

吴斌, 黄东梅, 邢文婷, 等. 不同发育期黄金百香果果皮挥发性物质和游离氨基酸成分 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (1): 57-65.

WU B, HUANG D M, XING W T, et al. Volatiles and Amino Acids in Pericarp of Yellow Passion Fruit at Fruit Development Stages [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (1): 57-65.

不同发育期黄金百香果果皮挥发性物质和 游离氨基酸成分

吴斌^{1,2}, 黄东梅^{1,2}, 邢文婷^{1,2}, 黄利雄³, 杨其军⁴, 宋顺^{1,2*}

(1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业农村部华南作物基因资源与种质创制重点实验室/海南省热带作物资源遗传改良与创新重点实验室/海南省省级西番莲种质资源圃, 海南 海口 571101; 2. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南 三亚 572025; 3. 云南农业大学热带作物学院, 云南 普洱 665099; 4. 中国热带农业科学院海口实验站, 海南 海口 571101)

摘要:【目的】研究不同发育期黄金百香果果皮挥发性成分和游离氨基酸成分的组成和动态变化规律, 明确关键呈味氨基酸和特征差异挥发性成分, 为黄金百香果果皮的芳香调控、产品开发及综合利用等提供参考。【方法】采用氨基酸分析仪和顶空固相微萃取气质联用仪 (HS-SPME-GC-MS), 检测不同发育期 (T1~T7) 果皮中的游离氨基酸和挥发性物质, 并进行差异性分析。【结果】果皮中共检测出游离氨基酸 (Free amino acid, FAA) 15 种。呈味氨基酸中的芳香类氨基酸含量最高, 在 T7 时达到最大值 ($98.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 占比为 39.03%。OPLS-DA 和滋味活度值 (TAV) 分析表明, 胱氨酸为影响香气形成的关键呈味氨基酸。果皮中共检测出 90 种挥发性物质, T1~T6 时期以醛类为主, T7 时期以萜烯类为主。OPLS-DA 和 ROAV 分析表明, 特征差异挥发性成分有 9 种, 其中 T1~T5 时期以 1-辛烯-3-酮为主, 其次为苯甲醛 (T1~T4 时期) 和庚醛 (T5 时期), T6 和 T7 时期以 (E)- β -大马烯酮的贡献作用最大。【结论】胱氨酸是影响黄金百香果果皮香气形成的关键呈味氨基酸。黄金百香果果皮挥发性物质在不同发育期存在特异性, 其中果皮着色期 (T1~T5) 以 1-辛烯-3-酮为主, 完全成熟期 (T6 和 T7) 以 (E)- β -大马烯酮的贡献作用最大。

关键词: 黄金百香果; 发育期; 果皮; 游离氨基酸; 挥发性成分

中图分类号: S667.9

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 01-0057-09

Volatiles and Amino Acids in Pericarp of Yellow Passion Fruit at Fruit Development Stages

WU Bin^{1,2}, HUANG Dongmei^{1,2}, XING Wenting^{1,2}, HUANG Lixiong³, YANG Qijun⁴, SONG Shun^{1,2*}

(1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement in Southern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Tropical Crops Germplasm Resources Genetic Improvement and Innovation of Hainan Province/Germplasm Repository of Passiflora, Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Sanya Research Academy, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan 572025, China; 3. College of Tropical Crop Science, Yunnan Agricultural University, Puer, Yunnan 665099, China; 4. Haikou Experimental Station, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: 【Objective】Studying the composition and dynamic changes of volatile components and free amino acids (FAAs) in the pericarp of Yellow Passion Fruit during different growth stages, and clarifying the key flavor amino acids and characteristic volatile components, can provide references for the aroma regulation, product development, and comprehensive utilization of Yellow Passion Fruit pericarp. 【Method】Using amino acid analyzer and headspace solid-phase microextraction

收稿日期: 2023-06-18 修回日期: 2023-07-15

作者简介: 吴斌 (1989—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事西番莲育种及果实品质形成机理研究, E-mail: wubin520327@163.com

* 通信作者: 宋顺 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事西番莲分子育种研究, E-mail: sss1984006@163.com

基金项目: 海南省科技计划项目 (ZDYF2022XDNY177、ZDYF2021XDNY119); 海南省百香果育种联合攻关项目 (2024 年)

coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), the FAAs and volatile compounds in the pericarp of different growth stages (T1–T7) were detected and analyzed for differences. 【Result】 A total of 15 types of FAAs were detected in the pericarp. Among the flavor amino acids, aromatic amino acids had the highest content, reaching a maximum of $98.48 \text{ mg} \cdot \text{hg}^{-1}$ at T7, accounting for 39.03%. OPLS-DA and TAV analyses indicated that cystine was the key flavor amino acid that affects aroma formation. A total of 90 volatile compounds were detected in the pericarp. Aldehydes were dominant during the T1–T6 stages, while terpenes were dominant at T7. OPLS-DA and ROAV analyses showed that there were 9 types of characteristic volatile compounds with differential expression. Among them, 1-octen-3-one was the dominant compound during the T1–T5 stages, followed by benzaldehyde (T1–T4 stages) and heptanal (T5 stage). During the T6 and T7 stages, (E)- β -damascone contributed the most. 【Conclusion】 Cystine was the crucial flavoring amino acid associated with the aroma formation of the pericarp. The volatile composition varied by fruit development stages, such as 1-octene 3-one was the dominant component when the pericarp was forming color in T1–T5, while (E)- β -damalenone when the fruit was maturing in T6 and T7.

Key words: Yellow Passion Fruit; fruit growth stages; pericarp; free amino acids; volatile components

0 引言

【研究意义】黄金百香果学名黄果西番莲 (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*), 在国内外市场上受到消费者的广泛青睐^[1]。果皮不仅是判断果实成熟度的重要标志之一, 也是散发香气的主要部位, 果实未切开前所散发的香气主要来自果皮, 是决定百香果可接受性和价值的首要条件, 同时百香果果皮含有丰富的果胶和膳食纤维, 是制作果脯的最佳选择^[2]。研究果皮成熟过程中游离氨基酸和挥发性组分的动态变化规律, 对于阐释黄金百香果果皮风味形成机理、指导以香气为育种目标的品种选育和果皮的综合开发利用具有重要意义。【前人研究进展】能够反映风味形成的功能性成分主要包括挥发性物质和游离氨基酸等^[3,4]。其中, 挥发性物质按照一定比例构成特有的香气, 前人已对葡萄 (*Vitis vinifera* L.)^[5]、柠檬 [*Citrus × limon* (Linnaeus) Osbeck]^[6]、柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco)^[7]、香蕉 (*Musa nana* Lour.)^[8]等多种水果的果皮挥发性物质进行检测分析, 发现每一水果的果皮均有数十种香气挥发性物质, 但是只有达到香气阈值的关键香气物质才对香气形成起主要贡献作用^[9,10]。而游离氨基酸 (Free amino acid, FAA) 是一种重要的活性物质, 具有鲜味、甜味、苦味和芳香类等特性, 其含量的变化会对果实的风味造成一定影响^[11]。通常采用滋味活度值 (Taste active value, TAV)、相对气味活度值 (Relative odor activity value, ROAV) 和正交-偏小二乘判别分析 (Orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA), 量化评价不同游离氨基酸和挥发性物质对总体风味的贡献程度, 进而确定关键物质^[12]。郭艳峰等^[13]、陈庆等^[14]从紫色百香果果汁中鉴定出 81 种挥发性香气化合物, 其中酯类含量最高, 为百香果果汁香气的主要贡献化合物类^[13,14]。潘葳等^[15]对不同品种百香果果汁香气成分

进行分析, 结果表明种类繁多的少量萜烯类物质, 对百香果特有香味贡献较大, 可能是百香果香气尤其馥郁的原因^[15]。何洁等^[16]开展紫色百香果中 17 种游离氨基酸对品质的影响分析发现, 游离氨基酸含量排名前 4 是脯氨酸、天冬氨酸、谷氨酸和丝氨酸, 其中天冬氨酸和谷氨酸对紫色百香果的风味有着重要贡献^[16]。【本研究切入点】黄金百香果作为以香气闻名的水果, 目前有关百香果挥发性物质或游离氨基酸的研究主要集中在含量差异分析, 而香气阈值分析研究鲜见, 导致难以全面分析百香果果皮关键呈香物质的形成及其相互作用。【拟解决的关键问题】本研究采用氨基酸分析仪和顶空固相微萃取气质联用仪 (HS-SPME-GC-MS), 对不同发育期黄金百香果果皮挥发性成分和游离氨基酸成分的组成和动态变化规律进行分析, 揭示黄金百香果发育期 (T1–T7) 果皮的关键呈味氨基酸和特征差异挥发性成分, 对进一步研究果皮风味形成机制、果皮资源高值利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取芭乐味黄金百香果黄香 1 号 (自选品种) 为试验材料, 种植于海南省海口市美兰区大致坡百香果基地 ($19^{\circ}48'10.404''\text{N}$, $110^{\circ}41'7.44''\text{E}$)。于 2021 年 10 月开花授粉, 选取 7 个果实发育关键期采集 10 个大小均匀且成熟度一致的果实进行采收, 运回实验室将果皮洗净擦干后切成 1~2 mm 方块, 每个时期样品用四分法分成 3 份, 每份不少于 50 g, 立即用于测试分析。

7 个果实成熟关键期: T1 (花后 10 周): 果皮绿色, 果肉白色; T2 (花后 11 周): 果皮绿色, 果肉微黄; T3 (花后 12 周): 果皮绿色, 果肉颜色浅黄; T4 (花后 13 周): 果皮微黄, 果肉黄色; T5 (花后 14 周): 果皮半黄, 果肉黄色; T6 (花后

15周)：果皮全黄，果肉黄色；T7(花后16周)：果皮微皱，果肉黄色。

1.2 主要仪器

7894A-5975C气相色谱质谱联用仪(Agilent公司), DVB/CAR/PDMS萃取头(Supelco公司), HP-5MS(30 m × 250 μm × 0.25 μm)色谱柱(Agilent公司), A300全自动氨基酸分析仪(德国Membrapure公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 香气成分测定

(1) 样本预处理。①取样：每个时期的每份样品称取2.0 g放入顶空瓶中萃取。②萃取头老化：萃取前，先将固相微萃取头在气相色谱进样口老化16 min，老化温度250℃。③萃取：将固相微萃取头推出，距离样品0.5 cm高度萃取，萃取温度60℃、萃取40 min。④进样：取出萃取针后直接进样，解析温度250℃，解析时间30 s。

(2) GC-MS分析条件。色谱柱：HP-5MS(30 m × 250 μm × 0.25 μm)；载气：Helium；柱流速：1.0 mL·min⁻¹，不分流；前进样口温度200℃；柱箱升温程序：40℃保持1 min，3℃·min⁻¹线性升温至160℃，15℃·min⁻¹线性升温至230℃，保持1 min。离子源温度：230℃；质量扫描范围(m/z)为50~550。

对照NIST 2014谱库，进行检索与人工解析，仅保留匹配度大于80%的挥发性成分。采用峰面积归一法计算百香果中各挥发性成分的相对含量。

(3) ROAV计算。通过计算挥发性成分的相对气味活度值(ROAV)，确定各挥发性成分对百香果香气的贡献。

$$ROAV = (C_i/C_{\max}) \times (T_{\max}/T_i) \times 100$$

式中， C_i 为各香气成分的相对含量(%)； T_i 为各香气成分在水中的香气阈值(μg·kg⁻¹)； $C_{\max}$ 和为 $T_{\max}$ 分别为对样品总体香气贡献最大的香气成分相对含量(%)和香气阈值(μg·kg⁻¹)。

一般认为ROAV≥1的挥发性成分对香气有直接影响，是关键香气成分；0.1≤ROAV<1的挥发性成分对香气起修饰作用。

1.3.2 游离氨基酸的测定

采用《植物中游离氨基酸的测定》(GB/T 30987—2020)^[17]方法测定游离氨基酸，标准品来自德国Membrapure公司的42种游离氨基酸标准品(100 nmol·L⁻¹)。从每个时期的每份样品中取出2.0 mg果皮粉末放入5 mL离心管中解冻后加入等体积磺基水杨酸进行解离2 h，解离完成后对样品进行离心，7000

r·min⁻¹离心10 min，离心后吸取上清液1 mL置于10 mL容量瓶中，再加入4.0 mL的柠檬酸钠缓冲液(pH为2.2质量浓度为1.96 g·mL⁻¹)，定容至10 mL，混匀，再离心5 min后，取1 mL上清液过0.22 μm滤膜，用全自动氨基酸分析仪上机检测。

滋味活度值(TAV)指呈味物质含量值与呈味物质味觉阈值的比值，当TAV≥1时，该物质被认为对整体滋味具有较大的贡献^[18]。

1.4 数据统计分析

利用Excel 2016、SPSS Statistics 22软件进行单因素方差分析及相关图表的制作。采用正交-偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)组间差异将此作为潜在生物标记物的筛选条件之一。当VIP(Variable importance for the projection)>1时，说明该物质对香气差异的影响具有主要的作用，VIP值越大说明该物质在样品间的差异越显著。

2 结果与分析

2.1 发育期黄金百香果果皮游离氨基酸动态变化及TAV分析

2.1.1 果皮游离氨基酸含量和组成

由表1可知，利用氨基酸分析仪在不同发育期果皮中共检测出游离氨基酸15种，其中必需氨基酸(Essential Amino Acid, EAA)4种：异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸；半必需氨基酸(Semiessential amino acid, SAA)2种：组氨酸、精氨酸；非必需氨基酸(Non-essential amino acid, NEAA)7种：天冬氨酸、天冬酰胺、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、胱氨酸、脯氨酸；其他游离氨基酸2种：β-氨基异丁酸、氯化铵。

果实发育期总游离氨基酸含量从大到小为：T4>T1>T7>T3>T2>T6>T5。除天冬氨酸和亮氨酸无显著性差异外，其余游离氨基酸均存在显著性差异，其中在T1~T4时期天冬酰胺含量最高，在T5~T7时期胱氨酸含量最高。

各时期中必需氨基酸含量在T7时期最高[(0.0696±0.0026) mg·g⁻¹]，其次为T6时期，但二者的差异不显著，而半必需氨基酸含量在T7时期显著高于其他时期，其含量达(0.5772±0.0379) mg·g⁻¹，因此T7时期的果皮可加工制作成果脯等食品，补充人体所需的必需氨基酸和半必需氨基酸。

2.1.2 果皮呈味氨基酸含量及TAV分析

游离氨基酸具有一定的呈味性，参与果实风味的形成，黄金百香果果皮中除了天冬酰胺、β-氨基异丁酸和氯化铵外，其余游离氨基酸均为呈味氨基

表 1 发育期黄金百香果果皮游离氨基酸组成
Table 1 FAAs in Yellow Passion Fruit pericarp at fruit growth stages (单位: $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

游离氨基酸 FAAs	时期 Period						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
天冬氨酸 Asp	0.1606±0.0069 ab	0.1432±0.0153 b	0.1380±0.0166 b	0.1885±0.0274 a	0.1593±0.0189 ab	0.1553±0.0215 ab	0.1771±0.0282 ab
天冬酰胺 Asn	0.9362±0.1022 b	0.7631±0.0286 c	0.7267±0.0183 c	1.6309±0.1729 a	0.3255±0.0178 de	0.4643±0.0564 d	0.2866±0.0433 e
谷氨酸 Glu	0.1557±0.0239 ab	0.1323±0.0091 bc	0.1712±0.0203 a	0.1769±0.0124 a	0.0725±0.0110 e	0.1012±0.0121 d	0.1154±0.0168 cd
甘氨酸 Gly	0.0073±0.0007 abc	0.0092±0.0011 a	0.0080±0.0009 ab	0.0086±0.0024 ab	0.0038±0.0022 d	0.0058±0.0017 bcd	0.0051±0.0003 cd
丙氨酸 Ala	0.0168±0.0018 cd	0.0228±0.0041 ab	0.0192±0.0031 bc	0.0264±0.0029 a	0.0268±0.0027 a	0.0137±0.0021 d	0.0182±0.0028 bcd
胱氨酸(Cys) ₂	0.4918±0.0786 c	0.5518±0.0363 c	0.5332±0.0113 c	0.4982±0.0222 c	0.5038±0.0399 c	0.8643±0.0514 b	0.9632±0.0385 a
异亮氨酸 Ile	0.0050±0.0007 c	0.0053±0.0006 c	0.0142±0.0026 a	0.0049±0.0008 c	0.0048±0.0006 c	0.0058±0.0003 c	0.0080±0.0008 b
亮氨酸 Leu	0.0168±0.0024 a	0.0170±0.0028 a	0.0153±0.0006 ab	0.0137±0.0007 ab	0.0136±0.0030 ab	0.0155±0.0014 ab	0.0128±0.0018 b
苯丙氨酸 Phe	0.0128±0.0026 cd	0.0099±0.0012 d	0.0226±0.0028 b	0.0291±0.0057 a	0.0182±0.0028 bc	0.0213±0.0029 b	0.0216±0.0029 b
β-氨基异丁酸 β-AiBA	0.3621±0.0340 a	0.3072±0.0291 ab	0.2966±0.0279 b	0.2790±0.0258 b	0.2791±0.0338 b	0.2749±0.0342 b	0.2597±0.0378 b
组氨酸 His	0.2260±0.0167 a	0.1295±0.0210 d	0.1483±0.0059 cd	0.1697±0.0174 bc	0.1843±0.0070 b	0.1701±0.0194 bc	0.2189±0.0074 a
赖氨酸 Lys	0.0132±0.0033 c	0.0112±0.0015 c	0.0127±0.0014 c	0.0199±0.0013 b	0.0128±0.0018 c	0.0225±0.0028 b	0.0273±0.0028 a
氯化铵 NH ₄	0.0276±0.0021 b	0.0274±0.0018 b	0.0268±0.0015 b	0.0442±0.0037 a	0.0163±0.0032 d	0.0238±0.0019 bc	0.0216±0.0018 c
精氨酸 Arg	0.0236±0.0027 e	0.0218±0.0033 e	0.0237±0.0045 e	0.0578±0.0046 d	0.0989±0.0128 c	0.1240±0.0117 b	0.3583±0.0307 a
脯氨酸 Pro	0.1879±0.0302 b	0.2370±0.0114 a	0.2531±0.0101 a	0.2111±0.0042 b	0.1158±0.0123 c	0.1039±0.0069 c	0.0293±0.0034 d
总游离氨基酸 TOFAA	2.6433±0.2651 b	2.3887±0.0915 b	2.4094±0.0464 b	3.3589±0.2154 a	1.8354±0.0696 c	2.3662±0.1523 b	2.5229±0.1389 b
必需氨基酸 EAA	0.0478±0.0077 b	0.0435±0.0051 b	0.0648±0.0055 a	0.0676±0.0080 a	0.0494±0.0019 b	0.0651±0.0064 a	0.0696±0.0026 a
半必需氨基酸 SAA	0.2496±0.0146 cd	0.1512±0.0199 e	0.1719±0.0090 e	0.2276±0.0200 d	0.2832±0.0174 bc	0.2941±0.0306 b	0.5772±0.0379 a
非必需氨基酸 NEAA	1.9563±0.2181 b	1.8594±0.0470 bc	1.8494±0.0254 bc	2.7406±0.1672 a	1.2075±0.0191 e	1.7084±0.1114 cd	1.5949±0.0997 d

同行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Data with different lowercase letters on same row indicate significant difference at $P<0.05$.

酸, 其中芳香类氨基酸 (Aromatic amino acid, AAA) 包括胱氨酸、苯丙氨酸, 鲜味氨基酸 (Delicious amino acid, DAA) 包括天冬氨酸、谷氨酸、赖氨酸, 甜味氨基酸 (Sweet amino acid, SAA) 包括甘氨酸、丙氨酸、组氨酸、脯氨酸, 苦味氨基酸 (Bitter amino acid, BAA) 包括异亮氨酸、亮氨酸、精氨酸^[19]。由表 2 可知, 芳香类氨基酸含量迅速上升, T7 含量最高, 为 $(0.9848\pm0.0413)\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 占比为 39.03%。

OPLS-DA 分析表明, $\text{VIP}>1$ 的游离氨基酸有 6 种, 即天冬酰胺、胱氨酸、β-氨基异丁酸、赖氨酸、精氨酸和脯氨酸, 这些游离氨基酸可能具有调控百香果果皮香气形成的潜在功能。果皮呈味氨基酸 TAV 值比较结果如表 3, 从表中可知 $\text{TAV}\geq 1$ 的氨基酸有胱氨酸和组氨酸, 但只有胱氨酸在全时期

的 $\text{TAV}\geq 1$, 且 TAV 值随果实成熟不断升高。结合 OPLS-DA 和 TAV 的分析结果表明, 胱氨酸含量是影响百香果果皮香气的因素之一。

2.2 发育期黄金百香果果皮挥发性成分分析

2.2.1 果皮香气成分构成

黄金百香果果实发育期果皮中的挥发性物质变化差异较大, 如图 1 所示, T1~T4 时期果皮中的挥发性成分以醛类为主, 占比达 93.74%~99.30%, 随着果实成熟, 其含量逐渐减少, 其中 T5~T6 时期醛类物质含量快速下降, 反之, 酯类和萜烯类物质含量迅速上升, 在 T7 时期含量达最高, 占比分别为 14.32% 和 37.11%。除此之外, 醇类物质呈现出先上升后下降的变化趋势, 在 T6 时期占比达到最高 (26.61%)。

表 2 发育期黄金百香果果皮呈味氨基酸含量
Table 2 The pericarp of Yellow Passion Fruit exhibits flavor amino acid content during the growth period (单位: $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

呈味氨基酸 Flavor amino acid	发育期 Developmental stage						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
鲜味氨基酸 DAA	0.329 4±0.028 4 ab	0.286 7±0.021 4 bc	0.322 0±0.029 0 b	0.385 3±0.026 1 a	0.244 5±0.027 8 c	0.279 0±0.029 9 bc	0.319 7±0.032 9 b
甜味氨基酸 SAA	0.438 0±0.031 3 a	0.398 4±0.036 1 a	0.428 5±0.008 5 a	0.415 8±0.020 9 a	0.330 7±0.019 5 b	0.293 4±0.023 5 bc	0.271 5±0.005 4 c
苦味氨基酸 BAA	0.045 5±0.004 5 e	0.044 1±0.002 6 e	0.053 1±0.005 9 de	0.076 4±0.004 0 d	0.117 3±0.013 5 c	0.145 3±0.011 5 b	0.379 1±0.030 4 a
芳香类氨基酸 AAA	0.504 6±0.081 1 c	0.561 7±0.037 4 c	0.555 8±0.013 3 c	0.527 2±0.022 6 c	0.522 0±0.037 1 c	0.885 6±0.048 7 b	0.984 8±0.041 3 a

同行数据后不同小写字母表示不同时期差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters after peer data indicate significant differences during different time periods ($P<0.05$).

表 3 发育期黄金百香果果皮中呈味氨基酸及 TAV
Table 3 Flavor amino acids and TAVs in Yellow Passion Fruit pericarp at fruit growth stages

种类 Species	氨基酸 Amino acid	味觉阈值 ^[20] Taste threshold/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	滋味活度值 TAV						
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
鲜味氨基酸 DAA	Asp	1.00	0.161	0.143	0.152	0.188	0.159	0.155	0.177
	Glu	0.30	0.52	0.44	0.48	0.59	0.24	0.34	0.38
	Lys	0.50	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05
甜味氨基酸 SAA	Gly	1.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	Ala	0.60	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03
	His	0.20	1.13	0.65	0.89	0.85	0.92	0.85	1.09
	Pro	3.00	0.06	0.08	0.07	0.07	0.04	0.03	0.01
苦味氨基酸 BAA	Ile	0.90	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Leu	1.90	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Arg	0.50	0.05	0.04	0.05	0.12	0.20	0.25	0.72
芳香类氨基酸 AAA	(Cys) ₂	0.02	24.59	27.59	26.09	24.91	25.19	43.21	48.16
	Phe	0.90	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02

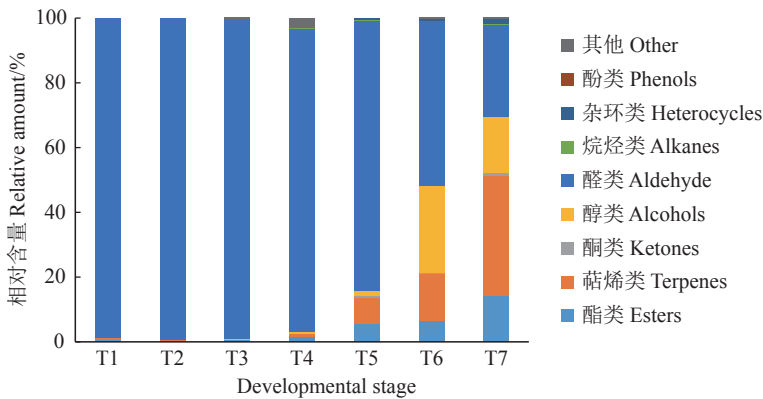


图 1 发育期黄金百香果果皮挥发性物质组成
Fig. 1 Volatiles in Yellow Passion Fruit pericarp at fruit growth stages

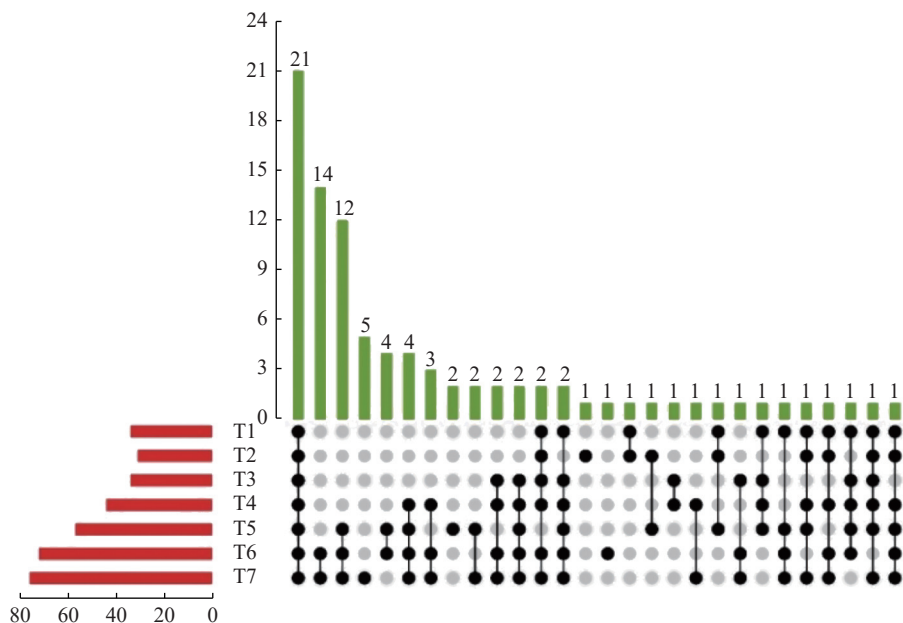


图 2 发育期黄金百香果果皮挥发性成分维恩图

Fig. 2 Venn diagram on volatiles in Yellow Passion Fruit pericarp at fruit growth stages

2.2.2 果皮挥发性成分与含量

发育期的黄金百香果果皮挥发性物质共检测出 90 种, 如图 2 所示, 随着果实成熟, 果皮中挥发性物质的种类呈现先下降后上升的变化趋势, T2 时期挥发性物质种类最少 (31 种), T7 时期挥发性物质种类最多 (76 种)。不同发育期的果皮挥发性物质含量存在显著变化, 其中 T1~T3 时期含量最高的前 5 种挥发性物质种类一致, 苯甲醛作为含量最高的醛类物质, 在 T1~T6 时期其含量均最高。T1 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 苯甲醛 (81.85%) > (E)-2-壬烯醛 (20.09%) > 壬醛 (20.02%) > 叶醛 (1.68%) > 己醛 (0.57%); T2 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 苯甲醛 (93.80%) > 壬醛 (2.55%) > 叶醛 (1.42%) > (E)-2-壬烯醛 (0.67%) > 己醛 (0.57%); T3 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 苯甲醛 (94.97%) > 壬醛 (2.13%) > 叶醛 (0.95%) > (E)-2-壬烯醛 (0.42%) > 己醛 (0.32%); T4 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 苯甲醛 (90.16%) > 4-辛烯酸乙醚 (3.02%) > 壬醛 (1.65%) > 叶醛 (0.95%) > 苯甲醇 (0.60%); T5 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 苯甲醛 (49.09%) > 叶醛 (14.36%) > 壬醛 (8.42%) > 庚醛 (4.76%) > 己醛 (2.44%); T6 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 苯甲醛 (28.97%) > 苯甲醇 (24.45%) > 叶醛 (9.93%) > 壬醛 (4.32%) > (Z)- β -罗勒烯 (3.26%); T7 时期含量最高的前 5 种挥发性成分分别为: 叶醛 (14.40%) > 茶螺烷

(11.93%) > 苯甲醇 (9.38%) > 正己醇 (7.18%) > α -水芹烯 (6.35%)。

经 Venn 分析, 不同发育期所共有的挥发性物质有 21 种, T2、T5、T6 和 T7 均存在特有的挥发性物质, 其中 T2 时期特有挥发性物质为 γ -壬内酯, T5 时期特有挥发性物质为己酸环戊酯和 4-己烯-1-醇乙酸酯等 2 种, T6 时期特有挥发性物质为丁酸香叶酯, T7 时期特有挥发性物质为胡椒酮、 α -松油烯、 α -法呢烯、2-萜烯和 α -衣兰油烯等 5 种。

2.2.3 不同时期黄金百香果果皮挥发性物质的关键香气成分分析

结合 ROAV 和 OPLS-DA 分析表明, 如表 4 所示, 当 ROAV ≥ 1 和 VIP > 1 时, 筛选出 9 种挥发性物质可直接影响发育期果皮香气的形成, 是果皮特征差异挥发性成分。其中 T1~T3 时期的果皮特征差异挥发性成分一致, 均有 6 种, ROAV 值依次为 1-辛烯-3-酮 > 苯甲醛 > 正辛醛 > (E)-2-己烯醛 > 庚醛 > γ -癸内酯; T4 时期果皮特征差异挥发性成分比 T1~T3 时期增加 1 种, 共有 7 种, ROAV 值依次为 1-辛烯-3-酮 > 苯甲醛 > 正辛醛 > (E)-2-己烯醛 > γ -癸内酯 > 庚醛 > 苯乙醛; T5 时期果皮特征差异挥发性成分比 T4 时期增加 1 种, 共有 8 种, ROAV 值依次为 1-辛烯-3-酮 > 庚醛 > γ -癸内酯 > (E)-2-己烯醛 > 正辛醛 > 苯甲醛 > 苯乙醛 > 异戊醛; T6 时期果皮特征差异挥发性成分下降至 3 种, ROAV 值依次为 (E)- β -大马烯酮 > 1-辛烯-3-酮 > 正辛醛; T7 时期果皮特征差异挥发性成分只有 1 种, 即 (E)- β -大马烯酮。

表 4 发育期黄金百香果果皮挥发性物质的气味描述、香气阈值及相对香气活度值
Table 4 Description, threshold, and ROAV of volatiles in Yellow Passion Fruit pericarp at fruit growth stages

挥发性物质 Volatile substances	香气阈值 Odor thresholds /(μg·kg ⁻¹)	相对气味活度值 ROAV							香气描述 Odor description
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
异戊醛 3-Methyl butanal	1.10 ^[21]	0.00	0.00	0.00	0.00	3.84	0.05	0.02	巧克力味、麦芽味 ^[22]
庚醛 Heptanal	3.00 ^[23-25]	5.40	4.21	4.18	4.62	57.09	0.62	0.28	油味、草味 ^[22]
(E)-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	17.00 ^[25-29]	15.77	15.31	10.52	10.19	30.97	0.57	0.20	草味、脂肪味 ^[22]
1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	0.05 ^[23]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	1.45	0.86	蘑菇味 ^[22,23]
正辛醛 Octanal	0.70 ^[25,29]	16.76	22.09	33.84	24.96	30.14	1.03	0.17	脂肪味、蜂蜜、柑橘、柠檬、果味 ^[22,23,25]
苯甲醛 Benzaldehyde	350.00 ^[29,30]	43.70	52.19	52.63	48.49	5.41	0.09	0.00	樱桃、杏仁味，烤肉，焦糖，苦味 ^[31-33]
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	4.00 ^[23,25,29,34]	0.00	0.00	0.00	1.71	4.10	0.10	0.03	刺鼻的绿色气味、风信子、花香、玫瑰味 ^[23,25]
(E)-β-大马烯酮 (E)-β-Damascenone	0.000 75 ^[24]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	玫瑰、花香，蜂蜜味、甜香，果香、烤苹果味 ^[24,25]
γ-癸内酯 γ-Decalactone	1.00 ^[23]	4.27	2.41	6.51	9.40	31.99	0.28	0.08	桃味、杏、椰子、果香，甜味 ^[22,23,26,35]

黄金百香果果皮特征差异挥发性成分的种类随着果实成熟，呈现出先上升后下降的变化趋势，其中 T5 时期的果皮特征差异挥发性成分最多，且 1-辛烯-3-酮的 ROAV 均为最高，此时果皮以蘑菇味的香气为主；T7 时期的果皮特征差异挥发性成分仅为 1 种，且 T6 和 T7 时期的 (E)-β-大马烯酮的 ROAV 均为最高，此时果皮以玫瑰、花香、蜂蜜味、甜香、果香、烤苹果味等香气为主。

3 讨论

游离氨基酸作为植物体内重要的组分之一，在果实成熟过程中作为脂类、醛类等挥发性物质的前体物质参与香气的形成^[36,37]。植物体内的氨基酸主要以游离态和结合态的形式存在，虽然游离氨基酸含量较少，但其以游离态的形式存在，对果实风味的贡献较大^[38,39]。本研究通过氨基酸分析仪，从发育期的黄金百香果果皮中共检测出 15 种游离氨基酸，其中 T4 时期的游离氨基酸含量最高（335.89 mg·hg⁻¹），与何洁等^[16]发现紫果西番莲果实中游离氨基酸含量（355.12 mg·hg⁻¹）相当。经 OPLS-DA 和 TAV 分析，胱氨酸对黄金百香果果皮香气的形成有着重要贡献，这一结论与何洁等^[16]研究表明天冬氨酸和谷氨酸对紫果西番莲果浆的风味有着重要贡献不完全相同，主要原因在于本研究的品种和组织部位不一样。

果皮挥发性物质是影响果实香气的重要因素，本研究检测出黄金百香果果皮挥发性物质 90 种，且在不同时期的表现差异较大，果皮中醛类物质在 T1~T6 时期占主导地位，以苯甲醛为主，随着果实成熟，其含量逐渐下降，酯类和萜烯类物质含量逐渐上升，在 T7 时期占比最高，该研究结果与方灵等^[40]研究结果相一致，但本研究中检测到的挥发性物质种类较多，主要是由于品种差异造成，本研究采用芭乐味黄金百香果，具有浓郁芭乐味且果实偏大、口感偏甜，为自主选育品种（系）。

经 OPLS-DA 和 ROAV 共同分析发现，当 ROAV≥1 和 VIP>1 时，筛选出异戊醛、庚醛、(E)-2-己烯醛、1-辛烯-3-酮、正辛醛、苯甲醛、苯乙醛、(E)-β-大马烯酮、γ-癸内酯等 9 种果皮特征差异挥发性成分，与方灵等^[40]通过 OPLS-DA 和主成分分析表明苯甲醛、苯甲醇、(E)-2-壬烯醛及桉叶油醇为果皮特征差异挥发性成分存在差异，主要是本研究引入 ROAV 算法所产生的差异，最大限度保留了黄金百香果果皮特征差异挥发性成分的种类。T1~T5 时期（即果皮完全转色之前）对果皮香气贡献最大的关键香气成分为 1-辛烯-3-酮，其次为苯甲醛（T1~T4 时期）和庚醛（T5 时期）。1-辛烯-3-酮存在于咖啡^[41]、橙汁^[42]、葡萄汁^[43]等多种作物中，具有蘑菇的特征气味和抗微生物活性^[44]，有利于黄金百香果果皮抵

御病虫等伤害。虽然果皮中苯甲醛含量最高,但其香气阈值远大于 1-辛烯-3-酮和庚醛,因此在 T1~T5 时期对果皮香气贡献作用最大的为 1-辛烯-3-酮。果实完全成熟以后,即 T6~T7 时期,(E)- β -大马烯酮由于其香气阈值极低,成为对果皮香气贡献作用最大的挥发性物质,散发着玫瑰花香、蜂蜜味甜香、果香等混合香气。与方灵等^[40]利用 OPLS-DA 对完全成熟期黄金百香果果皮挥发性成分分析,加之罗勒烯含量显著提高,可用作判别黄金百香果完全成熟的关键挥发性成分特征指标。而本研究中罗勒烯含量在完全成熟期(T6~T7 时期)虽然显著上升,且罗勒烯的 VIP>1,但其 ROAV<1,且含量占比较低,分别为 0.033% 和 0.012%,这可能是由于试验材料品种和种植管理所造成的差异,因此罗勒烯可否用于判别黄金百香果完全成熟的关键挥发性成分特征指标还需进一步研究。

4 结论

随着果皮颜色的转变,芳香类氨基酸含量迅速升高,其中胱氨酸是影响黄金百香果果皮香气形成的关键呈味氨基酸。黄金百香果果皮挥发性物质在不同发育期存在特异性,其中 T1~T6 时期以醛类为主,T7 时期以萜烯类为主,其特征差异挥发性成分有 9 种,其中 T1~T5 时期以 1-辛烯-3-酮为主,其次为苯甲醛(T1~T4 时期)和庚醛(T5 时期),T6 和 T7 时期以(E)- β -大马烯酮的贡献作用最大。

参考文献:

- [1] RINALDI M M, COSTA A M, FALEIRO F G, et al. Conservação pós-colheita de frutos de *Passiflora setacea* DC. submetidos a diferentes sanitizantes e temperaturas de armazenamento [J]. *Brazilian Journal of Food Technology*, 2017, 20:e2016046.
- [2] 冯颖,张萍萍,赵存朝,等.响应面优化百香果果皮脯制备工艺[J].食品工业科技,2022,43(17):275-282.
FENG Y, ZHANG P P, ZHAO C C, et al. Optimization of preparation technology of passion fruit peel and preserved fruit by response surface methodology [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(17):275-282. (in Chinese)
- [3] 刘文静,潘葳,吴建鸿.5种百香果品种氨基酸组成比较及评价分析[J].食品工业科技,2019,40(24):237-241.
LIU W J, PAN W, WU J H. Comparative analysis and evaluation of amino acids composition among five passion fruit varieties [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(24):237-241. (in Chinese)
- [4] 邝瑞彬,孔凡利,杨护,等.百香果汁营养特性分析与评价[J].食品工业科技,2021,42(9):347-357.
KUANG R B, KONG F L, YANG H, et al. Analysis and assessment of nutritional components of passion fruits juice [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(9):347-357. (in Chinese)
- [5] 董纪崇,胡文效,邱磊,等.‘玫瑰香’葡萄皮游离态和结合态香气成分分析[J].中外葡萄与葡萄酒,2022(4):14-22.
DONG J C, HU W X, QIU L, et al. Analysis of free and combined aroma components in ‘Muscat hamburg’ grape skin [J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2022(4):14-22. (in Chinese)
- [6] 李春秀,李勋兰,梁国鲁,等.不同成熟阶段柠檬果皮挥发物和酚类成分分析[J].食品科学,2022,43(4):215-224.
LI C X, LI X L, LIANG G L, et al. Analysis of volatile components and phenols from peels of two lemon cultivars during fruit ripening [J]. *Food Science*, 2022, 43(4):215-224. (in Chinese)
- [7] 张赫宇,徐瑞,李勇.不同萃取头对橘子皮挥发性化合物的研究[J].现代食品,2022,28(6):140-145.
ZHANG H Y, XU R, LI Y. Research of volatile substances in orange peels by different extraction fibers [J]. *Modern Food*, 2022, 28(6):140-145. (in Chinese)
- [8] 赵明,邹瑜,何海旺,等.基于GC-MS的不同香蕉品种果实香气品质分析[J].西南农业学报,2021,34(5):964-970.
ZHAO M, ZOU Y, HE H W, et al. Analysis of aromatic components from six banana varieties by GC-MS [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(5):964-970. (in Chinese)
- [9] ZHANG X M, JIA H J. Changes in aroma volatile compounds and ethylene production during Hujingmiliu peach (*Prunus persica* L.) fruit development [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(1):41-46.
- [10] 刘士健.腊肉加工过程中主体风味物质变化研究[D].重庆:西南农业大学,2005.
LIU S J. Study on change of main flavour composition in preserved ham during processing[D]. Chongqing: Agricultural University Of Southwest, 2005. (in Chinese)
- [11] 朱奕凡,王妍,汪国云,等.不同杨梅品种果实游离氨基酸组成分析[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2021,47(6):736-742.
ZHU Y F, WANG Y, WANG G Y, et al. Analysis of free amino acid composition in fruits of different bayberry(*Morella rubra*) varieties [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, 47(6):736-742. (in Chinese)
- [12] KIEFFER D A, PICCOLO B D, VAZIRI N D, et al. Resistant starch alters gut microbiome and metabolomic profiles concurrent with amelioration of chronic kidney disease in rats [J]. *American Journal of Physiology Renal Physiology*, 2016, 310(9):F857-F871.
- [13] 郭艳峰,吴惠娣,夏雨,等.百香果不同发育阶段果汁挥发性成分研究[J].福建农业学报,2017,32(3):299-304.
GUO Y F, WU H C, XIA Y, et al. Volatiles in juice of passion fruits at different developmental stages [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 32(3):299-304. (in Chinese)
- [14] 陈庆,贾强,董浩,等.紫红百香果果汁挥发性香气分析及仿香研究[J].现代食品科技,2018,34(12):258-263.
CHEN Q, JIA Q, DONG H, et al. Studies on volatile aroma compounds of the juice of purple *Passiflora edulis* and aroma simulation experiments [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(12):258-263. (in Chinese)
- [15] 潘葳,刘文静,韦航,等.不同品种百香果果汁营养与香气成分的比较[J].食品科学,2019,40(22):277-286.
PAN W, LIU W J, WEI H, et al. Comparative analysis of nutritional and aroma components in passion fruit juices from five cultivars [J]. *Food Science*, 2019, 40(22):277-286. (in Chinese)
- [16] 何洁,莫仁甫,廖洁,等.紫果西番莲中游离氨基酸主成分分析[J].轻工科技,2018,34(11):5-7.
HE J, MO R F, LIAO J, et al. Principal component analysis of free amino acids in *Passiflora edulis* [J]. *Light Industry Science and Technology*, 2018, 34(11):5-7. (in Chinese)

- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 植物中游离氨基酸的测定: GB/T 30987—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [18] 谷镇, 杨焱. 食用菌呈香呈味物质研究进展 [J]. 食品工业科技, 2013, 34 (5): 363–367.
GU Z, YANG Y. Research progress in flavor components of edible fungus [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34 (5): 363–367. (in Chinese)
- [19] PRIPIS-NICOLAU L, DE REVEL G, BERTRAND A, et al. Formation of flavor components by the reaction of amino acid and carbonyl compounds in mild conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48 (9): 3761–3766.
- [20] 林媚, 张伟清, 王天玉, 等. 15个杂交柑橘品种的果实游离氨基酸组成及其对风味品质的影响 [J]. 果树学报, 2022, 39 (3): 352–365.
LIN M, ZHANG W Q, WANG T Y, et al. Study on the composition of free amino acid and the effects on fruit flavor quality in 15 hybrid citrus varieties [J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39 (3): 352–365. (in Chinese)
- [21] VAN GEMERT L J. Odour thresholds: Compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. Publisher: Oliemans Punter & Partners BV, Zeist, The Netherlands, 2011.
- [22] LIU X S, LIU J B, YANG Z M, et al. Aroma-active compounds in Jinhua ham produced with different fermentation periods [J]. *Molecules*, 2014, 19 (11): 19097–19113.
- [23] BURDOCK, GEORGE A. Fenaroli's handbook of flavor ingredients(6th ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [24] 王超. 新疆引种红枣风味特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WANG C. Study on the flavor characteristics of introduced jujube from Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021. (in Chinese)
- [25] 张文文. 鲜食葡萄香气特征与感官品评的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
ZHANG W W. Study on the characteristics of aroma and sensory evaluation of table grapes[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [26] GENOVESE A, LAMORTE S A, GAMBUTI A, et al. Aroma of Aglianico and Uva di Troia grapes by aromatic series [J]. *Food Research International*, 2013, 53 (1): 15–23.
- [27] 谢永恒. 甜瓜中关键香气物质鉴定及其相互作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
XIE Y H. Identification and perceptual interaction of key aroma compounds in muskmelon[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [28] 李维妮, 郭春峰, 张宇翔, 等. 气相色谱-质谱法分析乳酸菌发酵苹果汁香气成分 [J]. 食品科学, 2017, 38 (4): 146–154.
LI W N, GUO C F, ZHANG Y X, et al. GC-MS analysis of aroma components of apple juice fermented with lactic acid bacteria [J]. *Food Science*, 2017, 38 (4): 146–154. (in Chinese)
- [29] PINO J A, MESA J. Contribution of volatile compounds to mango (*Mangifera indica* L.) aroma [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2006, 21 (2): 207–213.
- [30] WANG L B, BAI J H, YU Z F. Responses of volatile compounds in inner tissues on refrigeration in full ripe tomatoes [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41 (6): e13272.
- [31] 李晓颖, 武军凯, 王海静, 等. 欧李果实发育期内挥发性成分变化特征 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (9): 1964–1980.
LI X Y, WU J K, WANG H J, et al. Characterization of volatiles changes in Chinese dwarf cherry fruit during its development [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (9): 1964–1980. (in Chinese)
- [32] NOGUEROL-PATO R, GONZÁLEZ-BARREIRO C, CANCHO-GRANDE B, et al. Quantitative determination and characterisation of the main odourants of Mencia monovarietal red wines [J]. *Food Chemistry*, 2009, 117 (3): 473–484.
- [33] KIM Y, LEE K G, KIM M K. Volatile and non-volatile compounds in green tea affected in harvesting time and their correlation to consumer preference [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53 (10): 3735–3743.
- [34] 孙宝国, 陈海涛. 食用调香术[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [35] DU X F, PLOTTO A, BALDWIN E, et al. Evaluation of volatiles from two subtropical strawberry cultivars using GC-olfactometry, GC-MS odor activity values, and sensory analysis [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59 (23): 12569–12577.
- [36] QIN G H, TAO S T, ZHANG H P, et al. Evolution of the aroma volatiles of pear fruits supplemented with fatty acid metabolic precursors [J]. *Molecules*, 2014, 19 (12): 20183–20196.
- [37] 王博, 李雯昕, 李经纬, 等. 采后苯并噻嗪氮处理对‘玉金香’甜瓜氨基酸代谢酯类香气物质及其代谢机理的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39 (17): 212–220.
WANG B, LI J X, LI J W, et al. Effect of postharvest benzothiadiazole treatment on aroma esters derived from amino acid metabolism and metabolic mechanism in ‘Yujinxiang’ melon [J]. *Food Science*, 2018, 39 (17): 212–220. (in Chinese)
- [38] 程远, 万红建, 姚祝平, 等. 不同品种樱桃番茄氨基酸组成及风味分析 [J]. 核农学报, 2019, 33 (11): 2177–2185.
CHENG Y, WAN H J, YAO Z P, et al. Comparative analysis of the amino acid constitution and flavor quality in different cherry tomato varieties [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33 (11): 2177–2185. (in Chinese)
- [39] 侯娜, 赵莉莉, 魏安智, 等. 不同种质花椒氨基酸组成及营养价值评价 [J]. 食品科学, 2017, 38 (18): 113–118.
HOU N, ZHAO L L, WEI A Z, et al. Amino acid composition and nutritional quality evaluation of different germplasm of Chinese prickly ash(*Zanthoxylum bungeanum* maxim) [J]. *Food Science*, 2017, 38 (18): 113–118. (in Chinese)
- [40] 方灵, 孔宝玉, 韦航, 等. 不同发育阶段黄金百香果挥发性成分差异性研究 [J]. 果树学报, 2022, 39 (12): 2376–2389.
FANG L, KONG B Y, WEI H, et al. Study on variation of volatile components in Golden Passion Fruit at different development stages [J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39 (12): 2376–2389. (in Chinese)
- [41] POLLIN P, FAY L B, BAUMGARTNER M, et al. First attempt of odorant quantitation using gas chromatography-olfactometry [J]. *Analytical Chemistry*, 1999, 71 (23): 5391–5397.
- [42] BUETTNER A, SCHIEBERLE P. Evaluation of aroma differences between hand-squeezed juices from Valencia late and Navel oranges by quantitation of key odorants and flavor reconstitution experiments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49 (5): 2387–2394.
- [43] SEROT T, PROST C, VISAN L, et al. Identification of the main odor-active compounds in musts from French and Romanian hybrids by three olfactometric methods [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49 (4): 1909–1914.
- [44] XIONG C, LI Q, LI S H, et al. *In vitro* antimicrobial activities and mechanism of 1-octen-3-ol against food-related bacteria and pathogenic fungi [J]. *Journal of Oleo Science*, 2017, 66 (9): 1041–1049.