

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22269

对比不同微生物肥料与化肥对茶园土壤肥力和茶叶品质的影响

刘文彬¹, 崔诗宇², 陈 锋³, 夏昕彤¹, 陈俊辉¹, 马嘉伟⁴, 柳 丹^{1*}

(1. 浙江农林大学, 亚热带森林培育国家重点实验室 / 浙江省土壤污染生物修复
重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学风景园林与建筑学院,
浙江 杭州 311300; 3. 新昌县农业资源利用指导中心, 浙江 绍兴 312500;
4. 浙江农林大学茶学与茶文化学院, 浙江 杭州 311300)

摘 要: 为探究微生物肥料对茶园土壤肥力及茶叶产量与品质的影响, 以茶树“龙井 43”品种为材料, 通过田间试验, 研究了不施肥 (CK)、常规化肥 (TF)、多菌种复合微生物肥料 (BCF1)、豆粕发酵类微生物肥料 (BCF2)、黄腐酸类微生物肥料 (BCF3) 对茶园土壤养分含量与碳、氮、磷转化酶活性及绿茶产量与品质的影响。结果表明, 与常规化肥相比, 3 种微生物肥料使土壤 pH 平均提升 0.27 个单位、容重显著降低 9.73%, 土壤速效钾、有效磷、有机质和碱解氮含量平均提升 9.72%、6.25%、9.19% 和 5.40%; 与常规化肥相比, 3 种微生物肥料使土壤 β -葡萄糖苷酶、 β -N-乙酰氨基葡萄糖酶活性分别增加 11.61%、20.13%, 且黄腐酸类微生物肥料使亮氨酸氨基肽酶、纤维二糖苷酶和 β -木聚糖酶活性分别显著增加 97.70%、66.44% 和 71.62%。与常规化肥相比, 3 种微生物肥料处理使茶叶磷积累量上升 10.08%; 铁、钙、锰和镍分别增加 19.63%、7.56%、12.06% 和 24.14%。与常规化肥相比, 黄腐酸类微生物肥料显著提高了百芽重、发芽密度、鲜叶产量和游离氨基酸总量。相关性分析表明鲜叶产量与土壤速效钾、碱解氮、有机质含量及纤维二糖苷酶、酸性磷酸酶和 β -木聚糖酶活性显著正相关 ($P < 0.05$)。综上所述, 3 种微生物肥料相比化肥可以更好地提高茶园土壤肥力, 提高茶叶产量和品质, 其中黄腐酸类微生物肥料效果最好。

关键词: 微生物肥料; 茶叶; 胞外酶活性; 产量; 品质; 土壤肥力

茶叶作为我国重要的经济作物, 在我国农业生产中占有重要地位。据统计, 截至 2020 年我国茶园总面积达 318 万 hm^2 , 茶叶种植面积居于世界首位, 茶业产量占世界产量的 1/2^[1]。然而, 近年来茶农为追求经济效益逐步加大了化肥投入量, 长期不合理施肥导致茶园土壤酸化、茶叶重金属含量超标, 土壤环境质量问题日益显现^[2]。据统计, 当前我国茶园土壤平均 pH 为 4.73, 仅有 41% 的茶园位于 4.5 ~ 5.5 这一最适宜茶树生长的区间, 高达 52% 的茶园 pH 在 4.5 以下, 处于严重酸化程度^[3]。因此, 合理施用肥料, 尤其是增施有机肥, 是未来我国茶园健康发展的必要途径^[4], 对改善茶园土壤质量、提高茶叶产量与品质具有重要意义。目前, 有机肥特别是微生物肥料在茶园中的应

用越来越普遍。微生物肥料施用后不仅可以提供作物生长所需的氮、磷、钾及微量元素, 还能增加土壤有机质和活性有益微生物^[5]。微生物肥料中的有益微生物可以通过固氮、解磷、解钾作用提高土壤肥力^[6], 促进土壤团粒结构形成, 提高土壤保水保肥能力^[7]。一些研究表明, 相较于普通化肥, 茶园施用微生物肥料使茶树株高提高 75.05%, 茶多酚含量增长 11.00%, 土壤铵态氮提高 201.04%, 显著提高植株对矿质元素的吸收^[8]。此外, 研究表明, 茶园连续施用 2 年以芽孢杆菌和木霉菌为主要成分的微生物肥料后发现, 土壤 pH 提高 0.4 个单位, 土壤养分含量显著提高^[9], 茶园每公顷增产 1185 ~ 1650 kg, 增产率达 18.4% ~ 21.1%^[10]。然而, 微生物肥料种类繁多, 前人的研究多聚焦于单一或者某些复合菌剂的施用效果, 在不同发酵材料制备的微生物肥料方面研究较少, 且不同微生物肥料相比化肥, 对土壤肥力、茶叶品质和生物学功能缺乏系统研究。本研究选取多菌种复合微生物肥料、豆粕发酵类微生物肥料和黄腐酸类微生物肥料

收稿日期: 2022-05-02; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LZ20C160003)。

作者简介: 刘文彬 (1998-), 在读硕士研究生, 主要从事土壤学与植物营养学研究。E-mail: lwb@stu.zafu.edu.cn。

通讯作者: 柳丹, E-mail: liudan7812@aliyun.com。



3 种不同类型的微生物肥料作为研究对象,通过田间试验,探究茶园施用微生物肥料相比常规化肥对茶园土壤理化性质、酶活性、茶叶产量与品质的影响,为茶园合理施用微生物肥料提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地点位于绍兴市新昌县澄潭街道东西陈村茶园(东经 $120^{\circ}45'42''$, 北纬 $29^{\circ}26'26''$)。该地区属亚热带季风气候,常年日照约 1900 h,年平均气温 16.6°C ,年降水量 1500 mm,无霜期 240 d。茶树品种为“龙井 43”,树龄 7 年,双条行种植,行距 1.5 m,管理方式为人工采摘茶园。试验区土壤类型为红壤,土壤容重 1.58 g/cm^3 , pH 3.78,碱解氮 292.25 mg/kg ,有效磷 91.16 mg/kg ,速效钾 90.28 mg/kg ,有机质 57.34 g/kg 。

1.2 供试材料

多菌种复合微生物肥料:有效菌种为枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*)、胶冻样芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*), $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1:1:2$,有效活菌数 ≥ 10 亿 /g,有机质 $\geq 60\%$,生产厂家为北京世纪阿姆斯生物技术有限公司。

豆粕发酵类微生物肥料:有效菌种为枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*), $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=2:0.5:1$,有效活菌数 ≥ 10 亿 /g,有机质 $\geq 60\%$,生产厂家为山东迈能农业科技有限公司。

黄腐酸类微生物肥料:有效菌种为巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*), $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=2:1:2$,有效活菌数 ≥ 10 亿 /g,有机质 $\geq 60\%$,黄腐酸 $\geq 15\%$,生产厂家为临沂联农肥业有限公司。

复合肥: $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=16:16:16$,生产厂家为湖北新洋丰肥业有限公司。

1.3 试验设计

试验共设 5 个处理,分别为:不施肥对照(CK)、施用多菌种复合微生物肥料 1500 kg/hm^2 (BCF1)、施用豆粕发酵类微生物肥料 1500 kg/hm^2 (BCF2)、施用黄腐酸类微生物肥料 1500 kg/hm^2 (BCF3)、以及施用常规化肥即复合肥 (16-16-16) 750 kg/hm^2 (TF)。试验采用随机区组设计,每个处理设置 3 次重复,小区面积 40 m^2 (长 20 m、宽 2 m),不同小区间设置间隔 1.5 m 的保护行。肥料施用时间为 2021 年 1 月,采用条状沟施,沿小区的

茶树行,在茶树根际到树冠边缘 2/3 处(距茶树 0.3 m 左右),开宽 20 cm、深 15 cm 施肥沟,一次性将肥料施入,施后覆土,其他管理措施同当地保持一致。

1.4 样品采集

茶叶样品:于 2021 年 7 月进行采样,采样标准为一芽二叶茶鲜叶,采后立即带回实验室,放入已预热 105°C 的烘箱,烘 10 ~ 15 min,转 80°C 烘至足干,由此制得热风固样样品,烘干后放入冰箱低温保存备用。

土壤样品:采用 5 点取样法,利用不锈钢土钻在离茶树根系 10 cm 处取表层 (0 ~ 20 cm) 土壤混合成一份样品,每份样品质量 1 kg。低温保存带回实验室后剔除杂物,过 2 mm 筛,充分混合后将土壤分两部分,一部分储存于 4°C 冰箱用于测定土壤酶活性,另一部分自然风干用于测定土壤理化性质。

1.5 测定方法

1.5.1 发芽密度和百芽重

在茶树鲜叶采摘前,采用 0.1 m^2 样框 5 点取样调查法 ($33.3\text{ cm}\times 33.3\text{ cm}$),从上至下采摘方框内驻芽小开面一芽二叶,记录发芽密度,每个小区重复 6 次;对各试验小区内每个小区采摘足量的新梢(一芽二叶),随机快速选取 100 个新梢称重,称重后混合至原来的茶鲜叶中,重新选取 100 个新梢称重,如此重复 6 次^[11]。

1.5.2 茶叶产量和含水量

采用全小区记产(不包含保护行)测量鲜叶产量 ($\text{kg}/\text{小区}$),通过小区产量换算得出公顷产量 (kg/hm^2)。将每个处理小区的芽叶(一芽二叶)全部采摘完,称重。取 200 g 茶树鲜叶放入烘箱, 120°C 烘干至恒重,计算茶树鲜叶含水量^[11]。

1.5.3 茶叶品质与微量元素测定

茶多酚参照 GB/T 8313—2018 福林酚法测定;游离氨基酸总量参照 GB/T 8314—2013 茚三酮比色法测定;咖啡碱参照 GB/T 8312—2013 紫外分光光度法测定。采用 NY/T 2017—2011 检测茶叶氮、磷、钾含量。利用单波长激发能量色散 X 射线荧光光谱仪(北京安科慧生, PHECDA-PRO),测定茶叶中钙、铁、锰、锌和镍元素含量,使用快速基本参数法测试,时间 10 min/个,采用 Fast FP 算法作为分析方法。将茶叶样品磨粉,过 0.15 mm 标准筛混匀。样品杯用 X 射线专用聚丙烯膜密封完整,将过筛后的

茶叶样品分别装入专用样品杯中，压实并保证样品测试面光滑平整，样品测试 3 次平行^[12]；采用叶绿素仪（Chlorophyll Meter Model SPAD-502）测定各处理茶叶相同部位（即新芽往下第 3 片茶叶）的 SPAD 值。

1.5.4 土壤理化性质分析

土壤容重参照 NY/T 1121.4—2006 测定；pH 参照 NY/T 1377—2007 电位法测定；有效磷参照 NY/T 1121.7—2014 钼锑抗比色法测定；速效钾参照 NY/T 889—2004 火焰光度法测定；碱解氮参照 LY/T 1229—1999 碱解扩散法测定；有机质参照 NY/T 1121.6—2006 高温外热重铬酸钾氧化法测定。

1.5.5 土壤酶活性测定

本试验测定了 6 种土壤酶活性，包括 β- 葡萄糖苷酶、纤维二糖苷酶、β- 木聚糖酶、β-N- 乙酰氨基葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶以及酸性磷酸酶。土壤酶活性测定采用荧光微孔板检测技术^[13]。称取 2 g 鲜土于离心管中，加入 100 mL pH 为 5.0 的醋酸铵缓冲液，在 25℃ 180 r/min 摇床振荡 30 min。吸取 200 μL 土壤悬浊液于 96 孔板中，并立即加入 50 μL 反应底物，放入 25℃ 培养箱中避光培养 3 h。用酶标仪（Synergy TM H1，Biotek，美国）在

365 nm 激发波长和 450 nm 发射波长下检测吸光值并计算土壤酶活性，酶活性的单位用 nmol/（g·h）表示。

1.6 统计分析

使用 Excel 2018 进行数据整理，使用 SPSS 23.0 进行数据统计分析。利用单因素方差分析对数据进行差异显著性检验，用邓肯（Duncan）法对试验数据做多重比较，差异显著性标准采用 $P<0.05$ 水平。通过 Origin 2021 完成相关数据的图表制作，试验数据均采用平均值 ± 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同微生物肥料处理对茶园土壤理化性质的影响

由表 1 可知，与 TF 处理相比，BCF1、BCF3 处理土壤容重分别显著降低 12.42%、14.29%，土壤速效钾含量分别显著提升 17.02%、14.96%；BCF2、BCF3 处理土壤 pH 分别显著提高 0.29、0.38 个单位，土壤有效磷分别提高 7.96%、19.81%；BCF3 处理土壤有机质、碱解氮含量显著提高，增幅分别为 20.82%、25.45%。

表 1 不同微生物肥料处理对茶园土壤理化性质的影响

处理	容重（g/cm ³ ）	pH	碱解氮（mg/kg）	有效磷（mg/kg）	速效钾（mg/kg）	有机质（g/kg）
CK	1.67 ± 0.05a	3.80 ± 0.02c	296.24 ± 17.71b	90.05 ± 7.42a	83.85 ± 5.50b	53.90 ± 4.95b
BCF1	1.41 ± 0.09b	3.87 ± 0.12bc	303.68 ± 41.44b	98.25 ± 15.34a	114.00 ± 4.35a	63.36 ± 5.60ab
BCF2	1.57 ± 0.14ab	4.04 ± 0.14ab	336.78 ± 20.95b	116.60 ± 8.12a	94.66 ± 11.50b	55.62 ± 1.76b
BCF3	1.38 ± 0.06b	4.13 ± 0.11a	421.20 ± 48.42a	129.40 ± 0.59a	112.00 ± 7.00a	69.53 ± 5.22a
TF	1.61 ± 0.14a	3.75 ± 0.05c	335.75 ± 38.90b	108.00 ± 16.42a	97.42 ± 9.16b	57.55 ± 6.15b

注：同列数据后不同字母表示不同处理差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

2.2 不同微生物肥料处理对茶园土壤酶活性的影响

由表 2 可知，与 TF 化肥处理相比，微生物肥料处理使土壤 β- 葡萄糖苷酶、β-N- 乙酰氨基葡萄糖苷酶活性分别增加 3.48% ~ 20.08%、2.47% ~ 31.42%；BCF3 处理与 TF 处理相比，土壤亮氨酸氨基肽酶、纤维二糖苷酶和 β- 木聚糖酶活性分别显著增加 97.70%、66.44%、71.62%；BCF1、BCF2 处理与 TF 处理相比，酸性磷酸酶活性分别降低 24.71%、23.31%，纤维二糖苷酶

活性分别下降 13.15%、15.92%。

2.3 不同微生物肥料处理对茶叶养分累积量的影响

从图 1 可知，BCF2 处理氮积累量最高，为 37.80 g/kg；BCF1、BCF2 和 BCF3 处理磷含量相比 TF 处理分别上升 16.46%、13.63% 和 0.14%；茶叶钾含量表现出 BCF3（16.89 g/kg）>TF（16.49 g/kg）>BCF2（16.31 g/kg）>BCF1（16.12 g/kg）>CK（14.94 g/kg），与 TF 处理相比，BCF3 处理上升 2.42%，BCF1、BCF2 处理分别下降 2.24%、1.09%。

表 2 不同微生物肥料处理对土壤酶活性的影响 [nmol/ (g · h)]

处理	亮氨酸氨基肽酶	β-葡萄糖苷酶	纤维二糖苷酶	β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	酸性磷酸酶	β-木聚糖酶
CK	2.13 ± 0.46c	27.66 ± 5.40a	2.08 ± 0.63b	15.03 ± 1.51b	199.72 ± 25.57c	8.60 ± 2.20b
BCF1	3.76 ± 0.23abc	44.05 ± 4.55a	2.51 ± 0.36b	24.49 ± 4.87ab	239.00 ± 13.60c	16.60 ± 4.20a
BCF2	5.24 ± 0.24ab	47.37 ± 5.06a	2.43 ± 0.40b	30.23 ± 3.71a	243.43 ± 23.23bc	11.25 ± 1.05ab
BCF3	6.03 ± 0.41a	51.12 ± 5.60a	4.81 ± 0.02a	31.41 ± 3.14a	327.67 ± 31.20a	16.87 ± 0.97a
TF	3.05 ± 0.69bc	42.57 ± 6.57a	2.89 ± 0.44b	23.90 ± 4.20ab	317.43 ± 25.41ab	9.83 ± 2.15b

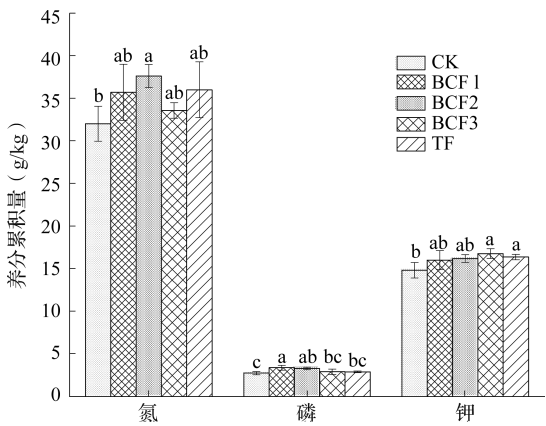


图 1 不同微生物肥料处理对茶叶养分累积量的影响
注：同一养分不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.4 不同微生物肥料处理对茶叶中微量元素含量的影响

由表 3 可知，与常规化肥处理相比，微生物肥料处理茶叶中钙、锰、镍分别增加 3.34% ~ 14.06%、1.04% ~ 18.26%、18.45% ~ 61.74%；与 TF 处理相比，BCF2、BCF3 处理铁含量分别提高 29.45%、38.15%，BCF1 处理下降 8.71%；茶叶中锌含量表现为 BCF1、BCF2 处理分别增加 15.15%、3.98%，BCF3 处理显著增加，增幅为 23.17%。从试验结果来看，与 TF 处理相比，微生物肥料施用后均能提高茶叶中钙、铁、锰、锌和镍含量，其中 BCF2 处理中钙含量最高，而 BCF3 处理中的铁、锰、锌和

表 3 不同微生物肥料处理对茶叶中微量元素含量的影响 (mg/kg)

处理	钙	铁	锰	锌	镍
CK	6670.33 ± 207.05a	160.33 ± 7.57c	1232.00 ± 260.09b	37.27 ± 1.76c	51.20 ± 1.87b
BCF1	6950.66 ± 507.22a	174.67 ± 32.35c	1804.67 ± 45.76a	45.37 ± 5.52ab	77.43 ± 4.24ab
BCF2	7671.67 ± 472.63a	247.67 ± 28.22ab	1560.00 ± 145.71ab	40.97 ± 3.55bc	60.30 ± 21.1ab
BCF3	7081.00 ± 353.59a	264.33 ± 57.73a	1826.00 ± 39.95a	48.53 ± 2.67a	105.73 ± 48.82a
TF	6726.00 ± 501.01a	191.33 ± 13.65bc	1544.00 ± 259.76ab	39.40 ± 0.61bc	65.37 ± 3.67ab

镍含量与其他处理相比均为最高，说明黄腐酸类微生物肥料能够增强茶树对微量元素的吸收，从而提高茶叶中微量元素含量。

2.5 不同微生物肥料处理对茶树叶绿素含量的影响

不同处理茶树鲜叶叶绿素含量 (SPAD 值) 变化如图 2 所示。SPAD 值大小表现为 BCF1>BCF3>BCF2>TF>CK，其中 BCF1、BCF2、BCF3 和 TF 处理茶树叶片的 SPAD 值比 CK 处理分别显著提高了 33.77%、24.50%、30.69% 和 21.71%；与 TF 处理相比，BCF1、BCF2 和 BCF3 处理的 SPAD 值分别增加了 9.91%、2.29% 和 7.38%，由此可见，施用微生物肥料可以显著提高茶树鲜叶的 SPAD 值，其中以 BCF1 处理 (多菌种复合微生物肥料) 的效果最好。

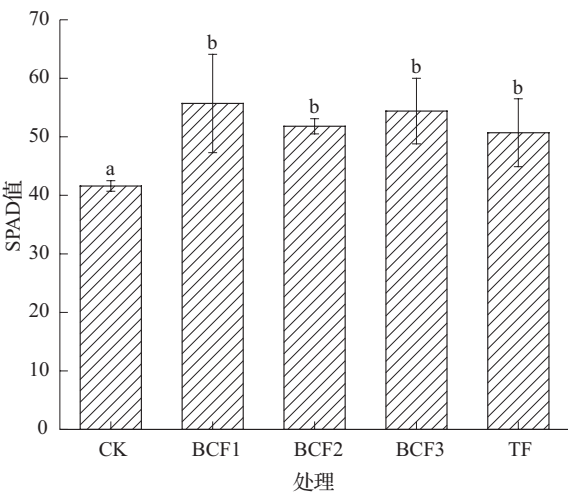


图 2 不同微生物肥料处理对茶树鲜叶 SPAD 值的影响

2.6 不同微生物肥料处理对茶叶产量的影响

由表4可知,与TF处理相比,BCF1、BCF3处理百芽重分别增加0.13%、13.01%,其中BCF3处理具有显著性差异;BCF3和TF处理新梢含水率与CK处理相比显著增加,增幅分别为8.70%和9.77%;BCF3处理发芽密度最大,为333.33个/m²,与CK处理相比显著增加了117.39%,与TF处理相比显著增加了

26.58%;茶鲜叶产量表现出BCF3(945.89 kg/hm²)>TF(661.27 kg/hm²)>BCF1(593.32 kg/hm²)>BCF2(456.89 kg/hm²)>CK(323.09 kg/hm²),与CK处理相比,微生物肥料处理显著增加了41.41%~192.76%,与TF处理相比,BCF3处理显著增加了43.04%。试验结果表明,施用微生物肥料后对茶叶百芽重、发芽密度和产量的提高具有重要作用。

表4 不同微生物肥料处理对茶叶产量的影响

处理	百芽重(g)	发芽密度(个/m ²)	新梢含水率(%)	鲜叶产量(kg/hm ²)
CK	20.97±1.14d	153.33±15.28d	53.27±0.02b	323.09±66.63d
BCF1	25.13±1.70b	236.67±15.28b	52.03±0.01b	593.32±19.76b
BCF2	23.21±0.65c	196.67±25.17c	53.25±0.01b	456.89±46.02c
BCF3	28.37±0.22a	333.33±11.55a	57.91±0.01a	945.89±78.38a
TF	25.10±0.52b	263.33±25.17b	58.47±0.01a	661.27±40.21b

2.7 不同微生物肥料处理对茶叶主要品质成分的影响

分析不同处理下的茶叶品质发现(表5),各处理茶多酚含量表现为TF>BCF1>BCF2>BCF3>CK,与CK处理相比,微生物肥料处理增加了6.03%~14.88%,其中BCF1处理茶多酚含量显著增加;与TF处理相比,BCF2和BCF3处理游离氨基酸总量显著增加,增幅分别为30.12%、40.16%,

BCF1处理增加17.67%,增幅不显著。各处理中CK处理酚氨比最高,为7.62,其次是TF处理,为7.41,与TF处理相比,BCF2、BCF3处理分别显著下降26.72%、34.41%,BCF1处理下降14.17%,差异不显著。各个处理咖啡碱含量变化不大,与TF处理相比,BCF1、BCF2、BCF3处理分别增加1.44%、3.46%、0.86%,且各处理间没有显著性差异。

表5 不同微生物肥料处理对茶叶主要品质成分的影响

处理	茶多酚含量(%)	游离氨基酸总量(%)	咖啡碱含量(%)	酚氨比
CK	15.93±2.35b	2.09±0.05d	3.30±0.07a	7.62±1.12a
BCF1	18.30±0.23a	2.93±0.54bc	3.52±0.38a	6.36±1.12ab
BCF2	17.60±0.88ab	3.24±0.11ab	3.59±0.31a	5.43±0.46b
BCF3	16.89±0.84ab	3.49±0.30a	3.50±0.21a	4.86±0.61b
TF	18.44±0.40a	2.49±0.14cd	3.47±0.02a	7.41±0.30a

2.8 茶叶产量和品质与土壤理化特性及酶活性相关性分析

由图3可知,鲜叶产量与土壤速效钾、碱解氮、有机质、纤维二糖苷酶、酸性磷酸酶和β-木聚糖酶活性显著正相关($P<0.05$),其中土壤碱解氮显著促进茶树新梢含水率与发芽密度增加。茶叶氨基酸含量与土壤有效磷、纤维二糖苷酶和酸性磷酸酶活性显著正相关($P<0.05$),酚氨比与茶树新梢含水率、发

芽密度、鲜叶产量、氨基酸和土壤纤维二糖苷酶活性显著负相关($P<0.05$)。土壤有效磷与pH、β-葡萄糖苷酶和纤维二糖苷酶活性显著正相关($P<0.05$),碱解氮与有机质、亮氨酸氨基肽酶、纤维二糖苷酶、β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性显著正相关($P<0.05$),土壤容重与茶树发芽密度、鲜叶产量、氨基酸和土壤有效磷、速效钾、有机质、纤维二糖苷酶、β-木聚糖酶活性显著负相关($P<0.05$)。

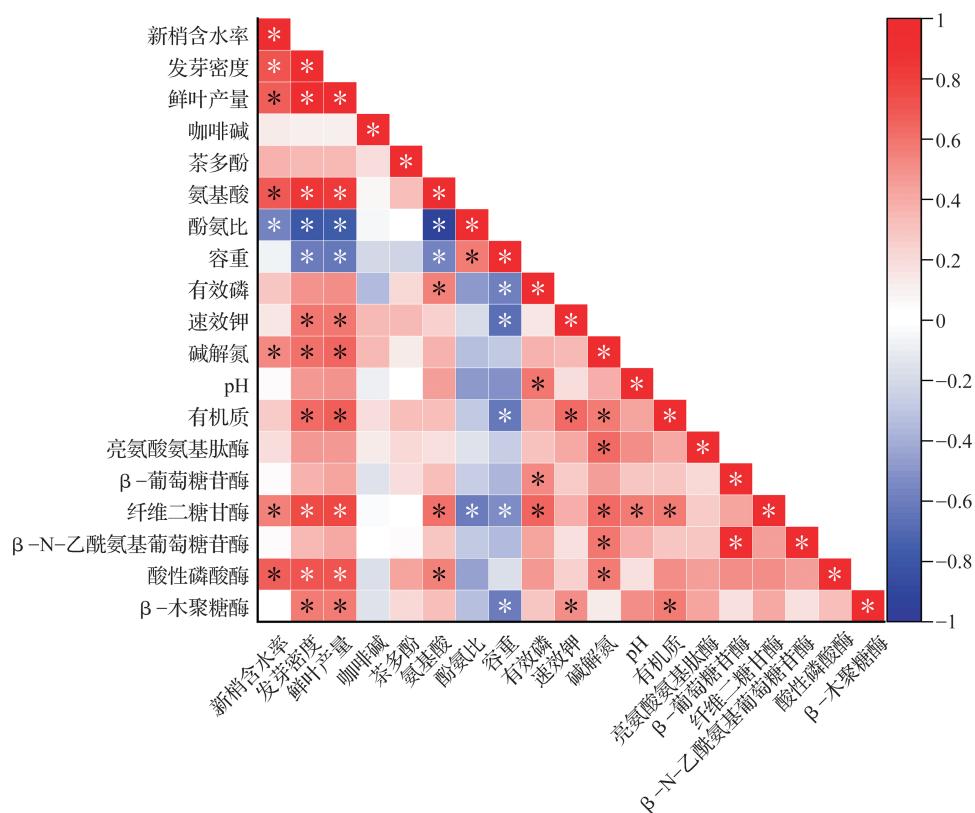


图3 茶叶产量品质与土壤理化特性及酶活性相关性分析

3 讨论

3.1 不同微生物肥料对茶园土壤理化性质的影响

本研究发现, 茶园施用微生物肥料后表层土壤容重均存在不同程度地下降, 与常规化肥相比, 下降幅度为 2.41% ~ 14.29%。茶园属于旱地耕作, 常年不松土或者少松土, 导致土壤发生板结, 土壤孔隙度不断下降, 最终影响茶树正常生长。谢建华^[14]的研究证实在茶园施用微生物肥料后, 与施用复合肥相比表层土壤容重降低了 7.75%, 下层土壤容重降低了 5.07%。韦建玉等^[15]的研究表明施用微生物肥料能够显著降低土壤容重, 提高土壤肥力。因此, 微生物肥料能够改善茶园土壤物理结构, 从而有助于提高茶叶产量与品质。适宜茶树生长的土壤 pH 为 4.5 ~ 5.5, 然而由于茶树本身分泌酸性物质, 再加上大量施用化肥, 逐渐造成土壤 pH 不断下降^[16]。本研究发现, 试验前茶园土壤 pH 为 3.78, 施用微生物肥料后土壤 pH 都有所上升, 说明微生物肥料能够提高茶园土壤 pH、降低土壤酸度。

微生物肥料不仅能够提高茶园土壤 pH, 还能提升茶园土壤养分。本研究中土壤碱解氮、有效磷、速

效钾和有机质含量在微生物肥料施用后均有所上升。微生物肥料作为生物肥料的一种, 不仅促进养分供给, 还可以改善茶树根际微环境和微生物活性^[17]。本研究中所涉及到的枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶冻样芽孢杆菌可以通过固氮、解磷和解钾作用来改善土壤养分。例如解淀粉芽孢杆菌能够将大气中的氮通过固氮作用转化为氨, 从而提高土壤中的氮含量^[18]; 枯草芽孢杆菌可以通过向细胞外释放有机酸性物质来将不溶态磷转化为植物可以吸收利用的有效态磷^[19]; 而胶冻样芽孢杆菌则可以在溶解硅酸盐矿物质过程中产生有机酸, 如草酸、乙酸等, 这些酸性物质能够与金属离子发生络合、螯合和交换作用, 从而释放出 K^+ ^[20-22]。

3.2 不同微生物肥料对茶园土壤酶活性的影响

土壤酶在土壤的能量转移、代谢性能、养分循环中起着重要作用, 是土壤中活跃的有机成分之一, 常作为评价土壤肥力的重要指标^[23]。在本研究中, 黄腐酸类微生物肥料处理土壤中亮氨酸氨基肽酶、纤维二糖苷酶、β-木聚糖酶含量与常规化肥处理相比均显著增加, 这与前人的研究结果一致^[24]。孙希武等^[25]发现在桃树中施用黄腐酸钾能够显著增加桃幼树生长季各个时期土壤酸性磷酸

酶、脲酶和过氧化氢酶活性。有研究表明,施用微生物肥料显著增加小麦根际土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶及脲酶等酶的活性^[26]。这主要是由于土壤酶活性与土壤中微生物的活动存在着紧密相关的联系,微生物肥料的施用能够提高土壤中有益微生物的数量,调节土壤微生态,从而增强土壤酶活性。

3.3 不同微生物肥料对茶树生长和茶叶产量与品质的影响

3种微生物肥料的施用均能够增加茶叶新梢中氮、磷和钾的含量。茶树新梢中氮、磷和钾的含量对于茶树生长和茶叶品质的形成具有重要意义^[27],例如磷素对于提升茶叶的香气和滋味具有重要作用,茶叶中的氨基酸、咖啡碱含量也与植物体内的氮素和钾素含量呈显著正相关^[28-29]。铁是组成植物叶绿素的重要元素,与茶叶中叶绿素含量增加、叶片光合作用改善有关。利用X射线荧光法测定了茶叶中6种微量元素,发现豆粕发酵类微生物肥料和黄腐酸类微生物肥料处理茶叶中铁含量显著增加,茶叶铁含量的增加可能与微生物肥料中的微生物能够分泌铁载体^[30],从而促进植物根系对铁的吸收有关。3种微生物肥料的施用均能够显著增加叶片的SPAD值,其中施用多菌种复合微生物肥料处理的叶片SPAD值最高。这与该肥料中所富含的枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌和胶冻样类芽孢杆菌能够分泌出吡啶乙酸、赤霉素、氨基酸和多糖,从而作为植物生长调节剂对茶树的光合作用具有显著影响有关。因此,在茶园施用多菌种复合微生物肥料能够增加叶片中叶绿素的含量,提升茶树的光合作用。

茶叶产量的形成主要依靠单位面积内茶树的发芽密度以及茶芽的质量。与常规化肥相比,黄腐酸类微生物肥料的施用能显著增加茶树新梢的发芽密度、百芽重和鲜叶产量。黄腐酸是腐殖酸中较小的有机弱酸混合物^[31],含有多种活性官能团,它可以通过茶树的根、茎和叶促进茶树发芽。前人研究发现在茶树底肥中添加黄腐酸类水溶肥料进行沟施,能够显著提高春茶、夏秋茶产量,并且随着黄腐酸类肥料用量的增加,产量有增加的趋势^[32]。彭志对等^[33]发现黄腐酸在茶叶中施用能够显著提高茶叶每平方米的茶芽数和百芽鲜重,其中对夏茶的效果优于秋茶,并以52.5 kg/hm²的施用效果最佳。这与本研究的结果一致,说明黄腐酸

类微生物肥料的施用能够提高茶叶的发芽密度,从而增加茶叶的产量。茶叶品质是评价茶叶质量的一项重要指标,品质决定了茶叶的经济效益^[34]。就茶叶品质而言,酚氨比越低,越有利于提高名优绿茶的品质。在本试验结果中,3种微生物肥料均能够明显降低酚氨比,其中黄腐酸类微生物肥料茶叶品质最佳。有研究表明,通过施用黄腐酸能够显著提高茶叶游离氨基酸总量,这主要由于黄腐酸作为植物内源激素的一种,能够刺激植物体内内生长素和细胞激态类物质含量的增加^[35-36],增强植物根系活力,提高叶片中叶绿素的含量和光合作用强度,从而增加茶叶叶片中游离氨基酸的含量,促进植物蛋白的合成,降低茶叶酚氨比,提高茶叶品质^[37-38]。

4 结论

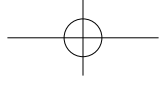
不同微生物肥料与常规化肥相比均能不同程度改善茶园土壤物理结构,提高茶园土壤养分含量,增强土壤酶活性。

与常规化肥相比,3种微生物肥料处理叶绿素含量均有所增加,其中黄腐酸类微生物肥料处理百芽重、发芽密度、鲜叶产量、游离氨基酸总量、钾积累量和铁含量均显著增加,酚氨比显著下降。

3种微生物肥料处理均能改善土壤肥力,提高茶叶品质,其中黄腐酸类微生物肥料在提高茶园土壤养分,增强土壤酶活性等方面优于其他微生物肥料。

参考文献:

- [1] 李兵. 茶园管理机械发展现状及趋势[J]. 现代农业装备, 2021, 42(2): 14-17.
- [2] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1094-1109.
- [3] 颜鹏, 韩文炎, 李鑫, 等. 中国茶园土壤酸化现状与分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(4): 795-813.
- [4] 耿赛攀, 马立锋. 施肥对茶园土壤质量及茶叶产量、品质的影响研究进展[J]. 茶叶学报, 2021, 62(1): 22-29.
- [5] 张奇, 张振华, 陈雅玲, 等. 施用生物有机肥对土壤特性、作物品质及产量影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(15): 71-76.
- [6] 周法永, 卢布, 顾金刚, 等. 我国微生物肥料的发展阶段及第三代产品特征探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 12-17.
- [7] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响[J]. 土壤, 2019,



- 51 (3): 477-487.
- [8] 肖开兴, 肖析蒙, 杨瑶君, 等. 复合微生物肥对茶树生长的促进作用初探 [J]. 四川林业科技, 2019, 40 (6): 48-54.
- [9] 吴林土, 徐火忠, 李贵松, 等. 微生物菌剂对松阳茶园土壤酸化改良及肥力提升的效果分析 [J]. 浙江农业科学, 2022, 63 (6): 1245-1249.
- [10] 陈美清. 复合微生物肥料在闽北茶叶生产上的示范效应 [J]. 福建茶叶, 2019, 41 (1): 6.
- [11] 谢克孝, 薛志慧, 陈志丹. 茶园间作不同植物对茶叶产量和品质及茶园土壤的影响 [J]. 茶叶通讯, 2021, 48 (3): 422-429.
- [12] 龚春慧, 曾国强, 葛良全, 等. 波长色散 X 射线荧光法测定茶叶中微量元素 [J]. 核技术, 2013, 36 (9): 11-19.
- [13] German D P, Weintraub M N, Grandy A S, et al. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43 (7): 1387-1397.
- [14] 谢建华. 复合微生物肥料对茶园土壤结构和茶叶生长的影响初探 [J]. 亚热带水土保持, 2021, 33 (2): 13-16.
- [15] 韦建玉, 王政, 黄崇峻, 等. 增施微生物菌肥对植烟土壤理化性质及微生物量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2018, 46 (11): 57-61.
- [16] 颜鹏, 韩文炎, 李鑫, 等. 中国茶园土壤酸化现状与分析 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (4): 795-813.
- [17] 彭江涛, 周国英, 蒋越西, 等. 生物复合肥对油茶苗木生长及土壤微生态的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (6): 137-142.
- [18] 王璠, 徐圣君, 马双龙, 等. 解淀粉芽孢杆菌菌剂对雪菜生长和土壤氧化亚氮排放的影响 [J]. 中国农学通报, 2015, 31 (13): 229-235.
- [19] 张艺灿, 刘凤之, 王海波. 根际溶磷微生物促生机制研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (2): 1-9.
- [20] 郑立伟, 闫洪波, 张丽, 等. 微生物肥料发展及作用机理综述 [J]. 河北省科学院学报, 2020, 37 (1): 61-67.
- [21] Stamenkovi S, Bekoski V, Karabegovi I, et al. Microbial fertilizers: a comprehensive review of current findings and future perspectives [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2018, 16 (1): e1R-e9R.
- [22] Naik K, Mishra S, Srichandan H, et al. Plant growth promoting microbes: potential link to sustainable agriculture and environment [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 21: 101326.
- [23] 张晓宇, 高原, 刘彩娟, 等. 黄腐酸与化肥配施对设施辣椒根区土壤环境及氮磷钾利用效率的影响 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (6): 893-902.
- [24] 刘佳欢, 王倩, 罗人杰, 等. 黄腐酸肥料对小麦根际土壤微生物多样性和酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (10): 1808-1816.
- [25] 孙希武, 彭福田, 肖元松, 等. 硅钙钾镁肥配施黄腐酸钾对土壤酶活性及桃幼树生长的影响 [J]. 核农学报, 2020, 34 (4): 870-877.
- [26] 胡诚, 刘东海, 乔艳, 等. 施用生物有机肥对土壤酶活性及作物产量的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32 (S1): 308-312.
- [27] 罗凡, 张厅, 龚雪蛟, 等. 不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (12): 3499-3506.
- [28] Lin Z, Qi Y, Chen R, et al. Effects of phosphorus supply on the quality of green tea [J]. Food Chemistry, 2012, 130 (4): 908-914.
- [29] 周志, 刘扬, 张黎明, 等. 武夷茶区茶园土壤养分状况及其对茶叶品质成分的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (8): 1425-1434.
- [30] Shilev S, Naydenov M, Prieto M S, et al. PGPR as inoculants in management of lands contaminated with trace elements [M]// Maheshwari D K. Bacteria in agrobiology: stress management. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 259-277.
- [31] 程亮, 张保林, 王杰, 等. 腐植酸肥料的研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2011 (5): 1-6.
- [32] 李秀花, 刘士坤, 孙萌萌, 等. 生物黄腐酸肥料在茶叶上的应用研究 [J]. 腐植酸, 2017 (5): 40-43.
- [33] 彭志对, 黄继川, 于俊红, 等. 施用腐植酸肥料对茶叶产量和品质的影响 [J]. 广东农业科学, 2012, 39 (22): 6-8.
- [34] 王凯, 张乃明, 刘惠见, 等. 不同施肥措施对勐海大叶茶产量与品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (3): 194-198.
- [35] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (4): 1065-1076.
- [36] 张萌欣, 薛胜平, 王晓环, 等. 黄腐酸应用概述及研究课题展望 [J]. 腐植酸, 2020 (5): 15-19.
- [37] Nardi S, Pizzeghello D, Muscolo A, et al. Physiological effects of humic substances on higher plants [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34 (11): 1527-1536.
- [38] El-Ghamry A M, Abd K M, Ghoneem K M. Amino and humic acids promote growth, yield and disease resistance of faba bean cultivated in clayey soil [J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2009, 3 (2): 731-739.

Effects of different microbial fertilizers and chemical fertilizers on soil fertility and tea quality in tea garden

LIU Wen-bin¹, CUI Shi-yu², CHEN Feng³, XIA Xin-tong¹, CHEN Jun-hui¹, MA Jia-wei⁴, LIU Dan^{1*} (1. Zhejiang Agricultural & Forestry University, State Key Laboratory of Subtropical Forest Cultivation/ Zhejiang Key Laboratory of Soil Pollution Bioremediation, Hangzhou Zhejiang 311300 ; 2. College of Landscape Architecture and Architecture, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Hangzhou Zhejiang 311300 ; 3. Xinchang Agricultural Resources Utilization Guidance Center, Shaoxing Zhejiang 312500 ; 4. College of Tea Science and Tea Culture, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Hangzhou Zhejiang 311300)

Abstract: In order to explore the effect of microbial fertilizer on soil fertility, yield and quality of tea in tea garden, the tea cultivar ‘Longjing 43’ was used as material. The effects of no fertilizer (CK), conventional fertilizer (TF), multi-strain compound microbial fertilizer (BCF1), soybean meal fermentation microbial fertilizer (BCF2) and fulvic acid microbial fertilizer (BCF3) on soil nutrient content, carbon, nitrogen and phosphorus invertase activity and green tea yield and quality in tea garden were studied by field experiment. The results showed that compared with conventional fertilizers, three microbial fertilizers increased soil pH by 0.27 units on average, decreased bulk density by 9.73%, and increased soil available potassium, available phosphorus, organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen by 9.72%, 6.25%, 9.19% and 5.40% on average, respectively. Compared with conventional fertilizers, three microbial fertilizers increased the activities of β -glucosidase and β -N-acetylglucosaminidase by 11.61% and 20.13%, respectively, and fulvic acid microbial fertilizers increased the activities of leucine aminopeptidase, cellulose diglucosidase and β -xylanase by 97.70%, 66.44% and 71.62%, respectively. Compared with conventional chemical fertilizer, three microbial fertilizer treatments increased the phosphorus accumulation of tea by 10.08%, and increased the contents of iron, calcium, manganese and nickel by 19.63%, 7.56%, 12.06% and 24.14%, respectively. Compared with conventional fertilizers, fulvic acid microbial fertilizers significantly increased hundred-bud weight, germination density, fresh leaf yield and total free amino acids. Correlation analysis showed that fresh leaf yield was significantly positively correlated with soil available potassium, available nitrogen, organic matter, cellulose diglucosidase, acid phosphatase and β -xylanase enzyme activities ($P < 0.05$). In summary, compared with chemical fertilizers, the three microbial fertilizers can better promote the soil fertility of tea gardens and improve the yield and quality of tea. Among them, fulvic acid microbial fertilizers have the best effect.

Key words: microbial fertilizer; tea; extracellular enzyme activity; yield; quality; soil fertility