

# 基于GC-IMS技术分析不同竹荪品种挥发性风味物质

安诗语<sup>1,2</sup>, 汤鹏宇<sup>2</sup>, 孟繁博<sup>2</sup>, 黄道梅<sup>2</sup>, 莫小引<sup>1,2</sup>, 林茂<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州贵阳 550006) (2. 贵州省农产品加工研究所, 贵州贵阳 550006)

(3. 贵州省食用菌育种重点实验室, 贵州贵阳 550006)

**摘要:** 为探究不同品种竹荪的风味特性, 利用气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-ion Mobility Spectroscopy, GC-IMS) 结合 ROAV 分析法分析了三个品种竹荪干品及鲜品的挥发性风味物质, 从中共鉴定出 54 种挥发性风味物质, 其中包含 7 种醇类 (4.51%~46.46%)、11 种酯类 (8.00%~49.87%)、6 种酮类 (7.28%~18.76%)、20 种醛类 (14.86%~60.51%)、2 种醚类 (0.46%~6.41%)、2 种吡啶类 (0.08%~0.49%)、1 种咪唑类 (0.05%~0.30%)、3 种硫化物 (0.19%~3.44%)、1 种烯烃 (0.06%~0.72%) 和 1 种羧酸 (0.17%~4.08%) 类化合物。GC-IMS 指纹谱图显示, 棘托竹荪和长裙竹荪的特征峰区域大于红托竹荪红托竹荪和长裙竹荪之间差异较大, 而棘托竹荪和长裙竹荪之间差异较小。竹荪中不同品种中主要挥发性风味物质不同, 含量最多的是醛类、醇类和酯类。同时, 主成分和欧氏距离显示, 竹荪鲜品在干燥后与干燥前风味存在差异。GC-IMS 可对不同品种竹荪样品的风味物质进行可视化研究。该实验为丰富不同品种竹荪风味品质特性提供了一定参考信息。

**关键词:** 竹荪; 干制; 挥发性风味物质; 气相-离子迁移色谱

文章编号: 1673-9078(2024)06-231-242

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0700

## Analysis of Volatile Flavor Substances in Different *Dictyophora* Cultivars by Gas Chromatography-ion Mobility Spectroscopy

AN Shiyu<sup>1,2</sup>, TANG Pengyu<sup>2</sup>, MENG Fanbo<sup>2</sup>, HUANG Daomei<sup>2</sup>, MO Xiaoyin<sup>1,2</sup>, LIN Mao<sup>1,2,3\*</sup>

(1.College of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550006, China)

(2.Guizhou Agricultural Products Processing Research Institute, Guiyang 550006, China)

(3.Guizhou Key Laboratory of Edible Fungi Breeding, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** To study the flavor characteristics of different *Dictyophora* varieties, gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS) was used, combined with relative odor activity value analysis. The volatile flavor substances were analyzed in dried and fresh *Dictyophora* varieties. A total of 54 volatile flavor substances were identified, which included seven alcohols (4.51%~46.46%), eleven esters (8.00%~49.87%), six ketones (7.28%~18.76%), twenty aldehydes (14.86%~60.51%), two ethers (0.46%~6.41%), two pyridines (0.08%~0.49%), one furan (0.05%~0.30%), three sulfides

引文格式:

安诗语,汤鹏宇,孟繁博,等.基于GC-IMS技术分析不同竹荪品种挥发性风味物质[J].现代食品科技,2024,40(6): 231-242.

AN Shiyu, TANG Pengyu, MENG Fanbo, et al. Analysis of volatile flavor substances in different *Dictyophora* cultivars by gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 231-242.

收稿日期: 2023-06-10

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2022]一般 337); 贵阳市科技计划项目 (筑科合同[2020]-18-3 号); 贵州省食用菌现代农业产业技术体系 (GZCYTX2021-05-02)

作者简介: 安诗语 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物与医药, E-mail: 1281253148@qq.com

通讯作者: 林茂 (1979-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工及贮藏保鲜, E-mail: linmao520132@163.com

(0.19%~3.44%), one olefin (0.06%~0.72%), and one carboxylic acid (0.17%~4.08%). GC-IMS fingerprint spectra showed that the characteristic peak regions were larger for *Dictyophora acanthophora* than for *Dictyophora maxi*. The main volatile flavor substances were different in different varieties of *Dictyophora*, with the most common being aldehydes, alcohols, and esters. Principal components analysis and Euclidean distance showed that there were differences in flavor between dried and fresh *Dictyophora*. Thus, GC-IMS enables visualization of flavor substances in different varieties of *Dictyostelium*. These findings provide some reference information for enriching the flavor quality characteristics of different *Dictyophora* varieties.

**Key words:** *Dictyophora*; dry-cure; volatile flavor compounds; gas chromatography-ion mobility spectroscopy

竹荪味道鲜美, 质地脆嫩, 含有丰富的营养物质<sup>[1,2]</sup>, 一直以来都是名贵的食用菌, 历史上列为“宫廷贡品”, 近代作为国宴名菜, 在医学上也是食疗佳品, 有“山珍之王”、“菌中皇后”的美称<sup>[3,4]</sup>。常见并可食用的竹荪主要是: 红托竹荪、棘托竹荪、长裙竹荪和短裙竹荪, 主要分布于中国福建、广东、广西、四川、贵州、云南等省区。竹荪有降血糖血脂<sup>[5,6]</sup>、抗氧化<sup>[7,8]</sup>、抗疲劳<sup>[9]</sup>和抗炎<sup>[10]</sup>等作用, 竹荪多糖在抗肿瘤<sup>[11,12]</sup>、调节菌群<sup>[13]</sup>、调节免疫<sup>[14,15]</sup>等方面都有一定的疗效, 其抗癌活性远优于冬虫夏草和香菇, 因此红托竹荪的商品价值较高<sup>[16]</sup>, 除此之外, 竹荪还有一定的抑菌作用<sup>[17]</sup>。也是一种高蛋白低脂肪含量的食物<sup>[18]</sup>。

不同品种的竹荪在风味和口感上各不相同, 感官风味是辨别这三种竹荪重要的方法之一, 也是最简单的方法。在竹荪家族中大多数品种都具有令人不愉快的异杂臭味<sup>[19]</sup>, 不能直接使用, 但红托竹荪是几种竹荪品种中唯一的清香型竹荪<sup>[20]</sup>。竹荪鲜品平均含水量约 90%<sup>[21]</sup>, 不易存放。为了尽可能的保留竹荪的营养品质, 延长保存期限, 需要对鲜竹荪进行干燥处理。干燥过程中, 竹荪的风味会发生变化, 竹荪干品较鲜品来看, 一些原有的风味物质含量会降低, 但同时也会有新的风味物质产生<sup>[22]</sup>, 因此, 同一品种的干品竹荪和鲜品竹荪在风味上有明显的差异。梁亚丽<sup>[23]</sup>、郑杨等<sup>[24]</sup>和陈曦等<sup>[25]</sup>分别对红托竹荪、棘托竹荪和长裙竹荪的风味进行过检测, 但都是使用传统的 GC-MS 进行检测。GC-MS 对于含量较低的小分子化合物容易漏检, 气相色谱-离子迁移谱解决了传统 GC-MS 技术中的一些限制, 可对不同品种样品进行较好分类, 能够对气态离子进行痕量分析<sup>[26]</sup>, 结合了 GC 的分离特性和 IMS 的高灵敏度, 且无需样品前处理<sup>[27]</sup>, 具有检出限低、灵敏度高、分析时间短等优势, 目前, GC-IMS 技术在各类食品的挥发性风味化合物、品质检测分析等检测

中得到广泛的应用<sup>[28]</sup>。但 GC-IMS 谱库数据量有限, 且对大分子化合物的检测能力较低。所以研究人员会将两种方法进行结合, 以得到更全面的挥发性风味物质, 在已查阅文献中还未发现有使用 GC-IMS 测定竹荪挥发性风味物质以及将三种常见竹荪品种在挥发性风味物质方面进行对比的。通过 GC-IMS 技术对不同品种竹荪中挥发性风味物质进行测定和差异分析的还少有报道。本研究利用新兴 GC-IMS 技术探究市场上三种品种(红托、棘托、长裙)竹荪的挥发性风味物质差异, 可视化构建挥发性风味物质指纹图谱, 主成分分析、欧氏距离等分析竹荪差异性挥发性风味物质, 为丰富不同品种竹荪风味品质特性提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验用竹荪(红托竹荪, 棘托竹荪, 长裙竹荪)均采自贵州省遵义赤水市宝源乡, 实验前鲜品采用超低温(-80℃)冷冻保藏备用。竹荪干品由鲜品 60℃热风干燥得到, 常温密封保存。文中竹荪样品缩写词如表 1 所示。

表 1 缩写词对照表

Table 1 Abbreviation comparison table

简写	全称
XHT	红托竹荪鲜品
XJT	棘托竹荪鲜品
XCQ	长裙竹荪鲜品
GHT	红托竹荪干品
GJT	棘托竹荪干品
GCQ	长裙竹荪干品

### 1.2 实验仪器

FlavourSpec® 风味分析仪、气相离子迁移谱联用仪, 德国 G.A.S. 公司; 电子天平, 天津天马衡基

仪器有限公司; DW-HL218 超低温冰箱, 中科美菱低温科技股份有限公司。

### 1.3 实验方法

实验方法和条件参考并修改自 Hou 等<sup>[29]</sup>, 取样品 (各品种竹荪干品 0.3 g, 鲜长裙 2.1 g, 鲜棘托 2.1 g, 鲜红托 2.1 g), 置于 20 mL 顶空瓶中, 60 °C 孵育 15 min 后进样 1 000 μL。

系统条件: 分析时间为 20 min, 色谱柱类型 MXT-5, 15 mL, 0.53 mm ID, 1 μm FT, 柱温 60 °C, 载气 / 漂移气为高纯 N<sub>2</sub>(99.999%), IMS 温度 45 °C。

自动顶空进样单元, 进样体积 1 000 μL, 孵育时间为 15 min, 孵育温度 60 °C, 进样针温度 85 °C, 孵化转速 500 r/min。气相色谱条件如表 2 所示。

表 2 气相色谱条件

Table 2 Gas chromatography conditions

Time	EPC1 (漂移气流量) (mL/min)	EPC2 (载气流量) (mL/min)	Record (记录谱图)
00:00 000	150	2	-Rec(开始采集记录)
02:00 000	150	2	—
20:00 000	150	100	-Stop(该样本分析结束)

### 1.4 主体挥发性风味物质的评定

香气活度值 (Odor Activity Value, OAV) 是一种能够从香气成分含量和香气阈值两方面较为客观全面地评价某香气成分香气贡献度的方法。香气成分 OAV > 1 则被认为对竹荪的整体风味有贡献, 且 OAV 值越大贡献就越大。

OAV 计算公式:

$$A = \frac{C}{D} \quad (1)$$

式中:

A—香气活度值 (OAV);

C—挥发性化合物的含量;

D—该化合物的香气阈值 (OT)。

在得到 OAV 值得基础上, 参考刘登勇等<sup>[30]</sup>的研究确定的分析食品关键风味化合物的一种新方法: ROAV 法, 该方法是以 OAV 值最大的香气成分为标准, 即  $R_{\max} = 100$ , 将其他香气成分的 OAV 值与之作比, 进而计算出各香气成分的 ROAV 值。ROAV 公式如下:

$$E \approx \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \times 100 = \frac{A_i}{A_{\max}} \times 100 \quad (2)$$

式中:

E—ROAV 值;

$C_i$ 、 $T_i$ —各挥发性组分的相对百分含量和相对应的感觉阈值;

$C_{\max}$ 、 $T_{\max}$ —分别是对样品总体风味贡献最大的组分的相对百分含量和相对应的感觉阈值;

$A_{\max}$ —对竹荪整体风味贡献最大的香气成分的 OAV 值;

$A_i$ —各挥发性组分的 OAV 值。

各香气成分的 ROAV 值均介于 0~100 之间。香气成分的 ROAV 值越大, 对竹荪的整体风味贡献作用越大, ROAV ≥ 1 为关键香气化合物, 0.1 ≤ ROAV < 1 对竹荪的整体风味具有修饰作用, ROAV < 0.1 的香气成分对竹荪整体风味具有潜在贡献作用。

### 1.5 数据分析

使用德国 G.A.S. 公司的 FlavourSpec® 风味分析仪中的 VOCal、Reporter 插件、Gallery Plot、Dynamic PCA 三款插件进行数据分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 相似度分析

主成分分析可以直观的看出样品之间差异的大小, 如图 1 所示, 鲜品竹荪前两个主成分 PC1 和 PC2 分别为 34.13% 和 60.26%, 累积贡献率 94.39%, 说明对原始数据进行线性变换和降维时, 核心成分有效的保留, 分析结果能反映样品的总体特征。干品竹荪前两个主成分 PC1 和 PC2 分别为 30.16% 和 58.28%, 累计贡献率为 88.44%, 能够真实反映样品的主要特征信息。三个品种竹荪鲜品及干品样本之间距离较远, 图像无重叠, 说明 PCA 分析可有效区分出不同品种竹荪样品的气味变化。

图 2 是干品和鲜品之间不同竹荪品种样品欧氏距离图, 可以看出样本间距离明显大于平行样本间的距离, 说明不同竹荪之间在干燥前后, 挥发性风味物质组成均有明显差异, 可以通过距离对不同样本进行直接的聚类区分。从图 2 中看出, 不论是干品还是鲜品, 红托竹荪和长裙竹荪相似度较低, 距离较远, 长裙竹荪和棘托竹荪距离较近。三个品种的竹荪在干燥后相似度有所提高, 该结果与 PCA 主成分分析结果一致。不同品种竹荪的欧式距离明显大于平行样品之间的平均距离。

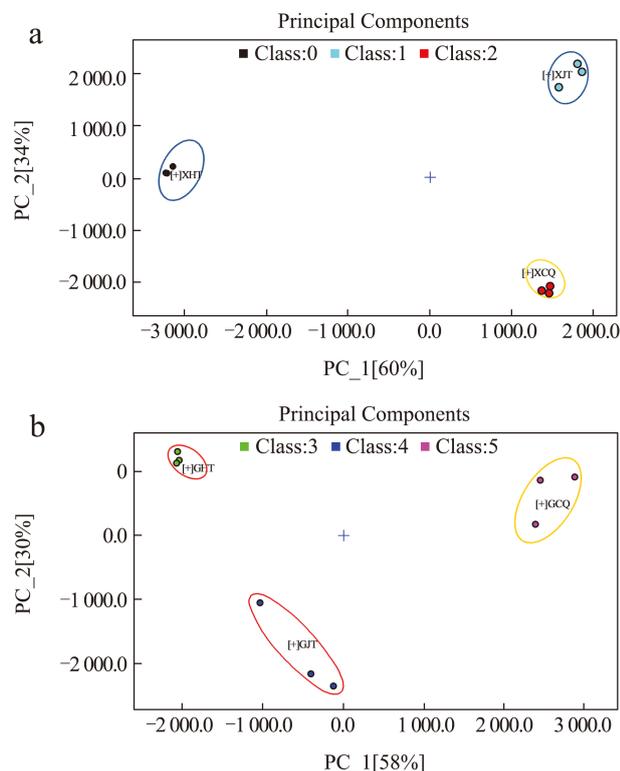


图1 鲜 (a) / 干 (b) 竹荪样品 PCA 分析

Fig.1 PCA analysis of fresh (a)/dried (b) *Dictyostelium* samples

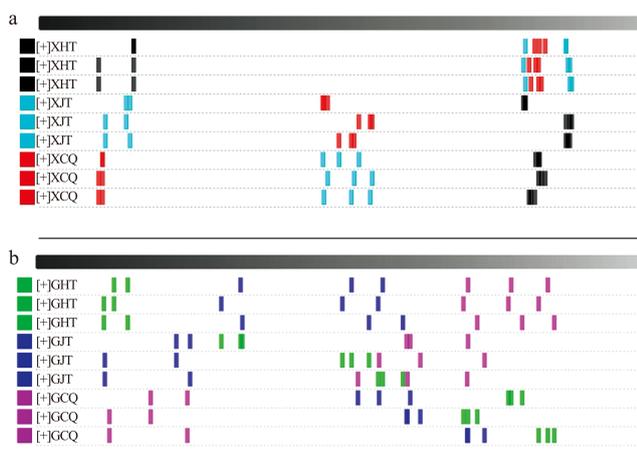


图2 鲜 (a) / 干 (b) 竹荪样品间欧氏距离图

Fig.2 Euclidean distance plot between fresh (a)/dried (b) *Dictyostelium* samples

## 2.2 挥发物质定性分析

利用 GC-IMS 在三种竹荪及其两种不同状态中共检测到 54 种挥发性化合物，由于 GC-IMS 谱库

有限，16 种物质未被定性，从表 3 已定性的挥发性风味物质中可以看出，一些化合物在不同品种和不同状态竹荪中的含量各不相同，如 2- 甲基丁酸乙酯、2- 甲基丁酸、乙酸异丁酯等在红托竹荪中含量比棘托和长裙竹荪高，这三种化合物都呈果香或清香<sup>[40]</sup>。这些都可能是使红托竹荪与另两种竹荪风味区别明显的原因。

如表 3 所示，1- 辛烯 -3- 酮、丁酮、苯乙酸丁酯等化合物在棘托竹荪和长裙竹荪中的含量高于红托竹荪。1- 辛烯 -3- 酮是蘑菇中的特征风味物质，裴斐<sup>[41]</sup>和 Guo 等<sup>[42]</sup>分别在双孢蘑菇和松茸中测得 1- 辛烯 -3- 醇。陈洪雨等<sup>[43]</sup>发现鲜香菇中主要的化合物是以 1- 辛烯 -3- 醇（蘑菇醇）为代表的八碳化合物，该类化合物也是大多数食用菌中的主要化合物，由不饱和脂肪酸经过酶促和裂解反应形成。Bozok 等<sup>[44]</sup>的研究中也得到 1- 辛烯 -3- 醇是鲜牛肝菌中主要的挥发性风味物质的结论。该物质具有浓烈的蘑菇香、青香、蔬菜香及油腻的气息，普遍存在于大部分食用菌中<sup>[45]</sup>，该物质也存在于竹荪中。从表 5 中的 ROAV 值来看，二甲基三硫化物对三个品种的鲜竹荪都具有重要贡献作用，同时，具有蘑菇味的 1- 辛烯 -3- 酮对三个品种的竹荪也都有着重要的贡献作用。

## 2.3 红托、棘托和长裙竹荪挥发性风味物质 GC-IMS 图谱对比

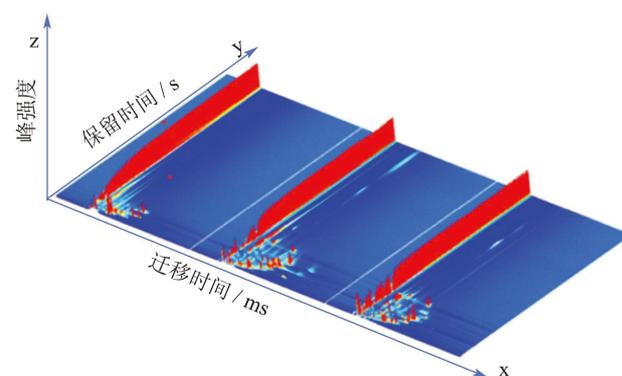


图3 鲜样中挥发性风味物质成分三维谱图

Fig.3 Three-dimensional spectrum of volatile matter components in fresh sample

表3 竹荪定性化合物列表

Table 3 List of qualitative compounds in *Dictyophora*

化合物	阈值/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	保留时 间/s	ROAV										相对含量/%	气味描述	参考文献	
			XHT	XJT	XCQ	GHT	GJT	GCQ	XHT	XJT	XCQ	GHT				GJT
乙酸香茅酯	1 000	2 573.33	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	1.275 43	0.100 71	0.011 06	0.015 29	0.091 67	0.017 66	呈强烈玫瑰香气, 并带杏子果香, 颇似柠檬油	[31]
苯乙酸丁酯		2 261.49						1.030 48	0.038 28	0.036 88	0.013 30	0.027 48	0.196 13	玫瑰和蜂蜜香气		
正己酸乙酯-M	0.76	353.41	0.37	0.07	0.05	9.45	4.58	4.73	0.247 91	0.001 01	0.001 29	0.012 09	0.010 96	0.013 79	具有酒样香气	[32]
正己酸乙酯-D		354.82						0.586 11	0.004 75	0.007 65	0.012 26	0.014 98	0.023 60			
乙酸异戊酯	2	249.16	5.58	0.12	0.04	0.40	0.20	0.24	9.773 94	0.004 20	0.002 59	0.001 36	0.001 28	0.001 83	有香蕉气味	[31]
2-甲基丁酸乙酯	0.1	229.75	87.52	2.73	0.67	10.57	4.64	3.87	7.669 02	0.004 88	0.002 23	0.001 78	0.001 46	0.001 49	苹果、菠萝和未成熟李子果皮香	[32]
乙酸乙酯	0.1	126.05	6.46	0.27	0.06	3.31	1.60	0.98	28.292 69	0.023 81	0.010 55	0.027 87	0.025 17	0.018 79	类似水果香味和香蕉水的味道有些相似	[33]
酯类															乙酸气味	
2-丁氧基乙酯		277.39							0.015 51	0.000 41	0.000 48	0.002 77	0.007 20	0.001 24		
乙酸异丁酯	66	189.47	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000 67	0.001 31	0.000 46	0.000 35	0.000 55		具有生梨和覆盆子的香气	
乙酸正丙酯	240	168.33	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.203 88	0.004 22	0.003 64	0.003 36	0.003 05	0.004 28	柔和的水果香味	[33]
丁位辛内酯		975.80							0.208 15	0.018 73	0.002 31	0.003 43	0.003 23	0.003 14	温暖椰子样气息、香豆素样豆香和奶油样脂肪气息	
茴香醚		275.97							0.113 77	0.004 22	0.003 80	0.001 36	0.004 31	0.006 78	具有芳香气味	
艾草醚		848.59							0.343 48	0.003 87	0.005 25	0.003 78	0.059 78	0.032 49	呈大茴香似香气	
2-十一烯醛		1 563.67							0.368 96	0.003 59	0.005 28	0.006 75	0.005 16	0.034 36	新鲜醛味、蜡香、醛香、青香、柑橘、肉香	
壬醛-M	1	506.62	0.17	0.23	0.08	6.69	6.53	6.68	0.152 80	0.004 16	0.002 56	0.011 25	0.020 54	0.025 62	强烈的油脂气味和甜橙气息, 其稀乙醇溶液有香草醛和香调	[33]
壬醛-D		505.21							0.074 62	0.000 88	0.000 63	0.002 67	0.007 33	0.008 86		
苯乙醛-M	1.2	406.12	0.42	0.27	0.14	2.05	3.84	4.82	0.437 44	0.005 79	0.005 60	0.004 13	0.014 49	0.022 17	呈强烈风信子香气, 低浓度时有杏仁、樱桃香味	[34]
苯乙醛-D		406.12							0.049 77	0.000 86	0.000 38	0.001 22	0.003 05	0.005 65		
反-2-辛烯醛-M	3	437.75	0.13	0.15	0.18	1.08	0.29	0.56	0.340 52	0.008 15	0.017 76	0.005 45	0.002 74	0.006 48	脂肪和肉类香, 黄瓜和鸡肉香味	[34]
(E)-2-庚烯醛	13	308.87	0.01	0.12	0.16	0.14	0.07	0.20	0.080 50	0.028 68	0.067 76	0.003 12	0.002 90	0.010 03	脂芳香	[32]

续表 3

化合物	阈值/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	保留时 间/s	ROAV						相对含量/%						气味描述	参考 文献
			XHT	XJT	XCQ	GHT	GJT	GCQ	XHT	XJT	XCQ	GHT	GJT	GCQ		
庚醛	3	262.48	0.12	0.35	0.11	0.12	0.11	0.18	0.309 81	0.018 85	0.01123	0.000 58	0.001 02	0.002 04	果香, 适当稀释似甜杏、 坚果香	[34]
己醛	5	202.93	0.18	0.52	0.32	0.16	0.14	0.76	0.790 17	0.046 47	0.05292	0.001 35	0.002 20	0.014 51	生油脂和青草气及苹果香味	[34]
戊醛	12	160.51	0.10	0.13	0.10	0.17	0.08	0.15	1.037 55	0.028 45	0.03907	0.003 42	0.003 07	0.006 72	具有特殊香味的浸透性液体	[34]
3-甲基丁醛	0.25	146.16	5.62	10.44	5.96	100.00	50.58	39.27	1.231 93	0.046 69	0.04974	0.042 07	0.039 80	0.037 66	苹果、桃子香味	[35]
(E)-2-己烯醛	82	232.41	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.049 47	0.004 87	0.00258	0.000 98	0.000 89	0.003 00	呈浓郁新鲜水果、 绿叶清香气	[36]
反-2-辛烯醛-D	3	433.53	0.08	3.48	0.47	1.00	0.39	0.41	0.222 05	0.186 52	0.04694	0.005 06	0.003 68	0.004 71	新鲜的黄瓜、清香的药草、 香蕉叶样脂肪气息	[33]
苯甲醛	3	311.75	0.13	0.50	0.04	0.78	1.31	1.11	0.338 82	0.026 68	0.00394	0.003 93	0.012 33	0.012 81	具有苦杏仁味, 燃烧时 有芬香气	[33]
反式-2-戊烯醛	980	199.49	0.00	0.00	0.00	0.23	0.10	0.03	1.936 02	0.009 62	0.01590	0.385 92	0.310 23	0.164 23	草莓, 果香, 番茄 青香和醚类气味, 刺激辛辣味	[36]
2-甲基-2-丁烯醛		179.53							6.255 07	0.021 76	0.00566	0.114 38	0.063 96	0.050 71		
2,4-二甲基苯甲醛		844.18							0.096 51	0.000 81	0.00136	0.000 77	0.006 97	0.001 93	甜的, 杏-杏仁 洋葱和肉、烤马铃薯 香气, 低浓度呈愉快的 肉和肉汤味	
3-甲基丙醛		273.43							0.261 64	0.000 39	0.00045	0.010 39	0.008 81	0.001 20		
反式-2-己烯醛		232.05							0.383 00	0.014 48	0.00326	0.001 35	0.001 01	0.005 65	稀释前香气强烈而尖锐, 稀释后令人愉快的 绿叶清香和果香	
2-甲基-2-戊烯醛		218.76							0.446 31	0.002 79	0.00073	0.000 34	0.000 37	0.001 33	强烈青草青香, 略带 水果香气	
1-辛烯-3-醇	1	345.68	24.01	9.44	9.59	12.46	5.17	5.85	21.040 16	0.168 91	0.32032	0.020 97	0.016 28	0.022 43	蘑菇、薰衣草、玫瑰和 干草香气	[33]
芳樟醇	140	501.70	0.00	0.01	0.02	0.12	0.02	0.05	0.261 31	0.023 11	0.10174	0.027 69	0.010 30	0.025 12	具有铃兰香气, 但随来源 而有不同香气	[33]
环己醇		621.87							1.651 32	0.006 45	0.01160	0.011 37	0.008 76	0.004 49	似樟脑气味	
正己醇	1600	244.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.335 16	0.007 38	0.00699	0.003 52	0.002 64	0.002 57	呈脂肪和水果似香气, 味甜	

续表 3

化合物	阈值/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	保留时 间/s	ROAV						相对含量/%						气味描述	参考 文献		
			XHT	XJT	XCQ	GHT	GJT	GCQ	XHT	XJT	XCQ	GHT	GJT	GCQ				
醇类																		
正戊醇	4 000	189.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	有杂醇油气味	[33]
3-甲基-1-丁醇	178.56																有不愉快的气味	
$\alpha$ -松油醇	330	471.33	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.092 85	0.001 08	0.005 93	0.028 32	0.005 88	0.003 70			紫丁香花香, 稀释后呈 橙子香味	[31]
6-甲基-5-庚烯-2-酮	50	341.47	0.01	0.00	0.00	0.15	0.13	0.19	0.227 54	0.002 57	0.002 44	0.012 30	0.021 04	0.036 41			具有水果香气和新鲜 清香香气	
2-庚酮	140	254.71	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.376 90	0.045 00	0.028 28	0.000 96	0.001 12	0.003 28			有类似梨的水果香味	[34]
2-丁酮	50 000	127.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.141 79	0.021 86	0.017 60	0.023 09	0.028 67	0.018 51			有类似苯的芳香气味	[37]
3-羟基-2-丁酮	155 000	164.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.972 34	0.002 93	0.002 81	0.086 40	0.067 59	0.047 21			呈奶油香气	
丙酮	107.80								2.892 93	0.017 71	0.008 22	0.064 33	0.047 75	0.029 87			微有香气	
1-辛烯-3-酮	0.00	327.14	30.28	100.00	80.78	57.48	27.38	43.43	0.132 65	0.008 95	0.013 49	0.000 48	0.000 43	0.000 83			清新泥土、蘑菇、 蔬菜的香气	[32]
吡喃类																		
2-戊基吡喃	6	342.33	0.01	0.01	0.01	0.08	0.06	0.13	0.054 98	0.000 60	0.001 08	0.000 86	0.001 07	0.003 01			豆香、果香、泥土、青香 及类似蔬菜的香韵	[32]
吡啶类																		
3-乙基吡啶	322.05								0.110 60	0.002 82	0.000 65	0.000 52	0.001 23	0.000 77			类似烟草、坚果香样的香气	
2, 6-二甲基吡啶	246.71								0.021 66	0.002 12	0.000 88	0.000 32	0.000 23	0.000 64			有吡啶和薄荷油的气味	
羧酸类																		
2-甲基丁酸	229.07								0.726 20	0.002 25	0.002 14	0.002 97	0.001 66	0.040 79			刺鼻、辛辣的羊乳干酪气味, 低浓度呈愉快的水果香气, 味辛辣	
烯烃类																		
E-罗勒烯	34	412.49	0.01	0.01	0.00	0.13	0.04	0.04	0.153 69	0.005 88	0.000 60	0.007 17	0.004 64	0.004 57			有草香、花香并伴有橙花油	
烯丙基硫化物	263.09								0.112 9	0.000 46	0.000 54	0.001 93	0.014 62	0.008 08			大蒜气味	
硫化物																		
二甲基三硫化物	0.01	318.73	100.00	7.60	100.00	76.91	100.00	100.00	0.876 27	0.001 36	0.033 40	0.001 29	0.003 15	0.003 21			呈强烈挥发性冷的薄荷 气味和浓烈辛辣香气, 类似新鲜洋葱气息	[36]
二甲基二硫化物	0.16	180.49	0.02	0.01	0.10	0.27	0.34	0.98	0.003 37	0.000 04	0.000 49	0.000 07	0.000 20	0.000 47			有硫化物异臭味	[38]

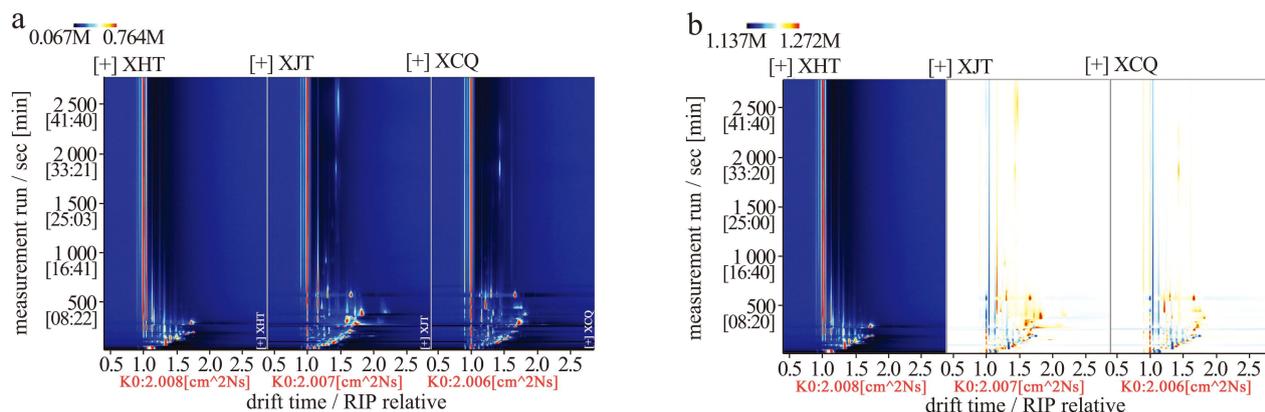


图4 鲜样中挥发性风味物质成分谱图(俯视图)(a)和对比差异谱图(b)

Fig.4 Spectra of volatile matter composition in fresh samples (top view) (a) and comparative difference spectra (b)

注: 纵坐标代表气相色谱的保留时间 (s), 横坐标代表离子迁移时间 (归一化处理)。

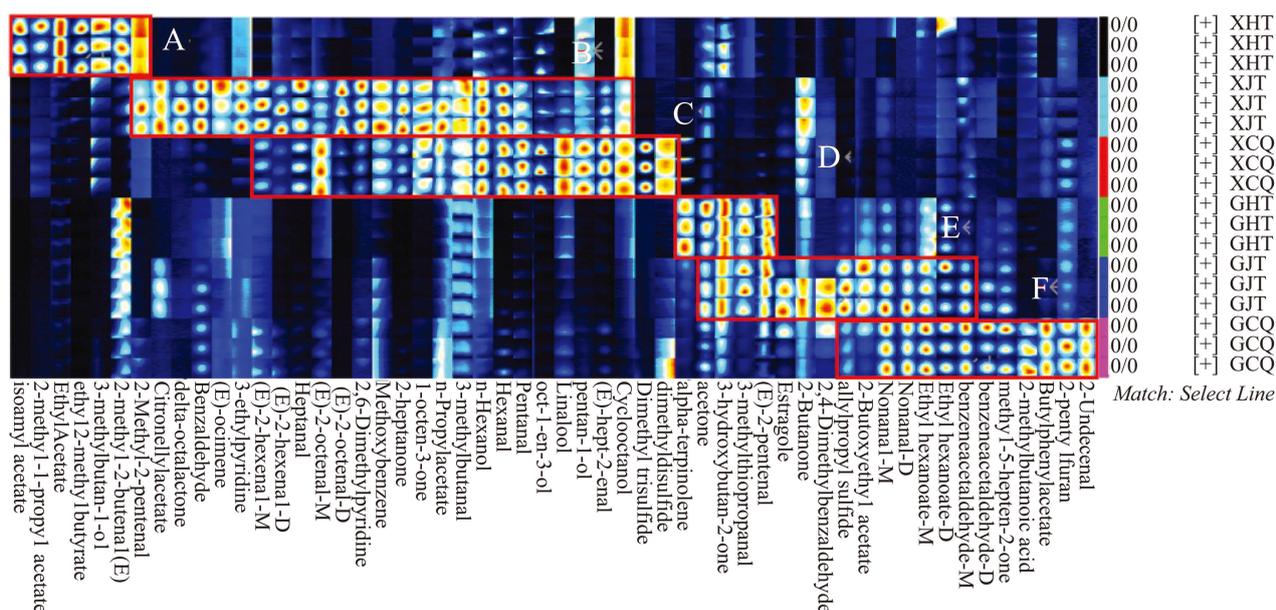


图5 竹荪样品 Gallery Plot 指纹谱图

Fig.5 Gallery Plot fingerprint of *Dictyostelium* sample

图3为鲜样中挥发性风味物质成分三维谱图,图4为三种不同品种竹荪3D地形图投影获得的2D图,结合图3与图4来看,可相对容易比较三种品种竹荪挥发性成分的差异性。图4三种品种竹荪挥发性风味物质被气相离子迁移谱较好地分离开来,且不同品种竹荪中部分挥发性风味物质含量有升有降,呈现了相对差异(图4b),致使不同品种竹荪的GC-IMS特征谱也存在一定差异。图4b是以鲜红托竹荪为参比,浅色图谱扣除干红托竹荪中的信号峰,得到二者的差异谱图。

## 2.4 GC-IMS品种竹荪样品风味指纹比较

为直观显示不同竹荪干品、鲜品挥发性风味成

分的差异,分别对六种竹荪样品三次平行测定得到GC-IMS图谱中所有风味物质斑点,由Gallery Plot插件得到样品挥发性风味物质指纹谱图(图5)。图5中的A、B、C、D、E和F区域分别是鲜红托、鲜棘托、鲜长裙、干红托、干棘托和干长裙的特征峰区。这和图2欧氏距离得到的结果一致,红托竹荪和长裙竹荪之间的差异更大。

从图5中可以看出,竹荪样本干燥前后挥发性风味物质组成变化较大,鲜样中大部分挥发性风味物质在干燥后消失或者含量非常低,而干燥样本中的挥发性风味物质基本在鲜样中不存在或者含量很低。在干燥过程中,竹荪中的部分化合物逐渐减少至极少量甚至消失,同时也有一些鲜竹荪中含量极

少的物质在逐渐增加。结合表 3 和图 6 可以看出任意两个品种的竹荪都在化合物种类及含量上存在差异,由此造成了每个品种之间风味的巨大差异。陈洪雨等<sup>[43]</sup>在实验中发现,香菇在干燥前气味清香,而干燥后产生了一些含硫化物,被赋予了炒制的大蒜味。不同竹荪在干燥前后的挥发性风味物质均有较大差异。红托竹荪和棘托竹荪鲜品中已定性化合物种类相同且含量较多的只有 2- 甲基 -2- 戊烯醛和 3- 乙基吡啶。在已知挥发性化合物中,长裙竹荪比棘托竹荪多了两种硫化物,分别是二甲基二硫化物(硫化物异臭味)和二甲基三硫化物(浓烈的薄荷辛香和新鲜洋葱气味),挥发性硫化物是重要的芳香诱导化合物<sup>[46]</sup>, 阈值低、气味明显,在食品中广泛存在。

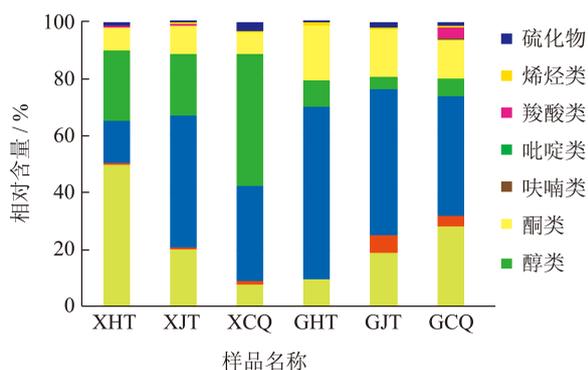


图 6 不同品种竹荪中各种挥发性有机物相对含量  
Fig.6 Relative contents of volatile organic compounds in different dictyophora species

如图 7 所示,鲜红托竹荪中测得 20 种化合物,其中 13 种在干红托竹荪中也存在,而另 7 种物质在干燥过程中逐渐消失,产生了 6 种新的化合物。其中,鲜竹荪在干燥后消失的几种化合物包含 2 种醇类和 4 种酯和 1 种醛类物质,新产生了 2 种醛、2 种酮、1 种酯和 1 种醇类化合物。对鲜红托竹荪的主体挥发性香气成分是二甲基三硫化物 (ROAV=100),其次,贡献最大的三个物质分别是 2- 甲基丁酸乙酯 (ROAV=87.52)、1- 辛烯 -3- 酮 (ROAV=30.28) 和 1- 辛烯 -3- 醇 (ROAV=24.01)。干红托竹荪中的主体挥发性香气成分是 3- 甲基丁醛 (ROAV=100),棘托竹荪和长裙竹荪干品较鲜品来看,3- 甲基丁醛 (果香) 贡献度增大。干品和鲜品共同存在的大多数化合物中在经过干燥后含量增加,如乙酸异戊酯、乙酸乙酯、2- 甲基丁酸乙酯等在鲜红托竹荪中含量最高。而干燥后,3- 羟基 -2- 丁酮、丙酮、 $\alpha$ - 松油

醇等在干红托竹荪中含量最高。3- 羟基 -2- 丁酮主要来自于碳水化合物代谢 (糖类) 产生的丙酮酸,两者都提供了奶油风味<sup>[47]</sup>。 $\alpha$ - 松油醇有一种海桐花香味,在微生物发酵过程中,糖苷通过水解和进一步氧化得到萜醇及其衍生物,竹荪干品被赋予柑橘茶甘甜和木香的香气<sup>[48]</sup>。

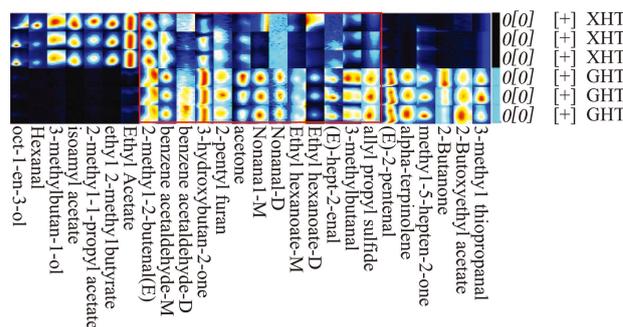


图 7 红托竹荪样品 Gallery Plot 指纹谱图

Fig.7 Gallery plot fingerprint of dictyophora rubra sample

醇等在鲜长裙竹荪中含量最高。鲜竹荪中的挥发性化合物主要以醛类、醇类和酮类为主。己醇、反 -2- 辛烯醛和正己醇都有脂肪香气,1- 辛烯 -3- 酮和 1- 辛烯 -3- 醇都呈蘑菇味或泥土味,反 -2- 庚烯醛、正戊醇和戊醛都具有刺激性臭味,环己醇具有樟脑味,这些化合物可能是使长裙竹荪被赋予独特异臭味的原因,而这些物质在干燥后大量减少,这使得干品竹荪的刺激性异臭味减弱。己酸乙酯 (酒香味)、庚醛 (果香)、苯乙醛 (风信子香味)、E-2- 庚烯醛 (青草气及刺鼻臭)、E-2- 辛烯醛 (脂肪及肉类气味)、己醛 (油脂、青草、苹果气味)、芳樟醇 (铃兰香味) 等在干长裙竹荪中含量最高。袁桃静<sup>[49]</sup>的实验中罗非鱼随着油菜籽油炸时间的延长,壬醛的含量逐渐增加。结合图 6,三个品种竹荪鲜品相对含量最高的化合物种类分别是醛类、酯类和醇类,而经过干燥后相对含量最高的都是醛类,在唐秋实等<sup>[50]</sup>的实验中,金针菇在经过热泵和热风干燥后,醛类物质都有所增加,而真空冷冻干燥却没有,由此推论,加热干燥可促进醛酮类的生成,芳香醛和小分子醛可能是竹荪中的糖类物质与氨基酸、蛋白质发生美拉德反应得到的。

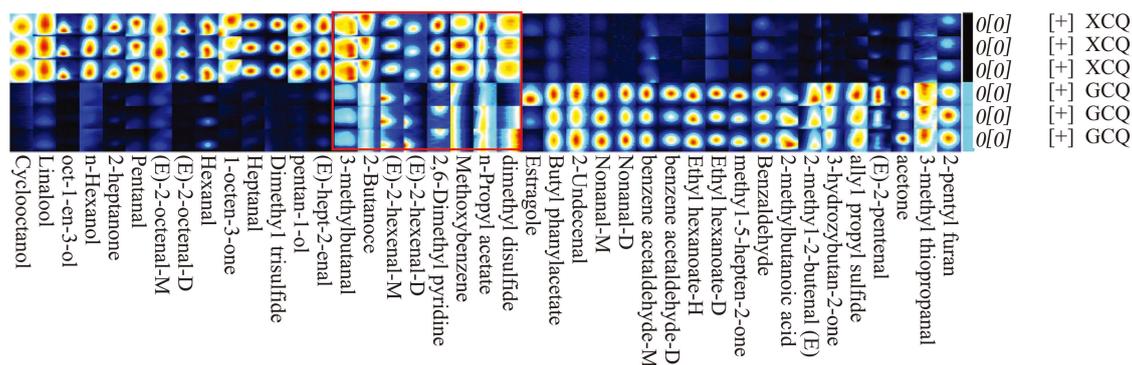


图 8 长裙竹荪样品 Gallery Plot 指纹谱图

Fig.8 Gallery plot fingerprint of dictyophora indusiata sample

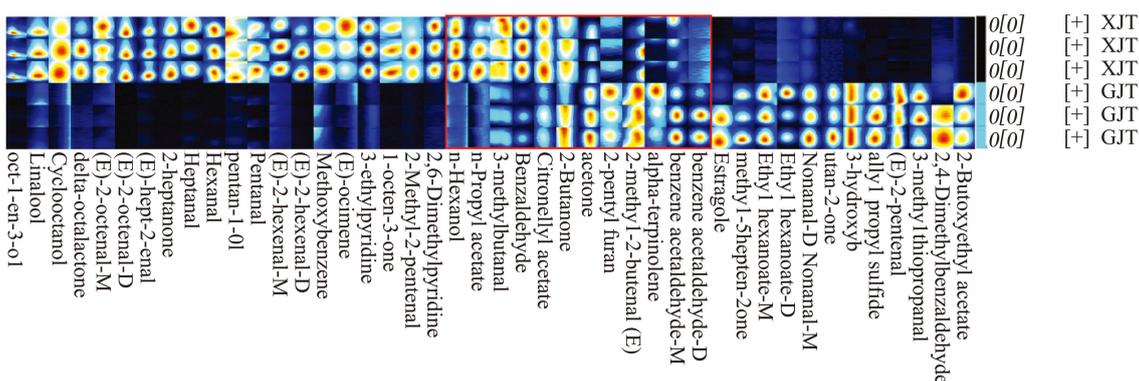


图 9 棘托竹荪样品 Gallery Plot 指纹谱图

Fig.9 Gallery plot fingerprint of dictyophora echinvolvata sample

鲜棘托竹荪中有 32 种挥发性有机化合物，干品中含有 24 种挥发性风味物质，共同存在的有 12 种（如图 9 所示）。其中，苯甲醛（苦杏仁味）、罗勒烯（草香、花香伴有橙花油）、己醇（脂肪及水果甜味）、庚醛（具有油脂气味略带果香特征）、E-2-辛烯醛（脂肪和肉类气味）等在鲜棘托竹荪中含量最高。艾草醚（大茴香味）、乙酸香茅酯（似柠檬油）和 2-丁酮（苯的芳香气味）等在干棘托竹荪中含量最高。干燥前，干燥后棘托竹荪中的苯乙醛（风信子香气）、 $\alpha$ -松油醇（紫丁花香）、2-甲基-2-丁烯醛（青草、醚类和刺激辛辣味）、2-戊基呋喃（豆香、果香、泥土、青草味）和丙酮（微有香气）的含量增加。在干燥过程中，竹荪中苯乙醛的增加可能是苯丙氨酸作为前体物质形成的，形成的途径主要有三个<sup>[51,52]</sup>，第一个途径是氨基酸脱羧酶与苯丙氨酸反应生成苯乙胺，然后被单胺氧化酶脱氨生成苯乙醛；第二个途径是发生了 Strecker 降解，氨基转移酶将苯丙氨酸脱氨基生成丙酮酸苯酯，然后通过苯丙酮酸脱羧酶形成苯乙醛；第三种途径是苯丙氨酸通过酶 CYP97D73 产生苯乙醛肟，然后产生苯乙醛，苯丙氨酸在酶的作用下逐步转化生成苯乙

醛。在王冬<sup>[53]</sup>对葡萄干加工方式的研究中知道，葡萄在干燥过程中发生美拉德反应产生 2-戊基呋喃，棘托竹荪在干燥后测得的较高含量的 2-戊基呋喃可能是在干燥过程中糖类物质与氨基酸或蛋白质反应得到。以上研究结合 Hadi 等<sup>[54]</sup>和 Gonda 等<sup>[55]</sup>的研究推论，一些新物质的产生可能是竹荪在受热干燥过程中细胞受到破坏，细胞中的物质互相接触反应，竹荪中的各种营养物质作为香气前提物质，在一些关键酶的催化作用下形成不同的挥发性风味物质。

### 3 结论

本实验以红托竹荪、棘托竹荪和长裙竹荪的鲜品及干制品作为研究对象，利用 GC-IMS 对其挥发性风味物质进行检测分析，定性分析识别出 54 种挥发性风味物质，其中包含 7 种醇类、11 种酯类、6 种酮类、20 种醛类、2 种醚类、2 种吡啶类、1 种呋喃类、3 种硫化物、1 种烯烃和 1 种羧酸类化合物等。在红托竹荪中酯类的相对含量最高，棘托竹荪中醛类的相对含量最高，长裙竹荪中醇类的含量最高，但是在三个品种的干品中都是醛类物质的含量最高。通过图谱、定性分析和主成分分析等可以

看出,三个竹荪品种及其干品、鲜品之间的挥发性风味物质种类和含量都存在显著的差异。ROAV法分析得到,在已查阅到香气阈值的物质中鲜红托竹荪中有7种化合物是关键香气成分,鲜棘托竹荪中有6种关键香气成分,鲜长裙竹荪中有4种关键香气成分,ROAV值可以根据香味阈值和含量综合判断某种挥发性风味物质对于竹荪整体风味的贡献。实验表明,竹荪干燥前后的风味物质及含量与干燥前存在差异,主要的化合物种类也不同,在三个品种的竹荪干品中,二甲基三硫化物和1-辛烯-3-酮都是很重要的香气成分。GC-IMS可实现对不同竹荪样品的较好区分。该研究基于GC-IMS技术建立了不同竹荪挥发性风味物质的可视化,为更好的区分三种竹荪及其干品鲜品风味提供参考。

### 参考文献

- [1] 梁亚丽,秦礼康,王何柱,等.红托竹荪及竹荪蛋各部位主要营养成分分析[J].食品与机械,2020,36(4):72-76,114.
- [2] 罗丽平,李冰晶,赵景芳,等.贵州不同地区红托竹荪不同部位的营养成分分析[J].中国食用菌,2022,41(8):60-64.
- [3] WANG J Q, WEN X F, YANG B W, et al. De novo transcriptome and proteome analysis of *Dictyophora indusiata* fruiting bodies provides insights into the changes during morphological development [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 875-886.
- [4] 杨晶莹,张驰.竹荪多糖的研究进展[J].山东化工,2020,49(17):54-56,59.
- [5] 杨玲,王万坤,罗丽平,等.红托竹荪菌托多糖提取工艺及抗氧化降血糖活性[J].菌物学报,2023,42(1):418-429.
- [6] WANG W S, SONG X L, GAO Z, et al. Anti-hyperlipidemic, antioxidant and organic protection effects of acidic extractable polysaccharides from *Dictyophora indusiata* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 281-292.
- [7] LIU X Y, CHEN Y X, WU L X, et al. Optimization of polysaccharides extraction from *Dictyophora indusiata* and determination of its antioxidant activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 103: 175-181.
- [8] WANG W S, SONG X L, ZHANG J J. Antioxidation hepatic and renal-protection of water-extractable polysaccharides by *Dictyophora indusiata* on obese mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 290-301.
- [9] WANG J H, ZHANG B W, SUN Y H, et al. Structure of polysaccharide dips-2 from *Dictyophora indusiata* and its effect on anti-fatigue activities [J]. Current Topics in Nutraceutical Research, 2016, 13(4): 213-219.
- [10] WANG Y L, LAI L, TENG L P. Mechanism of the anti-inflammatory activity by a polysaccharide from *Dictyophora indusiata* in lipopolysaccharide-stimulated macrophages [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019,126: 1158-1166.
- [11] HU T, ZHANG K J, PAN D, et al. Inhibition effect of dictyophora polysaccharides on human hepatocellular carcinoma cell line HCC-LM3 [J]. Medical Science Monitor, 2020, 26: 1643-3750.
- [12] 张文岭,赵飞飞,赵丹,等.竹荪多糖对5种肿瘤细胞增殖的抑制效果[J].广西医学,2021,43(18):2209-2213.
- [13] LAI Y, FANG Q, GUO X R. Effect of polysaccharides from *Dictyophora indusiata* on regulating gut microbiota and short-chain fatty acids in mice [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 17(1): 1-11.
- [14] HUA Y, GAO Q, WEN L, et al. Structural characterisation of acid-and alkali-soluble polysaccharides in the fruiting body of *Dictyophora indusiata* and their immunomodulatory active-ties [J]. Food Chemistry, 2012, 132 (2): 739-743.
- [15] 尚京迎.竹荪三螺旋多糖的免疫调节活性研究[D].无锡:江南大学,2016.
- [16] 王斌,李跃华,蔡景尧,等.红托竹荪饮料的初步研究[J].农产品加工(学刊),2006,3:15-16.
- [17] 张永杰,江丽慧,潘明,等.超声波辅助提取长裙竹荪抑菌物质工艺优化及其抑菌活性研究[J].中国调味品,2021,46(4):50-54,60.
- [18] 王德美,刘桂华,杨念龙,等.织金县红托竹荪品质特征分析[J].南方农业,2022,16(3):88-91.
- [19] 毛秋生.让中国竹荪之乡大放光芒[J].中国食用菌,2000,4:37.
- [20] 郑秀艳,黄磊,王培,等.红托竹荪菌托和冬荪菌托的营养价值评价及抗氧化能力分析[J].食品安全质量检测学报,2022,13(13):4374-4382.
- [21] 黄成运.红托竹荪保存过程中主要质量指标检测分析[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [22] 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.
- [23] 梁亚丽.红托竹荪各部位营养与风味成分及鲜浆复合面条品质研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
- [24] 郑杨,黄明泉,孙宝国,等.棘托竹荪挥发性成分分析[J].食品科学,2012,33(20):221-226.
- [25] 陈曦,黄明泉,孙宝国,等.同时蒸馏萃取-气相色谱-质谱联用分析长裙竹荪挥发性成分[J].食品科学,2012,33(14):129-135.
- [26] QIAN X, LI Z M, SONG J H, et al. Research progress on the detection of volatile organic compounds in agricultural food by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2021, 12(18): 7184-7190.
- [27] WANG X, YANG S, HE J, et al. A green triple-locked strategy

- based on volatile-compound imaging, chemometrics, and markers to discriminate winter honey and sapium honey using headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Res Int*, 2019, 119: 960-967.
- [28] 冯韵鸾,佟明慧,李清,等.GC-IMS在食品药品检测方面的研究进展[J].沈阳药科大学学报,2023,40(1):115-123.
- [29] 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: 1096-1127.
- [30] 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,2008,29(7):370-374.
- [31] 郝旭东,张盛贵,王倩文,等.四个不同地区大红袍花椒主体风味物质分析研究及香气评价[J].食品与发酵科技,2021,57(4):63-74.
- [32] 李佳霖,杨焱,李文,等.大球盖菇干制过程香气变化规律及与关键酶促反应的关联性[J].食品科学技术学报,2023,41(1):30-42.
- [33] 李小林,陈诚,清源,等.会东县不同品种块菌挥发性香气成分的GC-MS分析[J].食品科学,2015,36(18):132-136.
- [34] 杨芳,杨莉,张振宇,等.基于气相-离子迁移谱对竹燕窝菌汤风味成分的分析[J].食品工业科技,2020,41(23):8-14,24.
- [35] 李巧珍,李晓贝,吴迪,等.不同杏鲍菇菌株工厂化栽培子实体的挥发性风味成分分析及其香气评价[J].食品科学,2019,40(6):265-270.
- [36] 杨靖,宋梦坤,杨鹏飞,等.基于香气活力值的烤烟烟叶清(青)香风格特征分析[J].烟草科技,2020,53(1):34-43
- [37] 李丛聪.不同食盐浓度腌制油菜苔风味特征及理化品质研究[D].长沙:湖南农业大学,2021.
- [38] 兰秀华.羊肚菌营养品质形成因素分析、功能成分鉴定及液体发酵应用[D].成都:电子科技大学,2023.
- [39] 刘子琪.牛肝排风味差异分析及贮藏稳定性评价[D].兰州:甘肃农业大学,2022.
- [40] 陈丽兰,陈祖明,袁灿.GC-IMS结合化学计量法分析不同炒制时间对郫县豆瓣酱挥发性化合物的影响[J].食品科学,2023,44(14):283-290.
- [41] 裴斐.双孢蘑菇冷冻干燥联合微波真空干燥传质动力学及干燥过程中风味成分变化研究[D].南京:南京农业大学,2014.
- [42] GUO Y, CHEN D, 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]. *J Chromatogr B*, 2018, 1099: 46-55.
- [43] 陈洪雨,鲍大鹏,康前进,等.香菇挥发性风味物质的研究进展[J].食用菌学报,2018,25(4):105-114.
- [44] BOZOK F, ZARIFIKHOSROSHAHI M, KAFKAS E, et al. Comparison of volatile compounds of fresh *Boletus edulis* and *B. pinophilus* in Marmara region of Turkey [J]. *Not Bot Horti Agrobot Cluj-Na*, 2015, 31(1): 192-195.
- [45] 殷朝敏,范秀芝,樊喆,等.14种侧耳属食用菌干品挥发性香味成分分析[J].食品科学,2018,39(16):240-246.
- [46] 程玉娇,李贵节,翟雨淋,等.食品中挥发性硫化物的研究进展[J].食品与发酵工业,2019,45(4):229-235.
- [47] 彭雨露.乳酸菌协同酶解发酵制备稀奶油-大豆分离蛋白复合风味香基的研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [48] 戚贺亭.湘柑茶的干燥工艺及不同柑橘原料对其综合品质的影响[D].长沙:湖南大学,2021.
- [49] 袁桃静.油脂及炸制条件对油炸罗非鱼风味影响的研究[D].南宁:广西大学,2021.
- [50] 唐秋实,陈智毅,刘学铭,等.几种干燥方式对金针菇子实体挥发性风味成分的影响[J].食品工业科技,2015, 36(10):119-124.
- [51] ZHAO G, DING L L, HADIATULLAH H, et al. Characterization of the typical fragrant compounds in traditional Chinese-type soy sauce [J]. *Food Chemistry*, 2019, 312: 126054.
- [52] ZENG L, TIAN H, LIAO Y, et al. Increasing temperature changes flux into multiple biosynthetic pathways for 2-phenylethanol in model systems of tea (*Camellia sinensis*) and other plants [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(36): 10145-10154.
- [53] 王冬.葡萄干特征干化香气组成及其产生机制研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [54] EI H, MUNA A M, ZHANG F J, et al. Advances in fruit aroma volatile research [J]. *Molecules*, 2013, 18: 8200-8229.
- [55] GONDA I, BAR E, PORTONY V, et al. Branched-chain and aromatic amino acid catabolism into aroma volatiles in *Cucumis melo* L. fruit [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(4): 1111-1123.