

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明	(2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹	(2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹	(2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明	(2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思吟, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双	(2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军	(2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启	(2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅	(2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂	(2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮	(2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞	(2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军	(2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰	(2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方	(2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇	(2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波	(2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红	(2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明	(2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥	(2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威	(2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab	(2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞	(2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂	(2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤	(2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣	(2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷	(2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲	(2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春	(2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇	(2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波	(2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞	(2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼	(2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮	(2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉	(2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明	(2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌	(2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬	(2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达	(2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华	(2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀	(2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元	(2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵	(2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇	(2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉	(2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅	(2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯	(2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚	(2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰	(2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成	(2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭	(2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森	(2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进	(2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰	(2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘	(2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍	(2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽	(2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡	(3003)
《环境科学》征订启事(2480)	《环境科学》征稿简则(2538)	信息(2766, 2798, 2927)

霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价

刘海, 赵国红

(安徽省公益性地质调查管理中心, 合肥 230091)

摘要:为阐明霍邱县城西湖和城东湖表层沉积物营养盐的空间分布及污染特征,测定了城西湖和城东湖各30个表层沉积物样中的总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM)含量,分析了其污染水平和来源。结果表明,城西湖总氮(TN)、总磷(TP)、有机质(OM)含量显著高于城东湖,其含量平均值分别为 $746.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $538.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 1.17% 和 $470.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $492.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 0.68% ,城西湖的北部及西北部显著高于其他湖区,且大致由北向南呈递减的特点。C/N值表明城西湖和城东湖的有机质主要来源于无纤维束植物和浮游植物,相关性分析表明城西湖和城东湖TN、TP和OM具有同源性;城西湖和城东湖沉积物的TN单项指数(S_{TN})的平均值分别为0.67和1.18,而TP单项指数(S_{TP})平均值分别为0.42和1.08,表明两湖的TN处于清洁状态而TP处于中度污染状态,综合污染指数(FF)平均值分别为1.51和1.31,整体处于中度污染状态。有机指数和有机氮指数评价显示城西湖和城东湖均呈清洁状态。

关键词:霍邱县;城西湖;城东湖;表层沉积物;营养盐;污染评估

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2023)05-2583-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202206068

Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County

LIU Hai, ZHAO Guo-hong

(Public Geological Survey Management Center in Anhui Province, Hefei 230091, China)

Abstract: To clarify the spatial distribution and pollution characteristics of nutrients in the surface sediments of Chengxi Lake and Chengdong Lake in Huoqiu County, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and organic matter (OM) in 30 surface sediment samples of Chengxi Lake and Chengdong Lake were determined, and their pollution levels and sources were analyzed. The results showed that the contents of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and organic matter (OM) in Chengxi Lake were significantly higher than those in Chengdong Lake, and their average contents were $746.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $538.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and 1.17% and $470.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $492.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and 0.68% , respectively. The spatial distribution in the north and northwest of Chengxi Lake was significantly higher than that in other areas and decreased from north to south. The C/N value indicated that the organic matter in Chengxi Lake and Chengdong Lake mainly came from unbundled plants and phytoplankton. Correlation analysis showed that total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and organic matter (OM) in Chengxi Lake and Chengdong Lake were homologous. The average values of TN and TP single index (S_{TN} and S_{TP}) of sediments in Chengxi Lake and Chengdong Lake were 0.67 and 1.18 and 0.42 and 1.08, respectively, indicating that TN in the two lakes was clean whereas TP was moderately polluted, and the average comprehensive pollution index (FF) was 1.51 and 1.31, respectively. The evaluation of organic index and organic nitrogen index showed that both Chengxi Lake and Chengdong Lake were clean.

Key words: Huoqiu County; Chengxi Lake; Chengdong Lake; surface sediments; nutrients; pollution assessment

沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,为底栖生物和水生植物提供重要物质基础的同时^[1],也担任着营养盐、重金属等污染物的“源”和“汇”^[2-4]。当前,湖泊富营养化已成为近年来国内外关注的一个重要环境问题^[5-7],而沉积物是造成湖泊水体富营养化的主要来源之一^[8,9]。沉积物中营养元素的分布特征在一定程度上能反映出湖库的污染程度及地球化学信息^[1,10],因此,开展湖泊沉积物中营养盐特征及污染的研究,对提升湖泊生态环境质量具有重要意义。

氮、磷等既是水生生物生长所必需的营养盐分,也是湖泊水体及沉积物富营养化的主要驱动因素,而有机质为沉积物中重要的胶体,影响污染物的迁移和转化^[11-13]。近年来,国内外相关学者对沉积物总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM)等营养元素的分布特征和污染状况开展了广泛研究,研究的

对象大体包括湖泊^[9-15]、水库^[16-18]、湿地^[19,20]和河流^[21,22]等。如国内卢少勇等^[6]、张杰等^[12]和王艳平等^[14]分析了湖泊沉积物的TN、TP和OM,基于污染指数法和有机指数法等方法评价湖区沉积物的污染状况,采用C/N和C/P确定来源;国外Lone等^[23]利用C/N研究了印度3个淡水湖泊沉积物中OM的来源,Amor等^[24]利用C/N和C/P研究了突尼斯Monastir湾沉积物中营养盐的来源。前人的研究为湖泊沉积物污染物分布特征和污染状况评价方面提供了良好的解决方法。然而以往的研究对象大多是比较典型而且单一的湖泊或水库,但对于典型内陆同一地区不同湖泊的对比研究略显不足。

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-07-26

基金项目: 安徽省自然资源厅公益性项目(2018-g-1)

作者简介: 刘海(1984~),男,博士,主要研究方向为生态环境风险评价与修复, E-mail: 103304365@qq.com

城东湖和城西湖是安徽省霍邱县城内的两个典型湖泊(图1). 近年来调查结果显示,两湖水质及沉积物均有富营养化的趋势^[25,26]. 然而以往的研究仅集中于单一湖泊且采样点较少,代表性不足,尤其是对于城东湖和城西湖沉积物的营养状况和污染特征研究不足. 鉴于此,本研究采用野外调查和取样测试

分析相结合的手段,分析城东湖和城西湖沉积物 TN、TP 和 OM 等营养盐空间分布特征,采用综合污染指数、有机氮指数和有机污染指数评价其污染等级和风险,利用 Pearson 相关性分析 C/N 和 C/P 的关系来确定营养盐来源,提出相应的防控措施,以期 为污染排放管控和水质提升提供科学依据.

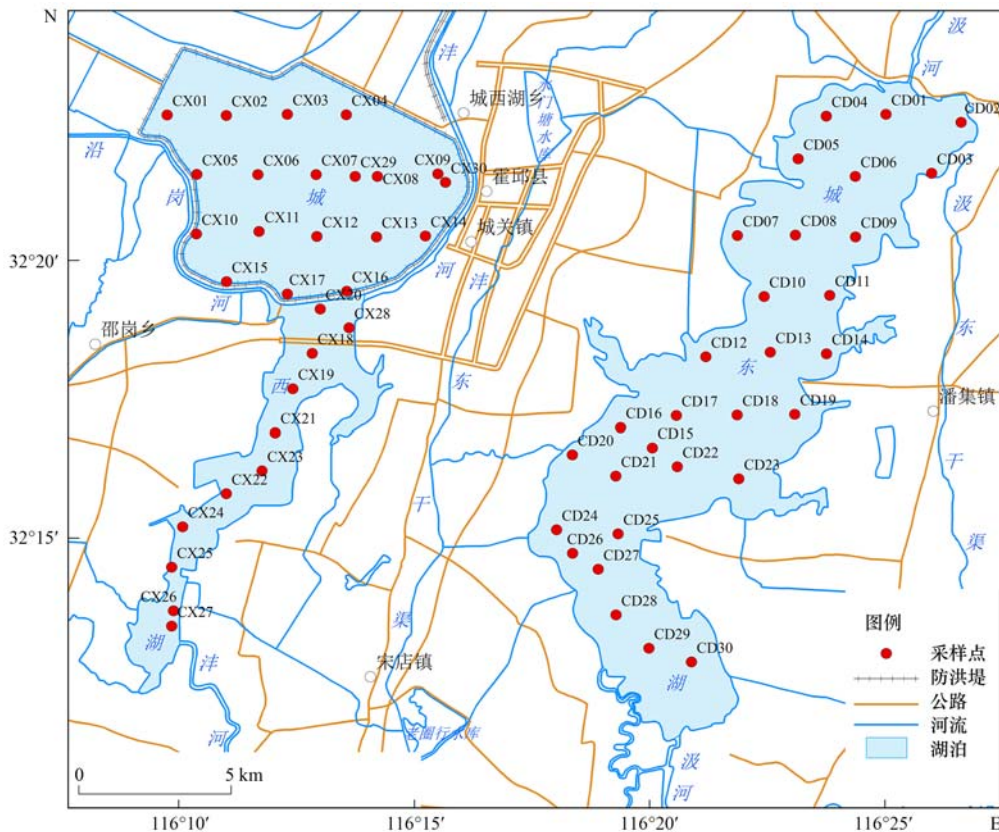


图1 采样位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in study area

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处安徽省西北部,大别山北麓,淮河南游南岸.地势南高北低,自西南向北东呈变低缓趋势.西部为丘陵,中部岗地相间的浅丘状和波状平原,北部和东部为河湖平原.区内年平均气温为 14.6 ~ 15.6℃,多年平均降水量为 1 008.5 ~ 1 545.7 mm,多年平均蒸发量 1 395.0 mm.

城东湖位于淮河右岸支流汲河的下游,城东湖地形狭长,东西平均宽度 5 ~ 6 km,南北平均长度 30 km,湖底高程 17.8 m,面积约 180 km²,城东湖主要来水为汲河,于三流集注入后,穿湖而过,河湖一体,自南向北流,至溜子口注入淮河.

城西湖位于淮河右岸沔河下游,地处霍邱县城西侧,南承沔河全部来水,东西纳沿岗河全部来水及地面径流.城西湖正常水位在 20.5 m 左右,高水位时达 24.5 m.湖区汇水总面积 1 750 km²,是淮河中

游最大的蓄洪区.洪水期受淮河顶托作用明显.湖区西部为深水区,目前湖区周边已建成了防洪堤.

城西湖和城东湖目前在沿湖低洼地建设龙虾养殖带,而在湖湾建设河虾围网养殖区,湖区流域分布较多畜禽养殖场.城东湖和城西湖流域内大宗农作物以水稻为主.

1.2 样品采集与测试

基于 GPS 定位采用网格化方式布点,采样密度为每 4 km⁻² 1 个点.利用重力式柱状采泥器采集湖底 0 ~ 20 cm 的连续土壤柱,共采集沉积物样品 60 件,其中城东湖 30 件,城西湖 30 件(图1).沉积物样品自然阴干,用木锤加工后过 20 目筛,送检样品重量约 200 g,平行样约 350 g.然后送实验室测试.

选择使用离子选择性电极法(ISE)测定 pH, TN 和 TP 含量的测定按照《湖泊富营养化调查规范》^[27]中 TN 和 TP 的测定方法进行. TN 含量采用重铬酸钾-硫酸消化法测定; TP 含量测定采用高氯酸-硫酸酸熔-钼锑抗比色法测定. OM 含量采用烧失

量法(550℃,焙烧 5 h)测定. 为保证测定结果的准确性和精度,测量过程中所有样品均平行试验 3 次,并用国家一级标准物质(GBW07408)进行回收试验,回收率的范围为 90%~110%,所有样品分析误差均小于 10%,符合质量控制要求.

1.3 沉积物污染评估方法

目前,国内外对浅水湖泊沉积物污染状况的评价尚缺乏统一的标准与方法,本研究采用综合污染指数法和有机污染指数法评价湖泊表层沉积物的污染状况.

1.3.1 综合污染指数法

综合污染指数法以单项评价指数为基础^[12]. 其

单因子指数法计算公式如下:

$$S_i = C_i/C_s \tag{1}$$

式中, i 为评价因子, S_i 为单因子的评价指数, C_i 为评价因子的实测值, C_s 为评价因子的标准值, 本文选取中国东部浅水湖泊的基准阈值作为标准值^[14,26].

综合污染指数公式如下:

$$FF = \sqrt{(F^2 + F_{\max}^2)/2} \tag{2}$$

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. 沉积物综合污染程度分级标准见表 1.

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

表 1 沉积物综合污染程度分级标准^[12]

Table 1 Standard of comprehensive pollution index in sediments				
等级划分	S_{TN}	S_{TP}	FF	污染程度
I	$S_{TN} < 1.0$	$S_{TP} < 0.5$	$FF < 1.0$	清洁
II	$1.0 \leq S_{TN} < 1.5$	$0.5 \leq S_{TP} < 1.0$	$1.0 \leq FF < 1.5$	轻度污染
III	$1.5 \leq S_{TN} < 2.0$	$1.0 \leq S_{TP} < 1.5$	$1.5 \leq FF < 2.0$	中度污染
IV	$S_{TN} \geq 2.0$	$S_{TP} \geq 1.5$	$FF \geq 2.0$	重度污染

指标,由有机氮和有机碳两个部分组成,其分级标准见表 2,计算公式如下^[12,28~32]:

$$OI = \omega(OC) \times \omega(ON) \tag{3}$$

$$\omega(OC) = \omega(OM)/1.724 \tag{4}$$

$$\omega(ON) = \omega(TN) \times 0.95 \tag{5}$$

式中, OI 表示有机指数, $\omega(OC)$ 表示有机碳含量,%, $\omega(ON)$ 表示有机氮含量,%, $\omega(OM)$ 表示有机质含量,%, $\omega(TN)$ 表示总氮含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

表 2 沉积物有机氮与有机指数评价标准^[12]

Table 2 Evaluation standard of organic nitrogen and organic index in sediments								
项目	$\omega(ON)/\%$				有机指数			
	< 0.033	$0.033 \sim 0.066$	$0.066 \sim 0.133$	> 0.133	< 0.05	$0.05 \sim 0.20$	$0.20 \sim 0.50$	> 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 数据处理

数据处理与分析采用 Excel 2013 和 SPSS26.0 软件,基于 Origin2021 和 ArcGIS10.8 平台绘制图表.

沉积物 TN 的空间分布差异明显,高值区主要位于城西湖的北部,尤其是在防洪堤内 CX07 和 CX08 附近(图 1 和图 2),由北往南呈递减趋势;城

2 结果与讨论

2.1 沉积物营养盐含量

2.1.1 沉积物 TN 含量和分布

全区湖泊沉积物 $\omega(TN)$ 变幅为 $316.68 \sim 1\,865.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $608.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数为 51.47%. 不同湖区 TN 含量差异显著,其中城西湖沉积物 $\omega(TN)$ 在 $389.76 \sim 1\,865.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,变异系数为 52.25%;城东湖沉积物 $\omega(TN)$ 在 $316.68 \sim 662.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,变异系数为 16.78%,城西湖沉积物 $\omega(TN)$ 平均值($746.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于城东湖($470.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)($P < 0.001$).

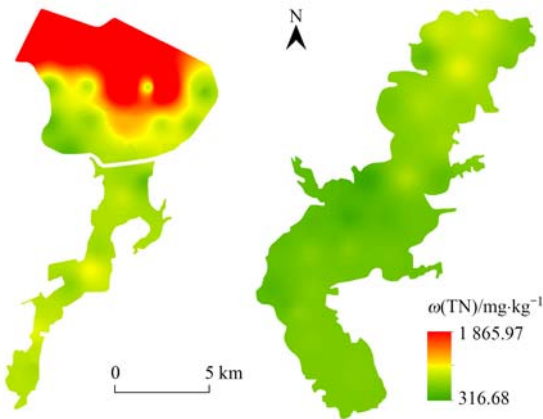


图 2 沉积物总氮含量及空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of total nitrogen(TN) content of the sediments

东湖整体处于低值区(图2)。

2.1.2 沉积物 TP 含量和分布

全区湖泊沉积物 $\omega(\text{TP})$ 在 $387.84 \sim 771.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $515.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 13.18% 。不同湖区的 TP 含量也差异明显,其中城西湖沉积物的 $\omega(\text{TP})$ 介于 $417.03 \sim 771.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 12.36% ;城东湖沉积物 $\omega(\text{TP})$ 在 $387.84 \sim 636.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,变异系数为 12.39% 。城西湖沉积物 $\omega(\text{TP})$ 平均值 ($538.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于城东湖 ($492.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.01$)。

沉积物 TP 的空间分布差异明显,与 TN 的空间分布不同,城西湖和城东湖的北部均为高值区,呈由北部向南呈递减趋势(图3)。

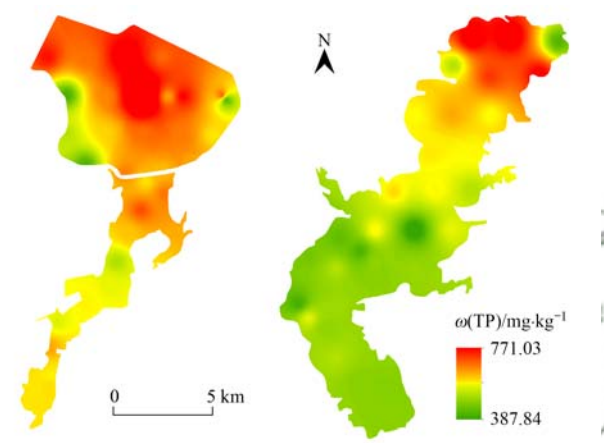


图3 沉积物总磷含量及空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of total phosphorus (TP)
content of the sediments

2.1.3 沉积物 OM 含量和分布

全区湖泊沉积物 $\omega(\text{OM})$ 在 $0.18\% \sim 3.23\%$ 之间,平均值为 0.92% ,变异系数为 62.94% 。不同湖区的 $\omega(\text{OM})$ 也差异明显,其中城西湖沉积物的 $\omega(\text{OM})$ 在 $0.51\% \sim 3.23\%$ 之间,变异系数为 62.10% ;城东湖沉积物 $\omega(\text{OM})$ 在 $0.18\% \sim 0.98\%$ 之间,变异系数为 27.82% 。城西湖沉积物 $\omega(\text{OM})$ 平均值 (1.17%) 显著高于城东湖 (0.68%) ($P < 0.001$)。

沉积物 OM 的空间分布与 TN 的空间分布基本一致,其高值区位于城西湖的北部深水区域。城东湖整体为低值区(图4)。

2.2 沉积物营养盐溯源

2.2.1 沉积物营养盐相关性

城西湖和城东湖沉积物 TN、TP 和 OM 的相关系数如表3所示。研究区湖泊中 TN、TP 和 OM 三者之间呈极显著相关($P < 0.01$),且相关系数均大于 0.5 ,尤其是城西湖 TN 和 OM 的相关系数达 0.990 。

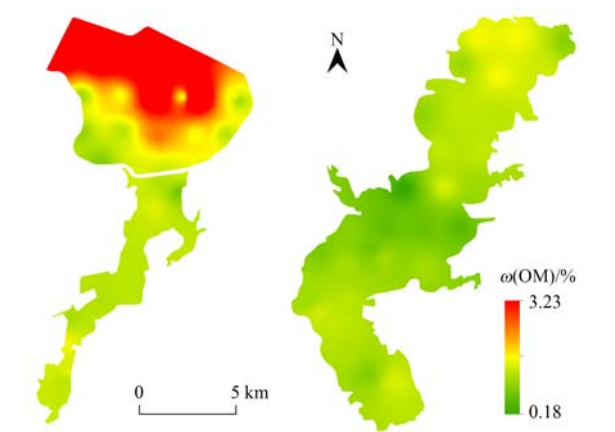


图4 沉积物 OM 含量及空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of organic matter (OM)
content of the sediments

相关研究表明,沉积物中总氮的 $70\% \sim 90\%$ 是以有机氮的形式存在^[33],城西湖和城东湖沉积物 TN 和 OM 的相关关系从侧面验证了以往研究成果。有研究表明沉积物中有机质与 TP,尤其是有机磷的生物地球化学循环有密切联系^[34]。卢少勇等^[6]指出沉积物有机质的矿化过程与沉积物中氮、磷,尤其是磷的物质来源和沉积变化过程有着密切的联系。Angeler 等^[35]研究也发现有机碎屑的分解过程中往往伴随着氮、磷营养元素的释放。TP 和 OM 呈极显著相关表明有机质也是磷的载体^[36]。研究区沉积物中 TN、TP 和 OM 这3种营养盐的高值区均位于城西湖的北部(图2和图3)。城西湖的 TN、TP 和 OM 具有相似的空间分布特征(图2~4),表明城西湖中 TN、TP 和 OM 可能具有相似的物质来源;城东湖中仅有 TN 和 OM 具有相似的空间分布特征,表明城东湖中 TN 和 OM 可能具有相似的物质来源。

表3 沉积物 TN、TP 和 OM 相关系数¹⁾

Table 3 Correlations of organic matter (OM), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of sediments				
湖泊		TN	TP	OM
城西湖	TN	1		
	TP	0.726 **	1	
	OM	0.990 **	0.713 **	1
城东湖	TN	1		
	TP	0.624 **	1	
	OM	0.816 **	0.522 **	1

1) ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著

城西湖和城东湖北部靠近霍邱县城,城镇生活污水的无序排放导致营养盐富集;湖区流域为典型的水稻种植区,农业种植中化肥、农药施用量大,由于施用不合理造成大量氮磷流失,近年来秸秆还田体量大,秸秆浸沤产生大量氮磷等有机物,遇雨天或河流退水,大量农业化学和有机物随地表径流排入

河道,最终进入湖区并加剧了营养盐的富集. 湖区流域内大量畜禽养殖场等点源由于粪污处理设施不配套,导致大量粪污直排入养殖场附近的农田、沟、渠、堰和塘中,终随地表径流进入河湖也导致营养盐富集累积. 湖区也是水产养殖的主要区域,在养殖过程中,残存的饵料、鱼类的排泄物以及其他废物等也是营养盐富集的主要原因^[37].

另外值得注意的是城西湖北部沉积物 TN、TP 和 OM 均为高值区(图 2~4),城西湖北部湖区修建了防洪堤,防洪堤修建导致水动力交换较弱,泥沙淤积的时间较长,淤积较严重,导致氮富集严重,表明营养盐的分布和富集受水动力交换程度有关,这与国内外研究成果较为一致,即水动力特征是影响沉积物污染空间分布的驱动因子之一^[8,32]. 此外,发现城西湖北部水生植物较其它湖区异常茂盛,水生植物的死亡、腐烂沉积也导致营养盐的富集^[12].

综上所述,农业面源径流、城镇生活污水和畜禽养殖污染物无序排放等是城西湖和城东湖沉积物 TN 和 TP 的重要来源,沉积物中营养盐的内源负荷不容忽视.

2.2.2 沉积物 C/N 和 C/P 特征分析

沉积物中的 C/N 值能大致反映有机来源的差异性,一般情况下,浮游动物的 C/N 小于 7,浮游植

物的 C/N 在 4~6 之间; C/N 大于 20 的为有纤维束植物碎屑,介于 4~12 之间的为无纤维束植物^[38~40]. C/N $\approx$ 10 时,表明沉积物内、外源有机质基本达到平衡状态,小于 10 时有机质以内源为主,大于 10 时以陆源为主. 因此, C/N 可用来区分湖泊、水库和海洋等水体沉积物中有机质的来源^[38~40].

城西湖沉积物中 C/N 的分布范围为 6.39~10.53,平均值为 8.76,有 4 个样点的 C/N>10; 城东湖沉积物中 C/N 在 3.32~12.20 之间,平均值为 8.32,有 3 个样点的 C/N>10. 表明城西湖和城东湖沉积物有机质均以内源为主. 除城东湖有一个样点(CD12)的 C/N 小于 4 和一个样点(CD26)的 C/N 大于 12 外,其余均处于 4~12 之间,表明研究区湖泊沉积物有机质主要来源于无纤维束植物和浮游植物. C/N 的高值区主要分布在城西湖的西北部和城东湖的西南部(图 5). 城西湖北部水深较深,而且整个湖区周边已建成防洪堤,导致换水周期长,沉积物中的有机质难以迁移并长期淤积,正是由于水深的原因湖区容易形成厌氧环境,反硝化作用会导致 N 含量降低,从而形成较高的 C/N^[18],此外也有可能湖区养殖和城镇生活污水等陆源 OM 进入湖区后无法迅速彻底分解而沉淀下来,是造成 C/N 高值的重要原因^[12,41]. 而城东湖的西南部主要是受养殖和城镇生活污水等陆源的影响.

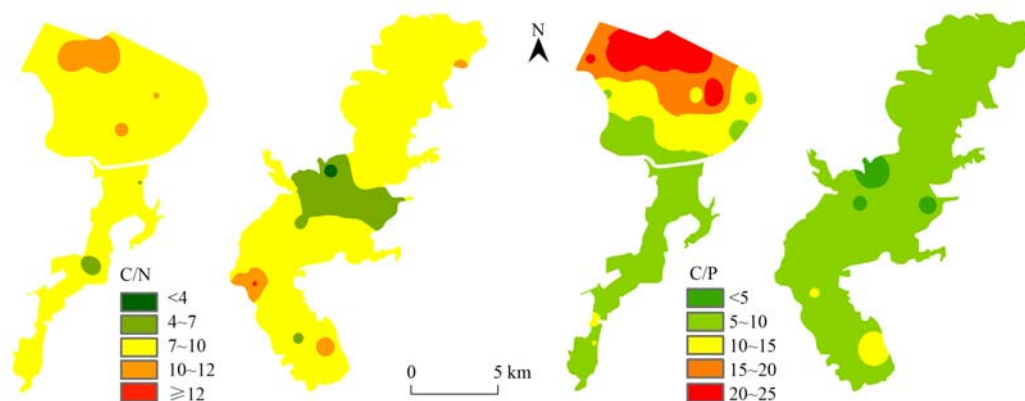


图5 沉积物 C/N 及 C/P 的空间分布

Fig. 5 Distribution of C/N and C/P ratios of sediments

C/P 值可大致反映沉积物中有机碳和磷化合物的分解速率和磷的存在形态^[39]. 城西湖沉积物 C/P 值在 5.24~30.78 之间,平均值为 12.11; 城东湖沉积物 C/P 值介于 2.02~11.17,平均值为 8.04. C/P 值的高值区位于城西湖的北部,与前述的含量水平、污染状况分布极为相似. 城西湖北部位于霍邱县城西边,城镇生活污水和农业面源污染径流等导致有机质在沉积物表层累积,形成表层富集现象,导致北部湖区 C/P 值增大. 相关研究发现,沉积物中磷以无机磷形态为主(占总磷的 79% 以上),铁结合态磷

是无机磷的重要组成部分,沉积物底层缺氧程度较表层严重,促进了有机磷的矿化分解成溶解态^[42]. 该区域水较深容易形成厌氧环境,促进了铁结合态磷的富集; 调查时发现城西湖北部区域水生植物较为旺盛,水生生物凋亡后,生物中磷将快速分解释放,尤其是 Fe/Al-P 和 OP 的释放,从而导致沉积物中 C/P 处于较高值^[12].

2.3 沉积物营养盐污染评价

2.3.1 综合污染指数

城西湖沉积物 S_{TN} 介于 0.35~1.68,平均值为

0.67; 城东湖的 S_{TN} 在 0.29 ~ 0.60 之间, 平均值为 0.42, 城西湖的 S_{TN} 显著高于城东湖 ($P < 0.01$). 城东湖 TN 处于清洁状态, 而城西湖有 5 个样点处于轻度污染状态, 有 1 个样点 (CX08) 为中度污染状态, 其余样点均处于清洁状态. 其污染区域位于北部 (图 6), 这可能与湖区水生植被分布集中、水生生物量大密切相关, 也可能与城西湖防洪堤的修建导致湖区水动力缓慢而污染物易于沉积有关.

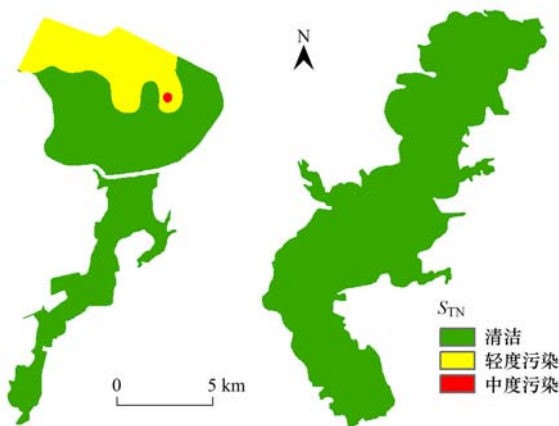


图 6 沉积物 S_{TN} 空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution of S_{TN} of the sediments

城西湖沉积物 S_{TP} 介于 0.91 ~ 1.69, 平均值为 1.18; 城东湖的 S_{TP} 在 0.85 ~ 1.39 之间, 平均值为 1.08, 城西湖的 S_{TP} 显著高于城东湖 ($P < 0.01$). 城西湖绝大部分样点 (86.7%) 处于中度污染状态, 轻度污染状态的样点有 3 个, 重度污染状态有 1 个 (CX07). 城西湖的重度污染分布在防洪堤湖区中心位置, 轻度污染分布在湖区西北部边缘区域 (图 7). 城东湖绝大部分样点 (73%) 处于中度状态, 轻度污染状态的样点有 8 个, 轻度污染区域主要分布在湖区中心、东北部和南部 (图 7).

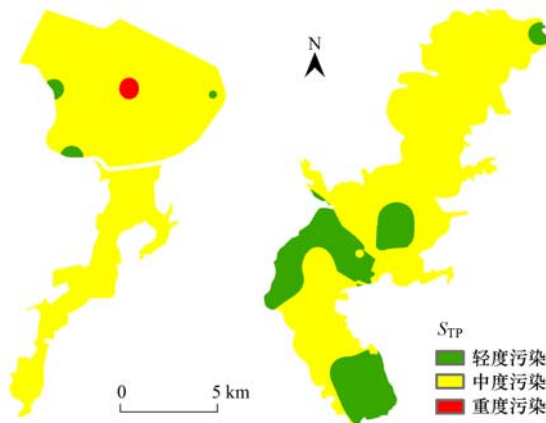


图 7 沉积物 S_{TP} 空间分布特征

Fig. 7 Spatial distribution of S_{TP} of the sediments

城西湖沉积物综合污染程度 (FF) 介于 1.12 ~ 2.31, 平均值为 1.51; 城东湖的 FF 在 1.04 ~ 1.70

之间, 平均值为 1.31, 城西湖的 FF 显著高于城东湖 ($P < 0.01$). 城西湖表层沉积物营养盐 FF 处于轻度、中度和重度污染状态的采样点占 66.67%、26.67% 和 6.67%. 中度污染以上区域主要分布在北部 (图 8), 尤其是湖区样点 CX07 和 CX08 周边. 而城东湖表层沉积物营养盐 FF 处于轻度和中度污染状态的采样点占 86.67% 和 13.33%, 中度污染区域仅在城东湖的东北部靠近防洪闸处 (图 8), 该处水动力交换弱, 泥沙淤积严重.

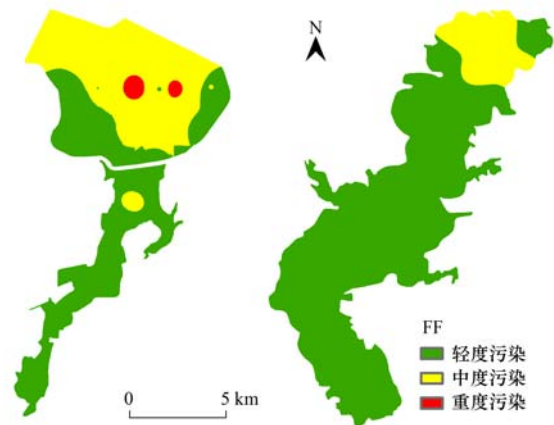


图 8 沉积物综合污染指数空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution of comprehensive pollution index for nutrients in the surface sediments

综上所述, 城西湖和城东湖的 S_{TN} 、 S_{TP} 和 FF 的空间分布与沉积物中 TN 和 TP 的空间分布相似. 从污染的统计分析和分布特征分析, TP 是研究区湖泊沉积物的主要污染物. 应重点关注 TP 的污染源和防控措施. TP 污染分布主要与城镇生活污水、畜禽养殖污染和农业面源降雨径流入湖有关, 另外也要关注水生植物沉积的内源负荷的影响.

2.3.2 有机氮和有机指数

城西湖沉积物 $\omega(ON)$ 的变化范围为 0.037% ~ 0.177%, 平均值为 0.071%, 整体上处于较清洁状态. 在所采样点中处于较清洁、尚清洁和有机氮污染的比例分别为 76.67%、16.67% 和 6.67%. 城东湖沉积物中 $\omega(ON)$ 的变化范围为 0.030% ~ 0.063%, 平均值为 0.045%, 整体上处于较清洁状态, 不存在有机氮污染. 在所采样点中处于清洁和较清洁的比例分别为 6.67% 和 93.33%.

城东湖沉积物有机指数变化范围为 0.003 ~ 0.036, 平均值为 0.018. 整体处于清洁状态. 城西湖沉积物有机指数变化范围为 0.012 ~ 0.332, 平均值为 0.063. 整体上处于清洁 ~ 较清洁状态. 其中清洁、较清洁和尚清洁所占比例分别为 80.00%、13.33% 和 6.67%. 城西湖和城东湖不存在有机污染.

有机氮和有机指数在空间分布上具有较好的一

致性(图9),表现为城西湖北部,在修建防洪堤的湖区中心位置存在有机氮污染和较高的有机指数分布区域,其余区域处于清洁~较清洁状态(图9)。城西湖和城东湖北部靠近霍邱县城,有机氮和有机污染

主要与城镇生活污水、畜禽养殖污染和农业面源降雨径流入湖有关,另外也要关注水生植物沉积的内源负荷的影响。另外,该区域由于修建了防洪堤导致湖区水动力滞缓,不利于污染物的迁移。

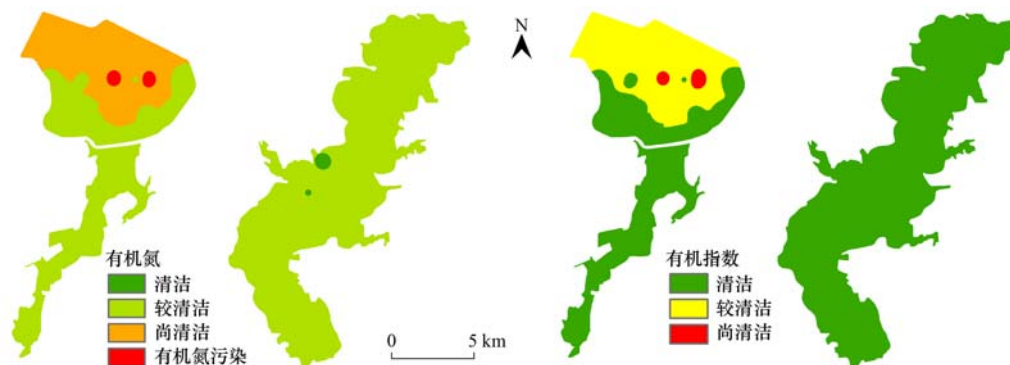


图9 表层沉积物有机氮和有机指数

Fig. 9 Organic nitrogen and organic index in the surface sediments of study area

2.4 沉积物营养盐污染重点管控区域及建议

总磷是城东湖和城西湖沉积物的主要污染物,城西湖全区属于中度污染以上,城东湖除湖区西南部小范围处于清洁状态外,其余区域均为轻度污染~中度污染。尽管有机污染整体较轻,但在城西湖北部仍较严重。城西湖和城东湖是霍邱县城镇生活、工业和农业灌溉的主要取水源地,调查时发现,城西湖及其主要支流沔河、沿岗河共有12处入河湖排污口。城东湖上有8处入河湖排污口。生活污水和工业废水对湖区污染也造成较大的影响。因此对湖区的沉积物的总磷和有机污染仍需加强管控。城西湖和城东湖总磷和有机物污染主要是由于该区农业面源污染、城镇生活污水和水产养殖的无序排放造成。水深较深形成厌氧环境,水生植物茂盛,水生植物残骸和凋落物大量腐烂沉积也造成一定的污染,此外可能还接受淮河的顶托作用带来的污染。

城西湖和城东湖污染程度不一,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磷和有机污染。就城西湖而言,应该减少农业面源污染、养殖和城镇生活污水的无序排放,建立长效机制,增强全区人员的生态环保意识,同时加强湖区大畜禽养殖场和散养户的管控,尽量做到污染有序排水,减少对湖区污染的排放。同时对湖区水生植物结构优化调控,根据水生植物生长情况,定期开展对生长茂盛的水生植物进行清理,从而消除水生植物凋落后腐烂沉积造成的二次污染。从而降低城西湖沉积物中总磷和有机污染。考虑到城西湖水深,防洪堤修建导致湖区水动力不足问题,建议采取合理措施加快湖区的换水周期,适当对湖区污染底泥进行疏浚,消除总磷和有机污染。就城东湖而言,主要是加强对农业面源污染、养殖和城镇生活污水的管控。

3 结论

(1)霍邱县城湖泊沉积物TN、TP和OM的空间分布较为一致,表现为城西湖沉积物TN、TP和OM明显高于城东湖,三者最高值均位于城西湖的北部,大致呈由北向南呈递减趋势,空间分布差异显著。

(2)城西湖和城东湖沉积物TN、TP和OM大致具有相同的来源,农业面源径流、城镇生活污水和畜禽养殖废物无序排放等是城西湖和城东湖沉积物TN和TP的重要来源,并且TN和TP都受到湖区水动力因素的制约。沉积物有机质均以内源为主。

(3)城西湖的 S_{TN} 、 S_{TP} 和FF显著高于城东湖,而且最高值均位于城西湖的北部,TP是城西湖和城东湖的主要污染物。两湖泊不存在有机污染,但城西湖北部存在有机氮污染。

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] Li Y Y, Gao B, Xu D Y, et al. Hydrodynamic impact on trace metals in sediments in the cascade reservoirs, North China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136914.
- [3] 刘昔,邓兆林,张露,等.洪湖沉积物内源污染及其氮磷释放特征[J].环境科学研究,2022,35(1):80-88.
Liu X, Deng Z L, Zhang L, et al. Sediment endogenous pollution and release characteristics of Honghu Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(1): 80-88.
- [4] 包宇飞,胡明明,王殿常,等.黄柏河梯级水库沉积物营养盐与重金属分布特征及污染评价[J].生态环境学报,2021,

- 30(5): 1005-1016.
- Bao Y F, Hu M M, Wang D C, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrients and heavy metals in sediments of the cascade reservoirs in Huangbai River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(5): 1005-1016.
- [5] 王汗, 燕文明, 吴挺峰, 等. 里下河区浅水湖泊表层沉积物营养盐溯源分析[J]. *水电能源科学*, 2017, **35**(10): 149-152.
- Wang H, Yan W M, Wu T F, *et al.* Traceability analysis of nutrients in surface sediments of shallow lakes in Lixiahe region [J]. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(10): 149-152.
- [6] 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.
- [7] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- Miao H, Shen Z, Jiang Y, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- [8] 任静雯, 王佳俊, 周磊, 等. 拉鲁湿地沉积物碳氮磷分布及污染风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(2): 172-181.
- Ren J W, Wang J J, Zhou L, *et al.* Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of Lhalu Wetland in dry and wet seasons and its pollution risk assessment [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(2): 172-181.
- [9] Huang B, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Changes in chemical fractions and ecological risk prediction of heavy metals in estuarine sediments of Chunfeng Lake estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **138**: 575-583.
- [10] 孟亚媛, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 471-480.
- Meng Y Y, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of nitrogen pollution and the potential mineralization in surface sediments of Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 471-480.
- [11] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [12] 张杰, 汪院生, 郭西亚, 等. 草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4497-4504.
- Zhang J, Wang Y S, Guo X Y, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrients in the surface sediments of a macrophyte-dominated zone in Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4497-4504.
- [13] Yang C H, Yang P, Geng J, *et al.* Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114292.
- [14] 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 699-711.
- Wang Y P, Xu W W, Han C, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and pollution evaluation [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 699-711.
- [15] 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 等. 近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3523-3531.
- Chen T Y, Liu C Q, Shi X L, *et al.* Ten-year trend analysis of eutrophication status and the related causes in Lake Hongze [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3523-3531.
- [16] 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 等. 宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5400-5409.
- Cui H F, Chen S Y, Yang C H, *et al.* Endogenous pollution and release characteristics of bottom sediments of Hengshan Reservoir in Yixing city [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5400-5409.
- [17] 孙文, 王理明, 刘吉宝, 等. 北运河沙河水库沉积物营养盐分布特征及其溯源分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(5): 1581-1589.
- Sun W, Wang L M, Liu J B, *et al.* Nutrients distribution and its sources analysis of sediments in Shahe reservoir of Northern Canal [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1581-1589.
- [18] 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.
- [19] 陈兴宏, 李立青, 张美一, 等. 白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 230-238.
- Chen X H, Li L Q, Zhang M Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals in sediments of the Fuhe river in fluvial area, Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 230-238.
- [20] 李慧, 雷沛, 李珣, 等. 天津市北大港湿地沉积物氮磷分布特征及污染评价[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(10): 4086-4096.
- Li H, Lei P, Li X, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen and phosphorus in sediments from Beidagang Wetland in Tianjin City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(10): 4086-4096.
- [21] 刘斌, 盛恩国, 蔡深文, 等. 赤水河流域中游沉积物营养元素分布特征及污染评价[J]. *地球环境学报*, 2021, **12**(2): 214-223.
- Liu B, Sheng E G, Cai S W, *et al.* Study on distribution characteristics and pollution evaluation of nutrient elements in surface sediments in the middle Chishui River, southwestern China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2021, **12**(2): 214-223.
- [22] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- Bai D R, Zhang T, Chen T, *et al.* Distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus bearing pollutants in the ancient town rivers of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- [23] Lone A M, Shah R A, Achyuthan H, *et al.* Source identification of organic matter using C/N ratio in freshwater lakes of Kashmir Valley, western Himalaya, India [J]. *Himalayan Geology*, 2018, **39**(1): 101-114.
- [24] Amor R B, Jerbi H, Abidi M, *et al.* Assessment of trace metal contamination, total organic carbon and nutrient accumulation in surface sediments of Monastir Bay (Eastern Tunisia, Mediterranean Sea) [J]. *Regional Studies in Marine Science*,

- 2020, **34**, doi: 10.1016/j.rsma.2020.101089.
- [25] 刘清学, 霍守亮, 咎逢宇, 等. 安徽省湖泊富营养化现状调查与评价[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(8): 4626-4629.
Liu Q X, Huo S L, Zan F Y, *et al.* Investigation and evaluation on the eutrophication of Lakes in Anhui province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(8): 4626-4629.
- [26] 王健, 张靖天, 咎逢宇, 等. 中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 992-999.
Wang J, Zhang J T, Zan F Y, *et al.* Study on sediment TN and TP criteria in eastern shallow lakes, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(6): 992-999.
- [27] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [28] 李芬芳, 黄代中, 连花, 等. 洞庭湖及其入湖口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(12): 2307-2313.
Li F F, Huang D Z, Lian H, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in the surface sediments of Dongting Lake and its lake inlets[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(12): 2307-2313.
- [29] 张杨, 许梦雅, 张超, 等. 白洋淀村落水域沉积物中营养元素和重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(10): 4074-4085.
Zhang Y, Xu M Y, Zhang C, *et al.* Distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals and its risk assessment in sediments around villages in Baiyangdian Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(10): 4074-4085.
- [30] Zhang W Q, Jin X, Liu D, *et al.* Assessment of the sediment quality of freshwater ecosystems in eastern China based on spatial and temporal variation of nutrients[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(23): 19412-19421.
- [31] 方家琪, 祁闯, 张新厚, 等. 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5367-5374.
Fang J Q, Qi C, Zhang X H, *et al.* Spatial distribution and pollution evaluation of carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5367-5374.
- [32] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3064-3069.
Gan S, Lu S Y, Qin P F, *et al.* Spatial distribution and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments from western lakeside belt of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3064-3069.
- [33] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 281-292.
Li H, Pan X J, Shi L Q, *et al.* Research progress on the analytical methods and characteristic of endogenous nitrogen and phosphorus pollution in lakes [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(1): 281-292.
- [34] Ribeiro D C, Martins G, Nogueira R, *et al.* Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal) [J]. Chemosphere, 2008, **70**(7): 1256-1263.
- [35] Angeler D G, Sánchez-Carrillo S, García G, *et al.* The influence of *Procambarus clarkii* (Cambaridae, Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland[J]. Hydrobiologia, 2001, **464**(1-3): 89-98.
- [36] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. Organic Geochemistry, 1993, **20**(7): 867-900.
- [37] 张弘杰, 秦梦钰, 胡方旭, 等. 渔业养殖对东太湖沉积物氮磷营养盐的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(S1): 206-211.
Zhang H J, Qin M Y, Hu F X, *et al.* Effects of aquaculture on nitrogen and-phosphorus nutrients in sediments of Eastern Lake Taihu [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(S1): 206-211.
- [38] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. Chemical Geology, 1994, **114**(3-4): 289-302.
- [39] Faganeli J, Planinc R, Pezdič, *et al.* Marine geology of the Gulf of Trieste (northern Adriatic): Geochemical aspects[J]. Marine Geology, 1991, **99**(1-2): 93-108.
- [40] Dan S F, Liu S M, Yang B, *et al.* Geochemical discrimination of bulk organic matter in surface sediments of the Cross River estuary system and adjacent shelf, South East Nigeria (West Africa) [J]. Science of the Total Environment, 2019, **678**: 351-368.
- [41] 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.
- [42] 于洋, 王晓燕, 吴在兴, 等. 沉积物中核酸态有机磷及其矿化过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1469-1472.
Yu Y, Wang X Y, Wu Z X, *et al.* Mineralization process of the organic phosphorus in nucleic acid from sediment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(7): 1469-1472.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwlun Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)