

史艳芙, 宗良纲, 张艳萍, 等. 茶树根际与非根际土壤硒特性及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1903–1909.
SHI Yan-fu, ZONG Liang-gang, ZHANG Yan-ping, et al. Characteristic differences of selenium in the rhizospheric and non-rhizospheric soils of tea plantations, and its influencing factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1903–1909.

茶树根际与非根际土壤硒特性及其影响因素分析

史艳芙, 宗良纲*, 张艳萍, 沈碧云珠, 杨雨菡

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 茶树根际效应影响茶园土壤的化学组成及特性。通过对江苏宜兴南部丘陵山区富硒茶园根际与非根际土壤采样调查, 比较茶树根际与非根际土壤硒特性, 并探讨其与土壤化学性质的相关性, 为富硒土壤地区开发生产富硒茶叶提供依据。结果表明: 大部分茶园茶树根际土壤全硒、有效硒含量及硒的活化率均高于非根际, 茶树根际对土壤硒具有一定程度的富集与活化效应; 根际土壤全硒含量与非根际土壤全硒含量有关, 而茶树非根际土壤有机质对土壤硒有一定的固持作用, 所固持的硒可作为根际土壤硒的来源, 有利于根际硒的积累。根际土壤有效硒含量与全硒含量呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数达 0.938; 土壤 pH、全磷、速效磷含量未对根际硒的活化效应起主导作用, 但根际 pH 的降低具有降低有效硒含量的趋势。茶树根际特殊的聚铝特性对土壤硒形态具有一定影响, 其中以交换态铝(Ex-Al)对硒特性的影响最为显著, Ex-Al 决定着土壤潜在酸度, 影响土壤硒的有效性, 根际土壤 Ex-Al 的增加使这一影响更显著, 与根际土壤全硒、有效硒含量呈显著负相关($P < 0.05$), 相关系数分别为 -0.646、-0.659。为提高茶树根际土壤对硒素的利用, 应重视茶园土壤酸化、铝毒问题, 增加土壤有机质含量, 同时调控土壤 pH, 降低 Ex-Al 含量, 以利于增加根际土壤全硒、有效硒含量。

关键词: 根际效应; 硒; 活性铝; 茶园土壤

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-1903-07 doi:10.11654/jaes.2017-1656

Characteristic differences of selenium in the rhizospheric and non-rhizospheric soils of tea plantations, and its influencing factors

SHI Yan-fu, ZONG Liang-gang*, ZHANG Yan-ping, SHEN Bi-yunzhu, YANG Yu-han

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The "rhizosphere effect" of plants has been widely understood. However, there are few studies on the characteristics of selenium in the rhizosphere and the bulk soil of tea gardens, where the soils are acidic, selenium-enriched, and aluminum-enriched. In this study, the content and availability of selenium in the rhizosphere and the bulk soil from tea plantations, together with the chemical properties of the soil, were investigated. The contents of total selenium, available selenium, and the activation rate of selenium were higher in the rhizospheric soil, than in the bulk soil. The enrichment and activation of selenium occurred in the rhizospheric soil. The total selenium in the rhizospheric soil was related to that of the non-rhizospheric soil. The organic matter of non-rhizospheric soils could fix soil selenium, the primary source of rhizospheric selenium. The available selenium in rhizospheric soils had a significant positive correlation with the total selenium ($P < 0.01$), with a correlation coefficient of 0.938. The pH, total phosphorus, and available phosphorus had little effects on the activation of rhizospheric selenium. The decrease in soil pH could reduce the available selenium in the rhizospheric soil. In addition, the exchangeable aluminum(Ex-Al) was negatively correlated to the total and available selenium in rhizospheric soils, with correlation coefficients of -0.646 and -0.659, respectively. Our results can provide strategies for the production of selenium-enriched tea.

Keywords: rhizosphere effect; selenium; active aluminum; tea plantation soil

收稿日期: 2017-12-01 录用日期: 2018-02-13

作者简介: 史艳芙(1992—), 安徽桐城人, 硕士研究生, 研究方向为环境质量与食品安全。E-mail: shiyanfu1105@126.com

*通信作者: 宗良纲 E-mail: zonglg@njau.edu.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303106)

Project supported: Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China(201303106)

茶树是一种天然富硒能力较强的植物,在富硒土壤上开发生产富硒茶叶具有很大潜力。茶树根际效应影响土壤的化学组成及特性,关系到土壤中硒素的利用。通常将距离根系几毫米范围内的土壤视为根际土壤,这是土壤受根系自身新陈代谢活动影响最直接、最强烈的区域^[1]。所谓根际效应就是在根际范围内由于土壤微生物种类与数量、pH及氧化还原条件、根系分泌物等因素使植物根系产生对外界环境适应性的反应^[2],由此导致根际与非根际土壤中土壤理化性质与元素分布存在一定差异^[3],这种差异又间接影响根际土壤硒的有效性^[4]与迁移性。硒的化学特性与土壤pH、有机质、磷含量等因素的关系已有报道^[4-5],但在根际土壤中这些因素对硒的影响研究较少。茶树是典型的喜酸性聚铝植物^[5],根际与非根际不同形态铝含量的变化对土壤铝氧化物的吸附能力具有重要意义^[6],而土壤中亚硒酸盐易受铝氧化物吸附^[7],铝的含量与活性很大程度上决定着土壤硒的有效性。此外,活性铝影响茶树根系低分子有机酸的分泌^[8],也可能间接影响硒的有效性。

目前国内外对土壤硒特性研究进展较快^[9-12],但对于植物尤其是茶树根际微环境中的硒特性研究很少。本研究通过对江苏宜兴南部丘陵山区富硒茶园根际与非根际土壤采样调查,比较茶树根际与非根际土壤硒特性,并探讨其与土壤化学性质的相关性,分析茶树根际土壤硒特性的影响因素,旨在为进一步研究茶树根际微环境中硒的环境行为及其生物有效性提供基础,并为生产中提高茶树对土壤硒素资源利用率提供技术依据。

1 材料与方 法

1.1 土壤样品采集

根据文献^[13]及本课题组^[12]前期对江苏较大规模茶场进行实地调查结果:江苏宜兴地区茶园土壤普遍富硒,土壤全硒平均含量为 $0.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于江苏其他地区平均值 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,本研究供试土壤均采自江苏宜兴境内的富硒茶场,包括无锡茶科所、长征茶场、大潮山茶场等8个茶场,选择茶树种植年限相对较长(20年左右)的茶园共10个。每个茶园中间选择周围较为开阔的茶垄,在离茶垄滴水线30~35 cm处,挖除0~20 cm表层土壤以去除杂草根系,在20~30 cm茶树根系较为丰富的土层^[14]挖取茶树根系,轻轻抖去大土块土粒,将剩余在根表几毫米厚的土体用刷子刷下,收集起来。为凸显茶树根际效应,在远

离茶垄树根部1 m左右挖取20~30 cm相对无根系土壤作为非根际土样。每个茶园挖取3~5棵茶树,混合样品,收集根际与非根际土壤各500 g。将土样带回实验室,风干,磨碎,根据检测指标分别过10目、20目、60目和100目筛,保存备用。

1.2 分析测定方法

1.2.1 土壤常规化学指标的测定

参照《土壤农化分析》^[15],土壤pH值测定采用水浸提电位法(水土比2.5:1);有机质含量测定采用浓硫酸-重铬酸钾油浴-容量法;速效磷含量测定采用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ - $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ (1/2 H_2SO_4)浸提,钼锑抗比色法;全磷含量测定采用 HClO_4 - H_2SO_4 消煮,钼锑抗比色法。

1.2.2 土壤硒全量与有效态含量测定

土壤全硒和有效态硒的测定参照瞿建国等^[16]的氢化物发生-原子荧光光度法。

全硒:称取100目土样0.500 g于聚四氟乙烯坩埚中,采用 HNO_3 - HClO_4 - HF 消化,160 °C蒸至白烟冒尽,溶液呈淡黄色黏稠状,用 $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 转移至比色管中,定容至25 mL,取适量溶液沸水浴30 min,将六价硒还原成四价硒,冷却后用原子荧光光度计测定。

有效硒:称取20目土样4.000 g于100 mL离心管中,加入60 mL $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$,30 °C下210 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡90 min提取有效态硒,离心后取10 mL上清液于试管中,加入1 mL 5% $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 沸水浴1 h分解有机硒, $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 条件下沸水浴30 min,将六价硒还原成四价硒,冷却后定容至25 mL,用原子荧光光度计测定。

1.2.3 土壤全铝与活性铝含量测定

全铝:参照范丽新等^[17]的测定方法并改进。称取100目土样0.500 g于聚四氟乙烯坩埚中,采用 HNO_3 - H_2SO_4 - HF 消化,视情况补加少量水和硝酸,蒸至白烟冒尽,溶液呈灰白色黏稠状,冷却后加水溶解,定容至100 mL,用电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

活性铝:参照邵宗臣等^[6]推荐的连续分级提取方法。①交换态铝(Ex-Al):称取风干60目土壤样品1.0 g于50 mL塑料离心管中,加入10 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$,25 °C下210 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡30 min,6000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心分离10 min;②无机态羟基铝(Hy-Al):10 mL $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 溶液振荡30 min,离心分离;③有机配合态铝(Or-Al):20 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 溶液,振荡2 h,离心分离。

样品溶液经电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

1.3 数据处理与分析

应用Excel进行数据处理计算,计算公式为:

$$\text{土壤硒活化率} = \frac{\text{有效硒含量}}{\text{全硒含量}} \times 100\%$$

应用SPSS软件对单独茶园根际与非根际土壤样品进行单因素方差分析并进行*t*检验,对土壤硒特性与化学性质进行Pearson相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 茶树根际与非根际土壤硒含量及活化率的差异

由于茶树根际效应,根际与非根际土壤硒特性存在差异,结果如表1所示。本研究中10个茶园土壤均为天然富硒土壤,茶树根际土壤全硒含量为0.511~1.029 mg·kg⁻¹,非根际全硒含量为0.261~1.019 mg·kg⁻¹。10个茶园中,长征茶场1号根际全硒含量显著低于非根际,新街茶场1号、红岭茶场根际全硒含量与非根际无显著差异,其他茶园根际全硒均显著高于非根际。茶树根际土壤有效硒含量为17.46~106.31 μg·kg⁻¹,非根际有效硒含量为4.78~97.37 μg·kg⁻¹。其中,新街茶场1号、林场茶场茶树根际土壤有效硒含量低于非根际土壤,其他茶园茶树根际有效硒含量均显著高于非根际,因此导致新街1号、林场茶场茶树根际土壤硒活化率也低于非根际,其他茶园根际土壤硒活化率均高于非根际。综上所述,大部分茶树根际土壤全硒、有效硒含量及活化率均大于非根际,茶树根际对土壤硒表现出一定程度的富集与活化效应,与秦恩华等^[18]的研究结果相似。

2.2 硒的根际效应与土壤化学性质的关系

茶树根际与非根际土壤化学性质差异可能是影

响根际土壤硒富集与活化的重要因素(部分化学性质测定结果见图1)。由于茶树的泌酸特性,有7个茶园茶树根际土壤pH显著低于非根际土壤,pH低于4.5的茶园中茶树根际与非根际土壤pH无明显差异,如红岭茶场和林场茶场。本研究所调查区域茶园土壤酸化较为严重^[9],根际土壤pH的变化是茶园土壤酸化的内因表现。除长征茶场1号,其他茶园中茶树根际土壤有机质含量显著高于非根际,这是由于茶树根系分解、根系分泌物以及根际微生物的作用^[20]。除了灵谷茶场,大部分茶场的茶树根际全磷含量显著高于非根际,且除了林场茶场,速效磷含量也符合这一规律,与周肇君^[21]的研究结果相似。总体来说,本研究中茶树根际土壤pH低于非根际,根际土壤有机质、全磷、速效磷含量高于非根际。

通过对茶树根际与非根际土壤全硒、有效硒与化学性质的相关分析,探究土壤化学性质对茶树根际与非根际硒特性的影响,结果见表2。无论茶树根际还是非根际土壤,有效硒与pH均呈正相关但未达到显著水平,说明随着pH的降低土壤有效硒含量具有降低的趋势,与戴慧敏等^[22]的研究结果一致。本研究所选择的供试茶园土壤本体pH值较低,一定程度上削弱了这种效应,在pH较高的土壤中,pH的降低对有效硒的抑制更为明显^[23]。根际土壤全硒与pH呈现弱正相关,有研究者^[5,23]从吸附解吸的角度分析,pH 4.5~6.0范围内,随pH降低,SeO₃²⁻与吸附质间的亲和力越强,硒的迁移性越易受黏粒矿物与有机质固定的影响而降低,由此可能导致土壤硒由非根际向根际迁移积累呈现减少趋势。在本研究条件下,pH未表现出对硒根际效应的主导作用,但茶园土壤酸化具有降低茶

表1 茶树根际与非根际土壤全硒、有效硒含量及活化率

Table 1 Total selenium, available selenium content and activation rate in rhizosphere and bulk soil of tea garden

茶园	全硒/mg·kg ⁻¹			有效硒/μg·kg ⁻¹			活化率/%		
	R	S	R/S	R	S	R/S	R	S	R/S
茶科所	0.800±0.013a	0.708±0.022b	1.13	48.90 ±3.23a	26.94±1.29b	1.82	6.11	3.51	1.74
长征1	0.853±0.010b	1.019±0.010a	0.84	65.51±2.54a	15.45 ±3.40b	4.24	7.68	1.52	5.05
长征2	1.029±0.014a	0.952 ±0.023b	1.08	106.31±2.33a	97.37±5.70b	1.09	10.33	10.23	1.01
大潮山	0.511±0.019a	0.261 ±0.009b	1.96	17.46±2.38a	4.78±0.60b	3.66	3.42	1.83	1.87
新街1	0.788±0.025a	0.808±0.074a	0.98	44.26±4.07b	63.15±3.91a	0.70	6.04	7.82	0.77
新街2	0.620±0.026a	0.451±0.020b	1.37	25.95±1.11a	18.16±1.37b	1.43	4.19	4.03	1.04
灵谷	0.750 ±0.054a	0.600±0.022b	1.25	61.19±0.44a	53.12±5.08b	1.15	8.16	7.59	1.08
阳羨	0.654±0.008a	0.538±0.006b	1.22	33.66±4.10a	16.45±0.63b	2.05	5.97	3.06	1.95
红岭	0.778±0.034a	0.748±0.004a	1.04	52.74±1.45a	12.04±1.77b	4.38	6.78	1.61	4.21
林场	0.678±0.021a	0.601±0.034b	1.13	25.75±2.52b	30.21±0.78a	0.85	3.80	4.31	0.88

注:R表示根际土壤;S表示非根际土壤;R/S表示根际与非根际比值;同一茶园根际与非根际的字母不同表示差异达到P<0.05显著水平。下同。

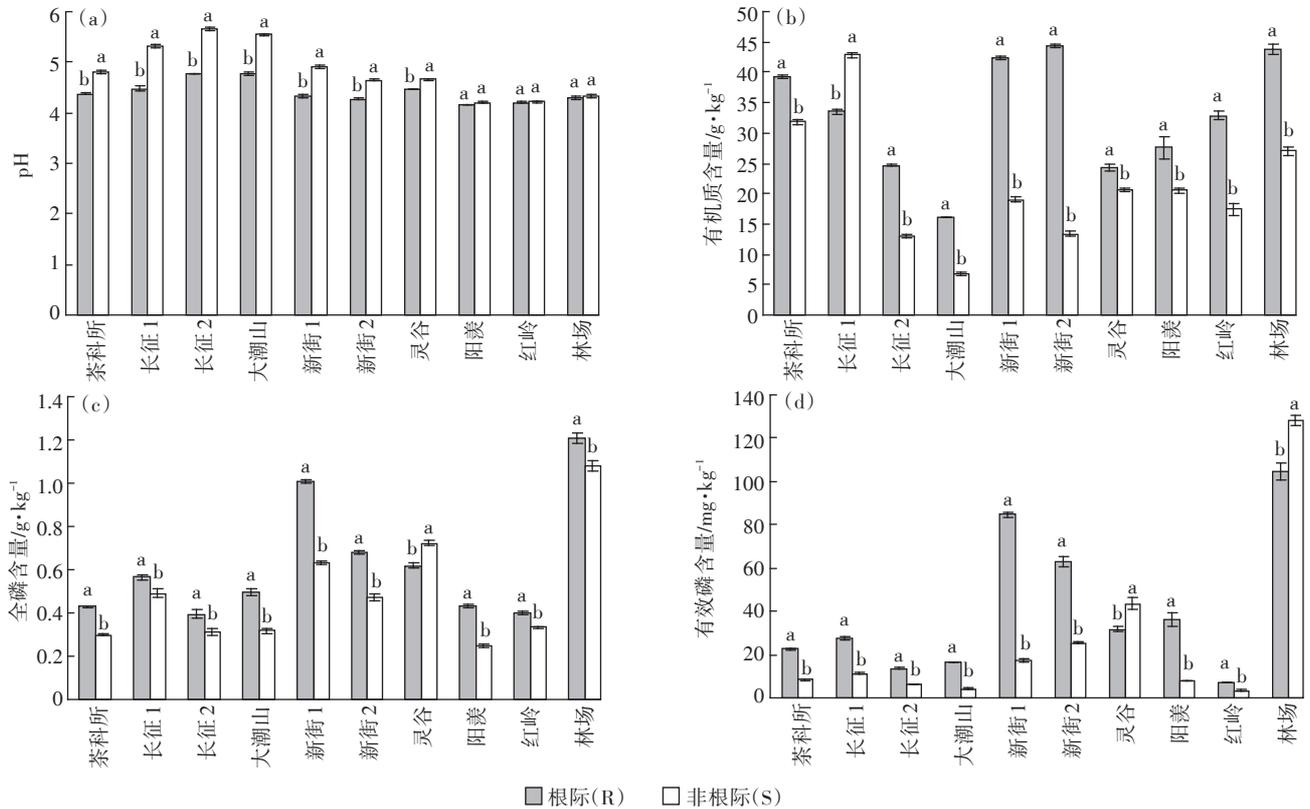


图1 茶树根际与非根际土壤化学性质差异

Figure 1 Chemical properties in rhizosphere and bulk soil of tea garden

表2 茶树根际与非根际土壤全硒、有效硒与土壤性质相关性分析

Table 2 Correlation analysis of total selenium, available selenium and soil properties in rhizosphere and bulk soil of tea garden

项目		pH	有机质	全磷	速效磷	全硒
全硒	R	0.312	0.052	-0.203	-0.282	—
	S	0.166	0.636*	0.130	-0.002	—
有效硒	R	0.416	-0.129	-0.384	-0.445	0.938**
	S	0.385	-0.169	0.120	0.019	0.535

注: $n=10$, *, **分别表示显著差异水平为0.05、0.01, 相关系数临界值分别为0.632、0.765。下同。

树根际土壤全硒、有效硒含量的趋势, 导致根际土壤富集率降低, 应予以重视。

茶树非根际土壤全硒与有机质呈显著正相关关系, 相关系数为0.636, 而在根际土壤中二者未呈现相关性, 可能是由于有机质组分不同所致。有机质对硒的作用具有二重性, 一方面通过吸附和络合作用表现出对硒的固定, 另一方面, 土壤有机质可促进有机硒的形成, 增加硒的有效性^[24]。本研究中茶树根际与非根际土壤有效硒与有机质几乎没有相关性, 有机质主要表现出对非根际土壤硒的固持作用, 长征茶场1号

非根际土壤有机质含量显著高于根际, 或许这正是其非根际全硒高于根际的原因之一。

非根际土壤硒与磷未呈现相关关系, 而根际土壤有效硒与全磷、速效磷含量呈负相关但未达到显著水平。研究表明^[25], 土壤中 PO_4^{3-} 可以通过与 $Se(IV)$ 竞争土壤胶体表面的吸附位点而减少对 $Se(IV)$ 的吸附, 增加硒的有效性, 但本研究中茶树根际磷与硒的相互关系具有相反趋势, 相关系数未通过显著性检验, 其原因有待进一步探究。新街茶场1号根际与非根际全磷、速效磷含量差异均最大, 可能这是导致其根际有效硒低于非根际的原因。

土壤有效硒与全硒呈极显著正相关, 并在根际土壤中达到极显著水平, 相关系数为0.938, 说明茶树根际土壤有效硒含量主要取决于全硒含量。这与王玉荣等^[26]的结果一致, 土壤全硒是有效硒的来源和基础。研究表明^[27]根际土壤营养元素含量取决于非根际土壤溶液中离子浓度以及向根迁移速率, 而土壤溶液中离子浓度又很大程度上受元素全量的影响。实际上, 本研究中茶树根际土壤全硒与非根际全硒也具有极显著的正相关性, 相关系数为0.919。

2.3 硒的根际效应与土壤铝特性的关系

图2为茶树根际与非根际土壤活性铝、全铝含量差异。除长征1号茶园根际Hy-Al和Or-Al显著低于非根际,林场茶场根际Or-Al显著低于非根际,其他茶园根际活性铝和全铝含量均明显高于非根际或无显著差异,与苗宵霖^[28]的研究结果相似。土壤pH影响土壤溶液中铝的形态,随着pH降低,Ex-Al的比例增加,而羟基态铝和腐植酸铝所占比例减少^[29],其中Ex-Al决定着土壤的交换性酸度,同时制约土壤pH值。除此之外,土壤有机质的增加也会增加Or-Al的含量^[30],根际土壤中根系分泌物可促进土壤中铝向腐植酸态铝转化^[28],由此导致茶树根际土壤铝的富集,Ex-Al、Hy-Al、Or-Al三种活性铝含量也具有一定程度的增加。

通过分析茶树根际与非根际土壤全硒、有效硒与土壤铝的相关关系,探究土壤活性铝形态及含量对根际土壤硒特性的影响,结果见表3。茶树根际和非根际全硒与Ex-Al均呈负相关,在根际土壤中达到显著水平,相关系数为-0.646,有效硒同样与Ex-Al呈负相关,并且在根际土壤中达到显著水平,相关系数为-0.659。这说明随Ex-Al的增加,土壤全硒、有效硒

含量均具有下降趋势,并且在根际土壤中这种关系更为显著。有研究表明^[6]土壤中Ex-Al与黏土矿物存在负相关性,土壤Ex-Al的增加可能减少黏土矿物组分,导致土壤对硒的吸附能力减弱,从而造成全硒含量的下降。Ex-Al与土壤pH密切相关,其对土壤硒的影响与前文pH对土壤硒的影响一致,茶树根际Ex-Al的增加相应加剧了这一影响。此外,研究表明^[31]Al³⁺可能与SeO₃²⁻生成Al₂(SeO₃)₃难溶物,影响硒的有效性。与pH一样,在酸性茶园土壤环境中Ex-Al未表现出对硒根际效应的主导作用,但具有降低根际土壤全硒与有效硒含量的趋势。

Hy-Al主要是羟基铝和氢氧化铝,具有极强的吸附能力,非根际土壤中,Hy-Al与全硒含量呈显著正

表3 茶树根际与非根际土壤全硒、有效硒与铝形态的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of total selenium, available selenium and forms of aluminum in rhizosphere and bulk soil of tea garden

项目		Ex-Al	Hy-Al	Or-Al	全Al
全硒	R	-0.646*	0.192	0.036	-0.123
	S	-0.502	0.635*	0.421	0.058
有效硒	R	-0.659*	0.076	-0.173	-0.166
	S	-0.458	0.201	0.009	0.281

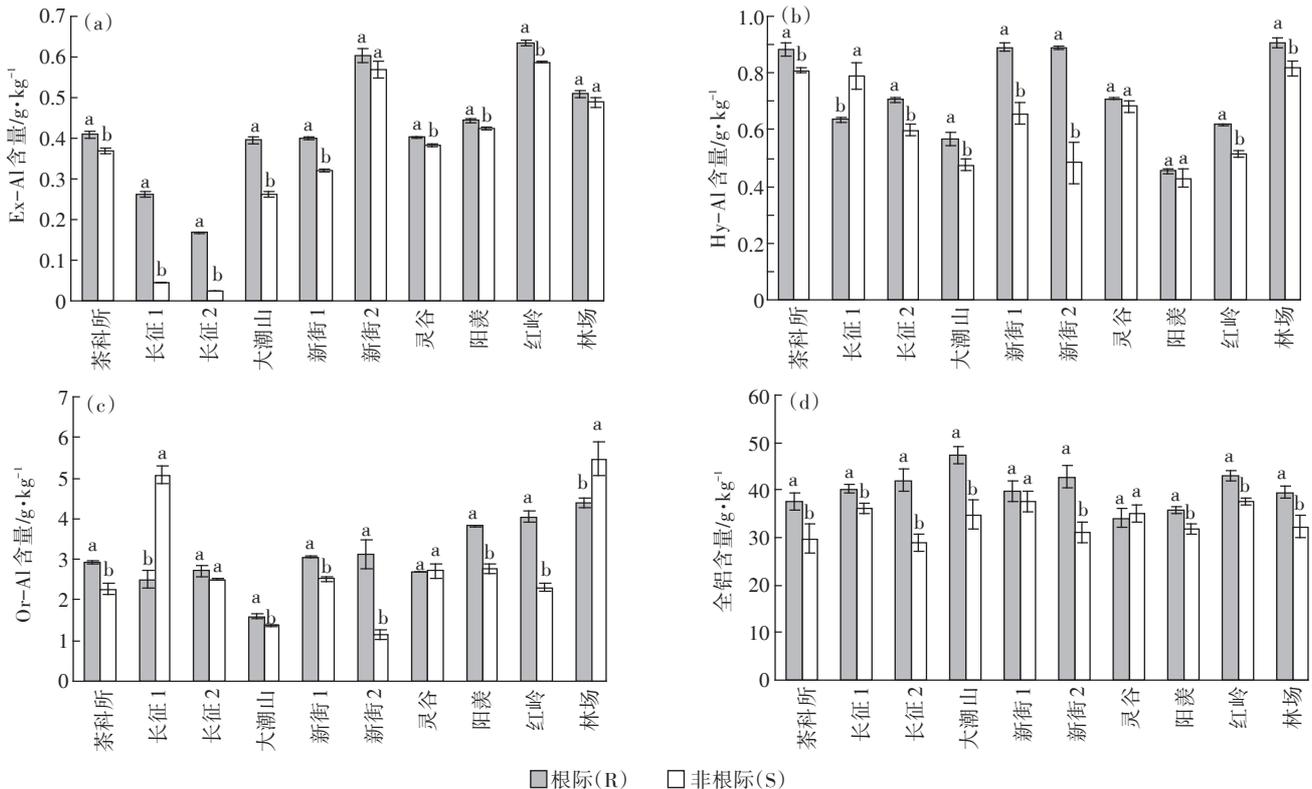


图2 茶树根际与非根际土壤活性铝、全铝含量差异

Figure 2 Content difference of aluminum in rhizosphere and bulk soil of tea garden

相关,相关系数为0.635,而根际土壤中未呈现这一规律,可能是由于根系分泌物的影响,这一效应与前文中有机质对非根际硒的固持作用类似。Or-Al与土壤有机质含量密切相关,其与土壤硒的关系可看作是有机质的影响结果。实际生产中,茶园管理施用有机肥以及土壤酸化调控,以降低Ex-Al含量,促进铝形态向Hy-Al和Or-Al转化,将有助于提高茶园土壤对硒的固持作用,增加根际土壤全硒和有效硒含量,并缓解铝毒。茶树根际和非根际土壤全硒、有效硒与土壤全铝未呈现相关性。这与童建川^[24]对重庆紫色土壤硒的研究结果相似,土壤中金属氧化物对硒的吸附受活性态金属制约,而与金属全量几乎没有相关性。

以全硒含量R/S值和硒活化率R/S值分别表征茶树根际对硒的富集和活化效应,其与土壤铝的相关分析见表4。其中,以非根际Hy-Al对根际效应的影响最为明显,与根际富集效应呈现负相关,与活化效应呈现正相关,但均未达到显著水平,非根际Hy-Al可能是通过影响非根际全硒含量而使根际表现出对硒的富集趋势,同时具有降低活化效应的趋势。由于研究样本较少,相关系数未通过显著性检验,存在不确定性,有待进一步探究。

3 结论

(1)茶树根际土壤全硒、有效硒含量及硒的活化率高于非根际土壤,茶树根际表现出对硒一定程度的富集与活化效应。

(2)根际土壤全硒含量与非根际土壤全硒含量有关,而茶树非根际土壤有机质对土壤硒有一定的固持作用,所固持的硒可作为根际土壤硒的来源,有利于根际硒的积累。根际有效硒含量主要取决于根际全硒含量,但根际pH降低时,有效硒含量也有降低趋势。

(3)土壤Ex-Al抑制土壤全硒与有效硒含量,根际Ex-Al的增加使这一影响更为显著。Hy-Al、Or-Al主要与非根际全硒含量有关,间接影响土壤硒在根际的富集。增加土壤有机质含量,同时调控土壤pH,降低Ex-Al含量,促进土壤铝向Hy-Al、Or-Al转化,将有

利于增加根际土壤全硒、有效硒含量,并缓解铝毒。

参考文献:

- [1] 马 斌,周志宇,张彩萍,等.超旱生灌木根际土壤磷的含量特征[J].草业学报,2005,14(3):106-110.
MA Bin, ZHOU Zhi-yu, ZHANG Cai-ping, et al. The character of phosphorus concentrations in rhizosphere soil of super-xerophytic shrubs[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3):106-110.
- [2] 曾曙才,苏志尧,陈北光,等.植物根际营养研究进展[J].南京林业大学学报,2003(6):79-83.
ZENG Shu-cai, SU Zhi-yao, CHEN Bei-guang, et al. A review on the rhizosphere nutrition ecology research[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2003(6):79-83.
- [3] Se'guin V, Cagnon C, Courchesne F. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1):1-17.
- [4] Roberta P M, Vico M P L, Claudia C W, et al. Correlation between the natural levels of selenium and soil physicochemical characteristics from the Jequitinhonha Valley (MG), Brazil[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 10:195-202.
- [5] 严 佳,宗良纲,杨 旒,等.不同pH条件和P-Se交互作用对茶园土壤Se(IV)吸附行为的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(5):935-942.
YAN Jia, ZONG Liang-gang, YANG Ni, et al. Effects of pH and phosphate on Se(IV) adsorption by tea garden soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):935-942.
- [6] 邵宗臣,何 群,王伟君.红壤中铝的形态[J].土壤学报,1998,35(1):38-48.
SHAO Zong-chen, HE Qun, WANG Wei-ju. Forms of aluminum in red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1):38-48.
- [7] 徐文坡,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 Wen-po, ZHU Jian-ming, QIN Hai-bo, et al. A study on selenium oxyanions adsorbed onto iron/manganese/aluminum oxides[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(3):357-365.
- [8] 刘腾腾,郜建红,宛晓春,等.铝对茶树根细胞膜透性和根系分泌有机酸的影响[J].茶叶科学,2011,31(5):458-462.
LIU Teng-teng, GAO Hong-jian, WAN Xiao-chun, et al. Impacts of aluminum on root cell membrane permeability and organic acids in root exudates of tea plant[J]. *Journal of Tea Science*, 2011, 31(5):458-462.
- [9] Mervi Soderlund, Juhani Virkanen, Stellan Holgersson, et al. Sorption and speciation of selenium in boreal forest soil[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 8(6):220-231.
- [10] Tomasz C, Grzegorz K, Monika K G, et al. Aluminium and selenium content in soils of industrial area in opole (Southern Poland) [J]. *Archives of Environmental Protection*, 2011(1):25-32.

表4 茶园土壤全硒含量R/S值、硒活化率R/S值与铝形态的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of R/S value and forms of aluminum in rhizosphere and bulk soil of tea garden

项目	Ex-Al		Hy-Al		Or-Al		全Al	
	R	S	R	S	R	S	R	S
全硒R/S	0.146	0.162	-0.244	-0.520	-0.413	-0.497	0.481	-0.118
硒活化率R/S	0.089	-0.208	0.057	0.489	-0.104	0.141	0.169	0.463

- [11] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
GUO Yu. Geochemistry of selenium in Enshi area and experimental study of selenium-enriched crop cultivation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [12] 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.
ZHAO Yan, ZONG Liang-gang, CAO Dan, et al. Distribution and availability fo selenium in typical tea garden of Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2467-2474.
- [13] 廖启林, 华明, 冯金顺, 等. 苏南局部富硒土壤及其天然富硒茶叶初步研究[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 347-353.
LIAO Qi-lin, HUA Ming, FENG Jin-shun, et al. Natural Se-rich tea in local Se-rich soils in southern Jiangsu[J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 347-353.
- [14] 杜霞飞, 宗良纲, 张琪惠, 等. 基于空间差异的有机茶园环境适宜性评价的土壤采样方法[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 150-157.
DU Xia-fei, ZONG Liang-gang, ZHANG Qi-hui, et al. Soil sampling methods for evaluation of environmental suitability in organic tea garden based on spatial difference[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 150-157.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005.
- [16] 瞿建国, 徐柏兴, 龚书椿. 氢化物发生-无色散原子荧光光度法测定土壤有效态硒和总硒[J]. 土壤通报, 1998, 29(1): 47-53.
QU Jian-guo, XU Bai-xing, GONG Shu-chun. Determination of available selenium and total selenium in soil by hydride generation-non dispersive atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(1): 47-53.
- [17] 范丽新, 王杰. 电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定铜磁铁矿中的Al、Ni、Cu、Mg、Pb、Zn 6种元素[J]. 中国无机分析化学, 2015, 5(1): 53-55.
FAN Li-xin, WANG Jie. Simultaneous determination of Al, Ni, Cu, Mg, Pb and Zn in coper magnetite by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2015, 5(1): 53-55.
- [18] 秦恩华, 杨兰芳. 烤烟苗期含硒量和根际硒形态的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 506-512.
QIN En-hua, YANG Lan-fang. Selenium content in seedling an selenium forms in rhizospheric soil of *Nicotiana tabacum* L.[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3): 506-512.
- [19] 张倩, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型差异土壤酸化趋势及其制约因素研究[J]. 土壤, 2011, 43(5): 751-757.
ZHANG Qian, ZONG Liang-gang, CAO Dan, et al. Study on soil acidification and its restrictive factors of typical tea garden in Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2011, 43(5): 751-757.
- [20] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. 2nd Edition. San Diego: Academic Press, 1995.
- [21] 周华君. 植物根系分泌物对难溶磷钾及土壤硒的活化作用研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2001.
ZHOU Jian-jun. A study on the activating reaction of root exudates on the insoluble phosphorus potassium and the selenium in the soil[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2001.
- [22] 戴慧敏, 宫传东, 董北, 等. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1356-1364.
DAI Hui-min, GONG Chuan-dong, DONG Bei, et al. Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1356-1364.
- [23] 周鑫斌, 于淑慧, 谢德体. pH和三种阴离子对则色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1069-1077.
ZHOU Xin-bin, YU Shu-hui, XIE De-ti. 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.
- [24] 童建川. 重庆紫色土硒分布、迁移富集及影响因子研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
TONG Jian-chuan. The distribution, migration and enrichment and influencing factors of Se in purple soil of Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [25] 刘勤, 曹志洪. 磷硒交互作用对水稻硒吸收积累的影响[J]. 扬州大学学报, 2003, 24(4): 67-70.
LIU Qin, CAO Zhi-hong. Interactions between selenium and phosphorus in paddy soil an its effects on selenium uptake and accumulation in rice[J]. *Journal of Yangzhou University*, 2003, 24(4): 67-70.
- [26] 王玉荣, 贾玮, 胡承孝, 等. 油菜硒的富集特征及其与土壤硒的关系[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 336-342.
WANG Yu-rong, JIA Wei, HU Cheng-xiao, et al. Characteristics of selenium accumulation in rape and the relationships between concentration of selenium in plant and in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 336-342.
- [27] 王震宇, 赵芳芳, 张保国, 等. 黄河三角洲湿地盐生植物氮和磷的根际效应[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 33-38.
WANG Zhen-yu, ZHAO Fang-fang, ZHANG Bao-guo, et al. Rhizosphere effect of three halophytes in the Yellow River Delta on nitrogen and phosphorus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(10): 33-38.
- [28] 苗霄霖. 茶树根际分泌物对土壤中磷、铝形态转化机制研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
MIAO Xiao-lin. Effect of tea root secretion on the transformation mechanism of phosphorus and aluminum forms in the soil[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [29] 苏有健, 廖万有, 王焯军, 等. 单宁酸对不同pH茶园土壤中活性铝形态分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1): 22-33.
SU You-jian, LIAO Wan-you, WANG Ye-jun, et al. Effects of acid on active aluminum forms distribution in tea garden soils with different pH[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(1): 22-33.
- [30] 王水良, 王平, 王趁义, 等. 马尾松酸性根际环境中铝的化学行为[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(4): 523-528.
WANG Shui-liang, WANG Ping, WANG Chen-yi, et al. Chemical behavior of aluminum in the acidic rhizosphere of *Pinus massoniana* lamb[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2010, 16(4): 523-528.
- [31] 王琳, 徐冰峰, 张梅, 等. 铝硒共沉淀体系除硒影响因素研究[J]. 昆明理工大学学报, 2014, 29(6): 104-107.
WANG Lin, XU Bing-feng, ZHANG Mei, et al. Study on factors of removing selenium by using aluminum-selenium co-precipitation system[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 2014, 29(6): 104-107.