

轻工学报
Journal of Light Industry
ISSN 2096-1553, CN 41-1437/TS

《轻工学报》网络首发论文

题目： 基于 GC-IMS 比较不同干燥方式对香椿挥发性成分的影响
作者： 孟克迪，张国治，王赵改，史冠莹
收稿日期： 2022-09-16
网络首发日期： 2023-03-29
引用格式： 孟克迪，张国治，王赵改，史冠莹. 基于 GC-IMS 比较不同干燥方式对香椿挥发性成分的影响[J/OL]. 轻工学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1437.ts.20230329.1131.004.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。

基于 GC-IMS 比较不同干燥方式对香椿挥发性成分的影响

孟克迪^{1,2}, 张国治^{1*}, 王赵改², 史冠莹²

1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001

2. 河南省农业科学院 农副产品加工研究中心, 河南 郑州 450002

摘要: 为研究不同干燥方式香椿外观、复水性以及挥发性成分的差异, 以真空微波干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥处理香椿为研究对象, 采用常规理化方法测定干燥香椿的复水性, 利用气相色谱-离子迁移谱联用 (GC-IMS) 技术分析新鲜香椿、不同干燥香椿、以及复水香椿的挥发性成分变化, 并结合主成分分析对不同干燥方式香椿进行比较区分。结果表明, 经真空冷冻干燥处理的香椿色泽诱人, 收缩率低, 复水性最低。不同干燥样品的风味有明显差异, 真空冷冻干燥香椿 (VFDTS) 中酯类和杂环类化合物含量高于真空微波干燥香椿 (VMDTS) 和热泵干燥香椿 (HPDTS)。以新鲜香椿 (FTS) 为对照, 真空冷冻干燥复水香椿 (VFDRTS) 保留成分较多且新产生化合物最多, 真空微波干燥复水香椿 (VMDRTS) 保留成分最少。基于主成分分析, 能够很好区分不同干燥及复水样品, 其中热干燥香椿样品风味较为接近。

关键词: 香椿; 干燥; 挥发性成分; 气相色谱-离子迁移谱; 指纹图谱; 主成分分析

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

Comparison of effects of different drying methods on volatile components of *Toona sinensis* based on gas chromatography-ion mobility spectrometry

MENG Kedi^{1,2}, ZHANG Guozhi^{1*}, WANG Zhaogai², SHI Guanying²

1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001,

China;

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 科技部科技伙伴计划资助项目 (KY202002007); 河南省农业科学院自主创新项目 (2022ZC59); 河南省科技攻关项目 (212102110018); 河南省农业科学院新兴学科发展专项项目 (2022XK01)

作者简介: 孟克迪 (1997—), 女, 河南漯河市人, 河南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: mengkedim@163.com。

*通信作者: 张国治 (1964—), 男, 河南开封市人, 河南工业大学教授, 主要研究方向为食品资源开发与利用。E-mail: zgzhill@163.com。

2. Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

The purpose of this study was to investigate the effect of vacuum freeze-drying (VFD), vacuum microwave drying (VMD) and heat pump drying (HPD) on the differences of appearance, rehydration, flavor of *Toona sinensis*. The rehydration of dried *Toona sinensis* was determined by conventional physical and chemical methods. The changes of volatile components in fresh *Toona sinensis*, different dried *Toona sinensis*, and rehydration *Toona sinensis* were analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology, and the volatile components in different drying methods were compared and distinguished by principal component analysis. The results showed that the *Toona sinensis* treated by vacuum freeze-drying (VFD) had an attractive color, low shrinkage, and the lowest rehydration capacity. The contents of esters and heterocyclic compounds in vacuum freeze-dried *Toona sinensis* (VFDTS) were higher than those in vacuum microwave-dried *Toona sinensis* (VMDTS) and heat pump-dried *Toona sinensis* (HPDTS). Compared with fresh *Toona sinensis* (FTS), vacuum freeze-dried rehydration *Toona sinensis* (VFDRTS) retained more components and produced the most new compounds, and vacuum microwave drying rehydration *Toona sinensis* (VMDRTS) retained the least components. Based on principal component analysis, different dried and rehydrated samples can be well distinguished, and the flavor of hot-dried *Toona sinensis* samples is closer.

Keywords: *Toona sinensis*; drying; volatile components; gas chromatography-ion transfer spectrum; fingerprint; principal component analysis

0 引言

香椿 (*Toona sinensis*)，又名椿芽树、椿树等，属楝科香椿属落叶乔木，原产于中国，现已有两千多年的栽培历史。香椿风味独特且富含氨基酸、维生素、黄酮、多酚等物质，具有较高的食用价值和保健功能，广受消费者的喜爱^[1]。然而新鲜香椿含水量较高，采收后仍处于旺盛的生理代谢状态，贮藏期短且运输不便，大大降低了其商品价值和食用价值^[2]，而对香椿进行干燥处理，可以大大延长贮藏期并便于贮藏和运输，其干制品复水后，营养价值及色、香、味等与新鲜蔬菜极其接近，具有较高的实用价值。对经过干燥处理的脱水香椿为原料再加工

利用不仅解决了新鲜香椿不易贮存的难题，同时大大提高了其附加值，因此干燥是延长香椿类产品贮藏期的重要方式，也成为香椿产业发展中的重要环节。

果蔬干燥技术可分为热干燥和非热干燥。热干燥技术主要包括热风干燥、红外干燥、真空-微波干燥、变温压差膨化和热泵干燥等，而真空冷冻干燥属于非热干燥方法^[3,4]。到目前为止，香椿干燥方面的研究主要集中于对营养品质及微观结构的影响，如不同干燥方式对香椿中叶绿素、VC、 γ -氨基丁酸、蛋白质、复水性以及干燥后叶片表面微观结构等的影响^[1,4,5]。而不同干燥方法对香椿挥发性成分的影响研究相对较少，陈等^[6]采用固相微萃取结合气相质谱法测定了不同干燥方法获得的香椿中的挥发性成分，主要风味物质包括 α -蒎烯、芳香烯和石竹烯等。翟^[7]等采用分子感官科学方法对两种不同干燥（太阳能干燥和真空干燥）香椿中的关键香气活性化合物进行了表征。王等^[1]采用 HS-SPME-GC-MS 从真空冷冻干燥和喷雾干燥香椿粉中分别鉴定了 49 和 41 种挥发性成分，且真空冷冻干燥香椿粉中含有较高的特征风味物质 2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩。可见目前分析比较不同加工处理香椿的挥发性化合物最常用的技术手段为气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)，但该技术样品的前处理较为复杂、检测时间较长、谱图解析复杂，且过长的分离时间和过高的进样温度容易导致受热不稳定的成分结构发生变化^[8]。相较于 GC-MS 等传统的分析技术，HS-GC-IMS 结合了气相色谱的卓越分离能力和离子迁移谱的快速响应和高灵敏度，对具有高电负性和高质子亲和力的化合物高度敏感，可以检测不同类型化合物，如醇类、醛类、芳烃类、酯类和酮类等^[9]，且该方法不需要任何样品预处理步骤，能够以较低的检测限进行快速分析^[10]，因此 GC-IMS 被广泛应用于食品中的挥发性化合物分析^[11,12]、食品掺假鉴别^[13,14]及品种溯源^[15,16]等领域。但目前基于 GC-IMS 技术对不同干燥香椿的挥发性风味成分研究还未见报道。

干燥过程中挥发性化合物容易损失和变化，不同的干燥方法所得产品其香气成分也存在极大差异。本研究首先对新鲜香椿分别进行热泵干燥、真空微波干燥、以及真空冷冻干燥处理，通过 GC-IMS 技术分析比较不同干燥香椿及复水后挥发性成分的差异，筛选出香椿干制品适宜的干燥方式，以期对香椿干燥加工及质量控制提供科学参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

香椿（含水量 83.49%，水分含量使用水分活度仪进行测量，下同），2022 年 4 月份采自河南登封市大冶镇弋湾村。

2-甲基-3-庚酮，Dr. Ehrenstorfer 公司；甲醇，天津市四友精细化学品有限公司；正酮 C4~C9，国药化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

ME204E 型电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；IKA A11 研磨仪，艾卡（广州）仪器设备有限公司；MA150C 水分测定仪，德国赛多利斯集团；HHS 型电热恒温水浴锅，上海博讯实业有限公司医疗设备厂；KL-2D-6KW 型微波真空干燥设备，广州市凯棱工业用微波设备有限公司；真空冷冻干燥机，上海比朗仪器制造有限公司；AGHD-015ELC 型空气能热泵烘干机，河南新国信机械制造有限公司；FlavourSpec GC-IMS 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 实验方法

1.3.1 干燥工艺参数

真空微波干燥(VMD)^[4]：置于微波专用托盘内，功率 3000 W，真空度-40 MPa；干燥时间 6 min，物料厚度 1 cm。

热泵干燥（HPD）：干燥温度 50 °C；干燥时间 14 h，物料厚度 1 cm。

真空冷冻干燥（VFD）^[1]：预冻温度-40 °C，预冻时间 2 h，干燥时间 48 h，物料厚度 1 cm，真空度<50 Pa，冷阱温度<-70 °C。

三种干燥方式所得样品含水量均低于 10%，取部分干燥香椿样品测定复水性，其余粉碎后置于干燥器中备用。新鲜香椿命名为 FTS，真空微波干燥香椿、热泵干燥香椿、真空冷冻干燥香椿分别命名为 VMDTS、HPDTS、VFDTS，真空微波干燥复水香椿、热泵干燥复水香椿、真空冷冻干燥复水香椿分别命名为 VMDRTS、HPDRTS、VFDRTS。

1.4 复水性测定

参照任广跃^[2]的方式，略有修改。取一定质量不同干燥后的香椿放入 90 °C 水中浸泡 30min，在浸泡过程中利用电热恒温水浴锅维持温度，并不断搅拌以防

$$\text{复水比} = \frac{m_n}{m} \quad (1)$$

止样品吸水不充分。浸泡完成后快速沥去水分，并用滤纸将样品表面水分擦干，称其质量 (m)，复水比按公式 (1) 计算。

式中：m 为样品复水前的质量/g；m_{f1} 为样品复水后的质量/g。

1.5 HS-GC-IMS 测定^[17]

样品测定：准确称取 0.20±0.01g 样品，装入 20 mL 专用顶空进样瓶中，并加入 5μL 内标 (2-甲基-3-庚酮)，40 °C 孵化 10 min，通过顶空进样用 GC-IMS 进行测定。

顶空进样条件：孵育温度 40 °C；孵育时间 10.0 min；孵育转速 250 r/min；顶空进样针温度 80 °C；进样体积 200 μL，不分流模式；载气：高纯氮气（纯度≥99.999）；清洗时间 0.5 min。

GC 条件：色谱柱为 M/XT-5 柱 (15m×0.53mm×0.53 μm)；色谱柱温度 60°C；载气：高纯氮气（纯度≥99.999%）；载气流速程序：初始 2.0 mL/min，保持 2 min，在 2-10 min 线性增至 5.0 mL/min，在 10-20 min 线性增至 50.0 mL/min，在 20-30 min 线性增至 100.0 mL/min。

IMS 条件：放射源：β 射线（氚，6.5 keV）；离子化模式：正离子模式；漂移管长度 9.8 cm；管内线性电压 500 V/cm；漂移管温度 45 °C；漂移气为高纯氮气（纯度≥99.999%）；漂移气流速 150 mL/min。

1.6 挥发性化合物定性^[16]

使用外标正酮 C4~C9 作为参考，计算挥发性物质的 RI，并利用 GC-IMS 中 Library Search 定性分析软件内置的 NIST 数据库和 IMS 迁移时间数据库进行匹配，从而对挥发性风味物质进行定性分析，RI 按公式 (2) 计算：

$$RI = 100n + \frac{100 \times (t_x - t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (2)$$

式中： t_x 为化合物 x 的保留时间/s； t_n 和 t_{n+1} 分别为正酮 n 和正酮 $n+1$ 的保留时间/s ($t_n < t_x < t_{n+1}$)。

1.7 挥发性化合物定量^[18]

采用内标法 (IS) 对挥发性化合物的浓度进行半定量。未知化合物的浓度按公式 (3) 计算。

$$C_i = RF \times \frac{A_i}{A_{is}} \times C_{is} \quad (3)$$

式中： C_i 是未知化合物的浓度。RF 代表响应系数，等于 1。 A_i 是未知化合物的峰面积， A_{is} 是内标物的峰面积。 C_{is} 是内标物的浓度，等于 $0.0496 \mu\text{g} \mu\text{L}$ 。

1.8 数据分析

运用 GC-IMS 设备内置的 LAV 软件的 Gallery Plot 插件自动生成挥发性化合物指纹图谱；采用 SPSS 软件进行方差分析和显著性分析 ($P < 0.05$)，采用 Origin2018 进行 PCA 分析。分析软件 LAV2.2.1 和 GC×IMS Library Search1.0.3 为德国 G.A.S 公司。

2 结果与分析

2.1 不同香椿样品外观性状分析

图 1 中 A-F 分别为 VMDTS, HPDTS, VFDTS, VMDRTS, HPDRTS, VFDRTS。真空冷冻干燥更好地保留了香椿的颜色和外观。



图 1 不同处理香椿样品

Fig. 1 Different treatments of *Toona sinensis*



图 2 新鲜样品

Fig. 2 Fresh samples

VFDTS 色泽与新鲜香椿 FTS 最接近，体积收缩较小，这可能是由于真空冷冻干燥物料由于冰晶的存在使冰晶升华后，物料基本保持原有的结构，最大限度地保持了物料原有的形状^[19]。而 HPDTS 和 VMDTS 的颜色较深且明显皱缩，这可能是由于热泵和真空微波干燥属于热干燥，干燥过程中表面水分快速蒸发，物料内外产生压力差导致结构和形状发生改变^[20]。复水后 VFDTS 颜色嫩绿，与新鲜香椿 FTS 复水后色泽几乎没有差异，而 VMDTS 颜色变化最大，呈暗黄色。但不同干燥香椿复水后均不能完全恢复至新鲜状态，这可能与香椿干燥处理过程中发生不可逆的细胞破坏和错位有关。

2.2 干燥技术对复水能力的影响

复水性是新鲜果蔬食品干制后吸水恢复原来新鲜程度的能力，是衡量干制品品质的重要指标^[21]。不同干燥技术处理，物料由于体积收缩程度不同导致了其复水能力也具有显著差异。

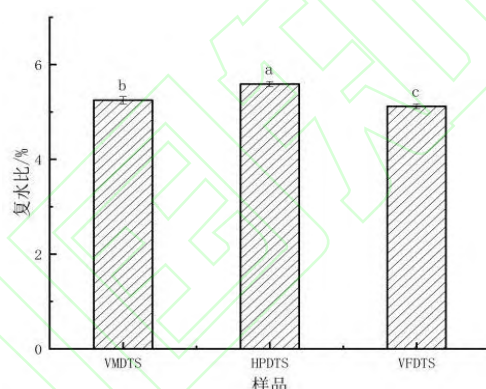


图3 不同干燥香椿样品的复水性能

Fig. 3 Rehydration performance of different dried *Toona sinensis* samples

由图3可知，干燥香椿样品的复水能力顺序为：HPDTS>VMDTS>VFDTS。与热干燥样品(HPDTS 和 VMDTS)相比，VFDTS 复水能力较低。一方面，可能是由于 VFDTS 疏松多孔^[22]，细胞间隙中的空气与外界的水进行交换的过程中样品外部水分不足以排出组织内的所有空气，阻碍了样品对水的吸收；另一方面，热干燥样品(HPDTS 和 VMDTS)体积收缩严重在复水过程中逐渐膨胀，起到泵的作用，因此样品对水的吸收能力增强。其中，热泵干燥样品 HPDTS 复水能力最强，分析原因可能是因为热泵干燥香椿含水量最低，而含水量与复水比有一定关系，随含水量降低，复水比逐渐增大^[23]。这些结果与之前报道的结果一致^[24]。

2.3 干燥技术对香椿挥发性成分的影响

2.3.1 不同干燥香椿中挥发性成分的定性和定量分析

不同干燥方式及复水香椿样品中挥发性成分通过 GC-IMS 能够很好地分离, 大部分信号出现在漂移时间为 1.0~1.9 ms 和保留时间为 100~1700 s 的区域, 利用离子迁移时间和保留指数对挥发性有机化合物进行定性鉴别。一些挥发性化合物由于浓度较高会同时产生单体和二聚体信号^[25,26], 表现出相似的保留时间, 但漂移时间不同, 如(E)-2-己烯醛、羟基丙酮、乙酸丁酯等。新鲜和不同干燥香椿样品中共鉴定了 40 种挥发性化合物(表 1), 其碳链在 C4~C10 之间, 主要包括醇类 10 种、醛类 8 种、萜烯类 2 种、酯类 6 种、酮类 4 种、酸类 2 种、含硫类 2 种、杂环化合物 4 种以及其它类 2 种。

表 1 不同干燥香椿中挥发性成分的 GC-IMS 结果比较

Table 1 Comparison of GC-IMS results of volatile components in different dried *Toona sinensis*

英文名称	中文名称	CAS	分子式	保留指		迁移时		含量 (μg/kg)			
				数	保留时间	间	FTS	VMDTS	HPDTS	VFDS	
(E,E)-2,4-Nonadienal	(E,E)-2,4-壬二烯醛	C5910872	C ₉ H ₁₄ O	1214.6	1220.52	1.335	455.19±79.27 ^a	81.72±6.45 ^b	63.8±3.02 ^b	70.42±1.99 ^b	
Benzaldehyde	苯甲醛	C100527	C ₇ H ₆ O	967.3	643.64996	1.151	151.05±37.37 ^a	43.21±1.31 ^b	43.38±1.74 ^b	41.33±0.75 ^b	
5-methylfurfural	5-甲基呋喃醛	C620020	C ₈ H ₈ O ₂	961.3	629.16	1.122	241.63±28.54 ^a	33.87±3.48 ^c	30.79±0.77 ^c	77.29±4.75 ^b	
Heptanal	庚醛	C111717	C ₇ H ₁₄ O	895.8	489.3	1.342	263.95±12.95 ^a	48.75±1.03 ^b	33.68±2.99 ^c	29.24±0.48 ^c	
2-Methylbutanal	2-甲基丁醛	C96173	C ₈ H ₁₆ O	642.3	165.26999	1.404	757.34±451.62 ^a	785.75±42.42 ^a	604.68±63.99 ^a	602.7±19.69 ^a	
Propanal	丙醛	C123386	C ₃ H ₆ O	500.3	102.585	1.053	587.09±63.74 ^a	302.91±21.31 ^b	261.98±0.57 ^{bc}	212.14±2.26 ^c	
butanal-M	正丁醛-M	C123728	C ₄ H ₈ O	593.7	140.385	1.103	93.55±16.89 ^a	54.31±1.5 ^b	55.72±1.93 ^b	59.32±2.33 ^b	
Butanal-D	正丁醛-D	C123728	C ₄ H ₈ O	587.9	137.655	1.291	23.1±3.63 ^a	16.68±0.48 ^c	22.59±2.95 ^b	20.82±0.26 ^{bc}	
(E)-2-Hexenal-M	(E)-2-己烯醛-M	C6728263	C ₈ H ₁₆ O	854.2	406.988	1.1825	1822±100.07 ^a	109.4±6.97 ^c	402.9±0.6 ^b	314.1±3.82 ^b	
(E)-2-Hexenal-D	(E)-2-己烯醛-D	C6728263	C ₈ H ₁₆ O	837.6	377.672	1.5152	9026.22±2229.94 ^a	69.99±9.87 ^b	1169.25±28.21 ^b	889.66±25.3 ^b	
醛类							13421.12	1546.59	2688.77	2317.02	
6-methyl-5-hepten-2-one	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	C ₈ H ₁₄ O	988.7	698.88	1.178	234.53±52.97 ^a	45.7±4.07 ^b	35.85±3.06 ^b	38.57±0.24 ^b	
2-pentanone	2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	695.7	199.39499	1.12	265.64±4.27 ^a	85.66±7.46 ^b	91.79±12.00 ^b	80.52±2.92 ^b	
3-Pentanone	3-戊酮	C96220	C ₅ H ₁₀ O	686.2	191.51999	1.359	607.62±31.45 ^a	26.93±0.88 ^c	58.58±4.88 ^b	71.32±1.02 ^b	
1-hydroxy-2-propanone	羟基丙酮	C116096	C ₃ H ₆ O ₂	658.3	174.405	1.047	237.5±10.29 ^a	104.94±10.48 ^b	45.17±5.19 ^c	42.8±1.38 ^c	
酮类							1345.29	263.23	231.39	233.21	
Hexyl propionate	丙酸乙酯	C2445763	C ₈ H ₁₆ O ₂	1110.1	947.93994	1.421	3530.25±188.11 ^a	144.94±11.39 ^b	186.27±28.32 ^b	122.82±3.17 ^b	
(Z)-3-Hexenyl acetate	乙酸叶醇酯	C3681718	C ₈ H ₁₄ O ₂	1006.9	738.36	1.818	186.55±11.57 ^a	10.07±3.31 ^b	6.69±0.36 ^b	9.38±0.77 ^b	
ethyl acetate	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	617.4	152.04	1.1	348.3±20.89 ^a	37.26±2.89 ^b	50.52±11.49 ^b	60.44±0.75 ^b	
ethyl propanoate	丙酸乙酯	C105373	C ₅ H ₁₀ O ₂	708.3	211.04999	1.154	13.05±3.48 ^b	5.18±0.74 ^c	5.69±0.58 ^c	40.84±1.15 ^a	
Butanoic acid methyl	丁酸甲酯	C623427	C ₅ H ₁₀ O ₂	707.5	210.31499	1.43	13.39±0.86 ^b	3.87±0.47 ^c	3.21±0.81 ^c	111.24±7.27 ^a	

ester											
butyl acetate-M	乙酸丁酯-M	C123864	C ₈ H ₁₂ O ₂	802	321.93	1.239	56.87±15.43 ^b	11.64±1.15 ^c	9.39±0.86 ^c	85±2.40 ^a	
butyl acetate-D	乙酸丁酯-D	C123864	C ₈ H ₁₂ O ₂	801.1	320.565	1.62	24.44±2.79 ^b	7.96±1.58 ^c	5.82±0.66 ^c	173.5±7.25 ^a	
	酯类						4172.85	220.92	267.59	603.22	
alpha-Pinene	α-蒎烯	C80568	C ₁₀ H ₁₆	933.7	565.95	1.217	742.23±144.09 ^a	235.19±7.87 ^b	229.24±19.55 ^b	68.93±4.83 ^c	
styrene	苯乙烯	C100425	C ₈ H ₈	894.2	486.25497	1.439	60.08±6.56 ^c	33.97±0.64 ^c	17.44±3.87 ^d	43.85±0.58 ^b	
	萜烯类						802.31	269.16	246.68	112.78	
2-Phenylethanol	苯乙醇	C60128	C ₈ H ₁₀ O	1109.8	947.1	1.647	7336.06±471.56 ^a	110.83±13.69 ^b	341.74±21.35 ^b	107.52±5.04 ^b	
Nerol	橙花醇	C106252	C ₁₀ H ₁₈ O	1219.9	1236.48	1.244	898.61±221.09 ^a	108.57±3.82 ^b	96±4.86 ^b	105.21±6.46 ^b	
Linalool	芳樟醇	C78706	C ₁₀ H ₁₈ O	1102.2	929.87994	1.214	827.23±67.48 ^a	60.67±5.68 ^c	265.45±16.58 ^b	69.32±19.58 ^c	
2-hexanol	2-己醇	C626937	C ₈ H ₁₄ O	788.4	302.81998	1.565	4092.33±608.57 ^a	68.82±3.40 ^b	365.62±24.14 ^b	392.61±6.81 ^b	
1-Pentanol	1-戊醇	C71410	C ₅ H ₁₂ O	764.4	271.74	1.257	100.88±6.66 ^a	61.16±6.97 ^b	34.31±1.25 ^c	13.95±1.10 ^d	
3-Methyl-butanoic acid methyl ester	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C556241	C ₈ H ₁₂ O ₂	761.6	268.38	1.202	79.03±7.28 ^a	8.09±1.15 ^c	18.47±6.82 ^{bc}	21.77±2.44 ^b	
1-butanol	正丁醇	C71363	C ₄ H ₁₀ O	659.5	175.14	1.191	122.38±38.57 ^a	59.74±4.27 ^b	55.55±1.55 ^b	73.75±4.77 ^b	
1-propanol	正丙醇	C71238	C ₃ H ₈ O	563.7	126.945	1.117	64.96±2.20 ^b	70.11±2.24 ^a	54.31±2.49 ^c	26.62±0.83 ^d	
1-hexanol	正己醇	C111273	C ₆ H ₁₄ O	861.8	420.94498	1.316	49.67±3.34 ^b	12.00±0.99 ^c	13.55±2.81 ^c	59.77±3.31 ^a	
2,3-butanediol	2,3-丁二醇	C513859	C ₄ H ₁₀ O ₂	789.5	304.28998	1.368	532.81±39.02 ^a	55.27±4.06 ^c	63.76±5.78 ^c	139.13±2.64 ^b	
	醇类						14103.96	615.26	1308.76	1009.65	
butanoic acid	丁酸	C107926	C ₄ H ₈ O ₂	822.5	353.00998	1.164	367.11±60.28 ^a	227.33±10.52 ^b	165.97±5.33 ^c	69.5±2.29 ^d	
Acetic acid	醋酸	C64197	C ₂ H ₄ O ₂	590.3	138.81	1.151	38.53±2.79 ^a	5.10±0.06 ^b	3.16±0.17 ^b	3.97±0.32 ^b	
	酸类						405.64	232.43	169.13	73.47	
2-Acetylfuran	2-乙酰基呋喃	C1192627	C ₈ H ₈ O ₂	905.3	507.36	1.115	485.11±182.00 ^a	21.12±0.68 ^b	22.64±1.32 ^b	52.17±6.72 ^b	
2-Ethylfuran	2-乙基呋喃	C3208160	C ₆ H ₈ O	720.6	223.125	1.307	967.10±39.97 ^a	81.80±6.37 ^c	147.09±10.37 ^b	117.14±3.64 ^{bc}	
2-Ethyl-6-methylpyrazine	2-乙基-6-甲基吡嗪	C13925036	C ₈ H ₁₀ N ₂	996.3	719.45996	1.209	787.2±58.32 ^a	25.16±0.96 ^b	24.51±2.90 ^b	24.08±2.62 ^b	
2-ethylpyrazine	2-乙基吡嗪	C13925003	C ₆ H ₈ N ₂	917.5	531.72	1.124	298.80±50.54 ^a	16.99±0.83 ^b	20.67±1.43 ^b	58.14±3.04 ^b	
	杂环类						2538.21	145.07	214.91	251.53	
2,4,5-Trimethylthiazole	2,4,5-三甲基噻唑	C13623115	C ₆ H ₈ NS	996	718.62	1.557	1019.15±47.72 ^a	24.65±2.76 ^b	19.59±0.74 ^b	21.84±3.64 ^b	
1-propene-3-methylthio	烯丙基甲基硫醚	C10152768	C ₄ H ₈ S	696.5	200.12999	1.045	264.91±37.97 ^a	96.63±11.63 ^b	52.22±4.56 ^c	126.88±1.28 ^b	
	含硫类						1284.06	121.28	71.81	148.72	
Eugenol	丁香酚	C97530	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1351.4	1699.5299	1.276	867.18±106.14 ^a	97.11±7.35 ^b	105.89±10.96 ^b	77.30±1.35 ^b	
Acetal	1,1-二乙氧基乙烷	C105577	C ₈ H ₁₆ O ₂	722.8	225.32999	1.043	287.18±8.81 ^a	113.81±6.77 ^c	46.1±7.63 ^d	137.94±0.62 ^b	
	其它类						1154.36	210.92	151.99	215.24	

注：同一行不同字母之间有显著差异($P<0.05$)。

由表 1 可以看出，不同产地干燥香椿样品中含量最高的均为醛类化合物，VMDTS、HPDTS、VFDTS 中醛类化合物含量分别为 1546.59 μg/kg、2688.77 μg/kg、和 2317.02 μg/kg。其次为醇类化合物，VMDTS、HPDTS、VFDTS 中醇类化合物含量分别为 615.26 μg/kg、1308.76 μg/kg 和 1009.65 μg/kg。VMDTS 中醛类及醇类化合物含量最低但酮类含量略高，可能是由于真空微波干燥瞬时温度过高，造成一些低沸点的醇类物质易挥发损失或受热氧化生成酮类物质^[27,28]。果蔬芳香物质

形成途径基本是在酶的直接或间接催化下进行的生物合成,而真空冷冻干燥能较好地保持原料酶活性,促进风味物质的形成^[29],在一定程度上有利于醛类和醇类物质的增加,但由于真空冷冻干燥加热时间较长,有利于加热过程美拉德反应中的 Strecker 降解和醇醛缩合反应^[30],因此, VFDTs 中醛类醇类含量略低于 HPDTS 组。热干燥 VMDTS 和 HPDTS 中酯类含量低于 VFDTs,分析原因可能是酯类在加热过程中发生水解反应生成酸类和醇类,热干燥样品加工过程中温度较高,酯类损失较多。

2.3.2 不同干燥香椿中挥发性成分的指纹图谱分析

A 区域为新鲜香椿和干燥香椿的共有挥发性化合物,主要为酮类和醛类化合物,包括 6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-戊酮、羟基丙酮、苯甲醛、丙醛、正丁醛、2-甲基丁醛等,说明不同干燥处理均对这些化合物影响较小。其中醛类化合物挥发性强、阈值较低,对风味的贡献较大,是香椿中的重要风味化合物^[27]。

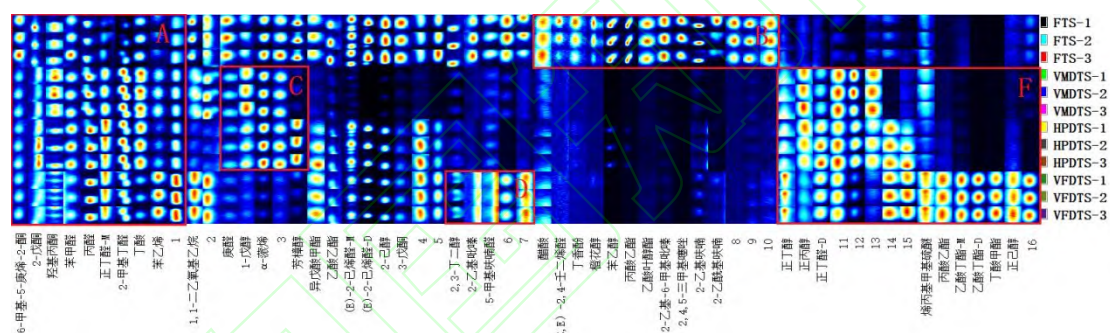


图 4 不同处理干燥香椿中挥发性成分的指纹图谱

Fig. 4 Fingerprints of volatile components in dried *Toona sinensis* under different treatments

B 区域为新鲜香椿特有的挥发性成分,包括醋酸、(E,E)-2,4-壬二烯醛、丁香酚、橙花醇、苯乙醇、丙酸乙酯、乙酸叶酯醇、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙酰基咪喃、2-乙基咪喃。其中丁香酚具有强烈的丁香花味道,橙花醇具有令人愉悦的玫瑰和橙花的香气,苯乙醇具有强烈的玫瑰花香,(E,E)-2,4-壬二烯醛具有强烈的花果和油脂香气。C 区域中的化合物在新鲜香椿和热干燥香椿中含量均较高,而在 VFDTs 中几乎检测不到,包括庚醛、1-戊醇、 α -蒎烯、芳樟醇等。D 区域中的化合物在新鲜香椿和非热干燥 VFDTs 中含量较高,而在热干燥香椿中几乎检测不到,包括 2,3-丁二醇、2-乙基吡嗪、5-甲基咪喃醛等。E 区域中的化合物为香椿经不同干燥处理后新产生的挥发性成分,以非热干燥 VFDTs 中检测到的

化合物最多, 包括正丁醇, 正丙醇, 正丁醛-M, 烯丙基甲基硫醚, 丙酸乙酯等。挥发性成分的种类和含量可以作为区分香椿不同干燥方式的重要指征。这些发现表明, 香椿的干燥伴随着挥发性物质的损失和新的挥发性物质的形成。这可能与干燥过程中的化学反应增强有关, 如美拉德反应、不同分子之间的相互作用以及大分子的降解^[31]。VMDTS 中化合物种类较少, 可能是因为干燥过程中瞬时温度较高, 一些长链化合物和对温度敏感的化合物降解, 没有留存在样品中。与热干燥技术相比, 真空冷冻干燥能保留较多新鲜香椿原有的挥发性物质, 减少香气的损失, 这些发现与之前报道的结果一致^[32]。

2.4 干燥复水对香椿挥发性成分的影响

2.4.1 不同干燥复水香椿中挥发性成分的定性和定量分析

不同干燥香椿样品复水后均有明显香椿风味, 尤其是低温干燥的香椿复水后几乎能够复原新鲜香椿的特征风味。这可能是干燥样品粉碎后与水接触导致酶重新激活产生了香椿特征性风味, 这与 Li 等人^[33]的研究一致。

表 2 不同干燥复水香椿中挥发性成分的 GC-IMS 结果比较

Table 2 Comparison of GC-IMS results of volatile components in different dried rehydration

Toona sinensis

英文名称	中文名称	CAS	分子式	保留		迁移时 间	含量 (µg/kg)			
				指数	保留时间		FTS	VMDRTS	HPDRTS	VFDRTS
(E,E)-2,4-Nonadienal	(E,E)-2,4-壬二烯醛	C5910872	C ₉ H ₁₆ O	1214.6	1220.52	1.335	455.19±79.27 ^a	85.28±15.11 ^c	189.36±20.13 ^b	382.28±14.15 ^a
Benzaldehyde	苯甲醛	C100527	C ₇ H ₆ O	967.3	643.64996	1.151	151.05±37.37 ^a	33.26±2.35 ^b	38.65±1.29 ^b	43.47±2.54 ^b
5-methylfurfural	5-甲基呋喃醛	C620020	C ₆ H ₈ O ₂	961.3	629.16	1.122	241.63±28.54 ^a	39.32±10.00 ^c	71.01±4.60 ^b	92.70±5.44 ^b
Heptanal	庚醛	C111717	C ₇ H ₁₄ O	895.8	489.3	1.342	263.95±12.95 ^a	59.15±2.04 ^b	63.99±2.09 ^b	54.92±2.03 ^b
2-Methylbutanal	2-甲基丁醛	C96173	C ₅ H ₁₀ O	642.3	165.26999	1.404	757.34±451.62 ^a	607.48±32.19 ^b	704.17±41.47 ^b	222.41±20.43 ^c
Propanal	丙醛	C123386	C ₃ H ₆ O	500.3	102.585	1.053	587.09±63.74 ^a	189.36±4.14 ^c	291.55±17.65 ^b	289.2±11.91 ^b
butanal-M	正丁醛-M	C123728	C ₄ H ₈ O	593.7	140.385	1.103	93.55±16.89 ^a	29.15±0.85 ^b	37.48±1.93 ^b	40.17±1.35 ^b
E-2-Hexenal-M	(E)-2-己烯醛-M	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	854.2	406.988	1.1825	1822.00±100.07 ^a	101.74±16.74 ^c	388.88±21.36 ^b	383.62±22.83 ^b
E-2-Hexenal-D	(E)-2-己烯醛-D	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	837.6	377.672	1.5152	9026.22±2229.94 ^a	70.65±6.94 ^b	679.23±68.94 ^b	1334.55±122.07 ^b
醛类							13398.02	1215.40	2464.33	2843.33
6-methyl-5-hepten-2-one	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	C ₈ H ₁₄ O	988.7	698.88	1.178	234.53±52.97 ^a	34.11±2.36 ^b	60.46±4.36 ^b	42.29±2.98 ^b
2-pentanone	2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	695.7	199.39499	1.12	265.64±4.27 ^a	60.6±2.16 ^c	61.61±1.76 ^c	115.88±11.10 ^b
3-Pentanone	3-戊酮	C96220	C ₅ H ₁₀ O	686.2	191.51999	1.359	607.62±31.45 ^a	14.13±2.30 ^b	23.94±3.69 ^b	26.83±2.05 ^b
Cyclohexanone	环己酮	C108941	C ₆ H ₁₀ O	897.8	493.08	1.154	23.88±6.83 ^a	14.51±1.86 ^c	18.55±6.65 ^c	19.41±0.80 ^c
1-hydroxy-2-propanone	羟基丙酮	C116096	C ₃ H ₆ O ₂	658.3	174.405	1.047	237.5±10.29 ^a	140.71±0.25 ^c	106.26±18.60 ^d	209.34±7.88 ^b
酮类							1369.19	264.06	270.81	413.74
Hexyl propionate	丙酸乙酯	C2445763	C ₈ H ₁₆ O ₂	1110.1	947.93994	1.421	3530.25±188.11 ^a	1047.24±130.72 ^c	1512.03±84.60 ^b	1716.55±96.26 ^b

Z-3-Hexenyl acetate	乙酸叶醇酯	C3681718	C ₈ H ₁₆ O ₂	1006.9	738.36	1.818	186.55 ± 11.57 ^a	9.34 ± 0.49 ^b	10.05 ± 2.16 ^b	11.21 ± 1.62 ^b
ethyl	乳酸乙酯	C97643	C ₅ H ₁₀ O ₃	818.3	346.28998	1.137	165.62 ± 99.46 ^{ab}	71.87 ± 3.45 ^b	186.56 ± 23.06 ^a	240.23 ± 9.89 ^a
2-hydroxypropanoate										
3-Methyl-butanoic acid	3-异戊酸甲酯	C556241	C ₈ H ₁₆ O ₂	761.6	268.38	1.202	79.03 ± 7.28 ^a	7.87 ± 2.17 ^b	10.04 ± 1.11 ^b	10.97 ± 1.33 ^b
methyl ester	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	617.4	152.04	1.1	348.3 ± 20.89 ^a	85.22 ± 5.36 ^c	90.68 ± 8.62 ^c	132.12 ± 11.63 ^b
ethyl acetate	乙酸丁酯-M	C123864	C ₈ H ₁₆ O ₂	802	321.93	1.239	56.87 ± 15.43 ^a	13.13 ± 0.76 ^b	12.77 ± 2.61 ^b	45.12 ± 7.64 ^a
butyl acetate-M	乙酸丁酯-D	C123864	C ₈ H ₁₆ O ₂	801.1	320.565	1.62	24.44 ± 2.79 ^b	8.77 ± 0.35 ^c	11.71 ± 1.79 ^c	47.43 ± 6.54 ^a
butyl acetate-D	甲氟膦酸异丙酯	C107448	C ₄ H ₁₀ FO ₂ P	819.8	348.705	1.468	29.53 ± 2.89 ^a	13.4 ± 1.35 ^b	29.59 ± 7.34 ^a	39.15 ± 7.57 ^a
Sarin	酯类						4420.60	1256.84	1863.43	2242.79
alpha-Pinene	α-蒎烯	C80568	C ₁₀ H ₁₆	933.7	565.95	1.217	742.23 ± 144.09 ^a	172.23 ± 18.88 ^b	172.65 ± 12.82 ^b	63.94 ± 7.96 ^b
styrene	苯乙烯	C100425	C ₈ H ₈	894.2	486.25497	1.439	60.08 ± 6.56 ^b	36.2 ± 1.33 ^c	38.15 ± 7.59 ^c	78.84 ± 0.69 ^a
alpha-Phellandrene	水芹烯	C99832	C ₁₀ H ₁₆	996.5	719.88	1.686	183.49 ± 23.63 ^b	616.38 ± 257.73 ^a	777.08 ± 200.55 ^a	450.76 ± 100.09 ^{ab}
	萜烯类						985.80	824.81	987.87	593.53
2-Phenylethanol	苯乙醇	C60128	C ₈ H ₁₀ O	1109.8	947.1	1.647	7336.06 ± 471.56 ^a	1963.49 ± 112.23 ^d	2711.11 ± 140.16 ^c	3312.3 ± 189.98 ^b
Nerol	橙花醇	C106252	C ₁₀ H ₁₈ O	1219.9	1236.48	1.244	898.61 ± 221.09 ^a	151.49 ± 9.15 ^d	437.88 ± 64.02 ^b	956.51 ± 72.58 ^a
Linalool	芳樟醇	C78706	C ₁₀ H ₁₈ O	1102.2	929.87994	1.214	827.23 ± 67.48 ^a	289.37 ± 12.5 ^b	248.78 ± 10.20 ^b	280.95 ± 12.19 ^b
2-hexanol	2-己醇	C626937	C ₈ H ₁₈ O	788.4	302.81998	1.565	4092.33 ± 608.57 ^a	73.56 ± 4.56 ^b	544.67 ± 22.92 ^b	575.31 ± 11.20 ^b
1-Pentanol	1-戊醇	C71410	C ₅ H ₁₂ O	764.4	271.74	1.257	100.88 ± 6.66 ^c	26.2 ± 1.45 ^b	23.16 ± 2.39 ^b	15.41 ± 1.78 ^c
1-butanol	正丁醇	C71363	C ₄ H ₁₀ O	659.5	175.14	1.191	122.38 ± 38.57 ^a	46.94 ± 10.15 ^b	68.32 ± 5.44 ^b	61.46 ± 2.16 ^b
2-Propanol	异丙醇	C67630	C ₃ H ₈ O	502.7	103.424995	1.173	26.56 ± 1.60 ^b	23.81 ± 1.46 ^b	40.52 ± 7.69 ^a	27.57 ± 2.64 ^b
1-hexanol	正己醇	C111273	C ₆ H ₁₄ O	861.8	420.94498	1.316	49.67 ± 3.34 ^a	10.63 ± 1.02 ^d	16.24 ± 2.22 ^c	25.02 ± 2.58 ^b
2,3-Butanediol	2,3-丁二醇	C513859	C ₄ H ₁₀ O ₂	789.5	304.28998	1.368	532.81 ± 39.02 ^a	66.77 ± 0.89 ^d	129.35 ± 22.11 ^c	232.48 ± 13.90 ^b
	醇类						13986.53	2652.26	4220.03	5487.02
butanoic acid	丁酸	C107926	C ₄ H ₈ O ₂	822.5	353.00998	1.164	367.11 ± 60.28 ^a	214.77 ± 115.97 ^b	171.45 ± 128.33 ^b	74.96 ± 12.03 ^c
Acetic acid	醋酸	C64197	C ₂ H ₄ O ₂	590.3	138.81	1.151	38.53 ± 2.79 ^a	5.51 ± 18.12 ^b	4.97 ± 18.59 ^b	6.87 ± 0.12 ^b
Propionic acid	丙酸	C79094	C ₃ H ₆ O ₂	706	208.84499	1.258	13.4 ± 2.57 ^a	18.96 ± 3.20 ^{ab}	14.77 ± 3.49 ^{bc}	19.95 ± 1.90 ^a
	酸类						419.04	239.25	191.20	101.78
2-Acetylfuran	2-乙酰基呋喃	C1192627	C ₈ H ₈ O ₂	905.3	507.36	1.115	485.11 ± 182.00 ^b	66.14 ± 47.58 ^c	234.72 ± 54.79 ^c	883.44 ± 110.05 ^a
2-Ethylfuran	2-乙基呋喃	C3208160	C ₈ H ₈ O	720.6	223.125	1.307	967.10 ± 39.97 ^a	93.58 ± 14.02 ^d	715.54 ± 36.95 ^c	831.85 ± 12.52 ^b
2-Ethyl-6-methylpyrazine	2-乙基-6-甲基吡嗪	C13925036	C ₇ H ₁₀ N ₂	996.3	719.45996	1.209	787.20 ± 58.32 ^a	53.31 ± 12.48 ^c	91.38 ± 16.72 ^c	162.78 ± 29.12 ^b
2-ethylpyrazine	2-乙基吡嗪	C13925003	C ₆ H ₈ N ₂	917.5	531.72	1.124	298.80 ± 50.54 ^a	30.11 ± 1.83 ^c	69.38 ± 7.10 ^c	137.48 ± 30.14 ^b
2-acetyl-1-pyrroline	2-乙酰基-1-吡咯啉	C85213225	C ₆ H ₈ NO	916.9	530.565	1.468	100.90 ± 30.27 ^a	12.17 ± 0.73 ^c	15.59 ± 2.30 ^{bc}	49.45 ± 18.37 ^b
	杂环类						2639.11	255.31	1126.60	2065.00
2,4,5-Trimethylthiazole	2,4,5-三甲基噻唑	C13623115	C ₆ H ₈ NS	996	718.62	1.557	1019.15 ± 47.72 ^a	50.41 ± 4.12 ^c	119.38 ± 11.81 ^c	443.93 ± 120.33 ^b
1-propene-3-methylthio	烯丙基甲基硫醚	C10152768	C ₄ H ₈ S	696.5	200.12999	1.045	264.91 ± 37.97 ^a	149.81 ± 6.49 ^b	181.84 ± 27.51 ^b	290.58 ± 12.84 ^a
	含硫类						1284.06	200.22	301.22	734.51
Eugenol	丁香酚	C97530	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1351.4	1699.5299	1.276	867.18 ± 106.14 ^a	338.93 ± 59.61 ^b	475.31 ± 29.40 ^b	812.55 ± 126.07 ^a
Acetal	1,1-二乙氧基乙烷	C105577	C ₆ H ₁₄ O ₂	722.8	225.32999	1.043	287.18 ± 8.81 ^a	157.8 ± 9.95 ^d	198.81 ± 21.93 ^c	261.28 ± 1.61 ^b
	其它类						1154.35	496.72	674.12	1073.83

注：同一行不同字母之间有显著差异($P < 0.05$)。

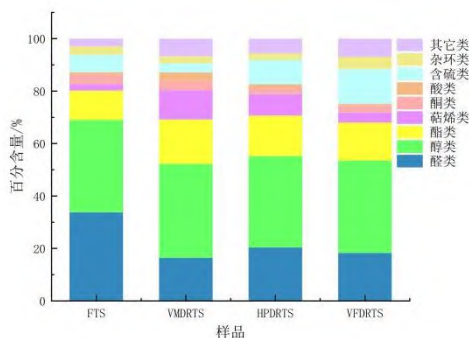


图5 不同干燥样品挥发性成分种类及含量

Fig. 5 Types and Contents of Volatile components in Different Dry Samples

不同干燥复水香椿中挥发性成分的种类及含量差异较大,由图5和表2可以看出,醇类、醛类、酯类是干燥复水香椿样品中的主要成分,约占总样品含量的70%。醛类主要来源于亚油酸、亚麻酸及花生四烯酸这些不饱和脂肪酸的自动氧化,如(E,E)-2,4-壬二烯醛、庚醛、丙醛、(E)-2-己烯醛,大多数具有较低的感官阈值,是脂肪味产生的原因^[30]。醇类中饱和醇类阈值较高,对气味贡献率不大;不饱和醇类如苯乙醇、橙花醇、芳樟醇具有较低的感官阈值,形成了玫瑰花香、果香、花香等香气,这些化合物对香椿风味贡献较大。酮类,酸类,酯类物质大多数阈值较高,能产生令人愉快的香味,也是构成香椿风味的重要补充部分^[34]。萜烯类物质 α -蒎烯、苯乙烯、水芹烯等,阈值较低,香气浓厚,大多具有花香、甜香及水果香等比较柔和的气味,起到中和香椿刺激性气味的作用^[35]。除萜烯类,酸类外,VFDRTS中各类化合物含量均高于热干燥复水样品组。这可能是由于VFDTS干燥过程中温度较低,风味相关酶的活性损失较小,加水以后酶被激活产生化合物种类较多。

2.4.2 不同干燥复水香椿中挥发性成分的指纹图谱分析

由图6可知,A区域中新鲜香椿和干燥复水香椿的共有化合物有15种,包括5-甲基呋喃醛、庚醛、丙醛、正丁醛、2-甲基丁醛等。相较于新鲜香椿,VMDRTS保留成分最少,VFDRTS保留成分较多且新生成物质最多。分析原因可能是真空微波干燥处理过程中瞬时高温对风味相关酶及香气成分影响最大,而真空冷冻干燥温度较低能更好的保护香椿香气成分及风味相关酶,复水后较多醛类、醇类以及杂环化合物得以保留,如(E)-2-己烯醛,(E,E)-2,4-壬二烯醛,2-乙基-6-甲基吡嗪,2-乙基呋喃,2,4,5-三甲基噻唑等。B区域中的化合物为不同干燥香椿复水

后新产生的物质,表明干燥香椿复水过程中会发生新的挥发性物质的生成和转化,其中 VFDRTS 新产生的挥发性化合物种类最多,达 20 余种,如橙花醇,正己醇,乙酸丁酯,苯乙烯,水芹烯等具有花香,果香等令人愉快的气味,使其整体香气成分更丰富。

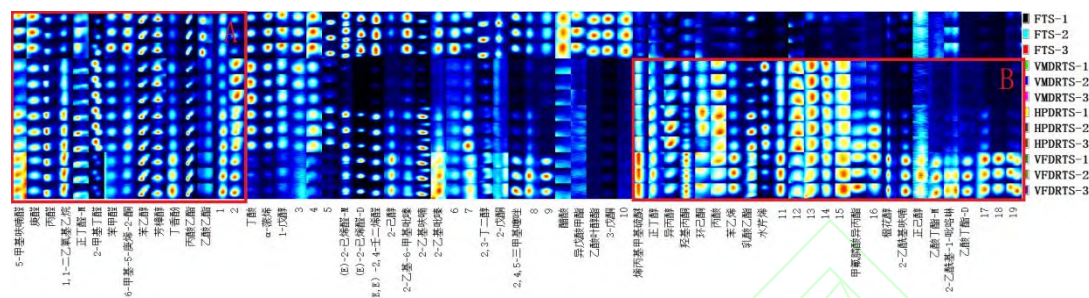


图 6 不同干燥复水香椿中挥发性成分的指纹图谱

Fig. 6 Fingerprints of volatile components in dried rehydration *Toona sinensis*

2.5 主成分分析

主成分分析 PCA 是一种多元统计分析技术,通过确定几个主成分因子来代表原始样本中许多复杂且难以发现的变量,然后基于主成分因子在不同样本中的贡献率,来评价样本之间的规律性和变异性^[36],图中样本距离越大,差异越明显。

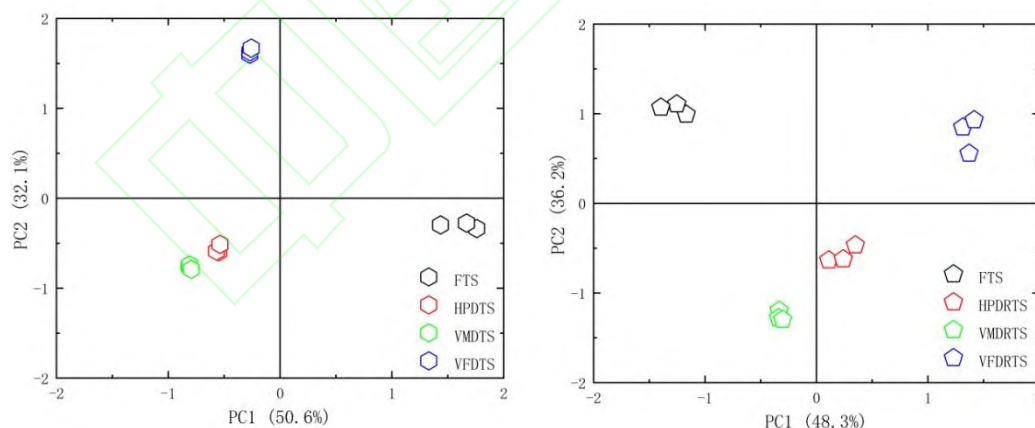


图 7 主成分 (a) 干燥样品 (b) 干燥复水样品

Fig. 7 Principal component. (a) dried samples (b) rehydration samples

不同干燥处理香椿样品的 PCA 分析结果如图 7(a)所示,主成分 1 与主成分 2 的方差贡献率之和为 82.9%,表明前 2 个主成分包含了原有变量的大部分信息,可以用于新鲜及不同干燥香椿样品挥发性成分分析。4 种香椿样品清楚地分为三

类,即新鲜样品 FTS、非热干燥样品(VFDTS)和热干燥样品(VMDTS 和 HPDTS)。这表明干燥处理显著改变了新鲜香椿的风味,并且非热干燥与热干燥样品的风味明显不同。不同热干燥处理的香椿样品之间的风味差异相对较小,风味较接近。从图 7(b)中可以看出,不同干燥复水香椿与新鲜香椿差异较大,反映了其在干燥和复水过程中可通过各种化学反应相互转化或生成新的挥发性风味物质造成风味改变。

3 结论

本研究首次将 GC-IMS 技术应用于不同干燥香椿复水前后的挥发性成分分析。基于 GC-IMS 技术可以快速、准确的对香椿不同干燥方式下挥发性成分进行鉴别,新鲜和不同干燥方式的香椿样品中共鉴定出 40 种挥发性化合物,新鲜和复水香椿样品中共鉴定出 44 种挥发性化合物,主要包括醇类、醛类、萜烯类、酯类、酮类、酸类、含硫类、杂环化合物以及其它类。GC-IMS 指纹图谱直观的看出不同处理样品挥发性成分的差异。通过半定量和 PCA 发现,干燥样品与新鲜样品差异较大,VMDTS 和 HPDTS 风味较为相似。与新鲜香椿相比,干燥样品复水有较多新生成物质,风味更加浓郁。通过综合比较不同干燥方式对香椿挥发性成分种类、含量以及外观形态的影响,确定冷冻干燥最有利于香椿风味的保存及恢复,是将香椿加工的最佳干燥方式。本研究为香椿干燥加工及质量控制提供科学参考,但其干制品复水过程中关键酶及风味恢复产生的形成机制还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王晓敏,王赵改,史冠莹,等.两种干燥方式对香椿粉品质特性的影响[J].保鲜与加工,2019,19(4):141-149.
- [2] 任广跃,刘军雷,刘文超,等.香椿芽热泵式冷风干燥模型及干燥品质[J].食品科学,2016,37(23):13-19.
- [3] ONWUDE D I,HASHIM N,CHEN G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops[J]. Trends in food science & technology, 2016, 57(A), 132-145.
- [4] 李文婷,施梦凡,于楠楠,等.不同干燥方法对香椿苗品质的影响[J].食品科技,2020,45(5):64-69.
- [5] 李湘利,刘静,肖鲜.热风与微波及其联合干燥对香椿芽品质的影响[J].食品科

学,2015,36(18):64-68.

[6] CHEN M,WANG C,LI L,et al. Retention of volatile constituents in dried *Toona sinensis* by GC-MS analysis[J]. *International journal of food engineering*, 2010, 6(2): 1-8.

[7] ZHAI X,GRANVOGL M. 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): 9885-9894.

[8] 王燕,卢恒,张敏敏,等.基于气相-离子迁移谱的不同干燥方式下金银花挥发性成分分析[J]. *中草药*,2022,53(12):3801-3810.

[9] HU X,WANG R,GUO J,et al. Changes in the Volatile Components of Candied Kumquats in Different Processing Methodologies with Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3053.

[10] GUO Y,CHEN D,DONG Y F,et al. Characteristic volatiles fingerprints and changes of volatile compounds in fresh and dried *Tricholoma matsutake* Singer by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *Journal of chromatography B*, 2018, 1099: 46-55.

[11] 李湘,江靖,李高阳,等.GC-IMS 结合化学计量学分析不同采后处理对柑橘果皮挥发性化合物的影响[J]. *食品科学*,2021(20):128-134.

[12] 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.

[13] Arroyo-Manzanares N,A Mart í n-G ó mez,Jurado-Campos N,et al. Target vs spectral fingerprint data analysis of Iberian ham samples for avoiding labelling fraud using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food chemistry*, 2018, 246: 65-73.

[14] 张宗国,陈东杰,孟一,等.基于顶空气相色谱-离子迁移谱与电子鼻技术快速检测宁夏滩羊肉中掺假鸭肉[J]. *肉类研究*,2020,34(12):43-48.

[15] ZHAO Y,ZHAN P,TIAN H L,et al. Insights into the Aroma Profile in Three Kiwifruit Varieties by HS-SPME-GC-MS and GC-IMS Coupled with DSA[J]. *Food analytical methods*, 2021, 14: 1033-1042.

[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):236-241.

[17] 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.

[18] ZHU J C,CHEN F,WANG L Y,et al. Characterization of the key aroma volatile compounds in

cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) Using Gas Chromatography-Olfactometry (GC-O) and Odor Activity Value (OAV)[J]. *Journal of agricultural & food Chemistry*, 2016, 64(24): 4990-4999.

[19] 王明,孙曼兮,雷激,等.不同干燥方式对银耳干制品品质的影响[J].*河南工业大学学报:自然科学版*,2015,36(6):90-95.

[20] Aprajeta J,Gopirajah R,Anandharamakrishnan C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying[J]. *Journal of food engineering*, 2015, 144: 119-128.

[21] 吕朝燕,高智席,马秀情,等.不同热风干燥温度对方竹笋品质的影响[J].*食品工业科技*,2021,42(11):23-29.

[22] FENG Y,TAN C P,ZHOU C,et al. Effect of freeze-thaw cycles pretreatment on the vacuum freeze-drying process and physicochemical properties of the dried garlic slices[J]. *Food chemistry*, 2020, 324, Article: 126883.

[23] 杜传来,叶洪梅,康永真.香椿芽微波干燥特性的研究[J].*保鲜与加工*,2007,7(1):35-38.

[24] FENG Y,XU B G,YAGOUB E G A,et al. Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic[J]. *Food chemistry*, 2021, 343, Article: 128404.

[25] LI M, YANG R,ZHANG H,et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC - IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J]. *Food chemistry*, 2019, 290: 32-39.

[26] YANG F,LIU Y,WANG B,et al. Screening of the volatile compounds in fresh and thermally treated watermelon juice via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry analysis[J]. *LWT-Food science and technology*, 2021, 137, Article:110478.

[27] 刘盼盼,任广跃,段续,等.基于变异系数法对不同干燥方式白萝卜品质及风味的评价[J].*食品与发酵工业*,2022,48(13):218-226.

[28] 张毅航,方东路,仲磊,等.热风干燥和真空冷冻干燥对猴头菇不同部位风味物质的影响[J].*食品工业科技*,2022,43(8):58-67.

[29] 张莉会,廖李,安可婧,等.干燥方式对果蔬风味物质影响研究进展[J].*食品工业科技*,2018,39(18):315-319.

[30] 高兴洋,安欣欣,赵立艳,等.真空低温油炸和真空冷冻干燥对香菇脆片品质及挥发性风味

成分的影响[J].食品科学,2015,36(17):88-93.

[31] YU G,DONG C,DONG Y,et al. Characteristic volatiles fingerprints and changes of volatile compounds in fresh and dried *Tricholoma matsutake* Singer by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC - MS[J]. *Journal of chromatography B*, 2018, 1099: 46-55.

[32] 张贝贝.加工处理对脱水香椿品质的影响[D].西北农林科技大学,2015.

[33] LI J X,EIDMAN K,GAN X W,et al. Identification of (S,S)- γ -glutamyl-(cis-S-1-propenyl)thioglycine, a naturally occurring norcysteine derivative, from the Chinese vegetable *Toona sinensis*[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2013, 61(31): 7470-7476.

[34] 刘莹莹,范莹莹,石佳宁,等.香辛料对莲藕泡菜挥发性风味成分和理化性质的影响[J].轻工学报,2021,36(5):34-41.

[35] 王晓敏,史冠莹,杨慧,等.河南不同产地香椿基本成分及风味物质分析[J].食品科学,2017,38(18):144-149.

[36] DENG S Y,LIU Y H,HUANG F,et al. Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357, Article: 129765.