

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.18.016

调节/缺氧+接触氧化+高效澄清用于农村生活 污水提标改造

金少格

(上海市嘉定区河道水闸管理所, 上海 201822)

摘要: 针对上海市嘉定区某农村生活污水处理站的出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的二级标准提升至上海市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB31/T 1163—2019)的一级B标准的需求,通过工艺重构实施提标改造:保留原有生物滤池及人工湿地主体结构,新增调节/缺氧池、接触氧化池与高效澄清池,构建“调节/缺氧池+生物滤池+接触氧化池+高效澄清池+人工湿地”处理工艺。改造后系统出水COD、SS、NH₃-N、TN及TP分别为19.0~26.0、5.0~9.0、1.9~3.6、9.6~14.3、0.4~0.7 mg/L,平均去除率分别达到72%、90%、85%、64%和78%,出水水质满足上海市一级B标准。该污水处理站改造后运行稳定高效,脱氮除磷能力增强,对低浓度农村生活污水具有良好的适应能力,且运行费用仅约0.60元/m³。

关键词: 生物滤池; 人工湿地; 农村生活污水; 提标改造; 脱氮除磷

中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)18-0100-06

Application of Equalization/Anoxic, Contact Oxidation, High-efficiency Clarifier for Upgrading of Rural Domestic Sewage Treatment

JIN Shao-ge

(River and Sluice Management Office of Shanghai Jiading District, Shanghai 201822, China)

Abstract: To meet the requirement of upgrading the effluent quality of a rural domestic sewage treatment station in Jiading District of Shanghai, from second level standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant*(GB 18918—2002) to first level B standard of *Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Sewage Treatment Facilities* (DB31/T 1163—2019) in Shanghai, this study implemented a retrofitting process through technological reconfiguration. While retaining the main structures of the original biological filter and constructed wetland, new units, including equalization/anoxic tank, contact oxidation tank, and high-efficiency clarifier, were constructed, forming a treatment process as equalization/anoxic tank, biological filter, contact oxidation tank, high-efficiency clarifier, and constructed wetland. After retrofitting, the effluent concentrations of COD, SS, NH₃-N, TN, and TP were measured as 19.0–26.0 mg/L, 5.0–9.0 mg/L, 1.9–3.6 mg/L, 9.6–14.3 mg/L, and 0.4–0.7 mg/L, respectively. The corresponding average removal rates reached 72%, 90%, 85%, 64%, and 78%, respectively. The effluent quality complied with the first level B standard in Shanghai. The upgrading system demonstrated stable and efficient operation, with enhanced nitrogen and phosphorus removal capabilities. It exhibited strong adaptability to low-concentration rural domestic sewage and maintained

通信作者: 金少格 E-mail: shaogej@163.com

low operational costs of about 0.60 yuan/m³.

Key words: biological filter; constructed wetland; rural domestic sewage; upgrading; nitrogen and phosphorus removal

生物滤池-人工湿地组合工艺处理农村生活污水具有效果稳定、投资较少、管理简单、运行费用较低等特点,因此广泛用于农村生活污水治理实践^[1-4],占上海地区农村生活污水处理工艺的26.6%^[5]。然而,随着上海市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB31/T 1163—2019)的实施^[6],依据排放水域的水环境功能区域划分执行一级A或一级B标准,原设计执行的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准已无法满足新要求,亟须通过工艺优化进行提标改造。目前,针对此类组合工艺的提标改造研究和实践较少,故以上海市嘉定区某农村生活污水处理站为例,探讨有效的提升改造方案。

1 工程概况

上海市嘉定区某农村生活污水处理站始建于2017年,服务范围为非乡村旅游区域(共有农户39户,常住人口380人),设计处理规模为40 m³/d,设计出水水质执行GB 18918—2002二级标准,采用全地埋式生物滤池+人工湿地处理工艺(见图1)。

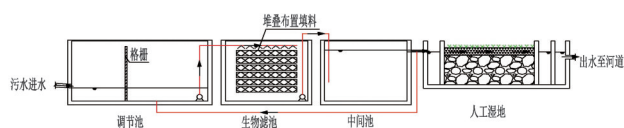


图1 原生物滤池-人工湿地组合工艺流程

Fig.1 Original biofilter-constructed wetland combined process flow

1.1 主要工艺单元存在的问题

① 调节池。原调节池承担缺氧池功能,而农村生活污水量在不同时段差异较大^[7],导致水力停留时间不稳定,再叠加回流水溶解氧较高,因此调节池不能形成严格的缺氧环境,脱氮效果较差。

② 生物滤池。生物滤池结构存在缺陷:原生物滤池采用塑料筐封装填料分层平铺堆叠布置的形式,塑料筐受压后发生变形,容易造成滤料层过水不均匀、跌水不充分,同一滤料层中出现部分区域过水流量大、部分区域无水流干涸现象;另外,布水系统存在缺陷,调节池提升水泵仅通过单一液位决定提升泵的启闭,造成生物滤池布水不稳定、不

均匀,生物滤池的过水处于间歇性流量大和无水流工况,处理效率低。

③ 人工湿地。人工湿地除磷效果受植被-基质-微生物三元耦合作用影响,呈现显著季节性波动,除磷效果不稳定。在植物生长期(5月—8月),植物根系磷吸附容量增大,系统除磷效率提升至65%~78%,而休眠期(11月—2月)因根系吸附能力衰减及沉积物磷释放加剧,效率骤降至28%~35%。

1.2 项目改造关键问题分析

为提高生化处理能力,从进水水质、出水标准、工程投资等方面对项目改造关键问题进行分析。

① 出水标准提高

该农村生活污水处理设施出水水质需从GB 18918—2002的二级标准提升至DB31/T 1163—2019的一级B标准,COD、NH₃-N、TP排放标准分别提升40%、40%、33%,新增SS、TN指标,减去BOD₅指标。改造前后设计进、出水水质见表1。

表1 改造前后设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality before and after upgrading mg·L⁻¹

项目		COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
改造前	设计进水	300	150	—	30	—	5
	设计出水	100	30	—	25	—	3
改造后	设计进水	300	—	150	30	40	5
	设计出水	60	—	20	15	25	2

② 进水有机物浓度低

该污水处理站进水主要由洗涤排水、洗浴排水、卫生间冲洗排水以及厨房排水组成。2022年4月—10月按照上海市一级B标准检测进、出水水质(见表2)。可见,实际进水有机物浓度显著低于设计值,其中进水COD、SS、NH₃-N、TN、TP均值分别低于设计值72.6%、56.6%、35.0%、21.5%、40.0%。进水有机物浓度低主要有3个原因:a. 受化粪池厌氧消化影响,农户污水经化粪池预处理后,污染物浓度大幅降低;b. 管网系统存在雨污混接,服务区域内雨水管网建设滞后导致雨污混接现象普遍,降水期间地表径流侵入污水收集系统,形成明显的稀

释效应;c.受区域水文地质影响,上海地区地下水位较高,存在地下水渗入污水管网问题。

基于进水水质特征,污水处理系统面临碳源不足及C/N比例失衡等突出问题,其中进水COD/TN比值约2.5,属于低碳氮比污水,反硝化脱氮的碳源不足^[8-9]。在此工况下,传统活性污泥法因难以维持微生物正常代谢需求而适用性受限,生物膜法因其生物量高、抗冲击负荷能力强等特点,更适宜作为工艺方案选择,因此仍采用生物滤池工艺。

表2 改造前的进、出水水质

Tab.2 Influent and effluent quality before upgrading $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	实际进水		实际出水	
	水质范围	平均值	水质范围	平均值
COD	71.0~92.0	82.0	45.0~67.0	58.0
SS	58.0~83.0	65.0	10.0~19.0	15.0
$\text{NH}_3\text{-N}$	16.7~21.3	19.5	15.3~17.5	16.4
TN	28.9~32.2	31.4	26.5~30.3	28.0
TP	2.3~2.9	2.6	1.8~2.2	2.1

③ 节约投资

根据属地政府建设类项目投资政策要求,改造类项目应坚持利旧原则,禁止大拆大建,故此次提标改造需要充分利用原有构筑物。

2 改造方案

2.1 改造思路

按照因地制宜、节约投资、稳定高效的原则,完善前置工艺,增设后续工艺,提升COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP、SS去除能力。采用调节/缺氧池+生物滤池+接触氧化池+高效澄清池+人工湿地的提标改造方案,改造调节池、生物滤池、中间池、人工湿地及污泥处置方式,增设除磷系统。

2.1.1 调节池改造

针对预处理缺氧环境不佳的问题,实施双池体功能重构。通过设置隔墙将原调节池改造为集水池和调节/缺氧池并联结构。集水池内设置新格栅去除大颗粒污染物,调节/缺氧池内设置悬浮固体碳源,形成“缓释碳源+生物挂膜载体”复合体系。采用改性棉纱作为悬浮固体碳源,改性棉纱浸泡在污水中被微生物分解利用^[10],实现碳源的缓慢释放和补充,用于解决污水低碳问题,提高碳源的利用效率,同时为微生物提供挂膜载体,强化反硝化脱氮效能^[11-12]。配备智能水位调控装置,池底变频水泵

与液位计联动,实现0~2.5 m水位区间动态平衡,确保缺氧区溶解氧稳定在0.5 mg/L以下,形成高效稳定的缺氧反应环境。

2.1.2 生物滤池改造

针对生物滤池处理效率低的问题,将原堆叠式填料结构改造为5层标准化箱体拼装结构(层高为0.5 m),采用滑轨式不锈钢支架实现单元化维护。

生物滤池改造前后的对比见表3。

表3 生物滤池改造前后对比

Tab.3 Comparison of biological filter before and after upgrading

项目	改造前	改造后
结构形式	塑料筐封装填料分层平铺堆叠,易受压变形	复合型多层级标准化箱体拼装结构,不锈钢支架固定,层高一致
布水系统	单一液位控制水泵启闭,布水不稳定、间歇性流量大或无水流	集成导流设备,均匀布水,消除汇水盲区
填料层特性	滤料层过水不均匀,局部干涸或流量过大	5层功能梯度分布,透水层与吸附层协同作用,过水均匀
微生物分布	无分层调控机制,微生物群落单一	溶解氧和污染物浓度梯度诱导微生物分层繁殖,形成多个代谢功能区
处理效能	间歇性水流导致处理效果不稳定,能效低	连续均匀布水提升滤料有效工作面积约40%,处理效能显著提高

滤层自上而下分别为生态毯过滤层、多孔纤维棉预处理层、火山岩吸附层、陶粒生物膜层、改性生物材料载体层,各级填料框均设导流设备,避免形成集中汇水点,其中生物毯和多孔介质棉具有较好的透水性,可过滤污水中的颗粒物,火山岩、陶粒和改性生物材料均具有孔隙率大、比表面积大的特点,吸附性能良好。滤料对污水中的固体悬浮颗粒、蛋白质、酶等大分子有机物进行拦截,延长微生物与有机物的接触时间,提高填料上生物膜对有机物的去除能力^[13]。依托滤料层间良好的通风布水结构,生物滤池在布水跌落过程中实现高效复氧,促进填料表面及内部微生物的富集生长,形成结构稳定的生物膜系统^[14]。生物膜表层至深层存在的基质和溶解氧浓度梯度,形成生物膜表层好氧、中层缺氧、深层厌氧的微环境,为生物硝化反硝化反应提供场所,在高效降解有机物的同时去除氮。此外,生物滤池不同池深的微生物因溶解氧和污染物浓度变化呈现一定分布规律和分层聚集现象^[15],形

成丰富微生物类群,增强了处理效能。

2.1.3 中间池改造

针对脱氮除磷效果差的问题,通过设置隔墙将原中间池改造为接触氧化池和高效澄清池两个功能区。在接触氧化池底部安装微孔纳米曝气膜组件,提升污水中溶解氧含量,中部填充轻质悬浮填料作为微生物载体,进一步增强硝化反应,促进氨氮去除。高效澄清池内设反应罩,通过加药系统精准实现除磷药剂靶向投加,除磷药剂与污水中的磷酸盐反应形成不溶性沉淀物;反应罩外部配置蜂窝斜管沉淀区加速悬浮物分离,构建“混凝-反应-沉淀”一体化除磷路径,同步提升出水透明度。

2.1.4 人工湿地改造

对人工湿地的渠道、管道进行改建,优化进出水管道布局,采用穿孔布水管实现均匀配水。分层铺设新型缓释除磷填料,构建梯度净化基质层,增强基质吸附性能。种植常绿鸢尾、美人蕉、铜钱草等植物,优化植物配置,利用不同植物根系分布深度和分泌物差异,增强湿地吸附氮磷能力^[16]。

2.1.5 污泥处置方式改造

采用气动提升排泥收集系统。在集水池、接触氧化池及高效澄清池底部布设气提排泥装置,构建分布式污泥收集网络,各工艺单元产生的含水污泥经气提作用输送至集水池内置的泥水分离装置,实现固液分离与污泥减量。

2.2 工艺流程

改造后工艺流程见图2。

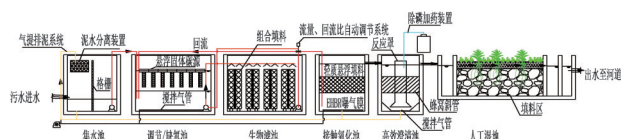


图2 改造后生物滤池-人工湿地组合工艺流程

Fig.2 Modified biofilter-constructed wetland combined process flow

生活污水经管网收集后流入集水池,通过提升泵进入调节/缺氧池发生碳氧化、氨化与反硝化反应。再通过提升泵进入生物滤池和接触氧化池,进一步进行生化反应,去除污染物。污水从接触氧化池自流至高效澄清池,部分回流至调节/缺氧池,通过加药除磷以及蜂窝斜管沉淀后,TP得到有效去除。沉淀出水溢流进入人工湿地,TP和TN进一步去除,出水达标后排放至河道。

2.3 主要构筑物及设计参数

该提标改造项目设计处理规模为40 m³/d,与原处理规模保持一致。土建主体直接利旧,仍为一体式地下组合型钢筋混凝土构筑物,整体尺寸为11.0 m×5.0 m×3.3 m,仅对局部进行改建。

① 改建集水池。将原有调节池25%的池容划为集水池,尺寸为1.1 m×2.1 m×2.9 m,有效水深约2.5 m,总有效容积为6.63 m³。进水端配置间隙6 mm的格栅,池内设提升泵2台(1用1备),单泵规格:Q=3.5 m³/h、H=40 kPa、N=0.37 kW。

② 改建调节/缺氧池。将原有调节池75%的池容划为调节池/缺氧池,尺寸为3.2 m×2.1 m×2.9 m,总有效容积为19.3 m³,有效水深为2.5 m,设计水力停留时间为12~14 h;安装60组浮体悬挂固体碳源,碳源总质量为600 kg。设提升泵2台(1用1备),单泵规格:Q=2.0 m³/h、H=40 kPa、N=0.18 kW。

③ 改造生物滤池。将原有堆叠式填料结构滤池改为5层标准化箱体拼装结构滤池,设计水力停留时间为14 h,表面水力负荷为0.04 m³/(m²·h)。布置5层填料,高为2.5 m,共42组。设出水泵2台(1用1备),单泵规格:Q=2.0 m³/h、H=40 kPa、N=0.18 kW;回流泵1台,单泵规格:Q=1.5 m³/h、H=40 kPa、N=0.18 kW。

④ 改建接触氧化池。将原有中间池63%的池容划为接触氧化池,尺寸为1.6 m×2.7 m×2.9 m,水力停留时间为8.6 h。基于调节/缺氧池的液位,调整接触氧化池的进水回流比为2:1。设曝气泵1台,N=0.3 kW。

⑤ 改建高效澄清池。将原有中间池37%的池容划为高效澄清池,尺寸为1.6 m×1.6 m×2.9 m,表面水力负荷为0.5 m³/(m²·h),采用不锈钢制作内筒作为反应罩,内筒外侧池体中部安装蜂窝斜管。设搅拌气泵1台,N=0.3 kW;除磷加药系统1套,Q=13.8 L/h。

⑥ 改造人工湿地。湿地尺寸为11.0 m×9.7 m,底部铺设新型缓释除磷填料,更换湿地植被品类,种植常绿植物(鸢尾、美人蕉、铜钱草)。

3 改造后运行效果及经济分析

3.1 改造后运行效果

该提标改造工程于2023年3月完工,经过2个月的调试后,进入稳定运行,出水水质稳定达标。

2023年6月—2024年5月,每月检测污水处理站进、出水水质,结果见表4。可见,出水水质达到上海市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 31/T 1163—2019)的一级B标准。

表4 提标后实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality after

upgrading

mg·L⁻¹

项目	实际进水水质 (平均值)	实际出水水质 (平均值)	一级B 标准
COD	71.0~94.0(83.5)	19.0~26.0(22.9)	60
SS	45.0~89.0(73.0)	5.0~9.0(7.0)	20
NH ₃ -N	16.1~21.1(19.6)	1.9~3.6(2.8)	15
TN	26.1~34.9(32.4)	9.6~14.3(11.5)	25
TP	1.9~2.9(2.4)	0.4~0.7(0.5)	2

对比改造前后的进、出水数据可知,改造前的进水水质相差不大,出水水质则相差较大。改造前COD、SS、NH₃-N、TN和TP平均去除率分别为29%、76%、16%、11%和19%;改造后COD、SS、NH₃-N、TN和TP平均去除率分别为72%、90%、85%、64%和78%,改造后出水水质均值较改造前具有明显改善,尤其氨氮、总氮和总磷去除效果显著。

3.2 经济分析

此次改造保留原有集水池、生物滤池和中间池,土建部分主要为砌筑墙体和翻建人工湿地,设备部分主要包括机泵安装以及滤池设备、除磷加药系统、管道系统等。该工程总投资为35万元,其中土建费用5万元、设备费用30万元,较翻建一座同规模污水处理站节省约25万元,工期仅为2个月。

该污水处理站已投入运行1年多,出水稳定,自动化程度较高,安排1名兼职人员管理养护,一周巡查养护一次,每次1 h,人工费为2 600元/a(50元/h)。机电设备(主要包括提升泵、回流泵、曝气泵、搅拌机、加药系统)总装机功率为2.24 kW(运行功率为1.87 kW),按电价为0.64元/(kW·h)、运行时间为11 h/d(365 d/a)计,则电费为4 800元/a。药剂主要为聚合氯化铝,投加量760 kg/a,单价2元/kg,费用为1 460元/a。该污水处理站主要运行费用为人工费、电费和药剂费,合计0.60元/m³。

4 结论

① 农村生活污水处理站提标改造采用调节/缺氧池+生物滤池+接触氧化池+高效澄清池+人工湿地处理工艺,改造后对COD、SS、NH₃-N、TN和TP

的平均去除率分别为72%、90%、85%、64%和78%,出水COD、SS、NH₃-N、TN及TP分别为19.0~26.0、5.0~9.0、1.9~3.6、9.6~14.3、0.4~0.7 mg/L,达到上海市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB31/T 1163—2019)的一级B标准。

② 此次提标改造较新建同规模污水处理站节约成本约42%,运行费用仅为0.60元/m³,实现了处理效能与经济效益的双重提升。

参考文献:

- [1] 范淼. 上海某乡镇农村生活污水收集处理研究[J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 590-595.
FAN Miao. Research on several problems of rural sewage collection and treatment in a township in Shanghai[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 590-595(in Chinese).
- [2] 黄媛媛, 许东阳, 纪荣平. 改进生物滴滤池-人工湿地处理农村生活污水研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(5): 93-97.
HUANG Yuanyuan, XU Dongyang, JI Rongping. Study on rural sewage treatment by improved biological trickling filter-artificial wetland [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(5): 93-97(in Chinese).
- [3] 欧文韬, 李旭东, 庞浩然, 等. 组合式分层生物滤池与人工湿地联合工艺处理农村生活污水试验研究[J]. 净水技术, 2009, 28(4): 28-31.
OU Wentao, LI Xudong, PANG Haoran, et al. Treatment of rural sewage by using combined processes of multi-layered biological filter and constructed wetland [J]. Water Purification Technology, 2009, 28(4): 28-31(in Chinese).
- [4] 陈奇. 上海农村地区生活污水处理工艺选择分析及探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2017(5): 140-143.
CHEN Qi. Analysis and discussion on selection of domestic sewage treatment technology in rural area of Shanghai [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(5): 140-143(in Chinese).
- [5] 曹高勇. 上海农村生活污水处理工艺的研究与分析[J]. 科技创新与应用, 2016(23): 190-191.
CAO Gaoyong. Research and analysis on rural sewage treatment process in Shanghai [J]. Technology Innovation and Application, 2016 (23): 190-191(in Chinese).
- [6] 李瑜, 蒋增辉. 上海农村生活污水治理标准体系构建[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 103-109.

- LI Yu, JIANG Zenghui. Construction of standardized system for rural domestic sewage treatment in Shanghai [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(12): 103–109 (in Chinese).
- [7] 缪静, 姬超, 高琳琳, 等. 我国农村居民生活污水量总变化系数的估算及其意义[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(9): 2326–2330.
- MIAO Jing, JI Chao, GAO Linlin, *et al.* Estimation and significance of the peak variation factor of rural domestic sewage quantity in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14 (9) : 2326–2330 (in Chinese).
- [8] 邓玮玮, 王晓昌. 低碳氮比废水脱氮研究进展[J]. *工业水处理*, 2015, 35(2): 15–19.
- DENG Weiwei, WANG Xiaochang. Research progress in the denitrification of sewage at low C/N ratio [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35 (2) : 15–19 (in Chinese).
- [9] 郑俊, 程洛闻, 张德伟, 等. 低滤层下不同 C/N 和碳源对反硝化生物滤池脱氮性能的中试研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(10): 92–97, 103.
- ZHENG Jun, CHENG Luowen, ZHANG Dewei, *et al.* Pilot study on the performance in a denitrifying biofilter with different C/N and carbon sources in a low filtration layer [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48 (10): 92–97, 103 (in Chinese).
- [10] 黄东, 郑亚楠, 邢志林, 等. 外加固体碳源强化生活污水研究进展与展望[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2024, 38(6): 298–304.
- HUANG Dong, ZHENG Yanan, XING Zhilin, *et al.* Research progress and prospect of domestic wastewater treatment technology enhanced by adding solid carbon sources [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2024, 38(6): 298–304 (in Chinese).
- [11] 聂正鑫. 模块化生物滤池对农村生活污水的处理效果及工艺优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- NIE Zhengxin. Research on the Treatment Effect and Process Optimization of Modular Biological Filter on Rural Domestic Sewage [D]. Nanjing: Southeast University, 2023 (in Chinese).
- [12] 王田天, 周伟, 刘兴, 等. 改良 AAO 一体化设备处理农村生活污水的研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(7): 75–79.
- WANG Tiantian, ZHOU Wei, LIU Xing, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from rural domestic sewage using modified AAO integrated process [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34 (7) : 75–79 (in Chinese).
- [13] 唐舒雯, 纪婧, 王梦娴, 等. 农村生活污水陶瓷膜-生物反应器处理工艺强化脱氮除磷研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(5): 1121–1129.
- TANG Shuwen, JI Jing, WANG Mengxian, *et al.* Enhancement of nitrogen and phosphorus removal in ceramic membrane bioreactor for rural sewage treatment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (5): 1121–1129 (in Chinese).
- [14] 薛金凤, 周明月, 梅杨, 等. 自然通风厌氧一体化复合垂直流生物滤池性能[J]. *水处理技术*, 2020, 46(1): 106–109.
- XUE Jinfeng, ZHOU Mingyue, MEI Yang, *et al.* Performances of composite vertical flow bio-filter with the integration of natural aerobic condition and anaerobic condition [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46 (1): 106–109 (in Chinese).
- [15] 张恒熙, 聂正鑫, 刘燕青, 等. 模块化生物滤池-人工湿地对农村生活污水的处理[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(3): 686–695.
- ZHANG Hengxi, NIE Zhengxin, LIU Yanqing, *et al.* Treatment of rural domestic wastewater by modular biological filter and constructed wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18 (3) : 686–695 (in Chinese).
- [16] 李洋, 魏亮亮, 赵庆良, 等. 磁絮凝分离/生物滤池组合工艺处理生活污水的效能[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(15): 29–34.
- LI Yang, WEI Liangliang, ZHAO Qingliang, *et al.* Treatment of domestic sewage by combined process of magnetic flocculation separation and trickling filter [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30 (15) : 29–34 (in Chinese).

作者简介: 金少格(1986–), 男, 安徽霍山人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为农村生活污水治理、水务设施管理。

E-mail: shaogej@163.com

收稿日期: 2025-03-30

修回日期: 2025-06-10

(编辑: 衣春敏)