

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

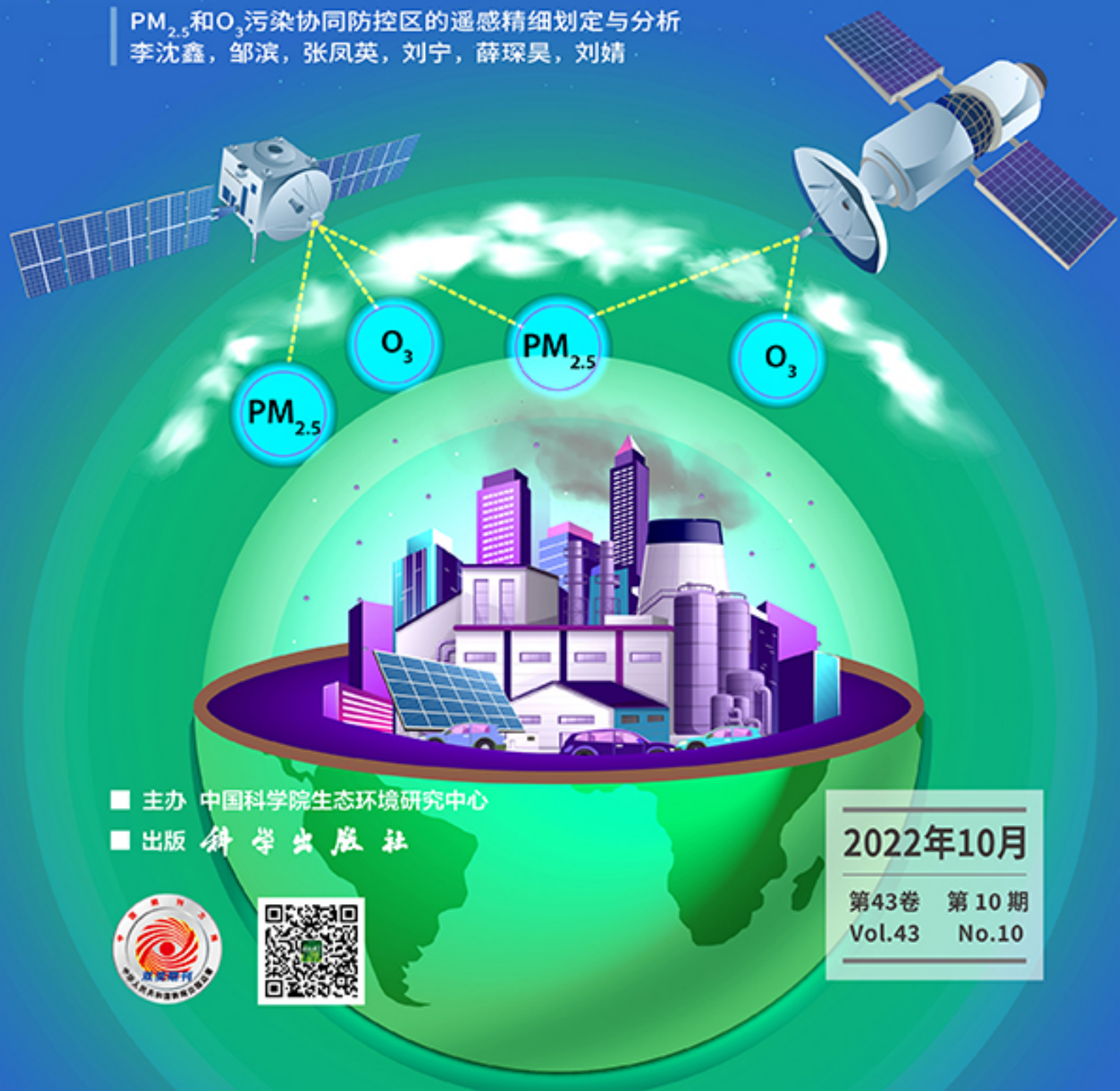
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估

郑飞^{1,2}, 郭欣^{1,2}, 汤名扬^{1,2}, 朱冬³, 董四君^{1,2}, 康乐^{1,2,4*}, 陈兵^{1,2*}

(1. 河北大学生命科学学院, 保定 071002; 2. 河北大学生命科学与绿色发展研究院, 保定 071002; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 4. 中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为了解白洋淀土壤重金属污染现状和潜在生态风险, 采集白洋淀区域表层土壤样本 55 个并检测锰(Mn)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)和镍(Ni)等 8 种重金属的含量. 采用地统计学方法(莫兰指数和半方差函数)分析其空间变异结构和分布格局, 运用地累积指数(I_{geo})和潜在生态风险指数(E_r^i 和RI)评估了重金属污染的程度及其风险. 结果表明, 研究区土壤重金属 ω (Mn)、 ω (Cr)、 ω (Cu)、 ω (Zn)、 ω (As)、 ω (Cd)、 ω (Pb)和 ω (Ni) 平均值分别为 467.75、43.59、28.57、89.04、12.32、0.18、19.26 和 30.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均低于农用地土壤污染风险筛选值, 但 Cu、Zn 和 Cd 明显高于背景值, 其中, Cu(48.65%) 和 Cd(37.52%) 为高度变异元素. 莫兰指数显示 Mn、Cu、Cd 和 Pb 空间自相关不显著, 半方差函数模型拟合显示 Cd 和 Pb 的块金系数均为 100%, 说明其空间变异由随机变异主导, 受人为因素影响较大. 重金属高值区主要分布在白洋淀的西南部地区, 并且元素之间均有显著的相关性, 表现为复合污染. 重金属污染程度 I_{geo} 从高到低依次为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cr}$, 其中, Cd 污染最为普遍, 67.27% 的样本为轻度污染. 风险评估(E_r^i)显示, Cd 的 E_r^i 平均值为 58.81, 属于中等程度生态风险; 其他重金属均为轻微生态风险. 研究区土壤重金属污染 RI 为轻微生态风险(87.81), 其中, Cd 对 RI 的贡献率最高(66.39%). 因此, 未来需要加强对白洋淀西南部重点区域重金属 Cd 污染的监测和治理.

关键词: 白洋淀; 重金属; 地统计学; 空间分布; 土壤污染; 风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4556-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202201075

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake

ZHENG Fei^{1,2}, GUO Xin^{1,2}, TANG Ming-yang^{1,2}, ZHU Dong³, DONG Si-jun^{1,2}, KANG Le^{1,2,4*}, CHEN Bing^{1,2*}

(1. School of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Institute of Life Sciences and Green Development, Hebei University, Baoding 071002, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To understand the spatial distribution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in soil of Baiyangdian Lake, 55 soil samples were collected and the contents of eight heavy metals (Mn, Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, and Ni) were detected. The spatial variation structure and distribution pattern were analyzed using geostatistical methods (Moran index and semi-variance model). The degree of heavy metal pollution and its risk were assessed using the geoaccumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (E_r^i and RI). The results showed that the average of ω (Mn), ω (Cr), ω (Cu), ω (Zn), ω (As), ω (Cd), ω (Pb), and ω (Ni) were 467.75, 43.59, 28.57, 89.04, 12.32, 0.18, 19.26, and 30.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, all of which were lower than the screening values of soil pollution risk in agricultural land. However, the contents of Cu, Zn, and Cd were significantly higher than their background values, with two highly variable elements of Cu (48.65%) and Cd (37.52%). The Moran index indicated that Mn, Cu, Cd, and Pb showed weak spatial autocorrelation. Nugget coefficients of both of Cd and Pb shown by the semi-variance model were 100%, suggesting random variation as a main spatial variation driven by anthropogenic factors. High values of soil heavy metals were mainly distributed in the southwest of Baiyangdian Lake with a significant correlation between the heavy metals. The I_{geo} of soil heavy metals from high to low was $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cr}$. Cd pollution was the most common, in which 67.27% of the samples were lightly polluted. Ecological risk assessment revealed that the average E_r^i of Cd was 58.81, belonging to the middle ecological risk level, and the rest were at light ecological risk. As a whole, the RI of soil heavy metal pollution in Baiyangdian Lake was at a light ecological risk level (87.81), with the highest contribution rate of Cd to RI (66.39%). Thus, it is necessary to strengthen the control of soil heavy metal Cd pollution in Baiyangdian Lake in the future.

Key words: Baiyangdian Lake; heavy metal; geostatistics; spatial distribution; soil pollution; risk evaluation

土壤是自然界最复杂的生态系统之一,在维持生态系统服务功能可持续性和保证粮食安全上起着关键的作用^[1].随着工业化和城镇化进程的加快,土壤中重金属仍在持续增加,造成的环境污染问题也日益严峻.据调查,我国受到重金属污染的耕地约15 000 km^2 ,每年因重金属污染的粮食达上千万吨,造成的直接经济损失有 200 余亿元^[2],严重威胁着我国农业生产和食品安全.同时,土壤重金属污染还会对土壤生

物产生强烈的毒性,比如降低生物多样性^[3],削弱其生殖能力,损伤其神经以及免疫系统^[4];甚至可以在农作物和水生生物中富集,并通过食物链进入人体,

收稿日期: 2022-01-09; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 河北省高校百名优秀创新人才支持计划项目 (SLRC2019019); 河北大学高层次人才支持计划项目 (521000981358, 521100221018)

作者简介: 郑飞(1991~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为环境污染物的生物毒性响应, E-mail: zhengfei@hbu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lkang@ioz.ac.cn; chenbing@hbu.edu.cn

从而危害环境生态系统和人类健康^[5]。

白洋淀的重金属污染问题由来已久,亟待解决。白洋淀地处大清河水系中部,是海河流域大清河南支流域重要的湖库,也是中国北方最具典型性的湖泊和草本沼泽湿地,对维持华北地区的生态环境有着重要作用,被誉为“华北明珠”^[6]。随着雄安新区的设立以及新区长远规划的需求,白洋淀作为新区境内最大的水体,其重金属污染问题也得到了广泛的关注。目前,关于白洋淀流域重金属污染的研究已取得一定的成果,尤其是水体和沉积物。比如,赵黔伟等^[7]利用多元统计方法探讨了白洋淀水体重金属污染的变化特征和来源,发现淀内湖水重金属呈现“西部高,东南低”的分布模式。向语兮等^[8]采用BCR 3步提取法分析了白洋淀全域沉积物中6种重金属的含量,结果表明白洋淀的首要污染因子是镉(Cd),整体面临较高的Cd风险,以圈头最高,端村最低。刘鑫等^[9]则是结合历史检测数据分析了白洋淀水体和沉积物的重金属污染的时空分布特征,结果显示白洋淀水体污染程度明显下降,沉积物整体处于中等风险水平,主要污染物质为Cd、锌(Zn)和铜(Cu)。另有研究通过检测白洋淀沉积岩芯的²¹⁰Pb、¹³⁷C比活度和重金属含量,重建70年以来白洋淀生态环境的演化过程,发现2000~2015年间,Cu、Zn、Cd和铅(Pb)的含量显著增加,并逐年升高^[10]。然而,对于白洋淀主流域地区的土壤重金属污染状态却鲜见报道,作为水体重金属的直接和主要来源,其周围的土壤重金属具有很好的稳定性和代表性。因此,针对白洋淀地区土壤重金属调查显得尤为重要。

土壤重金属污染可以通过各类评价指数进行判定,包括传统评价方法(单因子指数法^[11]和多因子指数法^[12])和现代评价方法(地统计学方法^[13])。其中,传统评价方法中以地累积指数法和潜在生态风险指数法应用最为广泛。地累积指数法侧重于地质背景等自然因素的影响,潜在生态风险指数法则结合重金属的生物毒性效应来评价重金属污染所造成的生态风险。然而,描述性统计分析只能说明重金属含量的变化,不能定量刻画其结构性、相关性和独立性;地统计学方法则可以最大限度保留空间变异信息,直观展示土壤重金属的空间分布和变异特征,便于解析重金属污染的来源和归趋^[13]。由于每一种评价指数都存在一定的局限性^[14],至今鲜有研究联合这3类评价方法进行白洋淀土壤重金属污染程度以及生态风险的评估。因此,选择白洋淀区域为研究区,以土壤重金属含量为基础,分析其空间变异特征,构建空间分布模式,结合多种评价指数全面评估

白洋淀土壤重金属污染状况,以期为雄安新区的合理规划和污染防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样本采集

围绕白洋淀主淀区及其周边进行网格化样点布设,每4 km²设置一个样点,采样时样点选择以农田土壤为主,遇到地表水体时采样点可作适当调整,实际共得到55个样点。按照DZ/T 0295-2016的重金属检测土壤样本采集标准^[15],在布设的采样点上,以GPS定位点为中心,向四周20~50 m辐射确定3~5个分样点,等份组合成一个混合样,采集地表以下0~20 cm深度的表层土壤样品。采样时避开沟渠、田埂、路边、旧房基、粪堆及微地形高低不平无代表性地块。将各分样点的土壤掰碎,挑出根系、秸秆、石块和虫体等杂物,充分混合后,四分法留取1.0 kg装入样品袋。每个样点取3个生物学重复。采集完成后,记录下样点地理位置、样地类型、植物类型和周围环境等信息并拍照记录。样点分布如图1所示。

1.2 样本处理与检测

按照DZ/T 0295-2016的重金属检测土壤样本加工标准^[15],将野外采回的土壤样品及时清理登记后,置于干净整洁的室内通风场地自然风干,适时翻动,并将大土块敲碎以防止黏泥结块,加速干燥。用木棍碾压风干的样品,并剔除植物残体、石块等侵入体和新生体。压碎的土样先过10目尼龙筛,再过100目尼龙筛,未过筛的土粒必须重新碾压,直至全部通过该孔径。采用美国哈希(型号为HQ40D-Multi)对10 g过10目筛网的土壤进行酸碱度(pH)的检测。取2 g过100目筛网的土壤样品送至中国科学院生态环境研究中心土壤分析测试中心,采用PerkinElmer公司的电感耦合等离子体质谱仪(型号为NexION300X)进行锰(Mn)、铬(Cr)、Cu、Zn、砷(As)、Cd、Pb和镍(Ni)这8种重金属指标的分析测试。采用国家一级标准土样监控分析测试的准确度和重复样监控分析测试的精密度进行土壤样品的分析测试,每批样品测定10%的平行双样,且两个平行样品测定结果的相对偏差 $\leq 20\%$ 。得到的数据通过中国科学院生态环境研究中心土壤分析测试中心的验收,样品分析测试质量和各元素指标检出限均满足生态地球化学评价样品分析技术规范要求^[16],确保分析数据可靠。

1.3 地统计学方法

1.3.1 莫兰指数

莫兰指数(Moran's *I* 指数)用来表征同一个变

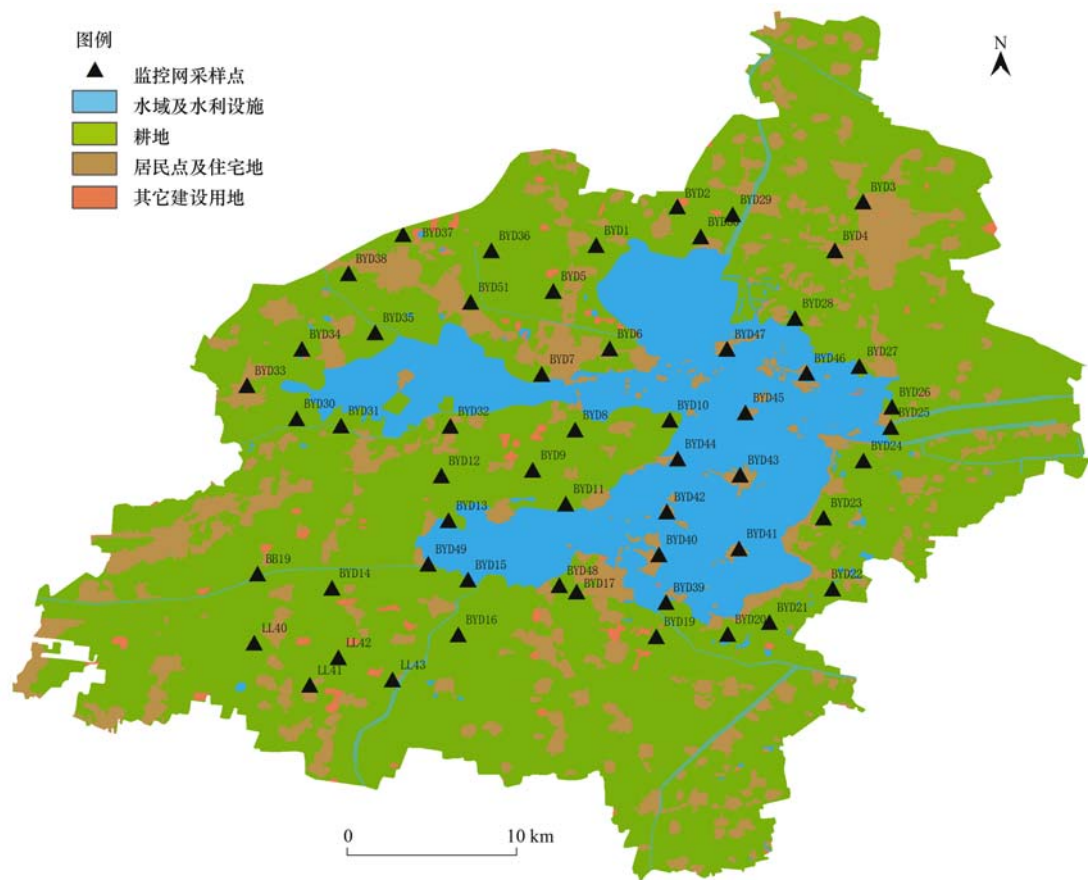


图1 白洋淀采样点示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Baiyangdian Lake

量在不同空间位置上的相关性^[17,18],零假设为统计的空间要素是随机分布的. Moran's I 指数的计算公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中, x_i 为重金属元素 x 在 i 处测得的实际值, $\bar{x}$ 为元素 x 的平均值, w_{ij} 为空间权重函数. 通常采用随机条件下近似正态分布假设的标准差 Z 值来判断空间相关性^[19]. 当 $Z > 1.96$ 且 $P < 0.05$ 时, 拒绝零假设, 空间自相关为正, 即相似的观测值趋于空间聚集; 当 $Z < -1.96$ 且 $P < 0.05$ 时, 拒绝零假设, 空间自相关为负, 相似的观测值趋于空间孤立; 当 Z 值为零时, 则接受零假设, 空间分布呈现随机性^[20].

1.3.2 半方差函数

半方差函数指的是两点间差值方差的一半, 是表征土壤元素空间连续变异的一个函数, 反映了土壤元素的不同距离观测值之间的变化, 能很好地描述重金属含量的空间变异结构^[21]. 运用半方差函数能够实现白洋淀重金属污染空间变异的表征, 并对该地区重金属的空间变异及相关程度进行量化. 其

计算公式为:

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N(h)} \times \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中, $\lambda(h)$ 为实验半方差函数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 是重金属 i 在土壤中的实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), $N(h)$ 为以 h 为间距的所有观测点的成对数目. 为了满足地统计学分析的要求, 对白洋淀土壤各重金属元素含量进行正态分布检验, 发现其多数不符合正态分布, 经对数转换后的各指标数据呈对数正态或近似对数正态分布, 因此半方差函数的计算均采用重金属含量对数转换后的数据.

1.4 污染评价方法

1.4.1 地累积指数

地累积指数 (I_{geo}) 主要用于定量沉积物及其他物质中重金属的污染程度^[22], 是目前使用较为普遍的重金属污染评价方法之一. 其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_i / k B_i) \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为重金属 i 的地累积指数, C_i 为重金属 i 在土壤中的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 为重金属 i 的背景值, 本研究采用河北省 A 层土壤中的背景值作为参考值^[23], k 为校正系数, 一般取 1.5^[24]. 按照

I_{geo} 值的大小可以将重金属污染划分为 0~6 共 7 个等级:0 级为 $I_{geo} \leq 0$, 无污染; 1 级为 $0 < I_{geo} \leq 1$, 轻度污染; 2 级为 $1 < I_{geo} \leq 2$, 偏中度污染; 3 级为 $2 < I_{geo} \leq 3$, 中度污染; 4 级为 $3 < I_{geo} \leq 4$, 偏重污染; 5 级为 $4 < I_{geo} \leq 5$, 严重污染; 6 级为 $I_{geo} > 5$, 极重污染。

1.4.2 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数法 (RI) 主要用于综合分析重金属的含量、种类和毒性水平等影响因素,定量地划分重金属的潜在生态风险程度^[12],也是目前土壤重金属污染程度和生态风险最常用的评价方法。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i / C_n^i) \quad (4)$$

式中,RI 为所有重金属总的潜在生态风险指数,为 E_r^i 为单项重金属 i 的单因子潜在生态风险指数, T_r^i 为重金属 i 的毒性系数,本研究调查的重金属毒性系数分别为 Zn=1、Cr=2、Mn=2、Cu=5、Ni=5、Pb=5、As=10 和 Cd=30。 C_i 为重金属 i 在土壤中的实际测得含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_n^i 是重金属 i 的参比值,本研究以河北省 A 层土壤背景值作为各项重金属的参比值^[23]。根据 E_r^i 和 RI 的值大小,将重金属污染程度划分为轻微 ($E_r^i \leq 40$, $RI \leq 150$)、中等 ($40 < E_r^i \leq 80$, $150 < RI \leq 300$)、强 ($80 < E_r^i \leq 160$, $300 < RI \leq 600$)、很强 ($160 < E_r^i \leq 320$, $600 < RI \leq 1\,200$)、极强 ($E_r^i > 320$, $RI > 1\,200$) 这 5 个级别。

1.5 数据分析

本实验数据使用 Excel 2019 进行平均值、变异

系数和相关指数的计算,使用 SPSS 22 进行数据检验和相关性分析,采用地统计分析软件 GS+9 进行重金属空间变异分析,运用 ArcGIS 10.7 进行采样点位置图和重金属空间分布图的绘制。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素特征

2.1.1 重金属的含量

白洋淀研究区的表层土壤重金属含量如表 1 所示。重金属 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 平均值分别为 467.75、43.59、28.57、89.04、12.32、0.18、19.26 和 30.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 值介于 8.10~9.01 之间,以碱性为主。根据土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018)^[25]对研究区土壤健康进行整体评估,虽然研究区域中所有样点的重金属含量均低于农用地土壤重金属污染风险筛选值;但是进一步对比河北省 A 层土壤重金属背景值^[23],发现 Ni 接近背景值,Cu、Zn 和 Cd 均明显高于背景值,尤其是 Cd,其含量约是背景值的 2 倍。所有重金属元素超过背景值的样点数量依次为 4、3、35、35、19、52、18 和 24 个。尽管研究区土壤重金属暂时对农作物生长或土壤生态环境不构成危害,但由于重金属风险筛选值是造成危害的土壤临界值,一般较高,因此需要更精准的方法评估超标重金属的污染程度以及潜在的生态风险。

变异系数可以反映该元素在土壤样点中的均匀性和变异程度,按照大小依次分为小变异 (0~15%)、中等变异 (15%~35%) 和高度变异

表 1 白洋淀土壤重金属元素含量特征¹⁾

Table 1 Characteristics of heavy metal element content in soil of Baiyangdian Lake

项目	Mn	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Ni	pH
最大值	795.71	81.46	83.13	146.22	21.26	0.48	44.25	56.15	9.01
最小值	271.04	25.87	12.96	50.26	6.52	0.08	9.81	17.08	8.10
平均值	467.75	43.59	28.57	89.04	12.32	0.18	19.26	30.56	8.66
中位数	456.03	40.89	25.20	84.22	12.06	0.17	18.59	29.71	8.67
标准差	109.21	11.56	13.90	23.67	3.24	0.07	6.02	8.55	0.18
变异系数/%	23.35	26.52	48.65	26.58	26.28	37.52	31.28	27.96	2.11
背景值	608.00	68.30	21.80	78.40	13.60	0.094	21.50	30.80	7.90
农用地筛选值	—	250	100	300	25	0.60	170	190	—

1) pH 无量纲,其他元素单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; “—”表示无筛选值

($>36\%$)^[26]。变异系数越大,元素在土壤中的含量分布越不平均,说明受人类活动影响越大^[27]。研究区土壤 pH 为小变异,重金属 Mn、Cr、Zn、As、Pb 和 Ni 属于中等变异元素,空间分布较均匀,推测其主要受自然因素 (地貌和成土母质) 的影响^[28]。Cu 和 Cd 为高度变异元素,其中 Cu 的变异系数最大

(48.65%),不均匀性最高; Cd 次之 (37.52%),这和多数调查结果一致^[26,29],说明研究区 Cu 和 Cd 不均匀性最高,受人类活动影响比较大。

2.1.2 重金属的空间变异特征

白洋淀土壤重金属的空间自相关分析的 Moran's I 指数如表 2 所示。空间自相关所统计的内

容主要为空间变量的空间位置及其属性. 根据 Z 值大小,以正态分布 95% 置信区间双侧检验阈值 1.96 为界限判断相关性^[30]. 可以看出,Cr、Zn、As 和 Ni 的空间自相关指数的标准化 Z 值均高于 1.96,且 $P < 0.05$,说明这些重金属呈现正的空间自相关性,相

邻观测点之间的值是相似的,其空间分布为聚集型,具有良好的空间结构^[31]. 而 Mn、Cu、Cd 和 Pb 的 Z 值在 0 ~ 1.96 之间,且 $P > 0.05$,表明这 4 种重金属元素空间自相关不显著,呈现空间随机分布,其中以 Cd 和 Pb 最为明显,说明受人为因素影响较大.

表 2 白洋淀土壤重金属空间自相关分析

Table 2 Spatial autocorrelation analysis of soil heavy metals in Baiyangdian Lake								
项目	Mn	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Ni
方差	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Z	1.01	2.46	1.38	2.64	2.26	-0.42	0.18	2.81
P	0.31	0.01	0.17	0.01	0.02	0.68	0.86	0.00

进一步用半方差函数定量这种空间关系,并揭示土壤特征值变异性^[32],其理论模型和拟合参数见表 3. 研究区土壤 Cd 和 Pb 的块金系数均为 100%,说明其空间变异由随机变异主导,受外在因素(施肥、灌溉、农药喷洒和工业排放等人类活动)影响较大,反映了在人类强烈干扰下土壤重金属空间变异的复杂性^[26,33,34]. 土壤 Mn 的块金系数为 23.85%,呈现强烈的空间自相关性,说明其主要受内在因素如气候、土壤类型和地质环境等控制;而 Cr、Cu、Zn、As 和 Ni 为中等空间相关性,表明这类重金属同时受到地质环境和外来物质的影响.

从半方差函数拟合模型来看,土壤 Mn 符合指

数模型,Cr 和 Zn 为线性模型,Cu 和 Ni 为高斯模型,As 符合球状模型,都较好地反映了土壤 Mn、Cr、Cu、Zn、As 和 Ni 的空间变异特征^[35]. 土壤 Cd 和 Pb 的拟合模型为纯块金形式的线性模型(pure nugget effect model),表现出较强的独立性和随机性,但决定系数相对较低,说明重金属 Cd 和 Pb 受人为干扰比较大,同时可能受限于采样密度和尺度. 有研究者对白洋淀洼地浅层土壤进行了环境地球化学物源判断分析,结果显示 Cd 和 Pb 存在典型的二元性特征,人为叠加作用十分强烈,空间上与相关污染企业具有对应关系^[36]. 因此,有必要进一步了解研究区的重金属空间分布.

表 3 白洋淀土壤重金属元素的理论模型和拟合参数

Table 3 Theoretical models and fitting parameters for heavy metals in soil of Baiyangdian Lake						
重金属	理论模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金系数[$C_0 / (C_0 + C) \times 100\%$]	决定系数(R^2)	残差(SS)
Mn	指数模型	2.60E-03	1.09E-02	23.85	0.58	1.62E-04
Cr	线性模型	6.76E-03	1.32E-02	51.31	0.94	2.30E-06
Cu	高斯模型	1.11E-02	3.08E-02	35.89	0.61	1.71E-04
Zn	线性模型	7.09E-03	1.42E-02	49.99	0.85	7.53E-06
As	球状模型	7.39E-03	1.49E-02	49.66	0.79	1.19E-05
Cd	线性模型	1.65E-01	1.65E-01	100.00	0.20	2.24E-02
Pb	线性模型	1.19E-03	1.19E-03	100.00	0.04	5.29E-07
Ni	高斯模型	7.79E-03	1.67E-02	46.70	0.94	4.81E-06

2.1.3 重金属的空间分布格局

为了更加直观地反映空间异常程度对重金属的影响,采用克里金插值法^[37,38]绘制了白洋淀土壤重金属含量的空间分布图(图 2). 可以看出,Cd、As、Zn、Cu 和 Pb 重金属含量的空间分布具有很强的一致性,高值区主要分布在白洋淀的西南部. 这种空间上的高度一致性说明它们具有相同的污染源,或是由于同一地质作用. 根据浅层土壤中重金属的地球化学行为特征,可初步判断这些高值区源自人为活动^[39]. 多项研究表明,土壤中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的高值区分布基本一致,主要来源于工业叠加,尤其是钢铁冶炼和金属加工;As 则更多源于燃煤烟气的大气沉降^[29,40,41]. 据调查,白洋淀西南地区曾建有废

旧金属的回收站以及金属加工等相关企业,长期生产活动导致周边土壤重金属的积累^[24,41].

2.1.4 重金属的相关性分析

研究区内土壤重金属的 Pearson 相关性分析显示所有检测的 8 种重金属之间均呈现极显著正相关($P < 0.001$,表 4). 按照相关性系数 0.80 以上为极强相关,则 Cr、Cu、Zn、As 和 Ni 之间,Cd 和 Pb 之间均为极强相关,说明研究区土壤呈现出明显的重金属复合污染,具有共同的污染来源,进一步解释了重金属空间分布的一致性. 据报道,Ni 和 Cr 是自然影响的指标,主要来源是成土母质^[42]. 同时,Cr、Cu、As 和 Ni 主要源自淀区的生产生活燃煤,白洋淀洼地西南部的数家简易炼铜厂和炼锌厂造成了

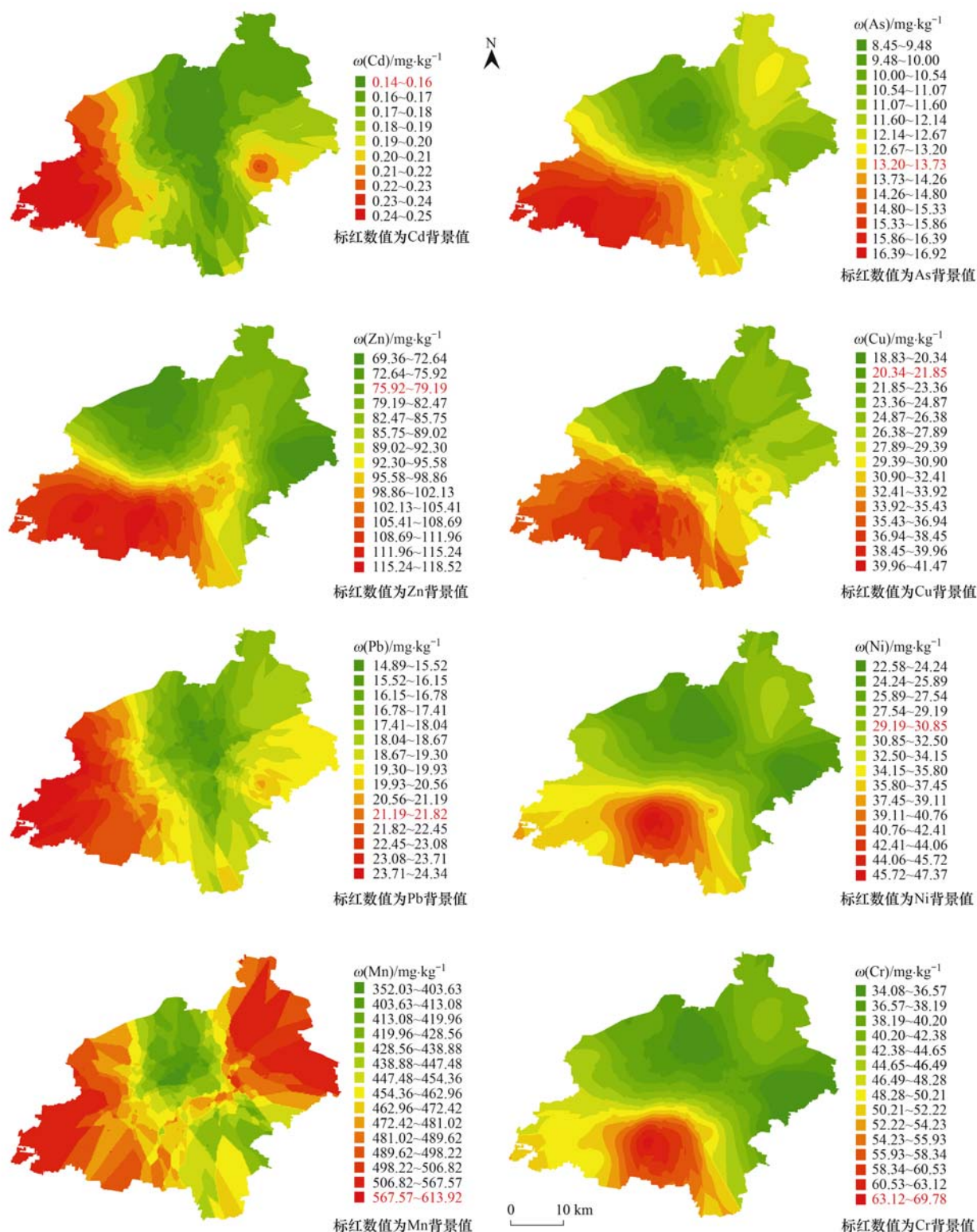


图2 白洋淀土壤重金属含量空间分布特征

Fig. 2 Distribution map of heavy metals in soil of Baiyangdian Lake

Cu 和 Zn 的富集,研究区农田的污水灌溉、化肥施用和农药喷洒等农业活动则是 Cd 和 Pb 的主要污染源^[40~43].

2.2 土壤重金属的污染评估

2.2.1 重金属污染程度

白洋淀土壤重金属 I_{geo} 平均值从高到低依次为:

$\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cr}$, 重金属污染的样点数量也呈现类似分布(表5). 其中, Cd 污染最普遍, 整体为轻度污染, 样本数占总样本数 67.27%, 另有 7.27% 样点为偏中度污染, 没有中度及以上污染样点. 其次为 Cu, 有 12 个样点为轻度污染(21.82%), 2 个偏中度污染(3.64%). 郭志

娟等^[24]对雄安新区的土壤重金属污染情况进行了调查, I_{geo} 评估显示全域重金属污染以 Cd 相对严重, 其次为 Cu 和 Pb, 这与本研究结果基本一致. 类似地, 高秋生等^[44]对白洋淀沉积物中的重金属污染的 I_{geo} 评估也显示, Cd 的污染程度极为严重. 崔邢涛等^[45]在 2014 年调查了保定市土壤重金属污染情况, 发现保定市土壤重金属污染以 Cd 为主, 污染总面积达到 0.22%. 土壤中的 Cd 会在粮食作物中富集, 由食物链进入人体, 进而威胁人类健

康^[14,46]. 郭志娟等^[24]的结果还显示 As、Cr、Ni 和 Zn 均为无污染状态^[24], 与之不同的是, 本研究发现土壤中仅 Mn 和 Cr 的 I_{geo} 整体呈现清洁状态; Zn、As、Pb 和 Ni 各有 16.36%、1.82%、1.82% 和 5.45% 的样点处于轻度污染状态, 无偏中度以上污染样点. 因此, 白洋淀土壤重金属 Cd 污染问题较为严重, 亟待解决, 未来需要以 Cd 修复为主制定重金属污染防治方案, 但同时其他重金属污染仍不可忽视.

表 4 白洋淀土壤重金属相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation coefficients for heavy metals in soil of Baiyangdian Lake

	Mn	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Ni
Mn	1							
Cr	0.62	1						
Cu	0.69	0.91	1					
Zn	0.54	0.79	0.83	1				
As	0.70	0.84	0.88	0.81	1			
Cd	0.68	0.55	0.71	0.52	0.62	1		
Pb	0.74	0.67	0.77	0.55	0.70	0.94	1	
Ni	0.65	0.97	0.93	0.83	0.89	0.57	0.69	1

1) 所有元素的 $P < 0.001$, 为极显著相关

表 5 白洋淀土壤重金属地积累指数分级

Table 5 Grades of I_{geo} for heavy metals in soil of Baiyangdian Lake

重金属	平均值	各级样本数量			
		0 (清洁)	1 (轻度污染)	2 (偏中度污染)	3~6 级 (中度~极重污染)
Mn	-1.00	55	0	0	0
Cr	-1.28	55	0	0	0
Cu	-0.32	41	12	2	0
Zn	-0.45	46	9	0	0
As	-0.78	54	1	0	0
Cd	0.30	14	37	4	0
Pb	-0.81	54	1	0	0
Ni	-0.65	52	3	0	0

2.2.2 重金属的生态风险

白洋淀土壤重金属生态风险评估如表 6 所示. 评估结果显示研究区内 Mn、Cr、Cu、Zn、As、Pb 和 Ni 单因子潜在生态风险指数均为轻微生态风险, 平均值都小于 40, 且差距悬殊. 然而 Cd 的潜在生态风险指数为 24.89 ~ 151.64, 平均值为 58.81, 约 74.55% 的样点属于中等程度生态风险, 另有 12.73% 的样点为强生态风险. 土壤重金属总潜在生态风险指数 RI 的分布范围是 46.08 ~ 205.28, 平均值为 87.81, 其中 94.55% 的样本属于轻微生态风险, 5.45% 的样本处于中等生态风险. 有研究显示, 广东省农田表层土壤 RI 值为 2 ~ 8 042^[47], 海南省主要农作物产区农田土壤 RI 值为 0 ~ 218^[48], 兰州市耕地“五毒”重金属的 RI 为 66 ~ 514^[38], 河南济

源市平原区农田土壤 RI 值为 146 ~ 7 341^[49], 保定市平原区土壤 RI 值为 38 ~ 1 399^[45]. 由此可见, 与其他城市或者区域相比, 研究区的土壤重金属潜在生态风险位于相对中等的水平. 所有检测的重金属中, Cd 对 RI 的贡献率最高, 为 66.39%, 其次是 As 和 Cu, 分别是 10.62% 和 7.32%. 由此可见, 研究区土壤主要潜在生态危害重金属元素为 Cd. 张素荣等^[41]对雄安新区西南部(老河头镇、同口镇和芦庄乡)的表层土壤进行的重金属含量分析显示 RI 的平均值达 252, 远高于本研究区的 RI 值, 但同样是 Cd 对 RI 的贡献最大. 由于 Cd 活性好, 迁移能力强, 易被植物吸收, 几乎对所有生物都有毒性^[50,51], 因此, 土壤中较高的 Cd 含量就会导致较高的生态风险.

表 6 白洋淀土壤重金属潜在生态风险评估
Table 6 Evaluation of potential ecological risk for soil heavy metals in Baiyangdian Lake

指数	重金属	分布范围	平均值	各级样本数量					贡献率/%
				轻微	中等	强	很强	极强	
E_r^i	Mn	0.89 ~ 2.62	1.54	55	0	0	0	0	1.83
	Cr	0.76 ~ 2.39	1.28	55	0	0	0	0	1.51
	Cu	2.97 ~ 19.07	6.55	55	0	0	0	0	7.32
	Zn	0.64 ~ 1.87	1.14	55	0	0	0	0	1.34
	As	4.79 ~ 15.63	9.06	55	0	0	0	0	10.62
	Cd	24.89 ~ 151.64	58.81	7	41	7	0	0	66.39
	Pb	2.28 ~ 10.29	4.48	55	0	0	0	0	5.13
	Ni	2.77 ~ 9.11	4.96	55	0	0	0	0	5.84
RI		46.08 ~ 205.28	87.81	52	3	0	0	0	100

作为天然的积水洼地,白洋淀独特的地球化学沉积环境是造成浅层土壤中重金属富集的主要原因,同时人类活动的影响也十分强烈. 每年,保定市大量的城市污水经府河排入白洋淀,而白洋淀西南部地区分布的金属加工厂、炼油厂和农药制造厂,导致重金属通过大气沉降、废渣渗滤和污水灌溉进入土壤,致使周边农田受到不同程度的污染. 研究表明,仅在 2004 ~ 2016 年间,白洋淀沉积物中 Cd、As 和 Pb 含量急剧增加,尤其是 Cd,贡献率达到 83% 以上,是主要的重金属污染因子^[44]. 这表明白洋淀 Cd 污染问题由来已久,应当引起足够重视. 2007 年,河北省地质调查院对河北平原多目标地球化学的调查发现,白洋淀洼地浅层土壤的重金属 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 的最大值分别达到了 282.9、1322.9、2.7 和 259.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,都远超相应的背景值 10 倍之多,Cd 甚至高于 20 倍^[36]. 相比之下,此次白洋淀土壤重金属的调查均显示出相当低的含量. 这说明自雄安新区成立以来,从 2017 年的淀区垃圾专项整治、唐河污水库污染治理和生态修复,到 2018 年重污染企业、“散乱污”企业、畜禽养殖清出整治,以及 2019 年的污水处理厂提标改造等一系列的污染整治工程取得了一定的成效^[9].

3 结论

(1)研究区土壤质量总体良好,全部土壤样品的重金属含量均低于农用地土壤污染风险筛选值,但 Cu、Zn 和 Cd 明显超出河北省背景值,且 Cu 和 Cd 的变异系数较高,分别为 48.65% 和 37.52%.

(2)研究区土壤重金属 Mn、Cu、Cd 和 Pb 空间自相关不显著,呈现空间随机分布. 半方差函数显示 Cd 和 Pb 的块金系数均为 100%,空间变异以随机变异为主,说明其受人为因素的影响较大.

(3)研究区土壤重金属元素的高值区主要分布在白洋淀的西南部地区,且 Cd、As、Zn、Cu 和 Pb 的空间分布具有很强的一致性. 而 Cr、Cu、Zn、As

与 Ni、Cd 和 Pb 之间具有极强的正相关,进一步说明它们有共同的污染来源,与当地相关的污染企业具有对应关系.

(4)地累积指数 I_{geo} 显示研究区重金属污染程度以 Cd 最为普遍,67.27% 的样本为轻度污染,另有 7.27% 样点为偏中度污染;其次为 Cu 污染样本数占比分别为 21.82% 和 3.64%;说明白洋淀土壤重金属污染以 Cd 为主.

(5)研究区土壤重金属生态风险 E_r^i 显示 Cd 为中等程度生态风险,其他均为轻微生态风险;土壤重金属总潜在生态风险指数 RI 显示该研究区为轻微生态风险等级,其中 Cd 对 RI 的贡献率最高,为 66.39%;表明未来白洋淀土壤重金属污染的治理工作需要以 Cd 为主.

致谢:感谢孙静、孟盼龙、张钰哲和甘玉立参与样品采集和整理.

参考文献:

[1] 朱永官,彭静静,韦中,等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学:生命科学, 2021, **51**(1): 1-11.
Zhu Y G, Peng J J, Wei Z, et al. Linking the soil microbiome to soil health[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2021, **51**(1): 1-11.

[2] 周建军,周桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, **29**(3): 315-320, 350.
Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2014, **29**(3): 315-320, 350.

[3] Gans J, Wolinsky M, Dunbar J. Computational improvements reveal great bacterial diversity and high metal toxicity in soil[J]. Science, 2005, **309**(5739): 1387-1390.

[4] El-Fawal H A, Waterman S J, De Feo A, et al. Neuroimmunotoxicology: humoral assessment of neurotoxicity and autoimmune mechanisms [J]. Environmental Health Perspectives, 1999, **107**(S5): 767-775.

[5] Zhou F K, Yin G M, Gao Y Y, et al. Toxicity assessment due to prenatal and lactational exposure to lead, cadmium and mercury mixtures[J]. Environment International, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105192.

[6] 汪敬忠,刘卓,魏浩,等. 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评估及来源分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 224-231.

- Wang J Z, Liu Z, Wei H, *et al.* Spatial characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian lake[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 224-231.
- [7] 赵黔伟, 汪敬忠, 魏浩, 等. 白洋淀水体氮、磷和重金属的变化特征及影响因素[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, **31**(6): 103-108.
- Zhao Q W, Wang J Z, Wei H, *et al.* Variation characteristics of nitrogen, phosphorus and heavy metals in waters from Baiyangdian Lake and the influencing factors[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, **31**(6): 103-108.
- [8] 向语兮, 王晓, 单保庆, 等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(6): 2237-2246.
- Xiang Y X, Wang X, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution, fractionation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(6): 2237-2246.
- [9] 刘鑫, 史斌, 孟晶, 等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2127-2136.
- Liu X, Shi B, Meng J, *et al.* Spatio-temporal variations in the characteristics of water eutrophication and sediment pollution in Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2127-2136.
- [10] 毛欣, 刘林敬, 宋磊, 等. 白洋淀近 70 年生态环境演化过程及影响因素[J]. *地球科学*, 2021, **46**(7): 2609-2620.
- Mao X, Liu L J, Song L, *et al.* A 70 year sedimentary record of eco-environment changes in Baiyangdian Lake and its influencing factors[J]. *Earth Science*, 2021, **46**(7): 2609-2620.
- [11] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, **28**(8): 1273-1285.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [13] Liu Y, Wang H F, Zhang H, *et al.* A comprehensive support vector machine-based classification model for soil quality assessment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 19-26.
- [14] 郑飞, 郭欣, 郭博洋, 等. 重金属污染评估及其生物健康效应[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, **51**(9): 1264-1273.
- Zheng F, Guo X, Guo B Y, *et al.* Risk assessments and health impacts of heavy metal pollution[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2021, **51**(9): 1264-1273.
- [15] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [16] DD2005-03, 生态地球化学样品分析技术要求(试行)[S].
- [17] Cliff A D, Ord J K. Spatial processes: Models and applications[M]. London: Pion Limited, 1981.
- [18] Overmars K P, De Koning G H J, Veldkamp A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models[J]. *Ecological Modelling*, 2003, **164**(2-3): 257-270.
- [19] Zhang C S, Luo L, Xu W L, *et al.* Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 212-221.
- [20] 刘斌, 郭星, 朱宇恩. 基于随机森林模型的土壤重金属源解析——以晋中盆地为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, **33**(1): 106-111.
- Liu B, Guo X, Zhu Y E. Analysis of soil heavy metal sources in Jinzhong basin based on random forest model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, **33**(1): 106-111.
- [21] Nielsen D R, Warrick A W, Myers D E. Geostatistical methods applied to soil science[A]. In: Klute A (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1986.
- [22] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [23] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 431-441.
- Guo Z J, Zhou Y L, Wang Q L, *et al.* Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 431-441.
- [25] 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].
- [26] 郭志娟, 周亚龙, 杨峥, 等. 雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4169-4179.
- Guo Z J, Zhou Y L, Yang Z, *et al.* Discussion on key issues of geochemical monitoring of soil heavy metal in Xiong'an new district[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4169-4179.
- [27] Ji Z H, Long Z W, Zhang Y, *et al.* Enrichment differences and source apportionment of nutrients, stable isotopes, and trace metal elements in sediments of complex and fragmented wetland systems[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117852.
- [28] 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 等. 雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评价[J]. *中国地质*, 2021, **48**(6): 1697-1709.
- Wang C Y, Zhang S R, Liu J H, *et al.* Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiong'an new district[J]. *Geology in China*, 2021, **48**(6): 1697-1709.
- [29] 董燕, 孙璐, 李海涛, 等. 雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, **48**(3): 172-181.
- Dong Y, Sun L, Li H T, *et al.* Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiong'an New Area, China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2021, **48**(3): 172-181.
- [30] 刘昭玥, 费杨, 师华定, 等. 基于 UNMIX 模型和莫兰指数的湖南省汝城县土壤重金属源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(10): 2446-2458.
- Liu Z Y, Fei Y, Shi H D, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Rucheng County of Hunan Province based on UNMIX model combined with Moran Index[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2446-2458.
- [31] 徐源, 师华定, 王超, 等. 湖南省郴州市苏仙区重点污染企业影响区的土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(5): 1213-1222.
- Xu Y, Shi H D, Wang C, *et al.* Heavy metal pollution sources in soil affected by key pollution enterprises in Suxian District, Chenzhou City, Hunan Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(5): 1213-1222.
- [32] 曹会聪, 王金达, 张学林. 吉林省农田黑土中 Cd、Pb、As 含量的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 2117-2122.
- Cao H C, Wang J D, Zhang X L. Spatial distribution of Cd, Pb, As contents in the farmland black soil in Jilin Province[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(10): 2117-2122.
- [33] Shen W B, Hu Y, Zhang J, *et al.* Spatial distribution and

- human health risk assessment of soil heavy metals based on sequential Gaussian simulation and positive matrix factorization model: A case study in irrigation area of the Yellow River[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **225**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112752.
- [34] Heuvelink G B M, Webster R. Modelling soil variation: past, present, and future[J]. *Geoderma*, 2001, **100** (3-4): 269-301.
- [35] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33** (2): 599-605.
- Liu Y L, Zhang L J, Han X F, *et al.* Spatial variability and evaluation of soil heavy metal contamination in the urban-transect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (2): 599-605.
- [36] 张秀芝, 郭海全, 李宏亮, 等. 河北省白洋淀洼地环境地球化学物源判断[J]. *地学前缘*, 2008, **15** (5): 90-96.
- Zhang X Z, Guo H Q, Li H L, *et al.* Distinguishing origins of elements in environmental geochemistry of Baiyangdian billabong of Hebei province, north China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15** (5): 90-96.
- [37] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **43** (4): 2104-2115.
- Wang H Y, Han L, Xie D N, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in farmland soils around mining areas and pollution assessment[J]. *Environmental Science*, 2021, **43** (4): 2104-2115.
- [38] 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 等. 兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43** (9): 4767-4778.
- Zhang L R, Peng X B, Ma Y L, *et al.* Risk assessment and attribution analysis of “five toxic” heavy metals in cultivated land in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (9): 4767-4778.
- [39] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 等. 河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29** (11): 2139-2146.
- Zhang L H, Xu H Z, Yu Q C, *et al.* The investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland soil and crop in the Qingyuan of Hebei, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29** (11): 2139-2146.
- [40] 刘雪松, 王雨山, 王旭清, 等. 白洋淀湿地表层土壤主要环境元素分布特征及来源[J]. *湖泊科学*, 2022, **34** (1): 496-505.
- Liu X S, Wang Y S, Wang X Q, *et al.* Distribution characteristics and source of the main environmental elements in the surface soil of Lake Baiyangdian wetlands [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34** (1): 496-505.
- [41] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评估[J]. *地学前缘*, 2021, **28** (4): 238-249.
- Zhang S R, Wang C Y, Liu J H, *et al.* Assessments of heavy metal pollution in soils of the southwestern Xiong'an District and its ecological risk[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28** (4): 238-249.
- [42] 吕建树, 何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39** (6): 2853-2864.
- Lv J S, He H C. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in the soils of the Jiangsu Coast [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (6): 2853-2864.
- [43] Bing H J, Qiu S J, Tian X, *et al.* Trace metal contamination in soils from mountain regions across China: spatial distribution, sources, and potential drivers[J]. *Soil Ecology Letters*, 2021, **3** (3): 189-206.
- [44] 高秋生, 田自强, 焦立新, 等. 白洋淀重金属污染特征与生态风险评估[J]. *环境工程技术学报*, 2019, **9** (1): 66-75.
- Gao Q S, Tian Z Q, Jiao L X, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9** (1): 66-75.
- [45] 崔邢涛, 秦振宇, 栾文楼, 等. 河北省保定市平原区土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. *现代地质*, 2014, **28** (3): 523-530.
- Cui X T, Qin Z Y, Luan W L, *et al.* Assessment of the heavy metal pollution and the potential ecological hazard in soil of plain area of baoding city of Hebei province[J]. *Geoscience*, 2014, **28** (3): 523-530.
- [46] Ma L Y, Liu Y R, Wu Y J, *et al.* The effects and health risk assessment of cauliflower co-cropping with *Sedum alfredii* in cadmium contaminated vegetable field [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115869.
- [47] 牛计伟, 杜艳君, 张建鹏, 等. 广东省农田土壤铅、镉、铬等重金属风险评估研究[J]. *环境卫生学杂志*, 2018, **8** (3): 184-190.
- Niu J W, Du Y J, Zhang J P, *et al.* Health risk assessment on exposure to heavy metals from farmland in Guangdong Province [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2018, **8** (3): 184-190.
- [48] 梁捷, 孙宏飞, 葛成军, 等. 海南省主要农作物主产区土壤重金属含量分布及其健康风险评估[J]. *热带作物学报*, 2019, **40** (11): 2285-2293.
- Liang J, Sun H F, Ge C J, *et al.* Distribution of heavy metal contents in soils of main crop production areas in Hainan and the health risk assessment [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, **40** (11): 2285-2293.
- [49] 李艳玲, 陈卫平, 杨阳, 等. 济源市平原区农田重金属污染特征及综合风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40** (6): 2229-2236.
- Li Y L, Chen W P, Yang Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and comprehensive risk evaluation of farmland across the eastern plain of Jiyuan city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40** (6): 2229-2236.
- [50] Linde M, Bengtsson H, Öborn I. Concentrations and pools of heavy metals in urban soils in Stockholm, Sweden[J]. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2001, **1** (3): 83-101.
- [51] An Q R, Li Y Y, Zheng N, *et al.* Influence of cadmium and copper mixtures to rhizosphere bacterial communities [J]. *Soil Ecology Letters*, 2022, doi: 10.1007/s42832-021-0128-9.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)