



食品工业科技

Science and Technology of Food Industry

ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS



《食品工业科技》网络首发论文

题目: 基于电子鼻和顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同干燥方式对羊肚菌挥发性化合物的影响

作者: 孙海澜, 裴龙英, 陈瑶, 袁荣欣, 陈潇, 赵立艳

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050088

网络首发日期: 2023-09-05

引用格式: 孙海澜, 裴龙英, 陈瑶, 袁荣欣, 陈潇, 赵立艳. 基于电子鼻和顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同干燥方式对羊肚菌挥发性化合物的影响[J/OL]. 食品工业科技. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050088>



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。

作者简介: 孙海澜 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与化学, E-mail: 2020108074@stu.njau.edu.cn。

*通讯作者: 赵立艳 (1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食用菌保鲜与加工、食品中功能成分的高效制备及其活性评价、食品加工过程中风味物质的变化, E-mail: zhlychen@njau.edu.cn。

基金项目: 2022 年度中央引导地方科技发展专项资金项目: 南疆羊肚菌产业升级关键技术研究示范 (ZY2022C03)。

基于电子鼻和顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同干燥方式对羊肚菌挥发性化合物的影响

孙海澜¹, 裴龙英², 陈瑶¹, 袁荣欣¹, 陈潇¹, 赵立艳^{1,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;

2.新疆理工学院食品科学与工程学院, 新疆阿克苏 843100)

摘要: 为探究不同干燥处理前后羊肚菌挥发性化合物的变化, 采用电子鼻结合顶空气相色谱-离子迁移谱 (headspace gas chromatography-ion mobility spectroscopy, HS-GC-IMS) 技术对新鲜、真空冷冻干燥和热风干燥羊肚菌的菌伞和菌柄中挥发性气味化合物进行比较分析。结果表明: 电子鼻数据结合主成分分析 (principal component analysis, PCA) 发现干燥前后不同羊肚菌样品在气味轮廓上存在差异。通过 HS-GC-IMS 分析检测出 41 种挥发性气味物质, 其中新鲜羊肚菌中醇类 (40.02%~50.76%)、酯类 (15.82%~25.66%) 和醛类 (18.24%~20.33%) 化合物相对含量丰富。经不同干燥处理后, 新鲜羊肚菌中醇类化合物损失了 27.39%~33.51%; 酯类化合物损失了 62.14%~68.51%, 而酮类和吡嗪类化合物总含量显著增加 ($P<0.05$)。此外, 相同干燥方式下羊肚菌菌伞中酯类和醛类化合物显著高于菌柄 ($P<0.05$)。根据相对气味活度 (Relative odor activity value, ROAV) 分析鉴定出 21 种对样品具有气味贡献的化合物。其中新鲜样品中有 6 种关键气味化合物包括 1-辛烯-3-醇、庚醛、丙醛、2-辛酮、乙酸异戊酯和二甲基硫醚, 可赋予羊肚菌蘑菇味、果香和酯香味, 干燥样品中增加了苯甲醛、己醛和 2,3-戊二酮 3 种关键气味化合物。研究结果可为今后羊肚菌干燥方式的选择和深加工产品的开发提供理论依据。

关键词: 羊肚菌; 真空冷冻干燥; 热风干燥; 电子鼻; 挥发性风味化合物; 顶空气相色谱-离子迁移谱 (HS-GC-IMS)

Analysis the Effects of Different Drying Methods on the Volatile Compounds in *Morchella esculenta* based on Electronic nose and Headspace Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry

SUN Hai-lan¹, PEI Long-ying², CHEN Yao¹, YUAN Rong-xin¹, CHEN Xiao¹, ZHAO Li-yan^{1,*}

(1.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2.College of Food Science and Technology, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China)

Abstract: To explore volatile variations of *Morchella esculenta* upon drying treatments, volatile compounds of fresh, vacuum freeze-dried and hot air-dried *Morchella esculenta* from two sampling parts (the pileus and stipe) were compared and analyzed by electronic nose combined with headspace gas chromatography-ion mobility spectroscopy (HS-GC-IMS) techniques. The principal component analysis (PCA) of electronic nose data showed that the drying treatment significantly changed the volatile profiles of *Morchella esculenta* regardless of the sampling parts. The HS-GC-IMS analysis yielded a total of 41 volatile flavor compounds, and abundant amounts of alcohols (40.02%~50.76%), esters (15.82%~25.66%), and aldehydes (18.24%~20.33%) were observed for the fresh sample. Moreover, the drying treatment induced the losses of alcohols and esters in fresh *Morchella esculenta*, i.e., 27.39%~33.51% and 62.14%~68.51%, respectively, while the total contents of ketones and pyrazines increased significantly ($P < 0.05$). Besides, the pileus sample was present with significantly ($P < 0.05$) higher contents of esters and aldehydes than the stipe sample under the same drying treatment. A total of 21 compounds were tentatively identified as key odorants according to relative odor activity value (ROAV) analysis. Among them, 6 compounds were detected from the fresh samples, including 1-octen-3-ol, heptanal, propionaldehyde, 2-octanone, isoamyl acetate, and dimethyl sulfide, which would contribute to mushroom, fruity and ester notes. Three key odorants, i.e., benzaldehyde, hexanal and 2,3-pentanedione, were only present in the *Morchella esculenta* sample after drying treatments. This study provides a theoretical basis for the selection of optimal drying methods to prepare dried *Morchella esculenta* and for the development of deep-processed *Morchella esculenta* products.

Key words: *Morchella esculenta*; vacuum freeze-drying; hot air-drying; electronic nose; volatile flavor compounds; headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)

中图分类号: TS201.2 文献标志码: A

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2023050088

羊肚菌 (*Morchella* spp.) 属羊肚菌科 (*Morchellaceae*), 羊肚菌属 (*Morchella*), 由菌伞和菌柄两部分组成, 菌伞表层无规则褶皱形如羊肚, 菌柄呈圆柱状中空, 在我国民间具有麻子菌、羊肚菜、鸡蛋花和狼肚菌等别称^[1]。羊肚菌的生长环境复杂, 在我国的甘肃、湖南、云南、青海、新疆、四川、山西等地均有种植^[2]。近年来, 随着羊肚菌栽培技术的发展和产业链条的完善, 我国羊肚菌栽培面积和栽培产量逐年增长, 发展势头迅猛^[3]。据统计, 2021年我国羊肚菌人工栽培面积已达 24.7 万亩^[4]。作为一种珍贵的药食两用真菌, 羊肚菌质脆可口, 味道鲜美, 同时富含多糖、蛋白质、膳食纤维和多酚等多种营养物质^[5-6], 具有抗氧化^[7]、抗肿瘤^[8]、免疫调节^[9]、降血压^[10]、抗菌消炎^[11]等多种功效, 具有良好的发展前景。

新鲜羊肚菌含水量高、易腐烂变质、不耐贮存, 因此市场上以干羊肚菌流通为主。干燥是羊肚菌主要的初加工技术之一, 其操作便捷成本低, 可在延长产品货架期同时降低运输损失^[12-13]。在现有的研究中, 羊肚菌干燥方式主要为热风干燥和真空冷冻干燥等, 不同的干燥处理方式会对羊肚菌风味产生不同影响^[14], 然而风味也是影响消费者购买产品的主要因素, 因此研究干燥处理对羊肚菌风味影响显得尤为重要。相比较自然风干或晒干等方式, 热风干燥和真空冷冻干燥效率更高, 更适合工业化加工生产。但是, 目前关于不同干燥方式对羊肚菌及羊肚菌不同部位的风味研究较少, 羊肚菌是一种风味独特的食用菌非常适用于调味料产品开发, 比较探究不同干燥方式下羊肚菌不同部位的风味差异可为羊肚菌菌伞和菌柄的分级加工利用提高依据, 促进羊肚菌资源高值化利用和精细化加工, 对羊肚菌产业发展具有重大意义。

电子鼻是一种基于模拟人嗅觉系统来分析样品气味轮廓的仪器,具有操作简单、快速无损的检测特点,但不能实现样品气味的具体定性分析。近年来顶空气相色谱-离子迁移谱(headspace gas chromatography-ion mobility spectroscopy, HS-GC-IMS)技术因前处理简单、灵敏度高、无损和高通量检测等特点,被广泛应用于食品风味分析研究,可实现对样品中具体挥发性化合物的鉴定分析^[15]。

因此本实验以新鲜羊肚菌为研究对象,进行真空冷冻干燥和热风干燥处理,采用电子鼻结合顶空气相色谱-离子迁移谱技术分析不同干燥处理前后菌柄和菌伞的挥发性气味化合物差异,并通过相对气味活度值(Relative odor activity value, ROAV)法分析不同挥发性气味化合物对样品的气味贡献程度,深入了解不同干燥处理对羊肚菌风味品质的影响,以期对羊肚菌精深加工产品的开发利用提供一定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜羊肚菌 产自云南省丽江市永胜县(春季采摘); C₄ ~ C₉ 酮类标准品 上海西格玛奥德里奇贸易有限公司; 实验用水为超纯水。

Millipore-Q 纯水仪 美国 Millipore 公司; DHG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司; PB 602-N 电子天平, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司; JYL-C022E 料理机, 山东省九阳股份有限公司; LyoBeta 15 真空冷冻干燥机 西班牙 Telstar 科技公司; HWS28 型电热恒温水浴锅 上海一恒科技有限公司; PEN3 电子鼻系统, 德国 AIRSENSE 公司; FlavourSpec®风味分析仪 德国 GAS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理

挑选无病虫害、外形饱满的新鲜羊肚菌,去掉表面灰尘及其他杂质,清洗后按菌伞和菌柄分级,并分别切块(1cm×1cm)混匀,取适量用作鲜样备用,新鲜羊肚菌菌伞和菌柄样品分别编号为 XS、XB,其余作干燥处理。

1.2.2 干燥实验

参考张毅航等^[16]方法稍作修改,具体如下。

热风干燥:取适量新鲜羊肚菌菌伞和菌柄块状样品,于 50℃干燥箱中干燥至水分含量低于 12%(羊肚菌干品水分含量的控制参考 GB 7096-2014《食品安全国家标准 食用菌及其制品》中理化指标规定,下同),取出后快速打粉 2 min,并过 80 目筛备用,将经热风干燥的羊肚菌菌伞和菌柄样品分别编号为 RS、RB。

真空冷冻干燥:取适量新鲜羊肚菌菌伞和菌柄样品,预冻后转移至真空冷冻干燥机中,在冷阱温度-50℃和真空度 10 Pa ~ 12 Pa 条件下连续干燥保证样品最终水分含量低于 12%,取出后快速打粉 2 min,并过 80 目筛备用,将经真空冷冻干燥后的羊肚菌菌伞和菌柄样品分别编号为 DS、DB。

1.2.3 电子鼻检测

分别准确称取干重为 0.200 g 不同羊肚菌样品于 20 mL 顶空瓶中,50℃水浴中加热 15 min,取出置于室温下平衡 15 min 后待测。电子鼻测定参数设置^[17]:室温 25℃,传感器自动清洗时间为 180 s,传感器归零时间为 5 s,样品准备时间为 5 s,样品测定时间为 120 s,

样品测定时间间隔为 1 s，进样流量为 300 mL/min，每个样品重复测定 3 次。PEN3 型电子鼻各个传感器的响应物质和灵敏度如表 1 所示。

表 1 PEN3 传感器性能描述

Table 1 Performance descriptions of PEN3 sensor

编号	传感器	响应物质	检测范围 (mL/m ³)
R1	W1C	芳烃化合物	10
R2	W5S	氮氧化物	1
R3	W3C	氨类、芳香型化合物	10
R4	W6S	氢化物	100
R5	W5C	烃类、芳香型化合物	1
R6	W1S	短链烷烃类化合物	100
R7	W1W	硫化物、萜烯类物质	1
R8	W2S	醇、部分芳香族化合物	100
R9	W2W	芳香成分、有机硫化物	1
R10	W3S	长链烷烃类、脂肪族化合物	100

1.2.4 挥发性风味物质的 GC-IMS 检测

1.2.4.1 样品前处理

分别称取研磨充分干重为 0.200 g 的不同羊肚菌样品，置于 20 mL 顶空固相瓶中密封，进行 GC-IMS 检测。

1.2.4.2 HS-GC-IMS 条件

参考 Hou 等^[18]稍作修改。

顶空进样条件：在 50℃下顶空孵化 15 min，转速 350 r/min；在 80℃下进样 500 μL，速度 10 mL/min，不分流模式。

GC-IMS 条件：色谱柱温度为 75℃，载气为高纯氮气（纯度 ≥ 99.999%），载气初始流速为 2 mL/min 保持 2 min；随后在 8 min 内逐步增大流速至 10 mL/min；再在 10 min 内，逐步增大流速至 50 mL/min；在最后 10 min 内，将流速逐步增加至 150 mL/min；IMS 温度为 45℃，漂移气流速为 150 mL/min，分析时间共为 30 min。

1.2.5 相对气味活度值（Relative odor activity value, ROAV）

参考刘登勇等^[19]方法，引入 ROAV 参数来评价各个挥发性风味化合物对样品气味的贡献程度。该参数设定对各个样品气味贡献最大组分的 $ROAV_{stan}=100$ ，其余组分 ROAV 计算如下：

$$ROAV_i \approx \frac{C_{ri}}{C_{rstan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i} \times 100 \quad (1)$$

式中： C_{ri} 为各个挥发性气味化合物的相对含量（%）； T_i 为各个挥发性气味化合物的气味阈值（mg/kg）； C_{rstan} 为对各样品总体气味贡献最大的组分的相对含量（%）； T_{stan} 为对各样品总体气味贡献最大的组分的气味阈值（mg/kg）。

1.3 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件和 Excel 2019 对数据进行统计学分析，采用 Origin 2021 软件对实验结果绘图。利用 Winmuster 分析软件对电子鼻采集到的数据进行 PCA 分析；利用 FlavourSpec®风味分析仪配套的分析软件对 GC-IMS 结果进行分析，利用 GC-IMS 内部的 NIST 数据库和 IMS 数据库，根据气相保留时间和离子迁移时间差异对样品中的挥发性气味成分进行二维定性分析；利用 LAV（Laboratory Analytical Viewer）软件获得的各个已定性挥发性化合物的峰强度，根据峰面积归一法计算样品中各个挥发性气味化合物的相对含量，进行定量分析。

2 结果与分析

2.1 电子鼻分析不同干燥方式下羊肚菌中挥发性化合物

2.1.1 电子鼻雷达图分析

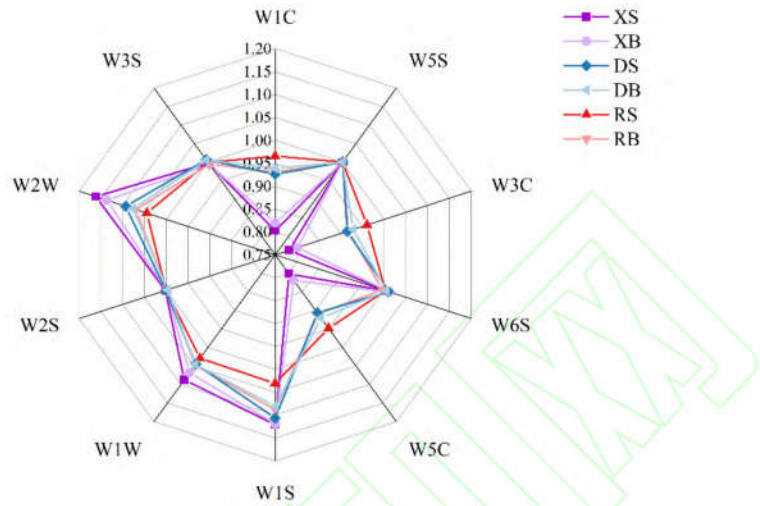


图 1 不同干燥方式下羊肚菌不同部位电子鼻雷达图

Fig. 1 Electronic nose radar map in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods

如图 1 所示, 根据电子鼻传感器对不同干燥方式下羊肚菌不同部位样品的挥发性气味物质的响应值大小绘制出雷达图。由图 1 可知, 各组样品对 W5S、W6S、W2S、W3S 这 4 个传感器的响应值差别较小, 难以区分。在 W1S、W1W、W2W 这 3 个传感器上, 新鲜羊肚菌样品的响应值最大且均大于干燥后羊肚菌样品的响应值, 说明新鲜羊肚菌样品中可能含有更多的烷类、硫化物、萜烯等挥发性气味物质, 此外新鲜羊肚菌菌伞的响应值也要高于菌柄; 而在 W2W 传感器上, 真空冷冻干燥样品的响应值大于热风干燥, 说明相比较热风干燥, 真空冷冻干燥更能保留新鲜羊肚菌样品中的芳烃化合物或含硫类化合物。在 W1C、W3C、W5C 这 3 个传感器上, 热风干燥和真空冷冻干燥羊肚菌样品的响应值明显大于新鲜羊肚菌样品, 且热风干燥羊肚菌菌伞样品的响应值均最大, 推测可能干燥后羊肚菌样品中的烯烃和芳香类化合物的含量升高。王永伦等^[20]探究了自然干燥、冷冻干燥和热风干燥三种方式下真姬菇的电子鼻气味轮廓差异, 发现不同干燥方式下气味轮廓相似, 但不同干燥方式下干燥样品的传感器响应值差异明显, 其中自然干燥后样品中 W5S 和 W1W 传感器响应值最低, 热风干燥和真空冷冻干燥样品相对接近, 这是因为自然干燥在长时间的光照下影响了挥发性气味化合物的形成。然而仅从传感器响应值大小很难区分不同干燥样品, 需要进一步处理传感器信号值, 探究不同样品的内在差异。

2.1.2 电子鼻 PCA 分析

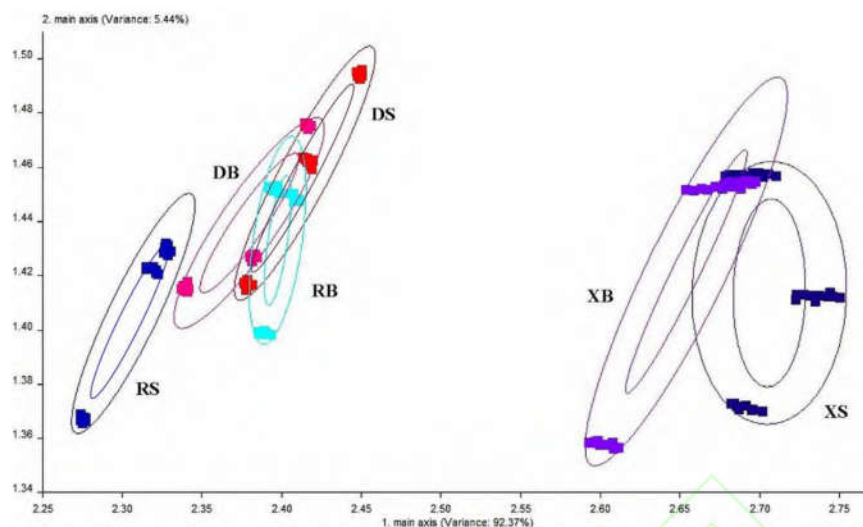


图 2 不同干燥方式下羊肚菌不同部位电子鼻 PCA 得分图

Fig. 2 PCA score plot of electronic nose data in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 是一种有效的降维方式, 能够最大限度保留原始数据信息, 并对观测值进行重新分组。为进一步评价不同干燥方式下羊肚菌不同部位样品间的差异, 基于电子鼻传感器数值进行了主成分分析, 如图 2 所示。由图 2 可知, 第一主成分 (PC1) 和第二主成分 (PC2) 的累计贡献率为 97.81% ($> 85\%$), 说明实验方法可行且两种主成分包括羊肚菌样品挥发性气味化合物的大部分信息^[15]。新鲜羊肚菌样品与干燥处理羊肚菌样品在 PC1 上距离较大, 说明干燥后羊肚菌电子鼻气味轮廓变化明显, 电子鼻检测可明显区分干燥前后羊肚菌样品。而真空冷冻干燥菌伞样品与新鲜羊肚菌样品间的距离最近, 说明真空冷冻干燥样品的气味化合物与新鲜样品最为接近, 相比热风干燥, 真空冷冻干燥有利于保留新鲜羊肚菌样品的原有气味化合物, 这与孟令帅等^[21]人研究真空冷冻干燥、热风干燥和微波干燥 3 种干燥方式对竹荪的香气品质影响的结论相一致, 真空冷冻干燥对竹荪样品的风味影响最小。热风干燥和真空冷冻干燥的菌伞样品之间能够明显区分, 而两种干燥方式下菌柄样品之间有一定的重合, 区分度较低。

值得注意的是, 电子鼻检测分析仅能够得到各组样品的整体气味轮廓, 可以说明不同干燥方式下羊肚菌不同部位样品间的挥发性气味化合物存在差异, 但是不能具体到确定化合物^[22]。因此本研究进一步采用了 HS-GC-IMS 技术分析了不同干燥方式下羊肚菌样品中具体的挥发性化合物。

2.2 HS-GC-IMS 分析不同干燥方式下羊肚菌中挥发性化合物

2.2.1 不同干燥方式下羊肚菌挥发性化合物 GC-IMS 差异对比图谱分析

如图 3 所示, 利用 Reporter 插件绘制不同羊肚菌样品中挥发性化合物的气相色谱离子迁移谱差异图。图 3 中横坐标为离子迁移时间、纵坐标为气相色谱保留时间, 1.0 处为 RIP 峰, 峰的右侧每一个光斑代表一种挥发性化合物, 光斑亮度大小表示物质含量的多少^[23]。如图 3 所示, 以新鲜羊肚菌菌伞样品为对照, 其余样品谱图对相同的物质做颜色抵消, 如果某个物质含量高于对照组则显现红色, 低于对照组则显现蓝色。由图 3 可知, 相比较对照组 (新鲜羊肚菌菌伞样品) 干燥后羊肚菌样品中出现红色和蓝色区域, 说明不同干燥处理对羊肚菌挥发性气味化合物的组成和含量影响明显, 干燥后损失了部分化合物, 同时长时间的干燥处理也促进了部分挥发性气味化合物的生成^[24]。值得注意的是, 新鲜羊肚菌菌柄样品与菌

伞样品之间也存在较大差异,而热风干燥和真空冷冻干燥两种方式下挥发性化合物组成较为接近,这与电子鼻结果一致。

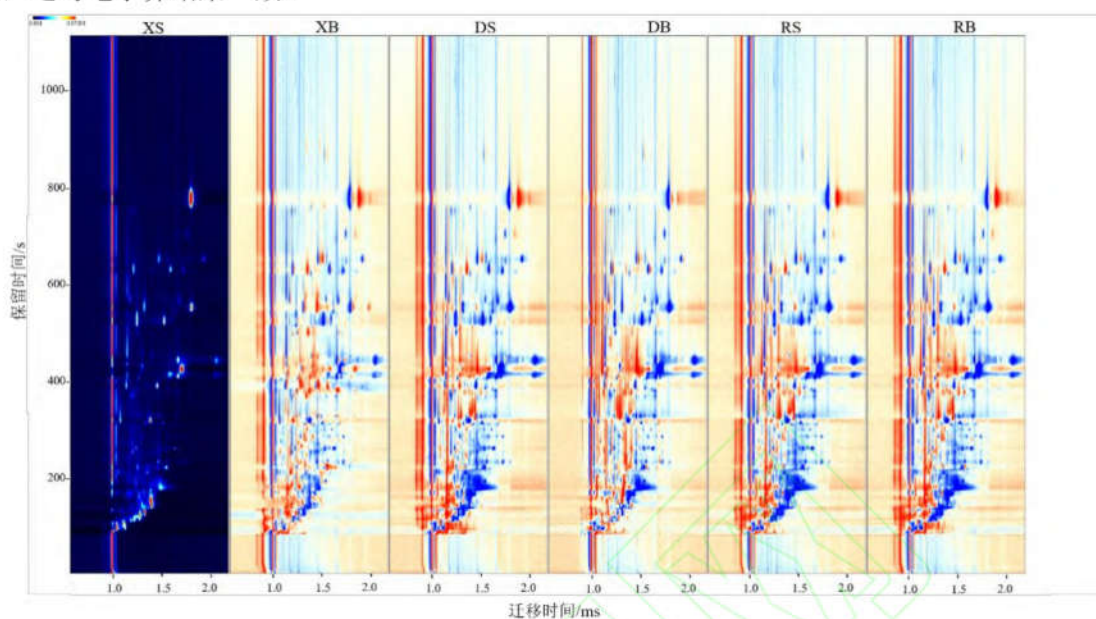


图3 不同干燥方式下羊肚菌不同部位中挥发性化合物的GC-IMS差异对比图谱

Fig. 3 GC-IMS difference comparison maps of volatile compounds in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods

2.2.2 不同干燥方式下羊肚菌中挥发性风味化合物指纹图谱分析

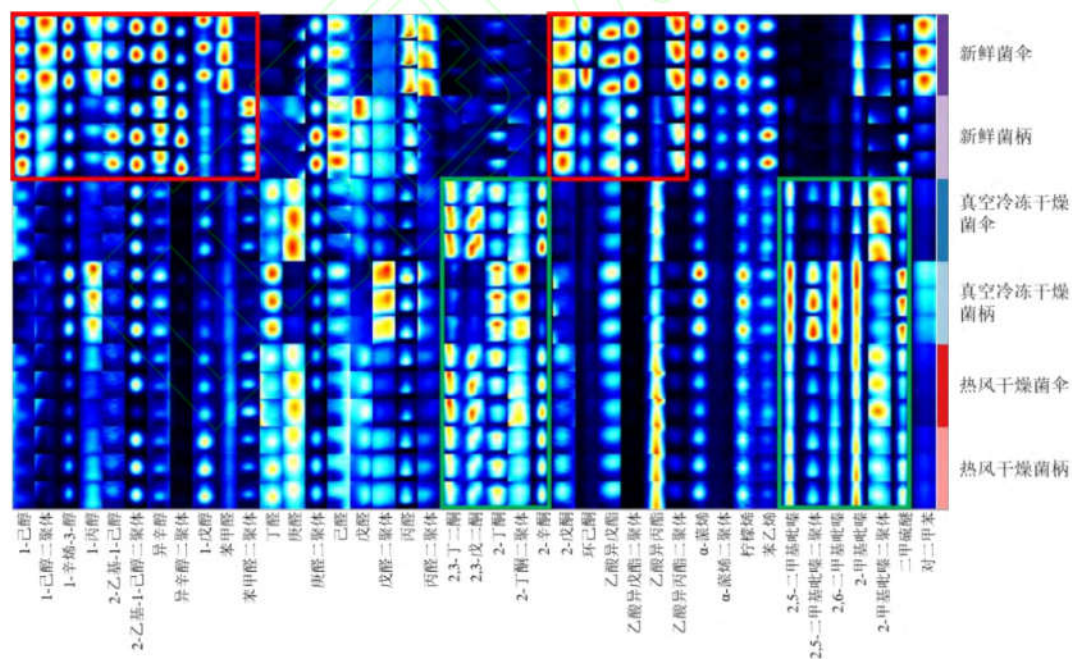


图4 不同干燥方式下羊肚菌不同部位中挥发性化合物的GC-IMS检出成分指纹图谱

Fig. 4 Fingerprints of volatile flavor compounds in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods by GC-IMS

利用 GC-IMS 内部的 NIST 数据库和 IMS 数据库对样品中的挥发性气味成分进行二维定性分析,其中包括部分高浓度的气味化合物的二聚体组分,利用单体和二聚体可更加精准

定性化合物^[25]。以定性后二维谱图的峰信号利用 Gallery 插件绘制出不同干燥方式下羊肚菌样品中挥发性气味化合物的指纹图谱，其中每一行代表一个样品，每一列对应一种挥发性化合物，每个光斑代表一种化合物，光斑颜色由红到蓝代表其含量由高到低。从指纹图谱中可以更好看出样品间挥发性气味化合物的差异，由图 4 可知，经过干燥处理后，新鲜羊肚菌中有 9 种醇类化合物、4 种酯类、2 种醛类和 2 种酮类化合物含量明显减少（图 4 中红色框区域）。这与张毅航等^[15]研究结果相一致，经过热风 and 冷冻干燥处理后猴头菇菌盖和菌柄中的醇类和醛类化合物损失较多。与新鲜羊肚菌样品相比，经真空冷冻干燥和热风干燥后有 11 种挥发性化合物含量明显增加（图 4 中绿色框区域），主要为酮类、吡嗪类化合物。葛帅等^[26]研究干燥方式对小米辣风味影响也有类似发现，其中热风干燥和红外干燥后小米椒中 2,6-二甲基-4-庚酮和 2,5-二甲基吡嗪等酮类和吡嗪类化合物含量增加。这可能是由于热风干燥较高温度的环境促进了美拉德反应生成风味物质。此外，两种干羊肚菌菌伞和菌柄挥发性化合物指纹图谱的变化趋势一致。

2.2.3 不同干燥方式下羊肚菌中挥发性风味化合物定性分析

表 2 不同干燥方式下羊肚菌不同部位中挥发性化合物的组成及相对含量
Table 2 The composition and relative content of volatile compounds in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods

类别	化合物	CAS 号	分子式	相对含量 (%)					
				新鲜菌伞	新鲜菌柄	真空冷冻干燥菌伞	真空冷冻干燥菌柄	热风干燥菌伞	热风干燥菌柄
醇类	1-己醇	111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	1.56±0.02 ^c	2.02±0.03 ^a	1.67±0.04 ^b	0.64±0.01 ^f	1.21±0.02 ^d	0.81±0.01 ^e
	1-己醇二聚体	111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	2.57±0.02 ^a	1.82±0.01 ^b	0.84±0.01 ^e	0.97±0.02 ^d	1.02±0.01 ^c	0.74±0.01 ^f
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	C ₈ H ₁₆ O	2.80±0.02 ^a	1.76±0.01 ^c	1.49±0.12 ^d	2.44±0.12 ^b	1.42±0.02 ^d	1.51±0.12 ^d
	1-丙醇	71-23-8	C ₃ H ₈ O	0.66±0.05 ^b	0.33±0.00 ^d	0.30±0.00 ^d	0.79±0.01 ^a	0.39±0.00 ^c	0.39±0.00 ^c
	异辛醇	104-76-7	C ₈ H ₁₈ O	0.62±0.02 ^a	0.64±0.02 ^a	0.42±0.01 ^c	0.41±0.00 ^{cd}	0.44±0.02 ^c	0.48±0.00 ^b
	异辛醇二聚体	104-76-7	C ₈ H ₁₈ O	23.31±0.23 ^d	29.38±0.65 ^a	27.72±0.53 ^b	25.46±0.32 ^c	20.28±0.43 ^e	25.82±0.56 ^c
	2-己烯-1-醇	2305-21-7	C ₆ H ₁₂ O	3.35±0.02 ^a	3.55±0.08 ^a	1.86±0.01 ^d	2.13±0.12 ^b	2.05±0.29 ^{bc}	1.77±0.12 ^d
	2-己烯-1-醇二聚体	2305-21-7	C ₆ H ₁₂ O	4.16±0.02 ^b	10.51±0.17 ^a	0.76±0.02 ^e	1.06±0.01 ^d	1.25±0.01 ^c	0.96±0.02 ^d
	1-戊醇	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	0.99±0.02 ^b	0.76±0.01 ^c	1.02±0.01 ^b	0.44±0.00 ^d	0.99±0.03 ^b	1.26±0.10 ^a
合计				40.02±0.40 ^b	50.76±0.98 ^a	36.07±0.75 ^c	34.34±0.61 ^c	29.06±0.83 ^d	33.75±0.94 ^c
醛类	苯甲醛	100-52-7	C ₇ H ₆ O	5.17±0.02 ^a	1.29±0.06 ^e	2.68±0.21 ^c	2.02±0.02 ^d	3.60±0.02 ^b	2.58±0.15 ^c
	苯甲醛二聚体	100-52-7	C ₇ H ₆ O	0.41±0.00 ^e	2.45±0.12 ^a	1.16±0.03 ^c	0.59±0.01 ^d	1.61±0.01 ^b	1.06±0.08 ^c
	丁醛	123-72-8	C ₄ H ₈ O	0.08±0.00 ^e	0.08±0.00 ^e	0.28±0.00 ^d	0.47±0.01 ^a	0.37±0.00 ^b	0.34±0.00 ^c
	庚醛	111-71-7	C ₇ H ₁₄ O	0.36±0.00 ^e	0.48±0.01 ^d	1.81±0.08 ^a	0.34±0.00 ^e	1.64±0.01 ^b	1.22±0.09 ^c
	庚醛二聚体	111-71-7	C ₇ H ₁₄ O	3.00±0.00 ^d	5.66±0.17 ^a	4.49±0.12 ^b	3.12±0.01 ^d	3.01±0.03 ^d	4.27±0.15 ^c
	己醛	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	0.20±0.01 ^d	0.30±0.00 ^c	0.29±0.00 ^c	0.21±0.00 ^d	0.41±0.00 ^a	0.35±0.00 ^b
	戊醛	110-62-3	C ₅ H ₁₀ O	0.31±0.00	1.09±0.01	0.97±0.01	0.25±0.00	1.02±0.01	0.72±0.03
	戊醛二聚体	110-62-3	C ₅ H ₁₀ O	0.23±0.00 ^f	0.43±0.01 ^c	0.65±0.00 ^c	1.41±0.01 ^a	0.59±0.02 ^d	0.82±0.01 ^b
	丙醛	123-38-6	C ₃ H ₆ O	8.01±0.14 ^a	5.77±0.16 ^b	3.50±0.01 ^c	4.63±0.08 ^c	4.50±0.21 ^d	4.78±0.14 ^c
	丙醛二聚体	123-38-6	C ₃ H ₆ O	2.57±0.08 ^a	0.69±0.00 ^d	0.90±0.01 ^d	1.36±0.03 ^b	1.14±0.08 ^c	1.11±0.01 ^c
合计				20.33±0.25 ^a	18.24±0.54 ^b	16.73±0.47 ^d	14.39±0.17 ^a	17.89±0.39 ^b	17.26±0.66 ^b
酮类	2,3-丁二酮	43-103-8	C ₄ H ₆ O ₂	0.35±0.00 ^f	0.86±0.01 ^c	6.84±0.31 ^a	2.17±0.01 ^d	6.28±0.35 ^b	5.04±0.01 ^c
	2,3-戊二酮	600-14-6	C ₅ H ₈ O ₂	0.26±0.00 ^e	0.38±0.01 ^{de}	3.30±0.07 ^a	0.49±0.00 ^d	2.77±0.18 ^b	1.96±0.06 ^c
	2-丁酮	78-93-3	C ₄ H ₈ O	0.49±0.01 ^e	0.70±0.02 ^d	1.84±0.04 ^c	2.62±0.04 ^a	2.05±0.04 ^b	2.13±0.10 ^b
	2-丁酮二聚体	78-93-3	C ₄ H ₈ O	0.21±0.00 ^f	0.30±0.00 ^e	0.87±0.01 ^c	1.12±0.01 ^a	1.10±0.01 ^b	0.70±0.01 ^d

	2-辛酮	111-13-7	C ₈ H ₁₆ O	0.53±0.00 ^f	2.43±0.21 ^d	5.63±0.31 ^a	1.45±0.02 ^e	5.02±0.08 ^b	4.21±0.12 ^c
	2-戊酮	107-87-9	C ₅ H ₁₀ O	0.32±0.01 ^a	0.29±0.00 ^b	0.10±0.00 ^f	0.13±0.00 ^e	0.18±0.00 ^d	0.19±0.00 ^c
	环己酮	108-94-1	C ₆ H ₁₀ O	1.73±0.02 ^a	0.93±0.01 ^b	0.51±0.01 ^c	0.29±0.00 ^f	0.49±0.00 ^d	0.37±0.00 ^e
合计				3.89±0.04 ^f	5.87±0.26 ^e	19.08±0.75 ^a	8.26±0.08 ^d	17.89±0.64 ^b	14.59±0.30 ^c
酯类	乙酸异戊酯	123-92-2	C ₇ H ₁₄ O ₂	0.57±0.00 ^b	0.52±0.00 ^d	0.52±0.01 ^d	0.54±0.00 ^c	0.59±0.00 ^a	0.52±0.01 ^d
	乙酸异戊酯二聚体	123-92-2	C ₇ H ₁₄ O ₂	16.95±0.52 ^a	8.74±0.21 ^b	1.05±0.04 ^c	0.45±0.01 ^d	0.82±0.01 ^{cd}	0.46±0.01 ^d
	乙酸异丙酯	108-21-4	C ₅ H ₁₀ O ₂	0.90±0.02 ^f	1.49±0.00 ^c	5.76±0.16 ^c	3.85±0.02 ^d	7.19±0.23 ^a	6.70±0.21 ^b
	乙酸异丙酯二聚体	108-21-4	C ₅ H ₁₀ O ₂	7.24±0.12 ^a	5.07±0.19 ^b	0.75±0.00	1.15±0.02 ^d	1.28±0.03 ^d	1.57±0.04 ^c
合计				25.66±0.66 ^a	15.82±0.40 ^b	8.08±0.21 ^c	5.99±0.05 ^f	9.88±0.27 ^c	9.24±0.27 ^d
烯炔类	α-蒎烯	80-56-8	C ₁₀ H ₁₆	1.36±0.08 ^b	1.11±0.01 ^d	1.20±0.01 ^c	1.82±0.01 ^a	1.24±0.02 ^c	1.26±0.07 ^c
	α-蒎烯二聚体	80-56-8	C ₁₀ H ₁₆	1.62±0.02 ^a	0.96±0.03 ^b	0.48±0.03 ^c	0.59±0.03 ^c	0.54±0.01 ^d	0.43±0.01 ^f
	柠檬烯	138-86-3	C ₁₀ H ₁₆	0.68±0.01 ^c	0.49±0.00 ^f	0.62±0.00 ^d	0.84±0.04 ^a	0.72±0.01 ^b	0.64±0.00 ^d
	苯乙烯	100-42-5	C ₈ H ₈	0.83±0.02 ^d	1.19±0.0 ^a	1.15±0.01 ^b	0.80±0.01 ^c	0.90±0.01 ^c	0.71±0.01 ^f
合计				4.49±0.13 ^a	3.76±0.05 ^c	3.45±0.05 ^d	4.05±0.09 ^b	3.39±0.05 ^d	3.03±0.09 ^e
吡嗪类	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	C ₆ H ₈ N ₂	0.28±0.00 ^d	0.50±0.00 ^d	2.55±0.06 ^c	4.13±0.26 ^a	3.34±0.12 ^b	3.31±0.11 ^b
	2,5-二甲基吡嗪二聚体	123-32-0	C ₆ H ₈ N ₂	0.40±0.00 ^f	0.77±0.01 ^c	3.35±0.04 ^d	12.07±0.45 ^a	5.41±0.15 ^c	5.94±0.12 ^b
	2,6-二甲基吡嗪	108-50-9	C ₆ H ₈ N ₂	0.59±0.02 ^c	0.88±0.01 ^d	3.01±0.18 ^c	6.73±0.18 ^a	4.11±0.11 ^b	4.16±0.09 ^b
	2-甲基吡嗪	109-08-0	C ₅ H ₆ N ₂	2.04±0.04 ^d	0.79±0.01 ^c	2.32±0.05 ^c	3.63±0.14 ^a	3.54±0.14 ^a	3.33±0.12 ^b
	2-甲基吡嗪二聚体	109-08-0	C ₅ H ₆ N ₂	0.29±0.00 ^c	0.19±0.00 ^f	1.53±0.01 ^a	0.62±0.01 ^d	1.22±0.01 ^b	0.81±0.02 ^c
合计				3.59±0.06 ^d	3.14±0.03 ^c	12.76±0.34 ^c	27.18±1.14 ^a	17.62±0.53 ^b	17.55±0.46 ^b
其他类	二甲基硫醚	75-18-3	C ₂ H ₆ S	1.11±0.02 ^f	2.14±0.02 ^c	3.64±0.07 ^d	5.34±0.34 ^a	4.06±0.11 ^c	4.36±0.08 ^b
	对二甲苯	106-42-3	C ₈ H ₁₀	0.91±0.01 ^a	0.27±0.00 ^c	0.19±0.00 ^e	0.45±0.01 ^b	0.20±0.00 ^e	0.22±0.00 ^d
合计				2.02±0.03 ^f	2.41±0.02 ^c	3.83±0.07 ^d	5.79±0.35 ^a	4.26±0.11 ^c	4.58±0.09 ^b

如表 2 所示,利用自带分析软件 LAV (Laboratory Analytical Viewer) 获得的各个已定性挥发性化合物的峰强度,根据峰面积归一法计算样品中各个挥发性气味化合物的相对含量^[27-28]。由表 2 可知,经 GC-IMS 共鉴定出羊肚菌中 41 种挥发性风味物质,包括 9 种醇类、10 种醛类、7 种酮类、4 种酯类、4 种烯类、5 种吡嗪类、1 种含硫化合物和 1 种芳香烷烃类。新鲜羊肚菌菌伞和菌柄样品中,醇类含量最高,其次为酯类和醛类,占总挥发性化合物的 86.01%和 84.82%。干燥后,醇类和酯类化合物总含量显著降低 ($P<0.05$),酮类和吡嗪类化合物总含量显著提高 ($P<0.05$)。

经两种干燥处理后,羊肚菌中挥发性气味化合物的含量和组成发生显著变化。其中醇类化合物在各个羊肚菌样品中含量丰富,尤其是新鲜羊肚菌菌伞和菌柄样品中。其中异辛醇和 1-辛烯-3-醇是八碳类化合物,这类物质被认为是食用菌特色“蘑菇”气味的主要贡献者^[29],经过干燥后其含量降低,说明干燥处理会对羊肚菌中部分醇类风味物质含量造成损失,其中真空冷冻干燥对醇类化合物的保留略优于热风干燥,这与张毅航等^[15]研究热风干燥和真空冷冻干燥对猴头菇风味物质影响结果相一致。

醛类化合物阈值较低,对羊肚菌风味贡献较大,通常 C₅~C₉ 醛类化合物主要来自于不饱和脂肪酸的氧化反应^[30]。醛类的挥发性强但热稳定性差,经过干燥处理后丙醛的含量明显降低;苯甲醛(苦杏仁和麦芽味)和庚醛(果香味)等含量大幅增加,亚油酸的氧化和异亮氨酸参与的美拉德反应可产生苯甲醛^[31]。

酮类挥发性化合物常具有果香味,相比新鲜羊肚菌样品,经过干燥处理后羊肚菌中酮类化合物总含量大幅增加。热风干燥样品中 2,3-丁二酮、2-辛酮和 2,3-戊二酮等酮类化合物的含量明显高于真空冷冻干燥的样品,可能的原因是高温条件下更容易发生脂类和醛类物质的

氧化，从而形成酮类挥发性化合物，这类物质具有果香味且阈值较低^[32]。

酯类挥发性化合物常具有果香和花香味，一般由醇和有机酸的非酶催化或微生物的酶促催化反应产生^[33]。新鲜羊肚菌中富含乙酸异丙酯和乙酸异戊酯，且菌伞中含量高于菌柄，经两种干燥处理后酯类化合物含量大大减少。

烯烃类挥发性化合物常易氧化分解产生烷烃、醇类等化合物，干燥后羊肚菌烯烃类化合物总含量下降。其中 α -蒎烯（松香味）在真空冷冻干燥的样品中的含量要高于热风干燥的样品，这可能是因为烯烃类化合物在热风干燥处理中受热易与酸发生水合反应造成损失，故在冻干样品中保存较好^[34]，这一结果也与电子鼻结果相对应。

一般而言，吡嗪类化合物常具有坚果和烤香味，可由美拉德反应或微生物代谢产生^[35]，干燥后羊肚菌中 2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪等的含量均上升，可能是干燥过程中加热促进了吡嗪类物质转化。此外，本研究在羊肚菌中还检测到一种含硫化合物（二甲基硫醚），经干燥后其含量上升，含硫化合物常可通过含硫氨基酸经美拉德反应中 Strecker 降解或微生物代谢产生^[36]。

2.2.4 不同干燥方式下羊肚菌中关键性风味化合物分析

表 3 不同干燥方式下羊肚菌不同部位中挥发性化合物的 ROAV 值和香气描述
Table 3 The ROAV value and odor description of volatile compounds in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods

序号	化合物	阈值 ^a (mg/kg)	ROAV						香气描述 ^b
			新鲜菌伞	新鲜菌柄	真空冷冻 干燥菌伞	真空冷冻 干燥菌柄	热风干燥 菌伞	热风干燥 菌柄	
1	1-辛烯-3-醇	0.0015	21.31	25.34	100.00	100.00	100.00	100.00	蘑菇味
2	2-己烯-1-醇	2	0.04	0.15	0.13	0.10	0.17	0.14	果香味
3	苯甲醛	0.3	0.21	0.27	1.29	0.53	1.83	1.21	苦杏仁味、麦芽味
4	丁醛	0.0562	0.02	0.03	0.50	0.51	0.70	0.60	麦芽、巧克力味
5	庚醛	0.031	1.24	4.28	20.46	6.86	15.85	17.59	果香味
6	己醛	0.0075	0.30	0.86	3.89	1.72	5.77	4.64	苹果味
7	戊醛	0.2	0.03	0.16	0.82	0.51	0.85	0.76	果香、坚果味
8	丙醛	0.06	2.01	2.33	7.38	6.14	9.93	9.75	坚果、葡萄味
9	2,3-丁二酮	3	0.00	0.01	0.23	0.04	0.22	0.17	酯香、黄油味
10	2,3-戊二酮	0.02	0.15	0.41	16.61	1.51	14.63	9.74	黄油、果香味
11	2-丁酮	0.4	0.02	0.05	0.68	0.57	0.83	0.70	丙酮、果香味
12	2-辛酮	0.05	0.12	1.05	11.34	1.78	10.61	8.36	奶香味
13	2-戊酮	0.09	0.04	0.07	0.11	0.09	0.21	0.21	木香、香蕉味
14	乙酸异戊酯	0.002	100.00	100.00	79.03	30.43	74.47	48.68	香蕉、果香味
15	乙酸异丙酯	1.7	0.05	0.08	0.39	0.18	0.53	0.48	苹果、果香味
16	α -蒎烯	1.0138	0.03	0.04	0.17	0.15	0.19	0.17	松木香、草本味
17	柠檬烯	0.5	0.02	0.02	0.12	0.10	0.15	0.13	果香味
18	苯乙烯	0.12	0.08	0.21	0.96	0.41	0.79	0.59	芳香味
19	2,5-二甲基吡嗪	1.75	0.00	0.02	0.34	0.57	0.53	0.53	土豆、坚果味
20	2,6-二甲基吡嗪	0.718	0.01	0.03	0.42	0.58	0.60	0.58	可可、坚果味
21	二甲基硫醚	0.01	1.27	4.62	36.64	32.83	42.89	43.31	洋葱味

注：^a 各个挥发性气味化合物在水中对应的气味阈值^[37]；^b 气味特征描述参考来源

<http://www.thegoodscentscompany.com/>

各个挥发性化合物能被感知到的最低浓度称为“气味阈值”，挥发性化合物对样品气味

的贡献程度不仅与其含量有关，还与其阈值有关。因此，为了进一步了解不同干燥处理前后羊肚菌的关键气味化合物，采用相对气味活度值（ROAV）评价各个挥发性化合物对样品整体气味形成的贡献程度， $ROAV \geq 1$ 说明该物质为关键气味成分，对羊肚菌样品整体气味贡献度大； $0.1 \leq ROAV < 1$ ，说明该物质为修饰性气味化合物，对羊肚菌整体气味起修饰作用^[38]。表 3 为各个样品中计算 $ROAV \geq 0.1$ 的挥发性化合物和香气描述。如表 3 所示，羊肚菌样品中共有 21 种化合物的 $ROAV \geq 0.1$ ，对样品香气具有贡献作用。干燥前后样品中 ROAV 值存在较大变化，其中新鲜羊肚菌样品中有 6 种挥发性气味化合物 $ROAV \geq 1$ ；干燥后羊肚菌样品中有 9 种挥发性气味化合物 $ROAV \geq 1$ ，经两种干燥处理后，新产生了苯甲醛、己醛和 2,3-戊二酮 3 种关键气味化合物，据报道苯甲醛具有苦杏仁味和麦芽味，己醛具有苹果味，2,3-戊二酮具有黄油和果香味，推测其可能是干燥后赋予羊肚菌更浓厚的气味来源^[19]。干燥前后样品中有 6 种共同关键气味化合物，分别为 1-辛烯-3-醇、庚醛、丙醛、2-辛酮、乙酸异戊酯和二甲基硫醚，其中“1-辛烯-3-醇”是赋予羊肚菌典型蘑菇味的来源，同时其他的醛、酮和酯类等挥发性化合物具有果香和酯香味，这些关键化合物之间的相互作用共同组成了羊肚菌独特的香气。值得注意的是，乙酸异戊酯的 ROAV 值在干燥处理后大幅度下降，而二甲基硫醚、1-辛烯-3-醇、2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪等 ROAV 值明显增大，说明经过真空冷冻干燥和热风干燥后可能损失了部分酯香味，但同时洋葱味、蘑菇味、坚果和焦香味的贡献更大。此外，羊肚菌的菌伞和菌柄的关键气味化合物的气味贡献度存在差异，两种干燥处理后菌伞中关键气味化合物的 ROAV 值均高于对应菌柄的 ROAV 值，这也与之前菌伞中较高的物质含量相对应。

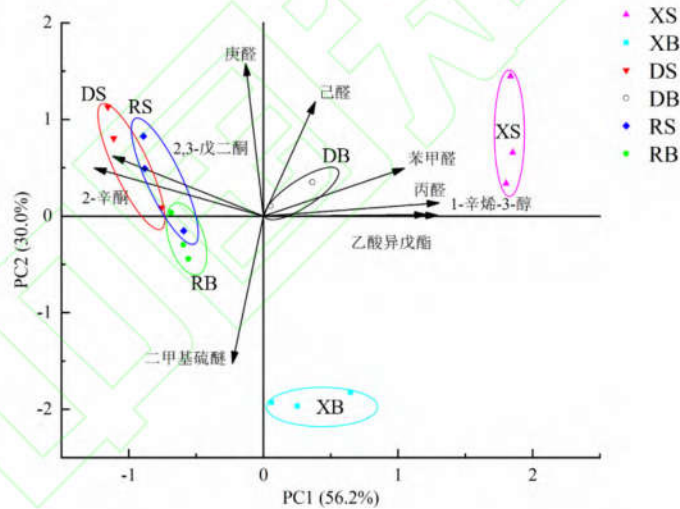


图 5 不同干燥方式下羊肚菌不同部位中关键风味化合物的 PCA 双标图

Fig. 5 Biplot of PCA of key volatile flavor compounds in different parts of *Morchella esculenta* under different drying methods

根据上述分析得到的不同干燥方式下羊肚菌样品中 9 种关键气味化合物的相对含量进行 PCA 分析，结果如图 5 所示。由图 5 可知，PC1 的贡献率为 56.2%，PC2 的贡献率为 30.0%，累计贡献率为 86.2%（ $>85\%$ ），新鲜羊肚菌与干燥后羊肚菌样品能够完整区分开，两种干燥方式后羊肚菌菌柄也可区分，菌伞有部分重叠。新鲜羊肚菌菌伞和菌柄之间差异可归因于二甲基硫醚（洋葱味）；其中 2-辛酮和 2,3-戊二酮是有气味贡献的差异标志物，可将新鲜羊肚菌与热风干燥和真空冷冻干燥的羊肚菌菌伞区分开来。

3 结论

本研究利用电子鼻和 HS-GC-IMS 技术对真空冷冻干燥和热风干燥处理后的羊肚菌菌伞和菌柄的挥发性气味化合物进行分析,发现两种干燥处理前后样品气味存在明显差异,且电子鼻可有效区分干燥前后样品。通过 HS-GC-IMS 分析,不同样品中共检测出 41 种挥发性风味物质,其中新鲜羊肚菌中醇类、酯类和醛类化合物含量丰富,干燥后,醇类和酯类化合物损失,而酮类和吡嗪类化合物总含量显著增加 ($P < 0.05$)。此外,相同干燥方式下羊肚菌菌伞中酯类和醛类化合物显著高于菌柄 ($P < 0.05$)。进一步结合 ROAV 分析共鉴定出 21 种对样品气味有贡献的化合物,其中新鲜羊肚菌样品中有 6 种关键气味化合物包括 1-辛烯-3-醇、庚醛、丙醛、2-辛酮、乙酸异戊酯和二甲基硫醚,它们赋予羊肚菌典型蘑菇味同时具有果香和酯香味,干燥后样品新增加了苯甲醛、己醛和 2-辛酮 3 种关键气味化合物。

综上,真空冷冻干燥和热风干燥对新鲜羊肚菌的气味特征存在明显影响,真空冷冻干燥更利于保留新鲜羊肚菌样品中的醇类和烯烃类化合物;而热风干燥更利于保留新鲜样品中的酯类化合物,同时有助于促进醛类和酮类化合物生成。在实际生产中可根据需求选择具体干燥方式,但本实验仅探究了单一的干燥方式对羊肚菌风味影响,今后还可以进一步探究真空冷冻干燥联合热风干燥等多种不同联合干燥方式对羊肚菌气味特征的影响。本研究有助于深入了解不同干燥方式处理后羊肚菌风味特征,可为羊肚菌的精细化加工和风味食品的进一步开发利用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 蔡英丽,马晓龙,刘伟. 羊肚菌营养价值与保健功能综述[J]. 食药用菌, 2021, 29(1): 20-27.
[CAI Y L, MA X L, LIU W. Review of nutrition value and health efficacy of *Morel*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2021, 29(1): 20-27.]
- [2] 孙巧弟,张江萍,谢洋洋,等. 羊肚菌营养素、功能成分和保健功能研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 323-328.
[SUN Q D, ZHANG J P, XIE Y Y, et al. Recent progress in research on nutrients, functional components and health benefits of *Morchella esculenta*[J]. Food Science, 2019, 40(5): 323-328.]
- [3] 赵瑞,刘绍雄,马超. 我国羊肚菌产业发展现状及市场分析[J]. 中国食用菌, 2020, 39(2): 7-10.
[ZHAO R, LIU S X, MA C. Current situation and market analysis of *Morchella spp.* industry in China[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(2): 7-10.]
- [4] 刘伟,何培新,时晓菲,等. 我国羊肚菌栽培历程及相关基础研究进展[J]. 食药用菌, 2022, 30(4): 261-270.
[LIU W, HE P X, SHI X F, et al. Cultivation history and related basic research progress of *Morchella* in China[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2022, 30(4): 261-270.]
- [5] 顾可飞,李亚莉,刘海燕,等. 牛肝菌、羊肚菌营养功能特性及利用价值浅析[J]. 食品工业, 2018, 39(5): 287-291.
[GU K F, LI Y L, LIU H Y, et al. Initial analysis on the nutritional and functional properties and utilization of *Bolete* and *Toadstool*[J]. The Food Industry, 2018, 39(5): 287-291.]
- [6] 王艳,翟飞红,赵晓东,等. 羊肚菌功能活性的研究进展[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2023, 22(1): 79-84.
[WANG Y, ZHAI F H, ZHAO X D, et al. Research progress on functional activity of *Morchella*[J]. Journal of Taiyuan Normal University(Natural Science Edition), 2023, 22(1): 79-84.]
- [7] TIETEL Z, MASAPHY S. True morels (*Morchella*)-nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 58(11): 1-14.
- [8] 陈彦,潘见,周丽伟,等. 羊肚菌胞外多糖抗肿瘤作用的研究[J]. 食品科学, 2008, (9): 553-556.
[CHEN Y, PAN J, ZHOU L W, et al. Antitumor activity of extracellular polysaccharides from *Morchella esculenta*[J]. Food Science,

2008, (9): 553-556.]

- [9] HUANG M, ZHANG S, ZHANG M L, et al. Effects of polysaccharides from *Morchella conica* on nitric oxide production in lipopolysaccharide-treated macrophages[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 94(3):763-71.
- [10] 王亚辉,梅晓灯,张松. 尖顶羊肚菌活性提取物降血压作用的研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(9): 2147-2151.
[WANG Y H, MEI X D, ZHANG S. Antihypertensive effect of bioactive extracts from *Morchella conica*[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(9): 2147-2151.]
- [11] WAN L, ZHENG N C, SHOMAILA M, et al. Anti-inflammatory effects of *Morchella esculenta* polysaccharide and its derivatives in fine particulate matter-treated NR8383 cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129:904-915.
- [12] 倪旭东,周化斌,杨海龙. 食用菌干燥技术及其干制品的储藏研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(14): 4685-4692.
[NI X D, ZHOU H B, YANG H L. Research progress on the drying technology of edible fungus and the storage of its dried products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(14): 4685-4692.]
- [13] 龚频,王佳婷,龙辉,等. 羊肚菌物理、化学保鲜方法及作用机制研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业:1-11[2023-06-21].DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033653.
[GONG P, WANG J T, LONG H, et al. Advance in physical and chemical preservation methods and mechanism of *Morchella esculenta*[J/OL]. Food and Fermentation Industries :1-11[2023-06-21]. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033653.]
- [14] 顾可飞,周昌艳. 烘干对羊肚菌营养成分影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 47-51.
[GU K F, ZHOU C Y. Effects of drying on nutritional components of *Morel*[J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 47-51.]
- [15] 顾双. 基于电子鼻和 HS-GC-IMS 技术在几种农产品受真菌污染检测中的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
[GU S. Detection of fungal contamination in several agricultural products based on electronic nose and HS-GC-IMS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]
- [16] 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.
[ZHANG Y H, FANG D L, ZHONG L, et al. Effects of hot air-drying and vacuum freeze-drying on flavor components in different parts of *Hericium erinaceus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 58-67.]
- [17] LIU C, HOU H, LU X S, et al. Production of an innovative mixed Qu (fermentation starter) for waxy maize brewing and quality comparison of different waxy maize wines[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(6):2328-2336.
- [18] HOU H, LIU C, LU X S, et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: Influence of drying techniques[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146.
- [19] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, (7): 370-374.
[LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. Food Science, 2008, (7): 370-374.]
- [20] 王永伦,李兴,杨茜,等. 干燥方式对真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 268-276.
[WANG Y L, LI X, YANG M, et al. Effect of Drying Methods on Volatile Flavor Compounds of the Pileus and Stipe of *Hypsizygus marmoreus*[J]. Food Science, 2023, 44(8): 268-276.]
- [21] 孟令帅,王瑞,郑婷婷,等. 不同干燥方式对红托竹荪感官品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 249-263.
[MENG L S, WANG R, ZHENG T T, et al. Effects of different drying methods on sensory quality of *Dictyophora rubrovalvata*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 249-263.]
- [22] 彭旭怡,郑经绍,刘宇航,等. 基于电子鼻、顶空气相色谱-离子迁移谱分析比较不同杀菌处理紫米甜酒酿中的挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 259-268.
[PENG X Y, ZHENG J S, LIU Y H, et al. Analysis and comparison of volatile components in purple rice sweet wine with different sterilization treatments by electronic nose and headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 259-268.]
- [23] 李佳欢,杨斌,任佳媛,等. 热风干燥温度对荷叶离褶伞干燥特性及挥发性风味物质的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3304-3319.

- [LI J H, YANG B, REN J Y, et al. Effects of hot air-drying temperature on drying characteristics and volatile flavor compounds for *Lyophyllum decastes*[J]. *Mycosystema*, 2021, 40(12): 3304-3319.
- [24] YANG Y Q, QIAN M C, DENG Y L, et al. Insight into aroma dynamic changes during the whole manufacturing process of chestnut-like aroma green tea by combining GC-E-Nose, GC-IMS, and GC × GC-TOF MS.[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387.
- [25] 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*, 2020, 137: 110478.
- [26] 葛帅, 陈宇昱, 彭争光, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法研究干燥方式对小米椒挥发性风味物质的影响[J]. *激光生物学报*, 2020, 29(4): 368-378.
- [GE S, CHEN Y Y, PENG Z G, et al. Application of headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry to investigate the influence of drying method on volatile substances of *Capsicum frutescens*[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2020, 29(4): 368-378.]
- [27] YI C P, LI Y S, ZHU H, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the volatile flavors of mung beans[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 146.
- [28] WANG A X, XIAO T Z, XI H H, et al. Edible qualities, microbial compositions and volatile compounds in fresh fermented rice noodles fermented with different starter cultures[J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111184.
- [29] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 等. 食用菌风味物质及其在美拉德反应中的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(15): 188-193.
- [LIU P J, CUI W J, WANG W L, et al. Research progress of edible fungi flavor substances and their application in maillard reaction[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(15): 188-193.]
- [30] 杨芳, 范成梦, 贾洪峰, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱对不同产地羊肚菌风味化合物的分析[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 207-213.
- [YANG F, FAN C M, JIA H F, et al. Analysis of flavor compounds of *Morchella spp.* from different habitats based on gas chromatography-ion mobility spectrum[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(10): 207-213.]
- [31] 咎学梅, 刘明, 刘艳香, 等. 酶解辅助预糊化技术工艺优化及风味物质差异分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 19-28.
- [ZAN X M, LIU M, LIU Y X, et al. Process optimization of enzyme-assisted pregelatinization technology and analysis of flavor substance difference [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 19-28.]
- [32] 余远江, 庞一扬, 袁桃静, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 分析五种水产原料的风味特征[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 106-117.
- [YU Y J, PANG Y Y, YUAN T J, et al. Analysis of flavor characteristics of five aquatic raw materials based on electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 106-117.]
- [33] Ricardo R, Aarón F, María D, et al. Volatile and sensory evaluation of Mexican Fresco cheese as affected by specific wild *Lactococcus lactis* strains[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(1): 242-253.
- [34] 李淑静, 何佳, 陈其勇, 等. 橙汁中主要芳香组分分析研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(24): 152-155.
- [LI S J, HE J, CHEN Q Y, et al. Review of main odor compounds in orange juice[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(24): 152-155.]
- [35] 高大禹, 李一关, 崔凤娇, 等. 高蛋白水解率对芝麻香型白酒发酵过程及原酒品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(6): 8-15.
- [GAO D Y, LI Y G, CUI F J, et al. Effects of high proteolytic rate on sesame-flavor liquor fermentation process and liquor quality[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(6): 8-15.]
- [36] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6 类常见食品中含硫化合物风味特征及形成机理研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(6): 13-25.
- [WANG B, HAN Z S, YANG Z J, et al. Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(6): 13-25.]
- [37] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 刘强, 昌德寿, 汤峨(译). 第二版. 北京: 科学出版社, 2015: 242-432.
- [VAN HEIMERT L. Compilation of flavour threshold values in water and other media[M]. LIU Q, CHANG D S, TANG E.

(translation) .2nd Edition. Beijing: Science Press, 2015: 242-432.]

- [38] SU D, HE J J, ZHOU Y Z, et al. Aroma effects of key volatile compounds in *Keemun* black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 373(PB).

