

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
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	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险

刘永九^{1,2}, 黄素珍^{2,3}, 张璐², 彭雪^{2,3}, 张心怡^{2,3}, 葛芳杰², 刘碧云^{2*}, 吴振斌^{1,2}

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 洪湖国际重要湿地沉积物磷不同空间分布研究发现, 洪湖入湖口沉积物 TP 含量范围为 781.31 ~ 1 955.84 mg·kg⁻¹, 平均值为 (1 287.21 ± 437.28) mg·kg⁻¹; 湖区沉积物 TP 含量范围为 438.33 ~ 1 554.04 mg·kg⁻¹, 平均值 (718.10 ± 238.15) mg·kg⁻¹. 入湖口沉积物 TP 含量显著高于湖区沉积物 ($P < 0.05$), 养殖围垸沉积物 TP 含量高于湖面沉积物, 但无显著差异 ($P > 0.05$). 湖区西北和东北区域沉积物 TP 含量高于西南区域, 四湖总干渠入湖口沉积物 TP 显著高于螺山干渠入湖口 ($P < 0.05$), 四湖总干渠磷输入可能是洪湖沉积物磷主要来源. 洪湖不同类型采样点的沉积物磷形态组成存在显著差异, 入湖口沉积物磷形态以 Fe/Al-P 和 Ca-P 为主, 而湖面沉积物以 OP 和 Ca-P 为主, 空间磷形态组成变化与人类活动影响和水生植物分布有关. 通过沉积物 Fe/Al-P 和 OP 估算沉积物生物有效磷 (BAP) 含量, 以 BAP 占 TP 比例来估算洪湖沉积物磷释放风险, BAP/TP 为 39.8% ~ 69%, 均值为 (56.5 ± 7.23)%, 存在较高的磷释放风险. OP 和 BAP 与上覆水 TP 显著相关 ($P < 0.01$), BAP 与上覆水正磷酸盐相关性最高, 表明上覆水磷浓度可能与沉积物 Fe/Al-P 和 OP 向上覆水释放有关.

关键词: 洪湖湿地; 沉积物; 磷形态; 生物有效磷; 释放风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3198-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009090

Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland

LIU Yong-jiu^{1,2}, HUANG Su-zhen^{2,3}, ZHANG Lu², PENG Xue^{2,3}, ZHANG Xin-yi^{2,3}, GE Fang-jie², LIU Bi-yun^{2*}, WU Zhen-bin^{1,2}

(1. School of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to a spatial distribution analysis of phosphorus in sediments from Honghu Wetland, it was found that TP content in sediments at the mouth of Honghu Lake was 781.31-1 955.84 mg·kg⁻¹ and the average value was (1 287.21 ± 437.28) mg·kg⁻¹. TP content in sediments in the open water area was 438.33-1 554.04 mg·kg⁻¹, with an average value of (718.10 ± 238.15) mg·kg⁻¹. The TP content of sediments in lake inlet was significantly higher than that of sediments in the open water area ($P < 0.05$), and that in the enclosed aquaculture was higher than in the open water area, although no significant difference was observed ($P > 0.05$). The TP content of sediments to the northwest and northeast of Honghu Lake was higher than that to the southwest of Honghu Lake, and the TP content of sediments in The Four-lake main canal was significantly higher than that of Luoshan main canal ($P < 0.05$). The phosphorus input in the Four-lake main canal may be the main source of phosphorus in Honghu Lake sediments. The phosphorus fraction composition in sediments from different sampling sites were significantly different. Fe/Al-P and Ca-P were the main forms of phosphorus in sediments from the lake inlet, while OP and Ca-P were the main forms of phosphorus in sediments from the open water area. The variation in spatial phosphorus form composition was related to the influence of human activity and the distribution of aquatic plants. Fe/Al-P and OP contents were used to estimate the content of biological available phosphorus (BAP) in evaluated sediments, and the proportion of BAP in TP was used to estimate the risk of phosphorus release in Honghu sediments. BAP/TP was 39.8% - 69%, with an average of (56.5 ± 7.23)%, indicating a high risk of phosphorus release. OP and BAP were significantly correlated with TP in overlying water ($P < 0.01$), and the correlation between BAP and phosphate in the overlying water was the highest. The results showed that phosphorus concentration in the overlying water may be related to the release of Fe/Al-P and OP into water bodies.

Key words: Honghu Lake; sediments; phosphorus fractions; bioavailable phosphorus; release risk

洪湖国际重要湿地 (29°38' ~ 29°59'N, 113°11' ~ 113°28'E) 位于湖北省南部的洪湖市与监利县之间, 长江与东荆河之间的洼地中, 2018 年面积为 348.33 km², 是中国第七大淡水湖泊^[1]. 洪湖原为与长江相连的吞吐型湖泊, 20 世纪 50 年代以来, 洪湖兴建各种水利工程, 如四湖总干渠和螺山干渠的围堤已经将洪湖与周围环境分隔开, 洪湖逐渐成为了

受人为控制的半封闭型湖泊. 20 世纪 90 年代以来洪湖围垸围网水产养殖持续扩大, 水产养殖区占据

收稿日期: 2020-09-09; 修订日期: 2020-12-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (31830013); 淡水生态与生物技术国家重点实验室项目 (2017FB05)

作者简介: 刘永九 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生生态修复, E-mail: 1286651855@qq.com

* 通信作者, E-mail: liuby@ihb.ac.cn

洪湖大部分水域面积,同时大量农业面源、生产、生活污水通过四湖总干渠和螺山干渠汇入洪湖. 长期的大面积围网和围垸养殖区以及入湖污染输入导致近些年来洪湖水质持续恶化,水生态退化,对洪湖湿地水环境和水生态造成了重要影响. 按照地表水环境质量标准(GB 3838-2002),洪湖水质现状整体为Ⅳ类,部分区域为Ⅴ类,沉水植物逐渐衰退,水生植物多样性在减少^[2,3].

磷作为影响湖泊富营养化的关键因子之一,外源输入的磷进入湖泊生态系统可以与悬浮颗粒物结合沉积到沉积物中,在一定条件下沉积物富集的磷又会向上覆水释放,外源磷的输入和沉积物磷的内源释放是水体磷含量主要来源^[4,5]. 在外部污染得到有效控制后,沉积物磷的内源释放显著影响水体磷含量并可能加速水体富营养化^[6~8]. 洪湖作为四湖总干渠受纳水体以及曾经大面积水产养殖水体,其沉积物磷形态空间分布格局研究还未见报道. 本研究通过实地调查,在洪湖湿地不同区域,包括入湖口、不同年限围垸养殖区和湖面区域分别设置采样

点,分析洪湖不同区域沉积物各形态磷含量和组成的空间变化,探讨洪湖湿地沉积物磷格局的成因及内源磷释放风险,以期为洪湖后期水生态修复及洪湖湖泊管理提供理论依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点设置及样品预处理

根据洪湖湿地的入湖支流,不同年限的围垸布局,结合湿地不同功能区域功能特点,共设置 37 个采样点(如图 1),其中入湖口采样点 9 个(R1 ~ R9),湖区采样点 28 个,湖区采样点按区域分为围垸采样点(W1 ~ W9)和湖面采样点(H1 ~ H19),根据围垸形成时间选取 3 个不同时长水产养殖围垸共设置 9 个围垸采样点,其中 W4、W5 和 W6 所处围垸形成时间最长(1996 年以前形成),W1、W2 和 W3 所处围垸形成时间次之(1996 ~ 2005 年形成),W7、W8 和 W9 所处围垸形成时间最短(2005 ~ 2014 年形成). 2019 年 9 月使用彼德森采泥器采集沉积物样品,将沉积物样混合均匀后,保存于塑料袋

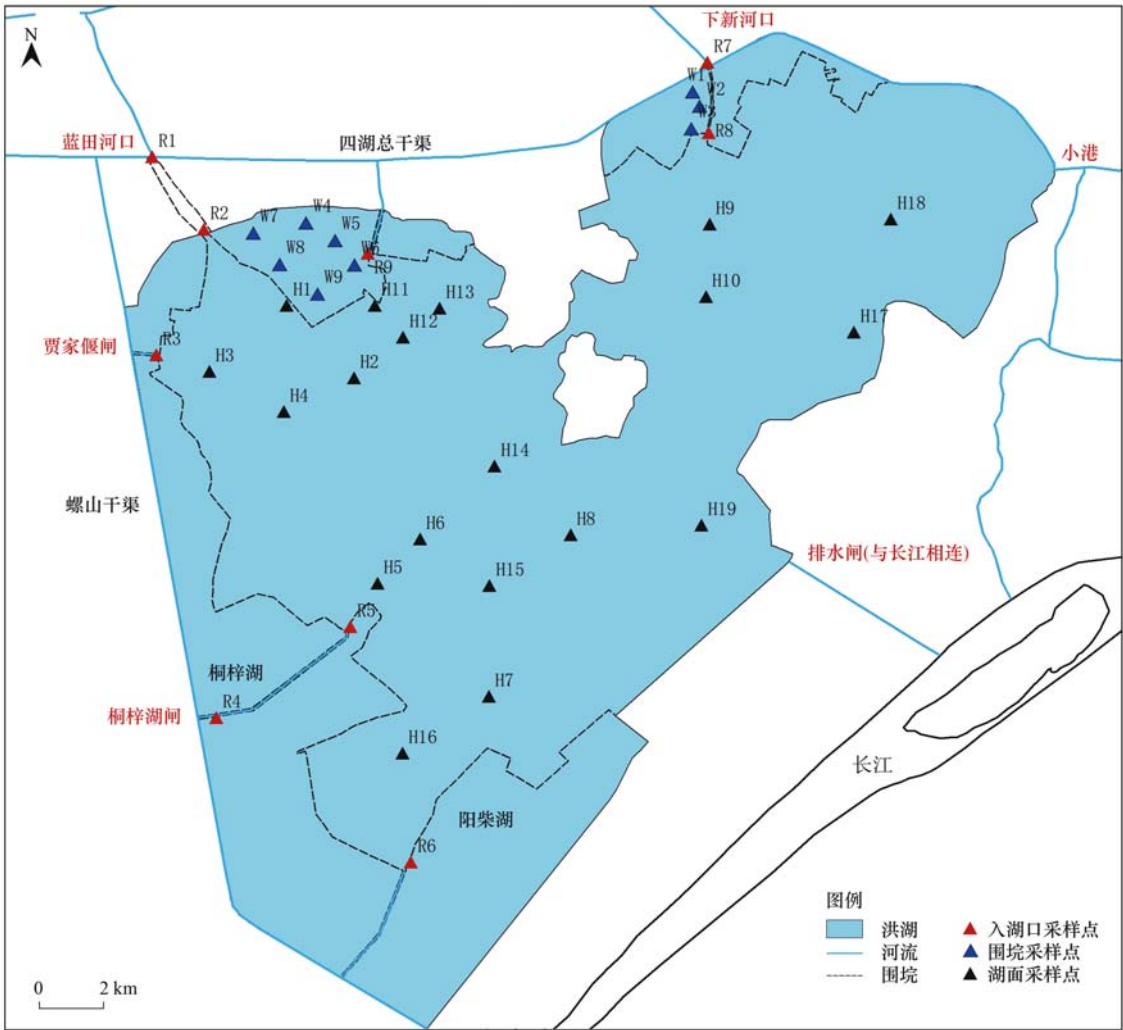


图 1 洪湖采样点分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites in Honghu Lake

中,同时采集上覆水水样,并尽快运回实验室处理分析.所有沉积物样品使用冷冻干燥仪干燥 48 h 后,剔除沉积物中动植物残体,研磨过 100 目筛,置于干燥皿中保存待测.

1.2 样品分析

水样测试指标包括 TP 和正磷酸盐,采用钼酸铵分光光度法测定相关指标^[9].沉积物各形态磷测定采用欧洲标准测试委员会 SMT 分级提取法进行测定,该方法将沉积物磷形态划分为总磷(TP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)和有机磷(OP),不同形态磷经分级提取后取上清液,采用钼酸铵分光光度法测定上清液磷浓度^[10],沉积物有机质测定采用灼烧减量法测定.

1.3 数据处理与分析方法

使用 Excel 和 Origin 软件进行测定数据的处理及图表的绘制,使用 ArcGis 10.2 软件进行采样点位图的绘制与各形态磷含量的空间插值分析,使用 SPSS 19 对数据进行统计和显著性分析,采用 Pearson 相关性系数对各形态磷进行相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 沉积物各形态磷空间变化

洪湖入湖口沉积物 TP 含量范围为 781.31 ~ 1 955.84 mg·kg⁻¹,平均值为 (1 287.21 ± 437.28) mg·kg⁻¹.洪湖湖区(围垸和湖面)TP 含量范围为 438.33 ~ 1 554.04 mg·kg⁻¹,平均值 (718.10 ± 238.15) mg·kg⁻¹.洪湖与长江中下游大型浅水淡水湖泊沉积物 TP 含量见表 1,将洪湖湖区沉积物 TP 含量与同类型大型浅水湖泊相比较,其最高值与巢湖接近,高于太湖等其它 4 个湖泊.根据加拿大安大略省沉积物质量评估指南:TP 含量小于 600 mg·kg⁻¹为安全水平,600 ~ 2 000 mg·kg⁻¹为中度污染水平,高于 2 000 mg·kg⁻¹为重度污染水平^[16].洪湖沉积物 TP 含量整体属于中度污染水平.将洪湖沉积物各形态磷做克里金插值分析,反映洪湖沉积物磷形态含量空间变化见图 2,可以看出洪湖湖心区域沉积物 TP 含量为安全水平,其他区域均为中度污染水平.四湖总干渠入湖口 TP 含量显著高于螺山干渠入湖口 ($P < 0.05$),洪湖西北区域和东北区域沉积物 TP 含量要高于西南区域.不同类型采样点沉积物磷形态箱线图见图 3,入湖口沉积物 TP 含量显著高于湖区沉积物 ($P < 0.05$),湖区中围垸沉积物 TP 含量含高于湖面区域,但无显著性差异 ($P > 0.05$).从入湖口向湖心方向沉积物 TP 含量呈减小趋势,洪湖作为一个半封闭湖泊,四湖流域的来水主要通过四湖总干渠和螺山干渠进入洪湖,入湖

后流速降低,来水携带营养盐在入湖口沉积,导致各入湖口沉积物磷含量较高.围垸区域沉积物 TP 含量与围垸形成时长无关,洪湖围垸水产养殖活动对沉积物磷含量的影响不明显.

表 1 洪湖与长江中下游大型浅水湖泊沉积物

TP 含量比较/mg·kg⁻¹

Table 1 Comparison of TP content in sediments from Honghu Lake and large shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River/mg·kg⁻¹

湖泊	TP 范围	TP 均值
太湖	382.6 ~ 1 314.4	523.8 ^[11]
巢湖	272 ~ 1 574	841 ^[12]
洞庭湖	466 ~ 869	703 ^[13]
鄱阳湖	544.76 ~ 932.11	709.17 ^[14]
洪泽湖	630.6 ~ 1 403.4	974.2 ^[15]
洪湖	438.33 ~ 1 554.04	718.10

入湖口采样点 IP 含量显著高于湖区采样点 ($P < 0.05$),围垸采样点 IP 含量高于湖面采样点,但无显著差异 ($P > 0.05$).Fe/Al-P 和 Ca-P 为 IP 主要组成成分.

Fe/Al-P 主要指由 Fe 和 Al 等氢氧化物和氧化物所吸附结合的磷,沉积物 Fe/Al-P 累积与工业和生活污水排放密切相关,研究表明沉积物中 Fe/Al-P 可以作为指示工业和生活污水中磷输入的良好指标^[17,18].从图 3 可以看出入湖口采样点 Fe/Al-P 含量显著高于湖区采样点 ($P < 0.05$),围垸采样点 Fe/Al-P 含量总体上要高于湖面采样点,但无显著性差异 ($P > 0.05$).从图 2 可以看出,洪湖沉积物 Fe/Al-P 含量由入湖口区域向湖心区域呈现下降趋势,其中洪湖西北部和东北部的 Fe/Al-P 含量要高于其他区域.R1、R7 和 R9 是四湖总干渠进入洪湖的主要入水口,四湖总干渠来水经由蓝田河口和下新河口等进入洪湖.相关研究报道四湖总干渠的来水磷负荷占据外源进入洪湖磷负荷的 63%^[19].入湖口采样点中,四湖总干渠入湖口的沉积物 Fe/Al-P 含量显著高于螺山干渠入湖口 ($P < 0.05$).洪湖围垸水产养殖活动可能使沉积物 Fe/Al-P 含量升高,但对洪湖沉积物 Fe/Al-P 含量影响不显著,推测四湖总干渠上游来水磷负荷输入是影响洪湖沉积物 Fe/Al-P 含量的主要原因.

Ca-P 主要是由变质岩或岩浆岩碎屑态磷灰石等陆源输入形成的一种沉积磷,是一种稳定态磷,由沉积物向上覆水释放的可能性较小.有研究表明河口附近和人为干扰导致磷输入较高的区域沉积物 Ca-P 的含量通常较高,沉积物 Ca-P 一定程度能反映区域土地水土流失情况^[20,21].从图 3 可以看出入湖口采样点 Ca-P 含量显著高于湖区采样点 ($P <$

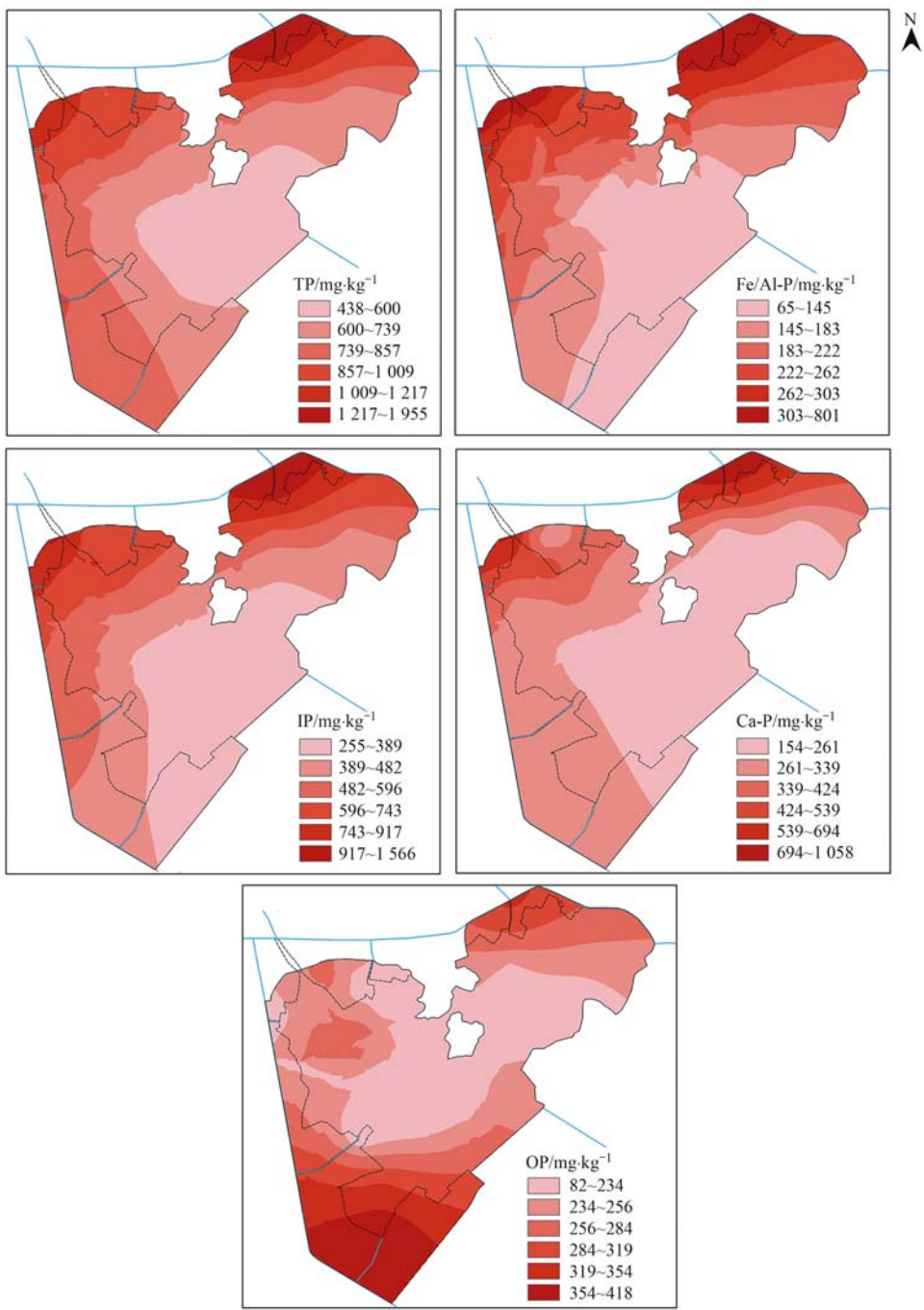


图2 洪湖沉积物各形态磷空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of phosphorus fractions in Honghu Lake sediment

0.05),围垸采样点 Ca-P 含量高于湖面采样点,但无显著性差异($P>0.05$).从图2可以看出,四湖总干渠的入湖口区域沉积物 Ca-P 含量最高,而其他区域沉积物 Ca-P 含量差异较小.洪湖流域范围较大,承接上游四湖流域的来水,春夏季雨水充沛,水土流失严重,导致地表径流带入大量陆源颗粒态的磷,随洪湖各入湖口河流汇入洪湖,这可能是洪湖沉积物 Ca-P 主要来源.而围垸所处区域靠近入湖口,这可能是围垸沉积物 Ca-P 含量高于湖面的原因.洪湖水体 pH 偏碱性,促进上覆水中钙离子生成碳酸钙沉淀在沉积物中,这些活性钙容易吸附上覆水中磷酸

盐形成 Ca-P,导致在人为磷输入较高的入湖口区域沉积物中 Ca-P 含量比较高^[22,23].
沉积物中的 OP 一般认为来自水生动植物残体和农业面源污染,沉积物中部分 OP 为不稳态磷,容易随沉积物有机物的分解矿化转化成无机磷向上覆水释放^[24].从图3可以看出不同类型采样点沉积物 OP 含量无显著性差异($P>0.05$).洪湖沉积物有机质含量(质量分数,下同)范围为 2.57%~21.67%,洪湖沉积物有机质含量空间差异较大,湖区沉积物有机质含量 $[(9.23\pm 3.58)\%]$ 显著高于入湖口 $[(5.30\pm 2.39)\%,P<0.05]$,这与湖区沉积物发现

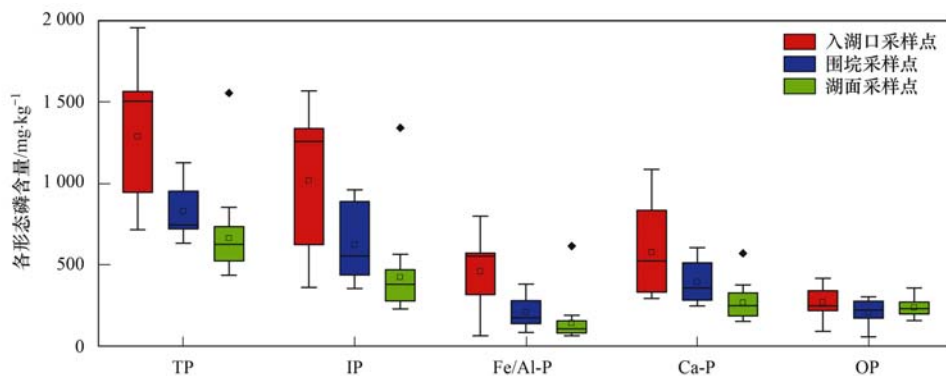


图3 不同类型采样点沉积物磷形态箱线图

Fig. 3 Phosphorus box diagram of surface sediments from the different sampling sites

大量水生植物残体相符合. 根据采样点水生植物调查情况, 曾经水生植物分布区(R6、H2、H4、H5和H16)沉积物OP含量显著高于其他采样点, 其采样点有机质含量也显著高于其他采样点沉积物($P < 0.05$), 推测与水生植物衰败残体进入有关. 由图2可以看出, 洪湖西南区域沉积物OP含量相对较高. 西南区域阳柴湖附近分布有大面积的水生植物, 又是洪湖湿地重要的水鸟栖息地^[25], 鸟粪作为天然有机肥一般富含有机态磷, 这可能是该区域OP含量相对其他区域较高的原因. 洪湖周围土地类型多为耕地, 推测入湖口沉积物OP来源可能与洪湖周围农业面源污染有关, 而湖区沉积物OP可能更多来自水生植物的残体.

各采样点沉积物IP占TP质量分数范围为46.5%~93.8%, 平均值为 $(68.3 \pm 13.01)\%$; Fe/Al-P占TP质量分数范围为8.4%~50.5%, 平均值为 $(24.7 \pm 10.18)\%$; Ca-P占TP质量分数范围为33.6%~55.6%, 平均值为 $(42.8 \pm 6.67)\%$; OP占TP质量分数范围为6.2%~53.5%, 平均值为 $(31.7 \pm 13.01)\%$. 洪湖不同类型采样点沉积物磷形态占比箱线图如图4所示, 洪湖不同类型采样点沉积物各形态磷占TP比例存在显著差异. 入湖口沉积物Fe/Al-P/TP显著高于湖区采样点($P < 0.05$), 湖面沉积物OP/TP显著高于入湖口沉积物($P < 0.05$), 各类型采样点沉积物Ca-P/TP无显著差异($P > 0.05$). 入湖口沉积物磷形态以Fe/Al-P和Ca-P为主, 而湖区沉积物磷形态以OP和Ca-P为主. 各采样点沉积物磷形态组成变化主要表现在Fe/Al-P和OP的占比变化, 结合对洪湖沉积物各形态磷含量特征分析, 这与洪湖上游来水输入和水生植物分布有关. 入湖口沉积物磷形态中Fe/Al-P占比较大; 湖区受Fe/Al-P占比相对较小. 春夏季沉水植物生长会利用沉积物中的Fe/Al-P, 使沉积物Fe/Al-P降低^[26]. 当沉水植物衰败进入沉积物后, 植物残体又

会成为OP的重要来源之一.

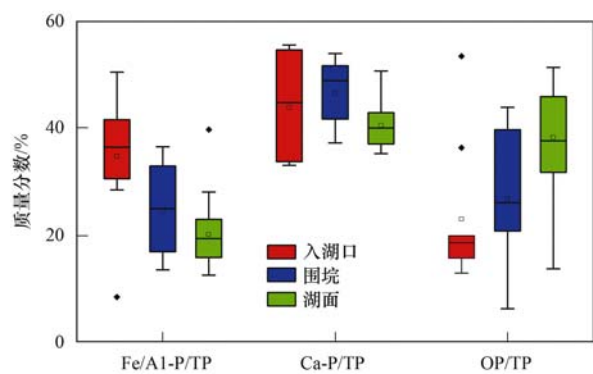


图4 洪湖不同类型采样点沉积物磷形态占比箱线图

Fig. 4 Box diagram of the proportions of phosphorus forms in sediments from different sampling sites in Honghu Lake

2.2 沉积物生物有效磷及磷释放风险

BAP是指沉积物中潜在可被水生生物直接利用的活性磷, 能以溶解态的磷酸盐释放出来, 并被水生生物所利用的那部分磷的含量^[27]. 关于BAP界定目前还没有统一的标准, Ca-P不容易水解矿化, 是一种较稳定的磷形态, 通常被认为是不被生物所利用的磷形态, Fe/Al-P作为一种活性磷可直接被水生生物利用, OP作为沉积物中磷和有机质的重要组成部分, 其在微生物和磷酸酶的作用下可以转化为生物活性磷, 并向上覆水释放被水生生物所利用, 相关研究将Fe/Al-P和OP视作为BAP^[28,29]. 由于BAP容易向上覆水释放导致上覆水磷含量升高, 以BAP占TP的比例可以初步评价沉积物磷的释放风险^[30]. 洪湖沉积物BAP空间分布见图5, 洪湖各采样点沉积物BAP含量范围为253.58~1050.89 mg·kg⁻¹, 平均值为 (476.40 ± 207.28) mg·kg⁻¹. 入湖口沉积物BAP含量显著高于湖区采样点($P < 0.05$), 围垸采样点沉积物BAP含量与湖面采样点无显著性差异($P > 0.05$). 入湖口BAP以Fe/Al-P为主, 而湖面BAP主要以OP为主, 表明入湖口沉积物磷释放风险主要来自Fe/Al-P向水体释放, 而

湖面沉积物磷释放风险主要来自 OP 矿化分解,而围垸沉积物磷释放风险与所处区域有关. BAP 占 TP 质量分数范围为 39.8%~69%,平均值为(56.5±7.2)%,表明洪湖沉积物容易向上覆水释放磷占

TP 比例较高,存在较高的磷释放风险,洪湖沉积物磷释放风险空间变化的克里金插值图见图 6,可以看出洪湖西南区域沉积物磷释放风险要高于其他区域.

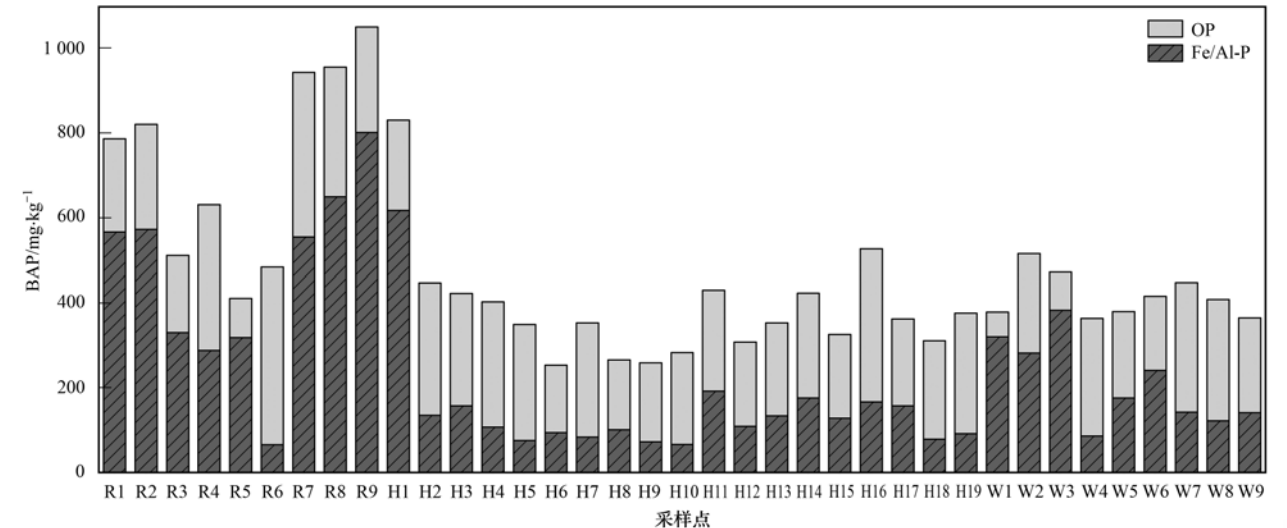


图 5 洪湖沉积物 BAP 空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of BAP in Honghu Lake sediment

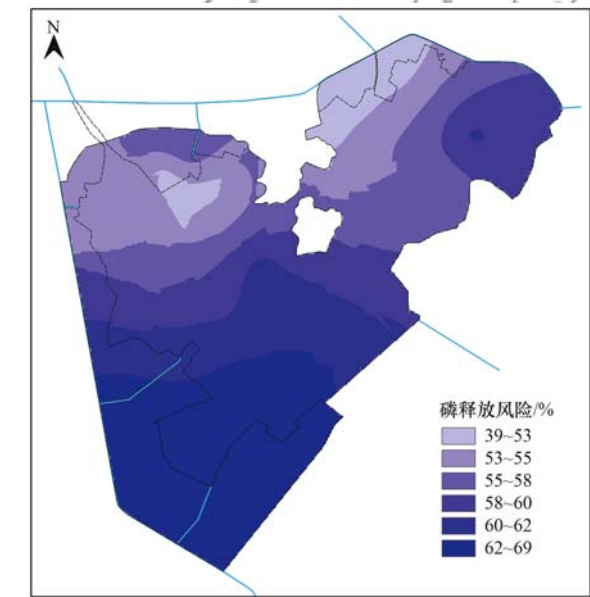


图 6 洪湖沉积物磷释放风险空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of phosphorus release risk in Honghu Lake sediment

2.3 沉积物磷形态和上覆水磷相关性分析

洪湖上覆水 TP 浓度范围为 0.042~0.211 mg·L⁻¹,平均值为(0.076±0.035) mg·L⁻¹. 上覆水正磷酸盐浓度范围为 0.029~0.091 mg·L⁻¹,平均值为(0.047±0.020) mg·L⁻¹. 入湖口采样点上覆水 TP 和正磷酸盐含量显著高于其他类型采样点($P<0.05$),围垸采样点上覆水与湖面采样点无显著差异($P>0.05$). 对洪湖沉积物和上覆水磷形态进行 Pearson 相关性分析,洪湖沉积物与上覆水各形态磷 Pearson 相关性系数见表 2. 沉积物中 TP 与 IP、Fe/Al-P 和 Ca-P 均呈极显著正相关(r 分别为 0.980、0.924 和 0.927, $P<0.01$). 这说明 Fe/Al-P 和 Ca-P 输入可能是洪湖沉积物磷负荷的主要来源. 沉积物各形态磷中,OP 与上覆水 TP 呈极显著正相关($r=0.478$, $P<0.01$),表明 OP 与上覆水 TP 存在磷交换,上覆水磷含量可能与沉积物 OP 向上覆水的释放有关^[31]. 沉积物 BAP 与上覆水 TP 呈显著正相关

表 2 洪湖沉积物与上覆水各形态磷 Pearson 相关性¹⁾

	TP	IP	Fe/Al-P	Ca-P	OP	BAP	TP(水)	正磷酸盐(水)
TP	1							
IP	0.980 **	1						
Fe/Al-P	0.924 **	0.951 **	1					
Ca-P	0.927 **	0.927 **	0.795 **	1				
OP	0.206	0.005	0.035	0.098	1			
BAP	0.946 **	0.897 **	0.929 **	0.785 **	0.338 *	1		
TP(水)	0.284	0.192	0.233	0.164	0.478 **	0.397 *	1	
正磷酸盐(水)	0.425 *	0.417 *	0.428 *	0.400 *	0.082	0.434 **	0.594 **	1

1) ** 表示在 0.01 水平下,显著相关,* 表示在 0.05 水平下,显著相关

($r=0.397, P<0.05$), 上覆水 TP 可能与 BAP 向上覆水的释放有关. 上覆水正磷酸盐与 TP、IP、Fe/Al-P、Ca-P 和 BAP 呈显著相关性, 上覆水中正磷酸盐可能与沉积物各形态磷释放有关, 同时沉积物中 Fe/Al-P、Ca-P 与上覆水正磷酸盐和 Fe、Al、Ca 离子结合沉积在沉积物中有关. 沉积物各形态磷中 BAP 与上覆水正磷酸盐相关性最高($r=0.434, P<0.01$), 这说明上覆水正磷酸盐可能与沉积物 BAP 向上覆水释放有关.

3 结论

(1) 洪湖湿地不同类型采样点沉积物 TP、IP、Fe/Al-P 和 Ca-P 含量存在显著差异, 入湖口采样点的含量显著高于湖区采样点($P<0.05$), OP 含量无显著差异($P>0.05$). 从入湖口到湖心, 沉积物 TP、IP、Fe/Al-P 和 Ca-P 含量呈下降趋势, 围垸水产养殖活动可能会使沉积物磷含量升高, 但对沉积物磷含量影响不显著.

(2) 洪湖不同类型采样点沉积物磷形态分布格局存在显著差异性, 入湖口沉积物磷形态以 Fe/Al-P 和 Ca-P 为主, 而湖面沉积物磷形态以 OP 和 Ca-P 为主, 四湖总干渠来水 Fe/Al-P 和 Ca-P 的输入, 可能是造成洪湖沉积物磷富集的主要原因, 另外沉积物中水生植物残体可能是沉积物 OP 的重要来源.

(3) 洪湖水体磷可能与沉积物 Fe/Al-P 和 OP 向上覆水释放与有关. 洪湖存在较高的沉积物磷释放风险, 入湖口沉积物磷释放风险主要来自 Fe/Al-P, 而湖面沉积物磷释放风险主要来自 OP.

致谢: 感谢洪湖国家自然保护区管理局工作人员对本研究样点布设和现场调查中的帮助和支持. 感谢胡泽和施鸿媛同学在采样中的帮助.

参考文献:

- [1] 宋辛辛, 蔡晓斌, 王智, 等. 1950s 以来洪湖主要优势沉水植物群落变化[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 859-867.
Song X X, Cai X B, Wang Z, *et al.* Community change of dominant submerged macrophyte in Lake Honghu since 1950s [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(4): 859-867.
- [2] 王思梦. 洪湖水质时空变异特征及污染来源分析[D]. 武汉: 湖北大学, 2018.
- [3] Li K, Wang L, Li Z H, *et al.* Exploring the spatial-seasonal dynamics of water quality, submerged aquatic plants and their influencing factors in different areas of a lake[J]. Water, 2017, **9**(9): 707.
- [4] Chen M S, Ding S M, Chen X, *et al.* Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments[J]. Water Research, 2018, **133**: 153-164.
- [5] 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 等. 污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 801-808.
- [6] Tang N, Li R Z, Wang Y Q, *et al.* Phosphorus forms and release risk of sediments in urban sewage treatment plant effluent and receiving stream reach [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 801-808.
- [7] 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 等. 巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2730-2737.
Li R Z, Bao Q, Zhang R G, *et al.* Potential for phosphorus uptake by bed sediments and its response to carbon additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2730-2737.
- [8] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 216-223.
- [9] Wu Z, Liu Y, Liang Z Y, *et al.* Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: a dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference [J]. Water Research, 2017, **116**: 231-240.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-246.
- [11] Ruban V, J F López-Sánchez, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [12] Wu T F, Qin B Q, Brookes J D, *et al.* Spatial distribution of sediment nitrogen and phosphorus in Lake Taihu from a hydrodynamics-induced transport perspective [J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 1554-1565.
- [13] 龚莹. 巢湖水体和沉积物中磷的形态及有效性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- [14] Wang L Q, Liang T. Distribution patterns and dynamics of phosphorus forms in the overlying water and sediment of Dongting Lake [J]. Journal of Great Lakes Research, 2016, **42**(3): 565-570.
- [15] Wang L Q, Liang T. Distribution characteristics of phosphorus in the sediments and overlying water of Poyang Lake [J]. PLoS One, 2015, **10**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0125859.
- [16] 杨文澜, 蒋功成, 王兆群, 等. 洪泽湖不同湖区表层沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 地球与环境, 2013, **41**(1): 43-49.
- [17] Yang W L, Jiang G C, Wang Z Q, *et al.* Chemical forms and distribution of phosphorus in surface sediments of Lake Hongze [J]. Earth and Environment, 2013, **41**(1): 43-49.
- [18] Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario [M]. Ontario: Ministry of Environment and Energy, 1993.
- [19] 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 等. 不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3375-3383.
Li R Z, Qin R B, Huang Q F, *et al.* Fractions and release risk of phosphorus in surface sediments of three headwater streams with different styles of water supply [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3375-3383.
- [20] Zhuang W, Gao X L, Zhang Y, *et al.* Geochemical characteristics of phosphorus in surface sediments of two major Chinese mariculture areas: the Laizhou Bay and the coastal waters of the Zhangzi Island [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **83**(1): 343-351.
- [21] Zhang T, Ban X, Wang X L, *et al.* Analysis of nutrient transport

- and ecological response in Honghu Lake, China by using a mathematical model [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 418-428.
- [20] Ni Z K, Wang S R, Wu Y, *et al.* Response of phosphorus fractionation in lake sediments to anthropogenic activities in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134242.
- [21] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
- Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [22] 郑煌, 杨丹, 金梦云, 等. 洪湖沉积柱中磷形态的垂直分布及指示意义[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1540-1547.
- Zheng H, Yang D, Jin M Y, *et al.* The vertical distribution of P forms and significance in a sediment core from Honghu Lake, China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1540-1547.
- [23] 金晓丹. 水体和表层沉积物不同形态磷分布及其迁移转化——以青草沙水库为例[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [24] 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 等. 特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性: 以成都市为例[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 219-227.
- Ding Y, Ouyang L L, Shi Q, *et al.* Distribution and bioavailability of phosphorus in surface sediments in megalopolis: a case study of Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 219-227.
- [25] 张莹莹, 蔡晓斌, 宋辛辛, 等. 基于决策树的洪湖水生植物遥感信息提取[J]. *湿地科学*, 2018, **16**(2): 213-222.
- Zhang Y Y, Cai X B, Song X X, *et al.* Remote sensing information extraction of hydrophyte in Honghu Lake based on Decision Tree [J]. *Wetland Science*, 2018, **16**(2): 213-222.
- [26] 刘子森, 张义, 王川, 等. 改性膨润土和沉水植物联合作用处理沉积物磷[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 665-674.
- Liu Z S, Zhang Y, Wang C, *et al.* Synergistic removal of sediment P by combining the modified bentonite and *vallisneria spiralis* [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 665-674.
- [27] 裴婷婷, 李如忠, 高苏蒂, 等. 合肥城郊典型农田溪流水系沉积物磷形态及释放风险分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 548-557.
- Pei T T, Li R Z, Gao S D, *et al.* Phosphorus fractions and release risk in surface sediments of an agricultural headwater stream system in Hefei suburban, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 548-557.
- [28] 刘佳, 雷丹, 李琼, 等. 黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1608-1615.
- Liu J, Lei D, Li Q, *et al.* Characteristics of phosphorus fractions and phosphate diffusion fluxes of sediments in cascade reservoirs of the Huangbai River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1608-1615.
- [29] Bao L L, Li X Y, Su J J. Alteration in the potential of sediment phosphorus release along series of rubber dams in a typical urban landscape river [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-59493-3.
- [30] 高春梅, 张中发, 张硕. 海州湾秋季沉积物磷的形态分布及生物有效性[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1499-1509.
- Gao C M, Zhang Z F, Zhang S. Speciation and bioavailability of phosphorus in sediments (autumn) of Haizhou Bay [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1499-1509.
- [31] Ni Z K, Wang S R, Wang Y M. Characteristics of bioavailable organic phosphorus in sediment and its contribution to lake eutrophication in China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 537-544.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groudwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)