DOI:10.19751/j.cnki.61—1149/p.2022.02.025

安徽石台地区富硒土壤分布及硒的富集迁移规律探讨

高雅,胡晨,张春雷,查世新

(安徽省地质实验研究所(国土资源部合肥矿产资源监督检测中心),安徽 合肥 230001)

摘 要:安徽省南部石台县是潜在的富硒地区,调查该区富硒土壤分布特征并研究 Se 元素的富集迁移规律,对该区富硒农产品开发具有重要意义。笔者采用元素分析等技术对石台地区富硒土壤分布特征及 Se 的富集迁移规律进行研究。结果表明,石台地区表层土壤 Se 含量平均值为 0.56 mg/kg,明显高于土壤富硒标准(0.4 mg/kg)。石台县硒含量分布较不均匀,其中均值达到富硒标准的乡镇有 5 个:仙寓镇、大演乡、小河镇、丁香镇及仁里镇。该区高 Se 区主要集中于寒武系荷塘组和黄柏岭组,尤其是石煤层出露区域,指示这些地层为石台地区土壤 Se 的主要来源。土壤中 Se 含量与 pH 值、C、S 及有机质含量有很好的相关性,表明土壤成分和性质对土壤中 Se 的迁移分布具有重要作用。石台地区局部富 Se 地层(尤其是寒武系黄柏岭组)同时也富集 Cd、Hg 等重金属元素,导致地层周边土壤富 Se 的同时还遭受重金属污染。该区发展富硒农业时应避开这些高重金属含量的区域。

关键词:石台;富硒土壤;分布规律;地球化学

中图分类号:P595 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-6248(2022)02-0284-08

Study on the Distribution of Selenium-rich Soil and the Regularity of Selenium Enrichment-Migration in Shitai Area, Anhui, China

GAO Ya, HU Chen, ZHANG Chunlei, ZHA Shixin

(The Geological Experiment Institute of Anhui Province (Hefei Mineral Resources Supervision and Testing Center, the Ministry of Land and Resources), Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: Shitai County in the southern Anhui Province is a potential Selenium (Se) -rich area. Investigating the distribution characteristics of Se-rich soil and studying the regularity of Se enrichment-migration are of great significance for the development of Se-rich agricultural products in this area. In this study, the distribution characteristics of Se-rich soil and the regularity of selenium enrichment and migration in the Shitai area were studied using elemental analysis techniques. Our results show that the average Se contents in the surface soils of the Shitai area are 0.56 mg/kg, which are significantly higher than the threshold value (0.4 mg/kg) of Se enrichment in soil. The distribution of Se contents in the Shitai area is not uniform, and the average soil Se contents of five towns in Shita have reached the standard Se-enrichment, i.e., Xianyu town, Dayan township, Xiaohe town, Dingxiang town, and Renli town. High-Se areas in Shitai are mainly concentrated in the areas where the Cambrian Hetang and Huangboling formation strata, especially the stone coal stratum are exposed. This indicates that these strata are the main

收稿日期:2021-10-20;**修回日期**:2021-12-26;**网络发表日期**:2022-05-10;**责任编辑**:吕鹏瑞

基金项目:安徽省公益性地质调查项目"淮南市生态地质调查项目"(2021-g-2-7)。

作者简介:高雅(1989-),女,工程师,硕士,主要从事水文工程环境地质调查评价与研究工作。E-mail:343379276@qq.com。

sources of Se in the soil of the Shitai area. There are good correlations between soil selenium contents and pH values, and the contents of carbon, sulfur, and organic matter, indicating that the composition and property of soil play an important role in the migration and distribution of Se. Local Se-rich strata (especially the Cambrian Huangboling formation) in the Shitai area are also rich in heavy metals such as Cd and Hg, resulting in both selenium enrichment and heavy-metal pollution in surrounding soils. These areas with high heavy metal contents should be avoided when developing Se-rich agriculture in the Shitai area.

Keywords: Shitai; Se-rich soil; distribution regularity; geochemistry

Se 是一种稀少的分散元素,在地壳中的丰度仅为 0.05 mg/kg,只有在十分特殊的情况下才有可能形成富硒地质体。中国的硒资源分布很不均匀,主要以缺硒区为主,全国缺硒区高达 72%,富硒区分布范围较少(苏晓云,1998)。越来越多的研究表明,Se 是人体和动物体必需的微量元素,许多疾病的发生与 Se 摄入量偏低有关,适当补 Se 不仅可以有效的改善人体的免疫力,还可以提高人体抵抗癌症的能力(郑宝山等,1993;李家熙等,2000)。Se 由外环境到动物体和人体的传输是一条紧密相关的生态链(李丽娟,1994),因此农产品中的 Se 含量高低决定人体 Se 摄入量的多少,而农产品的 Se 元素含量高低决定于土壤的 Se 含量(姬华伟等,2021;张亚丽等,2021)。因此,富 Se 土壤作为一种稀缺的地质资源,可以为当地发展特色农业产生巨大的推动作用。位于皖南山区西部的石台县是潜在的富硒地区(吴跃东等,2007;夏琼等,2017),也曾是国家级贫困县,山区经济发展需利用好生态资源,走优质化、品牌化、绿色化发展道路,开发特色农业。因此,探讨石台地区富 Se 土壤分布特征及土壤 Se 的富集迁移规律,对该区富硒农产品的开发具有重要的指导意义。

1　区域地质概况

安徽石台地区在大地构造上隶属扬子陆块的下扬子前陆带和江南隆起带(图 1a)。江南深断裂沿北东东—南西西向贯穿此区,横跨沿江坳陷带和皖南-苏南坳陷带(图 1a)。在地史演化过程中,该区经历了多旋回构造演化阶段,地质构造较为复杂。本区褶皱构造总体方位呈北东向;区内断裂构造发育,不同性质的断裂相互错切限制,主要为北北东向、北东向及近东西向(图 1b)。断层性质有平移断层、正断层及滑覆-拆离断层。

石台地区以北东东—南西西向展布的江南断裂带(JNF)为界(图 1a),横跨 2 个地层分区,即下扬子和江南地层分区,分别位于北西和南东(图 1b)。研究区广泛出露中元古界到第四系(图 1b)。石台县的土壤共划分为 7 种类型:地带性土壤红壤(47.85%)和黄棕壤(1.60%),非地带性土壤水稻土(6.19%)、石灰岩土(31.18%)、潮土(0.02%)和石质土(5.61%)及受山地垂直生物、气候带影响而形成的黄壤(7.55%)(汤明等,2020)。这些土壤的成土母质主要有 4 种类型,分别是岩石风化形成的泥质岩类残坡积物、碳酸盐岩类残坡积、酸性结晶岩类残坡积物和第四纪红色黏土。

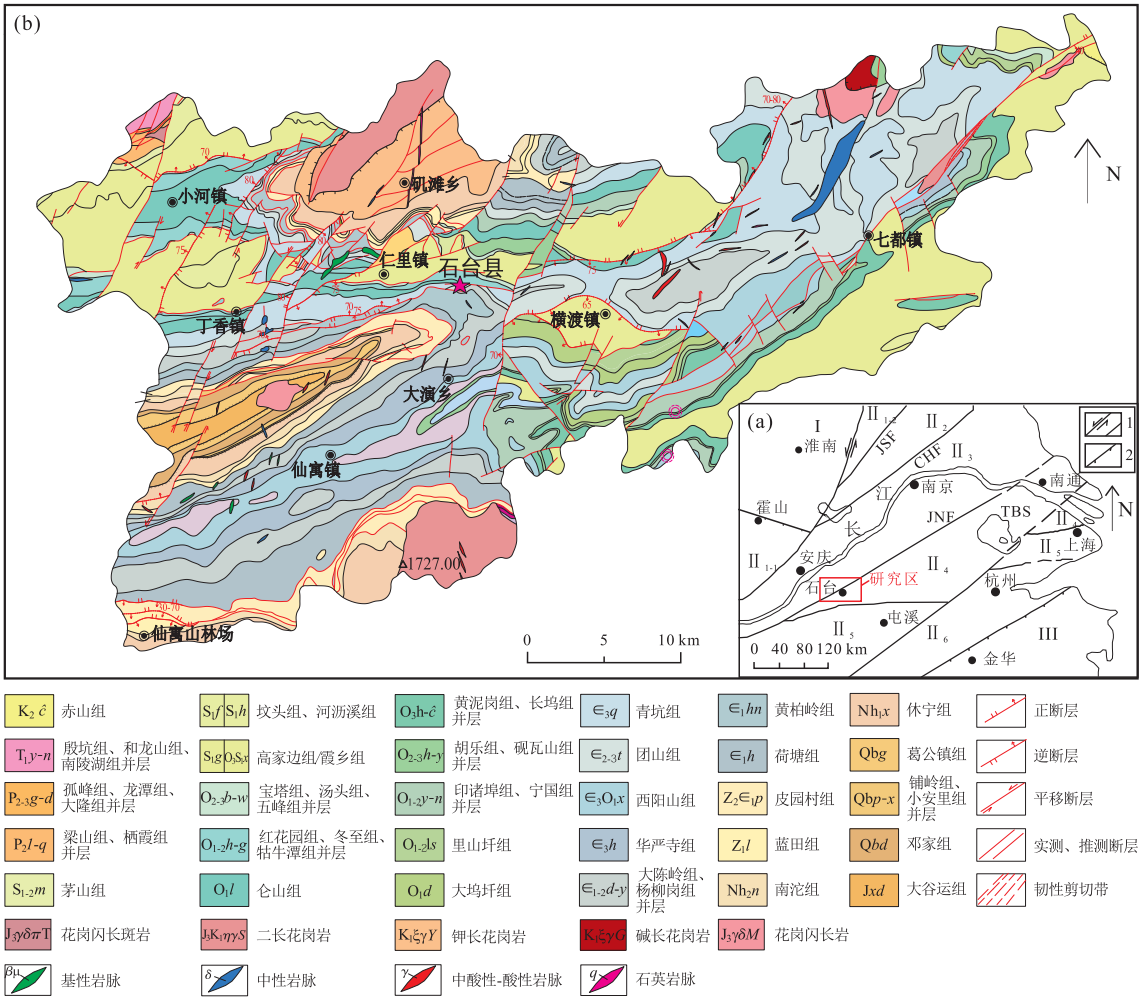
2　样品和分析方法

2.1　样品采集

在石台县区域按网格化均匀分布采样(1 点/km^2),共采集样品 1 000 件。采样点一般布设于水田、菜地、旱地、茶园、果园和林地中。每件样品由在同一块田中的 3～4 个采点组成,采集 0～20 cm 耕层土壤。采样时,避开明显点状污染地段、垃圾土或新进堆积土、田埂,用取土器垂直均匀取土,并去除动植物残体、石块等杂物,采样兼顾不同土壤类型。用 GPS 记录下每个采样点的位置,并对采样位置所处地貌环境、岩性、成因及母岩类型进行详细描述。采集的未加工土样重量大于 2 kg,样品干燥后,用 20 目尼龙筛过筛,将小于 20 目筛孔部分收集到纸袋中,过筛后要求样品重量大于 500 g。

2.2　测试方法

Se 含量的测定在安徽省地质实验研究所完成。土壤经硝酸-氯酸化溶解后,用原子荧光光谱法测定 Se 的总含量,检出限为 0.02 mg/kg。采用平行样品及标准参比物进行质量控制,标准样品符合规定误差要求,每次样品中插入一定比例的标准物质,用标准物质的标准值来衡量分析方法的精确性和准确



Ⅰ. 华北板块；Ⅱ. 扬子板块；Ⅱ$_{1\text{-}1}$. 大别造山带；Ⅱ$_{1\text{-}2}$. 胶南造山带；Ⅱ$_2$. 滁全拗陷带；Ⅱ$_3$. 沿江拗陷带；Ⅱ$_4$. 皖南-苏南拗陷带；Ⅱ$_5$. 江南隆起带；Ⅱ$_6$. 钱塘拗陷带；Ⅲ. 华夏板块；JSF. 嘉山-响水断裂带；CHF. 滁河断裂；JNF. 江南断裂带；TBS. 天目山-白际山剪切带；1. 断裂；2. 缝合线

图 1 安徽石台地区构造位置及地质简图

Fig. 1 Simplified tectonic and geological map of the Shitai area, Anhui province

性，内检样品的合格率不小于 90%。

3 结果与讨论

3.1 石台地区土壤中 Se 含量分布特征

依据中国地质调查局发布的最新规范《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)，富硒土地类型的划定指标见表 1。

表 1 富硒土地类型划分标准表

Tab. 1 Standard for the classification of selenium-rich lands

分类	缺乏	边缘	适量	高	过剩
Se(mg/kg)	≤0.125	0.125～0.175	0.175～0.40	0.40～3.0	>3.0

石台全县土壤 Se 含量总体平均值为 0.560 mg/kg，超过土壤富硒标准阈值(0.400 mg/kg)。全县均值达到富硒土地标准的乡镇有 5 个：仙寓镇、大演乡、小河镇、丁香镇、仁里镇（表 2）。该 5 个乡镇主要分布在县域的西部，尤其是西南部的仙寓镇和大演乡，为著名的天方富硒茶的产地，东部的七都镇土壤 Se 含量较低。仙寓镇 167 件样品的 Se 含量为 0.130～15.110 mg/kg，均值为 0.910 mg/kg；大演乡 72 件样品的 Se 含量为 0.149～21.484 mg/kg，均值为 0.857 mg/kg；小河镇 144 件样品的 Se 含量为 0.091～6.429 mg/kg，均值为 0.679 mg/kg；丁香镇 113 件样品的 Se 含量为 0.086～54.195 mg/

表 2　安徽省石台县各乡镇土壤 Se 含量特征统计表(mg/kg)

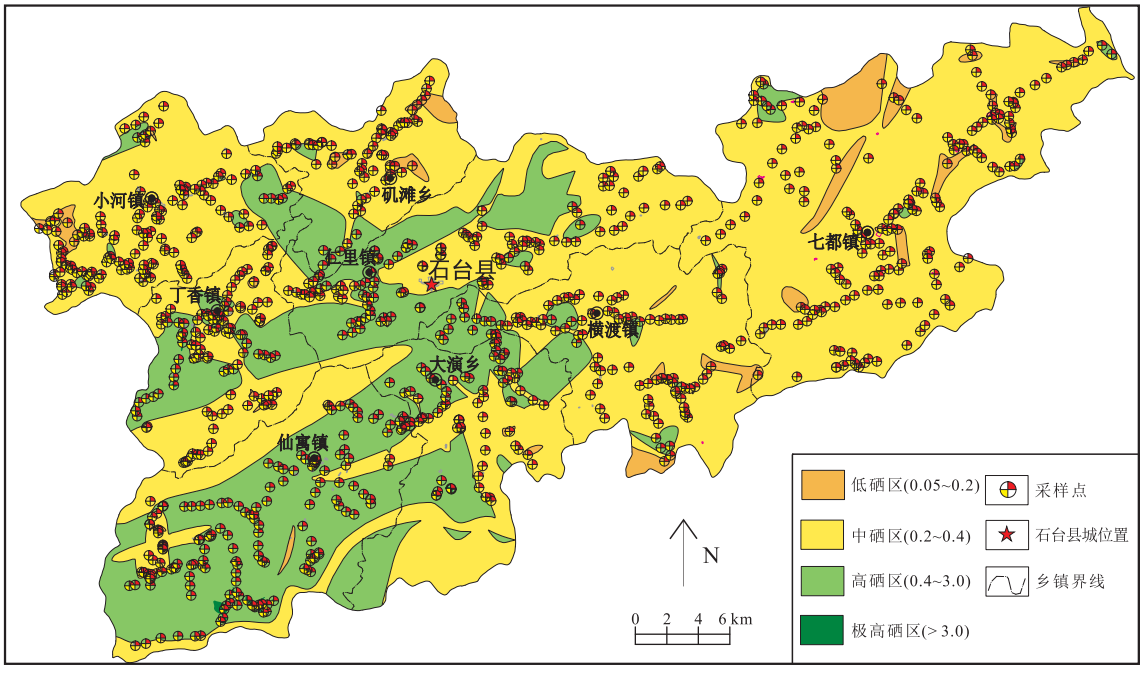
Tab. 2　Summary of Se contents (mg/kg) in the soil of different towns/townships in Shitai county, Anhui province

乡镇	仙寓镇	大演乡	小河镇	丁香镇	仁里镇	横渡镇	七都镇	矶滩乡
样品数	167	72	144	113	80	107	177	68
最小值	0.130	0.149	0.091	0.086	0.138	0.145	0.065	0.075
最大值	15.110	21.484	6.429	54.195	3.404	8.704	0.738	0.864
平均值	0.910	0.857	0.679	0.524	0.507	0.399	0.251	0.276
标准差	1.516	2.551	4.508	0.798	0.508	0.855	0.085	0.176
变异系数	1.67	2.99	6.59	1.52	1.00	2.11	0.34	0.62

kg,均值为 0.524 mg/kg;仁里镇 80 件样品的 Se 含量为 0.138～3.404 mg/kg,均值为 0.507 mg/kg。其余 3 个乡镇,横渡镇 107 件样品的 Se 含量为 0.145～8.704 mg/kg,均值为 0.399 mg/kg;七都镇 177 件样品的 Se 含量为 0.065～0.738 mg/kg,均值为 0.251 mg/kg;矶滩乡 68 件样品的 Se 含量为 0.075～0.864 mg/kg,均值为 0.276 mg/kg。总体上,石台地区 Se 极高区面积为 1.89 km^2,占总面积的 0.14%;高 Se 区的面积是 403.13km^2,占总面积的 28.73%;中 Se 区有 948.765 km^2,占总面积的 67.62%;低 Se 区有 49.215 km^2,占总面积的 3.51%,该县无极低 Se 区(图 2)。高 Se 区对应的土壤类型主要为石灰土和红壤土,成土母质主要为碳酸盐岩类和泥质岩类残坡积物。

3.2　石台地区富硒土壤分布规律

富硒土壤的形成受多种因素的影响。由于富硒土壤来自于母岩的风化,土壤中的各元素含量对母岩有继承性,同时又受后期地表风化林滤作用的影响而发生迁移。在表生作用过程中,土壤的理化性质也是影响土壤中 Se 迁移分布的重要因素。大量研究表明,除成土母质外,土壤 Se 含量分布情况受 pH 值、含 C 量、有机质及含 S 量的影响(陈继平等,2020)。



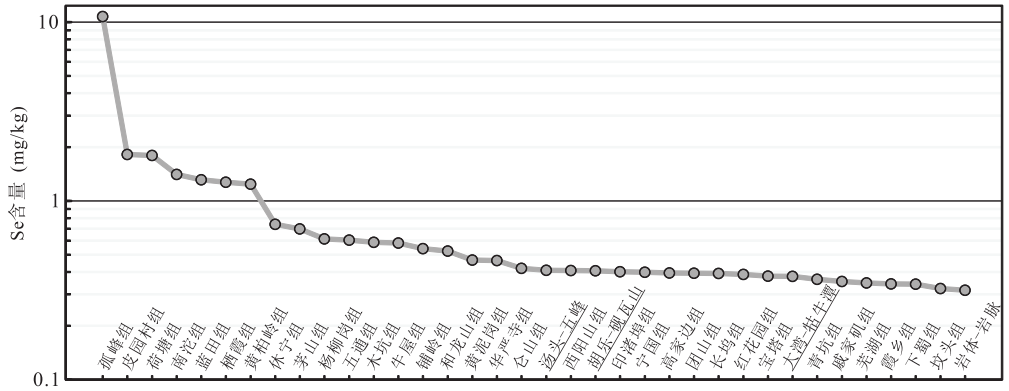
极低硒、低硒、中硒、高硒以及极高硒分别对应《土地质量地球化学评价规范》中的边缘、缺乏、适量、高及过剩的 Se 含量划分标准(表 1)

图 2　安徽石台地区土壤 Se 含量分布图

Fig. 2　Distribution map of Se contents in the soil of the Shitai area, Anhui province

成土母质是土壤的主要来源，因而也是决定土壤微量元素含量的重要因素。石台地区地处中亚热带，湿润多雨的季风气候和山地地形导致区内的风化作用强烈，基岩风化剥蚀产生的碎屑和溶解物是当地土壤的主要物质来源，而土壤的理化性质与其下伏基岩关系密切（吴跃东等，2007）。区内出露地层复杂，不同地史时期形成的岩石，即使岩石类型相同，各种元素含量也有不小的差异。这种差异通过岩石的风化传播到就近形成的土壤中，导致该区不同地点土壤中微量元素的含量也存在着明显的区别，呈现出分布不均匀的情况。

石台地区富硒土壤 Se 含量分布图（图 2）显示，高硒区主要分布于该区西南部。通过与该区地层情况（图 1b）对比发现，这些高硒区主要出露寒武系，包括荷塘组、黄柏岭组、大陈岭组、杨柳岗组、华严寺组、团山组及青坑组等含碳地层。虽然该区东北部大量出露寒武系青坑组、团山组、大陈岭组及杨柳岗组，但土壤中 Se 的背景值仍较低，这说明这些地层可能并不富硒，因而也不可能是该区西南部富硒土壤的主要来源。笔者也统计了不同成土母岩对应土壤的 Se 含量平均值，结果表明：孤峰组、皮园村组、荷塘组、南沱组、蓝田组和栖霞组 Se 含量相对较高（图 3），其他地层 Se 含量均比较低。虽然孤峰组、皮园村组、南沱组、蓝田组和栖霞组等具有高 Se 含



汤—五峰：汤头组与五峰组并层；胡乐—砚瓦山：胡乐组与砚瓦山组并层；大湾—牯牛潭：大湾组与牯牛潭组并层

图 3 石台不同地层中土壤 Se 含量对比图

Fig. 3 Comparison of Se content in the soils corresponding to different strata in the Shitai area

量，但是这些地层在整个石台地区并未广泛出露，因而也不可能是高硒区土壤 Se 的来源。所以，石台地区西南部高硒区土壤中 Se 只可能来自在该区还广泛出露的寒武系荷塘组和黄柏岭组（图 2）。荷塘组和黄柏岭组以黑色岩系为主。黄柏岭组下部为黑色碳质夹硅质页岩，底为透镜状石煤层；中部为灰色中厚层微晶灰岩和黑色碳质页岩；上部为黄绿色泥岩夹粉砂岩。荷塘组下部为碳硅质泥岩夹灰岩段；中部为碳质泥岩段，中部下段碳质富集形成石煤层，上部为具水平纹层泥岩段。前人的研究也表明高硒土壤很多继承于碳质石煤层。吴跃东等（2007）对石台大山地区含煤岩系中灰岩、石煤及硅质岩中 Se 含量的测试结果证实了荷塘组的石煤层高度富 Se。含煤岩系在地表受风化作用影响，其风化产物在流水、风力和重力作用下发生迁移、搬运，在适宜的条件下发生沉积，再经过成土作用形成富 Se 土壤。

3.3 土壤 Se 富集迁移规律

主要与土壤 Se 元素富集有关的因素：①碳质、硅质地层岩石 Se 元素含量相对较高，是土壤 Se 的主要来源。②这些富集 Se 元素的岩石常与碳酸岩/页岩地层共同分布于同一地区，岩石风化过程中 Se 元素易被岩石上覆残坡积土壤黏土矿物吸附富集（贾十军，2013）。母岩被风化为成土母质，成土母质在气象和生物的作用下，表层逐渐转变成土壤，因此成土母质是形成土壤的物质基础。由于各类土壤成土母质所含成分不同，其风化物对土壤中微量元素的含量和分布可产生不同影响。自然土壤中 Se 的含量随成土母质成分变化而变化，二者存在明显的依存关系，即表现为土壤微量元素对成土母质的继承性。石煤地层中的 Se 以还原态硫化物的形式存在，随后在地表水、氧气等的作用下发生氧化分解，以致矿物固结态形式的 Se 被释放进入土壤或水体

等表生生态环境中。

石台地区表层土壤 pH 测试结果显示,土壤总体呈中酸性(面积占比 99.18 %)(汤明等,2019),各区域 pH 值差异性不明显。但是该区土壤剖面自深部母质层至表层表现出 pH 值逐渐降低的趋势(图 4),同时 Se 元素含量逐渐升高,pH 值与 Se 含量呈现显著的负相关关系。这说明土壤 pH 对土壤中 Se 的迁移分布起着关键作用。Se 在土壤中通常以 +4 价的亚硒酸盐(SeO_3^{2-})或者 +6 价的硒酸盐(SeO_4^{2-})形式存在。亚硒酸盐在偏酸性条件下稳定存在,易与土壤中 Fe 和 Al 的半倍氧化物(Fe_2O_3、Al_2O_3 等)形成难溶的配合物和化合物(姚林波等,1999),并以化学吸附的形式被土壤中的黏粒吸附;而硒酸盐在偏碱性条件下稳定存在,不形成稳定的半倍氧的复合物,与吸附质的亲和力较弱,因而在所有 Se 形态中迁移能力最强,具有很高的溶解度。所以当土壤 pH 升高时,难溶的亚硒酸盐逐渐转化为易溶的硒酸盐,容易经雨水淋滤而流失,导致下层偏碱性的土壤 Se 含量逐渐降低。

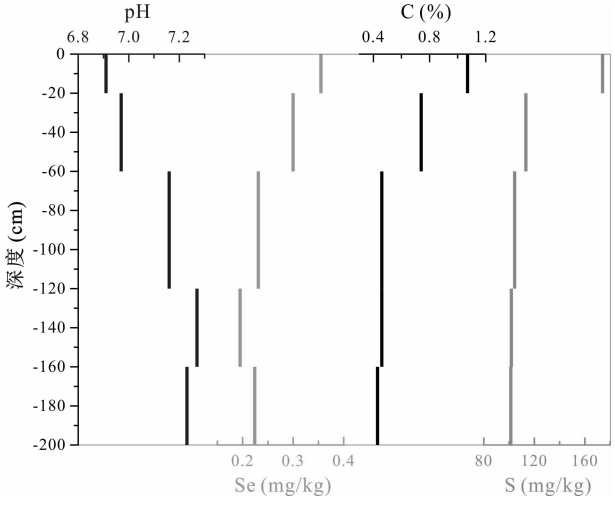


图 4　安徽石台地区土壤剖面平均 pH 值以及硒、碳、硫含量变化图

Fig. 4　Variation of average pH value, and selenium, carbon and sulfur contents of the soil profile in the Shitai area, Anhui Province

此外,石台地区土壤中 C、S 含量与 Se 含量体表现出正相关性,含量随深度增加而降低(图 4),这表明土壤 Se 的富集迁移还受控于土壤中的有机质和硫化物含量。石台地区富硒地层——寒武纪荷塘组中石煤层中含 S 量普遍较高(吴跃东等,2007),其 S 含量为 103.8 ~ 4 364.1 mg/kg。前人研究也认为,Se 含量与 C、S 和有机质含量有很好的相关性,尤其是与有机质含量之间呈明显的正相关关系(王金达等,2000;蔡子华等,2011)。事实上,该区土壤的 C、S 含量与 pH 值还呈现明显负相关关系,这说明土壤中有机质和硫化物等可能是影响土壤 pH 的主要因素,含量越高,则土壤 pH 值越低。前人研究也表明,土壤理化性质在不同程度上影响着土壤有机碳及硫化物等含量,而土壤有机碳和硫化物等含量的变化又会对该区域土壤理化性质有着明显的调节作用,两者相互联系并且相互影响,共同制约着土壤在生态系统中的演变(郑维熙等,2021)。宋明义等(2011)研究结果表明,有机碳与 Se 的相关性比全碳与 Se 的相关性更好,这是因为有机质还可以作为一种有机无机复合体黏粒吸附环境中的 Se,且在其他因素(低 pH 值)的综合影响下,对 Se 产生强烈的吸附与固定作用,充当了 Se 的捕集器,这也是该区 Se 元素表生富集的原因。

3.4　石台地区富硒土壤中的重金属元素

大量研究表明,各种因素导致农田土壤重金属积累量增加,使富硒地区存在较大的重金属威胁(陈继平等,2021)。黑色岩系形成的土壤富含 Se 的同时也会富集重金属元素。例如,同处于下扬子地区的浙江中部地区,富 Se 土壤就存在 Cd 超标的情况(成晓梦等,2021),在此基础上种植的富硒农产品因而也存在重金属超标的风险。依据汤明等(2019)研究,石台地区 Cd 平均含量大于 500 ng/g 的土壤对应的是早寒武世和晚震旦世及早寒武世相对较老地层,包括黄柏岭组、荷塘组、杨柳岗组、南沱组、蓝田组等;岩性主要为一套石煤、硅质岩、碳质页岩、钙质页岩灰岩、泥岩、砂岩等。从空间分布看,这些地层分布区正好与土壤 Cd 污染区十分吻合。

根据安徽省国土资源厅"安徽省石台县南村幅、丁香幅 1∶5 万区域矿产地质调查"项目,下扬子地层分区石台地区早寒武世黑色岩系荷塘组/黄柏岭组明显富集重金属元素(图 5);岩性主要为含硅质碳质页岩和碳质页岩。黄柏岭组中 Cd、Hg 等重金属元素含量显著高于荷塘组,其中硅质碳质页岩 Cd 含量最高达 62 074 ng/g,其次为砂屑硅质岩。因此,石台地区 Cd 污染区内土壤 Cd 元素主要来源于富含 Cd 等重金属的成土母岩寒武系黑色岩系,其中黄柏岭组硅质碳质页岩含 Cd 最高。

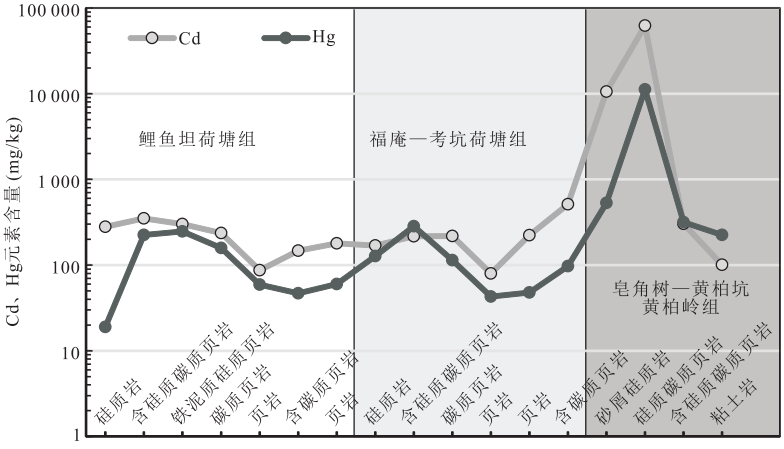


图 5 石台地区下寒武统黑色岩系不同地层/岩性 Cd、Hg 含量对比图

Fig. 5 Comparison of Cd and Hg contents in different strata/lithologies of Lower Cambrian black rock series in the Shitai area

由于石台地区黑色岩系富 Se 地层(尤其是黄柏岭组)同时也具有高的重金属含量,这些重金属进入土壤后容易导致土壤重金属污染。而且石台地区表层土壤 pH 值偏酸性,容易激活重金属的活性并造成农产品中重金属尤其是 Cd 元素的超标,然后进一步对人体健康造成伤害。但是石台地区至今鲜有 Cd 中毒事件发生,而且黑色岩系广泛出露的高硒地区大山村还是远近闻名的"长寿村"、"抗癌村",人均年龄在 80 岁以上。这主要是由于 Se 和 Cd 元素可产生拮抗效应(Filek et al.,2008;胡居吾等,2019),进而减少植物对 Cd 的吸收,进而降低对人的伤害。尽管如此,在发展特色富硒农业的同时,仍应注意重金属超标的风险。结合该区富 Se 土壤分布情况及不同地层中重金属元素含量进行分析,认为石台地区发展富硒农业、种植富硒农产品的理想区域应是出露寒武系荷塘组的周边富 Se 土地,同时也应避开寒武系黄柏岭组周边 Cd、Hg 超标/污染的土地。

虽然石台地区表层土壤具有高的 Se 含量,但是由于其总体偏酸性,不利于土壤中 Se 元素的释放迁移反而还会激发重金属活性。因而在种植富硒农产品时,可以考虑通过施肥灌溉适当增加土壤碱性,在促进土壤硒迁出、增强农作物 Se 吸收的同时,还可抑制重金属在农作物中富集,真正实现绿色富硒。

4 结论

(1)石台地区表层土壤中总 Se 含量较高,平均值为 0.560 mg/kg,各个区域 Se 含量分布较不均。土壤 Se 含量均值达到富硒标准的乡镇有 5 个:仙寓镇、大演乡、小河镇、丁香镇以及仁里镇。高硒区主要分布于寒武系荷塘组和黄柏岭组,尤其是石煤层出露区域。

(2)石台地区土壤剖面中 Se 与 pH 值、C、S 和有机质含量有较好的相关性,说明土壤理化性质变化对 Se 的迁移富集具有重要的控制作用。

(3)该区寒武系黄柏岭组富 Se 的同时还富集 Cd、Hg 等重金属元素,周边土地可能并不适合用于开发富硒农产品。因此,石台地区发展富硒农业时应重点利用寒武系荷塘组出露的周边土地,并通过增施碱性肥料,促进植物对 Se 的吸收,并抑制重金属富集。

参考文献(References):

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):249-253.

CAI Zihua, SONG Mingyi, HU Yanhua, et al. The Discovery of Lake Facies Selenium-rich Soil and its Ecological Significance[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 249-253.

陈继平,任蕊,王晖,等. 关中塿土地区土壤 pH 变化对硒形态及有效性的影响[J]. 西北地质,2020,53(01):254-260.

CHEN Jiping, REN Rui, WANG Hui, et al. Effect of Lou Soil pH Change on Selenium Forms and Availability[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(01): 254-260

陈继平,钞中东,任蕊,等. 陕西关中富硒土壤区农作物重金属含量相关性及安全性评价[J]. 西北地质,2021,54(02):273-281.

CHEN Jiping, CHAO Zhongdong, REN Rui, et al. Correlation and Safety Evaluation of Crop Heavy Metal Content in Shaanxi Guanzhong Selenium-enriched Areas[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(02): 273-281

成晓梦,吴超,孙彬彬,等. 浙江中部典型黑色岩系分布区土壤-作物富硒特征与重金属风险评价[J]. 现代地质,2021,35(2):425-433.

CHENG Xiaomeng, WU Chao, SUN Binbin, et al. Selenium-rich Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Crop in A Typical Black Shale Area of the Central Part of Zhejiang Province, China[J]. Geoscience, 2021, 35(2): 425-433.

胡居吾,熊华. 天然富硒土壤的性质及硒对重金属的拮抗研究[J]. 生物化工,2019,5(2):11-16.

HU Juwu, XIONG Hua. Study on Properties of Natural Se-enrichment Soil and the Antagonistic Effect of Se to Heavy Metals [J]. Biological Chemical Engineering, 2019, 5(2): 11-16.

姬华伟,任蕊,陈继平,等. 关中不同类型土壤硒含量特征及其对玉米籽粒硒含量的影响[J]. 西北地质,2021,54(04):239-249.

JI Huawei, REN Rui, CHEN Jiping, et al. Characteristics of Selenium Content in Different Soil Types in Guanzhong and Its Influence on Selenium Content of Corn Grain [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(04): 239-249.

贾十军. 安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J]. 资源调查与环境,2013,34(02): 133-137.

JIA Shijun. Evaluation Standards and Genesis of Selenium-rich Soil in Anhui Province[J]. Resources Survey and Environment, 2013, 34(02): 133-137.

李家熙,张光弟,葛晓立,等. 人体硒缺乏与过剩的地球化学环境特征及其预测[M]. 北京: 地质出版社,2000:5-7.

LI Jiaxi, ZHANG Guangdi, GE Xiaoli, et al. Geochemical Environmental Characteristics and Prediction of Selenium Deficiency and Excess in Human Body[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 5-7.

李丽娟. 土壤中硒元素丰度及富集因素分析[J]. 海洋环境科学,1994,13(3):38-42.

LI Lijuan. Analysis of Selenium Abundance and its Enrichment Factor in the Soil[J]. Marine Environment Science, 1994, 13(3): 38-42.

宋明义,蔡子华,黄春雷,等. 杭嘉湖平原区富硒土壤特征与成因分析[J]. 广东微量元素科学,2011,18(8):20-26.

SONG Mingyi, CAI Zihua, HUANG Chunlei, et al. The Characteristics and Genetic Analysis of Selenium-rich Soil in Hangjiahu Plain of Northern Zhejiang [J]. Guangdong Weiliang Yuansu Kexue, 2011, 18(8): 20-26.

苏晓云. 中国硒资源的开发与利用[M]. 北京:地质出版社,1998:17-139.

SU Xiaoyun. Exploitation and Utilization of Selenium Resources in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 17-139.

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.

TANG Ming, DONG Xu, JIANG Mingliang. Distribution Characteristics and Genesis of Zinc-rich Soils in Shitai County[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(23): 97-99.

汤明,吴海东. 安徽省石台县土地质量地区化学调查评价成果报告[R]. 合肥:安徽省公益性地质调查管理中心,2019.

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 Jinda, YU Junbao, ZHANG Xuelin. Geochemical Features of Elements of Selenium etc. in Soil of Loess Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(5): 469-473.

吴跃东,向钒,马玲,等. 安徽石台大山地区硒的地球化学研究[J]. 矿物岩石,2007,27(4): 53-59.

WU Yuedong, XIANG Fan, MA Ling, et al. The Geochemistry Study of Selenium in the Stone Mountain Area of Anhui Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27(4): 53-59.

夏琼,高东升,高雅,等. 安徽省石台县富硒土壤资源调查与评价[J]. 安徽地质,2017,27(4):314-316.

XIA Qiong, GAO Dongsheng, GAO Ya, et al. Survey and Assessment of Selenium-rich Soil Resources in Shitai County, Anhui Province[J]. Geology of Anhui, 2017, 27(4): 314-316.

姚林波,高振敏,龙洪波. 分散元素硒的地球化学循环及其富集作用[J]. 地质地球化学,1999, 27(3):62-67.

YAO Linbo, GAO Zhenmin, LONG Hongbo. Despersed Element Selenium: Its Geochemical Cycle and Enrichment [J]. Geology-Geochemistry, 1999, 27(3): 62-67.

张亚丽,张志敏,张继军,等. 安康西部农田土壤硒形态及农作物富硒特征[J]. 西北地质,2021,54(03):229-235.

ZHANG Yali, ZHANG Zhimin, ZHANG Jijun, et al. Soil Selenium Speciation in Cropland of Western Ankang and the Characteristics of Crop Selenium Enrichment [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(03): 229-235.

郑宝山,严良荣,毛大钧,等. 鄂西的硒资源及其开发战略研究[J]. 自然资源学报,1993,8(3):204-212.

ZHENG Baoshan, YAN Liangrong, MAO Dajun, et al. The Se Resource in Southwestern Hubei Province, China, and its Exploration Strategy[J]. Journal of Natural Resources, 1993, 8(3): 204-212.

郑维熙,周忠发,朱粲粲,等. 岩溶区土壤理化特征与土壤有机碳含量关系研究[J]. 环境科学与技术,2021,44(07):91-99.

ZHENG Weixi, ZHOU Zhongfa, ZHU Cancan, et al. Study on the Relationship between Soil Physical and Chemical Characteristics and Soil Organic Carbon Content in Karst Area[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(07): 91-99.

Filek M, Keskinen R, Hartikainen H, et al. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(8): 833-44.