

不同调控措施在强酸性高硒茶园土壤中的应用研究

赵 妍¹, 马爱军², 宗良纲^{1*}, 汪润池¹, 郭 悦¹, 何任红²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212400)

摘要:通过田间试验,研究了生物肥和粉煤灰、秸秆干馏液配合施用共 4 种不同调控措施对强酸性高硒茶园土壤上茶叶硒含量、土壤理化性质和土壤硒有效性的影响。结果表明,4 种调控措施不同程度地提高了土壤中有效硒含量和茶叶硒含量,由高到低依次为:生物肥处理>粉煤灰-秸秆干馏液-生物肥复合处理>粉煤灰-生物肥复合处理>秸秆干馏液-生物肥复合处理;对土壤 pH 值提高幅度的大小次序为:粉煤灰-秸秆干馏液-生物肥复合处理>粉煤灰-生物肥复合处理>生物肥处理>秸秆干馏液-生物肥复合处理;另外,4 种不同措施对改善酸化茶园土壤其他理化性质也呈现不同效果,其中秸秆干馏液-生物肥复合处理的综合效果较差。研究结果对于江苏高硒地区土壤中硒素的有效利用和加快发展富硒茶产业具有实际的参考价值和重要的指导意义。

关键词:强酸性土壤;改良措施;有效硒;茶叶硒;理化性质

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2306-07

Application of Different Adjustment Measures in Highly Acidic Se-rich Soil in Tea Garden

ZHAO Yan¹, MA Ai-jun², ZONG Liang-gang^{1*}, WANG Run-chi¹, GUO Yue¹, HE Ren-hong²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China)

Abstract:A field experiment was carried out to study the effects of 4 adjustment measures to the quality of highly acidic Se-rich soil of tea garden. The adjustment was achieved by the application of amendments made up from the following components: biological fertilizer, fly ash, and straw dry distillation liquid results showed that all of the 4 adjustment measures improved the available Se content in soil as well as the Se content in tea leaves. The order of the effectiveness was biological fertilizer>fly ash-straw dry distillation liquid-biological fertilizer>fly ash-biological fertilizer>straw dry distillation liquid-biological fertilizer. Application of these amendments also improved the pH of the soil that had been acidified due to tea tree culture. The order was fly ash-straw dry distillation liquid-biological fertilizer>fly ash-biological fertilizer>biological fertilizer>straw dry distillation liquid-biological fertilizer. The effects of the amendments on the overall soil quality of the tea garden varied. Straw dry distillation liquid-biological fertilizer had the least positive effect. Results of this research provide a reference to take the advantage of Se-rich soil in Jiangsu and the development of Se-rich tea industry.

Keywords: highly acid soil; adjustment measures; available selenium; Se in tea leaves; physicochemical properties

近年来,富硒茶倍受人们追捧,它的优点是集硒和茶多酚、维生素 C、维生素 E 等多种抗氧化成分于一体,对防止人体生物膜受过氧化物的伤害、预防肿瘤等疾病的发生均有一定的作用^[1]。过去 20 年中,富硒茶的研究取得了一定成绩,但局限于土壤施用硒肥

和叶面喷施亚硒酸钠,对调控茶树吸收土壤硒最适宜的环境条件的研究还鲜有报道。

目前,江苏省茶园土壤酸化现状十分严峻。本课题组 2008—2010 年间对江苏省 21 个典型茶场调查结果显示:所有被调查的茶园土壤 pH 值均低于茶树生长最适值 pH5.5,其中 pH 值低于 4.0 的茶园比例高达 42.8%。土壤酸性过强不仅会导致茶叶产量降低^[2],茶叶中重金属如铅及氟含量升高^[3-7],还影响茶树对土壤养分的吸收,其中也包括对元素硒的吸收^[8]。土壤中能够被茶树直接吸收利用的硒是有效硒,它是影响茶叶硒含量的主要因素^[9]。有文献报道^[10]在江苏南

收稿日期:2011-05-14

基金项目:江苏省“六大人才高峰”项目“土壤环境条件对农产品硒含量及形态分布的影响”;江苏省科技支撑计划(BE2009313-2);江苏省农业科技自主创新资金(CX(11)3042)

作者简介:赵 妍(1987—),女,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为环境质量与食品安全。E-mail:zhaoyan19871111@126.com

* 通讯作者:宗良纲 E-mail: zonglg@njau.edu.cn

部溧阳-宜兴一带低山丘陵地区存在较大面积的富硒土壤,并希望在当地开发富硒茶叶。本课题组前期对江苏省 21 个典型茶场的监测分析结果显示:茶园土壤有效硒与土壤 pH 值呈极显著正相关关系,唐玉霞等^[8]也证明麦田土壤有效硒含量与土壤 pH 呈相关关系。虽然茶树具有较强的硒富集能力,但江苏省茶园土壤严重酸化使得本来具有资源优势的高硒地区发展富硒茶产业面临现实的难题。本研究基于江苏省茶园土壤严重酸化的大背景,通过田间试验的方法,采取 4 种不同调控措施改良严重酸化的茶园土壤,探讨其对调控富硒土壤的理化性质、提高土壤硒有效性和茶叶硒含量的实际效果,旨在为改善江苏省严重酸化的茶园土壤环境、提高富硒地区土壤中硒的有效利用率和加快富硒茶产业的发展提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验基地位于江苏省宜兴市灵谷有机茶场,土壤类型为棕红壤。该茶场土壤全硒含量为 1.44 mg·kg⁻¹,此值大大高于全国土壤硒含量平均值 0.29 mg·kg⁻¹^[11]和江苏省土壤表层硒含量平均值 0.22 mg·kg⁻¹^[12]。依据谭见安等^[13]从我国克山病带和低硒环境的研究划分的我国硒元素生态景观的界限值,处于高硒水平(0.450~3.000 mg·kg⁻¹)。据文献报道^[10],当地富硒的煤系地层、含泥炭质粉砂岩及其风化残留产物是当地富硒土壤的基本物质来源,特定的区域地质背景是控制当地土壤大面积相对富硒的关键因素。但该茶场土壤有效硒含量为 44.69 g·kg⁻¹,土壤中硒的活化系数仅为 3.10%。田间试验供试土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 供试材料

粉煤灰,取自宜兴某燃煤电厂,含硒量为 30.71

mg·kg⁻¹;秸秆干馏馏出液(以下简称馏出液)由江苏恒太能源科技发展有限公司提供,主要是由水、醇、酸、酚和酮醛类有机物组成,以酸类化合物的含量最高;“爸爱我”生物肥(广谱型)由江苏新天地生物肥料工程中心提供,其有效成分是抗病菌种有效活菌数和有机质,有效活菌数≥0.5 亿个·g⁻¹,有机质≥25%,NPK≥6%,游离氨基酸+活性小肽≥4%,速效氮 847.1 mg·kg⁻¹,pH 7.16,含水量 28.3%。

1.3 试验方法

田间试验共设置 5 种不同处理:(1)对照(不采取改良调控处理的常规管理方式,CK);(2)施用粉煤灰-“爸爱我”生物肥复合处理(FA+Bio):7.5/0.08 kg·m⁻²;(3)施用秸秆干馏液-“爸爱我”生物肥复合处理(SD+Bio):12/0.08 L·m⁻²/L·kg·m⁻²;(4)施用粉煤灰-秸秆干馏液-“爸爱我”生物肥复合处理,(FA+SD+Bio):7.5/2.25/0.08 kg·m⁻²/L·m⁻²/kg·m⁻²;(5)单施“爸爱我”生物肥处理(Bio):0.08 kg·m⁻²。每种处理方法均设 3 个重复,共设 15 个小区。各处理小区面积为 45 m²(包括 3 个茶垄,9 m 长),与茶垄方向平行的小区之间分别设置长 3 m 的保护区,与茶垄方向垂直的小区之间空出一个茶垄作为保护区。施用改良材料的时间与茶园秋季施肥的时间同步,2010 年 10 月下旬将改良材料分别条施于行间茶垄滴水线内侧预先犁好的 20 cm 左右的沟中,施入后先与土混和再用土覆盖。

试验开始前在各小区内多点采集混合土样,分析后作为背景数据。改良调控措施实施后于次年即 2011 年春茶采摘期再进行土样和茶叶样品的采集分析。各小区土样采集在中间茶垄两边的滴水线内侧分设 7~8 个采样分点采集表层混合样(0~20 cm)。土样磨细分别过 1 mm(20 目)筛和 0.149 mm(100 目)筛,测定土壤基本理化性质、土壤有效硒含量和土壤全硒量。各小区茶叶样品单独采集并测定其硒含量。

表 1 供试茶园土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested tea garden soil

试验茶场	pH(H ₂ O)	有机质含量/g·kg ⁻¹	粘粒含量/%	CEC/cm ^{ol} ·kg ⁻¹	土壤质地
宜兴灵谷	3.99	29.40	32.66	12.56	中壤

表 2 供试改良材料的相关性质
Table 2 Some properties of tested amendments

供试改良材料	pH(H ₂ O)	有机质/g·kg ⁻¹	交换性 K ⁺	交换性 Na ⁺	交换性 Ca ²⁺	交换性 Mg ²⁺	CEC
			cm ^{ol} ·kg ⁻¹				
粉煤灰(FA)	10.32	62.18	0.93	1.21	47.15	2.07	2.48
秸秆干馏液(SD)	8.02	—	—	—	—	—	—

1.4 测定项目与方法

土壤基本理化性质测定:分析方法基本参照《土壤农化分析》^[14],其中土壤有机质测定采用外加热重铬酸钾氧化-容量法;土壤阳离子交换量测定采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵交换法;交换性 K^+ 和 Na^+ 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵交换-火焰光度法;交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵交换-原子吸收分光光度法;潜性酸(土壤交换性氢、交换性铝)的测定采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 中和滴定法;土壤 pH(H_2O)测定采用水浸提电位法。

土壤有效硒含量测定:参照瞿建国等^[15]推荐的测定方法,称取 4.000 g 左右的土壤样品,以 1:5 的固液比,用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 溶液浸提土壤中有有效态硒,取 10 mL 浸出液置于 50 mL 石英烧杯中。加入 $4.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 0.5 mL 和 5% $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1 mL ,摇匀,并置于沸水浴中加热 1 h ,分解浸出液中的有机质,并把有机硒转化为 Se^{6+} ,然后加入 3% $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 1 mL ,继续加热 30 min 。再加入 7.5 mL 浓 HCl 后加热 15 min ,冷却并用高纯水稀释至 25 mL ,摇匀,最后用原子荧光光度计测定。

茶叶中硒含量的测定:参照马作江等^[16]推荐的测定方法,取茶叶样品在烘箱中烘干后粉碎成粉状后,准确称取 1.00 g 茶叶样品于消化管中,加入 10 mL 混合酸溶液($\text{HNO}_3:\text{HClO}_3=4:1$),放置过夜,将消化管置于加热板上 160°C 加热,且要及时补加混合酸,以免蒸干发生爆炸危险,加热至溶液呈清亮无色时。为消化完全,继续加热至剩余体积 $2\sim 3 \text{ mL}$,加入 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 10 mL ,样品中的硒要用足量盐酸还原,以免还原不彻底。再加热至溶液变为清亮并伴有白烟出现,取下并转移至 25 mL 容量瓶中,加 2 mL HCl 后用超纯水定容至刻度,混匀,放置 6 h 后用原子荧光光度计测定。

2 结果与分析

2.1 不同调控措施对强酸性茶园土壤中有有效硒含量和茶叶硒含量的影响

2.1.1 不同调控措施对强酸性茶园土壤有效硒含量的影响

土壤中有有效硒是能够被植物直接吸收利用的硒。研究发现^[9]不同类型土壤中的有效态硒含量是影响茶叶含硒量的主要因素,两者之间呈显著正相关。因此,土壤中有有效态硒是决定食物链中硒水平的关键因素。不同调控措施对茶园土壤中有有效硒含量的影响见图 1。图中可以看出,除 $\text{SD}+\text{Bio}$ 复合处理外,其余 3 种处

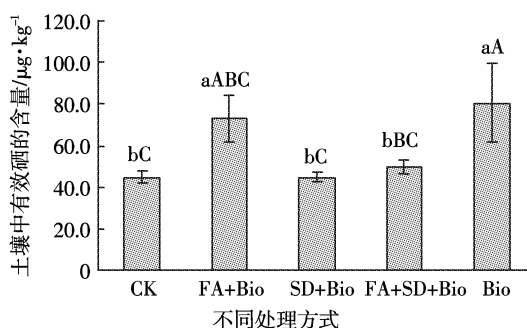


图 1 不同处理对茶园土壤中有有效硒含量的影响

Figure 1 The effects of different treatments on the available Se content of tea garden soil

理对土壤有效硒均有不同程度的提高,FA+Bio 复合处理提高了 $28.18 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,FA+SD+Bio 复合处理高出对照 $5.09 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,Bio 处理则提高了 $35.65 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,FA+Bio 复合处理达到显著性水平($P<0.05$),Bio 处理甚至还达到了极显著性水平($P<0.01$)。总体来看,Bio 处理对土壤有效硒含量的提高效果最明显,FA+Bio 复合处理次之,另两种处理其效果不明显。

2.1.2 不同调控措施对茶叶中硒含量的影响

方兴汉^[1]建议将茶叶含硒量低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的称为低硒茶,具有保健作用;含硒量 $0.2\sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为富硒茶,具有预防疾病的作用;含硒量 $1.5\sim 5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为高硒茶,具有防治疾病的作用。采取不同调控措施后茶叶中硒含量结果如图 2 所示,包括对照在内的所有处理茶叶硒含量都达到了富硒茶标准,也达到了中华人民共和国农业行业标准《富硒茶》(NY/T 600—2002)中规定富硒茶的标准($0.2\sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这跟该地区土壤富硒有直接关系。4 种不同调控处理对茶叶硒含量均有不同程度的提高作用,其中,Bio 处理和 FA+Bio 复合处理效果较好,与对照相比,其中 Bio 处理达到极显著性水平($P<0.01$),提高

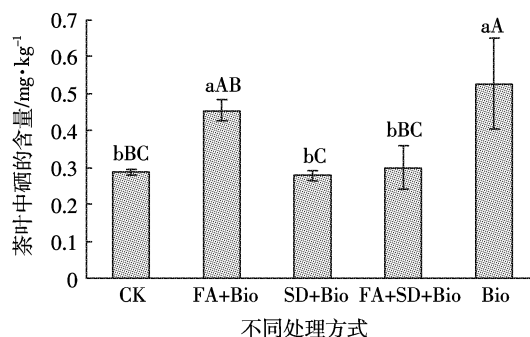


图 2 不同处理对茶叶中硒含量的影响

Figure 2 The effects of different treatments on the amount of Se in tea

幅度为 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; FA+Bio 复合处理达到显著性水平 ($P < 0.05$), 茶叶硒含量提高了 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而 SD+Bio 复合处理和 FA+SD+Bio 复合处理对提高茶叶硒含量效果没有达到显著水平。

由图 1、图 2 可以看出, 生物肥对提高茶叶硒含量以及土壤有效硒含量的效果明显, 达到了极显著水平, 这说明生物肥能够有效地提高土壤中硒的生物有效性, 从而增加了茶叶中硒含量。有研究报道^[17-19], 生物肥本身不仅具有速效、长效、抗病、改良土壤和抗板结作用, 其中的微生物还可以不断将土壤中难以被作物吸收的无效养分分解转化为易吸收的形态, 提高养分供应速率, 从而提高农作物产量、改善产品品质。

另外, 本试验中采用的粉煤灰虽然含有一定量的硒, 但其与生物肥混合施用的效果却没有单施生物肥的好, 这可能是由于粉煤灰碱性过强 (pH 值 10.32), 制约了生物肥中有效微生物的生存、繁殖, 难以发挥其应有的作用。同样, 秸秆干馏液的 pH 值也较高, 又具有抑菌作用, 同时施用时效果也不显著。

2.1.3 不同调控措施对强酸性茶园土壤硒活化系数的影响

为了更加直观地反映土壤中硒的生物有效性以及土壤供硒潜力, 本文引用了活化系数的概念。活化系数是土壤样品经 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提所得的有效硒含量占土壤全硒含量的百分比。即:

土壤硒的活化系数 = 土壤中有效硒含量 / 土壤中全硒含量 $\times 100\%$

土壤硒的活化系数越高, 土壤中硒的利用效率就越高。由图 3 可知, 改良调控措施实施半年后, FA+Bio 和 Bio 处理可使硒的活化系数大幅提高。具体表现为: FA+Bio 处理比对照提高了 3.06%, 提高比例为 91.1%, Bio 处理则提高了 3.76%, 提高比例高达 111.9%, 都达到了极显著性水平 ($P < 0.01$)。而 SD+Bio 和 FA+SD+Bio 处理对硒的活化作用较小, 未达到显

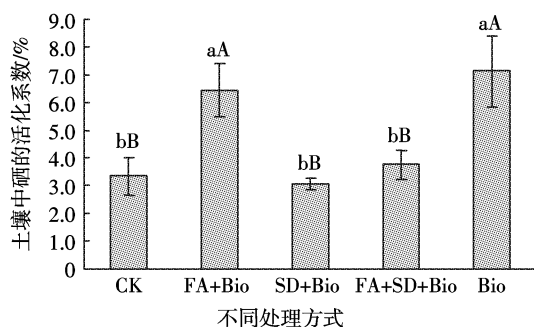


图 3 不同处理对茶园土壤中硒活化系数的影响

Figure 3 The effects of different treatments on activity index of Se

著水平。土壤中元素的活化系数大是提高其生物有效性的前提, 在本实验中生物肥处理对土壤硒也具有明显的活化作用, 说明其中的微生物具有将土壤中无效养分的分解转化作用。

2.2 不同调控措施对强酸性茶园土壤相关理化性质的影响

2.2.1 不同调控措施对强酸性茶园土壤 pH 值的影响

土壤酸碱度是土壤的重要指标之一, 其数值大小对土壤中的有效养分和多种元素的形态、分布有重要影响。20 世纪 90 年代, 苏、浙、皖 3 省的茶园最适土壤 pH 的比例由 1990—1991 年的 59.4% 下降到了 1998 年的 20.3%, 酸化速度惊人^[20]。此后也有相关报道指出我国不同地区茶园土壤酸化加重。本试验茶园土壤 pH 值为 3.99。由于土壤 pH 值既会影响不同价态硒的转化, 还会影响土壤粘土矿物对土壤硒的吸附, 最终影响土壤中硒的有效性。所以当土壤溶液呈酸性到中性时, 土壤中硒的有效性较低, 随着 pH 升高, 硒的有效性也相应提高^[21]。已有文献指出, 土壤有效硒的含量随土壤 pH 的提高而增加^[8, 22]。

由图 4 可以看出, 通过 4 种不同措施的调控, 强酸性茶园土壤 pH 值都得到了不同程度的提高, 提高幅度依次为: FA+SD+Bio 复合处理 > FA+Bio 复合处理 > Bio 处理 > SD+Bio 复合处理。其中, FA+SD+Bio 复合处理与对照相比提高了 0.32 个单位, FA+Bio 复合处理提高了 0.26 个单位, Bio 处理提高了 0.14 个单位, SD+Bio 复合处理提高了 0.09 个单位。FA+SD+Bio 复合处理、FA+Bio 复合处理的提高效果均达到了极显著性水平 ($P < 0.01$), Bio 处理达到显著性差异 ($P < 0.05$), 而 SD+Bio 处理对土壤 pH 值的影响不明显。这可能是由于秸秆干馏液中含有一定量的胺类、甲胺类等分子中含氮的碱类物质, 同时, 秸秆干馏液中还含有一定量的有机酸^[23]。一方面, 有机酸是一种形成有

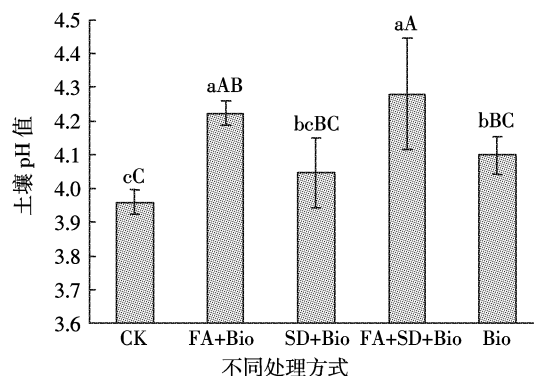


图 4 不同处理对土壤 pH 值的影响

Figure 4 The effects of different treatments on the soil pH value

机-无机复合体的有机胶体物质,具有的多种活性基团赋予其亲水性、阳离子交换性、络合能力及较高的吸附能力等,可提高土壤酸缓冲能力^[24];但另一面,有机酸可以通过羧基解离质子,提高土壤溶液中H⁺浓度从而导致土壤pH值的降低^[25]。

2.2.2 不同调控措施对强酸性茶园土壤交换性酸的影响

土壤潜性酸是土壤活性酸(pH)的主要来源。土壤酸化会导致土壤潜性酸中交换性铝含量增加。在强酸性土壤上,一方面以共价键结合在有机和矿质胶粒上的H⁺极难解离,另一方面腐植酸基团和带负电荷粘粒表面吸附的H⁺虽然容易解离,但因其数量极少,对于土壤溶液中H⁺的贡献小,但铝的饱和度大,土壤溶液中的每一个铝离子可水解产生3个H⁺。因此,在达到动态平衡的条件下,酸性土壤的酸度主要由交换性Al引起,交换性H所占比例较小^[26]。表4的结果表明,调控措施均可降低土壤交换性Al浓度,其降低效果依次为:FA+SD+Bio复合处理>FA+Bio复合处理>Bio处理>SD+Bio复合处理。4种调控措施使土壤交换性酸分别降低了1.51 cmol·kg⁻¹、0.85 cmol·kg⁻¹、0.38 cmol·kg⁻¹和0.08 cmol·kg⁻¹。

2.2.3 不同调控措施对强酸性茶园土壤交换性盐基离子的影响

交换性盐基(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)组成是衡量土壤质量的重要方面,盐基总量在很大程度上反映了土壤尤其是非酸性土壤的保肥、缓冲能力。因此,增加土壤

交换性盐基离子含量可提高土壤缓冲能力,对酸化土壤的改良起到一定的效果。盐基中的K、Ca、Mg在土壤中的交换性含量与作物的吸收利用有很好的相关关系,它们之间的比例关系不仅反映土壤生态过程的变化,而且还反映养分的生物有效性^[27]。由表5可知,4种不同调控措施均能提高土壤中交换性盐基离子的浓度,其中FA+SD+Bio复合处理的提高效果最好,FA+Bio复合次之。不同处理对土壤交换性Na⁺都没有明显的提高,这可能与改良材料中所含成分存在差异有关。

2.2.4 不同调控措施对强酸性茶园土壤其他理化性质的影响

不同调控措施除了影响土壤pH值外,对土壤有机质含量、土壤阳离子交换量和土壤粘粒等其他理化性质也有不同程度的影响。这些理化性质的改变可能就是影响土壤硒生物有效性的作用机理。已有研究表明,土壤有机质含量、土壤阳离子交换量和土壤粘粒都与土壤有效硒含量有良好的相关性。例如:一般认为,有机质对硒的大量富集将降低硒对植物的有效性;土壤质地对硒的影响主要是指粘土矿物和氧化铁可迅速吸收Se⁴⁺,降低Se⁴⁺的有效性^[28-29]等等。但是在本研究中,土壤有机质含量、土壤阳离子交换量和土壤粘粒都未达到显著性的效果(*P*<0.05)。这可能是由于试验进行的时间较短以及改良材料的成分特性有关。例如,秸秆干馏液进入土壤容易分解和生物肥本身施用量较少等有关。

表4 不同处理对土壤交换性酸和交换性Al的影响
Table 4 The effects of different treatments on the soil exchangeable acid content and exchangeable Al content

处理方式	交换性铝 /cmol·kg ⁻¹	降低幅度	交换性酸 /cmol·kg ⁻¹	降低幅度
CK	6.65 ± 0.61 a A	—	7.36 ± 0.54 a A	—
FA+Bio	5.80 ± 0.23 b B	0.85(13%)	6.57 ± 0.32 b B	0.79(11%)
SD+Bio	6.57 ± 0.49 a A	0.08(1%)	7.36 ± 0.67 a A	0.00(0%)
FA+SD+Bio	5.14 ± 0.21 c C	1.51(23%)	5.87 ± 0.65 c C	1.49(20%)
Bio	6.27 ± 0.47 a AB	0.38(6%)	7.01 ± 0.44 ab AB	0.35(5%)

表5 不同处理对土壤交换性盐基离子的影响
Table 5 The effects of different treatments on the soil exchangeable base cations

处理方式	交换性 K ⁺ /cmol·kg ⁻¹	交换性 Na ⁺ /cmol·kg ⁻¹	交换性 Mg ²⁺ /cmol·kg ⁻¹	交换性 Ca ²⁺ /cmol·kg ⁻¹
CK	0.56 b BC	0.60 a A	0.56 bc B	2.95 c B
FA+Bio	0.70 a A	0.62 a A	0.68 b B	4.87 a A
SD+Bio	0.53 b C	0.53 a A	0.50 c B	3.33 bc B
FA+SD+Bio	0.70 a A	0.65 a A	0.93 a A	5.22 a A
Bio	0.67 a AB	0.60 a A	0.61 bc B	3.51 b B

3 结论

(1)不同调控措施处理下,强酸性高硒茶园土壤中的硒得到不同程度的活化,土壤中有效硒含量和茶叶硒含量也相应地得到提高。其中,单独施用生物肥的调控效果最好,其次是粉煤灰-生物肥复合处理和粉煤灰-秸秆干馏液-生物肥复合处理,最后是秸秆干馏液-生物肥复合处理。试验中生物肥处理表现出较好的活化效果,其机理有待深入研究。

(2)对强酸性茶园土壤理化性质的调控效果也因不同调控处理方式而异。与对照相比,粉煤灰-秸秆干馏液-生物肥复合处理能够极显著地提高土壤 pH 值、交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度,降低土壤交换性酸和交换性铝含量;粉煤灰-生物肥复合处理则能极显著地提高土壤的 pH 值和土壤交换性 K^+ 、 Ca^{2+} 的浓度;单施生物肥也能显著提高土壤 pH 值、交换性 K^+ 的浓度;秸秆干馏液-生物肥复合处理总体效果较差。

参考文献:

- [1] 方兴汉,沈星荣. 硒对茶树生长及物质代谢的影响[J]. 中国茶叶, 1992,14(2):28-30.
- [2] 廖万有. 我国茶园土壤物理性质研究概况与展望[J]. 土壤, 1997(3): 121-124,136.
- [3] 丁力,范必威. 茶叶中铅的污染问题[J]. 广东省微量元素科学, 2005,12(6):6-11.
- [4] 宗良纲,周俊,罗敏,等. 模拟酸雨对茶园土壤中铅的溶出及形态转化的影响[J]. 土壤通报,2005,36(5):695-699.
- [5] 沙济琴,郑达贤. 福建茶树鲜叶含氟量的研究[J]. 茶叶科学,1994,14(1):37-42.
- [6] 白学信,杨兴太,梁代华,等. 饮茶型氟中毒[J]. 中国地方病学志, 1986,5(2):110-113.
- [7] 宗良纲,陆丽君,罗敏,等. 茶园土壤酸化对氟的影响及茶叶氟安全限量的探讨[J]. 安全与环境学报, 2006,6(1):100-103.
- [8] 唐玉霞,王慧敏,刘巧玲,等. 河北省麦田土壤硒的含量、形态及其有效性研究[J]. 华北农学报, 2010,25(增刊):194-197.
- [9] 沙济琴,郑达贤. 茶树鲜叶含硒量影响因素分析[J]. 茶叶科学, 1996,16(1):25-30.
- [10] 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):347-352.
- [11] 何振立,周启星,谢正苗. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1998:345.
- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:370.
- [13] 谭见安. 环境生命元素与克山病[M]. 北京:中国医药科技出版社, 1996.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:30-172.
- [15] 瞿建国,徐伯兴,龚书椿. 氢化物发生-无色散原子荧光光度法测定土壤中有态硒和总硒[J]. 土壤通报,1998,29(1):47-封3.
- [16] 马作江,陈永波,王尔惠. 原子吸收光谱法测定茶叶中硒和铜[J]. 微量元素与健康研究, 2011,28(1):41-45.
- [17] 夏光利,毕摇军,张萍,等. 新型生物有机肥(NAEF)对番茄生长及土壤活性质量效应研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 519-522.
- [18] ZONG Liang-gang, LU Li-jun, LUO Min, et al. Effects of soil acidification by tea plantation on fluoride and discussion of safety level of tea fluoride[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006,6(1):100-103.
- [19] TNAG Yu-xia, WANG Hui-min, LIU Qiao-ling, et al. Study on the content, speciation distribution and availability of selenium in wheat field soils of Hebei [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(Suppl): 194-197.
- [20] SHA Ji-qin, ZHENG Da-xian. Analysis on the factors influencing selenium content of tea fresh leaves [J]. *Journal of Tea Science*, 1996,16(1):25-30.
- [21] 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): 347-352.
- [22] HE Zhen-li, ZHOU Qi-xing, XIE Zheng-miao. Soil chemical Balances of pollution and beneficial elements[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998:345.
- [23] China National Environmental Monitoring Center. Background contents on elements of soil in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:370.
- [24] TAN Jian-an. Chronic Keshan disease and environmental elements of life [M]. Beijing: Chinese Medicine Science and Technology Press, 1996.
- [25] BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005:30-172.
- [26] QU Jian-guo, XU Bo-xing, GONG SHU-chun. Determination of available and total seleniums in soil by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998,29(1):47-cover three.
- [27] MA Zuo-jiang, CHEN Yong-bo, WANG Er-hui, et al. Determination of selenium and copper content in tea by atomic absorption spectrophotometer method[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2011,28(1): 41-45.
- [28] XIA Guang-li, BI Yao-jun, ZHANG Ping, et al. Effect of a new bio-or-

- ganic fertilizer on tomato growth and soil activity quality[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3):519-522.
- [18] 倪志华, 马国瑞. 有机无机生物活性肥料对蔬菜作物生长及土壤生物活性的影响[J]. *土壤通报*, 2002, 33(3): 212-215.
- NI Zhi-hua, MA Guo-rui. Effect of bioactivated organo-inorgano-mixed fertilizer on growth of cabbage and soil biological activity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(3): 212-215.
- [19] 韩晓玲, 张乃文, 贾敬芬. 生物有机无机复混肥对番茄产量、品质及土壤的影响[J]. *土壤肥料*, 2005(3): 50-53.
- HAN Xiao-ling, ZHANG Nai-wen, JIA Jing-fen. Effects of biological organic-inorganic compound fertilizer on yield, quality of tomato and soil[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(3):50-53.
- [20] 马立锋, 石元值, 陆建云. 苏、浙、皖茶区茶园土壤 pH 状况及近十年来的变化[J]. *土壤通报*, 2000, 31(5):205-207.
- MA Li-feng, SHI Yuan-zhi, LU Jian-yun. Soil pHs in the tea gardens in Jiangsu, Zhejiang and Anhui provinces and changes of soil pH in the past decade[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(5):205-207.
- [21] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 环境中硒的生物地球化学循环和营养调控及分异成因[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(10):1197-1203.
- ZHAO Shao-hua, YU Wan-tai, ZHANG Lu, et al. Biogeochemical cycling of selenium-nutrition adjustment and differentiation cause in environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10):1197-1203.
- [22] 赵中秋, 郑海雷, 张春光, 马建华. 土壤硒及其与植物硒营养关系[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(1):22-25.
- ZHAO Zhong-qiu, ZHENG Hai-lei, ZHANG Chun-guang, MA Jian-hua. Advances in the studies on selenium in soil and selenium biological effect[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):22-25.
- [23] 周建斌, 张合玲, 叶汉玲, 等. 几种秸秆醋液组分中活性物质的分析[J]. *生物质化学工程*, 2009, 43(2): 34-36.
- ZHOU Jian-bin, ZHANG He-ling, YE Han-ling, et al. Analysis of active substances of several kinds of straw vinegar[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2009, 43(2):34-36.
- [24] 王海英. 木醋液对植物生长调节机理研究[D]. 黑龙江省:东北林业大学, 2005: 1-3.
- WANG Hai-ying. Study on regulating mechanism of wood vinegar to plant growth[D]. Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2005:1-3.
- [25] 胡红青, 廖丽霞, 王兴林. 低分子量有机酸对红壤无机态磷转化及酸度的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 867-870.
- HU Hong-qing, LIAO Li-xia, WANG Xing-lin. Effect of low-molecular weight organic acids on inorganic phosphorus transformation in red soil and its acidity(In Chinese)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 867-870.
- [26] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 325-363.
- YU Tian-ren. Principle of soil chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1987: 325-363.
- [27] 胡宁, 娄翼来, 张晓珂, 等. 保护性耕作对土壤交换性盐基组成的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6):1492-1496.
- HU Ning, LOU Yi-lai, ZHANG Xiao-ke, et al. Effects of conservation tillage on the composition of soil exchangeable base[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6):1492-1496.
- [28] 陈铭, 谭见安, 王五一, 等. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学[J]. *土壤学进展*, 1994, 22(4):1-10.
- CHEN Ming, TAN Jian-an, WANG Wu-yi, et al. Soil chemistry and plant nutrition in the study of the relationship between selenium and health[J]. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(4):1-10.
- [29] 万洪富. 生态环境中硒及植物对它的吸收和转化[J]. *土壤学进展*, 1988, 16(6):1-9.
- WAN Hong-fu. Selenium in ecological environment and the absorption, transformation of plant to it[J]. *Progress in Soil Science*, 1988, 16(6): 1-9.