

# 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法 分析核桃分心木中挥发性成分

周纪廷<sup>1</sup>, 王纪辉<sup>2,3,4</sup>, 胡伯凯<sup>2,3,4</sup>

(1. 贵州方略经济资讯有限公司, 贵州 贵阳 550001)

(2. 贵州省核桃研究所, 贵州 贵阳 550005)

(3. 贵州省核桃工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550005)

(4. 贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

**[摘要]** 为揭示核桃分心木的关键挥发性风味物质, 采用 HS-SPME-GC-MS 定性、定量分析核桃分心木中挥发性化合物, 并通过主成分分析法分析其特征挥发性成分. HS-SPME-GC-MS 从核桃分心木中共鉴定出 7 种挥发性成分, 其中醛类占总含量的 30.12%, 酸类占总含量的 21.38%, 醇类、酮类及杂环类化合物含量较低. 对 7 种主要挥发性物质进行主成分分析, 提取了两个主成分, 累计方差贡献率达到 100%. 分析发现, 乙醛、壬醛、乙酸、二甲基酮、2-戊基呋喃与第 1 主成分呈高度正相关, 壬烯醛与第 1 主成分呈高度负相关. 第 2 主成分的贡献率为 23.21%, 其中乙醇的影响最大, 呈高度正相关, 这些物质是影响核桃分心木香气的关键性成分. 在 7 种挥发性物质中, 醛类物质占了 3 种. 综上所述, 醛类物质是核桃分心木主要特征香气成分.

**[关键词]** HS-SPME-GC-MS, 核桃分心木, 挥发性成分, 主成分分析

**[中图分类号]** TS255.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2024)02-0043-07

## Analyzing the Volatile Components of *Diaphragma Juglandis* Fructus Based on HS-SPME-GC-MS

Zhou Jiting<sup>1</sup>, Wang Jihui<sup>2,3,4</sup>, Hu Bokai<sup>2,3,4</sup>

(1. Guizhou Fanglue Economic Information Co., Ltd., Guiyang 550001, China)

(2. Guizhou Institute of Walnut, Guiyang 550005, China)

(3. Guizhou Province Walnut Engineering and Technology Research Center, Guiyang 550005, China)

(4. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China)

**Abstract:** In order to determine the key aroma compounds from *diaphragma juglandis* fructus, the aroma compounds in *diaphragma juglandis* fructus are analyzed qualitatively and quantitatively by using head-spacesolid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and the characteristic volatile components are analyzed by principal component analysis. A total of 7 volatile components are identified from the *diaphragma juglandis* fructus, aldehydes account for 30.12% of total content, acids account for 21.38% of total content, and the content of alcohols, ketones and heterocyclic compounds are low. Principal component analysis is performed on seven major volatile substances and two principal components are extracted with the cumulative variance contribution rate reaching 100%. The analysis finds that aldehyde, nonanal, acetic acid, acetone, 2-pentylfuran are highly positively correlated with first principal component, and nonenal is highly negatively correlated with first principal component. The contribution rate of principal component 2 is 23.21%, among which, ethanol is the most influential one, and highly positively correlated with principal components, these substances are the key component affecting the aroma of *diaphragma juglandis* fructus. The aldehydes account for three species of the seven kinds of volatile substances. In conclusion, aldehydes are the main characteristic aroma components of *diaphragma juglandis* fructus.

**Key words:** HS-SPME-GC-MS, *diaphragma juglandis* fructus, volatile components, principal component analysis

收稿日期: 2023-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(3186030247)、贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]重点 014 号).

通讯作者: 王纪辉, 副研究员, 研究方向: 经济林加工. E-mail: shikewangjihui@163.com

核桃(*Juglans regia*)分心木是一种干燥木质隔膜,位于核桃坚果果仁中间,隶属胡桃科(*Juglandaceae*)核桃属(*Juglans*),被乡间百姓称作胡桃衣或胡桃隔。核桃分心木一般呈薄片状,弯曲,表面为淡棕色至棕褐色或棕黑色,气微,味苦涩,以块大、质薄、色黄为上佳<sup>[1]</sup>。核桃分心木有药用价值,如可健脾和固肾,此外还具有涩精、促眠等多种功效,常用来作为中药的辅药之一<sup>[2]</sup>。研究表明,从核桃分心木中可检测出油酸、乙酸乙酯及抗坏血酸酯等11种挥发油类、黄酮类<sup>[3]</sup>、多糖类<sup>[4]</sup>、皂苷类<sup>[5]</sup>、酚酸类<sup>[6]</sup>等物质。分心木在抑菌、抗氧化及降糖与抗癌等方面具有一定的应用前景,可药食两用。近年来,随着核桃种植产业的不断扩大,核桃产量逐年递增,核桃经加工后产生大量的生产剩余物,其中包括核桃分心木。而核桃分心木并未得到有效开发利用,这不利于核桃附加产值的提升。对核桃分心木的综合利用开展研究,提高其附加产值,延伸其加工产业链,研发出核桃分心木衍生产品,意义重大<sup>[7]</sup>。

目前核桃分心木的开发利用主要集中在生物活性成分的提取方面,如多酚、黄酮类物质。程艳刚等<sup>[8]</sup>以分心木为材料进行乙醇提取黄酮响应面试验,得到总黄酮提取量为 $64.12\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;刘静等<sup>[9]</sup>借助超声波的各种叠加效应对分心木中多酚进行辅助提取,得到多酚提取率为6.98%;杨飞等<sup>[10]</sup>以分心木为研究对象,运用响应面法对分心木中多糖超声提取技术参数进行优化,在优化的技术参数下多糖得率为17.42%;Hu等<sup>[11]</sup>将分心木水提物及醇提物应用于过氧化氢氧化造成的损伤,发现效果良好,且均能清除DPPH、ABTS;赵娟娟<sup>[12]</sup>发现超氧阴离子和羟基自由基及DPPH均能被分心木黄酮清除,但较维生素C弱;赵焕新等<sup>[5]</sup>的研究结果表明,在抗氧化活性方面黄酮类化合物弱于酚酸类,且没食子酸的 $\text{IC}_{50}$ 为 $2.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (维生素C为 $5.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );刘亚娜等<sup>[13]</sup>通过MTT、Western blot、肿瘤3D细胞体外建模等方法,发现HCT116细胞的增殖被有效抑制,且分心木提取物可阻断其迁移;Meng等<sup>[14]</sup>发现 $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -D-葡萄糖苷酶的生物活性能被分心木多糖抑制,表明分心木可药用以降低血糖含量。此外,杨明珠等<sup>[4]</sup>以色谱和质谱为载体从核桃分心木中先后分离、鉴定出17种物质,包含酚酸类6种、黄酮类3种、醌类2种、萜类2种、其他4种。

分心木具有清热利尿、补肾助眠等功效,但分心木衍生产品在市面上却较为少见,食用者大多直接泡水或煎煮服用。目前,学者主要围绕核桃分心木生物活性成分提取、组分分离及生理活性开展研究,而其香气种类、呈香的关键成分以及挥发性物质定量研究的报道较为少见。本文以核桃分心木为研究对象,采用HS-SPME-GC-MS进行上机检测,分析其香气成分,研究其香气特性,为后期相关衍生产品的开发提供参考<sup>[15]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与仪器

待核桃青果皮30%由绿色变成淡黄色或青果皮开裂时即为核桃成熟期,该品种经贵州省核桃研究所孙建昌研究员鉴定为泡核桃果实。采样地点为贵州省贵阳市贵州省核桃研究所良种基地。挑选无病害、虫害且大小一致的青果核桃以人工除去青果皮,洗净后置于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱干燥,取分心木备用。

无水乙醇和氯化钠(色谱纯),国药集团化学试剂有限公司;HP6890/5975C气相色谱质谱联用仪,美国安捷伦公司。

### 1.2 核桃分心木挥发性成分测定

#### 1.2.1 进样方法

按照Laurienzo等<sup>[16]</sup>的方法进行HS-SPME-GC-MS分析。用液氮研磨后,准确称量3个批次质量均为1.5 g混匀核桃分心木样品于25 mL顶空瓶中。将DVB/CAR/PDMS型萃取头( $50/30\mu\text{m}$ )经 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行20 min活化,然后顶空萃取60 min,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平板加热下,萃取头置于GC进样口中进行3 min解吸。

#### 1.2.2 气相条件

GC-MS条件:Agilent HP-5MS毛细管色谱柱( $60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}, 0.25\text{ }\mu\text{m}$ );升温程序: $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 维持2 min,然后再以 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ 维持60 min。设定 $1.0\text{ mL}/\text{min}$ 为载气(He)流速且不分流<sup>[17]</sup>。

#### 1.2.3 质谱条件

电子电离源(EI);检测时接口温度为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、四极杆温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,离子源温度设定为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;电子能

量设定为 70 eV,质量扫描范围设定为( $m/z$ )29~500.

#### 1.2.4 定性定量分析

定性分析:挥发性化合物峰的检测和峰对齐及峰矫正借助 Mzmine2 完成,挥发性化合物解卷积通过 AMDIS 完成,挥发性化合物自动峰识别借助 Agilent ChemStation 软件完成. 挥发性化合物的峰通过 AMDIS 和 ChemStation 完成识别后再进行 NIST 14 比对,数据处理过程中以正向匹配大于 800 和反向匹配大于 700 为目标进行挥发性化合物的峰过滤和保留,再通过 RI(保留指数法)进行鉴定结果的二次筛选. 最后,挥发性化合物的定性以人工谱图解析及标样质谱图比对两种方法结合的方式进行鉴定<sup>[18]</sup>.

定量分析:保留时间的校正采用正构烷烃的实际测量值,以 NIST 17 数据库对 HS-SPME-GC-MS 的测定结果进行检索,通过峰面积归一化法对挥发性成分匹配度在 80% 以上的化学成分进行相对含量测定<sup>[17]</sup>.

### 1.3 数据处理

核桃分心木中挥发性成分数据取 3 次平均值表示. 主成分分析中的降维因子采用 SPSS19.0 进行分析,PCA 载荷图采用 ORIGIN2020b 进行制图.

## 2 结果与分析

### 2.1 核桃分心木挥发性风味化合物分析

由图 1、图 2 和表 1 可知,经 HS-SPME-GC-MS 检测,核桃分心木中有 7 种挥发性成分被鉴定出来,其中包含醛类物质 3 种、醇类物质 1 种、酸类物质 1 种、酮类物质 1 种和杂环类物质 1 种. 核桃烘干以后其分心木中挥发性化合物种类较少,能够识别出的 7 种化合物中,分子量小的挥发性化合物首先出峰,其保留时间集中在 5 min 左右;分子量较大的化合物出峰时间较迟,除 2-戊基呋喃出峰时间在 20 min 以内外,壬醛、壬烯醛出峰时间均在 20 min 以上.

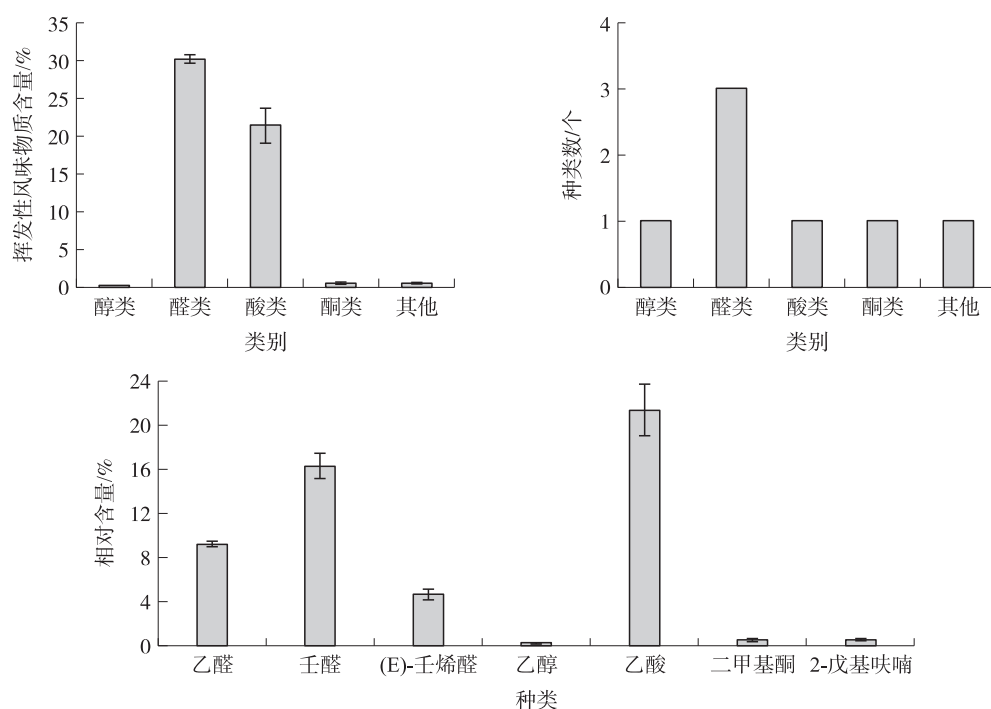


图 1 核桃分心木中挥发性物质的种类及含量

Fig. 1 Kinds and contents of volatile compounds identified in *diaphragma juglandis fructus*

核桃分心木中醛类化合物气味浓烈,是特征风味化合物之一. 低碳位数的醛类物质刺激性气味较为突出,中碳位数醛类物质具有油脂味,而高碳位数醛类物质则具有柑橘皮香味<sup>[19]</sup>. 分心木中共检测出 3 种醛类化合物,分别是乙醛、壬醛以及(E)-壬烯醛,占总含量的 30.12%. 其中,短链醛类乙醛的相对含量为 9.16%;长链醛类中,壬醛的相对含量为 16.32%,(E)-壬烯醛的相对含量为 4.64%. 壬醛具有强烈的脂肪、柑橘气味,壬烯醛具有浓郁坚果、脂肪气味<sup>[20]</sup>. 9 个碳原子的直链醛为分心木中的主要醛类,该类物质的

气味主要以清香、坚果香与脂香为主<sup>[21]</sup>,其中壬醛为脂肪族醛类,源自脂肪氧化,主要贡献油脂、清香、坚果和蘑菇的香味<sup>[22]</sup>.

醇类化合物具有植物香气.分心木中只检测出 1 种醇类,即乙醇,相对含量较低.脂肪水解、脂肪因发生氧化而产生小分子量脂肪酸是酸类物质的主要来源<sup>[21]</sup>,该酸类物质一般具有较高的觉察阈值,不能对风味产生重要影响.本研究检测出 1 种酸类化合物,即乙酸,相对含量为 21.38%,能和醇类物质发生酯化反应而生成具有香味的酯类物质<sup>[23]</sup>.不饱和脂肪酸因热而发生氧化、不饱和脂肪酸降解、氨基酸降解产生酮类化合物<sup>[21,24]</sup>.酮类化合物中部分酮类物质具有甜的花香和果香,一般碳链越长花香特征越明显<sup>[21-22]</sup>,二酮一般具有肉香和奶油香.分心木中检测到 1 种酮类化合物,即二甲基酮,相对含量较低,对核桃分心木香气贡献不突出.分心木中还检测到 1 种杂环类化合物,即 2-戊基呋喃,其青豆和黄油味突出,被认为是重要的风味物质,主要源自脂肪氧化.呋喃化合物来源主要有 3 种途径,分别是美拉德反应、热分解反应以及硫胺素降解<sup>[25]</sup>.

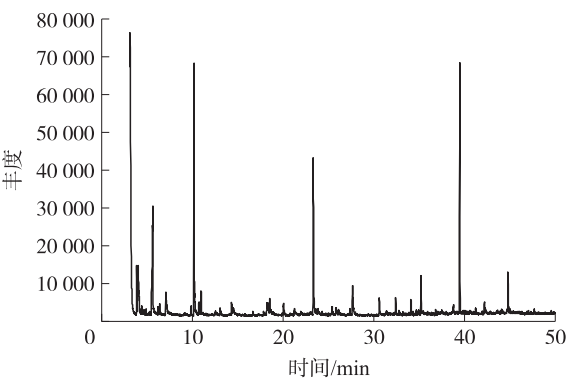


图 2 核桃分心木的总离子流图  
Fig. 2 Total ions chromatograph of diaphragm juglandis fructus

表 1 分心木样品中的挥发性成分  
Table 1 Volatile components of diaphragm juglandis fructus

序号	挥发性成分	分子式	保留时间/min	相对含量/%
1	乙醛	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	4.06	9.16±0.24
2	壬醛	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	23.34	16.32±1.12
3	(E)-壬烯醛	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O	27.69	4.64±0.45
4	乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	4.27	0.21±0.018
5	乙酸	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	5.67	21.38±2.31
6	二甲基酮	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	4.45	0.49±0.12
7	2-戊基呋喃	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	18.37	0.53±0.091

2.2 核桃分心木挥发性化合物主成分分析

2.2.1 挥发性化合物主成分分析

主成分分析是一种多元统计方法,主要用于考察多个变量间的相关性,其最终目的是以较少的变量来更好地解释原始数据中的大部分变异.主成分分析法是以寻找和判断事物、现象的综合指标为主要手段的一种分析方法,可以更好地揭示事物内在规律的原因在于其可以涵盖所有综合指标.降维是主成分分析中的一种特殊思想,主要途径是将众多无关联的数值变量通过旋转进而转化成几个不相关的综合指标.经筛选和旋转所得的综合指标就成为原来众多数据的主成分,且所筛选出的主成分是线性关系,所以原始数据得到了很好的解释,且主成分之间相互独立、互不相关.主成分数目的选定要综合较多的信息并满足降维要求,主成分数目的确定以累积方差贡献率大于等于某一值加以确定.本文结合数据分析和主成分碎石图,由表 2 可知,特征值大于 1 的主成分有 2 个:PC1 和 PC2,其特征值分别为 5.38、1.63.这 2 个主成分的累积贡献率达到 100%,其中,PC1 的贡献率为 76.79%,PC2 的贡献率为 23.21%,可见这两个主成分综合了样品尽可能多的信息.

表 2 主成分分析结果  
Table 2 Results of principal component analysis

成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
PC1	5.38	76.79	76.79
PC2	1.63	23.21	100

2.2.2 挥发性化合物因子分析

载荷值可以很好地呈现变量与主成分之间的相关性,指标和主成分间的正/负相关性可用符号“+/-”表示,数值的绝对值越大,说明该指标和某一主成分间的关联程度越紧密,进而说明了该指标在该主成分

上的载荷程度<sup>[26]</sup>. 由表 3 可看出,全部测定成分均能被两个主成分较好地解释. 每个指标所对应的系数特征向量,即旋转载荷,是经各指标变量的主成分载荷除以因子相对应的特征值开平方根而得到的. 经旋转之后得到的旋转载荷的系数若接近 1、0,则表明主成分可以更好地解释变量.

其中,第一主成分  $PC1 = 0.43X_1 + 0.43X_2 - 0.40X_3 - 0.01X_4 + 0.38X_5 + 0.38X_6 + 0.42X_7$ , 第二主成分  $PC2 = 0.01X_1 - 0.12X_2 - 0.29X_3 + 0.78X_4 - 0.37X_5 + 0.36X_6 - 0.14X_7$ .

依据各挥发性成分在主成分 1 和 2 中载荷系数绝对值大小,判断主成分包含的挥发性成分. 第一主成分在乙醛、壬醛、壬烯醛、乙酸、二甲基酮及 2-戊基呋喃 6 种挥发性成分上有较大的载荷系数,因此该主成分 1 与这 6 种成分有较强的相关性;第二主成分在乙醇上有较大的载荷系数,该主成分 2 与乙醇有较强的相关性.

表 3 因子载荷及特征向量  
Table 3 Factors load and characteristic vectors

指标	PC1		PC2	
	载荷	特征向量	载荷	特征向量
乙醛( $X_1$ )	1.00	0.43	0.015	0.01
壬醛( $X_2$ )	0.99	0.43	-0.15	-0.12
(E)-壬烯醛( $X_3$ )	-0.93	-0.40	-0.37	-0.29
乙醇( $X_4$ )	-0.027	-0.01	1.00	0.78
乙酸( $X_5$ )	0.88	0.38	-0.47	-0.37
二甲基酮( $X_6$ )	0.89	0.38	0.46	0.36
2-戊基呋喃( $X_7$ )	0.98	0.42	-0.18	-0.14

2.2.3 分心木挥发性成分载荷图

由图 3 可知,醛类作为核桃采后干制分心木样品的主要挥发性物质,其中,乙醛和壬醛与 PC1 高度正相关,载荷系数分别为 1.00、0.99;而壬烯醛与 PC1 高度成负相关,载荷系数为-0.93. 此外,乙酸、二甲基酮及 2-戊基呋喃也均与 PC1 高度成正相关,其载荷系数分别为 0.88、0.89、0.98. PC2 中载荷最高的正相关挥发性物质为醇类,载荷系数为 1.00,其次是二甲基酮,载荷系数为 0.46. 7 种挥发性风味化合物分布在 4 个象限, $X_1$ 、 $X_6$  分布在第一象限,以乙醛、二甲基酮为主; $X_4$  分布在第二象限,以乙醇为主; $X_3$  分布在第三象限,以醛类化合物为主; $X_2$ 、 $X_5$ 、 $X_7$  分布在第四象限,以壬醛、乙酸及 2-戊基呋喃化合物为主; $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  在 PC1 上贡献较高,PC1 与这 6 种挥发性成分相关性较强,PC1 在气味上主要以脂肪、柑橘、青豆、黄油味为主; $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$  在 PC2 上贡献较高,PC2 与这 3 种挥发性成分相关性较强,PC2 在气味上呈辛辣刺激.

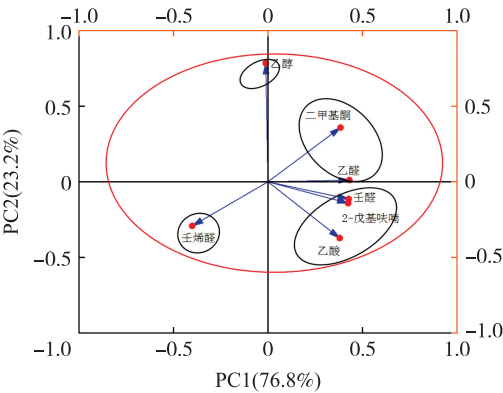


图 3 挥发性成分 PCA 载荷图

Fig. 3 Volatile component PCA loading plot

3 讨论

溶剂萃取、蒸馏萃取、固相微萃取是风味成分分析常用的 3 种方式<sup>[27]</sup>. 固相微萃取技术(solid phase micro-extraction, SPME)能与其他分析仪器联用,具有装置简便、易于操作等特点,是一种新型、非溶剂型萃取检测分析方法<sup>[27]</sup>. 本研究核桃分心木中共检测出 7 种香气化合物,定性定量结果显示,其中壬醛和乙酸较为突出,分别占总量的 16.32%和 21.38%,但乙酸对分心木呈香气味的贡献反而不大. Oliveira 等<sup>[28]</sup>研究发现,果实中一类重要的风味化合物是己醛、己醇及 2-己烯醛等长链芳香族化合物,其对于评价果实品质具有重要价值. 壬醛、壬烯醛及 2-戊基呋喃均为长链化合物,是本研究中分心木的呈香成分,主要贡献脂香、坚果香及柑橘、青豆味,带有清香. 此外,本研究与卓志航等<sup>[29]</sup>从核桃树皮中鉴定出的共有成分是 2-戊基呋喃,卓志航等<sup>[29]</sup>的结论是本研究结果的 17.51 倍;本研究与卓志航等<sup>[29]</sup>从核桃叶中鉴定出的共有成分是壬醛,本研究中壬醛相对含量是卓志航等<sup>[29]</sup>结果的 148.36 倍;说明同一植物的不同部位挥发性成分种类及含量存在差异,这可能是一些相同成分物质贡献了香气味. 本研究从核桃分心木中鉴定出的挥

发性成分种类较少,可能是分心木为干制样品,在鲜核桃采摘脱青皮以后进行烘干的过程中挥发性成分有所损失或干制样品中挥发性成分本就种类较少且含量较低,具体原因有待后续进一步研究发现。

## 4 结论

核桃分心木香气主要由醛类、醇类、酸类、酮类、杂环化合物构成,长链醛类化合物和2-戊基呋喃贡献了突出的清香、果香和脂香。醛类化合物是核桃分心木香气的重要贡献成分,后续可将其纳入评价核桃分心木香气质量的关键指标。不同产地间核桃分心木中挥发性成分的差异及前处理条件对核桃分心木中挥发性成分的影响有待进一步研究。

### [参考文献]

- [1] 王艳梅. 核桃隔膜黄酮类化合物、挥发油及其微量元素初探[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2009.
- [2] 韩艳春. 维吾尔药新疆核桃分心木有效化学成分及其药理作用的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆医科大学,2010.
- [3] 景援朝,赵焕新,孙永丽,等. 分心木化学成分的研究[J]. 食品与药品,2015,17(2):87-90.
- [4] 杨明珠,田新雁,肖朝江,等. 核桃分心木化学成分与生物活性研究[J]. 天然产物研究与开发,2012,24(12):1707-1711.
- [5] 赵焕新,景援朝,白虹,等. 分心木中的化学成分及抗氧化活性研究[J]. 中国实验方剂学杂志,2016,22(7):54-57.
- [6] LIU P Z, LI L L, SONG L J, et al. Characterisation of phenolics in fruit septum of *Juglans regia* Linn. by ultra performance liquid chromatography coupled with orbitrap mass spectrometer[J]. Food Chemistry, 2019, 286(7):669-677.
- [7] 石建春,段雅洁,李志刚,等. 核桃分心木袋泡茶制作及冲泡工艺[J]. 食品工业,2020,41(6):93-97.
- [8] 程艳刚,谭金燕,李国艳,等. 响应面法优化分心木总黄酮提取工艺[J]. 辽宁中医药大学学报,2018,20(2):40-43.
- [9] 刘静,黄慧福,刘继华,等. 响应面优化核桃分心木多酚超声辅助提取工艺[J]. 食品研究与开发,2020,41(23):155-160.
- [10] 杨飞,阿吉然姆·阿布拉,木巴拉克·伊明江,等. 响应面法优化核桃分心木中多糖的提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(16):5724-5729.
- [11] HU G S, GAO S, MOU D H. Water and alcohol extracts from *Diaphragm juglandis* on anti-fatigue and antioxidative effects in vitro and vivo[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(8):3132-3139.
- [12] 赵娟娟. 分心木黄酮超声-微波协同提取及抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发,2018,39(18):70-76.
- [13] 刘亚娜,王朴,杨映娟. 分心木乙醇提取物对人结肠癌 HCT116 细胞增殖、凋亡和迁移的影响[J]. 中国细胞生物学学报,2020,42(7):1163-1170.
- [14] MENG Q R, CHEN F, XIAO T C, et al. Inhibitory effects of polysaccharide from *Diaphragm juglandis* fructus on alpha-amylase and alpha-D-glucosidase activity, streptozotocin-induced hyperglycemia model, advanced glycation end-products formation, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-induced oxidative damage[J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2019, 124:1080-1089.
- [15] 李凯,商佳胤,苏宏,等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱法分析红富士葡萄果实香气[J]. 福建农业学报,2021,36(4):426-432.
- [16] LAURIENZO P, STASIO M D, MALINCONICO M, et al. De-hydration of apples by innovative bio-films drying[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(4):491-496.
- [17] 王鹤潼,潘泓杉,王朝,等. 不同品种金针菇特征挥发性物质的差异分析[J]. 食品科学,2021,42(2):193-199.
- [18] 李凯峰,尹玉和,王琼,等. 不同马铃薯品种挥发性风味成分及代谢产物相关性分析[J]. 中国农业科学,2021,54(4):792-803.
- [19] 张莹. 几种食用菌风味物质的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2012.
- [20] 周慧敏,张顺亮,郝艳芳,等. HS-SPME-GC-MS-O 结合电子鼻对坨坨猪肉主体风味评价分析[J]. 食品科学,2021,42(2):218-226.
- [21] WANG Y, SONG H L, ZHANG Y, et al. Determination of aroma compounds in pork broth produced by different processing methods[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2016, 31(4):319-328.
- [22] OLIVARES A, NAVARRO J L, FLORES M. Effect of fat content aroma generation during processing of dry fermented sausages[J]. Meat Science, 2011, 87(3):264-273.
- [23] 杨婷,祝霞,赵宾宾,等. 不同酿酒酵母对甜瓜酒香气品质的影响分析[J]. 食品科学,2015,36(14):145-150.

- 
- [24] 张凯华,臧明伍,张哲奇,等. 微波复热时间对预制猪肉饼过熟味、脂肪氧化和水分布特性的影响[J]. 食品科学, 2020,41(9):50-56.
- [25] 郇延军,周光宏,徐幸莲. 脂类物质在火腿风味形成中的作用[J]. 食品科学,2004,25(1):186-190.
- [26] 章辰飞,谢晓鸿,汪庆昊,等. 云锦杜鹃不同花期挥发性成分的 HS-SPME-GC-MS 检测与主成分分析[J]. 广西植物, 2020,40(7):1033-1045.
- [27] 范睿,郝朝运,秦晓威,等. 胡椒叶片挥发性成分 HS-SPME-GC/MS 分析[J]. 热带作物学报,2015,36(12):2276-2282.
- [28] OLIVEIRA J M,FARIA M,SÁ F,et al. C6-alcohols as varietal markers for assessment of wine origin[J]. Analytica Chimica Acta,2005,563(1):300-309.
- [29] 卓志航,杨伟,徐丹萍,等. 云斑天牛寄主核桃树皮及树叶的挥发性成分[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016,44(5):205-214.

[责任编辑:严海琳]

---

(上接第 27 页)

- [18] MARTIN E,TREEBY B. Investigation of the repeatability and reproducibility of hydrophone measurements of medical ultrasound fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2019,145(3):1270-1282.
- [19] YU L,YU L,ZHENG H,et al. Research on sound power measurement of multi-element ultrasonic focusing transducer based on cross-spectrum method[J]. Review of Scientific Instruments,2021,92(11):115105.
- [20] HERRIN D W,MARTINUS F,WU T W,et al. An assessment of the high frequency boundary element and Rayleigh integral approximations[J]. Applied Acoustics,2006,67(8):819-833.
- [21] JIANG Y J,ZHANG H,QIU Y M,et al. Givens coordinate descent methods for rotation matrix learning in trainable embedding indexes[J/OL]. arXiv Preprint arXiv:2203.05082,2022.
- [22] GRULER A,QUINTERO-ARAUJO C,CALVET L,et al. Waste collection under uncertainty:a simheuristic based on variable neighborhood search[J]. European Journal of Industrial Engineering,2017,11(1):228-255.
- [23] FAN C L,FU Q,LONG G Z,et al. Hybrid artificial bee colony algorithm with variable neighborhood search and memory mechanism[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2018,29(2):405-414.
- [24] KALATZANTONAKIS P,SIFALERAS A,SAMARAS N. A reinforcement learning-Variable neighborhood search method for the capacitated Vehicle Routing Problem[J]. Expert Systems with Applications,2022,213:118812.
- [25] 江湛,白景峰,余瑛. 应用 LabVIEW 的聚焦声场测量系统[J]. 中国医疗器械杂志,2014,38(3):181-185.

[责任编辑:陈 庆]