

陈建军, 伍惠郡, 张华俊, 等. 生物滤墙-水下森林耦合工艺在农村微黑臭水体治理中的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 86-95.

CHEN J J, WU H J, ZHANG H J, et al. Application of coupling process of biofilter wall-submerged forest in treatment of micro black and odorous water bodies in rural areas[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 86-95.

生物滤墙-水下森林耦合工艺在农村微黑臭水体治理中的应用

陈建军¹, 伍惠郡¹, 张华俊^{2,*}, 李保庆¹, 谢沁颖¹, 詹景怡¹, 张文磊²

(1. 广东环境保护工程职业学院, 广东佛山 528216; 2. 黔南民族师范学院旅游与资源环境学院, 贵州都匀 558000)

摘 要 【目的】近些年来乡村生活生产方式转变引起的环境问题愈发严峻, 农村微黑臭水体是严重影响农村人居环境和可持续发展的民生难题。文章提出了一种基于生物滤墙与水下森林耦合技术的农村微黑臭水体治理方法, 重点阐述了该耦合技术的设计原理、构建方法以及在实际工程中的应用效果。【方法】在控源截污基础上, 采用生物滤墙-水下森林耦合技术对某农村微黑臭水体进行治理, 文章生物滤墙沿水体靠近居民活动区域边缘沿铺设, 具有能解决填料清洗不便的技术问题的特征, 水下森林为以沉水植物为核心的“沉、浮、挺”水生植物生态系统。【结果】通过试验数据分析, 结果显示, 生物滤墙-水下森林耦合技术可使黑臭水塘水质明显改善, 在近 3 个月的治理中, 水体透明度(SD)提高 67.27%, 溶解氧(DO)提高 8.5 倍, 化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮、总氮(TN)、总磷(TP)分别降低 39.61%、58.90%、69.74%和 33.33%; 后又经过 6 个月的维护期, 水体 SD 提高 7 倍, DO 提高 10.4 倍, COD_{Cr}、氨氮、TN、TP 分别下降 67.05%、83.36%、84.23%和 72.22%; 可实现水质指标达到地表水Ⅲ类及以上。水塘底泥有机指数和污染指数经处理后分别降低 93.05%和 87.63%, 其底泥指数由重污染向轻度污染转变。【结论】由此表明, 生物滤墙-水下森林耦合工艺可实现农村微黑臭水体良好治理, 为农村微黑臭水体治理提供了一种新的、有效的解决方案。应进一步加强对该技术的研究和推广, 以更好地解决农村小微黑臭水体治理问题。

关键词 生物滤墙 水下森林系统 农村 微黑臭水体 生态修复

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0086-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.011

Application of Coupling Process of Biofilter Wall-Submerged Forest in Treatment of Micro Black and Odorous Water Bodies in Rural Areas

CHEN Jianjun¹, WU Huijun¹, ZHANG HuaJun^{2,*}, LI Baoqing¹, XIE Qinying¹, ZHAN Jingyi¹, ZHANG Wenlei²

(1. Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China;

2. School of Tourism and Resource Environment, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China)

Abstract [Objective] In recent years, the environmental problems caused by the transformation of rural living and production method have become increasingly severe. Micro, black and odorous water bodies in rural areas are a serious livelihood problem that affects the living environment and sustainable development of rural areas. This paper proposes a rural small and micro black and odorous water treatment method based on the coupling technology of biofilter walls and submerged forests, focusing on the design principles, construction method, and application effects of this coupling technology in practical engineering. [Methods] On the basis of controlling sources and intercepting pollution, a coupled process of biological filter wall and underwater forest was adopted to treat a small black and odorous water body in a rural area. The biological filter wall in this paper was laid along the edge of the water body near the residential activity area, which had the characteristic of solving the technical problem of inconvenient cleaning of fillers. The underwater forest was an aquatic plant ecosystem with submerged plants as the core, characterized by "sinking, floating, and standing" [Results] Through experimental data analysis, the result showed that the coupling process of biological filter wall and

[收稿日期] 2024-08-27

[基金项目] 2023 年佛山市科技创新项目(2320001007245); 2022 年广东省高校重点平台及科研项目(2022KCXTD049); 2022 年校长基金项目(K640422062406); 2024 年校长基金项目(K680524012612)

[作者简介] 陈建军(1982—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为环境工程技术与教育, E-mail: 260205347@qq.com。

[通信作者] 张华俊(1983—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事水环境修复工程与技术研究工作, E-mail: 155046257@qq.com。

underwater forest could significantly improve the water quality of black and odorous ponds. In the past three months of treatment, the water transparency (SD) increased by 67.27%, dissolved oxygen (DO) increased by 8.5 times, and chemical oxygen demand (COD_{Cr}), ammonia nitrogen, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) decreased by 39.61%, 58.90%, 69.74%, and 33.33%, respectively; After another 6-month maintenance period, the water's SD increased by 7 times, DO increased by 10.4 times, and COD_{Cr} , ammonia nitrogen, TN, and TP decreases by 67.05%, 83.36%, 84.23%, and 72.22%, respectively; It could achieve water quality indices of Class III or above for surface water. After treatment, the organic index and pollution index of the pond sediment decreased by 93.05% and 87.63%, respectively, indicating a shift from heavy pollution to moderate pollution. [Conclusion] This indicates that the biological filter wall underwater forest coupling process can achieve good treatment of small and micro black and odorous water bodies in rural areas, providing a new and effective solution for the treatment of small and micro black and odorous water bodies in rural areas. Further research and promotion of this technology should be strengthened to better solve the problem of rural small and micro black and odorous water treatment.

Keywords biofilter wall submerged forest system rural area micro black and odorous water body ecological remediation

目前对黑臭水体的研究多以城市河道黑臭水体治理技术开发与应用为主,对农村小微封闭黑臭水体关注相对较少^[1]。农村小微水体(如坑、塘、沟、渠等)同样面临着严重的污染问题,已成为农村水体污染的治理难题。本文以生物滤墙-水下森林耦合技术在农村小微封闭黑臭水体治理中应用效果为研究内容。生物滤墙由可渗透反应墙(PRB)演变而来,PRB是兴起的一种通过筛选或制造可降解或截留水体污染物成分的反应材料,构造出一种类似“墙”的反应区的水体污染原位修复技术,该技术通过吸附、络合、沉淀等物化、电化或生化反应,使污染物得到净化和截留^[2-3]。本文生物滤墙首先通过填料物理过滤,然后通过墙内微生物和植物对污染物进行吸收、降解和转化,从而达到净水目的。此生物滤墙除了具有利用物理、化学和生物的作用净化污染物的特征外,还具有解决填料清洗不便的技术问题特征。水下森林系统通过构建以沉水植物为核心的水下生态系统,改善和恢复水体质量^[4-7]。本文旨在通过研究生物滤墙-水下森林耦合技术的实际应用效果,为农村水环境治理提供新的技术支撑,探索适用于农村小微封闭黑臭水体治理的新方法。

1 工程概况

1.1 工程水体现状

项目位于佛山市里水镇某村,该地区为亚热带季风气候,其年平均温度是21.8℃。其年1月平均温度是12.3℃,7月、8月平均温度是28.6℃。其年降雨量平均为1760.2mm,5月、6月为雨季。对编号为1#、2#、5#、6#、7#、10#的黑臭水塘进行水体修复,水塘空间分布如图1所示。据现场调查,这些水塘存在淤泥过厚,水体富营养化严重,水色呈浅绿

色或黑色。各水塘现状情况如表1所示,6个水塘总面积约为20099m²,水深为0.2~1.5m,蓄水量约为11807m³,水体透明度低,水面长满浮游植物,底泥厚度约为1.0m,底泥平均密度为1.42g/cm³,呈黝黑色,局部区域淤积厚度为1.2~1.3m。

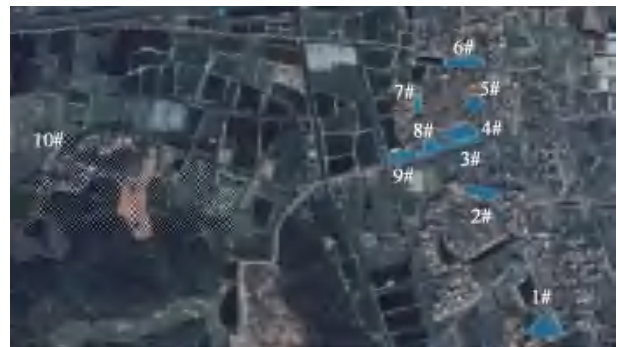


图1 村庄水塘空间

Fig. 1 Pond Space in Village

表1 各水塘现状统计情况

Tab. 1 Statistics of Existing Situation of Each Pond

编号	面积/m ²	水深/m	水体情况
1#	5 979.24	0.7~1.5	藻型混水状态,缺乏沉水植物的调节,透明度差,塘底淤泥深约为1.0m
2#	3 663.66	0.3	藻型混水状态,缺乏沉水植物的调节,透明度差,塘底淤泥深约为1.0m
5#	2 786.38	0.5	藻型混水状态,水体富营养化严重,透明度差,塘底淤泥深约为1.0m
6#	4 251.21	0.3	黑臭,悬浮物较多,感官效果差,塘底淤泥深约为1.0m
7#	1 802.06	0.3	氨氮及亚硝酸盐超标严重,水体黑臭,透明度及感官效果差,塘底淤泥深约为1.0m
10#	1 616.53	0.2	水体中大藻繁殖过盛,透明度差,塘底淤泥深约为1.0m,大量垃圾沉积

各水塘水质指标如表2所示,化学需氧量

(COD_{Cr})质量浓度为 46.83~77.67 mg/L,氨氮质量浓度为 2.79~8.98 mg/L,总磷(TP)质量浓度为 0.46~1.27 mg/L,总氮(TN)质量浓度为 4.02~9.32 mg/L,溶解氧(DO)质量浓度为 0.45~0.94 mg/L,固体悬浮物(SS)质量浓度为 23.90~76.70 mg/L,水体透明度(SD)为 10~20 cm。各小

微水体 TP 质量浓度均大于 0.1 mg/L,属水体富营养化状况。水体 DO 缺乏,呈绿色。《农村黑臭水体治理工作指南》^[8]以指标氨氮、DO、SD 来判定水体是否黑臭,其中任何一项不达标即被视为黑臭水体,各指标阈值如表 3 所示。对照表 2 中结果可知本项目小微水体均为黑臭水体。

表 2 各水塘水质结果

Tab. 2 Water Quality Results of Each Pond

取样点	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	DO/(mg·L ⁻¹)	SD/cm
1#	46.83	6.01	0.36	9.32	76.70	0.78	20
2#	47.60	3.63	0.58	5.12	23.90	0.94	15
5#	77.67	2.79	1.18	4.02	32.05	0.82	16
6#	48.40	8.98	1.27	9.22	30.15	0.56	15
7#	76.17	5.73	0.92	8.42	28.12	0.45	10
10#	34.50	3.78	0.46	5.23	33.21	0.62	10

表 3 监测指标阈值

Tab. 3 Monitoring Indices Threshold Values

监测指标	指标阈值
SD/cm	<25*
DO/(mg·L ⁻¹)	<2
氨氮/(mg·L ⁻¹)	>15

注: * 表示水深不足 25 cm 时,SD 取水深的 40%。

1.2 小微黑臭水体污染源解析

农村生活类、畜禽养殖类、水产养殖类、工业废水类、农业种植类等是农村黑臭水体的主要来源^[9-11]。持续排入大量外源性污染物,大量消耗水中氧气以致厌氧状况在水中逐渐显现,水体中有机物质被厌氧分解成为黑臭物质,造成水体黑臭现象^[12-15]。对水塘调查发现:点源污染方面,各水塘都有居民生活污水排放管道,塘边建有公共厕所及生活垃圾场;面源污染方面,水塘周边农用旱地进行农业生产的化肥和农药及枯萎的树叶可带来污染,在下雨天随地表径流入池塘的地面污染物也会带来污染;内源污染方面,各种漂(悬)浮物、腐败物、岸边垃圾等带来内源污染,1.0 m 左右厚的淤泥释放出的污染物造成水体发黑发臭。调查分析水塘主要污染为农村生活污染,次要污染为雨水径流带来的农业种植污染和水产养殖污染(养殖饲料、药物、打捞作业残留等雨水径流等)。水塘水黑臭因素中农村生活污染贡献最大,约占 75%,次要污染为农业种植污染和水产养殖污染,分别约占 20%和 5%,如图 2 所示。

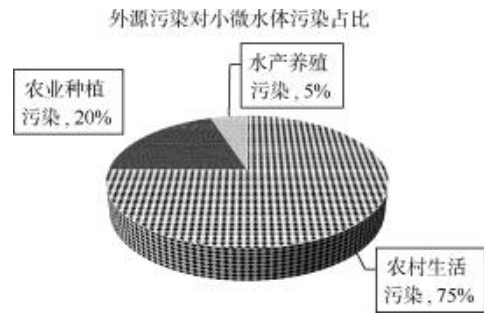


图 2 小微水体污染中外源污染所占比例

Fig. 2 Proportion of External Pollution on Small Water Bodies

1.3 工程方案设计

水塘外源污染主要是农村生活污水,借鉴国内外工程经验设计,相对聚集农村生活污水采用管网收集进入一体化设备处理后排入生物滤墙,生活区雨水径流通过生物滤墙截入处理;内源污染控制主要采取底泥疏浚、垃圾清理和生物净化等,其中底泥疏浚清淤 30 cm;水质净化主要采用生物-生态技术方法,构建水下森林系统使有机物降解而去除^[16-22]。整个治理工程实施内容包括截污处理站点(一体化设备)建设、生物滤墙净化系统构建及水塘沉、浮、挺水生植物生态系统构建等,本文以 1#水塘工程为例具体分析。

1.3.1 修复工艺流程

整个修复工艺流程分为 3 个单元,一体化处理设备、生物滤墙和水下森林系统。农村生活污水经管网收集到一体化设备[厌氧/好氧(AO)工艺]进

行处理,去除部分 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP 及 SS 等,然后排入生物滤墙内进一步去除污染物等后排入水塘;水塘岸边硬化生活区雨水径流截入生物滤墙净化去除污染物等后排入水塘;塘边农田及水产养殖区雨水径流污染首先经塘边挺水植物区净化去除后

进入塘,各类污水最后经塘中水下森林系统继续净化。其雨水径流污染水质及水量情况如表 4 所示。设施布局如图 3 所示,结合现场情况农田种植及水产养殖区水塘西边岸区域种植挺水植物,水塘东边岸设置生物滤墙,一体化设备设置在北边岸。

表 4 雨水径流污染水质、水量结果
Tab. 4 Rainwater Runoff Pollution Results in Water Quality and Quantity

项目	年水量/ m^3	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH 值
生活区雨水径流	9 505.1	≤ 120	≤ 80	≤ 13.24	≤ 0.23	6~9
农田及水产养殖区雨水径流	5 720.7	≤ 100	≤ 70	≤ 6.78	≤ 0.21	6~9

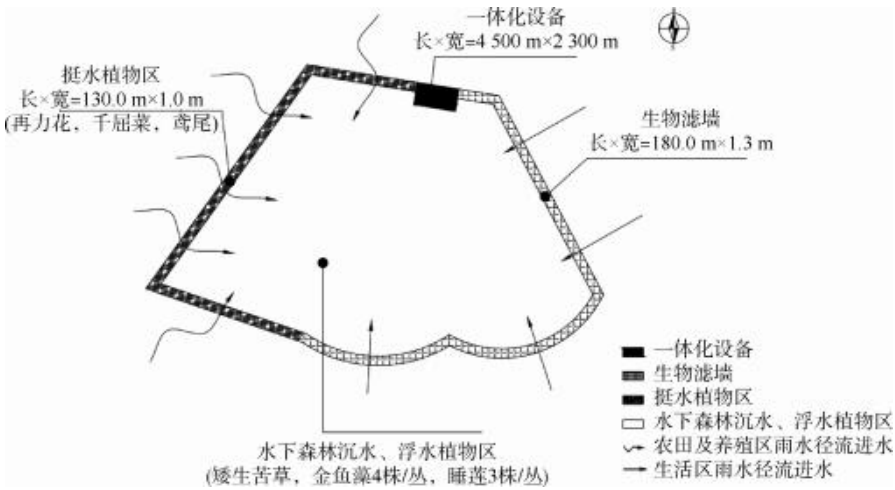


图 3 项目 1#水塘水体修复设施平面布局

Fig. 3 Plan Layout of Water Remediation Facilities for Project 1 # Pond

1.3.2 主要修复单元及参数设计

(1) 一体化污水处理设备

高效一体化污水处理设备由反应器(AO)、曝气系统及沉淀区等构成。本项目选用的埋地式一体化污水处理设备(规模为 $10 \text{ m}^3/\text{d}$),尺寸为 $4\,500 \text{ mm} \times 2\,300 \text{ mm} \times 2\,300 \text{ mm}$ (长×宽×高)为碳钢材质,内含预装管道,曝气膜,填充物等。其一体化设备水力负荷为 $0.97 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,容积负荷为 $29.4 \text{ g BOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (BOD_5 为五日生化需氧量)。经村内管网收集的农村生活污水经格栅井、提升泵井流到一体化设备中,如图 4 所示。首先经过格栅井去除污水中的较大杂质、颗粒及漂浮物,然后进入调节池均衡水质、水量。调节池内的污水经过水泵提升进入反应器 AO,反应器部分由厌氧水解池和接触氧化池组成。厌氧水解池内悬挂组合填料作为生物膜的载体,接触氧化池内悬挂弹性组合填料,接触氧化池底设曝气装置。整个流程采用“液位

控制+时间控制”模式,实现无人值守自动化处理。进、出水水质如表 5 所示,出水指标满足广东省《农村生活污水处理排放标准》(DB 44/2208—2019)三级标准,在人工强化生化处理后的出水流入生物滤墙内。

(2) 生物滤墙

生物滤墙结构如图 5 所示,其沿水体靠近居民活动区域边沿铺设,如图 3 所示,其长为 180 m、宽为 1.30 m。活动区域内受降雨产生的废水从岸边流入第一处理腔内,废水通过重力作用从上往下经过第一填料,将大部分固体杂质隔离沉淀,并通过填料及其附着的微生物进行物理吸附、化学所示转化和生物降解,将废水中的部分污染物去除。再流入第二处理腔内,利用植物层、第二填料及其附着的微生物的协同作用进一步去除污染物。第二处理腔内的处理水排入自然水体,通过自然水体的自净能力继续净化水中污染物。第一处理腔的宽度为

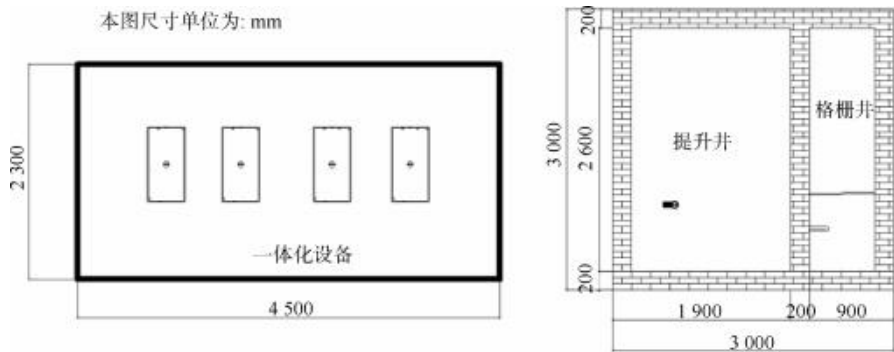


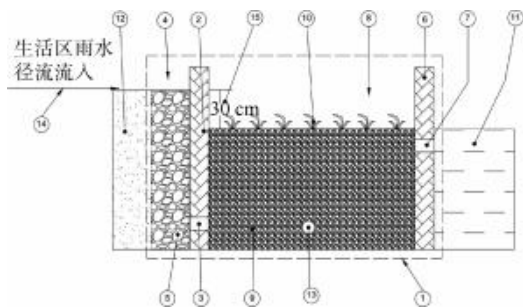
图 4 一体化设备

Fig. 4 Integrated Processing Equipment

表 5 设计进、出水水质

Tab. 5 Designed Influent and Effluent Quality

项目	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	pH 值
进水	≤220	≤100	≤40	≤4.5	≤150	6~9
出水	≤100	≤30	≤15	≤1.5	≤30	6~9



注:①—生物滤墙;②—第一墙体;③—第一出水口;
④—第一处理腔;⑤—第一填料(碎石);⑥—第二墙体;
⑦—第二出水口;⑧—第二处理腔;⑨—第二填料
(碎石和陶粒);⑩—植物层;⑪—水塘;⑫—岸边;
⑬——一体化设备出水布水管;⑭—雨水径流入;⑮—
水头损失。

图 5 一种生物滤墙

Fig. 5 A Biofilter Wall

30 cm,第二处理腔的宽度为 100 cm。第一填料区
从上至下 3 层,表层填充粒径为 5.0 cm 填料,中间
层填充粒径为 4.0 cm 填料,底部填充粒径为 3.0 cm
填料,其各层层厚上层:中间层:底部为 5:3:2。
第二填料区从上至下 3 层,表层填充粒径 3.0 cm 填
料,中间填充粒径为 1.0 cm 填料,底部填充粒径为
3.0 cm 填料,其各层层厚上层:中间层:底部为
1:14:1,表层种植植物。本生物滤墙填料为碎石、
陶粒的 1 种或 2 种组合,种植植物为风车草、美人蕉
等,植株高为 25.0 cm,种植密度为 20 株/m²。第一
填料和第二填料的高度相差 30 cm,避免第一、二次

填料中废水高度落差过大或过小。滤墙第一处理腔
填料高度与边岸高度齐平,第二处理腔填料高度为
水体年最高水深加上超高 15 cm。雨水径流污水流
进第一处理腔,污水中 SS 经填料过滤截住很容易造
成堵塞,这样过一段时间就需要填料经机械振动、水
力冲洗后再利用。一般的生物滤墙需要移走种植在
填料上面植物后对填料进行清洗,本文生物滤墙有
形成一个专门的截留 SS 区域,就是第一处理腔,这
样当发生堵塞时只需要清洗第一处理腔的填料,该
生物滤墙是一种新型改良的滤墙,相比一般生物滤
墙具有解决填料清洗不便的技术问题特征,节省维
护费用。第一处理腔出水经铺设在第二处理腔内底
部的布水管均匀分布,由第二处理腔底部往上形成
垂直流。一体化设备处理出水流入生物滤墙,由生
物滤墙里面铺设的布水管将来水均匀分布,布水管
铺在第二处理腔内底部,使其布水范围的水力负荷
为 0.5 m³/(m²·d)。生物滤墙内铺设的布水管材质
为塑料,沿生物滤墙第二处理腔底部中轴线铺设。
通过试验模拟处理污水结果表明,当生物滤墙水力
负荷为 0.5 m³/(m²·d)时对 COD_{Cr}、TP、TN、氨氮
的去除率分别为 68.11%、65.66%、74.73%和 66.47%,
如表 6 所示。

(3)水下森林系统

1#水塘先通过抽排去除部分有机底泥,然后构
建水下森林体系。沉水植物主要种植矮生苦草和金
鱼藻,浮叶植物种植睡莲,挺水植物主要为鸢尾、千

表 6 生物滤墙对污染物去除情况

Tab. 6 Removal of Pollutants by Biofilter Walls

项目	去除率
COD _{Cr}	68.11%
氨氮	66.47%
TP	65.66%
TN	74.73%

屈菜和再力花等,其中挺水植物带宽为 1.0 m。水生动物主要投放本地鱼类和底栖动物等。通过合理搭配不同生长习性的水生植物,形成稳定、健康和具有自净能力的水生生态系统。水生植物布置密度如表 7 所示,在实际应用中可根据具体情况进行灵活调整。综合考虑水深、成活率、施工成本等,水草种植采用抛种+扦插法+直插法相结合。塘边浅水处的挺水植物,采用直接栽植的方式栽植。种植精选除氮除磷能力较强,抑制藻类较好的植物等,以提高水生态系统的抗冲击性,维持生态系统的物种多样性。在生物滤墙附近沉水植物设计种植密度可适当提高。

表 7 水生植物布置密度

Tab. 7 Density of Aquatic Plants Arrangement

植物种类	规格	种植密度/ (丛·m ⁻²)
矮生苦草	4 株/丛,株高大于 15 cm,有完整的根系	20
金鱼藻	4 株/丛,株高大于 20 cm	10
睡莲	3 株/丛,有完整的根系	1
再力花、千屈菜、鸢尾	3 株/丛,株高大于 25 cm,有完整的根系	9

2 治理效果与讨论

2.1 水质指标变化及治理效果

2.1.1 水质指示指标变化

1#水塘至 2021 年 9 月 17 日约 3 个月治理期后,水体 SD 由治理前 22.0 cm 提高到 36.8 cm,提高了 67.27%。后维护期 SD 持续提升,至 2022 年 3 月 20 日约 6 个月后,水体清澈见底,SD 为 150 cm,SD 提高了近 7 倍,如图 6 所示。治理前 1#水塘 DO 质量浓度为 0.78 mg/L,约 3 个月的治理期后,为 6.63 mg/L,提高了 8.5 倍;而后约 6 个月的维护期后,DO 为 8.12 mg/L,提高了 10.4 倍。结果表明治理后水体 DO 显著提升,DO 提升至地表水 I 类,如图 6 所示。

2.1.2 水质典型污染物指标变化

如图 7 所示,约 3 个月的治理后,COD_{Cr} 质量浓

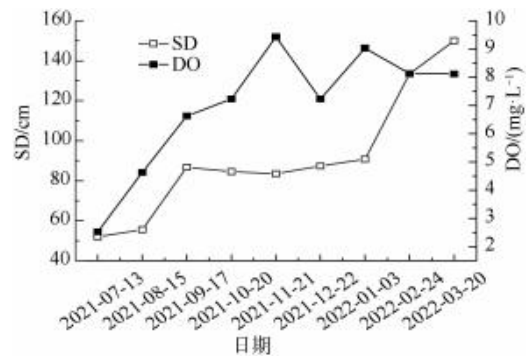


图 6 SD 与 DO 的变化

Fig. 6 Changes of SD and DO

度由 46.83 mg/L 降低到 28.28 mg/L,降低了 39.61%;氨氮质量浓度由治理前的 6.01 mg/L 降低到 2.47 mg/L,降低了 58.90%;TN 质量浓度由治理前 9.32 mg/L 降低到 2.82 mg/L,降低了 69.74%;TP 质量浓度由治理前的 0.36 mg/L 降低到 0.24 mg/L,降低了 33.33%。经过约 6 个月的维护期后,COD_{Cr} 质量浓度为 15.43 mg/L,降低了 67.05%,治理后水体 COD_{Cr} 显著降低,该指标提升至地表水Ⅲ类。氨氮质量浓度为 1.0 mg/L,降低 83.36%,治理后水体氨氮显著降低,该指标从地表水劣 V 类提升至地表水Ⅲ类。TN 质量浓度为 1.47 mg/L,降低了 84.23%,治理后水体 TN 指标显著降低,该指标提升至地表水Ⅳ类,TP 质量浓度为 0.10 mg/L,降低了 72.22%,治理后水体 TP 显著降低,该指标提升至地表水Ⅲ类。

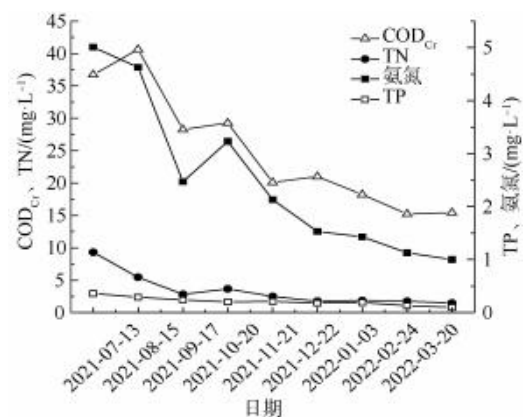


图 7 各水质指标变化

Fig. 7 Indices Changes of Water Quality

2.1.3 水质净化效果讨论

1#水塘治理前水质指标如表 2 所示,各项水质指标全部属于 V 类及劣 V 类水平,表明氨氮、总氮和

有机物含量过高导致了 1#水塘黑臭。图 6、图 7 表明 1#水塘水质净化效果良好。SD 与 DO 指标持续升高,氮、磷与有机质指标持续降低,表明在治理期已将大部分水体污染物削减完成,进入维护期后,水体污染物继续大幅减少。在较封闭的黑臭小微水塘中,污染物去除主要有以下 3 种方式:(1)生活区雨水径流污染物大部分被生物滤墙截留,然后通过生物填料过滤及生化作用去除;(2)水生植物自身的吸收同化以及水生动物的捕食;(3)水下森林中水生植物根部微生物的生化作用。靠近塘边的居民生活区域大部分地面被硬化,下雨天雨水冲刷房屋及地面很容易形成径流污染。1#水塘靠岸边修建的生物滤墙带可以截住雨水径流污染,那么雨水径流污染对靠居民生活区水塘水质影响要比没有修建生物滤墙带的水塘水质影响要小的多。无生物滤墙带水塘靠居民生活区水质明显在下雨后要差于 1#水塘靠居民生活区水质,有时雨后两天出现蓝藻爆发现象,水塘靠居民生活区 SD 显著降低。雨后 1#水塘靠居民生活区水质明显也要比靠农田区的挺水植物带区域水质要好,这表明生物滤墙截污效果要比挺水植物带截污效果要好。由表 5 可知,一体化设备处理后排入生物滤墙的污水能被净化出水水质达到广东省《农村生活污水处理排放标准》(DB 44/2208—2019)一级标准。水下森林系统也发挥了净化水质的重要作用,沉、浮、挺水生植物形成立体式、全方位的净化体系。这些植物的筛选主要是依据植物的生长状况及对水塘水中营养盐浓度的影响两个方面,选择成活率高、生物量大及对营养盐吸收高的植物种类。当然,水塘水体生态系统也要有水生动物的存在,选择一些喜食藻类的水生动物品种投放塘中,如微生物食藻虫及水螺、水蚌等。塘底沉水植物以苦草、金鱼藻为主,其种植密度可依据实际情况定,黑臭程度严重,种植密度可以适当提高,苦草、金鱼藻成活率高,其种植方式可以抛种、插种等。比较目前市面上流行的人工水草,苦草、金鱼藻可以自身吸收营养盐,而人工水草不能,且人工水草容易造成二次污染,不具有苦草、金鱼藻所形成的水下森林景观,而且人工水草对底泥污染物的净化作用弱于苦草、金鱼藻。

1#水塘治理效果表明,生物滤墙-水下森林耦合技术使水体 SD 和 DO 显著提升,使水体 COD_{Cr}、

氨氮、TN、TP 显著降低。1#水塘在治理维护期,水体水质指标得到持续提升,水质指标 SD 提高到了近 7 倍,DO 提高了 10.4 倍,COD_{Cr} 降低了 67.05%,氨氮降低了 83.36%,TN 降低了 84.23%,TP 降低了 72.22%。本工程基于生物滤墙-水下森林耦合技术对小微封闭黑臭水体治理取得较好净化效果。除去治理阶段水塘水质由于降雨的原因出现一定的波动,总的来看 1#水塘水质指标 DO、COD_{Cr}、氨氮、TN、TP 从地表水 V 类及劣 V 类水体提升至地表水 III 类及以上,充分表明生物滤墙-水下森林耦合技术能治理好相对封闭的小微黑臭水体,使其水质得到大幅改善,且能长期维持水体水质的稳定。

2.2 底泥指标变化及治理效果

对 1#水塘底泥治理前后取样检测,底泥泥质检测平均值,如表 8 所示。

表 8 治理前、后水塘底泥泥质平均值
Tab. 8 Average Sediment Quality of the Pond before and after Remediation

项目	治理前	治理后	维护期
有机质	7.98%	4.83%	3.38%
TN/(mg·kg ⁻¹)	5 885	1 224	948
TP/(mg·kg ⁻¹)	2 435	571	301

本文采用有机指数、有机氮指数及污染指数法评价水塘底泥^[23-25]。应用有机指数法对底泥富营养化程度进行评价,其计算如式(1),其中有机碳指数计算如式(2),其中有机氮指数计算如式(3)。

$$O_i = O_c O_N \quad (1)$$

$$O_c = O_M \times 100\% / 1.724 \quad (2)$$

$$O_N = 0.95 \times T_N \times 100\% \quad (3)$$

其中: O_i ——有机指数;

O_c ——有机碳指数;

O_N ——有机氮指数;

O_M ——底泥有机质质量分数;

T_N ——TN 质量分数,mg/kg。

水塘底泥有机污染指数经生物滤墙-水底森林耦合工艺降低至 0.18,有效降低 93.05%,属轻度污染类型,根据有机指数评价标准,如表 9 所示,很明显该耦合技术对 1#水塘底泥有机质和总氮都有较好改善。

对底泥 TP 进行评价,利用污染指数(P_i),其计算式如式(4)^[23-25]。

$$P_i = C_i / C_{0i} \quad (4)$$

表 9 河湖底泥评价标准
Tab. 9 Evaluation Criteria for River and Lake Sediments

项目	I	II	III	IV	治理前	治理后	维护期
有机指数	<0.05	0.05~0.20	0.20~0.50	≥0.50	2.59	0.33	0.18
有机氮指数	<0.033	0.033~0.066	0.066~0.133	≥0.133	0.559	0.116	0.090
污染程度	清洁	轻度	中度	重度	重度	中度	中度

其中: C_i ——为样品底泥中营养物 i 的实测浓度值,单位为 mg/kg;

C_{0i} ——为环境评价标准值,一般取 $C_{0i} = 440$ mg/kg。

本文分级标准为:无污染 $P_i < 0.5$,轻度污染为 $0.5 < P_i \leq 1.0$,中度污染为 $1.0 < P_i \leq 1.5$,重度污染 $P_i \geq 1.5$ 。水塘治理前底泥 TP 的 P_i 值为 5.53,为重度污染,后经生物滤墙-水下森林耦合工艺,有效降低 87.63%,为轻度污染,表明该耦合技术较好改善了底泥 TP。

2.3 经济技术指标分析

生物滤墙-水下森林耦合技术可实现优势互补,生物滤墙主要用来截住外源污染,水下森林主要用来净化内源污染。本 1#水塘工程主要投资为:水生植物费用为 3.36 万元,生物滤墙费用为 6.25 万元,一体化设备费为 10.0 万元。运行维护费为:一体化设备运行维护费用为处理污水 1.0 元/ m^3 ,人工费 4.8 万元/年。该项目 1#水塘总投资为 71.75 万元,单位面积水体投资为 120.0 元。

3 结论与建议

(1)生物滤墙-水下森林耦合技术能大幅提升水体 SD、DO,降低 COD_{Cr} 、氨氮、TN 及 TP。在约 3 个月治理期后,1#水塘 SD 提高了 67.27%,DO 提高了 8.5 倍, COD_{Cr} 、氨氮、TN 和 TP 各自降低 39.61%、58.90%、69.74%和 33.33%。在约 6 个月维护期后,SD 提高 7 倍,DO 提高 10.4 倍, COD_{Cr} 、氨氮、TN 和 TP 各自降低 67.05%、83.36%、84.23%和 72.22%。可见治理效果显著,黑臭水塘水质通过生物滤墙-水下森林耦合技术得到有效提升和修复。

(2)塘底底泥有机指数和污染指数经处理后分别降低 93.05%和 87.63%,其中塘底底泥 TP 污染指数类型由重污染向轻度污染转变,该耦合工艺改善底泥效果较好。

(3)“生物滤墙+水下森林”耦合技术能使农村小微黑臭水体(劣 V 类水体)水质提升至地表水 III 类及以上,其中生物滤墙沿水体靠近居民活动区域

边沿铺设,具有解决填料清洗不便的技术问题的特征。该耦合技术在消除相对封闭水体的黑臭等污染治理中具有参考借鉴价值。本文对工程治理研究还不够深入,建议下一步优化生物滤墙的最佳粒径分布及沉、浮、挺植物的最佳搭配与布局。

参考文献

[1] 王莉,刘萌硕,李亭亭,等. 河南省农村黑臭水体污染现状及污染特征研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 52-59.
WANG L, LIU M S, LI T T, et al. Study on pollution status and characteristics of black and odorous water in rural areas of Henan province[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 52-59.

[2] 杨茸茸,周军,吴雷,等. 可渗透反应墙技术中反应介质的研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4579-4587.
YANG R R, ZHOU J, WU L, et al. Research progress of reaction mediums in permeable reaction barrier technology[J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4579-4587.

[3] 李传维,丁浩然,陈成,等. 可渗透反应墙技术在固废填埋场渗滤液处理中的应用[J]. 环境工程学报, 2023, 17(2): 625-634.
LI C W, DING H R, CHEN C, et al. Application of permeable reactive barrier technology in treatment of solid waste landfill leachate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(2): 625-634.

[4] 吕健,李璐璐,梁元妹,等. “五色时空·水下森林氧吧”技术在城市湖泊生态修复的实践——以广东肇庆七星岩景区里湖生态修复为例[J]. 环境生态学, 2020, 2(6): 79-84.
LÜ J, LI L L, LIANG Y M, et al. Application of 5SSK-UF·OB ecological technology in urban lakes—An example in Lihu Lake of Qixingyan[J]. Environmental Ecology, 2020, 2(6): 79-84.

[5] 郑冰清,孙彩云,符洪铭,等. 沉水植物水生态修复工程的水-气界面 CO_2 通量及生态效益研究——以武汉东湖为例[J]. 环境科学学报, 2024, 44(5): 496-506.
ZHENG B Q, SUN C Y, FU H M, et al. Ecological restoration of submerged aquatic macrophytes can reduce CO_2 emission and increase ecological benefits: A case study of Lake Donghu, Wuhan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(5): 496-506.

[6] 刘岚昕,于素晗,李娜,等. 内电解-沉水植物-微生物耦合

- 体系处理黑臭水体效能及机制研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(6):796-804.
- LIU L X, YU S H, LI N, et al. Study on treatment efficiency and mechanism of black-odorous water by coupling system of internal electrolysis-submerged plant-microbe[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(6):796-804.
- [7] 吴航, 韩惠莹, 支永威, 等. 基于开放性围栏研究洪湖退垸还湖区沉水植物生长限制因子[J]. 植物科学学报, 2023, 41(5): 583-593.
- WU H, HAN H Y, ZHI Y W, et al. Enclosure study on the limiting factors of submerged macrophyte growth in restored sites of Honghu Lake[J]. Plant Science Journal, 2023, 41(5): 583-593.
- [8] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《农村黑臭水体治理工作指南》的通知[EB/OL]. (2023-12-26) [2024-08-27]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6931541.htm.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice on Issuing the *Guidelines for the Treatment of Black and Stinky Water Bodies in Rural Areas*[EB/OL]. (2023-12-26) [2024-08-27]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6931541.htm.
- [9] 李裕元, 李希, 孟岑, 等. 我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2):185-197.
- LI Y Y, LI X, MENG C, et al. Analysis of agricultural non-point source pollution issue in waters and technical strategy of comprehensive prevention and control in rural area of China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(2): 185-197.
- [10] 李亭亭. 河南省典型地区农村黑臭水体污染特征及治理技术比选研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- LI T T. Study on pollution characteristics and selection treatment technology of rural black and odorous water body in typical areas of Henan Province[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [11] 王莉, 姜惠源, 李亭亭, 等. 河南农村黑臭水体及影响因素调查与分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 1-5, 12.
- WANG L, JIANG H Y, LI T T, et al. Investigation and analysis of the present situation of water body in rural areas of Henan Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(3): 1-5, 12.
- [12] 王慧娟, 陈威, 王家乐, 等. 华中地区某黑臭水体整治工程案例[J]. 净水技术, 2020, 39(6):49-53.
- WANG H J, CHEN W, WANG J L, et al. Proposal of remediation project for black and odorous water body in central China Area[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(6): 49-53.
- [13] 孙磊, 马巍, 吴金海, 等. 城市黑臭水体治理进展及水利措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(8): 23-28.
- SUN L, MA W, WU J H, et al. Research on the progress of urban black-odorous water governance and water conservancy measures[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(8): 23-28.
- [14] 谭伟, 纪发达, 李明, 等. 安徽省农村黑臭水体成因及治理对策研究[J]. 环境科技, 2023, 36(6): 70-74.
- TAN W, JI F D, LI M, et al. Research on the causes and control measures of black and odorous water bodies in rural areas of Anhui Province[J]. Environmental Science and Technology, 2023, 36(6): 70-74.
- [15] 胡思雨, 李松, 宋广清, 等. 晋城市农村黑臭水体成因及污染因子相关性研究[J]. 给水排水, 2024, 50(2): 57-64.
- HU S Y, LI S, SONG G Q, et al. Analyzing the cause and pollution factor correlation of rural black and odorous water bodies in Jincheng city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(2): 57-64.
- [16] 王子健, 胡婧, 张晨, 等. 景观湖泊黑臭水体生态修复措施和效果——以武汉市金湖生态修复工程为例[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1702-1712.
- WANG Z J, HU J, ZHANG C, et al. Ecological restoration measures and effects of black and odorous water bodies in landscape lakes—Taking Jinhu ecological restoration project in Wuhan City as an example[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(5): 1702-1712.
- [17] 张伟, 叶新霞. 生态滤墙与仿生水草复合提升入库河段水质技术应用[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 126-130, 137.
- ZHANG W, YE X X. Application of ecological filter wall and bionic water grass for improvement of water quality of inflow reach of the reservoir[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 126-130, 137.
- [18] 马越. 滤墙/AF/BAF/复合流人工湿地用于黑臭水体治理[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 76-81.
- MA Y. Black-odorous water governance by a combined process of fabricated PB, AF, BAF and ICW[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 76-81.
- [19] 于金旗, 张鹤清, 孙磊, 等. 超磁-水下森林耦合工艺在景观水体修复中的应用[J]. 给水排水, 2022, 48(3): 62-67.
- YU J Q, ZHANG H Q, SUN L, et al. Application of coupling technology of magnetic separation technology and underwater forest in landscape water restoration[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(3): 62-67.
- [20] 商放泽, 许亮, 郎琪, 等. 基于新型光催化氧化的小微黑臭水体治理研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 103-112.
- SHANG F Z, XU L, LANG Q, et al. Treatment of small and

- black-smelly water using a new photocatalytic oxidation technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 103–112.
- [21] 李媛莉. 生物滤墙技术在黑臭水体治理中的性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
LI Y L. Bio-filter barrier technology in the treatment of black and smelly water[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [22] 孟环. 圆明园西部水域“水下森林”系统水生态监测与健康评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
MENG H. Water ecological monitoring and health evaluation of the "Underwater Forest" system in the western waters of the Old Summer Palace[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [23] 王莉君, 吴思麟. 南京黑臭河道底泥污染特征及评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 117–122.
WANG L J, WU S L. Characteristics and evaluation of sediment pollution in black and odorous rivers in Nanjing[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(3): 117–122.
- [24] 李艺, 吕玲钥, 徐毅, 等. 沂沭河底泥中污染物空间分布特征及评价[J]. 净水技术, 2021, 40(1): 101–106, 128.
LI Y, LÜ L Y, XU Y, et al. Spatial distribution characteristics and evaluation of pollutants in sediments of Yishu River[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(1): 101–106, 128.
- [25] 张沐, 任增谊, 张曼, 等. 外秦淮河底泥污染及疏浚效果[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3945–3956.
ZHANG M, REN Z Y, ZHANG M, et al. Bottom mud pollution and dredging effect of the outer Qinhuai River[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(7): 3945–3956.
-
- (上接第 51 页)
- [9] TSOU K, DUAN Y, PARKS A, et al. Per- and polyfluoroalkyl substance release from aqueous film-forming foam impacted solids exposed to stormwater and saltwater[J]. *ACS ES&T Water*, 2024, 4(2): 661–668.
- [10] TAKAGI S, ADACHI F, MIYANO K, et al. Fate of perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanoate in drinking water treatment processes[J]. *Water Research*, 2011, 45(13): 3925–3932.
- [11] 黄小卫, 郎丽媚, 祝顺波. 活性炭再生技术研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(5): 108–110.
HUANG X W, LANG L M, ZHU S B. Study on activated carbon regeneration technology[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(5): 108–110.
- [12] 董文龙. 几种活性炭再生方法的比较[J]. 湖北林业科技, 2012, 12(2): 63–65.
DONG W L. Comparaison on regeneration method of several activated carbon[J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2012, 12(2): 63–65.
- [13] XINYI Y, GISUNG K, IHNSUP H, et al. High efficiency regeneration performance of exhausted activated carbon by superheated steam and comparison with conventional chemical regeneration method[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(5): 2058–2067.
- [14] 邹吕熙, 王燕, 陈亚丽, 等. 利用过热蒸汽再生不同吸附饱和度的活性炭[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2668–2676.
ZOU L X, WANG Y, CHEN Y L, et al. Regeneration of different adsorption saturated-activated carbon with superheated steam[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(10): 2668–2676.
- [15] BOEHM H P. Surface oxides on carbon and their analysis: A critical assessment[J]. *Carbon*, 2002, 40(2): 145–149.
- [16] MONTES-MORÁN M A, SUÁREZ D, MENÉNDEZ J A, et al. On the nature of basic sites on carbon surfaces: An overview[J]. *Carbon*, 2004, 42(7): 1219–1225.
- [17] ZHI Y, LIU J X. Adsorption of perfluoroalkyl acids by carbonaceous adsorbents: Effect of carbon surface chemistry[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 202: 168–176.
- [18] 肖静, 许秦坤, 许建红, 等. 磁性颗粒活性炭对 PFOA 的吸附性能研究[J]. 离子交换与吸附, 2019, 35(4): 363–374.
XIAO J, XU Q K, XU J H, et al. Preparation of magnetic particles activated carbon and its adsorption properties for PFOA[J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2019, 35(4): 363–374.
- [19] SINI K, BOURGEOIS D, IDOUHAR M, et al. Metal-organic framework sorbents for the removal of perfluorinated compounds in an aqueous environment[J]. *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(22): 17889–17894.
- [20] 孙博, 马军. 水中全氟化合物的活性炭吸附特性研究[J]. 给水排水, 2017, 53(2): 14–18.
SUN B, MA J. Study on adsorption characteristics of perfluorinated compounds on activated carbon[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(2): 14–18.
- [21] FAGBAYIGBO B O, OPEOLU B O, FATOKI O S, et al. Removal of PFOA and PFOS from aqueous solutions using activated carbon produced from Vitis vinifera leaf litter[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(13): 13107–13120.