

doi: 10.11720/wtyht.2024.1034

彭学锐,陈翔,周思裕. 广西梧州六堡茶茶叶及根系土中硒含量影响因素[J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 545-554. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1034>

Peng X R, Chen X, Zhou S Y. Factors influencing the Se content in tea leaves and rhizosphere soils of the Liubao tea in Wuzhou City, Guangxi[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(2): 545-554. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1034>

# 广西梧州六堡茶茶叶及根系土中硒含量影响因素

彭学锐, 陈翔, 周思裕

(广西壮族自治区二七〇地质队, 广西 柳州 545005)

**摘要:** 为研究广西梧州六堡茶茶叶—根系土体系中 Se 含量特征及影响因素, 以六堡茶核心产区六堡镇、狮寨镇主要茶园为研究对象, 对六堡茶茶叶、根系土、茶叶浸出液样品中的 Se 含量进行了统计分析。结果表明: 研究区茶园土壤中 Se 含量在  $(0.40 \sim 1.98) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $1.08 \times 10^{-6}$ ; 六堡茶茶叶中 Se 含量在  $(0.03 \sim 0.25) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $0.07 \times 10^{-6}$ , 富 Se 率为 68%; 茶叶浸出液中 Se 的浸出率在 0~23.95%; 研究区六堡茶茶园根系土中 Se 含量主要受成土母质及土壤硅铁铝率的控制; 土壤中的 P、N 元素可促进茶叶对土壤中 Se 的吸收, 而酸化土壤中的铁铝氧化物则会使土壤中的 Se 无法被六堡茶充分利用, 建议通过适当的生物化学及农艺措施改良酸化土壤, 以提高六堡茶的富硒能力。

**关键词:** 六堡茶; 根系土; Se 含量; 影响因素; 富 Se 农业; 广西梧州

**中图分类号:** X142; X825

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2024)02-0545-10

## 0 引言

Se 是人体必需的微量营养元素, 具有促进生长、保护心血管和心肌健康、解除体内重金属的毒性、保护视器官健全等功能, 被称为生命的保护剂<sup>[1-2]</sup>。人体缺 Se 会引起部分器官功能紊乱, 免疫力降低, 严重缺 Se 还可引发关节炎、克山病、大骨节病, 因此科学补 Se 至关重要<sup>[3-4]</sup>。膳食是人体 Se 的主要来源<sup>[5]</sup>。有研究表明, 茶树是一种吸收、富集 Se 能力很强的植物, 茶树通过生物富集和转化作用, 能把非生物活性和毒性高的无机硒转化为安全有效、毒性低的有机硒<sup>[6]</sup>。茶叶中有机 Se 占全 Se 总量的 80%, 利于人体吸收, 是理想的补 Se 资源<sup>[7]</sup>。

近年来茶叶中硒含量问题引起不少学者的关注, 相关研究屡有报道, 其中彭赞文等<sup>[8]</sup>对梧州市六堡茶研究后认为, 茶叶、茶树枝条与土壤全 Se 含量均呈现极显著正相关, 土壤富 Se 是六堡茶富 Se 的主要原因; 张豪杰等<sup>[9]</sup>对湖北恩施、陕西安康不

同地点生产茶园成龄茶树研究后认为, 茶叶全 Se 含量与土壤有机质含量、水解性氮、锌含量以及茶叶中硫、锌含量呈显著相关; 易桂花等<sup>[10]</sup>通过对四川蒙顶山茶区茶叶 Se 含量研究后认为, 土壤 Se 含量并不是控制茶叶 Se 含量水平的最主要因素, 而土壤 pH 值是控制茶叶对土壤 Se 吸收的重要因素之一; 叶飞等<sup>[11]</sup>对湖北恩施地区 93 个茶园的土壤和茶叶样品 Se 含量研究发现, 茶园土壤 pH 值保持在 4.0~5.5 区间有利于茶树对土壤中硒的吸收。

六堡茶为中国千年名茶, 属黑茶类, 因原产于广西梧州市苍梧县六堡镇而得名。六堡茶以其独特的品质特征受到人们的热捧, 需求逐渐增大。2021 年六堡茶品牌价值 32.34 亿元, 比 2020 年的 26.40 亿元增加了 5.94 亿元, 居全国茶叶区域公用品牌价值第 25 位, 六堡茶产业在当地农业经济发展中占据支柱地位。但是相比其他名茶, 目前对六堡茶及茶园土壤 Se 的调查及研究相对滞后, 关于梧州六堡茶 Se 含量及其影响因素方面的研究鲜有报道。

本文测定了广西梧州六堡茶的核心产区茶园土壤及茶叶 Se 含量, 并分析了茶园土壤及茶叶中 Se

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-06-08

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA20302018-7); 广西地质矿产勘查开发局科研项目(桂地矿综研[2021]19 号)

第一作者: 彭学锐(1988-), 男, 工程师, 本科, 主要从事环境地球化学、农业地质调查等技术研究工作。Email: 825467525@qq.com

含量的主要影响因素,以期为富硒六堡茶开发、种植规划及富硒农业发展等提供科学的数据支持。

1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区东部苍梧县境内,包括六堡镇、狮寨镇全部区域,地理坐标为东经 111°3'14"~111°27'33",北纬 23°40'44"~23°57'4",全区总面积约 574.87 km<sup>2</sup>。区内主要以中低山丘陵地貌为主,海拔在 60~1 059 m,茶园所在区域主要出露的地层有黄洞口组三段( $\epsilon h^3$ )、洞口组二段( $\epsilon h^2$ )、洞口组一段( $\epsilon h^1$ )、小内冲组( $\epsilon x$ ),岩性主要为砂岩、泥岩、页岩,六堡茶茶园分布在黄洞口组和小内冲组地层内。研究区属亚热带季风气候区,处于海洋性气候与大陆性气候的过渡地域,年均气温 19.8℃,年均降雨量 1 513.9 mm。区内水资源丰富,溪河纵横,属珠江水系,浔、桂两江的支流龙江河、六堡河流经区内。

2 材料与方法

2.1 样品采集

考虑到研究区六堡茶茶园的分布和面积情况,结合研究区地质背景、土壤类型,在兼顾代表性和均匀性原则的条件下布设采样点位,采集六堡茶鲜叶样品 56 件,根系土壤样品 50 件(图 1),野外采样方

法技术依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)<sup>[12]</sup>。其中六堡茶样品于 7~8 月份采摘期,在采样点地块内视不同情况采用棋盘法、梅花法进行多点取样,然后等量混匀组成一个混合样品,采集总量在 500 g 以上。同时,对应采集茶叶样品所在区域的 0~40 cm 根系土,采用“X”形采样方法采集一个主样点和 4 个分样点混合成一个样品,样品质量在 1.5~2.0 kg,子样点与主样点在同一土地利用类型地块内,距主样点距离 15~20 m。土壤垂向剖面样品根据研究区不同地层成土母岩类型布置,采样深度为 200 cm,用洛阳铲按每 20 cm 等间距连续采样,共采集 4 条剖面,40 件样品。岩石样品主要布置在土壤垂向剖面样品下伏新鲜基岩面内,在采样点附近 10~20 m 范围内采集 3~5 个有代表性的新鲜岩块组合成一个样品,样品质量不小于 2 kg。采样点位见图 1。

2.2 样品处理

根系土、土壤剖面样品于干净、通风、无污染、无明火焚烧烟熏场地自然晾干。晾晒过程中及时敲打,防止结块。干燥后,用尼龙筛过筛截取 2 mm(10 目)粒级的部分,采用对角线缩分称取 200 g 样品作为分析样。

茶叶采样后用自来水冲净泥沙,再用去离子水洗净,自然晾干,放入干净托盘中,于 55℃烘箱中烘干至恒重,放入手提式中药粉碎机中破碎均匀至适合粒度(一般粒度不低于 20 目)后,过筛,转移至

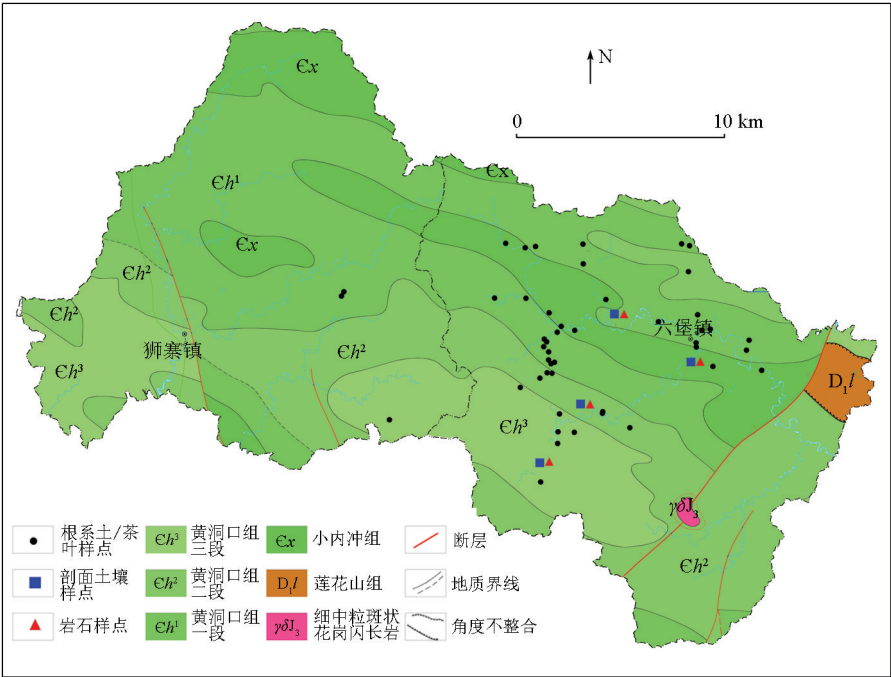


图 1 六堡茶园区采样点位  
Fig.1 Sampling points in study area

塑料瓶中待分析。

岩石样品首先除去非岩石杂质,用配有高铝瓷衬的颚式破碎机对其进行粗碎至约 1 mm,经缩分后取 100 g 样品,采用玛瑙球磨机将样品研磨至 200 目,装在纸袋中(外加塑料袋)用于化学分析(符合粒度要求的样品质量应不小于加工前样品质量的 95%)。

茶叶浸出液的制备:制作好茶叶干基后,均匀抽取 5 g 茶叶样品(干基),用研钵磨碎至不超过 20 目,置于 100 mL 锥形瓶中,加入煮沸的超纯水 50.0 mL,移入沸水浴中,浸提 45 min(每隔 10 min 摇动 1 次)。浸提结束后趁热立即进行减压过滤,滤液移入 100 mL 容量瓶中,用少量热超纯水洗涤残渣 2~3 次,并将滤液并入上述容量瓶中,冷却后用超纯水稀释定容至 100 mL,待测<sup>[13]</sup>。

Se 的浸出率  $\rho$  计算公式为:

$$\rho = \frac{c \times v}{w \times m} \text{ ,}$$

式中: $c$  位浸出液中 Se 的浓度,mg/L; $v$  为定容体积,L; $w$  为每千克茶叶中 Se 的含量, $10^{-6}$ ; $m$  为冲泡茶汤所用茶叶的质量,kg。

2.3 样品测试分析

样品由广西壮族自治区地质矿产测试研究中心测定完成,测试过程中加入 12 个国家一级土壤地球

化学标准物质 GBW07425~GBW07457 系列样品进行质量控制,样品报出率为 100.0%。主要指标测试方法为:根系土及剖面土壤样中 Mo、Cd、Ni、Cu、B、Ge 采用电感耦合等离子体质谱法测试,Mn、CaO、MgO 采用电感耦合等离子体发射光谱法测试,SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Cr、P、Pb、S、Zn、Ti 采用 X 射线荧光光谱法测试,As、Hg、Se 采用原子荧光光谱法测试,N 采用凯氏蒸馏—容量法测试,Corg 采用容量法测试,pH 值用玻璃电极法测试;茶叶、岩石中的 Se 分别按不同规范采用原子荧光光谱法进行测试,各项指标的准确度和精密度均符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)要求;茶叶浸泡液中 Se 测定采用电感耦合等离子体质谱法测试。

2.4 数据处理

采用 Excle 2020、IBM SPSS Statistics 21 软件进行数据处理、统计分析和散点图分析。

3 结果与讨论

3.1 根系土理化性质及元素地球化学特征

研究区六堡茶根系土中各项化学指标含量特征统计见表 1。表中硅铁铝率( $Saf$ )= $w(\text{SiO}_2)/[w(\text{Al}_2\text{O}_3)+w(\text{Fe}_2\text{O}_3)]$ ,土壤硅铁铝率( $Saf$ )表明土

表 1 研究区六堡茶根系土中各指标含量特征( $n=50$ )

Table 1 Characteristics of parameter contents in rhizosphere soils of Liubao tea of the study area( $n=50$ )

指标	标准偏差	变异系数	最大值	最小值	平均值	浓集系数( $K$ )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.74	0.16	23.03	10.96	16.84	1.34
CaO	0.02	0.24	0.15	0.054	0.08	0.03
Corg	0.29	0.21	2.17	0.87	1.39	3.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.51	0.24	9.51	2.93	6.36	1.35
K <sub>2</sub> O	0.34	0.17	2.80	1.29	2.07	0.83
MgO	0.09	0.14	0.86	0.47	0.65	0.36
SiO <sub>2</sub>	5.61	0.09	77.57	51.53	63.66	0.98
As	13.25	0.56	72.50	7.07	23.60	2.36
B	13.32	0.32	78.70	9.93	41.49	1.04
Cd	0.07	1.06	0.50	0.013	0.07	0.78
Cr	20.59	0.21	150.00	58.90	95.81	1.47
Cu	4.62	0.18	39.10	19.20	26.30	1.10
Ge	0.20	0.14	1.74	0.70	1.38	1.06
Hg	0.04	0.38	0.27	0.061	0.11	2.75
Mn	95.57	0.65	488.00	56.50	147.19	0.25
Mo	1.44	0.76	7.60	0.50	1.90	2.38
N	243.68	0.19	2092.00	872.00	1283.66	2.01
Ni	4.55	0.20	37.90	11.20	22.87	0.88
P	105.47	0.27	700.00	235.00	389.08	0.75
Pb	6.21	0.21	51.10	20.30	28.92	1.26
S	69.14	0.24	472.00	157.00	288.00	1.92
Se	0.44	0.41	1.98	0.40	1.08	5.40
Ti	635.45	0.12	7213.00	4071.00	5094.82	1.18
Zn	10.92	0.27	68.00	22.00	40.21	0.59
pH 值	0.25	0.06	5.12	3.96	4.41	
$Saf$	0.85	0.29	5.58	1.58	2.89	0.41

注:全国背景值数据来源于《中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征》<sup>[14]</sup>;氧化物及 Corg 含量单位为%,其他元素含量单位为  $10^{-6}$ ,pH 和  $Saf$  值无量纲。

壤脱硅富铁铝程度,反映了土壤的风化程度及铁铝氧化物及黏粒含量的多少<sup>[15]</sup>。浓集系数  $K$ =研究区该元素背景值/全国背景值,反映了研究区土壤中该元素相对全国的丰缺性。

表 1 结果显示:研究区茶园根系土整体偏酸性,pH 值在 3.96~5.12;硅铁铝率平均值 2.89,远低于全国平均值 7.1,表明茶园根系土壤经历了强烈的风化淋滤和脱硅富铝铁作用,红壤化程度较高,铁铝氧化物和黏粒含量高;与全国背景相比,土壤中 CaO、MgO、K<sub>2</sub>O 含量相对贫化,反映了在高温、高降雨量的条件下,土壤风化淋滤作用强烈,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 盐基离子淋失程度大;根系土中 Se 含量在  $(0.40 \sim 1.98) \times 10^{-6}$ ,平均值为  $1.08 \times 10^{-6}$ ,标准偏差为 0.44,变异系数为 0.41,在研究区空间分布相对比较均匀。与全国土壤背景值相比,研究区茶园根系土中 Se 表现出高含量特征( $K=5.40$ );与全国典型富硒茶园相比,研究区茶园土壤 Se 含量平均值依次是四川蒙顶山、湖北恩施、陕西安康、江西浮梁、福建寿灵、贵州都匀茶园土壤 Se 含量平均值的 3.38、0.71、0.87、2.45、1.89、0.86 倍<sup>[10-11,16-19]</sup>。

根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中 Se 等级划分标准,本次采集的 50 件根系土样品全部达到土壤富 Se 等级( $(0.4 \sim 3) \times 10^{-6}$ ),表明了研究区六堡茶茶园根系土整体富 Se。

3.2 根系土 Se 含量与成土母质的关系

富 Se 土壤的成因及其物质来源多源于岩石的风化,岩石是富 Se 土壤中 Se 元素的主要物质基础<sup>[14,20]</sup>。为研究 Se 从成土母质到土壤中的迁移情况,在研究区分别布设了 4 个不同地层的 0~200 cm 土壤剖面各 1 条,并采集了土壤剖面下对应的鲜基岩样品。

岩石风化成土过程中,元素从岩石到土壤的绝

对含量变化不能真实反映母岩化学风化过程中元素的淋失、富集状态,对活动性较强元素的迁聚特征存在偏差。为消除这一影响,可选用某种“不活动元素参照系”来确定风化岩土体元素成分相对于新鲜母岩的迁移活动性,当活动性较强的元素发生淋滤流失作用后会使得样品中“不活动性元素”含量相对增加,利用质量平衡方程来计算元素的质量迁移系数  $\tau$ <sup>[21]</sup>,其计算公式为:

$$\tau_{ij} = \frac{[X_j]_w}{[X_j]_p} \times \frac{[X_i]_p}{[X_i]_w} - 1,$$

式中: $X_i$ 、 $X_j$  为元素浓度, $i$ 、 $j$  分别代表参照元素和待计算元素; $w$ 、 $p$  分别为 0~40 cm 土壤和未风化新鲜基岩。若  $\tau_{ij}<0$ ,表示元素  $j$  相对迁移淋失; $\tau_{ij}=0$ ,表示元素  $j$  既不发生淋失也不产生次生富集,为惰性元素; $\tau_{ij}>0$ ,表示元素  $j$  发生次生富集。 $\tau_{ij}$  值合理性取决于参照元素的选取和参照体成土母岩的确定,常用的参照元素有 Ti、Zr、Sc、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Nb 等<sup>[22-23]</sup>。研究区无钛矿化,所以本次选取 Ti 作为参照元素进行元素  $\tau_{ij}$  值的计算。4 个不同地层迁移系数  $\tau$  统计结果见表 2。

表 2 显示,研究区不同地质背景岩石在风化成土过程中 Se 均发生了次生富集,但在不同地质背景中次生富集程度不一,其中在小内冲组地层中的次生富集作用最强。4 个地层成土母质在垂向土壤剖面中 Se 含量变化特征见图 2。结果显示,4 个地层

表 2 不同地质背景基岩—土壤 Se 质量迁移系数统计 ( $n=40$ )

Table 2 Statistics of mass transfer coefficient of selenium in different geological background ( $n=40$ )

	洞口组一段( $\epsilon h^1$ )	洞口组二段( $\epsilon h^2$ )	黄洞口组三段( $\epsilon h^3$ )	小内冲组( $\epsilon x$ )
$\tau$	1.18	0.40	0.23	5.16

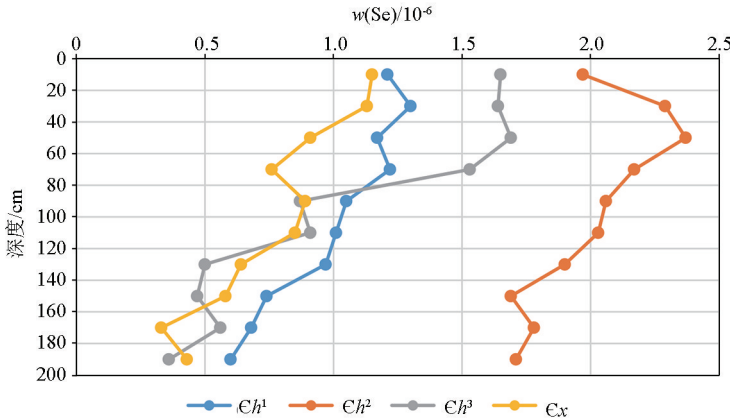


图 2 不同地质背景土壤垂向剖面 Se 含量特征

Fig. 2 Contents of selenium along vertical soil profiles of different geological backgrounds



中,Se 均主要集中在 0~80 cm 深度,80~200 cm 段 Se 含量均表现为下降趋势,其中各地层中成土母质风化后形成的深部土壤 Se 含量顺序为 $\epsilon h^2>\epsilon h^1>\epsilon x>\epsilon h^3$ ,表层土壤中 Se 含量顺序为 $\epsilon h^2>\epsilon h^3>\epsilon h^1>\epsilon x$ ,可见除了 $\epsilon h^3$ 之外,其他 3 个地层成土母质风化后形成的深部土壤 Se 含量与表层土壤 Se 含量高低顺序一致,说明表层土壤 Se 含量受成土母质 Se 含量的影响。

3.3 根系土 Se 含量与土壤理化性质的关系

为了研究根系土理化性质对 Se 含量的影响,将根系土 Se 与其他指标做相关性分析,结果见表 3。结果显示,土壤中的 Se 含量与铁硅铝率(*Saf*)呈显著负相关( $r=-0.785,p<0.01$ ),这主要是由于随着风化作用强度和脱硅富铝铁程度的增加,土壤中的

铁铝氧化物和黏粒含量也相对增加,黏粒和铁铝氧化物在酸性的环境中带正电,可吸附 Se,在酸性土壤中这种吸附作用更明显<sup>[24]</sup>,土壤中铁铝氧化物越多,对 Se 的吸附固定作用越强,导致土壤中 Se 含量越高<sup>[15]</sup>。

根系土 Se 含量与 Cr、Ni、As、Cu 重金属元素及 Mo、Ge 呈现显著正相关性,表明根系土中的 Se 与这些元素在迁移过程中存在伴生关系;Ti 在土壤风化的过程中化学性质较稳定,几乎不发生迁移,Se 与 Ti 呈现显著正相关,说明 Se 在成土过程中以原地残留为主;根系土 Se 含量与 S( $r=-0.327,p<0.05$ )和 P( $r=-0.370,p<0.01$ )存在显著负相关,这主要是由于 S、P 及其含氧盐与 Se 及其含氧盐在与部分带正电的阳离子(团)结合时存在竞争关系。

表 3 根系土 Se 含量与土壤理化指标相关系数(n=50)

Table 3 Correlation coefficients of selenium contents and other physicochemical parameters of rhizosphere soils (n=50)									
指标	r	指标	r	指标	r	指标	r	指标	r
Cr	0.884**	As	0.313*	Corg	0.016	N	-0.148		
Ti	0.793**	Cu	0.307*	K <sub>2</sub> O	-0.015	Pb	-0.158		
Mo	0.560**	Saf	-0.785**	B	-0.018	Zn	0.161		
Ni	0.499**	P	-0.370**	Cd	-0.124	pH	-0.022		
Ge	0.460**	S	-0.327*	Hg	-0.150				
MgO	0.428**	CaO	-0.042	Mn	-0.106				

注:“\*”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,“\*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

以往研究表明,土壤有机质和 pH 值对 Se 也有一定影响,主要表现为吸附和固定作用<sup>[25-26]</sup>,有机质含量越丰富的土壤,对于土壤中 Se 的吸附能力也就越强,土壤中 Se 含量也相对越高<sup>[27]</sup>。在本次研究过程中未发现根系土中 Se 含量与土壤有机质和 pH 值存在显著相关性。李杰等<sup>[28]</sup>在研究广西大新县不同农作物根系土中 Se 含量与有机质关系时发现,有机质含量较高(平均值为 3.17%)的水稻根系土中 Se 含量与 Corg 呈显著正相关,而有机质偏低(有机碳含量为 1.5%)的玉米、龙眼、香蕉根系土与 Corg 无明显相关性。本次工作中六堡茶根系土中有机质含量相对较低(1.39%),对根系土中 Se 的吸附和固定能力有限,因此两者未表现出显著相关性。研究区根系土整体偏酸性,pH 值的变化范围较小(3.96~5.12),这可能是根系土 Se 含量与 pH 值相关性不显著的原因。

3.4 六堡茶 Se 含量特征及 Se 浸出率

本次工作共采集了六堡茶样品 56 件,其中 Se 含量在 $(0.03\sim0.25)\times10^{-6}$ ,平均值为 $0.07\times10^{-6}$ ,标准偏差为 $0.03\times10^{-6}$ ,变异系数为 42%,Se 含量变化整体较稳定。根据《天然富硒食品硒含量分类标准(试行)》(HB001/T—2013)规定中富 Se 茶叶的 Se

含量为 $(0.05\sim5)\times10^{-6}$ ,本次采集的 56 件样品中有 38 件达到富 Se 茶标准,富 Se 率达到 68%。

与全国典型富硒茶园相比,研究区茶叶中 Se 含量平均值依次是四川蒙顶山、湖北恩施、陕西安康、江西浮梁、福建寿灵、贵州都匀茶叶 Se 含量平均值的 0.68、0.44、0.62、0.41、1.4、0.09 倍<sup>[10-11,16-19]</sup>,与土壤中 Se 含量对比结果相比,茶叶中 Se 含量处于相对较低的水平,表明研究区茶园土壤中丰富的 Se 未被茶树充分吸收和利用。

本次研究对 6 件茶叶样品浸出液中 Se 元素含量进行了测试分析,结果见表 4。结果显示,不同含量茶叶样品 Se 浸出率有所不同,茶叶浸出液中 Se 的浓度为 0~0.001 mg/L,茶叶中 Se 的浸出率为 0~23.95%。有研究表明,茶叶中 Se 浸出率除了与茶

表 4 茶叶中 Se 的浸出率

Table 4 Dissolved rate of selenium in tea			
样品序号	茶叶中 Se 含量/ $10^{-6}$	浸出液中 Se 浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	浸出率/%
1	0.074	0.0005	13.51
2	0.130	0.001	15.38
3	0.248	0.001	8.06
4	0.084	0.001	23.95
5	0.062	0	0
6	0.082	0	0

叶中 Se 含量有关之外,还与茶水比、冲泡温度、冲泡时间、冲泡次数、茶叶粒径等有关<sup>[29-30]</sup>,六堡茶浸出液 Se 含量及浸出率的影响因素有待进一步研究。

3.5 六堡茶 Se 含量影响因素

将 56 件六堡茶茶叶中 Se 含量与根系土样品中各化学指标做相关性分析,发现六堡茶中 Se 含量与根系土中的 Mo、N、K<sub>2</sub>O 呈现显著正相关,相关系数分别为 0.375( $p<0.01$ )、0.311( $p<0.05$ )、0.297( $p<0.05$ ),说明六堡茶茶叶中 Se 含量在一定程度上受到这 3 种指标的影响。本次研究未发现茶叶中 Se 含量与根系土中 Se 含量存在相关性,六堡茶茶叶中 Se 对土壤中 Se 继承性并不明显。大量研究表明,农作物对根系土中 Se 的吸收程度取决于 Se 形态的有效性<sup>[31]</sup>,土壤 Se 的有效性影响因素众多,主要有成土母质、土壤质地及类型、酸碱度、氧化还原电位、元素组成、有机质、微生物等<sup>[32-33]</sup>,本文主要研究土壤酸碱度、有机质、土壤元素对 Se 有效性的影响。

采用生物富集系数( $BCF$ )表征农作物对土壤中 Se 元素的吸收程度<sup>[34]</sup>,其计算方法为:生物富集系数( $BCF$ )=植物器官中 Se 含量/根系土中 Se 含量。对六堡茶 Se 元素生物富集系数( $BCF_{se}$ )与土壤各指标作相关性分析,结果见表 5。

表 5 六堡茶叶片 Se 生物富集系数  
与土壤中各元素指标相关系数( $n=50$ )

Table 5 Correlation coefficients between the  
bioconcentration factors of selenium in tea leaves and  
contents of other elements in soils( $n=50$ )

指标	$r$	指标	$r$	指标	$r$
$Saf$	0.734 **	Se	-0.686 **	Ge	-0.317 *
P	0.546 **	Cr	-0.596 **	pH	0.035
N	0.501 **	As	-0.478 **	Corg	0.228
S	0.349 *	Ti	-0.461 **		
Hg	0.292 *	MgO	-0.341 *		

注:“\*”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,“\*\*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表 5 结果显示,六堡茶茶叶对土壤中的生物富集系数与土壤中 P、N( $p<0.01$ )含量呈显著正相关,表明随着土壤中这两种元素含量的增加,茶叶对土壤中 Se 的吸收程度会有一定程度的增加,其中  $BCF_{se}$  与 N 呈现显著正相关,与茶叶中 Se 与 N 含量呈现显著正相关结果一致。主要原因有:N、P 作为土壤中主要的营养元素,在促进植物生长的同时,也会增加根系对包括 Se 在内的各类元素的吸收<sup>[35-36]</sup>;其次  $PO_4^{3-}$ 、 $NO_3^-$ 与  $SeO_4^{2-}$ 在土壤颗粒表面具有相似的吸附位点,在土壤中强烈竞争吸附或络合位置,可释放部分土壤 Se,从而提高植物对 Se 的吸收<sup>[37-38]</sup>。有研究表明,酸性土壤中 S 会降低植物

对 Se 的吸收,碱性土壤中则存在相反的情况<sup>[39]</sup>。本次研究酸性土壤中六堡茶茶叶生物富集系数与 S 呈现显著正相关( $p<0.05$ ),与该结论不符,具体原因有待进一步研究。Hg 与  $BCF_{se}$  呈显著正相关性,说明其在一定程度上促进了六堡茶对土壤中 Se 的吸收。

茶叶对土壤中的生物富集系数( $BCF_{se}$ )与土壤硅铁铝率( $Saf$ )呈显著正相关( $p<0.01$ ),且相关系数最高( $r=0.734$ ),说明土壤硅铁铝率( $Saf$ )对六堡茶 Se 吸收具有较大的影响。为了研究不同硅铁铝率对六堡茶 Se 含量的影响,按照土壤硅铁铝率从低到高分为 A、B 两组:A 组硅铁铝率较低表示土壤中 铁铝氧化物含量相对较高,二氧化硅含量相对较低;B 组硅铁铝率较高表示土壤中 铁铝氧化物含量相对较低,二氧化硅含量相对较高。结果见表 6。

表 6 A、B 组根系土和茶叶 Se 含量特征

Table 6 Characteristics of selenium contents in rhizosphere  
soils and tea leaves of group A and group B

	$n$	$Saf$	Se <sub>土</sub> 平均值	Se <sub>茶</sub> 平均值	相关系数
A 组	30	1.58~2.92	1.32	0.064	0.121
B 组	30	2.51~5.38	0.82	0.062	0.582 **

注:Se 含量单位为  $10^{-6}$ ;“\*”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 6 结果显示,低硅铁铝率的 A 组土壤中 Se 含量平均值( $1.32\times 10^{-6}$ )是高硅铁铝率 B 组( $0.82\times 10^{-6}$ )中 Se 含量的 1.6 倍,但是两者茶叶中 Se 含量差异不大( $0.064\times 10^{-6}$ 、 $0.062\times 10^{-6}$ )。即随着铁铝氧化物含量的升高,土壤中 Se 含量也随着升高,但六堡茶茶叶中 Se 含量未发现明显增加,即有效 Se 的含量无明显提升,土壤中有有效 Se 占 Se 总量的比例随着降低,因此其生物富集系数( $BCF_{se}$ )逐渐降低,这也解释了表 5 中  $BCF_{se}$  与土壤中的 Se 呈显著负相关关系( $r=-0.686$ , $p<0.01$ )的原因。有研究发现,较低的土壤 pH 值有助于铁铝氧化物表面产生更多的正电荷,从而提高了对 Se 的吸附能力<sup>[40]</sup>;随着 pH 升高, $OH^-$ 增加,而有效  $SeO_3^{2-}$ 、 $SeO_4^{2-}$ 与  $OH^-$ 均属于阴离子团,因此  $OH^-$ 会竞争金属氧化物的吸附位点而导致 Se 的吸附量下降,从而提高土壤 Se 生物有效性<sup>[41]</sup>。当土壤呈酸性—中性潮湿环境, $SeO_4^{2-}$ 向  $SeO_3^{2-}$ 的转化速度会加快,转化后的  $SeO_3^{2-}$ 易被氧化物和黏土矿物吸附,不易被植物吸收,从而导致土壤中 Se 的积累<sup>[42]</sup>。

表 6 结果显示在 B 组高硅铁铝率根系土中,茶叶中的 Se 含量与土壤的 Se 含量呈现显著相关性( $r=0.582$ , $p<0.01$ ),即在 B 组根系土中 Se 含量与茶

叶中 Se 含量表现出一定的继承性(图 3),而在相对低硅铁铝率的 A 组中未发现两者具有显著相关性。这一方面是因为随着 B 组铁铝氧化物含量的减少,其对 Se 的有效性影响的减小;另一方面 B 组中高二氧化硅含量一定程度上表明土壤偏砂质,而土壤通气孔隙度受土壤质地类型影响显著,其中砂质壤土耕层土壤通气孔隙度较高<sup>[43]</sup>。土壤通气性是影响

土壤氧化还原电位( $E_h$ )的主要因素,在通气良好时,土壤的  $E_h$  值较高,呈氧化状态。土壤中  $E_h$  越高,会导致有效态 Se 的释放,或引起亚硒酸盐转化为硒酸盐<sup>[44]</sup>。最终使得土壤中易于被植物根系吸收的可溶态 Se 含量升高,提高土壤中 Se 的有效性<sup>[45]</sup>。

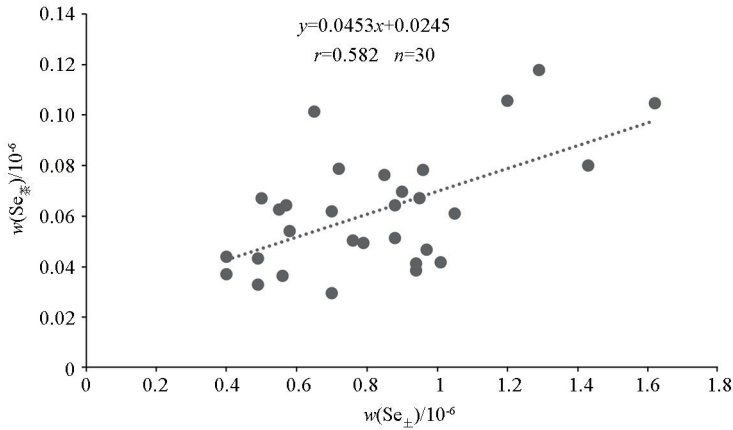


图 3 研究区 B 组根系土与六堡茶茶叶 Se 含量散点

Fig.3 Scattered plots of selenium contents in rhizosphere soils and tea leaves of group B

表 5 结果未发现,六堡茶茶叶对土壤中 Se 的吸收受到土壤 pH 值及 Corg 的显著影响,这与前人研究结果不符。这可能是因为研究区 Corg 含量相对不高,Se 是以被铁铝氧化物吸附为主,有效 Se 主要受铁铝氧化物的影响。而研究区土壤整体呈酸性,pH 变化范围较小,加之六堡茶对 Se 的吸收利用机制复杂,研究区土壤 pH 对六堡茶的影响有待进一步研究。

4 结论

1) 研究区六堡茶根系土 Se 含量在  $(0.40 \sim 1.98) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $1.08 \times 10^{-6}$ ,高于全国土壤背景值,所有根系土样品全部达到土壤富 Se 等级;六堡茶茶叶样品 Se 含量在  $(0.03 \sim 0.25) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $0.07 \times 10^{-6}$ ,茶叶富 Se 率达到 68%,茶叶浸出液中 Se 的浸出率在 0~23.95%。

2) 研究区小内冲组( $\epsilon x$ )岩石成土过程中 Se 元素在表层土壤的次生富集作用最强,土壤中的 Se 含量主要受成土母质的土壤硅铁铝率( $Saf$ )影响;在有机质含量相对较低的情况下,土壤中的 Se 主要是被铁铝氧化物所吸附,有机质对 Se 含量的吸附作用和影响较为有限。

3) 研究区六堡茶茶叶中 Se 含量主要受土壤中

N、P 元素及土壤硅铁铝率的影响。其中土壤中 N、P 可在一定程度上促进六堡茶茶叶 Se 含量的提升,铁铝氧化物对土壤中的 Se 的吸附导致研究区丰富的 Se 资源无法被六堡茶充分吸收利用。建议采取适当的生物化学及农艺措施加以改良,通过施用中性肥料及定期松土来适当提高土壤的 pH 值和  $E_h$  值,提升六堡茶对土壤 Se 的吸收利用率。

参考文献 (References) :

[1] Roman M, Jitaru P, Barbante C. Selenium biochemistry and its role for human health[J]. Metallomics, 2014, 6(1): 25-54.

[2] 吴永尧, 彭振坤, 陈建英, 等. 水稻对环境硒的富集和耐受能力研究[J]. 微量元素与健康研究, 1999, 16(4): 42-44.

Wu Y Y, Peng Z K, Chen J Y, et al. Research on the capacity of rice accumulation and re-sistance Se in environment[J]. Studies of Trace Elements and Health, 1999, 16(4): 42-44.

[3] 王立平, 唐德剑, 沈亚美, 等. 硒的营养缺乏现状及补充方式[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 339-343.

Wang L P, Tang D J, Shen Y M, et al. The status quo of nutrient deficiency and supplementation methods of selenium[J]. The Food Industry, 2020, 41(1): 339-343.

[4] Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: A review[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400: 115-141.

[5] 汤超华, 赵青余, 张凯, 等. 富硒农产品研究开发助力我国营养型农业发展[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3122-3133.

Tang C H, Zhao Q Y, Zhang K, et al. Promoting the development of

- nutritionally guided agriculture in research and development of selenium-enriched agri-products in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(18): 3122–3133.
- [6] 陈永波, 吴一鸣, 刘源, 等. 浅议开阳富硒茶的发展现状与对策[J]. *耕作与栽培*, 2010(6): 9.
- Chen Y B, Wu Y M, Liu Y, et al. Current situation and counter-measures of selenium-enriched tea in Kaiyang[J]. *Tillage and Cultivation*, 2010(6): 9.
- [7] 温立香, 郭雅玲. 富硒茶的研究进展[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(1): 201–206.
- Wen L X, Guo Y L. Research progress of selenium-enriched tea in China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(1): 201–206.
- [8] 彭赞文, 张立杰, 程道品, 等. 广西梧州六堡茶产区土壤硒含量及其与茶叶中硒的相关性分析[J]. *茶叶通讯*, 2021, 48(3): 430–434.
- Peng Z W, Zhang L J, Cheng D P, et al. Correlation analysis of selenium content in soil and tea in Liubao tea producing area of Wuzhou, Guangxi[J]. *Journal of Tea Communication*, 2021, 48(3): 430–434.
- [9] 张豪杰, 郝心愿, 周超, 等. 富硒区茶树鲜叶中硒累积与土壤因子的相关性分析[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(4): 465–477.
- Zhang H J, Hao X Y, Zhou C, et al. Correlation analysis between selenium accumulation in tea leaves and soil factors in selenium-rich areas[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(4): 465–477.
- [10] 易桂花, 彭培好, 倪师军, 等. 四川蒙顶山茶叶含硒量与土壤的含硒量和 pH 值的关系[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 37(5): 566–569.
- Yi G H, Peng P H, Ni S J, et al. Study on contents of tea selenium and the relationship of soil pH in Mengding tea gardens of Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2010, 37(5): 566–569.
- [11] 叶飞, 龚自明, 高士伟, 等. 湖北恩施茶园土壤及茶叶硒元素调查研究[J]. *四川农业大学学报*, 2015, 33(3): 275–278.
- Ye F, Gong Z M, Gao S W, et al. Investigation of the selenium element in tea plantation of Enshi district, Hubei Province[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2015, 33(3): 275–278.
- [12] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Specification of land quality geochemical assessment[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2016.
- [13] 赵佐平, 付静, 岳思羽, 等. 陕南茶园茶叶品质分析及重金属含量现状评估[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 201–211.
- Zhao Z P, Fu J, Yue S Y, et al. Analysis of tea quality and assessment of heavy metal content status in tea plantations of southern Shanxi Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(16): 201–211.
- [14] 鄯明才, 顾铁新, 迟清华, 等. 中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征[J]. *物探与化探*, 1997, 21(3): 161–167.
- Yan M C, Gu T X, Chi Q H, et al. Abundance of chemical elements of soils in China and supergenesis geochemistry characteristics[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1997, 21(3): 161–167.
- [15] Goldberg S, Lesch S M, Suarez D L. Predicting selenite adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(23): 5750–5762.
- [16] 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(3): 229–235.
- Zhang Y L, Zhang Z M, Zhang J J, et al. Soil selenium speciation in cropland of western Ankang and the characteristics of crop selenium enrichment[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 229–235.
- [17] 沈慧芳, 杨波, 方克明, 等. 江西浮梁茶园土壤硒与茶叶硒富集能力的研究[J]. *上海农业学报*, 2015, 31(1): 59–62.
- Shen H F, Yang B, Fang K M, et al. Study on the selenium-enriching ability in tea and tea garden soil selenium in Fuliang, Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015, 31(1): 59–62.
- [18] 吴一群, 陈子聪, 颜明娟, 等. 福建省寿宁县茶园土壤硒状况及其有效性[J]. *茶叶学报*, 2018, 59(3): 131–134.
- Wu Y Q, Chen Z C, Yan M J, et al. Status and availability of selenium in soil at tea plantations in Shouning County[J]. *Acta Tea Sinica*, 2018, 59(3): 131–134.
- [19] 宋志雪, 潘岩灵, 何华婷, 等. 都匀毛尖茶园土壤及茶叶锌硒含量的调查[J]. *茶叶*, 2018, 44(4): 191–193.
- Song Z X, Pan Y L, He H T, et al. Investigation on zinc and selenium contents in soil and tea leaves of Duyun Maojian tea garden[J]. *Journal of Tea*, 2018, 44(4): 191–193.
- [20] Zhu J M, Thomas M, Robert B, et al. The occurrence and origin of selenium minerals in Se-rich stone coals, spoils and their adjacent soils in Yutangba, China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 330–331: 27–38.
- [21] Chadwick O A, Brimhall G H, Hendricks D M. From a black to a gray box—A mass balance interpretation of pedogenesis[J]. *Geomorphology*, 1990, 3(3/4): 369–390.
- [22] Babechuk M G, Widdowson M, Kamber B S. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India[J]. *Chemical Geology*, 2014, 363: 56–75.
- [23] Oeser R A, Stronck N, Moskwa L M, et al. Chemistry and microbiology of the Critical Zone along a steep climate and vegetation gradient in the Chilean Coastal Cordillera[J]. *Catena*, 2018, 170: 183–203.
- [24] 徐文波, 朱建明, 秦海波, 等. 铁/锰和铝氧化物吸附硒的行为研究[J]. *矿物学报*, 2017, 37(3): 357–365.
- Xu W P, Zhu J M, Qin H B, et al. A study on selenium oxyanions adsorbed onto iron/manganese/aluminum oxides[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(3): 357–365.
- [25] 李永华, 王五一, 雒昆利, 等. 大巴山区土壤中的硒和氟[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 61–67.



Li Y H, Wang W Y, Luo K L, et al. Distribution of selenium and fluorine in soils of daba mountains [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 61-67.

[26] Pezzarossa B, Piccotino D, Petruzzelli G. Sorption and desorption of selenium in different soils of the Mediterranean Area [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(19/20): 2669-2679.

[27] 肖高强, 宗庆霞, 向龙洲, 等. 云南省盈江县旧城—姐冒地区土壤和农产品硒地球化学特征及影响因素 [J]. *物探与化探*, 2020, 44(2): 412-418.

Xiao G Q, Zong Q X, Xiang L Z, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils and agricultural products in the Jiucheng-Jiemao area, Yingjiang County, Yunnan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(2): 412-418.

[28] 李杰, 钟晓宇, 赖俊翔, 等. 广西典型岩溶地区硒在土壤—作物系统中累积特征及其影响因素 [J]. *矿产与地质*, 2022, 36(2): 380-388.

Li J, Zhong X Y, Lai J X, et al. Accumulation characteristics and influencing factor of selenium in soil-crop system in typical karst area of Guangxi [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2022, 36(2): 380-388.

[29] 杨如意, 杨程, 石晓菁, 等. 硒镉高背景区茶叶中硒和砷、汞、镉的积累与浸出特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(9): 2023-2030.

Yang R Y, Yang C, Shi X J, et al. Selenium, arsenic, mercury and cadmium in tea leaves and infusion of a green tea grown in an area with a high geological background of selenium and cadmium [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2023-2030.

[30] 郑宏彬, 张婉君, 穆青, 等. 恩施富硒茶硒和茶多酚的溶出特征及抗氧化活性研究 [J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(1): 103-111.

Zheng H B, Zhang W J, Mu Q, et al. Dissolution characteristics and antioxidant activity of selenium and tea polyphenols in Enshi Se-enriched tea [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(1): 103-111.

[31] 魏然, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 江西省鄱阳湖流域根系土硒形态分析及其迁移富集规律 [J]. *物探与化探*, 2012, 36(1): 109-113.

Wei R, Hou Q Y, Yang Z F, et al. An analysis of speciation of selenium as well as its trans-formation and enrichment in root soil of Poyang Lake Basin, Jiangxi Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(1): 109-113.

[32] 张立, 姜侠, 崔玉军, 等. 松嫩平原吕大火房垂直剖面中硒赋存形态及影响因素析 [J]. *地质与资源*, 2020, 29(6): 603-608.

Zhang L, Jiang X, Cui Y J, et al. Analysis on the occurrence forms of selenium and influencing factors in Ludahuofang vertical section of Songnen Plain [J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 603-608.

[33] 余飞, 张风雷, 张永文, 等. 重庆典型农业区土壤硒地球化学特征及影响因素 [J]. *物探与化探*, 2020, 44(4): 830-838.

Yu F, Zhang F L, Zhang Y W, et al. Geochemical characteristic sand influential factors of soil selenium in typical agricultural area, Chongqing [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(4): 830-838.

[34] 严洪泽, 周国华, 孙彬彬, 等. 福建龙海杨梅产地元素地球化学特征 [J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1155-1166.

Yan H Z, Zhou G H, Sun B B, et al. Geochemical characteristics of the bayberry producing area in Longhai, Fujian [J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1155-1166.

[35] 谢瑞芝, 董树亨, 胡昌浩, 等. 氮硫互作对玉米籽粒营养品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(3): 263-268.

Xie R Z, Dong S T, Hu C H, et al. Influence of nitrogen and sulfur interaction on grain quality of maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(3): 263-268.

[36] 吴军, 刘秀芳, 徐汉生. 硒在植物生命活动中的作用 [J]. *植物生理学通讯*, 1999, 35(5): 417-423.

Wu J, Liu X F, Xu H S. Functions of selenium in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 1999, 35(5): 417-423.

[37] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH 和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附—解吸的影响 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(5): 1069-1077.

Zhou X B, Yu S H, Xie D T. Effects of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1069-1077.

[38] Kirkby E A, Mengel K. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition [J]. *Plant Physiology*, 1967, 42(1): 6-14.

[39] Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M B, Raza A, et al. Selenium in plants: Boon or bane? [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 178: 104-170.

[40] Kämpf N, Curi N, Marques J J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio [C] // *Química e mineralogia do solo*, 2009: 573-610.

[41] Fontes M P F, Alleoni L R. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils [J]. *Sci. Agr.*, 2006, 63: 589-608.

[42] Goh K H, Lim T T. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: Effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption [J]. *Chemosphere*, 2004, 55: 849-859.

[43] 田育天, 李湘伟, 谢新乔, 等. 云南典型植烟土壤通气孔隙及其主控因素研究 [J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1430-1438.

Tian Y T, Li X W, Xie X Q, et al. Soil aeration porosity in typical tobacco-planting soils and its main controlling factors in typical tobacco-planting soil in Yunnan Province, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1430-1438.

[44] Fan J X, Zeng Y, Sun J X. The transformation and migration of selenium in soil under different  $E_h$  conditions [J]. *Soil Sediment*, 2018, 18: 2935-2947.

[45] 马迅. 不同内源调控措施对江西丰城土壤中硒有效性的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

Ma X. Selenium availability and its regulation in acidic selenium-rich soil [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.

Factors influencing the Se content in tea leaves and rhizosphere soils of the Liubao tea in Wuzhou City, Guangxi

PENG Xue-Rui, CHEN Xiang, ZHOU Si-Yu

(No. 270 Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou 545005, China)

**Abstract:** This study aims to investigate the characteristics and influencing factors of selenium (Se) content in the tea leaf-rhizosphere soil system of the Liubao tea in Wuzhou, Guangxi. With the main tea gardens in Liubao and Shizhai towns, the core production areas of the Liubao tea, as study areas, this study conducted statistical analysis of the Se content in the tea leaves, rhizosphere soils, and tea leachate samples of the Liubao tea. The results show that: ① The Se content in soils of the study areas ranged from  $(0.40\sim1.98)\times10^{-6}$ , averaging  $1.08\times10^{-6}$ ; ② The Se content in Liubao tea leaves was between  $(0.03\sim0.25)\times10^{-6}$ , averaging  $0.07\times10^{-6}$ , with a Se enrichment rate of 68%; ③ The leaching rates of Se in tea leachate ranged from 0~23.95%; ④ The Se content in the rhizosphere soils of tea gardens principally depended on soil parent materials and silica-sesquioxide ratios; ⑤ The P and N elements in soils can facilitate the absorption of soil Se by tea leaves, while the iron and aluminum oxides in acidified soils hinder the full utilization of soil Se by the Liubao tea. Hence, appropriate biochemical and agronomic measures are recommended for acidified soil amelioration to enhance the Se enrichment ability of the Liubao tea.

**Key words:** Liubao tea; rhizosphere soil; Se content; influencing factor; selenium-enriched agriculture; Wuzhou, Guangxi

( 本文编辑:蒋实)

上接 544 页

Ge in soils of cultivated land in Qixingguan District: Geochemical characteristics and absorption by crops

ZHANG Hong-Wei<sup>1</sup>, YANG En-Lin<sup>1,2</sup>, JIAO Shu-Lin<sup>1</sup>, WANG Gui-Yun<sup>1</sup>, YANG Shan-Jin<sup>1</sup>

(1. School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. No. 117 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550018, China)

**Abstract:** Determining the content and absorption by crops of germanium (Ge) in soils of cultivated land holds great significance for the development and utilization of Ge in the land, as well as the scientific seed selection for the land. However, few studies on the Ge element in soils of cultivated land in Qixingguan District have been reported. Based on the data from a project of the geochemical investigation and evaluation of the land quality in the district, this study made statistics of geochemical parameters such as the Ge content and analyzed the geochemical characteristics of Ge in soils and the absorption of Ge by crops. The results show that the soils of cultivated land in Qixingguan District exhibit a Ge content ranging from  $(0.86\sim2.48)\times10^{-6}$  (average:  $1.74\times10^{-6}$ ), which is equivalent to the background value of Ge in China. Based on the geostatistical analysis, this study determined that Ge-rich cultivated land covers an area of 65 853.54 hm<sup>2</sup>, accounting for 47.41% of the total cultivated land in the district, and is primarily distributed in the northwestern and southwestern portions. The biological absorption coefficients (Ax) to Ge in soils by crops are all below 1%, suggesting an extremely low absorption level. This study explored the causes of Ge enrichment in the soils and the environmental factors affecting Ge absorption by crops using methods such as correlation analysis, drawing the following conclusions: ① The Ge content in soils is principally governed by soil parent materials, accompanied by the influence of pedogenetic weathering process for soil formation. These factors, coupled with high organic matter content and slightly acidic soil, contribute to the Ge enrichment in the cultivated land of Qixingguan District; ② The correlation between Ax and pH is slightly negative in acidic soils but positive in neutral to alkaline soils, implying that slightly acidic soil reduces the absorption of Ge by crops in the study area.

**Key words:** soils in cultivated land; Ge; geochemical characteristics; biological absorption; Qixingguan District

( 本文编辑:蒋实)