

田甜, 封碧红, 宁明岸, 等. 两种樱桃番茄冷藏后风味品质分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 294–302. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120195

TIAN Tian, FENG Bihong, NING Ming'an, et al. Analysis of Flavor Quality of Two Cherry Tomatoes After Refrigeration[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 294–302. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120195

· 贮运保鲜 ·

两种樱桃番茄冷藏后风味品质分析

田 甜^{1,2}, 封碧红², 宁明岸³, 史君彦¹, 高丽朴¹, 左进华¹, 王 清^{1,*}

(1.北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 农业农村部蔬菜产后处理重点实验室,
果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 北京 100097;

2.广西大学农学院, 广西南宁 530004;

3.广西生态工程职业技术学院, 广西柳州 545000)

摘 要:为探究‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄冷藏中挥发性风味物质种类及相对含量差异, 采用电子鼻和顶空固相微萃取–气质联用法分析 4 ℃ 冷藏 16 d 后樱桃番茄 (‘千禧’和‘吉甜一号’) 风味品质的变化。结果表明: 电子鼻分析结果显示两种樱桃番茄冷藏前后发生明显变化的挥发性物质是无机硫化物、氮氧化合物和芳香物质, 采用 HS-SPME-GC-MS 技术共检测出 93 种挥发性物质, 包括 27 种醛类物质、23 种醇类物质、4 种酯类物质、11 种酮类物质、3 种呋喃类物质、9 种烷烃类物质、12 种烯烃类物质和 4 种其他物质。与 0 d 相比, ‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏后总挥发性物质相对含量分别降低了 7.08% 和 3.68%。两种樱桃番茄的主要挥发性物质己醛和反-2-己烯醛相对含量在冷藏后下降, 反式-2-戊烯醛、庚醛、1-戊醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮和 1-戊烯-3-酮等经冷藏后相对含量均增加。与‘千禧’相比, ‘吉甜一号’经冷藏后可以保留较高的醛类、酯类和酮类等樱桃番茄主要挥发性物质含量, 故‘吉甜一号’更利于采后储运和低温冷藏, 可为高品质樱桃番茄采后储运技术提供理论依据。

关键词:樱桃番茄, 电子鼻, 顶空固相微萃取–气质联用法, 风味品质

中图分类号: TS205.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0294-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120195

本文网刊:



Analysis of Flavor Quality of Two Cherry Tomatoes After Refrigeration

TIAN Tian^{1,2}, FENG Bihong², NING Ming'an³, SHI Junyan¹, GAO Lipu¹, ZUO Jinhua¹, WANG Qing^{1,*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Food Nutrition, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Key Laboratory of Vegetable Post-production Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Key Laboratory of Fruit, Vegetable and Agricultural Products Preservation and Processing, Beijing 100097, China;

2. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Guangxi Ecological Engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545000, China)

Abstract: To investigate the differences in the types and relative contents of refrigerated volatile flavor substances between 'Chitose' and 'Ji Tian No.1' cherry tomatoes, the effect of cold storage at 4 ℃ for 16 d on the flavor quality of cherry tomatoes ('Chitose' and 'Ji Tian No.1') was analyzed by using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography. The results showed that electronic nose analysis results displayed, the volatile substances that undergo significant changes before and after refrigeration in two cherry tomatoes were inorganic sulfides, nitrogen oxides, and aromatic substances, a total of 93 volatile substances were detected by HS-SPME-GC-MS technique, including 27 aldehydes, 23 alcohols, 4 esters, 11 ketones, 3 furans, 9 alkanes, 12 olefins and 4 other substances. Compared to 0 d, the

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设专项 (20210402); 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-23); 北京市农林科学院协同创新中心建设 (KJCX201915); 国家自然科学基金 (31960618)。

作者简介: 田甜 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏保鲜, E-mail: 2324403542@qq.com。

* 通信作者: 王清 (1979-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: wangqing@iapn.org.cn。

relative content of total volatile substances in 'Chitose' and 'Ji Tian No.1' after cold storage decreased by 7.08% and 3.68% respectively. The relative content of the main volatile compounds hexanal and trans-2-hexenal in two cherry tomatoes decreased after refrigeration, the relative content of trans 2-pentenal, heptanal, 1-pentanol, 6-methyl-5-hepten-2-one, and 1-penten-3-one increased after refrigeration. Compared with 'Chitose', 'Ji Tian No.1' could retain higher contents of main volatile substances of cherry tomato such as aldehydes, esters and ketones after cold storage. Therefore, 'Ji Tian No.1' was more suitable for post-harvest storage and transportation and low-temperature refrigeration, which would provide a theoretical basis for high-quality cherry tomato post-harvest storage and transportation technology.

Key words: cherry tomato; electronic nose; headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; flavor quality

樱桃番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)又称圣女果、小番茄,是茄科番茄属一年生草本植物,其果实表面色泽艳丽,口味酸甜清新,富含多种维生素、番茄红素和矿物质等,深受消费者喜爱^[1]。随着人们生活水平不断提高,樱桃番茄的需求量不断增加,人们对其口感风味的要求也更高。然而樱桃番茄常温下不耐储运,易腐烂变质,导致其品质和口感风味产生变化^[2]。低温贮藏是一种有效维持樱桃番茄品质的方法,可延长樱桃番茄保鲜期,但与常温贮藏相比会显著降低番茄中主要挥发性物质的含量,影响口感和风味^[3-4]。挥发性物质是决定樱桃番茄果实特殊风味形成的重要因素之一^[5]。‘千禧’樱桃番茄果型小而圆,形状似樱桃,质量好,含糖量和维生素 C 含量远高于一般番茄^[6]。‘吉甜一号’樱桃番茄由于其富含可溶性固形物、维生素 C、可滴定酸和可溶性糖含量而被重点关注^[7-9]。

目前,关于番茄挥发性风味物质的研究有较多报道。常培培等^[10]测定 5 个不同果色樱桃番茄品种新鲜果实,发现成熟果实挥发性物质主要成分为酮类、醛类、酯类和醇类。Li 等^[11]用溶剂辅助风味蒸发和固相微萃取提取了 73 种化合物,其中己醛、3-己烯醛、(E)-2-己烯醛、1-戊烯-3-酮和愈创木酚是番茄果实中的活性香气化合物。顶空固相微萃取-气质联用法(Headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)检测可得到样品中各挥发性成分的定性、定量结果,已在甜瓜^[12]、猕猴桃^[13]、柚子^[14]和芒果^[15]等果蔬的挥发性特征测定和分类研究中应用。HS-SPME-GC-MS 分析结果有利于对电子鼻分析结果进行解释,两者结合可同时从宏观和微观上对样品香气进行阐述和分析^[16]。低温冷藏会导致风味品质下降,此前已有研究揭示了樱桃番茄的主要风味物质^[17],但对于樱桃番茄在冷藏期间的风味变化的报道较少。

本研究采用电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 相结合的方法,通过对两种樱桃番茄在冷藏期间的风味变化的研究,探索其品种间的差异,为高品质樱桃番茄采后储运技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘千禧’、‘吉甜一号’均在 2021 年 8 月采于北

京天安公司小汤山基地,挑选果实完整、无机械损伤、无病虫害、成熟度一致、大小均匀的红熟期樱桃番茄作为试验材料。将挑选好的两种樱桃番茄分别装入 0.03 mm 厚的聚乙烯膜中,置于 4 ℃ 下冷藏 16 d,分别于 0 和 16 d 进行取样^[9],每次取样量为 500 g,每组设置 3 个重复;甲醇、乙腈 色谱纯,安徽天地高纯溶剂公司;超纯水 Milli-Q 纯水器进行纯化;0.03 mm PE 膜 北京华盾雪花有限公司;聚二甲基硅氧烷二乙烯基苯纤维、PTFE-硅胶隔膜 美国 Supelco 公司。

PEN3 型便携式电子鼻 德国 Airsense 公司; QP2010 plus GC-MS 设备 日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 电子鼻检测 采用 Yan 等^[18]方法稍加修改,将两种樱桃番茄样品(500 g)破碎处理分别置于密闭容器中,在 4 ℃ 条件下放置 1 h 后,用顶空吸气法进行采集。测定条件为:传感器清洗时间 80 s,自动调零时间 5 s,样品准备时间 5 s,样品测试时间 120 s,传感器流速 100 mL/min,实验中发现传感器响应值在 110 s 趋于稳定,故选择 112、113、114 s 时响应值的平均值用于数据分析。测量前后,均对传感器进行清洗和标准化。每个处理组重复测定 3 次。PEN3 型便携式电子鼻传感器性能见表 1。

表 1 PEN3 型便携式电子鼻标准传感器阵列与性能
Table 1 Standard sensor arrays and performance of electronic nose PEN3

阵列信号	传感器名称	性能描述
1	W1C	对芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化合物很灵敏,灵敏度大
3	W3C	对氨水和芳香成分(苯等)灵敏
4	W6S	对氢气有选择性
5	W5C	对烷烃(丙烷等)和芳香成分灵敏
6	W1S	对烷烃灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇类灵敏
9	W2W	对芳香成分和有机硫化物灵敏
10	W3S	对烷烃(甲烷等)灵敏

1.2.2 HS-SPME-GC-MS 检测 参考 Nzekoue 等^[19]的方法,将新鲜的樱桃番茄样品(8.0 g)与 1.2.1 一致破碎处理置于带有 1.5 g NaCl 的 PTFE-硅胶隔膜的

20 mL 密封小瓶中。将样品平衡 20 min 后,使用 65 μm 聚二甲基硅氧烷二乙烯基苯纤维在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下萃取 40 min。萃取后的样品从小瓶中取出并插入 GC-MS 设备的进样口(样品在 250 $^{\circ}\text{C}$ 下,不分流进样),使挥发性物质在 DB-WAX 柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)中分离。分析过程中氦气用作载气,流速为 1.0 mL/min。GC 的升温程序如下:40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 3 min,以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 120 $^{\circ}\text{C}$,然后以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 200 $^{\circ}\text{C}$ 后保持 5 min。传输线和离子源温度分别保持在 150 和 200 $^{\circ}\text{C}$ 。在电离源(EI)模式下使用 m/z 中的全扫描模式进行定性分析范围为 45~550 amu。将实验质谱与 NIST11 质谱库进行匹配,确定挥发性物质种类。根据峰面积百分比计算每种已鉴定挥发性物质的相对含量,最后进行归一化处理。

1.3 数据处理

利用仪器自带的 Winmuster 分析软件,对数据进行主成分分析(Principal component analysis, PCA)。利用 Excel 2010 统计分析软件进行数据整理,Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 樱桃番茄电子鼻检测结果分析

2.1.1 雷达图分析 图 1 为利用电子鼻的不同传感器所探测到的不同类型挥发物质的特征性雷达图,其中检测点距离圆心越远响应值越大,反之则越小^[20]。由图 1 可知,‘千禧’樱桃番茄在冷藏前后传感器 W1W 和 W5S 的响应值均高于‘吉甜一号’冷藏前后,说明‘千禧’冷藏前后能够检测出较多的无机硫化物和氮氧化合物等挥发性物质。而 W2W 传感器的响应值在两种樱桃番茄冷藏后均明显增加,说明冷藏后能够检测出较多的有机硫化物等挥发性物质,这可能是由于冷藏处理和贮藏期延长影响樱桃番茄中的硫化物等挥发性物质的含量,进而影响樱桃番茄的整体风味品质^[21]。

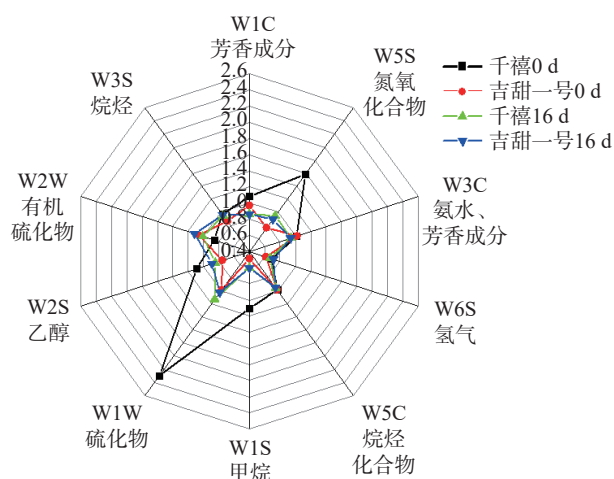


图 1 两种樱桃番茄冷藏前后电子鼻雷达图分析

Fig.1 Analysis of electronic nose radar chart before and after storage of two kinds of cherry tomatoes

2.1.2 主成分分析(PCA) PCA 是指将多个结果变量通过线性变换的方式,达到降维的目的,它能够反应因子和各个变量的相关程度,从而观察和比较不同样品中的主成分分析值在二维空间的分布差异^[22]。图 2 为两种樱桃番茄冷藏前后的 PCA 图。由图 2 可知,主成分 1 的贡献率为 98.88%,主成分 2 的贡献率为 0.89%,两种主成分的总贡献率为 99.77%,所受干扰较少,表明两个主成分能代表样品的主要信息特征^[23],反映两种樱桃番茄在冷藏过程中挥发性物质的变化。图 2 中 0 d 与冷藏 16 d 后的‘千禧’和‘吉甜一号’均无重叠区域,且均相距较远(距离越远表明变化越明显),这说明两种樱桃番茄在冷藏后的挥发性物质成分均发生显著变化,其中与‘吉甜一号’相比,‘千禧’的变化更为明显,因此冷藏对‘千禧’番茄风味品质的影响较大。

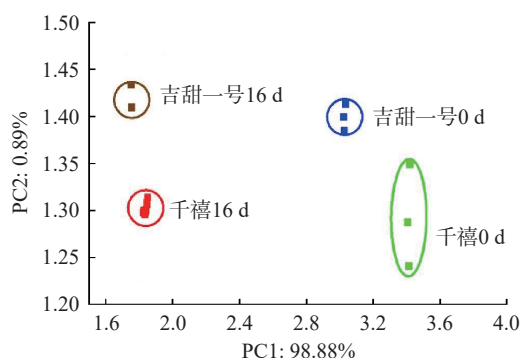


图 2 两种樱桃番茄冷藏前后主成分分析(PCA)

Fig.2 Principal component analysis (PCA) of two kinds of cherry tomatoes before and after refrigeration

2.1.3 负荷加载分析(LA) 10 个传感器所感应物质如表 1 所示。不同传感器在负荷加载分析(Loadings analysis, LA)图中的位置可以反映传感器对于样品挥发性物质贡献率的大小。距离原点越远,表示此传感器贡献率越大^[24]。由图 3 可知, W1W 对第一主成分的贡献率最大,其次是 W5S,说明第一主成分主要反应的是无机硫化物类,这也与雷达图分析的结果相呼应。传感器 W2W 对第二主成分的贡献率较大,说明第二主成分主要反应的是有机硫化物。由此可见,

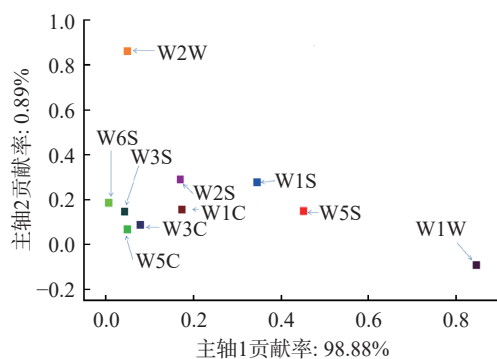


图 3 两种樱桃番茄冷藏前后电子鼻 LA 分析

Fig.3 Analysis of electronic nose LA before and after storage of two kinds of cherry tomatoes

传感器 W1W、W5S 和 W2W 的识别和分析能力较强。

2.2 樱桃番茄 HS-SPME-GC-MS 检测结果

由图 4 两种樱桃番茄贮藏前后挥发性成分总离子流图和表 2 所示,得出‘千禧’0 d 挥发性物质 53 种,‘吉甜一号’0 d 挥发性物质 55 种,且两个樱桃番茄 0 d 的挥发性物质主要为醛类、醇类、酯类和酮类。冷藏 16 d 后,在‘千禧’樱桃番茄中共检测出

50 种挥发性物质,在‘吉甜一号’樱桃番茄中共检测出 51 种挥发性物质,由此可知,这些挥发性物质种类的差异,可能是造成两种樱桃番茄风味品质差异的主要原因。此外,与 0 d 相比,‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏后总挥发性物质相对含量分别降低了 7.08% 和 3.68%(图 5),且两种樱桃番茄冷藏前后差异较大的挥发性物质主要为醛类、醇类、酯类和酮类。

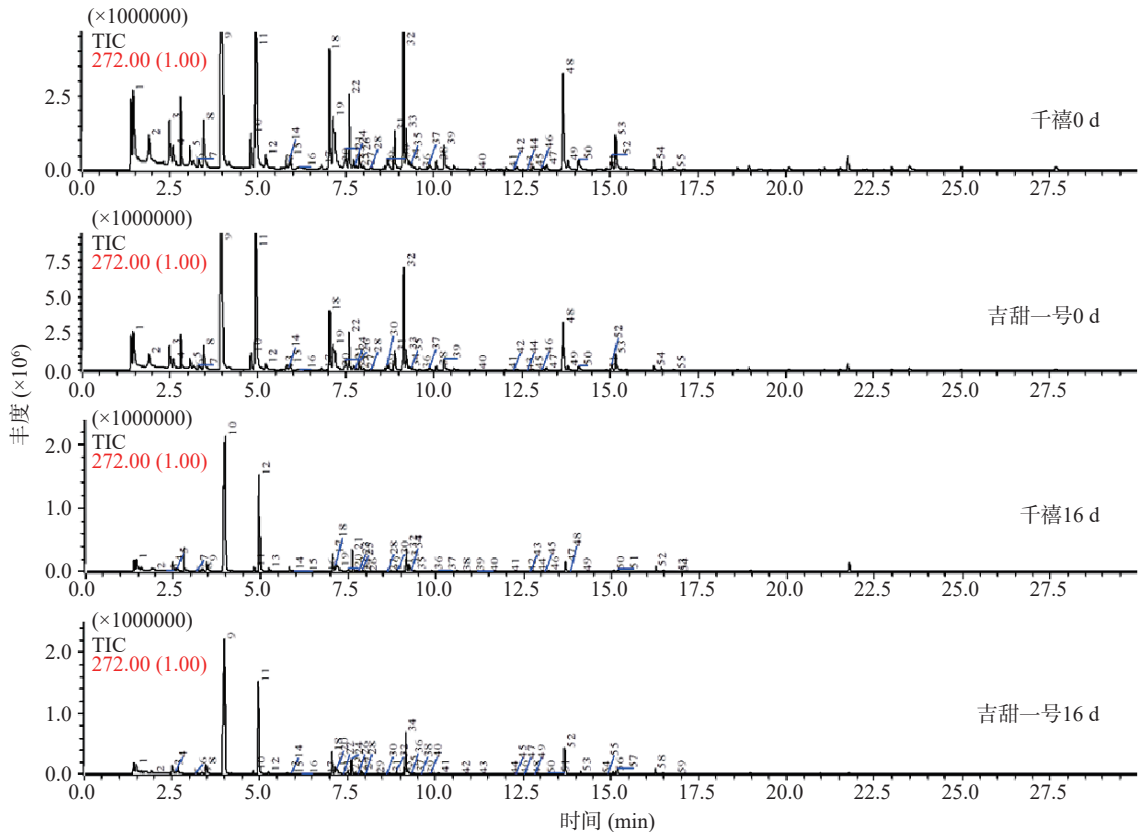


图 4 两种樱桃番茄冷藏前后挥发性成分总离子流图
Fig.4 Total ion current chromatogram from GC-MS of before and after storage of two kinds of cherry tomatoes

表 2 两种樱桃番茄冷藏前后挥发性物质类别及种类
Table 2 Classes and types of volatile substances before and after refrigeration for two cherry tomatoes

类别	种类			
	千禧0 d	吉甜一号0 d	千禧16 d	吉甜一号16 d
醛类	18	22	21	20
醇类	11	12	11	12
酯类	4	3	1	2
酮类	7	5	7	6
呋喃类	1	1	3	2
烷烃类	4	7	3	2
烯烃类	6	4	3	5
其他	2	1	1	2
合计	53	55	50	51

2.2.1 醛类物质 在冷藏前后的‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄中共检测出 27 种醛类物质(表 3),其中相同挥发性物质成分有 15 种。0 d 时‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄中醛类物质分别检测到 18 种和 22 种。

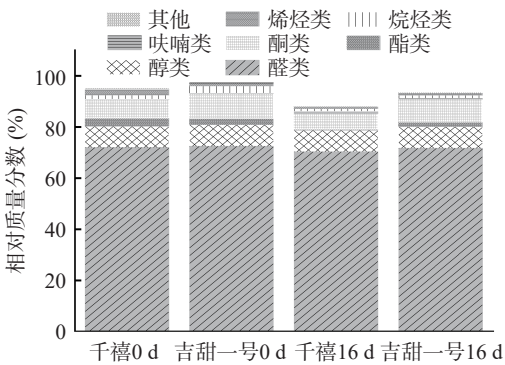


图 5 两种樱桃番茄冷藏前后挥发性物质分析比较结果
Fig.5 Analysis and comparison results of volatile substances of two cherry tomatoes before and after refrigeration

冷藏 16 d 后两种樱桃番茄醛类物质分别检测到 21 种和 20 种,‘千禧’和‘吉甜一号’0 d 醛类挥发性物质相对含量分别为 72.03% 和 72.47%,其中‘千禧’冷藏后醛类挥发性物质相对含量下降了 1.65%,而‘吉甜一号’冷藏后醛类物质相对含量仅下降了 0.77%。

表 3 两种樱桃番茄冷藏前后挥发性物质及相对含量

Table 3 Volatile compounds and relative contents of two cherry tomatoes before and after cold storage

挥发物质成分		相对含量(%)				
		分子式	千禧 0 d	吉甜一号 0 d	千禧 16 d	吉甜一号 16 d
醛类	Aldehyde		72.03	72.47	70.38	71.7
戊醛	Valeraldehyde	C ₅ H ₁₀ O	0.78	1.71	2.05	0.74
反式-2-甲基-2-丁烯醛	Tiglic aldehyde	C ₅ H ₈ O	—	0.25	—	—
反式-2-戊烯醛	(E)-2-Pentenal	C ₅ H ₈ O	0.34	0.22	0.72	0.69
己醛	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	39.32	40.85	32.29	35.63
反-2-己烯醛	Trans-2-hexenal	C ₆ H ₁₀ O	19.99	19.93	17.46	18.96
庚醛	Heptanal	C ₇ H ₁₄ O	0.15	0.14	0.2	0.19
反式-2-戊烯醛	(E)-2-Pentenal	C ₅ H ₈ O	3.11	2.52	3.75	3.17
聚丙烯醛	Polyacrylic aldehyde	C ₄ H ₆ O ₂	—	—	—	1.76
苯甲醛	Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	—	—	1.6	1.89
辛醛	Octanal	C ₈ H ₁₆ O	0.1	0.1	0.18	0.11
(E,E)-2,4-己二烯醛	2,4-Hexadienal	C ₆ H ₈ O	0.08	0.39	0.08	—
苯乙醛	Phenylacetaldehyde	C ₈ H ₈ O	—	1.02	—	—
反式-2-辛烯醛	(2E)-2-Octenal	C ₈ H ₁₄ O	4.6	2.15	6.18	3.48
壬醛	Nonanal	C ₉ H ₁₈ O	0.26	0.26	0.36	0.35
2,4-壬二烯醛	Trans,trans-2,4-nonadienal	C ₉ H ₁₄ O	—	—	—	0.06
反式-2-壬烯醛	(2E)-2-Nonenal	C ₉ H ₁₆ O	0.05	0.07	0.1	0.08
癸醛	Decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	0.06	0.09	0.1	0.11
3-羟基-β-环柠檬醛	3-Hydroxy-β-cyclocitral	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	—	—	0.18	—
3-甲基-3-(4-甲基-3-戊烯基)环氧乙醛	3-Methyl-3-(4-methyl-3-pentenyl) acetaldehyde oxide	C ₁₆ H ₂₂ O ₃	0.04	0.04	0.06	0.07
BETA-环柠檬醛	β-Cyclocitral	C ₁₀ H ₁₆ O	0.04	0.04	0.09	0.08
2-甲基-2-戊烯醛	2-Methyl-2-pentenal	C ₆ H ₁₀ O	—	0.09	—	—
反式-2-癸烯醛	(2E)-2-Decenal	C ₁₀ H ₁₈ O	—	0.1	—	0.06
反式柠檬醛	Trans Citral	C ₁₀ H ₁₆ O	0.16	0.26	0.32	0.35
反,反-2,4-癸二烯醛	(2E,4E)-Deca-2,4-dienal	C ₁₀ H ₁₆ O	2.42	1.33	2.43	3.32
2,4-十一碳二烯醛	2,4-Undecadienal	C ₁₁ H ₁₈ O	0.41	—	0.7	—
2-十一烯醛	Undecenal	C ₁₁ H ₂₀ O	0.12	0.06	0.06	—
顺-4-庚烯醛	Cis-4-heptenal	C ₇ H ₁₂ O	—	0.85	1.38	0.6
醇类	Alcohols		8.29	8.41	8.38	8.43
甲醇	Methanol	CH ₄ O	2.93	2.7	3.04	3.12
2-甲基丁醇	2-Methylbutan-1-ol	C ₅ H ₁₂ O	—	—	—	0.04
异戊醇	3-Methyl-1-butanol	C ₅ H ₁₂ O	—	0.07	—	—
2-甲基癸醇	2-Methyldecan-1-al	C ₁₁ H ₂₂ O	0.61	0.55	—	0.1
1-戊醇	Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	1.7	1	2	2.11
正己醇	1-Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	0.49	0.52	0.54	0.68
1-庚醇	Heptan-1-ol	C ₇ H ₁₆ O	0.36	—	0.4	—
2-丙基-1-戊醇	2-Propylpentan-1-ol	C ₈ H ₁₈ O	—	—	0.09	—
1-辛烯-3-醇	Oct-1-en-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	0.74	0.96	0.76	1.08
(E)-2-甲基-2,6-庚二烯-1-醇	2-Methylhepta-2,6-dien-1-ol	C ₈ H ₁₄ O	0.33	—	—	—
6-甲基-5-庚烯-2-醇	5-Hepten-2-ol,6-methyl-	C ₈ H ₁₆ O	—	0.15	—	0.21
2,6-二甲基-5-庚烯-2-醇	2,6-Dimethylhept-5-en-2-ol	C ₉ H ₁₈ O	—	—	0.09	—
1-戊烯-3-醇	1-Pentene-3-ol	C ₅ H ₁₀ O	—	—	0.27	—
反式-2-癸烯醇	(E)-2-Decen-1-ol	C ₁₀ H ₂₀ O	—	0.31	—	—
5-癸烯醇	Trans-5-decen-1-ol	C ₁₀ H ₂₀ O	0.27	—	—	—
环癸醇	Cyclodecanol	C ₁₀ H ₂₀ O	—	—	0.32	0.33
1-辛醇	1-Octanol	C ₈ H ₁₈ O	0.3	0.35	0.41	0.44
2,4-二甲基-2,6-庚二烯-1-醇	2,4-Dimethyl-2,6-heptadien-1-ol	C ₉ H ₁₆ O	0.21	0.17	—	—
2,4-二甲基环己醇	Cyclohexanol, 2,4-Dimethyl-	C ₈ H ₁₆ O	—	—	—	0.13
3,7-二甲基-1-辛醇	3,7-Dimethyl-1-octanol	C ₁₀ H ₂₂ O	—	0.31	—	—
苯乙醇	Phenylethanol	C ₈ H ₁₀ O	0.35	1.32	—	—

续表 3

挥发物质成分			相对含量(%)			
			分子式	千禧 0 d	吉甜一号 0 d	千禧 16 d
2-环戊烷乙醇	2-Cyclopentane ethanol	C ₇ H ₁₄ O	—	—	0.46	0.16
4-(2,6,6-三甲基环己烯基-1-基)-3-丁烯-2-醇	4-(2,6,6-Trimethylcyclohexenyl-1-yl)-3-butene-2-ol	C ₁₃ H ₂₂ O	—	—	—	0.03
酯类	Esters		3.19	2.48	0.37	1.81
反-2-戊烯酸甲酯	Methyl trans-2-pentenoate	C ₆ H ₁₀ O ₂	0.53	0.55	0.37	—
环己烷羧酸异丙酯	Isopropyl Cyclohexanecarboxylate	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1.12	—	—	—
2-氧代丁酸甲酯	Methyl-2-oxobutanoate	C ₅ H ₈ O ₃	1.29	1.74	—	1.71
4-苯乙基苯甲酸乙酯	Ethyl 4-biphenylcarboxylate	C ₁₅ H ₁₄ O ₂	0.25	0.19	—	0.1
酮类	Ketones		7.28	9.7	6.13	8.96
1-戊烯-3-酮	1-Pentene-3-one	C ₅ H ₈ O	1.67	2.09	1.99	2.19
5-甲基-3-己烯-2-酮	5-Methyl-3-hexen-2-one	C ₇ H ₁₂ O	3.27	—	—	—
5-辛基呋喃-2(5H)-酮	5-Octylfuran-2(5H)-one	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	—	4.08	1.57	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮	6-Methylhept-5-en-2-one	C ₈ H ₁₄ O	1.67	2.36	1.85	2.57
3,3,6-三甲基-1,5-庚二烯-4-酮	3,3,6-Trimethylhepta-1,5-dien-4-one	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	—	0.36
7-氧杂二环[2.2.1]庚-5-烯-2-酮	7-Oxabicyclo[2.2.1]hept-5-ene-2-one	C ₈ H ₆ O ₄	0.13	—	—	—
1,6-二氧杂螺[4.4]壬烷-2,7-二酮	1,6-Dioxa spiro[4.4]nonane-2,7-dione	C ₇ H ₈ O ₄	—	—	0.07	—
2,3,4,5-四甲基-2-环戊烯酮	2,3,4,5-Tetramethyl-2-cyclopenten-1-one	C ₉ H ₁₄ O	—	—	—	0.06
1-环己基-2-苯基-1-乙酮	1-Cyclohexyl-2-phenyl-1-ethanone	C ₁₄ H ₁₈ O	0.09	—	0.1	—
香叶基丙酮	Geranylacetone	C ₁₃ H ₂₂ O	0.31	0.8	0.9	1.03
3-甲基-4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	3-Buten-2-one,3-methyl-4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	C ₁₄ H ₂₂ O	0.05	0.06	0.12	0.09
呋喃类	Furan		0.21	0.26	0.98	0.44
2-甲基呋喃	2-Methylfuran	C ₅ H ₆ O	—	—	0.3	0.2
2-戊基呋喃	2-Amylfuran	C ₉ H ₁₄ O	0.21	0.26	0.42	0.24
2,3'-双呋喃, 八氢-	2,3'-Difuran, octahydrogen-	C ₇ H ₁₃ NO	—	—	0.26	—
烷烃类	Alkanes		1.49	2.78	0.95	1.13
己烷	Hexanes	C ₆ H ₁₄	0.95	2.16	—	—
1-硝基戊烷	1-Nitropentane	C ₅ H ₁₁ NO ₂	0.35	—	—	—
(2S)-2-戊基环氧乙烷	(S)-(-)-1,2-Epoxyoctane	C ₇ H ₁₄ O	—	0.21	0.14	0.14
三甲基亚甲基-环丙烷	Trimethylmethylene cyclopropane	C ₇ H ₁₄ O ₂ Si	—	—	—	—
1-乙基-1-甲基环戊烷	1-Ethyl-1-methylcyclopentane	C ₈ H ₁₆	0.13	0.06	0.69	0.99
五甲基环丙烷	Pentamethylcyclopropane	C ₄ H ₇ C ₁	—	0.08	—	—
3-甲基-4-亚甲基己烷	3-Methyl-4-methylene hexane	C ₁₀ H ₁₆ O	0.06	0.05	0.12	—
1-甲基-4-亚甲基-环己烷	1-Methyl-4-methylene-cyclohexane	C ₁₀ H ₁₆ O	—	0.16	—	—
1-甲基-1-(2-甲基-2-丙烯基)-环戊烷	1-Methyl-1-(2-methyl-2-propenyl)-cyclopentane	C ₈ H ₁₆	—	0.06	—	—
烯烃类	Alkenes		2.38	1.14	0.896	0.99
4-甲基-1,4-己二烯	4-Methyl-1,4-hexadiene	C ₇ H ₁₀ O	0.13	—	—	—
3-乙基-2-甲基-1-戊烯	1-Pentene,3-ethyl-2-methyl-	C ₈ H ₁₆	—	—	—	0.05
1-乙基-1,4-环己二烯	1,4-Cyclohexadiene,1-ethyl-	C ₈ H ₁₂	0.54	0.7	—	0.44
柠檬烯	Limonene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	—	0.04
3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	3-Ethyl-2-methyl-1,3-hexadiene	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.12	0.06	0.14	0.08
1,5-庚二烯, 2,3,6-三甲基-	1,5-Heptadiene, 2,3,6-Trimethyl-	C ₈ H ₁₄	—	0.05	—	—
2-甲基-6-亚甲基-2-辛烯	2-Methyl-6-methylene-2-octene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	—	0.38
反式-1,6-辛二烯, 3,5-二甲基	Trans-1,6-Octadiene, 3,5-dimethyl	C ₉ H ₁₆ O	—	—	—	—
3,5-辛二烯, 2,7-二甲基-, 反, 顺-	3,5-Octadiene, 2,7-dimethyl-trans, cis-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	—	—	0.686	—
反-4-壬烯	Trans-4-nonene	C ₉ H ₁₈	0.05	—	0.07	—
2,4-壬二烯, 反, 反-	2,4-Nondiene, trans, trans-	C ₉ H ₁₆	0.43	—	—	—
2,4-十二碳二烯, 反, 顺-	2,4-Dodecadiene, trans, cis-	C ₁₂ H ₂₀ O	1.11	0.33	—	—
其他	Other		0.37	0.02	0.07	0.12
2-甲基-3,4-二氢-2H-噻吩并[2,3-c][1,2]噻嗪-4-胺 1,1-二氧化物	2-Methyl-1,1-dioxo-3,4-dihydrothieno[2,3-c]thiazin-4-amine	C ₇ H ₁₀ N ₂ O ₂ S ₂	—	—	—	0.07
3,4-二氢-2H-吡喃	3,4-Dihydro-2h-pyran	C ₅ H ₈ O	0.33	—	—	—
十三炔	Tridecyne	C ₁₃ H ₂₄	—	—	0.07	0.05

续表 3

挥发物质成分		相对含量(%)				
		分子式	千禧 0 d	吉甜一号 0 d	千禧 16 d	吉甜一号 16 d
1,3-环辛二烯	1,3-Cyclooctadiene	C ₈ H ₁₂	0.04	0.02	—	—
总计	Total		95.24	97.26	88.16	93.58

注: “—”表示未检测出。

其中, 己醛在两种樱桃番茄冷藏前后的相对含量均最高, 其次是反-2-己烯醛。‘千禧’樱桃番茄冷藏后己醛和反-2-己烯醛相对含量分别下降了 7.03% 和 2.53%, 而‘吉甜一号’分别下降了 5.22% 和 0.97%。这说明‘吉甜一号’樱桃番茄在冷藏过程中可较好的维持果实中己醛和反-2-己烯醛等醛类挥发性物质相对含量和风味。

2.2.2 醇类物质 在冷藏前后的‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄共检测出 23 种醇类物质(表 3), 其中相同挥发性物质成分有 5 种。‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄在 0 d 和冷藏 16 d 后醇类物质分别检测到 11 种和 12 种, 0 d 时‘千禧’和‘吉甜一号’醇类挥发性物质相对含量分别为 8.29% 和 8.41%, 冷藏 16 d 后, ‘千禧’醇类挥发性物质相对含量为 8.38%, 吉甜一号’醇类挥发性物质相对含量为 8.43%, 较‘千禧’高 0.05%。其中 1-戊醇在两种樱桃番茄冷藏前后的相对含量均最高, ‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏后 1-戊醇相对含量分别上升 0.3% 和 1.11%。这表明‘吉甜一号’在冷藏过程中可较好的维持果实中 1-戊醇等醇类挥发性物质的相对含量和风味。

2.2.3 酯类物质 在冷藏前后的‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄共检测出 4 种酯类物质(表 3)。(‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄 0 d 酯类物质分别检测到 4 种和 3 种。冷藏 16 d 后两种樱桃番茄酯类物质分别检测到 1 种和 2 种, ‘千禧’和‘吉甜一号’0 d 酯类挥发性物质相对含量分别为 3.19% 和 2.48%, 其中‘千禧’冷藏后酯类挥发性物质相对含量下降了 2.82%, ‘吉甜一号’冷藏后酯类物质相对含量下降了 0.67%, 且两种樱桃番茄在冷藏后部分挥发性物质未被检测到。尽管在樱桃番茄中检测到的酯类物质的种类和相对含量较少, 但酯类物质是除醛类和醇类物质之外的樱桃番茄风味形成的三大挥发性物质之一, 对番茄风味形成的影响较大^[25], 且‘吉甜一号’樱桃番茄在冷藏过程中可较好的维持果实中酯类挥发性物质种类和相对含量。

2.2.4 酮类物质 在冷藏前后的‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄共检测出 11 种酮类物质(表 3), 其中相同挥发性物质成分有 4 种。‘千禧’和‘吉甜一号’樱桃番茄 0 d 酮类物质分别检测到 7 种和 5 种。冷藏 16 d 后两种樱桃番茄酮类物质分别检测到 7 种和 6 种, ‘千禧’和‘吉甜一号’0 d 酮类挥发性物质相对含量分别为 7.28% 和 9.7%, 且‘千禧’冷藏后酮类挥发性物

质相对含量下降了 1.15%, ‘吉甜一号’冷藏后酮类物质相对含量下降了 0.74%。6-甲基-5-庚烯-2-酮在两种樱桃番茄冷藏前后的相对含量均最高, 其次是 1-戊烯-3-酮。‘千禧’冷藏后 6-甲基-5-庚烯-2-酮和 1-戊烯-3-酮相对含量分别由 1.67% 和 1.67% 升高至 1.85% 和 1.99%, 而‘吉甜一号’樱桃番茄冷藏 16 d 后 6-甲基-5-庚烯-2-酮和 1-戊烯-3-酮相对含量分别由 2.36% 和 2.09% 升高至 2.57% 和 2.19%, 这表明‘吉甜一号’樱桃番茄在冷藏前后酮类挥发性物质含量均高于‘千禧’。

2.2.5 其他类物质 除检测到以上挥发性物质外, 在两种樱桃番茄冷藏前后还检测到呋喃类、烷烃类和烯炔类等挥发性物质, 且这些挥发性物质相对含量均无明显变化规律, 它们多是伴随各种加成或还原反应的产物或中间产物, 对番茄风味品质影响较小^[26]。

3 讨论与结论

风味是番茄果实的基本感官特征, 在消费者接受度方面起着重要作用^[27]。之前研究了在低温贮藏的条件下, ‘吉甜一号’外观品质优于‘千禧’, 更利于贮藏^[9]。本实验在此基础上进一步探究冷藏对两种樱桃番茄风味品质的影响, 通过电子鼻和 HS-SPME-GC-MS 在‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏前后共检测出 93 种挥发性物质, 包括醛类物质 27 种, 醇类物质 23 种, 酯类物质 4 种、酮类物质 11 种、呋喃类物质 3 种、烷烃类物质 9 种、烯炔类物质 12 种、其他类物质 4 种。其中在两个不同品种的樱桃番茄中共鉴定出 27 种挥发性物质, 且发现冷藏前后两种樱桃番茄风味品质均存在差异。常培培等^[10]在 5 个不同樱桃番茄品种中共检测到 81 种挥发性物质, 14 种共有成分。本研究结果进一步表明樱桃番茄品种不同, 会导致挥发性物质成分存在明显差异。

醛类物质赋予番茄绿叶清香味^[11], 已有研究证实了己醛、反-2-己烯醛、反式-2-戊烯醛和庚醛等是番茄的主要挥发性物质^[28], 本研究发现在‘千禧’和‘吉甜一号’中检测到的主要挥发性醛类物质为己醛、反-2-己烯醛、反式-2-戊烯醛和庚醛, 其中, 己醛在‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏前后的相对含量均最高, 其次是反-2-己烯醛, 且这两种香气成分相对含量在冷藏 16 d 后均下降, 表明番茄冷藏后醛类物质含量会降低, Zhang 等^[3]也研究表明己醛和反-2-己烯醛在番茄冷藏后含量会降低, 且‘吉甜一号’冷藏后醛类物质相对含量下降速度比‘千禧’慢, 这说明‘吉甜一号’可以较好的维持果实中的醛类挥发性物质含量。

醇类物质具有淡甜的果香,可以提升番茄的风味^[29]。两种樱桃番茄冷藏前后相对含量较高的醇类物质是 1-戊醇,是‘千禧’和‘吉甜一号’的主要挥发性物质,Viljanen 等^[30]也证实了 1-戊醇是番茄的主要挥发性物质。由表 3 可知,两种樱桃番茄中这种挥发性物质在冷藏后的相对含量均比冷藏前有不同程度的增加,这可能是因为随着成熟度的提高,番茄果实呼吸作用下产生了更多的醇类物质,导致两种樱桃番茄中醇类挥发性物质均不同程度升高^[31]。

尽管在樱桃番茄中检测到的酯类物质的相对含量较少,但酯类物质是除醛类和醇类物质之外的三大樱桃番茄风味形成物之一,对番茄风味提升有重要作用^[32-33]。‘千禧’和‘吉甜一号’中的酯类物质相对含量均在冷藏 16 d 后出现不同程度地减少,‘千禧’16 d 样品中仅检测到了相对含量为 0.37% 反式-2-戊烯酸乙酯,而‘吉甜 1 号’冷藏 16 d 样品中检测到的酯类物质有两种,相对含量也较高。且‘吉甜一号’冷藏后的酯类物质相对含量下降的速度比‘千禧’慢,表明‘吉甜一号’可以较好的维持果实中的酯类香气成分。

‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏前后相对含量较高的酮类物质有 6-甲基-5-庚烯-2-酮和 1-戊烯-3-酮,Selli 等^[34]也证实这两种挥发性物质可以给番茄带来芳香味。在两种樱桃番茄冷藏后 6-甲基-5-庚烯-2-酮的相对含量增加,可能是冷藏会影响参与将番茄红素或其前体转化的酶,导致其含量增加^[35]。Farneti 等^[36]也证实了 6-甲基-5-庚烯-2-酮在冷藏后相对含量会增加。且‘吉甜一号’冷藏后酮类物质相对含量下降的速度比‘千禧’慢,表明‘吉甜一号’可以较好地维持果实中的酮类挥发性物质,保持较好的风味品质。

综上,‘千禧’和‘吉甜一号’冷藏 16 d 前后挥发性物质和含量均有差异,冷藏会导致两种樱桃番茄风味品质下降。与‘千禧’相比,‘吉甜一号’可以更好的维持冷藏过程中樱桃番茄中的醛类、醇类、酮类等挥发性物质。因此,‘吉甜一号’更利于采后贮运和低温冷藏,在未来的研究中,可以通过转录组学和代谢组学联合分析番茄风味物质代谢调控途径,培育更加优良的番茄品种。

参考文献

- [1] SU L, XIE Y, HE Z, et al. Network response of two cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) cultivars to Cadmium stress as revealed by transcriptome analysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 222: 112473.
- [2] LI W, LIU Z, LI X, et al. Quality maintenance of 1-methylcyclopropene combined with titanium dioxide photocatalytic reaction on postharvest cherry tomatoes[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(5): e16500.
- [3] ZHANG B, TIEMAN D M, JIAO C, et al. Chilling-induced tomato flavor loss is associated with altered volatile synthesis and transient changes in DNA methylation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(44): 12580-12585.
- [4] BAIC M, WU C E, MA L L, et al. Transcriptomics and metabolomics analyses provide insights into postharvest ripening and senescence of tomato fruit under low temperature[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2021, 9(1).
- [5] FERNANDES I, LEÇA J M, AGUIAR R, et al. Influence of crop system fruit quality, carotenoids, fatty acids and phenolic compounds in cherry tomatoes[J]. *Agricultural Research*, 2021, 10(1): 56-65.
- [6] 宋晓雷. 千禧樱桃番茄品种特性及配套栽培技术[J]. 河南农业, 2012(19): 42. [SONG Xiaolei. Variety characteristics and supporting cultivation techniques of millennium cherry tomatoes[J]. *Henan Agriculture*, 2012(19): 42.]
- [7] 李佳璠, 宋梦圆, 许盟盟, 等. 不同有机肥处理对番茄生长、产量及品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(12): 173-180. [LI Jiafan, SONG Mengyuan, XU Mengmeng, et al. Effects of different organic fertilizer treatments on tomato growth, yield, and quality[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2022, 50(12): 173-180.]
- [8] 宋梦圆, 李佳璠, 许盟盟, 等. 中微量元素叶面肥处理对樱桃番茄生长、产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(6): 24-31. [SONG Mengyuan, LI Jiafan, XU Mengmeng, et al. Effects of foliar fertilization with medium and trace elements on the growth, yield, and quality of cherry tomatoes[J]. *North Horticulture*, 2022(6): 24-31.]
- [9] 姚萍, 蒋海峰, 刘瑶, 等. 不同处理对樱桃番茄贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(3): 8-15. [YAO Ping, JIANG Haifeng, LIU Yao, et al. Effects of different treatments on storage quality of cherry tomato[J]. *Preservation and Processing*, 2021, 21(3): 8-15.]
- [10] 常培培, 梁燕, 张静, 等. 5 种不同果色樱桃番茄品种果实挥发性物质及品质特性分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 215-221. [CHANG Peipei, LIANG Yan, ZHANG Jing, et al. Analysis of volatile substances and quality characteristics of five cherry tomato varieties with different fruit colors[J]. *Food Science*, 2014, 35(22): 215-221.]
- [11] LI J, FU Y L, BAO X L, et al. Comparison and analysis of tomato flavor compounds using different extraction methods[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(1): 465-475.
- [12] SHI J D, WU H B, XIONG M, et al. Comparative analysis of volatile compounds in thirty nine melon cultivars by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126342.
- [13] ZHANG C Y, ZHANG Q, ZHONG C H, et al. Volatile fingerprints and biomarkers of three representative kiwifruit cultivars obtained by headspace solid-phase microextraction gas chromatography mass spectrometry and chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2018, 271: 211-215.
- [14] GOH R M V, LAU H, LIU S Q, et al. Comparative analysis of pomelo volatiles using headspace-solid phase micro-extraction and solvent assisted flavour evaporation[J]. *LWT*, 2019, 99: 328-345.
- [15] MA X W, SU M Q, WU H X, et al. Analysis of the volatile profile of core Chinese mango germplasm by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Molecules*, 2018, 23(6): 1480.
- [16] BINGMAN M T, STELLICK C E, PELKEY J P, et al. Monitoring cider aroma development throughout the fermentation process by headspace solid phase microextraction (HS-SPME) gas chromatography-mass spectrometry (gc-ms) analysis[J]. *Beverages*, 2020, 6(2): 40.
- [17] 曹森, 赵成飞, 马凤伟, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 评价不同

- 采收期天麻的芳香品质[J]. 北方园艺, 2019(19): 87–94. [CAO Sen, ZHAO Chengfei, MA Fengwei, et al. Evaluation of aroma quality of gastrodia elata at different harvest stages based on electronic nose and GC-MS[J]. Northern Horticulture, 2019(19): 87–94.]
- [18] YAN Z, SHI J, GAO L P, et al. The combined treatment of broccoli florets with kojic acid and calcium chloride maintains post-harvest quality and inhibits off-odor production[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 262: 109019.
- [19] NZEKOUE F K, CAPRIOLI G, FIORINI D, et al. HS-SPME-GC-MS technique for FFA and hexanal analysis in different cheese packaging in the course of long term storage[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 730–737.
- [20] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 基于电子鼻判别富士苹果货架期的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(5): 272–276. [ZHANG Peng, LI Jiangkuo, CHEN Shaohui. Study on the shelf life of Fuji apple based on electronic nose[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2015, 36(5): 272–276.]
- [21] 牛远洋, 罗安伟, 刘焕军, 等. 番茄新鲜度与其挥发性成分的关系研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(5): 322–331. [NIU Yuan-yang, LUO Anwei, LIU Huanjun, et al. Study on the relationship between tomato freshness and its volatile components[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(5): 322–331.]
- [22] YIN Y, ZHAO Y. A feature selection strategy of E-nose data based on PCA coupled with Wilks Λ -statistic for discrimination of vinegar samples[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13(3): 2406–2416.
- [23] CHENG H, QIN Z H, GUO X F, et al. Geographical origin identification of propolis using GC-MS and electronic nose combined with principal component analysis[J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 813–822.
- [24] 肖文敏, 唐小燕, 任志红, 等. 基于电子鼻技术的茶鲜叶农残快速诊断[J]. *茶叶通讯*, 2021, 48(3): 484–493. [XIAO Wenmin, TANG Xiaoyan, REN Zhihong, et al. Rapid diagnosis of agricultural residues in fresh tea leaves based on electronic nose technology[J]. *Tea Communication*, 2021, 48(3): 484–493.]
- [25] LEE K C, PARK J H, KIM J K, et al. Rapid identification method for gamma-irradiated soybeans using gas chromatography-mass spectrometry coupled with a headspace solid-phase microextraction technique[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(9): 2803–2815.
- [26] LEE J H J, JAYAPRAKASHA G K, RUSH C M, et al. Production system influences volatile biomarkers in tomato[J]. *Metabolomics*, 2018, 14(7): 1–13.
- [27] LI X, TIEMAN D, LIU Z M, et al. Identification of a lipase gene with a role in tomato fruit short-chain fatty acid-derived flavor volatiles by genome-wide association[J]. *The Plant Journal*, 2020, 104(3): 631–644.
- [28] DISTEFANO M, MAURO R P, PAGE D, et al. Aroma volatiles in tomato fruits: The role of genetic, preharvest and postharvest factors[J]. *Agronomy*, 2022, 12(2): 376.
- [29] TANDON K S, BALDWIN E A, SHEWFEELT R L. Aroma perception of individual volatile compounds in fresh tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by the medium of evaluation[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 20(3): 261–268.
- [30] VILJANEN K, LILLE M, HEINIÖ R L, et al. Effect of high-pressure processing on volatile composition and odour of cherry tomato purée[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(4): 1759–1765.
- [31] 王利斌, 李雪晖, 石珍源, 等. 番茄果实的芳香物质组成及其影响因素研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(17): 291–300. [WANG Libin, LI Xuehui, SHI Zhenyuan, et al. Research progress in the composition of aromatic substances in tomato fruit and its influencing factors[J]. *Food Science*, 2017, 38(17): 291–300.]
- [32] LÓPEZ-GRESA M P, PAYÁ C, OZÁEZ M, et al. A new role for green leaf volatile esters in tomato stomatal defense against *Pseudomonas syringae* pv. tomato[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1855.
- [33] KAMIYOSHIHARA Y, MIYAJIMA S, MIYAGAWA Y, et al. Functional divergence of principal alcohol o-acyltransferase for biosynthesis of volatile acetate esters among tomato wild species (*Solanum sect. Lycopersicon*) [J]. *Plant Science*, 2020, 300: 110612.
- [34] SELLI S, KELEBEK H, AYSELI M T, et al. Characterization of the most aroma-active compounds in cherry tomato by application of the aroma extract dilution analysis[J]. *Food Chemistry*, 165: 540–546.
- [35] SCHOUTEN R E, FARNETI B, TIJSKENS L M M, et al. Quantifying lycopene synthesis and chlorophyll breakdown in tomato fruit using remittance VIS spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 96: 53–63.
- [36] FARNETI B, ALARCÓN A A, PAPASOTIRIOU F G, et al. Chilling-induced changes in aroma volatile profiles in tomato[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(7): 1442–1454.