



Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

滇中龙川江流域农田土壤重金属风险评价及来源解析

黄加忠^{1,2)}, 李锁明¹⁾, 涂春霖¹⁾, 姜昕¹⁾, 曾亮¹⁾, 王炳军¹⁾, 宋琳^{1,3)}

1) 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 昆明, 650100;

2) 中国地质学会热液型金铜多金属矿成矿规律与有效勘查技术创新基地, 昆明, 650100;

3) 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 昆明, 650100

内容提要:为掌握滇中龙川江流域农田土壤中重金属的分布状况,选取云南省楚雄市某农田集中区为研究对象,系统采集0~20 cm的表层土壤样品,分析土壤pH值以及8种重金属含量(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)。以农用地土壤污染风险筛选值为评价标准,采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法评估重金属污染风险,识别重金属污染物的主要来源。结果表明:研究区内土壤环境质量总体表现良好,pH平均值为6.78,呈中性。研究区绝大部分农田土壤重金属含量低于风险筛选值,环境风险较低。Cd含量表现出一定的空间异质性,其沿岸局部点位存在超出筛选值的情况。与云南省土壤背景值相比,As、Pb、Hg、Zn含量较低,处于贫化状态;Cr、Ni、Cu含量与背景值基本持平;Cd呈相对富集的趋势。内梅罗综合污染指数均值为0.616,综合潜在生态风险指数均值为32.54,表明全区土壤重金属总体危害程度较低,但需警惕Cd的局部生态风险。源解析表明,土壤重金属首要来源为成土母质风化(自然源,贡献率29.65%),其次为大气沉降(23.33%)、农业活动与河流沉积混合源(17.75%)、农业活动源(17.54%)及与矿业活动相关的矿化地层源(11.74%)。

关键词:农田土壤;重金属;生态风险评价;来源解析;龙川江流域

2024年5月发布的《中国生态环境状况公报》表明,我国农用地安全利用率达91%,农用地土壤环境状况总体良好,但土壤重金属污染的风险依旧存在。重金属污染不仅会影响农作物的生长发育和产量,还会通过食物链进入人体,对人类身体健康造成严重危害。

滇中地区矿产资源丰富,金、铅、锌、铜等矿床分布广泛,整体上属于土壤重金属高背景区域(贺灵等,2021)。楚雄盆地作为滇中盆地的主体部分,是滇中红层的典型发育区,大面积出露侏罗系—白垩系陆相红层,是一套以红色砂岩、泥岩为主的沉积建造,不仅是重要的砂岩型铜矿赋矿层位(吴鹏,2009),其富铁氧化物的风化产物作为主要成土母质(张好等,2024),更对汞、镉、砷等元素具有天然富集倾向(蒋玉莲等,2023),构成了显著的地质源高风险(秦元礼等,2020)。龙川江流域横贯楚雄盆地红层核心区,其沿岸农田土壤直接发育于红层风

化产物之上,是典型的“高地质背景区”与“高敏感农业区”叠置区域(董磊等,2022)。因此,系统评估该流域农田土壤重金属风险,辨识自然背景与人为活动的贡献,对于发展高原特色农业和保障粮食安全至关重要。

本文选取龙川江流域典型农田集中区,通过系统采样分析重金属含量特征与空间分布,采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法进行风险评估,并结合大气沉降、灌溉水、肥料等潜在输入源分析,运用正定矩阵因子分解模型(PMF)解析重金属污染物的主要来源,以期为该区域土壤环境管控与农业安全生产提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为山前平原,多由第四系沉积物改造而成,面积61.5 km²。G56杭瑞高速、G320国道、S322

注:本文为国家自然科学基金青年科学基金“云贵农田—煤矿交错区高镉土壤—玉米系统中镉的迁移转化及健康风险研究”(编号:42307058)和中国地质调查局地质调查项目“滇中楚雄地区土地质量地球化学调查”(编号:ZD20220210)的成果。

收稿日期:2024-12-06;改回日期:2026-01-19;网络首发:2026-02-15;责任编辑:李明。Doi:10.16509/j.georeview.2026.02.022

作者简介:黄加忠,男,1986年生,高级工程师,地球化学专业;Email:496473164@qq.com。通讯作者:宋琳,女,1985年生,高级工程师,从事生态地质、环境评价工作;Email:373256062@qq.com。

省道、楚南公路和楚大铁路在此交汇(图1)。龙川江由中西部进入,向北跨境而过,过境长度为6 km,对两岸的农业生产、生态环境等方面有着重要的影响。

出露地层较简单,由老到新依次为侏罗系上统妥甸组、白垩系下统高峰寺组、普昌河组、马头山组、白垩系上统江底河组和第四系。岩性主要为紫红色、灰紫色泥岩、砂质泥岩和粉砂岩,属于典型的滇中红层沉积建造。其中,白垩系上统江底河组一段是区域重要的砂岩型铜矿赋矿层位(吴鹏,2009),

其风化物是研究区南部和西北部土壤的主要成土母质,对土壤中Cu等元素的背景值具有决定性影响。第四系地层沿龙川江线性展布,主要由河流冲积物组成,地势平坦,绝大部分已被改造为农田。区内分布有多个历史铜矿点、页岩砖厂和采石场,这些潜在人为干扰源可能通过扬尘、径流等途径对周边土壤产生影响。

第三次全国国土调查显示,研究区土地利用类型以水田为主(图2),面积23.65 km²,占比38.46%;其次为林地,面积16.50 km²,占比

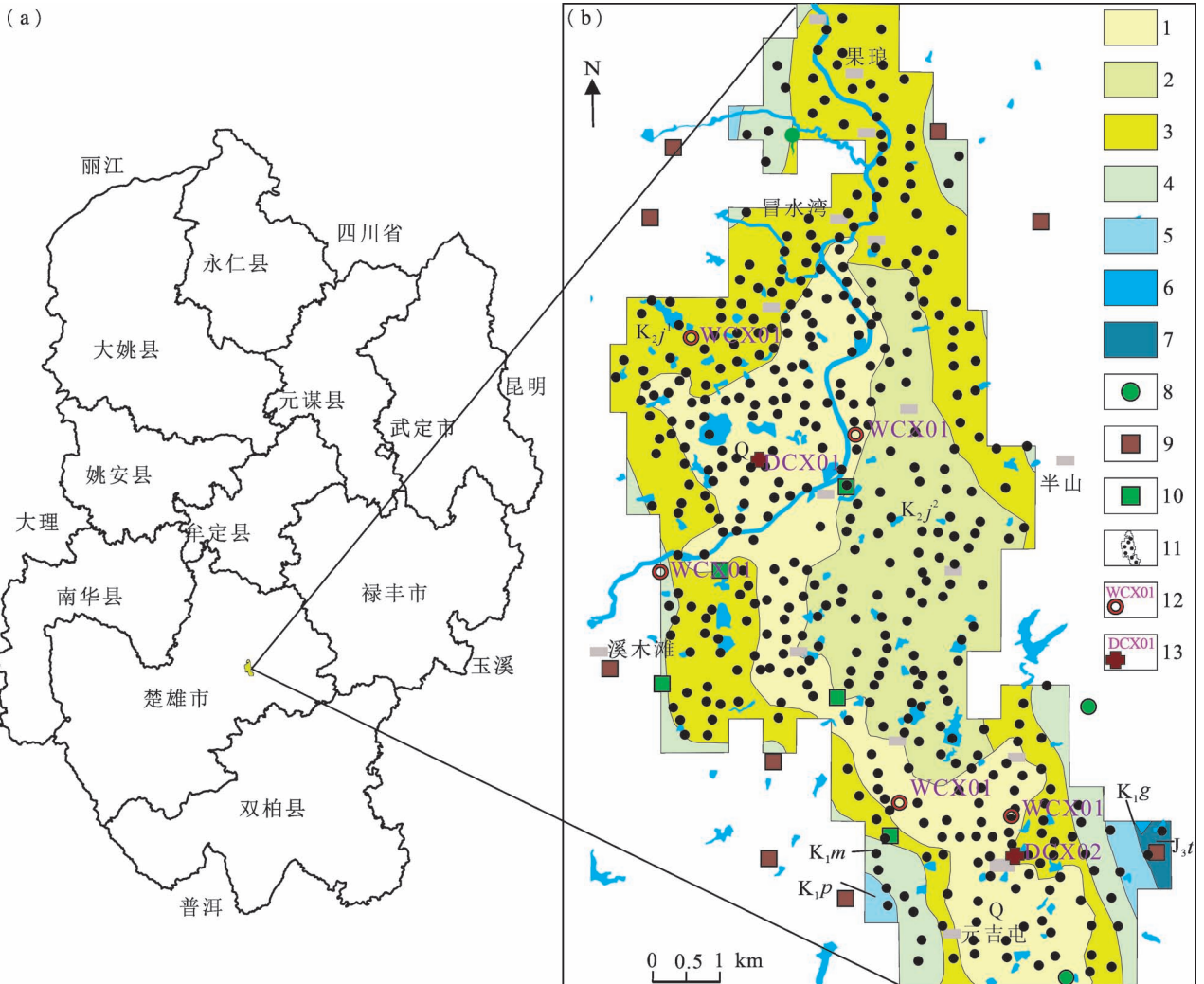


图1 滇中地质简图及采样点位置图

Fig. 1 Simplified geological map and sampling sites of the central Yunnan region

(a) 滇中交通位置示意图;(b) 采样位置图;1—第四系;2—白垩系上统江底河组二段;3—白垩系上统江底河组一段;4—白垩系下统马头山组;5—白垩系下统普昌河组;6—白垩系下统高峰寺组;7—侏罗系上统妥甸组;8—铜矿点;9—页岩砖厂;10—采石场;11—土壤采样点;12—灌溉水采样点;13—大气干湿沉降物布设点

(a) Transportation and location map of the central Yunnan region; (b) sampling site map; 1—Q; 2—K_{2j}²; 3—K_{2j}¹; 4—K_{1m}; 5—K_{1p}; 6—K_{1g}; 7—J_{3t}; 8—copper ore; 9—shale brick factory; 10—quarry; 11—soil sampling points; 12—irrigation water sampling points; 13—atmospheric dry-wet deposition points

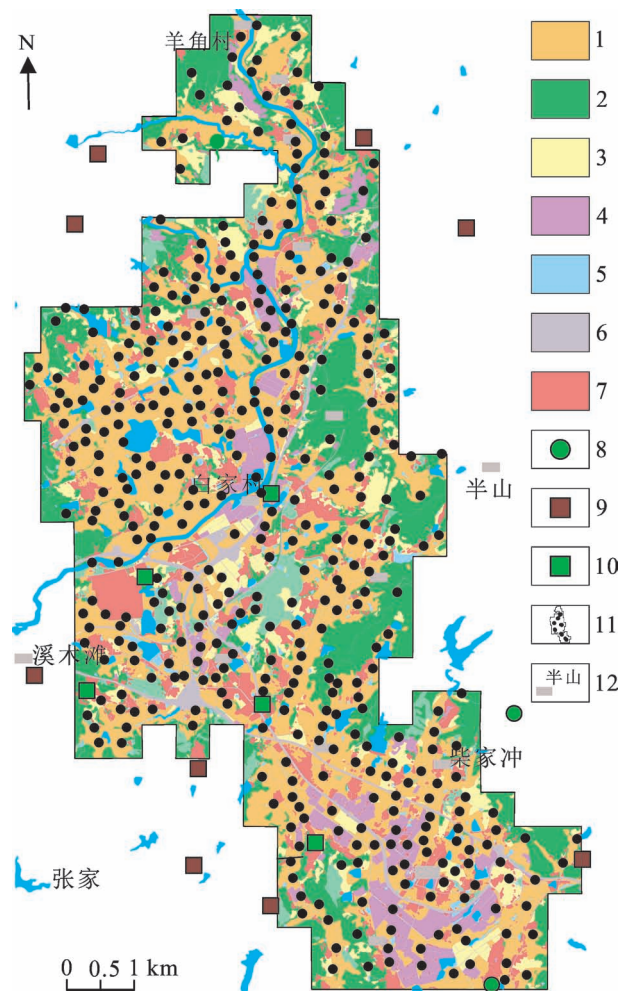


图2 滇中土地利用类型图

Fig. 2 Categories of land utilization of central Yunnan area

1—水田;2—林地;3—旱地;4—园地;5—河流水库;6—交通运输用地;7—其他用地;8—铜矿点;9—页岩砖厂;10—采石场;11—土壤采样点;12—村庄

1—Rice paddies; 2—woodland; 3—arid land; 4—garden area; 5—waterways and storage bodies; 6—transportation land; 7—miscellaneous land; 8—copper ore; 9—shale brick factory; 10—quarry; 11—soil sampling points; 12—Village

26.83%;旱地面积为4.62 km²,占比7.51%;其余土地利用类型为园地、河流水库、交通运输用地和其他用地(采矿用地、建筑用地和草地等)。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 表层土壤样品

根据《土地质量地球化学评价规范 DZ/T 0295-2016》规范要求,按照7点/km²的采样密度采集表层土壤样品,于2021年6月采集420件0~20 cm深度的表层土壤样品。在采样过程中,以设计的采样点为中心,在其周围30 m范围内采集3~5个子样,

并将其混合成一个土壤样品。现场记录包括样品编号、采样坐标、高程、取样深度、土壤类型、采样者及采样环境等信息。土壤样品在自然风干后,采用橡胶锤轻轻敲打以使胶结物中的颗粒解体,并剔除树根、石块等杂质。随后,通过0.84 mm孔径的标准尼龙筛进行筛分,将筛下物质混合均匀后取500 g装入聚乙烯瓶中,送往实验室进行分析。

1.2.2 大气干湿沉降物

2020年6月在研究区南部和北部,布设大气干湿沉降监测点2个,采用标准降尘缸收集总大气沉降物。采样周期为一年,收集缸内全部物质。降尘缸放置一年后,于2021年6月收集缸内全部物质,检测其中重金属含量及pH值。

1.2.3 灌溉水

在水稻灌溉高峰期(7月—8月),选择研究区内主要水源(或水库)的灌溉口处采集灌溉水样品。分析As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn、Cr⁶⁺、pH等指标。

1.2.4 肥料样品

在研究区所属的楚雄市范围内采集14件化肥样品。覆盖了区内常用肥料种类的90%以上,同时兼顾不同种类、不同厂家,每件样品重量1 kg,装于自封袋中,并送往实验室化验分析。

1.2.5 分析测试

样品分析测试工作由具有CMA资质的中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心分析测试实验室负责。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对Cu、Pb和Cd进行测定,利用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定Zn和Ni,通过原子荧光光谱法(AFS)测定As和Hg,采用压片制样—X射线荧光光谱法(XRF)测定Cr,并运用离子选择电极法(ISE)测定pH值(见表1)。在分析过程中,插入国家标准控制样品以监控数据的准确性,并通过重复样品监控分析数据的精密性。所有仪器设备的实际检出限均高于规范要求的检出限,且其准确度和精密性均超过各自的规范标准。实验室内部质量控制及外部监控结果通过中国地质调查局质量检查组的验收,表明所获得的分析数据具有可靠性,能够为后续的成图和综合研究工作提供支持。

1.3 评价方法

1.3.1 内梅罗综合污染评价法

根据不同土地利用类型的土壤样品pH值范围,依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中各重金属在农用地土壤污染风险筛选值作为评价标准,在单因子指

表 1 滇中样品分析方法配套方案

Table 1 Analysis parameters and methods of the sample from central Yunnan Province

指标	分析方法	仪器型号	水样规范检出限 (mg/L)	水样实际检出限 (mg/L)	土壤规范检出限 (mg/kg)	土壤实际检出限 (mg/kg)
As	AFS	XGY-1011A 原子荧光分光光度计	0.0004	0.0003	1	0.63
Hg	AFS	XGY-1011A 原子荧光分光光度计	0.05	0.00005	0.000 5	0.000 3
Cd	ICP-MS	iCAP QC 电感耦合等离子体质谱仪	0.004	0.001/0.004	0.03	0.03
Cu	ICP-MS	iCAP QC 电感耦合等离子体质谱仪	0.05	0.0001	1	0.46
Pb	ICP-MS	iCAP QC 电感耦合等离子体质谱仪	0.0004	0.00004	2	1
Ni	ICP-OES	iCAP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪	0.03	0.0001	2	1
Zn	ICP-OES	iCAP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪	0.01	0.0001	4	2
Cr	XRF	AxiosMAX X 射线荧光光谱仪	0.05	0.001	5	4
pH*	ISE	PHS-3C pH 计	0.1	0.1	0.1	0.1

注:pH为无量纲。

数法的基础上,采用内梅罗综合污染指数对土壤重金属污染状况进行评估。

在计算单因子指数法的同时,兼顾单项污染指数中的最大值,反应了土壤环境同时受到多种金属污染物影响的实际,还突出了污染较重的重金属污染物在整体环境质量的权重。其公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{i\text{max}})^2 + (P_{i\text{ave}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, C_i 为指标 i 的实测含量; S_i 为指标 i 的评价标准值; P_i 为土壤中指标 i 的单因子指数; $P_{\text{综}}$ 是采样点的内梅罗综合污染指数; $P_{i\text{max}}$ 是采样点中所有重金属污染指数的最大值; $P_{i\text{ave}}$ 是采样点中所有重金属污染指数的平均值。 P_i 和 $P_{\text{综}}$ 的分级标准见表 2。

表 2 单因子和综合污染指数评价标准

Table 2 Principle of grading for single pollution index and Nemer synthesis pollution index

等级	单因子指数 (P_i)	综合污染指数 ($P_{\text{综}}$)	污染程度
1	<1	<0.7	无污染
2	1.0~2.0	0.7~1.0	警戒值
3	2.0~3.0	1.0~2.0	轻度污染
4	3.0~5.0	2.0~3.0	中度污染
5	>5.0	>3.0	重度污染

1.3.2 潜在生态危害指数法

瑞典学者 Hakanson 的潜在生态危害指数法从重金属毒性出发,综合考虑了重金属含量、污染水平、毒性水平等因素,广泛应用于(土壤或)沉积物中重金属污染评价,公式为:

$$E_{r,i} = T_i \times \frac{C_i}{S_i} \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{r,i} \quad (4)$$

式中, $E_{r,i}$ 为单种重金属的潜在生态危害系数; C_i 为重金属 i 实测含量,单位为 mg/kg; S_i 为各重金属的农用地土壤污染风险筛选值,单位为 mg/kg; T_i 为重金属 i 的毒性响应系数。参照徐争启等人的研究,各元素毒性响应系数为 Zn=1、Cr=2、Cu=5、Pb=5、Ni=5、As=10、Cd=30、Hg=40(徐争启,2008;陈方伟,2025); RI 为多种重金属的综合潜在生态风险指数,为所有重金属 $E_{r,i}$ 之和。 $E_{r,i}$ 和 RI 等级划分标准见表 3(引自陈方伟,2025)。

表 3 潜在生态风险指数划分标准

Table 3 Classification standards of potential ecological risk assessment

$E_{r,i}$	污染程度	RI	生态风险等级
$E_{r,i} < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_{r,i} < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_{r,i} < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_{r,i} < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_{r,i} \geq 320$	极强		

1.3.3 正定矩阵因子分析法

正定因子矩阵分析法(PMF)广泛用于土壤污染源解析,采用多元因子分析类模型,将受体重金属元素浓度 $X(n \times m)$ 分解成因子谱矩阵 $F(p \times m)$ 、因子贡献矩阵 $G(n \times p)$ 两个因子矩阵和一个残差矩阵 $E(n \times m)$ 。解析上述矩阵时,通过定义一个“目标函数” Q 。当“目标函数” Q 值最小时,模型将 X 矩阵分解成因子贡献矩阵 G 和因子谱矩阵 F (牛明芬,

2024)。运算过程为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p (G_{ik} \times F_{kj}) + E_{ij} \quad (5)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p (G_{jk} \times F_{kj})}{U_{ij}} \right]^2 \quad (6)$$

式中: X_{ij} 为第*i*个样品中第*j*个化学成分测定值,单位为mg/kg; F_{kj} 为第*k*种源中第*j*个化学成分计算值; G_{ik} 为第*k*种源对第*i*件样品的贡献值; E_{ij} 为第*i*件样品中第*j*个化学成分的残差; U_{ij} 为第*i*件样品中第*j*个化学成分的不确定度。

根据前人的研究结果,土壤中各种重金属不确定度可用公式(7)计算,公式如下:

$$U_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(C \cdot EF)^2 + 0.5 \cdot MDL^2} & C > MDL \\ \frac{5}{6}MDL & C < MDL \end{cases} \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量与分布特征

2.1.1 表层土壤重金属参数统计

研究区土壤pH平均值为6.78,整体呈中性,有利于重金属保持结合态而不溶出,降低了重金属污染的风险(表4)。表层土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn平均含量分别为6.77、0.34、78.62、40.37、0.05、34.26、28.79和76.37 mg/kg,中位数分别为6.57、0.24、80.8、34.1、0.05、35.35、28.7和78.1 mg/kg,各元素含量平均值和中位数均未超过

农用地土壤风险筛选值。但是Cd高于农用地风险筛选值的比例为14.52%,高于农用地风险管制值的比例为1.67%,表明研究区土壤可能存在Cd污染,需进一步明确其来源。

相比云南省土壤背景值(侯青叶,2020),各元素富集系数由高到低依次为Cd(1.25)>Cu(1.01)>Ni(0.90)>Cr(0.86)>Zn(0.8)>Hg(0.77)>Pb(0.74)>As(0.64)。表明As、Pb、Hg、Zn平均值明显低于云南省土壤背景值,呈相对贫化状态;Cr、Ni、Cu平均值与各自的云南省土壤背景值相对持平;Cd平均值为0.34 mg/kg,高于云南省土壤背景值,富集系数为1.25,呈富集状态;相比全国冲积平原景观区土壤背景值,除As外,其他重金属元素普遍呈富集状态,各元素富集系数由高到低依次为Cd(2.62)>Cu(1.84)>Hg(1.43)>Ni(1.27)>Zn(1.21)>Pb(1.20)>Cr(1.19)>As(0.75),可能受到自然或人为因素的影响。

变异系数(CV)为标准差与平均值的比值,用以表征数据的离散程度(戴慧敏,2012)。CV \geq 1时,数据呈强变异;0.1<CV<1时,数据呈中等变异;CV \leq 0.1时,数据呈弱变异。各重金属变化系数由高到低依次为Cd(1.09)>Cu(1.05)>Hg(0.60)>As(0.31)>Zn(0.24)>Ni(0.23)>Pb(0.17)>Cr(0.14)。Cd、Cu的变化系数均大于1,为强变异,表明Cd、Cu受人类活动影响最大。其他重金属含量为中等变异。

2.1.2 不同地层土壤重金属含量

为探究成土母质对土壤重金属含量的控制作用,对比分析了不同地层单元土壤重金属平均含量

表4 滇中土壤重金属含量(mg/kg)参数统计

Table 4 Statistical parameters of heavy metal concentrations (mg/kg) in the soils from central Yunnan Province

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH
平均值	6.77	0.34	78.62	40.37	0.05	34.26	28.79	76.37	6.78
中位数	6.57	0.24	80.8	34.1	0.05	35.35	28.7	78.1	6.98
标准离差	2.09	0.37	11.22	42.39	0.03	8.04	5.01	18.31	0.95
变化系数	0.31	1.09	0.14	1.05	0.6	0.23	0.17	0.24	0.14
最大值	27.2	3.03	109	716	0.31	58	52.9	154	8.25
最小值	2.32	0.045	43.8	17.4	0.009	13.5	16.2	27.7	4.21
富集系数	0.64	1.25	0.86	1.01	0.77	0.9	0.74	0.8	1.1
云南省土壤背景值	10.6	0.269	91	40	0.07	38	39	96	6.14
全国冲积平原景观区	9	0.13	66	22	0.035	27	24	63	7.96
土壤风险筛选值	30	0.4	250	150	0.5	70	100	200	/
土壤风险管制值	150	2	850	/	2.5	/	500	/	/

注:pH为无量纲;富集系数为平均值与云南省土壤背景值(参考《中国土壤地球化学参数》(侯青叶等,2020))的比值,土壤风险筛选值和管制值引自《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018); $n=420$ 。

表 5 滇中不同地层单元的土壤重金属平均含量 (mg/kg)

Table 5 Average concentrations (mg/kg) of heavy metals in soils from different stratigraphic units from central Yunnan Province

指标	指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH
第四系 (n=148)	148	6.93	0.36	76.98	36.54	0.06	31.68	29.64	71.76	6.9
江底河组二段 (n=85)	85	6.78	0.27	84.63	37.61	0.04	39.01	28.13	84.31	7.17
江底河组一段 (n=156)	156	6.77	0.37	78.67	47.47	0.05	34.77	28.81	77.24	6.48
马头山组 (n=25)	25	5.81	0.26	71.33	33.2	0.04	31.18	26.47	70.01	6.45
普昌河组 (n=4)	4	4.95	0.34	70.13	29.1	0.04	29.55	26.28	76.05	6.79
妥甸组 (n=2)	2	8.5	0.54	63.8	26.25	0.05	25.8	25.05	63.75	6.87

注:pH为无量纲。

表 6 滇中大气干湿沉降物重金属含量

Table 6 Heavy metal concentrations in atmospheric dry and wet deposition from central Yunnan Province

样品号	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH
DCX01(上清液)	1.91	0.066	2.83	2.29	0.033	2.96	0.05	6.91	6.83
DCX08(上清液)	1.12	0.057	1.49	4.47	0.015	1.66	0.94	3.54	6.38
DCX08(尘粒)	7.26	1.61	49.7	114	0.119	14.9	141	270	

注:pH为无量纲,干沉降中元素含量单位为 mg/kg,湿沉降中元素含量单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

(表 5)。统计结果显示,Cu 含量在不同地层间存在较大差异。其中,江底河组一段土壤中 Cu 平均含量(47.47 mg/kg)显著高于其他地层,这与该层位是区域重要砂岩型铜矿赋矿层的地质事实相符,直接证明了成土母质是控制土壤 Cu 空间分异的决定性因素。江底河组二段则呈现 Cr、Ni、Zn 协同富集的特点。第四系土壤中 Hg 含量相对较高,而该区域人类活动频繁,暗示了人为输入的可能。综上所述,土壤重金属的“本底值”与空间分布格局,主要受其下伏母岩(地层)的岩性及成矿专属性控制,这构成了研究区土壤重金属最基础的自然背景源。

2.2 潜在输入源重金属含量分析

2.2.1 大气干湿沉降物

在研究区南部和北部共部署 2 个大气干湿沉降观测点,用口径为 58.5 cm 的降尘缸按要求采集了

研究区内大气干湿沉降物,共获取 2 件上清液样品和 1 件尘粒样品。结果显示:研究区南部大气中 Cd 含量要高于北部(表 6),可能与该地区村落聚集有关。但位于龙川江附近的观测点 DCX01 未收集到尘粒样品,说明龙川江附近 Cd 的高值区并不是大气沉降引起的。

2.2.2 灌溉水

在研究区主要的灌溉水来源(龙川江、冷水凹水库、小寨山水渠和河心水渠)采集 5 件灌溉水样品。统计结果显示(表 7),各指标含量值远低于农田灌溉用水水质要求的限制值,处于安全水平。表明灌溉水并非土壤重金属的主要来源。

表 7 滇中灌溉水样品重金属含量 ($\mu\text{g/L}$) 统计Table 7 Analysis of heavy metal concentrations ($\mu\text{g/L}$) in irrigation water samples from central Yunnan Province

指标	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn	Cr ⁶⁺	pH*
平均值	1.76	0.036	1.344	0.02	0.303	4.24	0.5	8.26
最小值	1	0.025	0.68	0.02	0.045	1.35	0.5	7.8
最大值	2.6	0.08	1.72	0.02	0.63	6.38	0.5	8.8
限制值	50	10	500	1	200	2000	100	5.5~8.5

注:pH为无量纲,其他含量单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

表 8 滇中肥料样品重金属含量统计

Table 8 Analysis of heavy metal concentrations in fertilizer samples from central Yunnan Province

指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH值
平均值	13.38	0.41	20.34	2.72	0.41	4.40	12.31	920.40	5.64
最小值	0.12	0.01	1.49	0.05	0.00025	0.05	0.44	1.16	2.73
最大值	43.25	1.11	59.99	8.08	1.74	9.44	55.26	4371.73	8.92
土壤风险筛选值	30	0.4	250	150	0.5	70	100	200	/
土壤风险管制值	150	2	850	/	2.5	/	500	/	/

注:pH为无量纲,其他含量单位为 mg/kg。

2.2.3 肥料

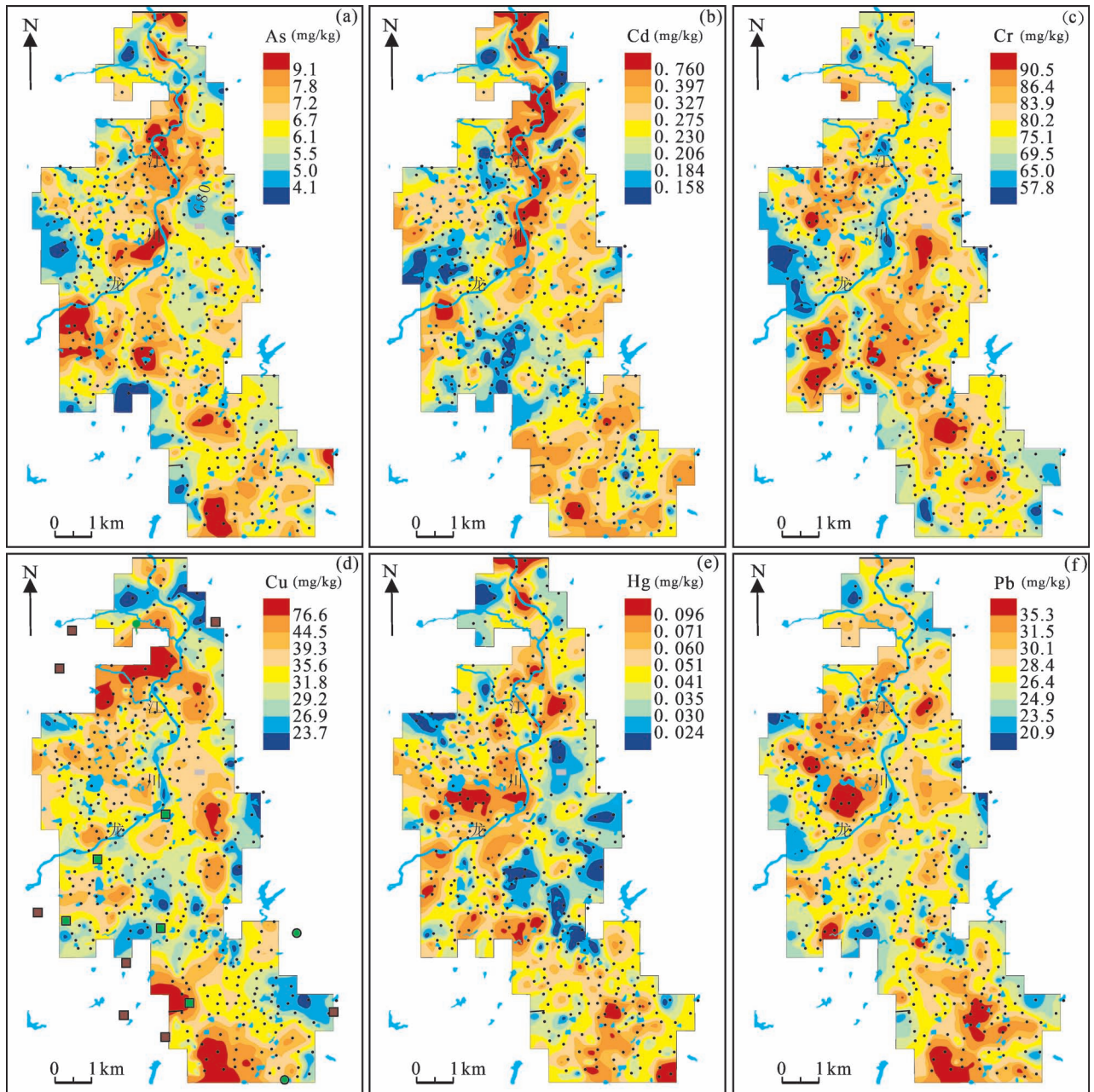
共采集了10件肥料样品,涵盖复合肥、尿素以及水溶性肥料等种类,基本涵盖了区内农业活动中常用的各类肥料(表8)。结果表明:研究区内肥料中镉(Cd)的平均含量为0.41 mg/kg,最大值达1.11 mg/kg;砷(As)含量的最大值为43.25 mg/kg,二者均超出了土壤风险筛选值。这说明肥料中通常含有一定的重金属杂质,肥料的不合理使用会向农田大量排放砷和镉,导致土壤重金属的超标。

综上所述,研究区内灌溉水和大气干湿沉降对土壤重金属含量影响较小,并非土壤重金属的主要来源。肥料的不合理使用可能会增加土壤重金属的

含量。

2.3 土壤重金属空间分布特征

使用空间插值法绘制各土壤重金属的地球化学图(图3),用以分析其空间分布特征(黄波涛,2022)。结果显示: Cd、As 高值沿龙川江两岸呈明显的线性分布,指示其分布模式与河流密切相关。然而,对研究区主要灌溉水源(包括龙川江)的水质检测结果表明(表7),其重金属含量远低于农田灌溉用水标准限值。因此,可以排除现状灌溉水是导致沿岸土壤 Cd、As 富集的主要直接来源。Cr、Ni、Zn 分布趋势较一致,高值区呈点状零星分布于研究区中部; Cu 高值区主要位于南部、西北部的上白垩统



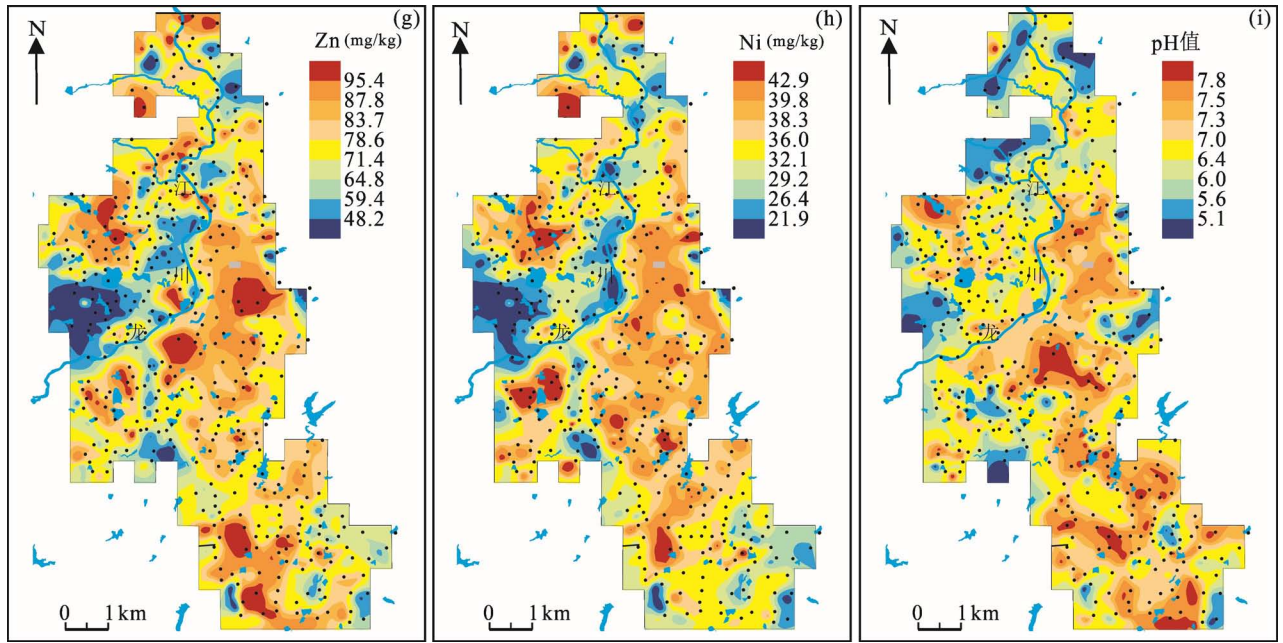


图3 滇中土壤重金属分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of heavy metals in soils from central Yunnan Province

(a) As 地球化学图; (b) Cd 地球化学图; (c) Cr 地球化学图; (d) Cu 地球化学图; (e) Hg 地球化学图;

(f) Pb 地球化学图; (g) Zn 地球化学图; (h) Ni 地球化学图; (i) pH 值地球化学图

(a) Distribution map of As; (b) distribution map of Cd; (c) distribution map of Cr; (d) distribution map of Cu; (e) distribution map of Hg; (f) distribution map of Pb; (g) distribution map of Zn; (h) distribution map of Ni; (i) distribution map of pH

江底河组地层中。Pb、Hg 高值区与村庄和大棚种植区套合较好,这暗示其富集可能主要来源于农业生产(如农药、肥料施用)与生活污染(如废弃物)等人为输入。这些高值区主要分布于乡镇建成区及中部的白家村一带;pH 低值区(酸性)主要分布于研究区西北部和西部,土地利用类型多为林地,该区域的样品点土地利用类型确以林地为主。酸性条件可能增强了重金属的活性和生物有效性,需引起关注。高值区(碱性)集中分布于中部陈家村一带。

2.4 土壤重金属污染评价

2.4.1 内梅罗综合污染评价

严格按照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)》规范要求,选择不同土地利用类型在不同 pH 值区间的重金属污染风险筛选值作为评价标准(周思雨, 2024),在单因子指数法的基础上,运用内梅罗综合污染指数对土壤重金属污染状况进行评价(江峰, 2024)。

全区内梅罗综合污染指数平均值为 0.616, 低于污染阈值(0.7), 表明从整体均值看, 土壤污染风险较低。然而, 该指数变异范围大(0.206~5.263), 且有约 10% 的样点处于不同等级的污染状态, 说明存在显著的局部污染风险。其中有 82.62% 的样品 $P_{综}$ 小于 0.7, 无污染风险; 有 7.38% 的样品 $P_{综}$ 介于 0.7~1 之间, 达到污染警戒值; 有 6.67% 的样品 $P_{综}$ 介于 1~2 之间, 为轻度污染; 有 1.90% 的样品 $P_{综}$ 介于 2~3 之间, 为中度污染; 有 1.43% 的样品 $P_{综}$ 大于

表9 滇中内梅罗指数评价结果

Table 9 Nemerow index assessment from central Yunnan Province

土地利用类型	水田	林地	旱地	园地	河流水库	交通用地	其他	全区
As	0.266	0.231	0.222	0.226	0.355	0.241	0.269	0.259
Cd	0.612	0.897	0.795	0.883	1.869	0.650	0.483	0.678
Cr	0.269	0.414	0.441	0.401	0.272	0.400	0.369	0.302
Cu	0.542	0.827	0.540	0.210	0.325	0.373	0.326	0.533
Hg	0.097	0.013	0.017	0.021	0.020	0.020	0.008	0.078
Ni	0.350	0.369	0.400	0.335	0.157	0.339	0.272	0.351
Pb	0.226	0.244	0.260	0.248	0.165	0.248	0.174	0.229
Zn	0.308	0.325	0.342	0.345	0.285	0.326	0.307	0.313
$P_{综}$	0.575	0.826	0.695	0.685	1.372	0.514	0.396	0.616
样品数	323	19	44	18	8	2	6	420

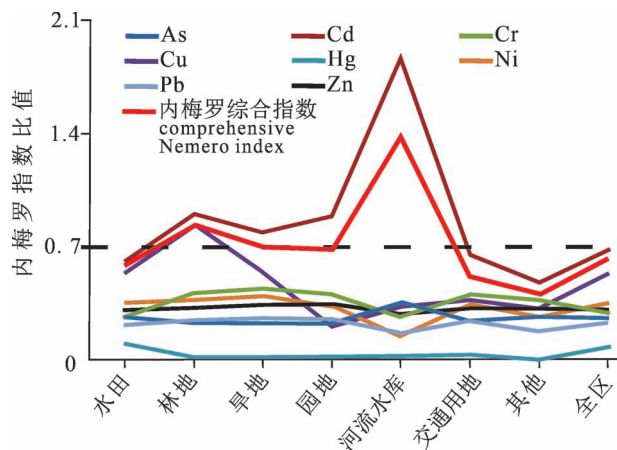


图4 滇中不同土地利用类型内梅罗指数的比值

Fig. 4 Ratio of the Nemerow index among different land use types from central Yunnan Province

3,已达到重度污染水平。

从不同的土地利用类型的内梅罗综合污染指数上看,河流水库>林地>旱地>园地>全区>水田>交通运输用地>其他(采矿用地、建筑用地和草地等),这表明,在本次研究区域内,河流水库周边土壤的重金属综合污染指数最高,其环境质量需予以重点关注(图4,表9)。值得注意的是,由于不同土地利用类型的土壤环境背景及受人为干扰程度存在差异,对其污染指数进行直接比较时需结合具体来源进行解读。

此外,全区内梅罗综合污染指数的变化趋势与Cd的单因子指数折线高度相似,说明Cd是影响研究区土壤重金属综合污染评价的主要贡献元素。因此,建议加强对龙川江流域的环境质量监测,并从源头控制Cd等重金属的输入,以降低区域土壤污染风险。

从单项重金属上看,河流水库的Cd单因子指数为1.869,污染程度达到警戒值(P_i 介于1~2之间)。其他土地利用类型的单项重金属单因子指数

表10 滇中土壤重金属潜在生态风险指数

Table 10 Potential ecological risk index of heavy metals in soils from central Yunnan Province

类型	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	RI
平均值	2.59	20.34	0.60	2.66	3.13	1.75	1.15	0.31	32.54
最小值	0.65	4.50	0.34	0.54	0.11	0.45	0.40	0.14	12.82
最大值	10.88	196.00	1.45	35.80	20.67	4.82	2.56	0.62	244.96

范围为0.008~0.897,均小于1,表明这些土地利用类型的单项重金属均无污染风险。

2.4.2 潜在生态风险评价

所有重金属综合潜在生态风险指数变化范围为12.82~244.96,平均值为32.54,总体上为轻微生态危害(表10)。但是有4件样品RI介于150~300之间,危害等级为中等(表11)。

表11 滇中土壤重金属潜在生态风险指数分布情况

Table 11 Distribution of the potential ecological risk index for soil heavy metals from central Yunnan Province

指标	各级样品数				
	轻微危害	中等危害	强危害	很强危害	极强危害
As	420	0	0	0	0
Cd	390	19	9	2	0
Cr	420	0	0	0	0
Cu	420	0	0	0	0
Hg	420	0	0	0	0
Ni	420	0	0	0	0
Pb	420	0	0	0	0
Zn	420	0	0	0	0
RI	416	4	0	0	0

除Cd外,其余重金属的潜在生态危害系数 $E_{r,i}$ 最大值和平均值均不超过40,单元重金属潜在生态风险从大到小依次为Cd>Hg>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn,均为轻微危害,生态风险较低。Cd的 $E_{r,i}$ 平均值为20.34,整体为轻微危害,但是有19件样品Cd的 $E_{r,i}$ 值介于40~80之间,为中等危害;有9件样品Cd的 $E_{r,i}$ 值介于80~160之间,危害等级较强;有2件样品Cd的 $E_{r,i}$ 值介于160~320之间,危害等级很强。说明研究区土壤的主要生态风险来自于Cd元素。

利用幂指数加权法对研究区潜在生态风险指数进行空间插值分析。可知RI指数总体呈中间低两边高的分布趋势。高值区主要集中于龙川江两岸,沿河流呈线状展布。另一高值区位于南部元吉屯周边,呈块状分布。低值区主要位于中部张家屯—戴家屯一带(图5)。

2.5 土壤重金属源解析

2.5.1 聚类分析

对8种重金属元素进行R型聚类分析。当相关系数在0.39时,可分成Cr—Ni—Zn、

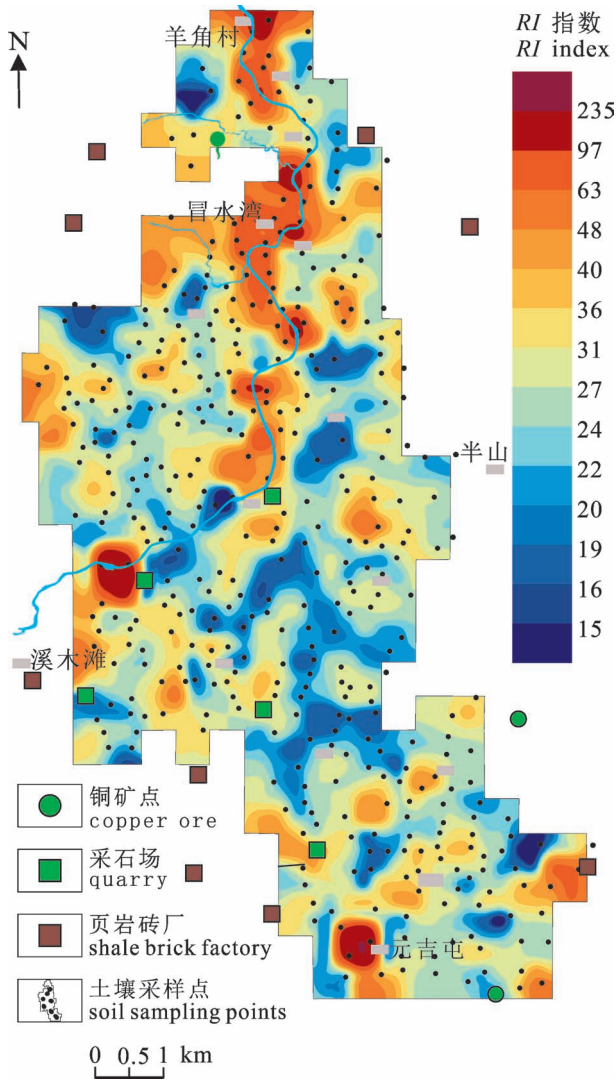


图5 滇中 RI 指数空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of the risk index (RI) from central Yunnan Province

As—Cd、Hg—Pb、Cu 等 4 类元素组合(图 6)。Cr—Ni 和 Cr—Zn 相关系数分别为 0.88、0.74, 表明这 3 种元素可能为伴生关系或者有相同的来源(曾庆庆, 2021)。且 Cr、Ni、Zn 这 3 种元素与 TFe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 的相关系数均在 0.7 以上, 为极显著正相关。在地质演化过程中, TFe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 是成土过程中基岩风化后的重要产物, 通常自然来源的元素与这些元素具有较强的相关性(王乔林, 2021)。As—Cd, 相关系数为 0.50, 为显著正相关, 指示 As、Cd 可能同源或伴生。Hg、Pb 二者相关系数为 0.398, 为正相关关系。在相关水平为 0.35 和 0.32 时, Hg 开始与 Cd、As 等元素聚合, 表明区内 Hg 受到多种因素的影响, 可能具有多种来源。Cu 具有独立性, 与区内白垩系上统江底河组一段关系密切。区内白垩系上统江底河组一段岩性主要为紫红色薄层状泥岩夹灰紫色薄层泥岩、钙质泥岩。吴鹏(2009)在《楚雄盆地砂岩型铜矿床地质地球化学及找矿预测研究》中提出了砂岩型铜矿床“紫化聚铜”的新模式, 认为含氧的成矿流体从紫色砂岩向浅色砂岩迁移时, 会导致 Cu 的聚集和砂岩的紫色化。铜在遇到氧化—还原界面时停止迁移, 并最终沉淀于紫色砂岩中。

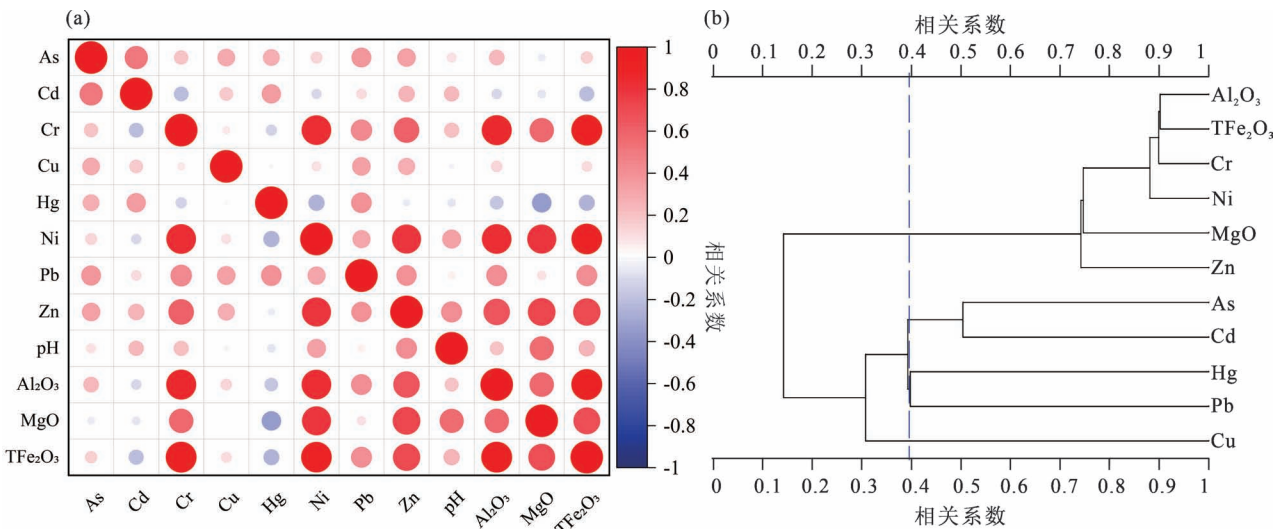


图6 滇中重金属元素聚类分析相关系数及谱系图: (a) 相关性热图; (b) R 型聚类分析谱系图

Fig. 6 Combined visualization of the correlation matrix and dendrogram from the cluster analysis of heavy metal elements from central Yunnan Province: (a) the hot spot analysis; (b) pedigree diagram for R-type cluster analysis

2.5.2 PMF 源解析

为进一步明确重金属污染物的主要来源,采用正交矩阵因子分解模型(PMF)进行源解析。在各元素的检出限基础上,计算各元素的不确定度。将重金属元素的含量数据及其不确定度输入 PMF5.0 软件中。设置因子数为 2、3、4、5、6 和 7,并将运行次数设定为 20 次。经过多次参数调整,当因子数设定为 5 时,仅获得一组 $Q(\text{robust})$ 和 $Q(\text{true})$ 值,且 $Q(\text{robust}) = Q(\text{true}) = 814.5$,二者比值为 1 (小于 1.5)。此时,各元素的数据噪声比(S/N)最小值为 2.3 (大于 2),重金属元素含量的实测值与预测值的拟合曲线结果的最小 r^2 值为 0.617 (大于 0.6),表明各元素的模拟值与真实值之间的契合度较高,模型的解析效果良好(见表 12)。

表 12 模型拟合参数

Table 12 Parameters for model calibration

指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
S/N	7.9	3.7	8.7	9	2.3	8.9	8.8	8.9
r^2	0.994	0.927	0.809	0.999	0.617	0.954	0.882	0.896

PMF 模型解析出 5 个因子(图 7)。其中,因子 1 的贡献为 29.65%。此因子对 Ni、Zn 和 Cr 的贡献率依次为 64.8%、58.8% 和 51.8%。在 5 个因子当中,因子 1 对 Ni、Zn、Cr 的贡献率均处于最高水平。聚类分析结果显示,Cr、Ni 和 Zn 之间存在极为显著的正相关关系($P < 0.01$),并且与 TFe_2O_3 、 MgO 和 Al_2O_3 等氧化物的相关系数均超过 0.7,呈现出极显著的正相关性。在地质演化进程中, TFe_2O_3 、 MgO 和 Al_2O_3 是成土过程中基岩风化后的重要产物。通常情况下,自然来源的元素与这些氧化物具有较强的关联性(张晓娟,2017)。此外,因子 1 对 Pb 和 As 的贡献率分别为 35.6% 和 26.2%。表 4 的统计结果表明,Cr、Ni 和 Zn 相对于云南省土壤背景值的富集系数分别为 0.86、0.9 和 0.8,这意味着研究区域内 Cr、Ni 和 Zn 的平均含量与云南省的土壤背景值较为接近,其在土壤中的主要来源为成土母质(潘泳兴,2024)。由此可以推断,因子 1 代表自然背景来源,反映了红层母质风化的基础性贡献;因子 2 的占比为 23.33%。其对 Hg 的贡献率高达 70.5%,对 Pb 和 Cr 等元素的贡献率次之。有研究指出,土壤中汞的主要来源是大气的干湿沉降(范晨子,2022)。楚雄州作为云南省的主要烤烟种植区,常常需要借助燃煤来烘干烤烟,而煤炭中含有一定量的汞。在燃烧过程中,汞被释放到大气中,随后通过

降雨以及自然沉降等方式,以干湿沉降物的形式进入土壤,并逐渐积累。汽车的轴承、刹车片和轮胎等部件中可能含有铅、铜、铬等金属(徐贝贝,2024)。研究区域内有多条公路,作为重要的交通干道,车流量较大。在汽车行驶过程中,机器零件的摩擦和磨损会将微量的铅、铜、铬金属颗粒释放到空气中。轮胎与路面的磨损也会产生含铅的粉尘。这些粉尘经过沉降后会渗入土壤,进而增加土壤中铅、铜、铬等重金属的含量。从元素的空间分布特征来看,汞的高值区主要集中在第四系地层中,该区域人类活动相对频繁,尤其是在交通线路两侧以及居民集中生活区,汞和铅的含量相对较高。因此,可以推测因子 2 主要来源于燃煤、交通粉尘和尾气,属于大气沉降来源。

因子 3 的占比为 17.75%。其对 Cd 的贡献率高达 90.3%,对 As 的贡献率为 18.9%。从元素的空间分布特征进行分析,镉、砷的高值区域主要沿着龙川江河流呈线性分布。前文曾提到,研究区内流水库的 Cd 污染程度已达警戒值。龙川江作为楚雄的“母亲河”,发源于楚雄州南华县天子庙坡东侧。而楚雄州的矿产资源极为丰富,是天然的土壤重金属高背景值区域。龙川江搬运的红层风化产物是 Cd 富集的主要载体。在岩石风化、河流冲刷和水土流失的作用下,岩石矿物中的 Cd 进入到龙川江水体当中,并以悬浮物的形式随着水流搬运迁移。当龙川江流经楚雄市区,到达研究区的平原地带时,流向开始由西东转向南北,由于江面变宽,水动力减弱,再加上第四系有机质和黏土的吸附作用,含 Cd 的悬浮物最终沉降在河漫滩上。研究区地貌为山前冲积扇,携带的泥沙在河道两侧不断沉积,河漫滩上土壤肥沃,最终被开发为农田。因此,河流两侧农田的 Cd 含量较高,沿河流呈线性分布。这就是河流两岸土壤重金属 Cd 的主要来源(杨忠芳,2008)。有研究显示,城市生活垃圾和生活污水中含有较多的镉,其主要来源于居民日常生活中所使用的含镉产品,比如废旧电池、电子产品等。如果未经有效处理就直接排放至河流中,会使河流中的镉含量增加,进而导致下游出现镉污染。另外,农药、化肥中通常含有大量的 As 和 Cd。不合理地使用农药化肥会向环境中排放大量的砷和镉(秦元礼等,2020),若来不及降解,就会随灌溉水重新进入农田生态系统,造成二次污染。因此,因子 3 主要代表河流沉积与农业活动混合来源,与地质背景、人类活动和农业生产有关。

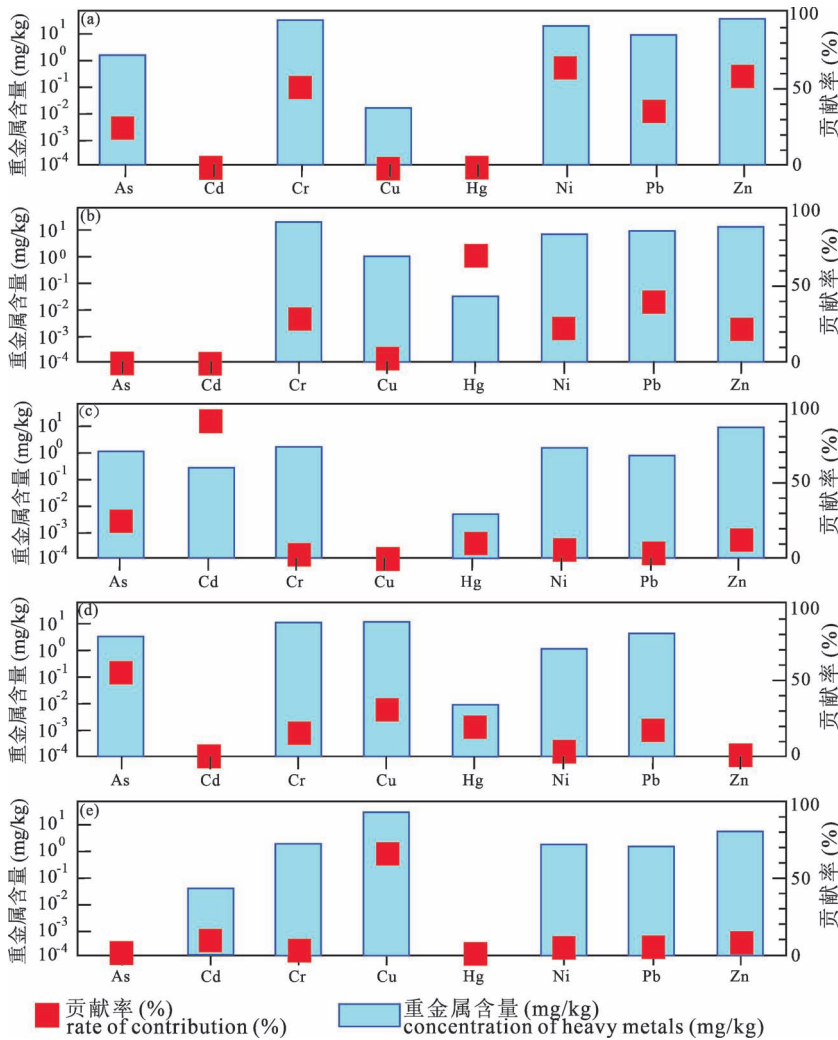


图7 滇中土壤重金属PMF模型解析污染源成分谱

Fig. 7 Soil heavy metal PMF model analysis of pollution source composition spectrum from central Yunnan Province

(a) 自然背景来源成分谱;(b) 大气沉降源成分谱;(c) 混合源成分谱;

(d) 农业活动源成分谱;(e) 矿化地层成分谱

(a) Natural background source, (b) atmospheric deposition source, (c) mixed source,

(d) agricultural activity source, and (e) mineralized strata source

因子4的占比为17.54%,对As、Cu、Hg、Pb的贡献率分别为54.9%、30.6%、19%和17.2%。其标识性元素为As、Cu。从As、Cu元素的空间分布来看,高值区主要集中在第四系地层中。该地层连片分布于山间盆地及河流阶地等部位,属于冲积、洪积、坡残积相沉积,成分为砾石、砂砾石、砂、粉砂、黏土等,地势较为平坦,多被改造为农田或耕地。区域内以水稻种植、大棚种植及村庄聚集为特征,农业活动极为频繁。在农业生产过程中,农药和肥料的使用量普遍高于其他区域(如楚雄地区肥料的使用)。已有研究表明,农药和肥料中均含有砷、汞、铜、铅等

重金属,频繁使用会导致这些重金属在土壤中累积(申汝佳,2024)。因此,推测因子4为农业活动源。

因子5的占比为11.74%,其中Cu为主要的贡献元素,贡献率达66.6%,其余元素的贡献率均低于10%。研究显示,白垩系上统江底河组一段地层的岩性主要为紫红色泥岩和灰紫色泥岩等,而这正是区内砂岩型铜矿的赋矿层位(韩润生,2010)。该因子贡献的Cu空间分布与已知铜矿点及赋矿地层(江底河组一段)高度吻合。这不仅证实了成土母质(含矿地层)的控制作用,也强烈暗示了局部矿业活动(如矿石堆存、尾矿扩散)可能是加剧该因子贡献的重要人为驱动因素。因此,因子5代表了与矿业活动相关的矿化地层源。

2.5.3 地质背景与人为活动的综合影响讨论

PMF源解析结果与空间分布特征表明,研究区土壤重金属来源是自然过程与人为活动共同作用的结果。因子1(自然背景源)和因子5(矿化地层源)共同揭示了地质背景的主导作用,贡献率合计超过41%。特别是因子5,其贡献的Cu空间分布与江底河组一段地层及已知铜矿点高度吻合。这不仅证实了成土母质的控制作用,也强烈暗示历史及潜在的矿业活动(如矿石堆存、尾矿风化淋滤)可能通过径流、扬尘等途径,对矿区周边土壤产生局部叠加污染。因子3(河流沉积与农业活动混合源)和因子4(农业活动源)则突出了农业生产(化肥、农药施用)和河流输送对Cd、As等元素累积的重要贡献,尤其是在龙川江沿岸及农业密集区。因子2(大气沉降源)则与交通、燃煤等区域人为排放活动相关。因此,研究区土壤重金属治理需在高地质背景的前提下,重点管控人为活动输入。

3 结论

(1) 研究区土壤重金属污染整体处于安全水平

(内梅罗综合污染指数均值 0.616)。空间分析表明,Cd 是需重点关注的元素,其在龙川江沿岸的相对富集与河流沉积输入密切相关,导致周边区域成为风险管理的重点区域。

(2) 潜在生态风险评价表明,研究区总体生态危害轻微。各重金属生态风险顺序为 $Cd > Hg > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$, 均属轻微危害等级。需注意的是,Cd 是贡献最主要的元素,其在个别点位的潜在风险值相对突出,提示在后续管理中应对此类点位予以优先关注。

(3) 源解析结果表明,土壤重金属主要受自然背景(成土母质风化,贡献率 29.65%)和人类活动(大气沉降、农业与河流沉积混合源等)共同影响。其中,特定地质背景(含矿地层)是 Cu 等元素的明确来源。这为实施分区分类的源头管控策略(如重点防控大气沉降与农业面源,关注地质高背景区)提供了直接依据。

(4) 综上所述,研究区土壤环境质量总体优良,呈中性(平均 $pH = 6.78$),土壤重金属污染与生态风险总体较低。需关注 Cd 元素在龙川江沿岸局部的空间富集特征,并依据其复合来源(如河流沉积、农业活动等)开展精准防控。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈方伟,李聪,郭军,张程安,毛雄,汤恒佳,廖琦,陈创. 2025. 洞庭湖及其支流沉积物重金属分布特征、风险及影响因素分析. 地质论评, 71(5): 1687~1700.
- 戴慧敏,代雅键,马振东,杨忠芳,宫传东,孙中任. 2012. 大兴安岭查巴奇地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向. 现代地质, 26(5): 1043~1050.
- 董磊,翟文亮,潘雄,林莉,张胜. 2022. 龙川江上游典型小流域农业面源污染物排放特征与评价. 安徽农业科学, 50(2): 59~65+71.
- 董鑫,胡浩然,张晓晴,任大军,张淑琴. 2024. 基于 Meta 分析的矿区周边土壤重金属污染特征及风险评价. 地学前缘, 31(2): 93~102.
- 范晨子,刘永兵,袁继海,郭威,孙冬阳,刘成海. 2022. 滇中典型工矿业城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价. 环境科学, 43(8): 3923~3933.
- 韩润生,邹海俊,吴鹏,方维萱,胡煜昭. 2010. 楚雄盆地砂岩型铜矿床构造—流体耦合成矿模型. 地质学报, 84(10): 1438~1447.
- 贺灵,吴超,曾道明,成晓梦,孙彬彬. 2021. 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. 岩矿测试, 40(3): 384~396.
- 侯青叶,杨忠芳,余涛. 2020. 中国土壤地球化学参数. 北京:地质出版社: 2553~2850.

- 黄波涛,钱诗颖,叶文娟. 2024. 典型钢铁冶炼场地重金属污染空间分布特征及风险评价. 环境污染与防治, 46(1): 104~110.
- 江峰,李强,高峰,吉勤克补子,刘汉武,王若帆. 2024. 黔中磷矿区土壤重金属污染及其生态风险评价. 中国岩溶, 43(3): 650~660.
- 蒋玉莲,余京,王锐,王佳彬,李瑜,余飞,张云逸. 2023. 渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价. 环境科学, 44(7): 4017~4026.
- 牛明芬,商莹,王镜然,周强,陈欣,王颜红,柴美云. 2024. 基于高通量监测数据的 PMF 源解析数据输入量研究. 安全与环境学报, 24(6): 2422~2431.
- 潘泳兴,陈盟,王楠. 2024. 基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析. 环境科学, 45(2): 1026~1037.
- 秦元礼,张富贵,彭敏,张舜尧,马宏宏,唐瑞玲,赵智慧,成杭新. 2020. 云南省武定县土壤重金属地球化学分布特征及其来源解析. 地质与勘探, 56(3): 540~550.
- 申汝佳,黄海波,谢恩平,程婷婷,李华玲,刘建坤. 2024. 土壤改进剂在重金属污染修复中的应用研究进展. 华东地质, 45(3): 281~301.
- 王乔林,宋云涛,王成文,徐仁廷,彭敏,周亚龙,韩伟. 2021. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布. 中国环境科学, 41(8): 3693~3703.
- 王万能,张耀堂,庞占基,李锁明,袁永盛,郑洪福. 2024. 滇中楚雄盆地龙川镇富稀土煌斑岩地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 70(S1): 166~168.
- 王晓晶,刘会茹,李少轩,张东明,曹阳,吕家珑,代允超. 2025. 不同措施对轻中度镉污染土壤小麦安全生产的影响. 农业环境科学学报, 44(5): 1190~1198.
- 吴鹏. 2009. 楚雄盆地砂岩型铜矿床地质地球化学及找矿预测研究. 导师:韩润生. 昆明. 昆明理工大学博士学位论文: 94~123.
- 徐贝贝,杨宇,任志建,李康建,余爱华. 2024. 路边土壤重金属锌的污染源解析. 环境科学与技术, 47(6): 36~43.
- 徐争启,倪师军,庾先国,张成江. 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. 环境科学与技术, 31(2): 112~115.
- 杨忠芳,夏学齐,余涛,侯青叶,曹铁宁,钟坚. 2008. 湖南洞庭湖水系 As 和 Cd 等重金属元素分布特征及输送通量. 现代地质, 22(6): 897~908.
- 曾庆庆,付天岭,邹洪琴,滕浪,吴康,谢挺,何腾兵. 2021. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析. 农业环境科学学报, 40(1): 102~113.
- 张好,董春雨,孙思静,黄祖志,张乃明,包立. 2025. 云南典型碳酸盐岩区土壤重金属污染特征及源解析. 环境化学, 44(1): 174~186.
- 张晓娟,季宏兵,冯晓静,温月花,张涛,熊凯. 2017. 岩溶盆地红土风化剖面的元素地球化学研究. 地理科学, 37(6): 944~951.
- 周思雨,张世文,李恩伟,张燕海,蔡慧珍,马军,胡睿鑫. 2024. 不同 pH 值条件下煤基固废重金属浸出特征及环境风险分析. 安徽工程大学学报, 39(1): 53~62.
- Chen Fangwei, Li Cong, Guo Jun, Zhang Cheng'An, Mao Xiong, Tang Hengjia, Liao Qi, Chen Chuang. 2025. Distribution characteristics and risk of heavy metal pollution in the sediments of Dongting Lake and its tributaries and the impact factor analysis. Geological Review, 71(5): 1687~1700.
- Dai Huimin, Dai Yajian, Ma Zhendong, Yang Zhongfang, Gong Chuandong, Sun Zhongren. 2012. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in the Chabaqi area of Da

- Hingan Mts Geoscience, 26(5): 1043~1050.
- Dong Lei, Zhai Wenliang, Pan Xiong, Lin Li, Zhang Sheng. 2022&. Discharge characteristics and evaluation of agricultural non-point source pollutants in typical small watersheds in the upper reaches of Longchuan River. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 50(2): 59~6571.
- Dong Xin, Hu Haoran, Zhang Xiaoqing, Ren Dajun, Zhang Shuqin. 2024&. A Meta-analysis of the distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in mining areas. *Earth Science Frontiers*, 31(2): 93~102.
- Fan Chenzi, Liu Yongbing, Yuan Jihai, Guo Wei, Sun Dongyang, Liu Chenghai. 2022&. Characteristics of heavy metals and other elements in atmospheric dry and wet deposition and health risk assessment of a typical industrial and mining city in central Yunnan. *Environmental Science*, 43(8): 3923~3933.
- Han Runsheng, Zou Haijun, Wu Peng, Fang Weixuan, Hu Yuzhao. 2010&. Coupling tectonic—fluid metallogenic model of the sandstone-type copper deposit in the Chuxiong Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 84(10): 1438~1447.
- He Ling, Wu Chao, Zeng Daoming, Cheng Xiaomeng, Sun Binbin. 2021&. Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of southwest China. *Rock and Mineral Analysis*, 40(3): 384~396.
- Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2020&. *Soil Geochemical parameters in China*. Beijing: Geological Publishing House; 2553~2850.
- Huang Botao, Qian Shiyang, Ye Wenjuan. 2024&. Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in a typical steel smelting site. *Environmental Pollution & Control*, 46(1): 104~110.
- Jiang Feng, Li Qiang, Gao Feng, Ji Qinkebuzi, Liu Hanwu, Wang Ruofan. 2024&. Heavy metal pollution of soil and its ecological risk evaluation in the phosphate mining area in central Guizhou. *Carsologica Sinica*, 43(3): 650~660.
- Jiang Yulian, Yu Jing, Wang Rui, Wang Jiabin, Li Yu, Yu Fei, Zhang Yunyi. 2023. Source analysis and pollution assessment of soil heavy metals in typical geological high background area in southeastern Chongqing. *Huanjing Kexue*, 44(7): 4017~4026.
- Liu Enjun, Chen Xiaonan, Chen Shengwen, Yu Jianping, Shao Xuexin. 2023&. Analysis and ecological risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in Qianjiangyuan National Park. *Environmental Science and Management*, 48(11): 183~188.
- Niu Mingfen, Shang Ying, Wang Jingran, Zhou Qiang, Chen Xin, Wang Yanhong, Chai Meiyun. 2024&. Research on the PMF source apportionment input data quantity based on high-throughput monitoring data. *Journal of Safety and Environment*, 24(6): 2422~2431.
- Pan Yongxing, Chen Meng, Wang Xiaotong. 2024&. Quantifying the contribution of soil heavy metals to ecological and health risk sources. *Environmental Science*, 45(2): 1026~1037.
- Qin Yuanli, Zhang Fugui, Peng Min, Zhang Shun Yao, Ma Honghong, Tang Ruiling, Cheng Hangxin. 2020&. Geochemical distribution characteristics and sources of heavy metals in Soils of Wuding County, Yunnan Province. *Geology and Exploration*, 56(3): 540~550.
- Wang Qiaolin, Song Yuntao, Wang Chengwen, Xu Renting, Peng Min, Zhou Yalong, Han Wei. 2021&. Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in Western Yunnan. *China Environmental Science*, 41(8): 3693~3703.
- Wang Wanneng, Zhang Yaotang, Pang Zhanji, Li Suoming, Yuan Yongsheng, Zheng Hongfu. 2024&. Geochemical characteristics and geological significance of rare earth-rich lamprophyres in Longchuan Town, Chuxiong Basin, central Yunnan. *Geological Review*, 70(S1): 166~168.
- Wang Xiaojing, Liu Huiru, Li Shaoxuan, Zhang Dongming, Cao Yang, Lv Jialong, Dai Yunchao. 2025&. Effects of different measures on safe production of wheat in mild to moderate cadmium contaminated soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 44(5): 1190~1198.
- Wu Peng. 2009&. *Geological and Geochemical Study and Prospecting Prediction Research of Sandstone-type Copper Deposits in Chuxiong Basin*. Advisor: Han Runsheng. Kunming: Kunming University of Science and Technology; 94~123.
- Xu Beibei, Yang Yu, Ren Zhijian, Li Kangjian, Yu Aihua. 2024&. Sources apportionment of roadside soil pollution of heavy metal zinc. *Environmental Science & Technology*, 47(6): 36~43.
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. 2008&. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science & Technology*, 31(2): 112~115.
- Yang Zhongfang, Xia Xueqi, Yu Tao, Hou Qingye, Cao Tiening, Zhong Jian. 2008. Distribution and fluxes of As and trace metals in the Dongting lake water system, Hunan Province, China. *Geoscience*, 22(6): 897~908.
- Zeng Qingqing, Fu Tianling, Zou Hongqin, Teng Lang, Wu Kang, Xie Ting, He Tengbing. 2021&. Spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of county in Guizhou Province, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 40(1): 102~113.
- Zhang Hao, Dong Chunyu, Sun Sijing, Huang Zuzhi, Zhang Naiming, Bao Li. 2025&. Characteristics and source apportionment of soil heavy metal pollution in typical carbonate area of Yunnan Province. *Environmental Chemistry*, 44(1): 174~186.
- Zhang Xiaojuan, Ji Hongbing, Feng Xiaojing, Wen Yuehua, Zhang Tao, Xiong Kai. 2017&. Element geochemistry characteristic of the red soil weathering profiles in the karst basin. *Scientia Geographica Sinica*, 37(6): 944~951.
- Zhou Siyu, Zhang Shiwen, Li Enwei, Zhang Yanhai, Cai Huizhen, Ma Jun, Hu Ruixin. 2024&. Characteristics and environmental risk analysis of heavy metal leaching from coal-based solid waste under different pH values. *Journal of Anhui Polytechnic University*, 39(1): 53~62.

Risk assessment and source apportionment of heavy metals in farmland soils of the Longchuan River Basin, central Yunnan

HUANG Jiazhong^{1,2)}, LI Suoming¹⁾, TU Chunlin¹⁾, JIANG Xin¹⁾,
ZENG Liang¹⁾, WANG Bingjun¹⁾, SONG Lin^{1,3)}

1) *Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming, 650100;*

2) *Innovation Base for Metallogenic Regularity and Effective Exploration Technology of Hydrothermal Gold—Copper Polymetallic Deposits, Geological Society of China, Kunming, 650100;*

3) *Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming, 650100*

Objectives: This study examines the distribution of heavy metals in the agricultural soil of the Longchuan River basin, situated in central Yunnan.

Methods: A concentrated farmland area in Chuxiong City, Yunnan Province was selected as the study site, and topsoil samples (0~20 cm) were systematically collected. The analysis encompassed evaluations of soil pH and the concentrations of eight heavy metals: Arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn). To assess the risk of heavy metal pollution, the study employed soil pollution risk screening values for agricultural land as a reference point, utilizing both the Nemerow Comprehensive Pollution Index and the Potential Ecological Risk Index methodologies. These approaches facilitated the assessment of pollution risk, identification of primary sources of heavy metal contaminants.

Results: The overall soil environmental quality was good, with an average pH of 6.78 (neutral). Except for localized Cd exceedances along the Longchuan River banks, heavy metal pollution risk was generally low. Compared to Yunnan soil background values, As, Pb, Hg, and Zn were depleted; Cr, Ni, and Cu were similar; Cd was relatively enriched. The average Nemerow composite pollution index was 0.616, and the average comprehensive potential ecological risk index was 32.54, indicating overall low heavy metal hazard but notable local ecological risk from Cd.

Conclusions: PMF analysis revealed five principal sources: Pedogenic parent material weathering (natural source, 29.65%), atmospheric deposition (23.33%), a mixed source of agricultural activities and riverine sedimentation (17.75%), direct agricultural activities (17.54%), and a mineralized stratum source associated with mining activities (11.74%). The results underscore the combined influence of natural geology and human activities on soil heavy metal accumulation in this high-background area.

Keywords: agricultural soil; heavy metals; risk assessment; source apportionment; Longchuan river Basin

Acknowledgements: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42307058) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (No. ZD20220210)

First author: HUANG Jiazhong, male, senior engineer, involved in research and analysis within the field of geochemistry; Email: 496473164@qq.com

Corresponding author: SONG Lin, female, senior engineer, involved in the fields of ecological geology and environmental evaluation; Email: 373256062@qq.com

Manuscript received on: 2024-12-06; Accepted on: 2026-01-19; Published online on: 2026-02-15

Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.022

Edited by: LI Ming

