

# 地层岩性变化对土壤 Zn 空间异质性的影响

## ——以贵州省为例

杨鉴<sup>1, 2</sup> 刘方<sup>1, 2</sup> 朱健<sup>1, 2</sup> 陈祖拥<sup>2</sup> 刘元生<sup>21</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**【摘要】:** 为探究地层岩性变化对土壤锌(Zn)含量空间分布的影响,采用地统计分析与GIS相结合的方法对贵州省境内262个采样点土壤Zn含量进行空间插值,并与贵州省地质图、岩性组合类型分布矢量图进行空间叠加。结果表明:贵州省区域土壤Zn含量水平可划分为中低锌区(0~80mg/kg)、丰锌区(80~200mg/kg)、预警区(>200mg/kg);贵州省土壤Zn空间块金系数达0.48,土壤Zn分布具有空间中等程度自相关性。土壤Zn预警区主要分布在石炭系和二叠系地层,土壤丰Zn区主要分布在三叠系和寒武系地层,而土壤中低Zn区主要分布在震旦系、奥陶系地层。此外,同一地层上碳酸盐岩对土壤Zn含量水平的影响程度大于碎屑岩,且碳酸盐岩占比越高的区域,土壤Zn的富集现象越明显。研究区域内土壤Zn含量的空间异质性与地层年代有明显的关联性,碳酸盐岩比例是制约土壤Zn富集的主导因子,地层年代及岩性组合变化是导致贵州省区域土壤Zn含量出现空间异质性的主要原因,土壤丰Zn区是发展富Zn农产品的重要区域。

**【关键词】:** 土壤 Zn 空间分布 地质岩性 地层年代

**【中图分类号】:** S153.6 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)08-1836-09

锌(Zn)是人体必需的微量元素之一,也是植物生长发育中不可缺少的微量元素,植物对Zn的吸收主要来源于其生长的土壤,而土壤Zn的分布受到地质背景、土壤母质及土地利用方式等因素的影响<sup>[1]</sup>。世界各地土壤Zn含量有明显的差异性,加拿大平均含量为74.0mg/kg,日本土壤背景值为58.0mg/kg,我国土壤Zn背景值为67.7mg/kg<sup>[2]</sup>。近年来的地球化学调查发现,西南地区一般土壤Zn含量含量范围为19.0~204.0mg/kg<sup>[3]</sup>,而预警区范围达204.0~2000.0mg/kg,主要分布在滇东北、黔西、滇东南、桂西、四川荣经等地<sup>[4]</sup>。研究表明,地质构造、矿床和高背景值的岩石风化成土是影响土壤Zn含量分布存在差异性的主要原因<sup>[5]</sup>,页岩风化物发育的土壤Zn含量比泥岩风化物形成的土壤高<sup>[6]</sup>,如贵州省寒武系存在富Zn页岩资源。也有研究发现,不同地层年代的岩石风化后形成的土壤中Zn含量出现明显的差异性,四川万源地区寒武系地层形成的土壤Zn含量平均值大于100.0mg/kg,高于同区域其他地层的土壤Zn含量<sup>[7]</sup>。同时不同时期地层中同一类型岩石发育而成的土壤Zn含量水平也有较大的差异<sup>[8]</sup>。可见,同一地层年代由于岩性不同,或者岩性相同但地层年代不同,其形成的土壤Zn含量存在明显的差别,土壤Zn含量水平与不同地质年代的地层及岩性有密切的关联性,存在明显的空间分布差异性<sup>[9]</sup>。近年来,全国各地开展了大面积的耕地质量地球化学调查对特色农产品开发利用起到了积极作用;其中,贵州省富Zn土壤调查评价促进了富锌硒茶的产业化发展。因而,研究不同类

**作者简介:** 杨鉴(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染治理与生态修复。E-mail:1041258808@qq.com;刘方,E-mail:lfang6435@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1612442);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788号)

型土壤中的 Zn 含量水平及其空间分布特征具有重要的现实意义。但是，目前主要是根据行政区域来研究土壤 Zn 的空间分布，对大尺度区域的地质环境下土壤 Zn 元素的空间分布特点研究还不够深入。因此，本文以贵州省为研究对象，探讨地质条件变化对土壤 Zn 含量空间分布的影响，全面了解土壤 Zn 空间分布的规律性及其制约因素，依据地质环境特点筛选出适合发展富 Zn 农产品种植的区域，为贵州省特色农业产业化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

贵州省位于云贵高原东部，年均气温为 15.3℃，年降雨量为 1100~1200mm；境内地形起伏较大，一般海拔在 600~1800m。贵州地层发育齐全，从前震旦系到第三系及第四系均有分布；贵州省地层在空间上有 3 个主要的时期，第一是海相陆源碎屑岩，第二为震旦纪晚期至晚三叠世纪中期海相碳酸盐岩为主，第三是晚三叠世纪后的陆相碎屑岩<sup>[10]</sup>，充分体现贵州陆地是由海相演变为陆相的演变过程。贵州省东部及东南部地层年代主要为震旦系，沉积类型多，岩性为浅变质岩；寒武系分布广除下统底部为碎屑岩组成外，其余以碳酸盐岩为主；奥陶系分布范围也广，主要为浅海相碳酸盐岩夹碎屑岩；志留系主要分布在黔北和黔东北，以滨海相陆源碎屑岩为主；泥盆系主要分布在黔南，以海相碳酸盐岩为主；石炭系在贵州南部出露，地层发育良好且连续，以海相碳酸盐岩为主；二叠系分布广泛且发育完整，出露面积大，有碳酸盐岩为主夹碎屑岩、石灰岩、煤系组成；三叠系分布也广泛，发育良好，中下部是海相沉积，上部是陆相地层；白垩系主要是紫红色粗碎屑沉积，与侏罗系仅集中在黔北赤水河一带。贵州省境内岩性分布具有地域性，以沉积岩为主，岩性组成结构和化学成分具有差异性<sup>[11]</sup>。全省土壤类型多样化，地带性土壤和非地带性土壤分布交错<sup>[12]</sup>；其中，黄壤分布面积最大，其次为石灰土。

### 1.2 土壤样品采集与分析方法

土壤样点布设基于地层及岩性和土壤类型变化，结合不同土壤类型分布面积的大小，重点考虑黄壤、石灰土区域的布点数量，分别是 72、121 个样点；其次是红壤、黄棕壤、紫色土区域，分别是 16、20、27 个样点；棕壤区域布点较少，仅 6 个样点。研究区布设的 262 个自然土采样点基本覆盖了贵州省主要地层年代、岩性和土壤类型，土壤样点具体分布见图 1。



图 1 贵州省岩性组合类型分布<sup>[13]</sup>及土壤采样点矢量图

在设置的土壤采样点采集表层土(0~15cm)，每个采样点采用五点法取约 1kg 混合样品。室内风干后去除植物残体和碎石等杂物，过 100 目筛后备用。土壤样品测试时，准确称量 0.1000g 左右土壤样品采用王水消煮法消解，用火焰原子吸收光谱仪测定

消解液中全量 Zn 浓度，再计算成土壤 Zn 的含量，同时加入标准样品进行质量控制。

### 1.3 数据处理与评价方法

本文前期根据中国西南地区七十六种元素地球化学图集的锌(Zn)地球化学图<sup>[3]</sup>进行空间矢量化；采用 SPSS 软件对 262 个采样点土壤 Zn 含量水平进行正态分布检验和统计分析；并运用 ArcGIS10.2 软件进行适用于普通克里金插值得到变异函数分析土壤 Zn 含量的空间结构<sup>[14]</sup>，结果见表 2。同时，根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)中最低筛选值 200mg/kg；结合富 Zn 茶、富 Zn 核桃等产地土壤 Zn 含量水平的要求一般土壤 Zn 含量大于 80mg/kg，结合前人划分方案<sup>[15]</sup>，并根据贵州省地域特点将土壤 Zn 含量划分为 3 个等级：即中低 Zn 区(0~80mg/kg)、丰 Zn 区(80~200mg/kg)、预警区(>200mg/kg)<sup>[16]</sup>，因为土壤 Zn 含量虽然大于 200mg/kg，农作物并不一定会造成污染，但是需要引起我们重视，故设立为预警区；同样中低 Zn 区农作物适当时候需要考虑人为补锌。本研究以贵州省区域土壤(262 个采样点)Zn 含量克里金插值图为基础，按照上述土壤 Zn 含量划分的 3 个等级，将贵州省区域土壤锌含量水平的空间分布划为 3 个区(图 2)，通过对该图与西南地区贵州省土壤锌(Zn)地球化学图(按上述土壤 Zn 含量划分的 3 个等级进行图件整理分区，见图 3)进行叠加分析，进一步确认贵州省区域土壤 Zn 含量空间分区的合理性。然后，将贵州省区域土壤锌含量空间分区图(图 2)与贵州省地质图进行空间叠加，探讨地层年代变化对区域土壤锌含量空间分布的影响，地理统计分析结果见表 3。

根据李瑞玲等研究<sup>[10]</sup>，贵州省区域岩性可分为碳酸盐岩和碎屑岩两大区域，其中在碳酸盐岩区域根据碳酸盐岩占比的高低，碳酸盐岩与碎屑岩的厚度及其组合方式进一步分为连续性碳酸岩(碳酸盐岩占比>90%)、碳酸盐岩夹碎屑岩(碳酸盐岩占比 70%~90%)和碳酸盐岩与碎屑岩互层(碳酸盐岩占比 30%~70%)，绘制出的 1:50 万贵州省岩性组合类型分布矢量图(图 1)。本研究通过把贵州省区域 262 个采样点与贵州省岩性组合类型分布矢量图进行叠加，统计出在碳酸盐岩区有 193 个土壤采样点(石灰土 121 个、黄壤 52 个、红壤 7 个、紫色土 2 个、黄棕壤 8 个、棕壤 3 个)，而在碎屑岩区有 69 个土壤采样点(黄壤 20 个、红壤 9 个、紫色土 25 个、黄棕壤 12 个、棕壤 3 个，详见图 1)。进一步将贵州省区域土壤锌含量空间分区图(图 2)与贵州省岩性组合类型分布矢量图(图 1)进行空间叠加及地理统计分析，统计结果见图 4、图 5。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同类型土壤 Zn 含量的差异性

通过对采集 262 个土壤样品按土壤类型进行分析，统计描述结果列于表 1。从表 1 可以看出，不同类型土壤 Zn 含量出现明显的差异性，其平均含量的大小顺序表现为棕壤>黄棕壤>石灰土>黄壤>紫色土>红壤。从变异系数的变化范围来看，黄壤变异系数大于 1.0，黄壤 Zn 含量为强变异<sup>[17]</sup>，其它土壤类型变异系数在 0.1~1.0 之间，属于中等变异。黄壤类土壤 Zn 含量变化范围较大，土壤 Zn 含量变化范围达 2.60~1320.50mg/kg；其次是石灰土，土壤 Zn 含量变化范围为 26.70~926.40mg/kg；紫色土主要分布在赤水市一带，相对其他土壤的地层年代和岩性较为单一，因此变异系数最小。调查区内土壤 Zn 含量变化范围达 0.70~1320.50mg/kg，其空间分布具有明显的异质性。土壤形成受母岩、海拔、地层年代、湿度的影响，同一类型土壤 Zn 含量的变异系数高，说明其他因素对土壤中 Zn 含量变化也有着较大的影响。

表 1 贵州省不同类型土壤样本数据描述性统计

土壤类型	样本数	几何均值(mg/kg)	算术均值(mg/kg)	范围值(mg/kg)	标准差	变异系数
黄壤	72	104.80	141.63	2.60~1320.50	156.54	1.11
红壤	16	79.67	114.34	0.78~302.70	68.35	0.60

石灰土	121	130.86	152.82	26.70~926.40	118.39	0.77
紫色土	27	80.95	84.07	43.40~135.60	22.66	0.27
黄棕壤	20	249.82	310.43	53.10~894.30	205.53	0.66
棕壤	6	347.39	376.05	204.50~370.60	142.26	0.38
总计	262	123.27	159.00	0.70~1320.50	143.10	0.90

## 2.2 区域土壤 Zn 空间分布的异质性

ArcGIS 普通克里金插值法中块金系数小于 0.25 说明空间相关性很强, 在 0.25~0.75 之间说明中等强度空间相关性, 若大于 0.75, 表明空间相关性较弱<sup>[18]</sup>。本研究采用 ArcGIS 普通克里金插值法, 可直观的看到研究区土壤 Zn 积累的空间分布特点<sup>[19]</sup>。根据克里金插值结果的标准平均值预测误差结果, 对空间结构特点进行分析。由表 2 可知, 克里金插值法中指数模型模型的标准平均误差值最小, 选择指数模型进行插值可以得到最好的空间分布图。根据选定模型块金值为 0.48, 土壤 Zn 在全省的分布有中等程度自相关性, 半变异函数拟合得到主变程为 11815m。说明贵州省境内土壤 Zn 含量的积累在主变程范围内有自相关性, 受全省不同地区的土壤类型、地层年代、地质环境等结构因素和随机因素影响<sup>[20]</sup>。

表 2 贵州省土壤 Zn 含量半变异函数模型相关参数

模型种类	块金值	主变程(m)	偏基台值	基台值	块金系数	标准平均预测误差
稳定的	0.53	8453	0.35	0.88	0.60	-0.02
球面模型	0.51	9854	0.37	0.88	0.58	-0.02
指数模型	0.48	11815	0.42	0.9	0.53	-0.01
高斯函数模型	0.53	8689	0.36	0.89	0.60	-0.03

全省土壤 Zn 含量分区(图 2)分布具有连续性、空间异质性的特征。预警区主要在毕节市与六盘水市的边界处, 与 2008 年地球化学图集的前人调查分布区域分布趋势基本相同<sup>[20]</sup>(图 3)重合度大于 80%, 因此分区和贵州省采样点克里金插值具有合理性。

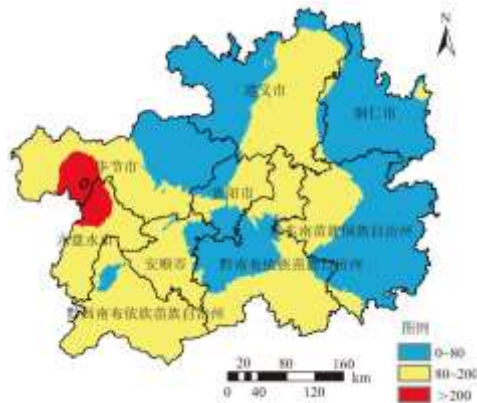


图2 贵州省区域土壤锌含量空间分区图

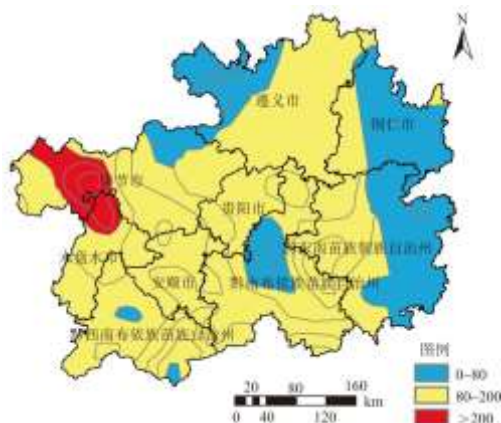


图3 西南地区贵州省土壤锌(Zn)地球化学图

通过贵州省区域土壤锌含量空间分区图与贵州省地质图叠加分析，贵州省中低 Zn 区地层年代类别广，范围大，主要分布在震旦系地层年代，而在寒武系、三叠系、二叠系、侏罗系、白垩系、石炭系、泥盆系、奥陶系、志留系均有出现。贵州省丰 Zn 区地层年代相对较少，主要为三叠系和二叠系地层，其次为寒武系、石炭系，其余为白垩系、泥盆系、奥陶系、志留系零散分布。贵州省预警区地层类别相对集中范围最小，由石炭系、二叠系、三叠系三个地层组成。可见，贵州省土壤 Zn 含量空间分布具有明显的地层年代变化。从岩性分布看，中低 Zn 区岩性主要为非碳酸盐岩，丰 Zn 区与预警区岩性主要为碳酸盐岩。

### 2.3 地层年代及岩性变化对土壤 Zn 空间分布的影响

对土壤采样点与贵州省地质图进行空间叠加。对不同地层年代的土壤 Zn 含量进行统计分析，结果见表 3。从全省区域不同地层年代统计结果看出，土壤 Zn 含量大小表现为：石炭系地层年代土壤 Zn 含量最高，范围值在 76.0~838.0mg/kg, 其次是二叠系、三叠系，土壤范围值在 28.0~894.0、32.0~348.0mg/kg, 可见，石炭系、二叠系、三叠系地层年代上的土壤 Zn 含量要高于其他地层年代。从变异系数来看，三叠系的土壤 Zn 含量变异系数远小于二叠系，说明三叠系上的岩性变化差异性相对较小，寒武系、二叠系、震旦系和石炭系变异系数大，说明这些地层年代分布较广，岩性变化大。从全省分布广涉及地层年代和岩性结构多的黄壤来看，对全省强变异的黄壤进行叠加统计，发现发育的地层年代时间不同，导致的土壤 Zn 含量不同。根据黄壤分布的地层年代，石炭系形成的土壤含量为 271.0mg/kg, 寒武系和二叠系分别为 290.9、177.9mg/kg, 最低的为侏罗系的 92.8mg/kg, 表明土壤 Zn 含量空间分布特征受到不同年代地层的影响。

表 3 贵州省不同地层年代土壤 Zn 含量

	样本数	几何均值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	中值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	变异系数
白垩系	13	76.45	79.27	71.24	22	117	50	0.28
侏罗系	7	91.84	93.07	71.24	22	117	50	0.24
三叠系	86	122.45	137	131.39	65	348	32	0.47
二叠系	38	137.85	185.59	133.61	174.7	894	28	0.94

石炭系	26	212.74	260.56	207	183.4	838	76	0.70
泥盆系	16	92.21	114.33	120.35	62	205	17	0.54
奥陶系	14	101.53	104.4	91.21	48.25	225	31	0.46
寒武系	48	124.40	193.43	133.3	222	1321	1	1.15
震旦系	14	97.67	122	108	91	345	23	0.75

全省分为碳酸盐岩区与碎屑岩区划分<sup>[13]</sup>,从图4看出,碳酸盐岩区、碎屑岩区土壤Zn富集程度出现明显的差异,中低Zn区在碎屑岩区占比最高,而丰Zn区和预警区面积在碳酸盐岩区显著高于碎屑岩区,分别占比为75.0%、69.4%。说明碳酸盐岩区土壤Zn富集明显高于碎屑岩区。

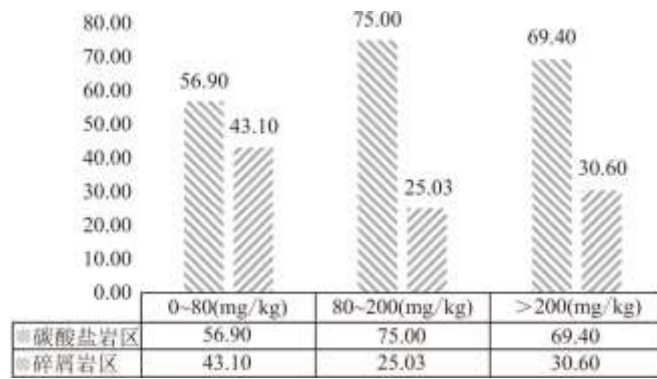


图4 贵州省碳酸盐岩区与碎屑岩区土壤Zn含量等级分区面积比例的变化

贵州省碳酸盐岩区岩性组合复杂多样,从地层年代变异系数来看,变异系数差异性大,说明不同地层年代上的岩性存在明显的差异性,因此有必要进一步分析碳酸盐岩区岩性组合的变化对土壤Zn空间分布的影响。用GIS将贵州省土壤Zn含量分区图与贵州省岩性图进行叠加分析,得到贵州省碳酸盐岩区土壤Zn含量区与岩性比例关系(图5),从岩性组合变化来看,在碳酸盐岩区域中连续性碳酸盐岩在预警区面积占比达50.4%,在中低Zn区和丰Zn区集中占比分别为31.3%和30.7%,也占主导地位;在碳酸盐岩夹碎屑岩中丰Zn区面积占比最大,说明该岩性风化成土主要集中在丰Zn区;而在碳酸盐岩与碎屑岩互层区的变化趋势明显随着碳酸盐岩含量越少,分区等级越小。进一步对碳酸盐岩和等级区进行Spearman相关性分析,中低Zn区、丰Zn区和预警区与碳酸盐岩类存在显著相关性( $P < 0.05$ )。由此可见,贵州省区域内土壤Zn含量的高低受碳酸盐岩类型影响。



图 5 碳酸盐岩区不同岩性组合下土壤 Zn 含量等级分区面积比例的变化

### 3 讨论

土壤 Zn 空间分布的差异性主要受土壤母质和地层年代组合变化影响。碳酸盐岩发育的土壤 Zn 含量明显的高于碎屑岩发育的土壤，碳酸盐岩发育的土壤一般呈中性至微碱性<sup>[21]</sup>，而碎屑岩发育的土壤多呈酸性至强酸性，土壤酸性条件下会加速 Zn 元素的淋溶迁移<sup>[22]</sup>。研究表明，碳酸盐岩地区土壤 Zn 含量与 pH、容重、有机质等土壤理化性质相关性并不显著<sup>[23]</sup>，土壤中碳酸盐态 Zn 含量受碳酸盐含量制约，碳酸盐通过吸附和共同沉淀保持土壤中 Zn 含量<sup>[24]</sup>，碳酸盐岩成土过程中碳酸盐含量的高低会对土壤中 Zn 含量造成影响<sup>[25]</sup>，碳酸盐岩中石灰岩、白云岩纯度越高就越能形成富 Zn 含量高的土壤；而且石灰岩发育的土壤对 Zn 元素的富集能力比白云岩发育的土壤更强，石灰岩发育的土壤较黏重，砂粒含量低，而白云岩主要是原地逐步淋溶的物理风化形成，土壤残留的砾石较多，颗粒较粗；同等条件下，白云岩裂隙发育具有更强的渗透性，Zn 元素更容易随雨水渗透流失<sup>[26]</sup>。此外，在贵州多降雨冲刷条件下，碳酸盐岩风化成土过程中 Ca 和 Mg 等盐基离子流失，最终土壤相对富含 Fe、Al 等组分<sup>[27]</sup>，而土壤中氧化铁对 Zn 有很高的富集活性，这样使得碳酸盐岩发育的土壤中 Zn 含量相对较高，同时形成的石灰土仍偏中性到微碱性，容易造成土壤锌的累积，从而影响土壤中 Zn 含量水平。可见，成土母岩是土壤 Zn 含量高低的重要因素，表生土壤与成土母岩具有地质同源性<sup>[28]</sup>；而且形成于不同地层年代的同一成土母岩中的 Zn 元素含量也有较大的差异，从而造成了土壤 Zn 含量在空间分布上出现异质性<sup>[29]</sup>。同时地层年代变化导致成土母岩中 Zn 元素含量差异性大，进而影响土壤 Zn 的空间分布。

不同地层年代岩石形成的环境条件有明显差异，从而影响岩石中含锌矿物组分及数量的区别，而且土壤锌的来源主要受到成土母质的影响。贵州震旦纪晚期至晚三叠世中期以海相碳酸盐岩为主，夹有部分海相碎屑岩；而晚三叠系晚期以后全为陆相碎屑岩<sup>[30]</sup>，近期研究表明，古环境对于沉积岩的形成有着明显的区别，以陆相和海相来说，是影响沉积岩形成差异性最明显的因素，海相沉积环境更容易形成较多的含锌矿物，这也就是三叠系后期和震旦系前期岩石中 Zn 含量较低的原因。石炭系地层以海相沉积岩为主，而且石炭系地层有形成含三水铝石的红土风化壳，铝土矿伴随铁氧化物，具有富集 Zn 的活性，这也应该是同样的海相沉积环境中，石炭系地层年代上形成的岩石和土壤中 Zn 含量水平高的原因<sup>[31]</sup>。从成矿模式来看，贵州黔西北五指山铅锌矿成矿模式与武陵运动有关，褶皱运动为沉积盖层准备物源，青白口纪形成富含 Pb、Zn 矿元素碎屑岩，早寒武系海相浅滩环境又提供了有利于 Pb、Zn 矿元素的富集<sup>[32]</sup>。贵州铅锌矿以石炭系下统和寒武系下统为主，除志留系，从震旦系到上二叠系均有产出。进一步佐证不同地层年代的古环境，沉积环境都会对岩石矿物的 Zn 元素含量产生影响。从而影响岩石风化成土后土壤中的 Zn 含量。

研究认为 Zn 含量大于 20mg/kg 的农产品即可称为富 Zn 产品<sup>[7]</sup>，土壤 Zn 含量的富集与农业产业布局有密切的关联性，如具有中国地理标志产品的贵州省丹寨富 Zn 米 (15.00~50.00mg/kg)。在同一地层年代，岩性类别和碳酸盐的纯度是决定土壤 Zn 含量的高低主要因素，所以同地层年代岩性中碳酸盐纯度越高，越容易风化形成富 Zn 土壤<sup>[26]</sup>。不同岩性对土壤中 Zn 元素富集作用有显著的影响<sup>[33]</sup>，例如，遵义凤冈县独特的寒武系富 Zn 页岩资源，开发了 Zn 含量达到 55.4~103.2mg/kg 的有机富 Zn 茶叶。据统计贵州省主要富 Zn 茶叶产地的岩性多数是碳酸盐岩夹碎屑岩区域，本研究根据贵州省土壤 Zn 分区、地层年代、土壤 Zn 含量与富 Zn 茶叶分布区进行对比分析，在石炭系、三叠系、寒武系地层土壤中 Zn 平均含量分别高达 212.74、122.45、124.40mg/kg，地层年代上有安顺市西秀区、湄潭县、凤岗县、余庆县、都匀地区产的富 Zn 茶 (43.80~52.40mg/kg)，其分布区属于丰 Zn 区，需要注意的是石炭系发育土壤中，碳酸岩盐占比高的区域可能会达到预警值，同时铅锌矿带区的地区也会导致土壤 Zn 含量超出阈值；而震旦系、泥盆系、地层土壤的 Zn 含量略低，平均含量为 97.13mg/kg 左右，虽然也能产出富 Zn 茶叶 (28.30~47.00mg/kg)，但是含量相对要低。此外，根据地层年代与岩性的交互协同组合，发现贵州省境内黔北的寒武系、二叠系、三叠系，黔西南和黔中地区的石炭系、三叠系、二叠系地层上碳酸盐岩占比高的地区，大部分属于土壤丰 Zn 区，因此该区域适宜发展富 Zn 核桃等特色农产品。可见，区域优势作物和名特产农产品取决于所处区域的地质环境，地质环境对于优势作物和特优农产品的生产有着显著影响<sup>[34]</sup>。从地层年代到区域岩性及土壤类型变化研究土壤 Zn 的空间分布特点，从宏观地层年代变化导致土壤 Zn 含量空间分布异质性到微观岩性组合及土壤类型变化影响土壤 Zn 含量水平，分析贵州省土壤 Zn 的空间分布特点及富 Zn 土壤区的划分，可为贵州省富 Zn 土壤资源及富 Zn 农产品的开发及利用提供科学依据，但在更具体区域尺度和地区富 Zn 农作物协同生产这方面还

值得深入研究。

## 4 结论

(1) 不同类型土壤 Zn 含量出现明显的差异性, 贵州省土壤 Zn 含量平均含量顺序表现为棕壤>黄棕壤>石灰土>黄壤>紫色土>红壤。土壤 Zn 含量水平主要是受其成土母岩制约, 碳酸盐岩风化形成的土壤 Zn 含量明显地高于碎屑岩发育的土壤。

(2) 贵州省土壤 Zn 含量水平可划分为中低 Zn 区、富 Zn 区、预警区 3 个区, 分布具有连续性、空间性异质性的特征。贵州省境内土壤 Zn 预警区地层年代主要为二叠系和石炭系地层, 土壤富 Zn 区地层年代主要是为三叠系和寒武系地层, 而土壤中低 Zn 区地层年代主要是震旦系、泥盆系、侏罗系。

(3) 土壤 Zn 含量空间分布与地层年代及岩性组合有密切的关联性, 地层年代变化对土壤 Zn 含量水平产生明显的影响, 同一地层年代岩性组合差异性对土壤 Zn 含量也有较大的影响, 地层年代及岩性组合变化是导致贵州省区域土壤 Zn 含量出现空间异质性的主要原因。

### 参考文献:

- [1]张敬雅, 李湘凌, 章凌曦, 等. 安徽庐江县砖桥潜在富硒土壤重金属元素空间变异与来源[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1594-1603.
- [2]陈敦和. 《中华人民共和国土壤环境背景值图集》简介[J]. 大自然探索, 1991(1):40.
- [3]谢学锦, 程志中, 张立生. 中国西南地区七十六种元素地球化学图集[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [4]鲁孝军. 云南保山凤庆地区成矿地质背景分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [5]王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 等. 桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(2):876-885.
- [6]王敬时. 四川万源地区土壤 Zn 地球化学特征及开发价值研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [7]李先琨, 黄玉清, 苏宗明, 等. 隆安县不同地层岩石与土壤中的元素自然含量特征[J]. 广西科学, 1997(2):33-38.
- [8]东野光亮, 赵文武. 中国土壤地质学研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2008(5):875-880.
- [9]刘建中, 王泽鹏, 杜远生, 等. 贵州开阳以东震旦系陡山沱组磷矿富磷机制与“三位一体”预测找矿重大突破[J]. 古地理学报, 2020, 22(5):913-928.
- [10]张亚冠. 黔中地区震旦纪陡山沱组磷矿沉积地质与大规模成矿作用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [11]聂爱国. 黔西南卡林型金矿的成矿机制及成矿预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [12]邹国础. 贵州土壤的发生特性及分布规律[J]. 土壤学报, 1981(1):11-23.

- 
- [13]李瑞玲,王世杰,周德全,等.贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J].地理学报,2003(2):314-320.
- [14]李晓岚,高秉博,周艳兵,等.基于时空不确定性分析的北京市农田土壤重金属镉含量等级划分[J].农业环境科学学报,2019,38(2):307-316.
- [15]汤明,董旭,姜明亮.石台县富Zn土壤分布特征及成因分析[J].安徽农学通报,2020,26(23):97-99.
- [16]万亚男.我国土壤中锌的生态阈值研究[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [17]刘继龙,刘璐,马孝义,等.不同尺度不同土层土壤盐分的空间变异性研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(2):305-312.
- [18]赵业婷.基于GIS的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [19]高文武,姜燕,赵晋陵.基于协同克里金插值法的土壤锰元素含量预测[J].地理与地理信息科学,2018,34(3):119-124.
- [20]陈桂香,高灯州,曾从盛,等.福州市农田土壤养分空间变异特征[J].地球信息科学学报,2017,19(2):216-224.
- [21]朱朝晖,宋明义,覃兆松,等.土壤地质单位的建立与研究——以浙江省为例[J].中国地质,2004(S1):51-61.
- [22]H,WAYNE,NESBITT,et al.Weathering of granodioritic crust,long-term storage of elements in weathering profiles,and petrogenesis of siliciclastic sediments[J].Geochimica Et Cosmochimica Acta,1997,61(8).
- [23]徐焯,邓艳,曹建华,等.云南小江流域不同土地利用类型土壤微量元素的对比分析[J].中国岩溶,2018,37(5):752-760.
- [24]张旭,曲燕,梁东丽,等.全国主要土壤铜、Zn、镍重金属形态及其与土壤性质的关系[J].环境科学导刊,2016,35(5):9-14.
- [25]孙子媛,文雪峰,吴攀,等.喀斯特地区典型风化剖面重金属超标程度及元素迁移特征研究[J].地球与环境,2019,47(1):50-56.
- [26]王尚彦,况顺达,戴传固,等.白云岩和石灰岩山区石漠化速度差异原因分析[J].贵州地质,2009,26(1):49-51.
- [27]周德全,王世杰,刘秀明.石灰土(碳酸盐岩风化壳)形成地球化学过程研究[J].地球与环境,2005(2):31-38.
- [28]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.
- [29]严明书,黄剑,何忠庠,等.地质背景对土壤微量元素的影响——以渝北地区为例[J].物探与化探,2018,42(1):199-205.
- [30]王立享.贵州古地理的演变[J].贵州地质,1994(2):133-140.
- [31]刘平,廖友常,张雅静.黔中—渝南石炭纪铝土矿含矿岩系中的海相沉积特征[J].中国地质,2015,42(2):641-654.

---

[32]金中国, 周家喜, 郑明泓, 等. 贵州普定五指山地区铅锌矿床成矿模式[J]. 矿床地质, 2017, 36(5):1169-1184.

[33]杨宋玲, 李方林, 黄建军, 等. 碳酸盐岩风化过程中次生富集作用对土壤地球化学异常评价的影响——以浙江下铜山铅锌异常评价为例[J]. 物探与化探, 2015, 39(6):1124-1131.

[34]刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(1):91-105.