

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2021.01.007

湖南隆回县土壤硒元素地球化学特征及其影响因素： 以石门-滩头镇为例

宋江涛, 林治家, 张锦煦, 孟杰, 陈珍宝

SONG Jiang-Tao, LIN Zhi-Jia, ZHANG Jing-Xu, MENG Jie, CHEN Zhen-Bao

(湖南省地质调查院, 长沙 410116)

(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China)

摘要:湖南省隆回县石门-滩头两个乡镇的土地质量地球化学调查共采集表层土壤样品 699 件, 农产品样 45 件以及 4 个土壤垂向剖面, 系统分析了表层土壤以及农产品中硒元素的含量特征, 并探讨了土壤硒元素含量与成土母质、土地利用方式、土壤酸碱度以及有机质之间的关系。结果表明: 区内土壤表层硒含量平均值为 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于全国背景值, 富硒土壤面积比例达到 87.96%; 表层土壤硒含量主要受控于成土母质, 即硒来源与硅质岩密切相关; 土壤垂向剖面总体呈现硒元素的表聚性; 土地利用方式对土壤硒的富集也产生一定的影响; 土壤硒含量与土壤 pH 值呈负相关, 与有机质含量则呈显著的正相关。黄豆以及玉米富硒率非常高, 同时这两种农产品大多数样品内重金属元素含量均符合国家食品安全标准。这些研究成果为当地富硒土壤资源开发利用等提供理论上的支持。

关键词:富硒土壤; 地球化学分布特征; 影响因素; 湖南隆回县

中图分类号: P595; X142

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2021)01-0083-10

Song J T, Lin Z J, Zhang J X, Meng J and Chen Z B. Geochemical Characteristics of Selenium in Soil and Its Influencing Factors in Longhui County, Hunan Province: A Case Study of Shimen-Tantou Township. *South China Geology*, 2021, 37(1): 83-92.

Abstract: The geochemical survey of land quality in Shimen and Tantou townships of Longhui County, Hunan Province collected 699 surface soil samples, 45 crop samples and 4 vertical soil profiles systematically analyzed the contents of selenium in topsoil and crops, and discussed the relationship between selenium content in soil and parent materials, land use patterns, soil pH and organic matter. The results showed that the average selenium content in the surface soil was $0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was higher than the national background value, and the proportion of selenium-enriched soil area reached 87.96%. Selenium content in surface soil is mainly controlled by parent material, which indicates that the selenium source is closely related to siliceous rocks. The vertical profile of soil generally shows the surface aggregation of selenium. The land use pattern has also certain impact on soil selenium enrichment. The pH value of soil has a negative correlation with soil selenium content, but a significant positive correlation with the content of organic matter. The soybean and corn contain very high selenium, and the contents of heavy metal elements in most samples of

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-1-19; 责任编辑: 庞迎春

基金项目: 湖南省国土资源厅“湖南省隆回县土地质量调查”项目

第一作者: 宋江涛(1988—), 男, 工程师, 地球化学专业, 研究方向为环境地球化学、农业与环境地质, E-mail: 379249940@qq.com

these two crops meet the national food safety standards. These results provide theoretical support for the development and utilization of local selenium-rich soil resources.

Key Words: selenium-rich soil; geochemical distribution; influence factor; Longhui County of Hunan Province

硒(Se)作为人类以及动物所必须的微量元素之一,有提高免疫力、防止衰老以及预防癌症等功效^[1-2]。据统计,世界上有70%以上的地区缺硒,中国有72%的县市不同程度的缺硒,其中1/3为严重缺硒区^[3]。人和动植物体内的硒主要来源于土壤,因此土壤中硒的分布、赋存状态以及土壤-农产品系统中硒的迁移转化规律一直是国内外研究的热点^[4-5]。全球高硒地区主要为不同地质时代的页岩分布区^[6]。国内学者冯彩霞等^[7]、张光弟等^[8]、樊海峰等^[9]对渔塘坝地区的硒地质成因、地球化学特征、表生地球化学活动性等开展了研究。杨忠芳等^[4]对海南岛农田土壤研究表明土壤pH,有机质等是影响土壤中硒含量的重要因素。黄钊等^[10]对云南新平县哀牢山地区研究表明不同的土地利用方式也会影响土壤中

硒元素的含量。周小娟等^[11]认为不同农产品对硒的富集能力差异明显,其中农产品硒的含量与土壤中硒的含量具有一定的正相关性。

本文依托湖南省隆回县土地质量调查项目所取得的丰富资料,探讨研究区硒的地球化学特征及其影响因素,为当地土地资源合理利用、名特优产品的开发等提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于湖南省中部隆回县的石门镇和滩头镇,总面积259.62 km²,工作区地理坐标为东经110°57'~110°13',北纬27°03'~27°22'(图1)。区内属中亚热带季风湿润气候,气候温和、四季分明、雨

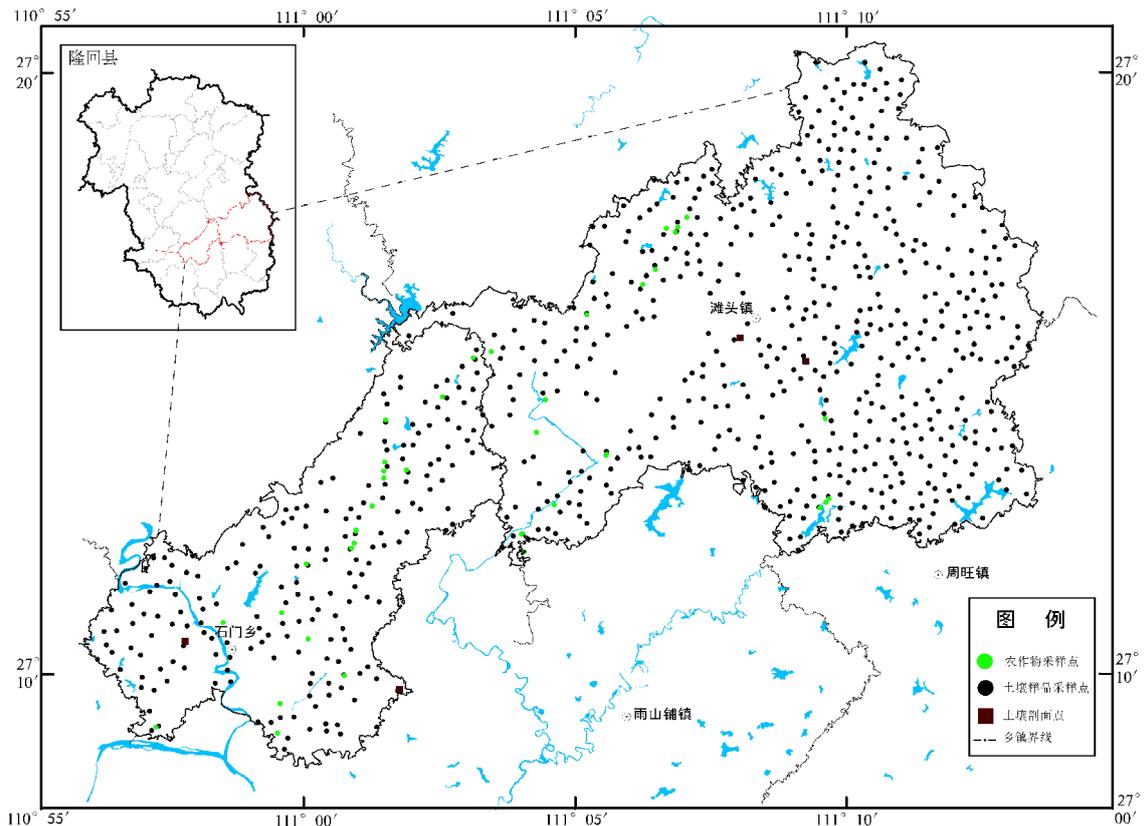


图1 研究区位置及采样点图

Fig. 1 Location and sampling point map of the study area

量集中,前湿后干,且南北差异较大,年日平均气温 11-17℃,年平均无霜期 281.2 天,年平均降水量 1427.5 mm。研究区主要出露泥盆纪、石炭纪、二叠纪以及三叠纪地层(图 2)。根据第二次国土调查成果显示,区内主要土地利用类型为果园、旱地、其他林地、水田以及有林地。农产品主要有水稻、玉米、烟叶以及龙牙百合等。

2 样品采集与分析测试

2.1 样品采集与制备

土壤样品用 GPS 定位采集,每个土壤样品采样点采用对角线法设置 4 个不同的采样位置(以 GPS 定位点为中心,向四周辐射 50~100 m 确定分样点),每个位置采集 0-20 cm 的耕作层土壤,然后将 4 个位置采集的土样充分混匀到一起作为一个样本。农产品样品采集时避开过大、过小和遭受病虫害或机械损伤以及田边路旁的植株,并且进行多植株多部位(植株的不同部位一般是指其根、茎、

叶、籽、果等)采样,分别组成组合样品,即把所采集对象不同植株上同一部位组合成一个样品,并把这一批植株上不同部位的样品作为一组样品,以便分析比较。

本次共采集面积性样品 699 个,农产品及其根系土样 45 组,其中玉米 30 组,黄豆 15 组。

2.2 分析方法

本次样品测试单位为国土资源部长沙矿产资源监督检测中心(湖南省地质测试院)。土壤样品中 Cr、Cd、Pb、As、Hg、pH 和有机质这 7 种指标测定采用以电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)和电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)为主,以原子荧光法(AFS)、离子选择电极法(ISE)、容量法(VOL)为辅的分析方法体系。As、Hg 测定首先加入 5mL 1+1 王水,用原子荧光法测定 Hg,将测完 Hg 的溶液抽至剩下 20 mL,然后再用定量加液器准确加入 5 mL 5%硫脲-抗坏血酸溶液,摇匀,澄清 2 小时,采用原子荧光法测定 As。元素 Cr、Cd、Pb 含量的测试,首先用 HNO₃、HF、HClO₄ 分解,然后用 ICP-OES 测定

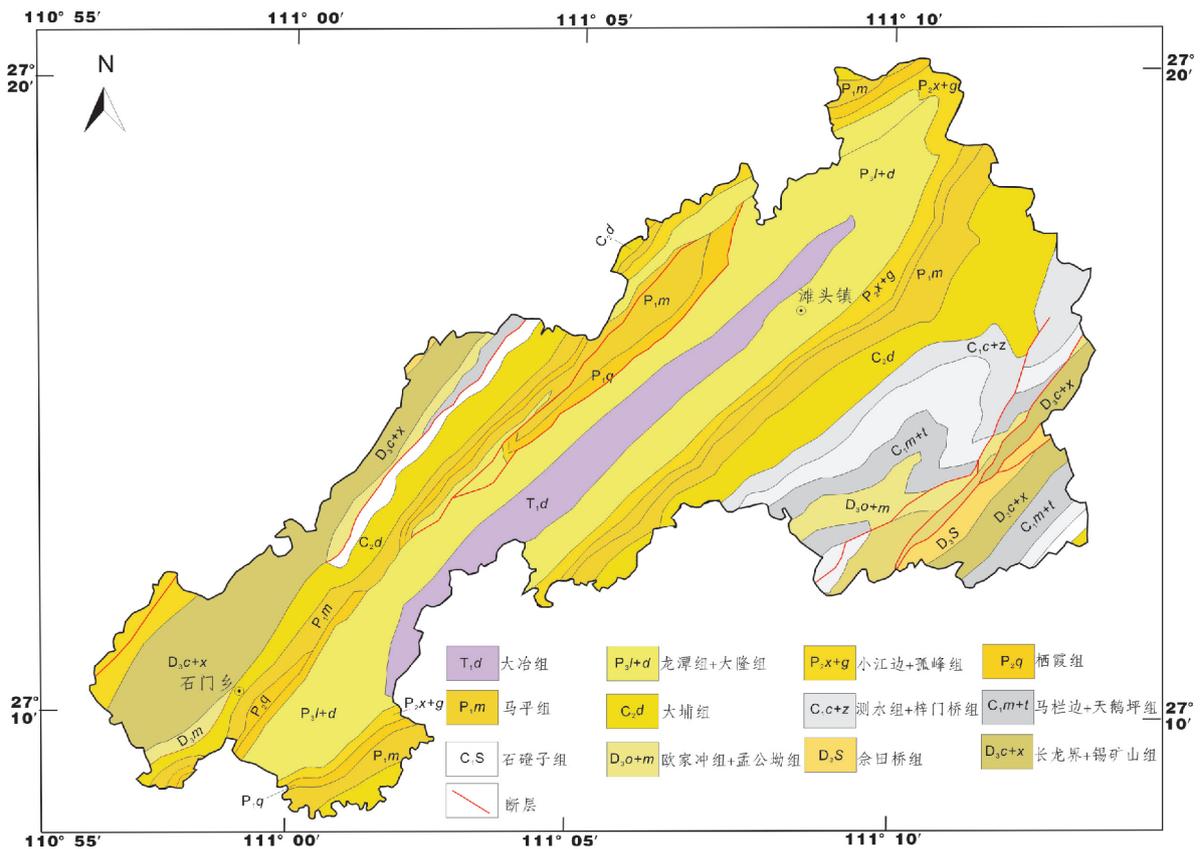


图2 研究区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of the study area

Cr, 用 ICP-MS 测定 Cd、Pb。首先称取 0.2000 g 样品,加重铬酸钾-硫酸溶液、油浴加热消煮,用 VOL 测定有机质。土壤 pH 值用离子选择性电极法 (ISE) 测定。

农产品样品将其果实冲洗干净,除去黏附土壤和因施肥、喷农药引起的污染,然后再用去离子水冲洗 2 次,在室温下晾干后在 80-90 °C 烘箱中烘 15-30 min,再降温至 60-70 °C 烘 12-24 h 以逐尽水

分。各分析样品按分析要求取足重量,直接用捣碎机捣碎后消化分析。电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cr、Cd、Pb;原子荧光光谱法 (AFS) 测定 As、Hg。分析数据质量采用插入同类型标准物质进行准确度和精密度监控,按 5% 的比例抽取外检样和异常点抽查进行样品分析质量监控。检测数据均符合中国地质调查局生态地球化学调查标准和规范的要求,具体方法和检出限见表 1。

表1 各样品测试方法及检出限

Table 1 The analysis method and detection limit of target elements

类型	元素	测试方法	检出限	类型	元素	分析方法	检出限
土 壤	Cr	ICP-OES	2	农 产 品	Cr	ICP-MS	0.08
	Cd	ICP-MS	0.017		Cd	ICP-MS	0.01
	Pb	ICP-MS	2		Pb	ICP-MS	0.03
	As	AFS	0.5		As	AFS	0.02
	Hg	AFS	0.00047		Hg	AFS	0.0008
	Se	AFS	0.01		Se	AFS	0.003
	有机质	VOL	0.05*				
	pH	ISE	0.10**				

注:检出限单位为%,标*单位为 10^{-2} ,标**单位为无量纲,其他元素单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

3 结果与分析

3.1 土壤硒的含量特征

根据所采集的 699 组表层土壤样的测试结果,统计出了研究区表层土壤硒元素的地球化学特征值(表 2)。结果显示研究区表层土壤硒含量平均值为 $0.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中位数 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差 $0.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究区表层土壤硒元素含量高于全国土壤平均值($0.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

依据《天然富硒土地划定与标识》(DD2019-10)^[12]规定的硒评价划分标准(表 3),得出研究区富硒土壤的样本数达到了 559 组,占到总样本数的

79.97%,显示石门-滩头镇存在大面积的富硒土壤。

为了解研究区土壤硒元素含量空间分布情况,依据表 3 的划分指标绘制出研究区表层土壤硒含量评价图(图 3)。从空间分布上看,研究区主要以富硒土壤为主,一般土壤主要分布在研究区的东北和西南部分地区。

3.2 不同成土母质对土壤硒元素的影响

成土母质是土壤中各种物质的最初来源,不同成土母质经风化后形成的土壤,其各元素含量也存在着显著的差距^[14]。对研究区内几种主要的成土母质(样品数量大于 10 件)发育的土壤硒元素进行统计分析(表 5)。可以看出研究区内主要成土母质所发育的

表2 表层土壤硒元素地球化学特征值

Table 2 Geochemical characteristics of selenium in topsoil

元素	样本数 (件)	平均值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变化范围 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	中值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准偏差 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 (%)	全国土壤背景值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Se	699	0.67	0.18-4.78	0.50	0.53	79	0.29

注:全国土壤背景值引自文献[13]。

表3 富硒土地类型划分指标^[12]

Table 3 Classification index of selenium rich land types

类型	土壤类型	pH	土壤硒标准 阈值(mg/kg)	条 件
富 硒 土 地	绿色富硒土地	中酸性土壤 ≤7.5	≥0.40	镉、汞、砷、铅和铬重金属元素含量符合 GB 15618 标准。农田灌溉水水质和土壤肥力同时满足 NY/T 391 要求。
		碱性土壤 >7.5	≥0.30	
地	无公害富硒土地	中酸性土壤 ≤7.5	≥0.40	镉、汞、砷、铅和铬重金属元素含量符合 GB 15618 标准。农田灌溉水水质同时满足 NY/T 5010 要求。
		碱性土壤 >7.5	≥0.30	
地	一般富硒土地	中酸性土壤 ≤7.5	≥0.40	镉、汞、砷、铅和铬重金属元素含量符合 GB 15618 标准。
		碱性土壤 >7.5	≥0.30	

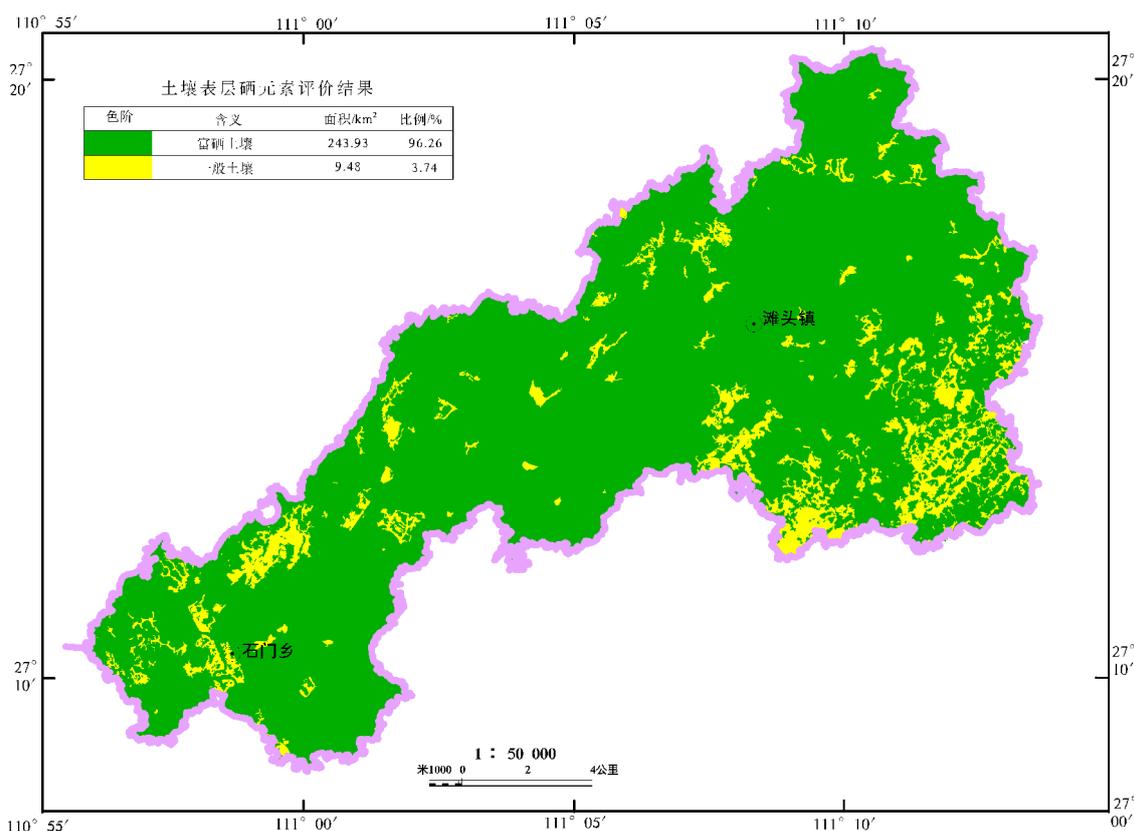


图3 研究区土壤表层硒元素地球化学等级图

Fig. 3 Geochemical distribution map of selenium contents in topsoil in the study area

土壤中硒元素含量普遍都大于 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即达到富硒程度,同时从表中可以得出,在区内整个地质历史时期出现了一个明显的富硒高峰,即二叠系的龙潭组和小江边组。其中龙潭组岩性为长石石英砂岩、粉砂岩、页岩以及硅质岩,土壤硒含量平均为 $0.856 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;小江边组为泥岩、页岩、硅质岩以及硅质灰岩,土壤硒含量平均为 $1.078 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这一结果与牛志军等^[15]在湖北建始、朱建明等^[16-20]在湖

北鱼塘坝、林治家等^[21]在湖南涟源研究的结果一致。而其他几类风化母质土壤中硒的含量相对较低,其中与小江边组为成土母质的土壤比较,硒含量最高相差将近 3 倍,反映出成土母质对土壤中硒含量控制特征明显。

综上所述,石门—滩头镇不同成土母质发育的土壤硒含量存在明显的差异,研究区土壤中硒元素含量受控于成土母质,即硒来源与硅质岩密切相关。

表5 不同成土母质土壤硒元素地球化学特征值

Table 5 Geochemical characteristics of selenium contents in soils from different parent materials

时代	地层名称	岩性	样本/ 件	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变化范围/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准偏差/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数/ %
三叠系	大冶组	泥晶灰岩夹泥灰岩、页岩	14	0.673	0.35-1.67	0.35	51.90
二叠系	龙潭组	长石石英砂岩、粉砂岩、页岩、硅质岩	182	0.856	0.26-1.67	0.42	48.83
	小江边组	泥岩、页岩、硅质岩、硅质灰岩	30	1.078	0.31-1.67	0.39	36.18
	栖霞组	生物屑泥晶灰岩、硅质岩、粉砂岩	49	0.702	0.42-1.57	0.29	41.31
	马坪组	灰岩夹白云岩	78	0.615	0.28-1.67	0.28	45.57
石炭系	大埔组	白云岩夹灰质云岩	98	0.479	0.23-0.81	0.11	22.55
	梓门桥组	石英砂岩、粉砂岩、页岩	37	0.450	0.27-0.66	0.09	19.56
	石磴子组	泥晶灰岩、生物屑泥粉晶灰岩	38	0.401	0.21-0.59	0.08	19.95
	马栏边组	生物屑泥粉晶灰岩、钙质泥岩	30	0.407	0.22-0.60	0.09	22.08
泥盆系	孟公坳组	石英砂岩、粉砂质页岩、泥灰岩	31	0.417	0.22-0.57	0.10	22.75
	余田桥组	泥灰岩、钙质页岩、生物屑泥晶灰岩	21	0.562	0.22-1.13	0.23	40.93
	锡矿山组	泥灰岩、钙质页岩、泥晶灰岩	93	0.383	0.42-1.57	0.07	18.28

3.3 土壤硒含量的垂向变化特征

王美珠等^[2]对我国一些主要土壤含硒量的分析测定表明,由于生物积累作用和淋溶作用相对强弱的差别,硒在土壤剖面中的分布常可归结为3种形式:①上高下低,生物积累大于淋溶作用;②上低下高,生物积累小于淋溶作用;③上下相近,生物积累等于淋溶作用。

在调查区4个典型的垂向土壤剖面硒含量随深度的变化曲线(图4)。可以看出:龙潭组土壤剖面硒的含量变化范围为 $0.12\text{--}0.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,0-40 cm范围内硒含量富集,平均值为 $0.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;大隆组土壤剖面硒的含量变化范围为 $0.34\text{--}1.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,0-50 cm范围内硒含量富集,平均值为 $1.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;茅口组土壤剖面的硒含量变化范围为 $0.25\text{--}0.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,0-40 cm范围内硒含量富集,平均值为 $0.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;吴家坪组土壤剖面硒的含量变化范围为 $0.17\text{--}0.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,0-20 cm范围内硒含量富集,平均值为 $0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。总体上看四个剖面在垂向上变化趋势基本一致,均呈现出表聚性的特点,表层土壤硒的含量高于下层,即生物积累大于淋溶作用。

3.4 不同土地利用类型硒含量特征

不同土地利用方式对土壤硒的富集以及迁移

往往有不可忽视的影响^[23]。研究区内主要的土地利用方式为果园、旱地、水田以及有林地。对区内这几种主要土地利用方式表层土壤硒含量分别进行统计(表6)。从表中可知:土壤中硒含量最高的是有林地,平均含量为 $0.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要原因可能为林地区人为干扰因素较少,同时本地区富硒母岩原地风化后硒元素在表层土壤中富集,最终使得林地区土壤硒含量高于其他土地利用类型^[24-25]。旱地土壤中硒元素仅次于有林地,平均含量为 $0.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能与人为干扰较少,同时旱地土壤通气条件较好,氧化还原电位较其他土地利用类型高,导致土壤中的硒容易被粘土矿物吸收^[13]。水田和果园的硒含量最低,主要原因可能是在淹水条件下,土壤中的硒元素由于下渗等原因而发生流失,最终导致硒元素含量低于有林地和旱地土壤^[26]。这与本次得出的结果一致。

3.5 pH值和有机质对土壤硒元素影响

土壤有机质和pH值是土壤重要的理化指标,对土壤中硒元素具有不同程度的影响^[27]。对研究区表层土壤硒含量与pH值、有机质含量进行相关性分析(图5)。结果表明,研究区土壤硒含量与土壤有机质和pH值都存在明显的相关性,其中与有机质含量存在显著的正相关性,相关系数为0.67,与pH值则为明显的负相关性。

土壤有机质是土壤中含碳有机化合物的总称,

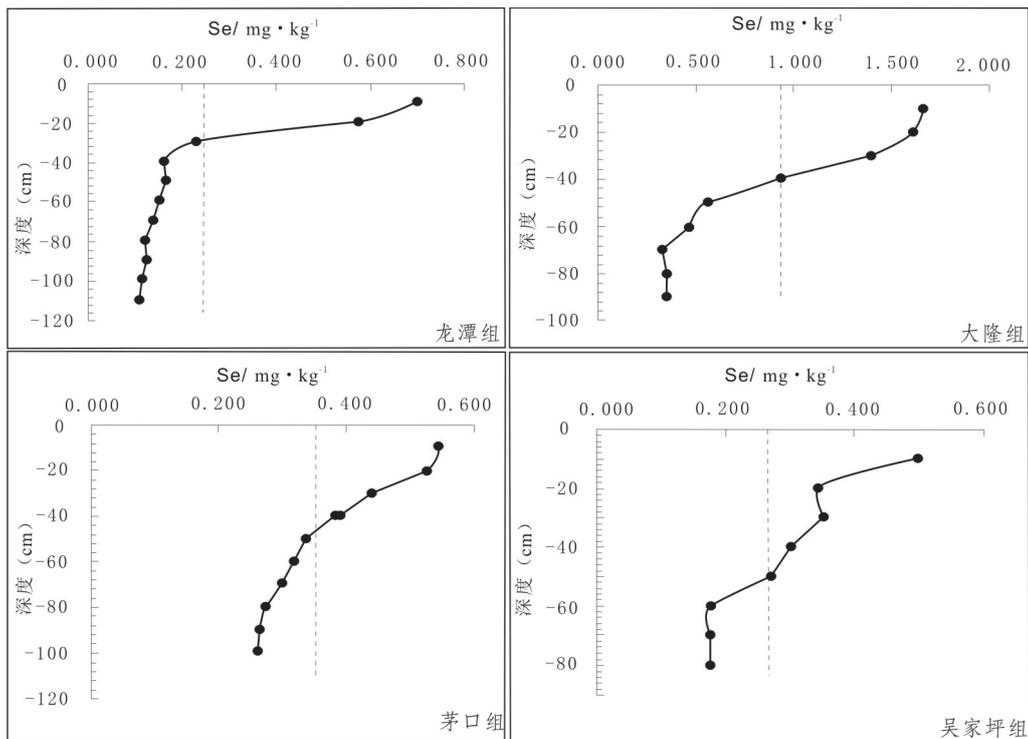


图4 土壤剖面中硒含量变化特征分布

Fig. 4 Distribution of selenium in soil profile

表6 不同土地利用方式下层土壤硒含量

Table 6 Selenium content in surface soil under different land use patterns

土地利用方式	平均值 (mg·kg ⁻¹)	最大值 (mg·kg ⁻¹)	最小值 (mg·kg ⁻¹)	标准偏差 (mg·kg ⁻¹)	变异系数 (%)
果园	0.62	0.82	0.47	0.12	19.23
旱地	0.76	4.78	0.22	0.59	79.00
水田	0.63	3.88	0.18	0.42	66.68
有林地	0.77	4.49	0.22	0.56	72.95

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^[28]。有机质含量高的地方往往土壤硒的含量也较高^[29]。从图 4 可以看出, 土壤硒与有机质含量呈现出极显著的正相关性(P<0.01), 相关系数达到了 0.67, 说明本区土壤硒的富集与有机质的关系密切, 主要的原因可能为在有机质增加的情况下促进了土壤微生物的活性, 加强了土壤中硒元素的吸附和固定作用, 从而使硒快速固定富集在表层土壤中^[30]。

许多研究成果认为土壤中 pH 值与硒具有显著的负相关性^[4, 10], 本文与前人研究结果一致。造成这现象的主要原因为通气良好的碱性环境土壤中, 硒主要以硒酸盐(Se⁶⁺) 形式存在, 硒溶解度高、迁

移性较强且不易被金属氧化物固定, 相反, 在酸性土壤中, 主要以亚硒酸盐(Se⁴⁺) 的形式存在^[31-32], 容易与土壤中金属氧化物和有机质结合而稳定存在。本区主要以酸性土壤为主, 因此在表层土壤中存在大面积的富硒土壤。

3.6 研究区主要农产品硒含量及重金属特征

本次在研究区共采集玉米和花生两种农产品。农产品中硒的平均含量变化范围为 0.06~0.12 mg·kg⁻¹, 根系土硒平均含量变化范围为 0.36~0.42 mg·kg⁻¹。无论是根系土中的硒含量还是农产品中的硒含量, 黄豆均高于玉米。参照国家稻谷富硒标准 GB/T 22499-2008^[33], 研究区玉米样品有 30 件达到富硒标准(0.07~0.3 mg·kg⁻¹), 富硒率为 100%; 黄豆样

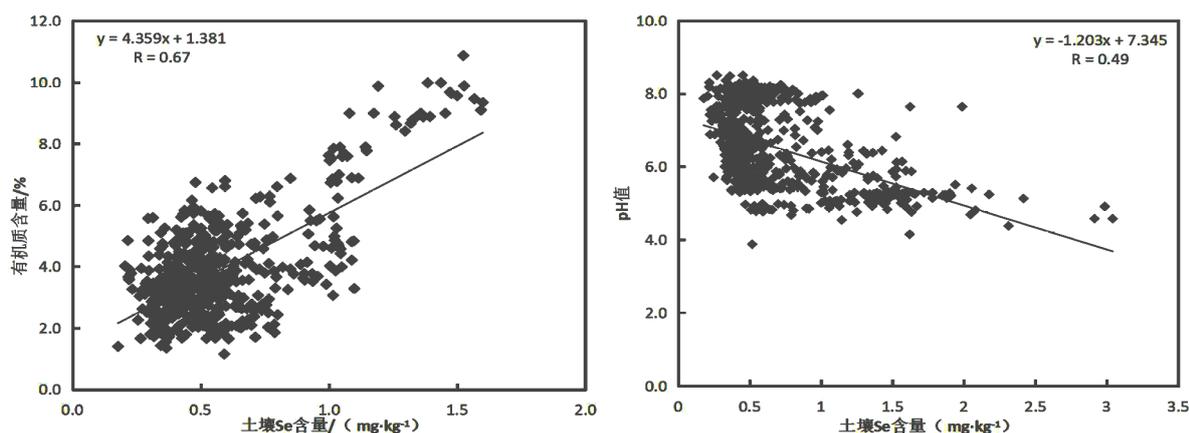


图5 研究区土壤有机质、pH与硒含量相关关系

Fig. 5 Correlation between soil organic matter, pH and selenium content in the study area

品有 12 件达到富硒标准($0.04\sim 0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),富硒率也达到 80%。

农产品中硒的主要来源是其根系土壤中的硒。作物从土壤吸收硒能力的大小,通常用生物吸收系数来表示,即富集系数^[34],其反应了作物对硒的富集能力,是筛选与评价富硒作物的关键性参数。富硒系数的计算公式为农产品硒含量/对应土壤硒含量 $\times 100\%$ 。每种农产品对其土壤中硒元素的富集能力是不同的,其中十字花科最强,而水果的富硒能力则最差^[29]。本次调查结果显示(表 7),黄豆根系土硒含量为 $0.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,富集系数为 0.24;玉米根

系土硒平均含量较低,仅 $0.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,并未达到富硒土壤标准,但富集系数却达到 0.15。农产品中硒高含量和高富集的特征为研究区开发富硒玉米和黄豆等农产品提供了基础。

与此同时,农产品重金属污染问题也一直是富硒农产品开发所面临的重要问题。参照食品安全国家标准 GB2762-2017^[35],研究区内玉米和黄豆仅仅有 2 件样品 Cd 超标,1 件玉米样品 Cr 超标(表 8),这两种农产品重金属超标现象不明显。

总体上看,研究区内的玉米和黄豆样品富硒率高,同时重金属超标现象不明显,即为绿色富硒农产品。

表7 不同农产品及根系土硒含量特征

Table 7 Selenium contents in different crops and their root soils

指标	样本数 (件)	平均值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最小值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准偏差 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异系数 (%)	富集系数
玉米硒	30	0.06	0.03	0.16	0.03	52.77	0.15
根系土硒	30	0.36	0.15	0.69	0.13	36.09	
黄豆硒	15	0.12	0.05	0.17	0.03	27.56	0.24
根系土硒	15	0.42	0.32	0.68	0.09	20.48	

表8 农产品重金属含量特征统计表

Table 8 Heavy metal contents in crops

指标	As		Hg		Cr		Cd		Pb	
	未超标	超标								
玉米	32	0	32	0	31	1	30	2	32	0
黄豆	16	0	16	0	16	0	14	2	16	0

4 结论

(1)隆回县石门-滩头镇土壤硒含量主体变化范围在 $0.18\text{--}4.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $0.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于全国土壤硒的背景值 $0.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,总体上以富硒土壤为主,具有一定的富硒土壤资源开发潜力。

(2)研究区土壤硒含量主要受控于成土母质,与硅质岩的分布密切相关,龙潭组与小江边组发育的土壤硒含量显著高于其他成土母质发育土壤。土地利用方式对硒元素的富集也产生一定的影响,其中林地比农田更容易富集硒元素。研究区土壤硒含量与有机质存在极显著的正相关性,与 pH 值呈负相关性。

(3)研究区黄豆及玉米富硒率非常高,并且这两种农产品对其土壤中硒元素的吸收能力较强。通过对农产品中重金属元素研究发现,所采农产品安全性较高。这为开发绿色富硒玉米和黄豆等农产品提供了理论指导。

参考文献:

- [1] Fordyce F M, Zhang G D, Green K, Liu X P. 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] 葛晓立,李家熙,万国江,张光弟,张忠,张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究 [J]. 岩矿测试,2000,19(4):254-258.
- [3] 仝双梅,连国奇,秦趣,代稳.贵州省开阳县土壤硒含量及其制约因素研究 [J]. 甘肃农业大学学报,2013(02): 105-109.
- [4] 杨忠芳,余涛,侯青叶,杨奕,傅杨荣,赵相雷.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.
- [5] Sharma N, Prakash R, Srivastava A. Profile of selenium in soil and crops in seleniferous area of Punjab, India by neutron activation analysis [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, 281(1): 59-62.
- [6] 王巧环,任玉芬,孟龄,李虹,傅慧敏,王华锋.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳 [J]. 分析试验室, 2013,32(10):41-45.
- [7] 冯彩霞,刘家军,刘桑,李志明,李恩东.渔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.
- [8] 张光弟,葛晓立,张绮玲,罗代洪,刘新平, Fordyce F M, 毛大钧,苏宏灿.湖北恩施地区硒地质地球化学环境背景 [J].地球学报, 1998,19(1):59-67.
- [9] 樊海峰,温汉捷,胡瑞忠.渔塘坝硒矿床多元素富集与沉积环境[J].沉积学报,2008,26(2):271-282.
- [10] 黄钊,陈政,薛传东,刀艳,许胜超,代达龙,吴松.云南省新平县哀牢山地区富硒土壤成因及其影响因素研究 [J].现代地质,2020,34(3):609-617.
- [11] 周小娟,张嫣,祝莉玲,万翔,徐宏林.武汉市侏儒一消泗地区农田系统中硒的分布特征及有效性研究[J].地质科技情报,2016,35(4):158-171.
- [12] 中国地质调查局.天然富硒土地划定与标识(DD2019-10)[S].2019.
- [13] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:501.
- [14] 魏振山,涂其军,唐蜀虹,王化兵,赵雪娇,白金启.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.
- [15] 牛志军,徐安武,段其发,傅泰安.湖北建始北部二叠纪地层硒的来源与富集[J].地质通报,2000,19(4):396-401.
- [16] 朱建明,尹祚莹,凌宏文,李社红,苏宏灿.渔塘坝微景观中硒的高硒成因探讨[J].地球与环境,2007,35(2):117-122.
- [17] 朱建明,郑宝山,王中良,肖化云,毛大均,苏宏灿.渔塘坝微域中玉米硒的分布及其与土壤硒的关系[J].环境科学,1999,20(4):39-42.
- [18] 朱建明,秦海波,罗泰义,李璐,苏宏灿.西南寒武、二叠系富硒碳质岩中硒结合态的比较研究 [J]. 高校地质学报,2007,13(1):69-74.
- [19] 朱建明,秦海波,李璐,冯志刚,苏宏灿.湖北恩施渔塘坝高硒土壤中硒的结合态 [J]. 环境科学学报,2008,28(4):772-777.
- [20] 朱建明,李社红,左维, Sykorova L, 苏宏灿,郑宝山, Pesek J.恩施渔塘坝富硒碳质岩中硒的赋存状态[J].地球化学,2004,33(6):634-640.
- [21] 林治家,王珍英,胡航,朱泽求,宋江涛.涟源富硒土壤研究与湖南省富硒土壤分布初探 [J]. 国土资源导刊, 2016,13(4):50-55+61.
- [22] 王美珠,章明奎.我国部分高硒低硒土壤的成因初探[J].浙江农业大学学报,1996,22(1):89-93.
- [23] 刘道荣,徐虹,周漪,侯建国,宋元青,翁雍蓉.浙西常山地区富硒土壤特征及成因分析[J].物探与化探,2019,43(3):658-666.
- [24] Gustafsson J P, Johnsson L. Selenium retention in the organic matter of Swedish forest soils [J]. Journal of Soil

- Science, 1992, 43(3):461-472.
- [25] 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.
- [26] Yamada H, Kadama A, Usuki M, Yanai J. Total selenium content of agricultural soils in Japan [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2009, 55(5):616-622.
- [27] 谢薇,杨耀栋,侯佳渝,李国成,菅桂芹.天津市蓟州区富硒土壤成因与土壤硒来源研究[J].物探与化探, 2019, 43(6):1-9.
- [28] 肖建安.明溪县富硒土壤资源调查及影响因素探讨[J].西部资源, 2019, (1):138-140.
- [29] 侯少范,李德珠,王丽珍,王五一,谭见安.暖温带地理景观中土壤硒的分异特征[J].地理学报, 1992, 47(1):31-39.
- [30] 李晓慧,高宇,赵万伏,刘志坚.宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析[J].农业资源与环境学报, 2018, 35(5):422-429.
- [31] 梁东丽,彭琴,崔泽玮,王丹,李哲学,黄杰, QUANG Toan Dinh. 土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展[J].生物技术进展, 2017, 7(5):374-380.
- [32] 邱啸飞.珠三角沿海地区土壤硒的来源和富集成因初探[J].华南地质与矿产, 2019, 35(4):441-448.
- [33] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 22499-2008 富硒稻谷[S].2008.
- [34] 何和明,吴生.海南岛西南地区某些药用植物微量元素的生物吸收和含量变化[J].中国野生植物资源, 1998, 17(4):25-29.
- [35] 国家卫计委, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].2017.

《华南地质》参考文献著录格式

本刊按引用文献在正文中出现的先后顺序连续编码,以阿拉伯数字排序,并用方括号标注。引用格式举例:“花岗岩成矿问题研究近年来取得了不少进展^[1, 23-27]。”“高山和金振民^[1]最早将“拆沉作用”的概念引入国内。”“原始地幔数据引自文献^[26]。”

文后参考文献著录格式如下:

1 普通图书

[序号] (顶格,下同) 作者(全部列出).书名[M].版次(第1版不写).出版地:出版者,出版年:起止页码.例如:

- [1] 史明魁,傅必勤,靳西祥,周雪昌.湘中铋矿[M].长沙:湖南科学技术出版社,1993:56-67.

2 普通图书、会议论文集等中析出的文献

[序号] 作者(全部列出).题名[文献类型标识]//原文献编者(全部列出).原文献题名.版次(第1版不写).出版地:出版者,出版年:起止页码.例如:

- [1] 陈丕基,万晓樵,曹流,等.中国陆相白垩系富饶阶研究进展[M]/王泽九,黄枝高.中国主要断代地层建阶研究报告(2001-2005).北京:地质出版社,2008:65-73.

3 连续出版物中析出的文献

[序号] 论文作者(全部列出).题名[J].连续出版物名,出版年,卷号(期号):起止页码.例如:

- [1] 李献华.扬子地块南苑四堡群 Sm-Nd 同位素体

系及其地壳演化意义[J].地质科学,1996,31(3):218-228.

4 学位论文

[序号]作者.题名[D].保存单位论文类型,年份.例如:

- [1] 刘锐.华夏地块前海西期地壳深熔作用[D].中国地质大学(武汉)博士学位论文,2009:65-69.

5 参考文献类型及其标识

文献类型	类型标识
普通图书	M
会议论文集	C
报纸文章	N
期刊文章	J
学位论文	D
报 告	R
汇 编	G
档 案	B
标 准	S
专 利	P
参考工具	K
其 他	Z