

赵辰, 孙彬彬, 贺灵, 等. 四川昭觉县中部乡镇表层土壤硒地球化学特征[J]. 岩矿测试, 2022, 41(3): 412 - 426.

ZHAO Chen, SUN Binbin, HE Ling, et al. Geochemical Characteristics of Selenium in Surface Soil of Central Townships in Zhaojue County, Sichuan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(3): 412 - 426.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202111250185】

## 四川昭觉县中部乡镇表层土壤硒地球化学特征

赵辰<sup>1,2</sup>, 孙彬彬<sup>1,2\*</sup>, 贺灵<sup>1,2</sup>, 吴超<sup>1,2</sup>, 成晓梦<sup>1,2</sup>, 曾道明<sup>1,2</sup>, 刘冬<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 硒元素是人体必需的微量元素之一, 食用富硒农产品是人体获取和补充硒元素的主要途径, 调查区域硒地球化学特征是有效地利用富硒土地资源以及开发富硒农副产品的重要依据。本文选择四川省昭觉县境内较为重要的农耕乡镇采集表层土壤样品, 采用原子荧光光谱法、X射线荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱/发射光谱法等方法测定 1328 件土壤、19 件玉米及 20 件土豆中硒等地球化学指标含量, 利用相关分析与统计学等方法, 结合距离加权反比插值法, 探讨研究区硒含量、分布和影响因素等地球化学特征, 评价土壤与作物的富硒情况及安全性。结果表明: ①研究区表层土壤硒含量范围为 0.04 ~ 1.50 mg/kg, 平均值为 0.33 mg/kg, 划定富硒土壤面积为 7.23 km<sup>2</sup>, 占全区土壤面积的 30.31%, 玄武岩发育的土壤硒含量最高, 平均值为 0.4 mg/kg, 表明区内地质背景与土壤硒含量密切相关, 区内富硒土壤主要受含玄武岩夹苦橄岩、凝灰质砂泥岩的峨眉山玄武岩组地层控制; ②不同的用地类型和土壤类型对硒元素的富集能力不同, 人为农业活动导致土壤对硒的吸附能力下降, 黄棕壤土层中黏粒或铁氧化物等易与硒结合富集; 酸性土壤中硒含量与 pH 值成反比; 土壤有机质与硒含量呈显著的正相关; 土壤质地对硒含量具有一定的控制作用; ③富硒土壤产出的玉米和土豆富硒率极低。研究结果认为昭觉县在开发利用富硒土壤时, 旱地与水田等农耕区应及时补充有机肥并调节土壤酸碱度, 并积极利用富硒资源开发其他农业产品。

**关键词:** 富硒; 表层土壤; 地球化学特征; 昭觉县; 原子荧光光谱法; X射线荧光光谱法; 电感耦合等离子体质谱/发射光谱法

**要点:**

- (1) 研究区富硒土壤面积为 7.23 km<sup>2</sup>, 空间上与二叠系峨眉山玄武岩组地层分布一致, 有较强规律性。
- (2) 除成土母质外, 用地类型、土壤类型、土壤 pH 值、土壤有机质及土壤质地等均对土壤硒的富集活化产生影响。
- (3) 区内玉米和土豆作物重金属均未超标, 但富硒率较低, 其中玉米籽粒硒含量高于土豆。

**中图分类号:** O657.31; O657.63

**文献标识码:** A

硒是生态环境中一个重要的微量元素, 与人体健康密切相关<sup>[1-2]</sup>, 通过食物进入人体<sup>[3-4]</sup>。土壤中硒元素的分布特征、影响因素及土壤-作物系统中硒的迁移转化规律等一直是研究热点。

大量研究调查掌握了不同地区硒元素含量和分布情况, 在国内外发现了许多典型富硒地区, 如英国东北部诺森伯兰郡石炭系煤层中硒异常丰富, 平均值达 12.1 mg/kg, 富含黄铁矿的煤层硒较高<sup>[5]</sup>; 日本

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2021-12-28; 接受日期: 2022-01-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190522-03)

第一作者: 赵辰, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为勘查地球化学。E-mail: 619138825@qq.com。

通信作者: 孙彬彬, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为地球化学勘查与评价。E-mail: sbinbin@mail.cgs.gov.cn。

农耕区土壤硒含量范围为0.05~2.8mg/kg,旱地土壤硒含量高于水田<sup>[6]</sup>,关东、东北、北海道及九州等地土壤硒含量丰富<sup>[7]</sup>;中国陕西紫阳县富硒土壤分布区与黑色含碳岩系分布一致<sup>[8]</sup>。另有研究表明,土壤中硒含量受到成土母质、地形地貌、土壤理化性质及用地类型方式等多种因素的影响<sup>[9-14]</sup>,但是其影响程度却因为区域性差异而各不相同,戴慧敏认为中国东北三省至云贵高原低硒带分布与季风气候密切相关<sup>[15]</sup>;吴兴盛在福建武平县表层土壤的研究中指出,影响表层土壤硒含量的重要因素有土壤有机质、铁氧化物含量等<sup>[16]</sup>;近年许多学者在不同地区的调查还发现土壤中硒含量与含黑色岩系地层密切相关,并且通常与重金属元素共生<sup>[17-20]</sup>。

四川省昭觉县是中国最大的彝族聚居县,农业生产是当地重要的经济来源,本文以昭觉县中部阿并洛古、庆恒、特布洛及革吾四乡镇为研究区,采集表层土壤样品后采用原子荧光光谱法、X射线荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱/发射光谱法及电位法等方法测定Se、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、pH和Corg等地球化学指标,利用传统统计及相关性分析方法研究表层土壤的硒地球化学特征,着重讨论区内

土壤硒含量的影响因素,以期为整个昭觉县未来发展富硒特色农业、提升用地类型价值、实现促进农业农村优先发展提供科学依据。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省凉山彝族自治州昭觉县,主要包括阿并洛古、庆恒、特布洛及革吾四乡,区内交通相对较便利,主要以省道、县乡道为经络,省道S208和S307分别从南北、东西向穿过研究区。该区属川西高原雅砻江温带气候,多年平均气温10.9℃,最暖年平均气温11.6℃,最冷年平均气温10.1℃。区内地貌类型多样,以山原为主,东、南、西三面海拔较高,地势相对高差大于1800m。用地类型以林地、旱地、草地为主,共占研究区总面积的93.4%。土壤类型众多且复杂,主要以红壤、黄棕壤、棕壤为主。

研究区地质环境相对简单(图1),东西边缘发育有两条南北向断层。区内出露地层主要为古生代一中生代地层,其中晚古生界二叠系峨眉山玄武岩组(Pe)面积较大,为研究区主要的出露地层之

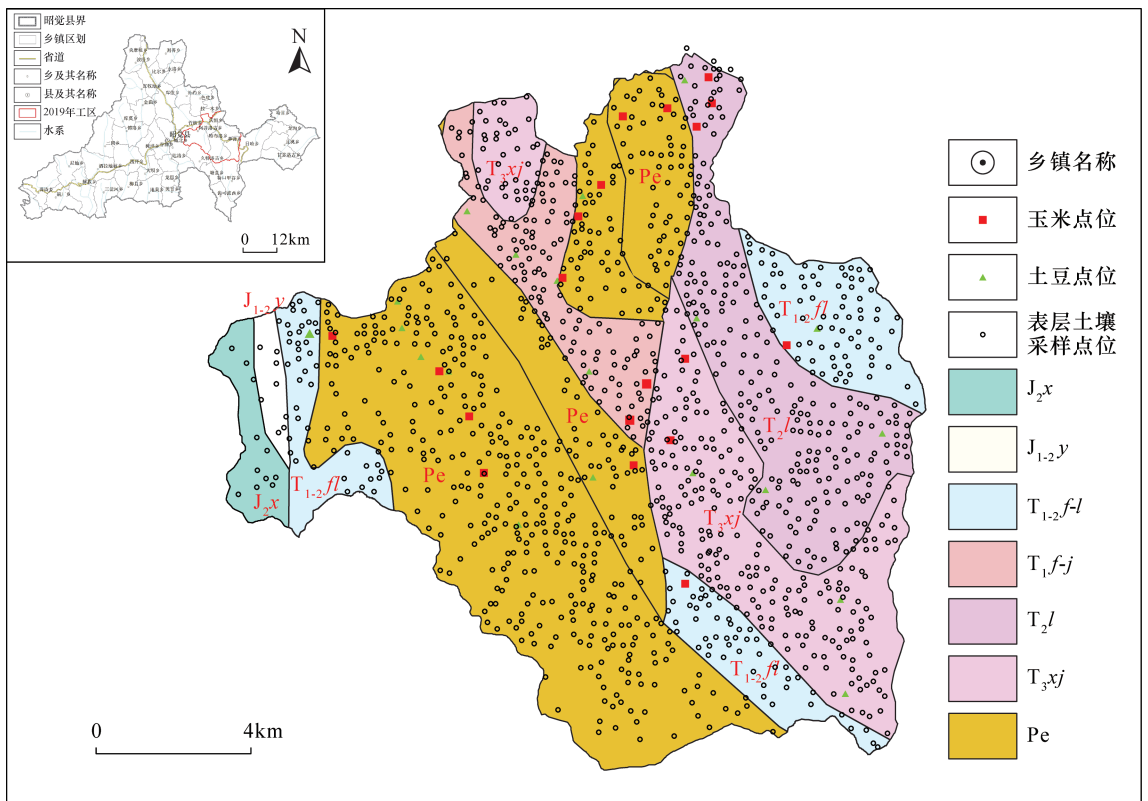


图1 研究区采样点位示意图

Fig. 1 Sampling location map in the study area

一,岩性以玄武岩夹苦橄岩、凝灰质砂泥岩为主;下三叠统飞仙关组、嘉陵江组并层( $T_{1f-j}$ )、下一中三叠统飞仙关组、嘉陵江组、雷口坡组并层( $T_{1-2f-l}$ )、中三叠统雷口坡组( $T_2l$ )、上三叠统须家河组( $T_{3xj}$ )、下一中侏罗统益门组( $J_{1-2y}$ )及中侏罗统新村组( $J_2x$ )岩性主要以碳酸盐岩为主,另有少量砂岩、泥岩、页岩等。

### 1.2 样品采集与处理

(1)土壤样品布设遵循网格控制与用地类型图斑结合的原则,以农耕地为主、其他用地类型为辅布设采样点位,并确保采样密度在空间上分布总体均匀,密度控制在每平方千米4~16个点左右,全区200km<sup>2</sup>土地面积共采集表层土壤1328件,采样深度为0~20cm,样品原始质量约为1kg。无污染风干后用尼龙筛筛分至10目(<2mm),过筛后充分拌匀、缩分、称重,称取大于200g样品送至实验室分析测试。

(2)作物样品在成熟期进行采集,根据采样地块实际情况采用棋盘法与梅花点法等方法进行多点取样,然后等量混匀组成混合样品,质量大于1.0kg即可,其中玉米19件,土豆20件。玉米样品自然晾干后脱粒称取,土豆样品直接称取,每件样品各称取200g,处理称量后送至实验室进一步分析。

### 1.3 样品分析测试

本次所有样品分析测试由河南岩石矿物测试中心完成。严格按照《土地质量地球化学评价规划》(DZ/T 0295—2016)、《多目标区域地区化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)和《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03)执行。

(1)土壤样品分析测试。Se、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、pH、Corg及重金属元素等指标的分析方法及检出限见表1。取实验室内部监控和外部监控方案,

表1 土壤样品分析方法、检出限及数据合格率

Table 1 Analysis method, detection limit and qualified rate of data for soil samples

分析指标	分析方法	检出限	单位	重复样合格率 (%)	分析指标	分析方法	检出限	单位	重复样合格率 (%)
Cd	ICP-MS	30	μg/kg	99.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	XRF	0.05	%	100
Cr	XRF	5	mg/kg	98.5	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	XRF	0.05	%	100
Cu	ICP-MS	1	mg/kg	100	SiO <sub>2</sub>	XRF	0.1	%	100
Hg	CV-AFS	0.5	μg/kg	99.5	Se	AFS	0.01	mg/kg	99.5
Ni	ICP-MS	2	mg/kg	99.5	Corg	POT	0.1	%	99.3
Pb	ICP-MS	2	mg/kg	100	pH	POT	0.1	mg/kg	100

注:HG-AFS为氢化物发生原子荧光光谱法;ICP-MS为电感耦合等离子体质谱法;XRF为X射线荧光光谱法;CV-AFS为冷蒸汽原子荧光光谱法;POT为电位法。

采用重复样等控制分析质量,本次样品分析测试方法水平、重复样分析质量水平、样品分析准确度水平均满足规范要求。

(2)作物样品Se及重金属元素含量分析。具体分析方法见表2。作物样品的分析方法选择合理、得当,分析过程质量控制措施实用、正确。其准确度采用国家一级生物标准物质进行控制,用重复性分析控制其精密度(表2)。所有标准物质和实验室重复样品检测数据合格率均达到100%。

表2 作物样品分析方法、检出限及数据合格率

Table 2 Analysis method, detection limit and qualified rate of crop samples

分析指标	分析方法	检出限	数据合格率 (%)	
			CRMs	实验室重复样
As	HG-AFS	0.01mg/kg	100	100
Cd	ICP-MS	10μg/kg	100	100
Cr	ICP-MS	0.2mg/kg	100	100
Cu	ICP-MS	1mg/kg	100	100
Hg	HG-AFS	0.5μg/kg	100	100
Ni	ICP-MS	0.2mg/kg	100	100
Pb	ICP-MS	0mg/kg	100	100
Zn	ICP-MS	2mg/kg	100	100
Se	ICP-MS	0.01mg/kg	100	100

注:HG-AFS为氢化物发生原子荧光光谱法;ICP-MS为电感耦合等离子体质谱法;CRMs为国家标准物质。

### 1.4 数据处理

地球化学参数统计、多元统计及相关性分析利用EXCEL和SPSS完成,统计前对所有数据进行正态分布检验,原始数据经多次迭代剔除后均近似符合正态分布;文中所有图件均使用ArcGIS和CorelDRAW完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层土壤硒地球化学特征

经两次迭代剔除后的硒元素含量数据和四川省、中国表层土壤背景值数据见表3。其中各指标平均值为迭代剔除后所得算术平均值,可以代表研究区内各元素含量状况。统计结果显示研究区表层土壤硒含量范围为0.04~1.50mg/kg,平均含量为0.33mg/kg,高于四川省和中国表层土壤均值。标准差为0.15,变异系数为0.45,分布相对不均匀。

依据谭建安等<sup>[21]</sup>提出的土壤硒生态景观划分界限值对土壤中硒含量进行等级划分,利用距离加权反比插值法对研究区无采样点图斑进行插值,以土壤硒含量划分界限值为等值线,绘制研究区土壤硒含量的空间分布图(图2)。依据该分界限值研究区土壤硒含量没有过剩情况,富硒土壤面积约为67.23km<sup>2</sup>,占全区土壤面积的30.31%,主要分布在研究区西南部,呈NW方向条带状分布。足硒土壤面积约为140.87km<sup>2</sup>,占研究区大部分土壤面积,边缘与缺乏硒土壤占比较少,共6.19%,主要分布在庆恒乡中部和阿并洛古乡西北部地区。富硒土壤连续成片,具备开发该资源的潜力。

### 2.2 表层土壤硒含量影响因素

为研究川西南典型农耕区表层土壤中硒含量与土壤性质的关系,本文探讨了研究区内成土母质、用地类型、土壤类型及土壤相关理化性质等条件对表层土壤中硒含量的影响。

### 2.2.1 成土母质

成土母质是土壤形成的物质基础和大多数植物矿质养分元素的最初来源,不同成土母质所含成分的差别导致了风化后发育的土壤中元素含量存在显著的差异<sup>[22]</sup>。研究区地处中国四川盆地西南边缘高海拔山区,风化作用强烈,土壤淋滤作用较强,区内土壤的主要来源为基岩风化剥蚀产生的碎屑,物质继承性较强。

对比研究区内几种母质发育的表层土壤中硒元素含量(图3)发现,研究区峨眉山玄武岩组地层(Pe)发育土壤硒元素的平均含量最高,达到0.4mg/kg,其岩性主要为玄武岩夹苦橄岩、凝灰质砂泥岩;下三叠统飞仙关组、嘉陵江组并层(T<sub>1f-j</sub>)发育的土壤硒含量最低,平均含量为0.2mg/kg,其他地层发育土壤硒含量均值由高到低的排序为:下-中三叠统飞仙关组、嘉陵江组、雷口坡组并层(T<sub>1-2f-l</sub>)(0.33mg/kg) > 中三叠统雷口坡组(T<sub>2l</sub>)(0.31mg/kg) > 上三叠统须家河组(T<sub>3xj</sub>)(0.29mg/kg) > 下-中侏罗统益门组(J<sub>1-2y</sub>)及中侏罗统新村组(J<sub>2x</sub>)(0.26mg/kg),无论是二叠系、三叠系还是侏罗系地层,土壤硒平均含量均低于0.4mg/kg,其岩性以灰岩、白云岩、页岩、泥岩及砂岩为主。结合表层土壤硒的空间分布特征,研究区不同成土母质发育土壤硒含量差异明显,富硒土地与峨眉山玄武岩地层的广泛分布密切相关,在地层较老的玄武岩地区更容易富集硒。多数学者认为硒与峨眉山玄武岩的喷发相

表3 表层土壤元素地球化学特征值

Table 3 Geochemical characteristics of elements in topsoil

指标	平均值	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数	四川表层土壤 平均值	中国表层土壤 平均值	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
Se(mg/kg)	0.33	0.32	1.50	0.04	0.15	0.45	0.25	0.20	1.34	1.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	16.40	16.72	25.09	5.30	2.02	0.12	14.04	12.6	1.17	1.30
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	8.84	7.74	17.10	2.85	3.08	0.35	5.59	4.70	1.58	1.88
SiO <sub>2</sub> (%)	54.30	55.94	81.36	21.39	9.75	0.18	61.59	65.0	0.88	0.84
pH	5.53	5.35	8.11	4.34	0.57	0.10	/	/	/	/
有机质(%)	2.34	1.95	12.80	0.36	1.35	0.57	1.46	0.35	1.60	6.69
As(mg/kg)	10.03	8.86	39.11	1.14	6.80	0.68	9.50	10.0	1.06	1.00
Cd(mg/kg)	0.26	0.23	2.84	0.04	0.16	0.63	0.34	0.09	0.76	2.88
Cr(mg/kg)	92.1	84.5	395	25.8	38.1	0.41	82.0	65.0	1.12	1.42
Cu(mg/kg)	96.9	53.3	1067	14.9	88.3	0.91	32.0	24.0	3.03	4.04
Hg(mg/kg)	0.09	0.09	0.25	0.02	0.04	0.45	0.10	0.04	0.99	2.37
Ni(mg/kg)	43.5	42.1	112	17.0	12.8	0.30	36.0	26.0	1.21	1.67
Pb(mg/kg)	30.9	31.2	88.5	9.33	8.43	0.27	38.0	23.0	0.81	1.34
Zn(mg/kg)	108	95.9	255	38.4	35.9	0.33	90.0	68.0	1.20	1.59

注:四川表层土壤平均值引自《中国土壤地球化学参数》(侯青叶、杨忠芳等,2020);中国表层土壤平均值引自《中国土壤元素背景值》(魏复盛,1990)。K<sub>1</sub>为本区表层土壤平均值/四川表层土壤平均值;K<sub>2</sub>为本区表层土壤平均值/中国表层土壤平均值;“/”表示无此数据。

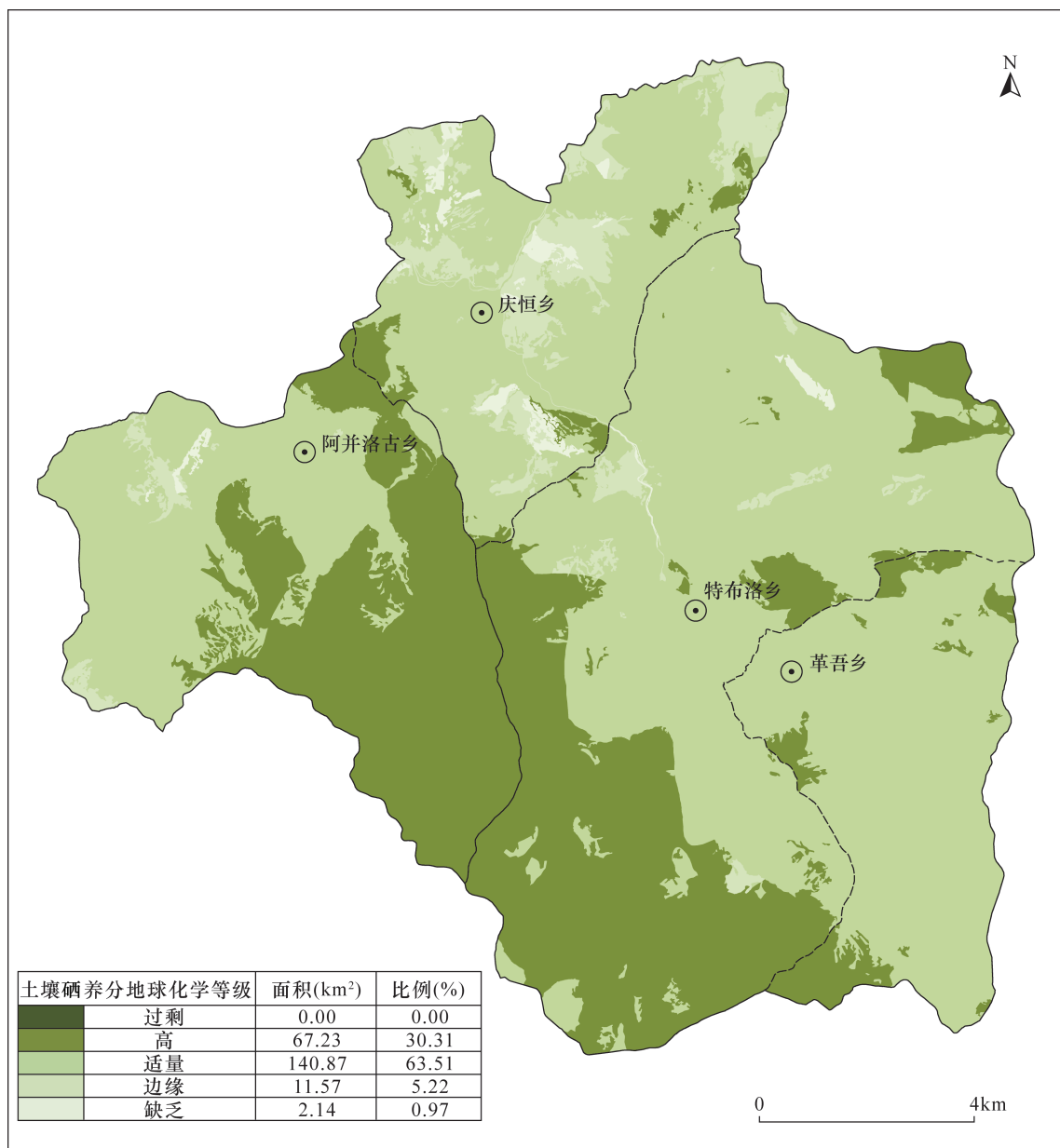


图2 研究区表层土壤硒空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of topsoil selenium concentration in the study area

相关<sup>[23-24]</sup>,火山及热水活动从地幔带来了大量的硒和铬等元素,虽然玄武岩中硒元素平均含量与其他岩类相比并不高,但是玄武岩类属不稳定的岩石类型,易风化或蚀变,有利于硒元素析出,析出的硒迅速被有机质吸附而沉积下来<sup>[25]</sup>。而地层较新的灰岩、白云岩等地区土壤硒富集能力较弱。

### 2.2.2 用地类型与土壤类型

用地类型可能导致土壤性质和土地生产力发生改变,从而影响土壤质量和环境<sup>[26]</sup>,不同的用地类型能够在一定程度上反映人为活动对土壤性质的影响,硒含量往往在不同用地类型条件下存在较大差

异<sup>[27]</sup>,研究区内用地类型主要分为旱地、水田、林地和草地。

经统计(表4),草地及林地表层土壤中硒含量明显高于旱地与水田。草地与林地多分布于地势较高的山坡与山顶,受人为干扰程度低,富硒母岩风化后硒元素在表层土壤产生富集<sup>[28]</sup>,且草地和林地分布区表层土壤中腐植层较厚,有机质含量高,对土壤硒有固定及吸附作用,降低了硒元素的迁移转化能力。而在农田系统中,长期耕作活动促使土壤结构、成分组成及理化性质发生变化,影响表层土壤中硒的赋存形态,同时作物根系作用吸收了土壤中的硒

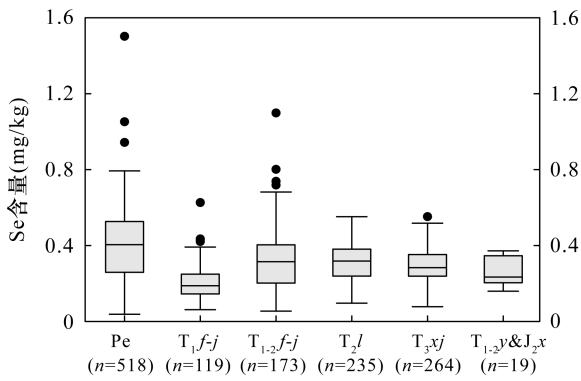


图3 研究区不同地质单元表层土壤硒含量  
Fig.3 Contents of topsoil selenium in different geological units in the study area

元素<sup>[29]</sup>,从而导致旱地和水田土壤中硒含量相对较低。其中水田土壤在淹水条件下硒元素会由于下渗等原因发生流失,导硒含量低于旱地土壤<sup>[30]</sup>。用地类型对土壤中硒含量的影响是各种因素综合作用的结果,对于耕作习惯、施肥情况等具体影响因素有待更深入的研究。

不同类型土壤的硒含量不同,研究区内土壤类型主要分为黄壤、黄棕壤、红壤、紫色土等。由表4可知,硒含量大小关系为:黄棕壤 > 黄壤 > 红壤 > 其他 > 紫色土,表层土壤中黄棕壤和黄壤的硒含量较高,均值分别为0.36mg/kg和0.34mg/kg,高于区内硒背景值,变异程度较小;红壤、紫色土和其他土壤的硒含量略低,平均值小于0.25mg/kg,并且红壤变异程度大,紫色土和其他土壤中没有样点达到富硒土壤标准。黄棕壤、黄壤和红壤分布与高海拔坡地,植被覆盖茂盛,岩石风化更为强烈,易富集硒<sup>[31]</sup>。

表4 不同用地类型和土壤类型表层土壤中硒含量特征

Table 4 Characteristics of selenium content in topsoil from different land utilization types and soil types

用地类型	样品数量 (件)	Se 含量平均值 (mg/kg)	Se 含量中位数 (mg/kg)	Se 含量范围 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数	研究区 Se 含量 背景值 (mg/kg)
旱地	632	0.29	0.27	0.06 ~ 1.05	0.13	0.45	0.33
水田	13	0.24	0.21	0.09 ~ 0.32	0.06	0.27	
草地	554	0.39	0.37	0.05 ~ 1.10	0.14	0.37	
林地	129	0.34	0.30	0.03 ~ 1.50	0.19	0.58	
土壤类型	样品数量 (件)	Se 含量平均值 (mg/kg)	Se 含量中位数 (mg/kg)	Se 含量范围 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数	研究区 Se 含量 背景值 (mg/kg)
黄壤	648	0.34	0.33	0.10 ~ 1.10	0.12	0.36	0.33
红壤	63	0.23	0.16	0.04 ~ 1.50	0.21	0.94	
黄棕壤	545	0.36	0.35	0.06 ~ 0.94	0.16	0.46	
紫色土	50	0.17	0.16	0.05 ~ 0.36	0.08	0.46	
其他	22	0.22	0.21	0.09 ~ 0.32	0.06	0.28	

### 2.2.3 土壤有机质

土壤有机质是表征土壤肥力和质量的重要因子,也是陆地生态系统中碳循环的重要源与汇<sup>[32-33]</sup>,包括动植物残体、微生物体和生物残体在不同分解阶段的产物,以及由分解产物合成的腐殖质等<sup>[34]</sup>。较多研究者认为土壤有机质对硒含量有较显著影响<sup>[35-37]</sup>。

将成土母质、用地类型和土壤类型分别作为统计单元,探讨表层土壤硒与有机质的相关性。由表5可见,除水田外,各种统计单元表层土壤中硒含量与有机质含量具有显著的正相关关系,其中紫色土中硒与有机质相关性最高,相关系数达到0.913,足以表明硒能以与腐殖质结合的形态存在,在表层土壤中固定下来<sup>[12]</sup>。也有研究表明,土壤中大部分硒与腐殖质结合,植物能够吸收的硒多与富里酸结合,但是与胡敏酸结合的硒难以被吸收,由此可以推断土壤有机质能促进硒含量,但同时也抑制着植物

表5 不同统计单元表层土壤硒与有机质相关关系

Table 5 Correlation between topsoil selenium and organic matter in different statistical units

统计单元	样品数量 (件)	相关系数	统计单元	样品数量 (件)	相关系数
Pe	518	0.508 **	草地	554	0.587 **
T1f-j	119	0.492 **	林地	129	0.489 **
T1-2f-l	173	0.751 **	黄壤	648	0.545 **
T2l	235	0.569 **	红壤	63	0.510 **
T3xj	264	0.641 **	黄棕壤	545	0.721 **
旱地	632	0.691 **	紫色土	50	0.913 **
水田	13	0.451	汇总	1328	0.615 **

注: “\*\*”表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

对硒的吸收<sup>[38]</sup>。对富硒土壤进行开发时,需要通过合理调节有机质含量水平来调整土壤硒含量,从而提高农作物产品对土壤硒的利用率。

#### 2.2.4 土壤酸碱度

土壤酸碱度被认为是影响土壤硒含量的重要因素之一,通过控制土壤元素的活性(生物有效性)进而影响作物中硒的含量<sup>[34]</sup>。参考《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),以研究区内表层土壤酸碱度为划分依据绘制表层土壤硒含量与pH值的散点图。从图4可知,不同酸碱度土壤中Se含量与pH值关系具有明显变化规律,在强酸性土壤(pH<5.0)中,Se含量较低,变化范围不大,呈正相

关趋势;在酸性土壤( $5.0 \leq \text{pH} < 6.5$ )中,Se含量迅速增加,变化拐点出现在pH为5.0时,整体呈负相关趋势;在中性( $6.5 \leq \text{pH} < 7.5$ )和碱性( $7.5 \leq \text{pH} < 8.5$ )土壤中,Se含量变换趋势不明显。说明Se在中性、碱性土壤中基本不受pH制约,而在土壤酸性条件下,随着pH值的下降,土壤中Se含量增加。前人研究表明,酸性土壤中Se主要以亚硒酸盐( $\text{SeO}_3^{2-}$ )形式存在,与吸附物质有较强的亲和力,易受黏粒矿物和被半氧化物固定;而在碱性土壤中,Se主要以硒酸态( $\text{SeO}_4^{2-}$ )形式存在,与吸附物质间的亲和力较弱,溶解度大,更易被植物吸收<sup>[39-40]</sup>。因此,pH越高,硒越容易淋失<sup>[41-42]</sup>。

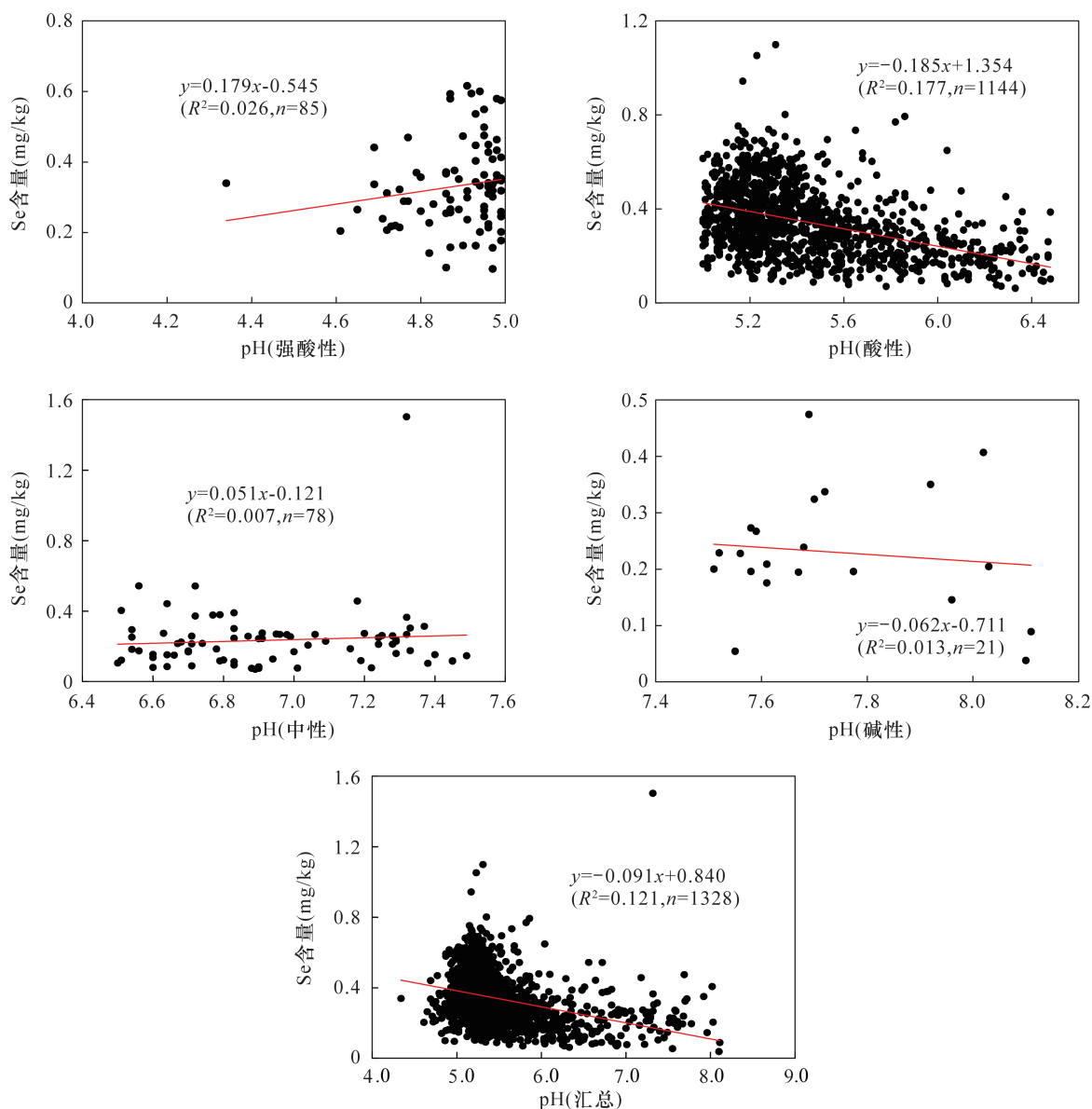


图4 不同酸碱度表层土壤 pH 与 Se 散点图

Fig. 4 Scatter plots of pH values and selenium content in topsoil with different pH



### 2.2.5 土壤质地

土壤质地是土壤理化性质之一,指土壤中不同大小直径的矿物颗粒的组合状况。有研究表明,土壤中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等常量组分的含量比值可以间接反映土壤质地, $\text{SiO}_2$  含量越高, $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等组分越低,表明土壤质地偏向于砂质、粉砂质,反之土壤质地偏向于黏土质,黏质组分比例越高、土壤质地越细<sup>[43]</sup>。一般来说,黏质土壤硒含量稍高,砂质土壤硒含量较低,土壤中黏粒含量越多,越黏重,硒元素易被吸附、固定,导致硒含量升高<sup>[27,44]</sup>。

图5为表层土壤中 Se 与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及其组合的关系,从中可以看出,研究区土壤 Se 含量与  $\text{SiO}_2$  含量呈显著负相关 ( $R^2 = 0.261$ ,  $P < 0.01$ ),与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量呈显著正相关 ( $R^2 = 0.374$ ,  $P < 0.01$ ),与  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  相关系数最大 ( $R^2 = 0.411$ ,  $P < 0.01$ )。表明研究区土壤质地对硒含量有一定控制作用。Se 含量与  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  相关性较低 ( $R^2 = 0.075$ ,  $P < 0.01$ ),指示铁氧化物对硒的吸附作用明显小于铝氧化物。有研究表明,铁(氢)氧化物对土壤硒酸盐的吸附能力受到 pH 的强烈影响,随着 pH 的升高,铁氧化物对硒的吸附能力降低<sup>[45]</sup>,研究区土壤

表层土壤以酸性为主 ( $5.0 \leq \text{pH} < 6.5$ ),影响了铁氧化物对硒的控制作用。

### 2.3 土地安全性评价

已有研究表明,富硒土壤通常与碳酸盐岩、玄武岩、含煤系地层等地质背景高度相关<sup>[46]</sup>,且硒元素往往与重金属元素 Cd 存在一定的伴生关系<sup>[47-48]</sup>。在富硒土壤开发利用过程中应密切关注土壤重金属超标的潜在风险。

参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)对土地资源进行安全性评价,评价指标包括 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 八个重金属元素。利用研究区表层土壤重金属含量分析结果在评价系统中对区内图斑进行赋值和插值处理后评价,结果统计于表6。研究区表层土壤中 Hg、Pb、Zn 风险等级全部为无风险;As、Cr、Ni 无风险土壤占比分别为 99.74%、99.11%、96.57%,风险可控的土壤面积分布极小,对土壤产生的污染影响微乎其微;Cd 无风险土壤面积为 178.00km<sup>2</sup>,占比80.25%,风险可控土壤面积为43.80km<sup>2</sup>,占比19.75%;Cu 无风险土壤面积为157.04km<sup>2</sup>,占比70.80%,风险可控土壤面积为64.77km<sup>2</sup>,占比29.20%。

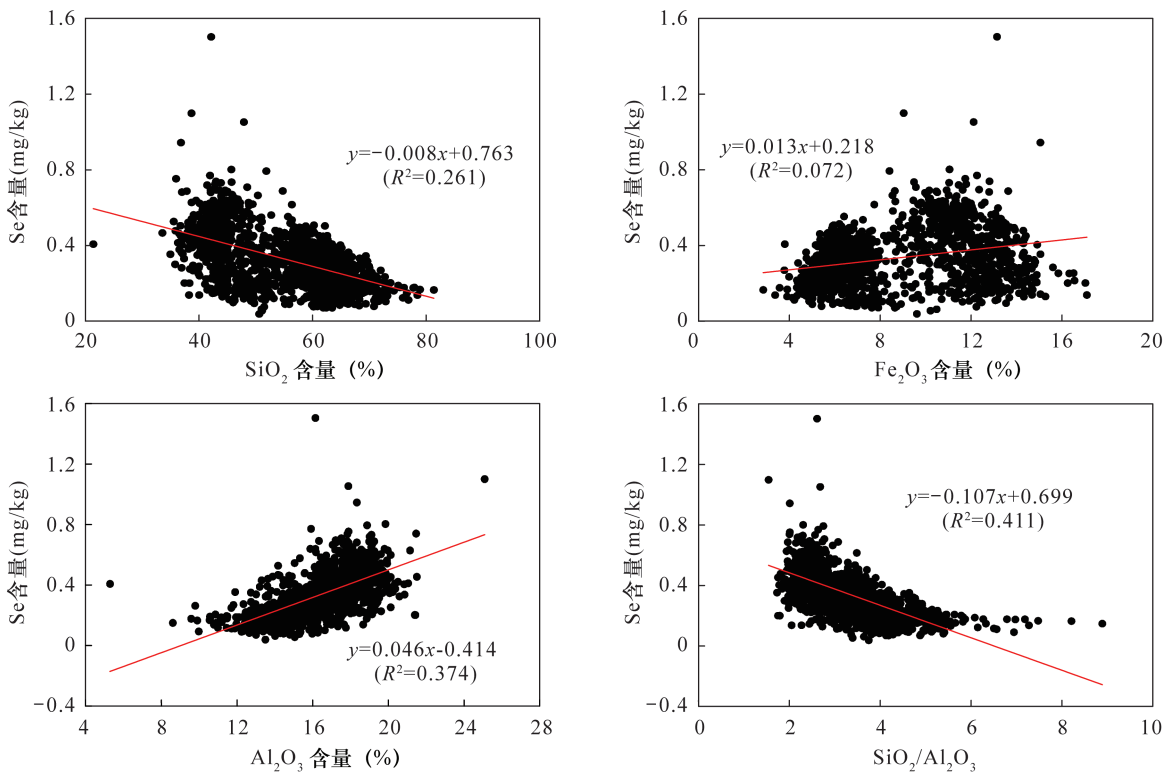


图5 表层土壤铁、铝、硅氧化物与硒含量相关关系

Fig.5 Relationship between the iron, aluminum, silicon oxide content and selenium content in topsoil



表6 研究区表层土壤环境地球化学等级划分

Table 6 Environmental geochemical grade in topsoil of the study area

重金属元素	无风险		风险可控	
	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)
As	221.22	99.74	0.58	0.26
Cd	178.00	80.25	43.80	19.75
Cr	219.82	99.11	1.98	0.89
Cu	157.04	70.80	64.77	29.20
Hg	221.81	100.00	0	0.00
Ni	214.20	96.57	7.60	3.43
Pb	221.81	100.00	0	0.00
Zn	221.81	100.00	0	0.00

研究区内影响土壤环境质量的元素主要为 Cd 和 Cu,通过其地球化学等级评价图(图6)发现,Cd、Cu 重金属元素风险可控区与富硒土壤在空间分布上大面积重叠,主要位于阿并洛古乡东部、特布洛乡西南部、庆恒乡东南部。但多项研究表明,在天然的地质高背景地区,其生物有效性通常很低,尤其研究区内多种植玉米、土豆等作物,对重金属元素的敏感度不高<sup>[49-50]</sup>。因此,研究区内富硒土壤仍具有开发利用前景。

## 2.4 作物富硒及安全性评价

作物中硒含量达到丰富水平并且符合食品安全规范时被称为富硒作物,具有较高的营养价值,对富硒土地的开发利用同样有着重要的意义。一般来讲,富硒土壤产出作物更易富硒。研究区土壤硒含量较高且富硒土壤与峨眉山玄武岩地层空间分布极

为相似,为探讨其土壤硒的开发利用,提高产出作物价值,将参照《富硒农产品标准》(DB50/T705—2016)对研究区内所采集的玉米和土豆进行富硒评价,富硒玉米、富硒土豆的硒含量限定范围均为 0.02 μg/g ~ 0.10 mg/kg。

经统计,区内玉米 Se 元素含量范围在 0.0036 ~ 0.0384 mg/kg,均值为 0.014 mg/kg,整体未达到富硒水平;土豆 Se 元素含量范围在 0.0013 ~ 0.0071 mg/kg,均值为 0.0032 mg/kg,整体 Se 含量更低。19 件玉米中富硒样品为 4 件,其中 3 件产于富硒土地;20 件土豆均不富硒。

不同农作物对土壤硒元素的富集能力有所差异,由强到弱依次为:十字花科(白菜等) > 豆科(大豆等) > 谷类(玉米、水稻等) > 水果类(苹果等)<sup>[51]</sup>。本次调查显示,研究区内土豆不易富硒,玉米富硒能力稍强于土豆,两种作物均未达富硒作物标准,除作物自身不易富硒外,区内土壤有机质含量较高及 pH 值较低的特征也影响了 Se 元素在土壤-作物系统的迁移过程,在种植施肥过程中要注意减少生物肥的使用并且适度调节农田土壤酸碱度。

与此同时,将 As、Cd、Cr、Hg、Pb 含量与《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)进行对照(表7),研究区内所有作物样品中未发现重金属含量超标,均符合国家食品安全标准。

国家标准中未制定作物中 Cu 限量值,但从作物中 Cu 元素含量统计值可以看出,玄武岩区产出作物 Cu 含量比非玄武岩区略高;玉米中 Cu 含量

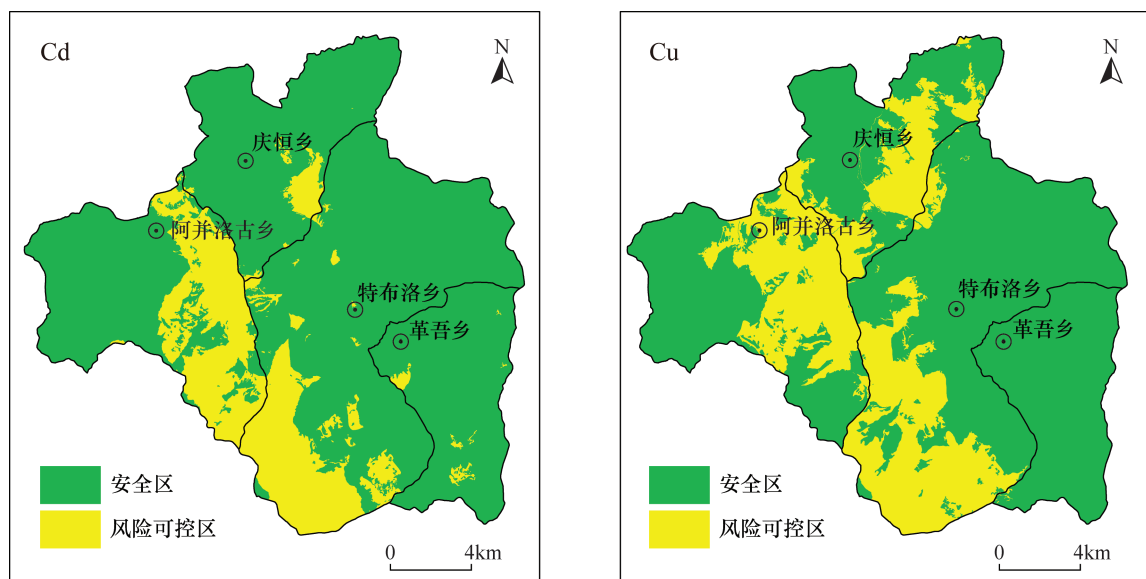


图6 研究区表层土壤 Cd、Cu 环境地球化学等级图

Fig. 6 Environmental geochemical grade maps of Cd and Cu in topsoil of the study area

表7 研究区不同作物重金属元素含量

Table 7 Heavy metal element contents in different crops of the study area

作物种类	含量特征	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
玉米	最小值(mg/kg)	0.008	0.001	0.070	1.23	0.001	0.02	0.005	13.38
	最大值(mg/kg)	0.030	0.015	0.108	4.89	0.003	0.27	0.086	31.53
	平均值(mg/kg)	0.017	0.004	0.079	2.17	0.001	0.07	0.028	19.17
	中位数(mg/kg)	0.017	0.003	0.078	1.96	0.001	0.05	0.017	18.15
	标准差(mg/kg)	0.005	0.004	0.009	0.81	0.001	0.06	0.025	4.12
	变异系数	0.30	0.82	0.11	0.37	0.57	0.86	0.90	0.22
	限量值(mg/kg)	0.5	0.1	1.0	/	0.02	/	0.2	/
土豆	最小值(mg/kg)	0.007	0.005	0.005	0.35	0.00002	0.01	0.002	1.56
	最大值(mg/kg)	0.013	0.067	0.011	1.65	0.00009	0.21	0.027	3.60
	平均值(mg/kg)	0.009	0.016	0.007	0.79	0.00003	0.05	0.005	2.23
	中位数(mg/kg)	0.009	0.013	0.007	0.73	0.00003	0.03	0.004	2.10
	标准差(mg/kg)	0.001	0.014	0.002	0.31	0.00002	0.05	0.006	0.50
	变异系数	0.13	0.84	0.21	0.39	0.49	1.00	1.05	0.22
	限量值(mg/kg)	0.5	0.1	0.5	/	0.01	/	0.2	/

高于土豆。说明区内玉米富集重金属的能力比土豆更强,玄武岩区所产作物的安全性也高于非玄武岩区。同时也有研究发现,Se元素对重金属的毒性有一定的抑制作用,可能在一定程度上缓解了重金属对作物自身的毒害<sup>[52-54]</sup>。

### 3 结论

对四川省昭觉县中部农耕区土壤硒元素含量特征、分布特征及理化性质等进行分析,查明了研究区土壤硒地球化学特征,探讨区内土壤硒含量的主要影响因素,为富硒土壤开发利用提出建议。结果表明:①研究区土壤以足硒土壤为主,富硒土壤呈片连续分布,范围与区内峨眉山玄武岩组地层的分布范围一致,显示区内表层土壤硒含量与成土母质关系密切;②除成土母质主控因素外,用地类型与土壤类型、土壤有机质、土壤酸碱度及土壤质地均能对土壤硒的富集活化产生一定程度影响,其中草地与林地等非农业区土壤硒易富集,黄棕壤土层中黏粒或铁氧化物等易与硒结合富集;酸性土壤中硒含量与pH值成反比;土壤有机质与硒含量呈显著正相关;土壤质地对硒含量具有一定的控制作用,硒含量与SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈显著负相关;③研究区土壤Cd、Cu含量较高是影响富硒土壤质量的主要地球化学问题,富硒区产出玉米及土豆未见重金属元素超标情况,但其富硒率较低。

本文研究成果讨论了研究区表层土壤硒元素的地球化学特征以及主要作物的富硒特征与安全性评价,为当地土地资源管理、农业种植规划提供了科学

依据。在将来的研究中,应进一步探讨土壤-作物系统中硒元素的迁移转化规律以及农田表层土壤中硒元素的形态特征,为当地土地资源管理和农业种植规划提供更全面的依据。

### 4 参考文献

- [1] Fordyce F M, Zhang G D, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China[J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(1): 117-132.
- [2] 韩晓霞, 魏洪义. 硒的营养生物学研究进展[J]. 南方农业学报, 2015, 46(10): 1798-1804.  
Han X X, Wei H Y. Research progress in nutritional biology of selenium[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(10): 1798-1804.
- [3] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake[J]. British Journal of Nutrition, 2008, 100(2): 254-268.
- [4] Bullock L A, John P, Magali P, et al. High selenium in the carboniferous coal measures of northumberland, North East England[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 195: 61-74.
- [5] Yanai J, Mizuhara S, Yamada H. Soluble selenium content of agricultural soils in Japan and its determining factors with reference to soil type, land use and region[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015, 61(2): 312-318.
- [6] Yamada H, Kamada A, Usuki M, et al. Total selenium content of agricultural soils in Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2009, 55(5): 616-622.
- [7] Zhu J M, Zheng B S. Distribution and affecting factors of selenium in soil in the high-Se environment of

- Yutangba mini - landscape [ J ]. Chinese Science Bulletin, 1999( Supplement 2 ): 46 - 48.
- [ 8 ] 张建东, 王丽, 王浩东, 等. 紫阳县土壤硒的分布特征研究[ J ]. 土壤通报, 2017, 48( 6 ): 1404 - 1408.  
Zhang J D, Wang L, Wang H D, et al. Distribution of soil total selenium in Ziyang, Shaanxi [ J ]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48( 6 ): 1404 - 1408.
- [ 9 ] 徐强, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 方正县土壤硒的分布特征及其与土壤性质的关系[ J ]. 土壤通报, 2015, 46( 3 ): 597 - 602.  
Xu Q, Chi F Q, Kuang E J, et al. Distribution characteristics of selenium in Fangzheng County and its relationship with soil properties [ J ]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46( 3 ): 597 - 602.
- [ 10 ] 马迅, 宗良纲, 诸旭东, 等. 江西丰城生态硒谷土壤硒有效性及其影响因素[ J ]. 安全与环境学报, 2017, 17( 4 ): 1588 - 1593.  
Ma X, Zong L G, Zhu X D, et al. Effectiveness and influential factors of soil selenium in selenium valley, Fengcheng, Jiangxi [ J ]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17( 4 ): 1588 - 1593.
- [ 11 ] 息朝庄, 张鹏飞, 吴林锋, 等. 贵州省惠水县涟江大坝土壤硒分布特征及影响因素研究[ J/OL ]. 中国地质, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210301.1622.008.html>.  
Xi C Z, Zhang P F, Wu L F, et al. Distribution characteristics and influencing factors of selenium in soil from Lianjiang Dam, Huishui County, Guizhou Province [ J/OL ]. Geology in China, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210301.1622.008.html>.
- [ 12 ] 杨忠芳, 余涛, 侯青叶, 等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[ J ]. 现代地质, 2012, 26( 5 ): 837 - 849.  
Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island [ J ]. Geoscience, 2012, 26( 5 ): 837 - 849.
- [ 13 ] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[ J ]. 土壤, 2018, 50( 6 ): 1119 - 1125.  
Yu T, Yang Z F, Wang R, et al. Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi [ J ]. Soils, 2018, 50( 6 ): 1119 - 1125.
- [ 14 ] 迟凤琴, 徐强, 匡恩俊, 等. 黑龙江省土壤硒分布及其影响因素研究 [ J ]. 土壤学报, 2016, 53( 5 ): 1262 - 1274.  
Chi F Q, Xu Q, Kuang E J, et al. Distribution of selenium and its influencing factors in soils of Heilongjiang Province, China [ J ]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53( 5 ): 1262 - 1274.
- [ 15 ] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素 [ J ]. 土壤学报, 2015, 52( 6 ): 1356 - 1364.  
Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. Distribution of soil selenium in the northeast China Plain and its influencing factors [ J ]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52( 6 ): 1356 - 1364.
- [ 16 ] 吴兴盛. 福建省武平县富硒土壤特征及成因分析 [ J ]. 物探与化探, 2021, 45( 3 ): 778 - 784.  
Wu X S. Characteristics and genesis of selenium - rich soil in Wuping area, Fujian Province [ J ]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45( 3 ): 778 - 784.
- [ 17 ] 任海利, 高军波, 龙杰, 等. 贵州开阳地区富硒地层及风化土壤地球化学特征 [ J ]. 地球与环境, 2012, 40( 2 ): 161 - 170.  
Ren H L, Gao J B, Long J, et al. Geochemical characteristics of selenium - rich strata and weathered soil from Kaiyang County, Guizhou Province [ J ]. Earth and Environment, 2012, 40( 2 ): 161 - 170.
- [ 18 ] 刘才泽, 王永华, 曾琴琴, 等. 成渝典型地区土壤硒地球化学特征及其成因分析 [ J ]. 物探与化探, 2018, 42( 6 ): 1289 - 1295.  
Liu C Z, Wang Y H, Zeng Q Q, et al. The distribution and source of soil selenium in typical areas of Chengdu—Chongqing Region [ J ]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42( 6 ): 1289 - 1295.
- [ 19 ] 宋明义, 李恒溪, 魏迎春, 等. 浙江省龙游志棠地区硒的地球化学研究 [ J ]. 贵州地质, 2005, 22( 3 ): 176 - 180.  
Song M Y, Li H X, Wei Y C, et al. Geochemistry of the selenium, Zhitang Town, Longyou County, Zhejiang Province [ J ]. Guizhou Geology, 2005, 22( 3 ): 176 - 180.
- [ 20 ] 周国华. 富硒土地资源研究进展与评价方法 [ J ]. 岩矿测试, 2020, 39( 3 ): 319 - 336.  
Zhou G H. Research progress of selenium - enriched land resources and evaluation methods [ J ]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39( 3 ): 319 - 336.
- [ 21 ] 谭建安. 中华人民共和国地方病与环境图集 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1989.  
Tan J A. The atlas of endemic diseases and their environments in the People's Republic of China [ M ]. Beijing: Science Press, 1989.
- [ 22 ] 魏振山, 涂其军, 唐蜀虹, 等. 天山北坡乌鲁木齐至沙湾地区富硒土壤地球化学特征及成因探讨 [ J ]. 物探与化探, 2016, 40( 5 ): 893 - 898.  
Wei Z S, Tu Q J, Tang S H, et al. A discussion on the

- geochemical features and origin of selenium - rich soil on the northern slope of the Tianshan Mountains from Urumqi to Shawan County [ J ]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40( 5 ): 893 - 898.
- [ 23 ] 冯彩霞,刘家军,刘木焱,渔等.塘坝硒矿硅质岩的地球化学特征及成因[ J ]. *沉积学报*, 2002, 20( 4 ): 727 - 732.
- Feng C X, Liu J J, Liu M Y, et al. The geochemistry and genesis of siliceous rocks of selenium diggings in Yutangba [ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20( 4 ): 727 - 732.
- [ 24 ] 郑翔,钱汉东,吴雪枚.湖北恩施双河硒矿床地球化学特征及成因探讨[ J ]. *高校地质学报*, 2006, 12( 1 ): 83 - 92.
- Zheng X, Qian H D, Wu X M. Geochemical and genetic characteristics of selenium ore deposit in Shuanghe, Enshi, Hubei Province [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12( 1 ): 83 - 92.
- [ 25 ] 牛志军,徐安武,段其发,等.湖北建始北部二叠纪地层硒的来源与富集[ J ]. *中国区域地质*, 2000, 19( 4 ): 396 - 401.
- Niu Z J, Xu A W, Duan Q F, et al. Origin and enrichment of selenium in Permian strata in the northern part of Jianshi, Hubei [ J ]. *Regional Geology of China*, 2000, 19( 4 ): 396 - 401.
- [ 26 ] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等.土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[ J ]. *中国农业科学*, 2007( 8 ): 1697 - 1702.
- Wu W B, Yang P, Tang H J, et al. Regional variability of effects of land use system on soil properties [ J ]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007( 8 ): 1697 - 1702.
- [ 27 ] 童建川.重庆紫色土硒分布、迁移富集及影响因子研究[ D ].重庆:西南大学, 2009.
- Tong J C. The distribution, migration and enrichment law and influencing factors of Se in purple soil of Chongqing [ D ]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [ 28 ] 曹容浩.福建省龙海市表层土壤硒含量及影响因素研究[ J ]. *岩矿测试*, 2017, 36( 3 ): 282 - 288.
- Cao R H. Study on selenium content of surface soils in Longhai, Fujian and its influencing factors [ J ]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36( 3 ): 282 - 288.
- [ 29 ] Qin H B, Zhu J M, Xu W P, et al. Selenium speciation in seleniferous agricultural soils under different cropping systems using sequential extraction and X - ray absorption spectroscopy [ J ]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 361 - 369.
- [ 30 ] Yamada H, Kamada A, Usuki M, et al. Total selenium content of agricultural soils in Japan ( soil chemistry and soil mineralogy ) [ J ]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55( 5 ): 616 - 622.
- [ 31 ] 蒋惠俏,陆国斌,赵震云,等.广西钟山县主要农用地土壤硒的地球化学特征[ J ]. *矿产与地质*, 2020, 34( 2 ): 339 - 346.
- Jiang H Q, Lu G B, Zhao Z Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium of main agricultural land in Zhongshan County of Guangxi [ J ]. *Mineral Resources and Geology*, 2020, 34( 2 ): 339 - 346.
- [ 32 ] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [ J ]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65( 1 ): 2 - 3.
- [ 33 ] Wright A L, Hons F M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes [ J ]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69( 1 ): 141 - 147.
- [ 34 ] 黄春雷,宋明义,魏迎春.浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[ J ]. *环境科学*, 2013, 34( 11 ): 4405 - 4410.
- Huang C L, Song M Y, Wei Y C, et al. Study on selenium contents and combined forms of typical selenium - rich soil in the central part of Zhejiang Province [ J ]. *Earth and Environment*, 2013, 34( 11 ): 4405 - 4410.
- [ 35 ] 蔡子华,宋明义,胡艳华,等.湖沼相富硒土壤的发现及其生态学意义[ J ]. *物探与化探*, 2011, 35( 2 ): 248 - 253.
- Cai Z H, Song M Y, Hu Y H, et al. The discovery of lake facies selenium - rich soil and its ecological significance [ J ]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35( 2 ): 248 - 253.
- [ 36 ] 郭莉,杨忠芳,阮起和,等.北京市平原区土壤中硒的含量和分布[ J ]. *现代地质*, 2012, 26( 5 ): 859 - 864.
- Guo L, Yang Z F, Ruan Q H, et al. Content and distribution of selenium in soil of Beijing Plain [ J ]. *Geoscience*, 2012, 26( 5 ): 859 - 864.
- [ 37 ] 王金达,于君宝,张学林.黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[ J ]. *地理科学*, 2000, 20( 5 ): 469 - 473.
- Wang J D, Yu J B, Zhang X L. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of Loess Plateau [ J ]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20( 5 ): 469 - 473.
- [ 38 ] 王子健,赵利华,彭安.低硒带土壤中硒的挥发过程研究[ J ]. *环境化学*, 1989, 8( 2 ): 7 - 11.
- Wang Z J, Zhao L H, Peng A. Selenium evaporation from soils of Chinese Se - deficient belt [ J ]. *Environmental Chemistry*, 1989, 8( 2 ): 7 - 11.
- [ 39 ] Zhang L H, Shi W M, Wang X C. Difference in selenium accumulation in shoots of two rice cultivars [ J ]. *Pedosphere*, 2006( 5 ): 646 - 653.
- [ 40 ] 章海波,骆永明,吴龙华,等.香港土壤研究 II. 土壤硒的含量、分布及其影响因素[ J ]. *土壤学报*, 2005, 42( 3 ): 404 - 410.
- Zhang H B, Luo Y M, Wu L H, et al. Hong Kong soil researches II. Distribution and content of selenium in soils [ J ]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42( 3 ): 404 - 410.

- 404-410.
- [41] 朱建明,梁小兵,凌宏文,等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,(1):75-81.  
Zhu J M, Liang X B, Ling H W, et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003,22(1):75-81.
- [42] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1996.  
Liu Z. Soil trace elements in China[M]. Nanjing:Jiangsu Science and Technology Press,1996.
- [43] 孙彬彬,周国华,刘占元,等. 黄河下游山东段沿岸土壤中重金属元素异常的成因[J]. 地质通报,2008,27(2):265-270.  
Sun B B, Zhou G H, Liu Z Y, et al. Origin of heavy metal anomalies in soils along the Shandong reach of the Lower Yellow River, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008,27(2):265-270.
- [44] 黄锦法,洪春来,陈轶平,等. 浙北嘉兴平原土壤和作物硒元素研究初报[J]. 浙江农业科学,2010(6):1356-1358.  
Huang J F, Hong C L, Chen Y P, et al. Se in soils and crops of Jiaxing Plain Region in northern Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2010(6):1356-1358.
- [45] Selinus O, Alloway B, Centeno J, et al. Essentials of medical geology: Impacts of the natural environment on public health [M]. Elsevier Academic Press, 2005.
- [46] 韩伟,王乔林,宋云涛,等. 四川省沐川县北部土壤硒地球化学特征与成因探讨[J]. 物探与化探,2021,45(1):215-222.  
Han W, Wang Q L, Song Y T, et al. Geochemical characteristics and genesis of selenium in soil in northern Muchuan County, Sichuan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021,45(1):215-222.
- [47] 耿建梅,王文斌,温翠萍,等. 海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性[J]. 生态学报,2012,32(11):3477-3486.  
Geng J M, Wang W B, Wen C P, et al. Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(11):3477-3486.
- [48] 郭跃品,傅杨荣,何玉生,等. 琼北火山岩区农田土壤重金属和硒含量评价及来源研究[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):330-334.  
Guo Y P, Fu Y R, He Y S, et al. Evaluation and source analysis of the heavy metals and selenium in the farmland soils of volcanic area, north of Hainan Island [J]. Journal of Safety and Environment, 2015,15(1):330-334.
- [49] 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 characteristics 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.
- [50] 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估[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.
- [51] 安梦鱼,张青,王煌平,等. 土壤植物系统硒累积迁移的影响因素及调控[J]. 中国农学通报,2017,33(11):64-68.  
An M Y, Zhang Q, Wang H P, et al. Selenium accumulation and transfer in soil-plant system: Influence factors and control [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017,33(11):64-68.
- [52] Wan Y, Yu Y, Wang Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: Influence of different forms of selenium [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2016,133:127-134.
- [53] 郑淑华,朱凤榕,李榕,等. 自然富硒土中Se对不同水稻籽粒吸收Cd的影响[J]. 环境保护科学,2014,40(5):74-76,80.  
Zheng S H, Zhu H R, Li R, et al. Effect of Se in the natural selenium-rich soils on absorption of Cd in rice grains [J]. Environmental Protection Science, 2014,40(5):74-76,80.
- [54] 周墨,陈国光,张明,等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究:以青塘—梅窖地区为例[J]. 现代地质,2018,32(6):1292-1301.  
Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of south Jiangxi Province: A typical area of Qingtang—Meijiao [J]. Geoscience, 2018,32(6):1292-1301.

# Geochemical Characteristics of Selenium in Surface Soil of Central Townships in Zhaojue County, Sichuan Province

ZHAO Chen<sup>1,2</sup>, SUN Binbin<sup>1,2\*</sup>, HE Ling<sup>1,2</sup>, WU Chao<sup>1,2</sup>, CHENG Xiaomeng<sup>1,2</sup>, ZENG Daoming<sup>1,2</sup>, LIU Dong<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources; Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China;  
2. UNESCO International Centre on Global – scale Geochemistry, Langfang 065000, China)

## HIGHLIGHTS

- (1) The selenium – enriched land covers 7.23km<sup>2</sup>, which is consistent with the distribution of Permian Emeishan basalt Formation, indicating strong regularity in space.  
(2) In addition to soil parent material, land utilization type, soil type, soil pH value, soil organic matter and soil texture all affected the enrichment and activation of selenium in soil.  
(3) Heavy metals in corn and potatoes did not exceed the standard, but the selenium enrichment rates were low, and selenium content was higher in corn than in potatoes.



## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Selenium (Se) is one of the essential trace elements for humans, and an important way for humans to obtain and supplement selenium is by eating natural selenium – enriched agricultural products. The geochemical characteristics of selenium in the survey area are an important basis for the effective utilization of selenium – enriched land resources and the development of selenium – enriched agricultural and sideline products.

**OBJECTIVES:** To investigate the geochemical characteristics of selenium content, distribution and influence factors in the study area.

**METHODS:** Soil and crop samples were collected from a central village of Zhaojue County, Sichuan Province. AFS, XRF and ICP – MS were used to determine the contents of elements including Se, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, OrgC, and pH values. Geochemical characteristics of selenium content, distribution and influencing factors in the study area were investigated using statistical and correlation analysis.



**RESULTS:** (1) The soil selenium content in the study area ranged from 0.04 to 1.50mg/kg, with an average value of 0.33mg/kg. The delineated selenium – enriched soil area was 7.23km<sup>2</sup>, accounting for 30.31% of the total soil area. The selenium content of the soil developed in basalt was the highest, with an average of 0.4mg/kg, indicating that the geological background in the area was closely related to the soil selenium content. The Se – enriched soil in the area was mainly controlled by the Emeishan basalt Formation, which contained basalt intercalating with picrite and tuffaceous sand and mudstone. (2) The enrichment capacity of selenium varied in different land utilization and soil types. The absorption capacity of selenium in soil decreased due to human agricultural activities. Clayey particles or iron oxides in the yellow – brown loam layer were easy to combine and enrich selenium. The selenium content in acidic soil was inversely correlated to pH value. There was a significant positive correlation between soil organic matter and selenium content. Soil texture had a certain effect on selenium content. (3) Corn and potatoes from selenium – enriched soils had very low selenium content.

**CONCLUSIONS:** During the exploitation and utilization of selenium – enriched soil, organic fertilizer should be added in time and soil pH should be adjusted in agricultural areas such as dry land and paddy field, and other agricultural products should be developed by using selenium – enriched resources.

**KEY WORDS:** selenium – enriched; surface soil; geochemical characteristics; Zhaojue County; atomic fluorescence spectrometry; X – ray fluorescence spectrometry; inductively coupled plasma – mass spectrometry/optical emission spectrometry