

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价

方家琪¹, 祁闯¹, 张新厚^{1,2}, 韩睿明^{1,2}, 黄和笑¹, 王卓森¹, 王国祥^{1,2*}

(1. 南京师范大学环境学院, 南京 210097; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏省水土环境生态修复工程实验室, 南京 210023)

摘要: 为了揭示太湖竺山湾沉积物中碳、氮和磷的分布特征, 本研究在太湖竺山湾设置3个断面(湖湾内, A断面; 湖湾中部, B断面; 开敞湖区, C断面)10个采样点, 采集沉积物柱状样, 每2 cm间隔分层测定沉积物中总氮(TN)、总磷(TP)和总有机碳(TOC)含量, 以揭示其水平分布和垂向分布特征。结果表明, 在空间上竺山湾表层沉积物呈现开敞湖区向湖湾富集的特征, 湖湾内部碳、氮和磷含量显著高于开敞湖区($P < 0.01$), 其中湖湾内(A断面)表层沉积物TN、TP和TOC含量分别为1.53、1.55和11.31 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 而靠近开敞湖区(C断面)表层沉积物TN、TP和TOC含量仅为0.75、0.57和6.70 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。垂向分布特征表现为表层富集, 3个断面TN、TP和TOC含量随着底泥深度的增加均呈现出下降趋势, 表层沉积物TN、TP和TOC含量分别是底层的2~3、2~5和2~3倍。整体而言, 竺山湾沉积物TP含量均值为0.93 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 属于重度污染, 而TN平均含量为1.11 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 属于轻度污染; 有机氮指数和综合污染指数显示, 竺山湾北部地区污染水平为重度污染区, 有机污染相对较强, TP的污染指数(S_{TP})处于1.03~3.87之间, 属于重度污染。

关键词: 太湖; 沉积物; 氮; 磷; 总有机碳(TOC); 污染评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5367-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905127

Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake

FANG Jia-qi¹, QI Chuang¹, ZHANG Xin-hou^{1,2}, HAN Rui-ming^{1,2}, HUANG He-xiao¹, WANG Zhuo-sen¹, WANG Guo-xiang^{1,2*}

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Jiangsu Engineering Laboratory of Water and Soil Eco-remediation, Nanjing 210023, China)

Abstract: To reveal the distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in the sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake, sedimentary columns were collected and sliced by 2 cm vertically from ten sampling points in three sections of Zhushan Bay. The content of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total organic carbon (TOC) were determined for each slice to reveal their horizontal and vertical distribution. The results showed that: spatially, the content of TN, TP, and TOC increased in the surface sediments of Zhushan Bay from the open lake area to the bay, and inside the bay these indexes were significantly higher than in the open lake area ($P < 0.01$). The content of TN, TP, and TOC in the surface sediments in the bay (section A) were 1.53 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 1.55 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and 11.31 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, while in the surface sediments near the open lake (section C) they were only 0.75 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 0.57 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and 6.70 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Vertically, a feature of surficial enrichment was shown, and the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in all three sections showed a decreasing trend with increase of depth. The contents of TN, TP and TOC in the surface sediments are 2-3 times, 2-5 times, and 2-3 times those in the bottom sediments, respectively. Generally, the average TP content in the sediment of Zhushan Bay is 0.93 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, suggesting an apparent heavy pollution, while the average TN content is 1.11 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ as slight pollution. According to the organic nitrogen index and comprehensive pollution index, the northern part of Zhushan Bay is suffering from heavy pollution, where the organic pollution is relatively strong. The TP pollution index is between 1.03 and 3.87, indicating heavy pollution in Zhushan Bay.

Key words: Taihu Lake; sediment; nitrogen; phosphorus; total organic carbon (TOC); pollution evaluation

湖泊富营养化是目前全世界共同面临的重大环境问题之一, 我国是世界上湖泊富营养化发生最为严重的国家之一。大量外源污染物的输入, 使得湖泊已经无法通过自身来修复净化, 导致碳、氮和磷等营养元素在水中富集沉降并不断积累, 汇入到沉积物中, 故湖泊沉积物成为碳、氮和磷等营养盐重要的汇^[1-5]。相比于开敞湖区而言, 湖湾区具有水流不畅、污染负荷高和污染物易聚积等特点, 所以湖湾区的总体污染较为严重^[6]。太湖自经历 2007

年无锡饮用水安全事件之后, 政府便投入大量资金, 采取了一系列严厉政策, 使得外源输入得到一定的控制^[7]。虽然外源输入的氮、磷营养盐有所减少, 但近年对太湖的研究表明, 太湖依旧为富营养化状

收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203003); 国家自然科学基金项目(41703105, 41573061)

作者简介: 方家琪(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: 1185022835@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

态,水体总磷浓度反弹,蓝藻水华现象依旧频发^[8]. 由于氮、磷营养盐在沉积物中不断累积达到一定程度时,在风浪、底栖生物扰动以及人为活动等因素的作用下,沉积物中的氮、磷营养盐便会通过再悬浮、扩散和对流等形式重新释放到上覆水中,使得湖泊面临来自沉积物的内源释放污染^[9~13]. 因此,在外源输入得到一定程度控制的同时沉积物的内源释放便成为影响湖泊富营养化最重要的因素,在富营养化湖泊巢湖、滇池也出现了同样的问题,说明内源释放问题已成为湖泊水生态环境整治过程中迫切需要解决的问题^[14~17].

竺山湾位于太湖西北部,入湖河流众多,大量生活污水、工业废水流入,入湖水量及入湖污染物通量最高,且位于盛行风东南风下风向,在外源输入和内源释放共同作用下,氮和磷等营养盐负荷高,蓝藻水华频发,是太湖主要“湖泛”易发区^[18~23]. 因此本研究选取太湖竺山湾为典型研究区,由湖湾向开敞湖区,沿垂直岸边方向设置3个断面,分析各断面沉积物碳、氮和磷分布特征,并对底泥污染状况进行

评价,旨在全面揭示太湖竺山湾地区富营养化程度以及碳、氮和磷含量之间的相互关系,以期对太湖竺山湾地区清淤工程以及控制水华现象提供理论依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2017年9月,选取太湖典型“湖泛”易发区竺山湾为研究区域,由湖湾向开敞湖区设置3个断面,共10个采样点(图1),自岸边向湖心方向,每隔2 km设点采集底泥柱状样,用GPS准确定位每个采样点的位置. 利用柱状采泥器采集沉积物样品,现场对采集到的沉积物严格按2 cm分层,由于每个采样点沉积物淤积程度不同,故采集的柱状沉积物厚度不同,分层的数量也不同. 采集的样品分别装入聚乙烯自封袋中,立即放入冷藏箱中4℃保存,带回实验室处理. 沉积物样品送达实验室后,经冷冻干燥后取出,用玛瑙研钵进行充分研磨后过200目筛,放入自封袋中放置于干燥阴凉处备用.

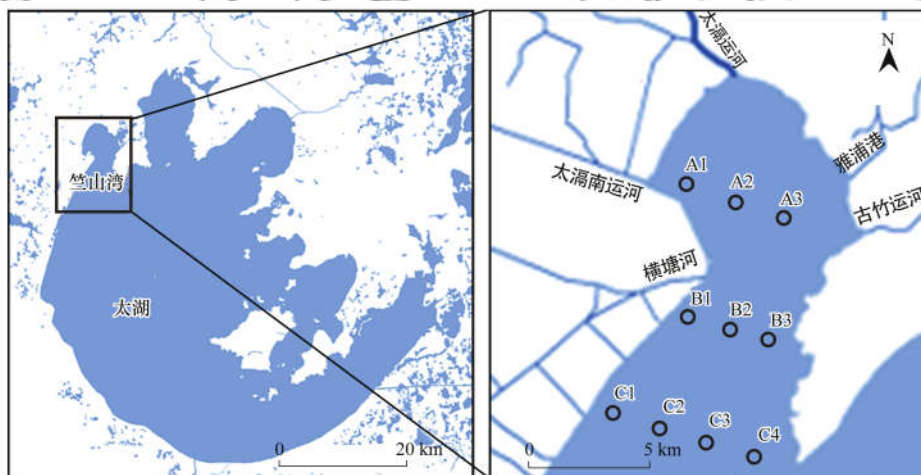


图1 采样点示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

1.2 指标分析方法

本研究所测定的理化指标为总氮(TN)、总磷(TP)和总有机碳(TOC). 本研究采用高温灼烧法测定TOC,准确称取0.05 g冷冻干燥后的沉积物样品转移至燃烧舟中,用一次性滴管加入1~2滴0.5 mol·L⁻¹盐酸溶液完全浸润沉积物样品,将酸化过的沉积物样放入烘干箱中60℃烘8 h以上,将多余盐酸溶液挥发之后,放入TOC分析仪(德国,Multi N/C 3100)中进行测试. TN采用过硫酸盐消化法测定;TP测试采用欧洲标准测试框架下发展的沉积物磷形态测试方法——SMT法,磷浓度的测定采用钼蓝比色法. 每个样品测定3个重复. 采用Excel 2016进行数据整理,使用Origin 9.1进行绘图,使用

SPSS 22.0进行单因素方差分析以及相关分析.

1.3 沉积物污染评价标准

为了更好地评估竺山湾湖区富营养化程度,根据相关研究^[24~28],本文选取单因子指数法以及综合污染指数法对沉积物碳、氮和磷污染情况做出评价,同时考虑到太湖主要入湖河流中,有机氮污染严重,为进一步判定竺山湾沉积物污染情况,选取有机质污染指数及有机氮作为评价水域沉积物有机污染状况的评价因子,对沉积物中营养盐污染状况进行可靠评价^[29]. 评价标准如表1~3. 单因子指数法公式如下:

$$S_i = C_i/C_s \quad (1)$$

式中, i 为评价因子, S_i 为单项因子的评价指数, C_i

为评价因子的实测值, C_s 为评价因子的标准值. 在参考国内外评价标准并结合太湖实际情况, 本文选取 1960 年太湖底泥的 TN 和 TP 实测数据为标准值^[30].

综合污染指数公式如下:

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, F 为 n 项污染指数的平均值, $F_{\max}$ 为最大单项污染指数.

有机指数及有机氮指数公式如下:

$$\text{有机指数(OI)} = \text{有机碳(OC\%)} \times \text{有机氮(ON\%)} \quad (3)$$

$$\text{有机碳(OC\%)} = \text{有机质(OM\%)} / 1.724 \quad (4)$$

$$\text{有机氮(ON\%)} = \text{TN\%} \times 0.95 \quad (5)$$

表 1 湖泊沉积物污染程度等级

Table 1 Lake sediment pollution level

等级划分	S_{TN}	S_{TP}	FF	等级
1	$S_{\text{TN}} < 1.0$	$S_{\text{TP}} < 0.5$	$\text{FF} < 1.0$	清洁
2	$1.0 \leq S_{\text{TN}} \leq 1.5$	$0.5 \leq S_{\text{TP}} \leq 1.0$	$1.0 \leq \text{FF} \leq 1.5$	轻度污染
3	$1.5 < S_{\text{TN}} \leq 2.0$	$1.0 < S_{\text{TP}} \leq 1.5$	$1.5 < \text{FF} \leq 2.0$	中度污染
4	$S_{\text{TN}} > 2.0$	$S_{\text{TP}} > 1.5$	$\text{FF} > 2.0$	重度污染

表 2 太湖沉积物中有机指数评价标准

Table 2 Evaluation index of organic index in sediments of Taihu Lake

有机指数	< 0.05	$\geq 0.05 \sim < 0.20$	$\geq 0.20 \sim < 0.50$	≥ 0.50
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染
等级	I	II	III	IV

表 3 太湖沉积物中有机氮评价标准

Table 3 Evaluation criteria for organic nitrogen in sediments of Taihu Lake

有机氮质量分数	$< 0.0033\%$	$\geq 0.0033\% \sim < 0.066\%$	$\geq 0.066\% \sim < 0.133\%$	$\geq 0.133\%$
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染
等级	I	II	III	IV

2 结果与讨论

2.1 竺山湾表层沉积物碳、氮、磷分布特征

2.1.1 表层沉积物中 TN 分布特征

竺山湾表层沉积物 (0 ~ 6 cm) TN 含量呈现由湖湾向开敞湖区递减趋势, 沉积物 TN 含量在 $0.52 \sim 1.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 这与 Yao 等^[28]对太湖竺山湾沉积物营养盐负荷调查结果一致. 从图 2(a)中可以看出, 竺山湾沉积物 TN 含量具有明显的空间异质性. 由湖湾向开敞湖区延伸的断面 A 至断面 C 的 TN 平均含量分别为 1.53 、 1.15 和 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 根据美国环保署 (EPA) 确定的沉积物 TN 污染评价标准, 沉积物 TN 含量低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 为清洁; $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 为轻污染; 大于 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时为重污染, 故竺山湾湖湾内沉积物 TN 整体表现为轻度污染. 沉积物 TN 含量较高的区域主要分布在西北部沿岸区和湾内中心区, 究其原因, 一方面, 竺山湾位于太湖西北部, 处于盛行东南风的下风向, 容易造成水生植物与蓝藻碎屑残体的堆积, 同时又是存在多条汇入河流, 促进外源输入增加, 导致沉积物 TN 含量较高. 另一方面, 竺山湾湖湾内历史曾有围网养殖区, 养殖过程中大量的饵料投加, 也

会增加沉积物中 TN 负荷. 此外, 相对于湖湾的半封闭静水环境, 开敞湖区沉积物在风浪、湖流等水动力扰动下, 沉积物再悬浮后, 促进了沉积物中营养盐向上覆水的释放. 故湖湾与开敞湖区沉积物 TN 含量呈现出明显的空间异质性.

2.1.2 表层沉积物中 TP 的分布特征

竺山湾沉积物 TP 含量在 $0.45 \sim 1.70 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 其中由湖湾向开敞湖区延伸的断面 A 至断面 C 的 TP 平均含量分别为 1.55 、 0.79 和 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 峰值区主要分布在湖湾内的断面 A, 根据美国环保署 (EPA) 所规定的沉积物 TP 污染程度评价标准, 小于 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 属轻度污染区, 在 $0.42 \sim 0.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 属中度污染区, 大于 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 属重度污染区. 太湖竺山湾沉积物 TP 负荷整体处于重度污染, 尤其是湖湾内部, 而局部开敞湖区为中度污染. 由于竺山湾是太湖西北部上游来水的主要湖区, 是太滬运河、漕桥河、沙塘河等河流入射湖湾, 受入湖河道排污影响, 加之湖湾水流不畅, 污染物易于累计, 使得沉积物 TP 负荷较为严重, 这与王华等^[31]的研究结果较为一致, 即入湖污染负荷量大是太湖总磷浓度居高不下的根本原因. 此外, 竺山湖处于太湖盛行风的下风向, 一方面促进

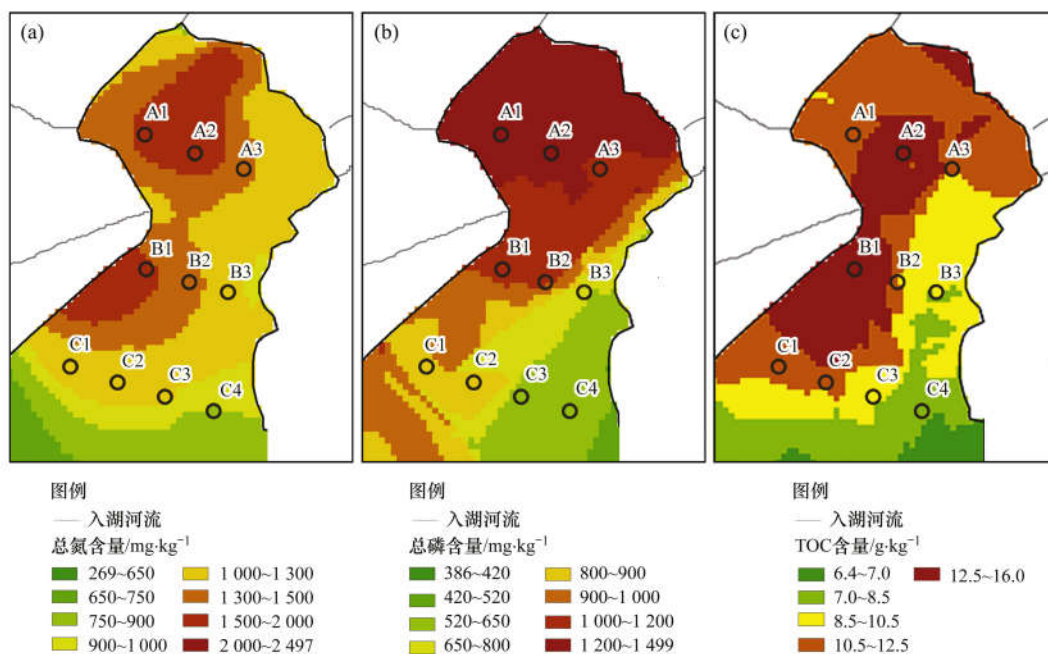


图2 表层沉积物中碳、氮和磷分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of TOC, TN, and TP at different sample sites

了蓝藻水华的聚积,持续累积大量藻类有机碎屑增加沉积物磷负荷,另一方面风浪扰动促进底泥再悬浮,造成内源磷释放,对太湖水磷浓度调查表明,竺山湖总磷浓度最高^[31].由此可见,竺山湖沉积物TP负荷,主要以外源输入为主,其独特的地理位置及地形特征促进了沉积物TP负荷增加.

2.1.3 表层沉积物中 TOC 的分布特征

底泥是一个复杂多介质多界面系统,其中有机质是这一环境中最为活跃的化学物质之一.有机质将底泥中的扩散物质与生物联系在一起,在水环境的物理、化学和生物反应以及蓝藻水华暴发中都扮演了非常重要的角色.竺山湖表层沉积物 TOC 含量在 $7.88 \sim 12.69 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $8.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与氮、磷的分布特征较为一致,整体表现为湖湾内有机质含量最高,向开敞湖区呈递减趋势[图2(b)].湖湾内中心区域有机质含量较高(A2点),可能与河口处的湖底冲刷有关,入湖距离增加 TOC 含量升高,说明入湖河流流速降低,大量有机碎屑逐渐沉降堆积,因而湖湾中心区 TOC 含量较高.此外,竺山湖西北部符淦港沿岸分布有人工和自然芦苇群落(B1点),该区域表层有机质含量较高,主要由藻类水华聚集及特殊地形所致.藻类及来自开敞湖区的有机质在湖流的推动下向芦苇群落内堆积,加之芦苇群落外围有消浪木桩,使得芦苇群落内形成较为封闭的环境,大量的藻类和植物碎屑残体堆积,故该区域沉积物中有机质含量显著高于其他区域.相比之下,开敞湖区受湖流

动力作用影响,藻类和有机碎屑不易聚集,因而有机质含量相对较低.

2.2 竺山湖沉积物碳、氮和磷的垂向分布特征

2.2.1 沉积物中 TN 的垂向分布特征

太湖竺山湖沉积物 TN 含量随着底泥深度的增加逐渐降低,表现为表层富集特征.表层 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 深度范围内 TN 含量较高,由湖湾向开敞湖区沉积物 $0 \sim 15 \text{ cm}$ 深度 TN 平均含量分别为 1.30 、 0.88 和 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 15 cm 以下沉积物 TN 含量变化较小,其平均含量仅为 0.91 、 0.69 和 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (图3).此外,单因素方差分析表明,竺山湖湖湾各采样点 TN 含量在垂向分布上显著高于开敞湖区($P < 0.01$),3个断面由高到低分别为湖湾内($1.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 湖湾中部($0.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 开敞湖区($0.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$).各个采样点 TN 含量在垂直剖面上自上而下逐渐降低,表明由湖湾向开敞湖区竺山湖沉积物氮负荷逐渐加重.一方面,湖湾内受陆源输入影响较大,使得沉积物中营养盐含量偏高造成 TN 含量较高.另一方面,常年受盛行风东南风的影响^[32],水华蓝藻在湖湾内聚积沉降,且有机碎屑的沉降速率高于其分解速率^[18],最终导致沉积物中 TN 负荷增加.此外,表层沉积物矿化分解过程消耗大量溶氧,随着沉积深度的增加,沉积环境逐渐变为还原环境,促进了反硝化作用的进行,导致底层氮素通过反硝化作用转化为氧化亚氮和氮气等气体形式脱离湖泊系统,因而沉积物 TN 含量呈现明显的表层富集特征.

2.2.2 沉积物中 TP 的垂向分布特征

在外源有效控制后,沉积物内源营养物质尤其是内源磷的释放是湖泊持续富营养化、影响治理成效的重要原因^[33, 34]. 太湖竺山湾沉积物 TP 含量的垂向分布与 TN 呈现相似规律,随着沉积深度增加,TP 含量在垂直剖面上表现出下降的趋势. 由湖湾向开敞湖区沉积物 0~15 cm 深度 TP 平均含量分别为 $1.36 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.58 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.47 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 15 cm 以下沉积物 TP 含量变化较小,其平均含量分别为 0.64 、 0.33 和 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 3).

表层沉积物 TP 含量是底层沉积物的 2~5 倍,这可能是由于表层沉积物新沉积大量浮游藻类残体以及外源有机质的输入. 随着沉积深度的改变,氧

化还原电位发生变化,由于铁存在氧化还原平衡,当 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} 时,结合的磷便会随 Fe^{2+} 的溶出而释放到间隙水中,进而在浓度梯度作用下进入上覆水,而且藻类堆积腐解过程中硫酸盐还原作用同样会诱发底层沉积物磷释放,并最终趋于稳定状态^[35]. 此外,底栖附着藻类还能够吸收水体中的磷并且抑制沉积物磷的释放,沉积物释放的磷 70% 可以被表层附着藻类吸收^[36]. 总之,表层沉积物磷富集是多因素作用的结果,对于湖泊环境中沉积物磷的释放机制还有待进一步研究.

2.2.3 沉积物中 TOC 的垂向分布特征

沉积物中 TOC 含量高低是内源污染的一个重要指标. 沉积物中有机质的生物降解过程会消耗水

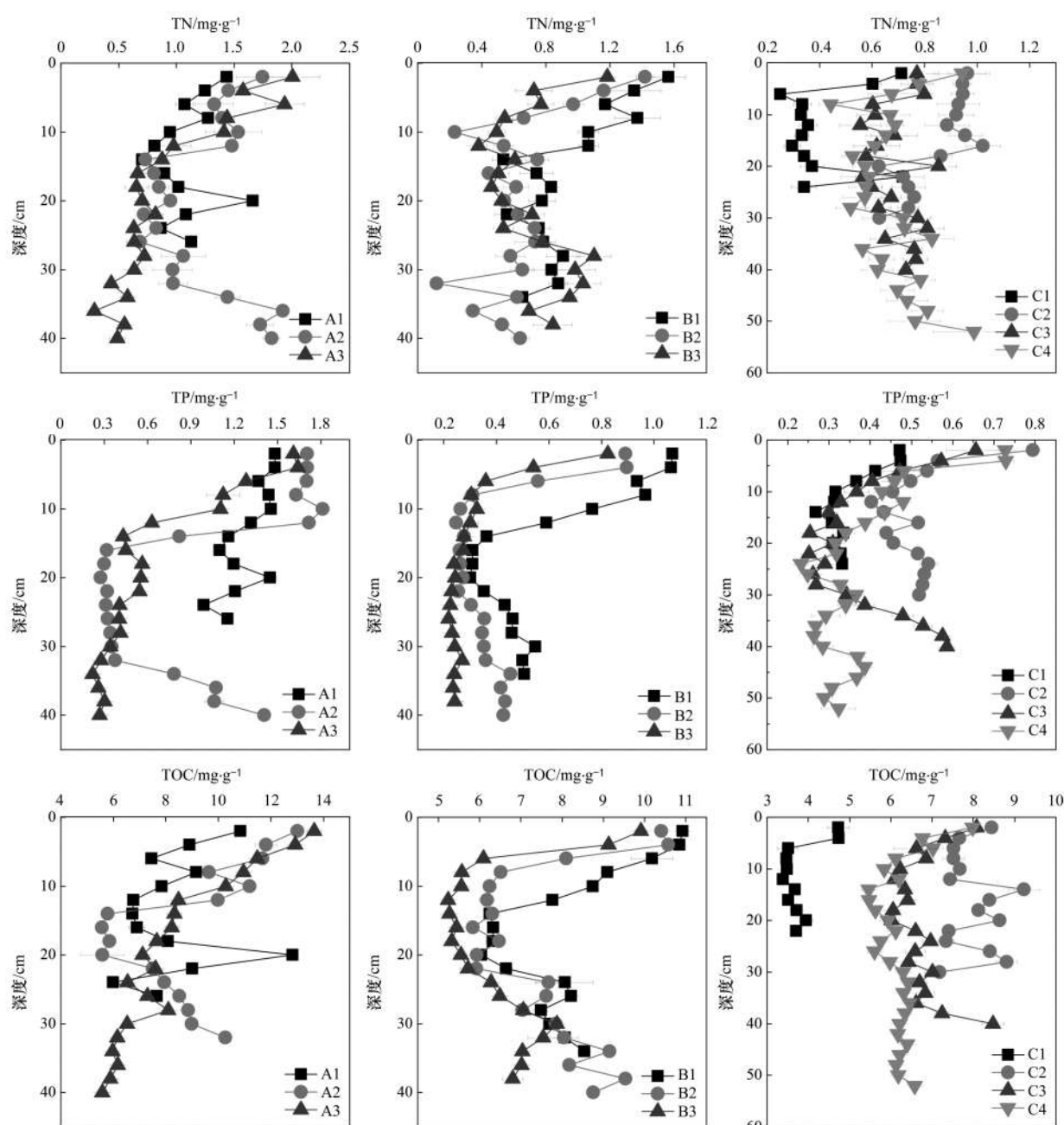


图 3 沉积物中碳、氮和磷的垂向分布特征

Fig. 3 Vertical distribution of TOC, TN, and TP in sediments

体中的溶氧,同时释放出大量的氮、磷等营养物质,因而降低沉积物中有机质含量对减少氮磷营养盐释放具有重要作用. 湖泊沉积物中有机质的来源主要有陆源输入和水体自养生物合成,陆源高等植物 TOC/TN 比通常为 20~30,内源藻类有机质 TOC/TN 比为 4~10 之间^[37]. 进一步分析表明,竺山湾沉积物 TOC/TN 比介于 6.89~9.40,因而竺山湾沉积物中有机质主要以藻源性为主,这与祁闯等^[37]的研究结果较为一致.

与氮、磷相比,沉积物 TOC 垂向分布较为复杂,湖湾区(A断面)和开敞湖区(C断面)沉积物 TOC 含量呈现波动下降的趋势,湖湾区沉积物 TOC 含量介于 5.57~13.66 mg·g⁻¹之间,平均含量为 8.48 mg·g⁻¹,而开敞湖区沉积物 TOC 含量介于 3.39~9.23 mg·g⁻¹之间,平均含量仅为 6.37 mg·g⁻¹,究其原因,湖湾内沉降物质以藻类碎屑残体为主,有机质含量在 8.30%~12.65%,而开敞湖区沉降物质以悬浮泥沙为主,有机质含量在 1.60%~4.87%^[18],故湖湾区和开敞湖区沉积物 TOC 含量差异显著($P<0.01$). 此外,受近年清淤活动的影响,近岸带 C1 处的有机质含量显著低于其他点位,可见底泥清淤能够有效削减沉积物中有机负荷. 相比之下,湖湾中部(B断面)沉积物中有机质呈现出先下降后升高的趋势,呈“U”型分布,可能与湖湾中部古河道分布有关,有研究表明,竺山湾分布有宽窄不一的古河道,部分切穿下部的沉积层,并与现代入湖河道相连^[38],这些古河道分布对沉积物中有机质的蓄积及其矿化过程有待进一步研究.

2.3 竺山湾沉积物污染评价

根据单因子指数法以及综合污染指数法对竺山湾沉积物碳、氮、磷污染情况进行评价. 由有机指标来看,竺山湾湖区有机氮介于 0.011%~0.022%之间,属于尚清洁范畴;有机指数显示,竺山湾地区属于较清洁地区. 竺山湾沉积物 TN 的污染指数(S_{TN})由湖湾内向开敞湖区递减, S_{TN} 处于 0.78~2.75 之间,属于中度污染,其中湖湾内(A断面)属于重度污染区. 竺山湾沉积物 TP 的污染指数(S_{TP})处于 1.03~3.87 之间,属于重度污染. 综合评价结果显示,竺山湾沉积物为重度污染,FF 值在 0.97~3.60 之间,竺山湾沉积物有机污染相对较强,沉积物磷负荷较高,尤其是北部湖湾区,具有潜在的內源磷释放风险,在今后的研究中应予以重点关注.

3 结论

(1)水平空间上,竺山湾表层沉积物碳、氮、磷含量均呈现由湖湾向开敞湖区递减趋势,沉积物 TN

含量介于 0.52~1.84 mg·g⁻¹之间,平均值为 1.11 mg·g⁻¹,TP 含量在 0.45~1.70 mg·g⁻¹之间,平均值为 0.93 mg·g⁻¹,TOC 含量在 7.88~12.69 mg·g⁻¹之间,平均值为 8.95 mg·g⁻¹,以藻源性有机质来源为主.

(2)垂向分布上,受地形特征、蓝藻水华及水动力等多因素作用下,竺山湾沉积物碳、氮、磷含量均表现为表层富集特征,在表层 0~15 cm 深度范围内碳、氮、磷负荷较高.

(3)根据单因子指数法以及综合污染指数法,竺山湾沉积物 TN 为轻度污染,TP 属于重度污染;有机氮指数和综合污染指数显示,竺山湾北部地区污染水平为重度污染区,有机污染相对较强,TP 的污染指数(S_{TP})处于 1.03~3.87 之间,属于重度污染,存在內源释放风险,在今后的研究中应予以关注.

参考文献:

- [1] Carreira R S, Wagener A L R, Readman J W, *et al.* Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach[J]. *Marine Chemistry*, 2002, **79**(3-4): 207-227.
- [2] Hupfer M, Lewandowski J. Retention and early diagenetic transformation of phosphorus in Lake Arendsee (Germany)-consequences for management strategies [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 2005, **164**(2): 143-167.
- [3] 冯峰,王辉,方涛,等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(3): 342-345.
Feng F, Wang H, Fang T, *et al.* The correlation between microbial biomass and carbon, nitrogen, phosphorus in the sediments of Lake Donghu [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(3): 342-345.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王敏,张建云,陈求稳,等. 太湖西北湖区 2003-2012 年间氮磷浓度及浮游植物主要类群变化趋势分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 164-172.
Wang M, Zhang J Y, Chen Q W, *et al.* Variations in nitrogen and phosphorous concentrations and major phytoplankton species in the northwestern Lake Taihu between 2003-2012 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 164-172.
- [7] 刘俊杰,陆隼,朱广伟,等. 2009—2017 年太湖湖泛发生特征及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(5): 1196-1205.
Liu J J, Lu J, Zhu G W, *et al.* Occurrence characteristics of

- black patch events and their influencing factors in Lake Taihu during 2009 and 2017[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(5): 1196-1205.
- [8] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(9): 896-906.
- Qin B Q, Wang X D, Tang X M, *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 896-906.
- [9] 余茂蕾,洪国喜,许海,等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 603-613.
- Yu M L, Hong G X, Xu H, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 603-613.
- [10] 刘杰,郑西来,陈蕾,等. 水库沉积物氮磷释放通量及释放规律研究[J]. *水利学报*, 2012, **43**(3): 339-343.
- Liu J, Zheng X L, Chen L, *et al.* Study on flux and release law of nitrogen and phosphorus of sediment in reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(3): 339-343.
- [11] 杨柳燕,杨欣妍,任丽曼,等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 18-27.
- Yang L Y, Yang X Y, Ren L M, *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(1): 18-27.
- [12] Qi C, Xu X G, Shi K, *et al.* In situ resuspension rate monitoring method in the littoral zone with multi-ecotypes of a shallow wind-disturbed lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(8): 7476-7485.
- [13] Qi C, Zhou Y, Xu X G, *et al.* Dynamic monitoring of resuspension in the multiple eco-types of the littoral zone of a shallow wind-disturbed lake[J]. *Aquatic Sciences*, 2019, **81**(2): 33.
- [14] 凌虹,巫丹,谭东烜,等. 近年太湖总磷升高成因及对策建议[J]. *环境科技*, 2018, **31**(6): 54-59.
- Ling H, Wu D, Tan D X, *et al.* Causes and countermeasures of total phosphorus rise in Taihu Lake during recent years [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(6): 54-59.
- [15] 孟春红,赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1831-1837.
- Meng C H, Zhao B. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Donghu Lake [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(7): 1831-1837.
- [16] 袁旭音,李兵,许薇薇,等. 太湖入湖河道沉积物中生物利用磷和营养水平分析[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 212-218.
- Yuan X Y, Li B, Xu W W, *et al.* Bioavailable phosphorus in sediments in the rivers to the west of the Taihu lake and their trophic level, East China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 212-218.
- [17] 杜奕衡,刘成,陈开宁,等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- [18] 祁闯,王国祥,吴馨婷,等. 太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 95-103.
- Qi C, Wang G X, Wu X T, *et al.* Deposition characteristics of suspended solids and the response of dissolved nutrients in spring in the western lakeside of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 95-103.
- [19] 王佩,卢少勇,王殿武,等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 703-709.
- Wang P, Lu S Y, Wang D W, *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 703-709.
- [20] 王莹,胡维平. 太湖湖滨湿地沉积物营养元素分布特征及其环境意义[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 204-210.
- Wang Y, Hu W P. Nutrients distribution characteristics and their environmental significance of Taihu lakeside wetland sediments [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 204-210.
- [21] 许梦爽,卢少勇,黄国忠,等. 28 条环太湖河流沉积物氮的分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(7): 1381-1386.
- Xu M S, Lu S Y, Huang G Z, *et al.* Distribution characteristics of nitrogen in sediments of 28 rivers around Tai Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(7): 1381-1386.
- [22] 叶斌,黄兰英,李春华,等. 太湖竺山湾缓冲带草林系统生长状态及土壤性质分析[J]. *环境工程技术学报*, 2015, **5**(5): 411-417.
- Ye B, Huang L Y, Li C H, *et al.* Investigation on growth situation and soil property of grass-forest system in lake buffer zone of Zhushan Bay, Lake Taihu[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, **5**(5): 411-417.
- [23] 于佳佳,尹洪斌,高永年,等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- Yu J J, Yin H B, Gao Y N, *et al.* Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- [24] Müller A K, Westergaard K, Christensen S, *et al.* The diversity and function of soil microbial communities exposed to different disturbances[J]. *Microbial Ecology*, 2002, **44**(1): 49-58.
- [25] 范成新,羊向东,史龙新,等. 江苏湖泊富营养化特征、成因及解决途径[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(2): 218-223.
- Fan C X, Yang X D, Shi L X, *et al.* Characteristics and cause of lake eutrophication in Jiangsu Province with suggestions on its control measures[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(2): 218-223.
- [26] 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.
- [27] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价[J]. *湖泊科学*, 1996, **8**(4): 319-324.
- Sui G R. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, **8**(4): 319-324.
- [28] Yao S C, Xue B. Nutrients and heavy metals in multi-cores from Zhushan Bay at Taihu Lake, the largest shallow lake in the Yangtze Delta, China[J]. *Quaternary International*, 2010, **226**(1-2): 23-28.
- [29] 孙顺才,赵锐,毛锐,等. 1991 年太湖地区洪涝灾害评估与人类活动的影响[J]. *湖泊科学*, 1993, **5**(2): 108-117.
- Sun S C, Zhao R, Mao R, *et al.* Evaluation on the flood

- disasters and effect of human activities in Taihu plain in 1991 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1993, **5**(2): 108-117.
- [30] 陈荷生. 太湖底泥的生态疏浚工程[J]. *水利水电科技进步*, 2004, **24**(6): 34-37, 54.
- Chen H S. Eco-dredging project of sediment in Taihu Lake[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2004, **24**(6): 34-37, 54.
- [31] 王华, 陈华鑫, 徐兆安, 等. 2010—2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 919-929.
- Wang H, Chen H X, Xu Z A, *et al.* Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010—2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 919-929.
- [32] 许嫚, 刘晓收, 刘清河, 等. 太湖竺山湾湖泊缓冲带内湿地浮游植物季节变化[J]. *海洋湖沼通报*, 2014, (4): 41-51.
- Xu M, Liu X S, Liu Q H, *et al.* Seasonal changes of phytoplankton in the wetlands of lake buffer zone of Zhushan Bay, Taihu Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014, (4): 41-51.
- [33] Han C, Ding S M, Yao L, *et al.* Dynamics of phosphorus-iron-sulfur at the sediment-water interface influenced by algae blooms decomposition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **300**: 329-337.
- [34] 董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 等. 太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4194-4202.
- Dong D P, Zhang T X, Zhang D Y, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in the sediments of the black water aggregation in Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4194-4202.
- [35] Zhao Y P, Zhang Z Q, Wang G X, *et al.* High sulfide production induced by algae decomposition and its potential stimulation to phosphorus mobility in sediment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 163-172.
- [36] 张强, 刘正文. 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 930-934.
- Zhang Q, Liu Z W. Simulation on the effect of periphytic algae on phosphorus release from sediments of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 930-934.
- [37] 祁闯, 方家琪, 张利民, 等. 太湖藻型湖区沉积物中生物易降解物质组成及分布规律[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 941-949.
- Qi C, Fang J Q, Zhang L M, *et al.* Composition and distribution of biodegradable compounds in phytoplankton-dominated zone of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 941-949.
- [38] 沈吉, 袁和忠, 刘恩峰, 等. 太湖表层沉积物的空间分布与层序特征分析[J]. *科学通报*, 2010, **55**(36): 3516-3524.
- Shen J, Yuan H Z, Liu E F, *et al.* Spatial distribution and stratigraphic characteristics of surface sediments in Taihu Lake, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(2): 179-187.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)