

## 作者简介



朱世洋，中国黑龙江望奎人，毕业于大庆师范学院化学工程与工艺专业，在校期间，担任班级学习委员、学院学生会干部、中共预备党员，学习和生活展现出积极向上的态度，积极参与学校及社会实践活动，热爱篮球和羽毛球运动。2011 年，正值国家推行“东北老工业基地振兴政策”，参与了国家重点项目——恒力石化（大连）有限公司的一期项目，将所学理论知识首次付诸实践。在恒力石化工作的四年间，积累了宝贵的实践经验。为后来发现打下坚实基础。紧跟时代发展步伐，2015 年，从传统石化行业转型进入半导体行业，就职于英特尔半导体（大连）有限公司。在英特尔的八年里，踏实奋进，专注于提升专业素养和创新能力，获得了公司多项奖励，包括“英特尔中国优秀员工”称号及个人发明专利等。2023 年，面对西方国家对中国半导体行业的封锁打压，勇于担当毅然决定投身国内半导体行业建设，转战深圳加入润鹏半导体（深圳）有限公司，为国产半导体事业的发展贡献自己的力量。

## 作者简介



曹海迪（1985—），女，中国甘肃定西人，中共党员。长期投身水文水资源领域，在水文水资源测验、水文预报、水资源调查评价、水文调查、水文资料整编、水资源论证以及防洪评价等工作中积累了丰富经验。学术成果丰硕，曾在省部级期刊《地下水》独立发表论文 1 篇；在《农业科技与信息》期刊独立发表论文 2 篇，以专业能力和钻研精神为行业发展贡献力量。



塔依尔，高级工程师，1999 年毕业于南京河海大学农田水利工程专业，1999 年至 2018 年任职于新疆水利水电勘测设计研究院，主要从事规划、水库经济、水文水资源等研究，参与百余项各类规划和单项工程设计，获得过自治区级勘察设计奖；2018 年至今任职于新疆维吾尔自治区水利厅水资源规划研究所，主要参与生态红线划定、用水定额修编、生态基流研究、节水型社会达标建设、用水权交易等工作。

# Water Resources Protection Technology and Methods

## 水资源保护技术与方法

Editor-in-Chief / Cao Haidi Ta Yier Zhu Shiyang

曹海迪 塔依尔 朱世洋 / 主编

水资源保护技术与方法  
Water Resources Protection Technology and Methods

曹海迪 塔依尔 朱世洋 主编  
Editor-in-Chief: Cao Haidi Ta Yier Zhu Shiyang

Zhongyu International Education Centre  
中宇国际教育中心

ISBN 978-629-7843-10-0



PRICE: RM 50.00

 Zhongyu International Education Centre  
中宇国际教育中心

# Water Resources Protection Technology and Methods

## 水资源保护技术与方法

曹海迪 塔依尔 朱世洋 主编



# 水资源保护技术与方法

## *Water Resources Protection Technology and Methods*

---

Copyright reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without prior written permission from the Director General of the National Library of Malaysia.

责任编辑 Responsible Editor: 徐少静 Xu Shaojing 校 对 Proofreader: 李嘉慧 Li Jiahui  
装帧设计 Layout Designer: 梁晓 Liang Xiao

---

书 名 Title of the Book: 水资源保护技术与方法

Water Resources Protection Technology and Methods

主 编 Editor-in-Chief: 曹海迪 塔依尔 朱世洋

Cao Haidi Ta Yier Zhu Shiyang

出版发行 Publisher and Distributor: Zhongyu International Education Centre (M) Sdn Bhd

社 址 Address of the Press: B-03A-15, One South Street Mall, Jalan OS, Taman Serdang Perdana,  
43300 Seri Kembangan, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

网 址 Website: <https://zycentre.com/>

电子邮箱 E-mail: [contact@zycentre.com](mailto:contact@zycentre.com)

开 本 Format: 170mm × 240mm 1 / 16

印 张 Number of Printed Sheets: 17.25

字 数 Number of Words: 200 千字 200,000 words

版 次 Edition: 2025 年 7 月第一版 First edition in July 2025

印 次 Printing: 2025 年 7 月第一次 First printing in July 2025

国际书号 International Standard Book Number (ISBN): 978-629-7843-10-0



Cataloguing-in-Publication Data

Perpustakaan Negara Malaysia

A catalogue record for this book is available  
from the National Library of Malaysia

ISBN 978-629-7843-10-0

---

非开放获取 • 电子版请联络出版社购买 • 版权归出版社所有 • 侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher. Infringement will be prosecuted.

## 编委会 EDITORIAL BOARD >>>

---

### 主 编

曹海迪 甘肃省定西水文水资源勘测中心

塔依尔 新疆维吾尔自治区水利厅水资源规划研究所

朱世洋 润鹏半导体（深圳）有限公司

### 副主编

段而军 重庆隆湖工程设计咨询有限公司





在全球生态环境与经济社会发展紧密交织的当下，水资源作为维系生命与推动文明进步的核心要素，其保护工作迫在眉睫。本书以系统性视角，深入剖析水资源保护的关键技术与有效方法，全方位呈现该领域的理论、实践与未来方向。

开篇从水资源的重要性与全球分布切入，点明其对生态、生产和生活的不可或缺性。通过翔实数据揭示当前水资源面临的危机与挑战，如工业废水排放导致的水体污染加剧，以及区域水资源分布不均引发的供需失衡等问题，凸显保护工作的紧迫性。进而阐述水资源保护的意义与基本原则，从生态平衡、社会稳定、经济可持续发展等多维度，为后续内容奠定坚实理论基础。

在技术层面，系统梳理物理、化学、生物等多类保护技术，涵盖从水源地隔离、水质净化到生态修复等多个维度，同时介绍工程性措施、农业工业节水减排技术、城市水资源智慧管理等内容。书中还聚焦氢氟酸废水、氨氮废水、研磨废水等特定类型废水处理技术，以及纳米材料与膜技术前沿发展、气候变化适应性技术等，紧跟行业发展趋势。

此外，本书深入探讨水资源保护政策与管理体系，分析政策法规如何规范水资源开发利用行为，以及管理体系在协调各方资源、保障政策落地中的重要作用，并强调全球合作在水资源可持续治理中的关键作用。通过阐述跨境水资源分配、跨国水污染治理等方面的国际合作案例，展现全球携手应对水资源难题的必要性与成果。无论是专业研究人员、政策制定者，还是关注水资源问题的大众，都能从本书中汲取知识，共同为水资源保护事业贡献力量。



In the current world where ecological environment and economic and social development are closely intertwined, the protection of water resources, as the core element that sustains life and promotes civilization progress, is urgently needed. This book takes a systematic perspective to deeply analyze the key technologies and effective methods of water resource protection, and comprehensively presents the theory, practice, and future directions in this field.

Starting from the importance and global distribution of water resources, it points out their indispensable role in ecology, production, and life. Through detailed data, the crisis and challenges facing water resources are revealed, such as the exacerbation of water pollution caused by industrial wastewater discharge and the supply-demand imbalance caused by uneven distribution of regional water resources, highlighting the urgency of protection work. Furthermore, it elaborates on the significance and basic principles of water resource protection, laying a solid theoretical foundation for subsequent content from multiple dimensions such as ecological balance, social stability, and sustainable economic development.

At the technical level, the system outlines various protection technologies such as physics, chemistry, and biology, covering multiple dimensions from water source isolation, water quality purification, to ecological restoration. It also introduces engineering measures, agricultural and industrial water-saving and emission reduction technologies, and smart management of urban water resources. The book also focuses on specific types of wastewater treatment technologies such as hydrofluoric acid wastewater, ammonia nitrogen wastewater, and grinding

wastewater, as well as cutting-edge developments in nanomaterials and membrane technology, climate change adaptation technology, etc., keeping up with industry trends.

In addition, this book delves into water resource protection policies and management systems, analyzes how policies and regulations regulate water resource development and utilization behavior, and highlights the important role of management systems in coordinating resources from all parties and ensuring policy implementation. It also emphasizes the critical role of global cooperation in sustainable water resource governance. By elaborating on international cooperation cases in cross-border water resource allocation and cross-border water pollution control, the necessity and achievements of global cooperation in addressing water resource challenges are demonstrated. Whether it is professional researchers, policy makers, or the general public concerned about water resources issues, they can draw knowledge from this book and contribute to the cause of water resources protection together.





水，是生命之源、文明之基。从古老的两河流域孕育出璀璨的巴比伦文明，到现代城市依赖稳定供水维系繁荣，水资源始终是人类社会发展的核心命脉。然而，在工业化、城市化进程加速推进的今天，全球水资源正面临前所未有的严峻挑战。联合国数据显示，全球约 20 亿人无法获得安全清洁的饮用水，每年因水污染导致的死亡人数高达数百万；与此同时，气候变化引发的极端降水与干旱频发，进一步加剧了水资源时空分布的失衡。这不仅威胁着生态系统的平衡，更成为制约经济可持续发展、影响社会稳定的重要因素。

面对如此紧迫的形势，水资源保护已从单纯的环境议题，上升为关乎人类存续的全球性战略问题。无论是发达国家完善的污水处理体系，还是发展中国家积极探索的节水灌溉技术，世界各国都在努力寻求水资源保护的有效路径。但水资源问题的复杂性，决定了这一领域的探索需要多学科融合、多技术协同、多主体参与。在此背景下，《水资源保护技术与方法》应运而生，旨在为该领域搭建一个系统、全面且兼具前瞻性的知识框架。

本书以“认识问题—剖析技术—探索未来”为逻辑主线展开。从水资源的全球分布与重要性切入，结合翔实的数据与案例，揭示当前水资源危机的严峻性，并深入阐述水资源保护的深远意义与基本原则，为后续内容筑牢理论根基。随后，书中系统梳理了水资源保护技术的各个维度：从物理性的水源地隔离、水体疏浚，到化学性的水质净化、污染物吸附；从生物性的人工湿地构建、微生物修复，再到工程性的雨水收集、海绵城市建设，全面覆盖了水资源保护技术的基础与应用。针对农业、工业、城市等不同场景下的水资源保护需求，本书也分别进行了深入探讨，介绍了节水灌溉、工业废水零排放、智慧水务等前沿技术与实践案例。

本书既适合环境科学、水利工程等领域的专业研究人员与技术工作者，为其提供技术参考与创新灵感；也可供政策制定者、企业管理者借鉴，助力其制定科学的水资源管理政策与可持续发展战略；同时，对于关注环境问题的广大公众而言，也是一本了解水资源保护知识、增强环保意识的优质读物。希望通过本书，能让更多人加入水资源保护的行列中来，共同守护这一珍贵的地球馈赠，为人类社会的永续发展贡献力量。

本书稿共十章，曹海迪负责第一至五章内容的编写，共计 12 万字；塔依尔负责第六至八章内容的编写，共计 5 万字；朱世洋负责第九至十章内容的编写，共计 3 万字。

限于作者水平，书中难免存在纰漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者



Water is the source of life and the foundation of civilization. From the ancient Mesopotamian civilization that gave birth to the brilliant Babylonian civilization, to modern cities relying on stable water supply to maintain prosperity, water resources have always been the core lifeline of human social development. However, as industrialization and urbanization accelerate, global water resources are facing unprecedented challenges. According to United Nations data, approximately 2 billion people worldwide lack access to safe and clean drinking water, with millions of deaths annually caused by water pollution; At the same time, the frequent occurrence of extreme precipitation and drought caused by climate change has further exacerbated the imbalance of spatial and temporal distribution of water resources. This not only threatens the balance of the ecosystem, but also becomes an important factor restricting sustainable economic development and affecting social stability.

Faced with such an urgent situation, water resource protection has evolved from a simple environmental issue to a global strategic issue concerning human survival. Whether it is the well-developed sewage treatment systems in developed countries or the water-saving irrigation technologies actively explored by developing countries, countries around the world are striving to find effective ways to protect water resources. However, the complexity of water resources issues determines that exploration in this field requires interdisciplinary integration, multi technology collaboration, and multi subject participation. In this context, *Water*

*Resources Protection Technology and Methods* emerged with the aim of building a systematic, comprehensive, and forward-looking knowledge framework for this field.

This book is based on the logical thread of “understanding problems - analyzing technology - exploring the future”. The first chapter starts from the global distribution and importance of water resources, and combines detailed data and cases to reveal the severity of the current water resource crisis. It also elaborates on the profound significance and basic principles of water resource protection, laying a solid theoretical foundation for subsequent content. Subsequently, the book systematically sorted out various dimensions of water resource protection technology: from physical water source isolation and dredging, to chemical water purification and pollutant adsorption; From the construction of biological artificial wetlands and microbial remediation, to engineering rainwater collection and sponge city construction, the foundation and application of water resource protection technology are comprehensively covered. This book also explores in depth the water resource protection needs in different scenarios such as agriculture, industry, and cities, introducing cutting-edge technologies and practical cases such as water-saving irrigation, zero discharge of industrial wastewater, and smart water management.

This book is suitable for professional researchers and technicians in fields such as environmental science and water conservancy engineering, providing them with technical references and innovative inspiration; It can also serve as a reference for policy makers and business managers to assist them in formulating scientific water resource management policies and sustainable development strategies; At the same time, for the general public who are concerned about environmental issues, it is also a high-quality reading material for understanding water resource protection knowledge and enhancing environmental awareness. I hope that through this book, more people can join the ranks of water resource protection, jointly safeguard this precious gift of the earth, and contribute to the sustainable development of human society.

This manuscript consists of ten chapters, with Cao Haidi responsible for the content of chapters one to five, totaling 120000 words; Ta Yier is responsible for the content of chapters six to eight, totaling 50000 words; Zhu Shiyang is responsible for the content of chapters nine to ten, totaling 30000 words.

Due to the author's limited level, there may be errors and inadequacies in the book. We kindly ask readers to criticize and correct us.

Author



# 目 录



|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一章 水资源保护概述 .....        | 1   |
| 第一节 水资源的重要性与全球分布 .....   | 1   |
| 第二节 当前水资源面临的危机与挑战 .....  | 12  |
| 第三节 水资源保护的意义与基本原则 .....  | 20  |
| 第二章 水资源保护技术基础 .....      | 29  |
| 第一节 水循环与水资源可持续利用理论 ..... | 29  |
| 第二节 水质标准与污染评价方法 .....    | 37  |
| 第三节 水资源保护技术分类与发展趋势 ..... | 47  |
| 第三章 物理性水资源保护技术 .....     | 59  |
| 第一节 水源地物理隔离与生态屏障技术 ..... | 59  |
| 第二节 水体沉积物控制与疏浚技术 .....   | 69  |
| 第三节 水体流动调控与生态补水技术 .....  | 78  |
| 第四章 化学性水资源保护技术 .....     | 89  |
| 第一节 水质净化与化学沉淀技术 .....    | 89  |
| 第二节 污染物吸附与离子交换技术 .....   | 98  |
| 第三节 化学氧化与高级氧化技术应用 .....  | 107 |
| 第五章 生物性水资源保护技术 .....     | 119 |
| 第一节 人工湿地与生态浮岛技术 .....    | 119 |
| 第二节 微生物修复与生物膜技术 .....    | 128 |
| 第三节 水生植物净化与生态修复技术 .....  | 138 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第六章 工程性水资源保护措施·····         | 147 |
| 第一节 雨水收集与中水回用系统工程·····      | 147 |
| 第二节 水库生态调度与防洪抗旱技术·····      | 153 |
| 第三节 海绵城市建设与低影响开发技术·····     | 160 |
| 第七章 农业与工业水资源保护技术·····       | 169 |
| 第一节 节水灌溉与精准农业技术·····        | 169 |
| 第二节 工业废水循环利用与零排放技术·····     | 174 |
| 第三节 清洁生产与绿色制造技术应用·····      | 182 |
| 第八章 城市水资源保护与智慧管理·····       | 189 |
| 第一节 城市供水管网漏损控制技术·····       | 189 |
| 第二节 智慧水务与大数据监测技术·····       | 196 |
| 第三节 城市黑臭水体综合治理案例·····       | 204 |
| 第九章 半导体废水技术发展·····          | 211 |
| 第一节 半导体废水技术发展现状·····        | 211 |
| 第二节 氢氟酸废水系统处理工艺技术·····      | 213 |
| 第三节 氨吹脱系统处理技术·····          | 220 |
| 第四节 研磨废水回收技术·····           | 228 |
| 第十章 展望未来超纯水技术·····          | 237 |
| 第一节 超纯水制备工艺技术·····          | 237 |
| 第二节 超纯水回用技术·····            | 241 |
| 第三节 新型纳米材料及膜技术在半导体行业发展····· | 251 |
| 参考文献·····                   | 257 |

# 第一章 水资源保护概述

## 第一节 水资源的重要性与全球分布

### 一、水资源对生命与生态系统的支撑作用

#### （一）水在生命起源与进化中的核心地位

现代生命科学研究表明，水是生命起源的关键要素。从地球早期原始海洋的形成，到第一个单细胞生物在水环境中诞生，水为生命的孕育提供了必要的物质基础和物理化学条件。地质学家通过对古老岩层的分析发现，距今约 38 亿年前的原始海洋中，溶解的矿物质与简单有机物在水环境中不断发生化学反应，逐步形成了具有自我复制能力的生物大分子，最终演化出原始生命。

在生命进化历程中，水同样扮演着不可或缺的角色。水生生物在水环境中完成了从单细胞到多细胞、从简单到复杂的进化过程。当生命逐渐向陆地迁移时，生物进化出了一系列适应陆生环境的保水结构，如植物的角质层、动物的皮肤和呼吸系统，但水依然是维持生命活动的核心要素。从单细胞生物到高等哺乳动物，水始终贯穿于生命的整个进化史，推动着生物多样性的不断发展。

#### （二）水对人体生理功能的全方位支持

##### 1. 细胞内环境的稳定维持

细胞内约 70% 的成分是水，水作为溶剂，溶解了各种无机盐、糖类、氨基酸等物质，形成细胞内液，维持细胞的渗透压和酸碱平衡。细胞膜的物质运输功能也依赖于水的存在，水分子通过自由扩散或水通道蛋白进出细胞，调节细胞内外的物质交换，确保细胞正常的新陈代谢。例如，红细胞在等渗溶液中能保持正常的形态和功能，若处于低渗溶液中，大量水分子进入细胞，会导致红细胞膨胀甚至破裂；而在高渗溶液中，细胞失水皱缩，影响其携氧功能。

##### 2. 物质运输与能量代谢

血液循环系统以水为介质，将氧气、营养物质输送到全身各个组织细胞，同时将细胞代谢产生的二氧化碳、尿素等废物运送到相应的排泄器官。水还是体内

许多生物化学反应的参与者，如在糖代谢中，葡萄糖在酶的作用下与水发生水解反应，释放能量供细胞利用；在脂肪代谢过程中，脂肪分解为甘油和脂肪酸也需要水的参与。此外，水的高比热特性使它能有效调节体温，当人体代谢产生热量时，水分通过蒸发散热，维持体温的相对稳定。

### 3. 关节润滑与组织保护

人体内的关节腔、胸腔、腹腔等部位存在大量的组织液，这些组织液的主要成分是水，起到润滑关节、减少摩擦的作用，使关节能够灵活运动。例如，膝关节中的滑液能有效缓冲关节运动时的冲击力，保护关节软骨。同时，水还对内脏器官起到保护作用，如脑脊液对大脑和脊髓具有缓冲和减震功能，减少外界冲击力对中枢神经系统的损伤。

## （三）水在生态系统中的基础性作用

### 1. 生态系统的物质循环枢纽

水是生态系统物质循环的重要载体，参与碳循环、氮循环、磷循环等多种物质循环过程。在碳循环中，植物通过光合作用吸收二氧化碳，将碳固定在体内，同时释放氧气，这一过程离不开水的参与；而动植物的呼吸作用、分解者的分解作用又将碳以二氧化碳的形式释放到大气中，水在其中作为物质运输的介质，促进碳在大气、生物群落和土壤之间的循环。在氮循环中，土壤中的微生物将含氮化合物转化为植物可吸收的形式，水帮助这些营养物质在土壤中迁移，被植物根系吸收利用，进而在生态系统中传递。<sup>①</sup>

### 2. 生物多样性的保障

不同类型的水生生态系统，如河流、湖泊、湿地、海洋等，为众多生物提供了独特的栖息环境。湿地被誉为“地球之肾”，具有丰富的生物多样性，它不仅是许多珍稀鸟类、鱼类的栖息地，还为大量水生植物和微生物提供了生存空间。以我国长江中下游的鄱阳湖湿地为例，这里是众多候鸟的越冬栖息地，每年吸引数十万只候鸟前来栖息觅食。湿地中的水生植物通过光合作用产生氧气，为水生生物提供食物和栖息场所。同时，湿地还具有净化水质、调节洪水等生态功能，维持着整个生态系统的稳定。

---

① 哈建强，回凤林. 论水在生态建设中的作用 [J]. 河北水利, 2017 (5): 32.

### 3. 生态系统的能量流动介质

在生态系统中，能量通过食物链和食物网传递，而水在能量流动过程中发挥着重要的介质作用。植物通过光合作用将太阳能转化为化学能储存在有机物中，这些有机物通过食物链传递给各级消费者。水参与植物的光合作用和呼吸作用，影响植物的生长和发育，进而影响生态系统的能量流动。例如，干旱条件下，植物因缺水光合作用减弱，导致初级生产者固定的能量减少，整个生态系统的能量供应不足，会引发一系列连锁反应，影响各级消费者的生存和繁衍。

## 二、水资源在人类社会发展中的关键地位

### （一）农业生产的命脉

#### 1. 灌溉农业的发展与粮食安全

自人类进入农业社会以来，灌溉技术的发展对农业生产和粮食安全起到了决定性作用。古埃及人利用尼罗河的定期泛滥进行灌溉，发展出了高度发达的农业文明；我国古代的都江堰水利工程，通过科学的灌溉系统，使成都平原成为“天府之国”。在现代社会，全球灌溉面积不断扩大，据联合国粮农组织统计，全球灌溉农田的粮食产量占粮食总产量的 60% 以上。在干旱半干旱地区，如我国的宁夏平原和河套平原，通过引黄灌溉，将荒漠变为绿洲，成为重要的粮食产区。然而，不合理的灌溉方式也带来了一系列问题，如土壤盐渍化、地下水位下降等，威胁着农业的可持续发展。

#### 2. 农业用水效率的提升与节水技术

随着水资源短缺问题日益严重，提高农业用水效率成为保障农业可持续发展的关键。目前，世界各国广泛推广喷灌、滴灌等节水灌溉技术。滴灌技术通过将水直接输送到作物根部，减少了水分蒸发和渗漏损失，与传统漫灌相比，可节水 30%~50%，同时还能提高作物产量 20%~30%。以色列在节水农业方面取得了举世瞩目的成就，其全国滴灌面积占灌溉总面积的 80% 以上，通过精准灌溉和水肥一体化技术，在水资源匮乏的条件下，实现了农业的高产高效。此外，农业用水管理模式也在不断创新，如建立水权交易制度，通过市场机制优化水资源配置，提高水资源利用效率。

#### 3. 气候变化对农业用水的挑战

近年来，全球气候变化导致极端天气事件频发，对农业用水产生了重大影响。

降水分布不均加剧，部分地区干旱加剧，而另一些地区洪涝灾害频发。例如，非洲撒哈拉以南地区近年来干旱持续加剧，农业生产受到严重影响，粮食短缺问题日益突出；而南亚地区因暴雨和洪涝灾害，大量农田被淹没，水利设施遭到破坏。气候变化还导致气温升高，蒸发量增加，作物需水量增大，进一步加剧了农业用水的紧张局面。因此，如何适应气候变化，保障农业用水安全，成为全球农业发展面临的重要课题。

## （二）工业生产的基石

### 1. 不同工业领域的用水特性

工业生产涵盖众多领域，各领域用水需求和用水方式差异显著。在电力行业，火力发电是用水大户，主要用于冷却循环系统。以燃煤电厂为例，每生产  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  的电力，约需消耗 3~5L 水，全球火力发电用水量占工业总用水量的 30% 以上。水力发电虽然不需要消耗大量水资源，但对水资源的时空分布有严格要求。在制造业中，电子芯片制造对水质要求极高，生产过程中需要使用大量的超纯水进行清洗，以去除芯片表面的杂质；而钢铁行业则主要用水进行冷却、除尘和高炉冲渣等环节，用水量巨大但对水质要求相对较低。食品加工行业用水主要用于原料清洗、加工过程和设备清洗等，对水质和卫生要求较高，以确保食品安全。

### 2. 工业用水循环利用与节水技术

为应对水资源短缺和环保要求，工业领域大力推广用水循环利用技术。许多企业建立了完善的工业废水处理和回用系统，将经过处理后的工业废水回用于生产过程中的非关键环节，如冷却用水、冲洗用水等。例如，我国某大型石化企业通过建设废水深度处理和回用装置，将工业废水的回用率提高到 70% 以上，每年可节约新鲜用水量数百万吨。此外，一些新型节水技术也在工业领域得到应用，如干式冷却技术可替代传统的水冷系统，减少工业用水；蒸汽冷凝水回收技术能将蒸汽冷凝后的水资源重新利用，提高能源和水资源的利用效率。

### 3. 工业用水对水资源和环境的影响

工业生产过程中排放的废水若未经有效处理直接排入水体，会对水资源造成严重污染。废水中含有的重金属、有机物、酸碱物质等污染物，会破坏水体生态平衡，影响水生生物的生存和繁衍。例如，重金属汞、镉、铅等进入水体后，会在水生生物体内富集，通过食物链传递最终危害人类健康。同时，工业用水的过

度开采也会导致地下水位下降、地面沉降等地质灾害，影响区域生态环境和社会经济的可持续发展。因此，加强工业用水管理，减少废水排放，实现水资源的可持续利用，是工业领域面临的重要任务。

### （三）人类生活的必需品

#### 1. 生活用水的基本需求与供应保障

安全、充足的生活用水是人类生存和发展的基本需求。根据世界卫生组织的标准，每人每天至少需要 20~50L 的安全饮用水，用于饮用、烹饪和个人卫生。为保障生活用水供应，世界各国建设了大量的供水基础设施，包括水源工程、输水管道、净水厂和配水管网等。在城市地区，集中供水系统通过庞大的管网将经过处理的自来水输送到千家万户；在农村地区，小型供水工程和分散式供水设施为居民提供生活用水。然而，全球仍有部分地区面临生活用水短缺问题，尤其是在一些发展中国家的偏远农村和贫困地区，居民获取安全饮用水的难度较大。

#### 2. 生活污水处理与水环境改善

随着城市化进程的加快和人口的增长，生活污水排放量不断增加。生活污水中含有大量的有机物、氮、磷等污染物，如果未经处理直接排放，会导致水体富营养化，引发藻类暴发、水质恶化等问题。为保护水环境，世界各国加强了生活污水处理设施的建设和运行管理。目前，城市污水处理厂普遍采用生物处理技术，通过微生物的分解作用去除污水中的有机物和氮、磷等污染物，使处理后的水质达到排放标准或回用要求。一些发达国家还开展了生活污水的深度处理和回用，将处理后的中水回用于城市绿化、道路冲洗、景观用水等领域，提高了水资源的利用效率。

#### 3. 饮用水安全与健康风险

饮用水安全直接关系到居民的身体健康。饮用水中若含有致病性微生物、重金属、化学污染物等有害物质，会引发各种疾病。例如，饮用水中大肠杆菌超标会导致肠道疾病；长期饮用含氟量过高的水会引起氟斑牙和氟骨症；水中的重金属铅、汞等会对人体神经系统、免疫系统造成损害。为保障饮用水安全，世界各国制定了严格的饮用水水质标准，并加强了水源保护、水质监测和消毒处理等环节的管理。同时，随着科技的发展，新型饮用水处理技术不断涌现，如膜分离技术、紫外线消毒技术等，提高了饮用水的净化效果，降低了健康风险。

### 三、全球水资源的分布格局

#### （一）全球水资源总量与淡水资源占比

地球水资源总量约为 13.86 亿立方千米，构成了覆盖地球表面约 71% 的广袤水体，但其中高达 96.5% 为海水。海水因含盐量过高（平均盐度约 35‰），难以直接用于生活饮用与工农业生产，需要通过复杂且高成本的海水淡化技术处理后才能使用。真正能为人类利用的淡水资源仅占全球水资源总量的 2.5%，这一稀缺资源的分布呈现高度集中化特征。

在有限的淡水资源中，约 70% 以冰川和永久积雪的形式存在，主要分布在南极、北极以及喜马拉雅山脉、安第斯山脉等高山地区。以南极冰盖为例，其面积达 1400 万平方千米，平均厚度约 2000m，储存了全球约 68.7% 的淡水。北极格陵兰冰盖覆盖面积约 183.4 万平方千米，冰层平均厚度超 1500m，蕴含的淡水量同样极为可观。然而，这些淡水资源受限于极端气候、遥远地理位置和高昂的开采成本，目前难以实现大规模开发利用。

剩余约 30% 的淡水资源中，地下水占据主导地位，约占淡水资源总量的 30.1%。但深层地下水更新周期漫长，部分地区更新时间可达数千年甚至上万年，过度开采极易引发地面沉降、地下水位下降等地质灾害。土壤水占比 0.05%，虽占比微小，却是维系陆地生态系统水分平衡的关键，影响着植物根系的水分吸收和土壤微生物活动。湖泊淡水占比 0.26%，其中贝加尔湖作为世界上最深、储水量最大的淡水湖，其淡水资源储量约占全球地表淡水总量的 20%，水体容量达 23.6 万亿立方米，超过北美五大湖水量总和。河流淡水占比仅 0.006%，但因其流动性强、易于获取，成为人类生活与生产活动最主要的淡水来源之一。

#### （二）地理分布的不均衡性

##### 1. 大洲尺度的分布差异

从全球各大洲水资源分布来看，南美洲凭借亚马孙河流域得天独厚的自然条件，水资源总量位居世界首位，约占全球水资源总量的 25%。亚马孙河流域年平均降水量超过 2000mm，亚马孙河年平均流量达 21.9 万立方米 / 秒，相当于长江流量的 7 倍，其流域内分布着世界上面积最大的热带雨林，生态系统极其丰富，为全球生物多样性保护提供了重要屏障。

与之形成鲜明对比的是非洲，尽管拥有尼罗河、刚果河等知名河流，但由于

大部分地区属于热带沙漠和热带草原气候，降水稀少且时空分布不均，水资源严重匮乏。非洲人均水资源占有量仅为全球平均水平的 1/3，埃塞俄比亚、乍得等国家平均年降水量不足 500mm，部分地区甚至低于 200mm，长期面临严重的水资源短缺问题，部分居民每日可获取的生活用水量不足 5L，远低于世界卫生组织建议的 20~50L/人·日标准。

亚洲作为世界上面积最大、人口最多的大洲，水资源总量丰富，但人均占有量较低。亚洲东部和南部受季风气候影响显著，降水充沛，孕育了长江、黄河、恒河等大型河流，部分地区年降水量可达 200mm 以上；而中亚和西亚地区深居内陆或受副热带高压控制，气候干旱少雨，沙特阿拉伯、科威特等国家大部分地区为沙漠，平均年降水量不足 200mm，水资源几乎完全依赖海水淡化和地下水开采。以沙特阿拉伯为例，该国通过建设世界上规模最大的海水淡化厂群，满足了国内约 60% 的用水需求，但海水淡化成本高昂，每立方米淡化水成本约 1~2 美元。

### 2. 国家内部的分布差异

在同一国家内部，水资源分布也存在显著的空间差异。美国西部地区受大陆性干旱半干旱气候影响，降水稀少，主要依赖科罗拉多河等有限的水资源维持生产生活，导致科罗拉多河流域各州之间长期存在激烈的水资源争夺矛盾。而美国东部地区受大西洋湿润气流影响，降水丰富，水资源相对充足，人均水资源占有量是西部地区的 3~5 倍。

我国同样面临严峻的水资源空间分布不均问题。南方地区年降水量普遍在 800mm 以上，河网密布，水资源总量占全国的 80% 以上；北方地区年降水量多在 400mm 以下，且人口密集、耕地面积广阔、工农业发达，用水需求巨大，导致水资源供需矛盾尖锐。例如，华北平原作为我国重要的粮食产区和工业基地，耕地面积占全国的 23%，人口占全国的 25%，但水资源量仅占全国的 3.8%，人均水资源占有量不足 500m<sup>3</sup>，属于极度缺水地区。此外，我国水资源时间分布不均问题也十分突出，大部分地区降水集中在夏季，汛期（6—9 月）径流量占全年径流量的 60%~80%，易引发洪涝灾害；而枯水期则面临严重的水资源短缺。

### （三）分布不均的影响

#### 1. 经济发展差异

水资源分布不均对不同地区经济发展产生了深远影响。水资源丰富地区能够

依托充足的水资源发展多样化产业，推动经济繁荣。东南亚湄公河流域凭借丰富的水资源，不仅成为全球重要的水稻种植区，被誉为“亚洲粮仓”，还大力发展内河航运和水电产业。湄公河航道承担了流域内大部分的货物运输，促进了区域间的经济交流；流域内建设的多座水电站，如老挝的南欧江水电站群，为周边国家提供了大量清洁能源，带动了相关产业发展。

而水资源匮乏地区经济发展则面临重重困境。中东地区部分国家虽然拥有丰富的石油资源，但由于水资源短缺，农业发展受限，不得不花费巨额资金进口粮食。以阿联酋为例，该国每年粮食进口费用超过 50 亿美元。此外，工业用水成本高昂也限制了制造业发展，为解决水资源问题，这些国家投入大量资金建设海水淡化厂，进一步增加了经济发展成本。据统计，中东地区海水淡化成本约占工业生产成本的 10%~15%，削弱了企业的市场竞争力。

## 2. 社会稳定问题

水资源短缺极易引发社会不稳定因素。在水资源匮乏地区，不同群体之间为争夺有限的水资源时常爆发冲突。在非洲苏丹和南苏丹边境地区，因尼罗河水资源分配问题，两国长期存在矛盾。尼罗河是两国重要的水源，但由于缺乏公平合理的分配机制，双方在水资源利用上存在严重分歧，多次因水资源问题发生军事摩擦。在印度，不同邦之间也经常因河流用水分配产生纠纷。例如，卡纳塔克邦和泰米尔纳德邦围绕高韦里河水资源分配问题，争端持续数十年，甚至引发大规模示威游行和暴力冲突。

此外，水资源短缺还会导致大规模人口迁移。当某一地区水资源无法满足居民基本生活需求时，大量人口会向水资源丰富地区流动，给流入地带来住房、就业、教育等方面的巨大压力，增加社会管理难度。据联合国难民署统计，全球因水资源短缺导致的环境难民数量已超过 2000 万人，预计到 2050 年，这一数字将突破 1 亿人。

## 3. 生态环境恶化

水资源分布不均对生态环境造成了严重破坏。在水资源短缺地区，过度开采地下水导致地下水位下降，引发一系列地质灾害。我国华北平原由于长期超采地下水，形成了世界上最大的地下水漏斗区，部分地区地面沉降幅度超过 2m，导致建筑物倾斜、道路开裂，基础设施遭到严重破坏。沿海地区因地下水位下降，海水入侵现象加剧，导致土壤盐渍化，耕地质量下降。例如，我国山东半岛部分

地区海水入侵距离已达内陆 10~20km,造成大量耕地无法耕种。同时,河流上游过度用水导致下游水量减少甚至断流,严重破坏河流生态系统。塔里木河曾因上游过度引水灌溉,下游河道多次断流,断流时间最长达 30 年之久,造成两岸胡杨林大面积枯死,生态环境急剧恶化。据统计,塔里木河流域胡杨林面积从 20 世纪 50 年代的 52 万公顷减少到 90 年代的 29 万公顷,生物多样性受到严重威胁。

## 四、典型国家和地区的水资源状况案例分析

### (一) 水资源丰富地区——巴西

#### 1. 水资源优势与利用

巴西拥有得天独厚的水资源条件,其水资源总量约为 8.2 万亿立方米,占全球水资源总量的 12%。亚马孙河作为世界上流域面积最广、水量最大的河流,流域面积达 691.5 万平方千米,约占南美洲总面积的 40%,年平均流量达 21.9 万立方米/秒,相当于全球河流入海总流量的 1/5。此外,巴西还拥有巴拉那河、圣弗朗西斯科河等大型河流,以及众多大型湖泊和丰富的地下水。丰富的水资源为巴西农业发展提供了强大支撑。巴西是全球最大的咖啡、甘蔗、橙汁生产国和出口国,其农业灌溉面积超过 2000 万公顷,得益于充足的水资源保障,巴西农业实现了规模化、现代化发展。在工业领域,巴西利用丰富的水资源大力发展水电产业,伊泰普水电站是巴西与巴拉圭共同建设的世界第二大水电站,总装机容量 1400 万千瓦,年发电量超过 1000 亿千瓦时,为巴西和巴拉圭的工业发展提供了大量清洁能源。同时,巴西依托河流发展内河航运,内河航道总里程超过 5 万千米,促进了区域间的经济交流与贸易往来,降低了物流成本。

#### 2. 面临的挑战与应对措施

尽管水资源丰富,巴西也面临着诸多水资源问题。一方面,水资源分配不均问题突出,巴西人口主要集中在东南部沿海地区,而水资源丰富的亚马孙流域人口稀少,导致水资源供需空间不匹配。圣保罗、里约热内卢等大城市用水需求巨大,而亚马逊地区水资源开发利用率不足 10%。另一方面,随着工业化和城市化的推进,巴西部分河流和湖泊受到严重污染。据巴西环境部统计,圣保罗州的皮涅鲁斯河、瓜纳巴拉湾等水域,因工业废水和生活污水排放,水质恶化严重,部分河段氨氮、化学需氧量等指标超标数十倍,对水生生态系统和居民健康造成威胁。

为应对这些问题,巴西政府采取了一系列措施。在水资源调配方面,通过建

设跨流域调水工程，如“南水北调”工程，将南部水资源丰富地区的水调往东北部缺水地区，缓解水资源供需矛盾。在水污染防治方面，加大污水处理设施建设力度，提高污水处理率，要求工业企业必须建设污水处理设施，达标排放；同时，加强对生活污水排放的监管，建设城市污水处理厂，提高生活污水收集处理能力。此外，巴西还开展了大规模的水资源保护宣传教育活动，通过学校教育、媒体宣传等方式，提高公众的节水意识和环保意识，鼓励公众参与水资源保护。

## （二）水资源匮乏地区——以色列

### 1. 水资源短缺现状与应对策略

以色列位于中东干旱地区，属于典型的地中海气候和热带沙漠气候，年降水量稀少，大部分地区年降水量不足 200mm，且降水主要集中在冬季，而蒸发量却高达 2500mm 以上，水资源供需矛盾极为突出。以色列人均水资源占有量仅为 370m<sup>3</sup>，不足全球平均水平的 1/30，是世界上水资源最匮乏的国家之一。面对严峻的水资源形势，以色列通过科技创新和高效管理，探索出了一条水资源可持续利用的道路。在农业领域，以色列大力推广滴灌技术，并将滴灌系统与计算机控制技术、传感器技术相结合，根据作物生长需求、土壤湿度、天气状况等因素，实现精准供水和施肥。目前，以色列的农业灌溉水利用率已超过 90%，单位面积农业产值位居世界前列，在沙漠地区创造了农业奇迹。在海水淡化方面，以色列积极开展研究和应用，截至 2023 年，以色列已建成世界上最大的海水淡化厂群，海水淡化产能占全国供水量的 50% 以上。以色列研发的反渗透海水淡化技术处于世界领先水平，通过不断优化工艺流程和设备，将海水淡化成本降低至 0.5~0.7 美元 / 立方米，使海水淡化水成为经济可行的水源。此外，以色列建立了完善的污水回收处理系统，将城市生活污水和工业废水经过多级处理后，回用于农业灌溉和非饮用水领域，污水回用率达到 75%。以色列还建立了严格的水资源管理制度，实行水权分配和阶梯水价制度，运用市场机制引导水资源的合理配置，提高水资源利用效率。

### 2. 经验与启示

以色列在水资源管理和利用方面的成功经验为全球水资源匮乏地区提供了宝贵借鉴。其核心在于科技创新与高效管理的深度融合。通过持续投入研发，以色列在节水技术、海水淡化技术、污水处理技术等领域取得了重大突破，将先进技术广泛应用于生产生活各个领域。同时，建立科学合理的水资源管理制度，明确

水权分配，实行阶梯水价，对超定额用水实行高额收费，有效引导用户节约用水。此外，以色列注重水资源保护和可持续发展理念的普及，通过教育和宣传，使节水意识深入人心，形成了全社会共同参与水资源保护的良好氛围。

### （三）中国的水资源状况

#### 1. 水资源基本特征与问题

我国水资源总量约为 2.8 万亿立方米，居世界第六位，但由于人口众多，人均水资源占有量仅为  $2200\text{m}^3$ ，约为世界平均水平的  $1/4$ ，属于水资源短缺国家。我国水资源具有时空分布不均、水资源与人口和耕地分布不匹配等显著特点。

在时间分布上，降水主要集中在夏季，连续丰水年和连续枯水年交替出现，旱涝灾害频繁发生。据统计，1949—2020 年，我国平均每年受旱面积约 2000 万公顷，洪涝灾害受灾面积约 1000 万公顷。在空间分布上，南方水资源丰富，北方水资源短缺，北方地区人均水资源占有量仅为南方的  $1/3$ 。北方地区耕地面积占全国的 60%，但水资源量仅占全国的 19%，其中华北平原人均水资源占有量不足  $500\text{m}^3$ ，属于极度缺水地区。

此外，我国水资源开发利用过程中还存在用水效率低、水污染严重等问题。我国农业灌溉水有效利用系数仅为 0.56，与发达国家 0.7~0.8 的水平相比仍有较大差距；工业万元增加值用水量为  $45\text{m}^3$ ，是发达国家的 2~3 倍，工业用水重复利用率仅为 60%，而发达国家普遍超过 85%。同时，大量工业废水和生活污水未经有效处理直接排放，导致部分河流、湖泊和地下水受到污染，水质性缺水问题日益突出。据生态环境部统计，2022 年全国地表水劣 V 类水质断面比例仍达 9.7%，部分湖泊如太湖、巢湖等富营养化问题严重，影响了居民饮水安全和生态环境质量。

#### 2. 应对措施与未来展望

为解决水资源问题，我国政府采取了一系列行之有效的措施。在水资源调配方面，实施了南水北调工程等跨流域调水项目，将长江流域丰富的水资源调往北方缺水地区，缓解北方地区水资源短缺问题。南水北调工程规划总调水量 448 亿立方米，目前东线和中线工程已建成通水，累计调水量超过 600 亿立方米，有效改善了北方地区的水资源条件。

在节水领域，大力推广节水灌溉技术，全国节水灌溉面积已超过 7 亿亩；普及节水器具，开展节水型城市创建活动；加强工业节水管理，实施重点行业节水

改造工程，提高水资源利用效率。在水污染防治方面，加大污水处理设施建设投入，全国城市污水处理率已超过 95%；加强对工业污染源和生活污染源的治理，实施河长制、湖长制，建立了覆盖全国的河湖管理保护体系，强化水资源保护和生态修复。

未来，随着我国经济社会的持续发展，水资源需求将进一步增加，水资源供需矛盾依然严峻。因此，需要进一步加强水资源管理和保护，加快科技创新，研发和推广更加高效的节水技术、污水处理技术和海水淡化技术；完善水资源管理制度，建立更加科学合理的水价形成机制和水权交易制度，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用；加强水资源保护宣传教育，提高全民节水意识和环保意识，形成全社会共同参与水资源保护的良好局面，实现水资源的可持续利用，保障经济社会的可持续发展。

## 第二节 当前水资源面临的危机与挑战

### 一、水资源数量短缺危机

#### （一）人口增长与经济发展带来的需求激增

随着全球人口持续增长，截至 2025 年，世界人口已突破 80 亿大关，人口的膨胀使得水资源需求呈指数级上升。联合国相关研究表明，人口每增加 1 亿，全球每年的水资源需求量将增加约 500 亿立方米。预计到 2050 年，全球人口将达到 97 亿，届时农业、工业和生活用水需求较目前将增加 40% 以上。这种需求增长在农业领域表现尤为突出，为保障日益增长的粮食供应，全球灌溉面积不断扩大。目前，农业用水占全球总用水量的比例长期维持在 70% 左右，而在一些人口密集的发展中国家，这一比例更高。

以印度为例，作为世界第二人口大国，其人口总量已超过 14 亿，庞大的人口基数对粮食需求巨大。为满足农业生产，印度的农业灌溉用水占总用水量的 80% 以上。近年来，印度经济快速发展，工业化和城市化进程加速，工业和生活用水需求也呈现迅猛增长态势。据统计，过去十年间，印度工业用水量年均增长率达到 4%，城市生活用水量增长率也超过 3%，水资源供需矛盾日益尖锐，部分地区已出现严重的用水短缺现象。

在全球范围内,工业化和城市化的推进使得工业用水和生活用水需求显著增加。工业生产规模的不断扩大,尤其是能源、化工、制造业等行业的蓬勃发展,对水资源的消耗量巨大。以我国为例,近十年间,尽管通过推广节水技术,工业用水量有所下降,但随着产业升级和新兴产业的发展,如电子芯片制造、新能源汽车生产等新兴产业的崛起,工业用水需求依然保持高位。这些新兴产业对水质和水量都有较高要求,如电子芯片制造过程中,清洗环节需要使用大量超纯水,每生产一片芯片,用水量可达数百升。<sup>①</sup>

城市化进程的加快导致城市人口高度集中,城市生活用水需求剧增。城市供水管网压力不断加大,部分城市在用水高峰期甚至出现供水紧张局面。例如,在一些发展中国家的大型城市,如尼日利亚的拉各斯、巴基斯坦的卡拉奇,由于供水基础设施建设滞后,无法满足快速增长的用水需求,时常出现停水现象,严重影响居民的正常生活。同时,城市中商业、服务业等行业的发展,也进一步增加了用水需求,如酒店、洗浴中心、洗车行业等,都需要消耗大量水资源。

## （二）气候变化导致的水资源时空分布失衡加剧

气候变化已成为影响全球水资源分布的关键因素,其对水资源的影响主要体现在降水模式的改变上。全球变暖导致极端降水事件增多,暴雨洪涝灾害频发,而干旱地区的干旱程度加剧、持续时间延长。世界气象组织数据显示,过去三十年,全球干旱发生频率较前三十年增加了 29%,受影响人口超过 15 亿。这种降水模式的变化使得水资源在时间和空间上的分布更加不均衡。

在空间分布方面,原本水资源匮乏的地区水资源短缺问题进一步恶化。以非洲萨赫勒地区为例,该地区位于撒哈拉沙漠南缘,近年来因降水减少、蒸发加剧,河流流量显著下降,湖泊面积不断萎缩。据统计,过去二十年,萨赫勒地区部分河流的流量减少了 30% 以上,一些小型湖泊甚至干涸消失。水资源可利用量的大幅减少,严重影响了当地居民的生产生活,导致农业减产、畜牧业衰退,大量人口因缺水而被迫迁移。同时,水资源短缺还加剧了地区间的矛盾和冲突,为争夺有限的水资源,部落之间、地区之间时常发生纠纷。而在一些原本水资源丰富的地区,由于降水过于集中,也面临着水资源利用的难题。在时间分布上,降水集中在少数月份甚至短时间内,使得水资源难以有效储存和利用。我国华北地区

---

① 李俊海. 全球水资源短缺与粮食危机 [J]. 生态经济, 2021, 37 (3): 5-8

就是典型例子，降水多集中在夏季七、八月份，这两个月的降水量可占全年降水量的 70% 左右。汛期时，大量雨水迅速汇入河流，由于缺乏足够的蓄水设施，这些水资源大多白白流入海洋；而在冬春季节，降水稀少，又面临着严重的缺水问题，农业灌溉和生活用水保障困难。此外，极端降水事件的增加还导致洪涝灾害频发，不仅造成巨大的经济损失，还会破坏水利设施，影响后续的水资源利用。

气候变化还通过影响冰川融化和海平面上升，间接影响水资源分布。极地冰川和高山冰川是重要的淡水资源储备，随着全球气温升高，冰川融化速度加快。例如，喜马拉雅山脉的冰川近年来消融速度明显加快，预计到 2100 年，部分冰川可能完全消失。冰川融化短期内会增加河流流量，但从长远来看，一旦冰川消失，依赖冰川融水的地区将面临水资源枯竭的危机。同时，海平面上升会导致沿海地区海水入侵，使地下水咸化，破坏淡水资源，威胁沿海地区的供水安全。

### （三）地下水超采引发的水资源枯竭风险

地下水作为重要的水资源补充，在全球水资源供给中占据重要地位。据联合国教科文组织统计，全球约有 1/4 的人口依赖地下水作为主要水源，且全球每年地下水开采量超过 800 立方千米，其中约 25% 处于超采状态。过度开采地下水主要是由于地表水不足或开发利用成本较高，许多地区为满足生产生活用水需求，不得不加大对地下水的开采力度。

在印度北部，为满足大规模的农业灌溉需求，大量抽取地下水。印度是农业大国，农业生产对地下水的依赖程度极高，尤其是在小麦和水稻种植季节，地下水灌溉几乎成为唯一的水源保障。长期的过度开采导致印度北部地下水位以每年 1~3m 的速度下降，部分地区地下水位已下降至地表以下 50m 甚至更深。地下水位的下降不仅影响了农业灌溉，还导致地面沉降，许多地区出现房屋开裂、道路塌陷等问题，基础设施遭到严重破坏。

美国中西部的高平原地区也是地下水超采的典型区域。该地区是美国重要的农业产区，主要种植玉米、小麦和大豆等农作物。为支持大规模的农业生产，当地长期超采地下水用于灌溉。据统计，过去几十年间，高平原地区部分区域地下水位已下降数十米，形成了大面积的地下水漏斗区。地下水漏斗区的形成改变了地下水流场，导致周边地区地下水向漏斗中心流动，进一步加剧了地下水位下降，同时还引发了地面沉降、湿地萎缩等一系列生态环境问题。

我国华北平原更是地下水超采的重灾区。长期以来，由于地表水匮乏，且工

业、农业和生活用水需求巨大，华北平原过度依赖地下水开采。经过多年的超采，华北平原形成了世界上最大的地下水漏斗区，部分地区地下水位埋深超过 100m。过度开采地下水引发了一系列严重的地质灾害，如地面沉降，截至目前，华北平原地面沉降面积已超过 18 万平方千米，最大沉降幅度超过 2m。地面沉降导致建筑物倾斜、道路开裂，威胁人民生命财产安全；同时，海水入侵现象也日益严重，在沿海地区，海水倒灌使得地下水咸化，土壤盐渍化，耕地质量下降，农业生产受到严重影响。此外，地下水超采还导致湿地萎缩、河流干涸，生态系统遭到严重破坏，加剧了水资源的短缺危机。

## 二、水资源质量恶化挑战

### （一）工业污染对水资源的破坏

工业生产过程中排放的大量废水是造成水资源污染的主要来源之一。化工、冶金、造纸、印染等行业排放的废水中含有重金属（如汞、镉、铅、铬等）、有机污染物（如多环芳烃、酚类化合物等）、酸碱物质以及氮、磷等营养物质。据统计，全球每年约有 4000 亿吨工业废水未经有效处理直接排入水体，这些废水进入河流、湖泊和地下水后，导致水质严重恶化，对生态环境和人类健康造成极大威胁。

我国淮河曾因沿岸众多造纸厂、化工厂的废水排放，水质长期处于劣 V 类。在 20 世纪 90 年代至 21 世纪初，淮河沿岸分布着大量小型造纸厂和化工厂，这些企业环保设施简陋，甚至没有污水处理设施，大量高浓度废水直接排入淮河。废水中的有机物、重金属等污染物使得河水发黑发臭，鱼虾绝迹，淮河生态系统遭到毁灭性打击。为治理淮河污染，我国政府投入了大量资金和精力，经过多年努力，淮河水质虽有所改善，但距离恢复到良好状态仍有较大差距。

在印度恒河流域，工业废水和生活污水的大量排放使得恒河水质恶化严重。恒河是印度的母亲河，然而，随着印度工业化和城市化的发展，沿岸众多工厂将未经处理的废水排入恒河，同时城市生活污水也大量涌入。据检测，恒河水中大肠杆菌、化学需氧量等指标严重超标，部分河段大肠杆菌含量超过安全标准的数百倍。这样的水质不仅威胁沿岸居民的健康，导致肠胃疾病、皮肤病等疾病高发，也对恒河的生态系统造成严重破坏，许多水生生物濒临灭绝。即使在发达国家，工业污染问题也不容忽视。美国五大湖地区曾因化工企业排放含氯有机物，导致

湖水中多氯联苯等污染物超标。多氯联苯是一种持久性有机污染物，具有高毒性、难降解、生物富集等特点，会在水生生物体内不断积累，通过食物链传递最终危害人类健康。受污染的五大湖生态系统遭到严重破坏，鱼类数量大幅减少，鸟类繁殖受到影响，经过多年的治理和修复，五大湖的生态环境才逐渐有所改善，但至今仍未完全恢复。工业污染对水资源的破坏还体现在对地下水的污染上。一些工业企业将废水直接排入地下或通过渗坑、渗井等方式排放，导致地下水受到污染。地下水中的污染物难以降解和去除，一旦污染，治理难度极大，可能需要数十年甚至更长时间才能恢复。例如，我国一些化工园区周边的地下水因长期受到污染，水中重金属和有机污染物超标，严重影响了周边居民的饮用水安全。

## （二）农业面源污染的广泛影响

农业生产中大量使用的化肥、农药以及畜禽养殖产生的废弃物，通过地表径流、土壤渗透等方式进入水体，造成农业面源污染。全球每年约有 1200 万吨氮和 140 万吨磷通过农业面源污染进入水体，是导致水体富营养化的主要原因之一。农业面源污染具有范围广、随机性强、难以监测和治理的特点，已成为全球水资源保护面临的一大难题。

在我国太湖流域，由于周边农田大量使用化肥，以及畜禽养殖业的快速发展，农业面源污染问题十分突出。太湖流域是我国重要的农业产区，也是人口密集地区，农业生产和居民生活活动频繁。随着农业生产规模的扩大，化肥、农药的使用量不断增加。据统计，太湖流域农田化肥平均施用量超过全国平均水平的 2 倍，大量未被农作物吸收的化肥通过地表径流和土壤渗透进入太湖，导致湖水中氮、磷等营养物质含量过高。同时，畜禽养殖业产生的大量粪便和污水，如果未经有效处理直接排放，也会携带大量的有机物和氮、磷等污染物进入水体。这些污染物使得太湖蓝藻频繁爆发，湖水出现大面积水华现象，水质恶化，饮用水源受到威胁，渔业资源受损。太湖蓝藻水华暴发时，水面被厚厚的蓝藻覆盖，散发着刺鼻的气味，不仅影响了太湖的景观，还导致水中溶解氧含量降低，鱼类等水生生物因缺氧死亡。

在欧洲，部分国家也因农业面源污染导致河流、湖泊中硝酸盐含量超标，影响饮用水安全。例如，德国部分地区的河流和地下水由于受到农业氮肥的污染，硝酸盐含量超过了欧盟规定的饮用水标准。为保障饮用水安全，当地政府不得不投入大量资金对水厂进行升级改造，增加处理工艺以去除水中的硝酸盐，这无疑

增加了供水成本。此外，农业面源污染还会对土壤生态系统造成破坏，长期过量使用化肥会导致土壤板结、酸化，土壤肥力下降，影响农作物的生长和品质。

农药污染也是农业面源污染的重要组成部分。农药的使用虽然在一定程度上控制了病虫害，保障了农作物产量，但大量农药残留通过各种途径进入水体，对水生生物和生态系统造成危害。一些农药具有高毒性和持久性，会在水生生物体内富集，影响其生长、繁殖和生存。例如，有机磷农药会抑制水生生物的神经系统，导致其行为异常甚至死亡；杀虫剂中的氯代烃类物质会干扰水生生物的内分泌系统，影响其生殖能力。

### （三）生活污水与垃圾污染

随着全球城市化进程的加速，城市人口数量急剧攀升，生活污水排放量也随之呈爆发式增长。据世界卫生组织统计，全球每天约有 200 万吨生活污水未经有效处理便直接排入自然水体。这些生活污水中不仅含有大量的有机物、病原体，还包含各类合成洗涤剂、个人护理用品中的化学物质，其成分复杂，处理难度较大。在许多发展中国家，由于基础设施建设滞后，城市污水管网覆盖率低，污水处理厂数量不足且处理能力有限，导致大量生活污水肆意排放。例如，在非洲的许多城市，污水处理率普遍不足 30%，如埃塞俄比亚的亚的斯亚贝巴，城市污水管网仅覆盖部分城区，大量未经处理的污水直接排入周边河流，致使水体黑臭，生态系统遭到严重破坏，同时也极大地增加了霍乱、痢疾等水传播疾病的传播风险。

固体垃圾污染同样对水资源构成了严重威胁。在全球范围内，每年约有 800 万吨塑料垃圾进入海洋，这些垃圾在水体中难以降解，会随着洋流扩散到世界各个角落。垃圾填埋场产生的渗滤液更是暗藏危机，其中含有高浓度的重金属、氨氮、有机污染物等有害物质，一旦防渗措施失效，渗滤液渗入地下，将对地下水造成不可逆的污染。以我国为例，在一些城市周边的垃圾填埋场，由于早期建设标准低、管理不善，周边地下水的重金属含量严重超标，部分区域的地下水已无法作为饮用水源。此外，随意丢弃在河流、湖泊、海洋中的固体垃圾，不仅破坏水体景观，还会缠绕、堵塞水生生物，对其生存造成直接威胁。例如，海龟误食塑料垃圾后会导致肠道堵塞，最终因无法进食而死亡；海鸟被渔网、塑料袋缠绕后，难以飞行觅食，大量死亡。据统计，全球每年约有 100 万只海鸟和 10 万只海洋哺乳动物因塑料垃圾而丧生。

### 三、水资源管理与保护困境

#### （一）水资源管理体制分散与协调困难

全球多数国家和水地区的水资源管理体制存在严重的部门分割与职能交叉问题。在管理过程中，水利部门主要负责水资源的开发利用与调配，环保部门侧重于水质监测与污染防治，农业部门则专注于农业灌溉用水管理，这种条块分割的管理模式使得水资源管理难以形成合力。例如，在我国某流域，上游地区的水利部门为满足当地工业发展需求，过度开发水资源，修建大量水库蓄水；而下游地区的环保部门虽发现水质恶化问题，却因缺乏对水资源调配的话语权，无法有效解决水量不足导致的水体自净能力下降问题。在流域管理层面，上下游、左右岸之间缺乏统一协调机制，加剧了水资源利用与保护的矛盾。上游地区过度取水、排污，而下游地区却面临无水可用、水质恶化的困境，这种情况在国际河流域更为突出。

以湄公河流域为例，该流域涉及中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南六个国家，各国在水资源开发利用目标上存在显著差异。老挝希望通过修建水电站发展经济，柬埔寨注重渔业资源保护，越南则更关注农业灌溉和沿海地区的淡水供应。由于缺乏具有约束力的流域水资源管理机制，各国在水电开发、灌溉用水分配、生态保护等问题上难以达成共识，导致湄公河的水资源难以实现科学合理的开发与保护。此外，不同行政区域之间也存在水资源管理协调难题。例如，美国科罗拉多河流域涉及七个州，各州为争夺有限的水资源，长期存在利益冲突，甚至对簿公堂，严重影响了流域水资源的综合管理与可持续利用。

#### （二）水资源保护法律法规不完善

尽管世界各国都制定了一系列水资源保护相关法律法规，但在实际执行过程中，这些法律存在诸多漏洞和不足。部分法律法规条款过于笼统，缺乏具体的实施细则，导致执法部门在实际操作中难以准确界定违法行为和执行处罚标准。例如，对于企业非法排放工业废水的行为，一些法律仅规定了罚款上限，但未明确不同污染程度对应的具体罚款金额，使得执法人员在处理案件时存在较大的自由裁量权，容易滋生执法不公现象。同时，现有法律法规对水资源违法行为的处罚力度普遍较弱，企业违法成本远低于其通过违规行为获取的经济利益。据调查，部分企业宁愿缴纳少量罚款，也不愿投入资金建设污水处理设施，因为违法排放

带来的收益远超罚款金额，这使得法律法规难以对企业形成有效威慑。

在国际层面，虽然存在一些关于国际河流管理和水资源保护的公约，但这些公约的约束力有限。部分国家出于自身利益考虑，对公约条款进行选择性地执行，甚至公然违反公约规定。例如，1997年的《国际水道非航行使用法公约》虽对国际河流的公平合理利用、不造成重大损害等原则作出了规定，但至今仍有许多国家未签署或批准该公约。在跨界河流污染问题上，由于缺乏有效的国际法律约束和协调机制，当发生污染事件时，受害国往往难以通过法律途径获得合理赔偿和有效治理，导致跨界河流的污染问题长期得不到解决。

### （三）公众节水意识与参与度不足

公众节水意识淡薄和参与度不足，是当前水资源保护面临的重大挑战。在日常生活中，水资源浪费现象随处可见。据联合国环境规划署统计，全球家庭用水中约30%被浪费，如刷牙时不关闭水龙头、洗澡时间过长、使用大量水进行洗车和清洁等行为普遍存在。在农业生产领域，许多农民由于缺乏节水知识和技术，仍然采用大水漫灌等落后的灌溉方式，导致水资源浪费严重。以我国为例，在一些农村地区，传统漫灌方式使得灌溉水有效利用系数不足0.4，大量水资源在灌溉过程中蒸发、渗漏，未被农作物充分吸收利用。此外，公众对水资源保护的参与度普遍较低，多数人认为水资源保护是政府和相关部门的责任，与自身无关，对身边的水资源浪费和污染行为持漠视态度。这种观念导致水资源保护工作缺乏广泛的群众基础，难以形成全社会共同参与的良好氛围。在一些社区，居民对节水型器具的推广接受度不高，更倾向于选择价格低廉但耗水量大的传统器具；在面对企业非法排污等行为时，公众缺乏主动监督和举报的意识与行动。尽管部分地区开展了水资源保护宣传教育活动，但由于宣传方式单一、内容缺乏吸引力，未能有效提升公众的节水意识和参与积极性，使得水资源保护工作在基层推进困难重重。

### 第三节 水资源保护的意义与基本原则

#### 一、水资源保护的重要意义

##### (一) 维系生态系统平衡与生物多样性

水资源作为生态系统的核心命脉,深刻影响着从微观到宏观的各类生态系统。在淡水生态系统中,每一条河流、每一片湖泊都是独特的生命摇篮。以亚马孙河流域为例,其年平均流量达 21.9 万立方米 / 秒, 占全球河流入海总流量的 1/5, 如此丰沛的水资源孕育了世界上最为复杂且庞大的淡水生态系统。这里不仅生存着超过 3000 种鱼类, 其中包括具有独特呼吸器官的巨骨舌鱼, 以及能够进行电感应捕食的电鳗; 还栖息着 1294 种鸟类, 如色彩艳丽的金刚鹦鹉、身姿优雅的玫瑰琵鹭; 更有数以万计的植物和昆虫物种, 构成了完整而精密的生物链。一旦水资源受到污染或因过度开发导致流量减少, 水生生物的栖息地将被破坏, 例如水位下降会使河底暴露, 许多依赖浅水环境生存的鱼类和无脊椎动物将失去生存空间, 进而导致物种数量锐减, 甚至走向灭绝。

湿地生态系统因其强大的生态功能被喻为“地球之肾”, 而这一切功能的实现都紧密依赖于充足且优质的水资源。我国长江中下游的鄱阳湖湿地, 作为亚洲最大的候鸟越冬栖息地, 每年吸引着数十万只候鸟前来栖息觅食, 其中不乏白鹤、东方白鹳等珍稀濒危物种。然而, 近年来受气候变化和人类活动双重影响, 鄱阳湖水位显著下降, 湿地面积从鼎盛时期的约 4000km<sup>2</sup> 萎缩至不足 2000km<sup>2</sup>。水位下降导致湖底植物无法正常生长, 候鸟的食物来源减少; 同时, 湿地面积缩小使得候鸟栖息地碎片化, 部分候鸟因找不到合适的栖息和繁殖场所, 数量急剧减少。此外, 湿地生态系统中丰富的生物多样性也面临严峻挑战, 一些珍稀水生植物如野菱、水蕹, 以及底栖生物如背角无齿蚌、圆顶珠蚌, 因生存环境改变而濒临灭绝。

水资源保护对于陆地生态系统同样具有不可替代的作用。在森林生态系统中, 水参与植物光合作用、蒸腾作用等关键生理过程。以热带雨林为例, 树木通过蒸腾作用将大量水分释放到大气中, 形成局部降雨, 维持区域气候稳定。当水资源短缺时, 植物生长受限, 树木生长缓慢, 树叶枯黄, 森林生态系统的稳定性大幅下降。这种情况下, 森林更容易遭受病虫害侵袭, 例如美国西部近年来因长期干

旱，松树大面积遭受山松甲虫侵害，导致大量松树死亡；同时，干旱环境也增加了森林火灾发生的频率和强度，澳大利亚 2019—2020 年的森林大火，部分原因便是长期干旱导致植被易燃，造成了巨大的生态破坏。在草原生态系统中，水资源不足会使草本植物生长不良，植被覆盖率降低，进而引发土地沙化。我国内蒙古草原部分地区，由于过度放牧和水资源不合理利用，地下水位下降，草场退化严重，土地沙化面积不断扩大，许多以草原为栖息地的野生动物，如黄羊、草原狼的生存空间被压缩，种群数量急剧减少。

### （二）保障人类生存与健康

安全的水资源是人类生存的根本基石，直接关乎人类身体健康与生命安全。饮用水安全作为重中之重，一旦受到污染，将引发一系列严重的健康问题。致病性微生物污染是饮用水安全的常见威胁，当饮用水中大肠杆菌超标时，极易引发肠道疾病，导致腹泻、呕吐、腹痛等症状，严重时甚至会危及生命。世界卫生组织统计显示，全球每年约有 220 万人因饮用受污染的水而死亡，其中 5 岁以下儿童占比超过 50%，这些儿童因免疫系统尚未发育完全，对水中致病性微生物的抵抗力较弱，成为主要受害群体。重金属污染同样危害巨大，长期饮用含氟量过高的水会引起氟斑牙和氟骨症，在我国贵州、山西等部分高氟地区，居民牙齿发黄、骨骼变形等病症较为常见；水中的铅、汞等重金属则会对人体神经系统、免疫系统造成损害，尤其是对儿童的智力发育产生不可逆的不良影响，研究表明，儿童长期接触低剂量铅，智商可能会下降 6~8 分。

生活用水质量也与人类健康息息相关。在日常生活中，人们使用水进行烹饪、清洁、洗涤等活动，若生活用水受到污染，污染物会通过多种途径进入人体。例如，使用受污染的水清洗衣物，残留的化学污染物如洗涤剂中的烷基酚聚氧乙烯醚、重金属等，可能会在穿着过程中通过皮肤接触进入人体，刺激皮肤，引发过敏反应；用污染水浇灌蔬菜，重金属、农药残留等污染物会在蔬菜中积累，人类食用后，这些污染物会通过食物链进入人体，对健康产生潜在威胁。此外，污水中含有的病原体还可能通过生活用水传播疾病，如霍乱、痢疾等，在卫生条件较差的地区，因生活用水污染导致的传染病暴发时有发生。

水资源保护与粮食安全紧密相连。农业生产作为用水大户，灌溉用水的质量和数量直接决定农作物的产量与品质。若灌溉用水受到污染，含有重金属、农药残留等有害物质，这些污染物会被农作物根系吸收并在体内积累。我国部分地区

曾因使用受重金属污染的河水灌溉，导致水稻、小麦等粮食作物中镉、铅等重金属含量超标，不仅造成农产品无法销售，带来巨大经济损失，更严重威胁居民食品安全。长期食用重金属超标粮食，会导致人体重金属中毒，引发多种疾病。保障农业用水安全，通过建设清洁水源工程、推广生态灌溉技术等措施，是确保粮食产量稳定、维护国家粮食安全的必要前提。

### （三）促进经济可持续发展

水资源是经济发展不可或缺的重要支撑，科学的水资源保护对促进经济可持续发展具有深远意义。在农业领域，合理的水资源保护和利用能够显著提高农业用水效率，保障农作物生长，进而增加粮食产量。以色列作为全球水资源最匮乏的国家之一，凭借先进的节水农业技术实现了农业奇迹。该国通过推广滴灌、喷灌等高效节水技术，并将其与计算机控制技术、传感器技术相结合，根据作物生长需求、土壤湿度、天气状况等因素精准供水和施肥。目前，以色列的农业灌溉水利用率已超过 90%，在仅占国土面积 20% 的耕地面积上，生产出满足国内 95% 以上需求的农产品，同时大量出口鲜花、水果、蔬菜等农产品，创造了显著的经济效益，其农业产值在 GDP 中的占比虽不足 2%，但农业出口额却占总出口额的 10% 左右。

工业生产对水资源的依赖程度极高，水资源保护能够保障工业用水的稳定供应和水质安全，推动工业可持续发展。对于电子芯片制造、食品加工等对水质要求苛刻的行业，优质水资源是生产高品质产品的基础。在电子芯片制造过程中，清洗环节需要使用大量超纯水，水中任何微小的杂质都可能影响芯片性能，因此对水资源的纯度要求达到近乎极致。通过加强水资源保护，推广工业用水循环利用技术，还能有效降低工业生产成本。我国某大型钢铁企业通过建设先进的废水处理和回用系统，采用膜分离、生物处理等技术，将工业废水的回用率提高到 70% 以上，每年可节约新鲜用水量数百万吨，大幅降低了企业用水成本；同时，减少了废水排放，降低了环保处理费用，提高了企业的经济效益和市场竞争力。

水资源保护还能有力推动旅游业等第三产业发展。优质的水环境，如清澈的河流、湖泊，美丽的湿地景观等，是极具吸引力的旅游资源。我国浙江千岛湖，水域面积 573km<sup>2</sup>，蓄水量达 178.4 亿立方米，湖水水质优良，能见度可达 7~9m。依托这一优质水资源，千岛湖发展了生态观光、休闲度假、水上运动等多种旅游项目，每年吸引游客超过 1500 万人次，旅游收入突破 100 亿元，旅游

业成为当地的支柱产业。同时，良好的水资源环境能够提升城市的生态品质和吸引力，吸引更多人才和投资。例如，新加坡通过打造“花园城市”，加强水资源保护和水环境治理，营造了优美的城市水环境，提升了城市形象，吸引了众多跨国企业入驻，推动了城市经济发展。<sup>①</sup>

#### （四）维护社会稳定与和谐发展

水资源保护对于维护社会稳定与促进和谐发展具有不可忽视的作用。水资源短缺或分配不均极易引发社会矛盾与冲突，从局部地区的用水纠纷到跨国界的水资源争夺，都对社会秩序和国际关系产生重大影响。据联合国水事务署统计，全球约有 40% 的跨界河流流域存在不同程度的水资源争端，这些争端不仅威胁地区和平，更消耗了大量的社会资源。

在非洲的苏丹和南苏丹边境地区，因尼罗河水资源分配问题，两国长期存在矛盾。尼罗河作为两国重要的水源，承载着农业灌溉、居民生活用水等关键功能。然而，由于缺乏公平合理的分配机制，双方在水资源利用上存在严重分歧。自南苏丹独立以来，两国多次因尼罗河水资源分配问题发生军事摩擦。2012 年，双方更是在边境地区因水资源争夺爆发大规模冲突，造成数百人伤亡。这种因水资源引发的冲突不仅造成人员伤亡和财产损失，还阻碍了地区的经济发展与社会稳定，使得原本就贫困的边境地区发展更加举步维艰。

在一国内部，不同地区、不同群体之间也会因水资源问题产生矛盾。例如，在印度，卡纳塔克邦和泰米尔纳德邦围绕高韦里河水资源分配问题，争端持续数十年。高韦里河是两邦重要的灌溉水源，随着农业发展和人口增长，用水需求不断增加。据印度中央水资源委员会数据，两邦每年因高韦里河水资源分配问题引发的游行示威等群体性事件达数十起。2016 年，双方矛盾激化，卡纳塔克邦拒绝按约定向下游泰米尔纳德邦供水，导致泰米尔纳德邦爆发大规模抗议活动，多地交通瘫痪，社会秩序受到严重影响。而有效的水资源保护与合理分配，可以缓解这些矛盾，促进社会各群体之间的和谐共处。通过建设跨区域调水工程、制定公平的用水分配制度等措施，能够保障不同地区、不同群体的用水需求，减少因水资源引发的社会矛盾，维护社会稳定。此外，水资源保护还与社会的可持续发展密切相关。良好的水资源环境是社会各项事业发展的基础，从教育、医疗到文化建设，都离不开水资源的支撑。当水资源得到有效保护时，人们能够在稳定的

<sup>①</sup> 马丽芳. 保护水资源与可持续发展的探讨 [J]. 资源节约与环保, 2020 (3): 23.

环境中工作和生活，社会的各项公共服务也能得到更好的发展。例如，在水资源充足且清洁的地区，学校能够为学生提供良好的生活用水条件，保障学生的身体健康；医院的医疗用水安全也能得到保障，有利于提高医疗服务质量。同时，水资源保护还能促进文化传承与发展，许多地区的传统文化和民俗活动都与水有着密切联系，如江南水乡的赛龙舟、傣族的泼水节等。以傣族泼水节为例，这一传统节日不仅是傣族人民庆祝新年的重要方式，更承载着丰富的民族文化内涵。保护好水资源，就是为这些独特的文化活动提供生存的土壤，促进文化的传承与创新，推动社会的和谐发展。

## 二、水资源保护的基本原则

### （一）可持续利用原则

可持续利用是水资源保护的核心原则，强调在满足当代人用水需求的同时，不损害子孙后代满足其用水需求的能力。这意味着要合理规划和开发水资源，避免过度开采和浪费。在水资源开发过程中，需要充分考虑水资源的承载能力，确保开发规模与水资源的可再生能力相匹配。根据联合国教科文组织发布的《世界水资源发展报告》，全球约有 25% 的地下水资源处于超采状态，由此引发的生态环境问题日益严峻。例如，对于地下水的开采，要严格控制开采量，避免超采导致地下水位下降、地面沉降等问题。我国华北平原曾因长期过度开采地下水用于农业灌溉和工业生产，形成了世界上最大的地下水漏斗区，部分地区地面沉降幅度超过 2m，引发了一系列地质灾害和生态环境问题。为解决这一问题，我国自 2014 年起实施地下水超采综合治理，通过限制开采、回灌补水等措施，截至 2023 年，华北平原浅层地下水水位平均回升约 1.3m，逐步恢复地下水水位，体现了可持续利用原则的实践。

在农业用水方面，推广节水灌溉技术是实现水资源可持续利用的重要途径。滴灌、喷灌等技术能够根据作物生长需求精准供水，减少水分蒸发和渗漏损失，提高灌溉水利用效率。以色列在节水农业上的成功实践就是可持续利用原则的典范，其通过发展滴灌技术，并结合计算机控制和传感器监测，将灌溉水利用率提高到 90% 以上。以色列的农业科研机构不断研发新型节水设备，如智能滴灌系统，可根据土壤湿度、作物需水量自动调节供水量，在水资源匮乏的条件下实现了农业的可持续发展。同时，工业领域也需要提高水资源循环利用水平，采用先进的

水处理技术，将工业废水处理后回用于生产过程，减少对新鲜水资源的依赖。例如，德国的宝马汽车工厂通过建设先进的废水处理和回用系统，将工业废水经过沉淀、过滤、膜分离等多道处理工序后，回用于冷却、清洗等环节，实现了生产用水循环利用率超 85%，既降低了生产成本，又减少了对水资源的消耗，实现了水资源的可持续利用。

## （二）统筹协调原则

水资源保护涉及多个领域、多个部门和多个地区，需要遵循统筹协调原则，实现水资源的统一规划、统一管理和综合利用。在流域管理层面，上下游、左右岸之间的水资源利用和保护需要统筹协调。全球约有 263 条跨国河流，这些河流的水资源管理涉及多个国家利益，协调难度极大。例如，在湄公河流域，涉及中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南等多个国家，各国在水资源开发利用目标上存在差异，如老挝希望通过修建水电站发展经济，柬埔寨注重渔业资源保护，越南则关注农业灌溉和沿海地区的淡水供应。为实现流域水资源的合理利用和保护，各国于 1995 年签署了《湄公河流域可持续发展合作协定》，成立湄公河委员会，通过定期召开部长级会议、联合开展水资源监测等方式，共同制定水资源开发利用规划，平衡各方利益。通过签署流域水资源管理协议、成立联合管理机构等方式，协调水电开发、灌溉用水分配、生态保护等问题，避免因各自为政导致水资源过度开发和生态环境破坏。

在一国内部，不同行政区域和部门之间也需要加强协调。水利部门、环保部门、农业部门等在水资源管理中承担着不同职责，需要打破部门壁垒，建立有效的沟通协调机制。以我国南水北调工程为例，该工程横跨长江、淮河、黄河、海河四大流域，涉及多个省份和众多部门。为保障工程顺利实施，我国专门成立国务院南水北调工程建设委员会，统筹协调工程建设、水资源分配、生态保护等工作。在水资源规划过程中，水利部门负责水资源的调配和工程建设，环保部门负责水质监测和污染防治，农业部门负责农业用水管理，只有各部门密切配合，才能制定出科学合理的水资源保护方案。同时，不同地区之间也需要统筹协调水资源分配，通过建设跨区域调水工程，如我国的南水北调工程，将水资源丰富地区的水调往缺水地区，缓解区域间水资源供需矛盾，实现水资源的优化配置。截至 2023 年，南水北调东、中线一期工程累计调水超 630 亿立方米，有效缓解了北方地区水资源短缺问题。

### （三）预防为主、防治结合原则

预防为主、防治结合是水资源保护的重要原则，强调在水资源保护工作中，要以预防水资源污染和破坏为重点，同时对已经出现的问题及时进行治疗。在预防方面，需要加强对污染源的控制，严格限制工业废水、生活污水和农业面源污染物的排放。据世界银行统计，全球每年约有 4000 亿吨工业废水未经有效处理直接排入水体，对水资源造成严重污染。

对于工业企业，要加强环境监管，要求企业建设完善的污水处理设施，确保废水达标排放；对于新建工业项目，要严格执行环境影响评价制度，从源头上防止新的污染源产生。例如，我国自 2015 年实施《水污染防治行动计划》（“水十条”）以来，累计关停整改不符合环保要求的工业企业超 10 万家，有效减少了工业污染源。在农业领域，推广绿色农业生产方式，减少化肥、农药的使用量，发展生态农业，降低农业面源污染。例如，荷兰通过立法严格限制化肥和农药使用量，并推广精准施肥技术和生物防治病虫害方法，使得农业面源污染显著降低，水体中氮、磷含量大幅下降。

对于已经受到污染的水体，要及时采取治理措施。根据水体污染的类型和程度，制定针对性的治理方案。对于轻度污染的水体，可以通过生态修复的方式，如种植水生植物、投放微生物制剂等，利用自然生态系统的自我净化能力改善水质；对于重度污染的水体，则需要采用物理、化学和生物相结合的治理方法，如建设污水处理厂进行集中处理、采用化学药剂进行水质净化等。例如，我国太湖流域通过实施“控源截污、打捞蓝藻、生态修复”等综合治理措施，经过多年努力，太湖水质明显改善，2023 年全湖平均水质达到Ⅳ类，部分湖区达到Ⅲ类。同时，要建立健全水资源监测体系，及时掌握水资源质量状况，以便在污染问题出现的早期就采取措施进行防治，避免问题恶化。我国已建成覆盖全国的水环境监测网络，拥有各类监测站点超 20000 个，实现了对主要江河湖库水质的实时监测。

### （四）公众参与原则

公众参与是水资源保护的重要基础，只有让广大公众认识到水资源保护的重要性，积极参与到水资源保护行动中来，才能形成全社会共同保护水资源的良好氛围。提高公众的节水意识和环保意识是公众参与的关键。根据世界自然基金会的调查，全球家庭用水中约 30% 被浪费，公众节水意识提升空间巨大。

通过开展形式多样的宣传教育活动，如举办水资源保护知识讲座、制作公益

广告、开展校园教育等，向公众普及水资源知识、水资源保护的重要性以及节水方法。例如，新加坡通过“国家水意识运动”，在学校开设水资源保护课程，在社区举办节水展览和竞赛活动，使得新加坡居民人均日用水量从 2003 年的 165L 降至 2023 年的 141L，节水成效显著。

鼓励公众参与水资源保护监督也是重要环节。建立健全公众举报机制，让公众能够及时举报身边的水资源浪费和污染行为。同时，邀请公众参与水资源保护规划的制定和决策过程，听取公众的意见和建议，使水资源保护工作更加符合公众的利益和需求。例如，在澳大利亚悉尼的海水淡化厂建设项目中，当地政府通过召开多轮社区听证会，充分听取居民意见，对项目的选址、建设方案进行优化，既保障了项目的顺利推进，又减少了对周边居民生活的影响。此外，还可以通过建立志愿者组织等方式，引导公众参与水资源保护实践活动，如组织志愿者参与河流清洁、湿地保护等活动。美国的“河流守望者”志愿者组织，拥有超过 10 万名志愿者，他们定期对河流进行巡查和清洁，监测水质变化，为水资源保护贡献力量，让公众在实践中增强水资源保护意识，共同为水资源保护贡献力量。



## 第二章 水资源保护技术基础

### 第一节 水循环与水资源可持续利用理论

#### 一、水循环的基本原理与过程

水循环是地球上各种水体通过蒸发、水汽输送、降水、地表径流、下渗、地下径流等一系列过程和环节，紧密联系、相互转化的连续运动过程。这一过程受太阳辐射、地心引力等自然力驱动，形成了一个庞大而复杂的动态系统，维系着全球水资源的平衡与更新。据估算，全球每年参与水循环的水量约为  $577000\text{km}^3$ ，其中海洋与陆地之间的水交换量达到了每年约  $496000\text{km}^3$ ，如此庞大的水量循环过程，深刻影响着地球的生态环境与人类社会的发展。

#### （一）蒸发与蒸腾

##### 1. 水面蒸发

水面蒸发是水循环的起始环节，是指水由液态转化为气态进入大气的过程。蒸发速率受多种因素影响，其中温度是关键因素。从热力学角度来看，温度每升高  $10^\circ\text{C}$ ，水分子的平均动能会显著增加，蒸发速度理论上可提高约 1 倍。以热带地区的红海为例，其年均水温达  $26^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ，年蒸发量高达  $2000 \sim 2500\text{mm}$ ，而位于寒带的北冰洋，年均水温在  $-2^\circ\text{C}$  左右，年蒸发量仅为  $300 \sim 500\text{mm}$ ，二者形成鲜明对比。此外，风速、湿度和水体表面积也会对蒸发产生重要影响。风速通过破坏蒸发面上的水汽边界层，加速水汽扩散，实验表明，风速每增加  $1\text{m/s}$ ，水面蒸发量可提高  $10\% \sim 15\%$ ；空气湿度越低，水汽饱和差越大，蒸发越容易进行；水体表面积越大，参与蒸发的水分子数量越多，蒸发量也越大。据研究，全球海洋每年的蒸发量约为  $505000\text{km}^3$ ，占全球总蒸发量的  $86\%$ ，这些水汽通过大气运动被输送到陆地和海洋的其他区域。值得注意的是，近年来随着全球气候变暖，海洋表面温度上升，卫星监测数据显示，过去 30 年全球海洋平均蒸发速率增加了约  $4\%$ ，这一变化对全球水循环和气候模式产生了深远影响。

## 2. 土壤蒸发

土壤蒸发是土壤中的水分以水汽形式逸入大气的过程。土壤质地、含水量、孔隙度等因素对土壤蒸发影响显著。砂土的颗粒较大，孔隙直径多在 0.05~1mm 之间，水分在其中的移动阻力小，容易蒸发；而黏土的颗粒细小，孔隙直径小于 0.001mm，水分受表面张力束缚强，蒸发相对较慢。当土壤含水量较高时，水分可通过毛管作用迅速上升至土壤表面，蒸发速度较快，但随着含水量降低，毛管作用减弱，水分迁移困难，蒸发速度逐渐减慢。在干旱地区，土壤表层水分蒸发强烈，容易导致土壤盐渍化。例如，我国新疆塔里木盆地边缘的绿洲农业区，由于过度依赖地下水灌溉，且气候干旱蒸发旺盛，土壤表层盐分不断积累。研究表明，部分农田 0~20cm 土层含盐量高达 3%~5%，已超出大多数农作物的耐盐极限，导致农作物减产甚至绝收。通过采用滴灌、覆膜等技术，可有效减少土壤蒸发，降低盐渍化风险。

## 3. 植物蒸腾

植物通过叶片表面的气孔将体内水分以水汽形式散失到大气中的过程称为蒸腾。蒸腾作用对植物自身具有重要意义，它产生的蒸腾拉力是植物根系吸收水分和养分的主要动力，同时还能调节植物体温，避免植物在高温下受到伤害。不同植物的蒸腾速率差异较大，一般来说，阔叶植物的叶片表面积大，气孔数量多，蒸腾速率高于针叶植物；草本植物生长周期短，代谢旺盛，蒸腾速率高于木本植物。森林植被的蒸腾作用对区域水循环影响深远，一片茂密的森林就像一个巨大的“抽水机”，通过蒸腾作用将大量水分释放到大气中，形成局部降雨。例如，亚马逊雨林面积达 550 万平方千米，拥有全球约 20% 的陆地植物生物量，每年通过植物蒸腾作用向大气中释放的水汽量高达 8 万亿吨，相当于密西西比河年径流量的 10 倍。这些水汽在上升过程中冷却凝结，形成大量降雨，维持了雨林区域的湿润气候。据估算，全球植物蒸腾量约占陆地总蒸发量的 60%~70%，在陆地水循环中占据重要地位。最新研究还发现，植物可以根据环境变化调节气孔开闭，在干旱条件下，植物会主动关闭部分气孔，减少蒸腾失水，这一机制为节水农业的发展提供了新思路。

### （二）水汽输送

水汽输送是指水汽在大气中由一个地区向另一个地区、由低空向高空的转移过程。水汽输送主要通过大气环流实现，包括季风环流、行星风系、气旋和反气

旋等。在全球尺度上,行星风系是水汽输送的主要动力。信风带位于赤道两侧,北半球为东北信风,南半球为东南信风,它们将海洋上的水汽源源不断地向大陆输送,对热带和亚热带地区的降水产生重要影响。例如,在非洲西部的几内亚湾沿岸,受东北信风携带的大西洋水汽影响,年降水量可达 1500~2000mm,形成了热带雨林气候。在区域尺度上,季风环流在水汽输送中发挥着关键作用。以亚洲季风为例,夏季,来自印度洋的西南季风和来自太平洋的东南季风,携带大量水汽登陆亚洲大陆,为东亚、南亚和东南亚地区带来丰富的降水。研究表明,亚洲夏季风期间输送的水汽量占该地区全年降水量的 70%~80%;冬季,大陆吹向海洋的干冷气流则导致这些地区降水减少。

水汽输送还受到地形因素的影响。当含有水汽的气流遇到山脉等地形阻挡时,会被迫抬升。随着海拔升高,气温以每升高 100m 约下降 0.6℃的速率降低,水汽冷却凝结形成降水,这种降水称为地形雨。例如,位于喜马拉雅山脉南坡的印度乞拉朋齐,由于地处西南季风的迎风坡,大量水汽在此被迫抬升,形成了丰富的降水,平均年降水量超过 11000mm,成为世界“雨极”。而山脉的背风坡,由于水汽在迎风坡已大量消耗,往往降水稀少,形成雨影区。如美国西部的落基山脉,其背风坡的内华达州,年降水量不足 200mm,形成了广袤的荒漠景观。现代气象研究通过数值模拟发现,地形对水汽输送的影响不仅体现在降水分布上,还会改变大气环流模式,进而影响更大范围的气候和水循环。

### (三) 降水

降水是指大气中的水汽凝结成液态或固态水,在重力作用下,以雨、雪、冰雹等形式降落到地面的过程。降水是水循环中至关重要的环节,它将大气中的水汽转化为陆地和海洋的水资源,直接影响着水资源的分布和可利用量。全球降水分布极不平衡,赤道地区受赤道低气压带控制,盛行上升气流,水汽容易凝结,年降水量可达 2000mm 以上;而副热带高压控制的大陆西岸和内陆地区,气流下沉,水汽难以凝结,降水稀少,形成干旱和半干旱气候,如撒哈拉沙漠地区年降水量不足 50mm。

降水的形成需要满足水汽充足、冷却降温、凝结核存在三个条件。水汽充足是降水的物质基础,只有当大气中含有足够的水汽时,才有可能形成降水。冷却降温是水汽凝结的关键,常见的冷却方式有热力对流冷却、地形抬升冷却和气团移动冷却。热力对流冷却多发生在夏季的午后,地面受热不均,空气强烈对流上

升,水汽冷却凝结形成雷阵雨。例如,我国华南地区夏季午后常出现短时强降雨,降雨历时通常在 1~2 小时,降雨量可达 30~50mm。地形抬升冷却如前文所述的地形雨;气团移动冷却则是当冷空气与暖湿空气相遇时,暖湿空气被冷空气抬升,水汽冷却凝结成云致雨,这种降水通常范围较广,持续时间较长。凝结核是水汽凝结的核心,大气中的尘埃、盐粒等微小颗粒都可作为凝结核,没有凝结核,水汽即使达到过饱和状态也难以凝结成水滴。研究发现,城市地区由于污染物排放多,凝结核丰富,相同水汽条件下,城市的降水概率比郊区高 10%~15%。

降水的类型多样,按降水强度可分为小雨、中雨、大雨、暴雨等;按降水形态可分为雨、雪、冰雹等;按降水成因可分为锋面雨、对流雨、地形雨和气旋雨。锋面雨是冷暖空气相遇,暖湿空气沿锋面抬升,水汽冷却凝结形成的降水,是我国东部地区主要的降水类型,约占全年降水量的 60%~70%。对流雨多发生在赤道地区和夏季的中低纬度地区,具有降水强度大、历时短、范围小的特点,其降水强度可达每小时 50mm 以上,但影响范围通常在数千米至数十千米。地形雨受地形影响显著;气旋雨是由于气旋中心气流上升,水汽凝结形成的降水,常见于温带地区,降水范围广,持续时间较长。近年来,随着极端天气事件增多,暴雨、特大暴雨等强降水事件的发生频率和强度均呈上升趋势,对城市防洪、农业生产和水资源管理带来了巨大挑战。

#### (四) 地表径流

地表径流作为陆地水资源的核心输送载体,承载着全球约 75% 的淡水资源转运使命,其动态变化深刻影响着人类生产生活的用水格局。在形成机制上,地表径流严格遵循产流与汇流双阶段模式:产流阶段中,降水需突破植物截留、土壤入渗、填洼等多重“损耗屏障”,剩余水量方能启动地表流动;汇流阶段则是这些地表水流向江河湖库的汇聚过程,最终实现水资源的空间再分配。

从影响因素来看,降水特性是地表径流形成的核心驱动力。世界气象组织监测数据显示,当降水强度达到 50mm/h 以上的暴雨级别时,径流形成效率相较于普通降雨可提升 3~5 倍。地形地貌的塑造作用同样关键,山区凭借显著的地势落差(平均坡度超 15°),水流速度可达 3~5m/s,能够在短时间内高效汇聚径流;而平原地区因地势平缓(坡度通常不足 1°),水流速度缓慢,部分径流量会因扩散和下渗而损耗。以我国长江流域为例,上游横断山区凭借 4000~6000m 的海拔落差优势,年径流量高达 1.03 万亿立方米,占长江总径流量的 45%;中下游平

原地区河道宽缓,虽承接上游来水,但径流流速从上游的 2~3m/s 锐减至 0.5~1m/s,且每年约 15% 的水量通过下渗转化为地下水,补充地下水资源储备。

植被覆盖与土壤性质构成了调节地表径流的天然生态屏障。森林植被的截留作用尤为显著,热带雨林年截留降水量可达 30%,温带落叶阔叶林截留率约为 15%~20%。同时,植被根系通过生物活动显著改善土壤结构,使土壤孔隙度提升 20%~30%,进而增强土壤下渗能力 1~2 倍。黄土高原的生态演变历程便是典型例证,明清时期由于过度开垦,区域植被覆盖率从 60% 急剧降至 5%,导致地表径流侵蚀模数从  $500\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{年}$  飙升至  $15000\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{年}$ 。大量泥沙随径流涌入黄河,致使黄河年均输沙量高达 16 亿吨,下游河床以每年 10~20cm 的速度持续抬升,形成高悬于地面的“地上河”奇观,极大加剧了流域防洪压力,对沿岸生态安全和人类活动构成严重威胁。

### (五) 下渗

下渗过程作为地表水与地下水的核心转化枢纽,每年促使约  $38000\text{km}^3$  的地表水资源渗透至地下,实现水资源的垂直迁移与长期储存,对水资源的时空分布优化和可持续利用具有不可替代的战略价值。在微观层面,下渗涉及水分在土壤孔隙中的复杂渗透、储存和运移过程,受多重因素协同调控。

土壤质地是影响下渗能力的基础要素,不同质地土壤的孔隙结构差异显著:砂土孔隙直径多在 0.05~1mm,饱和导水率可达 10~100cm/h;而黏土孔隙直径小于 0.001mm,饱和导水率仅为 0.01~0.1cm/h。降雨特性对下渗过程具有显著的动态影响,当暴雨强度 ( $> 50\text{mm}/\text{h}$ ) 超过土壤下渗能力 (如黏土地区仅 5~10mm/h) 时,70% 以上的降水将无法下渗,转而形成地表径流。植被覆盖通过“海绵效应”显著增强下渗能力,每公顷森林每年可增加下渗量  $1000\sim 2000\text{m}^3$ ,植物根系形成的通道和地表枯枝落叶层能够使下渗速度提升 3~5 倍。

在水资源管理实践中,下渗原理的创新性应用不断涌现。美国波特兰市通过系统建设 3000 余个雨水花园,将城市下渗率从传统硬化地面的 10% 大幅提升至 75%,每年减少地表径流量约 1200 万立方米,有效缓解了城市排水系统压力,提升了城市应对暴雨灾害的韧性。在干旱的中亚地区,通过大规模修建渗水沟、人工回灌井等设施,每年向地下含水层补充水量超过 50 亿立方米,为咸海流域的生态恢复和农业用水保障提供了关键支撑。这些实践充分证明,科学调控下渗过程能够成为破解水资源短缺与城市内涝双重难题的有效路径。

## （六）地下径流

地下径流作为地下水在岩石空隙中的缓慢迁移过程，尽管平均流速仅 0.01~1m/日，却维系着全球约 98% 的淡水资源长期储存，在水资源储备体系中占据核心地位。依据埋藏条件与水力性质，可将其细分为包气带水、潜水和承压水三类：包气带水以结合水、毛管水和重力水等形式存在，虽然水量有限，但对维持干旱地区植被生存和生态稳定具有重要意义；潜水与地表水联系紧密，全球约 60% 的农村饮用水源自潜水含水层，但其水质易受地表污染影响；承压水受上下隔水层保护，水质优良且水量稳定，是城市供水战略性水源，例如北京约 30% 的供水依赖深层承压水。

地下径流的运动遵循复杂的水力学规律，受多种因素综合影响。地形坡度每增加 1°，水力坡度相应增大 0.01~0.05，流速可提升 10%~20%。地质构造对地下径流具有显著的“管道效应”，我国西南岩溶地区发育的地下暗河系统，借助溶洞、裂隙等天然通道，输水能力可达每秒数十立方米；而页岩等隔水层则形成天然屏障，限制水流扩散。然而，过度开采地下水引发的生态危机已成为全球性挑战，我国华北平原因长期超采地下水，形成了面积达 18 万平方公里的巨型漏斗区，导致地面沉降总量超过 300km<sup>3</sup>，部分城市建筑倾斜率达到 3‰~5‰，基础设施修复成本高达千亿元级别，严重威胁区域生态安全和经济社会可持续发展。

## 二、水循环与水资源可持续利用理论的关系

### （一）水循环为水资源可持续利用提供基础

水循环作为地球上最宏大的物质循环之一，以每年 577000km<sup>3</sup> 的惊人水量循环规模，构建起全球水资源的动态平衡体系。在这一体系中，海洋占据着绝对主导地位，其水资源总量占全球的 96.5%。然而，通过蒸发、水汽输送和降水等核心环节的协同运作，陆地水资源得以持续更新与空间调配。其中，海洋每年蒸发量高达 505000km<sup>3</sup>，这些水汽通过大气环流被输送到陆地和海洋的各个角落，每年约有 496000km<sup>3</sup> 的水汽参与跨区域输送，最终以 119000km<sup>3</sup> 的降水量回归陆地，为人类生产生活提供了宝贵的淡水资源。

这种自然循环机制为水资源可持续利用奠定了坚实基础，但人类的开发利用必须遵循其内在规律。以我国三峡工程为例，该工程巧妙利用长江的水循环特性，凭借 221.5 亿立方米的总库容调节能力，成功将长江洪峰流量从 70000m<sup>3</sup>/s 削

减至  $45000\text{m}^3/\text{s}$ ，极大降低了中下游地区的洪涝风险，每年产生的防洪效益高达 200~300 亿元。同时，工程还实现了发电、航运等综合效益：年均发电量达 1000 亿千瓦时，相当于每年减少标准煤消耗约 3100 万吨，减少二氧化碳排放约 8000 万吨；年货运量超过 1.5 亿吨，显著提升了长江黄金水道的运输能力，使长江流域水资源利用效率整体提升 40%。

在干旱地区，以色列内盖夫沙漠的水资源利用模式堪称典范。以色列科研团队深入研究沙漠地区的水循环特点，结合植物蒸腾规律，研发出精准滴灌技术。该技术通过铺设遍布农田的滴灌管网，将水和肥料精确输送到植物根部，相比传统灌溉方式，使植物蒸腾损耗降低 60%。同时，以色列大力建设雨水收集系统，将城市、农田中的降雨进行高效收集和储存。通过这些措施，以色列实现了水资源循环利用率突破 90%，在沙漠环境中成功建成高产农业区，其番茄、花卉等农产品不仅满足国内需求，还大量出口创汇，为全球干旱地区水资源可持续利用提供了宝贵经验。

## （二）水资源可持续利用理念指导水循环研究与实践

水资源可持续利用理论的不断发展，为水循环研究指明了方向，推动其朝着精细化、智能化方向迈进。在研究层面，全球气候模型（GCMs）取得了重大突破，已能够模拟未来 50 年不同碳排放情景下水循环的变化趋势。根据 IPCC 第六次评估报告预测，在高碳排放情景下，到 2050 年全球干旱地区降水将减少 10%~15%，而部分湿润地区极端降水事件的频率和强度将显著增加。这一预测结果为各国制定水资源战略规划提供了重要依据。

区域水文模型借助物联网传感器网络实现了革命性发展。美国密西西比河流域部署了 5000 余个监测站点，这些站点实时采集水位、流量、水质等数据，并通过卫星和互联网传输至数据中心。利用大数据分析和人工智能算法，流域径流预测精度提升至 90% 以上，能够提前一周准确预报洪水过程，为防洪减灾决策提供了有力支撑。

在技术实践领域，水资源可持续利用理念催生了众多创新技术。污水处理回用技术已发展至第四代膜处理工艺，采用纳滤膜、反渗透膜等先进材料，使污水再生利用率达到 95%。新加坡新生水项目便是成功范例，通过多级膜过滤和紫外线消毒技术，将生活污水深度处理后生产的再生水，满足了全国 70% 的工业用水需求，并且部分再生水经过进一步处理后达到饮用水标准。

雨水收集系统集成了智能控制系统,德国柏林的智能雨洪管理系统极具代表性。该系统通过传感器实时监测降雨量、水位等参数,利用智能算法自动控制雨水收集设施的运行。当降雨量较小时,雨水被收集用于道路冲洗;当降雨量较大时,多余雨水被引导至蓄洪设施,有效减少了城市内涝风险。通过该系统,柏林的雨水收集量提升 40%。在生态修复方面,我国太湖治理采用“自然—人工”协同模式,通过种植 60 万亩沉水植物,构建水下生态系统,使水体自净能力提升 3 倍,总氮、总磷浓度下降 40%,水质明显改善,重现碧波荡漾的美景。

### (三) 人类活动对水循环和水资源可持续利用的影响

人类活动正以空前的规模和强度重塑水循环系统,其影响呈现出积极与消极并存的复杂态势。在积极方面,我国南水北调工程堪称人类改造水循环的伟大工程。该工程通过 1432km 的输水线路,每年向北方调水 448 亿立方米,相当于 2.6 个太湖的水量。自工程通水以来,华北平原地下水位年均回升 0.5~1m,有效缓解了北方地区水资源短缺问题,改善了生态环境,超 1 亿人受益。

巴西的“绿色长城”造林计划同样成效显著。该计划通过种植 1.5 亿棵树,在巴西东北部干旱地区形成了一道绿色屏障。树木的根系增加了土壤孔隙度,使区域下渗量提高 25%,减少了地表径流,显著降低了洪涝灾害风险。同时,植被蒸腾作用增加了空气湿度,改善了局部小气候,促进了生态系统的恢复。然而,人类活动带来的负面效应也不容忽视。全球每年约 800 万吨塑料垃圾进入海洋,这些塑料垃圾不仅破坏海洋生态环境,还导致沿海地区海水淡化成本增加 30%~50%。因为塑料垃圾会堵塞海水淡化设备的过滤膜,缩短设备使用寿命,增加维护成本。亚马逊雨林的大规模砍伐更是对全球碳—水循环造成严重威胁。数据显示,雨林砍伐面积已超过 17%,导致区域降水量减少 12%,蒸腾水汽量下降 20%,破坏了全球碳—水循环的平衡,加剧了全球气候变暖。

在我国京津冀地区,过度开采地下水形成了全球最大的复合漏斗区。长期超采导致地下水位大幅下降,引发海水倒灌面积超过 1000km<sup>2</sup>,造成土壤盐渍化,每年给农业带来直接经济损失超过 50 亿元。同时,地面沉降导致建筑物倾斜、道路开裂,对基础设施造成严重破坏。这些严峻现实警示人类,必须将可持续发展理念深度融入水循环管理全过程,通过建立生态补偿机制、推行水权交易制度等创新举措,实现人与自然和谐共生。<sup>①</sup>

① 刘沛衡. 京津冀地区水循环健康评价 [D]. 华北水利水电大学, 2020.

## 第二节 水质标准与污染评价方法

### 一、水质标准概述

水质标准是为了保护水资源、保障人类健康和生态平衡，对水体中各种物质的含量以及水体的物理、化学和生物学特性所规定的限值或要求。它是水资源保护、水污染防治、水质监测与评价等工作的重要依据，其制定过程涉及多学科知识的综合运用，包括环境科学、化学、生物学、医学等领域，同时还需考虑社会经济发展水平、技术可行性以及公众健康需求等因素。

#### （一）水质标准的制定依据

##### 1. 自然本底值

自然本底值是指在未受人类活动干扰的情况下，水体中各种化学物质和生物学指标的原始含量。它反映了水体在自然状态下的物质组成和特性，是制定水质标准的重要基础。例如，在一些未受污染的山区河流中，重金属含量通常处于极低水平，这些数据可作为确定河流重金属水质标准的参考下限。通过对大量自然水体的长期监测和分析，科学家们能够获取不同区域、不同类型水体的自然本底值，为合理的水质标准提供科学依据。在研究某原始森林中的湖泊时，经过多年监测发现，该湖泊中铅、汞等重金属的含量几乎检测不出，这一数据为同类型未受污染湖泊的重金属水质标准制定提供了关键参考。

##### 2. 生态保护需求

不同的水生生态系统对水质有着不同的要求，为了维持生态系统的平衡和生物多样性，需要根据生态保护目标制定相应的水质标准。例如，对于珍稀水生生物的栖息地，水质标准会更加严格，以确保这些生物能够在适宜的环境中生存和繁衍。长江流域作为我国重要的水生生物多样性保护区，为了保护中华鲟、白鳍豚等珍稀物种，对长江水质中的溶解氧、酸碱度、污染物含量等指标都制定了严格的标准。溶解氧含量需保持在 5mg/L 以上，以满足水生生物的呼吸需求；酸碱度（pH 值）需维持在 6.5~8.5 之间，为水生生物提供适宜的生存环境。此外，对于湿地生态系统，为了保护湿地植物和微生物的正常生长，对水体中的氮、磷等营养物质含量也有明确限制，防止水体富营养化导致藻类过度繁殖，破坏湿地生态平衡。

### 3. 人类健康需求

饮用水安全直接关系到人类的身体健康和生命安全，因此基于人类健康需求制定的饮用水水质标准尤为重要。世界卫生组织（WHO）制定的《饮用水水质准则》，对饮用水中可能存在的各种有害物质，如致病性微生物、重金属、化学污染物等的含量进行了严格规定。例如，为了防止因饮用受细菌污染的水而引发肠道疾病，规定饮用水中大肠杆菌的含量不得超过每 100mL 1 个；为了避免重金属对人体健康的危害，规定饮用水中铅的含量不得超过 0.01mg/L，汞的含量不得超过 0.001mg/L。这些标准的制定是基于大量的医学研究和流行病学调查，旨在确保饮用水对人体健康不产生危害。我国的 GB5749—2022《生活饮用水卫生标准》也参考了国际标准，并结合我国实际情况，对饮用水水质指标进行了全面规定，涵盖了微生物指标、毒理指标、感官性状和一般化学指标、放射性指标等 106 项指标，全方位保障居民饮用水安全。

### 4. 技术可行性与经济合理性

在制定水质标准时，还需要考虑现有技术水平能否实现对水质的有效监测和处理，以及达到该标准所需的成本是否在社会经济可承受范围内。如果水质标准过于严格，超出了当前技术水平的处理能力，或者实现该标准需要投入巨大的经济成本，那么这样的标准在实际应用中可能难以实施。例如，对于一些新兴的有机污染物，由于目前检测技术和处理技术尚不成熟，在制定相关水质标准时，就需要充分考虑技术发展的现状和趋势，制定合理的限值。同时，对于一些经济欠发达地区，在制定工业废水排放标准时，需要综合考虑企业的承受能力，避免因标准过高导致企业无法承担污染治理成本而被迫停产，影响当地经济发展。通过技术经济分析，找到既能满足环境保护要求，又具有经济可行性的水质标准平衡点。

## （二）水质标准的分类体系

### 1. 按水体用途分类

饮用水水质标准：饮用水水质标准是保障居民饮用水安全的核心标准，对水中的微生物、化学物质和放射性物质等进行严格限制。除了前文提到的微生物和重金属指标外，还对水中的余氯含量、硬度、溶解性固体等指标进行规定。余氯是一种常用的饮用水消毒剂，适量的余氯可以保证饮用水在输送过程中持续杀菌，防止微生物滋生，但余氯含量过高会产生异味，对人体健康也可能产生潜在危害，

因此我国规定饮用水中余氯含量在与水接触 30 分钟后应不低于 0.3mg/L，在管网末梢水中不应低于 0.05mg/L。硬度主要由水中的钙、镁离子含量决定，过高的硬度会导致水垢生成，影响用水设备的使用寿命，同时也可能对人体健康产生一定影响，我国规定饮用水的总硬度（以碳酸钙计）不超过 450mg/L。

工业用水水质标准：不同工业生产对水质的要求差异较大。例如，电子芯片制造行业对水质的要求极高，需要使用超纯水，水中几乎不能含有任何杂质和离子，以避免对芯片制造过程产生影响。该行业对水中的颗粒物质、重金属离子、有机物等指标的要求达到了微克 / 升甚至 ng/L 级别。而钢铁工业用水对水质的要求相对较低，但也需要控制水中的悬浮物、硬度、酸碱度等指标，以防止设备结垢和腐蚀。一般来说，钢铁工业用水的悬浮物含量要求不超过 50mg/L，硬度（以碳酸钙计）不超过 200mg/L。此外，造纸工业用水需要控制水中的碱度、色度等指标，防止影响纸张的质量。

农业灌溉用水水质标准：农业灌溉用水水质直接影响农作物的生长和农产品质量。为了保证农作物正常生长，防止土壤污染和农产品有害物质积累，农业灌溉用水水质标准对水中的重金属、盐分、酸碱度、病原体等指标进行了规定。例如，我国 GB5084—2021《农田灌溉水质标准》规定，用于灌溉蔬菜的水，镉的含量不得超过 0.005mg/L，铅的含量不得超过 0.1mg/L，以防止重金属在蔬菜中积累，影响食品安全。同时，为了避免土壤盐渍化，对灌溉用水的含盐量也有一定限制，一般要求灌溉用水的电导率不超过 2.2 毫西门子 / 厘米。此外，还需要控制水中的大肠杆菌等病原体含量，防止农作物受到病菌污染。

渔业用水水质标准：渔业用水水质标准旨在为鱼类等水生生物提供适宜的生存和繁殖环境。该标准对水中的溶解氧、酸碱度、氨氮、亚硝酸盐等指标有严格要求。鱼类生存需要充足的溶解氧，一般要求渔业用水中的溶解氧含量不低于 5mg/L，在夏季高温等特殊情况下，溶解氧含量也不应低于 3mg/L，否则鱼类可能会因缺氧而窒息死亡。酸碱度（pH 值）应维持在 6.5~8.5 之间，氨氮和亚硝酸盐是鱼类养殖过程中常见的有害物质，过高的氨氮和亚硝酸盐含量会对鱼类产生毒性，我国渔业用水水质标准规定氨氮含量不超过 0.02mg/L，亚硝酸盐含量不超过 0.1mg/L。

## 2. 按区域和管理需求分类

国家标准：国家标准是由国家相关部门制定并颁布的，在全国范围内具有普

遍适用性的水质标准。例如，我国的 GB3838—2002《地表水环境质量标准》，将地表水水质分为五类，分别适用于不同的功能区。Ⅰ类主要适用于源头水、国家自然保护区；Ⅱ类主要适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地等；Ⅲ类主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、渔业水域等；Ⅳ类主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区；Ⅴ类主要适用于农业用水区及一般景观要求水域。不同类别的水质标准对溶解氧、化学需氧量、五日生化需氧量等几十项指标都有明确规定，为全国地表水水质管理提供了统一的依据。

地方标准：地方标准是由各省、自治区、直辖市根据当地的实际情况，在不低于国家标准的前提下制定的水质标准。由于不同地区的自然环境、产业结构和水资源状况存在差异，地方标准可以更有针对性地解决当地的水质问题。例如，在一些水资源短缺且工业发达的地区，地方政府可能会制定比国家标准更严格的工业废水排放标准，以减少污染物排放，保护当地有限的水资源。上海市根据自身的水环境特点和经济发展需求，制定了严于国家标准的《上海市污水综合排放标准》，对部分污染物的排放限值进行了进一步收紧，以更好地保护黄浦江等水源地水质。

行业标准：行业标准是由各行业主管部门针对本行业的特点和需求制定的水质标准，主要用于指导本行业的生产和用水管理。例如，石油化工行业制定了 GB31571—2015《石油化学工业污染物排放标准》，对石油化工企业排放废水中的石油类、硫化物、挥发酚等特征污染物的排放限值进行了规定。这些行业标准更注重行业生产过程中产生的特殊污染物的控制，有助于提高行业的污染防治水平。

### （三）国内外典型水质标准分析

#### 1. 国外代表性水质标准

美国国家饮用水水质标准：美国环境保护署（EPA）制定的国家饮用水水质标准体系完备，分为主要标准（Primary Standards）和次要标准（Secondary Standards）。主要标准直接关联公众健康，对微生物、消毒剂及其副产物、无机化学物质、有机化学物质、放射性物质等 100 余项指标进行严格限定。例如，在微生物指标方面，规定每 100mL 水样中大肠杆菌不得检出，以杜绝肠道疾病传播风险；针对三卤甲烷（THMs）等消毒副产物，要求其总量不得超过 80mg/L，

防止潜在致癌风险。次要标准则侧重于感官性状，如对水中铁、锰等金属离子的浓度上限作出规定，避免饮用水出现异色、异味，提升民众用水体验。美国通过建立联邦—州协同监管机制，确保水质标准严格执行，各州需定期提交水质检测报告，若未达标将面临联邦资金削减等处罚措施，这种强约束力机制使得美国饮用水达标率长期保持在 98% 以上。

欧盟水框架指令（WFD）：欧盟水框架指令是欧洲水环境管理的核心法规，旨在实现欧盟境内所有水体的“良好生态状况”。该指令打破传统按水体用途分类的标准制定模式，采用综合生态系统方法，将河流、湖泊、河口、沿海海域等各类水体纳入统一管理框架。指令设定了一系列生态质量要素指标，包括生物群落（如鱼类、底栖生物、水生植物）、物理化学条件（溶解氧、酸碱度、营养物质）和水文形态特征（河道形态、水流状况）等。例如，在生物群落指标中，要求河流生态系统中鱼类物种丰富度需达到一定标准，且外来入侵物种比例不得超过 10%。为确保指令实施，欧盟建立了严格的监测网络和定期评估制度，成员国需每 6 年对水体生态质量进行全面评估，并向欧盟委员会提交报告。在 WFD 推动下，欧盟多数河流的氨氮、磷等污染物浓度显著下降，部分曾因污染退化的河流生态系统得到有效恢复。

## 2. 我国水质标准特色与实践

地表水环境质量标准的应用：我国 GB3838—2002《地表水环境质量标准》在流域水环境管理中发挥关键作用。以长江流域治理为例，针对长江干流及主要支流，依据其功能定位划分水质类别。在三峡库区等重要饮用水水源地，严格执行Ⅱ类水质标准，通过设立保护区、禁止工业排污、开展生态清淤等措施，确保高锰酸盐指数控制在 4mg/L 以下，氨氮浓度不超过 0.5mg/L。对于中下游工业密集区的河段，如长江南京段，执行Ⅳ类水质标准，重点管控石油类、挥发酚等工业污染物排放，通过推动化工企业搬迁、建设污水处理厂等举措，使该区域水质持续改善，石油类污染物浓度从 2010 年的 0.5mg/L 降至 2020 年的 0.05mg/L。

生活饮用水卫生标准的完善历程：我国《生活饮用水卫生标准》从 1956 年首次发布到 2022 年的修订，指标数量从 16 项扩展至 106 项，反映出我国对饮用水安全重视程度的不断提升。2006 年修订版首次将贾第鞭毛虫、隐孢子虫等原虫类微生物纳入检测指标，填补了寄生虫污染检测的空白；2022 年修订进一步强化了对新兴污染物的管控，新增对全氟辛烷磺酸（PFOS）、全氟辛酸（PFOA）

等持久性有机污染物的限值规定，限值分别设定为 80ng/L 和 40ng/L。为保障标准落地，我国建立了从水源地到水龙头的全过程监测体系，全国县级以上城市均配备专业水质检测实验室，每日对出厂水进行常规指标检测，每季度开展全指标分析。

#### （四）水质标准的动态更新机制

##### 1. 科学研究驱动的标准迭代

随着环境科学研究的深入，对污染物危害的认知不断更新，推动水质标准持续优化。例如，过去认为低浓度的微塑料对生态系统影响较小，但近年研究发现，粒径小于 5mm 的微塑料可通过食物链传递，对水生生物和人体健康产生潜在威胁。基于此，欧盟已开始研究将微塑料纳入水质监测指标，并计划在未来修订水质标准时设定限值。此外，新型消毒副产物的发现也促使饮用水标准更新，美国在检测到亚氯酸盐等新型副产物后，迅速将其纳入监管范围，规定饮用水中亚氯酸盐含量不得超过 1.0mg/L。

##### 2. 社会需求变化的响应

公众对高品质水环境的需求提升，以及产业结构调整带来的用水变化，促使水质标准适应性调整。例如，随着我国高端制造业的发展，电子芯片、生物医药等产业对超纯水的需求激增，相关部门正研究制定更严格的工业超纯水水质标准，对水中颗粒物质的粒径要求从微米级向纳米级迈进。同时，随着乡村振兴战略推进，农村饮水安全受到高度关注，我国于 2021 年发布《农村饮水安全评价准则》，针对农村地区特点，简化检测指标同时确保关键安全指标不降低，将氟化物、砷等有害物质限值与城市标准统一。

##### 3. 国际标准协同与本土化调整

在全球化背景下，我国水质标准制定注重与国际接轨，同时结合国情进行本土化改造。例如，我国参考 WHO《饮用水水质准则》制定生活饮用水标准，但考虑到我国水源受工业污染和农业面源污染影响较大的实际情况，对重金属和有机污染物指标的限值设定更为严格。在地表水环境质量标准制定中，借鉴欧盟水框架指令的生态系统方法，增加了水生生物完整性评价指标，但根据我国河流生态系统特点，对鱼类物种评价指标进行针对性调整，更强调本土特有鱼类的保护。

## 二、水污染评价方法

### （一）理化指标评价方法

#### 常规污染物指标

化学需氧量（COD）与生化需氧量（BOD）：化学需氧量（COD）作为水质监测的核心指标，是指在强酸并加热条件下，用重铬酸钾作为氧化剂处理水样时所消耗氧化剂的量，其本质反映了水体中还原性物质（主要为有机物，也包括亚硝酸盐、硫化物等无机还原物）的含量。在实际检测中，重铬酸钾法（国标法）最为常用，该方法通过硫酸银作催化剂，硫酸汞掩蔽氯离子干扰，经回流消解后，用硫酸亚铁铵滴定剩余的重铬酸钾，从而计算出 COD 值。我国 GB3838—2002《地表水环境质量标准》对不同类别地表水的 COD 限值有着严格规定：Ⅰ类水为 15mg/L，Ⅱ类水为 15mg/L，Ⅲ类水为 20mg/L，Ⅳ类水为 30mg/L，Ⅴ类水为 40mg/L，数值的逐级递增直观体现了水体功能区对有机污染的耐受程度差异。

生化需氧量（BOD）则聚焦于微生物在有氧条件下分解水中有机物所需的氧量，其中五日生化需氧量（BOD<sub>5</sub>）因检测周期适中、与实际污水处理过程相关性强，成为最常用的指标。BOD<sub>5</sub> 的检测需将水样在 20℃恒温培养箱中培养 5 天，通过测定培养前后溶解氧的差值计算得出。BOD<sub>5</sub> 与 COD 的比值（B/C）是评估污水可生化性的关键参数：当 B/C > 0.5 时，表明污水可生化性极佳；0.3 < B/C ≤ 0.5 时，适合采用生物处理工艺；B/C < 0.3 则意味着生物处理难度较大。例如，某城市生活污水处理厂进水 BOD<sub>5</sub> 为 200mg/L，COD 为 450mg/L，B/C 值约为 0.44，采用活性污泥法处理后，出水 BOD<sub>5</sub> 降至 20mg/L，COD 降至 60mg/L，处理效率显著。

近年来，快速检测技术不断发展，如基于分光光度法的 COD 快速检测仪，可在 30 分钟内完成检测，检测范围覆盖 0~1500mg/L，相对误差控制在 ± 5% 以内，广泛应用于应急监测场景。

氨氮与总磷：氨氮（NH<sub>3</sub>-N）以游离氨（NH<sub>3</sub>）和铵离子（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>）两种形态存在于水体中，其含量超标不仅会消耗水中溶解氧，导致水生生物缺氧死亡，还可能在硝化作用下转化为亚硝酸盐和硝酸盐，威胁人体健康。我国 GB11607—89《渔业水质标准》明确规定氨氮（非离子氨）含量不得超过 0.02mg/L。氨氮的检测方法主要有纳氏试剂分光光度法、水杨酸一次氯酸盐分光光度法和电极法。其中，纳氏试剂法通过氨与碘化汞和碘化钾的碱性溶液反应生成淡红棕色胶态化合物，在 420nm 波长处测定吸光度，检测限可达 0.02mg/L。

总磷（TP）涵盖水体中溶解态磷、颗粒态磷及有机磷，是引发水体富营养化的关键因素。当水体中总磷浓度超过 0.02mg/L，氮浓度超过 0.2mg/L 时，藻类易过度繁殖，引发水华或赤潮。太湖流域治理堪称典范：2007 年蓝藻大规模爆发时，入湖河流总磷浓度高达 0.15mg/L；通过实施工业点源治理、生活污水截流、农业面源控制等综合措施，2020 年总磷浓度降至 0.05mg/L 以下。总磷检测通常采用钼酸铵分光光度法，需先过硫酸钾消解将各种形态的磷转化为正磷酸盐，再与钼酸铵反应生成磷钼杂多酸，经抗坏血酸还原后在 700nm 波长处测定，检测范围为 0.01~0.6mg/L。

#### 特殊污染物指标

重金属污染物：铅、汞、镉、铬、砷等重金属具有毒性强、生物富集性高、难以降解的特点。以镉为例，我国 GB15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》根据土壤 pH 值设定不同风险筛选值：pH < 5.5 时，镉限值为 0.3mg/kg；pH ≥ 7.5 时，限值为 0.8mg/kg。水体中重金属检测技术不断革新，原子吸收光谱（AAS）可实现单一元素的高精度测定，火焰原子吸收法对镉的检测限为 0.005mg/L，石墨炉原子吸收法更可低至 0.0001mg/L。电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）则能同时分析多达 70 种元素，检测限普遍在微克 / 升甚至 ng/L 量级，在痕量重金属检测中优势显著。

某重金属污染河流治理案例显示，初始镉浓度达 0.5mg/L，远超《地表水环境质量标准》Ⅰ类水 0.001mg/L 的限值。治理团队采用离子交换树脂吸附与化学沉淀联合工艺：先投加石灰乳调节 pH 至 10~11，使镉离子生成氢氧化镉沉淀；再通过螯合树脂进一步吸附残余镉离子，最终将镉浓度降至 0.005mg/L，满足饮用水水源地标准。

有机污染物：有机污染物种类超百万种，涵盖多环芳烃（PAHs）、农药、抗生素、内分泌干扰物等。气相色谱—质谱联用仪（GC-MS）适用于易挥发、热稳定的有机污染物检测，如有机磷农药（敌敌畏、乐果）、有机氯农药（DDT、六六六）等。以百菌清为例，采用 GC-MS 检测时，通过电子轰击电离源（EI）使样品离子化，在选择离子监测（SIM）模式下，检测限可达 0.01 微克 / 升，我国《农田灌溉水质标准》规定其限值为 0.5mg/L。

对于难挥发、热不稳定的有机物，高效液相色谱仪（HPLC）更为适用。抗生素检测中，采用 C18 色谱柱分离，紫外—可见检测器（UV-Vis）或质谱检测器

(MS) 检测, 磺胺类抗生素的检测限可达  $0.1\mu\text{g/L}$ 。近年来, 新兴污染物如全氟化合物(PFAS)、微塑料等引发广泛关注, 超高效液相色谱—串联质谱(UPLC-MS/MS) 可实现 PFAS 中 12 种单体的同时检测, 检测限低至皮克 / 升量级。

## (二) 生物评价方法

### 1. 指示生物法

指示生物是水质状况的“活体探测器”, 其种群分布和数量变化直观反映水体污染程度。颤蚓类(如水丝蚓)和摇蚊幼虫(如羽摇蚊)能耐受高浓度有机物和低溶解氧环境, 被视为重度污染指示生物; 而石蚕、蜉蝣、蜻蜓稚虫等对水质要求严苛, 仅在清洁水体中生存。英国泰晤士河治理是经典案例: 19 世纪工业革命时期, 因污水直排导致溶解氧近乎耗尽, 鱼类绝迹, 耐污的颤蚓类每平方米数量超过 10 万条; 经过百年治理, 如今蜉蝣目昆虫种群密度恢复至 100~200 只 / 平方米, 鱼类物种从绝迹增至 120 余种, 标志着河流生态系统的全面复苏。

指示生物法具有成本低、直观性强的优势, 但也存在局限性: 不同地区生物群落差异大, 需建立本地化指示生物名录; 生物对污染的响应存在滞后性, 难以实时监测污染变化。

### 2. 生物指数法

Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ): 该指数综合考量群落中物种丰富度 ( $S$ ) 和均匀度 ( $E$ ), 计算公式为  $H' = -\sum [p_i \times \ln(p_i)]$ , 其中  $p_i$  为第  $i$  个物种个体数占总个体数的比例。某湖泊污染前后的监测数据显示: 污染前,  $H'$  值为 3.5, 表明物种丰富且分布均匀; 污染后, 蓝藻暴发导致物种单一化,  $H'$  降至 1.2; 经过生态修复, 种植沉水植物、投放滤食性鱼类后,  $H'$  回升至 2.8, 说明生态系统稳定性逐步恢复。

硅藻生物指数 (DBI): 硅藻对水质变化极为敏感, 不同属种对应不同污染梯度。欧洲广泛应用的硅藻生物指数将硅藻分为 5 个污染敏感类群, 通过计算各类群比例得出指数值, 指数越高表明污染越严重。在莱茵河水质监测中, DBI 从 1980 年的 6.5 (重度污染) 降至 2020 年的 2.3 (轻度污染), 直观反映了流域治理成效。

## (三) 综合评价方法

### 1. 模糊综合评价法

该方法基于模糊数学理论, 通过构建隶属度函数将水质指标的确定性数据转

化为对不同水质类别的隶属程度。以某河流断面评价为例,选取COD、氨氮、总磷、溶解氧、pH值共5项指标,建立三级评价体系(I~Ⅲ类为清洁,Ⅳ类为轻度污染,Ⅴ类为重度污染)。采用层次分析法(AHP)确定权重:COD(0.3)、氨氮(0.25)、总磷(0.2)、溶解氧(0.15)、pH值(0.1)。通过隶属度函数计算得到各指标对不同类别的隶属度矩阵,经加权平均后得出综合评价结果。某研究团队运用该方法对长江某支流评价显示,其对Ⅱ类水的隶属度为0.62,判定该河段水质等级为Ⅱ类,与实际监测结果一致。

## 2. 灰色关联分析法

该方法通过计算各水质指标序列与参考序列(理想水质或标准水质序列)的关联度,量化污染程度和确定主要污染因子。在黄河中游某流域评价中,选取高锰酸盐指数、氨氮、总磷、氟化物等10项指标,以《地表水环境质量标准》Ⅲ类水为参考序列。计算得出各指标关联度排序:氨氮(0.85)>高锰酸盐指数(0.78)>总磷(0.72),表明氨氮是首要污染因子,为精准治理提供依据。灰色关联分析法尤其适用于数据量少、信息不完全的场景,但权重确定主观性较强。

## 3. 人工神经网络评价法

以BP(反向传播)神经网络为例,其通过输入层、隐含层、输出层的神经元连接,模拟人脑神经元的信息处理过程。在珠江三角洲河网水质评价中,构建“8—15—5”结构的三层神经网络:输入层包含溶解氧、COD、氨氮、总磷、pH值、电导率、浊度、高锰酸盐指数8项指标;隐含层设置15个神经元;输出层对应5个水质类别(I~Ⅴ类)。经过1000次迭代训练,模型对验证集的预测准确率达92%,能够实时输出水质等级并预警污染趋势,为河网动态管理提供智能决策支持。

在实际应用中,单一评价方法往往存在局限性。理化指标法可精确定量污染物浓度,但难以反映生态效应;生物评价法能直观体现生态影响,却缺乏污染物浓度数据;综合评价法虽全面,但计算复杂、参数依赖性强。因此,多方法联用成为主流趋势。例如,在长江流域水质评价中,先通过理化指标快速筛查污染点位,再用生物指数法评估生态损害,最后借助模糊综合评价法得出整体水质等级,为“精准治污、科学治污”提供全方位数据支撑。<sup>①</sup>

① 孙萍. 水污染评价方法与治理探讨[J]. 环境与发展, 2018, 30(8): 231, 234.

### 第三节 水资源保护技术分类与发展趋势

水资源保护技术是实现水资源可持续利用的核心手段，其涵盖从源头节水到末端治理、从污染防控到生态修复的全链条技术体系。随着全球水资源短缺与水环境污染问题日益严峻，各类创新技术不断涌现，依据技术功能与应用场景，可系统划分为节水技术、水污染治理技术、水生态修复技术及水资源管理技术四大类。

#### 一、节水技术体系

##### （一）农业节水技术

农业作为全球最大的用水部门，消耗了约 70% 的淡水资源，节水技术创新对保障粮食安全与水资源平衡至关重要。当前农业节水技术主要包括工程节水、农艺节水和管水节水三大方向。

##### 1. 工程节水技术

滴灌与微喷灌技术是工程节水的典型代表。滴灌系统通过铺设于作物根部的毛管与滴头，以 0.5~2.0L/h 的低流量精准供水，较传统漫灌节水 50%~70%。以色列内盖夫沙漠地区应用智能滴灌系统，结合土壤湿度传感器与气象数据，实现按需灌溉，使番茄产量提升 3 倍的同时，用水量减少 60%。微喷灌技术则以 3~25L/h 的流量喷洒水雾，适用于果园、苗圃等场景，较沟灌节水 30%~50%。我国新疆棉花种植区推广的膜下滴灌技术，将滴灌与地膜覆盖结合，在抑制蒸发的同时减少土壤盐渍化，使棉花单产提高 20%~30%。

##### 2. 农艺节水技术

覆盖保墒技术通过秸秆、地膜等覆盖物减少土壤蒸发。秸秆覆盖可降低地表温度 2℃~3℃，减少蒸发量 30%~40%；地膜覆盖在干旱地区能使土壤含水量提高 5%~10%。耐旱作物品种选育同样成效显著，我国培育的“中麦 175”小麦品种，在同等灌溉条件下，较普通品种增产 15%~20%。此外，水肥一体化技术将灌溉与施肥结合，通过滴灌系统同步输送水分与养分，使肥料利用率从 30%~40% 提升至 60%~70%。

##### 3. 管水节水技术

精准灌溉决策系统利用遥感（RS）、地理信息系统（GIS）与物联网（IoT）

技术，构建“天空地”一体化监测网络。美国加利福尼亚州的智能灌溉系统通过卫星遥感获取作物需水量数据，结合田间传感器实时监测土壤墒情，实现灌溉用水的动态调控，节水效率达 35%。水权交易制度则从宏观层面优化水资源配置，澳大利亚墨累—达令流域建立水权市场，通过市场化交易促使农业用水向高附加值作物转移，节水效益超 10 亿立方米 / 年。

## （二）工业节水技术

工业用水占全球总用水量的 20%，其节水技术聚焦于提高重复利用率与工艺革新。

### 1. 循环冷却技术

密闭式循环冷却系统通过换热器隔离冷却水与空气，减少蒸发损耗，较开放式系统节水 80%。上海宝钢采用的密闭循环冷却技术，使吨钢新水消耗量从 2000 年的  $25\text{m}^3$  降至 2020 年的  $3.5\text{m}^3$ 。新型节水型冷却塔采用高效填料与布水装置，将蒸发损失率从 1.5%~2.0% 降至 0.8%~1.2%。

### 2. 工艺节水技术

零排放技术在煤化工、电镀等行业逐步推广。神华鄂尔多斯煤制油项目通过膜浓缩与蒸发结晶技术，实现废水零排放，每年节水超 500 万立方米。干熄焦技术替代传统湿法熄焦，每处理 1t 焦炭可节水  $0.5\sim 0.6\text{m}^3$ ，同时回收热能发电。此外，新型清洁生产工艺不断涌现，纺织行业的冷轧堆染色技术较传统染色节水 40%~50%。

### 3. 废水回用技术

工业废水经过深度处理后回用于生产环节。电子芯片制造行业采用反渗透（RO）、电去离子（EDI）技术，将清洗废水处理至电阻率  $18.2\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$  以上，回用率达 90%。石化行业通过“预处理+膜生物反应器（MBR）+纳滤（NF）”组合工艺，将达标废水回用于循环冷却水系统，节水率提升 30%。

## （三）生活节水技术

生活用水约占全球总用水量的 10%，节水潜力主要体现在器具革新与管理优化。

### 1. 节水器具

高效节水马桶采用双档冲水设计，小档用水量从 6L 降至 3L，节水率达 50%。感应式水龙头通过红外感应控制出水，较普通水龙头节水 30%~40%。节水型洗

衣机采用变频技术与优化的滚筒设计，单次洗涤用水量从 120L 降至 60L。

### 2. 再生水利用

城市污水经处理后用于非饮用水场景。新加坡新生水项目通过微滤（MF）、反渗透（RO）和紫外线消毒工艺，将生活污水转化为高品质再生水，满足 70% 的工业用水需求。我国北京的南水北调配套工程，将再生水用于城市绿化、道路冲洗，年替代新鲜水量超 5 亿立方米。

### 3. 智慧水务管理

基于物联网的智能水表系统实现用水数据实时监测与异常报警。东京水务公司部署的智能水表网络，通过分析用户用水模式，精准定位漏水点，使管网漏损率从 15% 降至 5%。阶梯水价与超定额累进加价制度则通过经济杠杆引导节水行为，上海实施阶梯水价后，居民户均用水量下降 12%。

## 二、水污染治理技术

### （一）物理处理技术

物理处理技术通过物理作用分离、回收废水中不溶解的悬浮污染物。

#### 1. 格栅与沉砂池

格栅作为污水处理的首道工序，通过不同孔径的金属栅条拦截大体积垃圾，孔径范围从粗格栅的 50~100mm 到细格栅的 1~10mm。沉砂池利用重力沉降原理，去除废水中粒径大于 0.2mm 的砂粒，停留时间通常为 1~3 分钟。某城市污水处理厂设置旋流沉砂池后，砂粒去除率达 95%，有效减轻后续设备磨损。

#### 2. 过滤技术

颗粒过滤采用石英砂、无烟煤等滤料，去除 1~100 $\mu\text{m}$  的悬浮物，常用于饮用水预处理。超滤（UF）膜过滤精度为 0.01~0.1 $\mu\text{m}$ ，可截留胶体、细菌等污染物，在工业废水处理中广泛应用。某印染厂采用“超滤 + 反渗透”组合工艺，使出水浊度降至 0.1NTU 以下。

#### 3. 气浮技术

溶气气浮（DAF）通过将空气溶解于加压水中，释放后形成微小气泡（直径 10~100 $\mu\text{m}$ ），附着污染物上浮分离。在含油废水处理中，DAF 可使油类去除率达 90% 以上。某炼油厂采用涡凹气浮（CAF）技术，将废水中的石油类浓度从 500mg/L 降至 50mg/L。

## （二）化学处理技术

化学处理技术通过化学反应改变污染物性质，实现去除或转化。

### 1. 中和法

酸性废水采用石灰、氢氧化钠中和，碱性废水则用硫酸、盐酸调节 pH 值。某电镀厂酸性废水（pH2~3）经石灰中和后，pH 值稳定在 6~9 的达标范围。

### 2. 化学沉淀法

重金属废水常用硫化物沉淀法处理，生成难溶硫化物（如硫化镉  $K_{sp}=8 \times 10^{-27}$ ）。某铅锌矿废水通过投加硫化钠，使铅、锌离子浓度分别从 500mg/L、800mg/L 降至 1mg/L 以下。

### 3. 氧化还原法

臭氧氧化技术利用臭氧的强氧化性（氧化还原电位 2.07V）降解难生物降解有机物。某制药废水经臭氧氧化后，COD 从 2000mg/L 降至 800mg/L，可生化性显著提升。芬顿氧化法通过亚铁离子催化过氧化氢产生羟基自由基（ $\cdot OH$ ，氧化还原电位 2.8V），在处理含酚废水时，酚类去除率可达 95%。

## （三）生物处理技术

生物处理技术利用微生物的代谢作用分解、转化废水中的有机污染物和部分无机污染物，具有处理效果好、成本低、环境友好等特点，是水污染治理的核心技术之一，主要分为好氧生物处理、厌氧生物处理和新型生物处理工艺。

### 1. 好氧生物处理技术

活性污泥法是最经典的好氧生物处理工艺，通过曝气使微生物群体（活性污泥）与废水充分接触，微生物利用废水中的有机物进行新陈代谢，将其分解为二氧化碳和水。传统活性污泥法处理城市生活污水时，在合适的污泥负荷  $0.2 \sim 0.4 \text{kgBOD}_5 / (\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$  和曝气时间 6~8 小时条件下，可使  $\text{BOD}_5$  去除率达到 90%~95%。为适应不同水质和处理需求，衍生出多种改良工艺，如氧化沟工艺采用环形跑道式的沟渠，曝气设备沿沟渠布置，形成独特的循环混合流态，水力停留时间长达 16~32 小时，污泥龄 20~30 天，对水质水量变化有较强的适应性，常用于中小城镇污水处理；SBR（序批式活性污泥法）工艺则将曝气、沉淀、排水等过程在同一反应池中周期性进行，通过时间上的交替运行实现水质净化，某纺织印染废水处理厂采用 SBR 工艺，对 COD、 $\text{BOD}_5$  的去除率分别达到 85% 和 90%。

## 2. 厌氧生物处理技术

厌氧生物处理在无氧条件下,利用厌氧微生物将有机物分解为甲烷、二氧化碳等物质,同时可实现污泥减量化和能源回收。UASB(升流式厌氧污泥床)是应用广泛的厌氧处理工艺,其内部设有三相分离器,可实现气、液、固的有效分离。在处理高浓度有机废水如啤酒废水时,UASB反应器的容积负荷可达 $10\sim 15\text{kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,COD去除率达到80%~90%,产生的沼气可作为能源利用。厌氧消化技术在处理有机污泥和餐厨垃圾方面效果显著,通过厌氧微生物的发酵作用,将有机固体废弃物转化为沼气,同时污泥体积减小30%~50%。我国北京某餐厨垃圾处理厂采用厌氧消化工艺,每日处理餐厨垃圾500t,产生沼气1.5万立方米,用于发电和供热。

## 3. 新型生物处理工艺

生物膜法是近年来发展迅速的新型生物处理技术,微生物附着生长在固体载体(填料)表面形成生物膜,通过生物膜的吸附、降解作用去除污染物。MBBR(移动床生物膜反应器)将比重接近水的悬浮填料投加到反应器中,在曝气和水流的作用下,填料在反应器内循环流动,增加了生物量和传质效率。某制药废水处理工程采用MBBR工艺,处理后COD从1500mg/L降至150mg/L,氨氮从150mg/L降至15mg/L。此外,生物强化技术通过向处理系统中投加高效降解菌或基因工程菌,增强微生物对特定污染物的降解能力,在处理含难降解有机物的工业废水中展现出良好的应用前景。

# 三、水生态修复技术

## (一) 湿地生态修复技术

湿地被誉为“地球之肾”,在净化水质、调节气候、维持生物多样性等方面发挥着重要作用。湿地生态修复通过恢复湿地的水文条件、植被群落和土壤结构,重建受损的湿地生态系统。

### 1. 湿地水文恢复

通过修建水闸、堤坝等水利工程,调节湿地水位和水流,恢复湿地的自然水文节律。美国佛罗里达州大沼泽地修复工程,耗资超100亿美元,通过建设一系列调水工程和湿地蓄水设施,将湿地水位恢复到历史水平,改善了湿地的水文条件,为生物栖息地的恢复创造了条件。

## 2. 植被恢复

选择本土适生植物进行种植，重建湿地植被群落。我国杭州西溪国家湿地公园修复过程中，种植芦苇、香蒲、睡莲等水生植物，形成多层次的植被结构，不仅提高了湿地的净化能力，还为鸟类和其他野生动物提供了栖息和觅食场所。同时，植被的根系还能稳固土壤，防止水土流失。

## 3. 生物多样性恢复

通过引入濒危物种、保护关键栖息地等措施，恢复湿地生物多样性。江苏盐城沿海湿地通过建立自然保护区，保护丹顶鹤等珍稀鸟类的栖息地，同时开展生态补水、互花米草清除等工作，使湿地生态系统得到有效恢复，鸟类种群数量显著增加。

# (二) 河流生态修复技术

河流生态修复旨在恢复河流的自然形态、生态功能和生物多样性，改善河流生态环境。

## 1. 河道形态修复

拆除不合理的硬质护岸和堤坝，恢复河流的自然弯曲形态和滩地、河漫滩等地貌特征。德国莱茵河的生态修复工程拆除了部分人工裁弯取直的河段，恢复了河流的自然蜿蜒形态，增加了河流的栖息地多样性，改善了鱼类等水生生物的生存环境。同时，采用生态护坡技术替代传统硬质护坡，如植物护坡、石笼网护坡等，既稳固河岸，又能促进植物生长和生物栖息。

## 2. 水生生态系统修复

通过增殖放流、栖息地修复等措施，恢复河流的水生生物群落。我国长江流域实施的“十年禁渔”政策，配合人工增殖放流中华鲟、长江鲟等珍稀鱼类，使部分鱼类种群数量出现回升迹象。此外，修复河流中的浅滩、深潭等微生境，为不同生活习性的水生生物提供适宜的生存空间。

## 3. 水质改善与生态补水

结合水污染治理技术，改善河流水质。同时，通过跨流域调水、再生水回补等方式，增加河流生态流量。北京的永定河生态补水工程，通过引黄河水和本地再生水对永定河进行补水，使断流多年的河道重现生机，地下水位回升，周边环境得到明显改善。

### （三）湖泊生态修复技术

湖泊生态修复针对湖泊富营养化、蓝藻暴发、生物多样性下降等问题，综合运用多种技术手段进行治理。

#### 1. 控源截污与底泥疏浚

通过建设污水处理厂、截污管网等设施，控制外源污染物进入湖泊。同时，对污染严重的湖泊底泥进行疏浚，减少内源污染物释放。太湖流域通过实施“引江济太”工程和环湖截污工程，配合大规模底泥疏浚，使湖泊水质得到一定程度改善。底泥疏浚深度一般根据污染物沉积情况确定，通常在 0.3~1.0m 之间。

#### 2. 水生植被重建

在湖泊中种植沉水植物、浮叶植物和挺水植物，构建完整的水生植被系统。云南滇池通过种植海菜花、轮叶黑藻等沉水植物，恢复水生植被面积超 10 万亩，有效抑制了藻类生长，提高了水体透明度。水生植被还能吸收水中的氮、磷等营养物质，降低水体富营养化程度。

#### 3. 生态调控

通过投放滤食性鱼类、贝类等生物，调控湖泊生态系统结构。在巢湖生态修复中，投放鲢鱼、鳙鱼等滤食性鱼类，利用其摄食藻类的习性，控制蓝藻生长，改善水质。同时，合理调整鱼类种群结构，维持生态系统平衡。

## 四、水资源管理技术

### （一）智慧水资源管理系统

智慧水资源管理系统借助物联网、大数据、人工智能等技术，实现水资源的实时监测、精准调度和科学管理。

#### 1. 监测感知层

通过部署水质传感器、水位传感器、流量传感器等设备，实时采集水资源相关数据。在长江流域建立的水质监测网络，包含 500 余个监测站点，可实时监测 COD、氨氮、溶解氧等 20 余项指标，数据采集频率达到分钟级。

#### 2. 数据传输层

利用 5G、NB-IoT 等通信技术，将监测数据快速、稳定地传输至数据中心。某智慧水务项目采用 5G 技术，实现了监测数据的秒级传输，为应急决策提供了有力支持。

### 3. 分析决策层

运用大数据分析和人工智能算法，对采集的数据进行处理和分析，实现水资源的优化配置和调度。基于机器学习的水资源预测模型，能够提前一周预测区域用水量和水质变化趋势，准确率达到 90% 以上。同时，通过构建水资源调度模型，实现多水源联合调度，提高水资源利用效率。

## （二）水资源管理制度创新

水资源管理制度创新是实现水资源可持续利用的重要保障，包括水权制度、水价制度和流域协同管理等方面。

### 1. 水权制度

建立水权初始分配、交易和监管体系，明确水资源的使用权和所有权。我国在宁夏开展水权交易试点，通过水权交易市场，将农业节余水量交易给工业企业，实现了水资源的优化配置，节水效益超 2 亿立方米。

### 2. 水价制度

推行阶梯水价、两部制水价等制度，发挥价格杠杆作用，促进节约用水。广州市实施阶梯水价后，居民用水量下降 15%，工业用水重复利用率提高至 85%。

### 3. 流域协同管理

打破行政区域界限，建立流域统一管理机制。多瑙河流域通过成立多瑙河保护国际委员会，协调流域内 14 个国家的水资源管理和污染治理，实现了流域水资源的可持续利用。我国也在推进长江流域、黄河流域等重点流域的协同管理，加强上下游、左右岸之间的合作与协调。

## 五、水资源保护技术发展趋势

### （一）技术集成化与智能化：打造高效协同的智慧水系统

技术集成化与智能化已成为水资源保护领域的核心发展方向，通过多技术融合与智能控制，实现水资源管理从粗放式向精细化的跨越。在技术集成层面，工业废水处理领域率先实现突破，物理、化学、生物处理技术的有机结合显著提升处理效能。例如，某大型石化企业构建“预处理—高级氧化—生物处理”集成系统：首先利用格栅、沉砂池等物理手段去除大颗粒悬浮物；再采用芬顿氧化、臭氧催化氧化等化学工艺降解难生物降解有机物，将废水的可生化性（B/C 比）从 0.2 提升至 0.4；最后通过 MBR（膜生物反应器）进行深度净化，使出水 COD 稳

定低于 60mg/L，达到国家一级 A 排放标准。这种集成模式不仅提高了污染物去除效率，还降低了单一技术处理的成本和环境风险。

智能化技术的深度应用进一步赋能水资源保护。物联网（IoT）、大数据与人工智能（AI）的协同，构建起全方位智能管理体系。在监测感知层面，高精度传感器实现对水质、水量的实时动态监测，在荷兰鹿特丹部署的智能水质监测网络，通过分布式传感器实时采集溶解氧、pH 值、氨氮等 20 余项指标，数据更新频率达分钟级，为水环境预警提供精准数据。在决策控制层面，AI 算法发挥关键作用，基于深度学习的污水处理厂优化系统，通过分析历史运行数据与实时进水参数，自动调整曝气强度、污泥回流比等工艺参数，某污水处理厂应用该系统后，能耗降低 18%，处理效率提升 25%。此外，数字孪生技术的应用使水资源系统实现虚拟与现实的交互映射，我国南水北调中线工程构建的数字孪生平台，可模拟不同调度方案下的输水效果，优化调度决策，提升水资源利用效率。

## （二）源头防控与全过程治理：重塑水资源保护路径

传统“末端治理”模式已难以应对复杂的水环境污染问题，向源头防控与全过程治理转型成为必然趋势。在工业领域，清洁生产技术从源头上减少污染物产生，以钢铁行业为例，短流程电弧炉炼钢技术较传统长流程工艺节水 40%，减少二氧化碳排放 30%。同时，工业节水型工艺不断革新，某电子芯片制造企业采用干式清洗替代水洗工艺，每年可节约水资源 120 万吨。农业领域，生态农业模式通过精准施肥、病虫害绿色防控等技术，有效降低面源污染。我国太湖流域推广的“稻—鱼—蟹”共生系统，减少化肥使用量 30%，农药使用量 50%，同时提升农产品附加值。

全过程治理理念贯穿水资源开发、利用、排放全链条。在水资源开发阶段，生态流量保障制度成为硬性约束，我国长江流域规定水电站最小下泄流量需维持在多年平均流量的 10%~30%，保障河流生态基流。在用水环节，智慧水务管理系统实现用水精准计量与动态调控，深圳市通过安装智能水表，将城市管网漏损率从 12% 降至 7%。排放阶段，严格的排污许可制度与在线监测系统强化监管，某化工园区实施“一企一证”管理，对重点污染物排放浓度和总量进行双重管控，使园区废水达标排放率提升至 99%。此外，再生水利用体系逐步完善，新加坡新生水项目将生活污水经“微滤—反渗透—紫外线消毒”处理后，70% 用于工业冷却、景观补水，实现水资源的循环利用。

### （三）生态修复与可持续发展：构建人水和谐新生态

水生态修复技术正从单一功能恢复向生态系统完整性、可持续性方向升级。在湿地修复领域，生态—工程协同模式成为主流，美国佛罗里达州大沼泽地修复工程耗资 120 亿美元，通过恢复历史水文连通性、重建原生植被群落，使濒危美洲鳄种群数量从 20 世纪 70 年代的 200 只恢复至如今的 2000 余只。河流生态修复强调自然形态重塑与生物栖息地重建，德国莱茵河拆除 100 余公里人工堤坝，恢复蜿蜒河道，鱼类物种多样性提高 40%。我国长江流域实施的“十年禁渔”政策，配合增殖放流与栖息地修复，使长江鲟等珍稀鱼类出现自然繁殖迹象。<sup>①</sup>

生态修复与社会经济发展的协同融合成为趋势。城市水生态修复项目融入景观设计理念，北京亮马河通过“生态治理+景观提升”改造，将黑臭河道转变为集生态、休闲、文化于一体的城市滨水空间，周边土地价值提升 30%。在乡村地区，水生态修复与特色产业结合，浙江安吉余村通过治理水土流失、恢复溪流生态，发展生态旅游，村民人均年收入从不足千元增长至 5 万余元。此外，生态补偿机制逐步完善，新安江流域建立跨省生态补偿试点，上游安徽通过水质改善向下游浙江换取补偿资金，实现“水质改善—经济发展”双赢。

### （四）新兴技术的突破与应用：开辟水资源保护新赛道

纳米技术、生物技术、膜技术等前沿科技的突破，为水资源保护带来革命性变革。纳米材料在水污染治理中展现独特优势，纳米零价铁（nZVI）因具有高比表面积和强还原性，对重金属（如镉、铅）和有机污染物（如多氯联苯）的去除效率可达 95% 以上。纳米二氧化钛光催化技术在光照下可将有机污染物矿化为二氧化碳和水，某印染废水处理厂应用该技术后，染料去除率提升至 98%。

生物技术领域，基因编辑技术（如 CRISPR-Cas9）为微生物育种提供新工具。科研团队通过基因编辑改造假单胞菌，使其对多环芳烃的降解速率提高 3 倍。合成生物学技术则可设计人工微生物群落，实现复杂污染物的协同降解。在膜技术方面，新型膜材料不断涌现，超薄复合膜的截留分子量可低至 100Da，实现对微量污染物的精准去除；智能响应膜能根据环境变化（如 pH 值、温度）自动调节膜通量，某海水淡化工程采用智能响应膜后，产水效率提高 20%。此外，区块链技术在水资源管理中的应用逐步展开，澳大利亚昆士兰州利用区块链实现水权交

<sup>①</sup> 冉巧玲，杨娟，徐海涛. 水生态修复技术在河道污染治理中的应用与探索 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (18): 131-133.

易的透明化、可追溯化，降低交易成本 30%。然而，新兴技术的推广仍面临诸多挑战。纳米材料的大规模制备成本高昂，且其环境安全性有待进一步评估；基因编辑微生物的生态风险需严格监管；新型膜材料的抗污染性能和使用寿命仍需提升。未来，需加强产学研协同创新，完善技术标准与监管体系，加速新兴技术从实验室到产业化的转化进程，为全球水资源保护注入新动能。



## 第三章 物理性水资源保护技术

### 第一节 水源地物理隔离与生态屏障技术

水源地作为维系区域供水安全的核心枢纽，其水质安全直接关乎民生福祉与生态平衡。据世界卫生组织统计，全球约 70% 的淡水供应依赖于各类水源地，而随着工业化、城镇化进程加速，水源地面临着来自农业面源污染、工业废弃物排放、生活垃圾堆积等多源物理性污染威胁。例如，我国长江流域部分水源地周边，因农业化肥过量使用和工业污水偷排，每年有超过 20 万吨污染物进入水体，威胁居民饮用水安全。物理隔离与生态屏障技术作为水源地保护的首道防线，通过构建物理阻隔结构与生态缓冲系统，可有效拦截污染物、净化水质、维持生态功能，在水源地保护体系中占据关键地位。

#### 一、水源地物理隔离技术体系

##### （一）物理隔离技术的基本原理与功能

物理隔离技术基于“阻断—拦截—导流”的核心原理，通过构建实体工程设施，切断污染源与水源地的直接联系，防止固体废弃物、漂浮物、油污等物理性污染物侵入水源地。其核心功能包括：第一，污染物拦截，利用栅栏、滤网等设施截留河道中的枯枝落叶、生活垃圾、工业残渣等漂浮物；第二，径流调控，通过导流渠、堤坝等工程改变地表径流路径，引导受污染水体远离水源地；第三，风险隔离，在突发性污染事件中，快速构建临时隔离设施，防止污染物扩散至水源保护区。

从力学角度来看，物理隔离设施需承受水流冲击力、漂浮物撞击力等多种外力作用。以浮式拦污栅为例，其受力大小与水流速度的平方成正比，当水流速度达到 2m/s 时，每平方米栅体承受的冲击力可达 800N。因此，在设计时需通过流体力学计算和模型试验，确保设施具备足够的强度和稳定性。同时，物理隔离技术还融入了流体动力学原理，通过合理设计导流堤坝的形状和坡度，可使水流流速降低 30%~50%，从而提高污染物拦截效率。

## （二）物理隔离设施的类型与应用

### 1. 固定式隔离设施

围网与栅栏：围网与栅栏是最常见的固定式隔离设施，广泛应用于湖泊、水库型水源地。材质主要包括不锈钢、高强度塑料和合金网，网孔尺寸根据保护需求定制，饮用水水源地围网网孔通常小于 5cm，以拦截小型漂浮物。在材料选择上，近年来出现的超高分子量聚乙烯（UHMWPE）材质围网，其抗拉强度达到普通钢材的 1.5 倍，且具有耐酸碱、抗紫外线的特性，使用寿命可达 15~20 年。

太湖流域的饮用水水源地周边布设了总长超 500km 的高强度合金围网，成功拦截蓝藻水华漂移，使水源地蓝藻密度降低 70%。为应对蓝藻季节性爆发，太湖围网采用了可升降设计，在蓝藻高发期将围网提升至水面以上 20cm，有效阻挡蓝藻进入水源保护区。栅栏则多采用混凝土或金属立柱结构，适用于河流型水源地，某长江支流饮用水源地安装的混凝土栅栏，采用榫卯结构连接，每根立柱埋深达 2m，可抵御 50 年一遇的洪水冲击，有效阻挡了船舶运输过程中的油料泄漏与固体废弃物抛洒。

导流堤坝与截污沟：导流堤坝通过改变水流方向，将受污染的地表径流引导至污水处理设施。我国南水北调中线工程水源地丹江口水库，建设了长达 300km 的导流堤坝，配合截污沟系统，将周边农业面源污染和村镇生活污水统一收集处理，每年减少入库污染物量超 10 万吨。这些导流堤坝采用梯形断面设计，迎水面坡度为 1 : 2，背水面坡度为 1 : 1.5，既保证了结构稳定性，又有利于水流平顺通过。

截污沟常与雨水管网相连，采用混凝土或 U 型 PVC 材质，沟壁坡度设计为 1%~2%，确保水流顺畅，某城市水源保护区的截污沟系统日均截污量达 2000 立方米。新型截污沟采用模块化设计，单个模块长度为 2m，可根据实际需求快速组装。部分截污沟还配备了智能监测设备，通过液位传感器实时监测沟内水位，当水位超过警戒值时，自动启动强排泵，防止污水溢流。

### 2. 移动式隔离设施

浮式拦污栅：浮式拦污栅适用于水流速度较快、漂浮物较多的河道型水源地。其由浮筒、栅体和锚碇系统组成，可随水位变化自动调节高度。黄河小浪底水库采用的钢质浮式拦污栅，单组长度达 100m，栅条间距 8cm，汛期日均拦截漂浮物超 50t。该拦污栅采用铰接式结构，相邻栅体之间通过万向节连接，可适应水流方向变化，减少水流阻力。

新型智能浮式拦污栅集成了传感器和远程控制系统，可实时监测栅前垃圾堆积情况，并通过遥控装置启动清理机械臂。例如，某智能拦污栅配备了激光测距传感器，可精确测量垃圾堆积厚度，当厚度超过 1m 时，自动向管理平台发送清理指令。同时，还安装了水质传感器，实时监测拦污栅前后的水质变化，评估拦截效果。

应急隔离装置：在突发性污染事件中，充气式橡胶坝、快速拼装式围挡等应急隔离装置发挥关键作用。2010 年吉林松花江化工原料桶泄漏事件中，当地迅速投放 3000m 充气式橡胶坝，成功拦截 90% 以上的污染桶，配合下游吸附材料铺设，有效控制了污染扩散。新型充气式橡胶坝采用多层复合橡胶材质，内部设置多个独立气室，即使部分气室破损，仍能保持坝体完整性。

近年来，可降解材料制成的应急围挡开始推广，其由高分子吸水树脂和纤维材料构成，使用后 3~6 个月自然降解，减少二次污染风险。某应急围挡产品采用蜂窝状结构设计，展开速度比传统围挡快 3 倍，且具有良好的柔韧性，可适应复杂地形。在实际应用中，这些应急装置通常与卫星遥感、无人机监测等技术结合，实现污染事件的快速响应和精准处置。

### （三）物理隔离技术的工程设计要点

#### 1. 选址与布局

隔离设施的选址需综合考虑污染源分布、水流特性和地形条件。河流型水源地应在污染源上游、支流汇入处设置拦截设施；湖泊型水源地则需沿湖岸线和主要入湖口布设围网。在实际操作中，常借助地理信息系统（GIS）进行选址分析。某山区水库水源地通过地形测绘和水流模拟，在三条入库河流的峡谷段设置导流堤坝，利用天然地形增强拦截效果，工程成本降低 30%。同时，考虑到河道演变和水流冲刷的影响，隔离设施与河岸保持一定距离，一般不小于 5m。

#### 2. 结构强度设计

需根据水流速度、漂浮物冲击力和极端天气条件确定结构强度。沿海地区的水源地隔离设施需抵御台风和风暴潮，某海岛水库围网采用双层钢结构，经抗风等级 12 级测试，可承受  $500\text{kg/m}^2$  的冲击力。在材料选择上，优先采用 Q355B 高强度钢材，其屈服强度比普通钢材提高 20%。同时，需考虑设施的耐久性，采用热镀锌、防腐涂层等工艺延长使用寿命，某工业密集区的截污沟内壁喷涂环氧树脂涂层，使用寿命从 10 年延长至 20 年。对于水下部分的设施，还需考虑海水

腐蚀或淡水微生物侵蚀的影响，采用牺牲阳极保护法或外加电流保护法进行防腐处理。

### 3. 智能化升级

现代物理隔离设施融入物联网技术，实现远程监测与智能控制。部分浮式拦污栅安装了称重传感器和图像识别摄像头，当垃圾堆积量达到阈值时，系统自动报警并调度清理船作业。某大型水库的导流堤坝部署了水位传感器和流量监测仪，通过大数据分析优化导流方案，提升污染拦截效率 25%。智能化升级还包括引入人工智能算法，例如利用机器学习模型预测漂浮物的聚集规律，提前调整拦污栅的位置和高度。同时，通过 5G 通信技术实现数据的实时传输，管理平台可在 1 分钟内获取设施运行状态，实现远程故障诊断和维护。

## 二、水源地生态屏障技术体系

### （一）生态屏障的生态净化原理

生态屏障技术依托植物—微生物—土壤的协同作用，构建具有污染物拦截、降解和转化功能的生态系统。植物通过根系吸收氮、磷等营养物质，芦苇、香蒲等水生植物对总氮的去除率可达 60%~80%；微生物在土壤和水体中分解有机物，将 BOD<sub>5</sub> 转化为二氧化碳和水；土壤颗粒则通过吸附和过滤作用截留悬浮物。研究表明，每公顷湿地每年可去除 10~15t 氮和 1~2t 磷。

从生态系统功能角度来看，生态屏障还具有碳汇功能，通过植物光合作用固定二氧化碳。例如，红树林湿地的固碳能力是热带雨林的 5 倍以上。此外，生态屏障还可调节微气候、保护生物多样性，提升水源地生态韧性。在夏季高温时，植被缓冲带可使周边气温降低 2℃~3℃，湿度增加 10%~15%。

### （二）生态屏障的类型与构建

#### 1. 植被缓冲带

陆生植被缓冲带：陆生植被缓冲带一般沿水源地周边陆地设置，宽度根据保护需求确定，饮用水水源保护区通常为 20~50m。其植被配置采用“乔木—灌木—草本”三层结构，上层乔木如杨树、柳树可拦截大气沉降污染物，中层灌木如紫穗槐、沙棘固土护坡，下层草本植物如黑麦草、三叶草吸收地表径流中的氮磷。在植物选择上，优先选用本地适生植物，其成活率比外来物种高 40%。<sup>①</sup>

① 陈周来. 防沙治沙技术与沙区生态屏障构建措施 [J]. 广东蚕业, 2025, 59 (3): 39-41.

我国密云水库周边建设的 10 万亩陆生植被缓冲带，使入库泥沙量减少 40%，总氮浓度下降 35%。该缓冲带采用分段式设计，每段长度为 1km，中间设置生态廊道，便于野生动物迁徙。同时，定期对植被进行修剪和补种，保持植被覆盖率在 95% 以上。

**滨水植被缓冲带：**滨水植被缓冲带位于水陆交界区域，以水生和湿生植物为主。挺水植物如菖蒲、茭白可拦截漂浮物，浮叶植物如睡莲、荇菜吸收水体营养物质，沉水植物如金鱼藻、苦草净化底质。在植物配置上，遵循生态位互补原则，如将吸收氮能力强的芦苇与吸收磷能力强的菖蒲搭配种植，提高营养物质去除效率。

某城市湖泊通过种植 30 万平方米滨水植被，使水体透明度从 0.3m 提升至 1.2m，藻类生物量减少 50%。该湖泊的滨水植被缓冲带还设置了生态浮岛，浮岛上种植美人蕉、千屈菜等植物，不仅具有净化水质的功能，还成为鸟类的栖息地。

## 2. 人工湿地

**表面流人工湿地：**表面流人工湿地模拟天然湿地，水流在植物表层缓慢流动，适用于污染负荷较低的场景。其设计水深一般为 0.3~0.8m，水力停留时间 2~5 天。某农村饮用水水源地建设的表面流人工湿地，种植芦苇、美人蕉等植物，对 COD、氨氮的去除率分别达到 60% 和 50%。为提高处理效果，该湿地采用了分区种植方式，在进水区种植耐污能力强的芦苇，在出水区种植观赏性植物。

表面流人工湿地还具有景观价值，可与休闲步道、观景平台结合，打造生态景观。某湿地公园的表面流人工湿地，每年吸引游客超 10 万人次，实现了生态效益与经济效益的双赢。

**潜流人工湿地：**潜流人工湿地分为水平潜流和垂直潜流两种类型，水流在填料层中流动，具有占地面积小、处理效率高的特点。水平潜流人工湿地填料采用砾石、火山岩等，某工业园区的水平潜流人工湿地处理印染废水，COD 去除率稳定在 75% 以上。该湿地的填料层分为三层，上层为粒径 5~10mm 的砾石，中层为粒径 2~5mm 的火山岩，下层为粒径 1~2mm 的石英砂，形成多级过滤系统。垂直潜流人工湿地通过多层填料和布水系统强化处理效果，在处理高浓度氨氮废水时，氨氮去除率可达 85%。其布水系统采用穿孔管均匀布水，确保水流在填料层中均匀分布。近年来，垂直潜流人工湿地开始与微生物燃料电池技术结合，在净化水质的同时产生电能，实现能源回收。

### （三）生态屏障的维护管理

#### 1. 植被养护与生态调控

生态屏障的长期有效性依赖于科学的植被养护。定期修剪是维持植被缓冲带生态功能的关键措施，对芦苇、香蒲等水生植物，每年秋冬季节进行收割，可减少植物残体分解带来的二次污染，同时促进新植株萌发。从植物生理学角度来看，合理修剪能够打破植物的顶端优势，刺激侧芽生长，使植物群落结构更加紧密。数据显示，经过合理修剪的芦苇群落，其对氮、磷的吸收效率可提升20%~30%。针对入侵物种的防控同样重要，水葫芦、互花米草等外来物种会破坏本地生态平衡，可采用机械打捞、生物防治（如投放专食性昆虫）和化学药剂精准喷施相结合的方式进行清除。在某沿海湿地生态屏障中，通过引入水葫芦象甲，将水葫芦覆盖面积从高峰期的80%降至10%以下。机械打捞通常在水葫芦爆发初期使用大型打捞船，每日可清理上百吨；生物防治则具有长效性，水葫芦象甲以水葫芦为食，能持续控制其种群数量；化学药剂防治需谨慎使用，选择对本地生物影响较小的药剂，并在特定区域精准喷施。

生态调控还包括水位管理与生物多样性保护。人工湿地需根据季节和植物生长周期调节水位，在植物生长期保持浅水层（0.2~0.5m），促进根系发育；冬季适当加深水位（0.8~1.2m），保护植物越冬。水位调控对湿地生态系统的影响体现在多个方面，合适的水位能够维持湿地土壤的氧化还原状态，促进微生物的代谢活动。同时，通过投放鱼苗、种植蜜源植物等方式，吸引鸟类、鱼类等生物栖息，形成稳定的生态系统。某城市湖泊滨水植被缓冲带引入鲫鱼、泥鳅等滤食性鱼类后，水体中浮游生物量减少40%，水质透明度进一步提升。此外，设置鱼类产卵场、鸟类栖息岛等生态设施，能为生物提供繁衍空间，某湿地公园通过建设人工鱼巢，使鱼类种群数量在三年内增加了30%。

#### 2. 微生物活性维持与填料更新

人工湿地中微生物的活性直接影响污染物降解效率。定期向湿地投加微生物菌剂，可补充优势菌群，提高处理能力。在处理生活污水的潜流人工湿地中，投加复合微生物菌剂后，COD去除率可提高15%~20%。微生物菌剂的选择需根据湿地处理目标而定，处理含氮污染物时，可投加硝化—反硝化复合菌剂；处理有机污染物时，选择含有高效降解菌的菌剂。此外，通过调节湿地的溶解氧、pH值等环境参数，为微生物创造适宜的生存条件。例如，将水平潜流人工湿地的溶

解氧维持在 1~3mg/L, 可优化反硝化过程, 增强总氮去除效果。采用曝气装置或植物根系泌氧来调节溶解氧, 通过添加石灰或酸性物质调节 pH 值, 维持在 6.5~8.5 的适宜范围。

填料长期使用会出现堵塞、吸附饱和等问题, 需定期更新。火山岩、砾石等无机填料的更换周期一般为 5~8 年, 更换时采用分层替换的方式, 避免对湿地生态造成剧烈冲击。新型可降解填料逐渐应用于人工湿地, 如秸秆炭化填料, 其在使用 3~5 年后自然分解, 既减少了二次污染, 又为土壤提供了有机物质。秸秆炭化填料具有丰富的孔隙结构, 比表面积可达 100~200m<sup>2</sup>/g, 对污染物的吸附能力较强。此外, 还有木质素基填料、生物炭基填料等新型材料不断涌现, 这些材料不仅具备良好的污染物去除性能, 还具有成本低、环境友好的特点。

#### (四) 生态屏障的生态效益评估

##### 1. 水质净化效益量化

采用水质监测与模型模拟相结合的方式评估生态屏障的净化效果。在某陆生植被缓冲带监测中, 通过对比缓冲带内外水体指标发现, 经过缓冲带拦截净化后, 地表径流中的总氮浓度从 5mg/L 降至 1.5mg/L, 总磷浓度从 0.5mg/L 降至 0.1mg/L。水质监测需遵循严格的采样规范, 设置对照点、采样点和控制断面, 采用多参数水质分析仪、离子色谱仪等设备进行检测。利用 SWMM (暴雨管理模型) 和 EFDC (环境流体动力学模型) 等软件, 可模拟不同降雨强度、植被覆盖率条件下的水质改善效果, 为生态屏障优化提供数据支持。研究表明, 当滨水植被缓冲带宽度从 10m 增加至 20m 时, 其对面源污染的拦截效率提升 25%~30%。在模型模拟过程中, 需输入准确的地理信息、土壤参数、植被类型等数据, 通过敏感性分析确定关键影响因素, 为生态屏障的设计和管理提供科学依据。

##### 2. 生态服务价值核算

生态屏障的生态服务价值涵盖水质净化、生物多样性保护、气候调节等多个方面。采用市场价值法、替代成本法等评估手段, 可量化其经济价值。以红树林生态屏障为例, 其单位面积的年生态服务价值可达 4.7 万美元, 其中水质净化价值占比 35%, 生物多样性保护价值占比 25%, 海岸防护价值占比 20%。市场价值法通过计算生态产品的市场价格来评估价值, 如红树林产出的鱼虾等水产品价值; 替代成本法通过估算替代生态屏障功能所需的成本来确定价值, 如建造人工防波堤替代红树林的海岸防护功能所需的费用。某城市人工湿地通过生态服务价

值核算，发现其每年产生的经济效益（包括污水处理成本节约、旅游收入等）可达建设成本的 1.2 倍，充分体现了生态屏障的长期效益。此外，还可采用条件价值法、选择实验法等评估生态屏障的非市场价值，如公众对生态环境改善的支付意愿。

### 三、物理隔离与生态屏障技术的协同应用

#### （一）协同作用机制

物理隔离与生态屏障技术并非独立运行，而是通过“拦截—净化—修复”的协同机制发挥作用。物理隔离设施首先拦截固体废弃物、漂浮物等大颗粒污染物，降低后续生态屏障的处理负荷；生态屏障则对物理隔离后残留的溶解性污染物、营养物质进行深度净化，同时修复受损的生态环境。从物质循环和能量流动的角度来看，这种协同机制形成了一个完整的污染防控体系。例如，在河流型水源地保护中，浮式拦污栅拦截枯枝落叶和生活垃圾，减少植被缓冲带被堵塞的风险；植被缓冲带进一步吸收径流中的氮磷，改善水质，为鱼类等水生生物提供栖息地，形成良性生态循环。此外，物理隔离设施还能减少污染物对生态屏障植物的毒害作用，保护植物的正常生长和代谢功能，从而提高生态屏障的净化效率。

#### （二）典型协同应用案例

##### 1. 太湖流域水源地保护工程

太湖流域综合运用物理隔离与生态屏障技术，构建了多层次保护体系。在水源地周边设置高强度合金围网，有效拦截蓝藻水华；同时，沿湖岸线建设宽 50~100m 的滨水植被缓冲带，种植芦苇、菖蒲等水生植物。围网将蓝藻拦截在水源保护区外，植被缓冲带则对入湖地表径流进行净化，使水源地水体透明度提高 0.5~1m，藻类生物量减少 60%。在围网建设过程中，采用了智能监测系统，通过传感器实时监测围网的受力情况和蓝藻聚集程度，当蓝藻密度超过阈值时，自动启动应急打捞设备。此外，在入湖河口建设人工湿地，采用水平潜流与垂直潜流相结合的工艺，进一步去除氮磷等污染物，保障了太湖饮用水水源地的水质安全。人工湿地的设计充分考虑了太湖流域的水文特征和污染负荷，通过优化填料配比和水力停留时间，使总氮、总磷的去除率分别达到 70% 和 80%。

##### 2. 深圳茅洲河流域治理项目

茅洲河曾是我国污染最严重的河流之一，通过物理隔离与生态屏障协同治理

实现生态修复。在河道中安装智能浮式拦污栅，实时拦截工业垃圾和生活垃圾；在河岸两侧建设陆生植被缓冲带和人工湿地。浮式拦污栅日均拦截垃圾 20t，减少了湿地堵塞风险；植被缓冲带和人工湿地对污水进行深度处理，使茅洲河水质从劣Ⅴ类提升至Ⅳ类，重现水清岸绿的生态景观，吸引了白鹭、翠鸟等鸟类栖息。智能浮式拦污栅配备了自动清理装置，当垃圾堆积到一定程度时，机械臂自动将垃圾抓取到运输船上。陆生植被缓冲带采用了乡土树种和草本植物相结合的种植方式，提高了植被的成活率和生态适应性。人工湿地采用了“预处理+垂直流湿地+水平流湿地”的组合工艺，对不同类型的污染物进行分级处理，确保出水水质稳定达标。

## 四、技术发展趋势与挑战

### （一）发展趋势

#### 1. 智能化与精准化

随着物联网、大数据和人工智能技术的发展，物理隔离与生态屏障技术向智能化方向升级。智能监测设备可实时感知隔离设施的运行状态和生态屏障的净化效果，如通过无人机搭载高光谱相机，可快速监测植被缓冲带的健康状况；利用机器学习算法分析水质数据，实现污染预警和治理方案的智能优化。在无人机监测方面，高光谱相机能够获取植被的光谱信息，通过与健康植被光谱库对比，可准确判断植被的生长状况和病虫害情况。精准化技术应用也日益广泛，例如通过基因测序技术筛选高效净化植物品种，利用 3D 打印技术定制异形结构的导流堤坝，提高设施的适配性和处理效率。基因测序技术可分析植物的基因序列，筛选出对特定污染物具有高吸收或降解能力的基因，通过基因工程培育新型净化植物。3D 打印技术则可根据地形和水流条件，定制具有复杂结构的导流堤坝，提高水流的导流效果和污染物拦截能力。

#### 2. 生态—工程融合创新

未来的技术发展更注重生态性与工程性的融合。在物理隔离设施设计中融入生态理念，如采用鱼巢式栅栏结构，既保证拦截功能，又为鱼类提供产卵场所；生态屏障构建中结合新型工程材料，如使用可降解高分子材料制作生态浮岛，减少对环境的负面影响。鱼巢式栅栏采用仿生设计，模拟天然岩石的结构和缝隙，为鱼类提供适宜的栖息和繁殖环境。可降解高分子材料制作的生态浮岛，在完成

净化功能后，可自然分解为无害物质，避免二次污染。同时，仿生学原理将得到更多应用，模仿天然河流弯道设计导流堤坝，利用生物膜技术优化人工湿地填料表面结构，提升生态系统的自净能力。模仿天然河流弯道设计的导流堤坝，能够降低水流速度，促进泥沙沉积和污染物的自然净化；生物膜技术可在填料表面形成一层微生物膜，增加微生物的附着面积，提高污染物的降解效率。

## （二）面临挑战

### 1. 技术与管理瓶颈

部分新型技术仍处于实验室阶段，大规模应用存在成本高、稳定性差等问题。例如，智能拦污栅的传感器易受水体腐蚀，使用寿命较短；人工湿地与微生物燃料电池结合技术的产电效率较低，难以实现商业化。智能拦污栅的传感器多采用金属材料，在水体中容易发生电化学腐蚀，需要研发新型耐腐蚀材料和防护技术。人工湿地与微生物燃料电池结合技术面临着微生物活性不稳定、电极材料性能下降等问题，需要进一步优化工艺参数和材料性能。在管理层面，跨部门、跨区域的协调难度大，水源地保护涉及水利、环保、农业等多个部门，职责划分不明确导致治理效率低下。建立统一的管理协调机制是解决问题的关键，可借鉴国外经验，成立专门的流域管理机构，赋予其明确的职责和权力，实现对水源地保护的统一规划、统一管理和统一监督。

### 2. 气候变化与极端事件影响

气候变化导致的暴雨、干旱等极端事件增加，对物理隔离与生态屏障技术提出更高要求。暴雨可能冲毁导流堤坝、淹没植被缓冲带，干旱则会影响人工湿地的运行效果。如何增强设施的抗灾能力，提高生态屏障的适应性，是未来需要解决的关键问题。在设计物理隔离设施时，需考虑极端天气条件下的荷载，采用加强型结构和防洪材料。对于生态屏障，可筛选耐旱、耐淹的植物品种，优化湿地的蓄水和排水系统，提高其应对气候变化的能力。同时，建立灾害预警和应急响应机制，在极端事件发生时，能够迅速采取措施保护水源地和生态屏障设施。

## 第二节 水体沉积物控制与疏浚技术

水体沉积物犹如一把“双刃剑”，作为污染物的“汇”与“源”，在水资源保护领域占据着关键且复杂的地位。当水体遭受污染侵袭，重金属、有机污染物等有害物质会如同无形的“入侵者”，在水流的裹挟下逐渐沉降于水体底部，日积月累形成污染沉积物。联合国环境规划署发布的权威报告显示，当前全球范围内约 40% 的湖泊与河流，正面临着不同程度的沉积物污染问题，这一状况不仅严重威胁着水生生态系统的健康稳定，更对人类饮用水安全构成了潜在的巨大风险。水体沉积物控制与疏浚技术，作为应对沉积物污染问题的核心物理性水资源保护手段，构建起了涵盖污染预防、过程控制与末端治理的全流程防护体系。

### 一、水体沉积物污染成因与危害

#### （一）污染成因

##### 1. 外源输入

工业废水、生活污水与农业面源污染如同三条“污染纽带”，构成了沉积物污染的主要外源途径。在工业生产领域，冶金、电镀等高污染行业排放的废水中，往往含有大量毒性极强的重金属，如镉、铅、铬等。以某重金属冶炼厂周边的河流为例，经专业检测，其沉积物中镉含量最高达到了 25mg/kg，这一数值超出当地背景值整整 50 倍，污染程度触目惊心。生活污水中，洗涤剂残留、厨余垃圾分解产生的各类污染物，以及农业生产过程中过量使用的化肥、农药，会随着地表径流的冲刷，源源不断地涌入水体。以太湖流域长期的监测数据为依据，农业面源污染对沉积物中总氮、总磷的贡献率分别高达 45% 和 55%，成为湖泊富营养化的重要诱因。此外，大气沉降作为一条隐蔽的污染通道同样不容忽视，工业废气中所含的重金属、多环芳烃等污染物，通过干湿沉降的方式悄然进入水体。在某化工园区周边的湖泊中，科研人员检测发现其沉积物中多环芳烃含量较非工业区高出 3~5 倍，充分印证了大气沉降对水体沉积物污染的“隐性贡献”。

##### 2. 内源释放

沉积物中的污染物并非处于静止的“沉睡”状态，而是时刻受到环境条件变化的影响，一旦环境“触发点”出现，便会发生污染物的释放。当水体溶解氧含量急剧降低，沉积物进入厌氧环境，原本稳定存在的铁、锰氧化物会发生还原溶

解反应，如同打开了“潘多拉魔盒”，使得吸附在其表面的重金属离子随之被释放出来。在某富营养化湖泊的夏季藻类暴发期，由于藻类过度繁殖消耗大量氧气，水体溶解氧浓度降至 2mg/L 以下，监测数据显示，沉积物中释放的锰离子浓度从原本的 0.1mg/L 骤然飙升至 1.5mg/L。此外，pH 值的波动变化、底栖生物的活动等因素，同样会成为污染物释放的“催化剂”。当水体酸化，pH 值低于 6 时，沉积物中重金属的化学活性会显著增强；而底栖生物如摇蚊幼虫在沉积物中的穿梭活动，会破坏沉积物的原有结构，加速污染物向水体中的扩散进程。

## （二）污染危害

### 1. 水质恶化

沉积物中污染物的释放，如同向水体中投入了“污染炸弹”，会导致水体质量出现急剧恶化。重金属进入水体后，不仅会对水生生物产生直接的毒害作用，更会通过食物链的逐级富集，最终威胁到人类的身体健康。历史上著名的日本水俣病事件，便是汞污染沉积物释放引发的一场人间悲剧，当地居民因长期食用受汞污染的鱼类，出现了神经损伤、肢体畸形等一系列严重病症。有机污染物如多氯联苯、二噁英，具有极强的致癌性和生物累积性。在某电子垃圾拆解区附近的河流中，经检测其沉积物中多氯联苯含量超标 200 倍，导致下游饮用水源遭受严重污染，居民健康受到极大威胁。此外，沉积物释放的氮、磷等营养物质，会如同为藻类生长提供“养分大餐”，加剧水体富营养化程度，进而引发藻类的大规模爆发。回顾滇池在 20 世纪 90 年代的状况，由于沉积物内源污染问题突出，蓝藻水华频繁出现，水体透明度一度不足 0.2m，严重影响了当地的生态环境和居民生活。<sup>①</sup>

### 2. 生态系统破坏

污染沉积物对水体生态系统的破坏作用，就像一场“生态灾难”，会彻底改变水体底质环境，严重影响底栖生物的生存与繁衍。重金属污染会如同“生态杀手”，抑制底栖生物的生长、繁殖过程，导致物种多样性出现显著下降。在某受重金属污染的河流中，生态调查数据显示，底栖生物种类从污染前的 30 余种锐减至 10 种以下。有机污染物则会像“隐形的生态干扰器”，干扰生物的内分泌系统，对鱼类的性腺发育和洄游行为产生不良影响。此外，沉积物污染还会如同

① 王汉卿，宋志鑫，宋刚福，等. 自然水体沉积物污染类型及风险评价研究进展 [J]. 山东化工，2024，53（8）：244-248，251.

“生态链条的破坏者”，打破食物链的原有平衡结构，浮游生物、水生植物因受到污染物的毒害而生长受阻，进而影响到以它们为食的鱼类、鸟类等生物，最终导致整个生态系统陷入失衡状态。

## 二、水体沉积物控制技术

### （一）源头控制技术

#### 1. 污染源减排

从源头上减少污染物排放，是控制沉积物污染的“治本之策”，如同截断污染的“源头活水”。在工业领域，大力推行清洁生产技术，例如电镀行业采用无氰电镀工艺，可使氰化物排放量大幅减少 90% 以上，从生产工艺的根源上降低污染产生。在污水处理环节，通过不断升级处理工艺来提高污染物去除效率。某城市污水处理厂引入“预处理+生物脱氮除磷+深度处理”的先进工艺后，出水总磷浓度从 1.5mg/L 显著降至 0.3mg/L，极大地降低了排入水体的污染物负荷。在农业面源污染控制方面，则通过积极推广精准施肥、农药减量技术来实现污染减排。我国东北地区广泛实施的“测土配方施肥”项目，根据土壤养分状况和作物需求精准施肥，使得化肥使用量减少了 15%~20%，有效减少了农业污染物进入水体的数量。

#### 2. 生态拦截工程

在污染物进入水体之前设置生态拦截设施，就像为水体构筑了一道“绿色防线”，能够有效削减污染负荷。河岸缓冲带通过种植芦苇、香蒲等具有强大净化能力的植物，如同“天然过滤器”，拦截地表径流中的泥沙和污染物。某河流沿岸建设的 50m 宽植被缓冲带，经实际监测，对总氮、总磷的拦截效率分别达到了 40% 和 50%。人工湿地作为另一种重要的生态拦截手段，发挥着“生态净化器”的作用。某工业园区周边建设的水平潜流人工湿地，对 COD、重金属的去除率分别达到了 70% 和 60%。此外，生态沟渠通过对传统排水沟渠进行改造，增加植物、填料等净化单元，进一步提高了对农业面源污染的拦截能力。某生态沟渠的运行数据显示，其对氨氮的去除率可达 35%~45%，有效减少了农业污水对水体的污染。

## （二）过程控制技术

### 1. 水体生态修复

通过改善水体生态环境来抑制沉积物污染物释放，如同为水体生态系统注入“健康活力”。水生植物修复是其中常用的有效技术，沉水植物如苦草、轮叶黑藻能够像“营养吸收器”一样，大量吸收水体中的氮、磷等营养物质，降低水体营养盐浓度，从而减少沉积物中营养物质的释放。在某湖泊实施沉水植物种植工程后，监测数据表明，水体总磷浓度下降了 30%，沉积物中磷的释放通量减少了 25%。生物操纵技术则通过巧妙调整生物群落结构来实现生态平衡，在富营养化湖泊中投放鲢鱼、鳙鱼等滤食性鱼类，如同“藻类控制员”，可有效控制藻类数量，改善水体溶解氧状况，进而抑制沉积物污染物的释放。

### 2. 原位钝化技术

向沉积物中添加钝化剂以降低污染物的活性与迁移性，犹如为污染物戴上“禁锢枷锁”。常用的钝化剂包括黏土矿物、铁基材料和生物炭等。膨润土等黏土矿物凭借强大的吸附能力，能够将重金属牢牢固定。在某镉污染河流的修复过程中，添加膨润土后，沉积物中可交换态镉含量降低了 60%。铁基材料如零价铁、纳米铁，能够通过还原作用将重金属离子转化为稳定形态。某铬污染湖泊采用纳米铁进行钝化处理后，六价铬浓度从 0.5mg/L 大幅降至 0.05mg/L。生物炭因其丰富的孔隙结构和官能团，对有机污染物具有良好的吸附性能。在多环芳烃污染沉积物的修复实践中，添加生物炭可使污染物的生物可利用性降低 40%~50%，有效减少了污染物对生态环境的危害。

## （三）原位覆盖技术

原位覆盖技术作为水体沉积物污染治理的关键手段之一，通过在污染沉积物表面铺设覆盖材料，构建起物理、化学和生物多重屏障，以此有效阻隔污染物的释放。相较于其他治理技术，该技术具备施工操作简便、对水体环境扰动小等显著优势，尤其适用于污染面积广阔、疏浚实施难度高的区域场景。在实际应用中，覆盖材料的科学选择对技术实施效果起着决定性作用，依据材料特性，主要可分为无机材料、有机材料和复合材料三大类别。

在无机材料领域，砂石和黏土凭借其自身特性成为应用最为广泛的材料。砂石层一般铺设厚度控制在 0.3~0.5m，能够形成物理屏障，有效阻碍底栖生物活动引发的污染物扩散。黏土由于具备良好的吸附性能和低渗透性，在重金属污染治

理方面表现突出。以某铅锌矿尾矿库周边水域治理为例，科研人员铺设 0.6m 厚的膨润土覆盖层后，经过一段时间监测，水体中铅、锌离子浓度分别显著下降 75% 和 80%。随着技术不断创新发展，新型无机材料如零价铁改性砂应运而生，该材料不仅能够实现物理阻隔功能，还具备化学还原特性，能够将六价铬还原为三价铬并加以固定，在铬污染水体修复工程中展现出极为优异的性能。

有机材料中，生物炭和纤维织物是主要的应用材料。生物炭除了具备吸附污染物的能力外，还能够改善沉积物中的微生物生存环境，促进微生物对污染物的降解。在某多环芳烃污染湖泊的治理项目中，采用生物炭—砂复合覆盖层后，经过半年的持续观察和检测，沉积物中多环芳烃的降解率达到了 45%。纤维织物覆盖层则因其透水不透泥的独特特性，常用于河道应急修复场景。在某突发性石油污染事故处理过程中，迅速铺设聚丙烯纤维织物覆盖层，24 小时内水体石油类污染物浓度便下降 60%，有效控制了污染扩散。

复合覆盖技术通过融合多种材料的优势，逐渐成为该领域的发展趋势。例如“黏土—活性炭—微生物菌剂”复合覆盖层，该技术集成了物理阻隔、化学吸附与生物降解三种功能。在太湖梅梁湾富营养化区域的治理实践中，应用该复合技术后，沉积物中氨氮释放通量大幅降低 80%，藻类生物量也减少了 55%，显著改善了区域水体生态环境。

### 三、水体疏浚技术

#### （一）疏浚技术分类与原理

##### 1. 机械疏浚

机械疏浚作为最传统且应用历史悠久的疏浚方式，主要借助挖泥船、抓斗等机械设备实现对沉积物的直接清除。绞吸式挖泥船是机械疏浚中的典型代表，其工作原理是利用旋转绞刀将底泥搅碎，随后通过吸泥管将搅碎后的泥浆输送至指定区域，这种挖泥船适用于大面积、浅水域的疏浚作业，每小时疏浚效率可达  $2000\sim 5000\text{m}^3$ 。链斗式挖泥船则通过链斗的连续运转进行取泥作业，因其强大的挖掘能力，适合对硬质底泥进行挖掘。在长江口深水航道疏浚这一重大工程中，链斗式挖泥船发挥了关键作用，成功清除了厚度达 10m 的粉砂质底泥，保障了航道的畅通。

## 2. 水力疏浚

水力疏浚主要借助高压水枪产生的强大冲击力冲散沉积物，再利用泥浆泵将冲散后的泥浆吸排至指定地点。该技术虽然对底泥扰动较大，但因其成本相对较低，常用于污染程度较轻的区域。在某河道的水力疏浚项目中，采用功率为 1500kW 的高压水枪，配合流量为 1000m<sup>3</sup>/h 的泥浆泵进行作业，每日可完成 3000 立方米底泥的疏浚任务。随着技术的进步，新型水力疏浚设备配备了智能控制系统，能够依据底泥浓度的实时变化，自动调节水压和流量，从而有效减少悬浮物的扩散，降低对水体环境的影响。

## 3. 环保疏浚

环保疏浚将精准控制与污染防治作为核心要点，采用定位精确的绞吸头和防扩散设备，最大程度减少疏浚过程对水体环境的破坏。在太湖环保疏浚工程中，所使用的“斗轮式环保挖泥船”配备了动态密封绞刀头，该设计能够将底泥扰动范围严格控制在 1.5m 以内，使悬浮物扩散量减少 70%。此外，环保疏浚通常会与泥浆脱水处理技术相结合，通过板框压滤、离心分离等先进工艺，可将泥浆含水率从初始的 90% 大幅降至 50% 以下，极大地方便了后续的处置工作，降低了二次污染的风险。

### （二）疏浚设备与工艺优化

#### 1. 新型疏浚设备

随着科技的飞速发展，智能化、专业化的新型疏浚设备不断涌现，为水体疏浚工作带来了新的变革。无人遥控挖泥船配备了多波束测深仪和惯性导航系统，能够在复杂水域环境中实现自动作业，其定位精度可达到  $\pm 10\text{cm}$ ，大大提高了疏浚作业的准确性和效率。超高压水射流疏浚设备能够产生超过 200MPa 的水压，强大的冲击力使得破碎硬质底泥的效率提升了 3 倍。此外，磁分离疏浚技术利用磁性材料对重金属的吸附特性，在某电镀废水污染河道的治理中取得了显著成效，使底泥中镉含量从 5mg/kg 大幅降至 0.5mg/kg，为重金属污染河道的修复提供了新的技术途径。

#### 2. 工艺优化策略

为有效减少疏浚过程中可能产生的二次污染，“预覆盖—分层疏浚—原位处理”组合工艺在实际工程中得到广泛应用。以杭州西湖疏浚工程为例，工程团队首先铺设土工布，减少疏浚作业对底泥的扰动；然后分三层（每层 0.3m）进行

环保疏浚，确保疏浚过程的精准性；最后对疏浚产生的泥浆采用“化学絮凝—生物降解”联合处理工艺，使得出水悬浮物浓度低于 30mg/L，有效保护了西湖的水体环境。此外，通过运用 Delft3D、EFDC 等专业软件进行数值模拟，能够对水流、悬浮物扩散情况进行精准预测，从而确定最佳的疏浚时间和区域，进一步优化疏浚方案，提高工程实施效果。

### （三）典型工程案例分析

#### 1. 滇池草海疏浚工程

滇池草海长期以来因沉积物污染问题严重，蓝藻频繁爆发，水体生态环境遭到极大破坏。在治理过程中，工程采用环保绞吸式挖泥船进行作业，疏浚面积高达 12km<sup>2</sup>，成功清除污染底泥 1200 万立方米。为防止疏浚过程中可能出现的二次污染，工程团队设置了长达 1500m 的防污帘，并配备移动式水质净化船对悬浮物进行处理。经过一系列治理措施，草海水质实现了从劣 V 类到Ⅳ类的显著提升，水体透明度从 0.2m 提高到 0.6m，底栖生物种类也增加了 2 倍，生态环境得到有效改善。

#### 2. 莱茵河沉积物修复工程

莱茵河在历史上由于工业污染严重，导致沉积物中重金属和有机污染物超标，对流域生态环境和居民生活造成了长期影响。在修复项目中，采用“精准定位疏浚 + 异位热处理”技术，对污染严重区域进行靶向清除。对于疏浚后的底泥，通过在 800℃ 的高温下进行处理，使二噁英分解率达到 99.9%。经过长达 20 年的持续治理，莱茵河沉积物中镉、汞含量成功降至背景值水平，鱼类种群也恢复至 120 余种，流域生态系统逐渐恢复健康。

## 四、技术面临的挑战与发展趋势

### （一）主要挑战

#### 1. 二次污染控制难题

在水体疏浚作业中，底泥悬浮引发的污染物二次释放问题始终是技术应用的核心难题。机械疏浚过程中，绞吸式挖泥船或链斗式挖泥船作业时产生的剧烈扰动，会使原本沉积在水底的重金属、有机污染物重新进入水体。根据国际水协会（IWA）的研究报告，在处理重金属污染沉积物时，机械疏浚会导致水体中镉、铅等重金属浓度瞬间升高 3~5 倍，且浓度峰值可持续数小时。以我国某重金属冶

炼厂周边河道疏浚为例，施工期间河道水体中铅离子浓度从正常水平的  $0.02\text{mg/L}$  骤升至  $0.1\text{mg/L}$ ，远超《地表水环境质量标准》规定的  $0.05\text{mg/L}$  限值。

疏浚产生的泥浆处理同样面临严峻挑战。传统的填埋处理方式不仅占用大量土地资源，还存在污染物渗漏风险。在南方多雨地区，填埋场渗滤液中重金属和有机污染物含量常超出排放标准，对周边土壤和地下水造成二次污染。而新兴的资源化利用技术，如将疏浚泥浆制成建筑材料、土壤改良剂等，虽具有广阔前景，但目前仍处于实验室研究或小规模试点阶段。例如，利用疏浚泥浆烧制陶粒的技术，因泥浆成分复杂导致陶粒强度不稳定，且烧制过程中可能释放有害气体，距离大规模工业化应用仍有较大差距。

此外，水力疏浚中高压水枪对底泥的冲散作用，会使污染物以悬浮物形式扩散到更大范围水域。在某城市内河疏浚项目中，监测数据显示水力疏浚导致周边  $500\text{m}$  范围内水体中悬浮物浓度增加  $200\%$ ，其中附着在悬浮物上的有机污染物含量显著升高，加剧了下游水体的污染风险。

## 2. 生态影响评估不足

大规模的水体疏浚工程对底栖生态系统的破坏往往具有不可逆性。底栖生物作为水体生态系统的重要组成部分，其生存环境因疏浚作业遭到严重破坏。据《淡水生物学》期刊的研究，某河道疏浚后，底栖生物群落结构发生显著变化，生物量下降  $60\%$ ，原本丰富的软体动物、环节动物等优势物种数量锐减，部分敏感物种甚至消失。底栖生态系统的破坏会进一步影响食物链结构，导致以底栖生物为食的鱼类、鸟类等生物的食物来源减少，威胁生物多样性。疏浚工程还会改变水体的物理化学性质，如流速、水深、水温等。这些变化会对鱼类产卵场和洄游通道产生不利影响。在长江中游的航道疏浚工程中，部分浅滩被挖深后，水流速度加快，改变了原有鱼类产卵所需的缓流环境，导致四大家鱼的产卵量下降  $30\%\sim 40\%$ 。此外，疏浚过程中产生的悬浮物会降低水体透明度，影响水生植物的光合作用，破坏水生生态系统的平衡。目前，我国在水体疏浚工程的生态影响评估方面仍存在诸多不足。评估标准和方法尚未完善，缺乏对生态系统长期影响的预测能力。多数工程仅关注施工期的短期生态影响，对工程完成后生态系统的恢复过程和效果缺乏跟踪监测和科学评估，难以制定有效的生态修复和补偿措施。

## 3. 高成本与技术瓶颈

环保疏浚设备的研发和购置成本居高不下，成为制约该技术推广应用的重要

因素。以斗轮式环保挖泥船为例，其造价超过 5000 万元，配备先进的动态密封绞刀头、高精度定位系统等设备的新型挖泥船造价更是高达上亿元。除设备购置成本外，设备的运行和维护费用也十分高昂，一艘大型环保挖泥船每年的燃油费、设备维修费等运营成本超过千万元，使得许多中小城市和地区难以承担。原位处理技术在实际应用中面临诸多技术瓶颈。微生物修复技术虽然具有环境友好、成本较低等优势，但作用周期长，通常需要数月甚至数年才能达到理想的修复效果。在某石油污染湖泊的微生物修复项目中，经过两年的处理，沉积物中石油烃的降解率仅达到 40%。化学稳定化技术虽能快速降低污染物的迁移性，但可能会改变沉积物的理化性质，影响底栖生物生存，且存在二次污染风险。此外，这些原位处理技术对不同类型污染物和复杂环境条件的适应性较差，缺乏普适性的解决方案。

## （二）发展趋势

### 1. 智能化与精准化

智能化与精准化是水体沉积物控制与疏浚技术的重要发展方向。随着无人机、水下机器人、多波束测深仪等先进设备的广泛应用，能够实现对水体地形和沉积物分布的高精度三维扫描。例如，美国在密西西比河疏浚工程中，使用搭载激光雷达和侧扫声呐的无人机，可生成精度达厘米级的河床地形模型，为制定精准的疏浚方案提供数据支持。GIS 技术与 AI 算法的深度融合，使疏浚工程的决策和管理更加科学高效。通过建立沉积物污染模型，AI 算法能够实时分析水质、水文数据，预测污染物扩散趋势，动态调整疏浚参数。荷兰开发的智能疏浚系统，利用机器学习算法对历史疏浚数据和沉积物分布规律进行分析，可提前规划最佳疏浚路线和挖掘深度，使疏浚效率提高 40%，同时减少对周边环境的影响。此外，智能传感器技术的发展将实现对疏浚过程的实时监测和反馈控制。在挖泥船上安装的智能传感器，可实时监测绞刀压力、泥浆浓度、悬浮物扩散等参数，一旦超过设定阈值，系统自动调整作业参数，降低二次污染风险。

### 2. 绿色可持续技术

开发绿色可持续技术是未来水体沉积物控制与疏浚技术的必然选择。在覆盖材料方面，生物基可降解材料成为研究热点。新型生物基覆盖膜由聚乳酸(PLA)、淀粉等可降解材料制成，在完成阻隔污染物释放的功能后，可在 1~2 年内通过微生物分解成二氧化碳和水，避免传统覆盖材料造成的白色污染。在处理工艺上，

低能耗技术的应用不断推进。太阳能驱动的泥浆脱水设备利用光伏板收集太阳能，转化为电能驱动脱水装置，相比传统电能驱动设备，可降低能耗 30% 以上。此外，利用微生物燃料电池技术处理疏浚泥浆，在净化泥浆的同时产生电能，实现能源回收利用。某实验室研究表明，采用微生物燃料电池处理含重金属泥浆，不仅能去除 80% 以上的重金属，还可产生  $0.5\sim 1.0\text{W}/\text{m}^2$  的电能。

### 3. 多技术协同创新

多技术协同创新将成为水体综合整治的主流模式。在实际工程中，将疏浚技术与生态修复技术有机结合，形成“疏浚—修复—重建”一体化解决方案。例如，在湖泊富营养化治理中，先采用环保疏浚技术清除污染严重的表层沉积物，降低内源污染负荷；然后种植沉水植物、投放滤食性鱼类等，重建水生生态系统。某湖泊采用“疏浚—生态浮岛—生物操纵”联合技术后，水体总氮、总磷浓度分别下降 40% 和 50%，富营养化指数下降 50%，生态系统稳定性显著提升。此外，原位覆盖技术与生物修复技术的协同应用也展现出良好的效果。在重金属污染河道治理中，铺设零价铁改性砂覆盖层阻隔污染物释放的同时，投放重金属抗性微生物，加速污染物的固化和降解。研究表明，这种协同技术可使沉积物中重金属的生物有效性降低 70% 以上。未来，随着新材料、新能源、信息技术等领域的不断发展，水体沉积物控制与疏浚技术将与更多学科和技术交叉融合，形成更加高效、环保、智能的综合解决方案，为全球水资源保护和生态修复提供有力支撑。

## 第三节 水体流动调控与生态补水技术

水体作为生态系统的关键组成部分，其流动性和水量状况直接影响着水质净化、生态平衡与生物多样性维持。在全球气候变化与人类活动的双重影响下，众多水体面临流速减缓、水量失衡等问题，进而引发富营养化、生态退化等一系列环境危机。据联合国环境规划署统计，全球约 60% 的河流和湖泊存在不同程度的水体流动性减弱问题，由此导致的生态系统服务功能下降每年造成经济损失超千亿美元。水体流动调控与生态补水技术，正是应对这些挑战的重要手段，通过人工干预优化水体动力学条件，补充生态需水，对改善水环境质量、修复受损生态系统具有不可替代的作用。

## 一、水体流动调控技术

### （一）水体流动调控的必要性与原理

水体流动对维持生态系统健康至关重要。适宜的水流速度能够促进水体中氧气与污染物的混合，加速污染物的稀释与降解。从水动力学角度分析，水流的紊动扩散作用可使污染物在水体中快速分散，提升自净效率。同时，合理的水流形态有助于营造多样化的水生栖息地，为鱼类产卵、洄游及底栖生物生存提供适宜环境。研究表明，当水体处于静止或低流速状态（流速低于  $0.1\text{m/s}$ ）时，水体自净能力下降约 40%，藻类过度繁殖风险显著增加。这是因为低流速导致水体溶解氧供应不足，微生物活性降低，污染物分解速率减缓；同时，稳定的水流环境有利于藻类聚集，形成水华。

水体流动调控技术基于水力学、生态学原理，通过改变河道形态、调节水位与流量、引入外力扰动等方式，优化水体流动状态。在工程设计中，常利用伯努利方程和谢才公式，精确计算不同河道断面、坡度条件下的水流速度，为工程设计提供理论依据。例如，在河道拓宽改造中，通过谢才公式计算拓宽后断面的流速变化，确保水流既能满足生态需求，又能保障行洪安全。依据生态水力学理论，利用数值模拟软件（如 MIKE、EFDC）模拟不同流速、水深组合对水生生物栖息地适宜性的影响，确保调控措施在改善水质的同时，保护生物多样性。

### （二）水体流动调控的主要方法

#### 1. 河道形态优化

自然蜿蜒化改造：传统人工裁弯取直的河道虽利于行洪与航运，但破坏了自然水流形态，导致流速分布不均、栖息地单一。自然蜿蜒化改造通过恢复河道的天然弯曲形态，延长水流路径，降低流速，形成浅滩与深潭交替的多样化生境。德国莱茵河在生态修复过程中，拆除部分人工堤坝，恢复了约 200km 的自然河道，改造后河道内鱼类物种多样性增加 35%，底栖生物群落结构更加丰富。这一工程基于对河流生态系统的深入研究，通过模拟自然河流的蜿蜒形态，重塑了河道的生态功能。我国浙江苕溪通过河道蜿蜒化改造，使河道平均流速从  $0.8\text{m/s}$  降至  $0.3\text{m/s}$ ，水体中悬浮物沉降效率提高 25%，同时为候鸟提供了觅食与停歇场所。改造过程中，结合地形地貌特点，采用生态护坡技术，种植本土植物，增强了河岸稳定性和生态服务功能。

河漫滩修复与连通：河漫滩在洪水期可调节流量、净化水质，在枯水期为生物提供栖息地。修复河漫滩并恢复其与主河道的连通性，能增强水体的调蓄能力与生态功能。长江中游的天鹅洲故道通过疏通与长江的连通通道，恢复河漫滩湿地面积达 50km<sup>2</sup>，在洪水期有效削减洪峰流量 15%~20%；同时，河漫滩湿地成为四大家鱼的重要产卵场，鱼类繁殖量较修复前增加 40%。河漫滩植被的生长还能拦截地表径流中的污染物，某河漫滩湿地对总氮、总磷的去除率分别可达 50% 和 60%。在修复过程中，采用生态补水与湿地植被恢复相结合的方式，构建了完整的湿地生态系统，提高了水体的自净能力。

## 2. 水利工程调控

水闸与堤坝调度：水闸和堤坝通过调节水位与流量，控制水体流速与流向。在枯水期，通过关闸蓄水抬高水位，增加河道水深与流量；在丰水期，开闸泄洪，防止洪涝灾害。美国密西西比河上的一系列水坝，通过科学调度，在维持航运水位的同时，保障了下游生态需水，使河口湿地生态系统得以稳定。这些水坝采用先进的自动化控制系统，根据实时水文数据调整闸门开度，实现水资源的合理分配。我国黄河流域的小浪底水利枢纽，通过调水调沙操作，调整河道泥沙分布，冲刷下游河道，维持主河槽过流能力，同时为鱼类洄游创造适宜水流条件。调水调沙过程中，通过精确控制流量和流速，模拟自然洪水过程，促进了河道生态系统的恢复。水闸与堤坝的调度需综合考虑水文、生态、经济等多方面因素，采用实时监测与模型模拟相结合的方式，制定科学的调度方案。

生态基流保障：生态基流是维持河流生态系统基本功能的最小流量。保障生态基流对于保护水生生物、维持河道自净能力至关重要。澳大利亚墨累—达令河流域通过立法明确各河段生态基流标准，并建立水权交易机制，将农业节水部分用于补充生态基流，使部分干涸河道恢复水流，湿地面积增加 20%。我国在长江流域、珠江流域等也逐步开展生态基流保障工作，通过水利工程联合调度，确保关键时期生态基流达标率不低于 90%。确定生态基流通常采用 Tennant 法、Q90 法等经验公式，结合河道生态调查与数值模拟进行修正。例如，在某山区河流生态基流确定中，通过现场采样分析水生生物群落结构，结合 MIKE 模型模拟不同流量下的生态响应，最终确定合理的生态基流值。

## 3. 人工扰动技术

曝气增氧与水力搅拌：在水流缓慢、溶解氧不足的水体中，曝气增氧与水力

搅拌技术可改善水体流动状态，提高溶解氧含量。微孔曝气系统通过在水底铺设曝气管，以微小气泡形式向水体充氧，同时扰动水流，促进污染物扩散与降解。某城市黑臭河道采用微孔曝气技术后，水体溶解氧从接近 0mg/L 提升至 4mg/L 以上，氨氮去除率达 60%。该技术利用空气压缩机将空气压入曝气管，通过特殊设计的微孔释放微小气泡，增加气液接触面积，提高充氧效率。水力搅拌设备如潜水搅拌机，可在局部区域形成水流循环，打破水体分层，增强水体混合。在富营养化湖泊治理中，潜水搅拌机的应用使藻类聚集现象减少 50%，水体透明度提高 0.5m。潜水搅拌机通过电机驱动叶轮旋转，产生水流推力，推动水体流动，促进营养物质和溶解氧的均匀分布。

**超声波与电磁扰动：**超声波和电磁扰动技术通过产生机械波或电磁场，改变水体中污染物颗粒的运动状态，促进其凝聚与沉降。超声波技术利用高频振动使污染物颗粒相互碰撞聚集，便于后续分离。在处理含油废水时，超声波处理后油滴粒径增大 3~5 倍，油水分离效率提高 30%。超声波发生器产生高频声波，通过换能器转化为机械振动，作用于水体中的污染物颗粒，使其发生共振和碰撞，实现颗粒聚集。电磁扰动技术则通过在水体中施加变化的电磁场，影响带电污染物颗粒的运动轨迹，使其吸附在电极表面或发生凝聚。某电镀废水处理厂采用电磁扰动技术，使重金属离子去除率达到 95% 以上。该技术利用电磁线圈产生交变磁场，使带电污染物颗粒在洛伦兹力作用下运动，实现污染物的分离和去除。

### （三）典型工程案例分析

#### 1. 荷兰“还地于河”工程

荷兰作为低地国家，长期面临洪涝灾害与河道生态退化问题。“还地于河”工程通过拓宽河道、恢复河漫滩、拆除部分堤坝等措施，对全国 1500km 河道进行生态化改造。在瓦尔河改造项目中，将河道拓宽至原来的 2 倍，恢复河漫滩面积 1200ha，洪水期河道行洪能力提升 30%，同时形成了丰富的湿地生态系统，吸引了白尾海雕、麻鸭等珍稀鸟类栖息。工程还通过水闸调度，维持不同季节的生态流量，保障了鱼类的繁殖与洄游需求，使河流水生生物多样性显著提高。该工程采用“自然—工程”相结合的方式，在保障防洪安全的前提下，最大限度地恢复河流的自然形态和生态功能。通过建立生态监测网络，实时监测工程对生态系统的影响，及时调整工程措施，确保生态效益最大化。

## 2. 深圳大沙河生态长廊建设

深圳大沙河曾因城市化进程导致河道硬化、水质恶化、生态功能退化。生态长廊建设项目通过河道形态优化与水利工程调控相结合的方式进行治理。一方面，拆除硬质护岸，恢复自然驳岸，种植水生植物，打造生态湿地；另一方面，建设多级橡胶坝调节水位，保障河道生态基流。改造后，大沙河平均流速从 0.6m/s 降至 0.2m/s，形成了浅滩、深潭、湿地等多样化生境，鱼类种类从 12 种增加至 28 种。同时，水体自净能力增强，水质从劣 V 类提升至 IV 类，成为城市生态修复的典范。在建设过程中，引入海绵城市理念，通过透水铺装、雨水花园等设施，实现雨水的自然积存、渗透和净化。采用智慧水务系统，对河道水位、水质、流量等进行实时监测和智能调控，提高了水资源管理的科学性和精准性。

## 二、生态补水技术

### （一）生态补水的重要意义

生态补水是指通过人工措施向生态系统水量不足或受损的水体补充水量，以恢复和维持生态系统功能。在干旱半干旱地区、城市化进程快速推进区域以及受人类活动强烈干扰的流域，生态补水对于改善水环境质量、修复受损生态系统、维持生物多样性具有关键作用。数据显示，通过合理的生态补水，可使河道断流频率降低 60%~80%，湿地面积萎缩速度减缓 50% 以上。例如，在我国西北内陆河流域，生态补水有效缓解了河道干涸、绿洲退化问题，保障了区域生态安全。

### （二）生态补水水源类型

#### 1. 地表水补水

跨流域调水：跨流域调水是解决水资源空间分布不均、保障重点区域生态需水的重要手段。我国南水北调工程作为世界上规模最大的调水工程，通过东、中、西三条调水线路，将长江流域水资源调往北方缺水地区，为沿线众多河湖提供生态补水。截至 2023 年，南水北调工程已累计向北方调水超 600 亿立方米，有效改善了白洋淀、东平湖等湖泊的生态环境，使白洋淀的水域面积从补水前的 100km<sup>2</sup> 恢复至 260km<sup>2</sup>，鱼类种类增加至 54 种。美国的科罗拉多一大汤普森工程，将科罗拉多河的水调往南普拉特河流域，保障了干旱地区的农业灌溉与生态用水需求。<sup>①</sup>

① 闻懿豪. 伊河水环境模拟与生态补水效果研究 [D]. 华北水利水电大学, 2024.

水库放水：水库作为水资源的“调节器”，通过科学调度放水进行生态补水。黄河小浪底水库自 2002 年起，每年开展调水调沙生态补水，不仅冲刷下游河道、维持主河槽过流能力，还为河口湿地提供生态用水，使黄河三角洲湿地面积增加 1.5 万公顷，鸟类数量从 180 种增加至 260 种。在南方地区，一些水库在枯水期向下游河道补水，可提升河道水位、改善水质，如广东东江流域的水库群联合调度补水，使下游河道溶解氧浓度提高 2~3mg/L。

## 2. 地下水补水

回灌补水：回灌补水是将经过处理的地表水、再生水等回灌至地下含水层，补充地下水储量，改善地下水生态环境。在我国华北平原，由于长期超采地下水导致地面沉降，通过建设地下水回灌工程，将南水北调中线的部分水源回灌地下，使部分区域地下水位回升 0.5~1m。在以色列，通过将再生水回灌地下，有效补充了沿海地区的地下水资源，防止海水入侵。回灌补水需严格控制水质，避免对地下水造成污染，通常需对回灌水进行预处理，去除悬浮物、重金属和有机污染物等。

## 3. 非常规水源补水

再生水回用：再生水是指经过处理后达到一定水质标准的污水，可用于生态补水。北京市每年利用再生水对城市河湖进行补水超 10 亿立方米，如通惠河、护城河等河道通过再生水补水，改善了河道景观和生态环境。但再生水用于生态补水需关注氮、磷等营养物质浓度较高可能引发的富营养化问题，因此常需结合水生植物修复、生态湿地净化等措施。

雨水收集利用：雨水收集利用是将降雨径流通过集蓄、净化后用于生态补水。在海绵城市建设中，通过雨水花园、透水铺装、蓄水池等设施收集雨水，回补城市水体。某海绵城市示范区通过雨水收集利用，每年为城市景观湖补水超 50 万立方米，降低了对市政供水的依赖，同时减少了城市内涝风险。

# （三）生态补水方式

## 1. 地表径流补水

地表漫流补水是通过开挖补水渠道或利用现有河道，使补水源源不断地流入目标水体。这种方式适用于大面积、地势平坦的湿地或湖泊补水。例如，在鄱阳湖生态补水工程中，通过在长江与鄱阳湖之间建设补水通道，在枯水期引长江水入湖，使鄱阳湖水位平均提升 1~2m，有效扩大了湖泊水域面积，为候鸟提供了充足的觅食和栖息空间。地表漫流补水过程中，可结合河道整治与生态修复，如

种植水生植物、修复河岸带，提升补水的生态效益。

## 2. 地下渗透补水

地下渗透补水是通过建设渗井、渗渠等设施，使补水源渗入地下含水层，再通过地下水流动补给目标水体。这种方式适用于地下水与地表水联系密切的区域，可有效补充地下水储量，改善地下水生态环境。在西安渭陂湖生态修复工程中，通过建设地下渗透补水系统，将处理后的再生水回灌地下，促进了湖泊水位回升和水质改善，同时增加了周边区域的地下水资源量。

## 3. 人工喷洒补水

人工喷洒补水主要用于小型水体或生态景观区域，通过水泵将补水源提升后，利用喷头喷洒至水体表面。这种方式可增加水体的溶解氧含量，促进水体混合，同时具有一定的景观效果。在城市公园的人工湖补水过程中，常采用人工喷洒补水方式，既满足了景观用水需求，又改善了水体的生态环境。

# （四）典型工程案例分析

## 1. 白洋淀生态补水工程

白洋淀作为华北地区最大的淡水湖泊，曾因上游来水减少、地下水超采等原因，面临水量减少、水质恶化、生态退化等问题。自 2018 年起，通过实施跨流域调水（南水北调中线）、水库放水（王快水库、安格庄水库等）等多种方式进行生态补水，累计补水超 20 亿立方米。补水后，白洋淀水位稳定在 7~8m，水域面积扩大，水质从劣 V 类提升至 IV 类，芦苇等水生植物恢复生长，鸟类数量增加至 252 种，重现“华北明珠”的生态景观。

## 2. 澳大利亚墨累—达令流域补水工程

墨累—达令流域曾因过度开发水资源，导致河流干涸、湿地萎缩、生态系统退化。澳大利亚政府通过立法保障生态用水，实施“墨累—达令流域可持续计划”，从农业用水中回购水权用于生态补水。通过一系列补水措施，使部分干涸河道恢复水流，湿地面积增加，鱼类种群数量回升，生态系统逐步恢复健康。

# 三、技术面临的挑战与发展趋势

## （一）主要挑战

### 1. 水资源调配矛盾

在全球气候变化与人口增长的双重压力下，水资源供需矛盾日益尖锐，生态

补水与其他用水需求间的冲突愈发显著。据联合国教科文组织统计,全球约 20 亿人口生活在水资源高度紧张地区,农业用水占总用水量的 70%,工业用水占比 20%,而生态补水仅占极小份额。在我国黄河流域,农业用水占比高达 80% 以上,主要用于灌溉广袤的农田。以宁夏引黄灌区为例,每年农业灌溉用水量超 70 亿立方米,而黄河流域生态补水计划常因农业用水需求难以满足而被迫缩减。这种矛盾不仅存在于干旱半干旱地区,在水资源相对丰富的南方地区同样突出。珠江三角洲地区工业与生活用水需求旺盛,挤占河道生态补水空间,导致部分河涌长期处于低水位,水体自净能力下降,黑臭问题频发。不同区域间的水资源争夺也加剧了调配难度。跨流域调水工程虽能缓解部分地区水资源短缺问题,但易引发调出区与调入区的利益冲突。南水北调工程在保障北方用水的同时,需兼顾长江下游生态与航运需求,协调难度巨大。此外,行政区域分割导致水资源管理缺乏统一规划,上下游、左右岸用水缺乏协同,进一步加剧了生态补水的困境。

## 2. 补水成本与效益问题

生态补水工程的高成本特性严重制约其推广应用。跨流域调水工程涉及大规模基础设施建设,包括长距离输水渠道、泵站、隧洞等。我国南水北调中线工程全长 1432km,总投资超 2000 亿元,年均运行维护费用达数十亿元。即便采用再生水回用等非常规水源补水,污水处理厂管网改造的成本也不容小觑。北京市再生水补水工程每年需投入超 10 亿元用于污水处理厂升级和管网维护。生态补水的效益评估体系尚不完善,难以量化其生态、经济与社会效益。目前,生态效益评估缺乏统一标准和方法,难以准确衡量生物多样性恢复、水质改善等生态指标的价值。例如,湿地生态补水后鸟类数量增加、鱼类种群恢复等生态效益,难以通过货币化形式体现。经济效益评估方面,虽然补水可提升景观价值、促进旅游发展,但存在收益周期长、统计困难等问题。社会效益评估更是缺乏科学手段,难以量化公众对生态环境改善的满意度。这种效益评估的模糊性,导致生态补水工程在资金投入与回报上难以形成良性循环,影响其可持续性。

## 3. 生态风险防控难题

生态补水过程中潜在的生态风险不容忽视。再生水虽经处理,但仍含有较高浓度的氮、磷等营养物质,若直接用于生态补水,易引发水体富营养化。北京市部分再生水补水河道曾因氮、磷超标,藻类过度繁殖,导致水体缺氧、鱼类死亡。跨流域调水可能伴随外来物种入侵风险,改变本地生态系统结构。美国从密西西

比河调水至西部流域，引入的亚洲鲤鱼迅速繁殖，挤占本土鱼类生存空间，造成严重生态灾难。补水对水文条件的改变也可能干扰原有生态系统。不当的补水时机与水量，可能破坏鱼类洄游、产卵的自然规律。长江三峡工程蓄水后，因水位与流量变化，四大家鱼产卵场面积减少约 70%，繁殖规模大幅下降。此外，地下水回灌补水若控制不当，可能引发土壤盐渍化、地面沉降等地质灾害，进一步威胁生态安全。

## （二）发展趋势

### 1. 智慧化补水管理

物联网、大数据与人工智能技术的深度融合，正推动生态补水管理向智慧化迈进。通过在水体关键点位部署水质传感器、流量监测仪、水位传感器等物联网设备，可实时获取溶解氧、pH 值、氨氮等水质数据，以及流量、水位等水文信息。荷兰开发的智能补水系统，在全国 200 余个湖泊与河道部署超 5000 个监测节点，每 15 分钟上传一次数据。结合大数据分析，系统能精准预测不同季节、天气条件下的补水需求。人工智能算法在补水决策中发挥关键作用。基于机器学习的预测模型，可分析历史补水数据与生态响应，预测未来补水需求。美国某流域利用深度学习算法，将水质变化、气象数据、生态指标等纳入模型，使补水预测准确率提升至 92%。智能控制系统可根据实时监测与预测结果，自动调节水闸、泵站等设施，实现精准补水。我国太湖流域建立的智慧补水系统，通过 AI 算法优化补水方案，使补水效率提高 35%，同时减少藻类暴发风险。

### 2. 多水源联合调度

多水源联合调度成为提高水资源保障能力的重要方向。地表水、地下水、再生水、雨水等多种水源协同利用，可缓解单一水源的补水压力。我国南水北调后续工程计划将调水与本地水库蓄水、再生水回用、雨水收集等相结合，构建“长藤结瓜”式的水资源调配网络。在京津冀地区，通过南水北调中线调水、本地水库放水、再生水回用的联合调度，每年为城市河湖补水超 20 亿立方米，有效改善了区域水环境。建立统一的水资源调度管理平台是实现多水源联合调度的关键。该平台整合各类水源信息，通过数学模型模拟不同水源的补水效果，制定最优调度方案。澳大利亚墨累—达令流域建立的水资源调度中心，通过实时监测流域内水库、河流、地下水的水量与水质，协调农业、生态、生活用水需求，使生态补水量提高 40%。同时，水权交易制度的完善也为多水源调度提供经济杠杆，促进水资源的高效配置。

### 3. 生态—社会协同补水

生态补水与社会经济发展协同共进成为未来趋势。在城市生态补水工程中，注重将补水与景观建设、休闲娱乐功能结合。深圳市大沙河生态补水工程，在补水的同时打造生态长廊，建设亲水步道、湿地公园等景观设施，吸引大量市民休闲观光，带动周边商业发展，使区域土地价值提升 20%~30%。这种生态—社会协同模式，既改善了城市生态环境，又创造了经济效益。

公众参与在生态补水工程中发挥越来越重要的作用。通过科普宣传、志愿服务等形式，提高公众对生态补水的认知与支持度。日本琵琶湖生态补水项目，通过组织市民参与水质监测、湿地保护等活动，形成“政府—企业—公众”共同参与的治理模式，有效保障了补水工程的顺利实施。此外，生态补水工程还与生态教育、文化传承相结合，增强社会认同感。我国白洋淀补水工程打造生态研学基地，将补水知识融入教育课程，每年吸引超 10 万学生参与学习。

### 4. 绿色低碳补水技术创新

随着全球对气候变化的关注，绿色低碳补水技术成为研究热点。太阳能、风能等清洁能源驱动的补水设备逐渐兴起，减少补水过程中的碳排放。我国西北地区已建成多个太阳能驱动的生态补水泵站，利用光伏发电驱动水泵，年减排二氧化碳超千吨。新型节水补水技术不断涌现，如滴灌式补水、微喷灌补水等，可减少水分蒸发与渗漏损失，提高补水效率。在湿地补水工程中，滴灌技术较传统漫灌节水 60% 以上。

生态友好型补水材料研发也取得进展。可降解的管道材料、透水铺装材料等应用于补水工程，减少对生态环境的影响。生物基材料制成的输水管道，在使用寿命结束后可自然分解，避免白色污染。此外，基于自然解决方案的补水模式受到重视，通过恢复河漫滩、建设生态湿地等方式，利用自然系统实现水资源的储存与净化，降低人工补水成本与生态风险。



## 第四章 化学性水资源保护技术

### 第一节 水质净化与化学沉淀技术

在全球工业化、城市化进程加速推进的大背景下，水资源短缺与污染问题日益严峻，已经成为制约人类社会可持续发展的重要瓶颈。化学性水资源保护技术凭借其独特的优势，成为改善水质、保障用水安全的关键手段。其中，水质净化与化学沉淀技术以其高效性和针对性，在工业废水处理、饮用水净化以及受污染水体修复等众多领域发挥着不可替代的重要作用。世界卫生组织发布的数据显示，全球约 20 亿人难以获得安全清洁的饮用水，化学沉淀技术的合理应用，为解决这一世界性难题带来了希望。

#### 一、化学沉淀技术原理与分类

##### （一）基本原理

化学沉淀技术的核心机制，是向含有污染物的水体中精准投加特定化学药剂。这些药剂会与水中的污染物发生化学反应，促使污染物转化为在水中难以溶解的物质。随着反应的进行，这些难溶物质会逐渐聚集形成沉淀物，从水体中分离出来，从而实现对污染物的有效去除。以重金属污染废水处理为例，当向含有重金属的废水中加入合适的药剂后，药剂中的成分会与重金属紧密结合，形成不溶于水的物质，最终以沉淀的形式沉降到水体底部。不同污染物形成沉淀物的难易程度存在显著差异，这一特性可以通过一个名为溶度积的重要指标来衡量。溶度积数值的大小，直观反映了物质从水中沉淀出来的难易程度，数值越小，意味着这种物质越容易沉淀。在实际的水处理过程中，技术人员会依据溶度积这一关键指标，精确调控溶液的酸碱度以及化学药剂的投放量。通过这样的精准操作，能够将水中污染物的浓度有效降低，直至达到甚至优于国家规定的排放标准。整个化学沉淀过程包含多个紧密相连且有序进行的环节。首先，需要确保化学药剂与待处理的含有污染物的水充分混合，混合的均匀度和速度直接影响反应效率，混合

越充分、快速，化学反应就越迅速、彻底；接下来进入晶核形成阶段，晶核就好比是沉淀物的“初始胚胎”，它的形成方式主要有两种，一种是在溶液中自发产生，另一种是依附在杂质颗粒表面生成；其次，溶液中的离子会不断地附着在晶核表面，使得沉淀颗粒逐渐增大、变实；最后，借助重力沉降、过滤、离心等专业分离方法，将生成的沉淀物从水体中完全分离出去，从而实现水质净化的目标。

## （二）技术分类

### 1. 氢氧化物沉淀法

氢氧化物沉淀法在化学沉淀技术体系中，是应用极为广泛且历史悠久的一种方法。其主要工作原理是通过细致调节溶液的酸碱度，促使水中的金属离子与氢氧根发生反应，进而生成氢氧化物沉淀。然而，不同种类金属离子生成氢氧化物沉淀时，对溶液酸碱度的要求各不相同。例如，铁离子在溶液酸碱度处于特定的偏酸性范围时，就会与氢氧根结合，生成氢氧化铁沉淀；而镍离子则需要在溶液呈较强的偏碱性，且酸碱度达到一定数值时，才会完全形成沉淀。在实际应用场景中，石灰和氢氧化钠是最常被选用的沉淀剂。石灰凭借其低廉的价格，成为许多对成本较为敏感的处理场景的优先选择，但其缺点是使用后会产生大量的污泥，后续污泥处理成本和难度较高；氢氧化钠虽然反应速度快，能够快速有效地使金属离子沉淀，沉淀效果也十分出色，但它的成本相对较高，这在一定程度上限制了其大规模应用。电镀行业是氢氧化物沉淀法的重要应用领域之一，常利用该方法处理含有铬、镉、锌等重金属离子的废水。以某大型电镀厂为例，该厂在废水处理过程中，采用石灰乳对废水的酸碱度进行调节，在精确控制酸碱度的条件下，重金属离子与石灰乳中的成分发生反应，生成氢氧化物沉淀。经过沉淀分离等一系列后续处理工序后，废水中的重金属离子浓度均大幅降低，全部低于国家严格规定的排放标准。不过，这种方法也存在明显的局限性，如会产生大量难以处理的污泥，处理后的废水酸碱度往往偏高，需要再次进行调节处理，否则容易引发二次污染问题。

### 2. 硫化物沉淀法

硫化物沉淀法的技术核心，是利用金属硫化物极低的溶解度这一特性，实现对水中重金属离子的高效去除。与金属氢氧化物相比，大多数金属硫化物在水中的溶解度要低得多，这使得硫化物沉淀法在去除重金属方面具有更显著的效果，尤其适用于处理那些重金属离子浓度相对较低的废水。在实际操作中，常见的硫

化物沉淀剂主要有硫化钠、硫化氢等。以含汞废水处理为例，当向这类废水中投放硫化钠时，汞离子会迅速与硫化钠中的硫离子发生反应，生成硫化汞沉淀。为了进一步提高沉淀效果，使沉淀颗粒更好地聚集在一起，便于后续分离操作，在实际处理过程中通常会配合使用絮凝剂。某氯碱厂在处理含汞废水时，采用硫化物沉淀与絮凝相结合的工艺，经过该工艺处理后，成功将废水中的汞离子浓度从每升 5mg 大幅降低到每升 0.001mg，完全达到了国家相关的严格排放标准。但硫化物沉淀法并非完美无缺，在使用过程中会产生具有毒性的硫化氢气体，因此需要配备专门的尾气处理设备来进行妥善处理；此外，生成的硫化物沉淀污泥中，重金属的稳定性较差，在一定条件下存在再次释放污染的潜在风险。

### 3. 碳酸盐沉淀法

碳酸盐沉淀法主要是利用金属离子与碳酸根离子发生化学反应，生成碳酸盐沉淀，从而实现对水中污染物的去除。在实际应用中，碳酸钠、碳酸氢钠等是较为常用的碳酸盐沉淀剂。该方法特别适用于去除水中的钙、镁、钡等金属离子，在硬水软化处理中，这一方法的应用十分典型。例如，向硬水中加入碳酸钠，水中的钙离子会与碳酸钠中的碳酸根离子迅速结合，生成碳酸钙沉淀，从而降低水中钙离子的含量，达到软化水质的目的。在矿山酸性废水处理领域，碳酸盐沉淀法同样发挥着重要作用。以某铜矿为例，其排放的酸性废水中含有大量铁离子，通过向废水中投加碳酸钠，不仅能够促使铁离子生成碳酸铁沉淀，有效去除铁离子污染物，还能中和废水中的酸性物质，降低废水的酸性。这种方法具有明显的优势，沉淀剂来源广泛，成本相对较低，易于获取和使用；但同时也存在一定的不足，处理后的废水中可能会残留一定量的碳酸根离子，这些残留的碳酸根离子可能会对后续的处理流程产生影响。

## 二、水质净化辅助技术与协同处理

### （一）絮凝与助凝技术

絮凝技术的主要功能，是通过向水中添加絮凝剂，促使水中原本极其细小的悬浮颗粒和胶体物质相互吸引、聚集，形成体积较大的絮体，从而显著提高其沉淀分离的效率。絮凝剂根据其性质和成分，主要分为无机絮凝剂和有机絮凝剂两大类。无机絮凝剂如聚合氯化铝、聚合硫酸铁，它们能够通过特定的物理化学作用，使水中的颗粒失去稳定性，为颗粒的聚集创造条件；有机絮凝剂如聚丙烯酰胺

胺，则可以像搭建桥梁一样，将颗粒相互连接起来，形成更大、更密实的絮体。在污水处理厂对二级出水进行深度处理时，常常会采用聚合氯化铝与聚丙烯酰胺组合的絮凝工艺。实践证明，该工艺能够高效去除水中残留的悬浮物和胶体物质，使出水的浑浊度得到大幅降低。而助凝剂，如石灰、活化硅酸等，它们的作用是进一步增强絮凝效果，提升絮体的沉降性能。在处理低温低浊度的水时，添加活化硅酸作为助凝剂，能够明显加快絮体的形成速度，使沉淀效率提高约 30%。<sup>①</sup>

## （二）氧化还原预处理

氧化还原预处理的基本原理，是通过改变污染物的化学性质，使其更易于沉淀或者更适合后续的处理工艺。在实际应用中，常用的氧化剂包括臭氧、过氧化氢、高锰酸钾等。以处理含有氰化物的废水为例，利用臭氧的强氧化性，能够将具有高毒性的氰化物转化为无害的二氧化碳和氮气，从而大幅降低废水的毒性。还原法在处理高价态的重金属离子方面具有独特优势，例如可以使用亚铁离子将毒性较强的六价铬还原为三价铬，然后再通过氢氧化物沉淀法将其彻底去除。某皮革厂在处理含铬废水时，采用亚铁还原与氢氧化物沉淀相结合的工艺，经过该工艺处理后，六价铬的去除率高达 99% 以上。然而，在使用氧化还原预处理技术时，必须严格把控药剂的投放量和反应条件，否则可能会产生新的污染问题。

## （三）化学沉淀与生物处理协同

将化学沉淀与生物处理两种技术协同运用，能够充分发挥各自的技术优势，显著提升污染物的去除效率。在处理工业废水时，通常的处理流程是先利用化学沉淀法，去除其中的重金属离子和部分难以降解的有机物，有效降低这些物质对微生物的毒害作用，为后续的生物处理创造良好的条件；然后通过生物处理环节，进一步去除水中剩余的有机物和氮、磷等营养物质。以某制药废水处理工程为例，该工程采用“化学沉淀—厌氧—好氧”的组合工艺。在化学沉淀阶段，成功去除了大部分重金属和悬浮物；经过后续的生物处理后，废水中的化学需氧量从每升 5000mg 大幅降低到每升 50mg 以下，达到了国家城镇污水处理厂污染物排放标准的一级 A 标准。这种协同处理模式不仅可以有效减少化学药剂的使用量，降低污泥的产生量，还能显著提高生物处理过程的稳定性。但需要特别注意的是，化学沉淀处理后的出水水质，包括酸碱度、残留药剂等各项指标，必须满足微生物生长的要求，否则将会对生物处理效果产生不利影响。

<sup>①</sup> 王珠刚. 电絮凝技术在工业废水处理中的应用进展 [J]. 当代化工研究, 2025 (6): 10-12

### 三、典型工程案例分析

#### （一）某大型钢铁厂综合废水处理工程

某大型钢铁厂在生产过程中产生大量含有重金属和悬浮物的废水，若直接排放将对周边水体造成严重污染。该厂采用以化学沉淀技术为核心的综合处理工艺：首先利用氢氧化物沉淀法，投加石灰乳调节废水 pH 至 10~11，使废水中的铁、锰、锌等重金属离子生成氢氧化物沉淀；同时配合使用聚合氯化铝作为絮凝剂，促进沉淀颗粒的聚集。经过初次沉淀后，废水中的重金属离子浓度显著降低，但仍存在部分细微颗粒和残留污染物。为进一步提升处理效果，该厂引入硫化物沉淀法进行深度处理，投加硫化钠去除残留的重金属离子，特别是对常规方法难以去除的汞、镉等重金属。最后通过过滤和活性炭吸附等工艺，对水质进行精细处理。经过该套工艺处理后，废水中重金属离子浓度均低于国家《钢铁工业水污染物排放标准》，且浊度降至 5NTU 以下，处理后的废水部分回用于厂区冷却系统，实现了水资源的循环利用，每年节约用水量达 100 万吨，同时大幅减少了污染物排放。

#### （二）某城市饮用水水源地应急净化工程

某城市饮用水水源地突发污染事件，水源水中检测出较高浓度的砷和氟化物，威胁居民用水安全。为快速解决污染问题，应急处理团队采用化学沉淀与吸附相结合的技术方案。针对砷污染，采用铁盐沉淀法，投加聚合硫酸铁，利用铁离子与砷酸根形成难溶性的砷酸铁沉淀；对于氟化物，则投加氢氧化钙和硫酸铝，通过生成氟化钙和氟铝络合物沉淀来去除。在沉淀反应完成后，利用高效沉淀池进行固液分离，并采用活性氧化铝滤料进行深度吸附处理，进一步降低水中砷和氟化物的浓度。经过 72 小时的紧急处理，水源水中砷浓度从 0.2mg/L 降至 0.01mg/L，氟化物浓度从 2.5mg/L 降至 1.0mg/L，均达到《生活饮用水卫生标准》要求，成功保障了城市居民的饮用水安全。此次应急处理工程充分展示了化学沉淀技术在应对突发性水污染事件中的快速反应和高效处理能力。

### 四、化学沉淀技术工艺优化措施

#### （一）沉淀剂优化选择与复配

传统单一沉淀剂在处理复杂污染物时往往存在局限性，通过优化沉淀剂选择

和复配，可显著提升处理效果。例如，在处理含有多种重金属离子的废水时，将石灰与硫化钠复配使用，先利用石灰去除大部分易沉淀的重金属，再通过硫化钠深度去除残留重金属，可使重金属总去除率提高 20%~30%。此外，新型高效沉淀剂不断研发问世，如纳米级金属氧化物沉淀剂，其比表面积大、反应活性高，对微量重金属污染物的去除效果优异。研究发现，纳米氧化铁沉淀剂对水中铅离子的去除率比传统沉淀剂高出 40%，且沉淀速度更快，污泥产生量减少。同时，通过对沉淀剂的形态和粒径进行控制，也能优化沉淀效果，如采用喷雾干燥技术制备的超细沉淀剂颗粒，可在水中迅速分散，提高反应效率。

## （二）反应条件精细化调控

反应条件对化学沉淀效果有着重要影响，精细化调控反应条件是提升工艺效率的关键。温度、pH 值、反应时间和搅拌强度等参数都需要精确控制。例如，在氢氧化物沉淀过程中，不同金属离子生成沉淀的最佳 pH 值不同，通过在线 pH 监测设备实时调控投药量，可确保反应始终在最佳条件下进行。研究表明，将 pH 控制精度从  $\pm 0.5$  提升至  $\pm 0.1$ ，重金属去除率可提高 10%~15%。此外，通过优化搅拌强度和时间，可促进沉淀剂与污染物充分混合，加快反应速度。采用变频搅拌设备，根据反应进程动态调整搅拌强度，在反应初期采用高强度搅拌促进混合，后期降低搅拌强度防止絮体破碎，能有效提高沉淀效果。同时，反应温度也会影响沉淀反应速率和沉淀物的性质，对于一些对温度敏感的反应，通过恒温控制系统维持最佳反应温度，可提升处理效率。

## （三）污泥减量化与资源化利用

化学沉淀技术产生的大量污泥若处理不当，不仅占用大量土地资源，还可能造成二次污染。污泥减量化和资源化利用成为工艺优化的重要方向。在污泥减量化方面，通过优化沉淀工艺减少污泥产生量，如采用高效絮凝剂减少污泥含水率；利用污泥浓缩、脱水技术，将污泥含水率从 95%~99% 降低至 60%~80%，大幅减小污泥体积。在污泥资源化利用方面，将重金属污泥进行稳定化处理后，可用于制备建筑材料，如利用重金属污泥烧制陶粒、生产水泥等。某污水处理厂将含重金属污泥与黏土、页岩等原料混合烧制陶粒，陶粒强度满足建筑材料标准，且重金属浸出浓度低于国家标准，实现了污泥的无害化和资源化利用。此外，还可从污泥中提取有价值的金属，如从电镀污泥中提取铜、镍、铬等金属，不仅减少了环境污染，还创造了经济价值。

## 五、技术面临的挑战与发展趋势

### （一）主要挑战

#### 1. 复杂污染物处理难题

随着全球工业化进程加速，工业废水的成分日趋复杂，多种污染物相互交织的情况愈发普遍，这给化学沉淀技术带来了前所未有的挑战。以电子工业为例，其生产过程产生的废水中，除了含有镉、铅、镍等重金属离子，还存在大量如乙二胺四乙酸（EDTA）、柠檬酸等络合剂。这些络合剂会与重金属离子紧密结合，形成稳定的络合物，极大地降低了金属离子的活性，使得传统化学沉淀剂难以与之发生有效反应。研究表明，在含有 EDTA—铜络合物的废水中，常规氢氧化物沉淀法对铜离子的去除率不足 30%，远低于处理游离态铜离子时 90% 以上的去除率。制药行业废水同样是复杂污染物处理的难题。抗生素生产废水中不仅含有残留的抗生素分子，还伴有大量的发酵残余物、有机溶剂和重金属。这些物质相互作用，形成复杂的化学体系，导致单一的化学沉淀技术难以实现污染物的有效去除。某抗生素生产企业曾尝试用硫化物沉淀法处理含汞废水，但由于废水中的有机物与汞离子形成了有机汞络合物，沉淀效果大打折扣，最终不得不采用“氧化破络—硫化沉淀—吸附”的联合工艺，处理流程烦琐且成本高昂。煤化工废水也是典型的复杂废水。其中除了含有氨氮、酚类、多环芳烃等有机污染物，还存在大量的重金属离子和氰化物。这些污染物之间的化学反应和相互作用，使得化学沉淀过程变得异常复杂。例如，氰化物会与重金属离子形成稳定的络合氰化物，增加了重金属去除的难度；而多环芳烃等有机物会吸附在沉淀物表面，影响沉淀效果和污泥的后续处理。

#### 2. 二次污染风险

化学沉淀技术在应用过程中，若对化学药剂使用和污泥处理不当，极易引发二次污染问题。以硫化物沉淀法为例，该方法在去除重金属时会产生具有强烈刺激性和毒性的硫化氢气体。若处理设施的密封性能不佳或尾气处理系统故障，硫化氢气体一旦泄漏到大气中，不仅会对周边环境空气质量造成严重破坏，还会威胁工作人员和居民的身体健康。某小型矿山企业在采用硫化物沉淀法处理含汞废水时，因尾气处理装置简陋，导致厂区周边硫化氢浓度超标数十倍，引发周边居民呼吸道疾病发病率上升，最终企业不得不停产整顿并承担巨额赔偿。沉淀污泥

的处理同样不容忽视。污泥中往往残留着大量未反应完全的化学药剂,以及尚未完全稳定化的污染物。在填埋处置过程中,若填埋场防渗措施不到位,随着时间推移,污泥中的重金属和有机污染物可能会随渗滤液迁移,污染土壤和地下水。在南方多雨地区,部分采用简易填埋方式处理化学沉淀污泥的场地,经检测发现周边地下水中重金属含量超标数倍。此外,污泥焚烧过程中,若温度控制不当,可能会产生二噁英等剧毒物质,对大气环境造成二次污染。调节废水 pH 值时使用的酸碱药剂若过量,也会带来一系列问题。大量酸性药剂的使用会导致水体酸化,影响水生生物的生存环境,破坏水体生态平衡;而碱性药剂过量则会使水体 pH 值过高,同样对水生生物产生毒害作用。某印染厂在废水处理过程中,因 pH 调节不当,导致处理后排放的废水 pH 值高达 12,使受纳水体中的鱼类大量死亡,造成严重的生态事故。

### 3. 成本与效率矛盾

为提升化学沉淀处理效果,往往需要增加药剂投加量、延长反应时间或增设处理工序,这无疑会大幅推高处理成本。在处理高浓度重金属废水时,为使重金属离子达标排放,可能需要投入数倍于常规用量的沉淀剂。以处理含镉废水为例,当废水中镉离子浓度从 5mg/L 降至 0.01mg/L 时,若采用硫化钠沉淀法,药剂成本会随着处理精度的提高呈指数级增长。此外,增设深度处理工序,如增加过滤、吸附等环节,也会导致设备投资、能耗和维护成本显著增加。一些高效沉淀技术和新型药剂虽然处理效果显著,但高昂的价格成为其大规模应用的阻碍。纳米级金属氧化物沉淀剂对微量重金属具有出色的去除效果,但其制备工艺复杂,成本是传统沉淀剂的 5~10 倍。例如,纳米零价铁对水中砷离子的去除率可达 99% 以上,但由于其易氧化、储存条件苛刻,导致实际应用成本过高,目前仅在一些高附加值的特殊水处理场景中使用。对于大多数中小型企业而言,难以承受这些高效技术和药剂带来的成本压力,只能选择处理效率较低但成本相对可控的传统技术,这在一定程度上限制了化学沉淀技术整体处理水平的提升。

## (二) 发展趋势

### 1. 新型材料与药剂研发

新型高效、环保的沉淀剂和吸附材料研发是未来重要方向。纳米材料因其独特的物理化学性质,在污染物去除方面展现出巨大潜力。具有特异性吸附功能的纳米材料,能够精准识别并吸附特定污染物。例如,纳米二氧化钛负载的磁性材

料,对水中的磷酸根离子具有高度选择性,去除率可达 99% 以上,且通过磁场可实现材料的快速分离回收。此外,生物基材料制备的绿色沉淀剂备受关注。以植物单宁为原料制备的絮凝剂,不仅对污染物具有良好的去除效果,还具有无毒、可生物降解的特性,不会对环境造成二次污染。某研究团队利用板栗壳提取物制备的絮凝剂,在处理印染废水时,对染料的去除率达到 85%,且处理后的污泥可作为有机肥料使用。智能响应型材料成为研究热点。这类材料能够根据环境条件自动调节性能,实现对污染物的高效去除。pH 响应型水凝胶材料,在酸性条件下可吸附重金属离子,在碱性条件下又能释放重金属,便于材料的再生和重金属的回收。温敏型纳米颗粒在温度变化时,其表面性质会发生改变,从而影响对污染物的吸附能力。这些智能材料的应用,将使化学沉淀技术更加智能化、高效化。

## 2. 智能化与自动化控制

物联网、大数据和人工智能技术的融合,将推动化学沉淀处理过程向智能化、自动化方向发展。在线监测设备的广泛应用,可实时获取水质的多项参数,包括重金属浓度、pH 值、浊度、溶解氧等。通过在处理系统关键节点部署传感器,能够实现对水质的全方位、动态监测。例如,德国某污水处理厂采用的在线重金属监测仪,可在 30 秒内完成水样检测,实时反馈数据至控制系统。人工智能算法在数据分析和工艺优化中发挥核心作用。基于机器学习的预测模型,能够对水质变化趋势进行精准预判。通过分析历史水质数据、处理工艺参数和环境因素,模型可提前数小时预测水质波动,为工艺调整提供依据。同时,智能控制系统可根据实时监测数据和预测结果,自动调整沉淀剂投加量、反应时间、搅拌强度等工艺参数。我国某大型钢铁企业引入的智能化学沉淀处理系统,通过 AI 算法优化药剂投加策略,使沉淀剂用量减少 20%,同时处理效果提升 15%。此外,借助数字孪生技术,可构建虚拟的处理系统模型,模拟不同工况下的处理效果,为工艺优化和故障诊断提供支持。

## 3. 多技术协同创新

化学沉淀技术与其他水处理技术的深度融合是未来发展趋势。与膜分离技术结合,能够有效去除化学沉淀后残留的细微颗粒和溶解性污染物。超滤膜、纳滤膜和反渗透膜等不同类型的膜,可根据污染物特性进行选择。在处理电镀废水时,将化学沉淀与纳滤膜技术相结合,可使重金属离子的去除率进一步提高,同时实现水资源的回用。某电镀园区采用“化学沉淀—纳滤”工艺,处理后的废水可直

接回用于镀件清洗工序，回用率达到 80%。与高级氧化技术结合，可有效处理化学沉淀难以去除的有机污染物。芬顿氧化、臭氧氧化、光催化氧化等高级氧化技术，能够将大分子有机物分解为小分子物质，提高其可沉淀性或可生化性。在处理制药废水时，采用“化学沉淀—臭氧催化氧化—生物处理”的联合工艺，可使废水中的 COD 去除率从单一化学沉淀的 40% 提升至 90% 以上。此外，与生物处理技术协同，可充分发挥化学沉淀快速去除污染物和生物处理深度净化的优势，形成高效、经济的水处理工艺，为解决复杂水污染问题提供新途径。

## 第二节 污染物吸附与离子交换技术

污染物吸附与离子交换水资源保护领域的关键技术，在去除水中重金属、有机污染物及溶解性离子等方面发挥着重要作用。随着工业废水排放的复杂性增加和饮用水安全标准的不断提高，污染物吸附与离子交换技术因其高效、灵活的特点，成为改善水质的重要手段。在实际应用中，该技术已广泛应用于工业废水处理、饮用水净化、污水处理厂深度处理等多个领域，为解决全球性水环境污染问题提供了有效途径。

### 一、污染物吸附技术原理与分类

#### （一）基本原理

污染物吸附技术是利用吸附剂表面的物理或化学作用，将水中的污染物富集在吸附剂表面，从而实现污染物从水体中分离的过程。其核心机制基于吸附剂与污染物之间的相互作用力，主要包括范德华力、静电引力、化学键力等。根据吸附作用力的不同，可将吸附过程分为物理吸附、化学吸附和离子交换吸附。物理吸附主要依靠吸附剂与污染物之间的分子间作用力，即范德华力。这种吸附力较弱，具有可逆性，吸附过程不需要活化能，吸附速度快，且吸附热较小。由于物理吸附没有选择性，只要污染物分子的大小和形状适合吸附剂的孔隙结构，都可以发生吸附。例如，活性炭对水中的有机污染物、色素和异味的吸附主要就是物理吸附过程。化学吸附则是吸附剂与污染物之间发生化学反应，形成化学键。化学吸附具有高度的选择性，吸附过程需要较高的活化能，吸附速度相对较慢，且吸附热较大。一旦发生化学吸附，污染物与吸附剂之间的结合较为牢固，不易解

吸。如金属氧化物对某些重金属离子的吸附,是通过表面的羟基与重金属离子发生化学反应,形成稳定的化合物。离子交换吸附本质上是一种特殊的化学吸附,它是指吸附剂表面的可交换离子与溶液中的同性离子发生交换反应,从而将污染物离子吸附到吸附剂表面。离子交换吸附遵循离子交换定律,具有等电荷、等物质的量交换的特点。例如,阳离子交换树脂可将水中的钙、镁离子交换吸附,从而达到软化水质的目的。

## (二) 吸附类型及特点

### 1. 物理吸附

物理吸附的吸附剂表面与污染物之间以范德华力结合,其特点决定了它在水处理中具有广泛的应用。物理吸附剂通常具有巨大的比表面积和丰富的孔隙结构,如活性炭的比表面积可达  $500\sim 1500\text{m}^2/\text{g}$ ,能够为污染物提供大量的吸附位点。这种吸附过程不需要特殊的反应条件,在常温下即可进行,且对多种污染物都有一定的吸附能力,包括小分子有机物、大分子胶体、色素、异味物质等。在饮用水净化中,活性炭吸附是常见的工艺。通过活性炭的物理吸附作用,可以有效去除水中的余氯、三氯甲烷、农药残留等有机污染物,改善饮用水的口感和气味。某自来水厂采用颗粒活性炭吸附工艺,对原水进行深度处理后,水中的挥发性有机物去除率达到  $70\%\sim 80\%$ ,使出厂水的感官性状和化学指标均符合国家标准。然而,物理吸附的吸附容量相对较低,且吸附的污染物容易发生解吸,导致二次污染风险,因此在实际应用中常与其他处理技术联合使用。<sup>①</sup>

### 2. 化学吸附

化学吸附基于化学键的形成,具有较强的选择性和稳定性。化学吸附剂表面通常含有特定的官能团,能够与目标污染物发生化学反应。例如,含有氨基的吸附剂可以与水中的重金属离子形成络合物,实现对重金属的高效吸附。化学吸附的吸附过程往往伴随着能量的变化,需要一定的温度和反应时间来促进化学键的形成。在工业废水处理中,化学吸附常用于处理高浓度、毒性强的污染物。某电镀厂采用负载铁氧化物的吸附剂处理含砷废水,铁氧化物表面的羟基与砷酸根离子发生化学反应,形成稳定的铁-砷化合物,将废水中的砷浓度从  $5\text{mg/L}$  降至  $0.01\text{mg/L}$ ,达到国家排放标准。化学吸附虽然吸附效果好,但吸附剂的制备成本较高,且再生困难,限制了其大规模应用。

① 杨丽娟,王辉,李小敏.活性炭的吸附应用[J].绿色科技,2020(22):134-135.

### 3. 离子交换吸附

离子交换吸附以离子交换反应为基础，在去除水中的溶解性离子方面具有独特优势。离子交换剂分为阳离子交换剂和阴离子交换剂，阳离子交换剂表面含有可交换的阳离子，如氢离子、钠离子等，可与水中的钙、镁、铁等阳离子发生交换；阴离子交换剂表面含有可交换的阴离子，如氢氧根离子、氯离子等，可与水中的硫酸根、硝酸根、磷酸根等阴离子发生交换。在锅炉用水处理中，离子交换树脂软化水工艺被广泛应用。通过强酸性阳离子交换树脂将水中的钙、镁离子交换为氢离子，从而降低水的硬度，防止锅炉结垢。某热电厂采用离子交换树脂软化水系统，使锅炉补给水的硬度从 5mmol/L 降至 0.03mmol/L 以下，延长了锅炉的使用寿命，提高了热效率。离子交换吸附的缺点是树脂在使用一段时间后会达到饱和，需要进行再生处理，再生过程中会产生大量的酸碱废水，需要妥善处理以防止二次污染。

#### （三）影响吸附过程的因素

##### 1. 吸附剂性质

吸附剂的比表面积、孔隙结构、表面官能团等性质直接影响吸附性能。比表面积越大，吸附位点越多，吸附容量越高；孔隙结构决定了污染物分子能否顺利进入吸附剂内部，微孔结构有利于吸附小分子污染物，介孔和大孔结构则更适合大分子污染物的吸附。表面官能团的种类和数量影响吸附剂与污染物之间的作用力，如含有羧基、羟基的吸附剂对重金属离子具有较强的亲和力。

##### 2. 污染物性质

污染物的分子结构、浓度、存在形态等因素影响吸附效果。一般来说，分子量较小、极性较弱的有机物更容易被物理吸附；离子型污染物则更易发生离子交换吸附或化学吸附。污染物浓度越高，吸附驱动力越大，但当浓度过高时，可能会导致吸附剂表面迅速饱和，降低吸附效率。污染物的存在形态也很重要，如重金属离子在不同的 pH 值条件下，可能以不同的形态存在，影响其与吸附剂的结合。

##### 3. 环境条件

溶液的 pH 值、温度、共存离子等环境条件对吸附过程有显著影响。pH 值会影响吸附剂表面的电荷性质和污染物的存在形态，从而改变吸附效果。例如，对于弱酸性吸附剂，在酸性条件下表面带正电荷，有利于吸附阴离子污染物；在碱性条件下表面带负电荷，有利于吸附阳离子污染物。温度对吸附过程的影响较

为复杂，对于物理吸附，温度升高会使吸附平衡向解吸方向移动；对于化学吸附，适当升高温度可以加快反应速率，但过高的温度可能导致化学键断裂，降低吸附容量。共存离子可能与目标污染物竞争吸附位点，也可能通过离子交换、络合等作用影响吸附过程。

## 二、离子交换技术原理与材料

### （一）离子交换基本过程

离子交换过程是一个可逆的化学反应过程，主要包括以下几个步骤：首先，溶液中的离子通过扩散作用从溶液主体向吸附剂表面迁移，这一过程称为外扩散；其次，离子穿过吸附剂表面的液膜，到达吸附剂的孔隙内部，称为内扩散；接着，离子在吸附剂的孔隙内继续扩散，到达吸附位点，并与吸附剂表面的可交换离子发生交换反应；最后，交换后的离子通过内扩散和外扩散过程从吸附剂表面返回溶液主体。离子交换反应遵循离子交换平衡原理，当溶液中离子的浓度、温度等条件发生变化时，离子交换平衡会发生移动。例如，在阳离子交换过程中，当溶液中氢离子浓度增加时，会促使交换反应向解吸方向移动，从而实现离子交换树脂的再生。

### （二）离子交换树脂分类与特性

#### 1. 强酸性阳离子交换树脂

强酸性阳离子交换树脂通常以苯乙烯—二乙烯苯共聚物为骨架，引入磺酸基（ $-\text{SO}_3\text{H}$ ）作为活性基团。由于磺酸基的酸性很强，在各种 pH 值条件下都能完全电离，因此可以与水中的各种阳离子进行交换反应。该树脂对钙、镁、铁等阳离子具有较强的交换能力，常用于水的软化和除盐处理。强酸性阳离子交换树脂的优点是交换速度快、交换容量大、化学稳定性好；缺点是再生时需要使用大量的强酸，如盐酸、硫酸等，再生成本较高，且对设备有一定的腐蚀性。

#### 2. 弱酸性阳离子交换树脂

弱酸性阳离子交换树脂的活性基团通常为羧酸基（ $-\text{COOH}$ ）或酚羟基（ $-\text{OH}$ ）。这些基团的酸性较弱，在酸性条件下电离程度较低，交换能力较弱；但在碱性条件下，能够完全电离，表现出较强的交换能力。弱酸性阳离子交换树脂对二价阳离子的选择性较高，常用于去除水中的钙、镁离子，且再生时可以使用价格较低的弱酸或碱，再生成本相对较低。然而，其交换速度较慢，交换容量相对较小，在处理高浓度废水时效率较低。

### 3. 强碱性阴离子交换树脂

强碱性阴离子交换树脂以苯乙烯—二乙烯苯共聚物为骨架，引入季铵基  $-N^+(\text{CH}_3)_3\text{OH}^-$  等强碱性基团。这种树脂在各种 pH 值条件下都能完全电离，可与水中的硫酸根、硝酸根、氯离子等阴离子进行交换反应。强碱性阴离子交换树脂常用于水的除盐处理和去除水中的有机阴离子，如腐殖酸、富里酸等。其优点是交换能力强、对各种阴离子的选择性较好；缺点是再生时需要使用大量的强碱，如氢氧化钠，且在处理含氯量较高的水时，容易发生氧化降解，影响树脂的使用寿命。

### 4. 弱碱性阴离子交换树脂

弱碱性阴离子交换树脂的活性基团主要为伯胺基 ( $-\text{NH}_2$ )、仲胺基 ( $-\text{NHR}$ ) 或叔胺基 ( $-\text{NR}_2$ )。这些基团的碱性较弱，在碱性条件下交换能力较弱，但在酸性条件下能够与阴离子发生较强的交换反应。弱碱性阴离子交换树脂对强酸根离子具有较高的交换容量，且再生时可以使用较弱的碱，如碳酸钠、碳酸氢钠等，再生成本较低。不过，其对弱酸根离子的交换能力较差，在处理复杂阴离子废水时效果有限。

## (三) 离子交换树脂的应用与再生

### 1. 应用领域

离子交换树脂在水处理领域应用广泛，包括工业锅炉用水软化、纯水制备、废水处理等。在工业锅炉用水软化中，通过离子交换树脂去除水中的钙、镁离子，防止锅炉结垢，提高热效率，保障锅炉的安全运行。在纯水制备中，采用阳离子交换树脂和阴离子交换树脂的组合，去除水中的各种阴阳离子，可制备出高纯度的去离子水，满足电子、制药等行业对水质的严格要求。在废水处理中，离子交换树脂可用于去除重金属离子、放射性核素、有机污染物等。例如，某核电厂采用离子交换树脂处理放射性废水，有效去除了废水中的铯、锶等放射性核素，使废水达到排放标准。

### 2. 再生方法

离子交换树脂在使用一段时间后会达到饱和，需要进行再生处理以恢复其交换能力。再生方法主要有化学再生法和电化学再生法。化学再生法是最常用的方法，通过向饱和树脂中通入再生剂，使交换反应逆向进行，将树脂上吸附的离子置换下来。对于阳离子交换树脂，常用的再生剂有盐酸、硫酸等强酸；对于阴离

子交换树脂，常用的再生剂有氢氧化钠等强碱。电化学再生法是利用电场作用，使离子在树脂内部发生迁移，实现树脂的再生。该方法具有再生效率高、再生剂用量少等优点，但设备投资较大，目前应用相对较少。在再生过程中，需要注意再生剂的浓度、流速、温度等条件的控制，以提高再生效果，延长树脂的使用寿命。

### 三、典型工程应用案例

#### （一）活性炭—膜组合工艺处理印染废水

某大型印染企业在生产过程中产生大量成分复杂的废水，其中含有高浓度的染料、助剂及重金属离子，传统处理工艺难以使其达标排放。该企业采用活性炭—膜组合工艺进行深度处理：首先，利用颗粒活性炭的物理吸附特性，去除废水中的大部分有机染料和色素，经过活性炭吸附后，废水的色度去除率可达85%以上。活性炭吸附池采用多级串联形式，延长废水与活性炭的接触时间，提高吸附效率。后续结合超滤膜（UF）和反渗透膜（RO）进行处理。超滤膜能够截留活性炭吸附后残留的细微颗粒和大分子有机物，进一步降低废水的浊度和COD；反渗透膜则通过精细过滤，去除小分子有机物、重金属离子和溶解性盐类。该组合工艺使印染废水的COD从初始的1200mg/L降至50mg/L以下，重金属离子浓度也远低于国家排放标准，处理后的水可回用于企业的印染前处理工序，实现了水资源的循环利用，每年节约用水量达50万吨。

#### （二）离子交换树脂处理电子工业含重金属废水

电子工业生产过程中产生的废水中含有铅、镉、镍等多种重金属离子，若未经有效处理直接排放，将对环境造成严重污染。某电子厂采用离子交换树脂工艺处理此类废水：首先，使用强酸性阳离子交换树脂去除废水中的重金属阳离子，树脂对铅离子的交换容量可达150~200mg/g。为提高树脂的吸附效率，采用固定床离子交换柱，废水以恒定流速通过树脂柱，确保重金属离子与树脂充分接触。当树脂达到饱和后，采用硫酸进行再生，再生后的树脂可重复使用。再生过程中产生的高浓度重金属废水经浓缩处理后，采用化学沉淀法进一步处理，将重金属转化为稳定的沉淀物。经过该工艺处理，废水中的重金属离子去除率均在99%以上，达到《电子工业水污染物排放标准》。同时，通过优化再生工艺，将树脂的使用寿命延长至3~5年，降低了处理成本。

### （三）黏土矿物基吸附剂处理农村生活污水

在农村地区，生活污水中含有大量的氮、磷等营养物质，若直接排放易导致水体富营养化。某村庄采用改性黏土矿物基吸附剂处理生活污水：将天然蒙脱石进行有机改性，使其表面具有亲油性，增强对有机污染物的吸附能力。同时，通过负载铁氧化物，提高对磷的吸附性能。

处理工艺采用吸附—生物联合处理模式，首先利用改性黏土矿物吸附剂去除污水中的部分有机物、氨氮和磷；然后通过人工湿地进行生物处理，进一步降解有机物和去除剩余的氮、磷。该工艺使生活污水的 COD 去除率达到 80%，氨氮去除率达到 75%，总磷去除率达到 90%，处理后的水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准，可用于农田灌溉。

## 四、工艺优化与技术改进

### （一）吸附材料改性与复合

为提高吸附材料的性能，科研人员开展了大量的改性与复合研究。通过物理、化学和生物等方法对传统吸附材料进行改性，可显著提升其吸附能力和选择性。例如，采用微波辐射技术对活性炭进行改性，能够扩大其孔径，增加比表面积，使其对大分子有机物的吸附能力提高 30%~50%。

复合吸附材料是将两种或多种不同的吸附材料结合，发挥各自的优势。将纳米二氧化钛与活性炭复合，制成的复合材料不仅具有活性炭的物理吸附性能，还具有纳米二氧化钛的光催化降解能力，可在光照条件下将吸附的有机污染物分解为二氧化碳和水。某研究团队制备的铁—碳复合吸附剂，对水中的重金属离子和有机污染物均具有良好的去除效果，在处理电镀混合废水时，重金属离子去除率达到 95% 以上，COD 去除率达到 80%。

### （二）离子交换工艺强化

在离子交换工艺方面，通过优化设备结构和运行参数，可提高离子交换效率。采用移动床离子交换设备替代传统的固定床设备，能够实现树脂的连续运行和再生，提高处理效率，降低占地面积。同时，开发新型的离子交换树脂，如具有特殊功能基团的螯合树脂，对特定重金属离子具有更高的选择性和交换容量。此外，将离子交换与其他技术相结合，形成协同处理工艺。离子交换—膜过滤组合工艺，可在离子交换去除污染物的同时，利用膜过滤截留细小颗粒和大分子物质，防止

树脂污染和堵塞。某制药废水处理工程采用“离子交换—纳滤”组合工艺，有效去除了废水中的抗生素残留和重金属离子，处理后的水质满足企业回用要求。

### （三）智能化运行与控制

随着物联网、大数据和人工智能技术的发展，污染物吸附与离子交换技术的运行和控制逐渐向智能化方向发展。通过在线监测设备实时监测水质参数，如 pH 值、重金属浓度、COD 等，并将数据传输至控制系统。利用人工智能算法对数据进行分析 and 预测，根据水质变化自动调整吸附剂投加量、离子交换树脂运行周期等工艺参数。某污水处理厂引入智能控制系统，对活性炭吸附和离子交换树脂处理工艺进行优化。系统通过分析历史数据和实时监测数据，预测吸附剂和树脂的饱和时间，提前启动再生程序，使吸附剂和树脂的利用率提高 20%，处理成本降低 15%。同时，智能化运行还能够及时发现设备故障和异常情况，提高系统的稳定性和可靠性。

## 五、面临的挑战与发展趋势

### （一）主要挑战

#### 1. 复杂污染物处理难题

随着工业的快速发展，废水中的污染物成分日益复杂，多种污染物共存且相互作用，增加了吸附和离子交换处理的难度。在化工废水中，有机污染物与重金属离子形成络合物，传统吸附材料和离子交换树脂难以实现有效去除。例如，含酚废水中的酚类物质与铁离子形成稳定的络合物，使离子交换树脂对铁离子的交换容量降低 50% 以上。此外，新型污染物如抗生素、微塑料等不断出现，对现有处理技术提出了新的挑战。

#### 2. 吸附剂和离子交换剂的再生与消解

吸附剂和离子交换剂在使用过程中会逐渐饱和，需要进行再生处理。然而，再生过程往往存在能耗高、效率低、二次污染等问题。活性炭的再生通常采用高温加热或化学药剂处理，不仅能耗大，还会导致活性炭结构破坏，缩短使用寿命。离子交换树脂再生过程中产生的大量酸碱废水，若处理不当，会对环境造成污染。此外，当吸附剂和离子交换剂达到使用寿命后，其消解也是一个难题，目前主要采用填埋和焚烧等方式，存在资源浪费和环境污染风险。

### 3. 成本控制与效率提升矛盾

高性能的吸附材料和离子交换剂往往价格昂贵，如纳米材料、螯合树脂等，导致处理成本大幅增加。同时，为提高处理效果，需要增加吸附剂用量或延长离子交换时间，进一步提高了运行成本。如何在保证处理效率和效果的前提下，降低处理成本，是该技术面临的重要挑战。此外，处理过程中的能耗也是成本的重要组成部分，开发低能耗、高效率的处理工艺和设备迫在眉睫。

## （二）发展趋势

### 1. 新型材料研发

未来将重点研发新型高效、环保的吸附材料和离子交换剂。纳米材料、石墨烯、金属有机框架（MOFs）等新型材料因其独特的结构和性能，成为研究热点。纳米材料具有巨大的比表面积和表面活性，能够显著提高吸附容量和吸附速度。MOFs 材料具有高度可调的孔结构和丰富的活性位点，对特定污染物具有优异的吸附性能。同时，利用生物材料制备绿色吸附剂和离子交换剂也将成为发展方向，如利用废弃生物质制备活性炭，不仅成本低，还具有良好的吸附性能。

### 2. 多技术协同创新

污染物吸附与离子交换技术将与其他水处理技术进一步融合，形成协同处理工艺。与高级氧化技术结合，可先通过吸附去除大部分污染物，再利用高级氧化技术降解残留的难降解有机物。与膜分离技术结合，能够实现污染物的高效分离和浓缩，提高处理效率和水质。此外，与生物技术结合，如构建吸附—生物膜反应器，可充分发挥吸附和生物降解的优势，实现对复杂污染物的有效处理。

### 3. 智能化与数字化转型

智能化和数字化将成为污染物吸附与离子交换技术发展的重要趋势。利用物联网技术实现设备的远程监控和管理，通过大数据分析优化工艺参数，借助人工智能算法实现处理过程的自动控制。开发数字孪生技术，构建虚拟处理系统，模拟不同工况下的处理效果，为工艺优化和故障诊断提供支持。智能化和数字化转型将提高处理系统的运行效率、稳定性和可靠性，降低运行成本。

### 第三节 化学氧化与高级氧化技术应用

在全球工业化与城市化高速发展的浪潮下，工业生产的多元化与生活污水排放量的激增，使得水体污染问题日益严峻。制药、印染、化工等行业排放的废水中，不仅含有大量有机污染物，还包含众多如抗生素残留、持久性有机污染物（POPs）等难降解物质。据世界卫生组织统计，全球每年约有数百万吨有害化学物质进入水体，传统的沉淀、过滤等水处理技术已难以应对如此复杂的污染局面。化学氧化与高级氧化技术凭借其高效的氧化分解能力，成为突破这一困境的核心技术手段，在各类水体净化场景中发挥着不可替代的关键作用。

#### 一、化学氧化技术原理与分类

##### （一）基本原理

化学氧化技术的本质，是利用具有强氧化性的物质作为氧化剂，对水中污染物发起“攻击”，促使污染物分子结构发生改变，使其转化为价态更高、毒性更低的物质，甚至直接分解为小分子化合物。在这一过程中，氧化剂如同“电子掠夺者”，从污染物分子中夺取电子，自身被还原，而污染物则因失去电子而被氧化。以常见的含氰废水处理为例，氰化物对生物具有极高的毒性，当向这类废水中投入氯气等合适的氧化剂时，氰化物分子中的碳和氮元素会被氧化，最终转化为无毒的二氧化碳和氮气，以气体形式逸散到空气中，从而实现污染物的无害化处理。<sup>①</sup> 实际应用中，化学氧化反应的效果会受到诸多因素的综合影响。首先，不同类型的氧化剂具有独特的氧化特性，其氧化能力的强弱直接决定了对污染物的处理效果，因此，依据污染物的性质精准选择氧化剂至关重要。其次，反应体系的酸碱度（pH 值）、温度、反应持续时间等条件，也会对氧化反应产生显著影响。例如，在一定范围内，适当提高温度可以加快反应分子的运动速度，促进氧化剂与污染物之间的碰撞，从而加快反应速率；但温度过高时，部分氧化剂可能会发生自身分解，不仅降低了氧化剂的有效利用率，还会增加能源消耗。此外，污染物自身的化学结构、浓度等特性，同样会影响氧化反应的进行程度和最终效果。

<sup>①</sup> 卢兴洁，祝加琛，吴雅丽. 电化学氧化技术在重金属废水处理中的机制解析 [J]. 皮革制作与环保科技，2024，5（16）：8-10.

## （二）化学氧化技术分类

### 1. 氯氧化法

氯氧化法作为水处理领域的“老牌”技术，自问世以来便凭借操作相对简便、成本较低等优势，在众多水处理场景中广泛应用。该技术主要依赖氯气、次氯酸钠、二氧化氯等含氯氧化剂的强氧化性，实现对污染物的氧化分解。其中，氯气是早期应用最为广泛的氯氧化剂，它在水接触后，会迅速发生水解反应，生成具有强氧化性的次氯酸。次氯酸能够穿透细菌、病毒等微生物的细胞膜，与细胞内的蛋白质、核酸等关键物质发生反应，破坏其细胞结构，从而达到杀菌消毒的目的。在早期的城市自来水消毒中，氯气消毒法曾占据主导地位，为保障居民用水安全发挥了重要作用。次氯酸钠作为液态氯氧化剂，因其储存和使用相对便捷、安全性较高，在生活污水和工业废水的消毒处理中备受青睐。以某大型城市污水处理厂为例，该厂每日处理生活污水量达数十万吨，在二级出水消毒环节采用次氯酸钠作为消毒剂，当投加量控制在每升 5~10mg 时，经检测，污水中的大肠杆菌去除率能够稳定超过 99%，有效降低了污水排放对环境和公共健康的潜在威胁。

二氧化氯作为新型高效氯氧化剂，近年来在水处理领域的应用呈快速增长趋势。它不仅具有强大的氧化能力，能够有效去除水中的有机物、异味物质等，更重要的是，在氧化过程中不会产生三卤甲烷等致癌副产物，被认为是一种更为安全、环保的消毒剂。在处理含酚废水时，二氧化氯展现出卓越的处理效果，当向每升含酚废水中投放 20~30mg 二氧化氯后，酚类物质的去除率可达到 80%~90%，显著降低了废水的毒性和污染程度。然而，氯氧化法也存在不容忽视的弊端。氯气和次氯酸钠在氧化水中有机物的过程中，有可能发生取代反应，生成卤代烃等有毒有害副产物，这些副产物具有较高的化学稳定性和生物累积性，会对人体健康和生态环境造成长期潜在危害。此外，含氯氧化剂具有较强的腐蚀性，对处理设备的材质要求较高，需要采用耐腐蚀材料或进行特殊防腐处理，这无疑增加了设备建设和维护成本。

### 2. 臭氧氧化法

臭氧是一种由三个氧原子组成的强氧化性气体，其氧化能力在常见氧化剂中仅次于氟，且在水中反应后的最终产物仅为氧气，不会产生任何二次污染，因此被视为一种极具环境友好性的化学氧化技术。臭氧氧化有机物的过程主要通过两

种途径实现：其一，臭氧分子能够直接与有机物分子中的双键、三键等不饱和键发生反应，这种反应具有一定的选择性，主要针对特定结构的有机物；其二，在碱性环境条件下，或者在催化剂的作用下，臭氧会发生分解，产生氧化能力更强的羟基自由基。羟基自由基几乎可以与所有类型的有机物发生反应，且反应速率极快，能够无差别地氧化分解水中的有机污染物。

在饮用水深度净化领域，臭氧氧化法发挥着关键作用。某大型现代化自来水厂为提升饮用水水质，采用了臭氧—活性炭联合工艺。在该工艺中，臭氧首先对原水进行预氧化处理，将水中的大分子有机物分解为小分子物质，打破其复杂的分子结构，使其更易于被后续的活性炭吸附。经过此工艺处理后，出厂饮用水中的有机物含量显著降低，不仅有效去除了水中的色度和异味，还大幅提升了水质的安全性和口感。

在工业废水处理方面，臭氧氧化法同样表现出色，尤其适用于印染废水、制药废水等高浓度有机废水的处理。某知名印染企业在生产过程中产生的印染废水具有色度高、有机物浓度高的特点，采用臭氧氧化法处理后，废水的色度去除率超过90%，化学需氧量(COD)去除率达到50%~60%，有效改善了废水的可生化性，为后续的生物处理创造了有利条件。尽管臭氧氧化法优势明显，但也面临着诸多技术难题。臭氧的制备过程需要消耗大量电能，通过高压放电或紫外线照射等方式将氧气转化为臭氧，导致其制备成本居高不下。此外，臭氧在水中的溶解度较低，且半衰期较短，为了确保其与污染物充分接触并发生反应，需要专门设计高效的接触反应装置和精准的投加方式，这无疑增加了技术应用的复杂性和设备投资成本。

### 3. 高锰酸钾氧化法

高锰酸钾是一种紫黑色晶体，作为强氧化剂，它在酸性、中性和碱性等不同环境条件下均能发挥氧化作用，但氧化能力和反应产物会有所差异。在酸性环境中，高锰酸钾的氧化能力最强，反应后锰元素通常被还原为二价锰离子；而在中性和碱性环境下，锰元素主要被还原为二氧化锰沉淀。凭借这种独特的氧化特性，高锰酸钾能够对水中的有机物、氨氮、铁锰离子等多种污染物发起有效“进攻”。

在地下水除铁除锰处理中，高锰酸钾氧化法是一种常用且高效的技术手段。当地下水中含有铁锰离子时，投加适量的高锰酸钾后，铁锰离子会被迅速氧化，分别生成不溶性的氢氧化铁和二氧化锰沉淀。某地下水处理厂采用该方法，在每

升地下水中投放 1~2mg 高锰酸钾，经过沉淀、过滤等后续处理工序后，出水的铁锰含量均远低于国家饮用水标准，成功解决了地下水铁锰超标的问题，保障了居民的饮用水安全。在处理含酚废水时，高锰酸钾同样展现出良好的处理效果。在适宜的反应条件下，通过合理控制高锰酸钾的投加量和反应时间，酚类物质的去除率可达 70%~80%，有效降低了废水的毒性和污染程度。然而，高锰酸钾氧化法在应用过程中也存在一些局限性。一方面，反应过程中会产生一定量的锰泥，这些锰泥若处理不当，会对环境造成二次污染，因此需要配套完善的污泥处理设施；另一方面，高锰酸钾的投加量必须严格精准控制，过量投加不仅会增加处理成本，还可能导致出水颜色发黄，影响水质外观和后续处理。

## 二、高级氧化技术原理与特点

### （一）基本原理

高级氧化技术以产生具有超强氧化能力的羟基自由基为核心，致力于将水中顽固的有机污染物彻底分解为二氧化碳和水，从根本上消除污染物的危害。羟基自由基具有极高的氧化还原电位，其氧化能力几乎可以与所有类型的有机物发生快速反应，且反应过程不依赖于有机物的特定结构和官能团，能够实现对各类有机污染物的无差别氧化分解。目前，产生羟基自由基的方法丰富多样，其中光催化氧化、芬顿氧化、臭氧—过氧化氢联合氧化、电化学氧化等是较为常见且应用广泛的技术路径。以芬顿氧化技术为例，它巧妙地利用亚铁离子和过氧化氢之间的化学反应来生成羟基自由基。在反应过程中，亚铁离子与过氧化氢发生反应，生成羟基自由基和三价铁离子，生成的羟基自由基随即对水中的有机物展开“攻击”，将其氧化分解。与此同时，在一定条件下，三价铁离子又可以被还原为亚铁离子，重新参与反应，形成一个循环的化学反应过程，持续产生羟基自由基，从而保证了氧化反应的持续进行。光催化氧化技术则是借助半导体催化剂的独特性质来实现羟基自由基的产生。在光照条件下，半导体催化剂（如二氧化钛）吸收光子能量，其内部的电子被激发，产生电子—空穴对。其中，空穴具有极强的氧化性，能够将吸附在催化剂表面的水分子或氢氧根离子氧化，进而生成羟基自由基，实现对有机物的降解。

## （二）主要特点

### 1. 氧化能力强

高级氧化技术产生的羟基自由基堪称“氧化先锋”，其强大的氧化能力能够轻松攻克传统化学氧化技术难以降解的有机污染物“堡垒”。诸如多环芳烃、农药残留、抗生素等顽固污染物，在羟基自由基的作用下，分子结构会被迅速破坏，最终被彻底分解。相关研究数据显示，在采用芬顿氧化技术处理含多环芳烃的工业废水时，在适宜的反应条件下，多环芳烃的去除率能够稳定超过 95%，充分彰显了高级氧化技术在处理难降解污染物方面的卓越能力。

### 2. 反应速度快

羟基自由基与有机物之间的反应犹如“闪电战”，其反应速率常数通常处于  $10^6 \sim 10^{10} \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$  的超高区间，这意味着反应能够在极短的时间内迅速完成。以臭氧—过氧化氢联合氧化技术处理染料废水为例，在实际工程应用中，仅需 30 分钟，废水的色度和化学需氧量就能得到显著降低，有效提升了废水处理的效率。

### 3. 无选择性

羟基自由基具有“广域攻击”特性，无论有机物的结构和类型如何复杂多样，它都能与之发生反应。这种无选择性的氧化特性，使得高级氧化技术在面对成分复杂、污染物种类繁多的工业废水和受污染水体时，能够同时对多种不同类型的有机污染物发起“总攻”，实现高效处理。在处理化工园区排放的综合废水中，高级氧化技术能够同时去除其中的醇类、酯类、酚类等多种有机污染物，展现出强大的适应性和处理能力。

### 4. 环境友好

从环保角度来看，高级氧化技术具有显著优势，其最终反应产物仅为二氧化碳、水和无机盐，不会产生新的污染物，真正实现了污染物的无害化处理。以光催化氧化技术为例，该技术主要消耗光能和少量的催化剂，在整个反应过程中不产生任何有害副产物，对环境十分友好。不过，部分高级氧化技术在实际运行过程中，如芬顿氧化技术，需要使用亚铁离子和过氧化氢等化学药剂，因此需要对药剂的合理使用和妥善处理进行科学规划，以避免可能产生的环境影响。

### 三、典型工程应用案例

#### （一）氯氧化法处理医院污水工程

医院污水中含有大量病原体、药物残留及放射性物质，处理不当易引发公共卫生风险。某三甲医院采用以氯氧化法为核心的处理工艺，在污水预处理阶段，通过格栅和沉砂池去除大颗粒杂质后，进入接触氧化池。在接触氧化池中，采用二氧化氯作为氧化剂，利用其强氧化性杀灭污水中的细菌、病毒等微生物。

该医院每日处理污水量达  $500\text{m}^3$ ，二氧化氯投加量控制在每升  $15\sim 20\text{mg}$ 。经检测，处理后的污水中粪大肠菌群数从每升  $10^6$  个以上降至每升 100 个以下，肠道致病菌、结核分枝杆菌等病原体几乎全部被灭活。同时，二氧化氯对污水中的抗生素残留、消毒副产物等有机污染物也有一定的氧化去除效果，化学需氧量去除率达到  $30\%\sim 40\%$ 。该工程还配备了完善的尾气处理装置，对反应过程中可能产生的少量有害气体进行收集处理，避免二次污染。

#### （二）臭氧—活性炭联合工艺净化饮用水工程

某城市饮用水水源受到微量有机污染物和藻类代谢产物污染，导致出厂水出现异味和色度超标问题。为解决这一难题，水厂采用臭氧—活性炭联合工艺进行深度净化。原水首先进入臭氧接触池，臭氧以每升  $3\sim 5\text{mg}$  的投加量与水充分接触反应，氧化分解水中的大分子有机物和藻类代谢产物，使这些物质转化为小分子，降低其在水中的含量和活性。经过臭氧氧化后的水进入活性炭吸附池，利用活性炭巨大的比表面积和丰富的孔隙结构，进一步吸附水中残留的小分子有机物、异味物质以及臭氧氧化过程中产生的中间产物。运行数据显示，该工艺使出厂水的色度从 15 度降至 5 度以下，嗅阈值从 3 级降至 1 级，有机物含量大幅降低，其中耗氧量从每升  $5\text{mg}$  降至每升  $2\text{mg}$  以下，有效提升了饮用水的感官品质和化学安全性。该工程已稳定运行多年，为百万居民提供了优质的饮用水。

#### （三）芬顿氧化处理印染废水工程

某印染企业排放的废水中含有大量难以生物降解的偶氮染料、表面活性剂等有机污染物，化学需氧量高达  $2000\text{mg/L}$ ，传统生物处理工艺难以达标。企业引入芬顿氧化工艺作为预处理手段，在芬顿反应池中，按照亚铁离子与过氧化氢质量比  $1 : 3\sim 1 : 5$  的比例投加药剂，控制反应 pH 值在  $3\sim 5$  之间，反应时间为  $1\sim 1.5$  小时。经过芬顿氧化处理后，废水中的大分子染料分子被羟基自由基氧化

分解，废水的色度去除率达到 95% 以上，化学需氧量去除率达到 50%~60%，显著改善了废水的可生化性。后续与生物处理工艺相结合，最终使出水化学需氧量降至每升 80mg 以下，达到国家排放标准。该工程还通过对芬顿反应后产生的铁泥进行回收处理，提取其中的铁元素用于制备铁盐絮凝剂，实现了资源的循环利用，降低了处理成本。

## 四、工艺优化措施

### （一）氧化剂协同作用优化

单一氧化剂在处理复杂污染物时往往存在局限性，通过氧化剂协同作用可显著提升处理效果。例如，在处理含有多种有机污染物和重金属离子的电镀混合废水时，采用臭氧与二氧化氯协同氧化。臭氧先将大分子有机物氧化为小分子，同时使部分重金属离子转化为高价态，增强其稳定性；二氧化氯则进一步氧化剩余的有机污染物，并对水中的细菌、病毒等微生物进行杀灭。实验数据表明，与单独使用臭氧或二氧化氯相比，协同氧化使废水中化学需氧量去除率提高 20%~30%，重金属离子的去除率也有所提升。此外，在芬顿氧化工艺中，引入过硫酸盐作为辅助氧化剂，与过氧化氢协同作用，可产生更多的羟基自由基，提高对难降解有机物的氧化效率，使处理效果提升 15%~20%。

### （二）反应条件精细化调控

反应条件对化学氧化和高级氧化技术的处理效果有着关键影响。通过在线监测设备实时监测反应体系的 pH 值、温度、氧化还原电位等参数，并利用自动化控制系统进行精细化调控。例如，在芬顿氧化反应中，通过 pH 在线传感器实时监测反应液的酸碱度，当 pH 值偏离最佳范围（3~5）时，自动投加硫酸或氢氧化钠进行调节。温度控制方面，采用恒温反应装置，将反应温度控制在 25℃~35℃，以保证羟基自由基的产生速率和反应速率。同时，优化反应时间，通过实验确定不同污染物的最佳反应时长，避免反应时间不足导致处理不彻底，或反应时间过长造成药剂浪费和成本增加。某化工废水处理厂通过上述精细化调控措施，使化学氧化处理效率提高 30%，药剂消耗降低 20%。

### （三）催化剂研发与应用

催化剂在高级氧化技术中发挥着重要作用，新型高效催化剂的研发成为工艺优化的重要方向。在光催化氧化技术中，通过对二氧化钛催化剂进行改性，如

掺杂金属离子（银、铁等）或非金属元素（氮、碳等），提高其对可见光的响应能力和光催化活性。实验表明，掺杂银的二氧化钛催化剂在可见光照射下，对有机污染物的降解效率比未改性催化剂提高 50% 以上。在芬顿氧化技术中，开发非均相催化剂替代传统的亚铁离子。如利用磁性纳米铁基材料作为催化剂，其具有易于分离回收、重复利用率高的特点，且能有效降低反应体系的酸碱度要求，扩大适用范围。某制药废水处理项目采用非均相芬顿催化剂后，处理成本降低 40%，处理效果显著提升。

## 五、面临的挑战与发展趋势

### （一）主要挑战

#### 1. 处理成本较高

化学氧化与高级氧化技术的高成本问题，已成为制约其广泛应用的关键瓶颈。以臭氧氧化技术为例，臭氧的制备需依赖高压放电或紫外线照射设备，每制备 1 千克臭氧的电耗高达 15~20kW 时。若以工业用电均价 0.8 元 /kW · h 计算，仅臭氧制备的电费成本就达到 12~16 元。某中型印染厂每日处理废水 1000t，采用臭氧氧化工艺进行深度处理，每月仅臭氧制备的电费支出就超过 4 万元。此外，臭氧发生器设备初期投资成本也十分高昂，一套处理规模为 1000 吨 / 天的臭氧发生系统，设备采购及安装费用可达 200~300 万元。芬顿氧化技术同样面临高昂的药剂成本压力。在实际应用中，亚铁离子和过氧化氢的药剂费用占处理成本的 60%~70%。某制药企业处理高浓度有机废水时，每处理 1t 废水需消耗亚铁离子 5~8kg、过氧化氢 3~5kg，按照当前市场价格，药剂成本约为 30~50 元 /t。对于年废水产生量在 10 万吨左右的中小企业而言，仅芬顿氧化工艺的药剂费用每年就高达 300—500 万元，这还未包括设备投资、能耗及人工成本。除了药剂和能耗成本，部分技术还涉及高额的设备维护费用。如电化学氧化技术中，电极材料在长期使用过程中会发生损耗，需要定期更换，这进一步增加了运行成本。对于利润微薄的中小企业，难以承受如此高昂的处理成本，导致部分企业选择违规排放或采用低效处理方式，从而加剧了环境污染问题。

#### 2. 二次污染风险

化学氧化过程中的二次污染问题日益凸显，严重威胁生态环境安全。氯氧化法在消毒和氧化有机物时，极易产生卤代烃等有毒有害副产物。研究表明，当水

中存在腐殖质等天然有机物时，氯气消毒会生成三氯甲烷、四氯化碳等三卤甲烷类物质。某自来水厂曾因原水有机物含量较高，采用氯气消毒后，出厂水中三氯甲烷含量超标 3 倍，导致周边居民出现轻微头晕、恶心等不适症状。这些卤代烃不仅具有致癌、致畸、致突变性，还具有较强的生物累积性，可通过食物链传递，对生态系统和人体健康造成长期危害。

芬顿氧化反应后产生的大量铁泥处理也是一大难题。每处理 1t 废水，芬顿氧化工艺大约会产生 50~100kg 铁泥。这些铁泥中不仅含有大量的铁氧化物，还吸附了多种重金属和有机污染物。某电镀厂在采用芬顿氧化处理含重金属废水后，因铁泥未得到妥善处置，导致周边土壤中铬、镍等重金属含量超标 10~20 倍，土壤生态系统遭到严重破坏。此外，一些新型高级氧化技术中使用的催化剂，如负载重金属的纳米材料，在使用过程中可能会溶出重金属离子，污染水体。某光催化氧化处理项目，因催化剂溶出少量银离子，导致受纳水体中鱼类出现鳃部病变等中毒症状。

### 3. 处理效率与选择性矛盾

高级氧化技术产生的羟基自由基虽然氧化能力极强，但缺乏选择性的特性，使其在处理复杂水体时面临效率与成本的双重困境。在处理含有多种污染物的工业废水中，羟基自由基不仅会与目标污染物反应，还会与水中的溶解性有机物、氯离子等非目标物质发生反应。例如，在处理化工园区综合废水时，水中的大量氯离子会与羟基自由基反应生成次氯酸根，消耗大量的羟基自由基，导致对目标有机污染物的氧化效率降低 30%~50%。同时，由于缺乏选择性，为了达到理想的处理效果，往往需要投加过量的氧化剂或延长反应时间，这进一步增加了处理成本。某印染废水处理厂在采用芬顿氧化工艺时，为了去除废水中的多种染料，将过氧化氢投加量提高至理论值的 2 倍，但处理效率仅提升了 15%，而药剂成本却大幅增加。此外，非选择性氧化还可能产生一些难以降解的中间产物，增加后续处理难度。

## （二）发展趋势

### 1. 新型绿色氧化剂研发

新型绿色氧化剂的研发成为解决传统技术弊端的重要方向。生物酶作为一种新型氧化剂，凭借催化效率高、反应条件温和、环境友好等优势，受到广泛关注。以漆酶为例，其在温和的常温、近中性 pH 条件下，就能高效催化氧化酚类、芳

香胺类等有机污染物。某造纸厂采用漆酶处理含酚废水,在酶投加量为 50U/L 时,酚类物质去除率可达 90% 以上,且反应过程中无需添加化学药剂,不会产生二次污染。金属有机框架材料(MOFs)因其独特的多孔结构和可调控的化学性质,成为可循环利用氧化剂的研究热点。研究人员通过对 MOFs 材料进行功能化改性,使其具有氧化催化活性。如铁基 MOFs 材料在催化降解有机污染物后,可通过简单的加热或化学还原方法再生,重复使用次数可达 10 次以上,且催化效率无明显下降。此外,一些天然植物提取物,如单宁酸、茶多酚等,也被发现具有一定的氧化能力,有望开发为新型绿色氧化剂。

## 2. 多技术协同创新

化学氧化与高级氧化技术与其他水处理技术的协同创新,正成为提升处理效果的重要途径。与膜分离技术结合形成的氧化—膜过滤联合工艺,能够有效克服单一技术的局限性。在处理含油废水时,先通过臭氧氧化将大分子油类物质分解为小分子,再利用超滤膜截留氧化过程中产生的悬浮物和小分子油滴,可使出水含油量从 50mg/L 降至 1mg/L 以下,达到回用水标准。与生物处理技术协同,可充分发挥氧化技术改善可生化性和生物处理深度净化的优势。某工业园区采用“臭氧氧化—生物活性炭”联合工艺处理高浓度有机废水,臭氧氧化阶段将废水中的大分子有机物分解为小分子,使废水的 BOD<sub>5</sub>/COD 比值从 0.2 提升至 0.4,显著改善了可生化性。后续生物活性炭处理阶段,利用活性炭表面的生物膜进一步降解有机物,最终使废水化学需氧量去除率达到 92% 以上,出水水质稳定达标。此外,与吸附技术结合,先通过吸附去除部分污染物,再利用氧化技术降解残留污染物,也能提高处理效率和降低成本。

## 3. 智能化与精准化控制

物联网、大数据和人工智能技术的融合,推动化学氧化与高级氧化处理过程向智能化、精准化方向发展。通过在处理系统中部署 pH 传感器、氧化还原电位传感器、在线 COD 检测仪等多种在线监测设备,可实时获取水质的多项关键参数。某污水处理厂建立的智能监测网络,每 5 分钟就能完成一次水质数据采集,实现对处理过程的动态监测。人工智能算法在数据分析和工艺优化中发挥核心作用。基于机器学习的预测模型,能够根据历史水质数据、处理工艺参数和环境因素,提前数小时预测水质变化趋势。例如,当预测到进水污染物浓度升高时,系统可

自动调整氧化剂投加量和反应时间，确保处理效果稳定。智能控制系统还能通过优化投加策略，实现药剂的精准投加。某印染废水处理厂引入智能控制系统后，过氧化氢投加量减少 28%，处理效率提高 32%，同时降低了污泥产生量。此外，数字孪生技术的应用，可构建虚拟处理系统，模拟不同工况下的处理效果，为工艺优化和故障诊断提供有力支持。



## 第五章 生物性水资源保护技术

### 第一节 人工湿地与生态浮岛技术

在水资源保护领域，生物性技术凭借其环境友好、成本效益高以及可持续性强等显著优势，成为当前研究和应用的热点方向。人工湿地与生态浮岛技术作为生物性水资源保护技术的重要组成部分，通过模拟自然生态系统，利用植物、微生物和基质的协同作用，实现对水体污染物的有效去除和水质改善。这两种技术不仅能够处理城市生活污水、工业废水和农业面源污染，还能在景观营造、生态修复和生物多样性保护等方面发挥重要作用，为解决全球性水环境污染问题提供了绿色、可持续的解决方案。

#### 一、人工湿地技术原理与分类

##### （一）基本原理

人工湿地是一种人为设计和建造的生态系统，它通过模拟自然湿地的结构和功能，将物理、化学和生物过程相结合，实现对污水的净化处理。其核心原理在于利用湿地植物、微生物和基质组成的复合生态系统，通过吸附、过滤、沉淀、植物吸收、微生物分解等多种作用，去除污水中的有机物、氮、磷、重金属等污染物。在人工湿地中，基质作为湿地系统的重要组成部分，不仅为植物和微生物提供生长载体，还能通过物理过滤和吸附作用去除污水中的悬浮物和部分污染物。常见的基质材料包括砾石、沙子、沸石、炉渣等，不同基质的孔隙结构、比表面积和化学性质各异，对污染物的去除效果也有所不同。例如，沸石具有丰富的孔隙结构和离子交换性能，对氨氮具有良好的吸附去除效果；炉渣则因含有多种金属氧化物，对重金属离子有一定的吸附和沉淀作用。湿地植物在人工湿地系统中发挥着关键作用。一方面，植物通过根系吸收污水中的氮、磷等营养物质，用于自身生长发育，从而降低水体中的营养盐浓度，减少水体富营养化风险。如芦苇、香蒲等挺水植物，对氮、磷的吸收能力较强，在生长旺季，每公顷芦苇每年可吸

收氮 150~200kg、磷 20~30kg。另一方面,植物根系向周围环境分泌的氧气和有机物质,为微生物的生长和代谢创造了适宜的微环境。根系周围形成的好氧—缺氧—厌氧微环境,有利于不同类型微生物的生存和繁殖,促进有机物的分解和氮的转化。<sup>①</sup>微生物是人工湿地系统中污染物降解的主要执行者。好氧微生物在有氧条件下,将污水中的有机物分解为二氧化碳和水;厌氧微生物则在缺氧或无氧条件下,进行反硝化作用,将硝态氮转化为氮气排放到大气中,实现氮的去除。此外,一些微生物还能通过代谢活动将重金属离子转化为沉淀或低毒形态,降低重金属的毒性。

## (二) 人工湿地分类

### 1. 表面流人工湿地

表面流人工湿地是最接近自然湿地的一种类型,污水在湿地表面缓慢流动,水深一般为 0.3~0.5m。这种湿地系统中,污水与空气接触面积大,氧气供应充足,有利于好氧微生物的生长和有机物的好氧分解。湿地植物通常选择芦苇、香蒲等挺水植物,它们生长在湿地表面,形成茂密的植物群落。

表面流人工湿地具有建设成本低、操作简单等优点,适合处理水量较大、污染物浓度较低的污水,如城市二级出水的深度处理、农村生活污水的初步处理等。某农村地区建设的表面流人工湿地,处理规模为每天 500t,用于处理周边村庄的生活污水。经过该湿地处理后,污水的化学需氧量(COD)从 150mg/L 降至 50mg/L 以下,氨氮从 30mg/L 降至 10mg/L 以下,处理效果显著。然而,表面流人工湿地也存在占地面积大、易受气候影响、冬季处理效果下降等缺点,且污水直接暴露在表面,可能会产生异味,影响周边环境。

### 2. 潜流人工湿地

潜流人工湿地又可分为水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地。水平潜流人工湿地中,污水在湿地表面以下的基质层中水平流动,植物根系和微生物主要分布在基质层内。这种湿地系统的优点是污水不直接暴露在表面,减少了异味散发和蚊虫滋生,同时受气候影响较小,冬季也能保持相对稳定的处理效果。某工业园区建设的水平潜流人工湿地,用于处理工业废水,经过处理后,废水中的 COD 去除率达到 70%~80%,重金属离子去除率达到 60%~70%。

---

① 李小康. 人工湿地环境效益绩效评价体系构建与应用研究 [D]. 山东大学, 2023.

垂直潜流人工湿地中,污水从湿地表面垂直向下或向上流动,通过与基质、植物根系和微生物充分接触,实现污染物的去除。该湿地系统具有水力停留时间短、处理效率高的特点,尤其适合处理氮、磷含量较高的污水。在处理生活污水时,垂直潜流人工湿地对氨氮的去除率可达 80%~90%,对总磷的去除率可达 70%~80%。但垂直潜流人工湿地的建设成本相对较高,且容易出现堵塞问题,需要定期维护。

### 3. 复合人工湿地

复合人工湿地是将两种或两种以上不同类型的人工湿地组合在一起,充分发挥各自的优点,提高污水的处理效果。常见的复合人工湿地组合方式有表面流—潜流人工湿地组合、水平潜流—垂直潜流人工湿地组合等。某城市污水处理厂采用表面流—水平潜流人工湿地组合工艺对二级出水进行深度处理。首先,污水进入表面流人工湿地进行初步处理,去除部分悬浮物和有机物;然后,污水流入水平潜流人工湿地,进一步去除氮、磷等营养物质和剩余有机物。经过该复合人工湿地处理后,出水的 COD、氨氮、总磷等指标均达到国家一级 A 排放标准,可作为景观用水回用。复合人工湿地通过合理的组合设计,能够优化处理流程,提高系统的稳定性和适应性,但也存在占地面积较大、建设和管理成本较高的问题。

## 二、生态浮岛技术原理与特点

### (一) 基本原理

生态浮岛技术是一种将水生植物种植在浮体上,使其漂浮在水面上的生态修复技术。该技术的原理主要基于植物的吸收、吸附作用,微生物的分解作用以及物理的遮光、抑制藻类生长等作用,实现对水体污染物的去除和水质的改善。浮岛上种植的水生植物通过根系吸收水体中的氮、磷等营养物质,减少水体中的营养盐含量,从而抑制藻类的过度生长,防止水体富营养化。同时,植物根系表面附着的微生物形成生物膜,微生物在生物膜内进行新陈代谢活动,将水中的有机物分解为二氧化碳和水,进一步净化水质。此外,生态浮岛还能通过遮挡阳光,降低水体温度,减少藻类的光合作用,从而抑制藻类的繁殖。研究表明,生态浮岛覆盖面积达到水体面积的 30%~50% 时,对藻类的抑制效果最为明显,可使藻类生物量减少 50%~70%。

## （二）主要特点

### 1. 生态友好

生态浮岛技术主要利用植物和微生物的自然净化能力，不使用化学药剂，不会对水体造成二次污染。浮岛上种植的水生植物还能水生动物提供栖息地和食物来源，促进水体生态系统的生物多样性恢复。在某湖泊生态修复工程中，设置生态浮岛后，湖泊中的鱼类、鸟类等生物种类明显增加，生态系统逐渐恢复平衡。

### 2. 灵活便捷

生态浮岛可根据水体的大小、形状和污染程度进行灵活设计和布局，安装和拆卸方便，能够快速投入使用。对于一些临时性的水质改善需求或应急处理场景，生态浮岛具有很强的适应性。此外，生态浮岛还可以通过移动位置，对不同区域的水体进行针对性处理。

### 3. 景观效果好

生态浮岛上种植的各种水生植物，如睡莲、鸢尾、千屈菜等，具有较高的观赏价值，能够美化水体景观。在城市景观水体中，生态浮岛不仅可以净化水质，还能营造出优美的水景，提升城市的生态环境品质。某城市公园的景观湖设置生态浮岛后，吸引了大量游客前来观赏，成为公园的一大亮点。

### 4. 处理效率相对较低

与一些物理化学处理技术相比，生态浮岛技术的处理效率相对较低，处理周期较长，难以在短时间内对高浓度污染水体进行快速净化。因此，该技术更适合处理污染程度较轻、水量较小的水体，或作为其他处理技术的辅助手段。

## 三、典型工程应用案例

### （一）某北方农村人工湿地处理生活污水工程

北方某村庄常住人口约 1200 人，每日产生生活污水约 180t。由于村庄地处偏远，缺乏完善的污水管网和集中处理设施，过去生活污水多为随意排放，导致周边沟渠黑臭，水体富营养化严重，蚊虫滋生。为解决这一问题，该村采用垂直潜流人工湿地技术进行生活污水治理。在人工湿地设计上，选用沸石、砾石和火山岩按特定比例混合作为基质，其中沸石占比 40%，充分利用其优异的氨氮吸附性能；砾石和火山岩则提供良好的孔隙结构，保障污水的顺畅流通。湿地植物选择芦苇、菖蒲和水葱，三种植物按 1 : 1 : 1 的比例间隔种植，形成错落有致的

植物群落。芦苇根系发达，能够有效吸收污水中的氮、磷；菖蒲和水葱对有机物降解有较好促进作用，且冬季枯萎后可为微生物提供碳源。该人工湿地系统设置了预处理单元，包括格栅和沉砂池，用于去除污水中的大颗粒杂质和砂粒，降低后续湿地处理负荷。运行数据显示，经过处理后，污水的化学需氧量（COD）从初始的 180mg/L 降至 40mg/L 以下，氨氮从 45mg/L 降至 8mg/L 以下，总磷从 5mg/L 降至 0.8mg/L 以下，出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准。此外，人工湿地还吸引了多种鸟类和昆虫栖息，成为村庄的生态景观节点。

## （二）南方工业园区复合人工湿地处理工业废水工程

南方某工业园区以电子、电镀企业为主，每日产生工业废水约 2000t，废水中含有重金属离子（铜、镍、锌等）、氰化物以及有机污染物，水质复杂且污染浓度高。为实现废水达标排放和资源化利用，园区建设了“表面流人工湿地—水平潜流人工湿地—垂直潜流人工湿地”三级复合人工湿地处理系统。表面流人工湿地作为预处理单元，种植宽叶香蒲和水烛，水深控制在 0.4m，通过植物的拦截和初步吸附作用，去除部分悬浮物和有机物，同时对废水进行均匀布水。水平潜流人工湿地选用炉渣和石灰石作为基质，炉渣对重金属离子有吸附沉淀作用，石灰石可调节废水 pH 值。湿地内种植风车草和再力花，通过植物根系分泌物促进微生物对氰化物的降解。垂直潜流人工湿地采用沸石和陶粒基质，重点去除剩余的氨氮和磷元素，种植美人蕉和梭鱼草。

经过该复合人工湿地处理后，废水中重金属离子的去除率均超过 90%，氰化物去除率达到 95% 以上，COD 从 1200mg/L 降至 120mg/L 以下，实现了稳定达标排放。处理后的部分出水回用于园区绿化灌溉和道路冲洗，每年节约水资源约 30 万吨，产生了显著的经济效益和环境效益。

## （三）城市景观湖生态浮岛水质净化工程

某城市景观湖面积约 15 万平方米，由于周边居民生活污水渗漏、雨水径流带来的面源污染，以及湖内鱼类养殖等因素，导致湖水富营养化严重，夏季蓝藻频繁爆发，水体透明度低，景观效果差。为改善水质和景观，在景观湖内布置了总面积达 3000 平方米的生态浮岛。浮岛框架采用高强度聚乙烯材料制成，具有耐腐蚀、抗老化的特点，浮岛内部填充可降解的环保型泡沫材料作为浮力支撑。植物选择上，以观赏性和净化能力兼具的水生植物为主，包括睡莲、鸢尾、水生

美人蕉和香菇草。睡莲叶片宽大，能有效遮挡阳光，抑制藻类生长；鸢尾和水生美人蕉对氮、磷的吸收能力强；香菇草根系发达，可吸附水中的悬浮物。经过一个生长季（约6个月）的运行，景观湖的水质得到明显改善。水体透明度从最初的20cm提升至50cm，总氮浓度从3.5mg/L降至1.2mg/L，总磷浓度从0.3mg/L降至0.1mg/L，蓝藻暴发频率显著降低。同时，生态浮岛成为鸟类和鱼类的栖息地，丰富了景观湖的生物多样性，吸引大量市民前来观赏休闲，提升了城市的生态品质。

## 四、工艺优化措施

### （一）植物筛选与搭配优化

科学合理的植物筛选与搭配是提升人工湿地和生态浮岛处理效果的关键。在人工湿地植物选择上，除了考虑植物对污染物的去除能力，还需结合当地气候条件、污水水质特点以及植物的生长特性。例如，在寒冷地区，优先选择耐寒性强的植物，如西伯利亚鸢尾、芦苇等，确保冬季湿地系统的正常运行。针对含重金属的工业废水，可种植蜈蚣草、东南景天等超积累植物，这些植物能将重金属富集在体内，实现污染物的有效去除。在生态浮岛植物搭配方面，采用“高低错落、功能互补”的原则。将挺水植物、浮叶植物和沉水植物相结合，形成立体植物群落。上层种植鸢尾、千屈菜等挺水植物，中层搭配睡莲、荇菜等浮叶植物，下层种植苦草、狐尾藻等沉水植物。这种搭配方式不仅能充分利用水体空间，提高对污染物的去除效率，还能增强景观的层次感和观赏性。

### （二）基质改良与优化

基质性能直接影响人工湿地的处理效果，通过基质改良可提升其对污染物的去除能力。一种常见的改良方法是将不同基质按一定比例混合，发挥各自优势。例如，将具有良好吸附性能的膨润土与透气性好的陶粒混合，用于处理含重金属和有机物的污水，可使重金属去除率提高20%~30%，有机物去除率提高15%~20%。对基质进行表面改性也是优化的重要手段。通过在基质表面负载铁氧化物、活性炭等材料，可增加基质的吸附位点和催化活性。研究表明，负载氧化铁的沸石基质对氨氮的吸附容量比未改性沸石提高了40%，且能促进氨氮的硝化一反硝化过程，增强脱氮效果。此外，定期对基质进行清洗和更换，可防止基质堵塞，维持人工湿地的长期稳定运行。

### （三）运行参数调控优化

合理调控人工湿地和生态浮岛的运行参数，能有效提高处理效率。在人工湿地水力负荷控制方面，根据污水水质和湿地类型确定合适的水力停留时间。对于表面流人工湿地，水力停留时间一般控制在 2~5 天；水平潜流人工湿地为 1~3 天；垂直潜流人工湿地为 0.5~1.5 天。通过调节进水流量和湿地水位，确保污水在湿地内充分与植物、基质和微生物接触。生态浮岛运行过程中，需根据水质变化和植物生长状况，适时调整浮岛的覆盖面积。当水体富营养化严重时，可增加浮岛覆盖面积至水体的 50%；随着水质改善，逐步减少浮岛面积，维持生态系统的平衡。此外，定期对浮岛上的植物进行修剪和收割，避免植物过度生长影响水体光照和溶解氧含量，同时将收割的植物进行资源化利用，如制作堆肥。

## 五、面临的挑战与发展趋势

### （一）主要挑战

#### 1. 低温运行效果不佳

在我国北方地区以及高纬度国家，冬季漫长且气温极低，人工湿地和生态浮岛技术面临着严峻的低温考验。以东北地区为例，冬季平均气温可达  $-20^{\circ}\text{C}$  ~  $-30^{\circ}\text{C}$ ，极端低温甚至能突破  $-40^{\circ}\text{C}$ 。在如此严寒的环境下，人工湿地中的水生植物如芦苇、香蒲等，其地上部分会迅速枯萎，根系活力大幅下降，对污水中氮、磷等污染物的吸收能力几乎丧失。某位于黑龙江的农村人工湿地工程数据显示，冬季运行期间，湿地植物的氮吸收量较夏季减少了 80% 以上，磷吸收量减少约 75%。微生物作为人工湿地污染物降解的核心力量，其活性受低温影响更为显著。当水温低于  $5^{\circ}\text{C}$  时，好氧微生物的呼吸作用和代谢速率急剧下降，对有机物的分解效率大幅降低；厌氧微生物的反硝化作用也受到抑制，导致人工湿地的脱氮效果严重下滑。据监测，在华北某人工湿地冬季运行时，氨氮去除率从夏季的 85% 骤降至 25%~35%，总氮去除率从 75% 下降至 30%~40%。除了生物活性降低，低温还会引发物理层面的问题。人工湿地的基质孔隙和管道系统容易结冰，导致污水流动受阻，甚至出现堵塞现象。内蒙古某工业园区的人工湿地，曾因冬季管道结冰，致使整个处理系统停运长达两周，造成大量污水无法及时处理。生态浮岛在低温环境下同样面临困境，浮体可能因结冰受损，植物根系易被冻伤，失去净化功能，难以维持水体生态平衡。

## 2. 占地面积大与用地矛盾

人工湿地的处理效率与占地面积紧密相关,通常处理 1t 污水需要 3~10m<sup>2</sup> 的湿地面积。在土地资源日益紧张的城市和工业园区,大规模建设人工湿地面临着巨大的用地矛盾。以一线城市为例,土地价格高昂,每平方米土地的开发成本动辄数万元甚至更高,用于建设人工湿地的土地机会成本极高。在城市更新过程中,原有的工业用地、居住用地等被重新规划用于商业开发、住宅建设等,留给生态基础设施的空间十分有限。上海某中心城区,曾规划建设一座处理规模为 5 万吨/日的人工湿地用于污水深度处理,但因难以找到合适的建设用地,最终不得不放弃该方案。生态浮岛虽然不占用陆地面积,但在小型水体中大量布置也会引发新的问题。在一些城市景观河道和小型湖泊中,浮岛的过度设置会影响水面船只的通航,阻碍水上交通;同时,过多的浮岛可能破坏水体原有的景观协调性,降低水体的美学价值。杭州某景区内的湖泊,因前期大量布置生态浮岛,导致湖面景观杂乱,游客体验下降,后期不得不拆除部分浮岛进行景观重塑。

## 3. 长效维护管理困难

人工湿地和生态浮岛系统的长效稳定运行,依赖于科学规范地维护管理,但目前这方面存在诸多难题。人工湿地运行一段时间后,基质表面会逐渐积累大量的悬浮物、微生物代谢产物等沉积物,这些沉积物会堵塞基质孔隙,降低湿地的水力传导性能,影响污水的处理效果。某南方人工湿地运行 3 年后,因未及时清理基质,导致水力停留时间延长了 50%,污染物去除效率下降约 30%。生态浮岛的维护同样复杂,需要及时更换死亡或生长不良的植物,否则腐烂的植物会释放污染物,造成二次污染。然而,目前对于生态浮岛植物更换和维护的频率、方法等缺乏统一标准,不同工程的维护效果差异较大。此外,湿地植物收割后的处理和资源化利用也是一大难题。收割后的植物往往含有较高浓度的污染物,若处理不当,可能导致污染物重新进入环境;而将其作为堆肥等资源化利用时,又面临着处理工艺复杂、成本较高等问题。在维护管理人才方面,专业人员严重不足。人工湿地和生态浮岛的维护涉及生态学、环境工程学、植物学等多学科知识,需要具备专业技能的人员进行操作。但目前相关专业人才培养体系不完善,企业和地方缺乏专业的维护团队,许多工程只能由非专业人员进行简单管理,难以保障系统的长期稳定运行。

## （二）发展趋势

### 1. 新型功能材料研发与应用

新型功能材料的研发成为提升人工湿地和生态浮岛性能的关键方向。在人工湿地基质材料研发上,纳米复合材料展现出巨大潜力。科研团队开发出的纳米铁—活性炭复合材料,将纳米级铁颗粒负载在活性炭表面,其比表面积是普通活性炭的 3~5 倍,对重金属离子和有机污染物的吸附容量显著提升。实验表明,该材料对铅离子的吸附量可达 200~300mg/g,较传统基质提高了 2~3 倍。生物炭基材料也备受关注,通过将农业废弃物如秸秆、稻壳等进行高温热解制备生物炭,并对其改性处理,可增强对氮、磷等污染物的去除能力。某研究机构利用改性生物炭作为人工湿地基质,在处理生活污水时,总氮去除率提高了 25%,总磷去除率提高了 30%。在生态浮岛浮体材料研发方面,可降解的生物高分子材料成为研究热点。以聚乳酸(PLA)为基础,添加天然纤维制备的复合浮体材料,不仅具有良好的力学性能和浮力,而且在自然环境中可逐步降解,使用周期结束后无需回收处理,减少了对环境的影响。目前,这种材料已在部分小型生态浮岛项目中进行试点应用,效果良好。

### 2. 智能化监测与精准管理

物联网、大数据和人工智能技术的融合,为人工湿地和生态浮岛的管理带来了革命性变革。通过在人工湿地系统中部署大量的传感器,如水质传感器(实时监测 COD、氨氮、总磷等指标)、温度传感器、液位传感器、溶解氧传感器等,可实现对湿地运行状态的全方位实时监测。江苏某大型人工湿地项目,借助传感器网络,每 10 分钟就能完成一次全系统数据采集。利用人工智能算法对采集到的数据进行深度分析和预测,能够提前发现系统运行中的潜在问题,并自动调整运行参数。当系统监测到进水氨氮浓度突然升高时,人工智能系统可根据历史数据和模型预测,自动增加湿地的水力停留时间,同时调整植物灌溉量和微生物菌剂投加量,确保处理效果稳定。远程监控平台的建立,实现了对多个人工湿地和生态浮岛工程的集中管理。管理人员通过手机或电脑,可随时随地查看各工程的运行数据、设备状态等信息,并进行远程操作。浙江某环保公司开发的智能化管理平台,已接入省内 50 余个湿地和浮岛项目,通过统一管理,使维护成本降低了 30%,设备故障响应时间缩短了 70%。

### 3. 多技术协同创新

人工湿地和生态浮岛技术与其他水处理技术的协同创新日益深入。在与膜分离技术结合方面，“人工湿地—膜生物反应器（MBR）”组合工艺成为研究热点。人工湿地先对污水进行初步处理，去除大部分悬浮物和有机物，降低污染物浓度；后续 MBR 工艺则通过膜的高效截留作用，进一步去除残留的微量污染物，实现水资源的高品质回用。北京某再生水厂采用该组合工艺，处理后的出水达到生活杂用水标准，可用于城市绿化灌溉、道路冲洗等，年回用水量达 500 万吨。与微生物强化技术结合，通过投加高效降解菌剂或构建生物膜反应器，可显著提高对难降解有机物的去除能力。在处理制药废水时，向人工湿地中添加专门筛选的降解菌群，可使废水中抗生素类污染物的去除率提高 40%~50%。生态浮岛与光伏技术的结合也展现出独特优势。将太阳能光伏板集成到浮岛结构中，利用太阳能为浮岛的水质监测设备、水循环系统、植物灌溉系统等供电，实现绿色低碳运行。广东某湖泊生态修复项目中，安装光伏装置的生态浮岛，不仅有效降低了运行能耗，还额外产生了部分电能并入电网，实现了经济效益和环境效益的双赢。

## 第二节 微生物修复与生物膜技术

微生物修复与生物膜技术凭借其高效、环保、可持续的特性，成为生物性水资源保护技术的核心组成部分。微生物修复技术利用微生物的代谢活动，将水中的污染物转化为无害物质；生物膜技术则通过微生物在载体表面形成的生物膜，实现对污染物的吸附、降解。这两项技术广泛应用于工业废水处理、受污染水体生态修复、饮用水深度净化等领域，不仅能有效去除水中的有机污染物、氮磷营养盐、重金属等有害物质，还能减少化学药剂的使用，降低二次污染风险，为改善水环境质量、实现水资源可持续利用提供了重要的技术支撑。

### 一、微生物修复技术原理与分类

#### （一）基本原理

微生物修复技术的核心在于利用微生物独特的代谢功能，将水体中的污染物作为营养物质或能量来源，通过分解、转化、固定等方式，降低污染物的毒性和浓度，最终实现污染物的无害化处理。微生物种类繁多，不同的微生物具有不同

的代谢途径，能够适应多种环境条件并降解各类污染物。微生物对有机污染物的降解主要通过好氧呼吸和厌氧呼吸两种方式进行。在好氧条件下，微生物以氧气作为电子受体，将有机污染物彻底氧化分解为二氧化碳和水，并从中获取能量。例如，在处理生活污水中的糖类、蛋白质等有机物时，好氧微生物如假单胞菌、芽孢杆菌等，通过一系列酶促反应，将有机物逐步分解为小分子物质，最终转化为二氧化碳和水。在厌氧条件下，微生物利用硝酸盐、硫酸盐、二氧化碳等作为电子受体，将有机污染物进行不完全氧化或发酵，产生甲烷、氢气等气体和简单的有机酸。如在处理高浓度有机废水的厌氧消化过程中，产酸菌将复杂有机物分解为挥发性脂肪酸，产甲烷菌进一步将脂肪酸转化为甲烷和二氧化碳。对于重金属污染物，微生物主要通过吸附、沉淀、氧化还原等作用降低其毒性和迁移性。一些微生物表面带有负电荷，能够通过静电作用吸附水中的重金属离子；还有部分微生物可以分泌胞外聚合物，与重金属离子形成络合物，从而实现重金属的固定。此外，微生物还能通过氧化还原反应改变重金属的价态，例如，某些细菌可将剧毒的六价铬还原为毒性较低的三价铬，降低其对环境 and 生物的危害。

## （二）微生物修复技术分类

### 1. 原位微生物修复

原位微生物修复是指在不改变受污染水体原有环境条件的前提下，直接向水体中添加营养物质、电子受体或微生物菌剂，激活或强化水体中土著微生物的代谢活性，使其对污染物进行降解和转化。这种修复方式具有操作简便、成本较低、对环境扰动小等优点，适用于污染面积较大、污染程度较轻的水体修复。<sup>①</sup>

在湖泊富营养化治理中，原位微生物修复技术得到广泛应用。当湖泊出现蓝藻暴发、水体富营养化问题时，可向湖水中投加复合微生物菌剂，这些菌剂中包含能够分解藻类有机物的细菌、促进氮磷转化的硝化—反硝化细菌等。同时，添加适量的碳源和电子受体，为微生物提供充足的营养和代谢条件。某湖泊采用原位微生物修复技术后，经过一个生长季的处理，水体中的总氮浓度从 3.5mg/L 降至 1.2mg/L，总磷浓度从 0.3mg/L 降至 0.1mg/L，藻类生物量减少了 60% 以上，水质得到明显改善。然而，原位微生物修复也存在一定的局限性。由于水体环境复杂多变，微生物的生长和代谢容易受到温度、pH 值、溶解氧等因素的影响，

---

① 李轶，雷梦婷，杨楠，等. 河流微生物生态学的研究进展 [J]. 水资源保护，2022，38（1）：190-197.

修复效果可能不稳定。此外，对于污染程度较重、污染物毒性较强的水体，原位修复所需时间较长，难以快速达到预期效果。

## 2. 异位微生物修复

异位微生物修复是将受污染水体抽取到特定的处理设施中，通过人工控制环境条件，如温度、pH 值、溶解氧、营养物质等，为微生物创造更适宜的生长和代谢环境，从而提高污染物的降解效率。常见的异位微生物修复技术包括生物反应器处理、土地处理系统等。

生物反应器是一种高效的异位微生物修复设备，它将微生物与受污染水体在反应器内进行充分混合和反应。根据运行方式的不同，生物反应器可分为悬浮生长型和附着生长型。悬浮生长型生物反应器如活性污泥法，微生物以悬浮状态存在于水体中，通过曝气提供充足的氧气，使微生物与污染物充分接触，实现对有机物的降解。某食品加工厂的废水处理采用活性污泥法生物反应器，经过处理后，废水中的化学需氧量（COD）从 1500mg/L 降至 100mg/L 以下，处理效果显著。附着生长型生物反应器如生物膜反应器，微生物附着在载体表面形成生物膜，废水在反应器内流动时与生物膜接触，污染物被微生物吸附和降解。

土地处理系统是将受污染水体通过沟渠、管道等输送到土地表面，利用土壤中的微生物、植物和土壤颗粒的共同作用进行净化。污水在土壤孔隙中缓慢渗透的过程中，微生物分解有机物，植物吸收氮磷等营养物质，土壤颗粒则起到过滤和吸附作用。某农村地区采用土地处理系统处理生活污水，污水经过土壤层的净化后，水质达到农田灌溉水标准，实现了污水的资源化利用。异位微生物修复的优点是能够精确控制处理条件，处理效率高，处理效果稳定；但该方法需要建设专门的处理设施，投资成本较高，且在污水输送过程中可能存在二次污染风险。

## 3. 植物—微生物联合修复

植物—微生物联合修复是将植物修复与微生物修复相结合的一种新型修复技术。植物通过根系吸收、富集污染物，同时向根系周围分泌有机物质，为微生物提供碳源和能源，促进微生物的生长和代谢。微生物则可以降解植物难以吸收的有机污染物，将大分子有机物分解为小分子物质，便于植物吸收；还能通过改变土壤或水体的理化性质，提高植物对污染物的耐受性和吸收能力。在处理重金属污染水体时，植物—微生物联合修复技术具有独特优势。选择超积累植物如蜈蚣草、东南景天等，它们能够将水体中的重金属离子吸收并积累在体内。同时，在

植物根系周围接种具有重金属抗性和促生作用的微生物，如根际促生菌（PGPR），这些微生物可以分泌植物激素，促进植物根系生长，提高植物对重金属的吸收效率。此外，微生物还能通过代谢活动降低重金属的毒性，如将重金属离子转化为沉淀或络合物，减少其在水体中的迁移性。某重金属污染河流采用植物—微生物联合修复技术，经过两年的修复，水体中重金属浓度降低了 80% 以上，河流生态系统逐渐得到恢复。植物—微生物联合修复技术综合了植物修复和微生物修复的优点，具有修复效果好、环境友好、成本较低等特点，但该技术的应用受植物生长周期和环境条件的限制，修复周期相对较长。

### （三）影响微生物修复的因素

#### 1. 微生物种类和数量

不同种类的微生物对污染物的降解能力和代谢途径不同，选择合适的微生物种类是保证修复效果的关键。例如，降解石油烃的微生物主要有假单胞菌属、芽孢杆菌属等，而降解农药的微生物则包括白腐真菌、根瘤菌等。此外，微生物的数量也直接影响修复效率，足够数量的微生物能够保证对污染物的充分降解。在实际应用中，通常通过添加微生物菌剂或优化环境条件促进微生物的生长繁殖，提高微生物数量。

#### 2. 污染物性质

污染物的种类、浓度、化学结构等性质对微生物修复效果有显著影响。一般来说，小分子、易溶于水的有机物更容易被微生物降解；而大分子、结构复杂的有机物，如多环芳烃、持久性有机污染物等，降解难度较大。污染物浓度过高可能会对微生物产生毒性抑制作用，影响微生物的生长和代谢。例如，当废水中重金属离子浓度超过一定阈值时，会破坏微生物细胞的细胞膜结构，抑制酶的活性，导致微生物死亡。

#### 3. 环境条件

温度、pH 值、溶解氧、营养物质等环境条件对微生物的生长和代谢至关重要。大多数微生物的最适生长温度在 20℃~35℃ 之间，温度过高或过低都会影响微生物的活性。不同微生物对 pH 值的适应范围不同，一般来说，中性环境（pH 值 6.5~7.5）有利于大多数微生物的生长。溶解氧是好氧微生物进行代谢活动的必要条件，充足的溶解氧能够保证好氧微生物对有机物的有效降解；而厌氧微生物则需要无氧或低氧环境下才能正常生长。此外，微生物的生长和代谢需要碳、

氮、磷等营养物质，当水体中营养物质比例失调时，会限制微生物的生长和污染物的降解。

## 二、生物膜技术原理与结构

### （一）生物膜形成机制

生物膜是微生物在固体载体表面附着生长，通过分泌胞外聚合物（EPS）相互粘连，形成的一种具有一定结构和功能的微生物聚集体。生物膜的形成是一个动态的过程，主要包括以下几个阶段：

首先，初期附着阶段，水中的微生物细胞通过布朗运动、水流携带等方式与载体表面接触。在这个阶段，微生物细胞与载体表面之间的相互作用力较弱，主要是范德华力和静电引力。一些表面带有特殊结构或物质的微生物更容易附着在载体表面，如具有菌毛、鞭毛的细菌。其次，进入不可逆附着阶段，随着微生物细胞与载体表面接触时间的延长，微生物开始分泌胞外聚合物，这些聚合物中含有多糖、蛋白质、核酸等物质，能够在微生物细胞与载体表面之间形成化学键，使微生物细胞牢固地附着在载体表面。同时，微生物细胞之间也通过胞外聚合物相互粘连，形成微小的微生物群落。再次，生物膜发展阶段，附着在载体表面的微生物利用周围环境中的营养物质进行生长繁殖，微生物数量不断增加，生物膜逐渐增厚。在这个过程中，生物膜内部会形成复杂的三维结构，包括孔隙、通道等，这些结构有利于营养物质和代谢产物的传输。不同种类的微生物在生物膜中占据不同的位置，形成具有特定功能的微生物层，如好氧层、缺氧层和厌氧层。最后，生物膜成熟与脱落阶段，当生物膜发展到一定厚度后，进入成熟阶段。此时生物膜的结构和功能相对稳定，但由于营养物质和溶解氧的供应限制，生物膜内部的微生物生长速率逐渐减缓。在水流剪切力、微生物自身代谢活动等因素的作用下，部分生物膜会从载体表面脱落，进入水体中。脱落的生物膜细胞一部分会被水流带走，另一部分可能会在新的载体表面重新附着，开始新的生物膜形成过程。

### （二）生物膜结构特点

生物膜具有复杂的三维结构，从外到内一般可分为好氧层、缺氧层和厌氧层。好氧层位于生物膜的最外层，由于直接与水体接触，溶解氧浓度较高，适合好氧微生物生长。好氧微生物在这一层中通过有氧呼吸将水中的有机物分解为二氧化碳和水，同时消耗大量的溶解氧。随着深度的增加，溶解氧逐渐减少，进入缺氧

层。在缺氧层中，溶解氧浓度较低，适合兼性厌氧微生物和部分厌氧微生物生长。这些微生物利用硝酸盐、亚硝酸盐等作为电子受体，进行反硝化作用，将氮素转化为氮气排放到大气中，实现脱氮。生物膜的最内层为厌氧层，这里几乎没有溶解氧，厌氧微生物占据主导地位。厌氧微生物通过发酵、厌氧呼吸等方式分解有机物，产生甲烷、氢气、二氧化碳等气体和有机酸。生物膜中还存在丰富的孔隙和通道结构，这些孔隙和通道的大小和分布不均匀，它们为营养物质、溶解氧和代谢产物的传输提供了通道。较大的孔隙有利于水流的通过和营养物质的扩散，较小的孔隙则为微生物提供了相对稳定的生存环境。此外，生物膜表面的粗糙度和孔隙率也会影响其对污染物的吸附和降解能力。一般来说，表面粗糙度高、孔隙率大的生物膜具有更大的比表面积，能够吸附更多的污染物，同时也有利于微生物与污染物的充分接触，提高降解效率。生物膜中微生物的组成具有多样性，包含细菌、真菌、藻类、原生动物等多种微生物。不同种类的微生物在生物膜中相互协作，形成一个复杂的生态系统。细菌是生物膜中的主要微生物类群，它们承担着大部分有机物降解和氮磷转化的功能。真菌能够分泌胞外酶，分解大分子有机物，如纤维素、木质素等。藻类在光照条件下进行光合作用，产生氧气，为好氧微生物提供溶解氧。原生动物则以细菌、藻类等为食，起到调节微生物群落结构和净化水质的作用。

### 三、典型工程应用案例

#### （一）某石油污染河流原位微生物修复工程

某石油运输管道泄漏，导致周边河流受到严重污染，水体中苯系物、石油烃浓度严重超标，河流水质发黑发臭，水生生物大量死亡，生态系统遭到严重破坏。为恢复河流生态，采用原位微生物修复技术进行治疗。首先对污染河段的土著微生物进行分析，筛选出具有石油烃降解能力的优势菌株，主要包括假单胞菌和芽孢杆菌。同时，向河流中添加氮、磷营养物质，按照  $C : N : P = 100 : 5 : 1$  的比例调节水体营养结构，并通过曝气设备增加水体溶解氧含量，使其维持在  $4 \sim 6 \text{mg/L}$ 。此外，定期投放复合微生物菌剂，补充和强化微生物群落。经过 6 个月的修复，监测数据显示，河流水体中苯系物浓度从初始的  $80 \text{mg/L}$  降至  $5 \text{mg/L}$  以下，石油烃浓度从  $500 \text{mg/L}$  降至  $50 \text{mg/L}$  以下，COD 从  $200 \text{mg/L}$  降至  $60 \text{mg/L}$  以下。河流的黑臭现象消失，水体透明度显著提高，溶解氧恢复到正常水平，水

动植物开始重新生长，鱼类等水生生物逐渐回归，河流生态系统得到初步恢复。

## （二）制药废水异位微生物修复工程

某制药企业排放的废水中含有抗生素、有机溶剂等多种难降解有机污染物，COD 高达 5000mg/L，氨氮浓度为 300mg/L，传统处理工艺难以实现达标排放。企业采用异位微生物修复技术，构建了“厌氧生物反应器—好氧生物反应器—生物膜反应器”组合处理系统。在厌氧生物反应器中，利用厌氧微生物的发酵和水解酸化作用，将大分子有机物分解为小分子物质，提高废水的可生化性。反应器内控制温度在  $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ，pH 值维持在 6.8~7.2，水力停留时间为 24 小时。经过厌氧处理后，废水的 COD 降至 2500mg/L 左右。好氧生物反应器采用活性污泥法，通过曝气提供充足的溶解氧，使好氧微生物对有机物进行进一步降解。控制溶解氧浓度在 2~4mg/L，污泥龄为 15~20 天，经过好氧处理，COD 进一步降至 800mg/L 左右，氨氮去除率达到 60%。最后，废水进入生物膜反应器进行深度处理。生物膜反应器采用新型多孔陶粒作为载体，微生物在载体表面形成丰富的生物膜。在生物膜的作用下，剩余的难降解有机物和氨氮得到有效去除，最终出水 COD 稳定在 50mg/L 以下，氨氮降至 5mg/L 以下，达到国家排放标准。该工程运行稳定，处理效果良好，且污泥产生量较传统工艺减少 30% 以上。

## （三）重金属污染土壤植物—微生物联合修复工程

某矿区周边土壤受到镉、铅等重金属污染，土壤中镉含量超标 10 倍，铅含量超标 8 倍，导致农作物无法正常生长，生态环境受到严重威胁。采用植物—微生物联合修复技术进行治疗。选择超积累植物蜈蚣草和东南景天作为修复植物，同时筛选出对重金属具有抗性和促生作用的根际微生物，包括根瘤菌和解磷菌。在种植植物前，先对土壤进行翻耕和改良，添加有机肥料和微生物菌剂，改善土壤的理化性质和微生物群落结构。在修复过程中，定期对植物进行施肥和灌溉，促进植物生长。同时，监测土壤中重金属的形态和含量变化。经过两年的修复，土壤中镉的含量降低了 60%，铅的含量降低了 50%。植物收获后，对富集重金属的植物进行安全处置，避免二次污染。修复后的土壤逐渐恢复肥力，开始重新种植农作物，生态环境得到有效改善。

## （四）城市污水处理厂生物膜技术应用工程

某城市污水处理厂日处理污水量为 10 万吨，原有的活性污泥法处理系统存在污泥产量大、运行成本高、处理效果不稳定等问题。为提高处理效率和出水水质，

对处理系统进行升级改造,引入生物膜技术,采用生物接触氧化池和曝气生物滤池相结合的处理工艺。生物接触氧化池内安装组合式填料,填料比表面积大,有利于微生物附着生长。污水在池内与生物膜充分接触,有机物被微生物吸附和降解。控制水力停留时间为 2~3 小时,溶解氧浓度在 2~3mg/L。经过生物接触氧化池处理后,污水的 COD 去除率达到 60%~70%。曝气生物滤池采用火山岩作为滤料,滤料表面生长着丰富的生物膜。污水从滤池底部进入,向上流动过程中与生物膜接触,进一步去除剩余的有机物、氨氮和悬浮物。控制气水比为 3 : 1~5 : 1,滤池运行周期为 24~36 小时,定期进行反冲洗,防止生物膜堵塞。经过曝气生物滤池处理后,出水 COD 降至 50mg/L 以下,氨氮降至 5mg/L 以下,悬浮物含量低于 10mg/L,出水水质达到一级 A 排放标准。改造后的处理系统污泥产量减少 40%,运行成本降低 25%,处理效果稳定可靠。

## 四、工艺优化措施

### (一) 微生物菌种筛选与优化

筛选高效降解微生物菌种是提高微生物修复和生物膜技术处理效果的关键。通过从污染现场采集样品,利用富集培养、驯化等手段,筛选出对特定污染物具有高效降解能力的微生物菌株。例如,从长期受多氯联苯污染的土壤中筛选出能够降解多氯联苯的白腐真菌,其降解效率比普通菌株提高 30%~50%。此外,采用基因工程技术对微生物进行改造,提高其降解能力和环境适应性。将编码特定降解酶的基因导入微生物细胞中,使其获得新的代谢功能。研究人员将编码汞还原酶的基因导入大肠杆菌中,使其能够将毒性较高的汞离子还原为金属汞,降低汞的毒性。同时,通过基因调控技术,优化微生物的代谢途径,提高其对污染物的降解效率。

### (二) 运行参数调控优化:

合理调控运行参数是保证微生物修复和生物膜技术稳定高效运行的重要措施。在微生物修复过程中,根据污染物性质和微生物种类,优化营养物质的投加量和比例。对于以有机物降解为主的修复过程,确保碳源充足的同时,合理调节氮、磷等营养元素的比例。控制适宜的温度、pH 值和溶解氧等环境条件。不同微生物对环境条件的要求不同。例如,大多数好氧微生物的最适生长温度为 25℃~30℃,pH 值为 6.5~7.5,溶解氧浓度应保持在 2~4mg/L。通过实时监测和

自动控制系统，精确调节环境参数，为微生物提供最佳的生长和代谢环境。

在生物膜技术中，优化水力负荷、气水比等参数。水力负荷过大，会导致生物膜冲刷严重，微生物流失；水力负荷过小，则会影响污染物与生物膜的接触效率。根据生物膜反应器的类型和处理规模，合理确定水力负荷。例如，生物接触氧化池的水力负荷一般控制在  $1\sim 3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。同时，合理调节气水比，保证生物膜的供氧和传质需求。

### （三）载体材料优化

载体材料的性能直接影响生物膜的形成和处理效果。研发新型高效载体材料是生物膜技术优化的重要方向。新型载体材料应具有比表面积大、孔隙率高、机械强度好、生物相容性强等特点。例如，采用纳米材料改性的高分子载体，其比表面积比传统载体提高 2~3 倍，有利于微生物的附着和生长。对传统载体材料进行表面改性处理，提高其表面活性和吸附性能。通过物理、化学或生物方法在载体表面引入功能基团，增强载体与微生物之间的相互作用。在陶粒表面涂覆一层铁氧化物，能够提高其对氨氮的吸附能力，同时促进硝化细菌的生长。此外，开发可降解载体材料，解决载体废弃后的处理问题，降低对环境的影响。

## 五、面临的挑战与发展趋势

### （一）主要挑战

#### 1. 微生物适应性问题

实际水体环境复杂多变，污染物种类繁多，且可能存在多种抑制微生物生长的因素，如重金属、有毒有机物等。微生物在复杂环境下的适应性和耐受性较差，容易受到环境因素的影响，导致生长缓慢、代谢活性降低，甚至死亡。例如，当水体中重金属浓度过高时，会破坏微生物细胞内的酶系统，抑制微生物的代谢活动，使修复效果大打折扣。

#### 2. 修复效率与周期矛盾

对于一些污染严重、污染物性质复杂的水体或土壤，微生物修复和生物膜技术的修复效率较低，修复周期较长。例如，对于受多氯联苯、二噁英等持久性有机污染物污染的场地，修复周期可能长达数年甚至数十年。这不仅增加了修复成本，也难以满足快速改善环境质量的需求。

### 3. 技术集成与优化难题

单一的微生物修复或生物膜技术往往难以满足复杂污染环境的修复需求，需要与其他技术进行集成和优化。然而，不同技术之间的兼容性、协同性以及工艺参数的优化匹配等问题尚未得到很好解决。例如，在植物—微生物联合修复技术中，如何选择合适的植物和微生物种类，以及如何优化两者之间的相互作用关系，仍然是研究的难点。

### 4. 运行管理难度大

微生物修复和生物膜技术的运行管理需要专业的技术人员和设备，对操作人员的要求较高。目前，相关专业技术人才短缺，运行管理经验不足，导致一些工程运行不稳定，处理效果不理想。此外，微生物修复过程中微生物群落结构和功能的动态监测，以及生物膜反应器中生物膜的生长、更新和脱落等过程的控制，都需要先进的监测和控制技术支持，增加了运行管理的难度。

## （二）发展趋势

### 1. 微生物强化技术创新

未来将加强对高效降解微生物的筛选、培育和改造技术研究。利用基因编辑技术、合成生物学等前沿技术，构建具有更强降解能力和环境适应性的工程菌。同时，研发微生物菌剂的高效制备和保存技术，提高菌剂的稳定性和活性。例如，开发微胶囊包埋技术，将微生物菌剂包裹在微胶囊中，保护微生物免受外界环境的影响，延长菌剂的保存时间和使用寿命。

### 2. 多技术协同修复

微生物修复和生物膜技术将与其他环境修复技术，如物理修复、化学修复、植物修复等进行深度融合，形成多技术协同修复体系。例如，将微生物修复与纳米材料吸附技术相结合，利用纳米材料的高吸附性能快速去除污染物，再通过微生物的代谢活动实现污染物的彻底降解。同时，开发智能化、集成化的修复设备和系统，提高修复效率和自动化水平。

### 3. 原位监测与智能调控

借助物联网、大数据、人工智能等技术，实现对微生物修复和生物膜技术运行过程的实时原位监测和智能调控。在修复现场部署各种传感器，实时监测污染物浓度、微生物活性、环境参数等信息，并通过无线传输技术将数据上传至云端。利用人工智能算法对数据进行分析和预测，自动调整修复工艺参数，实现修复过

程的智能化控制。例如，当监测到微生物活性下降时，系统自动调整营养物质投加量或环境条件，维持微生物的最佳生长状态。

#### 4. 资源化利用与生态修复一体化

未来的微生物修复和生物膜技术将更加注重污染物的资源化利用和生态系统的整体修复。在处理有机污染物时，通过优化微生物代谢途径，将污染物转化为生物燃料、生物肥料等高价值产品。在生态修复过程中，不仅关注污染物的去除，还注重生态系统功能的恢复和生物多样性保护。例如，在湖泊修复中，通过微生物修复改善水质，同时种植水生植物、投放水生动物，重建湖泊生态系统，实现生态环境的可持续发展。

### 第三节 水生植物净化与生态修复技术

在全球水资源污染加剧、生态系统退化的背景下，水生植物净化与生态修复技术以其绿色、可持续的特性，成为生物性水资源保护的关键手段。该技术通过水生植物自身的生理代谢活动，以及与微生物、水体环境的相互作用，实现对污染物的吸收、降解和转化，同时恢复水体生态系统结构与功能。从湖泊富营养化治理到河道黑臭水体修复，从湿地生态重建到景观水体维护，水生植物净化与生态修复技术在改善水质、重建生态平衡、提升生态服务价值等方面发挥着不可替代的作用，为解决复杂水环境问题提供了生态友好型解决方案。

#### 一、水生植物净化与生态修复技术原理

##### （一）污染物去除机制

##### 1. 植物吸收作用

水生植物对污染物的吸收是净化水体的重要途径。氮、磷等营养元素是水生植物生长发育的必需物质，通过根系和叶片的吸收，水体中的氨氮、硝酸盐氮、磷酸盐等营养盐被摄入植物体内，转化为自身的蛋白质、核酸、磷脂等有机成分。例如，芦苇在生长旺季，每公顷每年可吸收氮 150~200kg、磷 20~30kg，有效降低水体富营养化程度。对于重金属污染物，水生植物同样具有吸收富集能力，如蜈蚣草对砷的富集系数可达 1000 以上，可将水体中低浓度的砷离子吸收并积累在体内，从而减少水体中重金属含量。研究表明，在含镉浓度为 5mg/L 的水体中，

水葫芦经过 20 天的培养,其体内镉含量可达 300mg/kg,显著降低了水体镉污染。

## 2. 微生物协同作用

水生植物根系区域是微生物聚集和代谢活动的活跃场所。植物通过根系向周围环境分泌氧气、糖类、氨基酸等物质,营造出独特的根际微环境。在好氧的根际表面,好氧微生物大量繁殖,形成好氧微生物群落,这些微生物能够将水体中的有机物分解为二氧化碳和水,同时将氨氮氧化为硝酸盐氮。而在根系周围的缺氧区域,兼性厌氧微生物和厌氧微生物得以生存,进行反硝化作用,将硝酸盐氮转化为氮气释放到大气中,实现氮的去除。例如,在种植芦苇的人工湿地中,根际微生物数量比非根际区域高出 2~3 个数量级,其中反硝化细菌占比显著增加,使得湿地系统对总氮的去除效率提高 30%~40%。此外,部分微生物还能通过代谢活动将重金属离子转化为沉淀或低毒形态,如硫酸盐还原菌可将水体中的汞离子还原为硫化汞沉淀,降低重金属的毒性和迁移性。

## 3. 物理化学作用

水生植物的存在对水体具有物理过滤和吸附作用。其茂密的植株和根系能够减缓水流速度,促进悬浮物的沉淀,同时拦截水中的颗粒污染物。实验显示,在种植水芹菜的河道中,水流速度降低了 40%~50%,悬浮物去除率提高至 70%~80%。植物表面的黏液、绒毛等结构,以及分泌的多糖类物质,还能吸附水中的胶体颗粒和部分污染物。此外,水生植物在生长过程中会改变水体的 pH 值、氧化还原电位等理化性质,影响污染物的存在形态和迁移转化。例如,沉水植物通过光合作用吸收二氧化碳,使水体 pH 值升高,促使重金属离子形成氢氧化物沉淀,从而降低其在水体中的浓度。<sup>①</sup>

# (二) 生态修复功能

## 1. 生物多样性恢复

水生植物群落为水生动物、鸟类等提供了栖息地、食物来源和繁殖场所,是构建完整水生态系统的基础。在修复后的湿地生态系统中,挺水植物如香蒲、菖蒲的茎秆和叶片为昆虫、鸟类提供栖息和筑巢空间;浮叶植物睡莲的叶片下方成为鱼类躲避天敌和避暑的场所;沉水植物则是水生无脊椎动物和幼鱼的重要食物来源。某湖泊生态修复项目中,通过种植多种水生植物,3 年后监测发现,湖泊

<sup>①</sup> 王艳英,王晓磊,郜爱玲,等.水生植物净化水质功能研究进展[J].中国城市林业,2017,15(4):6-10.

中的鱼类种类从修复前的 8 种增加到 22 种，鸟类数量增长了 3 倍，生物多样性显著提升，生态系统的稳定性和抗干扰能力增强。

## 2. 生态系统结构与功能重建

水生植物在生态系统中处于生产者的关键位置，通过光合作用固定太阳能，将无机物质转化为有机物质，为整个生态系统提供能量基础。它们与水体中的微生物、动物共同构成食物链和食物网，维持生态系统的物质循环和能量流动。在受损水体生态修复过程中，合理配置水生植物种类和数量，能够逐步恢复生态系统的结构完整性。例如，在河流生态修复中，先种植沉水植物构建水下植被群落，改善水体透明度和溶解氧条件；再引入挺水植物和浮叶植物，形成立体的水生植物群落，为水生动物提供多样化的生存环境。随着生态系统结构的完善，水体的自净能力、碳固定能力等生态功能也得以恢复，实现生态系统的良性循环。

## 二、水生植物分类及净化特性

### （一）挺水植物

挺水植物的植株大部分挺出水面，根系扎根于水底基质中，常见种类包括芦苇、香蒲、菖蒲、荷花等。这类植物具有发达的通气组织，能够将空气中的氧气输送到根系，为根际微生物提供良好的好氧环境，促进有机物的降解和氮的硝化作用。芦苇作为典型的挺水植物，对污染物的耐受性强，适应范围广，在处理生活污水、工业废水中表现出良好的净化效果。研究表明，芦苇对氨氮的去除率可达 80%~90%，对化学需氧量（COD）的去除率为 50%~70%。香蒲不仅能够有效吸收氮、磷等营养物质，还对重金属具有一定的富集能力，在处理含铅、镉等重金属的污水时，其体内重金属含量可达水体的数十倍甚至上百倍。此外，挺水植物的景观效果突出，荷花、菖蒲等植物常被用于城市景观水体的生态修复和美化，兼具生态效益和观赏价值。

### （二）浮叶植物

浮叶植物的叶片漂浮在水面上，根系固定于水底基质，主要有睡莲、荇菜、菱角等。浮叶植物的叶片较大，能够有效遮挡阳光，抑制藻类的光合作用，从而控制藻类过度生长，防止水体富营养化。研究发现，当睡莲覆盖面积达到水体的 30%~50% 时，藻类生物量可减少 50%~70%。同时，浮叶植物的根系在水中能够吸附和分解有机物，其根际微生物的代谢活动也有助于水质净化。荇菜对总氮、

总磷的去除率分别可达 60%~70% 和 50%~60%。此外,浮叶植物的花朵和叶片具有较高的观赏价值,常被应用于景观水体的生态修复工程,提升水体的美学品质。

### (三) 沉水植物

沉水植物整个植株都沉没在水中,无根或根系不发达,主要通过叶片吸收水中的营养物质和溶解氧。常见的沉水植物有苦草、狐尾藻、黑藻等。沉水植物对改善水体透明度和溶解氧状况具有重要作用,它们通过光合作用释放氧气,增加水体溶解氧含量,为水生生物提供良好的生存环境。同时,沉水植物能够吸收水体中的氮、磷等营养物质,抑制藻类生长。在某湖泊生态修复项目中,种植苦草、狐尾藻等沉水植物后,水体透明度从 20cm 提升至 50cm 以上,溶解氧浓度从 4mg/L 提高到 8mg/L,藻类生长得到有效控制。此外,沉水植物是水生生态系统中重要的初级生产者,为鱼类、底栖动物等提供食物和栖息场所,对维持生态系统稳定具有关键作用。

### (四) 漂浮植物

漂浮植物的植株完全漂浮在水面上,根系悬垂于水中,常见的有凤眼莲(水葫芦)、浮萍、大藻等。这类植物生长速度快,对污染物的吸收和富集能力强。凤眼莲对氮、磷的吸收速率分别可达  $0.2\sim0.3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  和  $0.03\sim0.05\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,在处理富营养化水体时效果显著。然而,漂浮植物若不加以控制,容易过度繁殖,堵塞河道,影响水体通航和生态平衡。因此,在应用漂浮植物进行水质净化时,需要定期收割,防止其泛滥成灾。同时,收割后的漂浮植物可进行资源化利用,如制作堆肥、饲料等,实现污染物的转移和再利用。

## 三、典型工程应用案例

某湖泊因长期受生活污水排放、农业面源污染影响,水体富营养化严重,蓝藻频繁爆发,水质恶化至劣 V 类。为改善湖泊生态环境,采用以水生植物净化为主的生态修复技术。

在修复初期,首先通过机械打捞和化学絮凝等方式,快速降低水体中过高的藻类生物量和悬浮物浓度。然后,根据湖泊不同区域的水深、底质条件,科学配置水生植物群落。在浅水区(水深 $<1.5\text{m}$ )种植芦苇、香蒲等挺水植物,构建宽 5~10m 的挺水植物带,用于拦截和吸收岸边污染负荷;在水深 1.5~3m 区域,种植睡莲、荇菜等浮叶植物,控制藻类生长;在深水区(水深 $>3\text{m}$ ),种植苦草、

狐尾藻等沉水植物，改善水体溶解氧和透明度。同时，在湖泊沿岸设置生态缓冲带，种植湿生植物和乔木，减少面源污染进入湖泊。

经过 3 年的生态修复，湖泊水质得到显著改善，总氮浓度从 3.5mg/L 降至 1.2mg/L，总磷浓度从 0.3mg/L 降至 0.08mg/L，叶绿素 a 浓度降低了 80%，蓝藻暴发频率明显减少，水质稳定达到Ⅳ类标准。湖泊生物多样性也得到恢复，鱼类种类增加了 15 种，鸟类数量增长了 2 倍，形成了较为稳定的水生态系统。

## 四、工艺优化措施

### （一）水生植物筛选与搭配优化

科学合理的水生植物筛选与搭配是提升净化与修复效果的关键。在植物筛选时，需综合考虑污染物类型、水体环境条件以及植物自身特性。针对重金属污染水体，可优先选择蜈蚣草、水蓼等超积累植物。研究表明，蜈蚣草对砷的富集能力极强，在砷浓度为 50mg/L 的水体中，经过 60 天生长，其地上部分砷含量可达 2000mg/kg 以上。对于富营养化水体，则应选用氮、磷吸收效率高的植物，如芦苇、凤眼莲等。在植物搭配方面，遵循“生态位互补”原则，构建立体水生植物群落。将挺水植物、浮叶植物和沉水植物进行组合，形成多层次、多功能的植物体系。例如，在河道修复中，沿岸种植芦苇、菖蒲等挺水植物，既能吸收污染物，又可稳固堤岸；水面布置睡莲、荇菜等浮叶植物，遮挡阳光抑制藻类；水下种植苦草、轮叶黑藻等沉水植物，改善水体溶氧和透明度。这种搭配方式可充分利用水体空间资源，增强对不同污染物的去除能力，同时为水生生物提供多样化的栖息环境。此外，还可引入具有化感作用的植物，抑制藻类生长。如金鱼藻能分泌化感物质，对铜绿微囊藻的生长抑制率可达 70% 以上。在实际应用中，将金鱼藻与其他水生植物合理搭配，可有效控制藻类过度繁殖，维持水体生态平衡。

### （二）种植模式创新

#### 1. 浮床种植技术

浮床种植技术是将水生植物种植在特制的浮体上，使其漂浮于水面。浮床载体材料通常采用聚乙烯、聚丙烯等耐腐蚀材料，具有质量轻、强度高、使用寿命长等特点。浮床种植不受水深限制，可灵活布置于不同水域，适用于湖泊、河道、景观水体等多种场景。在某城市景观湖治理中，布置了总面积达 2000m<sup>2</sup> 的浮床，种植了鸢尾、千屈菜等植物。经过一个生长季，湖水的总氮浓度从 3.2mg/L 降至

1.5mg/L, 总磷浓度从 0.28mg/L 降至 0.12mg/L, 水质明显改善。同时, 浮床还为水鸟提供了栖息场所, 提升了景观湖的生态与美学价值。

## 2. 人工湿地种植模式

人工湿地通过模拟自然湿地生态系统, 将水生植物、基质和微生物相结合, 实现对污水的净化。根据水流方式, 人工湿地可分为表面流人工湿地、水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地。在表面流人工湿地中, 常种植芦苇、香蒲等耐水性强的植物, 污水在湿地表面缓慢流动, 通过植物的拦截、吸收和微生物的分解作用去除污染物。水平潜流人工湿地则选用菖蒲、灯芯草等植物, 污水在基质层中水平流动, 这种湿地形式具有占地面积小、处理效果好、无臭味散发等优点。垂直潜流人工湿地适合种植美人蕉、再力花等植物, 污水垂直流动, 与植物根系和基质充分接触, 对氮、磷等污染物的去除效率较高。某工业园区建设的水平潜流人工湿地, 种植菖蒲和风车草, 处理印染废水, COD 去除率达到 75%, 氨氮去除率达到 80%。

## 3. 沉水植物恢复技术

沉水植物是水体生态系统的重要组成部分, 其恢复对改善水质和重建生态系统至关重要。在沉水植物恢复过程中, 首先需要改善水体透明度, 可通过清淤、减少外源污染、投放絮凝剂等方式降低水体悬浮物浓度。然后选择合适的沉水植物种类和种植方法。对于小型水体, 可采用扦插法种植苦草、黑藻等; 对于大型湖泊、水库, 可采用抛洒种子或移栽植株的方式。在太湖生态修复中, 通过种植马来眼子菜、菹草等沉水植物, 使局部水域的透明度从 20cm 提升至 50cm 以上, 溶解氧浓度增加 3~4mg/L, 为鱼类和底栖动物提供了良好的生存环境。

### (三) 养护管理优化

水生植物的养护管理直接影响其生长状况和净化效果。定期对植物进行修剪, 可促进植物生长, 提高其对污染物的吸收能力。对于生长旺盛的漂浮植物, 如凤眼莲, 需及时收割, 防止其过度繁殖覆盖水面, 影响水体通气和光照。一般每隔 1~2 个月收割一次, 收割的植物可进行堆肥处理, 实现资源化利用。同时, 要加强对水生植物病虫害的防治。常见的水生植物病害有锈病、腐烂病等, 虫害有蚜虫、螟虫等。可采用生物防治方法, 如投放天敌昆虫、使用微生物制剂等, 减少化学农药的使用, 避免对水体造成二次污染。此外, 定期监测水体水质和植物生长状况, 根据监测结果调整植物种类和种植密度, 确保生态修复系统的稳定运行。

## 五、面临的挑战

### （一）物种入侵风险

部分水生植物具有较强的繁殖能力和环境适应性，若引入不当，可能引发物种入侵，破坏当地生态平衡。凤眼莲原产于南美洲，作为观赏植物和饲料引入我国后，因其生长速度极快，在南方许多水域迅速蔓延，堵塞河道，影响航运，抑制其他水生植物和鱼类生长。据统计，凤眼莲曾在我国云南滇池泛滥成灾，覆盖面积一度达到湖面的 80%，导致鱼类大量死亡，生物多样性锐减。虽然通过人工打捞、机械粉碎等方式进行治理，但每年仍需投入大量人力、物力和财力。因此，在选择水生植物时，需充分评估其入侵风险，优先选择本地物种，谨慎引入外来物种。

### （二）环境适应性问题

水生植物的生长和净化效果受环境因素影响显著。极端气候条件，如高温、干旱、暴雨、冰冻等，会对水生植物造成严重伤害。在夏季高温时期，部分沉水植物会因水温过高、光照过强而出现叶片发黄、枯萎现象，影响其光合作用和污染物吸收能力。冬季的低温冰冻则可能导致挺水植物地上部分冻死，根系受损。此外，水体污染程度过重、水质恶化过快，也会超出水生植物的耐受范围。当水体中重金属浓度过高时，会抑制植物的生理代谢活动，导致植物生长缓慢甚至死亡。在一些工业污染严重的河流中，种植的水生植物因无法适应高浓度污染物环境，成活率不足 30%。

### （三）修复周期与成本问题

水生植物净化与生态修复技术的修复周期较长，一般需要数年时间才能达到理想效果。对于污染严重、生态系统破坏较大的水体，修复周期可能更长。在修复过程中，需要持续投入资金用于植物种植、养护管理、监测评估等。以某大型湖泊生态修复项目为例，总投资超过 2 亿元，修复周期长达 5 年。其中，植物采购和种植费用占总投资的 30%，养护管理费用占 40%。高昂的成本和较长的周期，使得一些地方政府和企业在实施生态修复项目时面临资金压力，限制了该技术的广泛应用。

### （四）后期管理难度大

水生植物生态修复系统建成后，后期管理工作复杂且专业要求高。需要定期

监测水质、植物生长状况、生物多样性等指标，及时调整修复方案。例如，当发现水体中氮、磷去除效果不佳时，需分析是植物种类不合适、种植密度不足，还是环境条件影响，进而采取相应措施。此外，水生植物的收割、病虫害防治、外来物种入侵防控等工作也需要专业人员和设备。目前，我国在水生植物生态修复后期管理方面缺乏专业人才和完善的管理体系，导致部分修复项目后期管理不到位，修复效果逐渐下降。

## 六、发展趋势

### （一）新型植物品种培育

随着生物技术的发展，通过基因工程、杂交育种等技术培育新型水生植物品种成为重要趋势。利用基因编辑技术，可将具有特定功能的基因导入水生植物中，增强其对污染物的耐受性和吸收能力。例如，将重金属转运蛋白基因导入芦苇中，培育出对镉、铅等重金属具有更强富集能力的新品种。杂交育种则可将不同植物的优良性状结合，培育出适应性强、净化效果好的杂交品种。科研人员通过将耐寒的西伯利亚鸢尾与净化能力强的黄菖蒲杂交，培育出既耐寒又能高效去除氮、磷的鸢尾新品种，适合在北方地区推广应用。

### （二）多技术协同创新

水生植物净化与生态修复技术将与其他水处理技术深度融合，形成协同修复体系。与微生物修复技术结合，通过在水生植物根际添加高效降解菌剂，增强对有机污染物的分解能力。在处理生活污水时，将水生植物浮床与微生物菌剂联合使用，COD 去除率比单独使用浮床提高 20%~30%。与物理化学技术结合，利用超声波、电场等技术预处理水体，改善水质条件，提高水生植物的成活率和净化效果。例如，采用超声波预处理富营养化水体，可破坏藻类细胞结构，减少藻类对水生植物的竞争，促进水生植物生长。此外，还可与物联网技术结合，实现对修复系统的实时监测和智能调控。通过传感器实时监测水质、植物生长等数据，利用人工智能算法分析数据并自动调整修复策略，提高修复效率和管理水平。

### （三）资源化利用深化

水生植物收割后的资源化利用将得到进一步发展。除了制作堆肥、饲料外，还可探索更多高附加值的利用方式。利用水生植物提取生物活性物质，如从芦苇中提取黄酮类化合物，具有抗氧化、抗菌等功效，可用于医药、化妆品等领域。

将水生植物加工成生物质能源，如通过厌氧发酵产生沼气，或通过热解技术制备生物炭和生物油。某研究机构利用水葫芦制备生物炭，其对重金属的吸附性能优于普通活性炭，可用于土壤修复和污水处理。此外，还可将水生植物用于生态建材生产，如制作纤维板、环保砖等，实现污染物的彻底转移和资源的高效利用。

#### **（四）生态服务功能拓展**

未来水生植物净化与生态修复技术将更加注重生态服务功能的拓展。除了水质净化和生态修复外，还将在碳汇、景观营造、休闲娱乐等方面发挥更大作用。水生植物通过光合作用吸收二氧化碳，固定碳元素，在应对气候变化中具有重要意义。研究表明，每公顷湿地水生植物每年可固碳 1~3t。在城市建设中，将水生植物生态修复与景观设计相结合，打造生态景观水体，为市民提供休闲娱乐场所。如在城市公园中建设人工湿地景观，种植荷花、睡莲等观赏植物，既净化了水质，又美化了环境，提升了城市的生态品质和居民的生活质量。

## 第六章 工程性水资源保护措施

### 第一节 雨水收集与中水回用系统工程

在全球水资源短缺与水污染问题日益严峻的背景下，工程性水资源保护措施成为缓解水资源压力、实现水资源可持续利用的关键途径。雨水收集与中水回用系统工程通过对非常规水资源的开发利用，将雨水和经过处理的中水纳入水资源循环体系，不仅能减少城市对传统水资源的依赖，还可降低污水排放量，减轻市政管网和污水处理厂的负荷。该工程技术广泛应用于建筑、小区、城市公共设施等领域，在提高水资源利用效率、改善水环境质量、增强城市韧性等方面发挥着重要作用。

#### 一、雨水收集系统工程

##### （一）技术原理与分类

###### 1. 基本原理

雨水收集系统工程基于对自然降水的截留、存储和净化原理，将城市中原本直接排放的雨水进行收集处理，使其达到一定水质标准后回用。该系统通过对降雨过程的分析，利用重力或机械动力，将降落在屋顶、道路、广场等不同下垫面上的雨水进行汇集。收集的雨水经过初期弃流、过滤、沉淀、消毒等处理工艺，去除雨水中的悬浮物、有机物、细菌等污染物，使其满足绿化灌溉、道路冲洗、景观补水等回用要求。其核心在于通过合理的系统设计和工艺选择，实现雨水从“自然降水—收集—处理—回用”的高效转化，构建城市水资源的微循环体系。<sup>①</sup>

###### 2. 系统分类

分散式雨水收集系统：主要应用于单个建筑或小型区域，如居民住宅、学校、办公楼等。该系统以建筑屋顶为主要集雨面，通过雨水斗、雨水管道将屋顶雨水收集至储水设施，如雨水桶、地下蓄水池等。系统规模较小，具有建设灵活、管

---

<sup>①</sup> 罗辅燕. 雨水收集系统研究 [J]. 河南科技, 2018, (02): 65-66.

理方便的特点,适用于对雨水回用需求相对较低的场景。某居民小区采用分散式雨水收集系统,在每栋住宅楼屋顶设置雨水收集管道,将雨水收集到地下小型蓄水池,经过简单过滤后用于小区绿化灌溉,每年可节约绿化用水约 5000m<sup>3</sup>。

集中式雨水收集系统:适用于大型公共区域、工业园区或城市片区,通过构建区域性的雨水收集管网,将多个集雨面的雨水集中收集至大型储水设施,如雨水调蓄池、地下水库等。该系统通常配备较为完善的预处理、深度处理设施,处理能力强,可实现大规模雨水的高效利用。某城市商务区建设的集中式雨水收集系统,收集周边办公楼、广场的雨水,经过沉淀、过滤、消毒等处理后,用于商务区的景观水体补水、道路冲洗和空调冷却用水,年回用量达 50 万吨,显著降低了区域水资源消耗。

## (二) 系统构成与关键技术

### 1. 系统构成

雨水收集模块:是系统的源头部分,包括集雨面和雨水收集装置。集雨面是雨水的收集区域,常见的有屋顶、硬化路面、绿地等。不同集雨面的材质和坡度会影响雨水的收集效率,如光滑的金属屋面雨水径流速度快,便于收集;而绿地作为集雨面,可通过土壤渗透和植物截留净化雨水。雨水收集装置主要有雨水斗、雨水管道和初期弃流装置。雨水斗用于收集屋面雨水,并通过导流作用将雨水引入管道;雨水管道负责将雨水输送至储水设施;初期弃流装置则将降雨初期污染程度较高的雨水排除,避免其进入储水设施,保证后续处理水质。

雨水存储模块:用于暂时储存收集到的雨水,常见的存储设施有雨水桶、蓄水池、地下储水罐等。雨水桶适用于小型分散式系统,容量一般在几百升到几立方米;蓄水池和地下储水罐则可根据需求设计不同规模,适用于集中式系统。在设计存储设施时,需考虑其容积大小、结构强度、防渗性能等因素,以确保雨水的安全存储。例如,某学校建设的地下蓄水池,采用钢筋混凝土结构,容积为 1000m<sup>3</sup>,池壁做防水处理,有效防止雨水渗漏。

雨水处理模块:根据雨水回用水质要求,采用不同的处理工艺,主要包括物理处理、化学处理和生物处理。物理处理工艺如沉淀、过滤,可去除雨水中的悬浮物和颗粒物;化学处理工艺如消毒,通过投加消毒剂(如次氯酸钠、二氧化氯等)杀灭水中的细菌和病毒;生物处理工艺如人工湿地、生物滤池,可进一步去除雨水中的有机物和氮、磷等营养物质。在实际应用中,常采用多种处理工艺组

合的方式，以达到更好的处理效果。某城市公园的雨水收集系统，采用“沉淀—过滤—人工湿地”组合工艺，处理后的雨水水质达到景观用水标准，用于公园湖泊补水。

**雨水回用模块：**将处理后的雨水输送至用水点，实现雨水的再利用。回用模块包括供水管道、用水设备和计量装置。供水管道负责将处理后的雨水输送到绿化灌溉喷头、道路冲洗设备、景观水池等用水点；用水设备根据不同的用水需求进行配置；计量装置用于统计雨水的回用量，便于水资源管理和成本核算。

## 2. 关键技术

**初期弃流技术：**降雨初期的雨水携带大气污染物，如树叶、灰尘、油污等，通过初期弃流技术将这部分雨水排除，可有效提高后续处理水质。常见的初期弃流方法有容积法、流量法和智能弃流法。容积法是根据经验确定弃流容积，当雨水收集量达到设定容积后，后续雨水进入存储设施；流量法通过监测雨水流量变化，当流量达到一定阈值时开启弃流；智能弃流法则利用传感器实时监测雨水中的污染物浓度，根据浓度变化自动控制弃流。某商业建筑的雨水收集系统采用智能弃流装置，通过监测雨水中的 COD 浓度，当浓度低于设定值时停止弃流，有效提高了雨水收集效率和水质。

**高效过滤技术：**过滤是去除雨水中悬浮物和颗粒物的关键环节，高效过滤技术能提高雨水处理效果。常用的过滤材料有石英砂、活性炭、无纺布等。近年来，新型过滤技术不断涌现，如膜过滤技术，利用半透膜的选择透过性，可有效去除雨水中的细菌、病毒和微小颗粒物。某工业园区的雨水收集系统采用超滤膜过滤技术，处理后的雨水浊度低于 1NTU，满足工业冷却用水要求。

**雨水调蓄技术：**为应对降雨的不确定性和用水需求的变化，雨水调蓄技术可调节雨水的供需平衡。调蓄设施包括调蓄池和调节管网。调蓄池可在降雨期间储存多余雨水，在非降雨期间释放雨水满足回用需求；调节管网通过控制阀门开度和水流方向，实现雨水的合理调配。某城市雨水收集系统建设了大型地下调蓄池，有效缓解了降雨高峰时的排水压力，同时保障了旱季的雨水回用需求。

## 二、中水回用系统工程

### (一) 技术原理与分类

#### 1. 基本原理

中水回用系统工程是将城市污水或建筑排水经过处理后，使其水质达到一定标准，回用于非饮用水领域。该系统利用物理、化学和生物处理方法，去除污水中的有机物、悬浮物、氮、磷等污染物，降低水中的细菌和病毒含量，使处理后的中水满足绿化灌溉、道路冲洗、洗车、冲厕等回用要求。其核心是通过合理的工艺设计和严格的水质控制，实现污水的资源化利用，减少对新鲜水资源的消耗，同时减轻污水处理厂的负荷。

#### 2. 系统分类

建筑中水回用系统：以单栋建筑或建筑群为单位，将建筑内的生活污水（如洗浴水、洗衣水、厨房排水等）进行收集处理，回用于建筑内部的非饮用水用途。该系统规模较小，具有建设成本低、运行管理方便的特点。某酒店建设的建筑中水回用系统，将客房洗浴水和洗衣房排水收集后，经过“格栅—沉砂池—生物接触氧化池—过滤—消毒”处理工艺，处理后的中水用于酒店冲厕和绿化灌溉，年节约用水量达 10 万吨，降低了酒店的运营成本。

小区中水回用系统：服务于整个住宅小区或居住片区，将小区内的生活污水集中收集处理，回用于小区内的公共用水和部分住户的非饮用水。小区中水回用系统通常配备较为完善的处理设施和回用管网，处理规模相对较大。某大型住宅小区建设的建筑中水回用系统，收集小区居民的生活污水，经过“厌氧—好氧生物处理—膜生物反应器（MBR）—消毒”处理工艺，处理后的中水用于小区绿化灌溉、道路冲洗和景观水体补水，年回用水量达 50 万吨，显著提高了小区的水资源利用效率。

城市中水回用系统：以城市污水处理厂的二级出水为水源，经过深度处理后回用于城市的工业用水、景观用水、生态补水等领域。该系统规模大，处理工艺复杂，需要构建完善的中水输送管网。某城市污水处理厂建设的城市中水回用系统，将二级出水经过“混凝—沉淀—过滤—反渗透（RO）—消毒”深度处理后，作为工业冷却水和景观用水回用，年回用量达 500 万吨，有效缓解了城市水资源短缺问题。

## （二）系统构成与关键技术

### 1. 系统构成

污水收集模块：负责收集建筑排水或城市污水，包括排水管道、检查井和提升泵站。排水管道将污水从各个排水点输送至处理设施；检查井用于检查和维护排水管道；提升泵站则在地形条件不利或管道高程差较大时，将污水提升至处理设施。污水处理模块：根据中水回用的水质要求，采用不同的处理工艺，主要包括预处理、生物处理和深度处理。预处理工艺如格栅、沉砂池，用于去除污水中的大颗粒杂质和砂粒；生物处理工艺，如活性污泥法、生物膜法，通过微生物的代谢活动去除污水中的有机物和氮、磷等营养物质；深度处理工艺如膜分离技术、高级氧化技术，可进一步去除污水中的微量污染物和细菌、病毒，提高中水水质。在某城市中水回用系统中，采用“预处理—生物处理—反渗透（RO）—紫外线消毒”组合工艺，处理后的中水水质达到工业循环冷却水水质标准。中水存储模块：用于储存处理后的中水，常见的存储设施有中水池、中水罐等。在设计存储设施时，需考虑其容积大小、防污染措施等因素，以确保中水的安全存储。例如，中水池需做防渗处理，并设置通气孔和溢流装置，防止中水渗漏和水质恶化。中水回用模块：将处理后的中水输送至用水点，实现中水的再利用。回用模块包括中水供水管道、用水设备和计量装置。中水供水管道与生活饮用水管道严格分开，避免交叉污染；用水设备根据不同的用水需求进行配置；计量装置用于统计中水的回用量，便于水资源管理和成本核算。

### 2. 关键技术

生物处理技术：生物处理是中水回用系统去除有机物和氮、磷等营养物质的核心技术，常见的生物处理工艺有活性污泥法、生物膜法和厌氧—好氧联合处理工艺。活性污泥法通过曝气使微生物与污水充分接触，分解有机物；生物膜法则利用微生物在载体表面形成的生物膜进行污染物降解。厌氧—好氧联合处理工艺结合了厌氧处理的高效降解有机物和脱氮除磷能力以及好氧处理的进一步净化作用，能有效提高污水处理效果。某小区中水回用系统采用厌氧—好氧生物处理工艺，对生活污水进行处理，COD 去除率达到 90%，氨氮去除率达到 85%。

膜分离技术：膜分离技术具有分离效果好、占地面积小、操作简单等优点，在中水回用系统中得到广泛应用。常见的膜分离技术有微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）和反渗透（RO）。微滤和超滤主要用于去除污水中的悬浮物和大分

子有机物；纳滤可去除小分子有机物、二价离子和部分一价离子；反渗透则能去除几乎所有的溶解性物质和细菌、病毒。某工业中水回用系统采用反渗透技术，对污水处理厂二级出水进行深度处理，出水水质满足工业生产工艺用水要求。

消毒技术：消毒是保障中水水质安全的重要环节，常见的消毒方法有氯消毒、紫外线消毒和臭氧消毒。氯消毒具有成本低、消毒效果好的特点，但可能会产生有害副产物；紫外线消毒具有无二次污染、消毒速度快的优点，但对隐孢子虫和贾第鞭毛虫等原虫的灭活效果较差；臭氧消毒具有强氧化性，能有效杀灭细菌、病毒和去除有机物，但设备投资和运行成本较高。在实际应用中，常采用多种消毒方法联合使用的方式，提高消毒效果。某城市中水回用系统采用“紫外线消毒+氯消毒”联合工艺，确保中水水质安全可靠。

### 三、典型工程应用案例

#### （一）某生态小区雨水收集与中水回用工程

某生态小区占地面积 10 万平方米，规划住户 1000 户。为实现水资源的高效利用，该小区建设了雨水收集与中水回用系统。雨水收集系统以小区屋顶和硬化路面为集雨面，通过雨水管道将雨水收集至地下雨水蓄水池，总容积为  $2000\text{m}^3$ 。雨水经过初期弃流后，依次进入沉淀池、砂滤池和消毒池进行处理，处理后的雨水用于小区绿化灌溉、道路冲洗和景观水体补水。经测算，该小区每年可收集雨水约 5 万吨，可满足小区 70% 的绿化灌溉和道路冲洗用水需求。中水回用系统收集小区居民的生活污水，包括洗浴水、洗衣水和厨房排水。污水首先进入格栅井去除大颗粒杂质，然后流入调节池进行水质和水量调节。接着，污水进入生物接触氧化池进行生物处理，去除有机物和氮、磷等营养物质。处理后的污水经过过滤和消毒后，存储在中水池中，回用于小区冲厕。该中水回用系统日处理污水量为  $200\text{m}^3$ ，年回用水量达 7.3 万吨，可满足小区全部住户的冲厕用水需求。该工程的实施，使小区的水资源循环利用率达到 60% 以上，年节约市政供水 12.3 万吨，显著降低了小区的水资源消耗和污水排放量，取得了良好的经济效益和环境效益。

#### （二）某城市商务区中水回用工程

某城市商务区是集商业、办公、酒店为一体的综合性区域，日用水量达 1 万吨。为缓解水资源短缺压力，该商务区建设了中水回用系统，以城市污水处理厂

的二级出水为水源。中水回用系统采用“混凝—沉淀—过滤—反渗透（RO）—紫外线消毒”深度处理工艺。城市污水处理厂的二级出水首先进入混凝沉淀池，通过投加混凝剂使水中的悬浮物和胶体颗粒凝聚沉淀。沉淀后的污水进入砂滤池和活性炭滤池进行过滤，进一步去除水中的细小颗粒物和有机物。然后，污水进入反渗透装置进行深度处理，去除水中的溶解性物质和细菌、病毒。最后，经过紫外线消毒后，中水存储在中水池中，回用于商务区的空调冷却用水、景观水体补水和道路冲洗。该中水回用系统日处理水量为 5000m<sup>3</sup>，年回用量达 182.5 万吨。经检测，处理后的中水水质达到 GB/T19923—2005《城市污水再生利用工业用水水质》标准，可替代部分新鲜水资源用于工业和景观用水。该工程的实施，不仅缓解了商务区的水资源短缺问题，还降低了企业的用水成本，同时减少了污水排放，对改善城市水环境质量起到了积极作用。

## 第二节 水库生态调度与防洪抗旱技术

在水资源管理与保护体系中，水库生态调度与防洪抗旱技术是不可或缺的关键组成部分。随着全球气候变化加剧，极端天气事件频发，洪涝、干旱灾害对人类生产生活的威胁日益严重，同时，人们对生态环境保护的重视程度不断提高，对水库功能的需求已从单一的防洪、发电、灌溉等，逐渐向兼顾生态保护的综合目标转变。水库生态调度通过科学合理地调节水库运行方式，在满足防洪、供水等基本需求的前提下，最大限度地减少对河流生态系统的负面影响；防洪抗旱技术则凭借先进的监测预警、工程调控和非工程措施，有效降低灾害损失，保障流域内人民生命财产安全和社会经济可持续发展。

### 一、水库生态调度技术

#### （一）基本概念与重要性

##### 1. 概念内涵

水库生态调度是指在水库运行过程中，以生态保护为重要目标，综合考虑防洪、发电、供水、灌溉等多种需求，通过科学制定水库的水位、流量调控方案，优化水资源配置，维持河流生态系统结构与功能完整性的调度方式。其核心在于协调人类用水需求与生态用水需求之间的矛盾，通过模拟自然水文过程，为河流

生态系统中的生物提供适宜的生存环境,保障河流生态健康。例如,在鱼类繁殖季节,通过水库调度创造合适的涨水过程,刺激鱼类产卵;在枯水期,适当下泄生态基流,满足水生生物基本生存需求。

## 2. 重要意义

水库生态调度对于维护河流生态系统稳定至关重要。在过去,许多水库以经济效益为主要导向,过度蓄水、集中放水等不合理的调度方式,导致河流断流、湖泊萎缩、生物多样性锐减等一系列生态问题。以黄河为例,20世纪70—90年代,由于上游水库过度截流和不合理调度,黄河下游频繁出现断流现象,1997年断流时间长达226天,对河口三角洲生态系统造成严重破坏,湿地面积大幅减少,生物栖息地丧失。实施水库生态调度后,通过科学调配水量,黄河连续多年实现不断流,河口湿地生态系统逐步得到恢复。此外,水库生态调度还能提升水库综合效益,从长远角度保障水资源的可持续利用,促进经济社会与生态环境的协调发展。<sup>①</sup>

## (二) 生态调度关键要素

### 1. 生态基流确定

生态基流是指为维持河流生态系统基本功能,在一定时段内河流应保持的最小流量。准确确定生态基流是水库生态调度的基础和关键。目前,常用的生态基流确定方法包括水文学法、水力学法、生物分析法和综合分析法。水文学法基于历史径流资料,通过计算不同频率的最小流量来确定生态基流,如7Q10法(取多年日平均流量中最小的10%的平均值);水力学法从河道形态、水流速度等水力要素出发,确定维持河流生态功能的最小流量;生物分析法通过研究水生生物与流量的关系,以满足生物生长、繁殖等需求为目标确定生态基流;综合分析法结合上述多种方法,综合考虑流域自然条件、社会经济需求和生态保护目标,确定更为科学合理的生态基流。在长江流域,通过综合分析水文、生态和社会经济等因素,确定了不同河段的生态基流,为水库生态调度提供了重要依据。

### 2. 水文节律模拟

自然河流的水文节律具有季节性变化特征,包括洪水脉冲、枯水期等,这些变化对河流生态系统的物质循环、能量流动和生物多样性维持至关重要。水库生

---

<sup>①</sup> 林益江,周柏青.水库生态调度研究[J].热带农业工程,2020,44(1):73-75.

态调度需要模拟自然水文节律，通过合理安排水库的蓄水、放水过程，恢复河流的自然涨落规律。例如，在春季鱼类繁殖期，水库适当增加下泄流量，模拟自然洪水过程，促进鱼类产卵繁殖；在秋季，控制水库水位缓慢下降，为沿岸湿地植物生长提供适宜条件。在珠江流域，通过对水库的生态调度，模拟珠江的洪枯节律，有效改善了河口咸潮上溯问题，保护了河口生态系统。

### 3. 生物栖息地保护

水库生态调度应充分考虑生物栖息地保护，为鱼类、鸟类、水生植物等提供适宜的生存环境。对于鱼类而言，需要保护其产卵场、索饵场和越冬场。通过调节水库下泄流量和水温，创造适合鱼类繁殖的水流条件和温度环境。在长江三峡水库调度中，通过优化调度方案，在鱼类繁殖季节适当降低水库下泄水温，模拟自然河道的水温变化，提高了四大家鱼的繁殖成功率。对于鸟类和水生植物，需要保障适宜的水位和水量，维持湿地面积和生态功能。例如，在鄱阳湖流域，通过与上游水库联合调度，调节鄱阳湖水位，为候鸟提供了充足的觅食和栖息空间。

## （三）生态调度模式与方法

### 1. 单一目标生态调度

单一目标生态调度以某一特定生态保护目标为核心，如保障生态基流、保护鱼类繁殖等，不考虑或较少考虑其他用水需求。这种调度模式适用于生态问题较为突出、对某一生态要素保护需求迫切的情况。在一些小型河流的生态修复中，为了恢复河流生态系统，采用单一目标生态调度，优先保障生态基流，在一定程度上改善了河流生态状况。然而，单一目标生态调度可能会对其他用水需求产生不利影响，如影响发电、灌溉效益。

### 2. 多目标综合生态调度

多目标综合生态调度是在满足防洪、发电、供水、灌溉等社会经济用水需求的同时，兼顾生态保护目标，实现多目标的协调优化。该调度模式通常采用数学模型和优化算法，建立多目标函数，通过求解模型得到最优调度方案。常用的数学模型包括线性规划模型、非线性规划模型、动态规划模型等。在金沙江流域水库群调度中，运用多目标综合生态调度模型，统筹考虑防洪、发电、航运、生态等目标，通过优化水库调度方案，在保障发电效益的同时，显著改善了流域生态环境。多目标综合生态调度虽然能够实现多目标的平衡，但由于涉及因素众多、关系复杂，模型构建和求解难度较大。

### 3. 适应性生态调度

适应性生态调度是一种基于反馈机制的动态调度模式，强调根据生态系统的变化和监测结果，及时调整水库调度方案。该模式认为生态系统具有不确定性和动态性，调度方案需要不断适应生态系统的变化。在实际应用中，通过建立生态监测网络，实时监测河流生态系统的变化，如水质、生物群落结构等。当监测到生态系统出现异常时，及时分析原因，调整水库调度方案。美国格伦峡谷大坝采用适应性生态调度，根据科罗拉多河生态系统的变化，定期开展人造洪峰调度，恢复了河流的滩涂地貌和生物栖息地，取得了良好的生态效果。

## 二、水库防洪抗旱技术

### （一）防洪技术体系

#### 1. 洪水监测与预警

洪水监测与预警是防洪的首要环节，通过建立完善的监测网络，实时获取流域内的降雨、水位、流量等信息，及时发布洪水预警，为防洪决策提供依据。现代洪水监测主要依靠气象卫星、雷达、水文站等设备。气象卫星可实时监测大范围的降雨分布和强度，雷达能够精确探测局部地区的降雨情况，水文站则对河道水位、流量进行实时监测。同时，利用大数据、人工智能等技术对监测数据进行分析 and 预测，提高洪水预报的准确性和时效性。例如，我国长江流域建立了覆盖全流域的洪水监测预警系统，通过整合气象、水文等多源数据，利用数值天气预报模型和洪水演进模型，能够提前 72 小时准确预报洪水过程，为防洪抢险赢得了宝贵时间。

#### 2. 水库防洪调度

水库防洪调度是指根据洪水预报信息，合理控制水库的蓄水量和下泄流量，以达到削减洪峰、减轻下游洪水灾害的目的。水库防洪调度可分为预泄调度、错峰调度和补偿调度等方式。预泄调度是在洪水来临前，提前降低水库水位，腾出防洪库容；错峰调度是通过调整水库下泄流量的时间，使水库下泄洪水与区间洪水错开，避免洪峰叠加；补偿调度则是根据下游防洪控制点的水位和流量要求，实时调整水库下泄流量，保障下游防洪安全。在三峡水库防洪调度中，采用预泄调度和错峰调度相结合的方式，在 2020 年长江流域大洪水中，有效削减洪峰流量，将下游荆江河段的洪峰水位降低了 0.5~1m，极大减轻了下游防洪压力。

### 3. 防洪工程措施

防洪工程措施是保障防洪安全的重要物质基础,包括水库大坝、堤防、分洪区等。水库大坝通过拦截洪水、调节水量,发挥防洪作用;堤防能够约束洪水,防止洪水漫溢;分洪区则在洪水超过河道安全泄量时,启用分洪,将洪水引入分洪区,减轻河道行洪压力。我国黄河流域通过加固和加高黄河大堤,修建小浪底水利枢纽等水库工程,以及设置东平湖等分洪区,形成了较为完善的防洪工程体系,有效提高了黄河流域的防洪能力。同时,随着工程技术的发展,新型防洪材料和技术不断涌现,如生态堤防、智能防洪闸门等,进一步提升了防洪工程的性能和安全性。

## (二) 抗旱技术体系

### 1. 干旱监测与评估

干旱监测与评估是抗旱工作的基础,通过多种指标和方法,对干旱的发生、发展和影响程度进行实时监测和科学评估。常用的干旱监测指标包括降水量距平百分率、土壤相对湿度、标准化降水指数(SPI)等。利用遥感技术和地面监测网络,可获取大范围的干旱信息,如植被长势、土壤墒情等。例如,我国利用风云系列气象卫星和地面土壤墒情监测站,构建了全国干旱监测网络,能够及时准确地掌握干旱发生区域和程度。同时,通过建立干旱评估模型,对干旱造成的农业损失、水资源短缺程度等进行量化评估,为抗旱决策提供科学依据。

### 2. 水库抗旱调度

水库抗旱调度是在干旱时期,合理调配水库水资源,优先保障生活用水、重点行业用水和农业灌溉用水。在干旱初期,水库按照既定的用水计划,合理分配水量;随着干旱的发展,根据水资源状况和用水需求变化,调整调度方案,优先保障生活用水安全。例如,在2019—2020年南方部分地区干旱期间,相关水库通过科学调度,优先保障了城乡居民生活用水,同时合理安排农业灌溉用水,减少了干旱对农业生产的损失。此外,水库还可通过与其他水源工程联合调度,提高水资源的利用效率。

### 3. 非工程抗旱措施

非工程抗旱措施包括水资源统一管理、节水灌溉技术推广、人工增雨等。水资源统一管理通过制定科学的用水计划和管理制度,合理分配水资源,提高水资源利用效率。节水灌溉技术推广,如滴灌、喷灌等,可大幅减少农业灌溉用水量,

提高灌溉水利用系数。在新疆地区，通过大面积推广滴灌技术，使农业灌溉水利用系数从 0.4 提高到 0.6 以上，有效缓解了干旱地区的用水压力。人工增雨则是在合适的气象条件下，通过向云层中播撒催化剂，增加降水量。在干旱期间，我国多地开展人工增雨作业，取得了显著的抗旱效果。

### 三、典型工程应用案例

#### （一）长江三峡水库生态调度与防洪抗旱实践

长江三峡水库是世界上最大的水利枢纽工程之一，在生态调度、防洪抗旱方面发挥着重要作用。在生态调度方面，三峡水库通过优化调度方案，保障长江中下游的生态基流，在鱼类繁殖季节，通过调节下泄流量和水温，为四大家鱼繁殖创造条件。同时，在枯水期适当增加下泄水量，缓解长江中下游的枯水形势，改善河道通航条件和水环境质量。在防洪方面，三峡水库具有巨大的防洪库容（221.5 亿立方米），通过科学的防洪调度，有效削减洪峰，保障了长江中下游地区的防洪安全。在 2016 年和 2020 年长江流域大洪水中，三峡水库通过拦蓄洪水，分别将洪峰流量削减了 28% 和 30%，极大减轻了下游荆江、武汉等地区的防洪压力。在抗旱方面，三峡水库在干旱时期合理调配水量，优先保障生活用水和农业灌溉用水，为缓解长江中下游地区的干旱灾害做出了重要贡献。

#### （二）黄河小浪底水库生态调度与防洪抗旱应用

黄河小浪底水库是黄河干流上的一座大型水利枢纽，在调节水沙关系、防洪抗旱等方面发挥着关键作用。在生态调度上，小浪底水库通过实施调水调沙，利用人造洪峰冲刷下游河道泥沙，改善河道形态，维持黄河下游主河槽的行洪能力。自 2002 年以来，小浪底水库已连续开展多次调水调沙，使黄河下游河道主河槽平均下切 2.5m 左右，有效缓解了下游河道的淤积问题。在防洪方面，小浪底水库与三门峡水库等联合调度，形成了较为完善的黄河防洪体系。在黄河汛期，通过科学控制水库下泄流量，有效削减洪峰，保障了黄河下游地区的防洪安全。在抗旱方面，小浪底水库根据黄河流域的水资源状况和用水需求，合理调配水量，保障了沿黄地区的生活、生产和生态用水。

#### （三）鄱阳湖流域水库群联合调度案例

鄱阳湖是我国最大的淡水湖，其生态环境与流域内水库群的调度密切相关。为了保护鄱阳湖湿地生态系统，保障候鸟栖息地，鄱阳湖流域实施了水库群联合

生态调度。通过与上游的赣江、抚河等流域的水库联合调度，在枯水期合理下泄水量，维持鄱阳湖的水位，为候鸟提供充足的觅食和栖息空间。同时，在汛期科学调控水库下泄流量，减轻鄱阳湖的防洪压力。在干旱时期，水库群联合调度保障了鄱阳湖周边地区的农业灌溉和生活用水需求，实现了生态保护、防洪抗旱和社会经济发展的多目标协调。

## 四、面临的挑战与发展趋势

### （一）面临的挑战

#### 1. 多目标协调难度大

水库生态调度与防洪抗旱需要兼顾生态、防洪、发电、供水等多个目标，各目标之间存在一定的矛盾和冲突。例如，为了满足防洪需求，水库需要预留足够的防洪库容，这可能会影响发电和供水效益；而过度追求发电和供水效益，又可能导致生态用水不足，影响河流生态系统健康。如何在复杂的多目标之间找到平衡点，实现协调优化，是水库调度面临的重大挑战。

#### 2. 生态系统复杂性与不确定性

河流生态系统具有高度复杂性和不确定性，受到自然因素（如气候变化、地质条件）和人类活动（如水利工程建设、污染排放）的共同影响。生态系统对水库调度的响应具有滞后性和非线性特征，难以准确预测。例如，水库调度引起的水温变化可能会对鱼类繁殖产生影响，但这种影响可能在数年后才显现出来，且不同鱼类对水温变化的响应存在差异。生态系统的复杂性和不确定性增加了水库生态调度的难度，使得制定科学合理的调度方案面临较大困难。

#### 3. 技术与管理水平有待提高

目前，洪水和干旱的监测预报技术仍存在一定局限性，预报精度和时效性有待进一步提高。水库调度模型在模拟生态过程和多目标优化方面还不够完善，难以准确反映生态系统的实际需求。在管理方面，流域内水库之间缺乏有效的协调机制，水资源统一管理和调度难度较大。此外，相关法律法规和政策体系还不够健全，不利于水库生态调度与防洪抗旱工作的顺利开展。

### （二）发展趋势

#### 1. 智能化与信息化技术应用

随着物联网、大数据、人工智能等技术的快速发展，智能化与信息化技术将

在水库生态调度与防洪抗旱领域得到广泛应用。通过在水库和流域内部署大量传感器，实时获取降雨、水位、流量、水质、生物等多源信息，并利用大数据分析和人工智能算法对数据进行处理和预测，实现水库调度的智能化决策。例如，利用机器学习算法建立洪水预报模型，提高洪水预报的准确性；通过物联网技术实现水库闸门的远程智能控制，提高调度效率。

### 2. 流域综合管理与协同调度

未来，水库生态调度与防洪抗旱将更加注重流域综合管理和协同调度。打破行政区域和部门界限，建立流域统一管理机构，统筹协调流域内各水库的调度运行，实现水资源的优化配置。加强水库与其他水利工程（如堤防、分洪区、灌溉工程等）的联合调度，提高流域整体防洪抗旱能力。同时，将生态保护理念贯穿于流域管理全过程，实现流域生态、经济和社会的协调发展。

### 3. 生态—水文耦合模型发展

为了更准确地模拟生态系统对水库调度的响应，生态—水文耦合模型将成为研究热点。该模型通过将水文过程与生态过程相结合，综合考虑水资源、生物、土壤等要素之间的相互关系，能够更真实地反映水库调度对生态系统的影响。利用生态—水文耦合模型，可以优化水库调度方案，实现生态保护与水资源利用的双赢。例如，通过模型模拟不同调度方案下河流生态系统的变化，为制定科学合理的生态调度方案提供依据。

## 第三节 海绵城市建设与低影响开发技术

在城市化快速推进的背景下，传统城市建设模式引发的内涝频发、水资源短缺、水生态破坏等问题日益凸显。海绵城市建设与低影响开发（Low Impact Development, 简称 LID）技术应运而生，通过构建城市“吸水、蓄水、渗水、净水”的生态系统，重塑城市与水的关系。该技术体系以“自然积存、自然渗透、自然净化”为核心理念，通过模拟自然水文过程，最大限度减少城市建设对生态环境的影响，在提升城市防洪排涝能力、改善水环境质量、促进水资源可持续利用等方面发挥着重要作用，成为现代城市水资源保护与可持续发展的关键路径。

## 一、海绵城市与低影响开发技术原理

### （一）核心理念与基本目标

#### 1. 核心理念

海绵城市建设与低影响开发技术的核心理念是顺应自然、与自然协同共生。传统城市建设多采用“快排式”模式，通过硬化路面、修建管网迅速排放雨水，导致城市水循环失衡，加剧内涝与水资源流失。而海绵城市强调将城市建设成具有良好“弹性”的生态系统，如同海绵般，在降雨时吸水、蓄水、渗水、净水，干旱时释放储存的水资源，实现雨水的自然迁移与净化。低影响开发技术则从源头控制出发，通过分散式、小规模生态设施，模拟自然地形地貌和植被覆盖，减少开发活动对水文、生态系统的干扰，维持区域开发前后的水文平衡。<sup>①</sup>

#### 2. 基本目标

其基本目标涵盖多个维度。在水文目标上，通过削减雨水径流总量、延缓径流峰值时间，降低城市内涝风险；同时提高雨水资源利用率，补充地下水，缓解水资源短缺问题。在生态目标方面，恢复城市水生态系统，保护和修复河流、湖泊、湿地等水体，提升生物多样性。在环境目标上，减少面源污染，通过自然净化过程降低雨水中的污染物含量，改善城市水环境质量。此外，还致力于提升城市景观品质，打造宜居、生态的城市空间，实现生态、社会与经济效益的统一。

### （二）技术理论基础

#### 1. 水文循环模拟

海绵城市与低影响开发技术基于对自然水文循环的深入研究与模拟。自然状态下，降雨通过植被截留、土壤渗透、地表径流等方式参与水循环，维持生态系统的稳定。城市建设中，通过设置透水铺装、雨水花园、绿色屋顶等设施，模拟植被截留和土壤渗透过程，增加雨水下渗量，减少地表径流。例如，透水铺装可使雨水迅速渗透至地下，补充地下水；雨水花园中的植物和土壤层能截留、过滤雨水，延缓雨水径流速度，模拟自然状态下雨水的缓慢迁移过程。

#### 2. 生态系统服务功能强化

该技术注重强化城市生态系统的服务功能。生态系统服务包括水资源调节、水质净化、生物栖息地提供等。海绵城市建设通过恢复和构建湿地、河流等生态

<sup>①</sup> 王羽. 安徽省海绵城市建设水平测度及影响因素研究 [D]. 安徽建筑大学, 2022.

空间,增强生态系统对雨水的调蓄能力;利用植物、微生物的自然净化作用,提升水质净化能力。例如,城市湿地在降雨时可储存大量雨水,降低洪水风险;湿地中的植物和微生物能分解、吸收雨水中的污染物,改善水质。同时,这些生态空间为城市生物提供了栖息地,促进生物多样性保护。

### 3. 景观生态学原理应用

景观生态学原理是海绵城市建设与低影响开发技术的重要理论支撑。通过合理布局生态设施,构建连续的生态廊道和斑块,形成完整的城市生态网络。不同类型的低影响开发设施(如雨水花园、生态树池、湿地等)作为生态斑块,通过绿色街道、河道等生态廊道相互连接,实现物质、能量和生物的流通。这种生态网络不仅能有效应对雨水径流,还能促进城市生态系统的整体性和稳定性,提升城市景观的生态价值。

## 二、海绵城市建设与低影响开发技术措施

### (一) 源头减排技术

#### 1. 透水铺装

透水铺装是海绵城市建设的基础技术之一,包括透水混凝土、透水沥青、透水砖等材料。这些材料具有良好的透水性,能使雨水迅速渗透至地下,减少地表径流。研究表明,透水铺装可使雨水渗透率提高80%~90%,有效缓解城市内涝。在城市道路、广场、停车场等区域应用透水铺装,不仅能解决积水问题,还可补充地下水,改善土壤墒情,为周边植物生长创造有利条件。例如,某城市商业街改造中采用透水砖铺装,降雨时雨水迅速下渗,路面无明显积水,同时地下水位得到一定回升。

#### 2. 绿色屋顶

绿色屋顶是在建筑物屋顶种植植被、铺设种植土和排水层,形成的生态屋顶系统。它具有截留雨水、隔热降温、净化空气等多重功能。植被和种植土可截留部分雨水,延缓雨水径流;植物蒸腾作用和土壤水分蒸发能降低屋顶温度,减少城市热岛效应。一般来说,绿色屋顶可截留30%~70%的雨水,截留量与植被类型、种植土厚度和降雨强度密切相关。在城市建筑密集区推广绿色屋顶,可有效减少雨水径流总量,缓解市政管网排水压力。如某办公楼的绿色屋顶,在小雨条件下可实现雨水零排放,显著减轻了周边排水系统负担。

### 3. 生物滞留设施

生物滞留设施包括雨水花园、生态树池等，通过植物、土壤和微生物的共同作用，实现雨水的截留、渗透和净化。雨水花园通常由表层种植土层、砂层、砾石层和排水系统组成，雨水进入花园后，经植物截留、土壤过滤和微生物分解，去除雨水中的悬浮物、有机物和部分污染物。生态树池则是在树木周围设置具有渗透功能的树池，收集和净化周边雨水，同时为树木生长提供良好的水分和养分条件。某小区建设的雨水花园，对雨水中的 COD 去除率可达 50%~70%，悬浮物去除率超过 80%，有效改善了小区内的水环境。

## （二）过程控制技术

### 1. 植草沟

植草沟是一种表面覆盖植被的开放式沟渠，用于收集、输送和净化雨水。它通过植被和土壤的截留、过滤作用，去除雨水中的污染物，同时延缓雨水径流速度。植草沟可分为转输型、渗透型和储存型，根据不同需求选择合适的类型。转输型植草沟主要用于雨水输送，在沟内种植耐水湿植物；渗透型植草沟底部设置砾石层，促进雨水下渗；储存型植草沟则具有一定的蓄水空间，用于调节雨水径流。在城市道路两侧、居住区绿地等区域设置植草沟，可有效收集和净化周边雨水，减轻管网排水压力。例如，某城市道路旁的植草沟，在降雨时能快速收集路面雨水，经植物和土壤净化后，排入市政管网的雨水中污染物含量大幅降低。

### 2. 雨水塘（湿地）

雨水塘和湿地是具有较大调蓄容积的生态设施，可有效调节雨水径流，净化水质。雨水塘通过蓄水、沉淀和水生植物的吸收作用，去除雨水中的悬浮物和部分污染物；湿地则利用植物、微生物和土壤的共同作用，对雨水进行深度净化。湿地中的水生植物如芦苇、香蒲等能吸收氮、磷等营养物质，微生物可分解有机物，使水质得到显著改善。某城市建设的雨水湿地，对雨水中的总氮去除率可达 60%~80%，总磷去除率为 50%~70%，成为城市重要的水质净化和生态景观空间。

### 3. 调节池

调节池用于调节雨水径流的流量和水质，在降雨初期储存污染程度较高的雨水，待降雨后期或雨后进行处理。调节池可设置在管网系统中，也可与其他生态设施结合使用。通过调节池的调蓄作用，可避免大量高浓度雨水直接进入市政管网或水体，减轻污水处理厂的负荷。同时，调节池内的沉淀作用可去除部分悬浮

物，提高后续处理效率。例如，某工业园区设置的雨水调节池，有效降低了初期雨水对周边水体的污染，保障了园区水环境安全。

### （三）系统治理技术

#### 1. 城市水系连通与生态修复

城市水系连通与生态修复是海绵城市建设的重要组成部分。通过打通城市内的断头河、沟渠，恢复水系的连通性，增强水体的流动性和自净能力。同时，对受损的河流、湖泊、湿地等水体进行生态修复，恢复其生态功能。例如，采用生态护岸技术替代硬质驳岸，种植水生植物，为水生生物提供栖息地；清理河道淤泥，恢复河道的自然形态。某城市通过水系连通和生态修复工程，使原本黑臭的河道水质得到明显改善，生物多样性显著增加，形成了连续的城市水生态廊道。

#### 2. 海绵型道路与广场建设

海绵型道路与广场综合运用多种低影响开发技术，实现雨水的收集、渗透和净化。在道路建设中，采用透水铺装、下沉式绿地、生物滞留带等设施，收集和處理路面雨水；在广场设计中，设置雨水花园、景观水体等，既满足景观需求，又发挥雨水调蓄和净化功能。某城市新建的海绵型广场，通过合理布局透水铺装、雨水花园和景观水池，在降雨时可实现雨水的自给自足，多余雨水经净化后排入市政管网，成为城市海绵建设的示范项目。

#### 3. 海绵型小区与园区建设

海绵型小区和园区将低影响开发技术融入规划设计和建设中，打造完整的雨水管理系统。小区内设置透水铺装的道路和停车场、雨水花园、屋顶绿化等设施，实现雨水的源头减排；通过建设雨水收集池、湿地等设施，对雨水进行储存和净化，用于小区绿化灌溉、道路冲洗等。工业园区则结合生产用水需求，建设雨水收集回用系统，将处理后的雨水回用于工业冷却、景观补水等，提高水资源利用效率。某海绵型小区建成后，雨水径流总量削减率达 70%，雨水回用率达到 30%，显著降低了小区对市政供水的依赖。

## 三、典型工程应用案例

### （一）深圳市光明新区海绵城市试点建设

深圳市光明新区作为国家首批海绵城市试点区域，在海绵城市建设方面取得显著成效。新区以流域为单元，统筹规划，构建了“源头减排—过程控制—系统

治理”的海绵城市建设体系。在源头减排方面，新建和改造项目全面采用透水铺装、绿色屋顶、雨水花园等技术。例如，光明新城公园采用透水混凝土铺装地面，面积达 5 万平方米，雨水渗透率超过 90%；部分建筑实施绿色屋顶改造，总面积达 2 万平方米，有效截留雨水。在过程控制环节，建设了大量植草沟、生态湿地等设施。茅洲河支流通过生态修复，建设了长 5km 的植草沟和面积达 10 万平方米的湿地，显著改善了河道水质和生态环境。在系统治理方面，实施水系连通工程，打通了区域内的断头河渠，恢复了水系生态功能。经过几年的建设，光明新区雨水径流总量削减率达到 75%，内涝积水点全部消除，河道水质从劣 V 类提升至 IV 类，生物多样性明显增加，成为全国海绵城市建设的典范。

### （二）嘉兴市海绵城市建设实践

嘉兴市地处江南水乡，面临着内涝频发、水质恶化等问题。在海绵城市建设中，嘉兴市结合本地水乡特色，探索出了一套适合江南地区的海绵城市建设模式。在城市道路改造中，采用透水沥青铺装，设置下沉式绿地和生态树池，有效收集和净化路面雨水。如南湖大道改造后，路面雨水经生态设施处理后，直接排入河道的雨水中污染物含量大幅降低。在居住区建设方面，推广海绵型小区，如秀洲区某小区建设了雨水收集回用系统和大面积的雨水花园，实现了小区内雨水的自给自足，绿化灌溉、道路冲洗等全部使用收集处理后的雨水。同时，嘉兴市注重水系生态修复，对城市内的河道进行清淤、护岸生态化改造，并建设了多个湿地景观公园。通过海绵城市建设，嘉兴市内涝灾害明显减少，河道水质得到显著改善，城市生态环境和居民生活品质大幅提升。

### （三）美国波特兰市低影响开发技术应用

美国波特兰市是低影响开发技术应用的先驱城市之一。该市在城市建设和改造中广泛应用低影响开发技术，以解决城市内涝和雨水污染问题。在波特兰市的街道改造中，大量采用透水铺装和生物滞留设施。例如，SEClinton 街改造项目将原有不透水路面更换为透水混凝土，并在道路两侧设置雨水花园，有效减少了路面雨水径流，同时净化了雨水。在新建小区和商业建筑中，绿色屋顶和雨水收集系统成为标准配置。某商业园区的绿色屋顶面积占屋顶总面积的 60%，每年可截留雨水约 10 万吨，用于园区内的景观补水和空调冷却用水。此外，波特兰市还建立了完善的雨水管理体系，通过政策法规推动低影响开发技术的应用，并开展公众教育活动，提高市民对雨水管理的认识和参与度。经过多年实践，波特

兰市的城市内涝问题得到有效缓解，雨水污染显著减少，城市生态环境得到极大改善。

## 四、面临的挑战与发展趋势

### （一）面临的挑战

#### 1. 建设理念与传统模式冲突

海绵城市建设与低影响开发技术强调生态优先、自然协同的理念，与传统城市建设中以工程设施为主、追求快速见效的模式存在较大冲突。一些地方政府和建设单位对海绵城市建设的认识不足，仍习惯于采用传统的“快排式”排水系统和硬化建设方式。在项目实施过程中，存在重地上景观、轻地下设施，重短期效益、轻长期规划的现象，导致海绵城市建设难以达到预期效果。

#### 2. 技术标准与规范不完善

目前，海绵城市建设与低影响开发技术的相关标准和规范尚不完善，不同地区的气候、土壤、地形等条件差异较大，现有技术标准难以完全适应各地实际需求。在设施设计、施工和验收等环节，缺乏统一的技术指标和操作指南，导致工程质量参差不齐。例如，对于透水铺装的透水性能检测、雨水花园的植物配置等，各地做法不一，影响了工程的整体效果和使用寿命。

#### 3. 资金投入与运维管理压力大

海绵城市建设需要大量的资金投入，包括前期规划设计、工程建设和后期运维管理等费用。对于一些经济欠发达地区，资金短缺成为制约海绵城市建设的重要因素。同时，海绵城市设施的运维管理难度较大，需要专业的技术人员和设备。如透水铺装的堵塞清理、雨水花园的植物养护、雨水收集系统的设备维护等，都需要持续的资金和人力投入。目前，许多城市缺乏完善的运维管理机制，导致部分设施老化、损坏，无法正常发挥功能。

#### 4. 公众参与度不足

海绵城市建设是一项系统工程，需要全社会的共同参与。然而，目前公众对海绵城市的认知度和参与度较低，缺乏主动参与建设和维护的意识。部分市民对透水铺装、雨水花园等设施存在误解，认为会影响生活便利性；在设施运维过程中，存在随意破坏、占用等现象。公众参与度不足，不利于海绵城市建设理念的推广和设施的长期有效运行。

## （二）发展趋势

### 1. 技术创新与集成应用

未来，海绵城市建设与低影响开发技术将不断创新，新材料、新工艺、新设备将不断涌现。例如，研发具有更高透水性能、更强耐久性的透水材料；开发智能化的雨水收集和处理设备，实现雨水管理的自动化和精准化。同时，多种技术的集成应用将成为趋势，通过将透水铺装、绿色屋顶、雨水花园等技术智慧监测系统相结合，构建更高效、更智能的海绵城市系统。

### 2. 智慧化管理与监测

随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展，海绵城市将向智慧化方向发展。通过在城市内部署大量传感器，实时监测雨水流量、水质、设施运行状态等信息，并利用大数据分析和人工智能算法，实现对海绵城市系统的智能管理和优化调度。例如，根据降雨预报信息，提前调整雨水调蓄设施的运行状态；通过监测设施运行数据，及时发现故障并进行维修，提高系统的可靠性和运行效率。

### 3. 跨区域协同与流域统筹

海绵城市建设将更加注重跨区域协同和流域统筹。城市的水管系统与周边区域紧密相连，单一城市的海绵城市建设难以解决流域性的水问题。未来，将加强区域间的合作与协调，以流域为单元进行统一规划和建设，实现上下游、左右岸的协同治理。例如，在河流流域内，上下游城市共同制定海绵城市建设规划，合理分配雨水资源，共同应对洪涝灾害和水资源短缺问题。

### 4. 政策法规与公众参与机制完善

为推动海绵城市建设，将进一步完善相关政策法规，明确建设标准、责任主体和奖惩机制。同时，加强公众参与机制建设，通过宣传教育、社区活动等方式，提高公众对海绵城市的认知度和参与度。鼓励公众参与海绵城市建设的规划、设计和监督，形成政府主导、企业实施、公众参与的良好机制。



## 第七章 农业与工业水资源保护技术

### 第一节 节水灌溉与精准农业技术

在全球水资源短缺的严峻形势下，农业用水占比居高不下，约占总用水量的70%，其中灌溉用水又占据农业用水的绝大部分。传统大水漫灌的灌溉方式不仅浪费大量水资源，还易引发土壤盐碱化、地下水位下降等生态问题。与此同时，随着农业现代化进程加速，对农产品产量和质量的要求不断提高，传统粗放型的农业生产模式已难以满足需求。节水灌溉与精准农业技术应运而生，通过创新灌溉方式、精准调控农业资源投入，在保障农作物产量与品质的同时，实现水资源的高效利用，成为农业可持续发展的关键支撑。

#### 一、节水灌溉技术原理与分类

##### （一）节水灌溉技术原理

节水灌溉技术以“按需供水”为核心，通过对土壤墒情、作物需水规律、气象条件等多因素的综合分析，精准控制灌溉水量与时间，减少无效蒸发、渗漏等水资源浪费。其核心原理涵盖三个层面：一是通过改变灌溉方式，如将地表漫灌改为局部灌溉，减少水分在输送和灌溉过程中的损失；二是利用物理、化学和生物手段改善土壤保水性能，提高水分利用效率；三是结合作物生长周期，在关键需水期进行精准灌溉，避免水分过度消耗。例如，通过土壤湿度传感器实时监测土壤含水量，当含水量低于作物生长需求阈值时，自动启动灌溉系统，实现水资源的精准供给。

##### （二）主要节水灌溉技术分类

###### 1. 喷灌技术

喷灌技术是将水通过水泵加压，经管道输送至喷头，以喷洒的方式均匀灌溉农田。根据喷头的移动方式，可分为固定式喷灌、半固定式喷灌和移动式喷灌。固定式喷灌系统的管道和喷头固定安装，具有灌溉均匀度高、自动化程度高的优

点,但初期投资较大;半固定式喷灌系统的干管固定,支管可移动,降低了投资成本;移动式喷灌系统灵活性强,适用于不同地块,但需要人工频繁移动设备。喷灌技术相比传统漫灌,可节水 30%~50%,且能调节田间小气候,改善作物生长环境。在北方小麦种植区,采用喷灌技术后,灌溉水利用系数从 0.4 提升至 0.7,小麦产量提高 15%~20%。<sup>①</sup>

## 2. 滴灌技术

滴灌技术是通过滴头将水一滴一滴地、均匀而缓慢地滴入作物根区土壤中的灌溉方式。它可实现对作物的精准供水,避免水分蒸发和深层渗漏,节水效果显著,较漫灌可节水 50%~70%。滴灌系统主要由水源工程、首部枢纽、输配水管网和滴头组成,根据滴头的布置方式,可分为地表滴灌和地下滴灌。地表滴灌安装方便,便于观察和维护,但滴灌带易老化;地下滴灌将滴灌带埋于地下,可减少蒸发和杂草生长,但维修难度较大。滴灌技术特别适用于干旱缺水地区和高附加值经济作物种植,如新疆的棉花种植采用滴灌技术后,不仅节水效果显著,还能通过水肥一体化技术精准施肥,提高棉花品质和产量。

## 3. 微灌技术

微灌技术包括微喷灌、涌泉灌等,是介于喷灌和滴灌之间的一种局部灌溉方式。微喷灌通过低压管道系统和微喷头,将水以细小的雾状喷洒在作物叶面和根区;涌泉灌则是通过涌水器将水缓慢地涌出,浸润作物根区土壤。微灌技术具有节水、节能、适应性强等特点,可节水 40%~60%,适用于果园、茶园、温室大棚等种植区域。在山东的苹果园中,采用微喷灌技术,既能满足果树生长需水,又能降低空气温度,减少病虫害发生,提高苹果品质。

## 4. 渠道防渗与管道输水技术

渠道防渗技术通过对传统土渠进行衬砌,减少渠道渗漏损失,提高输水效率。常用的防渗材料有混凝土、塑料薄膜、浆砌石等。采用渠道防渗后,渠道水利用系数可从 0.4~0.6 提高到 0.8~0.9。管道输水技术则是通过管道代替明渠输水,减少水分蒸发和渗漏,具有输水速度快、占地少、便于管理等优点。在河南的农田灌溉中,推广管道输水技术后,灌溉水利用系数提高 0.2~0.3,有效缓解了水资源短缺问题。

---

<sup>①</sup> 张宏. 农田节水灌溉技术的应用研究 [J]. 园艺与种苗, 2025, 45 (2): 108-110.

## 二、精准农业技术原理与应用

### （一）精准农业技术原理

精准农业技术以信息技术为支撑，融合全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）、遥感技术（RS）、物联网（IoT）和智能决策系统，实现对农业生产过程的精准监测、管理和调控。其核心原理是通过获取农田土壤、作物生长、气象等多源数据的采集与分析，构建农田空间信息数据库，精准识别农田内不同区域的差异，制定个性化的农业生产方案，实现资源的精准投入和高效利用。例如，利用遥感技术获取农田作物的长势信息，结合GIS分析不同区域的土壤肥力差异，通过变量施肥机实现精准施肥，提高肥料利用率，减少环境污染。

### （二）精准农业技术主要应用领域

#### 1. 精准灌溉管理

结合土壤湿度传感器、气象站和作物生长模型，实时监测土壤含水量、蒸发量和作物需水量，制定精准灌溉计划。例如，在温室大棚中安装土壤湿度传感器和气象监测设备，将数据实时传输至智能控制系统，系统根据作物需水模型自动控制滴灌系统的开启与关闭，实现按需供水。以色列的现代化农场采用精准灌溉管理技术，在保证作物产量的同时，节水率高达80%。

#### 2. 变量施肥技术

利用GPS和GIS技术，对农田土壤养分进行空间分析，绘制土壤养分分布图。根据不同区域的土壤肥力和作物需求，通过变量施肥机实现肥料的精准投放。例如，在玉米种植中，通过土壤采样分析和GIS制图，确定不同地块的氮、磷、钾需求差异，采用变量施肥机进行施肥，使肥料利用率提高20%~30%，同时减少因过量施肥导致的面源污染。

#### 3. 病虫害精准防治

借助遥感技术和无人机监测，及时发现作物病虫害发生区域和程度。结合病虫害预测模型，制定精准的防治方案，采用变量施药设备进行精准施药。在水稻种植区，利用无人机搭载多光谱相机，快速识别稻瘟病发生区域，然后通过无人机精准喷洒农药，减少农药使用量30%~50%，降低对环境的污染。

#### 4. 作物长势监测与产量预估

通过遥感影像分析和田间传感器监测，实时掌握作物的生长状况，如叶面积指数、生物量等。结合作物生长模型，预测作物产量，为农业生产决策提供依据。

例如，在小麦种植中，利用卫星遥感影像和田间监测数据，建立小麦生长模型，提前预测产量，帮助农民合理安排收割时间和销售计划。

### 三、典型应用案例

#### （一）内蒙古河套灌区节水改造项目

内蒙古河套灌区是我国重要的粮食生产基地，但传统灌溉方式导致水资源浪费严重。为解决这一问题，灌区实施了大规模节水改造项目。项目采用渠道防渗和管道输水技术，对干支渠进行混凝土衬砌，铺设低压输水管道。同时，推广喷灌、滴灌等先进节水灌溉技术，在经济作物种植区建设滴灌系统，在大田作物种植区推广喷灌系统。项目实施后，灌溉水利用系数从 0.35 提高到 0.55，年节约水量达 5 亿立方米，同时改善了灌区土壤盐碱化问题，提高了农作物产量和品质。

#### （二）美国中西部精准农业实践

美国中西部是重要的玉米和大豆产区，广泛应用精准农业技术。农场主利用 GPS 定位系统和变量施肥机，根据土壤肥力差异进行精准施肥；通过安装在拖拉机上的传感器和智能控制系统，实现精准播种，控制播种深度和间距。同时，利用无人机和卫星遥感监测作物长势，及时发现病虫害并进行精准防治。这些技术的应用使肥料利用率提高 25%，农药使用量减少 30%，农作物产量提高 15%~20%，有效提高了农业生产效益，减少了对环境的影响。

#### （三）中国新疆棉花滴灌与精准农业融合项目

新疆是我国最大的棉花生产基地，水资源短缺制约着棉花产业发展。当地推广滴灌技术，并与精准农业技术相结合，实现了棉花生产的高效节水。通过在棉田安装土壤湿度传感器和气象站，实时监测土壤墒情和气象条件，结合棉花生长模型，制定精准灌溉计划。同时，利用变量施肥机实现水肥一体化，根据棉花不同生长阶段的需求，精准供给水分和养分。项目实施后，棉花种植节水率达 60%，肥料利用率提高 30%，棉花产量提高 20%，品质也得到显著提升。

### 四、面临的挑战与发展趋势

#### （一）面临的挑战

##### 1. 技术推广成本高

节水灌溉和精准农业技术的初期设备投资较大，如滴灌系统每亩安装成本在

1000~3000 元,精准农业设备如变量施肥机、无人机等价格昂贵。对于经济实力较弱的农户和农业企业来说,难以承担高额的设备购置费用,限制了技术的推广应用。

## 2. 专业人才短缺

节水灌溉与精准农业技术涉及多学科知识,需要专业技术人员进行设备安装、调试和维护,以及数据分析和决策支持。目前,我国农业领域专业技术人才匮乏,农民对新技术的接受和应用能力有限,影响了技术的实施效果。

## 3. 数据管理与共享困难

精准农业技术依赖大量数据的采集、分析和应用,但目前数据管理体系不完善,数据标准不统一,不同设备和系统之间的数据难以共享和兼容。此外,数据安全和隐私保护问题也制约了数据的有效利用。

## 4. 基础设施配套不足

部分地区农田水利基础设施老化,难以满足节水灌溉和精准农业技术的要求。例如,一些地区的供水管道老化、破损,导致输水效率低下;电力供应不稳定,影响智能灌溉设备的正常运行。

# (二) 发展趋势

## 1. 智能化与自动化升级

随着物联网、人工智能和 5G 技术的发展,节水灌溉和精准农业技术将向智能化、自动化方向升级。未来,灌溉系统将实现全自动控制,根据实时监测数据自动调节灌溉水量和时间;农业机械将具备自主导航和智能决策功能,实现精准作业。例如,智能灌溉机器人可根据土壤湿度和作物需水情况,自动进行灌溉作业,提高灌溉效率和精准度。

## 2. 多技术融合发展

节水灌溉技术将与精准农业技术、生物技术、新能源技术等深度融合。例如,将基因编辑技术应用于作物品种改良,培育耐旱、节水的作物品种;利用太阳能、风能等新能源为节水灌溉设备提供动力,降低对传统能源的依赖。同时,区块链技术将应用于农业数据管理,保障数据安全和共享。

## 3. 标准化与规范化建设

为促进节水灌溉和精准农业技术的健康发展,将加强相关标准和规范的制定,统一设备接口、数据格式和技术要求。建立健全技术推广服务体系,加强对技术

应用的指导和培训，提高技术实施的标准化和规范化水平。

#### 4. 政策支持与模式创新

政府将加大对节水灌溉和精准农业技术的政策支持和资金投入，鼓励金融机构提供优惠贷款和保险服务。同时，创新农业经营模式，推广农业合作社、农业企业与农户合作的模式，降低技术应用成本，提高农业生产的规模化和集约化水平。

## 第二节 工业废水循环利用与零排放技术

在全球工业化快速推进的进程中，工业用水规模持续攀升，而工业废水排放带来的污染问题也愈发严峻。联合国数据显示，全球工业废水年排放量已突破6000亿吨，其中重金属、有机污染物、酸碱物质等复杂成分，不仅对水资源造成严重破坏，还威胁着生态系统平衡与人类健康。传统的工业废水达标排放模式，已难以满足可持续发展需求。工业废水循环利用与零排放技术应运而生，通过技术创新与系统优化，将工业废水转化为可利用资源，实现污染物的减量化、无害化与资源化，成为工业绿色转型的核心驱动力。

### 一、工业废水循环利用与零排放技术原理

#### （一）核心理念与目标体系

工业废水循环利用与零排放技术秉持“减量化、再利用、资源化”三位一体的核心理念。减量化聚焦生产源头，通过革新生产工艺、优化设备参数，减少废水产生量；再利用强调对处理后废水的循环应用，依据不同生产环节的水质要求，将处理水回用于冷却、洗涤等工序；资源化则致力于将废水中的污染物转化为有价值的产品或能源，实现资源的循环再生。零排放作为终极目标，要求工业生产全过程不向自然环境排放任何形式的废水，所有废水经处理后或循环利用，或固化处置。<sup>①</sup>这一技术体系旨在达成多重目标：在水资源层面，显著提升工业用水重复利用率，缓解水资源短缺；在环境保护层面，大幅降低污染物排放，遏制水体、土壤和大气污染；在经济维度，降低企业用水与废水处理成本，挖掘污染物

---

① 张壮伟. 工业废水循环利用的机理与方法研究 [J]. 资源节约与环保, 2021 (12): 114-116.

资源化带来的经济效益；在社会层面，推动工业绿色可持续发展，保障生态环境安全与公众健康福祉。

## （二）技术理论基石

### 1. 物质分离与转化机制

物理分离技术依托物质物理性质差异实现固液、液液分离。例如，离心分离利用离心力使不同密度物质分层，常用于含油废水处理，可有效分离浮油与水分；过滤技术通过滤网拦截悬浮物，微滤膜能截留  $0.1\sim 10\mu\text{m}$  的颗粒，超滤膜则可分离  $0.001\sim 0.1\mu\text{m}$  的胶体与大分子有机物。化学转化借助中和、氧化还原、化学沉淀等反应改变污染物性质。以电镀废水处理为例，投加石灰进行中和反应，不仅调节 pH 值，还能使重金属离子形成氢氧化物沉淀；芬顿氧化利用过氧化氢与亚铁离子反应生成羟基自由基，氧化降解废水中的难降解有机物。生物处理依靠微生物代谢活动分解有机物。活性污泥法通过微生物菌群吸附、分解废水中的有机污染物；厌氧生物处理可在无氧条件下降解高浓度有机废水，同时产生沼气作为能源。

### 2. 热力学与传质理论支撑

热力学原理为工业废水处理工艺设计提供能量分析依据。蒸发浓缩过程需考量水的蒸发潜热，多效蒸发通过多次利用蒸汽潜热降低能耗，机械蒸汽再压缩（MVR）技术则通过压缩二次蒸汽实现能量循环利用，将蒸发能耗降低  $30\%\sim 50\%$ 。传质理论在吸附、离子交换等技术中发挥关键作用。活性炭吸附利用其巨大的比表面积，通过固—液界面传质吸附废水中的有机物；离子交换树脂通过离子交换反应，去除或回收废水中的特定离子，如在重金属废水处理中，阳离子交换树脂可高效吸附铜、锌等金属离子。

### 3. 系统工程优化逻辑

工业废水处理是复杂的系统工程，需综合考量废水水质、水量、处理工艺、设备选型与运行成本等要素。从整体出发，根据废水污染物特性选择预处理、深度处理工艺组合，合理布局设备与管道。例如，高盐有机废水处理常采用“预处理—膜浓缩—蒸发结晶”工艺路线，同时配备自动化控制系统，实时监测调节 pH 值、流量、压力等参数，保障系统高效稳定运行。

## 二、工业废水循环利用与零排放核心技术

### （一）预处理技术革新

#### 1. 智能格栅与高效沉砂系统

现代智能格栅集成传感器与自动清理装置，通过图像识别技术实时监测栅渣堆积情况，当达到设定阈值时，自动启动机械清理，提升拦截效率与运行稳定性。在汽车制造涂装废水处理中，智能格栅对漆渣、纤维的拦截率达 95% 以上。高效沉砂池采用旋流沉砂技术，利用离心力加速砂粒沉降，沉砂效率提升 30%。部分沉砂池配备在线监测设备，实时反馈沉砂量与粒径分布，为后续污泥处理提供精准数据。

#### 2. 多功能调节池设计

调节池不再局限于水量水质调节，而是向多功能集成发展。化工园区的调节池常与应急事故池结合，突发环境事件时可迅速储存事故废水，防止污染扩散。部分调节池内置生物预处理单元，投加微生物菌剂对有机物进行初步降解。如某制药园区调节池设置生物接触氧化单元，对青霉素类废水预处理后，COD 去除率达 20%~30%。

#### 3. 精准中和处理技术

中和处理通过精准投加药剂调节废水 pH 值。自动化控制系统根据在线 pH 监测数据，精确控制酸碱药剂投加量。在电镀酸性重金属废水处理中，投加石灰中和，不仅调节 pH，还使重金属离子沉淀，同时采用混凝沉淀技术，进一步去除悬浮物与重金属，出水重金属浓度可降至国家排放标准以下。

### （二）深度处理技术突破

#### 1. 膜分离技术创新

新型膜材料不断涌现，石墨烯基复合膜凭借超高机械强度与分子筛分性能，对二价离子截留率超 99%，抗污染能力显著增强，在海水淡化与工业废水处理项目中，使反渗透系统运行压力降低 20%，能耗减少 15%。纳滤膜对小分子有机物、二价离子具有高选择性，在制药废水处理中，可有效去除抗生素、激素等污染物，同时保留部分有用物质。超滤—反渗透组合工艺广泛应用于电子工业废水处理，去除重金属离子与溶解性盐分后，出水可回用于芯片清洗。

## 2. 高级氧化技术升级

芬顿氧化与臭氧催化氧化协同应用,产生更多羟基自由基,提升对难降解有机物的处理效率。在焦化废水处理中,“芬顿氧化—臭氧催化氧化—生物活性炭”组合工艺使 COD 去除率从 60% 提升至 85%,氨氮去除率达 90% 以上。光催化氧化技术采用新型催化剂如二氧化钛改性材料,在可见光下即可激发自由基产生,对染料废水、农药废水处理效果显著,污染物降解率可达 80%~90%。

## 3. 离子交换技术优化

新型离子交换树脂性能不断提升,螯合树脂对特定重金属离子具有高选择性 with 吸附容量。在重金属废水处理中,螯合树脂可将铜、镍等金属离子浓度降至 0.1mg/L 以下,实现重金属高效回收。同时,开发出低耗酸、低耗碱的再生工艺,减少再生废水产生量。

# (三) 循环利用与零排放系统集成

## 1. 智能循环利用系统构建

工业废水循环利用系统实现智能化升级,配备多参数在线监测设备,实时监测 pH 值、电导率、浊度、微生物含量等指标,通过物联网传输数据至中央控制系统。当水质参数异常时,系统自动调整加药泵投加量、启动旁流过滤装置。热电厂循环冷却水系统通过智能调控,将浓缩倍数从 3.5 提升至 5.0,节水率达 30%。

## 2. 零排放工艺创新实践

“预处理—膜浓缩—蒸发结晶”零排放工艺不断优化。在煤化工废水处理中,预处理去除悬浮物、有机物与部分盐分;纳滤—反渗透膜浓缩产生高浓度浓缩液与回用水;MVR 蒸发结晶使水分蒸发,结晶盐纯度达 98% 以上,可作为化工原料,实现废水零排放与资源回收。

# 三、典型工程应用与实践成效

## (一) 神华煤制油化工零排放示范工程

神华煤制油化工项目针对高盐有机废水,构建“预处理—膜浓缩—MVR 蒸发结晶”零排放系统。预处理阶段通过格栅、沉砂池、气浮、生物处理与高级氧化,去除大颗粒杂质、有机物与难降解污染物;膜浓缩采用纳滤—反渗透技术,淡水回用于生产,浓缩液进入 MVR 蒸发结晶单元。项目实施后,年回用水量达 500 万吨,结晶盐实现资源化利用,为煤化工行业零排放提供标杆。

## （二）电子芯片制造废水循环利用工程

某电子芯片制造企业采用“中和沉淀—膜分离—离子交换—蒸发浓缩”工艺处理含重金属与酸碱废水。中和沉淀去除大部分重金属离子，超滤—反渗透膜深度处理后，出水达芯片清洗用水标准；离子交换回收铜、镍等重金属，浓缩液蒸发浓缩后安全处置。工程实施后，废水循环利用率超 90%，年节水 100 万吨，重金属回收率达 95% 以上。

## （三）印染废水资源化利用工程

某印染企业构建“预处理—生物处理—高级氧化—膜分离—蒸发结晶”资源化系统。预处理去除悬浮物与部分有机物，厌氧—好氧生物处理降解大部分有机物，臭氧氧化与光催化氧化去除残留难降解物质；膜分离产水回用于漂洗，浓水蒸发结晶分离染料与盐分，染料经处理后回用，盐分无害化处置。工程使废水循环利用率达 70%，年节水 30 万吨，降低生产成本 20%。

# 四、技术发展挑战与未来趋势

## （一）现存挑战分析

### 1. 技术与成本瓶颈

工业废水的复杂性堪称全球水处理领域的“头号难题”。据国际水协会（IWA）统计，化工、制药、石化等行业排放的废水中，超过 60% 含有两种以上复杂污染物，部分煤化工废水甚至检测出多达上百种有机化合物。以煤化工行业的高盐有机废水为例，其不仅含有酚类、多环芳烃等难降解有机物，还伴有高达 10000-30000mg/L 的总溶解固体（TDS），常规处理技术难以实现有效分离与降解。蒸发结晶技术作为零排放的关键环节，其高昂的成本成为中小企业难以逾越的障碍。以机械蒸汽再压缩（MVR）蒸发设备为例，单套处理规模为 50m<sup>3</sup>/h 的设备投资高达 1200~1500 万元，且运行过程中每处理 1 吨废水需消耗 20-30kW·h 的电，运行成本达 50~80 元/t。这导致许多中小企业即便意识到零排放的重要性，也因资金压力望而却步。据《中国工业废水处理行业发展报告》显示，我国年排放废水 10 万吨以下的中小企业中，仅有不足 15% 采用先进的零排放技术，多数企业仍依赖传统的达标排放模式，间接加剧了环境污染压力。此外，现有技术在应对新型污染物时也面临巨大挑战。随着新兴产业的发展，废水中出现了如全氟辛酸磺酸（PFOS）、微塑料、抗生素抗性基因等新型污染物，

这些物质具有高毒性、持久性和生物累积性特点，现有处理工艺对其去除效率普遍低于 40%，亟待技术突破。

## 2. 标准规范缺失

当前，工业废水循环利用与零排放领域的标准规范呈现“碎片化”状态。我国虽已出台《污水综合排放标准》《工业循环冷却水处理设计规范》等相关标准，但不同地区、行业的执行差异显著。例如，长三角地区对印染废水的 COD 排放限值要求低于 80mg/L，而中西部部分地区仍执行 100mg/L 的标准，这种区域差异导致企业在跨区域投资时面临技术适配难题。对于新型污染物的处理，现行标准更是处于空白状态。以抗生素残留为例，我国尚未制定工业废水中抗生素的排放限值，仅有少数研究机构提出部分抗生素的参考阈值。在零排放定义方面，国际上尚无统一标准，欧盟将“零排放”定义为废水中污染物浓度低于检测限，而美国则强调污染物的资源化利用程度，这种概念分歧导致企业在技术研发和项目建设时缺乏明确导向。标准规范的缺失还体现在检测方法上。对于某些痕量污染物，如纳米颗粒、内分泌干扰物，现有的检测技术存在灵敏度不足、检测周期长等问题，难以满足实时监测需求，进一步制约了行业规范化发展。

## 3. 运行管理难题

工业废水处理系统的复杂性对运行管理提出了极高要求。一个完整的零排放处理系统通常涉及预处理、膜分离、蒸发结晶等 10 余个工艺单元，每个单元的参数变化都会影响整体处理效果。例如，反渗透膜的运行压力、温度、pH 值需严格控制在特定范围，稍有偏差就会导致膜通量下降或脱盐率降低。据统计，我国工业废水处理系统因操作不当导致的故障频率高达每月 2~3 次，设备平均停机时间超过 12 小时 / 月。专业技术人才的匮乏加剧了管理难度。调查显示，我国工业废水处理领域的专业技术人员缺口达 30 万人，且现有人员中具备高级技术职称的不足 15%。许多企业的操作人员仅经过简单培训便上岗，缺乏对复杂工艺的理解和故障诊断能力。某化工企业因操作人员未及时调整中和池的 pH 值，导致后续膜系统堵塞，直接经济损失超过 500 万元。此外，运行管理制度的不完善也是突出问题。多数企业缺乏标准化的操作手册和应急预案，对设备的维护保养仅停留在表面清洁，未建立预防性维护体系。同时，数据管理混乱，大量运行数据未得到有效分析利用，无法为工艺优化提供支撑。

#### 4. 公众认知不足

公众对工业废水循环利用与零排放技术的认知存在严重偏差。中国环境科学研究院的调查显示, 78% 的受访者对循环利用水的安全性表示担忧, 认为“处理过的水必然存在有害物质”。这种误解源于信息不对称, 企业在宣传中往往侧重技术优势, 忽视了对处理过程和水质安全性的详细说明。零排放工程产生的二次污染物问题引发公众抵触。蒸发结晶产生的结晶盐若处置不当, 可能造成土壤污染和地下水污染, 这成为周边居民反对项目建设的主要原因。某工业园区的零排放项目因结晶盐暂存场选址靠近居民区, 引发上千名居民联名抗议, 导致项目延期 18 个月, 额外增加成本 3000 余万元。社会科普宣传的不足进一步加剧了公众的不信任。目前, 我国关于工业废水处理的科普活动主要集中在学校和社区, 针对企业员工和决策者的培训较少, 且宣传形式单一, 多以文字展板为主, 缺乏生动形象的案例展示和互动体验, 难以有效提升公众认知水平。

### (二) 未来发展趋势

#### 1. 技术创新突破

新材料研发将成为技术突破的核心方向。在膜材料领域, 石墨烯基复合膜的研究已取得阶段性成果。中国科学院研发的氧化石墨烯—聚酰胺复合膜, 对二价盐的截留率高达 99.8%, 且抗污染性能提升 3 倍, 预计 2025 年将实现规模化应用。纳米纤维膜凭借其独特的三维孔隙结构, 在处理含油废水时展现出巨大潜力, 油水分离效率可达 99.9%, 目前已在油田废水处理中开展中试研究。高级氧化技术正朝着高效、绿色方向发展。微波诱导氧化技术通过微波激发催化剂产生羟基自由基, 对难降解有机物的降解效率比传统芬顿氧化提高 40% 以上, 且可减少 30% 的药剂用量。等离子体氧化技术利用高压放电产生的活性粒子, 能快速分解抗生素、农药等污染物, 处理时间缩短至传统工艺的 1/3。这些新技术的应用将显著提升工业废水的处理效率和效果。低耗蒸发工艺的研究也在加速推进。真空冷冻蒸发技术利用真空环境下溶液的低温沸腾特性, 将蒸发温度降低至 30℃ 以下, 能耗较传统蒸发技术降低 60%。目前, 该技术已在高盐废水处理领域开展示范应用, 预计未来 5 年将逐步实现产业化推广。

#### 2. 智能化深度融合

物联网、大数据和人工智能技术的深度融合将重塑工业废水处理模式。智能传感器的广泛应用可实现对水质、设备运行状态的实时监测。德国某水务公司开

发的智能监测系统,通过部署 pH、浊度、电导率等传感器,每秒钟采集 100 组数据,并利用边缘计算技术实现数据的实时分析和预警,设备故障预测准确率达 92%。AI 算法在工艺优化中的应用将大幅提升处理效率。采用强化学习算法的污水处理系统,可根据实时水质数据自动调整曝气量、药剂投加量等参数,使污水处理成本降低 15%~20%。数字孪生技术则通过构建虚拟处理系统,实现对实际系统的全生命周期模拟。美国某化工园区利用数字孪生技术,提前 3 个月预测到蒸发结晶系统的结垢风险,并及时采取预防措施,避免了一次重大停机事故。

### 3. 政策标准完善

政策支持力度将持续加大。我国《“十四五”节水型社会建设规划》明确提出,对采用先进废水处理技术的企业给予 20% 的设备投资补贴,并将工业废水循环利用率纳入地方政府绩效考核指标。欧盟计划在 2030 年前投入 500 亿欧元用于支持零排放技术研发,对达标企业提供税收减免和绿色信贷优惠。标准规范体系将逐步完善。国际标准化组织(ISO)正在制定《工业废水零排放技术规范》,预计 2024 年发布。我国也在加快推进新型污染物排放标准的制定,生态环境部已启动《工业废水中抗生素残留限值》《微塑料污染控制标准》等 10 余项标准的编制工作。同时,国家将建立统一的零排放认证体系,明确技术指标和验收流程,为行业发展提供规范指引。

### 4. 产业协同发展

工业园区将成为产业协同发展的重要载体。以江苏盐城环保科技城为例,园区内建立了集中式废水处理中心,统一收集处理园区企业的废水。通过优化资源配置,将不同企业的废水进行分类预处理,再采用联合膜处理和蒸发结晶工艺,实现水资源的梯级利用和污染物的集中处置,处理成本降低 35%。区域协同治理模式将得到推广。京津冀地区已建立跨区域的工业废水协同处理机制,通过统一排放标准、共享监测数据、联合技术攻关,实现区域内废水处理设施的互联互通。长三角地区正在建设工业废水资源化利用产业联盟,整合高校、科研院所和企业资源,共同攻克技术难题,推动产业协同发展。产业融合发展趋势明显。工业废水处理与新能源、新材料产业的跨界融合将催生新的经济增长点。例如,利用废水处理产生的沼气发电,实现能源自给;将结晶盐加工成建筑材料或化工原料,形成循环经济产业链。这种产业协同发展模式将推动工业废水循环利用与零排放技术向规模化、产业化方向迈进。

### 第三节 清洁生产与绿色制造技术应用

在全球资源约束趋紧、环境问题日益严峻的背景下，传统工业生产模式高消耗、高污染、低效率的弊端愈发凸显。清洁生产与绿色制造技术以“源头预防、过程控制、末端优化”为理念，通过技术创新、工艺改进和管理优化，从根本上减少工业生产过程中的资源消耗和污染物排放，成为实现工业可持续发展的重要支撑。相较于工业废水循环利用与零排放技术侧重于末端治理，清洁生产与绿色制造技术更强调从生产源头和全生命周期层面进行优化，二者相辅相成，共同构建起工业水资源保护与环境保护的完整体系。

#### 一、清洁生产与绿色制造技术原理

##### （一）核心理念与目标

###### 1. 核心理念

清洁生产与绿色制造技术的核心理念是将环境保护融入工业生产的全过程。它摒弃了传统“先污染，后治理”的思维模式，强调通过技术创新和管理优化，在产品的设计、原材料选择、生产工艺、能源利用等各个环节，最大限度地降低资源消耗和污染物产生。绿色制造进一步拓展了清洁生产的内涵，不仅关注生产过程的绿色化，还涵盖产品全生命周期，包括原材料获取、产品制造、使用、回收再利用等阶段，追求整个生命周期内环境影响最小化、资源利用最大化和经济效益最优化。

###### 2. 基本目标

其基本目标涵盖环境、经济和社会三个维度。在环境目标上，减少工业生产过程中的废水、废气、废渣排放，降低温室气体排放，保护生态环境；在经济目标上，通过提高资源利用效率、降低生产成本，增强企业的市场竞争力；在社会目标上，推动工业可持续发展，创造绿色就业机会，保障公众健康和生活质量。

##### （二）技术理论基础

###### 1. 生命周期评价（LCA）理论

生命周期评价理论是清洁生产与绿色制造技术的重要理论基础。它通过对产品从原材料开采、加工、制造、使用、废弃到最终处置的整个生命周期进行环境影响评估，量化分析各个阶段的资源消耗和环境负荷。例如，在汽车制造行业，

运用 LCA 理论可以分析不同车型从原材料获取到报废回收过程中的能源消耗、碳排放以及废水排放情况,从而为优化设计和生产工艺提供依据,减少产品全生命周期的环境影响。

## 2. 循环经济理论

循环经济理论强调资源的循环利用和废弃物的减量化、再利用、资源化。在清洁生产与绿色制造中,该理论体现在生产过程中尽量减少原材料和能源的使用,提高资源的循环利用率,将生产过程中产生的废弃物转化为可再利用的资源。例如,钢铁企业通过回收废钢进行炼钢,不仅减少了铁矿石的开采,还降低了能源消耗和二氧化碳排放;造纸企业利用废纸作为原料生产再生纸,减少了木材资源的消耗和废水排放。

## 3. 生态设计理论

生态设计理论要求在产品的设计阶段就充分考虑产品的环境属性,将环境因素纳入产品设计的各个环节。包括选择环保的原材料、优化产品结构以降低生产过程中的能耗和污染、设计易于拆解和回收的产品结构等。例如,苹果公司在 iPhone 产品设计中,采用模块化设计,便于产品维修和零部件回收;同时,减少有害物质的使用,采用可回收的包装材料,降低产品对环境的影响。

# 二、清洁生产与绿色制造核心技术

## (一) 源头削减技术

### 1. 绿色设计技术

绿色设计技术贯穿产品设计的全过程,包括材料选择、结构设计和功能设计等方面。在材料选择上,优先选用可再生、可回收、低环境影响的材料,避免使用有害物质。例如,在电子产品制造中,采用无铅焊料、无卤阻燃剂等环保材料替代传统有害物质;在汽车制造中,使用生物基材料如天然纤维复合材料替代部分塑料部件,降低对石油资源的依赖。在结构设计方面,采用模块化设计、轻量化设计等理念。模块化设计使产品便于维修和更换零部件,延长产品使用寿命;轻量化设计通过优化产品结构,减少材料使用量,降低产品在生产和使用过程中的能源消耗。例如,飞机制造中采用轻量化设计,减轻机身重量,降低燃油消耗;家具制造中采用模块化设计,方便运输和组装,减少包装材料的使用。<sup>①</sup>

① 齐复兴.绿色制造技术分析[J].湖北农机化,2020(21):116-117.

## 2. 清洁原料替代技术

清洁原料替代技术通过采用清洁、可再生的原材料替代传统高污染、高能耗的原材料，从源头上减少污染物的产生。在化工行业，以生物质原料替代化石原料成为重要趋势。例如，生物乙醇可以替代汽油作为燃料，减少汽车尾气排放；利用玉米、甘蔗等生物质发酵生产生物基塑料，替代传统石油基塑料，降低塑料生产过程中的碳排放。在印染行业，采用天然染料替代合成染料。天然染料来源于植物、动物或矿物，具有无毒、无害、可生物降解等优点，能减少印染废水的污染。例如，印度的一些传统纺织企业利用姜黄、靛蓝等天然植物染料进行染色，不仅减少了废水排放，还赋予了产品独特的文化价值。

### （二）过程优化技术

#### 1. 高效节能工艺技术

高效节能工艺技术通过改进生产工艺，提高能源利用效率，降低能源消耗。在钢铁冶炼行业，采用氧气顶吹转炉、连铸连轧等先进工艺，替代传统的平炉炼钢和模铸工艺，可使能源消耗降低 30%~40%。在水泥生产中，新型干法水泥生产工艺采用悬浮预热和预分解技术，提高了原料的分解效率，降低了煤耗和电耗。在机械加工行业，采用高速切削、精密成型等先进加工工艺，不仅可以提高加工精度和生产效率，还能减少原材料的浪费和能源消耗。例如，采用精密铸造工艺生产零部件，可减少切削加工量，降低材料损耗和能耗。

#### 2. 少废无废工艺技术

少废无废工艺技术致力于在生产过程中减少废弃物的产生，实现资源的最大化利用。在化工生产中，采用反应精馏、膜反应等集成工艺，将反应和分离过程结合在一起，提高反应转化率和产品收率，减少副产物的产生。例如，在乙酸乙酯的生产中，采用反应精馏工艺，可使乙酸乙酯的收率提高到 95% 以上，同时减少废水和废渣的排放。在金属加工行业，采用冷轧、冷挤压等无切削或少切削工艺替代传统的切削加工工艺，可显著减少金属废料的产生。例如，采用冷挤压工艺生产汽车零部件，材料利用率可从切削加工的 60%~70% 提高到 90% 以上。

### （三）末端治理与资源化技术

#### 1. 废弃物资源化利用技术

废弃物资源化利用技术将生产过程中产生的废弃物转化为可再利用的资源。在工业固体废弃物处理方面，钢铁厂的高炉渣、电厂的粉煤灰等经过加工处理后，

可用于生产水泥、建筑材料等。例如，我国每年利用粉煤灰生产水泥超过 2 亿吨，不仅减少了固体废弃物的堆放，还节约了大量的石灰石资源。在废水处理方面，通过膜分离、蒸发结晶等技术，将废水中的有用物质进行回收。例如，在电镀废水中，通过离子交换、电解等技术回收重金属离子，实现重金属的资源化利用；在印染废水中，采用膜技术回收染料和水资源，降低生产成本和环境污染。

## 2. 清洁能源替代技术

清洁能源替代技术通过使用太阳能、风能、水能、生物质能等清洁能源替代传统化石能源，减少能源生产和使用过程中的污染物排放。在工业生产中，许多企业采用太阳能光伏发电、风力发电等清洁能源满足部分生产用电需求。例如，我国西北地区的一些工业园区建设了大型太阳能光伏电站，为园区内的企业提供绿色电力，减少了对煤炭发电的依赖。在供热领域，采用生物质锅炉、地源热泵等技术替代燃煤锅炉。生物质能是一种可再生能源，燃烧过程中二氧化碳排放可实现零增长；地源热泵利用地下浅层地热资源进行供热和制冷，具有高效、节能、环保的特点。

# 三、典型行业应用案例

## （一）钢铁行业清洁生产实践

宝钢集团作为我国钢铁行业清洁生产的标杆企业，通过技术创新和管理优化，实现了清洁生产的目标。在源头削减方面，宝钢采用绿色设计理念，优化产品结构，开发高强度、高性能钢材，减少钢材的使用量；同时，采用清洁原料替代技术，提高废钢的使用比例，减少铁矿石的消耗。在过程优化方面，宝钢引进了国际先进的高效节能工艺技术。例如，采用顶底复吹转炉、连铸连轧等工艺，提高了钢铁冶炼效率，降低了能源消耗；采用干法除尘技术替代湿法除尘技术，减少了废水排放。在末端治理与资源化方面，宝钢建立了完善的废弃物资源化利用体系。高炉渣、转炉渣经过加工后用于生产水泥和建筑材料；煤气得到回收利用，用于发电和供热；废水经过处理后实现了循环利用，工业水重复利用率达到 98% 以上。

## （二）电子信息行业绿色制造应用

华为公司在电子信息行业绿色制造方面进行了积极探索。在产品的设计阶段，华为采用绿色设计技术，优先选用环保材料，减少产品中的有害物质含量。例如，

华为手机全部采用无铅焊料、无卤阻燃剂等环保材料，符合欧盟 RoHS 指令要求。在生产过程中，华为采用高效节能工艺技术，优化生产流程，降低能源消耗。例如，在手机组装生产线，采用自动化设备和精益生产管理模式，提高生产效率，减少能源和原材料的浪费。在废弃物处理方面，华为建立了完善的回收体系，对废旧手机进行回收和再利用。通过拆解、分类和处理，回收其中的金属、塑料等资源，减少电子垃圾对环境的污染。

### （三）食品加工行业清洁生产案例

蒙牛乳业在食品加工行业的清洁生产方面取得了显著成效。在源头削减方面，蒙牛采用清洁原料替代技术，选用优质、无污染的奶源，从源头上保证产品质量和安全性。在生产过程中，蒙牛采用高效节能工艺技术，优化生产流程，降低能源消耗。例如，在牛奶杀菌过程中，采用超高温瞬时杀菌（UHT）技术，不仅保证了牛奶的营养成分和口感，还降低了能源消耗。在废弃物处理方面，蒙牛建立了废弃物资源化利用体系。对生产过程中产生的废水进行处理，采用生物处理、膜分离等技术，将处理后的水回用于生产环节；对产生的废渣进行处理，用于生产有机肥料，实现了废弃物的资源化利用。

## 四、面临的挑战与发展趋势

### （一）面临的挑战

#### 1. 技术创新难度大

清洁生产与绿色制造技术涉及多学科、多领域的知识融合，技术创新难度大。目前，一些关键技术如高效节能工艺、废弃物资源化利用技术等仍存在瓶颈，需要进一步加大研发投入。例如，在生物质能源利用方面，虽然生物质能是一种可再生能源，但目前生物质发电的效率较低，成本较高，制约了其大规模应用。

#### 2. 企业实施动力不足

清洁生产与绿色制造技术的实施需要企业投入大量的资金和人力进行技术改造和设备更新，短期内可能会增加企业的生产成本，影响企业的经济效益。对于一些中小企业来说，由于资金和技术实力有限，缺乏实施清洁生产与绿色制造技术的动力。此外，一些企业对清洁生产与绿色制造技术的认识不足，缺乏长远的发展眼光，不愿意进行技术创新和管理优化。

### 3. 政策法规不完善

虽然我国已经出台了一系列鼓励清洁生产与绿色制造的政策法规，但在实际执行过程中，还存在一些问题。例如，政策法规的配套措施不完善，缺乏具体的实施细则和标准；对企业的激励和约束机制不够健全，导致政策法规的执行效果不理想。此外，不同地区、不同行业之间的政策法规存在差异，不利于企业的公平竞争和行业的健康发展。

### 4. 公众认知度和参与度低

公众对清洁生产与绿色制造技术的认知度和参与度较低，缺乏绿色消费意识。一些消费者在购买产品时，只关注产品的价格和性能，忽视了产品的环境属性；对企业的绿色生产行为缺乏了解和支持，没有形成良好的社会氛围。这在一定程度上影响了企业实施清洁生产与绿色制造技术的积极性。

## （二）发展趋势

### 1. 技术创新加速

随着科技的不断进步，清洁生产与绿色制造技术将不断创新和发展。新材料、新工艺、新技术将不断涌现，如纳米技术、生物技术、信息技术等将在清洁生产与绿色制造领域得到广泛应用。例如，纳米材料具有独特的物理和化学性质，可用于开发高效的过滤材料、催化剂等，提高废弃物的处理效率；生物技术可用于开发生物基材料、生物降解塑料等，减少对化石资源的依赖。

### 2. 智能化与数字化融合

智能化和数字化技术将与清洁生产与绿色制造技术深度融合。通过物联网、大数据、人工智能等技术，实现生产过程的实时监测、智能控制和优化管理。例如，利用传感器和物联网技术，实时监测生产过程中的能源消耗、污染物排放等数据；利用大数据和人工智能技术，对数据进行分析 and 处理，优化生产工艺和管理决策，提高生产效率和资源利用效率。

### 3. 全生命周期管理深化

清洁生产与绿色制造将更加注重产品全生命周期管理。从原材料获取、产品设计、生产制造、使用消费到回收再利用的整个生命周期，都将纳入绿色管理的范畴。企业将更加关注产品在使用过程中的能耗和环境影响，以及产品报废后的回收和处理问题。例如，汽车制造商将不仅关注汽车生产过程中的节能减排，还将关注汽车在使用过程中的燃油消耗和尾气排放，以及汽车报废后的回收和再利用。

#### 4. 产业协同发展加强

清洁生产与绿色制造将促进产业协同发展。企业之间将加强合作，实现资源共享、优势互补，共同推进清洁生产与绿色制造技术的研发和应用。例如，在工业园区内，企业之间可以实现能源的梯级利用、废弃物的集中处理和资源的循环利用，形成循环经济产业链。同时，政府、企业、科研机构、行业协会等各方将加强合作，共同推动清洁生产与绿色制造技术的发展。

## 第八章 城市水资源保护与智慧管理

### 第一节 城市供水管网漏损控制技术

在全球水资源危机日益严峻的背景下，城市作为水资源消耗与供给的核心载体，其供水管网的运行效率直接关乎可持续发展战略的实施。联合国水机制（UNWater）发布的《世界水资源发展报告》指出，全球城市供水管网平均漏损率高达 30%，部分发展中国家的漏损率甚至突破 50%，这意味着每年约有数百亿立方米的清洁水资源在输送过程中白白流失。我国虽在“十四五”期间大力推进管网改造工程，但住建部 2023 年数据显示，全国城市公共供水管网漏损率仍达 12.9%，相当于每年浪费的水量可填满 3 个太湖。这些触目惊心的数据，凸显出城市供水管网漏损控制技术研究应用的紧迫性和重要性，其不仅是城市水资源保护的关键环节，更是实现智慧水务管理的核心突破口。

#### 一、城市供水管网漏损成因分析

##### （一）管网老化与材质缺陷

城市供水管网的服役年限与漏损率呈显著正相关。以我国北方城市为例，哈尔滨、长春等老工业基地，部分供水管网始建于 20 世纪 50—60 年代，服役时间超过 60 年。长期受到水流冲刷、土壤电化学腐蚀以及季节性冻融循环的影响，管道材质性能严重下降。例如，早期广泛使用的灰口铸铁管，因其含碳量高、韧性差，在土壤酸碱环境的侵蚀下，管壁逐渐变薄，穿孔现象频发。实测数据表明，使用超过 30 年的灰口铸铁管，其平均漏损率达到 18%~22%，而新型球墨铸铁管的漏损率仅为 6%~8%，两者相差超过 3 倍。在管道材质方面，不同材料的耐腐蚀性和机械性能差异显著影响漏损率。普通钢管虽然强度较高，但极易生锈，尤其是在地下水位较高的南方地区，钢管外壁的腐蚀速度可达每年 0.1~0.3mm；而一些小厂商生产的劣质塑料管材，由于原料配比不达标，在长期高压水流冲击下，接口处容易出现裂缝渗漏。北京某老旧小区改造时发现，使用 10 年的劣质 PE 管，其接口渗漏点密度达到每公里 15~20 处，严重影响供水效率。

## （二）施工与维护管理不足

施工过程中的质量缺陷是管网漏损的“隐形杀手”。在管道铺设环节，部分施工单位为降低成本，沟槽回填未严格按照规范操作，回填土密实度不达标，导致管道长期处于不稳定的受力状态。例如，在某城市道路改造工程中，由于沟槽回填土含水量过高，压实度仅达到 80%，通车半年后，下方 DN300 的供水管道出现多处变形裂缝。此外，市政工程交叉施工时，对地下管网的保护措施不到位，机械开挖导致管道破损的案例屡见不鲜。上海某地铁施工项目中，因挖掘机误挖，造成直径 800mm 的供水主管道破裂，瞬时漏水量达到每小时 500m<sup>3</sup>，直接经济损失超过 200 万元。维护管理体系的不完善进一步加剧了漏损问题。据中国城镇供水排水协会调研，我国县级城市管网巡检频率平均仅为每周 1~2 次，且主要依赖人工肉眼观察，难以发现隐蔽的微小漏点。部分城市的管网维护队伍缺乏专业培训，维修技术落后，对于管道接口渗漏、暗管破损等问题，往往采取临时堵漏的方式，未能从根本上解决问题。数据显示，未及时修复的漏点，其漏水量每月平均增长 25%，小漏点在半年内可能发展为严重漏损。

## （三）运行压力与环境影响

供水管网运行压力的不合理调控是导致漏损的重要因素。许多城市的供水系统缺乏动态压力管理机制，在用水高峰时段，为满足高层用户需求，水泵站盲目加压，导致管网压力超过设计值。例如，广州某老旧小区在夏季用水高峰期，管网压力达到 0.8MPa，远超 0.4~0.6MPa 的正常范围，致使多处管道接口爆裂。而在用水低谷时段，部分区域管网出现负压，吸入周边污水，不仅污染水质，还会加速管道内壁的腐蚀。外部环境变化对管网安全构成持续性威胁。地震、地面沉降等地质灾害会直接破坏管道结构，2013 年四川雅安地震后，当地供水管网受损长度超过 120km，漏损率飙升至 40%。在沿海城市，如天津、青岛，土壤中的高含盐量对金属管道产生强烈的电化学腐蚀，管道使用寿命缩短至正常情况的 60%~70%。此外，树木根系生长侵入管道缝隙、地下水位季节性波动引发的地基沉降，都会导致管道变形渗漏。

# 二、城市供水管网漏损检测技术

## （一）人工巡检与听漏技术

人工巡检作为最传统的漏损检测方式，至今仍在部分地区广泛应用。技术人

员通过目视检查地表是否存在积水、青苔异常生长等现象，初步判断漏损位置；在夜间用水低谷时段（通常为凌晨 1~4 点），使用听音棒贴附在阀门、水表等管道暴露部位，凭借经验辨别漏水产生的细微声响。这种方法虽然操作简单、成本低廉，但受环境噪声干扰大，检测效率极低，一名熟练的巡检人员每天最多只能排查 2~3km 管网，且对埋深超过 1.5m 的管道检测效果不佳。<sup>①</sup>

随着技术发展，电子听漏仪逐渐普及。其内置的高灵敏度传感器可将漏水声转换为电信号，通过放大器和滤波电路，将背景噪声过滤，使检测人员能够清晰地听到漏声。新型智能听漏仪进一步集成了频谱分析功能，可自动识别不同管径、材质管道的漏水特征频率。例如，德国某品牌智能听漏仪，能够在 30 秒内分析出漏点的大致位置，定位误差不超过  $\pm 1$  米，适用于 DN50-DN500 的各类管道检测。

## （二）区域计量与压力监测技术

区域计量（DMA）技术通过将供水管网划分为若干个独立的计量区域，在每个区域的进出水口安装高精度流量计，实时监测区域内的总进水量和总用水量。通过计算两者差值，可量化评估该区域的漏损水平。当区域漏损率超过设定阈值（一般为 15%~20%）时，再采用其他检测手段进行精准定位。英国泰晤士水务公司应用 DMA 技术后，将管网划分为 12000 个计量区域，通过 3 年持续优化，漏损率从 28% 降至 12%，年节约水量达 5000 万立方米。

压力监测技术依托安装在管网关键节点的压力传感器，构建实时监测网络。这些传感器以每秒 10~20 次的频率采集压力数据，并通过物联网传输至监控中心。当某区域压力出现骤降（如 5 分钟内压力下降超过 0.05MPa）或持续异常波动时，系统自动触发预警。结合流量数据，可初步判断是否存在漏损。例如，杭州水务集团建立的智能压力监测系统，通过分析压力梯度变化，能够将漏损定位范围缩小至 500m 以内，为后续检测提供精准导向。

## （三）先进检测技术应用

### 1. 光纤传感技术

光纤传感技术基于光的干涉原理，当管道发生泄漏时，水流冲击产生的振动会引起光纤中传播光的相位、强度发生变化。分布式光纤传感系统可将数公里甚至数十公里的光纤沿管道铺设，实现全线路实时监测。例如，在南水北调中线工

---

<sup>①</sup> 朱敏. 城市供水管网漏损检测技术与控制措施 [J]. 城市建设理论研究（电子版），2024，（02）：199-201.

程北京段，铺设了 200km 的分布式光纤，能够在 30s 内定位毫米级的微小漏点，定位精度达到  $\pm 1\text{m}$ 。其检测灵敏度极高，可感知  $0.01\text{m}^3/\text{h}$  的微小流量变化，且不受电磁干扰，特别适合长距离、深埋地的重要输水管道监测。

## 2. 声学监测技术

声学监测技术通过在管道表面安装高灵敏度声波传感器，捕捉漏点处水流喷射产生的声波信号。基于大数据训练的智能分析系统，能够识别不同材质（铸铁、塑料、钢管）、不同管径（DN20-DN2000）管道的漏声特征。丹麦某城市在管网关键节点安装了 5000 个声学传感器，构建了覆盖全城的监测网络，成功检测到直径仅  $0.5\text{mm}$  的微小漏点，检测灵敏度较传统方法提升 60%。该系统还具备自动学习功能，可根据环境变化（如温度、湿度）自适应调整检测参数。

## 3. 红外热成像技术

红外热成像技术利用泄漏点处水流与周围土壤的温度差异进行检测。由于水的比热容较大，漏点周围土壤温度通常低于周边区域。热成像仪通过捕捉地表温度分布，生成伪彩色图像，异常低温区域即为疑似漏点。这种技术不受地下水位、土壤类型影响，可快速扫描大面积区域，特别适用于绿化带、建筑物下方等难以直接探测的区域。但受限于热传导速度，对微小漏点（流量小于  $0.5\text{m}^3/\text{h}$ ）的检测效果较差，且检测精度易受天气条件（如阳光直射、降雨）影响。

# 三、城市供水管网漏损控制技术

## （一）管网更新与改造技术

### 1. 管材升级替换

选用高性能管材是降低漏损的根本措施。球墨铸铁管凭借其高强度（抗拉强度  $\geq 420\text{MPa}$ ）、高韧性（延伸率  $\geq 10\%$ ）和优异的耐腐蚀性，成为老旧管网改造的首选材料。其使用寿命可达 50 年以上，且接口采用柔性橡胶圈连接，密封性强，可有效减少渗漏。例如，北京东城区在 2022 年的管网改造中，将 120km 的灰口铸铁管替换为球墨铸铁管，改造后管网漏损率从 18% 降至 8%，年节约水量超过 100 万立方米。

新型塑料管材如 PE 管、PPR 管也在管网改造中广泛应用。PE 管具有良好的柔韧性和抗冲击性能，可采用热熔连接或电熔连接，接口强度高于管材本体；PPR 管则具有优异的耐温性能（可承受  $-10^\circ\text{C} \sim 95^\circ\text{C}$  温度范围），适用于热水输

送系统。深圳在城中村供水改造中，累计使用 PE 管 800 公里，改造后支管漏损率从 35% 降至 12%。

## 2. 非开挖修复技术

非开挖修复技术通过管道内衬、喷涂、点状修复等方式，在不破坏路面的前提下实现管道修复。内衬修复技术是将高密度聚乙烯（HDPE）管或玻璃纤维增强树脂管通过牵引或翻转的方式插入旧管道内，形成“管中管”结构。这种方法可恢复管道强度和密封性，同时减小管道内壁粗糙度，提高输水能力。例如，上海某主干道下方的 DN800 供水管道，采用 HDPE 内衬修复技术后，管道承压能力从 0.6MPa 提升至 1.0MPa，漏损率下降 90%。

喷涂修复技术利用高压设备将聚氨酯、环氧树脂等材料喷涂在管道内壁，形成 0.5~2mm 厚的防腐耐磨涂层。该技术适用于管径 DN100-DN2000 的各类管道，施工速度快，每小时可修复 50~100m 管道。点状修复则针对局部破损，采用气囊扩张、树脂固化等方式进行精准修复，特别适合修复管道接口渗漏、小面积腐蚀穿孔等问题。

## （二）压力调控与分区管理

### 1. 智能压力调控系统

智能压力调控系统集成压力传感器、流量传感器、电动阀门和智能控制终端。系统通过实时采集管网压力、流量数据，结合用水模型（如 EPANET 模型），自动调节水泵转速或阀门开度，实现管网压力的动态平衡。例如，上海浦东某供水区域安装的智能压力调控系统，可根据实时用水需求，将管网压力波动控制在  $\pm 0.02\text{MPa}$  以内，有效减少因压力过高导致的管道破损。系统还具备压力异常自动报警功能，当压力超过设定阈值时，可在 1 分钟内自动启动应急降压措施，爆管次数同比下降 50%。

### 2. 分区计量管理优化

深化区域计量管理，需要进一步细化计量分区，将 DMA 单元规模缩小至  $0.5\sim 1\text{km}^2$ 。同时，依托物联网技术，建立覆盖全区域的计量管理平台，实时监测各区域的流量、压力、水质数据。通过大数据分析，预测漏损趋势，制定精准的漏损控制方案。例如，某供水企业将原有的 100 个 DMA 区域细化为 500 个，结合智能分析系统，能够提前 3-5 天预测漏损高发区域，将漏损定位时间从平均 7 天缩短至 2 天，维修效率提升 70%。

### （三）智慧化管理平台建设

#### 1. 管网地理信息系统（GIS）

GIS 系统将管网空间数据与属性数据深度融合，以三维电子地图的形式直观展示管网布局、管道材质、管径、埋深、阀门位置等信息。管理人员通过 GIS 系统，可快速查询任意管道的历史维修记录、检测数据，制定科学的巡检计划。当发生漏损时，系统可结合检测数据，自动生成最佳维修路线，并调用周边施工图纸、地下管线资料，为抢修提供全方位支持。例如，广州水务 GIS 系统集成了全市 2.8 万公里管网数据，在某次爆管事故中，抢修人员通过 GIS 系统快速定位阀门位置，关闭上游阀门，将停水影响范围缩小了 60%。

#### 2. 大数据与人工智能应用

利用大数据技术对管网运行数据、漏损检测数据、维修记录等海量信息进行深度挖掘。通过机器学习算法，建立漏损预测模型，可根据历史数据和实时监测数据，预测未来 7~15 天的漏损高发区域和时间。例如，深圳水务集团基于 LSTM 神经网络构建的漏损预测模型，预测准确率达到 85% 以上，为预防性维护提供了科学依据。人工智能技术还应用于漏损检测数据分析，通过卷积神经网络（CNN）自动识别漏声信号，替代人工判读，检测效率提升 10 倍以上。同时，AI 客服系统可自动处理用户的漏水报修电话，通过语义分析快速定位问题区域，派单准确率超过 90%。

## 四、典型应用案例

### （一）新加坡智慧管网建设项目

新加坡作为水资源极度匮乏的城市国家，在供水管网漏损控制方面走在世界前列。其耗资 15 亿新元建设的全国统一智慧管网管理平台，集成了 GIS、物联网、大数据、人工智能等先进技术。在管网检测层面，采用分布式光纤传感技术，对总长超过 2000km 的主干管网进行 24 小时在线监测；部署 5000 个智能压力传感器和 3000 个流量计，构建全覆盖监测网络。通过智能压力调控系统，新加坡将管网压力波动控制在  $\pm 0.01\text{MPa}$  以内，结合 AI 漏损预测模型，提前发现潜在漏损点。经过 10 年持续建设，新加坡供水管网漏损率从 2010 年的 12% 降至 2023 年的 4.8%，达到世界领先水平，每年节约水资源超过 8000 万立方米，相当于 3 个新生水工厂的年产量。

## （二）深圳供水管网改造工程

深圳市针对老旧管网漏损严重问题，启动“正本清源”管网改造工程。在硬件升级方面，累计投入 80 亿元，将 1500km 的老旧铸铁管、镀锌管更换为球墨铸铁管和 PE 管；推广非开挖修复技术，完成 300km 管道的内衬修复和点状修复。在智慧管理层面，构建全市统一的供水管网 GIS 系统，实现管网数据的实时更新；部署智能压力调控系统和区域计量管理平台，将全市划分为 2000 个 DMA 区域。经过 3 年改造，深圳供水管网漏损率从 2018 年的 15% 降至 2021 年的 9%，年节约水量超过 5000 万立方米，相当于 10 个深圳水库的年均供水量。同时，改造后的管网压力稳定性提升 40%，用户投诉率下降 65%。

## （三）法国巴黎管网漏损控制实践

巴黎供水系统通过“技术 + 管理”双轮驱动，实现高效漏损控制。在技术上，采用声学监测技术，在管网关键节点安装 8000 个声波传感器，构建城市级漏损监测网络；运用区域计量管理，将供水管网划分为 5200 个 DMA 区域，最小分区面积仅 0.3 平方公里。在管理上，建立专业的管网维护队伍，实行“2—24”响应机制，即漏点发现后 2 小时内到达现场，24 小时内完成修复。通过持续优化，巴黎供水管网漏损率稳定在 8% 左右，为欧洲城市管网管理树立了标杆。其开发的管网智能分析系统，可自动生成维修方案和成本预算，每年节省运维成本超过 2000 万欧元。

# 五、面临的挑战与发展趋势

## （一）面临的挑战

### 1. 技术应用成本高

先进的漏损检测和控制技术，如光纤传感系统、智能压力调控设备等，购置和安装成本高昂。一套覆盖 10km<sup>2</sup> 区域的声学监测系统，投资超过 500 万元，且后期维护、数据处理费用也较高，中小城市供水企业难以承受。

### 2. 数据整合与共享困难

智慧管网建设涉及多个部门和系统的数据融合，包括 GIS 数据、监测数据、维修数据等。但由于数据标准不统一、系统兼容性差，导致数据难以有效整合和共享，影响智慧管理平台功能发挥。

### 3. 专业人才短缺

城市供水管网漏损控制技术涉及机械、电子、计算机、水利等多学科知识，需要既懂技术又懂管理的复合型人才。目前，供水行业专业技术人才匮乏，尤其缺乏精通智慧管网建设和运营的高端人才。

## （二）发展趋势

### 1. 技术智能化升级

随着物联网、5G、人工智能技术的发展，漏损检测与控制技术将向智能化、自动化方向发展。智能检测设备将具备自诊断、自适应功能，自动识别漏损特征；智慧管理平台将实现管网运行状态的自主分析、智能决策，如自动调整压力调控策略、优化维修路径规划。

### 2. 多技术融合创新

未来将出现更多跨技术融合的解决方案，如将声学监测与光纤传感技术结合，提高漏损检测的灵敏度和准确性；将 GIS 与数字孪生技术结合，构建虚拟管网模型，实现管网运行的实时仿真和预测。

### 3. 全生命周期管理强化

城市供水管网管理将从单一的漏损控制，向全生命周期管理转变。在管网规划设计阶段，应用 BIM 技术优化管网布局；在建设阶段，加强施工质量管控；在运行阶段，通过智慧管理平台实现精细化运维，提高管网整体安全性和可靠性。

## 第二节 智慧水务与大数据监测技术

在数字化浪潮席卷全球的当下，城市水资源管理正经历着从传统模式向智慧化模式的深刻变革。智慧水务与大数据监测技术作为这场变革的核心驱动力，通过整合物联网、大数据、人工智能、云计算等新一代信息技术，实现对城市水资源从源头到用户全流程的实时感知、智能分析与精准调控。与城市供水管网漏损控制技术侧重于局部环节优化不同，智慧水务与大数据监测技术构建起城市水资源管理的整体数字化框架，为解决水资源短缺、水污染防治、水生态修复等问题提供系统性方案，是实现城市水资源可持续利用的关键支撑。<sup>①</sup>

---

① 李胜勇，李有明，龙岩. 基于大数据技术的城市智慧水务框架构想 [J]. 海河水利，2021（1）：105-108.

## 一、智慧水务与大数据监测技术原理

### （一）核心理念与目标体系

智慧水务的核心理念是将“智慧”融入水资源管理的全生命周期。它以数据为核心资产，通过全面感知、互联互通、智能决策，打破传统水务管理中信息孤岛的壁垒，实现对城市供水、排水、污水处理、水环境监测等环节的协同管理。大数据监测技术则是智慧水务的“神经中枢”，通过对海量、多源、异构数据的采集、存储、分析和挖掘，揭示水资源系统的运行规律，为科学决策提供依据。其目标体系涵盖多个维度：在资源管理方面，实现水资源的优化配置，提高用水效率；在运营管理方面，降低水务企业运营成本，提升服务质量；在环境管理方面，加强水污染监测与预警，保护水生态环境；在应急管理方面，提高应对城市内涝、供水突发事件的能力，保障城市水安全。

### （二）技术理论基础

#### 1. 物联网（IoT）理论

物联网技术是智慧水务实现全面感知的基础。通过在水源地、水厂、管网、用户终端等关键节点部署各类传感器（如水质传感器、压力传感器、流量计、液位计等），构建起覆盖城市水资源系统的感知网络。这些传感器实时采集水质、水量、水压、水位等数据，并通过无线通信技术（如 NB-IoT、LoRa、5G）将数据传输至云端平台，实现对水资源系统运行状态的实时监测。例如，在供水管网中，压力传感器可实时监测管网压力变化，水质传感器能实时检测水中余氯、浊度、pH 值等指标，为管网运行优化和水质安全保障提供数据支持。

#### 2. 大数据分析理论

大数据分析理论为智慧水务提供决策支持。城市水资源管理过程中产生的海量数据，包括历史运行数据、实时监测数据、用户用水数据、气象数据、地理信息数据等，具有数据量大、类型多样、价值密度低、处理速度快的特点。通过大数据分析技术，如数据清洗、数据集成、数据挖掘、机器学习等，可从这些数据中提取有价值的信息，预测水资源变化趋势，优化资源配置方案。例如，利用机器学习算法对用户用水数据进行分析，可建立用户用水行为模型，预测不同时间段的用水量，为供水调度提供依据。

### 3. 系统工程理论

智慧水务是一个复杂的系统工程，涉及多个子系统和众多参与主体。系统工程理论强调从整体出发，运用系统分析、系统设计、系统优化等方法，对智慧水务系统进行综合规划和管理。在系统设计阶段，需要综合考虑水资源的自然属性和社会属性，协调供水、排水、污水处理等各个环节；在系统运行阶段，通过建立协同管理机制，实现各子系统之间的信息共享和业务协同，提高系统的整体运行效率。

## 二、智慧水务与大数据监测核心技术

### （一）数据采集与传输技术

#### 1. 智能传感器技术

智能传感器是数据采集的关键设备，其性能直接影响数据的准确性和可靠性。现代智能传感器不仅具备传统的信号检测功能，还集成了微处理器、存储器和通信模块，具有自校准、自诊断、自适应等智能功能。在水质监测领域，多参数水质传感器可同时检测溶解氧、电导率、化学需氧量（COD）、氨氮等多个指标，检测精度达到 ppb 级别；在供水管网监测中，超声波流量计采用非接触式测量原理，具有精度高、压损小、安装方便等优点，可实时监测管道流量变化。

#### 2. 无线通信技术

无线通信技术实现了数据的远程传输。窄带物联网（NB-IoT）具有低功耗、广覆盖、大连接的特点，适用于对功耗要求高、数据传输频率低的传感器，如消防栓监测、井盖监测等场景。LoRa 技术则在远距离传输和抗干扰能力方面表现出色，可实现数十公里范围内的数据传输，常用于农村地区的水资源监测。5G 技术凭借其高速率、低时延、大容量的特性，为实时视频监控、大数据量传输提供了保障，在水厂无人值守、应急调度指挥等场景中具有广泛应用前景。

### （二）数据处理与分析技术

#### 1. 云计算技术

云计算技术为大数据处理提供强大的计算能力和存储资源。通过将数据存储在云端，水务企业无需建设庞大的本地数据中心，可根据业务需求灵活调整计算资源和存储容量。云计算平台还支持多用户、多终端的数据访问和处理，方便不同部门之间的数据共享和协同工作。例如，阿里云的弹性计算服务（ECS）和对

象存储服务（OSS），为智慧水务项目提供了稳定可靠的计算和存储支持。

## 2. 大数据分析与挖掘技术

大数据分析与挖掘技术包括数据清洗、数据集成、数据建模等多个环节。数据清洗用于去除噪声数据和错误数据，提高数据质量；数据集成将来自不同数据源的数据进行整合，实现数据的统一管理；数据建模则通过构建数学模型和算法，对数据进行分析和预测。例如，利用时间序列分析算法对管网压力数据进行建模，可预测未来一段时间内的压力变化趋势，提前采取调控措施；通过关联规则挖掘算法分析水质指标与污染源之间的关系，可追溯污染源头。

## 3. 人工智能技术

人工智能技术在智慧水务中发挥着重要作用。机器学习算法可用于构建预测模型，如利用神经网络算法预测用水量、水质变化趋势；图像识别技术可用于污水处理厂的污泥浓度检测、管网泄漏点的红外图像识别等；自然语言处理技术则可应用于客服系统，实现用户用水咨询的智能应答。例如，百度的飞桨深度学习平台提供了丰富的算法模型和开发工具，可帮助水务企业快速构建智能预测和决策模型。

# （三）智慧管理与决策支持技术

## 1. 数字孪生技术

数字孪生技术通过构建与物理系统一一对应的虚拟模型，实现对城市水资源系统的实时仿真和优化。在智慧水务中，数字孪生技术可用于构建虚拟水厂、虚拟管网等模型，模拟不同工况下系统的运行状态，评估决策方案的可行性。例如，通过数字孪生模型模拟城市内涝场景，可提前优化排水泵站的调度方案，提高城市防洪排涝能力；在水厂运行管理中，数字孪生模型可实时监测设备运行状态，预测设备故障，制定预防性维护计划。

## 2. 智能决策支持系统

智能决策支持系统整合了数据仓库、模型库、知识库和人机交互界面，为管理者提供科学的决策支持。系统通过对大数据的分析和挖掘，生成可视化的决策报表和建议方案，管理者可根据实际情况进行决策。例如，在供水调度决策中，智能决策支持系统可根据实时的水源水量、管网压力、用户需求等数据，自动生成最优的供水调度方案，实现水资源的合理分配。

### 三、智慧水务与大数据监测技术应用场景

#### （一）城市供水智慧化管理

##### 1. 智能水厂运营

智慧水务技术推动水厂向智能化方向发展。在生产过程控制方面，通过物联网传感器实时监测原水水质、加药量、工艺流程参数等，实现生产过程的自动化控制。例如，在混凝沉淀环节，根据原水浊度自动调整混凝剂投加量，提高沉淀效果；在消毒环节，通过余氯在线监测系统自动控制消毒剂投加量，确保出厂水水质安全。在设备管理方面，利用物联网和人工智能技术实现设备的智能运维。通过在设备上安装振动传感器、温度传感器等，实时监测设备运行状态，利用机器学习算法分析设备运行数据，预测设备故障，提前进行维护。例如，某水厂利用智能运维系统，将设备故障率降低了 40%，设备使用寿命延长了 20%。

##### 2. 精准供水调度

大数据监测技术为精准供水调度提供了支撑。通过对管网压力、流量、水质等实时监测数据的分析，结合用户用水行为模型和气象数据，可预测不同区域、不同时段的水量，制定科学的供水调度方案。例如，在夏季高温时段，根据天气预报和历史用水数据，提前调整水厂的供水流量和压力，避免出现供水不足或压力过高导致的爆管问题；在夜间用水低谷时段，降低供水压力，减少管网漏损。

#### （二）城市排水与污水处理智慧化管理

##### 1. 智能排水系统

智能排水系统通过实时监测排水管网的液位、流量、水质等数据，实现对排水系统的智能调度和管理。在降雨期间，利用雨水传感器和液位传感器实时监测降雨量和管网水位，通过智能决策支持系统优化排水泵站的运行，避免城市内涝。例如，在上海某中心城区，智能排水系统通过实时监测和动态调度，将内涝积水时间从原来的平均 2 小时缩短至 30 分钟以内。

##### 2. 智慧污水处理厂

智慧污水处理厂利用物联网、大数据和人工智能技术，实现污水处理过程的优化控制和高效运行。通过对污水处理工艺参数（如溶解氧、污泥浓度、pH 值等）的实时监测和分析，利用机器学习算法优化工艺控制策略，提高污水处理效率和出水水质。例如，某污水处理厂采用智能控制系统后，COD 去除率提高了

10%，污泥产生量减少了 15%。在污水处理厂的运营管理方面，智慧技术可实现设备的远程监控和管理，降低人工成本；通过对污水处理数据的分析，优化药剂投加量，降低运行成本。

### （三）水环境监测与保护

#### 1. 水质实时监测与预警

利用物联网传感器构建覆盖河流、湖泊、水库等水体的水质监测网络，实时监测水质指标（如高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮等）。当水质指标超过设定阈值时，系统自动发出预警信息，并通过大数据分析追溯污染源头，为环境监管部门提供决策支持。例如，在长江流域水质监测中，通过部署大量的水质传感器和卫星遥感监测设备，实现了对长江水质的实时监测和污染预警。

#### 2. 水生态修复智能管理

在水生态修复工程中，智慧水务技术可用于监测生态修复措施的实施效果，优化修复方案。通过在修复区域安装水质传感器、生物监测设备等，实时监测水体生态指标（如浮游生物数量、底栖生物种类等），利用大数据分析评估生态修复效果。例如，在某湖泊生态修复项目中，通过智能管理系统实时监测水质和生态指标，及时调整水生植物种植和鱼类投放方案，加速了湖泊生态系统的恢复。

## 四、典型应用案例

### （一）新加坡 ABC 水计划智慧管理系统

新加坡 ABC 水计划（Active, Beautiful, Clean Waters Programme）将智慧水务技术与城市水生态建设深度融合。通过构建全国统一的智慧水管理平台，整合了供水、排水、污水处理、水环境监测等多个子系统的数据。在供水管理方面，利用分布式光纤传感技术对主干管网进行实时监测，结合智能压力调控系统，将管网漏损率降至 4.8%；在排水管理方面，通过部署大量的雨量传感器、液位传感器和视频监控设备，实现对城市排水系统的实时监测和智能调度，有效应对暴雨内涝。

该系统还利用大数据分析技术，对城市水资源的需求和供给进行预测，优化水资源配置方案；通过数字孪生技术构建虚拟水系统模型，模拟不同规划方案对城市水生态的影响，为城市水规划和建设提供科学依据。

## （二）北京城市副中心智慧水务项目

北京城市副中心智慧水务项目以打造“智慧、生态、安全”的水务体系为目标，构建了覆盖供水、排水、污水处理、水环境等领域的智慧管理平台。在供水方面，建设了智能水厂和智慧管网系统，通过物联网传感器和大数据分析技术，实现了水厂生产过程的自动化控制和管网的精准调度，供水水质合格率达到 100%，管网漏损率低于 8%。在排水和污水处理方面，利用智能排水系统和智慧污水处理厂，实现了排水管网的实时监测和污水处理过程的优化控制。通过对降雨数据、管网液位数据的分析，提前启动排水泵站，有效预防内涝；通过智能控制系统优化污水处理工艺，出水水质达到一级 A 标准。在水环境监测方面，建立了覆盖潮白河、北运河等河流的水质监测网络，实时监测水质变化，为水环境保护和治理提供数据支持。

## （三）荷兰鹿特丹“水弹性城市”智慧管理系统

荷兰鹿特丹作为全球应对城市水问题的典范，其“水弹性城市”智慧管理系统充分体现了智慧水务技术的应用。该系统通过在城市中部署大量的传感器（如水位传感器、雨量传感器、水质传感器等），实时监测城市的水文状况。利用大数据分析技术，对降雨、潮汐等数据进行预测，提前制定防洪排涝方案。在城市排水系统管理方面，采用智能排水闸门和可调式蓄水池，根据实时监测数据自动调节排水流量和蓄水容量，有效应对暴雨和海水倒灌。通过数字孪生技术构建城市水系统的虚拟模型，模拟不同极端天气条件下城市水系统的运行状态，为城市水安全保障提供决策支持。

# 五、面临的挑战与发展趋势

## （一）面临的挑战

### 1. 数据安全与隐私保护问题

智慧水务系统涉及大量的敏感数据，包括用户用水数据、水质监测数据、城市地理信息数据等。这些数据一旦泄露，可能会对用户隐私、城市安全造成严重威胁。目前，数据安全技术（如数据加密、访问控制、入侵检测等）在智慧水务领域的应用还不够成熟，数据安全管理体系有待完善。同时，在数据共享和开放过程中，如何平衡数据利用和隐私保护的关系，也是亟待解决的问题。

## 2. 技术标准与规范不统一

智慧水务涉及多个技术领域和众多设备供应商，由于缺乏统一的技术标准和规范，导致不同系统之间的数据接口不兼容，设备互操作性差。例如，不同厂家生产的水质传感器，其数据格式和通信协议各不相同，给数据的整合和分析带来困难。此外，智慧水务项目在建设过程中，缺乏统一的规划和设计标准，容易造成重复建设和资源浪费。

## 3. 专业人才短缺

智慧水务是一个跨学科、跨领域的综合性系统，需要既懂水务专业知识，又掌握信息技术的复合型人才。目前，我国在智慧水务领域的专业人才严重短缺，现有从业人员的知识结构和技术能力难以满足智慧水务发展的需求。同时，相关的人才培养体系还不完善，高校和职业院校在智慧水务专业课程设置和实践教学方面存在不足。

## 4. 资金投入压力大

智慧水务项目建设需要大量的资金投入，包括传感器设备采购、通信网络建设、数据中心建设、软件系统开发等。对于一些中小城市和经济欠发达地区的水务企业来说，难以承担如此高昂的建设成本。此外，智慧水务系统的运行和维护也需要持续的资金投入，包括设备更新、软件升级、数据存储等，进一步增加了资金压力。

# （二）发展趋势

## 1. 技术融合创新加速

未来，物联网、大数据、人工智能、5G、区块链等新一代信息技术将与水务技术深度融合，推动智慧水务技术创新。例如，区块链技术可用于保障数据的真实性和不可篡改，提高数据共享的安全性；边缘计算技术可将数据处理能力下沉到网络边缘，减少数据传输延迟，提高系统响应速度。同时，生物技术、新材料技术等也将在水务领域得到应用，为智慧水务发展提供新的技术支撑。

## 2. 应用场景不断拓展

智慧水务的应用场景将从传统的供水、排水、污水处理等领域，向城市水生态修复、水灾害防御、水文化传承等领域拓展。例如，利用虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术，打造沉浸式的水文化体验场景；通过智慧监测技术，加强对城市水生态系统的保护和修复。同时，智慧水务还将与智慧城市建设深度融合，实现与交通、能源、环境等其他城市管理系统的协同联动。

### 3. 数据价值深度挖掘

随着大数据技术的发展，智慧水务将更加注重数据价值的深度挖掘。通过构建更加完善的数据模型和算法，从海量数据中提取更多有价值的信息，为水资源管理、水务工程建设、水环境保护等提供更精准的决策支持。例如，利用人工智能技术对历史数据和实时监测数据进行分析，预测水资源的长期变化趋势，为城市水资源规划提供依据。

### 4. 可持续发展理念贯穿始终

在全球可持续发展的大背景下，智慧水务将更加注重资源节约、环境保护和社会经济效益的平衡。通过智慧技术的应用，实现水资源的高效利用，减少能源消耗和污染物排放；加强公众参与，提高公众的节水意识和环保意识。同时，智慧水务项目的建设和运营将更加注重社会效益，为改善城市居民生活环境、促进城市可持续发展做出贡献。

## 第三节 城市黑臭水体综合治理案例

随着城市化进程的加速，城市水体污染问题日益严峻，黑臭水体成为城市生态环境的突出“痛点”。城市黑臭水体的形成不仅破坏水生态系统平衡，散发的恶臭气体影响居民生活质量，还可能滋生有害病菌，威胁公众健康。世界卫生组织研究表明，全球约 30% 的城市存在不同程度的水体黑臭问题，我国在 2015 年启动“水十条”专项治理行动时，全国排查出黑臭水体超 1800 段。近年来，国内外众多城市积极探索黑臭水体综合治理路径，通过技术创新、管理优化和制度完善，涌现出一批具有示范意义的成功案例，为全球城市水环境治理提供了宝贵经验。

### 一、城市黑臭水体形成原因分析

#### （一）污染源排放

##### 1. 生活污水直排

生活污水是城市黑臭水体的主要污染源之一。在一些老旧城区和城中村，由于污水管网建设不完善，生活污水未经处理直接排入河道。例如，部分城市的合流制排水系统在雨季时，大量混合雨水的生活污水因超出污水处理厂处理能力，

溢流进入水体，带来高浓度的有机物和氨氮。据统计，生活污水中的化学需氧量（COD）浓度通常在 200~400mg/L，氨氮浓度在 20~50mg/L，远超地表水Ⅴ类标准（ $\text{COD} \leq 40\text{mg/L}$ ， $\text{氨氮} \leq 2\text{mg/L}$ ）。

### 2. 工业废水违规排放

尽管我国加强了工业污染治理，但仍有部分企业为降低成本，违规偷排工业废水。在一些化工、印染、食品加工等行业，废水中含有大量难降解有机物、重金属和有毒有害物质。例如，印染废水中的染料、助剂等污染物，不仅使水体呈现深色，还会抑制水生生物生长；化工废水中的氰化物、硫化物等有毒物质，会导致水体发黑发臭，破坏水生态系统。

### 3. 农业面源污染

城市周边的农业活动也是黑臭水体的污染源之一。农田中过量使用的化肥、农药，畜禽养殖产生的粪便、废水，在降雨冲刷下随地表径流进入城市水体。据估算，农业面源污染贡献的总氮、总磷分别占城市水体污染负荷的 30%~50% 和 20%~40%。例如，过量的氮、磷营养物质会引发水体富营养化，导致藻类过度繁殖，藻类死亡后分解消耗大量溶解氧，造成水体缺氧，引发黑臭。

## （二）水系生态破坏

### 1. 河道硬化与裁弯取直

城市建设过程中，为了防洪排涝和土地开发，大量河道被硬化和裁弯取直。河道硬化破坏了河岸带的生态功能，阻隔了水体与土壤之间的物质交换和能量流动；裁弯取直导致河道水流速度加快，缩短了水体的自净时间，降低了水体的生态承载力。例如，传统的混凝土护岸使得水生植物无法生长，破坏了鱼类、底栖生物的栖息环境，削弱了水体的生态修复能力。<sup>①</sup>

### 2. 湿地等生态空间减少

城市扩张侵占了大量湿地、湖泊等生态空间。湿地作为“地球之肾”，具有净化水质、调节水量、维持生物多样性等重要生态功能。湿地面积的减少，使得其对城市水体的净化和缓冲作用减弱，污染物无法得到有效降解和拦截。据统计，近 30 年来，我国城市湿地面积减少了 50% 以上，部分城市的湖泊调蓄能力下降 40%。

<sup>①</sup> 赵中珊. 城市黑臭水体综合治理及水质保持技术研究 [J]. 城市建设理论研究（电子版），2023（30）：180-182.

### （三）水系流动性不足

#### 1. 缺乏活水补给

许多城市水体缺乏天然的活水补给，依赖人工补水，且补水量不足、水质不佳。例如，北方一些城市的景观河道，主要依靠再生水或劣质地表水补水，这些水本身含有一定污染物，无法有效改善水体水质。同时，部分城市水系相互割裂，水体无法形成有效循环，导致污染物在局部区域积聚。

#### 2. 闸坝阻隔

城市中的闸坝设施在防洪、供水等方面发挥了重要作用，但也阻隔了水系连通，影响水体流动。闸坝的长期蓄水使得水体流速减缓，甚至处于静止状态，不利于污染物的稀释和扩散。例如，某城市河道由于多个闸坝拦截，水流速度从自然状态下的 0.3m/s 降至 0.05m/s 以下，水体自净能力下降 70% 以上。

## 二、国内典型城市黑臭水体综合治理案例

### （一）北京亮马河综合治理项目

#### 1. 项目背景

亮马河曾是北京城区典型的黑臭河道，全长 9.3 公里，流域内人口密集，生活污水和商业废水排放量大，加之河道硬化、水流不畅，水体长期处于黑臭状态，严重影响周边居民生活和城市形象。

#### 2. 治理措施

**截污控源：**全面排查流域内排污口，新建污水管网 20km，改造合流制管网 15km，实现生活污水全收集、全处理；对流域内餐饮、洗车等服务业进行专项整治，杜绝违规排水。**生态修复：**拆除河道硬质护岸，恢复自然河岸带，种植芦苇、菖蒲等水生植物 3 万平方米，构建生态缓冲带；投放滤食性鱼类和底栖生物，重建水生生态系统。**水系连通与活水循环：**打通与周边水系的连接通道，建设泵站和调水管线，实现亮马河与通惠河、坝河等水系的互联互通；利用再生水补水，每天补充清洁水源 5 万吨，提高水体流动性。**智慧管理：**建立亮马河智慧水务管理平台，安装水质、水位、流量传感器 120 余个，实时监测水体环境；运用大数据分析技术，优化补水调度和生态修复措施。

#### 3. 治理成效

经过 3 年综合治理，亮马河水质从劣 V 类提升至Ⅳ类，溶解氧浓度从不足

1mg/L 提高到 5mg/L 以上，水体黑臭现象完全消除。河道生态系统得到有效恢复，鱼类种类从治理前的 3 种增加到 12 种，鸟类数量显著增多。同时，亮马河还打造成为城市景观带，年接待游客超百万人次，实现了生态效益、社会效益和经济效益的多赢。

## （二）深圳茅洲河治理工程

### 1. 项目背景

茅洲河是深圳第一大河，曾因流域内工业企业密集、生活污水直排严重，成为全国污染最严重的河流之一。2015 年，茅洲河共和村断面水质为劣 V 类，氨氮浓度高达 38mg/L，超过地表水 V 类标准 18 倍，被称为“深圳的龙须沟”。

### 2. 治理措施

全面截污：投资 150 亿元，建设污水管网 1500km，实现流域内污水全收集；对流域内 2000 多家工业企业进行清理整顿，关停淘汰高污染企业 300 余家，规范提升 1500 余家。污水处理设施建设：新建、扩建污水处理厂 5 座，污水处理能力从 35 万吨/日提升至 120 万吨/日；采用 MBR（膜生物反应器）、臭氧—活性炭等先进处理工艺，提高污水处理标准。生态修复：实施河道清淤工程，清理淤泥 300 万立方米；建设人工湿地 200 万平方米，种植红树林等耐污植物，构建生态净化系统；在河道内设置生态浮岛，提高水体自净能力。流域协同治理：建立深莞跨区域协同治理机制，与东莞联合开展茅洲河流域污染整治；加强流域内农业面源污染治理，关闭畜禽养殖场 200 余家，推广生态农业模式。

### 3. 治理成效

2020 年，茅洲河共和村断面水质稳定达到 V 类标准，氨氮浓度降至 1.5mg/L 以下，实现了从黑臭水体到清水绿岸的历史性转变。流域内生物多样性显著增加，消失多年的水鸟、鱼类重新回归。茅洲河沿岸还建成多个湿地公园，成为市民休闲娱乐的好去处，极大提升了城市品质。

## 三、国外典型城市黑臭水体综合治理案例

### （一）英国伦敦泰晤士河治理

#### 1. 项目背景

19 世纪末，随着工业革命的发展，泰晤士河成为伦敦工业废水和生活污水的排放通道，水体严重污染，鱼类灭绝，恶臭难闻，被称为“死河”。1858 年夏季，

泰晤士河的恶臭甚至迫使英国议会提前休会。

## 2. 治理措施

截污工程：建设了长达 200km 的污水管网，将伦敦市区的污水收集至下游的污水处理厂；19 世纪末至 20 世纪初，先后建成了巴金和克罗斯纳斯两座大型污水处理厂，采用沉淀、过滤等工艺处理污水。

生态修复：20 世纪后期，开始拆除河道内的硬质设施，恢复自然河岸；投放大量鱼苗，种植水生植物，重建水生态系统；开展河流生态调查，监测生物多样性恢复情况。

立法与管理：英国政府颁布《河流污染防治法》《水资源法》等一系列法律法规，严格限制污水排放；成立专门的泰晤士河水务管理局，统一管理流域内的供水、排水和污水处理。

## 3. 治理成效

经过 100 多年的持续治理，泰晤士河水质得到显著改善，鱼类从灭绝状态恢复到 120 余种，河水清澈见底，重新成为伦敦的重要景观。如今，泰晤士河每年吸引大量游客前来观光，水上运动、游船旅游等产业蓬勃发展，实现了生态环境与经济良性互动。

### （二）新加坡加冷河—碧山宏茂桥公园改造项目

#### 1. 项目背景

加冷河曾是一条混凝土衬砌的排水渠，由于缺乏生态功能，水质较差，周边环境单调。新加坡政府希望通过改造，将其打造成为集生态、休闲、防洪于一体的城市公共空间。

#### 2. 治理措施

河道生态化改造：拆除混凝土护岸，将笔直的排水渠改造为蜿蜒的自然河道；挖掘浅滩和深潭，营造多样化的水生栖息地；种植超过 5 万株本土植物，构建河岸生态系统。雨洪管理：在公园内建设雨水花园、下凹式绿地等海绵设施，收集和净化雨水；利用河道的自然形态，增强洪水调蓄能力，使河道防洪标准从 10 年一遇提升至 50 年一遇。公众参与：开展“河流之友”等公众教育活动，鼓励市民参与河流保护；设置生态解说牌，普及水环境保护知识，提高公众环保意识。

#### 3. 治理成效

改造后的加冷河—碧山宏茂桥公园成为新加坡生态修复的典范。河道水质得

到明显改善，吸引了翠鸟、水獭等多种野生动物；公园年接待游客量超过 200 万人次，成为市民休闲娱乐的热门场所。该项目还荣获 2012 年世界建筑节“最佳景观奖”，为全球城市水体生态修复提供了创新思路。

## 四、城市黑臭水体综合治理经验总结与启示

### （一）截污控源是根本

从国内外案例来看，截污控源是黑臭水体治理的首要任务。只有切断污染源，才能从根本上改善水体水质。这需要完善污水管网建设，提高污水收集处理能力，加强对工业、生活和农业污染源的监管。例如，深圳茅洲河通过大规模的污水管网建设和企业整治，实现了污染物减排 80% 以上，为水质改善奠定了基础。

### （二）生态修复是关键

生态修复能够恢复水体的自净能力和生物多样性，巩固治理成效。通过恢复自然河岸带、种植水生植物、投放水生生物等措施，构建健康的水生态系统。如北京亮马河和新加坡加冷河，都通过生态修复，使水体从黑臭状态转变为生机勃勃的生态景观。

### （三）科技支撑是保障

智慧水务、大数据监测等技术的应用，为黑臭水体治理提供了科学决策依据。实时监测水质、水量等数据，能够及时掌握水体变化情况，优化治理措施；先进的污水处理工艺和生态修复技术，提高了治理效率和效果。

### （四）长效管理是核心

黑臭水体治理不是一蹴而就的，需要建立长效管理机制。包括完善法律法规，加强环境监管；建立跨区域、跨部门协同治理机制；鼓励公众参与，形成全社会共同保护水环境的良好氛围。例如，英国泰晤士河通过 100 多年的持续管理，才实现了水质的长期稳定改善。

## 五、城市黑臭水体综合治理面临的挑战与未来展望

### （一）面临的挑战

#### 1. 治理资金压力大

黑臭水体综合治理涉及截污管网建设、污水处理设施升级、生态修复等多个方面，资金需求量巨大。对于一些经济欠发达地区的城市，难以承担高额的治理

费用。同时，治理后的维护和管理也需要持续投入资金，增加了地方财政压力。

### 2. 治理技术仍需突破

虽然现有技术在黑臭水体治理中取得了一定成效，但对于一些复杂污染水体，如含有大量难降解有机物、重金属的水体，治理技术仍存在瓶颈。此外，生态修复技术的稳定性和长效性还需要进一步提高。

### 3. 公众参与度有待提升

部分市民对黑臭水体治理的重要性认识不足，存在乱扔垃圾、违规排水等行为，影响治理效果。同时，公众参与治理的渠道和方式有限，缺乏有效的激励机制，导致公众参与的积极性不高。

## （二）未来展望

### 1. 技术创新驱动

未来，随着生物技术、纳米技术、人工智能等技术的发展，黑臭水体治理技术将不断创新。例如，利用微生物降解技术处理难降解有机物，运用纳米材料吸附重金属；通过人工智能技术优化治理方案，提高治理效率。

### 2. 流域协同治理加强

城市黑臭水体治理将更加注重流域整体规划和协同治理。打破行政区域界限，建立上下游、左右岸协同治理机制，实现流域内污染联防联控。同时，加强城市水体与周边生态系统的连通，构建完整的生态网络。

### 3. 公众参与深化

通过加强宣传教育，提高公众环保意识；建立多元化的公众参与机制，鼓励市民参与监督、举报和志愿服务。例如，开展“民间河长”“河流守护者”等活动，形成全社会共同参与黑臭水体治理的良好局面。

### 4. 智慧化管理升级

进一步完善智慧水务管理平台，实现对黑臭水体治理全过程的实时监测、智能分析和精准调控。利用数字孪生技术，构建虚拟水体模型，模拟不同治理方案的效果，为科学决策提供更有力的支持。

## 第九章 半导体废水技术发展

### 第一节 半导体废水技术发展现状

在信息技术飞速发展的当下，半导体产业作为核心支撑行业，呈现出蓬勃发展的态势。然而，半导体在生产过程中会产生大量成分复杂、污染物浓度高的废水，若处理不当，将对环境造成严重危害。半导体废水处理技术也随着行业发展不断进步，成为保障半导体产业可持续发展的关键环节。

#### 一、半导体废水的特性

半导体废水成分极为复杂，含有多种污染物。其中，重金属是主要污染物之一，如硅片切割、研磨等工序会产生含铜、镍、铅、砷等重金属的废水，这些重金属具有毒性强、难降解、易生物富集的特点，对生态环境和人体健康威胁极大。同时，废水中还含有高浓度的有机物，像光刻胶、显影液等工艺环节排放的废水，有机物浓度较高，化学需氧量（COD）可达数千甚至上万毫克每升。此外，部分废水还具有强酸性或强碱性，如蚀刻工序产生的废水，pH 值可能低至 1~2 或高达 13~14，处理难度较大。而且，半导体废水的水质和水量波动较大，不同生产工序、不同产品类型产生的废水差异显著，这给废水处理带来了诸多挑战。

#### 二、半导体废水处理技术的演进

早期，半导体产业规模较小，废水处理技术相对简单，主要采用物理化学方法，如中和、沉淀、过滤等，对废水中的部分污染物进行去除。但随着半导体产业的快速发展，废水排放量大幅增加，污染物种类更加复杂，传统处理技术已难以满足环保要求。20 世纪 80 年代以后，生物处理技术开始应用于半导体废水处理领域。活性污泥法、生物膜法等生物处理技术能够有效去除废水中的有机物，降低 COD 等指标。然而，由于半导体废水中含有重金属等有毒有害物质，对微生物活性有抑制作用，生物处理技术的应用受到一定限制。近年来，随着材料科学、

环境工程等学科的不断发展，一系列新型半导体废水处理技术应运而生。膜分离技术、高级氧化技术、吸附技术等在半导体废水处理中得到了广泛应用，这些技术具有处理效率高、污染物去除彻底等优点，大大提高了半导体废水的处理水平。

### 三、当前主流的半导体废水处理技术

膜分离技术是当前半导体废水处理中的重要技术之一。反渗透（RO）膜、超滤膜、纳滤膜等膜材料能够有效截留废水中的重金属离子、有机物、细菌等污染物，出水水质好，可实现废水的回用。例如，在半导体晶圆清洗废水处理中，采用“超滤+反渗透”的组合工艺，能够将废水中的污染物去除率达到99%以上，处理后的水可回用于生产工序，提高了水资源的利用率。高级氧化技术也是处理半导体难降解有机物的有效手段。芬顿氧化、臭氧氧化、光催化氧化等高级氧化技术能够产生具有强氧化性的羟基自由基，将废水中的难降解有机物氧化分解为无害物质。在处理含有光刻胶等难降解有机物的半导体废水中，高级氧化技术表现出了优异的处理效果，COD去除率可达80%以上。吸附技术则在半导体废水重金属去除方面发挥着重要作用。活性炭、沸石、离子交换树脂等吸附材料能够通过物理吸附、化学吸附等作用，将废水中的重金属离子吸附在材料表面，从而达到去除的目的。例如，离子交换树脂对半导体废水中的铜、镍等重金属离子具有较高的选择性吸附能力，去除率可达95%以上。<sup>①</sup>

### 四、半导体废水处理技术的应用案例

某大型半导体制造企业采用了“预处理+生物处理+深度处理”的组合工艺处理半导体废水。预处理阶段采用中和、沉淀等方法去除废水中的重金属和部分悬浮物；生物处理阶段采用活性污泥法去除废水中的有机物；深度处理阶段则采用反渗透膜技术进一步去除污染物，确保出水水质达标。该工艺运行稳定，处理后的废水各项指标均满足国家排放标准，部分处理后的水实现了回用，每年节约水资源数十万吨。另一半导体企业针对含高浓度氟化物的蚀刻废水，采用了化学沉淀法与吸附法相结合的处理工艺。首先向废水中投加氯化钙等药剂，使氟化物形成氟化钙沉淀去除；然后采用活性氧化铝吸附塔进一步去除残留的氟化物，处理后的废水中氟化物浓度可降至10mg/L以下，达到排放标准。

① 康宽华. 半导体新材料清洗废水处理技术研究及展望 [J]. 工程建设与设计, 2023(20):81-83.

## 五、半导体废水处理技术面临的挑战与未来发展趋势

当前,半导体废水处理技术仍面临一些挑战。一方面,随着半导体产业的不断升级,芯片制程越来越先进,生产过程中使用的化学药剂种类不断增加,废水中的污染物成分更加复杂,给处理技术带来了新的难题。另一方面,半导体废水处理成本较高,膜材料、化学药剂等消耗量大,增加了企业的负担。未来,半导体废水处理技术将朝着高效化、低能耗、资源化的方向发展。新型膜材料的研发将进一步提高膜分离技术的性能,降低成本;高级氧化技术与生物处理技术的耦合将实现优势互补,提高处理效率,降低运行成本;同时,半导体废水的资源化利用将成为研究热点,通过回收废水中的重金属、水资源等,实现变废为宝,提高资源的利用效率。此外,智能化技术在半导体废水处理中的应用也将越来越广泛,通过在线监测、自动控制等手段,实现废水处理过程的优化运行,提高处理效果和稳定性。

## 第二节 氢氟酸废水系统处理工艺技术

在现代工业高速发展的浪潮中,氢氟酸(HF)因其强腐蚀性和独特的化学活性,成为化工、电子、冶金、玻璃蚀刻等众多领域不可或缺的原料。在半导体芯片制造中,氢氟酸用于硅片表面蚀刻;在磷肥生产过程中,它作为分解磷矿石的关键试剂。然而,随着氢氟酸使用量的急剧攀升,每年全球产生的氢氟酸废水已超亿吨。这类废水不仅呈现强酸性、高氟离子浓度的特性,还常伴有铬、镍、铅等重金属污染物。据世界卫生组织(WHO)统计,全球每年因氢氟酸废水排放导致的土壤酸化面积超过12万公顷,污染水体达5亿立方米,严重威胁生态环境与人类健康。因此,深入研究和持续优化氢氟酸废水系统处理工艺技术,已成为水资源保护领域刻不容缓的重要任务。<sup>①</sup>

### 一、氢氟酸废水特性与危害

#### (一) 废水主要成分

氢氟酸废水的成分复杂且具有行业特异性。在半导体芯片制造环节,产生

<sup>①</sup> 刘建君,刘辉,杨武龙,等.氢氟酸废水绿色处理技术[J].浙江化工,2018,49(2):20-23.

的废水中氟离子(F<sup>-</sup>)浓度通常在 5000~15000mg/L, pH 值低至 1~3, 同时含有光刻胶分解产生的有机添加剂和微量重金属离子。以某 12 英寸晶圆制造工厂为例, 其每日产生的氢氟酸废水约 50t, F<sup>-</sup> 浓度高达 12000mg/L, 还含有浓度为 5~10mg/L 的六价铬。而在磷肥生产行业, 废水除了高浓度氟离子外, 还富含大量钙、镁等金属离子, 部分企业废水中钙离子浓度可达 5000mg/L, 形成复杂的离子共存体系。

## (二) 危害性分析

### 1. 腐蚀性危害

氢氟酸的强腐蚀性对工业设施和生态环境造成双重破坏。某氟化工企业因氢氟酸废水管道发生局部腐蚀泄漏, 在 24 小时内导致周边 200m<sup>2</sup> 土壤 pH 值骤降至 2.0, 土壤中的微生物群落几乎全部死亡, 致使该区域农作物连续三年绝收。此外, 氢氟酸对混凝土结构的侵蚀会导致其强度大幅下降, 某污水处理厂的混凝土调节池在接触氢氟酸废水三年后, 池壁厚度减少了 20%, 存在严重的安全隐患。

### 2. 氟污染危害

氟离子进入水体后, 会与钙、镁离子发生化学反应, 形成难溶性氟化钙、氟化镁沉淀, 从而降低水体硬度, 破坏水生生态系统的平衡。研究表明, 当水体中 F<sup>-</sup> 浓度超过 1mg/L 时, 会对鱼类的鳃组织和神经系统造成损害, 导致鱼类生长缓慢、繁殖能力下降。长期饮用氟含量超标的水, 人体会出现氟斑牙、氟骨症等病症。我国北方某高氟地区, 因长期饮用含氟量达 3mg/L 的地下水, 当地居民氟斑牙患病率高达 60%, 氟骨症患者占比达 15%。

### 3. 重金属污染危害

氢氟酸废水中的重金属离子如铬、镍等, 具有毒性强、难以降解、易在生物体内富集的特点。六价铬具有强氧化性和致癌性, 进入人体后会与细胞内的 DNA 结合, 引发基因突变, 增加患癌症的风险。通过食物链传递, 重金属在生物体内的浓度会逐级放大。在某受污染河流中, 底栖生物体内的铬含量是水体的 100 倍, 鱼类体内的铬含量则达到水体的 500 倍。

## 二、氢氟酸废水处理核心工艺技术

### （一）中和沉淀法

#### 1. 基本原理

中和沉淀法是氢氟酸废水处理的基础工艺，其核心在于利用碱性药剂与氢氟酸发生中和反应，同时使氟离子生成氟化钙沉淀。在实际反应中，溶液的 pH 值对氟化钙的生成影响显著。当 pH 值在 8~9 时，氟化钙的沉淀效率最高，此时溶液中氟离子与钙离子的反应最充分。

#### 2. 工艺流程

废水首先流入中和反应池，池内安装的在线 pH 传感器以每秒 1 次的频率实时监测废水 pH 值。控制系统根据预设的 pH 值范围（8~9），自动调节石灰乳或氢氧化钠溶液的投加量。反应完成后，混合液进入斜管沉淀池进行固液分离，沉淀时间一般为 2~3 小时。分离后的上清液经检测达标后排放，沉淀下来的氟化钙污泥通过板框压滤机进行脱水处理，使污泥含水率降至 60%~70%，以便后续安全处置。

#### 3. 技术优缺点

该方法操作简便，药剂成本较低，对氟离子的去除率通常可达 90% 以上，在中小型企业中应用广泛。但此方法会产生大量含氟污泥，据测算，处理 1 吨氟离子浓度为 10000mg/L 的废水，约产生 200~300kg 含氟污泥。且处理后的废水中氟离子浓度一般在 10~50mg/L，难以满足日益严格的排放标准。

### （二）混凝沉淀法

#### 1. 基本原理

混凝沉淀法是在中和沉淀的基础上，通过投加混凝剂和助凝剂，强化固液分离效果。聚合氯化铝（PAC）在水中水解生成的多核羟基络合物，能通过吸附电中和作用，降低氟化钙颗粒表面的电荷，使其相互聚集；聚丙烯酰胺（PAM）则利用其长链结构，通过吸咐架桥和网捕卷扫作用，将细小颗粒连接成大絮体，加速沉淀过程。

#### 2. 工艺优化

实际应用中，需先将废水 pH 值调节至 7~8，为混凝反应创造最佳条件。聚合氯化铝的投加量根据废水水质有所不同，一般在 50~200mg/L 之间。投加后进行

快速搅拌（转速 200~300r/min）1~2 分钟，使药剂迅速分散；随后加入 0.5~2mg/L 的聚丙烯酰胺，慢速搅拌（转速 50~80r/min）10~15 分钟，促进絮体生长。最后，混合液进入辐流式沉淀池进行固液分离，沉淀时间约为 3~4 小时。

### 3. 应用效果

该方法能将氟离子去除率提升至 95%~98%，使出水氟离子浓度降至 5~10mg/L。但混凝剂的大量投加会增加处理成本，以处理 1 吨废水为例，仅聚合氯化铝的成本就达 3~8 元。同时，混凝剂的使用可能引入新的污染物，如铝离子残留，若处理不当，可能对环境造成二次污染。

## （三）吸附法

### 1. 吸附剂类型

活性氧化铝：活性氧化铝具有发达的孔隙结构和较大的比表面积（通常大于 200m<sup>2</sup>/g），其表面的羟基（-OH）能与氟离子发生离子交换和络合反应。在 pH 值为 6~7 的条件下，活性氧化铝对氟离子的吸附容量可达 10~15mg/g。某工业园区采用活性氧化铝处理低浓度氢氟酸废水，当进水氟离子浓度为 15mg/L 时，出水氟离子浓度可降至 1mg/L 以下。羟基磷灰石：作为一种天然矿物材料，羟基磷灰石的晶体结构中，羟基（-OH）可与氟离子发生离子交换反应，生成更稳定的氟磷灰石。该吸附剂对氟离子具有较高的选择性，且环境友好。研究发现，羟基磷灰石在 pH 值为 5~8 的范围内，对氟离子的吸附效果最佳，最大吸附容量可达 20mg/g。磁性吸附材料：近年来，磁性氧化铁—活性炭复合材料等磁性吸附材料备受关注。这类材料不仅具备良好的吸附性能，还能通过外加磁场实现快速分离，大大缩短了固液分离时间。例如，某科研团队制备的磁性壳聚糖—纳米氧化铁复合材料，对氟离子的吸附容量达 18mg/g，且在外加磁场作用下，5 分钟内即可完成固液分离。

### 2. 工艺特点

吸附法操作简便，处理效果优异，尤其适用于低浓度氢氟酸废水的深度处理，可将氟离子浓度降至 1mg/L 以下。但吸附剂的吸附容量有限，以活性氧化铝为例，当吸附饱和后，需进行再生处理。其再生过程通常采用氢氧化钠溶液洗脱，不仅工艺复杂，还会产生大量再生废液，处理成本较高。

#### （四）膜分离法

##### 1. 主要膜技术

反渗透（RO）膜：反渗透膜的孔径小于 0.5nm，能在压力驱动下（通常为 1.5~4.0MPa），通过选择性透过性截留氟离子和其他污染物。其对氟离子的截留率可达 95% 以上，但该技术对进水水质要求极高，需要进行严格的预处理，包括混凝沉淀、过滤、保安过滤等步骤，以防止膜污染。同时，反渗透膜容易受到有机物、微生物和胶体的污染，需要定期进行化学清洗，膜的使用寿命一般为 3~5 年。纳滤（NF）膜：纳滤膜的孔径在 1~10nm 之间，对二价离子和分子量在 200~1000Da 的小分子有机物具有较高的截留率，可选择性地截留氟离子。在处理氢氟酸废水时，纳滤膜能在较低压力（0.5~1.5MPa）下运行，能耗相对较低。然而，纳滤膜的膜通量较低，一般为 10~30L/（m<sup>2</sup>·h），处理效率有待提高，且同样面临膜污染问题。

##### 2. 工艺应用

膜分离法常与其他工艺联合使用，形成“中和沉淀—膜分离”等组合工艺。某电子企业采用“中和沉淀—超滤—纳滤—反渗透”工艺处理氢氟酸废水，先通过中和沉淀去除大部分悬浮物和氟离子，再经超滤进一步截留大分子有机物和胶体；纳滤和反渗透膜进行深度处理，最终产水达到电子级超纯水标准，回用于芯片清洗工序，实现了水资源的循环利用，年节约新鲜用水量达 12 万吨。

### 三、氢氟酸废水处理工艺组合应用案例

#### （一）某化工企业氢氟酸废水处理工程

##### 1. 项目背景

该化工企业主要从事氟化工产品生产，每日产生氢氟酸废水 200t，废水中 F<sup>-</sup>浓度为 8000mg/L，pH 值为 2.0，同时含有浓度为 10~20mg/L 的铬、镍等重金属离子。

##### 2. 处理工艺

采用“中和沉淀—混凝沉淀—吸附—反渗透”组合工艺。废水首先进入中和反应池，投加石灰乳将 pH 值调节至 8.5，使氟离子生成氟化钙沉淀；随后流入混凝沉淀池，投加聚合氯化铝和聚丙烯酰胺，进一步去除悬浮物和细小氟化钙颗粒；经过滤后，废水进入活性氧化铝吸附柱进行深度处理；最后，通过反渗透膜进行浓缩分离。产水达标排放，浓水进入三效蒸发结晶系统，经蒸发结晶处理后，结晶盐作为危险废物交由专业单位处置。

### 3. 处理效果

经处理后,出水氟离子浓度稳定降至 1mg/L 以下, pH 值保持在 6~9 之间, 铬、镍等重金属离子浓度均低于 GB8978—1996《污水综合排放标准》中的一级标准。该项目运行三年来, 累计减少氟离子排放超 500t, 实现了废水的达标排放和部分水资源的回用, 取得了良好的环境效益和经济效益。

## (二) 电子芯片制造企业氢氟酸废水处理项目

### 1. 废水特性

该企业生产过程中产生的氢氟酸废水具有水量小(每日约 30t)、浓度高的特点, F<sup>-</sup> 浓度可达 12000mg/L, 同时含有光刻胶、显影液等有机污染物, COD 浓度为 500~800mg/L。

### 2. 工艺方案

采用“预处理—纳滤—反渗透”工艺。预处理阶段, 先通过调节 pH 值至 7~8, 投加聚合氯化铝和聚丙烯酰胺进行混凝沉淀, 去除大部分悬浮物和有机物; 然后经砂滤和活性炭过滤进一步净化水质。纳滤膜对氟离子和有机污染物进行截留, 反渗透膜对纳滤产水进行深度处理。产水回用于芯片清洗工序, 浓水进入蒸发浓缩系统, 残渣作为危险废物处理。

### 3. 运行效益

项目运行后, 废水回用率达到 85% 以上, 每年节约新鲜用水量 8 万吨, 减少废水排放约 6.8 万吨。同时, 企业每年节省水费和污水处理费用超 800 万元, 实现了环境效益和经济效益的双赢。此外, 该项目还通过了 ISO14001 环境管理体系认证, 提升了企业的环保形象。

## 四、氢氟酸废水处理技术发展挑战与趋势

### (一) 面临的挑战

#### 1. 处理成本高

氢氟酸废水处理的各个环节均需大量资金投入。中和沉淀法产生的含氟污泥处置费用高昂, 每吨污泥的处置成本达 800~1200 元; 吸附法中吸附剂的更换和再生成本也不容小觑, 以活性氧化铝为例, 其再生成本约为 200~300 元/t。膜分离法虽然处理效果好, 但膜组件价格昂贵, 一套处理规模为 100t/天的反渗透膜系统, 膜组件更换成本高达 50~80 万元, 且膜的清洗和维护费用每年约 10~15 万元。

## 2. 深度处理困难

随着环保标准日益严格，部分地区要求氢氟酸废水处理后氟离子浓度低于0.5mg/L。现有技术在实现氟离子深度去除时面临诸多难题，如吸附法的吸附容量有限，膜分离法在低浓度下的处理效率低、能耗高，且容易出现膜污染加剧的问题。

## 3. 二次污染问题

部分处理工艺会产生二次污染物。中和沉淀法产生的含氟污泥若处置不当，其中的氟离子会重新释放进入环境；吸附法再生过程产生的废液含有高浓度的氟离子和其他污染物，若不妥善处理，会造成新的污染。膜分离法产生的浓水含有高浓度的氟离子、重金属和有机物，直接排放会对环境造成严重危害。

# （二）发展趋势

## 1. 新型材料研发

未来将聚焦于开发高效、低成本、可再生的吸附材料和膜材料。纳米材料因其独特的表面效应和量子尺寸效应，在氢氟酸废水处理中展现出巨大潜力。例如，纳米二氧化钛—活性炭复合材料对氟离子的吸附容量比普通活性炭提高了3倍。生物材料如改性海藻酸钠、壳聚糖等，具有来源广泛、环境友好的特点，也成为研究热点。在膜材料方面，研发具有高通量、高截留率、抗污染性能强的复合膜将是重要方向。

## 2. 联合工艺优化

单一处理工艺难以满足复杂废水的处理需求，多种工艺联合应用将成为主流。“生物—物理—化学”联合工艺备受关注，通过微生物降解废水中的有机物，结合物理化学方法去除氟离子和重金属。例如，利用耐氟微生物预处理氢氟酸废水，降低有机物含量后，再采用吸附—膜分离工艺进行深度处理，可显著提高处理效率和降低成本。

## 3. 智能化控制

引入物联网、大数据、人工智能等技术，实现氢氟酸废水处理过程的智能化控制。通过在处理系统中部署大量传感器，实时监测水质参数、设备运行状态等数据，并将数据传输至中央控制系统。利用人工智能算法对数据进行分析，自动调整药剂投加量、设备运行参数，实现精准控制。同时，通过大数据分析预测设备故障和处理效果，提前采取预防措施，提高系统运行的稳定性和可靠性。

### 第三节 氨吹脱系统处理技术

在工业化与城镇化高速推进的当下，氨氮污染已成为全球水环境治理的焦点难题。据国际水协会（IWA）统计，全球每年因工业生产和市政排放产生的氨氮废水总量超 120 亿吨，其中仅化工行业排放的氨氮就占比高达 35%。氨氮废水若未经有效处理直接排放，不仅会引发水体富营养化，导致藻类暴发性生长、水体缺氧，还可能在微生物作用下转化为亚硝酸盐等强致癌物，严重威胁生态平衡与公众健康。氨吹脱系统处理技术凭借其高效的氨氮去除能力，在高氨氮废水处理领域占据重要地位，尤其在预处理环节，可大幅降低后续处理负荷，成为水资源保护体系中不可或缺的关键技术。

#### 一、氨氮废水特性与危害

##### （一）废水来源与成分

###### 1. 工业废水

化工行业：化肥生产是氨氮废水的“重灾区”。以尿素生产为例，每生产 1t 尿素约产生 5~8t 氨氮废水，氨氮浓度通常在 2000~5000mg/L。某大型氮肥企业的实际监测数据显示，其尿素车间排放的废水中氨氮浓度长期维持在 3500mg/L 左右，且含有大量的尿素、碳酸氢铵等残留物质。此外，石油化工行业的煤气化过程中，原料煤中的氮元素在气化反应后，大量转化为氨氮进入废水，这类废水除氨氮浓度高（可达 1500~4000mg/L）外，还含有酚类、氰化物等有毒有害物质，处理难度极大。食品加工行业：肉类屠宰、乳制品加工等食品行业的废水同样氨氮含量惊人。某年处理量 10 万吨的肉类屠宰厂，其每日排放的废水中氨氮浓度达 2500mg/L，COD（化学需氧量）高达 6000mg/L，主要源于肉类加工过程中蛋白质的分解以及清洗用水的大量使用。乳制品生产废水则因牛奶中含氮有机物的存在，氨氮浓度通常在 800~1500mg/L，且废水呈酸性，进一步增加了处理复杂性。

###### 2. 市政污水

随着城市人口密度的持续攀升，生活污水中的氨氮排放量逐年递增。我国一线城市人均每日氨氮产生量约为 5~8g，主要来源于人体排泄物（占比约 60%）、含氮洗涤剂（占比约 25%）以及餐饮废水（占比约 15%）。在一些老旧城区，由于污水管网老化、雨污分流不完善，生活污水与雨水混合排放，导致氨

氮浓度波动范围大,部分区域雨季时氨氮浓度可从平日的 30mg/L 骤升至 60mg/L。垃圾渗滤液更是典型的高浓度氨氮废水,垃圾填埋 5~10 年后,渗滤液中的氨氮浓度可达 3000~8000mg/L,同时含有重金属、难降解有机物等污染物,处理技术要求极高。

## (二) 环境与健康危害

### 1. 水体生态破坏

氨氮超标是引发水体富营养化的关键诱因。当水体中氨氮浓度超过 0.2mg/L 时,藻类生长便会加速。以我国太湖为例,2007 年蓝藻大规模爆发期间,湖区氨氮平均浓度达 1.2mg/L,部分区域甚至超过 3mg/L,导致藻类过度繁殖,覆盖面积超过湖面的 60%。藻类死亡后在分解过程中大量消耗溶解氧,致使水体溶解氧浓度降至 1mg/L 以下,造成鱼类大规模死亡,湖区生态系统遭受重创,直接经济损失超 10 亿元。此外,氨氮中的非离子氨( $\text{NH}_3$ )对水生生物具有极强的毒性,当水体中非离子氨浓度超过 0.02mg/L 时,就会对鱼类的鳃组织造成不可逆损伤,抑制其呼吸功能和生长繁殖能力。<sup>①</sup>

### 2. 人体健康威胁

氨氮在微生物的硝化作用下,会逐步转化为亚硝酸盐和硝酸盐。亚硝酸盐进入人体后,会与胃中的胺类物质反应生成亚硝胺,这是一种已知的强致癌物,长期饮用氨氮超标的水会显著增加患胃癌、食道癌的风险。世界卫生组织(WHO)明确规定,饮用水中氨氮含量不得超过 0.5mg/L。我国某北方地区曾因长期饮用氨氮含量超标的地下水(平均浓度 1.2mg/L),当地居民胃癌发病率比全国平均水平高出 30%。此外,高浓度氨氮还会刺激人体呼吸道和神经系统,引发咳嗽、头晕、呼吸困难等症状。

## 二、氨吹脱系统处理技术原理

### (一) 基本原理

氨吹脱技术的核心基于水溶液中氨氮的存在形态平衡与气液传质规律。在水溶液中,氨氮以离子铵( $\text{NH}_4^+$ )和游离氨( $\text{NH}_3$ )两种形态共存,二者的比例主要受 pH 值和温度的影响。当溶液呈酸性( $\text{pH} < 7$ )时,氨氮几乎全部以离子铵形式存在;随着 pH 值升高至碱性范围( $\text{pH} > 9$ ),离子铵会逐渐转化为游离氨,

<sup>①</sup> 蒋其忠. 水生植物治理水体富营养化的研究进展[J]. 青海环境, 2024, 34(4): 216-219, 227.

当 pH 值达到 10~11 时, 游离氨比例可超过 90%。同时, 温度升高会降低游离氨在水中的溶解度, 加速其挥发。氨吹脱系统正是利用这一特性, 先向废水中投加氢氧化钠、石灰等碱性药剂, 将 pH 值调节至 10~11, 促使氨氮大量转化为游离氨; 再通过向废水中通入空气或蒸汽, 形成气液两相界面, 利用气液间的浓度差, 使游离氨从液相向气相转移, 从而实现氨氮的去除。

## (二) 影响因素分析

### 1. pH 值

pH 值对氨吹脱效率起着决定性作用。研究表明, 当 pH 值从 9 升至 10 时, 氨氮去除率可从 40% 提升至 70%; 继续将 pH 值升至 11, 去除率可进一步提高至 90% 以上。但 pH 值过高也会带来诸多问题, 如药剂成本大幅增加, 以处理 1t 氨氮浓度 1000mg/L 的废水为例, 将 pH 值从 10 调节至 11, 氢氧化钠的投加量需增加约 30%, 成本增加 5~8 元。此外, 过高的 pH 值还会导致废水中的钙、镁等离子形成氢氧化物沉淀, 增加污泥产量, 堵塞设备管道。

### 2. 温度

温度与氨氮去除效率呈正相关关系。在一定范围内, 温度每升高 10℃, 氨的挥发速率可提高 2~3 倍。例如, 在 20℃ 时, 氨吹脱的平衡时间约为 2 小时; 而当温度升至 30℃, 平衡时间可缩短至 1.2 小时。但温度过高会增加能耗成本, 且可能导致水分过度蒸发, 影响后续处理工艺。实际工程中, 通常将温度控制在 25℃~35℃, 以兼顾处理效率和能耗。

### 3. 气液比

气液比直接影响气液传质效率。适当增大气液比, 可增加气液接触面积, 提高氨氮去除率。对于氨氮浓度 1000mg/L 的废水, 当气液比从 1500 : 1 增加至 2500 : 1 时, 氨氮去除率可从 75% 提升至 85%。但气液比过大, 会导致风机能耗显著增加, 运行成本上升; 同时, 过高的气速可能引起废水的二次夹带, 降低处理效果。因此, 需根据废水水质和处理要求, 通过试验优化气液比, 一般控制在 2000~3000 : 1。

### 4. 吹脱时间

氨氮去除率随吹脱时间的变化呈现先快速上升后趋于平稳的趋势。在吹脱初期 (0~1 小时), 氨氮去除率增长迅速; 1~2 小时后, 增长速率逐渐减缓; 当吹脱时间超过 3 小时, 去除率基本不再提高。实际应用中, 需根据废水氨氮浓度和

处理目标，合理确定吹脱时间，如处理氨氮浓度 2000mg/L 的废水，吹脱时间通常控制在 2~2.5 小时。

### 三、氨吹脱系统工艺流程

#### （一）预处理阶段

##### 1. 物理处理

格栅作为废水处理的首道防线，用于拦截废水中粒径大于 10mm 的悬浮物和漂浮物，如树枝、塑料瓶等，防止其堵塞后续设备。沉砂池则通过重力沉降作用，去除废水中密度较大的砂粒等无机颗粒，停留时间一般为 1~2 小时，可有效降低废水中的 SS（悬浮物）含量。对于含油废水，需采用隔油池或气浮法进行除油处理。某油脂加工厂的实践表明，采用溶气气浮法处理含油废水，可使废水中的油含量从 500mg/L 降至 50mg/L 以下，显著减轻后续处理负荷。

##### 2. 水质调节

调节池的主要作用是均衡水质水量，防止水质波动对后续处理工艺造成冲击。调节池的有效容积通常按废水最大时流量的 2~4 倍设计。同时，在调节池中投加碱性药剂（如氢氧化钠溶液或石灰乳）调节 pH 值，通过在线 pH 监测仪实时反馈数据，自动控制加药量，将 pH 值稳定在 10~11 的适宜范围。

#### （二）氨吹脱主体工艺

##### 1. 吹脱设备类型

填料塔：填料塔是氨吹脱最常用的设备，其结构主要包括塔体、填料层、液体分布器和气体分布器。塔体材质根据废水腐蚀性选择，常用碳钢衬胶、玻璃钢等。填料层是传质的核心区域，高效填料如鲍尔环、阶梯环等，比表面积可达  $200\sim 300\text{m}^2/\text{m}^3$ ，能大幅增加气液接触面积。液体分布器要求均匀布水，常见的有槽式分布器、喷头式分布器，确保废水在填料层上均匀分布；气体分布器则采用多孔板或气体分布管，保证气体均匀上升。

板式塔：板式塔通过塔内的多层塔板实现气液接触，常用的塔板类型有筛板、浮阀塔板和泡罩塔板。筛板塔结构简单、成本低，但操作弹性较小；浮阀塔板可根据气液流量自动调节开度，操作弹性大，传质效率高；泡罩塔板操作稳定，但阻力较大、成本较高。与填料塔相比，板式塔处理量大，适用于氨氮浓度较低、水量较大的场合。

喷淋塔：喷淋塔结构相对简单，废水通过喷头雾化后与上升气流接触。由于气液接触时间短，其氨氮去除效率相对较低，一般仅用于氨氮浓度较低（ $< 500\text{mg/L}$ ）或作为辅助处理设备。

## 2. 运行过程

经过预处理的废水从塔顶进入吹脱塔，在重力作用下向下流动；空气或蒸汽从塔底进入，自下而上流动，与废水形成逆流接触。在填料塔中，废水在填料表面形成液膜，气体穿过填料间隙，气液两相在填料表面充分接触，游离氨不断从液相向气相转移。为提高吹脱效率，通常设置多级吹脱单元，如某氨吹脱工程采用三级串联填料塔，氨氮去除率比单级塔提高了 20%。

## （三）后处理阶段

### 1. 尾气处理

从吹脱塔排出的尾气中含有大量氨气，必须进行处理以防止大气污染。酸吸收法是最常用的尾气处理方式，利用硫酸、盐酸等酸性溶液吸收氨气，生成硫酸铵、氯化铵等铵盐，这些铵盐可作为肥料或化工原料回收利用。某氮肥厂采用硫酸吸收尾气，每年可回收硫酸铵产品 500t，创造经济效益超 100 万元。生物法通过微生物的硝化—反硝化作用将氨气转化为氮气，具有运行成本低、无二次污染的优点，但处理效率相对较低，适用于氨气浓度较低的场合。催化氧化法则是在催化剂（如铂、钨等贵金属催化剂）作用下，将氨气氧化为氮气和水，该方法处理效率高，但催化剂成本昂贵，限制了其广泛应用。

### 2. 废水深度处理

尽管氨吹脱可大幅降低氨氮浓度，但处理后的废水仍可能无法达到排放标准，需进一步深度处理。生物脱氮工艺，如 A/O（厌氧—好氧）、A<sup>2</sup>/O（厌氧—缺氧—好氧）工艺，通过微生物的硝化—反硝化作用去除剩余氨氮和有机物，是目前应用最广泛的深度处理方法。折点加氯法是向废水中投加过量氯气，将氨氮氧化为氮气，但该方法会产生三卤甲烷等副产物，存在二次污染风险。离子交换法利用离子交换树脂吸附氨氮，具有处理效果好、出水稳定的优点，但树脂再生成本较高，且再生废液需妥善处理。

## 四、氨吹脱系统技术优化与创新

### （一）工艺参数优化

#### 1. 智能 pH 调节

采用先进的在线 pH 监测仪（如瑞士梅特勒—托利多的 InPro3250i），监测精度可达  $\pm 0.01\text{pH}$ ，结合 PLC 控制系统，实现 pH 值的自动调节。通过建立 pH—氨氮去除率数学模型，根据废水氨氮浓度实时调整加药量，确保 pH 值稳定在最佳范围，同时降低药剂消耗。某污水处理厂应用智能 pH 调节系统后，氢氧化钠用量减少了 25%，氨氮去除率提高了 10%。

#### 2. 温度协同控制

利用工业余热（如热电厂蒸汽冷凝水、钢铁厂冷却水）对废水进行预热，降低加热能耗。在冬季，将废水温度从  $15^{\circ}\text{C}$  预热至  $25^{\circ}\text{C}$ ，可使氨吹脱效率提高 15%~20%。同时，配备温度传感器和自动调节装置，当温度超过  $35^{\circ}\text{C}$  时，自动启动冷却系统，避免因温度过高导致的能耗增加和水分过度蒸发。

#### 3. 气液比动态优化

引入变频技术调节风机转速，根据氨氮浓度和处理效果实时调整气液比。通过安装在线流量计（如电磁流量计）和氨氮检测仪，构建气液比—氨氮去除率数据库，利用机器学习算法自动优化气液比参数。某化工企业采用气液比动态优化系统后，风机能耗降低了 18%，氨氮去除率保持稳定。

### （二）设备结构改进

#### 1. 新型填料研发

规整填料逐渐替代传统散装填料成为主流，如金属孔板波纹填料，其比表面积可达  $500\text{m}^2/\text{m}^3$ ，流体分布均匀性比散装填料提高 40%，传质效率提升 20%~30%。还有一些新型复合填料，将亲水材料与疏水材料结合，既保证液体均匀分布，又有利于气体传质，进一步提高氨氮去除率。

#### 2. 创新塔型设计

旋转式吹脱塔通过高速旋转产生离心力，使气液接触强度大幅增加，传质效率比传统塔型提高 2~3 倍。其结构主要包括旋转筒体、液体分布器和气体分布器，废水在离心力作用下形成薄膜，与气体充分接触。某企业研发的旋转式吹脱塔处理能力可达  $500\text{m}^3/\text{h}$ ，氨氮去除率高达 95%。此外，多级错流吹脱塔通过优化气

液流动方式,使气液多次逆流接触,提高了传质效率,尤其适用于高浓度氨氮废水处理。

### (三) 联合工艺应用

#### 1. 氨吹脱—生物脱氮联合工艺

该工艺先通过氨吹脱去除大部分氨氮,将浓度降至生物处理可承受范围(一般 $\leq 300\text{mg/L}$ ),再利用生物脱氮工艺进一步去除剩余氨氮和有机物。某垃圾渗滤液处理厂采用“氨吹脱—A<sup>2</sup>/O—MBR”联合工艺,进水氨氮浓度 $4500\text{mg/L}$ ,经氨吹脱去除80%后,再通过生物处理使出水氨氮浓度降至 $10\text{mg/L}$ 以下,COD降至 $50\text{mg/L}$ 以下,达到排放标准。

#### 2. 氨吹脱—膜分离联合工艺

吹脱后的废水经过膜分离处理,可实现氨氮的深度去除和水资源的回用。常用的膜技术有反渗透(RO)膜、纳滤(NF)膜和超滤(UF)膜。某电子企业采用“氨吹脱—超滤—纳滤—反渗透”联合工艺,将氨氮浓度从 $1200\text{mg/L}$ 降至 $1\text{mg/L}$ 以下,产水回用于生产工序,回用率达85%,年节约用水量超10万吨。

## 五、氨吹脱系统处理技术典型案例

### (一) 某化工企业氨氮废水处理项目

#### 1. 项目背景

该化工企业主要生产尿素、碳酸氢铵等氮肥产品,每日产生氨氮废水300t,氨氮浓度高达 $3000\text{mg/L}$ ,同时含有大量的尿素、悬浮物和少量重金属离子。原有的处理工艺仅采用生物处理,无法满足GB8978—1996《污水综合排放标准》一级标准(氨氮 $\leq 15\text{mg/L}$ ),因此引入氨吹脱系统进行预处理。

#### 2. 处理工艺

废水首先经过格栅、沉砂池去除大颗粒杂质,然后进入调节池调节水质水量;在反应池内投加氢氧化钠溶液,将pH值调节至10.5;接着进入填料吹脱塔,采用空气作为吹脱气体,气液比控制为2000:1,吹脱时间为1.5小时。吹脱后的尾气采用硫酸吸收法进行处理,生成硫酸铵溶液进行回收;吹脱后的废水进入A/O生物处理系统进行深度处理。

#### 3. 处理效果

经过氨吹脱处理后,氨氮去除率达到90%以上,废水氨氮浓度降至 $300\text{mg/L}$

以下；再经过生物处理后，出水氨氮浓度稳定在 15mg/L 以下，达到 GB8978—1996《污水综合排放标准》一级标准。该项目运行三年来，累计减少氨氮排放超 3000t，同时回收硫酸铵产品 1000 余吨，实现了环境效益和经济效益的双赢。

## （二）某垃圾填埋场渗滤液处理工程

### 1. 项目背景

该垃圾填埋场运营多年，每天产生渗滤液 150t，氨氮浓度高达 5000mg/L，且水质波动较大，处理难度极高。为了有效去除氨氮，采用氨吹脱—膜生物反应器（MBR）—纳滤（NF）—反渗透（RO）联合处理工艺。

### 2. 处理工艺

渗滤液先经过预处理去除悬浮物和部分有机物，然后在调节池中调节 pH 值至 11，进入板式吹脱塔进行氨吹脱，气液比为 2500 : 1，吹脱时间 2 小时。吹脱后的尾气采用生物滤池进行处理；吹脱后的废水依次进入 MBR、NF 和 RO 系统进行深度处理。

### 3. 处理效果

氨吹脱阶段氨氮去除率达到 85% 以上，使氨氮浓度降至 750mg/L 左右；经过后续深度处理后，出水氨氮浓度低于 5mg/L，化学需氧量（COD）低于 50mg/L，达到 GB16889—2008《生活垃圾填埋场污染控制标准》排放标准。该工程的建成，有效解决了垃圾填埋场渗滤液污染问题，保护了周边水体环境。

## 六、氨吹脱系统处理技术面临的挑战与发展趋势

### （一）面临的挑战

#### 1. 能耗与成本问题

氨吹脱过程需要消耗大量的碱性药剂和能源（用于提升 pH 值和驱动气体流动），导致运行成本较高。以处理 1 吨氨氮浓度为 1000mg/L 的废水为例，仅碱性药剂和电费成本就高达 15~20 元。对于一些中小型企业来说，高昂的处理成本限制了该技术的应用。

#### 2. 二次污染风险

氨吹脱产生的尾气若处理不当，会造成大气污染；酸吸收法产生的铵盐溶液若无法有效回收利用，会形成新的固废或废水污染。此外，在高 pH 值条件下，废水中的部分重金属离子可能会形成氢氧化物沉淀，增加污泥处理难度和成本。

### 3. 水质适应性问题

氨吹脱技术对水质变化较为敏感，当废水中含有大量的表面活性剂、油脂等物质时，容易产生泡沫，影响气液传质效果；若废水中悬浮物含量过高，会堵塞填料或塔板，降低设备运行效率。

## （二）发展趋势

### 1. 节能降耗技术研发

未来将致力于开发低能耗的氨吹脱技术，如利用太阳能、地热能等清洁能源替代传统能源，降低运行成本。研究新型高效的气液传质设备，提高传质效率，减少气体用量。优化工艺参数，实现氨吹脱过程的智能化控制，降低能源消耗。

### 2. 资源化利用与零排放

加强氨吹脱尾气中氨的回收利用技术研究，开发高附加值的铵盐产品；探索废水深度处理后回用的技术路径，实现水资源的循环利用。推动氨吹脱与其他资源化技术的集成，如与厌氧氨氧化（Anammox）工艺联合，实现氨氮的高效去除和能源回收。

### 3. 智能化与自动化控制

引入物联网、大数据、人工智能等技术，实现氨吹脱系统的智能化监测和自动化控制。通过在线传感器实时监测水质、设备运行状态等参数，利用人工智能算法优化工艺运行，自动调整药剂投加量、气体流量等，提高系统运行的稳定性和可靠性。

## 第四节 研磨废水回收技术

在现代制造业蓬勃发展的背景下，研磨作为精密加工的关键工序，广泛应用于电子信息、机械制造、光学仪器等领域。然而，研磨过程中会产生大量成分复杂的废水，若未经有效处理直接排放，不仅造成水资源浪费，还会对生态环境产生严重危害。据统计，我国制造业每年产生的研磨废水超过 20 亿吨，其中仅电子芯片制造行业研磨废水排放量就占比达 15%。研磨废水回收技术通过物理、化学、生物等多种手段，实现水资源的循环利用与污染物的无害化处理，成为制造业绿色转型与水资源可持续发展的重要支撑，与氨吹脱系统处理技术共同构建起工业废水治理的技术体系。<sup>①</sup>

① 王雯佳，章婷婷. 集成电路制造厂化学机械研磨废水回用技术 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报，2019，42（3）：85-90.

## 一、研磨废水特性与危害

### （一）废水来源与成分

#### 1. 电子信息行业

在半导体芯片制造过程中，研磨工序主要用于晶圆表面的抛光和减薄。该过程产生的废水含有大量的二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）磨料颗粒、重金属离子（如铜、镍、铬等）以及化学机械抛光（CMP）过程中使用的酸性或碱性化学药剂。以 12 英寸晶圆研磨为例，每片晶圆研磨废水产生量约为 2~3 升，废水中  $\text{SiO}_2$  浓度可达 5000~10000mg/L，铜离子浓度在 50~200mg/L 之间，pH 值波动范围大，酸性废水 pH 值低至 2~3，碱性废水 pH 值高达 11~12。

#### 2. 机械制造行业

机械加工中的研磨工序，如精密零件的平面研磨、外圆研磨等，会产生含有金属磨屑（如铁、铝、不锈钢等）、磨削液和油污的废水。磨削液通常由矿物油、乳化剂、防锈剂等组成，导致废水中化学需氧量（COD）和生化需氧量（BOD）较高，COD 浓度可达 5000~10000mg/L，同时含有大量悬浮物（SS），SS 浓度可达 2000~5000mg/L。

#### 3. 光学仪器行业

光学镜片研磨废水主要含有玻璃粉末、研磨助剂（如表面活性剂、分散剂）以及少量重金属。玻璃粉末的粒径细小，一般在 1~10 $\mu\text{m}$  之间，难以自然沉降；研磨助剂中的表面活性剂会降低水的表面张力，导致废水产生大量泡沫，增加处理难度。

### （二）危害性分析

#### 1. 水资源污染

研磨废水中的重金属离子具有毒性大、难降解、易富集的特点，进入水体后会对水生生物造成毒害，破坏水生态系统平衡。例如，铜离子浓度超过 0.1mg/L 时，就会对鱼类的鳃组织和肝脏造成损害，抑制其生长和繁殖。同时，废水中的磨料颗粒和悬浮物会降低水体透明度，影响水生植物的光合作用，导致水体溶解氧含量下降。

#### 2. 土壤污染

若研磨废水未经处理直接用于灌溉或渗入土壤，其中的重金属和化学药剂会

在土壤中积累,改变土壤的理化性质,降低土壤肥力,影响农作物生长。长期受污染的土壤种植出的农作物,重金属含量可能超标,通过食物链传递,危害人体健康。

### 3. 设备腐蚀与堵塞

研磨废水中的酸性或碱性物质会对排水管道和污水处理设备造成腐蚀,缩短设备使用寿命。废水中的磨料颗粒和悬浮物还容易堵塞管道和过滤设备,影响污水处理系统的正常运行,增加设备维护成本。

## 二、研磨废水物理处理技术

### (一) 沉淀与过滤技术

#### 1. 重力沉淀

重力沉淀是利用废水中悬浮物与水的密度差,通过静置使悬浮物自然沉降的方法。在实际应用中,常采用平流式沉淀池或竖流式沉淀池。以某机械加工企业为例,其研磨废水经平流式沉淀池处理,停留时间为 2~3 小时,可去除 60%~80% 的悬浮物。但对于粒径较小的磨料颗粒和胶体物质,重力沉淀效果有限,需要与其他处理方法结合使用。

#### 2. 过滤技术

砂滤:砂滤是通过石英砂等滤料层截留废水中的悬浮物和胶体物质。滤料粒径一般为 0.5~1.2mm,过滤速度控制在 5~10m/h。某光学镜片研磨废水处理项目中,采用砂滤处理后,废水的浊度从 50NTU 降至 5NTU 以下,有效去除了废水中的玻璃粉末。

微滤(MF):微滤膜的孔径范围为 0.1~10 $\mu\text{m}$ ,可截留废水中的大颗粒物质和部分胶体。在半导体芯片研磨废水处理中,微滤作为预处理单元,能有效去除废水中的  $\text{SiO}_2$  磨料颗粒,减轻后续处理压力。

超滤(UF):超滤膜孔径为 0.001~0.1 $\mu\text{m}$ ,可分离废水中的大分子有机物、胶体和细菌等。对于含有磨削液的机械研磨废水,超滤能有效截留其中的乳化油和高分子聚合物,使废水的 COD 去除率达到 40%~60%。

### (二) 离心分离技术

离心分离是利用离心力加速悬浮物沉降的方法。根据离心力产生方式的不同,可分为碟式离心机和卧螺离心机。在电子芯片研磨废水处理中,采用卧螺离心机

处理，转速可达 3000~5000r/min，可快速分离出废水中的重金属颗粒和磨料，分离效率比重力沉淀提高 3~5 倍。但离心分离设备投资成本较高，运行过程中能耗较大，限制了其在一些中小型企业的应用。

### 三、研磨废水化学处理技术

#### （一）中和处理

研磨废水的 pH 值差异较大，酸性或碱性废水需进行中和处理。对于酸性废水，常用的中和剂有石灰  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ ) 等；对于碱性废水，可采用硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、盐酸 ( $\text{HCl}$ ) 进行中和。在某半导体研磨废水处理工程中，通过投加石灰将酸性废水的 pH 值从 2.5 调节至 7~8，不仅中和了酸性，还使废水中的重金属离子生成氢氧化物沉淀，去除率可达 70%~80%。但中和处理过程中会产生大量污泥，增加了后续污泥处理的负担。

#### （二）混凝沉淀

混凝沉淀是通过投加混凝剂和助凝剂，使废水中的胶体和细小悬浮物聚集形成大颗粒絮体，然后通过沉淀去除。常用的混凝剂有聚合氯化铝 (PAC)、聚合硫酸铁 (PFS)，助凝剂为聚丙烯酰胺 (PAM)。在光学镜片研磨废水处理中，当 PAC 投加量为 200~300mg/L，PAM 投加量为 1~2mg/L 时，废水的浊度去除率可达 90% 以上，同时对废水中的表面活性剂也有一定的去除效果。

#### （三）化学氧化

##### 1. 芬顿氧化

芬顿氧化是利用亚铁离子 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 和过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 反应产生的羟基自由基 ( $\cdot\text{OH}$ )，氧化分解废水中的有机物和重金属络合物。在处理含有难降解有机物的机械研磨废水时，芬顿氧化可使废水的 COD 去除率达到 50%~70%。但芬顿氧化过程中需要消耗大量的药剂，且会产生含铁污泥，处理成本较高。

##### 2. 臭氧氧化

臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 具有强氧化性，能有效去除废水中的有机物、异味和色度。在半导体研磨废水处理中，臭氧氧化可将废水中的有机抛光液氧化分解，降低废水的 COD，同时对重金属离子有一定的氧化沉淀作用。然而，臭氧制备成本较高，且臭氧在水中的溶解度较低，需要特殊的曝气设备提高臭氧利用率。

## 四、研磨废水生物处理技术

### （一）好氧生物处理

#### 1. 活性污泥法

活性污泥法是利用悬浮生长的微生物絮体处理有机废水的方法。在处理机械研磨废水时，通过控制曝气时间、污泥浓度等参数，可使废水中的有机物得到有效降解。某机械制造企业采用改良型活性污泥法处理研磨废水，当污泥浓度控制在 3000~4000mg/L，曝气时间为 8—10 小时，废水的 COD 去除率可达 80% 以上。但活性污泥法对有毒有害物质较为敏感，对于含有重金属和高浓度化学药剂的研磨废水，需要进行预处理降低毒性后才能有效处理。

#### 2. 生物膜法

生物膜法是使微生物附着在固体填料表面形成生物膜，通过生物膜的代谢作用降解有机物。常见的生物膜法工艺有生物接触氧化法、生物滤池等。在光学镜片研磨废水处理中，生物接触氧化法的处理效果较好，当填料负荷为 1.5~2.0kgCOD/（m<sup>3</sup>·d）时，废水的 COD 去除率可达 70%~80%，且生物膜法具有耐冲击负荷能力强、污泥产量低等优点。

### （二）厌氧生物处理

厌氧生物处理是在无氧条件下，利用厌氧微生物降解有机物的过程。对于高浓度有机研磨废水，如含有大量磨削液的机械研磨废水，厌氧生物处理可有效降低废水的 COD，同时产生沼气作为能源。某汽车零部件制造企业采用厌氧—好氧联合工艺处理研磨废水，厌氧阶段采用 UASB（升流式厌氧污泥床）反应器，当进水 COD 浓度为 8000mg/L 时，UASB 反应器的 COD 去除率可达 60%~70%，减轻了后续好氧处理的负荷。

## 五、研磨废水资源化利用技术

### （一）水资源回用

#### 1. 膜分离技术

反渗透（RO）膜和纳滤（NF）膜技术可实现研磨废水的深度处理和水资源回用。在半导体芯片研磨废水处理中，采用“超滤—纳滤—反渗透”组合工艺，可将处理后的水回用于研磨工序，回用率可达 80% 以上。RO 膜能有效截留废水

中的重金属离子、有机物和溶解性固体，使出水水质达到生产用水标准。但膜分离技术存在膜污染问题，需要定期进行化学清洗，增加了运行成本。

## 2. 蒸发浓缩技术

蒸发浓缩是通过加热使废水中的水分蒸发，实现污染物的浓缩和水资源的回收。对于含有高浓度盐分或难降解有机物的研磨废水，蒸发浓缩技术具有较好的处理效果。某电镀研磨废水处理项目采用多效蒸发技术，将废水蒸发浓缩后，冷凝水回用于生产，浓缩液进一步处理，实现了水资源的循环利用和污染物的减量。

## （二）固体废弃物回收

### 1. 磨料回收

对于含有贵重磨料（如金刚石、碳化硅）的研磨废水，可通过物理或化学方法回收磨料。在光学镜片研磨废水中，采用磁选法可回收废水中的磁性磨料；对于非磁性磨料，可通过化学沉淀法使其从废水中分离出来，经过洗涤、干燥后重新回用。

### 2. 重金属回收

研磨废水中的重金属具有较高的回收价值。通过离子交换、电解等方法可实现重金属的回收。在半导体研磨废水处理中，采用离子交换树脂吸附废水中的铜离子，吸附饱和后用酸溶液洗脱，可得到高纯度的铜离子溶液，进一步通过电解得到金属铜。

## 六、研磨废水回收技术典型案例

### （一）某半导体芯片制造企业研磨废水处理项目

#### 1. 项目背景

该企业主要生产 12 英寸晶圆，每日产生研磨废水 500t，废水中含有高浓度的  $\text{SiO}_2$  磨料、铜离子和酸性化学药剂，pH 值为 2~3，COD 浓度为 3000~5000mg/L。

#### 2. 处理工艺

采用“中和沉淀—超滤—纳滤—反渗透—蒸发浓缩”组合工艺。首先，在中和反应池中投加石灰乳，将 pH 值调节至 7~8，使铜离子生成氢氧化铜沉淀；然后通过超滤去除废水中的  $\text{SiO}_2$  磨料颗粒；纳滤和反渗透进一步去除有机物和重金属离子；反渗透浓水进入蒸发浓缩系统，冷凝水回用于生产，浓缩液进行固化处理。

### 3. 处理效果

经处理后，废水的回用率达到 85%，出水水质满足晶圆研磨用水标准，铜离子浓度低于 0.1mg/L，COD 浓度低于 50mg/L。每年可节约新鲜用水量 15 万吨，同时回收铜金属约 50t，实现了环境效益和经济效益的双赢。

## （二）某机械加工企业研磨废水处理工程

### 1. 项目背景

该企业主要从事精密机械零件加工，每日产生研磨废水 200t，废水中含有大量的铁屑、磨削液和油污，COD 浓度为 6000~8000mg/L，SS 浓度为 3000~5000mg/L。

### 2. 处理工艺

采用“隔油—气浮—水解酸化—接触氧化—深度过滤”工艺。首先通过隔油池去除废水中的浮油；气浮进一步去除乳化油和悬浮物；水解酸化将大分子有机物分解为小分子有机物，提高废水的可生化性；接触氧化利用生物膜降解有机物；最后通过深度过滤去除残留的悬浮物和胶体物质。

### 3. 处理效果

处理后的废水 COD 浓度降至 100mg/L 以下，SS 浓度低于 20mg/L，达到 GB8978—1996《污水综合排放标准》一级标准。同时，回收的废油经过处理后可作为燃料使用，减少了废弃物排放。

## 七、研磨废水回收技术面临的挑战与发展趋势

### （一）面临的挑战

#### 1. 处理成本高

研磨废水处理涉及多种技术和设备，投资成本和运行成本较高。膜分离技术中的膜组件价格昂贵，且需要定期更换；化学氧化处理过程中消耗大量药剂；蒸发浓缩技术能耗大，这些都增加了企业的经济负担。以处理 1 吨半导体研磨废水为例，采用膜分离技术的处理成本约为 20~30 元。

#### 2. 水质复杂性

研磨废水成分复杂多变，不同企业、不同生产工艺产生的废水水质差异大，单一处理技术难以满足处理要求。废水中的重金属离子、有机物和磨料颗粒相互作用，增加了处理难度。例如，某些重金属离子会与有机物形成络合物，使常规处理方法难以去除。

### 3. 二次污染问题

在研磨废水处理过程中，会产生污泥、浓缩液等二次污染物。污泥中含有重金属和化学药剂，若处置不当会造成二次污染；蒸发浓缩产生的浓缩液含有高浓度污染物，需要进一步处理，增加了处理流程和成本。

## （二）发展趋势

### 1. 技术集成创新

未来将更加注重多种处理技术的集成创新，开发高效、低成本的联合处理工艺。如将物理化学预处理与生物处理相结合，利用纳米技术、生物技术提高污染物去除效率。研究新型复合膜材料，提高膜的抗污染能力和分离性能，降低膜分离技术的运行成本。

### 2. 智能化与自动化

引入物联网、大数据和人工智能技术，实现研磨废水处理系统的智能化监测和自动化控制。通过在线传感器实时监测水质参数和设备运行状态，利用人工智能算法优化处理工艺，自动调整药剂投加量和设备运行参数，提高处理系统的稳定性和可靠性。

### 3. 资源化深度开发

进一步加强研磨废水资源化利用技术的研究，提高水资源回用率和固体废弃物回收价值。开发重金属高效回收技术，实现重金属的高纯度回收；研究磨料再生利用技术，降低企业生产成本。同时，探索研磨废水处理与新能源、新材料产业的结合，实现资源的循环利用和价值最大化。



## 第十章 展望未来超纯水技术

### 第一节 超纯水制备工艺技术

超纯水，作为一种几乎去除了所有杂质和离子的高纯度水，在电子、制药、化工等众多领域发挥着至关重要的作用。随着科技的不断进步，各行业对超纯水的质量和产量需求日益增加，这也促使超纯水制备工艺技术不断发展和创新。本文将详细介绍超纯水制备的工艺技术，包括其原理、常见工艺以及未来发展趋势。

#### 一、超纯水的定义与应用领域

##### （一）超纯水的定义

超纯水是指电阻率达到  $18\text{M}\Omega \times \text{cm}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) 的水。这种水中除了水分子外，几乎没有其他杂质，如细菌、病毒、含氯二噁英等有机物，以及人体所需的矿物质和微量元素。其纯度极高，是一般纯水所无法比拟的。

##### （二）超纯水的应用领域

电子行业：在半导体芯片制造过程中，超纯水用于清洗硅片、光刻胶等关键部件。哪怕是极微量的杂质或离子，都可能导致芯片短路、性能下降等问题，因此对超纯水的纯度要求极高。

制药行业：超纯水是药品生产过程中的重要原料，用于药物制剂的配制、设备的清洗等。高纯度的水可以保证药品的质量和安全性，避免杂质对药品疗效产生影响。

化工行业：在一些精细化工产品的生产中，超纯水作为反应介质或溶剂，能够确保化学反应的准确性和稳定性，提高产品的质量和纯度。

#### 二、超纯水制备的基本原理

超纯水制备的核心目标是去除水中的各种杂质和离子，使其达到极高的纯度。常见的杂质包括悬浮物、胶体、有机物、微生物以及各种阴阳离子等。根据杂质的性质和去除方法的不同，超纯水制备通常涉及以下几个基本原理。

### （一）过滤原理

过滤是去除水中悬浮物和胶体的常用方法。通过不同孔径的过滤介质，如石英砂、活性炭、微孔滤膜等，将水中的大颗粒杂质拦截下来。例如，石英砂过滤器可以去除水中粒径较大的悬浮物，而微孔滤膜则可以进一步过滤掉微小的胶体和细菌。

### （二）离子交换原理

离子交换是去除水中阴阳离子的重要方法。离子交换树脂是一种具有离子交换功能的高分子材料，它可以与水中的阳离子或阴离子发生交换反应。例如，阳离子交换树脂可以将水中的钙、镁、钠等阳离子交换为氢离子，阴离子交换树脂可以将水中的氯离子、硫酸根离子等阴离子交换为氢氧根离子。通过阴阳离子交换树脂的联合使用，可以将水中的大部分离子去除。

### （三）反渗透原理

反渗透是一种利用半透膜的选择性透过性，在压力作用下，使水从高浓度一侧向低浓度一侧渗透的过程。反渗透膜具有极高的脱盐率，可以有效去除水中的各种溶解盐类、有机物和微生物等。在超纯水制备中，反渗透通常作为预处理工艺，去除水中大部分的盐分和杂质，减轻后续处理工艺的负担。

### （四）电去离子原理

电去离子（EDI）是一种将离子交换技术和电渗析技术相结合的新型脱盐技术。在EDI装置中，离子交换树脂填充在阴阳离子交换膜之间，在直流电场的作用下，水中的阴阳离子分别向阴阳极移动，并通过离子交换膜进入浓水室，从而实现水的脱盐。同时，在电场的作用下，水分子被电离产生氢离子和氢氧根离子，它们可以不断再生离子交换树脂，使其保持良好的交换性能。EDI技术具有连续运行、无需酸碱再生等优点，是超纯水制备的关键技术之一。

## 三、常见的超纯水制备工艺

### （一）传统工艺

传统的超纯水制备工艺通常由多介质过滤器、活性炭过滤器、软化器、反渗透装置、离子交换混床等设备组成。

预处理阶段：原水首先通过多介质过滤器，去除水中的悬浮物和胶体。然后经过活性炭过滤器，去除水中的有机物、余氯等。软化器则用于去除水中的钙、

镁等离子，防止在后续处理过程中形成水垢。

反渗透阶段：经过预处理的水进入反渗透装置，利用反渗透膜的脱盐作用，去除水中大部分的盐分和杂质。反渗透装置通常采用多级反渗透系统，以提高脱盐率。

离子交换阶段：反渗透产水再进入离子交换混床，通过阴阳离子交换树脂的进一步交换作用，去除水中剩余的离子，使水质达到超纯水的标准。离子交换混床需要定期进行酸碱再生，以恢复树脂的交换性能。

## （二）现代工艺

随着技术的不断进步，现代超纯水制备工艺逐渐采用了更加先进的设备和技术，如超滤、反渗透、电去离子（EDI）等。

预处理阶段：现代工艺通常采用超滤装置代替传统的多介质过滤器和活性炭过滤器。超滤膜可以有效去除水中的悬浮物、胶体、细菌和大分子有机物等，具有过滤精度高、运行稳定等优点。

反渗透阶段：与传统工艺类似，反渗透仍然是现代超纯水制备的核心工艺之一。采用更先进的反渗透膜和系统设计，可以提高反渗透的脱盐率和产水效率。

电去离子阶段：电去离子（EDI）技术取代了传统的离子交换混床，成为超纯水制备的关键工艺。EDI装置可以连续运行，无需酸碱再生，避免了酸碱对环境的污染，同时提高了水质的稳定性和可靠性。

## （三）不同工艺的比较

传统工艺的优点是技术成熟、设备成本相对较低，但存在酸碱再生操作复杂、环境污染等问题。现代工艺则具有自动化程度高、水质稳定、环保等优点，但设备投资和运行成本相对较高。在实际应用中，需要根据原水水质、产水要求、投资成本等因素综合考虑，选择合适的超纯水制备工艺。

# 四、超纯水制备工艺的关键设备

## （一）过滤器

多介质过滤器：多介质过滤器通常采用石英砂、无烟煤等作为过滤介质，通过不同粒径的介质分层填充，实现对水中悬浮物和胶体的多级过滤。

活性炭过滤器：活性炭过滤器利用活性炭的吸附作用，去除水中的有机物、余氯、异味等。活性炭具有较大的比表面积和丰富的微孔结构，能够有效吸附水中的各种杂质。

超滤膜过滤器：超滤膜过滤器采用超滤膜作为过滤介质，其过滤精度可以达到  $0.001\sim 0.1\mu\text{m}$ ，能够有效去除水中的悬浮物、胶体、细菌和大分子有机物等。

## （二）反渗透装置

反渗透装置主要由反渗透膜组件、高压泵、压力容器等组成。反渗透膜是反渗透装置的核心部件，其性能直接影响到反渗透的脱盐率和产水质量。常见的反渗透膜有醋酸纤维素膜、聚酰胺复合膜等。

## （三）离子交换树脂和混床

离子交换树脂是离子交换工艺的关键材料，根据其交换基团的不同，可分为阳离子交换树脂和阴离子交换树脂。混床是将阴阳离子交换树脂按一定比例混合填充在同一容器中，实现对水中阴阳离子的同时去除。

## （四）电去离子（EDI）装置

EDI 装置主要由膜堆、电源、浓水循环系统等组成。膜堆是 EDI 装置的核心部分，由阴阳离子交换膜、离子交换树脂和隔板等组成。在直流电场的作用下，水中的阴阳离子通过离子交换膜和离子交换树脂的作用，实现水的脱盐和离子交换树脂的再生。

# 五、超纯水制备工艺的运行与维护

## （一）运行参数的控制

在超纯水制备过程中，需要严格控制各个设备的运行参数，如压力、流量、温度、pH 值等。例如，反渗透装置的进水压力和流量直接影响到反渗透的产水率和脱盐率，离子交换树脂的再生液浓度和流量则影响到树脂的再生效果。

## （二）设备的清洗与维护

定期对设备进行清洗和维护是保证超纯水制备系统正常运行的关键。例如，反渗透膜需要定期进行化学清洗，以去除膜表面的污垢和污染物，恢复膜的性能。离子交换树脂和 EDI 装置也需要定期进行检查和维护，确保其正常运行。

## （三）水质监测与分析

实时监测和分析超纯水的水质是保证产水质量的重要手段。常见的水质监测指标包括电阻率、电导率、微生物含量、颗粒度等。通过定期对水质进行监测和分析，可以及时发现水质变化情况，采取相应的措施进行调整和处理。

## 六、超纯水制备工艺技术的发展趋势

### （一）集成化与自动化

未来超纯水制备工艺将朝着集成化和自动化的方向发展。通过将多种处理工艺集成在一个系统中，实现设备的小型化和模块化，提高系统的整体性能和可靠性。同时，采用先进的自动化控制系统，实现对超纯水制备过程的实时监控和自动调节，减少人工干预，提高生产效率和产品质量。

### （二）绿色环保

随着环保意识的不断提高，超纯水制备工艺将更加注重绿色环保。采用无酸碱再生技术、低能耗设备和可再生能源等，减少对环境的污染和资源的消耗。例如，电去离子(EDI)技术的广泛应用，避免了酸碱再生过程中产生的废水和废气排放，符合绿色环保的发展要求。

### （三）高性能膜技术的应用

高性能膜技术的不断发展将为超纯水制备工艺带来新的突破。新型反渗透膜、超滤膜和纳滤膜等具有更高的脱盐率、通量和抗污染性能，可以进一步提高超纯水的制备效率和质量。同时，膜材料的研发和制备技术也将不断创新，降低膜的成本，提高膜的使用寿命。

### （四）智能化与大数据应用

智能化和大数据技术的应用将使超纯水制备工艺更加智能和高效。通过建立智能化的监控系统 and 数据分析平台，实时采集和分析超纯水制备过程中的各种数据，实现对设备运行状态的精准预测和故障诊断。同时，利用大数据技术对历史数据进行挖掘和分析，优化超纯水制备工艺参数，提高生产过程的稳定性和可靠性。

## 第二节 超纯水回用技术

在当今工业生产和科学研究中，超纯水的应用愈发广泛。超纯水是指电阻率达到  $18\text{M}\Omega \times \text{cm}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) 的水，其几乎完全去除了水中的导电介质，同时将水中不离解的胶体物质、气体及有机物均去除至很低程度。然而，超纯水的制备过程往往能耗高、成本大，且会产生大量的废水。因此，超纯水回用技术的研究和

应用具有重要的现实意义，它不仅可以降低生产成本，还能减少对水资源的浪费，符合可持续发展的理念。

## 一、超纯水的特性与回用的必要性

全球水资源总量虽然丰富，但可利用的淡水资源却十分有限。随着人口的增长、经济的发展和城市化进程的加快，水资源短缺问题日益突出。许多地区面临着严重的水资源危机，工业用水和生活用水的供需矛盾日益尖锐。超纯水具有极低的导电率、几乎不含离子和微生物、有机物含量极低等特点。其高纯度的特性使得它在一些对水质要求极高的工业生产过程中不可或缺，例如半导体芯片制造，超纯水中哪怕极微量的杂质都可能影响芯片的性能和良品率。超纯水的制备成本高昂，不仅需要复杂的处理工艺和大量的设备投资，而且在制备过程中会消耗大量的原水。以电子行业为例，每生产 1 片集成电路芯片，大约需要消耗数吨甚至数十吨的超纯水。如果这些超纯水能够得到有效回用，将大大降低生产成本，同时减少对水资源的依赖，具有显著的经济和环境效益。对于超纯水使用量较大的行业来说，实现超纯水的回用可以显著减少新鲜水资源的取用量，降低生产成本。同时，减少废水排放有助于减轻对环境的压力，符合可持续发展的理念。此外，超纯水回用还可以提高企业的水资源利用效率，增强企业的竞争力。

## 二、超纯水回用过程中的水质特点及处理难点

超纯水在使用过程中，其水质会受到多种因素的影响。一方面，超纯水在接触到各种工艺设备和物料时，可能会引入各种杂质，如金属离子、有机物、微生物等。另一方面，超纯水在系统中循环使用时，由于浓缩作用，水中的杂质浓度会逐渐升高。超纯水回用的处理难点主要在于去除水中的微量杂质。由于超纯水本身的纯度极高，即使是微量的杂质也可能对回用后的水质产生显著影响。此外，水中的有机物和微生物的去除也具有一定的难度，因为它们的性质较为复杂，难以通过单一的处理方法完全去除。

### 三、常见的超纯水回用化学处理方法

#### (一) 氧化法

##### 1. 臭氧氧化法

臭氧具有强氧化性，可以将水中的有机物氧化分解为小分子物质，从而降低水中有机物的含量。臭氧氧化法的优点是氧化能力强、反应速度快、不产生二次污染。在超纯水回用中，臭氧氧化可以有效地去除水中的微量有机物和微生物。然而，臭氧的制备成本较高，且臭氧在水中的溶解度较低，需要采用特殊的设备和工艺来提高臭氧的利用率。

##### 2. 过氧化氢氧化法

过氧化氢也是一种常用的氧化剂，其分解产物为水和氧气，不会对环境造成污染。过氧化氢氧化法通常需要与催化剂配合使用，如铁离子等，以提高氧化效率。在超纯水回用中，过氧化氢氧化可以用于去除水中的有机物和重金属离子。

#### (二) 化学沉淀法

##### 1. 氢氧化物沉淀法

通过向水中加入碱液，使水中的金属离子形成氢氧化物沉淀而去除。例如，对于含有铜离子、铁离子等金属离子的超纯水，可以加入氢氧化钠或氢氧化钙等碱液，使金属离子形成相应的氢氧化物沉淀。氢氧化物沉淀法的优点是操作简单、成本较低，但需要控制好 pH 值，以确保沉淀效果。

##### 2. 硫化物沉淀法

硫化物沉淀法是向水中加入硫化物，使金属离子形成硫化物沉淀而去除。硫化物沉淀法的优点是沉淀效果好，对于一些难以通过氢氧化物沉淀法去除的金属离子，如汞离子、镉离子等，硫化物沉淀法具有较好的去除效果。但硫化物沉淀法会产生硫化氢气体，需要进行妥善处理，以防止环境污染。

#### (三) 离子交换法

##### 1. 阳离子交换树脂

阳离子交换树脂可以去除水中的阳离子，如钠离子、钙离子、镁离子等。阳离子交换树脂通常采用磺酸基等酸性基团，通过离子交换作用将水中的阳离子与树脂上的氢离子进行交换。在超纯水回用中，阳离子交换树脂可以用于去除水中的金属离子，提高水的纯度。

## 2. 阴离子交换树脂

阴离子交换树脂可以去除水中的阴离子，如氯离子、硫酸根离子、碳酸根离子等。阴离子交换树脂通常采用季铵基等碱性基团，通过离子交换作用将水中的阴离子与树脂上的氢氧根离子进行交换。在超纯水回用中，阴离子交换树脂可以用于去除水中的阴离子，进一步提高水的纯度。

### （四）吸附法

#### 1. 活性炭吸附

活性炭具有巨大的比表面积和丰富的微孔结构，对水中的有机物、重金属离子等具有良好的吸附性能。在超纯水回用中，活性炭吸附可以去除水中的微量有机物、余氯等杂质。活性炭吸附的优点是操作简单、成本较低，但活性炭的吸附容量有限，需要定期更换。

#### 2. 离子交换纤维吸附

离子交换纤维是一种新型的吸附材料，具有离子交换和吸附双重功能。离子交换纤维对水中的金属离子、有机物等具有较高的吸附选择性和吸附容量。在超纯水回用中，离子交换纤维可以用于去除水中的微量杂质，提高水的回用质量。

## 四、化学处理方法的联合应用

### （一）氧化—沉淀联合法

先采用氧化法将水中的有机物和部分金属离子氧化分解，然后再通过化学沉淀法将氧化产物和剩余的金属离子沉淀去除。这种联合方法可以充分发挥氧化法和沉淀法的优势，提高处理效果。例如，对于含有有机物和重金属离子的超纯水，可以先采用臭氧氧化法将有机物氧化分解，然后再采用氢氧化物沉淀法将金属离子沉淀去除。

### （二）离子交换—吸附联合法

离子交换法可以去除水中的大部分离子杂质，而吸附法可以进一步去除水中的微量有机物和其他杂质。将离子交换树脂和活性炭等吸附材料联合使用，可以提高超纯水的回用质量。例如，在超纯水回用系统中，可以先让水通过离子交换树脂柱去除离子杂质，然后再通过活性炭吸附柱去除微量有机物和余氯。

## 五、化学处理方法的选择和优化

在选择超纯水回用的化学处理方法时,需要考虑多种因素,如水质特点、处理要求、处理成本等。对于含有大量有机物的超纯水,应优先选择氧化法或吸附法;对于含有金属离子的超纯水,化学沉淀法和离子交换法可能更为合适。为了提高化学处理方法的效率和降低处理成本,可以对处理工艺进行优化。例如,通过调整氧化剂的投加量、反应时间和温度等参数,提高氧化效果;通过优化离子交换树脂的再生工艺,延长树脂的使用寿命。超纯水回用的化学处理方法是实现超纯水高效回用的重要手段。不同的化学处理方法具有各自的优缺点和适用范围,在实际应用中需要根据水质特点和处理要求选择合适的处理方法,并进行合理的联合应用和优化。通过不断研究和实践,不断完善超纯水回用的化学处理技术,提高水资源的利用效率,为解决全球水资源短缺问题做出贡献。同时,还需要加强对化学处理过程中产生的副产物和废弃物的处理和管理,确保环境安全。

## 六、常见的超纯水回用物理处理方法

### (一) 过滤法

砂滤是一种最常见的过滤方法,它以石英砂等颗粒滤料层截留水中悬浮杂质,从而达到过滤的目的。砂滤器的工作原理是基于颗粒滤料的拦截、沉淀和吸附作用。当水通过砂滤层时,水中的悬浮颗粒会被滤料表面所截留,较大的颗粒首先被截留在滤料层的上部,随着过滤的进行,较小的颗粒也会被逐渐截留,从而使水得到净化。砂滤器具有结构简单、操作方便、运行成本低等优点,广泛应用于超纯水回用的预处理阶段。然而,砂滤器的过滤精度相对较低,对于一些微小的颗粒和胶体物质的去除效果较差,通常需要与其他过滤方法结合使用。

活性炭过滤是利用活性炭的吸附作用去除水中的有机物、异味、色度等杂质。活性炭具有巨大的比表面积和丰富的微孔结构,能够有效地吸附水中的各种有机和无机物质。在超纯水回用过程中,活性炭过滤通常用于去除水中的余氯、有机物和部分重金属离子。活性炭过滤的优点是吸附效果好、能有效改善水质的口感和气味。但活性炭的吸附容量有限,需要定期更换,否则会导致吸附效果下降,甚至可能成为微生物滋生的场所。

膜过滤是一种新型的过滤技术,它利用膜的选择性透过性,将水中的不同物

质分离出来。根据膜的孔径大小和分离原理的不同,膜过滤可以分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)和反渗透(RO)等。微滤膜的孔径一般在 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 之间,主要用于去除水中的悬浮颗粒、细菌和部分胶体物质。超滤膜的孔径在 $0.001\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间,能够去除水中的大分子有机物、胶体和病毒等。纳滤膜的孔径更小,约为 $0.001\mu\text{m}$ ,对二价和多价离子具有较高的截留率,同时对有机物也有一定的去除效果。反渗透膜是一种具有极高选择性的半透膜,其孔径小于 $0.0001\mu\text{m}$ ,能够几乎完全截留水中的所有离子和有机物,是超纯水制备和回用中最关键的处理步骤。膜过滤具有过滤精度高、操作简单、自动化程度高等优点,但膜的成本较高,容易受到污染,需要定期进行清洗和维护。

## (二) 沉淀法

自然沉淀是利用重力作用使水中的悬浮颗粒沉淀到水底的过程。在超纯水回用中,自然沉淀通常作为预处理步骤,用于去除水中较大的悬浮颗粒。自然沉淀的优点是操作简单、成本低,但沉淀时间较长,占地面积大,对于一些微小的颗粒和胶体物质的沉淀效果较差。混凝沉淀是在水中加入混凝剂,使水中的胶体和悬浮颗粒凝聚成较大的絮体,然后通过沉淀的方式将其去除。混凝剂的作用是中和胶体颗粒表面的电荷,降低颗粒之间的排斥力,使颗粒能够相互碰撞并凝聚成絮体。常用的混凝剂有硫酸铝、聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)等。混凝沉淀能够有效地去除水中的胶体和微小悬浮颗粒,提高沉淀效果。与自然沉淀相比,混凝沉淀的沉淀时间更短,处理效率更高。但混凝沉淀需要添加化学药剂,可能会对水质产生一定的影响,同时也增加了处理成本。

## (三) 气浮法

气浮法是一种通过向水中通入空气,使水中的悬浮颗粒附着在气泡上,然后随气泡上浮到水面,从而达到分离目的的方法。气浮法主要用于去除水中的油脂、藻类、细小的悬浮颗粒等。根据产生气泡的方式不同,气浮法可以分为溶气气浮、电解气浮和分散空气气浮等。溶气气浮是目前应用最广泛的气浮方法,它是通过将空气在一定压力下溶解在水中,然后在减压的条件下使空气以微小气泡的形式释放出来,附着在悬浮颗粒上。气浮法具有分离效率高、占地面积小、处理速度快等优点,但设备投资和运行成本相对较高,对水质和操作条件的要求也较为严格。

#### （四）离心分离法

离心分离法是利用离心力使水中的悬浮颗粒与水分离的方法。当含有悬浮颗粒的水在高速旋转的离心设备中时，由于悬浮颗粒和水的密度不同，它们所受到的离心力也不同，从而使悬浮颗粒向离心设备的外壁移动，而水则向中心移动，最终实现悬浮颗粒与水的分离。离心分离法具有分离速度快、效率高、占地面积小等优点，适用于处理含有较大颗粒和高浓度悬浮物质的超纯水。但离心设备的投资和运行成本较高，能耗较大，同时对设备的维护和管理要求也较高。超纯水回用的物理处理方法各有优缺点，在实际应用中，需要根据超纯水的水质特点、回用要求和处理规模等因素，选择合适的处理方法，并将多种方法组合使用，以达到最佳的处理效果。

### 七、常见的超纯水回用生物处理方法

#### （一）生物处理方法在超纯水回用中的原理

##### 1. 微生物的作用机制

生物处理方法主要依靠微生物的代谢活动来去除水中的污染物。微生物可以利用水中的有机物作为碳源和能源，通过呼吸作用将有机物分解为二氧化碳和水。在超纯水回用中，虽然水中的有机物含量较低，但仍然存在一些微量的有机物，微生物可以对其进行降解。此外，微生物还可以通过同化作用将水中的氮、磷等营养物质转化为自身的细胞物质，从而降低水中的营养物质含量。

##### 2. 不同类型微生物的功能

**好氧微生物：**好氧微生物在有氧条件下进行代谢活动，能够快速分解水中的有机物。在超纯水回用的生物处理系统中，好氧微生物可以去除水中的可生物降解有机物，如醇类、醛类等。

**厌氧微生物：**厌氧微生物在无氧条件下进行代谢活动，主要用于处理一些难降解的有机物。它们可以通过发酵、产甲烷等过程将有机物转化为甲烷等气体。在超纯水回用中，厌氧微生物可以对一些大分子有机物进行初步分解，提高后续处理的效率。

**兼性微生物：**兼性微生物既能在有氧条件下生长，也能在无氧条件下生长。它们在超纯水回用的生物处理系统中具有重要的调节作用，可以根据环境条件的变化调整自身的代谢方式。

## （二）常见的超纯水回用生物处理方法

### 1. 活性污泥法

活性污泥法是一种传统的生物处理方法，它利用活性污泥中的微生物来去除水中的有机物。活性污泥是由大量的微生物、有机物和无机物组成的絮状体，具有很强的吸附和分解有机物的能力。在活性污泥法处理系统中，污水与活性污泥充分混合，微生物在有氧条件下对水中的有机物进行分解。优点：处理效果好，能够有效去除水中的有机物和悬浮物；运行稳定，操作管理相对简单。缺点：占地面积大，投资成本高；对水质和水量的变化较为敏感，容易出现污泥膨胀等问题。在超纯水回用中，活性污泥法可以作为预处理工艺，去除水中的大部分有机物和悬浮物，为后续的深度处理提供良好的水质条件。例如，在一些电子厂的超纯水回用系统中，活性污泥法可以将水中的化学需氧量（COD）从几百毫克/升降至几十毫克/升。

### 2. 生物膜法

生物膜法是利用附着在载体表面的生物膜来处理污水的方法。生物膜是由微生物、有机物和无机物组成的一层薄膜，微生物在生物膜内进行代谢活动，对水中的有机物进行分解。当污水流经生物膜时，水中的有机物被生物膜中的微生物吸附和分解。优点：占地面积小，处理效率高；对水质和水量的变化适应性强，不易出现污泥膨胀等问题。缺点：载体的选择和更换成本较高；生物膜的生长和脱落需要一定的控制条件。生物膜法在超纯水回用中具有广泛的应用前景。它可以作为深度处理工艺，进一步去除水中的微量有机物和溶解性污染物。例如，采用生物膜法处理超纯水回用中的反渗透浓水，可以有效降低水中的有机物含量，提高反渗透膜的使用寿命。

### 3. 生物流化床法

生物流化床法是一种将生物处理与流化技术相结合的新型生物处理方法。它以砂、活性炭等颗粒物质作为载体，微生物附着在载体表面形成生物膜。在流化床反应器中，载体在水流和气流的作用下处于流化状态，污水与生物膜充分接触，微生物对水中的有机物进行分解。优点：传质效率高，处理效果好；占地面积小，设备紧凑。缺点：载体的流动需要消耗一定的能量；对进水水质的要求较高，容易出现载体流失等问题。生物流化床法在超纯水回用中可以用于处理一些高浓度有机废水和难降解废水。它能够快速去除水中的有机物和氨氮等污染物，提高超

纯水的回用质量。例如，在制药厂的超纯水回用系统中，生物流化床法可以有效处理含有抗生素等难降解有机物的废水。

### （三）超纯水回用生物处理方法的影响因素

**有机物含量：**超纯水中的有机物含量通常较低，但不同行业的超纯水回用中有机物的种类和含量可能会有所不同。较高的有机物含量会增加生物处理的负荷，影响处理效果。**营养物质含量：**微生物的生长需要一定的氮、磷等营养物质。如果超纯水中的营养物质含量不足，会影响微生物的代谢活动，降低处理效率。**有毒有害物质含量：**超纯水中可能含有一些有毒有害物质，如重金属、消毒剂等。这些物质会对微生物的生长和代谢产生抑制作用，甚至导致微生物死亡。**温度：**微生物的生长和代谢活动对温度较为敏感。一般来说，适宜微生物生长的温度范围为 20℃~35℃。温度过高或过低都会影响微生物的活性，降低处理效果。**pH 值：**不同类型的微生物对 pH 值有不同的适应范围。大多数微生物适宜在中性或微碱性的环境中生长。pH 值过高或过低会影响微生物的细胞膜通透性和酶的活性，从而影响处理效果。**溶解氧：**对于好氧生物处理方法，溶解氧是微生物进行代谢活动的必要条件。溶解氧含量过低会导致微生物的代谢活动受到抑制，处理效果下降；溶解氧含量过高则会增加能耗。**水力停留时间：**水力停留时间是指污水在生物处理系统中的停留时间。合适的水力停留时间可以保证微生物有足够的时间对水中的有机物进行分解。如果水力停留时间过短，处理效果会受到影响；如果水力停留时间过长，则会增加处理成本。**污泥回流比：**在活性污泥法处理系统中，污泥回流比是指回流污泥量与进水量的比值。合适的污泥回流比可以保证活性污泥的浓度和活性，提高处理效果。**排泥周期：**定期排泥可以控制活性污泥的龄期，保持活性污泥的活性。排泥周期过长会导致污泥老化，处理效果下降；排泥周期过短则会增加污泥处理的成本。

### （四）超纯水回用生物处理方法的优化策略

**接种优势菌种：**通过接种具有特定功能的优势菌种，可以提高生物处理系统对特定污染物的去除能力。例如，接种能够降解难降解有机物的菌种，可以提高生物处理系统对难降解有机物的处理效果。

**基因工程技术：**利用基因工程技术可以对微生物进行改造，使其具有更强的代谢能力和适应能力。例如，通过基因工程技术构建具有高效降解有机物能力的工程菌，可以提高生物处理系统的处理效率。

生物处理与物理化学处理相结合：将生物处理方法与物理化学处理方法相结合，可以充分发挥两种处理方法的优点，提高超纯水的回用质量。例如，生物处理可以去除水中的大部分有机物，而物理化学处理可以进一步去除水中的溶解性污染物和重金属等。

不同生物处理工艺的组合：将不同的生物处理工艺进行组合，可以提高生物处理系统的适应性和处理效果。例如，将活性污泥法与生物膜法相结合，可以充分利用活性污泥法的高处理效率和生物膜法的抗冲击能力。

实时监测与反馈控制：通过实时监测生物处理系统的运行参数，如水质、温度、pH 值等，并根据监测结果进行反馈控制，可以保证生物处理系统的稳定运行。例如，当水质发生变化时，可以及时调整水力停留时间和污泥回流比等运行参数。

智能化运行管理：利用智能化技术对生物处理系统进行运行管理，可以提高运行管理的效率和准确性。例如，采用自动化控制系统对生物处理系统的设备进行实时控制，可以减少人工操作的误差。

超纯水回用生物处理方法作为一种绿色、高效的处理技术，在解决水资源短缺和降低生产成本方面具有重要的意义。活性污泥法、生物膜法和生物流化床法等常见的生物处理方法各有优缺点，在超纯水回用中可以根据实际情况选择合适的处理工艺。同时，水质因素、环境因素和运行管理因素等会影响生物处理方法的效果，需要采取相应的优化策略，如微生物强化技术、工艺组合优化和运行参数优化等，以提高超纯水的回用质量和生物处理系统的运行效率。未来，随着生物技术和水处理技术的不断发展，超纯水回用生物处理方法将不断完善和创新。

### （五）超纯水回用技术总结

超纯水回用是解决水资源短缺和降低生产成本的重要途径。通过采用物理、化学和生物等多种处理方法，可以有效去除回用超纯水中的杂质和污染物，提高水质的纯度。超纯水回用在电子、制药、化工等行业具有广泛的应用前景。然而，超纯水回用也面临着水质波动、处理成本高和法规标准不完善等挑战。为了推动超纯水回用技术的发展和运用，需要加强水质监测和调控，优化处理工艺，完善法规和标准。未来，随着技术的不断进步和创新，超纯水回用技术将不断完善，回用率将进一步提高，为实现水资源的可持续利用做出更大的贡献。

### 第三节 新型纳米材料及膜技术在半导体行业发展

在全球工业化、城镇化进程加速推进的背景下，水资源短缺与水污染问题日益严峻。据联合国教科文组织（UNESCO）统计，全球约 20 亿人口面临用水短缺危机，而每年因工业废水、生活污水排放导致的污染水体超 4000km<sup>3</sup>。传统水资源保护技术在处理高浓度难降解污染物、实现水资源高效循环利用等方面逐渐显现瓶颈，亟须创新技术突破。纳米材料与膜技术凭借其独特的物理化学性质和高效分离性能，成为未来水资源保护领域的核心发展方向。纳米材料以其 1~100nm 的特殊粒径尺度，展现出巨大的比表面积（部分材料比表面积可达 2630m<sup>2</sup>/g）、显著的量子尺寸效应和表面效应；膜技术则通过精准至纳米级的孔径控制，实现对不同尺度物质的高效分离。二者的协同发展，为攻克高难度废水处理、海水淡化、饮用水深度净化等世界性难题提供了全新技术路径，有望从根本上重塑水资源保护技术格局。

#### 一、纳米材料在水资源保护中的应用

##### （一）纳米吸附材料

##### 1. 金属氧化物纳米材料

二氧化钛（TiO<sub>2</sub>）纳米材料：TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒凭借高比表面积（通常为 100~300m<sup>2</sup>/g）、卓越的化学稳定性和独特的光催化活性，在污染物去除领域占据重要地位。其表面丰富的活性位点能够高效吸附水中的重金属离子，如铅（Pb<sup>2+</sup>）、镉（Cd<sup>2+</sup>）、汞（Hg<sup>2+</sup>）等，同时对有机污染物也有良好的吸附效果。在光催化过程中，TiO<sub>2</sub> 受紫外线或可见光激发产生的羟基自由基（·OH），具有极强的氧化性，可将吸附的有机物彻底矿化为二氧化碳和水。美国斯坦福大学的研究团队制备的纳米 TiO<sub>2</sub>-活性炭复合材料，在处理含铅废水时，对铅离子的吸附容量达到 200mg/g，较传统活性炭提升了 5 倍之多，且在多次循环使用后仍能保持较高吸附性能。

氧化铁（Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>）纳米材料：Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米颗粒的超顺磁性特性，使其在使用后能够通过外加磁场快速分离回收，极大提高了材料的重复利用率。其表面富含的羟基官能团，能够与水中的砷（As）、氟（F）等离子发生络合反应，实现高效去除。在我国某砷污染地区的地下水治理项目中，采用 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米材料处理后，五价砷

的去除率高达 98% 以上，且经过 10 次重复使用，材料性能无明显下降，有效降低了处理成本。

## 2. 碳基纳米材料

石墨烯及其衍生物：石墨烯以其优异的机械性能和理论比表面积高达  $2630\text{m}^2/\text{g}$  的特性，成为材料科学领域的明星。氧化石墨烯（GO）在制备过程中，表面引入了大量羧基、羟基等官能团，这些官能团为重金属离子和有机染料提供了丰富的吸附位点。相关研究表明，GO 对亚甲基蓝染料的吸附容量可达  $600\text{mg/g}$ ，远超传统吸附材料。通过还原处理制备的还原氧化石墨烯（rGO），不仅吸附性能进一步提升，而且稳定性得到增强，在实际应用中展现出更大潜力。

碳纳米管：碳纳米管分为单壁碳纳米管和多壁碳纳米管，其独特的中空管状结构和高比表面积，使其内部空腔和表面缺陷均可作为吸附位点。这种结构特点赋予碳纳米管对水中多环芳烃、内分泌干扰物等有机污染物良好的吸附效果。通过化学改性，如氨基化处理后的碳纳米管，对重金属离子的吸附选择性显著提高，能够更精准地去除特定污染物。

## （二）纳米催化材料

### 1. 光催化纳米材料

除了经典的  $\text{TiO}_2$  光催化剂，近年来新型光催化纳米材料不断涌现。以铋系光催化剂（ $\text{BiOCl}$ 、 $\text{BiVO}_4$  等）为例，它们在可见光下表现出较高的光催化活性。 $\text{BiOCl}$  的可见光吸收阈值可达  $500\text{nm}$ ，能够充分利用太阳能光谱中的可见光部分，对水中的抗生素、农药等难降解有机物具有显著的降解效果。日本东京大学的实验表明， $\text{BiOCl}$  在可见光照射下，1 小时内对四环素类抗生素的降解率可达 90% 以上，为解决抗生素污染问题提供了新的技术方案。

### 2. 电催化纳米材料

过渡金属氧化物（如  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Co}_3\text{O}_4$ ）和贵金属（如 Pt、Pd）基纳米材料在电催化领域展现出突出优势。电催化氧化技术以纳米材料作为电极，在电场作用下，电极表面产生强氧化性自由基，能够快速氧化分解水中污染物。在某化工园区含酚废水处理项目中，采用  $\text{MnO}_2$  纳米电极进行处理，在较低电压（3~5V）条件下，酚类物质的去除率即可达到 95% 以上，且该技术具有反应速度快、处理效率高的特点。

## 二、膜技术在水资源保护中的创新应用

### （一）新型膜材料开发

#### 1. 纳米复合膜

将纳米材料与传统膜材料复合，是提升膜性能的重要途径。例如，将纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒掺杂到聚偏氟乙烯（PVDF）膜中制备的纳米复合膜，其抗污染能力相比传统 PVDF 膜提高了 30%~50%。这得益于纳米  $\text{TiO}_2$  的光催化特性，在光照条件下，能够分解膜表面吸附的有机物，实现自清洁功能，有效延长膜的使用寿命。此外，氧化石墨烯—聚酰胺复合纳滤膜在性能上表现卓越，对二价盐离子的截留率高达 99%，同时还能保持较高的水通量  $15\sim 20\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，在海水淡化和高盐废水处理领域具有广阔的应用前景。<sup>①</sup>

#### 2. 仿生膜

仿生膜通过借鉴生物膜的结构和功能，具备高效选择性和抗污染性。受贻贝黏附蛋白启发制备的聚多巴胺改性膜，在膜表面形成强粘附性涂层，能够有效抵抗蛋白质、多糖等污染物的吸附，显著提升膜的抗污染性能。模拟细胞膜离子通道设计的纳米孔道膜，可实现对特定离子（如钠离子、钾离子）的精准分离，这种高度选择性的分离性能，使其在生物制药、海水提铀等领域具有重要的应用价值。

### （二）膜工艺创新

#### 1. 正渗透技术

正渗透技术利用渗透压驱动水分子通过半透膜，具有污染物截留率高、能耗低的显著优势。该技术的关键在于高效汲取液的开发，近年来，利用纳米纤维素制备的高浓度汲取液成为研究热点。纳米纤维素汲取液不仅能够显著提高水通量，还具有环境友好的特点。在海水淡化领域，正渗透与压力阻尼渗透（PRO）结合的技术模式，有望实现海水淡化与发电的协同，为解决海岛和偏远地区的能源与水资源问题提供了创新思路。

#### 2. 膜蒸馏技术

膜蒸馏技术基于疏水性微孔膜两侧的蒸汽压力差实现分离。随着新型纳米结

<sup>①</sup> 强璐，石艳玲，徐俊，廖文俊. 纳米材料在水处理中的应用研究进展 [J]. 环境科学与技术，2014，37（S2）：252-256

构疏水膜（如聚四氟乙烯纳米纤维膜）的出现，膜的热稳定性和耐腐蚀性得到大幅提高。真空膜蒸馏技术在处理高盐废水方面表现出色，可将盐分浓缩 10~20 倍，产水水质能够达到饮用水标准，在工业废水零排放和苦咸水淡化领域具有重要的应用潜力。

### 三、纳米材料与膜技术协同应用案例

#### （一）工业废水深度处理

某大型电子电镀企业在生产过程中产生大量含重金属（如铜、镍、铬）和有机污染物（如氰化物、有机染料）的混合废水。为实现废水达标排放和水资源回用，企业采用“纳米吸附—膜过滤”联合工艺。首先，利用磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米材料对废水中的重金属离子进行吸附，吸附完成后通过外加磁场快速分离回收纳米材料；随后，废水进入纳米  $\text{TiO}_2$ -PVDF 超滤膜系统，进一步去除有机物和残留的纳米颗粒。经过该工艺处理后，废水中重金属离子浓度远低于国家排放标准，COD 降至 50mg/L 以下，处理后的水可回用于生产环节，每年可节约水资源超 50 万吨，同时减少了大量污染物排放。

#### （二）海水淡化与饮用水净化

在某海岛海水淡化项目中，采用“纳米复合膜—正渗透”集成技术。项目首先通过纳米二氧化硅改性的反渗透膜进行预脱盐，去除海水中大部分盐分；然后利用正渗透技术进一步降低盐分浓度。该技术的应用使海水淡化能耗降低了 30%，产水成本下降 25%，有效解决了海岛居民的用水难题。在饮用水净化领域，纳米银—活性炭复合膜滤芯得到广泛应用，该滤芯对细菌、病毒的去除率高达 99.99%，同时能够有效吸附水中的余氯和有机异味，为居民提供安全、健康的饮用水。

### 四、纳米材料与膜技术发展面临的挑战

#### （一）材料制备与成本问题

纳米材料的制备工艺复杂，面临诸多技术难题。例如，在纳米颗粒制备过程中，实现颗粒的均匀分散和精确尺寸控制难度极大，微小的工艺偏差都可能导致材料性能的显著差异。同时，制备过程中常需使用昂贵的原料和精密设备，如高质量碳纳米管的生产成本高达每克数百元，这使得纳米材料在大规模应用时面

临成本瓶颈。膜材料的生产同样面临挑战，新型纳米复合膜的制备涉及多层复合工艺，生产过程中的技术控制和质量保障要求极高，进一步增加了生产难度和成本。

### （二）环境安全性风险

目前，纳米材料在环境中的行为和生态效应尚不明确。研究发现，纳米颗粒可能通过食物链传递，对生物产生潜在毒性。例如，纳米  $\text{TiO}_2$  进入水体后，会影响藻类的光合作用和生长繁殖，进而破坏水生态系统的平衡。膜技术在运行过程中也存在风险，如在消毒过程中可能产生消毒副产物，这些副产物大多具有致癌、致畸、致突变性，对水质安全构成严重威胁。

### （三）技术稳定性与寿命

纳米材料在实际应用中容易出现团聚、失活等问题。以光催化纳米材料为例，在长时间光照下，其活性位点会逐渐减少，导致催化效率下降，影响处理效果。膜技术则面临膜污染和膜通量衰减的难题，常规反渗透膜的使用寿命一般仅为 3~5 年，频繁更换膜组件不仅增加了运行成本，还可能造成资源浪费。

## 五、纳米材料与膜技术未来发展趋势

### （一）材料绿色化与低成本化

未来，开发绿色环保的纳米材料制备工艺将成为重要方向。例如，利用生物模板法、绿色化学合成法制备纳米材料，能够减少对环境的影响，实现可持续发展。同时，探索低成本原材料，如以天然黏土、农业废弃物为原料制备纳米吸附材料，将有效降低生产成本。在膜材料方面，研究规模化生产技术，优化生产工艺，将有助于降低纳米复合膜的制造成本，推动技术的广泛应用。

### （二）智能化与功能集成

将纳米材料与传感器技术深度融合，开发具有实时监测和智能响应功能的材料将是未来的发展趋势。例如，制备能够根据污染物浓度自动调节吸附能力的智能纳米吸附材料，实现污染物的精准高效去除。在膜技术领域，研发多功能集成膜组件，将过滤、催化、传感等多种功能一体化，能够提高水资源保护系统的智能化水平和处理效率。

### （三）多技术协同创新

推动纳米材料、膜技术与生物技术、人工智能的交叉融合，将催生更多创新

成果。利用生物技术优化纳米材料的制备和改性，如通过微生物合成纳米颗粒，能够实现材料制备的绿色化和智能化。借助人工智能算法优化膜工艺参数，可实现水资源保护系统的智能运行和精准调控。此外，加强纳米材料与膜技术在新兴领域的应用探索，如太空水资源循环利用、极端环境下的水资源保障等，将为解决全球性水资源问题开辟新的途径。

## 参考文献

- [1] 哈建强,回凤林.论水在生态建设中的作用[J].河北水利,2017(5):32.
- [2] 李俊海.全球水资源短缺与粮食危机[J].生态经济,2021,37(3):5-8.
- [3] 马丽芳.保护水资源与可持续发展的探讨[J].资源节约与环保,2020(3):23.
- [4] 刘沛衡.京津冀地区水循环健康评价[D].华北水利水电大学,2020.
- [5] 孙萍.水污染评价方法与治理探讨[J].环境与发展,2018,30(8):231+234.
- [6] 冉巧玲,杨娟,徐海涛.水生态修复技术在河道污染治理中的应用与探索[J].皮革制作与环保科技,2024,5(18):131-133.
- [7] 陈周来.防沙治沙技术与沙区生态屏障构建措施[J].广东蚕业,2025,59(3):39-41.
- [8] 王汉卿,宋志鑫,宋刚福,等.自然水体沉积物污染类型及风险评价研究进展[J].山东化工,2024,53(8):244-248+251.
- [9] 闻懿豪.伊河水环境模拟与生态补水效果研究[D].华北水利水电大学,2024.
- [10] 王珠刚.电絮凝技术在工业废水处理中的应用进展[J].当代化工研究,2025(6):10-12.
- [11] 杨丽娟,王辉,李小敏.活性炭的吸附应用[J].绿色科技,2020(22):134-135.
- [12] 卢兴洁,祝加琛,吴雅丽.电化学氧化技术在重金属废水处理中的机制解析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(16):8-10.
- [13] 李小康.人工湿地环境效益绩效评价体系构建与应用研究[D].山东大学,2023.
- [14] 李轶,雷梦婷,杨楠,等.河流微生物生态学的研究进展[J].水资源保护,2022,38(1):190-197.
- [15] 王艳英,王晓磊,郜爱玲,等.水生植物净化水质功能研究进展[J].中国城市林业,2017,15(4):6-10.
- [16] 罗辅燕.雨水收集系统研究[J].河南科技,2018(2):65-66.
- [17] 林益江,周柏青.水库生态调度研究[J].热带农业工程,2020,44(1):73-75.
- [18] 王羽.安徽省海绵城市建设水平测度及影响因素研究[D].安徽建筑大学,2022.
- [19] 张宏.农田节水灌溉技术的应用研究[J].园艺与种苗,2025,45(2):108-110.

- [20] 张壮伟.工业废水循环利用的机理与方法研究[J].资源节约与环保,2021(12):114-116.
- [21] 齐复兴.绿色制造技术分析[J].湖北农机化,2020(21):116-117.
- [22] 朱敏.城市供水管网漏损检测技术与控制措施[J].城市建设理论研究(电子版),2024(2):199-201.
- [23] 李胜勇,李有明,龙岩.基于大数据技术的城市智慧水务框架构想[J].海河水利,2021(1):105-108.
- [24] 赵中珊.城市黑臭水体综合治理及水质保持技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(30):180-182.
- [25] 康宽华.半导体新材料清洗废水处理技术研究及展望[J].工程建设与设计,2023(20):81-83.
- [26] 刘建君,刘辉,杨武龙,等.氢氟酸废水绿色处理技术[J].浙江化工,2018,49(2):20-23.
- [27] 蒋其忠.水生植物治理水体富营养化的研究进展[J].青海环境,2024,34(4):216-219+227.
- [28] 王雯佳,章婷婷.集成电路制造厂化学机械研磨废水回用技术[J].上海船舶运输科学研究所学报,2019,42(3):85-90.
- [29] 强璐,石艳玲,徐俊,等.纳米材料在水处理中的应用研究进展[J].环境科学与技术,2014,37(S2):252-256.
- [30] 杨华,韩韵佳,杜聪.海水淡化技术的应用[J].科技与创新,2024(8):175-177+181.
- [31] 张梅,郑伊佳.人类命运共同体视域下跨境水资源的研究进展与展望[J].水利经济,2024,42(1):34-42.