

基于HS-SPME-GC-MS分析马桑香菇 不同干燥方式的挥发性成分差异

吴宸印^{1,2}, 龙艳丽^{1,2}, 欧成章², 杨迺嘉^{1*}, 潘年琼², 杜成兴^{1,2}

(1. 贵州省生物技术研究开发基地有限公司, 贵州贵阳 550002)

(2. 贵州省科晖检验检测研究院有限公司, 贵州贵阳 550002)

摘要: 为探究不同干燥方式对马桑香菇挥发性成分的影响, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 对马桑香菇鲜菇 (Fresh Sample, FS)、热风干燥菇 (Oven Drying, OD) 和真空冷冻干燥菇 (Vacuum Freeze Drying, VFD) 的挥发性成分开展组分与聚类分析, 比较其差异。结果表明, FS 中检测到 50 种挥发性成分, 以含氧化合物 (51.44%) 和含硫化合物 (36.23%) 为主, 所含 3-辛酮与二甲基三硫醚提供主要香气; OD 处理后检出 34 种, 其中含硫化合物占比显著升高至 63.08%, 所含主要化合物为二甲基三硫醚和香菇素, 是该状态下的主要呈味挥发性化合物; VFD 检出 72 种成分, 其中含氧化合物 (42.50%) 和萜类 (30.02%) 占主导, (+)-柠檬烯与己醛呈现了主要香气。聚类分析表明, 在共有化合物中 VFD 与 FS 的挥发性成分变化趋势更接近。OD 处理可富集大量含硫化合物, VFD 处理有利于保留与提升热敏性化合物的数量及含量。该研究为马桑香菇干燥工艺优化和推动高附加值产品开发提供了参考。

关键词: 马桑香菇; 顶空固相微萃取; 气相色谱-质谱联用; 挥发性成分; 干燥方式

文章编号: 1673-9078(2026)7-232-244

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0360

Differences in Volatile Components of *Lentinula edodes* under Different Drying Methods Based on HS-SPME-GC-MS Analysis

WU Chenyin^{1,2}, LONG Yanli^{1,2}, OU Chengzhang², YANG Naijia^{1*}, PAN Nianqiong², DU Chengxing^{1,2}

(1. Guizhou Biotechnology Research and Development Base Co. Ltd., Guiyang 550002, China)

(2. Guizhou Kehui Inspection and Testing Research Institute Co. Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: To investigate the effects of different drying methods on the volatile components of *Lentinula edodes* cultivated on *Coriaria nepalensis* wood, headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used to perform component and cluster analyses in fresh samples (FS), oven-dried samples (OD), and vacuum freeze-dried samples (VFD), and their differences were compared. The results showed that 50 volatile components were detected in FS, dominated by oxygen-containing compounds (51.44%) and sulfur-containing compounds (36.23%), with 3-octanone and dimethyl

引文格式:

吴宸印, 龙艳丽, 欧成章, 等. 基于HS-SPME-GC-MS分析马桑香菇不同干燥方式的挥发性成分差异[J]. 现代食品科技, 2026, 42(7): 232-244.

WU Chenyin, LONG Yanli, OU Chengzhang, et al. Differences in volatile components of *Lentinula edodes* under different drying methods based on HS-SPME-GC-MS analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 232-244.

收稿日期: 2025-03-13; 修回日期: 2025-07-28; 接受日期: 2025-08-01

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目 (黔科合支撑 (2025) 一般 143 号); 贵州省科研机构创新能力建设专项资金项目 (黔科合服企 [2023]012); 贵州省科技支撑计划项目 (黔科合支撑 (2022) 一般 176

作者简介: 吴宸印 (1998-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 大宗食用菌栽培与遗传转化及天然产物研究等方向, E-mail: wcyn531@163.com

通讯作者: 杨迺嘉 (1965-), 女, 研究员, 研究方向: 天然产物化学、新药研发和食品科学研究等方向, E-mail: 2089532674@qq.com

trisulfide as the main contributors to the aroma. After OD treatment, a total of 34 compounds were detected, with the proportion of sulfur-containing compounds increased significantly to 63.08%. The main compounds were dimethyl trisulfide and lenthionine, which were the key flavor-active volatile compounds in this state. In VFD, 72 components were detected, dominated by oxygen-containing compounds (42.50%) and terpenoids (30.02%), with (+)-limonene and hexanal as the main contributors to the aroma. Cluster analysis of shared compounds showed that, in terms of volatile-profile evolution, VFD was more closely related to FS. OD treatment significantly enriched sulfur-containing compounds, whereas VFD treatment preserved and enhanced the number and levels of thermosensitive compounds. This study provides a reference for optimizing the drying process and developing high-value-added products of *L. edodes*.

Key words: *Lentinula edodes*; headspace solid-phase microextraction; gas chromatography-mass spectrometry; volatile components; drying methods

马桑香菇 (*Lentinula edodes*) 是一种生长于马桑树枯枝上的野生香菇, 因其独特的风味和营养价值备受关注。其香气特征是决定品质和消费者偏好的核心因素之一^[1], 现有研究仅聚焦于野生马桑香菇挥发性成分的地理分布差异 (如海拔对萜烯类、醛酮类化合物的影响)^[2]。而人工栽培品种因规模化生产潜力与经济价值提升, 已成为市场供应的重要来源。目前商品化产品仍以子实体的鲜食与干制品为主, 但不同干燥工艺通过差异化的水分迁移机制与热力学效应对香气成分的保留与转化规律尚未系统阐明, 导致加工工艺选择缺乏理论依据。

气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 是分析挥发性成分的经典方法^[3-5], 顶空固相微萃取 (HS-SPME) 因其高效、绿色的特性, 特别适用于中高挥发性风味物质的痕量富集^[6,7]。HS-SPME-GC-MS 联用技术对固体基质具有良好兼容性^[8,9], 但在马桑香菇干燥产品的香气分析中尚未见应用报道。本研究首次采用 HS-SPME-GC-MS 技术系统比较马桑香菇的鲜菇 (FS)、热风干燥 (OD) 及真空冷冻干燥 (VFD) 三种商品化形态的挥发性成分差异, 旨在解析干燥过程中关键风味物质的变化规律, 阐明不同干燥技术对特征香气成分的影响, 建立工艺-风味成分的构效关系以期马桑香菇初加工工艺优化提供数据支撑, 并给风味导向型产品开发奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试供材料

以马桑香菇 Le.Msy-01 (中国典型培养物保藏中心保藏编号为 CCTCC NO: M20242211) 为试供菌株, 参照刘远伦等^[10]的代料栽培配方进行栽培直至出菇, 采收子实体鲜样 (FS), 并进行热风干燥 (OD) 和真

空冷冻干燥 (VFD) 处理作为试样。

1.1.2 仪器设备

Agilent 8890-7000E GC-MS-MS 型气相色谱-质谱联用仪, 安捷伦科技有限公司; PAL RTC 型四合一多功能自动进样模块, 广州智达实验室科技有限公司; PDMS/DVB 型固相微萃取纤维头 (涂层: 聚二甲基硅氧烷/二乙烯基苯, PDMS/DVB), 安捷伦科技有限公司; GFL-125 型电热鼓风干燥箱, 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司; EX224ZH 型电子天平, 奥豪斯仪器有限公司; BLK-FD-2 型真空冷冻干燥机, 江苏博莱客冷冻科技发展有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理

将采收的马桑菌子实体鲜样参考 Meng 等^[11]的方法, 将其放入恒温鼓风干燥箱中 80 °C 干燥 12 h 为 OD 处理; 参考 Liu 等^[12]的方法并稍加修改, 以 0.20 °C 每分钟的冷冻速率冻结至 -40 °C。随后进行 48 h 脱水处理为 VFD 处理, 具体条件为: 绝对压力 10 Pa、冷阱温度 -50 °C、隔板温度 30 °C。两种处理均按照食品安全国家标准 GB 5009.3-2016 的方法选取含水率 10% 的为供试样品。

分别称取各处理样品 1.0 g 于 20 mL 顶空瓶中, 参照 Mariano 等^[13]的方法并稍加修改, 选择已老化完成的 PDMS/DVB 萃取头, 60 °C 下孵化 10 min、萃取 30 min, 250 °C 脱附 5 min。

1.2.2 进样及测定方法

色谱柱为 HP-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm) 弹性石英毛细管柱, 初始温度 50 °C (保留 2 min), 以 3.5 °C·min⁻¹ 升温至 183 °C, 再以 10 °C·min⁻¹ 升温至 310 °C, 保持 10 min, 运行时间: 62.7 min; 汽化室温度 230 °C; 载气为高纯 He (99.999%); 柱前压

52.4 kPa,载气流量 1.0 mL·min⁻¹,分流进样,分流比 5:1,溶剂延迟时间: 0.2 min。

离子源为 EI 源,离子源温度 250 ℃,四极杆温度 150 ℃,电子能量 70 eV,倍增器电压 1 952 V,质量范围 45~500 u。

对总离子流图中的各峰经 Agilent MassHunter 软件处理,通过匹配 Nist20 质谱库(置信度≥85%)定性化合物;采用软件自带解卷积峰检测算法校正后,扣除±3 s 邻域空白信号均值降噪,最终通过净峰面积归一化法计算各成分相对含量。

1.3 数据分析

HS-SPME-GC-MS 原始数据的经质谱计算机数据系统检索,筛选置信度≥85%的化合物并查询 Cas 号,采用 Microsoft Excel 2010 数据整理, TB-tools 进行聚类分析。数据处理软件 Origin 2018、Illustrator CS6、GraphPad Prism8 用于数据可视化作图与进一步分析。

2 结果与讨论

2.1 挥发性化合物组分分析

在各类香菇的众多特性中,香气作为消费者偏好

的关键决定因素,受到了广泛的关注和研究^[14]。然而新鲜子实体容易变质,通常以干燥后的形式提供给市场,通过抑制微生物的生长、酶活性和水分介导的反应来延长其保质期^[15]。当前工业实践以热风干燥等方式为主导,真空冷冻干燥则主要应用于高附加值产品开发等场景^[16]。

本试验对马桑香菇 FS、OD、VFD 样进行挥发性成分鉴定,利用峰面积归一化法测定了各化学成分的相对质量分数,经鉴定分别鉴定到 50、34、72 种化合物,Chang 等^[17]也报告了类似结果。其中,从 FS、OD、VFD 处理中分别发现 31、18、56 种该状态下独有的化合物;存在于 FS 和 OD 的处理样中共有化合物 6 种,OD 和 VFD 中同时存在的 3 种,存在于 FS 和 VFD 的化合物 6 种。此外,同时存在于马桑香菇 3 种不同状态的化合物仅 7 种(表 1)。

根据国际纯粹与应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)分类规则,基于官能团主导、结构类比、复杂结构单独归类以突出独特性等将鉴定到的化合物划分为烃类化合物、含氧化合物、含氮化合物、含硫化合物、特殊结构化合物、其他类化合物六种组分大类(图 1、表 1)。

表 1 主要挥发性成分及其含量变化
Table 1 Main volatile components and changes in their contents

分类	编号	保留时间/ min	化合物中文名称	化合物英文名称	相对含量/%		
					FS	OD	VFD
烃类化合物	1	0.10	2,3,3-三甲基戊烷	Pentane,2,3,3-trimethyl-	—	—	0.16±0.01
	2	0.57	乙氧基乙炔	Ethoxyacetylene	—	—	0.18±0.03
	3	2.11	1-环丙基丙烷	Cyclopropane, propyl-	—	—	1.21±0.13
	4	2.21	邻二甲苯	O-Xylene	—	0.67±0.01	0.83±0.10
	5	2.92	苯乙烯	Styrene	—	—	11.22±0.24
	6	3.25	甲基环丁烷	Cyclobutane, methyl-	—	0.80±0.09	—
	7	6.04	2-甲基-5-异丙基双环[3.1.0]己-2-烯	Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 2-methyl-5-(1-methylethyl)-	—	—	0.14±0.02
	8	8.08	3,7,7-三甲基-1,3,5-环庚三烯	1,3,5-Cycloheptatriene,3,7,7-trimethyl-	—	—	0.34±0.02
	9	8.25	1-甲基-5-(1-甲基乙烯基)-环己烯	Cyclohexene, 1-methyl-5-(1-methylethenyl)-	—	—	0.34±0.04
	10	8.86	螺[2,4]庚-4,6-二烯	Spiro[2,4]hepta-4,6-diene	—	—	0.02±0.00
	11	9.93	正丁基环戊烷	Cyclopentane, butyl-	—	—	0.02±0.00
	12	10.84	(Z)-7-甲基-2-癸烯	2-Decene, 7-methyl-,(Z)-	—	0.52±0.01	—
	13	14.07	3-甲基-1-己烯	1-Hexene, 3-methyl-	2.12±0.01	—	—
	14	14.64	萘	Naphthalene	1.19±0.04	—	—
	15	17.48	(1R)-2,6,6-三甲基双环[3.1.1]庚-2-烯	(1R)-2,6,6-Trimethylbicyclo[3.1.1]hept-2-ene	0.95±0.01	—	—
	16	19.17	十六烷	Hexadecane	0.80±0.06	—	—
	17	19.67	2-甲基萘	Naphthalene, 2-methyl-	0.75±0.10	8.53±0.79	2.48±0.18

续表1

分类	编号	保留时间/ min	化合物中文名称	化合物英文名称	相对含量/%		
					FS	OD	VFD
烃类 化合物	18	20.17	3,3-二甲基己烷	Hexane,3,3-dimethyl-	0.73 ± 0.06	—	—
	19	22.91	2,4-二甲基癸烷	Decane,2,4-dimethyl-	0.33 ± 0.14	—	—
	20	25.64	7-十四炔	7-Tetradecyne	0.29 ± 0.05	—	—
	21	25.81	甲基环辛烷	Cyclooctane, methyl-	0.22 ± 0.01	—	—
	22	25.88	环十二烷	Cyclododecane	0.17 ± 0.01	—	—
	23	35.42	菲	Phenanthrene	0.13 ± 0.00	—	—
	24	41.02	2-甲基丁基环戊烷	Cyclopentane,(2-methylbutyl)-	0.07 ± 0.00	—	0.01 ± 0.00
	25	41.02	1-甲基-3-异丙基环戊烷	Cyclopentane,1-methyl-3-(1-methylethyl)-	0.07 ± 0.00	—	—
	26	41.70	1,E-11,Z-13-十八碳三烯	1,E-11,Z-13-Octadecatriene	0.03 ± 0.00	0.15 ± 0.01	0.04 ± 0.00
	27	43.80	正十九烷	Nonadecane	0.02 ± 0.00	—	—
	28	45.97	正二十七烷	Heptacosane	0.02 ± 0.00	—	—
含氧 化合物	29	0.10	己醛	Hexanal	1.86 ± 0.14	—	11.81 ± 1.22
	30	0.11	3-甲基环戊醇	Cyclopentanol,3-methyl-	—	5.23 ± 0.57	—
	31	2.36	4,4-二甲基戊烯-2-烯醛	4,4-Dimethylpent-2-enal	—	0.16 ± 0.03	—
	32	2.47	1-庚烯-3-醇	1-Hepten-3-ol	0.20 ± 0.01	—	—
	33	2.87	2-庚酮	2-Heptanone	—	—	1.41 ± 0.34
	34	3.25	庚醛	Heptanal	—	—	1.08 ± 0.09
	35	5.32	反-2-庚烯醛	2-Heptenal, E -	—	—	0.99 ± 0.03
	36	5.49	苯乙二醛	Phenylglyoxal	—	—	0.78 ± 0.02
	37	5.49	2,2-二乙酰氧基苯乙酮	Phenacylidene diacetate	0.23 ± 0.01	4.62 ± 0.21	0.10 ± 0.01
	38	6.19	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	—	—	2.22 ± 0.23
	39	6.41	2-甲基戊酸酐	Pentanoic acid,2-methyl-,anhydride	—	0.37 ± 0.07	—
	40	6.54	3-辛酮	3-Octanone	43.78 ± 1.84	0.83 ± 0.06	—
	41	6.85	3-辛醇	3-Octanol	—	—	0.45 ± 0.02
	42	6.99	戊二酸,2-氟苯基-4-甲氧基苄酯	Glutaric acid,2-fluorophenyl4-methoxybenzyl ester	—	0.25 ± 0.02	—
	43	7.03	己酸乙酯	Hexanoic acid,ethyl ester	—	—	0.24 ± 0.03
	44	7.38	4,4-二甲基-2-环己烯-1-醇	2-Cyclohexen-1-ol,4,4-dimethyl-	—	—	0.43 ± 0.02
	45	8.21	2-乙基-4-甲基-1-戊醇	1-Pentanol,2-ethyl-4-methyl-	0.16 ± 0.01	—	—
	46	8.21	2-乙基己醇	1-Hexanol,2-ethyl-	0.16 ± 0.03	—	—
	47	8.65	5-甲基-3-庚-2-酮	3-Hepten-2-one,5-methyl-	—	—	0.58 ± 0.05
	48	9.43	(E)-2-辛烯醛	2-Octenal,(E)-	0.20 ± 0.03	—	1.21 ± 0.11
	49	9.80	甲酸苯酯	Ethanone,2-(formyloxy)-1-phenyl-	—	0.22 ± 0.08	—
	50	10.32	3-羟基-4-甲基苯甲醛	3-Hydroxy-4-methylbenzaldehyde	—	—	0.02 ± 0.00
	51	10.44	2-乙基-1,6-二噁螺[4.4]-壬烷	1,6-Dioxaspiro[4.4]nonane,2-ethyl-	0.15 ± 0.02	—	—
	52	10.87	硝酸乙酯	Nitric acid,ethyl ester	—	—	1.22 ± 0.16
	53	11.16	乙酸芳樟酯	Linalyl acetate	—	—	2.15 ± 0.33
	54	11.34	2-壬烯-1-醇	2-Nonen-1-ol	0.23 ± 0.01	—	1.10 ± 0.21
	55	11.49	可可醛	trans-5-Methyl-2-isopropyl-2-hexen-1-al	—	0.49 ± 0.04	—
	56	12.23	2-壬烯-4-酮	2-Nonen-4-one	—	—	0.06 ± 0.01

续表1

分类	编号	保留时间/ min	化合物中文名称	化合物英文名称	相对含量/%		
					FS	OD	VFD
含氧化合物	57	12.80	3-壬烯-2-酮	3-Nonen-2-one	—	—	0.71 ± 0.11
	58	13.09	(+)-2-冰片酮	(+)-2-Bornanone	—	—	0.47 ± 0.06
	59	13.55	1-甲酰基环八四烯	1-Formylcyclooctatetraene	—	—	0.21 ± 0.04
	60	13.62	反式-2-壬烯-1-醛	2-Nonenal,(E)-	—	—	0.66 ± 0.05
	61	14.07	1-辛醇	1-Octanol	—	—	0.12 ± 0.02
	62	14.11	(+)-二苄氧基-L-酒石酸酐	(+)-Dibenzoyl-L-tartaric acid anhydride	—	—	0.02 ± 0.00
	63	14.40	(1 <i>α</i> ,2 <i>α</i> ,5 <i>α</i>)-2-甲基-5-异丙基双环[3.1.0]己-2-醇	Bicyclo[3.1.0]hexan-2-ol,2-methyl-5-(1-methylethyl)-,(1 <i>α</i> ,2 <i>α</i> ,5 <i>α</i>)-	—	—	3.27 ± 0.11
	64	14.94	<i>α</i> -松油醇	<i>α</i> -Terpineol	—	—	0.32 ± 0.01
	65	15.09	2-羟基-6-甲基苯甲醛	Benzaldehyde,2-hydroxy-6-methyl-	0.44 ± 0.02	—	—
	66	15.23	草酸,烯丙基壬酯	Oxalic acid,allyl nonyl ester	—	0.12 ± 0.01	—
	67	15.24	4-烯丙基苯甲醚	Estragole	—	—	1.41 ± 0.21
	68	15.49	1,14-十四烷二醇	1,14-Tetradecanediol	—	—	0.09 ± 0.00
	69	15.61	2-乙酰基茛满	Ethanone,1-(2,3-dihydro-1H-inden-5-yl)-	0.29 ± 0.02	—	—
	70	16.37	(R)- <i>β</i> -香茅醇	6-Octen-1-ol,3,7-dimethyl-,(R)-	—	—	0.23 ± 0.02
	71	16.39	3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇甲酸酯	1,6-Octadien-3-ol,3,7-dimethyl-,formate	0.27 ± 0.04	—	—
	72	16.93	顺式马鞭草醇	cis-Verbenol	0.34 ± 0.02	—	—
	73	18.20	2-苯基-2-丁烯醛	Benzeneacetaldehyde, <i>α</i> -ethylidene-	—	—	0.16 ± 0.01
	74	18.95	2-十一酮	2-Undecanone	—	1.11 ± 0.13	1.12 ± 0.09
	75	19.01	<i>α</i> -甲基-1H-茛-1-甲醇乙酸酯	1H-Indene-1-methanol, <i>α</i> -methyl-,acetate	—	—	0.05 ± 0.00
	76	19.83	反,反-2,4-癸二烯醛	2,4-Decadienal,(E,E)-	0.35 ± 0.03	—	0.56 ± 0.05
	77	20.00	<i>α,α</i> -二甲基苯乙基乙酸酯	Benzeneethanol, <i>α,α</i> -dimethyl-,acetate	—	—	0.24 ± 0.03
	78	20.53	反式对叔丁基环己基乙酸酯	Cyclohexanol,4-(1,1-dimethylethyl)-,acetate,trans-	—	—	0.02 ± 0.00
	79	22.00	2-丁基-2-辛烯醛	2-Octenal, 2-butyl-	—	—	1.79 ± 0.22
	80	23.82	百里氢醌二甲醚	Benzene,1,4-dimethoxy-2-methyl-5-(1-methylethyl)-	—	—	0.22 ± 0.00
	81	25.90	4-(2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-基)-3-戊烯-2-酮	3-Penten-2-one, 4-(2,6,6-trimethyl-2-cyclohexen-1-yl)-	—	—	0.12 ± 0.00
	82	26.23	5-甲基-2-苯基-2-己烯醛	5-Methyl-2-phenyl-2-hexenal	—	1.05 ± 0.13	—
	83	37.16	十五烷酸	Pentadecanoic acid	—	—	0.15 ± 0.02
	84	37.44	1,2-苯二甲酸双(2-甲基丙基)酯	1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl)ester	—	0.34 ± 0.04	0.05 ± 0.00
	85	39.09	棕榈酸	n-Hexadecanoic acid	0.99 ± 0.03	0.47 ± 0.03	1.73 ± 0.07
	86	41.71	(Z,E)-9,12-十四二烯-1-醇	9,12-Tetradecadien-1-ol, (Z,E)-	0.33 ± 0.03	—	—
	87	41.73	亚油酸	Linoleic acid	—	—	1.48 ± 0.12
	88	42.13	亚油酸乙酯	Linoleic acid ethyl ester	—	—	1.47 ± 0.05
	89	47.92	碳酸二十烷基乙烯基酯	Carbonic acid, eicosyl vinyl ester	1.46 ± 0.11	—	—

续表1

分类	编号	保留时间/ min	化合物中文名称	化合物英文名称	相对含量/%		
					FS	OD	VFD
含氮化合物	90	1.10	5H-四唑-5-胺	5H-Tetrazol-5-amine	—	0.05 ± 0.00	—
	91	4.74	4-甲基吡唑	Fomepizole	0.01 ± 0.00	—	—
	92	4.89	1H-四唑-5-胺	1H-Tetrazol-5-amine	0.07 ± 0.00	0.24 ± 0.01	—
	93	6.41	2-甲基-5-氨基四氮唑	5-Amino-2-methyl-2H-tetrazole	—	—	0.18 ± 0.00
	94	10.31	2,6-二乙基吡嗪	Pyrazine,2,6-diethyl-	—	0.80 ± 0.03	—
	95	10.55	2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	Pyrazine,3-ethyl-2,5-dimethyl-	—	0.06 ± 0.01	—
	96	16.28	苯并噻唑	Benzothiazole	0.14 ± 0.03	—	—
含硫化合物	97	19.80	3,5-二甲基-2-(3-甲基丁基)-吡嗪	2-(3-Methylbutyl)-3,5-dimethylpyrazine	—	0.25 ± 0.02	—
	98	1.15	乙基甲基二硫醚	Methyl ethyl disulfide	0.16 ± 0.01	—	—
	99	5.87	二甲基三硫醚	Dimethyl trisulfide	31.66 ± 1.41	44.76 ± 1.62	—
	100	12.56	3,5-二甲基-1,2,4-三硫环戊烷	1,2,4-Trithiolane,3,5-dimethyl-	—	0.28 ± 0.07	—
	101	15.98	二甲基四硫醚	Tetrasulfide,dimethyl	0.62 ± 0.06	0.92 ± 0.06	—
	102	30.90	香菇素	Lenthionine	3.75 ± 0.28	17.13 ± 0.84	—
特殊结构化合物	103	40.54	1,2,3,4,5,6,7,8-八硫杂环辛烷	Cyclic octaatomic sulfur	0.04 ± 0.00	—	0.13 ± 0.01
	104	4.51	反式-β-杂色烯	trans-β-Ocimene	—	—	2.10 ± 0.14
	105	5.08	莰烯	Camphene	—	—	0.26 ± 0.04
	106	8.26	(+)-柠檬烯	D-Limonene	—	—	22.83 ± 0.88
	107	10.73	γ-萜品烯	γ-Terpinene	—	—	1.36 ± 0.21
	108	19.27	α-水芹烯	α-Phellandrene	—	—	0.05 ± 0.00
	109	21.13	双环[4.1.0]庚-3-烯	(+)-3-Carene	—	—	0.74 ± 0.05
	110	22.03	α-衣兰烯	α-Ylangene	0.29 ± 0.03	—	—
	111	23.47	(+)-环苜蓿烯	(+)-Cyclosativene	—	—	0.28 ± 0.01
	112	23.51	(+)-α-barbatene	(+)-α-Barbatene	0.17 ± 0.02	—	—
	113	24.53	香橙烯	Aromandendrene	—	—	1.65 ± 0.15
	114	24.72	(±)-β-巴豆烯	(±)-β-Barbatene	0.34 ± 0.02	0.74 ± 0.08	0.31 ± 0.04
	115	25.32	(-)-亚利斯托林	(-)-Aristolene	—	—	0.17 ± 0.05
	116	28.69	4-亚甲基-2,8,8-三甲基-2-乙烯基双环[5.2.0]壬烷	Bicyclo[5.2.0]nonane, 4-Methylene-2,8,8-trimethyl-2-vinyl-	—	—	0.27 ± 0.04
其他类化合物	117	32.66	β-红没药烯	β-Bisabolene	0.16 ± 0.02	—	—
	118	37.78	缬草-4,7 (11) -二烯	Valerena-4,7 (11) -diene	0.29 ± 0.01	—	—
	119	2.94	2-丁基呋喃	2-n-Butyl furan	—	—	0.26 ± 0.00
	120	4.89	1-乙基丁基过氧化氢	Hydroperoxide,1-ethylbutyl	0.41 ± 0.01	0.94 ± 0.03	—
	121	6.73	2-戊基呋喃	Furan,2-pentyl-	2.18 ± 0.16	6.86 ± 0.52	9.70 ± 0.49
	122	16.18	3-苯基呋喃	Furan,3-phenyl-	—	0.08 ± 0.00	—
	123	26.35	10,11-环氧钙烯	10,11-Epoxycalamenene	0.28 ± 0.01	—	—
	124	26.91	2,4-二叔丁基酚	2,4-Di-tert-butylphenol	0.13 ± 0.01	0.22 ± 0.02	0.22 ± 0.01
	125	34.61	α-环氧蒎烷	α-Pinene oxide	—	0.72 ± 0.07	—
	126	27.09	萘并[2,1-b]呋喃	Naphtho[2,1-b]furan	—	—	0.01 ± 0.00
	127	29.82	二乙基甲氧基硼烷	Borinic acid, diethyl-, methyl ester	—	0.05 ± 0.00	—

注：表格中“—”表示该物质在本马桑香菇对应的处理组中未检测到。

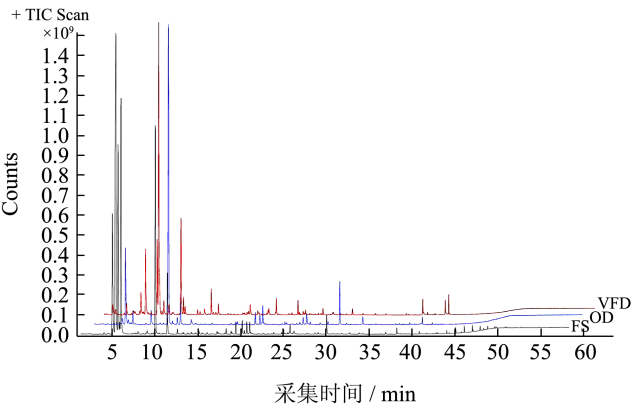


图 1 挥发性化合物总离子图

Fig.1 Total volatile compounds ion diagram

在马桑香菇 FS 样鉴定到的 50 种挥发性化合物中，含氧化合物 17 种，占整体相对含量 51.44%，此类化合物主导了鲜菇阶段的挥发香气。其次，含硫化合物共计 5 种，相对占含量 36.23%，这两类即为马桑香菇鲜菇中的主要类别（图 2a）。而其他类别挥发性化合物的占比较少，其中烃类化合物：16 种（7.87%）、其他类化合物：4 种（3.00%）、特殊结构化合物：5 种（1.25%）、含氮化合物：3 种（0.21%）。VFD 处理中鉴定到 72 种挥发性化合物，类别分布体现为含氧化合物：42 种（42.50%）、特殊结构化合物：11 种（30.02%）、烃类化合物：13 种（16.98%）、其他类化合物：4 种（10.19%）、含氮化合物：1 种（0.18%）、含硫化合物：1 种（0.13%）（图 2c），该处理有利于保留醇、醛、酮等挥发性物质，使得其风味特征、香气和味道更接近于鲜菇^[18]。OD 处理鉴定到 34 种化合物，其关键特征表现为含硫化合物：4 种（63.08%，主导干菇香气）（图 2b），这与王蓓等研究结果相似，均发现含硫化合物主导了干菇香气的呈现^[19]。其他类别则是含氧化合物：13 种（15.26%）、烃类化合物：5 种（10.67%）、其他类化合物：6 种（8.86%）、含氮化合物：5 种（1.39%）、特殊结构化合物：1 种（0.74%）。总体而言，OD 处理增强烤香与调味料风味（香菇素、二甲基四硫醚等升高），减弱青草与泥土气息（2-戊基呋喃、己醛降低）^[20]。

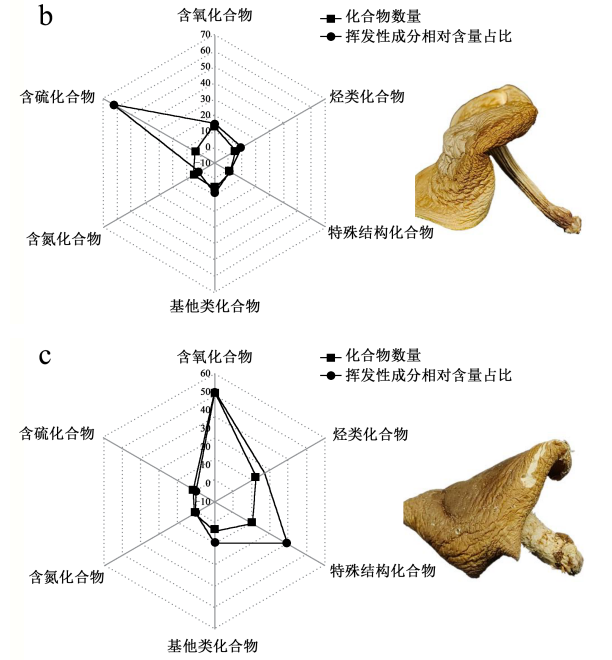
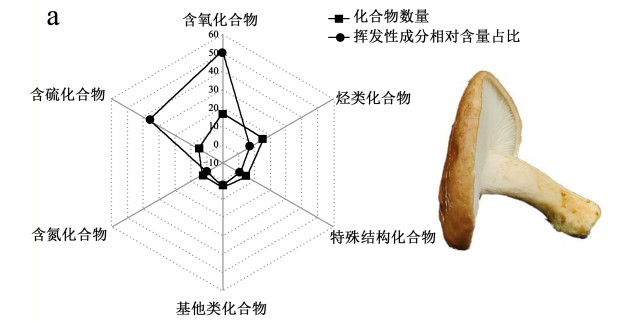


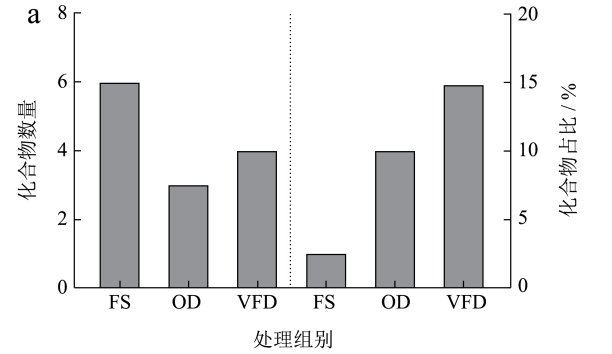
图 2 不同处理的马桑香菇子实体样品中挥发性化合物数量及挥发性成分相对含量占比

Fig.2 Number of volatile compounds and relative content distribution of volatile components in *Lentinula edodes* fruiting body samples under different treatments

注：（a）FS 样品；（b）OD 处理样品；（c）VFD 处理样品。

2.2 烃类挥发性成分类别差异分析

基于已划分的化合物大类，将烃类化合物按照键的类型、结构特征、化学性质的差异细分为脂环烃、烷烃、芳香烃、烯烃、炔烃 5 个小类别，在干燥处理后，可见各小类化合物数量均呈减少的趋势，化合物成分占比在不同处理中呈现差异。脂环烃化合物在 OD 处理中占比升高至 10.00%，在 VFD 处理中进一步增至 14.86%（图 3a）。烷烃类化合物在 FS 处理中含量占比最高（5.00%），但 OD 处理后完全消失，VFD 处理时仅保留 0.17%（图 3b）。芳香烃仅在 VFD 处理条件下检测到，占比 1.77%（图 3c）。烯烃和炔烃在 FS、OD 和 VFD 三种处理中的含量占比均低于 0.52%（图 3d，3e），表明此类化合物在马桑香菇中呈现低丰度特性。



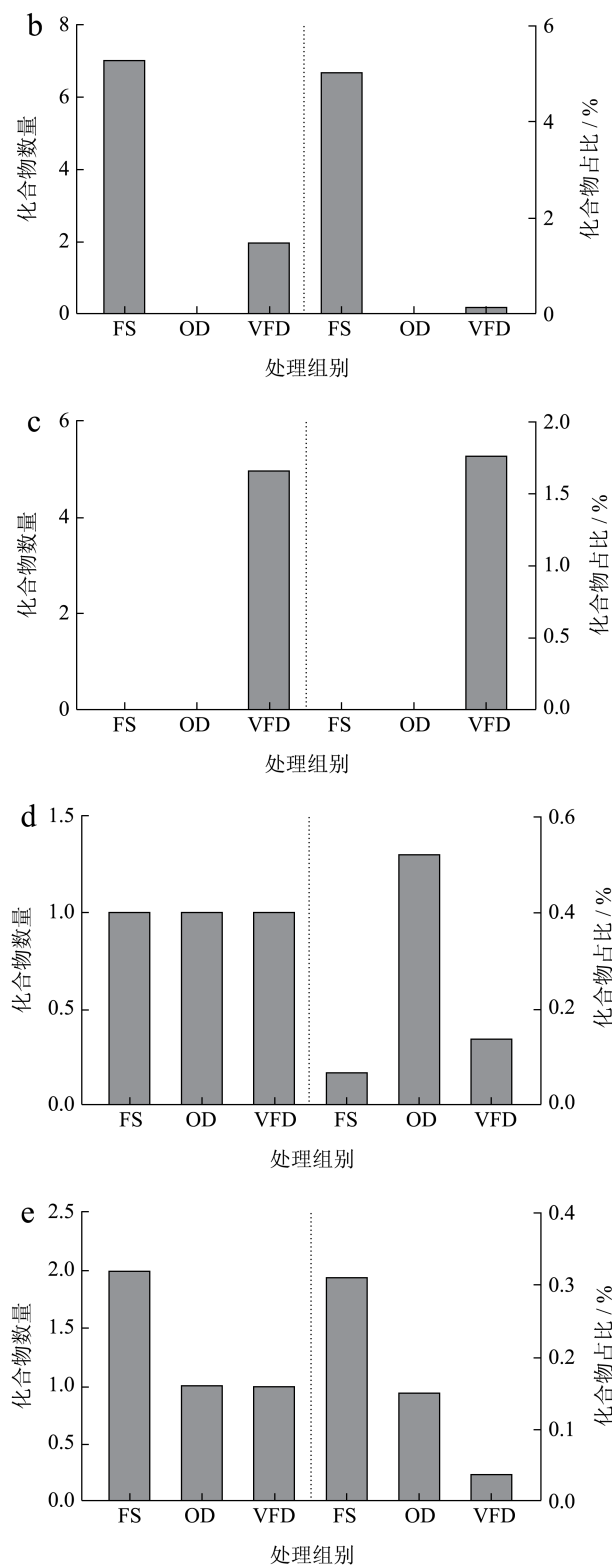


图3 马桑香菇 FS、OD、VFD 处理下烃类化合物的差异

Fig.3 Differences in hydrocarbon compounds under FS, OD, and VFD treatments of *Lentinula edodes*

注：(a) 脂环烃；(b) 烷烃；(c) 芳香烃；(d) 烯烃；(e) 炔烃。

2.3 关键风味挥发性成分类别差异分析

含氧化合物依据官能团类型等细分为醇类、醛类、酯类、酮类、酸与酸酐、醚类。已有研究表明,新鲜香菇的挥发性化合物主要由酮类和醇类组成^[21]。在 FS 样品中,酮类检出的 3-辛酮和 2-乙酰基茚满(图 4d),其相对含量分别为 43.78% 和 0.29%,这表明酮类主导了 FS 样品的含氧化合物气味特征,而其余类别化合物的总含量均较低(醇类 1.42%、醛类 2.85%、酯类 1.96%、酸与酸酐 0.99%、醚类 0.15%)。3-辛酮具有浓郁的果味、甜味、泥土味以及奶酪和蘑菇的风味,少量 2-乙酰基茚满则贡献了焦糖、坚果或烟熏气息,两者共同为马桑香菇赋予了复杂的香气特征。Lu 等^[22]对普通市售香菇冻干产品的检测结果表明,醇类、醛类是主要风味成分,这些类别的挥发性化合物因其气味阈值低且呈味强烈,是特有香气的重要贡献者。而本试验中,VFD 处理有效保护了马桑香菇中醛类等热敏性成分并提升了其种类与含量(图 5b,5d)。具体而言,在 FS 样中检出己醛(1.86%)、(E)-2-辛烯醛(0.20%)、2-羟基-6-甲基苯甲醛(0.44%)、反,反-2,4-癸二烯醛(0.35%) 4 种醛类化合物。OD 组仅检出 4,4-二甲基戊烯-2-烯醛(0.16%)、可可醛(0.49%)、5-甲基-2-苯基-2-己烯醛(1.05%) 3 种醛类。而 VFD 处理不仅提高 FS 原有醛类含量(己醛、(E)-2-辛烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛的含量分别提升至 11.81%、1.21%、0.56%),还额外检出庚醛(1.08%)、反-2-庚烯醛(0.99%)、苯乙二醛(0.78%)、3-羟基-4-甲基苯甲醛(0.02%)、1-甲酰基环八四烯(0.21%)、反式-2-壬烯-1-醛(0.66%)、2-苯基-2-丁烯醛(0.16%)、2-丁基-2-辛烯醛(1.79%) 8 种化合物,总量达 11 种。VFD 处理相较 FS 样和 OD 处理,醛类(热敏性成分)的含量分别提升了 6.74 与 11.36 倍。检出的热敏性成分中含量最高的己醛呈现青草、绿叶或未成熟水果的清新气息,该化合物气味阈值极低,在微量浓度下即可被感知,并能提供复杂的木香、树脂香或花香,增强天然感。己醛极大增强了 VFD 处理样品的清新感与香气层次感,赋予其类似青苹果或绿叶的清新调性。这种特性有助于最大限度地提高产品的整体可接受性,使整体香气更鲜活,综上所述,VFD 处理后马桑香菇热敏性成分无论从数量还是相对含量均有提升,表明次干燥方式在保留香菇风味方面展现出较好的优势^[23]。OD 处理样品则不含醚类化合物(图 4e),在其余小类中,酯类(5.55%)和醇类(5.23%)含量相对较高。其中,醇类仅检出 3-甲基环戊醇一种化合物,酯类

以 2,2-二乙酰氧基苯乙酮为主要成分，相对含量为 4.62%（图 4a，4c），该化合物具有甜香、木质、泥土、杏仁或花香的气息，增强了香菇的天然土腥味。

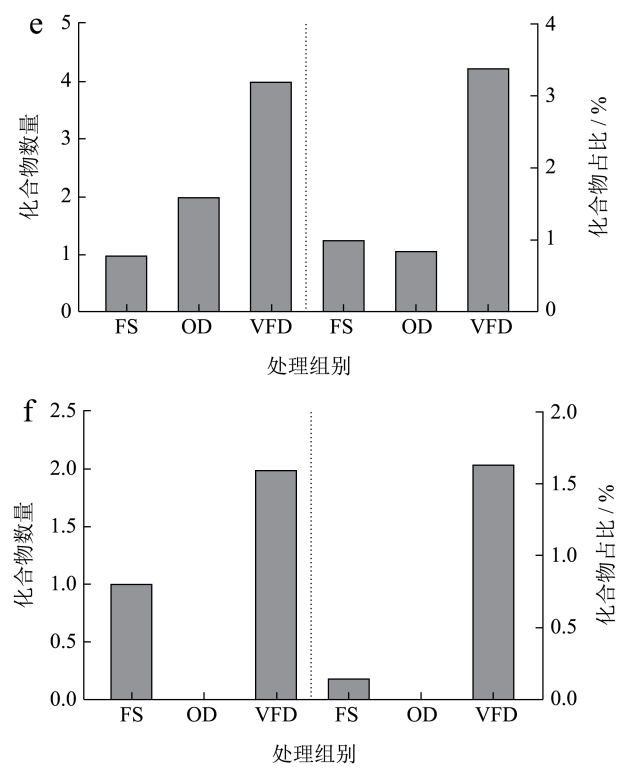
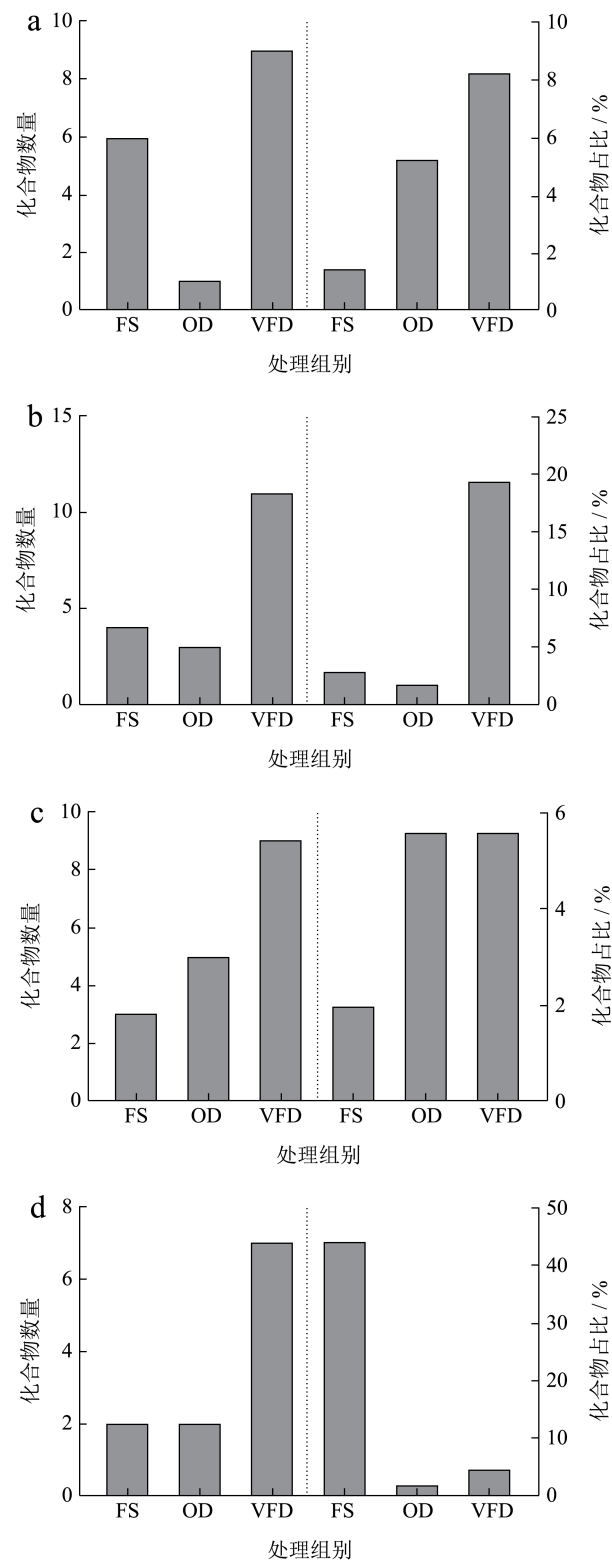


图 4 马桑香菇 FS、OD、VFD 处理下含氧化化合物的差异
Fig.4 Differences in oxygen-containing compounds under FS, OD, and VFD treatments of *Lentinula edodes*

注：(a) 醇类；(b) 醛类；(c) 酯类；(d) 酮类；(e) 酸与酸酐；(f) 醚类。

含氮化合物按照含氮原子或含氮杂环细分为胺类与杂环含氮化合物两类。分析发现，VFD 处理样品中未检出杂环含氮化合物，而 FS、OD、VFD 三种处理的马桑香菇均含有胺类化合物，且其含量占比均极低（图 5a、5b）。

干燥香菇的典型香气通常由环状和直链含硫化合物（如二甲基三硫醚、香菇素、二甲基四硫醚等）共同表征，鲜菇中这类化合物含量约占 19.41%~21.53%，而一些干香菇中占比可高达 22.91%~74.74%^[24]。本研究中，含硫化合物归为一个总类别，FS、OD、VFD 样品中分别检测到 5、4、1 种，其相对含量占比分别为 36.23%、63.08% 和 0.13%。不难发现，OD 处理后含硫化合物相对含量显著增加 ($P<0.05$)，是 FS 和 OD 样品主要香气的关键贡献者，二甲基三硫醚是其中最主要的成分，在 FS 和 OD 中的相对含量分别高达 31.66% 和 44.76%，是烘干样品核心“鲜味”的主要来源；香菇素则是另一重要成分，仅存在于 FS 和 OD 中，

相对含量分别为 3.75% 和 17.13%，共同构成了样品的香气特征（图 5c）。在子实体的干燥初期（0~40 min），如 γ -谷氨酰转肽酶等一系列酶将香菇酸转化为脱谷氨酰蘑菇酸，然后被半胱氨酸亚砷（C-S）裂解酶酶裂解产生硫代硫酸盐，在降低酮类和醇类化合物浓度的同时造成含硫化合物种类与含量的增加^[25,26]。且有研究发现，在热风烘干过程中休克蛋白 *HSP20*、*P450* 基因快速表达，也加速了挥发性含硫化合物的代谢^[27]。此外，Hou 等^[28]还发现较高的温度能促进二甲基三硫醚和二甲基二硫醚的形成。这可能是本试验中 OD 含硫化合物含量急剧升高的诱因。虽然高浓度的含硫化合物可能赋予马桑香菇刺鼻或微腐败感，且其含量的剧烈升高可能影响风味的接受度^[29]，但另一方面，这也使得热风干燥（OD）处理的马桑香菇在开发富含鲜味游离氨基酸的产品方面展现出较高潜力^[30]。

2.4 特殊结构化合物与其他类化合物差异分析

基于独特分子骨架和天然来源特性，将特殊结构化合物划分为萜类与单萜衍生物小类。在 VFD 处理中，此类化合物的相对含量显著升高至 30.02%，且种类多达 11 种（图 5d），其中柠檬烯是主要挥发物质，相对含量达 22.93%，这表明 VFD 处理更利于此类化合物的保留。邢颖等^[31]的研究结果也表示，真空冷冻干燥处理很好的保留了萜类等化合物。有研究还发现，真空冷冻干燥与热风干燥相比，干燥速率降低了 42.00%~71.40%，但冷冻后再升温的方式改善了细胞结构中因温度变化的水分扩散速率，确保了对温度敏感物质的释放^[32]。因此，VFD 处理有很好的风味感知优势，食用冻干马桑香菇时，低沸点萜类（如 (+)- 柠檬烯）能快速挥发产生前调香气，赋予丰富的花果香气，从而提高产品接受度^[33]。

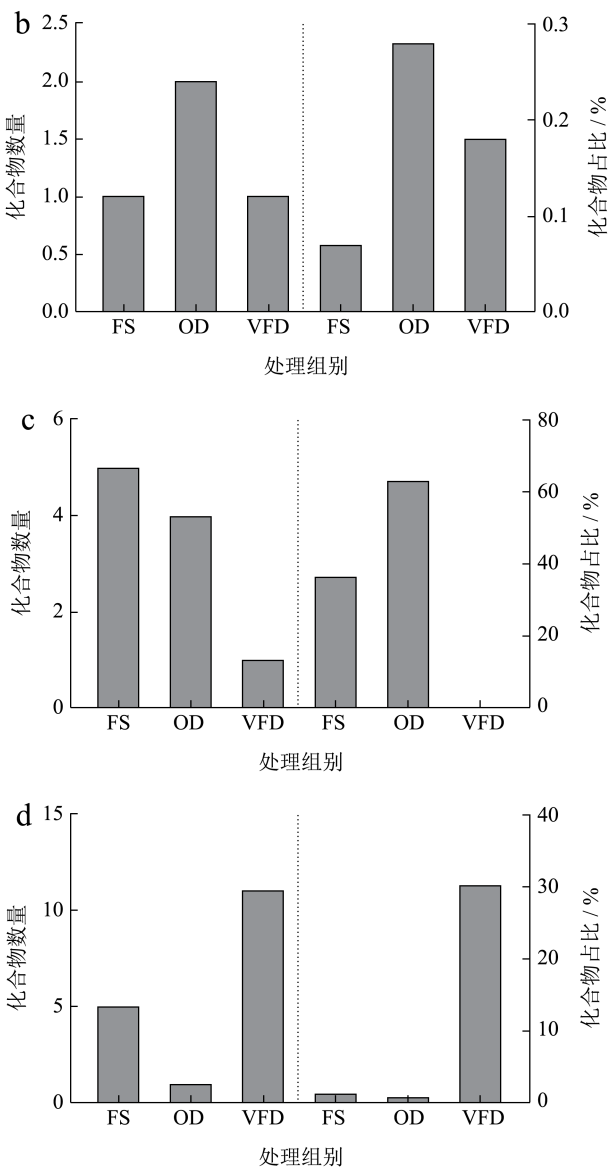
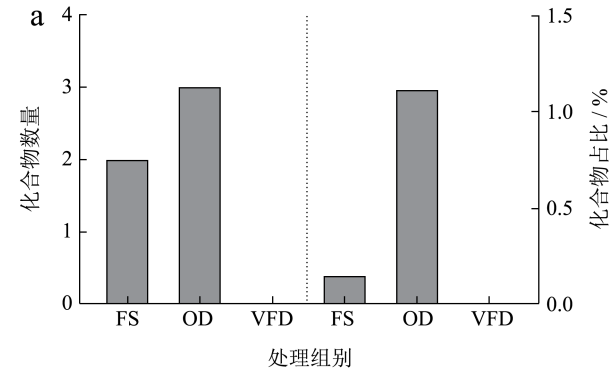


图 5 马桑香菇 FS、OD、VFD 处理下含氮、硫化合物及特殊结构化合物的差异

Fig.5 Differences in nitrogen and sulfur-containing compounds and compounds with special structures under FS, OD, and VFD treatments of *Lentinula edodes*

注：（a）杂环含氮化合物；（b）胺类；（c）含硫化合物；（d）萜类与单萜衍生物。

其他类化合物细分后涵盖呋喃衍生物、环氧化物、酚类、过氧化物、硼酸酯。呋喃衍生物在 FS（1 种，2.18%）、OD（2 种，6.94%）和 VFD（3 种，9.97%）中，其数量和含量均逐渐增加，主要成分为 2- 戊基呋喃（图 6a）；酚类仅检出 2,4- 二叔丁基酚 1 种化合物，

且在3种处理下含量都极低(FS:0.13%;OD:0.22%;VFD:0.22%)(图6c);环氧化物和过氧化物类在VFD中均未检出,在FS和OD中各含1种,相对含量均<1%(图6b、6f);硼酸酯类仅在OD处理中微量检出二乙基甲氧基硼烷(相对含量占比0.05%),该化合物非马桑香菇自身合成,可能源于样品处理过程中的外部因素(如设备污染),其形成需醇类参与脱水缩合反应^[34],可能对OD中3-甲基环戊醇的含量估算产生微弱影响(图6e)。

2.5 共有化合物的聚类分析

为揭示干燥工艺对核心风味组分的影响,依据跨处理一致性选取FS、OD、VFD处理下马桑香菇的子实体中共同检出的7种挥发性化合物进行聚类分析,分别是烃类化合物中的螺[2.4]庚-4,6-二烯(木质调背景香)和乙氧基乙炔(美拉德反应指示物)、含氧化合物中的棕榈酸(脂质氧化标志物)及2,2-二乙酰氧基苯乙酮(烟熏气息)、特殊结构化合物(±)-β-巴豆烯(萜烯前体)以及其他类化合物的2-戊基呋喃(关键青草味物质)和2,4-二叔丁基酚(药草尾韵)。这些化合物均为三组样品GC-MS图谱中共有的色谱峰,在确保跨比较的基准一致性的同时,排除干燥方式包含的特异性成分,聚焦干制过程中稳定存在的挥发性组分。采用Complete Linkage聚类方法与Euclidean distance距离度量,为消除化合物间固有含量差异并提升模型稳健性,对每个化合物(行)在不同样品(列)中的相对含量数据执行Z-score行标准化,有效抑制极端值干扰,使不同丰度化合物具有可比性,从而保障对化合物行聚类的结果可靠反映挥发性成分在干燥处理中的变化趋势。聚类分析表明(图7),FS同VFD在相同化合物的相对含量占比上聚为姊妹枝,在挥发性香气成分变化上更加接近,证实真空冷冻干燥能最大限度保留鲜菇萜烯及醛类热敏性特征风味物质。

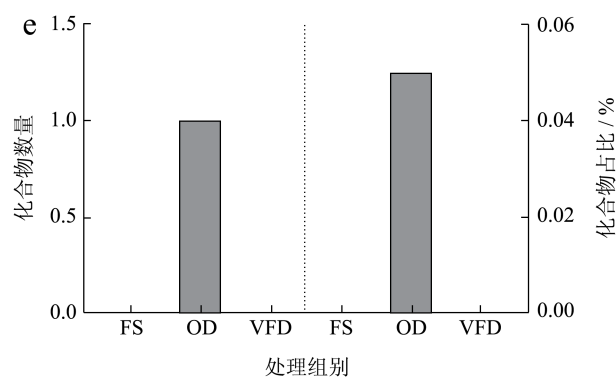
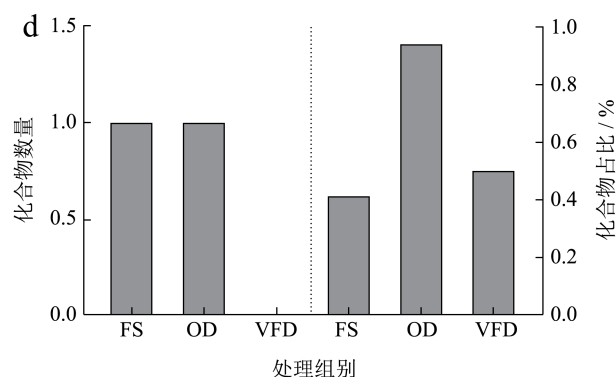
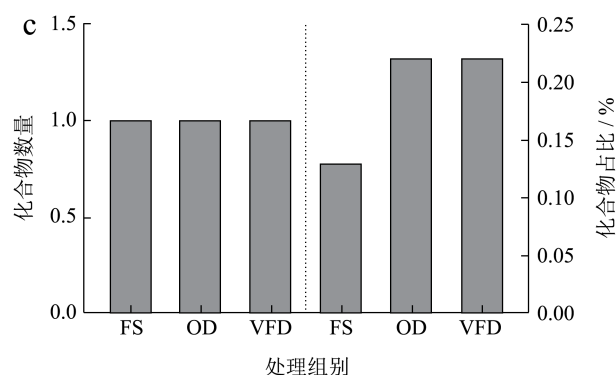
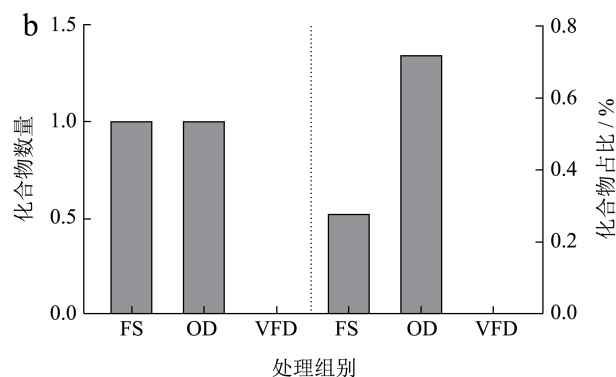
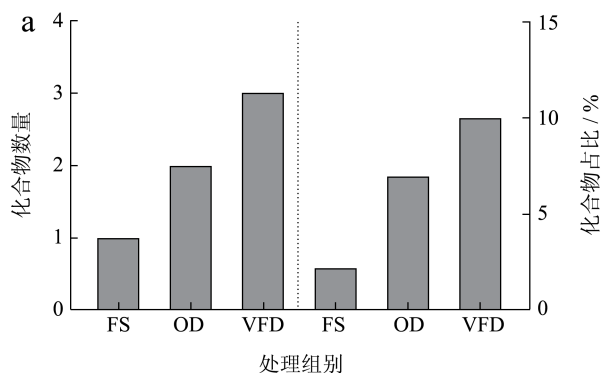


图6 马桑香菇 FS、OD、VFD 处理下其他类化合物的差异

Fig.6 Differences in other categories of compounds under FS, OD, and VFD treatments of *Lentinula edodes*

注:(a)呋喃衍生物;(b)环氧化物;(c)酚类;(d)过氧化物;(e)硼酸酯。

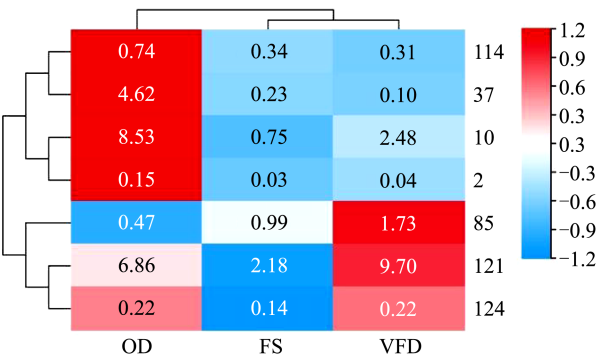


图 7 马桑香菇 FS、OD、VFD 处理中共有挥发性成分的聚类分析

Fig.7 Cluster analysis of shared volatile components in *Lentinula edodes* under FS, OD, and VFD treatments

注：聚类热图各行右侧编号分别对应的化合物见表 1。

3 结论

本研究基于 HS-SPME-GC-MS 技术探究干燥工艺对马桑香菇挥发性成分的影响，发现真空冷冻干燥（VFD）通过低温脱水机制，显著保留热敏性含硫化合物（如香菇素）及鲜菇特征香气组分。含硫化合物对热加工高度敏感，热风干燥（OD）促使二甲基三硫醚等含硫风味物质含量升高，同时将伴随刺激性气味增强。醛类（如己醛）与萜类（如柠檬烯）作为风味修饰成分，其 VFD 处理的高保留性对维持清新调性具有协同作用。研究结果为马桑香菇初加工工艺选择提供关键依据，阐明了干燥工艺与风味特征的交互关系，后续可继续结合非挥发性成分（如游离氨基酸、多糖）对风味的协同作用，结合代谢组学等进一步深入研究，为高附加值产品定向开发奠定理论基础。

参考文献

[1] 孙燕,李浪,刘妮,等.鲜美型香菇品种选育及栽培研究[J].园艺与种苗,2020,40(1):9-11.

[2] 龙汉武,潘高潮,乔东生,等.贵州省一种野生马桑香菇香气成分分析[J].中国食用菌,2019,38(1):107-108.

[3] 刘畅,李慧敏,梁丽雅,等.GC/MS代谢组学技术在食品分析中的应用进展[J].食品研究与开发,2023,44(21):173-179.

[4] 普明斌,胡广地,孙翰昌,等.基于GC-MS分析淡水产品风味物质研究进展[J].农产品加工,2024,22:105-108.

[5] WILLIAM H, CATHY K, JUDE W, et al. Early detection of dry bubble disease in *Agaricus bisporus* using volatile compounds [J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137518.

[6] 陈诗怡,胡维霞,朱海燕,等.基于顶空固相微萃取、气相色谱-质谱结合相对香气活性值探究不同摊青温度对古丈毛尖绿茶香气物质的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(12):352-360.

[7] 王子宜,马国秀,高新月,等.基于吸附剂的顶空萃取技术研究进展[J].化学试剂,2024,46(11):1-9.

[8] LEI H, YUE J, YIN X Y, et al. HS-SPME coupled with GC-MS for

elucidating differences between the volatile components in wild and cultivated *Atractylodes chinensis* [J]. Phytochemical Analysis, 2023, 34(3): 317-328.

[9] 陆欢,徐宁,刘建辉,等.基于HS-SPME-GC-MS法分析春生田头菇子实体不同部位挥发性成分[J].食品与生物技术学报,2021,40(8):95-104.

[10] 刘远伦,欧胜平,曾庆庆,等.马桑香菇的栽培技术[J].食用菌,2023,45(3):35-37.

[11] MENG L, NIE Y, ZHOU Q, 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.

[12] LIU Q, BAU T, JIN R, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Changes in volatile compounds, taste properties, and texture qualities [J]. LWT, 2022, 164: 113651.

[13] MARIANO ANA P X, RAMOS ANA L C C, DE OLIVEIRA JÚNIOR AFONSO H, et al. Optimization of extraction conditions and characterization of volatile organic compounds of *Eugenia klotzschiana* O. berg fruit pulp [J]. Molecules, 2022, 27(3): 935.

[14] DENG G, LI J, LIU H, et al. Volatile compounds and aroma characteristics of mushrooms: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(33): 13175-13192.

[15] WU X, ZHANG M, LI Z. Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris* [J]. LWT, 2019, 111: 790-798.

[16] 孟迪,党斌,杨希娟.食用菇类干燥方法研究进展[J].青海农林科技,2022,3:46-51.

[17] CHANG M J, LIU Y, LI Z, et al. Fingerprint analysis of volatile flavor compounds in twenty varieties of *Lentinula edodes* based on GC-IMS [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 328: 112893.

[18] JIANG C P, DUAN X Y, LIN L, et al. A review on the edible mushroom as a source of special flavor: Flavor categories, influencing factors, and challenges [J]. Food Frontiers, 2023, 4(4): 1561-1577.

[19] 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.

[20] ZHANG H, PU D, SUN B, et al. Characterization and comparison of key aroma compounds in raw and dry porcini mushroom (*Boletus edulis*) by aroma extract dilution analysis, quantitation and aroma recombination experiments [J]. Food Chemistry, 2018, 258: 260-268.

[21] QIN L, GAO J X, XUE J, et al. Changes in aroma profile of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during Different Stages of Hot Air Drying [J]. Foods, 2020, 9(4): 444.

[22] LU X, HOU H, FANG D, et al. Identification and characterization of volatile compounds in *Lentinula edodes* during vacuum freeze-drying [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(6): 13814.

[23] SONG J X, CHEN Q Q, BI J F, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods [J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127201.

[24] GUO Y, ZHAO J, WEI H, et al. Disentangling the tissue-specific variations of volatile flavor profiles of the *Lentinula edodes* fruiting

- body [J]. Foods, 2024, 13(1): 86.
- [25] XU Y, LIU W, LI L, et al. Evolution behavior of volatile components of shiitake mushrooms during infrared-assisted spouted bed drying [J]. Food Control, 2024, 158: 110206.
- [26] NEIERS F, GOURRAT K, CANON F, et al. Metabolism of cysteine conjugates and production of flavor sulfur compounds by a carbon-sulfur lyase from the oral anaerobe *Fusobacterium nucleatum* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(32): 9969-9979.
- [27] LI Z, PAN F, HUANG W, et al. Transcriptome reveals the key genes related to the metabolism of volatile sulfur-containing compounds in *Lentinula edodes* mycelium [J]. Foods, 2024, 13(14): 2179.
- [28] 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: 111402.
- [29] XIE L, JIANG Y, WANG Y, et al. Changes in the physical properties and volatile odor characteristics of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) in far infrared radiation drying [J]. Foods, 2023, 12(17): 3213.
- [30] HU S, FENG X, HUANG W, et al. Effects of drying methods on non-volatile taste components of *Stropharia rugoso-annulata* mushrooms [J]. LWT, 2020, 127: 109428.
- [31] 邢颖,张月,徐怀德,等.不同干燥方法对生姜叶活性成分和抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2020,41(18):75-80.
- [32] ADDO P W, GARIEPY Y, SHEARER M, et al. Microwave-assisted hot air drying of *Cannabis sativa*: Effect of vacuum and pre-freezing on drying kinetics and quality [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 218: 119015.
- [33] DENG Y, LUO Y, WANG Y, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 168-176.
- [34] 谢贤清,范乃立,邱曾焯,等.合成二乙基甲氧基硼烷的工艺优化[J].江西师范大学学报(自然科学版),2015,39(5):488-491.