

引文格式: 崔瀚文, 杨广斌, 崔文刚. 贵阳市观山湖区喀斯特城乡交错区土壤重金属的分布特征及风险评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 351–357. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202104024](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202104024)

贵阳市观山湖区喀斯特城乡交错区土壤重金属的分布特征及风险评价*

崔瀚文^{1,2}, 杨广斌^{1,2**}, 崔文刚¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州师范大学, 贵州省山地资源与环境遥感应应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:【目的】研究喀斯特地区城乡交错区土壤中重金属分布情况, 为喀斯特城郊土地资源安全利用提供科学依据。【方法】以贵阳市观山湖区城乡交错带为研究区, 采集土壤样品, 检测并分析土壤中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 等 5 种重金属含量, 利用单因子评价法、内梅罗综合评价法和潜在生态风险指数评价法进行风险评估, 并使用克里金插值法分析其空间分布特征。【结果】单因子评价结果显示: 各元素污染程度为 Cd<As<Pb<Cr<Hg; 内梅罗综合评价结果显示: 该区域土壤重金属污染等级为重度污染; 潜在生态风险因子系数评估显示: 各元素风险程度为 Cr<Pb<As<Cd<Hg, 存在中等综合潜在风险; Hg、As 和 Pb 元素含量呈中间低、四周高分布; Cd 和 Cr 元素含量呈带状过渡分布。【结论】喀斯特城乡交错区重金属元素的空间分布呈现差异, 研究区内土壤受多种重金属元素的复合污染, 存在中等程度的潜在生态风险。

关键词: 土壤污染; 重金属; 喀斯特地区; 城乡交错区

中图分类号: S151.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2022) 02-0351-07

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metal in Karst Peri-urban Areas in Guanshan Lake District, Guiyang City

CUI Hanwen^{1,2}, YANG Guangbin^{1,2}, CUI Wengang¹

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Mountain Resources and Environmental Remote Sensing Application, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Purpose] To study the distribution of heavy metals in the soil of peri-urban areas in karst area, providing scientific basis for the safe use of land resources. [Methods] The peri-urban area of Guanshan Lake District in Guiyang City was selected as the study area. Soil samples were collected to detect and analysis the contents of five heavy metals: Cd, Hg, As, Pb and Cr in soil. Risk assessment was adopted through single factor evaluation, Nemerow comprehensive evaluation and po-

收稿日期: 2021-04-12

修回日期: 2021-12-21

网络首发日期: 2022-03-18

*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 (U1812401); 贵州省科学技术基金项目 (黔科合基 [2020]1Z031, [2019]1222, [2019]1218); 贵州师范大学资助博士科研项目 (GZNU2017J8, GZNU2017J9)。

作者简介: 崔瀚文 (1998—), 女, 四川内江人, 在读硕士研究生, 主要从事地图学与地理信息系统研究。

E-mail: chwchw98@163.com

**通信作者 Corresponding author: 杨广斌 (1973—), 男, 山东聊城人, 博士, 教授, 主要从事地图学与地理信息系统研究。E-mail: ygbyl@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20220316.0823.001.html>



tential ecological risk index evaluation method. Kriging interpolation method was adopted to study the spatial distribution characteristics. [Results] Single factor evaluation result showed that the pollution degree of elements in the study area was as followed $Cd < As < Pb < Cr < Hg$. Nemerow comprehensive evaluation result showed that the soil heavy metal pollution level in this area was heavy pollution. The risk degree of elements in potential ecological risk index result showed that: $Cr < Pb < As < Cd < Hg$, and the comprehensive potential risk was medium level. The distribution of Hg, As and Pb content were low in the middle and high around the area, and the distribution of Cd and Cr content were zonal transition. [Conclusion] The spatial distribution of heavy metals in karst peri-urban area are different. The soil in the study area was polluted by a variety of heavy metals, which had a medium degree of potential ecological risk.

Keywords: soil pollution; heavy metals; karst area; peri-urban areas

城乡交错区是由城镇化产生的具有城市和乡村双重特性的过渡地带, 交通便利, 往往是工业和农业的复合区^[1], 该区域土壤在工业化和城市化的影响下易受到工业“三废”、生活垃圾以及农药和化肥等污染^[2]。重金属污染具有长期隐蔽性、不可逆性以及富集后毒性增强等特点, 易在农产品中富集, 并通过食物链进入人体, 是人类健康的潜在威胁^[3]。同时, 土壤环境质量关系到农作物生产安全性, 是保障人民粮食安全的基础^[4-5]。因此, 准确认识城乡交错区土壤环境质量污染特征及其空间分布, 是城市化进一步发展、规划和设计的基础, 对促进社会稳定和平稳完成国家战略发展需要尤为重要^[6]。

城乡交错区的土壤环境质量研究集中在平原区^[7-9], 而喀斯特地区具有独特的地质背景和气候条件, 土层环境较为敏感, 是典型的生态环境脆弱区, 具有较高的重金属元素背景值^[10-11]; 此外, 喀斯特地区富有矿产和能源, 随着工矿行业的发展需求, 该区域的土壤环境污染状况愈发复杂^[12-13]。姚成斌等^[14]对喀斯特石漠化治理示范区土壤的研究发现: 土壤中 Cd 和 As 含量均高于背景值, 在不同作物系统中的迁移能力有差异; 张家春等^[15]对喀斯特地区林地土壤评价指出: 研究区土壤受 Cd 和 As 复合污染, 且重金属长期积聚在土壤中, 无法彻底清除; 陈拙等^[16]研究认为: 喀斯特地区的地质背景是造成贵州清虚洞组土壤重金属元素累积的主要因素, 而矿化带的出现加重了累积效应。

目前, 评价土壤重金属污染的方法较多, 且各有优劣。本研究以喀斯特地区城乡交错区土壤为研究对象, 为准确了解重金属分布及污染情

况, 选用单因子和内梅罗综合指数评价法对 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 等元素含量进行分析, 研究区域内主要污染元素; 使用潜在生态污染评价法预测研究区内可能出现的高度致污元素, 从而在城市建设中采取干预措施, 有针对性地加强污染物管控; 基于相关分析和主成分分析对重金属污染物来源进行探讨, 从而为城市发展中的土地安全利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以贵阳市观山湖区某典型城乡交错区为研究区, 其地处 $N26^{\circ}32' \sim 26^{\circ}45'$, $E106^{\circ}29' \sim 106^{\circ}36'$, 东西向长约 10 km, 南北向宽约 25 km, 总面积约 125 km², 东临 5 个城市社区服务中心和 3 个农村社区服务中心。区域内山地和丘陵相间分布, 地势自东北向西南逐渐升高, 平均海拔 1200 m, 以高原地貌为主。地质年代属于寒水系和石灰系, 岩石类型以灰岩和白云岩为主。区域内有大量黄壤、石灰土和红壤分布, 具有典型的喀斯特土壤特性。气候类型属于亚热带季风气候, 冬季盛行东北风, 夏季盛行南风, 年平均温度 15 ℃, 年平均降雨量 1160 mm, 天气环境质量达到国家一类标准。

1.2 样品采集及分析测定

在研究区按 1 km×1 km 的网格布设 150 个样方, 在 2020 年秋季基于研究区土地利用现状、地形及土壤类型等特点实际采集 57 个样方的土样。按照双对角线法采集 0~20 cm 的表层土壤, 采集过程中使用 GPS 记录经纬度, 在每个样点周围采集 3 份土壤样品各 50 g, 并进行分袋与编

号。土壤样品采用 $\text{HNO}_3\text{—HCl—HF—HClO}_4$ 四酸消解法^[17]进行处理并稀释, 采用电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent 7900, 美国) 测定 Cd、As、Pb 和 Cr 元素含量; 使用双道原子荧光光度计 (吉天 AFS-920, 北京) 测定 Hg 元素含量。分析过程中采用国家一级标样土壤进行质量控制。

1.3 评价方法

1.3.1 统计学分析

使用 Excel 2016 计算各项污染指数, 并进行重金属含量描述性统计分析, 其中变异系数 (CV) 按照 $\text{CV}<10\%$ 为弱变异性、 $10\%<\text{CV}\leq 100\%$ 为中等变异性、 $\text{CV}>100\%$ 为强变异性的标准对重金属元素含量进行划分^[18]。使用 SPSS 24.0 软件进行土壤样本相关性分析和主成分分析, 以判断 2 个变量之间的相关性, 相关系数越大则变量间相关性越强, 就本研究而言, 可表征污染来源相似或污染程度相近^[6]。利用 GS⁺ 9.0 软件中的半变异函数拟合各项同性的最适土壤空间模型, 若基底效应小于 25%, 则表明空间自相关性强烈; 若介于 25%~75%, 则为中等程度的空间自相关性; 大于 75% 时, 则属于弱相关^[19]。使用 Arc-GIS 中的地统计分析模块对研究区土壤环境背景下的重金属污染状况及其空间分布特征进行区域分析。

1.3.2 单因子评价法和内梅罗综合评价法

单因子评价法是根据污染物环境质量标准所规定的一种评价方法, 可以反映样品受单一污染物的污染程度^[15]。其计算公式为: $P_i=C_i/S_i$ 。式中: P_i 为重金属元素 i 的污染程度指数; C_i 是土壤中重金属元素 i 含量的实测值; S_i 是该土壤环境背景下 i 元素含量的标准值。本研究选用贵州省背景值为评价标准^[20], $P_i<1$ 表示土壤环境中未受 i 元素污染, $P_i>1$ 表示土壤中已受 i 元素污染; P_i 越大, 表示受污染状况越严重^[21]。

当区域内存在多种污染物对农产品或土壤造成污染时, 需使用内梅罗综合指数对单因子指数进行综合评价, 以反映该区域若干污染因子导致的土壤质量状况及受污染程度^[22]。其计算公式为:

$$P_c = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{\max}^2}{2}}$$

式中: P_c 为土壤受多种污染物的综合污染程度指数; $\bar{P}$ 表示 P_i 的平均值, 即土壤中所有重金属元

素污染程度指数平均值; $P_{\max}$ 为所有元素污染程度指数的最大值。 $P_c\leq 0.7$ 为清洁, $0.7<P_c\leq 1.0$ 为尚为清洁, $1.0<P_c\leq 2.0$ 为轻微污染, $2.0<P_c\leq 3.0$ 为中度污染, $P_c>3.0$ 为重度污染^[22]。

1.3.3 潜在生态风险指数评价法

潜在生态风险指数评价法是根据重金属性质及其环境效应特点, 综合考虑污染程度及生态效应, 采用量化的等价指数分级法进行土壤重金属污染评价^[23], 其计算公式为:

$$\text{RI} = \sum E_i = \sum T_i \times F_i = \sum T_i \times \frac{C_i}{C_c}$$

式中: RI 为区域内综合风险指数; E_i 为单项重金属潜在生态风险因子系数; T_i 为单项重金属污染程度的毒理系数; F_i 为单项重金属元素的污染系数; C_i 为元素 i 的实测值; C_c 为该元素在研究区的背景值。本研究选用贵州省背景值为评价标准^[20], Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的毒理系数分别为 30、40、10、5 和 2^[24]。潜在生态污染风险分级标准见表 1。

表 1 潜在生态污染风险等级
Tab. 1 Assessment grade of potential ecological pollution risk

等级 class	E_i	RI	风险程度 risk level
I	$E_i<40$	$\text{RI}<150$	低 low
II	$40\leq E_i<80$	$150\leq \text{RI}<300$	中 medium
III	$80\leq E_i<160$	$300\leq \text{RI}<600$	较高 high
IV	$160\leq E_i<320$	$\text{RI}\geq 600$	高 higher
V	$E_i\geq 320$	—	非常高 highest

注: E_i 单项潜在生态风险因子系数; RI. 综合风险指数。
Note: E_i . single potential ecological risk coefficient; RI. comprehensive risk coefficient.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量及分布特征

由表 2 可知: 重金属 Hg、As、Cr 和 Pb 的平均含量均已超过研究区背景值, 且分别为背景值的 2.55 倍、1.69 倍、1.12 倍和 1.11 倍。Cr、Pb 和 Cd 含量的变异系数均小于 50%, 其中 Cr 含量的变异系数最小; As 含量的变异系数大于 70%, 表明该元素含量变化较为剧烈; 所有元素均属于中等变异。

半变异函数拟合模型 (表 3) 显示: 基底效应介于 25%~75%, 说明研究区土壤重金属含量具有中等程度的空间自相关性。地统计分析 (图 1)

表 2 研究区土壤重金属含量
Tab. 2 Soil heavy metal content in study area

元素 element	最小值/ (mg·kg ⁻¹) minimum value	最大值/ (mg·kg ⁻¹) maximum value	平均值/ (mg·kg ⁻¹) average value	标准差 standard deviation	变异系数/% coefficient variations	研究区背景值/ (mg·kg ⁻¹) ^[20] background value of study area	贵阳市中心区表层土壤平均值 (mg·kg ⁻¹) ^[23] average surface soil value of central area of Guiyang City
Cd	0.19	1.29	0.52	0.24	45.40	0.66	0.50
Hg	0.07	0.87	0.28	0.15	53.99	0.11	0.22
As	10.90	134.00	33.72	26.34	78.11	20.00	19.09
Pb	20.00	77.00	38.92	12.24	31.45	35.20	41.23
Cr	67.40	158.00	107.05	23.74	22.18	95.50	107.10

表 3 半变异函数模型及其参数
Tab. 3 Semivariogram model and the parmeters

重金属元素 heavy metal element	模型 model	块金值 nugget	基台值 sill	变程/km range	基底效应 nugget effect	决定系数 (R ²) coefficients of determination	残差平方和 residual sum of squares
Cd	指数模型 exponential model	0.127	0.271	19.890	0.469	0.388	0.026
Hg	高斯模型 Gaussian model	0.120	0.218	0.866	0.550	0.260	0.016
As	球状模型 spherical model	0.226	0.412	1.560	0.549	0.271	0.012
Pb	高斯模型 Gaussian model	0.057	0.141	10.253	0.404	0.507	0.012
Cr	指数模型 exponential model	0.637	1.275	6.690	0.500	0.493	0.090

结果表明：各元素含量在空间上的分布有差异。研究区西部 Cd 含量较高，总体上呈现西南和东北高、中间低的态势；研究区北部 Hg 含量较高，且成片分布；研究区北部 As 含量最高，其余地区含量相对较低；研究区北部 Pb 含量相对较高，中部及南部地区含量降低；Cr 含量分布总体上呈现中部偏高、两端偏低的态势。5 种重金属元素在土壤中的积聚具有空间分异的特征，Cd 和 Cr 元素的分布存在较大差异，Hg、As 和 Pb 元素的含量分布在中部区域均表现为低值区。

2.2 土壤重金属污染程度评价

单因子评价法结果 (表 4) 表明：在调查样品

中各元素的污染程度为 Cd<As<Pb<Cr<Hg，所有重金属元素均对研究区土壤造成不同程度的污染，其中 Hg 元素污染程度最大。内梅罗综合污染程度指数为 5.67，表明研究区受多种重金属元素复合污染，综合污染程度为重度污染，土壤中主要污染元素为 Hg。

2.3 潜在生态风险评价

由表 5 可知：土壤中重金属 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的潜在生态风险因子系数 (E_i) 平均值分别为 23.57、103.62、16.86、5.53 和 2.24，除 Hg 元素的潜在污染等级为Ⅲ级外，其余元素的 E_i 值均小于 40，污染等级均为Ⅰ级。该区域潜在生态

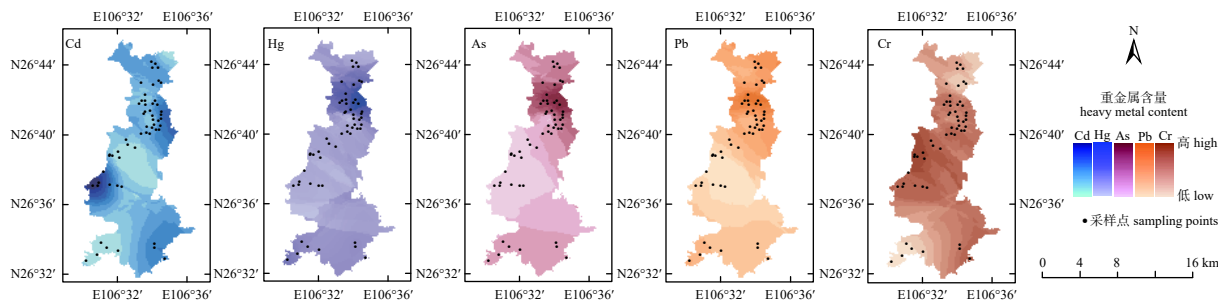


图 1 重金属元素空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of heavy metal elements

表 4 土壤重金属污染程度评价结果
Tab. 4 Evaluation results of heavy metal pollution in soil

元素 element	单因子污染程度指数 (P_i) single factor pollution index		单因子指数评价 single factor index evaluation		综合污染程度指数 (P_c) comprehensive pollution index
	范围 range	平均值 average value	未污染样点占比/% ratio of unpolluted samples	污染的样点占比/% ratio of pollution samples	
Cd	0.29~1.95	0.79	81	19	5.67
Hg	0.62~7.88	2.59	2	98	
As	0.55~6.70	1.69	46	54	
Pb	0.57~2.19	1.11	44	56	
Cr	0.71~1.65	1.12	35	65	

表 5 潜在生态风险评价
Tab. 5 Potential ecological risk evaluation

风险指数 risk coefficient	土壤重金属元素 heavy metal element of soil	最小值 minimum value	最大值 maximum value	平均值 average value	污染等级 pollution class	风险程度 risk level
单项潜在生态风险因子系数 (E_i) single potential ecological risk coefficient	Cd	8.64	58.64	23.57	I	低 low
	Hg	24.73	315.27	103.62	III	较高 high
	As	5.45	67.00	16.86	I	低 low
	Pb	2.84	10.94	5.53	I	低 low
	Cr	1.41	3.31	2.24	I	低 low
综合风险指数 (RI) comprehensive risk coefficient		151.82			II	中 medium

风险因子系数从低到高依次是: $Cr < Pb < As < Cd < Hg$, 各元素的潜在生态风险差异较大; Pb 和 Cr 的潜在生态风险系数低于 10, 产生的环境污染最小。研究区的综合风险指数为 151.82, 等级为 II 级, 处于中等风险程度, Hg 是造成区域内潜在生态污染的主要因子。

2.4 土壤重金属来源初步分析

相关性分析结果 (表 6) 显示: Pb、Hg 和 As 之间相关性显著, 说明其污染来源、污染程度相近; Cd 和 Cr 与其他元素的相关性不显著, 说明其污染来源和程度与其他元素不一致。主成分分析结果 (表 7) 显示: 提取出的 2 个主成分能够解释 65.24% 的信息, 可以反映研究区内重金属主

要污染物的情况, 其中第 1 主成分的贡献率为 45.00%, Hg、As 和 Pb 的载荷相对较高, 说明这 3 种元素具有同源性; 第 2 主成分的贡献率为 20.24%, 重金属 Cd 和 Cr 的载荷明显大于其他元素, 说明这 2 种元素与其他元素不具有同源性, 这与相关性分析的结果一致, 即 Hg、As 和 Pb 具有相同的污染源, 而 Cd 和 Cr 污染源相同。

3 讨论

变异系数可反映土壤中重金属元素在空间分布上的均匀性, 变异系数越大, 其变异性越强, 则区域内的土壤重金属含量受人为干扰越强^[26], 5 种重金属元素的变异系数介于 22%~78% 之间, 元素含量存在空间分异的特征, 推测是由人类活动对土壤组分造成干扰所导致^[27]。半变异函数是描述土壤性质空间变异的理论模型, 其中基底效应可反映研究区重金属元素的空间异质性是受结构性因素还是随机性因素控制^[28], 本研究 5 种重金属元素的基底效应介于 25%~75%, 在空间分布上具有中等程度的自相关性, 说明研究区土壤的空间分布不仅受到结构性因素 (地质、地形和气候条件等原始自然条件) 的控制, 还受随机性因素 (种植方式和施肥等人类活动) 影响^[29]。

表 6 土壤重金属各元素的相关性
Tab. 6 Correlation of heavy metal elements in soil

	Cd	Hg	As	Pb	Cr
Cd	1				
Hg	0.177	1			
As	0.075	0.671**	1		
Pb	0.053	0.459**	0.699**	1	
Cr	0.016	0.002	0.016	-0.002	1

注: “**”在 0.01 水平上相关性显著 (双尾)。
Note: “**” means significant correlation at the 0.01 level (double-tailed).

表 7 重金属含量主成分分析
Tab. 7 Principal component analysis of heavy metal contents

主成分 principal component	特征值 characteristic value	贡献率/% contribution rate	累计贡献率/% cumulative contribution rate	土壤重金属元素载荷 factor loads of heavy metal element of soil				
				Cd	Hg	As	Pb	Cr
1	2.250	45.00	45.00	0.092	0.367	0.408	0.367	0.006
2	1.012	20.24	65.24	0.628	0.047	-0.078	-0.13	0.754
3	0.984	19.67	84.91					
4	0.524	10.48	95.39					
5	0.230	4.61	100.00					

Hg、As 和 Pb 元素含量的空间插值结果均显示：土壤的污染程度最大处均出现在研究区北部，中部的污染程度较小；而 Cd 和 Cr 元素含量的分布呈现一定的过渡规律。相关性分析在一定程度上可以反映重金属元素来源的一致性^[30]，主成分分析可以反映主变量和次变量之间的相互关系，对系统内土壤组分的联系做出判断，进而推测重金属元素的来源，并解释主要的重金属污染物^[31]。根据相关性分析和主成分分析结果以及前人对城乡交错区土壤的研究^[6,32]可知：Hg、As 和 Pb 具有相关性，且来源于同一污染源；Cd 和 Cr 元素污染程度分布情况同其他元素差异较大，推测可能与喀斯特地区土壤背景有关^[31]。

研究区土壤中 Cd、Hg、Pb 和 Cr 含量与贵阳市中心区^[25]土壤元素含量接近，而 As 含量较高。中心区已具有完备的城市面貌，耕地较少，而研究区处于城市化发展阶段，建设用地明显增多，但仍有一部分土地为耕地，长期使用含 As 磷肥会使土壤中 As 累积^[29]；Pb 元素污染大部分是由工矿企业生产时燃烧煤炭等能源造成大气污染物沉降所导致；中国 Hg 元素的释放源主要来自 Hg 矿化带的土壤中，而西南地区是中国主要的 Hg 矿化带地区^[33]，同时 Hg 亦是受人类活动影响最大的重金属元素，往往通过化工生产、农业污水灌溉和大气污染层降等人类活动而积聚在土壤中^[34]。由于研究区处于城乡交错区，城市扩张使交通运输业和建筑业迅速发展，所以推测该区域土壤中重金属含量积累是交通污染、施用化学肥料和工业生产污染等^[24]协同作用的结果。同时，西南喀斯特地区地貌受岩石风化影响，重金属元素扩散迁移能力强于非喀斯特地区，导致土壤背景值高于其他地区^[35]。研究区 Cd 含量超过国家农用地土壤筛选值的比率最高，但其平均值

低于研究区背景值，说明土壤中 Cd 含量可能主要受成土母质影响，而受人类活动的影响较小^[36]；伍海闻等^[31]研究表明：西南喀斯特烟田土壤 Cd 含量背景值为 0.64 mg/kg，是中国 Cd 背景值的 3.3 倍，与本研究结果相似。综上所述，研究区土壤中重金属含量积累是人为活动与自然条件双重作用的结果。

内梅罗综合评价法可以反映土壤受复合污染的情况^[15]。本研究结合主成分分析，通过单因子和内梅罗综合评价法进行分析，推测研究区以 Hg、As 和 Pb 复合污染为主，同时潜在生态风险指数评价法与单因子评价法的结果均显示该城乡交错区 Hg 元素为主要的生态风险影响因子，综合风险程度为中等。城乡交错区具有城市和农村的双重职能，在城市化扩张进程中应考虑环境状况，采取适当措施加强土壤重金属风险管控。

4 结论

喀斯特城乡交错区各重金属元素含量及其空间分布差异较大，Cd 和 Cr 元素分布呈带状过渡分布，重金属 Hg、As 和 Pb 含量均在北部地区表现出较强的积聚性；除 As 元素外，其余元素的平均含量均与贵阳中心区土壤中元素含量接近，但 Cd 含量平均值未超过研究区背景值。研究区受不同元素的复合污染，存在中等程度的综合潜在风险，且以 Hg 为主要的风险因子。

[参考文献]

[1] 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. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0593.
[2] 席晋峰, 俞杏珍, 周立祥, 等. 不同地区城郊用地土壤重金属含量特征的比较[J]. 土壤, 2011, 43(5): 769. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2011.05.004.

- [3] 韩伟,王成文,彭敏,等.川南山区土壤与农作物重金属特征及成因[J].环境科学,2021,42(5):2480. DOI: 10.13227/j.hjks.202008257.
- [4] 段志斌,王济,蔡雄飞,等.贵阳市城郊菜地土壤重金属污染评价[J].河北农业大学学报,2017,40(5):32. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2017.0099.
- [5] 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. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2016.01.034.
- [6] 付传城,王文勇,潘剑君,等.城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析:以南京市柘塘镇为例[J].土壤学报,2014,51(5):1066.
- [7] 吴东辉,刘红霞,刘毛林,等.典型城乡交错区土壤中多环芳烃污染及健康风险评价[J].环境化学,2018,37(7):1565. DOI: 10.524/j.issn.0254-6108.2017100301.
- [8] 朱小琴,孙维侠,黄标,等.长江三角洲城乡交错区农业土壤pH特征及影响因素探讨:以江苏省无锡市为例[J].土壤学报,2009,46(4):594. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2009.04.005.
- [9] 王小莉,陈志凡,魏张东,等.开封市城乡交错区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境化学,2018,37(3):513. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017072407.
- [10] 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. DOI: 10.15958/j.cnki.sdnyswxb.2018.05.001.
- [11] 王旭莲,刘鸿雁,周显勇,等.地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值[J].农业环境科学学报,2021,40(2):355. DOI: 10.11654/jaes.2020-0988.
- [12] 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. DOI: 10.11654/jaes.2018-0373.
- [13] 刘品祯,贾亚琪,程志飞,等.不同方法评价喀斯特煤矿区农田土壤重金属生态风险比较[J].中国岩溶,2018,37(3):371. DOI: 10.11932/karst20180307.
- [14] 姚成斌,周明忠,熊康宁,等.喀斯特高原石漠化治理示范区土壤和农作物重金属含量特征[J].中国环境科学,2021,41(1):316. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0038.
- [15] 张家春,曾宪平,张珍明,等.喀斯特林地土壤重金属形态特征及其评价[J].水土保持研究,2019,26(6):347. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.046.
- [16] 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. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201912.009.
- [17] 伏小勇,许生辉,杨柳,等.城市污泥中重金属消解方法的比较试验研究[J].中国给水排水,2008,24(15):97. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4602.2008.15.025.
- [18] 陈优良,史琳,王兆茹. GIS的矿区土壤重金属污染评价及空间分布[J].测绘科学,2018,43(4):80. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.04.013.
- [19] 任加国,王彬,师华定,等.沱江上源支流土壤重金属污染空间相关性及其源解析[J].农业环境科学学报,2020,39(3):530. DOI: 10.11654/jaes.2019-1049.
- [20] 中国环境监测总站.中国土壤环境背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [21] 王春光,张思冲,辛蕊,等.哈尔滨市东郊菜地土壤重金属环境质量评价[J].中国农学通报,2010,26(2):262.
- [22] 赵慧,何博,孟晶,等.典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(12):1892. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190199.
- [23] 孟源思,高琳琳,李子杰,等.农田土壤重金属污染风险评价模型与方法研究[J].地球与环境,2020,48(4):489. DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.058.
- [24] 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. DOI: 10.13254/j.jare.2020.0434.
- [25] 潘自平,何邵麟,李朝晋,等.贵阳中心区土壤重金属污染及其环境影响[J].环境化学,2016,35(11):2295. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.11.2016053103.
- [26] CHEN H Y, TENG Y G, LU S J, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 512/513: 143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.025.
- [27] 王美青,章明奎.杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究[J].环境科学学报,2002,22(5):603. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2002.05.012.
- [28] 刘强,冯娜,张娅娅,等.基于GIS的天水市秦州区樱桃园土壤重金属元素空间分布与污染评价[J].水土保持通报,2017,37(3):258. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.044.
- [29] 钟晓兰,周生路,李江涛,等.长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征:以江苏省太仓市为例[J].土壤学报,2007,44(1):33. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2007.01.006.
- [30] 魏海英,饶雷振,章博函,等.太原市叶面尘中重金属分布特征及其健康风险评价[J].环境科学学报,2021,41(3):1050. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0342.
- [31] 伍海闻,罗婷,马瑾,等.基于PCA和地统计的西南烟田土壤重金属源解析[J].农业环境科学学报,2020,39(5):1010. DOI: 10.11654/jaes.2019-1181.
- [32] 马宏宏,彭敏,刘飞,等.广西典型碳酸盐岩区农田土壤—作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J].环境科学,2020,41(1):449. DOI: 10.13227/j.hjks.201905040.
- [33] ERICKSEN J A, GUSTIN M S, SCHORRAN D E, et al. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(12): 1613. DOI: 10.1016/S1352-2310(03)00008-6.
- [34] 钟凝,周金华,毕华,等.广州市农村蔬菜地土壤汞水平及其生态、人体健康风险评价[J].中国公共卫生,2019,35(7):904. DOI: 10.11847/zgggws1123086.
- [35] SHI T R, ZHANG Y Y, GONG Y W, et al. Status of cadmium accumulation in agricultural soils across China (1975—2016): from temporal and spatial variations to risk assessment[J]. Chemosphere, 2019, 230: 136. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.208.
- [36] 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. DOI: 10.13227/j.hjks.201607201.

责任编辑:何承刚