

## 不同品种番茄采后品质和挥发性物质差异分析

赵竞伊, 张鹏, 曹森, 吴迪, 李东华, 段玉权, 李江阔

### Analysis of Postharvest Quality and Volatile Substances of Different Tomato Varieties

ZHAO Jingyi, ZHANG Peng, CAO Sen, WU Di, LI Donghua, DUAN Yuquan, and LI Jiangkuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080152>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 不同品种苹果采后品质和挥发性物质的差异分析

Difference Analysis of Postharvest Quality and Volatile Substance in Different Varieties of Apple Cultivars

食品工业科技. 2019, 40(13): 154-160 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.13.025>

#### 基于GC-IMS分析新疆不同寄主肉苁蓉挥发性物质

Volatile Substances of Different Hosts of *Cistanche deserticola* in Xinjiang Based on GC-IMS

食品工业科技. 2024, 45(9): 272-279 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050230>

#### 气相离子迁移谱分析市售燕盏挥发性物质成分

Analysis of Volatile Substances in Bird's Nest by GC-IMS Technique

食品工业科技. 2020, 41(12): 251-255 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.041>

#### 基于顶空气相-离子迁移色谱的不同品种番荔枝挥发性成分比较

Comparison of Volatile Components of Different Annona Varieties Based on Headspace Phase-Ion Mobility Chromatography

食品工业科技. 2021, 42(16): 249-254 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090230>

#### 基于GC-IMS分析粮仓位置效应对稻谷挥发性风味物质的影响

Effect of Storage Positions on the Volatile Flavor Compounds (VFCs) of Paddy Rice through Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy (GC-IMS) Analysis

食品工业科技. 2023, 44(17): 375-382 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120073>

#### 两种樱桃番茄冷藏后风味品质分析

Analysis of Flavor Quality of Two Cherry Tomatoes After Refrigeration

食品工业科技. 2023, 44(22): 294-302 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120195>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵竞伊, 张鹏, 曹森, 等. 不同品种番茄采后品质和挥发性物质差异分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 274–282. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080152

ZHAO Jingyi, ZHANG Peng, CAO Sen, et al. Analysis of Postharvest Quality and Volatile Substances of Different Tomato Varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 274–282. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080152

· 分析检测 ·

# 不同品种番茄采后品质和挥发性物质差异分析

赵竞伊<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>, 曹森<sup>3</sup>, 吴迪<sup>4,5</sup>, 李东华<sup>6</sup>, 段玉权<sup>7,\*</sup>, 李江阔<sup>2,\*</sup>

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

2. 天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384;

3. 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州贵阳 550005;

4. 浙江大学农业与生物技术学院, 浙江杭州 310058;

5. 浙江大学中原研究院, 河南郑州 450000;

6. 沈阳化工大学制药与生物工程学院, 辽宁沈阳 110142;

7. 中国农业科学院, 农产品加工研究所, 北京 100089)

**摘要:** 为明确不同品种番茄采后品质及挥发性物质差异, 本文通过气相离子迁移色谱技术 (Gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS) 分别测定不同品种番茄 ('567' '普罗旺斯' '优柿 3 号' '勇士 808' '美琪') 挥发性物质成分, 并对品质指标进行探讨。'567' 番茄果实呈现高圆形。'普罗旺斯' 番茄为近圆形, 可滴定酸含量最高。'优柿 3 号' 番茄果实为高圆形, 可溶性固形物含量最高, 果实硬度最大。'勇士 808' 番茄为近圆形果实。'美琪' 番茄果实为近圆形, 果皮颜色最有光泽, 颜色最红, 维生素 C 含量最高。5 个品种番茄果实中共检测到 57 种挥发性物质, 其中定性出 51 种挥发性物质, 包括醛类 18 种、酯类 11 种、酮类 8 种、醇类 8 种、呋喃类 2 种、萜烯类 3 种、其他 1 种。不同品种番茄主要挥发性物质存在差异。5 个品种番茄都具有的挥发性物质是丁酸乙酯 (苹果味)、反式-2-己烯醛 (青香蕉)。正己醇 (果味)、丙酸 (酸味)、乙酸己酯 (果香) 是 '美琪' 番茄的主要气味物质。罗勒烯 (热带柑橘味)、乙酰丙酸乙酯 (果味)、异丁酸乙酯 (甜味) 是 '567' 番茄的主要气味物质。2-甲基丁基乙酸酯 (甜香蕉味) 是 '普罗旺斯' 番茄的主要气味物质。此外, (Z)-4-庚烯醛 (奶油味) 是 '勇士 808' 番茄的主要气味物质。最后, 1-辛烯-3-酮 (蘑菇味) 是 '优柿 3 号' 番茄的主要气味物质。因此, 本实验明确了不同品种番茄果实采后品质的差异, 气相离子迁移色谱技术可以有效评价其挥发性物质差异。

**关键词:** 番茄, 品种, 品质, 挥发性物质, 气相离子迁移色谱 (GC-IMS)

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)15-0274-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080152



本文网刊:

## Analysis of Postharvest Quality and Volatile Substances of Different Tomato Varieties

ZHAO Jingyi<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, CAO Sen<sup>3</sup>, WU Di<sup>4,5</sup>, LI Donghua<sup>6</sup>, DUAN Yuquan<sup>7,\*</sup>, LI Jiangkuo<sup>2,\*</sup>

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, National Engineering and Technology Research Center of Agricultural Products Preservation (Tianjin), Key Laboratory of

收稿日期: 2023-08-16

基金项目: 甘肃省科技计划重大项目 (21ZD4NA016); 贵州省科技计划项目 (黔科中引地 [2022]4050); 辽宁省教育厅科学研究面上项目 (LJKZ0444)。

作者简介: 赵竞伊 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜, E-mail: 1772127496@qq.com。

\* 通信作者: 段玉权 (1972-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: Duanyuquan@caas.cn。

李江阔 (1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: lijkuo@sina.com。

Agricultural Products Storage and Preservation, Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage and Preservation of Agricultural Products, Tianjin 300384, China;

3.School of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

4.College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

5.Zhongyuan Research Institute, Zhejiang University, Zhengzhou 450000, China;

6.School of Pharmaceutical and Biological Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

7.Institute of Agricultural Products Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to clarify the differences of postharvest quality and volatile substances of different tomato varieties, the volatile substances of different tomato varieties ('567' 'Provence' 'Youshi No.3' 'Warrior 808' 'Meiqi') were determined by gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS), and the quality indexes were discussed. '567' tomato fruit was round-shaped. The 'Provence' tomato was near-round and had the highest titrable acid content. 'Youshi No.3' tomato fruit was round-shaped, whose soluble solid content and fruit firmness was the highest. 'Warrior 808' tomato was a near-round fruit. 'Meiqi' tomato fruit was near-round, whose the skin color was the most shiny, which contained the most red color and the highest vitamin C content. A total of 57 volatile substances were detected in 5 varieties of tomato fruits, of which 51 volatile substances were identified, including 18 aldehydes, 11 esters, 8 ketones, 8 alcohols, 2 furans, 3 terpenes and 1 others. There were differences in the main volatiles of different varieties of tomatoes. The volatiles present in all five varieties of tomatoes were ethyl butyrate (apple flavour), trans-2-hexenal (green banana). Hexanol (fruity flavour), propionic acid (sour flavour), and hexyl acetate (fruity flavour) were the main odour substances of 'Meiqi' tomato. Basilene (tropical citrus flavour), ethyl acetyl propionate (fruity flavour), ethyl isobutyrate (sweet flavour) were the main odour substances of '567' tomato. And 2-methylbutyl acetate (sweet banana flavour) was the main odour substance of 'Provence' tomato. Moreover, (Z)-4-heptenal (creamy flavour) was the main odour substance of 'Warrior 808' tomato. Lastly, 1-octen-3-one (mushroom flavour) was the main odour substance of 'Youshi No.3' tomato. In light of this, the differences of postharvest quality of different varieties of tomato fruits were identified in this experiment, and gas chromatography-ion mobility spectroscopy can effectively evaluate the differences of volatile substances.

**Key words:** tomato; breed; quality; volatile substances; gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS)

番茄是茄科中重要的经济作物,果实营养丰富,具有独特的风味,是世界上消费最多的蔬菜之一。番茄果实也是膳食抗氧化剂的重要来源,如番茄红素、酚类化合物(尤其是类黄酮)、维生素 C 和维生素 E<sup>[1-3]</sup>。因其感官和营养特性而一直受到消费者的欢迎,具有抗氧化和抗癌活性的生物活性化合物<sup>[4]</sup>。由于我国幅员辽阔,番茄种植面积广、品种较多、品质差异较大,因此比较不同番茄品种采后品质及挥发性物质差异具有重要的意义。

目前国外针对不同品种番茄品质差异研究中,COYAGO-CRUZE 等<sup>[5]</sup>研究了塞维利亚大学温室中生长的 5 个樱桃番茄品种及 6 种常见番茄品种中糖、酚类、番茄红素等指标差异,在 'Tigerella' 和 'Byelsa' 中检测到最高水平的番茄红素,在 'Green Zebra' 中检测到酚类物质。STÜRTZ 等<sup>[6]</sup>研究 9 个番茄品种之间褪黑素含量的对比,发现褪黑素浓度因番茄品种而异,范围从 4.11 到 114.52 ng/g。BARROS 等<sup>[7]</sup>研究 4 个品种番茄果实中酚类化合物含量的高低,研究结果发现在 4 个番茄品种中,最丰富的类黄酮是槲皮素戊糖基芦苇糖苷,黄番茄的酚类化合物含量最高(54.23 μg/g),包括酚酸(43.30 μg/g)和类黄酮(10.93 μg/g)。我国各地番茄资源丰富,众多研究者也分别研究了不同地域、不同品种番茄果实之间的营养和风味差异。王仁杰等<sup>[8]</sup>分析比较了 10 个番

茄品种的营养指标及感官评分,结果表明番茄硬度范围为 2.06~7.83 kg/cm<sup>2</sup>,从营养指标上来看,不同品种番茄品质差异较大,变异指数超过 20%。余定浪等<sup>[9]</sup>对贵州种植的 6 个大果番茄品种的维生素 C、番茄红素等含量进行对比分析,研究发现番茄红素在不同品种及不同颜色番茄中含量差异较大,大红果明显高于粉红果及鲜红果。'567'番茄、'普罗旺斯'番茄、'优柿 3 号'番茄、'勇士 808'番茄、'美琪'番茄为京津冀一带主栽品种。'567'番茄果实较大,口感甜美、产量大;普罗旺斯番茄果实大,口感细腻;'优柿 3 号'番茄果实产量较高;'勇士 808'番茄口感鲜美,果实较大;'美琪'番茄产量高、色泽鲜艳、果实形状不规则。目前,众多研究者已对不同品种番茄品质进行差异对比,但针对京津冀一带主栽番茄品种('567'番茄、'普罗旺斯'番茄、'优柿 3 号'番茄、'勇士 808'番茄、'美琪'番茄)的品质对比及挥发性物质差异分析鲜有报道。

气相色谱离子迁移谱法(Gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)提供了一种新型的气相分离检测技术。该技术将气相色谱的高分离能力和离子迁移谱的快速响应结合为一体,已在药物检测、疾病监测 and 环境保护中得到广泛应用<sup>[10]</sup>,尤其适用于食品风味分析<sup>[11-14]</sup>。在利用 GC-IMS 测定番茄挥发性物质方面,王新策<sup>[15]</sup>研究了以番茄为实验



对象,使用番茄内源气体物质反式-2-己烯醛和氢分子对采后番茄果实进行外源处理后,对比处理后的番茄果实与对照番茄果实挥发性成分接近,但对于不同品种番茄整体挥发性物质的差异研究鲜有报道。

因此,本实验以‘567’‘普罗旺斯’‘优柿3号’‘勇士808’‘美琪’为研究对象,研究不同品种番茄果实外观及内在品质,通过GC-IMS测定番茄的挥发性物质及对比不同品种番茄之间的挥发性物质差异,以期不同品种番茄的开发和利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

‘567’番茄、‘普罗旺斯’番茄、‘优柿3号’番茄、‘勇士808’番茄、‘美琪’番茄于2023年4月17日采自天津市农业科学院番茄示范园,如图1所示,其中‘普罗旺斯’‘勇士808’‘美琪’番茄均为近圆形果实,‘优柿3号’‘567’番茄均为高圆形,五个品种番茄均为完熟期果实。每个处理选取15个番茄用于指标测定及表型拍照,试验试材均选取单果质量为170~200g的果实,选择无病虫害、无机械损伤的果实作为试验用果;草酸、EDTA、氢氧化钠 天津市大茂化学试剂厂;偏磷酸、钼酸铵 天津市科密欧化学试剂有限公司;硫酸 天津市风船化学试剂科技有限公司;醋酸 天津市基准化学试剂有限公司;外标物正构酮C<sub>4</sub>~C<sub>9</sub> 山东海能科学仪器有限公司。

PAL-1 便携式手持折光仪 日本爱宕公司; Synergy H1 全功能微孔板检测仪酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; 916Ti-Touch 电位滴定仪 瑞士万通中国有限公司; KF-568 电子称 中国凯丰集团; 恒温水浴锅 金坛市金南仪器制造有限公司; CM-700 d 型色差计 日本柯尼卡美能达公司; Flavour Spec® 气相色谱-离子迁移谱仪 德国 G.A.S 公司; MXT-5 色谱柱(15 m×0.53 mm, 1.0 μm) 美国 Restek 公司; TA.XT.Plus 物性仪 英国 SMS 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 番茄品质指标的测定

1.2.1.1 色差 参考王丽琼等<sup>[16]</sup>的方法利用色差仪测定。每次从各个处理分别取5颗番茄进行测定,每个番茄以赤道为中心取4个点,最后求出测定结果的平均值。

1.2.1.2 可溶性固形物 根据林本芳等<sup>[17]</sup>的方法并略作调整。随机切取番茄可食部分,搅拌均匀后打浆(或研磨),用清洁的四层纱布包裹压滤汁液,使用数字手持折射仪对番茄的汁液进行6次测定,最后求

出6次测定结果的平均值。

1.2.1.3 维生素C 参考李军<sup>[18]</sup>的钼蓝比色法测定。均匀取样打浆,取匀浆20g用草酸-EDTA定容到100mL,混匀后静置5min左右用定性滤纸过滤于250mL锥形瓶,取滤液10mL,分别加入1mL偏磷酸-醋酸溶液、2mL5%硫酸溶液、4mL钼酸铵溶液混匀后用蒸馏水定容至50mL容量瓶中,静置15min后在705nm处比色测得吸光值,每个处理重复测定3次结果取其平均值。

1.2.1.4 可滴定酸 参考霍俊伟等<sup>[19]</sup>、李文生等<sup>[20]</sup>方法,略有修改。取20g番茄匀浆液,精确至0.001g,以蒸馏水定容250mL容量瓶中,采用0.025mol/L NaOH溶液电位滴定仪测定,每个处理重复测定3次结果取其平均值。

1.2.1.5 硬度 参考国崇文等<sup>[21]</sup>的方法,略有修改。果实硬度测定采用质构仪进行测定;选用直径为2mm的P/2型不锈钢探头,测试前、中、后速度都为1.0mm/s,穿透距离为5mm,沿番茄赤道均匀测定4个点,最终结果取5个果实的平均值。得到的硬度数据中去除最高值和最低值,取其平均值为最终硬度。

1.2.2 番茄果实挥发性物质的测定 采用气相离子迁移色谱(GC-IMS)联用法测定。参考王新策<sup>[15]</sup>的方法,略有修改。

样品前处理:取番茄匀浆3g,置于20mL顶空瓶中,50℃孵化20min后进样,孵化转速500r/min,每个样品平行测定2次。

进样:顶空进样针温度85℃;进样量500μL;孵化转速500r/min。

GC条件:色谱柱MXT-5(15m×0.53mm,1.0μm),色谱柱温60℃,分析时间20min,载气为高纯氮气N<sub>2</sub>(99.999%),载气流速:初始2mL/min保持2min,2~10min线性增至10mL/min。10~20min内线性增至100mL/min,不分流。

IMS条件:漂移管温度45℃,漂移气流量75mL/min,载气为高纯氮气N<sub>2</sub>(99.999%)。

定性分析:使用仪器自带LAV(Laboratory analytical viewer)分析软件,采用正构酮C<sub>4</sub>~C<sub>9</sub>作为外标物质计算挥发性成分的保留指数(RI)<sup>[22]</sup>,并根据保留指数和相对迁移时间,与NIST气相数据库和IMS离子迁移谱数据库进行检索对挥发性风味物质进行定性分析。内置Galley Plot、Reporter等插件,比较不同样品之间谱图、指纹图谱差异分析,从而得

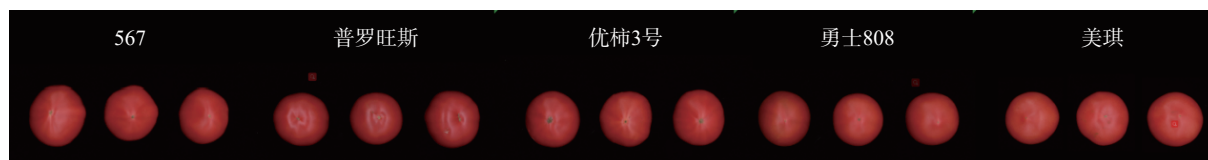


图1 不同品种番茄果实表面色泽形态图

Fig.1 Surface color and morphology of tomato fruits of different varieties

到较为准确的结果。

$$RI = RI_{(Z)} + \frac{[RI_{(Z+1)} - RI_{(Z)}] \times [\log_t^{R_{(X)}}] - \log_t^{R_{(Z)}}}{[\log_t^{R_{(Z+1)}} - \log_t^{R_{(Z)}}]}$$

式中, Z 和 Z+1 分别为目标化合物(X)流出前后的正构酮所含碳原子的数目; RI<sub>(Z+1)</sub>为目标化合物流出后正构酮所含碳原子的数目的保留指数; RI<sub>(Z)</sub>为目标化合物流出前正构酮所含碳原子的数目的保留指数; R<sub>(X)</sub>为目标化合物的保留时间; R<sub>(Z)</sub>为目标化合物流出前正构酮所含碳原子的数目的保留时间; R<sub>(Z+1)</sub>为目标化合物流出后正构酮所含碳原子的数目的保留时间。

### 1.3 数据处理

数据均使用 Excel 2021 进行记录作图, 采用 SIMCA 14.1 绘制 PCA 主成分分析, 采用 Origin 2023 绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种番茄果实色差分析

色差是衡量果实外观品质的关键指标之一。L\*、a\* 和 b\* 值分别代表果实外观颜色的变化, 其中 L\* 越高, 果皮越明亮, 反之越暗。a\* 正值越大则果皮越红。b\* 值越大则果皮越黄, 反之越蓝。由表 1 可知, ‘美琪’番茄的 L\* 值最大, 表明其果皮颜色最亮, 显著高于其他品种番茄 (P<0.05) 。‘普罗旺斯’及‘优柿 3 号’番茄、‘567’及‘勇士 808’番茄的 L\* 值均相差不多, 说明果皮亮度较为接近。虞新新等<sup>[23]</sup> 研究也表明番茄果皮 L\* 值越大, 果皮颜色较鲜亮。5 个品种番茄 a\* 值均为正值, 说明番茄果实均呈现红色, 其中‘美琪’番茄 a\* 值最大, 果皮红色程度较深, 与‘普罗旺斯’‘优柿 3 号’番茄存在显著性差异 (P<0.05) 。‘美琪’番茄 b\* 值最大, 说明该品种番茄与其他品种相比偏向黄色, 与‘勇士 808’番茄相比无显著性差异 (P>0.05) , 与其他三个品种番茄差异性较显著 (P<0.05) 。

### 2.2 不同品种番茄果实品质特征分析

不同品种番茄的口感及品质存在明显差异, 这主要取决于番茄的固酸比。常用可溶性固形物 (TSS)、可滴定酸 (TA)、维生素 C 等指标来衡量及判断番茄果实的营养品质。由图 2 可知, 不同品种番茄的可溶性固形物含量存在显著差异。‘优柿 3 号’番茄可溶性固形物含量为 6.233%, 显著高于其他 4 个品种番茄的可溶性固形物含量 (P<0.05) , 属于含糖量较高的蔬菜, 而其他 4 个品种番茄的可溶性固形物在 5.000% 左右, 5 个番茄品种的可溶性固形

物之间均存在显著差异 (P<0.05) , 本实验测得的可溶性固形物含量与王仁杰等<sup>[8]</sup> 的研究结果基本一致。维生素 C 是评价果蔬营养成分的重要指标, 5 个品种番茄维生素 C 含量在 20 mg/100 g 左右, 这与刘庞源等<sup>[24]</sup> 的研究结果中维生素 C 含量相差不多。‘美琪’番茄维生素 C 含量为 23.04 mg/100 g, 显著高于‘567’及‘勇士 808’番茄的维生素 C 含量 (P<0.05) , 除‘美琪’番茄以外, 其他四种番茄品种的维生素 C 含量的高低次序为‘优柿 3 号’‘普罗旺斯’‘567’‘勇士 808’。可滴定酸的含量对于评估番茄的风味品质至关重要。从图 2 结果来看, 不同品种番茄可滴定酸差异并不大, 均维持在 0.3% 左右, 这与王仁杰等<sup>[8]</sup> 的研究结果中可滴定酸含量基本一致。可滴定酸含量最高的品种是‘普罗旺斯’番茄, 含量达 0.349%, 显著高于其他 4 个品种的番茄 (P<0.05) 。可滴定酸含量最低的品种是‘美琪’番茄, 含量为 0.307%。果实的硬度和水分是其质地形成的重要基础, 能明显影响消费者的需求。硬度从大到小依次是‘优柿 3 号’‘勇士

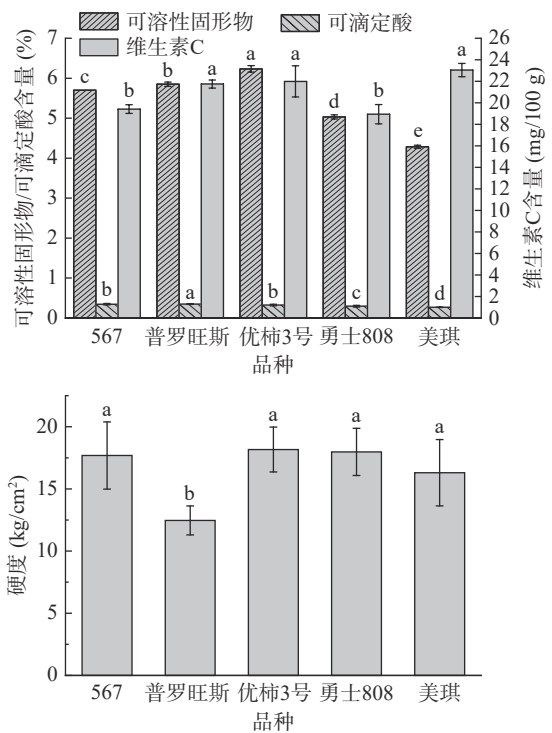


图 2 不同品种番茄品质指标及硬度分析

Fig.2 Analysis of quality indexes and hardness of different varieties of tomato

注: 不同小写字母表示同一指标下不同品种番茄差异显著 (P<0.05)。

表 1 不同品种番茄色差值分析

Table 1 Analysis of color difference of different tomato varieties

指标	‘567’	‘普罗旺斯’	‘优柿3号’	‘勇士808’	‘美琪’
L*	30.651±1.203 <sup>b</sup>	29.354±1.144 <sup>c</sup>	29.253±1.303 <sup>c</sup>	31.000±0.948 <sup>b</sup>	33.401±1.096 <sup>d</sup>
a*	15.319±1.924 <sup>ab</sup>	14.621±1.453 <sup>bc</sup>	14.162±2.171 <sup>c</sup>	15.304±1.515 <sup>ab</sup>	16.350±1.453 <sup>a</sup>
b*	7.161±1.180 <sup>b</sup>	6.681±0.760 <sup>b</sup>	7.263±1.244 <sup>b</sup>	8.149±1.665 <sup>a</sup>	8.880±1.138 <sup>a</sup>

注: 不同小写字母表示同一指标下不同品种番茄差异显著 (P<0.05)。

808’‘567’‘美琪’‘普罗旺斯’,其中‘普罗旺斯’番茄品种的硬度显著低于其他四个品种( $P<0.05$ ),其他4个品种番茄硬度差异不显著( $P>0.05$ ),均在 $17\text{ kg/cm}^2$ 左右。

### 2.3 不同品种番茄的挥发性物质特征分析

2.3.1 不同品种番茄果实挥发性物质的二维谱图分析 图3A为GC-IMS分析不同品种番茄果实挥发性物质的二维谱图,整个图背景为蓝色,其中1.0处红色竖线为反应离子峰(Reaction ion peak, RIP),图中横坐标代表离子迁移时间,纵坐标则代表气相色谱的保留时间(Retention time, RT),RIP峰两侧的每一个点代表一种挥发性有机物。颜色深浅表示物质的峰体积大小,浅蓝色表示番茄挥发性物质峰体积较低,红色表示番茄挥发性物质峰体积较高。

GC-IMS俯视图能够整体展现出不同品种番茄气味物质的异同点,通过斑点的有无以及颜色的深浅变化可分析得知样品之间组分及浓度的差异。由图3A分析可知,‘美琪’‘567’‘普罗旺斯’‘优柿3号’‘勇士808’番茄代表气味物质的斑点集中在迁移时间 $1.00\sim 2.00\text{ ms}$ 和保留时间 $100\sim 800\text{ s}$ 内,且图中斑点相对比较接近,分析可得知5个品种番茄谱图相似。进一步观察图3A谱图,与其他4个品种番茄挥发性成分相比,‘勇士808’番茄橘色框中斑点的颜色明显变深,说明该区域气味物质浓度与其他品种番

茄有明显不同。

不同品种番茄的挥发性成分图谱大体相似,但个别化合物含量可能会有所不同,然而仅凭颜色的变化很难准确区分。因此,以‘勇士808’番茄样本谱图为参照,绘制不同品种番茄果实的GC-IMS二维差异对比谱图(图3B)。其中,当挥发性成分含量相同时,背景颜色为白色,而当挥发性成分含量超过参照值时,颜色为红色,低于参照值时,颜色为蓝色。如图3B所示,4个品种番茄谱图中既出现代表该位置化合物含量较参照样本高的红色斑点,如2-甲基丁基乙酸酯等物质,也出现了代表该位置化合物含量较参照样本低的蓝色斑点,如(Z)-4-庚烯醛、4-庚酮等物质。从图3B可直观看,‘勇士808’番茄气味物质浓度明显高于‘美琪’番茄气味物质浓度。

2.3.2 不同品种番茄果实挥发性物质定性及指纹图谱分析 使用正构酮 $\text{C}_4\sim\text{C}_9$ 作为外标参考,以此为基础计算每种化合物的保留指数,基于挥发性物质的气相色谱保留时间和离子迁移时间对挥发性组分进行定性分析。以NIST气相保留指数数据库与IMS迁移时间数据库进行匹配分析,共检出番茄果实中含57种挥发性物质,由于数据库的数据有限,有6种物质无法定性。一种化合物电离后可能会产生1、2个或多个斑点(单体、二聚体或多聚体),具体取决于其浓度<sup>[25]</sup>。由表2可知,挥发性化合物中醛类

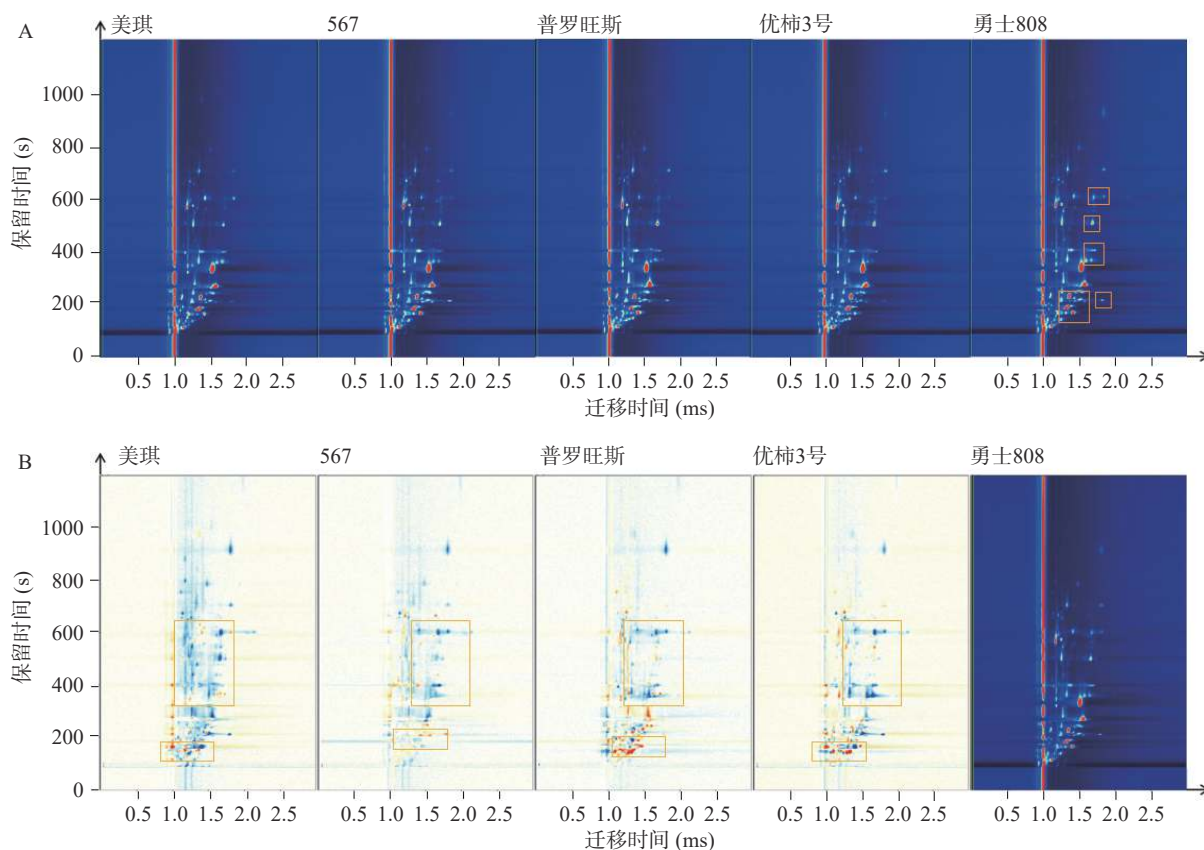


图3 不同品种番茄果实中挥发性有机物的GC-IMS二维谱图

Fig.3 GC-IMS two-dimensional spectra of volatile organic compounds in tomato fruits of different varieties

注: A: 俯视图; B: 差异图。



物质占较大比例为 18 种,其次是酯类 11 种、酮类 1 种。这与学者采用 GC-IMS 仪器分析番茄中挥发性成分的种类,结果基本一致<sup>[26]</sup>。

表 2 不同品种番茄挥发性物质定性

Table 2 Qualitative analysis of volatile substances in different tomato varieties

序号	类别	化合物名称	CAS号	分子式	分子量	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	香气特征
1		壬醛	124-19-6	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	142.2	1104.8	785.925	1.48391	花香味
2		反-2-辛烯醛(M)	2548-87-0	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	126.2	1067.5	705.429	1.33095	青草味
3		反-2-辛烯醛(D)	2548-87-0	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	126.2	1067.5	705.429	1.33095	青草味
4		苯乙醛	122-78-1	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	120.2	1053.9	678.254	1.2579	花香味
5		(E)-2-庚烯醛(M)	18829-55-5	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	112.2	963.6	506.433	1.25414	草香味
6		(E)-2-庚烯醛(D)	18829-55-5	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	112.2	963.6	506.433	1.25414	草香味
7		(Z)-4-庚烯醛(M)	6728-31-0	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	112.2	898.5	394.314	1.14236	草香味
8		(Z)-4-庚烯醛(D)	6728-31-0	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	112.2	898.5	394.314	1.14236	草香味
9	醛类	庚醛(M)	111-71-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114.2	901.8	399.342	1.34382	柑橘味
10		庚醛(D)	111-71-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114.2	875.8	363.306	1.3263	柑橘味
11		2-己烯醛	505-57-7	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	98.1	864.2	348.69	1.18154	草香味
12		反式-2-己烯醛	6728-26-3	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	98.1	852.5	334.515	1.51208	果味
13		反式-2-戊烯醛(M)	1576-87-0	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	84.1	745.6	226.747	1.35723	青草味
14		反式-2-戊烯醛(D)	1576-87-0	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	84.1	745.6	226.747	1.35723	青草味
15		戊醛	110-62-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	723.4	208.301	1.42741	杏仁味
16		异戊醛(M)	590-86-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	650.1	163.893	1.19432	苹果味
17		异戊醛(D)	590-86-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	650.1	163.893	1.19432	苹果味
18		丁醛	123-72-8	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72.1	598.2	141.902	1.28539	香蕉味
19		乙酸己酯	142-92-7	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	144.2	1013.7	603.961	1.41512	花香味
20		己酸甲酯	106-70-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130.2	926.3	438.811	1.28356	果香味
21		丁酸丙酯	105-66-8	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130.2	901.1	398.403	1.69	水果味
22		2-甲基丁基乙酸酯	624-41-9	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130.2	879.5	368.024	1.29301	香甜味
23	酯类	丁酸乙酯	105-54-4	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.2	795.1	273.114	1.55106	草莓味
24		甲酸异戊酯	110-45-2	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.2	783.9	262.495	1.2714	苹果味
25		异丁酸乙酯	97-62-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.2	722.9	207.898	1.55472	甜味
26		乙酸乙酯(M)	141-78-6	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88.1	610.6	146.878	141786	香蕉味
27		乙酸乙酯(D)	141-78-6	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88.1	610.6	146.878	141786	香蕉味
28		反式-2-丁烯酸乙酯	623-70-1	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	114.1	841.2	321.378	1.17991	焦糖味
29		乙酰丙酸乙酯	539-88-8	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	144.2	1047.6	666.002	1.64155	甜味
30		1-辛烯-3-酮(M)	4312-99-6	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	126.2	983.4	546.392	1.27602	蘑菇味
31		1-辛烯-3-酮(D)	4312-99-6	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	126.2	983.4	546.392	1.27602	蘑菇味
32		4-庚酮	123-19-3	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114.2	872.5	359.048	1.57266	果味
33		酮类	2,3-戊二酮(M)	600-14-6	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	100.1	722.5	207.598	1.22194
34	2,3-戊二酮(D)		600-14-6	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	100.1	699.5	190.125	1.20658	黄油味
35	1-戊烯-3-酮(M)		1629-58-9	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	84.1	675.6	175.933	1.0799	辛辣味
36	1-戊烯-3-酮(D)		1629-58-9	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	84.1	675.6	175.933	1.0799	辛辣味
37	丙酮	67-64-1	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58.1	519.2	519.2	1.11058	辛辣味	
38	2-庚醇	543-49-7	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	116.2	901.7	399.236	1.38181	果味	
39	正己醇	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	102.2	873.4	360.14	1.64653	香草味	
40	醇类	1-戊醇(M)	71-41-0	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88.1	763.8	243.067	1.25418	药草味
41		1-戊醇(D)	71-41-0	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88.1	763.8	243.067	1.25418	药草味
42		异戊醇	123-51-3	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88.1	730.8	214.334	1.49432	焦糖味
43		异丁醇(M)	78-83-1	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74.1	628.9	154.52	1.17465	香草味
44		异丁醇(D)	78-83-1	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74.1	628.9	154.52	1.17465	香草味
45		2-己醇	626-93-7	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	102.2	813	290.978	1.27381	果香味
46	呋喃类	2-正戊基呋喃	3777-69-3	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	138.2	996.3	574.074	1.25057	果香味
47		2-正丁基呋喃	4466-24-4	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	124.2	886.9	377.836	1.17909	葡萄酒味
48	萜烯类	罗勒烯	13877-91-3	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	136.2	1047.9	666.683	1.21226	柑橘味
49		3-萜烯(M)	13466-78-9	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	136.2	1007.7	593.506	1.20433	柑橘味
50		3-萜烯(D)	13466-78-9	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	136.2	1007.7	593.506	1.20433	柑橘味
51	其他	丙酸	1979/9/4	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74.1	703.3	192.896	1.11245	辛辣味

注: M为单体, D为二聚体; 表中香气特征来源于网站<http://www.thegoodscentscompany.com/search2.html>。

由表2可知,醛类主要有壬醛、反-2-辛烯醛、苯乙醛、(E)-2-庚烯醛、(Z)-4-庚烯醛、庚醛、2-己烯醛、反式-2-己烯醛、反式-2-戊烯醛、戊醛、异戊醛、丁醛单体及部分二聚体。醛类被认为主要通过脂质氧化和分解产生,由于气味阈值相对较低,在所有类别中对整体香气的贡献最大<sup>[27]</sup>。2-己烯醛和庚烯醛具有草香味<sup>[28]</sup>。壬醛具有柑橘香、脂肪香、花香<sup>[29]</sup>。酯类物质主要有乙酸己酯、己酸甲酯、丁酸丙酯、2-甲基丁基乙酸酯、丁酸乙酯、甲酸异戊酯、异丁酸乙酯、乙酸乙酯、反式-2-丁烯酸乙酯、乙酰丙酸乙酯单体及部分二聚体。酯类赋予水果果香,2-甲基丁基乙酸酯被发现具有水果香甜的香气<sup>[30]</sup>。酮类主要有1-辛烯-3-酮、4-庚酮、2,3-戊二酮、1-戊烯-3-酮、丙酮单体及部分二聚体。酮类物质主要来自于醇的氧化或酯类的分解,酮类化合物香气阈值较低。1-辛烯-3-酮的香气被形容为蘑菇味<sup>[31]</sup>。醇类物质主要有2-庚醇、正己醇、1-戊醇、异戊醇、异丁醇、2-己醇单体及部分二聚体。醇是由食物基质中的糖分解代谢或酸降解形成的<sup>[32]</sup>。正己醇可为番茄提供香草味<sup>[33]</sup>。

利用 GC-IMS 内置 Gallery Plot 插件生成指纹图谱(如图4),能清晰地观察出不同品种番茄之间的挥发性物质差异。图中为5个品种番茄样品平行2次测定得到的所有挥发性物质斑点,每一行代表了一个品种的挥发性物质组成成分,依次为‘美琪’‘567’‘普罗旺斯’‘优柿3号’‘勇士808’。每一列代表了挥发性物质在不同品种番茄中的信号峰,其中信号峰的颜色代表了该组分浓度,颜色越亮代表该组分浓度越高。将图4划分为6个部分,橙色区域表示‘美琪’番茄的挥发性物质浓度明显高于其他品种番茄挥发性物质浓度,共8种:1-戊烯-3-酮(辛辣味)、庚醛(柑橘味)、正己醇(香草味)、丙酸(辛辣味)、乙酸己酯(花香味)、未知物1、反式-2-丁烯酸乙酯(焦糖味)、异戊醛(苹果味)。其中正己醇、丙酸、乙酸己酯是‘美琪’番茄的主要挥发性物质。黄色区域表示‘567’番茄的挥发性物质浓度明显高于其他品种番茄,共11种:1-戊醇(药草味)、罗勒烯(柑橘味)、乙酰丙酸乙酯(甜味)、2-庚醇(果味)、己酸甲酯(果香味)、甲酸异戊酯(苹果味)、未知物2、异丁酸乙酯(甜味)、戊醛(杏仁味)、未知物3、3-

烯(柑橘味)。其中罗勒烯、乙酰丙酸乙酯、异丁酸乙酯是‘567’番茄的主要挥发性物质。红色区域表示‘普罗旺斯’番茄的挥发性物质浓度明显高于其他品种番茄,共8种:壬醛(花香味)、(E)-2-庚烯醛(草香味)、2-甲基丁基乙酸酯(香甜味)、2-己烯醛(草香味)、2-己醇(果香味)、2,3-戊二酮(黄油味)、异丁醇(香草味)、丁醛(香蕉味)。其中2-甲基丁基乙酸酯是‘普罗旺斯’番茄的主要挥发性物质。绿色区域表示‘优柿3号’番茄的挥发性物质浓度明显高于其他品种番茄,共10种:反式-2-戊烯醛(青草味)、1-辛烯-3-酮(蘑菇味)、反-2-辛烯醛(青草味)、苯乙醛(花香味)、2-正戊基呋喃(果香味)、2-正丁基呋喃(葡萄酒味)、未知物4、丙酮(辛辣味)、未知物5、乙酸乙酯(香蕉味)。其中1-辛烯-3-酮是‘优柿3号’番茄的主要挥发性物质。白色区域表示‘勇士808’番茄的挥发性物质浓度明显高于其他品种番茄挥发性物质浓度,共5种:丁酸丙酯(水果味)、未知物6、4-庚酮(果味)、异戊醇(焦糖味)、(Z)-4-庚烯醛(草香味)。其中(Z)-4-庚烯醛是‘勇士808’番茄的主要挥发性物质。紫色区域表示5个品种

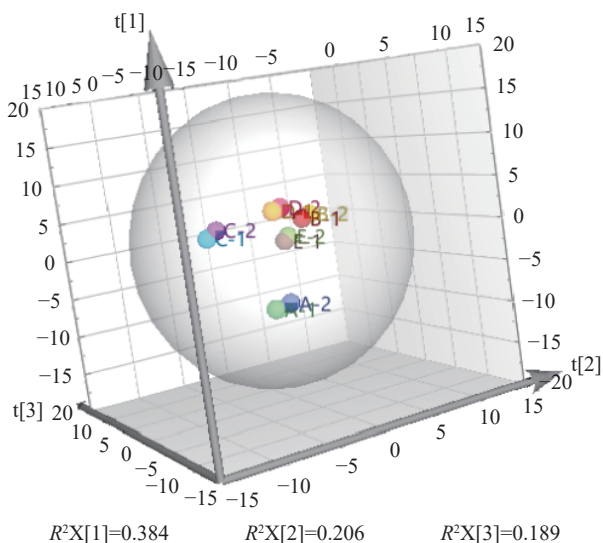


图5 不同品种番茄挥发性物质 PCA 分析

Fig.5 PCA analysis of volatile substances in different varieties of tomato

注: A~E 分别为: ‘美琪’‘567’‘普罗旺斯’‘优柿3号’‘勇士808’。

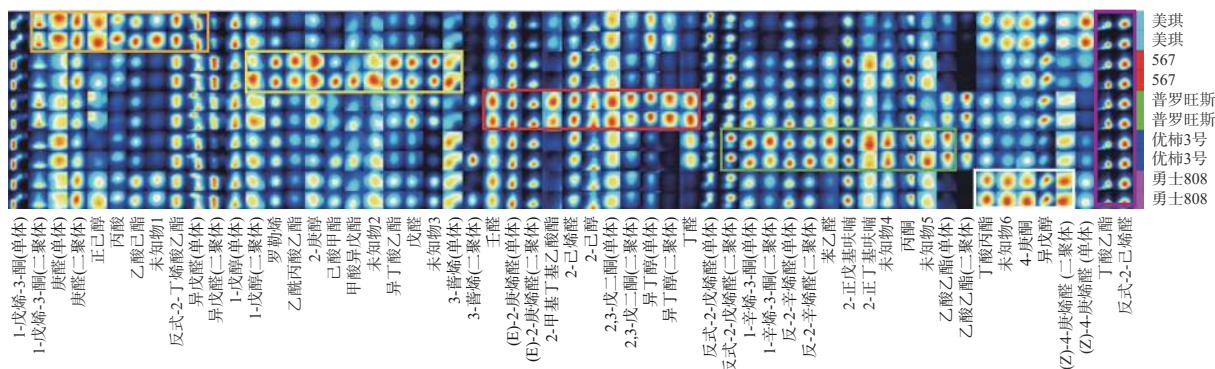


图4 不同品种番茄挥发性物质的指纹图谱分析

Fig.4 Fingerprint analysis of volatile substances in different varieties of tomato



番茄共有的挥发性物质,且浓度差异较小,共 2 种:丁酸乙酯(草莓味)、反式-2-己烯醛(果味)。不同品种番茄的挥发性成分存在差异,各自有主要挥发性成分区域,也有共同挥发性成分区域。

2.3.3 不同品种番茄果实挥发性物质 PCA 分析 选用 SIMCA 软件进行分析,使样品间的特征差异情况以可视化的方式呈现。如图 5 所示,主成分 1、主成分 2、主成分 3 的贡献率分别为 38.4%、20.6%、18.9%,总贡献率为 77.9%,能充分地代表原始数据信息。‘美琪’‘567’‘普罗旺斯’‘优柿 3 号’‘勇士 808’番茄各数据点区分相对较明显,说明不同品种番茄样品之间气味成分存在一定差异。运用 GC-IMS 技术得到样品信号峰强度较高的挥发性物质,可实现品种区分。

### 3 结论

5 个品种番茄品质分析存在明显差异。从果形上来看,‘567’‘优柿 3 号’番茄为高圆形,‘勇士 808’‘美琪’‘普罗旺斯’番茄为近圆形。‘美琪’番茄果皮颜色最鲜亮,颜色最红。‘普罗旺斯’番茄可滴定酸含量最高。‘优柿 3 号’番茄可溶性固形物含量显著高于其他 4 个品种番茄,果皮强度高于其他品种番茄。番茄维生素 C 含量由高到低依次为‘美琪’>‘优柿 3 号’>‘普罗旺斯’>‘567’>‘勇士 808’。不同品种番茄果实品质及外观各有不同,能够满足不同口味要求的消费者。

5 个品种番茄的主要挥发性物质以醇类、醛类、酮类、酯类、呋喃类、萜烯类为主,其中具有苹果味的丁酸乙酯及具有青香蕉味的反式-2-己烯醛是 5 个品种番茄都具有的挥发性物质成分,具有果味的正己醇、具有酸味的丙酸、具有果香的乙酸己脂是‘美琪’番茄的主要气味物质,罗勒烯(热带柑橘味)、乙酰丙酸乙酯(果味)、异丁酸乙酯(甜味)是‘567’番茄的主要气味物质,2-甲基丁基乙酸酯(甜香蕉味)是‘普罗旺斯’番茄的主要气味物质。(Z)-4-庚烯醛(奶油味)是‘勇士 808’番茄的主要气味物质。1-辛烯-3-酮(蘑菇味)是‘优柿 3 号’番茄的主要气味物质。本实验可以有效利用 GC-IMS 技术评价不同品种番茄挥发性物质差异、针对不同品种番茄特征性气味,实现品种区分,通过测定指标来区分不同番茄品种的品质差异,以为番茄果实栽培品种的选择提供有效参考。

© The Author(s) 2024. 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] LEONARDI C, AMBROSINO P, ESPOSITO F, et al. Antioxidative activity and carotenoid and tomatine contents in different typologies of fresh consumption tomatoes[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2000, 48(10): 4723-4727.

[2] LENUCCI M S, CADINU D, TAURINO M, et al. Antioxidant composition in cherry and high-pigment tomato cultivars[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2006, 54(7): 2606-2613.

[3] STEWART A J, BOZONNET S, MULLEN W, et al. Occurrence of flavonols in tomatoes and tomato-based products[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(7): 2663-2669.

[4] TZORTZAKIS N, XYLIA P, CHRYSARGYRIS A, et al. Sage essential oil improves the effectiveness of aloe vera gel on postharvest quality of tomato fruit[J]. *Agronomy*, 2019, 9(10): 635.

[5] COYAGO-CRUZ E, CORELL M, MORIANA A, et al. Study of commercial quality parameters, sugars, phenolics, carotenoids and plastids in different tomato varieties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 480-489.

[6] STÜRTZ M, CEREZO A B, CANTOS-VILLAR E, et al. Determination of the melatonin content of different varieties of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) and strawberries (*Fragaria ananassa*) [J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1329-1334.

[7] BARROS L, DUEÑAS M, PINELA J, et al. Characterization and quantification of phenolic compounds in four tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) farmers' varieties in northeastern Portugal homegardens[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2012, 67(3): 229-234.

[8] 王仁杰, 蔡红明, 夏海波, 等. 不同品种番茄的果实品质及感官评价[J]. *中国果菜*, 2022, 42(7): 42-50. [WANG R J, CAI H M, XIA H B, et al. Fruit quality and sensory evaluation of different varieties of tomato[J]. *Chinese Fruits and Vegetables*, 2022, 42(7): 42-50.]

[9] 余定浪, 谭书明. 不同品种番茄营养成分分析[J]. *现代食品*, 2018(15): 130-132. [YU D L, TAN S M. Analysis of nutritional components of different varieties of tomato[J]. *Modern Food*, 2018(15): 130-132.]

[10] LENG P, HU H W, CUI A H, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds of honey peach packaged with different preservation methods during storage[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021(149): 149.

[11] VERKOUTEREN J R, STAYMATES J L. Reliability of ion mobility spectrometry for qualitative analysis of complex, multicomponent illicit drug samples[J]. *Forensic Science International*, 2011, 206(1-3): 190-196.

[12] ALLAFCHIAN A R, MAJIDIAN Z, IELBEIGI V, et al. A novel method for the determination of three volatile organic compounds in exhaled breath by solid-phase microextraction-ion mobility spectrometry[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2016, 408(3): 839-847.

[13] RUZSANYI V, MOCHALSKI P, SCHMID A, et al. Ion mobility spectrometry for detection of skin volatiles[J]. *Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*, 2012, 911: 84-92.

[14] MÁRQUEZ-SILLERO I, AGUILERA-HERRADOR E, CÁRDENAS S, et al. Ion-mobility spectrometry for environmental analysis[J]. *Trac Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30(5): 677-690.

[15] 王新策. 反式-2-己烯醛和氢分子对番茄采后转色的调控机制研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021. [WANG X C. Study on the regulatory mechanism of trans-2-hexenal and hydrogen molecules on postharvest color transformation of tomato[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.]

[16] 王丽琼, 林少华, 陈存坤, 等. 3 种不同的保鲜方法对香椿贮藏品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(13): 150-155. [WANG L Q, LIN S H, CHEN C K, et al. Effects of three differ-

- ent preservation methods on storage quality of Chinese Toon[J]. Food Research and Development, 2019, 40(13): 150-155. ]
- [ 17 ] 林本芳, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 冰温结合 1-MCP 贮藏对西兰花品质及生理的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(12): 304-307. [ LIN B F, LU X X, LI J K, et al. Effects of ice temperature combined with 1-MCP storage on quality and physiology of broccoli[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(12): 304-307. ]
- [ 18 ] 李军. 钼蓝比色法测定还原型维生素 C[J]. 食品科学, 2000(8): 42-45. [ LI J. Determination of reduced vitamin C by molybdenum blue colorimetry[J]. Food Science, 2000(8): 42-45. ]
- [ 19 ] 霍俊伟, 高静, 张鹏, 等. 1-甲基环丙烯对蓝靛果贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 321-328. [ HUO J W, GAO J, ZHANG P, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on storage quality of indigo fruit[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(19): 321-328. ]
- [ 20 ] 李文生, 冯晓元, 王宝刚, 等. 应用自动电位滴定仪测定水果中的可滴定酸[J]. 食品科学, 2009, 30(4): 247-249. [ LI W S, FENG X Y, WANG B G, et al. Determination of titrable acids in fruits by automatic potentiometric titrator[J]. Food Science, 2009, 30(4): 247-249. ]
- [ 21 ] 国崇文, 魏宝东, 张鹏, 等. PE 包装对西兰花贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 53-59. [ GUO C W, WEI B D, ZHANG P, et al. Effect of PE packaging on storage quality of broccoli[J]. Preservation and Processing, 2020, 20(1): 53-59. ]
- [ 22 ] 申梦娜, 乔海军, 张卫兵, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱的市售酸奶挥发性风味物质差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 242-249. [ SHEN M N, QIAO H J, ZHANG W B, et al. Analysis of volatile flavor compounds in yogurt based on gas chromatography-ion migration spectrometry[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(19): 242-249. ]
- [ 23 ] 虞新新, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同气调环境对番茄保鲜品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 135-139. [ YU X X, LÜ E L, LU H Z, et al. Effects of different air conditioning environment on fresh-keeping quality of tomato[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(12): 135-139. ]
- [ 24 ] 刘庞源, 张宝海, 何伟明, 等. 传统优良番茄品种与新番茄品种品质比较[J]. 中国蔬菜, 2009, 188(10): 37-40. [ LIU P Y, ZHANG B H, HE W M, et al. Comparison of quality of traditional and new tomato varieties[J]. Chinese Vegetables, 2009, 188(10): 37-40. ]
- [ 25 ] ARROYO-MANZANARES N, MARTIN-GOMEZ A, JURADO-CAMPOS N, et al. Target vs spectral fingerprint data analysis of Iberian ham samples for avoiding labelling fraud using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 65-73.
- [ 26 ] 刘晶晶. 反式-2-己烯醛(E2H)对番茄转色期质体转化的调控作用[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022. [ LIU J J. The regulatory effect of trans-2-hexenal (E2H) on plastid transformation in tomato during color transformation period[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022. ]
- [ 27 ] QIAO Y N, BI J F, CHEN Q Q, et al. Volatile profile characterization of winter jujube from different regions via HS-SPME-GC/MS and GC-IMS[J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021: 9958414.
- [ 28 ] MOON P, FU Y, BAI J, et al. Assessment of fruit aroma for twenty-seven guava (*Psidium guajava*) accessions through three fruit developmental stages[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 238: 375-383.
- [ 29 ] 田真, 张萌, 王银, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱对不同品种猕猴桃果汁的香气指纹表征[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 9. [ TIAN Z, ZHANG M, WANG Y, et al. Aroma fingerprint characterization of different varieties of kiwi fruit juice based on headspace gas chromatography-ion migration spectrometry[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(1): 9. ]
- [ 30 ] QIN G H, QI X X, QI Y J, et al. Identification and expression patterns of alcohol dehydrogenase genes involving in ester volatile biosynthesis in pear fruit[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1742-1750.
- [ 31 ] 迟雪露, 刘慧敏, 叶巧燕, 等. 奶中风味物质检测技术研究进展[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(4): 40-45, 56. [ CHI X L, LIU H M, YE Q Y, et al. Research progress on detection technology of flavor substances in milk[J]. Dairy Industry of China, 2022, 50(4): 40-45, 56. ]
- [ 32 ] ISSA-ISSA H, GUCLU G, NOGUERA-ARTIAGA L, et al. Aroma-active compounds, sensory profile, and phenolic composition of Fondillon[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126353.
- [ 33 ] 冯翰杰, 李涛, 杨梅, 等. 不同发酵方式对柿子酒中挥发性香气成分的影响研究[J]. 天津农学院学报, 2022, 29(3): 56-65. [ FENG H J, LI T, YANG M, et al. Effect of different fermentation methods on volatile aroma components in persimmon wine[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2022, 29(3): 56-65. ]