

化肥减量配施微生物菌肥对榴莲蜜果实品质及土壤养分的影响

杨 米, 赵丽娟, 张海梅, 刘学敏, 杜 浩, 孙寅虎*

云南省红河热带农业科学研究所, 云南河口 661300

摘 要: 为探明化肥减量配施微生物菌肥对榴莲蜜果实品质及土壤养分的影响, 本研究以树龄 7 a 的多异 1 号榴莲蜜 [*Artocarpus champeden* (Lour.) Spreng.] 果实为试验材料, 设置 6 个施肥处理: (1) CK 处理, 100% 复合肥 (2 kg); (2) T₁ 处理, 复合肥减量 20%+20% 微生物菌肥; (3) T₂ 处理, 复合肥减量 40%+40% 微生物菌肥; (4) T₃ 处理, 复合肥减量 60%+60% 微生物菌肥; (5) T₄ 处理, 复合肥减量 80%+80% 微生物菌肥; (6) T₅ 处理, 100% 微生物菌肥处理 (5 kg)。分析不同施肥处理对榴莲蜜果实品质、土壤养分的影响, 以及榴莲蜜果实品质指标与土壤养分指标的相关性。结果表明: (1) 较 CK、T₅ 处理, 其他处理均提高了榴莲蜜果实的单果质量、可食率、单苞质量、单苞果核质量、可溶性固形物含量, 降低了果皮厚度, 且 T₃、T₄ 处理显著提高了榴莲蜜果实的单果质量、单苞质量; (2) 配施微生物菌肥对土壤养分有一定提升作用, T₄ 处理大幅改善了土壤全氮、速效磷、速效钾、有机质含量和 pH, 同时提高了土壤中的 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 六种金属元素含量, T₃ 处理效果仅次于 T₄; (3) 相关性分析结果表明, 配施微生物菌肥主要通过提高土壤中的速效磷、速效钾、Fe、Mn 等养分来提升榴莲蜜果实的单果质量和单苞质量。综上, 复合肥减量 60%+60% 微生物菌肥 (T₃)、复合肥减量 80%+80% 微生物菌肥 (T₄) 不仅能提高榴莲蜜果实的产量和品质, 还可改善土壤环境, 提高生态效益, 是榴莲蜜绿色、高效栽培的较优配施模式。

关键词: 榴莲蜜; 化肥减施; 微生物菌肥; 品质; 土壤肥力

中图分类号: S667.9 文献标志码: A

Effects of Reducing Chemical Fertilizer Application and Applying Microbial Fertilizer on Cempedak [*Artocarpus champeden* (Lour.) Spreng.] Quality and Soil Nutrients

YANG Mi, ZHAO Lijuan, ZHANG Haimei, LIU Xuemin, DU Hao, SUN Yinhu*

Yunnan Institute of Honghe Tropical Agriculture, Hekou, Yunnan 661300, China

Abstract: The study was aimed to explore the effects of reducing chemical fertilizer application combined with microbial fertilizer on the quality of cempedak [*Artocarpus champeden* (Lour.) Spreng.] and soil nutrients. 7-year-old Duoyi No.1 cempedak was used as the material and 6 treatments, 100% compound fertilizer treatment (CK, 2 kg), 20% reduction in compound fertilizer + 20% microbial fertilizer (T₁), 40% reduction in compound fertilizer + 40% microbial fertilizer (T₂), 60% reduction in compound fertilizer + 60% microbial fertilizer (T₃), 80% reduction in compound fertilizer + 80% microbial fertilizer (T₄), and 100% microbial fertilizer treatment (T₅, 5 kg) were set up. The effects of different fertilization treatments on cempedak quality, the effects of soil nutrients, and the correlation between cempedak quality index and soil nutrient index were analyzed. Compared with CK and T₅ treatments, other treatments increased the fruit weight, edible rate, single aril pit weight, single aril weight, and soluble solids content of cempedak, reduced the fruit wall thickness. The T₃ and T₄ treatments significantly increased the single fruit weight and single aril weight of cempedak. The combined application of microbial fertilizer had a certain promoting effect on soil nutrients. The T₄

收稿日期 2025-9-26; 接受日期 2025-10-30

基金项目 云南省科技人才与平台计划院士专家工作站项目 (No. 202305AF150146); 云南省科技厅创新引导与科技型企业培育计划项目 (No. 202104AR040006)。

作者简介 杨 米 (1995—), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 热带作物种质资源创新改良。*通信作者 (Corresponding author): 孙寅虎 (SUN Yinhu); E-mail: 394011435@qq.com。

treatment significantly enhanced soil total nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter, and pH, while also increasing the levels of six metal elements in the soil: Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, and Zn. The T₃ treatment was second only to T₄ treatment. Correlation analysis showed that the combined application of microbial fertilizer improved the single fruit weight and single aril weight of cempedak mainly by increasing available phosphorus, available potassium, Fe and Mn in the soil. In conclusion, the treatments of T₃ and T₄ not only improved the yield and quality of cempedak, but also improved the soil environment and ecological benefits, which are the optimal combined application modes for green and efficient cultivation of cempedak.

Keywords: cempedak; chemical fertilizer reduction; microbial fertilizer; quality; soil fertility

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.020

榴莲蜜[*Artocarpus champeden*(Lour.) Spreng.] 又称尖蜜拉, 属桑科木菠萝属植物, 原产于马来西亚, 目前主要种植于东南亚地区, 我国海南、福建、广西、广东和云南等地均有种植。果实形似菠萝蜜, 但体积更小, 气味类似榴莲。果肉富含碳水化合物、蛋白质、维生素 C 和膳食纤维等物质^[1], 是一种新兴高产值水果, 近年来市场需求不断增加^[2]。

传统的施肥方式往往依赖大量化肥, 不仅增加生产成本, 还会造成土壤营养失衡和土壤板结等问题, 进而影响榴莲蜜果实的品质与产量, 限制其可持续发展^[3-4]。目前, 解决施肥过量问题的主要方案为有机肥配施化肥, 已有诸多研究证明有机肥配施化肥在改良土壤、促进作物产量和品质提升方面具有良好效果^[5-7]。而微生物菌肥作为一种新型有机肥, 主要通过活性微生物的各种生命活动为作物提供所需养分, 具有无毒害、肥效长、活性高等优点, 可降低土壤重金属和化学物质残留、改良盐碱地、改善土壤理化性质、优化土壤菌群结构、增强作物抗逆性、促进作物生长发育^[8]。菌肥中有益微生物的活动能改善作物的营养条件, 增加土壤中的有机质含量, 为作物提供养分, 从而达到增产增效的目的^[9]。SALEEM 等^[10]研究表明, 土壤微生物在植物对养分的吸收和利用方面发挥着巨大作用。李昕玥等^[5]发现, 复合微生物菌剂处理后的土壤中速效钾、有机质和水解氮含量较对照均有所提高, 能在一定程度上改善土壤理化性质, 提升番茄品质。张东风等^[6]通过试验发现, 施用生物菌肥后, 龙眼葡萄叶片营养成分显著提高, 果实可溶性固形物含量也显著提高, 效果明显。魏保国等^[7]通过试验发现, 生物菌肥与化肥合理配施可显著改善番茄果实品质, 同时提高其果实甜酸比, 改善果实的风味。然而, 关于化肥减施结合微生物菌肥对榴莲蜜产

量和品质影响的研究未见报道。本研究通过田间试验, 比较分析榴莲蜜果实品质差异及其与土壤营养成分的相关性, 探讨不同化肥减施配施微生物菌肥对土壤养分及榴莲蜜果实产量、品质的影响, 以期对榴莲蜜绿色、高效栽培提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为树龄 7 a 的多异 1 号榴莲蜜果实。试验地位于云南省红河州河口县沙坝, 试验区属热带季风雨林气候类型, 年平均气温为 14.3 ℃, 年平均降水量为 675.3 mm, 年平均日照时数为 2510.7 h。供试肥料: 微生物菌肥为金满田复合生物菌剂 (有机质含量 ≥ 50%, 有效活菌数 ≥ 2 亿个/g); 复合肥为史丹利复合肥 (N : P : K = 18 : 18 : 18)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2023 年 12 月至 2024 年 8 月在云南省红河热带农业科学研究所榴莲蜜示范基地进行。设置 6 个施肥处理: (1) CK 处理, 100% 复合肥 (2.0 kg); (2) T₁ 处理, 复合肥减量 20% + 20% 微生物菌肥; (3) T₂ 处理, 复合肥减量 40% + 40% 微生物菌肥; (4) T₃ 处理, 复合肥减量 60% + 60% 微生物菌肥; (5) T₄ 处理, 复合肥减量 80% + 80% 微生物菌肥; (6) T₅ 处理, 100% 微生物菌肥处理 (5.0 kg)。除施底肥配比不同外, 其他田间管理与常规处理相同。施肥方式为沟施。采用随机区组排列, 每处理 3 次重复, 每重复 3 株果树, 株距 5 m、行距 6 m。各处理肥料施用情况见表 1。

1.2.2 指标测定 (1) 果实指标测定。于 2024 年 8 月, 采集成熟期榴莲蜜果实样品, 测定单果质量、果实横径、果实纵径、单苞质量、单苞果核质量、可食率、可溶性固形物含量等指标。

表 1 不同处理肥料施用情况
Tab. 1 Application rates of different fertilizer treatments

处理 Treatment	复合肥施 用量 Application amount of compound fertilizer/kg	微生物菌 肥施用量 Application amount of microbial fertilizer/kg	复合肥减量 比例 Compound fertilizer reduction ratio/%	微生物菌 肥量比例 Microbial fertilizer dosage ra- tio/%
CK	2.0		0	0
T ₁	1.6	1.0	20	20
T ₂	1.2	2.0	40	40
T ₃	0.8	3.0	60	60
T ₄	0.4	4.0	80	80
T ₅		5.0	100	100

单果质量、单苞质量、单苞果核质量用万分之一天平称量；果皮厚度用游标卡尺测量；果实纵径以果蒂到果顶的距离为准，果实横径以果实横截面最大处的直径为准；果形指数为纵径与横径之比；可食率为果肉鲜质量与单果质量之比；可溶性固形物含量采用 ATAGO MASTER-53T 糖酸仪测定。

(2) 土壤指标测定。采用 5 点混合采样法于榴莲蜜果实成熟期同时采集土壤样品，采集深度为 0~40 cm。

① 全氮含量测定。参照 LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定，采用元素分析法测定全氮含量（梅特勒 AB235-S 型十万分之一天平、EA3100 元素分析仪）。

② 速效磷含量测定。参照 HJ 704—2014 土壤有效磷的测定-钼锑抗分光光度法，采用钼锑抗比色法测定速效磷含量（梅特勒 ML204 型万分之一天平、赛默飞世尔 Multiskan GO 1510 全波长酶标仪）。

③ 速效钾含量测定。参照 LY/T 1234—2015 森林土壤钾的测定，采用电感耦合等离子体发射光谱法测定速效钾含量（梅特勒 ML204 型万分之一天平、Agilent 5800 ICP OES）。

④ 有机质含量测定。参照鲍士旦《土壤农化分析》，采用重铬酸钾容量法测定有机质含量（梅特勒 ML204 型万分之一天平、普兰德数字瓶口滴定器）。

⑤ Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 元素含量测定。参照 HJ 781—2016 固体废物 22 种金属元素的测定-电感耦合等离子体发射光谱法，采用电感耦合等离子体发射光谱法测定 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 元素含量（梅特勒 ML204 型万分之一天

平、Agilent 5800 ICP OES）。

⑥ pH 测定。采用 pH 计法，参照 NY/T 1377—2007 土壤 pH 的测定；所用仪器为梅特勒 ML204 型万分之一天平、雷磁 PHB-4 便携式 pH 计。

1.3 数据处理

利用 Excel 2010 软件进行试验数据整理，采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析，采用 Duncan 法作差异显著性分析，使用 Origin 2018 和 Prism 10.1.2 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对榴莲蜜果实品质的影响

由图 1 可知，增施微生物菌肥、减施复合肥均能提高榴莲蜜果实的单果质量、可食率、单苞质量、单苞果核质量、可溶性固形物含量，降低果皮厚度。不同处理对榴莲蜜果实单果质量、可食率、单苞质量、单苞果核质量、可溶性固形物含量的影响之间差异显著。微生物菌肥的施用对榴莲蜜果实的果皮厚度、果形指数也均有改善作用。

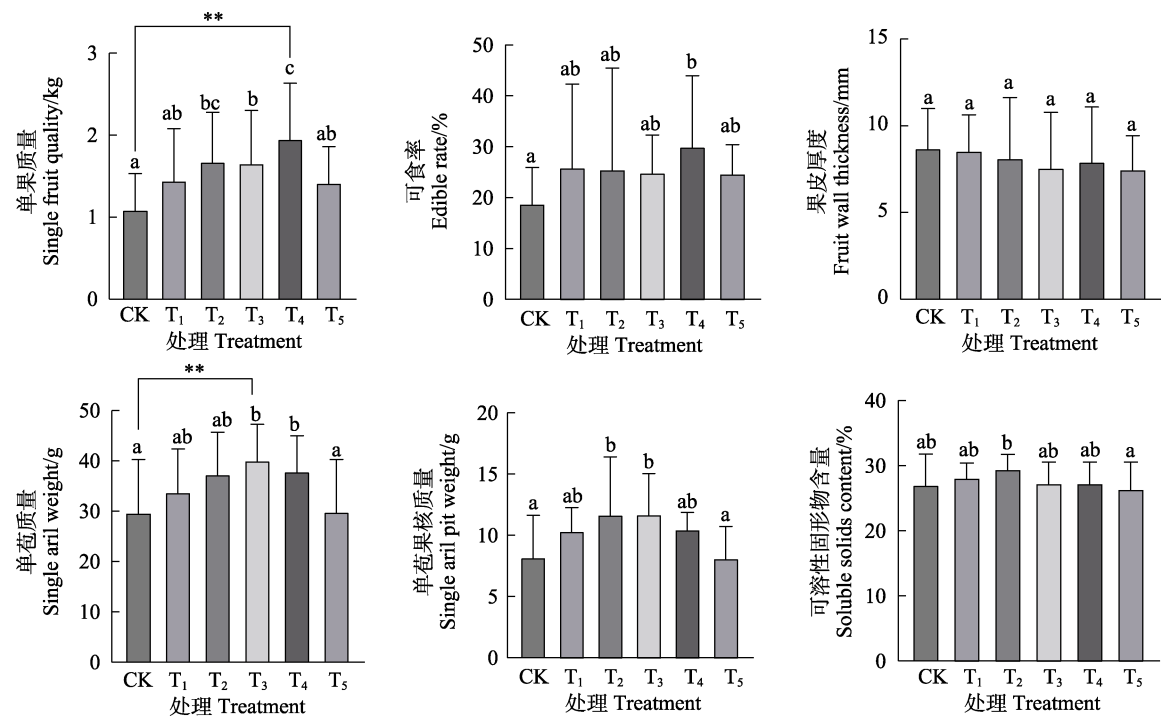
2.1.1 对单果质量的影响 不同处理的单果质量均较 CK 增加，且均随菌肥施肥量的增加呈先升高后降低的趋势。在 T₄ 处理时单果质量最高，为 1.96 kg，且极显著高于 CK；T₂、T₃ 处理显著高于 CK。

2.1.2 对可食率的影响 不同处理的可食率均较 CK 增加。在 T₄ 处理时可食率最高，为 30.07%，且显著高于 CK。

2.1.3 对果皮厚度的影响 不同处理的果皮厚度均较 CK 降低。在 T₅ 处理时果皮厚度最低，为 7.50 mm；T₃、T₄ 处理的果皮厚度次之，且差异较小，分别为 7.61、7.94 mm。

2.1.4 对单苞质量、单苞果核质量的影响 不同处理的单苞质量均较 CK 增加，且均随菌肥施用量的增加呈先升高后降低的趋势。在 T₃ 处理时达到最高，为 28.41 g，且极显著高于 CK，显著高于 T₅ 处理；T₃、T₄ 处理之间差异不显著。不同处理的单苞果核质量均较 CK 增加，且均随菌肥施用量的增加呈先升高后降低的趋势，在 T₃ 处理时最高，为 11.74 g，且 T₂、T₃ 处理显著高于 CK、T₅ 处理。

2.1.5 对可溶性固形物含量的影响 在可溶性固形物含量上，T₁、T₂ 处理高于 CK，而 T₃、T₄、T₅ 处理则低于 CK。其中 T₂ 处理的可溶性固形物含量最高，为 29.18%；T₅ 处理最低，为 26.16%；且 T₂、T₅ 处理之间差异显著。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), **表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

图 1 不同施肥处理榴莲蜜果实产量与品质变化

Fig. 1 Changes in yield and quality of cempedak under different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

如表 2 所示, T_4 、 T_5 处理的土壤全氮含量高于 CK, 增长率分别为 7.29% 和 3.13%; 不同处理的土壤速效磷含量均高于 CK, 且均随菌肥施用量的增加而呈先升高后降低的趋势, 其中 T_3 处理最高, 较 CK 增长 198.00%; 不同处理的土壤速效钾含量均高于 CK, 且均随菌肥施用量的增加而呈先升高后降低的趋势, 其中 T_3 处理最高, 较 CK 增长 102.00%; T_3 、 T_4 、 T_5 处理的土壤有机质含量高于 CK, 分别较 CK 增长 2.89%、21.33%、25.42%; T_4 、 T_5 处理的土壤 pH 较 CK 升高, 其中 T_4 处理最高, 较 CK 增长 7.69%, pH 为 7.14。

如表 3 所示, 除 T_1 处理的 Mn、Cu、Zn, T_3

处理的 Mg 和 T_5 处理的 Ca、Mg 元素外, 其余均能不同程度地增加土壤中 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 金属元素含量, T_4 处理的 Ca、Mg、Fe、Cu 元素含量均最高, 而 Mn、Zn 元素含量则仅次于 T_3 处理。

2.3 土壤养分指标与榴莲蜜果实品质指标的相关性

由图 2 可知, 榴莲蜜果实的单果质量与土壤速效磷、速效钾、Ca、Fe、Mn、Cu 呈极显著正相关; 单苞质量与速效磷、速效钾、Fe、Mn、Cu 呈极显著正相关; 单苞果核质量与速效磷、速效钾、Fe、Mn 呈极显著正相关; 可溶性固形物与有机质、pH 呈显著负相关。果实品质指标方面, 单

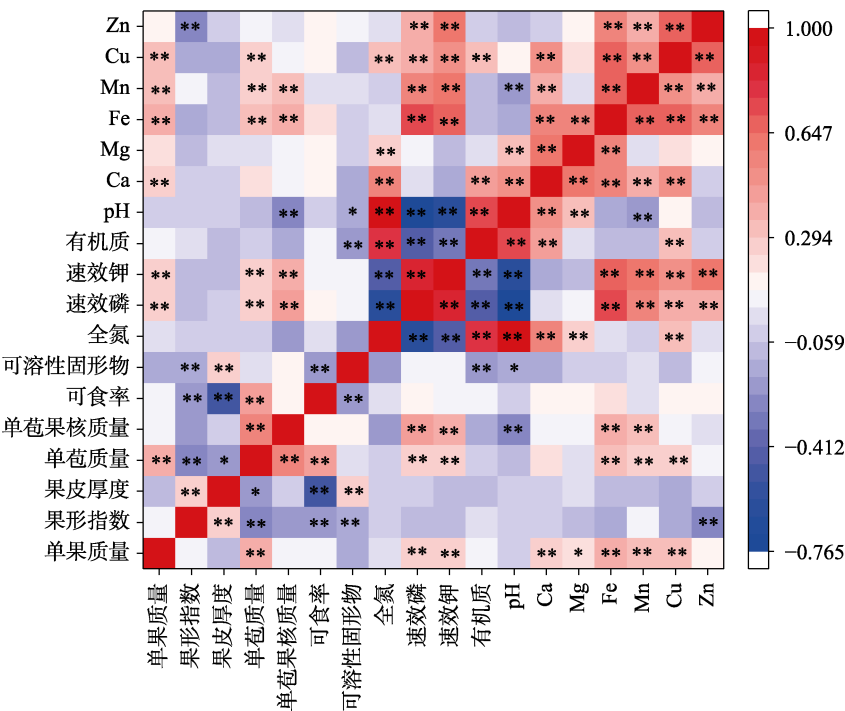
表 2 不同施肥处理土壤养分含量变化

Tab. 2 Changes in soil nutrients content under different fertilization treatments

处理 Treatment	含量 (较 CK 增长) Content (growth rate compared to CK/%)				pH(水土比 2.5 : 1)
	全氮 Nitrogen/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	
CK	0.96	32.64	147.59	12.47	6.63
T ₁	0.87 (-9.38)	86.84 (166.05)	210.79 (42.82)	12.23 (-1.92)	5.94 (-1.04)
T ₂	0.92 (-4.17)	96.20 (194.73)	292.54 (98.21)	11.87 (-4.81)	6.17 (-6.94)
T ₃	0.92 (-4.17)	97.19 (198.00)	298.80 (102.00)	12.83 (2.89)	6.04 (-8.90)
T ₄	1.03 (7.29)	63.49 (94.52)	184.12 (24.75)	15.13 (21.33)	7.14 (7.69)
T ₅	0.99 (3.13)	36.78 (12.68)	203.51 (37.89)	15.64 (25.42)	6.85 (3.32)

表 3 不同施肥处理土壤金属元素含量变化
Tab. 3 Changes in soil metal content under different fertilization treatments

处理 Treatment	含量 (较 CK 增长) Content (growth rate compared to CK/%)					
	Ca/(g·kg ⁻¹)	Mg/(g·kg ⁻¹)	Fe/(g·kg ⁻¹)	Mn/(g·kg ⁻¹)	Cu/(g·kg ⁻¹)	Zn/(g·kg ⁻¹)
CK	1.24	2.76	20.17	0.49	0.02	0.07
T ₁	1.26 (1.61)	3.19 (15.58)	22.15 (9.82)	0.49 (0)	0.02 (0)	0.07 (0)
T ₂	1.28 (3.23)	3.74 (35.51)	27.68 (37.23)	0.56 (14.29)	0.04 (100.00)	0.16 (128.57)
T ₃	1.58 (27.42)	2.01 (-27.17)	25.48 (26.33)	0.78 (59.18)	0.03 (50.00)	0.11 (57.14)
T ₄	4.01 (2.23)	4.67 (69.20)	28.34 (40.51)	0.63 (28.57)	0.04 (100.00)	0.09 (28.57)
T ₅	0.93 (-25.00)	2.48 (10.14)	20.59 (2.08)	0.45 (-8.16)	0.03 (50.00)	0.10 (42.86)



*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$) 。
* indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 2 土壤养分指标与榴莲蜜果实品质指标的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between soil nutrient index and cempedak quality index

果质量与单苞质量呈极显著正相关；果形指数与果皮厚度呈极显著正相关，与单苞质量、可食率、可溶性固形物呈极显著负相关；果皮厚度与可溶性固形物呈极显著正相关，与单苞质量、可食率呈显著负相关；单苞质量与单苞果核质量、可食率呈极显著正相关；可食率与可溶性固形物呈极显著负相关。土壤养分指标方面，全氮与速效磷、速效钾呈极显著负相关，与有机质、pH、Ca、Mg、Cu 呈极显著正相关；速效磷与有机质、pH 呈极显著负相关，与速效钾、Fe、Mn、Cu、Zn 呈极显著正相关；速效钾与有机质、pH 呈极显著负相关，与 Fe、Mn、Cu、Zn 呈极显著正相关；有机质与 pH、Ca、Cu 呈极显著正相关；pH 与

Mn 呈极显著负相关，与 Ca、Mg 呈极显著正相关；Ca 与 Mg、Fe、Mn、Cu 呈极显著正相关；Mg 与 Fe 呈极显著正相关；Fe 与 Mn、Cu、Zn 呈极显著正相关；Mn 与 Cu、Zn 呈极显著正相关；Cu 与 Zn 呈极显著正相关。

3 讨论

3.1 化肥减量配施微生物菌肥对榴莲蜜品质的影响

配施微生物菌肥对土壤环境改善和作物生长具有显著正面效应。微生物在土壤和植物根系的大量繁殖，促进微生物固氮、解磷、解钾等功能，同时提高土壤的生物肥力，释放基础营养元素和

游离因子, 增加土壤养分, 改善作物品质^[11-13]。本研究结果表明, 复合肥减量配施微生物菌肥影响榴莲蜜果实品质, 且对榴莲蜜产量、品质的增益效果均随微生物菌肥的增加呈先增加后降低的趋势。其中 T₃、T₄ 处理效果最佳, 即复合肥减量 60%~80% (0.4~0.8 kg), 微生物菌肥增量 60%~80% (3~4 kg) 效果最好; 但当 100% (5 kg) 施用微生物菌肥时, 榴莲蜜果实的品质指标均低于 CK。这可能是因为微生物菌肥肥效释放速度慢且肥力有限, 单独施用不能满足作物初长期和旺长期生长的需要^[14]。

有研究表明, 单苞质量、单苞果核质量、可溶性固形物是榴莲蜜品质性状评价的主要指标, 其中可溶性固形物和单苞质量为正向评价指标, 单苞果核质量为负向评价指标^[15]。在本研究中, 与全量复合肥 (CK) 和全量微生物菌肥 (T₅) 相比, 复合肥配施微生物菌肥均能不同程度地改善榴莲蜜果实的品质性状, 且单苞质量、可溶性固形物变化显著, 表明本研究的施肥模式能显著影响决定榴莲蜜果实品质的主要指标。不仅榴莲蜜果实的单苞质量随着微生物菌肥的施用而增加, 而且单苞果核质量同样也在增加, 这与相关性分析结果一致。相关性分析表明单苞质量与单苞果核质量呈极显著正相关, 这可能是由于某些物质在促进单苞果肉质量增加的同时也促进了单苞果核质量的增加, 在后续的研究中, 应注重提高单苞质量的同时适当降低单苞果核质量。

在本研究中, 仅有 T₁、T₂ 处理的可溶性固形物含量高于 CK, 而 T₃、T₄、T₅ 处理低于 CK。其中 T₂ 处理最高, 为 29.18%; T₅ 处理最低, 为 26.16%。即表现为随着微生物菌肥的增加, 对可溶性固形物的改善作用开始降低, 原因可能是增施微生物菌肥的同时, 复合肥的施用量也在降低, 较低的 N、P、K 肥影响了可溶性固形物的积累。在后续的研究中, 应适当调高复合肥的施用, 以兼顾、平衡好其他品质性状与可溶性固形物的提升效果。

3.2 化肥减量配施微生物菌肥对土壤养分的影响

氮作为蛋白质、核酸、叶绿素等物质的组成元素, 发挥着重要功能^[16]。本研究中, 当配施微生物菌肥增加至 80%~100% 时, 其土壤氮含量高于全复合肥处理, 结合前人的研究, 推测其原因

可能是微生物有机肥处理改善了土壤中复杂的碳代谢和氮还原过程, 抑制了以硝化作用为代表的氮氧化, 从而提高了土壤氮含量^[17]。

磷是植物细胞合成核酸、磷脂和 ATP 的重要元素^[18]。钾参与植株体内有机物的合成, 是多种酶的活化剂, 除了参与糖和淀粉的合成、运输和转化外^[19], 还起到调节植物细胞的渗透压和细胞膨压的作用^[20]。本研究中, 土壤中速效磷、速效钾含量均随着配施微生物菌肥的增加呈先增加后降低, 在 T₃ 处理时达到峰值, 较 CK 增长 198.00% 和 102.00%, 提高幅度较大, 这与张建鹏^[21]、杨囡君等^[22]的研究结果一致。

土壤中的 Fe 元素大部分以难溶性的 Fe³⁺ 形式存在, Fe 作为合成叶绿素的相关元素, 不仅能提高植物光合作用, 增加有机物的积累, 而且可以促进树体对其他微量元素的吸收^[23-24]。Mn 参与植株的光合作用、抗氧化作用、激素合成、元素吸收等重要生理过程。Cu 参与植物的呼吸作用, 对植物的生理代谢进行调控, 适量的 Cu 可以增强植物的抗病能力。Cu 的缺失会使植株的抗病能力减弱; 而土壤中大量的 Cu 堆积对植物有一定危害, 会使植物根系受损, 影响植株对水和其他营养成分的吸收, 进而影响植株正常生长。本研究所有配施微生物菌肥的处理, 其土壤中的 Fe、Mn、Cu 元素较 CK 几乎均有明显增长, 且相关性分析结果显示, Fe、Mn、Cu 与榴莲蜜果实的单果质量、单苞果核质量呈极显著正相关。虽经微生物菌肥处理后的 Fe、Mn、Cu 相较于速效磷、速效钾增长幅度较小, 但其对果实品质的改善效果则更佳。说明 Fe、Mn、Cu 对榴莲蜜果实品质的改善贡献更大。

3.3 土壤养分指标与榴莲蜜品质指标的相关性分析

榴莲蜜品质指标与土壤养分指标间的相关性分析显示, 榴莲蜜果实的单果质量、单苞质量、单苞果核质量与速效磷、速效钾、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu 呈极显著正相关。在本研究中, T₃、T₄ 处理显著提升的果实品质指标为单果质量、单苞质量、单苞果核质量和可溶性固形物; T₃、T₄ 处理明显改善的土壤养分指标为速效磷、速效钾、Mg、Fe、Mn 和 Cu。由此推断, 配施微生物菌肥主要通过提高土壤中的速效磷、速效钾、Fe、Mn、Cu 等土壤养分来提升榴莲蜜果实的品质。

4 结论

与全量复合肥 (CK) 和全量微生物菌肥 (T_5) 处理相比, 化肥减量增施微生物菌肥有利于榴莲蜜产量、品质的提升, 可提高榴莲蜜果实的单果质量、可食率、单苞质量、单苞果核质量、可溶性固形物, 降低果皮厚度。且复合肥减量 60%+微生物菌肥增量 60% (T_3) 和复合肥减量 80%+微生物菌肥增量 80% (T_4) 处理显著提升了榴莲蜜果实的单果质量、单苞质量, 显著提高了榴莲蜜的经济价值。几乎所有配施微生物菌肥的处理对土壤养分都有一定的改善作用, 其中 T_3 、 T_4 处理效果最佳, 不仅改善了土壤全氮、速效磷、速效钾、有机质含量和 pH, 同时也提高了土壤中的 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 六种金属元素含量。相关性分析结果也表明, 配施微生物菌肥主要通过提高土壤中的速效磷、速效钾、Fe、Mn 等来提升榴莲蜜的品质, 而 T_3 、 T_4 处理在速效磷、速效钾、Fe、Mn 等土壤养分的提升上也表现突出。因此, 在 T_3 、 T_4 处理下, 既保证了榴莲蜜的增产增收, 又减少了复合肥施用量; 既提升了榴莲蜜品质, 又改善了土壤肥力, 提高了生态效益。综合而言, 复合肥减量 60%+60%微生物菌肥 (T_3)、复合肥减量 80%+80%微生物菌肥 (T_4) 的微生物菌肥配施模式较好。

参考文献

- [1] 林盛, 李向宏, 罗志文, 刘振文, 古裕飞, 王运勤, 林文柱. 温度对“榴莲蜜一号”尖蜜拉生长的影响[J]. 中国南方果树, 2014, 43(1): 62-63.
LIN S, LI X H, LUO Z W, LIU Z W, GU Y F, WANG Y Q, LIN W Z. Effect of temperature on the growth of "cempedak No.1" *Artocarpus champeden* spreng.[J]. South China Fruits, 2014, 43(1): 62-63. (in Chinese)
- [2] 吴刚, 杨逢春, 闫林, 谭乐和. 尖蜜拉在海南兴隆的引种栽培初报[J]. 中国南方果树, 2010, 39(5): 60-61.
WU G, YANG F C, YAN L, TAN L H. Preliminary report on the introduction and cultivation of *Artocarpus champeden* Spreng. in Xinglong, Hainan[J]. South China Fruits, 2010, 39(5): 60-61. (in Chinese)
- [3] 林盛, 高尤英, 滕天广, 李向宏, 周文静, 林书生, 林瑞斌, 林文柱. 榴莲蜜栽培技术[J]. 中国热带农业, 2015(1): 78-80.
LIN S, GAO Y Y, TENG T G, LI X H, ZHOU W J, LIN S S, LIN R B, LIN W Z. *Artocarpus champeden* (Lour.) spreng. cultivation techniques[J]. China Tropical Agriculture, 2015(1): 78-80. (in Chinese)
- [4] 陶挺燕, 范鸿雁, 王书旺, 王祥和, 陈业光, 胡福初. 尖蜜拉新品种“多异 1 号”的选育及栽培技术要点[J]. 中国果树, 2017(3): 80-82.
TAO T Y, FAN H Y, WANG S W, WANG X H, CHEN Y G, HU F C. Breeding and key cultivation techniques of the new *Artocarpus champeden* (Lour.) spreng. variety 'Duoyi No. 1'[J]. China Fruits, 2017(3): 80-82. (in Chinese)
- [5] 李昕玥, 狄蕊, 吴平, 郭焕茹, 葛芙蓉, 王程安, 范雪莲. 微生物菌肥对番茄品质和土壤理化性质的影响[J]. 中南农业科技, 2023, 44(7): 232-234.
LI X Y, DI R, WU P, GUO H R, GE F R, WANG C A, FAN X L. Effects of microbial fertilizer on the quality of Tomato quality and soil physicochemical properties[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2023, 44(7): 232-234. (in Chinese)
- [6] 张东风, 刘俊, 李敬川. 不同生物菌肥对葡萄生长影响的研究[J]. 河北林业科技, 2015(2): 4-6.
ZHANG D F, LIU J, LI J C. Study on the effects of different microbial fertilizers on the growth of *Vitis vinifera*[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2015(2): 4-6. (in Chinese)
- [7] 魏保国, 王明友. 生物菌肥对设施连作番茄生长及产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2014(2): 172-175.
WEI B G, WANG M Y. Effects of bacterial manure on growth, yield and quality of protected tomato with continuous cropping[J]. Northern Horticulture, 2014(2): 172-175. (in Chinese)
- [8] 尹心馨. 微生物菌肥在农业生产中的应用研究[J]. 农业与技术, 2025, 45(1): 31-34.
YIN X X. Research on the application of microbial fertilizers in agricultural production[J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(1): 31-34. (in Chinese)
- [9] 李梦瑶, 胡兆羽, 刘洋, 宫帅, 沈晓艳. 微生物菌肥及其应用研究进展[J]. 现代农业科技, 2024, 21: 115-123.
LI M Y, HU Z Y, LIU Y, GONG S, SHEN X Y. Research progress on microbial fertilizer and its application[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024, 21: 115-123. (in Chinese)
- [10] SALEEM M, HU J, JOUSSET A. More than the sum of its parts: microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2019, 50(1): 145-168.
- [11] 樊军生, 贾丽霞, 樊文梅. 微生物肥料对土壤的改良作用及在农作物生产中的应用[J]. 农业开发与装备, 2017(7): 47.
FAN J S, JIA L X, FAN W M. The improvement effects of microbial fertilizers on soil and their application in crop production[J]. Agricultural Development & Equipments,

- 2017(7): 47. (in Chinese)
- [12] 赵岑, 赵新宇, 王梦娇, 吴倩倩. 微生物肥料对土壤的改良作用及在农作物生产中的应用[J]. 农业与技术, 2018, 38(14): 22-23.
- ZHAO C, ZHAO X Y, WANG M J, WU Q Q. The Improvement effect of microbial fertilizers on soil and their application in crop production[J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(14): 22-23. (in Chinese)
- [13] LIU C J, GONG X W, DANG K, LI J, YANG P, GAO X L, DENG X P, FENG B L. Linkages between nutrient ratio and the microbial community in rhizosphere soil following fertilizer management[J]. Environmental Research, 2020(184): 109261.
- [14] 赵政, 陈巍, 王欢, 夏可心, 高仁维, 姜斯琪, 庞冠, 蔡枫. 木霉微生物肥与减量化肥配施对番茄产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 土壤学, 2018, 55(5): 1243-1253.
- ZHAO Z, CHEN W, WANG H, XIA K X, GAO R W, JIANG S Q, PANG G, CAI F. Effects of bio-manure combined with chemical fertilizer reduced in application rate on soil fertility and yield and quality of tomato[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 1243-1253. (in Chinese)
- [15] 郭清云, 陈哲, 吴凤芝, 王祥和, 范鸿雁, 冯学杰, 胡福初. 5 份榴莲蜜种果实品质的主成分分析及综合评价[J]. 中国南方果树, 2022, 51(1): 106-117.
- GUO Q Y, CHEN Z, WU F Z, WANG X H, FAN H Y, FENG X J, HU F C. Principal component analysis and comprehensive evaluation of fruit quality in five *Artocarpus integer* (Thunb.) Merr germplasms[J]. South China Fruits, 2022, 51(1): 106-117. (in Chinese)
- [16] GARZA-ALONSO C A, OLIVARES-SAENZ E, GUTIERREZ-DIEZ A, VAZQUEZ-ALVARADO R E, LOPEZ-JIMENEZ A. Visual symptoms, vegetative growth, and mineral concentration in fig tree (*Ficus carica* L.) under macronutrient deficiencies[J]. Agronomy, 2019, 12(9): 787.
- [17] SCHWEITZER J A, BAILEY J K, FISCHER D G, LEROY C J, LONSDORF E V, WHITHAM T G, HART S C. Plant-soil-microorganism interactions: heritable relationship between plant genotype and associated soil microorganisms[J]. Ecology, 2008, 89(3): 773-781
- [18] 戴凌. 土壤磷素形态及物种多样性对植物生产力的影响研究[J]. 南方农业, 2014, 8(9): 113-115.
- DAI L. Study on the effects of soil phosphorus forms and species diversity on plant productivity[J]. South China Agriculture, 2014, 8(9): 113-115. (in Chinese)
- [19] KANAI S, OHKURA K, ADU-GYAMFI J J, MOHAPATRA P K, NGYEN N T, SANEOKA H, FUJITA K. Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(11): 2917-2928.
- [20] 刘寅笃, 姚攀锋, 杨志坚, 脱军康, 毕真真, 白江平. 马铃薯钾素营养研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, 59(8): 1505-1516.
- LIU Y D, YAO P F, YANG Z J, TUO J K, BI Z Z, BAI J P. Research progress of potassium nutrition in potato[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(8): 1505-1516. (in Chinese)
- [21] 张建鹏. 土壤调理剂配施有机肥对连作马铃薯土壤的改良效果[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 219-226.
- ZHANG J P. Improvement effects of soil conditioner combined with organic fertilizer on continuous cropping *Solanum tuberosum* soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(11): 219-226. (in Chinese)
- [22] 杨园君, 秦涛, 决超. 不同有机肥配施土壤调理剂对黄瓜连作土壤碳氮及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 225-231.
- YANG N J, QIN T, JUE C. Effects of different organic fertilizer combinations with soil conditioner on carbon, nitrogen, and enzyme activities in continuous cropping soil of *Cucumis sativus*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 225-231. (in Chinese)
- [23] 刘忠强, 李新中. 果树缺铁性黄叶的发生与防治[J]. 科学种养, 2018(3): 34-35.
- LIU Z Q, LI X Z. Occurrence and control of iron-deficiency-induced yellow leaves in fruit trees[J]. Scientific Planting and Breeding, 2018(3): 34-35. (in Chinese)
- [24] 杨艳, 付文进, 范宏迪, 何建军, 杨治明, 贺朝阳. 施用铁肥对红地球葡萄成熟的影响[J]. 新疆农垦科技, 2006(1): 46-47.
- YANG Y, FU W J, FAN H D, HE J J, YANG Z M, HE C Y. Effects of iron fertilizer application on the ripening of red globe *Vitis vinifera*[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2006(1): 46-47. (in Chinese)