

基于感官评价与多维风味分析的新疆五种番茄 炖煮前后品质差异评价

彭燚苹¹, 杨薇^{1*}, 杨平^{2,3*}, 彭芸², 戚晨晨², 黄峰², 张春晖², 赵鑫蕊³, 杨晓东³, 杨洁⁴

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300392) (2. 新疆新康农业发展有限公司, 新疆乌鲁木齐 830032)

(3. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100191)

(4. 新疆大学生命科学与技术学院, 新疆生物资源基因工程重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830017)

摘要: 番茄为炖煮制品核心原料, 风味特征丰富。选取 1808、博士 1812、意伯芬-6、莱格美万和吉诺比利五个新疆番茄进行炖煮前后风味比较, 采用感官评价、电子舌、电子鼻、气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用 (Headspace Solid-phase Micro Extraction-gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 检测技术, 结合偏最小二乘法 (Partial Least Squares-discriminant Analysis, PLS-DA) 分析。结果显示, 炖煮后清香、果香和青草香相关香气属性减弱, 蒸煮味和脂肪味增强, 挥发性物质由 48 种降至 28 种, 结合气味活性值 (Odor Activity Value, OAV) 筛选出 22 种关键香气物质, 包括叶醇、1-己醇、乙偶姻等, PLS-DA 证实不同品种炖煮前后香气组分差异显著。莱格美万鲜食品品质优异; 博士 1812 炖煮加工适配性更佳。本研究为新疆番茄品种选育及工业化炖煮菜肴原料筛选提供理论基础。

关键词: 番茄; 炖煮; 感官评价; GC-IMS; GC-MS; PLS-DA

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0929

Evaluation of Quality Differences of Five Tomato Varieties in Xinjiang Before and After Stewing Based on Sensory Evaluation and Multidimensional Flavor Analysis

PENG Yiping¹, YANG Wei^{1*}, YANG Ping^{2,3*}, PENG Yun², QI Chenchen², HUANG Feng², ZHANG Chunhui²,
ZHAO Xinrui³, YANG Xiaodong³, YANG Jie⁴

(1.College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)(2.Xinjiang Xinkang Agricultural Development Co. Ltd., Urumqi 830032, China)(3.Institute of Agricultural Product Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Comprehensive Key Laboratory of Agricultural Product Processing of the Ministry of Agriculture, Beijing 100191, China)(4.College of Life Sciences and Technology, Xinjiang University, Key Laboratory of Bioregional Resources Genetic Engineering, Urumqi 830017, China)

Abstract: Tomatoes serve as the core raw material for stewed dishes with abundant flavor profiles. Five Xinjiang tomato cultivars, namely 1808, Doctor 1812, Yibifen-6, Legameiwan and Ginobili, were selected to investigate flavor variations before and after stewing. Sensory evaluation, electronic tongue, electronic nose, gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) were applied, combined with partial least-squares-discriminant analysis (PLS-DA). The results demonstrated that aroma attributes including fresh-note, fruity and grassy notes decreased after stewing, whereas cooked-note and fatty-note intensified. The quantity of volatile compounds dropped from 48 to 28. Twenty-two key aroma compounds were screened based on odor activity values (OAV), including geraniol, 1-hexanol and acetoin. PLS-DA revealed significant differences in volatile aroma compositions among cultivars before and after stewing. Legameiwan exhibits superior fresh-eating quality, while Doctor 1812 shows

收稿日期: 2026-06-22; 修回日期: 2026-09-08; 接受日期: 2026-09-10

基金项目: 新疆“天池英才”引进计划资助

作者简介: 彭燚苹 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 3493772613@qq.com

通讯作者: 杨平 (1993-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: yangping01@caas.cn; 共同通讯作者: 杨薇 (1981-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: yangwei811127@126.com

favorable processing adaptability for stewing. These findings offer a theoretical basis for the breeding of Xinjiang tomato cultivars and raw-material screening for industrialized stewed dishes.

Key words: tomato; stewing; sensory evaluation; GC-IMS; GC-MS; PLS-DA

番茄作为果蔬加工领域中不可或缺的重要品类，在饮食文化中占据重要地位。番茄在烹饪过程中释放的清香与果香极大地提升了菜肴的感官品质和风味维度^[1]，随着工业化菜肴产品市场迅速发展，对优质耐加工原料的需求不断增长，番茄因其良好的耐炖煮特性，作为开发番茄类工业菜肴产品的理想选择^[2]。新疆是我国最大的加工番茄生产基地，被誉为“中国番茄之都”，据统计，2024 年全疆加工番茄种植面积达 121.50 万亩，年产量高达 850.60 万吨，种植规模占全国总面积的 80% 以上^[3]。

番茄香气以醇类和醛类化合物为主，现有研究通过定性定量分析，从番茄果实中鉴定出的挥发性化合物超过 400 种，主要为醛类、醇类、酮类、酯类、酚类、萜类和烃类等^[4]。由于番茄贮藏稳定性差，在生产与流通过程通常采用热处理进行加工保藏，但热处理会导致部分挥发性香气化合物的降解和挥发，从而使风味损失^[5]。如 Zhu 等^[6]在开发番茄香精的研究中利用吹扫气相色谱-质谱联用技术对李子番茄加工过程中风味特征的变化进行了表征和比较，发现了番茄汁在热加工过程中，与清香和果香相关的化合物出现损失。番茄在热处理过程也会产生新的成分，包括二甲基硫化物、乙醛等化合物，是描述番茄制品“熟”气味的香气成分^[7]。例如，Baenas 等^[8]研究了冷藏番茄汁在加工和贮藏过程中香气化合物风味相关酶和番茄红素的变化，发现负责新鲜和绿色香气属性（如醛类）的主要香气化合物在加工过程中会发生改变，这与脂氧合酶（LOX）和氢过氧化物裂解酶（HPL）的活性有关。Wang 等^[9]通过 GC-IMS 分析了新鲜番茄果肉、浓缩番茄酱和蒸发过程中馏出物的挥发性指纹图谱，发现经过蒸发处理后，苯乙醛、1-己醇和(Z)-3-己烯醇等化合物的含量显著增加。

现有研究已在番茄特征风味解析方面取得了显著进展，明确了多种挥发性化合物对番茄风味的重要贡献。然而，目前关于新疆主栽番茄品种在炖煮加工过程中的感官品质变化和香气演变规律仍缺乏系统比较，限制了不同品种番茄在炖煮类工业化菜肴中的定向应用。因此，本文聚焦新疆地区主栽的五种番茄品种（1808、博士 1812、意伯芬-6、莱格美万和吉诺比利），运用感官分析、电子舌、电子鼻、GC-IMS 和 GC-MS 检测技术，结合 PLS-DA 进行多元统计分析，系统解析五种番茄品种在炖煮前后的风味品质差异。为新疆番茄品种的加工利用和番茄类炖煮菜肴原料筛选提供参考，同时为工业化番茄类炖煮菜肴的加工工艺优化、产品感官品质提升提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 原料

番茄，新疆新康农业发展有限公司提供。

1.2 主要试剂和仪器设备

2-甲基-3-庚酮，Sigma Aldrich 美国；正构烷烃标准品（C7-C30），北京凯欧迪生物科技有限公司；BSA 423 S 电子天平设备，德国 Sartorius 公司；JR 18 S 多功能破碎机设备，浙江苏泊尔股份有限公司；RW 20 数显型顶置式均质机，德国艾卡仪器设备有限公司；ASTREE II/LS 16 电子舌设备，法国 Alpha MOS 公司；Microfuge 20 R 离心机设备，美国 Beckman 公司；GC-MS 8860-5977 B 设备、GC-IMS 255 H 4 设备，美国 Agilent 公司；PEN 3 电子鼻设备，德国 Airsense 公司；50/30 μm 二乙烯基苯/碳分子筛/二甲基硅氧基烷（DVB/CAR/PDMS）2 cm SPME 萃取头设备，美国 Supelco 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 番茄原料制备

番茄品种为 1808、博士 1812、意伯芬、莱格美万和吉诺比利五种，每个品种随机选取 50 个成熟度一致、无机械损伤和病虫害的果实。样品清洗后去蒂，切成大小基本一致的小块，随机分为炖煮前组和炖煮后组。炖煮前组样品一部分用于感官评价，另一部分经液氮速冻后研磨成粉，置于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用，炖煮后组样品：取 200 g 番茄样品放入不锈钢盆，加入 1 600 g 蒸馏水，设置加热功率 800 W，加盖进行炖煮，待体系沸腾后保持炖煮 40 min，

整个过程不额外补水，炖煮结束后冷却至室温，并将固液混合体系充分匀浆后分装，一部分用于感官评价，另一部分经液氮速冻研磨后于-80℃保存备用。该炖煮条件用于模拟番茄在水相炖煮体系中的加工过程，以评价不同品种番茄的炖煮风味保持能力。

1.3.2 感官评价

参考王仁杰等^[10]方法稍作修改。挑选12名无味觉、嗅觉障碍且经过专业培训的志愿者开展感官评价，所有样品感官结果取12位评价员评分的平均值。香气属性为清香、果香、甜香、青草香、蒸煮味、脂肪味、番茄香，香气描述词均由评价小组通过预评价讨论确认，滋味属性包括酸、甜、咸和鲜，其他感官评价指标包括质构和整体喜好。得分为感官评价小组成员直接对样品整体香气进行独立打分，采用7标度法来标注各个质量属性：香气强度基本未检测到为0.00分，强度微弱为0.50分，强度中等偏弱为1.00分，强度中等偏强为1.50分，强度偏强为2.00分，强度较强为2.50分，强度强烈为3.00分。

表1 炖煮前后番茄的感官评价标准

Table 1 Sensory Evaluation Criteria for Tomatoes Before and After Simmering					
项目	感官指数	评分标准 (0.00~3.00/0.50)	项目	感官指数	评分标准 (0.00~3.00/0.50)
炖煮前	气味	清香 (香气清香, 清爽)	炖煮后	气味	清香 (香气清香, 清爽)
		果香 (水果香)			果香 (水果香)
		甜香			甜香
		青草香			青草香
		蒸煮味			蒸煮味
		脂肪味			脂肪味
	滋味	番茄香 (浓郁纯正番茄香)		滋味	番茄香 (浓郁纯正番茄香)
		酸味			酸味
		甜味			甜味
		鲜味			鲜味
		咸味			咸味
	质构	形态完整为佳		质构	形态完整为佳
整体喜好			整体喜好		

1.3.3 电子舌测定

参考季文彤等^[11]方法，准确称量3g番茄样品，于1500 r/min条件下均质15 s，间隔10 s后再次均质，重复均质3次，超声震荡15 min，离心(10 000 r, 4℃, 20 min)，去掉上浮油脂和沉淀，取上清部分，定容到100 mL，过0.45 μm滤膜后上样。采用电子舌传感器进行检测，包括AHS(酸)、PKS、CTS(咸)、NMS(鲜)、CPS、ANS、SCS共7个传感器，选择AgCl作为参比电极，该套传感器对酸、咸、鲜和甜具有专一性识别。鉴定出样品的酸味、咸味和鲜味的相对强度值，通过传感器获得的强度值(平均值)数据，利用Origin-2024软件绘制雷达图。

1.3.4 电子鼻测定

参考Song等^[12]采用电子鼻进行测定，准确称取3g样品放入20 mL顶空瓶中，并立即用带聚四氟乙烯硅胶垫片的顶空瓶盖密封，设置实验参数：传感器平衡时间180 s，样品测试时间60 s，选取信号稳定的48~52 s为信号采集时间，每组样品做5次平行重复测定。

1.3.5 GC-IMS 测定

参考Yuan等^[13]方法并稍作修改进行测定，样品前处理：准确称取2g搅碎样品放入20 mL顶空瓶中重复3次。60℃孵化20 min，进样体积500 μL，进样温度65℃。

GC条件 使用MXT-5色谱柱，色谱柱温度60℃，运行时间70 min，漂移气体流量150 mL min⁻¹。IMS条件：漂移管温度45℃，管内线性电压550 v cm⁻¹，漂移气流量150 mL min⁻¹。

1.3.6 GC-MS 测定

参考Yang等^[14]方法并稍作修改，样品前处理：准确称取2g搅碎样品，加入1 μL内标溶液(2-甲基-3-庚酮，0.204 μg·μL⁻¹)立即用带聚四氟乙烯硅胶垫片的顶空瓶盖密封，将样品与55℃下恒温平衡20 min后，用50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头于55℃下萃取40 min，结束后于进样口解析5 min。

GC 条件: 使用 DB-WAX 色谱柱 (30 m×0.18 mm, 0.18 μm), 采用 10:1 分流比进样, 初始柱温度为 40 ℃, 载气为氦气 (纯度>99.99 wt.%), 流量 1.0 mL min⁻¹, 升温程序: 40 ℃保持 3 min, 再以 3 ℃ min⁻¹ 的升温速率升温至 50 ℃, 保持 10 min, 再以 10 ℃ min⁻¹ 速率升温到 120 ℃不保持, 最后以 12 ℃ min⁻¹ 速率升温到 200 ℃保持 7 min。MS 条件: 电子轰击电离源(EI), 温度 230 ℃, 电子能量 70 eV, 传输线温度 150 ℃, 离子扫描范围 *m/z* 33~450, 采集方式 Q 3 Scan。

定性分析: 依据相同色谱条件下的正构烷烃 (C₇~C₃₀) 保留时间计算化合物的保留指数 (Retention index, RI), 通过与美国国家标准与技术研究院 (National institute of standards and technology, NIST) 谱库中检索的信息进行比较, 筛选正、反匹配度均大于 800 的化合物定性鉴定采用 2-甲基-3-庚酮为内标, 并以峰面积归一化对样品中挥发性风味物质含量分析。

由下列公式计算出样品中挥发性化合物的保留指数 RI 值, 再结合文献报道中的保留指数对挥发性化合物进行对比鉴定^[15], 再通过出峰面积进行归一化定量, 确定各种挥发性成分的相对百分含量。

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{T_x - T_n}{T_{n+1} - T_n} \right) \quad (1)$$

式中:

RI——待测未知组分的保留时间;

n, *n*+1——正构烷烃标准品的碳原子数, 其中 *n*<*x*<*n*+1。

定量分析: 根据已知内标 2-甲基-3-庚酮的浓度及峰面积计算待测风味化合物相对于内标物的含量, 计算公式如下:

$$C_x = \frac{C_0 \times V_0 \times S_x}{S_0 \times m} \quad (2)$$

式中:

C_x——为未知化合物含量, μg·kg⁻¹;

C₀——内标物质量浓度, μg·mL⁻¹;

V₀——内标物进样体积, mL;

S_x——未知化合物峰面积;

S₀——内标物峰面积 *m* 为样品质量, kg。

1.3.7 番茄关键香气成分分析

本研究采用相对气味活性值进行分析, OAV 是结合化合物的感觉阈值建立的确定食品关键风味化合物的方法, 用于阐明每种香气化合物对样品整体香气特征的贡献, 一般来说 OAV≥1, 表明该化合物对样品风味有直接的贡献, 本研究根据各化合物相对浓度计算 OAV, 其计算公式如下:

$$OAV_i = \frac{C_i}{OT_i} \quad (3)$$

式中:

V_i——风味物质的相对气味活性值;

C_i——挥发性风味物质的相对质量浓度, μg·kg⁻¹;

OT_i——各挥发性风味化合物在水中的气味阈值。

1.4 数据分析

每个样品重复测定 3 次 (电子舌样品重复 5 次), 记录数据结果。运用 Excel 2016、Origin 2024 软件对试验数据进行分析处理, 结果以“平均值±标准差”的形式表示。运用 SPSS Statistics 23 软件对数据进行差异显著性检验; 运用 Simca.26 进行多元统计分析, 运用 TBtools-11 对关键香气化合物化合物进行聚类分析, 当 *P*<0.05 时不同样品之间存在显著差异。

2 结果与讨论

2.1 五种品种番茄炖煮后感官评价得分结果

由图 1 可知，不同品种番茄在炖煮前后的感官轮廓存在一定差异，综合得分为 12 名评价员打分的平均值。炖煮前，五种番茄的综合感官得分依次为意佰芬-6：1.96、博士 1812：2.13、莱格美万：2.29、1808：1.63 和吉诺比利：2.04；炖煮后分别为 1.50、1.63、2.04、1.54 和 1.96。总体来看，炖煮处理降低了五种品种的综合感官得分，但不同品种的下降幅度存在差异。

从香气属性看，炖煮前番茄主要表现为清香、果香、青草香和番茄香等新鲜香气特征，其中莱格美万在清香、果香和青草香方面评分较高，说明其鲜食品质表现较好。炖煮后，样品中清香、果香和青草香整体减弱，同时出现蒸煮味和脂肪味等热加工相关香气属性，表明炖煮处理显著改变了番茄的香气轮廓。

从滋味属性看，五种番茄炖煮前后均以酸味和甜味为主要特征，说明炖煮处理对番茄主要滋味轮廓的影响弱于对香气轮廓的影响。综合感官结果显示，莱格美万在炖煮前具有较好的新鲜香气表现，而博士 1812 在炖煮后仍保持相对较高的香气综合评分，表现具有较好的炖煮加工适宜性。对于加工适应性评价中 Yuan 等^[16]在以鳞伞菇的研究中，讨论了以四种烹饪方式（煮、蒸、微波、油炸）对其挥发性风味化合物产生显著差异化影响，最后得到油炸或微波处理更具加工适应性。

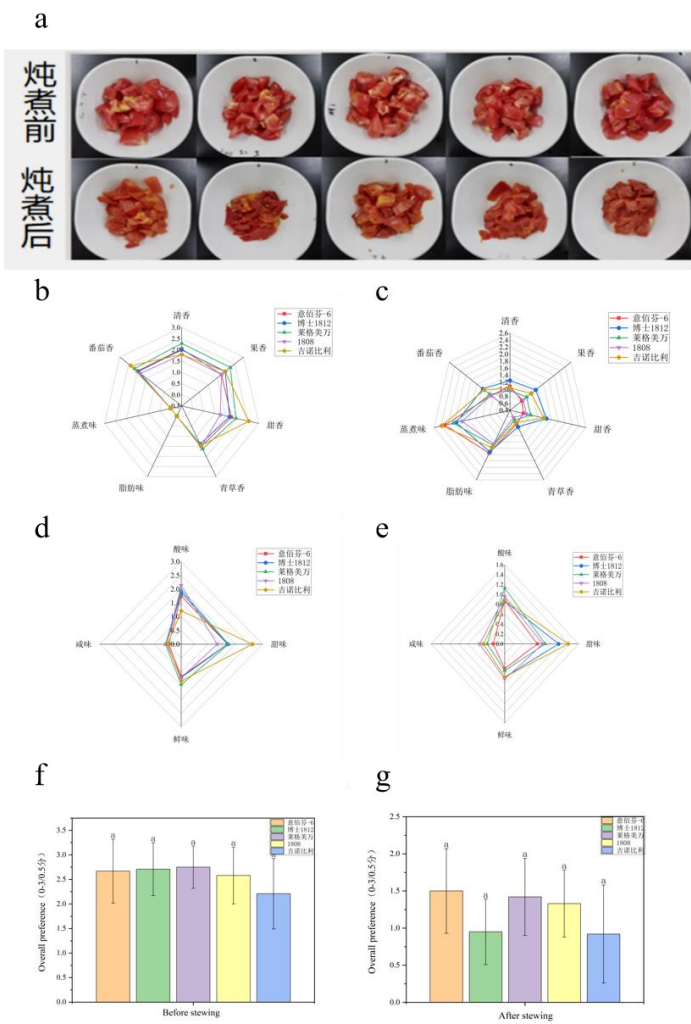


图 1 五个品种番茄炖煮后感官品质与果实形态完整度综合评价

Fig.1 Comprehensive evaluation of sensory quality and fruit morphology integrity of five varieties of tomatoes before and after cooking

注：（a）从左到右分别为意佰芬-6、博士 1812、莱格美万、1808 和吉诺比利品种的番茄炖煮前后图；（b）炖煮前感官评价香气

雷达图; (c) 炖煮后感官评价香气雷达图; (d) 炖煮前感官滋味雷达图; (e) 炖煮后感官滋味雷达图; (f) 炖煮前感官评价整体喜好柱状图; (g) 炖煮后感官评价整体喜好柱状图。图 f、g 中柱上字母表示组间无显著差异 ($P>0.05$)。

2.2 五种品种番茄炖煮前后电子鼻分析

从电子鼻结果的香气轮廓看, 如图 2a、b 所示, 炖煮前后的五个品种番茄的气味轮廓相似, 其中五个品种均在 W1W (对萜类和含硫化物化合物敏感) 和 W5S (对氮氧化合物敏感) 2 个传感器的气味响应值最大。炖煮前莱格美万在 W5S 和 W1W 传感器响应值的最高, 炖煮后 1808 在 W5S 传感器响应值最高, 吉诺比利在 W1W 传感器的响应值最高, 结果显示炖煮前莱格美万品种的香气更丰富, 而炖煮后吉诺比利品种更好。

从电子鼻结果的香气 PCA 看, 如图 2c 所示, 炖煮前第一主成分贡献率为 64.00%, 第二主成分为 25.60%, 累计贡献率 89.60%, 可较好解释炖煮前番茄香气物质的主要变异信息, 样品在二维 PCA 空间呈离散分布, 1808 和意佰芬-6 均在第三象限且相距较近, 证明具有相似的香气特征。如图 2d 所示, 炖煮后第一主成分贡献率为 54.40%, 第二主成分为 35.60%, 累计贡献率为 90.00%, 相比炖煮前的 PCA 二维空间更加聚集, 代表炖煮加工能够减小不同品种之间的香气差异。

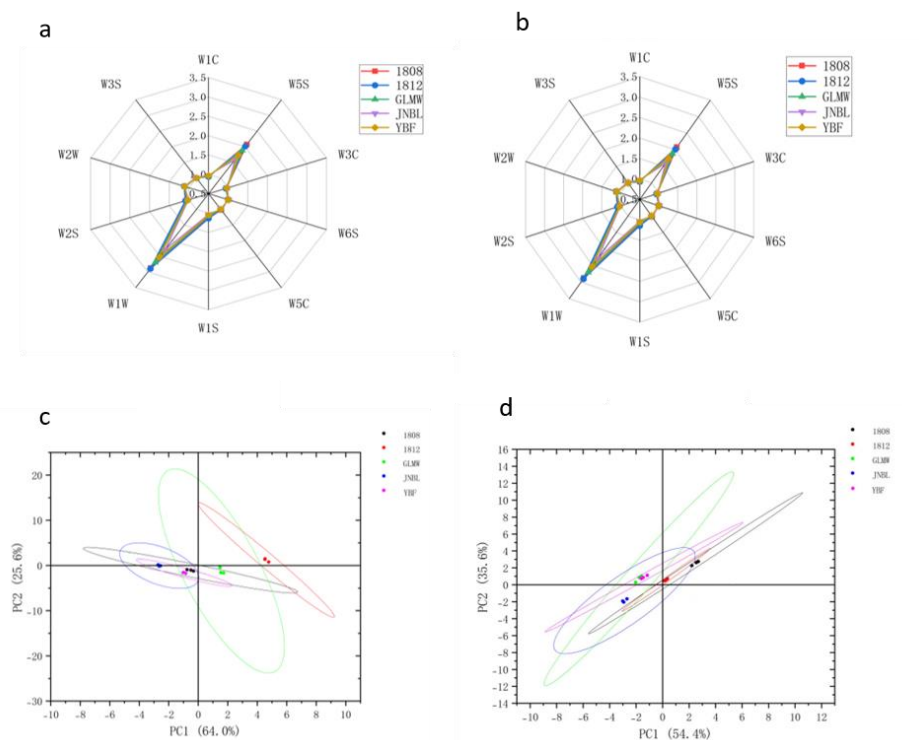


图 2 五个番茄品种炖煮前后电子鼻结果

Fig.2 Electronic nose results of five tomato varieties before and after cooking

注: (a) 意佰芬-6、博士 1812、莱格美万、1808 和吉诺比利品种的番茄炖煮前电子鼻雷达图; (b) 炖煮后电子鼻雷达图; (c) 炖煮前电子鼻 PCA 图; (d) 炖煮后电子鼻 PCA 图。1812 代表博士 1812, GLMW 代表格莱美万, JNBL 代表吉诺比利, YBF 代表意佰芬-6。

2.3 五种品种番茄炖煮前后电子舌分析

电子舌可通过传感器阵列反映样品整体滋味响应差异, 是作为区分样品滋味差异的快速感官智能检测分析工具。由图 3 可知, 不同品种番茄在电子舌响应模式上存在一定差异, 但炖煮前后整体滋味轮廓变化幅度小于香气轮廓变化。各样品主要在酸味、甜味相关响应上表现较为突出, 其结果与 2.1 感官评价中以酸味、甜味为核心滋味属性的感官评分结果基本吻合。与炖煮前相比, 炖煮后不同品种番茄的电子舌响应曲线整体趋于接近, 说明水相炖煮可能降低了品种间部分滋味差异。总体来看, 炖煮处理对番茄滋味轮廓的影响相对较小, 而对挥发性香气特征的影响更为明显。

的香气物质；而番茄本身的主体香气，则是成熟果实散发出的复合风味，兼具甜香、果香与轻微泥土气息，由果实发育成熟阶段通过多条代谢途径合成的各类挥发性物质共同叠加形成^[15,17]。炖煮后 3-辛酮、乙酸乙酯、2-己酮、甲酸异戊酯、2-甲基丁酸乙酯、2-庚酮、2-正戊基呋喃、甲基庚烯酮这些特征香气挥发性化合物含量显著降低，而这类物质是赋予番茄青草香、果香及花香的核心香气化合物，且多属于高挥发性化合物，在炖煮的高温环境下极易大量挥发散失而导致含量减少。由于热处理导致香气化合物减少的研究有许多，例如 Wang 等^[18]在猪肉嫩里脊的炒制研究中发现，随着加热时间延长，多种醛类（如己醛、壬醛）和含硫化合物含量显著下降，Lv 等^[19]在鸡肉炖煮过程中发现，关键挥发性物质如 1-辛烯-3-醇、壬醛等随炖煮时间延长而减少。

炖煮后保留和新生成的挥发性化合物主要有丙硫醇、异戊醇、正丙醇、2-甲基丁醛、正丁醛、2-甲基丁醛和乙偶姻挥发性化合物。其中乙偶姻是番茄在炖煮过程中通过美拉德反应和焦糖化两种途径新生成的^[20]；正丁醛主要来源于番茄中的亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸，这类物质在加热过程中发生氧化反应，经 β -断裂降解生成多种直链醛类，正丁醛为其产物之一^[21]；戊醇和正丙醇是由于自身沸点较高，在高温处理中挥发性损失较小而得以保留^[22]；而丙硫醇则有可能是含硫氨基酸经热降解作用新生成的特征挥发性化合物^[23]，这些特征香气化合物的变化共同赋予了炖煮后的蒸煮味和脂肪味。在热处理过程中导致香气化合物增加的研究中，Yuan 等^[16]在羊肚菌经微波或油炸处理后的研究中，发现挥发性风味化合物总数增加，表明热诱导反应可生成新的香气物质。

2.5 五种品种番茄炖煮前后挥发性成分与含量分析

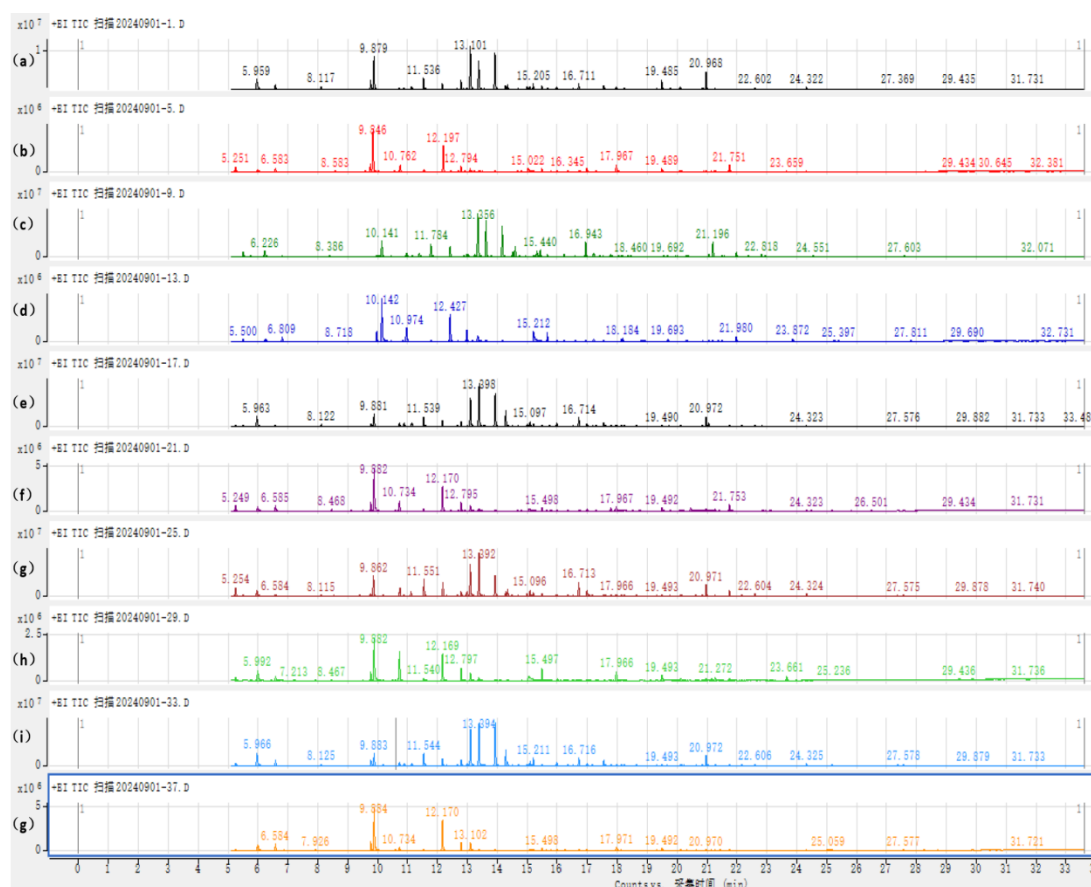


图5 总离子流图

Fig.5 Total ion current chromatograms

注：(a) 炖煮前意佰芬-6；(b) 炖煮后意佰芬-6；(c) 炖煮前博士 1812；(d) 炖煮后博士 1812；(e) 炖煮前莱格美万；(f) 炖煮后莱格美万；(g) 炖煮前 1808；(h) 炖煮后 1808；(i) 炖煮前吉诺比利；(j) 炖煮后吉诺比利。图 5 为不同样品挥发性成分总离子流图。受限于部分色谱峰共流出，图谱未直接标注峰编号，图中关键香气化合物的名称和保留时间详见表 6。

总离子流图（Total Ion Chromatogram, TIC）是 GC-技术解析复杂挥发性混合物的基础核心图谱，可完整记录色谱分离全过程中质谱检测器采集的全部离子信号，图谱中单个色谱峰对应某一挥发性组分在特定保留时间下的

洗脱信^[24]。由图 5 可知, 炖煮前五个品种色谱出峰分布规律相似, 说明该类挥发性化合物组分可作为番茄特征香气标志物, 炖煮后所有品种色谱峰数量均明显降低, 证实炖煮加工会显著改变番茄整体香气轮廓。

对挥发性物质与感官属性进行主成分分析, 得到 PCA 载荷双标图。由图 6 可知, PC1 与 PC2 方差贡献率分别为 35.60%和 23.80%, 二者累计贡献率为 59.40%, 可较好反映样品中挥发性组分与感官风味之间的相关关系。红色箭头代表感官风味属性, 黑色方块代表挥发性化合物; 向量之间的夹角表征相关性大小, 夹角越小代表相关性越强; 向量落点与同心圆圆心的距离代表相关性强弱。果香、青草香、番茄香与甜香分布于 PC1 正方向, 蒸煮味位于 PC1 负方向; 2-正戊基呋喃、1-己醇、反式-2-己烯醇对青草香、果香贡献突出, 说明这类醇类、呋喃类物质是形成果香、青草香的关键贡献组分; 苯乙醇、醋酸、2-羟基-3-戊酮等物质与蒸煮味相关性较高; 叶醇、反式-2-辛烯醇与番茄香、甜香具有较强相关性; 壬醛、甲基庚烯酮、二甲基二硫醚等与脂肪味关联紧密。

由表 2 可知, 炖煮前共检出 48 种挥发性香气化合物, 以醇类 (29 种) 占比最高, 1808、博士 1812、意伯芬-6、莱格美万、吉诺比利检出 35、25、32、26、42 种, 五个品种共有挥发性香气化合物 16 种, 其中(E)-2-己烯醇 ($117.73 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、2-乙基呋喃 ($9.59 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、2-正戊基呋喃 ($38.12 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 及愈创木酚 ($35.11 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量显著较高, 这些特征香气物质共同赋予其更为浓郁的果香与清香, 其中(E)-2-己烯醇直接贡献强烈的青草、生青气息, 是未熟或轻微损伤番茄的标志性香气, 2-正戊基呋喃具有坚果、青豆和泥土样香气, 愈创木酚带有烟熏、药草和木质调性^[1,25]。由表 4 可知, 炖煮处理后番茄样品中共检出的挥发性化合物种类从生品的 48 种锐减至 28 种, 降幅高达 41.7%, 醇类种类数减少最显著, 其中 1808、博士 1812、意伯芬-6、莱格美万和吉诺比利品种依次检出 18、21、19、15、25 种, 共有挥发性香气化合物仅 6 种, 表明炖煮处理显著降低了番茄挥发性物质种类及品种间共有组分数量, 针对这一变化, 现有研究已在番茄类产品热加工体系中报道了挥发性组分的损耗现象: 番茄热烫处理后 C₆醛醇类物质浓度显著降低^[26], 番茄汁经高强度热处理后青草调挥发性物质损失, 同时煮熟调挥发性物质生成^[27], 在关键香气组分变化层面, 本研究检测到炖煮后(E)-2-己烯醇等醇类特征香气物质显著减少, 这与番茄热烫加工中 C₆醛醇类降解的趋势相近; 但本研究进一步发现, 炖煮体系中二甲基二硫醚、2-羟基-3-戊酮等含硫及含氧化合物成为蒸煮味的重要贡献者, 这一现象在已有的番茄罐头热加工研究中较少被讨论^[28]。

由表 3 和图 6 可知, 炖煮前 OAV>1 的挥发性香气化合物有 18 种, 进一步筛选获得 7 种挥发性香气化合物, 它们在五个番茄品种中的 OAV 均大于 1, 包括 2-正戊基呋喃、乙偶姻、叶醇、1-辛烯-3-醇、正庚醇、(E)-2-辛烯醇和香叶醇, 总含量最高的是叶醇 ($1119.40 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、其次是乙偶姻 ($315.45 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最后是正庚醇 ($167.18 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 这些挥发性成分主要来自于自由氨基酸、脂肪酸和类胡萝卜素的降解。其中叶醇是典型的“绿叶挥发物”(Green Leaf Volatiles, GLVs) 之一, 主要由植物细胞中的脂肪酸 (亚麻酸和亚油酸) 通过脂氧合酶 (LOX) 途径降解产生^[29], 在番茄果实发育和成熟过程中, 这些前体物质的降解会释放出大量的 GLVs, 赋予番茄清新、青草和略带甜味的香气^[30]。乙偶姻的合成与糖代谢密切相关, 其前体为丙酮酸——糖酵解的终产物, 在番茄果实成熟过程中, 呼吸跃变导致糖酵解通量急剧升高, 丙酮酸产生增加, 当呼吸链趋于饱和时, 丙酮酸部分通过发酵途径转化, 经丙酮酸脱羧酶生成乙醛, 两分子乙醛 (或乙醛与活性乙醛) 缩合形成乙偶姻, 乙偶姻在低浓度下能提供果香和甜香, 对番茄的甜味感知有积极作用^[31]。正庚醇属于脂肪酸衍生的挥发性醇类化合物, 其前体物质主要是脂肪酸, 再通过不同位点的氧化裂解产生^[32], 在番茄整体风味中, 正庚醇与其他脂肪酸衍生挥发物协同作用, 共同构成番茄特征性的青草香和果香。2-正戊基呋喃、1-辛烯-3-醇、(E)-2-辛烯醇和香叶醇这四种挥发性化合物, 在丰富番茄风味层次、提升风味丰度方面发挥着重要作用^[9]。OAV 值分析显示, 芳樟醇 (OAV 1.05) 是吉诺比利的关键活性物质贡献了柑橘花香和甜玫瑰气味, 4-十二内酯 (OAV 4.05) 是意伯芬-6 的关键活性物质贡献了果香, 愈创木酚 (OAV 21.94) 是莱格美万关键活性物质贡献了酚醛类气味和木香气味^[31]。这一结果解释 2.2 电子鼻结果中的在 W5S 传感器的响应值。

由表 5 和图 6 可知, 炖煮后 OAV>1 的挥发性香气化合物有 9 种, 生成新挥发性香气化合物且 OAV>1 的有 6 种, 总含量最高是 2-甲基丁醇 ($289.70 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 是由于番茄在加热过程中的美拉德反应产生的 α -二羰基化合物与 L-异亮氨酸发生 Strecker 降解, 生成 2-甲基丁醛, 再经进一步还原生成 2-甲基丁醇^[33]; 其次是甲基庚烯酮 ($173.73 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 主要来源于类胡萝卜素的热氧化降解, 是番茄红素和 β -胡萝卜素降解的共同标志性产物, 具有典型的甜香和果香; 最后是正己醇 ($45.04 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 主要来源于脂肪酸的脂氧合酶途径 (LOX Pathway) 的残余活性及热氧化, 番茄组织破碎和加热初期, 膜脂中的亚油酸 (Linoleic acid) 和亚麻酸 (Linolenic acid) 在残留的脂氧合酶 (LOX) 催化下形成过氧化物, 进而裂解为正己醛, 最后再通过还原反应生成正己醇^[34]。炖煮后出现

的蒸煮味是由于加热过程中低分子量的己醇和己醛快速蒸发，从而使得新鲜草本和森林气韵减弱，并且醇类和醛类在升温过程中发生进一步氧化、酯化或分解反应，从而改变化合物的结构，形成新的香气特性^[6,35]，代表挥发性化合物是二甲基二硫醚和 2-羟基-3-戊酮，而脂肪味主要是由于番茄中的油脂降解和脂溶性香气化合物的生成，代表挥发性化合物是壬醛和香叶基丙酮。

炖煮前 1808 的特征香气化合物为 2-己烯醛 (7.72 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和异丁醇 (3.87 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，博士 1812 的特征香气化合物为(Z)-2-戊烯醇 (13.78 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、2,3-丁二醇 (41.82 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 2-异丁基噻唑 (66.98 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，意佰芬-6 的特征香气化合物为(E,E)-2,4-癸二烯醛 (5.88 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、法尼醇 (3.41 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 beta-紫罗兰酮 (3.03 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，莱格美万的特征香气化合物为 3-辛酮 (18.26 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和愈创木酚 (35.11 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 吉诺比利的特征香气化合物为苯甲醛 (3.29 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、(E)-2-戊醇 (13.19 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、2-甲硫基乙醇 (7.71 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、糠醇 (7.39 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和苯甲醇 (10.71 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，这些挥发性化合物作为品种间的差异组分，从而使各个品种之间的香气轮廓存在差异。而炖煮后 1808 品种中新生成了壬醛 (1.37 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，吉诺比利品种中生成了香叶基丙酮 (2.05 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，二者均赋予了番茄脂肪香气特征；吉诺比利品种中检出的二甲基二硫醚 (1.28 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 以及意佰芬-6 品种中的 2-羟基-3-戊酮 (1.73 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 赋予了番茄蒸煮风味，这是导致炖煮后的番茄产生脂肪味和蒸煮味的主要原因。

炖煮前莱格美万品种的(E)-2-己烯醛(41.13 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、3-己烯-1-醇(14.97 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、(E)-2-己烯醇(117.73 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、庚烯-1-醇(25.07 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、辛醇(86.05 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量均为五种番茄品种中含量最高，这些挥发性香气化合物协同作用赋予其浓郁纯正的番茄香，使炖煮前香气感官综合评分最高，表明莱格美万更适宜鲜食。炖煮后博士 1812 品种中 3-甲基-1-戊醇(17.16 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、正己醇(23.16 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、甲基庚烯酮(111.72 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、乙偶姻(503.54 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 及醋酸(220.93 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 等香气化合物含量均为五种品种中最高，赋予该品种更浓郁的果香和甜香特征，与炖煮后香气感官综合评分最高相契合，表明博士 1812 更适合炖煮加工。

表 2 炖煮前番茄挥发性化合物含量表

Table 2 Content of Volatile Compounds in Tomatoes Before Stewing

						挥发性风味化合物浓度/(μg·kg ⁻¹)				
	RI	CAS	分子式	化合物	1808	博士 1812	意佰芬-6	莱格美万	吉诺比利	
醛	1	1 125	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	正己醛	5.53±0.35 ^c		7.99±0.88 ^b	15.25±1.25 ^a	8.91±0.41 ^b
	2	1 210	505-57-7	C ₆ H ₁₀ O	2-己烯醛	7.72±0.56				
	3	1 225	6 728-26-3	C ₆ H ₁₀ O	(E)-2-己烯醛		10.5±0.88 ^c	10.54±1.33 ^c	41.13±1.93 ^a	26.41±1.31 ^b
	4	1 425	2 548-87-0	C ₈ H ₁₄ O	(E)-2-辛烯醛	4.22±0.44 ^b		7.89±0.63 ^a		7.06±0.40 ^a
	5	1 522	100-52-7	C ₇ H ₆ O	苯甲醛					3.29±0.94
	6	1 730	5 392-40-5	C ₁₀ H ₁₆ O	柠檬醛	2.43±0.52 ^c		3.67±0.51 ^b		5.67±0.37 ^a
	7	1 762	25 152-84-5	C ₁₀ H ₁₆ O	(E,E)-2,4-癸二烯醛			5.88±0.71		
醇	1	1 094	78-83-1	C ₄ H ₁₀ O	异丁醇	3.87±0.64				
	2	1 141	71-36-3	C ₄ H ₁₀ O	正丁醇					2.52±0.60
	3	1 203	123-51-3	C ₅ H ₁₂ O	异戊醇	32.27±1.12 ^a	30.98±2.80 ^b		30.41±1.59 ^b	27.60±1.61 ^b
	4	1 246	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	正戊醇	91.27±7.97 ^a	72.31±2.77 ^b	57.52±6.11 ^c	65.46±3.00 ^{bc}	86.87±5.96 ^a
	5	1 306	1 576-96-1	C ₅ H ₁₀ O	(E)-2-戊醇	2.36±0.19				13.19±1.25
	6	1 322	589-35-5	C ₆ H ₁₄ O	3-甲基-1-戊醇	3.66±0.79				
	7	1 328	1 576-95-0	C ₅ H ₁₀ O	(Z)-2-戊烯醇		13.78±1.16 ^a		8.45±0.64 ^b	
	8	1 348	111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	1-己醇	243.35±10.53 ^b	236.38±17.47 ^a	142.4±7.16 ^d	406.88±11.09 ^d	332.53±16.28 ^c
	9	1 359	544-12-7	C ₆ H ₁₂ O	3-己烯-1-醇				14.97±0.06 ^a	12.65±1.84 ^b
	10	1 379	928-96-1	C ₆ H ₁₂ O	叶醇	91.06±5.44 ^c	209.93±7.88 ^b	200.87±11.78 ^b	282.7±10.70 ^b	334.84±15.32 ^a
	11	1 400	928-95-0	C ₆ H ₁₂ O	(E)-2-己烯醇	16.93±0.68 ^c	30.69±1.47 ^b	16.82±0.79 ^c	117.73±9.01 ^a	109.37±4.64 ^a
	12	1 443	3 391-86-4	C ₈ H ₁₆ O	1-辛烯-3-醇	8.37±1.32 ^c	9.66±0.63 ^c	28.82±1.79 ^a	15.43±1.23 ^b	3.66±0.46 ^d
	13	1 450	111-70-6	C ₇ H ₁₆ O	正庚醇	27.56±1.91 ^c	41.17±2.43 ^a	24.43±3.39 ^c	42.15±1.45 ^b	31.87±3.19 ^b
	14	1 457	1 569-60-4	C ₈ H ₁₆ O	6-甲基-5-庚烯-2-醇	20.31±2.38 ^d	41.81±2.63 ^b	33.13±5.34 ^c	21.4±0.67 ^d	56.79±3.15 ^d

现代食品科技				Modern Food Science and Technology					2027, Vol.43, No.8				
	15	1 484	104-76-7	C ₈ H ₁₈ O	2-乙基己醇							2.91±0.89	
	16	1 505	33 467-76-4	C ₇ H ₁₄ O	(E)-2-庚烯-1-醇	6.62±0.27 ^d	13.23±0.70 ^c	12.3±0.97 ^c	25.07±0.76 ^a			17.96±1.22 ^b	
	17	1 528	5 271-38-5	C ₃ H ₈ OS	2-甲硫基乙醇							7.71±0.96	
	18	1 540	78-70-6	C ₁₀ H ₁₈ O	芳樟醇							6.31±0.46	
	19	1 552	111-87-5	C ₈ H ₁₈ O	辛醇	57.77±3.07 ^b	81.97±3.81 ^a	32.37±5.23 ^c	86.05±7.42 ^a			49.2±5.36 ^b	
	20	1 585	513-85-9	C ₄ H ₁₀ O ₂	2,3-丁二醇		41.82±4.31						
	21	1 607	18 409-17-1	C ₈ H ₁₆ O	(E)-2-辛烯醇	4.98±0.54 ^e	10.69±1.72 ^d	16.84±2.70 ^c	25.91±1.41 ^b			32.64±3.79 ^a	
	22	1 610	64 275-73-6	C ₈ H ₁₆ O	(Z)-5-辛烯-1-醇	5.79±1.31 ^b						7.77±0.49 ^a	
	23	1 654	98-00-0	C ₅ H ₆ O ₂	糠醇							7.39±0.41	
	24	1 654	143-08-8	C ₈ H ₂₀ O	1-壬醇	4.29±0.09 ^b	7.24±0.48 ^a						
	25	1 842	106-24-1	C ₁₀ H ₁₈ O	香叶醇	6.26±0.42 ^c	13.00±1.03 ^a	9.02±1.18 ^b	10.25±0.84 ^b			12.44±0.89 ^a	
	26	1 875	100-51-6	C ₇ H ₈ O	苯甲醇							10.71±1.70	
	27	1 881	4 602-84-0	C ₁₅ H ₂₆ O	法尼醇			3.41±0.64					
	28	1 911	60-12-8	C ₈ H ₁₀ O	苯乙醇	28.19±4.17 ^a	27.49±0.94 ^a	5.38±0.72 ^c	15.32±3.08 ^b			10.97±2.81 ^c	
	29	1 978	14 507-02-9	C ₁₀ H ₁₈ O	2,4-癸二烯-1-醇	7.83±1.16 ^a	10.58±1.69 ^a	9.26±1.16 ^a	8.21±0.71 ^a			8.25±0.96 ^a	
酮	1	1 175	110-43-0	C ₇ H ₁₄ O	2-庚酮	3.77±0.22 ^b						13.81±1.17 ^a	
	2	1 248	106-68-3	C ₈ H ₁₆ O	3-辛酮				18.26±1.01				
	3	1 332	110-93-0	C ₈ H ₁₄ O	6-甲基-5-庚烯-2-酮	161.01±5.75 ^d	313.29±12.59 ^a	258.28±17.92 ^c	281.09±8.31 ^{bc}			302.30±13.06 ^{ab}	
	4	1 852	689-67-8	C ₁₃ H ₂₂ O	香叶基丙酮	51.27±1.11 ^c	84.17±3.99 ^b	74.56±4.51 ^a					
	5	1 943	14 901-07-6	C ₁₃ H ₂₀ O	beta-紫罗兰酮			3.03±0.64					
含硫化 合物	1	1 404	18 640-74-9	C ₇ H ₁₁ NS	2-异丁基噻唑	29.92±2.51 ^b	66.98±5.64 ^a	27.19±3.74 ^b					
	1	1 029	3 208-16-0	C ₆ H ₈ O	2-乙基呋喃	3.09±0.22 ^c			9.59±0.45 ^a			6.57±0.36 ^b	
其他	2	1 223	3 777-69-3	C ₉ H ₁₄ O	2-正戊基呋喃	25.55±1.43 ^c	23.56±4.22 ^b	12.39±1.02 ^d	38.12±2.44 ^a			27.81±2.63 ^b	
	3	1 280	513-86-0	C ₄ H ₈ O ₂	乙偶姻	85.60±2.31 ^a	77.19±7.72 ^a	37.34±3.57 ^c	60.53±3.16 ^c			54.79±5.33 ^b	
	4	1 826	104-46-1	C ₁₀ H ₁₂ O	茴香脑	4.37±0.35 ^b		4.70±0.88 ^a					
	5	1 858	90-05-1	C ₇ H ₈ O ₂	愈创木酚				35.11±3.07				
	6	2 032	2 305-05-7	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	4-十二内酯			1.74±0.25					

注：同行不同小写字母代表差异显著（ $P<0.05$ ）。下表同。

表 3 炖煮前番茄 OAV>1 的挥发性化合物表

Table 3 Volatile Compounds with OAV>1 in Tomatoes Before Stewing

							OAV>1				
	RI	CAS	分子式	化合物	代表香气						
						1808 博士	1812 意佰芬	6 莱格美	万 吉诺比	利	
醇	1	1 443	3 391-86-4	C ₈ H ₁₆ O	1-辛烯-3-醇	生鸡肉香	5.58	6.44	19.21	0.00	2.44
	2	1 842	106-24-1	C ₁₀ H ₁₈ O	香叶醇	花香果香	0.95	1.97	1.37	1.55	1.88
	3	1 540	78-70-6	C ₁₀ H ₁₈ O	芳樟醇	花香	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05
	4	1 203	123-51-3	C ₅ H ₁₂ O	异戊醇	酒精气味	8.07	7.75	0.00	7.60	6.90
	5	1 348	111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	1-己醇	甜香	37.40	43.46	25.43	72.66	59.38
	6	1 379	928-96-1	C ₆ H ₁₂ O	叶醇	青草香	0.83	1.91	1.83	2.57	3.04
	7	1 450	111-70-6	C ₇ H ₁₆ O	正庚醇	酒精气味	5.10	7.62	4.52	7.81	5.90
	8	1 607	18 409-17-1	C ₈ H ₁₆ O	(E)-2-辛烯醇	果香	0.25	0.53	0.84	1.30	1.63
醛	1	1 425	2 548-87-0	C ₈ H ₁₄ O	(E)-2-辛烯醛	果香	1.41	0.00	2.63	0.00	2.35
	2	1 125	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	正己醛	清香	1.11	0.00	1.60	3.05	1.78

现代食品科技			Modern Food Science and Technology				2027, Vol.43, No.8			
	3	1 762 25 152-84-5	C ₁₀ H ₁₆ O	(E,E)-2,4-癸二烯醛	果香	0.00	0.00	29.40	0.00	0.00
含硫化 合物	1	1 404 18 640-74-9	C ₇ H ₁₁ NS	2-异丁基噻唑	番茄香	1.03	2.31	0.94	0.00	0.00
酮	1	1 332 110-93-0	C ₈ H ₁₄ O	甲基庚烯酮	果香	2.37	4.61	3.80	4.13	4.45
	1	1 223 3 777-69-3	C ₉ H ₁₄ O	2-正戊基呋喃	果香	3.17	4.41	2.14	6.57	4.79
	2	1 280 513-86-0	C ₄ H ₈ O ₂	乙偶姻	黄油香	6.11	5.51	2.67	4.32	3.91
其他	3	1 858 90-05-1	C ₇ H ₈ O ₂	愈创木酚	木香	0.00	0.00	0.00	21.94	0.00
	4	2 386 2 628-17-3	C ₈ H ₈ O	对羟基苯乙烯	酚类味	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30
	5	2 032 2 305-05-7	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	4-十二内酯	果香	0.00	0.00	4.05	0.00	0.00

表 4 炖煮后番茄挥发性化合物含量表

Table 4 Content of Volatile Compounds in Tomatoes after Cooking										
	RI	CAS	分子式	化合物	挥发性风味化合物浓度/(μg kg ⁻¹)					
					1808	博士 1812	意佰芬-6	莱格美万	吉诺比利	
醛	1	1 388 124-19-6	C ₉ H ₁₈ O	壬醛	1.37±0.39					
	2	1 522 100-52-7	C ₇ H ₆ O	苯甲醛	2.19±0.45 ^a		1.38±0.48 ^a		2.21±0.58 ^a	
	3	1 730 5 392-40-5	C ₁₀ H ₁₆ O	柠檬醛					1.02±0.23	
醇	1	1 202 123-51-3	C ₅ H ₁₂ O	异戊醇	58.97±6.63 ^a		22.76±0.5 ^b	26.02±1.43 ^b	7.83±0.77 ^c	
	2	1 215 137-32-6	C ₅ H ₁₂ O	2-甲基丁醇		289.7±5.18				
	3	1 046 71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	正戊醇	4.47±0.36 ^c	21.98±0.17 ^a	4.05±0.35 ^c	5.85±0.63 ^b	2.79±0.21 ^d	
	4	1 322 589-35-5	C ₆ H ₁₄ O	3-甲基-1-戊醇	1.40±0.10 ^b	17.16±2.59 ^a	2.4±0.12 ^b	1.73±0.02 ^b		
	5	1 323 626-89-1	C ₆ H ₁₄ O	4-甲基-1-戊醇		10.83±0.25 ^a	1.45±0.12 ^b	1.32±0.09 ^b		
	6	1 348 111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	正己醇	8.82±1.03 ^b	23.16±2.7 ^a	4.33±0.65 ^c	5.12±0.71 ^c	3.61±0.21 ^c	
	7	1 380 928-96-1	C ₆ H ₁₂ O	叶醇	1.42±0.7 ^b	8.18±0.93 ^a	1.68±0.84 ^b		1.7±0.72 ^b	
	8	1 471 1 569-60-4	C ₈ H ₁₆ O	6-甲基-5-庚烯-2-醇		33.24±1.72				
	9	1 498 104-76-7	C ₈ H ₁₈ O	2-乙基己醇		5.45±0.3 ^a			0.91±0.09 ^b	
	10	1 540 78-70-6	C ₁₀ H ₁₈ O	芳樟醇	1.48±0.3 ^b	13.66±0.1 ^a			0.92±0.01 ^c	
	11	1 553 111-87-5	C ₈ H ₁₈ O	辛醇	1.64±0.64 ^a				1.04±0.29 ^b	
	12	1 570 513-85-9	C ₄ H ₁₀ O ₂	2,3-丁二醇	2.85±0.58 ^c	40.8±0.78 ^a	9.73±0.57 ^b		1.96±0.7 ^c	
	13	1 911 60-12-8	C ₈ H ₁₀ O	苯乙醇	4.17±0.57 ^c	172.39±5.36 ^a	13.91±2.1 ^b	13.6±1.1 ^b	1.09±0.12 ^c	
酮	1	1 308 116-09-6	C ₃ H ₆ O ₂	羟基丙酮		11.86±0.63				
	2	1 332 110-93-0	C ₈ H ₁₄ O	甲基庚烯酮	16.44±2.39 ^{bc}	111.72±7.18 ^a	8.15±0.68 ^c	13.34±0.28 ^c	24.08±2.98 ^b	
	3	1 355 5 704-20-1	C ₅ H ₁₀ O ₂	2-羟基-3-戊酮			1.73±0.09			
	4	1 590 1 604-28-0	C ₈ H ₁₂ O	6-甲-3,5-庚二烯-2-酮					1.15±0.08	
	5	1 851 689-67-8	C ₁₃ H ₂₂ O	香叶基丙酮					2.05±0.43	
含硫化 合物	1	1 123 624-92-0	C ₂ H ₆ S ₂	二甲基二硫					1.28±0.27	
其他化 合物	1	1 279 513-86-0	C ₄ H ₈ O ₂	乙偶姻	52.01±8.31 ^c	503.54±4.66 ^a	71.42±1.8 ^b	55.92±5.62 ^c	52.47±2.17 ^c	
	2	1 447 64-19-7	C ₂ H ₄ O ₂	醋酸	18.75±0.96 ^c	220.93±3.07 ^a	35.43±5.45 ^b	13.76±2.58 ^c	6.48±1.43 ^d	
	3	1 695 503-74-2	C ₅ H ₁₀ O ₂	异戊酸		36.3±1.02				
	4	1 826 104-46-1	C ₁₀ H ₁₂ O	茴香脑	1.64±0.34 ^b	9.78±0.61 ^a	0.97±0.04 ^{bc}		0.7±0.19 ^c	
	5	2 183 112-05-0	C ₉ H ₁₈ O ₂	正壬酸					2.06±0.91	
	6	2 405 2 628-17-3	C ₈ H ₈ O	4-乙烯基苯酚		7.48±0.92				

表 5 炖煮后番茄 OAV>1 的挥发性化合物表

2.6 五种品种番茄炖煮前后挥发性化合物主成分 (PCA) 和偏最小二乘判别 (PLS-DA) 分析

为进一步解析不同品种番茄炖煮前后香气挥发性化合物的差异,对番茄品种中挥发性香气化合物中 $OAV>1$ 的香气化合物进行分析,用主成分 (PCA) 观察样品整体分布,构建正交偏最小二乘判别模型用于筛选差异挥发物($VIP>1$)^[5,36]。主成分中发现不同品种的番茄在空间中呈现出明显的分布模式,如图 7a 所示,炖煮前博士 1812、莱格美万和吉诺比利在 PCA 得分图中的位置较为接近,表明这三类品种炖煮前的香气特征相似度较高,炖煮后如图 7b 所示,1808 和意佰芬间隔较远,表明热处理下博士 1812、莱格美万和吉诺比利品种产生的变化较为一致,这与它们产生的挥发性化合物含量有关,而 1808 和意佰芬-6 品种差异较大,表明热处理对这两种品种的香气轮廓影响较大。

选取炖煮前香气活性值 ($OAV>1$) 的 16 种挥发性化合物及炖煮后 ($OAV>1$) 的 6 种化合物纳入 PLS-DA 分析。结果如图 7c、图 7d 所示,主成分预测能力参数 Q^2 为 0.50,组间区分能力参数 R^2Y 为 0.84,对自变量的解释能力参数 R^2X 为 0.10,上述指标表明该模型具有良好的解释力与预测能力,说明上述挥发性化合物在不同品种番茄间存在显著差异,是造成品种间香气特征差异的关键物质,可作为番茄风味品质差异的特征标志物。纵坐标方向样本间距较小表示组内差异较低;横坐标方向则反映组间差异,其中博士 1812 品种在炖煮前后的香气组成均与其他品种存在明显差异。

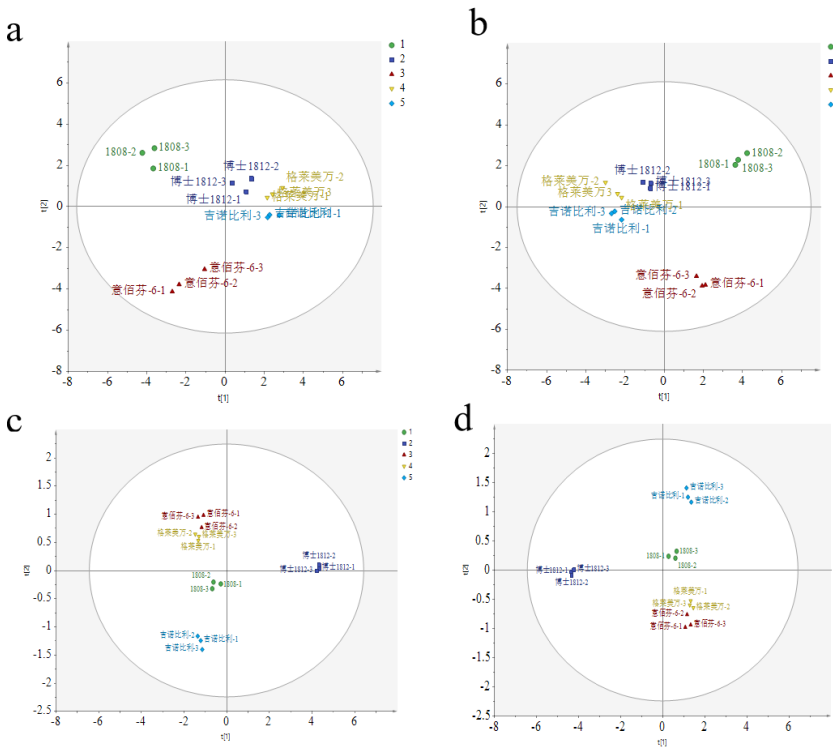


图 7 (a) 意佰芬-6、博士 1812、莱格美万、1808 和吉诺比利品种番茄炖煮前 PCA 得分图; (b) 炖煮后 PCA 得分图; (c) 炖煮前 PLS-DA 得分图; (d) 炖煮后 PLS-DA 得分图

Fig.7 (a) PCA score plots of varieties of Intabella-6, doctor 1812, Laigemeiwan 1808 and Ginobili before cooking; (b) PCA score plot after cooking; (c) PLS-DA score plot before cooking; (d) PLS-DA score plot after cooking

2.7 五种品种番茄炖煮前后关键香气化合物相关性分析

为更直观呈现出不同番茄炖煮前后各种关键香气物规律,采用聚类热图分析,筛选了炖煮前 16 种关键香气化合物,炖煮后的 6 种关键香气化合物,对香气化合物的含量进行归一化,以减小含量之间的差异,然后再对化合物进行聚类分析,可以将变化趋势相同的化合物聚集在一起^[31]。如图 8 所示,下方横坐标表示五种品种番茄,右侧纵坐标为关键香气化合物名称,热图上方是对品种之间进行聚类,方块颜色越红含量越高,颜色越蓝表示含量越低,以关键香气化合物浓度为评价指标,分析品种之间的相关性。从图 8a 可以看出,吉诺比利、莱格美万和博

士 1812 三种品种的相关性较高，与主成分结果一致。炖煮后博士 1812 品种的差异最大，主要由于乙偶姻含量显著高于其他组，乙偶姻是炖煮处理后番茄的关键甜香物质，增加了风味丰度。

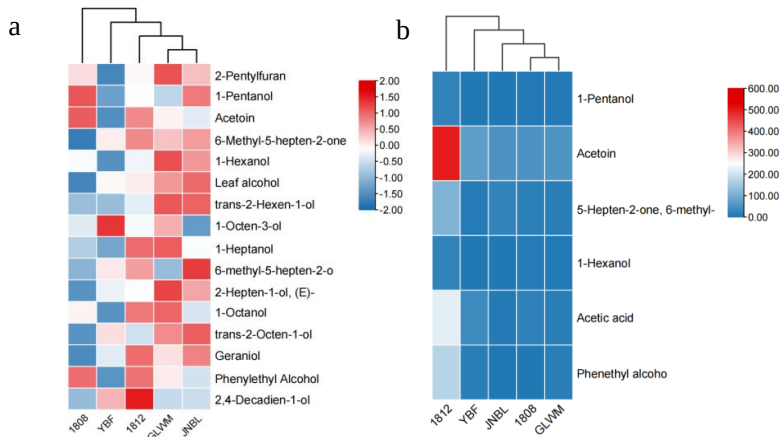


图 8 意佰芬-6、博士 1812、莱格美万、1808 和吉诺比利品种番茄炖煮前煮前 (a)、炖煮后 (b) 关键香气化合物图

Fig.8 Yibai Fen-6, doctor 1812, Laigemeiwan 1808, and Ginobili tomato varieties: heat map of key aroma compounds before (a) and after (b) stewing

注：1812 代表博士 1812，GLWM 代表格莱美万，JNBL 代表吉诺比利，YBF 代表意佰芬-6。

3 结论

本研究对比了新疆五种主栽番茄品种在炖煮加工前后的感官品质及挥发性香气化合物差异。经感官评价、电子鼻、电子舌、气相色谱-质谱检测及统计学分析，结果表明，不同番茄品种的香气轮廓与挥发性香气化合物组成在炖煮前后均存在显著差异。经炖煮热处理后，清香、果香相关的醇类、醛类物质含量整体呈下降趋势；乙酸、壬酸、二甲基二硫醚及部分酮类化合物的生成，是番茄炖煮后形成蒸煮风味与脂肪香气的重要挥发性化合物；（Acetoin）乙偶姻可作为反映番茄品种炖煮后甜香品质的潜在指示物。结合感官评价与挥发性风味组分综合分析可知，炖煮前莱格美万香气综合评分与整体接受度最优，为适宜鲜食的番茄品种；博士 1812 经炖煮后，与甜香、果香相关的特征挥发性物质含量下降趋势最小，且代表脂肪香和蒸煮味的挥发性化合物含量较低，是具备良好的炖煮加工适配潜力的品种。本研究可为新疆优质番茄鲜食品种筛选及番茄炖煮类制品的加工利用提供参考。

参考文献

[1] ZHANG Z, YE W, LI C, et al. Volatilomics-Based Discovery of Key Volatiles Affecting Flavor Quality in Tomato [J]. Foods, 2024, 13(6): 879.

[2] BI J, PING C, CHEN Z, et al. Evaluating the influence of high-temperature sterilization and pasteurization on volatile organic compounds in tomato stewed beef brisket: An analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry and multivariate statistical visualization [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 36: 100974.

[3] 邓蓉,华玉武.我国番茄产业发展现状与发展趋势分析[J].现代化农业,2025,12:78-82.

[4] 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.

[5] RAJKUMAR G, RAJAN M, ARAUJO H C, et al. Comparative evaluation of volatile profile of tomato subjected to hot air, freeze, and spray drying [J]. Drying Technology, 2020, 39(3): 314-325.

[6] ZHU Y, KLEE H J, SARNOSKI P J. Development and characterization of a high quality plum tomato essence [J]. Food Chemistry, 2018, 267: 337-343.

[7] XI Y, LI Q, YAN J, et al. Effects of Harvest Maturity, Refrigeration and Blanching Treatments on the Volatile Profiles of Ripe “Tasti-Lee” Tomatoes [J]. Foods, 2021, 10(8): 1727.

[8] BAENAS N, BRAVO S, GARC A-ALONSO F J, et al. Changes in volatile compounds, flavour-related enzymes and lycopene in a refrigerated tomato juice during processing and storage [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(4): 975-984.

- [9] WANG D, LU R, MA Y, et al. Development of volatile compounds fingerprints by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry in concentrated tomato paste and distillate during evaporation processing [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 56(6): 2708-2720.
- [10] 王仁杰,蔡红明,丁发强,等.5 种口感番茄的风味物质分析与感官评价[J].*中国蔬菜*,2025,6:146-156.
- [11] 季文彤,杨平,刘俊梅,等.炒制对榛蘑炖鸡肉菜肴风味品质的影响[J].*食品工业科技*,2025,46(23):350-362.
- [12] SONG F, XIANG H, LI Z, et al. Monitoring the baking quality of Tieguanyin via electronic nose combined with GC-MS [J]. *Food Research International*, 2023, 168: 112748.
- [13] YUAN J, LI H, CAO S, et al. Monitoring of Volatile Compounds of Ready-to-Eat Kiwifruit Using GC-IMS [J]. *Foods*, 2023: 12(24): 439.
- [14] YANG S, HAO N, MENG Z, et al. Identification, Comparison and Classification of Volatile Compounds in Peels of 40 Apple Cultivars by HS-SPME with GC-MS [J]. *Foods*, 2021, 10(5): 1051.
- [15] SIMONA G, MICHELINA R, FRANCESCO L, et al. Volatile organic compounds in *Solanum lycopersicum* leaves and their roles in plant protection [J]. *Horticulture Research*, 2025, 12(10): uhaf181.
- [16] YUAN H, XU L, CHANG M, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds, nutritional constituents, and antioxidant activities of *Clitocybe squamulosa* [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1017014.
- [17] WANG L, BALDWIN E A, BAI J. Recent Advance in Aromatic Volatile Research in Tomato Fruit: The Metabolisms and Regulations [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016,9(2): 203-216.
- [18] WANG Z, NIE T, ZHANG H, et al. Correlation Analysis between Volatile Compounds and Quality Attributes in Pork Tenderloin in Response to Different Stir-Frying Processes [J]. *Foods*, 2023, 12(24): 4299.
- [19] LV H, WANG Y. Effect of stewing time on the color, water distribution and contents of key volatile compounds in chicken [J]. *Applied Food Research*, 2026, 6(1): 100515.
- [20] SCHREIER P, DRAWERT F, JUNKER A. The quantitative composition of natural and technologically changed aromas of plants. IV. Enzymic and thermal reaction products formed during the processing of tomatoes (author's transl) [J]. *European Food Research and Technology*, 1977, 172(4): 257-270.
- [21] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Role of Lipids in Food Flavor Generation [J]. *Molecules*, 2022, 27(15): 5014.
- [22] JEYAPRAKASH S, FRANK D C, DRISCOLL R H. Influence of heat pump drying on tomato flavor [J]. *Drying Technology*, 2016, 34(14): 1709-1718.
- [23] LUO D, TIAN B, LI J, et al. Mechanisms underlying the formation of main volatile odor sulfur compounds in foods during thermal processing [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(3): 879-924.
- [24] WANG X-C, YANG C, LV H, et al. A GC-MS Data Analysis Platform for Untargeted Metabolomics with Enhanced Coeluting Peak Resolution [J]. *Analytical Chemistry*, 2026, 98(9): 3782-3790.
- [25] LU Y, LI J, CHENG K, et al. SIMES1 modulates methyl salicylate to influence fruit volatile profiles in tomato [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2025, 207: 108356.
- [26] WANG L, BALDWIN E A, YU Z, et al. The Impact of Kitchen and Food Service Preparation Practices on the Volatile Aroma Profile in Ripe Tomatoes: Effects of Refrigeration and Blanching [J]. *HortScience*, 2015, 50(9): 1358-1364.
- [27] KOLTUN S J, MACINTOSH A J, GOODRICH-SCHNEIDER R M, et al. Effects of thermal processing on flavor and consumer perception using tomato juice produced from Florida grown fresh market cultivars [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(12): e16164.
- [28] DHUEY E, CASTADA H Z, BARRINGER S, et al. Heat-induced compounds development in processed tomato and their influence on corrosion initiation in metal food cans [J]. *Food Science & Nutrition*, 20219(8): 4423-4434.
- [29] VINCENTI S, MARIANI M, ALBERTI J-C, et al. Biocatalytic Synthesis of Natural Green Leaf Volatiles Using the Lipoxygenase Metabolic Pathway [J]. *Catalysts*, 2019, 9(11): 924.
- [30] STOLTERFOHT H, RINNOFNER C, WINKLER M, et al. Recombinant Lipoxygenases and Hydroperoxide Lyases for the Synthesis of Green Leaf Volatiles [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(21): 5958-5966.
- [31] XU J, LU Y, CUI J, et al. Unraveling the difference in aroma characteristics of tomato flesh with different colors using HS-SPME-GC-MS/MS and E-nose combined with multivariate data analysis [J]. *Food Chemistry: X*, 2026, 30: 102527.

- [32] LIU Z, QIN G-H, WEI S-W, et al. PuERF008-PuFAD2 module regulates aroma formation via the fatty acid pathway in response to calcium signaling in ‘Nanguo’ pear [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 201: 107865.
- [33] GARBOWICZ K, LIU Z, ALSEEKH S, et al. Quantitative Trait Loci Analysis Identifies a Prominent Gene Involved in the Production of Fatty Acid-Derived Flavor Volatiles in Tomato [J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(9): 1168-1182.
- [34] HASHEM C, HOCHRINNER J, BÜRGLER M B, et al. From linoleic acid to hexanal and hexanol by whole cell catalysis with a lipoxygenase, hydroperoxide lyase and reductase cascade in *Komagataella phaffii* [J]. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 2022, 9: 947032.
- [35] ZHANG Z, MU S, GAO Z, et al. Effect of dynamic high-pressure microfluidization and thermal processing on quality and volatile components of NFC tomato juice [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2024, 146: 184-195.
- [36] WANG Y, HE Y, LIU Y, et al. Analyzing Volatile Compounds of Young and Mature *Docynia delavayi* Fruit by HS-SPME-GC-MS and rOAV [J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2476.