

# 基于气相色谱-离子迁移谱技术分析不同预处理技术对压榨山茶油风味的影响

彭丝兰<sup>1,2</sup>, 刘思思<sup>2</sup>, 易有金<sup>1</sup>, 刘汝宽<sup>2</sup>, 李昌珠<sup>2</sup>, 肖志红<sup>2,3</sup>

(1. 湖南农业大学 食品科学技术学院, 长沙 410128; 2. 湖南省林业科学院 木本油料资源利用国家重点实验室, 长沙 410004; 3. 湖南农业大学 长沙现代食品创新研究院, 长沙 410128)

**摘要:**旨在提升山茶油风味品质,采用气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术分析微波、烘烤、蒸制3种预处理技术对压榨山茶油中挥发性成分的影响,并结合正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)、相对气味活度值(ROAV)和聚类分析比较不同预处理压榨山茶油挥发性成分的差异。结果表明:不同预处理压榨山茶油中共鉴定出40种挥发性成分,其中醛类18种(40.02%~51.88%)、醇类9种(10.99%~19.85%)、酮类6种(19.37%~27.35%)、酯类3种(4.21%~11.44%)、吡嗪类2种(1.25%~6.50%)、烃类1种(0.19%~0.32%)和酸类1种(0.35%~2.16%),其中微波预处理压榨山茶油的挥发性物质含量最高,其次为烘烤、蒸制的;OPLS-DA建立的模型能够有效地区分不同预处理压榨山茶油,并根据变量投影重要性(VIP)值大于1筛选出了10种特征挥发性成分,分别是2-甲基丁醛D、3-甲基丁醛D、2,3-戊二酮、乙酸甲酯、2-甲基吡嗪、丙酮、3-羟基-2-丁酮、顺-2-庚烯醛、正己醇、1-丁醇,其中前5种为关键风味成分(ROAV大于1);聚类分析表明不同预处理压榨山茶油的10种特征挥发性成分存在差异,分类结果与OPLS-DA分类基本一致。综上,不同预处理技术所得压榨山茶油的风味不同,可通过OPLS-DA和聚类分析进行区分。

**关键词:**山茶油;气相色谱-离子迁移谱;挥发性成分;预处理技术

**中图分类号:**TS224;TS222+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2024)08-0048-08

## Analysis of effect of different pretreatment technology on the flavor of pressed oil - tea camellia seed oil based on gas chromatography - ion mobility spectroscopy

PENG Silan<sup>1,2</sup>, LIU Sisi<sup>2</sup>, YI Youjin<sup>1</sup>, LIU Rukuan<sup>2</sup>, LI Changzhu<sup>2</sup>, XIAO Zhihong<sup>2,3</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. State Key Laboratory of Utilization of Woody Oil Resource, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China; 3. Changsha Modern Food Innovation Institute, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** In order to improve the flavor quality of oil - tea camellia seed oil, gas chromatography - ion mobility spectrometry (GC - IMS) was used to analyze the effect of microwave, baking and steaming pretreatment on the volatile components in pressed oil - tea camellia seed oil, and orthogonal partial least squares - discriminant analysis (OPLS - DA), relative odor activity value (ROAV) and cluster analysis were used to analyze the difference of volatile components in different pretreated oil - tea camellia seed oil. The results showed that 40 volatile components were identified from the pressed oil - tea camellia seed oil by different pretreatment, including 18 aldehydes (40.02% -

收稿日期:2023-11-23;修回日期:2024-03-15

基金项目:湖南省科技创新领军人才(2020RC4026);湖南省林业杰青(XLK202108-1)

作者简介:彭丝兰(1997),女,硕士研究生,研究方向为食品加工原理与技术(E-mail)15675805154@163.com。

通信作者:易有金,教授,博士(E-mail)yiyoujin@163.com;刘汝宽,研究员,博士(E-mail)liurukuan@gmail.com。

40.02% -

51.88%), 9 alcohols (10.99% - 19.85%), 6 ketones (19.37% - 27.35%), 3 esters (4.21% - 11.44%), 2 pyrazines (1.25% - 6.50%), 1 hydrocarbon (0.19% - 0.32%) and 1 acid (0.35% - 2.16%), and the content of volatile compounds in pressed oil - tea camellia seed oil by microwave pretreatment was the highest, followed by baking and steaming. The model established by OPLS - DA could effectively distinguish the pressed oil - tea camellia seed oil with different pretreatment, and 10 characteristic volatile components were screened according to variable importance in projection (VIP) above 1, they were 2 - methyl - butanal D, 3 - methyl - butanal D, 2, 3 - pentanedione, methyl acetate, 2 - methylpyrazine, acetone, 3 - hydroxy - 2 - butanone, *cis* 2 - heptenal, *n* - hexyl alcohol, 1 - butanol, and the first 5 of which were the key flavor ingredients (ROAV > 1). Cluster analysis showed that there were differences in 10 characteristic volatile components of oil - tea camellia seed oil with different pretreatment, and the classification results were basically consistent with OPLS - DA classification. In conclusion, the flavor of pressed oil - tea camellia seed with different pretreatment is different, and it can be distinguished by OPLS - DA and cluster analysis.

**Key words:** oil - tea camellia seed oil; GC - IMS; volatile component; pretreatment technology

山茶油是从油茶籽中提取的食用油,又称油茶籽油,是我国特有的木本油脂,其不饱和脂肪酸含量高达90%<sup>[1]</sup>。山茶油由于具有抗氧化<sup>[2]</sup>、延缓衰老<sup>[3]</sup>、抗癌<sup>[4]</sup>、抗炎<sup>[5]</sup>等多种功效而受到广大消费者的关注。香气是反映食品风味品质的重要指标,油茶籽经过微波、烘烤、蒸制等预处理后,其所含的碳水化合物、脂肪、蛋白质等在高温有氧的情况下发生化学反应,从而对山茶油的风味产生重要影响<sup>[6]</sup>。因此,对不同预处理山茶油的风味进行分析很有必要。

目前,国内外传统检测油脂风味的方法有感官鉴别、色谱分析、光谱分析等<sup>[7]</sup>。气相色谱 - 离子迁移谱(GC - IMS)是目前国际上比较先进的挥发性有机物分析技术之一,与传统检测方法相比,具有样品无需前处理,仪器体积小、便于携带,检测范围广、灵敏、快捷等优点,尤其适合于挥发性有机化合物(VOCs)的快速检测<sup>[8]</sup>。Fang等<sup>[9]</sup>采用GC - IMS结合主成分分析(PCA)研究了不同品种山茶油的风味物质变化及精炼工艺对山茶油风味的影响。He等<sup>[6]</sup>采用气相色谱 - 质谱联用(GC - MS)分析了不同预处理山茶油挥发性成分的差异。但利用GC - IMS分析不同预处理山茶油风味的研究鲜有报道。因此,本文对油茶籽仁进行微波、烘烤、蒸制预处理,利用GC - IMS分析压榨山茶油中的风味物质组成,可视化构建挥发性成分指纹图谱,并结合正交偏最小二乘判别分析(OPLS - DA)、相对气味活度值(ROAV)和聚类热图分析不同预处理压榨山茶油的风味特征差异,以期对山茶油的品质鉴定及工艺优化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

油茶籽,由湖南省林业科学院试验林场提供。

FS - SE - 54 - CB - 1型气相色谱 - 离子迁移谱仪,德国G. A. S公司;ZYJ - 709型榨油机,东莞市房太电器有限公司;D10Q28MSXLRIIV - Q5B(S0)微蒸汽烤一体机,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 油料预处理及山茶油制取

油茶籽经剥壳后得到油茶籽仁,将油茶籽仁分别进行微波、烘烤及蒸制预处理。微波预处理:取200 g油茶籽仁于750 W微波下处理7.5 min。烘烤预处理:取200 g油茶籽仁于155 °C下烘烤15 min。蒸制预处理:取200 g油茶籽仁于100 °C水蒸气下加热25 min。待预处理后的油茶籽仁冷却至室温,采用螺旋榨油机在榨膛温度120 °C下压榨制油,所得油样在4 000 r/min下离心20 min,得到的山茶油密封保存于4 °C冰箱。以油茶籽仁不经预处理,直接压榨、离心得到的山茶油为对照。

#### 1.2.2 挥发性物质的测定

取2 g山茶油放入20 mL顶空瓶中,进行GC - IMS分析。分析条件:用氮气(质量分数≥99.999%)作载气,FS - SE - 54 - CB - 1色谱柱(15 m × 0.53 mm),柱温60 °C,IMS温度45 °C,分析时间40 min,进样量200 μL,进样针温度45 °C,孵育时间15 min,孵育温度40 °C,孵化转速500 r/min。每个样品平行检测3次。

根据挥发性成分气相色谱的保留指数和迁移时间,与GC - IMS数据库进行匹配,对不同预处理压

榨山茶油的挥发性成分进行定性分析,由仪器自带插件可视化不同预处理压榨山茶油的挥发性成分指纹谱图,采用峰面积归一化法对样品中鉴定出的不同类型挥发性成分进行半定量分析。

### 1.2.3 相对气味活度值(ROAV)的计算

ROAV 是一种结合阈值判定化合物重要性的方法,其原理及计算方法见参考文献[9-10],具体计算如式(1)所示。

$$R_{OVA} = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \quad (1)$$

式中: $R_{OVA}$ 为某个挥发性化合物的 ROAV; $C_{max}$ 为最大化合物的相对含量; $T_{max}$ 为最大化合物的阈值,mg/kg; $C_i$ 为某个挥发性化合物的相对含量; $T_i$ 为某个挥发性化合物的阈值,mg/kg。

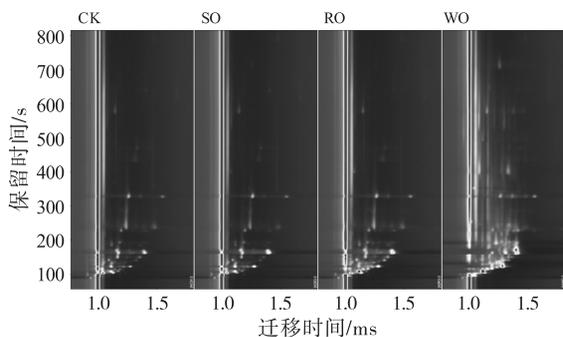
### 1.2.4 数据处理

利用 GC-IMS 自带的 LAV (Laboratory Analytical Viewer) 分析软件和插件 (Reporter 插件、Gallery Plot 插件) 进行样品分析,以及采用 GC × IMS Library Search 软件内置的 NIST 和 IMS 数据库对挥发性成分进行定性;采用 SIMCA 14.1 进行 OPLS-DA,采用 Origin Pro 2023 软件绘制聚类热图和柱状图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的差异动态分析

图 1 为不同预处理压榨山茶油挥发性成分的 GC-IMS 三维地形图投影获得的二维俯视图。



注:CK. 对照组;SO. 蒸制组;RO. 烘烤组;WO. 微波组。下同

图 1 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的 GC-IMS 二维俯视图

由图 1 可以看出,蒸制组、烘烤组、微波组山茶油的特征谱信息有一定差异,且不同样品部分挥发性成分含量出现升高或降低。

为了更加明显地观察不同组别山茶油挥发性成分的差异,以对照组为参照,将蒸制组、烘烤组、微波组中与对照组浓度相同的挥发性成分颜色抵消为白色,结果如图 2 所示。谱图中红色代表该挥发性成分含量高于对照组的,蓝色表示该挥发性成分含量低于对照组的。

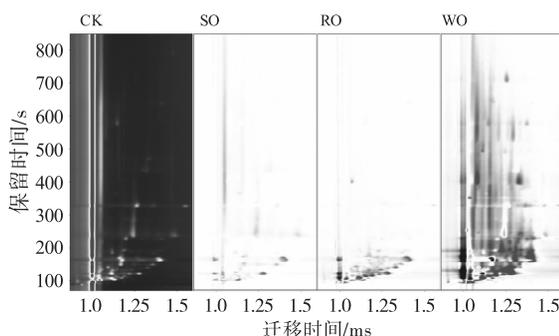


图 2 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的 GC-IMS 二维差异图

由图 2 可以看出,不同预处理压榨山茶油样品中挥发性成分存在差异。与其他处理组相比,微波组谱图中出现大量红点,说明微波组样品中大部分挥发性成分的浓度高于其他处理组。烘烤组谱图中红点多于蒸制组,说明烘烤组中部分挥发性成分的浓度高于对照组和蒸制组。

### 2.2 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的定性分析

不同预处理压榨山茶油挥发性成分的保留指数、迁移时间和气味描述见表 1。

由表 1 可知,不同预处理压榨山茶油中共鉴定出 40 种挥发性成分(包括单体及部分物质的二聚体),其中醛类 18 种、醇类 9 种、酮类 6 种、酯类 3 种、吡嗪类 2 种、烃类 1 种、酸类 1 种。这与郭子妍等<sup>[16]</sup>采用 GC-MS 技术所分析的不同产地山茶油挥发性成分的种类结果一致,但其研究中挥发性成分的数量达到 47 种,这可能与油茶籽产地、品种和检测方法差异等综合因素有关。

表 1 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的保留指数、迁移时间和气味描述

化合物	CAS 号	分子式	相对分子质量	保留指数	迁移时间/ms	气味描述 <sup>[11-15]</sup>
醛类						
正己醛M	66-25-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	100.2	795	1.264 4	青草味
正己醛D	66-25-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	100.2	795	1.559 0	青草味
正戊醛M	110-62-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	696	1.188 0	杏仁味、麦芽香

续表 1

化合物	CAS号	分子式	相对分子质量	保留指数	迁移时间/ms	气味描述 <sup>[11-15]</sup>
正戊醛D	110-62-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	694	1.391 2	杏仁味、麦芽香
3-甲基丁醛M	590-86-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	650	1.170 4	巧克力味、脂肪味
3-甲基丁醛D	590-86-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	651.5	1.404 8	巧克力味、脂肪味
2-甲基丁醛M	96-17-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	681	1.159 5	可可味、杏仁味
2-甲基丁醛D	96-17-3	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	665	1.398 6	可可味、杏仁味
丁醛M	123-72-8	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72.1	614	1.112 3	辛辣味、青草香
丁醛D	123-72-8	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72.1	607	1.281 9	辛辣味、青草香
正辛醛M	124-13-0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	128.2	1 003	1.401 9	脂肪味、青果皮香
正辛醛D	124-13-0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	128.2	1 003	1.671 0	脂肪味、青果皮香
苯甲醛M	100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	106.1	968.6	1.161 6	焦糖味、甜味
苯甲醛D	100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	106.1	968.6	1.475 1	焦糖味、甜味
苯乙醛	122-78-1	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	120.2	1 047	1.261 9	甜味、巧克力味
正庚醛	111-71-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	114.2	899.2	1.344 6	脂肪味、柑橘味
壬醛	124-19-6	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	142.2	1 100	1.495 2	柑橘味、脂肪味、花香
顺-2-庚烯醛	57266-86-1	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	112.2	951	1.072 8	青草香
醇类						
2-甲基丁醇M	137-32-6	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88.1	735.7	1.244 9	葡萄味、果味
2-甲基丁醇D	137-32-6	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88.1	735.7	1.496 5	葡萄味、果味
2-甲基丙醇M	78-83-1	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74.1	633.1	1.166 1	醇香、指甲油味
2-甲基丙醇D	78-83-1	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74.1	626	1.366 1	醇香、指甲油味
正己醇	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	102.2	857	1.329 1	花香、脂肪味、青草香
1-丙醇	71-23-8	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60.1	568	1.114 8	醇香、成熟水果香
1-丁醇	71-36-3	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74.1	664	1.161 9	水果香、青草香、麦芽香
正庚醇	111-70-6	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	116.2	969	1.366 4	青草香、脂肪味
2,3-丁二醇	513-85-9	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	90.1	803	1.366 5	黄油味、奶酪味
酮类						
2-丁酮	78-93-3	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72.1	598.3	1.065 0	轻微果香
丙酮	67-64-1	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58.1	547.5	1.111 0	苹果味、梨味、甜味
2,3-戊二酮	600-14-6	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	100.1	698	1.219 8	焦糖味、黄油味
2-戊酮	107-87-9	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	687.7	1.116 1	甜味、水果香
3-羟基-2-丁酮	513-86-0	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88.1	713	1.057 3	黄油味、乳脂肪味
3-戊酮	96-22-0	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86.1	707	1.108 9	甜味
酯类						
乙酸异戊酯	123-92-2	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130.2	873	1.315 0	香蕉味、果味
乙酸丙酯	109-60-4	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	102.1	708.4	1.159 8	果味
乙酸甲酯	79-20-9	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74.1	548	1.048 1	果味
吡嗪类						
2-甲基吡嗪	109-08-0	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>	94.1	851	1.081 2	烤坚果味
2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	108.1	916	1.122 0	烤坚果味、肉香味
烃类						
苯乙烯	100-42-5	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.2	898	1.429 2	花香、香油味
酸类						
丁酸	107-92-6	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88.1	834	1.162 8	酸味、奶酪味

注:M表示单体,D表示二聚体

### 2.3 不同预处理压榨山茶油挥发性成分指纹图谱分析

为进一步明确不同预处理压榨山茶油挥发性成分含量的变化情况,对比其指纹图谱,结果如图3所示。

图3中每一行代表一个样品中选取的信号峰,每列代表同一挥发性化合物在对照组、蒸制组、烘烤组、微波组样品中的信号峰。亮点表示挥发性成分,不同色调表示不同浓度,其色调从蓝色到红色表示化合物的浓度从低到高。

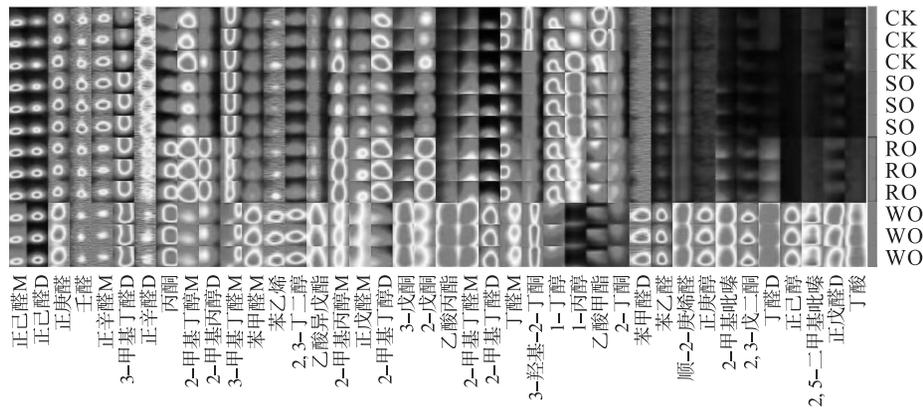


图3 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的指纹图谱

由图3可知:不同预处理压榨山茶油的挥发性成分类别相似,总体以醛类、酮类、醇类为主,其次是酯类、吡嗪类、酸类、烃类;但挥发性成分含量存在明显的差别,其中微波预处理压榨山茶油的挥发性成分含量最高,其次是烘烤组、蒸制组、对照组。微波组中挥发性成分含量较高的是苯甲醛(M和D)、正己醛D、正戊醛D、丁醛(M和D)、2-甲基丁醛(M和D)、3-甲基丁醛D、苯乙醛、顺-2-庚烯醛、2,3-丁二醇、正庚醇、正己醇、2,3-戊二酮、3-戊酮、丙酮、乙酸丙酯、乙酸异戊酯、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、苯乙烯、丁酸等;烘烤组中挥发性成分含量较高的是正己醛M、正戊醛M、2-甲基丁醇(M和D)、2-甲基丙醇(M和D)、2-戊酮等;蒸制组中挥发性成分含量较高的是正辛醛M、3-甲基丁醛M、壬醛、正庚醛、1-丁醇、1-丙醇等;对照组中挥发性成分含量较高的是正辛醛(M和D)、2-丁酮、3-羟基-2-丁酮、乙酸甲酯等。

#### 2.4 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的相对含量

为了更好地表征不同预处理压榨山茶油中挥发性成分含量的变化,测定了不同预处理山茶油中挥发性成分的相对含量,结果如图4所示。

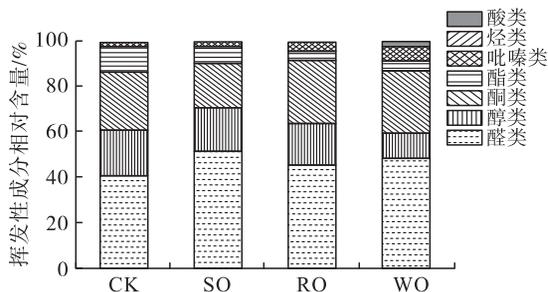


图4 不同预处理压榨山茶油中挥发性成分的相对含量

由图4可知,不同预处理压榨山茶油的挥发性

成分由醛类、醇类、酮类、酯类、吡嗪类、烃类和酸类组成,其中醛类、酮类和醇类化合物相对含量较高,依次为40.02%~51.88%、19.37%~27.35%、10.99%~19.85%,酯类、吡嗪类、烃类和酸类化合物相对含量较低,依次为4.21%~11.44%、1.25%~6.50%、0.19%~0.32%、0.35%~2.16%。微波组中吡嗪类(6.50%)、酸类(2.16%)化合物相对含量最高,烘烤组中酮类化合物相对含量(27.35%)最高,蒸制组中醛类化合物相对含量(51.88%)最高,对照组中醇类(19.85%)、酯类(11.44%)、烃类(0.32%)化合物相对含量最高。奉美桃等<sup>[17]</sup>利用GC-MS从不同预处理组的山茶油中共检测出34种挥发性成分,其中包括醛类、醇类、酸类、酮类和杂环类物质等,化合物种类和数量均少于本研究结果,这表明GC-IMS对于山茶油中的某些挥发性成分可能具有更高的灵敏度。

#### 2.5 OPLS-DA及模型评价分析

OPLS-DA是一种能够建立物质表达量与样品类别间关系模型的有效判别分析统计方法<sup>[18]</sup>。为进一步探究不同预处理压榨山茶油中挥发性成分,以鉴别出的40种挥发性成分的含量为因变量,以不同预处理山茶油样品为自变量,进行偏最小二乘判别分析,不同预处理压榨山茶油挥发性成分OPLS-DA得分图如图5所示,置换检验图如图6所示。

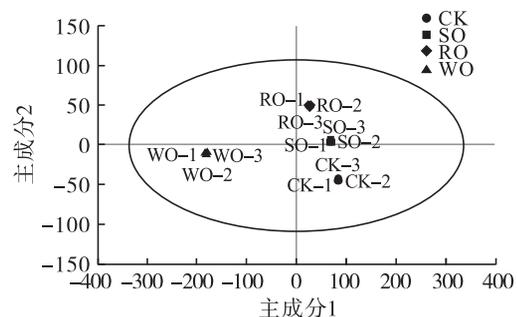


图5 不同预处理压榨山茶油挥发性成分OPLS-DA得分图

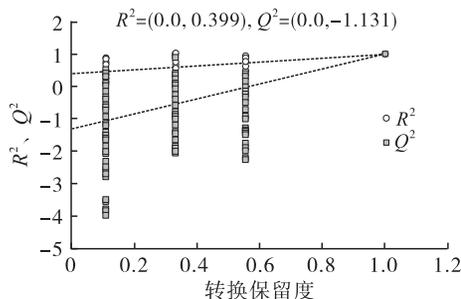


图6 不同预处理压榨山茶油挥发性成分置换检验图

本次分析中的自变量拟合指数( $R_x^2$ )为0.998, 因变量拟合指数( $R_y^2$ )为0.999, 模型预测指数( $Q^2$ )为0.995,  $R^2$ 和 $Q^2$ 均超过0.5, 表示模型拟合结果可接受<sup>[19]</sup>。由图5可知, 不同预处理压榨山茶油中挥发性成分差异较大, 且区分显著, 其中, 烘烤组、蒸制

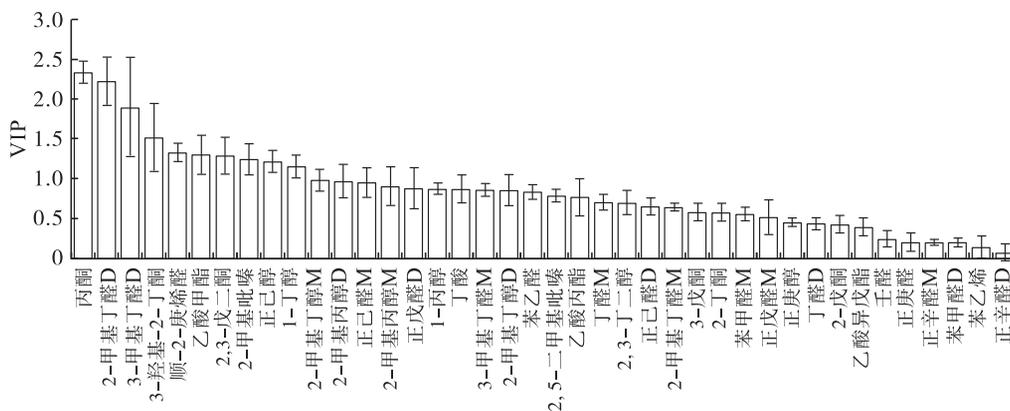


图7 不同预处理压榨山茶油挥发性成分的VIP值

由图7可知, 不同预处理压榨山茶油中共有10种特征挥发性成分, 分别为丙酮、2-甲基丁醛D、3-甲基丁醛D、3-羟基-2-丁酮、顺-2-庚烯醛、乙酸甲酯、2,3-戊二酮、2-甲基吡嗪、正己醇、

组可聚为一类, 表明这2个预处理组之间的风味差异较小, 微波组、对照组各自单独聚为一类, 表明微波组、对照组与其他预处理组之间的风味差异较大。由图6可知,  $Q^2$ 的回归线与垂直轴(左侧)截距为负数, 说明模型不存在过拟合, 模型验证有效, 该模型稳定性良好, 具有较好的预测能力<sup>[20-21]</sup>。综上, 模型能够较好地判别和区分不同预处理压榨山茶油。

2.6 不同预处理压榨山茶油挥发性成分中特征风味化合物及关键风味化合物的筛选

利用GC-IMS指纹图谱, 对不同预处理压榨山茶油中40种挥发性成分进行可视化后, 在构建可靠OPLS-DA模型的基础上, 以变量投影重要性(VIP)值大于1为指标筛选特征挥发性成分<sup>[22]</sup>, 结果如图7所示。

1-丁醇。

通过对VIP值大于1的10种特征挥发性成分计算ROAV<sup>[23]</sup>确定不同预处理压榨山茶油关键风味化合物, 结果如表2所示。

表2 10种特征挥发性成分的相对气味活度值

化合物	气味阈值 <sup>[17,24-27]</sup> /(mg/kg)	ROAV			
		CK	SO	RO	WO
2-甲基丁醛D	0.023	3.43	9.81	6.10	4.12
3-甲基丁醛D	0.010 8	14.35	35.86	20.03	4.68
顺-2-庚烯醛	0.25	0.21	0.34	0.13	0.13
1-丁醇	0.459 2	0.23	0.43	0.20	0.01
正己醇	0.4	0.02	0.03	0.01	0.06
3-羟基-2-丁酮	0.8	0.27	0.22	0.14	0.04
2,3-戊二酮	0.000 3	81.69	100.00	100.00	100.00
丙酮	0.832	0.24	0.31	0.36	0.10
乙酸甲酯	0.002	100.00	88.51	39.35	3.98
2-甲基吡嗪	0.006	2.80	4.85	4.60	4.68

当化合物ROAV大于1时, 表示其对样品风味有贡献, 为影响风味的关键挥发性成分<sup>[9]</sup>。由表2

可知, 10种特征挥发性成分中鉴定出5种ROAV大于1的关键挥发性成分, 分别为2-甲基丁醛D、3-

甲基丁醛 D、2,3-戊二酮、乙酸甲酯、2-甲基吡嗪。其中乙酸甲酯对对照组山茶油的风味贡献最大,2,3-戊二酮对蒸制、烘烤和微波预处理的山茶油风味贡献最大。

为了直观区分特征挥发性成分在不同预处理压榨山茶油中的变化,根据筛选出来的 10 种特征挥发性成分绘制聚类热图,结果如图 8 所示。

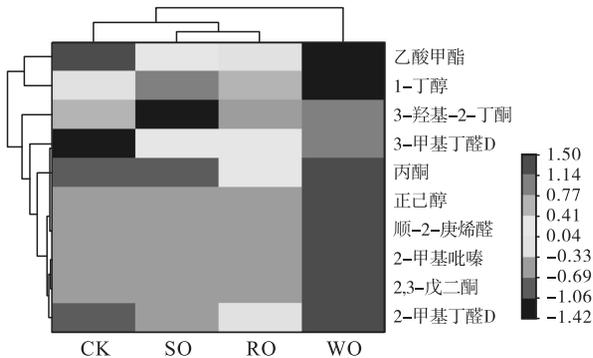


图 8 不同预处理压榨山茶油中 10 种特征挥发性成分的聚类热图

由图 8 可知,对照组为一类,蒸制组与烘烤组为一类,微波组为一类。这与 OPLS-DA 分类结果一致,可对不同预处理压榨山茶油进行区分。对照组的特征挥发性成分主要为酮类、酯类,主要包括 3-羟基-2-丁酮、乙酸甲酯,呈现黄油味、乳脂防味和果味。蒸制组的特征挥发性成分主要为醇类、酯类、醛类,主要包括 1-丁醇、乙酸甲酯、3-甲基丁醛 D,呈现水果香、青草香、麦芽香和巧克力味。烘烤组中特征挥发性成分主要为醇类、醛类和酮类,主要包括 3-甲基丁醛 D、1-丁醇和丙酮,呈现巧克力味、脂肪味、果味。微波组的特征挥发性成分主要为醛类、醇类、酮类、吡嗪类,主要包括 2-甲基丁醛 D、3-甲基丁醛 D、顺-2-庚烯醛、正己醇、2,3-戊二酮、丙酮、2-甲基吡嗪,呈现巧克力味、烤坚果味、青草香、脂肪味、焦糖味、黄油味和果味。不同预处理压榨山茶油的特征香气成分存在差异,风味存在差异。

### 3 结论

通过 GC-IMS 技术初步分析了微波、烘烤、蒸制预处理压榨山茶油的挥发性成分,并通过 OPLS-DA 和聚类热图分析不同预处理压榨山茶油挥发性成分的差异。结果显示,不同预处理山茶油中共鉴定出 40 种挥发性成分,其中醛类 18 种、醇类 9 种、酮类 6 种、酯类 3 种、吡嗪类 2 种、烃类 1 种和酸类 1 种,其中以醛类、酮类和醇类含量较高。不同预处理压榨山茶油中挥发性成分含量由高到低的顺序为微波组、烘烤组、蒸制组和对照组。从 40 种挥发性成

分中筛选出 10 种特征挥发性成分(VIP 值 > 1),分别是丙酮、2-甲基丁醛 D、3-甲基丁醛 D、3-羟基-2-丁酮、顺-2-庚烯醛、乙酸甲酯、2,3-戊二酮、2-甲基吡嗪、正己醇、1-丁醇,可实现对不同预处理压榨山茶油进行较好区分。10 种特征挥发性成分中鉴定出 5 种 ROAV 大于 1 的关键挥发性成分,即 2-甲基丁醛 D、3-甲基丁醛 D、2,3-戊二酮、乙酸甲酯、2-甲基吡嗪,其中乙酸甲酯对对照组山茶油的风味成分贡献最大,2,3-戊二酮对蒸制、烘烤、微波预处理的山茶油风味成分贡献最大。该研究基于 GC-IMS 技术对不同预处理压榨山茶油进行风味物质分析,对山茶油的品质鉴定及制取工艺具有一定的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 曾奥,陈元堃,罗振辉,等. 茶籽油不同提取工艺的特点分析及研究进展[J]. 广东药科大学学报, 2020, 36(1): 151-154.
- [2] LUO F, FEI X Q. Distribution and antioxidant activities of free, conjugated, and insoluble-bound phenolics from seven species of the genus *Camellia* [J]. J Am Oil Chem Soc, 2019, 96(2): 159-170.
- [3] LIU J, WU L C, CHEN D, et al. Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China [J]. Appl Soil Ecol, 2017, 113: 29-35.
- [4] CHEN L Y, CHEN J, XU H H. Sasanquasaponin from *Camellia oleifera* Abel. induces cell cycle arrest and apoptosis in human breast cancer MCF-7 cells [J]. Fitoterapia, 2013, 84: 123-129.
- [5] LUAN F, ZENG J S, YANG Y, et al. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel: A review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications [J/OL]. J Funct Foods, 2020, 75: 104242 [2023-11-23]. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104242>.
- [6] HE J H, WU X H, ZHOU Y, et al. Effects of different preheat treatments on volatile compounds of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) seed oil and formation mechanism of key aroma compounds [J/OL]. J Food Biochem, 2021, 45(3): e13649 [2023-11-23]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13649>.
- [7] 麦小漫. 色谱技术结合化学计量学用于食用植物油品质鉴定及掺伪筛查的研究[D]. 广州: 广东药科大学, 2021.
- [8] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J/OL]. Food Chem, 2020, 315: 126158 [2023-11-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126158>.

- [9] FANG Z Y, LI G Z, GU Y, et al. Flavour analysis of different varieties of camellia seed oil and the effect of the refining process on flavour substances [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2022, 170: 114040 [2023 - 11 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114040>.
- [10] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 金华火腿主体风味成分及其确定方法[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(2): 173 - 176.
- [11] 刘玉兰,连四超,陈璐,等. 不同工艺制取油莎豆油中挥发性成分和特征风味成分的分析研究[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(7): 123 - 132.
- [12] 车莹,褚彦钧,田笑,等. 鸡蛋酱油原料熟制和制曲条件优化及挥发性成分分析[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(7): 289 - 306.
- [13] 王海波,钟丹,林芷欣,等. 基于 GC - IMS 分析 3 种红肉番石榴在绿熟期和黄熟期的挥发性成分差异[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 301 - 310.
- [14] 孙旺斌,付琪,薛瑞林,等. 不同枣粉水平对陕北白绒山羊肉挥发性风味物质的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(10): 5664 - 5676.
- [15] 连四超. 不同制油工艺对油莎豆制油效果和产品质量的影响[D]. 郑州:河南工业大学,2022.
- [16] 郭子妍,朱梦婷,余强,等. 基于 HS - SPME - GC/MS 和化学计量学的不同产地茶油香气成分的分析[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2023, 47(1): 32 - 39.
- [17] 奉美桃,刘千千,刘智辉,等. 预处理技术对压榨山茶油品质及挥发性风味成分的影响[J]. *中国油脂*, 2023, 48(9): 15 - 23.
- [18] 刘俊霞,赵萍,金晶,等. 基于气相色谱 - 离子迁移谱结合化学计量学分析大鲵肉冷藏期间挥发性成分[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(22): 269 - 278.
- [19] 张倩,徐丽萍,高新鹏,等. 3 种不同加工方式对桑叶茶挥发性成分的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(2): 307 - 315.
- [20] 李振雨,梁月仪,吕渭升,等. 马鞭草药材 UPLC 指纹图谱建立及指标性成分的测定[J]. *天然产物研究与开发*, 2023, 35(4): 551 - 561.
- [21] 于茜雅,鲁骞,吴昌正,等. 温度对广式高盐稀态酱油原油品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 55 - 63.
- [22] 吴永康,林亲录,蒋志荣,等. 基于 GC - IMS 分析碾减率对籼米米饭挥发性物质的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(12): 26 - 31.
- [23] 张浩,易宇文,朱开宪,等. 基于 GC - IMS 结合化学计量法分析烧烤过程中温度对牦牛肉风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 337 - 344.
- [24] 范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 李智宇,王凯,冒德寿,等译. 北京:科学出版社,2018.
- [25] JIA X, ZHOU Q, WANG J Q, et al. Identification of key aroma - active compounds in sesame oil from microwaved seeds using E - nose and HS - SPME - GC × GC - TOF/MS[J/OL]. *J Food Biochem*, 2019, 43(10): e12786 [2023 - 11 - 23]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12786>.
- [26] JIA X, WANG L F, ZHENG C, et al. Key odorant differences in fragrant *Brassica napus* and *Brassica juncea* oils revealed by gas chromatography - olfactometry, odor activity values, and aroma recombination [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(50): 14950 - 14960.
- [27] 谢兆华,李洪军,王琴,等. 不同食用油制备酥肉挥发性风味物质的差异性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(7): 259 - 268.

(上接第 40 页)

大豆油脱臭过程中,采用先低温长时脱臭(180 ~ 220 °C, 60 ~ 70 min),再高温短时脱臭(240 ~ 250 °C, 10 ~ 20 min)的双温脱臭工艺,可在保证成品大豆油质量的同时,接近零反式脂肪酸的目标。

#### 参考文献:

- [1] 温运启,刘玉兰,王璐阳,等. 不同食用植物油中维生素 E 组分及含量研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 35 - 39.
- [2] 代红丽,魏安池,李桂华. 不同来源大豆中生育酚含量的 HPLC 测定与比较[J]. *中国油脂*, 2006, 31(2): 47 - 49.
- [3] 张志旭,昌超,刘东波. 天然植物甾醇的来源、功效及提取研究进展[J]. *食品与机械*, 2014, 30(5): 288 - 293, 298.
- [4] 吕双双,李书国. 植物甾醇性质、功能、安全性及其食品的研究进展[J]. *粮食加工*, 2014, 39(4): 40 - 44, 47.
- [5] 刘玉兰,王璐阳,黄会娜,等. 玉米油精炼过程氯离子含量变化及其对 3 - 氯丙醇酯和缩水甘油酯含量的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 286 - 292.
- [6] 刘玉兰,张家枫,胡文娜,等. 玉米毛油酸价及碱炼脱酸对其甘油酯组成及 3 - 氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 45(2): 81 - 85.
- [7] 刘玉兰,任我行,马宇翔,等. 吸附法脱除大豆油中 3 - 氯丙醇酯及缩水甘油酯的研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(11): 57 - 62.
- [8] 向晓玲,赵波,李春松,等. 食用油中 3 - 氯丙醇酯的研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(7): 59 - 64.
- [9] 张家枫,刘玉兰,孙国昊,等. 不同食用油的甘油酯组成、3 - MCPD 酯和 GEs 含量研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(12): 38 - 43.