

# 襄阳护城河清淤底泥资源化制备种植土工艺设计

石稳民<sup>1,2</sup>, 黄文海<sup>1,2</sup>, 罗金学<sup>1,2</sup>, 邱震寰<sup>1,2</sup>, 薛强<sup>1,2</sup>, 秦雄<sup>1,2</sup>,  
梁亚楠<sup>1,2</sup>, 姚雯<sup>1,2</sup>, 李思洁<sup>1,2</sup>

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 中建三局水务环保设计研究院,  
湖北 武汉 430014)

**摘要:** 针对清淤工程产生的大量脱水泥饼的消纳难题, 襄阳护城河清淤项目经调研比选设计了一套利用清淤底泥制备绿化种植土的工艺系统。该工程设计处理规模为 100 t/d, 以秸秆粉为主要添加材料, 采用强化搅拌+快速堆肥工艺制备绿化种植土。结果表明, 淤泥基绿化种植土主要性能指标达到《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016) 规范要求, 栽植试验效果良好, 可满足鱼梁洲中心公园绿化建设种植土需求。该工程总投资为 304.40 万元, 单位直接处理成本为 25.7 元/t, 实现了脱水泥饼的资源化再利用, 具有较好的经济效益和环境效益, 可为类似工程脱水泥饼消纳问题提供借鉴。

**关键词:** 清淤底泥; 资源化; 种植土; 工艺设计

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)06-0091-06

## Process Design for Producing Planting Soil from Dredged Sediment of Xiangyang Moat

SHI Wen-min<sup>1,2</sup>, HUANG Wen-hai<sup>1,2</sup>, LUO Jin-xue<sup>1,2</sup>, QIU Zhen-huan<sup>1,2</sup>,  
XUE Qiang<sup>1,2</sup>, QIN Xiong<sup>1,2</sup>, LIANG Ya-nan<sup>1,2</sup>, YAO Wen<sup>1,2</sup>, LI Si-jie<sup>1,2</sup>

(1. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056,  
China; 2. China Construction Third Bureau Water & Environment Design and Research  
Institute, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** To solve the disposal problem of large amount of dewatered sludge cake produced from dredging project, a set of process system was designed to produce planting soil for greening from dewatered sediment in Xiangyang moat dredging project through investigation and comparison. The design capacity of the project was 100 t/d, the straw powder was chosen as the dominated additives and a process of strengthened stir & rapid composting was adopted. The results showed that the main indicators of planting soil for greening produced from dewatered sediment reached the requirements of *Planting Soil for Greening* (CJ/T 340-2016). The planting test turned out to be satisfactory, which could meet the demand for planting soil in the greening construction of Yuliang island central park. The total investment of the project was 3.044 million yuan, and the direct unit operation cost was 25.7 yuan/t. This project realized the reutilization of dewatered sediment, which exhibited preferable economic and environmental benefits, and could provide reference for similar projects in disposal of dewatered sediment.

**Key words:** dredged sediment; reutilization; planting soil; process design

随着我国水环境治理工程的大规模开展,大量河湖底泥清淤工程得到实施,同时产生了数量巨大的清淤底泥。据统计,仅珠江三角洲地区每年产生的清淤底泥数量就达  $8\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>。清淤底泥含水率高、强度低,往往含有病原菌、重金属和有毒有害难降解有机物等有害成分<sup>[2]</sup>,如何安全妥善处置数量巨大的清淤底泥已成为亟待解决的难题。

传统的河湖淤泥处理以陆地堆埋处理为主,该工艺占地面积大、处理效率低、二次污染严重,随着土地资源的日益紧缺,堆埋处置方式遭遇瓶颈。近年来,以脱水固结一体化工艺为代表的新型淤泥处理工艺逐渐得到工程应用,如武汉东湖通道湖底淤泥处理工程<sup>[3]</sup>、武汉墨水湖淤泥处置工程<sup>[4]</sup>、山美水库疏浚底泥处置工程<sup>[5]</sup>等,该工艺具有占地面积小、脱水效率高、二次污染小的优点,可实现清淤底泥的减量化、无害化和稳定化。然而,由于抛海、吹填、填埋等方式逐渐受到限制,大量脱水泥饼的最终处置问题形势严峻,对清淤底泥进行资源化综合利用成为必然选择。

在襄阳护城河清淤项目中,采用改进固结压滤脱水工艺对清淤底泥进行减量化和稳定化处理,脱水泥饼含水率可降至 35% 以下。结合底泥性质检测分析及项目周边情况调研,采用强化搅拌+快速堆肥工艺对脱水泥饼进行资源化利用,制成绿化种植土后运往鱼梁洲用于公园建设。

## 1 工程概况

襄阳护城河清淤项目位于襄城区,清淤面积为  $54.8 \text{ hm}^2$ ,总清淤方量(水下方)为  $35.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。淤泥处置中心位于护城河水上公园旁,淤泥处置中心总占地面积约  $16\,200 \text{ m}^2$ ,采用改进的固结压滤脱水工艺,清淤淤泥经分离分级、浓缩调节、调质调理、板框压滤等工艺步骤进行脱水处理,淤泥含水率从 90% 以上降至 35% 以下。尾水采用超磁分离工艺处理后达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准后泵送至污水厂进行处理。

脱水泥饼资源化制备绿化种植土工程位于淤泥处置中心西北角,设计处理规模为  $100 \text{ t/d}$ ,总占地面积约  $750 \text{ m}^2$ 。脱水泥饼经破碎均化、材料添加、强化搅拌、快速堆肥等处理步骤,成品种植土指标满足《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)规范要求。

## 2 脱水泥饼消纳方案比选

### 2.1 底泥特性分析

根据前期底泥取样检测情况,襄阳护城河底泥特性分析如表 1 所示。由于沿岸无工业废水排放,襄阳护城河底泥污染较轻,主要为氮磷有机污染,重金属含量较低。经过固结压滤脱水工艺稳定化处理后,脱水泥饼含水率均在 35% 以下,淤泥中重金属含量进一步降低,远远低于《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)限值要求。

表 1 襄阳护城河底泥及脱水泥饼特性参数

Tab. 1 Characteristic parameters of sediment and dewatered sediment of Xiangyang moat

采样点位	pH 值	含水率/%	全氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	总磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	汞/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	铅/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	镉/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	铜/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	锌/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	铬/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	镍/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	砷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
护城河西门卫计委(1#)	6.9	68.6	566	803	0.103	42.3	0.37	41.3	188	60.2	21.7	10.06
护城河昭明小学旁(2#)	7.4	71.8	496	753	0.133	39.3	0.30	41.5	187	64.3	30.8	10.13
护城河华美酒店旁(3#)	6.8	70.4	526	654	0.130	43.4	0.32	41.4	150	58.4	30.7	8.19
护城河仲宣楼旁(4#)	7.2	66.9	506	774	0.143	41.3	0.29	42.3	198	61.1	28.9	9.16
护城河福德来旁(5#)	6.9	72.3	557	713	0.130	42.2	0.33	41.1	177	66.3	33.5	10.23
脱水泥饼	$11.5 \pm 0.5$	$35 \pm 5$	—	—	0.2	20.9	ND	16.3	32.5	21.8	18.1	5.7
《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》 (GB/T 23486—2009) 限值	酸性土壤 ( $\text{pH} < 6.5$ )	—	总氮+总磷+ 总钾 $\geq 30 \text{ g/kg}$		5	300	5	800	2 000	600	100	75
	中、碱性土壤 ( $\text{pH} \geq 6.5$ )	—			15	1 000	20	1 500	4 000	1 000	200	75

2.2 泥饼消纳方案比选

根据国内外相关工程经验,清淤底泥的最终消纳方式主要包括安全填埋、土地利用、工程回用以及建材利用等<sup>[6]</sup>。上述几种消纳方案的基本思路分析如下:

① 外运填埋

淤泥脱水泥饼运往垃圾填埋场或特定淤泥填埋场进行安全填埋是以往较为普遍的淤泥消纳方式。此种消纳方案操作简单,成本相对较低,但填埋处置占用大量的土地资源且二次污染严重。随着城市土地资源的日趋紧张,尤其在建成区内,淤泥填埋场地已严重受限,大方量的淤泥脱水泥饼外运填埋已失去其可行性。

② 土地利用

由于淤泥通常富含 N、P、K 等植物所需的营养成分,因此可以把经处理后的清淤底泥应用于园林、草地、林地、湿地、农田、严重扰动的土地等的建设。土地利用工艺简单、投资少、能耗低,其中有机部分可转化成土壤改良剂成分,重新进入自然环境的物质循环和能量循环中,是最有发展潜力的处置方式。然而,河道淤泥土地利用的前提条件是其所含的有害成分不超过相关标准规范限值。

③ 工程回用

在水环境综合治理工程中,除清淤工程外,往往

包含大量的地形整理、路基底基层填筑、湿地建设工程或者河道堤防等其他工程。淤泥经过一定的技术改良(如添加固化材料),达到工程要求,可以生产为固化填土、路基填土、湿地填料、河道堤防填筑材料等,就近回用于上述工程建设中。

④ 建材利用

由于河道淤泥的成分主要为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等氧化物成分,与黏土、页岩等原料的组成基本相似,因此河道淤泥具备替代黏土、页岩制备建材(如陶粒、烧结砖、透水砖、水泥熟料等)的可行性。利用淤泥烧制建材,不仅可以解决河道淤泥难消纳的现实问题,而且满足砖瓦、陶粒等企业对于原材料的需求。

结合襄阳护城河项目实际情况,对以上几种脱水泥饼消纳方式的综合对比分析见表 2。由于襄阳护城河清淤项目处理量大、工期紧,周边无额外可用建设用地,因而建设大型集中式泥饼资源化利用中心的消纳方式不可行;且该项目为单纯环保清淤项目,并无其他配套建设工程,采取脱水泥饼工程回用的方式消纳去向不明。襄阳市鱼梁洲中心公园建设有大量园林绿化土需求,结合底泥性质分析,最终确定采用“强化搅拌+快速堆肥”工艺对脱水泥饼进行资源化利用,制备园林绿化种植土,运往鱼梁洲用作绿化底肥。

表 2 几种脱水泥饼消纳方式综合对比

Tab. 2 Comprehensive comparison of different disposal methods for dewatered sediment

消纳方式	主要优点	主要缺点	工程适用性分析
安全填埋	处理工艺简单、处理量大、成本低	占地面积大,易造成二次污染	①襄阳市洪山头垃圾填埋场距项目地点 21 km,已于 2010 年进行了封场,城区生活垃圾全部由填埋改为焚烧处理;②项目位于主城区,周边区域为核心建成区,并无条件合适的可供填埋的山谷或洼地
土地利用	充分利用底泥中的营养物质,改善土壤物理性质,提高土壤肥力	可能含重金属或有机物污染,直接进入食物链,造成二次污染风险较大;产品市场接受度较低	①底泥检测分析显示襄阳护城河底泥并无重金属污染;②距项目 10 km 的鱼梁洲正在建设中央公园,有大量园林绿化土需求;③项目主管单位襄阳市水利局已与相关单位进行沟通,检测合格的淤泥基绿化种植土可作为公园建设的底肥
工程回用	就近消纳、可节省部分土方外购成本、综合消纳成本低	消纳量受工程实际情况及周边项目需求影响大;需额外添加固化材料	①脱水泥饼土工性质不能满足路基、堤岸等建设需求,需进一步改性,提高固化处理成本;②本工程为纯清淤项目,并无其他配套建设工程,工程回用去路不明
建材利用	对重金属固定作用好,节约黏土资源	环保要求高,烧结成本高,产品出路不畅	①需建设专门的资源化场地,项目周边无其他可用建设用地;②项目体量大、工期紧,建材利用消纳量有限,产品市场接受度不高

3 工艺设计

3.1 工艺介绍

襄阳护城河清淤项目脱水泥饼“强化搅拌+快

速堆肥”制备园林绿化种植土工艺流程如图 1 所示。由固结压滤脱水工艺生产的低含水率脱水泥饼经机械破碎均化处理后运往称量配料系统。根据营



营养物质设计配伍值准确称量添加辅料,采用双变频盘式行星搅拌系统对泥饼混合料进行强化搅拌。混合均匀后的泥饼混合料运往通风室,加入适宜比例的复合好氧堆肥微生物菌剂促进混合料快速腐熟,成品外运用作园林绿化种植土。

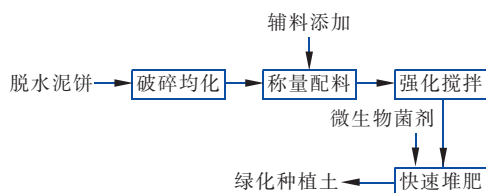


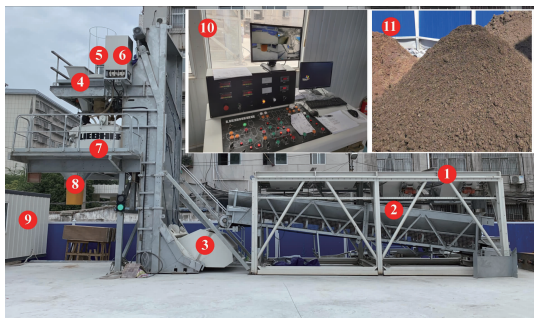
图1 脱水泥饼制种植土工艺流程

Fig.1 Flow chart of the production of planting soil from dewatered sediment

### 3.2 系统设计

襄阳护城河清淤底泥泥饼资源化制备种植土工程设计规模为100 t/d(按8 h/d工作时间),系统设计进泥泥饼含水率为 $(35 \pm 5)\%$ ,设计种植土泥质指标参数pH、含盐量、有机质、质地和入渗率5项主控指标达到《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)规范要求。

脱水泥饼制备种植土系统布置如图2所示。



①料口 ②配料皮带秤 ③斗式提升机 ④料斗进口  
⑤袋式除尘器 ⑥控制电柜 ⑦行星搅拌机 ⑧出料口  
⑨自控室 ⑩自控及监控系统 ⑪堆肥系统

图2 脱水泥饼制种植土系统布置

Fig.2 System layout of the production of planting soil from dewatered sediment

各工艺设计及要求如下:

#### ① 破碎均化

脱水后的泥饼呈硬塑状,破碎机械选型的重点在于防止淤泥结块。脱水泥饼经推土机运送至锤式破碎机,再由高速旋转的锤头进行二级冲击破碎,破碎后的泥饼由破碎机下部出料口排出。

泥饼破碎系统占地为 $3\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,设计处理能力为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ ,额定功率为30 kW,进泥尺寸 $\leq 100$

cm,出料泥饼尺寸为 $1 \sim 3\text{ cm}$ 。

#### ② 称量喂料

破碎后的脱水泥饼经装载机吊入皮带秤喂料仓,根据营养配伍设计同步添加改性秸秆粉及其他辅料进入各自喂料仓,通过自控室设置相关参数自动控制单批次物料添加量,称量完毕经皮带输送机输送至斗式提升机。

材料添加配料装置采用单仓设计,配备称重传感器及电-气操作蝶阀,最大称载能力为600 kg。电子机械式皮带秤宽为800 mm,皮带速度为 $1.41\text{ m/s}$ ,额定功率为22 kW,最大称重为6 000 kg。辅料添加设计干重配合比为脱水泥饼:秸秆粉:其他辅料=75:15:10。秸秆粉优先选用水稻秸秆和玉米秸秆,含水率 $<20\%$ ,粒径 $<0.5\text{ cm}$ 。其他辅料主要为调节淤泥孔隙和pH值的矿物粉料。设计采用专用自控系统,配备一套高压开关柜(IP54防护)和一套全自动工业计算机系统,实现称量提升系统自动化运转。

#### ③ 强化搅拌

泥饼混合物料经斗式提升机输送至搅拌机喂料口,搅拌设备采用双变频盘式行星搅拌机,搅拌轴和行星转子转速独立可显著缩短搅拌时间,提高单位产能,强化搅拌效果。

搅拌系统设计生产能力为 $60\text{ m}^3/\text{h}$ ,搅拌仓容积为 $35\text{ m}^3$ ,主轴转速为 $7.5 \sim 34\text{ r/min}$ ,行星转速为 $60 \sim 200\text{ r/min}$ ,额定功率为132 kW。在搅拌系统上方配置1套袋式除尘装置,过滤面积为 $22\text{ m}^2$ ,驱动功率为2.2 kW,收集搅拌过程中产生的粉尘。

#### ④ 快速堆肥

经搅拌均匀的混合泥饼运往通风室进行堆肥处理,添加复合好氧堆肥微生物菌剂加速堆肥过程。

堆肥系统设计处理能力为100 t/d,复合微生物菌剂添加比例为0.1%(按干物质质量计),混合物料含水率为 $60\% \sim 65\%$ ,堆肥采用动态强制堆肥方式(鼓风机通风),堆肥温度为 $45 \sim 65\text{ }^\circ\text{C}$ (维持 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 以上3 d),隔天翻堆一次,堆肥时间为 $7 \sim 10\text{ d}$ 。

该工程主要优化设计亮点:①淤泥处理工艺采用专用固化材料,脱水泥饼含水率 $<35\%$ ,进一步实现了淤泥中微量重金属的固化稳定化;②脱水泥饼破碎预处理工艺,可避免泥饼局部团块带来的不利影响,有利于后续的材料混合,降低搅拌工艺耗能;③选用专用泥饼强化搅拌设备,实现物料的充分均

匀混合;④合理配伍添加主辅材料,改善了泥饼营养成分及土壤孔隙特性;⑤采用微生物菌剂促进堆肥过程,利用酸化反应降低钙基固化剂带来的土壤 pH 值偏高的不利影响;⑥设计自控系统,提高了操作控制精度,减少了人力成本。

4 运行效果及效益分析

4.1 工程运行效果

襄阳护城河清淤底泥泥饼资源化制备种植土工程自投入运行以来,实际脱水泥饼处理量约 50~80 t/d,淤泥基绿化种植土检测数据如表 3 所示。绿化种植土性能参数 pH、含盐量、有机质、质地和入渗率 5 项主控指标达到《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)规范要求,主要肥力指标基本满足限值要求,重金属浸出检出含量远远低于规范限值。

表 3 淤泥基种植土性能参数

Tab. 3 Characteristic parameters of planting soil produced from dewatered sediment

项 目		种植土检测数据	CJ/T 340—2016 标准限值
主控 指标	pH 值	7.86 ± 0.08	5.0 ~ 8.0
	含盐量 EC 值/ (mS · cm <sup>-1</sup> )	1.08 ± 0.20	0.30 ~ 3.0
	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	53.13 ± 9.11	12 ~ 80
	质地	壤土	壤土类(部分植 物可用砂土类)
	土壤入渗率/ (mm · h <sup>-1</sup> )	148.44 ± 23.23	≥ 5
肥力 指标	水解性氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	141.74 ± 13.91	40 ~ 200
	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	133.74 ± 21.81	5 ~ 60
	有效硫/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	88.28 ± 18.82	20 ~ 500
	交换性钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	4.43 ± 0.59	60 ~ 300
	交换性镁/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	48.36 ± 13.73	50 ~ 280

45 d 绿化栽植试验效果如图 3 所示。结果表明,上海青、栀子花、月季三种常见植物平均存活率高于 90%,淤泥基绿化种植土可满足鱼梁洲公园绿化建设需要。

经检验合格的绿化种植土运往鱼梁洲中心公园,设计采用淤泥基种植土用作园林绿化底基肥。施工前对场地进行平整回填,铺设 250 g/m<sup>2</sup> 无纺布

工布,分层回填、适度夯实,每层不超过 30 cm。

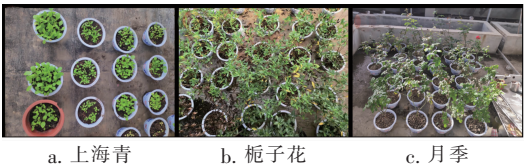


图 3 淤泥基种植土绿化栽植试验

Fig. 3 Planting test of planting soil produced from dewatered sediment

4.2 工程效益分析

该工程总投资为 304.40 万元,其中建筑工程费为 20.20 万元,设备购置费为 203.40 万元,安装工程费为 32.50 万元,工程其他费为 48.30 万元。工程投入运行后,制备园林绿化种植土的主要费用由电费(5.0 元/t)和材料费(20.7 元/t)构成,其直接处理成本约为 25.7 元/t。

脱水泥饼制备绿化种植土实现了淤泥的资源化利用,减少了填埋占地,降低了二次污染风险,同时能满足公园建设需要,具有较好的环境和经济效益。

5 结语

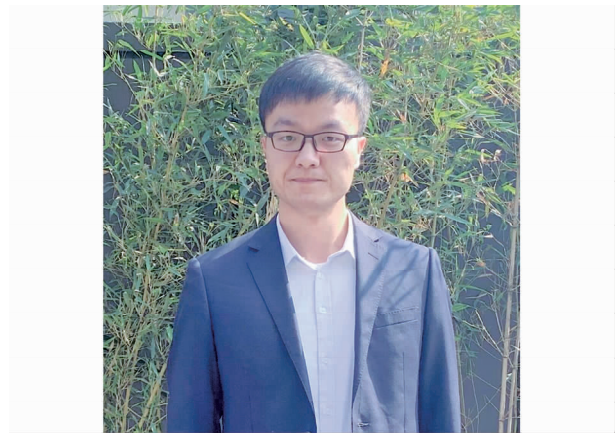
随着大量河湖清淤工程的实施,大量清淤淤泥的处理处置成为亟待解决的难题。襄阳护城河清淤项目采用改进的固结压滤脱水工艺实现了清淤淤泥的减量化和稳定化,结合淤泥性质分析和周边情况调研,采用“强化搅拌+快速堆肥”工艺将脱水泥饼制成园林绿化种植土,就近用于鱼梁洲中心公园建设,解决了脱水泥饼的消纳难题,实现了淤泥的资源化利用,具有较好的经济效益和环境效益,可为类似清淤工程脱水泥饼消纳提供应用参考。

参考文献:

[1] 恽文荣,崔健,陈玉荣. 河湖疏浚淤泥资源化研究现状与展望[A]. 湖泊保护与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛论文集[C]. 合肥:安徽省科学技术协会, 2014.  
Yun Wenrong, Cui Jian, Chen Yurong. Advance in research on resource utilization of dredged sediment of rivers and lakes[A]. Proceedings of the 4th China Lake Forum; Lake Protection and Ecological Civilization Construction[C]. Hefei: Anhui Association for Science and Technology, 2014(in Chinese).  
[2] 张春雷,管非凡,李磊,等. 中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J]. 环境工程, 2014, 32(12): 95 -

99.  
Zhang Chunlei, Guan Feifan, Li Lei, *et al.* The progress in the reutilization treatment and disposal of dredged sediments in China [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(12): 95 – 99 (in Chinese).
- [3] 曾祥英, 李尔, 张杞蓉, 等. 武汉东湖通道湖底淤泥处理工程设计[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(16): 49 – 54.  
Zeng Xiangying, Li Er, Zhang Qirong, *et al.* Design of sediment treatment project of Wuhan East Lake channel [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(16): 49 – 54 (in Chinese).
- [4] 骆文广, 杨国录, 陆晶, 等. 武汉市墨水湖疏浚泥浆脱水固结一体化研究[J]. *武汉大学学报:工学版*, 2017, 50(2): 187 – 192.  
Luo Wenguang, Yang Guolu, Lu Jing, *et al.* Research on dehydration-solidification integrative construction technique of bottom silt in Moshui Lake [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50(2): 187 – 192 (in Chinese).
- [5] 练新, 陈洁. 山美水库疏浚底泥的调理改性工艺应用[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(18): 103 – 106.  
Lian Xin, Chen Jie. Application of conditioning modification process for dredged sediment in Shanmei Reservoir [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(18): 103 – 106 (in Chinese).

- [6] 林莉, 李青云, 吴敏. 河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(10): 80 – 88.  
Lin Li, Li Qingyun, Wu Min. Advance in research on harmless treatment and resource utilization of dredged sediment of rivers and lakes [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(10): 80 – 88 (in Chinese).



作者简介: 石稳民(1992 – ), 男, 湖北黄石人, 硕士, 助理工程师, 主要从事污泥处理处置及资源化利用相关技术研究。

E-mail: 1226075947@qq.com

收稿日期: 2019 – 11 – 01

(上接第90页)

#### 参考文献:

- [1] 王舜和, 郭淑琴, 李朦. 降低负荷 + 臭氧催化氧化用于张贵庄污水处理厂提标改造[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(6): 56 – 58, 62.  
Wang Shunhe, Guo Shuqin, Li Meng. Renovation upgrading project of Zhangguizhuang wastewater treatment plant via reduction pollutants load + ozone catalytic oxidation process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(6): 56 – 58, 62 (in Chinese).
- [2] 周丹, 周雹. 反硝化最小碳氮比值的推求和应用[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(2): 46 – 48.  
Zhou Dan, Zhou Bao. Calculation and application of minimum carbon and nitrogen ratio for denitrification [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(2): 46 – 48 (in Chinese).



作者简介: 刘增军(1989 – ), 男, 山东莒县人, 硕士, 工程师, 主要从事给排水工程设计工作。

E-mail: 66940630@qq.com

收稿日期: 2019 – 08 – 21