

青海地区 6 个甜樱桃品种果实发育过程中香气物质变化规律

郝帅棋^{1,3}, 郭青云^{1,2*}, 李霖灏^{1,3}, 袁华宁^{1,3}

(1 青海大学农林科学院, 西宁 810016; 2 青藏高原生物技术教育部重点实验室, 西宁 810016; 3 青海省农业有害生物综合治理重点实验室, 西宁 810016)¹

[摘要]: 【目的】为鉴定青海地区 6 个甜樱桃品种果实不同香气类型中存在的香气物质, 并深入了解其生长发育过程中香气物质的变化。【方法】以 6 个品种莫莉 (Moreau)、2018-13、Celeste 塞莱斯特 (Celeste)、2018-20、甜心 (Sweetheart)、雷尼 (Rainier) 的果实样品为试材, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 对硬核期 (HS)、着色期 (VE)、商熟期 (CMP)、完熟期 (RP) 果实香气物质进行测定。运用韦恩图、热图聚类分析和主成分分析, 比较 6 个品种发育过程中香气物质的变化规律, 进而用偏最小二乘法判别分析筛选差异香气物质并分析其不同发育阶段的含量变化。【结果】6 个甜樱桃品种果实在 4 个不同发育时期, 共检测出 108 种香气物质, 其中共有香气成分 14 种。在 HS、VE、CMP、RP 期分别检出 69、46、45、32 种香气物质; 随着甜樱桃的生长发育, 莫莉品种香气物质含量大致呈现先升后降的趋势, 2018-13 及甜心品种中大致呈现升高后下降然后再升高的趋势, 2018-20 品种中大致呈现逐渐下降趋势至 RP 期含量最低, 而塞莱斯特及雷尼品种中大致呈现波动变化后至 RP 含量达高峰的趋势。利用偏最小二乘判别分析, 筛选出 VIP 值大于 1 的物质, 认定反式-2-己烯醛 (2-Hexenal, (E)-)、2-己烯醛 (2-Hexenal)、己醛 (Hexanal)、反式-2-己烯-1-醇 (2-Hexen-1-ol, (E)-) 为主要差异香气物质。在 6 个品种不同发育时期, 2-己烯醛的含量大致呈现出由低到高的变化趋势, 反式-2-己烯醛及反式-2-己烯-1-醇的含量均呈现“W 形”变化的趋势, 己醛含量大致呈现先升高后下降再升高的趋势。【结论】6 个甜樱桃品种果实发育过程中香气物质变化规律各有差异, 反式-2-己烯醛、2-己烯醛、己醛、反式-2-己烯-1-醇为最重要的关键香气成分。本研究结果为甜樱桃优良品种的香味遗传育种和香气合成代谢及分子生物学研究提供了理论依据。

[关键词]甜樱桃; 果实发育; GC-MS; 香气物质; 发育过程; 变化规律

中图分类号: S662.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2025)04-0001-08

Changes of aroma substances during fruit development of six sweet cherry varieties in Qinghai region

Hao Shuaiqi^{1,3}, Guo Qingyun^{1,2*}, Li Linhao^{1,3}, Yuan Huaning^{1,3}

(1 College of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, 2 Key Laboratory of Biotechnology on the Qinghai-Tibetan Plateau, Ministry of Education, China 3 Key Laboratory of Comprehensive Management of Agricultural Pests, Qinghai Xining 810016, China)

Abstract: 【Objective】 Sweet cherry is a large fruit, colorful, delicious, nutritious and popular among consumers, and the cultivation of sweet cherry in Qinghai Province started in 1994, and began to plant on a large scale after 2000, with a cultivated area of about 32,600 mu, which is a characteristic fruit industry developed in Qinghai Province in recent years. And sweet cherry

收稿日期: 2024-11-22 接受日期: 2025-01-23

基金项目: 青海省 2023 年重点研发与转化计划项目; (230-NK-150)

作者简介: 郝帅棋, 男, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理学研究。E-mail: 15003886246@163.com

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

flavor plays a very important role in the consumer's preference, with the maturity of the fruit, the fruit body will occur extremely complex physiological and biochemical metabolic processes, and the volatile aroma compounds in the fruit also change. Therefore, the developmental period is a key factor affecting the production and accumulation of fruit aroma. To identify the aroma compounds in different varieties of sweet cherry fruits from the Qinghai province in China and to investigate the changes of these compounds during the fruit developmental stages. **【Methods】** Fruits from six sweet cherry varieties, Moreau, Qingying No.1, Celeste, 2018-20, Sweetheart, and Rainier, were used as experimental materials. Aroma compounds were analyzed with headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) at four developmental stages, hardening stage (HS), veraison stage (VE), commercial maturity period (CMP), and full ripening period (RP, respectively). The variations in aroma compounds among these six varieties were compared using Venn diagrams, heatmap clustering analysis, and principal component analysis (PCA). Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) was applied to screen for differential aroma compounds and to analyze changes in their concentrations during different developmental stages. **【Results】** A total of 108 aroma compounds were identified across the four developmental stages in the six sweet cherry varieties, with 14 common aroma compounds. Specifically, 69, 46, 45, and 32 aroma compounds were detected in the HS, VE, CMP, and RP stage, respectively. During cherry fruit development, the Moreau variety showed a trend where aroma compound concentrations first increased and then decreased. The Qingying No.1 and Sweetheart varieties displayed an increase, followed by a decrease and then another increase. The 2018-20 variety exhibited a gradual decrease, reaching the lowest concentration in the RP stage. In contrast, the Celeste and Rainier varieties showed fluctuations, peaking at the RP stage. PLS-DA identified differential compounds with (Variable Importance in Projection) (VIP) values greater than 1, including 2-Hexenal (E), 2-Hexenal, Hexanal, and 2-Hexen-1-ol (E). Across different developmental stages of six cherry varieties, 2-Hexenal showed a trend of increasing concentrations from low to high, while 2-Hexenal (E) and 2-Hexen-1-ol (E) displayed a "W-shaped" trend. The concentration of Hexanal generally increased, then decreased, and increased again. The results showed that the six sweet cherry varieties were dominated by aldehydes from the HS phase to the PR phase; the contents of Moreau aroma substances showed a general tendency of increasing and then decreasing with the development of sweet cherries, among which aldehydes and olefins were the highest in the HS phase, which was obviously higher than that of other varieties, and then showed a decreasing tendency, and the lowest contents were found in the RP phase. The content of alcohols showed a trend of increasing and then decreasing. Alkane content was the highest in the HS period, slightly decreased in the VE period, increased in the CMP period, and decreased to the lowest in the RP period; 2018-13 varieties roughly showed a trend of first increasing and then decreasing 2018-20 varieties of RP content showed a gradual decline to the lowest trend, in which aldehydes showed a first increase and then a decline to the lowest RP content, alkanes showed a first increase and then a decline to the lowest RP content, and enols showed a first increase and then a decline to the lowest RP content. The RP content of Sweetheart varieties showed a general trend of increasing and then decreasing to the lowest, with aldehydes and alcohols showing the highest content in the VE period, then decreasing and increasing in the RP period; olefins showing the highest content in the HS period, then decreasing; and alkanes showing an increasing, then decreasing, then increasing RP content. Aldehydes

content was highest during the HS period and then decreased slightly; alcohols content decreased and then increased to the peak in the RP period; olefins content was highest during the HS period; alkanes content increased and then decreased and then increased to the peak in the RP period. By partial least squares discriminant analysis, the substances with VIP values greater than 1 were screened out, and 2-hexenal (E)-(trans-2-hexenal), 2-hexenal (2-hexenal), hexanal (hexanal) and 2-hexen-1-ol (E)-(trans-2-hexen-1-ol) were identified as the main differential aroma substances, with 2-hexenal (E)-content being higher, accounting for 63.32% of the total aroma content. 63.32% of the total aroma content. The contents of the aroma substances varied in different developmental periods of the six varieties. 【Conclusion】 The six sweet cherry varieties exhibited distinct patterns in aroma compound changes during fruit development. The most important key aroma compounds identified were 2-Hexenal (E), 2-Hexenal, Hexanal, and 2-Hexen-1-ol (E). These findings provide a theoretical foundation for the genetics and breeding of aroma in sweet cherry, as well as for research on aroma synthesis metabolism and molecular biology.

Keywords:Sweet cherry; Fruit development; GC-MS; Aroma substances; Developmental process; Law of change

我国甜樱桃从 1980 年左右开始商业化栽培, 种植面积以每年约 15%~20% 的速度在增长。据中国园艺学会樱桃分会统计, 2020 年我国甜樱桃种植面积和产量分别约为 20 万 hm^2 和 80 万 $\text{t}^{[1-2]}$, 是种植规模较大的国家之一^[3]。青海省甜樱桃栽培始于 1994 年, 2000 年后开始规模化种植, 目前栽培面积约 3.26 hm^2 , 是青海省近年来发展的特色水果产业, 主要分布在海东市的乐都区、民和县。因青海省具有独特的气候资源, 露地栽培甜樱桃较内地其他地区晚熟, 从而规避了供应高峰期, 大大延长了鲜果的供应时间, 具有较大的市场需求和良好的发展前景。

甜樱桃果实大、颜色艳丽、味道鲜美、营养丰富, 深受消费者喜爱^[4]。青海省甜樱桃栽培始于 1994 年, 2000 年后开始规模化种植, 目前栽培面积约 0.22 万 hm^2 , 是青海省近年来发展的特色水果产业, 主要分布在海东市的乐都区、民和县, 因独特的气候资源, 露地栽培较内地其他地区晚熟, 从而规避供应高峰期, 大大延长了鲜果的供应时间, 具有较大的市场需求和良好的发展前景。

水果风味在消费者的喜好中起着非常重要的作用, 包括口腔的感觉(甜、酸或苦)和香气物质的气味^[5-6]。糖和酸与消费者偏好有关, 而香气物质决定了水果的独特味道^[7], 随着生活水平的提高, 人们对高品质水果的需求也在增加, 具有诱人香气的水果会备受青睐^[8-9]。然而, 水果品质的退化, 特别是香气的损失, 会降低消费者的购买需求^[10]。因此, 目前水果香气的研究受到广泛关注。Gonçalves 等^[11]报道, 23 个甜樱桃品种中共鉴定出 66 种挥发物, 包括 16 种醛类、23 种醇类、6 种酮类、6 种酯类、8 种单萜、3 种异戊二烯类、2 种烃类和 2 种酸类。Magri 等^[12]研究显示, 4 个甜樱桃品种共鉴定出 34 种挥发性化合物, 不同的香气物质与甜樱桃品种相关。事实上, 果实香气组成与含量在不同发育阶段也明显不同。随着果实的成熟, 香气物质成分和含量会不断发生变化, 从而影响果实的香气程度^[13]。张序等^[14]研究显示, 红灯甜樱桃的特征香气成分在着色期大量合成, 在商熟期达到高峰, 完熟

期出现大量乙醇，风味变劣。Correia 等^[15]报道，3-甲基-2-丁烯-1-醇和 1-己醇（1-Hexanol）在甜樱桃成熟期间显著增加。田竹希等^[16]研究显示，绿熟期相对含量最高的物质是醇类，着色期、商熟期和完熟期相对含量最多的均是醛类物质。醛类物质从绿熟期开始便持续不断合成，直至商熟期达到最高值，至完熟期时又略微下降。

Villavicencio 等^[17]报道，甜樱桃的脂氧合酶（LOX）在成熟过程中 4 个发育阶段均有表达，共鉴定出 13 个 LOX 候选基因（6 个 9-LOX 和 7 个 13-LOX）在甜樱桃中有差异表达，且它们的高表达与挥发物含量的增加呈正相关。以上研究结果显示，随着果实的成熟，果实体内会发生极其复杂的生理生化代谢过程，果实中的挥发性香气化合物也随之改变。因此，发育时期是影响果实香气产生和积累的关键因素，果实发育过程中香气物质的变化成为近年甜樱桃产业领域的研究热点。

本研究旨在探讨甜樱桃品种莫莉（Moreau）、2018-13、Celeste 塞莱斯特（Celeste）、2018-20、甜心（Sweetheart）、雷尼（Rainier）果实发育过程中香气物质的变化规律，为甜樱桃香气物质的合成代谢与调控研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

甜樱桃品种莫莉、2018-13（斯坦勒自交后代）、塞莱斯特、2018-20（斯坦勒自交后代）、甜心、雷尼来源于青海省海东市乐都区农业示范园区（101°75 E，36°73 N）（表 1，图 1），建园时树龄 2 年，至 2024 年树龄 7 年；所有品种温室种植于 2022 年 12 月 5 日扣棚，2023 年 4 月 1 日升温。春季升温时，开花前浇透水；硬核期采用滴灌浇水；采果后浇水。秋季施肥并浇透水，冬季扣棚浇透水。春季开花前常规修剪枝条，采果后常规修剪管理，666.7 m²产量约为 220 kg。株行距 1.6 m×2.5 m，纺锤形。6 个品种分别于 2023 年 6 月 24 日、6 月 25 日、6 月 28 日、7 月 1 日、7 月 8 日和 7 月 10 日进行采样。6 个品种每个时期采集 45 个果实作为试验材料，3 个果实为 1 次重复。果实香气成分测定在西北农林科技大学园艺学院实验室进行。

表 1 供试 6 份甜樱桃品种材料

Table 1 Materials of six sweet cherry varieties tested

序号 Serial number	栽培品种 Cultivar	来源 Source	成熟期 Mature stage	水果形状 Fruit shape	果皮颜色 Peel color	果肉颜色 Flesh color
1	莫莉	法国 France	早熟 Precocity	宽心脏形 Wide heart	鲜红色 Bright red	红色 Red
2	2018-13	中国 China	早熟 Precocity	肾形 Reniform	深红色 Deep red	红色 Red
3	塞莱斯特	加拿大 Canada	早熟 Precocity	短心脏形 Brachycardia	紫红色 Fuchsia	红色 Red
4	2018-20	中国	晚熟	扁圆形	红色	淡红色

		China	Late-maturing	Oblateness	Red	Light red
5	甜心	加拿大	晚熟	肾形	深红色	深红色
		Canada	Late-maturing	Reniform	Deep red	Deep red
6	雷尼	美国	晚熟	宽心脏形	黄红色	白色
		America	Late-maturing	Wide heart	Yellowish red	White



图 1 供试 6 份甜樱桃果实的外观

Fig. 1 Appearance of 6 sweet cherry fruits tested

1.1.1 试验方法

取 10 g 樱桃果实冷冻研磨粉末，加入 10 μ L 2-壬酮 ($8.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 作为内标物、2 g NaCl 和磁力转子置于 30 mL 顶空瓶中，45 $^{\circ}\text{C}$ 平衡 60 min，将老化后的长度为 2 cm、厚度为 50/30 μm 的 DVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶空瓶置于液面上方 1.5 cm 处，42 $^{\circ}\text{C}$ 吸附 40 min，然后将 SPME 萃取头拔出插入 GC-MS 进样口，250 $^{\circ}\text{C}$ 热解吸 10 min。

GC-MS 条件：HP-5MS 毛细管色谱柱 (30 mm \times 0.25 mm, 0.25 μm)；载气为高纯氦气 ($\text{He}>99.999\%$)，流速 1 mL \cdot min $^{-1}$ 。固相微萃取手动进样，不分流进样，进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$ ，热解吸时间 8 min。离子能量 70 eV；质量扫描范围 45~450 u。

1.2 测定指标的计算

1.2.1 果实品质测定

参照田彦龙等^[18]的方法，测定单果质量、带果皮硬度、去果皮硬度和果形指数。

1.2.2 香气物质鉴定

基于 NIST2017 标准谱库中匹配的质谱数据，仅报道正反匹配度均大于 200 的结果。

1.2.3 定量分析

本研究中使用的所有标准品均用乙醇稀释至一定浓度。本研究通过添加 2-壬酮作为内标对样品中香气物质进行定量测定。各香气成分含量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) = [各成分的峰面积 / (内标的峰面积 \times 样品质量 (g)) \times 内标质量浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{uL}^{-1}$) \times 内标体积 (uL)]^[19]。

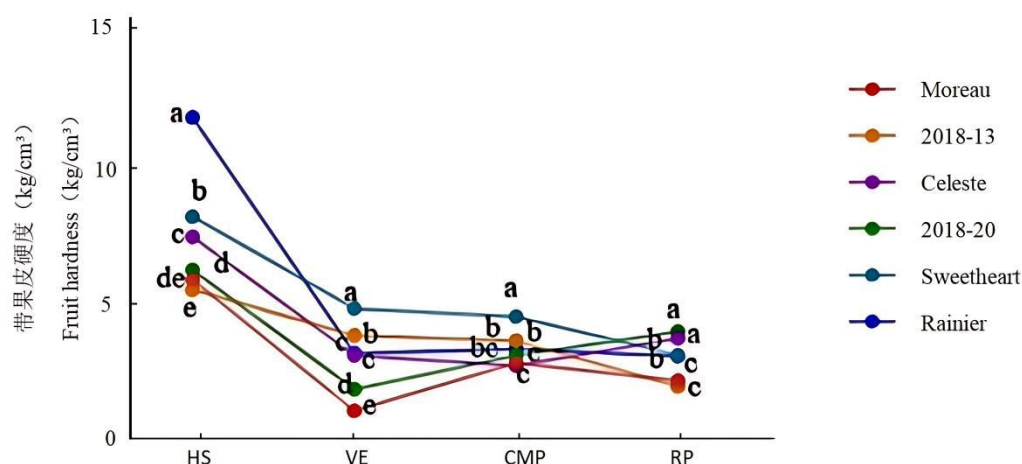
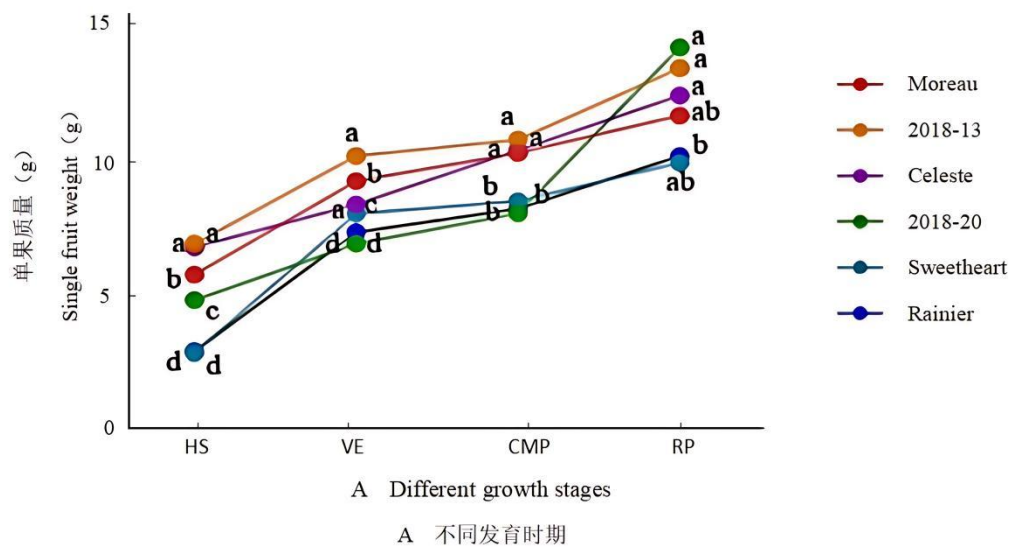
1.3 统计分析

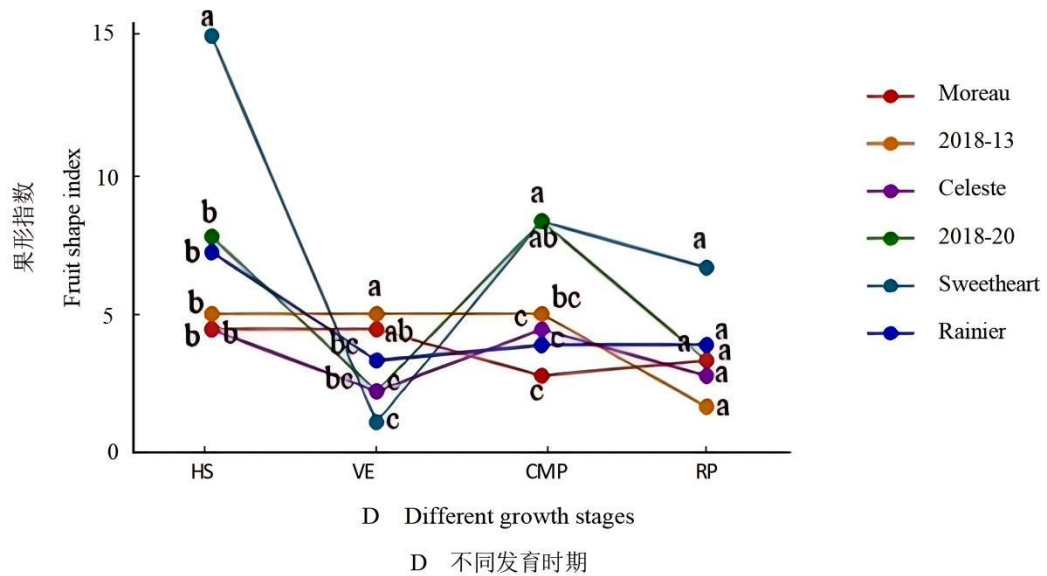
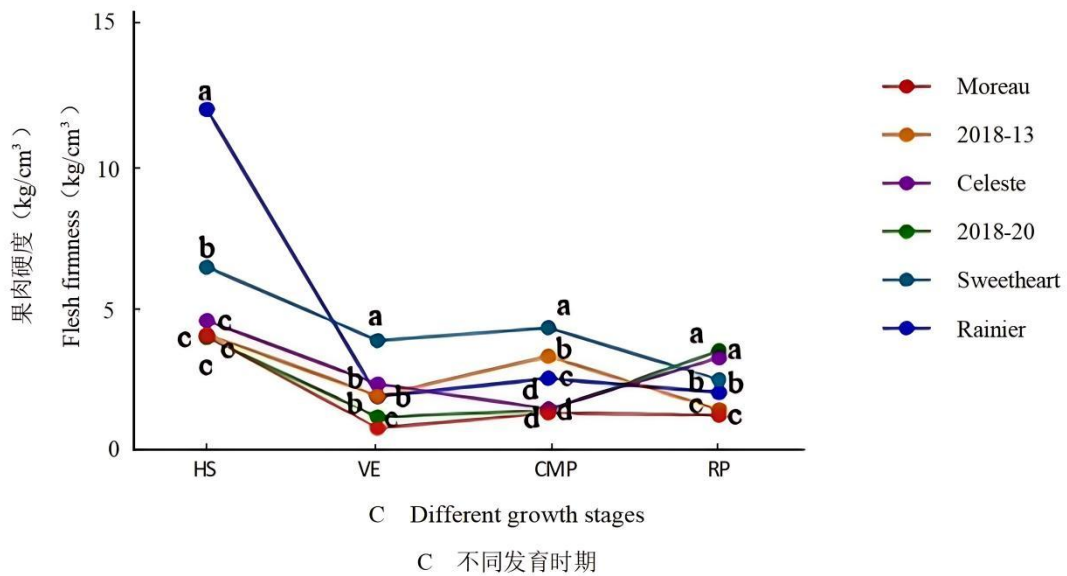
采 SPSS26.0 软件进行统计分析, 所有数据为 3 个重复的平均值, 数据显示为均数 \pm 标准差 ($\bar{X} \pm S$) ($n=3$)。采用方差分析比较 6 个甜樱桃品种的香气成分含量。并利用 Metabo Analyst5.0 进行主成分分析及偏最小二乘-判别 (PLS-DA) 分析。利用 TBtools 绘制热图。箱线图和条形图由 GraphPad prism9.5.0 生成。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 6 个甜樱桃品种果实生长发育调查

莫莉、2018-13、塞莱斯特、2018-20、甜心、雷尼的生长和发育情况如图 2 所示。随着甜樱桃的发育, 果实质量逐渐增加, 带果皮硬度和去果皮硬度逐渐减少, 而果形指数呈 W 形波动; 在完熟 (RP) 期, 莫莉、2018-13、塞莱斯特的果实质量显著高于其他品种 ($P < 0.05$) 见图 2-A, 塞莱斯特、2018-20 的带果皮硬度及去果皮硬度显著高于其他品种 ($P < 0.05$) 见图 2-B、C, 而 6 个品种果形指数 (在 0.8~0.95) 间差异不显著, 见图 2-D, 这表明 6 个品种果实形状为近圆形或椭圆形, 品质均较好, 具有可比性。





图中不同小写字母表示不同品种同一时期 5%水平差异显著。

Different lowercase letters in the figure indicate that the 5% level of different varieties is significantly different during the same period.

图 2 莫莉、2018-13、塞莱斯特、2018-20、甜心、雷尼的果实品质。(A) 单粒质量 (B) 带果皮硬度 (C) 去果皮硬度 (D) 果形指数。

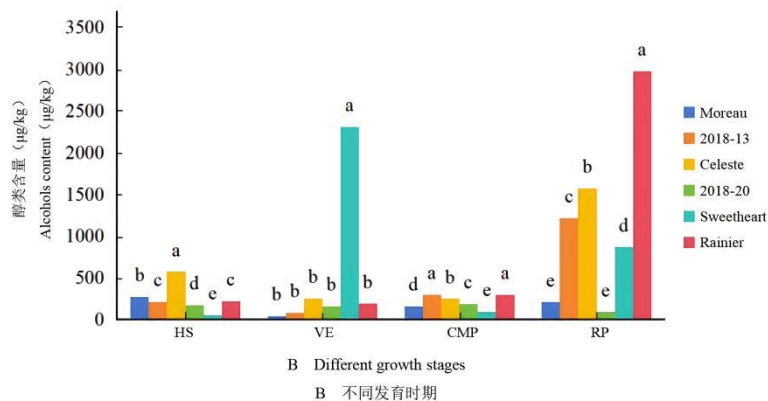
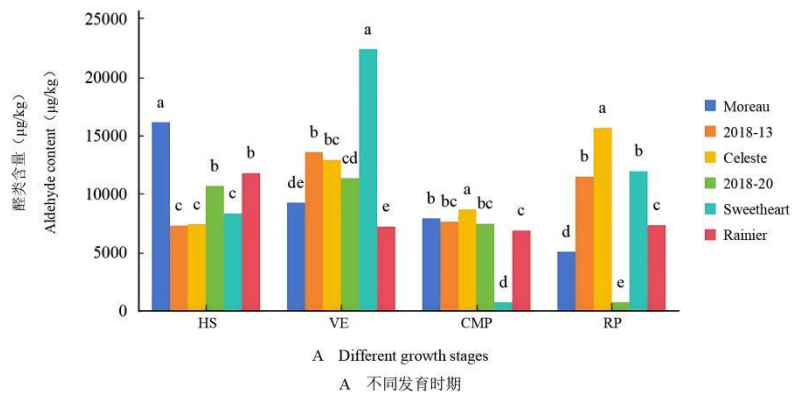
Fig. 2 Fruit quality of Moreau, 2018-13, Celeste, 2018-20, Sweetheart and Rainier. (A) single grain weight (B) hardness with peel (C) hardness without peel (D) fruit shape index.

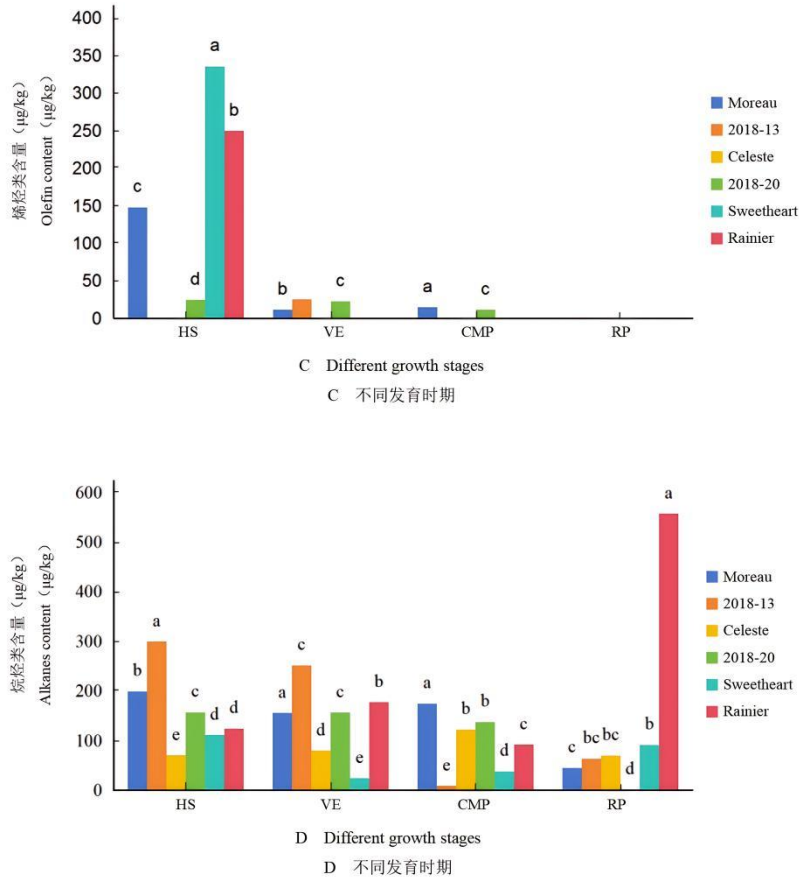
2.2 6个甜樱桃品种果实不同发育时期各香气成分种类及含量的动态变化

由附表 1 可知，6 个甜樱桃品种果实发育过程中，共检测到醛类 17 种、醇类 23 种、烷烃类 37 种、烯烃类 17 种、酯类 5 种、酮类 3 种、呋喃类 2 种、酸类 4 种共 8 类 108 种香气物质。其中，在 HS、VE、CMP、RP 分别检出 69、46、45、32 种香气物质。在果实生长发育过程中含量较高且随着果实生长发育含量有明显变化的香气物质有 4 类，分别为醛类、醇类、烷烃类、烯烃类，故对这 4 类香气物质进行分析，结果显示（图 3），从 HS 期到 PR 期，6 个甜樱桃品种均以醛类物质为主。

在醛类含量方面，6 个品种在 HS 期莫莉含量显著高于其他品种，在 VE 达到最大值，VE 期甜心醛类含量最高达 23 832.97 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，CMP 较低，在 RP 期 2018-20 醛类含量最低（图 3-A）。在醇类含量方面，在 HS 期塞莱斯特含量显著高于其他品种，在 VE 期甜心含量显著高于其他品种，莫莉含量最低，在 RP 期雷尼醇类含量最高达 2 947.88 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ （图 3-B）；烯烃类含量方面，6 个在 RP 期含量均无，在 HS 期甜心含量最高达 337.39 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，显著高于其他品种（图 3-C）。在烷烃类含量方面，6 个品种在 HS 期含量相对较高，2018-13 含量显著高于其他品种，在 RP 期烷烃类含量在 0.81~560.64 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，波动最大，其中雷尼含量显著高于其他品种（图 3-D）。

随着甜樱桃的生长发育，莫莉品种香气物质含量大致呈现先升后降的趋势，2018-13 及甜心品种中大致呈现升高后下降然后再升高的趋势，2018-20 品种中大致呈现逐渐下降趋势至 RP 期含量最低，而塞莱斯特及雷尼品种中大致呈现波动变化后至 RP 含量达高峰的趋势。说明 6 个甜樱桃品种果实发育过程中香气物质变化规律各有差异。





A. 醛类; B. 醇类; C. 烯烃类; D. 烷烃类。不同小写字母表示不同甜樱桃品种同一香气物质同一时期在 0.05 水平上有最显著性差异。

Different lowercase letters indicate that different sweet cherry varieties have the most significant difference at 0.05 level in the same aroma substance during the same period.

图 3 6 份甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质含量的动态变化。

Fig. 3 Dynamic changes of aroma substance contents in 6 sweet cherry varieties at different developmental stages. (A) Aldehydes (B) Alcohols (C) Olefin (D) Alkanes

2.3 6 个甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质韦恩图分析

维恩图能可视化地展现 6 种甜樱桃品种不同时期挥发性香气物质的分布情况。由图 4 可知, 从 HS 期到 RP 期, 香气组分呈现逐渐下降的趋势, 在 HS、VE、CMP、RP 有 14 种共有组分, 为: 反式-2-己烯-1-醇、1-己醇、己醛、2-己烯醛、反式-2-己烯醛、庚醛 (Heptanal)、苯甲醛 (Benzaldehyde)、辛醛 (Octanal)、壬醛 (Nonanal)、癸烷 (Decane)、4-甲基癸烷 (Decane,4-methyl-)、4,7-二甲基十一烷 (Undecane,4,7-dimethyl-)、2-甲基壬烷 (Nonane,2-methyl-)、甲基庚烯酮 (5-Hepten-2-one,6-methyl), 分别占各自总香气组分的 20.29%、30.43%、31.11%、43.75%, 在 HS 共有组分占总香气组分的含量最低, VE、CMP 相差不大; 在 HS、VE、CMP、RP 各自独有的组分分别有 42、9、13、5 种, 分别占各自总风味组分的 60.87%、19.57%、20.00%、15.63%, 这说明了 VE、CMP 挥发性香气成分具有更高的相似性, 而 HS 样品风味物质更为丰富。这些特有的风味组分赋予了样品独特的风味。

味。提示甜樱桃品种香气不同发育时期果实挥发性香气成分间相互作用，使得甜樱桃的香气丰富和

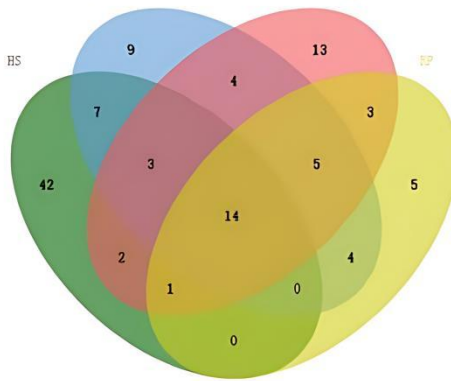


图 4 6 份甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质总类韦恩图

Fig. 4 Total Venn diagram of aroma substances in 6 sweet cherry varieties at different developmental stages

2.4 6 个甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质含量变化热图分析

TBtools 是一种用于高通量数据分析的小工具^[20]，利用 TBtools 绘制热图（图 6），可以直观的比较 14 种共有香气组分含量的变化，如图 4 所示：色阶颜色从粉色到红色的变化代表了相对含量从低到高，可以观察到，在四个发育时期，反式-2-己烯醛的含量较高占总香气含量的 63.32%，其次为己烯醛（Hexenal）占 14.69%、2-己烯醛占 13.67%、反式-2-己烯-1-醇占 3.97%。2-己烯醛在发育早期处于较低水平，在成熟阶段达到最大值，还有一部分香气组分在变熟阶段含量较高，收获时含量较低，主要是醇类和醛类等，如：反式-2-己烯-1-醇、1-己醇及壬醛等。

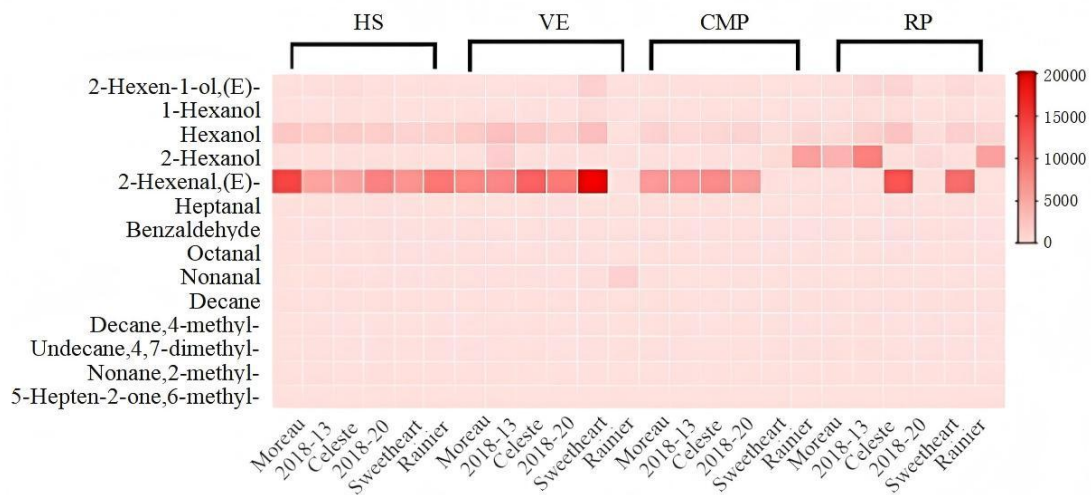


图 5 6 个甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质含量变化热图

Fig. 5 Heat map of changes of aroma substance content in fruits of 6 sweet cherry varieties at different developmental stages

2.5 6 个甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质 PCA 分析

主成分分析可直观反映样本成分之间关联的统计方法，不同样品之间的距离越远，表明其风味差异越明显，并且样品的分布区域和某种挥发性风味物质的分布越接近，说明该物质

对其风味贡献越大^[21]。

从表 1 中及韦恩图可以看出，在共检测出的 108 种香气物质中有 94 种物质变异大，故不进行主成分分析，仅将 6 个品种甜樱桃样品中 4 个时期均检测到的 14 种共有香气物质进行主成分分析，提取前两个主成分作图，累计贡献率占总变量的 50.6%，结果见图 6。不同时期甜樱桃品种的香气成分分布在不同的象限内，表明它们在香气成分上存在一定的差异性。甜心位于第 1 象限，在 RP 期及 VE 期与之密切的香气物质是反式-2-己烯-1-醇、苯甲醛、1-己醇、辛醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮（5-Hepten-2-one,6-methyl）；雷尼位于第 2 象限，从 VE 期到 CMP 期再到 PR 期与之密切相关的香气物质是 2-己烯醛、2-甲基辛醛（Nonanal,2-methyl-）、壬烷（Nonane）；莫莉位于第 3 象限，在 HS 期、VE 期及 CMP 期与之密切相关的香气物质是癸烷、4, 7-二甲基十一烷、4-甲基癸烷。以横坐标为基准，在 HS 期及 VE 期己醛、反式-2-己烯醛及庚醛和甜心品种的 RP 期及 VE 期的香气成分较为接近，然而区别于雷尼及莫莉；这可能与甜樱桃不同的品种有关。以纵坐标为基准，莫莉香气成分明显区别于雷尼和甜心。与之相关的香气成分己醛、反式-2-己烯醛及庚醛。

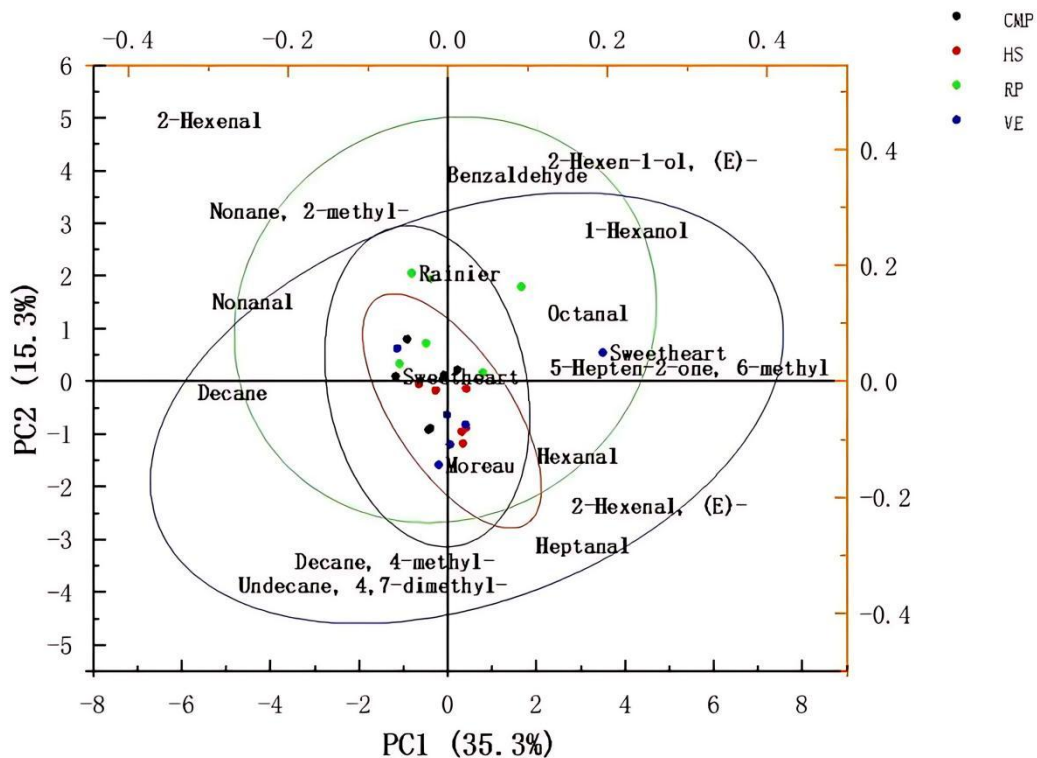


图 6 6 个甜樱桃品种果实发育时期前两个主成分的散点图

Fig. 6 Scatter plots of the first two principal components of six sweet cherry varieties during fruit development

2.6 6 个甜樱桃品种果实不同发育时期香气物质的 PLS-DA 分析

PLS-DA 是一种具有监督的判别分析方法，一般用于两组及两组以上组别的对比，寻找差异物质^[22]。PLS-DA 模型中香气组分对分类的贡献大小，在判别过程中一般认为 VIP > 1，表示其为主要差异香气物质^[23]，可以作为不同发育时期香气物质变化的关键性成分。VIP 值越大，说明该组分在不同发育时期中的差异越显著。如图 7 所示。筛选出 VIP 值大于 1 的物质，认定反式-2-己烯醛、2-己烯醛、己醛、反式-2-己烯-1-醇为主要差异香气物质。在 HS 期的果实香气中反式-2-己烯醛、己醛、甲基庚烯酮、庚醛、4-甲基癸烷、癸烷和辛醛含量较高，VE 期的果实香气中反式-2-己烯醛、己醛、壬醛、4, 7-二甲基十一烷、甲基庚烯酮、癸烷和辛醛含量较高；CMP 期的果实香气中 2-甲基壬烷、4-甲基癸烷含量较高；RP 期中 2-己烯醛、反式-2-己烯-1-醇、苯甲醛、1-己醇及庚醛含量较高。

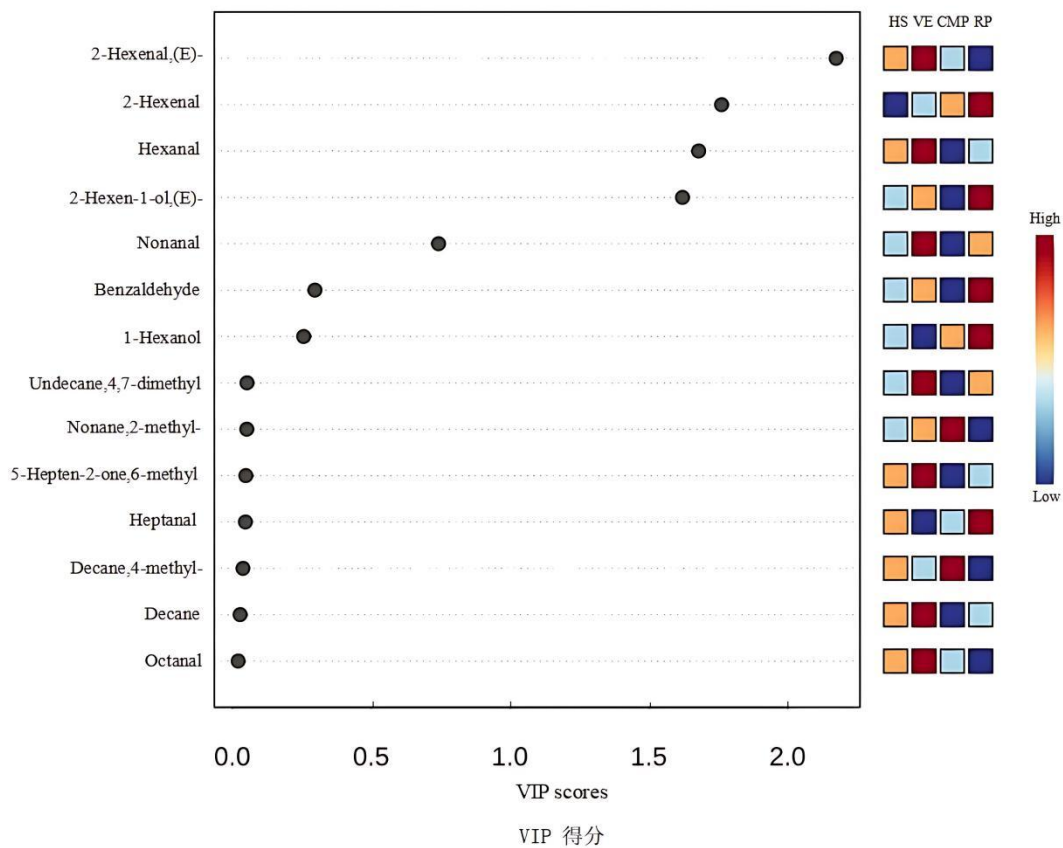
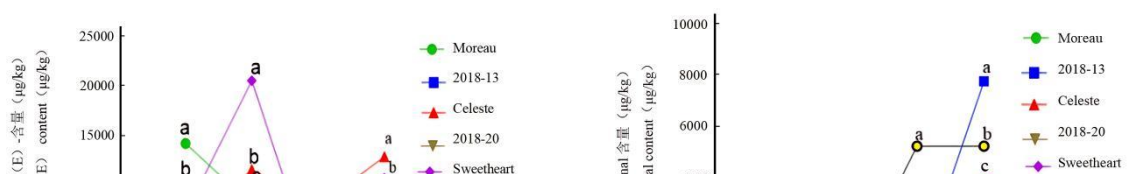


图 7 6 个甜樱桃品种不同发育时期香气化合物偏最小二乘-判别分析

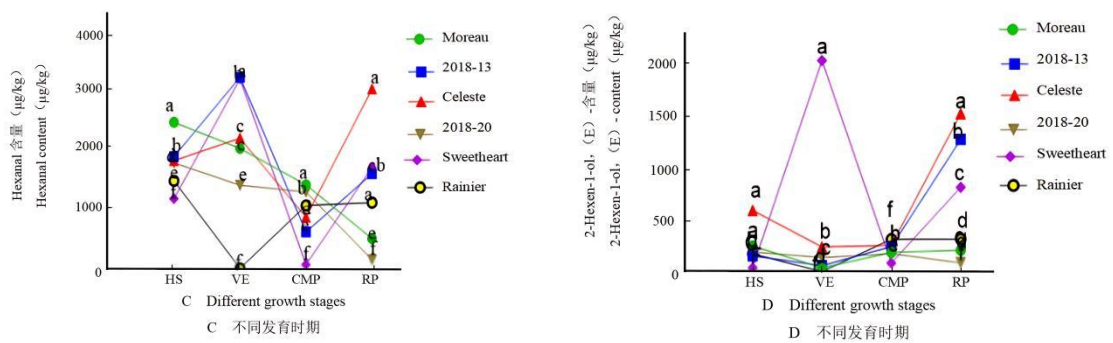
Fig. 7 Partial least squares discriminant analysis of aroma compounds in 6 sweet cherry cultivars at different developmental stages

进一步分析 6 种甜樱桃品种果实不同发育时期差异香气物质在发育过程中的变化(图 8)。

从图 8-A 可知,6 个甜樱桃品种在果实发育过程中反式-2-己烯醛含量呈现“W 形”变化的趋势。从图 8-B 可知,6 个甜樱桃品种在果实发育过程中 2-己烯醛的含量大致呈现出由低到高的变化趋势。从图 8-C 可知,6 个甜樱桃品种在果实发育过程中己醛含量大致呈现先升高后下降再升高的趋势。从图 8-D 可知,6 个甜樱桃品种在果实发育过程中反式-2-己烯-1-醇



含量大致呈现“W形”变化的趋势。说明6个甜樱桃品种不同发育时期差异香气物质的变化规律各有差异。



图中不同小写字母表示不同品种同一时期5%水平差异显著。

Different lowercase letters in the figure indicate that the 5% level of different varieties is significantly different during the same period.

图8 6个甜樱桃品种不同发育时期反式-2-己烯醛、2-己烯醛、己醛、反式-2-己烯-1-醇含量得变化

Fig. 8 Content changes of 2-Hexenal, (E)-, 2-Hexenal, Hexanal, 2-Hexen-1-ol, (E)- in 6 sweet cherry varieties at different developmental stages

3 讨论

3.1 6个甜樱桃品种不同时期的香气特征

甜樱桃香气物质主要存在于果实、花和叶片中，由一百多种有机成分混合形成^[24]，主要包括醛类、醇类、酯类、烷烃类、酮类、烯烃类等，是评价甜樱桃果实重要的特征品质指标^[25]，张序等^[26]在红灯甜樱桃发育进程中共检测到37种的香气成分，其中己醛、(E)-2-己烯醛、苯甲醛、(E)-2-己烯醇、乙酸乙酯、己酸乙酯是甜樱桃成熟果实的特征香气成分。田竹希^[17]研究发现，在玛瑙红樱桃不同发育阶段共检测出114种物质，在绿熟期、着色期、商熟期和完熟期分别检出79、77、44和53种香气物质。本研究热图分析显示6个品种在四个发育时期，均表现为反式-2-己烯醛的含量最高，占总香气物质的63.32%，其次为己烯醛占14.69%。与前人^[27]研究结果基本一致。在6个甜樱桃品种果实发育过程中，共检测到醛类17种、醇类23种、烷烃类37种、烯烃类17种、酯类5种、酮类3种、呋喃类2种、酸

类 4 种共 8 类 108 种香气物质。其中，在 HS、VE、CMP、RP 期分别检出 69、46、45 和 3 2 种香气物质。在 HS、VE、CMP、RP 四个时期有 14 种共有组分，文献报道，几种甜樱桃的挥发性特征显示出品种之间的共性^[28-29]，与本研究结果一致。

3.2 6 个甜樱桃品种香气物质不同发育时期变化规律

果实生长发育成熟过程是一个集糖酸代谢、细胞壁代谢、色素代谢、能量代谢等多个生物学途径交叉的复杂过程^[30]，大多数挥发性成分是在成熟后至收获期间产生的，而一些香气化合物则在成熟前产生^[31]。Cui 等^[32]研究发现，3 个矮樱桃品种成熟过程中的挥发性成分进行了动态评价，共检测出 164 种挥发性成分。在成熟过程的早期阶段，未成熟的果实含有丰富的醛类、烷烃类、烯烃类。随着果实的发育成熟，酯类化合物和萜类化合物占主导地位。另有研究报道，甜樱桃成熟过程中只有少数挥发性化合物对果实香气有实质性贡献，大多数是酯类、醇类、醛类等^[33]。本研究发现，在所检测的 4 个发育期含量较高且随着果实生长发育含量有明显变化的香气物质有醛类、醇类、烷烃类、烯烃类。从 HS 期到 PR 期，6 个甜樱桃品种均以醛类物质为主，与斯坦勒樱桃、先锋樱桃和红灯樱桃等大多数樱桃一致^[34-35]。另外，本研究发现莫莉品种中醛类、醇类、烷烃类、烯烃类含量大致呈现先升后降的趋势。在 2018-13 及甜心品种中大致呈现升高后下降然后在升高的趋势。在 2018-20 品种中大致呈现下降的趋势至 RP 含量最低。在塞莱斯特及雷尼品种中大致呈现波动变化后至 RP 含量达高峰的趋势。提示 6 个甜樱桃品种间香气物质含量及变化规律有不同程度的差异，分析其原因可能与甜樱桃品种遗传多样性有关。研究表明^[18]，在脂氧合酶(LOX)基因家族中，*PaLOX2*、*PaLOX5*、*PaLOX10*、*PaLOX7*、*PaLOX11* 和 *PaLOX12* 对甜樱桃的成熟和挥发性成分有重要影响。另有研究发现^[36]。不同甜樱桃品种间香气物质含量的差异已被证明对果实来源（遗传或地理）的区分特别有价值。

3.3 甜樱桃香气物质不同发育时期主成分分析

利用主成分分析对不同发育时期进行比较时发现，在四个发育时期，与甜樱桃品种密切相关的共有香气物质有 14 种：反式-2-己烯-1-醇、1-己醇、己醛、2-己烯醛、反式-2-己烯醛、庚醛、苯甲醛、辛醛、壬醛、癸烷、4-甲基癸烷、4, 7-二甲基十一烷、2-甲基壬烷、甲基庚烯酮。研究报道^[37]醛类和醇类和烷烃类是甜樱桃发育过程中独特香气的主要贡献者，与本研究结果一致。另有研究报道醛类和醇类也是西瓜^[38]、甜瓜^[39]果实香气的主要物质。在果实发育过程中，各香气组分的变化既受到内源基因的调控，又受到自然因素及栽培措施的影响^[40]，在草莓中，高架基质栽培方式下红颜果实 γ -癸内酯和天使 8 号果实 5-二甲基-3 (2 H) -呋喃酮 (DMMF) 及 4-甲氧基-2 的相对含量明显高于常规土壤栽培，保持了草莓果实成熟后主要挥发性香气物质的稳定性，提升了果实的果香、甜香味^[41]。在甜樱桃成熟和采收期间，由于高浓度醛的影响，使甜樱桃香气物质含量的产生晚于颜色变化，而致成熟不同步^[18]。本研究发现，不同时期甜樱桃品种的香气成分分布在不同的象限内，表明它们在香气成分上存在一定的差异性。甜心在位于第 1 象限，在 RP 期及 VE 期与之密切的香气物质

是反式-2-己烯-1-醇、苯甲醛、1-己醇、辛醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮；雷尼位于第2象限，从VE期到CMP期再到PR期与之密切相关的香气物质是2-己烯醛、2-甲基辛醛、壬醛；莫莉位于第3象限，在HS期、VE期及CMP期与之密切相关的香气物质是癸烷、4,7-二甲基十一烷、4-甲基癸烷。提示：这可能是甜樱桃品种差异及其香气物质种类不同所致。下一步将在分子水平上进一步研究其遗传多样性及相关机制^[42]。

3.4 甜樱桃香气物质不同发育时期偏最小二乘判别分析

甜樱桃基因组的研究有助于识别影响水果质量的信号传导和代谢途径，目前发现脂氧合酶（LOX），醇酰基转移酶（AAT）、乙醇脱氢酶（ADH）和O-甲基转移酶（OMT）基因与果实香气合成有关^[43]。研究发现^[18]，在甜樱桃成熟过程中香气物质的变化与LOX途径基因家族不同成员的表达模式存在差异有关。在葡萄的研究中发现^[44]，轻中度水分胁迫处理可提高‘赤霞珠’葡萄果实部分挥发性化合物的种类、含量和促进 *VvCCD1*、*VvEcar*、*VvHPLA*、*Vvlis* 基因表达。本研究利用偏最小二乘判别分析，筛选出VIP值大于1的物质，认定反式-2-己烯醛、2-己烯醛、己醛、反式-2-己烯-1-醇为主要差异香气物质。与多项研究结果一致^[13, 29, 42]。其中，6个品种甜樱桃在发育过程中，2-己烯醛的含量大致呈现出由低到高的变化趋势，反式-2-己烯醛及反式-2-己烯-1-醇的含量均大致呈现“W形”变化的趋势，己醛含量大致呈现先升高后下降再升高的趋势。分析可能的原因为甜樱桃成熟过程中香气物质的变化和基因调节有关。研究发现^[18]，在甜樱桃LOX基因中，*PaLOX2*、*PaLOX5*、*PaLOX10*、*PaLOX7*、*PaLOX11* 和 *PaLOX12* 对甜樱桃的成熟和挥发性成分有重要影响，这些基因可能对果实成熟过程中细胞扩增的生理变化具有调节作用^[45]。总之，甜樱桃在不同发育时期香气物质的变化受多种因素的影响。其中，基因型的差异是造成香气物质变化和含量差异的主要原因。不同品种甜樱桃的香气代谢途径也存在差异，需要进一步研究。随着基因组学、蛋白质组学和代谢组学的发展，可以对甜樱桃香气发育不同时期合成代谢的具体途径和关键基因进行详细研究。

4 结 论

结果表明樱桃品种果实发育过程中香气物质变化规律各有差异，这可能是甜樱桃品种差异及其香气物质种类不同所致。反式-2-己烯醛、2-己烯醛、己醛、反式-2-己烯-1-醇为最重要的关键香气成分，这为甜樱桃优新良品的香味遗传育种和香气合成代谢及分子生物学研究提供了理论依据。

参考文献

- [1] 段续伟, 李明, 谭钺, 张晓明, 王宝刚, 闫国华, 王晶, 潘凤荣, 刘庆忠, 张开春. 新中国果树科学研究70年: 樱桃[J]. 果树学报, 2019, 36(10): 1339-1351.
DUAN Xuwei, LI Ming, TAN Yue, ZHANG Xiaoming, WANG Baogang, YAN Guohua, WANG Jing, PAN Fengrong, LIU Qingzhong, ZHANG Kaichun. Fruit scientific research in new China in the past 70 years: Cherry[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1339-1351.
- [2] WU Y J, SONG Q Q, YUAN Y, GUO F Q, WU K X, DONG M M. *In vitro* efficiency of embryo rescue of intra- and interspecific hybrid crosses of sweet cherry and Chinese cherry cultivars[J].

Scientia Horticulturae, 2021, 275: 109716.

- [3] 李玉生, 吴永杰, 陈龙, 赵艳华, 吴雅琴, 程和禾. 不同砧木对甜樱桃红灯生长、产量及果实品质的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(4): 1073-1081.
- LI Yusheng, WU Yongjie, CHEN Long, ZHAO Yanhua, WU Yaqin, CHENG Hehe. Effects of different rootstocks on the growth, yield and fruit quality of sweet cherry Hongdeng[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(4): 1073-1081.
- [4] 李明, 赵改荣, 刘聪利, 李玉红. 国内外欧洲甜樱桃主产区生态气候比较与分析[J]. 果树学报, 2014, 31(增刊 1): 169-174.
- LI Ming, ZHAO Gairong, LIU Congli, LI Yuhong. Comparative analysis on ecological and climatic factors of the sweet Cherry main production area at home and abroad[J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(Suppl. 1): 169-174.
- [5] EL HADI M, ZHANG F J, WU F F, ZHOU C H, TAO J. Advances in fruit aroma volatile research[J]. Molecules, 2013, 18(7): 8200-8229.
- [6] KLEE H J, TIEMAN D M. The genetics of fruit flavour preferences[J]. Nature Reviews. Genetics, 2018, 19(6): 347-356.
- [7] GAO C C, ZHANG Y, LI H M, GAO Q, CHENG Y D, OGUNYEMI S O, GUAN J F. Fruit bagging reduces the postharvest decay and alters the diversity of fruit surface fungal community in 'Yali' pear[J]. BMC Microbiology, 2022, 22(1): 239.
- [8] DEFILIPPI B G, MANRÍQUEZ D, LUENGWILAI K, GONZÁLEZ-AGÜERO M. Aroma volatiles: Biosynthesis and mechanisms of modulation during fruit ripening[J]. Advances in Botanical Research, 2009, 50: 1-37.
- [9] SPAHO N, GAŠI F, LEITNER E, BLESÍĆ M, AKAGIĆ A, ŽULJEVIĆ S O, KURTOVIĆ M, RATKOVIĆ D Đ, MURTIĆ M S, AKŠIĆ M F, MELAND M. Characterization of volatile compounds and flavor in spirits of old apple and pear cultivars from the Balkan region[J]. Foods, 2021, 10(6): 1258.
- [10] LI X J, QI L Y, ZANG N N, ZHAO L H, SUN Y Q, HUANG X T, WANG H Y, YIN Z P, WANG A D. Integrated metabolome and transcriptome analysis of the regulatory network of volatile ester formation during fruit ripening in pear[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 185: 80-90.
- [11] GONÇALVES A C, CAMPOS G, PINTO E, OLIVEIRA A S, ALMEIDA A, DE PINHO P G, ALVES G, SILVA L R. Essential and non-essential elements, and volatile organic compounds for the discrimination of twenty-three sweet cherry cultivars from Fundão, Portugal[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130503.
- [12] MATTOS L A, AMORIM E P, DE OLIVEIRA COHEN K, DE AMORIM T B, DE OLIVEIRA E SILVA S. Agronomic, physical and chemical characterization of banana fruits[J]. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 2010, 10(3): 225-231.
- [13] 王登亮, 孙建城, 刘春荣, 郑雪良, 查波. 大棚设施栽培对柑橘香气成分的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(9): 1791-1794.
- WANG Dengliang, SUN Jiancheng, LIU Chunrong, ZHENG Xueliang, ZHA Bo. Effects of greenhouse facility cultivation on aroma components of *Citrus*[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(9): 1791-1794.
- [14] 张序, 李延菊, 孙庆田, 张福兴. 不同品种甜樱桃果实芳香成分的 GC-MS 分析[J]. 果树学报, 2014, 31(增刊 1): 134-138.
- ZHANG Xu, LI Yanju, SUN Qingtian, ZHANG Fuxing. GC-MS analysis of aroma components in sweet cherry

- (*Prunus avium*) cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(Suppl. 1): 134-138.
- [15] CORREIA S, SCHOUTEN R, SILVA A P, GONÇALVES B. Factors affecting quality and health promoting compounds during growth and postharvest life of sweet cherry (*Prunus avium* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 2166.
- [16] 田竹希, 龙明秀, 李咏富, 何扬波, 梁倩, 石彬, 罗其琪. 玛瑙红樱桃果实不同发育阶段香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 333-342.
- TIAN Zhuxi, LONG Mingxiu, LI Yongfu, HE Yangbo, LIANG Qian, SHI Bin, LUO Qiqi. Study on aroma constituents of Manaohong cherry cultivar at different development stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 333-342.
- [17] VILLAVICENCIO J D, TOBAR J, ZOFFOLI J P, O'BRIEN J A, CONTRERAS C. Identification, characterization, and expression of lipoxygenase genes in sweet cherry (*Prunus avium* L.) cv. *Regina* and their relationship with the development of an herbaceous off-flavor during fruit ripening[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 206: 108271.
- [18] 田彦龙, 马永强, 王磊, 郭青云, 陈红雨. 西北不同生态区甜樱桃果实品质分析[J]. 果树学报, 2021, 38(4): 509-519.
- TIAN Yanlong, MA Yongqiang, WANG Lei, GUO Qingyun, CHEN Hongyu. Quality analysis of sweet cherry fruits in different ecological areas in northwest China[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(4): 509-519.
- [19] 郝丽宁, 陈书霞, 王聪颖, 陈巧, 万旭花, 申晓青, 程智慧, 孟焕文. 不同基因型黄瓜果实芳香物质组成及含量差异研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 139-146.
- HAO Lining, CHEN Shuxia, WANG Congying, CHEN Qiao, WAN Xuhua, SHEN Xiaoqing, CHENG Zhihui, MENG Huanwen. Aroma components and their contents in cucumbers from different genotypes[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 139-146.
- [20] CHEN C J, CHEN H, ZHANG Y, THOMAS H R, FRANK M H, HE Y H, XIA R. TBtools: An integrative toolkit developed for interactive analyses of big biological data[J]. Molecular Plant, 2020, 13(8): 1194-1202.
- [21] 李芳. 硬脂鱼油的品质特征及在火锅底料中的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- LI Fang. Study on the quality characteristics of fish oil stearin and its application in hotpot seasoning[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [22] 张纪伟, 沈雪梅, 张钎, 周艺凡, 李光秀, 李家华. 不同产地和贮存年份普洱茶香气和呈味物质变化的比较研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 11-18.
- ZHANG Jiwei, SHEN Xuemei, ZHANG Qian, ZHOU Yifan, LI Guangxiu, LI Jiahua. Comparative study on changes of aroma and flavor components of raw Pu-erh tea produced in different producing areas and storage years[J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 11-18.
- [23] 张乐, 张雅, 史冠莹, 赵丽丽, 蒋鹏飞, 王旭增, 王赵改. GC-IMS 结合化学计量学分析 8 个产区香椿挥发性成分差异[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 301-308.
- ZHANG Le, ZHANG Ya, SHI Guanying, ZHAO Lili, JIANG Pengfei, WANG Xuzeng, WANG Zhaogai. Differences in volatile organic compounds of *Toona sinensis* from eight production regions analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics[J]. Food Science, 2022, 43(22): 301-308.
- [24] GONÇALVES A C, BENTO C, SILVA B, SIMÕES M, SILVA L R. Nutrients, bioactive compounds and bioactivity: The health benefits of sweet cherries (*Prunus avium* L.)[J]. Current Nutrition & Food Science, 2019, 15(3): 208-227.
- [25] 邱珊莲, 张少平, 林宝妹, 张帅, 洪佳敏, 吴妙鸿, 郑开斌. 不同成熟期番石榴果实香气成分变化[J].

江苏农业科学, 2021, 49(13): 162-169.

QIU Shanlian, ZHANG Shaoping, LIN Baomei, ZHANG Shuai, HONG Jiamin, WU Miaohong, ZHENG Kaibin. Changes of aroma components of guava fruits at different maturity stages[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(13): 162-169.

[26] 张序, 姜远茂, 彭福田, 何乃波, 李延菊, 赵登超. ‘红灯’甜樱桃果实发育进程中香气成分的组成及其变化[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1222-1228.

ZHANG Xu, JIANG Yuanmao, PENG Futian, HE Naibo, LI Yanju, ZHAO Dengchao. Changes of aroma components in ‘Hongdeng’ sweet cherry during fruit development[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(6): 1222-1228.

[27] HAYALOGLU A A, DEMIR N. Phenolic compounds, volatiles, and sensory characteristics of twelve sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivars grown in Turkey[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(1): C7-C18.

[28] VAVOURA M V, BADEKA A V, KONTAKOS S, KONTOMINAS M G. Characterization of four popular sweet cherry cultivars grown in Greece by volatile compound and physicochemical data analysis and sensory evaluation[J]. Molecules, 2015, 20(2): 1922-1940.

[29] LEGUA P, DOMENECH A, MARTÍNEZ J J, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ L, HERNÁNDEZ F, CARBONELL-BARRACHINA A A, MELGAREJO P. Bioactive and volatile compounds in sweet cherry cultivars[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2017, 5(11): 844-851.

[30] COLANTONIO V, FERRÃO L F V, TIEMAN D M, BLIZNYUK N, SIMS C, KLEE H J, MUÑOZ P, RESENDE M F R Jr. Metabolomic selection for enhanced fruit flavor[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(7): e2115865119.

[31] VILANOVA M, GENISHEVA Z, BESCANSÀ L, MASA A, OLIVEIRA J M. Changes in free and bound fractions of aroma compounds of four *Vitis vinifera* cultivars at the last ripening stages[J]. Phytochemistry, 2012, 74: 196-205.

[32] CUI Q Y, YE L Q, GUO C G, LI W D. Assessing volatiles in three Chinese dwarf cherry cultivars during veraison and maturation using headspace-solid phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. ACS Omega, 2020, 5(49): 31744-31752.

[33] ESPINO-DÍAZ M, SEPÚLVEDA D R, GONZÁLEZ-AGUILAR G, OLIVAS G I. Biochemistry of apple aroma: A review[J]. Food Technology and Biotechnology, 2016, 54(4): 375-397.

[34] SUN S Y, JIANG W G, ZHAO Y P. Characterization of the aroma-active compounds in five sweet cherry cultivars grown in Yantai (China)[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2010, 25(4): 206-213.

[35] 邱爽, 唐飞, 刘畅, 谢美林, 魏阳吉, 李景明. 气相色谱-质谱联机结合感官分析共建樱桃香气关联网络[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 209-217.

QIU Shuang, TANG Fei, LIU Chang, XIE Meilin, WEI Yangji, LI Jingming. Aroma networking of cherries based on gas chromatography-mass spectrometric data and sensory evaluation[J]. Food Science, 2021, 42(16): 209-217.

[36] MEDINA S, PEREIRA J A, SILVA P, PERESTRELO R, CÂMARA J S. Food fingerprints—A valuable tool to monitor food authenticity and safety[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 144-162.

[37] COLONGES K, JIMENEZ J C, SALTOS A, SEGUINE E, LOOR SOLORZANO R G, FOUET O, ARGOUT X, ASSEMAT S, DAVRIEUX F, CROSE, LANAUD C, BOULANGER R. Integration of GWAS, metabolomics, and sensorial analyses to reveal novel metabolic pathways involved in cocoa fruity aroma GWAS of fruity aroma in *Theobroma cacao*[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 171: 213-225.

[38] 黄小忠, 卢阳月, 林远至, 张旭溟, 许颉泮, 张曼. 不同瓢色西瓜果肉挥发性物质检测与分析[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(11): 33-39.

- HUANG Xiaozhong, LU Yangyue, LIN Yuanzhi, ZHANG Xuhao, XU Lifeng, ZHANG Man. Headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry analysis of volatile components of watermelon fruits with different flesh color[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(11): 33-39.
- [39] 李旺雄, 唐中祺, 程鸿, 孔维萍, 罗石磊. 不同甜瓜品种贮藏期间品质变化和风味物质分析[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(9): 50-55.
- LI Wangxiong, TANG Zhongqi, CHENG Hong, KONG Weiping, LUO Shilei. Analysis of quality changes and flavor substances of different melon varieties during storage[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(9): 50-55.
- [40] 温可睿, 黄敬寒, 潘秋红, 段长青, 王军. 葡萄香气物质及其影响因素的研究进展[J]. *果树学报*, 2012, 29(3): 454-460.
- WEN Kerui, HUANG Jinghan, PAN Qihong, DUAN Changqing, WANG Jun. Research progress of aromatic compounds and influencing factors in grapes[J]. *Journal of Fruit Science*, 2012, 29(3): 454-460.
- [41] 庞夫花, 王庆莲, 袁华招, 蔡伟建, 王珑静, 赵密珍. 不同栽培模式对草莓果实挥发性香气物质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(2): 359-366.
- PANG Fuhua, WANG Qinglian, YUAN Huazhao, CAI Weijian, WANG Longjing, ZHAO Mizhen. Effects of different cultivation modes on volatile aromatic substances of strawberry fruit[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40(2): 359-366.
- [42] WEN Y Q, HE F, ZHU B Q, LAN Y B, PAN Q H, LI C Y, REEVES M J, WANG J. Free and glycosidically bound aroma compounds in cherry (*Prunus avium* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 29-36.
- [43] 宋丽娟, 李雄伟, 陈琳, 柴明良, 高中山. 果实香气合成与遗传控制研究概述[J]. *果树学报*, 2008, 25(5): 708-713.
- SONG Lijuan, LI Xiongwei, CHEN Lin, CHAI Mingliang, GAO Zhongshan. A review on fruit aroma synthesis and its genetic control[J]. *Journal of Fruit Science*, 2008, 25(5): 708-713.
- [44] 侯晨阳, 张艳霞, 薛晓斌, 王振平, 李栋梅. 水分胁迫对‘赤霞珠’葡萄果实挥发性化合物及相关基因表达的影响[J/OL]. *干旱地区农业研究*, 2024: 1-11[2024-04-12](2024-04-02).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1088.S.20240401.0941.002.html>.
- HOU Chenyang, ZHANG Yanxia, XUE Xiaobin, WANG Zhenping, LI Dongmei. Effects of water stress on the expression of volatile compounds and related genes in ‘Cabernet Sauvignon’ grape berries[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024: 1-11[2024-04-12](2024-04-02).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1088.S.20240401.0941.002.html>.
- [45] VISWANATH K K, VARAKUMAR P, PAMURU R R, BASHA S J, MEHTA S, RAO A D. Plant lipoxygenases and their role in plant physiology[J]. *Journal of Plant Biology*, 2020, 63(2): 83-95.