

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.020

污泥生物沥浸深度脱水工艺用于污水厂提标扩建

何志健¹, 贝德光², 许谦², 罗莹²

(1. 南宁建宁水务投资集团有限责任公司, 广西 南宁 530030; 2. 广西绿城水务股份有限公司, 广西 南宁 530031)

摘要: 南宁市江南污水处理厂水质提标及三期扩建工程完成后污水总处理规模将达到 $72\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 预计污泥产量为500 t/d(含水率为80%)。为进一步推动污泥的处理处置实现无害化、减量化, 并为稳定化和资源化创造良好的条件, 该污水处理厂新建了污泥处理系统, 采用生物沥浸深度脱水工艺, 产出泥饼不再黑臭, 含水率降至60%以下, 体积比浓缩污泥减少90%~95%。经过近一年的试运营, 在75%的生产负荷下, 可稳定产出含水率约60%的泥饼约80 t/d, 基本实现设计目标。总结了生物沥浸深度脱水工艺的中试、工程建设以及调试运行的主要内容, 列出了较为详尽的试验数据及工艺参数, 对其他类似污泥处理系统的设计及运行具有借鉴意义。

关键词: 生物沥浸; 污泥处理; 提标改造

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0112-06

Application of Sludge Bioleaching Deep Dehydration in Upgrading and Expansion of a WWTP

HE Zhi-jian¹, BEI De-guang², XU Qian², LUO Ying²

(1. Nanning Jianning Water Investment Group Co. Ltd., Nanning 530030, China; 2. Guangxi Nanning Water Co. Ltd., Nanning 530031, China)

Abstract: After the completion of water quality improvement and phase III expansion project of Jiangnan Wastewater Treatment Plant (WWTP) in Nanning, the total sewage treatment capacity will reach $72\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and the expected sludge output is around 500 t/d with water content of 80%. In order to further realize the harmless processing and minimization of sludge, and create favorable conditions for stabilization and resource utilization of sludge, the WWTP builds a new sludge treatment system, which adopts the bioleaching deep dehydration technology. The output sludge cakes by the technology can fundamentally change the black and odorous appearance of the raw sludge, reduce the water content to less than 60%, and reduce the volume of the thickened sludge by 90% to 95%. After around one year of trial operation, the new sludge treatment system can steadily output around 80 t of mud cakes with the water content of around 60% on a daily basis and under the production load of around 75%, which basically realized the system's designed objective. By summarizing the whole application process of the bioleaching deep dehydration technology from the pilot-scale test to project construction and to trial operation, this paper lists detailed experimental data and technological parameters, which can also provide

基金项目: 广西创新驱动发展专项资金资助项目(桂科AA18118013-5)

通信作者: 许谦 E-mail: 164898609@qq.com

references for the design and operation of the other similar sewage treatment system.

Key words: bioleaching; sludge treatment; upgrading and reconstruction

江南污水处理厂是目前南宁市规模最大的污水处理厂,已建成一期、二期工程,污水处理规模为 $48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。自2015年来,随着南宁市内河综合整治工程不断推进,污水管网节点打通和泵站工程的建设,江南污水处理厂进水量不断增加,已超过设计处理规模,需及时开展三期扩建和水质提标工程,提升处理能力,同时为适应未来水质指标进一步提高的趋势,将出水水质由一级B标准整体提升至一级A标准。

1 工程概况

江南污水处理厂水质提标及三期扩建工程包括新增污水处理能力 $24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,按一期、二期和三期总共 $72 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水总处理规模进行水质提标改造,新建污泥处理系统也按 $72 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理总规模计算,采用污泥生物沥浸深度脱水工艺。扩建前日均产出含水率为80%的剩余污泥约350 t,因一期、二期工程采用常规的机械浓缩+带式压滤机脱水工艺,完全依靠机械设备的物理作用进行污泥处理,随着污泥量的不断增加,浓缩与压滤机械长期高负荷运转,需要经常停机维护,导致剩余污泥无法正常稳定产出。水质提标及三期扩建工程完成后污泥产量持续增加,而原一、二期工程污泥处理系统仅能生产含水率为80%的污泥,对后续的运输及处理处置造成困难,因此需要设计新的污泥处理系统,推动实现污泥无害化和减量化。

2 污泥处理工艺方案比选及原理

经测算,水质提标及三期扩建工程完成后污泥产量约500 t/d(含水率为80%),总体思路是污泥在厂内进行处理后,产出含水率为60%的泥饼,部分进入水泥厂焚烧,部分进行堆肥处置。对调理-压榨深度脱水工艺、污泥加钙稳定干化工艺和生物沥浸深度脱水工艺进行比选。根据现场调研和现况泥路分析,三种工艺都能使污泥的含水率大幅下降,但调理-压榨深度脱水工艺和污泥加钙稳定干化工艺因在污泥干化过程中需要投加调理药剂、石灰等,反而会增加污泥绝干量,污泥的减量化难以得到较大程度地实现。生物沥浸深度脱水工艺的技术性能与其他两个方案相比具有一定优势,不会

增加污泥绝干量,有利于后续处置。

生物沥浸深度脱水工艺是新型微生物污泥处理技术,通过在剩余污泥中接种特殊的微生物菌群,对污泥进行改性处理。在专用营养剂的助力下,污泥的沉降、脱水性能稳步改善,恶臭气味得以消除。生物沥浸处理后可不加任何絮凝剂,直接进行板框压滤脱水至污泥含水率60%以下,体积相对原浓缩污泥减少90%~95%,获得高干度的“洁净”污泥^[1-2]。生物沥浸深度脱水工艺重点解决以往常规污水处理中离心机和带式机脱水效果不佳、污泥产量多等问题,使污泥处理无害化、减量化,并为稳定化和资源化创造良好的条件^[1-2]。

3 中试研究

3.1 中试目的

生物沥浸深度脱水工艺首次应用于南宁市的污水处理厂,并无实际可参考的运行经验数据,南宁市的气候环境、污水特性等因素是否会影响生物沥浸效果亦未可知。因此,试验主要目的是验证生物沥浸深度脱水技术的适应性并模拟运行效果,同时通过试验对污泥含水率、有机质等核心参数进行分析对比,总结出适用于江南污水处理厂剩余污泥的菌种接种量和营养剂投加比。中试服务于实际工程设计并为投产后的调试运行提供参考经验。

3.2 中试过程

试验相关设备包括可移动集装箱式生物沥浸反应系统(螺杆式空气压缩机、储气库、曝气装置、生物沥浸反应器)以及板框压滤系统等辅助设备^[3]。

试验过程:①在好氧的情况下恢复生物沥浸反应器中原始污泥生物沥浸细菌的活性,采用江南污水处理厂污泥进行微生物接种和驯化。②将800~1 200 L剩余污泥通过泥浆泵送入生物沥浸反应器与菌种混合。同时在污泥泵进口处取样,测定该批次污泥的含水率和有机物含量,从而计算出该批次污泥的绝干量^[4]。结合试验方案中设定的营养剂投加比,向生物沥浸反应器中准确投加定量生物沥浸菌种专用营养剂,在曝气的作用下使污泥与生物沥浸细菌充分反应,改善污泥的沉降和脱水性能,经过约48 h的反应处理后,测定并记录该批次剩余污

泥的pH。③反应器中经过生物改性后的污泥,除保留500 L作为下一批次试验的菌种外,其余全部泵入板框压滤机进行压榨脱水形成泥饼,取泥饼样品检测其pH、含水率和有机质含量。至此,一个批次的试验结束,生物沥浸反应器中继续注入原泥,开始下一批次试验。

中试于2016年9月正式启动,大约每2天反应一批污泥。按照供试污泥的不同来源共进行了三个阶段的中试。前两个阶段主要验证工艺的适用性,使用一期和二期混合剩余污泥作为原料的第三阶段试验最符合工程实际运行时的进泥情况,因此重点对第三阶段试验进行数据分析。

3.3 试验数据分析

3.3.1 含水率

经过脱水处理,原始剩余污泥的含水率大幅下降,泥饼含水率降至60%以下,所有批次的泥饼含水率平均值为51%(见图1)。与传统仅能将含水率降至80%的机械浓缩-带式压滤机工艺相比,污泥脱水减量化效果显著。

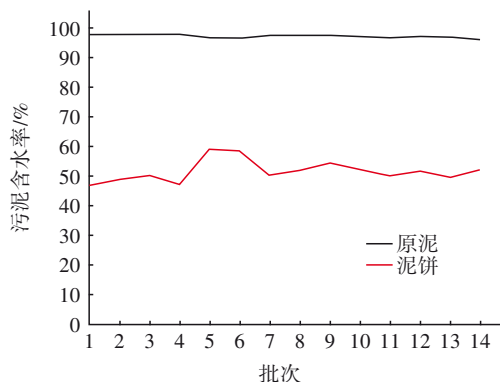


图1 生物沥浸处理前后污泥含水率变化

Fig.1 Changes of sludge moisture content before and after bioleaching treatment

3.3.2 有机质

江南污水处理厂污泥有机质含量普遍较低(25%~30%)。有机质含量越高,污泥的缓冲性能越强,pH越难降低。与此同时,由于高有机质污泥中含有较多的抑制因子,会对生物沥浸菌群中的硫杆菌的活性造成不良影响,进一步延长污泥获得最佳酸化时间。因此,低有机质、低浓度的污泥反应时间短,加药量较少,提高了实际应用的经济效益。与原泥相比,经过生物沥浸技术处理后的污泥有机物含量的波动幅度很小(见图2),排除检测误差等

因素影响后,可以认为生物沥浸处理后污泥有机质基本没有流失,后续的资源化利用可以较好地实现。

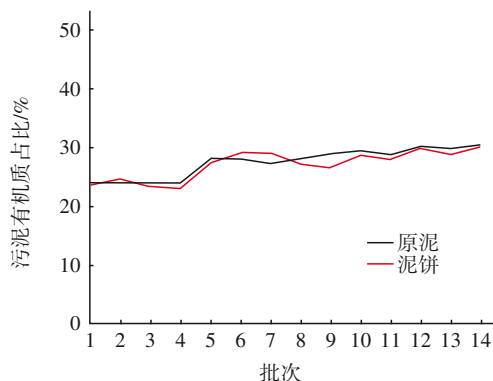


图2 生物沥浸处理前后污泥有机质变化情况

Fig.2 Changes of sludge organic matter before and after bioleaching treatment

3.3.3 pH

泥饼和压滤液呈弱酸性,pH为4.5~5.5,表明生物沥浸细菌生长良好,污泥改性效果明显。而泥饼在放置过程中,酸性物质会逐渐与外界物质发生反应使泥饼趋向中性,符合大部分后续利用的要求(见表1)。

表1 泥饼pH变化

Tab.1 pH change of sludge cake

抽查批次	pH			
	泥饼	放置24 h后	放置48 h后	放置76 h后
1	5.3	5.6	5.8	6.6
2	4.8	5.5	5.6	6.3
3	5.1	5.3	5.9	6.5

3.3.4 压滤液水质

压滤液的各项污染物指标均满足江南污水处理厂进水水质要求,不会对前端污水处理产生任何水质冲击(见表2)。

表2 压滤液水质

Tab.2 Water quality of filter press fluid

抽查批次	mg·L ⁻¹			
	TP	TN	氨氮	COD
1	0.18	32.8	26.3	39
2	0.17	38.3	30.0	30
3	0.20	36.2	25.6	33

3.3.5 营养剂投加比

营养剂是生物沥浸微生物加速生长的能量来源,含有N、P、K、S、Ca、Fe、Si等多种元素及少量用于降低疏水性的表面活性物质,是与生物沥浸菌

种搭配使用的专利产品,不会增加污泥绝干量和产生其他毒性,不影响脱水污泥后续处置出路^[1]。营养剂投加比为营养剂投加量与污泥绝干量的比值,与污泥生物沥浸反应后的 pH 存在相关性,即营养剂投加比越高,反应后污泥的 pH 越低,污泥脱水性能改善也就越明显。中试时,因江南污水处理厂剩余污泥有机物浓度偏低,试验确定江南污水处理厂污泥生物沥浸深度脱水的最适营养剂投加比为 11%~13.5%。

3.4 中试结论

江南污水处理厂剩余污泥经生物沥浸和板框压滤深度脱水处理后含水率均可稳定在 60% 以下,泥饼呈土黄色,无明显臭味产生。与此同时,生物沥浸深度脱水后污泥中的有机质及热值得到完好保留,且含水率大大降低,不管后续采取何种处置方式,污泥处置成本大幅降低,综合经济效益明显。

4 污泥生物沥浸工艺流程与工程设计

4.1 污泥生物沥浸工艺流程

江南污水处理厂原污泥含水率为 96%~98%,有机质、pH、重金属等参数均未超标,符合生物沥浸设计进泥指标要求。设计进、出泥泥质见表 3。

表 3 设计进、出泥泥质

Tab.3 Design inlet and outlet sludge quality

项目	含水率/%	pH	有机质/%	重金属含量
进泥	97~98	6~7	20~40	无超标项
出泥	≤60	4~6	20~40	无超标项

设计污泥处理工艺流程如图 3 所示。

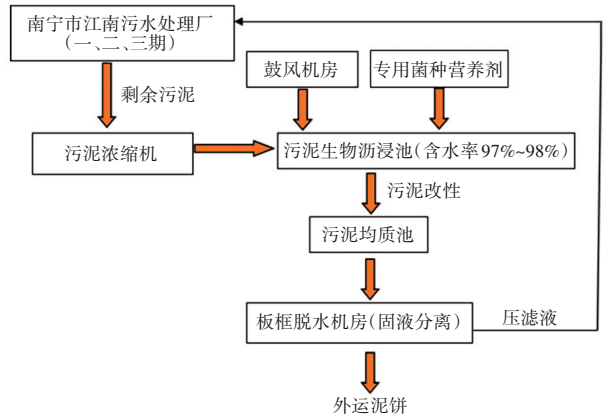


图 3 生物沥浸深度脱水工艺流程

Fig.3 Flow chart of bioleaching deep dehydration process
一期、二期和三期全部剩余污泥进入污泥浓缩机中调整其含水率至 97%~98%(设计进泥含水率),

经浓缩后的污泥进入生物沥浸池,在曝气的情况下使生物沥浸菌群与污泥充分反应,生物沥浸池出泥自流至污泥均质池,后用螺杆泵送至板框脱水机房进行固液分离,产生的泥饼直接运出厂区进行后续处置,压滤液则回流至污水处理厂前端处理。

4.2 生物沥浸反应系统

生物沥浸系统由生物沥浸池、污泥均质池、污泥提升泵房、加药间、鼓风机房等组成。剩余污泥首先通过污泥浓缩机控制其含水率为 97%~98%,然后进入生物沥浸池,在投加营养剂和持续曝气的作用下,生物沥浸微生物快速增殖,成为污泥中的高密度和优势菌群,通过替代效应、酸化效应等打破污泥原始稳定结构,改善污泥的沉降以及脱水性能^[1]。经生物沥浸改性后的污泥,部分经过每个反应系列配备的污泥回流泵回流至生物沥浸池,作为微生物菌种与下一批次污泥进行反应,回流比约为 40%,其余部分则统一汇集到生物沥浸池中部的污泥均质池,等待进入板框压滤脱水系统处理。污泥均质池的作用是通过搅拌和曝气对生物沥浸改性后的污泥进行均质处理,避免产生厌氧环境,影响后续板框机脱水效果。

4.3 板框压滤脱水系统

板框压滤脱水系统由进泥调质池、污泥泵、隔膜式板框压滤机、带式输送机等组成。将污泥均质池中生物沥浸改性后的污泥输送至进泥调质池准备进料,进泥调质池的主要作用是调控隔膜式板框压滤机的进泥批次。板框脱水机房设有 9 台隔膜式板框压滤机(7 用 2 备),其工作流程主要分为“进料、压榨、反吹、卸料”4 个步骤^[5]。

5 主要构筑物及设备参数

5.1 生物沥浸池

设计总流量为 4 194.6 m³/d(污泥含水率为 97.6%),分为东西两部分(每部分 4 个系列),共 8 个系列,单系列尺寸(L×B×H)为 2.8 m×2.8 m×7.0 m、24 格,有效水深 6 m,停留时间 48 h(常规),曝气量 201 m³/min。设置污泥回流泵 9 台,流量 60 m³/h,扬程 120 kPa,8 用 1 备。

5.2 污泥均质池

设计总流量 4 194.6 m³/d,池体尺寸(L×B×H)为 9.0 m×13.95 m×5.5 m,有效水深 4 m。设置搅拌机 6 台,直径 1 500 mm。

5.3 污泥提升泵房

设置3台污泥提升泵,将均质池出泥泵送至板框脱水机房,流量120 m³/h,扬程250 kPa,2用1备。设置2台曝气用鼓风机,1用1备,为污泥均质池曝气管路供气风量17.35 m³/min。

5.4 生物沥浸加药间

生物沥浸加药间由药剂储存区域、溶药池及设备间组成。其中药剂存储区域面积为485.52 m²,药剂为双层放置,加药量15 t/d(干粉),满足30 d储存药剂时间。设有4座半地下溶药池,有效水深2.25 m,有效容积36 m³/座,生物沥浸池需药量100 m³/d(药剂浓度15%),设5台加药泵(4用1备)。

5.5 生物沥浸鼓风机房

鼓风机房由机器间、进风塔、进风廊道、出风管沟等组成。总平面尺寸为29.5 m×11.7 m。设置5台单级离心鼓风机,4用1备,单台风量60 m³/min,气量调节范围为45%~100%,鼓风机设有900 mm×900 mm进风方管、DN750散热排风管、DN350出风管、入口过滤器和消声器。输气管低点设置排水分、油分的放泄口和清扫管道的排出口。

5.6 板框脱水机房

设9台隔膜式板框压滤机(7用2备),单机处理能力15 t/d,进泥含水率95%~98%,出泥含水率≤

60%,滤板尺寸2.0 m×2.0 m,总过滤面积800 m²。板框压滤机配备压榨泵9台,流量16 m³/h,扬程2.2 MPa。板框压滤机南侧设9组高压进泥泵组、9组低压进泥泵组及1套压榨系统。机房附属设备间内设1套冲洗水系统。机房外南侧设6座进泥调质池。

6 工程运行效果

江南污水处理厂污泥生物沥浸深度脱水系统总投资为25 818万元,于2020年1月正式开始调试运行。前期调试运行期间,根据生产实际情况和数据对比分析需求,先运行6个系列的生物沥浸池,原有的一期、二期工程机械浓缩+带式压滤机脱水系统照常运行,在进泥条件完全相同的情况下,对污泥脱水效果进行比较,同时逐步校正生物沥浸池运行工况数据。

在进泥条件完全相同的情况下,以连续运行3个月的数据进行对比(见表4),生物沥浸深度脱水系统产出的泥饼含水率能稳定降至60%左右,相较于机械浓缩+带式压滤机脱水系统产生的泥饼,含水率大幅下降,有机质含量变化则相差不大,说明生物沥浸脱水工艺实现了明显的减量化,且污泥中的有机质以及钾、氮等基本元素得到保留,各项重金属指标亦符合国标要求,未对污泥后续处置及资源化利用产生影响,达到设计目标要求。

表4 江南污水处理厂二期与三期产出泥饼主要成分

Tab.4 Main components of sludge cake produced in phase II and phase III of Jiangnan WWTP

项 目	江南污水处理厂二期			江南污水处理厂三期		
	2020年9月	2020年10月	2020年11月	2020年9月	2020年10月	2020年11月
含水率/%	76.58	79.6	77	60.8	61.8	61.1
有机质/%	37.1	39.4	37.4	40.2	38	39.1
氮/(mg·kg ⁻¹)	2.41×10 ⁴	2.60×10 ⁴	3.92×10 ⁴	2.41×10 ⁴	2.63×10 ⁴	2.55×10 ⁴
磷/(mg·kg ⁻¹)	1.68×10 ⁴	1.43×10 ⁴	1.52×10 ⁴	1.54×10 ⁴	1.58×10 ⁴	1.44×10 ⁴
钾/(mg·kg ⁻¹)	1.22×10 ⁴	1.44×10 ⁴	1.15×10 ⁴	9.81×10 ³	1.14×10 ⁴	1.05×10 ⁴
总铜/(mg·kg ⁻¹)	133	125	166	86.2	106	111
总铝/(mg·kg ⁻¹)	7.02	3.84	4.06	5.74	3.81	4.92
总镉/(mg·kg ⁻¹)	2.06	2.09	1.98	0.632	0.956	0.607
总铬/(mg·kg ⁻¹)	238	247	179	150	182	111
总铅/(mg·kg ⁻¹)	106	91.7	88.6	90.8	84.7	63.2
总汞/(mg·kg ⁻¹)	2.43	4.53	3.47	3.06	2.36	2.02
总锌/(mg·kg ⁻¹)	702	861	885	266	702	252
总砷/(mg·kg ⁻¹)	17.5	9.74	9.51	18.3	9.46	8.58
总镍/(mg·kg ⁻¹)	45.4	103	75.9	31.3	37.0	33.1

7 问题及建议

表5是中试与实际运行的数据对比,其中泥饼

含水率、泥饼有机质含量以及营养剂投加比三项数据存在差异。

表5 中试和实际运行生产泥饼的主要数据对比
Tab.5 Comparison of main data of sludge cakes in
pilot-scale test and actual operation

项 目	中试数值	工程实际运行数值
泥饼含水率/%	约51	约60
泥饼有机质/%	约25	约45
泥饼pH	4~6	4~6
泥饼气味	无明显臭味	无明显臭味
泥饼重金属含量	无超标项	无超标项
营养剂投加比/%	11~13.5	19

生产泥饼含水率略高是因为实际运行时污泥体量、设备运行工况等条件均与中试有较大区别,并且实际运行时需要尽可能地降低运行成本,泥饼含水率达到设计要求即可,无需进一步降低。最主要的问题为实际运行时营养剂最适投加比需要达到19%,与中试时的11%~13.5%相比有较大提升。营养剂投加比越高意味着处理同样体量的污泥所需投加的营养剂越多。以营养剂投加比为19%,其余条件按设计要求进行估算,污泥生物沥浸系统运行成本约为165元/t(污泥含水率80%,下同),其中营养剂费用约占成本的60%,相较于中试结果提高25~40元/t。主要原因在于2016年中试和项目设计时,江南污水处理厂剩余污泥有机质含量仅为25%左右,而南宁市经过近4年的黑臭水体攻关治理,使得江南污水处理厂进水的COD和BOD₅等指标大幅提高,产出的剩余污泥有机质含量也相应提高,目前平均达到45%,较2016年中试时几乎翻倍。高有机质含量的污泥对生物沥浸菌群的抑制作用增强,需要提高营养剂投加比来维持生物沥浸菌群的工作活性,这说明生物沥浸系统对进泥的有机质含量指标较为敏感,应在设计阶段对污水处理厂的进水水质及剩余污泥相关指标特性做出适当远期预测,并将预测结果纳入系统工艺设计和成本分析推算中,这样有利于项目建设与运营的成本目标把控。

8 结语

为使生物沥浸工艺在南宁市江南污水处理厂得以成功应用,从水质提标和三期扩建工程项目前期开始统筹策划,按工艺比选、中试、工程建设、调试运行的“四步走”计划逐项落实。项目建成后,经过近一年的运营及调整,生物沥浸反应系统和板框压滤脱水系统运行稳定,在75%生产负荷下,可生

产含水率约60%的脱水泥饼约80 t/d,污泥稳定化、无害化及减量化效果明显,实现了工程设计目标。

参考文献:

- [1] 周立祥. 污泥生物沥浸处理技术及其工程应用[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 154-166.
ZHOU Lixiang. Bioreaching role in improving sludge in deep dewatering and removal of sludge-borne metals and its engineering application [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35 (5): 154-166 (in Chinese).
- [2] 瞿祥. 生物沥浸法提高污泥脱水性能的工程参数优化[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
ZI Xiang. Engineering Parameter Optimization of Bioreaching Method in Improving the Dewatering Performance of Sludge [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [3] 韩德周, 魏宏, 李妍, 等. 城镇污泥生物沥浸减量试验研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(17): 139-144.
HAN Dezhou, WEI Hong, LI Yan, et al. Study on sludge reduction by bioreaching technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31 (17): 139-144 (in Chinese).
- [4] 侯晓峰, 赵建军, 马芸, 等. 西安第六污水处理厂污泥生物沥浸工艺改进与调试[J]. 给水排水, 2014, 40(3): 18-22.
HOU Xiaofeng, ZHAO Jianjun, MA Yun, et al. Upgrading and adjusting of the sludge bioreaching process in Xi'an No. 6 wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(3): 18-22 (in Chinese).
- [5] 董沫, 韩丹, 戴明华, 等. 北京槐房再生水厂泥区板框系统设计及讨论[J]. 给水排水, 2017, 43(7): 12-15.
DONG Mo, HAN Dan, DAI Minghua, et al. Design and discussion of the slab system in the mud area of Beijing Huafang reclaimed water plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43 (7): 12-15 (in Chinese).

作者简介: 何志健(1993-), 男, 广西梧州人, 大学本科, 工程师, 从事给排水技术管理工作。

E-mail: hezhijian7@163.com

收稿日期: 2021-02-07

修回日期: 2021-02-25

(编辑: 衣春敏)