

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.017

# 箱涵清淤及泥处理利用典型实例研究

侯 豪<sup>1,2</sup>, 朱 伟<sup>2,3</sup>, 陈益人<sup>4</sup>, 许小格<sup>3</sup>, 程 林<sup>3</sup>, 李云全<sup>3</sup>,  
吴思麟<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学  
土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098;  
4. 三川德青科技有限公司, 湖北 武汉 430079)

**摘 要:** 雨水箱涵作为城市排水管网的干管, 由于长期运行, 其内部出现了严重淤积, 堵塞管网。如何对箱涵进行清淤、清淤后的泥如何处理和利用是许多城市目前正面临的难题。以湖北省武汉市光谷管网及渠道清淤混错接改造工程为典型案例, 研究泥处理过程中泥的物理和化学性质的变化规律, 同时对泥饼的力学性质进行分析。基于对泥性质的分析, 梳理了该典型工程在清淤及泥处理利用中存在的 key 问题: 人工清淤危险低效; 工艺适合大土方快速施工工况, 存在泥处理过程效率低、沉淀池浓缩效果差、板框机未能充分发挥效力问题; 未进行施工尾水的处理, 泥饼 Zn 含量超标, 属于污染土, 外包处理可能造成二次污染。这些问题也是我国城市管网清淤工程中普遍存在的问题, 通过对上述问题的梳理能够为箱涵清淤工程提供指导及借鉴。

**关键词:** 箱涵; 清淤; 泥处理; 泥利用; 板框压滤

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0108-06

## Box Culvert Dredging and Mud Treatment and Utilization: A Case Study

HOU Hao<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>2,3</sup>, CHEN Yi-ren<sup>4</sup>, XU Xiao-ge<sup>3</sup>, CHENG Lin<sup>3</sup>,  
LI Yun-quan<sup>3</sup>, WU Si-lin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering <Ministry of Education>, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Safecleen Technologies Co. Ltd., Wuhan 430079, China)

**Abstract:** As the trunk main of urban drainage network, stormwater box culvert has been seriously silted and blocked during long-term operation. How to dredge the box culvert, treat and use the mud after dredging is a difficult problem that many cities are currently facing. Variations in physical and chemical properties of mud during treatment in a typical reconstruction project in Wuhan Optical Valley, Hubei Province were investigated, and the mechanical properties of mud cake were also analyzed. Based on the analysis of mud properties, the key problems existing in the dredging and mud treatment and utilization of this typical project were summarized as follows: artificial dredging was dangerous and inefficient; the process was suitable for large earthwork and rapid construction conditions, but there were some problems such as low efficiency of mud treatment process, poor concentration performance of sedimentation tank,

通信作者: 朱伟 E-mail: weizhu863@126.com

and failure of plate and frame machine to give full play to its effectiveness; the tail water of construction was not treated, Zn content of the mud cake exceeded the standard, and outsourcing treatment of this contaminated soil might cause secondary pollution. These are also common problems in Chinese urban network dredging project, and guidance and reference for box culvert dredging project are provided through summarizing the problems.

**Key words:** box culvert; dredging; mud treatment; mud utilization; plate pressure filtration

随着城镇化的推进,我国城市规模不断扩大,对供水量的需求越来越大,相应的排水量也大幅增加<sup>[1]</sup>。作为城市排水系统的主要组成部分,城市河流在防洪排涝方面起到了重要作用。在城镇化发展过程中,很多城市采用了以涵代河的方式,因此很多城市普遍存在城市箱涵。随着运行时间的增加,箱涵内部出现了淤积、堵塞等问题,增大了管道阻力,从而影响排水<sup>[2]</sup>,不仅成为城市内涝的原因<sup>[3]</sup>,箱涵内沉淀聚集的污泥也成为水污染的原因之一,对河湖水质产生重要影响<sup>[4]</sup>。近几年,各城市普遍发现城市污水收集系统中广泛存在淤堵漏损问题,管网清淤逐渐得到重视。同时,对于箱涵清淤工程的关注度也大大提升。由于较多的箱涵设计未充分考虑后续淤积和清淤问题,之前也非常缺少箱涵清淤、淤泥处理及利用经验,因此对于如何清淤、清淤后的泥浆如何处理、产物如何处置或资源化利用等均没有可参考的工艺或技术,这给工程实施带来了一定困难。

清淤方面,对于量小且成分复杂的城市河道清淤而言,机械清淤法和水力清淤法仍然是普遍使用的方式<sup>[5-6]</sup>,有着一定的现实适用性。而在清淤产生的后续产物处理方面<sup>[7]</sup>,过去大多数清淤产生的泥浆一般直接被输送至设定的堆场进行自然干化<sup>[8]</sup>。但由于对土地资源的占用以及可能带来的二次污染<sup>[9]</sup>,使这种处置方式在城市内已经很难应用。为了解决这些问题,城市河道清淤过程中开始较为普遍地使用板框压滤对泥浆进行脱水<sup>[10]</sup>。

对箱涵进行清淤可以借鉴城市河道的技术工艺,首先使用水力清淤,再通过板框压滤脱水,然后对后续泥饼进行利用或处置。围绕这一问题,结合武汉市光谷管网及渠道清淤工程进行了工程效果的检测、分析和总结,旨在为箱涵清淤工程提供经验和参考。

## 1 材料及方法

### 1.1 工程背景

武汉市光谷管网及渠道清淤混错接改造工程的主要对象是东湖高新区四条排水箱涵,包括新竹路、南湖大道、光谷大道和高新四路。四条箱涵总长度为 11 km,作为东湖高新区的雨水干管,承担着防洪排涝的重任。由于常年未进行系统性的清淤,箱涵内部淤积严重,排水能力较设计标准大幅下降,给上游地区造成较大的渍水隐患。同时,该地区虽为雨污分流制区域,但目前区域雨污水存在部分混错接的情况<sup>[11]</sup>,初期雨水和部分混流污水在箱涵内长期沉淀<sup>[12]</sup>,降低了箱涵的出水水质,尤其是沉积的底层淤泥经过长期厌氧消化后产生各类有毒有害物质<sup>[13]</sup>,进一步恶化了出水水质。作为直排式雨水管网,箱涵出水直接排入南湖,这在一定程度上恶化了南湖水质。为解决区域内现有雨水箱涵淤积问题,恢复现状排水设施的排水能力,急需实施管网及渠道清淤混错接改造工程。

清淤工作首先由工人进入箱涵中,在需要清淤的管段两端设置围堰,并通过导流孔进行导流。排干围堰内的水体后,通过高压水枪将淤泥冲成泥浆。针对水力清淤产生的大量高含水率泥浆,武汉市管网及渠道清淤混错接改造工程采用了“清淤泥浆—板框压滤—处置利用”工艺,如图 1 所示。清淤产生的泥浆首先通过吸淤车 1 泵送至车内,运输至淤泥处理场地,暂存在原浆池 2 中。由于单位长度箱涵内清淤方量少,无法满足处置场地连续运转的要求,故清淤泥浆首先在原浆池中暂存一段时间,达到一定方量后再进行后续处理。露天放置的泥浆随着水分蒸发使含水率下降,无法实现泵送,需通过水力冲刷 3 将泥调制成为易于泵送的状态,通过管道输送至泥沙分离器 4,泥沙分离器由两部分组成,泥浆首先通过粗砂分离器 4-1 筛出大垃圾、石块等粒径大于 3 mm 的物质。过筛后的泥浆通过泥浆

泵送至细砂分离器4-2上部的旋流分离器,实现泥浆和砂浆的初步旋流分离。分离后的泥浆回到沉淀池5,混合部分泥浆的砂浆通过振筛后筛分出细砂,过筛的泥浆通过管道回到沉淀池。在沉淀池中沉淀一定时间以后,由绞吸船6将沉淀池底泥绞吸泵送至调节池7。储药罐8中的絮凝药剂通过加药装置输送至调节池,在调节池中与泥浆进行充分混合,混合后的泥浆通过管道输送至储浆罐9,等待板框压滤。经过板框机10压滤后产生尾水和泥饼11。尾水通过管道排放至沉淀池5。整个过程产生的粗砂、细砂及泥饼通过运输车12运送至处置场地13。

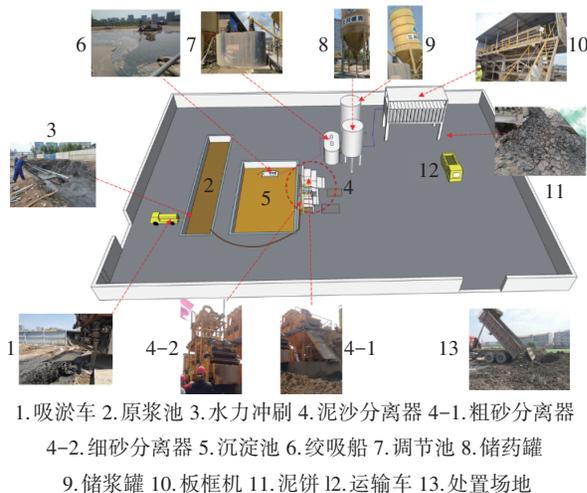


图1 工艺流程示意

Fig.1 Schematic diagram of process flow

## 1.2 采样方法

为分析管涵从清淤、泥浆处理、后续处置及利用中管涵淤泥的数量和性质的变化,对各工艺环节的泥、水进行了采样。由于箱涵内部环境复杂,普通人员无法进入,取样工作以原浆池为起点。对原浆池中的待处理泥(以下称“原泥”)采用小型抓斗挖泥器进行采样。对经过泥沙分离器后的泥浆(以下称“分离后泥浆”)、粗砂、细砂分别采集了样品。采用小型抓斗抓泥器对沉淀池的底泥(以下称“沉淀池底泥”)进行采样,并对沉淀池表层的水进行取样。调节池中混合了絮凝药剂的泥浆称为加药后泥浆,对加药后泥浆进行取样。对板框压滤后产生的泥饼和尾水分别进行取样。采集上述样品后将样品密封于聚乙烯袋中,低温保存运回实验室进行分析。

## 1.3 试验方法

工艺各阶段泥样的密度、浓度、液限和塑限、粒径分布、无侧限抗压强度、破坏应变及压缩系数均根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)进行测定;泥样和水样的pH值、有机质、总氮、总磷及重金属含量根据《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。

处理过程中泥浆的体积变化按式(1)核算。

$$V_{i\text{相对}} = \frac{\rho_{\text{原状}} \times C_{\text{原状}}}{\rho_i \times C_i} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{原状}}$ 为原状泥的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $C_{\text{原状}}$ 为原状泥的浓度; $\rho_i$ 为第*i*个工艺环节泥的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $C_i$ 为第*i*个工艺环节泥的浓度;  $V_{i\text{相对}}$ 为第*i*个工艺环节泥相对原状泥的体积。

## 2 结果与讨论

### 2.1 处理过程中泥的物理性质变化

原泥、分离后泥浆、沉淀池底泥、加药后泥浆、泥饼的密度分别为1.46、1.17、1.26、1.22、2.12  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,泥浓度的平均值分别为51.57%、26.70%、36.54%、29.45%、79.31%。由于水的加入,使得经过泥沙分离器后泥浆的密度和浓度明显低于原泥,沉淀池底泥的密度及浓度较分离后泥浆明显上升,经绞吸船绞吸后泵送至加药罐中添加药剂,绞吸后泥浆混入部分水,密度和浓度较沉淀池底泥略有下降,但仍高于分离后泥浆,加药后浓泥经板框压滤后,泥饼的密度和浓度达到了较高水平。

原泥和泥饼的液限分别为42.75%和46.61%,塑限分别为34.01%和38.50%,可见泥的液限和塑限均有一定的上升,这是因为经过泥沙分离后,清淤泥中黏粒含量上升,从而使得液限和塑限有所升高。经检测,与原泥相对密度2.59相比,泥饼的相对密度增大到2.64,这一现象也与砂粒的去除有关。泥饼的中值粒径均值为9.57  $\mu\text{m}$ ,相对于原泥的中值粒径均值12.04  $\mu\text{m}$ 明显降低,这主要是因为泥沙分离器将泥浆中的粗砂和细砂筛出,致使处理后得到的泥饼中值粒径减小。

分离后泥浆、沉淀池底泥、加药后泥浆、泥饼相对原泥的体积分别为2.41、1.63、2.12、0.45。可以看出,单位体积的原泥经水力冲刷后,分离后泥浆的体积增加一倍多,经过沉淀后稍有下降但仍大于原泥,加药后泥浆由于水的混入,体积稍有增加,但

低于进入沉淀池的水平,采用板框压滤后泥饼的体积接近原泥的一半。

## 2.2 处理过程中泥的化学性质变化

原泥、分离后泥浆、沉淀池底泥、加药后泥浆、泥饼的 pH 值分别为 8.90、8.20、8.41、7.80、7.74。可以看出,处理过程中泥的 pH 值总体呈下降趋势,且都偏碱性。原泥至分离后泥浆和沉淀池底泥至加药后泥浆的 pH 值降低,主要是由泥浆浓度下降引起的。而分离后泥浆至沉淀池底泥 pH 值略微上升,则是因为泥浆沉淀浓缩使得浓度上升的缘故。经检测,沉淀池上清液 pH 值为 8.80,与沉淀池底泥的 pH 值接近,均在 8~9 之间,而压滤尾水 pH 值却达到了 10,这可能与加入的絮凝剂有关。加入的碱性絮凝剂不与泥颗粒结合,大部分随着压滤尾水排出,表现为泥饼的 pH 值在加药和板框压滤阶段并没有显著变化,而压滤尾水的 pH 值则明显升高。

原泥、分离后泥浆、沉淀池底泥、加药后泥浆、泥饼的有机质含量分别为 6.64%、7.24%、7.59%、7.42% 和 6.05%。可以看出,由于整个处理过程中未涉及专门去除有机物的工艺,淤泥中有机质含量比较平稳。相较于原泥,泥饼有机质含量略有下降,这可能是由于泥沙分离工艺分离出来的产物中含有有机质。

原泥、分离后泥浆、沉淀池底泥、加药后泥浆、泥饼的 TN 分别为 2 467.7、2 214.63、2 831.70、2 573.43、2 505.37 mg/kg。可以看出,经过泥沙分离后 TN 较原泥下降,这是因为水的稀释作用加上分离出的沙子吸附了部分 TN。经压滤处理后泥的 TN 并没有下降,经检测沉淀池上清液和压滤尾水的 TN 分别为 90.39 和 95.00 mg/L,说明仅有少量的 TN 随压滤尾水排出。

原泥、分离后泥浆、沉淀池底泥、加药后泥浆、泥饼的 TP 分别为 1 165.93、1 022.62、1 245.32、1 252.32、1 271.59 mg/kg。可以看出,TP 的变化趋势与 TN 相似,在泥沙分离阶段由于分离出沙子的携带和水的引入使得 TP 含量明显下降。经压滤处理后的泥饼 TP 并没有下降,且经测定压滤尾水中的 TP 含量约为 0.38 mg/L,说明 TP 很好地吸附在了泥土颗粒中,基本不会随着间隙水经压滤而浸出。

图 2 为泥中重金属的变化。可以看出,与原泥相比,泥的处理产物中重金属种类并没有显著变化,泥中 Cd 和 Pb 两种重金属均未检出。经压滤处

理后,除 Zn 外,泥饼中的重金属含量较原泥有所下降,压滤尾水和沉淀池上清液的重金属检测结果表明,泥中有部分重金属随间隙水的压滤浸出到压滤尾水中。泥饼中 Zn 含量超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的规定值(300 mg/kg),存在土壤污染风险;同时,其高于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中土壤污染风险筛选值,在利用时应进行详细调查,采取风险管控或修复措施<sup>[14]</sup>。

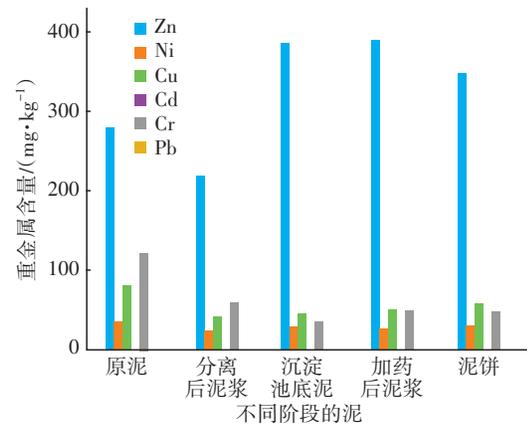


图 2 泥中重金属的变化

Fig.2 Change of heavy metals concentration of mud

## 2.3 泥饼的力学性质

为了了解箱涵淤泥经处理后产生泥饼的力学性质,对泥饼进行了重塑样无侧限抗压强度试验<sup>[15]</sup>,3组无侧限强度试验结果如图 3 所示。重塑泥饼的强度平均为(170±30) kPa,破坏应变集中在(8.51±0.5)%。根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)的特征压缩系数 $a_{1-2}$ (0.14 MPa<sup>-1</sup>),泥饼属于中压缩性土。

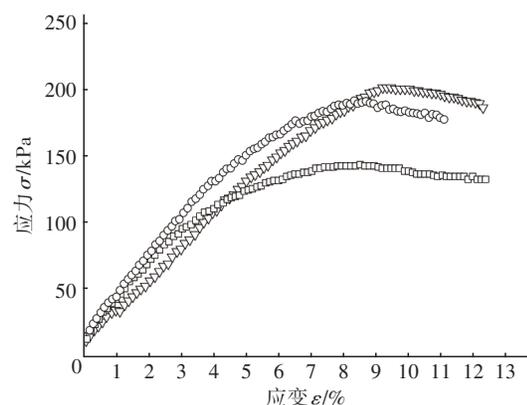


图 3 泥饼应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain relationship of mud cake

## 2.4 讨论

### 2.4.1 清淤过程存在的问题

由于箱涵的横截面积大,普通机械清淤方式无法满足大管径、高工效的要求<sup>[6]</sup>,该工程采取了人工水力清淤的方式进行箱涵清淤。这样的清淤方式一方面会产生大量高含水率的泥浆,增加运输和处理的工作量。但因为该工程的清淤方量小,泥处理场地距施工现场较近,因此该问题并未对工程造成明显影响。另一方面,箱涵内部空气闭塞,有毒有害气体弥散,环境条件复杂,人工进入工作不仅对人的安全和健康产生影响,也大大限制了清淤工程的施工速度。这个问题也是我国城市大直径管涵清淤过程中普遍遇到的问题。如果能够开发出适合大直径管涵,并能降低清淤泥浆含水率的新型清淤装备,便可以很好地解决这一系列困扰管涵清淤工程的瓶颈问题。因此这也是我国城市清淤方式未来的走向。另外,由于设计时未考虑其会产生如此严重的淤积,目前大部分箱涵在设计时未建设完善的清淤配套措施,如检查井、清掏口等,给清淤工作带来了一定困难。这要求之后的箱涵设计应该充分考虑淤积因素,合理安排水力坡降等因素,并配备完整的清淤配套装备。

### 2.4.2 泥处理过程中存在的问题

在该工程的泥处理过程中,为了实现泥的减量化处理,要求能够将泥的方量降到最小。首先当清淤工程方量小、工期长时,清淤的泥浆在原浆池中的储存时间过长导致无法直接泵送,需要再次加水调制成可以泵送的泥浆后再进行泥沙分离,这一步使得通过蒸发散失部分水的原泥又重新引入了水,增加了泥浆体积,增大泥处理的工作量。其次经过沉淀后底泥的浓度得到了明显升高,但通过绞吸船泵送至加药罐后泥浆的体积再次增加,这使得板框压滤的效率有所降低,且增加了板框压滤机的处理压力,因此需要寻找能够使得高浓度沉淀底泥直接进入加药罐加药混合的方法。综合分析,该套泥浆处理工艺适合于大方量、快施工的工况,相较于直接固化处理可以大幅减少固化材料用量。当方量减小、施工速度较慢时,可以考虑将泥浆先过泥沙分离器后再进行储存,以减少泥处理过程中水的引入量,提高工效。

### 2.4.3 产物处置利用的问题

该工程中,通过泥处理过程产生了粗砂、细砂

和泥饼三种固体产物及压滤尾水,以及沉淀池上清液两种液体产物。经检测,该工程产生的粗砂和细砂均符合混凝土骨料标准,可用于配制C30及以下等级的混凝土。泥饼含有一定的有机物,TN、TP和pH值在农业用地土壤要求范围内,但由于泥饼中重金属Zn的含量高于标准(300 mg/kg),故只能按照污染土进行处置。但由于淤泥的方量小,产物难以满足大量使用的需求,该工程采取了外包填埋的方式进行处置。这一方面造成了资源浪费,另一方面使得对产物的处置管控变得困难,难以对处置结果进行合理评价,对于处置方式是否会产生二次污染也无从知晓。该工程中两种液体产物混合后直接回排至箱涵,而箱涵作为雨水管道并不接入污水处理厂,相当于液体产物直接排放至环境,含有一定污染物的尾水势必会对环境产生一定的不利影响,这也是一个应该引起注意的问题。

## 3 结论

针对武汉市光谷管网及渠道清淤混错接改造工程中的管涵清淤工程,使用“水力清淤—板框压滤—泥处理利用”的工艺流程是可行的,能够为国内类似工程提供一定的借鉴。另外,本研究明确了管涵清淤工程中底泥变为泥浆,然后进行分离、脱水过程中泥的物理、化学性质的变化规律。由于清淤过程中过多水分的加入,导致泥浆处理量大大增加且产生了较多尾水,因此尾水和泥饼pH值偏高的问题值得关注。管涵淤泥中重金属Zn超标,处理后产生的泥饼中重金属Zn也超标,后续必须进行安全处置。

## 参考文献:

- [1] DONG X, DU X M, LI K, *et al.* Benchmarking sustainability of urban water infrastructure systems in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 330-338.
- [2] TSIHRINTZIS V A. Effects of sediment on drainage-culvert serviceability [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1995, 9 (3): 172-183.
- [3] 李华飞. 大管径排水管道水力清淤技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.  
LI Huafei. Research on the Hydraulic Cleaning Technology for Large-diameter Sewers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012(in Chinese).

- [ 4 ] HO H C, MUSTE M, ETTEMA R. Sediment self-cleaning multi-box culverts [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2013, 51(1):92-101.
- [ 5 ] 李季寰,张华. 城市中小河流清淤疏浚方案探讨[J]. *湖南水利水电*, 2018(1): 50-53.  
LI Jihuan, ZHANG Hua. Discussion on dredging and dredging schemes for small and medium rivers in cities [J]. *Hunan Water Resources and Hydropower*, 2018 (1): 50-53(in Chinese).
- [ 6 ] 翟俊,李华飞,关东,等. 大管径排水管道清淤系统的设计与开发[J]. *机械设计与制造*, 2012(12): 254-256.  
ZHAI Jun, LI Huafei, GUAN Dong, *et al.* The design and development of a large-diameter sewer cleaning system [J]. *Machinery Design & Manufacturing*, 2012 (12) : 254-256(in Chinese).
- [ 7 ] 黄英豪,董婵. 淤泥处理技术原理及分类综述[J]. *人民黄河*, 2014, 36(7): 91-94.  
HUANG Yinghao, DONG Chan. Principles and classifications for treatment of dredged material [J]. *Yellow River*, 2014, 36 (7): 91-94(in Chinese).
- [ 8 ] 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).
- [ 9 ] 刘敏,钟继承,余居华,等. 湖泊疏浚堆场淤泥污染及潜在生态风险评价[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1185-1193.  
LIU Min, ZHONG Jicheng, YU Juhua, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessments of contaminants in dredged sediments landfill sites [J]. *Journal of Lake Science*, 2016, 28(6): 1185-1193(in Chinese).
- [ 10 ] 吴思麟,朱伟,刘既明,等. 环保疏浚泥处理工程泥性质变化规律及问题分析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(12): 2290-2296.  
WU Silin, ZHU Wei, LIU Jiming, *et al.* Change laws of mud property and problems in typical environmental dredging treatment projects [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2290-2296(in Chinese).
- [ 11 ] 邱震寰,黄文海,罗金学,等. 襄阳护城河清淤底泥处理工艺改进及工程设计[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(4): 95-99, 105.  
QIU Zhenhuan, HUANG Wenhai, LUO Jinxue, *et al.* Dredging sediment treatment process improvement and project design of Xiangyang moat [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(4): 95-99, 105(in Chinese).
- [ 12 ] 刘志长. 合流制排水管道沉积物的沉积状况及控制技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.  
LIU Zhichang. The Study on Sediment Deposition and Sewer-sediment Control in Combined Sewers [D]. Changsha: Hunan University, 2011(in Chinese).
- [ 13 ] 张怡蕾,操家顺,薛朝霞,等. 城市排水管道内污染物迁移转化规律研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 111-121.  
ZHANG Yilei, CAO Jiashun, XUE Zhaoxia, *et al.* Research progress on the pollutants migration and transformation in municipal sewer [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33 (1) : 111-121 (in Chinese).
- [ 14 ] 杜延军,金飞,刘松玉,等. 重金属工业污染场地固化/稳定化处理研究进展[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 116-124.  
DU Yanjun, JIN Fei, LIU Songyu, *et al.* Review of stabilization/solidification technique for remediation of heavy metals contaminated lands [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 116-124(in Chinese).
- [ 15 ] 黄英豪,朱伟,张春雷,等. 固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1352-1356.  
HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHANG Chunlei, *et al.* Mechanical characteristics and strength source of remolded solidified dredged material [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1352-1356(in Chinese).
- [ 16 ] 李成群,么鸿鹏,张净霞. 自主式管道清淤机器人的研究[J]. *机床与液压*, 2015, 43(15): 51-52, 29.  
LI Chengqun, YAO Hongpeng, ZHANG Jingxia. Research on the autonomous drainage dredging robot [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(15): 51-52, 29(in Chinese).

作者简介:侯豪(1998- ),男,河南济源人,博士研究生,主要从事环境岩土方面的研究。

E-mail: hhuhouhao@qq.com

收稿日期:2020-03-04

修回日期:2020-06-15

(编辑:任莹莹)