

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.010

安祥瑞, 江尚焘, 李焕苓, 等. 减施化肥配施有机肥对荔枝生长、产量品质及肥料利用率的影响. 土壤, 2021, 53(6): 1174–1184.

减施化肥配施有机肥对荔枝生长、产量品质及肥料利用率的影响^①

安祥瑞¹, 江尚焘¹, 李焕苓², 秦献泉³, 胡小璇¹, 陈廷速⁴, 谢昶琰¹, 徐阳春¹, 董彩霞^{1*}, 沈其荣¹

(1 南京农业大学江苏省有机废弃物资源化高技术研究重点实验室, 江苏省有机固体废弃物协同创新中心, 教育部资源节约型肥料工程技术研究中心, 南京 210095; 2 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101; 3 广西农业科学院园艺研究所荔枝龙眼研究室, 南宁 530007; 4 广西农业科学院微生物研究所, 南宁 530007)

摘要: 针对我国荔枝园化肥施用量过高而存在的土壤质量下降、酸碱失衡和产量下降等问题, 综合考虑荔枝养分投入量与带走量, 研究减施化肥配施有机肥对荔枝生长、产量品质及肥料利用率的影响, 旨在为荔枝提质增效提供施肥指导。以妃子笑荔枝为研究对象, 设置单施化肥(CF)、减施化肥 30% 分别配施普通商品有机肥 5 kg/株(OF5)和 10 kg/株(OF10)、减施化肥 30% 配施生物有机肥 5 kg/株(BIO5)和 10 kg/株(BIO10)5 个处理, 比较不同施肥处理对荔枝生长、养分供应、产量品质、肥料利用率及经济效益的影响。结果表明: 化肥减施 30% 的情况下, 配施有机肥未明显减缓荔枝梢期生长; 总体来看, 在梢期与果实成熟期, 各处理间叶片养分含量无显著差异, 在二蓬梢期及末次梢期, OF10 与 BIO5 叶片 N 含量显著高于 CF 处理; 各处理叶片养分含量与变化趋势均符合荔枝生长规律。与 CF 相比, BIO5、OF10、BIO10 处理均显著提高荔枝单株产量; 各有机肥处理一定程度提高果实内在品质, 可固含量平均增加 1.76%~3.22%, 可溶性糖和可滴定酸含量平均增加 11.96%~21.84% 和降低 15.38%~35.35%; 产量品质综合评价 BIO5>BIO10>CF>OF10>OF5。各有机肥处理氮素偏生产力均显著高于化肥处理, BIO5 与 OF10 处理氮、磷、钾肥偏生产力与农学利用率均显著高于其他处理; OF10、BIO5、BIO10 均能显著提高荔枝经济效益。综合考虑荔枝生长、果实产量及品质、肥料利用效率以及经济效益, 该园区在减少 30% 化肥养分投入下株施 5 kg(2 700 kg/hm²)生物有机肥处理表现最佳, 其次是株施 10 kg(5 400 kg/hm²)普通商品有机肥。

关键词: 荔枝; 有机肥; 产量; 品质; 肥料利用率; 经济效益

中图分类号: S661.2 **文献标志码:** A

Effects of Reduced Chemical Fertilizer with Organic Fertilizer Application on Growth, Yield, Quality and Fertilizer Utilization Rate in Litchi

AN Xiangrui¹, JIANG Shangtao¹, LI Huanling², QIN Xianquan³, HU Xiaoxuan¹, CHEN Tingsu⁴, XIE Changyan¹, XU Yangchun¹, DONG Caixia^{1*}, SHEN Qirong¹

(1 *Jiangsu Provincial Key Lab for Organic Solid Waste Utilization/National Engineering Research Center for Organic-based Fertilizers/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization/College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*; 2 *Environment and Plant Protection Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Haikou 571101, China*; 3 *Research Room of Litchi and Longan, Horticulture Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*; 4 *Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*)

Abstract: Excessive use of chemical fertilizers led to the degradation of soil quality, resulting in soil acidification and poor yield. Based on the nutrient input and removal of litchi fertilization, the growth, yield and quality of litchi and fertilizer utilization rate were explored to study the effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application, aiming to provide a theoretical basis of reasonable fertilization for improving the quality and efficiency of litchi. A field experiment of Feizixiao litchi were

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0202)和广西科技基地和人才专项(桂科 AD20159001)资助。

* 通讯作者(cxdong@njau.edu.cn)

作者简介: 安祥瑞(1995—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事果树养分管理方面研究。E-mail: 2018103098@njau.edu.cn

conducted in Hainan, including 5 treatments: 100% chemical fertilizer (CF), 70% chemical fertilizer + 5 kg/plant commercial organic fertilizer (OF5), 70% chemical fertilizer + 10 kg/plant commercial organic fertilizer (OF10), 70% chemical fertilizer + 5 kg/plant bio-organic fertilizer (BIO5), 70% chemical fertilizer + 10 kg/plant bio-organic fertilizer (BIO10). The results showed that: compared with CF, OF5 significantly promoted the growth of young shoots. There were no significant differences in leaf nutrient contents among all treatments at branch or mature stages. At the second and last branch stages, the leaf nitrogen contents of OF10 and BIO5 were significantly higher than CF. The leaf nutrient contents of each treatment were in the appropriate range, and the trend were in line with the growth law of litchi. BIO5, OF10 and BIO10 significantly improved the per plant yield compared with CF. The organic fertilizer treatment could improve the internal quality of fruit, the averaged increase of soluble solid and soluble sugar contents in all organic fertilizer treatments were 1.76%-3.22% and 11.96%-21.84%, and the decrease of titratable acid content were 15.38% to 35.35%. The comprehensive evaluation result of yield and quality was BIO5>BIO10>CF>OF10>OF5. Compared with CF, the partial factor productivity of N in organic fertilizer treatments was significantly increased, BIO5 and OF10 significantly improved the partial factor productivity and agronomic utilization of N, P and K, compared with other treatments. OF10, BIO5 and BIO10 could significantly increase the economic benefits of litchi compared with OF5 and CF. Considering the growth of litchi, fruit yield and quality, fertilizer utilization efficiency and economic benefits, reducing 30% chemical fertilizer combined with 5 kg/plant (2 700 kg/hm²) bio-organic fertilizer or 10 kg/plant (5 400 kg/hm²) commercial organic fertilizer were the optimal treatments in this area.

Key words: Litchi; Organic fertilizer; Yield; Quality; Fertilizer use efficiency; Economic benefit

荔枝(*Litchi chinensis* Sonn.)果实色泽鲜艳、肉质细嫩多汁,素有“岭南果王”之美称。我国是荔枝的原产国,截至 2017 年,荔枝种植面积和产量均占世界的 65% 以上^[1],主要分布于广东、广西、海南等省区^[2],对当地农村经济发展及农民增收具有重要作用。然而,由于果农盲目追求早产高产,忽视荔枝园综合养分管理,导致荔枝园普遍存在土壤板结、营养失衡、肥料利用率下降及酸碱度失衡等一系列问题^[3-4],不仅降低经济效益,也造成环境危害,甚至由于经济效益降低,广西、广东荔枝生产面积分别减少 9.05% 和 3.45%^[5]。农业农村部“双减”计划提出,有机肥和化肥配施是解决化肥使用过量问题的重要措施,其中生物有机肥集有机肥和功能微生物为一体,与化肥配施时起到“四两拨千斤”的作用,在改良土壤、提高作物产量、改善品质等方面作用显著^[6-7]。魏晓兰等^[8]发现,在减化肥 25% 范围内配施等量生物有机肥不仅提高土壤肥力及小白菜产量,还能一定程度提高肥料利用率;陶磊等^[9]、宋以玲等^[10]和赵满兴等^[11]也发现,在化肥减量 20% ~ 40% 或 10% ~ 30% 情况下,配施生物有机肥可以改善土壤微生物区系结构、提高土壤酶活性、改善土壤根际环境、提高根系活力,实现养地、增产、提质。可见,利用生物有机肥替代部分化肥的方式是实现化肥减量增效的重要途径。本文在综合考虑荔枝养分投入与带走量的基础上,开展不同种类及用量的有机肥田间试验,通过综合评价产量品质及经济效益,为荔枝合

理减施化肥、提质增效与可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 荔枝养分管理调查

1.1.1 果园施肥现状调查 广东省和广西壮族自治区是我国荔枝栽培面积最大的两个省份^[5],海南省则是早熟荔枝的重要产地。针对荔枝主产区进行施肥现状调查,调查区域位于广东省东莞市、广西壮族自治区的贵港市、桂平市、北流市、玉林市、钦州市、南宁市以及海南省海口市、澄迈县、儋州市等,分别选取 22 个有代表性的“妃子笑”荔枝园(调查果园的种植面积均在 30 亩以上)进行施肥现状调查。

1.1.2 荔枝养分带走量调查 海南省琼山区大坡镇东昌农场(20°00'31"N、110°35'41"E)早熟荔枝栽培面积约 200 亩(1 亩=667 m²),栽培品种为“妃子笑”,树龄 19 a,株行距 4 m×5 m,每 667 m² 种植约 36 株。选择 3 株长势相对一致、具有代表性的妃子笑荔枝树进行养分带走量测定。2018 年 5 月 10 日进行整株果实采收并记录产量,6 月 8 日进行修剪,记录修剪枝和修剪叶鲜重。每棵树随机选取 20 个果实样品,采用四分法采集枝条和叶片样品。将植株样品用去离子水洗净,于 105 °C 杀青 30 min,在 70 °C 下烘至恒重,称取干物质量,研磨后放置自封袋中。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮植株后用流动分析仪(德国 seal 公司)测定植株 N 含量^[12];采用浓硝酸-高氯酸(4:1)消煮,ICP-OES710(电感耦合等离子体发射光谱仪)测定

P、K 含量,用标准物质 GBW07603 控制测试质量。

1.2 试验地概况

海南省琼山区大坡镇东昌农场土壤类型为赤红壤,壤质黏土,行间土壤(0~30 cm)基本性质如下:pH 4.91,有机质 38.32 g/kg,铵态氮 5.57 mg/kg,硝态氮 16.93 mg/kg,有效磷 38.71 mg/kg,速效钾 71.60 mg/kg,有效钙 277.17 mg/kg,有效镁 34.21 mg/kg。

1.3 试验设计

在对该园施肥调查的基础上设置 6 个处理:①不施肥处理(CK,空白);②单施化肥,即常规施肥(CF,对照);③化肥减量 30% 配施 5 kg/株羊粪有机肥(OF5);④化肥减量 30% 配施 10 kg/株羊粪有机肥(OF10);⑤化肥减量 30% 配施 5 kg/株生物有机肥(BIO5);⑥化肥减量 30% 配施 10 kg/株生物有机肥(BIO10)。有机肥施用量约合 2 700 kg/hm²和 5 400 kg/hm²。其中,不施肥处理(CK)仅进行测产用于计算肥料利用率及效益。选取长势基本一致的 6 行荔枝树,每个处理 6 株树,每 2 株为一个重复,共 3 个重复。

整个生育期内荔枝共施肥 3 次,依次为采后基肥

(2018 年 6 月)、坐果肥(2019 年 3 月)和壮果肥(2019 年 4 月),其中有机肥作基肥一次性施入。果农常规施肥(CF)中,基肥采用 22-7-11 复合肥 1.6 kg/株、26-8-19 复合肥 0.5 kg/株,各有机肥处理中施用 22-7-11 复合肥 1 kg/株,化肥及有机肥处理均施用钙镁磷肥 1 kg/株。所有处理坐果肥和壮果肥均施用高钾复合肥(15-5-30)1 kg/株和硫酸钾镁肥 0.5 kg/株。基肥采用条施法在树体一侧距树干 120 cm 处开沟(长 50 cm、深 30 cm、宽 20 cm),施肥时将肥料与挖出的土壤混匀后一并填入沟。壮果肥则根据当地习惯施肥方法水溶后绕树体均匀淋施。

供试商品有机肥(羊粪有机肥)购于当地农资部门,pH 为 9.3,含 N 12.2 g/kg、P₂O₅ 14.9 g/kg、K₂O 16.7 g/kg,有机质含量 186.7 g/kg;生物有机肥为南京农业大学自主研发的促生生物有机肥(江苏联业肥料有限公司生产),以腐熟有机肥接种解淀粉芽孢杆菌 SQR9 二次发酵而成,含解淀粉芽孢杆菌 SQR9 菌落数为 1×10⁸ cfu/g,pH 为 6.6,含 N 25.9 g/kg、P₂O₅ 39.5 g/kg、K₂O 17.8 g/kg,有机质含量 404.1 g/kg。各处理养分投入量见表 1。

表 1 不同处理下有机肥和化肥中养分投入量及配比

Table 1 Nutrient amounts and ratios of organic and inorganic fertilizers in different treatments

处理	化肥养分投入量(kg/hm ²)			有机肥养分投入量(kg/hm ²)			总养分投入量(kg/hm ²)	有机肥养分占比(%)
	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
CF	340.2	183.6	415.8	-	-	-	945.0	-
OF5	199.8	140.4	329.4	32.40	37.8	81.0	820.8	18.47
BIO5	199.8	140.4	329.4	81.0	59.4	27.0	837.0	19.84
OF10	199.8	140.4	329.4	64.8	75.6	162.0	972.0	31.19
BIO10	199.8	140.4	329.4	162.0	118.8	54.0	999.0	33.12

1.4 样品采集及测定

1.4.1 荔枝生长指标测定 于 2018 年 11 月 4 日在各个植株东、南、西、北 4 个方位选取 12 条形状完好、长势均一的荔枝新梢,在一蓬梢结节处以下第 3 复叶处取第二小叶,每个方位各取 10 片叶,每个处理共计 240 片,从中选取 100 片叶测定百叶重,20 片叶测定相对叶绿素含量,新梢结节处测定梢粗。新梢抽生处至一蓬梢结节为一蓬梢长度,一蓬梢结节至新梢顶端为末次梢长度,测定梢长。梢长使用钢卷尺测量;梢粗使用游标卡尺测量;叶片叶绿素含量使用手持式 SPAD 仪(KONICA MINOLTA SPAD-502 Plus)测定。

1.4.2 荔枝叶片养分测定 分别在荔枝一蓬梢期(2018 年 8 月 8 日)、二蓬梢期(2018 年 11 月 4 日)、

末次梢期(2018 年 12 月 29 日)、果实成熟期(2019 年 5 月 11 日采果当天)采集叶片,共计 4 次。每株树采集 8 个方位上枝条生长点以下第二复叶第二小叶,合计 10~15 片叶,每 2 株树为一个混合样。叶片养分测定方法同 1.1.2。

1.4.3 果实产量品质指标测定 于 2019 年 5 月 11 日(果实成熟期)在每株树东、南、西、北 4 个方位共采集 20 个均匀一致的果实,每个处理随机取 50 颗果实测定品质,根据株产换算成每公顷产量。可溶性固形物含量采用 PAL-1 型电子折光仪(日本 ATAGO 公司)测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[13];可滴定酸含量采用氢氧化钠滴定法测定;还原型维生素 C 采用 2,6-二氯酚酚法测定^[14]。同时,用游标卡尺测定荔枝果实的纵径(cm)和横径(cm),每个处

理测定 20 个果实及果肉重量，得到平均单果重及可食率。

1.5 数据处理

1.5.1 养分带走量 荔枝养分带走量=荔枝果实养分吸收量+荔枝修剪叶养分吸收量+荔枝修剪枝养分吸收量

荔枝果实养分吸收量=荔枝果实养分含量×果实干物质质量

荔枝修剪叶养分吸收量及荔枝修剪枝养分吸收量公式同果实养分吸收量。

1.5.2 肥料利用率 通过以下公式计算作物氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的肥料利用效率，参数计算公式如下^[15-17]：

氮(磷、钾)肥偏生产力(kg/kg)=荔枝产量/总氮(磷、钾)素施用量；

氮(磷、钾)肥农学效率(kg/kg)=(施氮(磷、钾)肥区产量-不施氮(磷、钾)肥区产量)/总氮(磷、钾)素施用量；

增产率(%)=(施肥区荔枝产量-不施肥区荔枝产量)/不施肥区荔枝产量。

1.5.3 荔枝经济效益 产值(万元/hm²)=产量(t/hm²)×单价(元/kg)×1 000/10 000；

收益(万元/hm²)=产值(万元/hm²) - 投入(万元/hm²)；

式中：由于各处理田间管理一致，管理费用相当，此处只考虑肥料投入成本。生物有机肥 1 800 元/t；羊粪有机肥 800 元/t；22-7-11 复合肥、26-8-19 复合肥、15-5-30 复合肥、硫酸钾镁肥及钙镁磷肥市场价格分别为 7 250、6 250、6 250、5 500 和 2 800 元/t。

1.5.4 数据分析 采用 Excel 2007、Oringin 2018 进行数据处理、绘制图表和统计分析，采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析，差异显著性分析用 Duncan 法(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 荔枝园养分投入与带走量调查

广东、广西及海南 3 省(自治区)化肥和有机肥投入的 N、P、K 养分量如图 1 所示，3 省(自治区)化肥和有机肥养分投入总量为 N 265.17 kg/hm²、P₂O₅ 186.00 kg/hm²、K₂O 232.96 kg/hm²，其中化肥养分投入量分别为 N 189.78 kg/hm²、P₂O₅ 132.75 kg/hm²、K₂O 200.64 kg/hm²，有机肥养分投入量分别为 N 75.38 kg/hm²、P₂O₅ 53.25 kg/hm²、K₂O 32.32 kg/hm²。整体来看，3 省养分投入均以化肥养分为主，有机肥

养分投入量较少。由图 2 可知，不同器官干物质年积累大小顺序为采收果>修剪叶>修剪枝，果实、修剪叶及修剪枝中养分总积累量依次为 N>K>Ca>Mg>P。其中，N 带走量最大，K、Ca 带走量分别是 N 的 89% 和 56%；Mg 和 P 带走量是 N 的 17% 和 10%。

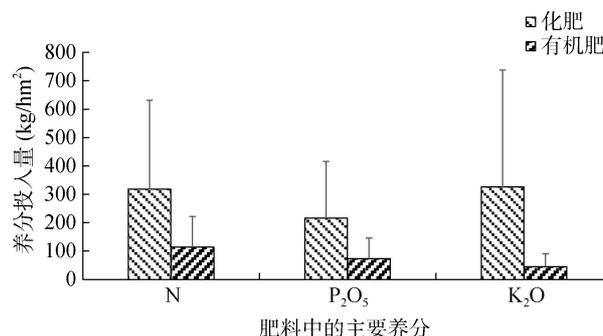


图 1 调查各果园的氮磷钾养分投入量
Fig. 1 Nitrogen, phosphorus, potassium inputs of orchard surveyed

2.2 减施化肥增施有机肥对荔枝生长的影响

如图 3A~3C 所示，化肥减量配施不同有机肥对荔枝梢生长有不同影响，OF5 处理一蓬梢长度显著大于 CF 处理，其余有机肥处理与 CF 处理无显著差异；OF10 处理二蓬梢长度显著低于 CF 处理，而其余有机肥处理与 CF 处理无显著差异；OF5 处理总梢长最大，但各处理间无显著差异。如图 3D~3E 所示，CF 处理梢粗百叶鲜物质量均显著高于化肥减量配施有机肥处理，且 OF5 处理梢粗显著大于 BIO5 处理，各有机肥处理百叶鲜物质量之间无显著性差异。对于新梢叶 SPAD 值，BIO 5 处理显著高于 CF 处理和 OF10 处理，其余有机肥处理 SPAD 值也有高于 CF 处理的趋势(图 3F)。综上所述，化肥处理在生长初期肥效更直接，但减施化肥并未对荔枝梢期生长产生显著影响。

2.3 减施化肥增施有机肥对荔枝树体养分含量的影响

如图 4A~4C 所示，荔枝叶片中各时期养分含量为 N>K>P，从梢期到果实成熟期，叶片 N 含量始终保持较高水平，而 P、K 呈现下降趋势。各时期叶片 N 含量虽与 CF 处理均无显著性差异，但在一蓬梢时期，CF 处理叶片 N 含量有高于各有机肥处理的趋势，而二蓬梢及末次梢时期，均表现出 OF5 处理与 BIO10 处理叶片 N 含量高于 CF 处理的趋势。在果实成熟期，由于壮果肥的施入，各处理叶片 N 含量均维持较高水平，但 OF10 与 BIO10 处理叶片 N 含量有低于化肥处理的趋势。在二蓬梢期，BIO5 处理叶片 P 含量显著高于化肥处理，其余时期有机肥处理叶片 P 含量与 CF 处理相比无显著性差异。各时期有机肥处理叶

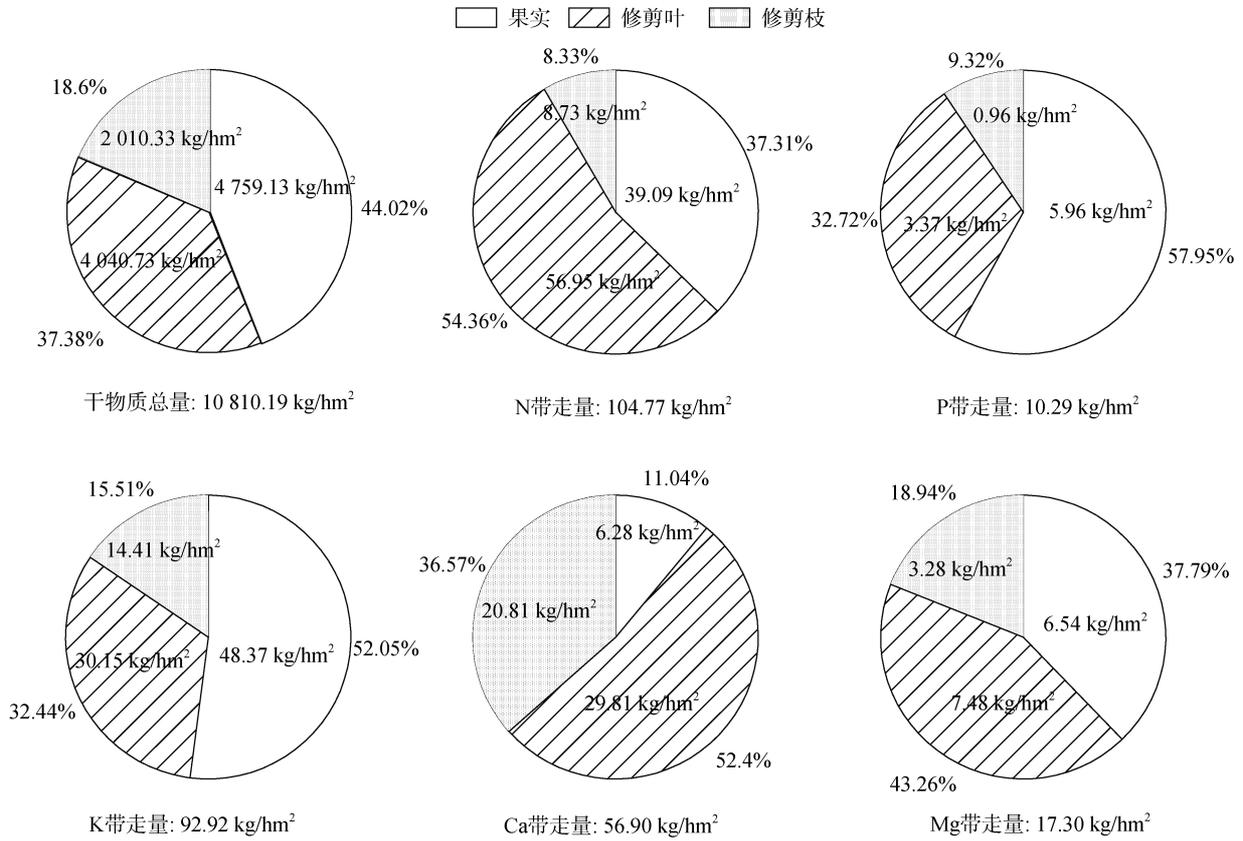
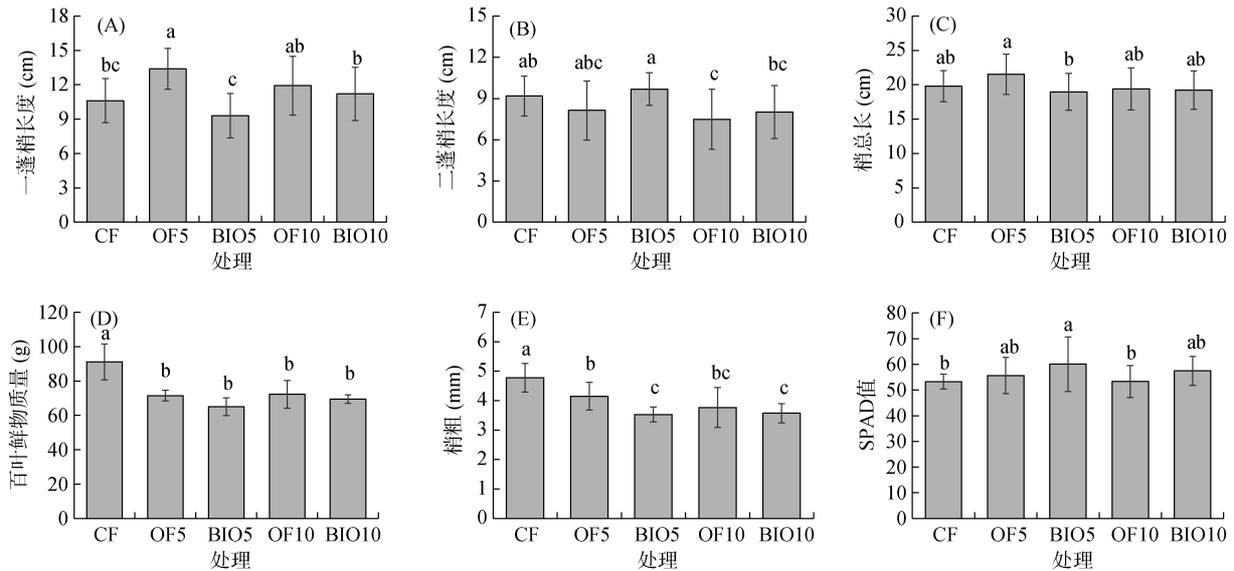


图 2 荔枝不同器官年干物质积累量及养分带走量

Fig. 2 Annual dry matter accumulation and nutrient removal of different organs of litchi



(图中小写字母不同表示处理间的差异显著(Duncan 检验, $P < 0.05$), 下同)

图 3 不同施肥处理对荔枝生长的影响

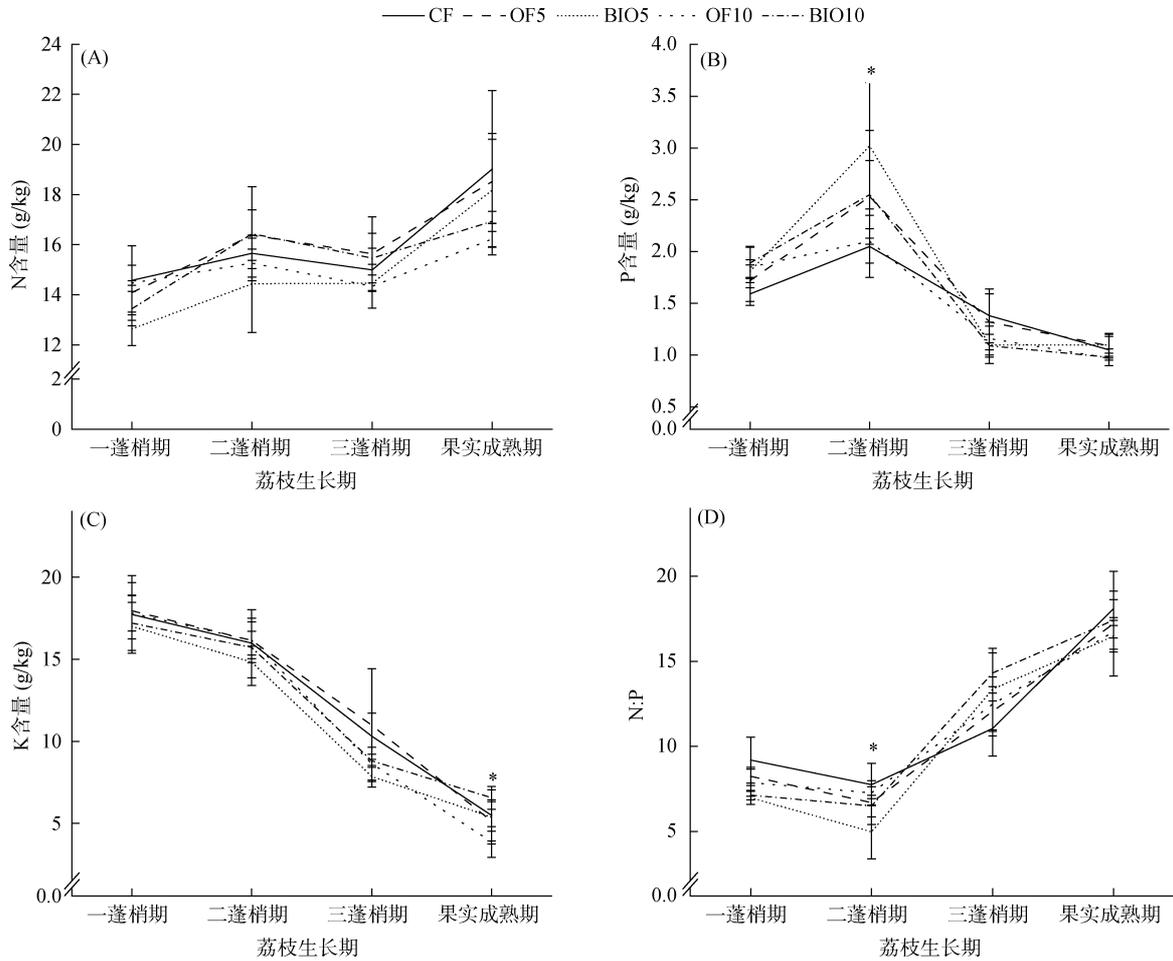
Fig. 3 Litchi growth traits under different fertilization treatments

片 K 含量与 CF 处理相比均无显著性差异, 但在一、二蓬梢期, OF5、OF10 处理叶片 K 含量均有高于 CF 处理的趋势。叶片 N:P 趋势在梢期与叶片 N 含量趋势一致, 在果实成熟期, 与叶片 P 含量趋势一致(图 4D)。综上, 在减施化肥 30% 情况下, 配施有机肥

对荔枝营养生长并无显著影响。

2.4 减施化肥增施有机肥对荔枝产量及品质的影响

2.4.1 减施化肥增施有机肥对荔枝外观品质及单株平均产量的影响 如图 5A 所示, BIO5、OF10 以及 BIO10 处理下荔枝单株平均产量均显著高于 CF 处



(图中 * 表示处理间存在显著差异(P<0.05))

图 4 不同施肥处理对荔枝叶片养分含量(A、B、C)及 N:P(D)的影响

Fig. 4 Nutrient contents (A,B,C) and nitrogen phosphorus ratios (D) of litchi leaves under different fertilization treatments

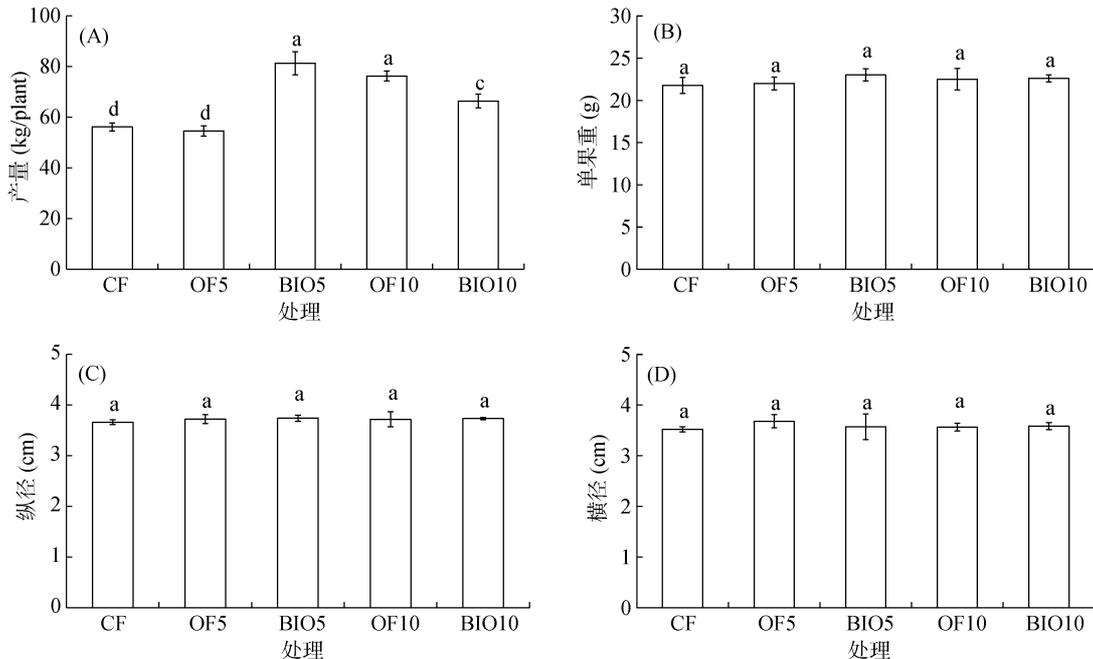


图 5 不同施肥处理对荔枝外观品质及单株平均产量的影响

Fig. 5 Litchi appearance qualities and average yields per plant under different fertilization treatments

理,其单株平均产量分别达到 81.27、76.23、66.37 kg,相比 CF 处理增幅分别为 44.77%、35.81%、18.23%;OF5 处理单株平均产量与 CF 处理无显著性差异。如图 5B~5D 所示,有机肥 BIO5 处理平均单果重和纵径数值均最大,OF5 处理横径数值最大,但各处理间未达到显著性差异。就单株总产量及平均单果重,施用生物有机肥 5 kg 效果最佳。

2.4.2 减施化肥增施有机肥对荔枝内在品质的影响 如表 2 所示,各施肥处理中, BIO5 处理可溶性固形物

含量最高, OF5 处理次之, 分别为 187.7、186.6 g/kg; OF5 处理可食率最高, BIO10 处理 Vc 含量最高, 各处理间无显著性差异。可溶性糖含量表现为 BIO5 处理与 BIO10 处理显著高于 CF 处理, 含量分别达到 185.7、177.9 g/kg, 相比 CF 处理分别提高 21.85%、16.73%。可滴定酸含量表现为有机肥处理低于化肥处理, 呈现出随有机肥施用量增加而降低的趋势。各有机肥处理糖酸比有高于化肥处理的趋势, 且 BIO10 处理显著高于 CF 处理, 比 CF 处理高出 67.60%。

表 2 不同施肥处理对荔枝品质指标的影响
Table 2 Quality indicators of litchi under different fertilization treatments

处理	可溶性固形物 (g/kg)	可食率(%)	维生素 C (mg/kg)	可溶性糖(g/kg)	可滴定酸 (g/kg)	糖酸比(%)
CF	181.8 ± 11.9 a	75.18 ± 1.29 a	286.55 ± 42.15 a	152.4 ± 7.1 b	1.02 ± 0.36 a	162.25 ± 53.78 b
OF5	186.6 ± 7.1 a	76.18 ± 3.37 a	284.21 ± 39.66 a	173.9 ± 6.6 ab	0.83 ± 0.05 a	210.59 ± 6.36 ab
BIO5	187.7 ± 1.3 a	73.34 ± 1.03 a	252.05 ± 23.56 a	185.7 ± 5.6 a	0.86 ± 0.19 a	222.52 ± 51.40 ab
OF10	186.4 ± 5.7 a	74.33 ± 0.68 a	236.84 ± 59.26 a	170.6 ± 14.1 ab	0.66 ± 0.10 a	261.20 ± 24.35 ab
BIO10	185.0 ± 4.5 a	74.13 ± 1.85 a	319.06 ± 74.39 a	177.9 ± 18.9 a	0.69 ± 0.17 a	271.90 ± 83.73 a

注: 碳酸比=可溶性糖/可滴定酸; 同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同。

2.4.3 不同施肥处理荔枝产量与品质评价 将荔枝的单株产量、单果重、可溶性固形物、可食率、纵径、横径、维生素 C(Vc)、可溶性糖、可滴定酸、糖酸比作为荔枝的产量指标和品质指标去量纲化绘制雷达图(图 6), 以雷达图的平均面积和平均周长构建评价函数进行综合评价(表 3), 评价函数结果 Y 值越高, 则产量与品质综合评价越好, 方法参照文献 [18-19]。由雷达图可以看出, BIO5 处理在总产量、

单果重、可溶性固形物以及可溶性糖含量 4 项指标表现最好, 除可滴定酸指标较低外, 其余指标表现为中等偏上。BIO10 处理各指标表现较好且均匀, OF10 处理各项指标表现为中等偏上但优势不突出。OF5 处理除在可食率、横径以及 Vc 3 个指标优势明显外, 其余指标表现为中等偏下。CF 处理除在 Vc 上表现较好, 其余各指标均表现一般, 且可溶性糖含量和可滴定酸指标均表现最差。通过综合评价函数得到的各

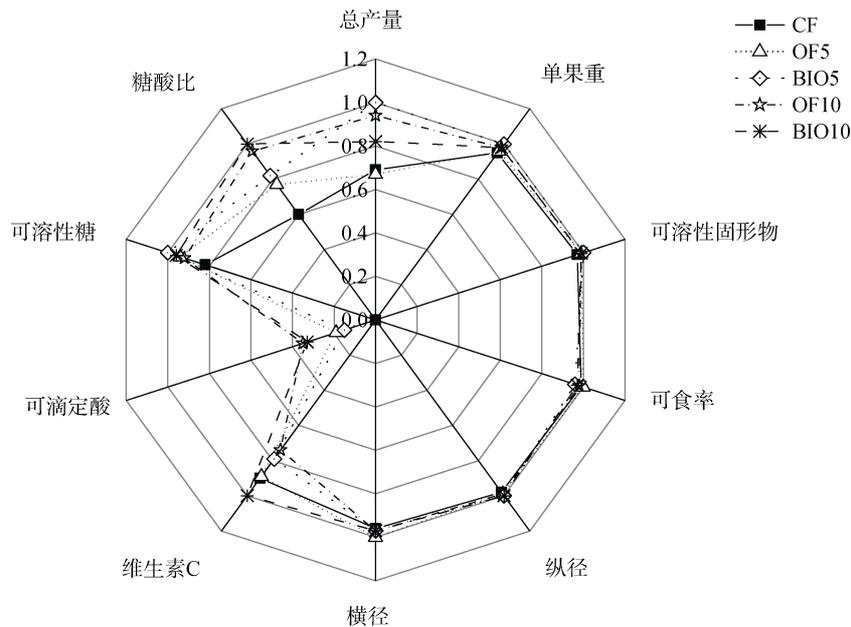


图 6 荔枝产量及品质评价指标雷达图

Fig. 6 Radar chart of evaluation indicators of litchi yield and quality

表 3 荔枝产量指标和品质指标综合评价结果
Table 3 Comprehensive evaluation results of indicators of litchi yield and quality

处理	平均面积	平均周长	V_x	Y	排序
CF	0.30	0.61	10.22	1.75	3
OF5	0.32	0.67	9.14	1.72	5
BIO5	0.37	0.69	9.72	1.90	1
OF10	0.35	0.73	8.40	1.72	4
BIO10	0.38	0.74	8.77	1.82	2

注： V_x ：周长评价向量； Y ：函数评价结果。

个处理的产量和品质综合评价结果排序为：BIO5>BIO10>CF>OF10>OF5(表 3)。BIO5 处理与 BIO10 处理 Y 值高达 1.90 和 1.82，其余 3 个处理 Y 值差异不大，且 BIO5 处理平均面积与 V_x 值均较大，表明其综合表现较为突出，各指标协调性也较好。

2.5 减施化肥增施有机肥对荔枝肥料利用率的影响

肥料利用效率体现了作物对于肥料的吸收利用情况，而养分偏生产力是肥料利用率最简单的表达方

法。如表 4 所示，与 CF 处理相比，OF5 和 OF10 两种普通商品有机肥处理的氮肥偏生产力分别增加了 37.85、66.44 kg/kg，氮肥农学效率分别增加了 0.48、43.51 kg/kg；BIO5 和 BIO10 两种生物有机肥处理的氮肥偏生产力分别增加了 67.91、10.68 kg/kg，氮肥农学效率分别增加了 50.44、14.87 kg/kg，各有机肥处理的氮肥偏生产力和氮肥农学效率均显著高于化肥处理(OF5 处理氮肥偏生产力除外)，综上，BIO5 处理氮肥利用率最高，OF10 处理次之。与 CF 处理相比，BIO5 处理磷肥偏生产力、磷肥农学效率分别提高了 74.77、105.57 kg/kg，显著高于其他处理，OF10 处理的磷肥偏生产力、磷肥农学效率分别提高了 17.59、71.82 kg/kg，仅次于 BIO5 处理。从钾肥利用率来讲，BIO5 处理的钾肥偏生产力和钾肥农学效率均显著高于其他处理，与磷肥利用率一致。不同施肥处理肥料增产率排序与钾肥利用率排序一致，BIO5 处理及 OF10 处理分别为 61.02%、51.05%，OF5 处理略低于 CF 处理。

表 4 不同施肥处理对荔枝肥料利用率的影响
Table 4 Fertilizer efficiencies of litchi under different fertilization treatments

处理	产量 (kg/plant)	养分投入量 (kg)	肥料偏生产力(kg/kg)			肥料农学效率(kg/kg)			肥料增产率(%)
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	50.47	0.00	—	—	—	—	—	—	—
CF	56.13	1.61	88.82 ± 2.48 d	277.89 ± 7.77 b	72.81 ± 2.04 d	8.96 ± 2.48 c	28.04 ± 7.77 cd	7.35 ± 2.04 c	11.22 ± 3.11 d
OF5	54.53	1.38	126.67 ± 4.48 b	288.54 ± 10.65 b	71.61 ± 2.64 d	9.44 ± 4.68 c	21.50 ± 10.65 d	5.34 ± 2.64 c	8.05 ± 3.99 d
BIO5	81.27	1.41	156.73 ± 8.75 a	352.57 ± 19.68 a	123.51 ± 6.89 a	59.40 ± 8.75 a	133.61 ± 19.68 a	46.8 ± 6.89 a	61.02 ± 8.99 a
OF10	76.23	1.66	155.26 ± 3.96 a	295.48 ± 7.53 b	83.50 ± 2.13 c	52.47 ± 3.96 a	99.86 ± 7.53 b	28.22 ± 2.13 b	51.05 ± 3.85 b
BIO10	66.37	1.71	99.50 ± 4.08 c	194.62 ± 7.98 c	94 ± 3.85 b	23.83 ± 4.08 b	46.62 ± 7.98 c	22.52 ± 3.85 b	31.50 ± 5.39 c

2.6 减施化肥增施有机肥对荔枝经济效益的影响

如表 5 所示，不同施肥处理下，成本投入和效益明显不同。BIO5、OF10 与 CF 处理相比，投入略高但收益却显著提高，达到 51.20、47.94 万元/hm²，与 CK 处理相比，收益增幅高达 56.62%、46.65%。BIO10 处理收益显著高于 OF5 处理和 CF 处理，与 CK 处理

相比，收益增幅为 25.77%。OF5 处理收益略低于 CF 处理，但未达到显著差异，且投入低于 CF 处理。与 CK 处理相比，OF5 处理与 CF 处理收益增幅分别为 4.82%、6.89%。不同施肥处理的产投比排序为 BIO5>OF10>OF5>CF>BIO10，OF5 处理产投比仅次于 BIO5 处理、OF10 处理。

表 5 不同施肥处理对荔枝经济效益的影响
Table 5 Economic benefits of litchi under different fertilizer treatments

处理	产量(t/hm ²)	单价(元/kg)	产值(万元/hm ²)	投入(万元/hm ²)	收益(万元/hm ²)	收益增幅(%)	产投比
CK	27.24	12.00	32.69	—	32.69	—	—
CF	30.30	12.00	36.37	1.43	34.94 d	6.89 d	25.39 b
OF5	29.43	12.00	35.51	1.24	34.27 d	4.82 d	28.53 b
BIO5	43.86	12.00	52.66	1.46	51.20 a	56.62 a	36.05 a
OF10	41.15	12.00	49.40	1.46	47.94 b	46.65 b	33.82 a
BIO10	35.82	12.00	43.01	1.89	41.11 c	25.77 c	22.72 b

3 讨论

3.1 减施化肥配施适宜用量有机肥能够保持荔枝树体养分正常供应

化肥配施有机肥能提高土壤养分有效性,保证作物整个生育期对养分的需求^[20]。本研究中,我们发现减施化肥配施有机肥处理有助于荔枝叶片中叶绿素产生和积累,且生物有机肥处理叶绿素含量高于普通商品有机肥处理,与陈乃祥等^[21]、刘拴成^[22]和赵满兴等^[23]在西瓜、马铃薯、烟草上研究结果相似。减施 30% 化肥后,配施不同用量有机肥不仅不会减缓荔枝树体生长(图 2A ~ 2C),还能一定程度提高树体养分含量(图 3A),与梨、葡萄、苹果、蜜柚上的研究结果一致^[24-27]。梢期是积累养分的重要阶段,高产妃子笑荔枝末次梢老熟期叶片中矿质元素适宜含量为 N 19.7 ~ 22.0 g/kg, P 1.69 ~ 1.95 g/kg, K 10.8 ~ 12.7 g/kg^[28]。荔枝不同物候期叶片养分需求不同,各个生育阶段 N、P、K 的需求量依次为 N>K>P^[29],叶片中 N、P 水平均在花叶分化期达到最高水平,而 K 素营养在末次梢老期达到最高水平,采果后, P、K 含量降低,而 N 素含量始终维持较高水平^[30]。本研究各处理 N、P、K 养分配比均属正常水平,末次梢时期荔枝叶片 N 素含量处于适宜含量范围,而 P、K 元素含量均偏低,且末次梢 N、P 钾养分水平低于二蓬梢期,可能由于秋梢尚未达到老熟,养分积累还未达到最高。果实成熟期时有机肥处理 P、K 元素含量低于化肥处理可能由于产量增多而导致更多 P、K 元素转移到果实中^[31]。叶片 N:P 被认为是评价植物 N、P 限制特征的信息^[32],当植物 N:P<14 时,生长受到 N 限制;植物 N:P>16 时,生长受到 P 限制;植物 N:P 处于 14 和 16 之间时,植物生长无明确的 N、P 限制^[33]。本研究中,一、二蓬梢期 N:P<14,此时 N 素限制植物生长,是荔枝利用基肥中养分进行营养生长的时期。末次梢期 N:P>16,此时高 N 基肥中大量 N 素满足供应, P 素相对较低,供应较慢。果实成熟期 N:P>16,此时受 P 素限制,是由于大量 P 素转移到果实,各时期养分供应均符合荔枝生理需要。综上,减施化肥配施不同用量有机肥与单施化肥相比,荔枝梢生长并未受到显著影响。各有机肥处理树体养分变化趋势符合荔枝生长规律,养分含量与化肥处理相比不但未降低,一定程度上还有所提高。

3.2 减施化肥配施适宜用量有机肥能够在稳产基础上提高品质

前人研究表明,施用有机肥对改善土壤肥力、实

现果树高产发挥着重要作用,而有机肥与化肥配施的施肥模式增产效果优于单施化肥或有机肥^[34-35]。在本研究中,减施 30% 化肥,配施 5 kg 生物有机肥、10 kg 生物有机肥、10 kg 普通商品有机肥处理的产量较单施化肥分别提升 44.77%、18.23%、35.81%。除显著增产外,有机肥处理的单果重和纵横径也有不同程度提升,与邹亚丽等^[36]和陶云彬等^[37]研究一致。在桃、苹果及芒果研究中发现,相比单施化肥或生物有机肥,有机肥化肥配施可显著提高果实的可溶性糖、糖酸比、总糖和 Vc 含量^[38-40]。果实品质是复杂的生理生化现象和结果,与矿质元素供应水平有着密切联系。有机肥中含有丰富的 N、P、K 3 种果实发育的必要元素,其缓释的特点保证了稳定持续的养分释放,相对满足作物不同时期的生理需求^[41],且缓效的 N 素供应水平保证了荔枝不会出现 N 素过多导致的氨基酸合成、纤维素和多酚类物质增多而还原糖减少,有利于提高果实风味^[42]。此外,荔枝作为修剪较重的果树,其采果及修剪势必带走大量中微量元素^[43],而有机肥含有丰富的 Ca、Mg、Zn、Fe、B 等多种中微量元素,配施有机肥能够有效补充上述带走的中微量元素,从而在稳产的基础上提高品质。因此,在本研究中配施有机肥均能一定程度提高荔枝可溶性固形物、可溶性糖和糖酸比,其中配施生物有机肥 10 kg 还能大幅提升 Vc 含量,同时通过综合评价产量、外观品质以及内在品质,我们发现,减施化肥 30% 下配施生物有机肥 5 kg、10 kg 能极大提升荔枝产量和品质(图 5、表 3),配施普通商品有机肥 10 kg 在品质方面优势虽不突出,但产量比化肥处理有很大提高。

3.3 减施化肥配施适宜用量有机肥能够提高肥料利用率和经济效益

肥料农学效率、偏生产力 and 养分回收率是表达肥料利用率的常用指标,其与产量、施肥量和土壤肥力水平关系最为密切^[44]。Dobermann 等^[45]认为粮食作物氮肥回收利用率为 30% ~ 50%,氮肥农学效率为 10 ~ 30 kg/kg,氮肥偏生产力为 40 ~ 70 kg/kg,代表 N 素管理较好。本研究发现,减化肥 30% 配施不同种类有机肥均能使氮肥的农学利用率及氮肥偏生产力提高且维持在较好水平;同时,除配施普通商品有机肥 5 kg,其余有机肥处理相比化肥均有效提高磷、钾肥的农学利用效率及偏生产力,与玉米、马铃薯、油菜及红薯上研究结果一致^[46,16-17]。一方面,有机肥含有丰富的碳源,施入后促进根际微生物繁殖与生长,从而促进对肥料的吸附及 N 转化作用,改善了

根际环境^[47]; 同时, 有机肥施入促进作物根系生长, 增加根系生物量与根系分泌物, 可溶解土壤中难溶性 P、K, 有利于植株的养分吸收^[48]; 另一方面, 有机肥特别是生物有机肥, 不仅接种有大量有益菌群, 同时可以富集固氮菌群、磷钾细菌以及与疾病抑制相关菌群, 减少养分淋溶流失, 抑制有害真菌、细菌定殖, 优化根际微域环境, 从而增加作物产量, 提高肥料利用率^[10,49-51]。与化肥处理相比, 配施生物有机肥 5 kg/株或普通商品有机肥 10 kg/株均极大提高了经济效益。在有机肥替代化肥研究中, 不仅要保证肥料养分的高效利用, 更要把握好肥料资源投入与经济效益的平衡, 普通商品有机肥 10 kg/株与生物有机肥 5 kg/株处理产投比均较低, 是最佳配施用量的参考。

4 结论

减施 30% 化肥养分下配施适宜用量的有机肥可以维持荔枝叶片养分持续供应, 有利于提高产量与品质。配施有机肥还可以显著提高荔枝氮肥偏生产力与农学利用效率, 提高经济效益。综合有机肥施用对树体生长及经济效益的影响, 株施生物有机肥 5 kg (2 700 kg/hm²) 或羊粪有机肥 10 kg (5 400 kg/hm²) 具有显著提质增效作用。

参考文献:

- [1] 郑红裕, 袁燕梅. 2018 年中国国际荔枝产业大会在广州顺利召开[J]. 中国热带农业, 2018(4): 2-3.
- [2] 赵飞, 廖美敬, 章家恩, 等. 中国荔枝文化遗产的特点、价值及保护——基于岭南荔枝种植系统(增城)的实证研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(9): 1435-1442.
- [3] 陈明智, 林彬, 谢国干, 等. 海南荔枝园土壤基本养分状况分析[J]. 海南师范学院学报(自然科学版), 2001, 14(2): 57-59.
- [4] 周兆禧, 林兴娥, 刘永霞, 等. 海南荔枝果园土壤存在的问题及提肥增效措施[J]. 中国热带农业, 2018(5): 23-24.
- [5] 齐文娥, 陈厚彬, 罗滔, 等. 中国大陆荔枝产业发展现状、趋势与对策[J]. 广东农业科学, 2019, 46(10): 132-139.
- [6] 田益华, 王倩, 奚晓军, 等. 有机肥施用量对‘夏黑’葡萄生长和果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(31): 125-129.
- [7] Wang L, Li J, Yang F, et al. Application of bioorganic fertilizer significantly increased apple yields and shaped bacterial community structure in orchard soil[J]. Microbial Ecology, 2017, 73(2): 404-416.
- [8] 魏晓兰, 吴彩蛟, 孙玮, 等. 减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 40-44.
- [9] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
- [10] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 352-360.
- [11] 赵满兴, 刘慧, 白二磊, 等. 腐殖酸肥或生物有机肥替代部分化肥对土壤肥力、红枣产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(6): 981-987.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [13] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 68-75.
- [16] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 852-864.
- [17] 郭梦成, 李鹏, 张欣, 等. 不同有机物施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 320-326.
- [18] 邓禄军, 夏锦慧, 卢扬, 等. 雷达图分析法在马铃薯品种特征综合评价中的应用[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(7): 59-62, 66.
- [19] 方长云, 胡贤巧, 邵雅芳, 等. 基于雷达图分析法初步评价稻米食味品质的研究[J]. 中国稻米, 2017, 23(2): 13-17.
- [20] 张士荣, 王军, 张德龙, 等. 有机肥 C/N 优化及钾肥运筹对烤烟钾含量及香气品质的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 220-228.
- [21] 陈乃祥, 李艳莉, 杨霞光, 等. 商品有机肥替代化肥对设施西瓜生产的影响[J]. 上海蔬菜, 2018(6): 55-57.
- [22] 刘拴成. 有机肥与无机肥配施对马铃薯生长发育及产质量的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(3): 32-39.
- [23] 赵满兴, 刘慧, 白二磊, 等. 腐殖酸和生物有机肥替代化肥对烤烟生长及品质的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(9): 3105-3114.
- [24] 刘茂, 柴仲平, 盛建东, 等. 施用有机肥对库尔勒香梨叶片营养元素及果实产量、品质的影响[J]. 北方园艺, 2014(10): 159-163.
- [25] 周兴. 不同有机肥对酿酒葡萄生长及果实品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
- [26] 蔺浩然. 有机肥对苹果园土壤及果实品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [27] 李水祥, 余文琴, 吴世涛, 等. 有机肥替代部分化肥改善‘三红蜜柚’树体营养及果实品质[J]. 热带作物学报, 2020, 41(4): 649-654.
- [28] 罗东林, 王伟, 朱陆伟, 等. 华南荔枝叶片营养诊断指标的建立[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 859-870.

- [29] 樊小林, 黄彩龙, Juhani U, 等. 荔枝年生长期周期内 N、P、K 营养动态规律与施肥管理体系[J]. 果树学报, 2004, 21(6): 548–551.
- [30] 杨苞梅, 姚丽贤, 李国良, 等. 荔枝叶片养分含量动态及不同比例钾、氮肥施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1212–1220.
- [31] 姚丽贤, 周昌敏, 何兆桓, 等. 荔枝年度枝梢和花果发育养分需求特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1128–1134.
- [32] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al. Organism Size, Life History, and N: P Stoichiometry Toward a unified view of cellular and ecosystem processes[J]. *BioScience*, 1996, 46(9): 674–684.
- [33] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441.
- [34] 李涛涛, 翟丙年, 李永刚, 等. 有机无机肥配施对渭北旱塬红富士苹果树生长发育及产量的影响[J]. 果树学报, 2013(4): 591–596.
- [35] 吴峰. 化肥与牛粪肥配施对设施黄瓜增产提质及氮肥利用效率的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [36] 邹亚丽, 呼丽萍, 魏蓉, 等. 生物有机肥施用量对大樱桃果实品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(1): 149–150, 211.
- [37] 陶云彬, 杨佳佳, 章日亮, 等. 有机肥替代、化肥养分调控对土壤理化性状、枇杷果实品质和产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(9): 1540–1541, 1543.
- [38] 罗华, 李敏, 胡大刚, 等. 不同有机肥对肥城桃果实产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 955–964.
- [39] 赵佐平, 高义民, 刘芬, 等. 化肥有机肥配施对苹果叶片养分、品质及产量的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(11): 2229–2236.
- [40] 臧小平, 周兆禧, 林兴娥, 等. 不同用量有机肥对芒果果实品质及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 98–101.
- [41] 张晓敏. 肥料种类对葡萄品质构成因子影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [42] 王允圃, 刘玉环, 阮榕生, 等. 有机肥改良农产品品质的科学探索[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 51–56.
- [43] 姚丽贤, 周昌敏, 何兆桓, 等. 荔枝主栽品种树体营养累积特点及与土壤养分关系[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(2): 40–47.
- [44] Qiu S J, He P, Zhao S C, et al. Impact of nitrogen rate on maize yield and nitrogen use efficiencies in northeast China[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 305–313.
- [45] Dobermann A, Dawe D, Roetter R P, et al. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(4): 633–643.
- [46] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 318–325.
- [47] Zhu S S, Vivanco J M, Manter D K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 324–333.
- [48] 余小芬, 杨树明, 邹炳礼, 等. 菜籽油枯有机无机复混肥对烤烟产质量及养分利用率的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1564–1574.
- [49] Xiong W, Li R, Ren Y, et al. Distinct roles for soil fungal and bacterial communities associated with the suppression of *Vanilla Fusarium* wilt disease[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 198–207.
- [50] Moretti B, Bertora C, Grignani C, et al. Conversion from mineral fertilisation to MSW compost use: Nitrogen fertiliser value in continuous maize and test on crop rotation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135308.
- [51] Otinga A N, Pypers P, Okalebo J R, et al. Partial substitution of phosphorus fertiliser by farmyard manure and its localised application increases agronomic efficiency and profitability of maize production[J]. *Field Crops Research*, 2013, 140: 32–43.