

蒋进元,陈朱迪,罗勇,等.五格式净粪池与三格式化粪池处理农村生活污水效果及成本对比[J].环境工程技术学报,2024,14(3):953-962.
JIANG J Y, CHEN Z D, LUO Y, et al. Comparison of effect and cost of five-compartment purification tank reactor and three-compartment septic tank in domestic sewage treatment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3): 953-962.

五格式净粪池与三格式化粪池处理农村生活污水效果及成本对比

蒋进元¹, 陈朱迪¹, 罗勇^{1,2}, 谭伟^{1*}, 宋浩洋¹, 石冬妮¹

1. 中国环境科学研究院

2. 重庆交通大学河海学院

摘要 针对三格式化粪池(TcST)出水COD及氮、磷浓度高,直排或溢流造成当地局部水体污染或黑臭的问题,构建了等容积五格式净粪池(FcPTR),并以实际生活污水为处理对象,对比研究2种反应器的运行特性和单位污染物去除成本。结果表明:FcPTR连续运行120 d,出水COD平均值为74 mg/L, TN、NH₄⁺-N、TP平均浓度分别为26、20、1.6 mg/L,在我国进水水质相似的农村地区使用时,可满足11个省(区、市)发布的农村生活污水处理设施水污染排放地方标准二级水质要求。厌氧折流区、好氧区填料与污泥上变形菌门(Proteobacteria)的生长代谢促进了含氮和含磷物质的去除。相比于TcST, FcPTR明显增强了系统对有机物的降解和脱氮除磷效果,提高了系统的抗冲击负荷能力。经成本核算,在设计容积和运行场景相同时运行10年, FcPTR削减1 kg COD、1 kg NH₄⁺-N的成本均比TcST降低19.8%。

关键词 农村生活污水;三格式化粪池;五格式净粪池;分散式污水处理;运行特性

中图分类号: X703 文章编号: 1674-991X(2024)03-0953-10 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230558

Comparison of effect and cost of five-compartment purification tank reactor and three-compartment septic tank in domestic sewage treatment

JIANG Jinyuan¹, CHEN Zhudi¹, LUO Yong^{1,2}, TAN Wei^{1*}, SONG Haoyang¹, SHI Dongni¹

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University

Abstract Three-compartment septic tank (TcST) with high concentrations of effluent COD, nitrogen and phosphorus would cause local water pollution or black odor when tailwater was directly discharged or overflowed. In view of the above problems, an equal-volume five-compartment purification tank reactor (FcPTR) was constructed and, taking actual domestic sewage as the treatment object, the operating characteristics and unit pollutant removal cost were compared and analyzed. The results revealed that when FcPTR operated continuously for 120 days, average concentrations of effluent COD, TN, NH₄⁺-N, TP were 74, 26, 20, and 1.6 mg/L, respectively, which could reach Class II of local standards for water pollutants discharge from rural domestic facilities that had been issued by 11 provinces (autonomous region, municipality directly under the Central Government) in China when applied in rural areas where the quality of the influent water was similar. The removal of nitrogenous and phosphorus-containing materials was promoted by the growth and metabolism of Proteobacteria on the filler and sludge in the anaerobic baffle zone and aerobic zone. Compared with TcST, FcPTR could significantly enhance the degradation of organic matter and denitrification and phosphorus removal, and improve the shock load resistance. According to cost accounting, when operating for 10 years with the same design volumes and operating scenarios, FcPTR could reduce the cost of 1 kg COD and 1 kg NH₄⁺-N removal both by 19.8% compared with TcST.

Key words domestic sewage; three-compartment septic tank (TcST); five-compartment purification tank reactor (FcPTR); decentralized wastewater treatment; operating characteristic

收稿日期: 2023-07-28

基金项目: 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022-YRUC-01-0203); 广元市长江水生态环境保护研究项目(2022-LHYJ-02-0509-06)

作者简介: 蒋进元(1974—), 男, 研究员, 博士, 主要从事水污染控制技术研究, jiangjy@cares.org.cn

* 通信作者: 谭伟(1988—), 男, 硕士, 主要从事水污染控制技术研究, weitan_2012@163.com

三格式化粪池 (three-compartment septic tank, TcST) 结构简单、投资少且运行便捷, 广泛应用于农村厕所污水的治理^[1]。按照 GB/T 38837—2020《农村三格式户厕运行维护规范》要求, TcST 仅限于厕所粪污的无害化处理, 其出水应接入农村生活污水处理管网或回田使用。但调研发现, 农村地形复杂和村落分散的特点导致尾水收集管网不健全, 化粪池出水无法通过管网良好收集而出现溢流或直排入河的现象非常普遍^[2-3]。此外, 大部分农村用户将生活杂用水一并排入 TcST, 导致其有机负荷偏低, 影响污水净化效率。根据江苏农村地区污水处理效果评价结果^[4], TcST 对 COD 的去除率为 48.51%, TN 的去除率仅为 6.83%, TP 的去除率为 23.92%, 是一种低效的污水处理技术。为了解决上述问题, 国内外多数研究采用 TcST 结合人工湿地、人工生态沟渠以及升流式厌氧污泥床反应器对生活污水做净化处理, 但往往伴随着工艺流程繁琐, 后期管理维护困难等缺点^[5-7]。与好氧技术相比, 厌氧处理技术具备处理成本低, 有机物去除率高, 发酵产物可以资源化利用等优点^[8-11]。其中, 厌氧滤池在处理含中低浓度有机物的生活污水和城市河流污染方面具有优势^[12]。随着研究人员的不断探索, 以厌氧滤池为基础又衍生出了许多新技术, 如上流式厌氧滤池、下流式厌氧滤池和绝缘厌氧滤池等, 其对 COD 的去除率均可超过 75%^[13-15]。除此之外, 厌氧折流板反应器是生物膜技术和升流式厌氧污泥床反应器的结合体, 具有污泥产生量少, 有效体积大, 水力停留时间 (HRT) 短等优势, 可用于去除污水中 COD、TN、TP 等污染物^[16-17]。研究表明, 厌氧折流板反应器在不同水力停留时间下, 即使有机加载率 (OLRs) 达到 2 kg/m³, COD 和 BOD 的去除率也能达到 85%, 且抗冲击负荷能力强^[18]。

结合厌氧滤池和厌氧折流板反应器的优点, 本研究优化了 TcST 结构, 设计了 1 种由沉淀分离区、厌氧折流区 (包括 2 个区)、好氧区、缺氧过滤区 4 部分组成的五格式净粪池 (five-compartment purification tank reactor, FcPTR)。以实际生活污水为处理对象, 对比相同容积与运行条件下 FcPTR 和 TcST 对 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 的去除效果, 重点分析 FcPTR 中微生物在填料和污泥表面的生长状况以及随着 HRT 的改变微生物种群组成的变化情况, 并讨论 2 种反应器的单位污染物去除成本, 旨在通过对 2 种反应器处理实际生活污水的实践研究, 探究 FcPTR 在农村生活污水处理方面的优势, 以期推动 FcPTR 在农村改厕中的实际应用, 为解决分散型农村地区 TcST 尾水不达标溢流或直排引起的环境污染问题提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置

TcST 和 FcPTR 的材质均为有机玻璃, 二者的有效容积均为 90 L。TcST 由缺氧池、厌氧池和沉淀池组成, 3 个区域的体积比为 2:1:3 [图 1(a)]。FcPTR 由沉淀分离区、厌氧折流区、好氧区和缺氧过滤区 4 部分构成, 各区域的体积比为 3:2:1:2 [图 1(b)]。其中, 厌氧折流区包括一区 [图 1(b)②] 和二区 [图 1(b)③] 2 个等体积单元。FcPTR 中, 厌氧折流区和好氧区填充聚氨酯 (PU) 填料, 缺氧过滤区填充火山岩填料, 填料均放置于填料框中, 且与池底保持一定距离。FcPTR 中厌氧折流区和好氧区填料投放量占所在区域体积的 40%, 缺氧过滤区填料投放量占所在区域体积的 80%。分别在 FcPTR 的进出水口、厌氧折流区 (二区)、好氧区、缺氧过滤区等处设置污水取样口, 在厌氧折流区和好氧区上部预留填

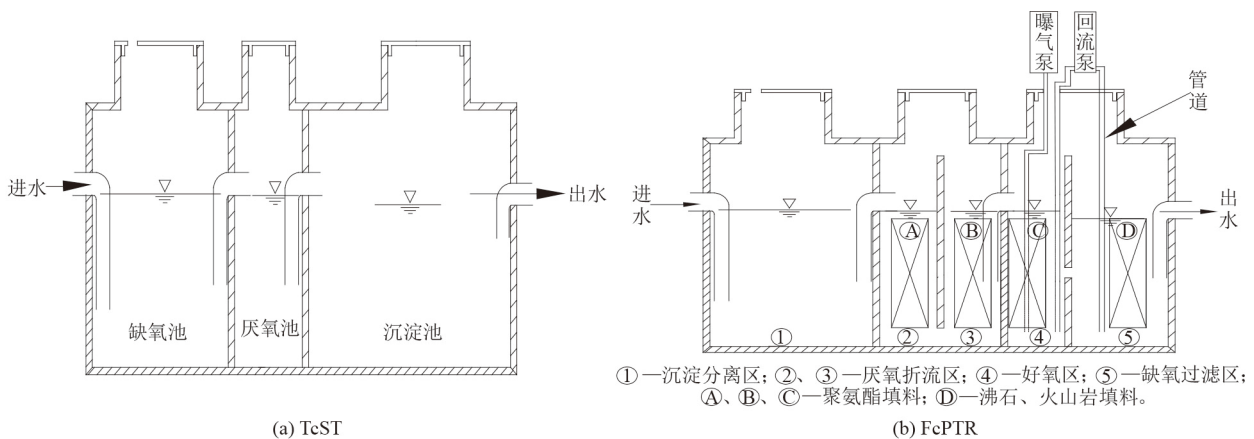


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

料和污泥取样口;在 TcST 的进出水口、厌氧池等处设置污水取样口。

1.2 填料特性

FcPTR 中厌氧折流区和好氧区采用的 PU 填料是一种热塑性聚合物,具有优越的力学特性,耐久性好;它的网状孔隙不仅为微生物生长提供场所,还起到了支撑填料的作用,增强了水处理效果^[19-20]。缺氧过滤区使用的火山岩填料表面孔隙多,具有较强的亲水性,能够促进生物膜在其表面生长;此外,火山岩填料还能够吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 污染物,提升出水水质^[21]。2 种填料特性见表 1。

表 1 PU 填料和火山岩填料特性

Table 1 Characteristics of PU filler and volcanic rock filler

填料	规格/mm	孔隙率/%	比表面积	吸水性/%	填充率/%
PU	30×30×30	96~99	$\geq 18\ 000\ \text{m}^2/\text{m}^3$	200	40
火山岩	直径为8	65	$12\ \text{m}^2/\text{kg}$	65	80

1.3 试验水质和污泥特性

试验用北京市朝阳区某单位家属小区生活污水作为进水,其水质见表 2。接种污泥取自北京市某污水处理厂厌氧池和曝气池,接种量为反应器有效容积的 30%。厌氧区接种污泥参数:混合液的挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)为 3 643 mg/L,混合液的悬浮固体浓度(MLSS)为 5 279 mg/L。

表 2 试验进水水质

Table 2 Parameters of test influent water quality

pH	COD/(mg/L)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度/(mg/L)	TP浓度/(mg/L)	TN浓度/(mg/L)
6.67~7.32	135~314	44~77	3.0~5.5	51~88

1.4 试验设计

参考杨延梅等^[22]研究的 FcPTR 启动特性,在第 46 天时 FcPTR 上的填料可以成功挂膜。本研究试验操作分为 2 个阶段,共运行 120 d。其中,阶段 I (0~72 d)确保填料能成功挂膜;阶段 II (73~120 d)运行 48 d。2 个运行阶段的溶解氧(DO)浓度保持在 1.8 mg/L,水温均维持在 26 ℃。FcPTR 和 TcST 在运行阶段 I 和阶段 II 的 HRT 分别设置为 36 和 24 h。不同阶段 FcPTR 和 TcST 的试验运行参数如表 3 所示。

TcST 包含缺氧池和厌氧池,FcPTR 是在 TcST 厌氧池的基础上增加了好氧区和缺氧过滤区。TcST 厌氧池出水即为 TcST 的总出水,FcPTR 缺氧过滤区出水即为 FcPTR 总出水。试验过程中,每隔 3 d 在 FcPTR 进水口、厌氧折流区(二区)、好氧区、

表 3 FcPTR 和 TcST 不同阶段的试验运行参数

Table 3 Test operation parameters at different stages of FcPTR and TcST

阶段	时间	DO浓度/(mg/L)	HRT/h	水温/℃
I	第1~72天	1.8	36	26
II	第73~120天	1.8	24	26

缺氧过滤区(总出水口)位置各取 50 mL 水样,在 TcST 进水口、厌氧池(总出水口)位置各取 50 mL 水样,用于测定 COD 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度。取 FcPTR 厌氧折流区(二区)填料和污泥各 40 g, TcST 厌氧区污泥 40 g,通过扫描电镜观察微生物在填料和污泥表面的生长状况。FcPTR 运行至第 72 天取厌氧折流区污泥、好氧区污泥、厌氧折流区填料、好氧区填料各 20 g,样品编号依次为 1、3、5、7;FcPTR 运行至第 120 天取厌氧折流区污泥、好氧区污泥、厌氧折流区填料、好氧区填料各 20 g,样品编号依次为 2、4、6、8,用于分析微生物种群结构。

1.5 分析方法

1.5.1 常规水质分析方法

将采集的水样静置 15 min,取上清液测定 COD;用 0.45 μm 滤膜过滤后,检测 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度。水样各项指标均按照《水质和废水监测分析方法》(4 版)进行分析测定,其中 COD 采用快速消解法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度采用纳氏试剂分光光度法测定,TN 浓度采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,TP 浓度采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定,微生物释磷量按照进、出水磷浓度差计算。

1.5.2 污泥形貌观察

将污泥和填料样品在 2.5% 的戊二醛溶液中于 4 ℃ 固定 9 h,采用磷酸缓冲溶液漂洗样品并用钨酸溶液固定。处理后,用梯度浓度的乙醇溶液对样品进行脱水,添加纯醋酸异戊酯放置 10 h。处理好的样品在扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU-8010 型)下进行观察,以定性了解反应器中微生物的生长情况。

1.5.3 微生物测序

清洗、冷冻干燥污泥和填料样品后,取 0.1~0.2 g 样品,采用 Fast DNA Spin Kit for Soil 试剂盒(BIO 101 System, 美国)提取污泥和填料样品中的 DNA。PCR 扩增采用全式金公司的 Pfu 高保真 DNA 聚合酶,并严格控制扩增循环数,保证同一批样本的扩增条件一致。扩增产物磁珠纯化回收后,将 PCR 扩增回收产物进行荧光定量,荧光试剂为 Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit,定量仪器为 Microplate Reader(BioTek, FLx800)。采用 Illumina 公司的 TruSeq

Nano DNA LT Library Prep Kit 制备测序文库。上机测序前,先用 Agilent High Sensitivity DNA Kit 对文库在 Agilent Bioanalyzer 上进行质检,利用保守区域设计引物来扩增 rRNA 基因的单个或多个可变区,测序分析微生物的多样性。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果对比

FcPTR、TcST 出水 COD、TN、NH₄⁺-N 去除效果如图 2 所示。运行至第 72 天, FcPTR 出水 COD、TN、NH₄⁺-N 去除率分别为 73%、64%、72%; TcST 出水 COD 去除率为 49%, TN、NH₄⁺-N 浓度则分别增加了 26%、11%。运行至第 120 天, FcPTR 出水 COD、

TN、NH₄⁺-N 去除率分别为 70%、50%、53%; TcST 出水 COD 去除率为 46%, TN、NH₄⁺-N 浓度分别增加了 33%、18%。可见,连续运行 120 d 期间, FcPTR 对 COD、TN、NH₄⁺-N 的去除率均高于 TcST,运行性能优于 TcST,有机物去除效果显著且具备较好的抗冲击负荷能力。

为探究 FcPTR 各单元对 COD、TN、NH₄⁺-N 的去除贡献度,试验监测了 FcPTR 在不同运行阶段各单元出水中 COD 与 TN、NH₄⁺-N 浓度的变化(图 3)。运行阶段 I、II, FcPTR 厌氧折流区出水 COD 低于 100 mg/L,该单元对 COD 的去除贡献最大。阶段 I 运行至第 15 天后, FcPTR 厌氧折流区出水 TN 和 NH₄⁺-N 浓度均高于进水。COD 与碳氮比(C/N)是影

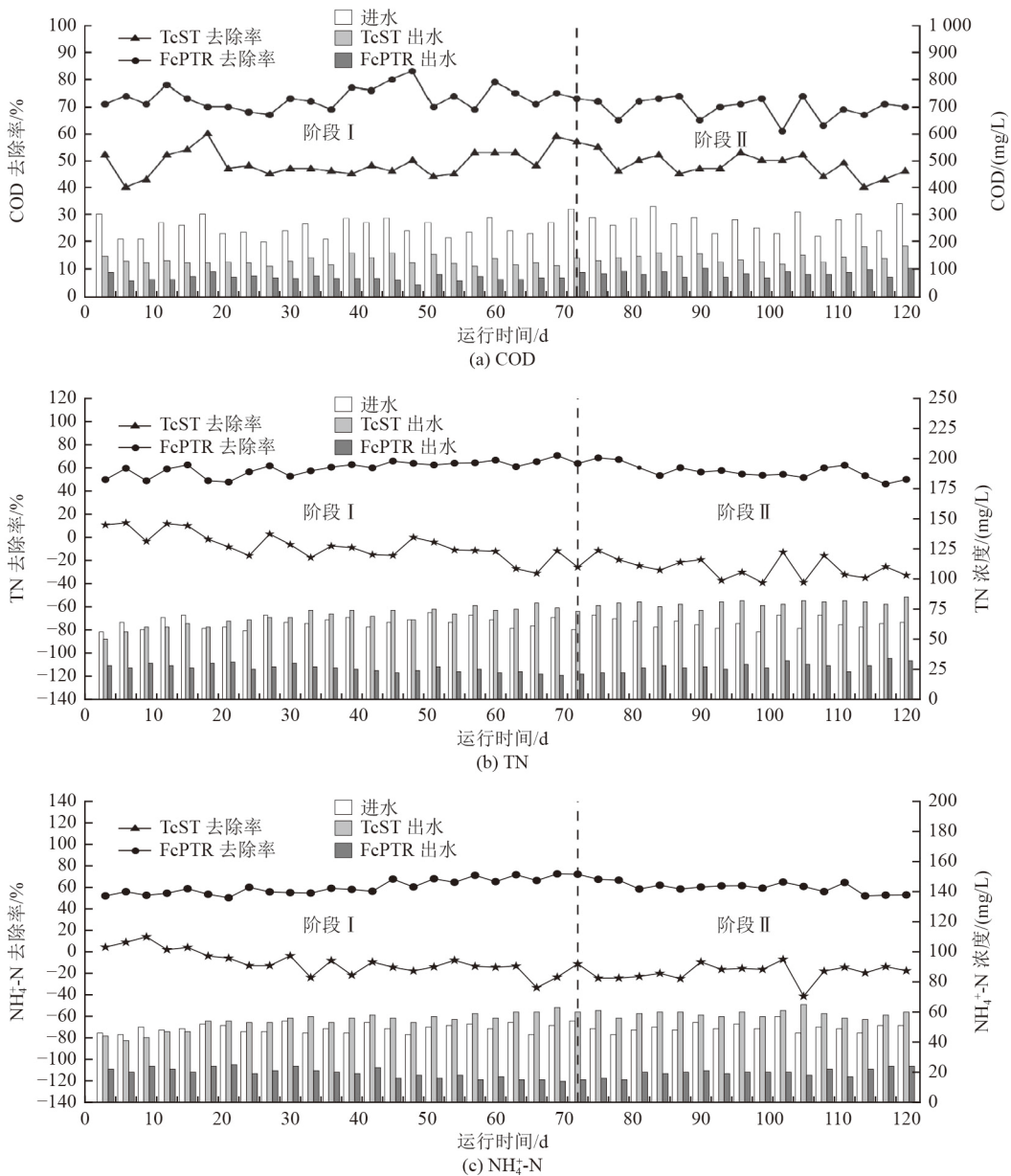


图 2 FcPTR 和 TcST 不同运行阶段进出水污染物浓度及去除率

Fig.2 Pollutant concentrations and removal rates of influent and effluent at different operation stages of FcPTR and TcST

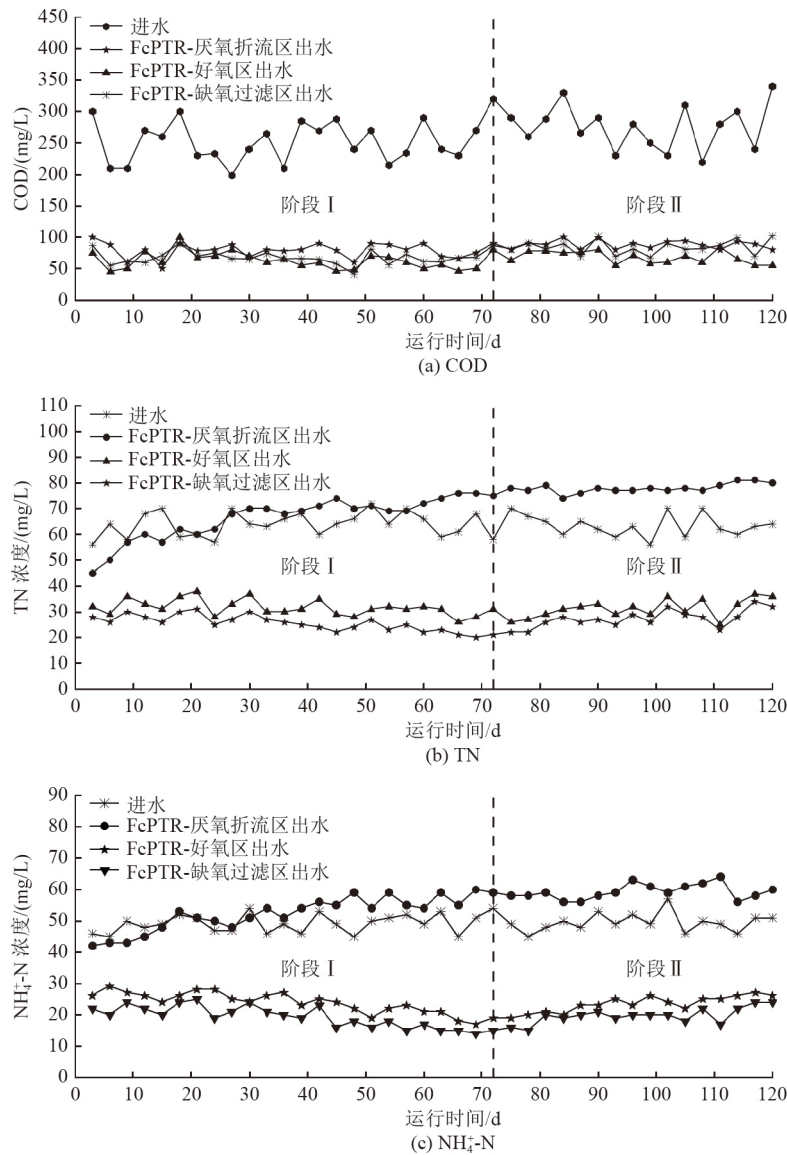


图 3 不同运行阶段 FcPTR 各单元出水污染物浓度

Fig.3 Pollutant concentration of effluent from each unit at different operation stages of FcPTR

响脱氮效率的主要因素, FcPTR 厌氧折流区 COD 下降, C/N 降低, 缺乏充足的碳源作为反硝化电子供体, 导致 TN 去除效果差^[23]。有机氮在氨氧化菌的作用下转化为NH₄⁺-N, FcPTR 厌氧折流区的无氧环境导致NH₄⁺-N无法通过反硝化作用去除而出现富集现象^[24-25]。由图 3(b)、(c)可知, 运行至第 72 天 FcPTR 缺氧过滤区出水 TN、NH₄⁺-N浓度分别降低了 37、45 mg/L, FcPTR 好氧区和缺氧过滤区对 TN 和 NH₄⁺-N 的去除贡献最大。硝化细菌在氧气充足时将 FcPTR 厌氧折流区中的 NH₄⁺-N 转为 NO₃⁻和 NO₂⁻, 反硝化菌在 FcPTR 缺氧过滤区以 NO₃⁻和 NO₂⁻为电子受体, 提高脱氮效果^[26]。缩短 HRT 运行至第 120 天, FcPTR 缺氧过滤区出水 TN、NH₄⁺-N浓度分别降低了 32、36 mg/L, 相比于第 72 天, FcPTR 出水 TN、NH₄⁺-N 的去除效果变差。降低 HRT 导致亚硝酸盐

在混合营养反硝化系统中积累, 从而使 FcPTR 好氧区和缺氧过滤区的脱氮能力下降^[27]。

FcPTR 厌氧折流区和 TcST 出水中 TP 的去除效果如表 4 所示。运行阶段 I, FcPTR 厌氧折流区

表 4 不同运行阶段 FcPTR 厌氧折流区和 TcST 厌氧区总磷去除效果

Table 4 Total phosphorus treatment in the anaerobic baffled zone of FcPTR and anaerobic zone of TcST at different operation stages

运行阶段	进水TP浓度/ (mg/L)	反应器	厌氧区	
			出水TP浓度/ (mg/L)	释磷量/ (mg/L)
I	3.0±0.4	TcST	16.0±1.6	13.0±1.2
		FcPTR	16.7±0.9	13.7±0.5
II	3.2±0.2	TcST	15.8±1.4	12.6±1.2
		FcPTR	15.3±1.3	12.1±1.1

和 TcST 出水 TP 浓度均升高, 释磷量分别为 13.7、13.0 mg/L; 运行阶段 II, FcPTR 厌氧折流区和 TcST 出水释磷量分别为 12.1、12.6 mg/L。厌氧条件下, 聚磷菌(PAOs)通过释放磷获取能量, 吸收挥发性脂肪酸(VFAs)并以聚羟基烷酸酯(PHAs)的形式储存在体内, 在好氧条件下进行磷的吸收, 增强了除磷效果^[28]。

FcPTR 各区域 TP 去除效果见表 5。运行阶段 I 和 II, 好氧区出水 TP 的平均去除率分别为 80% 和 79%; 缺氧过滤区在运行阶段 I、II 对 TP 的平均去除率分别为 46% 和 23%。可见, 好氧区对磷的去除效果显著; PAOs 生存需要充足的碳源, 而缺氧过滤区可利用的碳源减少, 导致 PAOs 的活性下降^[29]。

表 5 不同运行阶段 FcPTR 各单元对 TP 的去除效果

Table 5 TP removal in each unit of FcPTR at different operation stages

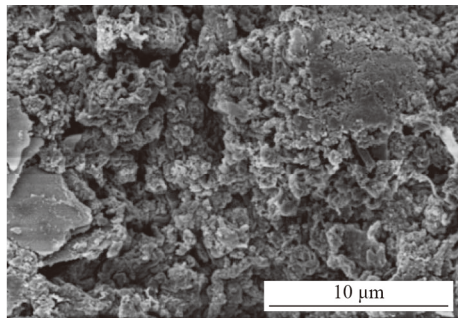
运行阶段	厌氧折流区		好氧区		缺氧过滤区	
	出水TP浓度/(mg/L)	释磷量/(mg/L)	出水TP浓度/(mg/L)	去除率/%	出水TP浓度/(mg/L)	去除率/%
I	16.7±0.9	13.8±0.6	2.8±0.5	80	1.5±0.3	46
II	15.33±1.3	12.1±1.1	2.6±0.3	79	2.0±0.2	23

连续运行 120 d 期间, FcPTR 出水 COD、TN、NH₄⁺-N、TP 平均浓度分别为 74、26、20、1.6 mg/L, 当 FcPTR 应用于与本文进水水质相似的农村地区时, 其出水水质可满足江西、福建、安徽、浙江、陕西、湖南、西藏、重庆、黑龙江、辽宁和吉林 11 个省

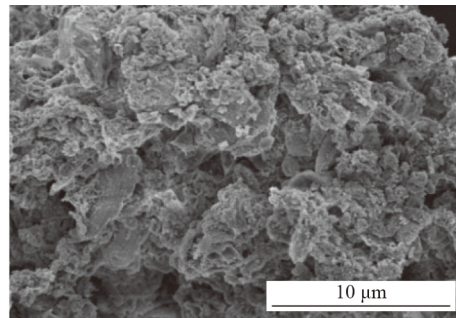
(区、市)发布的农村生活污水处理设施水污染物排放标准二级水质要求^[30]。

2.2 微生物生长及种群结构

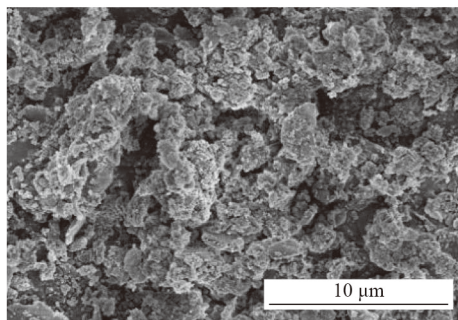
TcST、FcPTR 不同运行阶段污泥和填料样品的 SEM 图如图 4 所示。由图 4(a)、图 4(b)可知, 运行



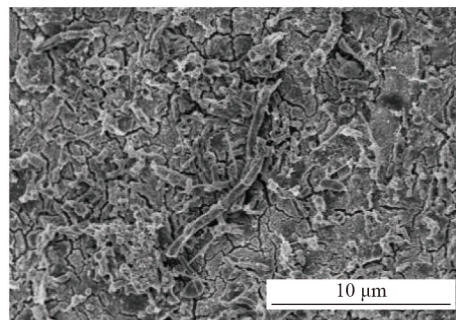
(a) 第 72 天 TcST 污泥



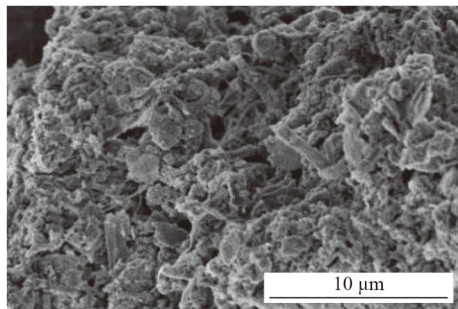
(b) 第 120 天 TcST 污泥



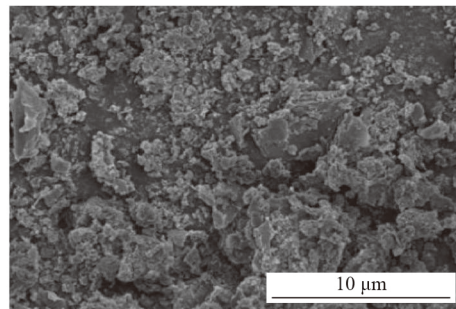
(c) 第 72 天 FcPTR 厌氧折流区填料



(d) 第 120 天 FcPTR 厌氧折流区填料



(e) 第 72 天 FcPTR 污泥



(f) 第 120 天 FcPTR 污泥

图 4 TcST、FcPTR 各阶段不同样品 SEM 图

Fig.4 SEM images of different samples at various stages of TcST and FcPTR

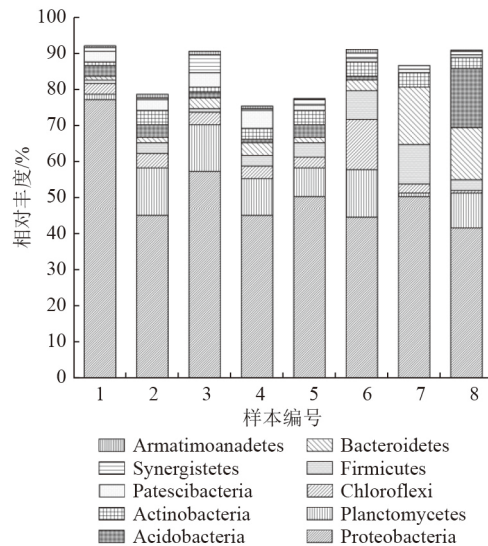
至第 72 天, TcST 污泥表面颗粒排布比较均匀紧密, 微生物在污泥表面生长状况良好; 但缩短 HRT 运行至第 120 天, TcST 污泥颗粒表面稀松、空洞, 杂质相对较多, 几乎没有网状生物膜形成, 无法为污水和微生物的接触提供较大的比表面积, 导致 TcST 对氮、磷的去除效果变差。

由图 4(c)、(e)可知, 运行至第 72 天, FcPTR 厌氧折流区填料和污泥表面的微生物在填料和污泥表面结合紧密, 菌体表面光滑, 形态结构完整, 无机杂质相对较少。结合图 5 分析可知, FcPTR 厌氧折流区微生物群落门水平占比最多的是变形菌门 (Proteobacteria), Proteobacteria 的优势菌群主要包括 α -Proteobacteria、 β -Proteobacteria、 γ -Proteobacteria^[31]。其中 α -Proteobacteria、 β -Proteobacteria 具备脱氮除磷能力, γ -Proteobacteria 为异养型微生物, 以有机物为碳源促进污水中 COD 的降解^[32-33]。这与 2.1 节得到的“FcPTR 厌氧折流区对 COD 去除贡献最大”结论一致。由图 4(d)、(f)可知, 与第 72 天相比, 运行至第 120 天时, FcPTR 厌氧折流区填料表面的生物膜老化, 微生物活性低, 填料中 Proteobacteria 相对丰度从 52% 降至 44%, 而 FcPTR 厌氧折流区污泥的微生物群落中 Proteobacteria 相对丰度从 76% 降至 45% (图 5)。 α -Proteobacteria、 β -Proteobacteria 耐冲击负荷能力差, 部分微生物失活, 导致 FcPTR 厌氧折流区出水氮、磷去除效果变差^[33]。

图 5 显示, 运行至第 72 天, FcPTR 好氧区污泥表面微生物群落中 Proteobacteria 和浮霉菌门 (Planctomycetes) 为优势菌群, 其相对丰度分别为 57% 和 13%, Planctomycetes 可推动厌氧氨氧化反应, 增强对生活污水中氨氮的去除效果^[34]。这印证了 FcPTR 好氧区对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除贡献较大的结论。缩短 HRT 运行至第 120 天, FcPTR 好氧区污泥表面 Proteobacteria 相对丰度下降了 21%, 导致第 120 天 FcPTR 好氧区出水中 COD 平均去除率降低。运行至第 72 天, FcPTR 好氧区填料表面微生物群落中 Proteobacteria 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 为优势菌群, 其相对丰度分别为 50% 和 16%, Bacteroidetes 对复杂生物聚合物的降解起关键作用^[35]; 运行至第 120 天, FcPTR 好氧区填料表面微生物群落中酸杆菌门 (Acidobacteria) 相对丰度显著增加, 达到 16.5%, 这是由于污水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度上升导致 Acidobacteria 快速生长^[36]。

2.3 污染物去除成本对比

以单户式 FcPTR 和 TcST 为对象进行成本分析, 借鉴周琨等^[37]对 TcST 成本分析数据可知, 建设



注: 编号 1、2 分别为运行至第 72 天和第 120 天厌氧折流区的污泥样品; 编号 3、4 分别为运行至第 72 天和第 120 天好氧区的污泥样品; 编号 5、6 分别为运行至第 72 天和第 120 天厌氧折流区的填料样品; 编号 7、8 分别为运行至第 72 天和第 120 天好氧区的填料样品。

图 5 FcPTR 厌氧折流区和好氧区在微生物群落门水平上微生物群落分布

Fig.5 Distribution of microbial communities at the level of microbial community phylum in anaerobic baffled zone and aerobic zone of FcPTR

容积为 2 m³ 的 TcST 所需建筑材料总费用为 1 500.00 元, 用工费用为 567.60 元, 建设成本合计 2 067.60 元。单户式建设容积为 2 m³ 的等体积的 FcPTR 在 TcST 的基础上增加建筑材料 (单砖、水泥、砂、碎石) 使用量、空气泵、回流泵、曝气管和填料等, 材料成本和设备成本共需 2 450.00 元, 用工费用为 600.00 元, 建设成本合计 3 050.00 元。

以年计, 单户式容积均为 2 m³ 的 FcPTR 和 TcST 的运行成本如表 6 所示。经调查, 单户式 TcST 容积为 2 m³ 的情况下, 一年需要抽取粪液 5 次, 根据抽粪车粪罐的体积以及清运距离远近等条

表 6 FcPTR 和 TcST 年运行成本分析

反应器	费用类型	单价	数量	金额/元
FcPTR	抽排	50.00元/次	2次/a	100.00
	用工	132.00元/d	1 d/a	132.00
	填料更换	200.00元/次	1次/a	200.00
	电费	0.28元/m ³	262.8 m ³ /a	73.58
	设备维护	200.00元/次	0.3次/a	60.00
	合计			565.58
TcST	抽排	50.00元/次	5次/a	250.00
	用工	132.00元/d	2.5 d/a	330.00
	管网维护	230.00元/次	0.5次/a	115.00
	集中处理	0.70元/m ³	262.8 m ³ /a	183.96
		合计		

件收费不一^[38]。按最近清运距离 1 km 和最小粪罐体积 2 m³ 收费 50.00 元计算, TcST 年抽排费用为 250.00 元, 年用工费用为 330.00 元; TcST 尾水需要集中处理, 农村生活污水的常用处理工艺为 MBR, 吨水运行成本为 0.70 元^[39], 4 人户型每天产污水量以 0.72 m³ 计算, TcST 尾水年处理费用为 183.96 元; 年管网维护费用为 115.00 元, TcST 年运行成本合计 878.96 元。FcPTR 年运行成本主要包括沉淀池粪污抽排费用、工人用工费用、更换填料费用、设备维护费用和使用空气泵产生的电耗费用, 年运行成本共计 565.58 元。

单户式容积均为 2 m³ 的 FcPTR 和 TcST 在进水水质相同(以进水 COD、NH₄⁺-N 浓度分别为 225、60 mg/L 计)的条件下, 出水 COD 和 NH₄⁺-N 浓度分别达到 100 和 25 mg/L, 废水年排放量为 262.8 m³, 同时运行 10 年, COD 的削减量为 328.5 kg, NH₄⁺-N 的削减量为 92.0 kg。则 10 年内, FcPTR 和 TcST 削减 1 kg COD 分别需要 26.50 和 33.05 元, 削减 1 kg NH₄⁺-N 分别需要 94.63 和 118.01 元。具体核算过程如表 7、表 8 所示。由此可见, 在相同条件下运行 10 年, FcPTR 的单位 COD 和 NH₄⁺-N 的去除成本较 TcST 均降低了 19.8%。

表 7 FcPTR 和 TcST 单位 COD 去除成本

Table 7 Removal costs of FcPTR and TcST per unit COD

反应器	进水COD/(mg/L)	出水COD/(mg/L)	10年COD削减量/kg	建设成本/元	年运行成本/元	10年总成本/元	COD去除成本/(元/kg)
FcPTR	225	100	328.5	3 050.00	565.58	8 705.80	26.50
TcST	225	100	328.5	2 067.60	878.96	10 857.20	33.05

表 8 FcPTR 和 TcST 单位 NH₄⁺-N 去除成本

Table 8 Removal costs of FcPTR and TcST per unit NH₄⁺-N

反应器	进水NH ₄ ⁺ -N浓度/(mg/L)	出水NH ₄ ⁺ -N浓度/(mg/L)	10年NH ₄ ⁺ -N削减量/kg	建设成本/元	年运行成本/元	10年总成本/元	NH ₄ ⁺ -N去除成本/(元/kg)
FcPTR	60	25	92.0	3 050.00	565.58	8 705.80	94.63
TcST	60	25	92.0	2 067.60	878.96	10 857.20	118.01

3 结论

(1) FcPTR 处理农村生活污水效果优于 TcST。运行至第 72 天, FcPTR 出水 COD、NH₄⁺-N、TN 去除率分别为 73%、72%、64%, 依次是 TcST 去除率的 1.49、1.26、1.40 倍。当 FcPTR 应用于我国进水水质相似的农村地区时, 连续运行 120 d, 其出水 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 平均浓度可满足中国 11 个省(区、市)发布的农村生活污水处理设施水污染物排放地方标准中的二级水质要求。

(2) 与 TcST 相比, FcPTR 抗冲击负荷能力更强。阶段 II 缩短 HRT 运行至第 120 天, TcST 中污泥表面几乎没有微生物附着生长; 具备抗冲击负荷能力的 Proteobacteria 是 FcPTR 厌氧折流区、好氧区污泥和填料中的优势菌群, 其提升了 FcPTR 的抗冲击负荷能力。

(3) FcPTR 单位污染物去除成本低于 TcST。经成本核算, 单户式容积均为 2 m³ 的 FcPTR 和 TcST 在进出水水质相同且同时运行 10 年的情况下, FcPTR 去除 1 kg COD、1 kg NH₄⁺-N 成本分别为 26.5、94.63 元, 比 TcST 均降低 19.8%。FcPTR 能在

很大程度上减少农村生活污水的长期处理成本。

参考文献

[1] 宁辉龙. 农村面源污染综合防治研究 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(10): 190-192.
NING H L. Research on comprehensive prevention and control of rural non-point source pollution[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(10): 190-192.

[2] 林龚华. 福建省农户“厕所革命”的调查与思考 [J]. 当代农村财经, 2019(6): 23-25.

[3] 曾琰婷. 基于环境安全与资源化利用的化粪池系统优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

[4] 王玉华, 方颖, 焦隽. 江苏农村“三格式”化粪池污水处理效果评价 [J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 80-83.
WANG Y H, FANG Y, JIAO J. Evaluation of night soil treatment efficiency of "three-grille-mode" septic tanks in the rural area of Jiangsu[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(2): 80-83.

[5] 鲁秀国, 黄林长, 方向波, 等. 农村环境生活污水处理工程初步设计: 以江西省九江市经济技术开发区永安乡为例 [C]//2015 年水资源生态保护与水污染控制研讨会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2016: 4498-4504.

[6] LI J, YU R X. A study on villages of the planning of water infrastructure planning: 25 villages in Shaanxi Province as an

- example[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2023, 72(1): 19-31.
- [7] SANTIAGO-DÍAZ Á L, GARCÍA-ALBORTANTE J, SALAZAR-PELÁEZ M L. UASB-septic tank as an alternative for decentralized wastewater treatment in Mexico[J]. *Environmental Technology*, 2019, 40(14): 1780-1792.
- [8] 敬双怡, 于治豪, 朱浩君, 等. AF-SMBBR 组合工艺处理制浆废水中试试验研究 [J]. *中国造纸*, 2017, 36(7): 25-30.
- JING S Y, YU Z H, ZHU H J, et al. Pilot experiment of pulping effluent treatment by using AF-SMBBR combined process[J]. *China Pulp & Paper*, 2017, 36(7): 25-30.
- [9] 吴沛, 姚以亮. 厌氧反应器处理低浓度废水的研究进展 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2012(19): 93-95.
- [10] HAN W, YUE Q Y, WU S Q, et al. Application and advantages of novel clay ceramic particles (CCPs) in an up-flow anaerobic bio-filter (UAF) for wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 137: 171-178.
- [11] YANG X J, TONG Y M, SONG Y, et al. Domestic sewage and secondary effluent treatment using vertical submerged biological filter[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 82: 012067.
- [12] 杨垒, 李晓彤, 任勇翔, 等. 基于 EEM-PARAFAC 解析厌氧生物滤池对城市污染河流中 DOM 的转化特性 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(7): 1615-1624.
- YANG L, LI X T, REN Y X, et al. Analysis of DOM transformation in polluted urban rivers by anaerobic biofilter based on EEM-PARAFAC[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(7): 1615-1624.
- [13] JO Y, KIM J, LEE C. Continuous treatment of dairy effluent in a downflow anaerobic filter packed with slag grains: reactor performance and kinetics[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 68: 147-152.
- [14] LADU J L C, LÜ X W. Effects of hydraulic retention time, temperature, and effluent recycling on efficiency of anaerobic filter in treating rural domestic wastewater[J]. *Water Science and Engineering*, 2014, 7(2): 168-182.
- [15] LEÓN-BECERRIL E, GARCÍA-CAMACHO J E, del REAL-OLVERA J, et al. Performance of an upflow anaerobic filter in the treatment of cold meat industry wastewater[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 102: 385-391.
- [16] BARBER W P, STUCKEY D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review[J]. *Water Research*, 1999, 33(7): 1559-1578.
- [17] WANG J L, HUANG Y H, ZHAO X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 93(2): 205-208.
- [18] GOPALA KRISHNA G V, KUMAR P, KUMAR P. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR)[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17): 8193-8200.
- [19] 马金霞, 张堃, 傅大放, 等. 聚氨酯填料复合式动态膜反应器脱氮性能研究 [J]. *环境工程*, 2014, 32(1): 42-45.
- MA J X, ZHANG K, FU D F, et al. Study on nitrogen removal performance of hybrid dynamic membrane bioreactor with polyurethane carrier materials[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(1): 42-45.
- [20] JOTHI K J, BALACHANDRAN S, MOHANRAJ K, et al. Fabrications of hybrid Polyurethane-Pd doped ZrO₂ smart carriers for self-healing high corrosion protective coatings[J]. *Environmental Research*, 2022, 211: 113095.
- [21] 彭剑峰, 宋永会, 高红杰, 等. 不同填料曝气生物滤池对河水的净化效能 [J]. *环境工程技术学报*, 2011, 1(4): 339-343.
- PENG J F, SONG Y H, GAO H J, et al. Purification effect of biological aerated filter stuffed with different stuffing for river water[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(4): 339-343.
- [22] 杨延梅, 罗勇, 谭伟, 等. 五格式净粪池 (FcPTR) 启动特性研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 255-261.
- YANG Y M, LUO Y, TAN W, et al. Study on the start-up characteristics of five-compartment purification tank reactor(FcPTR)[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(1): 255-261.
- [23] ZHANG J T, FAN C Z, ZHAO M, et al. A comprehensive review on mixotrophic denitrification processes for biological nitrogen removal[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137474.
- [24] 李军, 关琳琳, 王诗白, 等. HABR 系统实现固相异养与单质硫自养集成反硝化试验 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(3): 314-320.
- LI J, GUAN L L, WANG S B, et al. Solid-phase heterotrophic denitrification and sulfur autotrophic denitrification combined process in HABR system[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(3): 314-320.
- [25] 徐越群, 冯婧, 冯博, 等. 强制内循环厌氧反应器对生活污水处理效果研究 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(2): 112-115.
- XU Y Q, FENG J, FENG B, et al. Study on treatment effect of domestic sewage by forced internal circulation anaerobic reactor[J]. *Yellow River*, 2022, 44(2): 112-115.
- [26] 闫苗苗, 张海涵, 钊珍芳, 等. 生物脱氮技术中好氧反硝化细菌的代谢及应用研究进展 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3): 668-676.
- YAN M M, ZHANG H H, ZHAO Z F, et al. Research progress of metabolism and application of aerobic denitrifying bacteria in biological denitrification technology[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 668-676.
- [27] LU X J, WAN Y L, ZHONG Z X, et al. Integrating sulfur, iron(II), and fixed organic carbon for mixotrophic denitrification in a composite filter bed reactor for decentralized wastewater treatment: performance and microbial community[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148825.
- [28] ONG Y H, CHUA A S M, FUKUSHIMA T, et al. High-temperature EBPR process: the performance, analysis of PAOs and GAOs and the fine-scale population study of *Candidatus* 'Accumulibacter phosphatis'[J]. *Water Research*, 2014, 64: 102-112.
- [29] FAN Z W, ZENG W, MENG Q G, et al. Achieving enhanced

- biological phosphorus removal utilizing waste activated sludge as sole carbon source and simultaneous sludge reduction in sequencing batch reactor[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149291.
- [30] 李云, 夏训峰, 陈盛, 等. 我国农村生活污水处理地方标准现状、问题及对策建议 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 293-300.
- LI Y, XIA X F, CHEN S, et al. Local standards for domestic wastewater treatment in rural areas of China: current situation, problems and suggestion[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 293-300.
- [31] 赵林林, 王海燕, 杨慧芬, 等. PCR-DGGE 研究臭氧耦合 ASBR/SBR 控氮磷污泥减量工艺中的细菌多样性 [J]. *环境工程技术学报*, 2011, 1(2): 123-130.
- ZHAO L L, WANG H Y, YANG H F, et al. Bacterial diversity of the combined ozonation-ASBR/SBR sludge reduction with simultaneous nitrogen and phosphorus removal process using PCR-DGGE[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(2): 123-130.
- [32] BOWMAN D D. Introduction to the alpha-proteobacteria: *Wolbachia* and *Bartonella*, *Rickettsia*, *Brucella*, *Ehrlichia*, and *Anaplasma*[J]. *Topics in Companion Animal Medicine*, 2011, 26(4): 173-177.
- [33] MATHIEU L, BOUTELEUX C, FASS S, et al. Reversible shift in the alpha-, beta- and gamma-proteobacteria populations of drinking water biofilms during discontinuous chlorination[J]. *Water Research*, 2009, 43(14): 3375-3386.
- [34] YA T, DU S, LI Z Y, et al. Successional dynamics of molecular ecological network of anammox microbial communities under elevated salinity[J]. *Water Research*, 2021, 188: 116540.
- [35] NEWTON R J, JONES S E, EILER A, et al. A guide to the natural history of freshwater lake bacteria[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews:MMBR*, 2011, 75(1): 14-49.
- [36] LIU C X, DONG Y H, HOU L Y, et al. Acidobacteria community responses to nitrogen dose and form in Chinese fir plantations in southern China[J]. *Current Microbiology*, 2017, 74(3): 396-403.
- [37] 周琨, 冉毅, 吴进, 等. “沼改厕”推广模式的实现及其在四川省的应用 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 273-280.
- ZHOU K, RAN Y, WU J, et al. Model for popularizing "conversion of biogas to toilet" and its application in Sichuan Province of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(18): 273-280.
- [38] 陈兰鹏. 山东莒县“沼改厕”技术模式及效益分析 [J]. *中国沼气*, 2022, 40(5): 55-58.
- CHEN L P. Technical mode and benefit of "biogas digester to toilet" in Juxian County of Shandong Province[J]. *China Biogas*, 2022, 40(5): 55-58.
- [39] 彭兰. 典型农村生活污水处理工艺选择 [J]. *乡村科技*, 2022, 13(10): 137-141. ⊗