李雅男,夏学齐,杨忠芳,等.碳酸盐岩发育土壤重金属高背景:形成因素和风险特征 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):11-19.
Li Y N, Xia X Q, Yang Z F, et al. High background of soil heavy metals developed from carbonate rocks: issues about formation and risk [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):11-19.

碳酸盐岩发育土壤重金属高背景:形成因素和风险特征

李雅男[1],夏学齐[1*],杨忠芳[1],卢新哲[2],黄春雷[2] (1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083；2.浙江省地质院,浙江 杭州 310007)

摘要：从空间分布、元素组合、高背景范围、元素富集程度的控制因素,以及形成原因和风险特征等方面,系统梳理碳酸盐岩有关的土壤重金属高背景研究进展.当前普遍认为,该类高背景形成的主要因素是母岩风化过程中的“次生富集”,即钙等常量元素淋失造成镉等微量元素的相对富集,在此过程中,铁锰矿物对这些元素的原地富集发挥了重要作用.从宏观角度,湿热的气候更有利于形成更高的背景含量.总体上,碳酸盐岩残积背景下镉等元素具有“高背景,低活性”特征,而在以其为物源的冲积区,存在酸溶态较高的现象,在土壤酸化等特定条件下,存在被活化风险.在中小尺度空间变异复杂的情况下,如何对该类高背景下自然背景与人为污染进行区分,开展相关风险定量识别,以及制定相关管控措施,是未来研究的重要方向.

关键词：土壤；重金属；地质高背景；碳酸盐岩；形成原因；风险特征
中图分类号：X131.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0011-09

High background of soil heavy metals developed from carbonate rocks: issues about formation and risk. LI Ya-nan[1], XIA Xue-qi[1*], YANG Zhong-fang[1], LU Xin-zhe[2], HUANG Chun-lei[2] (1.School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China；2.Zhejiang Geology Institute, Hangzhou 310007, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：11~19

Abstract：The research progress of high background of soil heavy metals related to carbonate rocks was systematically reviewed from the aspects of spatial distribution, element combination, spatial coverage, controlling factors, formation process, and risk characteristics. At present, it was generally believed that the main causation for the formation of this type of high background was the “secondary enrichment” of elements in the weathering process of parent rock, that is, the leaching of major elements, e.g. Ca, caused the relative enrichment of trace elements, e.g. Cd. In this process, iron and manganese minerals played an important role in the in-situ concentration of these elements. From the geographical perspective, the hot and humid climate was conducive to the formation of a higher background content. In general, Cd and other elements in soil developed from carbonate eluvium had the character of “high background with low activity”, while in the alluvial areas formed by carbonate weathered materials, high acid soluble state of Cd might have occurred with risks of activation under conditions such as soil acidification. With high spatial variation of soil heavy metals in such areas, especially in the medium and small spatial scales, problems such as differentiation between natural background and anthropogenic pollution, quantitative recognition of relative risks, and development of control measures for environmental management, were required to be solved in the future study.

Key words：soil；heavy metals；high geochemical background；carbonate rocks；causes of formation；risk characteristics

土壤环境调查获取的重金属含量往往是自然背景和人为污染共同作用的结果.土壤元素背景值是指未受或少受人类活动影响的自然环境中土壤自身的化学元素含量[1-2].研究土壤重金属背景含量及其影响因素和空间分布特征是有效区分自然因素和外源污染,并在此基础上开展土壤环境标准制定、农用地土壤可持续管理、土壤修复目标确定和科学合理进行土地利用等基础性工作[3].

2014 年,生态环境部与自然资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,中国西南地区的 Cd、Hg、As、Pb 等重金属污染问题尤为突出,其中地质高背景是重要原因之一[4].随着 2016 年《土壤污染防治行动计划》、2018 年《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)以及 2019 年《土壤污染防治法》的相继实施,土壤重金属地质高背景的研究逐渐受到学术界和

收稿日期：2025-05-15
基金项目：国家重点研发计划(2022YFC3702303);国家自然科学基金重点项目(42330703);浙江省财政地质专项资金项目[省资](2023021)
* 责任作者, 教授, xiaxueqi@cugb.edu.cn

管理部门的广泛关注.

已有研究显示,西南地区 Cd 等土壤高值区与碳酸盐岩关系密切.Xia 等[5]基于 GIS 的空间叠加分析显示,云南、贵州和广西三省区土壤 Cd>1.5mg/kg 的高值区面积约 6.89 万 km^2,其中 89.9%与碳酸盐岩背景有关,碳酸盐岩地区土壤 Cd 含量可能比其它地质背景区高几倍至十几倍.

综上,研究碳酸盐岩背景下,土壤重金属高背景的发生原因,形成规模,覆盖区域,及其风险特征,对于区分自然背景和人为污染,有针对性地进行土壤重金属污染和风险管控,具有十分重要的意义.近些年,随着政府管理部门和学术界对该问题的重视,相关论文发文量呈现上升趋势[6],并成为土壤环境领域关注的热点之一.本文将近些年取得的认识进行了梳理.

1 空间特征和元素组合

1.1 空间规模特征

揭示土壤重金属高背景空间分布和规模等问题需要大数据量的支撑.当前,区域地球化学勘查(简称“区域化探”)、多目标区域地球化学调查(或称 1:25 万土地质量地球化学调查)、1:5 万土地质量地球化学调查等区域性土壤和沉积物地球化学调查工作,给相关研究提供了数据基础[7-11].这些调查利用 1~2km 甚至更密的网格采样获取土壤和水系沉积物等地表物质,并在严格的质量监控措施下获取重金属和常量元素等几十种元素含量.由于这些数据覆盖了多种岩性和地质背景信息,同时具有多种成土环境参数组合,给高背景空间分布、富集程度和影响因素等方面的研究提供了基础资料.

谢学锦等[12]基于区域化探数据编纂的图集显示,我国西南地区土壤(或沉积物)Cd 高值区不仅含量高,且分布范围很大,对比京津冀、长三角,珠三角等经济发达地区,工业发现水平有限的云南、贵州和广西等地区出现如此大范围高值显然不能使用人为污染解释.为考察土壤 Cd 等重金属含量与地质因素之间的关系,Xia 等[5]根据现行土壤环境质量标准(GB15618−2018)将区域化探 Cd 含量分级,并与西南地区岩性图对比,结果显示,Cd 含量大于 1.50mg/kg 的高值区与较纯碳酸盐岩地区具有很高的吻合度(图 1);而土壤 Cd 含量在 0.30~1.50mg/kg 的地区则多分布在泥灰岩、泥云岩,以及碳酸盐岩与泥页岩混层区域.对土壤 As 含量的分析也显示了类似的规律[13-14].

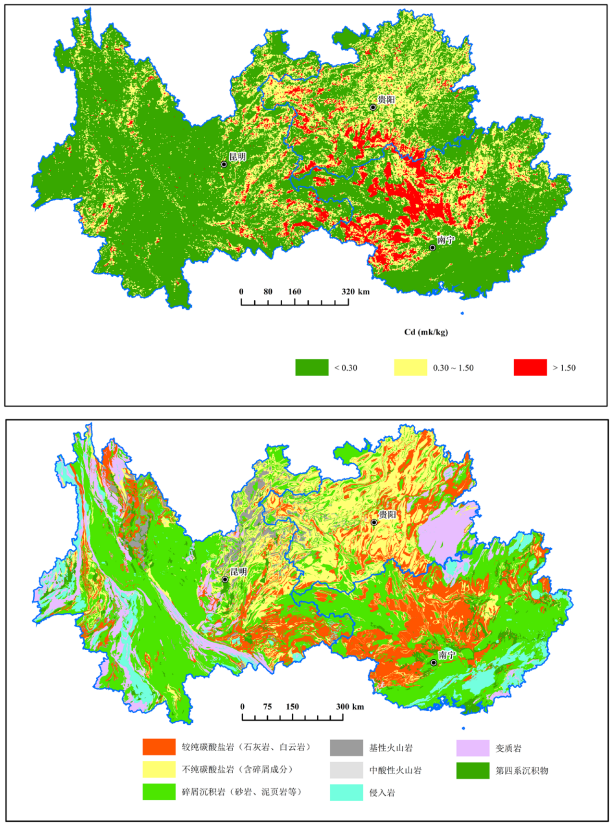


图 1 西南典型区土壤(或沉积物)Cd 含量与岩性空间对应关系

Fig.1 Spatial correspondence between soil (or sediment) Cd content and lithology in typical areas of Southwest China

基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改.自文献[5]修改

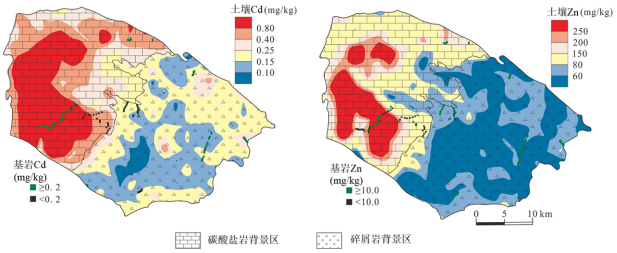


图 2 代表性地区不同岩性背景下典型土壤重金属空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of heavy metals in typical soils under different lithologic backgrounds in representative areas

自文献[15]修改

在空间分布上,这种土壤重金属背景还存在两大特点:空间变异很大,如图 1 所示,碳酸盐岩区土壤

Cd 四分位数和十分位数区间远高于其它岩类,其值域分布范围甚至可以跨 1~2 个数量级;在空间分布模式上[15],碳酸盐岩与其它岩类(如碎屑岩)地区边界上多存在突变特征,但在大面积的碳酸盐岩内部仍以高值和低值之间的渐变为主(图 2).因此,除了碳酸盐岩与其他大类基岩的区别外,还有哪些因素控制着背景重金属含量或其空间变异?这成为重要的研究内容之一.

1.2　富集元素种类

出于其环境意义,当前文献中对于碳酸盐岩地区土壤富集研究较多的元素为 Cd 和 As,其次为 Pb、Zn、Cr、Hg、Cu、Ni 等国家土壤环境质量标准(如 GB15618)中所涉及的元素.显然,该类背景区相对富集的元素可能不止这些.侯青叶等[16]基于多目标区域地球化学调查数据,给出了各类地质单元下土壤 52 种元素含量的统计参数.这里使用碳酸盐岩区域均值相对于全国均值的比值,获取其富集系数,用以指示各元素在碳酸盐岩发育土壤中的相对富集程度,计算结果见表 1.绝大多数微量元素,包括 Cd 等重金属元素,在碳酸盐岩发育土壤中存在显著富集现象,富集系数较高的元素依次为:Hg、Cd、Mo、Se、As 等.

需要注意的是,区域尺度上(如我国南北方),元素富集程度受气候等因素影响存在显著差异[13],例如北方干冷地区的 As、Cd 富集系数普遍低于西南湿热地区,这与表 1 的全国平均趋势并不矛盾,而是尺度效应的体现.Cd 与 As 虽地球化学性质不同,但在西南碳酸盐岩区土壤中共同富集的原因在于:Cd 主要通过碳酸盐矿物溶解后被黏土矿物和铁锰氧化物吸附而富集;As 则通过与铁锰氧化物形成稳定络合物而留存;西南地区湿热气候下强烈的风化作用既促进碳酸盐溶解(利于 Cd 富集),又加速铁锰氧化物的生成(利于 As 固定),因此两者在同一区域形成富集[17-20].

表 1　碳酸盐岩发育土壤相对于全国土壤各元素富集系数

Table 1　Enrichment coefficient of carbonate soil relative to the national soil elements

元素	Hg	Cd	Mo	Se	As	Sb	B	U	Bi	F	V
富集系数	2.26	2.07	1.99	1.86	1.70	1.59	1.54	1.54	1.52	1.51	1.51
元素	I	Pb	Li	Co	Ti	Cu	N	Cr	Nb	Fe_2O_3	Mn
富集系数	1.50	1.40	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.37	1.33	1.33	1.32
元素	Zn	Ni	TC	W	S	Sc	Sn	Br	Th	Au	Ce
富集系数	1.31	1.31	1.28	1.28	1.23	1.22	1.22	1.21	1.19	1.19	1.18
元素	Tl	Ag	Y	Ga	Be	Al_2O_3	La	Zr	Ge	P	Rb
富集系数	1.17	1.15	1.14	1.12	1.10	1.09	1.08	1.08	1.07	1.03	1.02
元素	SiO_2	K_2O	MgO	Cl	Ba	Sr	Na_2O	CaO			
富集系数	0.97	0.90	0.89	0.81	0.78	0.53	0.39	0.33			

2　背景值的影响因素

在碳酸盐岩高背景区土壤 Cd 等重金属含量分布的影响因素分析方面,基于 GIS 的空间分析和空间数据挖掘起到了重要作用,取得的认识如下.

2.1　基岩成分细分类型

碳酸盐岩为一大类岩石,其成分可以是方解石、白云石和泥砂质陆源碎屑成分的不同比例混合.因此,可以将纯石灰岩、白云岩和泥页岩看作其三种端元类型,同时存在泥灰岩、泥云岩等过渡类型.汪花等[14]通过对贵州省表层沉积物 As 地球化学图与岩性类型分布图进行空间叠加分析,发现碳酸盐岩对表生沉积物 As 含量分布的制约性强于非碳酸盐岩;同时还发现灰岩与白云岩的纯度对表生沉积物 As 含量空间分布也具有制约性,其中灰岩组合类型的制约性较为明显.Xia 等[5]和夏学齐等[21]为了印证基岩细分成分类型对其发育土壤重金属富集程度的控制,于广西选择了较“纯”的石灰岩(马平组)、白云岩(娄山关组)和碎屑岩(长安组)岩组,利用区域化探数据,统计了对应区域 Cd 统计特征(图 3).结果可以看出,在相同风化条件下,基岩细分成分类型可以对其发育土壤 Cd 等元素含量产生明显差异.

2.2　气候条件

Cd 和 As 等元素的地球化学图显示[12],尽管我国南方和北方均存在碳酸盐岩基岩区,但高背景现象在南方更为明显,这暗示着气候等地表风化条件

可能是影响其背景富集程度的又一重要因素.为确证该推论,Xia 等[13]基于土壤地球化学数据,从西南湿热地区到中北部干冷地区选择了典型碳酸盐岩背景区,对比了土壤 As 含量差异(图 4).结果显示,随着气候条件从湿热到干冷,土壤 As 含量呈明显递减特征.

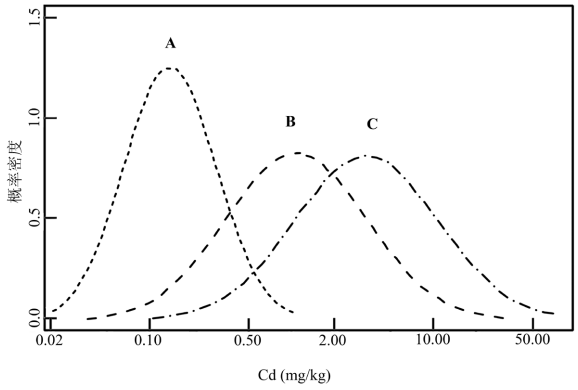


图 3 碳酸盐岩典型端元岩类发育土壤(或沉积物)Cd 含量概率密度曲线

Fig.3 Probability density curve of Cd content in soils(or sediments) developed from typical end-members of carbonate rocks

横坐标为对数坐标,A:莲花山组泥页岩 B:大埔组白云岩 C:马平组石灰岩(自文献[5]修改)

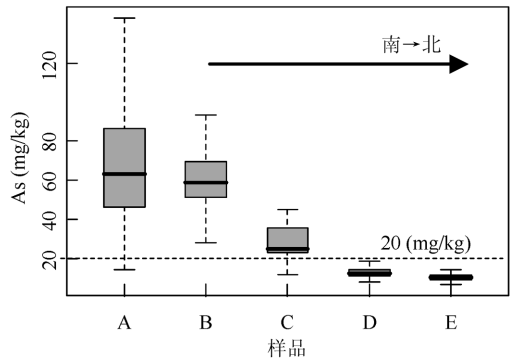


图 4 我国从西南湿热区至西北干冷区典型碳酸盐岩背景下土壤 As 含量箱线图

Fig.4 Boxplot of soil As content under typical carbonate background from southwest humid-hot regions to northwest dry-cold regions in China

A:广西横县唐家湾组;B: 广西武鸣县融县组;C:贵州六盘水关岭组;D:河南巩义市马家沟组;E:宁夏青铜峡马家沟组(自文献[13]修改)

为了进一步确证气候条件对于碳酸盐岩背景下土壤 As 的控制,Xia 等[13]收集了中国、欧洲、北美和澳大利亚等各地土壤调查数据,选择了典型碳酸盐岩区,获取了多年平均气温(MAT)和多年平均降水量(MAP)与土壤 As 的定量关系,结果显示"湿热"气候是形成高背景的重要因素,澳大利亚高温少雨和爱尔兰低温多降水成土环境都形成不了太高的土壤 As 背景(图 5).利用这种数量关系,可以基于基岩和气候数据从全球尺度对土壤 As 富集程度进行空间预测.

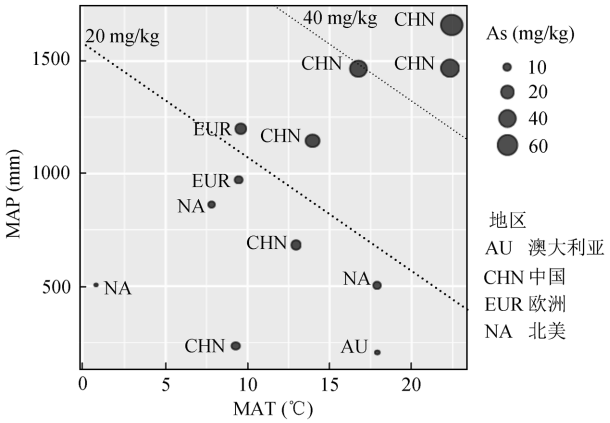


图 5 全球尺度下 MAT 和 MAP 对碳酸盐岩背景下土壤 As 含量的控制

Fig.5 MAT and MAP controlling of soil As content under carbonate rock background on a global scale

自文献[13]修改

类似现象在我国东南碳酸盐岩区(如福建、广东)同样存在:福建龙岩碳酸盐岩区土壤 Cd、As 平均含量分别为 0.87mg/kg 和 15.2mg/kg,显著高于全国均值,且与年均温、降水量呈正相关[22].但西南地区因岩溶地貌发育,碳酸盐岩出露面积更广,且地形封闭性强,元素淋溶后再富集效应更显著,因此高背景现象更突出[15].

2.3 土地利用方式

相关研究显示,在西南地区的区域尺度上,土地利用方式对碳酸盐岩地区土壤重金属高背景效应的重要性排在岩性和气候因素之后.如 Xia 等[5]基于单因素方差分析发现,只有选择单一岩组和类似气候条件下,才能得到不同利用类型下土壤 Cd 含量的差异,对广西马平组发育土壤的分析显示,森林条件比草地和农田更容易富集 Cd.使用地理探测器对该地区 As 的分析也显示[13],土地利用因素的重要性也排在岩性和气候条件(MAT 和 MAP)后.

综上,从空间特征角度,影响碳酸盐岩发育土壤 Cd 和 As 等重金属富集规模和富集程度的因素包括

内因(基岩成分)和外因(气候和土地利用方式等),它们在不同空间尺度上发挥作用.从全球和大区域尺度上,气候因素造成的差异更为明显,而在更小的区域尺度上,基岩成分细分类型和土地利用方式的效应逐渐显现.

3　形成原因机制

3.1　原因及类型

目前已知可形成土壤重金属高背景的岩性类型包括碳酸盐岩[15,19],黑色岩系[23-24]和玄武岩[25]等.它们具有不同的形成原因和元素组合特征.胡鹏杰等[6]将高背景形成原因分为运积型、残积型和次生富集型三大类型,并将碳酸盐岩高背景类型归为次生富集型大类.但笔者对此划分具有类似但稍有不同的观点.

在基岩残积区,土壤发育物源来源于风化产物,因此,其元素高背景的产生的可能原因有如下两个.1)母岩中某种元素含量高,造成残积物及其发育土壤继承了该高含量,可称为母岩“继承性”高背景;这里的“继承性”从意义上讲,大体上对应了胡鹏杰等[6]划分中的“残积型”,笔者推荐使用“继承”二字,避免“残积”二字,因为次生富集型也发育于残积物,需要避免混淆.玄武岩中存在高含量 Ni、Cr 等元素,其风化形成的土壤中继承了这些元素的高含量特征,是典型的继承性高背景.2)母岩中对应元素含量不高,但在土壤发育过程,元素含量发生了浓缩富集,可称为“次生富集性”高背景.碳酸盐岩通常被认为是非常贫 Cd 的岩石类型,全球 Cd 平均含量为 0.03~0.065mg/kg,远低于其地壳丰度(0.2mg/kg)[26-27].但绝大多数文献数据都显示,其残积剖面或所发育土壤中 Cd 含量均高于母岩数倍或数十倍(表 2),因此碳酸盐岩高背景为次生富集型高背景类型,几乎已经成为共识[19,28-29].

但需要注意的是,不同地区碳酸盐岩母岩中 Cd 差异也很大;如果以农用地土壤污染风险 Cd 筛选值 0.3mg/kg 作参考,也存在不少母岩高于该值的情况(表 2).因此,确切地讲,碳酸盐岩地区高背景的形成原因是以“次生富集”为主,局部地区可能叠加有母岩高 Cd 的“继承性”[30].甚至极端情况下,后者可能成为主要因素.例如,瑞士 Jura 山区中侏罗统鲕粒灰岩中 Cd 可达 4.9mg/kg,但由于其风化程度低,矿物学和 Cd 形态分析均显示元素次生富集迹象微弱,发育土壤中 Cd 含量 2.0mg/kg,其“超标”主要由母岩继承引起[31].

表 2　典型区碳酸盐岩及其发育土壤 Cd 含量(mg/kg)

Table 2　Cd contentin carbonate rocks and their developing soils in typical areas(mg/kg)

地点	基岩 Cd	土壤 Cd	土壤/基岩	来源
湖南吉首	0.05	0.23	4.6	[32]
贵阳花溪	0.38	3.15	8.3	[32]
贵州松桃	0.08	0.47	5.9	[32]
贵州遵义	0.21	1.17	5.6	[32]
北京	0.05	0.33	6.6	[33]
广西凌云	0.46	4.40	9.9	[34]
广西凌云	0.88	19.88	22.6	[34]
广西凌云	1.06	14.66	13.8	[34]
广西凌云	0.30	3.64	12.0	[34]
广西龙州	0.20	6.54	32.7	[35]
广西全州	0.15	0.43	2.9	[36]
安徽青阳	0.05±0.02	0.30±0.19	5.8	[37]
贵州六盘水	0.12±0.04	0.83±0.25	7.0	[37]
广西	0.45±0.31	4.94±3.46	11.0	[19]
瑞士 Jura 山	0.28	0.82	2.9	[31]

3.2　次生富集过程与机制

当前在富集过程机制方面,较为普遍的认识基于碳酸盐岩“二阶段”风化成土理论[5,13,28,38]:1)碳酸盐岩溶蚀,基岩中“杂质或不溶物”逐步堆积形成残积土阶段;2)类似于其它岩类(如泥页岩)的残积土演化阶段.在第一阶段,碳酸钙(镁)成分的溶解淋失,造成了 Cd 和 As 等元素的相对浓缩富集;在第二阶段的铝硅酸盐(或从实验角度称为酸不溶物,从岩石学角度称为泥沙质陆源碎屑成分)风化过程中,脱硅富铝等作用使这些元素可以发生进一步富集.有意思的是,冯志刚等[29]研究认为,尽管 Cd 等元素在风化过程中逐步富集,但这些元素仍然会发生流失,即发生了“绝对亏损和相对富集”,Wei 等[39]基于 Cd 同位素的分析也证实了这点.Wen 等[19]认为该过程中,碳酸盐溶解释放的 Cd 被酸不溶物中黏土矿物及铁/锰氧化物吸附而不易淋失,并随酸不溶物风化成熟度的增大而进一步残余富集.此外,许多研究表明,在后期演化过程中,As、Cd、Pb 等元素很容易通过表面吸附、络合或共沉淀形式与铁锰氧化物结合:As 主要通过与 Fe–O 键形成内层络合物,Cd 则通过静电引力吸附于 MnO_2 表面,这一过程使元素在铁锰结合态中占比较高,但仍属于可解吸的活性形态,而非晶

格内部的稳定态[20,40-41].表现在进行元素分步提取时,经常观测到这些元素在残积成土后铁锰结合态占据了很大的比例[42];同时,还经常观测到 As、Cd 等元素含量与 Fe_2O_3 或 Mn 等呈现显著的正相关关系[13,43].甚至局部地区形成的土壤铁锰结核中存在极高含量的 Cd、As、Pb、Cr、Zn、Ni、Cu、Mo 等元素,使得铁锰结核的形成和存在成为这些元素在残积成土过程中不断积累的重要因素[44-48].

4 风险特征

众所周知,由于赋存状态存在差异,土壤中重金属元素总量无法反映其风险[49-50],或者说,使用基于总含量值的评价方法与实际生态风险可能存在很大偏差,这一点在碳酸盐岩背景土壤中非常明显.大多数研究显示,碳酸盐地区铁锰氧化物结合态和残渣态是 Cd 和 As 等元素主要赋存状态[51-52];尽管从总量上看,超过管制值或筛选值的比例相对于非碳酸盐岩地区可能很高,但作物超标率比非碳酸盐岩地区明显较低[53-54],即,对碳酸盐岩地区土壤元素分步提取表现出的风险,以及所生产的作物中重金属含量表现出的风险比利用当前(农用地)土壤环境质量标准评价表现出的风险明显要低[43,55-57].因此,总体上讲,土壤 Cd 和 As 等重金属具有“高背景,低活性或低风险的特点”[30,37,58].

尽管如此,在风险管控方面,仍然需要注意以下情况.首先是碳酸盐岩区地形差异可能造成 Cd 等元素活性态占比或风险差异.前述相关研究主要取样于碳酸盐岩残坡积物发育的土壤,而通过对比发现,同样物源的冲积物发育土壤相对比残坡积物发育土壤具有更高的 Cd 酸溶态或活性态占比.Xia 等[37]的研究认为,受地形影响,在原地的“基岩→残积物→土壤”演化过程中,母岩中 Cd 等元素除了一部分残留在原地浓缩富集外,还有一部分释放至冲积物地区[29,39],由于这些地区通常土壤 pH 值较高造成 Cd 等元素以“酸溶态”的形式积累,比如以胶体吸附态或碳酸镉等固体沉淀的形式存在[34];而在冲积物地区农田耕作等因素很容易造成土壤酸化导致这些不稳定形态的元素释放,从而被作物吸收,极端情况下可能产生“镉米”(图 6).As 的风险主要体现在其生物有效性与土壤氧化还原条件密切相关:在碳酸盐岩残积土中,As 多与铁锰氧化物结合(残渣态占比>60%),生物有效性较低[15];但在冲积区或长期淹水的稻田中,还原条件会促使铁锰氧化物溶解,释放出活性 As(主要为 As^{3+}),被水稻根系吸收后积累于籽粒中[13].研究显示,广西岩溶区稻田稻米 As 超标率虽低于 Cd,但部分区域仍超过食品安全标准(GB 2762−2017),存在潜在健康风险[47].

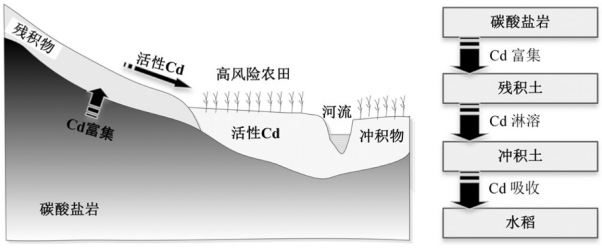


图 6 由于地形迁移造成的沉积土壤 Cd 镉风险产生过程示意

Fig.6 A schematic diagram of the process of Cd and Cd risk in sedimentary soils due to topographic migration

自文献[37]修改

5 展望

综上,经过近些年的研究,碳酸盐岩地区土壤 Cd 等重金属元素高背景形成原因,过程机制,空间规模和风险特征等方面均渐趋明晰,但在国家需求和环境应用等方面,还存在以下薄弱环节需要破解.

5.1 自然背景与人为污染的区分方法

高背景区土壤 Cd 等重金属含量具有空间变异大的特点,当前对于其空间变异控制因素的认识,如气候和土地利用因素,多在区域尺度发挥作用.事实上,从调查数据看,中小尺度下元素含量的空间变异也很显著.在当前环境管理中,自然背景和人为污染的区分思路仍然基于“低背景下的低空间变异”的理想假设,即假定某区域具有空间相对均一的背景值,在污染地区,测试所得观测值扣除背景值后即人为因素造成的污染;而背景值由于对应样本量较大,且其较低的值域分布容易与污染样本分开,通过数理统计方法比较容易获得.但在“背景值处处不同”的高背景区,该方法难以奏效.由于重金属等元素含量是自然演化过程的产物,其含量值与常量元素或矿物学特征具有协同演化关系,即后者可能隐藏着背景值信息;而人为叠加部分则与此无关.因此,厘清成土演化过程中,重金属元素含量与常量元素,矿物演化甚至气候水文条件和微地貌等成土环境的定量

关系,从而推知其“背景值”,可能成为破解高分辨率背景值空间分布难题,从而分离自然背景和人为污染的入口;当前机器学习等大数据技术的发展给该工作提供了技术条件.

5.2　风险指示指标的定量表征方法及其空间预测

当前研究表明,碳酸盐岩高背景区土壤不仅重金属元素总量具有高空间变异性,其分步提取和作物含量所表现出的风险特征也具有很大空间差异.例如,土壤 Cd 等活性态占比具有空间差异和复杂的控制因素,如何构造指标定量指示区域性土壤风险特征?目前对这些方面的认识和相关研究还很欠缺.破解这些问题,获取高空间分辨率风险分布特征,不仅具有科学意义,在实际应用上更有利于高背景区土壤重金属风险分区管控,土地资源有效利用,以及节约管理和修复治理成本.

5.3　制定有针对性的管理措施和管控标准

现有土壤管控标准基于一般条件下的土壤重金属风险特征制定.但由于碳酸盐岩残积环境下,重金属活性态占比相对较低,造成土壤超标的情况下,所生产作物中元素含量等情况所反映的风险并不高.直接采用当前“筛选值”和“管制值”(GB15618-2018)进行农用地风险管控可能造成一部分土地不能有效利用.根据土壤背景自然属性,研究制定高背景区特殊情况下的农用地土壤环境质量标准,将更有利于土壤环境管理,推进土地资源有效利用[43,56].

参考文献:

[1] 田嘉禹,刘　俐,汪群慧,等.中美土壤元素背景值调查研究中数理统计方法运用及影响 [J]. 环境科学研究, 2020,33(3):718-727.
Tian J Y, Liu L, Wang Q H, et al. Application and influence of mathematical statistics methods in the investigation of soil element background values in China and the United States [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(3):718-727.

[2] Reimann C, Garrett R G. Geochemical background—concept and reality [J]. Science of the Total Environment, 2005,350(1):12-27.

[3] 吴运金,周　艳,杨　敏,等.国内外土壤环境背景值应用现状分析及对策建议 [J]. 生态与农村环境学报, 2021,37(12):1524-1531.
Wu Y J, Zhou Y, Yang M, et al. Analysis of application status and countermeasures of soil environmental background values at home and abroad [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(12):1524-1531.

[4] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析 [J]. 农业环境科学学报, 2017,36(9):1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the “National Survey Bulletin on Soil Pollution Status”[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017,36(9):1689-1692.

[5] Xia X, Ji J, Zhang C, et al. Carbonate bedrock control of soil Cd background in Southwestern China: Its extent and influencing factors based on spatial analysis [J]. Chemosphere, 2022,290:133390.

[6] 胡鹏杰,詹　娟,刘　娟,等.土壤重金属地质高背景成因、风险与管控研究进展 [J]. 土壤学报, 2023,60(5):1363-1377.
Hu P J, Zhan J, Liu J, et al. Research progress on genesis, risks and management of heavy metals in soils with high geochemical background [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(5):1363-1377.

[7] 谢学锦.矿产勘查的新战略 [J]. 物探与化探, 1997,(6):402-410.
Xie X J. A new strategy for mineral exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997,(6):402-410.

[8] 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. Thirty years of the national regional geochemical survey program in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009,30(6):700-716.

[9] Li M, Xi X, Xiao G, et al. National multi-purpose regional geochemical survey in China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014,139:21-30.

[10] 李　括,彭　敏,赵传冬,等.全国土地质量地球化学调查二十年 [J]. 地学前缘, 2019,26(6):128-158.
Li K, Peng M, Zhao C D, et al. Twenty years of national land quality geochemical survey [J]. Earth Science Frontiers, 2019,26(6):128-158.

[11] 奚小环.大数据科学从信息化、模式化到智能化:现代地球化学应用研究的新范式 [J]. 地学前缘, 2021,28(1):308-317.
Xi X H. Big data science from informatization and modeling to intellectualization: A new paradigm for modern geochemical application research [J]. Earth Science Frontiers, 2021,28(1):308-317.

[12] 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: Geological Publishing House, 2012.

[13] Xia X, Ji J, Zhang C, et al. The degree of soil arsenic background enrichment by carbonate weathering is mainly controlled by climate in large spatial scale [J]. Science of the Total Environment, 2024,951:175868.

[14] 汪　花,刘秀明,刘　方,等.地质岩性对贵州省表生沉积物中砷的空间分布的制约 [J]. 地球化学, 2019,48(2):114-125.
Wang H, Liu X M, Liu F, et al. Constraints of geological lithology on the spatial distribution of arsenic in surficial sediments of Guizhou Province [J]. Geochimica, 2019,48(2):114-125.

[15] Yang Q, Yang Z, 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, 2021,567:120081.

[16] 侯青叶,杨忠芳,余　涛,等.中国土壤地球化学参数 [M]. 北京:地质出版社, 2020.
Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Geochemical parameters of soils in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.

[17] 余　飞,罗　恺,王佳彬,等.重庆岩溶地质高背景区土壤-农作物系统重金属累积特征及影响因素 [J]. 中国岩溶, 2023,42(1):71-83.
Yu F, Luo K, Wang J B, et al. Accumulation characteristics and

influencing factors of heavy metals in soil-crop systems in high geochemical background karst areas of Chongqing [J]. Carsologica Sinica, 2023,42(1):71-83.

[18] Guo Z, Gu S, Li Q, et al. Carbonate mineral controls the transport of Cd from tailings to surrounding soils: An example from Cd-rich Niujiaotang Zn mine in Guizhou Province, Southwest China [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022,10.10.3389/FENVS.2022.1045093.

[19] Wen Y, Li W, Yang Z, 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.

[20] Li B, Lin K, Liu X, et al. Mechanism of cadmium (Cd) enrichment in the soil of karst areas with high geochemical background in Southwest China [J]. Chemical Geology, 2025,673:122523.

[21] 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. Control of parent rock types on cadmium background in soils and sediments: A case study of Guizhou [J]. Earth Science Frontiers, 2022,29(4):438-447.

[22] 王 蕊,陈 楠,张二喜.龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 [J]. 环境科学, 2023,44(4):2252-2264.
Wang R, Chen N, Zhang E X. Pollution risks and contribution analysis of Pb, Cd and As in soils and crops of different land use types in Longyan City [J]. Environmental Science, 2023,44(4):2252-2264.

[23] Liu Y, Xiao T, Perkins R B, et al. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017,176:42-49.

[24] 杨梓璇,彭 渤,徐婧喆,等.湘西下寒武统黑色页岩风化元素活动规律 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017,36(6):984-994.
Yang Z X, Peng B, Xu J Z, et al. Element mobility during weathering of Lower Cambrian black shales in Western Hunan [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017,36(6):984-994.

[25] Wang H, Li X, 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.

[26] Gong H, Rose A W, Suhr N H. The geochemistry of cadmium in some sedimentary rocks [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1977,41(12):1687-1692.

[27] 刘 威.贵州岩溶区贫镉碳酸盐岩土壤镉富集/超常富集现象的探究 [D]. 衡阳:南华大学, 2022.
Liu W. Investigation on the enrichment/super-enrichment of cadmium in soils derived from cadmium-poor carbonate rocks in Guizhou karst areas [D]. Hengyang: University of South China, 2022.

[28] Yang Q, Yang Z, Zhang Q, et al. Transferability of heavy metal(loid)s from karstic soils with high geochemical background to peanut seeds [J]. Environmental Pollution, 2022,299:118819.

[29] 冯志刚,刘 威,张兰英,等.贫 Cd 碳酸盐岩发育土壤 Cd 的富集与超常富集现象——以贵州岩溶区为例 [J]. 地质通报, 2022,41(4):533-544.
Feng Z G, Liu W, Zhang L Y, et al. Enrichment and super-enrichment of cadmium in soils derived from cadmium-poor carbonate rocks: A case study of Guizhou karst areas [J]. Geological Bulletin of China, 2022,41(4):533-544.

[30] 文宇博.广西岩溶地质高背景地区土壤重金属的富集机制和生物有效性研究 [D]. 南京:南京大学, 2020.
Wen Y B. Study on enrichment mechanisms and bioavailability of heavy metals in soils of high geochemical background karst areas in Guangxi [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.

[31] Quezada-Hinojosa R P, Matera V, Adatte T, et al. Cadmium distribution in soils covering Jurassic oolitic limestone with high Cd contents in the Swiss Jura [J]. Geoderma, 2009,150(3/4):287-301.

[32] 罗 慧,刘秀明,王世杰,等.中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源 [J]. 生态学杂志, 2018,37(5):1538-1544.
Luo H, Liu X M, Wang S J, et al. Pollution characteristics and sources of soil Cd in the concentrated karst distribution areas of Southern China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018,37(5):1538-1544.

[33] Ni S, Ju Y, Hou Q, et al. Enrichment of heavy metal elements and their adsorption on iron oxides during carbonate rock weathering process [J]. Progress in Natural Science, 2009,19(9):1133-1139.

[34] 田恒川,徐国志.镉地球化学行为与我国西南地区镉污染 [J]. 现代矿业, 2014,30(11):134-136.
Tian H C, Xu G Z. Geochemical behavior of cadmium and cadmium pollution in Southwest China [J]. Modern Mining, 2014,30(11):134-136.

[35] 苗亚琼.广西龙州北部岩溶地区岩石与土壤中重金属的相关性及土壤环境质量研究 [D]. 南宁:广西师范学院, 2018.
Miao Y Q. Study on the correlation between heavy metals in rocks and soils and soil environmental quality in the karst area of northern Longzhou, Guangxi [D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2018.

[36] Liu P, Wu Z, Luo X, et al. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in acidic farmland of the karst region in southern China—A case study of Quanzhou County [J]. Applied Geochemistry, 2020,123:104764.

[37] Xia X, Ji J, Yang Z, et al. Cadmium risk in the soil-plant system caused by weathering of carbonate bedrock [J]. Chemosphere, 2020,254:126799.

[38] 王世杰,季宏兵,欧阳自远,等.碳酸盐岩风化成土作用的初步研究 [J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 1999,(5):441-449.
Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, et al. A preliminary study on the weathering and pedogenesis of carbonate rocks [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1999,(5):441-449.

[39] Wei X, Bai X, Wen X, et al. A large and overlooked Cd source in karst areas: The migration and origin of Cd during soil formation and erosion [J]. Science of the Total Environment, 2023,895:165126.

[40] Suda A, Makino T. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: A review [J]. Geoderma, 2016,270:68-75.

[41] Gasparatos D. Sequestration of heavy metals from soil with Fe–Mn concretions and nodules [J]. Environmental Chemistry Letters, 2013,11(1):1-9.

[42] Zhu L, Qi L. Chemical forms of heavy metals in carbonate-derived laterite and enrichment of its iron oxide minerals [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1997,16(3):263-270.

[43] Yang Q, Yang Z, Zhang Q, et al. Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil−rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China [J]. Science China Earth Sciences, 2021,64(7):1126−1139.

[44] Lin K, Yang Z, Yu T, et al. Enrichment mechanisms of Mo in soil in the karst region Guangxi, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023,255:114808.

[45] Lin K, Li B, Guan D X, et al. Enrichment mechanisms of Cadmium in natural manganese−rich nodules from Karst Soils [J]. Environmental Science & Technology, 2025,59(14):7256−7267.

[46] Ji W, Yang Z, Yu T, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in the Fe–Mn Nodules in the Karst Area of Guangxi, Southwest China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021,106(1):51−56.

[47] Ji W, Luo Z, Huang J, et al. Geochemical behaviors of heavy metal(loid)s in soil ferromanganese nodules in typical Karst Areas in Southwest China [J]. Agronomy, 2023,13(6):1602.

[48] 苏春田,黄晨晖,邹胜章,等.广西黎塘岩溶区富含铁锰结核土元素迁移特征 [J]. 南方农业学报, 2017,48(9):1594−1599.
Su C T, Huang C H, Zou S Z, et al. Element migration characteristics of soils rich in iron−manganese nodules in the Litang karst area of Guangxi [J]. Journal of Southern Agriculture, 2017,48(9):1594−1599.

[49] Xia X, Yang Z, Li G, et al. Practicability of monitoring soil Cd, Hg, and Pb pollution based on a geochemical survey in China [J]. Chemosphere, 2017,172:217−224.

[50] Zhang M, Liu Z, Wang H. Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010,41(7): 820−831.

[51] Liu X, Zhang C, Yu T, et al. Identification of the spatial patterns and controlling factors of Se in soil and rice in Guangxi through hot spot analysis [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023,45(7): 4477−4492.

[52] 罗　超,龙　健,刘承帅,等.典型喀斯特地质高背景区土壤剖面镉的迁移富集机制与形态转化过程研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023,42(5):1164−1172.
Luo C, Long J, Liu C S, et al. Migration, enrichment mechanisms and speciation transformation of cadmium in soil profiles in typical high geochemical background karst areas [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2023,42(5):1164−1172.

[53] 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 and migration/ enrichment characteristics of heavy metals in soil−crop systems in typical carbonate rock areas of Guangxi [J]. Environmental Science, 2020,41(1):449−459.

[54] 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. Migration and enrichment characteristics and controlling factors of heavy metals in soil−crop systems in typical high geochemical background areas of Southwest China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

[55] 唐瑞玲,徐进力,刘　彬,等.西南典型碳酸盐岩高地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型 [J]. 环境科学, 2024,45(5): 2995−3004.
Tang R L, Xu J L, Liu B, et al. Chemical speciation, influencing factors and regression models of heavy metals in farmland soils in typical high geological background carbonate rock areas of Southwest China [J]. Environmental Science, 2024,45(5):2995−3004.

[56] 杨　琼.广西岩溶区土壤 Cd 等元素次生富集、生态风险与防控 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.
Yang Q. Secondary enrichment, ecological risks and prevention of soil Cd and other elements in karst areas of Guangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

[57] 蔚　蓝.西南地质高背景区土壤−水稻系统重金属富集特征及影响因素 [D]. 沈阳:沈阳化工大学, 2022.
Wei L. Enrichment characteristics and influencing factors of heavy metals in soil−rice systems in high geological background areas of Southwest China [D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2022.

[58] Wang Y, Jing J, Li Y, et al. Bioavailability and speciation of potentially toxic trace metals in limestone−derived soils in a Karst Region, Southwestern China [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2025,236(3):169.

作者简介：李雅男(2001−),女,黑龙江牡丹江人,中国地质大学(北京)硕士研究生,主要研究方向为环境地球化学.1090338118@qq.com.