

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王飞龙, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价

孟晓飞^{1,2}, 郭俊梅^{1,2}, 杨俊兴^{1,2*}, 杨军^{1,2}, 郑国砥^{1,2}, 乔鹏伟³, 卞建林⁴, 陈同斌^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 轻工业环境保护研究所, 工业场地污染与修复北京市重点实验室, 北京 100089; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 为深入探讨典型工业区周边农田土壤重金属分布的特征, 以河南省新乡市凤泉区大块镇工业区周边农田土壤为研究对象, 对表面和剖面方向上土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等 7 种重金属污染的空间分布和污染风险进行分析, 并使用主成分分析进行污染源解析, 为该类型工业区周边农田重金属污染治理与防控提供理论基础。结果表明, 该工业区内表层土壤 Cd、Cu 和 As 含量分别为 (2.56 ± 1.23) 、 (205.58 ± 157.49) 和 (15.27 ± 4.14) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 点位超标率分别为 100%, 89.44% 和 3.40%。空间上, 受污染源分布、地势和风向共同影响, 研究区 7 种重金属在土壤表层方向上均呈现出南部含量高北部含量低的空间分布; 在剖面方向上, Cd 和 Cu 含量随土壤深度增加显著降低, As 在碱性土壤条件下迁移能力较强, 其含量随土壤深度增加含量变化较小。污染评价结果表明, Cd 和 Cu 达到重度污染(5 级), 同时 Cd 存在极强的潜在生态风险(5 级), Cu 存在中等潜在生态风险(2 级), 其余重金属均为低潜在生态风险(1 级), 风险排序为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$, 研究区内重金属综合潜在生态危害属强生态危害。主成分分析表明, 土壤 As、Cd 和 Cu 外源污染主要来自电池生产和铜(管、线)生产等活动, 属工业污染源。综上所述, 该研究区应重视土壤 Cd 和 Cu 污染的治理与防控, 同时警惕 As 对土壤环境质量进一步的影响。

关键词: 工业区; 农田土壤; 重金属含量; 空间分布; 风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0900-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005321

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province

MENG Xiao-fei^{1,2}, GUO Jun-mei^{1,2}, YANG Jun-xing^{1,2*}, YANG Jun^{1,2}, ZHENG Guo-di^{1,2}, QIAO Peng-wei³, BIAN Jian-lin⁴, CHEN Tong-bin^{1,2}

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Key Laboratory of Remediation of industrial Pollution Sites, Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to fully explore the spatial distribution of soil heavy metal contaminants in farmland soil surrounding a typical industrial area in Dakuai town, Xinxiang city, Henan Province, the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in the surface soil and within the soil profile were determined and assessed. The principal components were also analyzed for source apportionment to provide a theoretical basis for the control and prevention of heavy metal pollution. According to the results, the soils in the study area are severely contaminated by Cd and Cu and moderately contaminated by As due to the battery manufacture and Cu (e.g., pipe and wire) processing. The concentrations of Cd, Cu, and As in soils were (2.56 ± 1.23) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, (205.58 ± 157.49) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and (15.27 ± 4.14) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which exceeds standards by 100%, 89.44%, and 3.40%, respectively. Accounting for the influence of pollution sources, terrain, runoff erosion, and prevailing wind direction, all heavy metal concentrations were higher in the south direction, lower in the north direction. The concentrations of Cd and Cu in soil profile samples decreased with depth, with highest concentrations at the surface, indicating the strong effect of industrial activities. Arsenic concentrations varied little with soil depth due to its strong migration ability in alkaline soil, again suggesting an industrial source. Among them, the soil of study area was severely contaminated by Cd and Cu (Level 5). Cd poses a severe potential ecological risk (Level 5) and Cu poses a medium risk (Level 2) in the study soils, while other heavy metals show low potential ecological risk (Level 1). The order of the risk identified was $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$. In addition, the combined potential ecological risk of heavy metals in the target area is severe. The principal component analysis showed that the high As, Cd, and Cu contents are mainly derived from industrial areas. Therefore, it is urgent to remediate Cd and Cu soil contamination in this area and implement precautions to limit As contamination.

Key words: industrial area; farmland soil; heavy metal concentration; spatial distribution; risk assessment

收稿日期: 2020-05-30; 修订日期: 2020-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771509, 41907125); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802604, 2018YFD0800600); 中国博士后科学基金项目(2019M650827); 人才培养质量建设-高水平人才交叉培养计划-实培计划项目(PXM2020_014207_000009); 浙江省重点研发项目(2020C02024)

作者简介: 孟晓飞(1997~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: xfmengcumb@163.com

* 通信作者, E-mail: yangjx@126.com

工业区周边土壤重金属污染以及食品安全问题受到了各界的广泛关注^[1]。土壤是动植物生存的基础,也是环境中污染物主要的源和汇^[2]。近年来,随着工业化的快速发展,大量含有重金属离子的废水排放进入土壤,造成农田土壤重金属污染^[3]。重金属在土壤中大量积累,抑制了生物的生命活动,并通过食物链传递,进入动物和人体中,对食品安全和人类健康产生了巨大威胁^[4,5]。

新乡市是小麦的主要生产区,曾获“中国第一麦”的称号,也是我国重要的电池生产基地,有“中国电池之都”的称号^[6,7]。境内的凤泉区大块镇电池企业密集,同时有少量大型铜(管、线)生产厂,是典型的工业污染区。长期的工业生产使土壤中积累了大量的重金属,加剧周边农田土壤重金属污染,影响食品安全^[8,9]。2016 年新乡“镉小麦”事件暴发,小麦镉含量超标达 1.7 ~ 12.8 倍^[6]。长期食用种植在受污染农田的重金属超标食物会对人体肝脏等器官造成伤害,因此亟需摸清新乡市典型工业区周边农田土壤重金属污染的整体情况^[10]。

目前已有一些研究针对新乡工业区周边土壤重金属污染开展了调查^[6,11~13],但缺乏对新乡典型工业区如电池企业较为密集的大块镇百泉河周边农田土壤重金属污染分布特征的系统研究。大块镇是“问题小麦”的聚集区,多个中小型电池污染企业和少量大型铜冶炼厂分布在百泉河附近,对周边农田土壤造成重金属污染。由于该地区污染严重,一部分电子企业已经搬迁,虽然污染源头已得到一定程度的管控,但该区域周边农田未进行系统地治理,尚存在一定的潜在风险。

本文在新乡市工业区中选取电池企业较为密集的大块镇百泉河周边农田为研究区域,通过分析土壤重金属空间分布特征及其来源解析,掌握该地区土壤重金属污染现状并对其风险进行评价,以期为该类型典型工业区土壤重金属污染的修复和防控提供理论依据,对改善土壤环境质量、保证食品安全和降低人体健康风险具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

本研究在河南省新乡市凤泉区大块镇开展,该地主导风向为东北风^[6],土壤类型为潮化土壤,pH 多为中性偏碱。地势北高南低,海拔 68.9 ~ 292.7 m。研究区域有多家小型电池生产企业,北部和南部有少量大型铜冶炼厂,在工业生产过程中,排放大量的重金属,造成该区域土壤重金属污染。

为了调查大块镇典型工业区周边农田土壤重金

属污染情况,选取百泉河周边农田为采样区域,该区境周围分布多家小型电池生产企业和铜(管、线)等合金生产厂家,面积 133 400 m²(约 200 亩),略呈长方形。采用五点采样法采集表层(0 ~ 20 cm)土壤样品,沿河流向外以 25 m × 25 m 为一个采集区域,每个区域采集 1 份土壤样品,共采集 180 份(图 1)。采集剖面土壤时,参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004),在重金属污染区域沿河道方向设置剖面。采集深度分别为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 以及 80 ~ 100 cm。

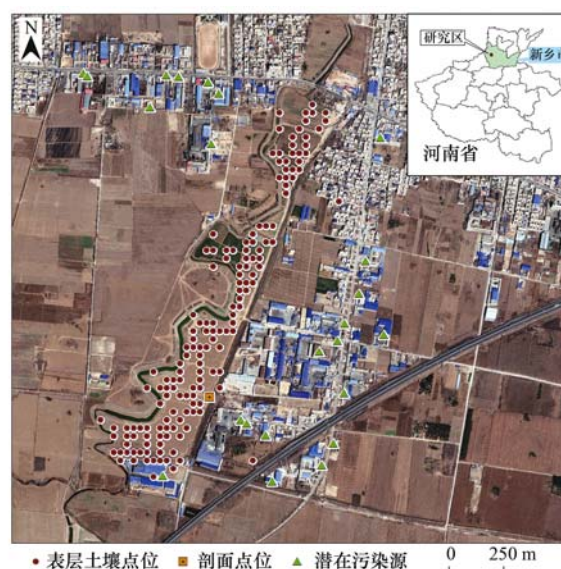


图 1 研究区的地理位置以及采样点的空间分布示意

Fig. 1 Location map of the study area and distribution of sampling sites

1.2 样品处理与理化指标测定

土壤样品经自然风干后去除砂石等杂质,研磨过筛(20 目),取部分样品使用玻璃电极法(GB 7859-87)测定土壤 pH,剩余样品研磨过 100 目尼龙筛后,用于重金属含量的测定。

土壤样品消解方法参照美国 USEPA (1996) Method 3050B^[14]。称取样品 0.2 g 于锥形瓶中,经 HNO₃ + H₂O₂ (均为优级纯)微波消解,砷(As)含量采用原子荧光光度计(AFS-9800 型,海光,国产)进行测定;铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)和镍(Ni)的含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 5300 DV, Perkin Elmer, 美国)进行测定;镉(Cd)和铅(Pb)的含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Elan DRC-e, Perkin Elmer, 美国)进行测定,其中 As、Cr、Ni 和 Zn 检出限范围为 1 μg·kg⁻¹, Cd、Cu 和 Pb 检出限为 0.1 μg·kg⁻¹。测试设置 2% 的平行样,样品中包含标准物质样品 GBW07402 (GSS-2),监控样品中重金属的回收率(90% ± 10%),平行样相对偏差、标准物质回收率均满足质

量控制要求.

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 单因子指数法

单因子指数法(P_i)指实测浓度与污染物土壤风险管控标准的比值,是国际上普遍采用的方法之一,表达式为:

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

式中, P_i 为土壤中重金属*i*的单因子指数; C_i 为重金属*i*的实测浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为重金属*i*在土壤中的筛选值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),评价标准参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018). $P_i > 1.0$ 说明土壤被污染;当 $P_i \leq 1.0$ 说明土壤没有受到污染; P_i 的值越大重金属的积累情况越严重. 国家农用地土壤污染风险筛选值及河南省土壤环境背景值见表 1.

表 1 国家农用地土壤污染风险管控标准及河南省土壤环境背景值¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Risk control standard for soil contamination of agricultural land and background values for soil in Henan Province/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
背景值 ^[15]	12.94	0.09	53.6	21.4	24.9	14.4	65.1
筛选值	25	0.6	250	100	190	170	300
管制值	100	4.0	1 300	—	—	1 000	—

1) 研究区域土壤为农用旱地土壤,土壤 pH > 7.5

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是结合环境质量和重金属含量进行综合评价的方法之一,其表达式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{iave}^2 + P_{imax}^2}{2}} \tag{2}$$

表 4 重金属潜在生态风险评价和风险程度分级标准

Table 4 Classifying standards of the potential ecological risk index and pollution degree of heavy metals

等级	潜在生态风险指数(E_i)	风险程度	等级	综合潜在生态风险指数(RI)	风险程度
1	<40	低潜在风险	1	<150	轻微生态危害
2	40~80	中等潜在风险	2	150~300	中等生态危害
3	80~160	中高等潜在生态风险	3	300~600	强生态危害
4	160~320	高等潜在风险	4	>600	很强生态危害
5	>320	极高等潜在风险			

1.4 数据处理与分析

采用反距离插值法进行土壤重金属含量空间插值. 数据统计和分析使用 Microsoft Excel 和 SPSS Statistics 19 完成,图表制作采用 Originlab 2017 完成,空间分析和制图在 ArcGIS 10.2 中完成.

2 结果与分析

2.1 研究区表层土壤重金属含量与污染特征

2.1.1 研究区表层土壤重金属含量特征

研究区表层土壤呈弱碱性(pH 值范围: 7.54 ~

式中, P_N 是指内梅罗综合污染指数; P_{iave} 为重金属*i*的平均单因子指数; P_{imax} 为重金属*i*的最大单因子指数. 根据综合污染指数(P_N)的大小可将土壤按污染程度划分为 5 级^[16],如表 2 所示.

表 2 内梅罗综合污染指数(P_N)分级原则
Table 2 Grading principle of the Nemerow synthesis pollution index (P_N)

等级	综合污染指数(P_N)	综合污染程度
1	<0.7	安全
2	0.7~1.0	警戒线
3	1.0~2.0	轻度污染
4	2.0~3.0	中度污染
5	>3.0	重度污染

1.3.3 潜在生态风险评价

重金属潜在生态风险指数法(PER)不仅考虑了重金属的生物毒性,而且考虑了多种污染物的综合作用^[17,18],被广泛应用,其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n} \tag{3}$$

式中,RI 为综合潜在生态风险指数; E_i 为重金属*i*的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属*i*的毒性系数,如表 3 所示^[13,19]; C_r^i 为重金属*i*的污染系数; C_p^i 为重金属*i*的实测值; C_n^i 为重金属*i*的背景值. 潜在生态风险指数、综合潜在生态风险指数以及等级和风险程度划分(表 4)^[20].

表 3 重金属的毒性系数

Table 3 Toxicity coefficient of heavy metals

重金属	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
毒性响应系数	10	30	2	5	5	5	1

7.78),土壤 As、Cd 和 Cu 含量均超出相应筛选值,且 Cd 含量最大值是其管制值的 1.8 倍(表 5),污染严重. As、Cd 和 Cu 含量范围分别为 6.65~36.80、0.8~7.21 和 51.60~1 015.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cd 污染最为严重,所有样品均超出筛选值;其次为 Cu 污染,超标率 89.44%;As 的污染相对较轻,超标率仅 3.40%. Cr、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 (88.01 ± 20.43) 、 (71.85 ± 18.68) 、 (29.02 ± 9.31) 和 (89.79 ± 15.65) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均低于相应筛选值. As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量分别是河南省土

壤背景值的 1.18、28.44、1.64、9.61、2.89、2.02 和 1.38 倍. 对变异系数(CV)排序 Cu (76.61%) > Cd (48.05%) > Pb (32.08%) > As (27.11%) > Ni (26.00%) > Cr (23.21%) > Zn (17.43%).

表 5 研究区农田表层土壤 pH 值及重金属含量 (n = 180) / mg · kg⁻¹

统计指标	pH	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值	7.54	6.65	0.8	51.10	51.60	36.35	9.29	51.57
最大值	7.78	36.80	7.21	172.13	1 015.79	120.78	55.79	161.35
平均值	7.67	15.27	2.56	88.01	205.58	71.85	29.02	89.79
中值	7.67	15.07	2.32	84.73	143.28	74.47	31.01	88.64
标准差	0.07	4.14	1.23	20.43	157.49	18.68	9.31	15.65
超标率/%	—	3.40	100	0.00	89.44	0.00	0.00	0.00
变异系数/%	0.91	27.11	48.05	23.21	76.61	26.00	32.08	17.43

2.1.2 研究区表层土壤重金属污染评价

As、Cd 和 Cu 对研究区农田土壤环境质量存在影响,Cd 和 Cu 均为重度污染(5 级),其中 Cd 存在极强的潜在生态风险(表 6). 重金属的平均 P_i 指数评价结果表明,Cd (4.27) > Cu (2.06) > As (0.61) > Ni (0.38) > Cr (0.35) > Zn (0.30) > Pb (0.17),Cd 和 Cu 的污染程度较高,所有样品的平均单因子指数均值分别为 4.27 和 2.06,最高值甚至分别达到 12.02 和 10.16,相对而言,As 污染处于轻度水平(平均 P_i = 0.61),最高值仅为 1.47,其余

重金属的变化并不明显. P_N 评价显示同样的结果,Cd 污染最为严重,超过重度污染分级值的 3 倍. 研究区内 7 种重金属的潜在生态风险总体呈强生态危害,重金属的单元素潜在生态风险从强到弱排序为 Cd (853.2) > Cu (48.05) > Ni (14.45) > As (11.80) > Pb (10.10) > Cr (3.28) > Zn (1.38),Cd 为极高潜在生态风险(5 级),Cu 为中等潜在生态风险(2 级),其余均为低潜在生态风险(1 级). 研究区内重金属综合潜在生态危害属很强生态危害(4 级).

表 6 研究区土壤重金属污染程度及生态风险评价结果

评价指标	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
平均单因子指数(P_i)	0.61	4.27	0.35	2.06	0.38	0.17	0.30
最大因子指数	1.47	12.02	0.69	10.16	0.64	0.33	0.54
内梅罗综合污染指数(P_N)	1.13	9.01	0.55	7.33	0.53	0.26	0.44
污染程度	轻度	重度	无	重度	无	无	无
潜在风险因子(E_r^i)	11.80	853.2	3.28	48.05	14.45	10.10	1.38
单元素潜在生态风险程度	低	极高	低	中等	低	低	低

2.2 农田土壤重金属空间分布特征

2.2.1 研究区表层土壤重金属分布特征

由图 2 可知,研究区重金属空间分布均呈南部浓度较高的趋势. 其中 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 空间分布相似,在研究区域南部浓度高,且随离河岸距离的增加重金属含量升高,其它区域浓度分布相对均匀;Cr 和 Ni 呈现南部浓度高,北部次之的特点.

2.2.2 研究区表层土壤重金属热点分布

由图 3 可知,研究区重金属的“热点”区域,即高值聚集区主要位于研究区南部. 7 种重金属的热点空间分布相似,南部均为热点聚集区,北部主要为冷点聚集区,南北差异较大. As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 向北冷点逐渐增加,而 Cr 和 Ni 冷点主要聚集在中部,北部次之.

2.2.3 研究区土壤重金属空间剖面特征

除 Ni 和 As 外其他重金属含量在垂直方向上均呈表面聚型分布(图 4). Cd 和 Cu 含量较高的深度

主要集中在土壤表层 0 ~ 20 cm 处,分别为 3.49 mg · kg⁻¹ 和 424.76 mg · kg⁻¹,其土壤表层的重金属含量要远高于 20 ~ 100 cm 土层处的重金属含量. As 在研究区剖面内除 80 ~ 100 cm 处含量明显减少外,其它深度处 As 含量基本不变. 随土壤深度的增加,Pb 和 Zn 的含量逐渐减小,Ni 的含量基本不变.

2.3 农田土壤重金属元素的主成分分析

采用 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 和 Bartlett (Bartlett's test of Sphericity) 法对土壤中重金属含量数据进行检验,得到 KMO 为 0.801 (> 0.5),Bartlett 球度检验的相伴概率为 0.000 (< 0.05),表明可进行主成分分析^[21](表 7). 提取 3 个特征值较大的成分,为得到的数据更加真实,对旋转后因子载荷进行分析,累计方差贡献率为 71.67%. As、Cd、Cu 和 Zn 为第一主成分中具有较高载荷的重金属元素,方差贡献率为 31.51%; As、Pb 和 Ni 为第二主成分中具有较高载荷的重金属元素,方差贡献率为

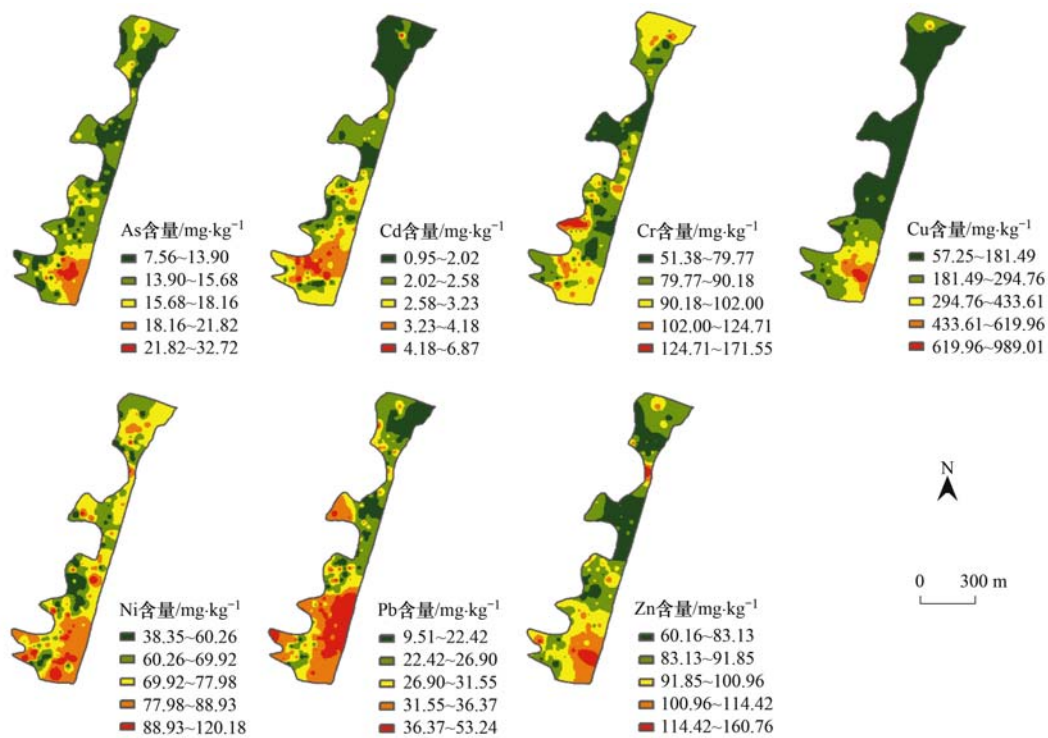


图2 研究区农田土壤重金属的水平分布
Fig. 2 Horizontal distribution of heavy metal concentrations along soil profiles

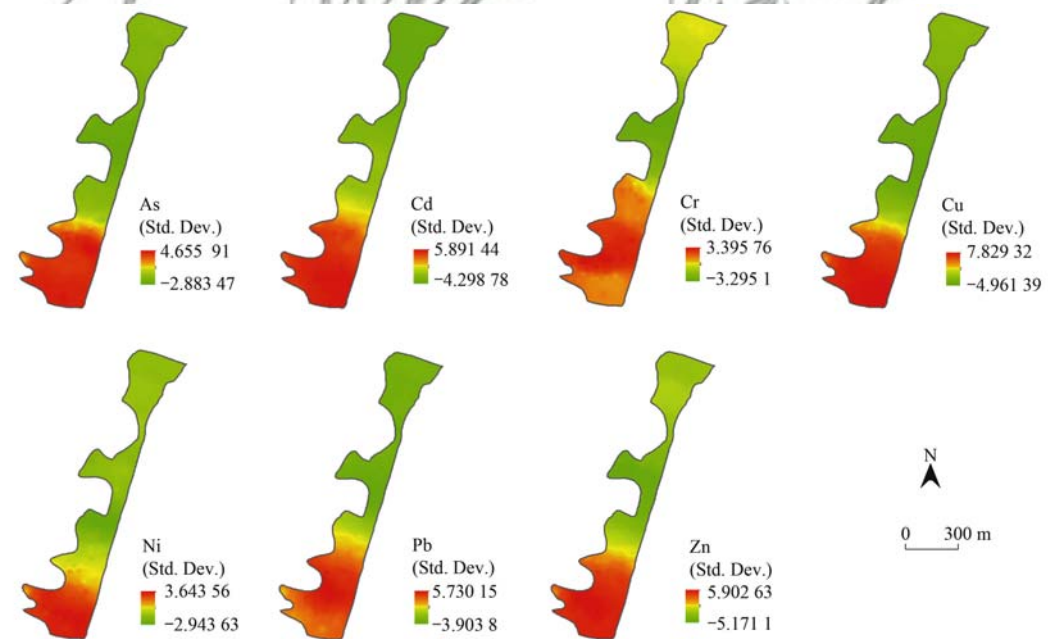


图3 研究区农田土壤重金属的热点分布
Fig. 3 Distribution of hotspots of heavy metal concentrations along soil profiles

24.51%；Cr为第三主成分中具有较高载荷的重金属元素,方差贡献率为15.65%。

3 讨论

3.1 重金属的污染特征及评价

研究结果表明,研究区内重金属含量均高于河南省土壤环境背景值,其中Cd和Cu的平均含量是农用地土壤污染风险筛选值(分别为:0.6 mg·kg⁻¹

和100 mg·kg⁻¹)的4.27倍和2.06倍,As部分点位高于土壤风险筛选值(25 mg·kg⁻¹),风险较高。Cd含量最大值是管制值的1.8倍,污染最为严重,超标率达到了100%,存在极强的潜在生态风险,这与王学锋等^[12]研究的新乡孟庄工业区周边农田土壤的重金属含量结果一致。研究区是一个兼有电池生产和Cu(管、线)生产、焊接的工业区,在镉镍等电池生产过程中,极片生产需要大量的氧化镉和亚镍,其中

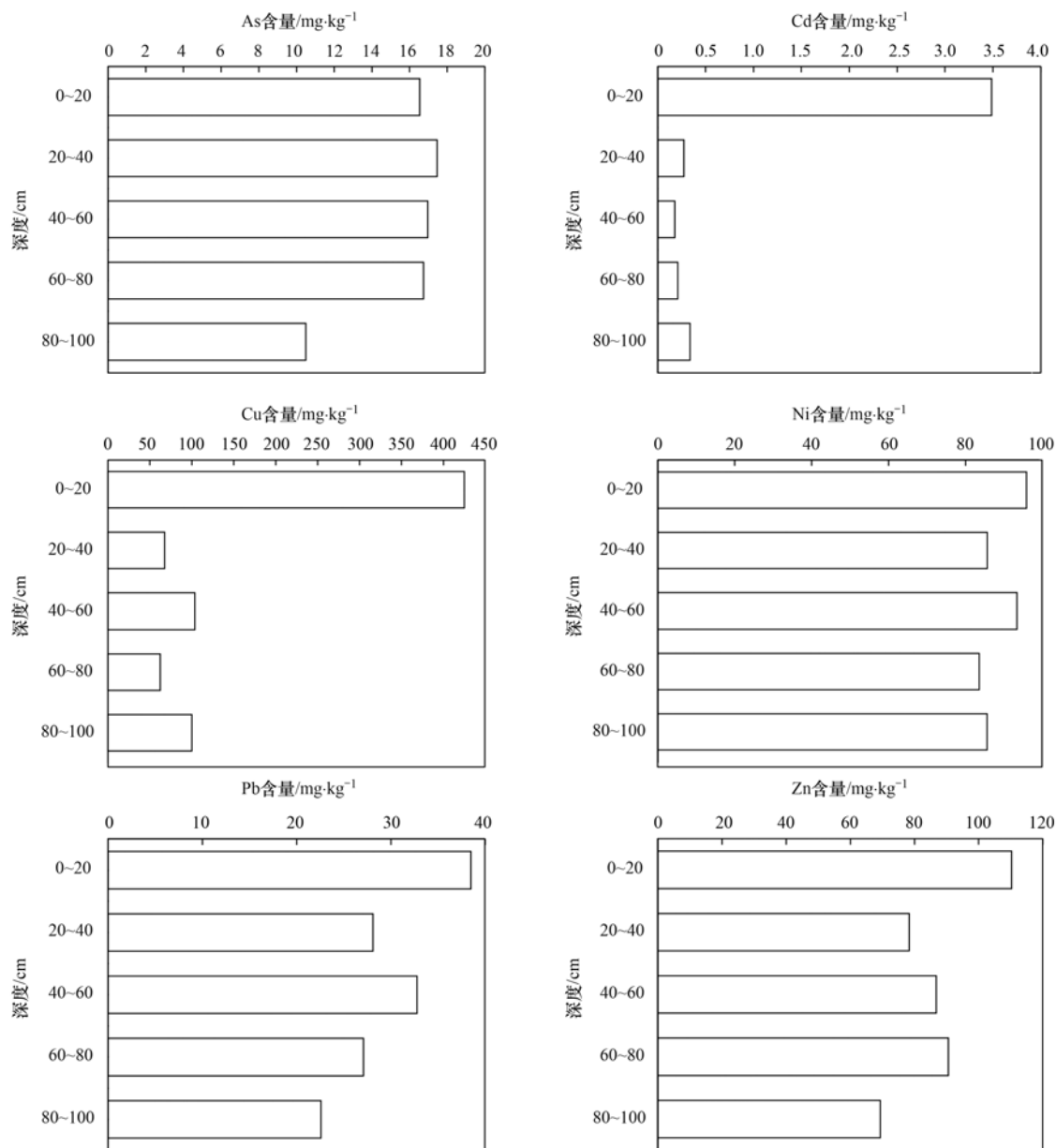


图4 研究区农田土壤重金属垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of heavy metal concentrations along soil profiles

表7 重金属主成分分析成分矩阵

重金属	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
As	0.783	0.155	0.175	0.526	0.565	0.269
Cd	0.608	-0.060	-0.579	0.820	-0.026	-0.188
Cr	0.045	0.897	0.260	-0.003	-0.053	0.933
Cu	0.843	0.169	-0.216	0.813	0.313	0.163
Pb	0.494	-0.492	0.462	0.038	0.789	-0.275
Ni	0.636	-0.077	0.370	0.216	0.685	0.099
Zn	0.851	0.028	-0.092	0.725	0.451	0.071
特征值	3.070	1.108	0.839	2.206	1.716	1.096
累积方差贡献率/%	43.85	59.69	71.67	31.51	56.02	71.67

氧化镉的生产过程会产生氧化镉烟雾,需用水冷却洗涤,电池填充物海绵镉的生产同样需要大量用水,据有关数据显示,平均每生产1 t 海绵镉,会产生几十吨的含镉废水^[22],通过废水排放及干湿沉降等方式进入土壤,造成土壤 Cd 污染. 此外,在铅酸蓄电池板栅生产过程中会加入少量的 Cd 和 As 等重金

属以提高电池的寿命和耐腐蚀性^[23],这可能是该研究区 Cd 和 As 污染的原因. 另外,在铜(管、线)生产过程中会排放大量的 Cd 和 Cu 进入环境,造成土壤 Cu 污染,并进一步加剧 Cd 污染. 由于该工业区内的厂区分布不均匀,重金属的排放源较多,导致空间分布差异较大^[24]. Cu 的变异系数达到了 76.61%,说明 Cu 受人为因素影响大,空间变异性较强. 该地区有少量大型铜(管、线)生产厂且厂区分布相距较远,生产过程中会排放大量的 Cu 进入土壤,在厂区周边积累,且距离厂区越远 Cu 积累量越小,这可能是该地区 Cu 的空间变异性较强的原因.

3.2 重金属污染的空间分布特征

掌握重金属污染的空间分布特征是鉴别土壤高污染区域以及污染来源的有效手段^[25,26]. 本研究区内表层土壤重金属含量空间分布均呈现南部高北部低的趋势,重金属的热点分布即高值聚集区也显示了同样的规律,这可能是由于大多数电池生产厂以及铜(管、线)生产厂主要聚集在研究区中部和南部,只有少量小型铜(管、线)生产厂在研究区北部,生产过程排放的废气、废水中的重金属进入土壤,造成土壤重金属污染. 此外,该地区地势北高南低,重金属在地表径流的冲刷下在南部积聚,且新乡位于黄河以北,主导风向为东北风^[6],在风力的作用下,重金属在南部沉降,致使研究区重金属含量南高北低的分布进一步加深.

另外,对于土壤剖面,Cd 和 Cu 主要积聚在土壤表层 0~20 cm 处,其含量远高于其它土层含量,表明 Cd、Cu 存在明显的外源输入,这与 Zhang 等^[27]的研究结果一致. 该研究区在工业生产过程中通过干湿沉降等方式排放了大量的 Cd、Cu 进入土壤,且该研究区土壤呈弱碱性,土壤表面的负电荷有一定的吸附作用,降低了重金属在土壤中的迁移能力,进一步使 Cd 和 Cu 在土壤表面积聚^[10]. As 含量在 0~80 cm 土层内随土壤深度变化的范围较小且略高于土壤环境背景值,而在 80~100 cm 土层处含量明显减少,表明 As 存在一定的外源输入,但输入量较少,在电池生产过程中会加入少量的 Cd、As 等重金属,以达到延长寿命,提高耐腐蚀性的目的^[23],该研究区电池企业密集,电池生产过程中排放了少量的 As 进入土壤,且 As 在碱性土壤条件下的移动能力较强^[28],部分重金属 As 向下迁移,使 As 在一定范围内(0~80 cm)随土壤深度的变化范围较小.

3.3 重金属污染的来源解析

土壤重金属污染的来源是多方面的,目前针对重金属的来源已开展了大量研究,多数研究表明,重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 污染主要来自人类活动,属

人为源金属^[29],主要来自工业活动、污水灌溉以及化肥的施用等^[30],Ni 和 Cr 更多地来源于成土母质或地质背景^[31,32],属自然源金属,As 既受人类活动等影响也受成土母质或地质背景的影响^[33,34],不同的土壤重金属来源有较大的差异. 本研究结果显示,As、Cd、Cu 和 Zn 这 4 种重金属的相关性较强,具有同源性. 在重金属剖面图中,Cd、Cu 和 Zn 均主要聚集在土层表层,随土壤深度的增加重金属含量明显降低,说明存在外源输入,As、Cd、Cu 和 Zn 的表层土壤重金属含量的空间分布均呈现南部高北部低的趋势,且越靠近电池生产厂和铜(管、线)生产厂重金属含量越高,这进一步说明这 4 种重金属来源于工业生产等活动. Ni 和 Pb 在剖面方向上随土壤深度变化范围较小,说明没有明显的外源输入,但空间分布趋势、热点聚集区与 Cd 和 Cu 等相似,推测 Ni 和 Pb 为混合源金属,工业生产排放贡献了一定的 Ni 和 Pb,还有一部分源于地质背景. Cr 含量空间上分布相对均匀,南北浓度差异较小,这可能是由于土壤中 Cr 主要来源于地质背景,与人为污染源的关系较小,这与前人的研究结果一致^[35].

4 结论

本研究为探明河南典型工业区周边土壤重金属污染分布的特点,以河南省新乡市凤泉区大块镇百泉河周边农田土壤为研究对象,探讨重金属在区域空间上分布的特点和风险,并分析其污染来源. 结果发现,研究区域是以电池生产和铜(管、线)生产为主的工业区,生产过程中排放的重金属造成周边农田土壤 Cd、Cu 和 As 污染,其中 Cd 和 Cu 达到重度污染,此外,Cd 存在极强的生态风险,需强化治理与防控;在表层土壤方向上,受污染企业分布、地形以及风向的影响,重金属含量均呈现出由北向南浓度升高的趋势;在剖面方向上,Cd 和 Cu 污染主要集中在土壤表层,As 在剖面方向上含量变化较小. 主成分分析表明土壤 As、Cd 和 Cu 外源污染主要来自电池生产和铜(管、线)生产等工业活动. 因此,该区域应针对性地进行治理与防控 Cd 和 Cu 污染,并防止 As 进一步对该地区土壤环境质量造成影响.

参考文献:

- [1] 戴彬,吕建树,战金成,等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 507-515.
Dai B, Lü J S, Zhan J C, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, Eastern China [J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 507-515.
- [2] 范俊楠,郭丽,张明杰,等. 湖北省重点区域及周边表层土壤重金属污染现状及评价[J]. 中国环境监测, 2020, 36

- (1): 96-104.
- Fan J N, Guo L, Zhang M J, *et al.* Present situation and evaluation of heavy metals pollution in surface soils of key areas and surrounding areas in Hubei[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(1): 96-104.
- [3] 邵金秋, 刘楚琛, 阎秀兰, 等. 河北省典型污灌区农田镉污染特征及环境风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 917-927.
- Shao J Q, Liu C C, Yan X L, *et al.* Cadmium distribution characteristics and environmental risk assessment in typical sewage irrigation area of Hebei Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 917-927.
- [4] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 270-279.
- Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 270-279.
- [5] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- [6] 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, Yuan 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.
- [7] 朱素梅. “新乡小麦”地理标志保护产品助力新乡小麦产业快速发展[J]. *中国粮食经济*, 2018, (5): 61-62.
- [8] 刘燕. 新乡污灌农田土壤某些化学成分空间分布特征的研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Liu Y. A Study on spatial Variation of certain chemicals of the sewage water irrigating farmland in Xinxiang suburb[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [9] 陈兆进, 李英军, 邵洋, 等. 新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2889-2897.
- Chen Z J, Li Y J, Shao Y, *et al.* Bacterial community composition in cadmium-contaminated soils in Xinxiang City and its ability to reduce cadmium bioaccumulation in Pak Choi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2889-2897.
- [10] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(8): 1498-1506.
- Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(8): 1498-1506.
- [11] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- [12] 王学锋, 苏霄雨, 尚菲, 等. 新乡孟庄工业区周边土壤重金属生态风险评价[J]. *科学技术与工程*, 2014, **14**(15): 105-109, 113.
- Wang X F, Su X Y, Shang F, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metal element in soil around Mengzhuang industrial zone of Xinxiang City[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(15): 105-109, 113.
- [13] 何聪聪. 新乡市典型工业区土壤重金属污染特征研究及治理[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012.
- He C C. Pollution characteristics and treatment of heavy metal in soils around metal in soils around topical industrial area, Xinxiang city[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2012.
- [14] U.S. EPA. EPA method 3050b: acid digestion of sediments, sludges, and soils[R]. Washington: U.S EPA, 1996.
- [15] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. *河南农业*, 1998, (10): 29.
- [16] 刘传文. 煤矿周边土壤重金属污染特征及评价[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- Liu C W. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil around coal mine[D]. Kaifeng: Henan University, 2017.
- [17] 刘灵飞, 龙健, 万洪富, 等. 贵州喀斯特山区锦冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J]. *土壤*, 2013, **45**(6): 1036-1047.
- Liu L F, Long J, Wan H F, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in agricultural soils in an abandoned antimony smelter in Guizhou Karst areas[J]. *Soils*, 2013, **45**(6): 1036-1047.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- Fan M Y, Yang H, Huang X F, *et al.* Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- [20] 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价[J]. *地学前缘*, 2020, doi: 10.13745/j.esf.sf.2020.7.1.
- Zhang S R, Wang C Y, Liu J H, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in Soils of the southwestern part of the Xiongan New Area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, doi: 10.13745/j.esf.sf.2020.7.1.
- [21] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [22] 崔守明, 杨玉新. 某镉镍电池生产企业职业病危害调查[J]. *医药论坛杂志*, 2006, **27**(18): 68-70.
- Cui S M, Yang Y X. Investigation of some cadmium nickel battery production enterprise occupational disease harms[J]. *Journal of Medical Forum*, 2006, **27**(18): 68-70.
- [23] 翁佳燕, 丁彬斌, 田茜茜, 等. 铅酸蓄电池中镉、砷含量测试与控制解析[J]. *蓄电池*, 2018, **55**(4): 192-197.
- Weng J Y, Ding B B, Tian Q Q, *et al.* Analysis of testing and controlling the cadmium and arsenic content in the lead-acid battery[J]. *Chinese Labat Man*, 2018, **55**(4): 192-197.
- [24] 曹宏杰, 王立民, 罗春雨, 等. 三江平原地区农田土壤中几

- 种重金属空间分布状况[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 155-161.
- Cao H J, Wang L M, Luo C Y, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in agricultural soil in Sanjiang Plain[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(2): 155-161.
- [25] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1514-1522.
- Zheng J P, Jiao X M, Fang N J, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1514-1522.
- [26] Xiao Q, Zong Y T, Lu S G. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **120**: 377-385.
- [27] Zhang P Y, Qin C Z, Hong X, *et al.* Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 1136-1147.
- [28] 杜习乐, 马诗院, 楚纯洁, 等. 郑州市城市土壤砷含量的分布特征及其成因探讨[J]. 土壤, 2008, **40**(4): 635-639.
- Du X L, Ma S Y, Chu C J, *et al.* Spatial distribution and its cause of arsenic (As) in urban soils of Zhengzhou [J]. Soils, 2008, **40**(4): 635-639.
- [29] Bi C J, Zhou Y, Chen Z L, *et al.* Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 1349-1357.
- [30] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 934-944.
- Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 934-944.
- [31] Rodríguez-Salazar M T, Morton-Bermea O, Hernández-Álvarez E, *et al.* The study of metal contamination in urban topsoils of Mexico City using GIS [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(5): 899-905.
- [32] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 704-714.
- Sun H, Bi R T, Guo Y, *et al.* Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 704-714.
- [33] Du F, Yang Z G, Liu P, *et al.* Accumulation, translocation, and assessment of heavy metals in the soil-rice systems near a mine-impacted region [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(32): 32221-32230.
- [34] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.
- [35] 陈志凡, 范礼东, 陈云增, 等. 城乡交错区农田土壤重金属总量及形态空间分布特征与源分析——以河南省某市东郊城乡交错区为例[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1317-1327.
- Chen Z F, Fan L D, Chen Y Z, *et al.* Spatial distribution and source analysis of heavy metals in agricultural soils in a Peri-urban area based on IDW interpolation and chemical fractions: a case study in Henan Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1317-1327.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)