

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氧化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价

陈凤¹, 董泽琴^{1*}, 王程程¹, 韦雪花¹, 胡宇¹, 张丽娟²

(1. 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550081; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 对贵州省某典型锌冶炼区耕地土壤和主要谷类农作物(稻米、玉米和小麦)进行取样调查, 测定了土壤和谷类农作物中重金属 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的含量, 采用单因子污染指数和综合污染指数法评价了土壤和作物籽粒中重金属的污染状况, 并分别采用潜在生态风险指数(RI)和危险商(HQ)法评价了土壤重金属污染的潜在生态风险程度和作物中重金属对成人和儿童的健康风险。结果表明:①冶炼区耕地土壤受到了重金属不同程度的污染, 污染程度排序:玉米地>水稻田>小麦地, 且 Cd>Cu>Zn>Pb, 内梅罗综合污染指数分析结果表明, 玉米地污染程度为重污染, 水稻田和小麦地为轻污染, 且均以 Cd 对综合指数的贡献最大;②土壤 Cd 存在极强生态风险, 4 种重金属潜在生态危害大小顺序为: Cd>Pb>Cu>Zn; 生态风险指数(RI)研究结果表明, 研究区处于轻微、中等、强的和很强的生态风险程度的采样点比例分别为 1.41%、21.1%、35.2% 和 42.3%。③冶炼区农作物稻米中重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含量分别为 0.145、0.017、16.97 和 2.704 mg·kg⁻¹; 玉米中重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含量分别为 0.094、0.055、26.81 和 4.464 mg·kg⁻¹; 小麦中重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含量分别为 0.048、0.085、35.37 和 5.426 mg·kg⁻¹。④研究区稻米、玉米和小麦均存在重金属超标现象, 重金属污染程度为小麦最重, 稻米和玉米的污染程度相当, 稻米和玉米污染等级均为安全, 小麦处于警戒线。⑤各重金属元素每日摄入量均低于美国环保署的参考暴露剂量, 安全性较好, 但食用该区域谷类农作物引起复合重金属污染对成人和儿童均存在健康风险。⑥耕地土壤重金属含量与谷类农作物可食部分重金属含量间无明显相关性。

关键词: 锌冶炼; 耕地土壤; 谷类农作物; 重金属; 污染特征; 生态风险; 健康风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4360-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704140

Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter

CHEN Feng¹, DONG Ze-qin^{1*}, WANG Cheng-cheng¹, WEI Xue-hua¹, HU Yu¹, ZHANG Li-juan²

(1. Guizhou Academy of Environmental Science and Designing, Guiyang 550081, China; 2. South China Institutes of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: To evaluate the influence of mining activities on heavy metal contamination and health risks in a zinc-smelting area in Guizhou Province, Pb, Cd, Zn, and Cu in agriculture soils and dominant crops were monitored and analyzed. A single factor pollution index and a comprehensive pollution index were calculated to assess the quality of soils and crops. Furthermore, the potential ecological risks of the four heavy metals in soils and crops were evaluated using the potential ecological risk index (RI). The potential health risks to adults and children induced by the intake of these heavy metals through consumption of crops were evaluated using the hazard quotient (HQ). The results showed that: ①The farmlands in the zinc-smelting area were contaminated by heavy metals; the most polluted farm land was corn fields followed by paddy fields and wheat fields. The order of the heavy metal concentrations was Cd>Cu>Zn>Pb. The Nemero index of corn fields was higher than the threshold value of heavy pollution and was higher than that of the paddy and wheat fields. Cd contributed most to the integrated pollution index. ②The very high ecological risk was posed by Cd followed by Pb, Cu, and Zn. The results of the potential ecological risk assessment showed that 1.41% of the sites were classified as low risk, 21.1% classified as medium risk, 35.2% as high risk, and 42.3% as extremely high risk. ③The average concentrations of Pb, Cd, Zn, and Cu in rice were 0.145, 0.017, 16.97, and 2.704 mg·kg⁻¹, respectively. The average concentrations of Pb, Cd, Zn, and Cu in corn were 0.094, 0.055, 26.81, and 4.464 mg·kg⁻¹, respectively. The average concentrations of Pb, Cd, Zn, and Cu in wheat were 0.048, 0.085, 35.37, and 5.426 mg·kg⁻¹, respectively. ④Rice, corn, and wheat from the study area were subjected to pollution at different degrees. Among the three crops studied, wheat was polluted most heavily, followed by rice and corn. Contamination levels of rice and corn were safe, whereas the contamination of wheat reached alarming levels. ⑤The daily intake of individual heavy metals from food was below the standard exposure dose set by the United States Environmental Protection Agency. In addition, the assessment results for the comprehensive health risk index for the three crops indicate that the contamination of heavy metals poses health risks to adults and children by food ingestion. ⑥Positive correlations were not observed between farmlands and crops.

Key words: zinc smelting; soil; crops; heavy metals; contamination; ecological risk; health risk

收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-04-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409042); 贵州省重大科技计划项目([2012]6014); 贵州省科学技术基金项目([2013]2163)

作者简介: 陈凤(1983~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境污染与治理, E-mail: wxq983927@163.com

* 通信作者, E-mail: dongzheqin@163.com

矿产开采、金属冶炼、化工、煤燃烧、汽车尾气排放、污水灌溉等人类活动是土壤重金属污染的主要成因^[1]。贵州省矿产资源丰富,是著名的矿产资源大省,有着悠久的有色金属开采冶炼历史。由于矿产开采和冶炼期间排放的大量废水、废渣、废气等,造成了矿区周边水体、大气、土壤、农作物等的重金属污染,并产生严重的生态环境风险^[1~7]。重金属作为一类持久性潜在有毒污染物,一旦进入土壤,将不能被生物降解而长期存在于土壤中并不断累积,进而通过土壤间接转移到农作物中,威胁人体和生态环境健康^[8]。食用重金属污染土壤上种植的农作物是矿区居民摄取重金属的最主要途径之一,由此可能造成当地居民的健康风险^[9]。

研究区为两江上游地区,地处贵州省赤水河上游,是三省的交通要冲,国酒基地上游,也是全省粮食生产较多的地区。2014 年研究区种植水稻 41 770 hm²、小麦 67 020 hm²、玉米 173 620 hm²,分别占全省水稻、小麦、玉米种植面积的 6.10%、27.0% 和 22.5%。研究区铅锌矿产资源丰富,铅锌冶炼历史悠久,据《大方府志》记载,在唐朝五代就有铅锌冶炼业,直到民国时期铅锌冶炼业也较为发展。仅研究区四县(市)35 个乡、168 个村民组,炼锌废渣估计总量达 1 210.72 万 t,占地面积 1 138.64 hm²。土法炼锌产生了大量的炼锌废气、废水、废渣,几乎全部直接排放于自然环境中,对生态环境造成了严重的损坏。研究表明,该地区土壤重金属铅、锌和镉污染严重^[10~14],生态环境破坏严重^[12]。但迄今为止,有关该地区农作物中重金属的污染情况研究鲜见报道。

近年来,有关耕地土壤和农作物中重金属污染特性和由此带来的健康风险越来越受到广大研究者的关注。有研究表明,在重金属污染严重的地区,食用受重金属污染的稻米所引起的危害甚至高于饮用重金属污染的水给人体所带来的危害,当地居民长期食用受重金属污染的大米,容易导致重金属慢性中毒^[15]。为摸清本区域耕地土壤和农作物存在的潜在安全风险,本研究采用污染指数评价和健康风险评价模型,分析本区域谷类农作物的污染状况和可能会给居民造成的健康风险,该结果对保障区域农产品安全生产和人体健康具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

根据农作物收获季节,土壤和谷类农作物水

稻、小麦、玉米籽粒采集于 2015~2016 年,采自贵州省毕节土法铅锌冶炼区的耕地土壤。有针对性地选择了矿区耕作年限较长且具有一定代表性的耕地样区,在每个样区内随机采集约 10 株谷类农作物籽粒,混合均匀后装袋,作为 1 个样品,采样量约为 500 g;在每个采集农作物的点位同步采集耕地土壤样品。共采集稻谷籽粒样品 23 个、小麦籽粒样品 15 个、玉米籽粒样品 33 个,共 71 个农作物样品,同步采集到耕地土壤样品 71 个,即共采集土壤和农作物样品 142 个。

土壤样品经风干、磨细过 100 目筛后装袋备用。将采集的谷类作物籽粒样品去壳(皮)后将籽粒用自来水冲洗,然后用去离子水冲洗,沥去水分、烘干、粉碎过筛保存备用。

1.2 样品分析方法

本研究中耕地土壤样品中重金属参照国家相关标准(GB/T 17141-1997)和 US EPA 3052^[16]分析测试,采用 HNO₃-HCl-HF 微波消解后测定;农作物籽粒中重金属参照国家相关标准分析测试(SN/T 0448-2011; SN/T 2208-2008),采用 HNO₃-H₂O₂ 微波消解后测定。土壤和农作物待测液中重金属含量均采用美国热电(Thermo)电感耦合等离子体质谱仪 X2(ICP-MS)测定。整个分析过程所用试剂均为优级纯,实验用水均为去离子水,所有玻璃器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上。分析过程中采用试剂空白、平行双样、国家标准样品进行质量保证和质量控制,且加标回收率范围在 95%~105%。

1.3 耕地土壤和谷类农作物重金属评价方法

1.3.1 耕地土壤谷类农作物重金属污染评价

耕地土壤和农作物重金属污染评价临界值(表 1)分别以我国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准、《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2012)和《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY 861-2004)为依据,耕地土壤采用内梅罗综合污染指数法(Nemero)、农作物采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法开展评价^[8]。

(1)单因子污染指数计算方法。计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, P_i 为污染物 i 的单因子污染指数; C_i 为污染物 i 的实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价

标准的临界值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 单因子污染指数评价标准^[18]见表 1.

表 1 土壤和农作物中重金属的标准限值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Main evaluation criteria of heavy metals pollution in soils and grains/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

对象	元素	Pb	Cd	Zn	Cu
土壤	土壤环境质量标准值 ¹⁾	250 ^a	0.30 ^a	200 ^a	50 ^a
		300 ^b	0.30 ^b	250 ^b	100 ^b
		350 ^c	0.60 ^c	300 ^c	100 ^c
农作物 ³⁾	贵州省土壤背景值 ²⁾	29.3	0.133	82.4	25.7
	稻米中污染物限量	0.2	0.2	50	10
	玉米中污染物限量	0.2	0.1	50	10
	小麦中污染物限量	0.2	0.1	50	10

1) 土壤环境质量标准值数据“a、b、c”中, a 为土壤 pH < 6.50, b 为 pH 介于 6.50 ~ 7.50 间, c 为土壤 pH > 7.50 时分别对应的质量标准; 2) 贵州省土壤背景值数据来源于文献[17]; 3) 农作物稻米、玉米和小麦中 Pb 和 Cd 的限量标准参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2012), Zn 和 Cu 的限量标准参照《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY 861-2004)

(2) 内梅罗综合污染指数法. 计算公式为:

$$PN = \sqrt{\frac{PI_{均}^2 + PI_{最大}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, PN 为耕地土壤和农作物籽粒中重金属的综合污染指数; $PI_{均}$ 为重金属单项污染指数的平均值; $PI_{最大}$ 为重金属最大单项污染指数. 内梅罗污染指数评价标准如表 2 所示^[18].

1.3.2 耕地土壤重金属生态风险评价

由瑞典科学家 Håkanson 提出的生态危害指数法^[19]在土壤重金属生态风险评价方面得到了广泛的应用^[20-22]. 本文同样采用此方法开展评价, 该方法是根据重金属性质及环境行为特点, 对土壤或

表 3 重金属潜在生态危害系数(E_r^i)、危害指数(RI)与危害程度分级的关系

Table 3 Relationship between potential ecological risk coefficients (E_r^i) and risk indices (RI) of heavy metals and their pollution degree

E_r^i		RI		生态危害程度
文献[19]	本研究	文献[19]	本研究	
<40	<30	<150	<50	轻微的生态危害
40 ~ 80	30 ~ 60	150 ~ 300	50 ~ 100	中等的生态危害
80 ~ 160	60 ~ 120	300 ~ 600	100 ~ 200	强的生态危害
160 ~ 320	120 ~ 240	>600	>200	很强的生态危害
>320	>240			极强的生态危害

1.3.3 谷类农作物摄入的健康风险评价

采用危险商(HQ)法对居民食用该区域农作物的健康风险进行评价^[5,18,23,24], 其中污染物经农产品的平均日摄取量(CDI)计算公式为:

$$CDI = \frac{C \cdot I \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad (4)$$

表 2 重金属污染指数分级标准

Table 2 Classification of pollution index of heavy metals

级别	单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染等级
1	$P_i \leq 1$	清洁	$PN \leq 0.7$	安全
2	$1 \leq P_i \leq 2$	轻污染	$0.7 < PN \leq 1$	警戒线
3	$2 \leq P_i \leq 3$	中污染	$1 < PN \leq 2$	轻污染
4	$P_i > 3$	重污染	$2 < PN \leq 3$	中污染
5			$PN > 3$	重污染

沉积物中重金属污染风险进行评价的方法, 不仅考虑土壤重金属含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 采取潜在生态危害指数(RI)进行分级评价. 其表达式为:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{C_i}{C_n} \quad (3)$$

式中, RI 为土壤中多种重金属潜在生态危害指数; C_i 为单一元素实测值; C_n 为单一元素参比值, 采用贵州省土壤环境背景值作为参照标准^[17], T_r^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数. Håkanson^[19]指出了几种重金属毒性系数: Pb 为 5, Cd 为 30, Zn 为 1, Cu 为 5. 依据重金属的潜在生态危害系数(E_r^i)可将土壤中重金属污染状况划分为 5 个等级; 依据重金属的潜在生态危害指数(RI)可将土壤中重金属污染程度划分为 4 个等级. 因 Håkanson^[19]研究的是 8 种有机污染物和重金属的潜在生态风险, 而 RI 的大小与参评污染物的种类和数量有关, 污染物的数目越多、毒性越强, RI 值就越大, 因此, 应用 RI 进行生态风险评价时, 必须根据参评污染物的种类和数量对其进行调整, 本文根据文献[21]中的方法对分级标准做了相应调整, 调整后的重金属潜在生态危害指数评价标准如表 3 所示.

式中, CDI 为污染物经谷类农作物摄入的平均日摄取量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; C 为谷类农作物中污染物的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); I 为人体每日对谷类农作物的食用量 ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$), 参照 US EPA 暴露因子手册和结合当地居民的饮食习惯, 确定研究区成人稻米摄入量为 $0.42 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$, 玉米摄入量为 $0.15 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$, 面粉摄入

量为 $0.10\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ；儿童稻米摄入量为 $0.15\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ，玉米摄入量为 $0.10\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ，面粉摄入量为 $0.05\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ；EF 为暴露频率 ($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$)；ED 为暴露时间 (a)；BW 为受体体重 (kg)；AT 为生命期望值 (a)。

单一重金属健康风险指数 (HQ) 计算公式为：

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \tag{5}$$

式中，HQ 为健康风险指数；RfD 为重金属暴露参考剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]； $HQ > 1$ 表明该污染物可引起人体的健康风险，而健康风险指数越大则表明该污染物对人体健康风险越大； $HQ < 1$ 表明该污染物不会引起人体的健康风险。

多种重金属复合污染的健康风险指数 (THQ) 计算公式为：

$$THQ = \sum HQ \tag{6}$$

式中， $THQ \leq 1$ 表明没有明显的健康影响； $THQ > 1$ 表明对人体健康产生影响的可能性大； $THQ > 10$ 表明存在慢性毒性。

式(4)和(5)中部分参数见表 4。

表 4 谷类农作物健康风险评价模型参数取值

Table 4 Parameters of the assessment models

评价参数	成人参考值	儿童参考值	文献
BW	70	16	[25, 26]
ED/a	30	10	[26]
EF/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	365	365	[25]
AT/d	10 950	3 650	[25]
RfD/ $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	RfD (Pb) = 3.50×10^{-3}		[27]
	RfD (Cd) = 1.00×10^{-3}		[28]
	RfD (Cu) = 4.00×10^{-2}		[29]
	RfD (Zn) = 3.00×10^{-1}		[30]

1.4 数据处理和分析

数据处理、分析和作图采用 SPSS 20 和 SigmaPlot 10.0 软件。

2 结果与讨论

2.1 耕地土壤中重金属污染总体状况

调查结果表明，研究区水稻田、玉米地和小麦地 pH 的平均值分别为 6.43、6.83 和 6.39，均处于偏酸性的水平。对比表 5 中研究区耕地土壤重金属的统计结果发现，水稻田、玉米地和小麦地各重金属元素含量的平均值和中位值均超过了贵州土壤元素背景值，水稻田 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均值分别是背景值的 1.18、4.43、1.57 和 3.24 倍，相应地超标点位所占比例分别为：65.2%、100%、87.0% 和 87.0%；玉米地 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均值分别是背景值的 7.76、23.5、3.36 和 4.14 倍，相应地

超标点位所占比例分别为：84.8%、100%、87.9% 和 93.9%；小麦地 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均值分别是背景值的 1.13、4.20、1.36 和 2.87 倍，相应地超标点位所占比例分别为：66.7%、100%、73.3% 和 93.3%。对照《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 二级标准，水稻田 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均值分别是该标准值的 0.11、1.96、0.52 和 0.83 倍，相应地超标点位所占比例分别为：0.00%、91.3%、4.35% 和 56.5%；玉米地 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均值分别是该标准值的 0.76、10.4、1.11 和 1.07 倍，相应地超标点位所占比例分别为：18.2%、87.9%、42.4% 和 54.6%；小麦地 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均值分别是该标准值的 0.11、1.86、0.45 和 0.74 倍，相应地超标点位所占比例分别为：0.00%、73.3%、0.00% 和 33.3%。重金属的污染程度排序：玉米地 > 水稻田 > 小麦地，且就单个重金属污染程度来说， $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$ ，此结果与文献[24, 31]的研究结果略有差异。

内梅罗综合污染指数评价结果(表 5)表明，水稻田、玉米地和小麦地土壤都受到了重金属不同程度的污染。其中，水稻田和小麦地的污染程度为轻污染，玉米地的污染程度为重污染，均以 Cd 对污染指数 PN 值的贡献最大。

2.2 耕地土壤中重金属污染评价

研究区耕地土壤 pH 处于偏酸性的水平，有研究表明^[32]，土壤酸性环境条件提高了重金属的活性，从而加大了土壤重金属污染的生态风险水平。研究区土壤 Cd 的潜在生态风险程度很高，极强、很强、强的和中等危害生态风险的样点数分别占总样点数的 31.0%、31.0%、35.2% 和 2.82%，是最主要的生态风险因子。其次是 Pb，极强、很强、强的、中等和轻微危害生态风险的样点数分别占总样点数的 2.82%、1.41%、4.23%、2.82% 和 88.7%，即以轻微生态风险危害为主，其他危害程度的点位都有。Cu 和 Zn 的生态风险较低，达到轻微生态风险的样点占总样点数的 83.1% 以上。4 种重金属潜在生态危害大小顺序为： $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn}$ ，此研究结果与文献[33]中对于会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价的研究结果一致。

从表 6 中不同 RI 风险级别样点数占总样点数的比例来看，轻微生态风险样点数占 1.41%，中等、强的和很强的生态风险分别占 21.1%、35.2% 和 42.3%，说明研究区域存在不同程度的土壤重金属污染风险。

表 5 耕地土壤重金属的含量水平及综合污染指数统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 5 Concentrations of heavy metals in soils and the Nemer index/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

耕地	统计值	重金属含量				PN 值
		Pb	Cd	Zn	Cu	
水稻田 (pH 5.23 ~ 7.26)	最小值	13.03	0.155	65.29	18.28	0.20
	最大值	66.51	1.423	238.1	212.8	3.63
	平均值	34.46	0.589	129.2	83.32	1.97
	中值	31.79	0.553	135.3	91.38	2.02
	标准差	12.92	0.303	46.42	50.82	
玉米地 (pH 4.98 ~ 8.28)	最小值	22.87	0.274	64.57	15.24	5.01
	最大值	1 999	9.38	1 395	365.6	22.46
	平均值	227.4	3.121	276.5	106.5	9.57
	中值	55.18	1.235	166.5	79.54	5.41
	标准差	429.1	5.486	286.1	88.13	
小麦地 (pH 4.35 ~ 8.28)	最小值	22.27	0.234	60.86	22.67	0.15
	最大值	63.50	1.515	191.8	239.1	3.50
	平均值	33.18	0.559	112.0	73.67	1.79
	中值	30.88	0.427	92.95	53.58	1.76
	标准差	10.56	0.370	42.90	58.33	1.76

表 6 不同生态风险级别样点数占样点总数的百分数/%

Table 6 Percentages of sites at different risk levels in the total sample sites/%

项目	评价指标	毒性系数	生态危害程度				
			轻微危害	中等危害	强的危害	很强危害	极强危害
E_i	Pb	5	88.7	2.82	4.23	1.41	2.82
	Cd	30	0.00	2.82	35.2	31.0	31.0
	Zn	1	94.4	2.82	1.41	1.41	0.00
	Cu	5	83.1	14.1	2.82	0.00	0.00
RI			1.41	21.1	35.2	42.3	

2.3 谷类农作物中重金属污染总体状况

铅锌冶炼区耕地土壤上采集的不同谷类农作物籽粒中重金属最小值、最大值、平均值、中位值等见表 7。可见,冶炼区农作物稻米中重金属 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的平均含量分别为 0.145、0.017、16.97 和 2.704 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;玉米中重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含量分别为 0.094、0.055、26.81 和 4.464 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;小麦中重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含

量分别为 0.048、0.085、35.37 和 5.689 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在稻米、玉米和小麦中,Zn 的含量最大,其次是 Cu,而 Pb、Cd 含量在不同的作物中无一定的规律;Pb 在农作物中的平均含量从大到小依次为:稻米>玉米>小麦;Cd、Zn 和 Cu 依次均为小麦>玉米>稻米。从显著性差异分析的结果来看($P<0.05$),稻米中 Pb 的含量水平显著高于小麦,玉米中 Pb 含量水平与稻米和小麦均无显著性差异;小麦中 Cd

表 7 研究区谷类农作物籽粒重金属的含量水平/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 7 Concentrations of heavy metals in grains from the study area/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

农作物	元素	最小值	最大值	平均值	中位值	标准偏差	变异系数/%	富集系数/%
稻米	Pb	0.048	0.485	0.145	0.101	0.118	81.4	1.29
	Cd	0.005	0.046	0.017	0.014	0.011	63.8	3.36
	Zn	12.93	24.13	16.97	16.81	2.910	17.1	14.5
	Cu	1.171	4.324	2.704	2.647	0.826	30.5	4.71
玉米	Pb	0.000	0.699	0.094	0.035	0.174	185	2.84
	Cd	0.003	0.588	0.055	0.020	0.111	203	8.55
	Zn	10.59	100.9	26.81	21.74	18.81	70.1	15.3
	Cu	1.269	34.24	4.464	2.495	6.506	146	6.35
小麦	Pb	0.000	0.372	0.048	0.017	0.092	190	0.16
	Cd	0.032	0.253	0.085	0.057	0.059	70.0	18.0
	Zn	21.32	45.35	35.37	37.03	5.815	16.4	35.4
Cu	3.364	7.172	5.426	5.689	1.121	20.7	10.9	

的含量水平显著高于稻米，玉米中 Cd 含量水平与稻米和小麦均无显著性差异；稻米中 Zn 含量水平显著高于玉米和小麦，玉米中 Zn 含量水平显著高于小麦；稻米、玉米和小麦中的 Cu 含量之间均无显著性差异。

变异系数可以反映人为活动对环境的干扰程度，变异系数越大，表明环境受人为活动影响越明显。变异系数小于 10% 为弱变异，在 10% ~ 30% 之间为中等变异，大于 30% 为强变异^[18]。从表 7 中可看出，研究区稻米中 Pb、Cd、Cu、玉米中 Pb、Cd、Cu、Zn、小麦中 Pb 和 Cd 的变异系数均大于 30%，为强变异；稻米中 Zn、小麦中 Cu 和 Zn 的变异系数均在 10% ~ 30% 之间，为中等变异。由此可见，本研究区域谷类农作物中重金属含量的空间分布差异显著，重金属来源受外界干扰影响较大，可能与当地锌冶炼活动有关。

与国内其他相似研究区域农作物样品中的重金属含量(表 8)相比，本研究区域稻米中的 Pb 和 Cd 含量低于四川省甘洛县、贵州省、苏南和湖南省凤凰等铅锌矿区和企业周边稻米中 Pb 和 Cd 的含量，稻米中的 Zn 含量低于四川省甘洛县、贵州省等铅

锌矿区稻米中 Zn 含量，稻米中的 Cu 含量低于四川省甘洛县、贵州省某铅锌矿区稻米中 Cu 含量，略高于另一贵州省某铅锌矿区；本研究区域玉米中的 Pb 含量低于云南省、四川省、贵州省、陕西省矿区及企业周边玉米中 Pb 的含量，Cd 含量高于云南省、陕西省矿区及企业周边玉米中 Cd 的含量、低于四川省和贵州省某矿区，Zn 含量高于四川省和陕西省矿区及企业周边玉米中 Zn 的含量，Cu 含量高于四川省、陕西省、贵州省矿区及企业周边玉米中 Cu 的含量、与陕西省某化工企业周边玉米中的 Cu 含量持平；小麦中的 Pb 含量低于四川省甘洛县和河南省开封市、焦作市矿区和污灌区小麦，Cd 含量高于陕西省商洛市、河南省焦作市冶炼厂及矿区小麦，低于四川省甘洛县和河南省开封市小麦，与苏南企业周边小麦 Cd 含量相当，Zn 含量低于四川省甘洛县和河南省焦作市矿区小麦，Cu 含量高于陕西省商洛市、河南省焦作市冶炼厂周边及矿区小麦、低于河南省开封市污灌区小麦、与四川省甘洛县铅锌矿区小麦中 Cu 含量水平相当。可见，本研究区域谷类农作物中重金属含量水平在相似研究区域中处于中间水平。

表 8 国内相关研究区域谷类农作物重金属的含量水平/mg·kg⁻¹
Table 8 Concentrations of heavy metals in grains from different regions/mg·kg⁻¹

研究区域	耕地来源	作物类型	Pb	Cd	Zn	Cu	文献
四川省甘洛县	铅锌矿区	稻米	2.69	0.29	20.42	3.73	[24]
贵州省	铅锌矿区	稻米	7.36	0.46	28.23	22.87	[5]
贵州省	铅锌矿区	稻米	11.43	0.71	61.91	1.81	[34]
苏南	企业周边	稻米	0.277	0.025			[35]
湖南省凤凰	铅锌矿区	稻米	0.85	0.18			[36]
云南省	锡矿区	玉米	0.16	0.01			[37]
陕西省商洛市	冶炼厂周边	玉米		0.006 2		0.914 6	[38]
贵州省	铅锌矿区	玉米	6.56	0.49	37.72	1.18	[34]
四川省甘洛县	铅锌矿区	玉米	0.36	0.30	22.19	3.55	[24]
陕西省	化工企业周围	玉米	0.129	0.036	17.45	4.74	[39]
苏南	企业周边	小麦	0.137	0.082			[35]
陕西省商洛市	冶炼厂周边	小麦		0.017 1		0.904 1	[38]
四川省甘洛县	铅锌矿区	小麦	5.51	0.58	54.05	5.74	[24]
河南省开封市	污灌区	小麦	0.57	0.63		10.12	[40]
河南省焦作市	矿区	小麦	33.10	ND	77.06	3.16	[41]

2.4 谷类农作物重金属富集特征

从表 7 可看出，稻米重金属元素富集系数大小的顺序为 Zn > Cu > Cd > Pb，玉米和小麦富集系数大小的顺序均为 Zn > Cd > Cu > Pb，说明 4 种重金属元素中，Zn 最容易在稻米、玉米和小麦中富集，而 Pb 最不易富集，可能是由于铅更容易富集在农作物的根部，而果实中富集 Pb 相对较少。从不同农作物对同一重金属元素的富集能力来看，Pb 富

集系数大小的顺序为玉米 > 稻米 > 小麦，说明玉米富集 Pb 的能力比稻米强，而稻米又比小麦更易富集 Pb，此结论与前人的研究结论一致^[42]；Cd、Zn 和 Cu 富集系数大小的顺序均为小麦 > 玉米 > 稻米，说明小麦更易富集 Cd、Zn 和 Cu，其次是玉米。

2.5 谷类农作物重金属的污染评价

如表 9 所示，在所采集的所有稻米样本中，Pb、Cd、Zn、Cu 共 4 种重金属元素的平均含量均未

超过标准限值,部分点位的 Pb 含量超标,超标率为 17.4%,Cd、Zn 和 Cu 均没有点位超标,超标率均为 0;玉米样本中,Pb、Cd、Zn、Cu 共 4 种重金属元素的平均含量均未超过标准限值,但部分点位的 Pb、Cd、Zn、Cu 含量超标,超标率分别为 12.1%、12.1%、6.06%、6.06%;小麦样本中,Pb、Cd、Zn、Cu 共 4 种重金属元素的平均含量均未超过标准限值,但部分点位的 Pb 和 Cd 含量超标,超标率分别为 6.67% 和 33.3%,Zn 和 Cu 均没有点位超标,超标率均为 0.综合污染指数评价的结果表明(表 9),不同农作物的平均综合污染指数大小顺序为小麦>稻米>玉米,研究区稻米和玉米污染等级均为安全,小麦处于警戒线.

表 9 谷类农作物重金属单因子污染指数和综合污染指数

Table 9 Single factor pollution index and comprehensive pollution index of heavy metals in grains

农作物	单因子污染指数和超标率/%								综合污染指数 (PN)	污染等级
	Pb		Cd		Zn		Cu			
	污染指数	超标率	污染指数	超标率	污染指数	超标率	污染指数	超标率		
稻米	0.727	17.4	0.085	0.00	0.339	0.00	0.270	0.00	0.572	安全
玉米	0.471	12.1	0.545	12.1	0.536	6.06	0.446	6.06	0.523	安全
小麦	0.242	6.67	0.847	33.3	0.707	0.00	0.543	0.00	0.847	警戒线

2.6 谷类农作物摄入的健康风险评价

土壤中重金属可通过农作物根系吸收进入植物体内,并积累在作物不同器官和组织中,如果农作物可食用部分积累大量重金属,则通过食物链传递将对人体健康造成严重影响.本研究根据公式(4)~(6)和表 3 中的评价参数,分别计算了冶炼区成人和儿童通过谷类农作物摄入重金属的 CDI 值、HQ 值和 THQ 值,计算结果见表 10.对于成人和儿童来说,单个重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 每日摄入量(CDI 指数)均低于 EPA 的参考暴露剂量(RfD)(表 4),说明单一重金属对人体健康风险不明显.复合重金属健康风险指数评价结果表明,食用研究区域谷类农作物对成人和儿童均存在健康风险.

表 10 食用谷类农作物的重金属摄入量及健康风险

Table 10 Intake and health risk of heavy metals by consumed grains

重金属	CDI/mg·(kg·d) ⁻¹		HQ	
	成人	儿童	成人	儿童
Pb	0.003	0.002	0.757	0.539
Cd	0.000	0.000	0.165	0.110
Zn	0.102	0.062	0.338	0.208
Cu	0.016	0.010	0.406	0.251
THQ			1.666	1.107

2.7 耕地土壤和农作物重金属相关性分析

锌冶炼区耕地土壤与谷类农作物可食部分重金

属综合重金属含量、重金属超标种类和重金属超标率等指标可知,冶炼区谷类农作物中重金属污染程度为小麦最重,稻米和玉米的污染程度相当.其原因可能由于旱地土壤上玉米植株非籽实部分生物量较大,生物稀释作用较强,重金属在作物体内分配规律是根>茎叶>籽实,茎叶吸收重金属的含量占整个作物吸收量的 20%~40%,玉米籽实吸收量最少^[43,44];文献[36]中对于铅锌矿区水稻中重金属的行为特征分析结果也表明,重金属 Pb 和 Cd 在稻米中的含量低于稻根、茎秆和稻叶;且水田土壤中由于大多数重金属是亲硫元素,土壤在淹水还原条件下易生成难溶性硫化物,重金属有效量降低,对水稻造成的影响减小^[24].

属含量间的相关系数列于表 11.从中可见,耕地土壤重金属含量与谷类农作物可食部分重金属含量间无明显相关性,此结果与前人的研究结果一致^[36].可能是由于植物从土壤中吸收和富集重金属的多少与土壤中重金属总量并无线性关系,而与土壤中重金属的植物有效态直接相关^[45].也有类似的研究表明^[46],农产品中重金属含量与土壤中重金属的化学形态、生物有效性有关.这也能说明为什么本研究中玉米地和水稻田土壤重金属含量高于小麦地的土壤重金属含量,而小麦的污染程度反而较稻米和玉米重.因此,今后对于土壤重金属的研究,不仅应关注土壤重金属的总量,还应应对土壤重金属的不同赋存形态进行分析,通过研究重金属不同形态对生物吸收的贡献程度,可以确定其生物有效性的大小,进而进行生物有效性评价,有助于今后更准确地开展土壤重金属污染评价.

表 11 耕地土壤重金属与谷类农作物重金属含量相关性分析

Table 11 Correlations of heavy metals in soils and

土壤重金属	heavy metals in crops			
	农作物重金属			
	Pb	Cd	Zn	Cu
Pb	-0.081	-0.035	-0.041	-0.082
Cd	-0.084	0.146	0.002	-0.043
Zn	-0.095	0.005	-0.026	-0.086
Cu	-0.002	0.164	0.105	0.146

3 结论

本文选取贵州省某典型铅锌冶炼区为研究区域, 调查了该区域耕地土壤和谷类农作物重金属的污染状况, 并评价可能的生态风险和健康风险. 结果表明, 土壤受到重金属不同程度的污染, 尤其是 Cd 污染突出. 谷类农作物受重金属污染状况有差异, 重金属对农作物的污染程度为小麦最重, 稻米和玉米的污染程度相当; 食用该区域谷类农作物引起单一重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 对人体健康的风险不明显, 复合重金属污染对成人和儿童均存在健康风险. 耕地土壤重金属含量与谷类农作物可食部分重金属含量间无明显相关性.

参考文献:

- [1] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 409-417.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 409-417.
- [2] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2007, **383**(1-3): 81-89.
- [3] 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 等. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 712-717.
Liu F, Wang S X, Wu Q R, *et al.* Evaluation and source analysis of the mercury pollution in soils and vegetables around a large-scale zinc smelting plant[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 712-717.
- [4] 孙清斌, 尹春芹, 邓金锋, 等. 大冶矿区周边农田土壤和油菜重金属污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 85-91.
Sun Q B, Yin C Q, Deng J F, *et al.* Investigation on the heavy metal contamination of farmland soil and brassica campestris nearby mining areas in Daye City, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(1): 85-91.
- [5] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(10): 1992-1998.
Wu D, Yang X Z, Li C X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(10): 1992-1998.
- [6] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 260-265.
Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang River Basin[J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 260-265.
- [7] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 重金属污染评价方法(TCLP)评价资江流域土壤重金属生态风险[J]. 环境化学, 2011, **30**(9): 1582-1589.
Liu C Z, Huang Y Z, Lei M, *et al.* Assessment of ecological risks of heavy metal contaminated soils in the Zijiang River region by toxicity characteristic leaching procedure[J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(9): 1582-1589.
- [8] 杨晶, 赵云利, 甄泉, 等. 某污灌区土壤与蔬菜重金属污染状况及健康风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 234-238.
Yang J, Zhao Y L, Zhen Q, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of soil and vegetable in a sewage-irrigated area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(2): 234-238.
- [9] Lim H S, Lee J S, Chon H T, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, **96**(2-3): 223-230.
- [10] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, *et al.* Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China[J]. Environment International, 2006, **32**(7): 883-890.
- [11] Yuan Z M, Yao J, Wang F, *et al.* Potentially toxic trace element contamination, sources, and pollution assessment in farmlands, Bijie City, southwestern China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, **189**(1): 25.
- [12] 林文杰. 土法炼锌区生态退化与重金属污染[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(1): 149-153.
Lin W J. Ecological degeneration and heavy metals pollution in zinc smelting areas[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(1): 149-153.
- [13] 彭德海, 吴攀, 曹振兴, 等. 赫章土法炼锌区水-沉积物重金属污染的时空变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 979-985.
Peng D H, Wu P, Cao Z X, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of heavy metal pollution of water-sediments in stream of zinc smelting area, Hezhang of Guizhou, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(5): 979-985.
- [14] 张国平, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵州省几个典型金属矿区周围河水的重金属分布特征[J]. 地球与环境, 2004, **32**(1): 82-85.
Zhang G P, Liu C Q, Yang Y G, *et al.* Distribution of heavy metals in downstream river waters in the surroundings of several typical metal mines in Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2004, **32**(1): 82-85.
- [15] Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B, *et al.* Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance[J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, **52**(3): 199-223.
- [16] US EPA. Method 3052 Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices[S]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1996.
- [17] 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.
- [18] 盛蒂, 朱兰保, 陈健. 蚌埠地区主要谷物重金属含量及健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2014, **14**(4): 263-266.
Sheng D, Zhu L B, Chen J. Heavy metals content and health risk assessment of cereals in Bengbu area, Anhui[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, **14**(4): 263-266.

- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [20] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(5): 879-885.
Hu G C, Zhang L J, Qi J Y, *et al.* Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 879-885.
- [21] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [22] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 186-193.
Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different Eastern dredging regions of Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 186-193.
- [23] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 都安县玉米籽粒重金属累积特征与健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(11): 2048-2054.
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, *et al.* Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in corn kernel in Du'an Yao Autonomous County[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(11): 2048-2054.
- [24] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
Yang G, Shen F, Zhong G J, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- [25] US EPA. Superfund public health evaluation manual[R]. EPA/540/1-86/060. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1986. 1-52.
- [26] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (part A)[R]. EPA/540/1-89/002. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1989. 35-52.
- [27] US EPA. CASRN 7439-92-1, Lead and compounds (inorganic) [S]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2004.
- [28] US EPA. CASRN 7440-43-9, Cadmium [S]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1994.
- [29] US EPA. CASRN 7440-50-8, Copper [S]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1991.
- [30] US EPA. CASRN 7440-66-6, Zinc and compounds [S]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2005.
- [31] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1076-1085.
Li R Z, Pan C R, Xu J J, *et al.* Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1076-1085.
- [32] Sauvé S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(7): 1125-1131.
- [33] 陆泗进, 王业耀, 何立环, 等. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(11): 1832-1838.
Lu S J, Wang Y Y, He L H, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize County [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(11): 1832-1838.
- [34] 吴迪, 邓琴, 秦樊鑫, 等. 铅锌矿区农作物果实中重金属的含量及其食用安全性评价[J]. *西南农业学报*, 2012, **25**(3): 954-957.
Wu D, Deng Q, Qin F X, *et al.* Heavy metals contents detection and food security assessment for crops products in lead-zinc mining areas [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, **25**(3): 954-957.
- [35] 严连香, 黄标, 邵学新, 等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属 Pb、Cd 的空间变异及其迁移规律[J]. *土壤学报*, 2009, **46**(1): 52-62.
Yan L X, Huang B, Shao X X, *et al.* Spatial variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, **46**(1): 52-62.
- [36] 姬艳芳, 李永华, 孙宏飞, 等. 凤凰铅锌矿区土壤-水稻系统中重金属的行为特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(6): 2143-2150.
Ji Y F, Li Y H, Sun H F, *et al.* Translocation and accumulation of heavy metals in soil-paddy system at Fenghuang lead-zinc deposit area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(6): 2143-2150.
- [37] 蔡保新, 黄玉, 王宇, 等. 云南某锡矿区主要农作物重金属富集差异性[J]. *地质通报*, 2014, **33**(8): 1175-1181.
Cai B X, Huang Y, Wang Y, *et al.* An analysis of differences in accumulation of heavy metals in main crops in a tin mining area of Yunnan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, **33**(8): 1175-1181.
- [38] 李堆淑, 胡景江, 张善红. 陕西商洛某冶炼厂周边农作物重金属污染评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, **44**(6): 85-92.
Li D S, Hu J J, Zhang S H. Evaluation of heavy metal pollution of crops around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, **44**(6): 85-92.
- [39] 齐雁冰, 楚万林, 蒲洁, 等. 陕北某化工企业周围污染区土壤-作物系统重金属积累特征及评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1453-1460.
Qi Y B, Chu W L, Pu J, *et al.* Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in soil-crop system affected by wastewater irrigation around a chemical factory in Shenmu County [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1453-1460.
- [40] 孙卉, 韩晋仙, 马建华. 开封市化肥河灌区小麦重金属含量及其健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**

- (6): 2332-2337.
- Sun H, Han J X, Ma J H. Health risk assessment of wheat seeds heavy metals in the sewage irrigation area of Huafei River, Kaifeng City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(6): 2332-2337.
- [41] 马守臣, 邵云, 杨金芳, 等. 矿粮复合区土壤-作物系统重金属污染风险性评价[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(5): 937-941.
- Ma S C, Shao Y, Yang J F, *et al.* Risk assessment of heavy metal contamination in soil-plant system of the overlapped areas of crop and mineral production[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(5): 937-941.
- [42] 李铭红, 李侠, 宋瑞生, 等. 受污农田中农作物对重金属 Pb 的富集特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(S): 109-113.
- Li M H, Li X, Song R S, *et al.* Accumulation of lead (Pb) in crops grown in polluted farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(S): 109-113.
- [43] 王新, 吴燕玉. 不同作物对重金属复合污染物吸收特性的研究[J]. *农业环境保护*, 1998, **17**(5): 193-196.
- [44] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(6): 774-779.
- Yang W W, Liu M, Cao M Z, *et al.* Accumulation and transfer of lead (Pb) and cadmium (Cd) on different species of maize [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(6): 774-779.
- [45] Ramos L, Hernandez L M, Gonzalez M J. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana National Park [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(1): 50-57.
- [46] Fairbrother A, Wenstel R, Sappington K, *et al.* Framework for metals risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, **68**(2): 145-227.



CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)