

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李颀, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响

任俊¹, 殷鹏², 王威振³, 唐婉莹^{1*}, 尹洪斌^{4*}, 朱丽娟⁵

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 南京 210094; 2. 江苏省水资源服务中心, 南京 210029; 3. 南京理工大学环境与生物工程学院, 南京 210094; 4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 5. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘要: 为研究不同类型脱水药剂对疏浚底泥脱水固化等综合作用的效果,以太湖疏浚底泥为对象,选择了微生物类、聚合铁铝盐类、有机聚合物类、有机无机复合类和铝盐微生物复合类这5种类型的复合脱水药剂,以土工管袋固化的方式对疏浚底泥进行为期3个月的固化实验.结果表明,有机聚合物类和有机无机复合类药剂脱水效率较好,1个月后底泥含水率分别降至61.78%和63.26%,3个月后分别降至40.56%和32.16%.与未固化底泥相比,经过有机无机复合类药剂固化后底泥总氮削减74.82%,达591 mg·kg⁻¹,主要以铵态氮的减少为主,固化底泥中的磷以铝结合态磷、钙结合态磷和铁结合态磷为主,其中有机无机复合类药剂对活性磷的削减量最大,活性磷含量降至64.3 mg·kg⁻¹.此外,研究发现有机聚合物类药剂对重金属的固化效果最好,重金属综合生态风险指数降低了51.3%,浸出毒性浓度均远低于标准阈值.有机聚合物类和有机无机复合类药剂对底泥的脱水固化综合效果较好,具有较好的应用前景.

关键词: 疏浚底泥; 脱水固化药剂; 理化性质; 氮磷形态; 重金属

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3672-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109133

Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment

REN Jun¹, YIN Peng², WANG Wei-zhen³, TANG Wan-ying^{1*}, YIN Hong-bin^{4*}, ZHU Li-juan⁵

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Jiangsu Water Resources Service Center, Nanjing 210029, China; 3. School of Environmental and Biological Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. SGIDI Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In order to study the comprehensive effects of different types of dehydrating agents on the dewatering and solidification of dredged sediments, this study took the dredged sediments of Taihu Lake as the research object and selected microorganisms, polymeric iron aluminum salts, organic polymers, organic-inorganic composites, and aluminum salt microorganisms. These five types of composite dehydrating agents were used to conduct a three-month solidification test on the dredged sediment by means of geotechnical pipe bag solidification. The results of the study showed that the dehydration efficiency of organic polymers and organic-inorganic composite chemicals was better. After one month, the water content of sediment dropped to 61.78% and 63.26%, respectively, which then dropped to 40.56% and 32.16% after three months. Compared with that of the unsolidified sludge, the total nitrogen of the bottom sludge after solidification by the organic-inorganic composite agent was reduced by 74.82%, reaching 591 mg·kg⁻¹, primarily due to the reduction in ammonia nitrogen. The solid sludge contained mainly aluminum-bound phosphorus, calcium-bound phosphorus, and iron-bound phosphorus. Among them, four groups (organic-inorganic composite) had the largest reduction in active phosphorus, with the lowest being 64.3 mg·kg⁻¹. In addition, organic polymer agents had the best curing effect on heavy metals, the comprehensive ecological risk index of heavy metals was reduced by 51.3%, and the leaching toxicity concentration was far below the standard threshold. This study showed that organic polymers and organic-inorganic composite medicaments have a better effect on the dehydration and solidification of bottom sludge and thus have good application prospects.

Key words: dredged sediments; dehydration curing agent; physical and chemical properties; nitrogen and phosphorus forms; heavy metals

近些年,随着经济的快速发展和城市的扩张,我国湖库和河流等水体污染严重,大量污染物蓄积于底泥中,成为水体内部重要的污染源^[1,2].目前,底泥疏浚已普遍用于河湖底泥内源污染的治理,对于河湖水生态环境的改善具有重要作用^[3,4].由疏浚所产生的大量污染底泥具有含水率高、强度低和污染物成分复杂等特性.未经处理的底泥长期堆放不仅会占用大量土地,而且更容易对周围环境造成二次污染甚至危害到人体健康^[5,6].此外,疏挖出来的底泥由于含水率过高、呈流质状态,无法实现外运和资源化再利用.因此,对疏浚底泥进行脱水固化显得十分重要.

脱水和固化是疏浚底泥的关键前处理措施^[7,8],底泥的深度脱水技术是指使用合适的调质处理方法使底泥的含水率降至60%以下,进而使底泥体积缩小50%以上.降低含水率可以大幅减小底泥堆积体积、节省占用土地,更重要的是为污泥的后续处理和处置提供了充分条件.底泥固化可以防止疏浚底泥造成的二次污染,有利于周围环境的保

收稿日期: 2021-09-15; 修订日期: 2021-11-19

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019006); 国家自然科学基金项目(41977363)

作者简介: 任俊(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为底泥脱水固化复合功能材料的研发与应用, E-mail: 15306579350@163.com

* 通信作者, E-mail: wytang@njut.edu.cn; hbyin@niglas.ac.cn

护和资源再利用^[9]。目前底泥脱水固化的方法主要有板框压滤机械脱水法^[10,11]、土工管袋法^[12]、生物脱水法^[13]和化学调节脱水法^[14]等。而土工管袋法较其他方法具有生态和环境友好等特点。土工管袋法是指将疏浚底泥输送到聚丙烯纱线编织而成的管状土工袋中,底泥经过自重脱水实现固结。固结后的底泥可作为湿地基质、农耕土等被再次利用。传统的土工管袋法仅仅依靠自然脱水,脱水过程较慢。通过向土工管袋中添加生态友好型脱水药剂,可以提高管袋中底泥的脱水效率,加速场地周转^[15]。但由于底泥有机污染物含量的不断增加以及不同水体底泥性质的差异,选择高效适用的脱水固化药剂显得尤为重要^[16,17]。

目前在污泥深度脱水技术上主要使用絮凝剂和助凝剂,其调理底泥脱水的机制主要是:由絮凝剂提供的正离子与淤泥表面负电荷的电中作用、压缩双电层作用促进体系脱稳,和高分子絮凝剂网捕卷扫的共同沉淀作用,加速污泥颗粒聚集沉降,从而达到泥水分离^[18,19]。絮凝剂主要分为:无机絮凝剂、有机絮凝剂、有机无机复合絮凝剂和微生物絮凝剂^[20]。无机絮凝剂是一种由无机组分组成的电解质化合物,主要有铝盐(硫酸铝、明矾、三氯化铝等)和铁盐(三氯化铁、绿矾、硫酸铁等)。有机絮凝剂是指天然的或人工合成的高分子聚合电解质,可使液体中分散的细粒固体形成絮凝物。微生物絮凝剂是由发酵、提取和精制的高效无毒微生物、多糖蛋白质以及聚氨基酸等组合而成,具有生物活性、生

物可降解性和无二次污染的特点^[21]。汤德意等^[22]研究了有机絮凝剂聚丙烯酰胺和铁铝盐等无机絮凝剂对水库疏浚底泥的脱水效果,发现聚丙烯酰胺具有很好的絮凝效果,但絮凝后上清液浊度较高,铁铝盐的絮凝效果相对较差,但可以显著改善上清液浊度; Xu 等^[23]研究了 FeCl_3 、壳聚糖等对疏浚底泥的絮凝固化效果,发现添加药剂后疏浚底泥流动性先变大后变小,而且絮凝固化处理后的底泥无侧限抗压强度增大;于容丽等^[24,25]的研究挑选并优化培养了微生物絮凝剂生产菌 F22 和 LMB8 菌株,用于疏浚底泥的絮凝脱水,发现其具有良好的底泥脱水性能,絮凝率达 83.1%。

不同类型脱水药剂的作用机制和脱水固化效果迥然不同,但该领域不同类型的絮凝脱水药剂对疏浚底泥脱水效果的综合对比少有研究,药剂固化后对底泥理化性质的影响也并不清晰。本实验选择了 5 种不同类型的复合絮凝固化药剂,以太湖新庄堆场疏浚底泥为研究对象,进行现场工程实验,测试对底泥的脱水固化效果,以期对脱水药剂的选择和疏浚底泥的处理提供科学参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 5 种固化材料主要成分

为全面评估不同类型脱水药剂的固淤效果,本实验主要收集国内不同种类和成分的脱水药剂,其具体组分如表 1 所示。

表 1 5 组固化药剂主要成分

Table 1 Five groups of main components of curing materials

实验组	固化药剂主要成分
第 1 组(微生物类)	由微生物引发的特殊高分子代谢产物,与含有氮和硫官能团配体的 DTC 聚合而成
第 2 组(聚合铁铝盐类)	聚铝、聚铁和生物碳源
第 3 组(有机聚合物类)	聚天冬氨酸、改性 PAM 和羧甲基纤维素钠
第 4 组(有机无机复合类)	钙盐和铝盐/铁盐以及硅酸盐 + 食品级聚丙烯酸类高分子助剂
第 5 组(铝盐微生物复合类)	铝盐(食品级 PAC) + 生物絮凝剂复合制成

1.2 土工管袋固化实验

本次现场工程实验的固化底泥取自江苏省宜兴市新庄堆场的太湖清淤底泥,为保证底泥性质均一性,过滤筛除大部分石块、草木和垃圾杂质等物料,经过水泵冲洗处理,最终将排泥场原泥用泥浆泵输送至 5 个 4 m^3 (最大冲淤体积) 的土工管袋中,同时加入等量的上述 5 种固化絮凝材料,添加量约为固化底泥湿重的千分之三,整个过程与实际固淤过程一致。纱线编制的土工管袋充满淤泥后表面和四角会有大量余水渗出,分别采集各组加药后的管袋余水,冷藏保存,带回实验室分析。充泥完成后封袋。自

然固化 1 个月,打开各个管袋从管袋封口处,利用柱状采样器采集适量固化后的底泥(0 ~ 20 cm),搅拌均匀之后做好标记分别装入自封袋,放入便捷式冷藏箱,以保证经材料固化后底泥各种理化性质的稳定性,之后及时带回实验室。固化 3 个月后,采取土工管袋开膛的方式,用柱状采样器取适量底泥,处理同上,同时两次取样均在原排泥场的冲泥点附近取等量未经任何固化材料处理的排泥场原泥做对照实验。

1.3 指标测定与数据分析

采集的各组管袋充泥后的余水测定其 pH 值、

悬浮颗粒物(SS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)浓度,并取原清淤区太湖原水样做对照;现场采集各个管袋和排泥场的底泥测定其pH值和含水率;完全烘干后的土样经研钵充分研磨,过100目(孔径为0.15 mm)的尼龙筛后,测定土样TN、TP、氮磷形态含量和重金属含量,并取适量湿泥测定其重金属浸出毒性.其中TN和TP的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[26];底泥TP采用在450℃马弗炉烧结后盐酸提取和钼酸铵比色法测定;底泥氮形态测定采用氯化钾提取法,提取得到的形态主要包括铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)^[27];磷形态采用改进的Psenner连续提取方法^[28-31],提取得到的形态主要包括弱结合态磷(Labile-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、有机磷(Org-P)、钙结合态磷(Ca-P)和残渣磷(Res-P).底泥中重金属Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb经过微波消解后,通过7700X型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,底泥中Hg含量是通过Hydra-c型全自动测汞仪测定.重金属浸出毒性实验是利用硫酸硝酸浸提法进行浸出后,测定浸出液中重金属含量^[32,33].

1.4 重金属生态风险评估

瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态风险指数法进行重金属生态危害评价,用潜在生态危害指数值(RI)来对底泥进行如同污染分级的评估^[34].RI可以反映4个方面的情况:①表层底泥金属的含量,②金属污染物的种类数,③金属的毒性水平,④水体对金属污染的敏感性.提出优先考虑的重金属类型和对象为:铬、镍、铜、锌、砷、镉、铅和汞.利用文献[34]中的方法,计算出各组及排泥场原泥中这8种重金属的单因子生态风险指数(E_r)和综合潜在生态风险指数(RI).不同 E_r 和RI

值对应的潜在生态风险分级标准如表2所示.数据分析和绘图分别使用Excel 2010和Origin 2021.

表2 单因子生态风险指数(E_r)和综合潜在生态风险评价指数(RI)与分级标准

E_r	单因子潜在生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
$E_r < 40$	低	RI < 150	低
$40 \leq E_r < 80$	中等	$150 \leq \text{RI} < 300$	中等
$80 \leq E_r < 160$	较重	$300 \leq \text{RI} < 600$	重
$160 \leq E_r < 320$	重	RI ≥ 600	严重
$E_r \geq 320$	严重		

2 结果与讨论

2.1 不同脱水药剂对余水污染物的影响

添加不同固化药剂的实验组土工管袋充泥后的余水各项理化指标如表3所示.各组管袋余水pH值在6.31~7.87之间波动,属于正常的湖水pH值范围,说明几类絮凝脱水药剂对余水的pH值影响相对较小.土工管袋孔径在0.1~0.5 mm之间,对于产生的余水起到良好的过滤作用,加之高分子絮凝药剂对淤泥的絮凝团聚沉降,因此各实验组余水悬浮颗粒物浓度均处于较低水平.经比较,第5组(无机铝盐类)的悬浮颗粒物浓度最高,为87.81 mg·L⁻¹,表明无机铝盐类絮凝剂对粒径较小颗粒物的絮凝沉降效果较弱.COD是衡量水体中有机污染物含量的一个重要指标,除第4组余水COD浓度为9.44 mg·L⁻¹外,其余各组COD值均在5 mg·L⁻¹以内,达到了三类水的标准^[35].各组余水TN相较太湖原水呈现不同程度的升高现象,最高的为第4组和第5组,而余水TP与TN相反,均有降低趋势,主要与悬浮颗粒物中磷酸盐的絮凝沉降到底泥中有关.

表3 余水理化指标

Table 3 Physical and chemical indicators of the residual water

实验组	pH	$\rho(\text{SS})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{COD})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
第1组	7.71	1.17	4.51	4.75	0.04
第2组	7.87	5.33	2.85	5.81	0.01
第3组	7.63	17.75	5.00	5.20	0.03
第4组	6.31	31.00	9.44	7.17	0.02
第5组	6.77	87.81	4.48	7.09	0.05
太湖原水	7.17	45.00	5.56	3.30	0.10

2.2 不同脱水药剂对底泥理化性质的影响

固化1月后各个组别和排泥场原泥理化性质指标如图1所示.不同类型的脱水固化药剂的脱水速率具有一定差异.经比较,1个月后第3组(有机聚合物类)和第4组(有机无机复合类)药剂固化后的淤泥含水率明显低于其他几组,均为60%左右.最

低值出现在第3组,为61.8%,这与第3组固化药剂中添加的聚天冬氨酸(PASP)和聚丙烯酰胺(PAM)有关.PASP分子中含有丰富的羧基和氨基基团,能与水分子以强度氢键形态结合,从而脱去污泥中大量的自由水,加之PAM的吸附架桥和絮凝团聚作用促使污泥中的颗粒物迅速团聚沉降,可以加速底泥

的脱水固化效率^[36]. 而第 1 组(微生物类)和第 5 组(无机铝盐类)药剂处理底泥的含水率均在 80% 左右,脱水效率一般. 一般来说,清淤底泥中含水率高达 90% 及以上,且底泥是从排泥场经过水泵冲洗转移至土工管袋,所以最初底泥含水率较高. 因此,迅速脱水是固淤效率的重要指标. 固淤后各组底泥 pH 值和排泥场原泥的 pH 值相比变化并不明显,波动在 6.3~7.3 之间. 第 4 组底泥 pH 值的降低可能是由于固化药剂中含有的铝盐、铁盐固化过程发生水解反应,导致底泥 pH 值降低. 但固化后的底泥 pH 值均属于湖泊水体底泥正常 pH 值的变化范围 6.36~7.65 之间^[37],未呈现过高碱性. 按照沉水植物以及底栖生物对湖底环境的需求,所有固化淤泥中的酸碱度也不会对周围环境产生影响,也不影响底泥的资源再利用. 由图 1 中底泥 TN 含量可知,排泥场

原泥 $\omega(\text{TN})$ 较高,达 $2347 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 经过不同类型药剂固化后,除第 1 组(微生物类)降低效果不明显外,其余组别对底泥 TN 含量基本都起到一定程度的降低作用,降低幅度在 36.1%~67.3%. TN 含量减少的顺序从高至低依次为:第 4 组 > 第 3 组 > 第 5 组 > 第 2 组 > 第 1 组;与 TN 含量不同的是,固化后各组淤泥的 TP 含量与排泥场原泥相比出现了不同幅度的增高现象,增高幅度在 25.5%~47.5%. TP 含量增高幅度从低到高为:第 1 组 < 第 3 组 < 第 4 组 < 第 5 组 < 第 2 组. 各组固化后的底泥 TP 含量普遍增大可能是因为:在高含水率淤泥体系中,悬浮颗粒物所含有的磷酸盐在分子絮凝剂的处理下聚集沉降到了固化底泥中^[38]. 另一方面,各组沥出余水中 TP 浓度较太湖原水样均有降低的事实也进一步说明这种解释的合理性.

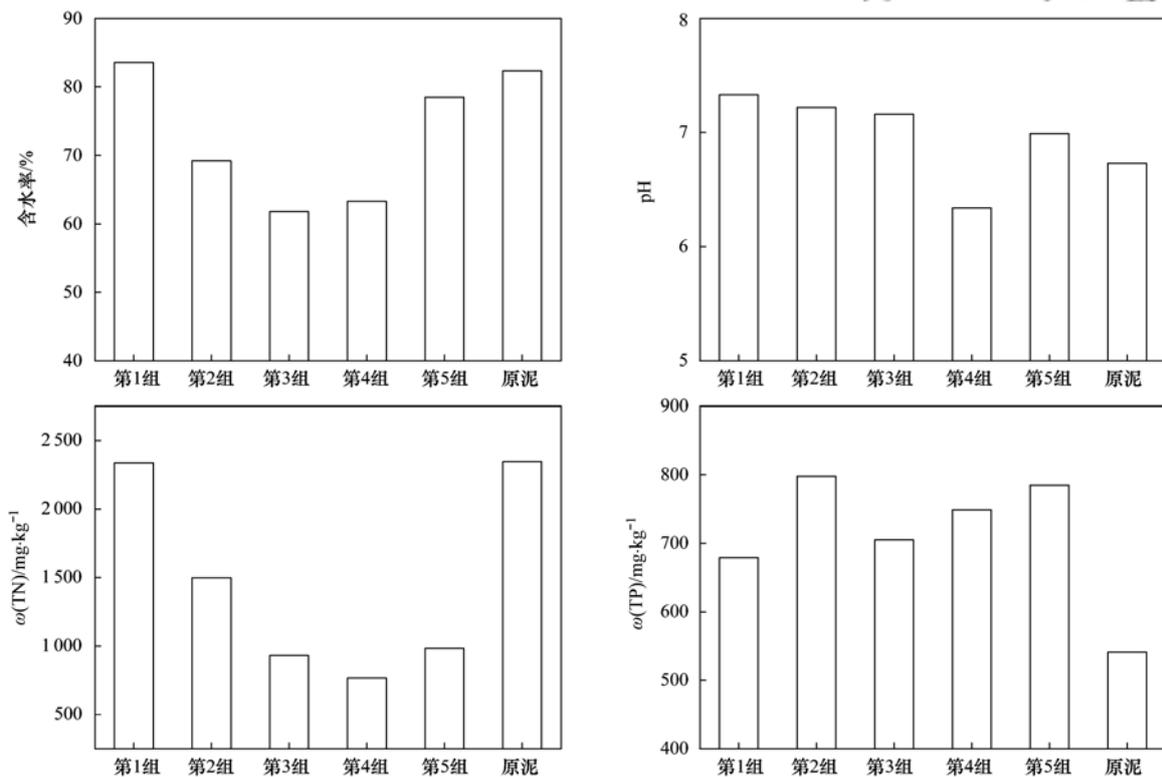


图 1 固淤 1 个月后各组别及排泥场原泥理化指标

Fig. 1 Physical and chemical indexes of the bottom sludge of each group and sludge disposal site after one month of solidification

固化 3 个月后各个组别及排泥场原泥理化性质指标变化如图 2 所示,排泥场原泥由于堆放于露天室外,经过较长时间的变化其理化性质与一直处于土工管袋中的底泥差异较大. 因此,重点对比固淤 1 个月后各组淤泥和排泥场原泥以及固淤 3 个月和 1 个月后理化性质差异. 随着固化时间的加长,固淤 3 个月后各组淤泥含水率基本相对稳定,相比固化第 1 个月淤泥的含水率大幅降低,各组底泥含水率在 32.2%~46.5% 之间波动,最低的是第 4 组,为 32.2%,最高为第 1 组的 46.5%. 随着固化时间的加

长各组淤泥的 pH 值出现小幅度波动,其中第 2 组的 pH 值降到了 7.0 以下,这种变化趋势与水分的损失以及淤泥中添加了聚铝和聚铁有一定的关系. 此外,排泥场中底泥 TN 和 TP 含量的变化幅度也要与各组药剂调理底泥的变化幅度有所不同. 因此,本次采样中排泥场原泥的数据只能作为参考. 采样分析结果显示,各组淤泥的 $\omega(\text{TN})$ 均进一步下降,其中最低的为第 4 组,仅为 $591 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而固化淤泥中最大的 $\omega(\text{TN})$ 也只有 $1325 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (第 1 组). 底泥中总氮的减少与水分损失、也与底泥中的可交换

态氮减少有关.此外,厌氧底泥中氮的硝化和反硝化作用也会造成底泥中氮的损失.与 TN 不同的是,

第 4 组和第 5 组淤泥的 $\omega(\text{TP})$ 出现了升高的现象,最高值出现在第 4 组,为 $1\,347\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

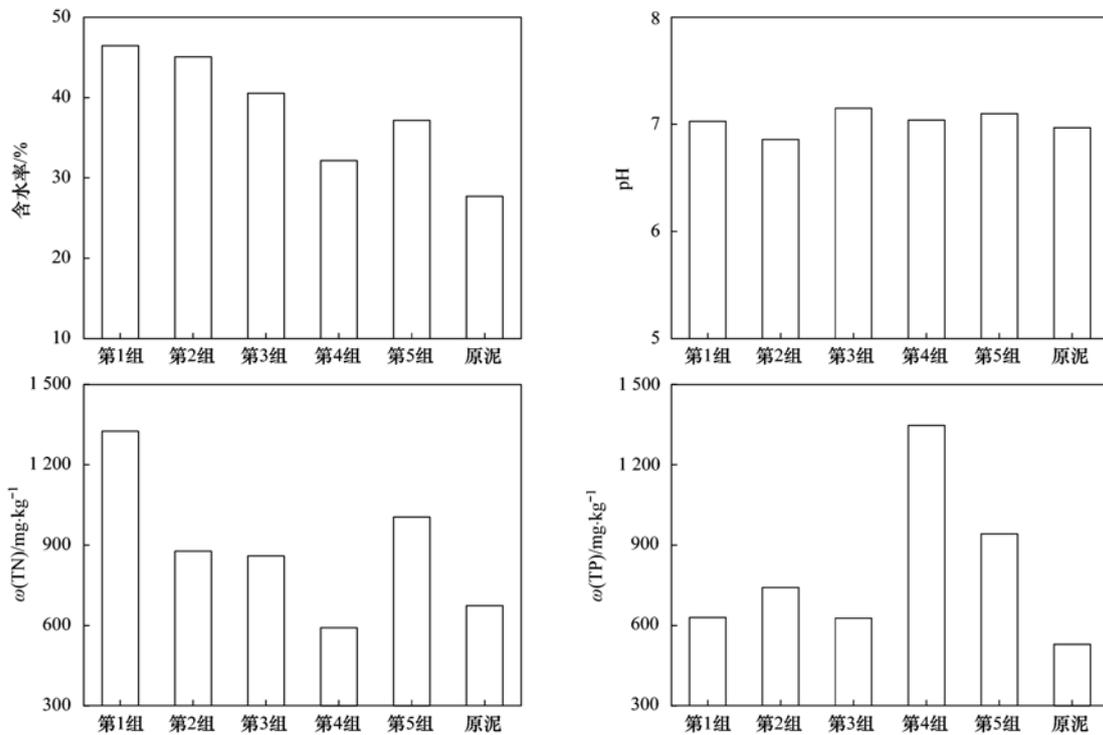


图 2 固淤 3 个月后各组别及排泥场原泥理化指标

Fig. 2 Physical and chemical indexes of the bottom sludge of each group and sludge disposal site after three month of solidification

2.3 不同脱水药剂对底泥氮形态的影响

添加不同固化药剂的土工管袋中底泥和排泥场原泥在不同时间包括 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的氮形态含量变化如图 3 所示. 相较于排泥场原泥各种类型固化药剂对底泥中的 NH_4^+ -N 的去除效果均较为显著, 1 个月后, 5 个组别中的 NH_4^+ -N 含量分别较排泥场原泥降低了 59.7%、53.9%、80.3%、65.5%、71.8%; 较 1 个月的固化周期, 3 个月后 NH_4^+ -N 含量进一步小幅度降低, 其中第 4 组 $\omega(\text{NH}_4^+$ -N) 最

低, 仅为 $18.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而第 3 组 NH_4^+ -N 含量较一个月后的含量上升了 40.3%, 但仍远低于排泥场原泥, 说明随着固化周期的延长, 某种条件下第 3 组 (有机聚合物类) 药剂可能会一定程度上导致底泥中 NH_4^+ -N 的小幅度释放. 固化 1 个月后, 第 2 组至第 5 组淤泥中的 NO_3^- -N 含量分别较排泥场原泥降低了 13.7%、19.0%、36.0% 和 32.0%, 3 个月后, 各组淤泥中的 NO_3^- -N 含量分别较第一个月又降低了 21.2%、15.0%、16.8%、-6.82% 和 8.85%, 其中

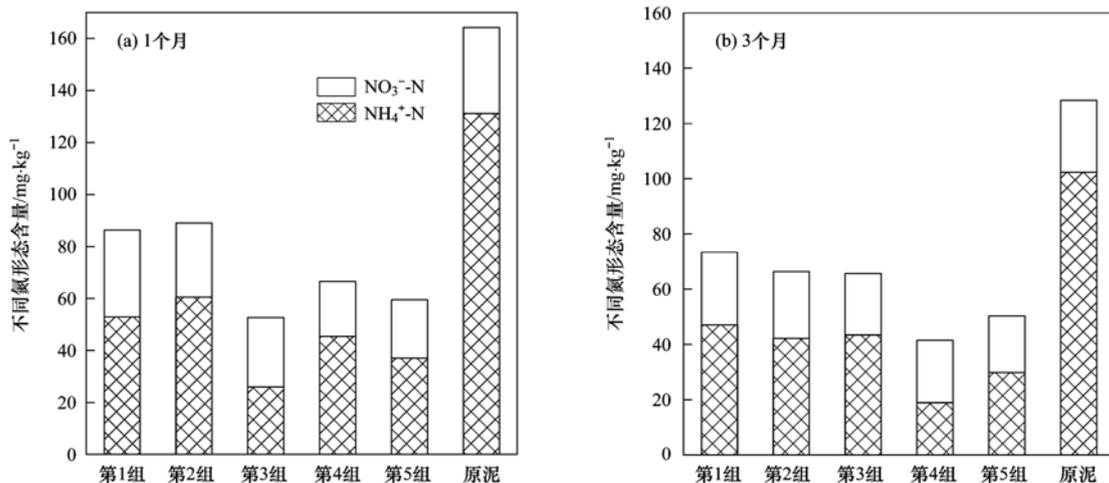


图 3 各组 and 排泥场原泥 1 个月和 3 个月氮形态变化特征

Fig. 3 Change characteristics of nitrogen form in the bottom sludge of each group and the mud dump after 1 month and 3 months

第 4 组较第一个月的 NO_3^- -N 也有少量释放, 只有第 1 组淤泥中的 NO_3^- -N 两个时间点的含量均略高于排泥场原泥, 说明第 1 组(微生物类)药剂中的物质对 NO_3^- -N 的去除效率较低。

2.4 不同脱水药剂对底泥磷形态的影响

3 个月后, 土工管袋和排泥场原泥的各种磷形态变化特征如图 4 所示。相较排泥场原泥, 添加不同类型脱水药剂后的底泥磷形态变化较大的是 Al-P、Ca-P 和 Org-P, 特别是第 5 组(铝盐微生物复合类), 而第 2 组(聚合铁铝盐类)中 Fe-P 增幅最大。对比各组淤泥 1 个月和 3 个月的磷形态可知, 管袋中 Al-P 和 Ca-P 含量前后变化幅度不大, 这主要跟 Al-P 和 Ca-P 的性质有关。相关研究指出在 5.5 ~ 9.0 的 pH 值范围内, Al-P 十分稳定很难被水体和底泥中的生物或微生物利用, 而 Ca-P 是一种永久性磷, 在接近中性的底泥 pH 环境下 Al-P 和 Ca-P 含量变化较小^[39, 40]。弱结合态磷(Labile-P)是通过物理吸附作用与沉积物颗粒相结合的磷, 其含量一般都相对较低, 各组淤泥和排泥场原泥中 $\omega(\text{Labile-P})$ 均在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 其中最高的为第 3 组(有机聚合物

类), 为 $3.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在图 4 中占比过小无法显示出来。由图 4 可知, 各实验组淤泥中 Al-P、Ca-P 和 Fe-P 是磷的 3 种主要结合态, 在总磷中的质量分数平均值为 41.3%、23.5% 和 23.0%, 其中第 4 组(有机无机复合类)处理淤泥中 $\omega(\text{Al-P})$ 最高, 为 $534 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 第 2 组(无机铁铝盐类)中 $\omega(\text{Fe-P})$ 最高, 为 $298 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与第 4 组和第 2 组固化药剂中添加的铝盐和聚铝聚铁有直接关系。底泥中易被生物利用的 Labile-P、Org-P 和 Fe-P 合称活性磷(Mobile-P), 它们与沉积物结合较为松散, 在特定条件下容易重新释放出来造成水体总磷含量升高, 因此 Mobile-P 作为评价底泥磷释放潜力的重要指标之一^[41]。5 个实验组淤泥中 $\omega(\text{Mobile-P})$ 从高到低排列为: 第 2 组($323 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 第 3 组($307 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 第 5 组($210 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 第 1 组($209 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 第 4 组($64.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 因此第 4 组(有机无机复合类)药剂处理淤泥后的淤泥磷的释放风险相对较小。这可能与药剂中的无机成分与底泥中活性磷结合形成更稳定形态的磷有关。此外, 无机金属如铝和钙成分的增加, 也可以增强固化淤泥对磷的固持能力。

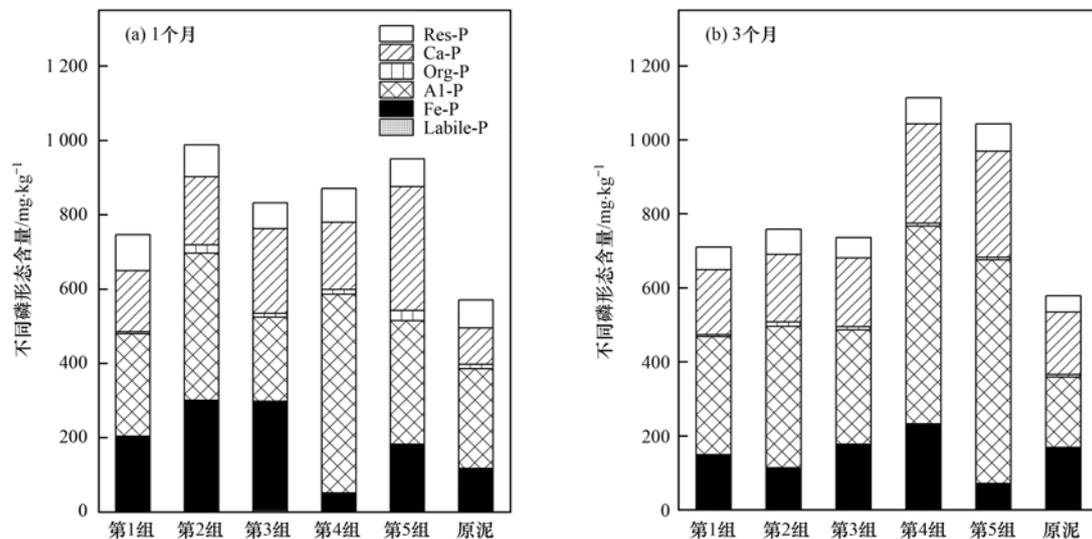


图 4 各组 and 排泥场原泥 1 个月和 3 个月磷形态变化特征

Fig. 4 Change characteristics of phosphorus in the bottom sludge of each group and the mud dump after 1 month and 3 months

2.5 不同脱水药剂对底泥重金属的影响

2.5.1 重金属含量特征

重金属是一种持久性的污染物, 其具有不可降解的特点, 因此其在底泥、底栖生物和水生植物体内富集, 并永久存在于底泥中^[42, 43]。不同类型脱水药剂固化后底泥中的重金属含量较排泥场原泥变化如图 5, 除第 1 组(微生物类)外, 其余各组底泥中的 Cr 和 Ni 含量较排泥场均有不同程度地降低, 下降幅度分别在 10.1% ~ 34.0% 和 5.62% ~ 27.5%。其中第 5 组(铝盐微生物复合类)Cr 的降低幅度最大,

为 34.0%, 第 3 组(有机聚合物类)中 Ni 的下降幅度最大, 为 27.5%。各实验组底泥中 As、Cd 和 Pb 的含量较排泥场全部表现出大幅度的降低, 降低幅度普遍在 50% 左右。重金属含量降低都十分显著的是第 3 组, As(50.0%)、Cd(67.1%) 和 Pb(45.0%), 其中 Cu 和 Zn 的含量降低幅度也是最大的, 分别为 33.4% 和 29.0%。由此可见, 第 3 组(有机聚合物类)的脱水固化药剂对疏浚底泥中的多种重金属均有着较为可观的固化稳定效果, 这跟第 3 组固化助剂中的 PASP 有着很大关系。PASP 是氨基酸聚合物

的类蛋白分子结构,每个氨基分子上有多个羧基基团,单个或多个链上的羧基基团能同时与多价态的重金属阳离子结合形成稳定金属络合物.值得注意的是,第1组(微生物类)固化后的底泥,其多项重

金属含量较排泥场原泥均出现了增高的现象,增幅表现为Cr(4.17%)、Ni(5.89%)、Cu(17.8%)、Zn(7.79%)和Hg(14.3%).因此,第1组的固化助剂不利于重金属的固化,存在一定风险.

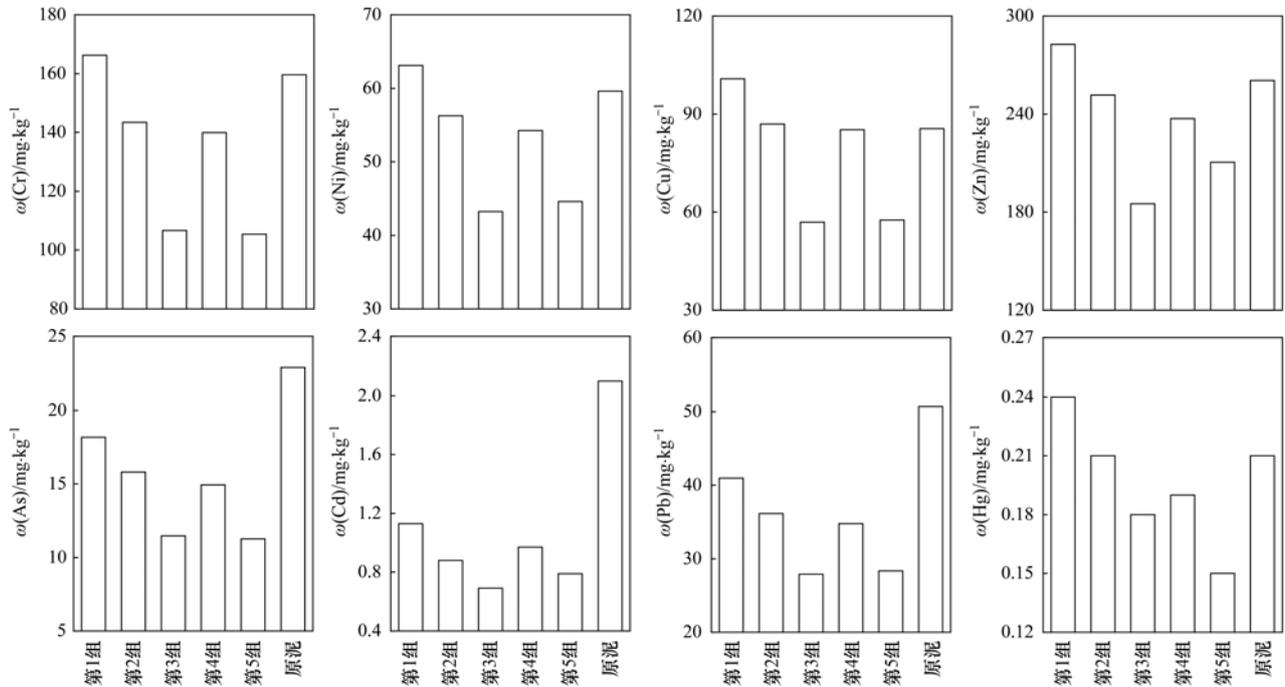


图5 各组固化后及排泥场原泥重金属含量变化

Fig. 5 Changes in heavy metal contents in the sludge of each group after solidification and in the sludge yard

2.5.2 重金属浸出毒性特征

通常,我国主要利用浸出毒性标准来判断是否属于危险废弃物,底泥重金属浸出毒性是判断底泥是否属于固废的重要标准,8种重金属的浸出毒性浓度阈值标准参考为:Cr(15 mg·L⁻¹)、Ni(5 mg·L⁻¹)、Cu(100 mg·L⁻¹)、Zn(100 mg·L⁻¹)、As(5 mg·L⁻¹)、Cd(1 mg·L⁻¹)、Pb(5 mg·L⁻¹)和Hg(0.1 mg·L⁻¹)^[44].因此,对5个实验组及排泥场原泥重金属的浸出毒性浓度进行了分析,结果如表4.相较于排泥场原泥,各组底泥中Cr和As的

浸出毒性均表现出明显的降低,幅度在65%~79%;其中第3组(有机聚合物类)和第5组(铝盐微生物复合类)处理底泥中的锌以及第4组(有机无机复合类)和第5组中的镉浸出毒性升高幅度较大,而各组的Ni、Cu、Pb和Hg浸出毒性的升高幅度略小,但对比标准阈值可知,5个实验组中底泥的重金属浸出毒性均未超出且远低于标准阈值浓度,因此,尽管个别类型药剂固化处理后的底泥有几类重金属浸出毒性较排泥场原泥有所升高,但未达到危险废弃物的标准,仍可作为一般废弃物处理.

表4 固化前后淤泥中的重金属浸出毒性的变化/μg·L⁻¹

Table 4 Changes in the leaching toxicity of heavy metals in the sludge before and after solidification/μg·L⁻¹

实验组	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
第1组	0.20	8.30	0.73	22.02	1.22	0.04	0.13	0.10
第2组	0.12	8.23	1.61	18.45	1.51	0.06	0.12	0.10
第3组	0.14	13.31	1.61	303.57	1.13	0.09	0.08	0.50
第4组	0.14	11.06	1.56	25.09	1.12	0.52	0.13	0.12
第5组	0.08	8.36	1.31	101.28	1.32	0.09	0.01	0.47
原泥	0.57	7.98	0.53	26.24	5.13	0.01	0.05	0.18

2.5.3 重金属潜在生态风险评估

重金属潜在生态风险结果如图6所示.从RI值的组成可以看出,底泥中对RI值贡献最大的单生态风险因子的重金属是Cd和Hg,在5个实验组底泥

中的平均值分别90.0和71.2. Cd和Hg的最大值均出现在第1组的底泥中,达到了中等污染等级和重污染等级.除Cd和Hg以外的6种重金属的单生态风险指数均处于污染水平较低的等级,可以认为

短期内没有潜在生态风险. 总体来看, 显然添加不同类型脱水固化药剂的 5 个实验组中, 底泥综合潜在生态风险指数普遍得到降低, 降低幅度分别为: 第 3 组(51.1%) > 第 5 组(50.1%) > 第 4 组(37.8%) > 第 2 组(37.3%) > 第 1 组(24.9%), RI 平均值为 264, 由此可见固化后的底泥生态风险指数均从重风险降到了中风险范围, 后续疏浚底泥的资源再利用也不会对周围生态环境产生较大的潜在影响. 一方面可能是由于排泥场原泥在泥浆泵冲泥的过程中造成了淤泥中部分重金属的流失, 另一方面各组脱水药剂中的有机无机成分与重金属之间的络合和矿化等反应也促进了重金属的钝化和稳定, 降低了其迁移性和风险性^[45].

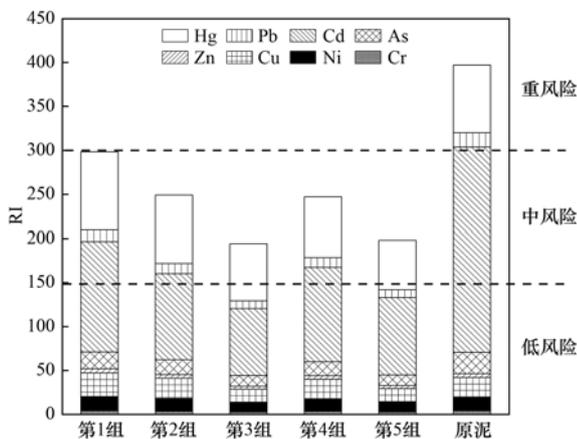


图 6 底泥中重金属生态风险指数和等级

Fig. 6 Ecological risk index and grade of heavy metals in the sludge

3 结论

(1) 不同类型的底泥脱水药剂对疏浚底泥的水分脱除效率差异显著. 固化 3 个月各组底泥含水率基本稳定在 32%~40%. 其中, 有机无机复合类药剂脱水效果最好, 主要由于高分子聚合物聚天冬氨酸等对游离水的去除和 PAM 的桥接絮凝沉淀作用加速了底泥的脱水固化.

(2) 脱水药剂的添加对于底泥中氮含量和形态具有较大的影响. 底泥固化后, TN 含量大幅降低, 有机聚合物类和有机无机复合类药剂处理后的 TN 含量降幅最大. 固化后底泥以铵态氮的减少为主, 硝态氮含量降低幅度较小.

(3) 脱水药剂的添加普遍使底泥总磷升高, 且对底泥中铝结合态磷影响最大. 其中添加有机无机复合类药剂使底泥铝磷含量增加了 181.6%, 这与药剂中大量的铝盐紧密相关. 有机无机复合类药剂对底泥活性磷削减最大.

(4) 固化后的底泥中大部分重金属指标均有一定程度的减小. 其中, 有机聚合物类药剂的削减效果

最显著, 这与药剂中的聚天冬氨酸等高分子物质的螯合作用有关. 重金属浸出毒性都远低于标准阈值. 各类药剂使底泥综合潜在生态风险指数普遍降低, 均从重风险降到了中风险范围.

(5) 综合各项指标分析, 以聚天冬氨酸、改性 PAM、羧甲基纤维素钠为主要成分的有机聚合物类和钙盐、铁铝盐以及硅酸盐 + 聚丙烯酸类高分子助剂为主要成分的有机无机复合类药剂在疏浚底泥的脱水固化、营养盐的去除以及重金属含量的降低等方面表现优异, 适合疏浚底泥的脱水固化处理.

参考文献:

- [1] Yang C H, Yang P, Geng J, *et al.* Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114292.
- [2] Zhong J C, You B S, Fan C X, *et al.* Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus [J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(1): 34-44.
- [3] 丁涛, 田英杰, 刘进宝, 等. 杭州市河道底泥重金属污染评价与环保疏浚深度研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 911-917.
- [4] Ding T, Tian Y J, Liu J B, *et al.* Assessment of heavy metal status in sediments and environmental dredging depth in Hangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(3): 911-917.
- [5] 刘丽香, 韩永伟, 刘辉, 等. 疏浚技术及其对污染水体治理效果的影响 [J]. *环境工程技术学报*, 2020, **10**(1): 63-71.
- [6] Liu L X, Han Y W, Liu H, *et al.* Dredging technology and its effect on the treatment of polluted water [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, **10**(1): 63-71.
- [7] Wang J P, Yuan S J, Wang Y, *et al.* Synthesis, characterization and application of a novel starch-based flocculant with high flocculation and dewatering properties [J]. *Water Research*, 2013, **47**(8): 2643-2648.
- [8] Lv S H, Sun T, Zhou Q F, *et al.* Synthesis of starch-g-p (DMDAAC) using HRP initiation and the correlation of its structure and sludge dewaterability [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, **103**: 285-293.
- [9] Kasmi A, Abriak N E, Benzerzour M, *et al.* Effect of dewatering by the addition of flocculation aid on treated river sediments for valorization in road construction [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, **8**(3): 585-597.
- [10] Cao B D, Zhang T, Zhang W J, *et al.* Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: a critical review [J]. *Water Research*, 2021, **189**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116650.
- [11] 李钢, 韩明爽, 徐海红. 水体疏浚底泥利用现状与资源化利用 [J]. *环境工程*, 2021, **39**(6): 55-58, 71.
- [12] Li G, Han M S, Xu H H. Utilization of sediments dredged from water bodies and its energy reutilization [J]. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(6): 55-58, 71.
- [13] Colin F, Gazbar S. Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering [J]. *Water Research*, 1995, **29**(8): 2000-2005.
- [14] Smith K E, Banks M K, Schwab A P. Dewatering of contaminated sediments: greenhouse and field studies [J].

- Ecological Engineering, 2009, **35**(10): 1523-1528.
- [12] 刘禹杨, 吴燕, 胡保安, 等. 疏浚底泥掺外加剂真空预压脱水技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2013, (3): 78-82.
Liu Y Y, Wu Y, Hu B A, *et al.* Research on dehydration technology of dredged sludge by admixture and vacuum preloading [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013, (3): 78-82.
- [13] 郭利芳, 迟姚玲, 赵华章. 新型复合絮凝剂对疏浚底泥脱水和重金属固化的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, **55**(2): 329-334.
Guo L F, Chi Y L, Zhao H Z. Study on new composite flocculants in dewatering of dredged sediments and solidification of heavy metals [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, **55**(2): 329-334.
- [14] 郭利芳. 共价键型絮凝剂对疏浚底泥脱水的研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2018.
Guo L F. Study on covalently bound hybrid coagulants in dewatering of dredged sediments [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2018.
- [15] Ratnayesuraj C R, Bhatia S K. Testing and analytical modeling of two-dimensional geotextile tube dewatering process [J]. Geosynthetics International, 2018, **25**(2): 132-149.
- [16] 姜霞, 王书航, 张晴波, 等. 污染底泥环保疏浚工程的理念·应用条件·关键问题[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(10): 1497-1504.
Jiang X, Wang S H, Zhang Q B, *et al.* Analysis of concepts, conditions and critical problems in environmental dredging [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(10): 1497-1504.
- [17] 黄佳音, 王占军, 肖博, 等. 白洋淀疏浚底泥絮凝脱水试验及应用[J]. 水运工程, 2020, (S1): 21-24.
Huang J Y, Wang Z J, Xiao B, *et al.* Flocculation dehydration test and engineering application of dredging sediment in Baiyangdian [J]. Port & Waterway Engineering, 2020, (S1): 21-24.
- [18] 周小丹. 无机-有机复合絮凝剂用于快速湖泊清淤研究[J]. 广州化工, 2019, **47**(1): 58-61, 79.
Zhou X D. Study on application of inorganic-organic composite flocculants in lake fast desilting [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, **47**(1): 58-61, 79.
- [19] Wang H F, Hu H, Wang H J, *et al.* Impact of dosing order of the coagulant and flocculant on sludge dewatering performance during the conditioning process [J]. Science of the Total Environment, 2018, **643**: 1065-1073.
- [20] 王东星, 唐弈锴, 伍林峰. 疏浚淤泥化学絮凝-真空预压深度脱水效果评价[J]. 岩土力学, 2020, **41**(12): 3929-3938.
Wang D X, Tang Y K, Wu L F. Evaluation on deep dewatering performance of dredged sludge treated by chemical flocculation-vacuum preloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(12): 3929-3938.
- [21] 陈波. 微生物絮凝剂在污水处理中的应用前景[J]. 化工管理, 2020, (30): 116-117.
Chen B. Application foreground of microbiological flocculant in sewage treatment [J]. Chemical Enterprise Management, 2020, (30): 116-117.
- [22] 汤德意, 翁浩轩, 史燕南. 水库疏浚底泥絮凝沉降室内试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, **35**(4): 31-36.
Tang D Y, Weng H X, Shi Y N. Indoor experimental study on flocculation settling of dredged sediment [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, **35**(4): 31-36.
- [23] Xu G Z, Qiu C C, Song M M, *et al.* Flocculant effects on fluidity and strength behavior of cemented dredged clay with high water content [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, **39**(8): 951-961.
- [24] 于荣丽, 孙铁珩, 孙丽娜, 等. 微生物絮凝剂用于河道疏浚底泥快速脱水的研究[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(5): 35-38, 42.
Yu R L, Sun T H, Sun L N, *et al.* Research of microbial flocculants in dredging sediment dewatering [J]. Environmental Pollution and Control, 2012, **34**(5): 35-38, 42.
- [25] 于荣丽, 胡筱敏, 李喆. LMB8 菌株产微生物絮凝剂用于河道疏浚底泥快速脱水的研究[J]. 环境工程, 2016, **34**(2): 108-112.
Yu R L, Hu X M, Li Z. Application of microbial flocculant by LMB8 strain in rapid dewatering of river dredging sediment [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(2): 108-112.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [27] 王红萍, 梁涛, 张秀梅, 等. 非点源污染研究中土壤溶解性无机氮的提取方法选择[J]. 地理研究, 2005, **24**(2): 236-242.
Wang H P, Liang T, Zhang X M, *et al.* Comparison of extraction methods on soil-soluble inorganic nitrogen in non-point pollution research [J]. Geographical Research, 2005, **24**(2): 236-242.
- [28] Psenner R, Pucsko R. Phosphorus fractionation: advantages and limits of the method for the study of sediment P origins and interactions [J]. Advances in Limnology, 1988, **30**: 43-59.
- [29] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [30] 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 799-810.
He J, Chen C Y, Deng W M, *et al.* Distribution and release characteristics of phosphorus in water-sediment interface of Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(5): 799-810.
- [31] James W F. Diffusive phosphorus fluxes in relation to the sediment phosphorus profile in Big Traverse Bay, Lake of the Woods [J]. Lake and Reservoir Management, 2017, **33**(4): 360-368.
- [32] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [33] HJ/T 299-2007, 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法[S].
- [34] 刘新, 蒋豫, 高俊峰, 等. 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评估[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 502-512.
Liu X, Jiang Y, Gao J F, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(3): 502-512.
- [35] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [36] 赵俭波, 魏军, 曹辉, 等. 聚天冬氨酸水凝胶的研究与应用进展[J]. 化工进展, 2019, **38**(7): 3355-3364.
Zhao J B, Wei J, Cao H, *et al.* The research and application progress of PASP hydrogel [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, **38**(7): 3355-3364.
- [37] 袁旭音, 许乃政, 陶于祥, 等. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J]. 资源调查与环境, 2003, **24**(1): 20-28.
Yuan X Y, Xu N Z, Tao Y X, *et al.* Spatial distribution and eutrophic characteristics of bottom sediments in Taihu Lake [J]. Resources Survey & Environment, 2003, **24**(1): 20-28.
- [38] Song Z Z, Zhang W J, Gao H Y, *et al.* Comprehensive assessment of flocculation conditioning of dredged sediment using organic polymers: dredged sediment dewaterability and release of

- pollutants[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139884.
- [39] Huser B J, Rydin E. Phosphorus inactivation by aluminum in Lakes Gårdsjön and Härsvatten sediment during the industrial acidification period in Sweden[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, **62**(8): 1702-1709.
- [40] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(3): 488-494.
- Hou L J, Lu J J, Liu M, *et al.* Species and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(3): 488-494.
- [41] 张奇, 喻庆国, 王胜龙, 等. 滇西北剑湖沉积物磷形态、空间分布及释放贡献[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(10): 3792-3803.
- Zhang Q, Yu Q G, Wang S L, *et al.* Phosphorus fractions, spatial distribution and release contributions in sediments of Jianhu Lake, northwestern Yunnan plateau, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3792-3803.
- [42] Yin H B, Zhu J C. In situ remediation of metal contaminated lake sediment using naturally occurring, calcium-rich clay mineral-based low-cost amendment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **285**, doi: 10.1016/j.cej.2015.09.108.
- [43] Ye X X, Kang S H, Wang H M, *et al.* Modified natural diatomite and its enhanced immobilization of lead, copper and cadmium in simulated contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **289**: 210-218.
- [44] GB 5085.3-2007, 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别[S].
- [45] 李仲权. 重金属污染河道底泥稳定化固化技术分析[J]. *科技创新导报*, 2018, **15**(13): 133-134.
- Li Z Q. Analysis of stabilization and solidification technology of river sediment polluted by heavy metals [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018, **15**(13): 133-134.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	.....	.....
.....	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	.....	.....
.....	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	.....	.....
.....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	.....	.....
.....	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	.....	.....
.....	JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	.....	.....
.....	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	.....	.....
.....	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	.....	.....
.....	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	.....	.....
.....	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	.....	.....
.....	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)