

# 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

孙天雨<sup>1</sup>, 文博<sup>1</sup>, 王春峰<sup>2</sup>, 田嘉<sup>1</sup>, 郝志超<sup>1</sup>, 林彦<sup>1</sup>, 温玥<sup>1\*</sup>, 张峰<sup>2</sup>  
(1.新疆农业大学园艺学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆库尔勒市香梨研究中心, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:**以库尔勒香梨为试材,在果实膨大期喷施不同质量浓度(50、100、150、200 mg/L)的5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, 5-ALA),测定成熟期脱萼果和宿萼果的果实品质,并基于主成分分析对5-ALA处理的果实品质进行综合评价,筛选出对库尔勒香梨果实品质提升效果最佳的质量浓度,探讨其对果实挥发性代谢物的影响。结果表明:外源喷施150 mg/L的5-ALA对香梨果实品质的提升效果最佳,其中脱萼果的硬度、石细胞含量和可滴定酸含量相比对照组显著下降了13.45%、31.03%和42.31%,而可溶性固形物含量与固酸比相比对照组分别提高了9.95%和90.57%;同时,宿萼果硬度、可滴定酸和石细胞含量相比于对照组显著下降了12.89%、48.48%和30.16%,而可溶性固形物和可溶性糖含量及固酸比相比对照组分别提高了19.33%、23.51%和131.63%。此外,外施5-ALA显著增加了脱萼果和宿萼果中挥发性代谢物的质量分数,主要提升了萜类、酯类等化合物,使果实木质味、水果味、香草味、清新味、青草味和甜味等相关香味属性更丰富,且在倍半萜和三萜生物合成通路中富集最高,其中注释到该通路中的 $\alpha$ -法呢烯、4-[(1E)-1,5-二甲基-1,4-己二-1-基]-1-甲基-环己烯、 $\delta$ -杜松烯、(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯和大根香叶烯B为关键化合物,为库尔勒香梨赋予特殊的柑橘味、薰衣草味、香柠檬味、干涩味、百里香味、辛辣味、泥土味、没药味和橙花味。综上所述,外源喷施5-ALA对改善库尔勒香梨果实品质具有显著作用,且以外施150 mg/L的5-ALA作用效果最优,有助于库尔勒香梨香气提升。

**关键词:** 库尔勒香梨; 果实品质; 挥发性代谢物; 5-氨基乙酰丙酸

## Effect of 5-Aminolevulinic Acid on the Quality and Volatile Metabolites of Korla Fragrant Pear Fruit

SUN Tianyu<sup>1</sup>, WEN Bo<sup>1</sup>, WANG Chunfeng<sup>2</sup>, TIAN Jia<sup>1</sup>, HAO Zhichao<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>1</sup>, WEN Yue<sup>1\*</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>

(1. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi 830052, China;

2. Xinjiang Korla Fragrant Pear Research Center, Korla 841000, China)

**Abstract:** In this study, the effect of applying different concentrations (50, 100, 150 and 200 mg/L) of 5-aminolevulinic acid (5-ALA) at the fruit swelling stage on the quality and volatile metabolites of Korla fragrant pear fruit was examined. The quality of pear fruit with and without calyx was determined at the maturity stage. Meanwhile, comprehensive quality evaluation of pear fruit under 5-ALA treatment was carried out using principal component analysis (PCA), and the optimal 5-ALA concentration for improving the fruit quality was determined. The results showed that exogenous spraying of 150 mg/L 5-ALA had the best effect on improving the quality of fragrant pear fruit. Specifically, compared with the control group, the hardness, stone cell content and titratable acid content of the fruit without calyx decreased by 13.45%, 31.03% and 42.31%, respectively, and the soluble solids content and solid/acid ratio increased by 9.95% and 90.57%, respectively; the hardness, titratable acid content and stone cell content of the fruit with calyx decreased significantly by 12.89%, 48.48% and 30.16%, and the soluble solids content, soluble sugar content and solid/acid ratio increased by 19.33%, 23.51% and 131.63%, respectively. In addition, exogenous spraying of 5-ALA significantly increased the mass fraction of volatile metabolites in both fruits, mainly including terpenoids and esters, enriching their aroma attributes such as woody, fruity,

收稿日期: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(32160686); 第二批天山英才培养计划青年托举人才项目(2023TSYCQNTJ0004);

新疆维吾尔自治区天山创新团队项目(2023D14015); 新疆农业大学高层次人才科研培育计划项目

第一作者简介: 孙天雨(1996—)(ORCID: 0009-0000-3251-6464), 男, 博士研究生, 研究方向为果树栽培与生理。

E-mail: 441704163@qq.com

\*通信作者简介: 温玥(1990—)(ORCID: 0000-0001-6307-1357), 女, 副教授, 博士, 研究方向为果树栽培与生理。

E-mail: wenyue900701@163.com

vanilla, fresh, grassy and sweet notes. The differential metabolites between the 5-ALA treatment and control groups were most enriched in the sesquiterpene and triterpenoid biosynthesis pathway. Among them,  $\alpha$ -farnesene, 4-[[[(1E)-1,5-dimethyl-1,4-hexanedi-1-yl]-1-methyl-cyclohexene,  $\delta$ -cadinene, (E)-1-methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-ylidene) cyclohex-1-ene and germacrene B were annotated as key compounds to this pathway, which together endowed Korla fragrant pears with special citrus-like, lavender, lemony, astringent, thyme-like, spicy, earthy, non-medicinal and orange flower-like flavors. In conclusion, it is demonstrated that the exogenous application of 5-ALA significantly improved the quality of Korla fragrant pear fruit, the effect being most pronounced at 5-ALA concentration of 150 mg/L.

**Keywords:** Korla fragrant pear; fruit quality; volatile metabolites; 5-aminolevulinic acid

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240418-176

中图分类号: S661.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 23-0008-10

引文格式:

孙天雨, 文博, 王春峰, 等. 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240418-176. <http://www.spkx.net.cn>

SUN Tianyu, WEN Bo, WANG Chunfeng, et al. Effect of 5-aminolevulinic acid on the quality and volatile metabolites of Korla fragrant pear fruit[J]. Food Science, 2024, 45(23): 8-17. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240418-176. <http://www.spkx.net.cn>

香气是果实的重要品质指标, 直接影响消费者喜好<sup>[1]</sup>, 主要由多种挥发性有机化合物共同作用产生, 包括酯类、萜类、醇类、醛类、酮类和烯炔类等, 这些挥发性代谢物在果实成熟过程中逐渐形成, 并赋予不同水果不同品种特有的香气特征<sup>[2]</sup>。研究证明己醛、(E)-2-己烯醛、1-己醇、(E)-2-己烯-1-醇、(Z)-3-己烯-1-醇和乙酸己酯等为库尔勒香梨的主要香气成分, 高浓度的醛和醇以及低浓度的酯赋予库尔勒香梨特殊的香味<sup>[3]</sup>。Li Huiyun等<sup>[4]</sup>在盘古香梨和库尔勒香梨中发现14大类的434种代谢产物, 其中酯类、萜烯类和醛类是两种梨中的主要挥发性代谢物, 并推测酯和醛类物质是盘古香梨特有的香气物质。Yan Dan等<sup>[5]</sup>研究发现, 2-甲基丁酸乙酯为“蜜脆”苹果的特殊香气来源, 而酯类化合物为果实提供果香味, 其中丁酸乙酯和乙酸己酯是成熟“蜜脆”果实中含量最高的两种香气成分。影响挥发性物质的因素有很多, 例如光照、温度、储存方式和外源植物生长调节剂等<sup>[6-8]</sup>。有学者将成熟后的康佛伦斯和卢卡斯梨果实进行1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理, 发现1-MCP影响了乙烯的生物合成与信号转导, 并通过调控关键酶的基因表达延迟梨香气特征挥发性化合物的形成, 减少了乙酸丁酯、乙酸己酯和乙酸戊酯的产生, 最终对梨果实的香气产生了负面影响<sup>[9-10]</sup>。

5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, 5-ALA)作为生物体内所有四吡咯化合物生物合成的关键前体, 是一种天然、无毒、可生物降解的环境友好型植物生长调节剂, 现已广泛应用在果树生产中, 如葡萄、梨、苹果和桃等, 具有调节果树生长发育, 增强光合作用效率, 改善果实风味和着色, 提高果实品质等作用<sup>[11-12]</sup>。例如5-ALA处理可提高果实乙酸己酯含量, 产生香叶基

丙酮, 从而使得葡萄香味更为丰富<sup>[13]</sup>。此外, 外源应用5-ALA可显著提高番茄果实中挥发性物质的含量, 产生给予番茄果实风味和芳香风味的类胡萝卜素衍生物6-甲基-5-庚烯-2-酮、香叶基丙酮、 $\beta$ -紫罗兰酮和紫罗兰酮。这些结果表明5-ALA具有促进果实挥发物质增加的潜力<sup>[14]</sup>。

库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis* Yü.)是新疆的“名优特”特色品种, 因其皮薄质脆、肉质细嫩、香气独特深受消费者喜爱<sup>[15]</sup>。糖、酸和香气共同构成了库尔勒香梨果实的整体风味, 硬度、石细胞等品质共同构成了其整体口感, 两者是果品鲜食和加工的重要因素<sup>[16]</sup>。近年来, 随着库尔勒香梨产业规模不断发展壮大, 但生产中出现“香味寡淡、品质下降”问题, 造成经济效益下降, 影响了产业可持续发展。此外, 目前库尔勒香梨挥发性香气代谢物相关研究主要在储存期与自然状态下库尔勒香梨香气成分方面<sup>[3,15]</sup>, 通过外施5-ALA对香梨果实品质和挥发性代谢物的影响鲜有报道。因此, 本研究以库尔勒香梨为试材, 通过喷施不同质量浓度的5-ALA溶液, 并在成熟期采集脱萼果和宿萼果, 探讨5-ALA对库尔勒香梨果实品质的影响, 并基于主成分分析(principal component analysis, PCA)法对5-ALA处理下的果实品质进行综合评价, 筛选出对库尔勒香梨果实品质提升效果最佳的质量浓度, 在此基础上通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)联用法进行最佳质量浓度处理下与自然状态下果实发育不同时期挥发性物质成分及含量差异变化对比, 综合评价外施5-ALA对库尔勒香梨挥发性代谢物的影响, 研究结果将为5-ALA在库尔勒香梨生产上

的应用提供理论基础和技术支持,有助于提升库尔勒香梨果实品质,促进香梨产业高质量发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

实验地点位于新疆巴音郭楞蒙古自治州库尔勒香梨研究中心实验基地(86°0'39.09"E、41°36'53.86"N,年均气温11.4℃,年均日照2 986 h,年均降水量58.6 mm)。实验材料为库尔勒香梨,树龄8 a,植株行距2 m×4 m,树形为疏散分层型,长势健壮一致,无病虫害。本实验采用随机区组设计,单株小区,重复3次,共选取15株库尔勒香梨实验树。库尔勒香梨果实通常分为脱萼果和宿萼果,花萼(包括萼筒和萼片)脱落的果实为脱萼果,花萼宿存的果实为宿萼果。

于果实膨大期(授粉后90 d左右)对所选实验树进行5-ALA喷施,设置质量浓度分别为50、100、150 mg/L和200 mg/L,并以喷施等量清水作为对照。喷施时间为晴朗无风的上午,以喷施部位全部湿润且有液珠滴下为宜。

5-ALA(99%)购于上海源叶生物科技有限公司(产品编号S30944,仅提供于科研实验)。

### 1.2 仪器与设备

GY-3型水果硬度计 浙江托普云农科技股份有限公司;手持糖度仪 日本Atago公司;数显游标卡尺 上海九量五金工具有限公司;电子天平 上海菁海仪器有限公司;8890-7000E GC-MS/MS仪、DB-5MS色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm) 美国安捷伦科技公司;Arrow SPME装置 瑞士思特斯分析仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 采样

于果实成熟期进行样品采集,分别在每个实验植株树冠外围东、南、西、北4个方向采集生长发育状况一致的脱萼果和宿萼果各2个,即每株实验树采集果实16个,每个处理进行3次生物学重复,每个处理共采集果实48个,4个处理和1个对照共计采集240个果实,采集完成后套网袋包装带回实验室进行果实品质测定。

#### 1.3.2 果实品质测定

果实纵横径使用数显游标卡尺进行测定,果形指数为纵横径之比;单果质量使用电子天平进行称量;果实硬度用GY-3型水果硬度计进行测定,将硬度计的探头垂直对准选定的测量点,均匀用力压入果实内,并在果实的赤道部位选取4个点进行多次测量,结果取平均值;将果实果肉用纱布压取汁液,取上清液用手持糖度仪测定可溶性固形物含量;可滴定酸和VC含量参考郭静等<sup>[17]</sup>的方法,分别用NaOH滴定法和2,6-二氯靛酚滴定法进行测

定;可溶性糖含量参考广新梅等<sup>[18]</sup>的方法,采用蒽酮法进行测定;石细胞含量参考聂继云等<sup>[19]</sup>的方法采用冷冻称质量法进行测定。

#### 1.3.3 挥发性代谢物检测

根据果实品质的测定结果,初步筛选出对库尔勒香梨果实品质提升效果最佳的5-ALA质量浓度,测定此质量浓度下的库尔勒香梨的挥发性代谢物。先前的研究发现,果实的香气多由果皮产生<sup>[20-21]</sup>,因此本实验主要探究外源5-ALA处理后库尔勒香梨果皮挥发性代谢物变化。用手术刀将果实品质提升效果最佳的5-ALA质量浓度下的库尔勒香梨果皮与果肉分离,用铝箔纸包裹切取好的果皮,迅速放入液氮罐冷冻保存,带回实验室后转移至-80℃超冰箱,用于挥发性代谢物测定。

将样品从-80℃冰箱中取出进行液氮研磨,涡旋混合均匀,每个样本配制为500 mg/mL后用于检测,并立即转移到含有NaCl饱和溶液的20 mL顶空瓶;全自动HS-SPME进行样本萃取,以供GC-MS分析。

HS-SPME萃取条件:在60℃恒温条件下,振荡5 min,120 μm DVB/CWR/PDMS萃取头插入样品顶空瓶,顶空萃取15 min,于250℃解吸5 min,然后进行GC-MS分离鉴定。采样前萃取头250℃老化5 min。

GC条件:DB-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm),载气为高纯氦气(纯度≥99.999%),恒流流速1.2 mL/min,进样口温度250℃,不分流进样,溶剂延迟3.5 min。升温程序:40℃保持3.5 min,以10℃/min升至100℃,再以7℃/min升至180℃,最后以25℃/min升至280℃,保持5 min。

MS条件:电子电离源,离子源温度230℃,四极杆温度150℃,质谱接口温度280℃,电子能量70 eV,扫描方式为选择离子监测模式,定性定量离子精准扫描。

#### 1.4 数据处理和统计分析

采用Microsoft Excel 2019整理数据,结果表示为 $\bar{x} \pm s$ ;使用SPSS 23.0软件进行方差分析和Person相关分析,若差异显著( $P < 0.05$ ),则用Duncan法进行多重比较;利用Origin Pro 2018 C进行图表制作,运用Adobe Photoshop CC对图片进行整合;使用SIMCA 14.1软件进行聚类分析、PCA、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)等。

## 2 结果与分析

### 2.1 5-ALA处理对库尔勒香梨脱萼果和宿萼果果实品质的影响

经过5-ALA处理后脱萼果与宿萼果的单果质量、纵径与横径均有所降低(表1),其中50 mg/L 5-ALA处



理后脱萼果与宿萼果的单果质量相比对照组显著降低了14.68%和11.54%，100 mg/L 5-ALA处理后脱萼果相比对照组则显著降低了11.37%；纵径方面，仅50 mg/L 5-ALA处理后宿萼果的纵径相比对照组显著降低了11.13%；5-ALA处理显著降低了宿萼果的横径，其中50、100、200 mg/L 5-ALA处理效果最明显，相比对照组显著降低了9.30%、8.59%和6.85%；而果形指数仅100 mg/L 5-ALA处理后宿萼果显著高于对照组，显著增加了9.65%。

表 1 5-ALA对库尔勒香梨果外观品质的影响					
Table 1 Effect of 5-ALA on the external quality of Korla fragrant pears					
5-ALA质量浓度/ (mg/L)	果实类型	单果质量/g	纵径/mm	横径/mm	果形指数
0	宿萼果	127.36±2.16 <sup>abc</sup>	72.35±3.40 <sup>a</sup>	63.32±1.35 <sup>a</sup>	1.14±0.06 <sup>b</sup>
	脱萼果	136.95±1.35 <sup>ab</sup>	67.52±6.66 <sup>abc</sup>	61.70±1.51 <sup>abc</sup>	1.10±0.06 <sup>b</sup>
50	宿萼果	112.66±4.99 <sup>d</sup>	64.30±1.56 <sup>bc</sup>	57.43±1.15 <sup>d</sup>	1.12±0.06 <sup>b</sup>
	脱萼果	116.85±2.01 <sup>de</sup>	63.60±2.40 <sup>c</sup>	57.93±1.08 <sup>cd</sup>	1.10±0.01 <sup>b</sup>
100	宿萼果	131.63±7.07 <sup>abcd</sup>	72.07±3.17 <sup>a</sup>	57.88±0.48 <sup>cd</sup>	1.25±0.07 <sup>a</sup>
	脱萼果	121.38±7.48 <sup>de</sup>	69.64±0.84 <sup>ab</sup>	62.23±0.83 <sup>ab</sup>	1.12±0.05 <sup>b</sup>
150	宿萼果	134.95±6.25 <sup>abc</sup>	69.04±4.54 <sup>abc</sup>	60.70±4.94 <sup>abcd</sup>	1.14±0.02 <sup>b</sup>
	脱萼果	128.60±7.61 <sup>bcde</sup>	66.59±3.04 <sup>abc</sup>	59.33±3.10 <sup>abcd</sup>	1.12±0.05 <sup>b</sup>
200	宿萼果	123.63±2.64 <sup>def</sup>	66.47±1.94 <sup>abc</sup>	58.98±1.99 <sup>bcd</sup>	1.13±0.02 <sup>b</sup>
	脱萼果	140.23±6.59 <sup>a</sup>	64.11±4.16 <sup>bc</sup>	60.05±3.79 <sup>abcd</sup>	1.07±0.03 <sup>b</sup>

注：同列小写字母不同差异显著（ $P<0.05$ ），下同。

库尔勒香梨果实中固酸比以及VC、可溶性糖、可溶性固形物含量在5-ALA处理后有所增加，而可滴定酸与石细胞含量有所降低（表2），其中以150 mg/L处理效果最明显。150 mg/L 5-ALA处理脱萼果与宿萼果的硬度相比对照组显著降低了13.45%和12.89%；可溶性固形物含量相比对照组显著提升了9.95%和19.33%；石细胞含量相比对照组显著降低了31.03%和30.16%；可滴定酸含量相比对照组显著降低了42.31%和48.48%；固酸比相比对照组显著提高了90.57%和131.63%；150 mg/L 5-ALA处理宿萼果的可溶性糖含量相比对照组显著增加了23.51%；而VC含量则差异均不显著。

表 2 5-ALA对库尔勒香梨果实内在品质的影响								
Table 2 Effect of 5-ALA on the internal quality of Korla fragrant pears								
5-ALA质量浓度/ (mg/L)	果实类型	硬度/ (kg/cm <sup>2</sup> )	可溶性 固形物 质量分数/%	石细胞 含量/ (g/100 g)	VC含量/ (mg/100 g)	可滴定酸 含量/ (g/kg)	可溶性糖 质量 分数/%	固酸比
0	宿萼果	5.51±0.22 <sup>b</sup>	10.14±0.41 <sup>c</sup>	0.63±0.04 <sup>a</sup>	3.20±1.60 <sup>d</sup>	0.33±0.10 <sup>f</sup>	7.57±0.51 <sup>d</sup>	30.73±4.37 <sup>e</sup>
	脱萼果	6.32±0.30 <sup>a</sup>	10.95±0.13 <sup>c</sup>	0.58±0.01 <sup>ab</sup>	6.58±0.41 <sup>ab</sup>	0.26±0.02 <sup>ab</sup>	9.51±0.36 <sup>abc</sup>	42.12±4.21 <sup>f</sup>
50	宿萼果	6.04±0.26 <sup>ab</sup>	10.42±0.13 <sup>bc</sup>	0.52±0.05 <sup>bc</sup>	3.64±2.67 <sup>cd</sup>	0.24±0.08 <sup>abc</sup>	9.12±0.53 <sup>bc</sup>	43.42±0.52 <sup>f</sup>
	脱萼果	6.23±0.18 <sup>a</sup>	11.49±0.12 <sup>b</sup>	0.47±0.04 <sup>cd</sup>	7.11±1.71 <sup>a</sup>	0.18±0.05 <sup>bcd</sup>	9.41±0.47 <sup>abc</sup>	63.83±2.30 <sup>bc</sup>
100	宿萼果	4.95±0.06 <sup>d</sup>	10.91±0.42 <sup>cd</sup>	0.47±0.06 <sup>cd</sup>	4.44±1.01 <sup>bcd</sup>	0.16±0.06 <sup>cd</sup>	8.80±0.24 <sup>c</sup>	68.19±0.09 <sup>d</sup>
	脱萼果	5.69±0.12 <sup>bc</sup>	10.35±0.51 <sup>c</sup>	0.44±0.02 <sup>d</sup>	5.33±1.41 <sup>abcd</sup>	0.12±0.06 <sup>d</sup>	9.67±0.17 <sup>ab</sup>	86.25±1.30 <sup>a</sup>
150	宿萼果	4.80±0.20 <sup>d</sup>	12.10±0.10 <sup>a</sup>	0.44±0.06 <sup>d</sup>	5.42±1.61 <sup>abcd</sup>	0.17±0.03 <sup>cd</sup>	9.35±0.61 <sup>abc</sup>	71.18±2.22 <sup>c</sup>
	脱萼果	5.47±0.09 <sup>c</sup>	12.04±0.33 <sup>a</sup>	0.40±0.03 <sup>d</sup>	7.47±0.92 <sup>a</sup>	0.15±0.01 <sup>cd</sup>	9.85±0.51 <sup>a</sup>	80.27±3.67 <sup>b</sup>
200	宿萼果	5.69±0.39 <sup>bc</sup>	11.04±0.02 <sup>bc</sup>	0.45±0.03 <sup>cd</sup>	5.87±1.77 <sup>abc</sup>	0.14±0.05 <sup>cd</sup>	9.39±0.40 <sup>abc</sup>	78.86±4.86 <sup>b</sup>
	脱萼果	5.54±0.05 <sup>c</sup>	11.40±0.33 <sup>bc</sup>	0.45±0.03 <sup>cd</sup>	4.27±1.07 <sup>bcd</sup>	0.18±0.10 <sup>bcd</sup>	10.08±0.30 <sup>a</sup>	63.33±5.06 <sup>c</sup>

2.2 5-ALA处理对库尔勒香梨果实品质的综合评价

2.2.1 PCA

对不同质量浓度5-ALA处理下的库尔勒香梨果实品质进行PCA（表3），结果表明前3个PC的累计贡献率为81.599%，3个PC代表11个果实品质指标。PC1特征值为4.695，其PC因子包括可溶性固形物含量、VC含量、可溶性糖含量和固酸比，贡献率为42.682%，为最重要PC，反映了库尔勒香梨营养品质与口味；PC2特征值为2.664，其PC因子包括果实纵径和果形指数，贡献率为24.218%，反映了库尔勒香梨果实外观大小；PC3特征值为1.617，其PC因子包括果实单果质量和横径，贡献率为14.700%，反映了库尔勒香梨果实外观。

表 3 5-ALA处理对库尔勒香梨果实品质影响的PCA													
Table 3 PCA results of the effect of 5-ALA treatment on the fruit quality of Korla fragrant pears													
PC	单果质量	纵径	横径	果形指数	硬度	可溶性固形物含量	石细胞含量	VC含量	可滴定酸含量	可溶性糖含量	固酸比	特征值	贡献率/%
PC1	0.037	-0.523	-0.474	-0.193	-0.098	0.740	-0.937	0.684	-0.884	0.869	0.847	4.695	42.682
PC2	0.378	0.774	0.116	0.791	-0.925	0.117	-0.255	-0.236	-0.299	-0.264	0.364	2.664	24.218
PC3	0.822	0.082	0.669	-0.441	-0.092	0.366	0.121	0.205	0.191	0.217	-0.099	1.617	14.700

2.2.2 综合评价

由于各PC的贡献率不同，对不同浓度5-ALA处理下的库尔勒香梨果实品质进行综合评价时，结合PC的贡献率，能更好地协调各PC之间的侧重关系，选定的2个PC贡献率为权重构建PC综合评价模型： $F=0.427\times F_1+0.242\times F_2+0.147\times F_3$ 。根据该公式计算不同浓度5-ALA处理的库尔勒香梨综合品质得分（表4）。通过综合得分及排序情况可以看出，150 mg/L 5-ALA处理的脱萼果综合评分最高，其次为该处理下的宿萼果，根据果实品质的综合评价结果，发现150 mg/L 5-ALA处理的库尔勒香梨相比于其他处理果实品质更优，其中脱萼果又优于宿萼果。

表 4 5-ALA处理对库尔勒香梨果实品质影响的综合得分排名表						
Table 4 Comprehensive score ranking for the effect of 5-ALA treatment on the fruit quality of Korla fragrant pears						
5-ALA质量浓度/ (mg/L)	果实类型	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F$	排名
0	宿萼果	-5.09	0.49	0.50	-1.98	10
	脱萼果	-1.28	-1.63	1.77	-0.68	8
50	宿萼果	-1.24	-1.84	-2.07	-1.28	9
	脱萼果	1.37	-2.02	-0.91	-0.04	7
100	宿萼果	-0.42	3.09	-1.34	0.37	5
	脱萼果	0.68	0.49	-0.29	0.37	6
150	宿萼果	1.05	1.85	1.12	1.06	2
	脱萼果	2.61	0.22	0.49	1.24	1
200	宿萼果	1.23	-0.03	-0.74	0.41	4
	脱萼果	1.09	-0.61	1.46	0.53	3

2.3 5-ALA处理后库尔勒香梨挥发性代谢物成分与含量分析

本研究选择150 mg/L的5-ALA为代谢组样品处理质量浓度，并对样本的代谢物进行了质谱定性定量分析



(图1)。本研究在4组处理样品中共检测到722种挥发性代谢物,总共分为16类,包括152种萜类、107种酯类、104种杂环化合物、76种烃类、64种酮类、63种醇类、54种醛类、40种芳烃、18种酚类、16种酸类、13种胺类、5种含氮化合物、4种其他类化合物、3种卤代烃、2种含硫化合物和1种醚类化合物。结合各化合物的占比,可以推断香气中的主要成分为萜类、酯类、杂环化合物和烃类,占比分别为21.05%、14.82%、14.40%和10.53%;而含氮化合物、卤代烃、含硫化合物与其他类化合物占比较小,仅为0.69%、0.42%、0.28%和0.55%。

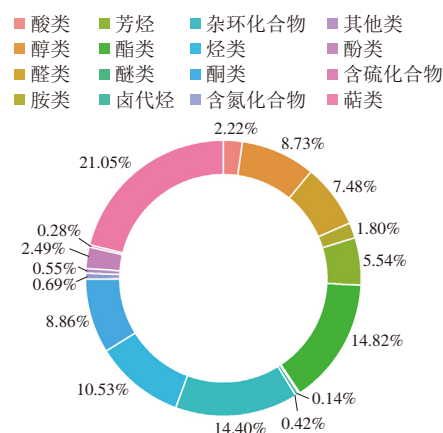
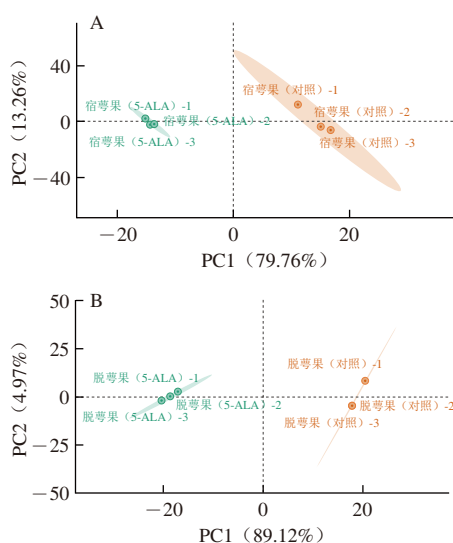


图1 库尔勒香梨挥发性代谢物类别组成环图

Fig. 1 Ring chart showing the composition of volatile metabolites in Korla fragrant pears

## 2.4 5-ALA处理对库尔勒香梨挥发性代谢物影响的PCA与OPLS-DA模型分析

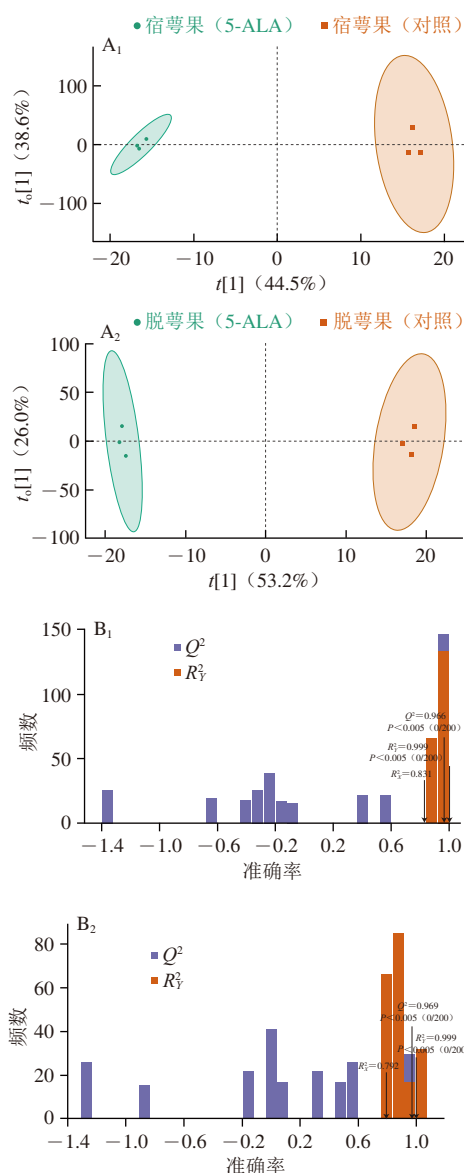


A.宿萼果; B.脱萼果。图4~7同。

图2 5-ALA与对照处理下库尔勒香梨挥发性代谢物的PCA得分图

Fig. 2 PCA score plots showing variation in volatile metabolites of Korla fragrant pears under 5-ALA treatment and control

通过PCA可区分代谢组学多维数据下的特征与不同组间的差异(图2)。本研究通过PCA发现,在5-ALA处理后的宿萼果与对照表现出明显分离,且PC1可以解释原始数据集的79.76%特征,而PC2可以解释原始数据集的13.26%特征,两者累计方差贡献率为93.02%;5-ALA处理后的脱萼果与对照组的挥发性代谢物PCA结果如图2B所示,其中PC1方差贡献率为89.12%,PC2为4.97%,两者累计方差贡献率为94.09%。通过两个比较组中发现,PC1通过5-ALA处理的分离较明显,离散程度高,不同处理的挥发性代谢物之间存在着差异。



A. OPLS-DA得分图; B. OPLS-DA验证图。

下标1和2.分别代表宿萼果和脱萼果。

图3 5-ALA与对照处理的挥发性代谢物OPLS-DA得分图与验证图

Fig. 3 Score plot and verification plots of OPLS-DA models showing variation in volatile metabolites of Korla fragrant pears under 5-ALA treatment and control

随后,为进一步了解5-ALA处理后库尔勒香梨挥发性代谢物的差异情况,采用OPLS-DA进行检验,OPLS-DA是一种具有监督模式识别的多元统计分析方法,在此模型中, $R^2_X$ 和 $R^2_Y$ 分别表示所建模型对X和Y矩阵的解释率, $Q^2$ 表示模型的预测能力,3种指标越接近于1时表示模型越稳定可靠,大于0.9时为出色模型,大于0.5时可认为是有效模型,得分图与验证图如图3所示,两对比组之间均有较好的分离度,且不同比较组的模型中 $R^2_X$ 分别为0.831和0.792, $R^2_Y$ 分别为0.999和0.999, $Q^2$ 分别为0.966和0.969,表明模型稳定可靠,且不同比较组均发生明显分离,说明5-ALA处理库尔勒香梨脱萼果的代谢物含量均差异明显。

## 2.5 不同处理下库尔勒香梨挥发性差异代谢物分析

采用差异倍数(fold change, FC)与变量投影重要性(variable importance in projection, VIP)筛选差异代谢物,当代谢物同时满足 $FC \geq 2$ 或 $FC \leq 0.5$ 、 $VIP > 1$ 时,被认为是差异性代谢物,结果表明在宿萼果(5-ALA)与宿萼果(对照)的对比中(图4A),一共有122种差异代谢物,其中有96种上调表达,26种下调表达;在脱萼果(5-ALA)与脱萼果(对照)的对比中(图4B),一共有174种差异代谢物,其中有167种上调表达,7种下调表达。

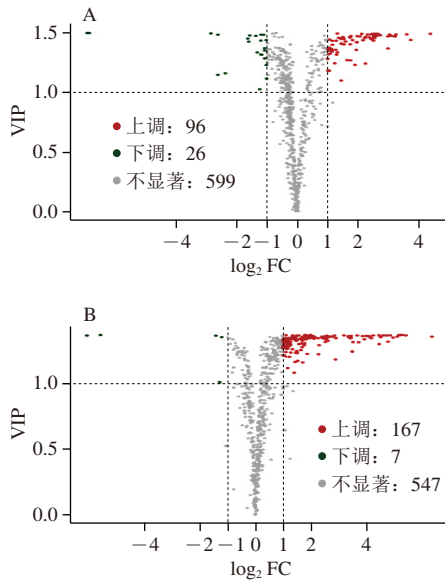


图4 5-ALA与对照处理的库尔勒香梨挥发性代谢物火山图

Fig. 4 Volcano plots illustrating differential volatile metabolites of Korla fragrant pears under 5-ALA treatment versus control

为更直观体现代谢物相对含量的变化规律,对5-ALA处理后库尔勒香梨脱萼果中的差异挥发性化合物进行热图分析(图5)。经5-ALA处理后的宿萼果挥发性化合物含量明显高于对照,该对比组差异代谢物的主要组分共有13类,其中萜类化合物差异最多,其次依次为酯类、杂环化合物、酮类、芳烃、醇类、醛类、酚类、炔类、酸类、胺类、含氮化合物和醚类化合物;经5-ALA

处理后的脱萼果其挥发性化合物含量也明显高于对照,该对比组差异代谢物的主要组分共有13类,其中萜类化合物差异最多,其次依次为酯类、酮类、杂环化合物、炔类、醇类、芳烃、醛类、酸类、酚类、胺类、卤代烃和含氮化合物。

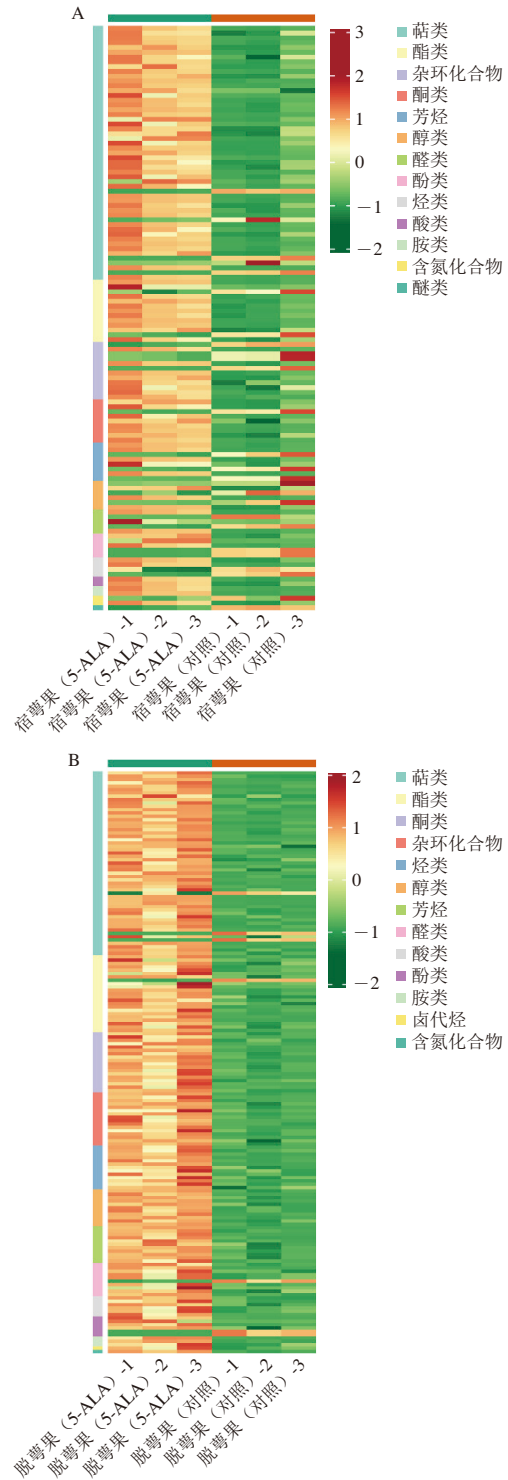


图5 5-ALA与对照处理的库尔勒香梨挥发性代谢物热图分析

Fig. 5 Heatmaps of differential volatile metabolites of Korla fragrant pears under 5-ALA vs control

2.6 不同处理下库尔勒香梨差异代谢物通路分析

将不同比较组中的差异显代谢物匹配京都基因与基因组百科全书 (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG) 数据库从而获得代谢物参与的通路信息。根据KEGG注释和富集结果发现, 宿萼果 (5-ALA) 与宿萼果 (对照) 的差异代谢物主要注释和富集在倍半萜和三萜生物合成、次生代谢产物的生物合成、各种植物次生代谢产物的生物合成、苯丙氨酸代谢、单萜生物合成、代谢途径通路等途径 (图6A), 其中最为显著 ( $P<0.05$ ) 富集的通路为倍半萜和三萜生物合成; 脱萼果 (5-ALA) 与脱萼果 (对照) 的差异代谢物主要注释和富集在倍半萜和三萜生物合成, 苯丙氨酸代谢, 次生代谢产物的生物合成, 丙酸代谢, 各种植物次生代谢产物的生物合成, 2-氧代羧酸代谢, 氨基酸的生物合成, C5-支链二元酸代谢, 半胱氨酸和甲硫氨酸代谢, 甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢, 缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸生物合成, 酪氨酸代谢,  $\alpha$ -亚油酸代谢和代谢途径通路 (图6B), 其中最为显著 ( $P<0.05$ ) 富集的通路与宿萼果组相同, 均为倍半萜和三萜生物合成, 在此通路中两对比组均有5个差异代谢物注解, 分别为 $\alpha$ -法呢烯、4-[(1E)-1,5-二甲基-1,4-己二-1-基]-1-甲基-环己烯、 $\delta$ -杜松烯、(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯和大根香叶烯B, 且均为上调表达 (表5)。

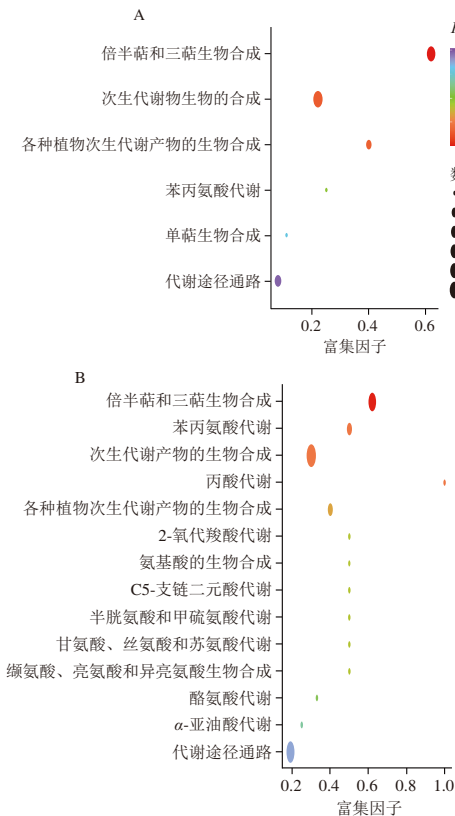


图6 5-ALA与对照处理的库尔勒香梨挥发性代谢物KEGG富集图  
Fig. 6 KEGG enrichment maps of differential volatile metabolites of Korla fragrant pears under 5-ALA treatment vs control

表5 富集于倍半萜和三萜生物合成通路的差异代谢物  
Table 5 Differential metabolites enriched in sesquiterpene and triterpene biosynthesis pathway

比较组	序号	化合物	分类	类型	FC	VIP
宿萼果 (5-ALA) vs 宿萼果 (对照)	1	$\alpha$ -法呢烯	萜类	上调	5.50	1.49
	2	4-[(1E)-1,5-二甲基-1,4-己二-1-基]-1-甲基-环己烯	萜类	上调	5.83	1.48
	3	$\delta$ -杜松烯	萜类	上调	5.79	1.47
	4	(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯	萜类	上调	5.00	1.48
	5	大根香叶烯B	萜类	上调	3.31	1.46
脱萼果 (5-ALA) vs 脱萼果 (对照)	6	$\alpha$ -法呢烯	萜类	上调	2.64	1.37
	7	4-[(1E)-1,5-二甲基-1,4-己二-1-基]-1-甲基-环己烯	萜类	上调	3.74	1.37
	8	$\delta$ -杜松烯	萜类	上调	5.24	1.36
	9	(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯	萜类	上调	3.37	1.29
	10	大根香叶烯B	萜类	上调	4.76	1.35

2.7 不同处理下库尔勒香梨差异代谢物香气特征分析

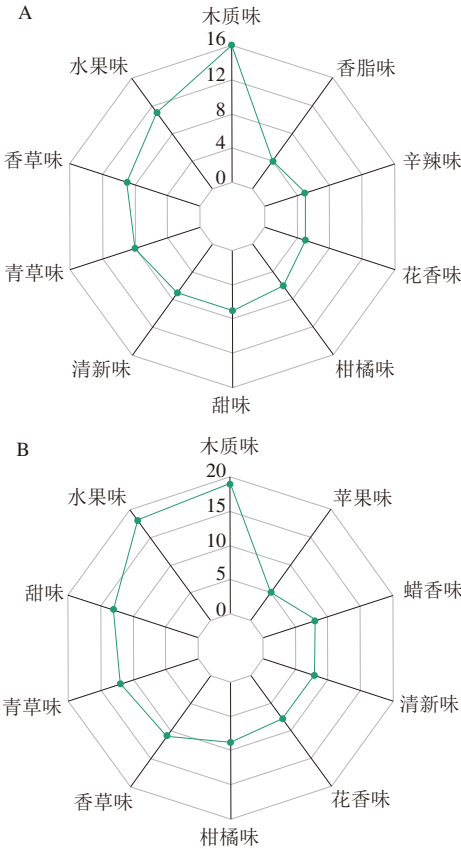


图7 5-ALA处理与对照处理的库尔勒香梨挥发性代谢物的香气特征雷达图  
Fig. 7 Radar maps for aroma characteristics of differential volatile metabolites in Korla fragrant pears under 5-ALA treatment vs control

为直观体现5-ALA处理后库尔勒香梨脱宿萼果中的香气特征, 挑选注释个数最高的前10个感官风味进行雷达图的绘制, 并根据VIP值由大到小筛选出各感官风味的差异代谢物。如图7所示, 经过5-ALA处理后



的宿萼果相比对照，其中具有木质味的香气物质最多（16种），其次为水果味（11种）、香草味（9种）、青草味（8种）、清新味（7种）、甜味（7种）、柑橘味（6种）、花香味（5种）、辛辣味（5种）和香脂味（4种）；经过5-ALA处理后的脱萼果相比对照，其木质味香气物质最多（19种），其次为水果味（18种）、甜味（13种）、青草味（12种）、香草味（11种）、柑橘味（9种）、花香味（8种）、清新味（8种）、蜡香味（8种）和苹果味（5种）。根据两对比组KEGG通路分析筛选出倍半萜和三萜生物合成通路，其注释的5种化合物中（表6）， $\alpha$ -法呢烯为库尔勒香梨赋予了香草味、青草味、柑橘味、薰衣草味、香柠檬味以及特有的没药味和橙花味； $\delta$ -杜松烯则赋予了木质味、香草味、干涩味和百里香味；大根香叶烯B则赋予了木质味、辛辣味和泥土味。

表6 关键差异代谢物香气特征

Table 6 Aroma characteristics of key differential metabolites

化合物	气味
$\alpha$ -法呢烯	香草味、青草味、柑橘味、薰衣草味、香柠檬味、没药味、橙花味
4-[(1E)-1,5-二甲基-1,4-己二-1-基]-1-甲基-环己烯	—
$\delta$ -杜松烯	木质味、香草味、干涩味、百里香味
(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯	—
大根香叶烯B	木质味、辛辣味、泥土味

注：—未检测出该化合物的香气特征。

### 3 讨论

目前，已有研究表明外源喷施ALA能够提高园艺作物的果实品质。例如，葡萄花期喷施100 mg/L ALA对葡萄果实单果质量与可溶性固形物具有显著提高作用<sup>[22]</sup>；在番茄收获期喷施200 mg/L ALA可以提高番茄果实可溶性糖含量，降低可滴定酸含量并提高糖酸比，有效改善番茄果实风味<sup>[23]</sup>。本研究结果表明，外施5-ALA能够影响库尔勒香梨脱萼果和宿萼果果实的可滴定酸和可溶性糖等果实品质，其中150 mg/L 5-ALA显著提高了脱萼果和宿萼果的可溶性糖和固酸比，同时显著降低了石细胞含量和可滴定酸含量。有学者研究发现，5-ALA处理可以降低‘早白花’桃果实的可滴定酸含量<sup>[24]</sup>，这与本研究结果相似，并可加速果树成熟使果实提早上市。尽管该处理降低了库尔勒香梨脱萼果与宿萼果的果实硬度（4.8~5.47 kg/cm<sup>2</sup>），但有研究表明库尔勒香梨特级果与一级果硬度范围一般为4.0~6.5 kg/cm<sup>2</sup><sup>[25-26]</sup>，因此推测5-ALA处理不会对库尔勒香梨的采后贮藏产生不利影响。而且，本实验基于PCA结果，最终筛选出150 mg/L 5-ALA处理对库尔勒香梨果实品质提升效果最佳。推测原因如下：5-ALA通过增强库尔勒香梨叶片的光合作用，促进光合产物在果实中的积累，进而提高果实品质<sup>[27]</sup>。而且，光合作用通过影响相关酶的形成进而

抑制木质素的生物合成，从而有效降低了库尔勒香梨果实中石细胞含量<sup>[28-30]</sup>。

果的香气是由多种挥发性化合物组合而成，这些化合物在果实成熟过程中会产生并散发出特有的香味<sup>[31]</sup>。对于库尔勒香梨而言，香气是评判其果实品质的重要指标之一。有学者通过对库尔勒香梨脱萼果与宿萼果代谢产物进行测定，发现脱萼果果实中代谢物的相对含量较高，果实风味更浓郁、营养品质更突出<sup>[16]</sup>。另有学者发现外施ALA能够促进番茄脂肪酸、类胡萝卜素、苯丙氨酸和支链氨基酸的形成，提高番茄果实中挥发性物质的含量<sup>[32]</sup>。本研究采用GC-MS技术对150 mg/L 5-ALA处理下和等量清水处理下的库尔勒香梨脱萼果和宿萼果实挥发性物质进行鉴定，共鉴定到722种挥发性代谢物，分为萜类、酯类、杂环化合物、烃类、酮类等16类化合物，其中5-ALA处理下萜类成为最高的香气成分，其次为酯类。近年来，库尔勒香梨的主要香气成分一直存在争议。研究表明，贮藏期库尔勒香梨香气中占比最大的化合物为酯类<sup>[17]</sup>，另有学者认为库尔勒香梨果实香气主要以醛类物质为主<sup>[3]</sup>，均与本研究结论不同。推测可能与5-ALA能够提高库尔勒香梨的抗逆性有关<sup>[33]</sup>，5-ALA处理下的库尔勒香梨会产生更多的萜类化合物来应对环境压力<sup>[34]</sup>。另外，从PCA与OPLS-DA模型结果来看，经5-ALA处理后的库尔勒香梨脱萼果和宿萼果与对照处理果实挥发性代谢物差异显著，处理组与对照组明显分离，即不同处理下库尔勒香梨果实挥发性代谢物变化明显。此外，差异代谢物的筛选与聚类热图显示，经5-ALA处理后的脱萼果和宿萼果挥发性化合物含量均明显高于对照，以上调模式为主，且以萜类化合物差异最大。分析原因可能是植物通过光合作用中的光反应阶段来感知光信号，光信号因子与萜类生物合成途径中的酶基因相互作用来调控相关基因表达，从而影响萜类化合物的合成<sup>[35]</sup>，而5-ALA可能通过促进库尔勒香梨叶片光合作用，从而使得果实果皮中萜类化合物上调<sup>[12]</sup>。

5-ALA处理后库尔勒香梨脱萼果和宿萼果果实挥发性差异代谢物在倍半萜和三萜生物合成通路中富集最显著，其中 $\alpha$ -法呢烯、4-[(1E)-1,5-二甲基-1,4-己二-1-基]-1-甲基-环己烯、 $\delta$ -杜松烯、(E)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚烷基)环己-1-烯和大根香叶烯B注释到该通路上，这些代谢物为库尔勒香梨提升了典型的木质味、青草味和香草味，并赋予特殊的柑橘味、薰衣草味、香柠檬味、干涩味、百里香味、辛辣味和泥土味以及特有的没药味和橙花味。而且，5-ALA处理下脱宿萼果与对照组相比，其木质味、水果味、香草味、清新味、甜味等相关香味属性差异较大，说明外源5-ALA处理丰富了库尔勒香梨的香气品质特性。在萜类化合物的生物合成中，倍半萜和三萜合成通路占据重要地位<sup>[36]</sup>。这些代谢通路涉及一

系列复杂的酶催化反应,其中异戊烯基二磷酸和烯丙基焦磷酸是关键的前体物质,通过一系列的缩合、修饰和环化反应,最终转化为具有特定结构和功能的倍半萜和三萜化合物,这些基因和酶在萜类化合物的生物合成过程中起着关键的调控和催化作用,从而影响了萜类化合物的种类、含量和分布<sup>[37-38]</sup>,由此推测这可能是外施5-ALA可以促进萜类化合物产生的另一原因。

综上所述,于库尔勒香梨果实膨大期外源喷施5-ALA处理可显著提高其脱萼果与宿萼果的果实品质,其中以150 mg/L 5-ALA促进效果最佳,且显著提升库尔勒香梨的香气。

#### 参考文献:

- [1] LYTOU A E, PANAGOU E Z, NYCHAS G J E. Volatilomics for food quality and authentication[J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 28: 88-95. DOI:10.1016/j.cofs.2019.10.003.
- [2] EL HADI M A M, ZHANG F J, WU F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. Molecules, 2013, 18(7): 8200-8229. DOI:10.3390/molecules18078200.
- [3] CHEN J Q, LÜ J H, HE Z S, et al. Investigations into the production of volatile compounds in Korla fragrant pears (*Pyrus sinkiangensis* Yu)[J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125337. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125337.
- [4] LI H Y, MA C W, LI S F, et al. Eight typical aroma compounds of 'panguxiang' pear during development and storage identified via metabolomic profiling[J]. Life, 2023, 13(7): 1504. DOI:10.3390/life13071504.
- [5] YAN D, SHI J R, REN X L, et al. Insights into the aroma profiles and characteristic aroma of 'Honeycrisp' apple (*Malus × domestica*)[J]. Food Chemistry, 2020, 327: 127074. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127074.
- [6] PENG X, WANG B, WANG X L, et al. Variations in aroma and specific flavor in strawberry under different colored light-quality selective plastic film[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2020, 35(3): 350-359. DOI:10.1002/ffj.3569.
- [7] ZOU J, CHEN J, TANG N, et al. Transcriptome analysis of aroma volatile metabolism change in tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit under different storage temperatures and 1-MCP treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 135: 57-67. DOI:10.1016/j.postharvbio.2017.08.017.
- [8] IBRAHIM M, AGARWAL M, YANG J O, et al. Plant growth regulators improve the production of volatile organic compounds in two rose varieties[J]. Plants, 2019, 8(2): 35. DOI:10.3390/plants8020035.
- [9] CAI H F, HAN S, JIANG L, et al. 1-MCP treatment affects peach fruit aroma metabolism as revealed by transcriptomics and metabolite analyses[J]. Food Research International, 2019, 122: 573-584. DOI:10.1016/j.foodres.2019.01.026.
- [10] HENDGES M V, NEUWALD D A, STEFFENS C A, et al. 1-MCP and storage conditions on the ripening and production of aromatic compounds in Conference and Alexander Lucas pears harvested at different maturity stages[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 146: 18-25. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.08.006.
- [11] LIANG R L, WANG L J, WANG X Q, et al. Effects of exogenous ALA on leaf photosynthesis, photosynthate transport, and sugar accumulation in *Prunus persica* L.[J]. Forests, 2023, 14(4): 723. DOI:10.3390/f14040723.
- [12] WANG X Q, ZHANG J T, WANG L J. Study on the mechanism of exogenous 5-aminolevulinic acid (ALA) in regulating the photosynthetic efficiency of pear leaves[J]. Forests, 2024, 15(5): 769. DOI:10.3390/f15050769.
- [13] 傅伟红, 夏澜, 应永涛, 等. 5-ALA对阳光玫瑰葡萄果实品质的影响[J]. 中国果树, 2023(10): 45-51. DOI:10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2023.10.007.
- [14] LI R R, WANG J W, YUAN H, et al. Exogenous application of ALA enhanced sugar, acid and aroma qualities in tomato fruit[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1323048. DOI:10.3389/fpls.2023.1323048.
- [15] CHEN J L, WU J H, WANG Q, et al. Changes in the volatile compounds and chemical and physical properties of Kuerle fragrant pear (*Pyrus serotina* Reld) during storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(23): 8842-8847. DOI:10.1021/jf061089g.
- [16] JIANG W, YAN P, ZHENG Q Q, et al. Changes in the metabolome and nutritional quality of pulp from three types of Korla fragrant pears with different appearances as revealed by widely targeted metabolomics[J]. Plants, 2023, 12(23): 3981. DOI:10.3390/plants12233981.
- [17] 郭静, 伏芳, 高同雨, 等. '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. DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2022.01.08.
- [18] 广新梅, 徐崇志, 王绪春, 等. 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. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.19.031.
- [19] 聂继云, 李静, 杨振锋, 等. 冷冻法测定梨的石细胞含量[J]. 果树学报, 2006, 23(1): 133-135. DOI:10.3969/j.issn.1009-9980.2006.01.032.
- [20] 刘园, 向思敏, 王江波, 等. 库尔勒香梨挥发性物质及初生代谢物的GC-MS分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1): 44-52. DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.01.006.
- [21] 李瑞, 刘翠华, 石金瑞, 等. '蜜脆'苹果果皮和果肉香气差异[J]. 西北农业学报, 2019, 28(10): 1621-1631. DOI:10.7606/j.issn.1004-1389.2019.10.008.
- [22] WATANABE K, NISHIHARA E, WATANABE S, et al. 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. DOI:10.1007/s10725-006-0024-4.
- [23] WANG J W, ZHANG J, LI J, et al. 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. DOI:10.3389/fpls.2021.683868.
- [24] 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): 1043-1050. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2013.06.004.
- [25] 库尔勒香梨收购质量要求: T/XLXH 004—2023[S]. 库尔勒: 巴音郭楞蒙古自治州库尔勒香梨协会, 2023: 11-10.
- [26] 新疆维库尔勒香梨果品质量分级标准: DB 65/T 4295—2020[S]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区市场监督管理局, 2020: 4-7.
- [27] XIE L, WANG Z H, CHENG X H, et al. 5-Aminolevulinic acid promotes anthocyanin accumulation in Fuji apples[J]. Plant Growth Regulation, 2013, 69(3): 295-303. DOI:10.1007/s10725-012-9772-5.

- [28] 孔佳君. 光质对梨果实品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. DOI:10.27244/d.cnki.gnjnu.2018.000546.
- [29] PLOSCHUK E L, BADO L A, SALINAS M, et al. Photosynthesis and fluorescence responses of *Jatropha curcas* to chilling and freezing stress during early vegetative stages[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 102: 18-26. DOI:10.1016/j.envexpbot.2014.02.005.
- [30] TURAN Ö, EKMEKÇI Y. Activities of photosystem II and antioxidant enzymes in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars exposed to chilling temperatures[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(1): 67-78. DOI:10.1007/s11738-010-0517-7.
- [31] JIN N, ZHANG D, JIN L, et al. Controlling water deficiency as an abiotic stress factor to improve tomato nutritional and flavour quality[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100756. DOI:10.1016/j.fochx.2023.100756.
- [32] RODRIGUES MAGALHÃES H C, ALVES FILHO E G, RIVERO MEZA S L, et al. Effect of methyl jasmonate on the biosynthesis of volatile compounds associated with the ripening of grape tomato fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(11): 4696-4705. DOI:10.1021/acs.jafc.2c06215.
- [33] ZHONG Y, LIU C Z, WEI B, et al. Exogenous 5-aminolevulinic acid promotes osmotic stress tolerance of walnuts by modulating photosynthesis, osmotic adjustment and antioxidant systems[J]. Forests, 2023, 14(9): 1789. DOI:10.3390/f14091789.
- [34] HUANG Y, XIE F J, CAO X, et al. Research progress in biosynthesis and regulation of plant terpenoids[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2021, 35(1): 1799-1808. DOI:10.1080/13102818.2021.2020162.
- [35] 张婵, 吴友根, 于靖, 等. 光与茉莉酸信号介导的萜类化合物合成分子机制[J]. 生物技术通报, 2022, 38(8): 32-40. DOI:10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2021-1267.
- [36] 夏诗琪, 周成钊, 郭昌庆, 等. 基于广泛靶向代谢组学分析花榈木不同部位挥发性代谢物差异[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2027-2039. DOI:10.16333/j.1001-6880.2023.12.002.
- [37] IGNEA C, PONTINI M, MOTAWIA M S, et al. Synthesis of 11-carbon terpenoids in yeast using protein and metabolic engineering[J]. Nature Chemical Biology, 2018, 14(12): 1090-1098. DOI:10.1038/s41589-018-0166-5.
- [38] IGNEA C, RAADAM M H, KOUTSAVITI A, et al. Expanding the terpene biosynthetic code with non-canonical 16 carbon atom building blocks[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5188. DOI:10.1038/s41467-022-32921-w.