

# 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱/嗅闻仪结合电子鼻和多元统计方法对4种柠檬的风味差异分析

邓广牒<sup>1</sup>, 曹庸<sup>1</sup>, 聂稳<sup>1</sup>, 阚启鑫<sup>1</sup>, 胡海娥<sup>2</sup>, 李学莉<sup>2</sup>, 贺丽苹<sup>1,3\*</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)

(2. 东鹏饮料(集团)股份有限公司, 广东深圳 518055) (3. 华南农业大学测试中心, 广东广州 510642)

**摘要:** 该研究旨在利用多种技术手段以及多元统计方法分析不同品种柠檬风味差异。采用气相色谱-质谱/嗅闻联用 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry/Olfactory, GC-MS/O) 与电子鼻技术对不同品种柠檬中挥发性风味成分进行研究, 并以主成分综合评价函数计算不同品种柠檬理化特性与香气的综合得分进行评价。结果显示: 电子鼻 PCA 分析能较好的区分不同品种柠檬, GC-MS/O 检测出 65 种挥发性风味组分, 分别为烯类 (46 种)、醛类 (6 种)、醇类 (5 种)、酯类 (5 种)、酮类 (2 种) 和酚类 (1 种)。不同品种柠檬中相对香气活度值 (ROAV) 大于 1 的风味组分有柠檬烯、合欢烯、芳樟醇、桉叶油醇、辛醛、壬醛、柠檬醛以及癸醛 8 种, 确定为其关键香气成分。安岳黄柠檬综合得分最高、香水柠檬次之, 表明安岳黄柠檬理化特性以及香气较好。该研究可应用于柠檬溯源鉴定与柠檬品质分析, 为柠檬综合利用提供理论支持。

**关键词:** 柠檬; 风味成分; 气相色谱-质谱/嗅闻仪法 (GC-MS/O); 电子鼻; 相对气味活性值; 偏最小二乘判别分析

文章编号: 1673-9078(2022)11-298-307

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.11.0041

## Analyzing Flavor Differences across Four Lemon Varieties Using Headspace Solid-phase Microextraction-GC-MS/Olfactometer Combined with Electronic Nose and Multivariate Statistical Methods

DENG Guangdie<sup>1</sup>, CAO Yong<sup>1</sup>, NIE Wen<sup>1</sup>, KAN Qixin<sup>1</sup>, HU Haie<sup>2</sup>, LI Xueli<sup>2</sup>, HE Lipin<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Food Science, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2. Eastroc Beverage Group Co. Ltd., Shenzhen 518055, China)

(3. Instrumental Analysis & Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The aim of this study was to analyze the differences in flavor across different lemon varieties using various techniques and multivariate statistical methods. Gas chromatography-mass spectrometry/olfactometer (GC-MS/O) and electronic nose were used to investigate the volatile flavor components in different lemon varieties. The comprehensive scores of the physical and chemical characteristics and odors of different varieties of lemons were evaluated by calculating the comprehensive evaluation function in principal component analysis (PCA). The results showed that the electronic nose-based PCA could better distinguish different lemon varieties. Sixty-five volatile flavor components were detected using GC-MS/O, including forty-six alkenes, six aldehydes, five alcohols, five esters, two ketones, and one phenol. Eight flavor

引文格式:

邓广牒, 曹庸, 聂稳, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱/嗅闻仪结合电子鼻和多元统计方法对4种柠檬的风味差异分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 298-307

DENG Guangdie, CAO Yong, NIE Wen, et al. Analyzing flavor differences across four lemon varieties using headspace solid-phase microextraction-GC-MS/olfactometer combined with electronic nose and multivariate statistical methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 298-307

收稿日期: 2022-01-13

基金项目: 广东省功能食品活性物重点实验室 (2018B030322010)

作者简介: 邓广牒 (1993-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品风味, E-mail: 1971654935@qq.com

通讯作者: 贺丽苹 (1965-), 女, 博士, 高级实验师, 研究方向: 食品分析化学及生物活性, E-mail: 582262409@qq.com

components with relative odor activity values greater than one, including limonene, farnesene, linalool, eucalyptol, octanal, nonanal, citral, and decanal, were detected in different lemon varieties as key odor components. The highest overall score was obtained for Anhuang lemon, followed by Xiangshui lemon, indicating that Anyue yellow lemon has better physical and chemical characteristics and odor. These findings can be applied to traceability identification and quality analysis for lemons and provides theoretical support for comprehensive utilization of lemons.

**Key words:** lemon; flavor composition; gas chromatography-mass spectrometry/olfactometer; electronic nose; relative odor activity value; partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA)

柠檬是芸香科柑橘属类植物果实, 根据外观色泽可以分为黄色皮、青色皮两大类。在我国柠檬产地有四川、台湾、海南、两广以及福建等地区<sup>[1]</sup>, 其中四川安岳气候温和, 日照充足全年温差并不大, 其柠檬果质优良, 享有“柠檬之都”美誉。柠檬不仅香气浓郁, 而且含有丰富的维生素 C、多酚、黄酮等物质<sup>[2]</sup>, 具有抗氧化<sup>[2]</sup>、抑菌消炎<sup>[3]</sup>、抗肿瘤<sup>[4]</sup>等功效, 在食品饮料、香精香料行业应用广泛。

柠檬的香气是反映柠檬品质的重要指标。目前, 电子鼻<sup>[5]</sup>、GC-MS/O<sup>[6]</sup>等技术已经成为常用的香气分析手段<sup>[7,8]</sup>。何塞<sup>[6]</sup>利用 GC-MS 对 4 种柠檬挥发性成分进行比较, 并鉴定出 75 种挥发性成分, 确定柠檬烯、月桂烯、蒎品烯等为主要挥发性成分。张海鹏<sup>[9]</sup>利用 GC-MS 对 106 种柑橘进行挥发性成分分析并确定柑橘汁中 162 种化合物, 其中柠檬烯、柠檬醛以及蒎烯含量最高。冯仕<sup>[10]</sup>通过 GC-MS/O 联用对荔枝挥发性化合物进行表征并鉴定出香叶醇、芳樟醇、呋喃醇为荔枝的关键香气成分。朱春华<sup>[11]</sup>利用 GC-MS 分析不同品种柠檬精油挥发性成分进行比较, 尤力克柠檬中柠檬烯、蒎烯、柠檬醛等特征香气成分高于其他品种。

上述风味研究均是仪器差异性分析, 近年来综合因子得分被用于综合品质评价方面。综合因子得分是利用统计学分析方法将指标数据, 通过计算降维后的特征值矩阵, 进行主成分分析, 确定其个数和表达量, 最后计算样品在不同主成分上的得分, 达到综合评价的效果, 如傅隆生<sup>[12]</sup>利用主成分得分与聚类分析, 分析不同种类猕猴桃的综合品质评价, 结果显示, 两种模式具有高度一致性。主成分综合得分分析最先应用在选优育种方向<sup>[12-14]</sup>, 也逐渐应用于农产品、食品品质评价和质量控制方面, 如石彦国等<sup>[15]</sup>通过分析 45 种不同大豆的理化指标和表现特性, 通过主成分综合得分结合感官评价筛选出 5 种适合蒸煮加工的大豆; 李丽梅通过接种不同酵母于雪花梨中, 以总酸、多酚、pH 等理化指标, 利用因子得分计算得出酿酒酵母 LA-BA 所酿梨酒的综合品质最好<sup>[16]</sup>; 张颖颖等<sup>[17]</sup>通过主成分综合评价对黑、白芝麻酱进行品质判别, 结果显示白芝麻综合得分高于黑芝麻, 与感官评价结果一致, 综上主成分得分评价是一种客观的综合评价方法。由于

柠檬品种丰富, 不同柠檬风味成分、品质质量差异较大, 全方位多手段研究柠檬挥发性风味差异, 对柠檬的综合利用具有重要意义, 目前对于柠檬的风味研究仅使用单一技术手段<sup>[18,19]</sup>, 对柠檬关键香气成分多种技术联合分析以及多元统计综合评价体系缺乏报道。

本文以安黄柠檬 (AH)、安青柠檬 (AQ)、香水柠檬 (XS) 以及海南青柠檬 (HQ) 为原料, 通过顶空固相微萃取 - 气相色谱 - 质谱联用 / 嗅闻仪 (HS-SPME-GC-MS/O) 结合电子鼻对四种柠檬挥发性风味进行分析。结合 ROAV 值确定柠檬中关键风味组分, 通过测定不同品种柠檬理化特性, 并对果肉中的多酚黄酮进行定性与定量, 进一步计算主成分综合得分, 建立不同品种柠檬原材料综合评价体系, 以此对不同品种柠檬进行综合的风味差异判定。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

柠檬样品由东鹏特饮有限公司提供, 分别采自四川省资阳市安岳县的安岳青柠檬 (AQ) 和安岳黄柠檬 (AH)、海南省海口市秀英区的海南青柠檬 (HQ)、广东省肇庆市播植镇的香水柠檬 (XS) 四种品种。正构烷烃 C<sub>7</sub>-C<sub>20</sub> 混合标准品, 美国 O2SI 公司; 环己酮 (色谱级)、甲醇 (色谱级)、丁香酸、圣草次苷、橙皮苷 (色谱级) 均为麦克林公司; 氯化钠、抗坏血酸、2,6-二氯酚、福林酚、碳酸钠等分析纯试剂。

### 1.2 主要仪器设备

6890-5973N 气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 公司; LC-15C 液相色谱仪、SPD-M20A 紫外/可见检测器、SIL-10AF 自动取样器 (配备 Diamonsil 5 $\mu$ m C<sub>18</sub>(2), 25 $\times$ 4.6 mm), 日本岛津公司; 10 种金属氧化物半导体感应器的 PEN3 系统 (Airsense Analytics GmbH, Schwerin, Germany) 电子鼻, 德国 Airsense 公司; CAR/PDMS 固相微萃取纤维头 (75  $\mu$ m), 美国 sigama 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 柠檬理化特性指标的测定

新鲜柠檬自采摘后立即榨汁, 装入聚乙烯真空包装袋放置-80 ℃。分别对不同品种柠檬的指标测定。pH测定: 参照 GB/T 10468-1989 方法测定。总酸测定: 参照 GB/ 12456-2021 食品安全国家标准 食品中总酸的测定。固形物含量测定: 参照 GB/T 12143-2008 饮料通用分析方法中可溶性固形物的测定。维生素 C 的测定: 参考 GB/ 5009.86-2016 第三法; 2,6-二氯酚酚滴定法进行测定。

多酚的测定: 分别将不同品种的柠檬的果皮和果肉分开, 果肉榨汁冷冻干燥粉碎过筛(200目), 称取 0.25 g 冻干粉末加入 25 mL 体积分数 80% 甲醇, 超声提取 30 min, 在 5 000 r/min 转速下离心 15 min, 取上清液备用。采用上述的同样操作对沉淀进行二次提取两次, 合并两次上清液定容至 50 mL。采用福林酚法测定总酚, 结合高效液相法测定多酚种类和含量。将样品各种多酚的保留时间和标准品的保留时间进行对比并进行定性, 外标法 ( $R^2 \geq 0.99$ ) 对不同柠檬品种中各种酚与黄酮含量进行定量。

### 1.3.2 柠檬挥发性风味成分测定

#### 1.3.2.1 电子鼻对不同品种柠檬汁风味分析

参考 Chen 等<sup>[20]</sup>的方法并略作修改, 准确称取 6.0 g 的不同品种柠檬果汁, 置于 25 mL 顶空瓶中, 室温下平衡 30 min。将 Luer-Lock 针插入样品顶空瓶中, 过滤的空气以 120 mL/min 的恒定速率泵入传感器阵列, 测量持续 300 s。10 个传感器的响应值描述如下。

表 1 PEN3 电子鼻传感器及其性能描述

Table 1 Performance description of PEN3 portable electronic

nose sensor		
序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分, 苯类
2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	芳香成分灵敏, 氨类
4	W6S	主要对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

#### 1.3.2.2 HS-SPME-GC-MS/O 对柠檬挥发性香气成分提取与分析

##### (1) HS-SPME 香气成分提取

参考 Gao 等<sup>[21]</sup>的方法略作修改, 称取 6 g 果汁于 25 mL 螺口顶空样品瓶中, 加入 4 g 氯化钠和 1  $\mu$ L 内标环己酮, 用聚四氟乙烯隔垫密封, 在 45 ℃ 磁力搅拌

器上加热平衡 5 min 后, 用 75  $\mu$ m CAR/PDMS 萃取头萃取 45 min 后, 解吸 5 min。

##### (2) GC 条件

色谱柱: DB-WAX 毛细管柱 (60 m $\times$ 0.25 mm, 0.25  $\mu$ m); 进样口温度: 260 ℃; 载气( $N_2$ )流量: 1 mL/min; 升温程序: 初始温度 70 ℃, 保持 2 min, 以 4 ℃/min 速率升至 210 ℃, 保持 10 min。

##### (3) MS 条件

四极杆温度 150 ℃, 电子轰击离子源, 电子能量 70 eV, 传输线温度 280 ℃, 质量扫描范围  $m/z$ : 35~500。根据总离子流图和出峰时间、谱库 (NIST 08 谱库)、保留指数进行定性, 添加环己酮内标进行定量。

##### (4) 嗅闻仪条件

MS 四极杆温度 150 ℃, 电子轰击离子源, 传输线温度 280 ℃, 电子能量 70 eV, 扫描范围同 MS 条件。嗅闻口与 MS 端的分流比例为 1:1, 嗅闻口温度 260 ℃, GC-MS/O 分析由 5 名成员分别对样品进行嗅闻描述, 记录气味特征及保留时间。

### 1.3.3 数据处理

#### 1.3.3.1 GC-MS 定性定量

以  $C_7$ - $C_{20}$  饱和烷烃作为标准, 用相同的升温程序对正构烷烃进行分离与测定, 计算所测试样品中各组分的保留时间指数 (Kovats Retention Indices, RI), 通过数据库检索及参考文献中相关物质的保留时间指数共同定性。以 1  $\mu$ L 环己酮为内标进行相对定量。

#### 1.3.3.2 相对气味活度值 (ROAV) 计算

参考刘登勇<sup>[22]</sup>的计算方法, 采用相对气味活度值 (ROAV) 评价各挥发性组分对柠檬样品风味的贡献, 相对气味活度值的计算公式为:

$$ROAV = \frac{C_A}{C_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T_A} \times 100\%$$

式中:

$C_A$ ——各风味组分相对百分含量;

$T_A$ ——各风味组分感觉阈值;

$C_{stan}$ ——对样品风味贡献最大的风味组分的相对百分含量;

$T_{stan}$ ——对样品风味贡献最大的风味组分的感觉阈值。

$ROAV > 1$ , 表明该组分对样品的风味贡献最大, 即为关键特征风味组分;  $0.1 \leq ROAV < 1$ , 表明该组分会对样品风味起修饰作用;  $ROAV < 0.1$ , 说明该组分对样品风味影响不显著, 在一定范围内,  $ROAV$  越大说明该物质对总体风味贡献越大<sup>[23]</sup>。

所有数据使用 SPSS 23.0 软件进行处理, 采用  $t$  检验进行样品间显著性差异分析, SIMCA-P 14.1 进行主成分分析 (PCA), Origin 2019 软件作图, 实验结果以平均值 $\pm$ 误差表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同品种柠檬的理化指标分析

柠檬在生长成熟过程中，果汁品质质量和香气含量亦会受到维生素 C、总酸等理化指标的影响，不同品种柠檬汁的理化指标测定结果如表 2 所示，可以看出：4 个不同品种柠檬间的理化指标都存在显著差异

( $p < 0.05$ )。pH 值、总酸是影响柠檬加工品质的重要因素，总酸含量越高，果汁的储藏性越好，AQ 的总酸含量最高 (4.59%)，HQ 的总酸最低 (3.93%)。总酸、固酸比是评价柠檬口感与品质的重要指标，AH 的固酸比最高 (1.79)，AQ 的维生素 C 含量最高 (34.97 mg/100 g)，其次是 AH (31.48 mg/100 g)、XS (23.09 mg/100 g)，最低的是 HQ (30.17 mg/100 g)，与洪林<sup>[24]</sup>研究尤力克柠檬在成熟期维生素 C 含量结果一致。

表 2 不同品种柠檬的理化指标结果分析

Table 2 Analysis of physical and chemical indexes of different varieties of lemon

品种	省份	产地	色泽	pH 值	总酸/%	固形物质量分数/%	固酸比
AQ	四川	安岳	青色果皮，偏白色果肉	2.31±0 <sup>d</sup>	4.59±0.02 <sup>a</sup>	6.8±0 <sup>b</sup>	1.48±0.01 <sup>c</sup>
AH	四川	安岳	果皮深黄色、果肉浅黄色	2.41±0.02 <sup>b</sup>	4.35±0.06 <sup>c</sup>	7.8±0 <sup>a</sup>	1.79±0.02 <sup>a</sup>
XS	广东	肇庆	青色果皮、粉白色果肉	2.38±0 <sup>c</sup>	4.49±0.01 <sup>b</sup>	5.8±0 <sup>d</sup>	1.29±0.02 <sup>d</sup>
HQ	海南	海口	青色果皮、果肉较黄色	2.46±0.01 <sup>a</sup>	3.93±0.02 <sup>d</sup>	6.4±0 <sup>c</sup>	1.62±0.03 <sup>b</sup>

品种	省份	产地	维生素 C/(mg/100 g)	多酚质量分数/%	含量/(mg/kg)		
					丁香酸	圣草次苷	橙皮苷
AQ	四川	安岳	34.97±0.49 <sup>a</sup>	8.36±0.20 <sup>b</sup>	29.52±0.31 <sup>b</sup>	3 027.06±1.28 <sup>b</sup>	568.91±2.48 <sup>c</sup>
AH	四川	安岳	31.48±0.59 <sup>b</sup>	10.3±0.16 <sup>a</sup>	29.42±1.52 <sup>b</sup>	4 081.32±1.89 <sup>a</sup>	1 010.25±1.71 <sup>a</sup>
XS	广东	肇庆	23.09±0.71 <sup>c</sup>	6.36±1.42 <sup>c</sup>	123.75±0.4 <sup>a</sup>	638.61±0.77 <sup>c</sup>	223.35±0.69 <sup>d</sup>
HQ	海南	海口	20.17±0.22 <sup>d</sup>	2.32±0.04 <sup>d</sup>	12.24±1.27 <sup>c</sup>	267.66±0.76 <sup>d</sup>	573.74±0.56 <sup>b</sup>

注：不同的字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )；AQ 安岳青柠檬；AH 安岳黄柠檬；XS 香水柠檬；HQ 海南青柠檬。

多酚可以抑制促炎因子的表达，从而减轻炎症反应，食用富含多酚的食物，可以减少心血管疾病的发生<sup>[25]</sup>。从表 2 可知，AH 多酚含量最高，HQ 最低。四川地区的 AQ、AH 柠檬多酚含量显著性高于广东、海南两地柠檬 ( $p < 0.05$ )，与高炜研究结果一致<sup>[1]</sup>，原因可能是气候、土壤等条件会影响柠檬果肉多酚的积累。

利用高效液相色谱法对柠檬中主要多酚、黄酮化合物进行测定分析，结果也列于表 2 中。从结果可以看出：四种柠檬中丁香酸、圣草次苷以及橙皮苷的含量存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )，其中丁香酸在 XS 中的含量最高，在 HQ 中含量最低；而圣草次苷在 AH 中的含量最高，在 HQ 中最低，分别为 4 081.32、3 027.06、638.61、267.66 mg/kg。AH 含有橙皮苷最多，其次是 HQ、AQ，最后是 XS 柠檬，分别为 1 010.25、573.74、568.91、223.35 mg/kg，与董昕颖<sup>[26]</sup>的研究结果一致。

中贡献较高，XS、AH、AQ 在 9 号感应器中的响应值 (20 左右) 与 HQ 的响应值 (10 左右) 差异较大，说明 XS、AH、AQ 中有机硫、芳香化合物差异较大。

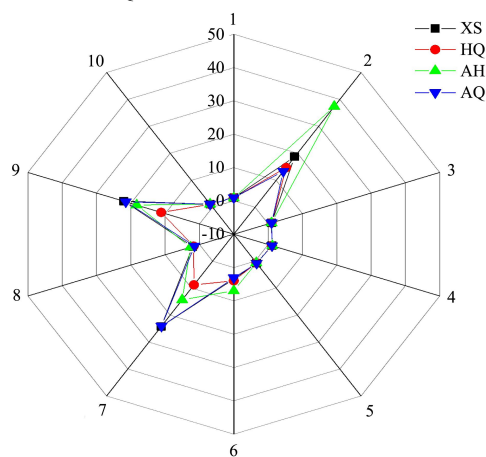


图 1 不同品种柠檬风味轮廓图

Fig.1 Flavor profile of different lemon varieties

### 2.2 不同品种柠檬的电子鼻分析

电子鼻是一种测定挥发性化合物风味敏感度的分析技术，样品中风味轻微的变化便会引起传感器响应值的差异<sup>[27]</sup>。4 种柠檬的风味雷达图结果如图 1 所示，电子鼻 2、7、9 号感应器具有明显的响应，表明柠檬中氮氧化合物、芳香化合物对风味的贡献率较大，其中 AH 在 2 号感应器响应最高，说明氮氧化合物在 AH

主成分分析如图 2 所示，在 PCA 空间分布图中显示了不同品种柠檬样品的挥发性成分。两个主成分贡献率分别为 (61.74%和 25.81%) 总贡献接近 87.55%，表明这两个主成分构成了 4 种不同柠檬样品的主要特征信息。4 种不同柠檬数据点组间具有较好聚集性以及样品间具有一定分散性，即 PCA 主成分分析可以有效区分不同柠檬风味。PC1 轴所示样品由 XS < AQ < HQ

<AH 等排列降低,而在 PC2 轴上样品 HQ<AQ<XS <AH 排列降低。其中 XS 和 AQ (主要分布在 PC2 负半轴上)两样品在 PCA 空间区域分布较为接近,即 AQ 和 XS 柠檬风味成分具有一定的相似度。而 HQ (主要分布在 PC1 负半轴和 PC2 正半轴上)和 AH (主要分布在 PC1 和 PC2 正半轴上)两种柠檬在空间区域距离较远,亦与 XS 和 AQ 空间区域距离较远,即与 XS、AQ 品种的挥发性成分相似度较低。

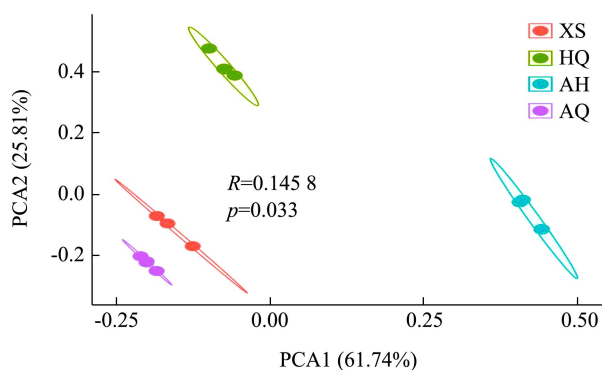


图2 不同品种柠檬挥发性物质的的 PCA 图

Fig.2 PCA of volatile compounds of different lemon varieties

### 2.3 不同品种柠檬 GC-MS/O 数据分析

采用 HS-SPME-GC-MS 分析了不同品种柠檬样品中的挥发性组分,图3为不同样品挥发性组分总离子色谱图(TIC),GC-MS 测定不同柠檬挥发性成分具体含量结果如表3所示。从中可以看出,4种柠檬挥发性组分种类以及含量各不相同,总检出63种挥发性组分,将其分为6大类,即烯类44种、醇类有5种、醛类6种、酯类5种、酮类2种、酚类1种。AH中烯类组分占总挥发性成分的85.28%、AQ中烯类占总挥发性成分的88.99%、XS中烯类占总挥发性成分的74.53%、HQ中烯类占总挥发性成分的98.25%。醛类在XS中含量占总挥发性成分的(22.25%),在AH中有4.79%。酯类在AH中占总挥发性成分的含量为8.72%,而其他3个品种中酯类含量均不高。酚类只在AQ中有检出。4种柠檬挥发性成分差异较大,可能是由于各地区的气候、土壤、成熟程度的不同,导致结果差异。而AQ和AH的差异集中在单萜烯含量的不同,可能是幼果不同处理导致含量的差异,以及单萜烯类在成熟过程中生成含氧萜烯类。

通过GC-MS测定4种不同品种柠檬挥发性组分中有13种共有峰:主要有 $\alpha$ -松油烯、月桂烯、 $\delta$ -杜松烯、 $\beta$ -红没药烯、松油烯、柠檬烯、合金欢烯、芳樟醇以及乙酸橙花酯等组分,将其分为烯类11种、醇类1种、酯类1种。D-柠檬烯含量最高,尤其在AH中最高,其次是AQ、XS,最后是HQ。柠檬烯是柑橘类水果中

普遍存在的一种组分,不仅具有柠檬的清香气味、水果味<sup>[28]</sup>。而且具有抗菌和防腐等效果,被广泛用于治疗胃痛、乳腺癌等<sup>[29]</sup>。 $\alpha$ -蒎烯具有木香、树脂香<sup>[30]</sup>,有很好的抗菌活性<sup>[31]</sup>以及消炎镇痛等作用<sup>[32]</sup>。月桂烯具有草香、松树香<sup>[10]</sup>香蜡和香精气味以及天竺葵等香气<sup>[33]</sup>。 $\alpha$ -萜品烯、萜品油烯具有松林香气<sup>[34]</sup>。芳樟醇具有抗菌、抗炎活性<sup>[35]</sup>、抗癌<sup>[36]</sup>等功能活性作用,并且具有浓郁的柑橘气味<sup>[36]</sup>紫丁香、铃兰与玫瑰花香、木香、果香等香气<sup>[10,37,38]</sup>。乙酸橙花酯呈现出玫瑰香气、花果香<sup>[33]</sup>,乙酸香叶酯具有玫瑰花般香<sup>[39]</sup>。

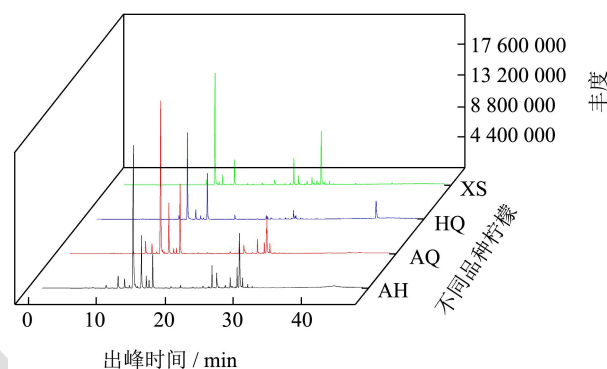


图3 不同品种柠檬 GC-MS 总离子流图

Fig.3 GC-MS total ion flow of different lemon varieties

利用SIMCA-P软件对不同品种柠檬挥发性成分进行主成分分析,结果如图4所示。PCA两个主成分合计贡献率为69.47%,可以说明了原始数据69.47%的信息。二维空间分布可以观察到不同样品差异明显,AH、AQ、HQ主要体现在PC2上,而XS与AH主要体现在PC1,以及组内样本点相互靠拢说明重复性较好。即表明GC-MS结合主成分分析能有效区分不同品种柠檬,为GC-MS用于不同地区原料的溯源鉴别提供参考方法。

ROAV值是一种可以量化样品中挥发性风味组分对整体香气贡献值的指标,从表4可以看出:ROAV>1的风味化合物有8种,分别为柠檬烯、罗勒烯、合金欢烯、芳樟醇、桉叶油醇、辛醛、壬醛、柠檬醛以及癸醛,是柠檬中的关键风味物质,具有明显的柑橘、柠檬果香等香气,是呈现柠檬香气的主要化合物。而0.1<ROAV<1的有5种,是柠檬中的修饰性风味化合物。其中AH柠檬中柠檬烯和壬醛的贡献值高于其他品种,表现出浓郁的柠檬香气。AQ中柠檬烯、壬醛以及癸醛的贡献值均小于AH,但是桉叶油醇却远远高于AH,呈现草药香气。而罗勒烯和辛醛是XS柠檬中独有,且ROAV值>1的辛醛、柠檬醛、癸醛贡献值均高于其他样品,即呈现出柑橘类青草香香气,也是香水柠檬香气浓郁的主要原因之一。ROAV值可以客观分析挥发性组分对整体风味的贡献,但是无法对样本间的整体香气进行评价。



表3 不同品种柠檬果汁挥发性成分 GC-MS 结果分析

Table 3 GC-MS analysis of volatile components of lemon juice of different varieties

类别	保留时间/min	名称	英文	保留指数	含量(n=3)/(μg/g)			
					AH	AQ	HQ	XS
	10.32	蒎烯	Camphene	930.37	1.14±0.03	-	-	-
	25.62	石竹烯	Caryophyllene	1 507.95	105.44±4.22	21.04±0.9	3.85±0.12	20.27±0.34
	30.99	愈创木烯	Guaiene	1 596.12	-	-	0.12±0.02	-
	12.47	α-水芹烯	α-Phellandrene	1 056.75	5.14±0.26	1.63±0.05	0.26±0.02	0.72±0.08
	11.36	β-萜品烯	Beta terpinene	1 021.37	13.32±0.19	4±0.25	-	-
	14.62	γ-萜品烯	γ-Terpinen	1 125.3	196.23±0.5	96.8±0.81	20.48±0.47	-
	12.86	α-松油烯	α-Terpinene	1 069.06	10.49±1.85	2.72±0.24	0.43±0.08	1.2±0.04
	12.14	β-月桂烯	β-Myrcene	1 046.33	113.15±0.48	21.28±0.38	7.83±0.4	11.87±0.15
	19.09	2,6-二甲辛四烯	Cosmene	1 267.36	0.61±0.11	0.59±0.1	0.14±0.02	-
	27.18	α-柏木烯	α-Cedrene	1 533.54	0.28±0.05	-	0.32±0.06	-
	30.15	罗汉柏烯	cis-Thujopsene	1 582.44	-	-	2.13±0.07	-
	29.25	芹子烯	Selinene	1 567.82	-	-	3.74±0.45	-
	29.94	δ-杜松烯	δ-Cadinene	1 578.91	3.15±0.25	1.2±0.05	1.69±0.11	2.05±0.04
	32.04	去氢白菖烯	Calamenene	1 613.51	-	-	0.61±0.04	0.13±0.02
	24.01	α-古芸烯	α-Gurjunene	1 481.46	0.15±0.03	-	-	-
	28.95	β-红没药烯	β-Bisabolene	1 562.31	247.08±0.61	10.03±0.77	19.83±0.64	79.28±0.43
	14.69	(+)-3-蒎烯	(+)-3-Carene	1 127.35	52.73±0.8	-	-	-
	13.97	α-罗勒烯	α-Ocimene	1 104.44	-	-	0.39±0.07	0.93±0.16
	9.23	环烯	Cyclene	953.68	2.18±0.37	-	-	-
	24.61	α-檀香烯	α-Santalene	1 491.26	4.4±0.26	0.59±0.06	-	-
烯类	13.68	β-水芹烯	β-Phellandrene	1 095.21	-	4.72±0.04	-	0.93±0.16
	15.72	松油烯	Terpinolene	1 160.18	75.68±1.55	10±0.32	3.01±0.05	2.69±0.3
	20.31	苯乙烯	Styrene	1 306.16	8.69±0.15	3.39±0.16	4.67±0.48	5.52±0.31
	27.17	雪松烯	Himachalene	1 533.36	-	-	-	1.25±0.17
	26.78	2,6-二甲基辛二烯	2,6-Dimethyl 2,6-octadiene	1 512.14	1.69±0.3	0.83±0.03	0.59±0.04	-
	13.74	1,5-二甲基环辛二烯	1,5-Dimethyl cyclooctadiene	1 097.09	-	-	0.85±0.15	-
	13.99	β-罗勒烯	trans-β-Ocimene	1 105.13	3.13±0.55	1.81±0.32	-	10.08±0.69
	25.78	α-雪松烯	α-Himachalene	1 510.5	-	-	-	2.21±0.22
	22.36	α-古巴烯	α-Copaene	1 454.28	0.41±0.07	-	0.47±0.03	-
	10.32	L-蒎烯	L-Camphene	988.21	1.15±0.2	-	-	-
	27.5	α-榄香烯	(E)-α-Elemene	1 538.75	-	-	-	0.67±0.06
	27.19	α-长叶蒎烯	α-Longipinene	1 533.72	0.53±0.09	-	-	0.88±0.11
	13.45	D-柠檬烯	D-Limonene	1 087.87	676.89±1.74	402.51±0.12	207.56±1.69	248.99±1.58
	27.71	α-石竹烯	α-Caryophyllene	1 542.19	7.28±0.99	-	-	2.48±0.44
	18.17	反式异罗勒烯	trans-Alloocimene	1 238.3	2.7±0.14	1.12±0.03	-	3.17±0.26
	9.44	1R-α-蒎烯	1R-α-Pinene	1 089.03	29.57±2.77	5.31±0.19	0.33±0.06	0.05±0.01
	32.2	δ-3-蒎烯	delta-3-Carene	3 365.68	0.05±0.01	-	-	-
	27.85	顺式石竹烯	cis-Caryophyllene	1 544.57	-	5.25±0.18	-	-
	11.2	左旋-β-蒎烯	laevo-β-Pinene	1 016.41	135.47±1.49	24.45±0.66	0.19±0.03	-
	26.92	(E)-β-金合欢烯	(E)-β-Famesene	1 529.21	17.82±2.16	2.32±0.16	1.65±0.12	14±0.48
	28.37	(+)-喇叭烯	(+)-Ledene	1 553.14	6.73±0.5	2.64±0.11	0.19±0.03	-

续表 3

类别	保留时间/min	名称	英文	保留指数	含量(n=3)/(μg/g)			
					AH	AQ	HQ	XS
	28.17	δ-硒烯	δ-Selinene	1 549.87	-	-	-	1.68±0.3
	21.46	4-萜烯	4-Carene	1 342.9	-	-	-	0.93±0.12
	30.17	红没药烯	Bisabolene	1 582.7	12.26±0.85	-	-	-
	19.88	(E)-7-十四碳烯	(E)-7-Tetradecene	1 363.28	-	0.05±0.01	-	-
	26.49	γ-榄香烯	γ-elemene	1 522.24	-	-	-	2.8±0.17
		小计			1735.54±23.57	624.28±5.94	281.33±5.25	414.78±6.82
酯类	29.43	乙酸香叶酯	Geranyl acetate	1 453.24	42.27±0.47	21.15±0.86	-	7.28±0.58
	31.15	丙酸橙花醇酯	Neryl propionate	1 504.26	0.33±0.06	-	-	-
	28.61	乙酸橙花酯	Nerol acetate	1 437.75	130.74±0.66	20.83±0.94	2.12±0.03	5.04±0.37
	7.5	乙酸乙酯	Ethyl Acetate		4.17±0.38	-	-	-
	30.3	丁酸香叶酯	Geraniol butyrate	1 532.96	-	0.77±0.14	-	-
		小计			177.51±1.57	42.75±2.94	2.12±0.03	12.32±0.95
酮	23.22	樟脑	(+)-2-Bornanone	1 398.81	1.2±0.05	-	-	-
	30.41	苯乙酮	Acetophenone	2 014.71	-	-	-	0.91±0.08
		小计			1.2±0.05	-	-	0.91±0.08
醛类	22.13	癸醛	Decanal	1 364.12	8.61±0.63	1.81±0.08	-	31.2±0.83
	25.28	十一醛	Undecanal	1 384.3	7.19±0.74	1.92±0.09	-	3.57±0.09
	15.47	辛醛	Octanal	761.65	-	-	-	2.83±0.37
	18.91	壬醛	Nonanal	1 420.28	17.99±1.85	4.99±0.24	0.1±0.02	-
	30.83	紫苏醛	Perilla aldehyde	907.41	5.42±0.17	1.57±0.15	-	-
	29.03	柠檬醛	Citral	1 583.77	58.38±6.28	-	0.21±0.04	86.44±2.00
		小计			97.59±9.67	10.29±0.56	0.31±0.06	123.84±2.3
酚类	41.02	苯酚	Phenol	1 965.65	-	-	61.71±0.77	-
		小计			-	-	61.71±0.77	-
醇类	23.61	芳樟醇	Linalol	1 411.46	11.87±0.5	7.01±0.27	1.94±0.04	5.57±0.3
	42.4	香叶醇	Geraniol	2 009.58	5±0.88	4.05±0.15	-	-
	40.96	橙花醇	Nerol	1 963.6	6.99±1.24	6.4±0.44	-	-
	19.57	异冰片醇	Isobornyl alcohol	1 282.74	0.52±0.09	-	-	-
	13.76	桉叶油醇	Eucalyptol	1 097.78	-	5.97±0.19	0.62±0.11	-
		小计			24.38±2.71	24.2±1.19	2.56±0.15	5.57±0.3
		合计			2 035.02±37.52	701.52±10.63	286.32±6.26	556.51±10.37

表 4 不同品种柠檬相对气味活度值的结果分析

Table 4 Results of the relative odour activity values of lemon juice of different varieties

序号	化合物	阈值 <sup>[40-44]</sup> /(μg/g)	GC-MS/O 结合文献进行香气描述 <sup>[40-44]</sup>	ROAV/%			
				XS	AQ	AH	HQ
1	月桂烯	0.1	天竺葵味	0.09	0.06	0.07	0.1
2	蒎烯	1.86	樟脑香气	0.01	-	-	-
3	D-柠檬烯	0.2	柑橘, 柠檬香气	8.61	6.89	10.61	11.71
4	α-石竹烯	0.16	辛香、木香、柑橘香气	0.47	0.44	0.78	0.27
5	罗勒烯	0.034	青草香	1.13	0.1	0.4	-
6	α-蒎烯	0.041	松木香	0.05	0.44	1.03	0.22
7	萜品油烯	41	松木香	0.01	0.02	0.06	0.02

续表 4

序号	化合物	阈值 <sup>[40-44]</sup> /(μg/g)	GC-MS/O 结合文献进行香气描述 <sup>[40-44]</sup>	ROAV/%			
				XS	AQ	AH	HQ
8	3-萜烯	44	松木香	-	0.01	0.08	-
9	合金欢烯	0.02	青香、花香、甜香	1.77	0.42	1.09	1.06
10	愈创木烯	0.01	辛香气味	-	-	-	0.19
11	芳樟醇	0.00022	花香, 果香, 木青香气	100	100	100	100
12	桉叶油醇	0.003	草药香气和樟脑香气	-	6.72	-	9.04
13	橙花醇	0.68	柑橘, 木兰香气、果香	0.1	0.1	0.18	-
14	辛醛	0.003	甜香	7.01	-	-	-
15	壬醛	0.0011	柑橘香气	-	17.67	41.33	2.94
16	柠檬醛	0.04	柠檬香气	9.62	-	7.74	0.19
17	癸醛	0.003	柑橘味, 青草味, 脂肪的味道	44.8	2.2	4.54	-
18	乙酸香叶酯	0.15	柠檬清香, 玫瑰香	0.18	0.47	0.43	0.01
19	乙酸橙花酯	2	果香, 水花香	0.01	0.03	0.09	0.01

注：“-”为未检出。

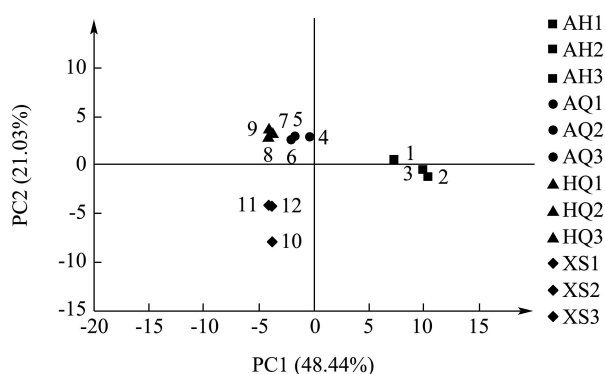


图 4 柠檬挥发性成分的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of lemon volatile components

注：数据表示为平均值±标准差；“-”为该化合物未检。

如表 5 所示，3 个主成分累计方差贡献值达到 100%，说明 3 个主成分能代表 17 种品质指标的全部信息，如表 6 所示，主成分 PC1 方差贡献值为 48.61%，特征值为 8.26，即以固形物、橙皮苷、柠檬烯、壬醛以及芳樟醇为主要影响指标。而 PC2 主要以 pH 值、罗勒烯以及柠檬醛为主。桉叶油醇则是 PC3 的主要影响指标。根据贡献率所示，柠檬营养品质指标主要是可溶性固形物、橙皮苷、pH，挥发性风味成分主要是柠檬烯、壬醛、芳樟醇、罗勒烯以及柠檬醛等指标。

表 5 柠檬品质主成分的方差贡献率

Table 5 Variance contribution rate of principal components of lemon quality

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	8.264	48.611	48.611
2	7.138	41.986	90.597
3	1.599	9.403	100

表 6 柠檬品质指标主成分载荷矩阵

Table 6 Principal component load matrix of lemon quality index

组分	PC1	PC2	PC3
pH 值	-0.007	0.936	-0.352
总酸	0.062	-0.997	-0.052
固形物	0.999	0.028	0.018
固酸比	0.865	0.501	0.04
维生素 C	0.658	-0.681	0.322
多酚含量	0.691	-0.686	-0.227
丁香酸	-0.599	-0.486	-0.637
圣草次苷	0.9	-0.434	0.038
橙皮苷	0.972	0.236	0.016
罗勒烯	0.021	0.936	0.352
柠檬烯	0.983	-0.13	-0.13
合金欢烯	0.669	0.717	-0.197
辛醛	-0.269	0.911	0.313
壬醛	0.954	-0.122	-0.273
柠檬醛	0.323	0.946	-0.007
芳樟醇	0.994	0.093	0.054
桉叶油醇	0.01	-0.669	0.744

以 4 种柠檬样本的总酸、pH 值、固酸比、固形物以及多酚、维生素 C 和 8 种柠檬关键风味组分为综合评价指标，进行主成分特征值、贡献率及累计贡献率并计算综合得分对柠檬综合品质进行分析。

根据综合 PCA 主成分因子得分计算，算出 4 种柠檬主成分得分以及综合得分，如表 7 所示。根据 PC1 中的 FAC1 得分所示，AH 得分最高 (1.32) 其次是 AQ (0.12)，即表明 AH 品种中固形物、固酸比、橙皮苷、柠檬烯、壬醛以及芳樟醇优于 XS 和 HQ，因为 AH 与



AQ 是同一产地不同样本,故在主成分 1 中存在很大的相似性。且综合得分最高,说明各指标较为协调、香气怡人以及功能作用更优于其他品种,即表明安岳柠檬更适合于综合利用,而 FAC2 得分显示 XS 品种最高,说明罗勒烯以及柠檬醛、合欢烯等具有清香柠檬香气的组分含量高于其他品种,即验证了“香水柠檬”香气浓郁的称号, XS 主要是以香气为主,多用于直接食用或菜肴增香等应用。

表 7 不同品种柠檬的主成分因子得分

Table 7 Principal component factor scores of four varieties of lemon

样品	FAC1	FAC2	FAC3	综合得分 (F)	排序
AQ	0.12	-0.92	1.18	-0.22	3
AH	1.32	0.08	-0.71	0.61	1
HQ	-1.04	-0.53	-0.94	-0.82	4
XS	-0.4	1.37	0.47	0.42	2

### 3 结论

AH 柠檬中固酸比、总酚等含量均优于其他品种柠檬, AQ 中维生素 C 含量最高。GC-MS 数据显示柠檬挥发性组分有 63 种,主要为烯类、醛类、醇类、酯类、酮类和酚类,电子鼻结果表明,氮氧化合物、硫化物、有机硫化物对柠檬风味贡献较大。通过相对气味活度值分析, ROAV>1 的关键风味化合物有 8 种,其中芳樟醇、壬醛、柠檬烯、柠檬醛以及癸醛贡献值较高,结合嗅闻结果显示他们是柠檬浓郁和特征香气的重要组成部分。

利用不同品种柠檬理化特性、关键香气成分进行综合得分评价,结果显示: AH 综合得分最高、其次是 XS 柠檬, AH 柠檬主要体现在固酸比、橙皮苷以及香气组分得分较高,说明 AH 更加适合综合利用,而 XS 柠檬在 FAC2 香气成分得分较高,说明 XS 柠檬更适合于直接食用或菜肴增香等应用。

### 参考文献

[1] 高炜,刘剑波,朱明扬,等.4 种柠檬不同组织的酚类物质分布及其抗氧化特性[J].中国食品学报,2019,19(2):281-290

[2] Barreca D, Bellocco E, Caristi C, et al. Flavonoid profile and radical-scavenging activity of Mediterranean sweet lemon (*Citrus limetta* Risso) juice [J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 417-422

[3] 黄巧娟,孙志高,龙勇,等.D-柠檬烯抗癌机制的研究进展[J].食品科学,2015,36(7):240-244

[4] 凌璐,刘伯霞,李涛,等.柠檬苦素抑制乳腺癌细胞转移相关基因芯片分析[J].宁夏医科大学学报,2020,42(12):1189-1194

[5] Uçar A, Özalp R. Efficient android electronic nose design for recognition and perception of fruit odors using kernel extreme learning machines [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2017, 166: 69-80

[6] Figueira J A, Porto-Figueira P, Pereira J A M, et al. A comprehensive methodology based on NTME/GC-MS data and chemometric tools for lemons discrimination according to geographical origin [J]. Microchemical Journal, 2020, 157: 104933

[7] Poormohammadi A, Bahrami A, Farhadian M, et al. Development of carbotrap B-packed needle trap device for determination of volatile organic compounds in air [J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1527: 33-42

[8] 贺羽,王帅,姚俊胜,等.基于电子鼻和电子舌分析不同酿造阶段柠檬果醋气、味差异[J].中国调味品,2018,43(12):154-159

[9] Zhang H, Xie Y, Liu C, et al. Comprehensive comparative analysis of volatile compounds in citrus fruits of different species [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 316-326

[10] Feng S, Huang M, Crane J H, et al. Characterization of key aroma-active compounds in lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26(2): 497-503

[11] 朱春华,李进学,高俊燕,等.GC-MS 分析柠檬不同品种果皮精油成分[J].现代食品科技,2012,28(9):1223-1227

[12] 傅隆生,宋思哲,邵玉玲,等.基于主成分分析和聚类分析的海沃德猕猴桃品质指标综合评价[J].食品科学,2014,35(19):6-10

[13] 荆瑞勇,卫佳琪,王丽艳,等.基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J].食品科学,2020,41(24):179-184

[14] 白沙沙,毕金峰,王沛,等.不同品种苹果果实品质分析[J].食品科学,2012,33(17):68-72

[15] 石彦国,单彤彤,曾剑华,等.基于主成分分析和偏最小二乘法的蒸煮大豆食味品质评价[J].中国食品学报,2019,19(10): 265-277

[16] 李丽梅,冯云霄,何近刚,等.‘雪花’梨酒综合品质评价体系的建立[J].食品科学,2020,41(17):23-28

[17] 王颖颖,侯利霞,胡爱鹏,等.主成分分析法评价市售芝麻酱产品品质[J].食品科学,2017,38(6):310-314

[18] Karl C M, Wendelin M, Lutsch D, et al. Structure-dependent effects of sweet and sweet taste affecting compounds on their sensorial properties [J]. Food Chemistry: X, 2020, 7: 100100

[19] 张海朋,彭昭欣,石梅艳,等.柑橘果实风味组学研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(1):32-39

[20] Chen X, Chen H, Xiao J, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) pickling process revealed by E-nose,

- HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Food Research International, 2020, 138: 109717
- [21] Gao G, Gosavi N, Pang X, et al. Identification of different pink pomelo varieties by gas chromatography-mass spectrometry and olfactometry coupled to chemometrics [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2018, 6(3): 158-167
- [22] 刘登勇,周光宏,徐幸莲.确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J].食品科学,2008,7:370-374
- [23] 马瑞婷,吴悠,曹庸,等.气相色谱-质谱/嗅觉检测联用分析九制陈皮腌制存放过程中香气成分的变化[J].现代食品科技, 2020,36(11):244-254
- [24] 洪林,周娜,文泽富,等.尤力克和菲诺 47 柠檬果实生长及品质变化动态分析[J].南方农业学报,2012,43(5):649-652
- [25] Yahfoufi N, Alsadi N, Jambi M, et al. The immunomodulatory and anti-inflammatory role of polyphenols [J]. Nutrients, 2018, 10(11): 1618
- [26] 董昕颖.不同采收期尤力克柠檬果实营养品质及其抗氧化活性评价研究[D].重庆:西南大学,2019
- [27] Wilson A D, Baietto M. Applications and advances in electronic-nose technologies [J]. Sensors, 2009: 9: 5099-5148
- [28] Wabg L, Hu G, Leu L, et al. Identification and aroma impact of volatile terpenes in Moutai liquor [J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(6): 1335
- [29] Hamuel Doughari J, Jamila Bazza M. Phytochemistry, GC-MS analysis, antioxidant and antibacterial potentials of limonene isolated from pericarp of *Citrus sinensis* [J]. International Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020, 5(1): 22-27
- [30] Adelina N M, Wang H, Zhang L, et al. Comparative analysis of volatile profiles in two grafted pine nuts by headspace-SPME/GC-MS and electronic nose as responses to different roasting conditions [J]. Food Research International, 2021, 140: 110026
- [31] Hernández-López G, Ventura-Aguilar R I, Correa-Pacheco Z N, et al. Nanostructured chitosan edible coating loaded with  $\alpha$ -pinene for the preservation of the postharvest quality of *Capsicum annum* L. and *Alternaria alternata* control [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 1881-1888
- [32] Li X, Yang Y, Li Y, et al.  $\alpha$ -Pinene, linalool, and 1-octanol contribute to the topical anti-inflammatory and analgesic activities of frankincense by inhibiting COX-2 [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 179: 22-26
- [33] 牛丽影,郁萌,刘夫国,等.香橼精油的组成及香气活性成分的 GC-MS-O 分析[J].食品与发酵工业,2013,39(4):186-191
- [34] Amanpour A, Guclu G, Kelebek H, et al. Characterization of key aroma compounds in fresh and roasted terebinth fruits using aroma extract dilution analysis and GC-MS-Olfactometry [J]. Microchemical Journal, 2019, 145: 96-104
- [35] Ma J, Xu H, Wu J, et al. Linalool inhibits cigarette smoke-induced lung inflammation by inhibiting NF- $\kappa$ B activation [J]. International Immunopharmacology, 2015, 29(2): 708-713
- [36] Rodenak-Kladniew B, Castro M A, Crespo R, et al. Anti-cancer mechanisms of linalool and 1,8-cineole in non-small cell lung cancer A549 cells [J]. Heliyon, 2020, 6(12): e5639
- [37] 谭艳,王国庆,吴锦铸,等.基于 GC-MS 与 GC-IMS 技术对四种柚皮精油挥发性风味物质的检测[J].食品工业科技,2021, 42(15):256-268
- [38] Fischer A, Grab W, Schieberle P. Characterisation of the most odour-active compounds in a peel oil extract from Pontianak oranges (*Citrus nobilis* var. *Lour. microcarpa* Hassk.) [J]. European Food Research and Technology, 2008, 227(3): 735-744
- [39] Asikin Y, Kawahira S, Goki M, et al. Extended aroma extract dilution analysis profile of Shiikuwasha (*Citrus depressa* Hayata) pulp essential oil [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26(1): 268-276
- [40] 郭建军,周艺,王小英,等.贵州不同产区代表绿茶的品质特征及香气组分分析[J].食品工业科技,2021,42(5):78-84
- [41] 程宏桢,蔡志鹏,王静,等.基于 GC-MS、GC-O 和电子鼻技术评价百香果酒香气特征[J].食品科学,2021,42(6):256-264
- [42] 胡梓妍,刘伟,何双,等.基于 HS-SPME-GC-MS 法分析 3 种金橘的香气挥发性成分[J].食品科学,2021,42(16):176-184
- [43] 茅中一,洪祖灿,刘加增,等.基于香气活性值的福建尤溪烟叶提取物香气特征成分分析[J].烟草科技,2020,53(10):56-65
- [44] Feng S, Suh J H, Gmitter F G, et al. Differentiation between flavors of Sweet Orange (*Citrus sinensis*) and Mandarin (*Citrus reticulata*) [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(1): 203-211