

doi: 10.11720/wtyht.2024.1129

肖高强,赵娟,陈子万,等.基于地质大数据技术对云南省土壤重金属地质高背景区的划定[J].物探与化探,2024,48(1):216-227. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1129>Xiao G Q, Zhao J, Chen Z W, et al. Delineation of areas with high geological background values of heavy metals in soils in Yunnan Province, China based on geological big data technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 216-227. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1129>

基于地质大数据技术对云南土壤重金属地质高背景区的划定

肖高强^{1,2,3}, 赵娟⁴, 陈子万^{2,3,5}, 宋旭锋^{2,3,5}, 朱能刚⁵

(1. 云南省地质调查局, 云南 昆明 650051; 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 3. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 4. 云南省生态环境监测中心, 云南 昆明 650034; 5. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216)

摘要:为系统研究云南省土壤重金属地质高背景区的分布范围及超标元素,以全省 1:20 万水系沉积物重金属元素含量数据和区域地质图为基础,采用 GIS 空间分析功能,并利用昆明、玉溪、昭通等地区的土壤重金属数据进行验证,确定云南省土壤重金属含量值超农用地筛选值的地质单元 61 个,占全省国土面积的 21.09%,其中位于地质高背景区的耕地面积约 284.41 万公顷,占全省国土面积的 7.22%;影响土壤重金属超标的岩性主要为碳酸盐岩、基性—超基性火山岩、中基性侵入岩、含煤碎屑岩和含基性组分碎屑岩;地质高背景区超标重金属元素主要为 Cu、Cr、Ni、Cd,而 As 主要于碳酸盐岩地层中存在超标风险,Pb、Zn 仅于个别地层中存在超标风险,Hg 基本无超标风险。

关键词:土壤重金属;地质高背景区;地质大数据;30 米全球地表覆盖数据;云南省

中图分类号: P632; X826

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0216-12

0 引言

土壤是农业生产和人类赖以生存的物质基础,是人类食物与生态环境安全的保障,然而已公开发布的《全国土壤污染状况调查公报》和《中国耕地地球化学调查报告》均显示,全国土壤环境状况总体不容乐观,其中西南地区的土壤重金属超标比例相对较高,土壤重金属污染已成为生态文明和美丽中国建设以及全面建成小康社会的突出短板之一。

土壤中的重金属来源分为人为成因和自然成因两大类,其中人为成因主要指由人类生活^[1-3]和各类工、矿业活动^[4-7]产生和排放的重金属;自然成因是指从成土母质(母岩)继承的或成土作用过程中发生的重金属次生富集^[8-17],因其通常与风化成土、

次生富集及成矿作用等地质过程相关,又被称为地质成因。由地质成因引起的土壤重金属富集区,通常又被称为土壤重金属地质高背景区,其重金属元素含量及空间分布特征多与成土母岩、下伏地层等地质体密切相关,常呈区域性面积连片分布,其影响范围远大于呈点状(或沿水系线状分布)的人为成因土壤重金属污染^[18]。然而,可能因地质成因的土壤重金属污染多位于人口密度相对较小的山区,或因其具有相对较高的稳定性尚未产生显著的负面生态效应等影响,目前受到的关注度相对较低。

中国地球化学图集^[19]及相关研究^[18,20-32]均显示,云南峨眉山玄武岩区和碳酸盐岩分布区的水系沉积物和土壤中重金属元素异常富集,可能为典型的土壤重金属地质高背景区;农业农村和生态环境等相关部门尽管针对部分地区耕地土壤重金属污染

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-06-20

基金项目: 中央土壤污染防治专项资金(云污防土[2018]17号); 中国地质调查局项目(DD20160313-04)

第一作者: 肖高强(1983-),男,硕士,高级工程师,主要从事环境和勘查地球化学研究工作。Email: 13057980@qq.com

通讯作者: 赵娟(1983-),女,硕士,高级工程师,主要从事土壤和地下水污染防治方面的工作。Email: 77563779@qq.com

现状和成因作过调查研究,但在地质成因方面认识明显不足。本文首次以地质大数据为基础,从地质成因的角度,分析全省土壤重金属地质高背景区分布范围和富集元素,进一步明确影响土壤重金属超标的岩性,为农用地土壤重金属高背景来源解析与科学防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究涉及的地球化学数据包括全省 1:20 万水系沉积物测量数据和 1:25 万土地质量地球化学调查(多目标区域地球化学调查)数据。

1:20 万水系沉积物测量数据:该数据来源于 1978 年开始的全国范围内系统实施的区域地球化学扫面计划(RGNR)项目,采样介质主要为分布于二级水系中和一级水系口上的水系沉积物,核心思想认为这种水系沉积物可以代表上游汇水盆地中土壤等地表疏松物质的平均元素含量^[33]。其工作采样密度为 1~2 件/km²,并按 4 km² 网格内样品组合

为一件样品送实验室分析,具体采样和分析测试方法技术参见《区域地球化学勘查规范》(DZ/T 0167—2006)。本次研究收集水系沉积物数据点 96 413 个,基本覆盖了云南省全境,基于该数据出版有《云南省地球物理地球化学图集》和《云南省地球化学地质应用研究》。

1:25 万土地质量地球化学调查(多目标区域地球化学调查)数据:该数据来源于中国地质调查局 1999 年开始实施的多目标区域地球化学调查计划,又称农业地质调查计划或土地质量地球化学调查计划。云南省相关工作启动较晚,始于 2006 年,目前已覆盖昆明(除东川、禄劝、富民、寻甸、嵩明外)、玉溪、昭通、会泽、宣威、保山(除腾冲、龙陵外)、文山、丘北、广南等地区(图 1)。本研究工作仅使用了表层土壤(0~20 cm)数据,其平均采样密度为 1 件/km²,并按 4 km² 网格内样品组合为一件样品送实验室分析,具体采样和分析测试方法技术参见《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)。目前收集的数据覆盖了

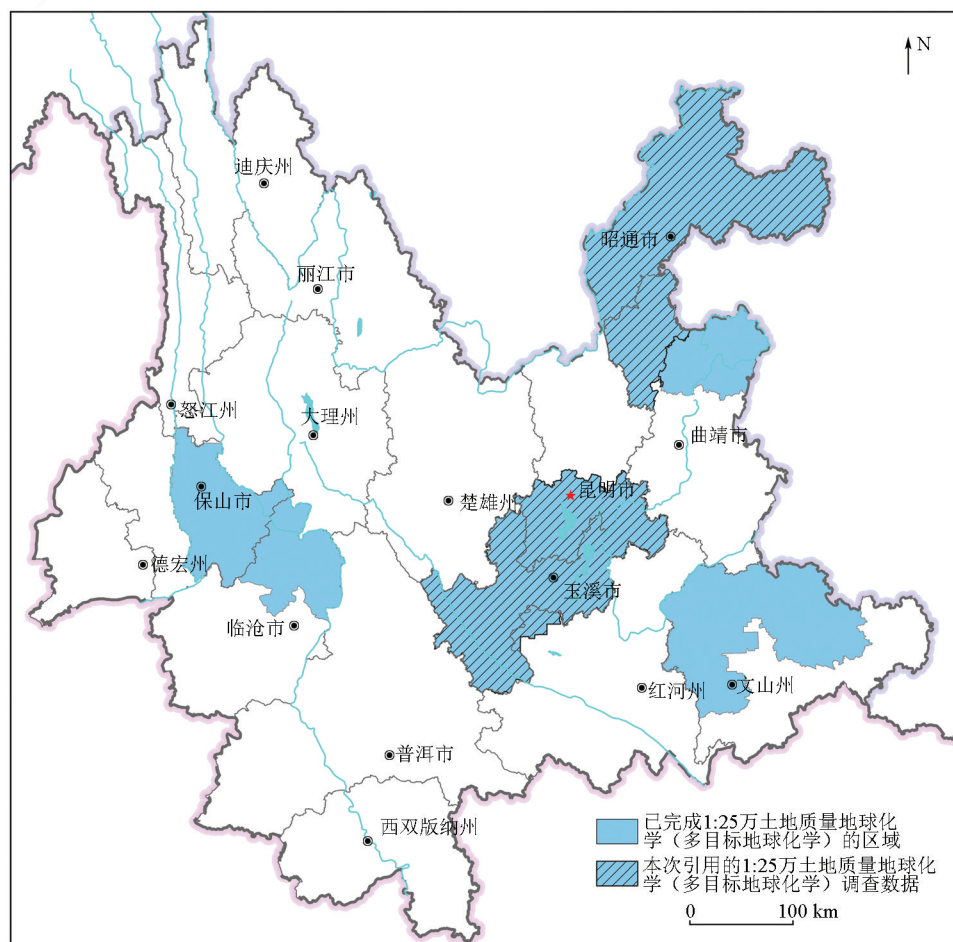


图 1 云南省 1:25 万土地质量地球化学调查工作程度

Fig. 1 Map of 1:250,000 geochemical survey of land quality in Yunnan Province

昆明(除东川、禄劝、富民、寻甸、嵩明外)、玉溪、昭通和会泽地区,面积约 52 866 km²,对应表层数据点 13 464 个。

云南省区域地质图:该矢量图件为云南省地质科学研究所于 1998 年编制的数字版地质图件,并于 2006~2013 年在开展“云南省矿产资源潜力评价”项目过程中对图件进行了修编,是目前地质部门使用最广、最具权威的区域地质类图件。

1.2 方法可行性分析

水系沉积物是指河流沟谷中的沉积物(包括湖泊近岸沉积物),主要是由地表水冲刷作用将地表岩石风化疏松物带入沟谷,并沿沟谷搬运沉积,可以代表上游汇水盆地中土壤等地表疏松物质的平均元素含量^[33]。水系沉积物测量数据不仅服务于矿产勘查,而且被广泛用于评价土壤地球化学环境。张春霖等^[34]利用浙江省水系沉积物资料对全省土壤环境质量级别进行划分;周余国等^[35]以云南个旧地区水系沉积物数据为基础,运用 FCA 模糊综合评价对个旧地区地球化学环境进行了系统评价;朱辉等^[36]通过对青海省东部地区已开展的水系沉积物测量和土地质量调查数据对比,得出 8 种重金属元素在水系沉积物和土壤中的分布规律及分布形态高度一致,从而有效建立了水系沉积物的土壤环境预测模型。

昆明—玉溪和昭通—会泽地区水系沉积物和土壤数据均为 2 km×2 km 的组合样品分析数据,具有相同的采样密度且是重叠的,因此可对二者数据配对后进行相关性分析,结果表明水系沉积物和土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量均存在显著正相关关系(P 值均小于 0.01),相关系数分别为 0.506、0.160、0.763、0.743、0.256、0.690、0.193 和 0.232;土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 中位值分别为 10.30×10^{-6} 、 0.44×10^{-6} 、 98.60×10^{-6} 、 48.10×10^{-6} 、 0.09×10^{-6} 、 43.60×10^{-6} 、 36.40×10^{-6} 和 110.00×10^{-6} ,水系沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 中位值分别为 7.30×10^{-6} 、 0.19×10^{-6} 、 81.70×10^{-6} 、 39.70×10^{-6} 、 0.05×10^{-6} 、 38.10×10^{-6} 、 27.40×10^{-6} 和 86.00×10^{-6} ,对比可知(图 2),昆明—玉溪和昭通—会泽地区土壤中 8 种重金属元素中位值均高于水系沉积物,其中土壤中 Cd 和 Hg 中位值几乎为水系沉积物中含量的 2 倍;同点位土壤与水系沉积物中的重金属含量比值看出(图 2),土壤中重金属含量大于水系沉积物中含量的样品占比至少在 60% 以上, Hg、Cd、Pb 更倾向于在土壤中富集,其原因一方面可能是土壤较水系沉积物含有更多的黏土矿物,这

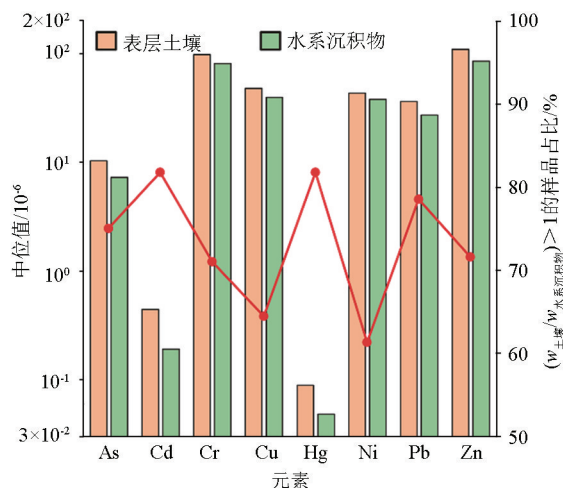


图 2 昆明—玉溪和昭通—会泽地区土壤和水系沉积物中重金属元素含量对比

Fig. 2 Comparison of heavy metals concentration in soil and stream sediments in Kunming-Yuxi and Zhaotong-Huize regions

些黏土矿物对重金属元素具有较强的吸附而更易形成次生富集,另一方面昆明—玉溪和昭通—会泽地区水系沉积物测量主要于 1983~1998 年完成,而土壤测量于 2006~2020 年完成,在中国工业化的近几十年中,水系沉积物测量数据较土壤受到人类活动影响相对更小。由此可见,利用水系沉积物数据圈定土壤重金属地质高背景区的技术方法可行,结果可能更可靠。

1.3 研究思路与方法

1.3.1 超标风险评价值的确定

根据中国环境监测总站^[37]调查结果,云南省土壤 pH 含量范围为 4.0~8.8,平均值为 5.7;昆明—玉溪、昭通—会泽地区表层土壤 pH 含量范围分别为 4.24~9.62 和 3.85~8.71,平均值分别为 6.27 和 5.98;保山地区表层土壤 pH 含量范围为 4.13~8.33,平均值为 6.45^[21-22];可见云南省土壤 pH 整体呈酸性。根据《云南省第三次全国国土调查主要数据公报》统计结果,云南省水田面积 99.14 万公顷,仅占全省耕地面积的 18.38%,而旱地等农用地面积占绝对优势。结合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),本次研究 pH 参考范围为 5.5~6.5,土地利用类型为其他,从而确定砷、镉、汞、铅、铬、铜、镍、锌 8 个重金属超标风险评价值分别为 40.00×10^{-6} 、 0.30×10^{-6} 、 1.80×10^{-6} 、 90.00×10^{-6} 、 150.00×10^{-6} 、 50.00×10^{-6} 、 70.00×10^{-6} 和 200.00×10^{-6} 。

1.3.2 超标占比临界值的确定

《地球化学普查规范(1:50 000)》(DZ/T 0011—

2015)中将元素累积频率在 75%~95%之间所对应的含量值范围定义为高背景区,刘东盛等^[38-39]将全国土壤中钴的 75%分位值作为其高背景基线值。本次研究通过多次对比分析,将超标点位数和超标面积占比临界值定为 80%,较为符合地质单元中重金属元素富集特征。

1.3.3 土壤重金属地质高背景划定方法

1)利用 GIS 空间属性挂接功能,将 96 413 个水系沉积物数据点与其对应的地质单元属性进行挂接,并按确定的超标风险评价值分别进行评价。若 8 种重金属元素含量值有一个超过其相应超标风险评价值,则可判定该样品综合环境质量为超标,最后进行汇总并将综合环境质量超标点数占比超过 80%的地质单元筛选出来。

2)利用 GIS 空间插值功能,按上述超标风险评价值分别获得 8 种重金属元素的空间分布范围,然

后按并集方式求取 8 种重金属元素的综合环境质量空间分布范围,并与全省区域地质图进行空间叠加分析,最后汇总统计各地质单元中综合环境质量超标的面积和所占比例,并将超标面积所占比例大于 80%的地质单元筛选出来。

3)将综合环境质量超标点数和超标面积所占比例同时大于 80%的地质单元筛选出来即可判识为土壤重金属地质高背景区。

2 结果与讨论

2.1 划定结果

利用 GIS 空间分析功能,叠加云南省区域地质图及水系沉积物中 8 种重金属含量和空间分布范围,将超标点位数和超标面积占比大于 80%的地质单元划为土壤重金属地质高背景区,其结果见表 1 和图 3。

表 1 云南省土壤重金属地质高背景区划定结果

Table 1 Delineation results of high geological background areas of soil heavy metals in Yunnan Province

序号	地层代码	地层名称	总点数/个	超标点数比例/%	地层面积/km ²	超标面积比例/%	主要岩性
1	SD _q	青山组	112	92.0	470	95.5	灰岩
2	Dd	达莲塘组	283	85.2	1077	93.5	灰岩、硅质岩、页岩
3	Dlh	莲花曲组	47	93.6	192	98.3	灰岩、页岩
4	Dg	古木组	296	80.7	1189	89.5	灰岩、白云岩
5	Dgg	干沟组	26	96.2	97	98.6	灰岩、白云岩
6	D ₂ d	东岗岭组	168	97.0	644	96.3	灰岩、白云岩
7	D ₂ q	曲靖组	470	84.0	1863	86.9	灰岩、白云岩、页岩、硅质岩
8	Dl	榴江组	69	92.8	343	99.5	灰岩、硅质岩
9	D ₂₋₃ d-g	东岗岭组、革当组并层	11	100.0	42	100.0	灰岩
10	D ₂₋₃ q-zj	曲靖组、一打得组、在结山组并层	14	85.7	60	100.0	白云岩、页岩、煤
11	D ₂₋₃ y-zj	一打得组、在结山组并层	46	97.8	191	100.0	灰岩
12	Dy	一打得组	116	80.2	466	92.0	灰岩、页岩
13	D ₃ g	革当组	168	95.8	673	96.0	灰岩、白云岩
14	D ₃ zj	在结山组	177	85.9	674	92.2	灰岩、白云岩
15	D ₃ -C ₁ z-y	海口组、宰格组、炎方组并层	13	92.3	46	98.8	白云岩、灰岩、页岩
16	DCy	炎方组	53	94.3	207	96.3	白云岩、灰岩、页岩、煤
17	C ₁₋₂ w-d	万寿山组、大埔组并层	271	86.7	1029	94.8	灰岩、白云岩、页岩、煤
18	C ₁ b	坝达组	19	100.0	63	94.8	灰岩、硅质灰岩、硅质岩
19	C ₁ pz	平掌组	171	89.5	683	90.1	玄武岩、灰岩
20	C ₁₋₂ h-m	黄龙组、马平组并层	247	89.9	1035	97.8	灰岩
21	Ch	黄龙组	798	96.1	3199	97.2	灰岩
22	Cw-m	石炭系全系并层	134	82.8	575	90.0	灰岩
23	Cy	鱼塘寨组	221	94.1	894	95.7	灰岩、白云岩
24	C ₂ m	马平组	21	95.2	111	99.0	灰岩
25	Cj	尖山营组	109	98.2	448	99.7	灰岩
26	C ₂ s	水长阱组	19	100.0	89	100.0	灰岩
27	C-Pt	他披组	22	86.4	67	80.4	灰岩
28	C ₂ d-w	丁家寨组、卧牛寺组并层	266	82.3	1051	83.1	玄武岩、灰岩
29	Cx	响姑组	62	85.5	245	94.0	灰岩、变基性火山岩
30	P ₁ l-y	梁山组、阳新组并层	2574	93.5	10251	95.8	灰岩、页岩、煤
31	P ₁ y	阳新组	809	95.2	3176	97.6	灰岩、白云岩
32	P ₁ d	大名山组	199	93.5	786	97.3	灰岩、白云岩
33	P ₁ bm-s	丙麻组、沙子坡组下部并层	60	88.3	228	83.3	灰岩、铁铝质页岩
34	Pe	峨眉山玄武岩	4222	98.6	16983	99.1	玄武岩
35	P ₁₋₂ e-l	峨眉山玄武岩、龙潭组并层	23	95.7	100	87.4	玄武岩、页岩、煤
36	P ₂ w	吴家坪组	220	93.2	906	97.8	灰岩、铁铝质泥质岩
37	P ₂ l	龙潭组	160	98.8	647	99.5	页岩、硅质岩、煤
38	P ₂ x	宣威组	439	97.5	1694	99.2	页岩、砂岩、煤

(续表)

序号	地层代码	地层名称	总点数/个	超标点 数比例/%	地层面积/ km ²	超标面 积比例/%	主要岩性
39	P ₂ h	黑泥哨组	310	96.5	1195	98.6	灰岩、页岩、煤
40	P _g	冈达概组	314	86.6	1276	90.7	玄武岩
41	T ₁ l	罗楼组	39	92.3	159	99.4	白云岩、灰岩
42	T ₁ x	洗马塘组	61	96.7	222	98.1	泥岩、页岩、粉砂岩
43	T ₁ f	飞仙关组	436	96.6	1831	97.4	泥岩、页岩、粉砂岩
44	T ₁ d	东川组	151	94.7	574	99.7	泥岩、页岩、粉砂岩
45	T ₁ q	青天堡组	249	96.4	943	96.8	泥岩、页岩、粉砂岩
46	T ₁₋₂ x-j	洗马塘组、嘉陵江组并层	21	100.0	84	100.0	灰岩、白云岩、页岩、粉砂岩
47	T ₁₋₂ f-j	飞仙关组、嘉陵江组并层	636	89.2	2591	92.2	灰岩、白云岩、页岩、粉砂岩
48	T ₁₋₂ d-j	东川组、嘉陵江组并层	174	95.4	695	97.7	灰岩、白云岩、页岩、粉砂岩
49	T _j	嘉陵江组	707	93.4	2808	97.9	灰岩、白云岩
50	T _n	尼汝组	300	81.7	1217	85.9	灰岩、砂岩、玄武岩
51	T ₂ g	个旧组	1503	92.5	5951	96.7	灰岩、白云岩
52	T ₂ gl	关岭组	1465	85.2	5843	93.1	灰岩、白云岩、页岩
53	T ₂ b	北衙组	832	87.5	3440	93.3	灰岩
54	T ₃ nh	牛喝塘组	120	85.0	448	96.8	玄武岩
55	νδ		13	92.3	64	95.3	辉长闪长岩
56	βμ		243	88.1	976	87.8	辉绿岩、辉长辉绿岩
57	N		8	87.5	30	96.4	基性岩
58	Σ-N		27	81.5	97	85.5	基性—超基性岩
59	σ		28	96.4	85	96.3	橄榄岩—橄辉岩
60	ψμ		2	100.0	7	90.5	辉石岩
61	φω		14	100.0	47	82.5	蛇纹岩

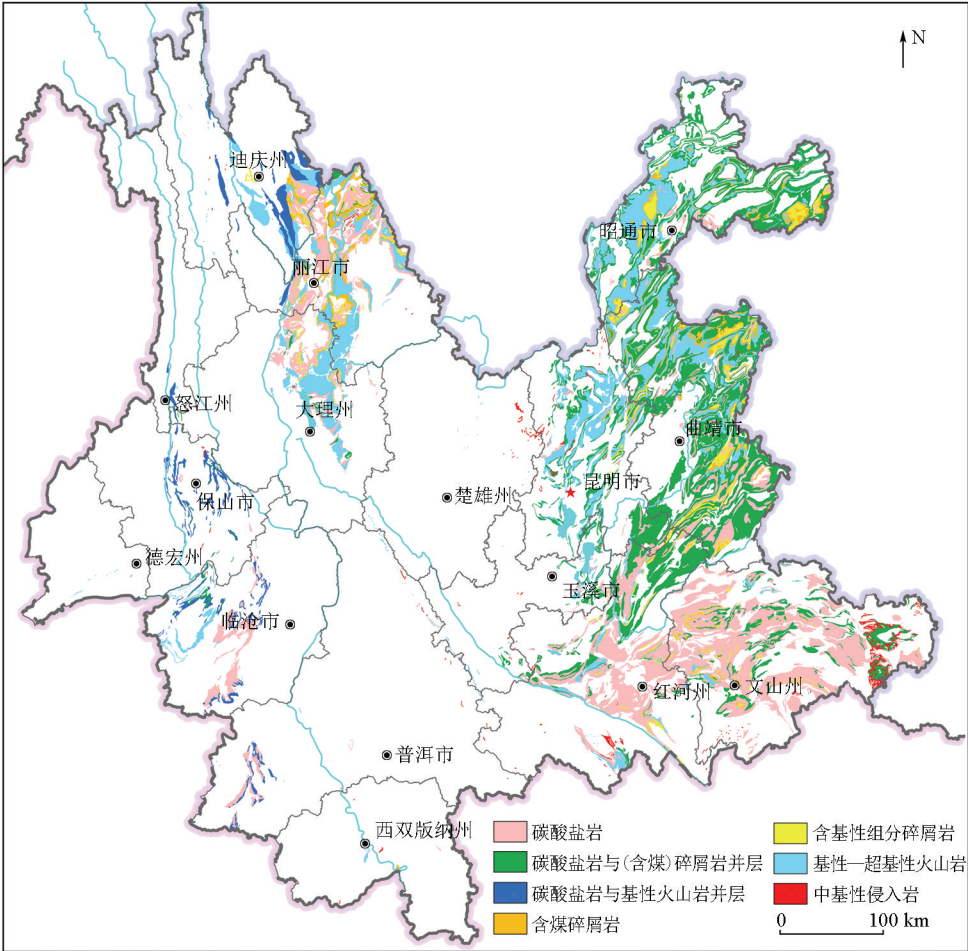


图 3 云南省土壤重金属地质高背景区分布
Fig.3 Distribution map of high geological background areas of soil heavy metals in Yunnan Province

由表 1 可知,全省共划定土壤重金属地质高背景单元 61 个,其中 14 个地质单元为并层,总面积为 $8.31 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省国土面积的 21.09%。

从土壤重金属地质高背景单元空间分布来看(图 3),高背景单元主要呈 4 大片分布,分别为滇中—滇东地区的昆明、昭通、曲靖、文山、红河,滇西北香格里拉、丽江、大理,滇西南保山、芒市、永德、镇康、耿马、沧源、澜沧、孟连及滇中哀牢山一带等地区。

从地质时代看,高背景单元主要集中于泥盆纪(D)、石炭纪(C)、二叠纪(P)和三叠纪(T)4 个时期,该时期为全省岩浆活动最为活跃、碳酸盐岩分布范围最广的地质时代。

从地质单元岩性看,影响土壤重金属元素含量的岩性主要为碳酸盐岩(灰岩、白云岩)、基性—超基性火山岩(玄武岩、橄榄岩、辉石岩、蛇纹岩等)、中基性侵入岩(辉长闪长岩、辉绿岩、辉长辉绿岩)、含煤碎屑岩(黑色页岩、煤、硅质岩等)和含基性组分碎屑岩(早三叠世泥质岩类)4 类,其中含基性组分碎屑岩(T_{1x} 、 T_{1f} 、 T_d 、 T_{1q})尽管为碎屑岩(泥岩、页岩、粉砂岩),但相关研究^[31,40-41]表明,该地层岩石在成岩过程中可能大量继承了晚二叠世峨眉山高钛玄武岩的物质成分,其超标的重金属元素主要为 Cr、Cu、Ni,也进一步证实可能受峨眉山玄武岩岩浆活动影响。由于云南省地质条件复杂,地质高背景区土壤重金属含量并不受单一岩性影响,因此按岩性地质高背景区可划分为以下几类组合:①碳酸盐岩: $S-Dq$ 、 D_2d 、 $D_{2-3}d-g$ 、 $D_{2-3}y-zj$ 、 D_3g 、 D_3zj 、 Dg 、 Dgg 、 $C_{1-2}h-m$ 、 C_2m 、 C_2s 、 Ch 、 Cj 、 Cy 、 $Cw-m$ 、 $C-Pt$ 、 P_1d 、 P_1y 、 T_1l 、 T_2b 、 T_2g 、 Tj ;②碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层: D_2q 、 $D_{2-3}q-zj$ 、 Dd 、 Dl 、 Dlh 、 Dy 、 D_3-C_1z-y 、 $D-Cy$ 、 C_1b 、 $C_{1-2}w-d$ 、 P_1bm-s 、 P_1l-y 、 P_2w 、 $T_{1-2}d-j$ 、 $T_{1-2}f-j$ 、 $T_{1-2}x-j$ 、 T_2gl ;③碳酸盐岩与基性火山岩并层: $C_{1p}z$ 、 C_2d-w 、 Cx 、 Tn ;④含煤碎屑岩: P_2h 、 P_2l 、 P_2x ;⑤含基性组分碎屑岩: T_{1f} 、 T_{1q} 、 T_{1x} 、 T_d ;⑥基性—超基性火山岩: $P_{1-2}e-l$ 、 Pe 、 Pg 、 T_3nh 、 σ 、 $\Sigma-N$ 、 N 、 $\varphi\omega$ 、 $\psi\mu$;⑦中基性侵入岩: $\beta\mu$ 、 $\nu\delta$ 。

2.2 划定结果合理性评价

利用 GIS 空间分析功能分别提取昆明—玉溪、昭通—会泽地区位于地质高背景区的土壤样品点,分别为 789 件和 4 111 件,再根据土壤中重金属元素含量进行土壤污染风险评价,以此评价土壤重金属地质高背景区划定结果的合理性。

2.2.1 土壤污染风险评价方法

1) 单因子评价法

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)中的筛选值 S_i ,基于表层土壤中 As、Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Ni、Zn 的含量 C_i ,评价土壤重金属超农用地筛选值的风险,并将其土壤环境质量等级分为两类。

无风险类: $C_i \leq S_i$,土壤重金属污染风险低,可忽略;

超农用地筛选值类: $C_i > S_i$,可能存在农用地土壤污染风险。

2) 多因子综合评价

多因子综合评价以 8 种重金属单因子评价结果的最差类别来确定,如某一土壤样品 As、Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Ni、Zn 单因子评价等级分别为无风险类、超农用地筛选值类、无风险类、无风险类、超农用地筛选值类、无风险类、无风险类、无风险类,那么多因子综合评价等级则为超农用地筛选值类。

2.2.2 合理性评价

昆明—玉溪、昭通—会泽地区划定土壤重金属地质高背景单元 27 个,岩性主要为基性—超基性火山岩、碳酸盐岩、含煤碎屑岩和早三叠世碎屑岩,其土壤重金属污染风险评价结果见表 2。各地质高背景单元土壤重金属多因子综合等级评价为超农用地筛选值类的样品比例均在 60% 以上,其中除 $\beta\mu$ 和 D_3-C_1z-y 超标比例稍低,可能与其出露面积小、代表性不强有关外,其余地质单元超标比例在 82.4%~100%。由此可见,本次通过 1:20 万水系沉积物成果划定的土壤重金属地质高背景单元,其结果是合理的。

2.3 超标重金属元素探讨

对划定的土壤重金属地质高背景区分别统计其水系沉积物中 8 种重金属元素的中位值和超标比例,结果见表 3 和表 4。由此可知,7 大类岩性组合的地质高背景区均存在 1 个以上的重金属元素中位值超过其相应的农用地污染风险筛选值,超标重金属元素主要为 Cu、Cr、Ni、Cd,而 As、Pb、Zn、Hg 中位值未超标;进一步结合超标比例来看,Cu、Cr、Ni、Cd 超标比例相对最高,分别为 78.29%、53.65%、50.74% 和 49.05%,其次为 As、Zn、Pb,超标比例分别为 22.03%、12.7% 和 5.21%,而 Hg 超标比例最低,仅为 0.23%。其中,碳酸盐岩高背景区超标重金属元素主要为 Cd、Cu、Ni、Cr、As,而 Zn 超标仅在 $D_{2-3}y-zj$ 、 D_3g 等个别地层中;碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层高背景区超标重金属元素主要为 Cd、Cu、Cr、Ni;碳酸盐岩与基性火山岩并层、含煤碎屑岩、含基性组分碎屑岩和基性—超基性火山岩高背景区超标重金属元素均主要为 Cu、Cr、Ni;中基性侵入岩高背景区

超标重金属元素均主要为 Cu、Ni。已有大量研究表明,广西^[14,18,42]、贵州^[16,43-44]、云南^[25,30-31]等地碳酸盐岩(灰岩、白云岩)区发育的土壤存在 Cd、As、Cr、Cu 明显富集现象,其原因主要与碳酸盐岩风化过程中因 Ca、Mg 等活性元素大量淋失,从而导致淋失相对缓慢的重金属元素在原地次生富集有关;基性—超基性火山岩(玄武岩、橄榄岩、辉石岩、蛇纹岩等)中的 Cu、Cr、Ni 等元素含量明显高于其他岩石,在该类岩石风化成土过程中 Cu、Cr、Ni 等被释放出来,其中一部分进入水体中淋溶流失,其余的部分则与黏土矿物、铁锰氧化物及有机质结合而残留在土壤中形成富集^[1,10-12];中基性侵入岩(辉长闪长岩、辉绿

岩、辉长辉绿岩)中的 Cu、Cr、Ni 等元素含量虽低于基性—超基性火山岩,但明显高于其他岩类^[23],其发育的土壤中 Cu、Cr、Ni 发生富集的原因与基性—超基性火山岩基本一致;浙江^[17,45]、湖南^[46-47]、重庆^[48]、贵州^[49-50]等地黑色岩系发育的土壤存在 As、Cd、Cu、Zn、Hg 明显富集现象,该类岩石富含有机质、硫化物以及多种重金属元素,在风化成土过程中,岩石极易风化分解,重金属元素被淋滤析出形成富集。可见,本次划定的碳酸盐岩、基性—超基性火山岩和中基性侵入岩等地质高背景区土壤富集的重金属元素与其他地区基本一致,而含煤碎屑岩区发育的土壤富集元素仅有 Cu、Cr、Ni,无 Cd 和 Zn,这

表 2 昆明—玉溪、昭通—会泽地区地质高背景单元土壤重金属污染风险评价结果

Table 2 Risk assessment results of soil heavy metals in high geological background units in Kunming-Yuxi and Zhaotong-Huize regions

地层代码	地层名称	总点数/个	超标点数比例/%	地层代码	地层名称	总点数/个	超标点数比例/%
D ₂ q	曲靖组	142	88.0	Pe	峨眉山玄武岩	1629	99.9
D ₂₋₃ q-zj	曲靖组、一打得组、在结山组并层	15	100.0	P ₁₋₂ e-l	峨眉山玄武岩、龙潭组并层	20	100.0
D ₂₋₃ y-zj	一打得组、在结山组并层	4	100.0	P ₂ l	龙潭组	91	100.0
Dy	一打得组	54	98.1	P ₂ x	宣威组	209	100.0
D ₃ zj	在结山组	105	100.0	T ₁ f	飞仙关组	96	97.9
D ₃ -C ₁ z-y	海口组、宰格组、炎方组并层	3	66.7	Td	东川组	119	100.0
C ₁₋₂ w-d	万寿山组、大埔组并层	54	94.4	T ₁₋₂ f-j	飞仙关组、嘉陵江组并层	431	100.0
C ₁₋₂ h-m	黄龙组、马平组并层	38	100.0	T ₁₋₂ d-j	东川组、嘉陵江组并层	171	100.0
Ch	黄龙组	34	82.4	Tj	嘉陵江组	22	100.0
Cw-m	石炭系全系并层	50	100.0	T ₂ gl	关岭组	264	96.2
C ₂ m	马平组	4	100.0	βμ	辉绿岩、辉长辉绿岩	11	63.6
P ₁ l-y	梁山组、阳新组并层	1256	99.5	Σ-N、σ、φω	基性—超基性岩	17	88.2
P ₁ y	阳新组	61	93.4		总计	4900	98.8

表 3 土壤重金属地质高背景区水系沉积物中重金属中位值统计

Table 3 Statistical results of median value of heavy metals in stream sediments in high geological background areas 10⁻⁶

岩性组合	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
碳酸盐岩	33.0	0.48	156	62.1	0.126	77.1	39.6	134
碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层	16.9	0.37	159	72.7	0.078	66.1	31.2	121
碳酸盐岩与基性火山岩并层	14.7	0.19	160	61.3	0.061	71.4	22.5	103
含煤碎屑岩	6.10	0.20	210	128	0.038	75.5	20.7	122
含基性组分碎屑岩	7.30	0.20	224	89.8	0.040	78.0	22.0	116
基性—超基性火山岩	6.00	0.20	141	179	0.045	67.1	22.0	131
中基性侵入岩	9.20	0.25	103	90.6	0.062	65.0	18.7	135
超标风险评价值	40	0.30	150	50	1.80	70	90	200

表 4 土壤重金属地质高背景区水系沉积物中重金属超标比例统计

Table 4 Statistical results of the proportion of heavy metals exceeding the screening value in stream sediments in high geological background areas %

岩性组合	样品数/个	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
碳酸盐岩	6664	40.19	64.33	53.24	68.01	0.48	59.11	8.55	24.94
碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层	6452	22.74	59.21	54.51	74.50	0.14	43.60	5.10	11.21
碳酸盐岩与基性火山岩并层	799	12.64	24.16	54.69	66.08	0.50	51.81	3.25	3.00
含煤碎屑岩	909	10.56	23.10	81.85	87.35	0.11	65.24	2.20	4.40
含基性组分碎屑岩	897	5.57	24.41	76.81	96.43	0.00	66.33	1.23	2.23
基性—超基性火山岩	4758	3.40	28.35	45.06	94.43	0.04	43.32	2.40	2.84
中基性侵入岩	256	5.47	36.33	17.58	83.59	0.00	41.41	3.91	11.72
总计	20735	22.03	49.05	53.65	78.29	0.23	50.74	5.21	12.70

可能与云南省含煤碎屑岩出露面积小,且多与峨眉山玄武岩地层伴生有关。综上可知,全省土壤重金属地质高背景区超标重金属元素主要为 Cu、Cr、Ni、Cd,而 As 主要于碳酸盐岩地层中存在超标风险,Pb、Zn 仅于个别地层中存在超标风险,Hg 基本无超标风险。

2.4 地质高背景区耕地分布情况

2020 年 9 月 15 日,自然资源部向社会发布了 2020 年版 30 m 全球地表覆盖数据,该套数据包括耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川及永久积雪 10 种地表覆盖类型,其中耕地指用于种植农作物的土地,包括水田、灌溉旱地、雨养旱地、菜地、牧草种植地、大棚用地、以种植农作物为主间有果树及其他经济乔木的土地,以及茶园、咖啡园等灌木类经济作物种植地。通过与地质高背景区进行叠加统计后,即可初步了解不同地质高背景单元内的耕地分布情况,其结果见表 5 和图 4。全省位于土壤重金属元素地质高背景区的耕地面积约 284.41 万公顷,占全省国土面积的

7.22%,其中碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层高背景区耕地面积最大,约为 102.55 万公顷,其次为碳酸盐岩和基性—超基性火山岩高背景区,耕地面积分别为 87.44 万公顷和 56.05 万公顷,而碳酸盐岩、碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层高背景区超标重金属元素个数较多,为 Cd、Cu、Cr、Ni,因此需加强耕地土壤与农产品协同监测力度,优选对重金属迁移富集

表 5 云南省土壤重金属地质高背景区耕地面积统计
Table 5 Statistical results of cultivated land areas in high geological background areas of soil heavy metals in Yunnan Province

岩性组合	总面积/ 万公顷	耕地面积/ 万公顷	比例/ %
碳酸盐岩	267.18	87.44	32.73
碳酸盐岩与(含煤)碎屑岩并层	259.43	102.55	39.53
碳酸盐岩与基性火山岩并层	31.95	8.95	28.00
含煤碎屑岩	35.37	12.48	35.30
含基性组分碎屑岩	35.71	12.90	36.14
基性—超基性火山岩	190.73	56.48	29.61
中基性侵入岩	10.40	3.61	34.70
合计	830.77	284.41	34.23



图 4 云南省土壤重金属地质高背景区耕地分布

Fig. 4 Distribution map of cultivated land in high geological background areas of soil heavy metals in Yunnan Province

能力弱的农作物。从空间分布看,滇东地区分布于地质高背景区的耕地面积和集中连片程度明显高于其他地区,且主要受碳酸盐岩、含煤碎屑岩、基性—超基性火山岩和早三叠世含基性组分碎屑岩等岩性共同影响,因此应重点加强滇东地区耕地土壤与农产品协同监测力度,保障农产品食用安全质量。

3 结论

1)首次全面、系统利用云南省区域地质图和1:20万水系沉积物测量成果,划定出61个土壤重金属地质高背景单元,总面积 $8.31 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省国土面积的21.09%;明确了影响土壤重金属超农用地筛选值的岩性主要为碳酸盐岩、基性—超基性火山岩、中基性侵入岩、含煤碎屑岩和含基性组分碎屑岩5类,据此全省地质高背景区可划分为7类岩性组合。

2)昆明—玉溪、昭通—会泽地区土壤重金属污染风险评价结果表明:位于调查区的各地质高背景单元土壤重金属多因子综合等级评价超标比例均在60%以上,证明本次划定的土壤重金属地质高背景区结果合理。

3)全省土壤重金属地质高背景区超标重金属元素主要为Cu、Cr、Ni、Cd,而As主要于碳酸盐岩地层中存在超标风险,Pb、Zn仅于个别地层中存在超标风险,Hg基本无超标风险。

4)全省位于土壤重金属地质高背景区的耕地面积约284.41万公顷,占全省国土面积的7.22%,其中滇东地区分布于地质高背景区的耕地面积和集中连片程度明显高于其他地区,建议重点加强滇东地区耕地土壤与农产品协同监测力度,保障农产品食用安全。

参考文献 (References):

- [1] Alloway B J. Heavy metals in soils; Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability [M]. Netherlands: Springer, 2013.
- [2] Cai L M, Xu Z C, Bao P, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and source of arsenic and heavy metals in the agricultural soils in Shunde, Southeast China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148: 189–195.
- [3] Sardar A, Shahid M, Natasha, et al. Risk assessment of heavy metal (loid)s via Spinacia oleracea ingestion after sewage water irrigation practices in Vehari District [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (32): 39841–39851.
- [4] 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: 143–153.
- [5] Palma P, Lopez-Orozco R, Lourinha C, et al. Assessment of the environmental impact of an abandoned mine using an integrative approach: A case-study of the "Las Musas" mine (Extremadura, Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 84–94.
- [6] Sun Z H, Xie X D, Wang P, et al. Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a poly-metallic mine in South China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 217–227.
- [7] Xie W S, Peng C, Wang H T, et al. Bioaccessibility and source identification of heavy metals in agricultural soils contaminated by mining activities [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77 (17): 606.
- [8] Acosta J A, Martínez-Martínez S, Faz Á, et al. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials [J]. Geoderma, 2011, 161 (1/2): 30–42.
- [9] Hseu Z Y, Zehetner F, Fujii K, et al. Geochemical fractionation of chromium and nickel in serpentine soil profiles along a temperate to tropical climate gradient [J]. Geoderma, 2018, 327: 97–106.
- [10] Wang H X, Li X M, Chen Y, et al. Geochemical behavior and potential health risk of heavy metals in basalt-derived agricultural soil and crops: A case study from Xuyi County, eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 729: 139058.
- [11] Wen Y B, Li W, Yang Z F, et al. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China [J]. Chemosphere, 2020, 245: 125620.
- [12] Wu W H, Qu S Y, Nel W, et al. The influence of natural weathering on the behavior of heavy metals in small basaltic watersheds: A comparative study from different regions in China [J]. Chemosphere, 2021, 262: 127897.
- [13] Xia X Q, Ji J F, Yang Z F, et al. Cadmium risk in the soil-plant system caused by weathering of carbonate bedrock [J]. Chemosphere, 2020, 254: 126799.
- [14] 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): 449–459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. Environmental Science, 2020, 41 (1): 449–459.
- [15] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (1): 18–26.
- Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, et al. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (1): 18–26.
- [16] 夏学齐, 季峻峰, 杨忠芳, 等. 母岩类型对土壤和沉积物镉背景的控制: 以贵州为例 [J]. 地学前缘, 2022, 29 (4): 438–447.
- Xia X Q, Ji J F, Yang Z F, et al. Parent rock type control on cadmium background in soil and sediment: An example from Guizhou Province [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29 (4): 438–447.

- [17] 赵万伏,宋根先,管冬兴,等.典型黑色岩系分布区土壤重金属污染与生物有效性研究[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1332-1341.
Zhao W F, Song Y X, Guan D X, et al. Pollution status and bio-availability of heavy metals in soils of a typical black shale area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1332-1341.
- [18] 彭敏.西南典型地质高背景区土壤—作物系统重金属迁移富集特征与控制因素[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
Peng M. Heavy metals in soil-crop system from typical high geological background areas, southwest China: Transfer characteristics and controlling factors [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [19] 谢学锦,任天祥,孙焕振.中国地球化学图集[M].北京:地质出版社,2012.
Xie X J, Ren T X, Sun H Z. Geochemical atlas of China [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 2012.
- [20] Tian H Y, Zhang C, Qi S H, et al. Concentration and spatial distribution of potentially toxic elements in surface soil of a peak-cluster depression, Babao Town, Yunnan Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(6): 3122.
- [21] Zhang L, Mckinley J M, Cooper M, et al. Transfer processes of potential toxic elements (PTE) between rock-soil systems and soil risk evaluation in the Baoshan area, Yunnan Province, Southwest China [J]. Applied Geochemistry, 2020, 121: 104712.
- [22] Zhang L, Mckinley J M, Cooper M, et al. A regional soil and river sediment geochemical study in Baoshan area, Yunnan province, southwest China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 217: 106557.
- [23] 成杭新,彭敏,赵传冬,等.表生地球化学动力学与中国西南土壤中化学元素分布模式的驱动机制[J].地学前缘,2019,26(6):159-191.
Cheng H X, Peng M, Zhao C D, et al. Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of distribution patterns of chemical elements in soil, southwest China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 159-191.
- [24] 周亚龙,郭志娟,王成文,等.云南省镇雄县土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J].物探与化探,2019,43(6):1358-1366.
Zhou Y L, Guo Z J, Wang C W, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Zhenxiong County, Yunnan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1358-1366.
- [25] 洪涛,孔祥胜,岳祥飞.滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评估[J].环境科学,2019,40(10):4620-4627.
Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a peak-cluster depression area, southeast of Yunnan Province [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4620-4627.
- [26] 李丽辉,王宝禄.云南省土壤 As、Cd 元素地球化学特征[J].物探与化探,2008,32(5):497-501.
Li L H, Wang B L. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(5): 497-501.
- [27] 范晨子,袁继海,刘成海,等.云南省安宁地区土壤重金属等元素生态地球化学调查与评价[J].物探与化探,2022,46(3):761-771.
Fan C Z, Yuan J H, Liu C H, et al. Eco-geochemical survey and evaluation of heavy metals and other elements in soil in Anning City, Yunnan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 761-771.
- [28] 唐瑞玲,王惠艳,吕许朋,等.西南重金属高背景区农田系统土壤重金属生态风险评价[J].现代地质,2020,34(5):917-927.
Tang R L, Wang H Y, Lyu X P, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in farmland system from an area with high background of heavy metals, southwestern China [J]. Geoscience, 2020, 34(5): 917-927.
- [29] 王乔林,宋云涛,王成文,等.滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J].中国环境科学,2021,41(8):3693-3703.
Wang Q L, Song Y T, Wang C W, et al. Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in western Yunnan [J]. China Environmental Science, 2021, 41(8): 3693-3703.
- [30] 王宇,彭淑惠,杨双兰.云南岩溶区 As、Cd 元素异常特征[J].中国岩溶,2012,31(4):377-381.
Wang Y, Peng S H, Yang S L. The anomaly features of As and Cd in the Karst area in Yunan Province [J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4): 377-381.
- [31] 肖高强,陈杰,白兵,等.云南典型地质高背景区土壤重金属含量特征及污染风险评估[J].地质与勘探,2021,57(5):1077-1086.
Xiao G Q, Chen J, Bai B, et al. Content characteristics and risk assessment of heavy metals in soil of typical high geological background areas, Yunnan Province [J]. Geology and Exploration, 2021, 57(5): 1077-1086.
- [32] 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.
- [33] 谢学锦,任天祥,奚小环,等.中国区域化探全国扫面计划卅年[J].地球学报,2009,30(6):700-716.
Xie X J, Ren T X, Xi X H, et al. The implementation of the regional geochemistry-national reconnaissance program (RGNR) in China in the past thirty years [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(6): 700-716.
- [34] 张春霖,黄立勇,冯沾明,等.用水系沉积物分析数据评价浙江土壤环境质量[J].物探与化探,2005,29(4):329-333.
Zhang C L, Huang L Y, Feng Z M, et al. The application of the stream sediments analytical data to the evaluation of soil environmental quality of Zhejiang Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(4): 329-333.
- [35] 周余国,高启芝,刘继顺,等.个旧地区区域地球化学环境的系统评价[J].物探与化探,2009,33(6):620-625.

- Zhou Y G, Gao Q Z, Liu J S, et al. A systematical evaluation of the regional geochemical environment of Gejiu area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 33(6): 620–625.
- [36] 朱辉, 黄强, 马瑛, 等. 基于水系沉积物的土壤环境预测模型——以青海省东部地区为例[J]. *矿产勘查*, 2021, 12(12): 2440–2446.
- Zhu H, Huang Q, Ma Y, et al. Soil environment prediction model based on stream sediment—A case study of eastern Qinghai Province [J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(12): 2440–2446.
- [37] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- China Environmental Testing Center. Chinese soil element background value [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [38] 刘东盛, 王学求, 聂兰仕, 等. 中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测[J]. *地球科学*, 2022, 47(8): 2781–2794.
- Liu D S, Wang X Q, Nie L S, et al. Cobalt geochemical anomalies characteristics and genesis in China and metallogenic prospecting areas prediction [J]. *Earth Science*, 2022, 47(8): 2781–2794.
- [39] 刘东盛, 王学求, 周建, 等. 中国钴地球化学基准值特征及影响因素[J]. *地球学报*, 2020, 41(6): 807–817.
- Liu D S, Wang X Q, Zhou J, et al. Characteristics of China's cobalt geochemical baselines and their influence factors [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(6): 807–817.
- [40] 张衡, 李仁涛, 巴金, 等. 川西南美姑地区下三叠统飞仙关组地球化学特征及其对物源和构造环境的指示意义[J]. *矿物岩石*, 2019, 39(3): 52–59.
- Zhang H, Li R T, Ba J, et al. Geochemical characteristics of the lower Triassic Feixianguan formation in Meigu area, southwestern Sichuan and its significance for the provenance and tectonic setting [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2019, 39(3): 52–59.
- [41] 张英利, 王宗起, 王刚, 等. 上扬子会泽地区早三叠世飞仙关组砂岩物源特征: 来自重矿物铬尖晶石和碎屑锆石的限定[J]. *地质论评*, 2016, 62(1): 54–72.
- Zhang Y L, Wang Z Q, Wang G, et al. Chromian spinel, zircon age constraints on the provenance of early Triassic Feixianguan formation sandstones from Huize Area, Upper Yangtze Region [J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 54–72.
- [42] Yang Q, Yang Z F, Filippelli G M, et al. Distribution and secondary enrichment of heavy metal elements in karstic soils with high geochemical background in Guangxi, China [J]. *Chemical Geology*, 2021, 567.
- [43] 刘炫志. 碳酸盐岩风化成土过程中重金属元素的富集行为及其环境风险评价——以贵州岩溶区为例 [D]. 衡阳: 南华大学, 2019.
- Liu X Z. Enrichment behavior of heavy metal elements and environmental risk assessment during weathering and soil formation of carbonate rocks—A case study of karst region in Guizhou Province [D]. Hengyang: University of South China, 2019.
- [44] 王济, 王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应 [J]. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 23(2): 113–120.
- Wang J, Wang S J. The sources and crops effect of heavy metal elements of contamination in soil [J]. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Science*, 2005, 23(2): 113–120.
- [45] 邹若松. 浙西典型黑色岩系区重金属地表迁移规律及农田土壤风险评价 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2021.
- Zou R S. Surface migration of heavy metals and risk assessment of farmland soil in typical black shale area of western Zhejiang Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [46] Peng B, Rate A, Song Z L, et al. Geochemistry of major and trace elements and Pb-Sr isotopes of a weathering profile developed on the Lower Cambrian black shales in central Hunan, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 51: 191–203.
- [47] 周东晓, 彭渤, 王勤, 等. 扬子地台西缘下寒武统黑色页岩土壤元素地球化学特征 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(1): 59–71.
- Zhou D X, Peng B, Wang Q, et al. Elemental geochemical characteristics of soils derived from the lower Cambrian black shales in the western Yangtze Platform, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(1): 59–71.
- [48] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高铝地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 [J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2877–2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2877–2884.
- [49] 杨连升, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州黑色页岩土壤地球化学特征 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(5): 1023–1037.
- Yang L S, Zhou M Z, Xiong K N, et al. Geochemical characteristics of black-shale soils in Guizhou Province, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(5): 1023–1037.
- [50] 张迪, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州遵义下寒武统黑色页岩区土壤重金属污染和人体健康风险评价 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34(5): 1247–1257.
- Zhang D, Zhou M Z, Xiong K N, et al. Assessment of pollution and human health risk from heavy metals in soils and crops in the lower Cambrian black shale area, Zunyi, Guizhou Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(5): 1247–1257.

Delineation of areas with high geological background values of heavy metals in soils in Yunnan Province, China based on geological big data technology

XIAO Gao-Qiang^{1,2,3}, ZHAO Juan⁴, CHEN Zi-Wan^{2,3,5}, SONG Xu-Feng^{2,3,5}, ZHU Neng-Gang⁵

(1. Yunnan Geological Survey, Kunming 650051, China; 2. MNR Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration & Utilization,

Kunming 650051, China; 3. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, China; 4. Yunnan Ecological and Environmental Monitoring Center, Yunnan 650034, China; 5. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China)

Abstract: This study aims to systematically investigate the distribution and over-limit elements of areas with high geological background values of heavy metals in soils in Yunnan Province. GIS spatial analysis was conducted based on the heavy metal content data from a province-wide 1 : 200,000 stream sediment survey and the regional geological map. The analysis results were validated using the data of heavy metals in soils in Kunming, Yuxi, Zhaotong, and other regions. A total of 61 geological units were identified, with heavy metal content in soils exceeding the screening values of agricultural land, accounting for 21.09% of the total land area of Yunnan. The cultivated land in high geological background areas covers an area of approximately 2.844 1 million hectares, accounting for 7.22% of the total land area of Yunnan. The lithologies that cause over-limit heavy metals in soils primarily comprise carbonate rocks, mafic-ultramafic volcanic rocks, intermediate mafic intrusive rocks, coal-bearing clastic rocks, and clastic rocks with mafic components. The over-limit heavy metal elements in high geological background areas are dominated by Cu, Cr, Ni, and Cd. In contrast, As manifests an over-limit risk mainly in carbonate rock formations, Pb and Zn only exhibit an over-limit risk in individual strata, and Hg almost shows no over-limit risk.

Key words: heavy metal in soil; high geological background area; geological big data; 30 m global land cover data; Yunnan Province

(本文编辑:蒋实)