黄晓润, 黄万兵, 郭银萍, 等. 黔产干品红托竹荪不同部位的关键挥发性风味物质比较分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 11−22. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050025

HUANG Xiaorun, HUANG Wanbing, GUO Yinping, et al. Comparative Analysis of Key Volatile Flavor Compounds in Different Parts of Dried *Dictyophora rubrovolvata* from Guizhou[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 11−22. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050025

·特邀主编专栏—地方特色食品:加工技术、感官品质、风味特性和营养健康(客座主编:易俊洁、和劲松、郭超凡)·

黔产干品红托竹荪不同部位的关键挥发性风味物质比较分析

黄晓润[1], 黄万兵[1,*], 郭银萍[1], 龚光禄[1], 杨通静[1], 李巧珍[2,*], 陈万超[2], 周　峰[2], 刘倾城[1], 刘宏宇[1], 卢颖颖[1], 桂　阳[1]

(1.贵州省农作物品种资源研究所,贵州省农业微生物全省重点实验室,贵州省食用菌育种重点实验室,贵州贵阳 550006;
2.国家食用菌工程技术研究中心,农业部应用真菌资源与利用重点开放实验室,上海市农业科学院食用菌研究所,上海 201403)

摘　要:研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS),结合主成分分析法(PCA)、正交偏最小二乘判别分析(PLS-DA)及气味活度值(OAV),系统分析干品红托竹荪(*Dictyophora rubrovolvata*)菌盖、菌裙、菌柄的挥发性风味物质组成及差异性。结果显示,共鉴定出 151 种挥发性化合物,涵盖酯类、萜类、酮类等 11 类物质,三个部位的挥发性物质种类和物质含量存在差异,菌裙和菌柄对整体风味的贡献显著高于菌盖。PCA 与 PLS-DA 分析证实,三个部位的挥发性风味物质组成差异显著,PLS-DA 共筛选出 57 种 VIP>1 的差异化合物,以醇类、萜类、烃类为主,结合 OAV 值分析发现,三个部位共有的 5 种 OAV≥1 但 VIP<1 的挥发性风味物质,(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、(E,E)-2,4-壬二烯醛、1-壬醇、三甲基恶唑和乙酸-2-戊酯是构成干品红托竹荪的基调风味物质;对比各部位 OAV≥1 且 VIP>1 的特异性关键风味物质,菌盖为(Z)-6-壬烯-1-醇,赋予菌盖鲜味和青草香味;菌裙为反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇、4,4-二甲基-2-戊酮、4,5-二氯-2-甲氧基苯酚和(Z)-6-壬烯-1-醇,其中前三种物质可作为菌裙区别于其他部位的关键性风味物质;菌柄为 3-环己烯甲酸乙酯,可赋予菌柄黄瓜味,青草香,是其高贡献成分,可作为菌柄的关键风味标识物质。研究结果为红托竹荪品质育种、部位特异性加工及风味调控提供了理论依据。

关键词:红托竹荪,挥发性风味物质,菌盖,菌裙,菌柄,HS-SPME-GC-MS,气味活度值(OAV)
中图分类号:S646.8　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)10−0011−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050025
本文网刊:

Comparative Analysis of Key Volatile Flavor Compounds in Different Parts of Dried *Dictyophora rubrovolvata* from Guizhou

HUANG Xiaorun[1], HUANG Wanbing[1,*], GUO Yinping[1], GONG Guanglu[1], YANG Tongjing[1], LI Qiaozhen[2,*], CHEN Wanchao[2], ZHOU Feng[2], LIU Qingcheng[1], LIU Hongyu[1], LU Yingying[1], GUI Yang[1]

(1.Institute of Crop Germplasm Resources, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guizhou Provincial Key Laboratory of Agricultural Microbiology, Guizhou Provincial Key Laboratory of Edible Fungus Breeding,

收稿日期: 2025−05−08
基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合成果 [2024] 一般 132 号);贵州省农业微生物全省重点实验室(黔科合平台 [2025]029);贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023] 一般 172);贵州省山地农业关键核心技术攻关项(GZNYGJHX-2023002)。
作者简介: 黄晓润(1995−),女,硕士,助理研究员,研究方向:药食用菌繁育、资源利用与加工等研究,E-mail:970711473@qq.com。
*** 通信作者:** 黄万兵(1988−),男,硕士,副研究员,研究方向:药食用菌繁育与栽培,E-mail:850083464@qq.com。
李巧珍(1986−),女,硕士,副研究员,研究方向:食用菌品质育种与栽培,E-mail:liqiaozhen@saas.sh.cn。

Guiyang 550006, China;
2.National Engineering Research Center for Edible Fungi, Key Open Laboratory of Applied Fungal Resources and Utilization, Ministry of Agriculture, Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract: In this study, headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was employed, in conjunction with principal component analysis (PCA), partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA), and odor activity value (OAV), to systematically investigate the composition and differential distribution of volatile flavor compounds in the pileus, indusium, and stipe of dried *Dictyophora rubrovolvata*. The results demonstrated that a total of 151 volatile compounds were identified, encompassing 11 types of substances such as esters, terpenes, and ketones. Notable variations were observed in both the types and contents of volatile compounds across the three morphological parts. Specifically, the contributions of the indusium and stipe to the overall flavor profile were significantly greater than that of the pileus. PCA and PLS-DA analyses confirmed that the volatile flavor compounds in the three regions exhibited significant compositional differences, enabling effective differentiation. PLS-DA jointly screened 57 differential compounds with VIP>1, primarily comprising alcohols, terpenes, and hydrocarbons. Combined OAV value analysis revealed five volatile flavor compounds common to all three parts with OAV≥1 but VIP<1: (E,E)-3,5-octadien-2-one, (E,E)-2,4-nonadienal, 1-nonanol, trimethyloxazole, and 2-pentyl acetate. They were recognized as the key shared flavor substances among the three parts and serve as the core volatile flavor compounds that define the basic flavor keynote of dried *Dictyophora rubrovolvata*. Comparing the specific key flavor compounds with OAV≥1 and VIP>1 across different parts, the pileus contained (Z)-6-nonen-1-ol, imparting umami and grassy notes. The indusium contained trans, cis-2,6-nonadien-1-ol, 4,4-dimethyl-2-pentanone, 4,5-dichloro-2-methoxyphenol, and (Z)-6-nonen-1-ol. The first three substances could serve as key flavor compounds that distinguish indusium from other parts. The stipe contained ethyl 3-cyclohexenecarboxylate, which imparted cucumber and grassy aromas to the stem. This compound was a high-contribution component and could serve as a key flavor identifier for the stipe. The findings of this study provide a theoretical foundation for quality-oriented breeding, part-specific processing, and flavor modulation of *Dictyophora rubrovolvata*.

Key words: *Dictyophora rubrovolvata*; volatile flavor compounds; pileus; indusium; stipe; HS-SPME-GC-MS; odor activity value (OAV)

红托竹荪(*Dictyophora rubrovalvata*)是竹荪类食用菌中鲜有的清香型且久煮不烂的特色珍稀品种[1−3]。其种质资源分布区域较为局限,主要集中在我国西南地区,其中以贵州为核心分布区。国内 7 个省级红托竹荪认定品种中,6 个源自贵州。红托竹荪的菌盖口感较脆,略带嚼劲,味道清淡,有“素毛肚”之称;菌裙质地柔软,入口滑嫩,味道鲜美;菌柄口感脆嫩,类似竹笋,味道清甜,其烘干后有鲜香味。红托竹荪还富含多糖、蛋白质、氨基酸、维生素、多种微量元素和膳食纤维,具有很高的食药用价值[4−7]。

红托竹荪的主要农艺性状包括产量、品质和颜色等,近年来红托竹荪的挥发性风味物质也成为其重要的农艺性状之一[8]。食用菌的风味物质主要由挥发性风味物质和非挥发性风味物质组成,其中挥发性风味物质是食用菌风味的主要组分[9−10],包括八碳化合物及其衍生物、含硫化合物以及醛类、酮类、酸类、醇类和酯类等物质[11],挥发性风味物质是评价食用菌产品价值的重要指标之一,也是影响消费者选择的重要因素之一,红托竹荪也因其独特的“清香味”受到广泛关注。顶空固相微萃取和气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)已广泛应用于食品中,相较于有机溶剂萃取法和水蒸气蒸馏法,该方法具有较好的准确度和精确度,且在食用菌挥发性成分分析中应用广泛,已在灰树花、香菇、松茸、猴头菇、牛肝菌、真姬菇和茶树菇[12−16] 等多种食用菌品种中得到应用和报道。

近年来,红托竹荪在野生资源驯化、栽培技术、病虫害防治、液体菌种开发、多糖提取、营养成分分析及酶活性研究等领域取得了丰硕成果[17−23],但针对其菌盖、菌裙和菌柄三个部位的挥发性风味物质的系统研究仍未见报道,解析红托竹荪不同部位风味物质的组成差异,可为辅助选育优质风味品种和开发红托竹荪不同部位风味产品提供理论基础。为此,研究采用 HS-SPME-GC-MS 技术对其进行挥发性化合物提取与鉴定,同时结合主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘判别分析(PLS-DA)判别分析三个部位挥发性风味物质的差异,计算气味活度值(OAV)确定三个部位挥发性风味物质中的关键性风味物质,旨在解析三个部位的关键性挥发性风味物质,不仅为筛选优质品种建立香气品质评价体系,更为精准调控加工工艺提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红托竹荪新鲜子实体(黔荪‘yzs020’)[24](图 1)出菇于贵州省农业科学院内出菇房,由贵州省农作物品种资源研究所提供;氯化钠(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;正己烷(色谱纯) 德国 Merck 公司;氘代对二甲苯-d10(色谱纯) 上海易恩化学技术

有限公司。

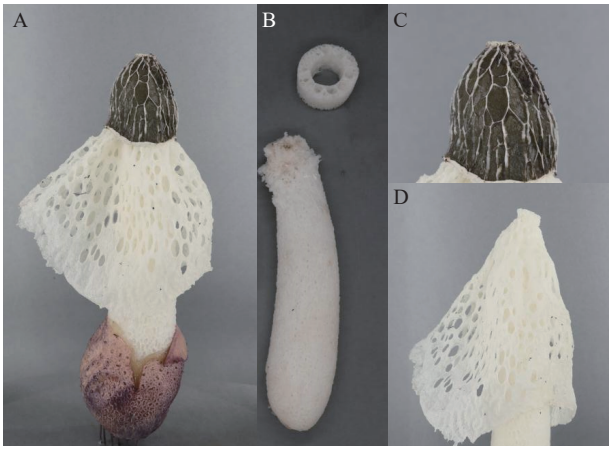


图 1　黔荪‘yzs020’整体图（A）、菌柄图（B）、菌盖图（C）和菌裙图（D）

Fig.1　Qian Sun 'yzs020' overall view (A), stalk diagram (B), cap diagram (C) and gills diagram (D)

120 μmDVB/CWR/PDMS 萃取头、8890-7000 DGC-MS/MS、DB-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm）色谱柱　Agilent 公司；MM400 球磨仪　德国 Retsch 公司；MS105DU 电子天平　梅特勒-托利多公司；SPME Arrow 固相微萃取装置、Fiber Conditioning Station 老化装置、Agitator 样品加热箱　瑞士思特斯分析仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　新鲜红托竹荪经挑选、将带有孢子的菌盖分离后清洗并擦干，然后将菌裙、菌柄进行分离，放入烘干机中烘干至恒重备用；取红托竹荪三个部位的样品分别进行液氮研磨，涡旋混合均匀，每个样本称取约 500 mg 于顶空瓶中；分别加入 2 mL 饱和 NaCl 溶液和 20 μL（10 μg/mL）氘代对二甲苯-d10 内标溶液；全自动顶空固相微萃取 HS-SPME 进行样本萃取，以供 GC-MS 分析。

1.2.2　GC-MS 分析　参考 WANG 等[25] 的方法，并作适当调整。HS-SPME 萃取条件：在 60 ℃ 恒温条件下，振荡 5 min，120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于 250 ℃ 下解析 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定。采样前萃取头在 Fiber Conditioning Station 中 250 ℃ 下老化 5 min。色谱条件：DB-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氦气（纯度不小于 99.999%），恒流流速 1.2 mL/min，进样口温度 250 ℃，不分流进样，溶剂延迟 3.5 min。程序升温：40 ℃ 保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 7 ℃/min 升至 180 ℃，最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃，保持 5 min。

质谱条件：电子轰击离子源（EI），离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃，质谱接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，扫描方式为选择离子检测模式（SIM），定性定量离子精准扫描（GB 23200.8-2016）。

1.2.3　挥发性化合物定性及定量分析　基于多物种、文献、部分标品以及保留指数的自建数据库，采用 Mass Hunter 定量软件和内标半定量法进行定性定量分析。

挥发性化合物的含量通过公式计算得出。其计算公式为：

$$X_i = \frac{V_s \times C_s}{M} \times \frac{I_i}{I_s} \times 10^{-3}$$

式中，X_i 为待测样品中化合物的含量（μg/g）；V_s 为加入内标物的体积（μL）；C_s 为内标物的浓度（μg/mL）；M 为待测样品的质量（g）；I_s 为内标物的峰面积；I_i 为待测样品中化合物 i 的峰面积。

1.2.4　气味活度值　参考相关文献 [26−28] 进行 OAV 分析，其计算公式如下：

$$OAV_i = \frac{C_i}{T_i}$$

式中，OAV_i 为化合物 i 的气味活度值，C_i 为化合物的含量（μg/g）；T_i 为化合物的阈值（Threshold，μg/g）。

1.3　数据处理

实验均设置 3 次平行，结果采用平均值±标准差表示。试验数据采用 Excel 2016 软件处理。Origin 2022 绘制相关图表，通过（https://cloud.metware.cn/#/user/login）进行 PCA 和 PLS-DA 分析。

2　结果与分析

2.1　干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄挥发性风味物质的成分分析

2.1.1　干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄挥发性风味物质的种类和数量　干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄挥发性成分总离子流图谱如图 2 所示，菌盖、菌裙和菌柄的挥发性成分 GC-MS 分析结果如表 1，检出成分的种类和含量对比如图 3、图 4 所示。

2.1.2　干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄挥发性风味成分组成分析　对干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄的挥发性成分进行了分析，从图 3、图 4 和表 1 可看出，共检测出 151 种挥发性风味物质，分为 11 类物质，其中包括醚类 2 种、酸类 5 种、酚类 7 种、含氮化合物 10 种、醛类 12 种、杂环化合物 14 种、酮类 17 种、烃类 20 种、醇类 20 种、酯类 21 种、萜类 23 种。萜类物质、酯类物质、醇类物质、烃类物质和酮类物质这些挥发性风味物质为干品红托竹荪三个部位主要的挥发性风味物质，这与李莉莉等[29]、邹青青等[30] 和 MENG 等[31] 的结果类似。

与菌裙、菌柄相比，红托竹荪菌盖的挥发性风味物质种类及总含量都较低，分析其原因可能是因为菌盖的核心功能是承载孢子进行繁殖，其功能决定了其代谢资源优先供给孢子发育，而非次生代谢物合成，疏松高水的结构限制了化合物储存，暴露环境加速了

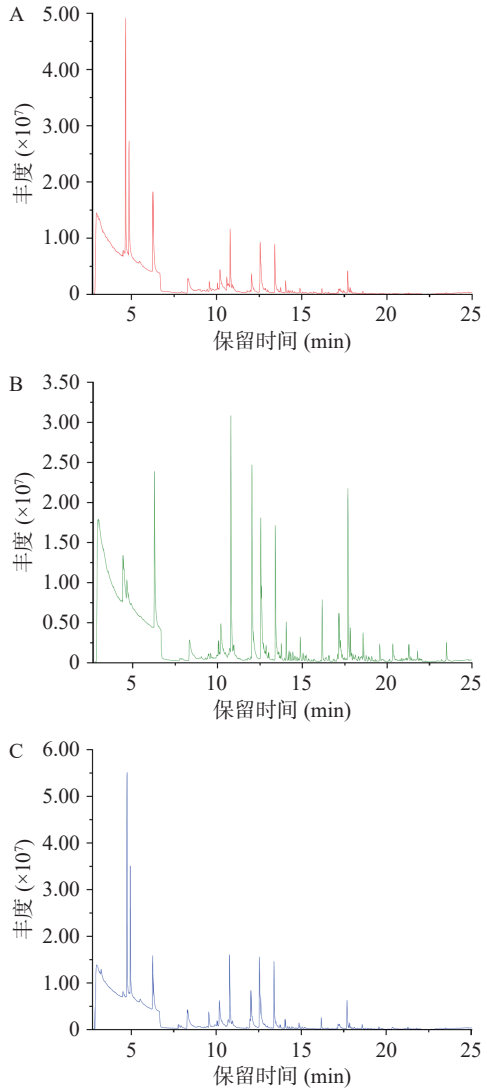


图 2　干品红托竹荪菌盖(A)、菌裙(B)和菌柄(C)的挥发性成分总离子流图

Fig.2　Total ion flow diagram of volatile components of cap (A), skirt (B), and stem (C) of dried *Dictyophora rubrovalvata*

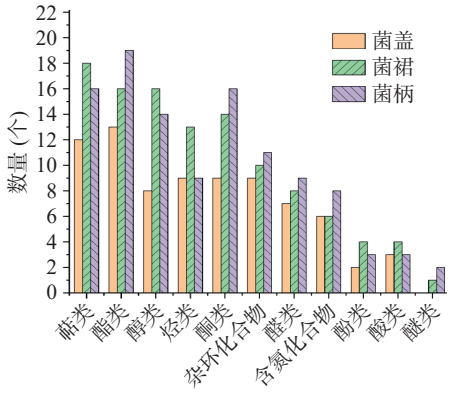


图 3　干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄的挥发性风味物质种类分布

Fig.3　Types of volatile compounds in the pileus, indusium, and stipe of dried *Dictyophora rubrovalvata*

化合物流失与降解，导致其目标化合物的种类(次生代谢物如挥发性风味物质的多样性低)和总含量(储存少、流失多)低于其他部位[32]。其特有的含量较高

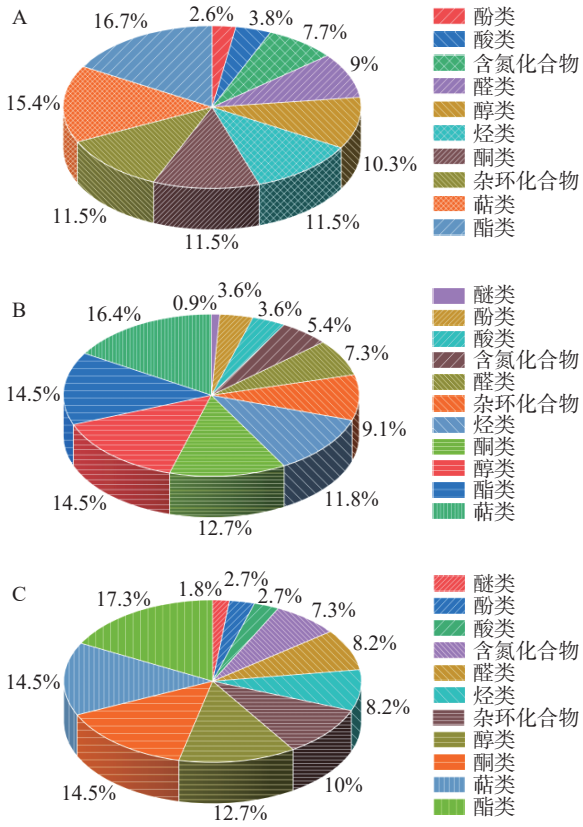


图 4　干品红托竹荪菌盖(A)、菌裙(B)和菌柄(C)的挥发性风味物质种类占比

Fig.4　Proportional distribution of volatile compounds in the cap (A), skirt (B), and stem (C) of dried *Dictyophora rubrovalvata*

的物质中 8-甲基-6-壬酸、2-甲基丁酸-2-甲基丙基酯、糠基庚酸酯、3-甲基苯甲醛、3-羟基-4-甲氧基苯甲醛、2-异丙基吡嗪等这部分物质具有甜香、果香味及青草味，它们对红托竹荪的香气风味具有重要贡献。癸烷、2,4-二甲基苯酚、5-异丙基-2-甲基吡嗪、γ-松油烯、3,4-二甲基苯酚有烘烤烟熏味的风味，可能是红托竹荪鲜品经加工干燥后形成的风味。

红托竹荪菌裙和菌柄相比，其物质分类都是 11 种，但挥发性风味物质种类和含量存在少量差异，可能主要源于二者独特的结构与发育代谢特性，菌裙呈网状，表面积大，但菌柄的横切面呈现更密切网状连锁结构，既为风味物质合成提供充足空间，又能高效储存避免流失，同时发育过程中，菌柄直接接触栽培基质，能给其直接提供碳水化合物、氨基酸等发育营养物质，而相比供给菌裙的营养物质通过层层消耗会减少，这些营养物质通过莽草酸途径、脂肪酸降解等通路，持续转化为风味物质前体，发育过程中环境影响可进一步激活相关代谢酶活性，推动风味物质大量合成[33]，导致最终菌柄的总含量稍大于菌裙。部分物质如菌裙特有的含量较高的物质(E)-6-壬烯-1-醇、(Z)-6-壬烯-1-醇、反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇具有青草味、甜瓜味、花香味、蜂蜜香味等味道，它们为红托竹荪的香气风味提供主要贡献，反式胡椒醇有辛辣的

表 1　红托竹荪干品子实体菌盖、菌裙和菌柄中的挥发性风味物质

Table 1　Volatile compounds in the cap, skirt, and stem of dried *Dictyophora rubrovalvata* fruiting bodie

序号	化合物名称	分子式	分子质量	含量(μg/kg)		
				菌盖	菌裙	菌柄
1	对二甲苯-d10	C_8D_{10}	116.14	686.63±6.19^a	681.45±2.99^a	–
2	(E)-6-壬烯-1-醇	$C_9H_{18}O$	142.14	–	474.81±23.33	–
3	8-甲基-6-壬酸	$C_{10}H_{18}O_2$	170.13	414.46±20.57	–	–
4	2-甲基丁酸-2-甲基丙基酯	$C_9H_{18}O_2$	158.13	414.46±20.57	–	–
5	癸烷	$C_{10}H_{22}$	142.172	239.19±12.95	–	–
6	1,5-戊二胺	$C_5H_{14}N_2$	102.12	222.53±14.15	–	–
7	糠基庚酸酯	$C_{12}H_{18}O_3$	210.13	116.69±9.71^a	1.38±0.14^b	–
8	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	$C_{12}H_{26}$	170.2	73.72±6.53	–	–
9	2,4-二甲基苯酚	$C_8H_{10}O$	122.07	73.72±6.53	–	–
10	3-乙基-2-甲基庚烷	$C_{10}H_{22}$	142.17	65.67±1.49	–	–
11	3-羟基-4-甲氧基苯甲醛	$C_8H_8O_3$	152.05	49.69±2.55	–	–
12	N-乙基苯胺	$C_8H_{11}N$	121.09	46.72±1.66	–	–
13	3-甲基苯甲醛	C_8H_8O	120.06	46.52±2.60	–	–
14	二氢-3-亚甲基-2(3H)-呋喃酮	$C_5H_6O_2$	98.04	46.52±2.60	–	–
15	5-异丙基-2-甲基吡嗪	$C_8H_{12}N_2$	136.1	39.96±2.35	–	–
16	γ-松油烯	$C_{10}H_{16}$	136.13	39.61±1.78	–	–
17	3,4-二甲基苯酚	$C_8H_{10}O$	122.07	36.53±0.50	–	–
18	2-异丙基吡嗪	$C_7H_{10}N_2$	122.09	35.81±1.89	–	–
19	(Z)-6-壬烯-1-醇	$C_9H_{18}O$	142.14	35.81±1.89^b	474.81±23.33^a	–
20	反式胡椒醇	$C_{10}H_{18}O$	154.14	35.13±1.16^c	262.54±15.41^b	673.05±11.61^a
21	硫代乙酸糠酯	$C_7H_8O_2S$	156.03	32.32±1.65^c	267.18±13.28^b	594.36±28.99^a
22	2-丙基-2-庚烯醛	$C_{10}H_{18}O$	154.14	32.06±3.28^c	142.85±7.82^b	594.36±28.99^a
23	2,2,3,3-四甲基环丙烷甲醇	$C_8H_{16}O$	128.12	28.02±2.07^b	24.17±1.96^b	349.01±16.32^a
24	甲酸异冰片酯	$C_{11}H_{18}O_2$	182.13	28.02±2.07^c	94.96±7.94^b	340.19±18.25^a
25	环辛烷甲醇	$C_9H_{18}O$	142.14	28.02±2.07^c	88.72±7.92^b	179.18±8.76^a
26	2,4-壬二酮	$C_9H_{16}O_2$	156.12	27.94±0.26^c	113.03±8.34^b	134.97±2.65^a
27	己酸-2-丙烯酯	$C_9H_{16}O_2$	156.12	27.80±0.34^c	79.14±1.16^b	121.25±5.60^a
28	2,6-壬二烯-1-醇	$C_9H_{16}O$	140.12	27.63±1.51^c	56.70±4.33^b	121.25±5.60^a
29	糠基硫醚	$C_{10}H_{10}O_2S$	194.04	27.40±2.22^b	75.27±10.43^a	86.10±0.93^a
30	1-壬醇	$C_9H_{20}O$	144.15	24.37±0.45^c	47.91±2.96^b	72.47±4.11^a
31	2-[(2-氨基乙基)氨基]乙醇	$C_4H_{12}N_2O$	104.1	23.44±0.57^c	72.52±1.81^b	81.58±2.05^a
32	(3R,6R)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇	$C_{10}H_{18}O_2$	170.13	23.42±3.01^c	39.61±3.11^b	74.72±3.44^a
33	己酸异丁酯	$C_{10}H_{20}O_2$	172.15	22.21±1.43^b	64.55±4.25^a	60.49±3.06^a
34	(S)-2-甲基-6-亚甲基-2,7-辛二烯-4-醇	$C_{10}H_{16}O$	152.12	21.98±0.15^b	59.76±2.56^a	61.19±1.94^a
35	3-(甲硫基)-(E)-2-丙烯酸乙酯	$C_6H_{10}O_2S$	146.04	21.69±0.23^b	65.70±4.55^a	63.12±2.00^a
36	3(2H)-哒嗪酮	$C_4H_4N_2O$	96.03	21.58±1.04^c	35.02±3.19^b	56.39±3.96^a
37	丁酸-3-甲基-3-亚硝基甲酯	$C_6H_{11}NO_3$	145.07	21.23±1.28^b	–	53.24±2.74^a
38	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	$C_8H_{12}O$	124.09	21.23±1.28^b	47.64±10.53^a	53.24±2.74^a
39	1-乙酰基-1H-咪唑	$C_5H_6N_2O$	110.05	21.23±1.28^b	49.31±10.00^a	44.39±2.29^a
40	2-甲基十一烷	$C_{12}H_{26}$	170.2	21.23±1.28^b	40.59±0.51^a	41.10±2.95^a
41	2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇	$C_{10}H_{20}O$	156.15	19.36±0.33^b	38.76±2.79^a	41.22±2.41^a
42	4-甲基-1-(1-甲基乙烯基)环己烯	$C_{10}H_{16}$	136.13	19.03±0.35^c	25.89±1.81^b	46.04±2.34^a
43	3-甲基丁酸-1-乙烯基-1,5-二甲基-4-己烯酯	$C_{15}H_{26}O_2$	238.19	16.79±0.21^b	39.19±2.54^a	39.83±0.93^a
44	1,1'-(1,4-亚苯基)双乙酮	$C_{10}H_{10}O_2$	162.07	16.79±0.21^b	38.47±2.63^a	39.83±0.93^a
45	2,5-呋喃甲醛	$C_6H_4O_3$	124.02	16.66±1.19^b	45.95±1.78^a	45.35±7.50^a
46	2-甲基-6-亚甲基辛基-2,7-二烯酮	$C_{10}H_{14}O$	150.1	16.37±0.73^b	21.95±1.58^b	45.35±7.50^a
47	3,4-二甲基十一烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	16.34±0.88^b	34.21±5.17^a	34.87±1.69^a
48	(Z)-2-壬烯醛	$C_9H_{16}O$	140.12	16.28±1.10^b	–	37.62±2.67^a
49	优降宁	$C_{11}H_{13}N$	159.11	15.91±0.35^c	27.16±2.32^b	36.51±0.39^a
50	反式-香芹醇	$C_{10}H_{16}O$	152.12	15.72±0.81^c	26.14±1.44^b	36.20±0.40^a
51	5-甲基十二烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	15.36±0.83^b	–	28.30±4.02^a
52	乙酸-2-戊酯	$C_7H_{14}O_2$	130.1	14.68±0.97^b	29.35±0.67^a	28.04±3.89^a

续表 1

序号	化合物名称	分子式	分子质量	含量(μg/kg)		
				菌盖	菌裙	菌柄
53	5-壬烯-2-酮	$C_9H_{16}O$	140.12	14.27±0.36^c	27.91±2.43^b	42.11±7.04^a
54	D-(-)-泛酰内酯	$C_6H_{10}O_3$	130.06	14.11±1.36^b	29.99±1.18^a	35.68±2.65^a
55	(-)-马兜铃烯	$C_{15}H_{24}$	204.19	14.10±0.61^b	31.75±0.36^a	33.61±1.49^a
56	四氢-6-丙基-2H-吡喃-2-酮	$C_8H_{14}O_2$	142.1	14.05±0.90^c	27.29±1.90^b	33.61±1.49^a
57	2-吡咯烷酮	C_4H_7NO	85.05	13.91±2.28^b	27.73±1.43^a	33.61±1.49^a
58	1-辛醇	$C_8H_{18}O$	130.14	13.44±1.06^c	27.89±1.35^b	33.61±1.49^a
59	(4aS-cis)-2,4a,5,6,7,8,9,9a-八氢-3,5,5-三甲基-9-亚甲基-1H-苯并环庚烯	$C_{15}H_{24}$	204.19	12.93±0.80^b	30.10±0.92^a	29.63±0.29^a
60	(1R, 9R, E)-4,11,11-三甲基-8-亚甲基双环[7.2.0]十一碳-4-烯	$C_{15}H_{24}$	204.19	12.76±1.32^b	28.42±0.48^a	28.24±0.25^a
61	3,6-二甲基-4H-呋喃并[3,2-c]吡喃-4-酮	$C_9H_8O_3$	164.05	12.73±0.42^b	31.78±2.39^a	30.40±1.16^a
62	3-乙基-3-甲基癸烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	12.40±0.81^b	25.45±1.05^a	23.93±2.29^a
63	山梨酸	$C_6H_8O_2$	112.05	12.40±0.81^b	27.27±0.98^a	23.93±2.29^a
64	异二氢香芹酚	$C_{10}H_{18}O$	154.14	12.27±0.57^b	18.01±1.61^a	22.15±2.87^a
65	三甲基恶唑	C_6H_9NO	111.068	12.27±0.57^b	21.60±0.26^a	22.15±2.87^a
66	甲酸芳樟酯	$C_{11}H_{18}O_2$	182.13	12.27±0.57^c	18.27±1.60^b	24.38±1.87^a
67	α-甲基-4-(2-甲基丙基)苯乙醛	$C_{13}H_{18}O$	190.14	12.15±1.06^b	23.52±3.37^a	25.82±0.46^a
68	十一碳烯酸	$C_{11}H_{20}O_2$	184.146	11.54±0.58^b	26.93±2.60^a	25.02±0.70^a
69	(E)-2-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$	128.12	11.54±0.58^b	20.33±1.99^a	19.21±2.73^a
70	1,2,4,5-四嗪-3-胺	$C_2H_3N_5$	97.039	11.54±0.58^c	29.02±1.82^b	18.89±2.66^a
71	对羟基苯甲酸甲酯	$C_8H_8O_3$	152.05	11.43±0.68^b	30.03±3.77^a	18.89±2.66^b
72	1,5-二氮杂双环[3.1.0]己烷	$C_4H_8N_2$	84.07	11.27±0.68^b	12.21±0.50^b	18.78±2.67^a
73	N-苯基甲酰胺	C_7H_7NO	121.05	11.27±0.68^b	15.57±1.30^b	21.93±1.63^a
74	左旋龙脑	$C_{10}H_{18}O$	154.14	11.02±0.86^c	15.50±1.28^b	24.11±0.33^a
75	5-(2-甲基丙基)壬烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	10.83±0.75^b	15.62±0.96^a	–
76	1-壬胺	$C_9H_{21}N$	143.17	10.79±0.79^b	21.21±1.24^a	23.93±1.10^a
77	2-辛烯-4-酮	$C_8H_{14}O$	126.1	10.79±0.79^b	–	21.90±0.21^a
78	4'-羟基苯乙酮	$C_8H_8O_2$	136.05	10.21±0.18^b	22.51±1.70^a	23.08±0.97^a
79	(E,E)-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	138.1	10.05±0.19^b	13.15±1.14^b	16.35±2.45^a
80	反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇	$C_9H_{16}O$	140.12	–	56.70±4.33	–
81	4,4-二甲基-2-戊酮	$C_7H_{14}O$	114.104	–	53.32±2.97	–
82	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	$C_{10}H_{18}O_2$	170.13	–	39.61±3.11	–
83	(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇	$C_{10}H_{18}O_2$	170.13	–	39.61±3.11	–
84	1-乙基-2,5-吡咯烷二酮	$C_6H_9NO_2$	127.06	–	41.44±2.33^b	74.72±3.44^a
85	(E,E)-2,6-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	138.1	–	39.19±2.05^a	25.76±4.32^b
86	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	138.1	–	39.19±2.05^a	34.72±1.55^a
87	α-马榄烯	$C_{15}H_{24}$	204.19	–	31.75±0.36	–
88	(4S, 7R, 7aR)-2,4,5,6,7,7a-六氢-3,7-二甲基-4-(2-甲基-1-丙烯基)-1H-茚	$C_{15}H_{24}$	204.19	–	28.42±0.48	–
89	(-)-反式-异胡椒醇	$C_{10}H_{16}O$	152.12	–	26.14±1.44	–
90	香芹醇	$C_{10}H_{16}O$	152.12	–	26.14±1.44	–
91	(-)-顺式-异胡椒醇	$C_{10}H_{16}O$	152.12	–	26.14±1.44	–
92	2-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$	128.12	–	20.33±1.99	–
93	(Z)-2-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$	128.12	–	20.33±1.99	–
94	6-乙基四氢-2H-吡喃-2-酮	$C_7H_{12}O_2$	128.08	–	18.53±0.81^a	20.59±1.13^a
95	反式-2-己烯基异戊酸酯	$C_{11}H_{20}O_2$	184.15	–	16.15±2.58^a	16.36±1.79^a
96	8-壬烯-2-酮	$C_9H_{16}O$	140.12	–	17.22±1.18^a	16.01±2.41^a
97	1-乙酰吡咯烷	$C_6H_{11}NO$	113.084	–	18.48±0.25^b	20.21±0.29^a
98	1-壬烯-3-醇	$C_9H_{18}O$	142.14	–	16.58±1.32^a	20.29±1.22^a
99	龙脑	$C_{10}H_{18}O$	154.14	–	15.50±1.28	–
100	2-甲基-5-丙基壬烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	15.62±0.96	–
101	5-甲基-5-丙基壬烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	15.62±0.96	–
102	辛腈	$C_8H_{15}N$	125.12	–	15.63±1.33^b	20.21±0.29^a
103	5-乙基-2-甲基辛烷	$C_{11}H_{24}$	156.188	–	15.85±2.04^b	20.59±1.13^a
104	[1S-(1α, 3β, 3aβ, 4α, 8aβ.)]-十氢-1,5,5,8a-四甲基-1,4-甲七氮烯醇	$C_{15}H_{26}O$	222.2	–	17.15±2.11^a	17.38±0.71^a

续表 1

序号	化合物名称	分子式	分子质量	含量(μg/kg)		
				菌盖	菌裙	菌柄
105	2-甲基环戊酮	$C_6H_{10}O$	98.07	–	15.52±0.43^b	19.91±1.11^a
106	3-甲基环戊酮	$C_6H_{10}O$	98.07	–	15.52±0.43	–
107	2-甲基丙烯酸酐	$C_8H_{10}O_3$	154.06	–	15.47±0.55	–
108	2,5-噻吩二甲醛	$C_6H_4O_2S$	139.99	–	13.07±1.23^b	20.36±0.81^a
109	2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	138.1	–	13.15±1.14	–
110	4,4-二甲基十一烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	12.47±1.93^b	17.33±0.41^a
112	2,6-二甲基十一烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	12.47±1.93	–
113	3,6-二甲基十一烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	12.47±1.93	–
114	4,8-二甲基十一烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	12.47±1.93	–
115	2-丙烯基脲	$C_4H_8N_2O$	100.06	–	13.97±0.97^b	16.05±0.20^a
116	(Z)-5-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$	128.12	–	12.16±1.16^b	17.38±0.71^a
117	甲氨基甲酸-3-甲苯酯	$C_9H_{11}NO_2$	165.08	–	12.34±0.77^a	14.18±0.89^a
118	1,1-二甲氧基庚烷	$C_9H_{20}O_2$	160.15	–	10.87±2.13^b	15.84±0.09^a
119	脱氢甲羟戊酸内酯	$C_6H_8O_2$	112.05	–	11.25±0.91^a	13.30±1.90^a
120	2-丙基吡啶	$C_8H_{11}N$	121.09	–	12.21±0.87^b	16.75±0.69^a
121	2-甲氧基-4-(1-丙烯基)苯酚	$C_{10}H_{12}O_2$	164.08	–	11.43±0.95^a	12.56±0.86^a
122	(E)-异丁香酚	$C_{10}H_{12}O_2$	164.08	–	11.43±0.95	–
123	2,6-二甲基-1-壬烯-3-炔-5-醇	$C_{11}H_{18}O$	166.14	–	11.71±0.73^b	16.93±0.72^a
124	2-羟基辛酸	C8H16O3	160.11	–	11.21±1.23^a	13.23±1.29^a
125	4,6-二氯愈创木酚	$C_7H_6C_{12}O_2$	191.97	–	10.32±0.97^a	11.85±0.74^a
126	4,5-二氯-2-甲氧基苯酚	$C_7H_6C_{12}O_2$	191.97	–	10.32±0.97	–
127	2-仲丁基环己酮	$C_{10}H_{18}O$	154.14	–	10.71±0.31^b	16.47±1.36^a
128	己酸糠酯	$C_{11}H_{16}O_3$	196.11	–	11.78±1.30^a	13.23±1.29^a
129	2-噻吩甲醛	C_5H4OS	112	–	–	53.24±2.74
130	2-丁基噻吩	$C_8H_{12}S$	140.07	–	–	20.21±0.29
131	3-甲基丁酸-2-呋喃甲酯	$C_{10}H_{14}O_3$	182.09	–	–	16.40±0.17
132	3-甲基-4-硝基苯酚	$C_7H_7NO_3$	153.04	–	–	16.30±0.15
133	4-甲基-1-己醇	$C_7H_{16}O$	116.12	–	–	16.30±0.15
134	1-辛胺	$C_8H_{19}N$	129.15	–	–	15.24±1.20
135	(E)-β-罗勒烯环氧化物	$C_{10}H_{16}O$	152.12	–	–	14.96±0.88
136	4-甲基吡唑	$C_4H_6N_2$	82.05	–	–	13.58±2.28
137	1,2,3-三甲基苯	C_9H_{12}	120.09	–	–	13.23±1.29
138	顺式-1-甲基-2-(1-甲基乙烯基)环丁烷乙醇	$C_{10}H_{18}O$	154.14	–	–	13.23±1.29
139	顺式-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	$C_{10}H_{18}O_2$	170.13	–	–	13.23±1.29
140	1,2-二乙基苯	$C_{10}H_{14}$	134.11	–	–	13.19±0.30
141	1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-1,2-环己二醇	$C_{10}H_{18}O_2$	170.13	–		12.88±0.73
142	4-甲基十二烷	$C_{13}H_{28}$	184.22	–	–	11.89±0.59
143	己酸异戊酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186.16	–	–	11.85±0.74
144	6,10-二甲基-5,9-十一碳二烯-2-醇	$C_{13}H_{24}O$	196.18	–	–	11.85±0.74
145	3-环己烯甲酸乙酯	$C_9H_{14}O_2$	154.1	–	–	11.82±0.67
146	2-羟基-3,4-二甲基-2-环戊烯-1-酮	$C_7H_{10}O_2$	126.07	–	–	11.16±2.04
147	(1α, 2β, 5α)-2,6,6-三甲基双环[3.1.1]-3-庚酮	$C_{10}H_{16}O$	152.12	–	–	10.92±1.05
148	甘氨酰胺	$C_2H_6N_2O$	74.05	–	–	10.59±0.72
149	(Z,Z)-1,1'-[乙亚基二(氧基)]二(3-己烯)	$C_{14}H_{26}O_2$	226.19	–	–	10.57±0.98
150	5-甲基-2-(1-甲基亚乙基)环戊酮	$C_{10}H_{16}O$	152.12	–	–	10.02±0.90
151	(S)-3,3,6-三甲基-1,5-庚二烯-4-乙酸酯	$C_{12}H_{20}O_2$	196.15	–	–	9.98±0.37

注：“–”表示未检出，数据形式为平均值±标准偏差，同行中不同肩标字母表示差异显著(P<0.05)。

草药气味，该物质可能与菌裙经过存放出现药香相关，(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇具有木质味。菌柄中特有的含量较高的 2-噻吩甲醛，具有硫磺气味，可能是烘干过程中少量菌柄过度烘干导致。

2.2　干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄挥发性风味物质差异比较分析

2.2.1　PCA 分析　为初步探究干品红托竹荪的菌盖、菌裙和菌柄挥发性物质成分差异，利用主成分分析(PCA)模型对三个部位检出气味物质进行 PCA 分

析，由图 5 可知，PC1 和 PC2 累计贡献率为 95.92%，能够反映样品的气味物质信息，三个部位的分布在不同区域，无重叠，说明干品红托竹荪三个部位的气味差异显著。为了更清晰地区分干品红托竹荪三个部位的挥发性差异物质，提升组间差异区分度与分类预测能力，后续构建 PLS-DA 模型。

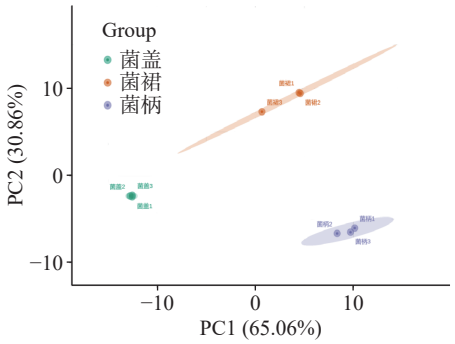


图 5 干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄的挥发性物质 PCA 得分图

Fig.5 Volatile PCA scores of cap, skirt, and stem in dried *Dictyophora rubrovalvata*

2.2.2 PLS-DA 分析 为进一步探究干品红托竹荪的菌盖、菌裙和菌柄挥发性风味物质成分差异，利用 PLS-DA 对三个部位检出的挥发性风味物质进行分析，由图 6 可知，PLS-DA 模型将三组样品进行更好的分离，三组样品得以完全区分，三个部位分布在不同区域，无重叠，累计贡献率为 97.1%，能够反映样品的气味物质信息。说明干品红托竹荪三个部位的气味差异显著，三个部位样品挥发性风味物质的 PLS-DA 得分如图 6 所示。

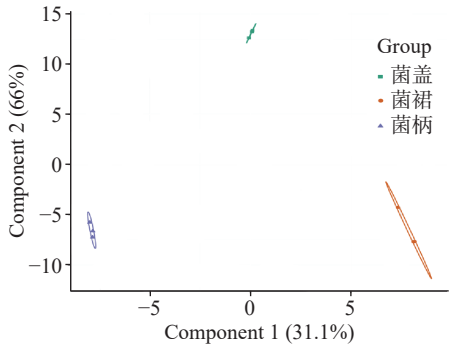


图 6 干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄的挥发性风味物质 PLS-DA 得分图

Fig.6 PLS-DA scores of volatiles in dried *Dictyophora rubrovalvata* cap, skirt and stem

为进一步区分不同部位间挥发性风味物质之间的差异，以上述的 151 种香气成分为因变量，不同部位为自变量，对数据进行 PLS-DA 分析，采用 200 次置换检验的交叉验证模型来显示模型的稳健性。经 200 次置换检验，Q^2 回归线与垂直轴的交点小于零（Q^2=0.997），说明模型验证有效，不存在过拟合现象（如图 7）。以上结果显示，可通过对挥发性风味物质构成的 PLS-DA 判别分析，实现对干品红托竹荪三个部位的区分。

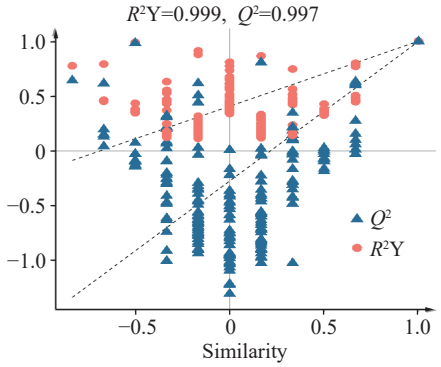


图 7 干品红托竹荪菌盖、菌裙和菌柄的 PLS-DA 分析 200 次交叉验证试验

Fig.7 200-permutation PLS-DA validation for dried *Dictyophora rubrovalvata* cap, skirt and stem

变量投影重要度（Variable importance for the projection, VIP）用于衡量 PLS-DA 分析中每个变量的贡献程度，三个部位的 PLS-DA 分析 VIP 结果如表 2 所示。共发现 57 种 VIP 值>1 的差异挥发性风味物质，其中醇类 11 种、萜类 10 种、烃类 9 种、酮类 5 种、酯类 5 种、杂环化合物 4 种、醛类 3 种、酚类 3 种、芳烃类 3 种、胺类 2 种、酸类 1 种、醚类 1 种。说明醇类、萜类、烃类、酮类、酯类可能对三个部位的香气贡献更大，包括(Z)-6-壬烯-1-醇、丁酸-3-甲基-3-亚硝基甲酯、5-2-甲基丙基壬烷、4-甲基-1-己醇等物质，这些物质可能对区别干品红托竹荪三个部位样品的挥发性风味物质种类具有关键作用，可以看出不同部位之间有部分挥发性风味物质一致，挥发性风味物质的特异性和含量造成了不同部位之间的风味差异。

2.2.3 OAV 值分析 香气对风味的贡献大小不仅取决于其含量的高低还与其阈值大小有关[34−43]。利用 OAV 分析其关键性香气，OAV≥1 的物质是样品的关键性风味物质[44]。查询香气化合物在水中的阈值[45−51] 并计算其 OAV，结果如表 3 所示。

结果表明，不同部位的 OAV 值存在显著差异。相较于菌裙和菌柄，菌盖中 OAV≥1 的物质仅 6 种，数量少于菌裙与菌柄。具体来看：(Z)-6-壬烯-1-醇仅存在于菌盖和菌裙中，且菌盖中 OAV 值略低于菌裙，(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、(E,E)-2,4-壬二烯醛、1-壬醇、乙酸-2-戊酯这 4 种物质，在菌盖中的含量均低于菌裙与菌柄，主要呈现鲜味、青草香与甜香，与之不同的是，三甲基恶唑在菌盖中的含量略高于菌裙与菌柄，其风味表现为坚果味与烤焦味，它们都是菌盖的主要赋香物质，对于红托竹荪的香气贡献具有重要作用。

菌裙和菌柄相比，菌裙 OAV≥1 的物质有 15 种，多于菌柄的 13 种。在两者共有的物质中，(E,Z)-2,6-壬二烯醛，(E,E)-2,6-壬二烯醛、1-辛醇、(E)-2-辛烯-1-醇的 OAV 值表现为菌裙高于菌柄，辛腈、(E,

表 2　PLS-DA 分析中 VIP 值>1 的差异挥发性风味物质

Table 2　Differential volatile flavor compounds with VIP scores>1 in PLS-DA analysis

序号	物质名称	VIP值	序号	物质名称	VIP值
1	(Z)-6-壬烯-1-醇	1.7905	30	6,10-二甲基-5,9-十一碳二烯-2-醇	1.5483
2	2-辛烯-4-酮	1.7672	31	己酸异戊酯	1.5483
3	(Z)-2-壬烯醛	1.7570	32	2-甲基-5-丙基壬烷	1.5482
4	丁酸-3-甲基-3-亚硝基甲酯	1.7547	33	5-甲基-5-丙基壬烷	1.5482
5	5-(2-甲基丙基)壬烷	1.7095	34	1-辛胺	1.5474
6	2,2,3,3-四甲基环丙烷甲醇	1.5947	35	甘氨酰胺	1.5466
7	3-甲基丁酸-2-呋喃甲酯	1.5542	36	(Z)-2-辛烯-1-醇	1.5464
8	3-甲基-4-硝基苯酚	1.5542	37	2-辛烯-1-醇	1.5464
9	4-甲基-1-己醇	1.5542	38	龙脑	1.5463
10	2-丁基噻吩	1.5540	39	4,4-二甲基-2-戊酮	1.5453
11	1,2-二乙基苯	1.5533	40	2,4-壬二烯醛	1.5445
12	2-噻吩甲醛	1.5533	41	E-异丁香酚	1.5439
13	对二甲苯-d10	1.5532	42	1,2,3-三甲基苯	1.5420
14	S-3,3,6-三甲基-1,5-庚二烯-4-乙酸酯	1.5512	43	顺式-1-甲基-2-(1-甲基乙烯基)环丁烷乙醇	1.5420
15	4-甲基十二烷	1.5509	44	顺式-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	1.5420
16	(E)-β-罗勒烯环氧化物	1.5506	45	5-甲基-2-(1-甲基亚乙基)环戊酮	1.5340
17	1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-1,2-环己二醇	1.5499	46	4,5-二氯-2-甲氧基苯酚	1.5395
18	2-甲基丙烯酸酐	1.5492	47	(1α, 2β, 5α)-2,6,6-三甲基双环[3.1.1]-3-庚酮	1.5392
19	3-环己烯甲酸乙酯	1.5491	48	(Z,Z)-1,1'-[乙亚基二(氧基)]二(3-己烯)	1.5388
20	3-甲基环戊酮	1.5490	49	4,4-二甲基十一烷	1.5228
21	反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇	1.5490	50	2,6-二甲基十一烷	1.5228
22	(3R,6S)-2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-吡喃-3-醇	1.5487	51	3,6-二甲基十一烷	1.5228
23	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	1.5487	52	4,8-二甲基十一烷	1.5228
24	(4S, 7R, 7aR)-2,4,5,6,7,7a-六氢-3,7-二甲基-4-(2-甲基-1-丙烯基)-1H-茚	1.5488	53	4-甲基吡唑	1.5141
25	(E)-6-壬烯-1-醇	1.5487	54	2-羟基-3,4-二甲基-2-环戊烯-1-酮	1.4893
26	(-)-反式-异胡椒醇	1.5486	55	1,5-二氮杂双环[3.1.0]己烷	1.2144
27	(-)-顺式-异胡椒醇	1.5486	56	2-甲基-6-亚甲基辛基-2,7-二烯酮	1.1634
28	香芹醇	1.5486	57	4-甲基-1-(1-甲基乙烯基)环己烯	1.1287
29	α-马榄烯	1.5485			

表 3　三个部位香气成分 OAV 值≥1 的物质

Table 3　Substances with aroma components OAV values≥1 in three parts

序号	物质名称	香气特征[35−43]	阈值(mg/kg)[45−51]	OAV		
				菌盖	菌裙	菌柄
1	(E,Z)-2,6-壬二烯醛		0.0000018	−	3918.86	3058.82
2	3-环己烯甲酸乙酯	黄瓜, 青草香	0.000003	−	−	2392.52
3	(Z)-6-壬烯-1-醇	鲜味, 青草香, 甜香, 蜡味, 蜜瓜味, 哈密瓜味, 黄瓜味, 清新	0.001	414.47	474.81	−
4	辛腈	脂肪, 醛香, 青草香	0.00013	−	120.19	123.48
5	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	脂肪, 甜香, 蜡味青草香, 紫罗兰香, 黄瓜, 果味, 焦香味	0.1	71.62	95.27	108.64
6	(E,E)-2,4-壬二烯醛	果味, 青草香	0.0000017	70.42	82.17	90.70
7	(E,E)-2,6-壬二烯醛	青草香, 黄瓜, 油味, 紫罗兰色	0.0005	−	78.38	47.85
8	反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇	鲜味, 柑橘味, 青草香, 黄瓜, 甜香	0.0002	−	56.70	−
9	1-壬醇	鲜味, 清新, 脂肪, 花香味, 玫瑰香味, 柑橘味, 油味	0.0011	7.54	9.04	11.54
10	4,4-二甲基-2-戊酮		0.0081	−	6.58	−
11	(Z)-5-辛烯-1-醇	青草香, 甜香, 清水味, 西瓜味, 泥土味, 蘑菇味, 紫罗兰味, 鱼腥味, 肥皂味	0.006	−	6.08	6.59
12	三甲基恶唑	坚果, 坚果皮, 烤焦味, 芥末味, 海贝味, 蔬菜味	0.017	4.40	4.32	4.38
13	4,5-二氯-2-甲氧基苯酚		0.0025	−	4.13	−
14	乙酸-2-戊酯	青草味, 杂草, 霉味, 青草香, 蔬菜, 坚果皮, 豆味, 酮香味	0.00087	1.86	1.96	1.98
15	1-辛醇		0.042	−	1.27	1.14
16	(E)-2-辛烯-1-醇	青草味、柑橘味, 蔬菜味, 脂肪	0.02	−	1.02	1.01
17	2-丙基-2-庚烯醛	鸢尾草, 脂肪, 蜡味, 黄瓜	0.15	−	−	1.19

注: “−”表示未检测出。

E)-3,5-辛二烯-2-酮、(E,E)-2,4-壬二烯醛、1-壬醇、(Z)-5-辛烯-1-醇、三甲基恶唑、乙酸-2-戊酯、2-丙基-2-庚烯醛则呈现菌柄 OAV 值高于菌裙,此外,菌裙中特有的物质包括反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇、4,4-二甲基-2-戊酮、4,5-二氯-2-甲氧基苯酚,而菌柄特有的物质有 3-环己烯甲酸乙酯,其 OAV 含量高达 2392.52,对菌柄的风味具有关键贡献作用。

2.2.4 关键性挥发性风味物质比较分析 通过对菌盖 OAV≥1 的 6 种与 VIP>1 的 57 种挥发性风味化合物进行综合分析,发现 OAV≥1 且 VIP>1 关键挥发性风味物质共有 1 种,为(Z)-6-壬烯-1-醇,其主要呈现鲜味,青草香,甜香。菌盖中 OAV≥1 但 VIP<1 的风味物质包括(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、(E,E)-2,4-壬二烯醛、1-壬醇、三甲基恶唑、乙酸-2-戊酯,这 5 种物质都存在于三个部位中,但在含量上有差异,对三个部位的风味贡献较大,这也说明它们是干品红托竹荪的主要基调关键挥发性风味物质。菌裙 OAV≥1 的 15 种与 VIP>1 的 57 种挥发性风味化合物进行综合分析,发现 OAV≥1 且 VIP>1 关键挥发性风味物质共有 4 种,分别为(Z)-6-壬烯-1-醇、反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇、4,4-二甲基-2-戊酮、4,5-二氯-2-甲氧基苯酚。菌柄 OAV≥1 的 13 种与 VIP>1 的 57 种挥发性风味化合物进行综合分析,发现 OAV≥1 且 VIP>1 关键挥发性风味物质共有 1 种,为 3-环己烯甲酸乙酯。

3 结论

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 技术结合 PCA、PLS-DA 及 OAV 分析,系统解析了黔产干品红托竹荪菌盖、菌裙、菌柄的挥发性风味物质组成及差异性。结果表明,三个部位共鉴定出 151 种挥发性化合物,涵盖酯类、萜类、酮类等 11 类物质,且在种类和含量上存在显著差异,其中菌裙和菌柄对整体风味的贡献显著高于菌盖。PCA 与 PLS-DA 分析证实,三个部位的挥发性风味物质组成差异显著,可实现有效区分;PLS-DA 共筛选出 57 种 VIP>1 的差异化合物,以醇类、萜类、烃类为主。结合 OAV 值分析发现,三个部位共有的 5 种 OAV≥1 但 VIP<1 的挥发性风味物质(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、(E,E)-2,4-壬二烯醛、1-壬醇、三甲基恶唑和乙酸-2-戊酯是构成干品红托竹荪的基调风味;对比各部位 OAV≥1 且 VIP>1 的特异性关键风味物质,菌盖为(Z)-6-壬烯-1-醇,赋予菌盖鲜味和青草香味;菌裙为反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇、4,4-二甲基-2-戊酮、4,5-二氯-2-甲氧基苯酚和(Z)-6-壬烯-1-醇,其中前三种物质可作为菌裙区别于其他部位的关键性风味物质;菌柄为 3-环己烯甲酸乙酯,可赋予菌柄黄瓜味,青草香,是其高贡献成分,可作为菌柄的关键风味标识物质。本研究明确了红托竹荪不同部位的关键性挥发性风味物质,为其品质育种、部位特异性加工及风味精准调控提供了重要理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] SONG Mingyang, WANG Jiawen, BAO Kaisheng, et al. Isolation, structural characterization and immunomodulatory activity on RAW264.7 cells of a novel exopolysaccharide of *Dictyophora* rubrovalvata[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132222.

[2] 张丽丽, 张磊, 章玉萍, 等. 工厂化栽培红托竹荪的营养成分测定及食用安全性评价[J]. 中国食用菌, 2023, 42(1): 111−117. [ZHANG Lili, ZHANG Lei, ZHANG Yuping, et al. Evolution on nutrient composition and edible safety of *Dictyophora rubrovolvata* cultivated in industrialization[J]. Edible Fungi of China, 2023, 42(1): 111−117.]

[3] 覃发玠, 敖珍, 龙俊训. 红托竹荪多糖提取、表征及生物活性研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(11): 255−260. [QIN Fajie, AO Zhen, LONG Junxun. Research progress on extraction, characterization and biological activities of *Dictyophora rubrovolvata* polysaccharide[J]. China Food Additives, 2023, 34(11): 255−260.]

[4] 李莹, 周克春, 石芳, 等. 红托竹荪菌托多糖提取工艺优化及其泡腾片的制备[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(23): 123−129. [LI Ying, ZHOU Kechun, SHI Fang, et al. Extraction optimization and preparation of effervescent tablets of polysaccharides from volva of *Dictyophora rubrovalvata*[J]. Food Research and Development, 2023, 44(23): 123−129.]

[5] 董慧, 赵晓燕, 李晓贝, 等. 贵州红托竹荪和冬荪的品质评价[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 198−205. [DONG Hui, ZHAO Xiaoyan, LI Xiaobei, et al. Quality evaluation of *Dictyophora rubrovolvata* and *Phallus dongsun* from Guizhou[J]. Food Science, 2024, 45(20): 198−205.]

[6] 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功能成分分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 72−76,114. [LIANG Yali, QIN Likang, WANG Hezhu, et al. The analysis of main nutritional and functional components in different parts of fruit-bodies and embryo of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 72−76,114.]

[7] 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. [ZHENG Xiuyan, HUANG Lei, WANG Pei, et al. Evaluation of nutritional values and antioxidant capacities of *Dictyophora rubrovalvata* volva and *Phallus impudicus* L. volva[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(13): 4374−4382.]

[8] 殷朝敏, 范秀芝, 史德芳, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 HPLC 分析 5 种食用菌鲜品中的风味成分[J]. 食品工业科技, 2019, 40(3): 254−260. [YIN Chaomin, FAN Xiuzhi, SHI Defang, et al. Flavor compounds analysis of 5 fresh mushrooms using HS-SPME-GC-MS and HPLC[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(3): 254−260.]

[9] 程玉, 孙进, 叶兴乾, 等. 食用菌风味物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 412−414. [CHENG Yu, SUN Jin, YE Xingqian, et al. Advances on flavor substances of edible mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 412−414.]

[10] 李润, 杨焱, 刘晓风, 等. 食用菌风味影响因素及其评价研究进展[J]. 食用菌学报, 2020, 27(4): 202−214. [LI Run, YANG

Yan, LIU Xiaofeng, et al. Research progress on influential factors and evaluation of edible fungi flavor[J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(4): 202−214.]
[11] 于梓芃, 李宁阳, 弓志青, 等. 食用菌呈味物质及其检测技术、应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 373−379. [YU Zipeng, LI Ningyang, GONG Zhiqing, et al. Research progress on edible fungus flavor substances and their detection technology and application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 373−379.]
[12] 王宇临, 胡代花, 王丹妮, 等. 食用菌不同部位风味物质差异及其对食品风味影响研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(9): 200−207. [WANG Yulin, HU Daihua, WANG Danni, et al. Research progress on differences of flavor substances in various parts of Edible fungi and their effects on flavor of food[J]. China Condiment, 2024, 49(9): 200−207.]
[13] 韩秀琴, 管庆林, 周笑犁. 7 种常见食用菌的挥发性风味及非挥发性呈味物质分析[J]. 食品科技, 2024, 49(11): 133−140. [HAN Xiuqin, GUAN Qinglin, ZHOU Xiaoli. Analysis of volatile flavor and nonvolatile taste components of seven kinds of common edible fungi[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(11): 133−140.]
[14] 李娜, 吕爽, 董建国, 等. 常见食用菌营养成分及风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 441−448. [LI Na, LÜ Shuang, DONG Jianguo, et al. Analysis of nutritional components and volatile flavor compounds in common edible fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 441−448.]
[15] 连希希, 孙佳宁, 孙伶俐, 等. 不同方法提取香菇中挥发性成分的测定[J]. 中国酿造, 2022, 41(6): 237−242. [LIAN Xixi, SUN Jianing, SUN Lingli, et al. Determination of volatile components extracted by different methods from *Lentinus edodes*[J]. China Brewing, 2022, 41(6): 237−242.]
[16] 秦玉川, 吴德平, 王丽玲, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 法分析不同干燥条件对皱环球盖菇挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 273−280. [QIN Yuchuan, WU Deping, WANG Liling, et al. Effects of various drying methods on volatile composition of *Stropharia rugosoannulata* by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(24): 273−280.]
[17] 张超, 何丽, 潘金壮, 等. 贵州红托竹荪害虫种类及发生规律调查[J]. 山地农业生物学报, 2024, 43(4): 39−44. [ZHANG Chao, HE Li, PAN Jinzhuang, et al. Investigation on species and occurrence regularity of insect pests feeding on *Dictyophora rubrovolvata* in Guizhou[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2024, 43(4): 39−44.]
[18] 郑旋, 杨玲, 王万坤, 等. 不同提取方法对竹荪菌托多糖结构及抑菌性保湿性的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(1): 201−208. [ZHENG Xuan, YANG Ling, WANG Wankun, et al. Effects of different extraction methods on the structure and antibacterial and moisturizing properties of polysaccharides from the volva of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(1): 201−208.]
[19] 陈飞, 韩冰, 于广峰, 等. 红托竹荪菌种快速分离培养基优化[J]. 微生物学杂志, 2023, 43(6): 54−61. [CHEN Fei, HAN Bing, YU Guangfeng, et al. Optimization of culture medium for rapid strain isolation of red volva dictyophora (*Dictyophora rubrovolvata*)[J]. Journal of Microbiology, 2023, 43(6): 54−61.]
[20] 周娟娟. 红托竹荪有效成分的提取及抗氧化性研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023. [ZHOU Juanjuan. Study on extraction and antioxidant activity of active components of *Dictyophora rubovolvatar*[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2023.]
[21] 江晓凌, 林辉, 杨驰, 等. 红托竹荪液体发酵培养基筛选及培养条件优化[J]. 东南园艺, 2024, 12(4): 278−284. [JIANG Xiaoling, LIN Hui, YANG Chi, et al. Screening of liquid fermentation medium and culture condition for *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Fujian Fruits, 2024, 12(4): 278−284.]
[22] 敖珍, 覃发玠, 罗迎春, 等. 红托竹荪菌托多糖浓缩及醇沉工艺研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 81−84. [AO Zhen, QIN Fajie, LUO Yingchun, et al. Research on concentration and alcohol precipitation process of polysaccharides from *Dictyophora rubrovalvata* volva[J]. China Condiment, 2022, 47(9): 81−84.]
[23] 龚光禄, 杨通静, 桂阳, 等. 我国竹荪产业现状与红托竹荪菌包脱袋覆土栽培技术[J]. 食药用菌, 2022, 30(4): 271−276. [GONG Guanglu, YANG Tongjing, GUI Yang, et al. The present situation of *Dictyophora* industry in China and the cultivation technique of bag removing and soil covering of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2022, 30(4): 271−276.]
[24] 龚光禄, 杨通静, 刘宏宇, 等. 红托竹荪新品种‘黔荪 yzs020’[J]. 园艺学报, 2023, 50(S1): 95−96. [GONG Guanglu, YANG Tongjing, LIU Hongyu, et al. A new *Phallus rubrovolvatus* cultivar ‘Qiansun yzs020’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(S1): 95−96.]
[25] WANG Yiju, YANG Chunxiang, LI Shaohua, et al. Volatile characteristics of 50 peaches and nectarines evaluated by HP–SPME with GC–MS[J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 356−364.
[26] HUANG Wenjing, FANG Shimao, WANG Jing, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.
[27] XUE Jinjin, LIU Panpan, YIN Junfeng, et al. Dynamic changes in volatile compounds of Shaken black tea during its manufacture by GC×GC–TOFMS and multivariate data analysis[J]. Foods, 2022, 11(9): 1228.
[28] 陈善敏, 袁林颖, 常睿, 等. 3 个茶树品种工夫红茶香气品质特征分析[J]. 食品科学, 2025, 46(17): 221−230. [CHEN Shanmin, YUAN Linying, CHANG Rui, et al. Aroma characteristics of congou black tea made from three varieties[J]. Food Science, 2025, 46(17): 221−230.]
[29] 李莉莉, 李晓贝, 董慧, 等. 基于顶空固相微萃取-全二维气相色谱-飞行时间质谱技术分析不同干制方式下红托竹荪香气特征[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 311−320. [LI Lili, LI Xiaobei, DONG Hui, et al. Analysis of differences in aroma characteristics of *Dictyophora rubrovalvata* between different drying methods based on headspace solid-phase microextraction-comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry technique[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6): 311−320.]
[30] 邹青青, 黄明泉, 孙宝国, 等. 同时蒸馏萃取结合 GC-MS 分析红托竹荪挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 425−430. [ZOU Qingqing, HUANG Mingquan, SUN Baoguo, et al. Analysis of volatile components in *Dictyophora rubrovolota* by simultaneous distillation extraction and GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(10): 425−430.]
[31] MENG Lingshuai, NIE Yu, ZHOU Qingsong, et al. Effect of hot-air drying processing on the volatile organic compounds and Maillard precursors of *Dictyophora rubrovalvata* based on GC-IMS, HPLC and LC-MS[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141074.
[32] 吴兴亮. 中国热带大型真菌资源调查及系统分类学研究[D]. 海口: 海南大学, 2013. [WU Xingliang. Investigation on the

resources and systematic taxonomy of macro-fungi in tropical China[D]. Haikou: Hainan University, 2013.]
[33] WANG Jian, TIAN Haoyuan, XU Yanjun, et al. Comprehensive analysis of the metabolome and the whole genome transcriptome to reveal the regulatory mechanism the flavor of *Phallus rubrovolvatus*[J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104483.
[34] RUBÉN D, MARÍA G, SONIA F, et al. Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat[J]. Meat Science, 2014, 97(2): 223−230.
[35] CAROLINA P, FRANCESCO S, MARTIN Š, et al. The effect of ripening time on the chemical, textural, volatile and sensorial traits of *Bicep femoris* and *Semimembranosus* muscles of the Slovenian dry-cured ham *Kraški pršut*[J]. Meat Science, 2015, 100: 58−68.
[36] 符潮. 猴樟精油多样性与重要萜类生物合成相关基因研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025. [FU Chao. Study on the diversity of essential oil of *Cinnamomum camphora* and genes related to the biosynthesis of important terpenoids[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2025.]
[37] 包陈力根, 关淳博, 辛明航, 等. HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻分析烘烤对大球盖菇挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 226−233. [BAO Chenligen, GUAN Chunbo, XIN Minghang, et al. Effect of roasting on volatile flavor compounds of *Stropharia* rugoso-annulata analyzed by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science, 2022, 43(14): 226−233.]
[38] GUO Q Y, ADELINA N M, HU J T, et al. Comparative analysis of volatile profiles in four pine-mushrooms using HS-SPME/GC-MS and E-nose[J]. Food Control, 2022, 134: 108711.
[39] LAI Pufu, LI Longxiang, WEI Yingying, et al. GC-IMS-based volatile characteristic analysis of *Hypsizygus marmoreus* dried by different methods[J]. Foods, 2024, 13(9): 1322.
[40] 蒋鹏飞, 王赵改, 史冠莹, 等. 不同干燥方式的苦瓜粉品质特性及香气成分比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 234−244. [JIANG Pengfei, WANG Zhaogai, SHI Guanying, et al. Quality characteristics and aroma components of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) powder dried by different methods[J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(3): 234−244.]
[41] GIANNETTI V, BOCCACCI MARIANI M, TORRELLI P, et al. Flavour component analysis by HS-SPME/GC–MS and chemometric modeling to characterize Pilsner-style Lager craft beers[J]. Microchemical Journal, 2019, 149: 103991.
[42] GUO Jie, YU Zhihao, LIU Meiyan, et al. Analysis of volatile profile and aromatic characteristics of raw Pu-erh tea during storage based on GC-MS and odor activity value[J]. Foods, 2023, 12(19): 3568.
[43] CHEN Zhi, LI Zixin, ZHAO Yiqiao, et al. A meta-analysis of dynamic changes of key aroma compounds during black tea processing[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103784.
[44] 刘盼盼, 刘晓辉, 罗龙新, 等. 不同产地绿茶饮料香气特征及差异分析[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 147−152. [LIU Panpan, LIU Xiaohui, LUO Longxin, et al. Comparative analysis of aroma characteristics of green tea beverages from different regions[J]. Food Science, 2016, 37(2): 147−152.]
[45] 李薇. 传统发酵永川豆豉和速成豆豉增香发酵关键香气物质基础比较研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022. [LI Wei. Comparative study on the key aroma compounds basis of traditional fermented Yongchuan Douchi and the fast-fermentated Yongchuan Douchi after aroma enhancement fermentation[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]
[46] JIANG Hao, OU Shaobi, YE Junjie, et al. Variation of volatile flavor substances in salt-baked chicken during processing[J]. Food Chemistry, 2024, 24: 101846.
[47] LI Xiaobei, ZHANG Yanmei, E Hengchao, et al. Characteristic fingerprints and comparison of volatile flavor compounds in *Morchella sextelata* under different drying methods[J]. Food Research International, 2023, 172: 113103.
[48] 马明娟, 苏晓霞, 檀馨悦, 等. 不同麻辣腊肠挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2022, 36(4): 28−34. [MA Mingjuan, SU Xiaoxia, TAN Xinyue, et al. Analysis of volatile flavor compounds in spicy sausages[J]. Meat Research, 2022, 36(4): 28−34.]
[49] 强宇, 姜薇, 刘成江, 等. 风冷与冷藏过程中酱卤牛肉风味逸散行为研究[J]. 中国农业科学, 2022, 55(16): 3224−3241. [QIANG Yu, JIANG Wei, LIU Chengjiang, et al. Flavor escape behavior of stewed beef with soy sauce during air-cooling and refrigeration[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(16): 3224−3241.]
[50] JIANG Hao, ZHANG Mutang, YE Junjie, et al. HS-SPME-GC-MS and OAV analyses of characteristic volatile flavour compounds in salt-baked drumstick[J]. Lwt, 2022, 170: 114041.
[51] JIN Lei, LIAN Xueyan, CHEN Li, et al. Characteristic aroma analysis and interaction study of key aroma compounds of Chuanhong congou black tea[J]. European Food Research and Technology, 2024, 250(2): 441−454.