doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.160
引用格式: 付小东,孙聪伍,姚叶婷,等.冶炼行业企业周边土壤重金属分布特征及潜在生态风险评价[J].中国地质调查,2025,12(3): 138 - 146. (Fu X D,Sun C W,Yao Y T,et al. Distribution characteristics of heavy metals in soils around smelting enterprises and potential ecological risk assessment[J]. Geological Survey of China,2025,12(3): 138 - 146.)

冶炼行业企业周边土壤重金属分布特征及潜在生态风险评价

付小东, 孙聪伍*, 姚叶婷, 杨正鹏
(云南省有色地质局三〇八队,云南 昆明 650214)

摘要: 为研究工业园区周边不同土地利用方式下土壤重金属的污染分布特征,以云南某典型冶炼行业企业周边为研究区,以不同土地利用方式下的土壤为研究对象,通过单项污染指数法、潜在生态风险指数法综合评价农用地、林地、荒地土壤 8 种重金属的污染状况,通过相关性分析及主成分分析对污染源进行探究。研究结果表明:研究区土壤 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg、As 含量平均值均超过云南省土壤重金属背景值; 3 种土地利用方式下,农用地土壤重金属的单项污染指数(Cr、Ni 除外)均值、综合潜在生态风险等级均明显大于林地和荒地; 整个区域内土壤重金属综合潜在生态风险等级为强和极强,基本呈现越远离工业园区,土壤重金属综合潜在生态风险等级越低的特征; 根据土壤重金属相关性分析及主成分分析,在 3 种土地利用方式下,林地和荒地 Cd、Pb、Zn、Hg、As 主要为工业源,农用地 Cd、Pb、Zn、Hg、As、Cu 还叠加农业源,而 Cr、Ni 主要受成土母质的控制。通过研究,能够了解重金属的动态变化以及土地利用方式合理性,从而为该区及周边土壤重金属污染防治以及安全利用提供科学依据及指导。

关键词: 铅锌冶炼; 土壤重金属; 土地利用方式; 潜在生态风险指数
中图分类号: P681.7 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095 - 8706(2025)03 - 0138 - 09

0 引言

土壤是自然环境要素的重要组成部分,也是农业生产的基础,是不可替代的自然资源[1]。随着人类活动的加剧,城市化、工业化和农业现代化等活动导致大量重金属污染物进入土壤中[2-3],土壤一旦受到污染,不仅很难得到恢复,且可能通过食物链对人体健康造成危害,因而受到普遍关注[4]。近年来,不同学者通过单因子指数法[5]、内梅罗综合污染指数法[4,6]、潜在生态风险指数法[7-8]等方法对不同区域[9-11]、不同行业[12-14]、不同尺度[15-16]的土壤重金属污染特征及来源进行了大量研究,但研究对象主要为农用地,目前对于不同土地利用方式下的土壤重金属污染特征及来源研究较少。

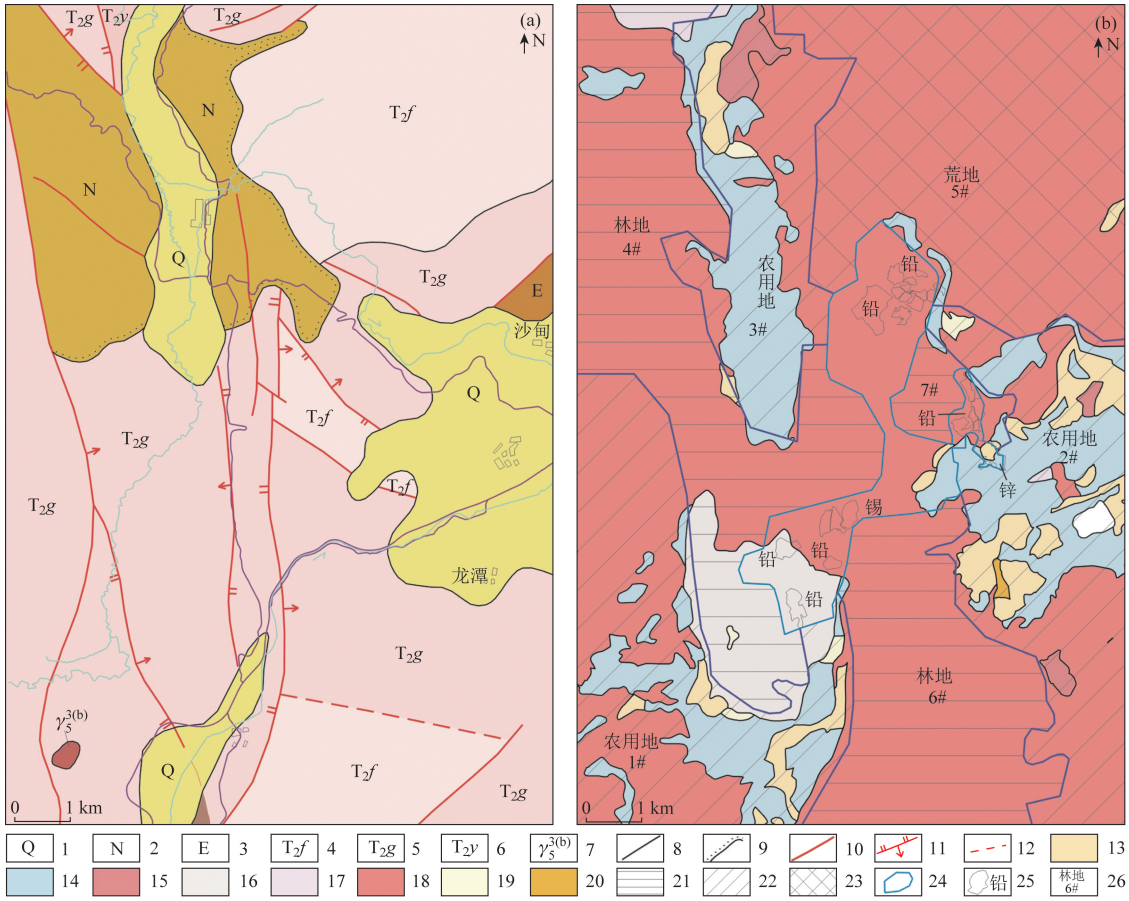
本文以云南省某工业园区周边为研究区,该片区是我国开展鼓风炉炼铅最为典型的区域之一,区内铅锌冶炼企业分布密集,生产历史悠久,虽然鼓风炉炼铅活动已经停止,但由于历史上长期粗放、落后的生产方式与滞后的环保管理等多重原因,使园区及周边土壤受到不同程度的污染[17]。园区周边分布有人口集中的乡镇,也是当地主要的蔬菜产地,土壤环境较为敏感。本文以冶炼行业企业周边表层土壤为研究对象,采用单项污染指数法、潜在生态风险指数法综合评价农用地、林地、荒地土壤重金属的污染特征,通过相关性分析及主成分分析对污染源进行探究,以期了解重金属的动态变化以及土地利用方式合理性,为该区及周边土壤重金属污染防治以及安全利用提供科学依据及指导。

收稿日期: 2024 - 03 - 09; **修订日期**: 2024 - 09 - 14。
基金项目: 中央土壤污染防治专项"云南省重点行业企业用地土壤污染状况调查(项目编号: YNJH2019167)"资助。
第一作者简介: 付小东(1987—),男,高级工程师,主要从事生态地质研究工作。Email: 290639843@qq.com。
通信作者简介: 孙聪伍(1982—),男,高级工程师,主要从事矿产地质及生态地质研究工作。Email: 512160611@qq.com。

1　研究区概况

1.1　研究区概况

研究区位于云南省某地,新生代高原隆升引起的断陷差异,以及侵蚀和溶蚀共同作用形成岩溶断陷盆地,盆地内被第四系、新近系覆盖,地势平坦,是当地重要的农业生产区,基底由三叠系个旧组、法朗组组成,属埋藏型岩溶区。盆地周边低中山环绕,出露三叠系个旧组、法朗组,岩溶发育,企业多分布于盆地周边低中山上。研究区海拔为 1 135 ~ 1 700 m,地貌类型较为复杂,地形高差悬殊,立体气候特征明显,属高原亚热带东南季风气候,多年平均降雨量为 1 100 mm。研究区内土壤类型主要有红壤、水稻土、石灰(岩)土,还有少量燥红土、黄壤、黄棕壤等(图 1)。



1. 第四系; 2. 新近系; 3. 古近系; 4. 中三叠统法郎组; 5. 中三叠统个旧组; 6. 三叠系下统永宁镇组; 7. 燕山期黑云母花岗岩; 8. 地质界线; 9. 地层不整合界线; 10. 断裂; 11. 逆断裂; 12. 推断断裂; 13. 新积土; 14. 水稻土; 15. 燥红土; 16. 石灰(岩)土; 17. 紫色土; 18. 红壤; 19. 黄壤; 20. 黄棕壤; 21. 林地; 22. 农用地; 23. 荒地; 25. 企业位置和冶炼金属种类; 26. 监测单元及编号

图 1　研究区地质简图(a)和土壤类型(b)

Fig. 1　Geological sketch (a) and soil type (b) of the study area

2　研究方法

2.1　样品采集与测定

研究区面积约 10.7 km^2,内部企业以铅、锌、锡等有色金属冶炼行业为主。监测范围参考《农用地土壤污染状况详查点位布设技术规定》附 1[18] 土壤重点污染源周边影响区范围,并考虑企业生产年限、规模、主导风向、多年平均降雨量、地形等因素。研究区范围为东西宽约 10 km、南北长约 15 km,共计 150 km^2(包括园区)。综合考虑研究区范围内土地使用种类、地形地貌等因素,划分为 7 个监测单元,其中 3 个监测单元为农用地,3 个为林地,1 个为荒地(图 1(b))。农用地监测单元

按 500 m×500 m 网格布点,林地和荒地监测单元按 1 000 m×1 000 m 网格布点,避开明显污染源及无法采样的区域,共采集样品 260 个,一般农田土壤采集耕作层土壤,种植一般农作物采集深度 0 ~ 20 cm 土壤,种植果林类农作物采集深度 0 ~ 60 cm 土壤。为保证样品的代表性,采取采集混合样的方案,混合样由网格内 5 ~ 20 个土壤样均匀混合后得到[19]。

所有分析测试工作均由云南省有色金属及制品质量监督检验站(云南冶金环境监测中心)实验室完成,样品于室内自然风干,经粗磨、细磨、分装后进行样品测定,其中粗磨样直接用于土壤 pH 值的测定[20]。土壤样品分析测定分析方法采用《GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》[21]中推荐的方法,土壤 pH 值采用 pH 计测定,Pb、Zn、Cu、Cd、Ni、Cr 采用火焰原子吸收分光光度法测定,Hg、As 采用原子荧光法测定。样品分析过程中,实验室通过平行样、标准样进行质量控制,所采取的质控措施和检测结果满足相关要求,数据准确可靠。

2.2 评价方法

2.2.1 单项污染指数法

单项污染指数法[1]计算公式为

$$P_{ip} = C_i / S_{ip} \quad 。 \tag{1}$$

式中:P_{ip}为土壤中污染物 i 的单项污染指数;C_i 为土壤中污染物 i 的实测浓度,10^{-6};S_{ip}为污染物 i 的评价标准值或参考值[22],10^{-6}。本次选取云南省的土壤背景值,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg、As 的背景值分别为 0.116、68.14、33.97、36.23、37.93、77.70、0.039、11.01[23],单位均为 10^{-6}。根据 P_{ip}的大小,将土壤污染程度划分为 5 个等级:$P_{ip} \leqslant 1$,无污染;(1,2],轻微污染;(2,3],轻度污染;(3,5],中度污染;$P_{ip} > 5$,重度污染。

2.2.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法综合考虑重金属的环境行为、生态效应、生物毒性,是当前评价土壤重金属的常用方法[21-23]。其中单项重金属的潜在生态风险因子计算公式为

$$E_r^i = T_r^i \times C^i / C_r^i \quad 。 \tag{2}$$

式中:E_r^i为重金属 i 的潜在生态风险指数;C^i 为重金属 i 的实测含量,10^{-6};C_r^i 为污染物 i 的评价标准值或参考值[21],本次选取云南省的土壤背景值[23];T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数,Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr、Zn 的毒性响应系数分别为 40、30、10、5、5、5、2、1[24]。单项潜在生态风险指数划分为 5 个等级:$T_r^i < 40$,轻微;[40,80),中等;[80,160),较强;[160,320),强;$T_r^i \geqslant 320$,极强[25]。

重金属的综合潜在生态风险指数 R_1 可以表示多元素环境风险综合指数[21],公式为

$$R_1 = \sum_{i=1}^{m} E_r^i \quad 。 \tag{3}$$

将综合潜在生态风险指数划分为 5 个等级:$R_1 < 150$,轻微;[150,300),中等;[300,600),较强;[600,1 200),强;$R_1 \geqslant 1\,200$,极强[25]。

3 结果与讨论

3.1 不同土地利用方式土壤重金属分布特征

根据分析测试结果(表 1),研究区周边 260 个土壤样品中,将 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg、As 平均值与云南省土壤重金属背景值[23]对比,8 种指标平均值均超过背景值,超标倍数分别为 56.62、1.44、1.99、0.84、3.81、1.51、5.27、12.38。其中 As、Cd 超背景值的比例为 100%,其余元素超背景值的比例也均大于 85%,说明人类活动,特别是冶炼活动使这些元素在研究区明显富集。通过对比发现,农用地土壤 Cd、Cu、Pb、Zn、As、Hg 含量平均值明显高于林地和荒地,说明农业生产可能会导致土壤中某些重金属的增加。

从变异系数看,3 种土地利用方式中 Cd、Pb、Hg、As 的变异系数均大于 0.5,为强变异,表现出明显的空间变异,判断其受到人为活动的强烈影响。农用地土壤样品中 Ni,林地土壤样品中 Cu、Ni、Zn、Cr,荒地土壤样品中 Zn 的变异系数为 0.3 ~ 0.5,为中等变异;农用地土壤样品中 Cr 变异系数小于 0.3,为弱变异,农用地土壤样品中 Cd、Cu、Pb、Zn、As 的变异系数明显高于其他土地利用方式。

表 1　土壤样品中重金属含量特征

Tab. 1　Characteristics of heavy metal content in soil samples

土壤类型	项目	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As
农用地	最小值/10^{-6}	1.00	51.00	26.00	22.00	27.00	47.00	0.02	29.70
	最大值/10^{-6}	78.90	295.00	728.00	121.00	2 295.00	2 025.00	2.82	1 788.00
	平均值/10^{-6}	7.82	164.26	108.30	64.66	212.75	219.76	0.27	165.10
	变异系数	1.43	0.28	0.83	0.34	1.40	0.98	1.02	1.39
林地	最小值/10^{-6}	0.96	80.00	26.00	20.00	16.00	38.00	0.03	26.90
	最大值/10^{-6}	9.05	330.00	197.00	127.00	262.00	203.00	0.78	252.00
	平均值/10^{-6}	3.20	169.39	85.70	74.22	97.32	117.72	0.20	96.42
	变异系数	0.67	0.36	0.46	0.44	0.62	0.39	0.80	0.56
荒地	最小值/10^{-6}	0.52	40.50	14.00	11.00	14.00	36.00	0.02	12.90
	最大值/10^{-6}	5.11	584.00	149.00	222.00	130.00	228.50	0.40	225.00
	平均值/10^{-6}	2.14	182.16	68.66	72.20	49.39	97.39	0.09	70.76
	变异系数	0.68	0.65	0.59	0.74	0.58	0.47	0.94	0.92
所有样品	最小值/10^{-6}	0.52	40.50	14.00	11.00	14.00	36.00	0.02	12.90
	最大值/10^{-6}	78.90	584.00	728.00	222.00	2 295.00	2 025.00	2.82	1 788.00
	平均值/10^{-6}	6.68	166.50	101.73	66.66	182.50	194.88	0.24	147.35
	变异系数	1.51	0.35	0.81	0.42	1.47	1.00	1.04	1.40

3.2　土壤重金属单因子污染评价

根据分析测试结果,全部土壤样品重金属 P_{ip} 均值依次为 Cd > As > Hg > Pb > Cu > Zn > Cr > Ni,农用地重金属 P_{ip} 均值依次为 Cd > As > Hg > Pb > Cu > Zn > Cr > Ni,林地重金属 P_{ip} 均值依次为 Cd > As > Hg > Pb > Cu > Cr > Ni > Zn,荒地重金属 P_{ip} 均值依次为 Cd > As > Cr > Hg > Cu > Ni > Pb > Zn,不同土地利用方式土壤重金属单因子污染评价结果见表 2。3 种土地利用方式中 Cd、As 的 P_{ip} 均值均达到重度污染,Cr、Ni 在 3 种土地利用方式下 P_{ip} 均值差别不大,为轻度或轻微污染,除 Cr、Ni 外,农用地其余重金属的 P_{ip} 均值均明显大于林地和荒地。

表 2　土壤重金属单因子评价统计结果

Tab. 2　Statistical results for single factor evaluation of heavy metals in soils

土壤类型	项目	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As
农用地	最小值	8.62	0.75	0.77	0.61	0.71	0.60	0.46	2.70
	最大值	680.17	4.33	21.43	3.34	60.51	26.06	72.31	162.40
	平均值	67.44	2.41	3.19	1.78	5.61	2.83	6.89	15.00
	污染程度	重度污染	轻度污染	中度污染	轻微污染	重度污染	轻度污染	重度污染	重度污染
林地	最小值	8.28	1.17	0.77	0.55	0.42	0.49	0.79	2.44
	最大值	78.02	4.84	5.80	3.51	6.91	2.61	19.90	22.89
	平均值	27.59	2.49	2.52	2.05	2.57	1.52	5.18	8.76
	污染程度	重度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻微污染	重度污染	重度污染
荒地	最小值	4.48	0.59	0.41	0.30	0.37	0.46	0.54	1.17
	最大值	44.05	8.57	4.39	6.13	3.43	2.94	10.31	20.44
	平均值	18.44	2.67	2.02	1.99	1.30	1.25	2.39	6.43
	污染程度	重度污染	轻度污染	轻度污染	轻微污染	轻微污染	轻微污染	轻度污染	重度污染
所有样品	最小值	4.48	0.59	0.41	0.30	0.37	0.46	0.46	1.17
	最大值	680.17	8.57	21.43	6.13	60.51	26.06	72.31	162.40
	平均值	57.62	2.44	2.99	1.84	4.81	2.51	6.27	13.38
	污染程度	重度污染	轻度污染	轻度污染	轻微污染	中度污染	轻度污染	重度污染	重度污染

3.3　潜在生态风险评价

3 种土地利用方式 8 种重金属的潜在生态风险系数(E_r^i)计算结果见图 2。在 3 种土地利用方式下,Cd 的潜在生态风险指数平均值均达到极强; Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的潜在生态风险指数平均值小于 40,表现为轻微生态风险,农用地及林地 Hg 的潜在生态风险系数平均值为 160 ~ 320,生态风险等级为强,荒地等级为中等; 农用地及林地 As 的潜在生态风险等级为较强,荒地等级为中等。

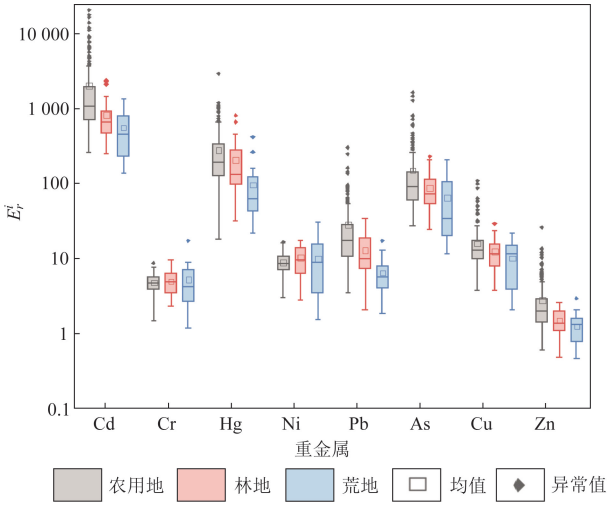


图 2　土壤重金属潜在生态风险系数

Fig. 2　Potential ecological risk coefficient of heavy metals in soils

区域内土壤重金属综合潜在生态风险评价见图 3(a),整个区域内土壤重金属综合潜在生态风险等级为强和极强,极强风险区紧靠工业园区,主要分布在园区边界外约 2 km 范围内,其外围分布强风险区,中等及较强风险区零星分布在工业园区外围。整个区域内,基本呈现越远离工业园区,土壤重金属综合潜在生态风险等级越低的特征,其形状与河流及道路交通线有一定的趋同性,可能也与河流及道路交通线主要分布在工业园区周边有关。

土壤重金属综合潜在生态风险等级受与工业园区中心距离的影响,这比土地利用方式的影响更为显著。如园区西南侧和东南侧的农用地因距离园区较远,其风险等级明显低于距离工业园区较近的农用地。通过分析,土壤重金属综合潜在生态风险等级的空间分布主要与以工业园区为中心的冶炼活动相关;同时,工业园区周边的道路交通线,在运输含有重金属的原辅材料、产品和固体废物时通过扬散等方式造成的周边土壤污染,也与该风险等级的空间分布存在显著相关性。

3 种土地利用方式下土壤重金属综合潜在生态风险等级所占比例见图 3(b),农用地几乎全为强及极强风险等级,二者占比高达 94%,无中等及以下风险等级,且极强风险等级的比例均远大于林地和荒地,说明农用地的污染状况较为严重。林地和荒地的强及极强风险等级占比分别为 79% 和 50%,二者的综合生态风险比农用地低。

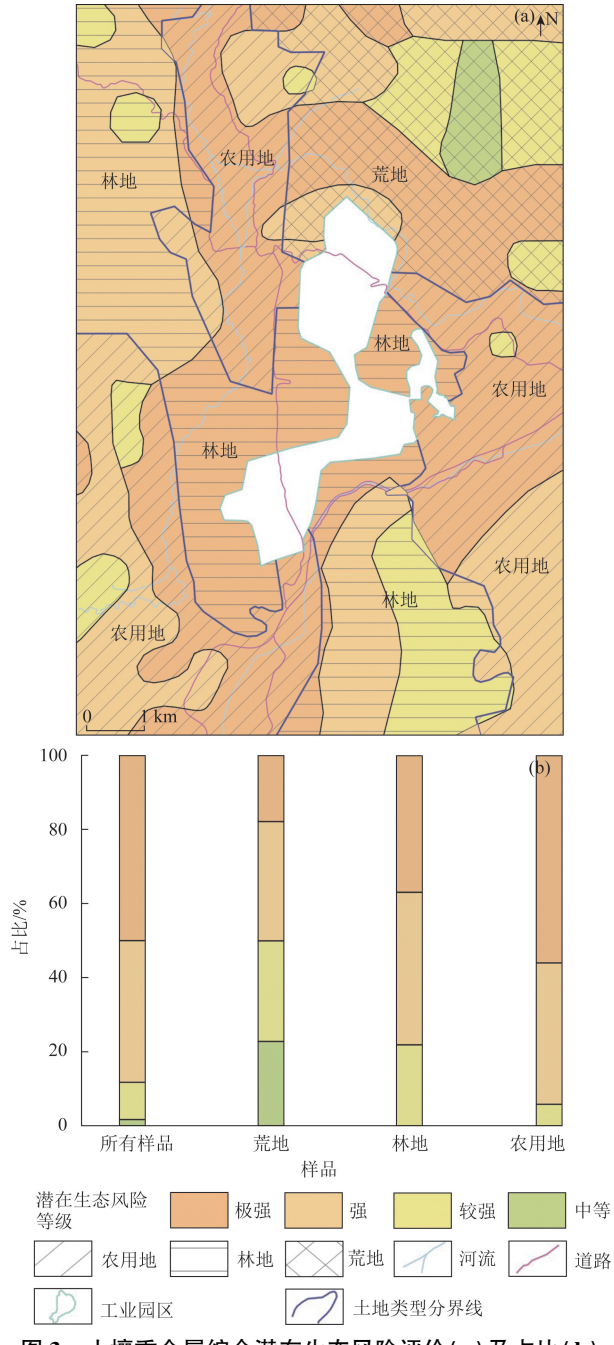


图 3　土壤重金属综合潜在生态风险评价(a)及占比(b)

Fig. 3　Comprehensive potential ecological risk assessment of heavy metals in soils (a) and respective proportions of different ecological risks (b)

3.4　土壤重金属相关性分析

通过重金属相关性分析,可以推测不同重金属之间的物源性及其可能来源[1]。通过检验及土壤重金属含量 Spearman 相关性分析得知(表 3),农用地 Cd、Cu、Pb、Zn、As 两两呈强正相关(>0.5);Cr – Ni 呈强正相关,且与其他重金属元素相关性弱。林地 Cd、Pb、Zn、As 两两呈强正

相关,Cr – Cu – Ni 两两呈强正相关。荒地 Cr、Cu、Ni 两两呈强正相关,与 Zn、As 呈强正相关,Cd、Zn、Hg、As 两两呈强正相关。3 种土地利用方式下,Cd – Zn – As,Cr – Ni 均两两呈强正相关,说明其可能有相似的来源,而 Cu、Pb、Hg 可能存在复合污染源,为了更准确地判断不同土地利用方式下土壤重金属的影响因素,采用主成分分析法对土壤重金属来源进行分析。

表 3　土壤重金属相关性分析

Tab. 3　Correlation analysis of heavy metals in soils

土地利用方式	重金属	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As
农用地	Cd	1.000							
	Cr	−0.063	1.000						
	Cu	0.558	0.243	1.000					
	Ni	−0.006	0.840	0.279	1.000				
	Pb	0.599	−0.052	0.822	−0.040	1.000			
	Zn	0.888	−0.046	0.533	0.011	0.664	1.000		
	Hg	0.589	0.010	0.379	0.019	0.552	0.682	1.000	
	As	0.779	0.017	0.894	0.034	0.887	0.726	0.539	1.000
林地	Cd	1.000							
	Cr	0.297	1.000						
	Cu	0.325	0.687	1.000					
	Ni	0.362	0.818	0.711	1.000				
	Pb	0.662	−0.049	−0.005	0.018	1.000			
	Zn	0.784	0.338	0.178	0.406	0.770	1.000		
	Hg	0.593	0.369	0.497	0.584	0.356	0.531	1.000	
	As	0.807	0.264	0.224	0.440	0.636	0.745	0.613	1.000
荒地	Cd	1.000							
	Cr	0.490	1.000						
	Cu	0.521	0.708	1.000					
	Ni	0.543	0.943	0.818	1.000				
	Pb	0.697	0.189	0.207	0.171	1.000			
	Zn	0.771	0.551	0.677	0.652	0.640	1.000		
	Hg	0.682	0.364	0.411	0.406	0.479	0.800	1.000	
	As	0.934	0.514	0.517	0.594	0.472	0.747	0.658	1.000

3.5　重金属主成分分析

主成分分析是一种在数据分析中常用的降维技术,它可以将多个变量转换为少数几个主成分,有效地降低数据的维度,可用于土壤研究中重金属元素污染源的识别[21-23]。利用 SPSS 22.0 软件对土壤重金属含量进行 KMO 和 Bartlett 检验,3 种土地利用方式下 KMO 均大于 0.5,Bartlett 球形检验 $P=0.000$,表明数据均适合进行主成分分析。3 种土地利用方式下均提取到 2 个特征值大于 1 的主成分,其贡献及主成分的累计方差贡献率详见表 4。

3 种土地利用方式下第一主成分 Cd、Pb、Zn、Hg、As 的载荷均较高,此外,农用地第一主成分 Cu 的载荷也较高,根据前述分析,Cd、Pb、Zn、Hg、As 重金属含量超云南省土壤背景值的倍数较大,变异系数也较其它元素高,表明这些元素可能主要受到人类活动的影响。研究区位于冶炼行业企业周边,企业产生的重金属污染物通过大气沉降、地表径流、

表 4　土壤重金属主成分分析

Tab. 4　Principal component analysis of heavy metals in soils

重金属元素	农用地		林地		荒地	
	成分 1	成分 2	成分 1	成分 2	成分 1	成分 2
Cd	0.868	−0.072	0.873	0.255	0.873	0.359
Cr	−0.018	0.952	0.083	0.892	0.183	0.915
Cu	0.811	0.332	0.071	0.869	0.269	0.847
Ni	0.020	0.951	0.214	0.912	0.230	0.955
Pb	0.889	−0.018	0.890	−0.180	0.847	−0.058
Zn	0.880	−0.064	0.894	0.201	0.791	0.495
Hg	0.716	−0.033	0.578	0.538	0.784	0.261
As	0.947	0.055	0.865	0.244	0.766	0.444
特征值	4.397	1.925	4.319	2.043	5.110	1.465
方差贡献率/%	54.968	24.061	53.985	25.539	63.876	18.308
累计	54.968	79.029	53.985	79.524	63.876	82.184

运输途径影响等方式均会对周边土壤造成污染影响。此外,农用地的重金属均值、超标倍数、单因子污染指数、潜在生态风险指数均明显大于林地和荒地,说明农药和化肥的使用导致农用地中部分重金

属[26]特别是 Cu 的积累,这与王雪雯等[5]和张富贵等的研究结论相符,根据以上分析可以推断,农用地 Cd、Pb、Zn、Hg、As、Cu 主要为工业源,叠加农业源,林地和荒地 Cd、Pb、Zn、Hg、As 主要为工业源。

3 种土地利用方式第二主成分中 Cr、Ni 为主要的贡献因子,林地和荒地中 Cu 的载荷也较高,土壤重金属相关性分析中,农用地 Cr、Ni,林地及荒地 Cr、Cu、Ni 存在极强正相关,且 Cr、Ni 与其他元素相关性较弱,Cr、Ni 的平均值超标倍数为 8 种重金属中最低的,变异系数也较低,说明其受人为干扰程度低于其他几种重金属,分析其可能主要受成土母质的控制,推断第二主成分为土壤母质源。

4 结论

(1)研究区表层土壤 8 种重金属平均值都超过背景值,其中 As、Cd 超背景值的比例为 100%,其余元素超背景值的比例也均大于 85%,说明这些元素在此处明显富集。农用地 Cd、Cu、Pb、Zn、As、Hg 含量平均值明显高于林地和荒地。3 种土地利用方式中 Cd、As 的单因子污染指数均值均达到重度污染,Cr、Ni 为轻度或轻微污染,除 Cr、Ni 外,农用地的其余重金属的 P_{ip} 均值均明显大于林地和荒地。

(2)整个区域内土壤重金属综合潜在生态风险等级为强和极强,农用地几乎全为强及极强风险等级,且极强风险等级的比例均远大于林地和荒地。整个区域内,基本呈现越远离工业园区,土壤重金属综合潜在生态风险等级越低的特征,与工业园区中心距离大小的土壤重金属综合潜在生态风险等级的规律性明显强于土地利用方式。极强风险区紧靠工业园区,主要分布在园区边界外约 2 km 范围内。

(3)根据土壤重金属相关性分析及主成分分析,3 种土地利用方式下二者均具有较好的一致性,农用地 Cd、Pb、Zn、Hg、As、Cu 主要为工业源,叠加农业源,林地和荒地 Cd、Pb、Zn、Hg、As 主要为工业源,3 种土地利用方式下 Cr、Ni 均主要受成土母质的控制。

(4)研究区冶炼行业企业已经对周边土壤造成了 Cd、As、Hg、Pb、Cu 等重金属污染,潜在生态风险等级高,建议加强对企业进行监管,减少或切断重金属污染物进入周边土壤的途径。

参考文献(References):

[1] 张乃明. 环境土壤学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2013:5 - 10.
Zhang N M. Environmental Pedology[M]. Beijing:China Agricultural University Press,2013:5 - 10.

[2] 陈鸿汉,谌宏伟,何江涛,等. 污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. 地学前缘,2006,13(1):216 - 223.
Chen H H,Chen H W,He J T,et al. Health - based risk assessment of contaminated sites:Principles and methods[J]. Earth Science Frontiers,2006,13(1):216 - 223.

[3] 陈怀满,郑春荣,周东美,等. 土壤环境质量研究回顾与讨论[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):821 - 827.
Chen H M,Zheng C R,Zhou D M,et al. Soil environmental quality:A review[J]. Journal of Agro - Environment Science,2006,25(4):821 - 827.

[4] 房辉,曹敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[J]. 生态学杂志,2009,28(7):1277 - 1283.
Fang H,Cao M. Assessment of heavy metals pollution in abandoned lead - zinc mine tailings in Huize of Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Ecology,2009,28(7):1277 - 1283.

[5] 王雪雯,刘鸿雁,顾小凤,等. 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征[J]. 环境科学,2022,43(4):2094 - 2103.
Wang X W,Liu H Y,Gu X F,et al. Distribution characteristics of heavy metals in soils affected by different land use types in a superimposed pollution area with high geological background[J]. Environmental Science,2022,43(4):2094 - 2103.

[6] 张浙,贾智彬,伍思扬,等. 典型锡矿开采加工活动集中区域农田土壤重金属污染评价与源解析[J]. 环境科学,2024,45(8):4847 - 4859.
Zhang Z,Jia Z B,Wu S Y,et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soil around tin mine[J]. Environmental Science,2024,45(8):4847 - 4859.

[7] 滕德强,崔振昂,袁晓婕,等. 北部湾海域表层沉积物中重金属元素分布特征及潜在生态危害评价[J]. 中国地质调查,2020,7(6):79 - 85.
Teng D Q,Cui Z A,Yuan X J,et al. Distribution patterns and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the surface sediments of Beibu Gulf[J]. Geological Survey of China,2020,7(6):79 - 85.

[8] 冉继伟,宁平,孙鑫,等. 云南个旧土壤农作物重金属污染特征及潜在风险[J]. 中国环境监测,2019,35(5):62 - 68.
Ran J W,Ning P,Sun X,et al. Heavy metal pollution characteristics and potential risks of soil and crops in Gejiu,Yunnan[J]. Environmental Monitoring in China,2019,35(5):62 - 68.

[9] 何军,李福林,陶良,等. 典型内陆湖泊沉积物氮、磷和重金属分布特征及生态风险评价——以武汉市武湖为例[J]. 中国地质调查,2022,9(2):110 - 118.
He J,Li F L,Tao L,et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of nitrogen,phosphorus and heavy metals in

sediments of typical inland lakes: A case study of Wuhu Lake in Wuhan[J]. Geological Survey of China,2022,9(2):110 - 118.

[10] 周艳,陈檣,邓绍坡,等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学,2018,39(6):2884 - 2892.
Zhou Y,Chen Q,Deng S P,et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb - Zn mine in southwestern China[J]. Environmental Science,2018,39(6):2884 - 2892.

[11] 庞国涛,阎琨,李伟. 广西防城港近岸表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 中国地质调查,2022,9(1):82 - 90.
Pang G T,Yan K,Li W. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in coastal surface sediments of Fangchenggang in Guangxi[J]. Geological Survey of China,2022,9(1):82 - 90.

[12] 冯依涛,阎秀兰,佟雪娇,等. 再生铝企业周边农田土壤与农作物重金属含量特征分析[J]. 农业环境科学学报,2020,39(1):87 - 96.
Feng Y T,Yan X L,Tong X J,et al. Analysis on characteristics of heavy metals content in farmland soils and crops around recycled aluminum enterprises[J]. Journal of Agro - Environment Science,2020,39(1):87 - 96.

[13] 徐友宁,张江华,柯海玲,等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报,2014,33(8):1239 - 1252.
Xu Y N,Zhang J H,Ke H L,et al. Human health risk under the condition of farmland soil heavy metals pollution in a gold mining area[J]. Geological Bulletin of China,2014,33(8):1239 - 1252.

[14] 余飞,张永文,严明书,等. 重庆汞矿区耕地土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. 环境化学,2022,41(2):536 - 548.
Yu F,Zhang Y W,Yan M S,et al. Heavy metal pollution and human health risks assessment of soil and crops near the mercury ore in Chongqing[J]. Environmental Chemistry,2022,41(2):536 - 548.

[15] 段淑辉,周志成,刘勇军,等. 湘中南农田土壤重金属污染特征及源解析[J]. 中国农业科技导报,2018,20(6):80 - 87.
Duan S H,Zhou Z C,Liu Y J,et al. Distribution and source apportionment of soil heavy metals in central - south of Hunan Province[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2018,20(6):80 - 87.

[16] 贺灵,吴超,曾道明,等. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. 岩矿测试,2021,40(3):384 - 396.
He L,Wu C,Zeng D M,et al. Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of southwest China[J]. Rock and Mineral Analysis,2021,40(3):384 - 396.

[17] 牛学奎,吴学勇,王薇,等. 典型鼓风炉铅冶炼废渣堆场周边优势植物重金属富集特征研究[J]. 生态环境学报,2021,30(6):1293 - 1298.
Niu X K,Wu X Y,Wang W,et al. Study on enrichment characteristics of heavy metals from dominant plants around the waste slag yard of lead smelting in a typical blast furnace[J]. Ecology and Environment Sciences,2021,30(6):1293 - 1298.

[18] 中华人民共和国环境保护部办公厅. 关于印发《农用地土壤污染状况详查点位布设技术规定》的通知[S]. 2007.
Office of the Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on Issuing the Technical Regulations for the Layout of Sampling Points in the Detailed Survey of Soil Pollution in Agricultural Land[S]. 2007.

[19] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社,2004.
State Environmental Protection Administration. HJ/T 166—2004 Technical Specification for Soil Environmental Monitoring[S]. Beijing:China Environmental Press,2004.

[20] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.2—2006 土壤检测 第2部分:土壤 pH 的测定[S].
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 1121.2—2006 Soil Testing - Part 2:Method for Determination of Soil PH[S].

[21] 生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land[S].

[22] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报,2010,26(17):310 - 315.
Fan S X,Gan Z T,Li M J,et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(17):310 - 315.

[23] 马攀华. 云南省土壤污染聚类及背景值相关分析系统的设计与实现[D]. 昆明:云南大学,2012.
Ma P H. Design and Implementation of Soil Pollution Clustering and Background Value Correlation Analysis System in Yunnan Province[D]. Kunming:Yunnan University,2012.

[24] 李朝奎,王利东,李吟,等. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. 矿产与地质,2011,25(2):172 - 176.
Li C K,Wang L D,Li Y,et al. Progress on evaluation method of soil heavy metal contamination[J]. Mineral Resources and Geology,2011,25(2):172 - 176.

[25] 山东省市场监督管理局. DB37/T 4471—2021 底泥重金属污染状况评价技术指南[S].
Shandong Administration for Market Regulation. DB37/T 4471—2021 Technical Guidelines for Pollution Condition Evaluation of Heavy Metals in Sediment[S].

[26] 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价[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.

Distribution characteristics of heavy metals in soils around smelting enterprises and potential ecological risk assessment

FU Xiaodong, SUN Congwu, YAO Yeting, YANG Zhengpeng
(*Geological Team* 308 *of Yunnan Nonferrous Mentals Geological Bureau*, *Kunming Yunnan* 650214, *China*)

Abstract: In order to investigate the distribution characteristics of heavy metal pollution in soils under different land use types of surrounding industrial parks, the authors in this paper focused on typical smelting industry areas in Yunnan Province and took targets soils with various land uses as the study object. The contamination status of eight heavy metals in agricultural land, forest land, and wasteland was comprehensively evaluated by single pollution index method and potential ecological risk index. Correlation analysis and principal component analysis were utilized to explore the sources of pollution. The results indicate that the average content of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, As in soils of the study area all exceeded the background value of heavy metals in soils of Yunnan Province. Among the three land – use types, agricultural land exhibited a significant higher mean single pollution index (excluding Cr and Ni) and higher comprehensive potential ecological risk level compared with forest land and wasteland. The overall comprehensive potential ecological risk level for heavy metals in the entire region was classified as strong or extremely strong. A clear spatial pattern emerged, showing that the comprehensive potential ecological risk level generally decreased with increasing distance from the industrial park. Correlation analysis and PCA indicated that Cd, Pb, Zn, Hg, As, Cu were primarily derived from industrial sources for forest land and wasteland, and Cd, Pb, Zn, Hg, As, Cu were superimposed with agricultural sources for agricultural land. Cr and Ni were mainly controlled by the soil parent material. Understnding of the dynamic changdes in heavy metal concentrations as well as the rationality regarding land utilization methods could be strengthened throug the research, and it could provide scientific basis and guidance for preventing soil heavy metal pollution in this area.

Keywords: Pb – Zn smelting; heavy metal in soils; land use types; potential ecological risk index

(责任编辑: 王晗)