



滇中姚安县富锌土壤地球化学特征及成因分析

黄加忠^{1,2}, 白平雁¹, 吴志超¹, 张 龙^{1,2}, 王 虎¹, 王长如¹, 阮 剑¹

1. 中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650000;

2. 自然资源部 自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南 昆明 650000

摘 要: 基于滇中大姚、姚安、南华、双柏四县土地质量地球化学调查数据, 研究姚安县土壤地球化学特征及富锌成因。结果表明: 姚安县表层土壤富锌(含量大于等于 84×10^{-6})面积 713.68 km², 占比 41.94%。受地质背景、成土母质、酸碱度等因素的影响, 锌高值区主要分布于太平镇-栋川镇-光禄镇沿线平坝区内, 呈近南北向面状展布。以姚安平坝区为例, 研究土壤富锌成因, 认为锌主要来源于区内富碱斑岩区的含锌岩石矿物风化, 受河流搬运作用, 由于黏土的吸附作用, 于第四系中坝区形成次生富集。

关键词: 富锌土壤; 地球化学; 成因分析; 云南省

Geochemistry and genesis of zinc-rich soil in Yao'an County, central Yunnan Province

HUANG Jia-zhong^{1,2}, BAI Ping-yan¹, WU Zhi-chao¹, ZHANG Long^{1,2}, WANG Hu¹,

WANG Chang-ru¹, RUAN Jian¹

1. Kunming Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Kunming 650000, China;

2. Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming 650000, China

Abstract: Based on the geochemical survey data of land quality of four counties (Dayao, Yao'an, Nanhua and Shuangbai) in central Yunnan Province, this paper studies the soil geochemical characteristics and Zn enrichment genesis in Yao'an County. The results show that the Zn-rich surface soil (with Zn content greater than or equal to 84×10^{-6}) covers an area of 713.68 km², accounting for 41.94% of the total area. Influenced by factors such as geological background, soil parent materials, and pH levels, the high-Zn zones are primarily distributed in the flatland areas along Taiping Town-Dongchuan Town-Guanglu Town, exhibiting a nearly north-south belt. Taking the Yao'an flatland as an example, the study on Zn enrichment genesis reveals that Zn primarily originates from the weathering of minerals in Zn-bearing rocks in alkali-rich porphyry areas. Through river transportation and subsequent clay adsorption processes, secondary Zn enrichment is completed in the Quaternary central flatland areas.

Key words: Zn-rich soil; geochemistry; genesis; Yao'an County; Yunnan Province

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-04-30. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“滇中大姚、姚安、南华、双柏四县土地质量地球化学调查”(ZD20220211); “西部地区战略性矿产靶区查证技术支撑”(DD20243018).

作者简介: 黄加忠(1986—), 男, 高级工程师, 从事勘查地球化学和环境地球化学工作, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail//496473164@qq.com

通信作者: 张龙(1988—), 男, 工程师, 从事基础地质和灾害地质工作, 通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号, E-mail//894639538@qq.com

引用格式: 黄加忠, 白平雁, 吴志超, 张龙, 王虎, 王长如, 阮剑. 滇中姚安县富锌土壤地球化学特征及成因分析[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 352-360.

Huang J Z, Bai P Y, Wu Z C, Zhang L, Wang H, Wang C R, Ruan J. Geochemistry and genesis of zinc-rich soil in Yao'an County, central Yunnan Province [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 352-360.

0 引言

锌是人体必需的微量元素之一,开发利用富锌特色土地资源,有利于地方经济发展。目前,国内尚未颁布富锌土地国家(或行业)标准。土地质量地球化学调查项目所圈定的优势土地多为富硒、富锗等。国内对土壤锌的研究主要集中于含量^[1-2]、有效性^[3-4]和分布^[5]等方面,针对土壤锌来源的研究较少。

本研究以姚安县为对象,利用滇中大姚、姚安、南华、双柏四县土地质量地球化学调查数据,总结对比姚安县表、深层土壤锌元素分布特征,结合土壤垂向剖面、底泥物和灌溉水样品分析结果,对表层土壤富锌成因进行分析,以期对姚安县富锌农产品种植及产业化发展提供科学依据。

1 研究区概况

姚安县地处云南省中部偏北,属云贵高原西部,行政区划隶属云南省楚雄彝族自治州。地貌上四周崇山环绕,中间为约120 km²的姚安平坝区。蜻蛉河发源于姚安县东南部的老街子一带,贯穿姚安坝子,流经大姚汇入长江。老街子是楚雄州境内最大的铅锌银矿集中区,主要矿石元素为Pb、Zn、Ag等,伴生元素为As、Cd等^[6]。

研究区地层由老到新依次为:中侏罗统张河组,上侏罗统蛇店组、妥甸组,下白垩统高峰寺组、普昌河组、景星组、马头山组,上白垩统江底河组,新近系和第四系(图1)。各地层均存在不同程度的风化剥蚀。岩浆岩较发育,主要为喷出相的碱性粗面岩,其次为浅成相的正长斑岩、煌斑岩和云斜煌斑岩脉,多集中分布于区内东南部太平镇-老街子附近^[7]。

以地层岩性为基础,将成土母质划分为碎屑岩区风化物、富碱斑岩区风化物、新近系残坡积物和第四系冲洪积物(表1)。

碎屑岩区风化物是区内分布范围最广的成土母质,地层主要为中生界三叠系、侏罗系和白垩系,岩性主要为砂岩、粉砂岩、灰岩、页岩和泥岩。

第四系冲洪积物,主要分布于姚安栋川-光禄等山间盆地,是姚安县重要的农业和生活集中区。

新近系残坡积物主要分布于弥兴镇和红梅水库附近,岩性主要为砂岩、泥岩夹煤层。

富碱斑岩区风化物是区内碱性粗面岩、正长斑

岩、煌斑岩和云斜煌斑岩的风化产物,主要位于姚安县东南角。

2 样品采集与分析

根据《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T0258—2014)要求,分别采集0~20 cm的表层土壤样品和120~170 cm的深层土壤样品,共采集表层土壤样品1 728件、深层土壤样品471件。配套采集湖积物、灌溉水和土壤垂向剖面样品。

土壤样品经自然风干后,过20目(0.8 mm)尼龙筛。表层土壤按每4 km²组合成1个样品,深层土壤按每16 km²组合成一个样品。表层土壤组合获得503件,深层土壤组合获得137件。灌溉水样品根据添加保护剂的不同,分成原水样、酸化水样和添加不同保护剂的样品,每件水样品分成3份。

土壤垂向剖面样品,以土壤垂向剖面挖掘的形式挖掘并采样,共挖掘2条剖面,分别位于蜻蛉河流入姚安坝区的入口处及出口处。土壤剖面深度为200 cm,从地表向下每间隔20 cm分别取1件土壤样品,每条剖面采集11件样品。

分析测试单位为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。表深层土壤样品和土壤垂向剖面样品分析测试指标均为Zn、Au、Ag等54项。Zn分析测试方法为X射线荧光光谱法(XRF),检测设备为Axios-Max X射线荧光光谱仪。

3 结果与分析

3.1 锌元素含量特征

3.1.1 不同土壤层位锌含量

由测试结果(表2)可知,姚安县表层土壤Zn含量平均值为 85.9×10^{-6} (质量分数),最大值为 336.0×10^{-6} ,最小值为 22.0×10^{-6} 。按“平均值 ± 3 倍标准离差”剔除高低值后,表层Zn含量平均值为 81.1×10^{-6} 。表层土壤Zn平均含量低于云南省表层土壤Zn含量背景值^[8]。

深层土壤Zn含量算术平均值为 87.3×10^{-6} ,最大值为 256.0×10^{-6} ,最小值为 45.2×10^{-6} 。按“平均值 ± 3 倍标准离差”剔除高低值后,深层平均值为 84.6×10^{-6} 。深层土壤Zn平均含量与云南省深层土壤Zn含量基准值相当。

变异系数(CV)是标准差与平均值的比值,体现了

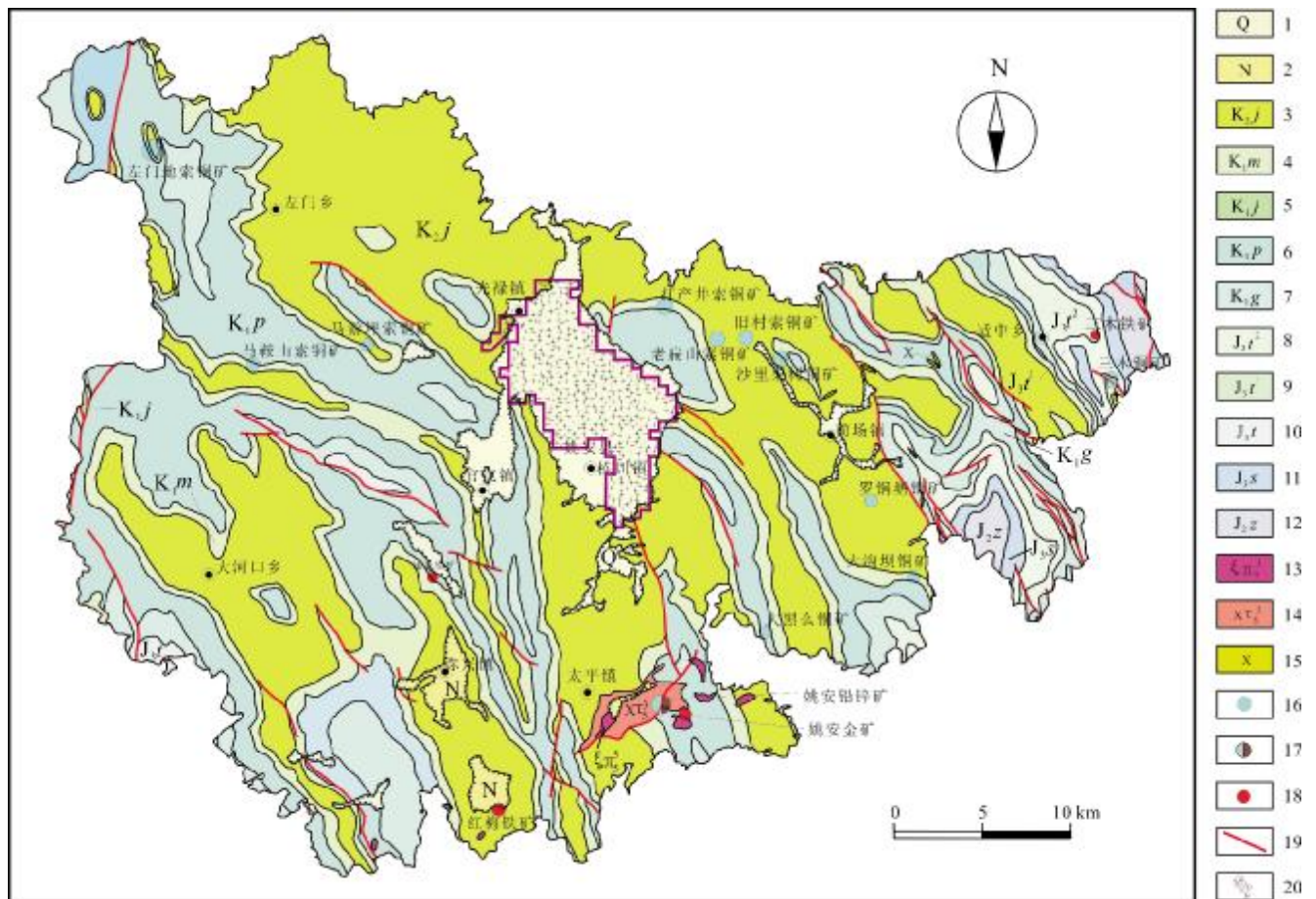


图 1 姚安县地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Yao'an County

1—第四系 (Quaternary); 2—新近系 (Neogene); 3—上白垩统江底河组 (Upper Cretaceous Jiangdihe fm.); 4—下白垩统马头山组 (Lower Cretaceous Matoushan fm.); 5—下白垩统景星组 (Lower Cretaceous Jingxing fm.); 6—下白垩统普昌河组 (Lower Cretaceous Puchanghe fm.); 7—下白垩统高峰寺组 (Lower Cretaceous Gaofengsi fm.); 8—上侏罗统妥甸组上段 (U. mem. of Tuodian fm., Upper Jurassic); 9—妥甸组下段 (L. mem. of Tuodian fm.); 10—妥甸组未分段 (Tuodian fm.); 11—上侏罗统蛇店组 (Upper Jurassic Shedian fm.); 12—中侏罗统张河组 (Middle Jurassic Zhanghe fm.); 13—喜马拉雅期正长斑岩 (Himalayan orthophyre); 14—喜马拉雅期碱性粗面岩 (Himalayan alkaline trachyte); 15—煌斑岩、云斜煌斑岩脉 (lamprophyre and kersantite dike); 16—铜矿 (Cu deposit); 17—铅锌矿 (Pb-Zn deposit); 18—铁矿 (Fe deposit); 19—断层 (fault); 20—富锌土壤范围 (Zn-rich soil)

表 1 研究区成土母质划分

Table 1 Classification of soil parent materials in the study area

成土母质类别	涉及地层 (岩体)	主要岩性	面积/km ²
碎屑岩区风化物	侏罗系、白垩系	砂岩、灰岩、泥岩、砂质泥岩、粉砂岩	1554.45
富碱斑岩区风化物	喜马拉雅期碱性粗面岩、正长斑岩、煌斑岩脉、云斜煌斑岩脉	碱性粗面岩、正长斑岩、煌斑岩、云斜煌斑岩	12.81
残坡积物	新近系	灰色砂岩、砂质泥岩夹煤层	14.80
冲洪积物	第四系	黏土、砂砾等	119.36

数据的变异程度^[9-10], 一般认为 CV>1.0 时,属于强变异;介于 0.1~1.0 之间时,属于中等变异; CV<0.1 时,属于弱变异. 研究区内表、深层土壤 Zn 含量变异系数

分别为 0.19 和 0.21,均属于中等变异.

3.1.2 不同地质背景土壤 Zn 含量

将数据用逐步剔除迭代法剔除高低值后, 对不同

表 2 姚安县土壤锌含量特征

Table 2 Characteristics of Zn content in the soil of Yao'an County

统计单元		样品数	平均值	中位数	标准离差	变异系数	最大值	最小值
表层	算术平均	503	85.9	81.7	29.31	0.34	336	22
	剔除高低值	473	81.1	81.2	15.59	0.19	127	34.6
	云南省表层土壤 *	6178	96	86	41	0.4	218	6
深层	算术平均	137	87.3	83.5	25.03	0.29	256	45.2
	剔除高低值	133	84.6	82.9	18.04	0.21	137	45.2
	云南省深层土壤 *	1624	92	84	35	0.4	197	22

* 数据引自文献[8], 含量单位:10⁻⁶ (质量分数).

表 3 锌元素在各统计单元中的分布特征

Table 3 Distribution characteristics of Zn in each statistical unit

统计单元	样品数	平均值	中位数	标准离差	变化系数	最大值	最小值	浓集克拉克值
第四系	32	94.31	94.5	21.88	0.23	143	53.4	1.10
新近系	4	84.23	82.9	6.61	0.08	93.4	77.7	0.98
碎屑岩区	358	80.08	80.75	13.13	0.32	336	22	0.93
富碱斑岩区	4	149.08	130.5	79.69	0.53	260	75.3	1.73

含量单位:10⁻⁶ (质量分数).

成土母质区的表层土壤 Zn 含量进行对比. 结果显示, Zn 元素在不同地质单元中平均含量大小依次为:富碱斑岩区>第四系>新近系>碎屑岩区 (表 3). 说明土壤 Zn 在富碱斑岩区内明显富集,受地质背景控制明显.

3.1.3 不同样品介质 Zn 含量

1)灌溉水样品

在姚安平坝区周边共采集灌溉水样品 12 件. 分析结果(表 4)显示,蜻蛉河上游中 Zn 含量高达 1 180 μg/L, 显著高于流经碎屑岩区的康郎河以及洋派水库水样中 Zn 含量.

表 4 灌溉水样品锌含量

Table 4 Zn content in irrigation water samples

采样地点	蜻蛉河上游	双甸河	洋派水库	康朗河	光禄镇水井	自久海水库
平均值/(μg/L)	1180	8.23	4.84	1.05	6.81	11

2)底泥样品

元素进入水体后, 当水动力变弱或环境因子改变时, 水中大多数物质可通过沉淀或颗粒物吸附而沉积

于底泥中^[11-12]. 底泥元素含量一定程度上反映水体和周边土壤的化学组成.

在姚安县各主要水系(或水库)采集底泥样品 39 件. 分析结果显示,蜻蛉河上游(双甸河)Zn 平均含量为 192.26×10⁻⁶,最大值为 493.0×10⁻⁶;蜻蛉河中段(中运河)Zn 平均含量为 132.5×10⁻⁶,最大值为 199.0×10⁻⁶. 蜻蛉河上游 Zn 平均含量高于中段 Zn 平均含量,Zn 含量随着河水流动而逐渐降低,且显著高于其他水系,在姚安坝区内 Zn 含量增加(表 5).

3)土壤垂向剖面样品

元素在土壤垂向剖面中的分布特征, 可以反映元素表生地球化学行为及人类活动等因素的影响, 从而为土壤元素来源判别提供依据^[13]. 在姚安坝区入口处(CP065)和出口处(CP020)各布置 1 条垂向剖面(图 2). Zn 含量在 CP065 剖面中最小值为 104×10⁻⁶, 最大值为 174×10⁻⁶, 平均值为 129×10⁻⁶;Zn 含量在 CP020 剖面中最小值为 84×10⁻⁶,最大值为 108×10⁻⁶,平均值为 100.2×10⁻⁶.

表 5 各主要水系底泥样品锌含量

Table 5 Zn content in aquatic sediment samples from major river systems

水系	Zn 平均值/ 10^{-6}	Zn 最大值/ 10^{-6}
石者河	87	136
弥兴大河	105.09	136
渔泡江	81.6	81.6
马游河	81.58	108
梯子河	83.7	83.7
康朗河	42.8	42.8
中运河(蜻蛉河中段)	132.5	199
双甸河(蜻蛉河上游)	192.26	493
洋派水库	61.28	88.7
紫贝乌河	65.5	71.5

Zn 含量在两条剖面中呈现出不同的分布特征. 相对平均值, 坝区入口处的 Zn 含量从地表自上而下呈现出先强烈亏损(0~60 cm)后富集(60~200 cm)的趋势; 坝区出口处的 Zn 含量平均值明显低于入口处平均值, 在垂向上变化程度较小, 相对平均值呈现出轻微亏损(0~20 cm)、轻微富集(20~140 cm)、强烈亏损(140~180 cm)、趋于稳定(180~200 cm)的趋势.

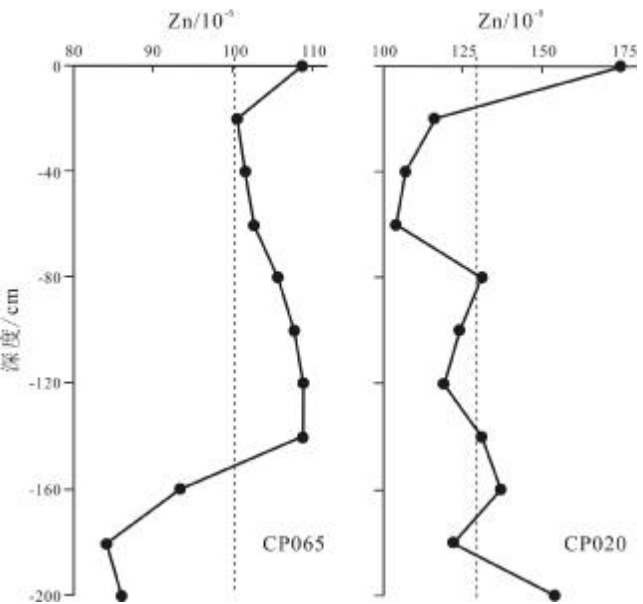


图 2 姚安坝区土壤垂向剖面锌元素分布图

Fig. 2 Vertical distribution of Zn in the soil section of Yao'an flatland area

3.2 土壤锌元素空间分布特征

由地球化学图(图 3、4)上可以看出, Zn 元素空间分布连续性较好, 表、深层分布特征基本一致, 且 Zn 最高值均位于太平镇老街一带的富碱斑岩区内. 总体呈中间高、两边低, 由南往北逐渐降低的趋势. 表层土壤锌元素对深层土壤具有较强的继承性.

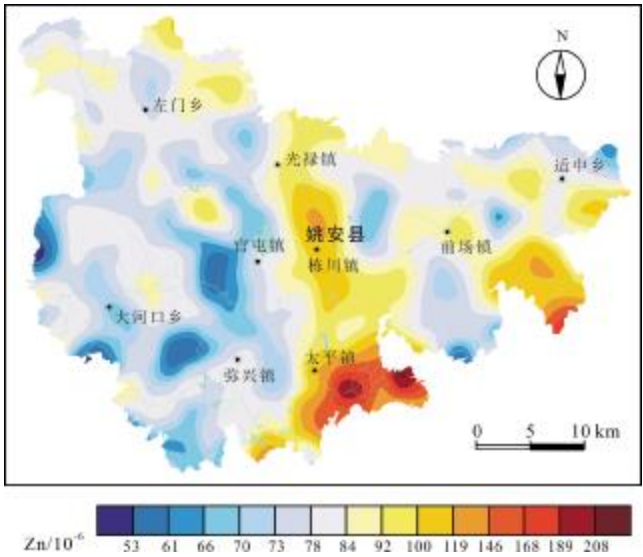


图 3 表层土壤锌地球化学图

Fig. 3 Geochemical map of Zn in surface soil

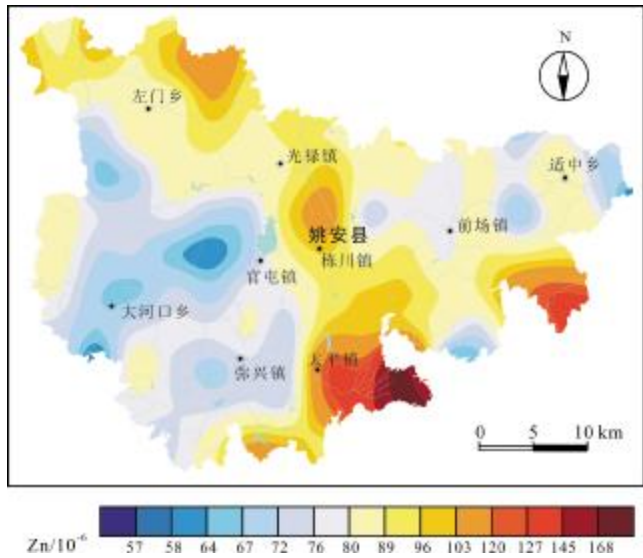


图 4 深层土壤锌地球化学图

Fig. 4 Geochemical map of Zn in deep soil

从局部上看, 太平镇老街一带与姚安县平坝区形成了连片的 Zn 元素高值区. 随着河流距离的延伸, Zn 含量稍有下降, 于蜻蛉河汇入坝区的部位, Zn 含量明显增加, 呈冲积扇状分布, 与区内蜻蛉河流域的分布相

吻合。

3.3 富锌土壤资源分布特征

根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016)中土壤锌养分划分标准,区内土壤锌缺乏($\leq 50 \times 10^{-6}$)比例为 2.12%,较缺乏($50 \times 10^{-6} \sim 62 \times 10^{-6}$)比例为 13.74%,中等($62 \times 10^{-6} \sim 71 \times 10^{-6}$)比例为 7.48%,较丰富($71 \times 10^{-6} \sim 84 \times 10^{-6}$)比例为 33.50%,丰富($84 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$)比例为 41.94%,过剩(200×10^{-6} 以上)比例为 1.23%。其中富锌土壤面积达到 713.68 km²,主要分布于太平镇—栋川镇—光禄镇沿线平坝区,呈近南北向面状展布。除此之外,前场镇、适中乡培龙村、上莱拉、左门乡大湾田、官屯镇义学村等地有零星分布。锌过剩的土壤主要分布于太平镇老街一带,面积仅为 20.86 km²。表明姚安县内土壤锌资源丰富,具有较高的富锌土地开发价值(图 5)。

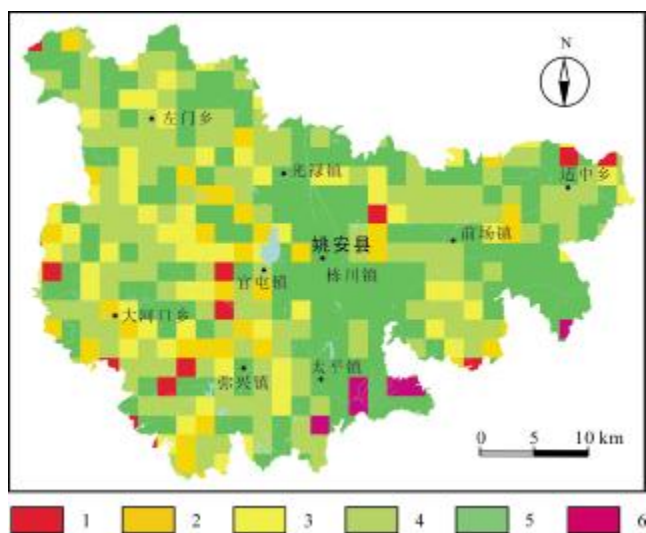


图5 姚安县表层土壤锌养分等级评价图

Fig. 5 Evaluation map of Zn nutrient grades in surface soil of Yao'an County

1—缺乏(deficient); 2—较缺乏(relatively deficient); 3—中等(moderate); 4—较丰富(relatively rich); 5—丰富(rich); 6—过剩(excessive)

4 讨论

4.1 影响因素

选取土壤主要物理化学指标酸碱度(pH)、有机质(SOM)、铝(Al_2O_3)、铁(TFe_2O_3)、锰(Mn)以及成土母岩中与锌关系密切的铅(Pb)、银(Ag)等指标,将其与 Zn 做相关性分析(表 6)。结果显示,Zn 与各元素(指标)的亲疏关系为 $Pb > Al_2O_3 > Mn > Ag > TFe_2O_3 > SOM > pH$ 值。

Zn 与 Pb、Ag 相关系数分别为 0.540 和 0.471,呈显著正相关,表明土壤中 Zn 与 Pb、Ag 来源具有较高的相似性,为伴生或者同源的关系^[14],极有可能来自于铅锌银矿石风化后的产物;Zn 与 Al_2O_3 、Mn、 TFe_2O_3 相关系数分别为 0.481、0.474、0.457,呈显著正相关,反映了黏土中铁铝或铁锰氧化物对 Zn 的吸附能力^[15-16]。Zn 与 SOM、pH 值相关系数分别为 0.244 和 0.09,相关性较弱。

土壤中 TFe_2O_3 、Mn、 Al_2O_3 和 SOM 指标与 Zn 均能拟合成一条较好的正向直线(图 6),相关系数 R^2 分别为 0.2093、0.2247、0.2315 和 0.0596,说明土壤中 Zn 含量随着 TFe_2O_3 、Mn 和 Al_2O_3 含量增加而显著增加,但 SOM 对 Zn 含量的影响较有限。其原因为: TFe_2O_3 、Mn 和 Al_2O_3 是土壤正电荷的主要贡献者,岩石风化成土后,能使土壤表面拥有大量可与无机和有机离子交换和配位的基团,进一步加强了土壤对 Zn 吸附能力^[17-18]。

4.2 富锌土壤成因分析

姚安县东南角出露一套以正长斑岩和二长斑岩类为主的富碱斑岩体,该岩体位于扬子地台西缘与金沙江—哀牢山缝合带交汇部位,出露面积约 24 km²,与铅锌银矿有着密切的物质和成因关系。在区内发现多个铅锌矿、银矿和金矿。主要金属矿物有方铅矿、白铅矿和铅矾,其次还有黄铁矿、闪锌矿、褐铁矿和铜蓝等矿物^[19],主要元素为 Pb、Zn、Ag、Cd、Hg 等。丰富的锌资源为区内土壤提供了稳定的锌物质来源。该富碱斑岩区是蜻蛉河的发源地,蜻蛉河流经姚安平坝区,最终汇入金沙江。

Zn 主要以二价状态赋存于含锌矿物中,矿物种类为闪锌矿(硫化锌),其次为红锌矿(氧化锌)、菱锌矿(碳酸锌)。在岩石风化过程中,大量的岩基淋失,相应的碱性阳离子也大量析出,Zn 在酸性和强淋溶条件下显著地淋失,随搬运介质进入到蜻蛉河中。有研究表明,Zn 在水体中迁移距离为 1~1.4 km。到达姚安坝区入口处后,姚安平坝区表层土壤质地多为第四系黏土,富含黏土矿物及铁铝或铁锰氧化物,对 Zn 的吸附能力很强,使锌和大量碱性阳离子随冲积物在姚安平坝区沉淀。同时土壤呈偏碱性,Zn 离子在碱性环境中以氢氧化物的形式沉淀富集^[20-21],使水体中的 Zn 含量降低,导致 Zn 呈现明显表生富集,并在坝区入口附近含量明显高于坝区出口处表土中的含量。垂向上,

表 6 土壤物理化学指标相关性分析统计表

Table 6 Correlation analysis statistics of soil physical and chemical indicators

	pH	SOM	TFe ₂ O ₃	Mn	Al ₂ O ₃	Pb	Ag	Zn
pH	1							
SOM	-0.018	1						
TFe ₂ O ₃	0.194**	0.145**	1					
Mn	-0.129**	0.337**	0.467**	1				
Al ₂ O ₃	0.003	0.110*	0.806**	0.382**	1			
Pb	-0.058	0.082	0.094*	0.266**	0.174**	1		
Ag	-0.079	0.139**	0.014	0.258**	0.152**	0.941**	1	
Zn	0.090*	0.244**	0.457**	0.474**	0.481**	0.540**	0.471**	1

* 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$.

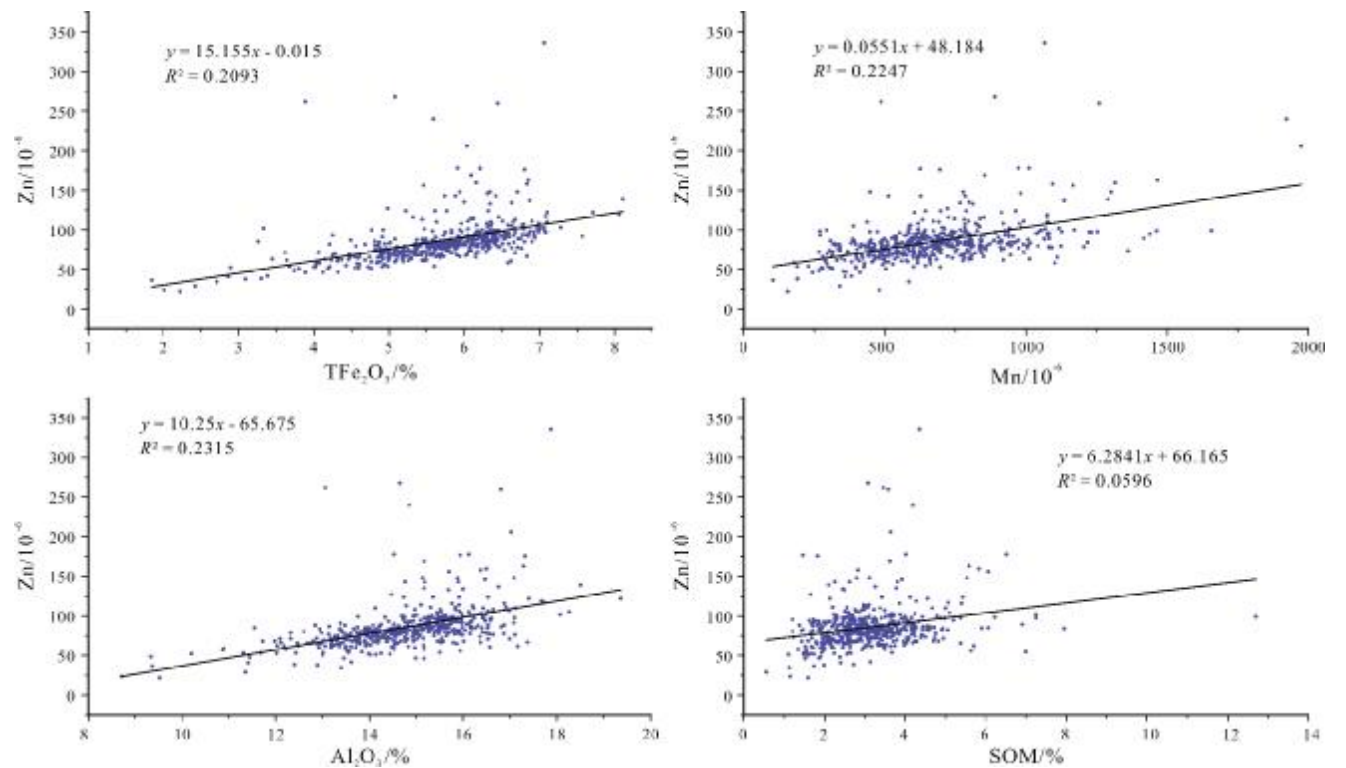


图 6 锌与土壤物理化学指标关系图

Fig. 6 Diagrams of Zn vs. physical and chemical indicators of soil

表层土壤 Zn 含量最高,在耕作层由上而下降低,但由于降水、灌溉等作用,表层土壤的 Zn 随着地表径流或雨水向下渗透迁移.随着时间的推移,于质地紧实的沉积层土壤中再次富集^[22],导致底部土壤 Zn 含量明显高于中部.

综上所述,姚安坝区土壤锌主要来源于富碱斑岩区内铅锌矿物的风化.含锌的岩石矿物在淋失风化

后,经河流搬运作用,沿着蜻蛉河流域,流经太平镇、栋川镇、光禄镇等地.随着水动力减弱,pH 升高,并在黏土、有机质的吸附作用下,沉淀于姚安县平坝区,形成次生富集,与富碱斑岩区形成了连片的锌高值区.

5 结论

(1)姚安县富锌土壤资源丰富,具有较好的富锌产

业发展前景. 本研究共圈定富锌土壤面积 713.68 km², 占全县总面积的 41.94%, 主要分布于太平镇—栋川镇—光禄镇沿线平坝区, 且锌过剩面积仅占 1.23%.

(2) 区内表深层土壤中 Zn 元素分布特征基本一致, 表层土壤 Zn 元素对深层土壤具有较强的继承性, 总体呈中间高两边低、由南往北逐渐降低的趋势. 表明 Zn 元素受地质背景、成土母质控制明显.

(3) 富碱斑岩的含锌岩石矿物是姚安坝区锌的主要物质来源, 经河流搬运, 沿蜻蛉河流域, 流经太平镇、栋川镇、光禄镇等地, 由于水动力减弱, pH 升高, 加上黏土的吸附作用, 于第四系中形成次生富集.

参考文献(References):

- [1] 李明辉, 陈富荣, 张笑蓉, 等. 皖西大别山区富锌土壤分布特征及成因分析[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(3): 235–240.
Li M H, Chen F R, Zhang X R, et al. Distribution characteristics and genetic analysis of zinc-enriched soil in the Dabie Mountain area, western Anhui Province[J]. Geological Survey and Research, 2019, 42(3): 235–240.
- [2] 杨鉴, 张珍明, 陈祖拥, 等. 贵州省典型茶园土壤锌含量空间异质性及影响因素[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(12): 21–31, doi: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2023.12.003.
Yang J, Zhang Z M, Chen Z Y, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of zinc content in typical tea garden soils in Guizhou Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(12): 21–31, doi: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2023.12.003.
- [3] 张家春, 林昌虎, 杨钧屹, 等. 贵州野生白及生长土壤的化学特性及微量元素特征分析[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1839–1844, doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2019.8.024.
Zhang J C, Lin C H, Yang J Y, et al. Chemical properties and microelement characteristics of soil for growth of wild *Bletilla striata* in Guizhou[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(8): 1839–1844, doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2019.8.024.
- [4] 苏欣悦, 王晋峰, 孙楠, 等. 大理烟田土壤有效锌、钼和硼含量的时空变异及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(12): 2371–2380.
Su X Y, Wang J F, Sun N, et al. Temporal and spatial variation of soil available zinc, molybdenum and boron contents in Dali tobacco-growing fields and the influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(12): 2371–2380.
- [5] 马旭东, 余涛, 杨忠芳, 等. 四川省邻水县土壤锌地球化学特征及玉米水稻籽实锌含量预测[J]. 中国地质, 2022, 49(1): 324–335, doi: 10.12029/gc20220121.
Ma X D, Yu T, Yang Z F, et al. Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of zinc content in maize and rice grains in Linshui County[J]. Geology in China, 2022, 49(1): 324–335, doi: 10.12029/gc20220121.
- [6] 齐永荣. 云南姚安县老街子铅矿地质特征与成因探讨[J]. 云南地质, 2018, 37(3): 320–324.
Qi Y R. A probe into the geological feature and genesis of Laojiezi Pb deposit in Yaoan, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2018, 37(3): 320–324.
- [7] 吴鹏, 杨航, 韩润生, 等. 滇中楚雄盆地老街子铅—银矿床镜铁矿特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2019, 35(5): 1489–1502.
Wu P, Yang H, Han R S, et al. Signature and geological significance of the specularite from the Laojiezi Pb-Ag deposit in the Chuxiong Basin, Central Yunnan, SW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(5): 1489–1502.
- [8] 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: 2553–2850.
Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil geochemical dataset of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 2553–2850.
- [9] 黄加忠, 杨明龙, 王晓龙, 等. 四川省瓦岗地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. 华东地质, 2024, 45(3): 332–344.
Huang J Z, Yang M L, Wang X L, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting directions in Wagang area of Sichuan Province[J]. East China Geology, 2024, 45(3): 332–344.
- [10] 秦丹鹤, 侯红星, 邵兴坤. 青海曲旁浪斜地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. 地质与资源, 2023, 32(4): 418–426.
Qin D H, Hou H X, Sao X K. Geochemistry of stream sediments and exploration prospects in Qupanglangxie area, Qinghai Province [J]. Geology and Resources, 2023, 32(4): 418–426.
- [11] 崔玉静, 张旭红, 王丽明. 广西某污染区金属元素在土壤—植物系统中的迁移规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1822–1825.
Cui Y J, Zhang X H, Wang L M. Transfer patterns of metal elements in soil-plant system in a contaminated area in Guangxi, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1822–1825.
- [12] 郭尚其, 周洁军, 农泽喜. 广西某铅锌矿水文地质调查与重金属迁移规律研究[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 567–572.
Guo S Q, Zhou J J, Nong Z X. Hydrogeological investigation and heavy metal migration regularity study of a Pb-Zn deposit in Guangxi [J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(3): 567–572.
- [13] 刘银飞, 孙彬彬, 贺灵, 等. 福建龙海土壤垂向剖面元素分布特征[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 713–721.
Liu Y F, Sun B B, He L, et al. Vertical distribution of elements in soil profiles in Longhai, Fujian Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(4): 713–721.
- [14] 汤明, 董旭, 姜明亮. 石台县富锌土壤分布特征及成因分析[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(23): 97–99, 117.
Tang M, Dong X, Jiang M L. Distribution characteristics and genetic analysis of zinc-rich soil in Shitai County, Anhui [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(23): 97–99, 117. (in Chinese)

- [15]刘志坚, 张琇, 董元华, 等. 宁夏卫宁平原土壤锌地球化学特征与富锌小麦种植区预测[J]. 中国地质, 2024, 51(4): 1319–1330, doi: 10.12029/gc20220705002.
- Liu Z J, Zhang X, Dong Y H, et al. Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of Zn-rich wheat cultivating areas in Weining Plain, Northwest China[J]. *Geology in China*, 2024, 51(4): 1319–1330, doi: 10.12029/gc20220705002.
- [16]张一鹤, 杨泽, 戴慧敏, 等. 穆棱河-兴凯湖平原土地质量地球化学评价[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 62–70, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.01.008.
- Zhang Y H, Yang Z, Dai H M, et al. Geochemical evaluation of land quality in Muling River-Xingkai Lake Plain[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(1): 62–70, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.01.008.
- [17]高文文, 刘景双, 王洋. 有机质对冻融黑土重金属 Zn 赋存形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 147–151.
- Gao W W, Liu J S, Wang Y. Effect of organic matter on fractional transformation of Zn in black soils under freeze-thaw cycle [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 147–151.
- [18]陆建衡. 汉源铅锌矿区土壤重金属分布特征及镉、锌迁移行为研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 36–69.
- Lu J H. A study on the spatial distribution of heavy metal elements and cadmium, zinc migration behavior in Hanyuan lead-zinc mining area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 36–69.
- [19]侯良刚, 袁玲, 李徐瑾. 云南姚安县老街子碱性杂岩体特征及稀土找矿前景[J]. 云南地质, 2020, 39(1), 20–25.
- Hou L G, Yuan L, Li X J. The feature and REE prospecting potentiality of Laojiezi alkaline complex body in Yaoan, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2020, 39(1): 20–25.
- [20]赵建, 师华定, 吴啸, 等. 遵义市土壤锌空间分布特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 298–303.
- Zhao J, Shi H D, Wu X, et al. Study on spatial distribution of zinc in soils in Zunyi City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 298–303.
- [21]杨策, 杨文松, 陆瀛龙, 等. 楚雄州不同海拔高度植烟土壤养分特征分析[J]. 湖南农业科学, 2022(6): 34–39, doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.006.009.
- Yang C, Yang W S, Lu Y L, et al. Analysis of soil nutrient characteristics at different altitudes in Chuxiong [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2022 (6): 34 –39, doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.006.009.
- [22]左健扬, 方璐, 赵柳青, 等. 宁夏固原地区土壤地球化学特征和养分状况评价[J]. 地质与资源, 2022, 31(4): 523–529, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.04.009.
- Zuo J Y, Fang L, Zhao L Q, et al. Soil geochemistry and nutrient evaluation in Guyuan City of Ningxia[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(4): 523–529, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.04.009.

(上接第 301 页/Continued from Page 301)

- [18]Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531–542.
- [19]Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181–193.
- [20]Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. *Precambrian Research*, 2000, 104(1/2): 77–93.
- [21]McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Boulder: Geological Society of America, 1993: 21–40.
- [22]McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *The Journal of Geology*, 1991, 99(1): 1–21.
- [23]Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919–2940.