



侯松峰,袁杨,曾智鸿,等.有机肥配施微生物菌剂对井冈蜜柚土壤微生物及果实品质的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(1):74-84.

HOU S F,YUAN Y,ZENG Z H,et al.Effects of organic fertilizer and microbial agent on soil microorganisms and fruit quality of Jing-gang pomelo[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(1):74-84.

有机肥配施微生物菌剂对井冈蜜柚土壤微生物及果实品质的影响

侯松峰^{1,2},袁 杨³,曾智鸿^{1,2},韩荔宇^{1,2},付圣男^{1,2},陈 洁^{1,2},方 熊^{1,2},
荣勤雷¹,倪国荣¹,谢凯柳^{1,2*},周春火^{1,2*}

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院,江西 南昌 330045;2.江西井冈蜜柚科技小院,江西 吉安 343000;3.中科生态修复(江西)创新院股份有限公司,江西 南昌 330000)

摘要:【目的】探究有机肥配施微生物菌剂对井冈蜜柚园土壤养分、土壤微生物及果实品质的影响,为井冈蜜柚的科学施肥提供依据。【方法】以井冈蜜柚品种之一的金兰柚为研究对象,设置对照(CK)、单施有机肥(T₁)、有机肥+微生物菌剂(T₂)及单施微生物菌剂(T₃)4个处理,探究有机肥配施微生物菌剂对柚园土壤养分和果实品质的影响,并通过 Biolog-ECO 方法分析土壤微生物群落代谢多样性特征。【结果】与 CK 相比,T₂处理能提高土壤 pH,改善土壤酸化情况;显著提高土壤全氮、有效磷、速效钾等养分,提升比例分别为 13.87%、44.39%、12.54%。T₂处理后土壤微生物的代谢活性和土壤中细菌的数量增加,其对碳水化合物类、羧酸类、胺类等碳源利用强度增高,但对酚酸类碳源利用强度降低。T₂处理能显著提高土壤微生物群落中的物种优势度和群落结构的丰富度,但对微生物群落均匀度无显著影响。与 CK 相比,T₁、T₂、T₃处理均能提高果实品质,其中 T₂处理对果实品质的提升效果最好。T₂处理能显著提高井冈蜜柚单果质量、可溶性固形物、VC 和固酸比,较 CK 处理分别提高 5.56%、12.14%、27.54% 和 36.39%。相关性分析显示,碳水化合物类等碳源利用强度与蜜柚可溶性糖、VC 和固酸比等品质指标呈显著正相关关系。【结论】有机肥配施微生物菌剂能提高土壤 pH,改善柚园土壤酸化情况;有效提高果园土壤微生物活性,增加土壤微生物对碳水化合物类、羧酸类和胺类等碳源的利用强度和微生物功能多样性,提升土壤肥力,进而改善井冈蜜柚的产量及果实品质。因此,有机肥配施微生物菌剂的施肥模式可在井冈蜜柚主产区进行推广。

关键词:井冈蜜柚;有机肥配施;微生物菌剂;微生物功能多样性;果实品质

中图分类号:S666.3 **文献标志码:**A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)01-0074-11



收稿日期:2024-06-08 **修回日期:**2024-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(32160751)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32160751)

作者简介:侯松峰,硕士生,orcid.org/0009-0000-2770-8031,2942562140@qq.com;*通信作者:谢凯柳,博士,主要从事植物营养研究,orcid.org/0000-0002-6887-7306,kailiuxie@jxau.edu.cn;周春火,教授,博士,主要从事农业废弃物资源化利用研究,orcid.org/0000-0002-3049-9928,zchh3366@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Effects of organic fertilizer and microbial agent on soil microorganisms and fruit quality of Jinggang pomelo

HOU Songfeng^{1,2}, YUAN Yang³, ZENG Zhihong^{1,2}, HAN Liyu^{1,2}, FU Shengnan^{1,2},
CHEN Jie^{1,2}, FANG Xiong^{1,2}, RONG Qinlei¹, NI Guorong¹,
XIE Kailiu^{1,2*}, ZHOU Chunhuo^{1,2*}

(1.School of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;
2. Jiangxi Jinggang Pomelo Science and Technology Courtyard, Ji' an, Jiangxi 343000, China; 3. Zhongke
Ecological Restoration(Jiangxi)Innovation Institute Co.,Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: [Objective] This study investigated the effects of organic fertilizer combined with a microbial agent on soil nutrients, soil microorganisms, and the quality of Jinggang pomelo, thus providing a basis for scientific fertilization of Jinggang pomelo. [Method] Jinlan Pomelo, one of the Jinggang pomelo varieties, was selected as the research object. Four treatments were set up, including control (CK), single application of organic fertilizer (T₁), organic fertilizer + microbial agent (T₂), and single application of microbial agent (T₃), to investigate the effects of organic fertilizer and microbial agent on soil nutrients and quality of Jinggang pomelo fruit. The metabolic diversity characteristics of soil microbial community were analyzed by Biolog-ECO method. [Result] Compared with CK, T₂ treatment can increase soil pH, improve soil acidification, and significantly increased soil total nitrogen, available phosphorus, and available potassium content by 13.87%, 44.39%, and 12.54%. After T₂ treatment, the metabolic activity of soil microorganisms and the number of bacteria in soil increased, the utilization intensity of carbon sources such as carbohydrates, carboxylic acids and amines increased, but the utilization intensity of phenolic acids decreased. T₂ treatment significantly increased the species dominance and community structure richness of soil microbial community, but it had no significant effect on the uniformity of microbial community. Compared with CK, T₁, T₂ and T₃ treatments could improve fruit quality, and T₂ treatment had the best effect on fruit quality. This treatment could significantly increase single fruit weight, soluble solid, VC and solid acid ratio of Jinggang pomelo by 5.56%, 12.14%, 27.54% and 36.39%, respectively, compared with CK treatment. Correlation analysis showed that quality indexes such as soluble sugar, VC content and solid acid ratio were significantly positively correlated with the utilization intensity of carbon sources such as carbohydrates. [Conclusion] The application of organic fertilizer combined with microbial agent could increase soil pH and improve soil acidification in pomelo orchard. It can effectively improve the activity of soil microorganisms in orchards, increase the utilization intensity and microbial functional diversity of carbon sources such as carbohydrates, carboxylic acids and amines by soil microorganisms, improve soil fertility, and then improve the yield and fruit quality of Jinggang pomelo. Therefore, the fertilization mode of organic fertilizer combined with microbial agent can be popularized in the main producing areas of Jinggang pomelo.

Keywords: Jinggang pomelo; application of organic fertilizer; microbial agent; microbial functional diversity; fruit quality

【研究意义】井冈蜜柚是指在吉安市生产栽培的蜜柚果品的统称,包括桃溪蜜柚、金沙柚、金兰柚 3 个优良品系。作为江西三大果业品牌之一,其种植面积逐年扩增^[1]。根据课题组前期调查结果显示,井冈蜜柚土肥管理比较粗放,氮、磷、钾肥施用量不合理,有机肥投入不足^[2],造成了肥料利用率低、土壤酸化板结和果实品质产量下降等问题^[3],无法保障蜜柚优质高产所需的土壤环境和营养条件,严重影响了蜜柚产业的可持续发展^[4]。因此,探究改善柚园土壤质量、提升蜜柚品质的绿色施肥方案对蜜柚产业高质

量发展具有十分重要的意义。【前人研究进展】施用有机肥或微生物菌剂具有改善土壤质量、促进养分利用、提升作物产量和品质的优势^[5],在作物已有较多应用^[6-9]。彭柱青等^[6]在温州蜜柑上的研究表明施用微生物菌剂能提高土壤有效磷,促进树体对磷的吸收进而改善温州蜜柑的品质。撒晓梅等^[10]研究发现蚯蚓粪配施微生物菌剂能提高葡萄果实可溶性糖、可溶性固形物和有机酸含量,提升比例分别为9.5%、9.2%和27.7%。土壤微生物是土壤生态系统重要组成部分,在土壤有机质分解和养分释放中起着重要作用^[11],分析土壤微生物的代谢和功能变化对于阐明土壤肥力和作物品质提升有重要意义。Biolog-ECO法作为评价微生物代谢功能多样性的重要方法^[12-13],在农业上已有较多应用。陈琳等^[14]采用Biolog-ECO法研究生物有机肥对板栗土壤微生物群落代谢活性的影响,结果表明生物有机肥处理能提高土壤中微生物的活性。于会丽等^[15]通过Biolog-ECO法研究表明菌肥能够提高新疆地区桃园土壤养分和土壤微生物对碳源利用的强度,增加土壤微生物活动。

【本研究切入点】目前有机肥配施微生物菌剂在井冈蜜柚的相关研究鲜有报道,其对于如何通过影响柚园土壤微生物功能多样性进而改变果实产量及品质的影响也并不清楚。【拟解决的关键问题】研究采用Biolog-ECO法,分析比较有机肥、微生物菌剂以及两者配施对土壤养分、土壤微生物代谢活性及其功能多样性、井冈蜜柚果实产量及品质的提升效果,探究土壤微生物与蜜柚果实品质间的相关关系,为井冈蜜柚园土壤肥力提升、果实品质改善以及实现蜜柚产业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2021年11月至2022年11月于江西省吉安市兴桥镇蜜柚园(27°8'27" N, 114°51'48" E)开展田间试验。该地区属亚热带季风湿润性气候,年总降水量为1 421.8 mm,年平均气温为16~25℃。果园土壤为红壤,2021年试验地取土检测结果为土壤pH 4.84,土壤有机质17.23 g/kg,全氮1.02 g/kg,有效磷24.34 mg/kg,速效钾114.47 mg/kg。供试蜜柚品种为8年生金兰柚,种植密度为495株/hm²。

供试微生物菌剂由江西农业大学周春火教授团队(有效菌落数 $\geq 3.0 \times 10^8$ CFU/mL)从吉安市井冈蜜柚种植园中筛出,符合国家肥料生产标准(GB 20287—2006)农用微生物菌肥的要求;供试化肥为尿素(N $\geq 46\%$)、过磷酸钙(P₂O₅ $\geq 18\%$)、硫酸钾(K₂O $\geq 52\%$),供试有机肥为蚯蚓粪有机肥(产自江西苏赣农业科技有限公司N+P₂O₅+K₂O $\geq 7\%$,有机质 $\geq 36\%$)。

1.2 试验设计

田间采用随机区组设计。试验设置4个处理,CK(对照)、T₁(单施有机肥)、T₂(有机肥+微生物菌剂处理)、T₃(单施微生物菌剂)。其中对照处理为当地农户常规施肥量。根据课题组前期研究结果确定^[16]有机肥替代氮肥的最佳比例为40%,单施有机肥处理以有机肥代替40%氮肥来计算,并补充氮磷钾化肥,保持与CK处理的施肥量相同。有机肥+微生物菌剂处理为在单施有机肥的基础上增施菌剂,单施菌剂处理为对照施肥的基础上增施菌剂。每个处理设置3个重复,每个重复包括4棵树。化肥分3次(越冬肥、促花肥、壮果肥)施用,有机肥全部作为基肥施用。微生物菌剂于2022年在4月中旬以灌根的方式施入土壤,CK和T₁处理施用同用量的清水,其余田间管理措施相同。具体施用量如表1所示。

表1 各试验处理的施肥量

Tab.1 The application rates of different fertilizers under different treatments

处理	施用量/(kg·株 ⁻¹)
CK	尿素 2.02 kg, 过磷酸钙 6.25 kg, 硫酸钾 1.7 kg, 清水 4 L
T ₁	有机肥 15.75 kg, 尿素 0.98 kg, 过磷酸钙 0.67 kg, 硫酸钾 1.38 kg, 清水 4 L
T ₂	有机肥 15.75 kg, 尿素 0.98 kg, 过磷酸钙 0.67 kg, 硫酸钾 1.38 kg, 菌剂 4 L
T ₃	尿素 2.02 kg, 过磷酸钙 6.25 kg, 硫酸钾 1.7 kg, 菌剂 4 L

1.3 土壤及果实样品的采集

于2022年蜜柚成熟期进行井冈蜜柚园表层土壤和果实的采集。采样点处于蜜柚树滴水线的位置,避开施肥沟。每棵树确定东南西北4个取样点,每取样点利用土钻垂直采集0~20 cm的土壤。将每个处

理的土壤混合后利用四分法保留 1 kg 土壤,一部分用于检测土壤微生物数量及活性,一部分检测土壤养分。每棵树采集蜜柚果实 2 个,取蜜柚中部位置的果肉混合后进行果实品质的测定。

1.4 测定指标及方法

土壤 pH 采用电位法测定;土壤有机质(soil organic matter, SOM)采用重铬酸钾容量法-稀释热法测定;全氮(total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法测定;有效磷(available phosphorus, AP)采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾(available potassium, AK)测定采用火焰光度计法^[9]。

利用 Biolog-ECO 微平板测定微生物活性、微生物功能多样性。计算平均颜色变化率(average well color development, AWCD)(表征微生物群落对碳源利用的总的能力),Simpson 指数 D (评估微生物群落功能优势度)、Shannon 指数 H (评估微生物群落功能的丰富度)、McIntosh 指数 U (基于群落物种多维空间上的 Euclidian 距离的多样性指数)和 Pielou 指数(表达多样性的物种的分布均匀) E 以及对六大类碳源(碳水化合物类 Carbohydrates、氨基酸类 Amino acids、羧酸类 Carboxylic acids、胺类 Polyamines、酚酸类 Polyphenolic、聚合物类 Polymers)的利用强度^[17],计算公式如下。

$$AWCD = \frac{(C_i - R)}{n} \quad (1)$$

$$\text{Simpson 指数 } D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Shannon 指数 } H = -\sum (P_i \cdot \ln P_i) \quad (3)$$

$$\text{McIntosh 指数 } U = \sqrt{\sum N_i^2} \quad (4)$$

$$\text{Pielou 指数 } E = \frac{H}{\ln S} \quad (5)$$

式中 C_i 表示每孔在 590 nm 下的吸光度, R 代表水(对照)的吸光度, P_i 为该孔的相对吸光度与所有非对照孔吸光度总和的比值, N_i 表示该孔的相对吸光值, S 表示平板上 31 种碳源的利用情况。

蜜柚产量由单果质量、挂果数和种植密度来计算;单果质量(fruit weight, FW)使用千分之一天平测定;可溶性固形物含量(total soluble solid, TSS)使用 PAL1 手持折光测糖仪测定;可滴定性酸含量(titratable acid, TA)使用标准碱滴定法滴定;维生素 C 含量(Vc)采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定;果实固酸比(TSS/TA)由可溶性固形物与可滴定酸的比值来计算^[18]。

1.5 统计分析与数据处理

采用 Excel 处理试验数据,利用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和 Pearson 相关性分析,运用 origin 2023 与 R 语言绘图。

2 结果与分析

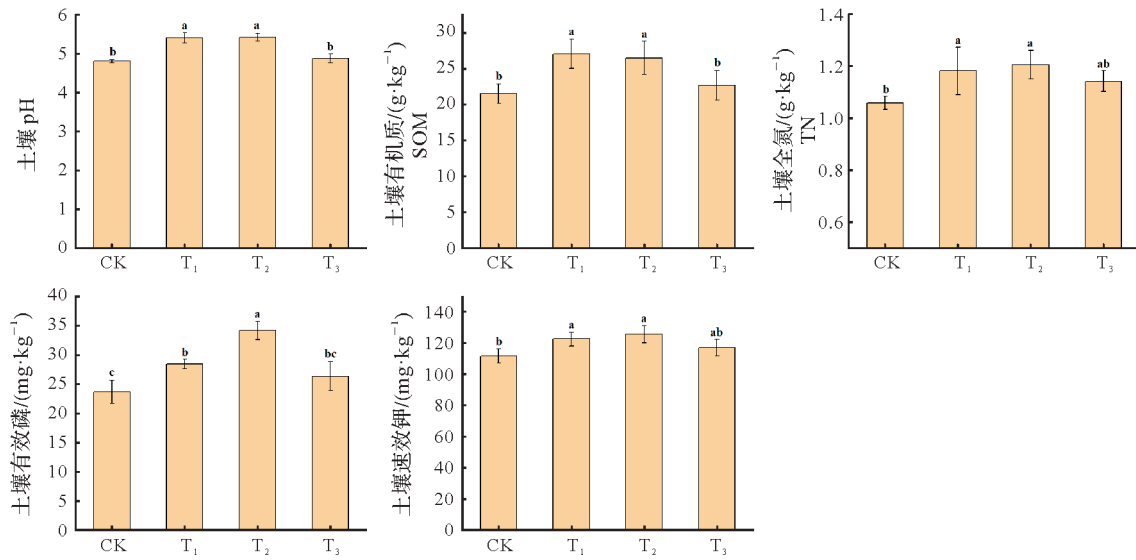
2.1 有机肥配施微生物菌剂对土壤 pH 和养分的影响

不同处理对土壤养分的影响如图 1 所示。与 CK 处理相比较, T_1 、 T_2 处理均能显著提高土壤 pH 值,且 T_2 处理的土壤 pH 值最高;能显著提高土壤有机质含量 25.83%、23.28%。 T_2 处理的土壤全氮含量最高,显著高于 CK 处理 13.87%,与 T_1 、 T_3 处理之间无显著性差异。4 个处理的土壤有效磷含量由高到低表现为 T_2 、 T_1 、 T_3 和 CK,其中 T_2 、 T_1 处理分别显著高于 CK 处理 44.39%、20.16%。 T_1 、 T_2 处理速效钾含量显著高于 CK 处理,分别超过 9.82%、12.54%,而 T_3 与 CK 处理之间的速效钾含量无显著性差异。与单施有机肥和单施菌剂相比,有机肥配施微生物菌剂处理对土壤养分提升的效果最好。

2.2 有机肥配施微生物菌剂对土壤微生物功能多样性的影响

2.2.1 有机肥配施微生物菌剂对土壤微生物活性和数量的影响

不同处理下平均颜色变化率 AWCD 如图 2 所示。接种后 24 h 时 4 个处理的 AWCD 值较低,表明培养初期微生物群落代谢缓慢,随着培养时间的增加逐渐趋于稳定。 T_2 、 T_3 处理的 AWCD 曲线于培养 120 h 到达平台期,而 CK 处理的 AWCD 曲线平台期在培养 168 h 之后。自培养 72 h 至培养 168 h, T_2 处理的 AWCD 均高于 CK 处理,在培养 120 h 时较 CK 处理提高 106%。说明有机肥配施微生物菌剂提高了土壤微生物对碳源的利用能力和碳代谢活性。与单施有机肥和微生物菌剂相比,有机肥配施微生物菌剂处理对提高柚园土壤微生物代谢活性的效果最好。



不同字母表示各处理间存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

Different letters indicate significant difference between treatments, $P < 0.05$.

图 1 有机肥配施微生物菌剂对土壤 pH 和养分的影响

Fig.1 Effects of organic fertilizer combined with microbial inoculants on soil pH and nutrients

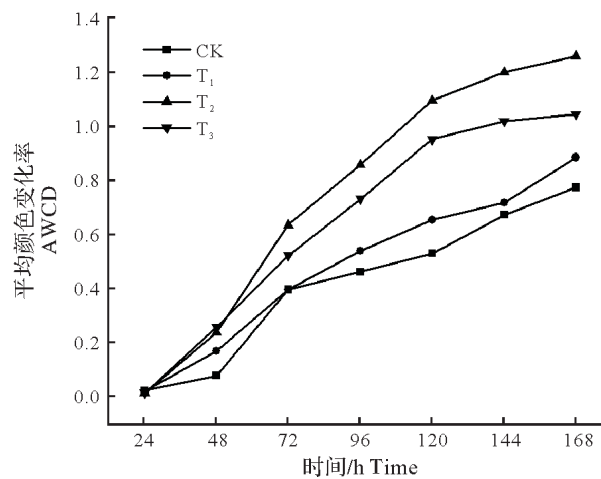


图 2 不同处理对蜜柚果园土壤微生物 AWCD 的影响

Fig.2 Effect of different treatments on soil microbial AWCD of Pomelo

表 2 不同处理对蜜柚土壤微生物数量的影响

Tab.2 Effect of different treatments on microbial populations of pomelo soil

处理 Treatment	细菌 1×10^6 CFU $\cdot$ mL ⁻¹ Bacteria	真菌 1×10^4 CFU $\cdot$ mL ⁻¹ Fungus	放线菌 1×10^5 CFU $\cdot$ mL ⁻¹ Actinomycetes
CK	3.82±0.59 ^b	2.90±0.36 ^a	2.42±0.39 ^a
T ₁	5.34±1.07 ^{ab}	3.36±0.94 ^a	3.13±0.37 ^a
T ₂	6.51±1.16 ^a	3.22±0.78 ^a	3.05±0.48 ^a
T ₃	4.70±0.47 ^b	3.13±0.26 ^a	2.57±0.24 ^a

表中不同字母表示各处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

Different letters indicate significant difference between treatments($P < 0.05$).

不同处理对蜜柚园土壤微生物数量的影响如表 2 所示。与 CK 处理相比,3 个处理均能提高土壤中细菌、真菌和放线菌的数量。其中 T₂ 处理能显著提高土壤中细菌数量,较 CK 处理提高 70.42%,T₁、T₃ 处理与 CK 之间无显著性差异。T₁ 处理的真菌、放线菌数量最多,但 4 个处理之间的真菌、放线菌数量之间无显著性差异。

2.2.2 有机肥配施微生物菌剂对微生物碳源利用特征的影响

柚园土壤微生物对6大类碳源的利用强度和相对利用率如图3所示。土壤微生物对6大类碳源的利用以碳水化合物类、氨基酸类和聚合物类为主,对酚酸类碳源利用程度较低。与CK处理相比,T₁、T₂、T₃处理能显著提高土壤微生物对碳水化合物类碳源的利用,分别提高147.30%、184.02%、22.03%;T₂处理能显著提高土壤微生物对羧酸类、胺类的利用,分别提高54.37%和144.39%。4个处理的土壤微生物对酚酸类、聚合物类的碳源利用强度之间无显著性差异。与CK处理相比较,T₂处理的碳水化合物类、胺类碳源的相对利用率提高,聚合物类、氨基酸类碳源的相对利用率降低。

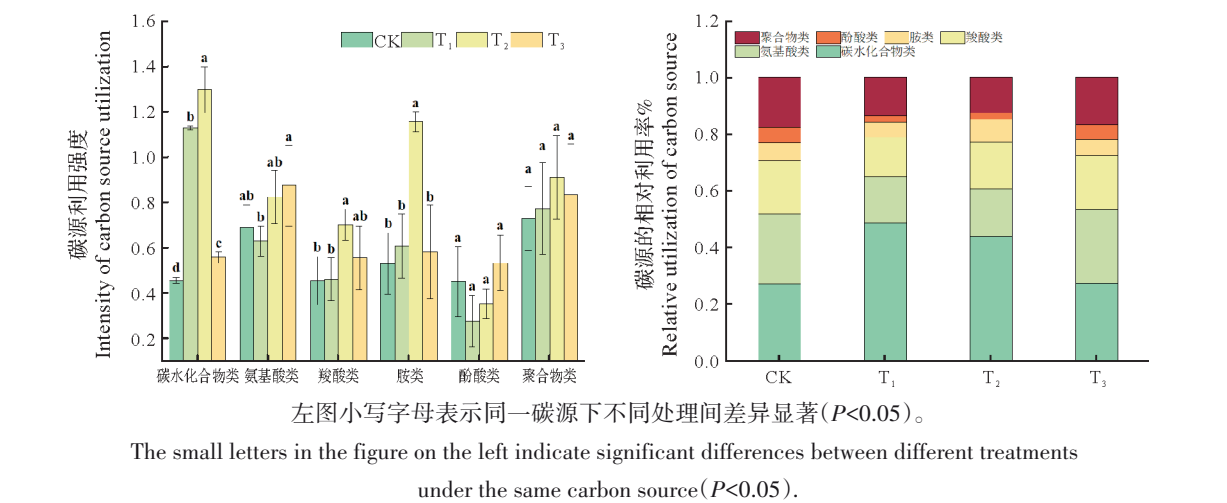


图3 不同处理对土壤微生物6大类碳源利用强度及相对利用率的影响

Fig.3 Effect of different treatments on the utilisation and relative utilisation of soil microbial carbon sources

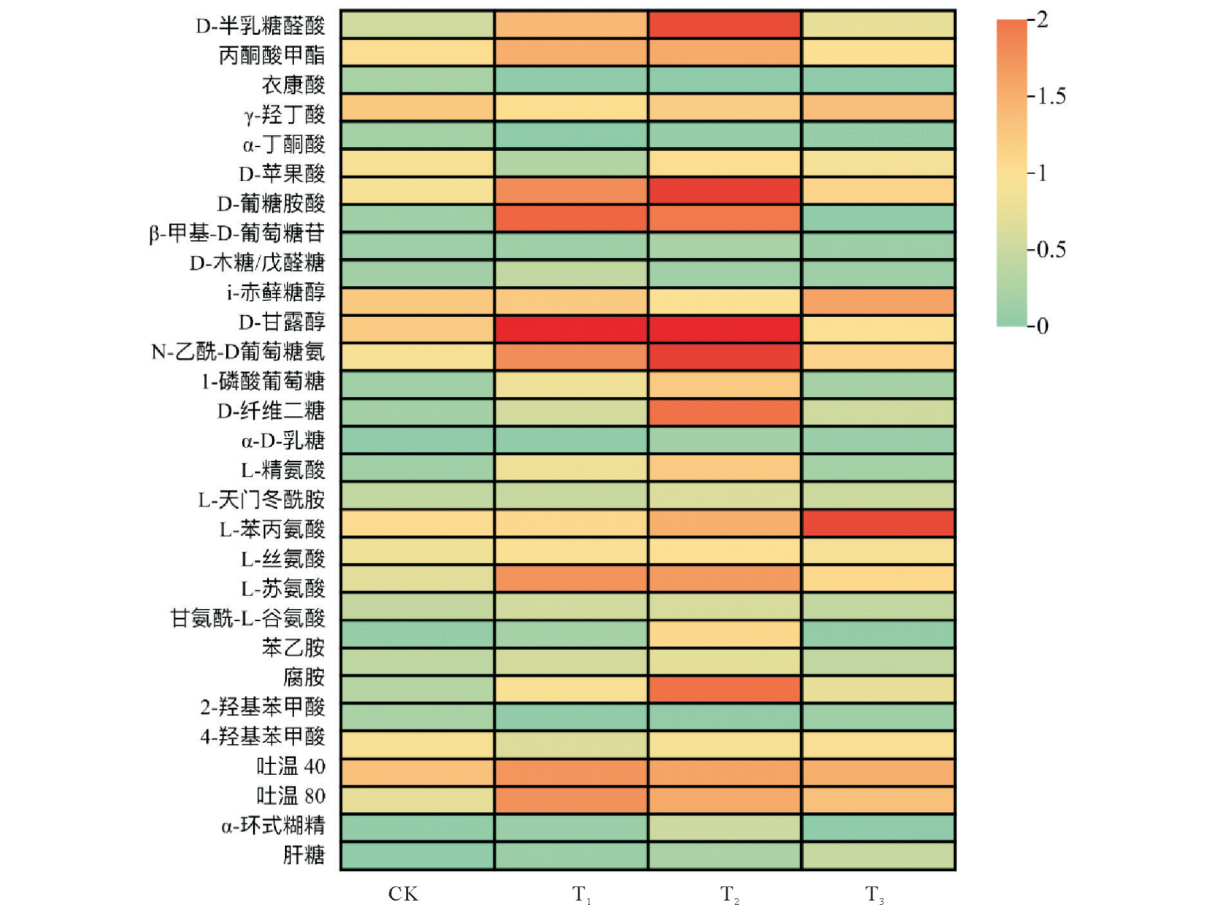


图4 不同处理的土壤微生物对不同碳源的利用特征分析

Fig.4 Characteristic maps of soil microbes using various carbon sources under different treatments

不同处理下土壤微生物对 31 种碳源的利用能够反映出微生物的代谢功能类群。将 120 h 测定的 AWCD 值按照不同碳源利用特征进行热图绘制。如图 4 所示,4 种处理均可将丙酮酸甲酯、 γ -羟丁酸、L-天门冬酰胺、吐温 40 等为碳源的功能微生物显著富集。与 CK 处理相比, T_2 处理的土壤微生物代谢功能发生了较大改变, T_2 处理能提高土壤微生物对 D-半乳糖醛酸、D-葡萄糖胺酸、甘氨酸-L-谷氨酸、腐胺等碳源的利用能力。

2.2.3 有机肥配施微生物菌剂对土壤微生物多样性的影响

选用培养 120 h 后的吸光度来计算不同处理下微生物功能多样性指数,结果如表 3 所示。与 CK 处理相比, T_1 、 T_2 、 T_3 处理均能提高 Simpson 指数,且 T_2 处理显著提高 Simpson 指数 5.62%。 T_1 、 T_2 、 T_3 处理均能显著提高 Shannon 指数,较 CK 处理分别提高 14.46%、20.88%、13.25%。与 CK 相比,其余 3 个处理能提高微生物群落结构的丰富度, T_2 处理的 McIntosh 指数显著高于 CK 处理 24.51%,但 4 个处理之间的 Pielou 指数无显著差异。综上,有机肥配施微生物菌剂处理对提高柚园土壤微生物多样性的效果最好。

表 3 不同处理对土壤微生物功能多样性指数的影响

Tab.3 Effect of different treatments on microbial functional diversity index

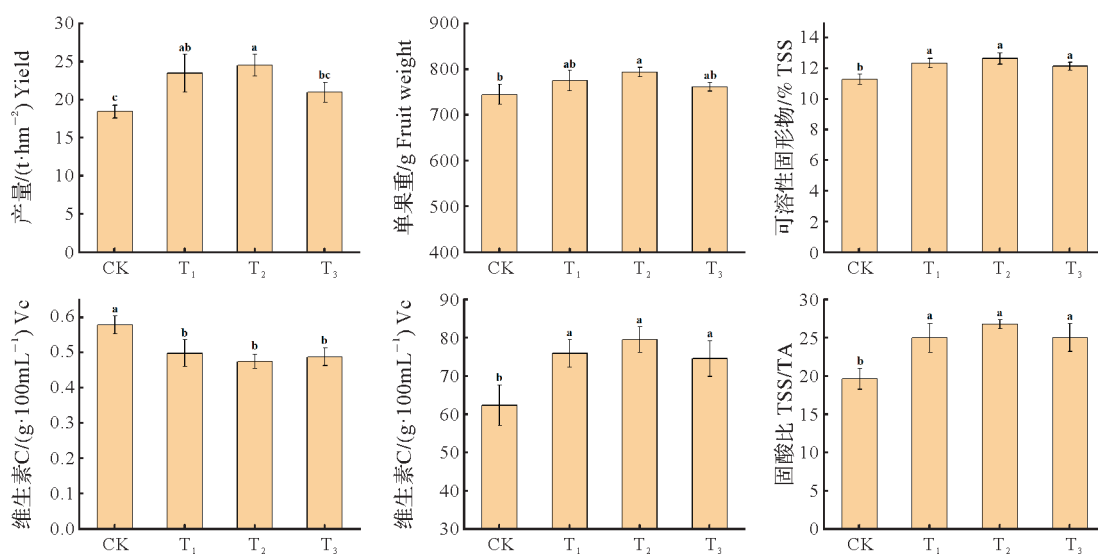
处理 Treatment	Simpson 指数 D	Shannon 指数 H	McIntosh 指数 U	Pielou 指数 E
CK	0.90±0.016 ^b	2.49±0.171 ^c	5.18±0.43 ^c	0.94±0.014 ^a
T_1	0.92±0.004 ^b	2.85±0.059 ^b	5.88±0.23 ^{ab}	0.92±0.013 ^a
T_2	0.95±0.006 ^a	3.01±0.054 ^a	6.45±0.21 ^a	0.93±0.025 ^a
T_3	0.93±0.003 ^{ab}	2.82±0.060 ^b	5.42±0.40 ^{bc}	0.93±0.008 ^a

不同小写字母表示各处理间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

2.3 有机肥配施微生物菌剂对蜜柚产量和果实品质的影响

有机肥配施菌剂对井冈蜜柚的产量和果实品质的影响如图 5 所示。与 CK 处理相比, T_1 、 T_2 能显著提高井冈蜜柚的产量 27.24%、33.10%。CK、 T_1 、 T_3 处理之间的单果质量差异不显著, T_2 显著高于 CK 处理 6.56%。 T_1 、 T_2 、 T_3 处理之间的可溶性固形物、维生素 C、固酸比之间无显著差异,且显著高于 CK 处理。 T_2 处理的可滴定酸含量最低,显著低于 CK 处理 17.91%。与 CK 处理相比,3 种处理均能提高井冈蜜柚产量、改善果实品质,其中 T_2 处理显著提高井冈蜜柚的产量、单果质量、可溶性固形物、Vc 和固酸比 33.09%、6.56%、12.14%、27.54% 和 36.39%;显著降低果实可滴定酸含量 17.91%, T_2 处理对果实产量和品质的提升效果最好。



不同小写字母表示各处理间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

图 5 不同处理对井冈蜜柚产量和果实品质的影响

Fig.5 Effects of different treatments on yield and fruit quality of Jinggang pomelo

2.4 微生物的碳源利用强度与果实品质的相关性分析

碳源利用强度与果实品质的相关性分析如图6所示,单果质量与土壤微生物碳源利用特征相关性较强,与碳水化合物类、羧酸类、胺类等碳源利用强度、可溶性固形物、VC含量和固酸比呈显著正相关,与可滴定酸含量呈显著负相关。可溶性糖、VC含量和固酸比与碳水化合物类等碳源利用强度呈显著正相关;VC含量与胺类碳源利用强度呈显著正相关,聚合物类碳源利用强度与可溶性固形物、固酸比之间呈显著正相关,与可滴定酸之间呈显著负相关。

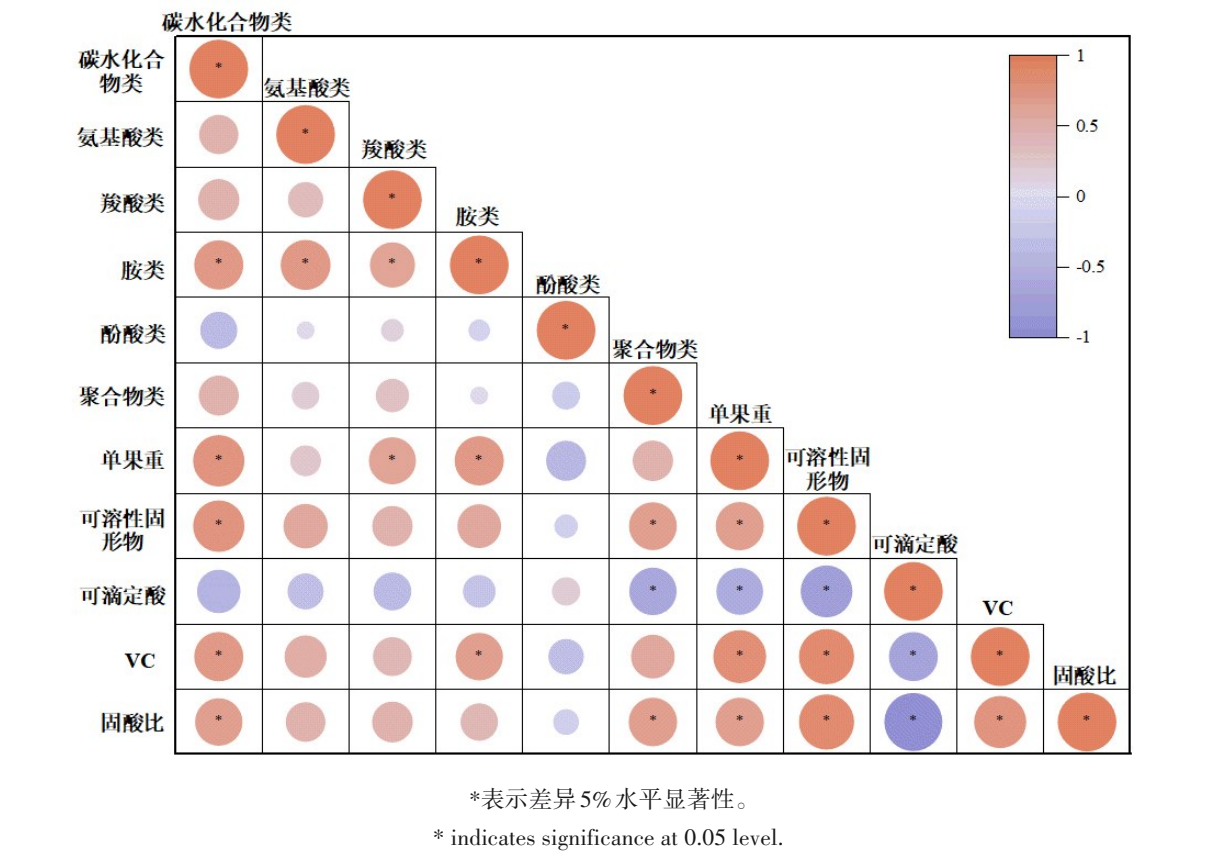


图6 土壤微生物碳源利用特征与果实品质的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between carbon utilization characteristics and fruit quality

3 讨 论

3.1 有机肥配施微生物菌剂对井冈蜜柚园土壤养分的影响

土壤养分是土壤理化性状和生物学特性的综合反映,直接影响土壤或土地生产力,是各种作物生长所需营养元素的基本来源^[19]。本研究明确了有机肥和微生物菌剂配施对土壤pH和养分的影响,T₁和T₂处理均能显著提高土壤pH,而单施菌剂对土壤pH的提升效果较小。其原因可能是施用的有机肥为碱性,其释放的盐基离子与土壤表面的交换性酸发生离子交换反应从而降低土壤酸度^[20]。土壤养分有效性受到土壤酸碱度的影响,土壤pH值过低不利于土壤微结构形成,影响微生物种群数量、分布和代谢活性以及土壤酶活性,造成作物产量不高^[21]。钱笑杰等^[22]通过探究福建果园土壤pH值与养分关系表明,pH值大于5.0的微酸性,能够充分发挥土壤养分的有效性,促进蜜柚的生长。在本试验条件下,单施有机肥、微生物菌剂和两者配施能提高土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾。已有大量研究表明,单施有机肥和有机肥配施均有利于土壤有机质的积累和土壤养分含量的提高。邢鹏飞等^[23]研究发现随着有机肥替代化肥比例的增高,土壤中速效磷含量也随之增加。吴强建等^[16]发现减氮配施生物炭基肥可以改善蜜柚果园土壤结构,降低养分流失,提高养分的利用效率。有机肥配施微生物菌剂则会增加土壤中的有机质和有益微生物的数量,加速有机质的分解速率,促使土壤养分转化从而提高土壤养分的有效性^[24-25]。侯会静等^[26]发现添加功能性微生物进入土壤后可有效活化被土壤固定的磷、钾养分,提升土壤肥力。有

机肥为微生物菌剂提供良好的生长环境和碳源,使土壤中微生物含量增多;而土壤微生物数量的增多又会加速有机质的分解,促进了微生物介导的土壤难溶性养分的转化^[27-28]。

3.2 有机肥配施微生物菌剂对井冈蜜柚园土壤微生物功能多样性的影响

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,是土壤有机质和土壤养分转化、循环的动力,对土壤肥力有较大影响^[29]。关于有机肥配施微生物菌剂对土壤微生物群落的影响已有较多研究^[10,35]。高晴等^[30]研究发现复配菌剂能改善花生根际土壤微生物群落结构,增加花生产量。侯栋等^[31]发现适宜用量的微生物菌肥部分替代化肥可提高土壤质量、平衡微生物区系,提高微生物的代谢活性。本试验中施用有机肥、微生物菌剂以及两者配施均能提高微生物的代谢活性,且两者配施对微生物代谢活性提升最高。这可能是有机肥配施微生物菌剂可以促进土壤养分转化,为土壤微生物的生长代谢提供了适宜的条件,进而提高了土壤微生物的代谢活性^[32]。有机肥配施微生物菌剂处理能提高土壤细菌数量,对真菌和放线菌数量的影响较小,这可能是微生物菌剂的直接添加增加了土壤中的细菌数量。有机肥配施微生物菌剂处理均能提高 Simpson 指数和 Shannon 指数,微生物丰富度和多样性越高,功能越稳定^[33]。对6种大类、31种小类碳源的利用强度进行分析,与对照相比,有机肥配施微生物菌剂处理能提高对碳水化合物类、胺类的碳源利用强度。碳水化合物类碳源结构简单,增强微生物对简单碳源的利用有助于将活性碳组分转化为微生物源碳组分,提高惰性碳库容量,进而提高土壤肥力。蛋白质、核酸等都是含氮胺类的复杂衍生物,提高胺类碳源的利用可有助于提高对土壤有机氮组分的利用,进而提高对有机肥中有机碳氮等组分的利用程度。在西瓜^[34]、桃^[14]中有类似的发现,土壤微生物群落结构发生变化,微生物群落的碳源利用特征也随之改变。

3.3 有机肥配施微生物菌剂对井冈蜜柚产量和果实品质的影响

在本研究试验条件下,表明有机肥配施微生物菌剂可显著提高金兰柚的单果质量、可溶性固形物、VC含量和固酸比,改善蜜柚的品质。这可能是由于有机肥配施菌剂处理提高了土壤pH,有效提高果园土壤微生物活性,增加土壤微生物对碳水化合物类、羧酸类和胺类等碳源的利用强度和微生物功能多样性,提升土壤全氮、有效磷和速效钾等养分;从而促进蜜柚根系及地上部的生长,进而提高金兰柚的产量且改善果实品质。此研究结果与前人研究相似,撒晓梅等^[10]蚯蚓粪和微生物菌剂配施能促进土壤养分含量提升,有效提高红地球葡萄可溶性糖、可溶性固形物、有机酸等内在品质。李荣发等^[35]研究发现有机肥配施枯草芽孢杆菌能提高夏玉米的生长发育,影响夏玉米的产量构成要素,提高夏玉米产量。王立辉等^[36]发现适宜用量的生物有机肥与微生物菌剂配施可显著促进蒜苗植株生长,提高产量,增强根系活力及硝酸还原酶活性,提高蒜苗叶绿素、维生素C、可溶性糖及大蒜素含量。

4 结 论

有机肥配施微生物菌剂可以提高土壤pH,改善柚园土壤酸化情况;有效提高果园土壤微生物活性,增加土壤微生物对碳水化合物类、羧酸类和胺类等碳源的利用强度和微生物功能多样性,提升土壤肥力,进而改善井冈蜜柚的产量及果实品质。因此,有机肥配施微生物菌剂的施肥模式可在井冈蜜柚主产区进行推广。

致谢:江西省科技专项(20222-051261-3-3)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 王斌强,何绍浪,林小兵,等.井冈蜜柚园土壤肥力和微生物特征调查研究[J].中国果树,2023(6):59-66.
WANG B Q, HE S L, LIN X B, et al. Investigation on soil fertility and microbial characteristics in Jinggang pomelo orchards [J]. China fruits, 2023(6): 59-66.
- [2] 康婷,谢凯柳,谢志坚,等.井冈蜜柚生产现状与农户特征因素调查与分析[J].中国果树,2022(8):81-88.
KANG T, XIE K L, XIE Z J, et al. Investigation and analysis on production status and peasant household characteristic factors of Jinggang honey pomelo [J]. China fruits, 2022(8): 81-88.
- [3] 吴强建,肖委明,赵晓东,等.江西井冈蜜柚种植区果园土壤肥力现状及区域分布特征[J].农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1025-1032.

- WU Q J, XIAO W M, ZHAO X D, et al. Status, spatial distribution, and fertility of soil in pomelo orchards in Jinggang, Jiangxi Province[J]. Journal of agricultural resources and environment, 2022, 39(5): 1025-1032.
- [4] 吴强建, 谢志坚, 谢凯柳, 等. 井冈蜜柚果园土壤和叶片养分状况及果实品质研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(11): 133-139.
- WU Q J, XIE Z J, XIE K L, et al. Study on soil and leaf nutrient status and fruit quality of Jinggang pomelo orchards[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2022(11): 133-139.
- [5] 祝虹钰, 刘闯, 李蓬勃, 等. 微生物菌剂的应用及其研究进展[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 805-808.
- ZHU H Y, LIU C, LI P B, et al. Application of microbial fungicides and its research progress[J]. Hubei agricultural science, 2017, 56(5): 805-808.
- [6] 彭柱青, 金胜昔, 梁晓敏, 等. 不同微生物菌剂对温州蜜柑果实产量及品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(5): 91-97.
- PENG Z Q, JIN S X, LIANG X M, et al. Effects of different microbial agents on fruit yield and quality of Wenzhou mandarin fruit[J]. Journal of Huazhong agricultural university, 2022, 41(5): 91-97.
- [7] 陆胜民, 陈巧云, 黄振东, 等. 根施益生菌剂对柑橘果园土壤化学指标及果实品质和产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(12): 2819-2823.
- LU S M, CHEN Q Y, HUANG Z D, et al. Effects of root application of probiotics on soil chemical indicators and fruit quality and yield in citrus orchards[J]. Zhejiang agricultural science, 2022, 63(12): 2819-2823.
- [8] FLORES-FÉLIX J D, VELÁZQUEZ E, GARCÍA-FRAILE P, et al. Rhizobium and Phyllobacterium bacterial inoculants increase bioactive compounds and quality of strawberries cultivated in field conditions[J]. Food research international, 2018, 111: 416-422.
- [9] 赵诣, 王振华, 杨磊, 等. 微藻配施枯草芽孢杆菌对烟田土壤化学性质和细菌群落的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(1): 241-250.
- ZHAO Y, WANG Z H, YANG L, et al. Effects of microalgae combined with *Bacillus subtilis* on soil chemical properties and bacterial communities in tobacco fields[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(1): 241-250.
- [10] 撒晓梅, 丁琴, 李明. 蚯蚓粪和微生物菌剂对土壤养分及红地球葡萄生理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59: 1-10.
- SA X M, DING Q, LI M, et al. Effects of earthworm manure and microbial agents on soil nutrients and physiological characteristics of red earth grapes[J]. Journal of Gansu agricultural university, 2024, 59: 1-10.
- [11] ZHANG M Y, RIOZ M, ZHANG L, et al. Response of fungal communities in different soils to biochar and chemical fertilizers under simulated rainfall conditions[J]. Science of the total environment, 2019, 691: 654-663.
- [12] 郑华, 欧阳志云, 方治国, 等. BIOLOG在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2004(3): 456-461.
- ZHENG H, OUYANG Z Y, FANG Z G, et al. Application of BIOLOG in the study of functional diversity of soil microbial communities[J]. Journal of soil science, 2004(3): 456-461.
- [13] RUTGERS M, WOUTERSE M, DROST S M, et al. Monitoring soil bacteria with community-level physiological profiles using Biolog(TM)ECO-plates in the Netherlands and Europe[J]. Applied soil ecology, 2016, 97: 23-25.
- [14] 陈琳, 谷洁, 胡婷, 等. 生物有机肥对板栗土壤微生物群落代谢活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1627-1632.
- CHEN L, GU J, HU T, et al. Effects of bio-organic fertiliser on the metabolic activity of soil microbial communities in chestnut[J]. Journal of applied ecology, 2013, 24(6): 1627-1632.
- [15] 于会丽, 徐国益, 徐变变, 等. 施用生物菌肥对桃园土壤养分及微生物功能多样性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 91-97.
- YU H L, XU G Y, XU B B, et al. Effects of biofertiliser application on soil nutrient and microbial functional diversity in peach orchards[J]. Arid zone agricultural research, 2020, 38(6): 91-97.
- [16] 吴强建, 胡梦蝶, 侯松峰, 等. 减氮配施生物炭基肥对蜜柚土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(5): 732-741.
- WU Q J, HU M D, HOU S F, et al. Effect of nitrogen reduction with carbon-based fertilizer on the physicochemical properties and enzyme activity of pomelo soil[J]. Journal of Henan agricultural university, 2022, 56(5): 732-741.
- [17] MIAO L, GUO S, LIU Z, et al. Effects of nanoplastics on freshwater biofilm microbial metabolic functions as determined by biolog eco microplates[J]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16(23): 4639.

- [18] 向建军,俞熙仁,董一帆,等.井冈蜜柚果实品质比较及综合评价[J].中国果树,2022(11):39-47.
XIANG J J, YU X R, DONG Y F, et al. Comparison and comprehensive evaluation of fruit quality of Jinggang pomelo[J]. Chinese fruit tree, 2022(11):39-47.
- [19] 柳文凯,雷永忠,王莉,等.化肥减量配施生物有机肥对高原夏季露地大白菜生长生理及养分吸收的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(2):340-355.
LIU W K, LEI Y Z, WANG L, et al. Effects of chemical fertiliser reduction and application of bio-organic fertiliser on growth physiology and nutrient uptake of open field Chinese cabbage in summer on the plateau[J]. Journal of Jiangxi agricultural university, 2024, 46(2):340-355.
- [20] 黄建凤,吴腾飞,叶芳,等.有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):606-613.
HUANG J F, WU T F, YE F, et al. Effect of organic fertilizer and lime combination on ameliorating acid soil in south China [J]. Journal of agricultural resources and environment, 2024, 41(3):606-613.
- [21] 唐琨,朱伟文,周文新,等.土壤pH对植物生长发育影响的研究进展[J].作物研究,2013,27(2):207-212.
TANG K, ZHU W W, ZHOU W X, et al. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development [J]. Crop research, 2013, 27(2):207-212.
- [22] 钱笑杰,林晓兰,肖靖,等.福建果园土壤pH值、养分关系与土壤肥力质量评价研究:以福建省漳州市平和县琯溪蜜柚园地为例[J].福建热作科技,2017,42(1):9-15.
QIAN X J, LIN X L, XIAO J, et al. Study on soil pH value, nutrient relationship and soil fertility quality evaluation in Fujian orchard: a case study of Guanxi Pomelo Garden in Pinghe County, Zhangzhou City, Fujian Province [J]. Fujian science & technology of tropical crops, 2017, 42(1):9-15.
- [23] 邢鹏飞,高圣超,马鸣超,等.有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2016(3):98-104.
XING P F, GAO S C, MA M C, et al. Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the north China plain [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2016(3):98-104.
- [24] 雷先德,李金文,徐秀玲,等.微生物菌剂对菠菜生长特性及土壤微生物多样性的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(4):488-494.
LEI X D, LI J W, XU X L, et al. Effects of microbial agents on the growth characteristics of spinach and soil microbial diversity [J]. Chinese journal of ecological agriculture, 2012, 20(4):488-494.
- [25] RAFIQUE M, SULTAN T, ORTAS I, et al. Enhancement of maize plant growth with inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and biochar amendment in soil [J]. Soil science & plant nutrition, 2017, 63(5):460-469.
- [26] 侯会静,韩正砥,杨雅琴,等.生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J].中国农学通报,2019,35(14):82-88.
HOU H J, HAN Z D, YANG Y Q, et al. Progress of research on the application of bio-organic fertiliser and its on-farm environmental effects [J]. Chinese agronomy bulletin, 2019, 35(14):82-88.
- [27] 张慧珍,张齐,高邦牢,等.有机无机肥配施菌剂对葡萄园土壤、果实及葡萄酒品质的影响[J].中国土壤与肥料,2024(1):129-140.
ZHANG H Z, ZHANG Q, GAO B L, et al. Effects of organic and inorganic fertilisers with mycorrhizal fungicides on soil, fruit and wine quality in vineyards [J]. China soil and fertiliser, 2024(1):129-140.
- [28] 张文学,王少先,刘增兵,等.基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用[J].植物营养与肥料学报,2021,27(5):777-790.
ZHANG W X, WANG S X, LIU Z B, et al. Evaluation of fertility enhancement of red soil paddy field by chemical fertiliser and organic fertiliser based on soil fertility quality index [J]. Journal of plant nutrition and fertiliser, 2021, 27(5):777-790.
- [29] CHEN X L, HENRIKSEN T M, SVENSSON K, et al. Long-term effects of agricultural production systems on structure and function of the soil microbial community [J]. Applied soil ecology, 2020, 147:387-396.
- [30] 高晴,杨智翔,刘光华,等.杀菌剂和根瘤菌剂拌种对花生根际微生物及荚果产量的影响[J].花生学报,2024,53(1):43-51.
GAO Q, YANG Z X, LIU G H, et al. Effects of fungicide and rhizobacterial seed dressing on inter-root microorganisms and pod yield of peanut [J]. Peanut journal, 2024, 53(1):43-51.