

外源喷施5-ALA对库尔勒香梨叶片 光合特性及果实品质的影响

刘广东, 文博, 田嘉*, 温玥, 王磊, 陈晨, 郝志超, 孙天雨

(新疆农业大学园艺学院·新疆林果高效栽培与高值化利用工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要:【目的】探究5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, 5-ALA)对库尔勒香梨叶片光合特性及果实品质的调控作用, 筛选最适喷施浓度与次数。【方法】以库尔勒香梨为试材, 于果实膨大期叶面喷施不同浓度、次数的5-ALA。每10 d测定1次光合特性指标; 在果实采收期, 测定果实外观及内在品质指标。【结果】外源5-ALA显著提升光合特性: 与喷施清水的对照(CK3)相比, 20 d时喷施3次 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5-ALA(T11)处理叶绿素含量显著提高9.30%, 10 d时T11处理净光合速率显著提高23.25%; 蒸腾速率各时期差异显著, 10 d时T12处理(喷施3次 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5-ALA)最优, 显著提高24.07%; 胞间 CO_2 浓度在第10天时T11处理最低, 为 $300.97\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。在果实品质方面, T11处理的单果质量、纵径、横径、可溶性固形物含量、维生素C含量和可溶性糖含量较CK3分别显著提升了9.75%、6.93%、6.61%、8.49%、28.51%和21.39%, 石细胞含量降低18.66%, 且对硬度、果形指数、可滴定酸含量无显著影响。主成分分析结果表明, $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5-ALA喷施3次(T11)的效果最优。【结论】叶面喷施3次 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5-ALA可增强库尔勒香梨叶片光合特性, 有效改善果实品质。

关键词: 库尔勒香梨; 5-氨基乙酰丙酸; 光合特性; 果实品质

中图分类号: S661.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2026)05-1143-14

Effects of exogenous spraying with 5-ALA on photosynthetic characteristics and fruit quality in Kuerlexiangli pear

LIU Guangdong, WEN Bo, TIAN Jia*, WEN Yue, WANG Lei, CHEN Chen, HAO Zhichao, SUN Tianyu

(College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University·Engineering Research Center of High-Efficiency Cultivation and High-Value Utilization of Xinjiang Forest Fruits, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: 【Objective】 This study aims to explore the regulatory effects of foliar spraying the pear trees with 5-aminolevulinic acid (5-ALA) on the photosynthetic physiological characteristics of leaves and fruit quality of Kuerlexiangli pear, and further screen out the optimal spraying concentration and frequency that can significantly improve its photosynthetic characteristics and fruit quality, so as to provide scientific technical support for the high-quality and efficient cultivation of Kuerlexiangli pear. 【Methods】 Taking the main cultivar Kuerlexiangli pear in Xinjiang as the sample, a two-factor randomized block experiment was adopted to apply combined treatments at different concentrations ($0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and different frequencies (1, 2, 3 times) during the fruit swell stage. Ten days after the third spraying, the photosynthetic characteristic indexes of leaves were systematically determined. Specifically, A portable chlorophyll meter was employed to determine the relative chlorophyll content in leaves, and the net photosynthetic rate, transpiration rate, intercellular CO_2 concentration, and stomatal conductance were determined with a photosynthesis system. Dynamic monitoring was conducted to clarify the influence of 5-ALA on the photosynthetic physiological activi-

收稿日期: 2025-09-11 接受日期: 2025-10-27

基金项目: 新疆香梨产业优质绿色智慧发展关键技术研发与示范(2024A02006)

作者简介: 刘广东, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为果树栽培生理。E-mail: h3245038437@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: terrisay@163.com

ties of leaves. After fruit ripening, the external and internal fruit qualities were comprehensively determined. To analyze the comprehensive impact of 5-ALA on fruit quality, external quality parameters (such as single fruit weight, longitudinal diameter, transverse diameter, and fruit shape index) and internal quality indicators (such as fruit firmness, soluble solids content, stone cell content, vitamin C content, soluble sugar content, and titratable acid content) were determined. **【Results】** The results showed that exogenous spraying with 5-ALA significantly improved the photosynthetic characteristics of leaves. The relative chlorophyll contents showed a significant increase on the 20th and 30th days after treatment, with the T11 treatment achieving an increase of 5.68%. This suggested that this treatment was capable of effectively enhancing the synthesis of chlorophyll in leaves, laying a material foundation for the efficient progress of photosynthesis. The net photosynthetic rate showed the most significant difference on the 10th day after treatment, with the T11 treatment having the most prominent promotion effect (23.25%), followed by the T7 treatment (18.36%). However, the promotion effect of each treatment gradually weakened on the 20th and 30th days, suggesting that spraying with 5-ALA during the fruit swell stage can effectively improve fruit quality but has no long-term effect. The transpiration rate showed significant differences throughout the determination period (10th, 20th, and 30th days). On the 10th day, the T12 treatment had the best effect, with an increase of 24.07%; on the 20th day, the T11 treatment performed best, with an increase of 17.15%; on the 30th day, the T12 treatment still maintained an increase of 15.15%, indicating that 5-ALA can affect the water metabolism and material transport for plants by regulating transpiration. The intercellular CO₂ concentration in the T11 treatment was the lowest (300.97 ppm) on the 10th day, and a lower intercellular CO₂ concentration implied stronger carbon assimilation capacity. On the 20th day, there was no significant difference among the treatments, but the T11 treatment was relatively lower. On the 30th day, the T1 and T11 treatments decreased by 12.44% and 9.36% compared with the corresponding controls CK1 and CK3, respectively, further indicating that the carbon utilization efficiency by plants under specific treatments was improved. However, there was no significant difference in stomatal conductance among treatments, suggesting that the influence of 5-ALA on the photosynthetic characteristics of leaves during the fruit swell stage was not mainly achieved by regulating stomatal conductance. In terms of fruit quality, exogenous spraying with 5-ALA had a significant impact on multiple quality indexes. Among them, the external quality indexes such as single fruit weight, longitudinal diameter, and transverse diameter were significantly improved. Compared with CK3, the T11 treatment increased by 9.75%, 6.93%, and 6.61%, respectively, indicating that this treatment can effectively promote fruit growth and development and increase fruit size. In terms of internal quality, the contents of soluble solids, vitamin C, and soluble sugar increased by 8.49%, 28.51%, and 21.39%, respectively, while the stone cell content decreased by 18.66%. These changes significantly improved the taste and nutritional value of the fruit. However, 5-ALA had no significant effect on fruit shape index, firmness, or titratable acid, suggesting that 5-ALA may promote the ripening of Kuerlexiangli pear fruits and enable them to be marketed earlier. Finally, through principal component analysis, the T11 treatment (150 mg · L⁻¹ 5-ALA spray for 3 times) was selected as the optimal treatment scheme by comprehensively considering various fruit quality indexes. Correlation analysis results revealed a significant positive correlation between leaf photosynthetic traits and fruit quality, which confirmed that improving leaf photosynthetic characteristics is an important way to enhance fruit quality. **【Conclusion】** In summary, foliar spraying with 150 mg · L⁻¹ 5-ALA for three times during the fruit swell stage of Kuerlexiangli pear can significantly enhance leaf photosynthetic characteristics and

effectively improve the external and internal fruit quality. It is a cultivation technique worthy of popularization and application in production.

Key words: Kuerlexiangli pear; 5-aminolevulinic acid; Photosynthetic properties; Fruit quality

库尔勒香梨(*Pyrus×sinkiangensis* Yu)果实香味浓郁、皮薄肉细、汁多味美、营养价值丰富,具有1400多年的栽培历史^[1],是新疆最具代表性的特色果品之一^[2]。植物生长调节剂在香梨生产中广泛应用,可调控果树生长发育,促进叶片光合作用,改善果实品质,提高产量^[3]。但由于农民长期不合理施用生长调节剂,过度追求果实大小、形状等外观品质,忽略了果实糖、酸等内在品质,导致库尔勒香梨风味寡淡。因此,如何在现有基础上提升果实内在品质,使其内外兼修是产业上的重要问题^[4-6]。此外,新型绿色无公害植物生长调节剂,一方面可以减少传统生长调节剂的过度施用;另一方面合理施用对生产上提升果实品质,提高农民创收,促进产业振兴及绿色农业健康可持续发展具有重要意义。

5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, 5-ALA)是生物体内卟啉化合物生物合成的关键前体,属于天然、无毒、可降解植物生长调节剂^[7],具有调节果树生长发育、增强光合作用率、改善果实风味和着色、提高果实品质等作用^[8]。研究表明,5-ALA可提高苹果可溶性糖含量,降低可滴定酸含量^[9]。对富士苹果的研究表明,喷施3次600倍液5-ALA在果实产量和品质方面优于喷施2次和4次^[10]。7月中上旬,在克瑞森无核白葡萄叶面喷施适宜浓度的5-ALA能够增强葡萄叶片的光合特性,提高光合效率,促进葡萄可溶性固形物积累,提高固酸比^[11]。在16个葡萄品种的果实膨大期,于果实表面喷施100 mg·L⁻¹ 5-ALA溶液,促进大多数葡萄品种果肉中酸性转化酶(AI)和中性转化酶(NI)基因的表达,抑制蔗糖转运蛋白(SS)和蔗糖磷酸合成酶(SPS)基因的表达,进而提高果肉中糖含量^[12]。在毛桃上的研究表明,5-ALA能够提高桃树叶片叶绿素相对含量(SPAD值)、诱导I-P相荧光强度增加、促进叶片对光能的捕获、降低热耗、显著提升桃树光合性能指数;同时显著提高果实单果质量及可溶性固形物、可溶性蛋白、可溶性糖、维生素C和花青素含量^[13]。此外,对南红梨喷施5-ALA可促进果实中可溶性固形物与糖含量增加,同时降低可滴定酸含量^[14]。上述结果表明,5-ALA具有提高叶片光合能力、改善果

实品质等作用,在园艺作物生产上具有广阔的应用前景。

课题组前期研究表明,外源喷施5-ALA显著提高了库尔勒香梨脱萼果和宿萼果中挥发性代谢物的含量,主要提高了萜类、酯等化合物含量^[15],但其对库尔勒香梨叶片光合特性、果实生长发育及果实品质等调控机制尚未明确。鉴于此,笔者以库尔勒香梨为试验材料,采用二因素随机区组试验(5-ALA浓度和喷施次数),在果实膨大期外施不同浓度、不同次数的5-ALA,探讨不同处理下5-ALA对叶片光合特性和果实品质的影响,明确对库尔勒香梨叶片光合特性和果实品质调控效果最佳的处理组合,探明5-ALA在生产上科学合理的施用方法,以期改善香梨果实品质提供技术支撑,为产业高质量发展提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为新疆巴州库尔勒市西域香妃基地的20年生库尔勒香梨树,株行距3 m×4 m,树高3~4 m,树形为疏散分层形。土肥水进行常规管理,修剪、病虫害防治措施均保持一致,供试树体长势相似、健康。

试验地位于库尔勒市阿瓦提乡,该地区属温暖带大陆性气候,年均气温11.0℃,7月平均气温28℃,年均积温4200℃,无霜期170~227 d,年日照时数2 762.1~3 186.3 h,四季分明,夏季炎热,冬季寒冷。

5-ALA(99%,产品编号S30944),购于上海源叶生物科技有限公司。

1.2 试验设计

采用双因素试验设计,即喷施次数(因素A)和喷施浓度(因素B)。喷施次数分为3个水平:喷施1次(喷施时间为7月3日)、喷施2次(喷施时间为7月3日、7月13日)、喷施3次(喷施时间为7月3日、7月13日、7月23日)。喷施浓度(ρ ,后同)分为5个水平:50、100、150、200 mg·L⁻¹ 5-ALA,以喷施清水作为对照。本试验共15个处理组合(表1),单株小区,每个处理3次重复。采用叶面喷施法,在2024年7

月3日至7月23日果实膨大期喷施全树叶片,喷施时间选择在傍晚,以叶面布满水珠但不滴水为宜。

表1 5-ALA 喷施试验设计方案
Table 1 Design of 5-ALA spraying test

处理 Treatment	喷施次数 Time for spraying		
	1次 Once	2次 Twice	3次 Three times
T1	50 mg·L ⁻¹		
T2	100 mg·L ⁻¹		
T3	150 mg·L ⁻¹		
T4	200 mg·L ⁻¹		
CK1	清水 Water		
T5	50 mg·L ⁻¹	50 mg·L ⁻¹	
T6	100 mg·L ⁻¹	100 mg·L ⁻¹	
T7	150 mg·L ⁻¹	150 mg·L ⁻¹	
T8	200 mg·L ⁻¹	200 mg·L ⁻¹	
CK2	清水 Water	清水 Water	
T9	50 mg·L ⁻¹	50 mg·L ⁻¹	50 mg·L ⁻¹
T10	100 mg·L ⁻¹	100 mg·L ⁻¹	100 mg·L ⁻¹
T11	150 mg·L ⁻¹	150 mg·L ⁻¹	150 mg·L ⁻¹
T12	200 mg·L ⁻¹	200 mg·L ⁻¹	200 mg·L ⁻¹
CK3	清水 Water	清水 Water	清水 Water

1.3 测定指标与方法

第3次喷施完成后,每隔10 d进行叶片光合特性及果实纵径、横径的测定;采收期每个处理采集36个果实带回实验室进行果实品质的测定,其中15个果实用于外观品质及硬度测定,其余果实用于测定内在品质。

1.3.1 叶片光合特性的测定 采用便携式Spad-502叶绿素仪测量叶绿素相对含量,每个重复选取12枚枝条基部成熟的叶片,测量时选取叶片上、中、下3个部位,求取平均值。采用CIRAS-3便携式光合仪

测定叶片光合效率,测定指标包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂浓度(C_i)、气孔导度(G_s),测量时每个重复在树体东、南、西、北4个方向共选取12枚叶片。

1.3.2 果实品质的测定 采用游标卡尺测量其纵径(mm)、横径(mm),计算果形指数(纵径/横径)。采用电子天平测量单果质量。采用GY-3硬度计测量香梨果实的硬度;使用数显糖度计测量可溶性固形物含量;参考郭静等^[16]的方法,采用酸碱滴定法测定可滴定酸含量,采用2,6-二氯酚酚滴定法测定维生素C含量;参考广新梅等^[17]采用蒽酮法测定可溶性糖含量;参考聂继云等^[18]采用冷冻称重法测定石细胞含量。

1.4 数据处理

采用WPS Office整理试验数据;采用SPSS 27.0进行方差分析、主成分分析和Person相关分析,若差异显著($P<0.05$),则通过Duncan法进行多重比较;采用Origin 2021制作图表。

2 结果与分析

2.1 外源5-ALA不同喷施浓度、次数对库尔勒香梨各项指标的主体间效应检验

由表2双因素方差分析结果可知,在叶片光合特性方面,不同浓度5-ALA对叶片叶绿素相对含量、 P_n 、 T_r 、 C_i 均有显著影响,对 G_s 无显著影响;喷施次数对叶绿素相对含量、 T_r 均有极显著影响,对 P_n 有显著影响,对其他指标并无明显影响。在果实品质方面,喷施浓度对单果质量、纵径、横径、可溶性固形物含量、维生素C含量、可溶性糖含量存在显著或极显

表2 不同5-ALA喷施浓度、次数处理下各指标间主体间效应检验

Table 2 Test of inter-subject effects between indicators under different 5-ALA treatments

指标 Index	显著性 Significant			指标 Index	显著性 Significant		
	次数 Time	浓度 Potency	交互作用 Interaction		次数 Time	浓度 Potency	交互作用 Interaction
叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content	10 d	/	/	气孔导度 Stomatal conductance, G_s	10 d	/	/
	20 d	***	***		20 d	/	/
	30 d	/	***		30 d	/	/
净光合速率 Net photosynthetic rate, P_n	10 d	*	***	单果质量 Single fruit mass	成熟 Ripe	***	**
	20 d	/	/	纵径 Vertical diamete	成熟 Ripe	/	**
	30 d	/	/	横径 Transverse diameter	成熟 Ripe	/	**

注:*表示在0.05水平上差异显著($P<0.05$);**表示在0.01水平上差异极显著($P<0.01$),***表示在0.001水平上差异极显著($P<0.001$);/表示不显著($P\geq 0.05$)。

Note: * indicates significant difference at the 0.05 level ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference at the 0.01 level ($P<0.01$), *** indicates that the difference is extremely significant at the 0.001 level ($P<0.001$); / indicates insignificant ($P\geq 0.05$).

表2 (续) Table 2 (Continued)

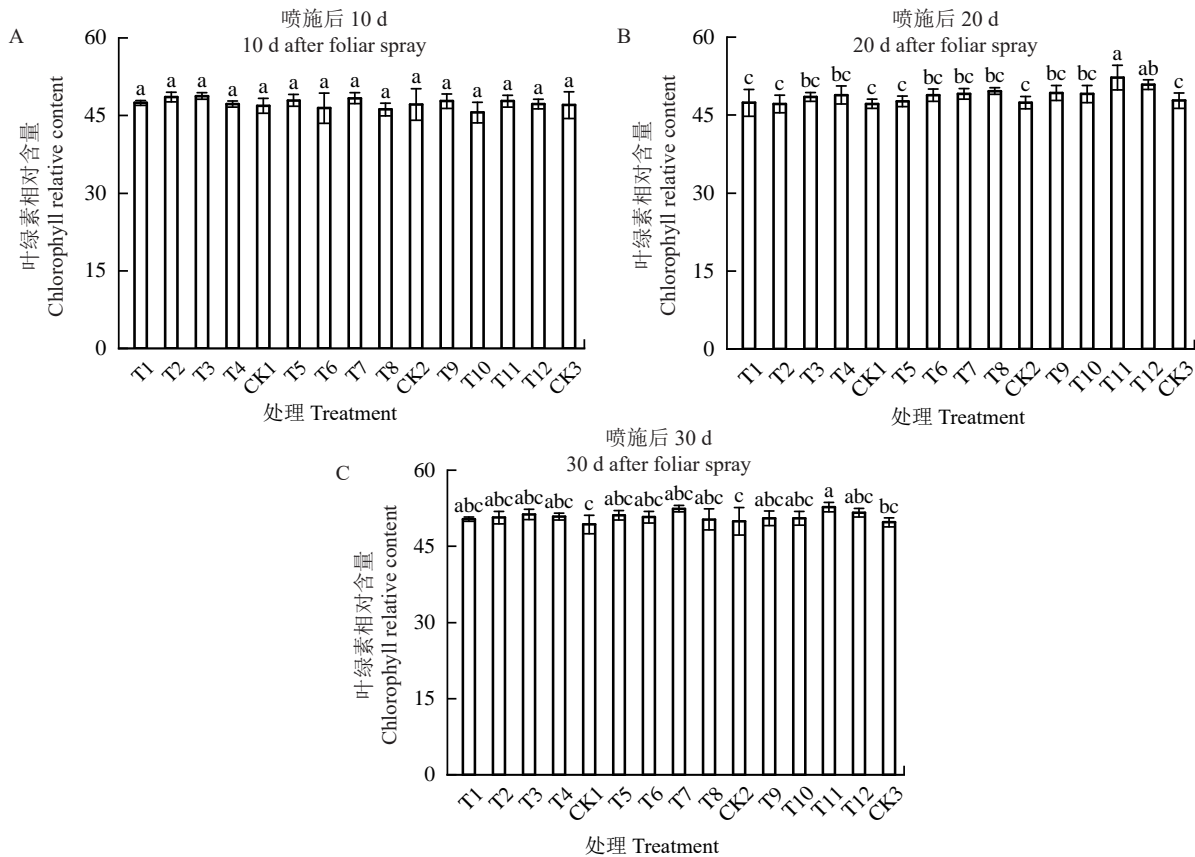
指标 Index	显著性 Significant			指标 Index	显著性 Significant			
	次数 Time	浓度 Potency	交互作用 Interaction		次数 Time	浓度 Potency	交互作用 Interaction	
蒸腾速率 Transpiration rate, T_r	10 d	***	***	**	果形指数 Fruit shape index	成熟 Ripe	/	/
	20 d	***	**	/	硬度 Hardness	成熟 Ripe	/	/
	30 d	***	***	*	可溶性固形物含量 Soluble solids content	成熟 Ripe	/	**
胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration, C_i	10 d	/	/	*	维生素C含量 Vitamin C content	成熟 Ripe	**	*
	20 d	/	/	/	石细胞含量 lithocyte content	成熟 Ripe	*	/
	30 d	/	**	*	可溶性糖含量 Soluble sugar content	成熟 Ripe	**	**
					可滴定酸含量 Titratable acid content	成熟 Ripe	/	/

著影响,喷施次数对单果质量、维生素C含量、石细胞含量、可溶性糖含量存在显著或极显著影响;果形指数、硬度和可滴定酸含量不受5-ALA浓度、次数影响。外源5-ALA不同喷施浓度、次数对库尔勒香梨叶片 P_n 、 T_r 、 C_i 存在显著或极显著交互作用,表明

二者可协同调节光合作用。

2.2 5-ALA 处理对库尔勒香梨叶片光合特性的影响

由图1可知,库尔勒香梨叶片叶绿素相对含量总体呈上升趋势。喷施后10 d,各处理间无显著差异;喷施后20 d,各处理间存在显著差异,T11处理



不同小写字母表示同一时间的不同处理间在0.05水平差异显著。下同。

Different small letters represent significant difference between different treatments of the same time at 0.05 level. The same below.

图1 不同5-ALA处理对库尔勒香梨叶片叶绿素相对含量的影响

Fig. 1 Effects of different 5-ALA treatments on relative chlorophyll content in leaves of Kuerlexiangli

相较CK3显著提高了9.30%;在30 d时,T11处理下叶绿素相对含量达到最高,为52.74 SPAD,喷施5-ALA的各处理相较CK1、CK2、CK3均有不同程度的提升。此结果说明,5-ALA在一定程度上促进叶片叶绿素合成,从而提高库尔勒香梨叶片叶绿素相对含量。

由图2-A可知, P_n 整体呈上升趋势。喷药后10 d,T11处理的效果最显著,达到 $16.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较CK3显著提高了23.25%;其次为T7处理, P_n 为 $15.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,较CK2显著提高了18.36%,表明 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA喷施3次的效果最佳,喷药后20、

30 d,各处理间无显著差异,推测可能与5-ALA降解或香梨自身生理代谢变化有关。

由图2-B可知,5-ALA处理下库尔勒香梨叶片 T 较未处理组总体呈升高趋势,喷药10 d时,T12、T11处理相较CK3分别显著提高了24.07%、16.50%,T8处理相较CK2显著提高了22.28%;喷药20 d时,T11、T12处理相较CK3分别提高了17.15%、12.13%,T8处理相较CK2提高了13.88%;喷药30 d时,T12、T11处理相较CK3分别显著提高了15.15%、13.96%,T8、T7处理相较CK2分别显著提高了15.83%、15.67%。各处理相较CK1、CK2、CK3提升效果明显,其中T11

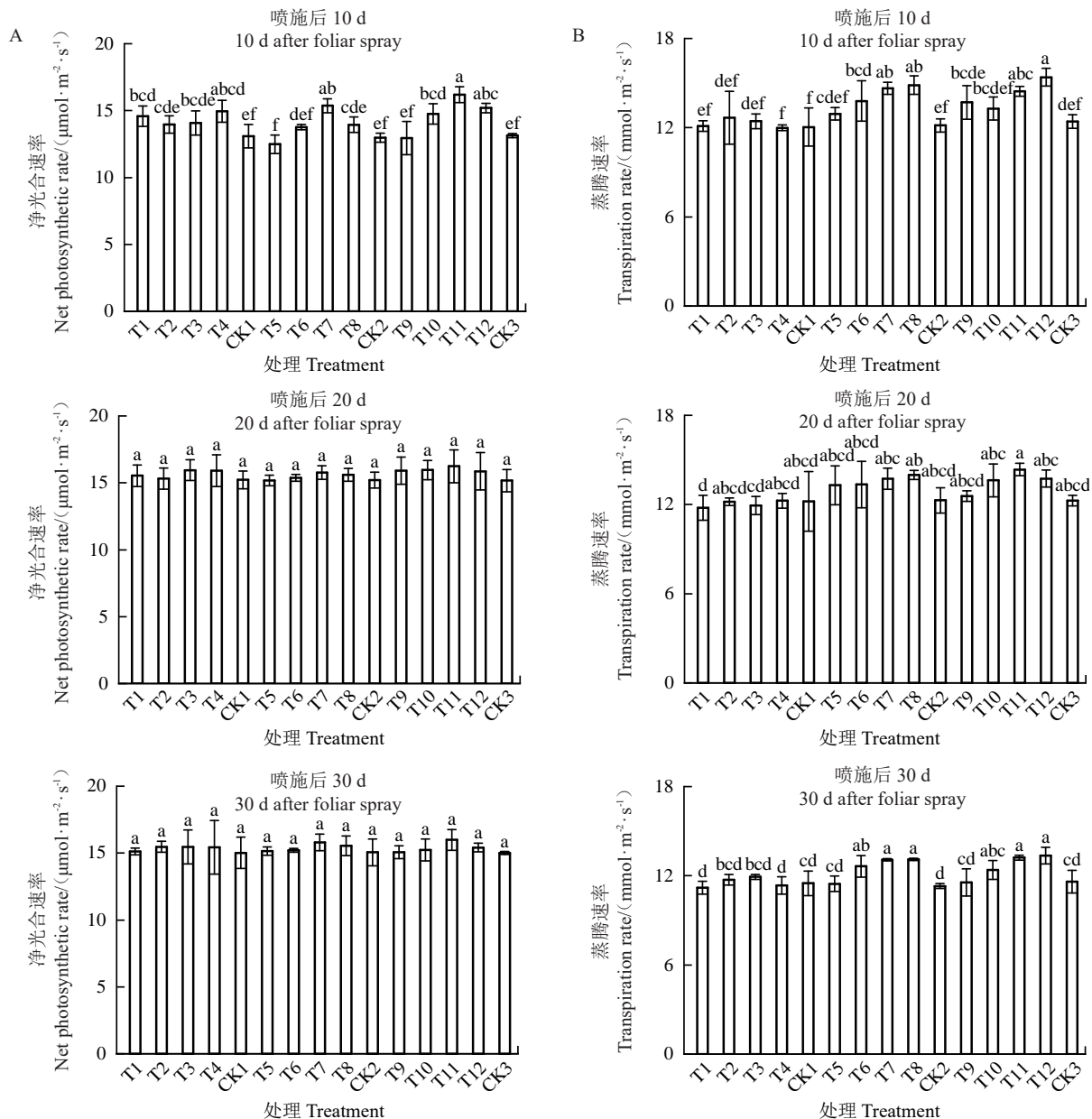


图 2 不同 5-ALA 处理对库尔勒香梨叶片光合作用的影响

Fig. 2 Effects of different 5-ALA treatments on photosynthesis of Kuerlexiangli leaves

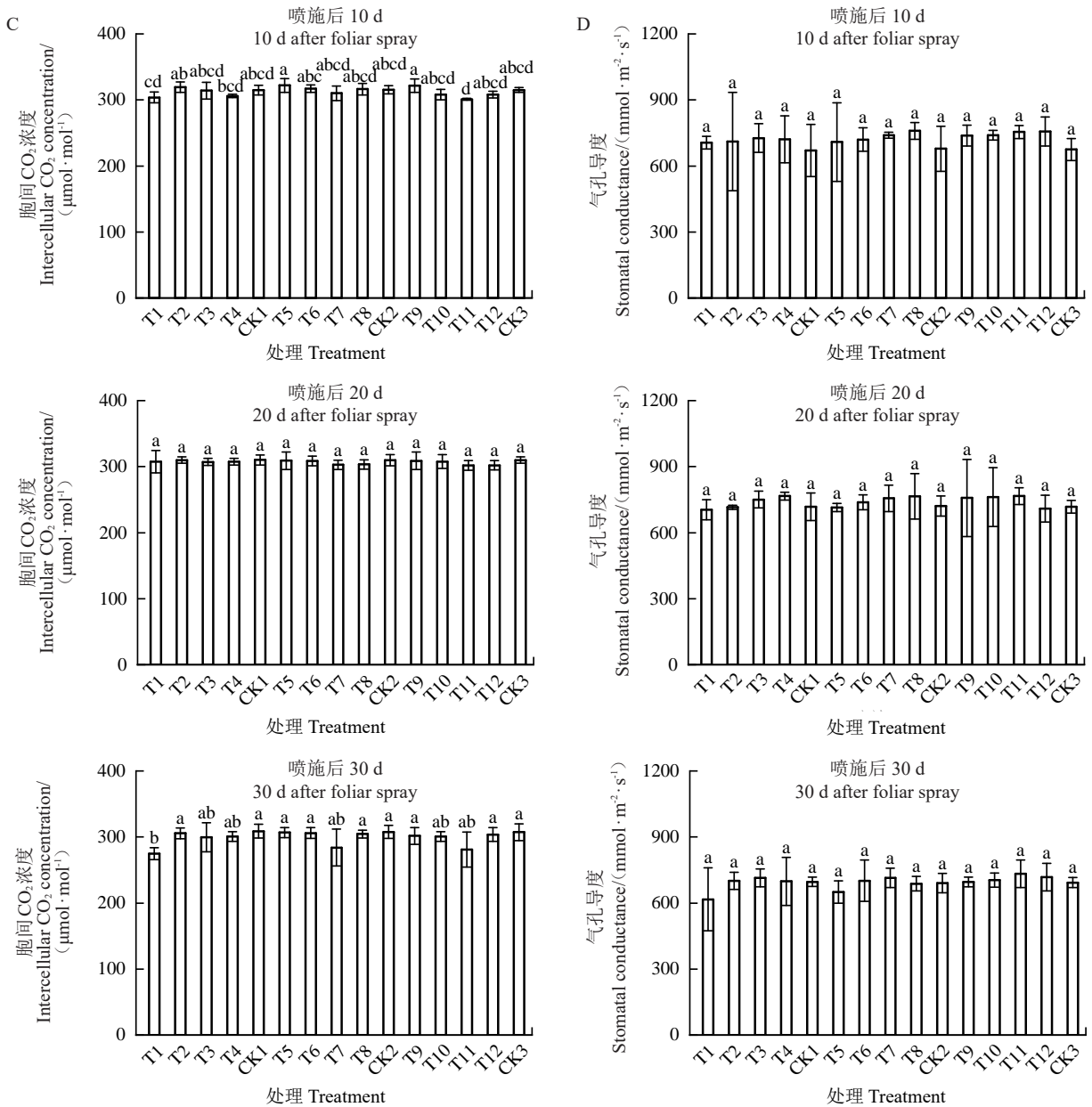


图2 (续) Fig. 2 (Continued)

与T12处理对叶片 T_i 的提升效果最好,两者之间无显著差异,说明 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5-ALA对 T_i 均有较好的提升效果;同时T7、T8与T11、T12处理间无显著差异,但均与T3处理差异显著,表明喷施2次与喷施3次的效果相近,均优于喷施1次

由图2-C可知,叶片 C_i 总体呈下降趋势。喷药10 d时,T11处理最低,为 $300.97\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$;喷药20 d时,各处理组间无显著差异;喷药30 d时,T1、T11处理分别相较CK1、CK3降低了12.44%、9.36%。由图2-D可知,各处理间叶片 G_s 无显著差异,表明5-ALA可能对库尔勒香梨叶片 G_s 的调控作用较小。

2.3 5-ALA处理下库尔勒香梨果实发育动态

由图3-A可知,果实纵径整体呈增长趋势,喷施10、20、30 d差异明显,其中T11处理效果最好,在第30天时达到 67.53 mm ,相较CK3显著提高了9.00%,其余各处理的效果均优于CK1、CK2、CK3,表明5-ALA对果实纵径产生了积极影响。

由图3-B可知,果实横径总体呈增长趋势,各阶段增长率相对平稳,整体上各处理效果略优于CK1、CK2、CK3。在30 d时,T11处理相较CK3综合提高了5.77%,表明5-ALA对果实横径具有促进作用。

由图3-C可知,喷施10、30 d时,各处理间果形指数无明显差异,喷施20 d时,各处理间产生显著差异,

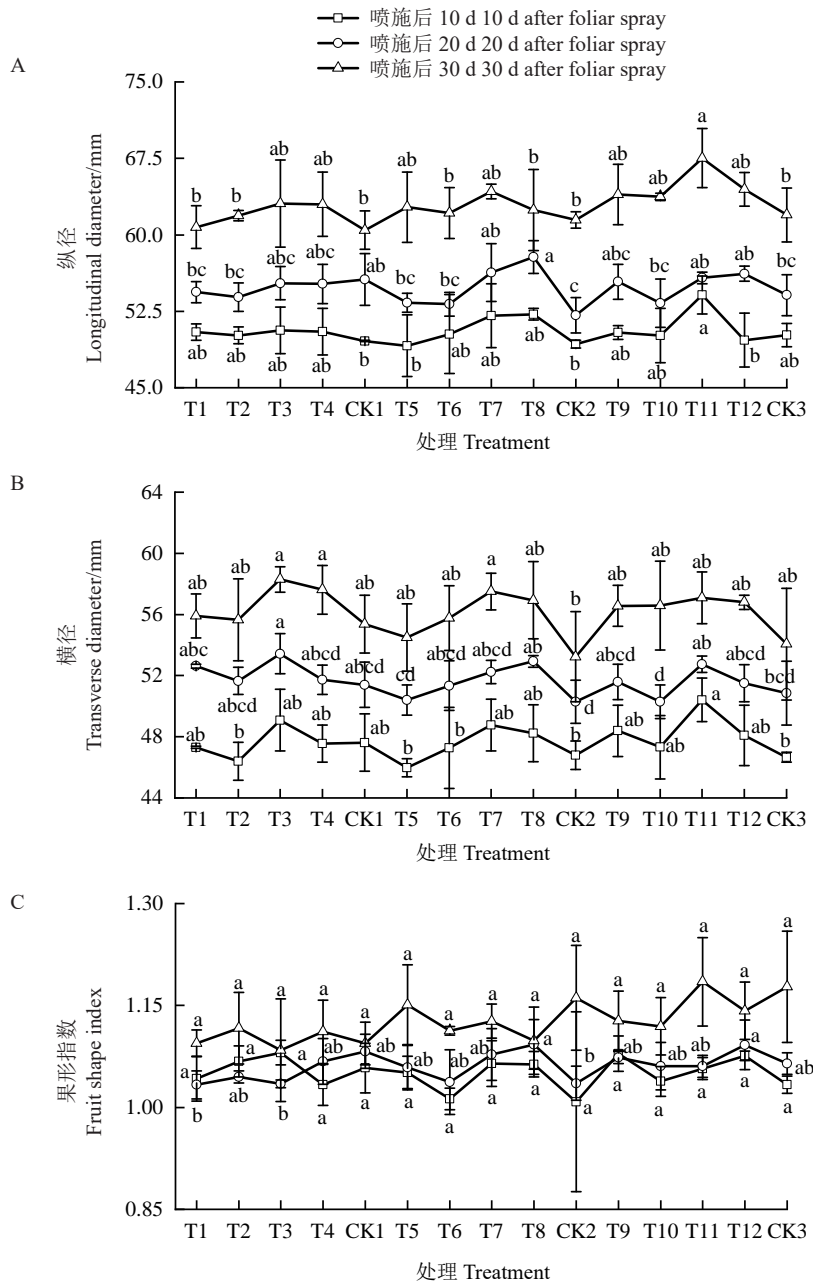


图 3 不同 5-ALA 处理对果实生长发育的影响

Fig. 3 Effects of different 5-ALA treatments on fruit growth and development

部分 5-ALA 处理组优于对照。这可能是由于 5-ALA 处理促进纵径增长,但随着果实生长发育至后期,横径增长差异逐渐不明显,对果形总体生长发育影响较小。上述结果表明,5-ALA 处理有助于提高果实纵径,增大果实体积,但对果形指数无显著影响。

2.4 5-ALA 处理对库尔勒香梨成熟果实品质的影响

如表 3 所示,喷施不同浓度、不同次数 5-ALA 可显著提高库尔勒香梨果实外观品质。与对照相比, T11、T12 处理下果实纵径、横径和单果质量均呈现

显著差异。其中, T11 处理下单果质量相较 CK3 显著提高了 9.75%,纵径显著提高了 6.93%,横径显著提高了 6.61%;其次为 T12 处理,分别显著提高了 9.31%、6.71%、5.23%。各处理间果形指数无显著差异。上述结果表明,5-ALA 能够促进库尔勒香梨果实纵径和横径增长,从而提升果实体积,增加单果质量。

由表 4 可知,喷施不同浓度及次数 5-ALA 均可提高果实可溶性固形物、维生素 C 和可溶性糖含量,而对石细胞含量、果实硬度和可滴定酸含量无显著影响。其中, T11 处理下可溶性固形物含量提升效

表3 不同5-ALA处理对成熟果实外观品质的影响

Table 3 Effect of different 5-ALA treatments on the appearance quality of mature fruits

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	纵径 Vertical diameter/mm	横径 Transverse diameter/mm	果形指数 Fruit shape index
T1	138.90±0.56 cde	65.60±1.28 abc	63.42±0.15 abc	1.034 0±0.021 7 a
T2	139.08±2.47 cde	65.85±0.42 abc	62.26±1.64 abcd	1.060 0±0.031 1 a
T3	139.83±3.38 cde	66.72±2.50 abc	64.18±2.38 ab	1.041 0±0.018 3 a
T4	140.36±2.37 cde	66.14±1.92 abc	62.41±2.30 abcd	1.061 0±0.052 9 a
CK1	135.56±4.48 e	63.56±0.92 c	60.96±0.59 cd	1.043 0±0.007 2 a
T5	139.05±2.29 cde	64.75±1.18 bc	61.88±1.95 bcd	1.048 0±0.031 7 a
T6	140.36±2.32 cde	65.46±0.96 abc	62.09±0.25 abcd	1.054 0±0.019 4 a
T7	143.34±5.85 bc	65.57±2.85 abc	63.18±2.01 abcd	1.039 0±0.021 5 a
T8	143.37±2.32bc	66.20±0.62 abc	63.28±0.97 abc	1.046 0±0.006 5 a
CK2	135.57±1.69 e	63.78±0.11 c	60.34±0.72 d	1.057 0±0.012 0 a
T9	141.77±2.85 cd	64.37±0.76 c	61.90±0.43 bcd	1.040 0±0.011 6 a
T10	147.82±2.38 ab	65.93±0.95 abc	63.43±0.69 abc	1.040 0±0.008 7 a
T11	149.65±3.16 a	68.40±2.19 a	64.85±0.91 a	1.055 0±0.021 6 a
T12	149.05±1.82 a	68.26±1.56 ab	64.01±1.69 ab	1.066 0±0.027 8 a
CK3	136.36±1.45 de	63.97±3.34 c	60.83±1.36 cd	1.053 0±0.046 6 a

注: 同列不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column represent significant difference between different treatments at the level of 0.05. The same below.

表4 不同5-ALA处理对成熟果实内在品质的影响

Table 4 Effects of different 5-ALA treatments on the internal quality of mature fruits

处理 Treatment	硬度 Hardness/ (kg·cm ⁻²)	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)	w(石细胞) Lithocyte content/(g·100 g ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/(g·kg ⁻¹)
T1	6.450±0.14 a	11.947±0.141 cd	3.583±0.9375 bc	0.173±0.08 ab	6.98±0.11 b	0.408±0.054 a
T2	6.500±0.31 a	12.220±0.28 abcd	3.604±0.5636 bc	0.146±0.02 b	7.11±0.52 b	0.386±0.040 a
T3	6.400±0.19 a	12.753±0.19 ab	3.687±0.248 bc	0.151±0.06 b	7.47±0.45 ab	0.371±0.050 a
T4	6.517±0.29 a	12.490±0.04 abcd	3.635±0.3191 bc	0.152±0.08 b	7.25±1.42 ab	0.372±0.040 a
CK1	6.405±0.36 a	11.890±0.220 cd	3.499±0.4062 c	0.175±0.02 ab	6.75±0.38 b	0.414±0.080 a
T5	6.255±0.42 a	12.150±0.23 abcd	3.593±0.3013 bc	0.175±0.02 ab	6.82±0.62 b	0.396±0.055 a
T6	6.035±0.07 a	12.410±0.66 abcd	3.859±0.43 abc	0.156±0.01 b	7.42±0.69 ab	0.372±0.120 a
T7	6.306±0.17 a	12.710±0.27 ab	4.075±0.109 abc	0.149±0.03 b	7.97±0.43 ab	0.354±0.102 a
T8	6.251±0.33 a	12.540±0.37 abc	4.003±0.132 abc	0.159±0.02 b	7.83±0.57 ab	0.364±0.019 a
CK2	6.269±0.17 a	11.853±0.05 cd	3.456±0.0748 c	0.193±0.04 ab	6.71±0.58 b	0.408±0.035 a
T9	6.267±0.33 a	12.020±1.08 bcd	4.060±0.130 abc	0.243±0.04 a	7.71±0.76 ab	0.373±0.090 a
T10	6.385±0.27 a	12.190±0.19 abcd	4.176±0.222 abc	0.210±0.04 ab	7.92±0.55 ab	0.356±0.027 a
T11	6.393±0.17 a	12.773±0.2369 a	4.478±0.3299 a	0.160±0.02 b	8.46±0.61 a	0.339±0.054 a
T12	6.514±0.13 a	12.550±0.11 abc	4.334±0.3724 ab	0.184±0.05 ab	8.43±0.91 a	0.344±0.038 a
CK3	6.441±0.34 a	11.770±0.186 d	3.485±0.3299 c	0.196±0.03 ab	6.97±0.22 b	0.413±0.046 a

果最佳,较CK3显著提高1.003百分点,其次为T3、T7处理;T11处理下可溶性糖含量最高,达到8.46%,相较CK3显著提高了1.49百分点,其次为T12处理,达到8.43%,相较CK3显著提高了1.46百分点;T11处理间维生素C含量最高,其次为T12处理,二者较CK3分别显著提高了28.49%、24.36%;

T2、T3、T4、T6、T7、T8、T11处理间石细胞含量无显著差异,其中T2、T7、T11处理分别相较于CK1、CK2、CK3降低了16.57%、22.80%、18.37%。上述结果表明,5-ALA能够促进库尔勒香梨果实中糖分的积累,提高维生素C含量,增强果实风味;同时在一定程度上降低石细胞含量,使果肉更加细腻。

2.5 5-ALA 处理对库尔勒香梨果实品质的综合评价

将 10 项指标依次设为 X_1 (单果质量)、 X_2 (纵径)、 X_3 (横径)、 X_4 (果形指数)、 X_5 (硬度)、 X_6 (可溶性固形物含量)、 X_7 (维生素 C 含量)、 X_8 (石细胞含量)、 X_9 (可溶性糖含量)、 X_{10} (可滴定酸含量)。

为研究不同浓度、不同次数 5-ALA 处理对库尔勒香梨果实品质的影响,对相关果实品质指标进行主成分分析。根据分析结果(表 5)共提取出 3 个主成分,累计贡献率达到 87.534%。第 1 个主成分贡献率为 60.392%,主要包括单果质量、纵径、横径、可溶性固形物含量、维生素 C 含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量等指标,主要反映果实的生长状况和营养积累。第 2 个主成分贡献率为 15.786%,其主成分因子为石细胞含量,侧重果实口感。第 3 个主成分贡献率为 11.356%,其主成分因子为硬度。

表 5 不同 5-ALA 处理下库尔勒香梨果实品质指标的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of fruit quality indicators of Korlaxiangli pear under different 5-ALA treatments

指标 Index	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3
单果质量 Single fruit mass	0.976	-0.056	0.110
纵径 Vertical diameter	0.828	0.374	0.350
横径 Transverse diameter	0.842	0.336	0.067
果形指数 Fruit shape index	-0.048	-0.165	-0.704
硬度 Hardness	0.040	-0.049	0.838
可溶性固形物含量 Soluble solids content	0.735	0.634	-0.019
维生素 C 含量 Vitamin C content	0.973	-0.120	-0.046
石细胞含量 Lithocyte content	-0.009	0.973	0.127
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.982	-0.007	0.036
可滴定酸含量 Titratable acid content	0.957	0.168	0.011
特征值 Eigenvalue	6.039	1.579	1.136
贡献率 Contribution rate/%	60.392	15.786	11.356
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	60.392	76.178	87.534

鉴于各主成分对果实品质的解释权重存在差异,在对不同 5-ALA 处理组的库尔勒香梨果实品质进行综合评价时,需结合各主成分的方差贡献率以平衡其信息侧重性。以主成分贡献率为权重,构建出主成分综合评价模型,具体公式如下:

$$F_1=0.976 \times X_1+0.828 \times X_2+0.842 \times X_3-0.048 \times X_4+0.04 \times X_5+0.735 \times X_6+0.973 \times X_7-0.009 \times X_8+0.982 \times X_9+0.957 \times X_{10};$$

$$F_2=-0.056 \times X_1+0.374 \times X_2+0.036 \times X_3-0.165 \times X_4-0.049 \times X_5+0.634 \times X_6-0.12 \times X_7+0.973 \times X_8-0.007 \times X_9+0.168 \times X_{10};$$

$$F_3=0.110 \times X_1+0.350 \times X_2+0.067 \times X_3-0.704 \times X_4+0.838 \times X_5-0.019 \times X_6-0.046 \times X_7+0.127 \times X_8+0.036 \times X_9+0.011 \times X_{10};$$

$$F=0.690 \times F_1+0.180 \times F_2+0.130 \times F_3.$$

根据以上构建的模型,计算不同浓度、不同次数 5-ALA 处理下库尔勒香梨果实品质的综合得分。通过综合评分及排序情况可知(表 6),150 mg·L⁻¹ 5-ALA 喷施 3 次得分最高,果实综合品质最优,其次为 200 mg·L⁻¹ 5-ALA 喷施 3 次。

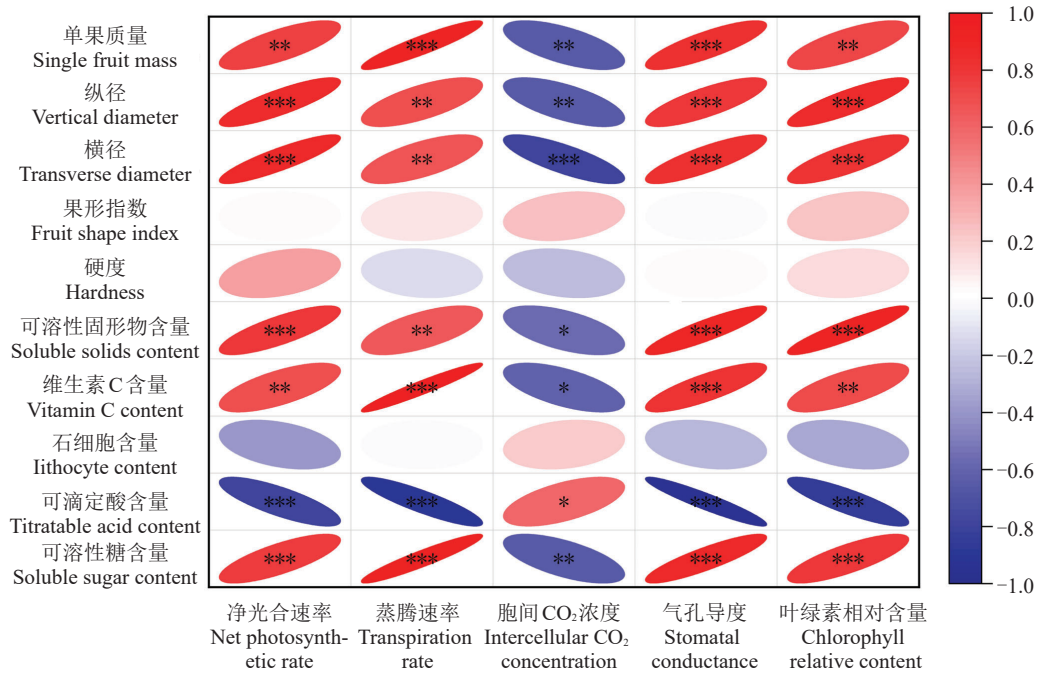
表 6 5-ALA 处理对库尔勒香梨果实品质影响的综合得分排名

Table 6 Ranking of comprehensive scores of the effects of 5-ALA treatment on fruit quality of Kuerlexiangli pear

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score			综合得分 Overall score	排名 Ranking
	F_1	F_2	F_3		
T11	6.30	2.07	0.99	4.85	1
T12	5.72	1.67	1.40	4.43	2
T7	4.13	1.75	0.23	3.20	3
T10	4.24	0.84	0.39	3.13	4
T8	3.87	1.64	0.34	3.01	5
T3	3.45	1.95	0.51	2.80	6
T4	2.71	1.69	1.09	2.31	7
T6	2.75	1.52	0.04	2.17	8
T9	2.68	0.17	-0.05	1.87	9
T2	2.06	1.52	0.99	1.83	10
T1	1.61	0.97	0.32	1.33	11
T5	1.41	1.02	0.19	1.18	12
CK3	0.40	0.42	0.51	0.42	13
CK2	0.17	0.52	0.28	0.25	14
CK1	0.25	0.64	0.23	0.32	15

2.6 叶片光合特性与果实品质的相关性分析

由图 4 可知,叶绿素含量、 P_n 、 T_r 、 G_s 与可溶性固形物含量、可溶性糖含量、纵径、横径、单果质量、维生素 C 含量均呈极显著正相关($P \leq 0.01$),与可滴定酸含量呈极显著负相关($P < 0.01$); C_i 与可滴定酸含量呈显著正相关($P < 0.05$),与单果质量、纵径、横径、可溶性糖含量呈极显著负相关($P \leq 0.01$),与可溶性固形物含量、维生素 C 含量呈显著负相关($P < 0.05$)。各光合特性指标与果形指数、硬度、石细胞含量不存在显著相关性。上述结果表明,5-ALA 能够通过提升库尔勒香梨叶片光合效率,从而使源扩



*表示在 0.05 水平显著相关; **表示在 0.01 水平极显著相关; ***表示在 0.001 水平极显著相关。

* represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level; *** represents extremely significant correlation at 0.001 level.

图4 叶片光合特性与果实品质的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between leaf photosynthetic characteristics and fruit quality

大;同时,提高果实单果质量、纵径、横径、可溶性糖含量、维生素C含量,加强了库的竞争,促进光合产物由源到库的运输,提升果实糖分积累,从而改善果实的风味品质。

3 讨论

汪良驹等^[7,19-21]最早将5-ALA应用于生产中,已在白菜、甜瓜、苹果、葡萄、梨上取得积极效果,其主要目的是促进作物光合作用,提升果实品质。叶绿素是光合过程中光能吸收、传递和转化的关键物质, P_n 决定光合产物的累积^[22],在葡萄^[23]、番茄^[24]、梨^[25]、苹果^[26-27]上的研究表明,5-ALA能有效提高叶片叶绿素含量和光合效率。本研究表明,外源喷施5-ALA显著提高了库尔勒香梨叶片叶绿素相对含量、 P_n 和 T ,降低 C_i ,对 G 影响较小,其中 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA喷施3次提升效果最为显著。5-ALA显著促进香梨叶片叶绿素合成,提升光合效率,且不同浓度、次数之间均有影响,与前人的研究结果相似。但在葡萄^[23]、番茄^[24]上喷施低浓度($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)5-ALA效果最好,表明5-ALA对不同物种之间叶绿素合成和光合作用的影响存在不同的最适浓度。同时,多数

研究表明,在正常栽培下^[25-26]或逆境条件下^[21,27],外源施用适宜浓度5-ALA均能增强植物的光合性能,促进植物生长,说明5-ALA能增强植物自身的抗逆性,面对多变的大田环境具有很强的适应性。此外,本研究外源施用5-ALA提升了库尔勒香梨叶片 P_n 和 T ,与张晓宏等^[24]在加工番茄上的研究结果基本一致;但5-ALA对香梨叶片 G 影响较小,与胡健等^[28]在苹果试管苗上的研究结果相悖,推测香梨果实发育后期叶片已经成熟,叶片气孔对5-ALA的响应并不明显;同时 C_i 显著降低,与申明^[25]在梨上的研究结果相似,但与李晟之等^[11]在葡萄上的研究结果相悖,表明5-ALA对不同物种及不同生长阶段光合作用的影响存在差异。

现有研究结果表明,外源喷施5-ALA可对园艺作物果实品质的提升产生积极作用。在葡萄花期,喷施 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA可显著提高单果质量与可溶性固形物含量^[29];在番茄收获期,喷施 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA,可提高番茄果实可溶性糖含量,降低可滴定酸含量,有效改善番茄果实风味^[30]。而本研究结果表明,在果实生长发育过程中,喷施3次 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA能够有效促进果实生长,提高果实纵径和横

径,促进果实膨大,但对果形指数影响较小。此外,外源喷施 5-ALA 能够显著提高库尔勒香梨果实中可溶性固形物、维生素 C 和可溶性糖含量等果实品质指标,其中 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA 喷施 3 次效果最好。5-ALA 对库尔勒香梨果实品质的提升与前人的研究结果相似,但对不同物种果实品质的影响存在不同的最适浓度。在玉露香梨上的研究表明,在果树营养生长期喷施低浓度 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 5-ALA 能有效改善光合作用,提高果实品质,而在果实转色期喷施高浓度 ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 5-ALA 能有效提高果实花青苷含量,改善果实品质^[31]。而本试验在库尔勒香梨果实膨大期喷施 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA 有效改善果实品质,说明 5-ALA 在果树生长发育的不同时期存在不同的最适浓度。此外,本研究发现,外源施用 5-ALA 对香梨果实硬度、石细胞含量和可滴定酸含量的影响不明显,推测其可以加速库尔勒香梨果实成熟^[32]并提早上市;库尔勒香梨一级果与二级果硬度范围维持在 $4.0\sim 6.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[32-33],推测 5-ALA 处理不会影响香梨的上市及采后贮藏。此外,根据上述果实品质的主成分分析结果可知,喷施 3 次 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA 处理对香梨果实品质的提升效果最优。

源是指营养制造与输出器官,主要为叶片^[34];库是指营养消耗或储藏器官,如果实等^[35]。Liang 等^[36]通过研究 5-ALA 对桃果实发育过程中叶片光合作用、同化物运输和糖分在果实中积累的影响,发现 5-ALA 增强了叶片中碳的固定能力,促进了同化物向果实的运输,降低了幼叶的分配率。这表明 5-ALA 扩大了源体积并加强了库的竞争,从而促进同化物易位到果实。本文通过光合特性与果实品质的相关性分析,明确叶片光合作用与果实中糖分及营养物质含量呈正相关,即叶片光合作用越强,越能促进果实中糖分的积累。此外,高晶晶等^[29]研究表明,在生长季节喷施 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA 溶液可增加红星和富士苹果叶片叶绿素含量,提高光合速率,进而提高果实可溶性固形物和可溶性糖含量,从而改善果实鲜食风味,进一步表明 5-ALA 能促进光合产物积累,增强果实对同化物的竞争。

4 结 论

外源喷施 3 次 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5-ALA 能够显著提高库尔勒香梨叶片叶绿素含量、 P_n 、 T_r ,降低 C_i ,显著提升光合作用效率;同时促进果实膨大,显著提高库尔

勒香梨果实单果质量、纵径、横径,并提高果实中可溶性固形物、可溶性糖和维生素 C 含量,有效改善香梨果实内在品质。本研究结果为香梨果实品质的调控提供了技术支撑。

参考文献 References:

- [1] 张峰,蒋志琴,陈小光,李世强,何天明. 库尔勒香梨产业发展因素分析及对策建议[J]. 中国农学通报, 2021, 37(34): 159-164.
ZHANG Feng, JIANG Zhiqin, CHEN Xiaoguang, LI Shiqiang, HE Tianming. The development factors of *Pyrus sinkiangensis* 'Korla Xiangli' industry[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(34): 159-164.
- [2] 饶媛媛,王晗瑶. 库尔勒市香梨产业发展现状、问题及对策[J]. 山西农经, 2024(14): 192-194.
RAO Yuanyuan, WANG Hanyao. The development status, problems and countermeasures of pear industry in Korla city[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2024(14): 192-194.
- [3] 张义,刘云利,刘子森,韩帆,严攀,贺锋,吴振斌. 植物生长调节剂的研究及应用进展[J]. 水生生物学报, 2021, 45(3): 700-708.
ZHANG Yi, LIU Yunli, LIU Zisen, HAN Fan, YAN Pan, HE Feng, WU Zhenbin. The research and application progress of plant growth regulators[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(3): 700-708.
- [4] 王春峰,张峰,程嘉宝,关晓媛,秦飞. 库尔勒香梨产业发展现状、存在问题与对策建议[J]. 果树资源学报, 2024, 5(5): 88-91.
WANG Chunfeng, ZHANG Feng, CHENG Jiabao, GUAN Xiaoyuan, QIN Fei. Current status, main problems and the suggestions on development of Korla Fragrant Pear[J]. Journal of Fruit Resources, 2024, 5(5): 88-91.
- [5] 魏朝晖,陈继红,张丽. 新疆库尔勒香梨果品质量存在的问题及对策[J]. 现代农业科技, 2018(14): 105.
WEI Chaohui, CHEN Jihong, ZHANG Li. Problems and countermeasures of fruit quality of Korla pear in Xinjiang[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(14): 105.
- [6] 赖灯妮,张群,尚雪波,谭欢,潘兆平,周雨佳,彭清辉. 植物生长调节剂在果蔬中的应用与安全性分析研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 451-459.
LAI Dengni, ZHANG Qun, SHANG Xuebo, TAN Huan, PAN Zhaoping, ZHOU Yujia, PENG Qinghui. Research progress on the application and safety analysis of plant growth regulator in fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 451-459.
- [7] 汪良驹,姜卫兵,章镇,姚泉洪,松井弘之,小原均. 5-氨基乙酰丙酸的生物合成和生理活性及其在农业中的潜在应用[J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(3): 185-192.
WANG Liangju, JIANG Weibing, ZHANG Zhen, YAO Quanhong, MATSUI Hiroyuki, OHARA Hitoshi. Biosynthesis and

- physiological activities of 5-aminolevulinic acid (ALA) and its potential application in agriculture[J]. *Plant Physiology Communications*, 2003, 39(3):185-192.
- [8] WANG L J, ZHANG J T, ZHONG Y, ZHANG L Z, YANG H, LIU L B, ZHOU J Y, IQBAL M M, GAN X. Regulation of 5-aminolevulinic acid and its application in agroforestry[J]. *Forests*, 2023, 14(9):1857.
- [9] 姚瑞赞,白茹,于庆帆,郑聪丽,杨怡帆,吉燕.基于主成分分析法研究不同植物生长调节剂对苹果果实品质的影响[J].*黑龙江农业科学*, 2023(3):56-63.
- YAO Ruiyun, BAI Ru, YU Qingfan, ZHENG Congli, YANG Yifan, JI Yan. Effects of different plant growth regulators on apple fruit quality based on principal component analysis[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2023(3):56-63.
- [10] 杨莉莉,张金水,李娜,同延安.乙酰丙酸对红富士苹果叶片生长和产量品质的影响[J].*西北农业学报*, 2020, 29(3):382-389.
- YANG Lili, ZHANG Jinshui, LI Na, TONG Yan'an. Effect of levulinic acid on leaf growth, yield and fruit quality of Red Fuji apple[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(3):382-389.
- [11] 李晟之,李阳阳,葛亚琪,杜菁荣,于小骞,张朝红.5-氨基乙酰丙酸对葡萄光合特性和果实品质的影响[J].*果树资源学报*, 2024, 5(2):34-37.
- LI Shengzhi, LI Yangyang, GE Yaqi, DU Jingrong, YU Xiaoqian, ZHANG Zhaohong. Effects of 5-aminolevulinic acid on photosynthetic characteristics and fruit quality of grapes[J]. *Journal of Fruit Resources*, 2024, 5(2):34-37.
- [12] 杨思玲,金欢淳,张培安,樊秀彩,生弘杰,卢素文,房经贵.5-氨基乙酰丙酸处理对葡萄果实品质及相关基因表达的影响[J].*南京农业大学学报*, 2023, 46(4):645-657.
- YANG Siling, JIN Huanchun, ZHANG Peian, FAN Xiucui, SHENG Hongjie, LU Suwen, FANG Jinggui. Effects of 5-aminolevulinic acid treatment on the quality of grape berries and the expression levels of related genes[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(4):645-657.
- [13] 杨雅兰,王诗赞,田蓿,王聪敏.ALA和氨基酸肥料对桃光合特性及品质的影响[J].*分子植物育种*, 2022, 20(6):1930-1936.
- YANG Yalan, WANG Shizhan, TIAN Yi, WANG Congmin. Effects of ALA and amino acid fertilizers on leaf photosynthesis and quality of peach[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(6):1930-1936.
- [14] 李文絮,曹晓云,汪晓谦.ALA与氯化钙、蔗糖配施对南红梨果实品质及着色的影响[J].*中国果树*, 2022(10):35-38.
- LI Wenxu, CAO Xiaoyun, WANG Xiaoqian. Effects of ALA combined with calcium chloride and sucrose on fruit quality and color of 'Nanhong' pear[J]. *China Fruits*, 2022(10):35-38.
- [15] 孙天雨,文博,王春峰,田嘉,郝志超,林彦,温玥,张峰.5-氨基乙酰丙酸对库尔勒香梨果实品质和挥发性代谢物的影响[J].*食品科学*, 2024, 45(23):8-17.
- SUN Tianyu, WEN Bo, WANG Chunfeng, TIAN Jia, HAO Zhichao, LIN Yan, WEN Yue, ZHANG Feng. Effect of 5-aminolevulinic acid on the quality and volatile metabolites of Korla fragrant pear fruit[J]. *Food Science*, 2024, 45(23):8-17.
- [16] 郭静,伏芳,高同雨,姜峰,李天忠,朱元娣.'京白梨'优质果实的评价指标分析[J].*中国农业大学学报*, 2022, 27(1):79-95.
- GUO Jing, FU Fang, GAO Tongyu, JIANG Feng, LI Tianzhong, ZHU Yuandi. Analysis on evaluation index of high quality *Pyrus ussuriensis* 'Jingbaili' fruits[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(1):79-95.
- [17] 广新梅,徐崇志,王绪春,兰海鹏,刘扬.采摘期内库尔勒香梨品质指标变化规律及相关关系[J].*江苏农业科学*, 2018, 46(19):118-121.
- GUANG Xinmei, XU Chongzhi, WANG Xuchun, LAN Haipeng, LIU Yang. On change rule and correlation of Korla fragrant pear quality indices in picking period[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(19):118-121.
- [18] 聂继文,李静,杨振锋,张红军,李明强.冷冻法测定梨的石细胞含量[J].*果树学报*, 2006, 23(1):133-135.
- NIE Jiyun, LI Jing, YANG Zhenfeng, ZHANG Hongjun, LI Mingqiang. Study on the conditions for measuring stone cell content in pear flesh by freezing method[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(1):133-135.
- [19] 汪良驹,石伟,刘晖,刘卫琴,姜卫兵,侯喜林.外源5-氨基乙酰丙酸处理对小白菜叶片的光合作用效应[J].*南京农业大学学报*, 2004, 27(2):34-38.
- WANG Liangju, SHI Wei, LIU Hui, LIU Weiqin, JIANG Weibing, HOU Xilin. Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid treatment on leaf photosynthesis of pak-choi[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(2):34-38.
- [20] 汪良驹,王中华,李志强,刘晖,刘卫琴,陈宗元,颜璞,孙乾乾.5-氨基乙酰丙酸促进苹果果实着色的效应[J].*果树学报*, 2004, 21(6):512-515.
- WANG Liangju, WANG Zhonghua, LI Zhiqiang, LIU Hui, LIU Weiqin, CHEN Zongyuan, YAN Pu, SUN Dunqian. Effect of 5-aminolevulinic acid on enhancing apple fruit coloration[J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, 21(6):512-515.
- [21] 汪良驹,姜卫兵,黄保健.5-氨基乙酰丙酸对弱光下甜瓜幼苗光合作用和抗冷性的促进效应[J].*园艺学报*, 2004, 31(3):321-326.
- WANG Liangju, JIANG Weibing, HUANG Baojian. Promotion of photosynthesis by 5-aminolevulinic acid (ALA) during and after chilling stress in melon seedlings grown under low light condition[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(3):321-326.
- [22] 郭建辉,刘波,王旭,张敏,徐晶.园艺作物种质资源光合特性研究进展[J].*安徽农业科学*, 2025, 53(11):1-4.
- GUO Jianhui, LIU Bo, WANG Xu, ZHANG Min, XU Jing. Advances in photosynthetic characteristics of horticultural crop germplasm resources[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(11):1-4.

- [23] 张梦燕,孙军利,赵宝龙. 外源 ALA 对克瑞森无核葡萄叶片光合特性及果实品质的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(3): 493-500.
ZHANG Mengyan, SUN Junli, ZHAO Baolong. Effect of 5-aminolevulinic acid (ALA) on leaf photosynthesis and fruit quality of Crimson Seedless grapevine[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(3): 493-500.
- [24] 张晓宏,郭刚,王著龙. 叶面喷施 5-氨基乙酰丙酸对加工番茄光合特征及果实冷藏后品质指标的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40(5): 326-331.
ZHANG Xiaohong, GUO Gang, WANG Zhulong. Effects of foliar application 5-aminolevulinic acid on photosynthetic characteristics and refrigerated quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2017, 40(5): 326-331.
- [25] 申明. 5-氨基乙酰丙酸调节梨树叶片光合特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
SHEN Ming. Regulation of 5-aminolevulinic acid (ALA) on leaf photosynthesis of pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [26] 高晶晶,冯新新,段春慧,李健花,师忠轩,高付永,汪良驹. ALA 提高苹果叶片光合性能与果实品质的效应[J]. 果树学报, 2013, 30(6): 944-951.
GAO Jingjing, FENG Xinxin, DUAN Chunhui, LI Jianhua, SHI Zhongxuan, GAO Fuyong, WANG Liangju. Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA) on leaf photosynthesis and fruit quality of apples[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(6): 944-951.
- [27] 安玉艳,张丽颖,冯新新,田凡,李洁,汪良驹. 5-氨基乙酰丙酸对苹果叶片耐弱光能力的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(5): 987-995.
AN Yuyan, ZHANG Liying, FENG Xinxin, TIAN Fan, LI Jie, WANG Liangju. Effect of 5-aminolevulinic acid on low light tolerance of apple leaves[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(5): 987-995.
- [28] 胡健,安玉艳,蔡长玉,何莎莎,汪良驹. 胞质 pH 参与 5-氨基乙酰丙酸诱导的苹果叶片气孔开放[J]. 园艺学报, 2019, 46(10): 1869-1881.
HU Jian, AN Yuyan, CAI Changyu, HE Shasha, WANG Liangju. Cytoplasmic pH is involved in 5-aminolevulinic acid (ALA)-induced stomatal opening in apple leaves[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2019, 46(10): 1869-1881.
- [29] WATANABE K, NISHIHARA E, WATANABE S, TANAKA T, TAKAHASHI K, TAKEUCHI Y. Enhancement of growth and fruit maturity in 2-year-old grapevines cv. Delaware by 5-aminolevulinic acid[J]. Plant Growth Regulation, 2006, 49(1): 35-42.
- [30] WANG J W, ZHANG J, LI J, DAWUDA M M, ALI B, WU Y, YU J H, TANG Z Q, LYU J, XIAO X M, HU L L, XIE J M. Exogenous application of 5-aminolevulinic acid promotes coloration and improves the quality of tomato fruit by regulating carotenoid metabolism[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 683868.
- [31] 刘慧芳,贾语秀,冯新新,李六林. 5-氨基乙酰丙酸在玉露香梨上的应用研究[J]. 山西农业科学, 2022, 50(2): 155-160.
LIU Huifang, JIA Yuxiu, FENG Xinxin, LI Liulin. Application of 5-aminolevulinic acid on Yuluxiang pear production[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 155-160.
- [32] T/XLXH 004—2023 库尔勒香梨收购质量要求[S].
T/XLXH 004—2023 Quality requirements for Korla pears acquisition. Information and literature[S].
- [33] DB65/T 4295—2020 新疆库尔勒香梨果品质量分级标准[S].
DB65/T 4295—2020 Quality grading standard of Korla pear fruit in Xinjiang[S].
- [34] 袁军,石斌,吴泽龙,谭晓风. 不同库源关系对油茶光合作用及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1287-1292.
YUAN Jun, SHI Bin, WU Zelong, TAN Xiaofeng. Response of fruit quality and leaf photosynthesis to different sink-source relationships in *Camellia oleifera*[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1287-1292.
- [35] 石斌. 不同库源关系对油茶光合作用及同化物分配的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
SHI Bin. Photosynthesis and assimilate distribution in source leaves in response to sink-source manipulations in *Camellia oleifera*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.
- [36] LIANG R L, WANG L J, WANG X Q, ZHANG J T, GAN X. Effects of exogenous ALA on leaf photosynthesis, photosynthate transport, and sugar accumulation in *Prunus persica* L.[J]. Forests, 2023, 14(4): 723.