

栽培方式对羊肚菌挥发性成分的影响

刘 妮 江 波 李 浪

(贵州科学院山地资源研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要: [目的] 全方位揭示不同栽培方式下的羊肚菌风味品质特性及差异, 并对其挥发性香气成分进行系统性综合评价。[方法] 采用顶空固相微萃取(HS-SPME)与气相色谱—质谱联用(GC-MS)方法, 对位于FAST周边的大棚、林下以及洞穴3种不同栽培环境下羊肚菌的挥发性成分进行了定性、定量分析。借助相对气味活度值(ROAV)方法, 评估了各组分对整体香气的贡献度, 进而执行了主成分分析与聚类分析, 以实现羊肚菌风味属性的全面综合评价。[结果] GC-MS检测结果显示, 3种栽培方式下的羊肚菌中共检出1 201种挥发性物质, 主要包括酸、醇、醛、胺、酯、醚、酮、烃类、酚、卤代烃、芳烃、杂环化合物、含氮化合物、含硫化合物及萜类, 其中杂环化合物的相对含量最高, 为11.042%~28.365%, 其次是酯类, 醛类第三, 因栽培方式不同各挥发性成分相对含量有所差异, 大部分表现出差异显著($P < 0.05$); 相对气味活度值评价结果表明, 3种栽培方式下羊肚菌中主体挥发性香气成分为 $\alpha, \alpha, 4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇、二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮和1-壬烯-3-酮, 栽培方式不同各羊肚菌主体挥发性香气成分有所差异; 主成分分析和聚类分析综合评价结果表明, 洞穴栽培方式下羊肚菌香气品质综合得分最高, 香气品质最佳。[结论] FAST周边地区大棚、林下、洞穴3种栽培方式下的羊肚菌挥发性物质种类众多, 相对含量差异显著, 栽培方式不同各主体挥发性香气成分有所差异; 洞穴栽培方式下的羊肚菌香气品质最佳。

关键词: 羊肚菌; 栽培方式; 挥发性成分; 相对气味活度值; 主成分分析; 聚类分析

Effect of cultivation methods on volatile components in *Morchella esculenta*

Liu Ni Jiang Bo Li Lang

(Guizhou Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: [Objective] To comprehensively reveal the flavor and quality characteristics, and differences of *Morchella esculenta* under different cultivation methods, and systematically evaluate their volatile aroma components. [Methods] Qualitative and quantitative analyses are conducted on volatile aroma components in *M. esculenta* cultivated in greenhouses, under forests, and in caves in the vicinity of FAST by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) techniques. The contribution of different components to the overall flavor is assessed by the relative odor activity value (ROAV) method. Based on this, principal component analysis and cluster analysis are conducted, achieving a comprehensive evaluation of the flavor characteristics of *M. esculenta*. [Results] The GC-MS analysis results show that 1 201 volatile substances are detected in *M. esculenta* under the three cultivation methods, mainly including acid, alcohol, aldehyde, amine, aromatics, ester, ether, halogenated hydrocarbons, heterocyclic compounds, hydrocarbons, ketone, nitrogen compounds, phenol, sulfur compounds, and terpenoids. Among them, the relative content of heterocyclic compounds is the highest, ranging from 11.042% to 28.365%, followed by ester and aldehyde. Due to different cultivation methods, the relative content of various volatile components varies, with significant differences between most of them ($P < 0.05$). The analysis results of the ROAV method show that the main volatile aroma components in *M. esculenta* under three cultivation methods are $\alpha, \alpha, 4$ -trimethyl-3-cyclohexene-1-methylthiol, dihydro-2-methyl-3(2H)-furanone, 5-ethyl-3-hydroxy-4-methyl-2(5H)-furanone, and 1-nonen-3-one. Different cultivation methods result in variations in the volatile aroma components in various *M. esculenta*. The comprehensive evaluation results of principal

基金项目: 贵州科学院青年基金(编号:黔科院J字[2023]21号); 贵州省科技计划项目(编号:黔科合支撑[2022]一般235)

通信作者: 江波(1981—), 男, 贵州科学院山地资源研究所助理研究员, 硕士。E-mail: 37208065@qq.com

收稿日期: 2025-06-25 **改回日期:** 2025-11-21

引用格式: 刘妮, 江波, 李浪. 栽培方式对羊肚菌挥发性成分的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 11-17.

Citation: Liu Ni, Jiang Bo, Li Lang. Effect of cultivation methods on volatile components in *Morchella esculenta*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 11-17.

component analysis and cluster analysis indicate that the cave cultivation method leads to the highest comprehensive score on the aroma quality of *M. esculenta* and the best aroma quality. [Conclusion] There are numerous types of volatile compounds in *M. esculenta* cultivated in greenhouses, under forests, and in caves in the vicinity of FAST, with significant differences in relative content. The main volatile aroma components vary with the cultivation method. Additionally, the best aroma quality is found in *M. esculenta* cultivated in caves.

Keywords: *Morchella esculenta*; cultivation method; volatile component; relative odor activity value (ROAV); principal component analysis; cluster analysis

羊肚菌(*Morchella esculenta*)以其形态与羊肚相似的 特征,被赋予了这一独特的命名,属于一种稀有的食用及 药用真菌资源。现阶段,人工培育羊肚菌的方法主要分 为温室环境下的栽培和森林间隙地带的种植方式两种模 式。采用温室型栽培技术,促使羊肚菌的生长过程实现 了集中化、稳定性和效率化的显著提升。在树木庇护下 的人工培育,使得羊肚菌得以在一种与自然野生环境更 为相似的条件下茁壮生长。近期研究^[1-4]显示,洞穴内的 食用菌栽培技术主要得益于洞穴内部环境温度的恒定 性,该特性为食用菌提供了全年连续生长的优越条件,有 效摆脱了传统季节性限制对菌类生长的影响。各类培养 方法的实施与特定的环境条件紧密相关,由此导致食用 菌的产出数量及其质量出现显著的差异。

风味是影响食用菌品质和感官体验的重要因素,由 于食用菌的生长环境各异,其香气成分也会有所不同。 食用菌的风味构成要素涵盖嗅觉感知的香气以及味觉体 验的滋味。嗅觉系统所感知的香气,其本质的驱动要素 在于挥发性风味成分的呈现。羊肚菌因其独特的鲜美风 味而闻名,该风味特质与其子实体内所含有的挥发性香气 成分紧密相关。当前,全球范围内对羊肚菌的研究焦点多 集中于其生命特征、种源素材及基因多样性、人工种植技 术、营养构成以及生物效能等方面,涉及各类栽培手段对 羊肚菌发育和品质影响的研究较少,其中有关羊肚菌挥发 性成分研究主要集中在不同品种、产地以及野生与人工栽 培比较等方面,不同栽培方式下羊肚菌的风味品质特性尚 未见报道。此外,大多数研究在评价羊肚菌的香气品质 时,直接使用挥发性物质的相对含量作为标准,缺乏对羊 肚菌香气品质的全面、系统、综合评价^[5-11]。

研究拟运用顶空固相微萃取技术(HS-SPME)与气相 色谱—质谱联用技术(GC-MS),对不同栽培方式下的羊肚 菌挥发性组分进行定性与定量比较;聚焦于 FAST 周边地 区的大棚、林下及洞穴 3 种不同栽培方式,分析羊肚菌挥发 性成分的种类及其相对比例。采纳相对气味活度值 (ROAV)技术,对羊肚菌中不同挥发性成分在整体风味构 成中的贡献度进行量化评估。通过主成分分析与聚类分 析的方法,深入探究数据内涵,以期为评价羊肚菌品质及 其在产品开发中的潜在应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大棚、林下、洞穴 3 种栽培方式下的羊肚菌:采自

FAST 周边地区贵州科学院山地资源研究所羊肚菌种植 基地,11 月上旬完成播种,次年 2 月下旬进行出菇管理,温 度为 15~18℃,空气相对湿度为 85%~95%,光照度为 300~ 500 lux,土壤 pH 为 6.5~7.5;

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;

色谱柱:DB-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm),美国 Agilent 公司;

萃取头:120 μm DVB/CWR/PDMS,美国 Agilent 公司;

GC-MS/MS:8890-7000E 型,美国 Agilent 公司;

球磨仪:MM400 型,德国 Retsch 公司;

电子天平:MS105DU 型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

固相微萃取装置:SPME Arrow 型,瑞士 CTC 公司;

老化装置:Fiber Conditioning Station 型,瑞士 CTC 公司;

样品加热箱:Agitator 型,瑞士 CTC 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品预处理 采集新鲜的羊肚菌菌株,烘干后磨 碎,混匀,随机分为 3 个样本,3 种栽培方式共 9 个样本。

1.2.2 样品提取流程 将液氮冷冻后的样本进行研磨处 理,旋涡混匀,精确称取 500 mg 样本置于顶空瓶中,依次 添加饱和氯化钠溶液,20 μL 质量浓度为 10 μg/mL 的内标 溶液。利用 HS-SPME 全自动顶空固相微萃取技术对样 品进行预处理,以备后续分析之用。

1.2.3 色谱质谱采集条件 参照王道平等^[12]和徐宁等^[13] 的方法。

(1) HS-SPME 萃取条件:首先将试样置入顶空瓶,随 后在 60℃的恒定温度下对试样进行 5 min 的振荡处理。 继而,将装有 120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头植入顶空 瓶中。试样顶空在 250℃的条件下抽取 15 min,接着进行 5 min 的解析阶段,最终通过 GC-MS 技术实施分离与鉴定 操作。在实施光纤连接步骤期间,将前置提取装置置于 250℃的环境下进行老化处理,持续时长为 5 min。

(2) 色谱条件:色谱柱为 DB-5MS 型毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为纯度≥99.999%的氮 气,气体流量 1.2 mL/min。样品进样口温度 250℃,不分 流模式,溶剂延迟时间 3.5 min。升温程序:40℃保持 3.5 min,以 10℃/min 升至 100℃,以 7℃/min 升至 180℃, 以 25℃/min 升至 280℃,稳定 5 min。

(3) 质谱条件:电子撞击离子源(EI),离子源温度 230 ℃,四极杆温度 150 ℃,质谱接口温度 280 ℃,电子动能 70 eV,离子监测模式(SIM),对定性与定量离子进行精确扫描。

1.2.4 化合物鉴定 经质谱分析与电子计算机辅助的数据处理系统协同作业,对羊肚菌在不同栽培方式下所释放的挥发性有机化合物进行有效的识别与确认。采用峰面积归一化方法,对不同化合物间的相对比例实施精准的含量评估。

1.2.5 主体挥发性香气成分评定 利用相对气味活度值(ROAV)评价各挥发性物质对样品总体风味的贡献,并按式(1)计算 ROAV。

$$\text{ROAV} = \frac{C_1}{C} \times \frac{T}{T_1} \times 100, \quad (1)$$

式中:

C_1 ——挥发性成分的相对含量,%;

T_1 ——挥发性成分的气味阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$;

C ——对样品总体风味贡献最大组分的相对含量,%;

T ——对样品总体风味贡献最大组分的气味阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

$\text{ROAV} \geq 1$ 的成分为样品的主要风味成分,且在一定范围内,ROAV 越大表示该成分对整体风味贡献越大; $0.1 \leq \text{ROAV} < 1$ 修饰整体风味^[14-19]。

1.3 数据处理

借助于 Excel 2019 软件平台进行数据的整理与处理,同时运用 SPSS 21.0 软件工具执行显著性检验、主成分分析及聚类分析等多种统计分析手段。

2 结果与分析

2.1 不同栽培方式下羊肚菌 GC-MS 分析

由图 1 和表 1 可知,在 3 种不同的栽培模式下,羊肚菌中检测出共计 1 201 种挥发性化合物。这些化合物分类为:62 种酸类、119 种醇类、87 种醛类、37 种胺类、33 种芳香烃、189 种酯类、25 种醚类、6 种卤代烃、145 种杂环化合物、70 种烃类、132 种酮类、16 种含氮化合物、44 种酚类、6 种含硫化合物以及 230 种萜烯类。在所研究的化合物中,杂环化合物的相对含量占据最高比例,为 11.042%~28.365%。位居其后的则是酯类化合物与醛类化合物。不同栽培方式下挥发性成分相对含量不同,3 种栽培方式下杂环化合物相对含量差异显著($P < 0.05$),洞穴栽培方式下的相对含量最高,其次是大棚栽培方式下;芳烃、醚、烃类、萜类整体上差异不显著;其他挥发性物质种类的相对含量存在一定差异($P < 0.05$),均表现为洞穴栽培方式下的相对含量明显高于大棚和林下栽培方式下的;整体上来说,洞穴栽培方式下羊肚菌中各挥发性成分相对含量均最高,可能与其独特的洞穴生态环境有关。

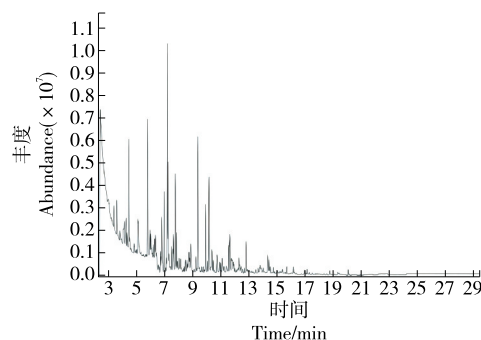


图 1 样品质谱分析总离子流图

Figure 1 Total ion chromatogram of mass spectrometry analysis on samples

表 1 不同栽培方式下羊肚菌的挥发性成分和相对含量[†]

Table 1 Volatile components and relative content in *M. esculenta* under different cultivation methods

种类	数量	相对含量/%		
		大棚羊肚菌	林下羊肚菌	洞穴羊肚菌
酸	62	2.048 ^b	2.015 ^b	3.500 ^a
醇	119	5.305 ^b	5.023 ^b	7.475 ^a
醛	87	11.894 ^b	11.884 ^b	13.945 ^a
胺	37	2.188 ^b	2.386 ^b	3.532 ^a
芳烃	33	3.381	3.231	3.081
酯	189	10.566 ^b	10.888 ^b	25.170 ^a
醚	25	0.817	0.970	0.916
卤代烃	6	0.197 ^b	0.186 ^b	0.279 ^a
杂环化合物	145	14.057 ^b	11.042 ^c	28.365 ^a
烃类	70	2.896	3.111	3.351
酮	132	7.653 ^b	8.192 ^b	10.808 ^a
含氮化合物	16	0.201 ^b	0.233 ^b	0.500 ^a
酚	44	1.970 ^b	1.706 ^b	2.576 ^a
含硫化合物	6	0.079 ^b	0.083 ^b	0.403 ^a
萜类	230	9.356	9.785	11.637

[†] 同行小写字母不同表示组间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同栽培方式下羊肚菌特征香味物质成分分析

通常情况下,挥发性化合物对食用菌香气的贡献是取决于其浓度比例与特定香气阈值相互作用的结果。因此,某些相对含量较高的化合物不一定对香气有较高贡献^[20]。由表 2 可知,3 种栽培方式下羊肚菌中有 11 种挥发性物质的 ROAV ≥ 0.1 ,为影响羊肚菌香气品质的关键香气。3 种栽培方式下, $\alpha, \alpha, 4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇、二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮和 1-壬烯-3-酮的 ROAV 值均 > 1 ,表明这 4 种物质是 3 种栽培方式下羊肚菌主体挥发性香气成分,其中, $\alpha, \alpha, 4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇对风味的影响尤为

显著,其低阈值特性使其在羊肚菌香气构成中占据重要地位,贡献巨大。 $\alpha,\alpha,4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇散发着芬芳、葡萄柚及木质气息,二氢-2-甲基-3(2*H*)-呋喃酮带有甘甜、面包香、黄油味和坚果风味,5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5*H*)-呋喃酮蕴含着甜美的果香和焦糖韵味,而1-壬烯-3-酮散发出蘑菇的特有香气。这些独特的香味成分共同构成了3种不同栽培方式下羊肚菌的标志性香气。剩余的七类特定的化合物被发现其ROAV值为0.1~1.0,这一数据表明,这些化合物在3种不同的栽培条件下,对于羊肚菌的香气属性展现出显著的修饰效果^[21]。3种栽培方式下羊肚菌中各主体挥发性香气成分种类及ROAV值因栽培方式不同而有所差异,其中大棚和林下栽培方式下的羊肚菌中各主体挥发性香气成分种类相同,均为前面4种化合物,但ROAV值略有不同,因此对整体风味的贡献也不同;洞穴栽培方式下的羊肚菌中主体挥发性香气成分种类比大棚和林下栽培方式下的多1种,为二甲基三硫,其ROAV值为1.24,带有熟洋葱、咸味,多肉香味,因此,与大棚和林下栽培的羊肚菌相比,洞穴栽培的羊肚菌在整体风味上展现出显著的差异,且由于各化合物ROAV值的差异,香气贡献程度不一,从而使得洞穴栽培羊肚菌的风味特征鲜明且独具一格。

2.3 不同栽培方式下羊肚菌挥发性物质主成分分析

由图2可知,每组群体内有明显的聚集趋势,3组羊肚菌的聚类中心之间可能存在一定距离,表明在3种不同的栽培条件下,羊肚菌所释放的挥发性成分的相对含量存在明显差异。大棚与林下两种栽培方式下羊肚菌的聚集位置较

为邻近,洞穴栽培方式下的羊肚菌聚集点则显著远离大棚和林下两种栽培方式,表明在大棚与林下环境中栽培的羊肚菌,其挥发性成分的相对含量差异不显著。在洞穴环境中栽培的羊肚菌,其挥发性成分的相对含量与大棚和林下环境中的显示出明显差异,可能源于不同栽培环境所形成的生态条件的差异,进而导致羊肚菌挥发性成分的差异。

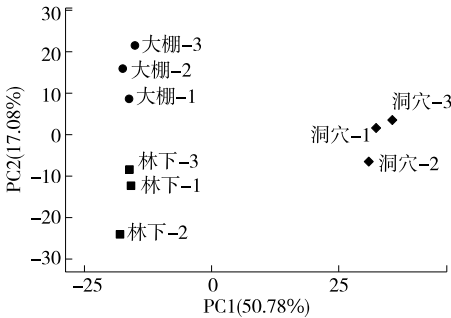


图2 不同栽培方式下羊肚菌质谱数据的PCA得分图
Figure 2 PCA score plot of mass spectrometry data on *M. esculenta* under different cultivation methods

由表3可知,第1主成分贡献率为50.778%,第2主成分贡献率为17.084%,第3主成分贡献率为10.105%。在深入探究大棚、林下及洞穴3种羊肚菌培养模式下,发现前8个主要成分的累积方差贡献率达到了100%,表明这些核心成分能够全面反映3种不同栽培条件下羊肚菌挥发性成分的显著特性。以不同主成分特征值的方差贡献率 $\beta_i(i=1,2,3,\dots,K)$ 为加权系数,用 $F=\beta_1f_1+\beta_2f_2+\beta_3f_3+\dots+\beta_8f_8$ 函数综合评价3种栽培方式下羊肚菌的香气品质,经过计算,得出了各个栽培模式下羊肚菌的主成分综合得分,并据此建立了相应的综合评价模型:

$$F=50.778f_1+17.084f_2+10.105f_3+6.189f_4+5.485f_5+3.914f_6+3.701f_7+2.744f_8。(1)$$

总因子F分值越高表示品质越好,计算结果见表4。

表3 主成分分析特征值、方差贡献率及累计贡献率
Table 3 Characteristic values, variance contribution rates, and cumulative contribution rates of the principal components

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
PC1	24.695	50.778	50.778
PC2	14.324	17.084	67.862
PC3	11.017	10.105	77.968
PC4	8.621	6.189	84.156
PC5	8.116	5.485	89.641
PC6	6.857	3.914	93.556
PC7	6.667	3.701	97.256
PC8	5.740	2.744	100.000

表2 不同栽培方式下羊肚菌中关键香气物质
Table 2 Key aromatic substances in *M. esculenta* under different cultivation methods

化合物	气味阈值 ^[22] ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值		
		大棚羊肚菌	林下羊肚菌	洞穴羊肚菌
$\alpha,\alpha,4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇	0.000 02	100.00	100.00	100.00
二氢-2-甲基-3(2 <i>H</i>)-呋喃酮	0.005	9.98	5.55	4.45
6-丙基-2-羟甲基-3-乙基-1(6 <i>H</i>)-吡喃酮	0.002	9.09	5.28	7.24
1-壬烯-3-酮	0.001	2.29	1.23	1.55
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	0.04	0.83	0.18	0.69
(5 <i>Z</i>)-辛烷-1,5-二烯-3-酮	0.003	0.83	0.39	0.36
2,3-二乙基-5-甲基吡嗪	0.031	0.39	0.13	0.41
二甲基三硫	0.008	0.26	0.21	1.24
1-辛烯-3-酮	0.005	0.18	0.06	0.14
3-环己烯甲酸乙酯	0.003	0.13	0.13	0.14
3-甲基戊酸乙酯	0.008	0.15	0.06	0.07

经过对表4的细致分析,可以观察到,在3种不同的栽培模式下,羊肚菌的香气品质经过综合评估,洞穴栽培模式中获得的评分最高,达到16.920分,表明其香气品质处于最优水平;而大棚栽培模式次之,林下栽培模式中的香气品质评分最低。

2.4 不同栽培方式下羊肚菌挥发性物质聚类分析

经过系统聚类分析法的应用,对羊肚菌在不同栽培模式下的挥发性成分进行了分类研究,并使用R程序脚本绘制聚类热图,结果如图3所示。由图3可知,在分类为两个群体时,羊肚菌在洞穴栽培模式下形成的聚类单独为一类,而在大棚及林下栽培模式下所形成的聚类则构成另一类,此结果与PCA分析所得结论相吻合。

表4 不同栽培方式下羊肚菌的香气品质综合得分

Table 4 Comprehensive score of aromatic quality of *M. esculenta* under different cultivation methods

主成分得分	大棚羊肚菌	林下羊肚菌	洞穴羊肚菌
f_1	-16.250	-16.616	32.866
f_2	15.299	-14.876	-0.423
f_3	4.354	-4.658	0.304
f_4	-1.524	1.703	-0.179
f_5	0.971	-1.199	0.228
f_6	0.027	-0.357	0.330
f_7	-0.083	-0.139	0.222
f_8	0.263	-0.353	0.090
F	-7.380	-8.577	16.920

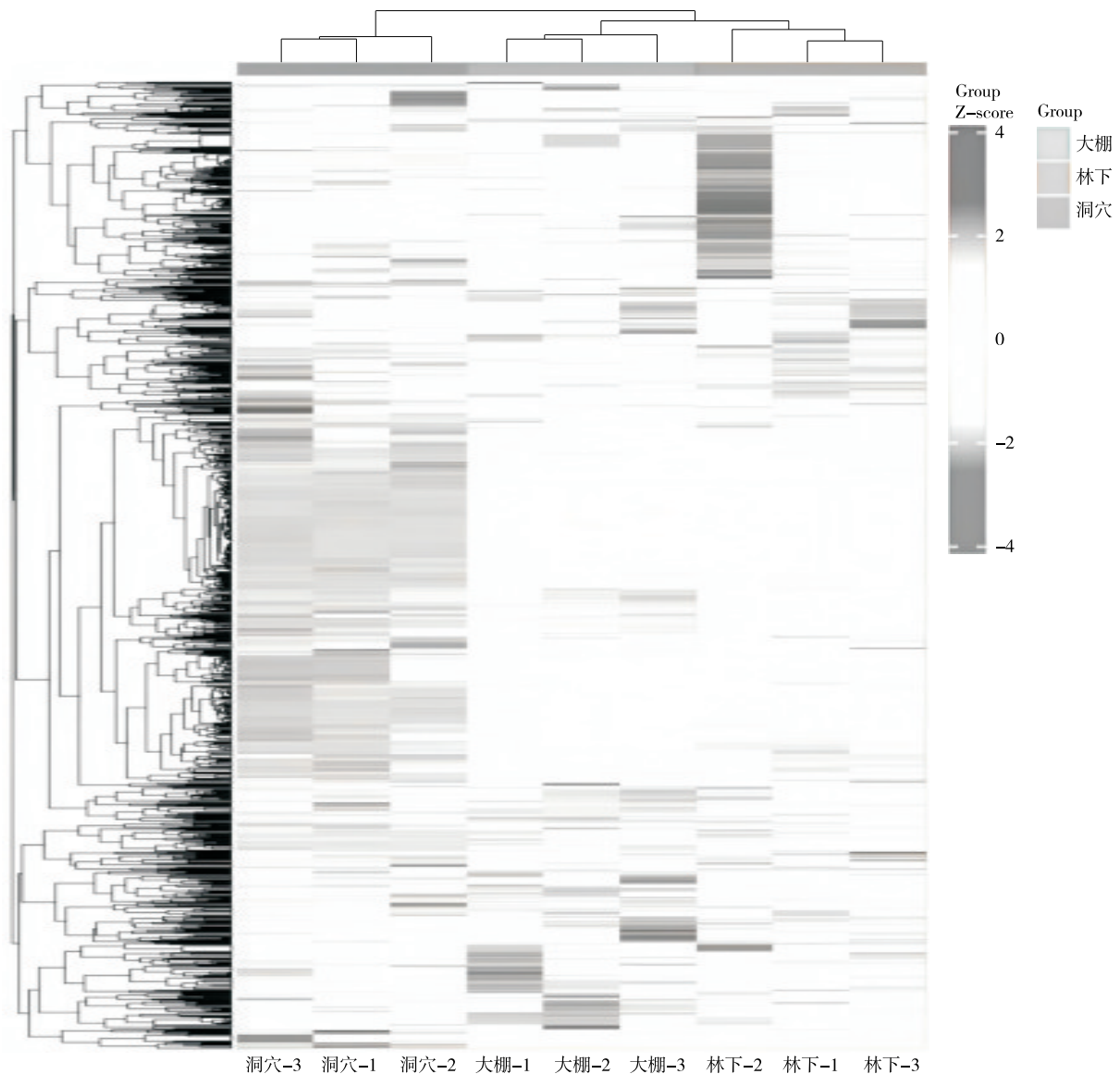


图3 不同栽培方式下羊肚菌挥发性物质聚类热图

Figure 3 Cluster heat map of *M. esculenta* under different cultivation methods

2.5 不同栽培方式下羊肚菌挥发性物质风味组学分析

在对比组别中,依据既定筛选准则所识别的差异代谢物及其关联的感官风味特性,选取注释数量最多的前 10 个感官风味特征予以呈现,如图 4 所示。由图 4 可知,

大棚、林下和洞穴栽培方式下共有风味 5 种,分别为果香、甜香、花香、香草及青气,构成了羊肚菌的主体风味。但不同栽培方式下的羊肚菌感官风味类别又有所不同,造就了其最终的风味存在一定差异。

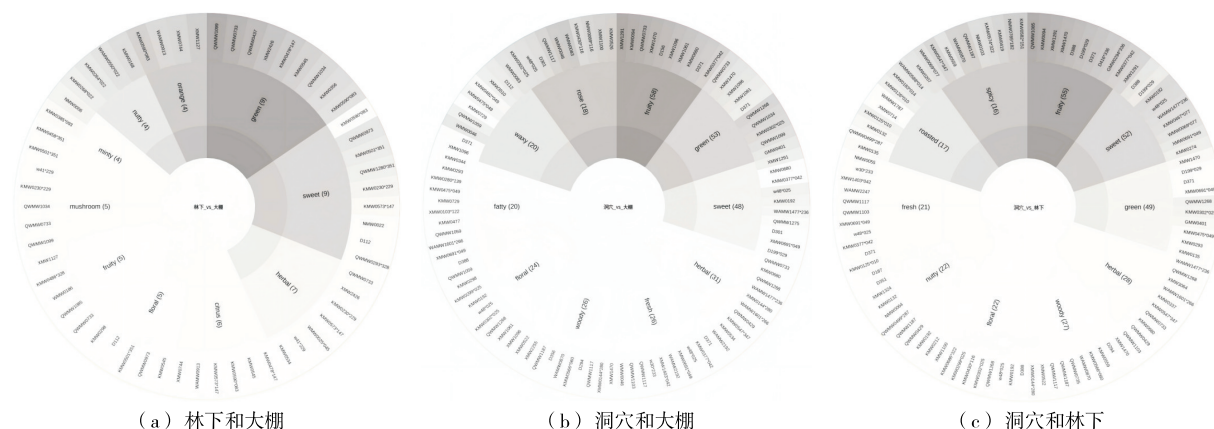


图 4 差异代谢物风味轮

Figure 4 Flavor wheel of differential metabolites

3 结论

采用顶空固相微萃取(HS-SPME)和气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术对 FAST 周边地区大棚、林下、洞穴 3 种栽培方式下羊肚菌的挥发性成分进行了定性定量分析,借助相对气味活性值(ROAV)方法,评估了各组成成分对于整体香气的贡献度。进一步通过主成分及聚类分析,对该研究样本进行了全面评估与综合判断。结果表明,3 种栽培方式下羊肚菌中共检出 1 201 种挥发性物质,分为 15 大类,其中相对含量最高的为杂环化合物,为 11.042%~28.365%,不同栽培方式下相对含量差异显著($P<0.05$),主体挥发性香气成分为 $\alpha, \alpha, 4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇、二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮和 1-壬烯-3-酮,其中, $\alpha, \alpha, 4$ -三甲基-3-环己烯-1-甲硫醇对风味影响最大,栽培方式不同各主体挥发性香气成分有所差异。综合评价可知,洞穴栽培方式下羊肚菌的香气品质最佳,可能与其独特的洞穴生态环境有关,具体影响因素有待进一步探究。

参考文献

[1] 卯晓岚. 中国蕈菌[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 750-777.
Mao X L. Macromycetes of China[M]. Beijing: Science Press, 2009: 750-777.
[2] 邢晓冉, 侯佳茜, 于艳杰, 等. 浅析羊肚菌研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 269-271.
Xing X R, Hou J Q, Yu Y J, et al. Brief analysis on the research progress of *Morchella esculenta*[J]. The Food Industry, 2022, 43(2): 269-271.

[3] 支彩艳, 乔俊, 赵建国, 等. 羊肚菌人工栽培技术研究进展[J]. 北方园艺, 2021(15): 143-150.
Zhi C Y, Qiao J, Zhao J G, et al. Research progress in artificial cultivation of *Morchella*[J]. Northern Horticulture, 2021(15): 143-150.
[4] 王晓, 蔡坤伦, 刘森, 等. 我国洞穴食用菌栽培研究进展[J]. 湖南农业科学, 2015(6): 148-151.
Wang X, Cai K L, Liu S, et al. Review of in-cave edible mushroom cultivation in China[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015(6): 148-151.
[5] 董慧, 李晓贝, 张艳梅, 等. 食用菌品质评价研究浅析[J]. 上海农业学报, 2020, 36(3): 146-150.
Dong H, Li X B, Zhang Y M, et al. Research progress on quality evaluation of edible fungi[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020, 36(3): 146-150.
[6] 兰秀华, 谢丽源, 许瀛引, 等. 羊肚菌挥发性物质综合评价和品质差异分析[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 270-275.
Lan X H, Xie L Y, Xu Y Y, et al. Comprehensive evaluation of volatile substances and quality differences of *Morchella importuna* samples[J]. Food Science, 2019, 40(14): 270-275.
[7] 张福生, 龙力, 余晓瑞, 等. 不同羊肚菌干品挥发性成分检测及其差异性分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2019, 56(5): 963-970.
Zhang F S, Long L, Yu X R, et al. Detection and analysis of volatile components in different varieties of morel[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2019, 56(5): 963-970.
[8] 周晓倩, 李晓贝, 张艳梅, 等. 基于 GC-IMS 和 GC×GC-To F-MS 技术分析产地对羊肚菌挥发性风味成分的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(22): 4 553-4 567.

- Zhou X Q, Li X B, Zhang Y M, et al. Effects of origin on the volatile flavor components of morels based on GC-IMS and GC×GC-To F-MS[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(22): 4 553-4 567.
- [9] 罗凯, 吕金丽, 吴迪, 等. 贵州野生羊肚菌的挥发性物质及香气品质分析[J]. *贵州农业科学*, 2025, 53(1): 42-54.
- Luo K, Lv J L, Wu D, et al. Analysis on volatile substances and aromatic quality of wild *Morchella* in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2025, 53(1): 42-54.
- [10] 赵子丹, 王周利, 开建荣, 等. 宁夏地区栽培食用菌中风味物质的品质差异分析[J]. *中国食用菌*, 2023, 42(6): 32-40.
- Zhao Z D, Wang Z L, Kai J R, et al. Analysis on the quality differences of flavor substances in cultivated edible fungi in Ningxia Region[J]. *Edible Fungi of China*, 2023, 42(6): 32-40.
- [11] 李翔, 钟方友, 凌云坤, 等. HS/SPME-GC/MS法比较分析野生与人工栽培羊肚菌挥发性成分[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(17): 225-228, 234.
- Li X, Zhong F Y, Ling Y K, et al. Comparative analysis of the volatile component from wild and cultivated *Morchella* by HS/SPME-GC/MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(17): 225-228, 234.
- [12] 王道平, 危莉, 彭小冰, 等. 顶空固相微萃取—气质联用法分析新鲜假蒟挥发性化学成分[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2013, 19(10): 142-145.
- Wang D P, Wei L, Peng X B, et al. SPME-GC-MS analysis of volatile constituents from fresh piper sarmentosum[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2013, 19(10): 142-145.
- [13] 徐宁, 陆欢, 冯立国, 等. HS-SPME-GC-MS法分析卵孢小奥德蘑子实体不同部位挥发性成分及营养成分分析[J]. *菌物学报*, 2020, 39(10): 1 933-1 947.
- Xu N, Lu H, Feng L G, et al. Volatile components analysed by HS-SPME-GC-MS in different parts of fruiting bodies and nutritional composition of *Oudemansiella raphanipes*[J]. *Mycosystema*, 2020, 39(10): 1 933-1 947.
- [14] 谢丽源, 兰秀华, 唐杰, 等. 不同品种羊肚菌挥发性物质分析及综合评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 227-233.
- Xie L Y, Lan X H, Tang J, et al. Analysis and comprehensive evaluation of volatile substances in different varieties of *Morchella* spp[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 227-233.
- [15] 谢丽源, 许瀛引, 彭卫红, 等. 不同生态环境对羊肚菌挥发性物质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(6): 95-100.
- Xie L Y, Xu Y Y, Peng W H, et al. Effect of differential ecological environments on the composition of volatile substances in *Morchella*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(6): 95-100.
- [16] 孙海澜, 裴龙英, 陈瑶, 等. 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]. *食品工业科技*, 2024, 45(7): 261-269.
- Sun H L, Pei L Y, Chen Y, et al. 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[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(7): 261-269.
- [17] 张茹茹, 余雄伟, 欧阳辉, 等. 基于HS-SPME-GC-O-MS和E-nose解析不同热加工方式下西瓜籽特征性香气差异[J]. *食品与机械*, 2023, 39(1): 9-17.
- Zhang R R, Yu X W, Ouyang H, et al. Combination of HS-SPME-GC-O-MS and E-nose revealed the characteristic aroma differences of watermelon seeds under various thermal processing treatments[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(1): 9-17.
- [18] 葛艳争, 孙晓雪, 安永强, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱、感官、电子鼻分析不同贮藏时间辣椒油风味成分[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 12-21.
- Ge Y Z, Sun X X, An Y Q, et al. Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 12-21.
- [19] 杨倩, 贾洪锋, 张森, 等. 不同烹制加工阶段水煮肉片关键挥发性风味物质分析[J]. *食品与机械*, 2024, 40(10): 28-38.
- Yang Q, Jia H F, Zhang M, et al. Analysis of key volatile flavor substances in boiled spicy pork slices during different cooking and processing stages[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(10): 28-38.
- [20] 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, 2022: 73-74.
- Lan X H. Analysis of nutritional quality formation factors, identification of functional components and application of liquid fermentation in *Morchella* spp[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022: 73-74.
- [21] 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: 131587.
- [22] Van Gemert L J. Odour thresholds: compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011: 13-207.