

HS-SPME-GC-MS结合化学计量学分析低温驯化猕猴桃的挥发性成分

郭智鑫, 张 维, 郭英杰, 程小梅, 赖灯妮, 陈双平, 李高阳, 朱向荣

Analysis of Volatile Organic Compounds in Low-temperature Conditioning of Kiwifruit by HS-SPME-GC-MS Combined with Chemometrics Methods

GUO Zhixin, ZHANG Wei, GUO Yingjie, CHENG Xiaomei, LAI Dengni, CHEN Shuangping, LI Gaoyang, and ZHU Xiangrong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050371>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

SPME-GC-MS与电子鼻结合分析不同酵母混菌发酵猕猴桃酒的挥发性香气物质

Analysis of Volatile Aroma Compounds in Kiwi Wine Co-Fermentation with Different Yeasts by SPME-GC-MS Combined with Electronic Nose

食品工业科技. 2021, 42(16): 119-128 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010133>

芦笋猕猴桃复合果酒发酵过程中挥发性香气物质的变化

Analysis of Changes of Volatile Aroma Compounds in Asparagus-Kiwifruit Wine during Fermentation

食品工业科技. 2022, 43(13): 242-250 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080153>

GC-MS结合化学计量学方法分析桂花净油分子蒸馏馏分的挥发性成分

Analysis of Volatile Components in the Molecular Distillation Fractions of *Osmanthus fragrans* Absolute by GC-MS Combined with Chemometrics Methods

食品工业科技. 2024, 45(7): 276-285 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060055>

基于HS-SPME-GC-MS和化学计量学对不同产地红枣香气成分的分析

Analysis of Aroma Components of Red Jujube from Different Origins Based on HS-SPME-GC-MS and Chemometrics

食品工业科技. 2024, 45(6): 265-271 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050125>

基于GC-IMS结合化学计量学分析不同冷冻时长对椰子水挥发性物质的影响

Effect of Frozen Periods on Volatile Flavor Compounds of Coconut Water Based on GC-IMS and Chemometrics Analysis

食品工业科技. 2023, 44(19): 329-335 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110273>

分离自野生猕猴桃的酿酒酵母A12-2和BL20对猕猴桃酒品质的影响

Effects of *Saccharomyces cerevisiae* A12-2 and BL20 Isolated from Wild Kiwifruit on Quality of Kiwifruit Wine

食品工业科技. 2022, 43(22): 31-38 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022010100>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭智鑫, 张维, 郭英杰, 等. HS-SPME-GC-MS 结合化学计量学分析低温驯化猕猴桃的挥发性成分 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 329–339. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050371

GUO Zhixin, ZHANG Wei, GUO Yingjie, et al. Analysis of Volatile Organic Compounds in Low-temperature Conditioning of Kiwifruit by HS-SPME-GC-MS Combined with Chemometrics Methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 329–339. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050371

· 贮运保鲜 ·

HS-SPME-GC-MS 结合化学计量学分析 低温驯化猕猴桃的挥发性成分

郭智鑫^{1,2}, 张 维^{1,2}, 郭英杰^{1,2}, 程小梅^{1,2}, 赖灯妮², 陈双平³, 李高阳^{1,2}, 朱向荣^{1,2,*}

(1.湖南大学生物学院隆平分院, 湖南长沙 410125;

2.湖南省农业科学院农产品加工研究所, 湖南长沙 410125;

3.湖南优铭农业开发有限公司, 湖南湘西土家族苗族自治州 416200)

摘 要: 为了更好地解决猕猴桃贮藏期间的香气问题, 本文以‘米良一号’猕猴桃为试材, 分别在 0、4、8 和 12 °C 下驯化 3、5 和 7 d 后进行乙烯利催熟后, 采用 HS-SPME-GC-MS 结合化学计量学与相对气味活度值 (Relative odor activity value, ROAV) 对猕猴桃挥发性成分 (Volatile organic compounds, VOCs) 进行了分析。共检出 67 种化合物, 其中酯类 17 种、醇类 8 种、醛类 11 种、酮类 9 种、酸类 5 种、烷烃类 13 种和烯萜类 4 种, 酯类物质的种类与含量最高, 且不同低温驯化条件下猕猴桃的挥发性成分种类与含量之间存在差异 ($P < 0.05$); OPLS-DA 模型分类预测准确率为 99.5%, 并通过 VIP>1 筛选出苯乙醇等 16 种差异性挥发性成分; 采用 ROAV 值分析出丁酸乙酯等 13 种关键香气成分 ($1 \leq \text{ROAV} \leq 100$), 香气轮廓分析可知 4 °C 驯化 7 d 的猕猴桃样品表现出强烈的果香气味, 综合香气品质佳; PCA 因子分析计算可知, 在 4 °C 驯化 7 d 下低温驯化猕猴桃香气最佳。本研究表明低温驯化技术可较好地保留采后猕猴桃贮藏期的香气品质。

关键词: 猕猴桃, 低温驯化技术, 化学计量学, 挥发性成分

中图分类号: TS205.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0329-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050371



本文网刊:

Analysis of Volatile Organic Compounds in Low-temperature Conditioning of Kiwifruit by HS-SPME-GC-MS Combined with Chemometrics Methods

GUO Zhixin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, GUO Yingjie^{1,2}, CHENG Xiaomei^{1,2}, LAI Dengni²,
CHEN Shuangping³, LI Gaoyang^{1,2}, ZHU Xiangrong^{1,2,*}

(1. Longping Branch, College of Biology, Hunan University, Changsha 410125, China;

2. Agricultural Products Processing Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences,
Changsha 410125, China;

3. Hunan Youyi Agricultural Development Co., Ltd., Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 416200, China)

Abstract: In order to better solve the problem of kiwifruit aroma during storage, the study utilized 'MiLiang No.1' kiwifruit as the material. The kiwifruit samples were subjected to pre-storage at 0, 4, 8, and 12 °C for 3, 5, and 7 d, followed by ethylene treatment for ripening. The volatile organic compounds (VOCs) of the kiwifruit under different temperature pre-storage conditions were analyzed using HS-SPME-GC-MS in conjunction with chemometrics and relative odor activity

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2024JK2141, 2023NK2042); 中国绿色食品发展中心绿色食品 (绿色优质农产品) 高质量创新发展技术研究项目 (GFJY20240023); 湖南省农业科技创新资金项目 (2023CX74)。

作者简介: 郭智鑫 (1998-), 男, 硕士, 研究方向: 植物源农产品贮藏与加工, E-mail: guozhixin1998@163.com。

* 通信作者: 朱向荣 (1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 植物源农产品贮藏与加工, E-mail: xiangrongchu@163.com。

value (ROAV). The results indicated that a total of 67 compounds were detected, including 17 esters, 8 alcohols, 11 aldehydes, 9 ketones, 5 acids, 13 hydrocarbons, and 4 terpenes. Among them, esters were the most abundant in both variety and content. Furthermore, significant differences were observed in the types and contents of VOCs of kiwifruit under different low-temperature pre-storage conditions ($P < 0.05$). The OPLS-DA model achieved a classification prediction accuracy of 99.5%, and 16 differential VOCs such as phenylethyl alcohol were identified through VIP > 1 selection criteria. Furthermore, analysis based on ROAV values revealed 13 key aroma compounds such as ethyl butyrate ($1 \leq \text{ROAV} \leq 100$). Aroma profile analysis indicated that kiwifruit samples pre-stored at 4 °C for 7 d exhibited a strong fruity aroma, demonstrating superior overall aroma quality. Lastly, PCA factor analysis indicated that the best aroma was achieved under the condition of pre-storage at 4 °C for 7 d. This study indicated that low-temperature acclimation technology can better retain the aroma quality of postharvest kiwifruit during storage.

Key words: kiwifruit; low temperature conditioning; chemometrics; volatile organic compounds

猕猴桃(*Actinidia chinensis* Planch.)起源于东亚的温带和亚热带地区,在中国有着悠久的种植历史,属于猕猴桃科的猕猴桃属草本植物,当前已知的猕猴桃品种多达 230 多种^[1-3]。猕猴桃含有 20 多种必需营养素,被认为是营养密度最高的水果之一^[4],因其鲜美的味道和丰富的营养特性而闻名于世,受到消费者的青睐。猕猴桃的主要挥发性成分主要是酯类、醛类、醇类、酮类与单萜烷烃类物质^[5-6],其香气主要散发出热带水果的果香、甜香和绿色草本植物的清香气息。猕猴桃是一种典型的呼吸跃变型水果,在采后贮藏期的不同阶段中果实品质容易发生显著性波动,导致其香气品质下降^[7-8],且在不当的贮藏温度下,极易遭受冷害。通常情况下,猕猴桃遭遇冷害的温度范围大致在 3~4 °C 之间。因此,如何更好地保留采后猕猴桃的香气成分,成为当前发展猕猴桃产业中亟待解决的问题。

低温驯化技术(Low temperature conditioning, LTC)是通过将易受冷害的果蔬置于略高于其冷害发生临界点的温度环境中,以此增强果实对更低温度环境的抵抗能力,减少果蔬在更低温度条件下的贮藏遭受冷害的风险^[9-10]。Jin 等^[11]采用茉莉酸甲酯结合 LTC 对水蜜桃进行处理,明显减少了果实冷害发生。Chaudhary 等^[12]也发现 LTC 有效降低了‘星红宝石’葡萄柚果实冷害的发生率,果实中类胡萝卜素、类黄酮、抗坏血酸、呋喃香豆素等物质含量有较好的保留。采用 LTC 技术对‘黄冠’梨果实进行处理对果实腐烂起到抑制作用,降低了果皮组织中膜脂过氧化水平^[13]。类似的结果在水蜜桃果实上也得到了证实^[14]。

当前针对低温驯化技术对果实的保鲜研究主要集中在冷害生理与其外观品质与营养物质变化方面,对其挥发性成分与其香气特征的变化情况研究鲜有报道。因此,本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)结合化学计量学对采后 LTC 处理后的‘米良一号’猕猴桃挥发性成分与香气特征进行分析,旨在为猕猴桃的采后贮藏保鲜风味调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘米良一号’猕猴桃 2023 年 9 月购于湖南省长

沙市开福区毛家桥水果市场,新鲜采摘的猕猴桃当日即被运送至冷库,经过筛选,去除病虫害和机械损伤的影响,选取大小统一和成熟度为五分熟的果实;环己酮(分析纯) 上海沪试实验室器材股份有限公司;无水乙醇(分析纯) 北京沃凯生物科技有限公司;氯化钠、3-辛醇(分析纯) 上海国药集团化学试剂有限公司;乙烯利熏蒸剂 山东营养源食品科技有限公司。

7890A-5975C 型 GC-MS 联用仪 美国 Agilent 公司;SPME 装置、二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲硅氧烷(DVB/CAR/PDMS 50/30 μm)萃取头 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 猕猴桃 LTC 处理 将 65 kg 的猕猴桃样品分别放置于温度为 0、4、8 和 12 °C 的冷库中进行驯化预贮,每个温度下猕猴桃分别驯化 3、5 和 7 d。采用 0.12% 的乙烯利对在密闭泡沫盒(25 cm×25 cm×18 cm)中 25 °C 下的果实熏蒸 24 h 进行催熟,每个密闭泡沫盒的猕猴桃装载量为 5 kg。对不进行 LTC 处理的猕猴桃直接使用乙烯利催熟作为对照组。从不同 LTC 处理的猕猴桃样品中随机挑选 10 个样品,去皮后液氮速冻,然后置于-80 °C 下进行保存。

1.2.2 猕猴桃各样品的 HS-SPME-GC-MS 检测 参照李辣梅等^[15]的方法略作修改。取猕猴桃并用磨样机把猕猴桃果肉样品磨成粉末,以环己酮与无水乙醇(1:20)为溶剂,10 μL/L 的 3-辛醇作为内标,称取 4 g 样品粉末加入到 20 mL 小瓶中,并加入 4 mL 饱和 NaCl 溶液和 2 μL 的内标溶液。60 °C 金属浴预热 15 min,然后插入萃取头吸附 40 min,接着将萃取头插入 GC-MS 进样口,解吸附 5 min 后缓慢拔出萃取头,GC-MS 联用仪对样品进行检测。

气相色谱条件:采用 HP-5 MS 毛细管柱(30 m×25 mm, 0.25 μm)和高纯度氦气作为载气。氦气流速为 1.0 mL/min,进样量为 1 μL,不分流进样。进样口温度设定为 250 °C。升温程序如下:开始时柱温为 40 °C,保持 3 min,然后以 5 °C/min 的速率升温至 150 °C,再以 10 °C/min 的速率升温至 250 °C 并保持 10 min,最后以 20 °C/min 的速率升温至 270 °C

并保持 1 min。

质谱条件,离子源温度为 230 ℃,四极杆温度为 150 ℃,电子能量为 70 eV。离子源采用电子轰击电离源(EI),质量扫描范围为 40~400 m/z。

定性定量方法:样品经过 GC-MS 分析得到的质谱数据与 NIST 05 标准谱库相匹配,仅保留匹配度大于 80% 的成分,对其成分进行定性分析;采用内标法(内标物质为 3-辛醇)定量计算各挥发性成分含量,计算方法如式(1)所示。

$$X_i(\mu\text{g/g}) = \frac{A_i \times n_s \times M_s}{A_s \times M_i} \times 10^6 \quad \text{式 (1)}$$

式中: X_i 为待测样品的质量浓度, $\mu\text{g/g}$; n_s 为内标物质的量, g/mol ; M_s 为内标物摩尔质量; M_i 为内标物进样量, g ; A_i 为待测样品的峰面积; A_s 为内标物质的峰面积。

1.2.3 猕猴桃 VOCs 的相对气味活度值计算 采用 ROAV 用于评估单个化合物对整体香气的贡献,通过相对气味活度值(Relative odor activity value, ROAV)的大小来确定关键风味成分^[16],计算方法如公式(2)、(3)所示。

$$\text{OAV}_i = \frac{A_i}{\text{OT}_i} \quad \text{式 (2)}$$

$$\text{ROAV}_x = 100 \times \frac{\text{OAV}_x}{\text{OAV}_{\max}} \quad \text{式 (3)}$$

式中: A_i 为猕猴桃 VOCs 的含量($\mu\text{g/g}$); OT_i 为该 VOCs 的香气阈值($\mu\text{g/g}$); OAV_i 和 OAV_x 为某个香气成分 i 和 x 的气味活性值; $\text{OAV}_{\max}$ 为所有香气成分中最大的气味活性值。

1.3 数据处理

通过气相色谱-质谱(GC-MS)分析得到的数据以内标法定量计算结果(平均值 $\pm$ 标准差)表示其含量,实验均进行 3 次重复,使用 Excel 2016 软件进行数据整理和初步统计分析,使用 SPSS 19.0 软件对所获取的 GC-MS 数据进行方差分析、Duncan 法多重比较与主成分分析(PCA)因子分析, $P < 0.05$ 表示差异显著;采用在线网站 <https://www.genesccloud.cn/> 绘制 Venn 图;采用 Orgrin 2024b 软件绘制堆积柱状图、聚类热图与雷达图;采用 SIMCA 软件绘制 OPLS-DA 图。

2 结果与分析

2.1 LTC 对猕猴桃挥发性成分的影响

猕猴桃在经过不同条件的 LTC 处理后共检出 67 种化合物(表 1),其中酯类 17 种、醇类 8 种、醛类 11 种、酮类 9 种、酸类 5 种、烷烃类 13 种、烯萜类 4 种。

猕猴桃中的酯类物质具有典型的果香味气息^[17],是决定猕猴桃香气的主要成分^[18]。其中丁酸乙酯、苯甲酸乙酯、苯甲酸甲酯是主要的酯类化合物,而丁酸乙酯是猕猴桃的特征性香气成分之一^[19-20]。通过

GC-MS 检测结果可知,除了 0 ℃+3 d 处理组,猕猴桃经过 LTC 处理的丁酸乙酯的含量均高于对照组,随着 LTC 处理时间的增加,在 0、4、8 ℃ 温度的 LTC 处理下丁酸乙酯的含量呈现出先增加后减少的趋势,在 12 ℃ 温度的 LTC 处理下丁酸乙酯的含量呈现出逐渐增加的趋势,这表明 LTC 处理对猕猴桃中特殊性香气成分丁酸乙酯的积累具有显著作用。其中 4 ℃ 下,驯化 7 d 处理猕猴桃其丁酸乙酯含量显著高于其余组($P < 0.05$)。苯甲酸乙酯和苯甲酸甲酯的含量在不同温度和驯化时间的处理组中也存在较为显著的变化,整体变化趋势与丁酸乙酯相似。

猕猴桃醇类物质中 4-萜烯醇、苯乙醇、芳樟醇和 α -松油醇为猕猴桃贡献了浓郁的花香与甜香气息^[21-22]。与对照组对比, LTC 处理的猕猴桃中苯乙醇具有香气的醇类物质同样随着处理时间延长积累增加,且样品之间具有显著性差异($P < 0.05$),说明 LTC 处理对猕猴桃的花香与甜香气息具有增强作用。尤其是在 4 ℃ 条件下驯化 7 d 的处理组中,苯乙醇和 α -松油醇的含量显著增加。

猕猴桃醛类物质赋予果实草本植物的清香气息^[23],其中 2-己烯醛可诱导植物体内产生对外界环境的各种防御反应^[24]。与对照组相比,经过 LTC 处理后的猕猴桃果实,2-己烯醛含量显著上升($P < 0.05$),并且随着 LTC 处理时间与温度的增加呈现累积增加的趋势。其中经 4 ℃ 驯化 5 d 的猕猴桃果实中 2-己烯醛含量最高为 $77.47 \pm 0.89 \mu\text{g/g}$,其次是低温驯化 7 d 的果实含量为 $77.06 \pm 0.75 \mu\text{g/g}$,说明随着低温驯化的时间增加,猕猴桃对外界环境的抗氧化能力增强,有助于延缓果实的新陈代谢,从而促进了香气成分的积累与延长果实的货架期。

猕猴桃各样品中共检出 9 种酮类物质,其中香叶基丙酮、 β -紫罗酮、苯乙酮为猕猴桃的整体香气贡献了浓郁的花香、甜香与果香气息^[25]。随着 LTC 处理的温度与时间增加,其含量呈现减少的趋势,但整体上对猕猴桃香气的贡献较为显著。

猕猴桃各处理组样品中酸类物质如长链脂肪酸棕榈酸、硬脂酸、亚油酸、油酸,与对照组相比,整体呈现增加的趋势,表明 LTC 处理同样促进脂肪酸合成,从而提升猕猴桃果实的贮藏保鲜能力与香气品质^[26]。

猕猴桃中烷烃类物质对果实整体香气贡献较小,主要起到保持其香气稳定的作用^[23]。猕猴桃烯萜类物质中,反式角鲨烯是植物中天然抗氧化剂,具有良好的抗氧化能力^[27]。

经过对猕猴桃在不同 LTC 处理的挥发性成分进行 Venn 分析,结果如图 1(a)所示,猕猴桃样品中共识别出 4 种共有成分。对照组(CK)及各处理组样品中,独有的挥发性成分数量从 0~6 种不等。这表明低温处理条件对猕猴桃挥发性成分的种类产生了明显影响,其中部分处理组之间存在明显差异。这一

表 1 猕猴桃各样品的挥发性成分含量
Table 1 Volatile components content of each sample of kiwifruit

序号	化合物名称	含量(μg/g)												
		CK	0 ℃+3 d	0 ℃+5 d	0 ℃+7 d	4 ℃+3 d	4 ℃+5 d	4 ℃+7 d	8 ℃+3 d	8 ℃+5 d	8 ℃+7 d	12 ℃+3 d	12 ℃+5 d	12 ℃+7 d
C1	丁酸乙酯	21.81±2.24 ^e	21.12±2.58 ^e	55.9±1.55 ^d	39±1.25 ^f	55.34±2.72 ^d	41.83±1.21 ^f	350.88±6.61 ^a	52.02±2.55 ^{de}	157.63±5.31 ^b	85.2±2.20 ^f	46.1±0.76 ^{ef}	52.33±3.78 ^{de}	84.79±3.42 ^e
C2	丁酸甲酯	—	3.65±0.26 ^b	4.89±0.13 ^{be}	20.22±0.02 ^e	12.42±0.54 ^f	—	43.4±3.35 ^b	7.24±0.06 ^e	61.14±0.95 ^f	35.64±0.60 ^e	42.8±1.71 ^b	24.89±0.95 ^f	7.22±0.18 ^e
C3	己酸甲酯	4.61±0.61 ^{de}	3.36±0.38 ^f	—	9.15±0.10 ^a	5.41±0.44 ^c	4.25±0.05 ^e	4.87±0.07 ^{de}	4.81±0.23 ^{de}	—	—	4.53±0.15 ^{de}	8.24±0.09 ^b	5.16±0.25 ^{cd}
C4	乙酸乙酯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.37±0.44 ^a	—	—	—
C5	己酸乙酯	—	—	—	25.59±7.73 ^b	—	31.79±1.14 ^a	—	12.93±0.46 ^e	—	—	—	—	—
C6	苯甲酸甲酯	22.1±4.75 ^b	21.73±0.73 ^b	15.01±0.52 ^f	51.29±1.61 ^a	71.23±2.16 ^c	131.65±2.27 ^c	141.61±1.89 ^b	46.42±0.43 ^e	182.82±4.00 ^a	59.34±0.81 ^f	124.65±3.25 ^d	—	63.01±3.16 ^f
C7	辛酸甲酯	0.94±0.05 ^a	0.81±0.08 ^a	0.76±0.06 ^a	3.43±0.09 ^c	1.49±0.17 ^f	4.85±0.21 ^a	2.5±0.12 ^d	1.01±0.02 ^e	3.97±0.10 ^b	2.48±0.27 ^d	—	3.74±0.09 ^c	1.90±0.05 ^e
C8	苯甲酸乙酯	9.39±1.57 ^b	3.45±0.18 ⁱ	4.02±0.22 ^f	12.08±0.11 ^a	14.72±0.43 ^f	15.3±0.71 ^f	108.42±1.05 ^a	10.31±0.39 ^b	65.05±0.22 ^b	30.5±1.06 ^e	15.79±0.73 ^f	43.52±2.29 ^a	46.09±0.38 ^e
C9	辛酸乙酯	4.69±0.25 ^a	1.44±0.03 ^b	3.11±0.13 ^{be}	6.84±0.05 ^d	2.24±0.22 ^{be}	18.16±1.01 ^a	11.26±0.6 ^e	2.14±0.04 ^{ab}	16.93±0.39 ^b	3.46±0.05 ^f	—	18.66±1.04 ^a	2.58±0.05 ^{be}
C10	苯甲酸丁酯	0.98±0.75 ^a	0.60±0.05 ^a	0.42±0.07 ^a	3.26±0.26 ^{ef}	2.52±0.03 ^f	3.08±0.12 ^{ef}	9.68±0.32 ^b	2.69±0.17 ^f	11.3±0.37 ^a	5.06±0.47 ^e	4.15±0.06 ^d	3.51±0.07 ^{de}	0.78±0.18 ^g
C11	丁酸丁酯	—	4.03±0.18 ^e	—	—	—	—	8.42±0.36 ^b	5.14±0.14 ^d	—	6.68±0.24 ^c	3.69±0.22 ^e	2.58±0.03 ^f	14.49±0.10 ^a
C12	单油酸甘油酯	—	0.22±0.06 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C13	丁酸苯甲酯	—	—	—	0.72±0.05 ^b	0.49±0.04 ^c	—	—	—	—	—	0.36±0.01 ^d	—	0.97±0.12 ^a
C14	丁酸异丁酯	—	—	—	—	5.62±0.57 ^b	—	7.73±0.25 ^a	4.52±0.19 ^c	4.1±0.16 ^c	—	—	—	3.87±0.08 ^d
C15	癸酸甲酯	—	—	—	—	0.19±0.02 ^a	—	—	—	—	—	—	0.13±0.03 ^b	—
C16	癸酸乙酯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.83±0.03 ^a	—
C17	2-糠酸乙酯	—	—	—	—	—	—	0.58±0.02 ^b	—	—	—	—	1.5±0.08 ^a	—
酯类		64.5±4.11 ⁱ	60.42±3.00 ⁱ	84.11±1.56 ^b	171.58±10.64 ^f	171.66±2.02 ^f	250.91±1.64 ^c	689.35±7.46 ^a	149.25±2.55 ^e	506.29±5.24 ^b	228.36±4.53 ^c	242.05±0.96 ^{cd}	159.92±2.13 ^a	230.87±3.84 ^{ef}
C18	3-甲基戊-2,4-二烯-1-醇	32.7±0.91 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C19	4-萜烯醇	—	0.31±0.04 ^b	—	—	—	—	—	—	1.91±0.11 ^a	—	—	—	—
C20	苯乙醇	—	—	—	3.74±0.40 ^c	1.4±0.11 ^d	4.84±0.23 ^c	7.66±0.29 ^b	3.79±0.18 ^c	7.21±0.56 ^b	6.79±0.28 ^b	—	7.8±0.53 ^b	9.04±0.06 ^a
C21	2-乙基己醇	—	—	—	—	—	—	18.16±0.17 ^a	—	—	—	—	—	—
C22	阿扎胆醇	—	—	—	—	—	—	—	—	2.18±0.14 ^a	—	—	—	—
C23	正辛醇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.77±0.34 ^a	—
C24	芳樟醇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5±0.12 ^a
C25	α-松油醇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.79±0.13 ^a
醇类		32.7±0.91 ^a	0.31±0.04 ⁱ	—	3.74±0.4 ^e	1.4±0.11 ^b	4.84±0.23 ^f	25.83±0.3 ^b	3.79±0.18 ^{be}	11.3±0.60 ^{cd}	6.79±0.28 ^c	—	10.57±0.83 ^d	12.33±0.28 ^c
C26	苯甲醛	6.50±0.35 ^a	4.12±0.11 ⁱ	3.45±0.12 ⁱ	9.26±0.35 ^c	5.00±0.29 ^b	13.27±0.73 ^c	14.20±0.63 ^d	—	15.26±0.39 ^a	—	7.70±0.04 ^f	9.20±0.05 ^e	10.18±0.18 ^d
C27	壬醛	9.62±0.73 ^a	4.42±0.32 ^b	2.91±0.19 ^e	6.63±0.43 ^f	12.89±0.24 ^c	20.77±0.84 ^a	11.04±0.9 ^d	2.58±0.16 ^f	6.17±0.65 ^{fe}	4.41±0.14 ^b	8.58±0.04 ^e	17.06±0.28 ^b	5.21±0.07 ^{bd}
C28	反式-2-壬醛	1.69±0.16 ^d	1.35±0.12 ^{ef}	1.28±0.09 ^f	3.14±0.15 ^b	1.45±0.07 ^{def}	4.05±0.11 ^a	1.38±0.05 ^{ef}	—	4.03±0.12 ^a	—	—	2.15±0.19 ^c	1.57±0.09 ^{de}
C29	癸醛	1.52±0.25 ^d	0.61±0.08 ^e	0.91±0.02 ^e	3.14±0.22 ^b	1.12±0.19 ^{ef}	3.69±0.11 ^a	1.33±0.03 ^{de}	—	—	—	—	2.13±0.09 ^c	1.88±0.06 ^c
C30	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	1.04±0.10 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C31	反式肉桂醛	2.92±0.23 ^b	—	—	—	—	—	—	—	3.41±0.08 ^a	—	0.22±0.01 ^d	0.54±0.06 ^c	—
C32	肉桂醛	—	1.27±0.08 ^c	1.18±0.03 ^c	—	1.33±0.13 ^c	4.78±0.22 ^a	—	0.54±0.12 ^d	—	—	1.13±0.23 ^c	—	2.18±0.04 ^b
C33	2-己烯醛	—	50.46±1.96 ^c	43.45±1.96 ^f	7.91±0.2 ^e	61.38±1.31 ^d	77.47±0.89 ^a	77.06±0.75 ^a	—	60.76±1.17 ^d	—	65.2±1.21 ^c	72.06±1.90 ^b	44.36±0.69 ^f
C34	(E,E)-2,4-庚二烯醛	—	1.23±0.05 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C35	反-2-辛烯醛	—	1.21±0.15 ^c	1.38±0.09 ^{bc}	—	1.36±0.09 ^{bc}	2.25±0.05 ^a	—	—	—	—	—	1.57±0.18 ^b	2.03±0.16 ^a
C36	柠檬醛	—	—	—	1.7±0.09 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—
醛类		23.28±0.36 ^b	64.66±2.55 ^c	54.56±1.96 ^f	31.77±0.59 ^e	84.53±1.99 ^d	126.28±2.15 ^a	105.01±2.30 ^b	3.12±0.26 ^f	89.62±1.57 ^c	4.41±0.14 ⁱ	82.83±1.22 ^d	104.71±2.19 ^c	67.41±0.89 ^e
C37	大马士酮	0.81±0.04 ^e	—	—	2.32±0.10 ^a	0.99±0.04 ^b	—	—	—	—	—	—	—	—
C38	香叶基丙酮	1.57±0.20 ^a	1.02±0.15 ^b	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C39	苯乙酮	4.7±0.34 ^a	0.45±0.02 ^c	0.53±0.03 ^{bc}	—	—	—	0.62±0.04 ^b	—	—	—	—	—	—
C40	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	18.67±0.32 ^b	0.44±0.02 ^d	3.89±0.27 ^c	23.82±0.63 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C41	β-紫罗酮	—	—	—	—	0.49±0.06 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—
C42	顺-5-甲基-2-(1-甲基乙基)环己酮	—	—	—	—	—	—	—	—	0.85±0.09 ^a	—	—	—	—
C43	薄荷酮	—	—	—	—	—	—	0.87±0.02 ^a	—	—	—	—	0.62±0.03 ^b	—
C44	胡薄荷酮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.21±0.21 ^a
C45	胡椒酮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.12±0.09 ^a
酮类		25.75±0.23 ^a	1.91±0.17 ^d	4.42±0.26 ^c	26.13±0.53 ^a	1.48±0.03 ^d	—	0.62±0.04 ^e	0.87±0.02 ^e	0.85±0.09 ^e	—	—	0.62±0.03 ^c	6.33±0.24 ^b
C46	棕榈酸	3.34±0.47 ^a	3.28±0.13 ^d	10.84±0.14 ^a	0.76±0.03 ^c	—	—	0.28±0.02 ^f	5.23±0.10 ^b	0.22±0.04 ^f	4.54±0.14 ^c	—	—	0.67±0.07 ^c
C47	硬脂酸	5.75±0.38 ^d	5.92±0.09 ^d	16.24±0.23 ^a	1.93±0.07 ^c	—	—	1.57±0.04 ^f	9.98±0.08 ^b	0.98±0.72 ^f	8.65±0.38 ^c	—	—	1.16±0.15 ^f
C48	亚油酸	—	—	0.12±0.03 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C49	油酸	—	—	0.58±0.03 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C50	壬酸	—	—	—	—	—	9.01±0.22 ^b	—	—	—	14.41±0.89 ^a	—	—	—
酸类		9.09±0.8 ^c	9.20±0.22 ^c	27.78±0.38 ^a	2.69±0.08 ^d	—	9.01±0.22 ^c	1.85±0.04 ^{de}	15.22±0.10 ^b	1.20±0.70 ^c	27.6±1.04 ^a	—	—	1.83±0.09 ^{de}

续表 1

序号	化合物名称	含量(μg/g)												
		CK	0 ℃+3 d	0 ℃+5 d	0 ℃+7 d	4 ℃+3 d	4 ℃+5 d	4 ℃+7 d	8 ℃+3 d	8 ℃+5 d	8 ℃+7 d	12 ℃+3 d	12 ℃+5 d	12 ℃+7 d
C51	十五烷	—	0.30±0.04 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C52	十七烷	—	0.02±0.00 ^b	1.3±0.02 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C53	二十烷	0.11±0.03 ^b	0.64±0.07 ^a	0.04±0.01 ^c	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C54	二十五烷	—	0.92±0.08 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C55	正二十六烷	—	1.46±0.17 ^c	2.86±0.05 ^b	—	—	—	—	4.81±0.33 ^a	—	—	—	—	—
C56	正二十七烷	—	1.94±0.19 ^b	3.51±0.07 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C57	正二十一烷	—	2.15±0.21 ^a	0.14±0.02 ^c	—	—	—	—	1.99±0.07 ^b	—	—	—	—	—
C58	正二十九烷	—	2.12±0.04 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C59	正二十四烷	—	1.3±0.04 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C60	三十烷	—	—	2.74±0.06 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C61	十二烷	—	—	—	—	0.41±0.02 ^a	—	—	—	—	—	—	—	—
C62	十四烷	—	—	—	—	0.15±0.02 ^b	—	0.29±0.05 ^a	—	—	—	—	—	—
C63	正十六烷	—	—	—	—	—	—	0.63±0.07 ^b	—	—	2.78±0.26 ^a	—	—	—
烷烃类		0.11±0.03 ^c	10.84±0.70 ^a	10.58±0.04 ^a	—	0.56±0.01 ^{de}	—	0.92±0.04 ^d	6.81±0.32 ^b	—	2.78±0.26 ^c	—	—	—
C64	反式角鲨烯	0.77±0.13 ^b	—	—	0.43±0.04 ^c	—	—	—	1.54±0.05 ^a	—	—	—	—	0.48±0.08 ^c
C65	苯乙烯	—	—	—	—	—	—	5.78±0.27 ^a	—	—	—	—	—	—
C66	马兜铃烯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.11±0.11 ^a
C67	α-水芹烯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.41±0.02 ^a
烯萜类		0.77±0.13 ^d	—	—	0.43±0.04 ^c	—	—	5.78±0.27 ^a	1.54±0.05 ^c	—	—	—	—	3.00±0.09 ^b

注: 表中数据以平均值±标准差表示; —表示未检出; 同行相同字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

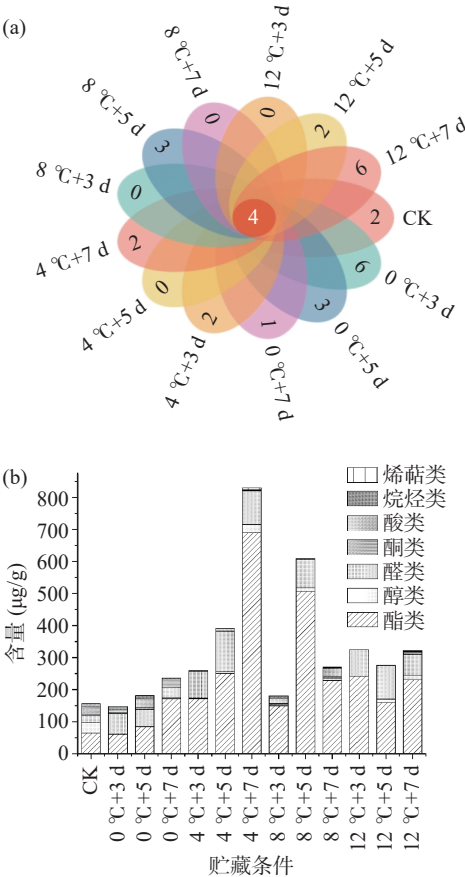


图 1 不同 LTC 处理猕猴桃挥发性成分 Venn 图分析(a)与含量(b)

Fig.1 Venn analysis of volatile components (a) and content (b) in kiwifruit under different LTC treatments

发现为后续探究低温储藏对猕猴桃风味影响的机制提供了重要依据。

如图 1(b)所示, 可知经过 LTC 处理的猕猴桃相比于对照组其香气成分含量整体均有所上升。在所

有处理组中, 4 ℃ 下驯化 7 d 的处理组显示出最高的挥发性成分含量, 其次是 8 ℃ 下驯化 5 d 的处理组。在这些处理中, 酯类化合物的含量最为丰富, 尤其是 4 ℃ 驯化 7 d 的处理组中酯类物质含量最高。总体而言, 经过低温预处理(LTC)的猕猴桃样品其挥发性成分的总含量明显高于未经处理的对照组。

2.2 LTC 对猕猴桃中挥发性成分的 OPLS-DA 分析

为了更好地分析不同 LTC 处理对猕猴桃挥发性成分的影响, 应用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)对猕猴桃样品的挥发性成分结果进行模型分析, 如图 2 所示, 猕猴桃各处理组的挥发性成分得以区分, 其中模型的自变量拟合指数(R^2x)为 0.994, 因变量拟合指数(R^2y)为 0.998, 模型预测指数(Q^2)为 0.995, 对于经 LTC 处理后的猕猴桃挥发性成分的区分预测准确率为 99.5%, 表明该模型具有良好的拟合和预测能力。在得分图中, 不同 LTC 处理条件下的猕猴桃样品挥发性成分分布在四个不同的象限, 这一分布模式揭示了不同处理条件下猕猴桃挥发性成分的差异。如图 2(b)所示, 为了验证猕猴桃样品 GC-MS 数据建立的 OPLS-DA 模型的稳健性, 进行了 200 次响应的置换检验。检验结果显示 R^2 值为 0.228, Q^2 值为 -0.665, Q^2 与 Y 轴的截距为负值, 这表明模型没有出现过度拟合的问题。同时, R^2 和 Q^2 的回归线斜率均大于 1, 进一步确认了模型的有效性和预测能力, 说明该模型在区分猕猴桃样品挥发性成分时具有良好的稳定性和可靠性。

在 OPLS-DA 模型中, 变量投影重要性(VIP)是一个关键指标。VIP 值越大, 表明该变量在不同处理组之间的含量差异越显著。通常, VIP 值大于 1 的变量被认为在区分不同类别时具有重要作用, 并且在模型的分类效果中发挥着关键作用。因此, 通过分析

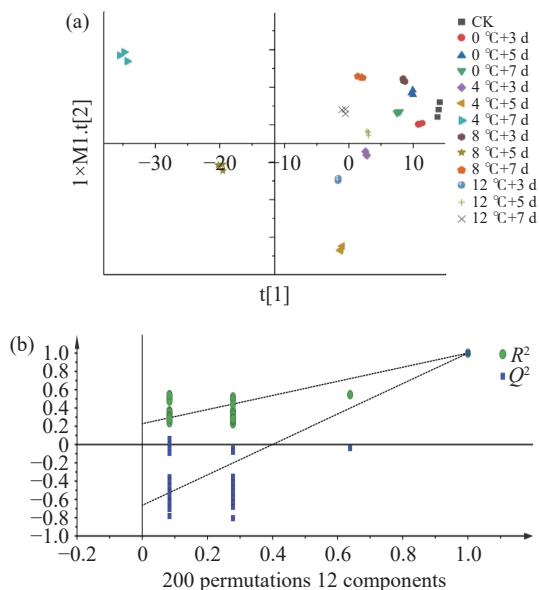


图2 猕猴桃 VOCs 的 OPLS-DA 分析得分图(a)与置换检验(b)

Fig.2 Plot of OPLS-DA analytical scores for VOCs of kiwifruit samples (a) with replacement test (b)

VIP 值, 可以确定哪些挥发性成分是区分不同 LTC 处理条件下猕猴桃样品的主要标志物^[28]。由图 3 可知, VIP 值大于 1 的猕猴桃各样品挥发性物质共有 16 种, 分别为丁酸乙酯、苯甲酸乙酯、丁酸甲酯、苯甲酸甲酯、2-己烯醛、2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮、己酸乙酯、壬酸、辛酸乙酯、丁酸丁酯、壬醛、丁酸异丁酯、硬脂酸、己酸甲酯、苯甲醛、苯乙醇。

为了更加准确地地区分猕猴桃各处理组样品中挥发性成分的贡献率, 在 $VIP > 1$ 的基础上, 根据 $P < 0.05$, 对图 3 中筛选出的 16 种挥发性成分进行聚类热图分析, 结果如图 4 所示, 在不同低温处理条件下, 猕猴桃样品中含量显著突出的挥发性成分有所不同。在 CK 组中, 苯乙醇的含量显著突出, 但随着 LTC 处理后, 在不同处理组猕猴桃样品中含量突出的挥发性成分类别逐渐产生变化, 说明 LTC 处理对猕猴桃样品的差异性挥发性成分影响是存在不均衡性的, 而在 4 °C+3 d 和 4 °C+7 d 处理组中, 分别有 1 种(辛酸乙酯)和 8 种(丁酸甲酯、丁酸乙酯、辛酸

乙酯、苯甲酸甲酯、丁酸异丁酯、壬酸、2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮、己酸乙酯); 而在 8 °C+5 d 和 0 °C+7 d 处理组中, 分别有 8 种(辛酸乙酯、丁酸异丁酯、己酸乙酯、丁酸丁酯、丁酸甲酯、苯甲酸甲酯、丁酸乙酯、2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮)和 2 种(苯甲酸乙酯和 2-己烯醛)挥发性成分的含量明显突出, 随着温度与时间的条件变化, 差异性挥发性成分的种类数量也开始呈现波动。而 LTC 处理条件对猕猴桃挥发性成分的含量也产生了明显影响, 不同处理组间存在明显差异, 这种差异也揭示了 LTC 处理对猕猴桃风味成分的复杂影响, 为优化储藏和加工工艺提供了关键数据, 有助于进一步深入探究 LTC 处理对猕猴桃风味影响的机制提供了重要信息。

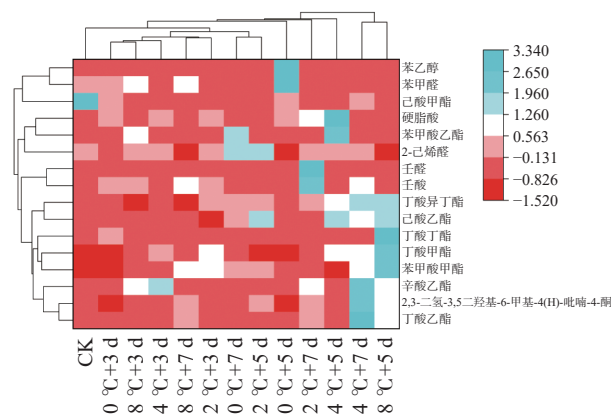


图4 不同 LTC 处理猕猴桃挥发性成分聚类热图

Fig.4 Clustering heat map analysis of VOCs of kiwifruit under different LTC treatments

2.3 采用 ROAV 法分析 LTC 处理对猕猴桃中挥发性香气物质的影响

香气成分对整体风味的贡献不仅取决于其含量, 还需结合阈值来评估^[29]。ROAV 值是衡量挥发性成分对样品风味贡献的关键指标, ROAV 值越高, 成分对风味的影响越显著。一般来说, ROAV 值在 1 到 100 之间的成分是关键香气成分, 决定了样品的风味特征; ROAV 值在 0.1 到 1 之间的成分虽然贡献较小, 但仍对风味有重要的修饰作用^[30]。本研究

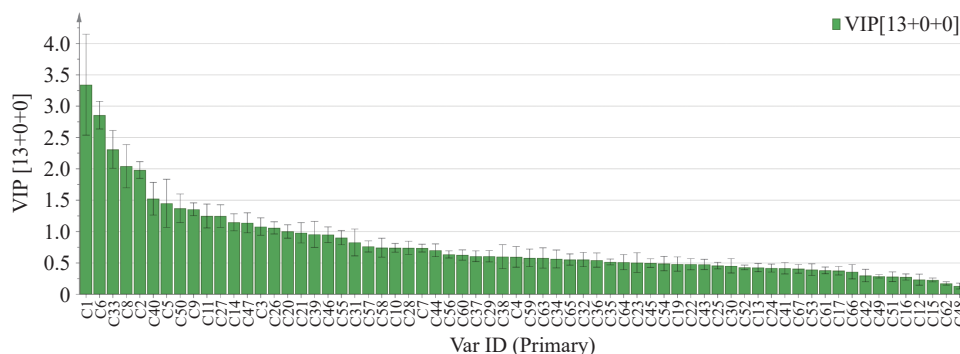


图3 不同 LTC 处理猕猴桃挥发性成分 VIP 值

Fig.3 VIP values of VOCs of kiwifruit under different LTC treatments

利用 GC-MS 技术分析鉴定了 67 种挥发性成分,并从中筛选出 24 种具有特征香气的化合物。为了更加准确地评估香气化合物对猕猴桃整体风味的贡献,通过计算出香气化合物的相对香气活性值(ROAV)进行判断,结果如表 2 所示可知,6 种香气化合物为关键香气成分,其 ROAV 值介于 1 到 100 之间,表明它们对猕猴桃的整体风味具有显著影响。此外,还有 8 种香气化合物的 ROAV 值在 0.1 到 1 之间,说明这些化合物虽然对风味贡献较小,但仍然在一定程度上影响着猕猴桃的风味特征。壬醛在猕猴桃所有样品中的 ROAV 值都较高,特别是在 4 ℃ 的样品中,其 ROAV 值达到了 100.00,表明壬醛是猕猴桃样品中是主要的香气成分,且在低温条件下具有很强的挥发性,对其整体香气的贡献较为显著。壬醛的香气类型描述为脂香和柑橘香味,这可能是猕猴桃香气中较为突出的特征。其次,丁酸乙酯在 0 ℃ 和 4 ℃ 的样品中具有较高的 ROAV 值,尤其是在 4 ℃ 的样品中,其 ROAV 值达到了 92.92,表明丁酸乙酯在低温 4 ℃ 下对猕猴桃香气有着显著的贡献,且较长时间的贮藏有助于提高其气味的相对香气活度。辛酸乙酯在 0、4 和 8 ℃ 的样品中也有较高的 ROAV 值,尤其是在 8 ℃ 的样品中,其 ROAV 值达到了 44.84,但在 LTC 处理的不同条件下相对香气

活度值存在一定波动且差异较大,表明辛酸乙酯在低温下对猕猴桃香气有着显著的贡献,但对 LTC 处理的温度与时间条件有着较强的敏感度。综上所述,不同样品的关键香气成分主要有壬醛、丁酸乙酯和辛酸乙酯,它们在不同样品中的相对气味活度值最高,对样品整体香气的贡献最大。这些香气成分的香气类型描述分别为脂香、柑橘香味、菠萝香、香蕉香、花香、青草香等。低温驯化技术有助于进一步提升和保留猕猴桃中重要的挥发性香气化合物含量,从而达到改善和调控猕猴桃香气品质的效果,这对于深入研究和了解猕猴桃香气的形成和变化具有重要意义。

将表 2 中猕猴桃各样品中同种风味关键香气成分的(ROAV>1)ROAV 值相加,并构建香气轮廓雷达图(图 5)。在各猕猴桃样品中,整体香气轮廓相似,果香香气程度最高,其次为脂香、花香和青草香,这主要是与丁酸乙酯、辛酸乙酯和壬醛的含量较高有关^[39],酯类作为猕猴桃各样品挥发性成分中种类和含量最多的物质,构成了猕猴桃香气的骨架,其中丁酸乙酯含量最高,为猕猴桃样品贡献了类似于菠萝香、香蕉香的果香味;醛类是猕猴桃挥发性香气中第二大类物质,其中壬醛含量较高,但由于其阈值仅有 0.0011 μg/g,所以 ROAV 值很高,对整体的香气

表 2 猕猴桃各样品香气成分的相对气味活度值
Table 2 Relative odor activity value of VOCs content in each sample of kiwifruit

序号	香气成分	阈值 (μg/g)	香气类型描述	相对气味活度值(ROAV)												
				CK	0℃+3 d	0℃+5 d	0℃+7 d	4℃+3 d	4℃+5 d	4℃+7 d	8℃+3 d	8℃+5 d	8℃+7 d	12℃+3 d	12℃+5 d	12℃+7 d
1	丁酸乙酯	0.02	菠萝香、香蕉香	5.77	5.59	14.80	10.33	14.65	11.08	92.92	13.78	41.74	22.56	12.21	13.86	22.45
2	丁酸甲酯	0.059	花香、果香	/	0.33	0.44	1.81	1.11	/	3.90	0.65	5.49	3.20	3.84	2.23	0.65
3	己酸甲酯	0.07	果香	0.35	0.25	/	0.69	0.41	0.32	0.37	0.36	/	/	0.34	0.62	0.39
4	苯甲酸甲酯	0.073	花香、果香、木香	1.60	1.58	1.09	3.72	5.17	9.55	10.27	3.37	13.26	4.31	9.04	/	4.57
5	苯甲酸乙酯	0.05556	果香、甜蜜香、油脂香	0.90	0.33	0.38	1.15	1.40	1.46	10.34	0.98	6.20	2.91	1.50	4.15	4.39
6	辛酸甲酯	0.0193	果香、花香	1.29	0.40	0.85	1.88	0.61	4.98	3.09	0.59	4.65	0.95	/	5.12	0.71
7	壬醛	0.0011	脂香、柑橘香味	46.33	21.29	14.02	31.92	62.08	100.00	53.17	12.44	29.70	21.22	41.32	82.13	25.10
8	2-己烯醛	0.3	果香、青草香	/	0.89	0.77	0.14	1.08	1.37	1.36	/	1.07	/	1.15	1.27	0.78
9	丁酸丁酯	0.1	甜润的水果香气	/	0.21	/	/	/	/	0.45	0.27	/	0.35	0.20	0.14	0.77
10	乙酸乙酯	0.5	果香、甜香	/	/	/	/	/	/	/	/	0.04	/	/	/	/
11	己酸乙酯	0.076	果香	/	/	/	1.78	0.00	2.22	/	0.90	/	/	/	/	/
12	辛酸乙酯	0.002	花香、菠萝香、杏香、青草香	12.41	3.82	8.23	18.13	5.92	48.10	29.83	5.68	44.84	9.17	/	49.40	6.84
13	癸酸乙酯	0.2	果香、脂肪味	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.02	/
14	4-萜烯醇	0.0024	芳香果香气息	/	0.69	/	/	/	/	/	/	4.22	/	/	/	/
15	苯乙醇	0.21	玫瑰香	/	/	/	0.09	0.04	0.12	0.19	0.10	0.18	0.17	/	0.20	0.23
16	芳樟醇	0.006	花香、果香	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	1.32
17	α-松油醇	0.01	白兰花香味	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.95
18	癸醛	0.007	柑橘香、蜡香	1.15	0.46	0.68	2.37	0.85	2.79	1.00	/	/	/	/	1.61	1.42
19	柠檬醛	0.032	柠檬香、木香	/	/	/	0.28	/	/	/	/	/	/	/	/	/
20	香叶基丙酮	0.06	花香	0.14	0.09	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
21	β-紫罗酮	0.0025	木香、紫罗兰花香	/	/	/	/	1.04	/	/	/	/	/	/	/	/
22	苯甲醛	0.751	果香	0.05	0.03	0.02	0.07	0.04	0.09	0.10	/	0.11	/	0.05	0.06	0.07
23	苯乙烯	0.73	花香、树脂香	/	/	/	/	/	/	0.04	/	/	/	/	/	/
24	苯乙酮	0.065	热带水果香、烟草香、肉桂香	0.38	0.04	0.04	/	/	/	0.05	/	/	/	/	/	/

注:表中/表示样品中未检出此化合物,表中阈值和香气描述均来自于文献[31-38]。

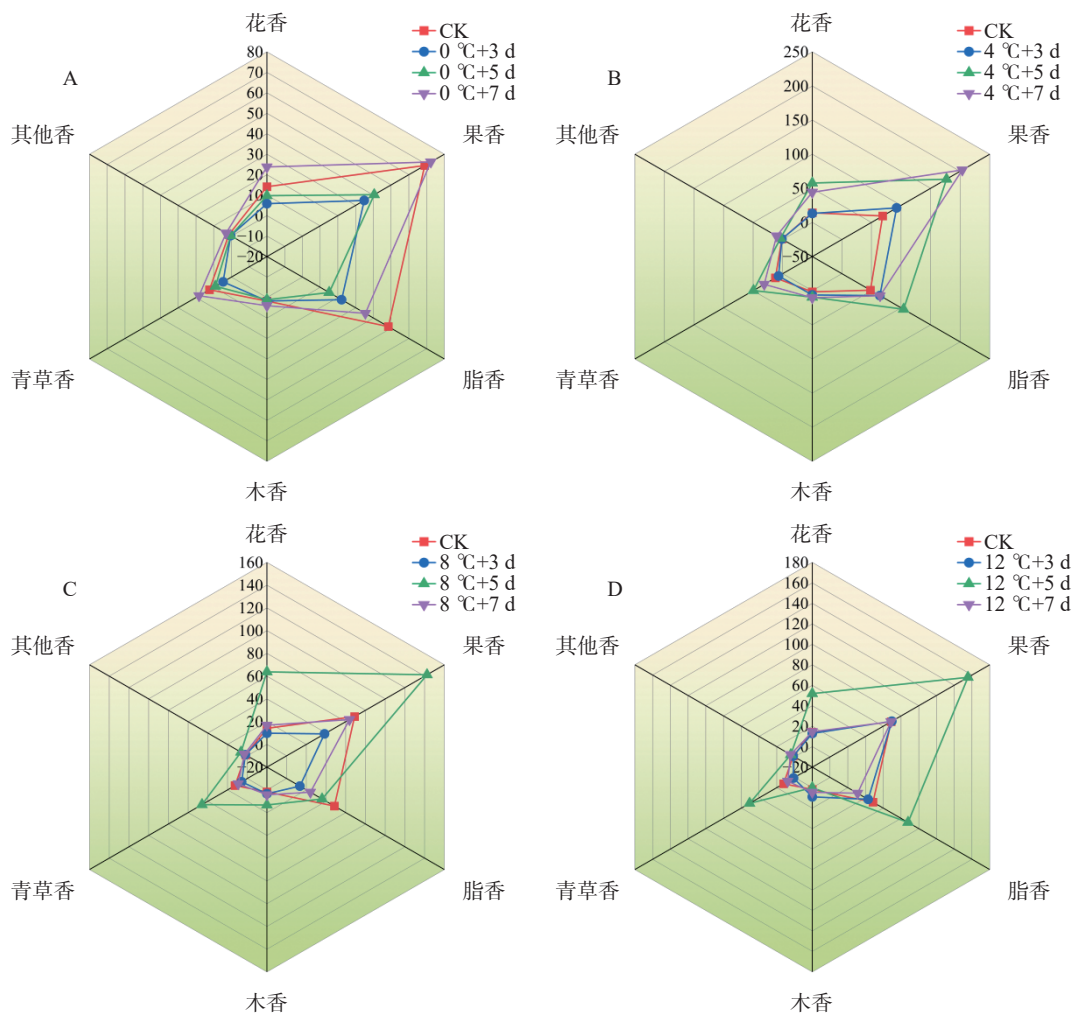


图 5 猕猴桃各样品气味雷达图
Fig.5 Radar chart of odor of each kiwifruit sample

轮廓具有很大的影响^[40]。
与 CK 相比,除经 0 °C+7 d 的 LTC 处理组和 CK 组香气浓郁程度相近外,其余组别的猕猴桃表现出比 CK 组浓郁多倍的香气。从驯化时间影响看,0 °C 的猕猴桃样品随着驯化时间的延长,表现出愈加浓郁的香气,而其余组别的猕猴桃果实随着驯化时间的延长,呈现出先增后减的趋势,在驯化第 5 d 表现出最浓郁的香气。4 °C 驯化 7 d 的猕猴桃表现出强烈的果香气味,综合香气品质佳,这可能与丁酸乙酯和苯甲酸甲酯含量较高有关^[41]。

2.4 低温驯化对猕猴桃中香气成分的主成分分析

对不同处理中猕猴桃各样品中 24 种具有香气特征的挥发性成分(表 2)进行 PCA 分析,结果如表 3 所示,通过提取前 6 个主成分(PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6),计算出其累计方差贡献率总计为 82.45%,表明前 6 个主成分可以解释猕猴桃各样品香气成分的大部分信息,用于计算不同处理猕猴桃的

香气成分指标综合得分,依据综合得分高低,对处理条件进行排名,以此来判断不同 LTC 处理猕猴桃香气的贮藏保鲜效果^[42]。如表 4 所示,在 4 °C+7 d 条件下 LTC 得分最高,在 12 °C+5 d 条件下 LTC 次之,在 0 °C+5 d 条件下 LTC 得分最低,说明在 4 °C+7 d 条件下进行 LTC 对猕猴桃的香气风味具有良好的保鲜作用。

表 3 猕猴桃各样品 PCA 分析的特征值和贡献率
Table 3 Eigenvalues and contributions to PCA analysis of each kiwifruit sample

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	6.05	26.32	26.32
2	3.84	16.70	43.02
3	3.45	15.01	58.04
4	2.05	8.93	66.97
5	1.84	8.01	74.97
6	1.72	7.47	82.45

表 4 猕猴桃各样品香气成分的 PCA 分析
Table 4 Eigenvalues and contributions to PCA analysis of each kiwifruit sample

样品名称	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P	排名
CK	-1.33	0.17	-0.58	1.28	2.31	0.65	-8.05	0.67	1.99	2.62	4.25	1.12	2.00	10

续表 4

样品名称	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA5	PCA6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P	排名
0 ℃+3 d	-0.95	-0.41	-0.28	0.15	0.46	-0.26	-5.76	1.58	0.95	0.31	0.86	0.45	2.26	12
0 ℃+5 d	-0.83	-0.49	-0.40	-0.12	-0.22	-0.52	-5.05	1.88	1.38	0.25	0.41	0.89	2.39	13
0 ℃+7 d	-0.46	0.86	0.09	-0.29	-0.82	2.22	-2.79	3.32	0.31	0.60	1.51	3.82	0.03	6
4 ℃+3 d	-0.45	0.35	-0.40	-0.03	-1.26	-1.53	-2.70	1.36	1.38	0.05	2.32	2.63	1.31	8
4 ℃+5 d	0.56	2.19	-0.50	-0.89	0.92	-1.43	3.37	8.41	1.74	1.83	1.70	2.46	2.21	3
4 ℃+7 d	1.94	-0.19	0.64	2.57	-0.10	-0.31	11.77	0.75	2.20	5.29	0.19	0.53	4.51	1
8 ℃+3 d	-0.82	-0.74	0.21	-0.07	-0.71	0.11	-4.95	2.85	0.71	0.14	1.31	0.19	2.15	11
8 ℃+5 d	1.93	-1.28	-1.67	-1.37	0.73	0.75	11.67	4.92	5.78	2.81	1.34	1.29	1.62	5
8 ℃+7 d	-0.28	-1.17	0.15	-0.03	-0.69	0.01	-1.70	4.50	0.51	0.07	1.28	0.02	1.49	9
12 ℃+3 d	-0.08	-0.45	-0.35	0.00	-0.68	-0.69	-0.51	1.73	1.20	0.01	1.26	1.19	0.96	7
12 ℃+5 d	0.48	1.59	0.23	0.06	-0.94	1.17	2.91	6.12	0.79	0.12	1.73	2.02	2.34	2
12 ℃+7 d	0.29	-0.44	2.87	-1.26	1.01	-0.18	1.77	1.68	9.90	2.59	1.86	0.31	1.90	4

3 结论

利用 HS-SPME-GC-MS 技术结合化学计量学方法, 从经不同 LTC 处理的猕猴桃中共检测到 67 种挥发性成分。不同 LTC 处理猕猴桃果实的挥发性成分在种类和含量上存在显著差异, 主要包括酯类、醇类、醛类、酮类、酸类、烷烃类和烯蒑类化合物。通过 OPLS-DA 模型分析发现不同 LTC 处理的猕猴桃挥发性成分能够明确区分, 且模型的稳定性与预测性通过置换检验得到了验证。通过 $P<0.05$ 和 $VIP>1$ 的标准进行筛选, 鉴定出丁酸甲酯、苯乙醇等 16 种含量差异显著的挥发性成分, 并利用聚类热图分析清晰展示了出在 4 ℃+3 d、4 ℃+7 d 组等处理组中的含量显著突出的挥发性成分; 同时表明, 低温驯化处理的温度与时间条件的差异会对猕猴桃关键差异性挥发性成分的种类与含量产生了显著影响。因此, 进一步地采用 ROAV 分析和香气轮廓描述分析对猕猴桃的挥发性成分进行了整体香气描述, 发现在 4 ℃ 下驯化 7 d 的猕猴桃样品展现出浓郁的果香气味, 具有较好的综合香气品质。最后, 通过 PCA 对最佳 LTC 条件进行综合判别, 表明在 4 ℃ 下驯化 7 d 的猕猴桃香气表现最佳。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] ZHANG Q, ZHANG H, GUI Y, et al. Phenological growth stages of a new kiwifruit cultivar (*Actinidia deliciosa* 'Jinfu') [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 327: 112795.

[2] COZZOLINO R, DE GIULIO B, PETRICCIONE M, et al. Comparative analysis of volatile metabolites, quality and sensory attributes of *Actinidia chinensis* fruit [J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126340.

[3] 汪梦诗, 祁雅楠, 赵沁雨, 等. 五种陕西主栽猕猴桃品种营养品质与香气特征解析 [J]. *食品工业科技*, 2024, 45(23): 272-281.

[WANG M S, QI Y N, ZHAO Q Y, et al. Nutritional quality and aroma characterization of five main kiwifruit varieties in Shaanxi

production area [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(23): 272-281.]

[4] LATOCHA P. The nutritional and health benefits of kiwiberry (*Actinidia arguta*)—A review [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2017, 72: 325-334.

[5] CHENG C H, SEAL A G, MACRAE E A, et al. Identifying volatile compounds associated with sensory and fruit attributes in diploid *Actinidia chinensis* (kiwifruit) using multivariate analysis [J]. *Euphytica*, 2011, 181: 179-195.

[6] KOSTYRA E, KRÓL K, KNYSAK D, et al. Characteristics of volatile compounds and sensory properties of mixed organic juices based on kiwiberry fruits [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 529.

[7] 李欣怡, 孙翔宇, 张文慧, 等. 家庭贮藏条件下‘翠香’猕猴桃果实品质演变规律解析 [J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(22): 19-27.

[LI X Y, SUN X Y, ZHANG W H, et al. Analysis of evolution of fruit quality of 'Cuixiang' kiwifruit under home storage conditions [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(22): 19-27.]

[8] 张翼钊, 王宝刚, 李文生, 等. 温度波动对贮藏猕猴桃品质劣变的影响 [J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(19): 43-48, 103.

[ZHANG Yizhao, WANG Baogang, LI Wensheng, et al. Effect of temperature fluctuations on quality deterioration of stored kiwifruit [J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(19): 43-48, 103.]

[9] 刘瑶, 郑秋丽, 左进华, 等. 茉莉酸甲酯结合低温预贮对尖椒采后品质及生理特性的影响 [J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 178-184.

[LIU Yao, ZHENG Qiuli, ZUO Jinhua, et al. Effect of methyl jasmonate treatment combined with low temperature conditioning on the quality and physiology of postharvest hot pepper [J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 178-184.]

[10] ZHANG Z, ZHU Q, HU M, et al. Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in stored mango fruit [J]. *Food Chemistry*, 2017, 219: 76-84.

[11] JIN P, WANG K, SHANG H, et al. Low-temperature conditioning combined with methyl jasmonate treatment reduces chilling injury of peach fruit [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2009, 89(10): 1690-1696.

[12] CHAUDHARY P R, JAYAPRAKASHA G K, PORAT R, et al. Low temperature conditioning reduces chilling injury while maintaining quality and certain bioactive compounds of 'Star Ruby' grapefruit [J]. *Food Chemistry*, 2014, 153: 243-249.

[13] LI D, CHENG Y, DONG Y, et al. Effects of low temperature

- conditioning on fruit quality and peel browning spot in 'Huangguan' pears during cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 131: 68–73.
- [14] 蔡琰, 余美丽, 邢宏杰, 等. 低温预贮处理对冷藏水蜜桃冷害和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 334–338. [CAI Yan, YU Meili, XING Hongjie, et al. Effects of low temperature conditioning on chilling injury and quality of cold-stored juicy peach fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 334–338.]
- [15] 李辣梅, 严涵, 王瑞, 等. 1-甲基环丙烯对即食“红阳”猕猴桃货架寿命与风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(12): 144–152. [LI Lamei, YAN Han, WANG Rui, et al. Effects of 1-methylcyclopropene treatment on shelf-life and flavor of ready-to-eat Hongyang kiwifruit[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(12): 144–152.]
- [16] ZHU Y F, CHEN J, CHEN X J, et al. Use of relative odor activity value (ROAV) to link aroma profiles to volatile compounds: Application to fresh and dried eel (*Muraenesox cinereus*) [J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 2257–2270.
- [17] 马婷, 任亚梅, 张艳宜, 等. 1-MCP 处理对‘亚特’猕猴桃果实香气的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(2): 276–281. [MA Ting, REN Yamei, ZHANG Yanyi, et al. Effect of 1-MCP treatment on the aroma of 'Yate' kiwifruit[J]. *Food Science*, 2016, 37(2): 276–281.]
- [18] 孙颖, 张博, 李书倩, 等. 野生软枣猕猴桃采后 20 °C 贮藏期间外释香气成分变化[J]. *食品科学*, 2012, 33(8): 155–158. [SUN Ying, ZHANG Bo, LI Shuqian, et al. Changes in aroma components of *Actinidia arguta* during postharvest storage at 20 °C [J]. *Food Science*, 2012, 33(8): 155–158.]
- [19] 席万鹏, 郁松林, 周志钦. 桃果实香气物质生物合成研究进展[J]. *园艺学报*, 2013, 40(9): 1679–1690. [XI Wapeng, YU Songlin, ZHOU Zhiqin. Advances in aroma compounds biosynthesis of peach fruit[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(9): 1679–1690.]
- [20] 林江丽, 朱亚娟, 王金霞, 等. SO₂ 处理对新疆 3 种葡萄香气成分的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(6): 116–120. [LIN Jiangli, ZHU Yajuan, WANG Jinxia, et al. Effect of SO₂ treatment on aroma components of berries of three grape varieties grown in Xinjiang[J]. *Food Science*, 2016, 37(6): 116–120.]
- [21] MOTA L M, AGUIAR A, FERREIRA I M, et al. Volatile profiling of kiwifruits (*Actinidia deliciosa* 'Hayward') evaluated by HS-SPME and GC-IT/MS: Influence of ripening, training system and storage[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5: 3115–3128.
- [22] ZENG Y, WANG M Y, HUNTER D C, et al. Sensory-directed genetic and biochemical characterization of volatile terpene production in kiwifruit[J]. *Plant Physiology*, 2020, 183(1): 51–66.
- [23] LAN T, GAO C, YUAN Q, et al. Analysis of the aroma chemical composition of commonly planted kiwifruit cultivars in China[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1645.
- [24] HYUN J, LEE J G, YANG K Y, et al. Postharvest fumigation of (E)-2-hexenal on kiwifruit (*Actinidia chinensis* cv. 'Haegeum') enhances resistance to *Botrytis cinerea*[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 187: 111854.
- [25] 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.
- [26] WAN H, KONG X, LIU Y, et al. Residue analysis and effect of preharvest forchlorfenuron (CPPU) application on quality formation of kiwifruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 195: 112144.
- [27] 刘纯友, 马美湖, 靳国锋, 等. 角鲨烯及其生物活性研究进展[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(5): 147–156. [LIU Chunyou, MA Meihu, JIN Guofeng, et al. Research process on squalene and bioactivities[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(5): 147–156.]
- [28] KANG C, ZHANG Y, ZHANG M, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC–MS/MS coupled with OPLS–DA[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132932.
- [29] 李扬, 李妍, 李栋, 等. 基于 ROAV 和嗅闻技术分析乳脂的关键风味化合物[J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 262–267. [LI Yang, LI Yan, LI Dong, et al. Analysis of key flavor compounds in dairy fat products using relative odor activity value and olfactometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 262–267.]
- [30] 王藤, 施娅楠, 李祥, 等. SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析腌制时间对大河乌猪火腿挥发性风味物质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 317–324. [WANG Teng, SHI Yanan, LI Xiang, et al. Analysis of the effect of curing time on the volatile flavor compounds of Dahe black pig ham by SPME-GC-MS and ROAV[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 317–324.]
- [31] GARCIA C V, QUEK S Y, STEVENSON R J, et al. Characterisation of bound volatile compounds of a low flavour kiwifruit species: *Actinidia eriantha* [J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(2): 655–661.
- [32] 田林平, 张琪, 李瑞, 等. 正丁醇处理对‘粉红女士’苹果贮藏期间挥发性物质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 337–345. [TIAN Linping, ZHANG Qi, LI Rui, et al. Effects of n-butanol treatment on volatile compounds of 'Pink Lady' apple during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(18): 337–345.]
- [33] 黄宇杏, 方炜聪, 徐纯伟, 等. GC-MS-O 结合 OAV 鉴定花生油特征香气成分[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(4): 278–288. [HUANG Yuxing, FANG Weicong, XU Chunwei, et al. Identification of characteristic aroma components in peanut oil by GC-MS-O combined with OAV[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(4): 278–288.]
- [34] ZHANG C Y, ZHANG Q, ZHONG C H, et al. Analysis of volatile compounds responsible for kiwifruit aroma by desiccated headspace gas chromatography–mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2016, 1440: 255–259.
- [35] YI J, KEBEDE B T, GRAUWET T, et al. A multivariate approach into physicochemical, biochemical and aromatic quality changes of purée based on Hayward kiwifruit during the final phase of ripening[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 117: 206–216.
- [36] 兰天, 赵沁雨, 王家琪, 等. 益生菌发酵猕猴桃果汁的贮藏特性及货架期预测[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 301–308. [LAN Tian, ZHAO Qinyu, WANG Jiaqi, et al. Storage characteristics and shelf-life prediction of probiotic fermented kiwifruit juice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 301–308.]

- [37] 靳政时, 牛犇, 刘瑞玲, 等. 干燥方式对猕猴桃果干品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 62-71. [JIN Zhengshi, NIU Ben, LIU Ruiling, et al. Effects of drying methods on the quality of dried kiwifruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 62-71.]
- [38] 王丽, 李雪, 刘光宪, 等. 芦笋猕猴桃复合果酒发酵过程中挥发性香气物质的变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 242-250. [WANG Li, LI Xue, LIU Guangxian, et al. Analysis of changes of volatile aroma compounds in asparagus kiwifruit wine during fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 242-250.]
- [39] 蒋小锋, 李云, 王彦平, 等. 基于 ROAV 法分析木瓜蛋白酶对马肉挥发性风味物质的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41(8): 201-205. [JIANG Xiaofeng, LI Yun, WANG Yanping, et al. Effect of papain on volatile flavor compounds in horse meat based on ROAV[J]. China Brewing, 2022, 41(8): 201-205.]
- [40] CORALIA V G, RALPH J S, ROSS G A, et al. Changes in the bound aroma profiles of 'Hayward' and 'Hort16A' kiwifruit (*Actinidia* spp.) during ripening and GC-olfactometry analysis[J]. Food Chemistry, 2013, 137: 45-54.
- [41] FARNETI B, KHOMENKO I, CAPPELLIN L, et al. Dynamic volatile organic compound fingerprinting of apple fruit during processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 21-28.
- [42] 薛友林, 于弘骏, 张鹏, 等. 不同处理条件的蓝莓货架品质比较分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 113-121, 309. [XUE Youlin, YU Hongtao, ZHANG Peng, et al. Comparison of shelf quality of different treatments on the blueberries[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 113-121, 309.]