

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)
《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)	

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险

郑敏慧^{1,2}, 白冬锐³, 张涛⁴, 陈坦^{1,5*}, 王洪涛^{6*}, 杨婷^{1,5}, 张冰^{1,5}, 金军^{1,5}

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074; 3. 京东方环境能源科技有限公司, 北京 100176; 4. 中广核铀业发展有限公司, 北京 100048; 5. 中央民族大学北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081; 6. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 苏州 100 km² 水网地区采样点的底泥中重金属 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别为 1.4、127.4、83.2、18.2、51.7、145.1 和 350.7 mg·kg⁻¹, 分别是背景值的 13.7、5.7、1.1、1.7、1.9、5.5 和 5.6 倍, 超过 GB 15618-2018 标准风险筛选值的点位比例分别为 100.0%、97.3%、38.4%、83.6%、97.3%、90.4% 和 100.0%。采用改进的地累积指数法评价单种重金属元素的污染程度, 可知苏州水网地区底泥中 7 种重金属元素污染程度依次为: Cd > Cu > Pb > Zn > As > Cr > Ni, 其中, Cd 属于极强污染, Cu 和 Pb 属于强度到极强污染, Zn 属于强度污染, As 属于中度到强度污染, Cr 和 Ni 属于中度污染。古城区、西北部、西南部和东部底泥样品中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 均是高污染贡献的重金属元素, 重金属潜在生态风险程度从大到小依次为: 西北部、西南部、古城区和东部。相关性分析和主成分分析表明, Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 元素可能源于尾气排放、化肥农药的使用和电子制造业的污染物排放等人为因素。

关键词: 底泥; 重金属; 苏州水网地区; 污染评价; 生态风险评价

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)01-0198-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202201255

Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China

ZHENG Min-hui^{1,2}, BAI Dong-rui³, ZHANG Tao⁴, CHEN Tan^{1,5*}, WANG Hong-tao^{6*}, YANG Ting^{1,5}, ZHANG Bing^{1,5}, JIN Jun^{1,5}

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. BOE Environment & Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China; 4. CGNPC Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100048, China; 5. Beijing Engineering Research Center of Food Environment and Health, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 6. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The average contents of the heavy metals Cd, Cu, Cr, As, Ni, Pb, and Zn in the sediment of sampling points in the Suzhou water network area were 1.4, 127.4, 83.2, 18.2, 51.7, 145.1, and 350.7 mg·kg⁻¹, respectively, which were 13.7, 5.7, 1.1, 1.7, 1.9, 5.5, and 5.6 times the background values, respectively. The proportions of points exceeding the risk screening values of the GB 15618-2018 standard were 100.0%, 97.3%, 38.4%, 83.6%, 97.3%, 90.4%, and 100.0%, respectively. The pollution degree of single heavy metal elements was evaluated using the improved ground accumulation index method. The pollution degree of the seven heavy metal elements in the sediment of the Suzhou water network area was in the order of Cd > Cu > Pb > Zn > As > Cr > Ni. Among them, Cd showed extremely strong pollution, Cu and Pb showed intense to extremely strong pollution, Zn showed strong pollution, As showed moderate to intense pollution, and Cr and Ni showed moderate pollution. Cd, Pb, Cu, and Zn in the sediment samples of the ancient city area, northwest area, southwest area, and east area were the heavy metal elements with high pollution contributions. The potential ecological risk degree of heavy metals was ranked as northwest > southwest > ancient city area > east. Correlation analysis and principal component analysis showed that Cd, Cu, Cr, As, Ni, Pb, and Zn may have come from anthropogenic factors such as tail gas emissions, the use of chemical fertilizers and pesticides, and the pollutant emissions of the electronic manufacturing industry.

Key words: sediment; heavy metals; Suzhou water network area; pollution assessment; ecological risk assessment

我国水体的重金属污染问题严峻^[1]。底泥是水体污染物的重要载体,能够富集水体中的污染物,环境条件发生变化时,底泥中的污染物又可能释放到水体中,造成“二次污染”。重金属污染具有毒性大、易积累的特点^[2],在自然环境中无法降解,严重影响生态环境安全^[3]。水体中的重金属可通过吸附沉积到底泥中^[4],经过生物富集或食物链放大后,对生态系统产生直接或间接的危害,威胁人体健康^[5~9]。

长江流域的建设与发展在全国有举足轻重的地位,生态文明建设是该区域发展的重要方面,水体底泥的重金属内源污染值得关注。洞庭湖底泥中的 6 种重金属(Cr、Cu、Pb、Cd、Hg 和 As)综合潜在生

态风险指数属于较高风险水平,可能对水生生物和人体健康产生危害^[10];株洲清水塘工业区和老霞湾港口池塘底泥中 Cd、Pb、As 含量远超过湖南省土壤背景值,人为因素(尤其是工业“三废”的不规范处置)是该区域污染严重的主要原因^[11];芜湖典型河道沉积物中 89% 和 44% 采样点的 Cu 和 Cr 分别达到轻度污染水平,可能与汽车、电镀行业和绿化施肥等人为源有关^[12]。

收稿日期: 2022-01-25; **修订日期:** 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007128);中央民族大学 2021 年自主科研项目交叉研究专项(2021JCXK01)

作者简介: 郑敏慧(2000~),女,主要研究方向为水体沉积物污染治理, E-mail: zhengmh0106@163.com

* 通信作者, E-mail: chentant05@tsinghua.org.cn; htwang@tsinghua.edu.cn

苏州市地处长三角经济圈,经济和社会发展水平高,2020 年 GDP 为江苏省第一^[13]. 该地区河网密布,河道沿岸人口密集,工业发达,经历了污水直排阶段^[14]. 苏州水网地区地下水、地表水交互作用复杂,水体流向多变,污染源分布广,水体污染治理难度高,底泥中的重金属污染值得关注. 苏州市水源地湖泊底泥中重金属 As 存在长期潜在污染风险^[15],包括苏州在内的太湖流域西部沿岸区中部(茭泾港至乌溪港近岸侧)、竺山湖北部、贡湖北部(望虞河入河口附近)0~30 cm 深度的底泥严重污染^[16],Mn 和 Sb 是导致太浦河和吴淞江昆山段水体重金属污染主要原因^[17],苏州古城区域河道底泥中重金属 Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的整体污染水平较高^[18].

本文在大尺度区域上了解底泥的重金属污染情况,分析了苏州 100.8 km² 水网地区 73 个代表性断面的 7 种重金属空间分布特征,采用改进的地累积指数法和内梅罗综合风险指数法评价重金属的污染程度,评价了单一重金属的污染等级和复合重金属污染,利用相关性分析和主成分分析法分析底泥重金属的来源,以期认识底泥中污染物的分布规律、制定污染控制方案提供基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品的采集和分析

苏州市地势平坦,属于亚热带海洋性季风气候,

降水充沛,年均降雨量约 1 200 mm,年均降水日约 130 d^[19]. 从 2016 年起,苏州产业结构以第三产业为主、第二产业次之,工业形成了电子信息、电器、钢铁、纺织、化工、装备制造等高端化主导产业^[20]. 2019 年 5 月(平水期),通过现场调研和地图比对等方式获得河道数据,综合考虑水文特征、河道情况、周边布局和支流汇水等情况,在区域总面积 100.8 km² 的水网地区选取水流流态稳定、河床结构一致、水体混合较好的 73 个可反映河道总体情况的代表性断面布设采样点(图 1):西北部 P1~P20 共 20 个采样点,西南部 Q1~Q19 共 19 个采样点,东部 M1~M21 共 21 个采样点,古城 N1~N13 共 13 个采样点. 西北部和西南部为苏州工业新区,西北部原为农田,正在开发,西南部开发程度更高,古城主要为生活文旅区,东部为工业园区.

在河道较窄的断面处,采样点位于河道中央;在河道较宽的断面处,在距离岸边约 1 m 处采样. 以活塞式柱状底泥采样器采集河道 0~20 cm 深的底泥样品,冷冻干燥后,研磨过 100 目筛备用,重金属监测指标包括 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn,均采用王水体系微波消解-电感耦合等离子体质谱法(HJ 803-2016; 7500 a, ICP-MS, Agilent, 美国)测定. 为保证测定结果的准确度和精密度,样品分析的重复率和标样分析的加标回收率分别控制在 20% 和 85%~115% 之间,所有样品分析误差均小于 20%,符合

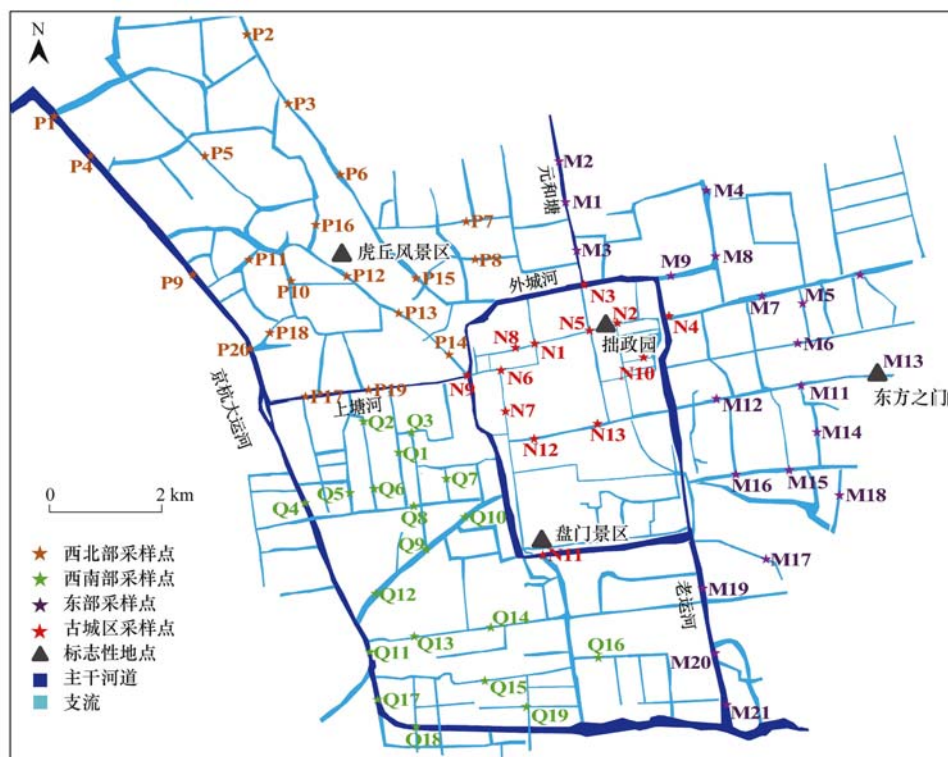


图 1 苏州水网地区采样点布局示意

Fig. 1 Layout of sampling sites in the Suzhou water network area

HJ 803-2016 质量控制要求. 具体采样和分析方法参见文献[21].

1.2 评价方法

1.2.1 重金属污染评价

地累积指数法可定量分析确定点位特定重金属的污染程度,为应对重金属含量分布不均匀和生态危害效应被忽视的问题,将最大含量与含量平均值以内梅罗指数法引入地累积指数法中,综合考虑重金属含量的最大值和各种重金属的生态毒性特征,改进的地累积指数法具体计算方法参考文献[22]. 本文选取江苏省土壤背景值^[23]为基准含量, Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 的背景值分别为 0.1、22.3、77.8、10.6、26.7、26.2 和 62.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 根据地累积污染指数(I_{geo})将污染程度分为 7 个等级: $I_{\text{geo}} < 0$, 无污染; $0 \sim 1$, 无到中度污染; $1 \sim 2$, 中度污染; $2 \sim 3$, 中度到强度污染; $3 \sim 4$, 强度污染; $4 \sim 5$, 强度到极强污染; $I_{\text{geo}} > 5$, 极强污染^[18,22]. 一般地累积指数法计算公式为^[24]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_i / 1.5 C_0) \quad (1)$$

式中, C_i 为元素 i 的含量实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_0 为沉积物中重金属含量的背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

改进的地累积指数法计算公式如下^[22].

区域内特定重金属污染评价:

$$P_{\text{ave1}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i / KB_i) \quad (2)$$

$$P_{\text{max1}} = C_{\text{max}} / KB_i \quad (3)$$

$$I_{\text{m1}} = \log_2 \sqrt{(P_{\text{ave1}}^2 + P_{\text{max1}}^2) / 2} \quad (4)$$

式中, P_{ave1} 为流域内 n 个采样点重金属含量变化指数的平均值; B_i 为重金属元素 i 的含量环境背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_{max1} 为含量最大的采样点的重金属含量变化指数; C_{max} 为重金属含量最大值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; I_{m1} 为改进的地累积指数; K 为变动转换系数, 用于修正自然成岩作用产生的各地土壤背景值差异, 一般取 1.5.

确定点位多种重金属复合污染评价:

$$R_i = S_{\text{imax}} / S_i \quad (5)$$

$$W_{1i} = R_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (6)$$

$$W_{2i} = T_i / \sum_{i=1}^n T_i \quad (7)$$

$$W_i = (W_{1i} + W_{2i}) / 2 \quad (8)$$

式中, S_i 为重金属 i 的土壤污染风险筛选值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_{imax} 为第 i 种重金属的土壤污染风险最大筛选值, 标准参考《农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018); R_i 为重金属的相关性比值; W_i 为等当量生态毒性指数; W_{1i} 为重金属的

相关性权重值; W_{2i} 为重金属毒性系数权重值; T_i 为第 i 种重金属的毒性系数, Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 的毒性系数分别为 30、5、2、10、5、5 和 1.

$$P_{\text{ave2}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i / KB_i) \quad (9)$$

$$P_{\text{max2}} = C_{\text{max-eq}} / KB_{\text{max}} \quad (10)$$

$$I_{\text{m2}} = \log_2 \sqrt{(P_{\text{ave2}}^2 + P_{\text{max2}}^2) / 2} \quad (11)$$

式中, P_{ave2} 为确定采样点所有重金属元素含量变化指数的平均值; P_{max2} 为等当量生态毒性指数最大的重金属的含量变化指数; $C_{\text{max-eq}}$ 为等当量生态毒性指数最大值的重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B_{max} 为该种重金属的土壤背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; I_{m2} 为改进的地累积指数.

1.2.2 重金属生态风险评价

潜在生态风险指数法是根据重金属毒性及环境行为特点, 综合考虑多种重金属的污染类型、赋存含量、毒性水平以及环境对重金属污染敏感性等因素的底泥重金属污染研究方法^[25,26]. 潜在风险指数法基于水体沉积学理论, 目前在国内外广泛采用^[27,28], 具体计算方法见式(12)和式(13):

$$E_i = T_i \cdot (C_i / C_0) \quad (12)$$

$$\text{RI} = \sum E_i \quad (13)$$

式中, E_i 为重金属 i 的潜在生态风险指数; RI 为多因子综合潜在生态风险指数.

计算单一重金属潜在生态风险指数(E_i), 其风险等级划分为: $E_i < 40$, 低风险; $40 \sim 80$, 中风险; $80 \sim 160$, 较高风险; $160 \sim 320$, 高风险; $E_i \geq 320$, 极高风险. 重金属潜在生态风险指数(RI)的等级划分为: $\text{RI} < 150$, 低风险; $150 \sim 300$, 中风险; $300 \sim 600$, 较高风险; $\text{RI} > 600$, 高风险^[29]. 由于上述标准基于毒性系数总和为 133, 而本文 7 种重金属对应的毒性系数总和为 58, 因此提出修正后的潜在生态风险指数分级标准为: $\text{RI} < 65$, 低风险; $65 \sim 131$, 中风险; $131 \sim 262$, 较高风险; $\text{RI} > 262$, 高风险^[22].

1.2.3 源解析

底泥中重金属的含量主要取决于沉积母质来源的自然因素及区域生活污水、工业废水排放^[30]和金属矿开采^[31]等人为活动的影响, 不同重金属的含量相关性分析能反映重金属间的空间变化趋势, 在一定程度上展现元素的矿物来源、存在形式和污染状况等信息^[18,32,33]. 主成分分析法(PCA)通过提取样点重金属含量构成中主要方差的特征向量作为主成分(累计影响达到 80% 以上), 分析水体底泥重金属含量数据的主成分数量及其构成, 从而大致判断重金属的来源是否相似^[34]. 本研究以苏州水网地区

河道底泥样品中 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 这 7 种重金属的含量作为变量分析主成分,以 KMO 方法和巴特利特球形度检验结果表征相关性^[35]. 经检验,全区域和 4 个子区域的 KMO 值均大于 0.50,5 个巴特利特球形度检验结果的 Sig. 值均小于 0.05,指征指标间相互独立的假设不成立,能够开展主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 苏州水网地区河道底泥重金属分布特征

苏州水网地区河道底泥中 7 种重金属元素含量的最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数等详见表 1. 全部采样点的底泥中重金属 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别为 1.4、127.4、83.2、18.2、51.7、145.1 和 350.7 mg·kg⁻¹,均已超过背景值且空间分布差异较大,分别超过江苏省土壤背景值的 13.7、5.7、1.1、1.7、1.9、5.5 和 5.6 倍,超过农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)的风险筛选值的采样点比例分别为 100.0%、97.3%、38.4%、83.6%、97.3%、90.4% 和

100.0%. 太湖流域河流沉积物中 95% 的采样点 Ni、Cu、Zn 和 Pb 均高于其相应的背景值,As、Cd、Cr 和 Hg 超过其相应背景值的采样点比例分别为 81.91%、76.60%、63.83% 和 47.87%^[36]; 苏州古城区域重金属 Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 超过江苏省土壤背景值的采样点比例分别为 100%、100%、65%、95%、70%、100%、95% 和 100%,整体污染水平较高^[18]. 与上述文献报道相比,苏州水网地区底泥重金属污染整体状况较严重.

Cd、Cu、Pb 和 Zn 的变异系数均超过 100%,说明这 4 种重金属的空间差异差别较大,而 Cr、As 和 Ni 属于中等变异,空间差异性较小^[37]. 一般认为,变异系数超过 20% 表明人类活动是重金属空间差异的主要驱动因子^[18,36]. 因此,人为因素是苏州水网地区河道底泥中 7 种重金属元素污染和空间差异性较大的主导因素,如工业废水和生活污水的不合理排放、不规范处理均可导致河道底泥重金属含量提高. 底泥污染可能与河道沿岸的土地利用类型相关,由于研究区域范围较大,结合该区域复杂的水文和水系特征,将研究区域分为 4 个子区域描述.

表 1 苏州水网地区河道底泥重金属含量描述性统计结果¹⁾

Table 1 Descriptive statistical results of heavy metals in river sediment of the Suzhou water network area								
区域	元素	Cd	Cu	Cr	As	Ni	Pb	Zn
苏州水网地区	最大值	26.5	1 280.0	395.0	109.0	121.0	1 050.0	1 200.0
	最小值	0.2	14.9	26.5	7.7	21.2	15.8	62.8
	中位数	0.5	82.3	62.5	16.0	41.7	70.6	198.0
	平均值	1.4	127.4	83.2	18.2	51.7	145.1	350.7
	标准差	3.3	171.5	54.2	12.8	22.8	191.1	405.7
	变异系数	243.6	134.6	65.1	70.0	44.1	131.6	115.7
古城区	平均值	1.0	142.7	82.2	17.4	56.8	295.9	404.4
	变异系数	76.3	65.0	45.4	34.6	38.0	110.4	77.3
西北部	平均值	2.3	119.4	88.6	18.3	47.7	131.1	349.9
	变异系数	247.9	109.7	87.9	55.7	44.1	79.2	83.3
西南部	平均值	1.0	97.4	80.3	17.7	51.2	116.4	362.5
	变异系数	77.3	59.9	44.0	28.0	36.9	91.2	71.4
东部	平均值	1.1	148.1	81.3	19.2	52.6	91.1	212.4
	变异系数	241.8	180.0	60.3	106.7	51.6	164.3	90.5
江苏省土壤背景值 ²⁾		0.1	22.3	77.8	10.6	26.7	26.2	62.6
风险筛选值 ³⁾		0.6	100.0	300.0	25.0	100.0	140.0	250.0

1) 变异系数的单位为%,其余单位为mg·kg⁻¹; 2) 江苏省土壤背景值选自文献[23]; 3) 农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)

苏州水网地区个别采样点的重金属含量远远超过土壤背景值,例如:西北部的采样点 P13 底泥 $\omega(\text{Cd})$ (26.5 mg·kg⁻¹) 是土壤背景值的 265 倍, $\omega(\text{Cr})$ (395.0 mg·kg⁻¹) 是土壤背景值的 5 倍,东部的采样点 M5 底泥 $\omega(\text{Cu})$ (1280.0 mg·kg⁻¹) 是背景值的 57 倍, $\omega(\text{As})$ (109.0 mg·kg⁻¹) 是背景值的 10 倍, M12 的 $\omega(\text{Ni})$ (121.0 mg·kg⁻¹) 为背景值的 4.5 倍,位于古城区的 N6 重金属 $\omega(\text{Pb})$ (1 050.0

mg·kg⁻¹) 为背景值的 40 倍, N8 处 $\omega(\text{Zn})$ (1 200.0 mg·kg⁻¹) 为背景值的 19 倍. 西北部、西南部、东部和古城区底泥的 7 种重金属平均含量也均已超过风险筛选值.

针对单一重金属元素,4 个子区域也呈现不同的分布规律. Cd 元素的含量大小为:西北部 > 东部 > 古城区 > 西南部; Cu 元素的含量大小为:东部 > 古城区 > 西北部 > 西南部; Cr 元素的含量大小为:

西北部 > 古城区 > 东部 > 西南部; As 元素含量大小为: 东部 > 西北部 > 西南部 > 古城区; Ni 元素含量大小为: 古城区 > 东部 > 西南部 > 西北部; Pb 元素含量大小为: 古城区 > 西北部 > 西南部 > 东部; Zn 元素含量大小为: 古城区 > 西南部 > 西北部 > 东部. 由于重金属含量未能充分体现底泥的污染状况和生态风险, 有必要讨论底泥重金属的污染等级和潜在生态风险评价. 西北部的 Cd 和 Cu, 东部的 Cd、Cu、As 和 Pb 以及古城区的 Pb 的变异系数较大, 空间差异性较大, 在分析污染等级、评价潜在生态风险评价和解析来源时需关注重金属含量很高的采样点的影响.

2.2 苏州水网地区河道底泥重金属污染评价

2.2.1 单一重金属污染

从全区域看, 一般的地累积指数法分析得到 7 种重金属元素的污染程度从高到低分别为: Cd > Cu > Zn > Pb > Ni > As > Cr, 其中, Cd、Cu、Pb 和 Zn 属于中度污染, Ni 和 As 属于轻度污染, Cr 无污染. 使用改进的地累积指数法评价, 7 种重金属元素的污染程度从高到低依次为: Cd > Cu > Pb > Zn > As > Cr > Ni, 其中, Cd 属于极强污染, Cu、Pb 属于强度到极强污染, Zn 属于强度污染, As 属于中度到强度污染, Cr 和 Ni 属于中度污染[图 2(a)]. 以地累积指数法评价华北平原的白洋淀湿地底泥重金属污染, 显示 As、Cr、Ni、Zn 和 Pb 污染程度等级以清洁无污染为主, Cu 和 Cd 的污染程度均属于轻度污染^[38]; 东北典型湖泊山口湖不同水期沉积物中 Cd 的污染水平相对较高, 而 Cu、Ni、As 和 Zn 基本未受到污染或污染水平相对较低^[39]; 武汉市东湖和金湖中 Cd 元素处于中度污染累积水平, 墨水湖和上金湖中 Cd 元素为偏中度污染累积水平^[40]; 属于珠江流域的磨刀门河口地累积指数的大小为: Cd > Zn > Cu > Mn > Pb > Cr > Ni, 其中, Cr 和 Ni 属于无污染的范畴, Cu、Zn、Pb 和 Mn 属于轻度污染, Cd 元素为偏中度污染^[41]; 属于长江经济圈内的崇明岛东风西沙水库地累积指数法评价显示, Cd 为主要污染元素, 总体处于偏中度污染水平^[42]; 浙江象山近海表层地累积指数法评价显示, Cd 为主要污染元素, 总体处于偏中度污染水平^[43]. 相比之下, 苏州水网地区的重金属污染较为严重.

比较发现, 改进的地累积指数法评价的污染等级比一般的地累积指数法所得结果普遍偏高, 原因是改进的地累积指数法, 使用含量的平均值及最大值的平方平均数代替一般的地累积指数法计算单一的重金属含量, 综合考虑了各采样点重金属的污染平均情况并突出严重污染点位的环境质量意义, 可

更充分展示区域内各点位特定重金属污染的总体情况. 基于此, 后续评价子区域污染程度和多种重金属复合污染时, 也采用改进的地累积指数法.

在西北部[图 2(b)], 7 种重金属元素的污染程度从高到低依次为: Cd > Cu > Zn > Pb > As > Cr > Ni, 其中 Cd 属于极强污染, Cu 属于强度污染, Pb 和 Zn 属于中度到强度污染, Cr 和 As 属于中度污染, Ni 属于无到中度污染. 在西南部[图 2(c)], 相应结果为: Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > As > Cr, 其中, Cd 和 Pb 属于强度污染, Cu 和 Zn 属于中度到强度污染, Cr、As 和 Ni 属于无污染到中度污染. 在东部[图 2(d)] 相应结果为: Cd > Cu > Pb > Zn > As > Ni > Cr, 其中, Cd 属于极强污染, Cu 属于强度到极强污染, Pb 属于强度污染, As 和 Zn 属于中度到强度污染, Ni 属于中度污染, Cr 属于无到中度污染. 孙保金等^[44]报道位于东部的苏州工业园区湿地表层沉积物中 As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的平均地累积指数大多小于 0, Pb 处于无污染向中度污染, Cd 处于中等污染. 相比之下, 本文中东部地区河道底泥的重金属污染更为严重. 在古城区[图 2(e)], 评价结果为: Pb > Cd > Zn > Cu > Ni > As > Cr, 其中, Pb 属于强度到极强污染, Cd 和 Zn 属于强度污染, Cu 属于中度到强度污染, Ni、As 和 Cr 属于无到中度污染. 这与白冬锐等^[18]报道的苏州古城区河道底泥中 Pd、Cd、Cu 和 Zn 有超过 65% 的点位处于中强度污染水平以上的结果吻合.

2.2.2 多种重金属复合污染

使用重金属毒性系数修正改进的地累积指数法测算了 73 个采样点样品重金属复合污染情况(见图 3), 其中强度及以上污染的采样点占 16.5%, 中度到强度污染的采样点占 30.1%, 中度污染的采样点占 21.9%, 无污染到中度污染的采样点占 31.5%, 地累积指数平均值为 1.83, 整个研究区属于中度污染等级. 西北部的地累积指数平均值为 2.21, 处于中度到强度污染; 西南部的地累积指数平均值为 1.86, 处于中度污染; 东部的地累积指数平均值为 1.30, 处于中度污染; 古城区的地累积指数平均值为 2.03, 处于中度到强度污染. 污染程度由高到低排序为: 西北部 > 古城区 > 西南部 > 东部. 苏州水网地区底泥重金属污染问题亟需解决.

多种重金属复合污染等级与单一重金属污染等级无明显一致性, 如西南部底泥的 Cd 和 Pb 处于强度污染, Cu 和 Zn 处于中度到强度污染, 而该区域多种重金属复合污染平均值属于中度污染. 原因在于改进的地累积指数法使用等当量生态毒性指数最大的重金属含量变化指数, 筛选出对生态危害贡献最

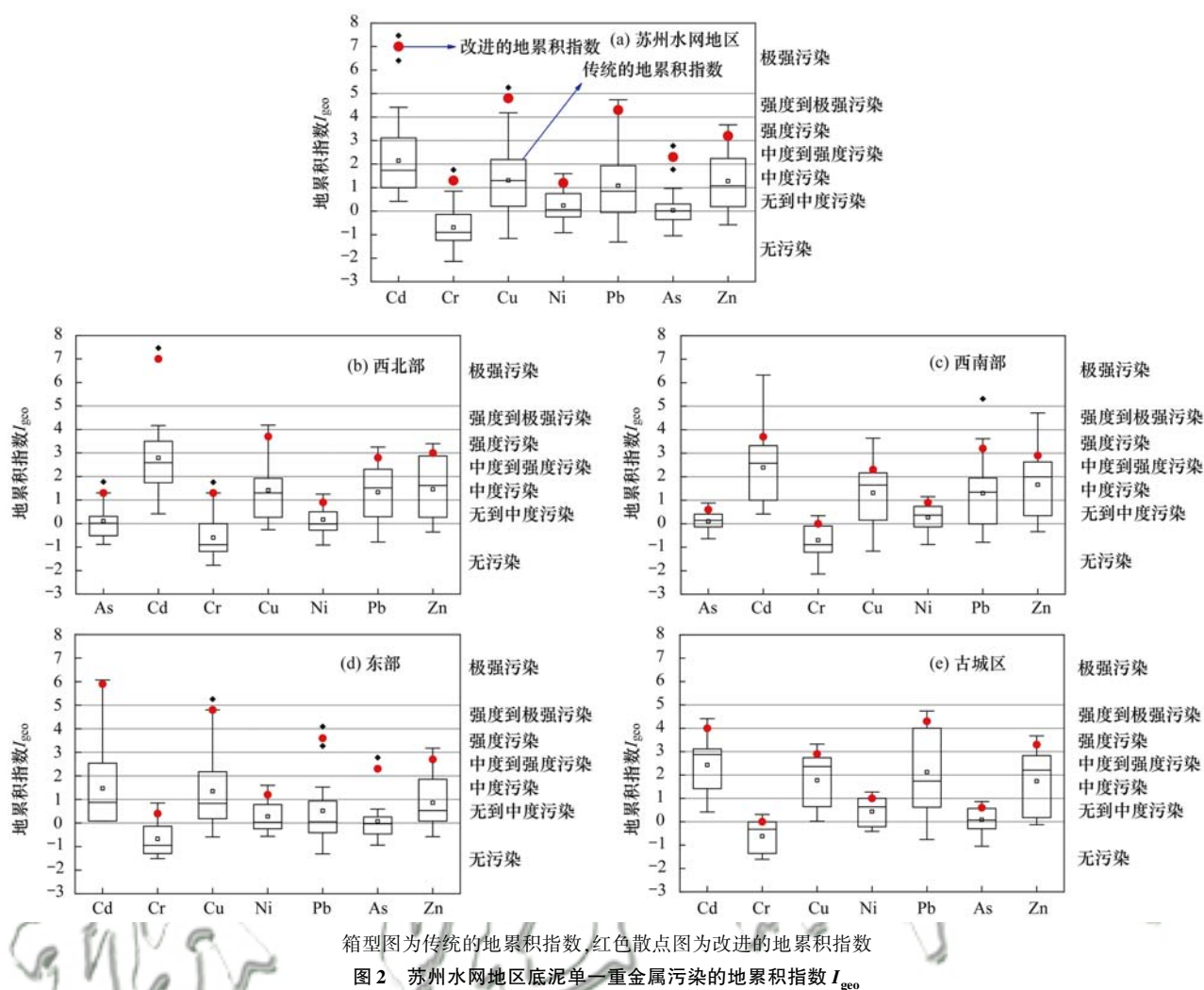


Fig. 2 Geoaccumulation index I_{geo} of single heavy metal pollution in sediment in the Suzhou water network area

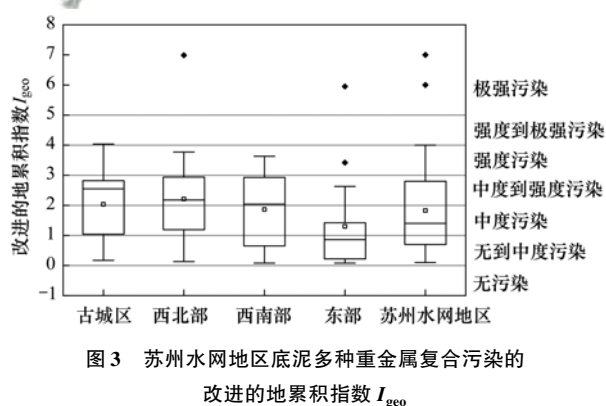


Fig. 3 Improved geoaccumulation index I_{geo} for combined pollution of multiple heavy metals in sediment

大的重金属,既考虑了含量高低,又考虑了生态毒性强弱。

2.3 苏州水网地区河道底泥重金属生态风险评价

针对单一重金属,在西北部 20 个采样点中,重金属元素 Cr、Ni 和 Zn 均属于低风险,Cu、As 和 Pb 超过 80% 属于低风险;Cd 的风险较高,10% 处于中等风险,30% 处于高风险,20% 处于高到极高风险,

40% 处于极高风险,尤其是 P13 采样点的 E_i 值远远超过平均值,周围学校众多,以居民区为主,可能是生活污水的不合理排放所致。在西南部 19 个采样点中,重金属元素 Cr、As、Ni 和 Zn 均属于低风险,Cu 和 Pb 近 90% 的采样点属于低风险,Cd 需要特别关注,21.1% 处于中风险,26.3% 处于高风险,10.5% 处于高到极高风险,42.1% 处于极高风险。在东部各采样点中,重金属元素 Cr、Ni 和 Zn 均处于低风险;Cu、As 和 Pb 超 80% 处于低风险;33.3%、42.9% 和 23.8% 的采样点中 Cd 分别处于中风险、高风险和极高风险水平,尤其是 M5 采样点,其 E_i 值亦远远超过平均值,沿岸有生产新型材料、汽车零部件、铜箔等材料的公司和电子公司,工业废水处理不达标可能是主要诱因。在老城区,Cr、As、Ni 和 Zn 处于低风险;Cu 和 Pb 过半数处于低风险,其中 Cu 元素 46.2% 的采样点处于中风险,30.8% 采样点的 Pb 处于高和极高风险;Cd 过半数处于极高风险,30.8% 处于中风险,剩余的处于高及以上风险。沈建伟等^[45]在 2010 年就发现,Cu 和 Cd 是苏州市农田

土壤的主要污染物,Cu 的含量超过江苏省土壤背景值和中国土壤背景值,Cd 的污染也比较严重,而造成农田土壤污染的原因之一就是使用的灌溉水源被没有经过处理的工业和生活污水污染.魏洪斌等^[46]也得出了 Cd 是长江三角洲典型县域——宜兴县耕地土壤潜在风险最大的重金属的结论,这与本文的结果一致.

结合改进的地累积指数法得到的污染等级和潜在生态风险指数法得到的生态风险发现,在苏州水网地区河道底泥中(见图 4),虽然重金属的污染等级比较高,但其潜在生态风险较小,呈现中度污染的

Cr、Ni 和极强污染的 Zn 有 100% 的采样点属于低风险,呈现极强污染的 Cu、Pb 和强度污染的 As 也超过 80% 的采样点属于低风险,只有极强污染的元素 Cd 所有采样点均呈现极高风险.查阅文献^[47 ~ 49]后发现,在沉积物污染等级确定和生态风险评价中,污染等级程度与潜在生态风险无直接关联的现象较为常见,原因是潜在生态风险指数的计算中使用的重金属毒性系数,其丰度和释放系数存在差异,毒性系数较小的,潜在生态风险可能就小.建议,优先关注、控制元素 Cd,兼顾元素 Cu、Pb 和 As 的含量异常点,元素 Cr、Ni 和 Zn 的控制可稍后.

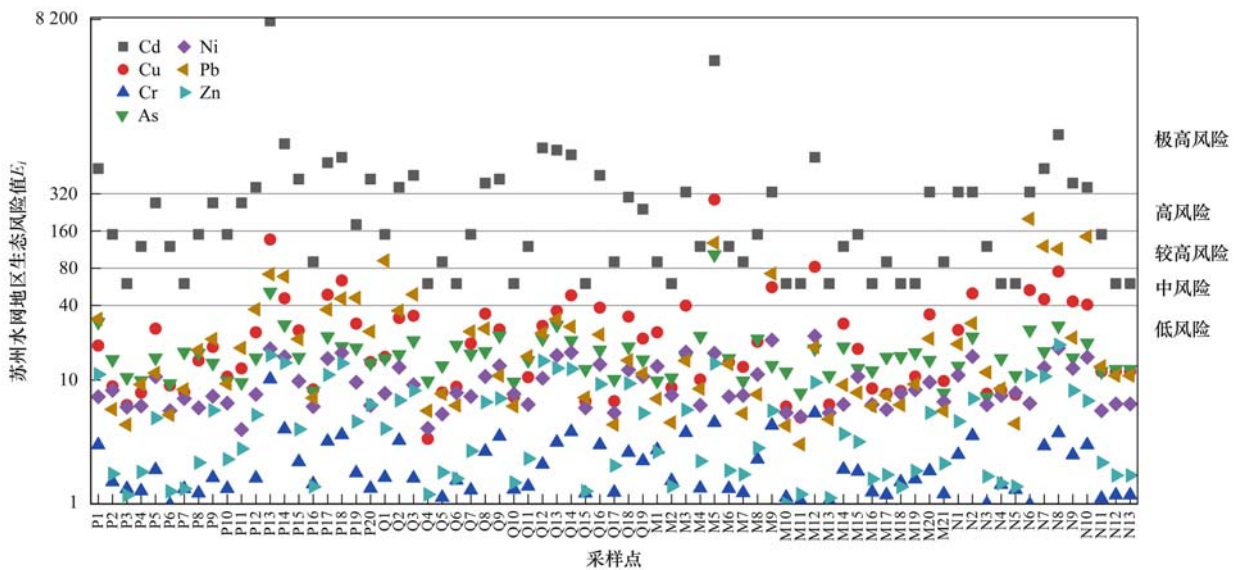


图 4 苏州水网地区生态风险指数值 E_i

Fig. 4 Ecological risk index value E_i of the Suzhou water network area

多因子综合潜在生态风险指数显示(见图 5), 49.3% 的采样点处于高风险,20.5% 的采样点处于

较高风险,剩余的 30.2% 处于中风险,可见即使单一重金属的潜在生态风险较小,复合污染的生态风

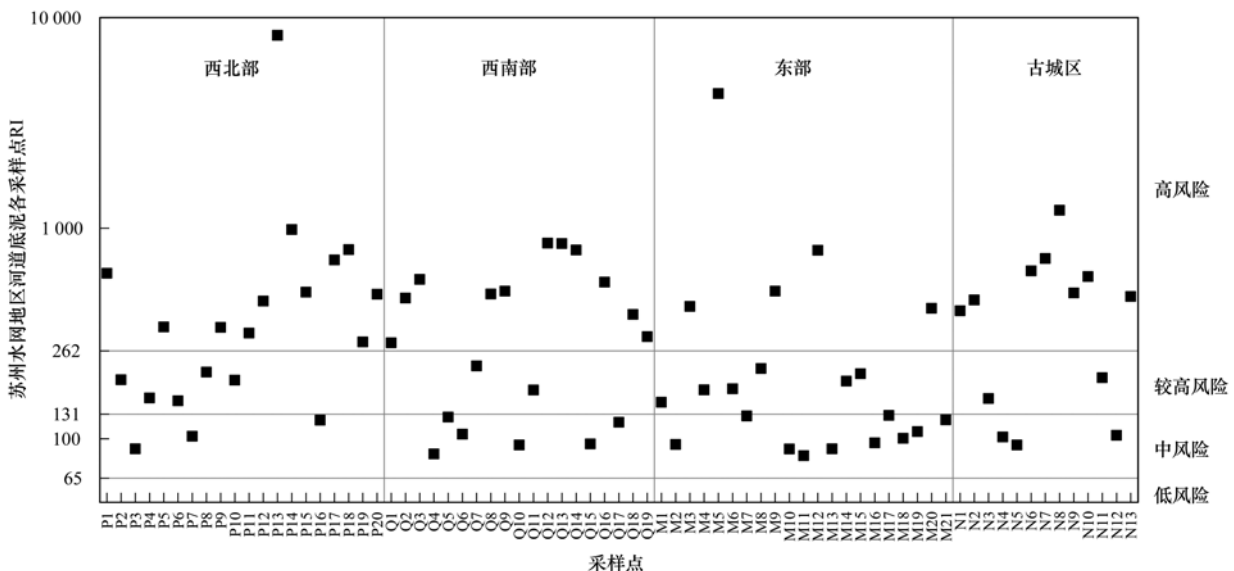


图 5 苏州水网地区潜在生态风险指数 RI

Fig. 5 Potential ecological risk index RI of the Suzhou water network area

险仍会较大,原因是不同种类重金属的毒性系数不同.这也印证了使用改进的地累积指数评价底泥重金属污染的积极意义,能更有效判别研究区域底泥治理的紧迫性.

2.4 苏州水网地区河道底泥重金属的来源解析

结合土地利用类型推测底泥重金属含量高值点的成因.西北部的采样点 P13 位于学校东侧的河汉处,距离护理院不足 300 m,周围属于生活区,重金属污染可能来源于生活污水的不合理排放.东部的采样点 M5 中 Cu 和 As 含量高,原因可能是周围分布零部件加工企业工业废水的不合理排放. M12 附近有装修公司和健身器材销售处,重金属 Ni 可能通过大气沉降进入河道.古城区的 N6 点位于高架公路入口,沿岸

还有交通主干道,附近分布装饰材料和机器设备销售点,在涂料、油漆等物品中可能含有大量的 Pb,过量的 Pb 元素进入河道造成底泥 Pb 含量超标; N8 点周围有较多的停车场,洗车污水可能是导致重金属 Zn 含量过高的主要原因.为更合理地识别污染来源,进一步开展相关性分析和主成分分析.

苏州水网地区河道底泥重金属含量的相关性分析结果见表 2, Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 元素两两之间呈显著正相关,表明这些重金属间具有一定的同源性,可能源自复合污染^[50,51],结合 2.1 节关于变异系数的讨论结果,推测人为源在导致苏州水网地区重金属元素 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 污染的贡献不可忽略.

表 2 苏州水网地区河道底泥重金属含量相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of heavy metal contents in river sediment in the Suzhou water network area							
	Cd	Cu	Cr	As	Ni	Pb	Zn
Cd	1	0.760 **	0.800 **	0.705 **	0.424 **	0.354 **	0.869 **
Cu	0.760 **	1	0.711 **	0.920 **	0.622 **	0.565 **	0.666 **
Cr	0.800 **	0.711 **	1	0.574 **	0.835 **	0.369 **	0.871 **
As	0.705 **	0.920 **	0.574 **	1	0.441 **	0.515 **	0.585 **
Ni	0.424 **	0.622 **	0.835 **	0.441 **	1	0.410 **	0.623 **
Pb	0.354 **	0.565 **	0.369 **	0.515 **	0.410 **	1	0.495 **
Zn	0.869 **	0.666 **	0.871 **	0.585 **	0.623 **	0.495 **	1

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著

苏州水网地区河道底泥重金属含量 PCA 的方差解释率如表 3 所示,PCA 结果前 2 个特征矢量的权重分别为 68.71% 和 12.20%,所对应的累计权重为 80.90%,故在整体的研究区域内提取两个主成分^[34,52,53].第一主成分中 7 种重金属均有较高载荷(Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 分别为 0.87、0.91、0.90、0.82、0.75、0.61 和 0.89),机动车辆不断增加,燃料和轮胎中的重金属成分不断向环境释放,随降雨进入河道并沉积在底泥中,导致 Pb 和 Zn 含量增

多;高 Cu 的添加剂在饲料中应用广泛,养殖业的污水未经处理排入河道也可导致底泥中 Cu 超标^[54],电镀和印染等行业的废水也会使底泥中累积重金属.第二主成分中 Pb 的荷载最高,达 0.55(Cd、Cu、Cr、As、Ni 和 Zn 分别为 -0.093、0.254、-0.397、0.399、-0.343 和 -0.220),可能是因为苏州水网地区河流众多,陆上交通基础设施完善,河流与道路联系紧密,汽车尾气中的 Pb 经过大气沉降进入河道,继而沉积.各子区域的主成分分析结果如表 4 所示.

表 3 苏州水网地区河道底泥重金属主成分分析结果¹⁾

Table 3 Principal component analysis of heavy metals in river sediment in the Suzhou water network area						
成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.810	68.708	68.708	4.810	68.708	68.708
2	0.854	12.195	80.903	0.854	12.195	80.903
3	0.709	10.133	91.036	—	—	—
4	0.485	6.933	97.970	—	—	—
5	0.080	1.142	99.112	—	—	—
6	0.046	0.659	99.771	—	—	—
7	0.016	0.229	100.000	—	—	—

1) “—”表示未提取该成分的数据

古城重金属含量进行主成分分析后,提取了 2 个主成分,累积贡献率达 92.50%,能够比较充分地提取有效数据,第一主成分的特征值为 5.42,方差贡献率为 77.40%,第二主成分的特征值为 1.06,方差贡献率为 15.10%,累积贡献率达 92.50%.第

一主成分决定了 Cu、Zn、Cd、As、Ni 和 Cr 这 6 种重金属的主要污染源,氮肥、磷肥和复合肥等化肥中含有较高含量的 As、Cd、Pb、Zn、Cr 和 Hg 等重金属^[55];杀虫剂和杀菌剂等农药中含有 Hg、Cu、Cd 和 As 等重金属^[56],如用于预防植物病害的福美肿中

含有 As,波尔多液和丙森锌等杀菌类药物含有 Cu 和 Zn.从老城区底泥中重金属含量的分布情况来看,含量较高的河段几乎都出现在公园或绿化带附近,植被覆盖率较高,可能因为化肥和农药未被植物完全吸收,经过雨水或者灌溉后进入河道,这与白冬锐等^[18]

报道一致. Pb 在第二主成分中荷载最高,含铅汽油的燃烧排放是过去城市铅污染的重要来源之一,过去相当长一段时期,苏州地区交通车辆多使用含铅汽油^[57],加上老城区属于生活区,交通便利且多沿河道,进入大气的 Pb 元素通过沉降作用进入河道.

表 4 子区域河道底泥重金属主成分分析结果

项目	Table 4 Principal component analysis results of heavy metals in river sediment of sub-region					
	西北部	西南部	东部		老城区	
	成分 1	成分 1	成分 1	成分 2	成分 1	成分 2
累积贡献率/%	86.151	74.971	79.367	96.652	77.401	92.503
Cd	0.941	0.942	0.929	-0.356	0.941	-0.086
Cu	0.982	0.947	0.973	-0.216	0.979	0.092
Cr	0.985	0.899	0.821	0.561	0.827	-0.521
As	0.922	0.864	0.875	-0.456	0.889	0.288
Ni	0.772	0.950	0.723	0.682	0.855	-0.474
Pb	0.853	0.335	0.926	-0.167	0.675	0.668
Zn	0.984	0.945	0.962	0.147	0.956	0.126

对西北部重金属含量进行主成分分析后,提取了 1 个主成分,该主成分的特征值为 5.96,方差贡献率为 85.15%,决定了 Cu、Cr、As、Zn、Ni、Cd 和 Pb 这 7 种重金属的主要污染源,西北部是苏州老工业区所在地,能源、建筑、运输、冶金等工业行业,产生的大量废气和粉尘中可能含有重金属,以蒸气或气溶胶的形式进入大气,沉降后进入农田土壤,加上该区物流业聚集、交通网密布,交通废物排放也会使得 Pb、Zn、Cu、Ni 和 Cd 等元素进入大气,最后沉降进入河道^[44].苏州市电子制造业发达,老工业区的基础设施有待进一步完善、监管不合理,也可能导致大量的含有 Pb、Cr、As 和 Cd 等元素的工业废水进入河道,造成污染^[58].

对西南部重金属含量进行主成分分析后,提取了 1 个主成分,特征值为 5.24,方差贡献率为 74.97%.第一主成分决定了 Cu、Zn、Cd、As、Ni 和 Cr 这 6 种重金属的主要来源,与西北部类似,西南部也有较多电子制造业,且大部分均沿河道分布,工业废水不合理的排放影响较大.

对东部重金属含量进行主成分分析后,提取了 2 个主成分,累积贡献率达 96.65%,第一主成分的特征值为 5.57,方差贡献率为 79.37%,第二主成分的特征值为 1.21,方差贡献率为 17.29%.第一主成分是 Cu、Zn、Cd、As、Pb、Cr 和 Ni 这 7 种重金属的主要污染源,第二主成分则是 Ni 和 Cr 元素的主要污染源,研究表明,第一主成分可以解释为来自于工业扬尘及交通排放的重金属,它们主要通过大气沉降至湿地沉积物中,第二主成分可以解释为来自于农业活动的重金属.

3 结论

(1)苏州 100.8 km² 水网地区底泥 73 个样品中,7 种重金属元素含量的平均值均超过江苏省土壤背景值和土壤污染风险筛选值,Cd、Cu、As、Ni、Pb 和 Zn 元素超标的采样点比例较高,可能存在较大的污染,Cr 元素的污染程度较低.根据变异系数可知人为因素是研究区域污染严重的主导因素,且区域的空间差异性较大.

(2)使用改进的地累积指数法评价发现,Cd 属于极强污染,Cu、Pb 属于强度到极强污染,Zn 属于强度污染,As 属于中度到强度污染,Cr、Ni 属于中度污染.73 个采样点整体属于中度污染.西北部处于中度到强度污染,西南部处于中度污染,东部处于中度污染,老城区处于中度到强度污染,污染程度由高到低顺序为:西北部>老城区>西南部>东部.苏州水网地区底泥重金属污染情况不容乐观.

(3)根据生态风险指数,73 个采样点底泥中重金属元素 Cr、As、Mn、Ni 和 Zn 都处于低风险;元素 Cd 的生态风险危害较大,子区域风险递降顺序为:西南部>西北部>老城区>东部,需要特别关注;元素 Cu 和 Pb 超过 80%的采样点属于低风险,且风险由大到小均为:老城区>西北部>东部>西南部,二者均需要重点关注.对于多种重金属复合污染的潜在生态风险,各采样点均处于中风险及以上,生态风险较大.

(4)相关性分析和主成分分析表明,底泥样品中的 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 元素主要源于人为因素.

参考文献:

- [1] 陈秀粉, 赵新民, 翟德勤, 等. 污染水体底泥重金属污染现状及植物修复技术进展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8): 97-102.
Chen X F, Zhao X M, Zhai D Q, *et al.* Pollution Status of heavy metals in polluted water sediment and its progress in phytoremediation technology [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(8): 97-102.
- [2] 庞阔, 李敏, 刘璐, 等. 基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4008-4017.
Pang K, Li M, Liu L, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in sediments of the Yellow River Basin based on Monte Carlo Simulation and PMF model [J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4008-4017.
- [3] 周亚龙, 王乔林, 王成文, 等. 雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5977-5987.
Zhou Y L, Wang Q L, Wang C W, *et al.* Heavy metal pollution and cumulative effect of soil-crop systems around typical enterprises in Xiong'an New District [J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5977-5987.
- [4] 王博, 赵爽, 夏敦胜, 等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1430-1440.
Wang B, Zhao S, Xia D S, *et al.* Characteristics of heavy metal elements and their relationship with magnetic properties of river sediment from urban area in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1430-1440.
- [5] 韩瑞杰, 任逸晨, 黄涛, 等. 包头市三类湿地中重金属污染程度及生物富集研究[J]. 环境工程, 2019, 37(1): 29-34.
Han R J, Ren Y C, Huang T, *et al.* Study on pollution degree and bio-concentration of heavy metals in three types of wetlands in Baotou, China [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(1): 29-34.
- [6] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 325-334.
Wei L L, Zhou Q, Xie C X, *et al.* Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in three gorges reservoir and effect of biological factors [J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 325-334.
- [7] 苑旭洲, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 菲律宾蛤仔对 6 种重金属的生物富集动力学[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(4): 49-56.
Yuan X Z, Cui Y, Chen B J, *et al.* Kinetic study on the bioconcentration of six heavy metals in *Ruditapes philippinarum* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(4): 49-56.
- [8] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1166-1176.
Sun H Y, Wei X F, Sun X M, *et al.* Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil-maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical vanadium-titanium magnetite tailings [J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1166-1176.
- [9] 李振良, 谢群, 曾珍, 等. 湛江观海长廊红树林土壤-植物体系重金属富集与迁移规律[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 398-409.
Li Z L, Xie Q, Zeng Z, *et al.* Enrichment and Migration of heavy metals in mangrove soil-plant system from sea promenade in Zhanjiang [J]. Tropical Geography, 2021, 41(2): 398-409.
- [10] 连花, 郭晶, 黄代中, 等. 洞庭湖表层沉积物中重金属变化趋势及风险评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 126-134.
Lian H, Guo J, Huang D Z, *et al.* Variation trend and risk assessment of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 126-134.
- [11] 杨海君, 许云海, 刘亚宾, 等. 清水塘工业区池塘底泥典型重金属污染特征及其风险评价[J]. 地球与环境, 2019, 47(5): 671-679.
Yang H J, Xu Y H, Liu Y B, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Qingshitang industrial district [J]. Earth and Environment, 2019, 47(5): 671-679.
- [12] 于孝坤, 熊欣怡, 范廷玉, 等. 芜湖河道沉积物重金属污染及生态风险评估[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 153-162.
Yu X K, Xiong X Y, Fan T Y, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from Wuhu [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(6): 153-162.
- [13] 黄建洪. 注意力分配视域下自贸区制度创新机理研究——基于自贸区苏州片区若干典型案例的分析[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2021, 42(6): 46-55.
Huang J H. A study of the mechanism of institutional innovation in free trade zones under the perspective of attention allocation: an analysis based on some typical cases in Suzhou area of free trade zones [J]. Journal of Soochow University (Philosophy & Social Science Edition), 2021, 42(6): 46-55.
- [14] 匡俊, 顾凤祥. 京杭运河苏州段沉积物重金属污染现状及评价[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(9): 8-12.
Kuang J, Gu F X. Assessment of heavy metal contamination in sediments in Suzhou of the Jinghang Canal [J]. Marine Geology Letters, 2008, 24(9): 8-12.
- [15] 蒋思丝, 夏维达, 蔡晔. 苏州市饮用水源地湖泊沉积物现状及污染评价[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(19): 133-135.
Jiang S S, Xia W D, Cai Y. Situation and pollution assessment of lake sediments in drinking water sources of Suzhou city [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(19): 133-135.
- [16] 陆志华, 蔡梅, 王元元, 等. 太湖沿岸区浅层底泥重金属污染分析及生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 455-467.
Lu Z H, Cai M, Wang Y Y, *et al.* Heavy metal pollution analysis and ecological risk assessment of shallow sediments in the coastal area of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 455-467.
- [17] 王漫漫, 陆昊, 李慧明, 等. 太湖流域典型河流重金属污染和生态风险评估[J]. 环境化学, 2016, 35(10): 2025-2035.
Wang M M, Lu H, Li H M, *et al.* Pollution level and ecological risk assessment of heavy metals in typical rivers of Taihu basin [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(10): 2025-2035.
- [18] 白冬锐, 张涛, 包峻松, 等. 苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3206-3214.
Bai D R, Zhang T, Bao J S, *et al.* Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3206-3214.
- [19] 王旭婷, 吴玮, 李淮. 苏州古城各功能区路面降雨径流分析[J]. 江苏水利, 2019, (7): 9-14.
Wang X T, Wu W, Li H. Analysis of pavement rainfall runoff in various functional areas of Suzhou ancient city [J]. Jiangsu Water Resources, 2019, (7): 9-14.

- [20] 龚思思. 苏州市产业转型升级研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [21] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区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.
- [22] 刘子赫, 孟瑞红, 代辉祥, 等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(9): 2157-2164.
Liu Z H, Meng R H, Dai H X, *et al.* Evaluation of heavy metals pollution in surface sediments using an improved geo-accumulation index method[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(9): 2157-2164.
- [23] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, **38**(5): 1363-1378.
Liao Q L, Liu C, Xu Y, *et al.* Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu province[J]. Geology in China, 2011, **38**(5): 1363-1378.
- [24] 张艳欣, 李任政, 刘莎莎. 苏州河底泥典型重金属空间分布及环境风险评价[J]. 中国资源综合利用, 2021, **39**(9): 163-166.
Zhang Y X, Li R Z, Liu S S. Spatial distribution and environmental risk assessment of typical heavy metals in the sediment of Suzhou creek[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, **39**(9): 163-166.
- [25] 贾琳, 杨林生, 欧阳竹, 等. 典型农业区农田土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2270-2276.
Jia L, Yang L S, Ouyang Z, *et al.* Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the farmland soils in Yucheng City, Shandong province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(11): 2270-2276.
- [26] 孟昭虹, 高玉娟. 黑龙江生态省土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(31): 13819-13821, 13830.
Meng Z H, Gao Y J. Distribution characteristics of heavy metals in soil of Heilongjiang ecological province and its ecological risk assessment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, **36**(31): 13819-13821, 13830.
- [27] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, **39**(6): 1233-1241.
Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index[J]. Geographical Research, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [28] 张海珍. 应用潜在生态风险指数法评价滇池沉积物中的重金属污染[J]. 地下水, 2012, **34**(3): 99-101.
Zhang H Z. Application of the potential ecological risk index to evaluate heavy metals pollution in Dianchi Lake[J]. Ground Water, 2012, **34**(3): 99-101.
- [29] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4): 1241-1249.
Li X P, Xu C L, Liu X Y, *et al.* Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City, P. R. China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- [30] 姜玉玲, 阮心玲, 马建华. 新乡市某电池厂附近污灌农田重金属污染特征与分类管理[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 645-654.
Jiang Y L, Ruan X L, Ma J H. Heavy metal pollution and classification management of sewage irrigation farmland around a battery factory in Xinxiang, Henan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 645-654.
- [31] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 3018-3027.
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [32] 何海星, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 厦门西港近岸沉积物重金属污染历史及源解析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 1045-1051.
He H X, Yu R L, Hu G R, *et al.* Pollution history and source of heavy metals in coastal sediments from Xiamen Western Bay[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(4): 1045-1051.
- [33] 宁增平, 蓝小龙, 黄正玉, 等. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(8): 3036-3047.
Ning Z P, Lan X L, Huang Z Y, *et al.* Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Hejiang River[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(8): 3036-3047.
- [34] 罗哲, 许仕荣, 卢少勇. 丹江口水库表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, **44**(3): 1-8, 17.
Luo Z, Xu S R, Lu S Y. Pollution characteristics and evaluation of heavy metals in surface sediments of Danjiangkou reservoir[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021, **44**(3): 1-8, 17.
- [35] 张丽丽, 李花粉, 苏德纯. 我国城市污水处理厂污泥中重金属分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 313-319.
Zhang L L, Li H F, Su D C. Characteristics and changes of heavy metals in sewage sludge of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(3): 313-319.
- [36] 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.
- [37] 张昕雨. 黑河上中游重金属污染特征及生态风险评价[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [38] 尹德超, 祁晓凡, 王雨山, 等. 雄安新区白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征及生态风险评价[J]. 中国地质, 2022, **49**(3): 979-992.
Yin D C, Qi X F, Wang Y S, *et al.* Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake, Xiong'an New District[J]. Geology in China, 2022, **49**(3): 979-992.
- [39] 刘丽娜, 马春子, 张靖天, 等. 东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(3): 520-529.
Liu L N, Ma C Z, Zhang J T, *et al.* Distribution characteristics of pollution from nitrogen, phosphorus, and heavy metals in sediments of Shankou Lake in Northeast China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(3): 520-529.
- [40] 龚杰, 孙紫童, 冯璐, 等. 武汉市东西湖区主要湖泊表层沉积物重金属污染特征与生态风险评价[J]. 地质科技通报, 2021, **40**(3): 204-210.
Gong J, Sun Z T, Feng L, *et al.* Pollution characteristics and

- ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of main lakes in Dongxihu district, Wuhan [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, **40**(3): 204-210.
- [41] 李平, 郭晓娟, 杨清书, 等. 珠江磨刀门河口表层沉积物中重金属的分布特征及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2017, **36**(5): 746-753.
- Li P, Guo X J, Yang Q S, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in Modaomen distributary mouth of Pearl River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, **36**(5): 746-753.
- [42] 毕宝帅, 余宏昌, 张亚, 等. 上海东风西沙水库表层沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2020, **29**(5): 709-719.
- Bi B S, Yu H C, Zhang Y, *et al.* Content characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment of Dongfeng Xisha Reservoir, Shanghai, China [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, **29**(5): 709-719.
- [43] 李金铎, 虞理鹏, 贺智能, 等. 象山近海表层沉积物重金属分布特征和生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(10): 1751-1760.
- Li J D, Yu L P, He Z N, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment in Xiangshan Offshore Areas[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(10): 1751-1760.
- [44] 孙保金, 庄起帆, 罗小进, 等. 苏州海绵城市试点区湿地沉积物中重金属的分布特征——以苏州工业园区为例[J]. *天津科技*, 2020, **47**(3): 62-68.
- Sun B J, Zhuang Q F, Luo X J, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in wetland sediments of Sponge city pilot area of Suzhou: a case study on SIP [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2020, **47**(3): 62-68.
- [45] 沈建伟, 徐加宽, 刘建国, 等. 苏州市农田土壤重金属污染状况研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(S2): 87-89, 93.
- Shen J W, Xu J K, Liu J G, *et al.* Study on heavy metal pollution in agricultural soils of Suzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(S2): 87-89, 93.
- [46] 魏洪斌, 罗明, 吴克宁, 等. 长江三角洲典型县域耕地土壤重金属污染生态风险评价[J]. *农业机械学报*, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
- Wei H B, Luo M, Wu K N, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metal pollution in cultivated soil at typical county level in Yangtze River Delta[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
- [47] 王超, 贾伯阳, 黄赓, 等. 典型山地城市河流沉积物重金属生态风险评价及来源解析[J/OL]. *长江流域资源与环境*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20220307.1412.005.html>, 2022-03-29.
- Wang C, Jia B Y, Huang Y, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in river sediments of a typical mountainous city [J/OL]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20220307.1412.005.html>, 2022-03-29.
- [48] 李林, 苏奇倩, 丁豪杰, 等. 剑湖流域土壤/沉积物重金属分布特征、来源解析及生态风险[J]. *环境化学*, 2022, **41**(3): 949-961.
- Li L, Su Q Q, Ding H J, *et al.* Distribution, ecological risks and sources of heavy metals in soil/sediment of Jianhu basin[J/OL]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(3): 949-961.
- [49] Calmuc V A, Calmuc M, Arseni M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution levels in sediments and of ecological risk by quality indices, applying a case study: the lower Danube River, Romania[J]. *Water*, 2021, **13**(13): 1801.
- [50] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al.* Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [51] 邹曦, 郑志伟, 张志永, 等. 三峡水库小江流域消落区土壤重金属时空分布与来源分析[J]. *水生态学杂志*, 2012, **33**(4): 33-39.
- Zou X, Zheng Z W, Zhang Z Y, *et al.* Temporal and spatial distribution and sources analyses of soil heavy metals in water-level-fluctuation zone of Xiaojiang Watershed in Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(4): 33-39.
- [52] 陈斌, 尹晓娜, 姜广甲, 等. 珠江口外陆架海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价及来源分析[J]. *应用海洋学学报*, 2021, **40**(3): 520-528.
- Chen B, Yin X N, Jiang G J, *et al.* Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the sediments of continental shelf and their sources off the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, **40**(3): 520-528.
- [53] 王影. 清河区流域底泥重金属污染监测及评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021.
- [54] 魏荣菲, 庄舜尧, 杨浩, 等. 苏州河网区河道沉积物重金属的污染特征[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(4): 527-537.
- WEI R F, Zhuang S Y, Yang H, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in sediments from the river network of Suzhou City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(4): 527-537.
- [55] 甘婷婷, 赵南京, 殷高方, 等. 长江三角洲地区农用地土壤重金属污染状况与防治建议[J]. *中国工程科学*, 2021, **23**(1): 174-184.
- Gan T T, Zhao N J, Yin G F, *et al.* A review on heavy metal pollution of agricultural land soil in the Yangtze River Delta and relevant pollution control strategy [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, **23**(1): 174-184.
- [56] 马新耀, 王静, 朱九生, 等. 山西省番茄中农药与重金属污染特征及膳食摄入风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(7): 1432-1440.
- Ma X Y, Wang J, Zhu J S, *et al.* Pollution characteristics and dietary intake risk assessment of pesticides and heavy metals in tomato samples in Shanxi Province, China [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2021, **40**(7): 1432-1440.
- [57] 王成, 袁旭音, 陈咏, 等. 苏州地区水稻土重金属污染源解析及单元影响量化研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3269-3275.
- Wang C, Yuan X Y, Chen Y, *et al.* Quantification of contributions from different sources on heavy metals accumulation in the paddy soil from Suzhou area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3269-3275.
- [58] 刘永伟, 毛小苓, 孙莉英, 等. 深圳市工业污染源重金属排放特征分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(2): 279-285.
- Liu Y W, Mao X L, Sun L Y, *et al.* Characteristics of heavy metals discharge from industrial pollution sources in Shenzhen [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(2): 279-285.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)