

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O₃ 驱动因素挖掘 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM_{2.5} 重污染过程输送和增长特性 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H₂O₂ 氧化水中有机微污染物 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果

张沐¹, 任增谊², 张曼³, 赵琼^{1*}, 尹洪斌^{3*}

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 南京水利规划设计研究院有限公司, 南京 210006; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 外秦淮河是南京市一条重要的城市景观行洪河道, 多年来受工业及生活污水影响, 内源污染严重. 为充分了解外秦淮河底泥污染特征, 为疏浚提供决策依据, 对河道上、中和下游典型断面底泥界面微环境以及营养物质含量进行调查, 采用有机指数法和污染指数法对底泥污染状况进行评估, 同时根据污染物垂向分布特征模拟清淤对底泥内源释放削减的影响. 结果表明, 上中下游底泥界面以上 DO 均值分别为 4.62、3.25 和 3.41 mg·L⁻¹, 且分别在 4.4、3.5 和 5.5 mm 处消耗殆尽, 是典型的城市河道污染特征体现. 调查河段表层底泥的 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{OM})$ 均值分别为 1734 mg·kg⁻¹、1337 mg·kg⁻¹ 和 4.82%, 底泥 TN 和 OM 的有机污染指数均值为 0.48, 处于尚清洁水平, TP 的单项污染指数均值为 3.18, 处于重度污染水平. 模拟 30 cm 清淤深度结果表明, 底泥 SRP 和 Fe²⁺ 的释放速率较清淤前分别削减 42%~82% 和 88%~96%, 而 NH₄⁺-N 的释放速率却较清淤前有所增加. DGT 测定技术与底泥磷形态分析结果表明, 清淤后表层底泥磷活性均明显下降, DGT-P 和 Mobile-P 较对照处理削减比例分别为 9%~11% 和 1%~35%. 以上研究结果表明, 外秦淮河底泥内源污染严重, 清淤可在一定程度削减内源磷释放, 可能是外秦淮河水水质改善的重要措施.

关键词: 外秦淮河; 营养物; 底泥污染评价; 疏浚; 氮磷释放; 氮磷形态

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3945-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202208081

Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River

ZHANG Mu¹, REN Zeng-yi², ZHANG Man³, ZHAO Qiong^{1*}, YIN Hong-bin^{3*}

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210006, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The Waiqinhuai River is an important urban landscape flood channel in Nanjing, which has been seriously polluted by industrial and domestic sewage for many years. To fully understand the characteristics of Waiqinhuai river sediment pollution and provide a decision-making basis for dredging, the sediment interface microenvironment and nutrient content of river sediment collected from method-typical sections in the upper, middle, and lower reaches were determined, and the organic index and pollution index methods were used to evaluate the sediment pollution condition. We also simulated the effect of desilting on the reduction of endogenous release in sediment according to pollutant characteristics of vertical distribution. The results showed that the average dissolved oxygen concentrations at the upper, middle, and lower sediment interfaces were 4.62, 3.25, and 3.41 mg·L⁻¹, respectively; the concentrations were exhausted at 4.4, 3.5, and 5.5 mm, respectively, which were typical characteristics of urban river pollution. The average contents of TN, TP, and OM in the surface sediment of the investigated reach were 1734 mg·kg⁻¹, 1337 mg·kg⁻¹, and 4.82%, respectively. The organic pollution index of TN and OM in the sediment was 0.48 on average, which was at the clean level, whereas the individual pollution index of TP was 3.18 on average, which was at the severe pollution level. The results of simulating the dredging depth of 30 cm showed that the release rates of SRP and iron divalent were reduced by 42%-82% and 88%-96%, respectively, whereas the release rate of ammonia nitrogen was increased. The results of DGT determination and phosphorus speciation analysis showed that the phosphorus activity of surface sediment decreased significantly after desilting, and DGT-P and Mobile-P decreased by 9%-11% and 1%-35%, respectively, compared with those in the control treatment. These results indicated that the sediment of Waiqinhuai River was seriously polluted by endogenous phosphorus, and desilting could reduce the release of endogenous phosphorus to a certain extent, which may be an important method for improving the water quality of the Waiqinhuai River.

Key words: Waiqinhuai River; nutrients; sediment pollution assessment; dredging; nitrogen and phosphorus release; nitrogen and phosphorus forms

底泥是河湖生态系统的重要组成部分,是氮磷等营养物的主要蓄积场所^[1]. 进入水体的氮磷绝大部分会通过沉降和吸附等物理化学作用不断累积于底泥中,达到一定程度后将造成内源污染. 蓄积于底泥中的污染物通过底泥孔隙水与上覆水体的浓度梯度以扩散的方式进入上覆水,或在外界动力扰动下通过再悬浮释放至水体中^[2]. 有研究表明,在外源污染物输入得到有效控制时,底泥的内源释放会极大影响水体中氮磷浓度^[3,4],因此对底泥内源污染采取适当的控制措施十分必要.

城市河流是城市生态系统的重要组成部分,在

提供水源、防洪排涝、调节城市气候和降低环境污染等方面发挥着重要的作用^[5]. 然而,随着城市人口的急剧扩张,大量未经处理的废水就近输入河道,久而久之致使城市河流底泥遭受严重的污染,甚至在很多城市形成黑臭水体. 城市河流较天然湖泊等水生生态系统而言,具有生态系统结构较为简单、

收稿日期: 2022-08-09; 修订日期: 2022-10-10

基金项目: 南京市水务科技项目(202105); 江苏省水利科技项目(2019006)

作者简介: 张沐(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为底泥污染控制, E-mail: zhang18297177651@163.com

* 通信作者, E-mail: zhaorong2019@ahu.edu.cn; hbyin@niglas.ac.cn

物种多样性低和外源污染物质输入量大等特点. 针对城市河流的特点, 采用底泥清淤的方式控制内源污染已经成为一种普遍的手段. 底泥清淤一方面可以去除河流表层的重污染底泥, 另一方面也可改善河床底部生境条件^[6], 进而在一段时间内改善河流水质及水生动植物的生境条件^[7].

外秦淮河主城区段长 15.6 km, 上游起自运粮河口, 流经南京主城秦淮、雨花、建邺和鼓楼这 4 个区, 最后汇入长江^[8]. 外秦淮河作为城市内河, 在南京城市发展与水环境优化中占有重要地位^[9]. 然而, 外秦淮河沿途接纳大量的生活污水与工农业废水, 超过其污染负荷时, 将会造成水体污染. 有研究表明, 自 2007 年以来, 外秦淮河入江段的污染程度有逐年增加的趋势, 虽然政府部门实施了一系列环境综合整治工程, 但由于截污不彻底和黑臭河道整治任务尚未彻底完成等多种原因, 水质污染问题仍较为严峻^[10]. 外秦淮河水质的降低, 不仅会对自身的饮用水水源地的供水安全带来隐患, 还会影响长江农业用水和渔业用水功能的正常发挥, 造成部分区域水质性短缺^[11]. 为全面掌握外秦淮河的内源污染状况, 本文对外秦淮河上、中和下游典型断面底泥进行调查, 评估底泥中氮磷等营养物的分布以及污染特征, 并开展模拟清淤研究, 分析清淤后内源污染物以及释放的

削减情况, 以期为后续的清淤工作提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究区域为南京外秦淮河中和桥至三汊河口闸段, 全长 13.35 km. 2021 年 11 月, 在该河段拟疏浚长度内, 手持 GPS 定位设置 8 个采样点 S3 ~ S10, 并在 12 月增加了 2 个采样点 S1 和 S2 (采样点情况如图 1 所示, 其中 S1 ~ S3 为上游, S4 ~ S7 为中游, S8 ~ S10 为下游). 利用柱状采样器 (Φ 85 mm \times 600 mm) 采集无扰动柱状样品, 柱状样品采集后根据实际底泥深度按照 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm 进行垂向分层分割处理, 每层样品取其具有代表性的混合样品带回实验室分析, 另在各采样点采集柱样用于释放实验.

此外在现场进行水样采集, 每个采样点采集的水样, 装入聚乙烯桶内, 冷藏保存. 对 S3、S5、S7、S8 和 S9 点位(上、中、下游)采集的柱状样品进行 Peeper(平衡式间隙水技术)和 DGT(薄膜扩散梯度)分析.

1.2 样品处理及测定

对于分层底泥样品, 取混合均匀底泥分层样品放入坩埚中, 60℃ 烘干至恒重, 前后称量测其含水

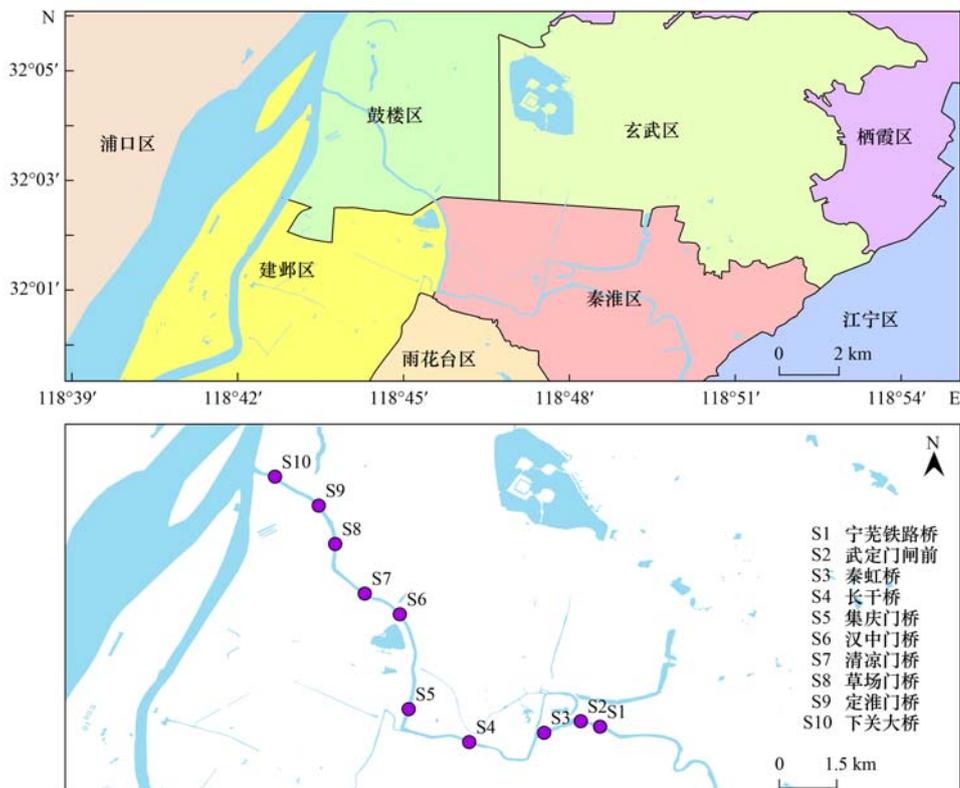


图 1 研究区域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution diagram of sampling sites in the study area

率. 去除样品中的沙石和动植物残体, 研磨后过 100 目(0.154 mm) 尼龙分样筛装入密封袋中, 贮存备用. 所有底泥样品均需测定总氮(TN)、总磷(TP)及有机质(OM)含量; 另选取每个采样点的表层底泥(0 ~ 10 cm) 测定包括氨氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)的氮形态以及包括不稳定的磷(Labile-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)和残渣态磷(Res-P)的磷形态.

底泥中总氮、总磷及有机质的测定采用文献[12]中的方法, 底泥氮形态的测定参考文献[13]中的方法, 底泥磷形态参考文献[14~17]中的方法.

1.3 薄膜扩散梯度分析(DGT)与平衡式间隙水技术(Peeper)

为研究柱样底泥界面附近的氮磷释放状况, 使用薄膜扩散梯度分析与平衡式间隙水技术相结合的方法测定氮磷释放速率.

DGT 技术以菲克第一扩散定律为理论基础, 其结合相可以迅速结合水凝胶和结合相界面间的被监测物质, 从而在水凝胶和外部水体间形成一个稳定的浓度梯度, 假设放置时间内梯度保持不变, 那么溶液中特定离子浓度可由扩散定律转化公式计算出^[18]. 在使用之前, 在固定外壳的底板上从下到上依次叠加放置 ZrO-Chelex 或 AgI 固定膜、扩散膜和滤膜(Whatman, 0.45 μm pore size), 轻轻赶出膜之间的气泡后, 盖上盖板固定, 最后将组装好的装置浸泡在浓度为 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液中并连续充氮气 16 h 后备用. 使用时, 将平板式 DGT 垂直缓缓插入底泥柱样, 其中约 2 cm 暴露上覆水中, 待平衡 24 ~ 48 h 后(若环境温度较低可适当增加时长)取出. 然后用超纯水冲洗掉附着物, 防止保存过程中渗透和再吸附影响. 冲洗数次后, 将 DGT 装置快速装入湿润封口袋中密闭冷藏保存, 待进一步分析. 后续处理参考王艳平等^[19]的方法, 得到灰度值数据, 并转化为 C_{DGT} , 使用 Origin2017 作出相应图像.

Peeper 基于内外膜渗透平衡原理, 采用滤膜将装有采样介质(如去离子水或电解质溶液)的小室与沉积物、水隔开, 利用滤膜的特性, 使沉积物间隙水中一些可溶离子和分子通过滤膜与 Peeper 装置中的采样介质进行物质交换, 放置一段时间后达到平衡. 使用前需将主体放入含盐酸的容器中浸泡清洗 6 h, 将 Peeper 装置装配完成后需使用 N_2 曝气 4 ~ 5 h 后备用. 使用时, 将 Peeper 装置垂直缓缓插入底泥柱样, 其中约 6 cm 暴露上覆水中, 待平衡 48 h 后取出, 后续取样方法参考文献[20]. 最终使用微孔板分光光度计测定装置各栅格孔内间隙水的亚铁

离子(Fe^{2+})、溶解性反应磷(SRP)和氨氮(NH_4^+ -N)的浓度, 并计算通量.

1.4 营养盐状况评价

有机污染指数法是目前采用最多的底泥营养盐评价方法, 但缺乏对底泥中磷的评价, 而污染指数法可以反映单个因子的污染状况. 本研究采用有机污染指数法对底泥中 C 和 N 污染进行评价, 污染指数法对 TP 的污染状况进行评价, 相关标准如表 1 所示, 计算方法如下^[21]:

$$\text{OC} = \text{OM}/1.724$$

$$\text{ON} = \text{TN} \times 95\%$$

$$\text{OI} = \text{OC} \times \text{ON}$$

$$\text{PI} = C_i/C_{is}$$

式中, OC 为有机碳质量分数, %; OM 为有机质质量分数, %; ON 为有机氮质量分数, %; OI 为有机污染指数; PI 为污染指数; C_i 为污染因子(TP)的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{is} 为 TP 在底泥中的标准值, 本研究根据之前的报道采用 420 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[22].

表 1 有机污染指数(OI)和污染指数(PI)评价标准

Table 1 Assessment standards of sediment organic pollution index (OI) and pollution index (PI)

OI	类型	等级	PI	污染程度
<0.05	清洁	I	<0.5	清洁
0.05 ~ 0.2	较清洁	II	0.5 ~ 1.0	轻度污染
0.2 ~ 0.5	尚清洁	III	1.0 ~ 1.5	中度污染
>0.5	有机污染	IV	>1.5	重度污染

1.5 数据分析

文中采样点的绘制使用 ArcGIS 软件完成; 原始数据处理使用 Excel 软件完成; DGT 影像处理使用 ImageJ 完成; 折线图及柱状图的绘制使用 Origin 2017 软件完成; 相关性分析使用 SPSS 软件完成.

2 结果与讨论

2.1 底泥污染分布规律及污染状况

2.1.1 底泥-水界面微环境特征

在研究区域上中下游各选取一个采样点(S1、S4 和 S8)的柱样进行底泥-水界面的理化性质[溶解氧(DO)]的分析, 结果如图 2 和表 2 所示. 由图 2 可知, 底泥-水界面 DO 的垂向变化有类似规律, 即随着深度增加而逐渐变小, 并向缺氧和厌氧变化. 上中下游在底泥-水界面以上 4 mm 范围内, DO 的垂向分布较为均匀, 上中下游均值分别为 4.62、3.25 和 3.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即底泥界面以上的 DO, 上游高于中游和下游, 可能由于上游水体有机质输入较少, 使得表层底泥 OM 含量较低, 生物的耗氧速率也比较低. 上中下游柱样的 DO, 在界面之下 1 mm 深度开始锐

减,并分别在 4.4、3.5 和 5.5 mm 处降为 0 并保持基本稳定状态.外秦淮河水体 DO 低于蒋艳等^[23]在淮河干流的 DO 调查结果(5.92 ~ 8.17 mg·L⁻¹),与

王话翔等^[24]在上海主城区感潮河网的 DO 调查结果(<4 mg·L⁻¹)类似,是典型的城市河道污染特征体现.

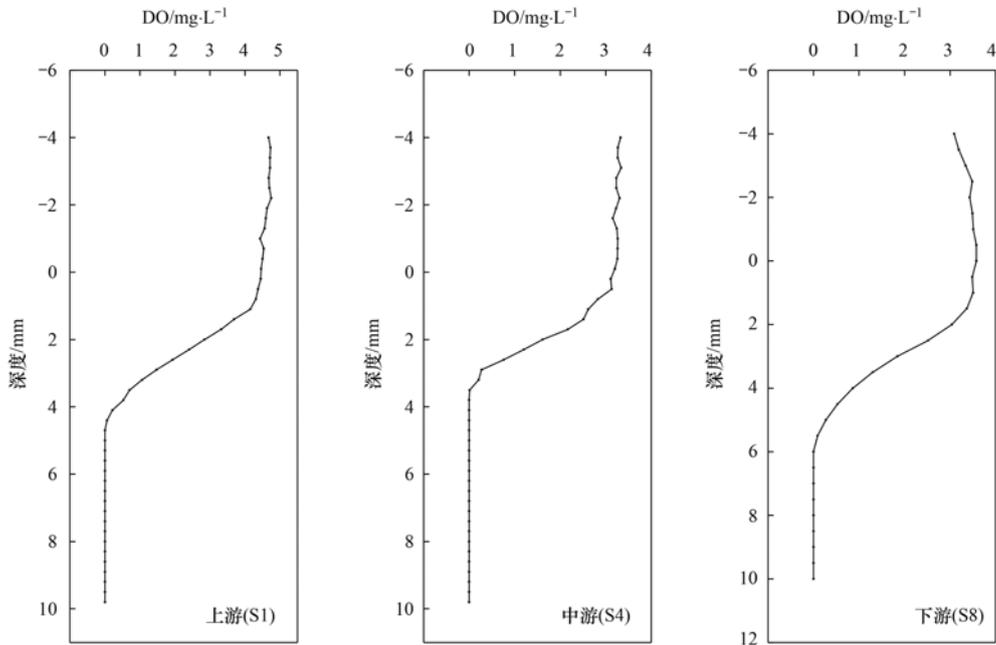


图2 底泥-水界面理化性质

Fig. 2 Physicochemical properties of sediment-water interface

表2 底泥-水界面理化性质

Table 2 Physicochemical properties of sediment-water interface

位置	界面以上 DO 均值/mg·L ⁻¹	氧气渗透深度/mm
上游	4.62	4.4
中游	3.25	3.5
下游	3.41	5.5

2.1.2 底泥总氮、总磷以及有机质的分布特征

沉积物(底泥)是水体污染物质的重要蓄积库,是水体污染物的“源”与“汇”,其性质可间接反映水体的污染状况^[25]. 污染物质通过生活污水、农业废水和工业废水的排放进入河流水体^[26],在悬浮物与沉积物的吸附、络合、絮凝与共沉淀作用下富集在沉积物上.当沉积物的碳氮磷形态发生变化或沉积物界面特征改变时,污染物质将会向水体不断释放^[27~29].

测定分层底泥样品的 TN、TP 和 OM 含量,结果显示,所有采样点 0 ~ 40 cm 深度 $\omega(\text{TN})$ 范围为 327 ~ 3488 mg·kg⁻¹,均值为 1916 mg·kg⁻¹; $\omega(\text{TP})$ 范围为 308 ~ 2590 mg·kg⁻¹,均值为 1461 mg·kg⁻¹; $\omega(\text{OM})$ 范围为 1.59% ~ 11.64%,均值为 5.10%. TN、TP 和 OM 含量的空间分布均表现为:中游 > 下游 > 上游.这是由于中下游两侧居民区与工业区密集,外源污染输入较多,使底泥污染较为严重.

表3是本研究与国内其他河流表层沉积物 TN、TP 和 OM 含量对比.其中外秦淮河的表层 TN 和 TP

含量处于中等水平,表层 OM 含量相比其他河流处于较高水平.外秦淮河调查段上中下游表层底泥(0 ~ 10 cm 深度)的 $\omega(\text{TN})$ 为 824 ~ 2284 mg·kg⁻¹,均值为 1734 mg·kg⁻¹,在 1000 ~ 2000 mg·kg⁻¹ 之间,根据美国环境保护署(EPA)制定的沉积物 TN 污染评价标准^[30],属于中度污染.各采样点的表层 TN 含量相差较大,其中上游 S3 采样点与中游 S7 采样点的 $\omega(\text{TN})$ 超过了 2000 mg·kg⁻¹,属于重度污染.其中上游采样点 S3 位于闸后,水流较为平缓,物质沉积速率较大,外源含氮污染物通过吸附、沉降作用不断堆积,使得表层 TN 含量较高.中游采样点 S7 所在位置(清凉门桥)附近有大量生活区,受生活污水的影响,TN 含量较高.

调查段上中下游表层底泥 $\omega(\text{TP})$ 为 520 ~ 1989 mg·kg⁻¹,均值为 1337 mg·kg⁻¹,根据美国环境保护署(EPA)制定的沉积物 TP 污染评价标准,属于重度污染.除了上游采样点 S1 之外,其余采样点的 $\omega(\text{TP})$ 均已超过 700 mg·kg⁻¹,处于重度污染.可能是由于上游采样点 S1 所在位置(宁芜铁路桥)处于上游,沉积速率低,底泥厚度较小,此外其附近居民区较为稀疏,使得外源物质输入较少,TP 含量较低.

OM 是反映湖泊内源污染状况的重要指标,也是反映有机营养程度的重要标志^[31,32].作为一种胶体物质,OM 可与污染物发生吸附、分配和络合作

用,对污染物的迁移释放有较大影响^[33]. 外秦淮河调查段上中下游的表层底泥 $\omega(\text{OM})$ 在 2.72% ~ 7.27% 之间,均值为 4.82%. 其中 OM 含量最高值出

现在中游采样点 S4,最低值出现在上游采样点 S1,这可能与水流冲刷强度及物质沉积速率,以及周边生活污水的输入有关.

表 3 不同河流表层沉积物中 OM、TN 和 TP 含量对比

Table 3 Comparison of OM, TN, and TP concentration in the surface sediments in different rivers

河流名称	$\omega(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{OM})/\%$		文献
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
外秦淮河	824 ~ 2 284	1 734	520 ~ 1 989	1 337	2.72 ~ 7.27	4.82	本研究
小清河	1 419 ~ 4 554	2 272	2 206 ~ 6 391	3 218	1.39 ~ 4.50	4.07	[34]
潮白河	5 ~ 1 028	192	367 ~ 4 825	1 662	0.02 ~ 1.32	0.53	[35]
南淝河	650 ~ 1 600	803.6	350 ~ 2 700	617.6	2.01 ~ 5.31	3.30	[36]
抚河	1 040 ~ 2 740	1 850	110 ~ 1 320	840	0.05 ~ 0.26	0.16	[37]

对外秦淮河调查段采集的底泥进行 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm 分层,对其中 TN、TP 和 OM 含量进行垂向分析,结果如图 3 所示. 由图 3 和表 4 可知,TN、TP 和 OM 含量在各采样点的分布规

律类似,相关性分析结果表明 TN、TP 和 OM 含量均显著正相关. 其中对于底泥 TN 含量,上游采样点 S1 和 S2 的表层(0 ~ 10 cm)的 TN 含量高于 30 ~ 40 cm 深度的 TN 含量,即新近沉积造成的污染高于历史

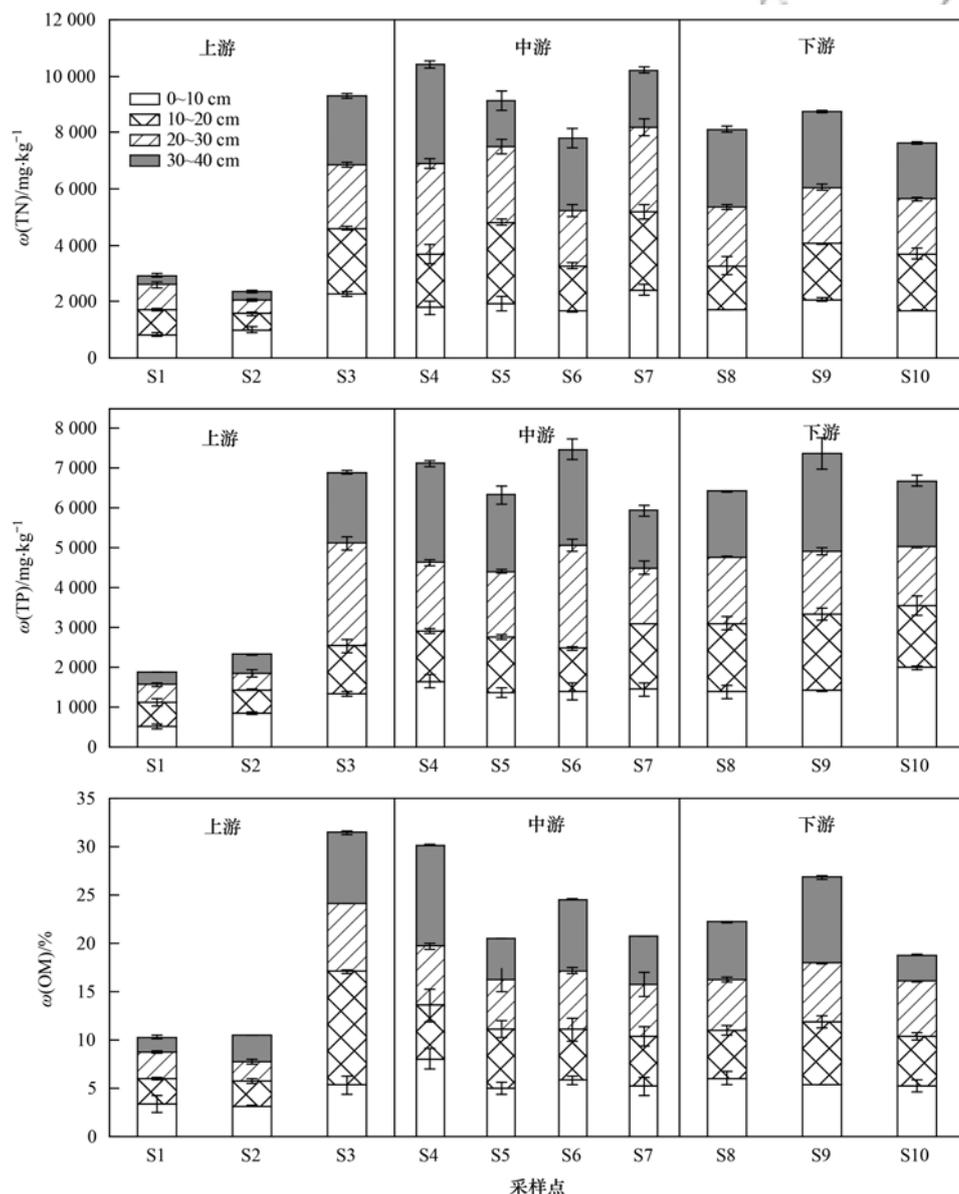


图 3 底泥中 TN、TP 和 OM 含量垂向分布

Fig. 3 Vertical distributions of TN, TP and OM in sediments

沉积污染,这可能由于周围存在稳定的外源输入.而上游采样点 S3,中游采样点 S4 和 S6,下游采样点 S10 均表现为 TN 含量随着深度的增加而增加,这可能由于近年来的截污工程降低了表层底泥的污染负荷,使表层底泥 TN 含量相对较低.中游采样点 S5 和 S7 的 TN 含量表现为随着深度增加,先增加后减少;下游采样点 S8 和 S9 的 TN 含量表现为随深度增加先减少后增加,这种垂向分布结构可能由于外秦淮河是航运型河流,常受大型航运船只的扰动影响,此外还可能受突发性污染事件的影响. TP 含量测定结果显示,上游采样点底泥 TP 和 TN 含量的垂向变化趋势相似,中游采样点 S4、S5 和 S6,下游采样点 S8 和 S9 的 TP 含量随着深度的增加而增加,中游采样点 S7 的 TP 含量随着深度增加先增加后减少,而下游采样点 S10 的表层底泥 TP 含量则高于下部底泥. OM 含量的垂向分布与 TP 类似,中下游采样点处于较高水平,而上游采样点含量较低.可能由于外秦淮河中、下游河道两侧居民区和工厂密集,有大量生活污水与工业废水排入.而上游采样点周围居民区较为稀疏,且经历过多次环保疏浚.

表 4 各点位 TN、TP 和 OM 含量均值的相关性分析¹⁾

		TN	TP	OM
TN	皮尔逊相关性	1	0.891 **	0.850 **
	Sig. (双尾)		0.001	0.002
	个案数	10	10	10
TP	皮尔逊相关性	0.891 **	1	0.875 **
	Sig. (双尾)	0.001		0.001
	个案数	10	10	10
OM	皮尔逊相关性	0.850 **	0.875 **	1
	Sig. (双尾)	0.002	0.001	
	个案数	10	10	10

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著

2.1.3 底泥营养盐污染状况

通过有机污染指数法和污染指数法对调查区域底泥的营养盐状况进行评价,结果如图 4 所示.表层底泥(0~10 cm)有机污染指数范围为 0.12~0.72,

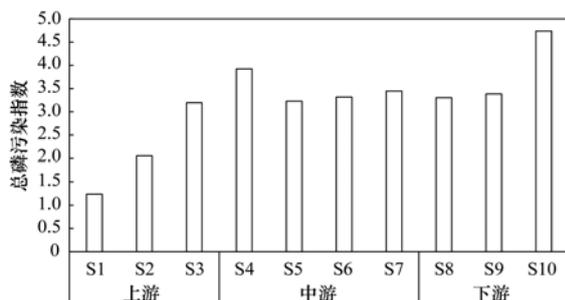


图 4 底泥中 OI 和 TP 的 PI 指数

Fig. 4 OI and PI of TP in sediments

均值为 0.48,处于尚清洁水平.其中中下游地区多处于有机污染水平.上游采样点 S1 和 S2 的有机污染指数处于最低水平.各采样点表层底泥(0~10 cm)的 TP 单项污染指数范围为 1.24~4.74,均值为 3.18,上游采样点 S1 处于中度污染,其余采样点均处于重度污染水平,这也与之前底泥的 TP 含量调查结果相对应.

2.2 模拟底泥疏浚对氮磷释放及其活性的影响

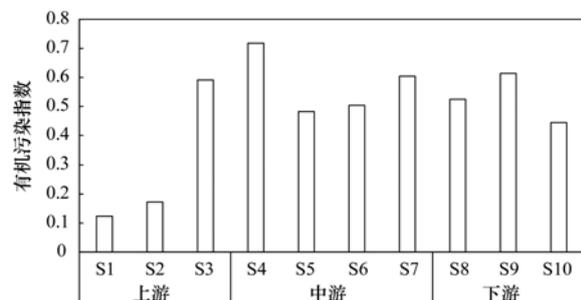
为研究外秦淮河底泥氮磷释放规律,对采集的柱状样品进行了 Peeper (平衡式间隙水技术)及 DGT (薄膜扩散梯度和高分辨率孔隙水采样)实验,以此来模拟底泥中氮磷营养元素向周围环境(上覆水和间隙水)的释放过程,并得出对应的氮磷释放速率数据.

2.2.1 平衡式间隙水采样(Peeper)结果与分析

为模拟清淤措施对底泥氮磷释放的影响,对上中下游采样点(S3、S7 和 S9)的原柱样与切泥 30 cm 后添加原水样的柱样进行 Peeper 实验,结果如图 5 所示.

由图 5 可知,清淤前上中下游间隙水的 $\rho(\text{SRP})$ 在 $0.25 \sim 1.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,均值为 $0.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较之滇池福保湾区^[38] ($0.02 \sim 0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与巢湖入湖河流十五里河^[39] ($0.39 \sim 1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)具有较高的释放风险;清淤 30 cm 后上中下游间隙水的 $\rho(\text{SRP})$ 在 $0.02 \sim 1.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,均值为 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓度较之清淤前显著降低.在柱样的垂直方向上,SRP 浓度随着深度的增加呈现先增加再减少的趋势.上游采样点清淤前后柱样分别在 1.5 cm 与 4.8 cm 深度达到峰值;中游采样点清淤前后柱样分别在 5.2 cm 和 5.6 cm 深度达到峰值;下游采样点清淤前后柱样分别在 1.6 cm 与 6.8 cm 深度达到峰值.从空间分布来看,清淤前上中下游柱样在垂向上的 SRP 浓度均值表现为:上游 > 中游 > 下游,清淤 30 cm 后,中游采样点柱样的 SRP 浓度降低最为明显.

清淤前上中下游间隙水的 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 在 1.03



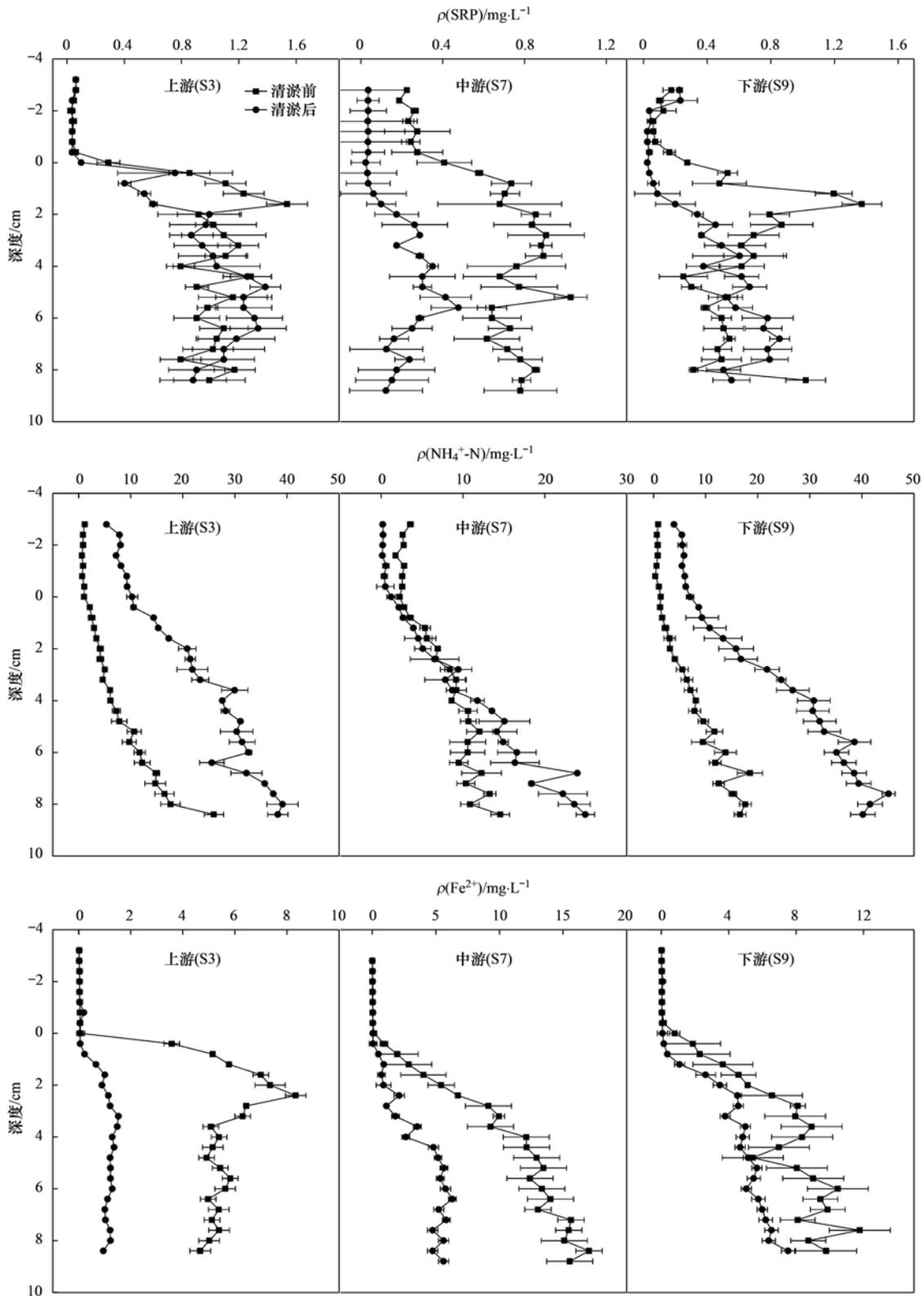


图5 清淤前后间隙水浓度

Fig. 5 Pore water concentration before and after desilting

~25.95 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值 8.68 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较之白洋淀入淀河流^[40] (5.24 ~ 10.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 与滆河^[41] (4.76 ~ 19.54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 浓度要高; 清淤 30 cm 后上中下游间隙水的 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 在 1.21 ~ 45.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值 21.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度较之清淤前显著升

高. 在柱样的垂直方向上, 各采样点的 NH_4^+-N 浓度随着深度的增加而增加, 这是由于随着深度增加, 底泥的还原性逐渐增强. 空间分布上, 清淤前上中下游柱样在垂向上的 NH_4^+-N 浓度均值接近, 清淤 30 cm 后, 中游采样点柱样的 NH_4^+-N 浓度最低.

清淤前上中下游间隙水的 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 在 $0.07 \sim 17.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值 $7.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 清淤 30 cm 后上中下游间隙水的 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 在 $0.05 \sim 7.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值 $2.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度较之清淤前显著降低. 其清淤前后浓度的变化趋势与 SRP 类似, 说明外秦淮河底泥 Fe—P 的化学键断裂可能是上覆水体磷酸盐的重要来源. 垂向上, 界面以上清淤前后浓度接近, 随着深度的进一步增加, 清淤前的 Fe^{2+} 浓度明显高于清淤之后. 空间上, 清淤前后上游采样点柱样的 Fe^{2+} 浓度最低.

表 5 清淤前后间隙水释放速率/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

Table 5 Pore water release rate before and after dredging/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

位置	SRP 释放速率		NH_4^+ -N 释放速率		Fe^{2+} 释放速率	
	清淤前	清淤 30 cm 后	清淤前	清淤 30 cm 后	清淤前	清淤 30 cm 后
上游	3.57 ± 0.53	1.83 ± 0.093	18.22 ± 3.67	26.57 ± 2.32	74.87 ± 9.34	2.88 ± 0.42
中游	0.97 ± 0.22	0.17 ± 0.016	12.72 ± 2.72	52.89 ± 6.18	42.35 ± 7.28	4.15 ± 0.79
下游	1.81 ± 0.31	1.05 ± 0.14	12.34 ± 1.96	33.95 ± 2.79	56.42 ± 6.33	6.60 ± 0.62

2.2.2 薄膜扩散梯度(DGT)结果与分析

DGT 有效态磷(DGT-P)性质较为活跃, 易释放进入间隙水, 并通过梯度扩散至上覆水体. 通过 DGT 技术得出模拟疏浚 30 cm 前后上中下游采样点(S3、S7 和 S9)柱样底泥-水界面的 DGT-P 二维分布, 结果如图 6 所示. 清淤前上中下游采样点的 $\rho(\text{DGT-P})$ 范围分别为 $0.003 \sim 4.25$ 、 $0.05 \sim 3.62$ 和 $0.03 \sim 4.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 界面以下间隙水中 $\rho(\text{DGT-P})$ 均值分别为 3.43 、 2.82 和 $3.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 上中下游采样点间隙水与上覆水 $\rho(\text{DGT-P})$ 差值分别为 3.38 、 2.78 和 $3.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 有研究表明, 间隙水与

上覆水的 DGT-P 浓度差是影响底泥与上覆水氮磷交换速率的关键因素^[43], 因此较之其余两个采样点, 中游采样点的磷酸盐释放能力较小, 与之前 Peeper 的结果相对应.

清淤 30 cm 后柱样的 DGT 分析结果显示, 上中下游采样点的 $\rho(\text{DGT-P})$ 范围分别为 $0.23 \sim 4.52$ 、 $0.001 \sim 3.46$ 和 $0.29 \sim 4.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 界面以下间隙水 $\rho(\text{DGT-P})$ 均值分别为 3.12 、 2.51 和 $2.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 间隙水中 DGT-P 浓度较之模拟疏浚前减少了 $9\% \sim 11\%$, 说明清淤能够有效削减 DGT-P 的释放.

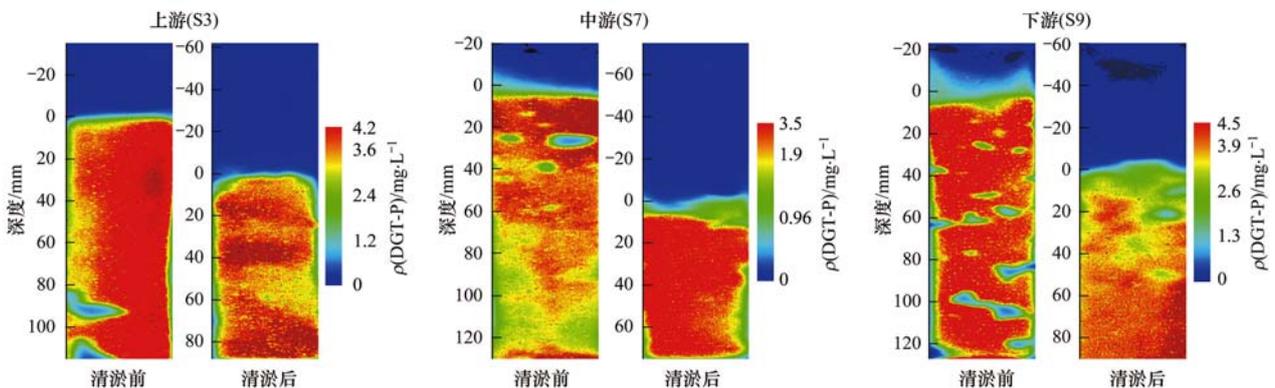


图 6 清淤前后 DGT-P 二维浓度

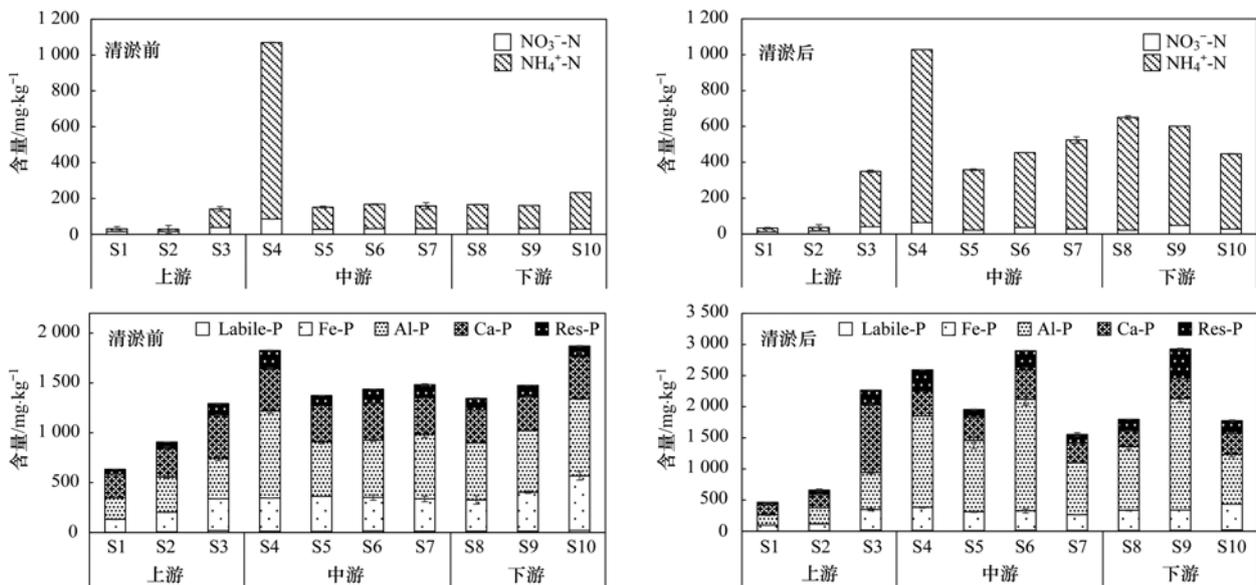
Fig. 6 Two-dimensional concentration of DGT-P before and after dredging

2.3 底泥疏浚对内源污染负荷削减及氮磷形态的影响

对模拟清淤 30 cm 前后的表层底泥进行氮形态(NH_4^+ -N、 NO_3^- -N)和磷形态(Labile-P、Fe-P、Al-P、Ca-P、Res-P、Org-P)的分析, 结果如图 7 所示. 对比可知, 模拟清淤 30 cm 后的表层泥较之清淤前的表

层底泥, NH_4^+ -N 含量显著上升, NO_3^- -N 含量下降, 这与深层底泥处于厌氧还原状况有关.

对于清淤前的磷形态, $\omega(\text{Labile-P})$ 、 $\omega(\text{Fe-P})$ 、 $\omega(\text{Al-P})$ 、 $\omega(\text{Ca-P})$ 和 $\omega(\text{Res-P})$ 均值分别为 11.61 、 3025.03 、 558.56 、 356.71 和 $112.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占 TP 的 0.8% 、 22% 、 38% 、 25% 和 7.8% ; 模拟清



Labile-P 的含量过小在图中无法显示

图7 疏浚前后表层泥氮磷形态

Fig. 7 Nitrogen and phosphorus morphology of surface mud before and after dredging

淤后 $\omega(\text{Labile-P})$ 、 $\omega(\text{Fe-P})$ 、 $\omega(\text{Al-P})$ 、 $\omega(\text{Ca-P})$ 和 $\omega(\text{Res-P})$ 均值分别为 16.84、284.16、987.81、392.57 和 212.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占 TP 的 0.8%、14%、48%、19.5% 和 10.2%。对比发现, 清淤前后, 底泥中的占比最大的磷形态为 Al-P, 此外 Fe-P 和 Ca-P 也占有较大比例, 张瑞明^[44]关于巢湖周边城市河流的研究也有类似发现。

Labile-P 是通过物理吸附与沉积物颗粒相结合的磷, 很容易释放进入上覆水体并被生物所利用^[15], 其在沉积物中含量很低。Fe-P 是指铁锰氧化物或氢氧化物与磷酸盐结合形成的磷, 其稳定性很大程度上受环境的氧化还原电位影响, 当处于缺氧还原条件下时, Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} , Fe-P 化学键断裂, 磷被释放^[45, 46]。由结果可以看出, 模拟清淤之后 Fe-P 含量降低, 这是由于随着深度的增加, 氧化还原电位降低, 环境处于还原状态, Fe-P 化学键断裂, 其含量降低。Al-P 是指铝的氧化物或氢氧化物, 以及铝土矿物与磷酸盐结合形成的磷, 当 pH 处于 5.5~9.0 之间时, Al-P 较为稳定^[47], 由汤莉莉等^[9]的研究结果可知, 枯水期外秦淮河三汊河口至秦虹桥段表层底泥的 pH 范围为 7.23~7.65, 因此 Al-P 在外秦淮河的释放潜力很小。由结果可以看出, 模拟清淤后 Al-P 较之清淤前有所升高, 这可能是由于在还原条件下 Fe-P 中的磷释放后与铝的氧化物或氢氧化物结合, 转化为更加稳定的形态。Ca-P 一般被认为是永久性磷, 性质稳定, 不易受氧化还原状况影响, 在短时间内难以参与水体磷的循环过程。

活性磷 (Mobile-P) 是底泥中生物易利用的

Labile-P、Fe-P 和 Org-P 的合称, 是评价底泥释放潜力的重要指标之一^[48], 其含量的变化如图 8 所示, 清淤前, 各采样点的 Mobile-P 含量均值占 TP 的 21%, 即 Mobile-P 占 TP 的一定比例, 具有一定的释放风险。在模拟 30 cm 清淤后, Mobile-P 含量削减了 1%~35%, 其中大多采样点的 Mobile-P 含量均有明显降低, 个别采样点如 S3 和 S8 的 Mobile-P 含量削减不明显, 由之前的底泥垂向分析结果可知, S3 和 S8 采样点底泥在深度超过 30 cm 时 TP 含量有下降趋势, 因此建议对 S3 和 S8 采样点适当增加清淤深度 (如 35 cm) 以取得较好的效果。综上所述, 清淤能够较为有效地削减 Mobile-P, 并减少其向周围水体的扩散迁移。

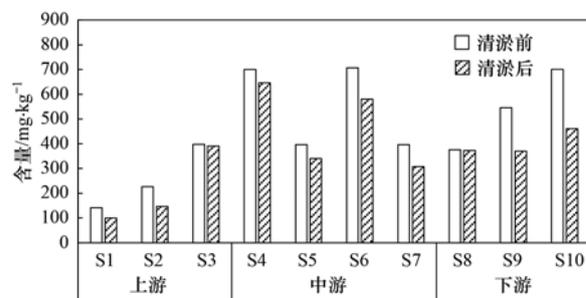


图8 疏浚前后表层底泥活性磷含量

Fig. 8 Mobile-P content of surface mud before and after dredging

3 结论

(1) 对外秦淮河重污染河道上中下游的底泥界面进行微电极分析, 结果显示, 较之国内其他河流, 外秦淮河底泥界面的溶氧处于较低水平, 是典型的城市河道污染特征体现。

(2) 0~40 cm 底泥的 TN、TP 和 OM 测定结果显示,其含量的空间分布均表现为:中游 > 下游 > 上游. 根据美国环境保护署(EPA)制定的沉积物污染评价标准,调查区域表层底泥 TN 和 TP 分别处于中度污染和重度污染水平; OM 相比于国内其他河流亦处于较高水平. 有机污染指数和总磷污染指数评价结果分别为尚清洁水平和重度污染水平.

(3) 调查区域上中下游采样点(S3、S7 和 S9)底泥均表现为 SRP 和 NH_4^+ -N 释放源. Peeper 结果显示,相比于国内其他河流,外秦淮河间隙水氮磷浓度较高,释放风险较大. 清淤 30 cm 后,间隙水的 SRP 和 Fe^{2+} 浓度均有下降,而 NH_4^+ -N 浓度则有所增加. SRP 与 Fe^{2+} 的释放速率较清淤前分别削减 42%~82% 和 88%~96%,而 NH_4^+ -N 的释放速率较之清淤前均有提高. 说明清淤能够有效控制表层底泥内源磷的释放. DGT-P 分析结果显示,清淤 30 cm 后上中下游采样点间隙水中 DGT-P 浓度较清淤前削减 9%~11%,也验证了清淤措施的可行性.

(4) 调查区域表层底泥的氮磷形态分析结果显示, NH_4^+ -N 为底泥中氮的主要形态,清淤后底泥中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量分别呈增加和减少趋势. Al-P 为磷的主要结合形态,其次为 Ca-P 和 Fe-P. 模拟 30 cm 清淤后,表层底泥的 Mobile-P 含量较之清淤前削减了 1%~35%,说明清淤能够较为有效削减底泥中的 Mobile-P,减少其向间隙水及上覆水的扩散.

参考文献:

- [1] 孙铭. 河流底泥氮磷释放规律及其对环境清淤的影响研究——以南淝河为例[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
Sun M. Study on the nitrogen and phosphorus release of river's sediment and the affect on the ecodredging—as the case of Nanfeihe River [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [2] 荣楠,周道坤,郭灿斌,等. 不同释放模式下网湖沉积物氮磷释放通量估算[J]. 环境科学学报,2022,42(5): 345-354.
Rong N, Zhou D K, Guo C B, et al. Estimation of nitrogen and phosphorus release fluxes from sediments of the Wanghu Lake under different release modes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(5): 345-354.
- [3] 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.
- [4] 杨盼,杨春晖,马鑫雨,等. 巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策[J]. 环境科学,2021,42(2): 712-722.
Yang P, Yang C H, Ma X Y, et al. Sediment pollution characteristics and dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 712-722.
- [5] 张肖静,位登辉,张红丽,等. 城市河道底泥中微生物组成及其转化氮、硫污染物的潜力[J]. 环境污染与防治,2022,44(4): 425-430.
Zhang X J, Wei D H, Zhang H L, et al. Microbial composition in sediment of urban river channel and its potential to transform nitrogen and sulfur pollutants [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(4): 425-430.
- [6] Wang Y, Liu H, Zhang W, et al. Improvement of physicochemical properties in dredging areas of Dianchi Lake [A]. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials (CEAM 2012) [C]. Guangzhou, 2012. 1952-1956.
- [7] 贾海峰,马洪涛. 城市河湖底泥疏浚对水生态的影响分析及对策探讨[J]. 北京水务,2006,(1): 48-51.
Jia H F, Ma H T. Analysis and discussion on aquatic ecological impact of urban water systems' sediment dredging [J]. Beijing Water, 2006, (1): 48-51.
- [8] 童朝锋,吕立锐,冯骞,等. 基于改进的模糊数学评价法的外秦淮河水水质评价[J]. 水资源保护,2014,30(4): 61-66.
Tong C F, Lyu L R, Feng Q, et al. Evaluation of water quality in external Qinhuai River based on improved fuzzy mathematical method [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(4): 61-66.
- [9] 汤莉莉,牛生杰,徐建强,等. 外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(3): 424-430.
Tang L L, Niu S J, Xu J Q, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metal in sediment of Qinhuai River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 424-430.
- [10] 许兴武,沃玉报,胡阳,等. 秦淮河水水质改善现场调水试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6): 492-496.
Xu X W, Wo Y B, Hu Y, et al. Field water diversion tests of water quality improvement in Qinhuai River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 492-496.
- [11] 沈乐,龚来存,郭红丽. 秦淮河入江段污染状况及其对长江污染的影响[J]. 水利经济,2012,30(6): 51-54.
Shen L, Gong L C, Guo H L. Pollution status in exit reach of Qinhuai River and its influence on water resources of Yangtze River [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012, 30(6): 51-54.
- [12] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [13] 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.
- [14] Psenner R, Puckso R. Phosphorus fractionation: Advantages and limits of the method for the study of sediment P origins and interactions [J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1988, 30: 43-59.
- [15] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Davison W, Zhang H. In situ speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels [J]. Nature, 1994, 367(6463): 546-548.
- [19] 王艳平,关庆伟,李超,等. 巢湖沉积物有效态磷与硫的

- DGT 原位同步分析研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2512-2518.
- Wang Y P, Guan Q W, Li C, *et al.* A study of *in situ* synchronous measurement of available phosphorus and sulfur in the sediments of lake Chaohu by diffusive gradients in thin films (DGT) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2512-2518.
- [20] Xu D, Wu W, Ding S M, *et al.* A high-resolution dialysis technique for rapid determination of dissolved reactive phosphate and ferrous iron in pore water of sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 245-252.
- [21] 王书锦, 刘云根, 张超, 等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 69-77.
- Wang S J, Liu Y G, Zhang C, *et al.* Distribution and pollution risk assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in inlet rivers of Erhai Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(1): 69-77.
- [22] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- Miao H, Shen Z, Jiang Y, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- [23] 蒋艳, 彭期冬, 骆辉煌, 等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. 水利学报, 2011, **42**(11): 1283-1288.
- Jiang Y, Peng Q D, Luo H H, *et al.* Analysis of spatial and temporal variation of water quality in Huaihe River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(11): 1283-1288.
- [24] 王话翔, 初晓冶, 陈莹, 等. 特大城市地表水环境溶解氧时空分布特征探究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020, (6): 154-163.
- Wang H X, Chu X Y, Chen Y, *et al.* A study on temporal and spatial distribution characteristics of dissolved oxygen in surface water of megacities[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2020, (6): 154-163.
- [25] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 961-968.
- Yu H, Zhang W B, Lu S Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 961-968.
- [26] 王晓锋, 袁兴中, 刘红, 等. 三峡库区梁滩河水体营养盐时空分布及输出风险[J]. 三峡生态环境监测, 2017, **2**(1): 21-27.
- Wang X F, Yuan X Z, Liu H, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and output risk in Liangtan River, Three Gorges Reservoir[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2017, **2**(1): 21-27.
- [27] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 393-398.
- Lu S Y, Xu M S, Jin X C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 393-398.
- [28] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 221-225.
- [29] Ding-Sie T, Appan A. General characteristics and fractions of phosphorus in aquatic sediments of two tropical reservoirs [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(7-8): 53-59.
- [30] 顾强. 苏州河水环境质量变化特征及其黑臭风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- Gu Q. Analysis on water quality characteristics and black-odor assessment of the Suzhou Creek [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [31] 卢少勇, 远野, 金相灿, 等. 7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- Lu S Y, Yuan Y, Jin X C, *et al.* Speciation distribution of nitrogen in sediments of 7 rivers around Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- [32] 王志齐, 李宝, 胡向辉, 等. 南四湖沉积物氮磷和有机质分布特征及其相关性分析[J]. 土壤通报, 2013, **44**(4): 867-874.
- Wang Z Q, Li B, Hu X H, *et al.* Distribution characteristics of nitrogen, phosphorus, organic matter and their correlation analyses in the sediments of Nansi Lake, China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(4): 867-874.
- [33] Bai J H, Cui B S, Chen B, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from a typical plateau lake wetland, China [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(2): 301-306.
- [34] 苏鑫. 小清河表层沉积物营养元素和重金属分布特征及风险评估研究[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- Su X. Distribution Characteristics and risk assessment of nutrient elements and heavy metals in surface sediment of Xiaoqing River [D]. Jinan: University of Jinan, 2021.
- [35] 迟明慧, 秦延文, 杨晨晨, 等. 潮白河中游沉积物氮磷和有机质分布特征及评价[J]. 地学前缘, 2022, **29**(4): 448-454.
- Chi M H, Qin Y W, Yang C C, *et al.* Distribution and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of the middle reaches of Chaobai River [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, **29**(4): 448-454.
- [36] 刘旭, 崔康平, 吴玉杰, 等. 南淝河沉积物污染特征及评价研究[J]. 环境科学与管理, 2015, **40**(6): 26-30.
- Liu X, Cui K P, Wu Y J, *et al.* Characteristics and evaluation of sediments pollution in Nanfei River [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, **40**(6): 26-30.
- [37] 向爱农, 苏甜, 刘方平, 等. 抚河故支河道沉积物污染物分布特征及污染评价[J]. 中国农村水利水电, 2020, (10): 117-120.
- Xiang A N, Su T, Liu F P, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of sediment pollutants in the old branch of Fuhe River [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (10): 117-120.
- [38] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 114-120.
- Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 114-120.
- [39] 李如忠, 李峰, 周爱佳. 巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3014-3023.
- Li R Z, Li F, Zhou A J. Sediment and Pore Water nutrient characteristics in growing zones of *alternanthera philoxeroides* in the Shiwuli River, Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3014-3023.
- [40] 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 等. 白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析[J]. 环境科学,

- 2021, **42**(7): 3176-3185.
- Zhang T N, Zhou S L, Chen Z Y, *et al.* Analysis of water quality and exchange flux of interstitial water-overlying water in sediments of Baiyangdian entrance area in summer [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3176-3185.
- [41] 郭伟强, 宋进喜, 刘琪, 等. 潘河冬季潜流带水交换对沉积物间隙水水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(5): 1957-1967.
- Guo W Q, Song J X, Liu Q, *et al.* Influence of hyporheic water exchange on quality of sediment pore water for the Juehe River in winter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(5): 1957-1967.
- [42] 申秋实, 周麒麟, 邵世光, 等. 太湖草源性“湖泛”水域沉积物营养盐释放估算[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 177-184.
- Shen Q S, Zhou Q L, Shao S G, *et al.* Estimation of in-situ sediment nutrients release at the submerged plant induced black bloom area in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(2): 177-184.
- [43] 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 等. 基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2527-2536.
- Ma Y S, Zhu X, Pang Q Q, *et al.* Sediment release and pollution source analysis of typical reservoirs in the upper reaches of the Yellow River based on DGT technology[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2527-2536.
- [44] 张瑞明. 巢湖主要入湖河流沉积物磷赋存特征及其环境意义[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- Zhang R M. Phosphorus speciation and its environmental significance in sediments of major rivers in Chaohu Lake watershed, China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [45] Schulz S, Conrad R. Influence of temperature on pathways to methane production in the permanently cold profundal sediment of Lake Constance[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 1996, **20**(1): 1-14.
- [46] 闫兴成, 王明玥, 许晓光, 等. 富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 306-313.
- Yan X C, Wang M Y, Xu X G, *et al.* Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 306-313.
- [47] Huser B J, Rydin E. Phosphorus inactivation by aluminum in Lakes Gårdsjön and Harsvatten sediment during the industrial acidification period in Sweden[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, **62**(8): 1702-1709.
- [48] 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 J 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.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrotriazole (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)