

环保疏浚底泥处置技术的研究进展

杨晓龙, 练新

(中交广州水运工程设计研究院有限公司, 广东 广州 510220)

摘要:介绍了河湖底泥的污染物组成、污染来源、特性及危害,并结合国内外文献系统综述了底泥脱水减量化、资源化利用、无害化处理等技术的最新研究进展,最后提出了湖泊环保疏浚底泥处置技术的研究展望以及建议。

关键词:河湖底泥;环保疏浚;底泥处置;资源化利用;研究进展

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)S1-0109-05

1 研究背景

近年来,随着我国河湖水环境点源污染控制逐见成效,受污染底泥作为一种长久性的污染源,受到了极大关注。湖泊内污染源(内源)是指通过人类工农业生产活动、水生植物残骸以及大气干湿沉降等方式输入,以及湖泊本身携带的污染物,与泥沙结合在一起所形成的污染底泥。在外来污染源存在时,氮磷营养盐只是在某个季节或时期对富营养化起到比较显著的作用,然而在湖泊外来污染源得到控制以后,底泥中的营养盐会逐渐释放出来,仍然使湖泊发生富营养化。

环保疏浚是利用工程措施对污染底泥进行异位修复的技术,是一种经济有效又彻底的污染底泥治理方式,可以有效减少底泥中的污染物向水体释放,为水生态系统的恢复创造条件。我国湖泊底泥疏浚早在20世纪50年代就已经开始,1953年开始的杭州西湖疏浚工程为环保疏浚技术在我国广泛应用奠定了基础,后来又先后在滇池、巢湖、洱海等湖泊进行了疏浚,这些工程均产生了一定效果,疏浚水域污染状况得到了改善。

环保疏浚产生的底泥不仅量大,含水率高,且其中的污染物含量也较高,单纯堆放不仅占用大量土地,而且在雨水的冲刷作用下很容易产生二次污染。但是底泥中富含有用成分,若不能加以利用,将造成资源浪费。若能将底泥作为原料,生产其他产品,实现资源化利用,则能带来一定的经济效益,走上一条可持续发展道路。疏浚底泥如何处置,成为疏浚能

否顺利实施的关键因素。

2 底泥污染物类型及危害

根据相关资料,西湖每年沉积物中磷的释放量可达1.3t左右,相当于年入湖磷负荷量的41.5%;安徽巢湖的磷年释放量高达220.38t,占全年入湖磷负荷量的20.90%;玄武湖的磷释放量占全年排入量的21.5%^[1]。由此可见,污染底泥对水体磷浓度的补充是不容忽视的,尤其是对于已采取了截污措施的湖泊,这种来自沉积物中的污染物,其重要性更是不言而喻的。

2.1 营养元素

经各种途径进入水体的N、P等营养元素,一部分被水生植物吸收利用,另一部分则通过水体自净作用迁移到底泥中。这部分底泥在外源污染得到一定控制的条件下,可作为内源污染源释放N和P等,造成水体富营养化,这将对水体中的生物构成严重威胁,甚至破坏湖泊水生生态系统的平衡。

2.2 重金属

在自然和人为因素的影响下,被排放到湖泊的重金属(如铜、铅和铬等)在吸附、水解和共沉淀的作用下,一小部分进入水体,其余大部分则沉淀到底泥中,并与水相保持一定的动态平衡。当水环境理化条件变化时,底泥中的重金属极易从沉积物再次进入水相,通过扩散作用和食物链进入生物体内,而造成危害。

2.3 难降解有机物

多环芳烃(PAH)、多氯联苯(PCBs)和有机氯农

药等有机物因其疏水性强、难降解而在底泥中大量积累,这不仅影响上覆水体的水质,还会因为食物链的生物富集作用在生物体内积累,对水生生物产生毒害作用。

3 污泥脱水调理技术

底泥中富含大量水、营养元素、重金属元素和难降解有机物,是有机物的重要蓄积库和营养盐再生地。大量研究表明,底泥的含水率一般在 95% 左右,主要由表面吸附水、间隙水、毛细结合水和内部结合水组成。过高的含水率往往会限制污泥处理的减量化要求。常用的改变污泥脱水性能的方法大致可以分为:物理机械法、化学混凝法、生物法。

3.1 物理机械法

物理机械法是借助机械外力的作用将污泥组分中的自由水挤压出来,减小污泥的质量和体积。常用机械压滤机主要包括板框式、带式、叠螺式、真空过滤式和离心式等。这些机械脱水工艺的优缺点见表 1。经这些常规脱水设备处理后污泥仍存在较高的含水率,无法达到“稳定化、无害化、减量化、资源化”的要求,其后续处置难度和成本也仍然较高,因此需进一步提高污泥脱水效率。姚尚安等^[2]使用改进的板框式压滤机,在一定压力条件下对底泥压滤 10 min,使其含水率降低至 75.3%。肖登均等^[3]使用污泥颗粒化器与带式压滤机联合工艺,使压滤后的泥饼含水率进一步降低。

表 1 机械脱水工艺的对比

机械脱水方法	脱水动力	含水率/%	优缺点
板框式压滤机	压力	55 ~ 70	效率高,耗时少,自动化程度高,设备复杂,间歇操作,噪音大,滤板清洗困难
带式压滤机	压力	55 ~ 70	可进料连续工作,污泥处理量大,出泥含水率偏高,且易发生偏带现象
叠螺式脱水机	压力	70 ~ 80	适用多个行业的污泥,占地小,具有自我清洗功能,部件磨损大,维修费用高
真空脱水	负压	60 ~ 85	处理后污泥含水率较低,可连续生产。基建投入较大,真空系统漏气会影响运行稳定性
离心脱水	离心力	80 ~ 85	基建投资少,占地少,药耗低且处理效果稳定,耗电量小,设备易于磨损

3.2 化学混凝法

采用化学混凝剂对污泥进行调理,可降低污泥胶体粒子斥力,使污泥颗粒稳定性降低,从而提高浓缩脱水效率。通常添加化学混凝剂后,污泥颗粒的电荷和结构及颗粒内部水分分布状况发生改变,污泥的脱水性能得到极大改善。化学混凝剂种类繁多,根据来源和性质可分为无机絮凝剂、有机絮凝剂

和天然生物高分子絮凝剂 3 大类。无机絮凝剂主要有硫酸铝、氯化铝、硫酸铁、氯化铁等。有机絮凝剂又可分为阴离子型、阳离子型、非离子型和两性型,如聚丙烯酰胺(PAM)和聚二甲基二烯丙基氯化铵(PDADMA)等。天然生物高分子絮凝剂一般为淀粉衍生物、纤维素衍生物、植物胶改性产物、多糖类及蛋白质改性产物等。吴幼权等^[4]以壳聚糖衍生物(CAM)和阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)为原料,制备出具有良好脱水性能的复合絮凝剂(CAM-CPAM)。曾德芳等^[5]采用累托石和虾蟹壳制备出一种新型污泥脱水絮凝剂,使污泥脱水率提高了 5.47%,沉降时间大幅缩短。林霞亮等^[6]研究了无机混凝剂与壳聚糖联合调理对污泥脱水效果的影响,发现泥饼含水率降低至 76% 左右。

3.3 生物沥浸脱水

生物沥浸技术不仅能够改善污泥的脱水性,同时还能去除污泥中的重金属。向污泥中投加优势种群,一方面可以抑制异养微生物分泌胞外聚合物(EPS),导致菌胶团破碎,使包裹在其中的水分释放出来,有利于脱水;另一方面,生物沥浸能促进污泥 pH 值下降,导致污泥表面负电荷被中和,易于絮凝沉降。宋兴伟等^[7]以 Fe²⁺和 S 作为能源物质进行生物沥浸研究,发现污泥脱水性能显著提高,污泥比阻降低了 79%,无需外接絮凝剂也可机械压滤脱水。石超宏等^[8]选用嗜酸性细菌混培物开展生物沥浸实验,污泥中 Cu、Cd、Zn 等重金属元素的去除率均达到 80% 以上,污泥结构由絮状变成明显的颗粒状,沥浸 12d 后污泥离心脱水率由之前的 73.1% 提高到 90%。

4 底泥的资源化处理技术

疏浚底泥含水率高,N、P 等营养元素含量高,同时富集着大量有毒有害的化学物质。如果仅仅采取堆放处理,不仅会占据大量土地,还可能产生二次污染,危害环境和人体健康,因此要进行资源化处理。

4.1 农业应用

底泥中通常富含 N、P、K 多种营养元素,同时还含有普通矿物肥料中所缺少的有机质及多种微量元素,因此无害化处理后的底泥可以作为农用肥料。无害化处理后的底泥农用肥料可有效改善土壤结构,增加空隙度,提高土壤自身保水和抗侵蚀性能,并且污泥中的矿质元素有利于土壤中微生物的生长。刘旭等^[9]用乌梁素海底泥作为培育葵花籽的肥料,结果发现不仅葵花籽的产量提高,而且品质也有大大改善,表现为葵花籽中蛋白质和总氨基酸组分含量提高。也有人把底泥与木屑混合堆肥,作为

育苗和花卉基质,发现效果优于一般的花卉基质。王玮等^[10]将苏州河底泥施用于青菜地,结果发现青菜的生长与底泥的施用量呈正相关。

4.2 工程建筑应用

4.2.1 施工用土

疏浚底泥经过特定的处理过后,可以代替砂石和土料作为填方材料用于工程施工。固化处理后的疏浚底泥在工程中运用十分广泛,包括:①用于城市、港口建设中低洼地区的回填,如朱伟等^[11]将深圳盐田港中港区的疏浚底泥进行固化处理后作为填方材料用于填海工程;②用于道路路基建设,防止边坡失稳和雨水冲刷等,如王志新等^[12]使用污泥、钢渣、消石灰为原料制备混合材料,不仅强度高,而且稳定性好,满足路基材料的技术要求;③用于堤防建设和加固,如张春雷等^[13]对疏浚底泥进行了固化处理和筑堤试验,发现淤泥固化 28d 后强度、变形和渗透系数能够满足堤防筑堤的要求,可以作为土方材料进行使用。

4.2.2 制砖

传统的制砖方式需要消耗大量的黏土,严重侵占了耕地,还会产生大量废弃物。Burt 等^[14]指出底泥制砖的可行性,但要求底泥中的含砂量要小于 30%。张群等^[15]分析了滇池草海底泥的物理化学性质,按一定配比掺入粉煤灰、黏土烧结制砖,与普通黏土砖相比,该砖表面更加平整光滑,强度更高。王立华等^[16]以兴宁合水水库淤泥为主料,配以煤矸石、炉渣等配料,制备出符合产品标准的高强度烧结砖。李志国等^[17]使用独流减河入海口淤泥制备出烧结砖,该产品各项技术指标均满足国标 GB 5101—2003《烧结普通砖》的要求。

4.2.3 制陶粒

污泥制陶粒是由 Nakouzi 等^[18]率先提出的,并取得了大量研究成果。陶粒作为一种轻骨料,具有密度小、强度高、保温、隔热性能好的优点^[19]。张国伟等^[20]在最佳工艺条件下,制备出底泥陶粒,其比表面积为 3.67 m²/g,空隙率达 53%,各指标优于其他同类产品,为底泥资源化利用提供了一条新出路。刘贵云等^[21]利用苏州河底泥烧制陶粒,制得的产品完全满足 GB 2482—81《轻骨料试验方法》中的技术指标,并且有效抑制了底泥中重金属的溶出量。常用的污泥陶粒制备流程见图 1。

4.2.4 制水泥

我国水泥工业所采用的主要原料是黏土。而底泥中存在明显的分级沉降现象,从化学成分上来看与黏土相似,这为底泥代替黏土制备水泥提供了理论基础,但是底泥含水率过高,需要经过脱水干燥处

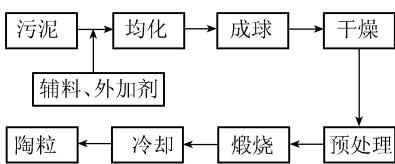


图 1 污泥陶粒的制备流程

理才能满足后续工艺要求。杨磊等^[22]利用河道疏浚的淤泥生产水泥熟料并确定了工艺参数,根据 XRD 分析发现淤泥水泥熟料的主要矿物成分与传统硅酸盐熟料并没有差别,保证了新型水泥的品质。林奕明等^[23]将用污泥制得的水泥与普通硅酸盐水泥 P·O42.5 比较,发现两者抗折抗压强度相当,但是污泥的掺杂量过大时会延迟水泥的固化时间。美国气体技术公司和 Unitel 环境技术公司合作,在华氏 3000 度下将废弃混凝土与淤泥、金属纤维粉末混合,制成高性能建筑水泥。房满满等^[24]以河涌淤泥代替水泥制备部分原料,制出生态环保水泥,研究了原淤泥中的有害物质在水泥窑煅烧过程中的挥发性,并发现重金属能有效固化在水泥浆中。

4.3 能源回收利用

4.3.1 污泥制氢

目前,污泥制氢是一项尚处于试验研究阶段的能源回收前沿技术。根据原理的不同,污泥制氢技术可以分为以下 3 类:①生物化学制氢;②超临界水气化制氢;③高温气化制氢^[25]。生物化学制氢法利用光合细菌或厌氧发酵菌,在酶的催化作用下以有机物作为底物分解制得氢。昌盛等^[26]优化设计了厌氧接触式发酵制氢反应器,发现经酸预处理的污泥可以形成丁酸型发酵体系,在水利停留时间 8h、COD 质量浓度 5 000 mg/L 条件下,发现高效发酵产氢菌 E. harbinense YUAN-3 占据绝对优势,产氢速率达到了 16 L/d。超临界水化是利用超临界水强大的溶解能力,将生物质中的各种有机物溶解,生成高密度、低黏度的液体,然后在高温、高压反应条件下快速气化,生成富含氢气的混合气体。张钦明等^[27]采用超临界水气化技术处理城市污泥,在 450℃、压力为 25 MPa 条件下反应 45 min,结果产生氢气的体积分数达到 22.39%。污泥高温气化制氢一般是指将污泥通过热化学方式转化为高品位的气体燃气或合成气,然后再分离出氢气。孙志刚等^[28]研究了污泥与煤共制浆进行气化制氢的工艺,发现随着污泥添加量的增加,制氢成本下降,该工艺的制氢能耗仅为每 1 000 m³ H₂ 耗能 20.5 GJ。

4.3.2 污泥燃料化

污泥作为生物质含有大量的有机物,一般含水率 80% 左右的污泥,其热值在 7 000 ~ 15 000 kJ/kg

之间。研究污泥燃料化技术对解决污泥处置问题、缓解能源压力具有指导意义。蒋建国^[29]使用污泥与煤或锯末混合物为原料造粒,得到污泥衍生燃料产品。赵培涛等^[30]在脱水压力为 1.2 MPa,按秸秆木屑与污泥之比为 1:10 的配比,制得最低含水率为 40% 的固体燃料,该固体燃料的净热值可达 3 260 kJ/kg,着火点低,燃烧性能良好。张辉等^[31]利用成型-干化工艺制备污泥-煤复合燃料,在室温条件下与普通污泥相比具有更快的干化速率。

5 污泥的无害化处理

5.1 污泥固化/稳定化

向污泥中添加药剂,可提高污泥硬度,降低透水性,从而改变污泥物理特性,封闭其中重金属残留物,防止有害物质溶出,同时有效改良泥土团粒结构。常用的固化剂包括石灰类固化剂和水泥类固化剂。徐杨等^[32]对秦淮河疏浚淤泥进行固化改良试验,结果发现固化土由塑性破坏向脆性破坏过渡,固化 28 d 后泥土强度可达到 670 kPa。侯浩波等^[33]研究了污泥改性剂对其河道淤泥固化/稳定化的效果,结果表明,改性后淤泥抗压强度提高,Cr、Cu、Ni 和 Zn 等离子浸出浓度降低 80% 以上,28 d 后浓度达到最低值。

5.2 焚烧

利用焚烧炉将污泥加热干燥,高温去除污泥中水分并使有机质分解,同时杀灭病原体,使污泥成为少量灰烬,从而实现污泥无害化、减量化的目的。焚烧后余灰亦可作为土壤改良剂,也可用作生产水泥、砖、陶粒等的原料。但是,由于污泥中水分含量高,热值低,需要添加大量辅助材料才能燃烧,焚烧过程还会产生 SO_x、NO_x、二噁英等有毒有害气体,这些因素导致焚烧处理技术运行成本高。荷兰 SNB 污泥焚烧厂利用外部热源将污泥加热干化至含水率 50% 左右,再将半干化污泥转移至流化床焚烧炉,焚烧产生的烟气经处理装置净化后达标排放,实现余热的循环利用。2005 年日本启动了污泥发电项目,使用碱性溶液从污泥焚烧飞灰中回收磷^[34],目前在岐阜市已建成了日处理量为 5 t/d 的工厂。

5.3 堆肥

用湖泊河道中的沉积物作为主要原料,在高温多湿的环境中,底泥中的有机物经过发酵酸化、微生物分解等步骤转化为简单有机物。堆肥产生的高温可以杀死污泥中所携带的病菌、虫卵等有害微生物。吕志刚等^[35]将东蠡湖底泥与木屑、猪粪和稻壳等固体废物混合进行堆肥,堆置 30 d 后堆肥材料呈腐殖质状,结构疏松,无恶臭散发,水分和有机质含量明

显下降。季俊杰等^[36]对氧化塘底泥进行堆肥处理,发现堆肥结束后 TN 含量下降 17.5%,而 TP 含量比堆肥初期上升了 47.0%。

5.4 余水处理

污泥脱水后的余水中含有大量的氮、磷、重金属和有机物等污染物,且污染物大多附着在细颗粒上,细颗粒比重小,易悬浮在余水中,很难沉降,所以,一般需要采取工程措施来加速余水中 SS 的沉淀,使余水水质达标并回排。王琦等^[37]采用物理、生物、化学综合处理方法,使疏浚余水依次通过生物排泥池、沉淀池、澄清池,并利用一体化加药设备向余水均匀投加聚合氯化铝(PAC)絮凝剂,经处理的余水排放水质达到 GB 8978—1996《污水综合排放标准》二级标准。在滇池污染底泥疏挖及处置工程中,采用了水生植物过滤带、间歇性吹填与多级溢流、变换排泥管口和投药促沉法等工程措施来进行余水处理,经过处理后的余水中各项指标(除 SS 外)达到城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准,取得了良好的效果。

6 展望和建议

污染底泥的环保疏浚,无论是设计还是实施上,都应以去除污染底泥,改善水质,恢复生态系统稳定性为目的。目前,随着我国疏浚项目的不断增加,如何处理大量产生的疏浚污泥成为人们关注的焦点。底泥是一种利用价值巨大的潜在资源,对底泥进行环保疏浚,并实现资源化利用,是未来疏浚行业发展的热点方向。笔者对底泥的环保疏浚及资源化利用提出以下建议:

a. 在疏通航道、增加库容的基础上去除水体中的内源污染污泥,从而改善水质,提高环境质量。由于疏浚水域往往面积大,污染底泥厚薄分布不均,在疏挖过程中应该配备先进的定位控制系统,提高疏浚精度,严格控制超深,减少污染底泥的处理量 and 处理费用。

b. 在吸收国外先进技术的基础上,研究新型环保的污泥脱水工艺,综合运用机械脱水、化学混凝、生物沥浸等技术。在污泥的无害化处理方面,应防止污泥中重金属和难降解有机物的溶出,避免二次污染,并制定严格合理的评价标准,为污泥资源化利用做好铺垫,减少后续处理工艺的成本和处理量。

c. 疏浚底泥资源化问题势必将成为疏浚业发展的热点。用疏浚污泥代替传统的土砖、水泥作为工程建筑材料,不仅节约了土地资源,更实现了废物的资源化利用。首先,要严格控制污泥资源化产品的质量,保证达到国家规定的行业标准。再者,做好

污泥中的毒害物质的稳定化、无害化处理,同时应全面考虑余水和残渣的处理。最后,研发污泥脱水减量化-无害化-资源化的一体化工艺,鼓励创新,简化工艺流程,节省运行成本,加大宣传推广,走出一条适合我国国情的环保污泥疏浚资源化道路。

参考文献:

[1] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992.

[2] 姚尚安,孙同华,瞿赞,等. 污泥深度机械脱水的优化研究[J]. 环境科学与技术,2014(3):126-131.

[3] 肖登均,孙先锋. 颗粒化器在带式污泥脱水系统中的应用研究[J]. 山东工业技术,2015(2):118.

[4] 吴幼权,郑怀礼. 复合絮凝剂 CAM-CPAM 的制备及其污泥脱水性能[J]. 环境科学研究,2009(5):535-539.

[5] 曾德芳,方勇,袁继祖. 新型污泥脱水絮凝剂的研制[J]. 化工环保,2006(4):329-332.

[6] 林霞亮,周兴求,伍健东,等. 无机混凝剂与壳聚糖联合调理对污泥脱水的影响[J]. 工业水处理,2015(10):38-41.

[7] 宋兴伟,周立祥. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究[J]. 环境科学学报,2008(10):2012-2017.

[8] 石超宏,朱能武,吴平霄,等. 生物沥浸去除污泥重金属及改善脱水性能研究[J]. 中国环境科学,2013(3):474-479.

[9] 刘旭. 乌梁素海底泥农田利用可行性分析及其环境风险评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[10] 王玮. 苏州河底泥农田应用的试验研究[J]. 农业环境科学学报,1990(2):1-5,48.

[11] 朱 伟,冯志超,张春雷,等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J]. 中国港湾建设,2005(5):27-30.

[12] 王志新,孙家瑛,王兆鹏,等. 城市通沟污泥无害化处理及其制备路基材料的研究[J]. 粉煤灰,2013(2):8-11.

[13] 张春雷,朱伟,李磊,等. 湖泊疏浚泥固化筑堤现场试验研究[J]. 中国港湾建设,2007(1):27-29.

[14] BURT T N, DEARNALEY M P. Beneficial uses of dredged material principles and practice[C]//Proceedings of the second International Conference on Dredging and Dredged Material Placement. NewYork:American Society of Civil Engineers,1994:631-643.

[15] 张群. 利用滇池海底泥制作建筑材料的研究[J]. 云南建材,1995(3):22-30.

[16] 王立华,刘佳,陈理达. 水库淤泥烧制原料理化性能试验研究[J]. 广东水利水电,2012(11):27-30.

[17] 李志国. 综合利用独流减河入海口清淤的海泥焙烧粘土砖试验研究[J]. 天津建设科技,2006(1):36-38.

[18] NAKOUZI S. A novel approach to paint sludge recycling[J]. Journal of Material Research, 1998, 13(1): 53-60.

[19] 王晓刚,赵铁军. 轻集料混凝土的新进展[J]. 建筑技术开发,2003,30(10):37-39.

[20] 张国伟. 河道底泥制备陶粒的研究[D]. 上海:东华大学,2007.

[21] 刘贵云. 河道底泥资源化:新型陶粒滤料的研制及其应用研究[D]. 上海:东华大学,2002.

[22] 杨磊,计亦奇,张雄,等. 利用苏州河底泥生产水泥熟料技术研究[J]. 水泥,2000(10):10-12.

[23] 林奕明,周少奇,周德钧,等. 利用城市污水处理厂污泥生产生态水泥[J]. 环境科学,2011(2):524-529.

[24] 房满满,林永权. 水泥窑协同无害化处理广州市河涌淤泥的研究[J]. 水泥,2010(8):8-10.

[25] 郭鸿. 污泥资源化技术研究新进展[J]. 化工科技,2007(1):46-50.

[26] 昌盛. 厌氧接触式发酵制氢反应器的运行调控与产氢效能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[27] 张钦明,王树众. 污泥制氢技术研究进展[J]. 现代化工,2005(11):34-37.

[28] 孙志刚,亢万忠. 污泥煤浆气化制氢工艺研究[J]. 大氮肥,2012(4):217-221,239.

[29] 蒋建国. 城市污水厂污泥衍生燃料成型的研究[J]. 中国环境科学,2008(10):904-909.

[30] 赵培涛,葛仕福. 污泥及秸秆生物质固体燃料制备中试工艺及燃烧特性[J]. 农业工程学报,2012(9):165-170.

[31] 张辉,胡勤海,滕玮,等. 污泥-煤复合燃料的成型干化工艺研究[J]. 中国环境科学,2013(3):486-490.

[32] 徐杨,阎长虹,许宝田,等. 城市河道淤泥特性及改良试验初探[J]. 水文地质工程地质,2013(1):110-114.

[33] 侯浩波,刘柳,周旻,等. 河道底泥重金属浸出毒性分析及其固化/稳定化效果[J]. 环境工程学报,2015(7):3339-3344.

[34] 朱芬芬,高冈昌辉,王洪臣,等. 日本污泥处置与资源化利用趋势[J]. 中国给水排水,2012(11):102-104.

[35] 吕志刚,杨艳丽,徐敏. 河湖疏浚底泥与固体废物好氧堆肥研究[J]. 环境科技,2010(2):12-14.

[36] 季俊杰,何成达,葛丽英,等. 氧化塘底泥堆肥过程氮磷及重金属变化研究[J]. 环境科学与技术,2006(12):14-15.

[37] 王琦,李中华. 环保疏浚底泥堆场余水处理方法及实施装置研究[J]. 水资源与水工程学报,2012(2):179-181.

(收稿日期:2016-08-30 编辑:彭桃英)