

DOI: 10.20045/j.cnki.issn.2096-0220.2022.04.002

引文格式: 陈玉真, 王峰, 单睿阳, 等. 闽北地区不同类型茶园土壤硒赋存形态特征及影响因素分析 [J]. 茶叶学报, 2022, 63 (4): 243-250.

闽北地区不同类型茶园土壤硒赋存形态特征及影响因素分析

陈玉真^{1,2}, 王峰^{1,2}, 单睿阳^{1,2}, 陈常颂^{1,2}, 余文权³, 尤志明^{1,2*}

(1. 福建省农业科学院茶叶研究所 / 国家茶树改良中心福建分中心, 福建 福州 350013;
2. 国家土壤质量福安观测实验站, 福建 福安 355015; 3. 福建省农业科学院, 福建 福州 350003)

摘要: 为探讨闽北典型茶园土壤中硒形态特征, 采集了闽北地区 4 个主要土壤类型(黄壤、红壤、潮砂土、紫色土)的 35 份茶园表层土壤 (0 ~ 20 cm), 分析土壤中硒含量、赋存形态及影响因素。结果表明: 闽北地区 35 份茶园土壤全硒含量为 0.22 ~ 1.07 mg · kg⁻¹, 均值为 0.59 mg · kg⁻¹, 达到富硒土壤标准 (> 0.4 mg · kg⁻¹) 比例茶园占 82.86%; 土壤硒活化率均值为 8.34%, 土壤中硒的有效度较低。不同土壤类型中以黄壤茶园土壤全硒及各形态硒含量最高, 潮砂土含量硒含量最低, 但其茶园土壤硒活化率最高。茶园土壤硒形态分布规律表现为有机结合态 > 残渣态 > 可交换态及碳酸盐结合态 > 铁锰氧化物结合态 > 可溶态, 土壤硒的生物有效性较低。相关分析表明, 茶园土壤硒形态总体受土壤有机质、氮素形态及 pH 的影响, 土壤有效磷与土壤全硒、有机结合态和残渣态硒之间呈显著或极显著正相关, 土壤铁锰氧化物结合态硒与土壤理化性质之间相关性均不显著。总体而言, 该区域茶园富硒土壤为发展天然富硒茶提供了物源保证, 但硒生物有效性不高, 如何提高硒生物有效性还有待进一步研究。

关键词: 茶园土壤; 土壤类型; 硒; 赋存形态; 影响因素

中图分类号: S153; S158.2

文献标志码: A

文章编号: 2096 - 0220 (2022) 04 - 0243 - 08

Selenium Contents and Forms in Soils at Tea Plantations of Different Soil Types in Northern Fujian

CHEN Yu-zhen^{1,2}, WANG Feng^{1,2}, SHAN Rui-yang^{1,2}, CHEN Chang-song^{1,2}, YU Wen-quan³,
YOU Zhi-ming^{1,2*}

(1. *Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences / Fujian Branch of National Center for Tea Improvement, Fuzhou, Fujian 350013, China*; 2. *National Agricultural Experimental Station for Soil Quality, Fu'an, Fujian 355015, China*; 3. *Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China*)

Abstract: Distribution of available selenium (Se) in soils at tea plantations of different soil types in northern Fujian province was determined to analyze the factors that contributed to the variations. Thirty-five specimens of surface soil at the depth of 0-20 cm from tea plantations of yellow soil, red earth, moisture sandy soil, and purple soil types in the region were collected. The chemical analysis showed that the total Se contents of the soils ranged from 0.22 mg · kg⁻¹ to 1.07 mg · kg⁻¹

收稿日期: 2022 - 08 - 16 初稿; 2022 - 09 - 27 修改稿

基金项目: 福建省属公益类科研院所基本科研专项 (2020R1029001、2021R1029002); 中央引导地方科技发展专项 (2020L3030); 农业科技创新联盟专项 (CXLM202202)。

作者简介: 陈玉真 (1985 -), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 茶树栽培与环境生态。E - mail: taotaoyuzhen@163.com

* 通信作者: 尤志明 (1964 -), 男, 研究员, 研究方向: 茶树栽培。E - mail: 847842412@qq.com

with an average of $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. A great majority of the area soil, i.e., 82.86%, belonged to the Se-rich classification. The availability of Se, however, was low, ranging from 1.10% to 31.64% with a mean of 8.34%. Among the different soil types, the yellow soil was the highest in contents of total and various forms of Se, while the sandy soil lowest but most available for plant utilization. The contents of various forms of Se were lower in the order of organic matter-bound Se > residual Se > exchangeable and carbonate-bound Se > iron and manganese oxides-bound Se > soluble Se. The chemical form was critically affected by the organic matters, pH, and nitrogen in the soil with significant positive correlations between available phosphate and total Se and between organic matter-bound Se and residual Se. On the other hand, there were no significant correlations between iron or manganese oxides-bound Se and soil physiochemical properties. In general, the soil in the region was rich in Se for tea cultivation, but the relatively low availability of the element deterred the potential benefit. Hence, improving Se bioavailability at the tea plantations would be a most desired task facing the scientists and industry.

Key words: Tea plantation; soil types; selenium; selenium forms; affecting factors

微量元素硒 (Se) 是人体和动物生长发育必需的微量元素之一, 其在参与体内谷胱甘肽过氧化酶的合成、保护心血管健康、增强机体免疫功能、抵抗衰老、预防地方性克山病和大骨节病、拮抗体内砷汞重金属毒性等方面意义重大^[1-4], 被誉为“生命保护剂”^[5]。土壤硒是植物吸收硒的主要来源, 通过食物链实现植物、动物以及人对硒的营养要求是提升我国居民的硒日均摄入量的重要途径^[6,7]。茶树是一种天然富硒作物, 能将吸收的无机态硒 80% 转化为安全有效的有机态硒。国内恩施、紫阳、石台、万源等富硒地区已开发出多种天然富硒茶产品, 但是富硒茶园土壤生产的茶叶并不一定都能达到富硒茶标准, 这与土壤硒赋存形态、茶树品种吸收能力、栽培措施等密切相关^[8-11]。

土壤是茶树吸收硒的主要来源, 而决定茶树硒吸收能力大小是硒的有效性。土壤硒的有效性往往由其赋存形态决定, 土壤硒形态一般可分为水溶态、可交换态及碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、有机结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态、残渣态等^[12,13], 土壤各赋存形态硒之间处于动态平衡状态, 且相互间存在可逆或不可逆的转化过程。有研究表明, 土壤中硒的赋存形态特征受土壤环境 pH、氧化还原电位 (Eh)、有机质、成土母质、阳离子交换量、铁锰氧化物、微生物活动、水热条件及地形等因素综合影响^[14-16], 不同区域、生态系统或栽培措施下土壤硒赋存形态差异较大^[17-19]。调查数据表明, 福建省富硒土地占全省土地面积的 1/4 (约有 3.26 万平方公里), 福建省典型茶园土壤硒含量 $0.22 \sim 2.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (均值为 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 达

到富硒土壤标准比例有 86.67%^[20], 这为发展天然富硒茶产品提供了优越的地质条件。同时, 本课题前期研究表明^[21], 尽管茶园属于富硒土壤, 土壤供硒潜力巨大, 但是硒活化率较低, 茶树新梢硒含量较低, 生产天然富硒茶必须提高土壤中硒的可利用度。在此背景下, 本研究通过采集闽北茶区典型茶园土壤, 研究不同类型土壤 (黄壤、红壤、紫色土和潮砂土) 中硒含量、硒元素赋存形态特征及影响因素, 从而为制定富硒茶开发利用措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与处理

土壤样品于 2016 年 12 月 (冬季基肥前) 采集于闽北地区武夷山市、建瓯市、建阳区和政和县典型茶园中, 包括黄壤 (15 个)、红壤 (11 个)、潮砂土 (3 个) 和紫色土 (6 个) 4 个类型共 35 份, 海拔高度在 120 ~ 170 m 之间。每个茶园样地按照多点法采集表层 (0 ~ 20 cm) 土壤样品, 混匀后采用四分法保留约 1 kg 土壤样品。每个样地采样点包括 5 个: 分别为两边茶行中线位置 2 个、茶行两边滴水线 2 个和茶行中间 1 个, 5 个土钻混匀为 1 个样品。采集的土壤样品去除杂质后, 在室内阴凉处风干后分别过筛, 贴好标签后装入自封袋备用。

1.2 土壤样品分析

土壤总硒采用混合酸 ($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$) 消煮法, 消煮液过滤后定容, 采用原子荧光光度计测定; 土壤有效硒采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液浸提, 浸提液加热消煮后定容待测。参照瞿建国等连续浸

提技术^[22]，经过5步分级浸提将土壤中的硒分为可溶态 (Soluble Selenium, SOL-Se)、可交换态及碳酸盐结合态 (Exchangeable and Carbonate-bound Selenium, EX-Se)、铁锰氧化物结合态 (Iron and Manganese Oxides-bound Selenium, FMO-Se)、有机物结合态 (Organic Matter-bound Selenium, OM-Se) 和残渣态 (Residual Selenium, RES-Se) 五种结合形态。具体步骤为：称取 2.000 g 土壤至聚乙烯离心管中，加入 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 20 mL，25℃条件下浸提振荡 1 h， $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 过滤，上清液消化后测定 SOL-Se 含量；在上述含有残渣的离心管中加入 20 mL $0.7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 ，25℃条件下浸提振荡 4 h， $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 6 min 过滤，上清液消化后测定 EX-Se 硒含量；在上述含有残渣的离心管中加入 $2.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 20 mL，90℃水浴中加热浸提 50 min， $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 6 min 过滤，上清液消化后测定 FMO-Se 硒含量；在上述含有残渣的离心管中加入 5% $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 8 mL 和 50% HNO_3 2 mL，90℃水浴中加热浸提 3 h，期间间隙振荡， $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 过滤，上清液消化后测定 OM-Se 硒含量；将剩余的残渣用去离子水清洗转移至石英烧杯中，用测定土壤总硒的方法消煮后测定 RES-Se 硒含量。土壤理化性质参照土壤农业化学分析方法进行^[23]。

1.3 数据处理与分析

数据采用 Excel 2010 进行处理，采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和多重比较 (Duncan) 比较不同类型茶园组间的差异，方差分析和 Spearman 相关性分析采用 SPSS 19.0 统计软件，图表制作分别采用 GraphPad Prism 8.0 和 Excel 2010 软件。

2 结果与分析

2.1 不同类型茶园土壤全硒和有效硒含量

由表 1 可以看出，闽北地区 35 份茶园土壤全硒含量为 $0.22 \sim 1.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，均值为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，高于福建土壤硒背景值^[24] ($0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和全国土壤硒背景值^[25] ($0.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，也超过富硒土壤标准^[26] ($0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，属于富硒土壤；土壤有效硒含量为 $6.17 \sim 125.17 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，均值为 $47.73 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，

硒的活化率为 1.14% ~ 19.63% (均值为 8.34%)。不同类型茶园土壤硒和有效硒差异较大，黄壤茶园土壤全硒含量显著高于潮砂土 ($P < 0.05$)，黄壤、红壤和紫色土茶园之间差异不显著 ($P > 0.05$)；黄壤茶园土壤有效硒含量显著高于红壤 ($P < 0.05$)，黄壤、紫色土和潮砂土茶园之间差异不显著 ($P > 0.05$)；潮砂土茶园土壤硒活化率显著高于红壤 ($P < 0.05$)，其他 3 种类型茶园之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 研究区茶园土壤全硒及有效硒含量

Table 1 Contents of total and available Se in soils at tea plantations under study

土壤类型		土壤全硒 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤有效硒 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	活化率 (%)
黄壤	范围	0.37 ~ 1.07	6.18 ~ 125.67	1.14 ~ 19.64
	均值	0.65a	54.85a	8.63ab
红壤	范围	0.22 ~ 0.90	10.48 ~ 125.17	1.40 ~ 18.48
	均值	0.62a	40.87b	6.32b
紫色土	范围	0.26 ~ 0.69	25.23 ~ 62.34	5.26 ~ 12.72
	均值	0.53ab	43.77ab	8.97ab
潮砂土	范围	0.30 ~ 0.45	31.76 ~ 62.00	9.18 ~ 20.67
	均值	0.36b	45.18ab	13.07a
全部样点	范围	0.22 ~ 1.07	6.17 ~ 125.67	1.14 ~ 20.67
	均值	0.59	47.73	8.34

注：表格中同列数据后不同小写字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.2 不同类型茶园土壤硒形态特征

从图 1 可以看出，茶园土壤硒以有机结合态和残渣态为主，所占比例分别为 44.64% ~ 54.19% (均值为 46.56%) 和 31.45% ~ 37.27% (均值为 34.85%)；土壤可溶态硒比例最低，所占比例为 0.71% ~ 4.92% (均值为 1.84%)。茶园土壤硒的不同形态所占比例大小顺序均表现为：有机结合态 > 残渣态 > 可交换态及碳酸盐结合态 > 铁锰氧化物结合态 > 可溶态。同时，不同类型茶园土壤硒赋存形态也存在差异，土壤可溶态硒含量以潮砂土含量及比例最高，红壤最低；土壤可交换态及碳酸盐结合态硒以紫色土和红壤含量较高，潮砂土最低；铁锰氧化物结合态硒含量以黄壤含量最高，潮砂土最

低；有机结合态硒以黄壤含量最高，潮砂土最低；残渣态硒以红壤含量最高。因此，不同土壤类型由

于成土母质不同，且各自理化性质存在差异，因而使得土壤硒形态的组成也不同。

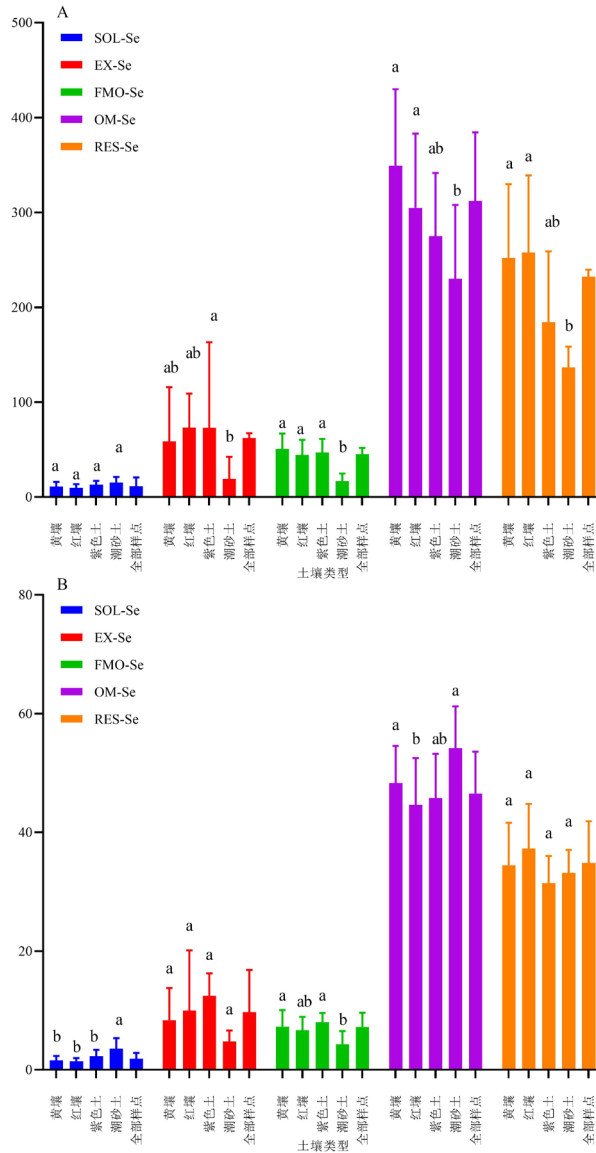


图 1 不同类型茶园土壤不同形态硒含量 (A) 及比例 (B)

Fig. 1 Contents and percentages of various forms of Se in soils of varied types

2.3 土壤理化性质与各形态硒之间的相关性

由表 2 可知，土壤全硒与有机结合态硒和残渣态硒之间呈极显著正相关，土壤有机结合态硒与残渣态硒之间呈极显著正相关，土壤有效硒与其它形态硒之间相关性均不显著。

进一步利用 Spearman 相关性分析，评价土壤理化性质与各形态硒含量之间相关性，结果见表 3。从表中可以看出，土壤全硒与土壤有机质、碱解氮和有效磷之间呈显著正相关，与其它理化性质相关性不显著；土壤有效硒与土壤全氮之间呈显著负相

关，与土壤硝态氮之间呈显著正相关，与其它理化性质相关性不显著；土壤可溶态硒与土壤全氮之间呈显著负相关；土壤可交换态及碳酸盐结合态硒与土壤碱解氮和铵态氮之间呈显著或极显著正相关；土壤铁锰氧化物结合态硒与土壤理化性质之间相关性均不显著；土壤有机结合态硒与土壤有机质、有效磷和有效钾之间呈显著或极显著正相关；土壤残渣态硒与土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和 pH 之间呈显著或极显著正相关，与其它理化性质指标相关性不显著。

表2 土壤各形态硒含量间相关系数

Table 2 Correlation coefficients between various forms of Se

	T-Se	A-Se	SOL-Se	EX-Se	FMO-Se	OM-Se	RES-Se
T-Se	1	-0.232	-0.158	0.13	0.082	0.570**	0.591**
A-Se		1	0.277	-0.082	-0.30	-0.011	-0.072
SOL-Se			1	0.145	-0.242	-0.237	0.01
EX-Se				1	0.124	-0.069	-0.007
FMO-Se					1	0.159	0.067
OM-Se						1	0.474**
RES-Se							1

注：T-Se 全硒；A-Se 有效硒；SOL-Se 可溶态硒；EX-Se 可交换态及碳酸盐结合态；FMO-Se 铁锰氧化物结合态；OM-Se 有机物结合态；RES-Se 残渣态硒，下同。

表3 土壤硒形态与土壤理化性质的 Spearman 相关分析

Table 3 Spearman correlation between form and physicochemical property of Se in soil

	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	有效钾	硝态氮	铵态氮	pH
T-Se	0.572**	0.291	0.344*	0.458**	0.318	-0.262	0.314	0.304
A-Se	-0.264	-0.398*	-0.254	-0.066	-0.032	0.378*	-0.324	-0.25
SOL-Se	-0.15	-0.474**	-0.25	-0.023	-0.089	0.063	-0.174	-0.252
EX-Se	0.259	0.165	0.351*	0.013	0.094	-0.028	0.413*	0.079
FMO-Se	0.015	0.04	0.066	0.242	0.132	0.121	0.125	-0.041
OM-Se	0.405*	0.084	0.125	0.547**	0.346*	0.17	0.084	0.245
RES-Se	0.561**	0.405*	0.347*	0.597**	0.319	-0.232	0.321	0.390*

注：* 表示 $P < 0.05$ ，** 表示 $P < 0.01$ 。

3 结论与讨论

总体而言，我国茶园土壤多数属于缺硒土壤，但是在湖北恩施、陕西紫阳、江西宜春、安徽石台、广西巴马、江苏如皋、广东蕉岭等也存在较大面积的富硒茶园，这些地区形成了中国天然富硒茶的主要产区。本研究中，闽北地区 35 份茶园土壤全硒含量为 $0.22 \sim 1.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ （均值为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），明显高于全国土壤硒背景值（ $0.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）^[26]，低于福建 60 份典型茶园土壤全硒含量（均值为 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）^[20]，达到富硒土壤标准（ $> 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）茶园土壤 29 份，比例为 82.86%，说明该区域土壤硒整体处于较高水平。另外，不同类型的茶园土壤硒含量差异较大，黄壤

和红壤茶园土壤全硒含量均值分别为 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，显著高于潮砂土（ $P < 0.05$ ），黄壤、红壤和紫色土茶园之间差异不显著（ $P > 0.05$ ），这说明在植被类型和耕作措施基本一致的情况下，土壤硒的含量与成土母质、成土过程及气候条件密切相关^[27]。本研究中黄壤和红壤茶园土壤成土母质为凝灰岩和砂砾岩，因而这类高硒母质发育而成的茶园土壤硒含量相对较高^[28]；而潮砂土茶园主要分布于河流两岸的冲刷地，成土母质主要源自于河流的上游地区风化岩石，这类成土母质发育而来茶园土壤硒含量较低。同时，潮砂土茶园表层土壤有机质易受到河流冲刷，有机质含量偏低（ $11.18 \sim 13.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），不利于硒的吸附和固定^[29]，因而其土壤硒含量较低。

硒一旦进入土壤环境中,就会与土壤各组分间(有机质、黏土矿物成分、铁锰氧化物等)不断发生着吸附/解吸、沉淀/溶解、氧化/还原等一系列物理化学反应^[30,31],从而表现出不同的化学形态,不同类型土壤中各形态硒所占比例有所不同。有研究表明,有机结合态硒是土壤中硒的主要存在形态(比例为 43%~60%)^[32],但也有研究认为土壤中硒以残渣态为主(残渣态硒含量超过 60%)^[33],土壤可溶态、可交换态及碳酸盐结合态硒比例含量相对较低(比例低于 5%)^[34]。本研究中,茶园土壤硒以有机结合态为主(均值为 46.56%),其次为残渣态(均值为 34.85%),这与湖北恩施富硒土壤^[35]和浙江富硒土壤^[36]硒形态的研究基本一致。同时,茶园土壤可溶态硒比例仅为 1.84%,这可能与研究区茶园土壤 pH 呈强酸性有关(pH 范围为 3.77~5.20)。在酸性土壤中,硒主要以移动性弱的四价态硒(Se IV)的形式存在^[37],再加之其易被土壤有机质或铁铝氧化物吸附发生络合反应^[38],因而硒有效性降低。另外,土壤中的总硒含量也显著影响着各形态硒含量,由高含硒母岩发育而成的土壤中,其有机结合态硒和残渣态硒含量较高,因而使得凝灰岩发育而成的黄壤茶园土壤中有机结合态硒和残渣态硒含量较高。从土壤各形态硒的相关分析可以看出,土壤全硒与有机结合态硒和残渣态硒之间呈极显著正相关,土壤有机结合态硒与残渣态硒之间呈显著正相关,这也进一步说明了土壤总硒与各形态硒之间相关密切。

有研究表明,硒在土壤中的存在形态及其转化过程受到土壤理化性质的影响,尤其是受到土壤有机质、pH、质地、铁铝氧化物及氧化还原电位等多方面因素的综合作用^[39]。本研究表明,茶园土壤全硒、有机结合态和残渣态硒与土壤有机质含量呈极显著正相关关系,这说明在相同气候条件下,土壤有机质含量是影响土壤全硒含量及有效性的主要因素,但这与以往大多数的研究结果基本一致^[40,41]。同时,土壤可交换态及碳酸盐结合态硒与土壤碱解氮和铵态氮之间呈显著正相关,土壤残渣态硒与全氮和碱解氮之间呈显著正相关,这与土壤碳氮之间存在显著的耦合关系相符^[42]。与其他土壤性质相比,土壤 pH 是控制土壤中硒的溶解—沉淀、吸附—解吸等一系列反应的重要调控因子。本研究中,土壤

pH 与土壤全硒、土壤有效硒和土壤残渣态硒之间呈正相关,这说明茶园土壤酸化降低硒的生物有效性。酸性土壤中硒以四价硒为主,土壤对其吸附量随 pH 值升高而降低^[43],进而增加土壤有效硒含量。在茶树栽培过程中,该区域茶园土壤可以通过施用土壤改良剂或有机肥来提高土壤 pH 和有机质,从而提高土壤硒的生物有效性,进而促进茶叶对硒的吸收利用。另外,土壤全硒、有机结合态和残渣态硒与土壤有效磷之间呈显著正相关,这可能与磷可通过与硒竞争土壤胶体表面的吸附位点有关^[44]。

综合以上可以看出,闽北 35 份茶园土壤全硒总体处于较高水平,达到富硒土壤标准($> 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)茶园土壤 29 份,占比达 82.86%,土壤硒活化率为 8.34%,土壤中硒的有效度较低。不同土壤类型中以黄壤茶园土壤全硒及各形态硒含量最高,潮砂土含量硒含量最低,但其茶园土壤硒活化率最高。茶园土壤硒形态分布规律表现为有机结合态 $>$ 残渣态 $>$ 可交换态及碳酸盐结合态 $>$ 铁锰氧化物结合态 $>$ 可溶态,土壤硒的生物有效性较低。茶园土壤硒形态总体受土壤有机质、氮素形态及 pH 的影响,可有针对性的采取不同栽培措施来提高土壤硒的生物有效性。一方面可以通过冬季基肥期间增施有机肥或土壤改良剂来提高土壤 pH 和有效硒含量,降低土壤硒的吸附和移动,从而提高硒的生物有效性;另一方面还可以通过适当减施磷肥或改变磷肥种类(钙镁磷肥)来提高茶园土壤有效硒含量,配套种植硒富集系数高的茶树品种来生产天然富硒茶,这有待进一步开展田间试验予以验证。

参考文献

- [1] BEN A I, TROUDI A, GAROUIE, *et al.* Protective effects of selenium on methimazole nephrotoxicity in adult rats and their offspring [J]. *Experimental Toxicologic Pathology*, 2011, 63(6):553 - 561.
- [2] JARZYNSKA G, FALANDYSZ J. Selenium and 17 other largely essential and toxic metals in muscle and organ meats of Red Deer (*Cervus elaphus*)—Consequences to human health [J]. *Environment International*, 2011, 37(5):882 - 888.
- [3] RAYMAN M P. Selenium and human health [J]. *The Lancet*, 2012, 379(9822):1256 - 1268.
- [4] 庞晓辰, 王辉, 吴泽赢, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9):1679 - 1685.

- [5] 吴永尧, 彭振坤, 陈建英, 等. 水稻对环境硒的富集和耐受力研究 [J]. 微量元素与健康研究, 1999, 16(4): 42 - 44.
- [6] 梁克红, 卢林纲, 朱宏, 等. 食物中硒的研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(3): 134 - 138.
- [7] 朱燕云, 吴文良, 赵桂慎, 等. 硒在动植物及微生物体中的转化规律研究进展 [J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 189 - 198.
- [8] 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.
- [9] 姚欢, 宗良纲, 孟蝶, 等. 增施磷肥对提高强酸性高硒茶园土壤硒有效性的效果 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 288 - 293.
- [10] 秦玉燕, 时鹏涛, 王运儒, 等. 不同茶树品种硒、汞、砷富集特性研究 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(6): 1396 - 1401.
- [11] 谢珊妮, 宗良纲, 张琪惠, 等. 3种改良剂对强酸性高硒茶园土壤硒有效性调控效果与机理 [J]. 茶叶科学, 2017, 37(3): 299 - 307.
- [12] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态 [J]. 环境化学, 1997, 16(3): 277 - 283.
- [13] 秦海波, 朱建明, 李社红, 等. 环境中硒形态分析方法及研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(2): 180 - 187.
- [14] DINH Q T, WANG M, TRAN T, *et al.* Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach [J]. *Critical Reviews in Environmental Science Technology*, 2019, 49(6): 443 - 517.
- [15] SHAHEEN S M, ALI R A, ABO W, *et al.* Assessing the mobilization of As, Cr, Mo, and Se in Egyptian lacustrine and calcareous soils using sequential extraction and biogeochemical microcosm techniques [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 191: 28 - 42.
- [16] LIU Y L, TIAN X L, LIU R, *et al.* Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: A case study in red beds of sichuan basin, China-ScienceDirect [J]. *Catena*, 2021, 196(24): 104926.
- [17] 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.
- [18] 张青, 王煌平, 孔庆波, 等. 干湿交替灌溉对富硒土壤硒形态及水稻硒积累的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 327 - 331, 338.
- [19] 周超, 胡玉荣, 曾建明, 等. 土壤因子对茶树硒吸收特性的影响 [J]. 茶叶科学, 2015, 35(5): 429 - 436.
- [20] 余文权, 王峰, 陈玉真, 等. 福建省典型茶园土壤硒含量及其影响因素研究 [J]. 茶叶科学, 2020, 40(2): 173 - 185.
- [21] 王峰, 陈玉真, 单睿阳, 等. 大田县茶园土壤和茶叶中硒含量及影响因素分析 [J]. 茶叶学报, 2018, 59(3): 126 - 130.
- [22] 瞿建国, 徐伯兴. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态 [J]. 环境化学, 1997, 16(3): 277 - 283.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤环境背景值研究 [J]. 环境科学, 1992, 13(4): 70 - 75.
- [25] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征 [J]. 中国环境监测, 1984, 7(1): 1 - 6.
- [26] 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.
- [27] JONES G D, DROZ B, GREVE P, *et al.* Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(11): 2848 - 2853.
- [28] 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 等. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源 [J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1813 - 1825.
- [29] 王仁琪, 张志敏, 晁旭, 等. 陕西省安康市西部稻田土壤硒形态特征与水稻富硒状况研究 [J]. 中国地质, 2022, 49(2): 398 - 408.
- [30] 赵妍, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2467 - 2474.
- [31] LIU N, WANG M, ZHOU F, *et al.* Selenium bioavailability in soil-wheat system and its dominant influential factors: A field study in Shaanxi province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770(8): 144664.
- [32] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 上海不同地区土壤中硒的形态分布及其有效性研究 [J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 398 - 403.
- [33] BUJDO M, MULOVA A, KUBOVA J, *et al.* Selenium fractionation and speciation in rocks, soils, waters and plants in polluted surface mine environment [J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(3): 353 - 360.
- [34] 王松山, 梁东丽, 王丹, 等. 基于路径分析的土壤硒形态与土壤性质的关系 [J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823 - 830.
- [35] 朱建明, 秦海波, 李璐, 等. 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.

- [36] 郦逸根, 徐静, 李琰, 等. 浙江富硒土壤中硒赋存形态特征 [J]. 物探与化探, 2007, 31 (2): 95 - 98.
- [37] QIN H B, ZHU J M, SU H. Selenium fractions in organic matter from Se-rich soils and weathered stone coal in selenosis areas of China [J]. Chemosphere, 2012, 86: 626 - 633.
- [38] DINH Q T, LI Z, TRAN T A T, *et al.* Role of organic acids on the bioavailability of selenium in soil: A review [J]. Chemosphere, 2017, 184: 618 - 635.
- [39] LI Z, LIANG D L, QIN P, *et al.* Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review [J]. Geoderma, 2017, 295: 69 - 79.
- [40] 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.
- [41] HUANG C L, SONG M Y, WEI Y C. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2013, 34 (11): 4405 - 4410.
- [42] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异 [J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22 (3): 57 - 60.
- [43] LI Z, MAN N, WANG S, *et al.* Selenite adsorption and desorption in main Chinese soils with their characteristics and physicochemical properties [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15 (5): 1150 - 1158.
- [44] LEE S, DOOLITTLE J J, WOODARD H J. Selenite Adsorption and desorption in selected south Dakota soils as a function of pH and other oxyanions [J]. Soil Science, 2011, 176 (2): 73 - 79.

《茶叶学报》征订征稿启事

《茶叶学报》是由福建省农业科学院主管、福建省农业科学院茶叶研究所主办的茶学类学术期刊。季刊, 1960 年创刊, 2023 年起改为双月刊。主要刊发茶叶科学领域学术和技术研究成果, 为茶叶科技工作者搭建学术信息交流平台, 服务茶叶科学研究工作与学科发展。适合茶叶科技工作者和茶叶爱好者阅读参考。

《茶叶学报》国际标准刊号 ISSN 2096-0220, 国内统一刊号 CN35-1330/S。本刊已列入: 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊 (遴选) 数据库收录期刊、中国知网、《中国学术期刊 (光盘版) 》全文收录期刊、“万方数据”数字化期刊数据库全文收录期刊。本刊热忱欢迎省内外同行投稿, 来稿请用电子邮件发至本编辑部信箱, 请勿一稿两投。来稿不退, 1 个月后若未收到录用通知, 可直接与本刊编辑部联系, 也可通过电子邮件咨询。

本刊自办公开发行, 已参加“全国非邮发报刊联合征订”。2023 年, 每期定价 10.00 元, 全年定价 60.00 元。订费汇款信息如下:

单位全称: 福建省农业科学院茶叶研究所

开户行: 兴业银行总行营业部

银行账号: 117010100100449941

请备注: 茶叶学报

联系电话: 0591-87922801

E-mail: cy6610388@163.com