

水肥一体化模式下不同水肥套餐对蜜柚产量、品质及经济效益的影响

张 青¹, 孔庆波^{1*}, 栗方亮¹, 黄煌伟²

1. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所, 福建福州 350013; 2. 平和县土壤肥料与生态能源站, 福建漳州 363700

摘 要: 通过 2020—2022 年定位试验, 研究水肥一体化条件下不同水肥套餐对蜜柚产量、品质及经济效益等的影响, 为探索和实践蜜柚水肥一体化施肥模式提供依据。对平和蜜柚高低产园分别设置 4 种处理方式: (1) TF (常规施肥)、(2) 30%WF (30%水肥套餐)、(3) 50%WF (50%水肥套餐)、(4) 70%WF (70%水肥套餐)。2020—2022 年定位试验结果表明: 水溶肥套餐不同程度减量施肥对蜜柚产量影响差异显著, 高低产园年平均产量影响均为: 70%W>50%WF>TF>30%WF; 高产园 50%WF、70%WF 处理比 TF 处理年平均增产率分别为 12.43%、24.67%; 低产园 50%WF、70%WF 处理比 TF 处理年平均增产率分别为 15.05%、26.80%; 高、低产园蜜柚年平均产量均以 70%WF 处理最高 (高产园 67 845.5 kg/hm²、低产园 53 495.5 kg/hm²), 低产园增产幅度大于高产园; 高、低产园中年平均次果率均以 70%WF 效果最佳 (高产园 5.71%、低产园 4.67%)。高、低产园不同水溶肥套餐施肥处理对蜜柚果肉粒化率无显著影响, 但对单果重、果肉重影响较为显著; 且不同水溶肥套餐施肥处理蜜柚裂果率年际变异大; 70%水溶肥套餐施肥明显改善了蜜柚基本农艺性状, 提高单果重, 降低裂果率。2021、2021 年高、低产园中 4 种处理可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸度增减幅度不大, 各处理间差异不显著; 70%水溶肥套餐蜜柚各品质指标均为最佳。高产园 50%WF、70%WF 处理年平均最终净收益较 TF 处理分别增收 30.58%、47.79%。年平均产投比以 70%WF 处理最高 (4.29 : 1), 较 TF 处理高 1.31 倍。低产园 50%WF、70%WF 处理年平均最终净收益较 TF 处理分别增收 40.41%、59.67%。年平均产投比以 70%WF 处理最高 (3.63 : 1), 比 TF 处理高 1.17 倍; 高、低产园中均以 70%水溶肥套餐处理经济效益最高, 低产园经济效益增幅大于高产园。水肥一体化模式下不同水肥套餐减量施肥具有提高蜜柚产量、经济效益和改善品质等效果, 且在高低产园中蜜柚施用 70%WF 处理对提高蜜柚产量、经济效益和改善品质等效果最好, 为最佳施肥处理, 推荐应用。

关键词: 减量施肥; 蜜柚; 质量; 经济效益; 水肥一体化

中图分类号: S666.3 文献标志码: A

Effects of Different Water and Fertilizer Packages on Yield, Quality and Economic Benefit of Honey Pomelo under Water and Fertilizer Integration Mode

ZHANG Qing¹, KONG Qingbo^{1*}, LI Fangliang¹, HUANG Huangwei²

1. Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China; 2. Pinghe County Soil, Fertilizer, Ecological and Energy Station, Zhangzhou, Fujian 363700, China

Abstract: The study investigated the effects of different water and fertilizer combinations on yield, quality, and economic benefits of pomelo under the condition of water and fertilizer integration to provide a basis for exploring and

收稿日期 2024-07-08; 修回日期 2024-08-24

基金项目 福建省农业科学院对外合作项目 (No. DWHZ-2022-03, No. DWHZ-2022-07); 福建省高质量发展超越“5511”协同创新工程项目 (No. XTCXGC2021009)。

作者简介 张 青 (1977—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 土壤环境与施肥。*通信作者 (Corresponding author): 孔庆波 (KONG Qingbo), E-mail: qbkong@qq.com。

practicing the integrated fertilization model of water and fertilizer for pomelo through a 3-year fixed position experiment. Four treatment methods were set up for Pinghe honey pomelo yield orchard: conventional fertilization (TF), 30% water and fertilizer package (30%WF), 50% water and fertilizer package (50%WF), and 70% water and fertilizer package (70%WF). The results showed that the effect of different degrees of reduced fertilization with a water-soluble fertilizer package on the yield of pomelo was significant. The average yield was as follows: 70%W>50%WF>TF>30%WF. The average 3-year yield increase rate of 50%WF, and 70%WF treatments in high-yield orchards was 12.43%, and 24.67%, respectively, compared to TF treatment. The average annual yield increase rate of 50%WF, and 70%WF treatments in low yield orchards compared to TF treatments was 15.05%, and 26.80%, respectively. The average 3-year yield of honey pomelo in high-yield and low yield orchards was the highest in the 70%WF treatment (high-yield orchards 67 845.5 kg/hm², low yield orchards 53 495.5 kg/hm²), and the yield increase in low yield orchards was greater than that in high yield orchards. 70%WF had the best 3-year average secondary fruit rate in both high and low yield orchards (5.71% in high yield orchards and 4.67% in low yield orchards). The application of different water-soluble fertilizer combinations in high-yield and low yield orchards had no significant effect on the granulation rate of pomelo flesh, but had a more significant impact on single fruit weight and flesh weight. Moreover, there was a significant interannual variation in the cracking rate of honey pomelo treated with different water-soluble fertilizer combinations. The 70% water-soluble fertilizer package significantly improved the basic agronomic traits of pomelo, increased single fruit weight, and reduced fruit cracking rate. The increase and decrease in soluble solids, soluble sugars, and titratable acidity of the four treatments in high-yield and low yield orchards after 2 years were not significant, and there was no significant difference among the treatments. The 70% water-soluble fertilizer package had the best quality indicators for honey pomelo. The 3-year average final net income of high-yield orchards treated with 50%WF, and 70%WF increased by 30.58%, and 47.79% compared to the TF treatment, respectively. The 3-year average production to investment ratio was the highest in the 70%WF treatment (4.29 : 1), which is 1.31 times higher than that of the TF treatment. The 3-year average final net income of low yield parks treated with 50%WF, and 70%WF increased by 40.41%, and 59.67% compared to the TF treatment, respectively. The 3-year average production to investment ratio was the highest in the 70%WF treatment (3.63 : 1), which is 1.17 times higher than that of the TF treatment. The 70% water-soluble fertilizer package treatment had the highest economic benefits in both high and low yield orchards, with the economic benefits of low yield orchards increasing more than those of high yield orchards. Under the integrated mode of water and fertilizer, different water and fertilizer combinations with reduced fertilization had the effect of increasing the yield and economic benefits, improving the quality of honey pomelo, and the application of 70%WF treatment in high and low yield orchards had the best effect on improving the yield and economic benefits, and improving the quality of honey pomelo. This is the best fertilization treatment and is recommended for application.

Keywords: reduced fertilization; honey pomelo; quality; economic performance; integration of water and fertilizer

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.01.013

柚类是我国柑橘生产家族中的后起之秀，占世界总产量的 85%^[1]。平和县现已成为我国最大的柚类生产基地县和出口基地县，被誉为“世界柚乡”和“中国柚都”^[2]，但是柚类在生长过程中会因环境、品种、树势和历年产量等原因造成营养物质产生与分配不协调^[3]。科学合理施肥是保证果树高产高效的关键技术措施之一，然而大多数蜜柚种植户主要凭经验施肥，通过“大水大肥”的传统管理方式，水肥的投入量达到作物实际需求量的 2~3 倍，盲目过量的水肥投入已经成为普遍现象，投入劳动力多，费水费肥，产投比低，导致肥料深层淋失、农产品产量与品质下降及环境污染等问题^[4-6]，很难满足和适应集约化蜜柚生产的需要^[7]。另外，福建省多以山地丘陵为

主，造成蜜柚施肥和管理十分不便。因此，在蜜柚生产中选用合适的水肥管理模式就显得尤为重要。水肥一体化可提高肥料利用率并达到节水节肥等效果，在国外农业发达地区已广泛应用。ZOTARELLI 等^[8]对番茄研究表明，大田种植条件下，与常规施肥相比，滴灌可提高番茄产量 21%~51%；臧小平等^[9]研究表明，通过水肥一体化技术对芒果实施节水灌溉，根据果树需要进行施肥，具有提升产量和品质，节省肥料、人工和促进增收的优势，从而实现产业增效的作用。岳文俊等^[10]在甜瓜上的研究指出，滴灌施肥能够明显提高氮肥利用效率。近年来，随着我国农业集约化水平的不断提高，水肥一体化技术在我国也迅速发展。部分研究者对作物水肥一体化技术和滴灌

减量化施肥方面做了相关研究，宋亚辉等^[11]的研究结果表明在花生上使用水肥一体化技术，减少化肥用量的 40%，增产 17.19%；臧小平等^[12]的研究表明，与喷水袋灌溉施肥相比，滴灌减量施肥显著提高了香蕉产量，综合经济效益显著；邢英英等^[13]在温室番茄上的研究表明，在滴灌施肥条件下中等施肥水平可获得较高的产量。但在蜜柚上进行水肥一体化减量施肥的相关研究相当缺乏，由于我国不同地区农业生产条件、土壤、气候和作物等不同，施肥量及施肥模式等技术指标存在很大差异。因此，本研究于 2020—2022 年在琯溪蜜柚定位实验的基础上，研究比较了水肥一体化施肥模式下不同程度的水肥套餐减量施肥对蜜柚产量、品质 and 经济效益的影响，以期完善蜜柚不同施肥模式下合理减量施肥提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验设在漳州市平和县霞寨镇黄庄村（24°21'32.18"N，117°08'19.12"E）琯溪蜜柚基地进行，属亚热带季风区，2020—2022 年年均降水量为 1724 mm，年均气温为 21.3 ℃。由于各产园的土壤肥力不同，蜜柚产量也不同，根据当地蜜柚每公顷产量将蜜柚园划分为高产园（45 000~67 500 kg/hm²）、低产园（30 000~45 000 kg/hm²），分别选取一处进行定位施肥试验，高、低产园试验土壤基本理化性状如下：土壤类型均为砖红壤，高产园土壤 pH 5.10，有机质含量为 24.1 g/kg，碱解

氮含量为 158.8 mg/kg，有效磷含量为 108.1 mg/kg，速效钾含量为 131.7 mg/kg；低产园土壤 pH 4.81，有机质含量为 15.0 g/kg，碱解氮含量为 122.1 mg/kg，有效磷含量为 37.6 mg/kg，速效钾含量为 118.1 mg/kg。

选用面积为 3.33 hm² 琯溪蜜柚[Citrus grandis (L.) Osbeck ‘Guanximiyu’]果园中的红心蜜柚品种，其树龄为 12 a，冠幅平均约 3 m，砧木为酸木。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 将 3.33 hm² 果园按照产量划分为高产园片区和低产园片区，高、低产园均设置 4 个不同处理，分别为：（1）TF（常规施肥）；（2）30%WF（30%水肥套餐）；（3）50%WF（50%水肥套餐）；（4）70%WF（70%水肥套餐）。每个处理 3 次重复，其中减量水肥套餐不减基肥养分，只减追肥养分。因此高、低产园分别有 4 个区组 12 个单元，每个区组 3 个单元，每个单元果树 6 株，每个区组果树 72 株。随机排列，小区间设保护行。供试肥料包括：（1）传统施肥处理（TF），按照当地习惯施肥施用氮磷钾肥料：普通尿素（N 46%）、过磷酸钙（P₂O₅ 12%）、硫酸钾（K₂O 50%）；（2）水溶肥施肥处理（30%WF、50%WF、70%WF），选用氮肥为尿素（N 46%），磷肥为磷酸二氢钾（P₂O₅ 52%、K₂O 34%），钾肥为全水溶硫酸钾（K₂O 50%），其具体施肥量见表 1。各处理钙肥、镁肥、锌肥、硼肥施用量均一致，钙肥、镁肥施用方法为表面撒施，锌肥、硼肥施用方法为叶面喷施，钙肥为石灰（CaO 95%），施用量为

表 1 2020—2022 年不同试验地蜜柚施肥量
Tab. 1 Fertilizer application rate for Honey pomelo at different experimental fields from 2020 to 2022 kg/hm²

组别 Group	施肥时间 Fertilizer application time	TF			30%WF			50%WF			70%WF		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
高产园	采果后期（10—11 月）	250	150	250	250	150	250	250	150	250	250	150	250
	促梢壮花期（2 月）	200	100	100	60	30	30	100	50	50	140	70	70
	幼果期（3—5 月）	120	60	90	36	18	27	60	30	45	84	42	63
	壮果期（7 月）	150	150	200	45	45	60	75	75	100	105	105	140
	总养分量	720	460	640	391	243	367	485	305	445	579	367	523
低产园	采果后期（10—11 月）	200	120	200	200	120	200	200	120	200	200	120	200
	促梢壮花期（2 月）	160	80	80	48	24	24	80	40	40	112	56	56
	幼果期（3—5 月）	96	48	72	28.8	14.4	21.6	48	24	36	67.2	33.6	50.4
	壮果期（7 月）	120	120	160	36	36	48	60	60	80	84	84	112
	总养分量	576	368	512	312.8	194.4	317.6	388	244	356	463.2	293.6	418.4

632 kg/hm²; 镁肥为 96% 七水硫酸镁 (MgO ≥ 15%), 施用量为 1602 kg/hm², 锌肥为 25% 锌动力, 株施浓度为 0.4%, 硼肥为 98% 硼砂, 株施浓度为 0.6%。

传统施肥方式用作基肥的为埋施 (即在距离树体主干左右两侧 40 cm 处挖长 50~60 cm、深度和宽度约 30 cm 的环状沟, 施肥后覆土), 其他 3 次施肥为地面撒施, 于蜜柚各生育时期分别一次性施入; 水溶肥套餐施肥为肥料随水冲入, 每个生育阶段分 5 次进行施肥, 间隔 7~10 d, 如果遇到雨季雨水天较多, 可将有机肥配成的水肥延后在无雨天再施入。各处理滴灌施肥每次用水量为 12 m³/hm², 总灌水量为 240 m³/hm², 不同处理施肥用水量均保持一致。

1.2.2 取样及测定方法 (1) 蜜柚样品的采集。于 2020—2022 年每年的蜜柚果实成熟期, 在高、低产试验区内, 分别选取各水平具有代表性的果树 10 株, 在每株果树的树冠外围中层部位东、南、西、北、中 5 个方向, 选择生长健壮的结果枝, 随机采得成熟度基本一致的果实样品各 1 个, 把每个水平 10 株果树上采集的 50 个蜜柚样品混合装袋, 带回实验室, 冷藏, 备用, 以便测定各项品质指标。

(2) 蜜柚品质测定。各处理蜜柚样品的单果重使用电子天平测定, 测定后计算平均值, 即为各处理的平均单果重。蜜柚商品果应该满足蜜柚的基本要求, 即具有本品种的固有特征, 黄绿色, 不得有萎蔫、裂果, 无黄斑病斑, 无粗大油胞, 不得有溃疡病斑和深疤, 重量在 1.0~2.5 kg。不满足上述要求以及重量在 2.5 kg 以上 (含 2.5 kg) 和 1.0 kg 以下 (含 1.0 kg) 的果实则为次果, 次果率是指每株次果数占总果数的百分率。裂果指果顶部皮层开裂的蜜柚果实, 裂果率是指每株裂果数占总果数的百分率。

果实粒化的判定: 汁胞木质化, 表现为局部异常膨大, 变硬。将琯溪蜜柚切开后算其粒化汁胞范围, 0 级: 果实汁胞呈透明状, 没有发生粒化; 1 级: 粒化汁胞范围小于总瓣长的 1/3; 2 级: 粒化汁胞范围在总瓣长的 1/3~1/2; 3 级: 粒化汁胞范围在总瓣长的 1/2~2/3; 4 级: 粒化汁胞范围大于总瓣长的 2/3。粒化率 = $\sum(\text{各级数} \times \text{该级瓣数之和}) / \text{总瓣数}$ 。

可溶性固形物含量 (TSS) 采用手持折光仪

测定, 可滴定酸含量采用酸碱中和滴定法 (以柠檬酸计) 测定, 可溶性糖含量用蕙酮法, 并以可溶性糖含量与可滴定酸含量的比值计算糖/酸比; 维生素 C (VC) 含量采用 2,6-二氯酚法测定^[14]。

(3) 经济效益计算。

用工成本 (元/hm²) = 修剪 (元/hm²) + 环割 (元/hm²) + 采摘 (元/hm²) + 施肥 (元/hm²) + 浇水 (元/hm²)

投入成本 (元/hm²) = 地租 (元/hm²) + 肥料 (元/hm²) + 用工 (元/hm²) + 水费 (元/hm²) + 电费 (元/hm²) + 设备 (元/hm²)

产出 (元/hm²) = 商品果重 (kg/hm²) × 当年商品果价格 (元/kg) + 次果重 (kg/hm²) × 当年次果价格 (元/kg)

净收益 (元/hm²) = 产出 (元/hm²) - 成本 (元/hm²)

肥料成本均以当地市场价格计、蜜柚产出价格按各年份市场价格计算。2020 年商品果 3.8 元/kg、次果 2.6 元/kg; 2021 年商品果 4.5 元/kg、次果 3.0 元/kg; 2022 年商品果 3.6 元/kg、次果 1.8 元/kg。滴灌设备一次性安装首部设施和管道部分共计 25000 元/hm², 平均可以使用 10 a, 每年维护费用 300 元/hm², 折合一年设备成本 2800 元/hm²。

1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理, 用 SPSS 17.0 软件进行数据统计和方差分析, 不同处理间数据采用 Duncan 法作差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水肥套餐处理对蜜柚产量的影响

不同水肥套餐处理显著影响高产园和低产园蜜柚产量; 同一水肥套餐处理下, 高产园增产量均大于低产园, 但高产园受水肥处理影响的程度小于低产园。2020—2022 年定位试验结果表明, 不同水肥套餐处理下高、低产园增产量均为: 70%WF > 50%WF > TF > 30%WF。高产园中 30%WF、50%WF、70%WF 处理比 TF 处理年平均产量分别增产 -10.97%、12.43%、24.67%, 年平均产量 70%WF 处理达 67 845.5 kg/hm², 较 30%WF、50%WF 处理增产 40.09%、10.94%; 低产园中 30%WF、50%WF、70%WF 处理比 TF 处理年平均产量分别增产 -12.42%、15.05%、26.80%, 年平均产量 70%WF 处理达 53 495.5 kg/hm², 比 30%WF、50%WF 处理分别增产 44.78%、10.21%; 两类型蜜柚园 30%WF 处理 2020—2022 年平均产

量分别为 48 430、36 949 kg/hm²，均减产。表明水肥一体化模式下合理减量施肥可提高蜜柚产量，高低产园均为 70%水肥套餐增产效果最好，低产园增产幅度大于高产园。

表 2 结果显示，不同处理高、低产园的蜜柚商品果重存在显著差异；与 TF 处理相比，高产园 30%WF、50%WF、70%WF 处理的蜜柚商品率分别提高-21.55%、21.55%、36.40%；低产园

30%WF、50%WF、70%WF 处理年平均商品率较 TF 处理提高了-14.44%、23.91%、36.88%。说明水肥一体化模式下适当减量施肥对提高蜜柚商品率有一定作用。不同处理间蜜柚次果率存在差异，且不同施肥处理的蜜柚次果率年际间变异大；高、低产园中年平均次果率均以 70%WF 效果最佳，分别为 5.71%、4.67%。说明水肥一体化模式下适当减量施肥可提高蜜柚商品性，而 70%水溶肥套餐效果最佳。

2.2 不同水肥套餐处理对蜜柚主要性状的影响

2021、2022 年度不同水肥套餐处理对蜜柚主要性状的影响见表 3。由表 3 可知，对于高产园，2021、2022 年蜜柚平均单果重 50%WF、70%WF 处理较 TF 处理分别提高 9.36%、10.35%，差异显著，而 2021、2022 年蜜柚平均单果重最大为 70%WF 处理，达 1717.2 g；2021、2022 年 50%WF、70%WF 处理果肉重较 TF 处理均显著提高，分别提高 9.30%、11.48%；

低产园中，2021、2022 年蜜柚平均单果重 50%WF、70%WF 处理较 TF 处理分别提高 5.57%、5.66%，差异显著，而 2021、2022 年蜜柚平均单果重最大为 70%WF 处理，达 1601.3 g；2021、2022 年 50%WF、70%WF 处理果肉重较 TF 处理均显著提高，分别提高 6.84%、6.26%。

不同水肥套餐处理对果肉粒化率均无显著影响，但却明显提高了单果重、果肉重。无论是高产园还是低产园，TF 处理与 WF 处理间蜜柚裂果率存在差异，且 WF 处理与 TF 处理相比，在 2021、2022 年裂果率均显著减少，30%WF、50%WF、70%WF 处理与 TF 处理相比，2021、2022 年平均裂果率分别减少 6.9%、7.6%、8.1%，其中 70%WF 处理 2021、2022 年的蜜柚裂果率最低。WF 各处理间蜜柚裂果率差异均不显著，且基本无裂果。裂果产生的原因多为果皮长期缺水或受夏季高温的影响停止生长，但果肉继续生长，果肉和果皮的生长速度不一，WF 处理在 2021、2022 年裂果率均显著减少，其原因可能是水肥套餐长时间滴灌施肥保持土壤湿润，为蜜柚补充充足的水分，且施肥比较平衡，不会造成在蜜柚不同生长阶段肥料过量或者肥料不足产生的裂果，从而降低裂果率。综上所述，70%水溶肥套餐施肥明显改善蜜柚果实主要性状，提高单果重和果肉重，降低裂果率。

表 2 不同处理下的蜜柚产量
Tab. 2 Yield of *H. pomelo* under different treatments

组别 Group	处理 Treatment	2020		
		产量 Yield (kg·hm ⁻²)	商品果重 Commodity fruit (kg·hm ⁻²)	次果率 Inferior fruit rate/%
高 产 园	TF	56233.6±1079 ^c	47404.8±1541.9 ^c	15.7±1.32 ^a
	30%WF	51060±2511.1 ^d	44779.6±2116.4 ^c	12.3±1.0 ^b
	50%WF	61575.2±3015.3 ^b	57511.1±2831.6 ^b	6.6±0.03 ^c
	70%WF	68448.0±1253.1 ^a	65824±1906.5 ^a	3.83±0.19 ^d
低 产 园	TF	42410.8±2060.4 ^c	37024.8±1733.5 ^b	12.7±0.1 ^a
	30%WF	38084.8±2389.7 ^d	33133.0±2094.5 ^c	13.0±0.1 ^a
	50%WF	47628±1436.9 ^b	45008.5±1481.1 ^a	5.5±0.1 ^c
	70%WF	51954±2153.6 ^a	48265.3±2187.9 ^a	7.1±0.1 ^b
组别 Group	处理 Treatment	2021		
		产量 Yield (kg·hm ⁻²)	商品果重 Commodity fruit (kg·hm ⁻²)	次果率 Inferior fruit rate/%
高 产 园	TF	48015±773.2 ^c	43885.7±849.2 ^c	8.6±0.8 ^{ab}
	30%WF	42733.5±1289.6 ^d	38588.4±1634.0 ^d	9.7±1.1 ^a
	50%WF	54592.5±1898.4 ^b	51753.7±2058.7 ^b	5.2±0.5 ^c
	70%WF	60115.5±619.8 ^a	55727.1±597.5 ^a	7.3±0.4 ^b
低 产 园	TF	38412±1212.5 ^b	36337.8±1423.3 ^b	5.4±0.1 ^b
	30%WF	33379.5±2167.9 ^b	29273.8±2461.5 ^c	12.4±1.8 ^a
	50%WF	44058±2151.1 ^a	43309.0±2100.0 ^a	1.7±0.1 ^c
	70%WF	49206±4564.4 ^a	46794.9±4335.4 ^a	4.9±0.1 ^b
组别 Group	处理 Treatment	2022		
		产量 Yield (kg·hm ⁻²)	商品果重 Commodity fruit/(kg·hm ⁻²)	次果率 Inferior fruit rate/%
高 产 园	TF	58987.5±482.7 ^c	49490.5±1148.2 ^c	19.0±0.6 ^b
	30%WF	51496.5±2265.2 ^d	42021.1±177.6 ^d	18.4±1.8 ^a
	50%WF	67305±3249.1 ^b	61853.3±312.0 ^b	8.1±0.2 ^c
	70%WF	74973±678.8 ^a	70474.6±1182.3 ^a	6.0±0.2 ^c
低 产 园	TF	45741±1397.9 ^c	38559.7±337.4 ^c	15.7±1.0 ^a
	30%WF	39382.5±1515.6 ^d	33357.0±150.2 ^d	15.3±1.3 ^a
	50%WF	53928±2413.8 ^b	50368.8±211.7 ^b	6.6±0.2 ^b
	70%WF	59326.5±2523.7 ^a	58140.0±312.7 ^a	2.0±0.1 ^c

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05).

表 3 不同处理下的蜜柚农艺性状
Tab. 3 Agronomic traits of *H. pomelo* under different treatments

组别 Group	处理 Treatment	2021				
		单果重	果皮重	果肉重	裂果率	果肉粒化率
		Fruit weight/g	Peel weight/g	Pulp weight/g	Fruit cracking rate/%	Pulp granulation rate/%
高产园	TF	1598.5±23.0 ^{ab}	347.3±11.5 ^b	1251.2±62.5 ^{ab}	12.5±1.1 ^a	6.4±0.2 ^a
	30%WF	1548.2±52.0 ^b	350.2±14.2 ^b	1198.0±50.7 ^b	8.1±0.3 ^b	6.5±0.3 ^a
	50%WF	1741.2±87.9 ^a	393.1±14.1 ^a	1348.1±73.9 ^a	7.7±0.5 ^b	7.0±0.2 ^a
	70%WF	1707.4±108.7 ^a	367.3±14.2 ^b	1340.1±75.6 ^a	7.9±0.4 ^b	7.0±0.4 ^a
低产园	TF	1505.4±47.0 ^b	370.5±6.5 ^b	1134.9±43.4 ^b	3.8±0.1 ^a	5.7±0.2 ^a
	30%WF	1480.3±11.4 ^b	364.1±10.9 ^b	1116.2±5.4 ^b	3.5±0.1 ^b	5.2±0.2 ^a
	50%WF	1581.9±44.9 ^a	372.5±4.8 ^b	1209.4±46.7 ^a	2.8±0.2 ^c	5.5±0.3 ^a
	70%WF	1605.4±38.1 ^a	393.6±9.5 ^a	1211.8±29.7 ^a	2.7±0.1 ^c	6.0±0.3 ^a
组别 Group	处理 Treatment	2022				
		单果重	果皮重	果肉重	裂果率	果肉粒化率
		Fruit weight/g	Peel weight/g	Pulp weight/g	Fruit cracking rate/%	Pulp granulation rate/%
高产园	TF	1513.7±97.8 ^b	350.6±18.8 ^a	1163.1±38.9 ^c	11.4±0.8 ^a	6.7±0.4 ^a
	30%WF	1553.2±50.2 ^b	365.9±22.7 ^a	1187.3±27.8 ^c	8.9±0.2 ^b	6.6±0.5 ^a
	50%WF	1662.1±28.9 ^a	371.3±23.3 ^a	1290.8±7.8 ^b	8.6±0.3 ^b	7.0±0.1 ^a
	70%WF	1726.9±104.5 ^a	375.6±20.3 ^a	1351.3±15.7 ^a	7.7±0.5 ^b	7.3±0.3 ^a
低产园	TF	1525.7±20.9 ^{ab}	378.0±12.3 ^a	1147.7±8.7 ^{bc}	11.6±0.3 ^a	6.0±0.2 ^a
	30%WF	1491.1±42.8 ^b	373.6±15.0 ^a	1117.5±28.5 ^c	4.7±0.5 ^b	5.5±0.4 ^a
	50%WF	1617.9±50.4 ^a	388.5±9.5 ^a	1229.4±42.2 ^a	4.0±0.5 ^{bc}	5.7±0.4 ^a
	70%WF	1597.2±73.9 ^a	383.5±20.9 ^a	1213.7±53.3 ^{ab}	3.5±0.3 ^c	6.0±0.5 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 不同水肥套餐处理对蜜柚内在品质的影响

果实可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、糖酸比和 VC 含量等是评价果实内在品质的重要指标，其中，糖酸比是衡量果实糖、酸含量的综合指标，直接影响果实的口感风味。从表 4 可以看出，高、低产园各处理蜜柚果实 2021、2022 年可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量变化不大，各处理间差异均不显著。高产园 70%WF 处理 VC 含量较 TF、30%WF、50%WF 处理都高，2021 年达 345.5 mg/kg、2022 年达 354.0 mg/kg；而不同年限比较，各处理果实中 VC 含量增加；50%WF、70%WF 处理 VC 含量较 TF 处理 2021、2022 年平均分别增长 3.07%、7.85%；50%WF、70%WF 处理平均糖酸比较 TF 处理 2021、2022 年分别高 0.2、1.5。低产园 70%WF 处理 VC 含量较 TF、30%WF、50%WF 处理都高，2021 年达 327.6 mg/kg、2022 年达 334.6 mg/kg；而不同年限比较，50%WF、70%WF 处理果实中 VC 含量增加，较 TF 处理 2021、2022 年平均 VC

含量分别增长 5.57%、9.82%；50%WF、70%WF 处理较 TF 处理 2021、2022 年平均糖酸比分别高 0.15、0.5。水肥一体化模式下适当减量施肥对蜜柚内在品质均有一定提高，高、低产园中均以 70% 水肥套餐下蜜柚内在品质为最佳，50%水肥套餐次之。

2.4 不同水肥套餐处理蜜柚经济效益分析

蜜柚获得的经济效益主要与 2 个方面有关：一是因节省投入产生的经济效益；二是因作物增产和品质改善所得的产出增加值。由表 5 可知，高产园中，TF 处理年平均投入 67 995.9 元/hm²，而减量施用水肥套餐的 30%WF、50%WF、70%WF 处理年平均投入分别为 55 472.0、58 387.9、60 522.9 元/hm²，30%WF、50%WF、70%WF 处理年平均投入较 TF 处理降低 18.42%、14.13%、10.99%。从全年各项投入看，减量施肥较常规施肥虽增加了水电、设备成本，但大大节省了肥料与用工成本。从产出方面可知，50%WF、70%WF 处理较 TF 处理分别提高 15.58%、28.08%，

表 4 不同处理下的蜜柚内在品质
Tab. 4 Internal quality of *H. pomelo* under different treatments

组别 Group	处理 Treatment	2021					2022				
		可溶性固形物含量 Soluble solid content/%	维生素 C 含量 VC content/(mg·kg ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/%	可滴定酸含量 Titratable acids content/%	糖/酸 Sugar/acid	可溶性固形物含量 Soluble solid content/%	维生素 C 含量 VC content/(mg·kg ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/%	可滴定酸含量 Titratable acids content/%	糖/酸 Sugar/acid
高产园	TF	12.0±0.2 ^a	322.1±13.8 ^b	11.7±0.5 ^a	0.768±0.02 ^a	15.2±0.9 ^a	12.8±1.5 ^a	326.5±14.8 ^b	12.0±0.3 ^a	0.770±0.01 ^a	15.2±0.9 ^b
	30%WF	12.3±1.1 ^a	313.1±13.3 ^b	11.7±1.2 ^a	0.776±0.01 ^a	15.1±1.7 ^a	11.5±0.7 ^a	315.3±10.2 ^b	10.5±0.6 ^a	0.776±0.05 ^a	14.8±0.5 ^b
	50%WF	12.3±0.6 ^a	329.6±11.3 ^{ab}	11.8±1.7 ^a	0.765±0.02 ^a	15.5±2.5 ^a	12.0±0.6 ^a	338.9±10.9 ^{ab}	11.1±0.5 ^a	0.765±0.03 ^a	15.3±0.9 ^b
	70%WF	13.5±0.6 ^a	345.5±13.9 ^a	12.6±0.4 ^a	0.756±0.03 ^a	16.7±1.1 ^a	13.5±0.4 ^a	354.0±14.3 ^a	13.0±0.4 ^a	0.755±0.03 ^a	16.7±0.4 ^a
低产园	TF	11.1±0.5 ^a	302.5±18.5 ^a	10.7±1.2 ^a	0.778±0.02 ^a	14.8±1.9 ^a	11.7±0.4 ^a	300.5±15.3 ^b	11.0±1.1 ^a	0.778±0.02 ^a	15.0±1.8 ^a
	30%WF	11.0±0.8 ^a	299.4±22.1 ^a	10.5±0.8 ^a	0.779±0.01 ^a	14.0±0.7 ^a	11.5±0.5 ^a	294.4±12.8 ^b	10.7±1.4 ^a	0.783±0.01 ^a	14.9±1.5 ^a
	50%WF	11.8±0.2 ^a	317.2±11.2 ^a	11.1±0.9 ^a	0.769±0.02 ^a	15.0±1.1 ^a	12.0±0.1 ^a	319.4±14.7 ^{ab}	11.2±0.4 ^a	0.774±0.02 ^a	15.1±0.8 ^a
	70%WF	11.8±0.2 ^a	327.6±7.2 ^a	11.2±0.3 ^a	0.765±0.03 ^a	15.3±0.4 ^a	12.2±0.3 ^a	334.6±10.7 ^a	11.7±0.1 ^a	0.768±0.01 ^a	15.5±0.3 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

表 5 不同处理下的经济效益分析
Tab. 5 Economic benefit analysis under different treatments

组别 Group	处理 Treatment	年平均投入 Annual average investment							年平均产出 Annual average output			元/hm ²	
		地租 Land rent	肥料 Fertilizer	用工 Recruit and use	水费 Charge for water	电费 Elec- tricity fees	设备 Equip- ment	合计 Total	商品果 Commodity fruit	次果 Inferior fruit	合计 Total	净收益 Net profit	较常规 增收 Increase income more than usual
高产园	TF	30 000	10 136.5	27 529.4	180	150	0	67 995.9	185 263.2	17 479.0	202 742.2	134 746.3	
	30%WF	30 000	6000.4	16 011.6	360	300	2800	55 472	165 028.7	15 273.4	180 302.1	124 830.1	-9916.3
	50%WF	30 000	7389	17 538.9	360	300	2800	58 387.9	224 701.9	9632	234 333.9	175 946.0	41 199.6
	70%WF	30 000	8778.1	18 284.8	360	300	2800	60 522.9	251 537.2	8133	259 670.2	199 162.4	64 401.0
低产园	TF	30 000	8109.3	26 062.6	180	150	0	64 501.9	147 676.4	10 964.4	158 640.8	103 138.9	
	30%WF	30 000	4800.3	14 633.9	360	300	2800	52 894.2	125 907.6	12 012	137 919.5	85 025.3	-9113.6
	50%WF	30 000	5911.2	16 024.6	360	300	2800	55 395.8	182 416.8	5154.8	187 571.6	132 175.8	38 036.9
	70%WF	30 000	7022.5	16 619.5	360	300	2800	57 102	201 096.4	6319.9	207 416.3	150 314.3	56 175.4

50%WF、70%WF 处理年平均最终净收益较 TF 处理分别增收 30.58%、47.79%。产投比大小为：70%WF（4.29：1）>50%WF（4.01：1）>30%WF（3.25：1）>TF（2.98：1），年平均产投比以 70%WF 处理最高（4.29：1），较 TF、30%WF、50%WF 处理分别高 1.31、1.04、0.28。

低产园中，从投入方面可知，TF 处理年平均投入 64 501.9 元/hm²，而减量施用水肥套餐的 30%WF、50%WF、70%WF 处理年平均投入分别为 52 894.2、55 395.8、57 102.0 元/hm²，30%WF、50%WF、70%WF 处理年平均投入较 TF 处理降低 18.00%、14.12%、11.47%。从产出方面可知，50%WF、70%WF 处理较 TF 处理分别提高 18.24%、30.75%；50%WF、70%WF 处理年平均

最终净收益较 TF 处理分别增收 40.41%、59.67%。产投比大小为：70%WF（3.63：1）>50%WF（3.39：1）>30%WF（2.61：1）>TF（2.46：1），年平均产投比以 70%WF 处理最高（3.63：1），较 TF、30%WF、50%WF 处理分别高 1.17、1.02、0.24。高、低产园均以 70%水肥套餐处理经济效益最高，且低产园经济效益增幅大于高产园，30%水肥套餐经济效益呈降低效果。说明水肥一体化模式下合理肥料用量，在获得蜜柚高产的同时也可获得更高的收益和可观的产投比。

3 讨论

套餐肥是将几种肥料按照不同作物在不同时期对养分的需求，科学且精准搭配最终形成适合

植物生长周期全程营养的肥料,相较于农民施用传统肥料普遍的单一性、盲目性和随意性,不仅可以保证植物高产优质,还符合农业部印发的《到 2020 年化肥施用量零增长行动方案》“提高肥料利用率,减少肥料使用量”的要求^[15]。合理施肥对于提高柑橘属果实的产量和品质具有十分重要的作用^[16],本研究 2020—2022 年定位试验结果表明,高产园 50%水肥套餐、70%水肥套餐处理较传统施肥年平均产量分别提高 12.43%、24.67%,30%水肥套餐较传统施肥年平均产量减产 10.97%;而低产园与高产园产量趋势相同,且变化幅度大于高产园。说明水肥一体化模式下合理减量施肥具有增产的效果,这一结果与前人研究效果一致。杜文波^[17]研究表明,日光温室番茄水肥一体化滴灌处理与常规漫灌处理相比可增产 11.83%~14.41%,水肥一体化滴灌条件下,即使减少施肥量 30%,仍可增产 8.64%。安华明等^[18]发现利用水肥耦合的方法施肥在提高产量的同时还可提高水分利用效率。邓真华等^[19]在果桑上通过在滴灌条件下不同施肥处理对其生长发育及产量品质的影响,研究表明在与常规穴施量 100%相比,滴灌随水施肥量 60%以上有利于促进设施果桑枝叶生长、提升桑果产量和品质。KUMAR 等^[20]研究表明,在滴灌施肥下施用 75%的推荐施肥量就能使香蕉获得良好的增产效果。臧小平等^[21]在滴灌施肥对芒果试验研究表明,在滴灌施肥下减量 70%施肥量比传统施肥、滴灌不减量施肥分别增产 29.2%、4.7%。陈昱辛等^[22]发现不同生育期适宜的滴灌水肥一体化处理都可以提高柑橘叶片光合能力。杜少平等^[23]研究表明滴灌施肥处理较对照在甜瓜生长后期光合指标显著提高,使其增产 7.4%~14.4%,水分利用效率提高 28.8%~40.7%。于冬梅等^[24]发现水肥一体化施肥处理可改善叶片营养状况、提高叶片的净光合速率。杨辉文等^[25]、温明霞等^[26]均表明水肥一体化施肥处理可显著提高柑橘叶片的全钾、全钙、全镁和全硼含量与柑橘果实全氮、全钾、全钙和全镁的含量,因此提高柑橘品质与产量。柑橘果实的生长发育受果实含水量的影响,而果实含水量又受空气湿度和土壤水分的双重调节,其中土壤水分直接影响果实含水量,是造成裂果的关键因素^[27]。本研究中水肥一体化模式的水肥套餐可长时间滴灌施肥保持土壤湿润,为蜜柚补充充足的水分,且施肥比较平衡,不会造成在蜜柚不同的生长阶

段肥料过量或者肥料不足产生的裂果,从而降低裂果率。4—5 月为蜜柚海绵层发育阶段,如果果园严重缺乏水分,会导致海绵层发育不完全,到后期果实发育程度大于海绵层承受能力时,就会产生大量裂果。同时,土壤中水分丰富,养分容易溶解在溶液中被根系吸收,特别是钙质吸收后,会增加果皮细胞壁的韧性,从而较少的果实裂果。赖呈纯等^[28]研究表明,采用适时喷灌的措施,使土壤含水量保持较均衡并在临界值之上,可有效防止茂谷柑裂果。唐政等^[29]对番茄研究表明,在水肥一体化模式下,施肥量减半不但不会显著降低番茄产量,还能增强番茄果实中 VC、可溶性糖、番茄红素等营养物质的含量,改善果实品质。张兰勤等^[30]对樱桃番茄的试验研究表明,与常规施肥相比,施肥量减量 30%~40%滴灌施肥的樱桃番茄果实外观形态和品质并未下降。本研究表明,高、低产园中水肥一体化模式下减量施肥的蜜柚可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸度与常规施肥差异不显著;但 70%水肥套餐下蜜柚较常规施肥有所差异,一定程度上改善果实内在品质,与王荣莲等^[31]、罗勤等^[32]的研究结果基本一致。探究增效原因,虽然传统施肥氮磷钾纯养分施入量并不低,但存在水溶性差、养分易流失等问题;尤其低产园土壤养分含量低,传统施肥方式所达到的效果更差;而滴灌施肥虽然减少了养分投入量,但根据各时期作物需肥特点,多次随水施肥提高水肥耦合效率,促进作物对养分的吸收,从而达到增产、改善果实品质的效果,在低产园中效果更为显著。

水肥一体化模式下减量施肥能够有效地防止植株营养生长过快而影响生殖生长,可提高番茄的产量和品质,从而提高经济效益^[33]。臧小平等^[34]在红毛丹上的试验发现,滴灌施肥较常规施肥 N、P₂O₅、K₂O 分别节省 44.57%、21.89%、9.63%,纯收益比常规处理提高 14 362 元/hm²,增加 76.32%;VCR (vario-cost ratio) 值由 1.91 上升到 2.81;严程明^[35]在菠萝上的试验发现,滴灌减量施肥模式比传统施肥模式净收益高 69 670 元/hm²,增长 92.07%,产出投入比由 2:1 上升到 2.97:1;路永莉等^[36]研究陕西不同生态区苹果园在相同肥料用量下,采用水肥一体化技术可使渭北旱塬区和关中平原区果园分别增收 15 500、36 500 元/hm²;当肥料用量减半时,收益增加分别为 2100、72 800 元/hm²;于舜章^[37]在山东省设施黄瓜上的试验表

明,滴灌减量施肥处理单位面积纯收入比农民传统施肥处理增加明显,每公顷增加纯收入 $(3.87 \times 10^4) \sim (5.92 \times 10^4)$ 元,增长20.2%~30.9%。本研究表明,与常规施肥相比,高产园中50%水肥处理、70%水肥处理的净收益明显提高,年平均净收益分别达175 946.0、199 162.4元/hm²,收益提高30.58%、47.79%,人工成本较传统施肥模式分别节省14.13%、10.99%。产投比由2.98:1上升到4.01:1和4.29:1;30%水肥处理净收益较传统施肥减少7.36%,低产园中各处理变化趋势与高产园相同,且低产园经济效益增幅大于高产园,70%水肥套餐处理经济效益最高。说明水肥一体化模式下合理减量施肥不仅可以提高蜜柚产量,还可以增加经济效益。

4 结论

在高、低产园中70%水肥套餐处理比其他水溶肥套餐处理更适合于蜜柚生产中推广应用。高、低产园蜜柚70%水肥套餐处理产量最佳、主要性状、品质指标、人工成本、净收益均为最佳,表明70%水肥套餐可提高蜜柚产量、经济效益及改善蜜柚外观商品价值和内在品质。综合水肥套餐的几种减量化施肥处理在蜜柚产量、农艺性状、品质及经济效益等参数可见,水肥一体化模式下合理减量施肥具有提高蜜柚产量和经济效益、改善品质等效果,在高、低产园中琯溪蜜柚施肥均以施用70%水肥套餐为最佳施肥处理,蜜柚产量增幅最大,经济效益最高。采用滴灌施肥技术,并且在滴口处安装120目叠片式、网式过滤器,定期清理,滴施完后保证15 min以上的清水冲洗,在管道安装开关,控制施肥速度和时间,少量多次施肥可以有效解决管道滴口堵塞的问题。滴灌施肥技术有望解决我国蜜柚肥料和劳动投入大、经济效益低等问题。

参考文献

- [1] 卢新坤,林旗华,林燕金,张金桃,张胜民,李春生. 优特柚类新品种:‘黄金蜜柚’的选育[J]. 果树学报, 2013, 30(5): 900-902.
LU X K, LIN Q H, LIN Y J, ZHANG J T, ZHANG S M, LI C S. ‘Huangjinmiyou’, a new orange-yellow fleshed pomelo cultivar[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(5): 900-902. (in Chinese)
- [2] 李发林,曾瑞琴,危天进,林晓兰,郑涛,张金桃,谢南松,武英,林智明,郑域茹. 福建省平和县琯溪蜜果园土壤磷环境风险评价研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1001-1009.
LI F L, ZENG R Q, WEI T J, LIN X L, ZHENG T, ZHANG J T, XIE N S, WU Y, LIN Z M, ZHENG Y R. Risk assessment in soil phosphorus environment of Guanxi pomelo orchard in Pinghe county, Fujian province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 1001-1009. (in Chinese)
- [3] 张玉琴. 果树产量的大小年形成原因及克服大小年的措施[J]. 农业科技与信息, 2002(8): 18.
ZHANG Y Q. Causes of large and small year formation of fruit tree yield and measures to overcome them[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2002(8): 18. (in Chinese)
- [4] 李若楠,张彦才,黄绍文,唐继伟,王丽英,陈丽莉,翟彩霞. 节水控肥下有机无机肥配施对日光温室黄瓜-番茄轮作体系土壤氮素供应及迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 677-688.
LI R N, ZHANG Y C, HUANG S W, TANG J W, WANG L Y, CHEN L L, ZHAI C X. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on soil nitrogen availability and movement under water and fertilizer saving management in cucumber-tomato double cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(3): 677-688. (in Chinese)
- [5] 袁亭亭,杨建平,徐坤. 秋延迟番茄氮、磷、钾优化施肥方案研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1246-1251.
YUAN T T, YANG J P, XU K. Study on optimization of NPK fertilization scheme of tomato in late autumn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1246-1251. (in Chinese)
- [6] 黄绍文,王玉军,金继运,唐继伟. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
HUANG S W, WANG Y J, JIN J Y, TANG J W. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 906-918. (in Chinese)
- [7] 吴凌云,李志忠,丁文. 缓控释肥在蜜柚上的施用效果研究[J]. 福建农业科技, 2011(4): 77-82.
WU L Y, LI Z Z, DING W. Effects of slow-controlled release fertilizer on honeyed shaddock[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2011(4): 77-82. (in Chinese)
- [8] ZOTARELLI L, SCHOLBENG J M, DUKES M D, MUÑOZ-CARPENA R, ICERMAN J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate irriga-

- tion scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1): 23-34.
- [9] 臧小平, 周兆禧, 王甲水, 林兴娥, 葛宇, 马蔚红. 海南芒果水肥一体化微喷灌技术规程[J]. *中国南方果树*, 2020, 45(5): 141-144.
- ZANG X P, ZHOU Z X, WANG J S, LIN X E, GE Y, MA W H. Hainan mango water and fertilizer integrated micro-sprinkler irrigation technical regulations[J]. *South China Fruits*, 2020, 45(5): 141-144. (in Chinese)
- [10] 岳文俊, 何文学, 丁春梅, 柏宇, 周英杰, 奚辉. 不同滴水水肥处理对温室甜瓜养分吸收、产量和品质的影响[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(12): 2370-2380.
- YUE W J, HE W X, DING C M, BAI Y, ZHOU Y J, XI H. Effects of different water and fertilization on nutrient uptake, yield and quality of greenhouse muskmelon under drip irrigation condition[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(12): 2370-2380. (in Chinese)
- [11] 宋亚辉, 刘朝芳, 李玉荣, 王瑾, 程增书, 陈四龙, 张嘉楠. 花生水肥一体化最佳施肥量研究[J]. *现代农业科技*, 2015(17): 12-13.
- SONG Y H, LIU C F, LI Y R, WANG J, CHENG Z S, CHEN S L, ZHANG J N. Study on the best fertilizer amount of water fertilizer integration in peanut[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(17): 12-13. (in Chinese)
- [12] 臧小平, 韩丽娜, 马蔚红, 周兆禧, 钟爽, 刘永霞. 非饱和灌溉条件下香蕉施肥减量技术研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(13): 247-251.
- ZANG X P, HAN L N, MA W H, ZHOU Z X, ZHONG S, LIU Y X. Reduction fertilization for banana under unsaturated irrigation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(13): 247-251. (in Chinese)
- [13] 邢英英, 张富仓, 张燕, 李静, 强生才, 吴立峰. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 713-726.
- XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, LI J, QIANG S C, WU L F. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 713-726. (in Chinese)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 北京农业出版社, 2000.
- LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: Beijing Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 孙喜军, 吕爽, 王安, 王小荣, 孟菁, 高莹, 李静, 郝红艳. 套餐肥对设施番茄产量及品质的影响[J]. *农学报*, 2022, 8(12): 62-67.
- SUN X J, LU S, WANG A, WANG X R, MENG J, GAO Y, LI J, HAO H Y. Effect of package fertilizers on yield and quality of greenhouse tomato[J]. *Journal of Agronomy*, 2022, 8(12): 62-67. (in Chinese)
- [16] 赖多, 邵雪花, 肖维强, 刘传和, 贺涵, 匡石滋. 广东柑橘化肥农药减量增效技术模式[J]. *广东农业科学*, 2021, 48(7): 118-125.
- LAI D, SHAO X H, XIAO W Q, LIU C H, HE H, KUANG S Z. Technical mode of reduction and synergism for citrus chemical fertilizers and pesticides application in Guangdong[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2021, 48(7): 118-125. (in Chinese)
- [17] 杜文波. 日光温室番茄应用滴灌水肥一体化技术初探[J]. *山西农业科学*, 2009, 37(1): 58-60.
- DU W B. Effects of drip fertigation on tomato in the solar greenhouse[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, 37(1): 58-60. (in Chinese)
- [18] 安华明, 樊卫国, 王启勇. 肥水耦合对柑橘产量和品质的影响[J]. *耕作与栽培*, 2007, 5(33): 18, 47.
- AN H M, FAN W G, WANG Q Y. Effect of coupling of fertilizer and water on yield and quality of citrus[J]. *Tillage and Cultivation*, 2007, 5(33): 18, 47. (in Chinese)
- [19] 邓真华, 王军文, 王亚威, 王丰, 余元善, 胡桂萍, 曹红妹, 杜贤明. 滴灌施肥对果桑生长发育及产量品质的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(8): 2243-2250.
- DENG Z H, WANG J W, WANG Y W, WANG F, YU Y S, HU G P, CAO H M, DU X M. Effects of drip irrigation fertilization on growth, yield and quality of fruit mulberry in facilities cultivation[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(8): 2243-2250. (in Chinese)
- [20] KUMAR D, PANDEY V. Effect of NPK fertigation on growth, yield and quality of banana Rasthali (AAB-Pathk-apoora) in coastal agro-climatic conditions of eastern India[J]. *India Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 78(9): 798-800.
- [21] 臧小平, 马蔚红, 张承林, 武红霞, 刘胜辉, 王松标, 魏长宾. 芒果滴灌施肥效果研究初报[J]. *广东农业科学*, 2009(3): 75-82.
- ZANG X P, MA W H, ZHANG C L, WU H X, LIU S H, WANG S B, WEI C B. Primary research on the effect of drip fertilization of mango[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009(3): 75-82. (in Chinese)
- [22] 陈昱辛, 贾悦, 崔宁博, 杨永刚, 赵璐, 胡笑涛, 龚道枝. 滴灌水肥一体化对柑橘叶片光合、产量及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(增刊 2): 50-58.
- CHEN Y X, JIA Y, CUI N B, YANG Y G, ZHAO L, HU X T, GONG D Z. Effects of integrated management of water and fertilizer on *Citrus* photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37 (Suppl. 2): 50-58. (in Chinese)

- [23] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 适宜施氮量提高温室砂田滴灌甜瓜产量品质及水氮利用率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 112-119.
- DU S P, MA Z M, XUE L. Optimal drip fertigation amount improving muskmelon yield, quality and use efficiency of water and nitrogen in plastic greenhouse of gravel-mulched field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 112-119. (in Chinese)
- [24] 于冬梅, 王克瀚, 张悦, 张雪梅, 戴永利, 郝家臣. 不同施肥模式对平欧杂种榛叶片光合特性、产量及生长的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1882-1890.
- YU D M, WANG K H, ZHANG Y, ZHANG X M, DAI Y L, HAO J C. Effects of different fertilization modes on the photosynthetic characteristics, yield and growth in hybrid hazelnut (*Corylus heterophylla* × *C. avellana*)[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1882-1890. (in Chinese)
- [25] 杨辉文, 李德金, 曹胜, 杨玉, 杨水芝, 向冬妹. 水肥一体化对山地椪柑园的影响[J]. 湖南农业科学, 2024(5): 51-54.
- YANG H W, LI D J, CAO S, YANG Y, YANG S Z, XIANG D M. Effect of integration of water and fertilizer on a mountain Ponkan orchard[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(5): 51-54. (in Chinese)
- [26] 温明霞, 奚辉, 吴韶辉, 李娜, 陈喜靖. 滴灌施肥对山地柑橘园生产效应的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022, 48(5): 566-572.
- WEN M X, XI H, WU S H, LI N, CHEN X J. The effect of drip irrigation and fertilization on the production efficiency of mountain citrus orchards[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2022, 48(5): 566-572. (in Chinese)
- [27] 陈晓林, 陈星宏, 马梦雨, 马岩岩, 郑永强, 易时来, 吕强, 谢让金. 不同水分处理对甘平果实裂果及相关生理特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 74-87.
- CHEN X L, CHEN X H, MA M Y, MA Y Y, ZHENG Y Q, YI S L, LYU Q, XIE R J. Effects of different water treatments on fruit cracking and related physiological characteristics of Kanpei Fruit[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(6): 74-87. (in Chinese)
- [28] 赖呈纯, 黄贤贵, 王琦, 陈源, 高慧颖, 谢鸿根. 果实生长与果园土壤含水量的变化对‘茂谷柑’裂果的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(4): 434-439.
- LAI C C, HUANG X G, WANG Q, CHEN Y, GAO H Y, XIE H G. Effect of fruit growth and soil moisture content on fruit cracking for ‘Murcott’ tangerine[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 48(4): 434-439. (in Chinese)
- [29] 唐政, 李虎, 邱建军, 王立刚, 邹国元. 有机种植条件下水肥管理对番茄品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 413-418.
- TANG Z, LI H, QIU J J, WANG L G, ZOU G Y. Effects of different water and manure management practices on quality and yield of tomato and NO_3^- -N accumulations in soil profile[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(2): 413-418. (in Chinese)
- [30] 张兰勤, 唐新莲, 黎晓峰, 唐琳, 陆兴伦, 阳继辉. 水肥一体化减量施肥对樱桃番茄产质量的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1270-1274.
- ZHANG L Q, TANG X L, LI X F, TANG L, LU X L, YANG J H. Effect of reducing fertilizer application on yield and quality of cherry tomato under integration of water and fertilizer[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(7): 1270-1274. (in Chinese)
- [31] 王荣莲, 于健, 张俊生, 赵永来. 温室条件下水肥耦合对无土栽培迷你黄瓜及樱桃番茄产量的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(3): 377-381.
- WANG R L, YU J, ZHANG J S, ZHAO Y L. Impacts of water and fertilizer coupling on landless planting fruit-cucumber's and cheery-tomato's output[J]. Research of Agricultural Modernization, 2010, 31(3): 377-381. (in Chinese)
- [32] 罗勤, 陈竹君, 闫波, 雷金繁, 张晓敏, 白新禄, 周建斌. 水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 449-457.
- LUO Q, CHEN Z J, YAN B, LEI J F, ZHANG X M, BAI X L, ZHOU J B. Effects of reducing water and fertilizer rates on soil moisture and yield and quality of tomato in solar greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 449-457. (in Chinese)
- [33] 降云峰, 焦晓燕, 王立革, 王劲松, 董二伟, 武爱莲, 宋卓琴. 不同水肥管理对日光温室番茄生长、产量及经济效益的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(11): 1185-1190.
- JIANG Y F, JIAO X Y, WANG L G, WANG J S, DONG E W, WU A L, SONG Z Q. Effect of different water and fertilizer managements on growth, yield and economic benefits in greenhouse tomato[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 1185-1190. (in Chinese)
- [34] 臧小平, 林兴娥, 丁哲利, 戴敏洁, 谭琳, 葛宇, 魏长宾, 马蔚红. 滴灌施肥对红毛丹产量、品质及经济效益的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(25): 113-117.
- ZANG X P, LIN X G, DING Z L, DAI M J, TAN L, GE Y, WEI C B, MA W H. Effects of drip fertigation on yield, quality and economic benefit of rambutan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(25): 113-117. (in Chinese)
- [35] 严程明, 张江周, 石伟琦, 刘亚男, 马海洋, 李晓林. 滴灌施肥对菠萝产量、品质及经济效益的影响[J]. 植物营养与

- 肥料学报, 2014, 20(2): 496-502.
- YAN C M, ZHANG J Z, SHI W Q, LIU Y N, MA H Y, LI X L. Effects of drip fertigation on yield, quality and economic benefit of pineapple[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 496-502. (in Chinese)
- [36] 路永莉, 白凤华, 杨宪龙, 李茹, 高义民, 同延安. 水肥一体化技术对不同生态区果园苹果生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(11): 1281-1288.
- LU Y L, BAI F H, YANG X L, LI R, GAO Y M, TONG Y A. Effect of fertigation on apple production in different ecological-regions orchards[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(11): 1281-1288. (in Chinese)
- [37] 于舜章. 山东省设施黄瓜水肥一体化滴灌技术应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 173-176.
- YU S Z. Application of drip irrigation of integral control of water and fertilization for cucumber under protected cultivation in shandong province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(6): 173-176. (in Chinese)