网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.05.004

氨基酸水溶肥对枇杷果实品质的影响

罗娅,彭雪梅,王晓莉,孔小梅,罗弦,林立金,张慧芬,邓群仙
(四川农业大学 园艺学院,四川 成都 611130)

[摘 要] 【目的】通过主成分分析法和熵权法,综合评价氨基酸水溶肥对枇杷果实品质的提升效果,为枇杷优质高效栽培提供参考。【方法】以3年生'大五星'枇杷为材料,以叶面喷施清水为对照(CK),研究叶面喷施250,350,450和550倍氨基酸水溶肥稀释液(依次记为A250、A350、A450和A550)对枇杷果实外观品质、风味品质和营养品质的影响。【结果】与CK相比,叶面喷施氨基酸水溶肥能显著提高枇杷果实的单果质量、纵径、横径和果形指数,其中250~550倍氨基酸水溶肥稀释液使枇杷果实的单果质量、横径和纵径分别较CK显著提高了3.83%~12.40%,16.28%~21.11%和21.39%~24.67%。与CK相比,不同稀释倍数氨基酸水溶肥对枇杷果实色差均无显著影响。与CK相比,叶面喷施氨基酸水溶肥提高了枇杷果实可溶性糖、维生素C、类胡萝卜素、总酚和总黄酮含量,其中250~550倍氨基酸水溶肥稀释液处理下,枇杷果实的可溶性糖、总酚和总黄酮含量分别较CK显著增加了40.72%~69.23%,21.33%~44.02%和27.86%~47.50%;350~450倍氨基酸水溶肥稀释液处理下,枇杷果实的维生素C和类胡萝卜素含量分别较CK显著增加29.62%~53.84%和13.96%~21.42%。利用主成分分析和熵权法综合评价氨基酸水溶肥对枇杷果实品质的提升效果,二者评价结果一致,均为A350>A450>A250>A550>CK。表明叶面喷施350倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果最好。【结论】氨基酸水溶肥能明显提高枇杷果实的外观品质,改善其风味品质,并增加其营养物质含量,且以350倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果最好。

[关键词] 枇杷栽培;氨基酸水溶肥;果实品质;主成分分析法;熵权法
[中图分类号] S667.3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0032-10

Effects of amino acid water-soluble fertilizer on loquat fruit quality

LUO Ya, PENG Xuemei, WANG Xiaoli, KONG Xiaomei, LUO Xian,
LIN Lijin, ZHANG Huifen, DENG Qunxian
(*College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*)

Abstract: 【Objective】 Based on principal component analysis (PCA) and the entropy weight method, this study comprehensively evaluated the impact of amino acid water-soluble fertilizer on the loquat fruit quality, to provide a reference for the efficient cultivation of high-quality loquat. 【Method】 Using 3-year-old 'Dawuxing' loquat as the experimental material and foliar spraying with distilled water as the control (CK), this research investigated the effects of foliar spraying of diluted amino acid water soluble fertilizers (250, 350, 450, 550 times diluted, recorded as A250, A350, A450 and A550 in that order) on the appearance quality, flavor quality and nutritional quality of loquat fruit. 【Result】 Compared with CK, foliar spraying of amino acid water-soluble fertilizer could increase fruit weight, horizontal diameter, vertical diameter and fruit shape index. Compared with CK, the app-

[收稿日期] 2025-03-28 [修回日期] 2025-05-25
[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)
[作者简介] 罗娅(1998—),女,贵州息烽人,在读硕士,主要从事园艺植物栽培与逆境生理研究。E-mail:1525416235@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与逆境生理研究。E-mail:luoxian@sicau.edu.cn

lication of 250－550 times diluted amino acid water-soluble fertilizer increased the fruit weight by 3.83%－12.40%, the horizontal diameter by 16.28%－21.11%, and the vertical diameter by 21.39%－24.67%. Compared with CK, amino acid water-soluble fertilizer at different dilution ratios had no significant effect on the color difference of loquat fruits. Compared with CK, the contents of soluble sugar, vitamin C, carotenoid, total phenol and total flavone in loquat fruits were increased after foliar spraying of amino acid water-soluble fertilizer. The contents of soluble sugar, total phenol and total flavone in loquat fruits were increased significantly by 40.72%－69.23%, 21.33%－44.02% and 27.86%－47.50%, respectively, after treatment with 250－550 times diluted amino acid water-soluble fertilizer. Vitamin C and carotenoids in loquat fruits were significantly increased by 29.62%－53.84% and 13.96%－21.42% with 350－450 times diluted amino acid water-soluble fertilizer. PCA and entropy weight method were used to comprehensively evaluate the effect of amino acid water-soluble fertilizer on the loquat fruits quality, and the same result was obtained: A350＞A450＞A250＞A550＞CK, indicating that foliar spra-ying of 350 times diluted amino acid water-soluble fertilizer had the best effect on the improvement of loquat fruit quality.【Conclusion】Amino acid water soluble fertilizer can improve the appearance quality, flavor quality and nutrient content of loquat fruit, and 350 times diluted amino acid water-soluble fertilizer had the best effect on the improvement of loquat fruit quality.

Key words: loquat cultivation; amino acid water-soluble fertilizer; fruit quality; principal component analysis; entropy weight method

枇杷（*Eriobotrya japonica*（Thunb.）Lindl.）为蔷薇科（Rosaceae）枇杷属（*Eriobotrya*）亚热带常绿果树，其果实富含糖类、维生素、铁和锌等营养成分[1-2]，且具有清咽润肺、止咳化痰等功效[3]，深受消费者喜爱。然而，近年来由于劳动力紧张，枇杷多以粗放管理为主，普遍存在重氮磷钾化肥、轻有机肥和中微量元素肥料等问题，导致果实中维生素C、可溶性糖和可溶性固形物含量等下降[2,4-5]，从而使枇杷果实品质降低。因此，如何有效改善枇杷综合品质是当前亟待解决的问题。

氨基酸水溶肥是指以游离氨基酸为主，添加适量中微量元素制成的液体或固体水溶性肥[6]。该肥料易被作物吸收利用，增强植株生理生化功能，加速干物质形成与积累，进而促进产量和品质提升[6]。研究发现，氨基酸水溶肥显著提高了杂柑[7]、西瓜[8]的单果质量、果实横径和纵径等外观品质，同时增加了草莓[9]、葡萄[10]的可溶性糖和可溶性固形物含量等风味品质。研究还发现，氨基酸水溶肥显著提升了辣椒[11]和杨梅[12]的维生素C和类胡萝卜素含量。上述研究为氨基酸水溶肥改良果实品质提供了重要依据。近年来，学者采用不同方法对果实品质进行了分析与评价。如ZHANG等[13]采用主成分分析法（PCA）对蓝莓果实的单果质量、总酚及可溶性固形物含量等进行综合评价，确定了最佳的氮磷钾施肥组合。邓箴等[14]基于熵权法对枸杞果实粒度、百粒质量、干果产量及总糖含量等进行综合评价，筛选出最优水肥配施方案。然而，不同的评价理论、数据标准化及权重赋值方法，往往会造成评价结果的差异[15]。比如，主成分分析虽然通过中心标准化消除了量纲和数量级的干扰，但同时也弱化了原始数据的差异性信息，导致各标准化指标的权重趋于均衡[16]；熵权法虽能规避主观偏差，却难以识别分布均匀但关联显著的关键指标，可能导致评估结果出现系统性偏差[16]。因此，综合运用多维度评价方法才能更科学系统地评估果实的综合品质。

本试验以3年生‘大五星’枇杷为研究对象，以叶面喷施清水为对照（CK），设置叶面喷施不同稀释倍数氨基酸水溶肥处理，通过田间肥效试验研究不同处理枇杷果实外观、风味和营养品质的变化；并采用主成分分析法和熵权法综合评价不同稀释倍数氨基酸水溶肥对枇杷果实品质的影响，以期筛选改善枇杷果实品质的适宜氨基酸水溶肥浓度，为枇杷优质高效栽培提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

氨基酸水溶肥，购自四川爱隆植物营养科技有限公司，剂型为水剂，复合氨基酸含量≥100 g/L，Zn含量≥10 g/L，Fe含量≥4 g/L，Mn含量≥4 g/L，Cu含量≥2 g/L。供试枇杷为3年生‘大五星’枇杷（砧木和接穗均为‘大五星’枇杷），株行距2.5 m×5 m。

试验在四川省成都市崇州桤泉镇四川农业大学现代农业研发基地(30°56′ N,103°65′ E)进行,属亚热带湿润季风气候,平均海拔688 m,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。土壤为潮土,pH 6.78,有机质含量12.91 g/kg,碱解氮含量77.65 mg/kg,有效磷含量20.48 mg/kg,速效钾含量62.16 mg/kg。

1.2 试验设计

2022年3月中旬(枇杷果实进入细胞迅速分裂期),在果园选取长势一致的15株枇杷树,每株选择果实发育时期相同的10个果穗挂牌标记。参考徐雅欣等[17]的方法,选择在晴天上午分别喷施清水(CK)和不同稀释倍数(250,350,450,550倍)的氨基酸水溶肥,分别记为A250、A350、A450和A550,每次喷施量为8 L/棵。20 d后(枇杷果实进入迅速膨大期)第2次喷施,待果面干燥后进行套袋。每处理重复3次,1株为1个重复。除氨基酸水溶肥水平差异外,枇杷周年管理中其他施肥方式、施肥量及果园管理措施(包括修剪、花果管理等)均保持一致。待枇杷果实成熟时选择树体东、南、西和北4个方向,各采集15个果实,置于冰盒中带回实验室用于果实品质测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 外观品质 采用千分之一电子天平测定单果质量,采用数显游标卡尺测定果实纵径和横径,并计算果形指数;采用CYHD-1型硬度计测定果实硬度;采用便携式色差仪测定枇杷果实的红色饱和度(a^*)、黄色饱和度(b^*)和明亮度(L^*)。

果形指数=果实纵径/果实横径。

1.3.2 风味品质 采用手持折光仪测定可溶性固形物含量,采用蒽酮比色法[18]测定可溶性糖含量,采用氢氧化钠滴定法[19]测定可滴定酸含量,并计算固酸比[20]。

固酸比=可溶性固形物含量/可滴定酸含量。

1.3.3 营养品质 采用2,6-二氯靛酚滴定法[19]测定维生素C含量,采用紫外分光光度法[21]测定类胡萝卜素含量,采用Folin-Ciocalteu法[22]测定总酚含量,采用亚硝酸钠-硝酸铝显色法[23]测定总黄酮含量。

1.4 数据处理与分析

使用Excel进行试验数据整理和熵权计算,采用SPSS 26.0软件进行方差分析(Duncan's新复极差法进行多重比较)、主成分分析和相关性分析,利用Origin 2024软件绘图。

1.4.1 主成分分析 选取16个枇杷果实品质性状指标进行主成分分析,按照特征值大于1.0的原则确定主成分个数,构建主成分与枇杷果实品质之间的线性关系式:

$$Y_n=c_1X_1+c_2X_2+\cdots+c_{16}X_{16}。\tag{1}$$

式中:Y_n为第n个主成分得分,c_1~c_{16}依次代表单果质量、横径、纵径、果形指数、硬度、L^*、a^*、b^*、可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、固酸比、维生素C含量、类胡萝卜素含量、总酚和总黄酮含量等指标在主成分上的特征向量,X_1~X_{16}依次代表单果质量、横径、纵径、果形指数、硬度、L^*、a^*、b^*、可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、固酸比、维生素C含量、类胡萝卜素含量、总酚和总黄酮含量等指标通过分析软件标准化后的值。

综合得分为:

$$Y=\lambda_1Y_1+\lambda_2Y_2+\cdots+\lambda_nY_n。\tag{2}$$

式中:λ_1~λ_n代表第1到第n个主成分对应的方差贡献率[24]。

1.4.2 熵权法 通过隶属函数与因子分析对不同处理下的枇杷果实品质进行综合评价,熵权法确定权重,计算不同处理枇杷果实品质的综合得分[25]。

正向指标:$Y_{ij}=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min})$;(3)

负向指标:$Y_{ij}=(X_{j\max}-X_{ij})/(X_{j\max}-X_{j\min})$;(4)

$$P_{ij}=Y_{ij}/\sum_{i=1}^{n}Y_{ij};\tag{5}$$

$$E_j=-\ln n^{-1}\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ \ln P_{ij};\tag{6}$$

$$G_j=1-E_j;\tag{7}$$

$$W_j=G_j/\sum_{j=1}^{n}G_j;\tag{8}$$

$$Z_i=\sum_{j=1}^{m}W_j\times P_{ij}。\tag{9}$$

式中:i(i=1,2,…,n)为不同处理,j(j=1,2,…,m)为不同枇杷品质指标,X_{ij}为第i处理第j枇杷品质指标数值,Y_{ij}为第i处理下隶属函数值,$X_{j\max}$为j指标的最大值,$X_{j\min}$为j指标的最小值,P_{ij}为第i处理第j指标的比重,E_j为信息熵,G_j为冗余度,W_j为指标权重,Z_i为各处理综合得分。

2 结果与分析

2.1 氨基酸水溶肥对枇杷果实外观品质的影响

由表1可知,与CK相比,叶面喷施氨基酸水溶肥显著提高了枇杷果实的单果质量、横径、纵径和

果形指数，且随着氨基酸水溶肥稀释倍数的增大，枇杷果实的单果质量、横径、纵径和果形指数均呈先增加后降低趋势。其中250～550倍氨基酸水溶肥稀释液使枇杷果实的单果质量、横径和纵径分别较CK显著提高了3.83%～12.40%，16.28%～21.11%和21.39%～24.67%；果形指数仅在氨基酸水溶肥450倍稀释液较对照显著增加了5.53%。与CK相比，250，350和550倍氨基酸水溶肥处理均显著降低了枇杷果实的硬度，降低幅度为12.70%～26.09%。

表1　氨基酸水溶肥对枇杷外观品质的影响

Table 1　Effects of amino acid water-soluble fertilizer on the appearance quality of loquat

处理 Treatment	单果质量/g Weight per fruit	横径/mm Horizontal diameter	纵径/mm Vertical diameter	果形指数 Fruit shape index	硬度/(kg·cm^{-2}) Hardness
CK	36.69±0.26 c	34.58±0.74 d	33.76±0.57 b	0.977±0.009 b	11.65±1.22 a
A250	39.55±1.57 ab	41.32±0.49 ab	40.99±1.53 a	0.992±0.027 b	9.01±0.53 cd
A350	41.24±0.94 a	41.88±0.78 a	42.09±0.35 a	1.005±0.015 ab	10.17±0.45 bc
A450	40.03±0.93 ab	40.21±0.30 c	41.48±0.81 a	1.032±0.026 a	10.85±0.30 ab
A550	38.10±1.21 bc	40.75±0.30 bc	40.98±0.61 a	1.006±0.013 ab	8.61±0.60 d

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

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

2.2　氨基酸水溶肥对枇杷果实色差的影响

由表2可知，氨基酸水溶肥对枇杷果实红色饱和度（a^*）的影响与CK差异不显著；随着氨基酸水溶肥稀释倍数的增大，枇杷果实明亮度（L^*）和黄色饱和度（b^*）均呈先降低后增大趋势，但均与CK差显不著异。表明氨基酸水溶肥对枇杷果实色差影响不大。

表2　氨基酸水溶肥对枇杷果实色差的影响

Table 2　Effects of amino acid water-soluble fertilizer on loquat fruit color difference

处理 Treatment	L^*	a^*	b^*
CK	62.32±1.01 ab	24.86±0.45 a	45.51±1.06 ab
A250	61.49±0.67 ab	25.65±0.76 a	44.49±0.61 ab
A350	61.33±1.03 b	25.06±0.29 a	43.98±1.15 b
A450	62.78±0.72 ab	25.27±0.69 a	46.23±1.67 a
A550	63.41±1.50 a	25.45±0.15 a	44.10±0.72 ab

2.3　氨基酸水溶肥对枇杷果实风味品质的影响

由表3可知，叶面喷施250～550倍氨基酸水溶肥稀释液后，枇杷果实的可溶性固形物、可溶性糖含量和固酸比均呈先增加后降低趋势。与CK相比，在350倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的可溶性固形物含量显著提高了10.84%；在250～550倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的可溶性糖含量显著提高了40.72%～69.23%，且在450倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的可溶性糖含量达到最大，为11.36%；在350～450倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的固酸比显著提高了18.76%～32.48%；在350倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的可滴定酸含量显著降低了18.18%。

表3　氨基酸水溶肥对枇杷果实风味品质的影响

Table 3　Effects of amino acid water-soluble fertilizer on the flavor quality of loquat fruit

处理 Treatment	可溶性固形物含量/% Soluble soild content	可溶性糖含量/% Soluble sugar content	可滴定酸含量/% Titratable acid	固酸比 Solid-acid ratio
CK	11.62±0.23 b	6.71±0.36 c	0.55±0.05 b	21.37±2.08 c
A250	11.78±0.53 b	10.65±0.91 ab	0.51±0.02 bc	23.07±0.68 bc
A350	12.88±0.72 a	11.06±1.23 ab	0.46±0.01 d	28.31±1.18 a
A450	12.30±0.38 ab	11.36±0.81 a	0.49±0.03 cd	25.38±2.40 b
A550	11.69±0.48 b	9.44±1.05 ab	0.65±0.01 a	18.06±0.65 d

2.4　氨基酸水溶肥对枇杷果实营养品质的影响

由表4可知，随着氨基酸水溶肥稀释倍数的增大，枇杷果实的维生素C、类胡萝卜素、总酚和总黄酮含量均呈先增加后降低趋势，且均在350倍氨基酸水溶肥稀释液处理下达到最高，分别为33.86 mg/kg和24.26，10.60和56.14 μg/g。其中在350～450倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的维生素C和类胡萝卜素含量分别较CK显著提高了29.62%～53.84%和13.96%～21.42%；在250～550倍氨基酸水溶肥稀释液处理下，枇杷果实的总酚和总黄酮含量分别较CK显著提高了21.33%～44.02%和27.86%～47.50%。

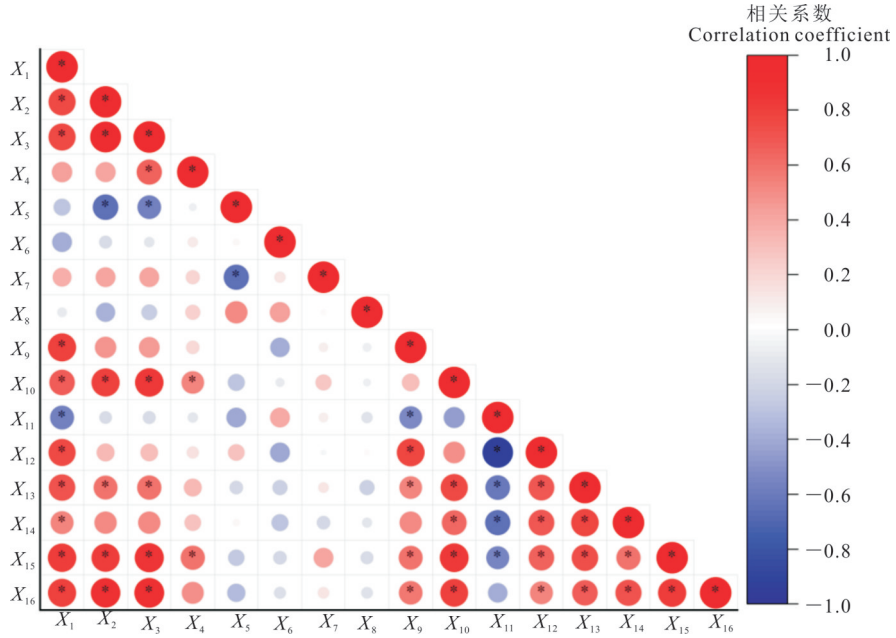
表 4 氨基酸水溶肥对枇杷果实营养品质的影响

Table 4 Effects of amino acid water-soluble fertilizer on the nutritional quality of loquat fruit

处理 Treatment	维生素 C 含量/(mg·kg^{-1}) Vitamin C content	类胡萝卜素含量/(μg·g^{-1}) Carotenoid content	总酚含量/(μg·g^{-1}) Total phenols content	总黄酮含量/(μg·g^{-1}) Total flavonoids content
CK	22.01±4.32 c	19.98±1.34 c	7.36±0.18 c	38.06±1.93 c
A250	26.74±1.90 bc	21.86±1.84 abc	9.50±0.90 ab	49.79±2.02 b
A350	33.86±4.40 a	24.26±1.03 a	10.60±0.30 a	56.14±2.56 a
A450	28.53±1.63 ab	22.77±1.51 ab	10.00±0.57 ab	52.59±0.98 ab
A550	24.94±1.18 bc	20.31±0.82 bc	8.93±0.86 b	48.67±2.99 b

2.5 氨基酸水溶肥对枇杷果实品质影响的综合评价

2.5.1 相关性分析 由图 1 可知,枇杷果实外观品质单果质量、横径、纵径与风味品质可溶性糖、可溶性固形物含量以及营养品质维生素 C、总酚和总黄酮含量呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)正相关,与可滴定酸含量呈极显著负相关关系($P<0.01$);枇杷果实风味品质可溶性固形物、可溶性糖含量和固酸比均与维生素 C、总酚和总黄酮含量呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)正相关;营养品质维生素 C、总酚和总黄酮含量与单果质量、横径、纵径、可溶性糖含量、固酸比呈极显著($P<0.01$)或显著($P<0.05$)正相关。综上可知,枇杷果实各品质指标在某种程度上存在着信息重叠现象,需进一步采用主成分分析进行分类和简化,以提高枇杷果实综合品质评价的效率和准确性。



X_1~X_{16}依次代表单果质量、横径、纵径、果形指数、硬度、L^*、a^*、b^*、可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、固酸比、维生素 C 含量、类胡萝卜素含量、总酚和总黄酮含量。*、**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关。

X_1−X_{16} respectively represent weight per fruit, horizontal diameter, vertical diameter, fruit shape index, hardness, L^*, a^*, b^*, soluble solid content, soluble sugar content, titratable acid content, solid-acid ratio, vitamin C content, carotenoids content, total phenols and total flavonoids content. *, ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

图 1 枇杷果实品质指标的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of loquat fruit quality indexes

2.5.2 主成分分析 由表 5 可知,对 16 个枇杷果实品质指标进行主成分分析,根据累计方差贡献率不低于 80% 的原则,第一主成分(PC1)、第二主成分(PC2)、第三主成分(PC3)和第四主成分(PC4)的方差贡献率分别为 49.504%,18.263%,10.882% 和 6.854%,累计方差贡献率为 85.503%,说明这 4 个主成分基本涵盖了 16 个指标 85.503% 的信息。载荷矩阵可以显示枇杷各品质指标在每个主成分上的权重,其绝对值越大,表示该指标与主成分的相关性越大。PC1 主要提取了纵径、横径、可溶性糖含量、维生素 C 含量、类胡萝卜素含量、总酚含量和总黄酮含量,主要代表果实营养品质;PC2 主要提取

了单果质量、可滴定酸含量和固酸比，主要反映果实酸甜风味；PC3主要提取了硬度和a^*，主要反映果实外观；PC4主要提取了L^*和b^*，主要反映果实色泽。

表5　枇杷品质的主成分载荷矩阵和特征向量

Table 5　Principal component loading matrix and eigenvector of loquat quality indexes

指标 Index	主成分载荷矩阵 Principal component load matrix				主成分特征向量 Principal component eigenvector			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
单果质量 Weight per fruit(X_1)	0.588	0.680	0.346	−0.088	0.209	0.398	0.262	−0.084
横径 Horizontal diameter(X_2)	0.848	0.145	0.331	−0.317	0.301	0.085	0.251	−0.303
纵径 Vertical diameter(X_3)	0.918	0.119	0.307	−0.135	0.326	0.070	0.233	−0.129
果形指数 Fruit shape index(X_4)	0.692	−0.011	0.090	0.432	0.246	−0.006	0.068	0.412
硬度 Hardness(X_5)	−0.396	0.309	−0.657	0.505	−0.141	0.181	−0.498	0.482
L^*(X_6)	0.071	−0.556	0.050	0.602	0.025	−0.325	0.038	0.575
a^*(X_7)	0.191	0.010	0.919	0.097	0.068	0.006	0.696	0.093
b^*(X_8)	−0.146	0.072	−0.014	0.917	−0.052	0.042	−0.011	0.876
可溶性固形物含量 Soluble soild content(X_9)	0.269	0.790	0.167	−0.100	0.096	0.462	0.127	−0.095
可溶性糖含量 Soluble sugar content(X_{10})	0.879	0.246	0.049	0.028	0.312	0.144	0.037	0.027
可滴定酸含量 Titratable acid content(X_{11})	−0.201	−0.873	0.250	−0.132	−0.071	−0.511	0.189	−0.126
固酸比 Solid-acid ratio(X_{12})	0.285	0.936	−0.125	0.052	0.101	0.548	−0.095	0.050
维生素C含量 Vitamin C content(X_{13})	0.666	0.513	−0.086	−0.159	0.237	0.300	−0.065	−0.152
类胡萝卜素含量 Carotenoid content(X_{14})	0.635	0.497	−0.413	−0.117	0.226	0.291	−0.313	−0.112
总酚含量 Total phenols content(X_{15})	0.789	0.470	0.236	0.001	0.280	0.275	0.179	0.001
总黄酮含量 Total flavonoids content(X_{16})	0.871	0.321	0.047	−0.100	0.309	0.188	0.036	−0.095
特征值 Eigenvalue	7.921	2.922	1.741	1.097				
方差贡献率/% Variance contribution rate	49.504	18.263	10.882	6.854				
累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	49.504	67.767	78.649	85.503				

根据特征向量，构建PC1、PC2、PC3和PC4得分与枇杷果实品质之间的线性关系式。

$$Y_1=0.209X_1+0.301X_2+0.326X_3+0.246X_4-0.141X_5+0.025X_6+0.068X_7-0.052X_8+0.096X_9+0.312X_{10}-0.071X_{11}+0.101X_{12}+0.237X_{13}+0.226X_{14}+0.280X_{15}+0.309X_{16};\quad(10)$$

$$Y_2=0.398X_1+0.085X_2+0.070X_3-0.006X_4+0.181X_5-0.325X_6+0.006X_7+0.042X_8+0.462X_9+0.144X_{10}-0.511X_{11}+0.548X_{12}+0.300X_{13}+0.291X_{14}+0.275X_{15}+0.188X_{16};\quad(11)$$

$$Y_3=0.262X_1+0.251X_2+0.233X_3+0.068X_4-0.498X_5+0.038X_6+0.696X_7-0.011X_8+0.127X_9+0.038X_{10}+0.189X_{11}-0.095X_{12}-0.065X_{13}-0.313X_{14}+0.179X_{15}+0.036X_{16};\quad(12)$$

$$Y_4=-0.084X_1-0.303X_2-0.129X_3+0.412X_4+0.482X_5+0.575X_6+0.093X_7+0.876X_8-0.095X_9+0.027X_{10}-0.126X_{11}+0.050X_{12}-0.153X_{13}-0.112X_{14}+0.001X_{15}-0.095X_{16};\quad(13)$$

$$Y=0.495Y_1+0.183Y_2+0.109Y_3+0.069Y_4。\quad(14)$$

式中：Y_1、Y_2、Y_3和Y_4分别代表PC1、PC2、PC3和PC4的得分；X_1～X_{16}分别代表单果质量、横径、纵径、果形指数、硬度、L^*、a^*、b^*、可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、固酸比、维生素C含量、类胡萝卜素含量、总酚含量和总黄酮含量等指标通过分析软件标准化后的值。

将不同稀释倍数氨基酸水溶肥处理的枇杷果实X_1～X_{16}测定值进行标准化处理后，再代入上式计算PC1、PC2、PC3和PC4的得分，然后结合每个主成分的方差贡献率，利用式(14)计算不同稀释倍数氨基酸水溶肥处理枇杷果实品质的综合得分，结果见表6。由表6可知，不同稀释倍数氨基酸水溶肥对

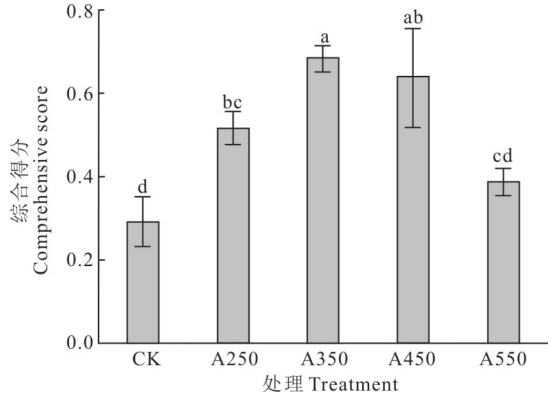
枇杷果实品质的改良效果为:A350(1.817)>A450(1.080)>A250(0.353)>A550(−0.613)>CK(−2.633)。说明350倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果最好。

表6 不同处理枇杷果实品质的主成分得分

Table 6 Principal component scores of loquat quality under different treatments

处理 Treatment	主成分得分 Principal component scores				综合得分 Comprehensive scores	排序 Sequence
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4		
CK	−3.990	−2.840	−2.470	1.863	−2.633	5
A250	0.560	0.240	1.110	−1.270	0.353	3
A350	2.453	3.993	−0.053	−1.763	1.817	1
A450	1.353	1.623	−0.043	1.743	1.080	2
A550	−0.377	−3.013	1.453	−0.573	−0.613	4

2.5.3 *熵权法分析* 依据熵权法,将枇杷果实的16个品质指标数据进行标准化处理,依次计算其信息熵值及权重系数。再将权重系数代入式(7)计算枇杷果实品质的综合得分,结果如图2所示。由图2可知,不同稀释倍数氨基酸水溶肥处理对枇杷果实品质改良效果为:A350(0.686)>A450(0.641)>A250(0.517)>A550(0.388)>CK(0.292)。说明350倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果最好。



图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters on the bars indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

图2 基于熵权法不同稀释倍数氨基酸水溶肥处理枇杷果实品质的综合得分

Fig. 2 Comprehensive scores of loquat fruit quality under the treatment of amino acid water-soluble fertilizer at different dilution ratios based on entropy weight method

3 讨 论

外观是衡量果实品质及产量的重要指标,也是影响消费者购买意愿的关键因素[26]。本研究中,与CK相比,250~550倍氨基酸水溶肥处理下枇杷果实的单果质量、横径、纵径和果形指数均有所提高,这与前人在杂柑[7]和桃[27]上的研究结果相似。表明氨基酸水溶肥可提高枇杷的单果质量,改善果实外观品质。这是由于氨基酸水溶肥中的$-NH_2$、-OH、-COOH与Cu、Fe、Zn、Mn等形成螯合物,提高了微量元素进入植物细胞膜的亲合力和利用率,进而促进了植物对微量元素的吸收,有效提高了植物的光合作用[28],促进了同化产物向果实转运与分配,最终导致枇杷果实单果质量、纵径和横径增加。但随着氨基酸水溶肥稀释倍数的增大,枇杷果实生长呈先增加后降低趋势,这与李磊等[29]在辣椒上的研究结果一致。其原因可能是当氨基酸水溶肥稀释倍数越小时,肥料中含有的营养物质浓度过高,从而抑制植株及果实生长;而当氨基酸水溶肥稀释倍数越大时,其营养物质浓度越小,导致肥料中的营养元素供应不足,对植物生长的促进作用较小[30]。

果实的内在品质包括风味品质和营养品质两个方面,是衡量果实风味特征和营养价值的关键指标[31]。本研究中,与CK相比,250~450倍氨基酸水溶肥处理均显著提高了枇杷果实的可溶性固形物、可溶性糖、维生素C、类胡萝卜素、总酚和总黄酮含量,但350倍氨基酸水溶肥稀释液处理显著降低了枇杷果实的可滴定酸含量,这与前人在葡萄[10]和甜樱桃[32]上的研究相似。一方面,氨基酸水溶肥提供的氮源以及Fe、Mn等元素可以促进叶绿素合成,增加光合作用,促进光合产物积累,从而提高可溶性糖等物质含量[29,33];另一方面,氨基酸水溶肥可通过上调*L*-半乳糖-1,4-内酯脱氢酶(GLDH)相关基因和下调抗坏血酸过氧化物酶(APX)相关基因来改善维生素C含量,以及通过抑制异柠檬酸裂解酶(ICL)和苹果酸合酶(MS)基因的表达来减少果实中的有机酸积累[9]。此外,氨基酸水溶肥中Cu、Zn可以调控次生代谢产物酚类及黄酮类物质的生物合成[34]。但随着氨基酸水溶肥稀释倍数的逐渐增大,枇杷果实的风味品质及营养品质呈现先升高后下降趋势,这与前人在猕猴桃[35]和蓝莓[36]上的研究

结果相似。其原因可能是当稀释倍数较小时，氨基酸水溶肥中含有的Cu、Fe、Zn、Mn浓度超过了植物的适宜范围，从而对果树造成毒害，导致果实品质下降[37]；而当稀释倍数过大时，氨基酸水溶肥中上述微量元素浓度过低，对果树的影响也相应地减小。

果实品质指标组成复杂，难以通过单一方法进行全面、客观地评价。本研究采用主成分分析和熵权法进行综合评价，两种方法的评价结果一致，均以350倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果最优，其次是450倍和250倍氨基酸水溶肥稀释液，而550倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果较差。这与氨基酸水溶肥在辣椒[29]和葡萄[10]上的研究结果类似。可能是适宜浓度的氨基酸水溶肥能促进植物对营养元素的吸收与利用，进而增强光合作用效率[28]，促进果实次生代谢途径中关键酶基因的表达[9]，从而促进可溶性糖以及维生素C等的合成和积累，进一步提高果实品质。主成分分析和熵权法分别从“协方差结构”和“信息量分布”两个维度提取数据特征，数据特征或规律会通过不同的数学方法呈现在两种评价方法的结果中[16]。基于两种方法的评价结果一致，表明氨基酸水溶肥对枇杷果实品质的提升效应具有强稳定性，这为该肥料在枇杷规模化种植中的推广应用提供了科学依据。

4　结　论

叶面喷施250～550倍氨基酸水溶肥稀释液改善了枇杷果实的外观品质、风味品质和营养品质。基于主成分分析和熵权法综合评价结果可知，350倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果最佳，其次是450倍和250倍氨基酸水溶肥稀释液，550倍氨基酸水溶肥稀释液对枇杷果实品质的提升效果较差。

[参考文献]

[1] CHI Z H, LIU X Y, WEN S Q, et al. Integrated metabolomic profiling and transcriptome analysis of fruit quality and ripeness in early-maturing seedless triploid loquat[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 316: 112012.

[2] 于馨淼，陈发兴，卢海芬，等. 不同品种枇杷果实微量元素分析及综合评价[J]. 热带作物学报，2019，40(11)：2227-2235.
YU X M, CHEN F X, LU H F, et al. Analysis and evaluation of trace elements in different varieties of loquat fruits[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(11): 2227-2235.

[3] LIU Y L, ZHANG W N, XU C J, et al. Biological activities of extracts from loquat (*Eriobotrya japonica* lindl.): a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(12): 1983.

[4] 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.

[5] 王会来，马嘉伟，柳丹，等. 基于主成分-聚类分析的山区果园土壤肥力评价[J/OL]. 果树学报，2025：1-20.[2025-02-28](2025-03-24)https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20240599.
WANG H L, MA J W, LIU D, et al. Evaluation of soil fertility of major hilly orchards based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Journal of Fruit Science, 2025: 1-20.[2025-02-28](2025-03-24)https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20240599.

[6] 颜宏，白亚妮，冯志珍，等. 含氨基酸水溶肥料研究现状及其在农业生产中的应用[J]. 中国农学通报，2024，40(24)：67-72.
YAN H, BAI Y N, FENG Z Z, et al. Research status of water-soluble fertilizers containing amino-acids and its application in agricultural production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(24): 67-72.

[7] 温明霞，张顺昌，吴韶辉，等. 蛋白水解氨基酸肥料对红美人杂柑果实品质的影响[J]. 浙江农业学报，2021，33(3)：422-428.
WENG M X, ZHANG S C, WU S H, et al. Effect of protein hydrolysate-based amino-acid fertilizers on fruit quality of Hongmeiren citrus hybrid[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(3): 422-428.

[8] 杨云月，马艳，王强锋，等. 施用含氨基酸水溶肥料对西瓜产量和品质的影响[J]. 四川农业科技，2024(11)：102-106.
YANG Y Y, MA Y, WANG Q F, et al. Effect of application of water-soluble fertilizer containing amino acid on yield and quality of watermelon[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2024(11): 102-106.

[9] LI Q, LIU L Z, ZHAO P T, et al. Insights into the promoting effects of water-soluble amino acid fertilizers on strawberry fruit quality under nitrogen reduction treatment[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 329: 112978.

[10] 谢荔，成学慧，冯新新，等. 氨基酸肥料对‘夏黑’葡萄叶片光合特性与果实品质的影响[J]. 南京农业大学学报，2013，36(2)：31-37.
XIE L, CHENG X H, FENG X X, et al. Effects of an amino acid fertilizer on the leaf photosynthesis and fruit quality of ‘Summer Black’ grape[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(2): 31-37.

[11] BAKPA E P, XIE J M, ZHANG J, et al. Influence of soil amendment of different concentrations of amino acid water-soluble fertilizer on physiological characteristics, yield and quality of ‘Hangjiao No. 2’ chili pepper[J]. PeerJ, 2021, 9: e12472.

[12] 王剑,郑锡良,戚行江,等. 氨基酸水溶肥料对衰弱病杨梅营养生长和果实品质的改良作用[J]. 浙江农业科学,2023,64(4):886-888.
WANG J,ZHENG X L,QI H J,et al. Effects of amino acid water-soluble fertilizer on vegetative growth and fruit quality improvement of *Myrica rubra*[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2023,64(4):886-888.

[13] ZHANG X Y,LI S S,AN X L,et al. Effects of nitrogen,phosphorus and potassium formula fertilization on the yield and berry quality of blueberry[J]. PLoS ONE,2023,18(3):e0283137.

[14] 邓箴,尹娟,吴军斌,等. 基于AHP和熵权法的枸杞水肥配施综合评判[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(7):712-719.
DENG Z,YIN J,WU J B,et al. Comprehensive evaluation of water and fertilizer application for *Lycium barbarum* L. based on AHP and entropy weight method[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021,39(7):712-719.

[15] 纪龙,申红芳,徐春春,等. 基于非线性主成分分析的绿色超级稻品种综合评价[J]. 作物学报,2019,45(7):982-992.
JI L,SHEN H F,XU C C,et al. Comprehensive evaluation of green super rice varieties based on nonlinear principal component analysis[J]. Acta Agronomica Sinica,2019,45(7):982-992.

[16] 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.

[17] 徐雅欣,黄泳,林立金,等. 氨基酸肥与海藻肥对枇杷幼苗光合色素和抗氧化酶活性的影响[J]. 贵州农业科学,2023,51(8):54-60.
XU Y X,HUANG Y,LIN L J,et al. Effects of amino acid fertilizer and seaweed fertilizer on photosynthetic pigments and antioxidase activity of loquat seedlings[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2023,51(8):54-60.

[18] 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.

[19] 李小方,张志良. 植物生理学实验指导[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2016.
LI X F,ZHANG Z L. Experimental instruction of plant physiology[M]. 5th ed. Beijing:Higher Education Press,2016.

[20] 蒋际谋,姜帆,陈秀萍,等. 枇杷主要品质评价指标研究[J]. 园艺学报,2013,40(12):2382-2390.
JIANG J M,JIANG F,CHEN X P,et al. Studies on several quality evaluation indices from loquat germplasm resources[J]. Acta Horticulturae Sinica,2013,40(12):2382-2390.

[21] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2006.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing:Higher Education Press,2006.

[22] 李静,聂继云,李海飞,等. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报,2008,25(1):126-131.
LI J,NIE J Y,LI H F,et al. On determination conditions for total polyphenols in fruits and its derived products by Folin-phenol methods[J]. Journal of Fruit Science,2008,25(1):126-131.

[23] 郭亚健,范莉,王晓强,等. 关于$NaNO_2$-$Al(NO_3)_3$-NaOH比色法测定总黄酮方法的探讨[J]. 药物分析杂志,2002,22(2):97-99.
GUO Y J,FAN L,WANG X Q,et al. Discussion about $NaNO_2$-$Al(NO_3)_3$-NaOH colorimetry for determination of total flavonoids[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis,2002,22(2):97-99.

[24] 彭杨,马晓燕,冯天乐,等. 基于株高、产量、品质联合分析筛选砂糖橘优良砧木[J]. 果树学报,2024,41(6):1078-1093.
PENG Y,MA X Y,FENG T L,et al. Selection of excellent rootstocks for Shatang mandarin based on combined analysis of plant height,yield,and quality[J]. Journal of Fruit Science,2024,41(6):1078-1093.

[25] 马宁,刘艳霞,李想,等. 基于熵权法综合评价植物根际促生菌对烟草的促生作用[J]. 南京农业大学学报,2020,43(5):887-895.
MA N,LIU Y X,LI X,et al. Comprehensive evaluation of growth promotion effect of PGPR strains on tobacco based on entropy weight method[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2020,43(5):887-895.

[26] DROGOUDI P D,PANTELIDIS G. Effects of position on canopy and harvest time on fruit physico-chemical and antioxidant properties in different apple cultivars[J]. Scientia Horticulturae,2011,129(4):752-760.

[27] 范中菡,张雪梅,陈庆华,等. 氨基酸水溶肥对桃果实品质的影响[J]. 北方园艺,2023(14):15-21.
FAN Z H,ZHANG X M,CHEN Q H,et al. Effects of amino acid water soluble fertilizer on peach fruit quality[J]. Northern Horticulture,2023(14):15-21.

[28] 杨俊雪,石如岳. 氨基酸叶面肥应用现状[J]. 农村经济与科技,2019,30(24):28,112.
YANG J X,SHI R Y. Application status of amino acid foliar fertilizer[J]. Rural Economy and Science-Technology,2019,30(24):28,112.

[29] 李磊,尹显慧,龙友华,等. 氨基酸水溶肥对辣椒果实氨基酸含量及品质的影响[J]. 南方农业学报,2019,50(5):1049-1056.
LI L,YIN X H,LONG Y H,et al. Effects of amino acid water soluble fertilizer on amino acid content and quality of pepper[J]. Journal of Southern Agriculture,2019,50(5):1049-1056.

[30] 韩丹,熊双莲,许自成,等. 硒对烤烟生长、化学指标及矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报,2017,31(10):2072-2079.
HAN D,XIONG S L,XU Z C,et al. Effects of selenium on growth, chemical index and mineral nutrition contents of flue-cured tobacco[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,

2017，31(10)：2072-2079.

[31] YANG C，CHEN T，SHEN B R，et al. Citric acid treatment reduces decay and maintains the postharvest quality of peach (*Prunus persica* L.) fruit[J]. Food Science & Nutrition，2019，7(11)：3635-3643

[32] AFONSO S，OLIVEIRA I，MEYER A S，et al. Biostimulants to improved tree physiology and fruit quality：a review with special focus on sweet cherry[J]. Agronomy，2022，12(3)：659.

[33] 户可欣，高铱遥，许世奇，等. 氨基酸肥料和鼠李糖脂配施对番茄耐盐性和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2024，42(5)：139-146，166.
HU K X，GAO Y Y，XU S Q，et al. Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on salt tolerance and yield of tomato[J]. Agricultural Research in the Arid Area，2024，42(5)：139-146，166.

[34] 崔志伟，王康才，邱佳妹，等. 叶面喷施氨基酸和微量元素对金银花生长发育和质量的影响[J]. 西北植物学报，2014，34(3)：523-529.
CUI Z W，WANG K C，QIU J M，et al. Effect of spraying micronutrient and amino acids on growth and quality of *Lonicera japonica* Thunb[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2014，34(3)：523-529.

[35] 车金鑫，蔡俊卿，翟丙年，等. 喷施复合氨基酸铁肥对猕猴桃果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2011，39(12)：119-123，128.
CHE J X，CAI J Q，ZHAI B N，et al. Effects of compound amino acid-iron fertilizer on fruit quality of kiwi fruit[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)，2011，39(12)：119-123，128.

[36] 张龙. 外源氨基酸对蓝莓生长发育的影响研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2017.
ZHANG L. Effects of exogenous amino acids on the growth and development of blueberries[D]. Changsha：Central South University of Forestry & Technology，2017.

[37] 王晋，王玉姣，王永博，等. 梨树微量元素营养研究进展[J]. 果树学报，2021，38(6)：995-1003.
WANG J，WANG Y J，WANG Y B，et al. Research progress in micronutrients in pears[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(6)：995-1003.

（责任编辑：陈丽）

（上接第 31 页）

[40] YANG H，LI P，JIN G H，et al. Temporal regulation of alternative splicing events in rice memory under drought stress[J]. Plant Diversity，2022，44(1)：116-125.

[41] AHMAD GANIE S，REDDY A S N. Stress-induced changes in alternative splicing landscape in rice：functional significance of splice isoforms in stress tolerance[J]. Biology，2021，10(4)：309.

[42] LU Y H，PIERCE B L，WANG P，et al. Alternative splicing induces sample-level variation in gene-gene correlations[J]. BMC Genomics，2024，23(4)：867.

[43] KOH E，KIM Y K，SHIN D，et al. MPC1 is essential for PGC-1α-induced mitochondrial respiration and biogenesis[J]. Biochemical Journal，2018，475(10)：1687-1699.

（责任编辑：屈李纯）