

# 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响<sup>①</sup>

杨 旒<sup>1</sup>, 宗良纲<sup>1\*</sup>, 严 佳<sup>1</sup>, 姚 欢<sup>1</sup>, 马爱军<sup>2</sup>, 何任红<sup>2</sup>

(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 3 种碱性改良剂(秸秆炭、生石灰粉和钙镁磷肥)与“爸爱我”生物有机肥的不同配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响。结果表明: 在无外源硒素添加的前提下, 通过这种内源调控途径能够有效提高强酸性高硒茶园土壤硒的生物有效性。秸秆炭、生石灰粉和钙镁磷肥与“爸爱我”生物有机肥的 3 个错时配施处理对提高土壤硒有效性的效果最佳, 分别使土壤有效硒含量提高 105.98、114.09 和 146.71  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 茶叶中硒含量相应提高 0.96、1.14 和 1.24  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 增幅均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

**关键词:** 土壤改良剂; 生物有机肥; 内源调控; 土壤有效硒; 硒的形态

**中图分类号:** S153.61

硒(Se)被科学家称为人体微量元素中的“抗癌之王”。大量研究表明, 许多疾病的发生与硒的摄入量偏低有关, 适量补硒可以提高人体对某些疾病的抵抗能力, 还可防止糖尿病、心脑血管疾病、克山病、大骨节病等<sup>[1]</sup>。补硒的来源主要包括无机硒和有机硒, 其中因生物源有机硒安全性最高, 不易发生硒中毒, 也易于被人体吸收, 补硒效率高, 所以最受青睐。生物源有机硒的获得主要是利用不同生物具有同化无机硒为有机硒的能力, 而茶树正是天然的富硒植物之一。茶树生长适宜的土壤 pH 范围是 4.5 ~ 6.0, 最适 pH 在 5.5 左右<sup>[2]</sup>。但大量研究表明, 江苏茶园土壤酸化问题日益严峻<sup>[3-4]</sup>。茶园土壤酸化不仅会破坏土壤微生物区系, 影响土壤有机质的矿化、养分的循环转化, 阻碍茶树吸收养分, 不利于茶树生长<sup>[5]</sup>, 更是影响土壤硒生物有效性的

重要因素之一<sup>[6]</sup>。

鉴于本课题组前期同时混施碱性改良剂和生物有机肥来提高土壤硒生物有效性的效果不及单施生物有机肥的效果好<sup>[7]</sup>, 本试验试图在不添加外源硒素的前提下, 比较碱性改良剂与生物有机肥不同配施方式的效果, 旨在通过这种内源调控的途径来提高强酸性高硒茶园土壤硒的生物有效性。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

田间试验布置于江苏省宜兴市灵谷有机茶场。该茶场土壤全硒含量平均为 2.06  $\text{mg}/\text{kg}$ , 变幅为 0.450 ~ 3.000  $\text{mg}/\text{kg}$ , 属于高硒土壤<sup>[8]</sup>, 有效硒含量 128.32  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 占全硒的 6.23%。该茶场土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质  
Table 1 Basic properties of tested soil

试验茶场	pH	体积质量( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	有机质( $\text{g}/\text{kg}$ )	质地	类型
宜兴灵谷有机茶场	3.99	1.33	21.86	中壤	棕红壤

### 1.2 供试材料

田间试验的供试材料主要有: 秸秆炭: 徐州万国生物能源科技有限公司生产, C 含量  $\geq 150 \text{ g}/\text{kg}$ ;

生石灰粉: 衢州晶纳钙业有限公司生产, CaO 含量  $\geq 850 \text{ g}/\text{kg}$ ; 钙镁磷肥: 荆门市高园磷肥有限公司生产, 有效磷  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量  $\geq 120 \text{ g}/\text{kg}$ ; “爸爱我”功

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(11)3042)和江苏省科技支撑计划项目(BE2009313-2)资助。

\* 通讯作者(zonglg@njau.edu.cn)

作者简介: 杨旒(1987—), 女, 浙江嵊州人, 硕士研究生, 主要从事环境质量与食品安全研究。E-mail: 2011103059@njau.edu.cn

能型生物有机肥:江苏新天地生物肥料工程有限公司生产,有效活菌数 $\geq 0.5$ 亿/g,有机质 $\geq 250$ g/kg,NPK $\geq 60$ g/kg。供试材料 pH 采用复合电极法测定(固液比为 1:10),分别为:秸秆炭,pH 9.0;生石灰粉,pH 12.0;钙镁磷肥,pH 9.3;“爸爱我”功能型生物有机肥,pH 7.2。

### 1.3 试验方法

田间试验在茶园常规施肥管理的基础上,除对照(CK,不施加改良剂和生物有机肥)外,设置了秸秆炭、生石灰粉、钙镁磷肥和“爸爱我”生物有机肥的不同施用方式共 7 个处理。第一种方式是单施生物有机肥(1 个处理):BIO,0.2 kg/m<sup>2</sup>。第二种方式是错位配施改良剂和生物有机肥(3 个处理):SC+BIO,错位分别施用秸秆炭与生物有机肥,1 kg/m<sup>2</sup>+0.2 kg/m<sup>2</sup>;QL+BIO,错位分别施用生石灰粉与生物有机肥,0.2 kg/m<sup>2</sup>+0.2 kg/m<sup>2</sup>;FC+BIO,错位分别施用钙镁磷肥与生物有机肥,0.2 kg/m<sup>2</sup>+0.2 kg/m<sup>2</sup>。第三种方式是错时配施改良剂和生物有机肥(3 个处理):SC-BIO,先施秸秆炭后施生物有机肥,1 kg/m<sup>2</sup>+0.2 kg/m<sup>2</sup>;QL-BIO,先施生石灰粉后施生物有机肥,0.2 kg/m<sup>2</sup>+0.2 kg/m<sup>2</sup>;FC-BIO,先施钙镁磷肥后施生物有机肥,0.2 kg/m<sup>2</sup>+0.2 kg/m<sup>2</sup>。

各处理均设 3 次重复,共 24 个小区,按随机区组设计布置试验小区。茶场中的茶垄为南北走向,每 3 条 9 m 长的茶垄为一个小区,每个小区 45 m<sup>2</sup>,小区间东西向间隔两条茶垄,南北向有 2 m 宽的隔离区。将供试材料分别条施于行间茶垄滴水线内侧预先犁好的 20 cm 左右的两条沟中,施入后用土覆盖。第一种方式单施生物有机肥的时间与茶园秋季施肥的时间同步;第二种方式是将改良剂和生物有机肥同时错位分别施于茶垄两侧的沟中,施用时间与茶园秋季施肥的时间同步;第三种方式是先在茶园秋季施肥时将秸秆炭、生石灰粉和钙镁磷肥 3 种改良剂施于茶垄一侧的沟中,一个月后在茶垄另一侧的沟中施入生物有机肥。大田试验于 2011 年 11 月至 12 月布置完成,并于次年 2012 年 5 月采茶时期再进行土壤、茶树根系及茶叶样品的采集。在各小区中间茶垄两侧的滴水线内侧分设多个采样点采集表层混合土样(0~20 cm),分别磨碎过 20 目筛和 100 目筛待测;采集茶树根尖起 10 cm 完整根系,保鲜待测;采集茶树上一芽两叶的茶叶鲜样,杀青烘干后待测。2012 年秋又重复了上述试验,取得了趋势一致的试验效果。

### 1.4 测定项目与方法

土壤 pH:参照《土壤农化分析》<sup>[9]</sup>中的复合电

极法测定。

土壤有效硒:参照文献<sup>[10-13]</sup>推荐的方法测定。称取 4.000 g 左右的土壤样品,以 1:15 的固液比,加入 60 ml 0.7 mol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液,在 30℃ 条件下以 210 r/min 的转速振荡 90 min 浸提土壤中有效态硒,用定量滤纸过滤,取 10 ml 浸出液置于 50 ml 石英烧杯中;加入 4.5 mol/L HCl 0.5 ml 和 5% K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 1 ml,摇匀,并置于微沸水浴中加热 1 h,分解浸出液中的有机质,并把有机硒转化为 Se<sup>6+</sup>,然后加入 3% H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 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。

茶叶硒含量:参照马作江等<sup>[14]</sup>推荐的方法测定。

硒的形态分析:参照瞿建国等<sup>[13]</sup>推荐的方法测定。

根系活力:参照《植物生理生化实验原理和技术》<sup>[15]</sup>中的 TTC 法。

微生物数量:参照《农业微生物学实验技术》<sup>[16]</sup>中的稀释平板法,细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂平板表面涂布法,真菌采用马丁氏(Martin)培养基平板表面涂布法,放线菌采用改良高氏一号培养基平板表面涂布法,结果以每克鲜土所含微生物菌落形成单位数量(colony forming unit per gram fresh soil, cfu/g)表示。

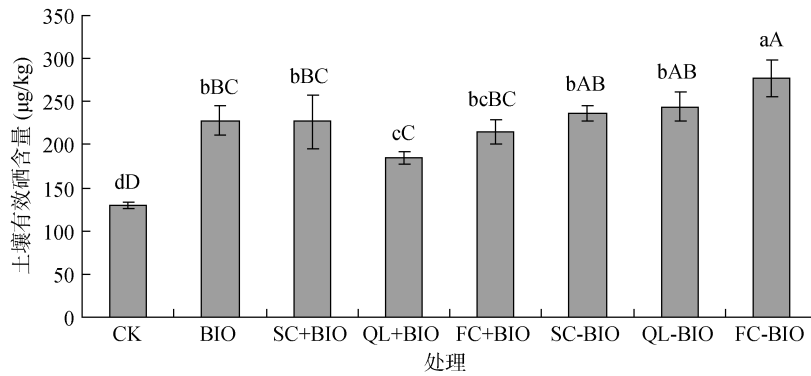
### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理与图表制作,通过 SPSS 17.0 软件进行差异显著性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同配施方式对土壤硒化学和生物有效性的影响

2.1.1 土壤硒化学有效性的变化 土壤中硒的化学有效性是直接影响其生物有效性的关键,也是决定食物链硒水平的关键因素<sup>[17]</sup>。KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 浸提剂提取的有效硒与作物吸收的硒存在良好的相关性,可以反映作物从土壤中吸收硒的情况<sup>[18]</sup>。改良剂和生物有机肥施用后对土壤中硒的存在形态能否产生影响并提高有效硒含量,这是评价改良效果的重要指标。从图 1 可以看出,不同改良剂和生物有机肥处理下土壤中有效硒的含量均有不同程度的提高,与 CK 相比,提高幅度均达到了极显著水平( $P < 0.01$ )。总体来看,错位配施改良剂与生物有机肥的处理对土壤有效硒含量的提高效果并未比单施生物有机肥的效果更好,这一结果与本课题组 2010—2011 年在同一茶场进行的



(柱图上方不同小、大写字母分别表示处理间差异在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平显著, 下同)

图 1 不同处理对土壤有效硒含量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil available Se

大田试验结果相一致<sup>[7]</sup>, 该研究中单施“爸爱我”生物有机肥(0.08 kg/m<sup>2</sup>)的处理对土壤有效硒含量的提高效果比另外 3 个复合处理的效果更好, 相比 CK 提高了 35.65 µg/kg, 达到极显著水平( $P<0.01$ )。而本研究提出的错时配施改良剂和生物有机肥的处理提高效果均比其他 4 个处理更好, SC-BIO、QL-BIO 和 FC-BIO 这 3 个错时配施的处理分别使土壤有效硒含量

提高了 105.98、114.09 和 146.71 µg/kg, 分别是 CK 的 1.81、1.88 和 2.12 倍。

为认识土壤中有效硒含量发生变化的机理, 进一步分析不同处理条件下土壤中硒的形态(表 2)。结果表明: 在茶园土壤硒的 5 种形态中, 不同处理下可溶态硒和有机物-硫化物结合态及元素态硒含量有较明显的改变。

表 2 土壤中各形态硒含量(µg/kg)及其分配系数(%)

Table 2 Contents and distribution coefficients of selenium species in soils

处理	特征值	可溶态	可交换态及碳酸盐结合态	铁-锰氧化物结合态	有机物-硫化物结合态及元素态	残渣态	合计
CK	含量	32.67 ± 3.88 e	96.13 ± 4.84 bc	112.17 ± 1.21 a	936.82 ± 20.09 a	820.79 ± 2.84 a	1 998.59 ± 29.53
	分配系数	1.63 e	4.81 b	5.61 a	46.87 a	41.07 a	
BIO	含量	95.05 ± 3.47 d	129.95 ± 13.12 a	109.89 ± 3.87 a	887.20 ± 7.44 c	797.85 ± 2.63 a	2 019.93 ± 8.82
	分配系数	4.71 d	6.43 a	5.44 a	43.92 d	39.50 bc	
SC+BIO	含量	106.15 ± 10.08 cd	121.85 ± 8.62 a	109.88 ± 1.56 a	925.41 ± 7.96 ab	805.88 ± 12.71 a	2 069.17 ± 36.26
	分配系数	5.13 cd	5.89 b	5.31 a	44.72 bc	38.95 c	
QL+BIO	含量	106.41 ± 4.61 cd	73.46 ± 4.19 c	114.56 ± 6.36 a	910.19 ± 21.75 ab	816.08 ± 20.05 a	2 020.70 ± 46.80
	分配系数	5.27 cd	3.64 c	5.67 a	45.04 b	40.39 ab	
FC+BIO	含量	114.95 ± 7.51 c	98.88 ± 1.74 b	106.82 ± 3.34 a	891.39 ± 18.43 c	809.97 ± 14.94 a	2 022.02 ± 44.72
	分配系数	5.69 c	4.89 b	5.28 a	44.08 cd	40.06 ab	
SC-BIO	含量	137.25 ± 7.80 b	98.97 ± 10.77 b	104.20 ± 5.33 b	896.57 ± 28.25 bc	787.78 ± 22.14 b	2 024.79 ± 29.79
	分配系数	6.78 b	4.89 b	5.15 b	44.28 bc	38.91 c	
QL-BIO	含量	161.23 ± 4.40 a	82.56 ± 4.54 c	101.07 ± 1.15 b	879.46 ± 16.24 cd	804.32 ± 18.78 a	2 028.65 ± 8.37
	分配系数	7.95 a	4.07 b	4.98 b	43.35 d	39.65 bc	
FC-BIO	含量	175.20 ± 15.16 a	104.75 ± 11.71 b	89.47 ± 1.75 c	868.65 ± 13.18 d	796.94 ± 8.63 a	2 035.01 ± 26.70
	分配系数	8.61 a	5.15 b	4.40 c	42.69 d	39.16 bc	

注: 表中不同小写字母表示不同处理间差异在  $P<0.05$  水平显著。

可溶态硒是被铁锰氧化物、黏土及有机质等矿物弱吸附或溶解于土壤溶液中的硒氧离子及有机硒, 是最易迁移和被植物利用的<sup>[19]</sup>。如表 2, 本试验中 CK 的可溶态硒含量平均为 32.67 µg/kg, 仅占全硒含量的 1.63%, 可见改良前该茶园土壤中能直接供给植物

吸收利用的硒只占总硒的很小一部分。在历经半年的改良后, 各种处理均对茶园土壤中可溶态硒的含量起到提高作用, 尤其是 FC-BIO 处理, 使土壤中可溶态硒含量提高了 4 倍之多, 占各形态硒含量总和的比例达到了 8.61%, 其次是 QL-BIO 和 SC-BIO 处理。

各种处理的土壤中, 有机物-硫化物结合态及元素态硒含量占总硒含量的 42.69% ~ 46.87%, 是灵谷茶场土壤硒的主要存在形式, 说明有机质是土壤中固定和贮存硒的重要介质<sup>[20-21]</sup>。通常有机结合态硒是土壤环境中易发生转化的那部分硒, 处于土壤耕作层中的有机质, 易于在耕作过程中暴露于空气而被氧化分解为小分子或完全降解释放其结合的硒; 而难以利用的硫化物结合态硒和元素态硒通常存在于强还原性条件下, 在本试验条件下含量低<sup>[19]</sup>。可以推测, 有机物-硫化物结合态及元素态硒这部分含量变化的主要来源是有机结合态硒。从表 2 可以看出, 与 CK 相比, 各处理中有机物-硫化物结合态及元素态硒含量均有不同程度的下降, 其中 FC-BIO 处理的效果最明显, 该处理下有机物-硫化物结合态及元素态硒含量下降了 68.17  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 分配系数下降了 4.18%, 其次是 QL-BIO 处理和 BIO 处理下降程度较明显, 其含量分别下降 57.36  $\mu\text{g}/\text{kg}$  和 49.62  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 分配系数分别下降 3.52% 和 2.95%。

有不少研究<sup>[18,22-24]</sup>报道, 可交换态及碳酸盐结合态硒和铁-锰氧化物结合态硒的含量与土壤 pH 存在一定的联系。但本试验中, 各处理下的土壤中这两种形态的硒并没有呈现有规律的变化, 可能与土壤 pH 变化幅度小有关。残渣态硒以较稳定的化合物和固定在晶格中的形式存在, 难溶解于水和一般的酸碱性溶液, 不能为植物所利用, 但这部分硒是土壤硒的重要储备库源, 随着岩石风化、土壤熟化过程逐步释放出

来<sup>[25]</sup>。本试验由于改良时间和供试材料的特性所限, 残渣态硒含量亦变化有限。

**2.1.2 土壤硒的生物有效性** 茶叶中的硒含量是本试验通过内源调控强酸性高硒茶园土壤中硒生物有效性效果的最重要的指标。由图 2 可以看出, 不同处理对茶叶硒含量的影响与对土壤有效硒含量的影响趋势基本一致, 但是茶叶硒含量的提高效果更明显, 与 CK 相比均达到了极显著水平( $P < 0.01$ ), 茶叶硒含量的提高效果由低到高依次是: QL+BIO、SC+BIO、FC+BIO、BIO、SC-BIO、QL-BIO、FC-BIO, 根据农业部颁布的《富硒茶 NY/T 600-2002》标准, 均达到了富硒茶标准(0.25 ~ 4.00  $\mu\text{g}/\text{g}$ )。其中 FC-BIO 处理使硒在茶叶中的积累量达到了 CK 的 3 倍以上。本试验中提出的错时配施的 3 个处理对提高茶园土壤硒生物有效性的效果最佳, 使茶叶硒含量分别提高了 0.96、1.14 和 1.24  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 其次是 BIO 处理, 其提高效果略优于错位配施的 SC+BIO、QL+BIO、FC+BIO 3 个处理。结合本课题组前期的田间试验结果<sup>[7]</sup>, 单施生物有机肥(0.08  $\text{kg}/\text{m}^2$ )的处理对茶叶硒含量的提高量为 0.24  $\mu\text{g}/\text{g}$ , 达到极显著性水平( $P < 0.01$ ), 优于粉煤灰-生物肥(7.5  $\text{kg}/\text{m}^2 + 0.08 \text{ kg}/\text{m}^2$ )、秸秆干馏液-生物肥(12  $\text{L}/\text{m}^2 + 0.08 \text{ kg}/\text{m}^2$ )和粉煤灰-秸秆干馏液-生物肥(7.5  $\text{kg}/\text{m}^2 + 2.25 \text{ L}/\text{m}^2 + 0.08 \text{ kg}/\text{m}^2$ )3 个复合处理, 说明利用生物有机肥提高茶园土壤硒生物有效性的效果与施用方式和施用量有关。

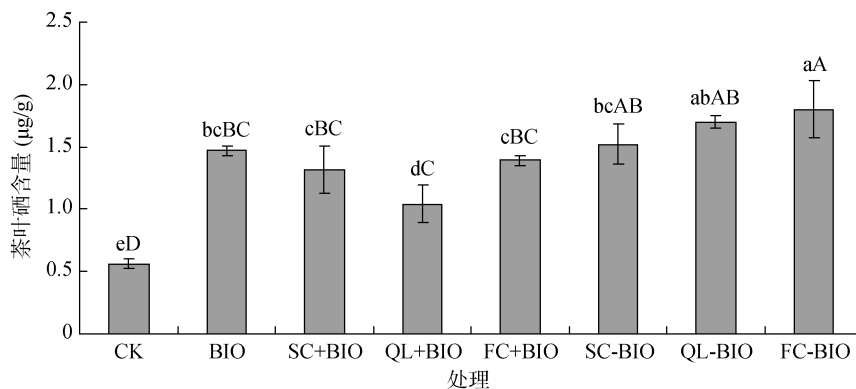


图 2 不同处理对茶叶硒含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on Se contents in tea

## 2.2 不同配施方式影响硒生物有效性的机理

**2.2.1 对土壤 pH 的影响** 从改良剂和生物有机肥施入到次年采茶历时半年多, 不同处理下茶园土壤 pH 测定结果见图 3。CK 的 pH 为 4.03, 各配施处理对茶园土壤 pH 均有不同程度的提高, 除了 BIO 和 SC+BIO 处理, 其余处理的提高效果均达到了显著水

平( $P < 0.05$ ), QL-BIO 和 FC-BIO 这两个处理甚至达到了极显著水平( $P < 0.01$ ), 分别使 pH 提高了 0.37 和 0.44 单位, 其中错时配施方式对中和土壤酸性的效果比单施生物有机肥或错位配施的效果更好, 由此也证实了本试验设计的预期。

土壤 pH 直接影响的是硒的存在价态和土壤对硒

的吸附固定作用,酸性土壤中的硒以迁移性较  $\text{Se}^{6+}$  低的  $\text{Se}^{4+}$  为主,而铁锰铝等氧化物和腐殖质对  $\text{Se}^{4+}$  的吸附作用大于  $\text{Se}^{6+}$ ,且吸附能力随 pH 的升高而降低<sup>[26]</sup>,因此 pH 在很大程度上影响着硒的有效性。通过回归分析,本试验中土壤可溶态硒含量与 pH 呈正相关,回归方程和系数分别为  $y = 319.51x - 1\ 252.6$ ,  $R^2 = 0.964$ ,这一结论与瞿建国等<sup>[18]</sup>的研究结果相一致,说明土壤中硒的存在形态与土壤 pH 是密切相关的。

由于土壤 pH 是一个动态变化的过程,因此,试验

结束后测定的土壤 pH 可能不能反映改良剂和生物有机肥实际能够起到的效果,本试验中各处理对土壤有效硒和茶叶硒含量的提高效果也因此明显优于对土壤 pH 的提高效果。为了缓解日益酸化的茶园土壤,笔者建议可以定期重复施用碱性改良剂,这既可以中和土壤酸度,又可以提高茶园土壤硒的活性。根据本研究的结果,钙镁磷肥是比较理想的碱性改良剂,它不仅可以通过中和土壤中的酸来活化硒,还可以为茶树生长提供更多的营养元素,促进茶树生长,提高茶叶品质。

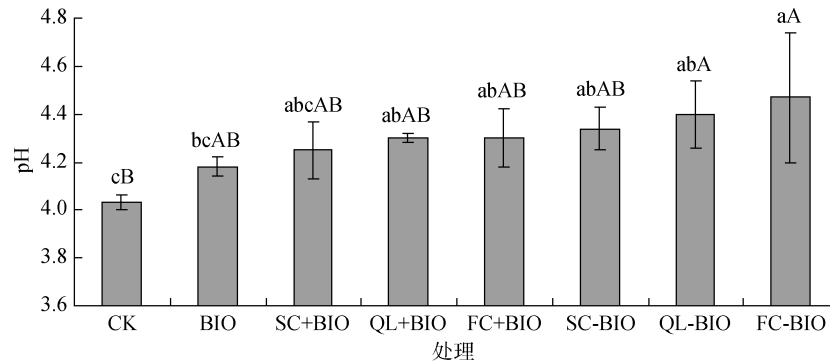


图 3 不同处理对土壤 pH 的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on soil pH

**2.2.2 对茶树根际微生物群落结构的影响** 表 3 中不同改良剂和生物有机肥配施方式下根际土壤的细菌、真菌和放线菌的数量测定结果表明:不同处理对茶树根际土壤微生物群落结构产生不同的影响。与 CK 相比,各种配施处理均使根际微生物数量有增加的趋势,使土壤中的细菌、真菌和放线菌分别增加了 1.6 ~ 43.2 倍, 0.3 ~ 3.2 倍和 0.5 ~ 7.3 倍,其中对细菌数量提高最显著的是 SC-BIO 和 QL-BIO 处理,除此,FC-BIO、FC+BIO 和 BIO 3 种处理也均达到了极显著的效果( $P < 0.01$ ),其余效果不显著;对真菌数量影响最大的是 FC+BIO 处理,其余除了 QL+BIO

处理效果不显著外,也都达到了极显著水平( $P < 0.01$ );对放线菌数量提高达到极显著水平( $P < 0.01$ )的是 SC-BIO、FC-BIO、QL-BIO 和 FC+BIO 处理,达到显著水平( $P < 0.05$ )的是 SC+BIO 和 QL+BIO 处理。由此可以看出,先施用碱性改良剂中和土壤酸性,能为生物有机肥提供更易适应的土壤环境,显著提高土壤中原有微生物的活性与繁殖能力,使土壤微生物数量大幅提高,改善茶树根际土壤微生物群落结构。

不同处理条件下土壤中硒形态(表 2)分析的结果显示,处理后的土壤中有机物-硫化物结合态及元素态硒含量呈现下降趋势。研究表明有机结合态硒主要赋存在土壤腐殖质胡敏酸和富里酸中,胡敏酸结合态硒难以被植物吸收利用,而富里酸结合态硒容易矿化分解成无机硒和低分子有机硒,容易被植物吸收利用<sup>[27]</sup>。因此微生物对土壤物质的生物转化作用不可忽视,有机质可以在微生物的矿化作用下分解释放出硒。总体上看,3 个错时配施处理对土壤微生物数量影响最大,也对土壤中硒的形态变化产生了较大的影响,使有机物-硫化物结合态及元素态硒含量下降的同时,可溶态硒含量有了较大的提高。

**2.2.3 对茶树根系活力的影响** 根系活力是指根系新陈代谢的活动能力,是反映根系吸收功能的一项综合指标。根系活力大则根系代谢、吸收能力强,反之则弱。由图 4 可以看出,与 CK 相比,在对茶园土

表 3 不同处理对茶树根际土壤微生物数量的影响  
Table 3 Effects of different treatments on microorganism numbers in the tea rhizosphere soils

处理	细菌( $\times 10^7$ cfu/g)	真菌( $\times 10^4$ cfu/g)	放线菌( $\times 10^6$ cfu/g)
CK	0.14 ± 0.04 dC	0.90 ± 0.24 eD	0.24 ± 0.04 dC
BIO	3.15 ± 0.28 cB	1.65 ± 0.10 dC	0.37 ± 0.03 cdC
SC+BIO	0.74 ± 0.06 dC	2.44 ± 0.16 cB	0.68 ± 0.03 cBC
QL+BIO	0.37 ± 0.06 dC	1.20 ± 0.35 deCD	0.67 ± 0.04 cBC
FC+BIO	2.92 ± 0.27 cB	3.30 ± 0.03 bA	1.06 ± 0.03 bB
SC-BIO	6.19 ± 0.11 aA	3.77 ± 0.02 aA	1.99 ± 0.06 aA
QL-BIO	6.08 ± 1.13 aA	3.16 ± 0.08 bA	1.17 ± 0.24 bB
FC-BIO	4.92 ± 0.08 bA	3.78 ± 0.30 aA	1.82 ± 0.37 aA

注:表中不同小、大写字母分别表示不同处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著、在  $P < 0.01$  水平极显著。

壤进行半年多的改良后,茶树根系活力均有不同程度的提高,提高效果最佳的是 FC-BIO 处理,该处理下的茶树根系活力是 CK 的 2.5 倍,提高效果达到了极显著水平( $P<0.01$ ),此外,QL-BIO、SC-BIO、FC+ BIO 和 BIO 处理下根系活力分别是 CK 的 2.2、1.8、1.6

和 1.6 倍,提高效果也均达到了极显著水平( $P<0.01$ ),其余达到显著水平( $P<0.05$ )。李巨<sup>[28]</sup>有关茶树有机种植的试验结果也表明,生物有机肥能够促进根系生长,增强根系活力,扩大根系的吸收面积,提高茶树抗病能力,增加植株产量和提高茶叶质量。

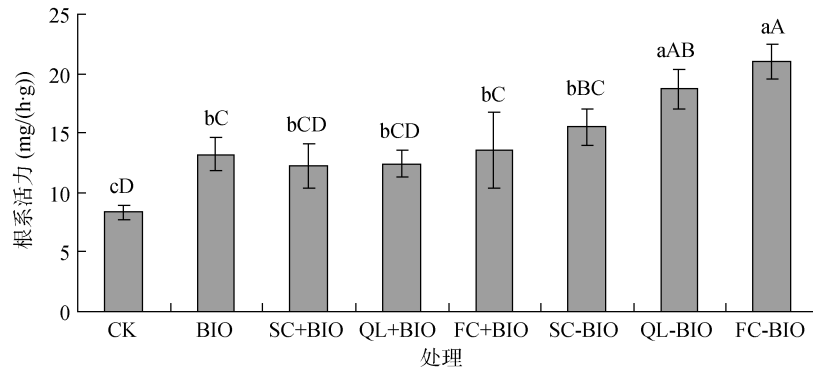


图 4 不同处理对茶树根系活力的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on tea root vitalities

### 3 结论

(1) 改良剂和生物有机肥不同配施方式均能不同程度地提高强酸性高硒茶园土壤中硒的有效性,其中 SC-BIO、QL-BIO 和 FC-BIO 3 个错时配施的处理效果最佳,分别使土壤有效硒含量提高 105.98、114.09 和 146.71  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,使茶叶硒含量提高 0.96、1.14 和 1.24  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,增幅均达到极显著水平( $P<0.01$ ),说明通过内源调控土壤硒的有效性是可行的。

(2) 不同处理对土壤硒生物有效性的提高,是在改良土壤的物理、化学和生物学性质的基础上,通过提高土壤中硒的化学有效性和增强茶树自身的吸收能力来实现的。错时配施的方式通过先施入碱性改良剂中和土壤酸度,使土壤硒的化学有效性得到提高;同时缓解了由于土壤低 pH 和碱性改良剂对生物有机肥的影响,使其能够更好地适应茶园土壤环境;追施生物有机肥后,茶树根际土壤微生物群落结构得到改善,进一步活化了土壤中的硒,并且促进茶树根系生长,提高了茶树吸收硒等营养元素的能力,从而提高了强酸性高硒茶园土壤硒的生物有效性。

#### 参考文献:

[1] 谭见安. 中国人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 83-118  
 [2] 俞永明. 茶树高产优质栽培新技术[M]. 北京: 金盾出版社, 2008: 23-25  
 [3] 马立锋, 石元值, 阮建云. 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

[4] 罗敏. 江苏省茶园土壤酸化现状及其影响因素研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 25-27  
 [5] 张永利, 孙力. 茶园土壤酸化及其改良措施[J]. 茶叶通报, 2011, 33(4): 158-161  
 [6] Zhang PC, Sparks DL. Kinetics of selenate and selenite adsorption /desorption at the goethite/water interface[J]. Environment Science & Technology, 1990, 24: 1 848-1 856  
 [7] 赵妍, 马爱军, 宗良纲, 汪润驰, 郭悦, 何任红. 不同调控措施在强酸性高硒茶园土壤中的应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2 306-2 312  
 [8] 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: 117-153  
 [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 163-165  
 [10] 赵成义, 任景华, 薛澄泽. 紫阳富硒区土壤中的硒[J]. 土壤学报, 1993, 30(3): 253-259  
 [11] 温国灿, 黄艳, 郭永玲, 陈炜, 王果. 酸性土壤有效硒提取条件优化的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1 996-2 000  
 [12] 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效态硒和总硒[J]. 土壤通报, 1998, 29(1): 47-封三  
 [13] 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  
 [14] 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  
 [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 119-120  
 [16] 李卓棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 43-45  
 [17] 陈铭, 谭见安, 王五一. 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  
 [18] 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

- [19] 朱建明, 秦海波, 李璐, 冯志刚, 苏宏灿. 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): 772-776
- [20] Kulp TR, Pratt LM. Speciation and weathering of selenium in Upper Cretaceous chalk and shale from South Dakota and Wyoming, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(18): 3 687-3 701
- [21] Martens DA, Suarez DL. Selenium speciation of marine shales, alluvial soils, and evaporation basin soils of California[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 424-432
- [22] 赵美芝. 影响土壤中硒有效性的若干因子[J]. 土壤, 1991, 23(5): 236-240
- [23] Dhillon KS, Dhillon SK. Adsorption-desorption reactions of selenium in some soils of India[J]. *Geoderma*, 1999, 93: 19-31
- [24] Hayes KF, Roe AL, Brown GE. In-situ X-ray absorption study of surface complexes: selenium oxyanions on  $\alpha$ -FeOOH[J]. *Science*, 1987, 238(4828): 783-786
- [25] 吴少尉, 池泉, 陈文武, 汤志勇, 金泽祥. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 92-95, 103
- [26] Kamei-Ishikawa N, Tagami K, Uchida S. Sorption kinetics of selenium on humic acid[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, 274(3): 555-561
- [27] 何振立, 杨肖娥, 祝军, 夏卫平, 潘健明, 刘小涯. 中国几种土壤中的有机态硒及其分布特征[J]. 环境科学学报, 1993, 13(3): 281-287
- [28] 李巨. EM 有机肥应用效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006: 15

## Effects of Applying Modes of Bio-organic Fertilizer and Conditioners on Selenium Bioavailability of Highly Acidic Se-rich Soil in Tea Gardens

YANG Ni<sup>1</sup>, ZONG Liang-gang<sup>1\*</sup>, YAN Jia<sup>1</sup>, YAO Huan<sup>1</sup>, MA Ai-jun<sup>2</sup>, HE Ren-hong<sup>2</sup>

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

**Abstract:** A series of field experiments were carried out to study the effects of different applying modes of conditioners on selenium (Se) availability of highly acidic Se-rich soil in tea gardens. And for reaching this goal, 3 alkaline conditioners (straw charcoal, lime and calcium-magnesium phosphate) and “BIO” bio-organic fertilizer were used. The results showed that the endogenous regulations to tea garden soil were able to improve Se bioavailability on the premise of not adding exogenous Se. 3 treatments that combined straw charcoal, lime and calcium-magnesium phosphate with bio-organic fertilizer respectively at intervals worked most effectively, which increased the content of soil available Se by 105.98, 114.09 and 146.71  $\mu\text{g}/\text{kg}$  respectively, increased the content of Se in tea by 0.96, 1.14 and 1.24  $\mu\text{g}/\text{g}$  correspondingly, and these enhancements all reached the extremely significant level ( $P < 0.01$ ).

**Key words:** Soil conditioner, Bio-organic fertilizer, Endogenous regulation, Effective selenium, Selenium species