

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.009

我国疏浚底泥资源化利用的研究进展与展望

董蕾¹, 吴雪^{1,2}, 王燕彩¹, 朱启凤¹, 周鸿斌¹, 常益蓉¹

(1. 昆明市生态环境科学研究院, 云南 昆明 650032; 2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 底泥环保疏浚是治理受污染河湖的一种有效措施,疏浚工程会产生大量疏浚底泥,而底泥不仅含有丰富的营养物质,还存在重金属等污染物,这使得底泥资源化利用充满机遇与挑战。本文基于引文空间(CiteSpace)综述了我国底泥资源化利用的发展趋势和相关研究进展,通过文献和发明专利分析,结合标准文件中的相关要求,梳理出不同底泥资源化利用方式的关键点及优缺点,最后,从技术创新、标准完善、政策支持等方面,展望了河湖疏浚底泥资源化利用的后续重点研究方向。

关键词: 疏浚底泥; 资源化利用; 研究趋势; 底泥性质; 利用途径; 适用条件

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0063-07

Advance and Prospects of Resource Utilization of Dredged Sediment in China

Dong Lei¹, Wu Xue^{1,2}, Wang Yancai¹, Zhu Qifeng¹, Zhou Hongbin¹, Chang Yirong¹

(1. Kunming Institute of Eco-Environmental Science, Kunming 650032, China; 2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Environmental dredging of sediment is an effective measure to treat polluted rivers and lakes. Dredging works produce a lot of sediment, which contains rich nutrients and heavy metals, making the resource utilization of sediment full of opportunities and challenges. Based on CiteSpace, this paper summarizes the development trend and related research progress of sediment resource utilization in China, and sorts out the key points, advantages and disadvantages of different sediment resource utilization methods through the analysis of literature and invention patents, combined with relevant requirements in standard documents. Finally, from the aspects of technological innovation, standard improvement and policy support, the future research direction of the resource utilization of dredged sediment in rivers and lakes is prospected.

Keywords: dredging sediment; resource utilization; research trends; sediment properties; utilization channels; applicable conditions

底泥是沉积于河湖等水体底部的黏土、泥沙、有机质及各种矿物的混合物,是水体多相生态系统的重要组成部分。底泥汇集了来自陆域和上覆水

中的污染物,在一定条件下形成内源污染,导致水环境恶化,严重威胁水体生态环境。环保疏浚是减轻河湖内源污染的一种有效措施,自1998年滇池草

通信作者: 吴雪 E-mail: stellawu7@126.com

海首次开展底泥环保疏浚以来,我国众多河湖都实施了环保疏浚工程^[1]。疏浚工程会产生大量的疏浚底泥,而底泥中含有丰富的营养物质,也可能含有重金属和有毒有害物质,存在二次污染的风险。资源化利用可以减少疏浚底泥的堆放和填埋、降低环境污染风险、实现资源循环利用,是学术研究和环境管理关注的热点。

近年来,已有学者对疏浚底泥处理处置技术、资源化利用途径及其风险评估等研究内容进行综述,提出底泥资源化利用将是今后疏浚底泥治理的主流方向^[2]。也有学者指出我国在底泥资源化研究中虽取得进展,但仍存在土地利用不当和风险评估意识较弱的问题,在未来底泥的资源化利用研究中需要结合国情,探索适合我国的发展道路。尽管我国学者对底泥资源化利用已有较多的实证研究和综述,但尚未开展过已有研究文献的系统性综述及专利技术的系统梳理。基于此,本文使用引文空间(CiteSpace)软件对文献进行梳理,系统综述疏浚底泥资源化利用领域的研究趋势,结合发明专利和相关标准文件分析整理,分类提出疏浚底泥资源化利用适用条件及优缺点,以期为我国疏浚底泥资源化利用提供参考依据。

1 数据来源与处理

本研究论文数据来源于CNKI和Web of Science数据库,中文文献使用CNKI专业检索,检索式为:TI='底泥'+ '疏浚物'+ '淤泥' AND TI='资源化利用' AND TI='河'+ '湖',检索时间跨度为1979年1月1日—2024年11月30日,共检索到文献343篇。英文文献使用Web of Science核心合集,检索式为:("lake" OR "lakes" OR "river" OR "rivers") AND ("dredged sediment" OR "dredged sediments" OR "dredging sediment" OR "dredged material" OR "dredged materials") AND ("resource utilization" OR "resource recovery" OR "resource management" OR "sustainable use" OR "recycling" OR "reclamation"),检索时间跨度为1979年1月1日—2024年11月30日,共检索到文献74篇。专利数据来源于中国国家知识产权局专利数据库(CNIPR),该数据库涵盖自1985年以来我国公开的所有专利资料。本文专利使用常规检索方式,检索要素为“底泥资源化利用”,检索申请日期为2004年1月1日—2024年11

月30日,共检索到相关发明专利166项。

本文采用文献计量分析法和内容分析法。文献计量分析法主要通过运用CiteSpace可视化文献计量分析软件,将检索到的417篇文献作为研究样本源,进行可视化的科学知识图谱呈现,直观地透视疏浚底泥资源化利用的主要研究方向,提出疏浚底泥资源化利用的潜在利用途径。内容分析法主要通过浏览文献和发明专利的摘要进行浏览,筛选出能够提供疏浚底泥资源化利用研究领域成果的文献、发明专利,梳理相关内容并整理分析,提出疏浚底泥资源化利用的适用条件及优缺点。

2 发展趋势与潜在利用途径

2.1 发展趋势

历年发文量反映了底泥资源化领域的理论水平和发展速度,专利则是衡量科技创新的重要指标,可以帮助分析底泥资源化领域的发展态势。发文量统计结果(见图1)显示,论文数量与专利数量整体呈上升趋势,2013年前处于发展缓慢阶段,之后快速增长,其中,论文数量在2020年达到最大值(27篇),专利数量在2021年达到最大值(24项),说明在底泥资源化利用领域,不仅理论水平不断进步,而且实际应用和科技创新也取得了成效,未来将有更广阔的发展前景。

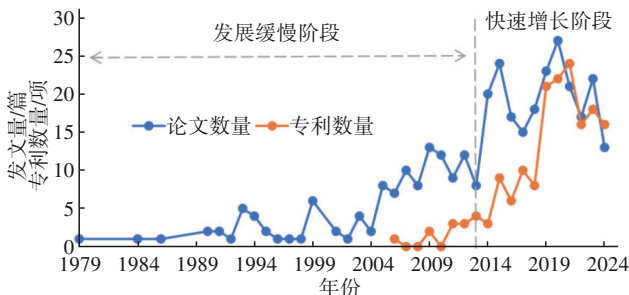


图1 发文量统计结果

关键词是作者对文章内容的高度凝练和总结,能够反映文献的核心内容。关键词共现图谱关系线颜色随时间推进由橘色向红色过渡,节点大小表征关键词频次。对417篇研究样本源进行聚类分析,主要形成3个关联性较强的生态框架,分别是:①底泥、固化/稳定化、底泥性质和营养物质等;②淤泥、土壤固化剂、路用性能、陶瓷及复合材料等;③土地利用、建材利用、堆肥处理和固化剂等。聚类分析结果(见图2)显示,研究样本中底泥资源化利用途径以土地利用、建材利用为主,主要技术手段

包括固化和稳定化处理。此外,主要研究方向还包括底泥性质、重金属、营养物质等。



图2 关键词共现示意

综上,结合已有研究经验,可将底泥资源化利用方式分为土地利用、建材利用、生态修复和其他利用4种,从多角度分析底泥资源化利用的发展趋势。

2.2 底泥潜在利用途径

随着对生态环境修复治理的重视,河湖疏浚整治力度也越来越大,采用传统填埋方式处置疏浚淤泥会占用大量土地,造成土地资源的浪费。为充分利用自然资源,开始进行疏浚底泥资源化利用的初探。由于底泥性质及可供利用的途径差异较大,关于底泥资源化利用的研究都是针对特定地点,按照时间线整理,可将我国底泥资源化利用发展分为如下3个阶段:

① 1979—2012年为早期探索阶段。这一时期我国疏浚底泥资源化利用方向以土地利用为主,在制肥、混合制备种植土等领域均有研究。

② 2013—2022年为技术发展与应用阶段,这一时期建筑行业每年消耗大量建筑材料,国家明令禁止使用农用地土制砖,将疏浚底泥用于制备建材不仅可减缓制造业与农争土,还可实现底泥资源化利用。底泥建材利用方式包括制作路基材料、场地回填及制砖等,不仅能解决底泥处理的难题,还可实现废弃物的循环利用。此外,国家相继发布相关标准文件,为底泥资源化利用提供具体的规范要求,确保淤泥在资源化利用过程中的安全性和有效性。2020年,周伟等^[3]通过模拟实验发现淤泥经过水泥固化处理后,各项指标均满足要求,可作为路基填料。2022年,倪亚玲等^[4]利用沱江淤泥制备了烧结砖,并用太湖淤泥烧制了淤泥陶粒,研究发现这

两种材料的各项指标均符合国家标准要求。

③ 2023年以来为高值化技术创新阶段。随着我国生态文明建设的快速推进,一些新型的资源利用方式成为研究热点,底泥资源化利用进入高值化技术创新阶段,在吸附剂、氢气、微生物燃料电池等能源利用方面不断突破,提高了能源利用效率。陈梓婷等^[5]将疏浚底泥通过“碱融+水热”合成沸石分子筛,结果表明该种材料对多种重金属具有良好的吸附性能,为底泥的高值资源化利用提供了新方向。潘晶等^[6]以黑臭水体底泥为底质构建了微生物燃料电池,发现该系统在产电的同时可去除底泥中的有机质、总氮和重金属等物质,能有效修复底泥。同时,部分研究者将底泥利用与现代科技相结合,实现了底泥利用的灵活性和便携性。例如,陈永辉等^[7]的专利技术——一种利用河湖底泥3D打印免烧砖的装置及制作方法,将3D打印与免烧砖制备相结合,能制备出形式多样的免烧砖,适用于不同场景需求。

3 底泥资源化利用的关键点及优缺点

底泥成分复杂,在利用过程中应综合考虑底泥性质、使用安全性和环境影响等因素,同时还应考虑当地的环境、社会、经济条件等。虽然现有研究都是针对特定地点的底泥资源化利用,但通过对相关文献、发明专利进行总结分析,结合相关标准文件,从土地利用、建材利用、生态修复和其他利用4个方面,梳理不同底泥资源化利用方式的关键点及优缺点,可为推进底泥的高效利用提供数据支撑。

3.1 土地利用

符合土地利用相关标准要求的底泥,可作为绿化种植和农业种植土壤添加物,用于园林、绿地、农田等场合。底泥中有很多由生物残体及其转化形成的有机质,可以改善土壤结构,促进植物生长。底泥中的重金属元素可能会导致土壤重金属污染,是底泥在土地利用中需要重点考虑的指标。由于疏浚底泥成分复杂,可能含有有毒有害物质,因此在土地利用时,需要综合考虑的因素较多,包括养分含量、污染物含量、底泥理化性质、相关标准要求及其技术经济可行性等。

3.1.1 农业种植

现行的农用地土壤环境质量标准主要有《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》

(GB 15618—2018)和《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018),满足标准要求的底泥可用于农业种植,但在使用过程中要控制底泥添加比例,否则可能造成重金属二次污染。根据实验研究,底泥添加量宜控制在50%以下,继续增大添加比例对养分无影响,但重金属可能对植物生长造成胁迫^[8]。农作物食用风险评价可参考《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中的重金属含量限值,薄录吉等^[9]通过实验发现底泥施用量控制在45%以下,能促进水稻的生长,且水稻中Cu和Zn的含量均未超过食品的限量标准。底泥除了可以作为土壤改良材料外,还可以制备复混肥和复合肥,成品相关指标测定可以参考《有机无机复混肥料》(GB/T 18877—2020)、《肥料中砷、镉、铬、铅、汞含量的测定》(GB/T 23349—2020)。复混肥制作过程中需考虑底泥和化肥的混合比例,在降低肥料成本的同时增加作物产量。底泥复合肥制备方法包括微生物发酵和煅烧,发酵过程中要考虑C/N比、初始含水率、通风量等条件,煅烧过程中温度和时间是关键。底泥用于农业种植不仅能提高土壤的有机质含量,还能改良土壤结构,提高土壤的保水保肥能力,与此同时为避免造成土壤污染,还需要严格控制添加比例。

3.1.2 绿化种植

对于没有达到底泥农用地相关标准的底泥,若其基本理化性质及营养肥力指标均满足《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)要求,重金属、多环芳烃等污染因子在《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)要求范围内,可用于绿化种植。疏浚底泥具有较高的营养成分,作为改良剂时常与动物粪便、秸秆、竹炭等混合使用,使用过程中原料配比是关键^[10]。底泥直接改良制备种植土对工艺技术要求较高,改良过程中需要添加秸秆、锯末和稻壳等材料,必要时还需掺加固化剂,才能使成品种植土指标满足标准要求^[11]。底泥在绿化种植领域的应用前景广阔,具有实际应用价值,相关的专利较多,如湖泊淤泥压缩营养土的生产方法专利,将淤泥、黏土、陶粒和泥炭等按比例混合后,通过低温灭菌制得压缩优质营养土,实现资源循环利用^[12]。底泥用于绿化种植能有效促进植物生长,且消纳量大,可能存在土壤污染风险,需加强土壤环境监测。

3.2 建材利用

建材利用是将底泥固化土作为填方材料和建筑材料,用于工程路基填筑或砖瓦陶粒生产等。疏浚底泥通常含有大量的无机质,包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,具有与黏土相似的组成,可以部分替代黏土用于制备建材产品。然而,受工矿企业和人类活动的影响,我国主要河流、湖泊底泥均存在不同种类、不同程度的重金属污染。因此,底泥的建材利用需要考虑污染物含量、底泥理化性质、成品性能要求及技术经济可行性等。

3.2.1 建筑材料

经过处理的底泥可替代黏土制备砖瓦、陶粒等建筑材料,避免二次污染是底泥利用的关键。为保证底泥利用的环境安全性,有必要对底泥制建筑材料中的重金属含量进行检测,其重金属指标应低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)规定限值。河湖底泥制砖是底泥和其他固体废物资源化利用的重要技术路线,免烧砖制备过程中固化材料配比和成型压力是重要的工艺参数^[13]。为确保底泥制成免烧砖的物理和化学性能适用于各类工程需求,免烧砖的性能指标应满足《非烧结垃圾尾矿砖》(JC/T 422—2007)中的MU15标准^[14]。底泥制陶粒密度小,内部多孔,以优越的物理化学性能得到广泛应用。制备过程中升温速率、煅烧温度和时间是影响陶粒性能的主要因素,成品性能指标可参照《水处理用人工陶粒滤料》(CJ/T 299—2008)、《轻集料及其试验方法 第2部分:轻集料试验方法》(GB/T 17431.2—2010)测定^[15]。改良工艺条件能够增加底泥制陶粒的吸附量,高红杰等^[16]通过正交试验发现,在最优条件下底泥制陶粒对磷酸盐的吸附量可达1 743.75 mg/kg,远高于商品陶粒。底泥用于制造建筑材料,避免了焚烧炉的大量使用,环境友好,原料获取成本低且储量大,但建材利用的效率不高,限制了淤泥的消纳量。

3.2.2 填方材料

底泥固化填方是一种绿色、环保的技术措施,既节约了远距离的运输成本又释放了底泥的堆放空间。为确保底泥作为填方材料在使用过程中的稳定性和耐久性,固化改性后的物质毒性需满足《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)规定的限值,力学性能可参考《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行检测,基本理化

指标则需满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中规定的填料要求。底泥用于填方材料制备对固化要求较高,需满足路堤填料的规范要求,同时还要考虑成本限制,普适性的固化剂配方仍是未来的攻克方向。邵玉芳等^[17]研究了太湖淤泥固化后用于路基填筑的可行性,结果发现固化剂质量分数为6%时,能够满足路堤填料的规范要求,且经济和社会效益显著。此外,为确保水环境的安全,有学者认为固化后重金属的浸出浓度应低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)相关限值,具体水质目标应根据所处水环境功能区来确定^[18]。由于缺乏普适性的固化剂配方,底泥制作填方材料时固化效果受到限制。

3.3 生态修复

生态修复是将底泥原位固化后用于生态护坡护岸、矿坑修复及湿地建设等领域。为满足护岸材料要求,可参考《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对底泥的理化指标进行检测,底泥固化后的性能指标测试可参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),重金属的浸出浓度应小于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)中相应指标限值。疏浚底泥用于生态修复时,固化技术是关键。孙即梁等^[19]采用ISER固化技术,按15%固化剂和1%发泡剂掺量配比制备的护岸材料符合相关标准,通过工程实践得出1 m护岸可消纳0.8 m³的疏浚底泥,具备大量消纳疏浚底泥的潜力。上海市地方标准《原位利用疏浚泥建设生态护岸技术标准》(DG/TJ 08—2331—2020)对底泥材料的生态护岸力学性能设计提出要求,可为底泥生态修复应用提供参考。随着市场需求的驱动及技术的不断进步,底泥在生态修复方面的应用已经在实际工程中有所体现,已有相关公司对底泥利用方法进行了研究,如上海市园林设计研究总院有限公司申请的专利技术——一种利用河道底泥资源化进行采煤塌陷区生态恢复的方法,提出使用河道底泥和辅料制备颗粒状产物,并将其回填至采煤塌陷区,可提高底泥利用率^[20]。底泥用于生态修复,能减少疏浚底泥处理成本,提高护岸材料的生态功能,但使用特殊固化剂会增加施工成本,同时可能存在二次污染问题。

3.4 其他利用

3.4.1 吸附剂

底泥与黏土的组成相似,具备优良的表面吸附和离子交换性能,经常被改性加工为吸附剂。韩霜等^[21]利用丙烯酸-富里酸共聚磷酸盐(聚AA-FA磷酸盐)对热解的疏浚底泥进行改性,改性后的底泥对重金属离子具有较强的吸附作用。改性方法是底泥作为吸附剂利用的关键,通常采用高温焙烧方法,焙烧温度、pH、吸附温度和吸附时间都会影响底泥的吸附效果。Chen等^[22]提出用疏浚的河流底泥制备沸石,在最佳条件下,制备的底泥基分子筛对Cd(II)的吸附能力可达200 mg/g。为更好地利用底泥资源,华南农业大学申请了专利——一种底泥基沸石分子筛及其制备方法和应用,该专利方法制备的底泥基沸石比表面积相对化学试剂合成的沸石表面积有所提高,具备更好的吸附性^[23]。底泥用于制备吸附剂,虽然对重金属离子有较强的吸附作用,但处理成本较高、吸附效果不稳定,这是亟待解决的问题。

3.4.2 制氢

底泥制氢主要包括生物制氢、高温气化制氢、超临界水气化制氢等技术,其中超临界水气化制氢技术与其他制氢技术相比,具有更好的环保优势和发展前景。超临界水气化制氢技术对反应条件要求较高,反应温度、停留时间、压力、催化剂用量等都是需要重点考虑的因素。由于底泥制氢对反应器和反应条件要求较高,技术尚不成熟,目前底泥制氢技术多处于试验阶段。昆明理工大学申请了专利——一种河湖底泥资源化利用方法,提出底泥经过脱水、预热、气化、分离、净化、气化固液物燃烧等过程,可制得肥料同时获得高热值可燃气,实现底泥的资源综合利用^[24]。底泥还可用于制氢,产品品质高,但对反应器和反应条件要求较高,目前技术尚不成熟。

3.4.3 微生物燃料电池

底泥制微生物燃料电池是一种基于微生物代谢产生电能的技术。微生物燃料电池可以在实现废水净化的同时回收能源,杨玥等^[25]以底泥为阳极底物构建了微生物燃料电池,在外接电阻为1 500 Ω时,稳定输出电压最高,底泥中有机质、全磷、铵态氮和硝态氮的含量均有降低。采用微生物燃料电池技术对黑臭河涌底泥进行修复,是近年来底泥利

用的新途径,能有效解决底泥黑臭的问题。福州大学申请的专利——一种受污染水体中黑臭底泥资源化处理的方法,利用黑臭底泥、河水、石墨板等构建沉积型微生物燃料电池,在解决底泥黑臭问题的同时提高了产电能力^[26]。底泥用于制备微生物燃料电池,环保价值高,能够实现废水净化和能源回收,但产生的电能较小,不足以用于生产实践。

4 结论与展望

作为控制河湖内源污染的重要手段,底泥环保疏浚在削减内源污染负荷的同时,也产生了大量疏浚底泥,带来了处置的困难和风险。我国学者高度关注底泥资源化利用,围绕底泥性质及其资源化利用途径开展了众多的理论研究和技术创新,关于这一主题的论文发表量和专利授权量都呈显著上升趋势。底泥处置逐步从简单的填埋发展到土地利用、建材利用等资源化利用方式,近年来又发展了能源回收、制备吸附材料等更加高值化的利用方式,底泥的资源属性越来越受到重视。底泥资源化利用应在确保安全的前提下,综合考虑底泥性质、社会经济发展水平等因素,选择适合的方式,实现环境、社会、经济效益的最大化。未来我国底泥资源化利用的相关工作还应从技术创新、标准完善、强化监管、政策支持等方面改进,推动该行业的持续健康发展。

① 加快技术创新。加大对底泥资源化利用核心技术的投入与创新。一方面,鼓励科研机构与高校开展跨学科合作,整合环境科学、材料科学、化学工程等领域的专业知识,开发更高效的底泥预处理技术,为后续资源化利用提供优质原料;另一方面,着力攻克底泥在转化为高附加值产品过程中的技术瓶颈,使其能够满足市场的高标准要求,避免潜在的环境和安全风险。在当前形势下,生态修复对底泥的消纳量大,能节约大量运输成本,释放底泥堆放空间,技术研究也相对成熟,专利成果丰富,有望实现专利成果转化,走向产业化发展。底泥制氢技术可以将废弃物进行高效转化,同时符合我国提出的培育能源领域生物质制氢新模式的发展方向。

② 完善相关标准。建立健全底泥资源化利用的技术标准体系。目前,我国虽已制定部分关于园林绿化用泥质、土地改良用泥质等污泥标准,但缺少针对底泥资源化利用的相关标准体系,因此应

建立底泥资源化利用全过程标准体系,从底泥的质量评估、资源化利用技术、资源化产品质量检测、环境风险跟踪评估标准等方面提出明确、规范的技术要求,避免底泥利用产生的二次污染,促进底泥资源化产品的市场认可度与公信力提升。

③ 加强环境监管。应建立全方位、全过程的底泥资源化利用监管机制,从底泥的采集、运输、处理到最终的资源化利用,均实施严格的环境监管措施,保障底泥资源化利用工作在环保合规的轨道上有序推进。在底泥采集环节,应确保遵循合理的采集深度与范围,避免过度扰动河湖底床生态系统;在运输过程中,要求采用密闭、防泄漏的运输设备,防止底泥沿途洒落造成二次污染;在处理和资源化利用环节,实时监测废气、废水、废渣的排放情况,督促企业采用环保型生产设备与污染治理设施,确保污染物达标排放。

④ 加大政策支持。政府应加大对疏浚底泥资源化利用的支持力度,出台相关政策,鼓励底泥资源化企业与上下游产业建立紧密的合作关系,形成完整的产业链条。政府可通过出台产业扶持政策,如税收优惠、财政补贴等,降低企业生产成本,提高企业参与底泥资源化利用的积极性。此外,应积极开展国际合作与交流,引进国外先进的底泥资源化利用技术与管理经验,推动我国底泥资源化利用产业走向国际化市场,拓宽产业发展空间。

参考文献:

- [1] 范成新,钟继承,张路,等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1254-1277.
- [2] 都正良,吴振元,刘正雄,等. 河湖疏浚底泥处理处置与资源化利用技术进展及展望[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(2): 248-259.
- [3] 周伟,桑斌,张耀,等. 淤泥固化土用于公路路基填土的研究[J]. 施工技术, 2020, 49(18): 99-101.
- [4] 倪亚玲,崔敬轩,何捷,等. 河湖淤泥性能及建材化利用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(6): 6-13.
- [5] 陈梓婷,商仲彬,欧阳荷,等. 底泥制备沸石及其对重金属废水的吸附特性[J]. 绿色科技, 2023, 25(8): 104-112.
- [6] 潘晶,王诗尧,孟雨欣,等. 水生植物-沉积物微生物燃料电池修复黑臭水[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(2): 173-179.

- [7] 陈永辉,孔纲强,王言然,等. 一种利用河湖底泥3D打印免烧砖的装置及制作方法:CN202110618961.9[P]. 2021-10-19.
- [8] 杨丹,范欣柯,刘燕,等. 河道疏浚底泥农业利用可行性分析[J]. 科技通报,2017,33(1):235-239.
- [9] 薄录吉,王德建,汪军,等. 苏南河道疏浚底泥农用对土壤及水稻生长的影响[J]. 土壤通报,2015,46(3):709-714.
- [10] 李菡庭,田美荣,霍晓君,等. 基于湖泊底泥的植物种植基对牧草生长的影响试验[J]. 生态与农村环境学报,2023,39(6):750-757.
- [11] 石稳民,黄文海,罗金学,等. 襄阳护城河清淤底泥资源化制备种植土工艺设计[J]. 中国给水排水,2020,36(6):91-96.
- [12] 金白云,管永祥,许盛英,等. 湖泊淤泥压缩营养土的生产方法:CN201410395764.5[P]. 2014-10-29.
- [13] 张琼,韩久春,顾永根,等. 基于巢湖疏浚底泥的免烧砖制备及其最佳工艺参数研究[J]. 新型建筑材料,2023,50(12):69-73.
- [14] 田久晖,程华强,赵旭远,等. 重金属污染疏浚底泥免烧生态砖资源化及污染控制研究[J]. 化工环保,2024,44(6):893-899.
- [15] 散剑娣,蔡德所,欧文昌,等. 底泥陶粒的制备及其性能研究[J]. 金属矿山,2022(11):229-237.
- [16] 高红杰,彭剑峰,宋永会,等. 清淤底泥制作陶粒的方法及其性能分析[J]. 环境工程技术学报,2011,1(4):328-333.
- [17] 邵玉芳,龚晓南,郑尔康,等. 疏浚淤泥的固化试验研究[J]. 农业工程学报,2007(9):191-194.
- [18] 武博然,柴晓利. 疏浚底泥固化改性与资源化利用技术[J]. 环境工程学报,2016,10(1):335-342.
- [19] 孙即梁,田旭,董家晏,等. 原位固化技术在河道底泥资源化建设生态护岸中的应用[J]. 净水技术,2022,41(增刊1):226-230,295.
- [20] 郑如霞,唐利,王灵恩,等. 一种利用河道底泥资源化进行采煤塌陷区生态恢复的方法:CN202010589323.4[P]. 2020-11-17.
- [21] 韩霜,王博,许伟锋,等. 改性松浦支渠疏浚底泥吸附重金属离子的研究[J]. 当代化工,2024,53(2):321-324.
- [22] Chen J, Huang R, Ouyang H, et al. Utilization of dredged river sediments to synthesize zeolite for Cd (II) removal from wastewater [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320:128861.
- [23] 黄荣,余光伟,陈剑,等. 一种底泥基沸石分子筛及其制备方法和应用:CN202211041667.7[P]. 2022-11-08.
- [24] 吴桢芬,罗会龙,王霜. 一种河湖底泥资源化利用方法:CN201510503244.6[P]. 2015-11-18.
- [25] 杨玥,王健,朱娟平,等. 城市黑臭河涌底泥-微生物燃料电池产电性能及对底泥的修复[J]. 生态环境学报,2015,24(3):463-468.
- [26] 范功端,林茹晶,辛怀佳,等. 一种受污染水体中黑臭底泥资源化处理的方法:CN201510223029.0[P]. 2015-08-12.

作者简介:董蕾(1995—),女,云南楚雄人,硕士,助理工程师,主要从事水生态修复研究工作。

E-mail:1227629894@qq.com

收稿日期:2024-12-17

修回日期:2025-01-10

(编辑:丁彩娟)

用生命之水,筑美丽中国