DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231210003 文章编号:1672-9331(2024)05-0013-19
引用格式:李静,郑浩通,刘正乾.河湖疏浚淤泥资源化技术研究进展与应用[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(5):13-31.
Citation: LI Jing, ZHENG Haotong, LIU Zhengqian. Current status of resource utilization technologies for dredged sludges in rivers and lakes and their applications[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(5): 13-31.

河湖疏浚淤泥资源化技术研究进展与应用

李静[1],郑浩通[2],刘正乾[2]
(1.中南建筑设计院股份有限公司,湖北 武汉 430071;2.华中科技大学 环境科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 河湖疏浚淤泥产量巨大、成分复杂。经济高效的疏浚淤泥资源化利用技术对促进疏浚污泥资源化利用具有重要意义。目前,经济有效的资源化利用方法依然缺乏。本文结合前人的研究与工程试验,将淤泥资源化技术分为4类,并系统梳理了4类技术的主要进展及其应用现状。固化处理类尚缺乏具有普适性的固化剂配方及固化剂信息数据库,固化效果受到限制,并且缺乏实际应用参考价值;建材利用类的效率不高,限制了淤泥消纳量,需要探索新的优化技术;土地利用类消纳量大,但对辅助介质材料的要求较高,并且无法保证对重金属等污染物的稳定控制;堆肥处理类降低了对辅助介质的要求,但同样存在二次污染的安全问题,以及对时间和空间的占用问题。本文还进一步归纳了现有技术,从两个角度对疏浚淤泥资源化技术的发展进行了思考。从工程化的角度看,固化处理的化学手段与建材利用的物理方法能够有机结合,同时引入工程技术,可能是未来工程化利用淤泥的主要发展方向;从自然化的角度看,应该统一土地利用与堆肥处理两种类的物质转化机理,为有效资源利用和污染物控制策略的提出奠定基础。总体而言,未来研究需要在优化现有技术的淤泥消纳量和拓展新的资源化路线两个方向进行努力,以更高效和更经济地解决疏浚淤泥的去向问题。

关键词: 水利工程;疏浚淤泥;资源化利用;固化处理;建材利用;土地利用;堆肥处理
中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A

Current status of resource utilization technologies for dredged sludges in rivers and lakes and their applications

LI Jing[1], ZHENG Haotong[2], LIU Zhengqian[2]
(1. Central-South Architectural Design Institute Co.,Ltd., Wuhan 430071, China;
2. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The production of dredged sludges in rivers and lakes is huge, and the composition is complex. The economical and efficient resource utilization technology for dredged sludges is of great significance in promoting its resource utilization, but there is still a lack of related technologies at present. Combined with previous research and engineering experiments, the sludge resource technologies are divided into four types, and the main progress and application status of different types to utilize dredged sludges are systematically sorted out. At present, The type of curing treatment is lack of a universal curing agent formula and curing agent information database,

收稿日期: 2023-12-10;**修回日期:** 2024-03-07;**接受日期:** 2024-03-07
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0105600)
通信作者: 刘正乾(1979—)(ORCID:0000-0001-6454-6182),男,教授,主要从事水和污水的深度处理及固体废物资源化利用方面的研究。E-mail:zhengqianliu@hust.edu.cn

curing effect is limited, and lack of practical application reference value. The utilization efficiency of building materials type is not high, which limits the amount of dredged sludges treated, and then new technologies need to be explored for optimization. Land use type has the advantage of treating a large amount of dredged sludge, but the current requirements for auxiliary media materials are high, and the stable control of pollutants, such as heavy metals, cannot be guaranteed. Although compost treatment type reduces the requirements for auxiliary media, it also has the problems of secondary pollution, as well as the occupation of time and space. Finally, the existing technologies are further summarized to reflect the development of dredged sludge resourcing technologies from two perspectives. From the perspective of engineering utilization, the chemical methods of curing treatment can be organically combined with the physical methods of building material utilization, and the introduction of engineering technology to treat sludges, and may be the main development direction of engineering utilization in the future. From the perspective of natural utilization, the material transformation mechanism of land use and compost treatment should be explored in a unified manner, so as to lay a foundation for effective resource utilization and pollutant control strategies. In general, future research needs to make efforts in two directions: optimizing the amount of dredged sludge treated by existing technologies and exploring new resource routes, so as to treat dredged sludges more efficiently and economically.

Key words: hydraulic engineering; dredged sludge; resource utilization; curing treatment; utilization of building material; land use; compost treatment

Foundation item: Project (2022YFE0105600) supported by National Key Research and Development Program of China

Corresponding author: LIU Zhengqian (1979—) (ORCID: 0000-0001-6454-6182), male, professor, research interest: advanced treatment of water and waste water and resource utilization of solid waste.

E-mail: zhengqianliu@hust.edu.cn

0 引言

河湖疏浚工程是港口、航道及水利设施等建设工程的重要组成部分,对保障水体的航运、行洪与调蓄功能具有重要作用。近年来提出的生态疏浚技术对水体生态系统,甚至水源的涵养能力具有促进与保护作用[1]。河湖疏浚工程产生的淤泥含水率高、量大。据估计,我国每年陆地清淤产生的淤泥量在10亿m^3以上[2],若将疏浚淤泥作为废弃物处理,不仅占用大量土地,而且其中的有机氮磷和重金属离子等有害物质对周围环境有二次污染的风险[2-3]。早期国内较多地采用海洋倾倒方式处理疏浚淤泥,虽然这种方式随着海洋保护法规的完善逐渐被取代[4],但当前对疏浚淤泥的处理仍然较多地依赖卫生填埋和吹填造陆等方法[5-6]。这些方法不仅难以满足大量淤泥的处理需求,还造成了资源的浪费。因此,探索开发经济高效的疏浚淤泥资源化利用技术对解决淤泥去向和缓解资源短缺问题均具有重要意义。

目前,众多学者从不同角度对疏浚淤泥的资源化利用技术展开了研究,其研究内容主要分为工程材料利用及自然环境利用两个方向。工程材料利用方向主要集中在固化处理改善疏浚淤泥的力学与结构性能研究上,并结合其他固废处治实现变废为宝的目标。李丽华等[7]通过击实试验与无侧限抗压试验,发现掺入稻壳灰的水泥对淤泥固化效果有显著提升,并结合扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)分析了其固化机理。LIU等[8]通过剪切、压缩和渗透试验探究了工业固体废弃物(矿渣、脱硫石膏和粉煤灰等)对疏浚淤泥固化的影响,发现矿渣对淤泥固结过程的贡献最大。WANG等[9]应用新兴的活性氧化镁水泥-生物碳化法进行疏浚淤泥固化,利用尿素分解菌

参与的水解反应，实现了对40.00%含水率的淤泥的有效固化，证明了该新技术用于淤泥资源化利用的可行性。上述研究均通过与其他材料混合搅拌或投加固化剂来降低淤泥含水率，达到提升力学性能的目的，同时开展了以淤泥作为工程材料的试验。同时，也有一些研究者着眼于将疏浚淤泥回归并应用于自然环境，主要研究方向集中于重金属等有害物质的稳定化，并充分利用淤泥的土地特征及其中丰富的氮磷资源。YUAN等[10]在长江三角洲的三处滩地利用疏浚淤泥进行了湿地生态恢复的试验，通过与未恢复湿地的对比，发现淤泥的引入有利于恢复沿岸动植物栖息地。刘明等[11]采用光谱学技术，分析了湖泊疏浚淤泥在好氧堆肥过程中的物质组成，探究了淤泥中有机物的转化规律，发现淤泥在堆肥过程快速腐殖，从而将溶解性有机物转化为肥料的有效成分。KIANI等[12]将土壤、淤泥与生物炭混合用于实际作物（黑麦草）的种植试验，发现其对植物生长具有促进作用，并提出了将淤泥覆盖在湖泊周围农用土壤上以提高植物产量和土壤养分状况的资源化利用方案。

现阶段对于疏浚淤泥资源化利用的研究涉及多种复杂的材料与技术，但很多资源化方法的普适性较差，实际应用中难以根据淤泥性质选择合适的方法。因此，有必要对目前较为成熟的疏浚淤泥资源化技术进行梳理与总结，为实际应用及进一步发展提供参考。本文分4类对现有资源化方法的研究进展和应用进行概述，并对不同类别的适用性与不足进行讨论与展望，以期为进一步开发新型经济高效的淤泥资源化利用方法提供一定的借鉴。

1　固化处理

淤泥具有含水率较高、孔隙率较高、有机质含量高、渗透性差和压缩性大等特点[13]，其力学性能较差，难以在工程中直接应用。将固化剂与淤泥发生化学反应并用于固化处理，能够有效降低淤泥的含水率，改善淤泥力学性能并稳定污染物及有害物质，使淤泥成为符合工程应用标准的新建筑材料[14]，在降低污染的同时实现了资源化利用。

1.1　固化剂的配方及其研究现状

从成分上看，目前较为成熟的固化剂一般分为4类，如图1所示：1）无机类[15-16]，通过水化反应固定淤泥中的自由水；2）有机类[17]，通过离子交换作用改变淤泥粒子电荷及其亲水性；3）生物酶类[9]，借助酶的催化作用黏合淤泥粒子，通常结合外力挤压增强效果；4）复合类，多种化学物质配合，可针对不同性质的淤泥选择不同的配方。此外，按照添加剂量来分类，淤泥可以分为添加量较大、以水泥和石灰等无机固化剂为代表的主固化剂，以及较小添加量、由各种有机、无机物及新型材料组成的添加剂[18]。

传统的无机物淤泥固化剂大多为硅酸盐水泥和石灰等，存在水稳定性较差、凝结周期长及容易受淤泥中天然有机质影响的问题[19]，对高有机质和高含水率淤泥的固化效果不佳。单独的有机和生物类固化剂，由于其水稳定性差和固化效率低，也同样存在产品寿命短及释放污染物的问题[17]。因此开展对由无机物和有机物多种物质组成的复合类固化剂的研究具有十分重要的意义。复合固化剂的发展过程大致分为三个阶段（图2）。

复合固化剂研究的第一阶段主要着眼于对传统无机物固化剂（水泥等）添加不同类型的改性剂以实现缩短固化周期、增强固化强度及金属离子稳定性等效果。国内外学者对众多固化剂的组合方式进行了理论研究与不同规模的试验，探索出一系列具有应用价值的固化剂配方（表1）[20-26]。从第一阶段的研究可以看出，复合固化剂存在不少优点，如不同的配方组合能够实现对固化过程或稳定过程的侧重改良，从而提高对不同淤泥的适用性[25]；其次，不同研究发现的复合类固化剂能够进一步复合，以达到不断优化的目的[20-22]。

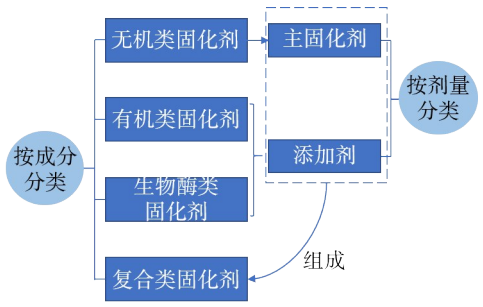

图1　固化剂分类示意图

Fig. 1　Curing agent classification

第二阶段,随着资源化与可持续发展理念的深入,近年来新兴的固化剂配方研究逐渐转向使用地质聚合物(用工业废弃物和天然矿物等硅铝质原料制备的高性能绿色胶凝材料)[27-28]和类似的环保复合材料来代替固化剂,以实现更高效、更经济和绿色的资源化利用。

卢立海等[29]发现,与传统生石灰和水泥固化剂相比,使用由76.00%质量分数的地质聚合物基材(粉煤灰、硅灰、建筑拆除垃圾粉及其他工业、建筑固体废弃物等)和24.00%质量分数的激发剂(少量碱类和盐类激发剂)组成的地聚物生态固化剂对原位滩涂淤泥进行原位固化,不仅节约固化成本,而且其固化强度高于生石灰和水泥。李胜等[30]基于响应面法为碱激发地聚物固化淤泥质土的配合比设计提供了参考,并探究了矿渣-粉煤灰基地聚物受碱性溶液激发后胶结固化淤泥的机理,证明了碱激发地聚物固化淤泥质土具有可行性与经济效益。张永杰等[31]探究了水泥取代率对地聚物-水泥固化土石混合体效果的影响,研究过程中揭示的地聚物-水泥固化剂固化机理对其在疏浚淤泥中的应用具有良好的参考作用。ZHOU等[32]探究了焚烧污泥灰与传统黏合剂(水泥和石灰等)的混合稳定/固化疏浚底泥的应用。其结果表明,焚烧污泥灰的多孔性和高吸水性不仅有利于提高高含水率淤泥的固化强度,还能在一定程度上提高重金属稳定性,实现变废为宝的目标。

第三阶段,学者也在探索新兴的固化技术的其他方面,如生物化学方法增强固化剂对河湖

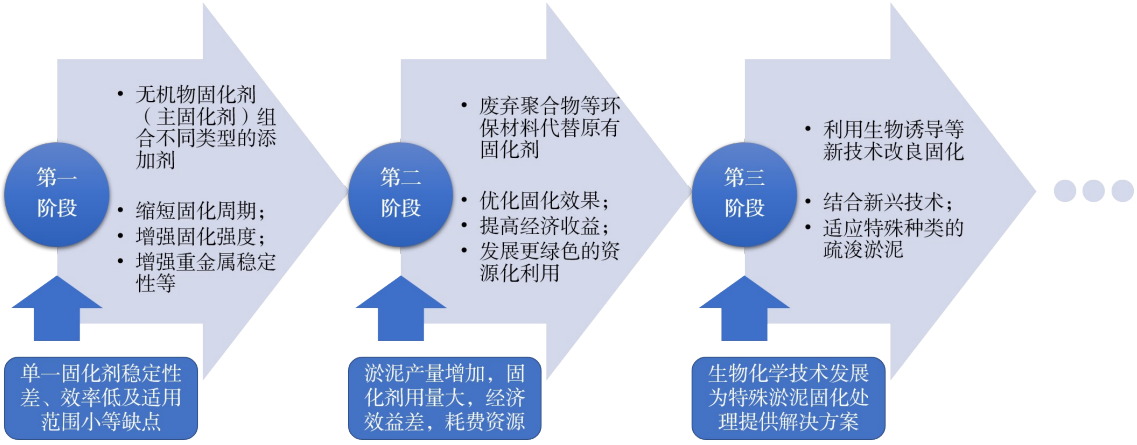

图2 固化剂研究的发展阶段图

Fig. 2 Development stage of curing agent research

表1 复合固化剂配方研究的案例

Table 1 Research on composite curing agent formulas

固化剂配方	主要结论	参考文献
水泥、粉煤灰、膨润土及新型有机物外加剂	减少了水泥配比,更经济高效;有机物外加剂提高减水效果及抗压强度	[24]
零价铁、羧甲基纤维素钠及硫酸盐铝水泥的组合	零价铁还原并配合重金属;羧甲基纤维素钠吸附配位;硫酸铝水泥包封与固化脱水作用,并且其水化产物钙矾石对Ni等重金属具有更好的稳定效果	[25]
膨润土复合传统水泥	膨润土能够提高固化产物强度,并通过中和水泥体系的强碱环境减轻重金属离子随有机物分解的析出,从而稳定金属离子	[20]
萘系减水剂、水玻璃、生石膏和NaOH等作为添加剂	该类化学添加剂能够抑制淤泥中有机质对固化过程的影响	[21]
水泥复合生石灰、高铁酸钾和高分子吸水树脂	高铁酸钾(氧化有机质)和吸水树脂(增加吸附能力)有效提升固化淤泥强度与稳定性	[22]
硅酸盐水泥、粉煤灰、聚丙烯酸钾和磺化油配比的正交试验	聚丙烯酸钾和磺化油的长链条作用有助于提高淤泥内部结构的密实性,在固化材料配比为5.00%:6.00%:0.20%:0.15%(相对淤泥的质量分数)时效果最佳	[23]
硅酸盐和硫铝酸盐两种水泥的稳定性对比探究	硅酸盐水泥更适用于处理重金属污染底泥	[26]

底泥的固化效果。FENG等[33]采用微生物诱导碳酸钙沉积法的固化改良技术研究了黄河泥沙中的皮沙砂岩，以微观试验等方式证明了生物矿化对形成能提高强度的胶结点的贡献，为生物矿化技术在皮沙砂岩区生态恢复中的应用提供了理论依据。

1.2　固化剂作用机理

淤泥难以脱水的因素主要在于其自身结构。淤泥中普遍存在大量微生物，导致其絮体内部存在多糖和蛋白质等微生物的胞外聚合物[34]，这些大分子物质的基团如—NH^+和—COO^-等具有很好的亲水性，能够将水分子吸附聚集在组成淤泥絮体的微生物细胞外，增大淤泥脱水时的阻力。此外，这些胞外聚合物的极性基团所带的电荷会形成类似胶体粒子的双电层结构，使淤泥结构更加稳定[34]。

要改善淤泥的脱水性能，就要针对以上因素破坏淤泥结构；而固化剂就是由具有这种作用的化学物质组成的药剂。固化剂促进淤泥脱水并提高固化土硬度的作用机理主要为以下几点：1）破坏蛋白质结构，减少亲水基团[21, 34-35]；2）固化剂中离子与淤泥中胞外聚合物进行离子交换，减小双电层厚度[21, 34, 36-38]；3）水解和水化反应后形成的网状结构网捕淤泥絮体[33]；4）固化剂颗粒的化学胶结或物理填充效应[33, 39-40]。

最普遍的固化机理是通过离子交换减小双电层厚度。崔勇涛等[34]利用硅藻土和木质素等环保材料固化剂，对云南某湖滨带底泥进行脱水、养护试验并分析固化过程，得出其固化机理为硅藻土脱出蛋白质、木质素网捕胶结淤泥颗粒及Ca^{2+}离子交换对双电层的削弱。由此可见，固化剂破坏蛋白质结构与离子交换等现象同时出现。梅警方等[36]采用水泥、生石灰、高铁酸钾和高分子吸水树脂按一定的比例复掺对淤泥进行处理，结合X射线衍射（X-ray diffraction，XRD）及SEM等分析手段，发现高价阳离子Fe^{3+}和Ca^{2+}等能与黏土颗粒中低价阳离子K^+和Na^+进行交换，减薄扩散层厚度；朱晓东等[37]通过对钙化聚酸-氧化钙-水泥的固化剂配方探究，得出氧化钙产生的Ca^{2+}能够使双电层变薄，进而促进了黏土颗粒的团聚。

微观结构的网捕胶结与物理填充作用主要由固化剂中易水化配合的金属离子提供，当配方中加入钙和镁等离子时，通常会出现该类作用机理。如FENG等[33]对疏松皮沙砂岩改良试验的SEM分析表明，碳酸钙能在颗粒间隙形成胶结点，以提高皮沙砂岩的强度；周恒宇等[39]通过对碱激发剂配比的研究表明，无定形凝胶产物通过黏结作用增强了土颗粒间凝聚力，并能有效填充土颗粒间隙，使土体结构更密实，是固化淤泥强度提升的主要原因；KONG等[40]采用活性氧化镁、脱硫石膏和钢渣对疏浚底泥进行固化，证实水化产物$Mg(OH)_2$和水合硅酸镁的填充和胶结是MgO固化沉积物强度增加的根本原因，而水化产物$Ca(OH)_2$和水合硅酸钙是固化沉积物强度增加的主要因素；王臻华[35]以福建宁德地区典型近海海相淤泥作为对象，水泥、生石灰、高铁酸钾和高分子吸水树脂作为复合固化剂，进行固化作用机理探究，发现淤泥中的有机大分子（蛋白质）被高铁酸钾氧化分解，转化为有机小分子和无机盐，且大量的孔隙水转化为树脂结合水或与水泥、生石灰发生水化反应，各类水化产物或凝胶共同起到填充孔隙和加强土颗粒联结的作用。

由于淤泥中通常存在重金属超标的风险，因此，固化剂除了要实现淤泥脱水产生稳定的结构，还需要具有对淤泥中的重金属进行固定化，避免固化后的淤泥在利用中发生重金属二次污染；实际上，固化法处理淤泥过程在大部分研究中的全称就是稳定/固化法（stabilisation/solidification，S/S）。固定重金属离子的主要作用机理如下：1）引入阴离子与重金属离子发生沉淀反应；2）形成的水化产物以化学键配位吸附[26, 36, 40]。KONG等[40]对重金属超标的疏浚淤泥进行固化处理，发现重金属离子主要通过OH^-和SO_4^{2-}的化学键合固定，并吸附部分水化产物；梅警方等[36]采用一定复掺比例的水泥、生石灰、高铁酸钾和高分子吸水树脂对淤泥进行处理，发现水泥、生石灰与淤泥作用生成水化物能吸附溶解态重金属离子，且高分子吸水树脂通过官能团与重金属离子配位，进一步抑制重金属离子的溶出；SUN等[26]以硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥为胶结固化剂，稳定上海复兴岛运河沉积物中的重金属，发现水合硅酸盐对铜的吸附力和化学键结合力远大于硫铝酸钙。

经过固化处理的淤泥,不仅其含水率降低,而且污染物也得到了固定。通常,固化淤泥多以固化土的形式存在,只能用作简单土方填料。固化淤泥若要应用在其他高附加值工程材料中,仍然需要进一步的加工处理。但是,当前固化处理药剂消耗量较大且处理规模难以提高,限制了固化处理的应用前景。为了提高疏浚淤泥在工程领域的应用效率和附加价值,许多研究提出了对淤泥进行脱水烧结等操作以直接制作建材,进一步为疏浚淤泥处治提供了新方向。

2 建材利用

随着基础建设快速发展,生产的各类建筑材料消耗了大量黏土资源,破坏耕地。从2007年开始,多地政府已出台文件禁止开采和生产黏土砖类的建筑材料[41-44]。淤泥虽然有含水率高的问题,但其化学物质的组成及存在形式与黏土有相似之处,元素比例也能够符合生产部分建材(陶粒等)的要求[45]。利用疏浚淤泥生产建材,一方面解决了一部分疏浚淤泥的处治去向,另一方面也为建筑墙材等提供了新的原料来源。因此,将疏浚淤泥用作生产建材也是其资源化利用的重要途径。

ZHOU等[46]以白洋淀受污染淤泥为研究对象,采用生命周期评价法对几种典型的疏浚淤泥处理技术进行了评估。其结果表明,将疏浚淤泥作为黏土原料制砖的资源化利用方法对环境的影响小于固化处理方法。BHAIRAPPANAVAR等[47]的研究也表明,与传统制砖相比,使用疏浚淤泥制砖的能量消耗指标与温室气体排放指标均较小。

水处理中的剩余污泥资源化利用相关研究发现[48],普通的热处理法(即热干化和污泥焚烧等)能够有效降低含水率,但无法将污泥或淤泥中有害物质如重金属等固定下来,往往会产生有害的飞灰与气体。即使使用低温工艺烧制的产品也可能存在重金属浸出的问题[41]。为解决淤泥热处理过程中的重金属固定问题,Solvay公司研发了Novosol工艺(又称磷酸烧结法)。Novosol工艺的主要原理是利用磷酸与淤泥混合后产生的磷酸钙盐(磷灰石)吸附或配合重金属,形成不溶性的磷酸盐;再通过热处理进一步稳定磷酸盐化合物,并分解淤泥中有机物[49]。由于重金属稳定效果优异,该方法在淤泥固化稳定及制作建材的研究中得到广泛使用。

周杉等[50]利用Novosol工艺处理河道淤泥。其毒性浸出试验结果表明,经Novosol工艺处理后,淤泥中Cd、Zn和Pb的浸出量远低于未经该工艺处理的样品的。

如前文所述,淤泥中的化学物质组成与制砖黏土相近。因此,许多研究使用Novosol工艺将河湖甚至海洋中的疏浚淤泥用于生产黏土砖,并从力学性能与重金属浸出的角度分析处理效果。SAMARA等[51]使用Novosol工艺处理受污染的河湖淤泥,以15.00%质量分数与原料混合并进行工厂规模的制砖试验,对产品进行的抗压、冻融、吸水性和浸出试验表明,其力学及物理性能均有提升,而重金属的浸出含量也符合要求。LAFHAJ等[52]将经Novosol工艺处理后的淤泥以25.00%~45.00%质量分数掺入原料进行制砖试验,力学试验表明产品抗压强度始终满足材料标准要求,但淤泥的掺入比例增加会使砖块内部孔隙比增大,间接影响其机械强度;在综合考虑力学、物理和化学试验结果的情况下,淤泥的最佳质量分数为35.00%。ZOUBEIR等[53]将Novosol工艺处理的海洋沉积物淤泥以30.00%质量分数与壤土混合为黏土制砖,对产品抗压强度与吸水率进行试验,结果显示这两类物理指标的试验结果与标准砖相当,具有工业可行性。从以上实例可以看出,目前对Novosol工艺资源化利用淤泥制砖的研究还停留在使用较低的原料替换率利用以保证产品性能,因此能够利用的淤泥量不多;而对于河湖及近海港口的巨大产量疏浚淤泥,这样的利用方式只能一定程度上缓解淤泥资源化利用问题,仍然需要探究改进与开发新方式。

对Novosol工艺的改进探究主要集中于两个步骤的处理方式优化,即磷酸处理和高温烧结。在磷酸处理的优化上,DIA等[54]使用两种不同组成的磷酸试剂(A6酸,由20.00%质量分数的磷酸与硫酸混合;A7酸,磷酸的质量分数为80.00%)分别对疏浚淤泥进行Novosol过程的磷酸处理,探究磷酸类型对产品物理化学和力学性质的影响。其

结果表明,减少纯磷酸的用量对成品的力学性质和化学组成影响较小。这也不失为降低处理成本的一个途径,值得进一步深入探究。而在高温烧结方式的优化方面,RAMAROSON等[55]研究了热烧结温度和保温时间两个主要因素对产物粒径及比表面积等物理性质的影响,发现高温处理后的产品的比表面积随保温时间延长而降低,间接影响淤泥制砖的材料密度;因此,通过温度和保温时间控制产品的物理特性也是一种可能的途径。

陶粒作为一种高附加值建材产品,其生产原料主要来源于黏土[56],因此上述淤泥烧结制砖方式同样适用于制造陶粒。陶粒能够应用在混凝土轻骨料、路基材料及海绵城市透水铺装等多种场景中[45],且用途广泛、需求量大。目前关于淤泥制陶粒的主要研究与淤泥制砖类似,集中在以对照或正交试验的方式探究一定成分特点的淤泥在制陶粒过程中受淤泥成分、添加剂及环境条件的影响,为淤泥制陶粒提供进一步的应用参考。徐长伟等[57]以河道淤泥为主料,以聚乙烯醇为成孔剂,生石灰、石膏为激发剂,采用免烧法制备陶粒,并采用正交试验得出了最佳的泥水比和添加剂比例;陈星佑等[58]构建多目标-理想点法优化模型,同样用正交试验得到了洞庭湖淤泥烧制陶粒等轻质骨料的最佳温度和时间;WANG等[59]引入沸石和膨润土作为添加剂,联合疏浚淤泥烧制陶粒,采用极值顶点设计法确定了三组分的最佳比例,并且淤泥陶粒的孔隙率、吸附性能与重金属稳定性均满足水处理系统的要求。因此淤泥制陶粒在水处理及海绵城市建设等场景的应用潜力也是其高附加值的重要原因之一,许多研究者在这个方向开展了研究工作。LU等[60]利用废弃稻壳与疏浚淤泥制备环境友好型陶粒材料,该材料对水体中铅离子等重金属具有良好吸附性能,并且达到了对淤泥的高比例利用(原料中淤泥质量分数约为90.00%);张兴宇等[61]也以河泥、海泥为原料制备探究了淤泥陶粒对含磷废水中磷的吸附效果;CAI等[62]利用滇池淤泥混合粉煤灰等添加剂经膨胀烧结制备高效吸水性能陶粒,制备得到富含表面亲水基团、吸水率达66.71%的陶粒,为其在海绵城市建设中的应用提供了技术基础。

此外,生产道路材料也是疏浚淤泥建材化利用的一个方向。TRIBOUT等[63-64]使用Novosol工艺处理过的疏浚淤泥代替标准砂进行路基材料的力学与化学试验,发现处理过的淤泥在力学性能方面可以提高抗拉强度;而渗透试验与毒性浸出试验的结果表明,处理后淤泥的重金属污染风险与原路基材料无异,安全性较好。MYMRIN等[65]使用巴西Paranaguá海港的疏浚淤泥、木灰和石灰的生产废料开发环保型复合材料,其材料的力学及结构性质表征证实淤泥在路基、混凝土和免烧砖等多种方面具有应用可能性。

3　土地利用

与建材化利用的出发点相似,疏浚淤泥的土地利用也是为了缓解土地资源紧缺与疏浚淤泥产量逐年增加之间的矛盾。将疏浚淤泥应用于湿地建设、生态修复及农业或园林等土地利用途径,不仅能增加良好的岸坡、湿地、农田土地资源,而且还能以更大的规模消纳和处治疏浚淤泥[66]。疏浚淤泥土地利用主要有湿地或岸坡的建设与修复,以及农业或园林业的土地利用[67-68]。

3.1　湿地或岸坡利用

世界各地的沿海都在一定程度上存在人口密集的问题,如中国国内约44.00%的人口居住于沿海区域[69-70];人口的急剧增加和经济的高速发展带来了沿海区域湿地类自然栖息地的丧失和物种的减少,因此沿海湿地的修复成为重要的生态保护策略[71]。而湿地中动植物栖息地的恢复与沿岸淤泥密切相关,利用江河航道疏浚淤泥修复沿海湿地生态环境,能够同时实现航运正常发展及沿海生态环境的保护,受到了广泛重视[10]。

YUAN等[10]在长江三角洲的三个观测点(崇明东滩、横沙东部浅滩和南汇东滩)以不同的策略进行湿地养护,并与未修复的观测点进行对比,发现:生态性利用附近的疏浚淤泥恢复和创造沿海湿地,比单纯在被破坏的湿地实施底泥截留更有效;上海横沙东滩圈围工程从2003年开始进行了8期疏浚淤泥吹填上滩工程,合理处治了长江口深航疏浚淤泥[72-73];长江九段沙湿地保护区曾进行过利用航道疏浚淤泥促进沿海滩涂生态演化的研究[74]。美国和加拿大等沿海区域的研究也说明了

引入疏浚淤泥修复湿地对沿海生态及经济方面的益处[75-77]。疏浚淤泥用于湿地恢复的案例如表2所示。

河岸作为陆地生态与水生生态的过渡带,对于河道水资源及生态环境的涵养保护具有重要的作用[78]。由于传统硬质的工程砌筑河岸易造成河流水环境恶化,业界在近几年提出了生态护岸的概念,将护岸作为一种兼顾动植物栖息与稳定河道结构的水利工程[79-80]。疏浚淤泥本身来源于河道,成分与河道原有的天然岸坡相近[78];淤泥经化学药剂固化处理后能够满足一定工程要求,因此疏浚淤泥适合用作生态护岸的建设材料。生态护岸在国外起步较早,如英国曾对蒙默思郡运河和兰戈伦运河采用疏浚淤泥、椰子纤维卷及木桩等天然材料建设生态护岸,不仅延缓了岸坡侵蚀,还在沿岸创造了良好的生态景观[81]。近年来,得益于技术发展,对于类似生态护岸技术也时有研究,如MOLDOVAN等[82]结合水力学与计算机建模方法对罗马尼亚内河流流段进行生态护岸对比分析,证明了绿色材料与原位淤泥建造的护岸工程有利于减缓河岸侵蚀,并保护生态系统。同时,国内也逐渐发展利用疏浚淤泥建设生态护岸,并在一些河道工程进行了试验[78-79],如ZHU等[78]采用疏浚淤泥与废弃生物质(废弃芦苇)经过水热法合成新型护岸材料,并将该材料于2019年应用于上海北横河的护岸,起到促进植物生长、保护岸边土壤的积极作用;田旭等[79]采用河道疏浚底泥制备生态护岸技术对河湖底泥进行改良,再用于制备生态护岸,有效改善了崇明区示范工程的岸坡生态景观。

此外,疏浚淤泥在矿山土地复垦中也有一定应用空间。矿山普遍由于过度的开采导致生态和地质条件被破坏,此前发展的修复方法多为人为的植被或土壤复垦[83]。因此,采用含土壤营养成分的疏浚淤泥进行矿山复垦同样是一种土地利用方式,如李佳[84]以河道和湖泊底泥为对象,添加多种骨架材料开展石灰岩矿山生态修复研究,确定了营养层材料配比等参数;美国纽约港的淤泥曾被用于宾夕法尼亚州矿坑的复垦,VOROS等[85]对该矿坑复垦项目中的污染物影响因素进行分析,并使用灰分废物改良了淤泥理化性质。

表2 疏浚淤泥用于湿地恢复的案例

Table 2 Cases of dredged sludges used for wetland restoration

地点	主要结论	参考文献
长江三角洲(中国)	利用疏浚淤泥恢复沿海湿地,较单方面底泥截留更有效,经济可行	[10]
上海横沙东滩(中国)	结合横沙吹填工程实例,说明疏浚淤泥吹填造陆对两方工程具有综合促进作用	[72-73]
长江九段沙保护区(中国)	利用长江口疏浚淤泥吹泥上滩,不仅加速滩涂工程,还促进生物多样化	[74]
Coastal Louisiana (USA)	疏浚淤泥修复沿海流失土地的效果显著	[75]
Mississippi River Delta (USA)	在上游进行绕过防洪大坝的工程改道,保留泥沙浓度对保护下游三角洲湿地具有重要意义	[76]
Prince Edward Island (Canada)	以疏浚淤泥为原料的小型湿地恢复工程有利于无尾类物种生存,保护了生物多样性	[77]

3.2 农业和园林利用

农业活动中常出现过量施肥现象。肥料中的营养元素(主要是氮、磷)随水循环从农田转移至水体,最终富集在水体沉积物,即疏浚淤泥中[12]。因此,将疏浚淤泥回收后用于农业土地利用,不仅有利于保持良好的土壤条件,同时也维持了农业活动的养分循环,为减少不可再生资源(磷肥等)的使用作出了贡献[12, 86]。有研究发现,农田施用疏浚淤泥后改善了孔隙度、团聚度及含水量等物理性质[87],同时也有利于农作物生长。目前国内外已开展了许多将疏浚淤泥回收利用并施用于不同农作物的研究[12, 86, 88-91],其结论多为淤泥与泥炭等介质混合作为种植基质能够基本满足农作物种植要求(表3)。

尽管疏浚淤泥利用在农业,尤其在促进植物生长方面表现出较好可行性,但农田土壤对重金属稳定性具有很高要求,控制不当很可能造成重金属污染,给人体和动物的安全带来危害,因此,疏浚淤泥在农业土地的利用必须要开发出重金属稳定性能更好的技术[88, 90]。此外,很多国家和地区都规定了农业土壤中的重金属浓度限值[67],这也在很大程度遏制了疏浚淤泥的农用。有学者提出,园林投放比农田投放具有更大的可行性,既降低了污染物进入食物链的风险,又解决了园林土

壤的贫瘠问题[92]。熊红霞等[93]分析了太湖疏浚淤泥的有机质、氮磷钾及重金属等成分特征,提出了淤泥用于园林绿化的可行性;杨丹等[94]采用盆栽试验分析了绿萝和吊竹梅等四种园林植物对河道疏浚淤泥的耐受性,证明了疏浚淤泥用于园林绿化不但能够支持植物的生长,还可以对受污染淤泥起到一定修复作用。

氮、磷等营养元素是农业肥料的主要成分。因此,对疏浚淤泥的利用还可以着眼于淤泥堆肥方向,同时拓展了淤泥中营养元素回归自然环境的途径。农业和园林利用的实质是将河湖淤泥中有机污染物蕴含的氮、磷资源回收利用到农田或园林等自然土壤环境中,实现可持续发展。

表3　疏浚淤泥农业利用研究案例

Table 3　Research on agricultural utilization of dredged sludges

种植对象	底泥利用方式	主要结论	参考文献
黑麦草	淤泥与生物碳混合施用	添加淤泥改善植物生长条件,同时能控制营养流失	[12]
玉米苗	淤泥与土壤按比例混合	淤泥添加比例会增加重金属污染风险,最佳比例为1:1	[86]
石榴树	淤泥单独和/或与泥炭混合进行对比	污染物的转移在标准限值内,有利用的可行性	[88]
莴苣	使用纯泥炭或淤泥与泥炭混合作为基质种植	混合淤泥与泥炭后物理性质与化学成分都满足种植要求	[89]
小白菜	疏浚淤泥与红壤、水稻土混合种植小白菜	施用疏浚淤泥后发芽率提高,但施用过快可能引起重金属污染	[90]

4　堆肥处理

疏浚淤泥的堆肥处理是在高温或中温高湿的条件下,利用淤泥中有机污染物作为底物,由微生物对淤泥中有机污染物进行发酵与分解,并转化为农业有机肥料中的可用物质。较为公认的原理是淤泥中的有机物质与堆肥介质(膨胀剂)在混合后并发酵形成多孔结构,提供空间促进微生物分解有机物质,最终产物中的氮、磷等营养物质以渗滤液的形式输出到堆肥系统[95],此时得到对植物生长具有良好促进作用的肥料。

淤泥的堆肥处理具有十分明显的优势。首先,由于堆肥过程需要水分以供微生物生长繁殖并产生渗滤液,因此淤泥在堆肥处理前含有较多的水分,即该资源化利用技术对淤泥的含水率要求不高,可以大大缩减预处理时间,降低处理成本,如在HAN等[96]对巢湖疏浚淤泥的堆肥试验中,原淤泥含水率为85.46%,经简单脱水后与稻秆(含水率为12.25%)等辅料混合,得到的堆肥系统含水率为53.70%~60.50%,此时堆肥效果较好;MATTEI等[97]进行了疏浚淤泥与植物残渣联合堆肥试验,其混合后的堆肥系统含水率最高为61.70%;和苗苗等[98]的堆肥试验表明可以通过添加保水剂来提升堆肥的育苗效果,这也证明一定的含水率在堆肥过程具有积极影响。其次,堆肥处理对淤泥中营养元素的转化量高[95],能够在渗滤液中积累高含量的氮、磷元素(硝态氮最高增幅605.00%左右)[99],同时氮元素流失率较低(流失率最低可降至21.00%左右)[96],避免了资源化利用过程中氮磷资源的过度流失。

堆肥处理虽然过程简单,但由于堆肥耗时多在数十天以上[96, 99],并且堆肥场地与淤泥处理量相关,因此规模处理疏浚淤泥需要大量时间、空间与劳动力,运行成本不容小觑;同时相关调研表明,不同地区及不同水体的疏浚淤泥的重金属污染程度、有机污染物种类及含水率等均存在显著差异[100]。这将导致堆肥处理工艺参数的变化,进而会增加前期的调试成本。更重要的是,普通的堆肥处理难以稳定重金属,因而利用或存储过程容易出现重金属二次污染。MAMINDY-PAJANY等[101]对疏浚淤泥堆肥的生态毒理学试验表明,堆肥后淤泥中的重金属铜和锌需要进一步稳定化处理,才能避免污染。

综上所述,国内外堆肥处理研究主要集中在为疏浚淤泥寻找合适的联合堆肥介质(表4),如生物炭(厨房垃圾或农业废物的热解产物)和绿色废弃物(城市绿化修剪产生的植物残渣等)等[96-97, 99, 102-104],以优化疏浚淤泥堆肥处理的效果;同时也集中在探究重金属等有害物质在堆肥过程中的截留机理[11, 101, 105],以期对堆肥配料比例的选择起参考作用。其中,关于堆肥过程中重金属稳

定性的研究,仍然处于特定淤泥成分及堆肥介质的机理探究,普适性较差,无法为淤泥堆肥的广泛利用提供有效支撑,因此目前淤泥堆肥的推广存在一定问题。关于特殊种类添加剂的研究也有一些报道[106-107],这也为控制堆肥效果与稳定性提供了新思路(表4)。

不论是将疏浚淤泥堆肥发酵还是直接作为种植土利用,其目的均是回收利用淤泥中有利于植物生长的氮、磷资源,并且均面临淤泥中有害物质的二次污染风险,因此这两种资源化利用疏浚淤泥技术都必须严格、合理管控,使淤泥在风险较低的场景得到理想规模的消纳和利用。

表4 疏浚淤泥堆肥处理研究案例

Table 4 Research on compost treatment of dredged sludges 可以向后移动位置

堆肥介质/添加剂	主要结论	参考文献
蓝藻、水生植物残骸与稻秆等	采用生物淋滤、脱水和堆肥的方法依次处理湖泊淤泥,成熟后的肥料能够安全用于白菜种植土壤	[96]
绿色废弃物(林业或农业的植物残骸、绿化植物修剪产生的残渣等)	与原始淤泥相比,绿色废弃物共堆肥增加了细菌多样性,无明显的生态毒理学影响,有利于植物生长	[97]
麸皮、青草等生物质材料作为调理剂	经过中试试验,生物质材料能够有效促进堆体发酵,产物具有良好的固氮作用与堆肥品质	[99]
生物炭作为堆肥介质	生物炭复合堆肥对原料中含有的重金属、有机物及堆肥过程产生的新污染物均有良好的稳定吸附作用	[102]
城市绿色废弃物(城市绿化修剪产生的植物残渣等)	与不同比例绿色废弃物混合的淤泥在堆肥后均能降解有机污染物,并改善淤泥性质,促进植物生长	[103]
粉碎的秸秆	采用强化搅拌+快速堆肥工艺,在100 t/d规模的实际项目中成功制备了符合规范要求的绿化种植土	[104]
陶粒和活性氧化铝球作为膨胀剂	两种膨胀剂均能保证堆肥的成熟,并稳定部分重金属;同时膨胀剂可以回收以提高经济效益	[106]
自然肥堆中分离提取的微生物菌剂	投加菌剂提高了肥堆升温速度和高温段持续时间,有助于促进堆料腐熟,提高肥料保氮效果	[107]

5 讨论

疏浚淤泥含水率高,产量巨大,同时具有复杂的成分,兼具回收价值与污染风险。有效的资源化利用方法,一方面要具备足够的淤泥消纳量,另一方面要合理地利用资源成分并稳定有害物质。固化处理添加剂种类繁杂,能够以灵活的固化剂配方从不同角度优化处理效果,产出更优质的材料,但这也影响了固化剂配方对不同成分淤泥时的适用性,进一步限制相关推广利用。建材利用通过物理高温处理,辅以化学药剂得到符合要求的建筑材料。该研究应用范围广,消纳淤泥量大,前景较好,但还处在比例较小的淤泥与传统建材原料掺混的阶段,技术不够成熟。土地利用也具有消纳淤泥量大的显著优势,并且其工艺相对更为简单,容易实施;但其主要的缺点是可能存在安全问题、土地利用场景要求特殊,以及轻则破坏环境、重则威胁人体健康的二次污染,故其在湿地岸坡的利用必须严格监测,对农业土地利用的安全性则更有待考量。堆肥处理实际上是利用旧方法处理新问题,堆肥发酵过程的确能够对淤泥中营养元素达到较好的利用效果,但其对空间与时间的要求也会限制其对淤泥的消纳能力;此外,将堆肥产物应用于农业存在安全风险,这意味着需要额外的预处理或后处理以满足农业生产对重金属离子稳定性的要求。

从产物的利用方式看,疏浚淤泥的固化处理与建材利用均属于通过改良力学与结构性质以实现淤泥在工程方面的应用,其目的均是废物利用和减少自然资源开发,只是借助了不同的物理和化学过程;事实上,对固化添加剂的研究大多数仍然以水泥和石灰等材料为基础进行化学改性,这与建材利用中淤泥掺杂传统建材原料烧结制建材并无本质区别,且烧结制建材本身就需要一定化学添加剂的辅助。因此,从现有研究方向的角度

看,固化处理还需更多实践以开发出更具普适性的固化剂配方,或者建立具有一定水平和规模的数据库,才能为实际应用提供有价值的参考;建材利用仍需提高淤泥在制备建材中的利用效率,并加强拓宽应用场景,如将制备的材料在进一步改性后用作水处理生物填料、吸附剂及某些体系的催化剂,以显著提高所得产品的附加值。而从淤泥工程化利用的角度看,同时借鉴固化处理与建材利用方法的优势,将物理过程与化学过程结合是未来主要的发展方向;近几年,有学者将絮凝[108]、真空预压[109-111]及纤维增强剂[112-113]等物理方法引入疏浚淤泥的固化过程,其研究结果表现出对高含水率淤泥的回收处理优势,有效促进疏浚淤泥更普遍地进入工程材料视野,降低利用难度,增加淤泥消纳量。

另外,两种将淤泥回归自然环境的资源化利用技术,其实质均是通过转化和利用淤泥中丰富有机物蕴含的营养物质,并用于各类土壤环境,减缓对原始优质土地资源的消耗。从增加资源化效率的角度看,目前不论是将淤泥直接引入种植土还是经堆肥腐殖后作为肥料,均需要以一定比例的原始土壤、泥炭或生物质等作为辅助介质才能达到预期效果,并且介质和淤泥掺杂比例在1∶1以上[86, 114],这就表明淤泥的利用需要消耗更多的其他资源,同时也体现了就地原位利用和充分利用废弃生物质堆肥的优势。由于土地或堆肥利用对二次污染安全性要求较高,未来的发展方向应该更注重淤泥堆肥等过程的物质转化机理研究[115],应该在充分了解有机物资源及重金属等污染物转化过程的基础上,进一步开发淤泥土地或堆肥利用的高效方案,或者提出对重金属等污染物的控制策略[116-117],才能真正提供疏浚淤泥回用至自然环境的有效路径。

6　结论

本文主要结论如下:

1)在现有的4类淤泥资源化技术中,固化处理还需要继续探究开发更具普适性的固化剂配方,并尝试建立固化剂数据库,为实际应用提供参考;建材利用需要提高淤泥在制备建材中的利用效率,并考虑产品在水处理等其他领域的应用拓展;土地利用对安全性要求较高,目前暂无成熟的污染物稳定策略,这限制了淤泥土地利用的规模与可靠度,故需要重点解决重金属等污染物的二次污染问题;堆肥处理技术与土地利用技术存在相似的污染物安全问题,同时堆肥对空间、时间的需求也是一大限制因素,需要探究进一步的解决方案。

2)从淤泥工程化利用的角度看,固化处理与建材利用技术具有相通性,两者差异主要在于对物理或化学处理手段的侧重不同。因此,业界宜结合新开拓的研究方向进行分析,可将两种技术中的物理和化学手段有机结合,或引入一些工程中成熟的材料处理方式,以促进疏浚淤泥进入工程材料视野,降低利用难度并增加淤泥消纳量。

3)从疏浚淤泥回归自然环境的角度看,不论是将淤泥直接引入种植土还是经堆肥腐殖后作为肥料,其最终目的都是转化和利用淤泥中的有机营养物质资源,并控制有毒、有害污染物不释放。为了优化淤泥中资源的转化与污染物控制,未来的研究应该更加关注堆肥等过程的物质转化规律和机理,为提出有效的资源利用和污染物控制策略打好基础,以进一步拓宽淤泥回归到自然环境中的路线。

4)从河湖疏浚淤泥处治的总体角度看,资源化技术在原理上都可以实现对淤泥的无害化、减量化和资源化,只是被各种因素限制了消纳量。所以,未来的研究需要从提高技术本身消纳淤泥的能力和探索更多消纳路线两方面进行努力,对已有资源化技术进行优化,同时突破传统思路,开发更多新型资源化技术,才能够更经济、更高效地解决淤泥问题。

综上所述,目前开发的较为成熟的淤泥资源化利用方法都具有各自的优势,但也不可避免地存在限制其广泛利用的缺点。要实现高效资源化利用疏浚淤泥,还需要更多研究以优化上述技术工艺,提高各项资源化方法的适用性、稳定性和经济性。

[参考文献]

[1]　熊庭,郭昊,范世东,等.生态疏浚技术的应用现状及发展趋势[C]//2022世界交通运输大会(WTC2022)

论文集(轨道交通与水上运输篇).北京:人民交通出版社,2022.
XIONG Ting, GUO Hao, FAN Shidong, et al. The application status and development trends of ecological dredging technology [C]//Proceedings of the 2022 World Transport Congress. Beijing: People's Transportation Press, 2022.

[2] 朱伟,闵凡路,吕一彦,等."泥科学与应用技术"的提出及研究进展[J].岩土力学,2013,34(11):3041-3054. DOI:10.16285/j.rsm.2013.11.031.
ZHU Wei, MIN Fanlu, LUY Yiyan, et al. Subject of "mud science and application technology" and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041-3054. DOI: 10.16285/j.rsm.2013. 11.031.

[3] 贾飞跃,朱晓明,魏华,等.环保疏浚底泥资源化利用技术研究和应用进展[C]//中国环境科学学会科学技术年会论文集.南京:中国环境科学学会,2020:1868-1874.
JIA Feiyue, ZHU Xiaoming, WEI Hua, et al. Research and application progress on environmental protection dredging sediment resource utilization technology [C]//Proceedings of the Science and Technology Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences. Nangjing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2020: 1868-1874.

[4] 陈东兴,张亚锋,陈亮鸿,等.国内外海洋倾废管理的比较与探讨[J].环境保护,2021,49(19):35-39. DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.19.009.
CHEN Dongxing, ZHANG Yafeng, CHEN Lianghong, et al. A comparative exploration into the domestic and international management of the ocean dumping [J]. Environmental Protection, 2021, 49 (19): 35-39. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.19.009.

[5] 徐元.洋山港疏浚土资源化利用探讨[J].水运工程,2007(8):33-38. DOI:10.16233/j. cnki. issn1002-4972.2007.08.015.
XU Yuan. Benificial utilization of dredging material at Yangshan Port[J]. Port & Waterway Engineering, 2007 (8): 33-38. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2007. 08.015.

[6] 梁松波.河湖淤泥疏浚及淤泥处理处置技术研究[J].有色冶金设计与研究,2018,39(6):101-104,108. DOI:10.3969/j.issn.1004-4345.2018.06.032.
LIANG Songbo. Study on technology of river and lake dredging and sludge treatment [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2018, 39 (6): 101-104, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4345.2018.06.032.

[7] 李丽华,杨星,裴尧尧,等.稻壳灰水泥固化淤泥土试验研究[J].地下空间与工程学报.2022,18(5):1547-1555. http://dxkjxb. cqu. edu. cn/CN/Y2022/V18/I5/1547.
LI Lihua, YANG Xing, PEI Yaoyao, et al. Experimental study of sludge solidification with adding rice husk ash and cement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2022, 18 (5): 1547-1555. http://dxkjxb. cqu. edu. cn/CN/Y2022/V18/I5/1547.

[8] LIU Y, LU H J, LIU M Y, et al. Microanalytical characterizations, mechanical strength and water resistance performance of solidified dredged sludge with industrial solid waste and architecture residue soil [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01492. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01492.

[9] WANG R, TANG C S, PAN X H, et al. Stabilization of dredged sludge using bio-carbonation of reactive magnesia cement method[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(3): 1529-1541. DOI: 10.1007/s11440-022-01683-6.

[10] YUAN L, LIU D Y, TIAN B, et al. A solution for restoration of critical wetlands and waterbird habitats in coastal deltaic systems [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302: 113996. DOI: 10.1016/j. jenvman.2021.113996.

[11] 刘明,李霖昱,胡爱彬,等.湖泊底泥好氧堆肥过程中溶解性有机物的转化规律[J].安全与环境工程,2022,29(5):155-163. DOI:10.13578/j. cnki. issn. 1671-1556.20210987.
LIU Ming, LI Linyu, HU Aibin, et al. Conversion of dissolved organic matter in aerobic composting of lake sediment [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29 (5): 155-163. DOI: 10.13578/j. cnki. issn. 1671-1556.20210987.

[12] KIANI M, RAAVE H, SIMOJOKI A, et al. Recycling lake sediment to agriculture: effects on plant growth, nutrient availability, and leaching [J]. Science of the Total Environment, 2021, 753: 141984. DOI: 10. 1016/j.scitotenv.2020.141984.

[13] 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,2013,40(1):110-114. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665. 2013. 01.025.
XU Yang, YAN Changhong, XU Baotian, et al. A study on the properties and modification test of the dredged material of an urban river[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40 (1): 110-114. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2013.01.025.

[14] PENG C, TIAN Z K, LONG H, et al. Experiment on the effect of freezing-thawing cyclic on mechanical properties of solidified sludge [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39 (6): 4195-4204. DOI: 10.1007/s10706-021-01748-5.

[15] LIU F Y, ZHU C G, YANG K J, et al. Effects of fly ash and slag content on the solidification of river-

dredged sludge [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(1): 65-73. DOI: 10.1080/1064119x.2019.1677827.

[16] LANG L, SONG C Y, XUE L, et al. Effectiveness of waste steel slag powder on the strength development and associated micro-mechanisms of cement-stabilized dredged sludge [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117975. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117975.

[17] SONG Z Z, GAO H Y, LIU W W, et al. Systematic assessment of dredged sludge dewaterability improvement with different organic polymers based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 103: 311-321. DOI: 10.1016/j.jes.2020.11.017.

[18] 陈萌, 杨国录, 徐峰, 等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 128-138. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0134.
CHEN Meng, YANG Guolu, XU Feng, et al. Research progress on solidification treatment of dredged silt[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 128-138. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0134.

[19] WANG S Q, HE X X, GONG S M, et al. Influence mechanism of fulvic acid on the strength of cement-solidified dredged sludge[J]. Water, 2022, 14(17): 2616. DOI: 10.3390/w14172616.

[20] 朱伟, 林城, 李磊, 等. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1020-1025. DOI: 10.13227/j.hjkx.2007.05.017.
ZHU Wei, LIN Cheng, LI Lei, et al. Solidification/stabilization(S/S) of sludge using calcium-bentonite as additive[J]. Environmental Science, 2007, 28(5): 1020-1025. DOI: 10.13227/j.hjkx.2007.05.017.

[21] 郭印, 徐日庆, 邵允铖. 淤泥质土的固化机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1071-1075. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.06.033.
GUO Yin, XU Riqing, SHAO Yuncheng. Study on mechanism of muddy soil stabilization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1071-1075. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.06.033.

[22] 王臻华, 项伟, 吴雪婷, 等. 复合固化剂固化淤泥的耐久性和稳定性研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(4): 74-78, 86. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2019.04.012.
WANG Zhenhua, XIANG Wei, WU Xueting, et al. Durability and stability of sludge solidified by composite stabilizer [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(4): 74-78, 86. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2019.04.012.

[23] 刘金, 王毅, 董良飞. 河道淤泥固化剂研发与机理探究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(6): 59-65, 92. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.009.
LIU Jin, WANG Yi, DONG Liangfei. Research and development of river sludge curing agent and its mechanism [J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2018, 30(6): 59-65, 92. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.009.

[24] YAN M, ZENG G M, LI X M, et al. Incentive effect of bentonite and concrete admixtures on stabilization/solidification for heavy metal-polluted sediments of Xiangjiang River [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(1): 892-901. DOI: 10.1007/s11356-016-7527-y.

[25] XU Q Q, ZHAO F B, WU B R, et al. Assessment of heavy metal pollution in suburban river sediment of Nantong (China) and preliminary exploration of solidification/stabilization scheme[J]. Water, 2022, 14(14): 2247. DOI: 10.3390/w14142247.

[26] SUN Y, ZHANG D F, TAO H, et al. The effects of Portland and sulphoaluminate cements solidification/stabilization on semi-dynamic leaching of heavy metal from contaminated sediment[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5681. DOI: 10.3390/su14095681.

[27] 马艳霞, 聂思凡, 郭佳庆. 硫酸盐渍土地区粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.
MA Yanxia, NIE Sifan, GUO Jiaqing. Experimental research on mechanical properties of fly ash concrete in sulfate saline soil area [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 64-72. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.008.

[28] 张雄飞, 乐新波, 王淑玲, 等. 高岭土基地质聚合物聚合动力学初探[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(2): 102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.02.017.
ZHANG Xiongfei, YUE Xinbo, WANG Shuling, et al. Reaction kinetics of kaolinite-based geopolymer with different active SiO_2/Al_2O_3 ratios [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(2): 102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.02.017.

[29] 卢立海, 章寒英, 邵吉成. 激发性地聚物生态固化剂的应用及材料成本分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(3): 182-192. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.03.017.
LU Lihai, ZHANG Hanying, SHAO Jicheng. Application and material cost analysis of activated geopolymer ecological solidified agent [J]. Water

Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(3): 182-192. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.03.017.

[30] 李胜, 张红日, 王桂尧, 等. 基于响应面法的碱激发地聚物固化淤泥质土试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4438-4448. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.20231106.003.
LI Sheng, ZHANG Hongri, WANG Guiyao, et al. Experimental study of alkali-activated geopolymer cured silty soil based on response surface method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(12): 4438-4448. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.20231106.003.

[31] 张永杰, 谭长江, 邓沛宇, 等. 地聚物-水泥固化土石混合体试验与固化机理研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 49-58. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230330001.
ZHANG Yongjie, TAN Changjiang, DENG Peiyu, et al. Study on test and curing mechanism of geopolymer-cement solidified soil-rock mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(5): 49-58. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230330001.

[32] ZHOU Y F, CAI G H, CHEESEMAN C, et al. Sewage sludge ash-incorporated stabilisation/solidification for recycling and remediation of marine sediments [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113877. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113877.

[33] FENG Z J, LI X L, SHAO X H, et al. Preferred injection method and curing mechanism analysis for the curing of loose Pisha sandstone based on microbially induced calcite precipitation [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(5): 12005-12019. DOI: 10.1007/s11356-022-22742-1.

[34] 崔勇涛,赵东华,钱晓明,等.基于河湖疏浚底泥资源化利用的脱水固化剂及机理研究[C]//中国环境科学学会2022年科学技术年会:环境工程技术创新与应用分会场论文集(三).南昌:中国环境科学学会, 2022. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.027797.
CUI Yongtao, ZHAO Donghua, QIAN Xiaoming, et al. Study on dehydration-curing agent and mechanism based on resource utilization of river and lake dredged sludge [C]//Proceedings of the 2022 Science and Technology Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences: Environmental Engineering Technology Innovation and Application Branch (Ⅲ). Nanchang: Chinese Society for Environmental Sciences, 2022. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.027797.

[35] 王臻华. 复合固化剂固化淤泥路用性能及机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019. DOI: 10.27492/d.cnki.gzdzu.2019.000023.
WANG Zhenhua. Study on Road performance and reinforcement mechanism of solidified sludge by composite stabilizer[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019. DOI: 10.27492/d. cnki. gzdzu.2019.000023.

[36] 梅警方, 曾庆强, 王臻华, 等. 水泥复合固化剂加固淤泥的工程性质及机理研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(6): 215-224. DOI: 10.13578/j. cnki. issn.1671-1556.20201161.
MEI Jingfang, ZENG Qingqiang, WANG Zhenhua, et al. Engineering properties and mechanism of cement composite curing agent for sludge reinforcement [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 215-224. DOI: 10.13578/j. cnki. issn. 1671-1556.20201161.

[37] 朱晓东, 薛丹璇, 顾琳琳, 等. 复合固化剂固化淤泥力学特性及微观机制[J]. 城市道桥与防洪, 2022(6): 196-200, 24. DOI: 10.16799/j. cnki. csdqyfh.2022.06.052.
ZHU Xiaodong, XUE Danxuan, GU Linlin, et al. Mechanical properties and microscopic mechanism of composite curing agent solidifying silt[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(6): 196-200, 24. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.06.052.

[38] 吴王正. 淤泥质土的固化改良及其作用机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2019.001064.
WU Wangzheng. Study on the solidification improvement of silty soil and its action mechanism[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc. 2019. 001064.

[39] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2089-2098. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0018.
ZHOU Hengyu, WANG Xiushan, HU Xingxing, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2089-2098. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0018.

[40] KONG X H, ZHANG Z B, LIANG Y P, et al. Experimental study on solidified dredged sediment with MgO and industrial waste residue[J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130105. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130105.

[41] 李明东, 丛新, 张志峰. 资源化利用废泥生产建材的现状与展望[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 116-121. DOI: 10.13205/j.hjgc.201604024.
LI Mingdong, CONG Xin, ZHANG Zhifeng. Reutilization of waste mud for producing building materials: a review and outlook [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(4): 116-121. DOI: 10.13205/j.hjgc.201604024.

[42] 陕西省人大常委会公告.陕西省新型墙体材料发展应用条例[EB/OL].(2011-11-25)[2023-10-19]. https://js.shaanxi.gov.cn/zixun/2011/11/48138.shtml.
Announcement of the Standing Committee of the Shaanxi Provincial People's Congress. Regulations on the development and application of new wall materials in Shaanxi Province[EB/OL].(2011-11-25)[2023-10-19]. https://js. shaanxi. gov. cn/zixun/2011/11/48138. shtml.

[43] 江苏省人大常委会公告.江苏省发展新型墙体材料条例[EB/OL].(2008-11-08)[2023-10-19]. http://www. jsrd. gov. cn/qwfb/sjfg/202110/t20211008_532346. shtml.
Announcement of the Standing Committee of the Jiangsu Provincial People's Congress. regulations on the development of new wall materials in Jiangsu Province [EB/OL]. (2008-11-08) [2023-10-19]. http://www. jsrd. gov. cn/qwfb/sjfg/202110/t20211008_532346.shtml.

[44] 安徽省人大常委会公告.安徽省发展新型墙体材料条例[EB/OL].(2007-08-24)[2023-10-19]. https://www.ah.gov.cn/szf/zfgb/8110891.html.
Announcement of the Standing Committee of the Anhui Provincial People's Congress. Regulations on the Development of New Wall Materials in Anhui Province [EB/OL]. (2007-08-24) [2023-10-19]. https://www.ah.gov.cn/szf/zfgb/8110891.html.

[45] 陈宇峰,朱爱东,刘红梅,等.利用长江及内河淤泥生产陶粒的试验研究[J].四川建筑科学研究,2013,39(3):210-213,233. DOI:10.3969/j.issn.1008-1933.2013.03.052.
CHEN Yufeng, ZHU Aidong, LIU Hongmei, et al. Experimental study on producing ceramsite by using sludge from the Yangtze River and inland rivers[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(3): 210-213, 233. DOI: 10.3969/j.issn. 1008-1933.2013.03.052.

[46] ZHOU H, ZHANG W J, LI L Q, et al. Environmental impact and optimization of lake dredged-sludge treatment and disposal technologies based on life cycle assessment (LCA) analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147703. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147703.

[47] BHAIRAPPANAVAR S, LIU R, SHAKOOR A. Eco-friendly dredged material-cement bricks [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121524.

[48] 杨小文,杜英豪.污泥处理与资源化利用方案选择[J].中国给水排水,2002,18(4):31-33. DOI:10.3321/j.issn:1000-4602.2002.04.009.
YANG Xiaowen, DU Yinghao. Options for sewage sludge treatment and reclamation for reuse[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(4): 31-33. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4602.2002.04.009.

[49] 施晓霖,陶桂兰.污泥资源化处理新工艺Novosol技术及其应用[J].电网与清洁能源,2015,31(4):132-136. DOI:10.3969/j.issn.1674-3814.2015.04.023.
SHI Xiaolin, TAO Guilan. Novosol, a new valorization technique for dredged sediment and its application[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 132-136. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2015.04.023.

[50] 周杉,曾宪琴,张盼月,等.Novosol法固定底泥中重金属研究[J].环境科学学报,2010,30(1):111-116. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2010.01.014.
ZHOU Shan, ZENG Xianqin, ZHANG Panyue, et al. Heavy metal immobilization in dredged sediments by the Novosol process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(1): 111-116. DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2010.01.014.

[51] SAMARA M, LAFHAJ Z, CHAPISEAU C. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: factory scale experiment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(2/3): 701-710. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.153.

[52] LAFHAJ Z, SAMARA M, AGOSTINI F, et al. Polluted river sediments from the north region of france: treatment with Novosol process and valorization in clay bricks[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5): 755-762. DOI: 10. 1016/j.conbuildmat. 2007.01.023.

[53] ZOUBEIR L, ADELINE S, LAURENT C S, et al. The use of the Novosol process for the treatment of polluted marine sediment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(3): 606-612. DOI: 10.1016/j. jhazmat. 2007.03.029.

[54] DIA M, RAMAROSON J, NZIHOU A, et al. Effect of chemical and thermal treatment on the geotechnical properties of dredged sediment [J]. Procedia Engineering, 2014, 83: 159-169. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.034.

[55] RAMAROSON J, DIA M, DIRION J L, et al. Thermal treatment of dredged sediment in a rotary kiln: investigation of structural changes [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(21): 7146-7152. DOI: 10.1021/ie203023k.

[56] 张政.底泥建材化利用研究进展[J].建筑节能,2022,50(7):142-146. DOI:10.3969/j. issn. 2096-9422.2022.07.023.
ZHANG Zheng. Research progress of building materials utilization of sediment[J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2022, 50(7): 142-146. DOI: 10.3969/j.issn.2096-9422.2022.07.023.

[57] 徐长伟,蒋昕桐.组成对淤泥免烧陶粒性能的影响

研究[J]. 混凝土, 2023(9): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2023.09.018.
XU Changwei, JIANG Xintong. Effect of composition on properties of non-fired ceramsite from sludge [J]. Concrete, 2023(9): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2023.09.018.

[58] 陈星佑, 张聪, 何怀光, 等. 基于多目标-理想点法的洞庭湖淤泥制备轻质骨料最优烧结条件[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 29-36. DOI: 10.11988/ckyyb.20210852.
CHEN Xingyou, ZHANG Cong, HE Huaiguang, et al. Multi-objective optimization of sintering condition of lightweight aggregate prepared from Dongting Lake silt by ideal point method [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 29-36. DOI: 10.11988/ckyyb.20210852.

[59] WANG L K, SHAO Y L, ZHAO Z L, et al. Optimized utilization studies of dredging sediment for making water treatment ceramsite based on an extreme vertex design [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 38: 101603. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101603.

[60] LU M, WANG R, XUE Y J, et al. Eco-friendly ceramsite from dredged sediment/biomass for Pb(Ⅱ) removal: process optimization and adsorption mechanistic insights [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(6): 108939. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108939.

[61] 张兴宇, 李俊奇, 张伟, 等. 河泥/海泥陶粒的制备及其对磷的吸附特性研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(6): 710-717, 723. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2022.06.003.
ZHANG Xingyu, LI Junqi, ZHANG Wei, et al. Study on preparation of river mud/sea mud ceramsites and their adsorption properties for phosphorus [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(6): 710-717, 723. DOI: 10.15985/j. cnki. 1001-3865.2022.06.003.

[62] CAI Y Y, GAO H J, QU G F, et al. Research on the efficient water-absorbing ceramsite generated by dredged sediments in Dian Lake: China and coal fly ash [J]. Water Environment Research, 2021, 93(11): 2769-2779. DOI: 10.1002/wer.1634.

[63] TRIBOUT C, HUSSON B, NZIHOU A. Use of treated dredged sediments as road base materials: environmental assessment [J]. Waste and Biomass Valorization, 2011, 2(3): 337-346. DOI: 10.1007/s12649-011-9068-4.

[64] TRIBOUT C, HUSSON B. Use of treated sediments in road building techniques [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2011, 15(2): 197-213. DOI: 10.3166/ejece.15.197-213.

[65] MYMRIN V, SCREMIM C B, STELLA J C, et al. Environmentally clean materials from contaminated marine dredged sludge, wood ashes and lime production wastes [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 307: 127074. DOI: 10.1016/j. jclepro. 2021.127074.

[66] 曾海波. 生态综合整治中内河底泥的再生技术路径[J]. 建材世界, 2022, 43(6): 104-108. DOI: 10.3963/j.issn.1674-6066.2022.06.027.
ZENG Haibo. Recycling methods of inland river sediment in comprehensive ecological improvement [J]. The World of Building Materials, 2022, 43(6): 104-108. DOI: 10.3963/j.issn.1674-6066.2022.06.027.

[67] XU Q Q, WU B R. Recent progress on ex situ remediation technology and resource utilization for heavy metal contaminated sediment [J]. Toxics, 2023, 11(3): 207. DOI: 10.3390/toxics11030207.

[68] RAKSHITH S, SINGH D N. Utilization of dredged sediments: contemporary issues [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2017, 143(3): 04016025. DOI: 10.1061/(ASCE)WW. 1943-5460.0000376.

[69] WANG W, LIU H, LI Y Q, et al. Development and management of land reclamation in China [J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 102: 415-425. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.03.009.

[70] SMALL C, NICHOLLS R J. A global analysis of human settlement in coastal zones [J]. Journal of Coastal Research, 2003, 19(3): 584-599. DOI: 10.2307/4299200.

[71] TIAN B, ZHOU Y X, ZHANG L Q, et al. Analyzing the habitat suitability for migratory birds at the Chongming Dongtan Nature Reserve in Shanghai, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 80(2): 296-302. DOI: 10.1016/j.ecss.2008.08.014.

[72] 季岚, 唐臣, 张建锋, 等. 长江口疏浚土在横沙东滩吹填工程中的应用[J]. 水运工程, 2011(7): 163-167. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2011. 07.027.
JI Lan, TANG Chen, ZHANG Jianfeng, et al. Application of Yangtze estuary dredged material to Hengsha east shoal reclamation projects [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(7): 163-167. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2011.07.027.

[73] 王恒宾, 唐臣, 楼飞, 等. 2020年后长江口深水航道疏浚土处置方案研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(10): 22-26. DOI: 10.7640/zggwjs201710005.
WANG Hengbin, TANG Chen, LOU Fei, et al. Disposal scheme of dredged material in the Yangtze estuary deepwater navigation channel after 2020 [J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(10): 22-26. DOI: 10.7640/zggwjs201710005.

[74] 虞志英,楼飞.长江口九段沙疏浚土吹泥上滩研究[C]//中国水利学会2006学术年会论文集(滩涂利用与生态保护).北京:中国水利水电出版社,2006:449-451.
YU Zhiying, LOU Fei. Study on dredging soil and blowing mud to beach in the nine sections of the Yangtze River estuary [C]//Proceedings of the 2006 Annual Conference of the Chinese Hydraulic Society (Beach Utilization and Ecological Protection). Beijing: China Water & Power Press, 2006: 449-451.

[75] SUEDEL B C, MCQUEEN A D, WILKENS J L, et al. Beneficial use of dredged sediment as a sustainable practice for restoring coastal marsh habitat [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2022, 18(5): 1162-1173. DOI: 10.1002/ieam.4501.

[76] KEMP G P, DAY J W, ROGERS J D, et al. Enhancing mud supply from the Lower Missouri River to the Mississippi River Delta USA: dam bypassing and coastal restoration [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 183: 304-313. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.07.008.

[77] STEVENS C E, DIAMOND A W, GABOR T S. Anuran call surveys on small wetlands in Prince Edward Island, Canada restored by dredging of sediments [J]. Wetlands, 2002, 22(1): 90-99. DOI: 10.1672/0277-5212(2002)022[0090:ACSOSW]2.0.CO;2.

[78] ZHU W H, LI J, ZHANG Y F, et al. Hydrothermal synthesis of a novel ecological revetment material by sediment mixed with biochar [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: 129380. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129380.

[79] 田旭,何贵堂,王铁,等.利用疏浚底泥制备生态护岸材料在河道原位生态治理中的应用[J].净水技术,2020,39(7):176-181. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2020.07.029.
TIAN Xu, HE Guitang, WANG Tie, et al. Application of ecological revetment materials by preparation of dredged sediments in in-situ river ecological remediation [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 176-181. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2020.07.029.

[80] WANG P C, DING J Q, HE Y, et al. Ecological revetments for enhanced interception of nonpoint source pollutants: a review [J]. Environmental Reviews, 2020, 28(3): 262-268. DOI: 10.1139/er-2019-0065.

[81] 史云霞,陈一梅.国内外内河航道护岸型式及发展趋势[J].水道港口,2007,28(4):261-264. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2007.04.007.
SHI Yunxia, CHEN Yimei. Revetment type of inland waterway and its development trends at home and abroad [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(4): 261-264. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2007.04.007.

[82] MOLDOVAN A C, HRĂNICIUC T A, MICLE V, et al. Research on the sustainable development of the bistrita ardeleana river in order to stop the erosion of the riverbanks and the thalweg [J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7431. DOI: 10.3390/su15097431.

[83] 张春燕.北京市典型废弃矿山生态修复模式研究[D].北京:北京林业大学,2019. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2019.001052.
ZHANG Chunyan. Study on ecological remediation modes of typical abandoned mines in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2019.001052.

[84] 李佳.底泥基石灰岩矿山生态修复基料研究[D].绵阳:西南科技大学,2022. DOI: 10.27415/d.cnki.gxngc.2022.001035.
LI Jia. Research on ecological restoration base material of sediment-based limestone mine [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.27415/d.cnki.gxngc.2022.001035.

[85] VOROS A S, LINNAN J P. The use of dredged materials in abandoned mine reclamation [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Remediation of Contaminated Sediments. Venice, Italy: Battelle Geneva Research Center, 2002: 37-44.

[86] 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. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2017.01.050.
YANG Dan, FAN Xinke, LIU Yan, et al. Availability analysis of dredged sediments utilization in agriculture [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(1): 235-239. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2017.01.050.

[87] 朱广伟,陈英旭,王凤平,等.城市河道疏浚底泥农田应用的初步研究[J].农业环境保护,2001,20(2):101-103. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2001.02.012.
ZHU Guangwei, CHEN Yingxu, WANG Fengping, et al. Application of sediment dredged in grand canal on agriculture (Hangzhou section) [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2001, 20(2): 101-103. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2001.02.012.

[88] MARTÍNEZ-NICOLÁS J J, LEGUA P, HERNÁNDEZ F, et al. Effect of phytoremediated port sediment as an agricultural medium for pomegranate cultivation: mobility of contaminants in the plant [J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9661. DOI: 10.3390/su13179661.

[89] TOZZI F, PECCHIOLI S, RENELLA G, et al. Remediated marine sediment as growing medium for

lettuce production: assessment of agronomic performance and food safety in a pilot experiment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 5624-5630. DOI: 10.1002/jsfa.9815.

[90] CHEN Y X, ZHU G W, TIAN G M, et al. Phytotoxicity of dredged sediment from urban canal as land application[J]. Environmental Pollution, 2002, 117(2): 233-241. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00270-6.

[91] 朱广伟, 陈英旭, 王凤平, 等. 景观水体疏浚底泥的农业利用研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 335-339.
ZHU Guangwei, CHEN Yingxu, WANG Fengping, et al. Agricultural application of sludge dredged from landscape water bodies[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 335-339.

[92] 马伟芳, 赵新华, 王洪云, 等. 排污河道的疏浚底泥在园林中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 74-77. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4602.2006.23.019.
MA Weifang, ZHAO Xinhua, WANG Hongyun, et al. Study on horticultural application of dredged sewage river sediment[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 74-77. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4602.2006.23.019.

[93] 熊红霞, 黄伟, 刘长兵, 等. 太湖疏浚底泥养分特征及园林应用研究[J]. 水道港口, 2015, 36(6): 583-586. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2015.06.022.
XIONG Hongxia, HUANG Wei, LIU Changbing, et al. Nutrient characteristics and horticultural application of the sediment in Taihu Lake[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(6): 583-586. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2015.06.022.

[94] 杨丹, 刘燕, 刘勇. 4种园林植物修复河道疏浚底泥中重金属污染的试验研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 224-227. DOI: 10.15889/j. issn. 1002-1302.2018.04.057.
YANG Dan, LIU Yan, LIU Yong. Experimental study on remediation of heavy metal pollution in river dredging sediment by four garden plants[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(4): 224-227. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.04.057.

[95] MAHAPATRA S, ALI M H, SAMAL K. Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin[J]. Energy Nexus, 2022, 6: 100062. DOI: 10.1016/j.nexus.2022.100062.

[96] HAN S Q, LI J L, ZHOU Q, et al. Harmless disposal and resource utilization of wastes from the lake in china: dewatering, composting and safety evaluation of fertilizer[J]. Algal Research, 2019, 43: 101623. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101623.

[97] MATTEI P, PASTORELLI R, RAMI G, et al. Evaluation of dredged sediment co-composted with green waste as plant growing media assessed by eco-toxicological tests, plant growth and microbial community structure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 333: 144-153. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.03.026.

[98] 和苗苗, 卢珏, 田汝响. 保水剂对底泥堆肥用作育苗基质的保水性和黄瓜幼苗生长的影响[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2020, 19(6): 76-84. DOI: 10.12191/j.issn.1674-232X.2020.06.011.
HE Miaomiao, LU Jue, TIAN Ruxiang. Effects of water retaining agent on the water retention capacity of sediment compost and the growth of cucumber seedlings[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2020, 19(6): 76-84. DOI: 10.12191/j.issn.1674-232X.2020.06.011.

[99] 宋楚轩, 唐文英, 罗双雪, 等. 黑臭水体疏浚底泥耦合生物质材料协同好氧堆肥中试[J]. 环境工程, 2024, 42(3): 138-146. DOI: 10.13205/j. hjgc.202403017.
SONG Chuxuan, TANG Wenying, LUO Shuangxue, et al. Pilot study on the synergistic aerobic composting of black-odor water dredging sediment coupled with biomass materials[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(3): 138-146. DOI: 10.13205/j. hjgc.202403017.

[100] GUO Y Q, GONG H, SHI W J, et al. Insights into multisource sludge distributed in the Yangtze River basin, China: characteristics, correlation, treatment and disposal[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 126: 321-332. DOI: 10.1016/j.jes.2022.04.038.

[101] MAMINDY-PAJANY Y, LIBRALATO G, ROMÉO M, et al. Ecotoxicological evaluation of Mediterranean dredged sediment ports based on elutriates with oyster embryotoxicity tests after composting process[J]. Water Research, 2010, 44(6): 1986-1994. DOI: 10.1016/j.watres.2009.11.056.

[102] TRAN H T, BOLAN N S, LIN C, et al. Succession of biochar addition for soil amendment and contaminants remediation during co-composting: a state of art review[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 342: 118191. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118191.

[103] MATTEI P, CINCINELLI A, MARTELLINI T, et al. Reclamation of river dredged sediments polluted by PAHs by co-composting with green waste[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566: 567-574. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.140.

[104] 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. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-

4602.2020.06.018.
SHI Wenmin, HUANG Wenhai, LUO Jinxue, et al. Process design for producing planting soil from dredged sediment of Xiangyang moat [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 91-96. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.06.018.

[105]ZHANG S Y, WEN J, HU Y, et al. Humic substances from green waste compost: an effective washing agent for heavy metal (Cd, Ni) removal from contaminated sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 366: 210-218. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.103.

[106]WANG X K, ZHENG G D, CHEN T B, et al. Application of ceramsite and activated alumina balls as recyclable bulking agents for sludge composting [J]. Chemosphere, 2019, 218: 42-51. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.103.

[107]代浩, 李连龙, 包强, 等. 投加菌剂对清淤底泥好氧堆肥效果的强化作用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13): 70-76. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602.2021.13.012.
DAI Hao, LI Lianlong, BAO Qiang, et al. Aerobic composting performance of dredged sediment enhanced by microbial agent addition [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(13): 70-76. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.012.

[108]LIU F Y, WU W Q, FU H T, et al. Application of flocculation combined with vacuum preloading to reduce river-dredged sludge[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(2): 164-173. DOI: 10.1080/1064119x.2018.1564092.

[109]BIAN X Y, YANG H D, DUAN K, et al. Study on effect of equivalent initial water content on dredged sludge treated by VP-FSCM [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101077. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101077.

[110]FENG S X, LEI H Y, LIU A Y, et al. Application and design method of dredging sludge ground treated via prefabricated radiant drain vacuum preloading [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41(5): 509-523. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2065650.

[111]ZHANG R J, ZHENG Y L, DONG C Q, et al. Strength behavior of dredged mud slurry treated jointly by cement, flocculant and vacuum preloading [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(6): 2581-2596. DOI: 10.1007/s11440-021-01346-y.

[112]WANG H S, TANG C S, GU K, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced, chemically stabilized dredged sludge [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(2): 629-643. DOI: 10.1007/s10064-019-01580-5.

[113]TANG C S, CHENG Q, WANG P, et al. Hydro-mechanical behavior of fiber reinforced dredged sludge [J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105779. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105779.

[114]PERUZZI E, MACCI C, DONI S, et al. Co-composting as a management strategy for posidonia oceanica residues and dredged sediments [J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(9): 4907-4919. DOI: 10.1007/s12649-019-00822-7.

[115]CAI S Y, LIU M, ZHANG Y, et al. Molecular transformation of dissolved organic matter and formation pathway of humic substances in dredged sludge under aerobic composting [J]. Bioresource Technology, 2022, 364: 128141. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128141.

[116]DO CARMO L I, BURSZTYN FUENTES A L, DE LOS RÍOS A, et al. Effects of green waste compost addition to dredged sediments of the matanza-riachuelo river (Argentina) on heavy metal extractability and bioaccumulation in lettuce (Lactuca sativa) [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021, 232(5): 200. DOI: 10.1007/s11270-021-05161-9.

[117]禤炜安, 熊剑平, 张仰鹏, 等. 改性乳化沥青混合料胶浆特性及强度分析[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4): 32-38. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2023060223081988.
XUAN Weian, XIONG Jianping, ZHANG Yangpeng, et al. Analysis of mortar characteristics and strength of modified emulsified asphalt mixture [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(4): 32-38. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2023060223081988.

(责任编辑:彭三军;校对:赵冰)