



典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价

刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 罗广飞, 李学先

引用本文:

刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 797–809.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0434>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锡矿山土壤重金属生态健康风险评价及重金属在优势植物的分布

白婧, 张文, 张思思, 向国红, 徐会娟, 郑玉, 张新, 段仁燕

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 411–421 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0783>

杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 杨小燕, 赵斌, 李淑英, 陆轶峰, 王媛媛, 周元清

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 755–763 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0484>

宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 513–521 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0191>

平度市金矿区农田土壤-玉米系统重金属污染风险评价

陈璐, 王凯荣, 王芳丽, 宋宁宁, 刘君

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 161–166 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0258>

西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价

王伟鹏, 卢宏玮, 冯三三

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 970–980 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0421>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 797-809.
LIU N T, LIU H Y, WU P, et al. Accumulation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in typical karst soils[J].
Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 797-809.



开放科学 OSID

典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价

刘南婷¹, 刘鸿雁¹, 吴攀^{2,3}, 罗广飞², 李学先^{1*}

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 3. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 基于 225 个样点分析了贵州省不同地区(自然背景区、农业种植区和矿区)表层土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 的含量、分布及累积特征, 采用地积累指数(I_{geo})对土壤重金属污染水平进行评价, 并根据潜在生态风险指数(RI)及人体健康风险评估模型评估了不同分区土壤重金属暴露的生态风险和人体健康风险水平。结果表明: 贵州省不同分区表层土壤中重金属含量差异较大, 与贵州省土壤背景值相比, 农业种植区土壤 Hg、Zn、Cd 和 As 累积特征明显; 矿区土壤 Hg、Zn、Cd、Pb 和 As 累积特征较显著, 平均含量分别是贵州省土壤背景值的 52.55、23.22、16.32、14.48 倍和 4.85 倍。 I_{geo} 值显示自然背景区土壤重金属处于无污染水平, 而农业种植区各重金属主要处于无污染或无-中污染水平, 矿区污染程度较突出, 重金属 Hg、Zn、Cd、Pb 达到中污染水平, 特别是在黔西北和铜仁等矿产资源分布区。综合生态风险评价结果表明, 矿区土壤中重金属生态风险水平远高于农业种植区和自然背景区, 矿产资源集中分布区土壤重金属生态风险较高, 部分样点达到高生态风险水平。单一重金属潜在生态风险评价结果显示, 农业种植区和矿区土壤中 Hg、Cd、Pb 和 As 为主要风险因子, Cr 和 Cu 处于低风险状态。人体健康风险评估结果显示, 矿区的人体健康风险高于农业种植区, 农业种植区和矿区土壤对成人的非致癌风险在可接受范围内, 但致癌风险不可忽视, 对儿童的非致癌风险与致癌风险均高于成人。

关键词: 土壤重金属; 累积; 生态风险; 健康风险; 风险评价; 喀斯特地区

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)05-0797-13

doi: 10.13254/j.jare.2020.0434

Accumulation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in typical karst soils

LIU Nanting¹, LIU Hongyan¹, WU Pan^{2,3}, LUO Guangfei², LI Xuexian^{1*}

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

Abstract: In this study, 225 topsoil samples were collected from different areas (natural background, agricultural planting, and mining areas) in Guizhou Province to systematically investigate the concentrations, distribution, and accumulation characteristics of heavy metals As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn. Based on this, the potential ecological risk index (RI) and human health risk assessment were used to assess the ecological risk level and human health risk of heavy metal exposure in different areas. Results indicated that the concentrations of heavy metals in the topsoil of different regions in Guizhou Province were significantly different. Compared with the corresponding background value of soil in Guizhou Province, the accumulations of Hg, Zn, Cd, and As in agricultural planting area soil were significant. The mean concentrations of Hg, Zn, Cd, Pb, and As in the soil of mining areas were 52.55, 23.22, 16.32, 14.48, and 4.85 times of the soil background values of Guizhou Province, respectively. The geoaccumulation index (I_{geo}) values showed that the heavy metals in the soil of

收稿日期: 2020-08-17 录用日期: 2020-11-03

作者简介: 刘南婷(1997—), 女, 贵州岑巩人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: 870992106@qq.com

*通信作者: 李学先 E-mail: xxli5@gzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1612442); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y186)

Project supported: National Natural Science Foundation of China, Project of Karst Scientific Research Center of the People's Government of Guizhou Province(U1612442); The Key Program of Science and Technology of Guizhou Province, China(Qian Ke He[2020]1Y186)

the natural background areas were uncontaminated, while the pollution from heavy metals in the agricultural planting areas were at uncontaminated or uncontaminated to moderately contaminated levels. The heavy metals contaminated levels were more prominent in the mining area, and the pollution of Hg, Zn, Cd and Pb reached moderately contaminated levels. especially in the mineral resources distribution areas, such as northwest Guizhou and Tongren areas. The RI results showed that the ecological risk levels of heavy metals in the soil of the mining area were considerably higher than those in agricultural planting areas and natural background areas. The ecological risks of heavy metals in the soil of mineral-resource concentrated-distribution areas were relatively high, with some samples were in high ecological risk levels. The potential ecological risk assessment of single heavy metal revealed that Hg, Cd, Pb, and As were the main risk factors in the soil of agricultural planting and mining areas, while Cr and Cu were in low risk levels. The health risk assessment results indicated that the non-carcinogenic risks existing in soils of agricultural planting and mining areas to adults were acceptable, but the carcinogenic risk could not be neglected. The non-carcinogenic and carcinogenic risks to children were evident. The overall human health risks in mining areas were higher than those in agricultural planting areas, and the human health risks for children were higher than those for adults.

Keywords: soil heavy metals; accumulation; ecological risk; health risk; risk assessment; karst area

土壤是地球生命的主要载体,是人类生存以及农业生产的重要自然资源。在社会经济和工农业快速发展趋势下,我国土壤受到不同程度的重金属污染^[1-2]。土壤重金属污染具有不可逆性、长期性、隐蔽性、易富集性和毒性强等特点^[3]。过量的重金属进入土壤环境,会对土壤理化性质造成影响,抑制土壤中微生物活动,导致土壤质量和生产能力下降,并且重金属很难随土壤的自然退化而发生迁移和降解^[4-6]。同时土壤重金属还可通过“土壤-农作物-人体”的食物链逐级累积,对人体健康造成危害^[7]。因此,土壤重金属污染带来的农产品质量安全问题及人类健康问题已成为社会关注的焦点^[8]。而开展土壤重金属累积特征、污染现状及生态风险评估研究对于全面认识区域土壤环境现状,保障农产品安全生产及土壤重金属污染防控具有重要的指导作用^[9-10]。

贵州省是我国西南典型的喀斯特地区,是“两江”上游重要的生态屏障,同时也是能源矿产资源富集区,全省91.7%的耕地分布在喀斯特山区^[11]。特殊的地质背景导致土壤重金属受区域地球化学与成土过程的内源影响,具有自然高背景属性^[12-14],同时工矿企业快速发展等人为活动的外源影响,导致喀斯特地区重金属来源及受控因素极为复杂^[15]。研究表明喀斯特地区土壤重金属污染具有迁移性强、范围广、治理难度大、潜在生态风险高等特点^[16-17],易对原本脆弱的喀斯特生态系统和人类健康构成潜在的威胁^[16]。因此,开展喀斯特地区重金属暴露环境风险评价,对于指导耕地土壤安全利用及保障区域粮食安全至关重要。

近年来,有学者开展了贵州喀斯特地区土壤重金属来源、污染现状相关的研究。如罗倩等^[18]对梵净山

自然保护区土壤重金属污染现状进行评价,结果显示成土母质和大气沉降会影响土壤重金属污染程度。刘晓媛等^[19]和喻子恒等^[20]对贵州某铅锌矿和丹寨县金汞矿等周边土壤重金属含量及来源进行研究,结果显示矿产资源的开采冶炼是土壤重金属的重要来源。此外,也有学者开展了耕地土壤重金属风险评价研究,如陈晓燕等^[21]和柴冠群等^[22]对贵州农业区土壤重金属污染特征与健康风险进行评价,表明农业区土壤存在Hg、Cd和As超标现象,且存在一定的健康风险。但是,基于全省范围内土壤重金属累积及环境风险评价研究相对较少。因此,本研究通过搜集并统计已发表的有关贵州省土壤重金属的中英文文献,对数据进行整理分析,在全面掌握贵州省土壤重金属含量、累积特征基础上,对土壤重金属暴露的潜在生态风险及人体健康风险进行评价,以期对贵州省土壤重金属污染防控和健康风险防范提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省地处我国西南连片岩溶分布区核心,是我国喀斯特发育较典型且复杂的高原山区,全省碳酸盐岩裸露面积占总面积的61.9%。贵州境内地势西高东低,平均海拔1 100 m,属亚热带季风气候,年平均气温14.8℃,年均降水量1 100~1 300 mm。省内河流属长江水系和珠江水系,河网密度较大。全省范围内喀斯特地貌,如岩溶漏斗、落水洞、溶蚀洼地、裂隙、地下暗河等分布广泛,具有独特的地表、地下双层结构。贵州喀斯特地区石灰岩分布广泛,易被侵蚀,导致水土流失。省内土壤类型复杂多样,主要以黄壤和石灰土为主,面积占总面积的38.6%和24.4%。贵州喀斯

特地区土壤重金属具有地球化学高背景分布及差异性显著等特点^[13]。同时,贵州作为矿产资源大省,被誉为“西南煤都”“中国汞都”“中国最大磷矿区”,是中国“锰三角”“金三角”的核心区域。长期的矿山开采、冶炼活动导致区域土壤重金属污染问题日益突出^[16,20]。

1.2 数据来源

本研究以CNKI全文数据库及Web of Science数据库为基础,检索时间从2009年至2020年3月。依据文献不重复、与主题相关且为学术论文的原则进行检索,收集整理了贵州省近10年与土壤重金属有关的160篇论文中表层土壤(20 cm以内,包括0~20 cm或0~15 cm或0~10 cm)的重金属含量数据,涉及126篇中文文献和34篇英文文献。为了进行分析、比较,将数据单位统一换算为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,并依据土壤的主要用途进行分区,将林地、草地、河流流域等未受明显污染地区归为自然背景区(样点 $n=10$),主要分布在贵州梵净山自然保护区及省内的植物园、森林公园等林

地;将农用地如果园、茶园、蔬菜基地等农作物种植区归为农业种植区(样点 $n=124$),主要集中在贵阳市水果蔬菜种植园,毕节、遵义等地烟草种植基地,都匀、遵义等地的茶园,以及黔东南中草药种植基地;将受矿山开采影响的矿区周边土壤归为矿区(样点 $n=91$),主要分布在铜仁万山、黔西北铅锌冶炼区、黔西南兴仁晴隆、都匀牛角塘、黔东南丹寨等地,矿产资源以铅锌矿和汞矿为主。不同分区土壤样点分布见图1。

1.3 地累积指数(I_{geo})

地累积指数(Geoaccumulation index, I_{geo})是用以定量描述土壤、沉积物中重金属污染程度的指标^[23]。计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5B_i} \right) \quad (1)$$

式中: C_i 为土壤中重金属元素 i 的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B_i 是重金属元素 i 的贵州省土壤地球化学背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。重金属地累积指数污染分级与污染程度标准见表1。

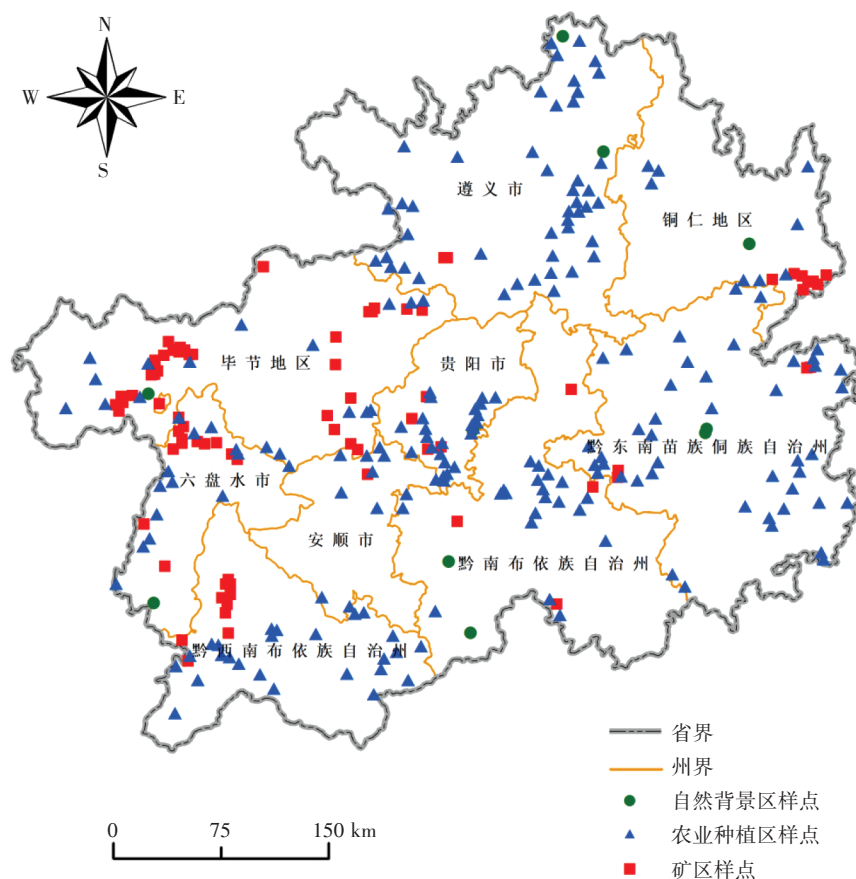


图1 不同分区土壤样点分布图

Figure 1 Distribution map of soil sample points in different regions

表1 地积累指数的污染判断标准

Table 1 Pollution judgment standard of land accumulation index

级别 Class	地积累指数 Geoaccumulation index	重金属污染程度 Heavy metal pollution degree
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	无-中污染
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	中污染
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中-强污染
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	强污染
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	强-极污染
6	$I_{geo} > 5$	极污染

1.4 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法^[24]是综合了土壤中重金属的性质和行为特点,对其造成的污染进行风险评价的方法。该方法采用潜在生态风险指数(RI)进行分级评价,是目前常用的土壤重金属生态风险评价的方法。计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times CF_i \quad (2)$$

$$CF_i = \frac{C_i}{C_n} \quad (3)$$

式中: C_i 为重金属*i*的含量, $mg \cdot kg^{-1}$; C_n 为贵州省土壤重金属的地球化学背景值, $mg \cdot kg^{-1}$; E_i^i 为重金属*i*的潜在生态风险因子; T_r^i 表示重金属*i*的毒理学响应因子; CF_i 是重金属*i*的污染因子。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn的毒理学响应因子 T_r^i 取值分别为10、30、2、5、40、5、1。重金属潜在生态风险指数评价标准如表2所示。

1.5 人体健康风险评价方法

本研究采用美国环境保护局(USEPA)推荐的健康风险评估方法,计算手-口吸食、皮肤接触和呼吸吸入3种暴露途径下的日平均暴露量(ADD, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$),

评价贵州省土壤重金属暴露对附近居民造成的健康风险,其计算公式如下:

$$ADD_{土壤-口} = \frac{C \times IR_1 \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

$$ADD_{土壤-皮肤} = \frac{C \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (5)$$

$$ADD_{土壤-呼吸} = \frac{C \times IR_2 \times EF \times ED}{BW \times PEF \times AT} \quad (6)$$

式中: C 表示土壤中重金属的含量,其余各参数取值及物理意义见表3。

本研究选用国际上通用的非致癌评价方法对贵州省各分区土壤中重金属As、Cd、Cu、Hg、Pb和Zn进行非致癌风险评价,采用致癌风险评价方法对贵州省各分区土壤中重金属Pb、As和Cd进行致癌风险评价,其公式如下:

$$HQ_i = \frac{ADD_{ij}}{RfD_{ij}} \quad (7)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (8)$$

$$CR = \sum ADD_{ij} \times SF_{ij} \quad (9)$$

式中: HQ_i 指重金属*i*的非致癌风险商; HI 是总体的非致癌风险指数; RfD_{ij} 表示非致癌重金属*i*暴露途径*j*的参考剂量; CR 是致癌风险值; SF_{ij} 是致癌重金属*i*暴露途径*j*的斜率系数。本研究涉及的重金属的RfD和SF参考值见表4。USEPA规定当总非致癌风险指数HI小于1时,说明风险较小或者可忽略,HI大于1时,表示可能存在潜在风险, HQ 值越大,对人体产生的健康风险越高。当 $CR_i < 10^{-6}$, 是人体可接受单一重金属致癌风险水平, $CR < 10^{-4}$, 则是人体可接受累计重金属致癌风险水平。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量及分布特征

贵州省土壤重金属含量统计见表5,不同分区表层土壤重金属含量水平差异较大。自然背景区土壤中各重金属含量均与贵州省土壤背景值相差不大,主要因为自然背景区土壤土地利用类型为林地、草地,受人为活动干扰较小,土壤重金属含量主要受成土母质影响^[18]。农业种植区土壤中除Cr外,其余重金属含量平均值均超过贵州省土壤背景值,其中As、Cd、Hg和Zn含量较高,分别是土壤背景值的2.96、3.32、4.82倍和4.52倍。农业种植区土壤中重金属含量高主要与汽车尾气排放、农用物资投入与地质背景的共同作用有关^[25]。此外,农业种植区的部分样点分布在矿区

表2 重金属潜在生态风险因子(E_i^i)、风险指数(RI)与风险等级

Table 2 Potential ecological risk coefficients(E_i^i), risk indices (RI) and risk level of heavy metals

级别 Class	E_i^i	RI	风险等级 Risk level
1	$E_i^i < 40$	$RI < 150$	低
2	$40 \leq E_i^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等
3	$80 \leq E_i^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	较高
4	$160 \leq E_i^i < 320$	$RI \geq 600$	高
5	$E_i^i \geq 320$	—	很高

注:符号“—”表明该项在此处无数据。下同。

Notes: The symbol “—” indicates that the item has no data here. The same below.

表3 人体健康风险评价模型参数
Table 3 Parameters of human health risk assessment model

评价参数 Evaluation parameters	物理意义 Physical meaning	取值 Values	
		成人 Adults	儿童 Children
BW	体质量/kg	70	15
CF	单位转化因子/($\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$)	10^{-6}	10^{-6}
IR_1	土壤颗粒摄入量/($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$)	100	200
IR_2	呼吸频率/($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$)	20	7.65
ED	土壤暴露持续时间/a	24	6
EF	土壤暴露频率/($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$)	350	350
SA	暴露皮肤面积/ cm^2	5 700	2 800
AF	皮肤的黏附系数/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	7×10^{-2}	2×10^{-1}
ABS	皮肤吸收因子	1×10^{-3}	1×10^{-3}
PEF	灰尘排放因子/($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.36×10^9	1.36×10^9
AT	平均总暴露时间/d	ED \times 365(非致癌) 70 \times 365(致癌)	ED \times 365(非致癌) 70 \times 365(致癌)

表4 土壤重金属不同暴露途径下参考剂量(RfD)和斜率系数(SF)

Table 4 Reference dose(RfD) and slope factor(SF) values of different heavy metal exposure pathways

重金属 Heavy metal	RfD/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)			SF/($\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$)		
	经口摄入 Oral ingestion	皮肤接触 Dermal absorption	呼吸吸入 Inhalation	经口摄入 Oral ingestion	皮肤接触 Dermal absorption	呼吸吸入 Inhalation
As	0.000 3	0.000 3	0.000 3	1.50	3.66	1.51
Cd	0.001	0.000 01	0.000 01	6.30	—	6.30
Cu	0.04	0.001 2	0.04	—	—	—
Hg	0.000 3	0.000 3	0.000 082 7	—	—	—
Pb	0.003 5	0.000 525	0.003 52	—	0.008 5	—
Zn	0.30	0.06	0.30	—	—	—

下游,地表径流过程也是导致矿区周边农业区重金属含量累积的原因之一^[26]。矿区土壤中各重金属含量平均值均远高于贵州省土壤背景值,As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb和Zn分别是土壤背景值的4.85、16.32、1.07、2.48、52.55、14.48倍和23.22倍,存在不同程度的累积,尤以Cd、Hg、Pb、Zn最为突出,主要与贵州矿产资源分布及矿产资源开发有关^[19]。Pb和Zn超标土壤集中分布在黔西北地区,与该区域铅锌矿的冶炼密不可分。铜仁市万山区土壤中Hg累积较显著,贵州东部土壤样点Cd、Pb和Zn累积程度相对较高,主要与该区域铅锌成矿带分布有关^[13,27]。贵州矿产资源分布较广,长期的矿产资源开发、冶炼产生的废气、废水导致重金属进入矿区周边土壤,从而引起土壤中重金属的累积。

将各分区土壤重金属含量与《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定的筛选值和管制值分别进行比较(表5)得

出,自然背景区土壤重金属含量除Cd元素有两个样点超过筛选值外,其他均无超标。农业种植区As、Cd、Cu、Hg、Pb和Zn元素均超过筛选值,其样点超标率为10.20%、59.29%、7.95%、1.20%、5.41%和13.04%,其中As、Cd、Hg和Pb分别有2.04%、5.36%、1.20%、0.91%的位点超过管制值。矿区土壤As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb和Zn的管制值超标率为39.34%、91.67%、7.55%、34.38%、20.37%、45.95%和55.56%,其中As、Cd、Hg和Pb分别有14.75%、38.89%、16.67%和16.22%的位点超过管制值。整体上,农业种植区和矿区土壤样点中As、Cd、Pb和Zn超标率均相对较高,对土壤生态环境具有潜在风险,需要严加管控。

2.2 土壤重金属污染程度评价

根据地累积指数法对各分区土壤重金属污染程度进行评价,结果显示,自然背景区中7种重金属元素的 I_{geo} 平均值均小于0,累积程度较低,处在无污染水平。由图2可知,农业种植区土壤中重金属主要处

表5 贵州省各分区土壤重金属描述性统计

Table 5 Descriptive statistics of heavy metals in soils of Guizhou Province

分区 Area	项目 Item	重金属元素 Heavy metal elements/(mg·kg ⁻¹)						
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
自然背景区(n=10) Natural background area(n=10)	最小值	1.13	0.21	19.67	4.03	0.04	9.05	87.62
	最大值	21.78	1.29	76.91	39.00	0.26	77.53	92.7
	平均值	11.42	0.62	40.92	20.93	0.13	28.50	90.16
	标准差	8.56	0.50	18.67	14.11	0.09	23.84	3.59
农业种植区(n=124) Agricultural planting area(n=124)	最小值	0.41	0.001 1	0.222 8	0.264 4	0.033 2	0.041 7	0.606 7
	最大值	3 680.00	103.13	216.76	237.00	23.00	1 466.00	14 076.98
	平均值	59.23	2.19	75.55	46.01	0.53	62.52	449.86
	标准差	372.66	10.76	38.52	39.03	2.51	141.87	1 834.94
矿区(n=91) Mining area(n=91)	最小值	8.17	0.07	0.5	6.2	0.07	6.04	25.1
	最大值	1 799.00	77.89	353.22	292.78	129.04	6 578.00	9 535.99
	平均值	96.94	10.77	101.79	79.28	5.78	509.69	2 310.49
	标准差	249.41	17.01	58.78	54.28	21.16	1 108.73	3 101.02
贵州省背景值 Background value of Guizhou Province		20.00	0.66	95.50	32.00	0.11	35.20	99.50
风险筛选值 Risk screening value(6.5<pH≤7.5)		30	0.3	200	100	2.4	120	250
风险管制值 Risk control value(6.5<pH≤7.5)		120	3.0	1000	—	4.0	700	—

注:以贵州省土壤重金属元素含量作为背景值^[28],风险筛选值和风险管制值参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。

Notes: Taking the content of heavy metal elements in soil of Guizhou Province as the background value^[28]. The risk screening value and risk control value are from *Soil Environment Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land* (GB 15618—2018).

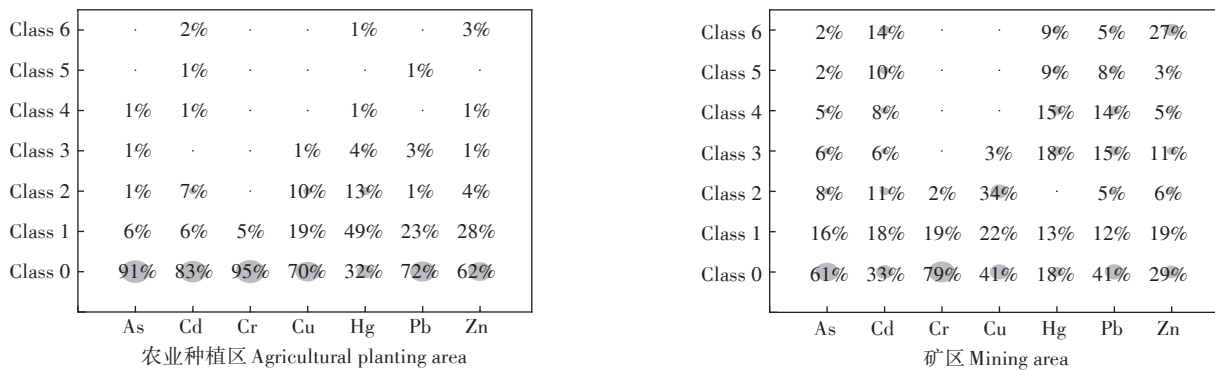


图2 农业种植区和矿区地累积指数(I_{geo})样点分布图

Figure 2 Sample points distribution map of accumulation index (I_{geo}) in agricultural planting area and mining area

于无污染或无-中污染水平,仅As、Cd、Hg和Zn的少部分土壤点位处于强污染水平。而矿区土壤中除Cr外的其余重金属元素均显示出不同程度的累积,其中Hg富集程度最强, I_{geo} 平均值高达2.17,达到中-强污染水平,主要与贵州省汞矿资源丰富及开采历史悠久有关。此外,矿区土壤Zn、Cd和Pb也均处于中污染水平,主要受人为活动(铅锌矿冶炼)和贵州重金属的地质高背景叠加的影响^[29,14]。整体上,矿区土壤重金属污染水平明显高于农业种植区,矿区土壤中Hg、Zn、Cd、Pb和As污染较突出,对土壤环境存在一定的

潜在威胁。贵州省土壤重金属的地累积指数空间分布如图3所示,全省范围内Cr和Cu的污染程度均以无污染和无-中污染水平为主,黔西北和黔南的Cd部分样点达到极污染水平,黔西南和铜仁地区As部分样点达到强污染水平。整体上Hg、Pb和Zn污染程度较高,因为贵州省矿产资源以汞矿和铅锌矿为主。铜仁地区的Hg污染程度最高,部分达到极污染水平,这与被称作“中国汞都”的万山汞矿密切相关。毕节地区、六盘水市和黔西南州的Pb和Zn污染也较突出,原因是黔西北地区广泛开展铅锌矿冶炼活动,而黔西

南地区主要进行煤矿和锑矿等矿产资源开发。

2.3 土壤重金属生态风险评价

表层土壤重金属生态风险评价结果见表6,从单项潜在生态风险指数 E_i^p 来看,自然背景区、农业种植区以及矿区土壤的排序大小分别为 $Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn$ 、 $Hg>Cd>As>Pb>Cu>Zn>Cr$ 和 $Hg>Cd>Pb>As>Zn>Cu>Cr$ 。自然背景区土壤中各元素的 E_i^p 值均小于40,处于低风险状态。农业区土壤Hg和Cd的 E_i^p 值分别为195.04、99.47,分别属于高、较高潜在生态风险水平,这与农业化肥、污水灌溉等人为源以及地质高背景叠加有关^[26,13]。矿区土壤中Hg和Cd污染较

突出, E_i^p 值高达2 102.14和489.76,均处于很高潜在生态风险水平,Pb、As则处于中等生态风险水平,这主要与贵州省汞矿、铅锌矿和锑矿等矿产资源的开采和工业污染有关^[19,30-31]。综合生态风险指数显示,矿区土壤的生态风险指数(RI=2 750.51)最高,处于高生态风险水平,自然背景区(RI=47.53)和农业种植区(RI=346.29)重金属生态风险明显低于矿区,分别属于低生态风险和较高生态风险。由此可见,自然背景区土壤重金属无明显生态风险,应加强农业种植区和矿区土壤重金属的污染防治,尤其是致险元素Hg和Cd,以降低对周边居民和生态环境的危害。

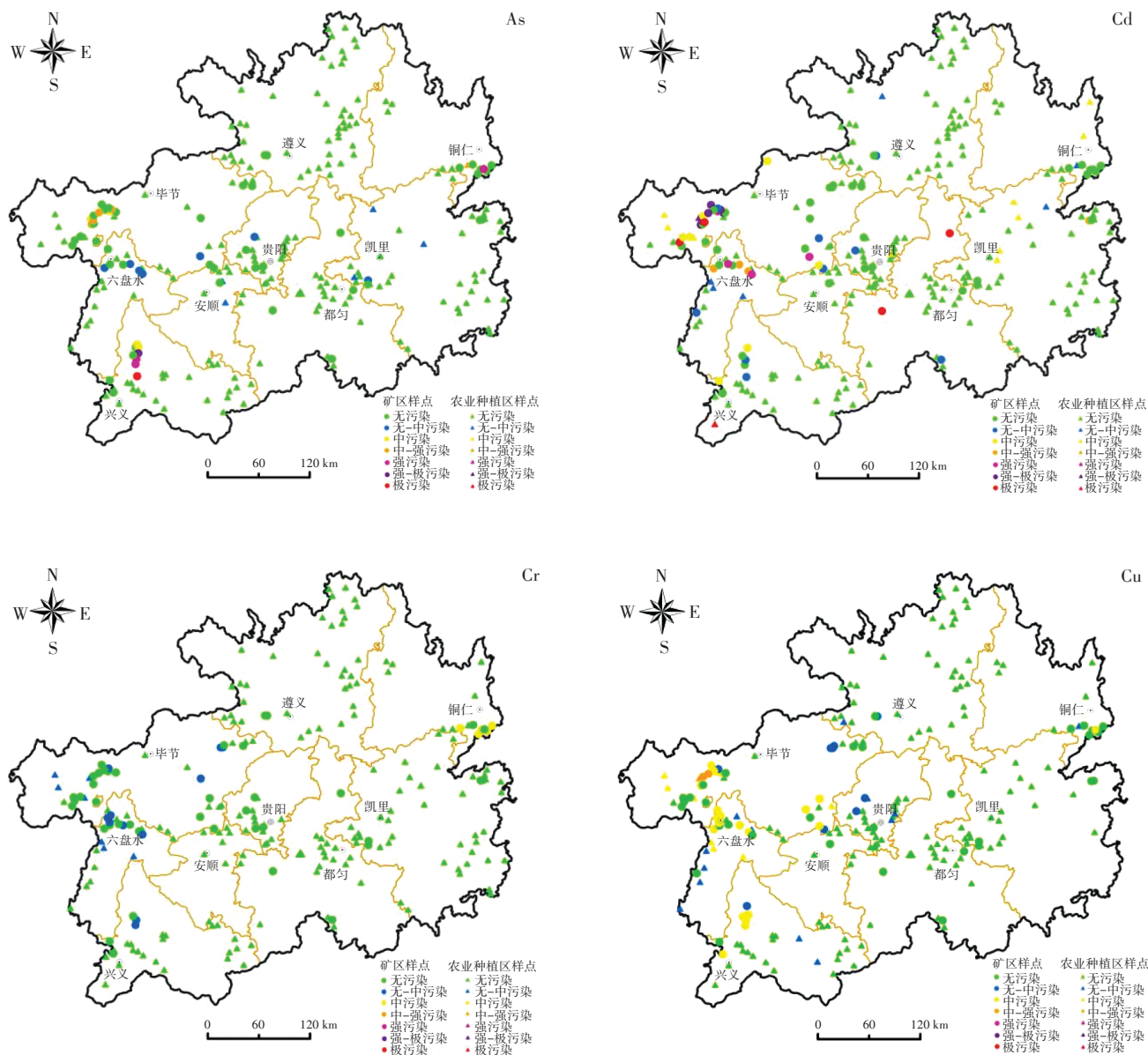
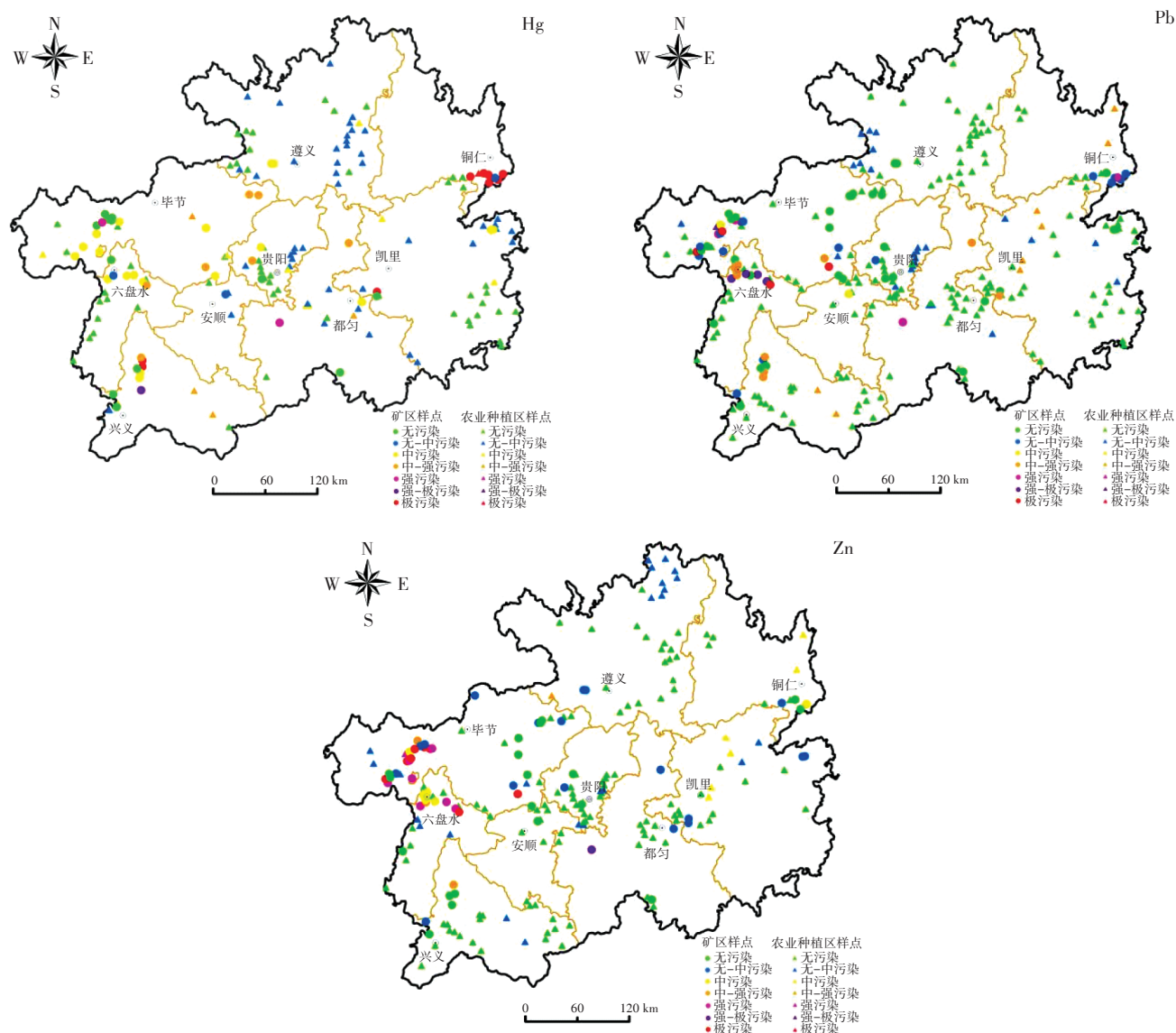


图3 贵州省土壤重金属地累积指数(I_{geo})空间分布

Figure 3 Spatial distribution of soil heavy metal accumulation index(I_{geo}) in Guizhou Province



续图3 贵州省土壤重金属地累积指数(I_{geo})空间分布

Continued figure 3 Spatial distribution of soil heavy metal accumulation index (I_{geo}) in Guizhou Province

表6 贵州不同分区土壤重金属潜在生态风险评估

Table 6 Ecological risk assessment of heavy metals in soils of different areas in Guizhou Province

分区 Area	单一金属的潜在生态风险因子 Potential ecological risk coefficients of individual metals (E_i^p)							潜在生态风险指数 Potential ecological risk indices (RI)
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	
自然背景区 Natural background area	3.51	11.27	0.52	1.76	28	2.36	0.11	47.53
农业种植区 Agricultural planting area	29.61	99.47	1.58	7.19	195.04	8.88	4.52	346.29
矿区 Mining area	48.47	489.76	2.13	12.39	2 102.14	72.40	23.22	2 750.51

贵州省土壤重金属的潜在生态风险空间分布如图4所示。全省的Cr和Cu样点均以低生态风险为主,As污染以黔西南较为突出,全省Cd、Hg污染生态风险较高,大部分样点处于较高生态风险和高风险状态,其中Cd主要分布在黔西北,Hg主要分布在毕节

地区、黔西南和铜仁等地,主要与贵州喀斯特地区Cd的地质高背景以及矿产资源分布有关^[13]。铜仁地区部分样点Hg污染达到较高的生态风险水平,与该地区历史汞矿开采有关。黔西北的Pb污染较严重,部分样点达到很高生态风险水平,与该区域铅锌矿的

开采活动密切相关^[27]。整体上,贵州省生态风险较高的区域是黔西北、黔西南和铜仁地区,这与贵州省铅锌矿和汞矿的主要分布区域一致,应得到相关部门重视。

上述结果表明,贵州省部分地区土壤重金属污染及生态风险水平较高,建议农业种植区适当调整农业产业结构,控制化肥使用量,提高灌溉水的质量管控,并在重金属超标的地区种植超富集植物进行生态修复。矿区生态风险较高,解决重金属污染问题刻不容缓,建议从源头控制重金属污染物排放量,尤其是黔西北、黔西南和铜仁等矿产资源分布较多的地区,相关部门应给予重视。

2.4 土壤重金属人体健康风险评价

由于自然背景区土壤重金属含量较低,基本处于无污染水平,因此,本研究仅对农业种植区和矿区土壤重金属进行人体健康风险评价,评估不同暴露途径下成人和儿童的人体健康风险。

从图5可知,农业种植区7种重金属对两个人群的非致癌风险商(HQ)均<1,但As和Pb对儿童的HQ值超过0.1,也可能产生潜在的健康风险^[32]。成人和儿童的总体非致癌风险指数(HI)分别为0.13和1.19,儿童HI值为成人的9.15倍,表明农业种植区重金属对成人产生的非致癌风险较小,但对儿童存在一定的健康风险。矿区土壤中除As和Pb对儿童的HQ>1之

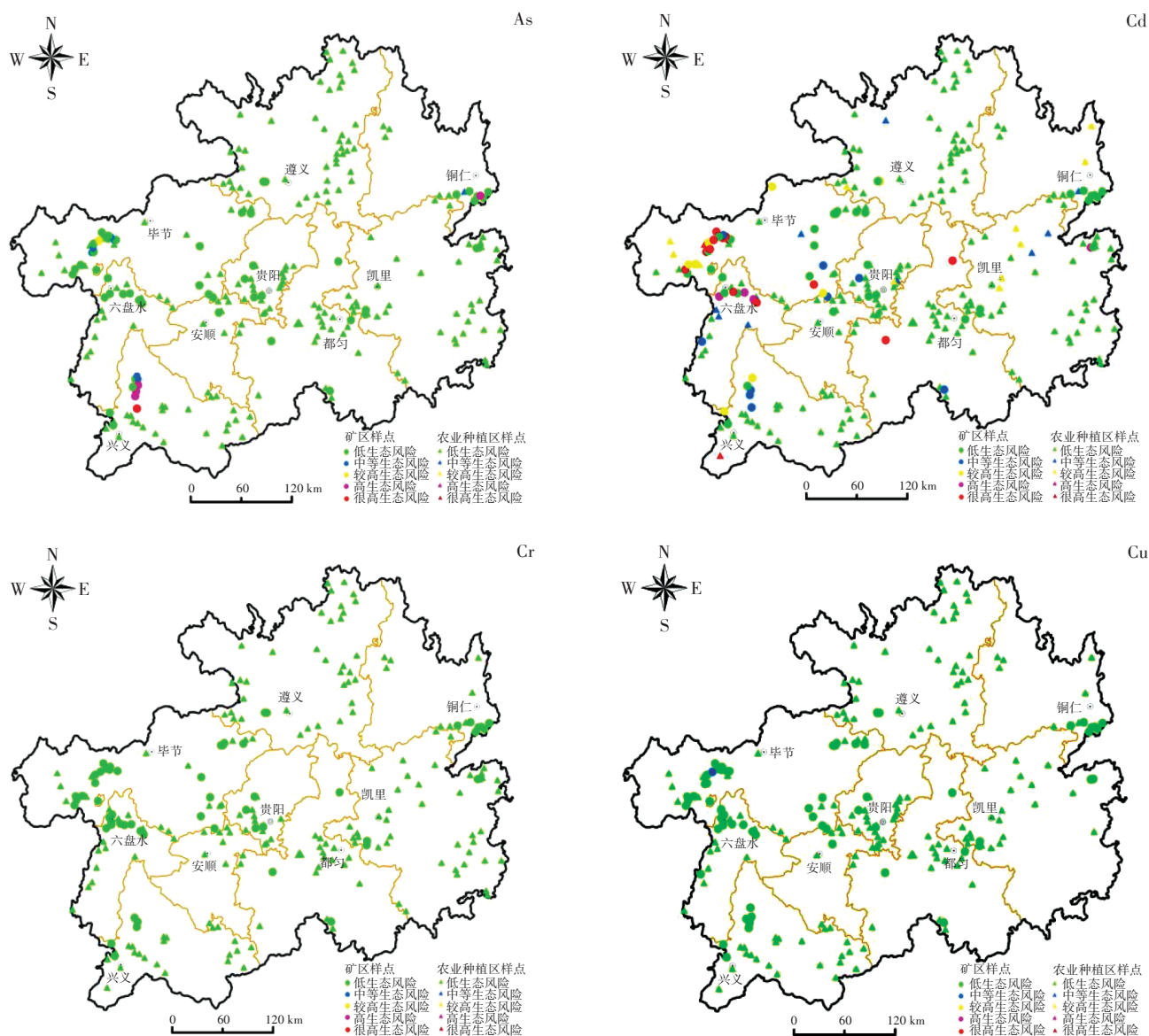
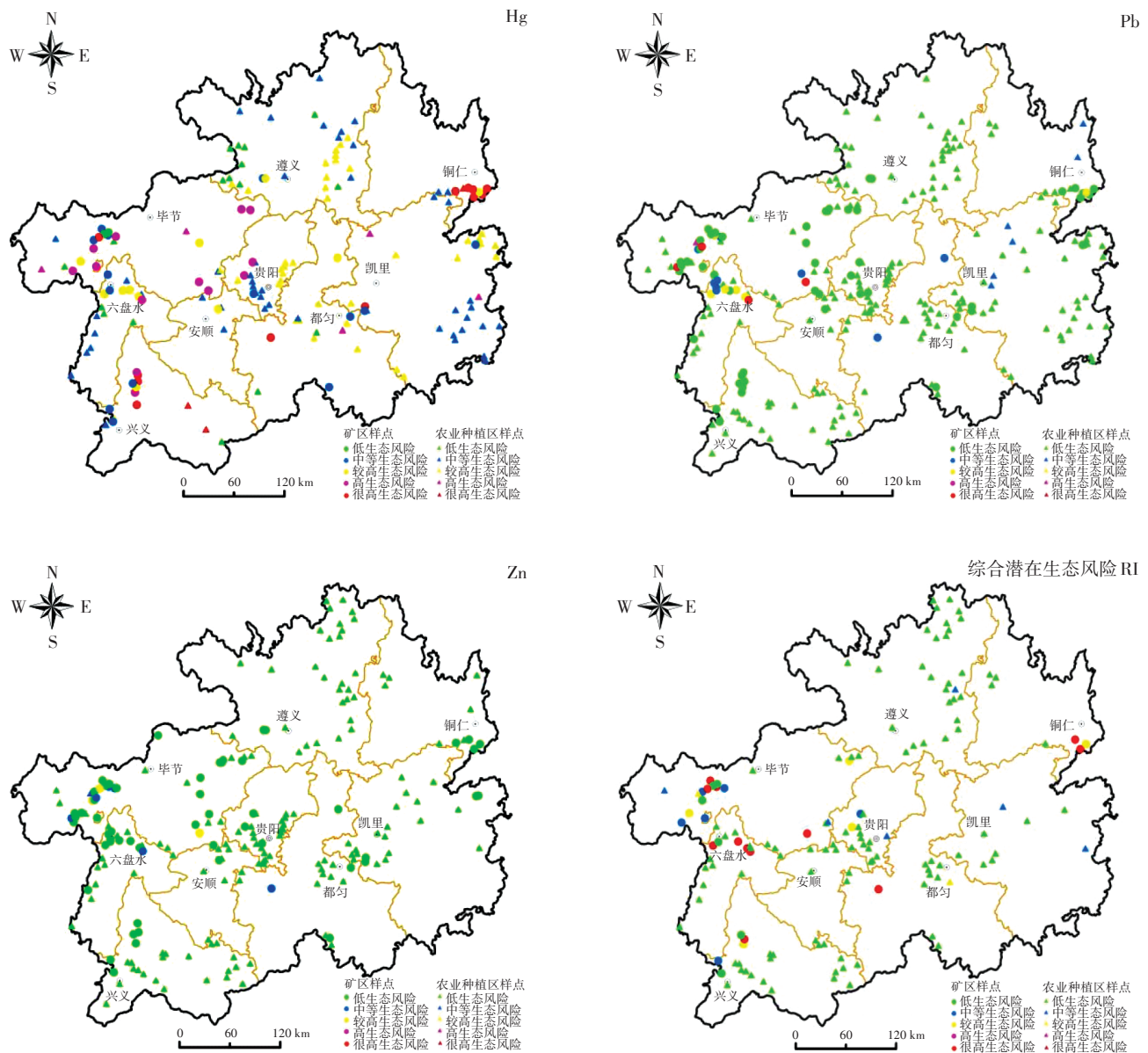


图4 贵州省土壤重金属的潜在生态风险空间分布

Figure 4 Spatial distribution of potential ecological risks of heavy metals in soils of Guizhou Province



续图4 贵州省土壤重金属的潜在生态风险空间分布

Continued figure 4 Spatial distribution of potential ecological risks of heavy metals in soils of Guizhou Province

外,其余重金属对两个人群的HQ均 <1 ,儿童总体HI值远 >1 ,高达6.52,是成人HI值(0.71)的9.18倍,表明矿区重金属污染对儿童的健康风险高于成人,且As和Pb对儿童的暴露风险最大。矿区成人非致癌风险指数(HI)虽小于1,但并非远小于1,因此其非致癌风险仍不可忽视^[33-34]。人类致癌物A类元素As、Cd以及B类元素Pb的致癌效应如图6所示,农业种植区和矿区中As和Cd对两个人群的致癌风险值(CR)均超过癌症风险阈值范围($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$)。同时发现,同一种重金属对儿童的致癌风险值均高于成人,所以重

金属对儿童的危害更大^[34]。农业区和矿区中成人、儿童的CR值分别为 2.11×10^{-5} 、 4.92×10^{-5} 和 1.01×10^{-4} 、 2.34×10^{-4} ,表明农业种植区和矿区重金属均会对儿童和成人产生潜在的致癌风险,As和Cd是主要的致险因子。整体上矿区土壤重金属的人体健康风险高于农业种植区,且Pb和As表现出较高的非致癌风险贡献率,这与矿产冶炼活动导致土壤重金属累积污染程度较高有关^[30,34]。儿童经土壤摄入重金属引起的人体健康风险均高于成人,这与儿童体质量轻、免疫力低以及喜欢室外活动等生活习惯有关^[34-35]。

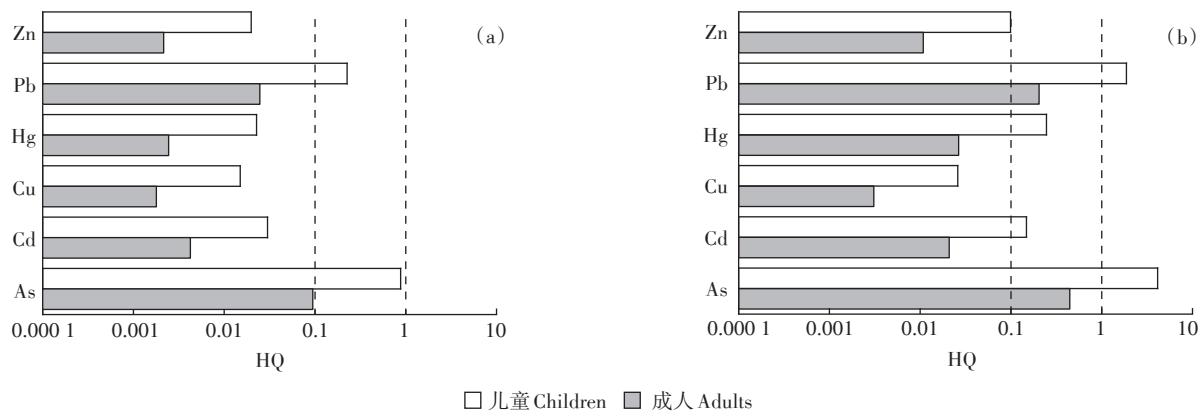


图5 农业种植区(a)和矿区(b)重金属的非致癌风险商(HQ)

Figure 5 Non carcinogenic risk index(HQ) of heavy metals in agricultural planting areas(a) and mining areas(b)

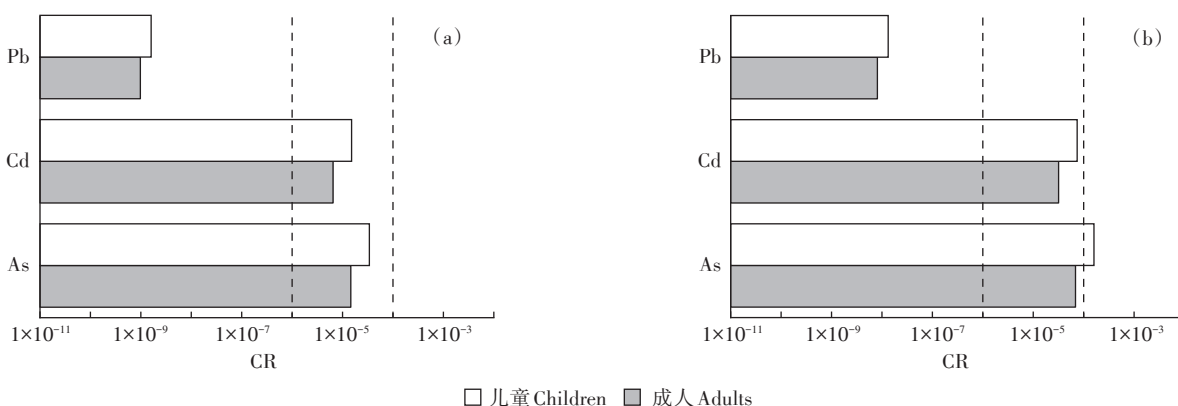


图6 农业种植区(a)和矿区(b)重金属的致癌风险值(CR)

Figure 6 Carcinogenic risk values(CR) of heavy metals in agricultural planting areas(a) and mining areas(b)

3 结论

(1)贵州省表层土壤重金属含量水平差异较大,自然背景区土壤重金属无明显富集特征,而农业种植区土壤中As、Cd、Hg和Zn含量较高,平均含量分别为 59.23 、 2.19 、 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $449.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。矿区土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb和Zn平均含量是贵州省土壤背景值的4.85、16.32、1.07、2.48、52.55、14.48倍和23.22倍。土壤重金属分布主要受矿产资源分布及开发的影响。

(2)地累积指数结果显示,自然背景区土壤重金属处于无污染水平,农业种植区各重金属主要处于无污染或无-中污染水平。矿区土壤重金属累积显著,地累积指数平均值大小顺序为 $\text{Hg} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cr}$,其中Hg、Zn、Cd和Pb达到了中污染水平。全省范围内土壤Cr和Cu处于无污染和无-中污染水平,毕节地区和六盘水市的Cd、Pb和Zn及铜仁地区的Hg累积较显著,部分样点甚至达到极强污染水平。

(3)从分区来看,重金属综合潜在生态风险表现为矿区>农业种植区>自然背景区。农业种植区和矿区土壤中Hg、Cd、Pb和As是主要的致险因子。矿产资源集中分布的地区生态风险较高,尤其是毕节地区、六盘水市和铜仁地区的Pb、Cd和Hg需严加管控。

(4)人体健康风险评估结果显示,矿区土壤重金属致癌风险和非致癌风险均高于农业种植区,对儿童的致癌风险与非致癌风险均高于成人,其中Pb和As是非致癌风险的主要因子,Cd和As是致癌效应的主要因子。

参考文献:

- [1] 陈奕云,唐名阳,王淑桃,等. 基于文献计量的中国农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 219-225. CHEN Y Y, TANG M Y, WANG S T, et al. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil of China based on bibliometrics[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 219-225.
- [2] 陈文轩,李茜,王珍,等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822-2833. CHEN W X, LI Q,

- WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [3] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502. HAN C M, WANG L S, GONG Z Q, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1499-1502.
- [4] ALLOWAY B J. Sources of heavy metals and metalloids in soils[M]. 3rd Edition. Berlin: Springer Press, 2013: 11-50.
- [5] WEI L, WANG K, NOGUERA D R, et al. Transformation and speciation of typical heavy metals in soil aquifer treatment system during long time recharging with secondary effluent: Depth distribution and combination[J]. *Chemosphere*, 2016, 165: 100-109.
- [6] LIU Y, MA Z W, LÜ J S, et al. Source analysis and environmental risk assessment of heavy metals in Rizhao soil[J]. *Journal of Geographic Sciences*, 2016, 26(6): 735-749.
- [7] ZHANG J G, LI H Z, ZHOU Y Z, et al. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, south China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 710-719.
- [8] XIAO X, ZHANG J, WANG H, et al. Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 135292.
- [9] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1875-1883. GUO X D, SUN Q F, ZHAO Y S, et al. Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2018, 37(9): 1875-1883.
- [10] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5628-5638. LI C F, CAO J F, LÜ J S, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5628-5638.
- [11] 苏维词, 朱文孝. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性分析[J]. 山地学报, 2000, 18(5): 429-434. SU W C, ZHU W X. The ecoenvironmental fragility in Karst mountain regions of Guizhou Province[J]. *Mountain Research*, 2000, 18(5): 429-434.
- [12] WU H, LIU Q, MA J, et al. Heavy metal(loids) in typical Chinese tobacco-growing soils: Concentrations, influence factors and potential health risks[J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125591.
- [13] 陈拙, 吴攀, 孟伟, 等. 喀斯特地区清虚洞组地层风化对土壤重金属累积的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3747-3753. CHEN Z, WU P, MENG W, et al. Effects of weathering of Qingxudong formation on heavy metal accumulation in soil in Karst area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3747-3753.
- [14] 刘鸿雁, 涂宇, 顾小凤, 等. 地球化学高背景农田土壤重金属镉的累积效应及环境影响[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(5): 1-6. LIU H Y, TU Y, GU X F, et al. Accumulative effect and environmental impact of cadmium in farmland soil with high background of geochemistry[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2018, 37(5): 1-6.
- [15] 吕悦风, 孙华. 浙北某县域耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 95-102. LÜ Y F, SUN H. Spatial differentiation characteristics, pollution evaluation, and source analysis of heavy metals in farmland soil in a county in northern Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2019, 38(1): 95-102.
- [16] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. 地球与环境, 2015, 43(1): 92-97. RUAN Y L, LI X D, LI T Y, et al. Heavy metal pollution in agricultural soils of the Karst areas and its harm to human health[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(1): 92-97.
- [17] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4197-4209. ZHANG F G, PENG M, WANG H Y, et al. Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4197-4209.
- [18] 罗倩, 张珍明, 向准, 等. 梵净山自然保护区林地土壤重金属分布与富集特征[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2352-2359. LUO Q, ZHANG Z M, XIANG Z, et al. Distribution and enrichment characteristics of heavy metals in soil of woodland in Fanjing Mountain nature reserve[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(10): 2352-2359.
- [19] 刘晓媛, 刘品桢, 杜启露, 等. 地质高背景区铅锌矿废弃地土壤重金属污染评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019, 72(2): 76-82. LIU X Y, LIU P Z, DU Q L, et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of lead-zinc mine wasteland with geological high background[J]. *Nonferrous Metals*, 2019, 72(2): 76-82.
- [20] 喻子恒, 黄国培, 张华, 等. 贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2296-2301. YU Z H, HUANG G P, ZHANG H, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in paddy soil in Danzhai Au-Hg mining area, Guizhou, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8): 2296-2301.
- [21] 陈晓燕, 刘桂华, 范成五, 等. 黔东南州黎平县耕地土壤重金属生态风险的评价[J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1412-1416. CHEN X Y, LIU G H, FAN C W, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil in Liping County of Qiandongnan Prefecture[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(6): 1412-1416.
- [22] 柴冠群, 敖明, 杨珊, 等. 贵州火龙果主产区典型重金属的分布特征及风险评估[J]. 西南农业学报, 2018, 31(12): 2691-2696. CHAI G Q, AO M, YANG S, et al. Distribution characteristics and risk evaluation of typical heavy metals in soils of main pitaya producing areas in Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(12): 2691-2696.
- [23] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geochemical Journal*, 1969, 2: 108-118.
- [24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control:

- A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [25] 李振国, 余光辉, 张勇, 等. 施肥与农田重金属累积的关联性分析——以湖南省为例[J]. *吉林农业*, 2017, 29(16):68-69. LI Z G, YU G H, ZHANG Y, et al. Correlation analysis of fertilization and heavy metal accumulation in farmland: Hunan Province as an example [J]. *Agriculture of Jilin*, 2017, 29(16):68-69.
- [26] 师荣光, 郑向群, 龚琼, 等. 农产品产地土壤重金属外源污染源解析及防控策略研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(4):9-13. SHI R G, ZHENG X Q, GONG Q, et al. Heavy metal pollution source analysis and control strategy in soil of agricultural producing area[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2017, 29(4):9-13.
- [27] 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.
- [28] 田林锋, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖沉积物重金属稳定性及潜在生态风险性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4):885-894. TIAN L F, HU J W, LUO G L, et al. Ecological risk and stability of heavy metals in sediments from Lake Baihua in Guizhou Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4):885-894.
- [29] 张迪, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州遵义松林Ni-Mo多金属矿区土壤Ni污染及农作物健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2):356-365. ZHANG D, ZHOU M Z, XIONG K N, et al. Risk assessment of nickel in soils and crops around the Ni-Mo polymetallic mining area in Songlin, Zunyi, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2019, 38(2):356-365.
- [30] 熊佳, 韩志伟, 吴攀, 等. 独山锑冶炼厂周边土壤锑砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2):655-664. XIONG J, HAN Z W, WU P, et al. Spatial distribution characteristics, contamination evaluation and health risk assessment of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Dushan County[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2):655-664.
- [31] 武晶芳, 江帆, 韦唯, 等. 某镍钼矿区周边土壤重金属风险评价及种植蔬菜健康风险评估[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019, 72(7):84-90. WU J F, JIANG F, WEI W, et al. Risk assessment of heavy metals in soil and health risk assessment of vegetable growing around nickel-molybdenum mine area[J]. *Nonferrous Metals*, 2019, 72(7):84-90.
- [32] DE M E, IRIBARREN I, CHACON E, et al. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain)[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(3):505-513.
- [33] HU B, SHAO S, NI H, et al. Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266(3):114961.
- [34] 张浩, 王辉, 汤红妍, 等. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3):1085-1094. ZHANG H, WANG H, TANG H Y, et al. Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil and vegetables in various functional areas of lead-zinc tailings pond[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(3):1085-1094.
- [35] 陈勇, 张文新, 齐誉, 等. 石河子市区土壤微量汞空间分布及风险评价[J]. *环境化学*, 2017, 36(2):430-438. CHEN Y, ZHANG W X, QI Y, et al. Spatial distributions and risk assessment of the trace mercury in soil of Shihezi City[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(2):430-438.