

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测

刘海¹, 魏伟^{2*}, 宋阳¹, 潘杨¹

(1. 安徽省公益性地质调查管理中心, 合肥 230091; 2. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 成都 611830)

摘要: 为阐明霍邱县城西湖和城东湖沉积物重金属的环境容量, 在城西湖和城东湖各采集了 30 件沉积物样品, 运用综合环境容量指数法 (PI), 研究了城西湖和城东湖沉积物重金属环境容量特征及空间分布规律, 估算了静态和动态环境容量, 预测了近百年的变化趋势。结果表明, 城西湖和城东湖沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量均值未超过国家规定的土壤风险筛选值; 城西湖和城东湖沉积物各重金属元素单项环境容量指数平均值大小分别为: Ni(0.81) < Zn(0.83) < Cu(0.88) < Cr(0.91) < As(0.95) < Cd(0.98) = Pb(0.98) < Hg(1.00) 和 Ni(0.89) < Zn(0.91) < Cu(0.96) < Cr(0.98) = As(0.98) < Hg(1.01) = Pb(1.01) < Cd(1.17), 除城东湖沉积物中 Hg、Pb 和 Cd 为高容量状态外, 其余元素基本处于中容量状态。城东湖的综合环境容量指数 PI 均值显著高于城西湖, 城西湖和城东湖整体上处于中容量水平。城西湖沉积物各重金属元素的静态总容量均小于城东湖, 静态总容量和现存容量的大小排序相同, 表现为: Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd。5 ~ 20 a 之内静态和动态年容量变化速度大于其他年限容量变化速度, 各年限动态年容量均大于静态年容量。

关键词: 沉积物; 重金属; 环境容量; 城西湖; 霍邱县

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-6106-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202211011

Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County

LIU Hai¹, WEI Wei^{2*}, SONG Yang¹, PAN Yang¹

(1. Public Geological Survey Management Center of Anhui Province, Hefei 230091, China; 2. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611830, China)

Abstract: To clarify the environmental capacity of heavy metals in sediments of Chengxi Lake and Chengdong Lake in Huoqiu County, 30 sediment samples were collected from Chengxi Lake and Chengdong Lake, respectively. The environmental capacity characteristics and spatial distribution of heavy metals in sediments of Chengxi Lake and Chengdong Lake were studied using the comprehensive environmental capacity index, the static and dynamic environmental capacity was estimated, and the change trend of nearly one hundred years was predicted. The results showed that the average contents of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn in the sediments of Chengxi Lake and Chengdong Lake did not exceed the national soil risk screening values. The average values of the single environmental capacity index of heavy metals in the sediments of Chengxi Lake and Chengdong Lake were in the following orders: Ni(0.81) < Zn(0.83) < Cu(0.88) < Cr(0.91) < As(0.95) < Cd(0.98) = Pb(0.98) < Hg(1.00) and Ni(0.89) < Zn(0.91) < Cu(0.96) < Cr(0.98) = As(0.98) < Hg(1.01) = Pb(1.01) < Cd(1.17), respectively. Except for Hg, Pb, and Cd in the sediments of Chengdong Lake, the other elements were basically in the medium capacity. The mean of PI of Chengdong Lake was significantly higher than that of Chengxi Lake, and Chengxi Lake and Chengdong Lake were in the middle capacity level as a whole. The static total capacity of heavy metal elements in the sediments of Chengxi Lake was smaller than that of Chengdong Lake sediments, and the static total capacity was in the same order as the existing capacity, with the order of Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd. Within 5 to 20 years, the static and dynamic annual capacity changed faster than that of other years, and the dynamic annual capacity of each year was greater than the static annual capacity.

Key words: surface sediments; heavy metals; environmental capacity; Chengxi Lake; Huoqiu County

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], 也承担着营养盐和重金属等污染物的“源”和“汇”^[2-4]。重金属具有富集性、隐蔽性、持久性和毒性等特点而受到普遍关注^[5], 沉积物重金属含量在土壤母质和人为因素的共同影响下迁移和累积, 环境容量的提出可有效用于沉积物重金属污染的研究和控制^[6]。因此, 了解沉积物环境能容纳多少污染物, 如何科学地认识沉积物环境容量, 对于沉积物重金属污染的防治具有重要意义。

重金属环境容量是指一定的环境单位, 在一定时间内遵循环境质量标准, 保证农产品的产量和生物质量, 同时避免环境污染, 即代表沉积物所

能承受的最大重金属污染物负荷^[6-8]。一旦超过这个最大负荷, 沉积物就会被重金属污染, 造成各种环境问题, 威胁人类健康。沉积物环境容量和风险预警是沉积物安全研究的核心内容。近年来, 国内外学者对环境容量开展了广泛的研究, 尤其在农田土壤重金属环境容量的评价方面, 取得了较多的研究成果^[9-16]。如吕悦风等^[13]将重金属投入产出通量模型与土壤环境容量方法相结合, 预测了 15 a(2030 年) 和 35 a(2050 年) 后太湖附近农田

收稿日期: 2022-11-01; 修订日期: 2023-01-16

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

* 通信作者, E-mail: jpwflz@sicau.edu.cn

土壤中砷、汞、铬、镉和铅等风险概率. Pan 等^[16]开展了中山市北部农用地重金属环境容量的评价,为工业城市农用地重金属环境容量风险预警提供了理论依据. 这些研究成果可以为土壤重金属环境容量评价提供强有力的支撑. 然而,湖泊和河流等表层沉积物重金属环境容量尚未得到有效探索.

城东湖和城西湖是安徽省霍邱县城内的两个典型湖泊,位于淮河干流中游南岸,是淮河水系中面积仅次于洪泽湖的大型天然淡水湖泊(图 1). 近年来,随着霍邱县经济的高速发展,社会经济发展活动

(肥料侵出、污水排放、工业废水和城市建设等)造成城东湖和城西湖受到不同程度的重金属污染. 目前尚未有相关文献对霍邱县城西和城东湖重金属环境容量评价与预测方面的研究. 鉴于此,本文以城东湖和城西湖为研究对象,通过采集湖泊域表层沉积物样品,基于 GIS 技术与地统计学,采用环境容量综合指数,分析城东湖和城西湖表层沉积物重金属环境容量水平及空间分布特征,估算城西湖和城东湖沉积物重金属元素的静态及动态环境容量,并预测近百年环境容量的变化趋势,以期对湖泊沉积物重金属的污染防治提供科学依据.

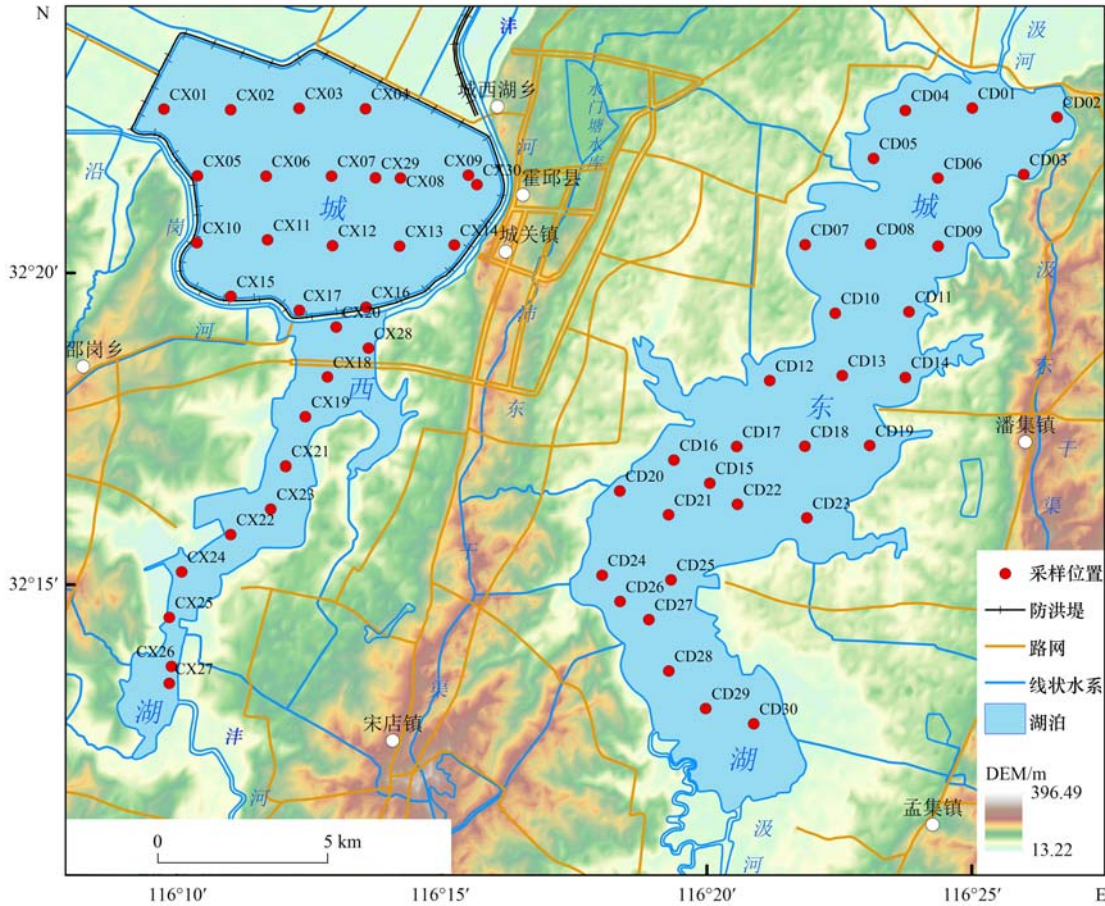


图 1 研究地理位置及采样位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in the 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,淮河中游南岸.地势南高北低,自西南向北东呈变低缓趋势.西部为丘陵,中部为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.此外,城东湖作为汲东灌区补给水源,通过支渠与汲东干渠相连通.

城西湖位于淮河右岸洋河下游,地处霍邱县城西侧,南承洋河全部来水,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

西北部为深水区,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水产品养殖带,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业作物以水稻为主。

采用离子选择性电极法 (ISE) 测定 pH,用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定 Cr、Ni、Cu、Pb 和 Zn 的元素含量,电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cd 元素,原子荧光法 (AFS) 测定 As、Hg 等元素。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。

1.2 研究方法

1.2.1 环境容量估算

以江淮流域土壤背景值作为参比值^[17],基于环境容量综合指数 (PI) 对沉积物重金属环境容量进行评价。其计算公式如下:

$$P_i = C_{sp}/C_{ss} \quad (1)$$

$$C_{sp} = 10^{-6}M(C_{ic} - C_{ip}) \quad (2)$$

$$C_{ss} = 10^{-6}M(C_{ic} - C_{ib}) \quad (3)$$

$$PI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

式中, P_i 为重金属 i 的单项环境容量指数; C_{sp} 为某一重金属现存容量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_{ss} 为某一重金属静态总容量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; M 为单位面积沉积物重量,取 $2.25 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_{ic} 为重金属元素 i 的允许限值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{ip} 为沉积物重金属元素 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{ib} 为沉积物重金属元素 i 的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; PI 为沉积物环境容量综合指数。重金属环境容量的分级标准^[8]如表 1 所示。

表 1 沉积物重金属环境容量分级^[8]

Table 1 Classification standard of the sediment environmental capacity

级别	容量等级	环境容量指数	污染水平
I	高容量区	$PI > 1$	基本未受污染
II	中容量区	$0.7 < PI \leq 1$	受轻度污染
III	低容量区	$0.3 < PI \leq 0.7$	污染较严重
IV	警戒区	$0.0 < PI \leq 0.3$	污染很严重
V	超载区	$PI \leq 0$	污染超过风险基准

1.2.2 环境容量预测

分别采用静态总容量 (C_{ss}) 与动态容量 (Q_{in}) 进行了环境容量预测。其中静态容量未考虑到沉积物环境的自净作用能力^[8]。动态容量 (Q_{in}) 是指一定的环境单元内,假定污染物参与沉积物圈层物质循环时,沉积物所容纳污染物的最大负荷量^[8]。重金

属动态容量的计算公式如下:

$$Q_{in} = 10^{-6}M(C_{ic} - C_{ip}K^m) \frac{1 - K}{K(1 - K)} \quad (5)$$

式中, C_{ic} 为多年之后沉积物重金属元素 i 含量的允许限值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{ip} 为重金属元素 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Q_{in} 为沉积物中重金属元素 i 的年动态容量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; m 为控制年限, a ; M 为单位面积沉积物重量,取 $2.25 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; K 为重金属的残留率(常量),取 $0.9^{[8,18]}$ 。

1.3 数据处理

本研究采用 Excel 2013 对沉积物重金属数据处理和描述性统计;基于 ArcGIS 10.8 绘制采样分布位置,采用反距离权重插值方法绘制环境容量指数的空间分布图;运用 Origin 2021 软件绘制数据关系图。

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属含量

研究区湖泊表层沉积物 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的均值为: 10.14、0.09、76.45、30.82、0.03、36.46、26.81 和 78.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。其中城西湖沉积物 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的均值为: 10.37、0.11、81.06、33.62、0.03、39.50、28.21 和 86.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为研究区土壤背景值的 1.10、1.04、1.17、1.35、0.73、1.58、1.09 和 1.62 倍;除 Hg 外,其余重金属具有明显的富集。城东湖沉积物 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的均值为: 9.91、0.07、71.84、28.03、0.02、33.42、25.41 和 70.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为研究区土壤背景值的 1.05、0.68、1.04、1.13、0.56、1.34、0.98 和 1.32 倍;除 Cd、Hg 和 Pb 外,其余重金属具有明显的富集。另经 T 值检验,除 As 外,城西湖沉积物的其余重金属元素平均含量显著高于城东湖 ($P < 0.01$)。

与国内其他湖泊相比较,除 Cd 和 Hg 外,其他重金属元素含量均高于安徽省内的巢湖^[20],但城西湖和城东湖的各重金属平均含量绝大部分小于太湖^[21]、阳澄湖^[22]、青海湖^[23]、汤逊湖^[24] 和东江湖^[25] 等湖泊。整体上,城西湖和城东湖沉积物重金属的含量相对较低,但城西湖和城东湖作为淮中游最大的两个城中湖,长期接纳沿湖流域矿山开采和工农业废水等排放,再加上渔业养殖对城西湖和城东湖水质的影响^[26],将导致城西湖和城东湖沉积物重金属累积。

表 2 研究区湖泊沉积物重金属描述性统计结果¹⁾

Table 2 Descriptive statistics of heavy metals in the sediments of lakes in the study area										
位置	参数	pH	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
城西湖 (n=30)	Min	5.81	5.43	0.04	68.80	26.80	0.01	32.10	23.80	67.30
	Max	7.59	15.18	0.32	92.50	39.60	0.07	46.50	36.40	100.40
	Mean	6.70	10.37	0.11	81.06	33.62	0.03	39.50	28.21	86.08
	Std	0.41	2.10	0.05	6.10	3.61	0.01	3.90	3.11	9.51
	CV	6.17	20.23	48.39	7.53	10.73	33.04	9.88	11.04	11.05
城东湖 (n=30)	Min	5.54	6.38	0.04	56.70	21.00	0.01	23.70	20.20	48.10
	Max	7.96	18.56	0.14	97.00	39.10	0.03	46.80	31.40	104.60
	Mean	6.70	9.91	0.07	71.84	28.03	0.02	33.42	25.41	70.22
	Std	0.53	2.28	0.02	9.98	4.80	0.00	5.95	3.02	16.20
	CV	7.97	22.99	32.10	13.89	17.11	18.17	17.82	11.89	23.07
全区 (n=60)	Min	5.54	5.43	0.04	56.70	21.00	0.01	23.70	20.20	48.10
	Max	7.96	18.56	0.32	97.00	39.60	0.07	46.80	36.40	104.60
	Mean	6.70	10.14	0.09	76.45	30.82	0.03	36.46	26.81	78.15
	Std	0.48	2.20	0.04	9.47	5.08	0.01	5.88	3.37	15.47
	CV	7.13	21.72	49.90	12.39	16.48	31.61	16.13	12.58	19.80
沉积物背景值 ^[17]		—	9.40	0.104	69.40	24.90	0.041	25.00	25.90	53.20
允许限值 ^[19]		—	30.00	0.30	200.00	100.00	2.40	100.00	120.00	250.00

1) Max 表示最大值,Min 表示最小值,Mean 表示均值,Std 表示标准差,CV 表示变异系数(%) ; “—”表示无数据;除 CV 和 pH 外,其他项单位均为mg·kg⁻¹

各重金属含量空间变异变化较大,相关研究表明,当 CV 超过 20% 时,人类活动是导致重金属含量空间差异的主要驱动因素^[26]. 城西湖沉积物重金属变异系数(CV)较大者为 As (20.23%)、Cd (48.39%) 和 Hg (33.04%), 城东湖为 As (22.99%)、Cd (32.10%) 和 Zn (23.07%). 表明城西湖和城东湖沉积物重金属受人类活动影响.

从元素的主成分分析结果可知(表 3),采用 Kaiser 标准化的正交旋转法,城西湖和城东湖沉积物重金属均可提取 2 个主成分,累计解释了总方差的 83.26% (城西湖)和 86.69% (城东湖),可较好地解释沉积物重金属的大部分信息.

城西湖和城东湖沉积物重金属第 1 主成分

表 3 研究区沉积物重金属元素旋转主成分矩阵¹⁾

Table 3 Rotated component matrix for principal component analysis				
loadings for heavy metals in sediment				
元素	成分			
	城西湖		城东湖	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Cr	0.89	0.32	0.91	0.39
Ni	0.91	0.25	0.92	0.35
Cu	0.93	0.27	0.88	0.42
Zn	0.92	0.24	0.88	0.37
Pb	0.53	0.74	0.56	0.70
Cd	0.51	0.52	0.28	0.81
As	0.62	0.67	0.37	0.68
Hg	0.06	0.91	0.36	0.53
特征值	5.64	1.09	5.80	1.15
方差/%	53.27	29.99	45.33	41.54
累计方差/%	53.27	83.26	45.33	86.69

1) 黑体字表示荷载较高

(PC1) 主要反映了 Cr、Ni、Cu 和 Zn 的组分信息,说明它们具有一致的来源,从元素的变异系数来看,第一主成分的重金属元素变异系数相对较低,受人为活动因素影响较小. 相关研究表明 Cr、Zn、Ni 和 Cu 元素主要受母质和成土过程等控制^[27],尤其是沉积物 Cr 受成土母质的影响明显^[28]. 另外,研究区为安徽省重要的铁矿金属矿产地,属于地质高背景区域^[17]. 说明第一主成分主要受到成土母质的影响. 故城西湖沉积物 Cr、Ni、Cu 和 Zn 等元素的环境容量及其空间分布格局主要受到自然因子(成土母质)的影响.

第 2 成分主要反映了 As、Cd、Hg 和 Pb 的组分信息. 相关研究表明 As、Cd 和 Pb 等元素主要来自人类活动^[28]. 城东湖和城西湖流域为霍邱县典型的水稻种植区,化肥、农药施用量大,肥料和农药中通常含有 Cd、Pb 和 As 等元素,且 Cd 可指示农药和化肥等农药活动的影响^[29],农药和杀虫剂的施用也是农业耕作中 Pb 的主要来源之一^[30]. 中国土壤中的 Hg 有 45% 来自有色金属冶炼^[31],煤炭燃烧和有色金属冶炼是我国大气 Hg 的主要污染源,达 90% 以上^[32],并通过大气沉降后进入土壤或沉积物^[29]. 城西湖流域为安徽省重要的铁矿矿产地,矿产资源的开采、冶炼等也导致重金属的富集. 城东湖和城西湖为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重金属富集的主要原因^[23,33,34]. 水动力特征是影响沉积物污染空间分布的驱动因子之一^[35]. 城西湖北部湖区修建了防洪堤,导致水动力交换较弱,泥

城东湖与城西湖略有不同,城东湖除 Hg 元素处于高容量外,其余元素从高容量水平到中容量水平均有分布,仅有 As 元素有 3.33% 的样品点处于低容量水平. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 高容量水平与中容量水平的占比分别为 43.33% 和 53.33%、93.33% 和 6.67%、46.67% 和 53.33%、30% 和 70%、6.67% 和 93.33%、56.67% 和 43.33%、20% 和 80%. 统计数据表明,城西湖和城东湖沉积物中 As、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 基本以中容量水平为主,而 Cd 和 Hg 则以高容量水平为主.

城西湖沉积物重金属环境容量综合指数 (PI) 介于 0.71 ~ 1.04,平均值为 0.92,而城东湖的 PI 值在 0.86 ~ 1.07,均值为 0.99 (图 3). 城西湖和城东湖基本上处于中容量区,呈现轻度污染状态. 双样本 *T* 值检验得出城东湖的 PI 均值显著高于城西湖 ($P < 0.01$),表明城东湖沉积物的重金属污染要显著低于城西湖.

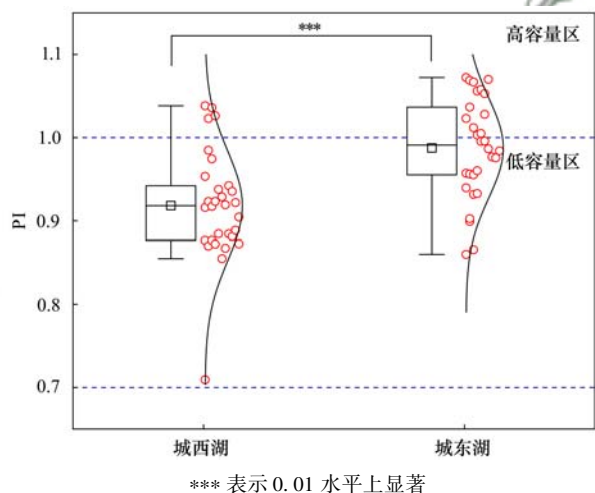


图 3 研究区沉积物重金属环境容量综合指数 (PI)

Fig. 3 Comprehensive index of heavy metal environmental capacity (PI) of sediments in the study area

2.3 沉积物重金属环境容量空间分布格局

研究区沉积物重金属环境容量指数的空间分布特征如图 4 所示. 研究区 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Hg、Pb 和 Zn 这 8 种重金属元素的环境容量空间分布各有不同,不同重金属元素具有不同的空间异质性. 大体上, Hg 在城东湖和城西湖中的单项环境容量指数较大,容量状况最好. 研究区 Hg 元素环境包括 2 个等级,其中城东湖全部为高容量区,说明城东湖沉积物具有较高的重金属承载量,沉积物环境质量整体较好;而城西湖绝大部分为高容量区,仅在湖区南部存在少量区域的中容量区,城西湖湖区中下部沉积物受到轻度污染 [图 4(e)].

城西湖 As 元素环境容量包括两个等级 [图 4(a)]: 以中容量区为主,中容量区覆盖城西湖绝大

部分区域,仅在湖区南部、西北部及东北部分布高容量区,这些区域为区域河流入湖口及排水口位置,水动力较好,污染物不易沉淀和累积. 城东湖 As 元素环境容量包括 3 个等级 [图 4(a)]: 以中容量区和高容量区为主,高容量区分布在城东湖中部,中容量区分布在湖区南部和北部,仅有湖区东北部分布有低容量区,该区域为城东湖的防洪闸处,水动力交换弱,泥沙淤积严重,易积累重金属元素,对于这部分区域 As 总量控制应引起注意.

城西湖 Cd 元素环境容量包括 5 个等级 [图 4(b)]: 绝大部分以中容量区和高容量区为主,在湖区北部防洪堤内 CX07 采样点周边分布有低容量区、警戒区和超载区,该区域靠近霍邱县城区,存在城镇生活污水的无序排放问题,从而增加重金属污染. 另该区域为深水区域,水动力缓慢而污染物易于沉积导致环境容量降低. 城东湖 Cd 元素环境容量为高容量区和中容量区两个等级 [图 4(b)], 主要以高容量区为主,中容量区仅在城东湖东北部少量分布. 整体上城西湖区域的 Cd 累积较城东湖更为严重,这可能与城西湖靠近城西县城,与城镇生活污水排放相关,另外,城西湖流域为安徽省重要的铁矿产地,矿产资源的开发进一步导致重金属的累积.

城西湖和城东湖的 Pb 元素环境容量均包括中容量区和高容量区两个等级. 其中城西湖的高容量区主要分布在南部,北部零星分布,中容量区主要分布在北部防洪堤内 [图 4(g)]. 城东湖高容量区主要分布在湖区中部,中容量区主要分布在北部和南部,中部呈点状分布 [图 4(g)].

城西湖 Cr、Cu、Ni 和 Zn 元素环境容量等级具有相同的空间分布特征,全区均为中容量区 [图 4(c)、图 4(d)、图 4(f) 和图 4(h)]. 而城东湖 Cr、Cu、Ni 和 Zn 元素分布有高容量区和中容量区两个等级,其空间分布略有差异,其中 Cr 元素高容量区主要分布在城东湖中部至南部区域,中容量区主要分布在北部和南部 [图 4(c)]. Cu 元素高容量区主要分布在中部偏西区域,中容量区分布全湖区 [图 4(d)]. Ni 元素中容量区分布全区,零星分布有高容量区 [图 4(f)]. Zn 元素中容量区分布全区,中南部零星分布有高容量区 [图 4(h)].

从研究区沉积物重金属元素环境容量综合指数 (PI) 空间分布格局来看 [图 4(i)], 研究区沉积物重金属 PI 值包括两个等级,以中容量区为主. 其中城西湖绝大部分区域 PI 值为中容量水平,仅有湖区北部偏西部分零星分布有高容量水平,湖区整体上呈轻度污染水平. 城东湖高容量区分布在湖区中南部,北部偏西部分零星分布,中容量区主要分布在北部

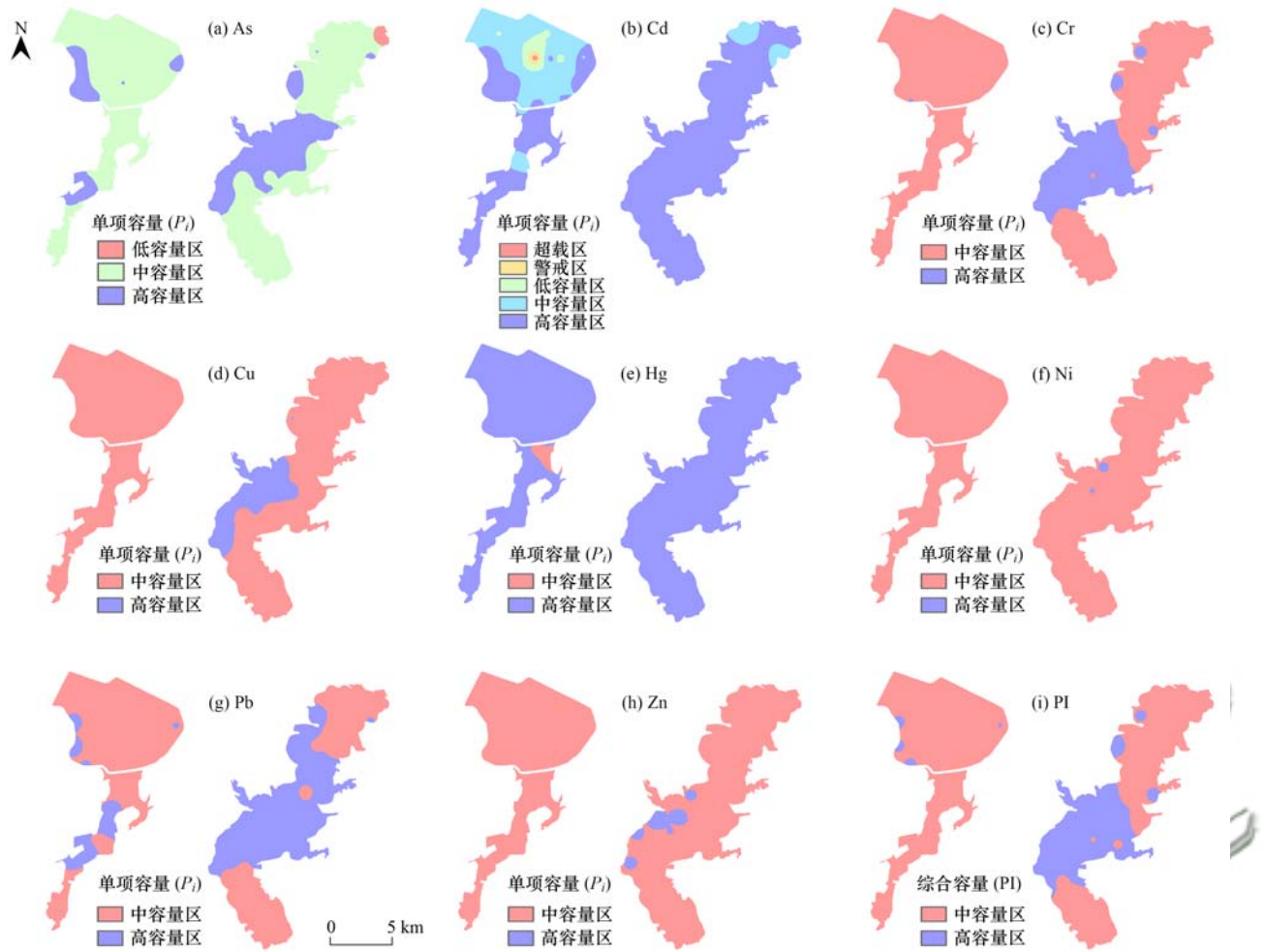


图4 研究区沉积物重金属环境容量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of environmental capacities of sediment in the study area

和南部,呈轻度污染水平. 整体上,城西湖的PI要低于城东湖,其污染水平较城东湖更为严重,这可能是城西湖受流域铁矿开采的影响,另外,湖区北部修建防洪堤导致水动力交换较弱也可能导致污染沉积与富集.

2.4 沉积物环境容量预测

2.4.1 沉积物静态总容量和现存容量

城西湖和城东湖沉积物重金属静态总容量和现存容量如表5. 结果表明,城西湖沉积物所有元素的静态总容量均小于城东湖,静态总容量和现存容量

的大小排序相同,依次为: $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd$. 沉积物对各元素存在的容纳具有一定程度的差异. Zn、Cr、Pb、Cu和Ni等5种元素的静态总容量远大于As、Cd和Hg等3种元素,其中城西湖Zn元素静态总容量超出Cd元素近856倍,城东湖Zn元素静态总容量也超出Cd元素达783倍. 表明沉积物对Zn、Cr、Pb、Cu和Ni等元素原有的容量较大,沉积物对这5种元素敏感程度相对较弱,当Zn、Cr、Pb、Cu和Ni元素外源输入较大时,沉积物仍保持未受污染的良好状态.

表5 沉积物重金属静态总容量和现存容量/ $kg \cdot hm^{-2}$

Table 5 Static total capacities and existing capacities of sediments/ $kg \cdot hm^{-2}$

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
静态总容量								
城西湖	44.16	0.43	267.62	149.36	5.33	136.13	206.53	368.82
城东湖	45.21	0.52	288.36	161.94	5.35	149.81	212.83	404.51
现存容量	46.35	0.44	293.85	168.98	5.31	168.75	211.73	442.80

城西湖和城东湖沉积物中As、Cr、Cu、Ni和Zn等元素的现存容量均大于静态总容量,说明上述元素对沉积物环境可容纳污染物的容量较大,但值

得注意的是,城东湖和城西湖的Hg元素、城东湖沉积物中的Cd和Pb元素中的静态总容量超过现存容量,由于As、Cd和Pb为毒性较高的重金属元

素^[9], 沉积物环境对这 3 种元素原有的环境容量较少, 沉积物环境对这 3 种元素相对敏感, 当这些元素输入沉积物中量略变大时, 也可能破坏沉积物的现有状态, 出现不同程度的污染特征。

以 5 a 为周期, 100 a 为控制年限, 得到研究区沉积物 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Hg 和 Zn 等元素百年静态容量(图 5)。结果表明, 研究区沉积物中 8 种元素在各年限的沉积物静态年容量从大到小依次为: $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd$ 。沉积物各

重金属静态年容量随控制年限的增长而减小, 且在不同年限内变化幅度各不相同。其中 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等元素在 5 ~ 40 a 之间静态容量变化趋势较大, 之后变化趋于平缓, 说明 5 ~ 40 a 期间沉积物输入的污染物较大而静态年容量减小的变幅较大。As 元素在 5 ~ 20 a 期间静态容量变化趋势较大, 但远小于 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等元素, 随后变化趋于平缓; Cd 和 Hg 这 2 种元素的静态年容量变化趋势不明显。

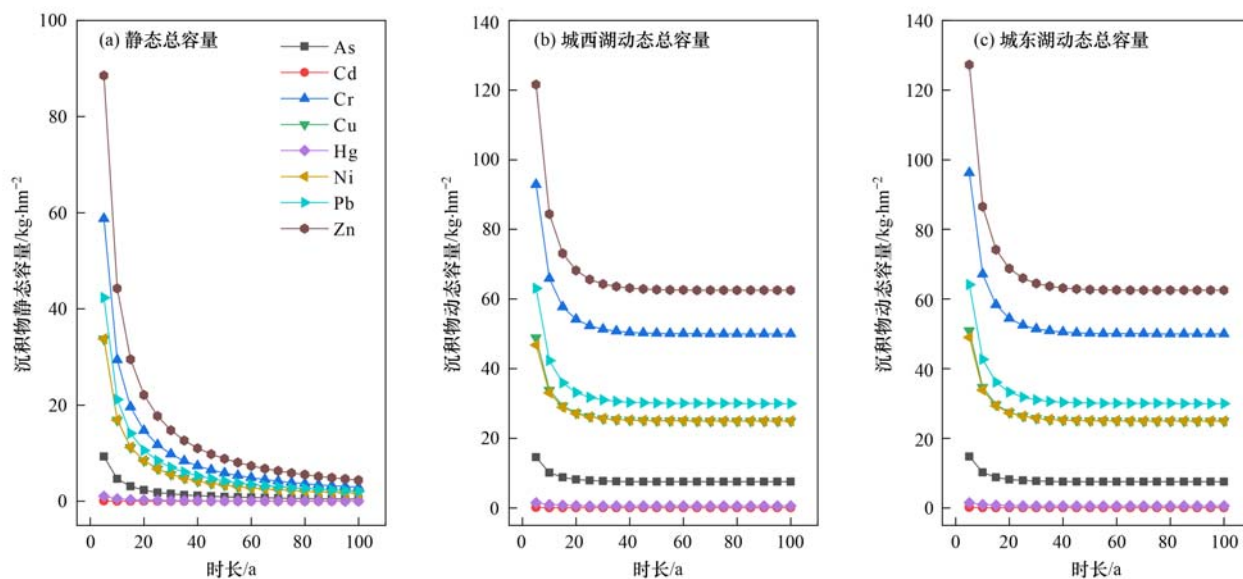


图 5 沉积物重金属静态年容量和动态年容量

Fig. 5 Static and dynamic annual capacities of heavy metals in sediments

2.4.2 沉积物动态环境容量预测

城西湖和城东湖动态年容量如图 5 所示。城西湖和城东湖沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Hg 和 Zn 等元素的静态年容量和动态年容量大小排序相同, 依次为: $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd$ 。As、Cd 和 Hg 元素动态容量各年内几乎保持不变, 其余 5 种元素在 5 ~ 20 a 内动态容量变化趋势较大, 之后的年限的各重金属动态容量区域平缓, 直至相互平行。

城西湖和城东湖沉积物中各重金属的不同年限内平均动态年容量均大于静态年容量, 说明沉积物在环境标准值范围内具有一定的容纳量。从图 5 可看出, 随着年限的增加, 除了 As、Cd 和 Hg 元素之外, 其他重金属元素的静态年容量减少速度大于动态年容量减少速度。从图 5 也可以看出, 20 ~ 100 a 之间各重金属元素动态容量相互平衡趋势, 其年动态容量几乎保持不变, 说明城西湖和城东湖沉积物中污染物的输入、输出以及固定和溶解、累积和降解等过程以及在自净能力的作用下, 沉积物环境容量趋于好转。但随着霍邱县经济快速发展, 污染物的

输入量是否维持在目前水平尚不确定, 因此在加强保护湖区环境意识的同时应开展沉积物重金属污染防治工作。

3 结论

(1) 研究区城西湖和城东湖沉积物重金属含量平均值由高到低依次为: $Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > As > Cd > Hg$, 除 As 外, 城西湖沉积物的其余重金属元素平均含量显著高于城东湖。城西湖和城东湖沉积物重金属受人类活动影响较大。

(2) 城西湖沉积物中各元素单项环境容量指数平均值从小到大依次为: $Ni(0.81) < Zn(0.83) < Cu(0.88) < Cr(0.91) < As(0.95) < Cd(0.98) = Pb(0.98) < Hg(1.00)$, 而城东湖则为: $Ni(0.89) < Zn(0.91) < Cu(0.96) < Cr(0.98) = As(0.98) < Hg(1.01) = Pb(1.01) < Cd(1.17)$ 。城西湖沉积物重金属环境容量综合指数(PI)平均值为 0.92, 而城东湖的 PI 均值为 0.99。城西湖和城东湖均属中容量区。城西湖 Cr、Cu、Ni 和 Zn 元素环境容量等级具有相同的空间分布特征, As、Cd、Pb 和 Hg 元素单

项环境容量分布格局各不同。

(3)城西湖沉积物各重金属元素的静态总容量均小于城东湖,静态总容量和现存容量的大小排序相同,表现为: $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd$ 。城西湖和城东湖沉积物中各重金属元素的静态年容量和动态年容量大小排序相同,表现为: $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd$ 。5~20 a之内静态、动态年容量变化速度大于其他年限容量变化速度。除了As、Cd和Hg元素之外,其他重金属元素的静态年容量减少速度大于动态年容量减少速度,各年限动态年容量均大于静态年容量,沉积物环境容量趋于好转。

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] 吴文星, 李开明, 汪光, 等. 沉积物重金属污染评价方法比较—以潭江为例[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(9): 143-149.
Wu W X, Li K M, Wang G, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in river sediment: a comparative case study in Tanjiang River[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(9): 143-149.
- [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] Li C, Song C W, Yin Y Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Shuangtaizi estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **98**(1-2): 358-364.
- [6] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 南京市溧水区土壤重金属环境容量研究[J]. 土壤通报, 2014, **45**(3): 734-742.
Fu C C, Wang W Y, Pan J J, *et al.* Research of heavy metal environmental capacity in Lishui district, Nanjing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(3): 734-742.
- [7] Li K Q, Wang X L. Calculation methodology of marine environmental capacity for heavy metal: A case study in Jiao Zhou Bay, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(2): 282-287.
- [8] 麦尔哈巴·图尔贡, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿依努尔·麦提努日, 等. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属环境容量评价与预测[J]. 地球与环境, 2020, **48**(5): 584-592.
Turhun M, Eziz M, Matnuri A, *et al.* Evaluation and prediction of environmental capacities of heavy metals in vineyard soils in the Turpan basin[J]. Earth and Environment, 2020, **48**(5): 584-592.
- [9] 安外尔·艾力, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 靳万贵, 等. 新疆焉耆盆地农田土壤重金属环境容量分析[J]. 环境工程, 2020, **38**(3): 168-173.
Eli A, Eziz M, Jin W G, *et al.* Environmental capacity of heavy metals in farmland Soils in Yanqi basin, Xinjiang [J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(3): 168-173.
- [10] 陈江, 毕京博, 吴杰, 等. 湖州土壤重金属污染趋势预测及环境容量评价[J]. 地球与环境, 2011, **39**(4): 531-535.
Chen J, Bi J B, Wu J, *et al.* Prediction of the trend for soil pollution of heavy metals in soils at Huzhou and evaluation of the environmental capacity[J]. Earth and Environment, 2011, **39**(4): 531-535.
- [11] 马辉英, 杨晓东, 吕光辉. 精河县重金属土壤环境容量及近百年趋势预测[J]. 新疆农业科学, 2016, **53**(8): 1521-1532.
Ma H Y, Yang X D, Lv G H. Tendency prediction about soil environmental capacity of heavy metals in Jinghe County in recent 100 Years[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, **53**(8): 1521-1532.
- [12] 吕悦风, 谢丽, 孙华, 等. 县域尺度耕地土壤重金属污染评价中的标准选择研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4743-4751.
Lv Y F, Xie L, Sun H, *et al.* Criterion selection in assessment of soil heavy metal pollution in farmland on county scale[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4743-4751.
- [13] 吕悦风, 谢丽, 朱文娟, 等. 基于环境容量的县域农用地土壤重金属风险概率预警研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(1): 253-264.
Lv Y F, Xie L, Zhu W J, *et al.* Risk prediction of heavy metals in farmland soil based on environmental capacity: case study of the county scale in northern Zhejiang Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, **29**(1): 253-264.
- [14] Zhang K, Yang J J, Ji Y N, *et al.* Spatiotemporal simulation and predication of heavy metal(loid) concentrations in coal chemical industrial areas with a soil environmental capacity model[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, **5**(4): 508-518.
- [15] Tian K, Li M, Hu W Y, *et al.* Environmental capacity of heavy metals in intensive agricultural soils: insights from geochemical baselines and source apportionment [J]. Science of the Total Environment, 2022, **819**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153078.
- [16] Pan Y J, Ding L, Xie S Y, *et al.* Spatiotemporal simulation, early warning, and policy recommendations of the soil heavy metal environmental capacity of the agricultural land in a typical industrial city in China: case of Zhongshan City[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124849.
- [17] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, **39**(2): 302-310.
Chen X R, Chen F R, Jia S J, *et al.* Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui province[J]. Geology in China, 2012, **39**(2): 302-310.
- [18] 于光金, 成杰民, 王忠训, 等. 山东省不同植被类型土壤重金属环境容量研究[J]. 土壤通报, 2009, **40**(2): 366-368.
Yu G J, Cheng J M, Wang Z X, *et al.* Soil-environmental capacity in different vegetative types in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, **40**(2): 366-368.
- [19] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标

- 准(试行)[S].
- [20] 杨辉, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 2013, **41**(2): 160-165.
Yang H, Chen G G, Liu H Y, *et al.* Pollution of heavy metals in the sediments from the Lower reaches of the Yangtze River and its potential ecological risk assessment[J]. Earth and Environment, 2013, **41**(2): 160-165.
- [21] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [22] 郭西亚, 高敏, 张杰, 等. 阳澄湖沉积物重金属空间分布及生物毒害特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 802-811.
Guo X Y, Gao M, Zhang J, *et al.* Characteristics of spatial distribution and biological toxicity for heavy metals in sediments of the Yangcheng Lake [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 802-811.
- [23] 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3037-3047.
Zhang Y R, Che F F, Fu Z H, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Lake Qinghai [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3037-3047.
- [24] 李星谕, 李朋, 苏业旺, 等. 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 859-866.
Li X Y, Li P, Su Y W, *et al.* Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Tangxun Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 859-866.
- [25] 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 等. 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3048-3057.
Zhao X L, Li X, Lu H B, *et al.* Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- [26] 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 等. 洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5355-5363.
Zi X Y, Zhang M, Gu X H, *et al.* Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5355-5363.
- [27] Lin C Y, Xue Y M, Zhang X, *et al.* Distribution of cadmium among multimedia in Lake Qinghai, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**, doi: 10.1007/s12665-018-7332-7.
- [28] Šajn R, Halamić J, Peh Z, *et al.* Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, **110**(3): 278-289.
- [29] Li S Y, Jia Z M. Heavy metals in soils from a representative rapidly developing megacity (SW China): levels, source identification and apportionment [J]. CATENA, 2018, **163**: 414-423.
- [30] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **78**: 2-8.
- [31] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.
- [32] Streets D G, Hao J M, Ye W, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(40): 7789-7806.
- [33] Li Y, Zhou S L, Zhu Q, *et al.* One-century sedimentary record of heavy metal pollution in western Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2018, **240**: 709-716.
- [34] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 3127-3138.
- [35] 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.
- [36] 黎静, 孙志高, 孙万龙, 等. 黄河尾间河段和河口区沉积物中重金属污染及潜在生态毒性风险评价[J]. 湿地科学, 2018, **16**(3): 407-416.
Li J, Sun Z G, Sun W L, *et al.* Assessment of pollution and potential ecotoxicity risk for heavy metals in sediments in the tail reach and estuary of the Yellow River [J]. Wetland Science, 2018, **16**(3): 407-416.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)