

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.013

农村生活污水处理的强化厌氧反应器设计优化及应用

刘建伟^{1,2}, 魏泽冉^{1,2}, 田洪钰^{1,3}, 孙建斌^{1,2}, 史世强^{1,2}

(1. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 3. 中国矿业大学<北京> 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对农村生活污水的特点,结合厌氧折流板反应器和厌氧生物滤池的优势,开发出一种强化厌氧反应器,并对其结构和参数设计进行优化。在厌氧折流反应区格室数量为4个、上下流格室宽度比为3:1,厌氧生物滤池反应区滤料为陶粒-砾石、填充率为45%的条件下,强化厌氧反应器达到最佳的处理效果。介绍了复合厌氧技术应用于北京市通州区某村庄生活污水处理的工程案例,处理规模为3 m³/d,出水水质达到北京市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612—2019)的新(改、扩)建三级标准,工程运行成本为0.73元/m³,可为小水量农村生活污水的原位处理提供技术依据。

关键词: 农村生活污水; 强化厌氧反应器; 厌氧折流板反应器; 厌氧生物滤池; 原位处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0085-06

Optimization of Enhanced Anaerobic Reactor Design and Its Application for Rural Domestic Sewage Treatment

LIU Jian-wei^{1,2}, WEI Ze-ran^{1,2}, TIAN Hong-yu^{1,3}, SUN Jian-bin^{1,2}, SHI Shi-qiang^{1,2}

(1. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology <Beijing>, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the characteristics of rural domestic sewage, this paper developed an enhanced anaerobic reactor and optimized its structure and design parameters based on the advantages of anaerobic baffled reactor and anaerobic biofilter. The optimal removal performance of the enhanced anaerobic reactor was obtained when the number of chambers in the anaerobic baffled reaction area was 4, the width ratio of upstream to downstream was 3 : 1, the packing media in the anaerobic biofilter were ceramsite and gravel, and the filling rate was 45%. The application of the composite anaerobic technology for the treatment of domestic sewage in a village in Tongzhou District, Beijing was introduced. The treatment scale of the project is 3 m³/d. The effluent quality meets the level 3 limit for new construction, reconstruction and extension projects in Beijing specified in *Discharge Standard of Water Pollutants for*

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102004)

通信作者: 刘建伟 E-mail: liujianwei@bucea.edu.cn

Rural Sewage Treatment Facilities (DB 11/1612-2019). The operational cost of the project is 0.73 yuan/ m^3 . The project can provide technical basis for the in-situ treatment of small-scale rural domestic sewage.

Key words: rural domestic sewage; enhanced anaerobic reactor; anaerobic baffled reactor; anaerobic biofilter; in-situ treatment

近年来,随着我国农村地区的快速发展,农村生活污水排放量不断增加。截至2020年底,我国农村人口达50 979万人,按照人均30~40 L/d的污水排放量计算,生活污水年排放量可达 $(55.82\sim74.43)\times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1],然而,其处理率还相对较低,全国有近80%村庄的生活污水没有得到有效处理^[2]。农村生活污水产生较为分散、排水管网建设难度大且缺少专业维护管理人员^[3-5],因此,不可能像城市污水一样对其进行规模化收集和处理,使得农村生活污水成为农村非点源污染的重要来源^[6]。2019年,北京市发布的《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612—2019),对不同规模 and 不同排放去向的农村生活污水的各项污染指标排放限值进行了明确规定,对规模 $<5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水执行三级标准,其中 $\text{COD}\leq 100 \text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5\leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}\leq 25 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SS}\leq 30 \text{ mg/L}$ 。针对农村生活污水产生分散、水量小和水质变化大的特点,开发经济、高效的农村生活污水原位处理技术,已成为目前解决农村生活污水问题的重要途径之一^[7]。

厌氧生物处理技术以其能耗低、能够回收能源等优点而在农村生活污水处理中得到广泛应用,其中厌氧折流板反应器和厌氧生物滤池是两种常见的工艺^[8]。然而,单一厌氧处理技术存在一定的问题,如厌氧折流板反应器可能存在水力死区、短流,而厌氧生物滤池易出现内部填料堵塞等问题,从而影响反应器的处理效果。因此,单一的厌氧处理技术较难实现农村生活污水的达标处理。

笔者以小型分散式农村生活污水(水量 $<5 \text{ m}^3/\text{d}$)为处理对象,将厌氧折流板反应器和厌氧生物滤池结合,构建一种新型的污水处理强化厌氧反应器,在开展反应器启动和运行效果小试研究的基础上进行结构和设计参数优化^[9-10]。并将该反应器应用于北京市通州区某村庄的生活污水处理中,考察其实际运行效果,旨在为该技术的进一步应用提供科学依据。

1 强化厌氧反应器的设计

强化厌氧反应器由上部的厌氧折流反应区和下部的厌氧生物滤池反应区组成,反应器尺寸为 $800 \text{ mm}\times 200 \text{ mm}\times 1\,030 \text{ mm}$,有效容积为120 L,反应器结构如图1所示。

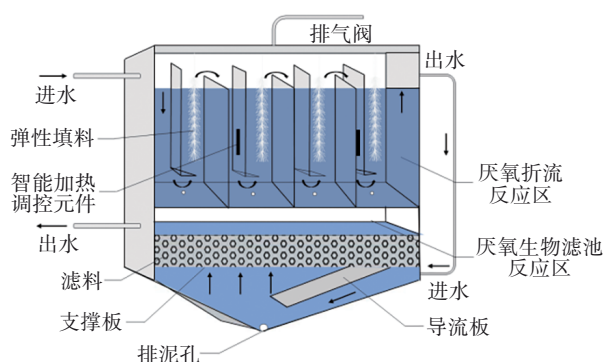


图1 强化厌氧反应器结构示意图

Fig.1 Schematics of enhanced anaerobic reactor structure

由图1可知,厌氧折流反应区被竖直挡板分成多个格室,每个格室又被折流板分为下流格室和上流格室。其中,每个格室上部均悬挂弹性填料,以进行微生物的富集培养,同时弹性填料的截留作用还可以减少污泥流失。下流格室中设置智能加热调控元件,保持水温 $\geq 15^\circ\text{C}$,以满足厌氧微生物生长代谢所需的温度。下流格室底部折流板倾角设计为 45° ,能够促进污水以推流形式流经反应区各个格室,强化微生物与污水的接触。

厌氧生物滤池反应区底部设置锥形槽和导流板,能够保证污泥在二者的作用下有效沉降,以避免反应区内滤料的堵塞。锥形槽底部设置排泥孔,沉降污泥可通过排泥孔回流至前端格室。反应区内填充生物滤料,滤料底部设置多孔玻璃板(直径为3 mm)作为支撑。滤池反应区采用升流式布水方式,微生物在滤料表面附着形成厌氧生物膜,通过滤料层截留、吸附及厌氧微生物降解作用去除厌氧折流反应区未去除的污染物^[11]。

强化厌氧反应器集成厌氧折流反应区和厌氧生物滤池反应区,利用厌氧活性污泥和厌氧生物膜

的协同作用,实现对污染物的去除。

2 强化厌氧反应器设计参数优化

反应器的结构和参数可能影响系统流态、污泥流变及微生物种群分布特征,进而影响污水处理效果。各反应器滤料挂膜完成后,在水力停留时间(HRT)为12 h、进水COD平均浓度为300 mg/L的条件下,对强化厌氧反应器的结构与设计参数进行了优化,以期达到最佳污水处理效果。

2.1 厌氧折流反应区参数优化

2.1.1 格室数量

格室数量通过改变厌氧折流反应区的混合流态和死区容积所占比例等条件来影响对污染物的降解效果^[12]。当上下流格室宽度比为3:1、滤料类型为陶粒-砾石(体积比为1:1)、填充率为45%时,进行了反应器格室数量的优化。研究了格室数量分别为3、4和5个的强化厌氧反应器对COD的去除率和滤料生物膜量,结果如图2所示。

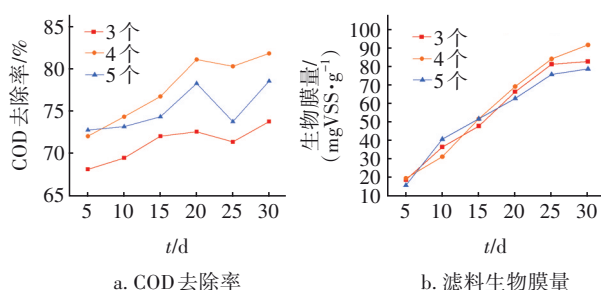


图2 格室数量对COD去除率和滤料生物膜量的影响

Fig.2 Effect of chamber numbers on COD removal rate and biofilm mass of filter media

由图2可知,当格室数量分别为3、4和5个时,反应器的COD平均去除率分别为71.30%、77.80%和75.20%,滤料平均生物膜量分别为55.80、58.20和54.50 mgVSS/g。相较而言,格室数量为4的反应器具有最高的COD去除率和滤料生物膜量。这与沈耀良等^[13]的研究结果一致,在处理低浓度污水时,厌氧折流板反应器的格室数量一般以3~4个为宜,当进水污染物浓度较高时,为达到更好的运行效果,可以适当增加反应器的格室数量。

2.1.2 上下流格室宽度比

上下流格室宽度比是影响强化厌氧反应器处理效能的重要参数,通过改变反应器整体的流动混合特性、死区占比来影响对污染物的去除效果。较优的上下流格室宽度比使得反应器的混合程度提高,有利于物质混合及传质过程,能够有效避免反

应器混合效果差、死区面积大及有效容积低的问题^[14]。在格室数量为4个、滤料类型为陶粒-砾石(体积比为1:1)、填充率为45%的条件下,研究了上下流格室宽度比分别为2:1、3:1和4:1的强化厌氧反应器对COD的去除率和滤料生物膜量。

结果表明,当厌氧折流反应区上下流格室宽度比分别为2:1、3:1和4:1时,COD平均去除率分别为69.00%、77.80%和72.50%,而滤料平均生物膜量则分别为53.20、58.20和48.50 mgVSS/g。这与Liu等^[15]的研究结果类似,在厌氧折流反应区上下流格室宽度比为3:1时,反应器的COD去除率和滤料生物膜量均最高,强化厌氧反应器可实现最佳的污水处理效果。

2.2 厌氧生物滤池反应区参数优化

2.2.1 滤料类型

滤料类型是影响厌氧生物滤池微生物种群和活性的重要因素^[16]。在厌氧折流反应区格室数量为4个、上下流格室宽度比为3:1、滤料填充率为45%的条件下,进行了滤料类型的优化。填充陶粒、砾石和陶粒-砾石(体积比为1:1)的反应器滤料挂膜时间分别为23、25和21 d,研究了不同滤料对COD去除率和滤料生物膜量的影响。

结果表明,当厌氧生物滤池反应区滤料分别为陶粒、砾石、陶粒-砾石时,反应器的COD平均去除率分别为73.90%、70.10%和77.80%,而滤料平均生物膜量分别为54.40、54.30和58.20 mgVSS/g。可见,当厌氧生物滤池反应区填充的滤料为陶粒-砾石时,反应器对COD的去除效果最好,滤料生物膜量也较高。这可能是由于陶粒-砾石组合滤料表面微生物富集量较大,挂膜时间短,因此对污染物的去除效果更好。张成^[17]的研究结果也表明,组合填料厌氧/好氧生物滤池对污水中有机物的去除率、挂膜速度和附着生物量均优于单一填料滤池。

2.2.2 滤料填充率

滤料填充率同样是影响厌氧生物滤池运行效果的重要因素之一^[18]。在厌氧折流反应区格室数量为4个、上下流格室宽度比为3:1、滤料类型为陶粒-砾石的条件下,研究了厌氧生物滤池反应区滤料填充率分别为30%、45%和60%时反应器对COD的去除率和滤料生物膜量。

结果表明,当厌氧生物滤池反应区滤料填充率分别为30%、45%和60%时,反应器的COD平均去

除率分别为66.80%、77.80%和76.90%，而滤料平均生物膜量分别为54.80、58.20和57.50 mgVSS/g。可见，当滤料填充率为45%和60%时，反应器对COD的去除率和滤料生物膜量均相对较高，且结果相差不大。考虑到经济性能，选择厌氧生物滤池反应区滤料填充率为45%。

综上，基于COD去除率和滤料生物膜量指标，优化后的强化厌氧反应器参数如下：厌氧折流反应区格室数量为4个、上下流格室宽度比为3:1，厌氧生物滤池反应区滤料类型为陶粒-砾石（体积比为1:1）、填充率为45%。在此条件下，反应器对COD的去除率为77.80%，滤料生物膜量达58.20 mgVSS/g。

3 应用案例

3.1 工程概况

将强化厌氧反应器应用于北京市通州区某村的生活污水处理。工程建设于2021年5月，于6月开始启动运行，强化厌氧反应器的外观见图3。



图3 强化厌氧反应器外观

Fig.3 Appearance of enhanced anaerobic reactor

工程的设计规模为3 m³/d，占地面积为0.80 m²，接种污泥取自某村镇污水处理站好氧池，污泥接种量为反应器有效容积的1/3，接种污泥的指标如下：污泥体积指数(SVI)为56.80 mL/g、混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)为4 792.30 mg/L、混合液悬浮固体浓度(MLSS)为9 011.40 mg/L、pH为6.8。设计进水水质主要参照该村污水的实际监测数据，由于该工程的设计处理规模<5 m³/d且为新建设施，设计出水水质应符合北京市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612—2019)的新(改、扩)建三级标准。设计进、出水水质如表1所示。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	pH
进水	150~450	100~300	25~50	100~200	6~9
出水	≤100	≤30	≤25	≤30	6~9

3.2 设计参数

强化厌氧反应器由6 mm厚的玻璃钢制成，尺寸为1.44 m×0.56 m×2.17 m，有效容积为1.30 m³，厌氧折流反应区与厌氧生物滤池反应区的容积比为3:2，HRT为12 h。采取间歇进水方式，进水泵为潜污泵($Q=3$ m³/h, $H=90$ kPa, $P=0.37$ kW)，进水时间为每10 min进水30 s。

厌氧折流反应区分4个格室，其中每个格室的下流格室宽度为90 mm，上流格室宽度为270 mm，顶部设排气阀。弹性填料固定在填料支撑架上，设置为悬挂式，包括中心绳和丝条，其中中心绳为聚酰胺材质，丝条为聚丙烯材质、直径为200 mm。

厌氧生物滤池反应区底部为锥形，采用升流式布水方式。滤料层滤料为陶粒和砾石，填充体积比为1:1。其中，陶粒粒径为4~6 mm，孔隙率为47.76%，堆积密度为877 kg/m³；砾石粒径为5~8 mm，孔隙率为43.60%，堆积密度为1 700 kg/m³。滤料总填充高度为0.24 m，填充率为45%，滤料支撑板采用厚度为8 mm、分布3 mm孔径圆孔的有机玻璃板。

3.3 运行效果

该工程在90 d内的运行效果如表2所示。

表2 工程运行效果

Tab.2 Project operation performance mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	SS
进水	160~420	70~270	25~35	90~170
出水	40~85	15~25	19~25	7~10

由表2可知，工程达到了较好的处理效果，出水水质满足北京市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612—2019)的新(改、扩)建三级标准要求。

3.4 经济分析

该工程总投资为2.10万元，其中强化厌氧反应器等设备费用为1.84万元，土建费用为0.26万元。处理水量为1 095 m³/a，工程主要运行费用如下：

① 电费(E_1)。工程耗电量为191.60 kW·h/a，电价按0.49元/(kW·h)计，则 $E_1=191.60 \times 0.49 \div$

1 095=0.09 元/m³。

② 人工费(E_2)。该污水处理装置无需专人管理,设1名巡检工人每两周巡检1次,年工资为500元,则 $E_2=500 \div 1\,095=0.46$ 元/m³。

③ 维护费(E_3)。以192元/a计,则 $E_3=192 \div 1\,095=0.18$ 元/m³。

污水处理运行费用总计: $E_T=E_1+E_2+E_3=0.73$ 元/m³。

4 结论

① 构建了一种将厌氧折流板反应器和厌氧生物滤池集成于一体的强化厌氧反应器,通过厌氧活性污泥法和厌氧生物膜法的协同作用,实现对农村生活污水中污染物的去除。

② 基于COD去除率和滤料生物膜量指标,优化后的强化厌氧反应器参数如下:厌氧折流反应区格室数量为4个、上下流格室宽度比为3:1,厌氧生物滤池反应区滤料为陶粒-砾石(体积比为1:1)、填充率为45%。在此条件下,反应器的COD平均去除率为77.80%,滤料平均生物膜量达58.20 mgVSS/g。

③ 强化厌氧反应器对小规模、低浓度农村生活污水具有良好的处理效果,出水水质符合北京市《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612—2019)的新(改、扩)建三级标准,运行费用较低。该技术在水量小农村污水的原位处理方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [2] 孔令为, 邵卫伟, 叶红玉, 等. 农村生活污水治理技术应用的浙江经验及发展方向[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 12-17.
KONG Lingwei, SHAO Weiwei, YE Hongyu, et al. Experience and development direction of application of rural domestic wastewater treatment technology in Zhejiang Province [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(2): 12-17 (in Chinese).
- [3] 段先月, 唐朝春, 吴庆庆, 等. 农村污水现状及处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 27-31.

- DUAN Xianye, TANG Chaochun, WU Qingqing, et al. Research progress of present situation and treatment technology of rural sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(9): 27-31 (in Chinese).
- [4] 郝晓地, 于晶伦, 付昆明, 等. 农村污水处理莫轻视“肥水”资源[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 5-12.
HAO Xiaodi, YU Jinglun, FU Kunming, et al. Don't despise nutrient during treating rural wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 5-12 (in Chinese).
- [5] 谭学军. 复合厌氧反应器处理农村生活污水研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(15): 111-114.
TAN Xuejun. Hybrid anaerobic reactor for treatment of rural domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(15): 111-114 (in Chinese).
- [6] 汪诚文, 赵雪锋, 王欣. 一体化生物处理反应器处理农村生活污水研究概况[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(6): 544-548.
WANG Chengwen, ZHAO Xuefeng, WANG Xin. Overview of researches on integrated bio-treatment reactors for rural domestic wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011, 1(6): 544-548 (in Chinese).
- [7] 王阳, 石玉敏. 分散式污水处理技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 168-174.
WANG Yang, SHI Yumin. Advances of decentralized wastewater treatment technologies [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(2): 168-174 (in Chinese).
- [8] STAZI V, TOMEI M C. Enhancing anaerobic treatment of domestic wastewater: state of the art, innovative technologies and future perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 78-91.
- [9] 刘建伟, 刘雪丽, 高柳堂, 等. 强化复合厌氧反应器处理农村生活污水的快速启动[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2339-2345.
LIU Jianwei, LIU Xueli, GAO Liutang, et al. Rapid start-up of enhanced hybrid anaerobic reactor for rural domestic sewage treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(9): 2339-2345 (in Chinese).
- [10] LIU J W, LIU X L, GAO L T, et al. Performance and microbial community of a novel combined anaerobic bioreactor integrating anaerobic baffling and anaerobic filtration process for low-strength rural wastewater

- treatment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(15): 18743–18756.
- [11] 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 等. 上向流厌氧滤池(UAF)处理城市生活污水的运行效能[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 4121–4127.
- YANG Zhongqi, LIU Xiuhong, LI Haixin, *et al.* Performances analysis of an upflow anaerobic filter for domestic sewage treatment [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4121–4127 (in Chinese).
- [12] 许明, 冯骞, 刘伟京, 等. ABR反应器的结构参数对流动及混合特性的影响[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(7): 758–762.
- XU Ming, FENG Qian, LIU Weijing, *et al.* Influence of structural parameters of an ABR reactor on flow and mixing characteristics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(7): 758–762 (in Chinese).
- [13] 沈耀良, 赵丹, 王承武, 等. ABR反应器的水力特征研究[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(11): 1–3.
- SHEN Yaoliang, ZHAO Dan, WANG Chengwu, *et al.* Study on hydraulic characteristics of ABR reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(11): 1–3 (in Chinese).
- [14] 于少亭, 张淑君, 冯骞. 上下流室宽度比对厌氧折流板反应器水力特性的影响[J]. *净水技术*, 2017, 36(3): 50–56.
- YU Shaoting, ZHANG Shujun, FENG Qian. Effect of width ratio of upstream to downstream chamber on hydraulic characteristics for anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(3): 50–56 (in Chinese).
- [15] LIU J, ZANG N, GAO L, *et al.* A modified packed anaerobic baffled reactor based on phase separation for the treatment of decentralized wastewater: performance and microbial communities [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2022, 183: 108455.
- [16] ZHAO Y X, LIU D, HUANG W L, *et al.* Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: current state-of-the-art, challenges, and opportunities [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121619.
- [17] 张成. 组合填料厌氧/好氧生物滤池生物除磷-回收磷工艺的研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- ZHANG Cheng. Biological Phosphorus Removal and Recovery by the Combined Medium Anaerobic/Aerobic Biofilter System [D]. Shanghai: Donghua University, 2015 (in Chinese).
- [18] 陈胜, 孙德智, 陈桂霞, 等. 移动床生物膜法处理垃圾渗滤液COD降解动力学[J]. *化工学报*, 2007, 58(3): 733–738.
- CHEN Sheng, SUN Dezhi, CHEN Guixia, *et al.* Kinetics of COD degradation in landfill leachate treatment using moving-bed bioreactor [J]. *CIESC Journal*, 2007, 58(3): 733–738 (in Chinese).

作者简介: 刘建伟(1979–), 男, 山东济宁人, 博士, 教授, 主要研究方向为分散污水处理技术。

E-mail: liujianwei@bucea.edu.cn

收稿日期: 2022-07-07

修回日期: 2022-07-21

(编辑: 沈靖怡)

加强水土保持, 打造绿水青山