

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.02.007

引用格式:李明辉,张芙蓉,杜国强,等. 安徽石台仙寓地区土壤硒地球化学特征及生物效应[J]. 华东地质, 2023, 44(2): 186-196. (LI M H, ZHANG X R, DU G Q, et al. Geochemical characteristics and biological effect of soil selenium in the Xianyu area, Shitai County of Anhui Province[J]. East China Geology, 2023, 44(2): 186-196.)

安徽石台仙寓地区土壤硒地球化学特征及生物效应

李明辉, 张芙蓉, 杜国强, 陶春军, 吴 正

(安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 安徽 合肥 230001)

摘要:为探讨安徽石台仙寓地区土壤-作物系统中硒的富集及迁移特征,在该区系统采集了岩石、土壤、灌溉水、农作物及根系土样品,研究土壤硒的地球化学特征、赋存状态、主要影响因素及生物有效性等。结果显示:研究区表层土壤硒含量为 0.27~15.79 mg/kg,平均值为 0.87 mg/kg,显著高于安徽省土壤背景值;土壤硒含量与有机质呈显著正相关,但与 pH 值无相关性;不同基岩地层的硒含量差异显著,其中蓝田组、荷塘组及皮园村组碳质页岩是该区土壤硒的主要物质来源;土壤硒形态主要为腐殖酸结合态、强有机结合态和残渣态,生物可直接利用形态的硒约占 3%。研究区稻谷、茶叶对硒的平均富集系数分别为 0.21 和 0.08,采集的水稻样品全部达到富硒标准,具有良好的富硒产业开发优势。

关键词: 硒;地球化学特征;生物效应;仙寓地区;安徽石台

中图分类号: P595;X142

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)02-186-11

硒(Se)是人体必需的微量元素之一,具有防衰老、抗氧化、抗癌等功能,被称为“生命之火”^[1-2]。研究表明,中国人群硒摄入量仅 13.3 $\mu\text{g}/\text{d}$,远低于世界卫生组织推荐的成人硒摄入量(40~400 $\mu\text{g}/\text{d}$)^[1]。我国总体是一个缺硒的国家,约有 72%的人口生活在土壤环境贫硒区,而硒摄入不足也是克山病、大骨节病的重要病因^[3-4]。人体主要通过农产品摄入食物中的硒,富硒土壤是天然富硒农产品生产的物质基础。近年来,通过开展土地质量地球化学调查及相关富硒土地专项调查工作,圈定了大面积的富硒土地^[1,5],为富硒农产品的开发及利用提供了科学依据。土壤中的硒含量主要受地质背景、成土母质、土壤类型、土壤理化性质及地理环境等因素影响^[6-9],土壤有效硒与全硒含量呈正相关^[10-11];土壤有机质含量也是影响表层土壤硒含量的重要因素,但在不同地区,土壤硒的赋存状态、主要影响因素及生物效应有所差异^[12-13]。

安徽省石台县富硒土壤资源丰富,前人^[14-16]对该区地质背景、土壤硒与其他元素的相关性进行了研究,发现土壤硒含量与地质背景相关,不同土地利用类型中土壤硒赋存状态也存在差异。为了进一步研究石台县仙寓地区硒在土壤-作物系统中的迁移及富集特征,通过开展岩石、土壤、灌溉水、农作物及根系土样品采集与分析工作,探讨土壤硒的地球化学特征、赋存状态、主要影响因素及生物有效性,为区域农业发展规划、富硒土壤资源高效合理利用提供参考。

1 研究区概况

1.1 地理概况

研究区位于安徽省南部石台县仙寓镇,面积约 24 km²,属于皖南国际旅游文化示范区的核心区(图 1),享有“中国原生态最美山乡”的美誉。区内地

* 收稿日期:2022-04-26 修订日期:2022-09-01 责任编辑:谭桂丽

基金项目:安徽省自然资源科技项目“安徽省高镉富硒土壤资源开发利用研究(编号:2020-K-7)”、安徽省重点研究与开发计划项目“池州市天然富硒土壤开发利用关键技术研究示范(编号:202004a06020048)”项目资助。

第一作者简介:李明辉,1987年生,男,高级工程师,硕士,主要从事农业地质和生态地球化学调查评价工作。Email:lmh050121@163.com。

通信作者简介:张芙蓉,1989年生,女,工程师,硕士,主要从事生态地球化学调查评价工作。Email:303769045@qq.com。

形复杂,海拔 50~1 000 m,地貌上北西部为山地,中间为河谷平原,NE 向公信河是区内主要的灌溉水系。

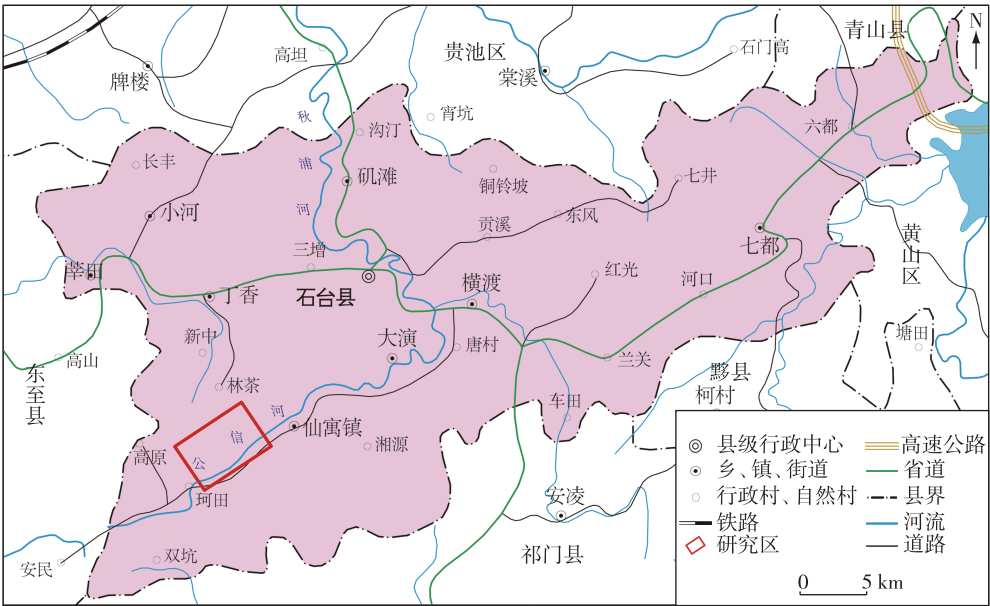


图 1 研究区交通位置图
Fig. 1 Traffic location of the study area

1.2 地质概况

研究区出露的地层由老至新依次为青白口系、南华系、震旦系、寒武系、奥陶系及第四系,以寒武系为主。青白口系主要为千枚岩;南华系休宁组以粉砂岩、泥岩为主,雷公坞组多数为含砂砾岩;震旦系蓝田组主要为条带灰岩、灰质白云岩、碳质硅质页岩,皮园村组以硅质岩、碳质硅质页岩为主;寒武系荷塘组主要为硅质页岩、碳质硅质岩、泥岩等,大陈岭组—西阳山组主要为灰岩;奥陶系多见泥岩和砂岩;第四系芜湖组主要为冲洪积物。区域断裂主要为 NNE 向、NE 向及近 SN 向 3 组,局部出露侵入岩(图 2)。

1.3 土壤概况

研究区成土母质主要以碳酸盐岩类风化物为主,含少量洪冲积物和浅色碎屑岩类风化物。土壤类型主要有石灰岩土、红壤、粗骨土及水稻土(图 3),其中石灰岩土较多,沿北东方向大面积分布在研究区内,红壤和粗骨土主要分布在北西部山地,潞育型水稻土沿公信河流域分布在研究区中部,也是区内主要的农业土壤资源。土地利用类型以林地为主,其次为水田和旱地,主要分布于山间盆地。水稻和茶叶是该区最主要的农作物。

2 研究方法

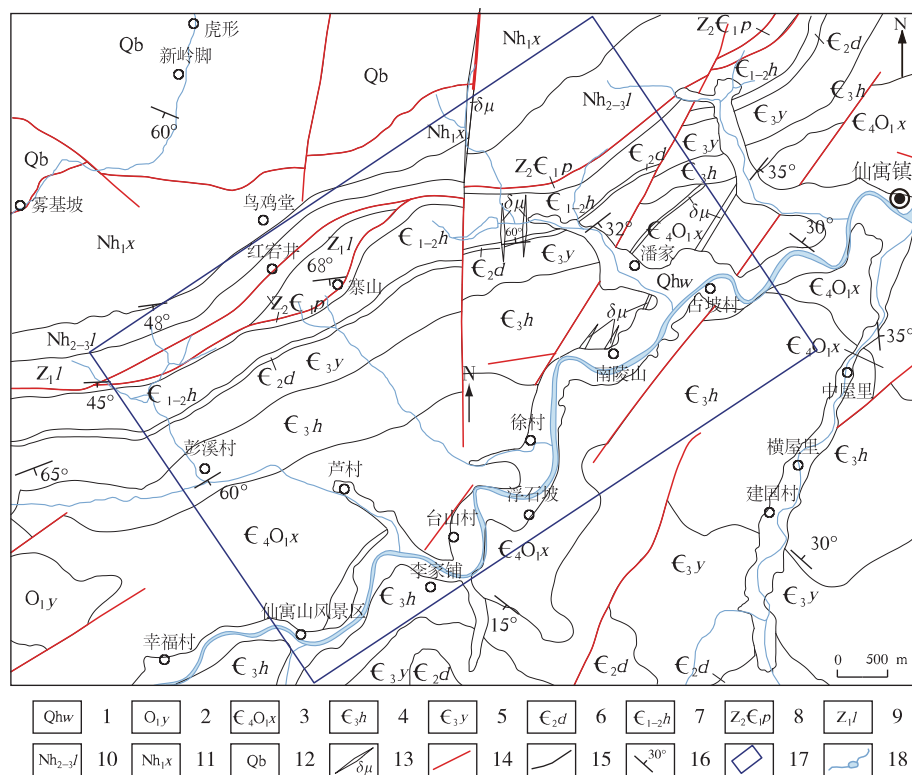
2.1 样品采集与处理

综合考虑研究区的地质背景、土壤类型、土地利用类型及种植方式等,在该区采集表层土壤样品 193 件、岩石样品 12 件、土壤垂向剖面样品 31 件(表 1)、灌溉水样品 20 件、水稻及其根系土样品各 43 件、茶叶及其根系土样品各 18 件(图 4)。

表 1 土壤垂向剖面采样信息
Table 1 The information of vertical profile of the soil

样品编号	采样深度/cm	样品数量/件	地层	表层土壤类型	土地利用现状
PM01	85	3	皮园村组	粗骨土	林地
PM02	75	3	荷塘组	粗骨土	林地
PM03	85	4	华严寺组	石灰岩土	茶园地
PM04	100	5	华严寺组	石灰岩土	茶园地
PM05	125	6	西阳山组	石灰岩土	旱地
PM06	200	10	芜湖组	水稻土	水田

表层土壤由 3~5 个等量子样混合组成 1 件样品,按土壤发生分层采集 3 个以上土壤垂向剖面样品,每件土壤样品质量不少于 1 000 g,并经自然风



1. 芜湖组; 2. 印渚埠组; 3. 西阳山组; 4. 华严寺组; 5. 杨柳岗组; 6. 大陈岭组; 7. 荷塘组; 8. 皮园村组; 9. 蓝田组; 10. 雷公坞组; 11. 休宁组; 12. 青白口系; 13. 闪长玢岩; 14. 断层; 15. 地质界线; 16. 产状; 17. 研究区; 18. 水系

图2 研究区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of the study area

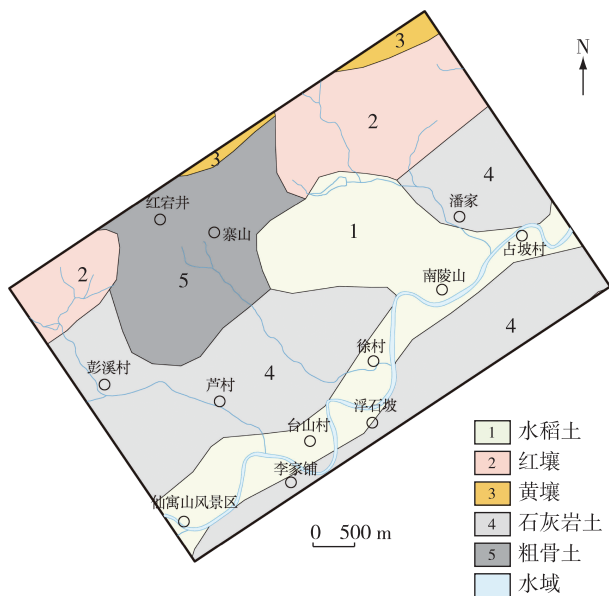


图3 研究区土壤类型分布图

Fig. 3 Soil types of the study area

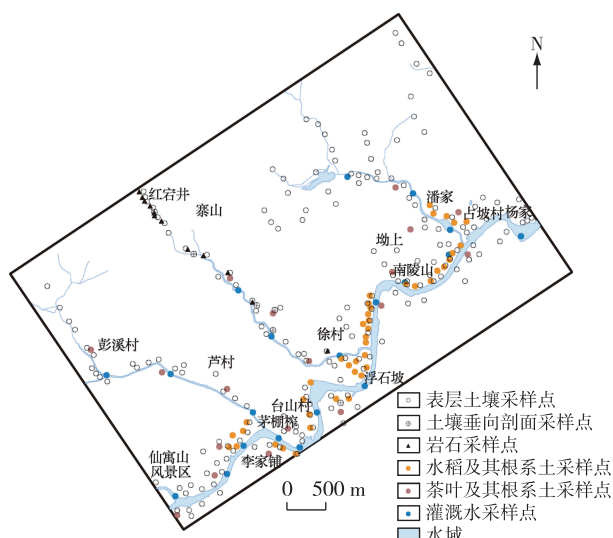


图4 研究区采样点位置分布图

Fig. 4 Sampling sites of the study area

干后过 10 目筛送检分析。岩石样品采自不同地层新鲜的基岩,由多点均匀采集组合而成。水稻和茶叶以五点取样法在田块中分散采集并等量组成 1 个样品,新鲜样品总质量不少于 1 000 g。灌溉水采自区内主要河流、小溪及灌渠。

2.2 样品检测方法与质量控制

2.2.1 检测方法

土壤样品分析指标为 pH 值、有机质含量、Se 含量、有效硒含量、硒形态等;岩石、农产品样品分析 Se 等指标;灌溉水样品测定 pH 值、Se 含量等。pH 值测试采用玻璃电极法,检出限为 0.1;有机质测试采用容量法,检出限为 0.1%;Se 含量测试采用原子荧光光谱法,检出限为 0.01 mg/kg;采用硝酸溶液浸提-原子荧光法测定有效 Se;农作物根系土样品以水、氯化镁、醋酸钠、焦磷酸钠、盐酸羟胺、过氧化氢为提取剂,提取制备水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态分析液,取适量形态提取后的残渣,用盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸处理后制备残渣态分析液,采用原子荧光光谱法测定土壤硒形态。

2.2.2 质量控制

在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)完成样品测试。测试过程采

用国家一级标准物质(GBW07386—GBW07389、GBW07458—GBW07461)进行质量控制,土壤各指标分析方法准确度控制在 0.01~0.06,精密度控制在 9%以下;农作物硒分析方法准确度控制在 0.01~2.22,精密度控制在 11%以下;土壤硒不同形态分析方法准确度控制在 0.01~15.38,精密度控制在 17%以下。以上测试均符合《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》^[17]要求,数据可靠。

2.3 数据处理

采用 Excel、SPSS 软件进行地球化学特征参数统计及相关性分析,利用 MapGIS、GeoIPAS 软件制作地质简图、土壤硒分布特征与富硒土壤评价图,后期使用 CorelDRAW 软件进行图形处理。

3 土壤硒地球化学特征

3.1 表层土壤硒含量特征

研究区表层土壤 Se 含量为 0.27~15.79 mg/kg(表 2),平均值为 0.87 mg/kg,中位数为 0.55 mg/kg,均高于中国土壤背景值^[18]和安徽省土壤背景值^[9],反映区内硒元素富集特征较明显。表层土壤硒元素变异系数为 1.55,表现为强变异,说明其分布空间变异较大。

表 2 研究区土壤硒含量统计结果

Table 2 Statistics of soil selenium contents in the study area

样品数量/件	硒含量/(mg·kg ⁻¹)				标准离差	变异系数	中国土壤/ (mg·kg ⁻¹)	安徽省土壤/ (mg·kg ⁻¹)
	最大值	最小值	平均值	中位数				
193	15.79	0.27	0.87	0.55	1.35	1.55	0.26	0.30

3.2 土壤硒空间分布特征

综合分析研究区土壤硒元素地球化学图(图 5)和地质简图(图 2),发现表层土壤硒在北侧、西北侧南华系休宁组—震旦系荷塘组中总体呈 NE 向条带状或串珠状高背景-高值区分布,含量为 0.86 mg/kg 以上;在中部芦村—南陵山一带,土壤硒总体呈 NE 向串珠状低背景-低值区分布,与华严寺组—西阳山组分布区域较为吻合;沿公信河流域芜湖组总体呈中-高背景分布。采用土壤硒评价等级标准^[17]编制研究区土壤硒含量等级图(图 6),可见区内土壤硒含量均在适量以上,其中硒高含量土壤呈大面积分布,占研究区总面积的 92%,表明该区富硒土壤资

源丰富。

3.3 土壤垂向剖面硒含量特征

根据土壤发生层位特征分别采集土壤剖面样品,从而判断硒元素含量的变化趋势,解析富硒土壤成因。土壤垂向剖面土壤硒含量变化趋势如图 7 所示,总体上由深至浅,土壤硒含量呈递增的趋势,表层土壤硒含量均明显高于母质层。其中皮园村组(碳质硅质页岩)深层土壤硒含量为 0.42 mg/kg,荷塘组(碳质页岩)深层土壤硒含量为 0.58 mg/kg,显示硒在母质层具有高含量的特征。在第四系芜湖组土壤垂向剖面中,硒含量略有变化,且在表层土壤中富集趋势明显。土壤硒含量在“母质层—淀

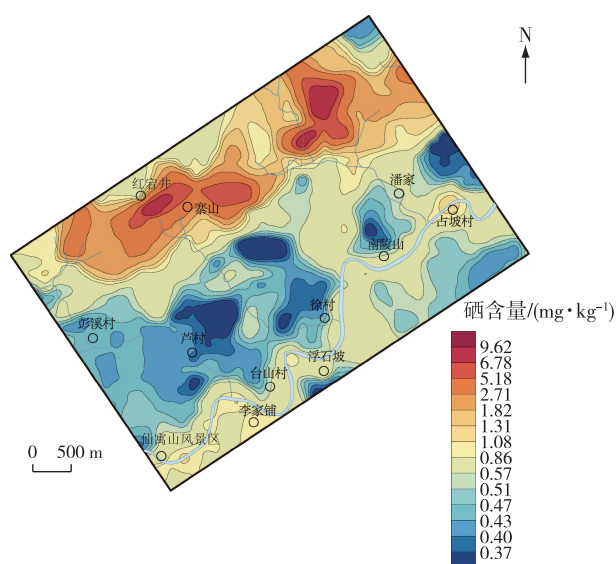


图5 研究区土壤硒元素地球化学图

Fig. 5 Geochemistry of soil selenium in the study area

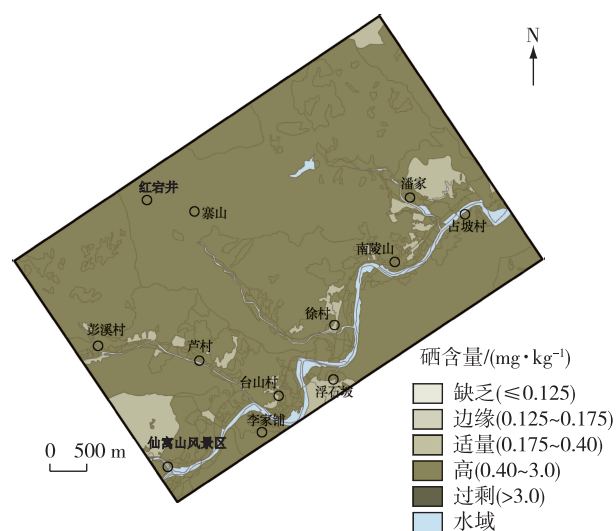


图6 研究区土壤硒含量评价等级图

Fig. 6 Grade of selenium content in the study area

积层(淋溶层)—腐殖层”中稳定上升。在水田中,深层土壤为黏土时,硒含量略有波动。此外,在垂向上,土壤硒含量与有机质含量呈明显的正相关,说明表层土壤中的硒不仅继承了母质层硒元素的迁移转化,还受到后期次生富集作用的影响。

4 土壤硒含量影响因素

4.1 岩石地层

研究区基岩的硒含量为 0.03~5.03 mg/kg,与

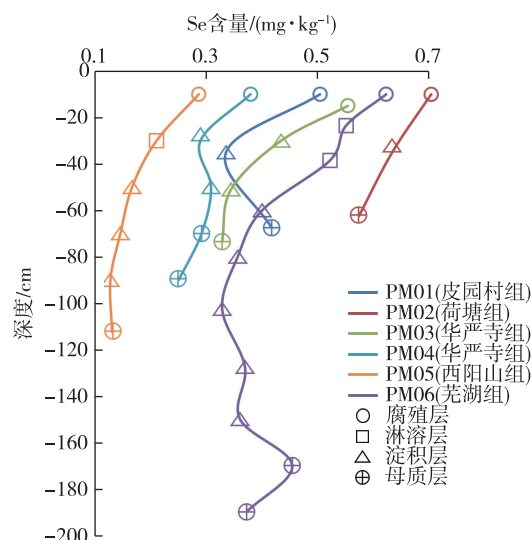


图7 土壤垂向剖面硒含量变化趋势图

Fig. 7 Variation trend of selenium contents in various soil profiles

中国东部上陆壳的硒丰度^[19]相比,南华系硒含量略低,震旦系、寒武系硒含量略高,其中皮园村组碳质硅质页岩、荷塘组碳质页岩和蓝田组碳质页岩中的硒浓集系数为 46.40~100.62(表3),蓝田组上段微晶灰岩、大陈岭组白云质灰岩、华严寺组微晶灰岩、西阳山组泥质灰岩中的硒浓集系数为 2.16~7.74,表明震旦系、寒武系碳质页岩、灰岩等硒高背景基岩经风化作用后,为区内富硒土壤的形成提供重要物质来源。

4.2 土壤类型

研究区不同土壤类型中硒含量特征(表4)表明,土壤硒含量受土壤类型影响较大。红壤中的硒含量平均值为 2.57 mg/kg,粗骨土中的硒含量平均值为 2.49 mg/kg,明显高于全区硒含量水平;水稻土中的硒含量平均值为 0.74 mg/kg,石灰岩土中的硒含量平均值为 0.54 mg/kg,均小于全区硒含量(0.84 mg/kg);红壤中的硒含量标准离差为 3.79,粗骨土中的硒含量标准离差为 3.87,说明红壤及粗骨土中的硒含量变化波动较大。结合研究区地质背景可知,红壤的成土母岩主要为南华系粉砂岩、震旦系硅质页岩等,粗骨土的成土母岩主要为寒武系碳质页岩、硅质页岩、白云岩等,石灰岩土中的成土母岩主要寒武系—奥陶系灰岩;水稻土的母质较复杂,与区内母岩均有关,亦受地形及次生富集作用影响,这也是造成区内不同土壤类型硒含量存在差

异的主要原因。此外,不同土壤类型中的有机质含量平均值表现为粗骨土>红壤>石灰岩土>水稻

土,说明有机质对不同土壤类型的硒含量也存在一定影响^[12]。

表 3 研究区不同地层硒含量浓集系数统计结果

Table 3 Concentration coefficient of selenium content in various strata in the study area

样品编号	地层	岩性	硒含量/ (mg · kg ⁻¹)	陆壳丰度/ (mg · kg ⁻¹)	浓集系数	土壤硒含量/ (mg · kg ⁻¹)
YS01	休宁组	粉砂岩	0.03		0.52	0.58
YS02	雷公坞组	含砾粉砂岩	0.04		0.86	0.71
YS03	蓝田组	碳质泥岩	0.05		1.02	0.65
YS04	蓝田组	微晶灰岩	0.12		2.32	0.53
YS05	皮园村组	硅质岩	0.06		1.24	0.82
YS06	皮园村组	碳质硅质页岩	2.32		46.40	2.41
YS07	蓝田组	碳质页岩	5.03	0.05	100.62	11.85
YS08	荷塘组	碳质页岩	2.51		50.26	2.58
YS09	大陈岭组	白云质灰岩	0.14		2.70	1.31
YS10	杨柳岗组	厚层灰岩	0.07		1.48	0.55
YS11	华严寺组	微晶灰岩	0.39		7.74	0.53
YS12	西阳山组	泥质灰岩	0.11		2.16	0.61

注:蓝田组岩石样品 3 件,皮园村组 2 件,荷塘组、休宁组、雷公坞组、大陈岭组、杨柳岗组、华严寺组、西阳山组均为 1 件。

表 4 研究区不同土壤类型的硒含量特征

Table 4 Statistics of selenium content in different types of soils in the study area

土壤类型	样品数量/ 件	最大值/ (mg · kg ⁻¹)	最小值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	中位数/ (mg · kg ⁻¹)	标准离差/ (mg · kg ⁻¹)	变异系数
粗骨土	17	11.85	0.37	2.45	1.01	3.87	1.58
红壤	19	15.79	0.50	2.57	0.95	3.79	1.47
石灰岩土	62	1.24	0.28	0.54	0.47	0.22	0.41
水稻土	94	8.03	0.27	0.74	0.58	0.80	1.08
全区	193	15.79	0.27	0.87	0.55	1.35	1.55

4.3 土壤理化性质

土壤 pH 值和有机质等理化指标对土壤硒吸附、活化迁移具有重要影响,也是控制土壤有效硒的主要因素。研究区表层土壤有机质含量为 0.69%~7.21%,平均值为 2.57%。根据土壤有机质分级评价标准^[17],该区土壤有机质含量总体较高,中等-丰富等级的土壤占 75%;硒含量与有机质相关系数为 0.364($p < 0.01$),具有相关性(图 8),说明有机质含量的高低对土壤中的硒含量存在影响。通常土壤有机质在腐殖化过程中可以产生腐殖酸与细粒胶体,能改善土壤团粒结构,从而提升土壤

对硒的吸附能力^[10]。

通过分析研究区不同酸碱度条件下表层土壤的硒含量特征(表 5)可知,区内表层土壤以酸性土壤为主,80%的表层土壤样品 pH 值 < 6.5 ,中性土壤及碱性土壤较少。表层土壤在强酸性(pH 值 ≤ 5.5)环境下,硒含量平均值为 1.30 mg/kg,明显高于其他酸碱度条件下表层土壤的硒含量平均值,这是因为酸性环境下硒主要以亚硒酸盐形式存在,易受土壤黏粒及氧化物固定^[8]。区内土壤硒含量随着 pH 值的升高呈先降后升的趋势,土壤酸碱度与硒含量相关性不显著,这与浙江常山^[8]、嘉善^[20]等地区的土壤特征类似。

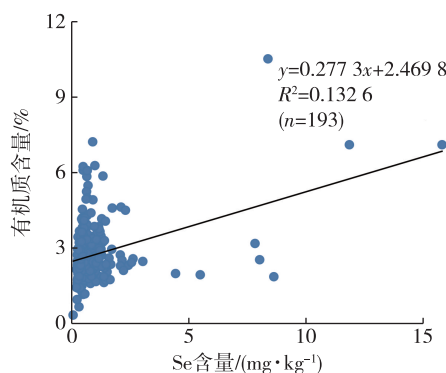


图 8 土壤硒与有机质含量相关关系图

Fig. 8 Correlation diagram between soil selenium and organic matter content

表 5 研究区不同酸碱度条件下的土壤硒含量

Table 5 Selenium contents in soil with different pH values in the study area

酸碱度	pH 值分级	样品数量/件	土壤硒含量/(mg · kg ⁻¹)		
			最大值	最小值	平均值
强酸性	pH 值≤5.5	71	15.79	0.27	1.30
酸性	5.5<pH 值≤6.5	84	1.38	0.28	0.60
中性	6.5<pH 值≤7.5	32	8.64	0.30	0.96
碱性	pH 值>7.5	6	1.27	0.31	0.95
全区		193	15.79	0.27	0.87

4.4 土壤硒形态组成分析

土壤中的硒以多种形态存在,主要受土壤理化条件控制,不同形态硒的生态效应不同。通常将土壤硒分为水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态、残渣态 7 种形态,其中水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态生物有效性最强,而呈残渣态的硒性质较稳定,难以被生物利用^[12]。

由土壤硒不同形态构成图(图 9)可知,区内土壤硒主要为腐殖酸结合态、强有机结合态和残渣态,

是水稻根系土中硒元素的主要赋存形态,分别占全量的 29.88%、32.83%和 35.59%;在茶叶根系土则分别占 31.41%、18.06%和 48.3%。总体来看,土壤中可被植物直接利用的形态硒仅占全量的 3%,要种植出天然富硒农产品,土壤硒含量必须达到一定的水平。

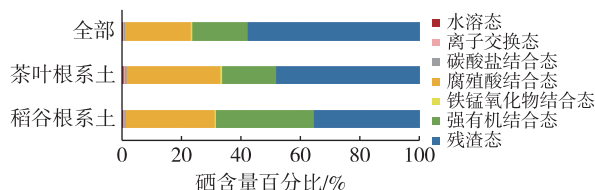


图 9 土壤硒不同形态构成图

Fig. 9 Map showing different forms of selenium in soil

4.5 灌溉水硒含量特征

研究区灌溉水样品的 pH 值为 6.93~8.45,平均值为 7.59;硒含量为 0.16~0.54 μg/L,平均值为 0.27 μg/L。灌溉水中 pH 值及硒含量均满足《GB 5084—2021 农田灌溉水质标准》^[21]限值要求,但其硒含量较低,对该区土壤硒含量变化总体影响较小。

5 生物效应

5.1 农作物富硒特征

研究区主要农作物的硒含量统计结果(表 6)表明,稻谷与茶叶中的硒含量差异明显:稻谷硒含量为 0.06~0.37 mg/kg,平均值为 0.15 mg/kg;茶叶硒含量为 0.02~0.14 mg/kg,平均值为 0.04 mg/kg。根据《GB/T22499—2008 富硒稻谷标准》^[22]和《NY-T 600—2002 富硒茶》^[23],区内 43 件稻谷样品全部达到富硒稻谷标准(0.04 mg/kg),富硒率达 100%,茶叶样品未达到富硒茶叶标准。

表 6 研究区主要农作物的硒含量统计结果

Table 6 Selenium contents of main crops in the study area

农作物	样品数量/件	最大值/(mg · kg ⁻¹)	最小值/(mg · kg ⁻¹)	平均值/(mg · kg ⁻¹)	标准差	变异系数	参考值/(mg · kg ⁻¹)	富硒率/%
稻谷	43	0.37	0.06	0.15	0.07	0.48	0.04	100
茶叶	18	0.14	0.02	0.04	0.03	0.68	0.25	—

土壤是植物硒的主要来源,农产品中的硒含量与土壤中的硒含量关系密切^[24-30]。为了研究农作物从土壤中吸收、富集硒元素的能力,利用生物富集系数(BCF)表征农作物对土壤硒的吸收富集程度,公式为

$$BCF = \frac{C_p}{C_s}, \quad (1)$$

表 7 研究区主要农作物硒元素生物富集系数

Table 7 Biological concentration factor of selenium in main crops in the study area

农作物	样品数量/件	C _p /(mg·kg ⁻¹)		C _s /(mg·kg ⁻¹)		BCF		
		最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	平均值
稻谷	43	0.37	0.06	1.21	0.40	0.47	0.12	0.21
茶叶	18	0.14	0.02	1.40	0.21	0.13	0.04	0.08

5.2 农作物与根系土硒含量相关性

一般认为,土壤是农作物中硒的主要来源,多数情况下农作物与土壤硒含量具有较好的正消长关系^[1]。研究区土壤垂向剖面中的硒含量变化趋势及不同地质基岩中硒含量分析结果表明,土壤硒含量主要受地质背景控制,农作物根系土壤中的硒含量较高。

由研究区稻谷、茶叶硒含量与根系土硒含量相

式中:C_p为生物体(农产品)中元素的浓度,mg/kg;C_s为环境(土壤)中元素的浓度,mg/kg。

由研究区主要农作物硒元素生物富集系数(表 7)可知:稻谷对硒的生物富集系数为 0.12~0.47,平均值为 0.21;茶叶对硒的生物富集系数为 0.04~0.13,平均值仅为 0.08,表明研究区水稻对土壤硒的吸收富集能力明显优于茶叶。

关关系图(图 10)可知,研究区农作物与根系土中的硒含量具有显著的相关性,其中稻谷中的硒含量与根系土中的硒含量的相关系数为 0.568(P<0.01),茶叶中的硒含量与根系土中的硒含量的相关系数为 0.842(P<0.01),表明稻谷及茶叶中的硒主要来自于土壤,但稻谷和茶叶对硒的富集能力存在差异,富硒生物效应不同。

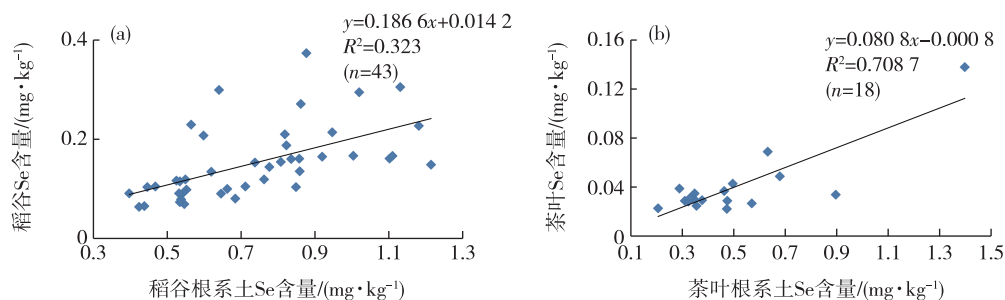


图 10 研究区稻谷(a)、茶叶(b)硒含量与根系土硒含量相关关系图

Fig. 10 The correlation diagrams between selenium in paddy and root soil(a), and that between tea and root soil(b)

6 结论

(1)安徽石台仙寓地区的表层土壤中硒含量为 0.27~15.79 mg/kg,平均值为 0.87 mg/kg,明显高于中国土壤背景值和安徽省土壤背景值。垂向剖面土壤硒含量由深至浅总体呈递增趋势,在表层土壤富集。

(2)震旦系、寒武系基岩中的硒强烈富集,是仙寓地区富硒土壤的重要物质来源。红壤、粗骨土中的硒含量较高,而水稻土和石灰岩土中的硒含量较

低。表层土壤硒含量与有机质相关,与 pH 值无相关性,硒主要以腐殖酸结合态、强有机态和残渣态存在,生物可直接利用的硒约占全量的 3%。

(3)仙寓地区稻谷、茶叶对硒的生物富集系数分别为 0.21 和 0.08,稻谷样品均达到富硒标准,且硒含量平均值达到 0.15 mg/kg,具有良好的富硒稻米开发潜力。

参考文献

[1] 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.
- [2] 宋晓珂,李宗仁,王金贵.青海东部农田土壤硒分布特征及其影响因素[J].土壤,2018,50(4):755-761.
- SONG X K, LI Z R, WANG J G. Distribution and influential factors of soil Se in eastern Qinghai Province [J]. Soils, 2018,50(4):755-761.
- [3] 谭见安.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 endemic diseases and their environments in the People's Republic of China[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [4] 廖金凤.土壤环境中的硒对人和动物健康的影响[J].广东微量元素科学,2002(3):20-23.
- LIAO J F. Effect of selenium in soil on health of human beings and animals[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2002(3):20-23.
- [5] 雍太健,张明,陈国光,等.赣州市土地质量地球化学评估及其富硒特征研究[J].华东地质,2020,41(4):403-409.
- YONG T J, ZHANG M, CHEN G G, et al. Geochemical evaluation and selenium-rich characteristics of land quality in Ganzhou City[J]. East China Geology, 2020, 41(4):403-409.
- [6] 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.
- [7] 成晓梦,孙彬彬,贺灵,等.四川省沐川县西部地区土壤硒含量特征及影响因素[J].岩矿测试,2021,40(6):808-819.
- CHENG X M, SUN B B, HE L, et al. Content characteristics and influencing factors of soil selenium in western Muchuan County, Sichuan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021,40(6):808-819.
- [8] 刘道荣,徐虹,周漪,等.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.
- LIU D R, XU H, ZHOU Y, et al. Characteristics and genetic analysis of selenium-rich soil in Changshan County, western Zhejiang Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3):658-666.
- [9] 贾十军.安徽省富硒土壤评价标准及富硒土壤成因浅析[J].华东地质,2013,34(2):133-137.
- JIA S J. Evaluation standards and genesis of selenium-rich soil in Anhui Province [J]. East China Geology, 2013,34(2):133-137.
- [10] 王美华.浙西典型石煤矿山周边耕地富硒土壤地球化学特征及影响因素[J].现代地质,2022,36(3):941-952.
- WANG M H. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium-enriched soils in cultivated land around typical stone coal mines in western Zhejiang [J]. Geoscience, 2022,36(3):941-952.
- [11] 王运,邹勇军,王鹤,等.江西信丰油山地区土壤硒及重金属元素地球化学特征[J].华东地质,2019,40(2):152-160.
- WANG Y, ZOU Y J, WANG H, et al. Geochemical characteristics of Se and heavy metal elements in the soil of Youshan, Xinfeng County, Jiangxi Province [J]. East China Geology, 2019,40(2):152-160.
- [12] 刘健,汪一凡,林钟扬,等.浙江建德市耕地表层土壤硒分布、来源及生态效应[J].现代地质,2022,36(3):953-962.
- LIU J, WANG Y F, LIN Z Y, et al. Distribution, sources and ecological effects of selenium in topsoil of cultivated land in Jiande City, Zhejiang Province [J]. Geoscience, 2022,36(3):953-962.
- [13] 郑雄伟,倪倩,郑国权,等.洪湖市峰口一万全地区土壤重金属和硒元素形态组成特征[J].华东地质,2018,39(4):311-318.
- ZHENG X W, NI Q, ZHENG G Q, et al. Occurrence features of heavy metals and selenium in soil of the Fengkou-Wanquan area, Honghu City [J]. East China Geology, 2018,39(4):311-318.
- [14] 吴跃东,向钊,马玲,等.安徽石台大山区硒的地球化学研究[J].矿物岩石,2007,27(4):53-59.
- WU Y D, XIANG F, MA L, et al. The geochemistry study of selenium in the stone mountain area of Anhui Province [J]. Mineralogy and Petrology, 2007,27(4):53-59.
- [15] XING K, ZHOU S B, WU X G, et al. Concentrations and characteristics of selenium in soil samples from Dashan region, a selenium-enriched area in China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2015,61(6):889-897.
- [16] 邢琛,周守标,赵冰,等.大山村地区土壤硒等元素含量及硒与其它元素相关性分析[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2020,43(3):249-257.
- XING C, ZHOU S B, ZHAO B, et al. Contents of selenium(Se) and other elements in soil of dashan area and correlation between selenium(Se) and other elements [J]. Journal of Anhui Normal University

- (Natural Science), 2020, 43(3): 249-257.
- [17] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京:地质出版社, 2016: 1-59.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T0295—2016 Specification of land quality geochemical assessment [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 1-59.
- [18] 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.
- HOU Q Y, YANG Z F, YU T, et al. Soil geochemical parameters in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [19] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京:地质出版社, 2007.
- CHI Q H, YAN M C. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [20] 胡艳华, 王加恩, 蔡子华, 等. 浙北嘉善地区土壤硒的含量、分布及其影响因素初探[J]. 地质科技情报, 2010, 9(6): 84-88.
- HU Y H, WANG J E, CAI Z H, et al. Content, distribution and influencing factors of selenium in soil of Jiashan area, northern Zhejiang Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 9(6): 84-88.
- [21] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 5084—2021 农田灌溉水质标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2021:1-8.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB5084—2021 standard for irrigation water quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021:1-8.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T22499—2008 富硒稻谷标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2008:1-2.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T22499—2008 Rich selenium paddy [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-2.
- [23] 中华人民共和国农业部. NY-T 600—2002 富硒茶[S]. 北京:中国标准出版社, 2002:1-3.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY-T600—2002 Rich-selenium tea [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002:1-3.
- [24] 徐聪, 刘媛媛, 孟凡乔, 等. 农产品硒含量及与土壤硒的关系[J]. 中国农学通报, 2018, 34(7): 96-103.
- XU C, LIU Y Y, MENG F Q, et al. Selenium content in agricultural products and its relationship with soil selenium[J]. Mineralogy and Petrology, 2018, 34(7): 96-103.
- [25] 牛雪, 何锦, 庞雅婕, 等. 三江平原西部土壤硒分布特征及其影响因素系[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 223-229.
- NIU X, HE J, PANG Y J, et al. Distribution feature of soil selenium in west Sanjiang Plain and its influencing factors[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 223-229.
- [26] World Health Organization. Trace elements in human-nutrition and health [M]. Geneva: World Health Organization, 1996.
- [27] XU Y F, LI Y H, LI H, et al. Effects of topography and soil properties on soil selenium distribution and bioavailability(phosphate extraction): A case study in Yongjia County, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 240-248.
- [28] LONG Z D, YUAN L X, HOU Y Z, et al. Spatial variations in soil selenium and residential dietary selenium intake in a selenium-rich county, Shitai, Anhui, China[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 50: 111-116.
- [29] COPPIN F, CHABROULLET C, MARTIN G A. Selenium interactions with some particulate organic and mineral fractions isolated from a natural grassland soil [J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60: 369-376.
- [30] TULLO P D, PANNIER F, THIRY Y, et al. Field study of time-dependent selenium partitioning in soils using isotopically enriched stable selenite tracer[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562: 280-288.

Geochemical characteristics and biological effect of soil selenium in the Xianyu area, Shitai County of Anhui Province

LI Minghui, ZHANG Xiaorong, DU Guoqiang, TAO Chunjun, WU Zheng

(Geological Survey of Anhui Province (Anhui Institute of Geological Sciences), Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: In order to understand the enrichment and migration behavior of selenium in the soil-crop system in the Xianyu area, Shitai County, Anhui Province, we systematically collected samples of rocks, soils (including root soils), irrigation water and crops to study selenium in terms of its geochemical features, occurrence status, main influencing factors and bioavailability. The results showed that the content of selenium in the topsoil of the study area ranged from 0.27 mg/kg to 15.79 mg/kg (0.87 mg/kg in average), and was evidently higher than the soil background value of Anhui Province. The content of selenium was positively correlated with organic matter, but unrelated to pH value of the soil. Various bedrock strata exhibit obviously different selenium content, which mainly sourced from carbonaceous shales of the Lantian Formation, Hetang Formation and Piyuancun Formation in the study area. Selenium is substantially humic acid-bound, strongly organically-bound and in its residual form in soil, of which only about 3% can be directly used by organisms. The average enrichment coefficient of selenium in paddy and tea of the study area is 0.21 and 0.08, respectively. All the paddy samples reached the selenium-rich standard, which implies that the local paddy has advantages in the development of selenium-rich products.

Key words: selenium; geochemical characteristics; biological effect; Xianyu area; Shitai County of Anhui Province