

外源 ALA 促进番茄糖酸品质及挥发性物质含量的作用研究

王俊文¹, 武 玥^{1,*}, 郁继华^{1,2,*}, 张 婧¹, 颀建明¹, 冯 致¹, 唐中祺¹,
刘晓奇¹, 李 晶¹, 钟 源²

(¹甘肃农业大学园艺学院, 兰州 730070; ²甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

摘 要: 为探究 5-氨基乙酰丙酸(ALA)对番茄果实风味品质的影响,以番茄(*Solanum lycopersicum*) ‘原味 1 号’品种为试材,向绿熟期果实表面涂抹浓度分别为 0 (对照)、100、200 mg · L⁻¹ 的 ALA 溶液,研究其对果实成熟过程中糖、酸组分及挥发性物质成分和含量的影响。结果表明:200 mg · L⁻¹ 外源 ALA 能够促进番茄果实成熟,使果实成熟期提前 4 d,并显著增加了果实中果糖、葡萄糖和可溶性总糖含量,降低酒石酸、柠檬酸、草酸、奎宁酸、莽草酸和总有机酸含量,从而显著提高果实糖酸比。在番茄果实中共检测出 96 种挥发性物质,包括 35 种醇类、25 种醛类、12 种烃类、9 种酮类、6 种酯类、5 种酚类和 4 种其他类物质;0 (对照)、100、200 mg · L⁻¹ ALA 处理中挥发性物质总含量分别为:1 065.72、1 478.60 和 2 374.50 μg · kg⁻¹。其中,200 mg · L⁻¹ ALA 处理可提高果实中醇类、醛类、烃类、酮类、酯类、酚类和其他类挥发性物质的总含量,100 mg · L⁻¹ ALA 处理可提高果实中醇类、酮类、烃类和其他类挥发性物质的种类。共检测出 10 种番茄果实特征挥发性物质,其中 200 mg · L⁻¹ ALA 处理中特征挥发性物质含量最高,为 1 074.78 μg · kg⁻¹。综上,在番茄果实成熟过程中施用适宜浓度的外源 ALA (200 mg · L⁻¹) 不仅能够增强果实的风味品质,还能提前番茄的成熟期。

关键词: 番茄; 果实; 5-氨基乙酰丙酸; 糖酸组分; 挥发性物质; 气相色谱-质谱联用

中图分类号: S 641.2

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2021) 05-0973-14

Soluble Sugar, Organic Acid Quality and Volatile Compounds Contents in Tomato Fruits can be Promoted by Exogenous ALA

WANG Junwen¹, WU Yue^{1,*}, YU Jihua^{1,2,*}, ZHANG Jing¹, XIE Jianming¹, FENG Zhi¹, TANG Zhongqi¹,
LIU Xiaoqi¹, LI Jing¹, and ZHONG Yuan²

(¹College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; ²Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The overall objective of this research was to explore the effects of exogenous 5-Aminolevulinic acid (ALA) on the flavor quality of tomato fruit. Tomato (*Solanum lycopersicum* ‘Yuanwei 1’) fruits were applied with different concentration of ALA (0, 100 and 200 mg · L⁻¹) being

收稿日期: 2020-07-27; **修回日期:** 2020-09-01

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划项目 (17ZD2NA015); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-23-C-07); 甘肃农业大学公招博士科研启动金项目 (GAU-KYQD-2018-34)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: wuyue@gsau.edu.cn, yujihua@gsau.edu.cn)

daubed on the surface at the mature green fruit stage. The soluble sugars, organic acids and volatile compounds were determined during maturation of tomato fruits. The results indicated that $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous ALA promoted the maturity of tomato fruits, advanced the tomato fruits maturation period by 4 days, and significantly increased the content of fructose, glucose and total soluble sugar in tomato fruits. Meanwhile, the tartaric acid, citric acid, oxalic acid, quinic acid, shikimic acid and total organic acid content were significantly reduced through the application of $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous ALA, thereby, the sugar acid ratio of the tomato fruits increased markedly. 96 volatile compounds were detected in tomato fruits, including 35 alcohols, 25 aldehydes, 12 hydrocarbons, nine ketones, six esters, five phenols and four other compounds. The content of volatile compounds in 0 (control), 100 and $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA treatment were: 1 065.72, 1 478.60 and 2 374.50 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The total contents of alcohols, aldehydes, hydrocarbons, ketones, esters, phenols and other compounds in tomato fruits were significantly increased by $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA, while the species of alcohols, ketones, hydrocarbons and other substances were increased by $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA. Ten characteristic volatile compounds were detected in tomato fruits, among which $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA treatment had the highest content (1 074.78 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). In conclusion, applying an appropriate concentration of exogenous ALA ($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) during maturation of tomato not only enhance the flavor quality of the fruits, but also advance the tomato fruits maturation period.

Keywords: tomato; fruit; exogenous 5-aminolevulinic acid; soluble sugars and organic acids; volatile compounds; gas chromatography – mass spectrometry (GC – MS)

番茄 (*Solanum lycopersicum*) 果实品质形成的重要指标有糖类物质、有机酸、芳香物质以及营养物质含量等 (程远 等, 2018; Ilahy et al., 2019; Hermanns et al., 2020)。已有大量研究表明, 植物生长调节物质在调控作物品质方面具有显著作用, 例如, 使用 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ABA 喷施 ‘霞晖 6 号’ 桃叶片, 可显著增加果实可溶性固形物和可溶性糖含量, 降低可滴定酸含量, 增加糖酸比 (许建兰 等, 2011)。*‘丽红宝’* 葡萄花后使用 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的赤霉素可有效增加果实中可溶性固形物含量, 降低可滴定酸含量和增加维生素 C 含量, 并显著提高鲜果硬度 (赵荣华 等, 2016)。

5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 是一种含氧和氮的碳氢化合物, 是所有生物体内卟啉类化合物生物合成的关键前体 (Castelfranco & Beale, 1983)。研究表明, 植物外源施加 ALA 能够调控生长发育过程, 提高对非生物逆境的抗性, 因此 ALA 被认为是一种植物生长调节物质 (Bindu & Vivekanandan, 1998), 在农业生产及研究领域具有广阔的应用和开发潜力 (汪良驹 等, 2003)。研究表明, ALA 能够提高植株光合速率 (汪良驹 等, 2004; Liu et al., 2016; 胡健 等, 2019; 胡淑 等, 2020)、提高种子呼吸能力 (汪良驹 等, 2005)、增强作物抗逆性 (刘卫琴 等, 2006) 和提高作物产量 (Hotta et al., 1997)。

ALA 能够调控果实品质形成。例如, 王婷等 (2008) 研究结果显示, 经过外源 ALA 处理的番茄果实可溶性固形物含量较对照提高 20.9%, 且可滴定酸含量显著降低。Ye 等 (2017) 研究表明, 喷施 ALA 可显著提高桃果实可溶性糖含量, 降低可滴定酸含量。Zheng 等 (2017) 使用 $20 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ALA 根施 ‘富士’ 苹果, 处理后的果实中可溶性糖含量比对照提高 25%~59%, 可滴定酸比对照降低 41%~49%。郭磊等 (2013) 对 ‘早白花’ 桃果实外源施加 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ALA 显著促进了果皮色素代谢并提前了果实的着色。

本试验中以设施栽培番茄为试材, 采用不同浓度外源 ALA 涂抹绿熟期果实表面, 研究其对番

茄果实发育过程中糖组分、酸组分、挥发性物质组分含量的调控作用, 以期应用 ALA 提高果实品质和在设施番茄种植推广中提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于 2019 年 11 月 2 日—2020 年 4 月 30 日在甘肃省兰州市榆中县城关镇李家庄栖云山国家田园综合体六区 1 号日光温室进行。该温室长 60 m, 跨度为 10 m。供试番茄品种为 ‘原味 1 号’。

采用槽式栽培, 栽培槽长、宽和深分别为 9、0.4 和 0.25 m。共 41 槽, 每槽填充 1 m³ 基质 (购自甘肃省绿能瑞奇农业科技股份有限公司)。每槽定植 36 株 (18 株 × 2 行), 小行距为 0.2 m, 株距为 0.45 m。灌溉方式为膜下滴灌, 应用精准灌溉施肥系统。育苗时间为 2019 年 9 月 14 日, 幼苗长至 3 叶 1 心时进行定植, 定植时间为 2019 年 11 月 2 日。

取番茄植株第 3 穗果, 记录坐果日期。坐果后 24 d (绿熟期) 开始, 选择充分膨大且大小一致的果实 (果径 4~5 cm) 进行 ALA 处理, 每 4 d 处理 1 次, 直至果实成熟为止。成熟期的判断标准为果实表面 90% 转为红色。共设置 3 个处理: 分别为在果实表面涂抹蒸馏水 (对照) 和浓度为 100、200 mg · L⁻¹ ALA 溶液 (添加 0.01% 吐温作为展着剂)。以果实表面均匀布满液滴为度。ALA 溶液浓度为前期试验筛选得到的适宜浓度。每个处理 3 次重复, 每重复 10 株番茄, 共 90 株。由于 ALA 及其代谢产物具有光敏性, 因此于傍晚温室盖帘后开始处理, 处理后避光 12 h。各处理日常管理一致。

处理期间每 4 d 取样 1 次, 取样至果实成熟期为止 (ALA 处理在第 5 次取样, 对照在第 6 次取样达到成熟)。取样时各处理随机取 5 个番茄果实并重复 3 次。取样后立即带回实验室进行糖组分、酸组分等指标的测定。果实挥发性物质组分的测定使用成熟期样品。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 番茄果实糖、酸组分的测定

果糖、葡萄糖和蔗糖的提取参考魏鑫等 (2013) 的方法。测定步骤及色谱条件参考柳帆红等 (2020) 的方法。酒石酸、琥珀酸、苹果酸、柠檬酸、草酸、奎宁酸和莽草酸的测定参考 Coelho 等 (2018) 的方法。

1.2.2 番茄果实挥发性物质组分的测定

挥发性物质组分使用气相色谱—质谱联用分析法 (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS), 参考魏守辉等 (2020) 的方法进行提取和测定。

番茄果实中的挥发性物质经 GC-MS 分析鉴定后, 各色谱峰通过计算机检索并与标准质谱图库 (NIST 2014), 辅以人工对相应的化合物进行定性鉴定, 参考质谱的匹配度以及相关文献报道的挥发性物质成分, 仅鉴定正反匹配度均大于 800 的挥发性物质。利用标准品对番茄果实中萃取出来的挥发性物质进行定量分析。

1.2.3 数据分析

试验数据利用 SPSS 23.0 进行方差分析, 运用 Duncan's 检验法对数据显著性差异进行多重比较, 并使用 Origin 8.5 进行制图。

2 结果与分析

2.1 外源 ALA 对番茄果实成熟过程中糖酸组分含量及糖酸比的影响

2.1.1 对糖组分含量的影响

番茄果实在成熟过程中糖含量呈增加趋势（图 1）。从整体上来看，与对照相比，200 mg · L⁻¹ 外源 ALA 处理可显著增加果实中果糖和葡萄糖的含量，且在坐果后 40 d 达到最大值，对照则在坐果后 44 d 达到最大值，并且达到 200 mg · L⁻¹ ALA 处理最高水平。

果实中果糖含量在坐果后 24 ~ 32 d 各处理间无显著差异；到坐果后 36 d, 100 和 200 mg · L⁻¹ ALA 处理分别比于对照高 8.24% 和 12.35%；到坐果后 40 d, 200 mg · L⁻¹ ALA 处理达到最大值，为 2.11%，比对照高 12.83%。对照在坐果后 44 d 达到最大值，与 ALA 处理坐果后 40 d 的水平无显著差异。果实中葡萄糖含量在坐果后 32 ~ 40 d, 200 mg · L⁻¹ ALA 处理显著高于对照；到坐果后 44 d, 对照达到与之一致水平。蔗糖含量的变化除坐果后 32 d ALA 处理高于对照外，其他各时间点各处理之间无显著差异。

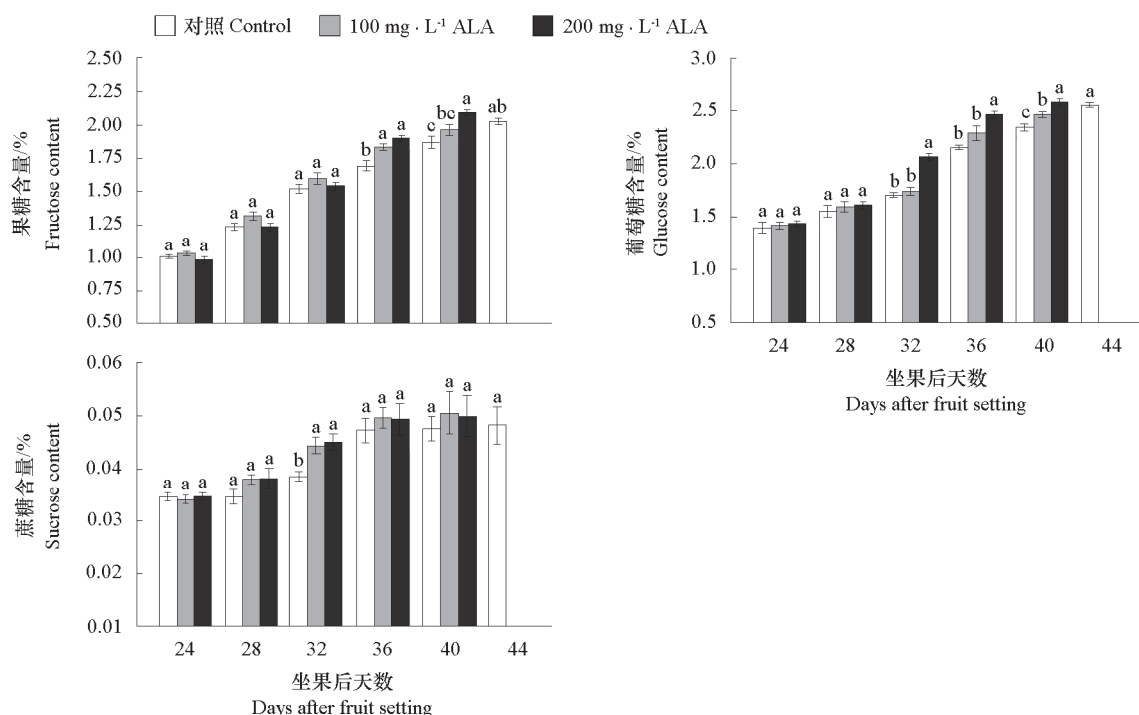


图 1 外源 ALA 处理对番茄果实成熟过程中糖组分含量的影响

柱状图短竖线表示平均值 ± 标准误 (n = 3)，同一天中相同字母表示各处理间在 0.05 水平上差异不显著。

44 d 与 40 d 数据同时进行比较分析。下同。

Fig. 1 Effect of exogenous ALA on the soluble sugars during maturation of tomato fruit

Vertical bars represent mean ± SE value (n = 3), no significant differences at the 0.05 level among difference treatments were indicated by same letters. The data of 44 and 40 d were compared and analyzed at the same time. The same below.

2.1.2 对酸组分含量的影响

由图 2 可知，各处理番茄果实成熟过程中，苹果酸含量先降低后增加，琥珀酸含量则持续增加，其他有机酸组分含量均呈现先增加后降低的变化趋势。

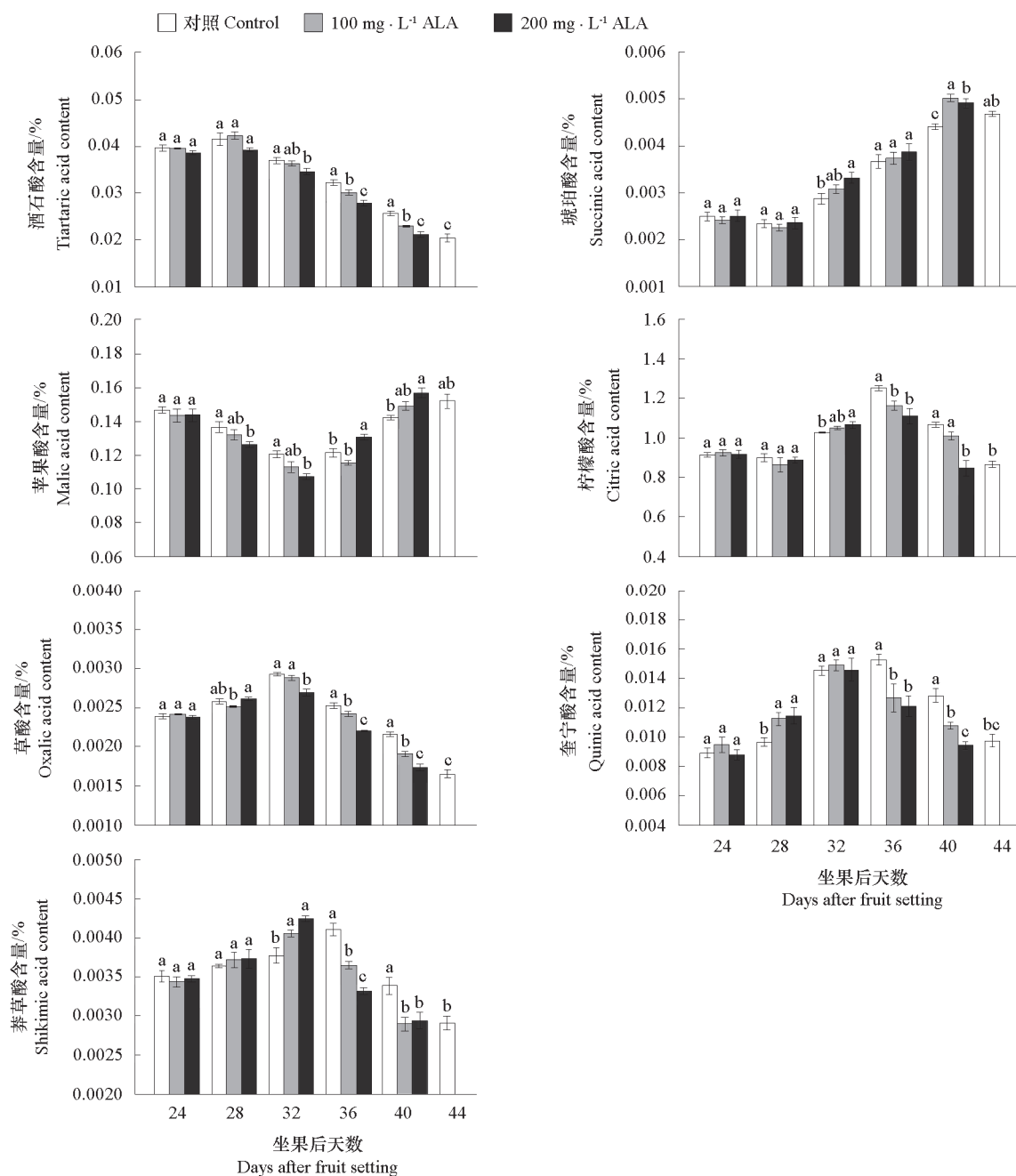


图 2 外源 ALA 对番茄果实成熟过程中有机酸组分含量的影响

柱状图短竖线表示平均值 ± 标准误 ($n=3$), 同一天中相同字母表示各处理间在 0.05 水平上差异不显著。

44 与 40 d 数据同时进行比较分析。

Fig. 2 Effect of exogenous ALA on the organic acids during maturation of tomato fruits

Vertical bars represent mean ± SE value ($n=3$), no significant differences at the 0.05 level among difference treatments were indicated by same letters. The data of 44 and 40 d were compared and analyzed at the same time.

酒石酸含量在坐果后 24 ~ 28 d 各处理之间无显著差异; 坐果后 32 ~ 40 d, 200 mg · L⁻¹ ALA 处理比于对照降低了 5.71% ~ 23.81%。对照在坐果后 44 d 与 200 mg · L⁻¹ ALA 处理坐果后 40 d 无显著差异。

琥珀酸则与酒石酸相反,随着果实成熟度的增加,含量逐渐增加,到坐果后 40 d,ALA 处理的果实中琥珀酸含量显著高于对照。

果实中苹果酸含量随着成熟度的增加整体呈先降低后增加的变化规律。坐果后 32 d,各处理均下降到最低,200 mg · L⁻¹ ALA 处理显著低于对照。在坐果后 40 d 时,200 mg · L⁻¹ ALA 处理达到最大值,比对照提高了 14.29%。对照在坐果后 44 d 时与 ALA 处理在坐果后 40 d 时无显著差异。

果实中柠檬酸含量在坐果后 24 ~ 28 d 各处理无差异。在坐果后 36 d 时各处理均达到最大值,ALA 处理显著低于对照。在坐果后 40 d 时 200 mg · L⁻¹ ALA 处理较对照降低了 20.56%。而对照在坐果后 44 d 时与 200 mg · L⁻¹ ALA 处理坐果后 40 d 时无显著差异。

草酸含量在坐果后 24 d 各处理间无显著差异,随后逐渐升高,32 d 时达最高,随后下降;在坐果后 32 ~ 40 d,200 mg · L⁻¹ ALA 处理显著低于对照和 100 mg · L⁻¹ ALA 处理。到坐果后 44 d 对照达到 200 mg · L⁻¹ ALA 处理 40 d 时的水平。

奎宁酸和莽草酸含量的变化与草酸表现出相似规律,外源 ALA 处理均能使之显著降低,对照在坐果后 44 d 与 ALA 处理在 40 d 时无显著差异。

2.1.3 对可溶性总糖、有机酸含量和糖酸比的影响

由图 3 可知,外源 ALA 处理可增加番茄果实成熟过程中可溶性总糖的含量,在坐果后 32 ~ 40 d 时 200 mg · L⁻¹ ALA 处理显著高于其他处理,对照果实坐果 44 d 达到成熟期时与 200 mg · L⁻¹ ALA 在 40 d 时无显著差异。果实中有机酸含量在坐果后 24 ~ 32 d 各处理无显著差异,坐果后 36 d 时 ALA

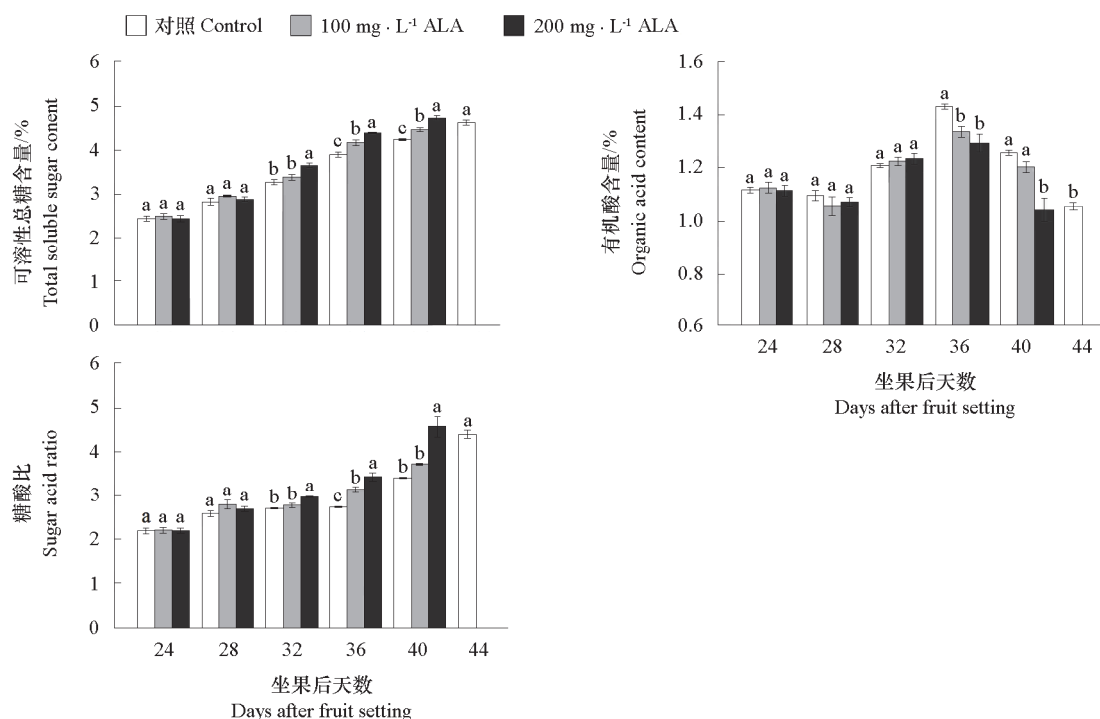


图 3 外源 ALA 对番茄果实成熟过程中可溶性总糖、有机酸及糖酸比的影响

柱状图短竖线表示平均值±标准误 (n = 3), 同一天中相同字母表示各处理间在 0.05 水平上差异不显著。

44 d 与 40 d 数据同时进行比较分析。

Fig. 3 Effects of exogenous ALA on total soluble sugar content, organic acid content and sugar acid ratio during maturation of tomato fruits

Vertical bars represent mean ± SE value (n = 3), no significant differences at the 0.05 level among difference treatments were indicated by same letters. The data of 44 and 40 d were compared and analyzed at the same time.

处理显著降低, 40 d 时 $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理比对照降低了 21.15%。果实中糖酸比的高低直接影响着番茄风味品质的形成。外源 ALA 处理在果实成熟过程中能显著提高果实糖酸比。在坐果后 36 d 和 40 d, $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的果实糖酸比分别比对照果实高 25.27%和 34.51%。对照在坐果后 44 d 时与 $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理在坐果后 40 d 时无显著差异。因此, 与对照相比, $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理可以使番茄果实提前 4 d 达到成熟期品质水平。

2.2 外源 ALA 对成熟期番茄果实挥发性物质组分的影响

2.2.1 对番茄果实挥发性物质类别和含量的影响

在各处理番茄果实中共检测到 96 种挥发性物质 (表 1), 包括 35 种醇类、25 种醛类、12 种烃类、9 种酮类、6 种酯类、5 种酚类以及 4 种其他类。对照检测到的物质种类数最少, 为 61 种, $100\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的最多, 为 80 种, $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的为 69 种。3 个处理果实中共有的挥发性物质种类数量为 48 种, 占全部挥发性物质的 49.5%, 对照、100 和 $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理果实中特有的挥发性物质分别为 3 种、20 种和 9 种, 分别占全部挥发性物质的 3.1%、20.6%和 9.3%。3 个处理中, 对照果实中检测出的挥发性物质总含量最少, 为 $1\,065.72\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的最高, 为 $2\,374.50\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $100\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的为 $1\,478.60\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。100 和 $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理的果实中挥发性物质总含量均高于对照, 分别高出 38.74%和 122.81%。在 3 个处理的果实中含量最高的物质均为顺-3-己烯-1-醇, 含量最低的物质却不相同, 分别是反-2-壬醛、间二甲苯和 2-丁烯醛。

表 1 外源 ALA 对番茄果实挥发性物质类别及含量的影响
Table 1 Effects of exogenous ALA on the categories and contents of volatile compounds in tomato fruits

类别 Category	挥发性物质 Volatile compound	保留时 间/min Retention time	ALA/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
			0 (对照 Control)	100	200
醇类 Alcohols	反-2-己烯-1-醇 (<i>E</i>)-2-Hexen-1-ol	29.40	$11.99 \pm 0.78\text{ c}$	$17.11 \pm 1.47\text{ b}$	$23.31 \pm 0.82\text{ a}$
	顺-2-戊烯醇 (<i>Z</i>)-2-Penten-1-ol	25.48	$4.51 \pm 0.52\text{ b}$	$5.18 \pm 0.69\text{ b}$	$11.68 \pm 1.29\text{ a}$
	顺-4-庚烯-1-醇 (<i>Z</i>)-4-Hepten-1-ol	33.56	$1.94 \pm 0.32\text{ b}$	$1.85 \pm 0.18\text{ b}$	$5.37 \pm 0.32\text{ a}$
	正戊醇 1-Pentanol	22.43	$3.94 \pm 0.36\text{ b}$	$4.95 \pm 0.64\text{ b}$	$11.41 \pm 0.78\text{ a}$
	(<i>S</i>)-(+)-3-甲基-戊醇 (<i>S</i>)-(+)-3-Methyl-1-pentanol	25.91	—	—	3.44
	1-环丁烯-1-甲醇 Cyclobut-1-enylmethanol	15.76	—	—	0.80
	1-壬醇 1-Nonanol	39.40	$1.64 \pm 0.16\text{ b}$	$1.90 \pm 0.59\text{ b}$	$3.90 \pm 0.21\text{ a}$
	1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	18.34	$1.72 \pm 0.16\text{ b}$	$2.47 \pm 0.59\text{ b}$	$4.69 \pm 0.21\text{ a}$
	1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	31.21	$1.19 \pm 0.21\text{ c}$	$2.34 \pm 0.39\text{ b}$	$4.63 \pm 0.31\text{ a}$
	2-辛烯-1-醇 2-Octen-1-ol	38.01	$0.28 \pm 0.04\text{ b}$	—	$0.55 \pm 0.03\text{ a}$
	2-乙基己醇 2-Ethyl-1-hexanol	32.93	$1.52 \pm 0.22\text{ b}$	$2.13 \pm 0.19\text{ ab}$	$3.24 \pm 0.5\text{ a}$
	3-甲基-1-戊醇 3-Methyl-pentanol	25.89	$1.27 \pm 0.12\text{ b}$	$2.06 \pm 0.35\text{ ab}$	$2.60 \pm 0.22\text{ a}$
	4,8-二甲基-1-壬醇 4,8-Dimethyl-1-nonanol	35.87	—	—	0.59
	苯甲醇 Benzyl alcohol	45.73	$3.38 \pm 0.89\text{ ab}$	$2.41 \pm 0.3\text{ b}$	$6.12 \pm 1.12\text{ a}$
	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	46.63	$1.90 \pm 0.22\text{ c}$	$4.36 \pm 0.35\text{ b}$	$8.53 \pm 0.51\text{ a}$
	反-2-辛烯-1-醇 <i>trans</i> -2-Octenol	38.00	$0.39 \pm 0.08\text{ b}$	$0.55 \pm 0.12\text{ b}$	$1.07 \pm 0.03\text{ a}$
	反-4-己烯-1-醇 (<i>E</i>)-4-Hexen-1-ol	29.61	$0.48 \pm 0.03\text{ c}$	$1.93 \pm 0.05\text{ a}$	$1.49 \pm 0.15\text{ b}$
	糠醇 2-Furanmethanol	39.84	—	—	8.47
	顺-3-辛烯-1-醇 (<i>Z</i>)-3-Octen-1-ol	38.14	—	$1.37 \pm 0.1\text{ b}$	$3.93 \pm 0.08\text{ a}$
	顺-4-己烯-1-醇 (<i>Z</i>)-4-Hexen-1-ol	30.12	—	$0.97 \pm 0.07\text{ a}$	$0.30 \pm 0.02\text{ b}$
	顺-5-辛烯-1-醇 <i>cis</i> -5-Octen-1-ol	38.15	$1.61 \pm 0.11\text{ b}$	—	$3.15 \pm 0.38\text{ a}$
	顺-3-己烯-1-醇 (<i>Z</i>)-3-Hexen-1-ol	27.99	$319.23 \pm 19.53\text{ b}$	$681.87 \pm 50.75\text{ a}$	$653.42 \pm 22.04\text{ a}$
	乙醇 Ethyl acetate	9.44	$245.21 \pm 11.94\text{ a}$	$164.74 \pm 13.46\text{ b}$	$248.83 \pm 13.03\text{ a}$
	异戊醇 3-Methyl-1-butanol	20.50	$24.69 \pm 0.78\text{ b}$	$14.99 \pm 1.25\text{ c}$	$39.67 \pm 2.39\text{ a}$
	正丁醇 1-Butanol	18.02	—	—	9.66
	正庚醇 1-Heptanol	31.49	$2.91 \pm 0.18\text{ b}$	$3.04 \pm 0.27\text{ b}$	$7.29 \pm 0.63\text{ a}$

续表 1

类别 Category	挥发性物质 Volatile compound	保留时间/min Retention time	ALA/ (mg · L ⁻¹)		
			0 (对照 Control)	100	200
醛类 Aldehydes	正己醇 1-Hexanol	27.06	110.00 ± 7.36 b	146.90 ± 11.77 b	285.63 ± 22.69 a
	正辛醇 1-Octanol	35.77	3.62 ± 0.28 b	3.37 ± 0.53 b	7.98 ± 0.70 a
	(S) - (+) - 6 - 甲基 - 1 - 辛 (S)-(+)-6-Methyl-1-octanol	36.09	—	0.24	—
	6 - 甲基 - 5 - 庚烯 - 2 - 醇 6-Methyl-5-hepten-2-ol	31.73	—	0.17	—
	6 - 甲基庚醇 6-Methyl-1-heptanol	35.88	0.41 ± 0.03 a	0.21 ± 0.01 b	—
	反 - 1, 2 - 环戊二醇 <i>Trans</i> -1,2-Cyclopentanediol	15.73	—	0.29	—
	顺 - 2 - 己烯 - 1 - 醇 (Z)-2-Hexen-1-ol	29.78	0.31 ± 0.03 b	0.41 ± 0.02 a	—
	顺 - 3 - 壬烯 - 1 - 醇 <i>cis</i> -3-Nonen-1-ol	29.16	—	0.18	—
	芳樟醇 Linalool	35.28	0.99	—	—
	合计 Total		745.13 ± 57.81 b	1 067.95 ± 101.97 b	1 361.72 ± 118.34 a
	2 - 丁烯醛 (E)-2-Butenal	13.34	—	—	0.14
	2 - 己烯醛 2-Hexenal	20.89	52.62 ± 1.78 b	—	270.57 ± 7.61 a
	反 - 2 - 己烯醛 (E)-2-Hexenal	20.75	85.66 ± 1.97 c	153.04 ± 8.14 b	245.67 ± 10.96 a
	3 - 己烯醛 3-Hexenal	17.16	6.69 ± 1.12 b	10.19 ± 1.34 b	17.03 ± 1.56 a
	苯甲醛 Benzaldehyde	34.47	4.55 ± 0.58 b	5.69 ± 0.78 b	15.47 ± 2.03 a
	反,反 - 2, 4 - 庚二烯醛 (E,E)-2, 4-Heptadienal	32.56	1.18 ± 0.17 b	1.84 ± 0.23 b	3.36 ± 0.20 a
	反,反 - 2, 4 - 己二烯醛 (E,E)-2, 4-Hexadienal	29.19	2.24 ± 0.18 b	7.70 ± 1.54 a	8.87 ± 1.38 a
	反 - 2 - 庚烯醛 (E)-2-Heptenal	25.73	—	6.96 ± 0.74 b	10.70 ± 0.57 a
	反 - 2 - 甲基 - 2 - 丁烯醛 Tiglic aldehyde	15.27	8.77 ± 0.76 b	3.07 ± 0.49 c	21.23 ± 1.31 a
	反 - 2 - 壬醛 (E)-2-Nonenal	34.96	0.19 ± 0.03 a	0.15 ± 0.01 a	0.16 ± 0.02 a
	反 - 2 - 戊烯醛 (E)-2-Pentenal	16.79	9.82 ± 0.91 b	6.61 ± 0.76 b	17.10 ± 1.87 a
	反 - 3, 7 - 二甲基 - 2, 6 - 辛二烯醛 Geranial	42.27	0.72 ± 0.05 c	1.47 ± 0.09 b	2.77 ± 0.16 a
	反 - 4 - 癸醛 (E)-4-Decenal	35.05	0.76 ± 0.13 b	0.22 ± 0.01 c	1.12 ± 0.03 a
	反 - 4 - 氧合己醛 (E)-4-Oxohe-2-enal	37.26	0.65 ± 0.05 b	1.07 ± 0.16 ab	1.54 ± 0.31 a
	壬醛 Nonanal	28.80	9.15 ± 0.81 c	13.15 ± 0.89 b	18.39 ± 1.50 a
	顺 - 2 - 庚烯醛 (Z)-2-Heptenal	25.76	2.92 ± 0.63 b	1.66 ± 0.11 b	6.00 ± 0.75 a
	顺 - 4 - 癸烯醛 (Z)-4-Decenal	35.03	—	0.71 ± 0.12 b	2.65 ± 0.36 a
	正己醛 Hexanal	14.64	46.68 ± 2.10 b	53.97 ± 4.54 b	124.92 ± 3.76 a
	正辛醛 Octanal	24.06	2.44 ± 0.53 b	3.45 ± 0.70 b	6.97 ± 0.73 a
	2 - 甲基 - 4 - 戊醛 2-methyl-4-Pentenal	17.82	—	4.50	—
	反,反 - 2, 4 - 癸二烯醛 (E,E)-2, 4-Decadienal	43.10	—	0.34	—
	癸醛 Decanal	33.33	—	2.06	—
	顺 - 2 - 壬醛 (Z)-2-Nonenal	34.93	—	0.19	—
	顺 - 3 - 己烯醛 <i>cis</i> -3-Hexenal	17.73	—	0.19	—
	顺 - 4 - 庚烯醛 (Z)-4-Heptenal	21.90	0.21	—	—
	合计 Total		235.25 ± 16.84 b	278.23 ± 22.63 b	774.66 ± 97.60 a
酯类 Esters	N - 苯基香豆甲酯 Methyl N-phenylcarbamate	42.72	—	42.51 ± 1.73 b	59.76 ± 3.85 a
	乙酸己酯 Hexyl acetate	23.26	1.13 ± 0.05 b	0.48 ± 0.05 c	2.19 ± 0.18 a
	乙酸叶醇酯 (3Z)-3-Hexen-1-yl acetate	25.34	4.20 ± 0.53 b	2.89 ± 0.43 b	10.98 ± 0.71 a
	乙酸乙酯 Ethyl acetate	8.10	38.36 ± 2.95 a	5.01 ± 0.67 b	39.89 ± 3.32 a
	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	43.49	—	2.59	—
酮类 Ketones	乙酸异戊酯 3-Methyl-1-butyl acetate	16.37	2.53	—	—
	合计 Total		46.22 ± 6.73 b	53.48 ± 0.98 c	112.82 ± 8.29 a
	1 - 戊烯 - 3 - 酮 Penten-3-one	12.26	6.72 ± 0.97 b	16.31 ± 0.80 a	16.42 ± 1.06 a
	1 - 辛烯 - 3 - 酮 1-Octen-3-one	24.64	—	1.42 ± 0.11 b	1.75 ± 0.04 a
	2 - 羟基苯乙酮 2-Hydroxyacetophenone	44.10	2.93 ± 0.36 b	1.98 ± 0.26 b	8.12 ± 0.81 a
	香叶基丙酮 Geranylacetone	45.18	—	6.10 ± 0.74 b	12.13 ± 0.76 a
	β - 紫罗兰酮 β-Ionone	47.46	0.81 ± 0.07 c	3.73 ± 0.58 a	2.53 ± 0.11 b
	苯乙酮 Acetophenone	39.67	0.33 ± 0.02 c	0.68 ± 0.11 b	1.24 ± 0.13 a
	甲基庚烯酮 6-Methylhept-5-en-2-one	26.31	9.94 ± 1.31 b	10.96 ± 1.21 b	26.41 ± 2.27 a
	仲辛酮 2-Octanone	23.94	1.59 ± 0.12 a	0.95 ± 0.10 b	1.44 ± 0.23 ab
	3 - 辛酮 3-Octanone	22.61	0.63 ± 0.02 a	0.27 ± 0.03 b	—
烃类 Hydrocarbons	合计 Total		22.95 ± 5.33 c	42.40 ± 1.69 b	70.04 ± 5.46 a
	(+) - 柠檬烯 D-Limonene	19.58	—	—	0.99
	1 - 硝基戊烷 1-Nitro-pentane	26.05	1.74 ± 0.17 c	5.38 ± 0.78 b	10.48 ± 0.85 a
	顺 - 7 - 十四碳烯 (Z)-7-Tetradecene	35.87	—	—	1.05

续表 1		保留时 间/min Retention time	ALA/ (mg · L ⁻¹)		
类别 Category	挥发性物质 Volatile compound		0 (对照 Control)	100	200
	正二十六烷 Hexacosane	48.43	—	—	2.17
	1 - 甲基 - 2 - (1 - 甲基戊基) - 环丙烷 1-Methyl-2- (1-methylpentyl)-cyclopropane	37.91	—	0.41	—
	2 - 甲基 - 1 - 己烯 2-Methyl-1-hexene	17.83	1.12 ± 0.04 a	1.08 ± 0.12 b	—
	3, 7 - 二甲基 - 1 - 辛烯 3,7-Dimethyl-1-octene	35.92	—	0.30	—
	对二甲苯 <i>p</i> -Xylene	19.01	—	0.38	—
	反 - 2 - 戊烯 (<i>E</i>)-2-Pentene	25.21	0.41 ± 0.12 b	0.68 ± 0.09 a	—
	间二甲苯 <i>m</i> -Xylene	19.18	—	0.11	—
	顺 - 2 - 癸烯 (<i>Z</i>)-2-Decene	22.10	—	1.23	—
	正十三烷 Tridecane	24.35	—	0.14	—
	合计 Total		3.27 ± 0.62 b	9.71 ± 2.39 ab	14.69 ± 1.15 a
酚类 Phenols	丁香酚 Eugenol	44.72	3.73 ± 0.84 b	3.99 ± 0.59 b	11.30 ± 1.21 a
	香芹酚 Carvacrol	46.95	0.45 ± 0.12 b	—	1.21 ± 0.17 a
	愈创木酚 2-Methoxy-phenol	45.34	3.40 ± 0.30 b	4.49 ± 0.78 ab	7.19 ± 1.29 a
	2, 4 - 二叔丁基苯酚	43.60	—	1.56	—
	2,4- <i>bis</i> (1,1-Dimethylethyl)- phenol				
合计 Total	间甲酚 <i>Meta</i> -Cresol	48.77	—	1.60	—
			7.58 ± 1.25 b	11.64 ± 0.61 b	19.70 ± 1.90 a
其他 Others	2 - 戊基呋喃 2-Pentyl-furan	21.27	1.96 ± 0.26 b	4.65 ± 0.64 a	6.11 ± 0.79 a
	2 - 异丁基噻唑 2-Isobutylthiazole	29.51	2.82 ± 0.15 c	6.47 ± 0.77 b	12.58 ± 0.67 a
	四氢吡喃 - 2 - 甲醇 Tetrahydropyran-2-methanol	47.84	0.56 ± 0.12 c	1.36 ± 0.15 b	2.14 ± 0.17 a
	2, 3 - 二氢 - 3 - 甲基苯并呋喃	46.43	—	2.71	—
合计 Total			5.34 ± 0.85 c	15.19 ± 0.98 b	20.83 ± 2.93 a
总含量/ (μg · kg ⁻¹) Total content			1 065.72 ± 45.35 c	1 478.60 ± 66.23 b	2 374.50 ± 59.96 a

注：“—”表示该种物质未检测出。
Note: “—” indicates that the compounds was not detected.

2.2.2 外源 ALA 对番茄果实特征挥发性物质的影响

不同果实的独特香气是由其特征挥发物质组成的混合物决定的（刘明池 等，2008）。番茄果实含有主要特征挥发物质 16 种（Buttery et al., 1989）。由表 2 可知，对照、100 和 200 mg · L⁻¹ ALA 处理果实中分别检测出番茄特征挥发物质 7 种、10 种和 8 种。从特征挥发性物质总含量来看，200 mg · L⁻¹ ALA 处理最高，为 1 074.78 μg · kg⁻¹，其次为 100 mg · L⁻¹ ALA 处理，为 927.62 μg · kg⁻¹，而对照最低，仅为 463.83 μg · kg⁻¹。

C6 芳香物质赋予番茄果实青草味和生青味（Wang et al., 2015）。本试验中共检测出 4 种具有该风味的特征挥发性物质，分别是顺 - 3 - 己烯醛、正己醛、反 - 2 - 己烯醛以及顺 - 3 - 己烯 - 1 - 醇。其中除顺 - 3 - 己烯醛仅在 100 mg · L⁻¹ ALA 处理果实中检测到以外，其余 3 种物质在 3 个处理中均检测到，并且经外源 ALA 处理后含量均显著高于对照。不同浓度 ALA 处理后，顺 - 3 - 己烯 - 1 - 醇的含量显著高于对照。反 - 2 - 庚烯醛赋予番茄青草香，本试验中仅在经 ALA 处理的果实中检测到，且 200 mg · L⁻¹ ALA 处理含量显著高于 100 mg · L⁻¹ ALA 处理。 β - 紫罗兰酮具有果香味和芳香味，是番茄中含量较低但对香气贡献极重要的一种物质，经过外源 ALA 处理后其含量显著高于对照，且 100 mg · L⁻¹ ALA 处理显著高于 200 mg · L⁻¹ ALA 处理。苯乙醇赋予番茄果实花香味，其含量在 200 mg · L⁻¹ ALA 处理后显著高于 100 mg · L⁻¹ ALA 处理和对照。作为番茄独有的芳香物质，2 - 异丁基噻唑赋予番茄果香味和生青味，经外源 ALA 处理后其含量显著高于对照，尤其是 200 mg · L⁻¹ ALA 处理后，其含量比 100 mg · L⁻¹ ALA 处理和对照分别提高了 1.29 倍和 3.46 倍。

表 2 外源 ALA 对番茄果实特征挥发性物质含量的影响
Table 2 Effects of exogenous ALA on characteristic volatile compounds content in tomato fruit

特征挥发性物质 Characteristic volatile compounds	风味描述 Flavor description	ALA/ (mg · L ⁻¹)		
		0 (对照 Control)	100	200
顺-3-己烯醛 <i>cis</i> -3-Hexenal	青草味, 生青味 (Wang et al., 2015) Grassy, green	—	0.19	—
正己醛 Hexanal	青草味, 生青味 (Wang et al., 2015) Grassy, green	46.68 ± 2.1 b	53.97 ± 4.54 b	124.92 ± 3.76 a
反-2-己烯醛 (<i>E</i>)-2-Hexenal	青草味, 生青味 (Wang et al., 2015) Grassy, green	85.66 ± 1.97 c	153.05 ± 8.14 b	245.67 ± 10.96 a
反-2-庚烯醛 (<i>E</i>)-2-Heptenal	青草味 (魏守辉 等, 2020) Grassy	—	6.96 ± 0.74 b	10.70 ± 0.57 a
β-紫罗兰酮 β-Ionone	果香味, 芳香味 (Wang et al., 2016) Fruity, aromatic	0.81 ± 0.07 c	3.73 ± 0.58 a	2.53 ± 0.11 b
1-戊烯-3-酮 Penten-3-one	果香味 (Wang et al., 2016) Fruity	6.73 ± 0.97 b	16.31 ± 0.8 a	16.42 ± 1.06 a
顺-3-己烯-1-醇 (<i>Z</i>)-3-Hexen-1-ol	青草味, 生青味 (Wang et al., 2015) Grassy, green	319.24 ± 19.53 b	681.87 ± 50.75 a	653.41 ± 22.04 a
苯乙醇 Phenylethyl alcohol	花香味 (Tiemann et al., 2006) Floral	1.90 ± 0.22 c	4.36 ± 0.35 b	8.53 ± 0.51 a
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	薄荷味 (王利斌 等, 2017) Minty	—	2.59	—
2-异丁基噻唑 2-Isobutylthiazole	果香味, 生青味 (Wang et al., 2016) Fruity, green	2.82 ± 0.15 c	6.47 ± 0.77 b	12.58 ± 0.67 a
总含量 Total content/ (μg · kg ⁻¹)		463.83 ± 17.63 c	927.62 ± 55.56 b	1 074.78 ± 17.44 a

注: “—” 表示该种物质未检测到, 相同字母表示各处理间在 0.05 的水平上差异不显著。
Note: “—” indicates that the compounds was not detected, no significant differences at the 0.05 level among difference treatments were indicated by same letters.

3 讨论

糖、酸含量和比例以及芳香物质种类和含量是构成果实风味品质的重要因素 (Xi et al., 2017; Zhang & Hao, 2020)。谢荔 (2012) 在 ‘红义’ 葡萄转色期用 100 mg · L⁻¹ 的 ALA 溶液喷施果穗, 果实可溶性糖和固酸比分别比对照提高了 21% 和 24%。Watanabe 等 (2006) 针对葡萄果实研究发现, 100 mg · L⁻¹ 的 ALA 处理后, 果实可溶性固形物含量提高了 2.7%, 且有机酸含量降低。韦继光等 (2014) 的研究证明 300 mg · L⁻¹ 的 ALA 可提高兔眼蓝莓果实可溶性糖含量, 降低果实酸度。在本研究中, 用 200 mg · L⁻¹ 外源 ALA 涂抹坐果 24 d 并达到绿熟期的番茄果实, 在坐果后 36 ~ 40 d 可显著提高番茄果实总糖含量, 降低有机酸含量, 提高糖酸比, 与前人研究结论一致, 并且相比于对照, 200 mg · L⁻¹ 的 ALA 处理可以提前 4 d 达到对照果实成熟期的糖酸品质, 说明外源 ALA 处理能够提前番茄果实的成熟, 这与郭磊 (2013) 使用 300 mg · L⁻¹ 的 ALA 涂抹 ‘早白花’ 桃果皮, 促进果皮提前转色和可溶性固形物提前积累, 从而促使果实提前成熟的研究结果相类似。

已有研究表明, 番茄果实中可溶性糖组分主要包括果糖、葡萄糖和蔗糖, 且果实的甜度也由这 3 种糖的含量决定 (王贵元 等, 2007)。另外, 成熟番茄果实中含有 13 种有机酸, 其中以苹果酸和柠檬酸含量较高 (刘静, 2014)。柠檬酸的酸味比苹果酸更加浓郁, 而苹果酸则能够增强人体口腔对甜度的感受 (刘娜 等, 2016)。本试验中, 向番茄果实表面涂抹 200 mg · L⁻¹ 外源 ALA 能够显著增加果实中果糖和葡萄糖含量, 在坐果后 40 d 达到最大值, 分别比对照显著高出 12.83% 和 10.26%, 并且可以提前 4 d 达到对照成熟期的水平, 但是对蔗糖含量的促进效果不明显。涂抹 200 mg · L⁻¹ 的 ALA 在坐果后 40 d 能显著降低柠檬酸、草酸、酒石酸、奎宁酸、莽草酸含量, 同时增加苹果酸和琥珀酸含量。在对照果实达到成熟期时 (坐果后 44 d) 各有机酸组分含量与 200 mg · L⁻¹ ALA 处理

果实成熟期(坐果后 40 d) 含量无显著差异。Rupasinghe (1995) 用 ALA 溶液浸泡绿熟期和转色期番茄果皮组织, 发现转色期番茄果皮组织与对照相比其内源乙烯含量显著增加, 而用乙烯合成前体 ACC 溶液浸泡, 则对内源乙烯含量没有显著影响, 因此认为 ALA 通过激活乙烯的合成促进果实成熟。王永章和张大鹏 (2000) 认为番茄果实经过 ALA 处理后, 在转色期可能促进了乙烯的合成, 果实中淀粉酶、蔗糖合酶的活性显著增加, 使得淀粉等大分子多聚糖被代谢成葡萄糖、果糖、蔗糖等小分子的寡糖或者单糖 (申明 等, 2011; Osorio et al., 2012), 从而提高了果实风味品质, 但其具体机制还需进一步研究。

番茄风味品质形成的另一关键因素是果实挥发性物质的种类和含量, 其在很大程度上决定了消费者对番茄果实的偏爱程度 (El Hadi et al., 2013)。研究表明, 挥发性芳香物质生物合成的前体物质为脂肪酸、类胡萝卜素、苯丙氨酸和支链氨基酸等 (董飞 等, 2019), 这些前体物质来自于植物体内卡尔文循环、糖酵解、莽草酸途径以及甲羟戊酸途径等多种代谢途径 (Rambla et al., 2014)。挥发性芳香物质主要有醇类、醛类、酮类、酯类、烃类、酚类等, 目前已经鉴定出 400 多种挥发性物质参与番茄果实成熟过程中风味的形成 (Klee, 2010)。在本研究中共检测出 96 种挥发性物质, 包括 35 种醇类、25 种醛类、12 种烃类、9 种酮类、6 种酯类、5 种酚类以及 4 种其他类挥发性物质, 其他类挥发性物质主要有呋喃类、噻唑类和吡喃类。其中, 不同浓度的 ALA 处理的番茄果实中挥发性物质数量和含量均不同, 就数量而言, 对照、100 和 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理分别检测出 61 种、80 种和 69 种挥发性物质; 就含量而言, 分别为 1 065.72、1 478.60 和 2 374.50 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源 ALA 显著增加了番茄果实挥发性物质的种类, 而 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源 ALA 显著提高了果实挥发性物质的含量。

在本试验中共检测出 10 种特征挥发性物质, 分别是顺-3-己烯醛、正己醛、反-2-己烯醛、反-2-庚烯醛、 β -紫罗兰酮、1-戊烯-3-酮、顺-3-己烯-1-醇、苯乙醇、水杨酸甲酯和 2-异丁基噻唑。其中, 正常生长条件下对照番茄中特征挥发性物质有 7 种, 含量为 463.83 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 使用 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源 ALA 处理的有 10 种, 含量为 927.62 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而使用 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源 ALA 处理的则有 8 种, 含量为 1 074.78 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同特征挥发性物质以适当的比例混合可以赋予新鲜成熟番茄不同的芳香味道, 其中顺-3-己烯醛、正己醛、反-2-己烯醛和顺-3-己烯-1-醇赋予番茄果实青草味和生青味 (Wang et al., 2015), 反-2-庚烯醛赋予番茄青草香 (魏守辉 等, 2020), β -紫罗兰酮具有果香味和芳香味, 1-戊烯-3-酮使番茄果实的果香味更加浓郁 (Wang et al., 2016), 苯乙醇赋予番茄果实花香味 (Tieman et al., 2006), 水杨酸甲酯使得番茄具有刺激性的薄荷味 (王利斌 等, 2017), 2-异丁基噻唑赋予番茄果香味和生青味 (Wang et al., 2016)。在本研究中, 番茄果实的特征挥发性物质正己醛、反-2-己烯醛、反-2-庚烯醛、苯乙醇和 2-异丁基噻唑的含量均以 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ALA 处理为最高, 且特征挥发性物质的总含量也是以该处理为最高。说明适当浓度的外源 ALA 处理对番茄果实的挥发性物质含量的积累有积极影响。

综上所述, 适宜浓度的外源 ALA 处理有利于番茄果实中糖组分的积累及总有机酸含量的降低, 从而提高了番茄果实糖酸比, 同时, 番茄果实挥发性物质的种类和含量也被显著促进。另外, 外源 ALA 处理的番茄果实能够比对照植株提前 4 d 到达成熟期, 说明在番茄果实成熟过程中施用适宜浓度的外源 ALA (200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 不仅能够增强果实的风味品质, 还能够提前番茄的成熟期。

References

- Bindu R C, Vivekanandan M. 1998. Hormonal activities of 5-aminolevulinic acid in callus induction and micropropagation. *Plant Growth Regulation*, 26 (1): 15 – 18.
- Buttery R G, Teranishi R, Flath R A, Ling L C. 1989. Fresh tomato volatiles: composition and sensory studies. *Acs Symposium Series-american Chemical Society*, 388: 213 – 222.
- Castelfranco P A, Beale S I. 1983. Chlorophyll biosynthesis: recent advances and areas of current interest. *Annual Review of Plant Physiology*, 34 (1): 241 – 276.
- Cheng Yuan, Chen De-liang, Ruan Mei-ying, Wan Hong-jian, Liu Chao-chao, Yao Zhu-ping, Ye Qing-jing, Li Zhi-miao, Wang Rong-qing, Zhou Guo-zhi. 2018. Comparative analysis of flavor/nutrient determination parameters in 16 different cherry tomato varieties. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 30 (11): 1859 – 1869. (in Chinese)
- 程 远, 陈德梁, 阮美颖, 万红建, 刘超超, 姚祝平, 叶青静, 李志邈, 王荣青, 周国治. 2018. 十六个樱桃番茄品种果实风味品质相关指标比较分析. *浙江农业学报*, 30 (11): 1859 – 1869.
- Coelho E M, Padilha C V d S, Miskinisa G A, Saa A G B D, Pereira G E, Azevedo L C D, Lima M D S. 2018. Simultaneous analysis of sugars and organic acids in wine and grape juices by HPLC: method validation and characterization of products from northeast Brazil. *Journal of Food Composition & Analysis*, 66: 160 – 167.
- Dong Fei, Wang Chuanzeng, Sun Xiudong, Zhang Qing, Dong Yuhui, Wang Lixia, Liu Shiqi. 2019. Volatile compounds in tomato fruits under different light qualities revealed by proteomic analyses. *Acta Horticulturae Sinica*, 46 (2): 280 – 294. (in Chinese)
- 董 飞, 王传增, 孙秀东, 张 庆, 董玉惠, 王立霞, 刘世琦. 2019. 基于蛋白质组学研究光质对番茄果实挥发性物质的影响机理. *园艺学报*, 46 (2): 280 – 294.
- El Hadi M A, Zhang F J, Wu F F, Zhou C H, Tao J. 2013. Advances in fruit aroma volatile research. *Molecules*, 18 (7): 8200 – 8229.
- Guo Lei, Cai Zhi-xiang, Zhang Bin-bin, Xu Jian-lan, Song Hong-feng, Ma Rui-juan. 2013. The mechanism analysis of anthocyanin accumulation in peach accelerated by ALA. *Acta Horticulturae Sinica*, 40 (6): 1043 – 1050. (in Chinese)
- 郭 磊, 蔡志翔, 张斌斌, 许建兰, 宋宏峰, 马瑞娟. 2013. 5-氨基乙酰丙酸促进桃果皮提前着色机制研究. *园艺学报*, 40 (6): 1043 – 1050.
- Hermanns A S, Zhou X S, Xu Q, Tadmor Y, Li L. 2020. Carotenoid pigment accumulation in horticultural plants. *Horticultural Plant Journal*, 6 (6): 343 – 360.
- Hotta Y, Tanaka T, Takaoka H, Takeuchi Y, Konnai M. 1997. Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on the yield of several crops. *Plant Growth Regulation*, 22 (2): 109 – 114.
- Hu Jian, An Yuyan, Cai Changyu, He Shasha, Wang Liangju. 2019. Cytoplasmic pH is involved in 5-aminolevulinic acid (ALA)-induced stomatal opening in apple leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 46 (10): 1869 – 1881. (in Chinese)
- 胡 健, 安玉艳, 蔡长玉, 何莎莎, 汪良驹. 2019. 胞质 pH 参与 5-氨基乙酰丙酸诱导的苹果叶片气孔开放. *园艺学报*, 46 (10): 1869 – 1881.
- Hu Shu, An Yuyan, Wang Liangju. 2020. Ethylene is involved in the regulation of stomatal movement by ALA-ABA/dark in apple leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 47 (3): 409 – 420. (in Chinese)
- 胡 淑, 安玉艳, 汪良驹. 2020. 乙烯参与 ALA-ABA/黑暗调控的苹果叶片气孔运动. *园艺学报*, 47 (3): 409 – 420.
- Ilahy R, Tlili I, Siddiqui M W, Hdider C, Lenucci M S. 2019. Inside and beyond color: comparative overview of functional quality of tomato and watermelon fruits. *Front in Plant Science*, 10: 769.
- Klee H J. 2010. Improving the flavor of fresh fruit: genomics, biochemistry, and biotechnology. *New Phytologist*, 187 (1): 44 – 56.
- Liu Fan-hong, Xiao Xue-mei, Yu Ji-hua, Lü Jian, Hu Lin-li, Wei Shou-hui, Tang Zhong-qi, Luo Shi-lei, Zhong Yuan. 2020. Effect of light supplementation in different periods on nutrition and flavor quality of tomato in solar greenhouse. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, (4): 1 – 9. (in Chinese)
- 柳帆红, 肖雪梅, 郁继华, 吕 剑, 胡琳莉, 魏守辉, 唐中祺, 罗石磊, 钟 源. 2020. 不同时段补光对日光温室番茄营养与风味品质的影响. *西北农业学报*, (4): 1 – 9.
- Liu L B, Xiong L J, An Y Y, Zheng J, Wang L J. 2016. Flavonols induced by 5-aminolevulinic acid are involved in regulation of stomatal opening in apple leaves. *Horticultural Plant Journal*, 2 (6): 323 – 330.

- Liu Jing. 2014. Quality analysis of different types of tomato's flavor. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, (10): 1 - 2. (in Chinese)
- 刘 静. 2014. 不同品种番茄风味品质分析. *农业科技与装备*, (10): 1 - 2.
- Liu Ming-chi, Hao Jing, Tang Xiao-wei. 2008. Advances in studies of aroma components in tomato fruits. *Scientia Agricultura Sinica*, 41 (5): 1444 - 1451. (in Chinese)
- 刘明池, 郝 静, 唐晓伟. 2008. 番茄果实芳香物质的研究进展. *中国农业科学*, 41 (5): 1444 - 1451.
- Liu Na, Yue Dong, Lu Bo, Tian Shou-bo, Zhang Hui, Zhu Long-ying, Zhu Wei-min. 2016. Analysis of amino acid composition and flavor quality-related indexes of yellow and red fruited tomato species. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 35 (10): 1081 - 1087. (in Chinese)
- 刘 娜, 岳 冬, 鲁 博, 田守波, 张 辉, 朱龙英, 朱为民. 2016. 黄果番茄果实部分风味品质及氨基酸组成分析. *食品与生物技术学报*, 35 (10): 1081 - 1087.
- Liu Wei-qin, Kang Lang, Wang Liang-ju. 2006. Effects on strawberry photosynthesis and relations to anti-oxidant enzymes of ALA. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, (1): 63 - 68. (in Chinese)
- 刘卫琴, 康 琅, 汪良驹. 2006. ALA 对草莓光合作用的影响及其与抗氧化酶的关系. *西北植物学报*, (1): 63 - 68.
- Osorio S, Alba R, Nikoloski Z, Kochevenko A, Fernie A R, Giovannoni J J. 2012. Integrative comparative analyses of transcript and metabolite profiles from pepper and tomato ripening and development stages uncovers species-specific patterns of network regulatory behavior. *Plant Physiol*, 159 (4): 1713 - 1729.
- Rambla J L, Tikunov Y M, Monforte A J, Bovy A G, Granell A. 2014. The expanded tomato fruit volatile landscape. *Journal of Experimental Botany*, 65 (16): 4613 - 4623.
- Rupasinghe H P V. 1995. Glutamic acid and 5-aminolevulinic acid may function as precursors of system II ethylene in ripening tomato fruits [M. D. Dissertation] . Iowa: Iowa State University.
- Shen Ming, Duan Chun-hui, Zhang Zhi-ping, Cheng Yun, Wang Liang-ju, Li Bai-jian. 2011. Effects of exogenous ALA on thinning and fruit quality in 'Hosui' Pear (*Pyrus pyrifolia*) . *Acta Horticulturae Sinica*, 38 (8): 1515 - 1522. (in Chinese)
- 申 明, 段春慧, 张治平, 程 云, 汪良驹, 李百健. 2011. 外源 ALA 处理对 '丰水' 梨疏花与果实品质的影响. *园艺学报*, 38 (8): 1515 - 1522.
- Tieman D, Taylor M, Schauer N, Fernie A R, Hanson A D, Klee H J. 2006. Tomato aromatic amino acid decarboxylases participate in synthesis of the flavor volatiles 2-phenylethanol and 2-phenylacetaldehyde. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (21): 8287 - 8292.
- Wang Gui-yuan, Xia Ren-xue, Wu Qiang-sheng. 2007. Advances in research on accumulation and metabolism of sugar in fruits. *Northern Horticulture*, (3): 56 - 58. (in Chinese)
- 王贵元, 夏仁学, 吴强盛. 2007. 果实中糖分的积累与代谢研究进展. *北方园艺*, (3): 56 - 58.
- Wang L, Baldwin E A, Bai J. 2016. Recent advance in aromatic volatile research in tomato fruit: the metabolisms and regulations. *Food & Bioprocess Technology*, 9 (2): 203 - 216.
- Wang L, Baldwin E A, Plotto A, Luo W, Raithore S, Yu Z, Bai J. 2015. Effect of methyl salicylate and methyl jasmonate pre-treatment on the volatile profile in tomato fruit subjected to chilling temperature. *Postharvest Biology & Technology*, 108: 28 - 38.
- Wang Li-bin, Li Xue-hui, Shi Zhen-yuan, Bai Jin-he, Jin Chang-hai, Luo Hai-bo, Yu Zhi-fang. 2017. Recent advances in research on volatile aroma compounds in tomatoes and their impacting factors. *Food Science*, 38 (17): 291 - 300. (in Chinese)
- 王利斌, 李雪晖, 石珍源, 白晋和, 金昌海, 罗海波, 郁志芳. 2017. 番茄果实的芳香物质组成及其影响因素研究进展. *食品科学*, 38 (17), 291 - 300.
- Wang Liang-ju, Jiang Wei-bing, Huang Bao-jian. 2004. Promotion of photosynthesis by 5-aminolevulinic acid (ALA) during and after chilling stress in melon. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (3): 321 - 326. (in Chinese)
- 汪良驹, 姜卫兵, 黄保健. 2004. 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. *园艺学报*, 31 (3): 321 - 326.
- Wang Liang-ju, Jiang Wei-bing, Zhang Zhen, Yao Quan-hong, Matsui Hiroyuki, Oharah Hitoshi. 2003. Biosynthesis and physiological activities of 5-aminolevulinic acid (ALA) and its potential application. *Plant Physiology Communications*, 39 (3): 185 - 192. (in Chinese)
- 汪良驹, 姜卫兵, 章 镇, 姚泉洪, 松井弘之, 小原均. 2003. 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. *植物生理学通讯*, 39 (3): 185 - 192.
- Wang Liang-ju, Liu Wei-qin, Sun Guo-rong, Wang Jian-bo, Jiang Wei-bing, Liu Hui, Li Zhi-qiang, Zhuang Meng. 2005. Effects of 5-aminolevulinic

- acid on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of radish seedlings. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, (3): 488 – 496. (in Chinese)
- 汪良驹, 刘卫琴, 孙国荣, 王建波, 姜卫兵, 刘 晖, 李志强, 庄 猛. 2005. 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. *西北植物学报*, (3): 488 – 496.
- Wang Ting, Rao Jing-ping, Song Yong-ling, Zhang Hai-yan, Zou Zhi-rong. 2008. Effects of 5-aminolevulinic acid on the quality and post harvest physiology of tomato fruit. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 36 (10): 127 – 131. (in Chinese)
- 王 婷, 饶景萍, 宋永令, 张海燕, 邹志荣. 2008. 5-氨基乙酰丙酸对番茄果实品质及采后生理的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 36 (10): 127 – 131.
- Wang Yong-zhang, Zhang Da-peng. 2000. Regulating Effects of Ethylene on Carbohydrate Metabolism in ‘Starkrimson’ Apple Fruit during the Ripening Period. *Acta Horticulturae Sinica*, 27 (6): 391 – 395. (in Chinese)
- 王永章, 张大鹏. 2000. 乙烯对成熟期红星苹果果实碳水化合物代谢的调控. *园艺学报*, 27 (6): 391 – 395.
- Watanabe K, Nishihara E, Watanabe S, Tanaka T, Takahashi K, Takeuchi Y. 2006. Enhancement of growth and fruit maturity in 2-year-old grapevines cv. Delaware by 5-aminolevulinic acid. *Plant Growth Regulation*, 49 (1): 35 – 42.
- Wei Ji-guang, Yu Hong, Zhang Xiao-na, Jiang Yan-qin, Zeng Qi-long. 2014. Effect of exogenous 5-aminolevulinic acid on photosynthetic capacity, yield and fruit quality of *Vaccinium ashei* reade. *Northern Horticulture*, (16): 9 – 12. (in Chinese)
- 韦继光, 於 虹, 张晓娜, 姜燕琴, 曾其龙. 2014. 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. *北方园艺*, (16): 9 – 12.
- Wei Shou-hui, Xiao Xue-mei, Zhong Yuan, Yu Ji-hua, Lü Jian, Hu Lin-li, Tang Zhong-qi, Liu Fan-hong, Wang Shu-ya, Jian Nai-dan. 2020. Effects of supplemental illumination in different periods on the quality and volatile compounds of tomato fruit in solar greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36 (8): 188 – 196. (in Chinese)
- 魏守辉, 肖雪梅, 钟 源, 郁继华, 吕 剑, 胡琳莉, 唐中祺, 柳帆红, 王舒亚, 坚乃丹. 2020. 日光温室不同时段补光对番茄果实品质及挥发性物质影响. *农业工程学报*, 36 (8): 188 – 196.
- Wei Xin, Wei Yong-xiang, Liu Cheng, Wang Xing-dong, Yang Yu-chun, Sun Bin. 2013. Determination of sugar and acid components and contents in four blueberry varieties by HPLC. *China Fruits*, (3): 64 – 67. (in Chinese)
- 魏 鑫, 魏永祥, 刘 成, 王兴东, 杨玉春, 孙 斌. 2013. 高效液相色谱法测定 4 个蓝莓品种果实中糖酸组分及含量. *中国果树*, (3): 64 – 67.
- Xi W P, Zheng Q, Lu J F, Quan J P. 2017. Comparative analysis of three types of peaches: identification of the key individual characteristic flavor compounds by integrating consumers’ acceptability with flavor quality. *Horticultural Plant Journal*, 3 (1): 1 – 12.
- Xie Li. 2012. Study on promotion of 5-aminolevulinic acid on fruit coloration in grape and apple and its mechanism in inducing anthocyanin accumulation in skins[M. D. Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University. (in Chinese)
- 谢 荔. 2012. ALA 诱导葡萄和苹果果皮花青素积累机理的研究[硕士论文]. 南京: 南京农业大学.
- Xu Jian-lan, Ma Rui-juan, Zhang Bin-bin, Cai Zhi-xiang, Shen Jiang-hai. 2011. Influence of exogenous substances on fruit quality of peach variety ‘Xiahui 6’. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, (5): 1078 – 1082. (in Chinese)
- 许建兰, 马瑞娟, 张斌斌, 蔡志翔, 沈江海. 2011. 喷施外源物质对‘霞晖 6 号’桃果实品质的影响. *江苏农业学报*, (5): 1078 – 1082.
- Ye J, Yang X, Chen Q, Xu F, Wang G. 2017. Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on fruit quality and coloration of *Prunus persica* (L.) Batsch. *Scientia Horticulturae*, 217: 266 – 275.
- Zhang C M, Hao Y J. 2020. Advances in genomic, transcriptomic, and metabolomic analyses of fruit quality in fruit crops. *Horticultural Plant Journal*, 6 (6): 361 – 371.
- Zhao Rong-hua, Bai Shi-jian, Li Chao, Chen Guang, Cai Jun-she. 2016. Effect of GA₃ treatment on quality and coloration of ‘Lihongbao’ Grape Berry. *Northern Horticulture*, (19): 35 – 39. (in Chinese)
- 赵荣华, 白世践, 李 超, 陈 光, 蔡军社. 2016. 赤霉素处理对‘丽红宝’葡萄果实品质及着色的影响. *北方园艺*, (19): 35 – 39.
- Zheng J, An Y Y, Feng X X, Wang L J. 2017. Rhizospheric application with 5-aminolevulinic acid improves coloration and quality in ‘Fuji’ apples. *Scientia Horticulturae*, 224: 74 – 83.