



食品科学

Food Science

ISSN 1002-6630, CN 11-2206/TS

## 《食品科学》网络首发论文

题目： 六个产地香椿主要活性成分及风味特征差异分析  
作者： 张剑辉，张梦琪，蔡世佳，姜凯丽，马珞珞，马倩云，王颖，孙剑锋，王文秀  
网络首发日期： 2022-09-29  
引用格式： 张剑辉，张梦琪，蔡世佳，姜凯丽，马珞珞，马倩云，王颖，孙剑锋，王文秀. 六个产地香椿主要活性成分及风味特征差异分析[J/OL]. 食品科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220928.1250.006.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 六个产地香椿主要活性成分及风味特征 差异分析

张剑辉, 张梦琪, 蔡世佳, 姜凯丽, 马珞珞, 马倩云, 王颀, 孙剑锋\*, 王文秀\*

(河北农业大学食品科技学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 以四川、陕西、山东、山西、河北和云南六个产地的香椿为研究对象, 探究不同产地香椿的主要活性成分和风味特征差异。利用感官评价对香椿的整体气味进行评价, 基于电子鼻技术和气相色谱离子迁移谱 (gas chromatography ion mobility spectrometry, GC-IMS) 技术对六个产地的香椿进行挥发性成分的分析, 研究不同产地香椿风味特征的差异。感官评价结果表明, 云南香椿的气味浓郁宜人, 陕西香椿具有刺激性气味。电子鼻分析结果表明, 六个产地香椿的芳香类、长链烷烃类含量相近, 氮氧化合物和硫化物含量存在较大差异。通过 GC-IMS 技术共鉴定出 76 种挥发性物质, 主要包括醇类 12 种, 酯类 10 种, 吡嗪类 9 种, 酮类 9 种, 萜类化合物 8 种, 有机硫化物 7 种, 醛类 7 种, 酸类 6 种, 酚类 4 种以及其他类 4 种。电子鼻和 GC-IMS 技术的主成分分析结果表明, 云南香椿风味较独特, 四川、陕西和山东香椿的风味类似, 山西香椿与其他产地香椿存在差异, 河北香椿的风味物质含量低。本研究通过电子鼻结合 GC-IMS 技术直观地反映了产地对香椿风味的影响, 为香椿深加工原料的筛选提供理论依据。

**关键词:** 香椿; 电子鼻; 挥发性物质; 气相色谱离子迁移谱; 主成分分析

## Analysis of the differences in the main active components and flavor characteristics of six origins of *Toona sinensis*

ZHANG Jianhui, ZHANG Mengqi, CAI Shijia, JIANG Kaili, MA Luoluo, MA Qianyun, WANG Jie,  
SUN Jianfeng\*, WANG Wenxiu\*

(College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, 071000, China)

**Abstract:** The main active components and flavor characteristics of *Toona sinensis* in different origins were explored by taking *Toona sinensis* from six origins of Sichuan, Shaanxi, Shandong, Shanxi, Hebei and Yunnan as the research objects. The overall odor of *Toona sinensis* was evaluated by sensory evaluation, and the volatile components of *Toona sinensis* from six origins were analyzed based on electronic nose technology and gas chromatography ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology to find differences in flavor profile. The sensory evaluation results showed that the odor of *Toona sinensis* in Yunnan was rich and pleasant, while the odor of *Toona sinensis* in Shaanxi was pungent. The results of electronic nose analysis showed that the contents of aromatics and long-chain alkanes of *Toona sinensis* in the six origins were similar, but the contents of nitrogen oxides and sulfides were quite different. A total of 76 volatile substances were identified by GC-IMS, including 12

基金项目: 河北省“三三三人才工程”人才培养资助项目 (A202005002); 河北省自然科学基金 (C2020204166); 河北省高等学校青年基金项目 (QN2019113)

第一作者简介: 张剑辉 (1996-) (ORCID:0000-0002-0183-0896), 女, 硕士研究生, 研究方向为果蔬加工与贮藏。E-mail: zhangjianhui1212@163.com

\*通信作者简介: 孙剑锋 (1979-) (ORCID: 0000-0002-8344-4891), 男, 教授, 研究方向为食品加工技术。E-mail: causunjf@hebau.edu.cn

王文秀 (1989-) (ORCID: 0000-0002-9268-3528), 女, 副教授, 研究方向为食品快速无损检测技术及装备。E-mail: godlovexiu@163.com



alcohols, 10 esters, 9 pyrazines, 9 ketones, 8 terpenoids, 7 organic sulfides, 7 aldehydes, 6 acids, 4 phenols and 4 other species. The principal component analysis results of electronic nose and GC-IMS technology showed that the flavor of *Toona sinensis* in Yunnan was unique, and the flavors of *Toona sinensis* in Sichuan, Shaanxi and Shandong were similar. *Toona sinensis* in Shanxi is different from that in other origins, and the content of flavor substances in *Toona sinensis* from Hebei is low. With the electronic nose and GC-IMS technology, this paper intuitively reflected the influence of the origin on the flavor of *Toona sinensis*, and provided a theoretical basis for the screening of deep processing raw materials of *Toona sinensis*.

**Keywords:** *Toona sinensis*; electronic nose; volatile components; gas chromatography ion mobility spectrometry; principal component analysis

中图分类号: TS255.1 文献标志码: A

DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20220608-082

香椿是一种常见的楝科植物,属于亚热带及温带树种,是我国独有的一种“树生菜”,食用和栽培历史已达两千余年<sup>[1]</sup>。在山东、云南、陕西等地广泛栽培,种植过程中不需要农药驱虫<sup>[2]</sup>,是一种绿色安全的蔬菜。香椿风味独特,富含黄酮、多酚和皂苷等多种生物活性成分,具有丰富的营养价值<sup>[3,4]</sup>和抗炎、抗癌<sup>[5]</sup>、抗氧化<sup>[6]</sup>等保健功效。香椿风味受品种、地域和环境等多方面因素的影响<sup>[7]</sup>,直接影响了香椿深加工产品的品质。因此,检测香椿的风味物质,辨别不同产地香椿的特征挥发性物质,对不同产地香椿风味的鉴别和深加工品种的选择具有重要意义。

电子鼻、气相色谱嗅闻和气相色谱-质谱联用技术是目前鉴别挥发性风味物质最常用的技术<sup>[8-10]</sup>,在水果新鲜度分析<sup>[11]</sup>和产地鉴别<sup>[12,13]</sup>等多种领域广泛应用。气相色谱离子迁移谱(gas chromatography ion mobility spectrometry, GC-IMS)是一种新型的风味检测技术,具有高选择性、高灵敏度和高分辨率等优点,目前已在茶叶<sup>[14]</sup>、果蔬<sup>[15]</sup>、生姜<sup>[16]</sup>、酒类<sup>[17]</sup>和肉类深加工<sup>[18]</sup>等风味物质检测上有所应用,此外在食用油掺假<sup>[19]</sup>、蜂蜜掺假<sup>[20]</sup>、水产品鉴定<sup>[21]</sup>、咖啡豆分级<sup>[22]</sup>等方面也取得了一定的研究进展。然而,将 GC-IMS 技术用于不同产地香椿风味差异和特征分析的分析较少。

本研究选取四川、陕西、山东、山西、河北和云南六个产地的香椿为原料,测定主要活性成分黄酮、多酚和皂苷的含量,并对香椿的气味进行感官评价分析。采用电子鼻和 GC-IMS 技术对不同产地香椿的挥发性物质进行检测,同时结合主成分分析(principal component analysis, PCA)和指纹图谱技术进行统计分析,比较不同产地香椿的风味差异,构建不同产地香椿特征风味物质 GC-IMS 数据库,以鉴别不同产地香椿的特征风味物质,为香椿品质评价体系建立提供理论依据,为深加工选种提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

香椿均为红油香椿,树龄为3年,种植地光照充足,土壤肥沃,大面积种植,选自四川眉山、陕西渭南、山东烟台、山西运城、河北保定、云南昆明六个产地的头茬香椿,取6-9 cm的嫩芽,依次编号为1、2、3、4、5、6,真空包装后置于4℃冰箱中储存。于2022年4月1日取样,剪成小且均匀的叶片,加液氮后用组织研磨仪研磨得到待测定的香椿原料,置于-80℃冰箱中随用随取。

芦丁标准品(纯度为99.9%) 北京索莱宝生物科技有限公司;人参皂苷标准品 上海源叶生物科技有限公司;植物总酚含量试剂盒 南京碧波生物科技有限公司;高纯氮气(纯度≥99.999%) Chemtron 制氮机制备;20 mL 顶空进样瓶 浙江欧尔赛斯科技有限公司;其他试剂均为分析纯。

## 1.2 仪器与设备

SB-5200DTD 超声波清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司；酶标仪 赛默飞世尔科技(中国)有限公司；研磨仪 IKA@A11 basic；电子鼻 德国 AIRSENSE 公司 PEN3 型； FlavourSpec®气相离子迁移谱联用仪 德国 G.A.S 公司；MXT-5 色谱柱 (15 m×0.53 mm, 0.53 μm) 美国 Restek 公司。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 主要活性成分测定

#### 1.3.1.1 总黄酮含量测定

参照文献<sup>[23]</sup>的方法从香椿中提取黄酮，参照文献<sup>[24]</sup>的方法绘制黄酮标准曲线，横坐标  $x$  为芦丁溶液浓度，纵坐标  $y$  为吸光度。按照以下公式计算香椿中黄酮类化合物的含量 (mg/g)：

$$\text{总黄酮含量 (mg/g)} = \frac{x \times v_1}{w \times v_2} \quad (1)$$

式中  $x$  为根据标准曲线计算的稀释液中总黄酮的浓度，mg/mL； $v_1$  为提取液体积，mL； $v_2$  为选取的待测液的体积，mL； $w$  为新鲜香椿质量，(5.000±0.002) g。

#### 1.3.1.2 植物总酚含量测定

参照植物总酚含量检测试剂盒测定，根据预实验结果稍作修改，将要求的吸取待测样品 50 μL 改为吸取 5 μL，总多酚含量由以下公式获得：

$$\text{总酚含量(mg/g)} = \frac{x \times v}{w} \times 10 \quad (2)$$

式中  $x$  为根据标准曲线计算的稀释液中总酚浓度，mg/mL； $v$  为提取液总体积，2 mL，10 为样品稀释倍数， $w$  为新鲜香椿质量，(0.100±0.002) g。

#### 1.3.1.3 皂苷含量测定

采用香草醛-冰乙酸显色法测定<sup>[25]</sup>，以人参皂苷作为标准品，横坐标  $x$  为人参皂苷质量浓度，纵坐标  $y$  为吸光度，制定标准曲线。按照以下公式计算香椿中皂苷含量 (mg/g)：

$$\text{皂苷含量(mg/g)} = \frac{m_1 \times v_2}{m_2 \times v_1} \quad (3)$$

式中  $m_1$  为根据标准曲线计算的样品测定液中皂苷的含量，mg/mL； $v_2$  为样品定容体积，mL； $v_1$  为比色测定样品体积，mL； $m_2$  为新鲜香椿质量，(1.000±0.002) g。

以上指标测定时，每个样品重复测定三次，用平均值±标准差表示，计算结果保留至小数点后两位。

### 1.3.2 感官评价

香椿的嗅觉评审标准，如表 1 所示。评审小组由 10 位专业人士构成，在无异气息的感官品评室内进行，总分为 10 分，取平均值。

表 1 香椿感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of *Toona sinensis*

气味评价标准	分值/(分)
香气浓郁持久	8-10
香气不高不低	6-8
香气较低，无杂异气	4-6
香气低微，无杂异气	2-4

### 1.3.3 电子鼻分析

采用德国 AIRSENSE 公司 PEN3 型电子鼻进行测定分析, 该电子鼻包括 10 个传感器, 具体性能描述见表 2。将新鲜的香椿叶剪成小块, 取 2 g 置于 100 mL 烧杯中, 双层保鲜膜封口, 放置 30 min 后进行测定。

测定条件: 采样时间为 1 s/组, 传感器自清洗时间为 80 s, 归零时间为 5 s; 样品准备时间为 5 s; 进样流量为 400 mL/min; 分析采样时间为 80 s, 每个样品做 3 个平行实验。

表 2 电子鼻传感器性能

Table2 Electronic nose sensor performance

阵列序号	传感器名称	传感器敏感性描述
1	W1C	芳香成分, 苯类
2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化物很灵敏
3	W3C	氨水, 对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢气有选择性
5	W5C	烷烃类芳香成分敏感
6	W1S	对甲烷等短链烷烃灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇醚醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃类成分灵敏

### 1.3.4 GC-IMS 分析

准确称取 1.1 中六个产地的香椿(2.000±0.005) g, 置于 20 mL 顶空进样瓶中, 封口, 利用 GC-IMS 进行测定, 每组重复三次。

顶空进样条件: 孵育温度: 40°C, 孵育时间: 10 min, 孵化转速: 500 r/min, 进样针温度 85°C, 进样量 300  $\mu$ L。

GC 条件: 色谱柱 FS-SE-54-CB-1 柱, 柱温 60°C, 分析时间 30 min, 载气: 高纯氮气(纯度 $\geq$ 99.999%), 流速: 初始为 2 mL/min, 保持 2 min, 2~20 min 线性增至 100 mL/min, 保持 20 min。

IMS 条件: 漂移管温度 45°C, 漂移气: 高纯氮气, 漂移流速 150 mL/min, IMS 检测器温度 45°C。

### 1.4 数据分析

利用 Origin2021 和 SPSS25.0 对六个产地香椿的主要活性成分进行分析; 利用 WinMuster1.6.2.18 进行 PCA; 利用 Flavour Spec®风味分析仪内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对挥发性气体物质进行定性分析; 利用 Gallery Plot 插件进行指纹图谱对比, 用于比较不同产地香椿的挥发性物质差异; 利用 SIMCA14.1 进行 PCA。



## 2 结果与分析

### 2.1 不同产地香椿活性成分分析

#### 2.1.1 活性成分标准曲线建立

分别以芦丁、没食子酸和人参皂苷为标准品，绘制了香椿中黄酮、总酚和皂苷含量的标准曲线，线性回归方程如表 3 所示，表中决定系数均大于 0.99，表明线性良好。

表 3 活性成分线性回归方程

Table3 Linear regression equation of active ingredients

活性成分	标准品	线性方程	$R^2$	线性范围/(mg/mL)
总黄酮	芦丁	$y=5.6229x+0.0098$	0.9963	0.0360-0.0525
总酚	没食子酸	$y=2.796x-0.0049$	0.9968	0.0387-0.0608
皂苷	人参皂苷	$y=2.0896x+0.0891$	0.9919	0.0090-0.6092

#### 2.1.2 活性成分含量分析

根据 1.3.1 中活性成分的测定方法，分析六个产地香椿的主要活性成分含量，如表 4 所示。可以发现，云南昆明产区香椿的总黄酮、总酚和皂苷含量最高。这可能是由于，植物活性成分的合成受光照、温度、水分等因素影响<sup>[26]</sup>，适当的自然光照有利于黄酮类化合物的合成<sup>[27]</sup>，3-4 月份云南的光照适宜，因而有利于黄酮类化合物的合成。酚类物质的合成受环境因素影响较大，云南昆明产区香椿的总酚含量较高，不仅受光照等影响，还与云南昆明的环境污染较少，有利于酚类的合成有关。此外，适宜光照有利于皂苷的合成<sup>[28]</sup>，云南昆明的气候为有利于香椿的生长和皂苷的积累。香椿的抗氧化活性和黄酮、多酚和皂苷呈正相关<sup>[29]</sup>，因此，在研发抗氧化产品时首选云南香椿。

表 4 不同产地香椿活性成分含量

Table4 Contents of active components in *Toona sinensis* from different habitats

香椿产地	总黄酮/ (mg/g)	总酚/ (mg/g)	皂苷/ (mg/g)
四川眉山	4.71±0.44 <sup>b</sup>	76.70±2.43 <sup>c</sup>	33.81±0.10 <sup>e</sup>
陕西渭南	5.13±0.36 <sup>b</sup>	61.05±0.42 <sup>d</sup>	46.96±0.18 <sup>b</sup>
山东烟台	3.62±0.03 <sup>c</sup>	36.33±0.61 <sup>e</sup>	32.35±0.19 <sup>d</sup>
山西运城	4.02±0.01 <sup>c</sup>	63.15±0.73 <sup>d</sup>	30.80±0.25 <sup>e</sup>
河北保定	4.02±0.23 <sup>c</sup>	79.22±0.80 <sup>b</sup>	23.57±0.24 <sup>f</sup>
云南昆明	5.95±0.19 <sup>a</sup>	101.08±0.52 <sup>a</sup>	51.31±0.22 <sup>a</sup>

注：以上数据根据不同产地香椿的含水率折算成干物质后计算所得；不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

#### 2.1.3 感官评价结果分析

香椿感官评分结果如表 5 所示，试验结果表明，云南昆明产地的香椿感官评分最高，为 9.39 分，具有浓郁的芳香和青草的香味，陕西香椿的气味偏高，有刺鼻的味道，能够明显区分。四川和山东产地的香椿风味较温和，山西香椿气味偏低，但是有宜人的香甜味，河北产地的香椿评分最低，气味不浓郁。

表 5 不同产地香椿感官评分结果

Table 5 Sensory evaluation results of *Toona sinensis* from different habitats

产地	气味描述	嗅觉评分
----	------	------

四川眉山	香气不高不低，有温和的果香	7.95
陕西渭南	香气不高不低，气味持久且刺鼻	8.17
山东烟台	香气不高不低，轻微的青草味	6.94
山西运城	香气较低，有宜人的香甜味	5.29
河北保定	香气低微，轻微的甜香	3.62
云南昆明	香气浓郁，有芳香和青草味	9.39

## 2.2 电子鼻结果分析

### 2.2.1 电子鼻传感器响应值分析

利用电子鼻对香椿的挥发性物质进行分析，结果如图 1 所示。W1W 代表的无机硫化物响应值最大，表明香椿中无机硫化物的含量较高。六个产地香椿的 W1C、W3C、W6S、W5C 和 W3S 传感器响应值几乎重叠，表明芳香类、长链烷烃类含量相近，W5S、W1W、W2W 传感器的响应值差异明显，表明各产地香椿的氮化合物和硫化物含量存在较大差异。对于云南昆明香椿，除 W5S 传感器响应值以外，其他响应值均大于其他五个产地的香椿，表明云南产地香椿的气味最浓郁。其中，W1S、W1W、W2W 传感器的响应值显著高于其他产地香椿，表明云南昆明产地香椿的短链烷烃类、无机硫化物、有机硫化物含量较高。河北保定香椿的响应值均偏低，表明河北保定产地香椿的风味物质含量最低。可能是由于，4 月份河北的温度较低，不利于风味物质的合成，挥发性风味物质含量较少。

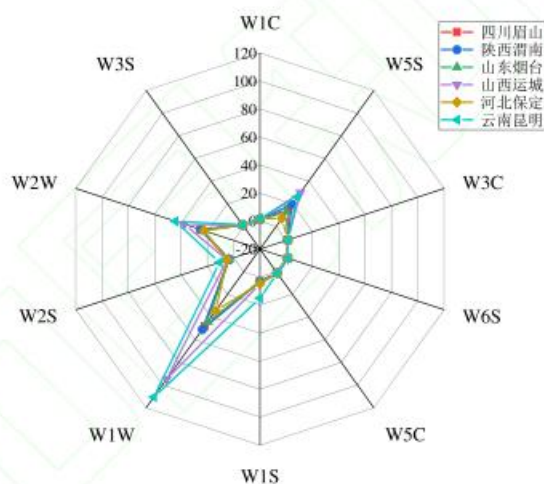


图 1 不同产地香椿电子鼻雷达图

Fig. 1 Radar chart of electronic nose data in *Toona sinensis* from different producing areas

### 2.2.2 不同产地香椿挥发性物质的 PCA

PCA 能够更加直观地反映香椿挥发性风味物质和产地之间的整体关系，选取测试稳定后第 70、71 和 72 s 的数据进行 PCA 分析。由图 2 可知，第一主成分的贡献率为 98.24%，第二主成分贡献率为 1.57%，累计贡献率为 99.81%，表明可以有效的反映原始数据的整体信息。图中同一样品的距离较近，表明实验的重复性和稳定性较高。利用电子鼻技术能够对不同产地香椿的风味物质进行明显区分，四川、陕西和山东的距离较近，表明三个产地香椿的风味类似。山西香椿与其他产地香椿存在明显差异，河北香椿风味物质含量最低，云南香椿的风味较为浓郁。上述分析表明，产地对香椿风味的影响较大。

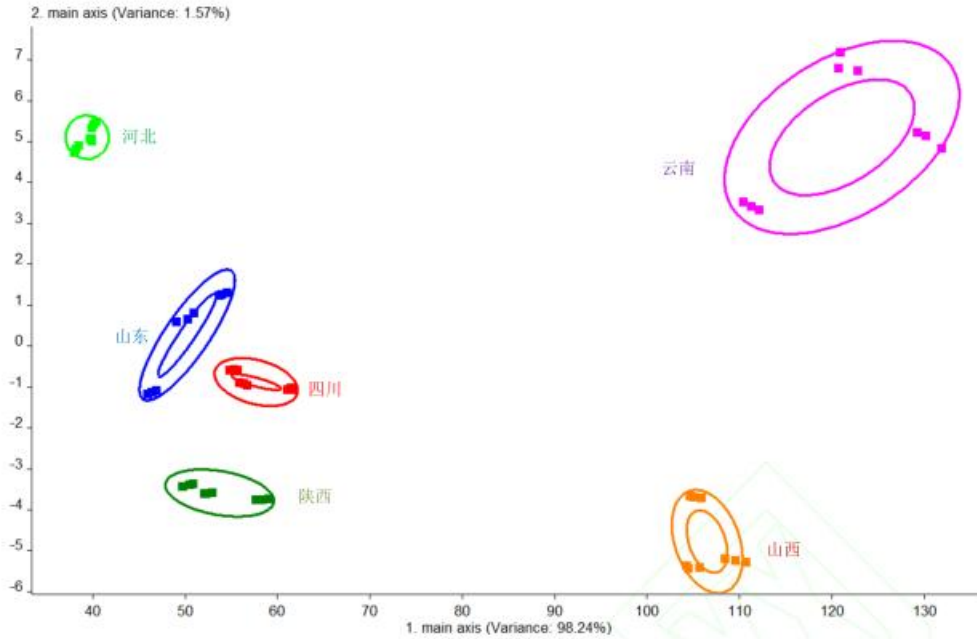


图 2 不同产地香椿电子鼻 PCA 图

Fig. 2 Principal component analysis diagram of electronic nose data in *Toona sinensis* from different producing areas

### 2.3 基于 GC-IMS 分析不同产地香椿的挥发性物质

#### 2.3.1 不同产地香椿挥发性物质定性和定量分析

利用 GC-IMS 技术检测了不同产地香椿的挥发性物质，主要信息如表 6 所示。分析发现，香椿中大多数挥发性物质的迁移时间在 1.0-1.9 ms 之间，保留时间为 130-1700 s 之间。结合 GC-IMS 数据库，共鉴定出 10 类 76 种挥发性物质，主要为 C<sub>4</sub>-C<sub>12</sub> 的小分子挥发性物质，包括醇类 12 种，酯类 10 种，吡嗪类 9 种，酮类 9 种，萜类化合物 8 种，有机硫化物 7 种，醛类 7 种，酸类 6 种，酚类 4 种以及其他类 4 种。其中，吡嗪类物质和醇类物质含量较高，但有研究表明，噻吩是香椿的主要挥发性成分<sup>[30]</sup>，与本文的结论不同，可能是由于采摘期不同或者采摘后包装方式不同造成的。

醇类物质主要由分解代谢产生，苯甲醇具有芳香味，在四川香椿中的相对含量最高，云南香椿中的含量最低。醇类在香椿挥发性物质中的相对含量虽然高，但是由于阈值一般较高，因此对风味的贡献较小。酯类物质通过酯化反应获得，在山东香椿中相对含量仅为 4.62%，而在云南香椿中高达 22.89%。主要是乙酯类化合物，包括异戊酸乙酯、乙酸乙酯、丙酸乙酯和乳酸乙酯，具有花香、果香和酒香。吡嗪类化合物是美拉德反应的专一性化合物<sup>[31]</sup>，阈值较低，具有浓郁的烘焙香<sup>[32]</sup>、坚果香和咖啡香，对产品的香气起重要作用。吡嗪类物质在陕西香椿中占比最高，相对含量达 26.53%，其中 2-乙基吡嗪和 2-乙酰基吡嗪具有烘烤香气，使香椿具有刺鼻的气味。酮类物质一般是由酯类分解和醇类氧化获得，在各产地香椿中的相对含量差异较小。其中，四川香椿的酮类挥发性物质占比最高，主要是仲辛酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮，具有焦香和类似牛奶、乳酪、蘑菇的香气<sup>[33]</sup>。萜类化合物主要包含罗勒烯、香茅醇和芳樟醇等，在山西香椿中的相对含量最高。其中罗勒烯具有香甜味，香茅醇具有玫瑰花香，芳樟醇具有浓香带甜的木青气息，香气柔和诱人。由此可见，萜类化合物是香椿具有宜人香味的重要原因。有机硫化物是香椿风味的主要贡献者<sup>[34]</sup>，在云南香椿中的含量最高。其中，二丁基硫醚具有熟肉香气<sup>[35]</sup>，二烯丙基二硫醚、烯丙基甲基硫醚、2,5-二甲基噻吩和 3,4-二甲基噻吩在大蒜中也存在<sup>[36]</sup>，因此香椿中呈现出与大蒜相似的辛辣、刺激味，这与孙晓健<sup>[37]</sup>关于有机硫化物对香椿风味的分析结果一致。醛类化合物一般具有青草香气<sup>[38]</sup>，在云南香椿中的含量最高，其中 2-甲基丁醛具有坚果香，异丁醛和 2-甲基丁醛具有麦芽香和黑巧克力的香味。云南香椿中的酯类、有机硫化物和醛类含量最高，风味最浓郁，这与感官评价和电子鼻评价结果相吻合。酸类物质阈值高，且在香椿中的



相对含量较低，对整体风味贡献较小，在河北香椿中的含量最高。酚类物质在山东香椿中的含量最高，其中，愈创木酚是烟熏产品的特征风味物质，具有烟草香味。香椿中多种挥发性物质之间的重叠使其具有独特的风味，相对含量的差异是各产地香椿具有不同风味的原因。

### 2.3.2 不同产地香椿挥发性物质指纹图谱分析

为了更好的观察不同产地香椿挥发性物质种类和含量的差异，利用 LAV 软件的 Gallery Plot 插件选取所有峰进行指纹图谱对比，结果如图 3 所示。图中颜色的深浅直观表示了挥发性物质的含量多少，红色代表浓度较高，黄色、白色、浅蓝色依次代表浓度变低。右侧是样品编号，每个样品做三个平行。

从指纹图谱可以发现，不同产地香椿的挥发性物质含量存在明显差异。在图中能够快速找出各个产地的特征挥发性物质，四川香椿中的特征挥发性物质包括顺式-3-辛烯-1-醇、苯甲醇、己酸、5-甲基-2-呋喃甲醇、丙二醇、乙二醇二甲醚。陕西香椿中的特征挥发性物质包括 2-甲基丁酸甲酯、异戊醛、羟基丙酮。山东香椿中的特征挥发性物质包括 2-丁酮。山西香椿中的特征挥发性物质包括芳樟醇和异戊酸乙酯河北香椿中的特征挥发性物质是丁酸戊酯。云南香椿中的特征挥发性物质包括呋喃酮、罗勒烯、6-甲基-5-庚烯-2-酮、反式-3-己烯-1-醇、2-甲基丁醛、2,3-戊二酮、4-甲基-2-戊醇、2,6-二甲基吡嗪、2-乙酰基噻唑、香茅醇、烯丙基二硫化物、松油烯、二烯丙基二硫、二乙基二硫醚、二丁基硫醚、2,6-二甲基吡嗪、2-甲基-3-(2-甲基丙基)吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙酰基吡嗪和 2-庚基呋喃等。

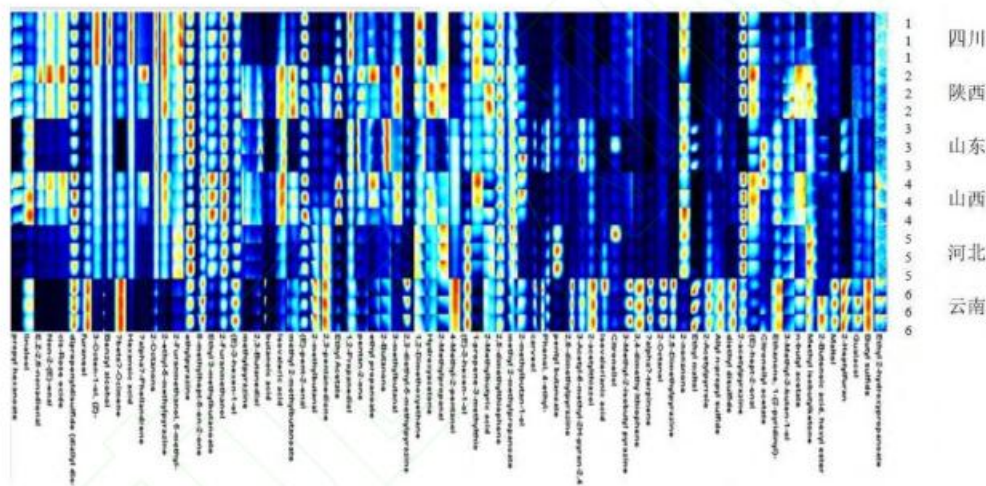


图 3 六个产地香椿挥发性物质指纹图谱

Fig.3 Fingerprint of volatile substances in *Toona sinensis* from six producing areas

### 2.3.3 不同产地香椿挥发性风味物质 PCA 分析

PCA 是考察多个变量间相关性的一种统计方法，尽可能的保留原始数据，更加直观、简单的反映数据的信息。由图 4 可以看出，PC1 的贡献率为 55.8%，PC2 的贡献率为 21.1%，累计贡献率达 76.9%，能够很好的反映整体信息。各组样品的平行之间有重叠或距离较近，说明样品检测的重复性较好，各产地样品之间存在距离，说明六个产地的香椿能通过 GC-IMS 技术进行区分。四川、陕西和山东的风味类似，这与电子鼻分析结果一致。

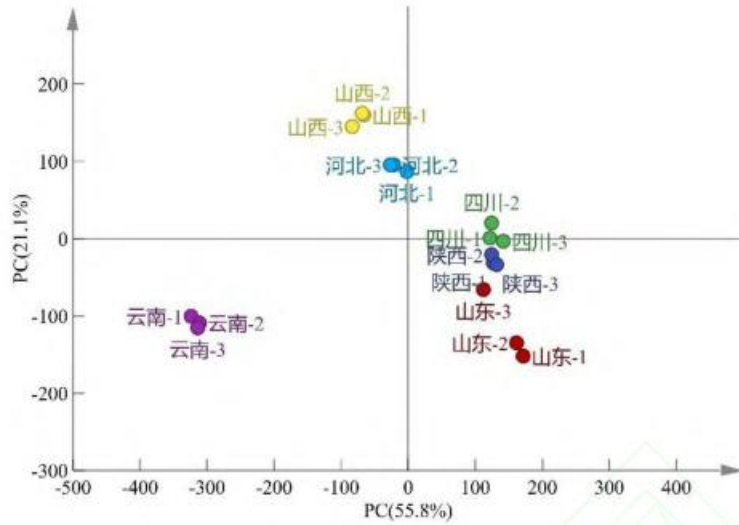


图 4 不同产地香椿主成分分析图

Fig.4 Principal component analysis of *Toona sinensis* from different habitats

### 3 结论

本研究比较了六个产地香椿的活性成分，并应用感官评价、电子鼻技术和 GC-IMS 技术对风味物质进行比较。云南的气候有利于黄酮、多酚和皂苷的合成，因此，云南香椿的主要活性成分含量最高。感官评分和电子鼻分析结果均表明，云南香椿的风味较浓郁。电子鼻的雷达图分析发现云南香椿的短链烷烃类、无机硫化物、醇类、有机硫化物含量较高。四川、陕西和山东产地的香椿的整体气味较类似，山西香椿与其他产地香椿风味存在明显差异，河北香椿的挥发性物质含量最低，云南香椿的挥发性物质含量最高，气味最浓郁。

GC-IMS 技术鉴定出 76 个挥发性物质，主要是 C<sub>4</sub>-C<sub>12</sub> 的小分子挥发性物质，包括醇类、酯类、吡嗪类、萜类和有机硫化物等 10 种化合物。云南香椿中酯类、有机硫化物和醛类含量最高，四川香椿中的醇类含量最高，陕西香椿中吡嗪类物质含量最高，山东香椿中酚类含量最高，山西香椿中的萜类化合物含量最高，河北香椿中酸类含量最高。

利用电子鼻和 GC-IMS 技术相结合，分析发现四川、陕西、山东、山西、河北和云南地区香椿的风味差异明显，在挥发性物质含量上有各自的特征。在今后的研究中应扩大香椿来源，建立不同产地香椿挥发性物质数据库，为香椿深加工提供理论依据和数据支撑。

表 6 不同产地香椿挥发性物质及其含量

Table 6 Volatile components and content of *Toona sinensis* from different producing areas

序号	英文名称	中文名称	CAS 号	化学式	保留时间/s	迁移时间/s	相对含量/%					
							四川	陕西	山东	山西	河北	云南
1	Propyl hexanoate	己酸丙酯	C626777	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	746.299	1.87259	10.90±0.29	14.04±2.28	0.78±0.09	5.66±2.84	10.13±0.36	12.89±0.00
2	Linalool	芳樟醇	C78706	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	790.174	1.21585	0.16±0.02	0.22±0.02	0.34±0.00	0.35±0.03	0.38±0.01	0.41±0.01
3	(E)-Z-2,6-nomadienal	反-2-,顺-6-壬二烯醛	C557482	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	826.627	1.38345	0.96±0.05	0.98±0.16	0.19±0.02	0.44±0.17	0.66±0.02	0.79±0.00
4	Non-2-(E)-enal	反式-2-,壬醛 (2S-顺)-四氢化-4-甲基	C18829566	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	810.261	1.3918	0.24±0.02	0.26±0.04	0.04±0.01	0.12±0.05	0.18±0.00	0.23±0.00
5	Cis-Rose oxide	-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	C3033236	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	800.47	1.38756	0.22±0.01	0.26±0.04	0.04±0.00	0.11±0.04	0.17±0.00	0.21±0.00
6	Dipropenyl disulfide (diallyl disulfide)	二烯丙基二硫	C2179579	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	688.078	1.21745	0.94±0.01	0.93±0.02	0.74±0.03	0.85±0.04	0.97±0.03	1.12±0.02
7	Furaneol	呋喃醇	C3658773	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	655.29	1.21214	0.75±0.02	0.85±0.04	0.39±0.01	0.64±0.06	0.91±0.02	1.18±0.01
8	3-Octen-1-ol-(Z)-	顺式-3-辛烯-1-醇	C20125842	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	633.153	1.31801	0.89±0.01	0.53±0.03	0.55±0.05	0.51±0.03	0.49±0.01	0.47±0.00
9	Benzyl alcohol	苯甲醇	C100516	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	592.248	1.32764	3.82±0.02	2.41±0.04	2.76±0.12	2.56±0.03	2.44±0.13	2.31±0.05
10	(E) beta-Ocimene	罗勒烯	C13877913	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	558.561	1.67412	1.16±0.06	1.35±0.09	0.17±0.01	0.68±0.09	1.26±0.06	1.86±0.12
11	Hexanoic acid	己酸	C142621	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	538.906	1.31953	1.86±0.03	1.07±0.03	1.24±0.08	1.15±0.02	1.10±0.04	1.09±0.03
12	Alpha-Pinellandrene	水芹烯	C99832	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	528.834	1.68075	0.13±0.00	0.4±0.11	0.07±0.01	0.20±0.11	0.29±0.00	0.34±0.01
13	2-Octanone	仲辛酮	C111137	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	491.065	1.32428	4.69±0.07	3.79±0.05	4.37±0.16	4.10±0.08	3.97±0.12	3.85±0.06
14	2-ethyl-5-methylpyrazine	2-乙基-5-甲基吡嗪	C13360640	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	482.412	1.64687	1.46±0.08	1.33±0.02	1.00±0.05	1.06±0.01	1.16±0.02	1.27±0.01



15	2-Furanmethanol,5-methyl-	5-甲基-2-呋喃甲醇	C3857258	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	449.038	1.56722	3.00±0.32	2.50±0.16	2.51±0.13	2.30±0.16	2.18±0.05	2.21±0.12
16	Ethyl pyrazine	2-乙基吡嗪	C13925003	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>	394.032	1.51146	18.54±0.64	18.44±1.42	21.61±0.88	17.66±2.07	14.84±0.37	13.28±0.12
17	6-methylhept-5-en-2-one	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	400.83	1.17692	4.83±0.27	3.48±0.33	3.52±0.23	3.78±0.14	4.12±0.11	4.20±0.26
18	Ethyl 3-methylbutanoate	异戊酸乙酯	C108645	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	290.201	1.67873	1.55±0.14	1.10±0.01	1.24±0.08	1.57±0.03	1.85±0.10	2.18±0.04
19	2-Furanmethanol	糠醇	C98000	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	291.437	1.3641	3.86±0.11	2.49±0.07	3.10±0.02	3.24±0.03	3.39±0.13	3.51±0.06
20	(E)-3-hexen-1-ol	反式-3-己烯-1-醇	C928972	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	309.482	1.25746	1.73±0.07	1.13±0.03	1.62±0.08	1.36±0.09	1.19±0.06	1.03±0.03
21	Methylpyrazine	2-甲基吡嗪	C109080	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>	275.432	1.39261	0.33±0.01	1.12±0.16	0.56±0.08	0.63±0.18	0.77±0.12	1.04±0.02
22	2,3-Butanediol	2,3-丁二醇	C513859	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	260.253	1.34888	0.37±0.05	1.71±0.35	1.87±0.17	1.61±0.20	1.30±0.07	1.21±0.06
23	Butanoic acid	丁酸	C107926	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	231.598	1.4003	0.47±0.03	0.82±0.12	0.27±0.02	0.58±0.10	0.91±0.06	1.15±0.03
24	Isovaleric acid	异戊酸	C503742	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	276.143	1.23797	0.44±0.04	0.51±0.04	0.52±0.02	0.54±0.05	0.57±0.02	0.56±0.01
25	Methyl 2-methylbutanoate	2-甲基丁酸甲酯	C868575	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	224.564	1.20477	0.12±0.01	0.25±0.02	0.04±0.00	0.09±0.00	0.14±0.02	0.20±0.01
26	(E)-pent-2-enal	反式-2-戊烯醛	C1576870	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	195.962	1.35972	7.79±0.22	6.14±0.30	6.15±0.46	6.22±0.63	6.69±0.12	7.65±0.07
27	2-methylbutanal	2-甲基丁醛	C96173	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	170.172	1.41137	0.53±0.06	1.67±0.36	0.87±0.01	0.91±0.63	1.11±0.27	1.65±0.05
28	2,3-pentanedione	2,3-戊二酮	C600146	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	171.11	1.31914	0.24±0.06	0.96±0.21	0.27±0.00	0.27±0.23	0.30±0.07	0.47±0.03
29	Ethyl Acetate	乙酸乙酯	C141786	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	150.01	1.34496	3.58±0.36	5.95±0.51	0.95±0.19	2.91±0.63	4.76±0.16	6.17±0.15
30	1,2-Propanediol	丙二醇	C57556	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	199.244	1.11622	1.29±0.06	0.58±0.05	1.01±0.06	0.95±0.08	0.91±0.01	0.82±0.01
31	Pentan-2-one	2-戊酮	C107879	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	158.948	1.13334	0.14±0.01	0.32±0.03	0.25±0.01	0.24±0.01	0.24±0.01	0.24±0.01
32	Ethyl propanoate	丙酸乙酯	C105373	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	181.57	1.13044	0.12±0.02	0.09±0.03	0.07±0.01	0.10±0.05	0.12±0.00	0.12±0.00
33	2-Butanone	2-丁酮	C78933	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	133.792	1.24377	0.7±0.03	0.54±0.02	2.07±0.06	1.64±0.09	1.26±0.00	0.81±0.04
34	3-methylbutanal	异戊醛	C590863	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	155.871	1.20308	0.18±0.01	0.24±0.02	0.04±0.00	0.10±0.01	0.16±0.01	0.21±0.01
35	2,3-diethyl-5-methylpyrazine	2,3-二乙基-5-甲基吡嗪	C18138040	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub>	891.248	1.2594	0.23±0.01	0.27±0.01	0.43±0.02	0.45±0.02	0.5±0.00	0.52±0.04
36	1,2-Dimethoxyethane	乙二醇二甲醚	C110714	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	155.401	1.09337	0.25±0.00	0.21±0.01	0.19±0.01	0.18±0.01	0.17±0.01	0.16±0.01

37	Hydroxy acetone	羟基丙酮	C116096	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	184.054	1.25318	0.09±0.02	0.37±0.04	0.11±0.01	0.18±0.03	0.25±0.01	0.30±0.00
38	2-Methylpropanal	异丁醛	C78842	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	136	1.0952	0.11±0.01	0.12±0.01	0.08±0.01	0.08±0.01	0.08±0.00	0.09±0.00
39	4-Methyl-2-pentanol	4-甲基-2-戊醇	C108112	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	217.325	1.29619	0.18±0.03	0.27±0.04	0.89±0.03	0.92±0.05	0.91±0.05	0.88±0.09
40	(E)-3-hexen-1-ol	反式-3-己烯-1-醇	C928972	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	303.229	1.54953	4.12±0.28	3.01±0.33	3.71±0.18	2.71±0.43	1.91±0.23	1.38±0.07
41	1-propene-3-methylthio	烯丙基甲基硫醚	C10152768	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> S	181.777	1.03696	0.38±0.02	0.32±0.06	0.22±0.01	0.30±0.07	0.35±0.02	0.37±0.01
42	2-Methylbutyricacid	2-甲基丁酸	C116530	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	300.832	1.47508	0.47±0.01	0.59±0.06	0.51±0.02	0.47±0.07	0.46±0.01	0.49±0.02
43	2,5-dimethylthiophene	2,5-二甲基噻吩	C638028	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	292.842	1.05414	1.76±0.11	1.42±0.12	1.55±0.08	1.39±0.07	1.30±0.06	1.13±0.01
44	Methyl2-methylpropanoate	异丁酸甲酯	CS47637	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	172.988	1.16009	0.46±0.02	0.47±0.04	0.54±0.03	0.48±0.07	0.46±0.02	0.46±0.01
45	2-methylbutan-1-ol	2-甲基丁醇	C137326	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	206.148	1.47794	0.05±0.01	0.15±0.02	0.27±0.07	0.31±0.07	0.34±0.01	0.29±0.02
46	Carveol	香芹醇	C99489	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	1024.826	1.19942	0.59±0.04	0.59±0.17	2.02±0.03	1.57±0.14	1.08±0.16	0.68±0.29
47	Phenol,4-ethyl-	4-乙基苯酚	C123079	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	921.905	1.20542	0.73±0.15	0.90±0.17	7.77±0.22	5.47±0.28	3.35±0.41	1.31±0.02
48	Pentyl butanoate	丁酸戊酯	CS40181	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	680.085	1.39486	0.1±0.01	0.17±0.03	0.22±0.01	0.18±0.01	0.13±0.06	0.10±0.01
49	2,6-dimethylpyrazine	2,6-二甲基吡嗪	C108509	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	353.611	1.14139	0.21±0.01	0.42±0.03	0.86±0.02	0.70±0.02	0.57±0.05	0.42±0.01
50	3-Acetyl-6-methyl-2H-pyran-2,4(3H)-dione	脱氢乙酸	CS20456	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	1620.451	1.26539	0.36±0.07	0.34±0.06	1.09±0.08	0.86±0.02	0.62±0.04	0.33±0.07
51	2-acetylthiazol	2-乙酰基噻唑	C24295032	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> NOS	507.57	1.11918	0.15±0.01	0.14±0.01	0.41±0.03	0.38±0.03	0.37±0.01	0.34±0.02
52	Isovaleric acid	异戊酸	CS03742	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	330.599	1.20567	0.07±0.00	0.14±0.00	0.05±0.01	0.08±0.01	0.11±0.09	0.13±0.19
53	Citronellol	香茅醇	C106229	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	1064.242	1.81713	0.31±0.01	0.32±0.04	0.49±0.26	0.52±0.04	0.33±0.44	0.33±0.03
54	3-Methyl-2-isobutylpyrazine	2-甲基-3-(2-甲基丙基)吡嗪	C13925069	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub>	752.756	1.28857	0.33±0.01	0.26±0.03	0.13±0.01	0.17±0.03	0.2±0.00	0.23±0.00
55	3,4-dimethylthiophene	3,4-二甲基噻吩	C632155	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S	656.562	1.63386	0.29±0.01	0.17±0.00	0.14±0.01	0.14±0.00	0.14±0.01	0.16±0.01
56	Alpha-terpinene	松油烯	C99865	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	594.273	1.21369	0.59±0.03	0.30±0.01	0.14±0.02	0.20±0.03	0.30±0.03	0.38±0.01
57	2-Octanol	仲辛醇	C123966	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	505.176	1.47578	0.08±0.00	0.09±0.01	0.12±0.00	0.12±0.00	0.12±0.00	0.12±0.01

58	2,5-Dimethylpyrazine	2,5-二甲基吡嗪	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	349.059	1.49242	0.08±0.01	0.11±0.01	0.25±0.03	0.21±0.01	0.16±0.00	0.10±0.12
59	2-nonanone	2-壬酮	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	735.41	1.38425	0.87±0.01	0.57±0.15	0.80±0.03	0.70±0.17	0.64±0.04	0.70±0.02
60	Ethyl maltol	乙基麦芽酚	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	930.162	1.65051	0.33±0.05	0.31±0.06	6.23±0.27	4.28±0.02	2.4±0.20	0.31±0.38
61	2-Acetylpyrrole	2-乙酰吡咯	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> NO	640.005	1.118	0.15±0.02	0.21±0.02	0.29±0.02	0.28±0.10	0.33±0.03	0.37±0.04
62	Allyl-propyl sulfide	烯丙基二硫化物	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> S	714.909	1.19289	0.13±0.02	0.10±0.01	0.25±0.04	0.18±0.01	0.15±0.00	0.08±0.03
63	Diethyl disulfide	二乙基二硫化	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S <sub>2</sub>	380.111	1.12487	0.08±0.01	0.08±0.01	0.25±0.04	0.25±0.02	0.25±0.01	0.24±0.01
64	2-acetylpyrazine	2-乙酰吡嗪	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O	558.591	1.22367	4.29±0.04	4.32±0.02	0.34±0.05	1.78±0.08	3.27±0.05	4.73±0.07
65	(E)-hept-2-enal	(E)-2-庚烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	438.009	1.64886	1.27±0.04	1.69±0.11	1.13±0.03	1.23±0.05	1.37±0.01	1.45±0.05
66	Citronellyl acetate	乙酸香茅酯	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	1259.135	1.4513	1.07±0.24	1.14±0.07	3.60±1.68	4.79±1.60	3.70±0.15	2.52±0.33
67	Ethانونe,1-(2-pyridinyl)-	2-乙酰吡啶	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO	525.662	1.10495	0.16±0.00	0.12±0.00	0.35±0.02	0.33±0.03	0.32±0.01	0.30±0.01
68	3-Methyl-3-buten-1-ol	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	195.837	1.27437	0.20±0.01	0.29±0.05	0.25±0.03	0.23±0.02	0.20±0.02	0.18±0.01
69	N-butyl acetate	乙酸丁酯	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	253.912	1.22408	0.03±0.01	0.05±0.01	0.05±0.00	0.04±0.00	0.05±0.00	0.04±0.01
70	Methyl isobutyl ketone	4-甲基-2-戊酮	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	196.263	1.18098	0.20±0.03	0.31±0.01	0.3±0.02	0.27±0.03	0.23±0.01	0.20±0.00
71	2-Butenoic acid hexylester	2-丁烯酸己酯	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	1123.312	1.44788	0.54±0.04	0.58±0.05	0.68±0.13	0.82±0.21	0.70±0.04	0.66±0.70
72	Maltol	甲基麦芽酚	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	751.521	1.21931	0.29±0.00	0.20±0.02	0.11±0.00	0.16±0.04	0.21±0.02	0.29±0.01
73	2-Heptylfuran	2-庚基呋喃	C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	924.336	1.41149	0.14±0.02	0.12±0.01	1.70±0.09	1.17±0.01	0.68±0.06	0.11±0.06
74	Guaiacol	愈创木酚	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	612.592	1.12174	0.08±0.00	0.10±0.00	0.14±0.00	0.13±0.01	0.12±0.00	0.11±0.04
75	Butyl sulfide	二丁基硫醚	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> S	688.495	1.28393	0.12±0.01	0.13±0.00	0.08±0.01	0.12±0.01	0.16±0.00	0.20±0.01
76	Ethyl 2-hydroxypropanoate	乳酸乙酯	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	250.908	1.52715	0.05±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00	0.06±0.01	0.06±0.00	0.07±0.00



## 参考文献:

- [1] LIU B B, ZHANG J F, SHI Y C, et al. Complete chloroplast genome of *Toona sinensis* (Meliaceae), a goluptionous 'tree vegetables'[J]. Mitochondrial DNA Part B,2019,4(2):3025-3026. DOI: 10.1080/23802359.2019.1666664.
- [2] 李辉尚, 曲春红, 王晓东, 等. 2018年中国蔬菜市场形势分析与后市展望[J]. 农业展望, 2019, 15(1): 16-21. DOI:CNKI:SU N:NYZW.0.2019-01-005.
- [3] LEO M D, MILELLA L, BRACA A, et al. Cedrela and Toona genera: a rich source of bioactive limonoids and triterp enoids[J]. Phytochemistry Reviews, 2018, 17(4): 751-783. DOI:10.1007/s11101-018-9557-1.
- [4] FU Y H, XIE Y T, GUO J M, et al. Limonoids from the fresh young leaves and buds of *Toona sinensis* and their pot ential neuroprotective effects[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(44): 12326-12335. DOI:10.1021/ac s.jafc.0c06352.
- [5] XU W J, LI J-H, ZHAO MM, et al. Toonasindiynes A-F, new polyacetylenes from *Toona sinensis* with cytotoxic and a nti-inflammatory activities[J]. Fitoterapia, 2020, 146. DOI:10.1016/j.fitote.2020.104667.
- [6] CAO J J, LV Q Q, ZHANG B, et al. Structural characterization and hepatoprotective activities of polysaccharides from the leaves of *Toona sinensis* (A. Juss) Roem[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 212:89-101. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.02. 031.
- [7] 刘常金, 张杰, 周争艳, 等. GC-MS 分析比较 3 个特产香椿品种的挥发性成分[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 261-267. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201320055.
- [8] DUAN Z L, DONG S L, GAO Y W, et al. Geographical origin identification of two salmonid species via flavor comp ound analysis using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with electronic nose and tongue [J]. Food Research International, 2021,145: 110385-110385. DOI:10.1016/J.FOODRES.2021.110385.
- [9] HE W, WEN H, FANG R, et al. Application of GC-IMS in detection of food flavor substances[J]. IOP Conference Seri es: Earth and Environmental Science, 2020, 545(1): 1-7. DOI:10.1088/1755-1315/545/1/012030.
- [10] 史冠莹, 赵丽丽, 王晓敏, 等. 红油香椿生长期主要活性物质及挥发性成分动态变化规律[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 276- 284. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210112-125.
- [11] 郭淼, 惠国华, 等. 基于电子鼻与非线性特征提取建模的猪肉鲜度快速分析方法[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6): 218-224. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.06.029.
- [12] DANDAN D, YINGQUN N, JIE S, et al. Characterization of specific volatile components in braised pork with different tastes by SPME-GC/MS and electronic nose[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(5): 1-14. DOI:10. 1111/JFPP.15492.
- [13] 蒋鑫妹. 电子鼻技术在欧李催熟检测中应用研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2021: 24-26. DOI:10.27163/d.cnki.gjlnu.2021.00 0377.
- [14] 李俊杰, 徐元昊, 陈梦娟, 等. 手筑茯砖茶加工过程中挥发性组分变化分析[J]. 食品科学,2020,41(24): 144-154. DOI:10.75 06/spkx1002-6630-20191226-316.
- [15] YANG C, YE Z, MAO L P, et al. Analysis of volatile organic compounds and metabolites of three cultivars of aspara gus (*Asparagus officinalis* L.) using E-nose, GC-IMS, and LC-MS/MS[J]. Bioengineered,2022,13(4): 8866-8880. DOI:10.1 080/21655979.2022.2056318.
- [16] 郭家刚, 杨松, 丁思年, 等. 基于气相离子迁移谱的不同产地生姜挥发性有机物指纹图谱分析[J]. 食品科学,2021,42(24): 2 36-241. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201127-285.
- [17] 刘丽丽, 杨辉, 荆雄, 等. 基于 GC-IMS 和电子鼻技术分析贮酒容器对凤香型白酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2022, 43 (4): 257-263. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210203-062.

- [18] 杜晓兰, 杨文敏, 黄永强, 等. 基于顶空气相离子迁移谱比较 3 种加工方式对番鸭肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 269-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210305-067.
- [19] NATALIE G, MARKUS B, DANIEL S, et al. Resolution-optimized headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) for non-targeted olive oil profiling [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2017, 409(16): 3933-3942. DOI:10.1007/s00216-017-0338-2.
- [20] WANG X R, M R K, LI Y, et al. Untargeted and targeted discrimination of honey collected by *Apis cerana* and *Apis mellifera* based on volatiles using HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(4): 12144-12152. DOI:10.1021/acs.jafc.9b04438.
- [21] PAN W C, SOOTTAWAT B, CHIARA S, et al. Characterization of the Flavor Profile of Bigeye Tuna Slices Treated by Cold Plasma Using E-Nose and GC-IMS[J]. Fishes, 2022, 7(1): 13-13. DOI:10.3390/FISHES7010013.
- [22] 杜萍, 陈振佳, 杨芳, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱技术的生咖啡豆快速鉴别方法[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 228-233. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190429-386.
- [23] 蒋鹏飞, 高海东, 赵丽丽, 等. 不同采收期香椿茶发酵前后活性成分、降糖活性及其挥发性成分比较分析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 262-270. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200116-194.
- [24] 宋继敏, 贺志荣, 赵三虎, 等. 香椿叶黄酮提取工艺及其生物活性研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 259-262. DOI:CNKI:SUN:SPGY.0.2019-11-070.
- [25] 徐芳菲, 冯惠柳, 李蕾, 等. 黑三七中总皂苷的含量测定[J]. 人参研究, 2021, 33(5): 15-18. DOI:10.19403/j.cnki.1671-1521.2021.05.005.
- [26] BRUNO S, EDRA DA L E, DA R A, et al. Effect of the environment on the secondary metabolic profile of *Tithonia diversifolia*: a model for environmental metabolomics of plants[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1. DOI:10.1038/srep29265.
- [27] 徐文燕, 高微微, 何春年, 等. 环境因子对植物黄酮类化合物生物合成的影响[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2006, 8(6): 68-72. DOI:10.3969/j.issn.1674-3849.2006.06.016.
- [28] 杨林林, 张涛, 杨利民, 等. 人参叶片中人参皂苷含量、关键酶基因表达和生态因子的相关性分析[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 39-47. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2018.03.007.
- [29] 王晓敏, 史冠莹, 王赵改, 张乐, 程菁菁, 蒋鹏飞, 赵丽丽, 王旭增. 不同产地香椿抗氧化活性及挥发性成分的差异分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 271-281. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.7.0008.
- [30] LIN S H, CHEN C K, LUO H X, et al. The combined effect of ozone treatment and polyethylene packaging on postharvest quality and biodiversity of *Toona sinensis* (A. Juss.) M. Roem[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154. DOI:10.1016/j.postharvbio.2019.04.010.
- [31] SCALONE G L, CUCU D, DE K N, et al. Influence of free amino acids, oligopeptides, and polypeptides on the formation of pyrazines in maillard model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(22): 5364-72. DOI:10.1021/acs.jafc.5b01129.
- [32] 舒焱, 刘玉兰, 姜元荣, 等. 鲜花生仁烘烤温度对花生酱风味和综合品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 28-35. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190519-210.
- [33] 夏季, 方勇, 王梦梦, 等. 不同发酵处理对香菇泡菜质构及风味物质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 171-177. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190416-208.
- [34] ZHAI X T, GRANVOGL M. Michael, et al. Characterization of the key aroma Compounds in two differently dried *Toona sinensis* (A. Juss.) Roem. by means of the molecular sensory science concept[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(35): 9895-9894. DOI:10.1021/acs.jafc.8b06656.

- [35] YANG W X, KEITH R C, LIU Y P, et al. Characterization of typical potent odorants in raw and cooked *Toona sinensis* (A. Juss.) M. Roem. by instrumental-sensory analysis techniques[J]. Food Chemistry, 2018,282: 153-163. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.112.
- [36] 赵铭洋, 王知斌, 孙延平, 等. 大蒜中的有机硫化物及其生物活性研究进展[J]. 食品与药品, 2021, 23(6): 565-571. DOI:10.3969/j.issn.1672-979X.2021.06.018.
- [37] 孙晓健. 香椿挥发性有机硫化物的呈味特性研究[D]. 天津:天津科技大学, 2019: 38-42. DOI:10.27359/d.cnki.gtqgu.2019.000134.
- [38] 刘胜男, 刘云锋, 曹荣, 等. 加工方式对玉筋鱼干风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 167-172. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201019-166.

