

曝气技术与人工湿地组合处理黑臭水体及底泥的关键技术探究

吴菊珍^{1*}, 邱 诚^{1#}, 兰 婷¹, 吴 勇², 郝林森¹, 熊 平^{1,3}

¹成都工业学院材料与环境工程学院, 四川 成都

²成都工业学院图书馆, 四川 成都

³四川省持久性污染物废水处理重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2025年1月7日; 录用日期: 2025年2月10日; 发布日期: 2025年2月18日

摘 要

本文针对黑臭水体和黑臭底泥对环境的影响, 通过对黑臭水体和黑臭底泥的输入和源解析进行研究, 采用曝气生物技术治理, 并对工艺参数进行调整, 去除水中的悬浮物、有机物、营养盐等污染物, 改善水质。从曝气量、曝气间歇时间、曝气位置三个角度分析了曝气治理黑臭水体污染物及黑臭底泥效果, 同时采用曝气技术与人工湿地技术有机结合, 分析不同条件对水体TN、NH₃-N、TP和COD去除率的影响。最终形成基于曝气技术与人工湿地组合处理黑臭水体污染物及黑臭底泥关键技术, 为河道治理提供参考。

关键词

黑臭水体, 底泥, 曝气生物技术, 人工湿地

Key Technologies Study for Combined Treatment of Black and Odorous Water and Sediments Using Aeration Technology and Constructed Wetlands

Juzhen Wu^{1*}, Cheng Qiu^{1#}, Ting Lan¹, Yong Wu², Linsen Hao¹, Ping Xiong^{1,3}

¹School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

²Library Administration, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

³Sichuan Environmental Protection Key Laboratory of Persistent Pollutant Wastewater Treatment, Chengdu Sichuan

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 吴菊珍, 邱诚, 兰婷, 吴勇, 郝林森, 熊平. 曝气技术与人工湿地组合处理黑臭水体及底泥的关键技术探究[J]. 农业科学, 2025, 15(2): 159-164. DOI: 10.12677/hjas.2025.152019

Abstract

This paper addresses the environmental impact of black and odorous water bodies and sediment. By studying the inputs and source analysis of black and odorous water bodies and sediment, aeration biological technology is applied for treatment, and process parameters are adjusted to remove pollutants, such as suspended solids, organic matter, and nutrients, thereby improving water quality. The effects of aeration on the removal of pollutants from black and odorous water bodies and sediment are analyzed from three perspectives: aeration volume, aeration interval, and aeration location. Additionally, the organic combination of aeration technology and constructed wetland technology is used to analyze the impact of different conditions on the removal rates of TN, NH₃-N, TP, and COD in water bodies. Ultimately, a key technology for the combined treatment of pollutants in black and odorous water bodies and sediment using aeration technology and constructed wetlands is developed, providing a reference for river management.

Keywords

Black and Odorous Water, Sediment, Aeration Biological Technology, Constructed Wetlands

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化与工业化加速,城市水环境问题日益突出,黑臭水体成为制约可持续发展的关键环境难题[1]。它不仅散发恶臭,严重影响居民生活质量和健康,还破坏水生态系统平衡,导致生物多样性锐减。目前,治理黑臭水体及底泥的技术多样,清淤疏浚虽能直接去除底泥污染物,但工程量大、成本高且易扰动生态;化学药剂虽见效快,却有二次污染风险且长期效果欠佳。生物修复技术因环境友好、成本低而备受青睐,其中曝气技术通过增氧改善水体环境,促进微生物分解污染物;人工湿地则利用植物、基质和微生物协同作用,有效去除污染物并兼具景观功能。然而,单一技术存在局限,曝气对底泥效果有限,人工湿地适应水力负荷能力弱且初期效率低。将两者组合使用,可优势互补,提升治理效果。优化组合方式、调控运行参数及评估生态影响等关键技术,为高效治理提供科学依据,助力城市水环境质量改善和水生态系统修复保护。

2. 黑臭水体及底泥研究现状分析

2.1. 研究目的

黑臭水体底泥中的致黑物质主要是有机物在厌氧条件下形成的黑褐色物质。长期处于厌氧环境的底泥会产生硫化氢、氨气等气体,导致水体发黑发臭。此外,底泥中氮、磷等营养物质超标,会引发水体富营养化,进一步破坏水体生态平衡,使水质恶化。黑臭水体治理不仅是环境保护的需要,也是实现可持续发展的重要举措。

近年来,曝气技术在黑臭水体治理中得到了广泛应用。曝气技术通过向水体中充入空气或氧气,增加水体溶解氧含量,从而抑制厌氧微生物的活动,减少硫化氢、氨气等有害气体的产生。同时,曝气技

术还能改善水体和底泥的氧化还原环境,促进底泥中污染物的氧化分解。研究表明,曝气技术对底泥中氮、磷的控释具有显著效果,泥水界面的硝化率和反硝化率可分别达到 46.3%和 43.6%。

在政策层面,生态环境部联合住房和城乡建设部制定了《城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》,通过加强监管、加大投入和科技创新等手段,全面推进城市黑臭水体治理。此外,《“十四五”城市黑臭水体整治环境保护行动方案》也已出台,为治理研究提供了重要指导。

然而,单一的曝气技术在实际应用中仍存在局限性。例如,曝气对污染物的去除主要依赖水体中的微生物作用,对于微生物含量匮乏的水体,效果不明显。因此,结合生物膜技术、微生物修复技术或人工湿地技术等复合治理方法,能够显著提高污染物的去除效率。例如,曝气技术与人工湿地技术的联合应用,不仅能有效去除水体中的氮、磷等营养物质,还能通过植物根系和微生物的协同作用,进一步改善水质。

2.2. 国内外研究现状和发展动态

目前,黑臭水体治理常用的净化方法包括物理法(如底泥清淤、引水冲稀和人工曝气等)、化学法(如投加铝盐、硝酸盐和过氧化氢等)和生物法(如水生植物净化、微生物强化净化等)。这些方法在一定程度上能够改善黑臭水体的水质,但也存在诸多不足。例如,物理方法中的清淤疏浚虽然能有效去除底泥中的污染物,但工程量大且易引发二次污染;化学方法可能对水体生态造成负面影响;而生物方法则需要较长的时间才能见效[2]。

随着我国黑臭水体治理的大力推进,截污系统逐渐完善,底泥中污染物的释放及厌氧发酵产生的臭味物质成为河湖黑臭的重要原因。截至 2016 年 2 月,中国有黑臭水体的城市达 218 座,河流 1595 条,湖、塘 266 个。近年来,我国出台了一系列政策推动黑臭水体治理,《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021~2025 年)》提出统筹农村黑臭水体整治与生活污水、垃圾、种植、养殖等污染治理,落实河长制,推进水体有效治理和管护,目标是到 2025 年基本消除较大面积农村黑臭水体。此外,《深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》将治理范围扩大到县级城市,从多个方面开展攻坚。

在技术层面,曝气技术虽然在黑臭水体治理中被广泛应用,但单独使用难以彻底解决问题。国外在黑臭水体研究和治理上也取得了一定进展,但仍面临技术挑战和可持续性问题。例如,单独曝气可能导致病原微生物形成气溶胶,对周边居民健康造成潜在危害。因此,复合治理技术逐渐受到关注。例如,曝气技术与人工湿地技术的联合应用,不仅能有效去除水体中的氮、磷等营养物质,还能通过植物根系和微生物的协同作用进一步改善水质。

近年来,科技进步推动了新型污水处理装备和生物发酵技术的出现,大幅提高了治理效果。例如,人工湿地技术在去除污染物方面表现出色,但其生态服务功能如碳固定和生物多样性维持仍需进一步提升。此外,“互联网 + 环保”趋势使大数据、云计算、物联网等新技术应用于黑臭水体治理,推动其朝数字化、智能化方向发展。信息技术的发展使曝气处理系统趋向自动化控制,通过自动化控制系统全面监控和控制处理过程,提高运行效率和稳定性。

在可持续性方面,曝气处理过程中产生的能量可通过能量回收技术转化为电力或其他可再生能源,降低污水处理厂能耗,减少对传统能源的依赖。此外,利用再生水作为生态补水,构建城市水的“生态循环、梯级利用”系统,被认为是城市水环境污染治理和水生态健康维系的可持续模式。

3. 城市黑臭水体污染的基本特征

3.1. 污染源的多样性

城市黑臭水体污染的特征之一是污染源的多样性[3]。生活污染源主要是居民排放的生活污水,含有

有机物、氮、磷等污染物, 未经处理直排会消耗溶解氧, 引发富营养化; 城市地表径流携带垃圾、油污、泥沙等, 以及合流制排水系统在降雨时溢流的污水, 均会带入高浓度污染物。工业污染源包括化工、印染行业排放的废水, 含有重金属、有机物、酸碱物质, 小型企业偷排漏排和工业事故性排放也会释放大量的污染物。农业污染源则是农田化肥、农药流失, 经地表径流进入水体, 加剧污染, 使黑臭水体污染源呈现复杂多样的特点。

3.2. 污染物的复杂性

黑臭水体污染物种类繁多, 包括有机物、营养物质、重金属、持久性有机污染物等, 它们之间发生复杂的物理、化学与生物反应。有机物分解改变水体氧化还原条件, 影响重金属形态与毒性。不同污染源物质交融, 同类污染源成分也不稳定, 如印染废水与电镀废水差异巨大。污染物还呈现时空变化, 随季节、昼夜更替, 以及城市不同区域、同一水体不同位置, 浓度与组成不同。各污染源排放规律各异, 生活污水稳定且量大, 工业废水排放可能间歇或集中, 农业面源污染受季节、降雨影响, 极具随机性, 使污染情况复杂多变, 治理难度大。

3.3. 污染范围的广泛性

黑臭水体污染影响广泛, 严重破坏生态环境和人类生活。生态环境方面, 它对水生态系统造成毁灭性打击, 水质恶化、溶解氧降低, 水生生物大量死亡, 水生植物生长受抑, 生物多样性下降; 渗透改变周边土壤环境, 影响土壤微生物和植被生长; 散发恶臭与病菌, 破坏空气质量, 威胁其他生态系统稳定。人类生活方面, 周边居民受难闻气味影响, 生活舒适度降低, 身心健康受损。城市发展方面, 黑臭水体损害城市景观与形象, 削弱投资和旅游吸引力, 阻碍经济可持续发展, 治理需投入巨额资金, 增加城市运营成本。

4. 黑臭水体和黑臭底泥的处理技术

4.1. 调查河流黑臭水体污染源和黑臭底泥

流域氮污染的主要来源有污染源(工业废水、城镇生活污水等)、地表水(直接径流)污染源(化肥、干湿沉降等)和地下水(基流)污染源[4]。本研究将根据枯水、丰水两期水质实际监测值, 综合分析流域无机氮形态与同位素特征, 利用氮氧同位素示踪技术进行氮污染物溯源研究。

河流黑臭水体污染源有外源污染(主要包括农村面源污染和入湖库支流污染)和内源(湖库底泥营养物质的释放)污染。对富营养化河流进行现场踏勘, 掌握黑臭水体污染水质和黑臭底泥成分和含量等。

4.2. 制定曝气复氧阻断内源输入性营养物质生态阻断参数和关键技术方案

分析监测黑臭水体和底泥污染物含量, 从曝气量、曝气间歇时间和曝气位置三个角度实验曝气治理黑臭水体污染物及黑臭底泥效果的治理技术, 分析不同条件对水体 TN、NH₃-N、TP 和 COD 去除率的影响。形成曝气技术处理参数的关键技术。曝气复氧可以减缓底泥中磷的释放, 并氧化或降解表层底泥中的还原类物质, 从而使表层沉积物表层形成个以好氧性细菌为主的环境, 促进好氧微生物的繁殖, 抑制厌氧微生物, 并对水体中有机物进行好氧降解, 且逐渐提升水体的溶解氧水平, 增强水体的自净能力。曝气复氧与产生黑臭的还原物质(H₂S、FeS 等)之间发生氧化还原反应, 促进还原态的 N、S 等有毒有害物质的氧化, 这些有害物质在溶解氧充足的环境下更易被氧化分解, 从而有效地缓解或改善黑臭现象。同时, 曝气复氧技术提高了水中的溶解氧含量, 抑制了厌氧微生物的过量繁殖, 达到降解污染负荷的目的。

4.3. 制定人工湿地处理关键技术

根据曝气复氧处理黑臭水体污染源和黑臭底泥后,增加人工湿地处理,具体情况选择采用地表流湿地、潜流湿地、垂直流湿地三种的某一种或者混合湿地。研究湿地处理主要植物的选择和搭配:通过筛选耐污和净化能力强的植物品种并进行优化组合,达到更好地调控人工湿地的净化功能以及符合景观建设的需要;同时建造适宜的湿地生态系统,使植物良好生长,充分发挥其各种功能。人工湿地中采用挺水植物、沉水植物、浮水植物的搭配。选择具有成活率高和处理性能好、根系发达耐污能力和抗寒能力强的植物。

4.4. 曝气技术与人工湿地技术协同治理效果

曝气技术主要是通过向水体中充入空气或氧气,促进氧气在水中的溶解和扩散,通过提供氧气来刺激水中微生物的生长和代谢,从而降解水中的营养物质[5]。人工湿地由基质、水生植物和微生物组成。基质通过吸附、沉淀等作用去除悬浮物和部分污染物;水生植物吸收氮、磷等营养物质,并为微生物提供附着场所;微生物则利用有机污染物进行生长代谢,实现污染物的降解转化。在处理黑臭水体及底泥时,人工湿地能够进一步去除曝气后水体中的剩余污染物,同时对从底泥中释放出的污染物进行拦截和净化,强化整个处理系统的效果。

通过曝气-人工湿地组合处理黑臭水体和底泥[6],对比实施前后水体中的 COD、BOD₅、TN、TP 等污染物的含量、藻类的种群变化、空间分布及代谢差异,展现生态修复技术对外源输入性营养物质生态阻断和底泥营养物质原位阻控的效果。最终形成基于曝气技术与人工湿地组合处理黑臭水体污染物及黑臭底泥关键技术。

5. 组合工艺关键技术参数

5.1. 曝气强度与时间

曝气强度过大可能导致底泥再悬浮,过小则无法满足水体溶解氧需求。合适的曝气强度应根据水体体积、初始溶解氧浓度、污染物负荷等因素确定[7],一般通过实验或模拟计算得出。曝气时间也需合理安排,既要保证有氧环境的维持,又要避免能源浪费,通常采用间歇曝气方式,如曝气 2~4 小时,停曝 2~3 小时,循环进行。

5.2. 湿地植物选择与配置

选择耐污能力强、根系发达、生长迅速且具有一定经济价值或景观价值的植物,如芦苇、菖蒲、美人蕉等。同时,要合理配置不同植物的种植比例和空间分布,形成多层次的植物群落结构,提高湿地系统的净化效率和稳定性。例如,在湿地进水口附近种植根系较粗、净化能力强的植物,在出水口附近种植对水质要求较高的植物,以充分发挥各植物的优势。

5.3. 水力停留时间(HRT)

组合工艺中,黑臭水体在曝气区和人工湿地的 HRT 对处理效果至关重要。在曝气区,HRT 一般控制在 1~3 天,以保证足够的氧气传递和污染物初步氧化分解;在人工湿地,HRT 通常为 3~7 天,确保水体与湿地基质、植物和微生物充分接触,完成深度净化过程。HRT 的确定需综合考虑处理规模、污染程度、工艺构型等因素,通过示踪实验等方法进行优化。

5.4. 底泥处置与曝气协同

对于黑臭底泥,在曝气过程中可适当进行扰动,促进底泥中污染物的释放和氧化,但要控制扰动强

度,防止底泥大量上浮造成二次污染[8]。同时,人工湿地对底泥释放的污染物进行后续处理,如设置前置沉淀区或强化湿地进水端的处理能力,减少底泥对整个系统的冲击,实现曝气与底泥处置的协同优化。

6. 结论与展望

曝气技术和人工湿地组合工艺在黑臭水体及黑臭底泥处理中具有显著的优势和良好的应用前景[9]。通过优化曝气强度、时间,合理选择湿地植物和配置,精准控制水力停留时间以及协同底泥处置等关键技术参数,能够实现高效的污染物去除和水体生态修复。然而,该组合工艺在长期运行稳定性、微生物群落调控、与周边环境的生态融合等方面仍有待进一步研究和完善。未来的研究可结合智能化监测与控制系统,实时调整工艺参数,提高处理效率和稳定性;深入探究微生物群落的演替规律,强化功能微生物的作用[10];加强生态景观设计,使处理设施更好地融入城市生态系统,为黑臭水体治理提供更加全面、可持续的解决方案,推动水环境质量的持续提升。

基金项目

本文系以下课题基金资助:获得成都工业学院(国家/省/校)级大学生创新创业训练计划项目基金支持(项目名称:曝气技术与人工湿地组合处理黑臭水体及黑臭底泥关键技术研究,项目编号:202411116057);(项目名称:乡村振兴背景下微氧生物复合人工湿地耦合系统治理农村生活污水,项目编号 202411116004);四川省高等教育学会研究课题:“乡村振兴背景下为四川省三州深度贫困县定向培养环保应用型人才模式的研究”(项目编号:GUXH2024ZHDA-006);四川省持久性污染物废水处理重点实验室开放课题基金资助(Fenton催化氧化法-生物法组合工艺处理难降解农药废水的研究与实践,项目编号 PPWT2023-05)。

参考文献

- [1] 王爽爽. 海绵城市建设协同城市黑臭水体治理应用研究[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(12): 104-106.
- [2] 李涛, 龚逸, 蔡浩瀚, 等. 黑臭水体底泥处理技术发展现状[J]. 水处理技术, 2024, 50(4): 8-11+31.
- [3] 牛丽梅. 城市黑臭水体污染基本特征及治理措施研究[J]. 清洗世界, 2024, 40(11): 128-130.
- [4] 林伟华. 黑臭水体整治研究[J]. 清洗世界, 2024, 40(11): 131-133.
- [5] 吴磊, 梁涛, 王春丽, 等. 曝气法治理地表黑臭水体实验研究[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(12): 76-78.
- [6] 张环惠, 陈曦. 基于现代环保理念的水处理技术革新与应用案例分析[J]. 云南化工, 2024, 51(11): 157-160.
- [7] 王莉, 李亭亭, 姜惠源, 等. 曝气扰动对黑臭水体底泥腐殖质的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(1): 151-158.
- [8] 曹琳, 刘煌, 许国静, 等. 曝气 + 底泥改良剂修复黑臭水体污染底泥[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(6): 734-739.
- [9] 张铠, 王怡, 张倩, 等. 微纳米曝气对黑臭水体底泥减量及气溶胶产生的影响[J]. 中国给水排水, 2024, 40(11): 19-23.
- [10] 侯露露, 徐婷, 赵风斌. 黑臭水体底泥修复中载体微生物技术的应用研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(10): 264-267.