

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.017

城市小区分散式灰水处理系统应用实例

聂芳^{1,2}, 张赛辉^{1,3}, 林晓敏^{1,2}, 龙华运^{1,3}, 刘智勇¹, 张茜¹,
蒋剑虹⁴, 樊佳⁴, 罗轩麒¹

(1. 湖南恒凯环保科技投资有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 湖南省立体生态创新建筑工程技术中心, 湖南长沙 410000; 3. 长沙市难降解工业废水处理技术创新中心, 湖南长沙 410000; 4. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南长沙 410000)

摘要: 以长沙市某小区17户居民灰水处理项目为例,采用水解酸化+A²O+MBR复合工艺技术构建分散式一体化污水处理系统,并分析了该系统2024年的运行效果、建设及运维成本。结果表明,系统对COD、BOD₅、SS、氨氮、总氮和总磷的平均去除率分别为94.02%、97.71%、96.06%、94.97%、79.49%和96.29%,出水水质可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,直接回用于小区园林绿化,总固碳量为2.85 tCO₂/a。与传统处理模式相比,该项目建设成本降低约30%,运维成本降低约15.6%。

关键词: 生活灰水; 分散式一体化处理系统; 水解酸化+A²O+MBR复合工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0117-06

Project Case of Decentralized Greywater Treatment in Urban Communities

NIE Fang^{1,2}, ZHANG Saihui^{1,3}, LIN Xiaomin^{1,2}, LONG Huayun^{1,3}, LIU Zhiyong¹,
ZHANG Xi¹, JIANG Jianhong⁴, FAN Jia⁴, LUO Xuanqi¹

(1. Hunan Hengkai Environmental Protection Technology Investment Co. Ltd., Changsha 410000, China; 2. Hunan Future Vertical Eco-building Engineering Technology Center, Changsha 410000, China; 3. Changsha Technology Innovation Center for Refractory Industrial Wastewater Treatment, Changsha 410000, China; 4. Machinery International Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: This study presents a decentralized integrated greywater treatment system constructed for 17 households in a residential community of Changsha. The system employs a hydrolysis acidification+A²O+MBR hybrid process and evaluates its operational performance in 2024 along with the associated construction and maintenance costs. Results demonstrate stable treatment effects and significant economic advantages, providing practical insights for urban residential greywater recycling. Results showed that the system achieved annual average removal rates of 94.02% for COD, 97.71% for BOD₅, 96.06% for SS, 94.97% for ammonia nitrogen, 79.49% for total nitrogen, and 96.29% for total phosphorus, consistently meeting the first level A standards of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant*(GB 18918-2002). The treated effluent was directly reused for landscape irrigation within

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0118500)

通信作者: 聂芳 E-mail: 870950803@qq.com

the community, contributing to a total carbon sequestration of 2.85 tCO₂/a. Compared with conventional approaches, this project reduced construction costs by approximately 30% and operation and maintenance expenses by around 15.6%.

Keywords: domestic greywater; decentralized integrated treatment system; hydrolysis acidification+A²O+MBR hybrid process

城市小区居民生活污水分为灰水和黑水两种,灰水是居民生活过程中产生的洗浴、洗衣、厨房污水等杂用水,黑水主要是居民厕所排出的粪污^[1-2]。2023年我国城市污水处理量达到642.7亿m³,相较于上一年度增长4.2%^[3],灰水在生活污水中占比达到13%~80%^[4-6],但这些灰水的资源化利用率却不足15%^[7]。国家《“十四五”节水型社会建设规划》提到,要大力推广建筑灰水、雨水等非常规水源的利用。经过源分离处理后的灰水污染物浓度较低,更适合采用分散式系统处理后就地资源化利用^[8],而且分散式系统具有构建完整的“源头减量-过程控制-末端回用”水资源循环利用闭环等优势^[9]。

长沙某小区总建筑面积85万m²,其日均灰水产量约2000m³。选取该小区作为研究案例,全面评估分散式一体化灰水处理系统的运行效果及成本,可为今后城市小区的灰水处理提供可复制的工程经验。

1 项目概况

该项目位于长沙市某小区示范楼栋地下室,占地面积约100m²。以中间单元17户居民为示范点,根据调研,平均居住人口为3.5人/户,该单元人口累计60人。湖南省《用水定额》(DB43/T 388—2020)中的城市居民生活用水定额为160L/(人·d),灰水排放系数为0.7,结合季节性最高修正系数1.3进行测算,设计灰水处理量为12m³/d。所收集处理的灰水主要来自厨房洗涤废水、阳台洗衣机排水以及浴室洗浴用水。

1.1 工艺流程

采用分散式一体化灰水处理系统,污水处理工艺为“隔油池→调节池→气浮池→水解酸化+A²O+MBR→紫外消毒→出水”,出水回用于园林绿化灌溉。该系统产泥量少,上清液回流至一体化设备调节段进行循环处理,剩余污泥则定期抽吸,经自然风干、灭菌后,用于该小区园林绿化土壤改良,实现减量化与资源化。工艺流程如图1所示。

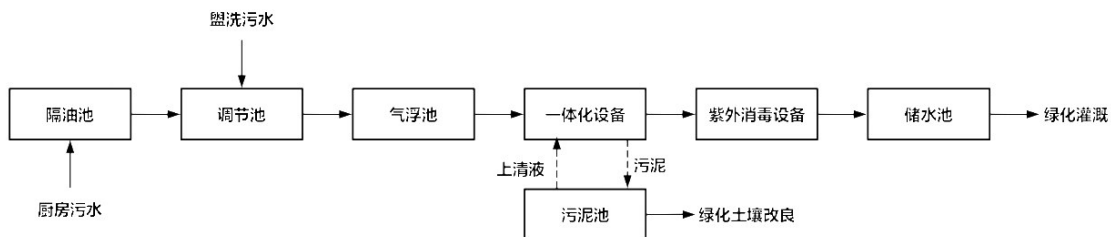


图1 小区灰水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of urban residential greywater treatment process

1.2 主要处理单元及设计参数

该灰水处理系统各主要处理单元均严格遵循现行国家及行业标准进行设计,包括《建筑中水设计标准》(GB 50336—2018)、《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)、《膜生物反应器城镇污水处理工艺设计规程》(T/CECS 152—2017)和相关紫外消毒技术规范等。各单元在满足技术指标的同时,充分考虑实际工程条件,确保系统高效稳定运行。

① 隔油池

隔油池作为预处理单元,设计依据居民厨房污水排水定额为30~50L/(人·d),结合时变化系数(3)综合测算确定。隔油池主体材质为碳钢,峰值处理规模为0.5m³/h,有效容积为1.0m³,外形尺寸为1.5m×0.6m×1.2m,水力停留时间为2h,表面水力负荷为0.56m³/(m²·h)。采用间距为50mm的平行板,配置运行速度为0.5m/min的刮板,并设置每周1次人工清渣。

② 调节池

调节池作为预处理与生化单元间的流量平衡枢纽,通过优化参数设计确保出水水质波动幅度稳定在10%以内,为后续气浮处理单元提供连续稳定的进水条件。调节池为碳钢立式圆形结构,设计处理规模为12 m³/d,有效容积为4 m³,直径为1.8 m,有效水深为1.8 m(总高为2.0 m),水力停留时间为24 h。配套安装叶轮直径500 mm的机械搅拌装置,并设置3:1的气水比控制系统。

③ 气浮池

气浮池作为关键预处理单元,主要承担隔油池出水中乳化油及微细悬浮物(SS)的高效分离功能,以显著降低后续生化处理单元的有机负荷。气浮池为碳钢结构,设计处理规模为12 m³/d,有效容积为0.3 m³,外形尺寸为1.2 m×0.8 m×1.8 m,有效水深为1.5 m,水力停留时间为30 min,表面负荷为1.8 m³/(m²·h)。系统配置30%回流比的溶气水装置,气固比控制在0.03,产生气泡粒径≤35 μm。配套0.5 m/min的旋转式刮渣机实现连续排渣,投加15 mg/L聚合氯化铝(PAC)和0.8 mg/L聚丙烯酰胺(PAM),通过自动控制系统实现6 h周期排泥,确保系统稳定运行。

④ 一体化处理设备

一体化处理设备作为灰水处理核心单元,针对灰水低C/N比特性,通过“水解酸化+A²O+MBR”组合工艺实现高效处理,并配备智能控制系统实现全流程自动化运行。设备为碳钢材质并施以环氧防腐涂层,外形尺寸4 m×2 m×2 m,设计处理规模为12 m³/d,总水力停留时间为14 h(水解酸化段6 h、生化段8 h);生化系统控制污泥浓度(MLSS)为4 000 mg/L,好氧段溶解氧维持在3 mg/L,设置200%的硝化液回流比,污泥龄为15 d。MBR膜组件选用聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜(孔径为0.1 μm),设计膜通量为10 L/(m²·h),曝气强度为0.8 m³/(m²·h)。设置在线加药装置,按50~100 mg/L投加乙酸钠以补充碳源。膜组维护采用每周在线清洗结合每半年化学清洗的方案,确保系统长期稳定运行。

⑤ 紫外消毒

紫外消毒装置作为分散式灰水处理的终端保障单元,确保出水水质满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)的园林绿化灌溉卫生学要求。该装置为碳钢材质,整体尺寸为1.35 m×0.32 m×0.48 m,处理规模为12 m³/d。系统运

行水力停留时间为15 s,水力负荷为0.25 m³/(m²·s),配置254 nm波长低压汞灯,有效紫外剂量为40 mJ/cm²,确保对粪大肠菌群的灭活率≥99.9%。

2 固碳量计算方法

本项目固碳量计算基于COD去除量转化为碳质量的路径,按照联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的碳核算模型^[10-11],分为直接固碳(有机物降解)与间接减碳(灰水回用)。其中,碳转化系数取0.375,自来水生产的碳排放因子取0.34 kgCO₂/m³。

3 运行效果分析

3.1 进水量

分析2024年进水量监测数据(见图2)可知,月均进水量为7.12~10.02 m³/d,年均值为8.49 m³/d,进水负荷的季节性波动十分明显。夏季(6月—8月),高温天数多、洗澡洗衣频繁,月均水量高于9.83 m³/d,较年均值高出15.8%,且灰水量与气温呈显著正相关(R²约0.72);冬季(12月—2月)因低温环境影响,月均水量低于7.46 m³/d,较年均值低12.1%。

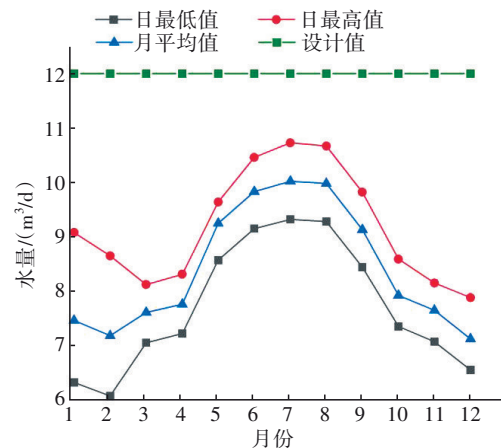


图2 2024年进水量的变化

Fig.2 Variation of water inflow in 2024

3.2 进、出水水质

灰水来自17户居民的厨房洗涤污水、浴室洗浴污水及阳台洗衣机洗衣污水。灰水水质受气候影响显著,夏季(6月—8月)受高温环境影响,居民洗衣及洗浴频次增加,导致水中COD、总磷、SS等指标浓度升高^[12]。尽管进水水质随季节波动较大,但处理系统整体运行稳定,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一

级A标准,对COD、总氮、总磷的去除率分别达到94.02%、79.49%、96.29%。实际进、出水水质见表1。

表1 实际进、出水水质

Tab.1 Actual influent and effluent quality

项目	COD	BOD ₅	SS	氨氮	总氮	总磷
进水范围/ (mg/L)	300~ 600	150~ 300	110~ 220	30~50	40~ 70	5~12
进水均值/ (mg/L)	438.5	215.9	267.7	31.3	50.5	9.3
出水范围/ (mg/L)	15~40	3~7	4~10	1~3	9~12	0.2~ 0.4
出水均值/ (mg/L)	26.1	4.9	6.4	1.6	10.2	0.3
出水标准/ (mg/L)	≤50	≤10	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5
去除率 均值/%	94.02	97.71	96.06	94.97	79.49	96.29

3.3 关键污染物指标去除的调控机制解析

3.3.1 BOD₅/COD(B/C)对COD去除的调控作用

COD去除效率与进水B/C具有正相关性,见图3。B/C为0.47~0.52,年均值为0.49;当B/C>0.5时,COD去除率均值达(94.27±0.07)%(*n*=3),较B/C<0.5时[(93.82±0.25)%]提升0.45个百分点。3月可能因为惰性有机物比例增加,B/C值为全年最低。通过工艺设计优化,夏季高B/C时段,气浮工艺侧重去除胶体COD,降低生物段负荷;A²O+MBR依托高温下增强的微生物代谢能力,活性污泥的比耗氧速率(SOUR)提升25%,主导降解溶解性有机物。冬季低B/C时段,气浮强化絮凝作用去除悬浮COD,补偿生物活性的下降;A²O+MBR通过延长水力停留时间和投加高效菌剂,维持系统的稳定性。

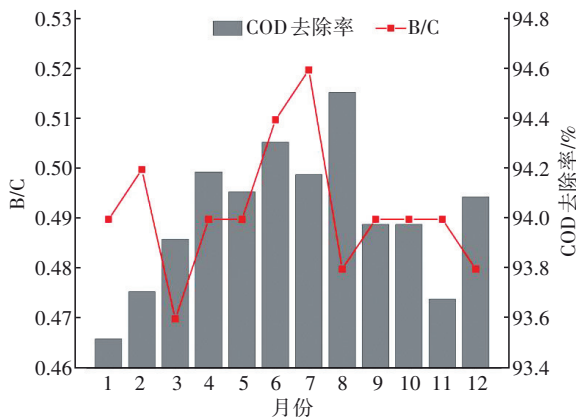


图3 B/C对COD去除率的影响

Fig.3 Effect of B/C on COD removal rate

3.3.2 C/N对总氮去除的调控作用

总氮去除率与C/N呈显著负相关,见图4。C/N为8.46~9.11,年均值为8.68;夏季6月—8月为低值区,C/N≤8.5;冬季12月—1月为高值区,C/N≥8.86。夏季当C/N<8.5,系统内易降解碳源占比上升(B/C同步提升),为反硝化提供了更高效的电子供体,总氮去除率均值达到(81.61±0.07)%(*n*=3),较C/N>8.8时提升3.89个百分点。这表明较低的C/N有利于反硝化菌群利用碳源进行脱氮,而高C/N时可能存在碳源竞争或碳源结构不合理,导致脱氮效率略微下降。

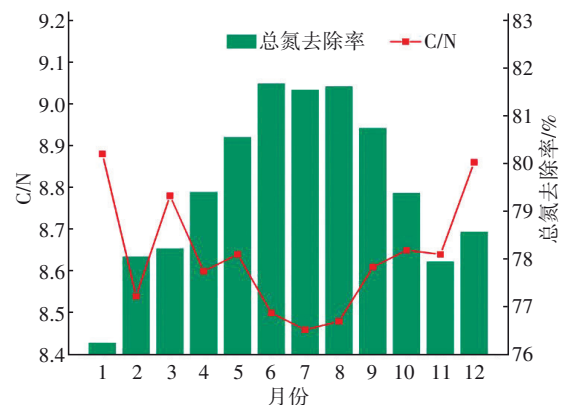


图4 C/N对总氮去除率的影响

Fig.4 Effect of C/N on total nitrogen removal rate

4 工程效益分析

4.1 经济效益

全生命周期成本分析显示,本项目较传统集中处理工艺可节省超30%管网建设费用,运维成本降低15.6%,在建设运营阶段展现显著经济性。

本项目设备投资(含安装)约25万元,利用地下车库修建中水处理间,叠加土建及管道费用,总建设成本控制在约30万元。相比之下,传统模式新建小区接入市政管网,仅300m管道投资就高达36~54万元,若增设提升泵站,总成本将升至41~64万元。分散式系统的经济性主要源于对长距离管网和泵站的替代,尤其适用于市政管网未覆盖或地形复杂的区域^[13]。

该系统配备智能化控制系统,运维便捷。灰水处理间设于源水地下室,采用重力流输送,节省设备与能耗。经测算,运维成本为5951元/a(含电费1051元、药剂及污泥处置费900元、MBR膜更换摊销费4000元)。处理后的再生水回用于绿化灌溉,

节水效益为6 132元/a,可覆盖运维成本。同等规模传统集中式处理厂的处理成本为2.0~3.5元/m³[14],运行费用约7 052元/a且无回用收益,本系统运维成本降低15.6%。分散式系统通过缩短输送路径、减少设备配置及优化运维模式,展现出全生命周期成本优势。具体成本分析见表2。

表2 建设及运维成本分析

Tab.2 Analysis of construction and operation maintenance costs

项目	分散式灰水处理系统	传统集中式污水处理系统
设备投资/万元	25	6.8~11.0
基础及场地建设费用/万元	1~2	15.0~22.5
管网建设费用/万元	<1	36~54(300 m管网)
泵站建设费用/万元	0	5~10(视地形高差)
运维费用/(元/m ³)	2.72	2.0~3.5(含管网维护)
总成本/万元	27~30	63~98

4.2 环境效益

本系统通过污染物高效去除与资源循环利用,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。灰水处理后就地回用于小区园林绿化灌溉,污泥回用于小区园林绿化土壤改良,实现“减排-固碳-回用”三重协同效益。

① 污染物削减效能

本灰水处理系统对典型污染物的削减效果显著,统计结果见表3,污泥与灰水的资源化回用进一步实现污染物闭环管理。

表3 主要污染物削减量统计

Tab.3 Statistics of major pollutants reduction

指标	进水负荷/(t/a)	出水负荷/(t/a)	削减量/(t/a)	法定污染物当量值*/kg	环境效益/(当量/a)
COD	1.344	0.079	1.265	1.0	1 265
BOD ₅	0.662	0.015	0.647	0.5	1 294
SS	0.495	0.019	0.476	4.0	119
氨氮	0.096	0.005	0.091	0.8	114
总氮	0.155	0.031	0.124	0.8	155
总磷	0.028	0.001	0.027	0.2	108

注: *污染物当量值来自《中华人民共和国环境保护税法》。

② 固碳效益与碳中和贡献

分散式灰水处理及资源化利用具有显著的“碳中和”潜力。本系统通过“水解酸化+A²O+MBR”工艺强化有机碳截存1.74 tCO₂/a,结合节水替代减排

1.04 tCO₂/a,污泥土壤增汇0.07 tCO₂/a,实现总固碳2.85 tCO₂/a,整个处理流程无二次污染,契合国家“双碳”目标,环境效益显著。

4.3 社会效益

本项目能让小区居民近距离参与灰水处理及再循环利用过程,社区整体节水意识提升,环保理念得到进一步强化。本项目采用的集成一体化设计思路,精准契合绿色建筑与低碳社区建设需求,若推广应用,一方面能够减轻周边市政污水处理厂的处理负荷,另一方面也能有效缓解城市基础设施运行压力,为城市可持续发展提供有力支撑。

5 结论

在城市小区分散式灰水处理过程中,采用“水解酸化+A²O+MBR”复合工艺,对COD、氨氮和总磷等关键污染物的平均去除率可达到94%以上,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,处理后出水经检测完全满足小区空中庭院及地面园林绿化灌溉水质要求。在经济效益方面,建设成本较传统模式降低约30%,运维成本降低15.6%。在环境效益方面,可削减污染物量:COD为1.265 t/a、BOD₅为0.647 t/a、SS为0.476 t/a、氨氮为0.091 t/a、总氮为0.124 t/a、总磷为0.027 t/a,总固碳量为2.85 tCO₂/a,实现了经济效益与环境效益的协同提升。这种新模式不仅可以有效缓解城市污水管网建设压力,还可通过水资源循环再利用模式实现生态价值转化,是践行“无废城市”建设理念、落实“双碳”目标的重要技术路径,为城市小区的灰水处理提供了可复制的工程经验。

参考文献:

- [1] 周华,孙亮,陈旭怀,等.广州市南沙区农村生活污水治理示范性研究[J].中国环保产业,2021(9):35-40.
ZHOU H, SUN L, CHEN X H, et al. Demonstration research on rural domestic sewage treatment in Nansha District, Guangzhou City [J]. China Environmental Protection Industry, 2021(9):35-40(in Chinese).
- [2] 周清时,江静,吕少辉.六合区农村生活污水治理模式与经验探讨[J].资源节约与环保,2022(1):67-69,73.
ZHOU Q S, JIANG J, LÜ S H. Discussion on rural

- domestic sewage treatment modes and experiences in Liuhe District [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2022 (1): 67-69, 73 (in Chinese).
- [3] 住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴(2023) [M]. 北京:中国统计出版社, 2024.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. China Urban-Rural Construction Statistical Yearbook (2023) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024 (in Chinese).
- [4] JAYYOUSI O A. Focused environmental assessment of greywater reuse in Jordan [J]. Environmental Engineering and Policy, 2001, 3:67-73.
- [5] SAMAYAMANTHULA D R, SABARATHINAM C, BHANDARY H. Treatment and effective utilization of greywater[J]. Applied Water Science, 2019, 9:1-12.
- [6] JUAN Y K, CHEN Y, LIN J M. Greywater reuse system design and economic analysis for residential buildings in Taiwan [J]. Water, 2016, 8(11):546.
- [7] 孙琴. 古典园林灰水回用系统的生态化改造路径研究 [C]//重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集(二). 杭州:杭州袁通建设有限公司, 2025:815-818.
SUN Q. Research on ecological transformation paths of greywater reuse systems in classical gardens [C]// Chongqing Big Data and Artificial Intelligence Industry Association. Proceedings of the Academic Symposium on Artificial Intelligence and Economic Engineering Development (Volume 2). Hangzhou: Hangzhou Yuantong Construction Co. Ltd., 2025: 815-818 (in Chinese).
- [8] 李政伟, 马玉涛, 高小涛, 等. 源分离灰水处理技术及应用进展[J]. 工业水处理, 2025, 45(5):12-19.
LI Z W, MA Y T, GAO X T, et al. Progress in treatment technology and application of source separation grey water [J]. Industrial Water Treatment, 2025, 45(5):12-19(in Chinese).
- [9] CHEN Z Q, LIU B F, WANG A J. Toward carbon-neutral water systems: what's next in wastewater and solid waste treatment? [J]. Engineering, 2023, 22: 28-32.
- [10] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines [M]. Switzerland: IPCC, 2019.
- [11] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2021: 45-46.
China Urban Water Association. Carbon Accounting and Emission Reduction Pathways for Urban Water Affairs Systems [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021:45-46(in Chinese).
- [12] 李云, 何志琴, 夏训峰, 等. 国内外灰水处理技术研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2021, 11 (5): 935-941.
LI Y, HE Z Q, XIA X F, et al. Research progress on greywater treatment technology at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5):935-941(in Chinese).
- [13] CHEN R, WANG X C. Cost-benefit evaluation of a decentralized water system for wastewater reuse and environmental protection [J]. Water Science and Technology, 2009, 59(8): 1515-1522.
- [14] 龙凤, 毕粉粉, 董战峰, 等. 城镇污水处理全成本核算和分担机制研究:基于中国333个城镇污水处理厂样本估算 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(10):1333-1339.
LONG F, BI F F, DONG Z F, et al. Study on the total cost accounting and sharing mechanism of municipal sewage treatment: an empirical research of 333 samples in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(10):1333-1339(in Chinese).

作者简介: 聂芳(1994—), 女, 湖南岳阳人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水污染治理。

E-mail: 870950803@qq.com

收稿日期: 2025-05-08

修回日期: 2025-06-18

(编辑: 衣春敏)