网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.006

减氮配施有机肥对枇杷果实品质的影响

孔小梅[a],徐嘉宁[a],郑婕雯[a],罗弦[a],罗娅[a],邓群仙[a],贾永霞[b]
(四川农业大学 a 园艺学院,b 资源学院,四川 成都 611130)

[摘 要] 【目的】研究减氮配施有机肥对枇杷果实品质的影响,为枇杷科学施肥提供理论依据。【方法】以 3 年生大五星枇杷为材料,采用大田试验,设置不施肥(CK)、常规施肥(CF)、减氮 30%配施有机肥(LOF)、减氮 60%配施有机肥(MOF)和减氮 90%配施有机肥(HOF)5 个处理,研究其对枇杷果实外观品质、风味品质和营养品质的影响。在此基础上,分别采用主成分分析法和熵权法对不同处理枇杷果实品质提升效果进行综合评价。【结果】与 CK 相比,CF 处理显著提高了枇杷果实的纵径、横径、单果质量和可食率;与 CF 处理相比,减氮配施有机肥处理(LOF、MOF、HOF)进一步明显提升了以上指标。与 CK 相比,CF 处理显著提高了可溶性糖含量和糖酸比,显著降低了可滴定酸含量;与 CF 处理相比,LOF、MOF、HOF 处理均显著提高了可溶性固形物含量和糖酸比,显著降低了可滴定酸含量,仅 MOF 处理显著提高了可溶性糖含量。与 CK 相比,CF 处理显著提高了总黄酮含量,而 Vc、可溶性蛋白和总类胡萝卜素含量无显著变化;与 CF 处理相比,MOF 和 HOF 处理显著提高了可溶性蛋白、总类胡萝卜素和总黄酮含量,LOF 处理以上指标无显著变化。主成分分析法与熵权法的综合评价结果均表明,减氮 60%配施有机肥(MOF)对枇杷果实品质的提升效果最佳。【结论】减氮配施有机肥明显改善了枇杷果实的外观、风味和营养品质,其中减氮 60%配施有机肥为最佳处理。

[关键词] 减氮配施有机肥;枇杷;果实品质
[中图分类号] S667.306+.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0056-09

Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on the quality of loquat fruit

KONG Xiaomei[a],XU Jianing[a],ZHENG Jiewen[a],LUO Xian[a],LUO Ya[a],
DENG Qunxian[a],JIA Yongxia[b]
(a *College of Horticulture*,b *College of Resources*,*Sichuan Agricultural University*,*Chengdu*,*Sichuan* 611130,*China*)

Abstract:【Objective】This research aims to study the effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on the quality of loquat fruit,to provide theoretical basis for scientific fertilization in loquat cultivation.【Method】Three-year-old 'Dawuxing' loquat trees were used as experimental materials,and field trial was adopted. Five treatments were set up:no fertilizer (CK),conventional fertilizer (CF),30% nitrogen reduction combined with commercial organic fertilizer (LOF),60% nitrogen reduction combined with commercial organic fertilizer (MOF),and 90% nitrogen reduction combined with commercial organic fertilizer (HOF). The effects of these treatments on the appearance,flavor,and nutritional quality of loquat fruit were investigated. On this basis,effects of different treatments on improving loquat fruit quality were comprehensively evaluated with principal component analysis (PCA) and entropy weight method,respec-

[收稿日期] 2025-02-03 [修回日期] 2025-03-11
[基金项目] 四川省科技支撑计划"十四五"育种攻关项目(2021YFYZ0023-07);国家现代化农业产业技术体系四川水果创新团队项目(SCCXTD-2024-04);四川农业大学本科生科研兴趣培养计划项目(2025009X)
[作者简介] 孔小梅(2002—),女,四川自贡人,在读硕士,主要从事园艺植物栽培研究。E-mail:1478024990@qq.com
[通信作者] 罗弦(1983—),男,四川自贡人,讲师,博士,主要从事园艺植物栽培研究。E-mail:lawxian@aliyun.com

tively.【Result】Compared with CK，CF significantly increased the longitudinal diameter，transverse diameter，single fruit weight，and edible rate of loquat fruit. Compared with CF，treatments of nitrogen reduction combined with organic fertilizer (LOF，MOF，HOF) further significantly increased the above indices. Compared with CK，CF treatment significantly increased soluble sugar content and sugar-acid ratio，and significantly decreased titratable acid content. Compared with CF，LOF，MOF and HOF treatments all significantly increased soluble solids content and sugar-acid ratio，and significantly decreased titratable acid content，with only MOF significantly increasing soluble sugar content. Compared with CK，CF treatment significantly increased the total flavonoids content，while no significant difference was observed in Vc，soluble protein and total carotenoids content. Compared with CF，MOF and HOF treatments significantly increased soluble protein，total carotenoids and total flavonoids content，while no significant difference of the above indices was observed in LOF treatment.【Conclusion】Nitrogen reduction combined with organic fertilizer significantly improved the appearance，flavor，and nutritional quality of loquat fruit，with 60% nitrogen reduction (MOF) being the optimal treatment.

Key words：nitrogen reduction combined with organic fertilizer；loquat；fruit quality

枇杷（*Eriobotrya japonica* Lindl）是蔷薇科（Rosaceae）枇杷属（*Eriobotrya*）的果树，其果实风味良好、营养丰富，深受消费者喜爱[1]。然而，随着市场需求的增加，果农为追求高产，生产中过量施用氮肥的现象日益普遍，导致枇杷树体营养失衡，果实风味变淡，品质下降[2]，严重制约了枇杷产业的可持续发展。

研究表明，减氮配施有机肥不仅能改善果树果实的外观品质，还能提升风味和营养品质[3]。例如，减氮配施有机肥处理显著提高了苹果[4]、甜瓜[5]的果实纵径、横径和单果质量；增加了葡萄[6]、井冈蜜橘[7]的可溶性固形物和可溶性糖含量，同时显著降低了可滴定酸含量；此外还显著提升了香蕉[8]和草莓[9]的 Vc、类黄酮含量。综上可知，减氮配施有机肥作为一种有效的施肥策略，能够实现化肥与有机肥的优势互补，满足作物全生育期的养分需求[10]，是推动农业绿色发展的关键措施之一。

近年来，有学者采用主成分分析（PCA）或者熵权法综合评价了不同施肥处理对果实品质的影响。例如，李栋等[11]采用 PCA 综合评价了有机肥替代不同比例氮肥对脐橙品质的影响，发现有机肥替代 30%氮肥时果实品质最优。张荣超等[12]采用熵权法评价了不同肥料用量对瓜蒌品质的影响，确定了最优施肥量。然而，各评价方法均存在一定的局限性[13]。如 PCA 虽然能避免量纲和数量级的影响，但标准化后的各指标权重可能无法准确反映原始数据的信息[14]。熵权法虽然避免了人为赋权的主观性影响，但可能忽略一些分布均匀但与结果相关性强的指标[15]。因此，结合多种评价方法进行综合分析，能够更全面地评估施肥处理对果实品质的影响。

目前，关于减氮配施有机肥对枇杷果实品质的影响研究还较少，为此本研究以四川省主栽品种大五星枇杷为材料，探讨减氮配施有机肥对枇杷果实外观、风味和营养品质的影响，并采用主成分分析法和熵权法进行综合评价，旨在为枇杷科学施肥提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地点为四川农业大学现代研发基地枇杷园，位于四川省崇州市，平均海拔 688 m，属亚热带湿润季风气候，年平均气温 16.7 ℃，年平均降雨量 1 085.5 mm，年平均无霜期 282 d。试验区土壤类型为潮土，0～40 cm 土层土壤主要理化性质为：pH 6.3，有机质 19.89 g/kg，全氮 1.07 g/kg，碱解氮 84.23 mg/kg，速效磷 15.61 mg/kg，速效钾 52.87 mg/kg。

1.2　供试材料

试验用地为地力较均匀的 3 年龄大五星枇杷园，株行距为 3 m×4 m。试验所用的化肥过磷酸钙（P_2O_5 15%）和硫酸钾（K_2O 50%）均购自济南睦宸环保科技有限公司；复合肥（N 15%，P_2O_5 15%，K_2O 15%）和有机肥（N 2.8%，P_2O_5 1.2%，K_2O 1.1%）均购自四川优信良品农业发展有限公司。

1.3　试验设计

采用大田试验，共设 5 个处理，分别为不施肥（CK）、常规施肥（CF）、减氮 30%配施有机肥（LOF）、减氮 60%配施有机肥（MOF）、减氮 90%配

施有机肥(HOF)。小区面积为 27 m^2(3 m×9 m),每处理重复 3 次,每个重复 3 株,随机排列。调研中得知常规施肥中施用的是复合肥,施用量为 1.59 kg/株。不同处理的施肥量如表 1 所示。各处理中减少的化学氮肥用有机肥补充,磷、钾不足的部分用过磷酸钙和硫酸钾补充,以保证 N、P_2O_5、K_2O 用量相同。上述肥料均于 2022 年 8 月下旬作为基肥一次性施入,在树冠滴水线两侧分别开长 60 cm、宽 20 cm、深 40 cm 的条状沟,施肥后充分灌溉。在周年管理过程中,各处理除基肥施肥水平差异外,其余施肥方式(壮花肥和壮果肥)、施肥量及果园管理措施(包括整形修剪、花果管理等)均保持一致。

于枇杷果实成熟期采样,每个处理每个重复均随机选取 1 株枇杷树,采摘树冠东、西、南、北 4 个方位中上部成熟果实 20 个,带回实验室。一部分鲜样进行枇杷外观品质的测定;另一部分去除果皮和果核,用液氮冷冻后,保存在−80 ℃冰箱,用于风味和营养品质的测定。

表 1 不同处理的施肥量及养分用量

Table 1 Fertilization and nutrient dosage in different treatments

处理 Treatment	N 肥占比/% N fertilizer ratio		施用量/(kg·株$^{-1}$) Fertilizer dosage		养分用量/(kg·株$^{-1}$) Nutrient dosage		
	复合肥 Complex fertilization	有机肥 Organic fertilizer	复合肥 Complex fertilization	有机肥 Organic fertilizer	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CF	100	0	1.59	0.00	0.24	0.24	0.24
LOF	70	30	1.11	2.57	0.24	0.24	0.24
MOF	40	60	0.64	5.14	0.24	0.24	0.24
HOF	10	90	0.16	7.71	0.24	0.24	0.24

注:CK. 不施肥;CF. 常规施肥;LOF. 减氮 30%配施有机肥;MOF. 减氮 60%配施有机肥;HOF. 减氮 90%配施有机肥。下同。

Note: CK. No fertilizer; CF. Conventional fertilizer; LOF. 30% nitrogen reduction combined with commercial organic fertilizer; MOF. 60% nitrogen reduction combined with commercial organic fertilizer; HOF. 90% nitrogen reduction combined with commercial organic fertilizer. The same below.

1.4 指标测定及方法

1.4.1 *枇杷果实的外观品质* 用数显游标卡尺测定果实纵径、横径,用 CYHD-1 型硬度计测定硬度,采用千分之一电子天平测定枇杷果实的果肉质量和单果质量,并计算果形指数(纵径/横径)及可食率(果肉质量/单果质量×100%);

1.4.2 *枇杷果实的风味品质* 可溶性固形物含量采用手持折光仪测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法[16]测定,可滴定酸含量采用碱溶液滴定法[16]测定,糖酸比=可溶性糖含量/可滴定酸含量×100%[16]。

1.4.3 *枇杷果实的营养品质* Vc 含量用 2,6-二氯酚靛酚比色法[17]测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法[16]测定,总黄酮含量采用亚硝酸钠-硝酸铝显色法[17]测定,总类胡萝卜素含量采用紫外分光光度法[17]测定。

1.5 不同施肥处理对枇杷果实品质影响的综合评价

1.5.1 *主成分分析法* 采用 SPSS 22.0 进行主成分分析,提取特征值大于 1 的主成分,由主成分的特征值和相应的载荷值计算各主成分得分,利用各主成分的方差贡献率作为其权重,并得出各处理的综合得分:

$$y=\sum D_n C_{in}。\tag{1}$$

式中:y 为第 i 个评价对象的综合得分,D_n 为第 n 个主成分的方差贡献率,C_{in} 为第 i 个评价对象第 n 个主成分得分。

1.5.2 *熵权法* 本研究共有 15 个评价对象(5 个处理,每个处理 3 个生物学重复)和 14 个评价指标(包括外观品质、风味品质和营养品质),以 15 个评价对象(n)和 14 个评价指标(m)构建原始矩阵 $\boldsymbol{X}=(X_{ij})_{n\times m}$。首先,将评价指标分为正向指标和负向指标(本研究中除了可滴定酸与果形指数为负向指标外,其余指标均为正向指标),分别用式(2)或(3)对数据进行标准化处理:

$$\text{正向指标:}X_{ij}^{*}=\frac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})};\tag{2}$$

$$\text{负向指标:}X_{ij}^{*}=\frac{\min(X_{ij})-X_{ij}}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})}。\tag{3}$$

式中:i($i=1,2,\cdots,n$)为评价对象,j($j=1,2,\cdots,m$)为评价指标,X_{ij}^{*} 为标准化处理后数据,X_{ij} 为原始数据,$\max(X_{ij})$为指标的最大值,$\min(X_{ij})$为指标的最小值。

然后利用由式(4)计算第 i 个评价对象的第 j 个指标的比重(p_{ij})以及第 j 项评价指标的信息熵

值(E_j)和权重系数(W_j)：

$$p_{ij}=\frac{X_{ij}^{*}}{\sum_{i=1}^{n}X_{ij}^{*}}; \quad (4)$$

$$E_j=-\ln(n)^{-1}\sum_{i=1}^{n}(p_{ij}\ln p_{ij}); \quad (5)$$

$$W_j=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{m}1-E_j}。 \quad (6)$$

最后通过式(7)计算各评价对象的综合得分(Z_i)：

$$Z_i=\sum_{j=1}^{m}W_j\times X_{ij}^{*}。 \quad (7)$$

1.6 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 处理和计算熵权，采用 SPSS 22.0 软件对数据进行方差分析(单因素 ANOVE 检验)和主成分分析，使用 Graph Pad Prism 9.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 减氮配施有机肥对枇杷果实外观品质的影响

表 2 显示，与 CK 相比，常规施肥(CF)处理果实纵径、横径、单果质量和可食率分别显著提高了 8.20%，3.84%，9.28%和 5.56%。LOF、MOF 和 HOF 处理果实纵径、横径和单果质量较 CF 处理分别提高了 0.75%～7.29%，1.52%～9.58%和 2.81%～8.79%，LOF、MOF 和 HOF 处理果实可食率与 CF 处理无显著差异。枇杷的果形指数在各施肥处理间无显著差异。与 CK 相比，CF 处理的果实硬度无显著变化；LOF、MOF 和 HOF 处理果实硬度较 CF 处理分别显著提高了 7.61%，12.28%和 13.15%。

表 2　减氮配施有机肥对枇杷外观品质的影响

Table 2　Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on appearance quality of loquat fruit

处理 Treatment	纵径/mm Longitudinal diameter	横径/mm Transverse diameter	果形指数 Fruit shape index	硬度/(kg·cm^{-2}) Hardness	单果质量/g Single fruit weight	可食率/% Edible rate
CK	40.72±2.09 c	34.90±0.81 c	1.17±0.03 a	5.55±0.15 c	36.44±1.18 c	0.72±0.02 b
CF	44.06±1.16 b	36.24±0.45 b	1.22±0.03 a	5.78±0.02 c	39.82±0.61 b	0.76±0.01 a
LOF	44.39±0.70 b	36.79±1.19 b	1.21±0.05 a	6.22±0.20 b	40.94±1.13 b	0.78±0.02 a
MOF	45.77±1.08 ab	39.57±0.63 a	1.16±0.03 a	6.49±0.05 a	41.28±0.68 b	0.77±0.02 a
HOF	47.27±0.82 a	39.71±1.33 a	1.19±0.03 a	6.54±0.06 a	43.32±0.77 a	0.79±0.01 a

注：同列数据后标不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 减氮配施有机肥对枇杷风味品质的影响

表 3 显示，CF 处理枇杷果实可溶性糖含量和糖酸比较 CK 分别显著提高了 15.67%和 60.23%，而可滴定酸含量较 CK 显著降低了 28.81%。LOF、MOF 和 HOF 处理枇杷果实可溶性固形物含量较 CF 处理分别显著提高了 18.06%，24.48%和 25.71%；仅 MOF 处理可溶性糖含量较 CF 处理显著提高了 8.22%，LOF 和 HOF 处理与 CF 处理间无差异。此外，LOF、MOF 和 HOF 处理枇杷果实可滴定酸含量较 CF 处理显著降低了 28.57%～35.71%，糖酸比则较 CF 处理显著提高了 41.09%～51.62%。

表 3　减氮配施有机肥对枇杷风味品质的影响

Table 3　Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on flavor quality of loquat fruit

处理 Treatment	可溶性固形物/% Soluble solids	可溶性糖/% Total sugar	可滴定酸/% Titratable acid	糖酸比/% Sugar-acid ratio
CK	10.27±0.22 c	9.57±0.45 c	0.59±0.01 a	16.37±1.03 c
CF	10.50±0.06 c	11.07±0.29 b	0.42±0.02 b	26.23±1.28 b
LOF	12.40±0.10 b	10.61±0.59 b	0.27±0.03 c	39.48±2.56 a
MOF	13.07±0.38 a	11.98±0.43 a	0.30±0.01 c	39.77±2.12 a
HOF	13.20±0.10 a	10.79±0.30 b	0.29±0.03 c	37.01±2.54 a

2.3 减氮配施有机肥对枇杷营养品质的影响

表 4 显示，各处理枇杷果实 Vc 含量无显著差异。与 CK 相比，CF 与 LOF 处理对果实可溶性蛋白和总类胡萝卜素含量无显著影响，MOF 和 HOF 处理果实可溶性蛋白和总类胡萝卜素含量较 CF 显著增加了 13.52%，19.53%和 11.16%，5.16%。与 CK 相比，CF 处理果实总黄酮含量显著提高了 50.00%；LOF、MOF 和 HOF 处理果实总黄酮含量较 CF 处理提高了 9.09%～42.42%。

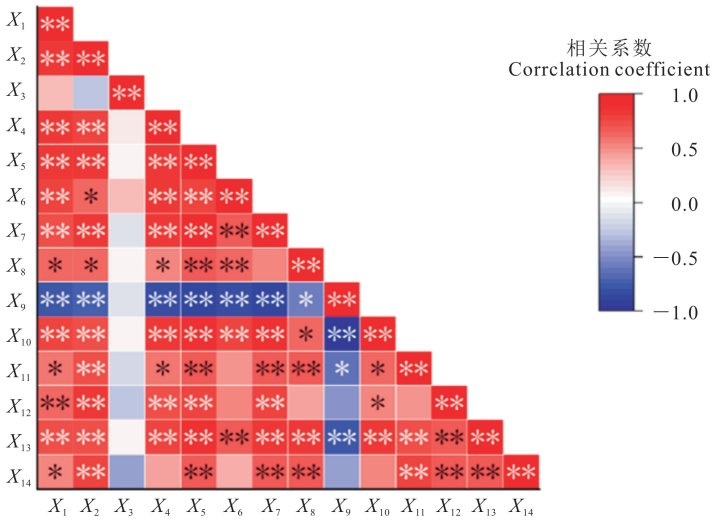
表 4 减氮配施有机肥对枇杷营养品质的影响

Table 4 Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on nutritional quality of loquat fruit

处理 Treatment	维生素 C/(mg·hg^{-1}) Vc	可溶性蛋白/(mg·g^{-1}) Soluble protein	总黄酮/(mg·g^{-1}) Total flavonoids	总类胡萝卜素/(μg·g^{-1}) Total carotenoids
CK	4.30±0.13 a	4.75±0.07 c	0.22±0.01 d	12.07±0.28 c
CF	4.47±0.08 a	4.66±0.15 c	0.33±0.05 c	12.01±0.03 c
LOF	4.47±0.03 a	4.79±0.13 c	0.36±0.02 bc	12.00±0.08 c
MOF	4.69±0.11 a	5.29±0.17 b	0.47±0.04 a	13.35±0.06 a
HOF	4.55±0.11 a	5.57±0.09 a	0.42±0.07 ab	12.63±0.13 b

2.4 减氮配施有机肥处理枇杷果实品质的相关性分析

图 1 显示,外观品质纵径、横径、单果质量、硬度和可食率与可溶性固形物、糖酸比、总黄酮呈极显著正相关关系($P<0.01$),与可滴定酸呈极显著负相关关系($P<0.01$);风味品质可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸和糖酸比与硬度、可食率、总黄酮呈极显著正相关关系($P<0.01$);营养品质 Vc、可溶性蛋白、总黄酮和总类胡萝卜素与横径、硬度、可溶性糖呈极显著正相关关系($P<0.01$)。由此可知,各品质指标之间的关系较为复杂,需要进一步利用主成分分析对果实品质进行降维分析。



X_1～X_{14} 分别表示纵径、横径、果形指数、单果质量、硬度、可食率、可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、维生素 C、可溶性蛋白、总黄酮和总类胡萝卜素。红色表示正相关,蓝色表示负相关。*、**分别表示显著($P<0.05$)与极显著($P<0.01$)相关。

X_1-X_{14} represent longitudinal diameter, transverse diameter, fruit shape index, single fruit weight, hardness, edible rate, soluble solids, total sugar, titratable acid, sugar-acid ratio, Vc, soluble protein, total flavonoids and total carotenoids, respectively. Red color indicates positive correlation and blue color indicates negative correlation. *, ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively.

图 1 减氮配施有机肥处理枇杷果实品质的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of nitrogen reduction combined with organic fertilizer treatment on loquat fruit quality

2.5 基于主成分分析的不同处理枇杷果实品质综合评价

选取包括外观品质、风味品质和营养品质的 14 个性状指标,进行主成分分析,以评价不同减氮配施有机肥处理对枇杷果实品质的提升效果。表 5 显示,根据方差累计贡献率不低于 80%的原则提取到 2 个主成分,其中第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的方差贡献率分别为 67.858%和 13.251%,累计方差贡献率为 81.109%,说明这两个主成分基本涵盖了这 14 个指标的大部分信息。载荷表示指标在各个成分上的权重,其绝对值越大,表示该指标与主成分相关性越大。PC1 主要代表外观品质和风味品质,包括纵径、横径、单果质量、硬度、可食率、可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、糖酸比和总黄酮等 10 项指标的信息;PC2 主要代表营养品质,包括果形指数、Vc、可溶性蛋白和总类胡萝卜素等 4 项指标的信息。

表 5　不同处理枇杷果实品质指标的主成分载荷矩阵、特征向量、特征值及方差贡献率

Table 5　Principal component loading matrix, feature vector, eigenvalues and contribution rate of loquat quality index

指标 Index	主成分载荷矩阵 Principal component loading matrix		主成分特征向量 Principal component feature vector	
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2
纵径(X_1)Longitudinal diameter	0.904	0.152	0.293	0.112
横径(X_2)Transverse diameter	0.697	0.621	0.226	0.456
果形指数(X_3)Fruit shape index	0.383	−0.831	0.124	−0.610
单果质量(X_4)Single fruit weight	0.896	0.177	0.291	0.130
硬度(X_5)Hardness	0.885	0.379	0.287	0.278
可食率(X_6)Edible rate	0.914	−0.058	0.296	−0.043
可溶性固形物(X_7)Soluble solids	0.801	0.467	0.260	0.343
可溶性糖(X_8)Total sugar	0.659	0.352	0.214	0.258
可滴定酸(X_9)Titratable acid	−0.926	−0.141	−0.300	−0.103
糖酸比(X_{10})Sugar-acid ratio	0.890	0.243	0.289	0.178
维生素 C(X_{11})Vc	0.570	0.593	0.185	0.436
可溶性蛋白(X_{12})Soluble protein	0.557	0.618	0.181	0.454
总黄酮(X_{13})Total flavonoids	0.826	0.378	0.268	0.278
总类胡萝卜素(X_{14})Total carotenoids	0.402	0.839	0.130	0.616
特征值 Eigenvalue	9.500	1.855		
方差贡献率/% Variance contribution rate	67.858	13.251		
累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	67.858	81.109		

根据主成分特征向量，构建 PC1 和 PC2 得分与枇杷果实品质之间的线性关系式为：

$$Y_1 = 0.293X_1 + 0.226X_2 + 0.124X_3 + 0.291X_4 + 0.287X_5 + 0.296X_6 + 0.260X_7 + 0.214X_8 - 0.300X_9 + 0.289X_{10} + 0.185X_{11} + 0.181X_{12} + 0.268X_{13} + 0.130X_{14}, \quad (8)$$

$$Y_2 = 0.112X_1 + 0.456X_2 - 0.610X_3 + 0.130X_4 + 0.278X_5 - 0.043X_6 + 0.343X_7 + 0.258X_8 - 0.103X_9 + 0.178X_{10} + 0.436X_{11} + 0.454X_{12} + 0.278X_{13} + 0.616X_{14}。 \quad (9)$$

式中：Y_1 和 Y_2 分别代表 PC1 和 PC2 的得分；X_1～X_{14} 分别代表纵径、横径、果形指数、单果质量、硬度、可食率以及可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、Vc、可溶性蛋白、总黄酮和总类胡萝卜素含量。

将不同处理的 X_1～X_{14} 测定值进行标准化处理后，代入式(8)和(9)，计算 PC1 和 PC2 的得分，再结合每个主成分的方差贡献率，通过评价公式 $y = 0.679Y_1 + 0.133Y_2$，计算不同处理枇杷品质的综合得分(y)，结果见表 6。由表 6 可知，不同处理枇杷品质的综合得分由高到低依次为 MOF(2.300)＞HOF(2.150)＞LOF(0.290)＞CF(−1.170)＞CK(−3.577)，说明基于主成分分析的评价结果显示，减氮 60%配施有机肥(MOF)处理对枇杷品质的提升效果最佳。

表 6　基于主成分分析(PCA)的不同处理枇杷品质评价结果

Table 6　Evaluation results of loquat quality under different treatments based on principal component analysis

处理 Treatment	得分 Score		综合得分 Composite scores	排序 Sequence
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2		
CK	−4.520	−3.797	−3.577	5
CF	−1.260	−2.377	−1.170	4
LOF	0.607	−0.903	0.290	3
MOF	2.533	4.377	2.300	1
HOF	2.637	2.700	2.150	2

2.6　基于熵权法的不同处理枇杷果实品质的综合评价

根据 15 份枇杷果实材料的 14 项品质性状指标建立原始数据矩阵，对各指标进行标准化处理后，依次计算出信息熵值及各指标权重系数，结果见表 7。由表 7 可知，总类胡萝卜素、可溶性固形物、可溶性蛋白和总黄酮含量的权重系数较大，其指标值离散程度大，提供的信息量多；而果形指数、单果质量、可

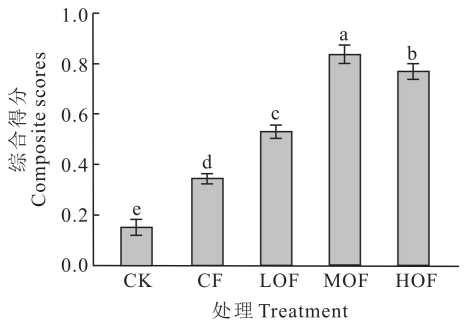
食率和纵径的权重系数较小,指标离散程度小,提供的信息量少。

表 7 不同处理枇杷果实品质指标的信息熵值及权重系数

Table 7 Information entropy and weight coefficient of quality index of loquat fruit under different treatments

指标 Index	信息熵值 Information entropy	权重系数 Weight coefficient	指标 Index	信息熵值 Information entropy	权重系数 Weight coefficient
纵径 Longitudinal diameter	0.956	0.041	可溶性糖 Total sugar	0.933	0.062
横径 Transverse diameter	0.921	0.073	可滴定酸 Titratable acid	0.922	0.072
果形指数 Fruit shape index	0.937	0.058	糖酸比 Sugar-acid ratio	0.916	0.078
单果质量 Single fruit weight	0.947	0.049	维生素 C V_C	0.938	0.058
硬度 Hardness	0.923	0.071	可溶性蛋白 Soluble protein	0.895	0.097
可食率 Edible rate	0.955	0.041	总黄酮 Total flavonoids	0.906	0.087
可溶性固形物 Soluble solids	0.888	0.103	总类胡萝卜素 Total carotenoids	0.879	0.111

将权重系数代入式(7),计算不同处理枇杷果实品质的综合得分,结果见图 2。图 2 显示,不同处理对枇杷品质的改良效果为 MOF(0.837)>HOF(0.771)>LOF(0.535)>CF(0.350)>CK(0.155)。说明基于熵权法的评价结果显示,对枇杷果实品质的提升效果最佳的处理为减氮 60%配施有机肥(MOF)。



图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters on the bar indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$).

图 2 基于熵权法的不同处理枇杷品质的综合评价结果

Fig. 2 Comprehensive valuation results of loquat quality under different treatments based on entropy weight method

3 讨 论

果实外观品质是消费者选择的重要依据。本研究中,与 CK 相比,常规施肥(CF)显著提高了枇杷果实纵径、横径、单果质量和可食率,这与徐红霞等[18]的研究结果一致。与 CF 处理相比,减氮配施有机肥处理(LOF、MOF、HOF)明显提升了枇杷果实的纵径、横径、硬度和单果质量,这是由于化学氮肥易淋溶或硝化反硝化,仅能在短期内维持土壤中氮素的供应[19];而有机肥的吸附和缓释特性能延长化学氮肥的有效性,从而均衡持久地供应养分[20],同时其富含的氨基酸、激素和微生物等活性物质[21]协同促进了枇杷的生长发育。与前人在苹果[4]和猕猴桃[22]上的研究结果相似,进一步验证了减氮配施有机肥在改善果实外观品质方面有积极作用。

果实的内在品质(风味与营养品质)直接影响口感和营养价值。本研究中,与 CK 相比,CF 处理提高了可溶性糖和糖酸比,降低了可滴定酸含量,这与刘国梁等[23]在梨上的研究结果一致。此外,减氮配施有机肥处理明显提高了可溶性固形物、可溶性糖含量和糖酸比,同时降低了可滴定酸含量,并显著增加了可溶性蛋白、总黄酮和总类胡萝卜素含量。这表明减氮配施有机肥不仅改善了枇杷的风味品质,还提升了其营养品质。这与 YANG 等[24]和彭先容等[25]分别在苹果和红心柚上的研究结论一致。这是因为氮肥与有机肥配施后改善了土壤结构[10],促进了养分吸收[26],增强了植物光合作用[27],从而显著提升了果实的内在品质。

果实品质的评价涉及多个指标,用单一指标分析难以全面反映施肥效果。本研究分别采用主成分分析和熵权法进行综合评价,结果表明减氮 60%配施有机肥(MOF)处理对枇杷果实品质的提升效果最佳,这与前人在井冈蜜橘[7]和香蕉[8]的研究结论一致。说明适量的有机肥替代化肥能够平衡养分供应,避免过量氮肥导致的营养生长过旺[28]。土壤氮循环与土壤氮供应和作物氮需求密切相关[29]。减氮 60%配施有机肥(MOF)可通过促进不稳定有机氮的矿化,从而提高土壤有效氮的供应[30]。而减氮 90%配施有机肥(MOF)处理中化学氮肥补充的速效氮不足,加之有机肥中有大量的碳从而导致氮被生物固持[3],未能满足枇杷生长的养分需求。因此,减氮 60%配施有机肥是提升枇杷果实品质的最佳施肥方案。

4 结 论

与 CK 相比,减氮配施有机肥显著改善了枇杷

果实的外观品质、风味品质和营养品质。其中，减氮60%配施商品有机肥（MOF）对果实品质的提升效果最佳，其次是减氮 90%（HOF）和减氮 30%（LOF）。表明适量减氮并配施有机肥不仅可以减少化肥使用，还能显著提升枇杷果实品质。未来研究可进一步探讨不同土壤类型和气候条件下减氮配施有机肥的长期效应，以优化枇杷种植的施肥管理策略。

[参考文献]

[1] KIM S M，KIM T K，KANG M C，et al. Effects of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) leaf extract with or without ascorbic acid on the quality characteristics of semi-dried restructured jerky during storage[J]. Food Science of Animal Resources，2022，42(4)：566-579.

[2] 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.
TAO Y B，YANG J J，ZHANG R L，et al. Effects of substituting with organic fertilizer and nutrients regulation of chemical fertilizer on physical and chemical properties of soil，quality and yield and yield of loquats[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences，2019，60(9)：1540-1541，1543.

[3] HUANG L，CHENG S M，LIU H L，et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on growth and nitrogen fate in banana at seedling stage[J]. Environmental Research，2022，214：113826.

[4] 王文赞，韩建，倪玉雪，等. 有机肥替代化肥氮对苹果产量、品质及温室气体排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2023，29(3)：437-448.
WANG W Z，HAN J，NI Y X，et al. Effects of substituting chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer on apple yield，quality，and greenhouse gas emissions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2023，29(3)：437-448.

[5] 胡国智，闫淼，熊韬，等. 适宜有机肥氮替代化肥氮比例提高甜瓜养分吸收、产量和品质[J]. 植物营养与肥料学报，2022，28(2)：260-268.
HU G Z，YAN M，XIONG T，et al. Optimum chemical fertilizer N substitution with organic manure N improves nutrient uptake，yield，and quality of muskmelon in Xinjiang[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2022，28(2)：260-268.

[6] MUHAMMED M，QAYYUM M F，ALOTAIBI F，et al. Organic nitrogen fertilization minimizes requirement of inorganic fertilizers and improves growth and yield attributes of superior grapevines[J]. Journal of Plant Nutrition，2023，46(17)：4171-4187.

[7] 陈凯威，张仕彬，徐凯，等. 不同有机肥替代化肥比对井冈蜜橘品质和土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料，2023(12)：97-106.
CHEN K W，ZHANG S B，XU K，et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on the quality of Jinggang tangerine and soil nutrient and enzyme activities[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2023(12)：97-106.

[8] 李跃森，吴水金，张帅，等. 有机肥氮投入比例对香蕉生长及主要品质影响[J]. 土壤，2022，54(2)：247-254.
LI Y S，WU S J，ZHANG S，et al. Effects of ratio of organic fertilizer nitrogen input on banana growth and main quality[J]. Soils，2022，54(2)：247-254.

[9] WU M，ZHAO P T，LIU L Z，et al. The organic manure-improved yield and quality in strawberries is attributed to metabolic reprogramming to increase amino acids，sugar/acid ratio，flavonoids and phenolic volatiles[J]. Plant and Soil，2024，504(1-2)：679-697.

[10] WEI Z B，HOFFLAND E，ZHUANG M H，et al. Organic inputs to reduce nitrogen export via leaching and runoff：a global meta-analysis[J]. Environmental Pollution，2021，291：118176.

[11] 李栋，邓丹丹，张丽君，等. 有机替代比例对奉节脐橙产量、品质及环境代价的影响[J]. 中国土壤与肥料，2024(4)：53-63.
LI D，DENG D D，ZHANG L J，et al. Effect of organic substitution ratio on yield，quality and environmental cost of Fengjie navel orange[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2024(4)：53-63.

[12] 张荣超，辛杰，郭庆梅. 施肥对瓜蒌品质影响的研究[J]. 四川农业大学学报，2016，34(3)：328-335.
ZHANG R C，XIN J，GUO Q M. Effect of different fertilizer regimes on quality of *Fructus trichosanthis*[J]. Journal of Sichuan Agricultural University，2016，34(3)：328-335.

[13] 陈烨锜，庞柳，陈小央，等. 基于不同方法综合评价浙北平原地区 101 份鲜食葡萄果实品质[J]. 果树学报，2024，41(12)：2377-2388.
CHEN Y Q，PANG L，CHEN X Y，et al. Comprehensive evaluation of 101 table grape cultivars qualities in northern Zhejiang plain based on different methods[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(12)：2377-2388.

[14] 程文强，徐阳，吴开云，等. 3 种综合评价方法在柿果品质评价中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2023，47(4)：61-72.
CHENG W Q，XU Y，WU K Y，et al. Comparison of three comprehensive evaluation methods to evaluate the quality of persimmon fruit[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)，2023，47(4)：61-72.

[15] QIN Y D，GONG A，LIU X G，et al. Testing a simulation model for the response of tomato fruit quality formation to temperature and light in solar greenhouses[J]. Plants，2024，13(12)：1662.

[16] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都：四川科学技术出版社，2003.
XIONG Q E. Plant physiology[M]. Chengdu：Sichuan Scientific & Technical Publishers，2003.

[17] 曹建康，姜微波，赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北

京:中国轻工业出版社,2007.
CAO J K,JIANG W B,ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing:China Light Industry Press,2007.

[18] 徐红霞,姜路花,李晓颖,等. 不同秋季施肥处理对枇杷开花、坐果和果实品质的影响[J]. 浙江农业科学,2023,64(3):620-623.
XU H X,JIANG L H,LI X Y,et al. Effects of different fertilization treatments on flowering,fruit setting and fruit quality of loquat in autumn[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2023,64(3):620-623.

[19] 张志浩,黄禹铭,白雨欣,等. 氮肥和秸秆还田对夏玉米土壤氧化亚氮排放及活性氮组分的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(1):33-44.
ZHANG Z H,HUANG Y M,BAI Y X,et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw return on nitrous oxide emission and soil reactive nitrogen fractions in summer maize field[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2025,53(1):33-44.

[20] 娄菲,左怿平,李萌,等. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响[J]. 作物学报,2024,50(4):1053-1064.
LOU F,ZUO Y P,LI M,et al. Effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen on yield,quality,and nitrogen efficiency of waxy maize[J]. Acta Agronomica Sinica,2024,50(4):1053-1064.

[21] 万连杰,何满,田洋,等. 有机肥替代化肥比例对椪柑生长发育、产量和土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(4):675-687.
WAN L J,HE M,TIAN Y,et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on *Ponkan* growth and yield and soil biological properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2022,28(4):675-687.

[22] RAIESI T,ALI SHIRI M,MOUSAVI S M. The fruit quality and nutrient content of kiwifruit produced by organic versus chemical fertilizers[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2024,104(11):6821-6830.

[23] 刘国梁,李素艳,孙向阳,等. 有机无机肥配施对梨园土壤肥力及果实品质的影响[J]. 土壤通报,2022,53(1):181-186.
LIU G L,LI S Y,SUN X Y,et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and fruit quality of pear orchard[J]. Chinese Journal of Soil Science,2022,53(1):181-186.

[24] YANG A,YANG L,CHENG C G,et al. Effect of different ratios of cow manure and chemical fertilizers on fruit quality of gala apples[J]. Agronomy-Basel,2022,12(11):2735.

[25] 彭先容,王帅,曾卓华,等. 有机肥替代化肥比例对红心柚产量和品质及土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(11):110-119.
PENG X R,WANG S,ZENG Z H,Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on the yield and fruits qualities of red pomelo and soil properties[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2023(11):110-119.

[26] JIANG Y L,ZHANG J,MANUEL D B,et al. Rotation cropping and organic fertilizer jointly promote soil health and crop production[J]. Journal of Environmental Management,2022,315:115190.

[27] 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[J]. 土壤,2021,53(6):1174-1184.
AN X R,JIANG S T,LI H L,et al. Effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application on growth,yield,quality and fertilizer utilization rate in litchi[J]. Soils,2021,53(6):1174-1184.

[28] 孙琛梅,程冬冬,杨越超,等. 土壤肥力质量与苹果生长、产量及品质关系的研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2022(2):207-215.
SUN C M,CHENG D D,YANG Y C,et al. Research progress of the relationship between soil fertility quality and the growth,yield and quality of apple[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2022(2):207-215.

[29] ANDERSEN M K,JENSEN L S. Low soil temperature effects on short-term gross N mineralisation-immobilisation turnover after incorporation of a green manure[J]. Soil Biology and Biochemistry,2001,33(4):511-521.

[30] HOU H Q,LIU X M,ZHOU W J,et al. N transformation mechanisms and N dynamics of organic fertilisers as partial substitutes for chemical fertilisers in paddy soils[J]. Journal of Soils and Sediments,2022,22(9):2516-2529.

(责任编辑:李小平)