

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.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价

张杰^{1,2}, 汪院生³, 郭西亚^{1,2}, 朱金格¹, 邓建才^{1*}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 苏州 215128)

摘要: 为阐明太湖草型湖区表层沉积物营养盐的空间分布及其污染特征, 测定了胥口湾 60 个表层沉积物样中的总氮(TN)、总磷(TP)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和有机质(OM)的含量, 分析其污染水平与来源。结果表明, 胥口湾表层沉积物中 TN、TP、AN、AP 和 OM 平均含量分别为 1 027.5、423.2、46.4、15.3 和 17 096.6 mg·kg⁻¹, 且在空间分布上均呈现出胥口湾东北部湖区高于其他湖区的特点。胥口湾表层沉积物中 TN 和 TP 单项评价指数(S_{TN} 和 S_{TP})平均值分别为 1.75 和 0.91, 表明 TN 和 TP 分别处于中度和轻度污染状态; 综合污染指数(FF)的平均值为 1.57, 整体上处于中度污染状态。在有机指数和有机氮评价中, 整体上处于清洁状态。C/N 比值表明胥口湾表层沉积物中生物沉积的有机质主要来源为无纤维束植物和浮游植物。相关性分析表明, 胥口湾表层沉积物中有机质与总氮具有同源性, 但与总磷不具有同源性。

关键词: 太湖; 草型湖区; 表层沉积物; 营养盐; 污染评估

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4497-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903103

Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu

ZHANG Jie^{1,2}, WANG Yuan-sheng³, GUO Xi-ya^{1,2}, ZHU Jin-ge¹, DENG Jian-cai^{1*}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215128, China)

Abstract: To clarify the spatial distribution and pollution status of nutrients in the surface sediments from a macrophyte-dominated zone in Lake Taihu, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), alkali nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and organic matter (OM) were measured at 60 sampling sites in Xukou Bay. A pollution evaluation and source apportionment analysis of these nutrients was also carried out. The average contents of TN, TP, AN, AP, and OM in the surface sediments of Xukou Bay were 1 027.5, 423.2, 46.4, 15.3, and 17 096.6 mg·kg⁻¹, respectively, with the OM content being significantly higher in the northeast zone than in other areas of the bay. The average value of S_{TN} and S_{TP} was 1.75 and 0.91, respectively, indicating that TN and TP represent moderate and mild levels of pollution, respectively. The average comprehensive pollution index (FF) was 1.57, indicated that the surface sediment was moderately polluted. The observed organic pollution index indicated that the surface sediments in Xukou Bay were generally clean. Based on C/N values, organic matter in the surface sediments is derived from the bio-deposition of non-fibrous plants and phytoplankton. Based on correlation analysis, OM and TN in the surface sediments of Xukou Bay are derived from the same source, while TP is derived from an alternative source.

Key words: Lake Taihu; macrophyte-dominated zone; surface sediments; nutrients; pollution assessment

氮和磷是水生物赖以生存的必需元素,也是水体富营养化的限制因素;有机质则影响环境介质中污染物的迁移和转化行为^[1]。沉积物是氮和磷等生源要素的重要储存库,上覆水体中的氮磷吸附在悬浮颗粒物表面,在重力作用下随着颗粒物沉降至沉积物中,当沉积物-水界面环境条件(pH、溶解氧、氧化还原电位和温度等)发生变化时,沉积物蓄积的营养盐以及污染物会进入上覆水,增加水体氮磷负荷,进而恶化水体环境^[2,3]。碱解氮和有效磷易被植物或藻类生长所利用,一定程度上可反映沉积物中营养盐内源释放潜力^[4]。

基于沉积物营养盐含量,前人开展了沉积物污染等级及风险评价,其中综合污染指数法和有机指数法应用较为广泛。黄廷林等^[5]和于佳佳等^[6]采用

综合污染指数法发现水源水库和太湖流域河流均处于重度污染状态,卢少勇等^[7]、张光贵等^[8]和余辉等^[9]利用有机指数和有机氮评价法发现长寿湖存在有机氮污染,而洞庭湖和洪泽湖则处于尚清洁状态。这些研究阐明了河流、湖库沉积物中营养盐污染状态及其程度,并识别出关键污染因子。

沉水植物具有降低水体氮磷营养盐、增加溶解氧、提高透明度、促进悬浮颗粒物沉降、抑制底泥再悬浮与藻类生长等水质改善功能,但在其死亡阶

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-05-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205-02); 国家自然科学基金项目(41271213)

作者简介: 张杰(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊生态环境与污染修复, E-mail: zhangjie175@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: jcdeng@niglas.ac.cn

段大量营养盐以及有机碎屑再次进入沉积物中,在水动力作用下沉积物再悬浮会导致二次污染^[10]. 目前,国内外学者已经开展了湖泊、河流和水库等沉积物中氮磷营养盐空间分布特征和释放机制研究^[7,10~12],但有关沉水植物分布区沉积物营养盐分布特征及其污染评价研究仍有待加强. 胥口湾是苏州市重要的水源地,也是沉水植物生长的区域. 本研究采用野外调查与室内分析相结合的方法,探讨胥口湾表层沉积物中营养盐空间分布特征,评价其污染等级及其风险,确定其来源,并提出相应的控制策略,以期对胥口湾污染物排放管控、水质提升提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖属于典型的多生态类型湖泊,根据生境差异可将其分为不同的湖区:北部以竺山湾和梅梁湾为代表的“藻型湖区”、以胥口湾、东太湖为代表的“草型湖区”以及中间过渡区^[13]. 胥口湾位于太湖东南部,湖区西面毗邻西山岛,西北部和西南部与大太湖相连通,其湾周边分布的新麓港、寺前港、

黄墅港和西大缺港等闸口与出湖河流相连通,同时也是苏州市重要的水源地. 胥口湾水生植被生长旺盛,空间分布范围广,且沉积物以含有机碎屑的软泥为主^[14]. 近年来,由于大太湖藻类入侵、持续高水位以及水生植被打捞、收割等人类活动影响,水生植被多样性呈下降趋势,其空间分布面积萎缩,且主要分布在东北部湖区.

1.2 样品采集及处理分析

2018年6月,借助全球定位系统(GPS)在胥口湾布设60个采样点(图1). 利用彼得森采泥器,采集表层沉积物样品(0~10 cm),将混合后的样品放入干净的聚乙烯自封袋中冷冻保存运回实验室. 沉积物样品用冷冻干燥机冻干,经玛瑙研钵研磨处理后过100目(0.154 mm)尼龙筛保存待测,总氮(TN)采用半微量开氏法测定,总磷(TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法测定,采用碱解扩散法测定沉积物中的碱解氮(AN),沉积物中有效磷(AP)的测定则采用钼锑比色法,有机质(OM)采用重铬酸钾容量法测定. 为保证测定结果的准确性和精度,对样品进行了重复分析,所有样品分析误差均小于10%,符合质量控制要求,所有分析结果均以沉积物干重计.

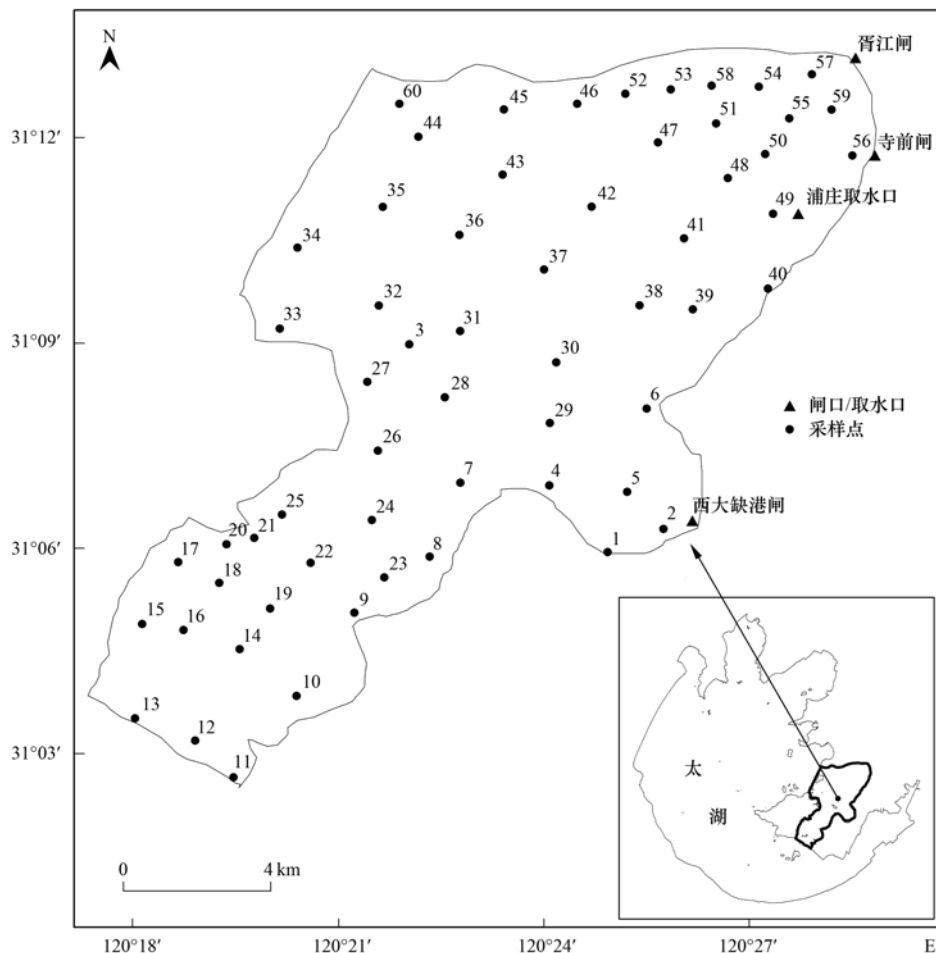


图1 太湖胥口湾采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in Xukou Bay, Lake Taihu

1.3 沉积物污染评估方法

1.3.1 综合污染指数法

综合污染指数法是以单项评价指数为基础，整体考虑总氮、总磷共同对水体沉积物的污染影响，以研究区域未受人类污染和破坏时，水体沉积物中总氮、总磷实测值的平均值作为评价标准值，对沉积物中总氮、总磷的综合污染状况进行评价，沉积物综合污染程度分级标准见表 1。计算方法如下：

$$S_i = C_i / C_s$$
$$FF = \sqrt{(F^2 + F_{MAX}^2)} / 2$$

式中， S_i 为单项评价指数； C_i 为第 i 种营养盐实测含量； C_s 为环境质量评价标准，由于缺少胥口湾总

氮和总磷的背景值，故选取太湖流域沉积物总氮和总磷的背景值作为该区域背景值，即 TN 的 $C_s = 670 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ， TP 的 $C_s = 440 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[15]； F 为 n 项评价指数平均值， F_{MAX} 为最大单项评价指数。

1.3.2 有机指数法和有机氮评价法

有机指数法是表征水体沉积物环境状况的重要指标，由有机氮和有机碳两个部分组成。沉积物有机氮和有机指数评价分级标准分别见表 2，其计算表达式为：

有机氮(%) = 总氮(%) × 0.95
有机碳(%) = 有机质(%) / 1.724
有机指数 = 有机碳(%) × 有机氮(%)

表 1 沉积物综合污染程度分级标准^[16]

Table 1 Standard of comprehensive pollution index in sediments				
等级划分	S_{TN}	S_{TP}	FF	污染程度
1	$S_{TN} < 1.0$	$S_{TP} < 0.5$	$FF < 1.0$	清洁
2	$1.0 \leq S_{TN} \leq 1.5$	$0.5 \leq S_{TP} \leq 1.0$	$1.0 \leq FF \leq 1.5$	轻度污染
3	$1.5 < S_{TN} \leq 2.0$	$1.0 < S_{TP} \leq 1.5$	$1.5 < FF \leq 2.0$	中度污染
4	$S_{TN} > 2.0$	$S_{TP} > 1.5$	$FF > 2.0$	重度污染

表 2 沉积物有机氮与有机指数评价标准^[17]

Table 2 Evaluation standards of organic nitrogen and organic index in sediments								
项目	有机氮/%				有机指数			
	<0.033	0.033~0.066	0.066~0.133	>0.133	<0.05	0.05~0.20	0.20~0.50	>0.50
污染程度	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染
等级	I	II	III	IV	I	II	III	IV

1.4 统计分析

本研究描述性统计参数包括平均值、最小值、最大值、标准差和变异系数(CV)，利用 ArcGIS 10.2 绘制表层沉积物营养盐的空间分布图及营养盐污染状况空间分布图；利用 SPSS 22.0 软件，计算沉积物有机质与营养盐之间的 Pearson 系数。

2 结果与讨论

2.1 草型湖区表层沉积物营养盐空间分布

胥口湾表层沉积物营养盐含量空间差异大(图 2)，其中 TN 含量变幅为 $262.2 \sim 2\,979.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $1\,027.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 50.1%，东北部湖区表层沉积物中 TN 含量较高； TP 含量变幅为 $41.2 \sim 728.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $423.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 29.6%，东北部、中部和西南部沿岸湖区表层沉积物中 TP 含量较高。 AN 含量变幅为 $8.6 \sim 150.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $46.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 54.3%，东北部湖区以及东部湖湾区表层沉积物中 AN 含量较高，这与 TN 的空间分布特征较一致； AP 含量变幅为 $4.4 \sim 36.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $15.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，变异系数为

39.7%，与 TP 空间分布趋势基本一致，即北部和中部湖区含量较高。

水生植物生物量及其空间分布是影响沉积物营养盐含量动态变化的重要因素。通常，水生植物生物量对沉积物中氮含量影响较大，二者具有较好地正相关关系，但对沉积物中总磷含量影响不明显^[18,19]。胥口湾东北部湖区水生植物生长繁茂、密度较高、生物量较大，沉积物中 TN 含量也较高；然而 TP 含量变化不明显。因此，东北部湖区表层沉积物中 TN 含量与该区域水生植被密切相关。水生动植物死亡凋落、腐烂分解后的营养物质经过长时间的沉降积累进入湖泊沉积物中，加之沉水植物根系拦截、固定作用，导致胥口湾东北部表层沉积物中 TN 含量升高。胥口湾表层沉积物碱解氮和有效磷的空间分布与总氮和总磷大致相似，但在局部也有不同，这可能与湖区氧化还原条件、微生物种类和数量存在差异有关^[20,21]。

与国内其他湖泊(水库)相比(表 3)，胥口湾表层沉积物中 TN 平均含量高于洪泽湖和太湖全湖平均，低于巢湖、鄱阳湖和洞庭湖； TP 平均含量较低，低于鄱阳湖、巢湖、洪泽湖和太湖全湖平均，

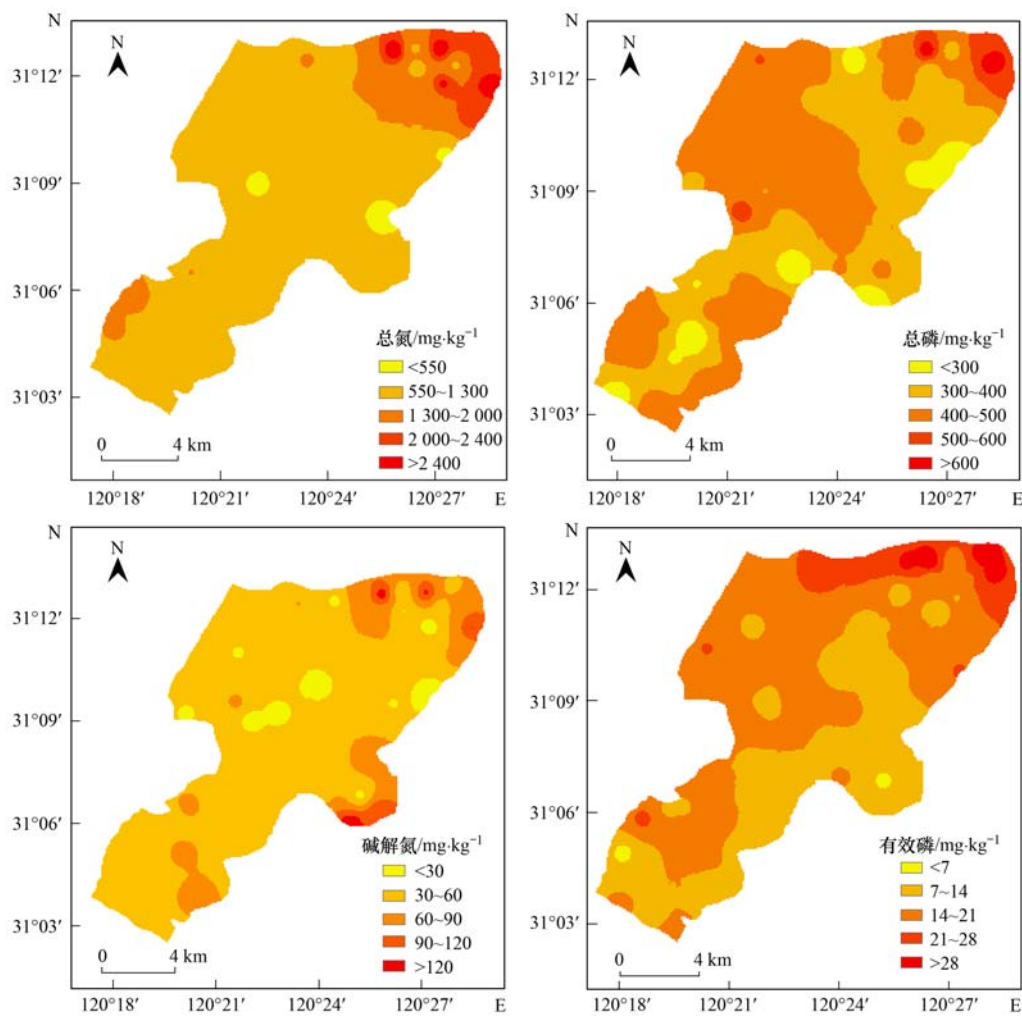


图2 胥口湾表层沉积物营养盐的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of nutrients in the surface sediments of Xukou Bay

但其含量高于洞庭湖。可见，胥口湾表层沉积物中TN含量仍相对较高，特别是东北部湖区，由于胥口湾是苏州市重要的水源地，对水环境安全，尤其是取水口水质有更高要求，因此，胥口湾沉积物中总氮内源污染负荷应加强管控。

通常，环境介质中OM来自生活和农业污水、水生植物以及陆源植物碎屑，是反映沉积物有机营养程度的重要指标^[9]。OM可吸附、络合重金属和持久性有机污染物，使这些污染物活性、生态风险增加。胥口湾表层沉积物中OM含量变幅为3 727.9~50 145.1 mg·kg⁻¹，均值为17 096.6 mg·kg⁻¹，变异系数为51.7%。在空间分布上，胥口湾中部湖区表层沉积物OM含量低，东北部、西南部湖区则较高(图3)。由于东北部湖区水生植被密布、生物量大，水生植被凋落残体堆积是导致该湖区表层沉积物中OM含量高的主要原因；此外，沉水植物阻碍了水体流动，减少了沉积物中营养盐与上覆水体交换，为水生植被腐烂残体堆积创造了有利的水动力条件，也是该区域表层沉积物中OM含量高的重要

原因。西南部湖区受到西山岛城镇居民生活污水排放、农业面源污染以及土地利用类型的影响，导致该湖区表层沉积物中OM含量也较高。与国内其他湖库相比(表3)，胥口湾表层沉积物中OM平均含量高于鄱阳湖、洪泽湖和太湖全湖平均，低于洞庭湖，可见，胥口湾表层沉积物中有机质含量相对较高，特别是东北部和西南部湖区，可能会对该湖区水质和水生态安全产生较大的影响。

表3 不同湖库表层沉积物营养盐含量对比

Table 3 Comparison of nutrient contents in surface sediments from different lakes and reservoirs

湖泊/水库	OM/mg·kg ⁻¹	TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹
鄱阳湖 ^[12]	15 900	1 340	460
太湖 ^[22]	12 800	860	560
巢湖 ^[23]	—	2 751	1 138
洪泽湖 ^[9]	13 600	1 020	580
洞庭湖 ^[8]	20 600	1 340	294
本研究	17 096.6	1 027.5	423.2

2.2 草型湖区表层沉积物营养盐污染评价

2.2.1 综合污染指数评价

基于TN、TP以及综合污染评价标准(表1)，

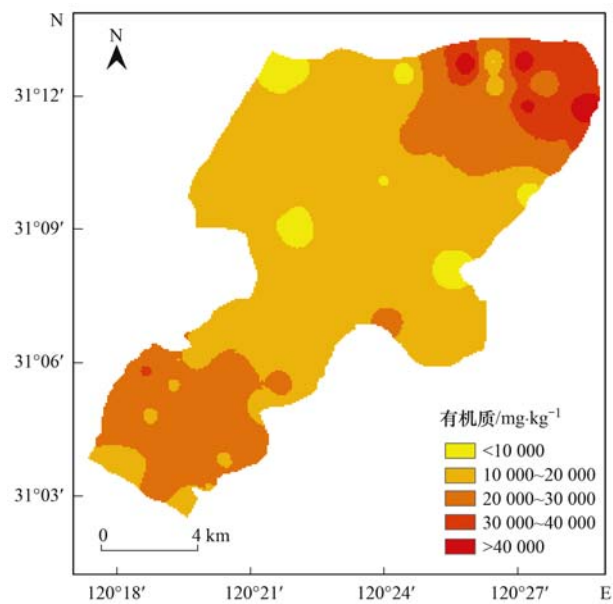


图3 胥口湾表层沉积物有机质的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of organic matters in the surface sediments of Xukou Bay

S_{TN} 、 S_{TP} 和FF平均值分别为1.75、0.91和1.57,胥口湾表层沉积物整体分别处于中度污染、轻度污染和中度污染状态. TN在绝大多数样点(90%)均处于污染状态,其中轻度、中度和重度污染采样点分别占35%、33.3%和21.7%;TP处于轻度、中度和重度污染状态的采样点分布占51.7%、36.7%和3.3%. 胥口湾表层沉积物营养盐综合污染程度处于轻度、中度和重度污染状态的采样点占45%、25%和16.7%,表明胥口湾表层沉积物中营养盐的内源负荷不容忽视. TN中度、重度污染的湖区主要位于东北部和西南部湖区,其他湖区多为低污染状态,这与综合污染评价指数结果较一致,可见, TN是胥口湾表层沉积物中的主要污染物. TP污染的空间分布相对单一,除北部湖区部分属于中度污染,其他湖区处于轻度污染状态(图4). 东北部湖区TN污染较重与该湖区水生植被分布集中、水生生物量大密切相关;西南部湖区TN污染较重则可能与西山岛村镇居民的生活污水直接排入湖区以及农业面源污染物降雨径流入湖有关.

2.2.2 有机指数及有机氮评价

胥口湾表层沉积物的有机指数变化范围为0.005~0.823,平均值为0.156,整体处于较清洁状态;有机氮变化范围为0.025%~0.283%,平均值为0.112%,整体也处于较清洁状态. 在所有采样点中,6.7%的样点处于有机污染状态,清洁的占13.3%,较清洁的占68.3%,尚清洁的占11.7%;20%的样点处于有机氮污染状态,处于清洁状态的占2.3%,较清洁的占10%,尚清洁的占

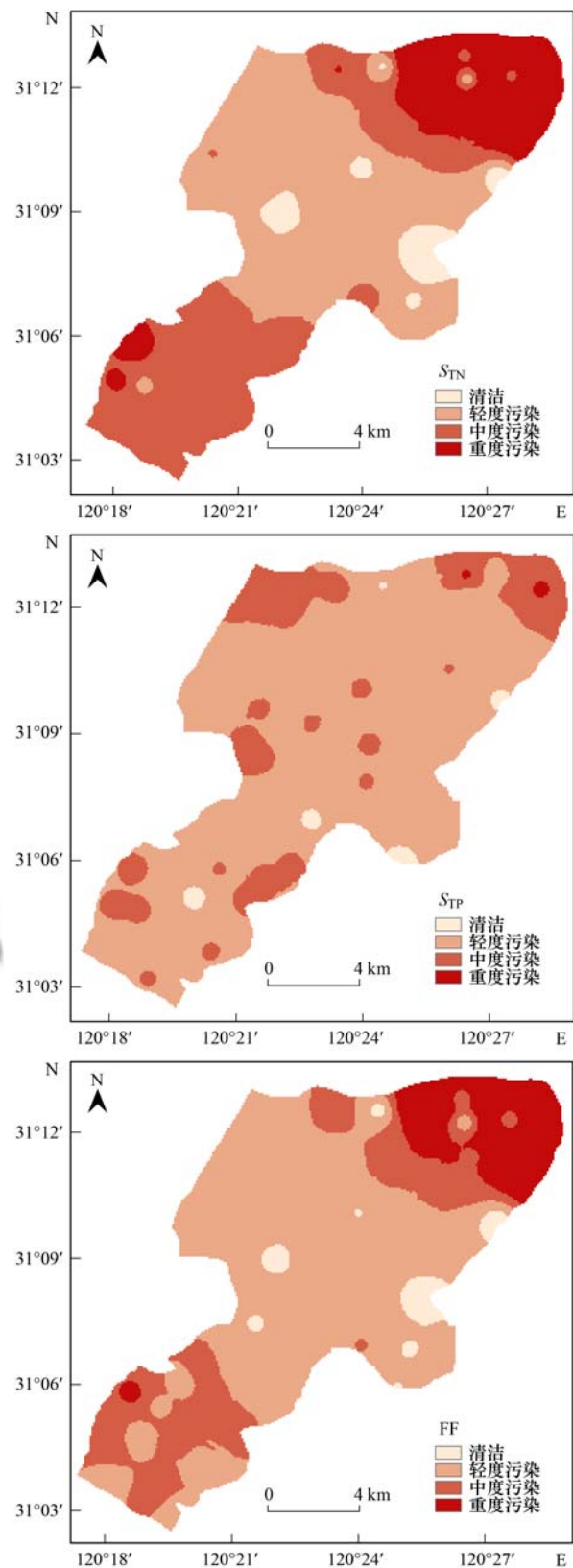


图4 胥口湾表层沉积物营养盐综合污染指数

Fig. 4 Comprehensive pollution index for nutrients in the surface sediments of Xukou Bay

66.7%. 这表明胥口湾表层沉积物有机污染状态整体较轻,但湖区内仍有部分区域污染较重. 由图5可知,有机氮和有机指数在空间分布上具有较好

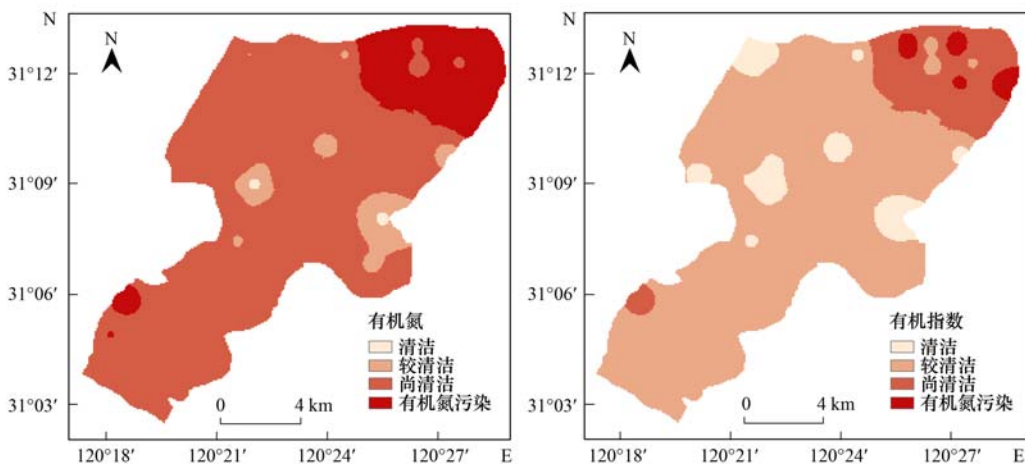


图5 胥口湾表层沉积物有机指数及有机氮

Fig. 5 Organic index and organic nitrogen in the surface sediments of Xukou Bay

地一致性,均呈现出东北部湖区的污染高于其他湖区的特点,即东北部湖区处于污染状态,而其余湖区则处于无污染状态.东北部湖区沉水植被生长茂盛,水生生物量大,该湖区有机污染和有机氮污染严重与生物沉积密切相关.

2.3 草型湖区表层沉积物中营养盐来源解析

2.3.1 沉积物 C/N 与 C/P 特征分析

从生物沉积角度来看,沉积物中 C/N 值可反映有机质来源差别,有纤维束植物碎屑 C/N 值大于 20,无纤维束植物 C/N 值为 4~12,浮游动物 C/N 值小于 7,浮游植物 C/N 值为 6~14,藻类 C/N 值为 4~10^[5].一般认为沉积物 C/N>10 时有机质以陆源为主,C/N<10 时以内源为主,C/N≈10 时内、外源有机质基本达到平衡状态^[24].胥口湾表层沉积物 C/N 值分布范围为 4.8~18.0(图 6),均值为 9.96,近半数采样点(48.3%)的 C/N 值>10,则表明胥口湾沉积物内、外源的有机质基本达到平衡状态.同时,绝大多数样点(98.3%)的 C/N 均处于 4~12,表明胥口湾表层沉积物有机质主要来自于无纤维束植物和浮游植物.西南部湖区表层沉积

物中 C/N 值较高,表明该区域受外源输入影响较大,即西山岛生活污水等陆源 OM 进入水体后无法迅速彻底分解而沉积下来(图 3),是造成 C/N 值较高的重要因素.

C/P 值可反映沉积物中有机碳、磷化合物的分解速率以及磷形态^[5].胥口湾表层沉积物中 C/P 值分布范围为 5.4~205.8(图 6),平均值为 26.5.胥口湾东北部和西南部湖区表层沉积物中 C/P 值较大,西山岛生活污水、农业废水排放等导致有机质在沉积物表层积累,形成表层富集现象,导致西南部湖区 C/P 值增大;东北部湖区水生生物凋亡后,生物中磷快速分解释放,尤其是 Fe/Al-P 和 OP,而有机质的分解则较慢^[1],使得沉积物中有机质相对累积,因此该湖区表层沉积物中 C/P 值也较高.

2.3.2 沉积物营养盐相关性分析

由表 4 可知,胥口湾表层沉积物中 OM、TN 和 AN 之间存在较高程度的相关性($P<0.01$),表明 OM、TN 和 AN 具有相似的污染来源;而 TP 与 TN、OM 之间的相关性弱,表明 TP 与 TN、OM 的污染来源可能不具有同源性.基于磷空间分布特征以及大

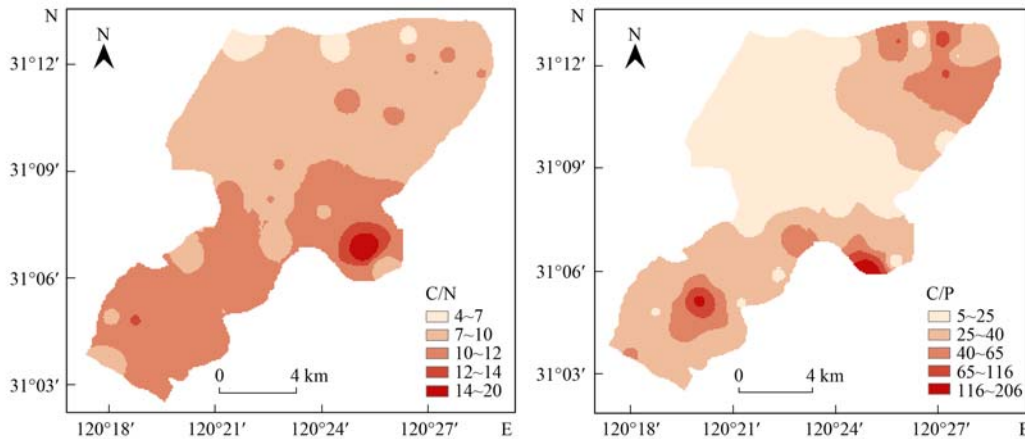


图6 胥口湾表层沉积物 C/N 及 C/P 值的空间分布

Fig. 6 Distribution of C/N and C/P ratios in the surface sediments of Xukou Bay

太湖总磷平均含量^[22]比较,表明大太湖总磷平均含量高于胥口湾湖区,且胥口湾作为太湖的出水湖区,大太湖的水流携带了大量悬浮颗粒物,由太湖大桥断面进入到胥口湾区域,水流流速变缓,水体中悬浮颗粒物在重力作用下逐渐沉积,并在表层沉积物累积,因此临近太湖大桥区域沉积物中磷含量相对较高,这不同于胥口湾表层沉积物中氮较均匀的空间分布特征(图2),表明大太湖的污染物输移对氮磷空间分布影响程度存在差异,也可能是因为动力作用下氧化还原条件的变化促使悬浮颗粒物吸附的氮处于硝化-反硝化不断交替中,导致悬浮颗粒物中氮损失,而氧化还原条件的变化对磷元素影响相对小.胥口湾表层沉积物中的有机质和总氮则主要由于东北部湖区水生植被生长茂盛,水生生物的残骸、凋落物等腐烂分解后使得表层沉积物中的OM和TN含量增加,即与水生植被空间分布以及水生生物量密切相关.

表4 胥口湾表层沉积物有机质与营养盐的 Pearson 相关系数¹⁾
Table 4 Pearson's correlation coefficients for organic matter and nutrients in the surface sediments of Xukou Bay

	OM	TN	TP	AN	AP
OM	1	0.956 **	0.154	0.504 **	0.259 *
TN		1	0.201	0.522 **	0.417 **
TP			1	-0.070	0.376 **
AN	0.158			1	
AP	1				1

1) *表示相关系数在0.05水平上显著; **表示相关系数在0.01水平上显著

2.4 草型湖区沉积物营养盐污染重点控制区域与建议

总氮是胥口湾表层沉积物中的主要污染物,且东北部、西南部湖区污染较严重;尽管表层沉积物有机污染整体较轻,但在东北部部分湖区仍较严重,且该区域邻近浦庄取水口,取水产生的定向湖流可能会导致底泥再悬浮以及污染物进入上覆水.因此,该湖区表层沉积物中有机污染仍需加强管控.胥口湾东北部湖区氮污染、有机污染主要是由于该湖区水生植被茂盛、水生生物残骸和凋落物大量腐烂沉积引起;西南部湖区总氮污染则与西山岛生活污水排放、农业面源污染等人为活动有关,西山岛多以果树和茶树种植为主,传统的施肥方式造成了该地区农业面源污染,再加上金庭镇污水处理设施不完善,居民生活污水大量排放进入湖区.

胥口湾东北部湖区以及西南部湖区是总氮、有机质污染较严重的区域,而污染产生的原因各异.因此,需要采取不同污染治理措施减轻总氮和有机污染.就东北部湖区而言,应该加强该湖区水生植

被结构优化调控,根据水生植物的生长规律,定期对生长茂盛的水生植物进行收割,消除因水生植物死亡、凋落以及腐烂分解造成的二次污染,从而降低该区域表层沉积物中总氮、有机污染.对于西南部湖区,一方面投入资金,改造金庭镇污水处理厂基础设施,使得分散型生活污水纳管,然后实行集中处理,提高污水处理厂的生活污水处理能力与效率,减少生活污水的直接入湖量;另一方面,对于茶果园产生的农业面源污染,首先要改变施肥方式,由过去的撒施改为挖坑深施,其次是根据果园坡降,开挖沟渠,拦截直接入湖的降雨径流量.有研究表明,底泥疏浚能够在一定程度上去除表层沉积物中的营养盐和有机质,降低其污染程度和生态风险^[25,26].胥口湾西南部湖区是总氮污染的高风险区域,且底泥深度在50 cm以上,这为污染底泥生态疏浚提供了有利条件,可对该区域的污染底泥进行适当疏浚,消除表层沉积物中总氮污染.

3 结论

- (1)胥口湾表层沉积物总氮和有机质含量相对较高,且东北部湖区营养盐含量高于其他湖区,而东北部和西南部湖区有机质含量较高.
- (2)总氮、总磷单项评价指数表明,胥口湾表层沉积物处于中、轻度污染状态;综合污染指数处于中度污染状态.胥口湾东北部湖区表层沉积物处于有机氮和有机污染状态.
- (3)有机质、总氮含量与同区域水生植物生长状态有关,而磷空间分布与大太湖来水有关.基于总氮、有机质含量空间分布与污染来源,应加强水生植被结构优化调控与生活污水管控、削减农业面源污染以及生态疏浚污染底泥.

参考文献:

[1] 王亚平,黄廷林,周子振,等.金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J].环境化学,2017,36(3):659-665.
Wang Y P, Huang T L, Zhou Z Z, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen reservoir[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 659-665.

[2] Varjo E, Liikanen A, Salonen V P, et al. A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes: (gypsum treatment to reduce internal loading)[J]. Water Research, 2003, 37(1): 1-10.

[3] Burford M A, Green S A, Cook A J, et al. Sources and fate of nutrients in a subtropical reservoir[J]. Aquatic Sciences, 2012, 74(1): 179-190.

[4] 孙宁波.黄河三角洲原型水库底泥磷特征的研究[D].青岛:青岛农业大学,2006.

[5] 黄廷林,刘飞,史建超.水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J].环境科学,2016,37(1):166-172.
Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and

- pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 166-172.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. *水生生态学杂志*, 2015, **36**(2): 25-31.
- Zhang G G. Characterization and ecological risk assessment of nutrients and heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(2): 25-31.
- [9] 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.
- [10] 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 Shiuli River, Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3014-3023.
- [11] Jarvie H P, Jürgens M D, Williams R J, *et al.* Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: the Hampshire Avon and Herefordshire Wye[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1-4): 51-74.
- [12] 王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. *环境工程技术学报*, 2012, **2**(1): 23-28.
- Wang S R, Ni D, Jiao L X, *et al.* Space-time variety of organic matter and nutrient in surface sediments from Poyang Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, **2**(1): 23-28.
- [13] 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 等. 夏季太湖草/藻型湖区 N_2O 生成与迁移特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2306-2315.
- Zheng X L, Wen S L, Li X, *et al.* Characteristics of N_2O release and influencing factors in Grass-type and Algae-type zones of Taihu Lake during summer [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2306-2315.
- [14] Dong B L, Qin B Q, Li W, *et al.* Growth and community composition of submerged macrophytes in Lake Taihu (China): assessment of changes in response to sediment characteristics [J]. *Wetlands*, 2017, **37**(2): 233-243.
- [15] 杨洋, 刘其根, 胡忠军, 等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- Yang Y, Liu Q G, Hu Z J, *et al.* Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- [16] 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.
- [17] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
- Qiu Z K, Hu X Z, Yao C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
- [18] Squires M M, Lesack L F W. The relation between sediment nutrient content and macrophyte biomass and community structure along a water transparency gradient among lakes of the Mackenzie Delta [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, **60**(3): 333-343.
- [19] 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 等. 涪湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 925-934.
- Xiong C H, Zhang R L, Wu X D, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in southern Jiangsu Province, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 925-934.
- [20] 李森. 查干湖低温期内源磷的释放及其对富营养化的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [21] 张晓军. 乌梁素海富营养化不同程度湖区水体和沉积物微生物群落多样性及进化分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [22] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 954-960.
- Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 954-960.
- [23] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物营养盐分布与释放风险[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(11): 1258-1264.
- Liu C, Shao S G, Fan C X, *et al.* Distribution and release risk of nutrients in the sediments of heavily polluted confluence bay of Chaohu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(11): 1258-1264.
- [24] 叶宏萌, 袁旭音, 李国平, 等. 闽北建溪流域表层沉积物营养元素分布特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2018, **37**(11): 2481-2488.
- Ye H M, Yuan X Y, Li G P, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of nutrient elements in surface sediments of Jianxi Watershed in northern Fujian [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(11): 2481-2488.
- [25] 王栋, 孔繁翔, 刘爱菊, 等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(3): 263-268.
- Wang D, Kong F X, Liu A J, *et al.* Analysis of the influence of the ecological dredging to ecosystem of Lake Wuli, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(3): 263-268.
- [26] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 385-392.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 385-392.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)