

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

张梦燕^{1,2}, 孙军利^{1,2*}, 赵宝龙^{1,2}

(1 石河子大学 农学院, 新疆石河子 832000; 2 特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室, 新疆石河子 832000)

摘 要:以日光温室栽培的欧亚葡萄品种克瑞森无核为试验材料,在果实膨大期和始熟期采用不同浓度(50、100 和 150 mg · L⁻¹)5-氨基乙酰丙酸(ALA)喷施叶片和果穗,研究外源 ALA 处理对葡萄叶片光合特性、果实着色效果及果实品质的影响。结果表明:(1)各浓度 ALA 处理后葡萄叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)都有不同程度的增加,并以 100 mg · L⁻¹ ALA 处理效果最好。(2)50~150 mg · L⁻¹ ALA 处理均能不同程度提高葡萄果皮花青素、叶绿素及类胡萝卜素含量,且各 ALA 处理的果实可溶性糖含量显著高于对照,但可滴定酸含量低于对照。(3)100 和 150 mg · L⁻¹ ALA 处理能够显著改善果实成熟期的着色参数,且果实着色指数(CIRG)与花青素的积累呈现出良好的一致性。研究发现,在葡萄果实膨大期及始熟期喷施适宜浓度(100 mg · L⁻¹)ALA 能够有效提高叶片光合性能,同时促进果实着色,显著改善果实外观色泽和果实品质。

关键词:5-氨基乙酰丙酸(ALA);葡萄;光合特性;果实品质

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

Effect of 5-aminolevulinic Acid (ALA) on Leaf Photosynthesis and Fruit Quality of Crimson Seedless Grapevine

ZHANG Mengyan^{1,2}, SUN Junli^{1,2*}, ZHAO Baolong^{1,2}

(1 College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2 Production and Construction Corps Key Laboratory of Special Fruits and Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In greenhouse, with cultivation Eurasian grape variety of Crimson Seedless as experimental materials, we sprayed the different concentrations (50, 100 and 150 mg · L⁻¹) of 5-aminolevulinic acid (ALA) on the leave and grape clusters in the stage of fruit enlargement and initial maturity, to investigate the effects of ALA treatment on grape leaf photosynthetic characteristics and fruit coloration and fruit quality. The results showed that: (1) after treated with different doses of ALA, grape leaf intercellular CO₂ concentration (C_i), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and net photosynthetic rate (P_n) had increased in different degrees, and 100 mg · L⁻¹ ALA had the best performance; (2) 50~150 mg · L⁻¹ ALA treatment significantly increased the grape anthocyanin, chlorophyll and carotenoid contents; soluble sugar content of fruit was significantly higher than that of control, and the titratable acid content was lower than that of the control; (3) 100 and 150 mg · L⁻¹ treatments can significantly improve the fruit maturity.

收稿日期: 2017-10-25; 修改稿收到日期: 2018-01-15

基金项目: 新疆建设兵团应用基础研究计划(2016AG007); 国家自然科学基金(31560542)

作者简介: 张梦燕(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事园艺植物生理调节研究。E-mail: 1511449518@qq.com

* 通信作者: 孙军利, 博士, 副教授, 主要从事园艺植物生理调节研究。E-mail: 1530322722@qq.com

ty and fruit coloring parameters, and color index (CIRG) agreement was in good agreement with the accumulation of anthocyanins. It was found that spraying suitable concentration ($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of ALA during grape fruit enlargement and initial maturity stage can effectively improve leaf photosynthetic performance, and promote fruit coloring, and significantly improve fruit appearance, color and fruit quality.

Key words: 5-aminolevulinic acid(ALA); grape; photosynthetic pigment; fruit quality

随着市场对鲜食葡萄果实品质要求的提高,如何改善果实外观品质和促进果实着色成为广大果树工作者普遍关心的问题。新疆是葡萄种植的优势产区,虽具有丰富的光热资源,但在设施葡萄生产中存在着一些葡萄品种着色困难的问题。克瑞森无核(Crimson Seedless),别名克伦生无核、淑女红无核,为晚熟无核葡萄品种,属欧亚种。该品种自根苗生长势强,树势旺,易形成花芽,易丰产,但若负载量过大或管理不善易发生着色不良现象。随着人们对食品安全的日益重视,着色剂的使用往往会引起消费者的不安,选择绿色友好型的物质促进果实着色、提高果实品质已经成为当前迫切需要研究的重要生产问题。

5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, ALA)作为自然界生物体内天然存在的一种生理活性物质,是所有生物体卟啉化合物(叶绿素、光敏色素、维生素 B、亚铁血红素等)生物合成的第一个关键前体^[1],调节植物生长发育,被视为一种新的生长调节物质。相关外源试验表明,适宜质量浓度的 ALA 处理能够显著提高植物叶片光合效率,促进作物生长,增强其抗逆性^[2-3]。日光温室番茄叶片通过 ALA 处理后,番茄植株的叶绿素含量明显提高,且番茄果实产量和品质也有明显的提高和改善^[4]。还有研究指出,ALA 与葡萄、苹果果皮花青素合成积累密切相关,ALA 处理能够诱导花青素合成相关基因的表达,促使花青素含量显著高于对照,果实品质明显提高^[5]。随着果实中花青素合成研究迅速发展,人们认识到花青素含量与果实着色有着密切联系,且花青素是使葡萄果实表面呈现出红、紫红到蓝等不同颜色的主要原因^[6]。在‘早白花’桃果实着色前利用不同质量浓度 ALA 溶液涂布果实,结果发现 ALA 处理不仅促使果皮花色素苷大量积累,还能够使果实提前着色,进而推测 ALA 参与了果实花色素苷合成的调控,对果皮花色素苷的提早合成具有促进作用^[7]。ALA 促进果实花青素合成积累已有大量报道,但有关 ALA 是如何通过色素类物质的调控来影响果实着色效果的研究尚较少。因此,本试验以日光温室栽培欧亚葡萄品种克瑞森无核为试验材料,研究不同质量浓度 ALA 处理对葡

萄果实着色效果及相关生理指标变化的关系,探讨外源 ALA 对叶片光合性能的作用效果,为 ALA 在葡萄生产上推广应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与处理

试验于 2017 年 5 月在石河子农业科学研究院葡萄研究所示范基地进行,试材选取基地内的 3 年生欧亚葡萄品种克瑞森无核。葡萄采用水平连叠式棚架栽培,株行距 $0.5\text{ m}\times3.5\text{ m}$,东西行向,葡萄果实性状表现均匀一致,设施栽培常规管理。于果实膨大期(6 月 15 日)及始熟期(6 月 25 日)选择架势、长势和负载量均相似的葡萄植株,每株随机选取大小一致的果穗及同侧节位中发育良好、无病虫害的结果枝功能叶挂牌做好标记,分别用 50、100 和 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ALA 溶液于当日傍晚喷施葡萄标记叶片及果穗,以清水喷施作为对照。从最后一次处理之日后,各处理每隔 1 周取果穗样 1 次,直至果实成熟,共取样 5 次。取样时随机从各处理植株上采摘 3 穗带标签果穗,作为 3 次重复。样品采集后,从各处理果穗上随机选取 10 粒长势一致的果实,剥取果皮立即放入液氮中,于 -80°C 超低温冰箱中贮存,用于花青素含量的测定;剩余各处理果穗带回实验室,用于测定葡萄果实的各项生理指标。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 叶片光合生理指标 叶片光合参数分别于葡萄果实始熟期(花后 45 d 大部分果实褪绿,进入转色,6 月 25 日)和果实成熟期(大部分果粒变软,果皮呈色鲜艳均匀,7 月 30 日)进行测定,各处理选择做好标记的植株叶片,在两个时期分别选择一晴天,于 10:00~18:00 每隔 2 h 测定 1 次,每次每株测定 3 片叶,重复 3 次。测定采用开放式气体交换 Li-6400 便携式光合作用测定系统,测定指标包括各处理葡萄叶片胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

1.2.2 果实品质及色泽指标 果实色泽指标采用 NC-9801 手持色差计测定。在果实成熟期各处理

果穗中随机选取 15 粒长势均匀一致的果实,测定每个果实赤道部位的色泽指标。包括果面色泽明亮度(L^*)、颜色组分(a^* 、 b^*),同时得到色泽饱和度(C^*)、色度角(h°),最终通过 L^* 、 C^* 、 h° 计算葡萄果实着色指数 CIRG,重复 3 次。其中, C^* 值越大表示果面色泽越鲜艳,着色效果越好;而葡萄果实颜色指数 CIRG 的大小表示果实的外观色泽,即 $CIRG < 2$ 表现为黄绿色, $2 < CIRG < 4$ 表现为粉红色, $4 < CIRG < 5$ 表现为红色, $5 < CIRG < 6$ 表现为深红色, $CIRG > 6$ 表现为蓝黑色^[8]。

1.2.3 果实品质 果实可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[9],可滴定酸含量的测定采用 NaOH 滴定法^[10]。

果皮花青素含量的测定参照王慧聪^[11]的方法并加以改进。各处理分别称取液氮速冻的葡萄果皮 1 g 剪碎混匀加入 10 mL 1% 盐酸-甲醇溶液,32 ℃ 恒温箱中提取 4 h 以上,过滤,滤液为花青素提取液。用紫外分光光度计分别在 553 nm 和 600 nm 处测定提取液的吸光值 D_{553} 和 D_{600} ,花青苷含量 = $D_{553} - D_{600}$ 。差值每增加 0.01 定义为一个单位(U)的花青苷含量,重复 3 次,取平均值。

果皮叶绿素与类胡萝卜素含量的测定参照李伟^[12]王枝翠^[13]的方法并加以修改。各处理分别称取新鲜葡萄果皮 0.2 g 剪碎混匀加入 10 mL 丙酮乙醇混合提取液,在黑暗条件下浸提 24 h,待果皮变白,取滤液分别用紫外分光光度计测定在 663 nm、645 nm、440 nm 波长处的吸光度值,重复 3 次。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据分析,用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,利用 Origin 9 软

件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度 ALA 处理对葡萄叶片光合指标日变化特性的影响

2.1.1 气孔导度 植物吸收水分和二氧化碳的主要通道为气孔,植物叶片气孔导度(G_s)的大小将直接影响植物的光合效应。图 1 显示,各外源 ALA 处理和对照葡萄叶片 G_s 在始熟期和成熟期表现相同的升高-降低-再升高-再降低双峰日变化曲线。其中,它们的 G_s 均在 12:00 和 16:00 分别达到最高峰和次高峰,于 14:00 表现为最低值;整个葡萄叶片 G_s 在两时期日变化过程中,3 种浓度 ALA 处理均较相应对照有不同程度的增加,并以 100 $mg \cdot L^{-1}$ 的 ALA 处理表现最好,其 G_s 在着色期 12:00 和 16:00 相比对照分别显著高出 16.8% 和 15.4%,成熟期分别较对照显著高出 19.1% 和 20.9% ($P < 0.05$);同时,生育期间比较发现,各处理和对照叶片 G_s 均表现为始熟期明显大于成熟期。

2.1.2 胞间二氧化碳浓度 各质量浓度 ALA 处理葡萄叶片胞间 CO_2 浓度(C_i) 在始熟期和成熟期的日变化趋势与其 G_s 变化规律相似,均呈双峰曲线(图 2)。其中,ALA 处理后两时期葡萄叶片 C_i 均高于相应对照,同样以 100 mg/L 的 ALA 处理效果最显著,50 和 150 mg/L ALA 处理效果虽高于对照,但其响应趋势不稳定,可能与处理浓度作用时间不同有关。各 ALA 处理和对照葡萄叶片 C_i 均在 12:00 达到最高,此时 50、100 和 150 $mg \cdot L^{-1}$ ALA 处理叶片 C_i 在始熟期分别比对照增加了 6.3%、11.4% 和 6.5%,在成熟期分别较对照高出 3.5%、14.9% 和

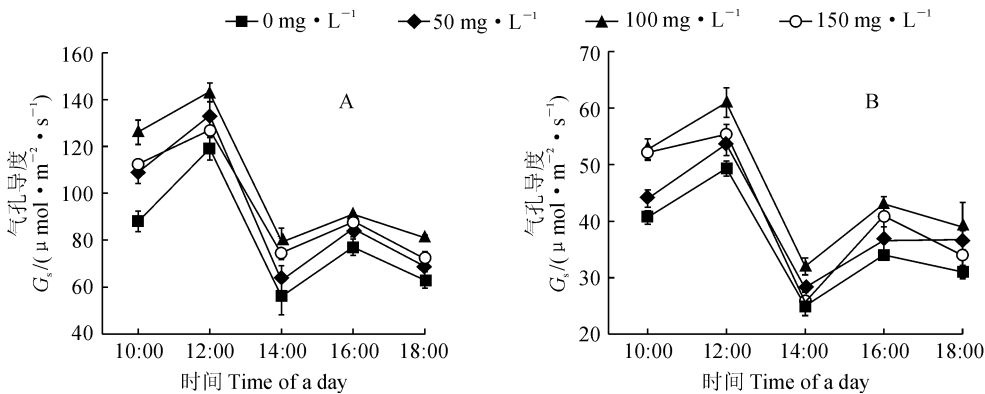


图 1 ALA 处理下葡萄始熟期(A)和成熟期(B)叶片气孔导度(G_s)的变化
Fig.1 The leaf stomatal conductance(G_s)of Crimson Seedless grape at veraison (A) and maturity (B) stages with ALA treatment

12.7%；两时期各处理叶片 C_i 均在 14:00 最低，这是由于中午光强和气温都较高，促使叶片温度升高，加速水分蒸腾，导致叶片水势下降，气孔关闭，叶片吸收 CO_2 量因此减少。另外，各 ALA 处理和对照叶片的 C_i 大小均表现为始熟期大于成熟期。

2.1.3 蒸腾速率 图 3 显示，无论在始熟期还是成熟期，各质量浓度 ALA 处理和对照葡萄叶片的蒸腾速率(T_r)日变化均呈双峰曲线，且始熟期各处理和对照的 T_r 均高于成熟期；相对于 G_s 和 C_i ，叶片 T_r 整体日变化幅度较小。其中，各处理和对照的 T_r 均随光强增大和叶片蒸腾作用加强于 12:00 达到最高值，后又因中午叶片光合“午休”现象导致叶片气孔关闭， T_r 又于 14:00 达到最低值；100 $mg \cdot L^{-1}$ ALA 处理葡萄叶片的 T_r 在始熟期和成熟期都显著高于同期对照，50 和 150 $mg \cdot L^{-1}$ ALA 处理仅在浓度作用响应较大时期显著高于对照。各处理葡萄叶片 T_r 变化在始熟期以 12:00 最为明显，而在

成熟期以 16:00 最为明显，此时 50、100 和 150 $mg \cdot L^{-1}$ ALA 处理的 T_r 在始熟期分别比同期对照增加了 11.5%、38% 和 25%，在成熟期较同期对照分别增加了 12%、16.4% 和 7.4%，且差异显著($P < 0.05$)。

2.1.4 净光合速率 图 4 显示，各梯度浓度 ALA 处理和对照的葡萄叶片净光合速率(P_n)在始熟期和成熟期日变化也均呈双峰曲线，并表现为始熟期明显高于成熟期，且都出现明显的光合“午休”现象。其中，随着光照强度的变化，两时期各浓度 ALA 处理和对照葡萄叶片 P_n 均分别在 12:00 和 16:00 达到最高峰和次高峰，均在 14:00 出现低谷，在 18:00 降到最低值；在始熟期和成熟期葡萄叶片 P_n 日变化过程中，100 $mg \cdot L^{-1}$ ALA 处理的叶片 P_n 始终高于其他处理和对照，并且在各个测定时刻与对照差异都达显著水平($P < 0.05$)，而 50 和 150 $mg \cdot L^{-1}$ 的 ALA 处理与同期对照差异不显著或仅在个

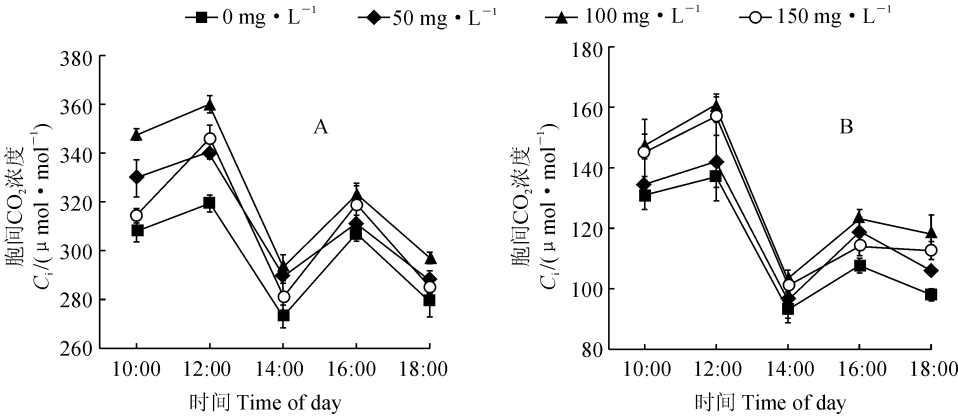


图 2 ALA 处理下葡萄始熟期(A)和成熟期(B)叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)的变化
Fig. 2 The leaf intercellular CO_2 conductance(C_i) of Crimson Seedless grape at veraison (A) and maturity (B) stages with ALA treatment

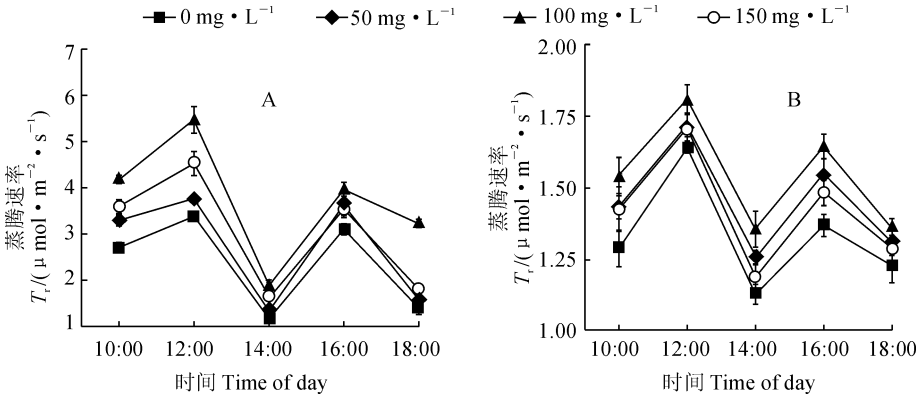


图 3 ALA 处理下葡萄始熟期(A)和成熟期(B)叶片蒸腾速率(T_r)的变化
Fig. 3 The leaf transpiration rate(T_r) of Crimson Seedless grape at veraison (A) and maturity (B) stages with ALA treatment

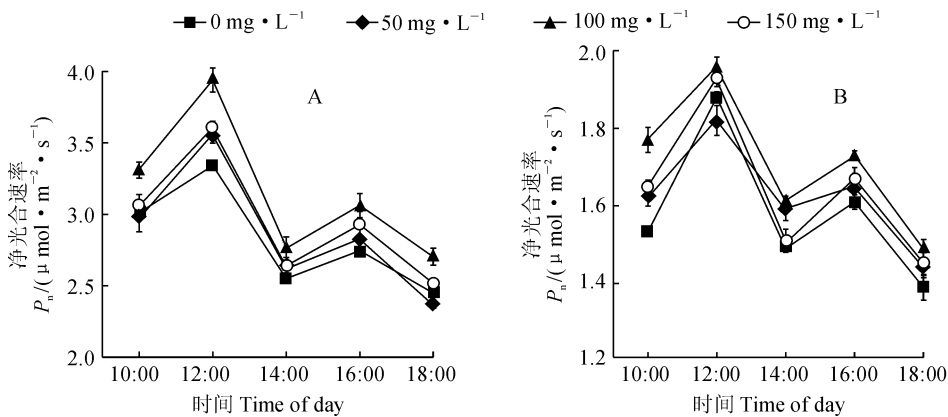


图 4 ALA 处理下葡萄始熟期(A)和成熟期(B)叶片净光合速率的变化
Fig. 4 The leaf net photosynthetic rate of Crimson Seedless at veraison (A)
and maturity (B) stages with ALA treatment

别浓度时才显著高于对照。以上结果说明,适宜浓度外源 ALA 处理能够显著提高葡萄叶片 P_n ,但并不改变其日变化总体趋势。

2.2 不同质量浓度 ALA 处理对葡萄成熟期果实色泽参数的影响

由图 5 可看出,各质量浓度 ALA 处理葡萄成熟期果实颜色指数(CIRG)均显著高于对照,50、100 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的 CIRG 值增幅分别达 7.3%、25.5%和 16.3%;而果面色泽明亮度(L^*)、颜色组分(a^* 、 b^*)、色泽饱和度(C^*)和色度角(h°)比对照均降低,并以 h° 值表现最为显著,50、100 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的 h° 值较对照分别降低 4.9%、31.3%和 13.0%。其中,100 mg/L ALA 处理各个果实色泽参数与对照差异均达显著水平($P < 0.05$),150 mg/L ALA 处理除 a^* 外也均与对照差异显著,而 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的果实仅 h° 和 CIRG 值与对照有显著差异。因此,外源 ALA 处理,尤其是 100 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理,虽然使得成熟期葡萄果面色泽明亮度变暗,但能够显著促进果实着色,有效改善果实外观色泽。

2.3 不同质量浓度 ALA 处理对葡萄果实品质的影响

2.3.1 可溶性糖和可滴定酸含量 在外源 ALA 处理后 25 d 内,从葡萄果实始熟期到果实成熟过程中,各 ALA 处理和对照葡萄果实中可溶性糖含量总体呈线性增长趋势(图 6,A)。其中,从处理后到 10 d 左右,果实可溶性糖含量增长缓慢,且各 ALA 处理与对照间无显著差异;在处理 10~25 d,果实可溶性糖含量呈较快增加趋势,各处理显著高于对照($P < 0.05$),并在处理后 25 d 效果最为明显,50、100 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理较对照分别显著提高了 19.8%、

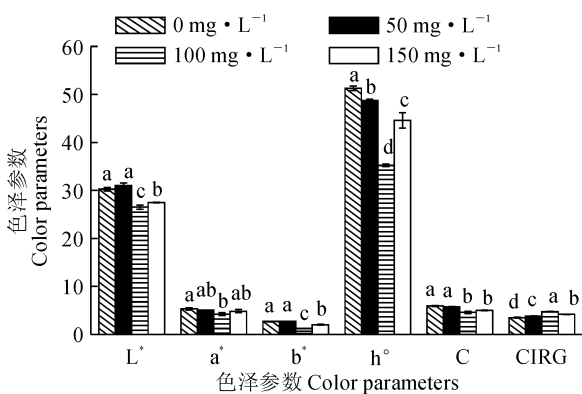


图 5 ALA 处理下成熟期葡萄果实色泽参数的变化
Fig. 5 The ripening grape fruit color parameters of Crimson Seedless grape at maturity stage with ALA treatment

31.1%和 17.1%。可见,ALA 处理能够不同程度提高葡萄果实可溶性糖含量,这种促进效应在处理后 15 d 开始显现,并保持较高的增长趋势,且以 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理效果最好。

同时,葡萄果实可滴定酸含量在 ALA 处理后 25 d 内整体表现出下降趋势,并以对照果实含量水平最高、下降幅度最大(图 6,B)。其中,在葡萄果实成熟过程中,ALA 处理果实可滴定酸含量始终显著低于对照,从处理后 5 d 开始便显现效应,且此时 50、100 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理与对照相差幅度最大,较对照分别降低了 51.2%、58.2%和 51.8%;伴随果实的成熟,各处理果实可滴定酸含量均持续下降,但 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理相比 50 和 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理效果更稳定,且含量水平最低、处理效果最显著($P < 0.05$)。

2.3.2 果皮花青素、叶绿素和类胡萝卜素含量 在 ALA 处理后 25 d 内,各处理和对照葡萄果皮花青素、

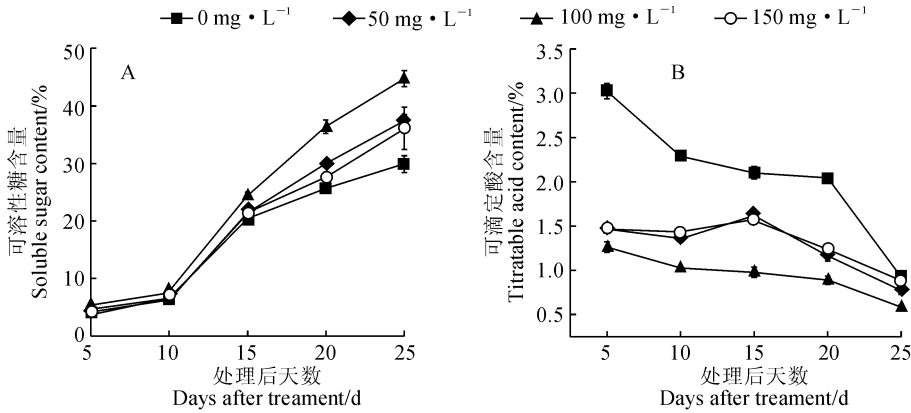


图 6 ALA 处理下葡萄果实可溶性糖、可滴定酸含量的变化

Fig. 6 The soluble sugar and titratable acid content in Crimson Seedless grape fruit with ALA treatment

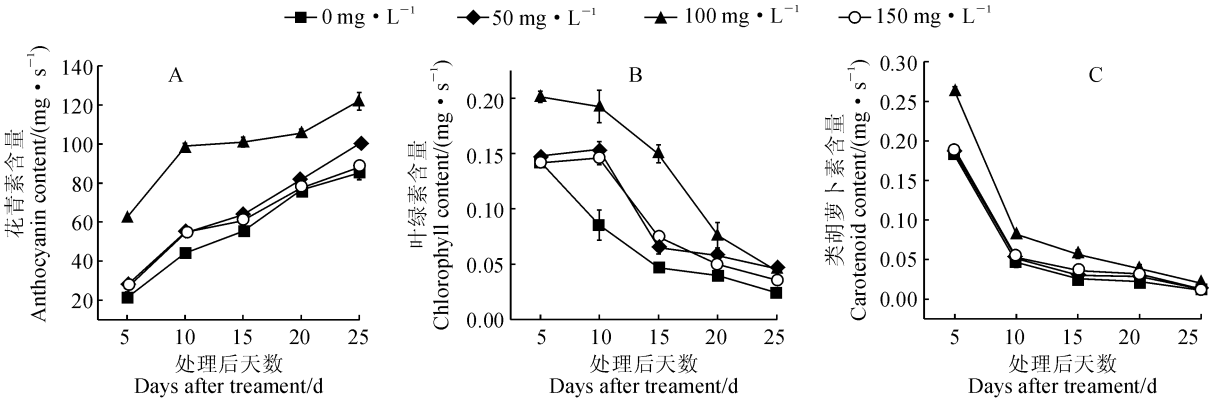


图 7 ALA 处理下葡萄果皮花青素、叶绿素和类胡萝卜素含量的变化

Fig. 7 The anthocyanin, chlorophyll and carotenoid contents in Crimson Seedless grape fruit with ALA treatment

叶绿素和类胡萝卜素含量总体表现出相似的变化趋势,即果皮花青素含量逐渐升高,而叶绿素和类胡萝卜素含量逐渐降低;期间,各果皮色素含量始终以 100 mg · L⁻¹ ALA 处理最高,并明显高于同期对照和其余处理(图 7)。其中,伴随着果实发育,各 ALA 处理葡萄果皮中花青素含量较相应对照都有不同程度的增加,且 100 mg · L⁻¹ ALA 处理效果最显著($P<0.05$);100 mg · L⁻¹ ALA 处理果皮花青素含量在处理 10d 迅速增加,较对照提高了 55.1%,至处理后 25 d 虽呈缓慢增长趋势,但相比对照仍表现出较高的促进效应(图 7,A)。同时,随着葡萄果实的着色和成熟,各浓度 ALA 处理能够有效促进各时期果皮叶绿素含量的积累;在处理 5~10 d,葡萄果实正处于着色阶段,各处理缓解了着色期花青素大量积累对叶绿素合成的屏蔽效应,减小了叶绿素在成熟过程中的降解速率;该促进效果在处理 10 d 最为显著,此时 50、100 和 150 mg · L⁻¹ 处理叶绿素含量分别较对照提高了 44.5%、55.7% 和 41.5%,并以 100 mg · L⁻¹ ALA 处理效果稳定且最为显著(图 7,B)。另外,伴随葡萄果实

成熟,各 ALA 处理果皮类胡萝卜素含量均比对照有不同程度的增加,但 50 和 150 mg · L⁻¹ 处理与对照总体差异不显著,而 100 mg/L ALA 处理较对照显著提高($P<0.05$);在 100 mg · L⁻¹ 处理后 5~15 d 开始显现效应且最为明显,处理 5、10、15 d 时分别相比对照增加 54.8%、42.5% 和 31.2%;随着果实逐渐成熟,各处理和对照果皮类胡萝卜素的降解基本趋于平缓,且其间差异性越来越小。

3 讨论

目前,有关 ALA 处理对植物叶片光合效应影响的研究已有大量报道。相关外源试验表明,ALA 可以促进小白菜^[14]、萝卜^[15]、番茄^[16]、黄瓜^[17] 和西瓜^[18] 等作物叶片光合作用,增强植物的抗逆性。研究普遍认为,ALA 是血红素合成的关键前体物质,而血红素作为呼吸酶的一个非蛋白性辅基,其处理诱导血红素合成,进而促进植物的光合反应^[19-20]。从本研究结果来看,ALA 处理明显提高了葡萄叶片胞间 CO₂ 浓度、气孔导度、蒸腾速率和净光合速率,但这种促进效应并不随 ALA 浓度的增加而增强,

只表现出一种类似于植物激素作用的浓度效应,因此,认为 ALA 是作为一种生长调节物质调节植物生长以及参与植物光合色素的合成。这与在兔眼蓝莓和苹果上观察到的效果相似。花后喷施 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA,兔眼蓝莓叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量较对照都有显著的提升^[21]。生长季节喷施 $0.05 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA,苹果叶片叶绿素含量、净光合速率和瞬时羧化率也都有不同程度的提高^[22],且这种处理促进效应是长期的。本试验测定的是处理后近 1 个月的效应,再次证明,ALA 对植物叶片光合效率的促进效应是持久的,且与浓度大小无直接关系。

色泽是葡萄浆果品质的重要指标之一,其形成是各种色素综合作用的结果。对葡萄而言,花青苷的种类含量、分布状态对果实着色和品质起决定性的作用,花青苷分子由糖和花色素组成,糖不仅是花青苷合成的关键前体物质,更多是通过信号机制作为信号物质促进花青苷的合成。在葡萄果实盛花期后喷施 ALA 可显著提高成熟期果实中可溶性糖含量,降低可滴定酸含量,且花青素含量与糖含量呈明显正相关,并以 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理效应最明显^[23]。本研究结果进一步表明,ALA 处理后 25 d 内,克瑞森无核葡萄果实可溶性糖、花青素含量持续增加,叶绿素和类胡萝卜素含量明显高于对照,同时果实着色指数(CIRG)显著提高,可滴定酸含量明显下降。汪良驹等^[24]早在苹果上的应用表明, $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理可明显促进果实着色,改善果实外观品质。不同的是本实验最为明显的浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这可能与处理时间、浓度作用时间和物种自身代谢的差异有关。由此看出,一定质量浓度 ALA 处理对果实糖酸含量的调控能够有效促进花

青素的积累。

花青素的表达常常受到果皮中叶绿素和类胡萝卜素含量的干扰。叶绿素迅速降解的时间与花青苷大量合成的时间大致吻合,且在果实发育过程中,叶绿素含量与花青素含量的变化呈极显著负相关^[25]。本研究结果与之相似,在果实成熟过程中,葡萄果皮花青素不断积累,同时果皮叶绿素和类胡萝卜素含量持续下降,经 ALA 处理后的果皮花青素、叶绿素和类胡萝卜素含量都明显高于对照;与前人结果不同的是,本研究发现,ALA 处理后 5~15 d 是果皮花青素迅速积累期,而此时经 ALA 处理的葡萄果皮叶绿素含量较对照降解速率明显变缓,由此可知,外源 ALA 在能够有效促进花青素积累的同时,还可以缓解叶绿素迅速降解对花青素合成的屏蔽作用。

综上所述,在果实膨大期和始熟期对葡萄果实和叶片喷施适宜浓度 ALA 能够显著提高克瑞森无核葡萄果皮叶绿素和类胡萝卜素含量,增强叶片光合效能,有效促进果皮花青素积累,进而使果实着色指数(CIRG)显著增加,果实外观品质得到改善。ALA 处理后果实可溶性糖含量明显增加,可滴定酸含量下降,使葡萄果实鲜食风味提高。喷施不同质量浓度 ALA 对克瑞森无核葡萄果实成熟过程中品质、着色效果和光合性能都有不同程度的提升,并以 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理总体效果表现最好,各浓度效应之间无规律变化,这可能与不同浓度发生作用效应时间的不同有关。目前,ALA 作为天然无毒的调节剂在果树和蔬菜上已有广泛应用,本实验结果将为 ALA 促进葡萄果实着色及光合性能提供理论依据,同时喷施 ALA 可以作为葡萄实际生产中改善果实品质的有效技术措施。

参考文献:

- [1] VON WETTSTEIN D, GOUGH S, KANANAGARA C G. Chlorophyll biosynthesis[J]. *Plant Cell*, 1995, 7: 1 039-1 057.
- [2] 孙永平,张治平,徐呈祥,等. 5-氨基乙酰丙酸处理对低温下西瓜叶片快速叶绿素荧光诱导动态曲线的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36: 671-678.
SUN Y P, ZHANG Z P, XU C X, *et al.* Effect of ALA on fast chlorophyll fluorescence induction dynamics of watermelon leaves under chilling stress [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36: 671-678.
- [3] 李汉钊,孙军利,赵宝龙,等. 外源 5-氨基乙酰丙酸对 NaCl 胁迫下酸枣光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(5): 952-958.
- [4] LI H Z, SUN J L, ZHAO B L, *et al.* Foliar spray of 5-aminolevulinic acid on photosynthetic characteristics of wild Jujube under NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(5): 952-958.
- [4] 徐 铭,徐福利. 5-氨基乙酰丙酸对日光温室番茄生长发育和产量品质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(9): 129-132.
- XU M, XU F L. Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid on the growth and the yield of the tomato in sunlight greenhouse[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2008, 36(9): 129-132.
- [5] 谢 荔. ALA 诱导葡萄和苹果果皮花青素积累机理的研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.

[6] 庞红霞,祝长青,覃建兵. 植物花青素生物便与相关基因研究进展[J]. 种子,2010,**29**(3): 60-64.
PANG H X, ZHU C Q, QIN J B. Advancement of plant genesrelated with anthocyanins synthetic biology[J]. *Seed*, 2010,**29**(3): 60-64.

[7] 郭磊,蔡志翔,张斌斌,等. 5-氨基乙酰丙酸促进桃果皮提前着色机制研究[J]. 园艺学报, 2013,**40**(6): 1 043-1 050.
GUO L, CAI Z X, ZHANG B B, *et al.* The mechanism analysis of anthocyanin accumulation in peach accelerated by ALA [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013,**40**(6): 1 043-1 050.

[8] FERNANDEZ-LOPEZ J A, ALMELA L, MUNOZ J A, *et al.* Dependence between colorand individual anthocyanin content in ripening grape [J]. *Food Research International*, 1998,**31**(9): 667-672.

[9] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:192-195.

[10] 沈德绪. 果树育种技术[D]. 北京:农业出版社,1992.

[11] 王惠聪,黄旭明,胡桂兵,等. 荔枝果皮花青苷合成与相关酶的关系研究[J]. 中国农业科学, 2004,**37**(12): 2 028-2 032.
WANG H C, HUANG X M, HU G B, *et al.* Studies on the relationship between anthocyanin biosynthesis and related enzymes in litchi pericarp[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004,**37**(12): 2 028-2 032.

[12] 李伟. 套袋及生理活性物质对苹果梨果实着色的影响[D]. 吉林延边:延边大学,2011.

[13] 王枝翠. 干旱区红地球葡萄果实色素积累的光响应机制研究[D]. 新疆石河子:石河子大学,2013.

[14] 汪良驹,石伟,刘晖,等. 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 L J, SHI W, LIU H, *et al.* Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid treatment on leaf photosynthesis of pak-choi[J]. *J. Nanjing Agri. Univ.*, 2004,**27**(2): 34-38.

[15] 汪良驹,刘卫琴,孙国荣,等. ALA 对萝卜不同叶位叶片光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报,2005,**25**(3): 488-496.
WANG L J, LIU W Q, SUN G R, *et al.* Effects of 5-aminolevulinic acid on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of radish seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005,**25**(3): 488-496.

[16] 王婷,饶景萍,宋永令,等. 叶面喷施 5-氨基乙酰丙酸对番茄果实采后生理指标的影响[J]. 西北农业学报,2009,**18**(1): 243-247
WANG T, RAO J P, SONG Y L, *et al.* Effects of foliar application 5-aminolevulinic acid on post harvest physiological of tomato during cold storage period [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, **18**(1): 243-247.

[17] 尹璐璐,于贤昌,王英华,等. 5-氨基乙酰丙酸对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 西北农业学报,2007, **16**(4): 166-169.
YIN L L, YU X C, WANG Y H, *et al.* Effect of 5-aminolevulinic acid on chilling-tolerance in cucumber seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, **16**(4): 166-169.

[18] 康琅,程云,汪良驹. 5-氨基乙酰丙酸对秋冬季大棚西瓜叶片光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2006,**26**(11): 2 297-2 301.
KANG L, CHENG Y, WANG L J. Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA) on the photosynthesis and antioxidant enzymes activities of the leaves of greenhouse watermelon in summer and winter[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006,**26**(11): 2 297-2 301.

[19] 张治平. 四种转 ALA 合酶基因(YHem1)植物的获得及其生理特性变化的研究[D]. 南京:南京农业大学,2010.

[20] ESPINAS N A, KOBAYASHI K, TAKAHASHI S, *et al.* Evaluation of unbound free heme in plant cells by differential acetone extraction[J]. *Plant Cell Physiol*, 2012, **53**(7): 1 344-1 354.

[21] 韦继光,於虹,张晓娜,等. 5-氨基乙酰丙酸对兔眼蓝莓光合性能及果实产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2014, (16): 9-12.
WEI J G, YU H, ZHANG X N, *et al.* Effect of exogenous 5-aminolevulinic acid on photosynthetic capacity, yield and fruit quality of *Vaccinium ashei* Reade [J]. *Northern Horticulture*, 2014, (16): 9-12.

[22] 高晶晶,冯新新,段春慧,等. 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 J J, FENG X X, DUAN C H, *et al.* Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA) on leaf photosynthesis and fruit quality of apples [J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, **30**(6): 944-951.

[23] 张梦燕,孙军利,赵宝龙,等. 外源 ALA 对葡萄果实品质及 PAL 活性的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2017,(3): 16-19.
ZHANG M Y, SUN J L, ZHAO B L, *et al.* Effects of exogenous ALA on fruit quality and PAL enzyme activity of grapevine [J]. *Sino Overseas Grapevine & Wine*, 2017,(3): 16-19.

[24] 汪良驹,王中华,李志强,等. 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 L J, WANG Z H, LI Z Q, *et al.* Effect of 5-aminolevulinic acid on enhancing apple fruit coloration [J]. *Fruit Sci.*, 2004,**21**(6): 512-515.

[25] 刘晓静,冯宝春,冯守千,等. ‘国光’苹果及其红色芽变花青苷合成与相关酶活性的研究[J]. 园艺学报,2009, **36**(9): 1 249-1 254.
LIU X J, FENG B C, FENG S Q, *et al.* Studies on anthocyanin biosynthesis and activities of related enzymes of Ralls and Its bud mutation [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, **36**(9): 1 249-1 254.

(编辑:裴阿卫)