

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.003

基于多源污泥泥质特性的处理技术路径探析

周维奇¹, 方 宁¹, 郭亚丽¹, 吴海斌², 黄嘉良¹, 王先恺²,
戴晓虎³, 董 滨³

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200050; 2. 中国长江三峡集团有限公司 长江生态
环境工程研究中心, 北京 100038; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 对长江经济带典型城市污水污泥、通沟污泥、河湖底泥采集测试,分析其有机质、含砂量、热值、重金属、微量污染物等指标。结果表明:污水污泥有机质含量为30%~50%,热值一般在5 500~11 000 kJ/kgDS,污泥热值与有机质含量有较大关系,即有机质含量越多,污泥热值越高;污泥含砂量较高,养分含量为6%~8%,重金属含量较低,95%以上脱水污泥样品中的重金属含量远低于《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)A级标准的限值,处于相对清洁水平;多环芳烃浓度较低,风险较小。通沟污泥成分复杂、有机质含量范围广,约5%~90%,通常热值和养分较低。河湖底泥有机质含量通常小于10%,热值不到1 000 kJ/kgDS,养分低。通沟污泥和河湖底泥重金属含量满足《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)第一类筛选值,可用于生活居住地的建设用地。

关键词: 长江大保护; 多源污泥; 有机质; 含砂量; 热值; 重金属; 微量污染物
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0016-07

Treatment Technology Path Based on the Characteristics of Multi-source Sludge

ZHOU Wei-qi¹, FANG Ning¹, GUO Ya-li¹, WU Hai-bin², HUANG Jia-liang¹,
WANG Xian-kai², DAI Xiao-hu³, DONG Bin³

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200050, China;
2. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation,
Beijing 100038, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji
University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The organic matter, sand content, calorific value, heavy metals, trace pollutants and other indicators of typical municipal sewage sludge, ditch sludge and sediment from rivers and lakes in the Yangtze River economic belt were collected and analyzed. The results showed that the organic matter content of sewage sludge was 30%~50%, and its calorific value was generally in the range of 5 500~11 000 kJ/kgDS; the calorific value of sewage sludge had a great relationship with the organic matter content, that was, the more the organic matter content, the higher the calorific value of sludge; the sand content was high, the nutrient content of sludge was 6%~8%; the heavy metal content was low, and the

基金项目: 三峡集团长江大保护专项基金资助科研项目(202003081); 国家重点研发计划项目(2020YFC1908700);
三峡上海院科标业项目[2019HJ(8)-007]

通信作者: 方宁 E-mail: fn@sidri.com

heavy metals in more than 95% of dehydrated sludge were far lower than the limit of class A criteria specified in the *Control Standards of Pollutants in Sludge for Agricultural Use* (GB 4284-2018), and at relatively clean level, with low concentration of PAHs and low risk. The composition of ditch sludge was complex, and the organic matter content ranged from 5% to 90%, which was usually low in calorific value and nutrients. The content of organic matter in sediment of river and lake was less than 10%, and the calorific value was low, less than 1 000 kJ/kgDS, with low fertility. The heavy metal content of ditch sludge and sediment of river and lake met the first category screening value of *Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Development Land* (GB 36600-2018), which could be used for construction land of residential areas.

Key words: great protection of the Yangtze River; multi-source sludge; organic matter; sand content; calorific value; heavy metals; trace pollutants

多源污泥是广义的城市污泥,是城市建设发展过程中产生的固体废弃物,是长江大保护治理的重要组成部分,包括污水污泥、通沟污泥、河湖底泥、工程泥浆等,其特点是组分复杂、产量巨大、含水率高。污水污泥是污水处理后的产物,其年产生量超过 $7\,000 \times 10^4$ t;通沟污泥是指排水管网养护过程中清掏出来的沉积物;河湖底泥是江河、湖泊、水库等水体底部长期积存的沉积物。开展长江经济带典型城市多源污泥泥质特性研究,构建多源泥质基础数据库,可为多源污泥协同处理处置规划、设计提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

污水污泥取自长江经济带典型城市23座生活污水处理厂,共采集109个污泥样品;通沟污泥取自主城区排水管网系统或通沟污泥处理贮存点,共采集69个通沟污泥样品;河湖底泥来源于当地污染较为严重的河道或湖泊,共有38个河湖底泥样品,污泥样品密封保存寄回实验室后,于4℃下保存待测。

1.2 测试方法

有机质参考《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)中的重量法测定;重金属采用微波高压消解/电感耦合等离子体发射光谱法测定;热值参考《煤的热值测定方法》(GB/T 213—2008),采用快速量热仪进行测定,即污泥弹筒热值,高位热值就是将污泥中气态水换算成液态水热值,通过公式换算分别可得空气干燥基高位发热量(kJ/kg)和空气干燥基低位发热量(kJ/kg)。

磷、钾元素采用电感耦合等离子体发射光谱法

测定,总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。取0.01 g样品,加入100 mL无氨水、50 mL碱性过硫酸钾溶液混匀进行加热消解。在紫外分光光度计上,以无氨水做参比,在220 nm与275 nm处测定吸光度,计算总氮浓度,然后换算成养分含量,以%计。

污泥中砂含量参照德国DWA标准方法测定,将污泥样品在105℃烘干,600℃灼烧,剩余残渣用32%的盐酸浸泡,快速滤纸过滤,同时用32%的盐酸反复淋洗滤渣,直至滤液颜色基本不变为止^[1]。

采用气相色谱仪串联三重四极杆质谱仪测试样品的PAHs含量,预处理方式:取0.1 g冻干研磨后样品,加入10 mL由正己烷和丙酮混合组成的提取液,密闭反应管,并在60℃条件下超声提取30 min,分离上清液,并在固相中加入提取液重复提取2次。收集合并上清液,在常温下氮吹浓缩,最终用正己烷定容至1 mL,随后加入10 μL内标溶液作为待测样品。

2 结果与分析

2.1 多源污泥基础特性

多源污泥中的有机质含量见图1。污水污泥有机质含量大多在30%~50%波动,平均值仅为40%,远低于欧洲国家60%~70%的水平,这主要是由于污水处理厂进水COD浓度较低所致。通沟污泥成分复杂,有机质含量变化较大,范围为5%~90%,推测与周边产业和作业方式有关。河湖底泥有机质含量普遍较低,在5%~15%左右,较低的有机质含量决定了其不适合焚烧,长江沿线河湖众多,水体流速缓慢,水体污染物易沉积在河湖底泥中。

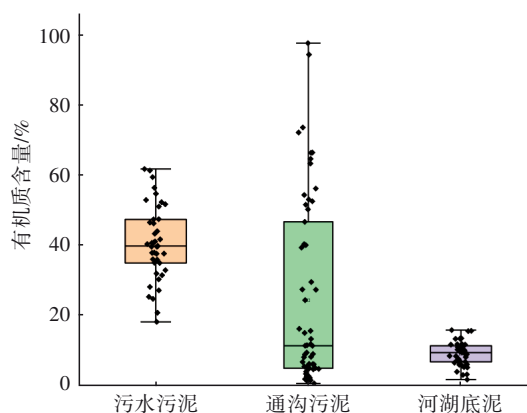


图1 多源污泥中有机质含量

Fig.1 Content of organic matter in multi-source sludge

污水污泥样品来自不同的污水处理厂,同一污水处理厂也多次采样,其含砂量见表1。脱水污泥含砂量在20%~40%,变化范围较大,九江、芜湖、六安、镇江4座城市污水污泥含砂量的平均值分别为26.36%、33.44%、34.20%、31.07%。污泥中砂粒如不能有效去除,不仅会加剧设备磨损,堵塞排泥管道,而且会导致污泥中有机质含量低,影响厌氧消化效率。进水水质、污水处理工艺对污泥泥质具有显著影响^[1],进水中砂粒粒径小于沉砂池设计规范中规定值,大部分砂粒无法通过沉砂池有效去除,污水处理厂平均除砂率低于15%,导致了污泥含砂量高、有机质含量低^[2]。调研的污水处理厂有机负荷约为0.05 kgBOD₅/(kgMLSS·d),接近《室外排水设计标准》中延时曝气氧化沟工艺的有机负荷,即0.03~0.08 kgBOD₅/(kgMLSS·d),部分活性污泥在池内进行内源呼吸,剩余污泥量较少,有机质含量较低^[3]。

表1 典型城市污水污泥含砂量

Tab.1 Sand content of municipal sewage sludge in typical cities

城市	测样数	含砂量/%			标准差/%
		最小值	最大值	平均值	
九江	7	12.46	47.02	26.36	10.75
芜湖	11	17.31	48.03	33.44	9.31
六安	2	26.11	42.28	34.20	11.43
镇江	17	16.70	45.01	31.07	7.89

通沟污泥含砂量较高^[4],且变化幅度较大,易造成管网淤塞,应定期清淤^[5-6]。污水污泥养分含量约为6%~8%,其养分含量相对较高,高于《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(CJ 248—2007)规

定的3%。通沟污泥养分含量约为2%~5%,河湖底泥养分含量约为1%~3%,其养分含量相对较低,大部分仅能达到《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)标准。

2.2 多源污泥热值

污水污泥空干基热值平均为6 603 kJ/kgDS,中位值为6 104 kJ/kgDS;通沟污泥空干基热值平均为5 418 kJ/kgDS,中位值为1 155 kJ/kgDS;河湖底泥空干基热值平均为731 kJ/kgDS,中位值为664 kJ/kgDS。典型城市多源污泥空干基热值见图2。污水污泥含有一定水分,这些水分在焚烧过程中将转变为蒸汽,并以汽化潜热的形式带走部分能量。污水处理厂脱水污泥含水率在75%~82%之间,经过深度脱水工艺处理后含水率一般为50%~60%,这些水分严重影响污泥焚烧,故污泥收到基低位热值对污泥焚烧处理企业更有参考意义^[7]。

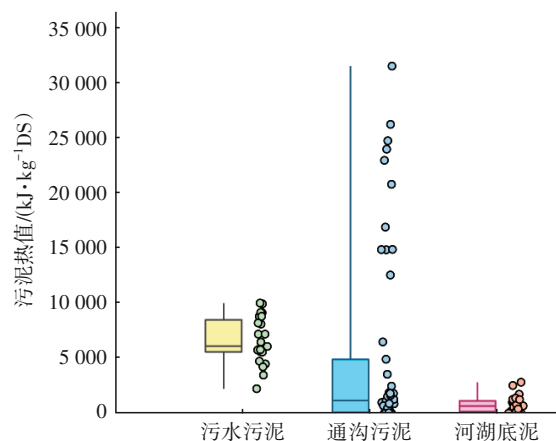


图2 典型城市多源污泥热值

Fig.2 Calorific value of multi-source sludge in typical cities

根据1个标准大气压下水的汽化潜热(2 512 kJ/kg)可以确定污泥水分蒸发带走的能量,利用公式计算出不同含水率状况下的污泥收到基低位热值^[8]。针对污泥焚烧,《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)对其理化特性做出一定限制,污泥自持燃烧的低热值约3 500 kJ/kg,故浓缩脱水污泥需要干化至含水率为30%~40%后方可自持焚烧。

污泥有机质完全焚烧至灰分释放的热量体现在污泥干基热值上,污泥干基热值计算如下^[9]:

$$Q = 2.5 \times 10^2 \times (100p - 5) \quad (1)$$

式中:Q为污泥干基热值,kJ/kgDS;2.5×10²、5

为污泥热值换算系数; p 为污泥中有机质含量。

根据实际测得的有机质含量与污泥干基热值,经拟合可得:

$$Q = 223p - 1\,146 \tag{2}$$

污泥热值与有机质含量直接相关,有机质含量越大,污泥热值越高,反之则越低。河湖底泥中有有机质含量一般低于 10%,其热值也较低,不到 1 000 kJ/kgDS;污水污泥的有机质含量范围为 30%~50%,其热值一般在 5 500~11 000 kJ/kgDS。通沟污泥的有机质含量变化范围较大。在实际测量过程中,由于取样存在不确定性,会导致污泥热值与有机质的关系不会是线性一一对应,在实际工程中,若污泥处置途径为干化焚烧,需要密切监测污泥中有机质含量与含水率变化。

2.3 多源污泥中重金属

多源污泥中重金属可能对生态环境造成潜在危害,评估方法有内梅罗指数法、潜在生态风险评

估^[10]等。其中,内梅罗指数(P)是一种兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数,分为 I ~ V 等 5 个等级,对应的判别标准依次为 $P \leq 0.7$ 、 $0.7 < P \leq 1.0$ 、 $1.0 < P \leq 2.0$ 、 $2.0 < P \leq 3.0$ 、 $P > 3.0$,分别代表清洁(安全)、尚清洁(警戒限)、轻度污染、中度污染、重度污染。

参考《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)中第一类用地筛选值,内梅罗指数法中 Cu、As、Pb、Cd、Ni、Hg 的 C_0 取值分别为 2 000、20、400、20、150、8 mg/kg,由于该标准中给定 Cr 为六价铬,而本次调研中测得的是总铬,此外,该标准并没有对 Zn 做出限制,故评估时不考虑这 2 种重金属。值得注意的是, C_0 的取值会极大影响评估结果,本次评估只是相对一般建设用地的泥质标准而言,若参考当地背景值进行评估,则会产生不同结果。污水污泥、通沟污泥、河湖底泥样品分别为 90、54、38 个,其重金属含量见表 2。

表 2 典型城市多源污泥重金属含量

Tab.2 Heavy metals content in multi-source sludge in typical cities

mg·kg⁻¹

重金属	污水污泥				通沟污泥				河湖底泥			
	均值	最小值	中位数	最大值	均值	最小值	中位数	最大值	均值	最小值	中位数	最大值
Zn	515.9	19.6	400.3	2 410.5	245.2	5.1	100.0	1 933.9	212.3	21.7	141.8	732.1
Cu	130.3	6.0	80.0	1 173.8	37.8	0.2	25.3	158.8	42.8	1.4	42.7	95.9
As	15.8	0.6	13.4	49.4	10.2	0.1	7.2	71.6	9.1	0.0	10.1	17.5
Pb	26.4	0.4	23.6	105.8	33.4	0.0	16.6	383.0	28.8	0.8	29.5	87.4
Cd	0.6	0.0	0.6	2.2	0.4	0.0	0.3	1.7	0.5	0.0	0.4	1.4
Cr	146.7	5.6	55.7	2 384.7	37.1	2.5	33.2	137.0	50.5	17.4	41.0	157.5
Ni	42.7	1.2	25.7	532.2	27.3	0.5	15.6	438.8	20.2	7.1	19.2	37.7
Hg	0.7	0.0	0.6	3.3	1.5	0.0	0.9	8.6	1.0	0.0	0.9	5.5

污水污泥中 Zn、Cu、As、Pb、Cd、Cr、Ni、Hg 含量均值分别为 515.9、130.3、15.8、26.4、0.6、146.7、42.7、0.7 mg/kg,95% 以上满足《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)A 级标准,可以考虑农用,部分污泥样品的 As、Cr、Zn 含量较高,这与西安^[11]、北京^[12-13]等地结果较为一致。污水污泥的内梅罗综合污染指数为 0.58,处于清洁水平。通常认为,污泥经过厌氧或堆肥处理后,重金属的含量会有所增加,调研过程中,4 次采集某污泥厌氧处理厂干化沼渣,Zn、Cu、As、Pb、Cd、Cr、Ni、Hg 含量的均值分别为 484.62、87.72、20.33、24.61、0.66、87.37、26.11、0.24 mg/kg,也满足 GB 4284—2018 的 A 级标准要求。

通沟污泥上述 8 种重金属含量均值分别为 245.2、37.8、10.2、33.4、0.4、37.1、27.3、1.5 mg/kg,满足《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)中第一类用地的筛选值,即通沟污泥可用于城市建设用地。通沟污泥的内梅罗综合污染指数为 0.38,处于清洁水平。

河湖底泥中上述 8 种重金属浓度均值分别为 212.3、42.8、9.1、28.8、0.5、50.5、20.2、1.0 mg/kg,均满足《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)第一类用地的筛选值,即河湖底泥可用于城市建设用地。河湖底泥的内梅罗综合污染指数为 0.34,处于清洁水平。

多数重金属的评价方法通常采用土壤背景值

作为 C_0 ,得到的污泥内梅罗综合污染指数较高,为重污染或高风险^[14-15],但在实际应用过程中,应该根据污染物去向,比如土地利用、园林利用或建设用地,选择合适的评估方法,这样得到的结果会更为合理。

2.4 多源污泥中微量污染物

污水污泥、通沟污泥、河湖底泥的多环芳烃检测样本分别为45、30、10个,多源污泥中多环芳烃含量见表3。河湖底泥中多环芳烃含量较低,受到的污染较轻^[16],明显低于通沟污泥,且低环PAHs占比大,可看成当地本底值。通沟污泥的多环芳烃含量最高,可以归结于市区汽车尾气、餐饮废弃物沉积到通沟污泥中,进而进入污水系统,由于污水系统的生化作用可以降解部分多环芳烃,导致污水污泥中多环芳烃浓度较低^[17]。2019年开始实施的《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)中对污泥中的PAHs含量做出了一定限制(A级污泥产物<5 mg/kg, B级污泥产物<6 mg/kg),污水污泥中的PAHs浓度满足该规定。

表3 多源污泥中多环芳烃含量

Tab.3 Content of PAHs in multi-source sludge

mg·kg⁻¹

项目	河湖底泥	通沟污泥	污水污泥
2环	0.009	0.041	0.048
3环	0.172	0.494	0.230
4环	0.149	0.881	0.303
5环	0.057	0.433	0.146
6环	0.014	0.259	0.086
合计	0.401	2.108	0.813

共测试29个污水污泥样品,检测了包括磺胺类、四环素、喹诺酮类在内的13种抗生素,共有22个样品被检出抗生素,检出率为75.86%,13种抗生素浓度之和平均为61 μg/kg。罗红霉素、阿奇霉素、环丙沙星、氧氟沙星是几种常被检出的抗生素,罗红霉素和阿奇霉素属于大环内酯类抗生素,在临床应用上较为常见;环丙沙星和氧氟沙星属于喹诺酮类抗生素,被广泛应用于畜牧、水产等养殖业。共测试8个通沟污泥样品,有6个样品被检出抗生素,13种抗生素浓度之和平均为9 μg/kg,通沟污泥中,阿奇霉素和氧氟沙星两种抗生素被检出。共测试10个河湖底泥样品,有7个样品被检出抗生素,13种抗生素浓度之和平均为10 μg/kg,河湖底泥中,红

霉素、罗红霉素、阿奇霉素、氧氟沙星四种抗生素被检出,其中阿奇霉素含量普遍高于氧氟沙星,而氧氟沙星含量略高于红霉素,罗红霉素含量最低。通沟污泥和河湖底泥中的抗生素含量远低于污水污泥,这说明抗生素主要来源于人类活动。整体而言,抗生素的浓度处于μg/kg级,含量较小,风险较低。

2.5 多源污泥协同治理思路

多源污泥具有不同的产生特性。从来源看,污水污泥来源固定,通沟污泥、河湖底泥则来源分散;从产生频率和产量看,污水污泥是连续稳定产生的,通沟污泥间歇、少量产生,河湖底泥产生具有间歇性,产生量大。在各类污泥中,污水污泥产生量和来源较为稳定,多源污泥协同处理应以污水污泥为核心。

依据“分质协同、分类利用”的总体原则,按照有机质含量高低分类处理,3种污泥有机质含量从高到低依次是污水污泥、通沟污泥、河湖底泥。可将污水污泥与城市其他有机固废协同厌氧消化处理,并根据不同城市特征与需求,探索产物的多途径利用方式,例如矿山生态修复、填埋场修复、城市园林绿化、建材利用^[18]。通沟污泥可采用预处理—多级筛分—泥水分离—固化等工艺,分离出的有机物与污水污泥协同处理,无机砂石作为道路路基材料、制作防汛沙袋或作为其他建材产品加工原料,泥饼可加工为工程回填土、透水砖、陶粒等。河湖底泥处理工艺与通沟污泥类似,可充分利用已有通沟污泥处理站点,经脱水固化处理后,作为工程土或其他建筑工程材料^[19]。同时规划应急处置设施,充分利用现有燃煤电厂、垃圾焚烧厂、填埋场为多源污泥提供托底应急处置。

3 结论

① 污水污泥有机质含量为30%~50%,含砂量高,其干基热值一般在5 500~11 000 kJ/kgDS,养分含量为6%~8%,重金属含量较低,远低于《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)A级标准,虽然经过后续厌氧消化或好氧发酵后,重金属含量会有所提高,但其土地利用风险依然较小。

② 通沟污泥成分复杂,有机质含量范围约5%~90%,热值和养分含量较低,仅能达到土地改良用泥质标准,且不稳定,不适宜土地利用;河湖底泥

有机质含量普遍较低,含量通常小于10%,其热值也较低,不到1 000 kJ/kgDS。

③ 污水污泥中13种抗生素的检出率较高,但浓度低,风险较小。污水污泥、通沟污泥、河湖底泥的16种多环芳烃之和均值为0.401、2.108、0.813 mg/kg,浓度低,风险较小。

④ 污水污泥处理处置主流工艺技术在我国均有广泛示范,在此基础上,可按照有机-无机分类原则积极探索多源污泥协同处理路径。

参考文献:

- [1] 戴晓虎,赵玉欣,沙超,等. 我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研[J]. 给水排水,2014,40(S1):75-79.
DAI Xiaohu, ZHAO Yuxin, SHA Chao, *et al.* Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014,40(S1): 75-79 (in Chinese).
- [2] 王建伟. 青岛城市污水厂污泥含砂量调查及水力旋流除砂试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2012.
WANG Jianwei. The Survey on the Sand Content in Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plants in Qingdao and the Experimental Study on Hydrocyclone Desanding [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012(in Chinese).
- [3] 王颖. 细微泥沙粒径对活性污泥MLVSS/MLSS的影响及预测研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
WANG Ying. The Effect of Fine Grit Particle Size on Activated Sludge MLVSS/MLSS and Prediction Research [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese).
- [4] 陈功. 通沟污泥处理的提质增效改进工艺设计[J]. 中国给水排水,2021,37(16):78-82.
CHEN Gong. Process design to improve quality and efficiency of sewer sludge treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021,37(16):78-82 (in Chinese).
- [5] 杨笛音. 通沟污泥处理处置技术方案选择——以上海市浦东新区为例[J]. 四川环境,2020,39(3):125-131.
YANG Diyin. Selection of technical scheme for treatment and disposal of sediment in sewer system—taking the Shanghai Pudong New District as an example [J]. Sichuan Environment, 2020,39(3): 125-131 (in Chinese).
- [6] 黄慧,孟飞琴,朱峥,等. 通沟污泥处置特细砂沉积问题探讨及对应措施[J]. 中国给水排水,2019,35(18):32-35.
HUANG Hui, MENG Feiqin, ZHU Zheng, *et al.* Discussion on deposition of superfine sand in dredging sludge disposal and corresponding measures [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (18) : 32-35 (in Chinese).
- [7] 陈萌,韩大伟,吉芳英,等. 城市污水处理厂污泥热值及影响因素分析[J]. 给水排水,2008,34(4):37-40.
CHEN Meng, HAN Dawei, JI Fangying, *et al.* On sludge heat value examination and its influencing factors of municipal wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34 (4) : 37-40 (in Chinese).
- [8] 项朝璧. 深度脱水后污泥热值及计算模型研究[J]. 中国水泥,2014(8):70-72.
XIANG Chaobi. Study on calorific value and calculation model of sludge after deep dehydration [J]. China Cement, 2014(8): 70-72(in Chinese).
- [9] 郝晓地,陈奇,李季,等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水,2019,35(4):35-42.
HAO Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, *et al.* Ultimate approach to handle excess sludge: incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (4) : 35-42 (in Chinese).
- [10] 李海燕,胡晓东,吴启航,等. 广州城市污泥中重金属的含量、排放通量及农用风险评价[J]. 环境工程学报,2015,9(3):1409-1416.
LI Haiyan, HU Xiaodong, WU Qihang, *et al.* Heavy metal concentration, emission flux and potential ecological risk assessment for agriculture in Guangzhou [J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 9 (3):1409-1416(in Chinese).
- [11] 李元瀚,孙长顺,王丽香,等. 西安市生活污水厂污泥中重金属特性及再利用风险评价[J]. 四川环境,2022,41(1):235-239.
LI Yuanhan, SUN Changshun, WANG Lixiang, *et al.* Characteristics and reuse risk assessment of heavy metals in sludge of Xi'an sewage treatment plant [J]. Sichuan Environment, 2022, 41 (1) : 235-239 (in Chinese).
- [12] 孟国欣,查同刚,张晓霞,等. 北京市污水处理厂污泥重金属污染特征和生态风险评价[J]. 生态环境学报,2017,26(9):1570-1576.
MENG Guoxin, ZHA Tonggang, ZHANG Xiaoxia, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological risk

- assessment of sludge from sewage treatment plants in Beijing [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2017, 26(9):1570-1576(in Chinese).
- [13] 李娟,李金香,杨妍妍. 城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1956-1966.
- LI Juan, LI Jinxiang, YANG Yanyan. Characteristics of sludge and associated risk assessment of urban sewage treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1956-1966(in Chinese).
- [14] 白冬锐,张涛,包峻松,等. 苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(7):3206-3214.
- BAI Dongrui, ZHANG Tao, BAO Junsong, *et al.* Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3206-3214(in Chinese).
- [15] 王磊,向甲甲,殷瑶,等. 河道底泥重金属的含量特征与潜在生态风险[J]. *净水技术*, 2020, 39(10): 162-167,172.
- WANG Lei, XIANG Jiajia, YIN Yao, *et al.* Content characteristics and potential ecological risks of heavy metals in river sediment [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(10): 162-167,172(in Chinese).
- [16] LIU X, CHEN Z, XIA C, *et al.* Characteristics, distribution, source and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments along the Yangtze River Estuary Deepwater Channel [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110765.
- [17] ZHANG X, YU T, LI X, *et al.* The fate and enhanced removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in wastewater and sludge treatment system: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(16): 1425-1475.
- [18] 李尔,曾祥英. 武汉市主城区污水厂污泥处理处置现状及展望[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(18):8-13.
- LI Er, ZENG Xiangying. Current situation and prospect of sludge treatment and disposal of WWTPs in the main urban area of Wuhan [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18):8-13(in Chinese).
- [19] 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):95-100.
- 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):95-100(in Chinese).

作者简介:周维奇(1988-),男,湖北天门人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水环境治理、城镇水务。

E-mail:zwq188@aliyun.com

收稿日期:2022-04-10

修回日期:2022-08-09

(编辑:李德强)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命