

朱雪诞 左倬 胡伟 仓基俊 等著

# 平原河网地区 微污染饮用水源生态净化

## ——盐龙湖湿地运行与管理研究



科学出版社

# 平原河网地区微污染 饮用水源生态净化

——盐龙湖湿地运行与管理研究

朱雪诞 左倬 胡伟 仓基俊 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

盐龙湖是我国首个沿海平原地区平地开挖建设的饮用水源生态净化工程。盐龙湖工程运用人工湿地水质净化作用,使蟒蛇河原水经净化处理后主要指标稳定达到Ⅲ类水标准;同时利用蓄水功能,在发生突发性水污染事件时,能保证盐城市区上百万居民 7 天正常供水,保障供水安全。历经 7 年的设计、施工建设、试验研究和运行优化,盐龙湖工程的主要功能全部得以实现。本书内容来源于历年盐龙湖工程科研成果的总结提炼,综合反映了盐龙湖工程建设、管理过程中的技术问题及解决方法,对今后类似饮用水源生态净化工程和人工湿地项目的设计优化、施工建设、运行管理具有指导和借鉴意义。

本书可供从事水体生态修复、湿地净化、水源地建设及管理的技术人员、科研人员和高等院校师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

平原河网地区微污染饮用水源生态净化——盐龙湖湿地运行与管理研究/朱雪诞等著. —北京:科学出版社,2016. 11  
ISBN 978-7-03-050674-0

I. ①平… II. ①朱… III. ①人工湖—饮用水—水源卫生—盐城—文集 IV. ①TV882.953.3-53 ②TU991.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 276881 号

责任编辑:许 健

责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 11 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 16 3/4 插页: 2

字数: 384 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 写作人员名单

审    核：李  巍  仓基俊

主    编：朱雪诞  左  倬  胡  伟  仓基俊

参加人员(按拼音排序)：

蔡丽婧  曹  卉  陈庆华  陈煜权

成必新  符新峰  何  伟  华浩发

蒋  欢  李茂学  李  阳  陆惠萍

卿  杰  饶婧婧  汤志华  唐陈杰

王  超  王瀚林  徐  平  余科平

张  俊  朱  斌  朱冬舟  周  晋

## 前 言

随着经济的高速发展,我国许多水源地都受到了不同程度的污染,尤其是开放式河道型水源地极易受到化学品泄漏等突发性水污染事件的影响,供水安全状况堪忧,与社会不断提高的水资源和水质需求之间的矛盾与日俱增。近年来,我国在饮用水源污染防治方面做了许多工作,但仍有不少水源地水质依然处于恶化趋势,水污染事故频发,尤以工业发达的平原河网地区为甚,江苏省盐城市便是饮用水源受到污染的一个典型城市。

地处淮河平原的盐城市区被誉为“百河之城”,穿城而过的新洋港(蟒蛇河)是区域洪水外排入海的主要通道之一,同时又是盐城市区居民重要的饮用水源。由于地处淮河流域下游,长期以来市区饮用水源水质不稳定,部分时段水质不达标,还不时受到突发性水污染的威胁,直接影响了盐城市区百万人口的生产和生活,也制约着盐城市区的社会经济发展。在这样的历史背景下,历经2年科学论证、3年精心建设、投资近8亿元的江苏省盐城市区饮用水源生态净化工程(盐龙湖工程)于2012年6月28日正式建成启用,从根本上改变了盐城市饮用水源格局。

盐龙湖工程是国内外目前已建成的生态净化系统中规模最大、兼具常规供水与应急备用功能的生态水利工程,其工程目标是满足盐城市区60万 $\text{m}^3/\text{天}$ 的供水规模、蓄水库容保证应急时7天以上的正常供水需求。自2010年以来,本课题组分别依托江苏省水利科技项目课题“生态湿地净化系统在盐龙湖工程中的研究与应用(2010022)”及“盐龙湖生态净化系统调试维护及调度运行关键技术研究(2014068)”等科研项目平台,围绕盐龙湖工程的设计、调试和运行的关键技术开展了系统研究,获取了大型原水生态净化工程的主要设计及运行参数,优化集成多项净水技术,构建出盐龙湖独特的生态净化系统,发挥其对水质的净化作用,并攻克了人工湿地无法长期稳定运行、人工湖富营养化等多项技术难题。研发提出多项创新技术,经水利部国际合作与科技司及江苏省科技厅分别组织的技术鉴定,多位院士及行业内资深专家评价盐龙湖工程总体上达到了国内领先水平,在保障饮用水安全的湿地净化工艺和工程结构设计方面处于国际先进水平,建议将“盐龙湖模式”及其相应技术在平原河网地区饮用水水源地建设中推广应用。

本书内容来源于历年盐龙湖工程科研成果的总结提炼,综合反映了盐龙湖工程从建设到运行过程中发现的技术问题及解决方法,研究内容丰富,实用性强,对今后类似饮用水源生态净化工程和人工湿地项目的设计优化、施工建设、运行管理具有较强的指导和借鉴作用。

在课题研究和成书期间,盐龙湖工程得到了社会各界的广泛关注和支持,在此表示衷心的感谢!

盐龙湖工程是一项多学科交叉、多领域融合的系统工程,作者水平有限,本书难免有疏漏及不足之处,敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

## 第一篇 工程建设背景篇

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 平原河网地区饮用水源现状及存在问题 .....  | 3  |
| 1.1 我国平原河网地区饮用水源现状 .....     | 3  |
| 1.2 传统给水工程净化技术研究进展 .....     | 5  |
| 1.3 水体生态净化技术研究进展 .....       | 8  |
| 1.4 饮用水源净化工作的研究方向及面临问题 ..... | 10 |
| 第二章 盐城市供水问题及水源地建设需求 .....    | 12 |
| 2.1 城市概况 .....               | 12 |
| 2.2 供水格局及面临的问题 .....         | 13 |
| 2.3 工程建设的需求 .....            | 16 |

## 第二篇 工程设计建设管理篇

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第三章 工艺方案研究 .....    | 21 |
| 3.1 建设任务及目标 .....   | 21 |
| 3.2 建设标准 .....      | 21 |
| 3.3 工程区域条件分析 .....  | 22 |
| 3.4 工艺方案研究 .....    | 26 |
| 第四章 工程中试研究 .....    | 29 |
| 4.1 研究目标 .....      | 29 |
| 4.2 研究内容 .....      | 29 |
| 4.3 技术路线 .....      | 30 |
| 4.4 试验基地建设 .....    | 30 |
| 4.5 主要研究成果 .....    | 33 |
| 第五章 工程总体设计 .....    | 36 |
| 5.1 总体布局设计 .....    | 36 |
| 5.2 预处理区设计 .....    | 39 |
| 5.3 生态湿地净化区设计 ..... | 42 |

|            |                      |           |
|------------|----------------------|-----------|
| 5.4        | 深度净化区设计 .....        | 49        |
| 5.5        | 其他专业设计 .....         | 52        |
| <b>第六章</b> | <b>工程建设与管理 .....</b> | <b>59</b> |
| 6.1        | 工程建设总体情况 .....       | 59        |
| 6.2        | 工程建设 .....           | 60        |
| 6.3        | 项目管理 .....           | 62        |
| 6.4        | 工程移交 .....           | 63        |
| 6.5        | 工程建设大事记 .....        | 64        |

### 第三篇 运行管理研究篇

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| <b>第七章</b> | <b>预处理区运行管理研究 .....</b>    | <b>67</b>  |
| 7.1        | 微泡增氧机运行方案研究 .....          | 67         |
| 7.2        | 沉淀区清淤方案研究 .....            | 69         |
| 7.3        | 人工介质净化效果研究 .....           | 72         |
| 7.4        | 预处理区层流现象研究 .....           | 74         |
| <b>第八章</b> | <b>生态湿地净化区运行管理研究 .....</b> | <b>79</b>  |
| 8.1        | 湿地最佳运行水位研究 .....           | 79         |
| 8.2        | 湿地干湿交替效果研究 .....           | 85         |
| 8.3        | 湿地滩面冲淤情况研究 .....           | 90         |
| 8.4        | 跌水堰增氧效果研究 .....            | 92         |
| 8.5        | 水生植物管理维护方案研究 .....         | 93         |
| 8.6        | 水生植物资源处置及利用方案研究 .....      | 99         |
| <b>第九章</b> | <b>深度净化区运行管理研究 .....</b>   | <b>106</b> |
| 9.1        | 多点进水调控方案研究 .....           | 106        |
| 9.2        | 生物操纵技术效果研究 .....           | 114        |
| 9.3        | 循环复氧技术去层化效果研究 .....        | 117        |
| <b>第十章</b> | <b>特殊工况应急调度方案 .....</b>    | <b>120</b> |
| 10.1       | 原水水质恶化调度方案研究 .....         | 120        |
| 10.2       | 原水化学污染应急调度方案研究 .....       | 121        |
| 10.3       | 原水冬季 TN 超标应对方案研究 .....     | 122        |

### 第四篇 工程运行指导篇

|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| <b>第十一章</b> | <b>常规及特殊工况调度运行 .....</b> | <b>131</b> |
| 11.1        | 总体要求 .....               | 131        |
| 11.2        | 常规工况调度运行 .....           | 131        |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 11.3        | 特殊工况调度运行 .....            | 133        |
| 11.4        | 调度运行工况汇总 .....            | 135        |
| <b>第十二章</b> | <b>环境监测与生态调查 .....</b>    | <b>138</b> |
| 12.1        | 水质监测 .....                | 138        |
| 12.2        | 底质监测 .....                | 145        |
| 12.3        | 大气干湿沉降监测 .....            | 147        |
| 12.4        | 高等水生植物群落调查 .....          | 148        |
| 12.5        | 大型底栖动物群落调查 .....          | 149        |
| 12.6        | 鱼类群落调查 .....              | 151        |
| 12.7        | 浮游生物群落调查 .....            | 152        |
| <b>第十三章</b> | <b>生态系统维护与管理 .....</b>    | <b>154</b> |
| 13.1        | 水生植物 .....                | 154        |
| 13.2        | 鱼类控制 .....                | 160        |
| 13.3        | 大型底栖动物 .....              | 161        |
| 13.4        | 青苔 .....                  | 161        |
| 13.5        | 人工介质 .....                | 162        |
| 13.6        | 预处理区清淤 .....              | 162        |
| <b>第十四章</b> | <b>常见与突发问题防治 .....</b>    | <b>163</b> |
| 14.1        | 盐龙湖出水水质略有超标 .....         | 163        |
| 14.2        | 水色及臭味异常 .....             | 163        |
| 14.3        | 挺水植物倒伏 .....              | 163        |
| 14.4        | 水生植物病虫害 .....             | 164        |
| 14.5        | 底栖动物集中性死亡 .....           | 165        |
| 14.6        | 鱼类集中性死亡 .....             | 166        |
| 14.7        | 蓝藻水华 .....                | 168        |
| <b>第十五章</b> | <b>主要设备的操作规程与管理 .....</b> | <b>170</b> |
| 15.1        | 原水泵站操作与管理 .....           | 170        |
| 15.2        | 闸门及启闭机的操作及管理 .....        | 172        |
| 15.3        | 电气设备维护与管理 .....           | 174        |
| 15.4        | 水质自动监测系统维护与管理 .....       | 177        |
| 15.5        | 微泡增氧机操作与管理 .....          | 180        |

## 第五篇 工程运行效益篇

|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| <b>第十六章</b> | <b>运行现状及效益分析 .....</b> | <b>183</b> |
| 16.1        | 水质净化效果 .....           | 183        |
| 16.2        | 富营养化防控效果 .....         | 197        |

---

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 16.3 水生生物群落演替 ..... | 198 |
| 第十七章 科技创新及效益 .....  | 209 |
| 17.1 工程创新 .....     | 209 |
| 17.2 工程效益 .....     | 209 |
| 17.3 展望 .....       | 211 |
| 参考文献 .....          | 212 |
| 附录 日常运行管理记录套表 ..... | 217 |
| 附件 .....            | 250 |
| 附件一 专利成果目录 .....    | 250 |
| 附件二 获奖目录 .....      | 251 |
| 附件三 发表论文目录 .....    | 251 |

## 第一篇

# 工程建设背景篇

近年以来,随着我国工业的发展、城市化进程的加快及农用化学品种类和数量的增加,国内许多城市饮用水源都受到了不同程度的影响,呈现出原水微污染特征。微污染原水通常存在溶解性有机物和营养盐类浓度偏高、水体异味、藻类繁殖等问题。国内多数城市水厂常规处理工艺对微污染原水中有机物、氨氮等污染物的去除效果不理想,甚者还会产生“三致”(致突变、致癌、致畸)消毒副产物。如何减轻水源污染、提高原水水质、保障饮用水源安全,关系到广大人民群众切身利益与社会的和谐稳定。

本篇概述了我国平原河网地区饮用水源现状以及所存在的问题,并对饮用水水源地原水净化技术的相关研究成果进行了综述。以地处我国东部平原地区、淮河里下河流域的盐城为例,探讨了该市市区供水所面临的问题以及建设饮用水源生态净化工程——盐龙湖湿地的必要性。



# 第一章 平原河网地区饮用水源现状及存在问题

## 1.1 我国平原河网地区饮用水源现状

### 1.1.1 水系情况概述

水系是具有同一归宿的水体所构成的水网系统,是由流域内大大小小的河流、湖泊、沼泽构成的脉络相通的水流系统,主要受地形和地质构造的控制。通常一条河流由多条相互衔接而形成网状结构的干支流组成,这种网状河流系统被称为河网水系。我国的河网水系主要包括七大水系:长江水系、黄河水系、淮河水系、珠江水系、海河水系、辽河水系以及松花江水系。

平原河流流经区域通常表现出地势平坦、水系发达、河流纵横交错呈网状分布的特征,称之为平原河网地区。该地区大小河湖纵横交错,河流与湖荡相连,河道比降小、流量少、流速低、易淤积,河水流量、流向多变,受洪水、潮汛及闸坝、泵站的影响,流向变化不定,水流有顺流、滞流、部分滞流、逆流,同一河网不同流向组合成多种流态,这些是平原河网水系的典型特点。

我国地形总体走势为西高东低,因此除内陆盆地平原外,平原河网区大都分布在华东沿海地区。以江苏省北部为代表的淮河流域中下游平原河网地区,由于历史上黄河夺淮的关系,淮河干流在江苏省西部注入洪泽湖后旋即消失,分成无数支纵横交错的大小河道,在江淮之间形成独特的互通网状水系。这些水系经过历代的人工疏浚,在整个苏北平原上形成了庞大的水路交通体系,南北方向由京杭运河和串场河连接,东西方向有通扬运河、苏北灌溉总渠和灌河等河道,而中小河道更不计其数。

### 1.1.2 饮用水水源地类型

平原河网地区水量充沛,自然水体的存在形式多样,各地城市通常选取水质相对较好、水量有保障的水体作为饮用水水源地。以江苏省县级以上集中式饮用水水源地为例,饮用水水源地类型可分为河道、湖泊、水库、地下水 4 类。根据江苏省人民政府发布的《全省县级以上集中式饮用水水源地保护区划分方案》(苏政复【2009】2 号),江苏省共有县级以上集中式饮用水水源地 111 个,其中河道型水源地 74 个、湖泊型水源地 13 个、地下水源地 14 个、水库型水源地 10 个。

### 1.1.3 水体污染类型及特征

#### 1) 水体污染的类型

根据污染物质的来源、污染物质的性质、分布特征等,平原河网地区饮用水水源地水

质污染可以分为以下类型。

(1) 按污染物质的来源划分,饮用水源污染可分为生活污染型、工业污染型和农业污染型。生活污染指生活污水、城市地面径流和医院污水等污染饮用水,是饮用水污染的主要因素;工业污染指工业废渣、废水排放或事故性泄漏等污染饮用水,涉及多种有毒有害的化学物质,几乎所有的水源地突发性污染事故均与工业污染有关;农业污染指在农业生产中农药、化肥的过量或不当使用导致的饮用水源污染,主要发生在农村地区。李丽娟等(2007)研究表明,在我国由生活污染导致的饮用水污染事故占 65.1%,其次是工业污染(占 22.4%)。

(2) 按污染物质的性质划分,饮用水源污染可分为物理污染、化学污染和生物污染。对于我国来说,饮用水污染主要是化学污染和生物污染。据统计资料显示,化学污染从 20 世纪 90 年代开始频繁发生,主要由工业排放物中的六价铬、亚硝酸盐、苯、氰化物、挥发性酚、氨氮、甲胺磷等引起。生物污染则主要是由于藻类在水源地的大量滋生而导致的水体异色、异味与藻毒素的污染。

(3) 按照污染源的分布特征划分,饮用水源污染可以分为点源污染和面源污染。点源污染指有固定排放点的污染源,如来自城市工业废水和社区生活污水的排放,具有排污点相对集中、排污途径明确的特征;面源污染来源比较广泛,无明确的排污点与途径,可理解为一种分散的污染源造成的水体污染,如农业径流污染。

## 2) 污染特征及危害

一般来说,当水体所含的污染物种类较多、性质较复杂但浓度相对较低时,通常被称为微污染水体(slightly polluted water)。通常微污染水体存在溶解性有机物和营养盐类浓度高、有异味异色、藻类大量繁殖等问题,易超标的水质指标主要为:氨氮、总磷、有机污染物、溶解氧等。其中有机污染物可以分为两类:天然有机物和人工合成有机化合物。天然有机物是指动植物在自然循环过程中经腐烂分解所产生的物质,分为腐殖质和非腐殖质两类。腐殖质包含土壤浸析和植物分解产生的有机物质——腐殖酸和富里酸等,非腐殖质包括亲水酸类、蛋白质、氨基酸、糖类等。人工合成有机化合物大多为有毒有机污染物,包括农药、挥发性有机物以及其他由工业废水带来的各种有机物质。

微污染水体中超标污染物的存在,不仅使水体感观恶化,而且会对饮用水安全造成严重影响。目前,我国多数城市的自来水厂常规处理工艺(如混凝、沉淀、过滤工艺)对原水的有机物和氨氮的去除非常有限,一般只能去除有机物的 20%~30%、氨氮的 10%~25%。如果原水中腐殖质等有机物含量过高,一方面会影响管网的稳定,引起细菌繁衍并导致疾病的传播;另一方面传统给水处理工艺中用来消毒的液氯可能会与有机物质结合,产生消毒副产物,导致饮用水中含有 THMs、MX 等可疑致癌物及其他有机物,威胁人体健康。而如果原水中的氨氮偏高,则会造成管网中亚硝化菌和硝化菌的繁殖生长,从而使管网中硝酸盐和亚硝酸盐的含量超标,并进一步转化成为亚硝胺等“三致”物质,可能会导致婴儿患上高铁血红蛋白症。

### 1.1.4 饮用水水源地存在的主要问题

受平原河网地区独特的地理、气候条件以及社会化程度等因素的影响,平原河网地区

的饮用水水源地往往具有如下代表性特征与突出问题。

(1) 以开放式的河道型水源地居多,抗风险能力低。平原河网地区河道纵横交错,相互联通,大多数城市集中式饮用水水源取水口都设置在开放式的河道上。然而,为了满足经济社会发展的需要,许多河道除了作为饮用水水源地为沿岸水厂供水外,往往还担负了灌溉、行洪、排涝、养殖、通航等多种社会功能,供水水质保障存在较大的安全隐患。若污染源治理和监管力度不够,上游一旦发生违法排污、偷排偷放等问题,势必造成饮用水源污染事故,增加饮用水水源地安全供水的风险。

(2) 水文条件复杂,水量时空分配不均。平原河网地区不缺水,然而由于受到上、下游城市的工农业用水的空间差异以及近年来由全球性气候异常导致的洪水、暴雨和强潮的综合影响,引起了平原河网水文条件的复杂多变,使饮用水水源地水量在周年当中分配不均,供水保证率受到了一定影响。

(3) 水环境容量较小,水质呈微污染态势。由于平原河网地区地势平缓,水体流动性通常不是很好,尤其是枯水期,河流流量较小,稀释作用弱,导致水环境容量较小。但与此同时,平原河网地区日益发达的工农业与密集的人口产生了明显多于其他地区的污废水,作为饮用水源的河流、湖泊等地表水体水质呈现逐年下降趋势,不能确保水源水质稳定达标。

(4) 水生态破坏日益严重。平原河网地区经济发达,人口众多,土地资源紧张,自然环境下的水生态系统往往遭受到人类社会的严重干扰,造成了生境丧失、生物多样性降低等后果。健康的生态是水质稳定的重要保障,生态系统的破坏使得水源地保护工作举步维艰。

(5) 水域生态系统初级生产力较高,易出现富营养化现象。平原河网地区光照充足、气候温润、水质营养物丰富,作为饮用水水源地的河流与湖泊生态系统往往具有较高的初级生产力。受到人类社会各种途径的干扰,许多自然水域中高等水生植物不复存在,在适宜的条件下,这部分剩余的生产力很容易转化成为藻类,从而引发水体富营养化现象。

## 1.2 传统给水工程净化技术研究进展

我国大多数水厂采取的“混凝、沉淀、过滤、消毒”常规水质净化工艺能满足出厂水浊度的要求,但对微污染水体中  $BOD_5$ 、 $COD_{Mn}$ 、 $NH_3-N$  等溶解性污染物指标的去除能力则非常有限,在原水恶化的情况下达不到处理要求。根据微污染水体的水质特性和出水水质要求,国内主要采取的处理对策有:① 强化传统水处理工艺的处理效果;② 在原有常规处理工艺前增加预处理工艺;③ 在原有常规处理工艺后增加深度处理工艺等。将各种预处理技术、深度处理技术与现有传统处理工艺集成联用,是当前微污染水源原水净化的基本技术对策;同时随着水处理技术的发展,寻求新型高效的微污染水源原水处理工艺也是研究和实践的热点。

### 1.2.1 强化传统水处理

在传统的水处理工艺“混凝、沉淀、过滤、消毒”的基础上,对传统水处理工艺的各项技术进行强化,加强各项技术对原水的净化功能,改善原水的净化效果。强化技术主要有强

化混凝、强化沉淀及强化过滤技术等。

(1) 强化混凝技术主要是通过改善混凝剂性能和优化混凝工艺条件,来提高混凝沉淀工艺对有机污染物的去除效果。

(2) 强化沉淀技术主要是通过提高絮凝体的沉淀性能、优化沉淀池的水力学条件,来提高悬浮颗粒、絮凝体在沉淀池中的去除效率。

(3) 强化过滤技术主要是通过采用新型滤料、在滤料表面培养生物膜等方式,来提高过滤工艺对浊度、有机物等的去除效果。

(4) 强化消毒技术主要是通过优化消毒环节在水处理工艺流程中的顺序以及采用更安全、更高效的消毒剂等方式,来减少消毒工艺产生的有害副产物等。

### 1.2.2 增加预处理

在传统水处理工艺前增加预处理技术,将原水经过预处理后再通过常规工艺进行处理,降低原水的污染负荷,减少传统水处理工艺的净化压力,有效改善供水水质。预处理技术主要有吸附预处理技术、化学氧化预处理技术、生物氧化预处理技术和生态处理技术。

(1) 吸附技术是利用吸附剂去除原水中的有机污染物,常用的吸附剂有活性炭、黏土、硅藻土、沸石等。

(2) 化学氧化预处理技术是指在原水中加入强氧化剂,利用氧化剂的氧化能力氧化、分解、去除有机污染物,从而提高后续工艺及整体工艺的处理效果。常用的氧化剂有二氧化氯、次氯酸钠、臭氧、双氧水、高锰酸钾等。

(3) 生物氧化预处理技术主要通过微生物的新陈代谢活动来去除水中的污染物,可以有效改善混凝沉淀性能、减少混凝剂用量,还能去除常规处理工艺不能去除的污染物,有利于后续处理工艺的运行。一般采用生物膜法,主要包括生物接触氧化、生物滤池、生物转盘、生物流化床等。

(4) 生态处理技术主要指通过构建人工湿地或在水体中恢复水生植被等方法来建立小型水生生态系统,通过水生生态系统中生产者、消费者和分解者的活动对营养盐进行吸收转化,通过整个水生生态系统的净化可以去除常规工艺不能去除的一些污染物,为后续深度处理工艺提供必要的条件。常见生态处理技术有表流湿地、潜流湿地、镶嵌水生植物群落等。

### 1.2.3 增加深度处理

深度处理工艺多用于水厂的改造及新建水厂,可将常规工艺无法去除的污染物和消毒副产物的前体物进行有效去除。常用的给水深度处理方法主要包括臭氧—活性炭联用、膜分离、光催化氧化技术等。

(1) 臭氧—活性炭联用技术采用臭氧氧化和生物活性炭滤池联用的方法。该技术将臭氧化学氧化、臭氧灭菌消毒、活性炭物理化学吸附和生物氧化降解四种技术合为一体,其主要目的是在常规处理之后进一步去除水中有机污染物、氯消毒副产物的前体物以及氨氮,以保证净水工艺出水的化学稳定性和生物稳定性。

(2) 膜分离与传统过滤工艺的不同之处在于膜可以在分子范围内进行质液分离,并且该过程是一种物理过程,不发生相的变化和添加助剂。膜的孔径一般为微米级,依据其孔径

的不同(或称为截留分子量),可将膜分为微滤膜(MF)、超滤膜(UF)、纳滤膜(NF)和反渗透膜(RO)等。其中,微滤可以过滤细菌,超滤可以过滤病毒,而反渗透膜可以过滤分子。

(3) 光催化氧化技术是利用光激发氧化,将  $O_2$ 、 $H_2O_2$  等氧化剂与紫外光辐射相结合,包括  $uv-H_2O_2$ 、 $uv-O_2$  等工艺,可以用于处理污水中  $CHCl_3$ 、 $CCl_4$ 、多氯联苯等难降解物质。

#### 1.2.4 技术比较

对可规模化应用的微污染原水的传统处理技术的适用性及处理效果等进行详细比较,如表 1-1 所示。传统水处理工艺实施方便,相对投资较低,处理效果稳定,但需要依托已建或新建水厂的给水处理设施才能实现,仅适用于给水的末端处理,可去除的污染物类别较少。增加预处理技术利用吸附剂和化学氧化剂等处理污水,虽然均可以较快达到比较好的效果,但化学氧化法易产生二次污染,吸附剂回收利用的问题尚没有很好的解决方案,仅适宜于小规模水体,且相对投资较高,用到的原料和工艺复杂;生物氧化工艺多用在小型污水和微污染水处理项目中,较广泛应用于对水处理效果要求不高的农村河道等。增加深度处理技术一般效果显著,出水水质稳定,但处理设施建设投资和运行费用均较高,现主要应用于污水处理工程,在给水处理方面尚处于探索性运用阶段,因投资较大,运用较为局限。

表 1-1 微污染原水传统处理工艺比较

| 项 目    |        | 工 艺 原 理          | 适用超标因子                    | 处理费用 | 规模化应用领域           | 缺 点                |
|--------|--------|------------------|---------------------------|------|-------------------|--------------------|
| 强化水处理  | 强化混凝   | 提高絮凝剂用量或性能、优化条件  | 有机物、浊度                    | 一般   | 水厂                | 对氮磷基本无处理作用         |
|        | 强化沉淀   | 提高絮凝体沉降性能、优化沉淀条件 | 有机物、浊度                    | 一般   | 水厂                |                    |
|        | 强化过滤   | 微生物降解、滤料改性       | 有机物、浊度、藻细胞、磷、重金属离子        | 较高   | 含重金属离子的微污染水       | 机理需进一步研究,未规模化使用    |
| 增加预处理  | 吸附     | 吸附剂投加            | 臭味、色度、磷                   | 高    | 含有机污染物的微污染水       | 吸附剂回收利用困难          |
|        | 化学氧化   | 氧化分解             | 有机物                       | 较高   | 含有机污染物的微污染水       | 可能产生有害副产物          |
|        | 生物氧化   | 微生物降解            | 有机物、浊度、氨氮、藻细胞             | 较高   | 农村河道修复            | 处理能力有限,设施分散,管理相对复杂 |
| 增加深度处理 | 臭氧+活性炭 | 氧化分解后吸附          | 有机物、氨氮                    | 较高   | 水厂深度处理            | 吸附剂回收利用困难          |
|        | 膜分离    | 高效过滤             | 臭味、色度、有机物、细菌、消毒副产物前体物、病毒等 | 高    | 高品质饮用水处理          | 处理能力有限,成本高         |
|        | 光催化氧化  | 紫外光分解有机物         | 臭味、色度、有机物                 | 高    | 尚处于试验研究阶段,无规模使用案例 | 高效光催化剂及载体尚需发掘      |

总体上看,虽然近年来我国给水工程中所实施的传统给水净化技术已有长足的发展,然而为了确保饮用水供水安全,在面对日益恶化的饮用水原水时,水厂所采取的传统强化处理的措施受到了种种因素的限制,有的建设运行成本过高,有的无法有效地去除微污染水体中有机物、氨氮、重金属等污染物,甚至会产生“三致”产物。

### 1.3 水体生态净化技术研究进展

20 世纪 70 年代起,以水生生物净化为代表的水体生态净化技术以其低碳环保、高效低廉等其他技术无法比拟的优势受到了人们的关注。有别于高浓度污水的工程净化,在处理微污染水体中生态净化技术成效显著。生态净化技术是指利用完整的生态系统,通过其特定的物质循环与能量流动发挥出净化能力来净化微污染水体的技术。而污染物的生态净化过程,即这些物质在一定的非生物因子,如大气、土壤、水体及阳光等的条件下,经过一系列物理、化学变化以及各种生物因子的作用得到转移、富集、转化、降解的过程。

#### 1.3.1 水生植物

在水生态系统中,水生植物通常包括大型维管束植物及藻类,其中大型维管束植物表现为 4 种生活型,分别为挺水植物、沉水植物、浮叶植物和漂浮植物。

##### 1) 挺水植物

挺水植物是根茎生于底泥中、植物体上部挺出水面的水生植物,代表物种有芦苇、茭草、香蒲等。挺水植物在水生生态系统中处于初级生产者的地位,在水体生态净化过程中能够发挥多种功能,如:挺水植物的茎叶可以减缓水流速度、消除湍流,起到过滤和沉淀泥沙颗粒、有机物颗粒的作用;水下发达的根茎为微生物提供了庞大的附着表面与有机碳源;发达的根系可以吸收水体与底泥中的营养盐类,从而可使植物体作为短期储存氮、磷等营养物质的仓库,净化水中的污染物;挺水植物还可将光合作用产生的氧气通过气道输送至根区,在水底营造出好氧或缺氧环境,为不同微生物提供各自适宜的生存条件,使微生物对氮素的硝化反硝化作用、磷素的过量积累作用得以进行。与其他生活型的水生植物相比,挺水植物更易于人工操纵,便于通过人工定期收获将其固定的氮、磷等营养物质带出水体。

利用挺水植物群落构建为主进行水体处理的人工湿地技术是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种生态净化技术,近年来在国内外得到广泛关注并进行了大量研究,现已积累了较多的建设和运行经验。人工湿地是根据天然湿地的自净原理,主要利用土壤、植物、微生物的物理、化学、生物三重协同作用净化水质。根据水体流态,人工湿地技术可分为垂直流、潜流和表流 3 种类型,其作用机理包括吸附、滞留、过滤、氧化还原、沉淀、微生物分解、转化、遮蔽、残留物积累、蒸腾水分和养分吸收等。通常来说,垂直流和潜流人工湿地净化效果要优于表流人工湿地,但也存在容易堵塞、管护复杂、无法大规模应用的缺点。

生物浮床技术是另一项利用挺水植物进行水体净化的技术,该技术把挺水植物种植在飘浮于水面的载体上,消除了挺水植物生长受水深条件限制的短板,通过植物根部的吸收、吸附作用以及根际微生物的分解作用达到净化水质的目的。生物浮床技术的优点在