

大球盖菇子实体不同部位挥发性成分的比较分析

陆欢¹, 尚晓冬¹, 王小艳², 王春晖², 刘建辉³, 陈晚朱⁴, 王瑞娟^{1*}, 徐宁^{2*}

(1. 上海市农业科学院食用菌研究所, 农业部应用真菌资源与利用重点开放实验室, 国家食用菌工程技术研究中心, 上海市农业遗传育种重点实验室, 上海 201403) (2. 湖南省食用菌研究所, 湖南长沙 410013) (3. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023) (4. 茶陵县兴农食用菌种植农民专业合作社, 湖南茶陵 412400)

摘要: 通过顶空固相微萃取法结合气相色谱-质谱联用方法, 对比分析了大球盖菇子实体菌盖和菌柄的挥发性成分, 并进行主成分分析(PCA)。结果表明, 从大球盖菇子实体菌盖和菌柄都分别鉴定出 50 种化合物, 其中菌盖主要以醇类、酯类和烷类化合物为主, 分别占总比例 19.93%、19.43%、9.79%; 菌柄主要以醇类、酯类和酮类化合物为主, 分别占总比例 23.04%、21.04%、12.35%。所检测出的化合物中以 3,4-二羟基-2-甲基吡啶-5-甲醇、4-哌啶醇、马来酸二乙基己酯、环己烷和 3-壬烯-2-酮相对百分含量最高, 对大球盖菇香味形成具有重要作用。主成分分析结果显示了醇类化合物为大球盖菇菌盖和菌柄的主要挥发性成分, 且菌盖和菌柄在挥发性成分组成上具有明显差异。该研究结果为大球盖菇风味品质评价和大球盖菇品质育种提供了参考。

关键词: 大球盖菇; 挥发性成分; 顶空固相微萃取; 气相色谱-质谱联用; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2022)07-271-281

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.1016

Comparison and Analysis of Volatile Components in Different Parts of Fruiting Body of *Stropharia rugoso-annulata*

LU Huan¹, SHANG Xiaodong¹, WANG Xiaoyan², WANG Chunhui², LIU Jianhui³, CHEN Wanzhu⁴,
WANG Ruijuan^{1*}, XU Ning^{2*}

(1. Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Applied Fungi Resources and Utilization (South), Ministry of Agricultural, P. R. China, National Engineering Research Center of Edible Fungi, Shanghai Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding, Shanghai 201403, China)

(2. Institute of Hunan Edible Fungi, Changsha 410013, China)

(3. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

(4. Chaling County Xingnong Edible Fungus Planting Farmer Professional Cooperative, Chaling 412400, China)

Abstract: The volatile components in pileus and stipe of the fruiting body of *Stropharia rugoso-annulata* were comparatively analyzed by headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Principal component analysis (PCA) was also performed. The results showed that 50 compounds were identified from the pileus and stipe of the fruiting body of *Stropharia rugoso-annulata*. Among which, alcohols, esters and alkanes were mainly present in the pileus, accounting for 19.93%, 19.43% and 9.79%, respectively. Alcohols, esters and ketones were mainly detected in the stipe, accounting for 23.04%, 21.04% and 12.35%, respectively. Among the detected compounds, the relative percentages of 3,4-dihydroxy-2-methylpyridine-5-methanol, 4-piperidinol, bis(2-ethylhexyl) maleate, cyclohexane and (E)-3-nonen-2-one were the highest, which played important roles in the formation of the aroma of *Stropharia*

引文格式:

陆欢,尚晓冬,王小艳,等.大球盖菇子实体不同部位挥发性成分的比较分析[J].现代食品科技,2022,38(7):271-281,+196

LU Huan, SHANG Xiaodong, WANG Xiaoyan, et al. Comparison and analysis of volatile components in different parts of fruiting body of *Stropharia rugoso-annulata* [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 271-281, +196

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50330); 上海市农业科学院卓越团队建设计划(2017[A-02]); 湖南省科技特派员创新创业项目(2020NK4135)

作者简介: 陆欢(1989-), 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向: 食用菌遗传育种, E-mail: 245450595@qq.com

通讯作者: 王瑞娟(1980-), 女, 副研究员, 硕士, 研究方向: 食用菌育种, E-mail: ruijuanwang@yeah.net; 共同通讯作者: 徐宁(1989-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食用菌活性成分, E-mail: 1050353232@qq.com

rugoso-annulata. The results of principal component analysis showed that alcohols were the main volatile components in the pileus and stipe of *Stropharia rugoso-annulata*, and there were significant differences in the volatile composition between the pileus and stipe. The results of this study provide a reference for the evaluation of the flavor and quality of *Stropharia rugoso-annulata* and breeding of high-quality *Stropharia rugoso-annulata*.

Key words: *Stropharia rugoso-annulata*; volatile components; head space solid-phase microextraction; gas chromatography-mass spectrometry; principal component analysis

大球盖菇 (*Stropharia rugoso-annulata*)，分类学地位为真菌界，担子菌门，层菌纲，伞菌目，球盖菇科，球盖菇属^[1]。大球盖菇是在美国首先发现并报道，主要分布于欧洲、北美洲、亚洲等地，在我国云南、西藏、四川、吉林等地都发现有野生大球盖菇分布，现已在全国大范围内推广栽培。大球盖菇色泽鲜明，肉质嫩滑，菌柄清香脆甜，烘干后有浓郁的香气。大球盖菇中还富含蛋白质、氨基酸、维生素、多种微量元素和膳食纤维，具有低糖、低脂肪等特点^[2-4]，具有很高的食药价值。

产量、品质和颜色等是食用菌生产上的主要农艺性状，近年来挥发性风味成分也成为了重要的农艺性状之一。据报道食用菌中含有的醇类化合物，如 1-辛烯-3-醇（蘑菇醇）是食用菌典型的风味物质，具有浓烈的蘑菇风味^[5]；橙花叔醇具有弱的甜清柔美的橙花气息，还带有像玫瑰、铃兰和苹果花的气息；辛醇具有蘑菇香、奶制品香、青香、辛香、薄荷香^[6]。酮类化合物有特殊的香气，3-辛烯-2-酮具有强烈的青香和蔬菜香，兼有水果味^[7]。微量醛类化合物可使香气更加醇厚，其中苯甲醛和苯乙醛是食用菌主要挥发性成分^[8]，辛醛具有似甜橙、油脂、蜂蜜香气^[9]。酯类化合物具有各种果实香味。吡嗪类化合物具有芳香的炒食烤香气味^[10]，呋喃类化合物具有豆香、果香、青香及类似蔬菜的香韵^[11]，2-戊基呋喃具有烘烤香味^[12]。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^[13]，相较于有机溶剂萃取法和水蒸气蒸馏法，该方法具有更好的准确度、精确度和重复性，且在食用菌挥发性成分方面应用也非常广泛。已在羊肚菌^[14]、真姬菇^[15]、金针菇^[16]、赤芝^[17]、香菇^[18]、双孢蘑菇^[19]、姬松茸^[20]、灰树花^[21]、桑黄^[22]、竹荪^[23]和草菇^[24]等品种上都有相关报道。

近年来，国内外学者在大球盖菇野生资源驯化、栽培技术、液体菌种、多糖提取、营养成分和酶活等方面开展了大量研究^[25-36]，但少见其活性成分的研究报道。大球盖菇柄粗菌盖薄，本研究第一次通过顶空固相微萃取法结合气相色谱-质谱联用方法分析比较了大球盖菇菌盖和菌柄中的挥发性物质，旨在探明大球盖菇特征香气成分，及为今后大球盖菇品质育种提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1.1.1 试验材料

大球盖菇新鲜子实体由湖南省食用菌研究所提供。

1.1.2 主要试剂

甲醇、乙腈（色谱纯），美国 Fisher 公司。其他试剂均为国产分析纯，购自国药集团化学试剂有限公司。

1.1.3 主要仪器设备

GC/MS Solution 色谱工作站和 NIST.17 质谱数据库，日本岛津公司；GC/MS-QP2010 型气相色谱-质谱联用仪，日本岛津公司；固相微萃取仪、Stableflex 固相微萃取纤维头、顶空萃取瓶，上海安谱实验科技股份有限公司；Scientz 冷冻干燥机，宁波新芝生物科技股份有限公司；CG001 型厨房干磨机，深圳市德尔有限公司；PL203 电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司。

1.2 样品制备

参考徐宁等^[37]方法对大球盖菇子实体样品进行预处理。将大球盖菇鲜品置于烘干机中低温烘干，再将菌盖和菌柄分开分别经超微粉碎机粉碎后过 100 目筛，放入冷冻干燥机中 48 h 后制得干燥样品，置于避光阴凉处密封保存。准确称取菌盖和菌柄各 0.1 g 置于 10 mL 顶空萃取瓶中，使之均匀分布在瓶底并盖上瓶盖后用封口膜密封。将萃取瓶置于固相微萃取装置中固定恒温 70 °C 预热 30 min，开启磁力搅拌（400 r/min），将萃取进样手柄插入顶空样品瓶中，推出萃取纤维头萃取 40 min，缩回萃取纤维头，取出萃取手柄，插入至气相色谱系统进样口。

1.3 GC-MS 条件

根据徐宁等^[37]方法对大球盖菇进行 GC-MS 分析。CD-WAX 色谱柱（30.0 m×0.25 μm，0.25 mm，上海安谱实验科技股份有限公司）；柱内温度为 60 °C；进样口温度 240 °C；进样方式：无分流；载气高纯 He（含有量 99.99%）；载气气体体积流速 0.98 mL/min；程序

升温条件为初始温度 60 °C, 保持 3 min, 以 3 °C/min 升至 140 °C, 保持 3 min, 再以 5 °C/min 升至 210 °C, 保持 5 min, 分析检测时间共 50 min。电子轰击离子源: EI 源; 离子源温度: 150 °C, 接口温度: 280 °C; 电子能量: 70 eV; 质核比扫描范围: 35~350 *m/z*。

1.4 数据处理

对 GC-MS 的总离子流图中的各峰经 NIST 谱库进行对所出峰的质谱图进行检索比对, 确定挥发性化学成分的种类, 并通过峰面积归一化法计算各化合物的相对百分含量。每组实验做三个平行, 样品中挥发性化合物含量以平均值形式表示。采用 JMP16 系统对大球盖菇菌盖和菌柄所含挥发性成分分别进行 PCA 分析。

2 结果与分析

2.1 大球盖菇子实体菌盖和菌柄中主要挥发性化合物

大球盖菇子实体菌盖和菌柄的挥发性成分 GC-MS 总离子见图 1。由表 1 可知, 从大球盖菇子实体的菌盖和菌柄中鉴定出的挥发性化合物成分组成种类及其含量存在差异。从大球盖菇菌盖中共鉴定出 50 个挥发性化合物, 主要包括 11 种醇类, 8 种酯类、5 种烷类、4 种醛类、4 种酮类、3 种酰胺类、2 种酸类、2 种糖类、1 种醚类、1 种炔类、1 种吡啶类、1 种胺类、1 种吗啉类、6 种其他类化合物。菌盖中醇类化合物占整个挥发性化合物总比例的 22%, 其次为酯类、烷类化合物, 分别占 16%、10%; 醛类、酮类、酰胺类、糖类和酸类化合物分别占 8%、8%、6%、4%和 4%。醛类化合物主要为双(2-甲基烯丙基)乙缩醛和十一醛, 相对百分含量分别为 2.25%和 2.09%; 酰胺类化合物主要为 *N*-(4-环辛烯-1-基)乙酰胺, 相对百分含量分别为 2.92%; 糖类化合物为 2,4:3,5-二亚乙-1-木糖和 1,2-*O*-亚异丙基-3-*O*-甲磺酰基-5-*O*-甲氧羰基-*D*-呋喃木糖, 相对百分含量分别为 3.19%和 1.36%; 酸类化合物为 6-羟甲基-三环十二烷基醋酸和 2-(羟基亚氨基)-己酸, 相对百分含量分别为 0.67%和 0.24%; 醚类化合物为十六烷基丙基醚, 相对百分含量为 2.56%; 炔类化合物为 1-十五炔,

相对百分含量为 1.67%; 吡啶类化合物为 4-甲磺酰基-3-硝基吡啶, 相对百分含量为 3.36%; 胺类化合物为 (1*S*,2*S*)-(+)-1,2-环己二胺, 相对百分含量为 1.42%; 吗啉类化合物为 4-[4-(1,2,4-恶二唑-3-基)-1,2,5-恶二唑-3-基]吗啉, 相对百分含量为 3.78%; 其他化合物中 2,2-二甲基-4,5-二(1-丙烯基)-1,3-二氧戊环、环氧呋隆和 4-氨基-*N*2-(4-吡啶亚甲基)-呋咱-3-甲酰肼等相对百分含量较高, 相对百分含量分别为 2.39%、2.20%和 1.93%。

从大球盖菇菌柄也共鉴定出 50 种挥发性物化合物, 包括 11 种醇类, 10 种酯类、6 种酮类、4 种烷类、4 种胺类、3 种酸类、2 种烯烃类、1 种醛类、1 种糖类、1 种咪唑类、1 种萘类、1 种呋喃类、1 种噻吩类、4 种其他类化合物。醇类化合物占挥发性化合物总比例 22%, 其次为酯类、酮类化合物, 分别占 20%、12%; 胺类、烷类、酸类和烯烃类化合物分别占 8%、8%、6%和 4%。胺类化合物主要为 2,3-二甲氧基苄胺和(3,5-二甲基-1*H*-吡唑-1-甲基)-噻唑-2-胺, 相对百分含量分别为 3.13%和 2.30%; 酸类化合物为 1-叔丁基-1-苯基-环己甲酸、甲基-4-丁基-2-氧代四氢-3-呋喃羧酸和 2-羟基-6-甲基-3-环己烯-1-羧酸, 相对百分含量分别为 2.20%、2.20%和 1.55%; 烯烃类化合物为 1,2-顺-1,5-反式-2,5-二羟基-4-甲基-1-(1-羟基-1-异丙基)-3-环己烯和 6-乙氧基-9-硫代双环[3.3.1]-2-壬烯, 相对百分含量分别为 2.12%和 1.96%; 醛类化合物为 2-丁基-2-庚烯醛, 相对百分含量为 1.71%; 糖类化合物为环 1,2:3,5-双(甲基硼酸)- α -*D*-呋喃木糖, 相对百分含量为 1.17%; 咪唑类化合物为 *N,N'*-硫羰基二咪唑, 相对百分含量为 1.47%; 萘类化合物为(2 α ,3 β ,4 α ,8 α)-2,3-二甲氧基十氢萘, 相对百分含量为 1.45%; 呋喃类化合物为四氢-2,2-二甲基-5-(1-甲基乙基)-呋喃, 相对百分含量为 1.43%; 噻吩类化合物为 3-甲基-4-(苯硫基)-2-丙烯基-2,5-二氢噻吩, 相对百分含量为 2.89%; 其他化合物中三环[5.1.0.0(3,5)]辛烷-2,6-二酮-1,3,4,5,7,8-六甲基-立体异构体和(E)-1-羟基-2,2-二甲基-2,5-二氢-1*H*-咪唑-4-甲醛肼等相对百分含量较高, 相对百分含量分别为 2.79%和 2.01%。菌柄与菌盖中所检测出的化合物中醇类和酯类含量最高, 酯类化合物具有水果的芳香味, 酮类也具有果香味, 大球盖菇鲜子实体具有清香味, 可能是由于含有大量酯类和酮类化合物而成。

表1 大球盖菇子实体菌盖和菌柄挥发性成分分析表

Table 1 GC-MS analytical results of chemical composition of volatile compositions of pileus and stipe from *Stropharia rugoso-annulata*

序号	化合物中文名称	化合物英文名称	分子式	保留时间/min	相对百分含量/%	
					菌盖	菌柄
1	4-哌啶醇	4-Piperidinol	C ₈ H ₁₃ NO	2.367	2.66	-
2	顺式-1-环戊烯-3,4-二醇	cis-1-Cyclopentene-3,4-diol	C ₅ H ₈ O ₂	3.233	3.79	-
3	3-叔丁基-1-乙炔基-4-甲氧基环己醇	3-tert-Butyl-1-ethynyl-4-methoxycyclohexanol	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	4.892	-	1.46
4	3,4-二羟基-2-甲基吡啶-5-甲醇	3,4-Dihydroxy-2-methylpyridine-5-methanol	C ₇ H ₉ NO ₃	5.133	-	3.13
5	2-甲基-5-异丙基-二环[3.1.0]己烷-2-醇	5-Isopropyl-2-methylbicyclo[3.1.0]hexan-2-ol	C ₁₀ H ₁₈ O	9.708	1.29	-
6	1-(1-甲基乙基)-环己甲醇	1-(1-methylethyl)-Cyclohexanemethanol	C ₁₀ H ₂₀ O	14.025	1.15	-
7	3-庚烯-1-醇	3-Hepten-1-ol	C ₇ H ₁₄ O	14.067	-	1.72
8	8 α ,14-环氧-5 α -胆甾烷-7 α -醇	8 α ,14-Epoxy-5 α -cholestan-7 α -ol	C ₂₇ H ₄₆ O ₂	14.208	1.45	-
9	2-溴-1-环丙基乙醇	2-Bromo-1-cyclopropylethanol	C ₅ H ₉ BrO	15.398	-	2.20
10	(+)-异松蒎醇	(+)-Isopinocampheol	C ₁₀ H ₁₈ O	16.601	1.93	-
11	4,4-二甲基-2-环己烯-1-醇	4,4-Dimethyl-2-cyclohexen-1-ol	C ₈ H ₁₄ O	18.250	2.05	-
12	4-甲基咪唑-2,5-二甲醇	4-Methylimidazole-2,5-dimethanol	C ₆ H ₁₀ N ₂ O ₂	19.142	-	2.02
13	6-甲基-5-环癸烯-1-醇	6-Methyl-5-cyclodecen-1-ol	C ₁₁ H ₂₀ O	23.608	-	2.52
14	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-丙醇	1-Cyclohexene-1-propanol, 2,6,6-trimethyl-	C ₁₂ H ₂₂ O	26.668	1.32	-
15	2,4-二甲基-1-庚醇	1-Heptanol, 2,4-dimethyl-	C ₉ H ₂₀ O	28.173	-	1.75
16	(2E)-2-乙基-2-己烯-1-醇	(2E)-2-Ethyl-2-hexen-1-ol	C ₈ H ₁₆ O	29.169	-	2.15
17	2-(2,5-二甲基环戊基)-1-丙醇	2-(2,5-Dimethylcyclopentyl)-1-propanol	C ₁₀ H ₂₀ O	29.476	-	2.62
18	5,9-二甲基-9-癸烯-3-醇	5,9-Dimethyl-9-decen-3-ol	C ₁₂ H ₂₄ O	31.308	1.30	-
19	(2,2,6-三甲基-二环[4.1.0]-1-庚基)-甲醇	(2,2,6-Trimethyl-bicyclo[4.1.0]hept-1-yl)-methanol	C ₁₁ H ₂₀ O	32.684	-	2.01
20	(1-乙基-1H-咪唑-2-基)甲醇	(1-Ethyl-1H-imidazol-2-yl)methanol	C ₆ H ₁₀ N ₂ O	32.945	-	1.46
21	9-十烯-1-醇	9-Decen-1-ol	C ₁₀ H ₂₀ O	37.529	1.79	-
22	1-(4-硝基苯基)-3-丁烯-1-醇	1-(4-Nitrophenyl)-3-buten-1-ol	C ₁₀ H ₁₁ NO ₃	38.603	1.20	-
23	亚磷酸十三烷酯	Trisdecylphosphite	C ₃₀ H ₆₃ O ₃ P	2.750	1.30	-
24	2,2,2-三氟-1,2-二甲基乙酸丁酯	Acetic acid, 2,2,2-trifluoro-, 1,2-diMethylbutyl ester	C ₈ H ₁₃ F ₃ O ₂	3.875	1.68	-
25	3-(乙酰氧基)-2-硝基环己新戊酸酯	3-(Acetyloxy)-2-nitrocyclohexyl pivalate	C ₁₃ H ₂₁ NO ₆	4.767	-	1.60
26	乙酸正壬酯	n-Nonanyl acetate	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	5.445	-	1.49
27	甲氧苄氟菊酯	Metofluthrin	C ₁₈ H ₂₀ F ₄ O ₃	5.567	-	1.50
28	(6Z)-7-十六碳烯酸甲酯	(6Z)-7-methyl-6-hexadecenoate	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	8.669	1.97	-
29	3H-吡唑-3-羧酸-4,5-二氢-5,5-二叔丁基乙酯	3H-Pyrazole-3-carboxylic acid, 4,5-dihydro-5,5-ditert-butyl-, ethyl ester	C ₁₄ H ₂₆ N ₂ O ₂	12.009	1.22	-

续表 1

序号	化合物中文名称	化合物英文名称	分子式	保留时间/min	相对百分含量/%	
					菌盖	菌柄
30	二(2-丁烯-1-)丁二酸酯	Succinic acid, di(but-2-en-1-yl) ester	C ₁₂ H ₁₈ O ₄	13.477	1.81	-
31	4-氯乙酸十六烷酯	Chloroacetic acid, 4-hexadecyl ester	C ₁₈ H ₃₅ ClO ₂	18.475	-	2.89
32	(15 β ,16E)-16,17,20,21-四氢-16-(羟甲基)-18,19-secoyohimban-19-oic acid 甲酯	(15 β ,16E)-16,17,20,21-Tetradehydro-16-(hydroxymethyl)-18,19-secoyohimban-19-oic acid methyl ester	C ₂₁ H ₂₄ N ₂ O ₃	20.446	-	2.90
33	2-(5-甲基-5-乙烯基四氢-2-呋喃)甲酸丙酯	2-(5-Methyl-5-vinyltetrahydro-2-furanyl)propylformate	C ₁₁ H ₁₈ O ₃	24.784	-	1.42
34	3-甲基丁基-2-十三炔-1-富马酸酯	Fumaric acid, 3-methylbutyl tridec-2-yn-1-yl ester	C ₂₂ H ₃₆ O ₄	29.292	-	3.16
35	甲基磷酸二频哪醇酯	Bis(1,2,2-trimethylpropyl) methylphosphonate	C ₁₃ H ₂₉ O ₃	30.592	-	1.67
36	(8E)-10-甲基-8-十四烯酯	(8E)-10-Methyl-8-tetradecenyl acetate	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	30.967	-	2.95
37	10-十一烯酸丁酯	10-Undecenoic acid	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	33.376	1.85	-
38	(2-乙基己基)亚磷酸三酯	Phosphorous acid, tris(2-ethylhexyl) ester	C ₂₄ H ₅₁ O ₃ P	37.144	2.76	-
39	硬脂醇乙酸酯	n-Octadecyl ethanoate	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	35.715	-	1.46
40	马来酸二乙基己酯	Bis(2-ethylhexyl) maleate	C ₂₀ H ₃₆ O ₄	38.225	6.84	-
41	6-羟甲基-三环十二烷基醋酸	6-(Hydroxymethyl)cyclodecyl acetate	C ₁₃ H ₂₄ O ₃	2.963	2.34	-
42	1-叔丁基-1-苯基-环己甲酸	Phenyl 1-tert-butyl-1-cyclohexanecarboxylate	C ₁₇ H ₂₄ O ₂	12.801	-	2.20
43	甲基-4-丁基-2-氧代四氢-3-呋喃羧酸	Methyl 4-butyl-2-oxotetrahydro-3-furancarboxylate	C ₁₀ H ₁₆ O ₄	19.965	-	2.20
44	2-(羟基亚氨基)-己酸	Hexanoic acid, 2-(hydroxyimino)-	C ₆ H ₁₁ NO ₃	21.918	1.21	-
45	2-羟基-6-甲基-3-环己烯-1-羧酸	2-Hydroxy-6-methyl-3-cyclohexen-1-carboxylic acid	C ₈ H ₁₂ O ₃	22.939	-	1.55
46	3,3-二甲基-1-(1-氧杂螺[4.5]癸-2-基)-2-丁酮	3,3-Dimethyl-1-(1-oxa-spiro[4.5]dec-2-yl)-butan-2-one	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	3.400	2.24	-
47	8-羟基-2,2,8-三甲基-5,9-癸二烯酮	8-Hydroxy-2,2,8-trimethyldeca-5,9-dien-3-one	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	6.775	1.86	-
48	2-辛基-1,3-环十二烷二酮	2-Octyl-1,3-cyclododecanedione	C ₂₀ H ₃₆ O ₂	6.958	-	1.45
49	5-羟基-3-(羟甲基)-7-氧杂二环[4.1.0]-3-庚烯-2 酮	7-Oxabicyclo[4.1.0]hept-3-en-2-one, 5-hydroxy-3-(hydroxymethyl)-	C ₇ H ₈ O ₄	17.641	-	1.68
50	4-(3-甲基-2-亚甲基-3-丁烯基)四氢-2H-吡喃-2-酮	4-(3-Methyl-2-methylene-3-butenyl)tetrahydro-2H-pyran-2-one	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	18.558	1.54	-
51	1- β -d-呋喃核糖-s-三唑并[2,3-a]-s-三嗪-5,7-二酮	1- β -d-Ribofuranosyl-s-triazolo[2,3-a]-s-triazin-5,7-dione	C ₉ H ₁₁ N ₅ O ₆	23.347	-	1.67
52	麝香酮	Muscone	C ₁₆ H ₃₀ O	25.907	-	2.92
53	4,5,5-三甲基-3-(3-甲基-2-亚甲基丁基)-2(5H)-呋喃酮	2(5H)-Furanone, 4,5,5-trimethyl-3-(3-methyl-2-methylenebutyl)-	C ₁₃ H ₂₀ O ₂	26.174	-	1.45
54	1-叔丁基-3-(1-甲基环庚基)氮丙啶-2-酮	1-tert-Butyl-3-(1-methylcycloheptyl)aziridin-2-one	C ₁₄ H ₂₅ NO	29.525	1.18	-
55	3-壬烯-2-酮	(E)-3-Nonen-2-on	C ₉ H ₁₆ O	38.375	-	3.30
56	异丁醛, 双(2-甲基烯丙基)乙缩醛	Isobutyraldehyde, bis(2-methylallyl)acetal	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	9.431	2.25	-
57	2-辛基环丙烷辛醛	2-Octylcyclopropanecetanal	C ₁₉ H ₃₆ O	12.436	1.72	-
58	(2Z)-3-(二甲基氨基)-2-(4-硝基-1H-吡唑-3-基)-2-丙烯醛	(2Z)-3-(Dimethylamino)-2-(4-nitro-1H-pyrazol-3-yl)-2-propenal	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₃	19.028	1.66	-

续表 1

序号	化合物中文名称	化合物英文名称	分子式	保留时间/min	相对百分含量/%	
					菌盖	菌柄
59	2-丁基-2-庚烯醛	2-Heptenal, 2-butyl-	C ₁₁ H ₂₀ O	28.815	-	1.71
60	十一醛	Undecanal	C ₁₁ H ₂₂ O	29.182	2.09	-
61	6-甲基-1-氮杂双环[3.2.1]辛烷	6-Methyl-1-azabicyclo[3.2.1]octane	C ₈ H ₁₅ N	1.567	-	1.46
62	2,6,10,14-四甲基-7-(3-甲基-4-亚戊烯基)十五烷	2,6,10,14-Tetramethyl-7-(3-methylpent-4-enylidene) pentadecane	C ₂₅ H ₄₈	3.742	-	1.78
63	1,1-二氯-2,3-二丙环丙烷	1,1-Dichloro-2,3-dipropylcyclopropane	C ₉ H ₁₆ Cl ₂	9.834	1.60	-
64	1,2-环氧十六烷	1,2-Epoxyhexadecane	C ₁₆ H ₃₂ O	15.687	-	1.70
65	1R-乙酰氨基-2,3-顺式-环氧-4-顺式-甲酰氧-环己烷	Cyclohexane, 1R-acetamido-2,3-cis-epoxy-4-cis-formyloxy-	C ₉ H ₁₃ NO	17.773	1.72	-
66	1-溴-5-甲基己烷	1-Bromo-5-methylhexane	C ₇ H ₁₅ Br	20.193	-	2.40
67	[2-(戊氧基)乙基]环己烷	[2-(Pentyloxy)ethyl]cyclohexane	C ₁₃ H ₂₆ O	28.633	2.75	-
68	反式-2,3-环氧癸烷	trans-2,3-Epoxydecane	C ₁₀ H ₂₀ O	7.400	1.18	-
69	1,4-二异丙基环己烷	1,4-Diisopropyl cyclohexane	C ₁₂ H ₂₄	38.724	1.21	-
70	1,2-O-亚异丙基-3-O-甲磺酰基-5-O-甲氧羰基-D-呋喃木糖	1,2-O-Isopropylidene-3-O-methanesulfonyl-5-O-methoxycarbonyl-d-xylofuranose	C ₁₁ H ₁₈ O ₉ S	9.950	1.36	-
71	2,4:3,5-二亚乙-1-木糖	2,4:3,5-Diethylidene-1-xylose	C ₉ H ₁₄ O ₅	28.745	3.19	-
72	环 1,2:3,5-双(甲基硼酸)-α-D-呋喃木糖	.alpha.-D-Xylofuranose, cyclic 1,2:3,5-bis(methylboronate)	C ₇ H ₁₂ B ₂ O ₅	28.950	-	1.71
73	1H-[1,2,4]三唑-3-羧酸-2-环己烯-1-乙基酰胺	1H-[1,2,4]Triazole-3-carboxylicacid (2-cyclohex-1-enyl-ethyl)-amide	C ₁₁ H ₁₆ N ₄ O	6.868	1.16	-
74	4-溴-N-辛基-丁酰胺	Butyramide, 4-bromo-N-octyl-	C ₁₂ H ₂₄ BrNO	19.689	1.83	-
75	N-(4-环辛烯-1-基)乙酰胺	N-(4-Cycloocten-1-yl)acetamid	C ₁₀ H ₁₇ NO	25.974	2.92	-
76	4-氨基-N2-(4-吡啶亚甲基)-咪唑-3-甲酰肼	Furazan-3-carbohydrazide, 4-amino-N2-(4-pyridylmethylene)-	C ₉ H ₈ N ₆ O ₂	13.208	2.20	-
77	咪唑[2,1-b][1,3]噻唑-6-甲胺	Imidazo[2,1-b][1,3]thiazol-6-ylmethanamine	C ₆ H ₇ N ₃ S	3.957	-	1.70
78	(3,5-二甲基-1H-吡唑-1-甲基)-噻唑-2-胺	(3,5-Dimethyl-1H-pyrazol-1-ylmethyl)-thiazol-2-yl-amine	C ₉ H ₁₂ N ₄ S	4.408	-	2.30
79	3-胆甾烷甲胺	Cholestan-3-ylmethanamine	C ₂₈ H ₅₁ N	19.022	-	1.52
80	(1S,2S)-(+)-1,2-环己二胺	(1S,2S)-(+)-1,2-Diaminocyclohexane	C ₆ H ₁₄ N ₂	23.117	1.42	-
81	2,3-二甲氧基苄胺	2,3-Dimethoxybenzamide	C ₉ H ₁₁ NO ₃	24.208	-	3.13
82	6-乙氧基-9-硫代双环[3.3.1]-2-壬烯	6-Ethoxy-9-thia-bicyclo[3.3.1]non-2-ene	C ₁₀ H ₁₆ OS	6.500	-	1.96
83	1,2-顺-1,5-反式-2,5-二羟基-4-甲基-1-(1-羟基-1-异丙基)-3-环己烯	1,2-cis-1,5-trans-2,5-dihydroxy-4-methyl-1-(1-hydroxy-1-isopropyl)cyclohex-3-ene	C ₁₀ H ₁₈ O ₃	18.171	-	2.12
84	4-[4-(1,2,4-恶二唑-3-基)-1,2,5-恶二唑-3-基]吗啉	4-[4-(1,2,4-Oxadiazol-3-yl)-1,2,5-oxadiazol-3-yl] morpholine	C ₈ H ₉ N ₅ O ₃	2.318	3.78	-
85	2,2-二甲基-4,5-二(1-丙烯基)-1,3-二氧戊环	2,2-Dimethyl-4,5-di(1-propenyl)-1,3-dioxolane	C ₁₁ H ₁₈ O ₂	2.783	1.72	-
86	1-十五炔	1-Pentadecyne	C ₁₅ H ₂₈	3.101	1.67	-
87	N,N'-硫羰基二咪唑	N,N'-Thiocarbonyldiimidazole	C ₇ H ₆ N ₄ S	5.358	-	1.47
88	十六烷基丙基醚	Hexadecyl propyl ether	C ₁₉ H ₄₀ O	6.292	2.56	-

续表 1

序号	化合物中文名称	化合物英文名称	分子式	保留时间/min	相对百分含量/%	
					菌盖	菌柄
89	香芹酮氧化物	Carvone oxide	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	10.050	2.39	
90	4-甲磺酰基-3-硝基吡啶	4-(Methylsulfonyl)-3-nitropyridine	C ₆ H ₆ N ₂ O ₂ S	10.224	3.36	
91	(E)-1-羟基-2,2-二甲基-2,5-二氢-1H-咪唑-4-甲醛肟	(E)-1-hydroxy-2,2-dimethyl-2,5-dihydro-1H-imidazole-4-carbaldehyde oxime	C ₆ H ₁₁ N ₃ O ₂	10.801		2.01
92	环氧咪隆	Epoxyfilifolone	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	12.879	1.32	
93	三环[5.1.0.0(3,5)]辛烷-2,6-二酮-1,3,4,5,7,8-六甲基-立体异构体	Tricyclo[5.1.0.0(3,5)]octane-2,6-dione, 1,3,4,5,7,8-hexamethyl-, stereoisomer	C ₁₄ H ₂₀ O ₂	14.233		2.79
94	澳洲茄碱	Solasonine	C ₄₅ H ₇₃ NO ₁₆	15.342	1.93	
95	(2 α ,3 β ,4 α ,8 α)-2,3-二甲氧基十氢萘	Naphthalene, decahydro-2,3-dimethoxy-, (2.alpha.,3.beta.,4a.alpha.,8a.alpha.)-	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	15.540		1.45
96	3-甲基-4-(苯硫基)-2-丙烯基-2,5-二氢噻吩	3-Methyl-4-(phenylthio)-2-prop-2-enyl-2,5-dihydrothiophene 1,1-dioxide	C ₁₄ H ₁₆ O ₂ S ₂	18.688		1.95
97	四氢-2,2-二甲基-5-(1-甲基乙基)-呋喃	Furan, tetrahydro-2,2-dimethyl-5-(1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₈ O	20.579		1.43
98	(2 α ,3 β ,5 α)-2,3,14-三羟基-20(22)-强心甙	Card-20(22)-enolide,2,3,14-trihydroxy-, (2.alpha.,3.beta.,5.alpha.)-	C ₂₃ H ₃₄ O ₅	21.291	1.27	
99	2,2'-脱水尿苷	2,2'-Cyclouridine	C ₉ H ₁₀ N ₂ O ₅	23.425		1.86
100	(2-氨基乙醇根合-N,O)(1,5-环辛烷二基)-, Tt-4)-硼	Boron,(2-aminoethanolato-N,O)(1,5-cyclooctanediyl)-, Tt-4)-	C ₁₀ H ₂₀ BNO	36.359		1.67

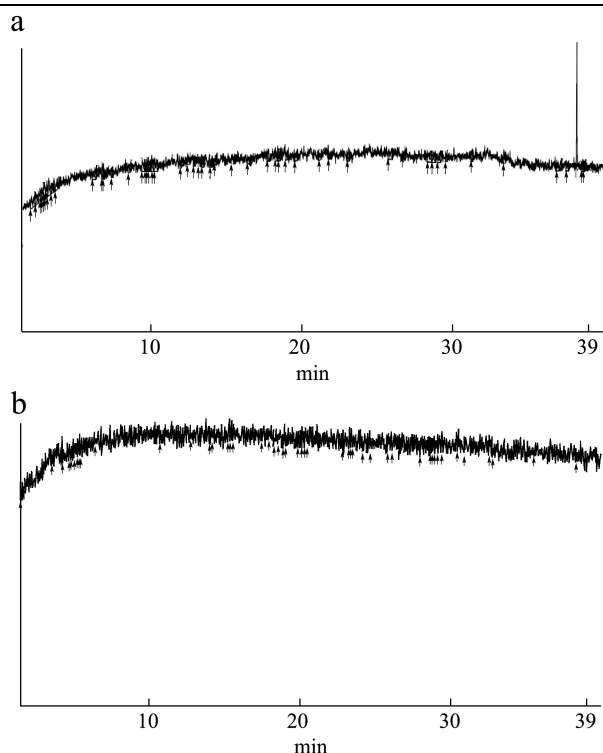


图1 春生田头菇子实体菌盖和菌柄总离子图谱

Fig.1 Total ion current chromatogram of volatile compositions of the pileus and stipe of *Stropharia rugoso-annulata*

注: a: 菌盖; b: 菌柄。

2.2 大球盖菇子实体菌盖和菌柄中主要挥发性化合物的比较

大球盖菇含有食用菌中大部分挥发性物质，醇类为主要呈香物质，酯类具有水果的芳香味，酮类化合物一般具有花香和果香风味，醛类化合物具有特殊的香气，多为花香及果香风味，较高碳位数的具有柑橘皮的香味，但所含特征性风味物质不一样。大球盖菇菌盖和菌柄所含挥发性化合物成分对比见图2。

2.2.1 醇类化合物的比较和分析

醇类化合物也是构成大球盖菇菌盖和菌柄挥发性成分的主要组成成分之一，大球盖菇菌盖和菌柄都鉴定出11种醇类化合物，分别约占总挥发性成分的22%。顺式-1-环戊烯-3,4-二醇和4-吡啶醇是构成大球盖菇菌盖醇类化合物的主要成分，相对百分含量分别为3.79%和2.66%；3,4-二羟基-2-甲基吡啶-5-甲醇和2-(2,5-二甲基环戊基)-1-丙醇是构成大球盖菇菌柄醇类化合物的主要成分，相对百分含量分别为3.13%和2.62%。

2.2.2 酯类化合物的比较和分析

酯类化合物主要通过醇和酸的酯化反应产生。酯类化合物约占大球盖菇挥发性总化合物数量的18%。大球盖菇菌盖和菌柄分别鉴定出8种和10种酯类化合物，

分别约占总挥发性成分的16%和22%。马来酸二乙基己酯和(2-乙基己基)亚磷酸三酯是构成大球盖菇菌盖酯类化合物的主要成分，相对百分含量分别为6.84%和2.76%；3-甲基丁基-2-十三炔-1-富马酸酯和(8E)-10-甲基-8-十四烯酯是构成大球盖菇菌柄酯类化合物的主要成分，相对百分含量分别为1.66%和1.53%。

2.2.3 酮类化合物的比较和分析

酮类化合物约占大球盖菇挥发性总化合物数量的10%。大球盖菇菌盖和菌柄分别鉴定出6种和4种酮类化合物，分别约占总挥发性成分的12%和8%。3,3-二甲基-1-(1-氧杂螺[4.5]癸-2-基)-2-丁酮和8-羟基-2,2,8-三甲基-5,9-癸二烯酮是构成大球盖菇菌盖酮类化合物的主要成分，相对百分含量分别为2.24%和1.86%；3-壬烯-2-酮和麝香酮是构成大球盖菇菌柄酮类化合物的主要成分，相对百分含量分别为3.16%和2.95%。

2.2.4 烃类化合物的比较和分析

烃类化合物包括烯烃类、烷烃类和芳香烃类化合物，也是构成大球盖菇挥发性成分主要组成之一。大球盖菇菌盖和菌柄分别鉴定出5种和4种烷烃类化合物，分别约占总挥发性成分的10%和8%；大球盖菇菌盖还鉴定出1种炔烃类化合物，菌柄鉴定出2种烯烃类化合物，分别约占总挥发性成分的2%和4%。[2-(戊氧基)乙基]环己烷和1R-乙酰氨基-2,3-顺式-环氧-4-顺式-甲酰氧-环己烷是构成大球盖菇菌盖烷烃类化合物的主要成分，相对百分含量分别为2.75%和1.72%；1-溴-5-甲基己烷和2,6,10,14-四甲基-7-(3-甲基-4-亚戊烯基)十五烷是大球盖菇菌柄烷烃类化合物的主要成分，相对百分含量分别为2.40%和1.78%。

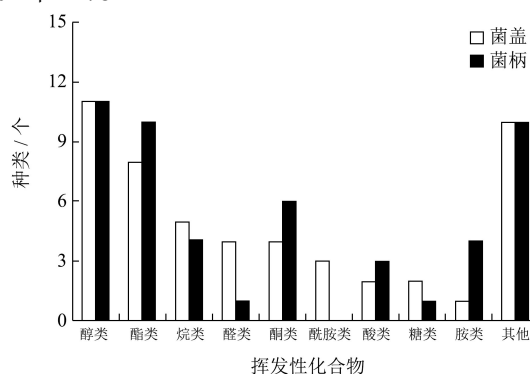


图2 大球盖菇菌盖和菌柄中差异性挥发性组分比较

Fig.2 Differential volatile components from *Stropharia rugoso-annulata* pileus and stipe

食用菌的挥发性成分主要包括八碳挥发性化合物和含硫化合物，还包括醇类、酯类、酸类和酮类等化合物，如1-辛烯-3-醇，1-辛烯-4-醇和3-辛烯-2-醇是大部分食用菌主要挥发性成分之一。陈万超等^[18]对香菇的挥发性成分鉴定可知，香菇挥发性成分主要包括八碳化合

物、含硫化合物、醛类、醇类、酸类、酮类、吡啶和呋喃化合物, 1-辛烯-3-醇、3-甲基-1-丁醇、3-辛酮、2-甲基-1-丁醇、2-乙基己醇、二甲基四硫、二甲基三硫、二甲基二硫、1,2,4-三硫戊烷等为主要特征性风味物质。余昌霞等^[24]对草菇所含挥发性物质进行了分析, 草菇挥发性成分主要是芳香族、烯烃类、醛类化合物, 其次是醇类化合物、酮类化合物, 特征挥发性物质为异戊醛、己醛、1-辛烯-3-醇、甲硫醇、2-戊基呋喃、二甲基硫醚等, 二甲基硫醚是产生美拉德反应的成分之一。张宪臣等^[20]对姬松茸挥发性成分研究发现, 含有酯类、醛类、醇类、酚类、烯烃类、酮类、酸类、呋喃类和含氮杂环化合物等为挥发性物质, 苯甲醛、己酸甲酯、丁酸甲酯、异戊酸甲酯、异戊酸、3-乙基-2,5-甲基吡嗪为主要特征性风味物质, 且吡嗪类化合物具有低阈值、留香时间长等特点, 具有明显焦香与谷物的香烤风味。张福生等^[14]对羊肚菌挥发性成分研究发现, 醛类、酮类、酯类、酸类、醇类、杂环类和烃类化合物为主要挥发性成分, 其中醇类、醛类和酮类化合物占总挥发性化合物含量的60%~80%; 2-甲基丙醛、3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、正己醛、1-辛烯-3-醇、薄荷酮为主要特征性风味物质。本研究通过 HS-SPME-GC-MS 对大球盖菇菌盖和菌柄的挥发性成分鉴定, 结果可知大球盖菇的主要挥发性成分是醇类、酯类、酮类和醛类化合物, 醇类化合物是主要呈香物质, 酯类化合物具有水果的芳香味, 酮类化合物一般具有花香和果香风味, 醛类化合物具有特殊的香气, 多为花香及果香气味, 较高碳位数的具有柑橘皮的香味, 其中 3,4-二羟基-2-甲基吡啶-5-甲醇、4-哌啶醇、马来酸二乙基己酯、环己烷和 3-壬烯-2-酮为主要挥发性成分。

2.3 大球盖菇子实体菌盖和菌柄的 PCA 分析

对表 1 中大球盖菇所含的挥发性成分进行 PCA 分析, 见图 3。大球盖菇子实体所含的挥发性物质中, 菌盖和菌柄第 1 主成解释释所有变量方差分别为 54.3% 和 61.3%, 第 2 主成解释释所有变量方差分别为 45.7% 和 38.7%。由图 3 可知, 在大球盖菇菌盖中, 大部分挥发性成分聚集在第二象限和第四象限。在 PCA1 上马来酸二乙基己酯得分最高, 亚磷酸十三烷酯得分最低; 在 PCA2 上 4-哌啶醇得分较高, 1,4-二异丙基环己烷得分较低。在大球盖菇菌柄中, 在 PCA1 上 3,4-二羟基-2-甲基吡啶-5-甲醇得分最高, 硬脂醇乙酸酯得分最低; 在 PCA2 上 3-壬烯-2-酮得分较高, 1,4-二异丙基环己烷得分较低。通过 PCA 可了解大球盖菇所含不同挥发性成分之间的相关性, 根据 PCA 的基本原则, 物质在得分图上距离越接近说明物质组分及含量的相似度越高。由此可

知, 菌盖挥发性成分在第二和第四象限聚集分布, 菌柄挥发性成分在每个象限呈分散分布, 说明大球盖菇菌盖和菌柄在挥发性成分组成上具有明显差异。

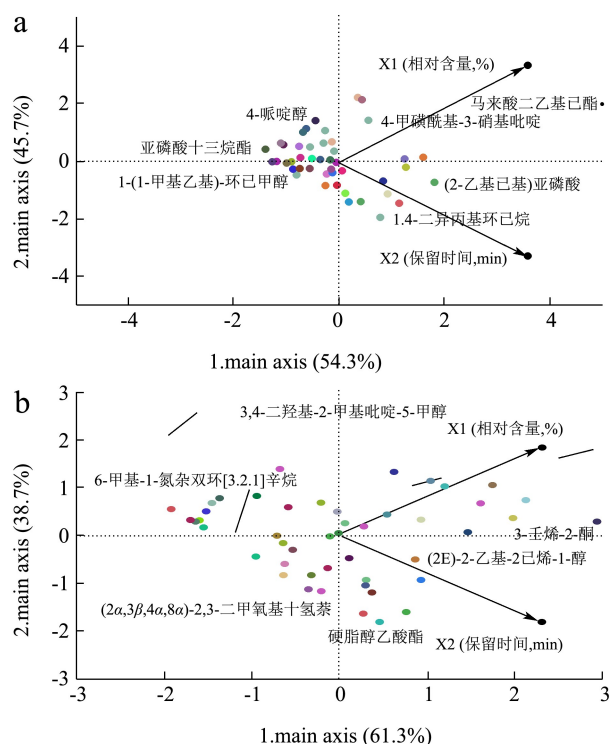


图 3 大球盖菇子实体菌盖 (a) 和菌柄 (b) 的主成分得分图

Fig.3 PCA score plots in pileus (a) and stipe (b) from *Stropharia rugoso-annulata*

3 结论

本研究通过 HS-SPME-GC-MS 技术分析了大球盖菇子实体菌盖和菌柄的挥发性成分。鉴定结果发现, 大球盖菇总共鉴定出 100 种挥发性化合物, 其中菌盖和菌柄都分别鉴定出 50 个挥发性化合物, 菌盖和菌柄的 PCA 的结果说明了挥发性成分和含量上存在明显差异。其中醇类、酯类、烷类和酮类化合物相对百分含量较高, 说明醇类和酯类是大球盖菇的主要特征性风味物质, 3,4-二羟基-2-甲基吡啶-5-甲醇、4-哌啶醇和马来酸二乙基己酯相对百分含量最高。但此次研究有些食用菌特征风味物质未检出, 可能与大球盖菇的品种、种植采收方式及样品处理方式有关。如 1-辛烯-3-醇(蘑菇醇), 可能是由于醇类物质容易分泌于胞外, 在采收后的保藏运输和干制过程导致了流失而致。本研究通过对大球盖菇不同部位的挥发性物质进行研究, 明确了不同部位的主体挥发性物质, 这些成分如何影响大球盖菇风味形成还需进一步研究确认, 但对建立大球盖菇特征风味指纹图谱, 并以风味为育种过程中考察的重要农艺性状之一, 对定向选育大球盖菇新品种具有重要意义。

参考文献

- [1] 戴玉成,周丽伟,杨祝良,等.中国食用菌名录[J].菌物学报, 2010,29(1):1-21
DAI Yucheng, ZHOU Liwei, YANG Zhuliang, et al. A revised checklist of edible fungi in China [J]. Mycosystema, 2010, 29(1): 1-21
- [2] 王丽,倪淑君,李淑荣,等.大球盖菇菇盖和菇柄营养成分分析[J].黑龙江农业学报,2016,11:143-145
WANG Li, NI Shujun, LI Shurong, et al. Analysis of the different parts of base nutrition of *Stropharia rugoso-annulata* [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016, 11: 143-145
- [3] 汪虹,陈辉,张津京,等.大球盖菇生物活性成分及药理作用研究[J].食用菌学报,2018,25(4):115-120
WANG Hong, CHEN Hui, ZHANG Jinjing, et al. Research progresses on bioactive components in *Stropharia rugosoannulata* and their pharmacological effects [J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 115-120
- [4] 李淑荣,王丽,倪淑君,等.大球盖菇不同部位氨基酸含量测定及营养评价[J].食品研究与开发,2017,38(8):95-99
LI Shurong, WANG Li, NI Shujun, et al. The amino acids content of different part of *Stropharia rugoso-annulata* and their nutrition evaluation [J]. Food Research and Development, 2017, 38(8): 95-99
- [5] 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
- [6] Chan W K, Tan L T H, Chan K G, et al. Nerolidol: a sesquiterpene alcohol with multi-faceted pharmacological and biological activities [J]. Molecules, 2016, 21(5): 529
- [7] Yoshie Terashima, Azusa Fujiie. Comparison of conditions for mycelial growth of *Lepista sordida* causing fairy (in Chinese) rings on *Zoysia matrella* turf to those on *Agrostis palustris* turf [J]. Mycoscience, 2007, 48: 365-372
- [8] 俞飞,周健,明红梅,等.机械化与传统酿造方式的浓香型原酒风味成分初步对比分析[J].食品与发酵工业,2021,47(23): 233-239
YU Fei, ZHOU Jian, MING Hongmei, et al. The flavor components of strong-flavor Baijiu of mechanization and traditional brewing methods [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(23): 233-239
- [9] Lorenzo Cecchi, Francesca Leri, Pamela Vignolini, et al. Characterization of volatile and flavonoid composition of different cuts of dried onion (*Allium cepa* L.) by HS-SPME-GC-MS, HS-SPME-GC×GC-TOF and HPLC-DAD [J]. Molecules, 2020, 25(2): 408
- [10] 李琴,朱科学,周惠明.固相微萃取-气相色谱-质谱及气相色谱嗅闻技术分析双孢蘑菇汤的风味活性物质[J].食品科学, 2011,16(32):300-304
LI Qin, ZHU Kexue, ZHOU Huiming. Analysis of flavor components in button mushroom soup by HS-SPME-GC-MS and GC-O [J]. Food Science, 2011, 16(32): 300-304
- [11] MA Longhua, GAO Wenjie, CHEN Feng, et al. HS-SPME and SDE combined with GC-MS and GC-O for characterization of flavor compounds in Zhizhong and Wujiapi medicinal liquor [J]. Food Research International, 2020, 137: 109590
- [12] Onu Ekpa, Vincenzo Fogliano, Anita Linnemann. Identification of the volatile profiles of 22 traditional and newly bred maize varieties and their porridges by PTR-QiTOF-MS and HS-SPME GC-MS [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(4): 1618-1628
- [13] 王凤丽,胡奇杰,王东旭,等.新型固相微萃取技术在食品安全检测中的应用进展[J].食品研究与开发,2018,39(23):214-218
WANG Fengli, HU Qijie, WANG Dongxu, et al. Recent advances in applications of new solid-phase microextraction technology in food safety detection [J]. Food Research and Development, 2018, 39(23): 214-218
- [14] 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 Fusheng, LONG Li, YU Xiaorui, 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
- [15] 何奎,俞建民,毕阳,等.纳米膜包装真姬菇贮藏期间挥发性风味成分变化分析[J].食品科学,2021,42(20):160-166
HE Kui, YUN Jianmin, BI Yang, et al. Analysis on the changes of volatile flavor components of *Hypsizygus marmoreus* packaged by nano-film during storage [J]. Food Science, 2021, 42(20): 160-166
- [16] 王鹤潼,潘泓杉,王朝,等.不同品种金针菇特征挥发性物质的差异分析[J].食品科学,2021,42(2):193-199
WANG Hetong, PAN Hongshan, WANG Chao, et al. Differences in characteristic volatile substances in different cultivars of *Flammulina filiformis* [J]. Food Science, 2021,

- 42(2): 193-199
- [17] 关小莺,黄康艳,谢意珍,等.赤芝挥发性成分分析及特征指纹图谱构建[J].食用菌学报,2019,26(3):113-118
GUAN Xiaoying, HUANG Kangyan, XIE Yizhen, et al. Volatile components of *Ganoderma lucidum* and establishment of the fingerprint chromatography [J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 26(3): 113-118
- [18] 陈万超,杨焱,李文,等.香菇挥发性成分SPME-GC-MS分析及特征指纹图谱的建立[J].食品与生物技术学报,2016,35(10):1074-1080
CHEN Wanchao, YANG Yan, LI Wen, et al. Analysis of volatile components in *Lentinula edodes* by SPME-GC-MS and establishment of fingerprint [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(10): 1074-1080
- [19] 王霆,负建民,毕阳,等.双孢蘑菇采后品质劣变过程中风味物质的变化规律[J].食品与发酵工业,2022,48(6):39-45
WANG Ting, YUN Jianmin, BI Yang, et al. Study on the variation of flavor substances during the quality deterioration of *Agaricus bisporus* [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 39-45
- [20] 张宪臣,张朋杰,容裕棠,等.松茸和姬松茸挥发性成分比较分析[J].食品科学,2019,40(10):229-235
ZHANG Xiancheng, ZHANG Pengjie, RONG Yutang, et al. Comparative analysis of volatile components of *Tricholoma matsutake* and *Agaricus blazei* [J]. Food Science, 2019, 40(10): 229-235
- [21] 杨生兵,陆震鸣,耿燕,等.灰树花子实体与发酵菌丝体挥发性化合物分析[J].菌物学报,2013,32(1):103-113
YANG Shengbin, LU Zhengmin, GENG Yan, et al. Analysis of volatile compounds in fruiting bodies and submergedly cultured mycelia of *Grifola frondose* [J]. Mycosystema, 2013, 32(1): 103-113
- [22] 汤晶晶,缪婧,崔月花.不同培养模式下桑黄挥发性风味物质的检测和分析[J].食品与发酵工业,2019,45(14):221-228
TANG Jingjing, MIAO Jing, CUI Yuehua. Analysis of volatile flavor compounds in *Phellinus linteus* at various cultivation modes [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 221-228
- [23] 孙燕,向淮,罗倩,等.不同温度竹荪品种挥发性成分及风味特性分析[J].生物技术,2019,29(6):586-592
SUN Yan, XIANG Zhun, LUO Qian, et al. Analysis of volatile components and flavor characteristics about different temperature varieties of *Dictyophora duplicata* [J]. Biotechnology, 2019, 29(6): 586-592
- [24] 余昌霞,赵妍,陈明杰,等.利用不同培养料栽培的草菇子实体挥发性风味成分分析[J].食用菌学报,2019,26(2):37-44
YU Changxia, ZHAO Yan, CHEN Mingjie, et al. Analysis of volatile flavor components in *Volvariella volvacea* fruiting bodies cultivated on different substrates [J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 26(2): 37-44
- [25] Gerhard Gramss, Rene Mascher. Mutual influence of soil basidiomycetes and white mustard plants on their enzymatic and catabolic activities [J]. Journal of Basic Microbiology, 2011, 51(1): 40-51
- [26] LIU Yuntao, SUN Jun, LUO Zeyu, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from Southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5): 1238-1244
- [27] 赵妍,任昀霏,陈明杰,等.GC-MS分析3个大球盖菇菌株脂肪酸组成及含量[J].食品与机械,2018,34(3):65-68
ZHAO Yan, REN Yunfei, CHEN Mingjie, et al. Analysis of fatty composition and content in three strains of *Stropharia rugoso-annulata* by GC-MS [J]. Food & Machinery, 2018, 34(3): 65-68
- [28] 张健,张国权,邹莉,等.大球盖菇的分离纯化及ITS序列鉴定[J].江苏农业科学,2017,45(1):120-123
ZHANG Jian, ZHANG Guoquan, ZOU Li, et al. Isolation and purification of *Stropharia rugoso-annulata* and identification of ITS ITS sequence [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(1): 120-123
- [29] 孙兴荣,韩勇武,卞景阳.大球盖菇菌丝体液体发酵培养条件的研究[J].黑龙江农业科学,2016,8:114-117
SUN Xingrong, HAN Yongwu, BIAN Jingyang. Study on the liquid fermentation conditions for production of mycelium of *Stropharia rugoso-annulata* [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016, 8: 114-117
- [30] ZHANG Yang, NI Jiupai, YANG John, et al. Citrus stand ages regulate the fraction alteration of soil organic carbon under a citrus *Stropharia rugoso-annulata* intercropping system in the three gorges reservoir area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(22): 18363-18371
- [31] Gerhard Gramss, Klaus-dieter Voigt. Basidiospores from wood-decay fungi transform laccase substrates in the absence of glucose and nitrogen supplements [J]. Journal of Fungi (Basel), 2020, 6(2): 62
- [32] SONG Zhen, JIA Le, XU Feng, et al. Characteristics of Se-enriched mycelia by *Stropharia rugoso-annulata* and its antioxidant activities *in vivo* [J]. Biological Trace Element Research, 2009, 131(1): 81-89