

陶忠发, 辜雪冬, 钟政昌, 等. 三种不同干燥方式对橙盖鹅膏菌基本营养成分和挥发性物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 266-277. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060233

TAO Zhongfa, GU Xuedong, ZHONG Zhengchang, et al. Effects of Three Different Drying Methods on the Basic Nutritional Components and Volatile Substances of *Amanita caesarea*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 266-277. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060233

· 包装与机械 ·

三种不同干燥方式对橙盖鹅膏菌基本营养成分和挥发性物质的影响

陶忠发¹, 辜雪冬², 钟政昌³, 马长中^{1,*}

(1. 西藏农牧大学食品科学学院, 西藏林芝 860000;

2. 西藏农牧大学食品科学学院, 西藏特农牧资源研发省部共建协同创新中心, 西藏林芝 860000;

3. 西藏野生生物资源评价与利用实验室, 西藏林芝 860000)

摘要:为探究不同干燥处理下橙盖鹅膏菌营养特性的变化规律, 本研究以新鲜橙盖鹅膏菌为原料, 采用真空冷冻干燥、热风干燥、自然晾晒干燥三种干燥方式对橙盖鹅膏菌进行干燥处理, 通过相关方法技术, 如原子吸收分光光度法、高效液相色谱法、气相色谱质谱联用法、气相色谱法、考马斯亮蓝法、硫酸苯酚法、索氏提取法、纤维测定仪酸碱水解法、食品中总灰分的测定方法、荧光分光光度法对不同干燥处理后的橙盖鹅膏菌中的 10 种矿物质、18 种氨基酸、挥发性物质、脂肪酸、粗蛋白、总糖、粗脂肪、粗纤维、灰分、核黄素进行分析。结果表明真空冷冻干燥中粗蛋白、总糖、核黄素的含量最高, 不同的干燥方式对核黄素含量的影响较大, 而对粗脂肪、粗纤维、灰分的影响较小; 矿物质 Ca 在热风干燥中含量最高, Fe、Na、Mg、Zn 和 Mn 在真空冷冻干燥中含量最高; 氨基酸总量、氨基酸评分以及必需氨基酸指数均为真空冷冻干燥>自然晾晒干燥>热风干燥; 挥发性成分种类在真空冷冻干燥中最多, 其次是自然晾晒干燥、热风干燥; 脂肪酸种类及含量均为真空冷冻干燥>自然晾晒干燥>热风干燥。基于以上三种干燥方式可见, 真空冷冻干燥对橙盖鹅膏菌中营养成分种类及含量的保留效果最优, 其次是自然晾晒干燥、热风干燥, 由此真空冷冻干燥更适合用于干燥橙盖鹅膏菌。本文通过研究三种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌基本营养成分和挥发性物质的保留效果, 为更加科学合理地干燥橙盖鹅膏菌以及其他食用菌提供了一定的理论依据。

关键词:橙盖鹅膏菌, 不同干燥方式, 矿物质元素, 氨基酸评析, 脂肪酸, 挥发性物质

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0266-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060233

本文网刊:



Effects of Three Different Drying Methods on the Basic Nutritional Components and Volatile Substances of *Amanita caesarea*

TAO Zhongfa¹, GU Xuedong², ZHONG Zhengchang³, MA Changzhong^{1,*}

(1. College of Food Science, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China;

2. College of Food Science, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Collaborative Innovation Center of Special Agricultural and Animal Husbandry Resources Research, Nyingchi 860000, China;

3. Xizang Laboratory of Wildlife Resources Evaluation and Utilization, Nyingchi 860000, China)

Abstract: To investigate the changes in nutritional characteristics of *Amanita caesarea* under different drying treatments, in this study, we used fresh *A. caesarea* as raw material and subjected them to three drying methods: vacuum freeze drying, hot air drying, and natural sun drying. The 10 kinds of minerals, 18 kinds of amino acids, volatile substances, fatty acids, crude protein, total sugar, crude fat, crude fiber, ash and riboflavin in *Amanita caesarea* after different drying treatments

收稿日期: 2025-06-19

基金项目: 西藏自治区重大科技专项 (XZ202201ZD0001N); 西藏农牧学院学科建设项目 (533323001)。

作者简介: 陶忠发 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 2189796680@qq.com。

* 通信作者: 马长中 (1975-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 高原特色农畜产品加工及贮藏, E-mail: 414767450@qq.com。

were analyzed by atomic absorption spectrophotometry, high performance liquid chromatography, gas chromatography-mass spectrometry, gas chromatography, Coomassie brilliant blue method, phenol-sulfuric acid method, Soxhlet extraction method, acid-base hydrolysis method of fiber analyzer, determination method of total ash in food and fluorescence spectrophotometry. The results showed that vacuum freeze drying yielded the highest levels of crude protein, total sugar, and riboflavin, different drying methods had a significant impact on riboflavin content, while their effects on crude fat, crude fiber, and ash were relatively small. The mineral calcium (Ca) content was highest in hot air drying, whereas iron (Fe), sodium (Na), magnesium (Mg), zinc (Zn), and manganese (Mn) were highest in vacuum freeze drying. The total amino acid content, amino acid score, and essential amino acid index were ranked as follows: vacuum freeze drying>natural sun drying>hot air drying. The number of volatile compounds was highest in vacuum freeze drying, followed by natural sun drying and hot air drying. The types and contents of fatty acids were vacuum freeze drying>natural sun drying>hot air drying. Based on the above three drying methods, it could be seen that vacuum freeze drying had the best retention effect on the types and contents of nutritional in *A. caesarea*, followed by natural sun drying and hot air drying. Therefore, vacuum freeze drying was more suitable for drying *A. caesarea*. This study provides a theoretical basis for more scientific and rational drying of *A. caesarea* and other edible fungi by investigating the retention basic nutrients and volatile substances under three different drying treatments.

Key words: *Amanita caesarea*; different drying methods; mineral elements; amino acid analysis; fatty acids; volatile substances

橙盖鹅膏菌(*Amanita caesarea*)属于担子菌亚门层菌纲伞菌目鹅膏菌科鹅膏属,在我国主要分布于河北、黑龙江、广东、福建、云南、四川、西藏等地^[1]。西藏因其独特的地理位置和自然环境,引起了很多国内外学者的关注,尤其是以林芝为代表的藏东南地区,气候类型多样,生态环境复杂,大型真菌种类多,拥有丰富的橙盖鹅膏菌。在鹅膏属中橙盖鹅膏菌是非常著名的食用菌之一,橙盖鹅膏菌因幼时呈鹅蛋状又名鹅蛋菌,其菌盖多为黄桔色,表面光滑,略带黏液,表面有一层白色的外衣紧紧包住鹅蛋菌菌盖,肉呈白色,内部空心^[2]。橙盖鹅膏菌作为西藏林芝具有特色的食用菌之一,其具有较高的药用食用价值,但目前对于橙盖鹅膏菌营养成分的研究鲜有报道,罗禹等^[1]从橙盖鹅膏菌中分离纯化出八种化合物,其中的麦角甾醇成分具有抑菌、抗肿瘤、抗氧化、抗病毒、降血糖和免疫调节^[3]等作用,DOĞAN 等^[4]在橙盖鹅膏菌中发现了酚类物质儿茶素、阿魏酸、对香豆酸和肉桂酸,并通过鉴定脂肪酸发现油酸为主要成分。

干燥作为一种应用最广泛的加工贮藏方法,可有效延长食用菌货架期,目前已广泛应用在香菇、杏鲍菇、双孢菇、金针菇等菌菇的脱水贮藏中^[5],其主要通过降低食用菌水分含量达到降低食用菌自身酶活性、抑制微生物生长繁殖的作用,可提高食用菌的生物利用率和经济效益^[6]。然而不同的干燥方式对食用菌原料的色泽、水分、营养物质和挥发性化合物含量等品质特性都会有较大影响^[7],且在干燥过程中,挥发性物质因发生了诸如酶促反应、美拉德反应、Strecker 降解等一系列复杂反应而变化^[5]。研究表明不同的干燥方式会影响食用菌的营养组分和挥发性成分,如氨基酸含量的变化^[8],一些特征挥发性成分的损失等^[9]。新鲜橙盖鹅膏菌水分含量高,不易贮藏,因此干燥成为了橙盖鹅膏菌长期贮藏的重要方

法之一,目前关于干燥方式对橙盖鹅膏菌营养成分及挥发性物质的影响鲜有报道。

为探究不同干燥方式对橙盖鹅膏菌营养成分价值的影响,本研究采用真空冷冻干燥(vacuum freeze drying, VFD)、热风干燥(hot air drying, HAD)和自然晾晒干燥(natural drying, ND)三种不同的干燥方式对橙盖鹅膏菌进行干燥处理,通过分析比较橙盖鹅膏菌中营养成分种类及含量在不同干燥方式中的差异性,探究橙盖鹅膏菌最佳的干燥保藏条件,为橙盖鹅膏菌的干燥贮藏提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

样品 于 2024 年 7 月采摘自西藏林芝市巴宜区色季拉山,经西藏农牧学院食品科学学院李连强副教授鉴定为橙盖鹅膏菌;氯化钾、氯化钠、氯化铯、氢氧化钠、无水硫酸钠、石油醚(均为分析纯)、正庚烷(色谱纯)、10 种矿物质元素标准液 天津市致远化学试剂有限公司;硝酸 分析纯,成都市科隆化学制品有限公司;硫酸 分析纯,安徽金粤冠新材料科技有限公司;葡萄糖标准品 分析纯,纯度≥98%,成都瑞芬思德丹生物科技有限公司;考马斯亮蓝 G-250 高纯,北京索莱宝科技有限公司;无水乙酸钠、盐酸 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;三乙胺(优级纯)、磷酸二氢铵(分析纯) 成都市科龙化工试剂厂;18 种氨基酸标准品 色谱纯,上海源叶生物科技有限公司;三氟化硼(纯度为 96%)、异硫氰酸苯酯(纯度为 98%) 上海麦克林生化科技股份有限公司;苯酚、乙醚 均为分析纯,成都市联合化工试剂研究所;乙腈 色谱纯,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;甲醇 色谱纯,天津益仁达化工有限公司;37 种脂肪酸甲酯混标 上海安普实验科技股份有限公司;焦性没食子酸 分析纯,贵州遵义佳宏化工有限责任公司。

F30520200 意大利 VELP-纤维测定仪 德祥科技有限公司; UV-2102PCS 型紫外可见分光光度计 尤尼柯(上海)仪器有限公司; RE52CS 旋转蒸发仪 上海亚荣生化仪器厂; DW-86L338J 超低温保存箱 青岛海尔生物医疗股份有限公司; SB-600 电热板 山东鄞城现代实验仪器有限公司; HG-10-4B 陶瓷纤维马弗炉 上海禾工科学仪器有限公司; AA-700S 原子吸收分光光度计、EW-320AC 无油低噪音空压机 北京东西分析仪器有限公司; LGJ-20F 真空冷冻干燥机 北京松源华真科技发展有限公司; DHG-9123A 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司; 1100 液相色谱仪 安捷伦科技(中国)有限公司; GCMS-QP2020 NX 气相色谱质谱联用仪、AOC-6000 顶空自动进样器 岛津企业管理(中国)有限公司; Varian CP-3800 气相色谱仪 美国瓦里安技术中国有限公司; Cary 660 FTIR 傅里叶红外光谱仪 广州市深华生物科技有限公司; Diamonsil AAA 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm)、DM-2560 色谱柱(100 m×0.25 mm×0.20 μm) 北京迪科马科技有限公司; Rtx-5MS 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm) 美国色谱集成技术公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料样品处理 真空冷冻干燥(VFD): 取适量新鲜橙盖鹅膏菌于-80℃超低温保存箱预冷结冰后, 平铺于层架上, 置于真空冷冻干燥箱内, 设置真空度为2 MPa, 温度-70℃, 干燥至恒重(48 h); 热风干燥(HAD): 取一定量新鲜橙盖鹅膏菌置于搪瓷托盘内, 放入50℃鼓风干燥箱中烘干至恒重(24 h); 自然晾晒干燥(ND): 取橙盖鹅膏菌适量, 分散于晾晒架上, 置于干燥通风处, 日光下自然晾晒至恒重(96 h)^[10-11]。干燥样品经粉碎后过80目筛, 置于干燥器阴凉处备用。

1.2.2 基本营养成分含量测定 粗蛋白含量测定参照文献[12]中的方法; 总糖含量测定参照文献[13]中的方法; 粗脂肪含量: 采用GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏提取法进行测定; 粗纤维含量: 采用梁萌等^[14]测定粗纤维的方法, 用纤维测定仪进行测定分析; 灰分含量: 采用GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中第一法食品中总灰分的测定进行测定; 核黄素含量: 采用GB 5009.85-2016《食品国家安全标准 食品中维生素 B2 的测定》中第二法荧光分光光度法进行测定。

1.2.3 矿物质元素含量分析方法 参考GB 5009.91-2017《食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定》; GB 5009.92-2016《食品安全国家标准 食品中钙的测定》; GB 5009.241-2017《食品安全国家标准 食品中镁的测定》; GB 5009.90-2016《食品安全国家标准 食品中铁的测定》; GB 5009.13-2017《食品安全国家标准 食品中铜的测定》; GB 5009.14-2017《食品安全国

家标准 食品中锌的测定》; GB 5009.242-2017《食品安全国家标准 食品中锰的测定》; GB 5009.15-2023《食品安全国家标准 食品中镉的测定》; GB 5009.123-2023《食品安全国家标准 食品中铬的测定》; GB 5009.12-2023《食品安全国家标准 食品中铅的测定》中的相应方法进行测定; 除镉、铬、铅元素使用石墨炉原子吸收光谱法外, 其余元素都使用火焰原子吸收光谱法。

1.2.4 氨基酸测定方法 采用6 mol/L 盐酸水解样品, 参照文献[15]使用异硫氰酸苯酯对标准品及样品进行柱前衍生化。色谱条件: 采用 Diamonsil AAA 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm), 0.05 mol/L 乙酸钠水溶液(用冰乙酸调节 pH 至 6.50±0.05)作为流动相 A, 流动相 B 为甲醇、乙腈和水的混合溶液(甲醇: 乙腈: 水=1:3:1, 体积比)。流速 0.9 mL/min; 检测波长 254 nm; 柱温 45℃; 进样量 6 μL; 梯度程序: 0~39 min, 95%~52%A; 39~40 min, 52%~40%A; 40~45 min, 40%~10%A; 45~46 min, 10%~95%A; 46~60 min, 95%A; 检测时间 60 min。色氨酸采用碱水解, 紫外分光光度计, 590 nm 波长下进行测定^[16]。

1.2.5 氨基酸的评价方式 采用化学评分(chemical score, CS)^[17], 氨基酸评分(amino acid score, AAS)^[18], 氨基酸比值(ratio of amino acid, RAA), 氨基酸比值系数(RAA/ratio coefficient, RC), 氨基酸比值系数分(score of ratio coefficient of amino acid, SRC)和必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)值^[19]对氨基酸进行评价^[20]。相关计算公式如下:

$$CS = \frac{A_x}{A_s} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$AAS = \frac{A_x}{A_{EGG}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

$$RAA = \frac{A_x}{A_{EGG}} \quad \text{式(3)}$$

$$RC = \frac{RAA}{RAA_{AVG}} \quad \text{式(4)}$$

$$SRC = 100 \left(1 - \frac{RC_{SD}}{RC_{AVG}} \right) \quad \text{式(5)}$$

$$EAAI = \sqrt[n]{\frac{Lys^p}{Lys^s} \times 100 \times \frac{Trp^p}{Trp^s} \times 100 \times \dots \times \frac{Thr^p}{Thr^s} \times 100} \quad \text{式(6)}$$

$$TAA(\%) = \frac{EAA_{al}}{TAA} \times 100 \quad \text{式(7)}$$

式中: A_x 为待测蛋白质中某一种必需氨基酸的含量, mg/g; A_s 为 FAO/WHO 评分标准模式中同种氨基酸含量, mg/g; A_{EGG} 为鸡蛋蛋白质中同种氨基酸含量, mg/g; RAA_{AVG} 为氨基酸比值的平均值; RC_{SD} 为氨基酸比值系数的标准差; RC_{AVG} 为氨基酸比值系数的平均值; n 为比较的氨基酸数; Lys^p 、

Trp^p、Thr^p 分别为被评价蛋白中赖氨酸、色氨酸、苏氨酸在必需氨基酸总量中的占比; Lys^s、Trp^s、Thr^s 分别为模式蛋白(鸡蛋蛋白)中赖氨酸、色氨酸、苏氨酸在必需氨基酸总量中的占比; EAA_{ai} 为某一个单项必需氨基酸组分含量, mg/g; TAA 为总氨基酸含量, mg/g。

1.2.6 脂肪酸测定方法 参照文献 [21–22] 方法, 样品经酸水解后, 通过乙醚石油醚混合液萃取, 氢氧化钠甲醇溶液皂化和三氟化硼甲醇溶液甲酯化后, 采用气相色谱仪(GC-FID)进行测定。色谱条件: 色谱柱为 DM-2560(100 m×0.25 mm×0.20 μm); 进样口温度 260 °C; 进样体积 5 μL; 分流比为 2:1; 载气为氮气, 流速 2.3 mL/min; 检测器(FID)温度为 260 °C; 采用程序升温, 110 °C(保持 13 min), 以 10 °C/min 升温至 180 °C(保持 6 min), 再以 1 °C/min 升温至 190 °C(保持 20 min), 最后以 4 °C/min 升温至 250 °C(保持 15 min)。结果参照 GB5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》中外标法进行计算。

1.2.7 挥发性成分测定方法 参考文献 [23] 中的方法, 色谱条件: 采用 Rtx—5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)毛细管色谱柱; 载气为氮气; 流速为 2 mL/min; 进样口温度为 250 °C; 进样模式为不分流; 采用程序升温模式, 初始温度 35 °C(保持 6 min), 以 4 °C/min 升温至 120 °C(保持 3 min), 最后以 8 °C/min 升温至 240 °C(保持 5 min)。质谱条件: 电离模式为 EI; 电子能量为 70 eV; 离子源温度为 230 °C; 界面温度为 240 °C; 数据扫描范围为 30~550 amU。进样方式: 为去除空针上的杂质峰, 采用的固相微萃取头在进样口处 240 °C 下老化 50 min, 分别称取不同干燥处理的样品 2.0 g 于 SHIMADZU 顶空瓶中进样; 取样针和传输线温度都为 80 °C; 样品在 80 °C 温度下萃取 10 min 后直接进样, 分析时间为 73 min。采用检索 GCMS solution\library\NIST17.lib 谱库, 保留相似度 80% 以上的成分进行定性, 峰面积归一化法计算各组分化合物相对含量。

1.3 数据处理

每次实验重复三次, 数据用 Excel 2016 处理、IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析($P<0.05$)及皮尔逊相关分析, 部分图用 Origin 2024 生成。使用 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis,

OPLS-DA), 以及计算预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)等。

2 结果与分析

2.1 基本营养成分分析评价

由表 1 可知, 在三种不同干燥的橙盖鹅膏菌样品中均含有较高的粗蛋白和粗纤维。VFD、HAD、ND 处理的橙盖鹅膏菌中粗蛋白含量分别为 20.01%±0.12%、19.03%±0.04% 和 18.08%±0.05%, HAD 干燥相对于 VFD 干燥温度相对较高, 这种较高的温度会导致蛋白质发生非酶促褐变, 从而发生降解, 而相较于自然晾晒干燥, 热风干燥可以在橙盖鹅膏菌表面迅速形成一层糖衣膜, 从而在非酶促褐变发生一段时间后起到一定的阻碍作用。自然晾晒干燥长时间处于光照与通风环境中, 会发生各类复杂反应。因此, VFD 干燥处于真空缺氧状态, 不利于非酶褐变的产生^[24], 且真空室中的氧气含量减少和温度降低, 有助于保持蛋白质的固有特性^[25], 从而使得粗蛋白的含量在 VFD 处理中显著($P<0.05$)高于 HAD 和 ND 处理、HAD 处理显著($P<0.05$)高于 ND 处理。VFD、HAD、ND 处理的橙盖鹅膏菌中总糖含量分别为 4.32%±0.13%、3.62%±0.10%、3.65%±0.08%, 糖类发生了美拉德反应, 醛、酮、还原糖的羰基与氨基酸、肽、蛋白质等含氮化合物的游离氨基之间发生反应^[26], 从而使得 HAD 和 ND 处理的橙盖鹅膏菌中总糖含量显著($P<0.05$)低于 VFD。VFD、HAD、ND 处理的橙盖鹅膏菌中核黄素含量分别为 7.35±0.06、2.52±0.04、1.40±0.02 mg/100 g, 核黄素在光热条件下会发生一定的分解^[27], 自然晾晒干燥经过较长时间的光照和温度的作用, 使得核黄素发生一定的分解, 而真空冷冻干燥处于低温低氧环境, 有助于核黄素的保存, 从而 VFD 中核黄素显著($P<0.05$)高于 HAD 和 ND, HAD 中核黄素显著($P<0.05$)高于 ND。综上所述, 不同的干燥方式对橙盖鹅膏菌中蛋白质、总糖和核黄素有一定的影响。

三种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌中粗脂肪、粗纤维、灰分含量无显著差异, 可见这三种成分在不同的干燥处理中含量相对稳定。综上, 真空冷冻干燥对橙盖鹅膏菌中基本营养成分的保留效果最好。

2.2 矿物质元素含量分析

由表 2 可知, 三种干燥方式处理的橙盖鹅膏菌中含量最高的为 K 元素, Mg、Ca 次之, 充足的膳食钾对心脏和骨骼健康非常重要, 可降低中风和冠心病的

表 1 三种不同干燥处理样品中基本营养成分及含量

Table 1 Basic nutritional components and their content in three different dry samples

干燥方式	粗蛋白含量(%)	总糖含量(%)	粗脂肪含量(%)	粗纤维含量(%)	灰分含量(%)	核黄素含量(mg/100 g)
VFD	20.01±0.12 ^a	4.32±0.13 ^a	8.22±0.21 ^a	16.25±0.05 ^a	7.28±0.18 ^a	7.35±0.06 ^a
HAD	19.03±0.04 ^b	3.62±0.10 ^b	8.27±0.16 ^a	16.27±0.11 ^a	7.27±0.10 ^a	2.52±0.04 ^b
ND	18.08±0.05 ^c	3.65±0.08 ^b	8.19±0.04 ^a	16.31±0.07 ^a	7.33±0.08 ^a	1.40±0.02 ^c

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异($P<0.05$)。

表2 三种不同干燥处理样品中矿物质元素及含量

Table 2 Mineral elements and their contents in three different dry samples

元素	含量(mg/kg)		
	VFD	HAD	ND
Ca	119.05±0.08 ^c	198.17±0.32 ^a	161.82±0.09 ^b
Cu	10.40±0.13 ^a	11.35±0.18 ^a	12.19±0.05 ^a
Fe	116.60±0.18 ^a	39.75±0.08 ^c	52.99±0.07 ^b
K	3070.56±0.22 ^a	2873.02±0.05 ^a	2939.96±0.34 ^a
Na	39.18±0.03 ^a	29.35±0.05 ^b	31.40±0.15 ^b
Mg	385.15±0.31 ^a	240.58±0.18 ^c	281.85±0.10 ^b
Zn	66.36±0.05 ^a	65.14±0.07 ^b	47.63±0.02 ^c
Mn	32.88±0.10 ^a	18.11±0.04 ^c	20.34±0.04 ^b
Cd	0.48±0.08 ^a	0.31±0.03 ^b	0.45±0.02 ^a
Pb	0.52±0.04 ^a	0.50±0.03 ^a	0.51±0.03 ^a

注:同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异($P<0.05$);表3同。

风险^[28]。橙盖鹅膏菌中的Ca、Fe、Na、Mg、Zn、Mn和Cd元素,在三种不同干燥处理条件下有显著差异($P<0.05$)。矿物质Ca在VFD、HAD、ND中含量分别为119.05±0.08、198.17±0.32、161.82±0.09 mg/kg,热风干燥中矿物质Ca含量显著($P<0.05$)高于其余两种干燥方式。矿物质Fe在VFD中显著($P<0.05$)高于HAD和ND,VFD中Fe含量约是HAD的2.9倍、ND的2.2倍,且ND中也显著($P<0.05$)高于HAD,可见不同的干燥处理对矿物质Fe的影响极大。VFD中的Na、Mg、Zn、Mn均显著($P<0.05$)高于HAD与ND。在VFD中除Ca以外大多矿物元素处于较高含量水平,不同的干燥过程中湿度、氧气浓度等因素发生的变化不同,进而影响各矿物质的溶出程度。橙盖鹅膏菌中各矿物质含量与干燥处理方式间的关系与郑晓敏等^[29]研究不同干燥方式鸡油菌中矿物质含量的结果类似。在三种不同干燥方式处理中,Cu、K、Pb的含量无明显差异,说明不同的干燥方式对Cu、K、Pb的含量影响较小。

橙盖鹅膏菌中含有K、Ca、Na、Mg等对人体有益的常量元素,由表2可知,Ca、K、Mg含量分别高达119.05~198.17、2873.02~3070.56、240.58~385.15 mg/kg,说明橙盖鹅膏菌可以作为钾、钙和镁来源的理想食物之一。三种不同干燥处理的样品中重金属Cd和Pb均在GB 2762-2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(镉≤0.5 mg/kg、铅≤1 mg/kg,干重计)的限定范围内,符合国家安全标准。

2.3 氨基酸分析及评价

2.3.1 氨基酸组成及含量比较 通过对三种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌样品进行氨基酸测定分析,样品中均检测出18种氨基酸,含量如表3所示。

由表3可知,三种不同干燥处理的样品中均检测到18种氨基酸。天冬氨酸、谷氨酸在VFD中的含量显著($P<0.05$)高于HAD干燥,酪氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸在VFD中的含量显著($P<0.05$)高于其余两种干燥方式。在ND中丝氨酸、甘氨酸、组氨

表3 三种不同干燥处理样品中氨基酸含量比较

Table 3 Comparison of amino acid content in three different dry samples

氨基酸种类	含量(mg/g)		
	VFD	HAD	ND
天冬氨酸(Asp)	12.41±0.25 ^a	11.68±0.42 ^b	12.00±0.30 ^{ab}
谷氨酸(Glu)	16.89±0.57 ^a	14.60±1.12 ^b	15.48±0.83 ^{ab}
丝氨酸(Ser)	6.97±0.13 ^b	6.68±0.12 ^c	7.41±0.13 ^a
甘氨酸(Gly)	5.53±0.19 ^{ab}	5.31±0.07 ^b	5.69±0.15 ^a
组氨酸(His)	15.15±1.43 ^a	14.60±1.14 ^a	16.73±0.94 ^a
精氨酸(Arg)	6.96±0.20 ^c	8.85±0.12 ^b	9.63±0.43 ^a
苏氨酸(Thr)*	6.23±0.07 ^a	5.45±0.04 ^b	6.38±0.11 ^a
丙氨酸(Ala)	7.02±0.24 ^b	7.46±0.16 ^b	7.97±0.25 ^a
脯氨酸(Pro)	6.93±0.26 ^a	6.77±0.12 ^a	7.09±0.26 ^a
酪氨酸(Tyr)	9.60±0.07 ^a	7.65±0.03 ^b	6.71±0.97 ^b
缬氨酸(Val)*	4.31±0.16 ^a	3.03±0.45 ^b	2.32±0.27 ^c
蛋氨酸(Met)*	5.23±0.06 ^b	5.45±0.18 ^b	6.02±0.30 ^a
胱氨酸(Cys-Cys)	1.01±0.30 ^a	0.95±0.23 ^a	1.34±0.13 ^a
异亮氨酸(Ile)*	4.52±0.13 ^b	4.66±0.16 ^{ab}	4.93±0.20 ^a
亮氨酸(Leu)*	8.58±0.08 ^b	8.53±0.29 ^b	9.45±0.32 ^a
苯丙氨酸(Phe)*	6.61±0.24 ^a	5.39±0.26 ^b	5.55±0.38 ^b
赖氨酸(Lys)*	5.48±0.05 ^b	5.55±0.03 ^b	5.88±0.12 ^a
色氨酸(Trp)*	1.54±0.02 ^b	1.28±0.02 ^c	1.70±0.02 ^a
EAA	42.50±0.20 ^a	39.33±0.27 ^b	42.23±0.94 ^a
NEAA	75.86±0.26 ^a	72.39±1.76 ^b	76.10±0.99 ^a
TAA	118.36±0.34 ^a	111.73±1.52 ^b	118.33±1.88 ^a
MSG	29.30±0.60 ^a	26.28±1.53 ^b	27.48±1.13 ^{ab}
D	77.30±0.43 ^a	73.01±1.27 ^b	76.41±1.17 ^a
E/T(%)	35.91±0.13 ^a	35.21±0.71 ^a	35.68±0.28 ^a
E/N(%)	56.02±0.32 ^a	54.36±1.70 ^a	55.48±0.67 ^a
M/T(%)	24.76±0.58 ^a	23.52±1.06 ^a	23.24±1.33 ^a
D/T(%)	65.31±0.54 ^a	65.34±0.37 ^a	64.57±0.19 ^a

注:*为必需氨基酸,表4、表5同;EAA为必需氨基酸总量;NEAA为非必需氨基酸总量;TAA为氨基酸总量;MSG为鲜味氨基酸总量;D为药用氨基酸总量;E/T为必需氨基酸含量与氨基酸总量的比值;E/N为必需氨基酸含量与非必需氨基酸含量的比值;M/T为鲜味氨基酸含量与氨基酸总量的比值;D/T为药用氨基酸含量与氨基酸总量的比值。

酸、精氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、蛋氨酸、胱氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸和色氨酸的含量均高于其它两种干燥方式。VFD处理的橙盖鹅膏菌样品中总氨基酸含量(118.36±0.34 mg/g)与ND处理(118.33±1.88 mg/g)的无显著差异,而HAD处理显著($P<0.05$)低于这两者。可能是热风干燥过程加快了美拉德反应和蛋白质氧化反应的程度,从而使氨基酸损失较多。必需氨基酸、非必需氨基酸、鲜味氨基酸和药用氨基酸在VFD和ND中无显著差异,而在HAD中除鲜味氨基酸外,含量均显著($P<0.05$)低于其余两者。可能是脱水应力导致蛋白质溶解释放氨基酸,而必需氨基酸是美拉德反应的关键反应物,热风干燥温度条件有利于美拉德反应的进行^[30],随着加热时间的延长,热敏性氨基酸也会进一步分解^[31],从而导致HAD处理的样品中氨基酸总量、必需氨基酸显著($P<0.05$)低于其它处理。

以FAO/WHO提出的氨基酸模式为参照,对不同干燥方式所处理的橙盖鹅膏菌中氨基酸组成与模

式谱标准进行比较, 结果见表 3。三种干燥方式中必需氨基酸总量为 39.33~42.50 mg/g, 必需氨基酸含量占氨基酸总量的比值为 35.21%~35.91%, 与 FAO/WHO 推荐的理想蛋白质模式(EAA/TAA 等于 40%)相接近, 必需氨基酸含量与非必需氨基酸含量的比值为 54.36%~56.02%, 与 FAO/WHO 理想蛋白质模式要求的 60% 相差不大。这表明三种不同方式干燥的橙盖鹅膏菌氨基酸模式接近 FAO/WHO 推荐的理想蛋白质标准, 因此橙盖鹅膏菌可以作为一种氨基酸来源较为理想的食用菌。

不同干燥处理的橙盖鹅膏菌中均含有大量的鲜味氨基酸和药用氨基酸。橙盖鹅膏菌中鲜味氨基酸主要为天冬氨酸和谷氨酸, 它们与谷氨酸钠的作用一致, 能够呈现鲜味, 其含量高达 27.69 mg/g(均值), 占氨基酸总量的 23.84%(均值)。天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、蛋氨酸、亮氨酸、酪氨酸、赖氨酸、精氨酸和苯丙氨酸是九种药用氨基酸, 在三种干燥方式中橙盖鹅膏菌药用氨基酸占总氨基酸含量的比值分别为 65.31%、65.34%、64.57%, 平均占氨基酸总量的 65% 以上, 可见橙盖鹅膏菌是一种调鲜与药用氨基酸理想来源的食用菌。

表 4 不同干燥方式样品中必需氨基酸占总氨基酸的质量分数与模式谱比较

Table 4 Mass fractions of essential amino acids in total amino acids in samples under different drying methods compared with the reference spectrum

必需氨基酸	WHO/FAO 模式	全鸡蛋白 模式	质量分数(%)		
			VFD	HAD	ND
苏氨酸Thr*	4	4.7	5.26	4.88	5.39
缬氨酸Val*	5	6.6	3.64	2.71	1.96
蛋氨酸Met*+胱氨酸Cys	3.5	5.7	5.27	5.73	6.22
异亮氨酸Ile*	4	5.4	3.82	4.17	4.17
亮氨酸Leu*	7	8.6	7.25	7.63	7.99
酪氨酸Tyr+苯丙氨酸Phe*	5	9.3	13.70	11.67	10.36
赖氨酸Lys*	5.5	7	4.63	4.71	4.97
Trp*	1	1.7	1.30	1.15	1.44

表 5 橙盖鹅膏菌中必需氨基酸的 AAS、CS、RAA、RC、SRC 和 EAAI 值

Table 5 AAS, CS, RAA, RC, SRC and EAAI values of essential amino acids in *Amanita caesarea*

EAA	VFD				HAD				ND			
	AAS	CS	RAA	RC	AAS	CS	RAA	RC	AAS	CS	RAA	RC
苏氨酸Thr*	131.50	111.91	1.32	1.1	122.00	103.83	1.22	0.99	134.75	114.68	1.35	1.07
缬氨酸Val*	72.80	55.15	0.73	0.56	54.20	41.06	0.54	0.44	39.20	29.70	0.39	0.31
蛋氨酸Met*+胱氨酸Cys	150.57	92.46	1.51	1.16	163.71	100.53	1.64	1.33	177.71	109.12	1.78	1.41
异亮氨酸Ile*	95.50	70.74	0.96	0.73	104.25	77.22	1.04	0.85	104.25	77.22	1.04	0.83
亮氨酸Leu*	103.57	84.30	1.04	0.80	109.00	88.72	1.09	0.89	114.14	92.91	1.14	0.91
酪氨酸Tyr+苯丙氨酸Phe*	274.00	147.31	2.74	2.11	233.40	125.48	2.33	1.90	207.20	111.40	2.07	1.64
赖氨酸Lys*	84.18	66.14	0.84	0.65	85.64	67.29	0.86	0.70	90.36	71.00	0.90	0.72
色氨酸Trp*	130.00	76.47	1.30	1.00	115.00	67.65	1.15	0.93	144.00	84.71	1.44	1.14
AAS平均值	130.27				123.40				126.45			
SRC		51.09				56.05				58.71		
EAAI		119.91				113.87				114.78		

2.3.2 氨基酸营养价值评价 氨基酸的营养价值评价常采用氨基酸比值系数法。以氨基酸平衡理论为基础, 通过目标物质中各必需氨基酸的占比与 WHO/FAO 中相对应的氨基酸模式谱或全鸡蛋白模式谱进行对比, 样品中比例越接近模式谱的营养价值越高。对三种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌中各必需氨基酸的 EAA 值与 WHO/FAO 中相对应的氨基酸模式谱和全鸡蛋白模式谱进行对比, 结果见表 4。在 VFD 中除缬氨酸、异亮氨酸和赖氨酸外, 其余氨基酸均高于 WHO/FAO 模式谱, 只有苏氨酸和酪氨酸+苯丙氨酸高于全鸡蛋白模式。在 HAD 中除缬氨酸和赖氨酸外, 均高于 WHO/FAO 模式谱。在 ND 中只有缬氨酸和赖氨酸低于 WHO/FAO 模式谱。在 HAD 和 ND 中只有苏氨酸、蛋氨酸+胱氨酸和酪氨酸+苯丙氨酸高于全鸡蛋白模式。

根据表 4 中必需氨基酸占总氨基酸的质量分数, 可以计算出三种不同干燥方式橙盖鹅膏菌的 AAS、CS、RAA、RC、SRC 和 EAAI 值, 从而对其营养价值进行评价, 结果见表 5。

AAS 及 RAA 能够反映出食物蛋白质与人体蛋白质构成模式的接近程度, AAS 值越大说明其营养价值越高, 越容易被机体吸收利用。从 AAS 评分来看 VFD>ND>HAD, 各干燥方式中 AAS 最高的为酪氨酸+苯丙氨酸。在三种干燥方式中第一限制性氨基酸均为缬氨酸, 第二限制性氨基酸为赖氨酸。当 RC 大于 1 或小于 1 时, 表示该种必需氨基酸相对过剩或不足, 在 VFD 中 RC 接近 1 的有苏氨酸(RC=1.1)和色氨酸(RC=1.00), 在 HAD 中 RC 接近 1 的有苏氨酸(RC=0.99), 在 ND 中 RC 接近 1 的有苏氨酸(RC=1.07)。SRC 是研究蛋白质结构和功能的重要指标。三种不同干燥方式中 SRC 值为 ND(58.71)>HAD(56.05)>VFD(51.09), SRC 均在 50 以上, 三种干燥方式的样品中必需氨基酸的结构和比例较为合理。EAAI 值均大于 100, 表明三种干燥方式的样品中必需氨基酸含量整体高于标准蛋白质, 营养价值更优。

2.4 脂肪酸的测定分析

对 37 种脂肪酸甲酯混标溶液及其甲酯化后的样品进行分析测定, 37 种脂肪酸甲酯标准溶液参考色谱图见图 1; 供试品溶液色谱图见图 2; 样品中所含有的脂肪酸见表 6。

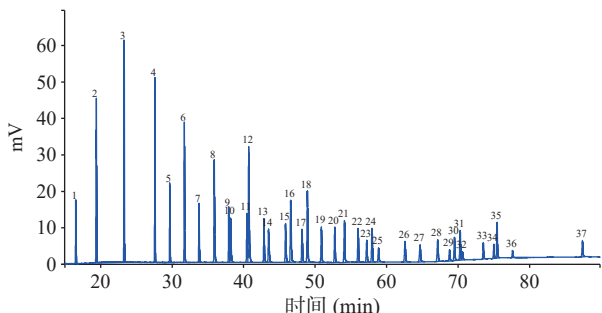


图 1 37 种脂肪酸甲酯标准溶液色谱图

Fig.1 Chromatogram of 37 fatty acid methyl ester standard solutions

注: 图中 1~37 分别对应: 1/C4:0, 2/C6:0, 3/C8:0, 4/C10:0, 5/C11:0, 6/C12:0, 7/C13:0, 8/C14:0, 9/C14:1, 10/C15:0, 11/C15:1, 12/C16:0, 13/C16:1, 14/C17:0, 15/C17:1, 16/C18:0, 17/C18:1n9t, 18/C18:1n9c, 19/C18:2n6t, 20/C18:2n6c, 21/C20:0, 22/C18:3n6, 23/C20:1, 24/C18:3n3, 25/C21:0, 26/C20:2, 27/C22:0, 28/C20:3n6, 29/C22:1n9, 30/C20:3n3, 31/C20:4n6, 32/C23:0, 33/C22:2, 34/C24:0, 35/C20:5n3, 36/C24:1, 37/C22:6n3。

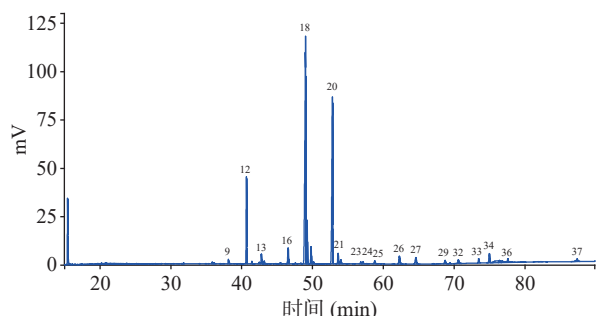


图 2 真空冷冻干燥样品脂肪酸甲酯色谱图

Fig.2 Chromatogram of fatty acid methyl esters in vacuum freeze-dried samples

注: 部分成分信号响应过低, 未完全标注出, 图中数字序号分别对应: 9/C14:1, 12/C16:0, 13/C16:1, 16/C18:0, 18/C18:1n9c, 20/C18:2n6c, 21/C20:0, 23/C20:1, 24/C18:3n3, 25/C21:0, 26/C20:2, 27/C22:0, 29/C22:1n9, 32/C23:0, 33/C22:2, 34/C24:0, 36/C24:1, 37/C22:6n3。

由表 6 可知, 三种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌中共检测出 28 种脂肪酸, 包括 14 种饱和脂肪酸, 6 种单不饱和脂肪酸, 8 种多不饱和脂肪酸。其中 VFD 处理的样品中有 25 种, HAD 中有 19 种, ND 中有 24 种。VFD 有 4 种特有脂肪酸, ND 中有 2 种特有脂肪酸。VFD 处理的样品中含量最高的是二十四碳酸, 其次是顺-9-十八碳一烯酸、顺,顺-9,12-十八碳二烯酸; HAD 和 ND 中含量最高的均为顺-9-十八碳一烯酸, 其次是顺,顺-9,12-十八碳二烯酸、十六碳酸。VFD 处理的橙盖鹅膏菌样品中总脂肪酸含量最高, 达 76287.01±134.96 μg/g; ND 处理的样品中总脂

表 6 三个不同干燥方式的橙盖鹅膏菌中脂肪酸组成及含量

Table 6 Composition and content of fatty acids in *Amanita caesarea* samples subjected to three different drying treatments

脂肪酸	含量(μg/g)		
	VFD	HAD	ND
丁酸	87.06±0.55 ^a	81.61±0.53 ^b	82.89±1.14 ^b
己酸	46.92±0.06 ^a	36.58±0.41 ^b	32.78±0.19 ^c
辛酸	nd	nd	23.51±0.27
十一碳酸	nd	nd	47.85±0.26
十二碳酸	nd	35.90±0.27 ^a	21.75±0.21 ^b
十四碳酸	29.57±0.45 ^c	43.15±0.12 ^b	48.58±0.03 ^a
十五碳酸	181.12±1.26 ^b	106.94±0.16 ^c	279.92±0.58 ^a
十六碳酸	1421.99±0.61 ^c	3683.69±4.70 ^a	2894.90±0.41 ^b
顺-9-十六碳一烯酸	442.43±3.11 ^b	257.75±1.09 ^c	572.86±1.89 ^a
顺-10-十七碳一烯酸	61.46±0.03 ^a	nd	38.33±0.45 ^b
十八碳酸	626.60±5.16 ^c	3122.47±0.09 ^a	1844.74±4.56 ^b
顺-9-十八碳一烯酸	19658.42±73.48 ^c	31591.98±13.64 ^b	34871.57±24.33 ^a
顺,顺-9,12-十八碳二烯酸	12208.16±0.80 ^c	14435.60±75.05 ^b	21482.72±12.91 ^a
二十碳酸	70.71±0.12 ^c	156.22±1.13 ^a	135.20±0.66 ^b
顺-11-二十碳一烯酸	172.25±1.58 ^a	85.48±0.58 ^c	105.32±1.30 ^b
顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸	36.45±0.14	nd	nd
二十一碳酸	41.15±0.20	nd	nd
顺,顺-11,14-二十碳二烯酸	348.48±1.30 ^c	495.18±26.73 ^b	918.08±5.17 ^a
二十二碳酸	71.99±0.08 ^c	162.87±1.50 ^a	101.74±1.39 ^b
顺,顺-8,11,14-二十碳三烯酸	146.78±2.86	nd	nd
顺-13-二十二碳一烯酸	82.04±2.2	nd	nd
顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸	117.34±2.09 ^a	44.12±0.45 ^b	39.83±0.84 ^c
二十三碳酸	468.35±4.60 ^a	nd	37.48±0.61 ^b
顺13,16-二十二碳二烯酸	238.98±0.16 ^a	97.03±0.28 ^b	42.26±0.80 ^c
二十四碳酸	31673.75±63.31 ^a	2505.21±1.63 ^b	1580.47±0.07 ^c
顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸	428.21±0.89 ^b	139.73±0.99 ^c	602.11±2.00 ^a
顺-15-二十四碳一烯酸	545.17±0.43 ^a	nd	390.94±1.04 ^b
顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸	7081.62±5.25 ^a	374.71±2.12 ^b	97.34±1.00 ^c
总计	76287.01±134.96 ^a	57456.25±75.20 ^c	66293.16±16.47 ^b

注: nd为未检测到, 同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异(P<0.05); 表7同。

肪酸含量为 66293.16±16.47 μg/g; HAD 处理的样品中总脂肪酸在三者中最少为 57456.25±75.20 μg/g。三种不同干燥方式的橙盖鹅膏菌中含量最多的为不饱和脂肪酸, VFD 处理的样品脂肪酸含量与种类保存最多, ND 次之。

2.5 挥发性物质的分析

对三种不同方式干燥的橙盖鹅膏菌挥发性成分测定如表 7 所示, 共鉴定出 84 种挥发性成分, 可分为 9 类, 其中包括 12 种醇类、21 种醛类、2 种酸类、7 种酯类、12 种烃类、9 种酮类、9 种杂环类、2 种含硫类、10 种其他类化合物。VFD 中 60 种挥发性成分占总挥发性成分含量的 99.96%, HAD 中 37 种挥发性成分占 100.00%, ND 中 45 种挥发性成分占

表 7 三种不同干燥的橙盖鹅膏菌中挥发性成分及相对含量

Table 7 Volatile components and their relative contents in *Amanita caesarea* subjected to three different drying treatments

序号	类型	化合物	英文名	CAS号	相对含量(%)		
					VFD	HAD	ND
1	醇类	2-乙基己醇	1-Hexanol, 2-ethyl-	104-76-7	0.26±0.02 ^a	0.27±0.09 ^a	0.31±0.05 ^a
2		二甲基硅烷二醇	Silanediol, dimethyl-	1066-42-8	0.07±0.02 ^b	0.14±0.04 ^a	0.03±0.00 ^b
3		正己醇	1-Hexanol	111-27-3	nd	0.19±0.02	nd
4		正辛醇	1-Octanol	111-87-5	nd	0.06±0.00	nd
5		十一醇	1-Undecanol	112-42-5	nd	0.03±0.00	nd
6		异戊醇	1-Butanol, 3-methyl-	123-51-3	nd	0.67±0.05 ^a	0.54±0.05 ^b
7		反-2-辛烯-1-醇	2-Octen-1-ol, (E)-	18409-17-1	nd	0.06±0.01	nd
8		2,6-二甲基-1,3-二恶烷-4-醇	m-Dioxan-4-ol, 2,6-dimethyl-	4740-77-6	nd	nd	0.03±0.00
9		辛醇	3-Octanol	589-98-0	0.2±0.05 ^b	0.57±0.10 ^a	0.25±0.04 ^b
10		2-乙烯氧基乙醇	Ethanol, 2-(vinyl-)-	764-48-7	nd	nd	40.79±1.8
11		2-甲基庚-6-烯-3-醇	2-Methyl-6-hepten-3-ol	78631-45-5	9.15±1.02	nd	nd
12		2-壬烯-4-炔-1-醇	2-Nonen-4-yn-1-ol, (Z)-	134225-90-4	nd	nd	0.03±0.00
13	醛类	苯甲醛	Benzaldehyde	100-52-7	1.73±0.31 ^a	0.35±0.02 ^b	nd
14		2-亚甲基己醛	2-n-Butylacrolein	1070-66-2	1.94±0.08 ^a	0.18±0.03 ^b	nd
15		正戊醛	Pentanal	110-62-3	2.43±0.20 ^a	0.30±0.03 ^c	1.80±0.22 ^b
16		正庚醛	Heptanal	111-71-7	0.56±0.07 ^a	0.18±0.03 ^b	nd
17		癸醛	Decanal	112-31-2	0.04±0.01 ^a	0.03±0.00 ^a	0.04±0.00 ^a
18		2-苯基乙醛	Benzeneacetaldehyde	122-78-1	0.15±0.02 ^b	0.29±0.07 ^a	0.10±0.02 ^b
19		2-甲基戊醛	Pentanal, 2-methyl-	123-15-9	1.24±0.17	nd	nd
20		正丁醛	Butanal	123-72-8	nd	0.21±0.04	nd
21		正辛醛	Octanal	124-13-0	0.42±0.05 ^a	0.36±0.02 ^b	0.40±0.03 ^{ab}
22		正壬醛	Nonanal	124-19-6	0.76±0.04 ^a	0.29±0.03 ^c	0.51±0.04 ^b
23		反-2-壬醛	2-Nonenal, (E)-	18829-56-6	0.05±0.03 ^b	nd	0.11±0.04 ^a
24		3-甲基己醛	Hexanal, 3-methyl-	19269-28-4	nd	nd	0.32±0.04
25		反,反-2,4-癸二烯醛	2,4-Decadienal, (E,E)-	25152-84-5	nd	nd	0.03±0.00
26		E-2-辛烯醛	2-Octenal, (E)-	2548-87-0	0.12±0.04 ^b	nd	0.49±0.03 ^a
27		阿托醛	2-Phenylpropenal	4432-63-7	0.1±0.04 ^{ab}	0.06±0.00 ^b	0.14±0.03 ^a
28		4-甲基-3-戊烯醛	3-Pentenal, 4-methyl-	5362-50-5	0.44±0.06 ^a	nd	0.13±0.03 ^b
29		异戊醛	Butanal, 3-methyl-	590-86-3	12.55±0.11 ^a	8.68±0.73 ^b	6.48±0.93 ^c
30		正己醛	Hexanal	66-25-1	13.16±0.67 ^a	5.49±0.17 ^c	10.27±1.20 ^b
31		反-2-己烯醛	2-Hexenal, (E)-	6728-26-3	0.32±0.04	nd	nd
32		2-十三(碳)烯醛	2-Tridecenal, (E)-	7069-41-2	0.06±0.02	nd	nd
33		异丁醛	Propanal, 2-methyl-	78-84-2	5.15±1.02 ^a	6.70±0.79 ^a	2.15±0.39 ^b
34	酸类	冰醋酸	Acetic acid	64-19-7	nd	0.03±0.00 ^a	0.02±0.00 ^b
35		L-(+)-乳酸	L-Lactic acid	79-33-4	3.34±0.54	nd	nd
36	酯类	碳酸二壬基丙-1-烯-2-基酯	Carbonic acid, decyl prop-1-en-2-yl ester	103-24-2	nd	9.40±0.68	nd
37		辛酸甲酯	Octanoic acid, methyl ester	111-11-5	0.02±0.00 ^a	nd	0.02±0.00 ^a
38		异戊酸甲酯	Methyl isovalerate	556-24-1	0.23±0.03	nd	nd
39		1-甲基-2-氧代-3-环己烯-1-甲酸甲酯	3-Cyclohexene-1-carboxylic acid, 1-methyl-2-oxo-, methyl ester	73611-76-4	0.07±0.03	nd	nd
40		反-2-辛烯酸甲酯	2-Octenoic acid, methyl ester, (E)-	7367-81-9	0.04±0.01 ^a	nd	0.02±0.00 ^b
41		二甲基丙二酸二(3-乙氧基丙基)酯	Dimethylmalonic acid, octadecyl 3-phenylpropyl ester	1619-62-1	2.10±0.15	nd	nd
42		2-环丙基-2-硝基-1-苯基乙醇	2-Cyclopropyl-2-nitro-1-phenyl-ethanol	2566-44-1	nd	nd	0.72±0.10
43	烃类	2,6,10-三甲基十三烷	2,6,10-Trimethyltridecane	3891-99-4	0.01±0.00	nd	nd
44		2,2,4,15,17,17-六甲基-7,12-双(3,5,5-三甲基己基)十八烷	Octadecane,2,2,4,15,17,17-hexamethyl-7,12-bis(3,5,5-trimethylhexyl)-	55470-97-8	nd	12.60±2.98	nd
45		二十一烷	Heneicosane	629-94-7	0.06±0.01 ^a	0.03±0.00 ^b	nd
46		苯乙烯	Styrene	100-42-5	nd	nd	0.54±0.06
47		顺式3-甲基-2-己烯	2-Hexene, 3-methyl-, (Z)-	10574-36-4	0.09±0.02	nd	nd
48		1-辛烯	1-Octene	111-66-0	0.21±0.03 ^c	0.24±0.05 ^b	0.25±0.03 ^a
49		1-十二烯	1-Dodecene	112-41-4	0.04±0.01	nd	nd
50		1-二十二烯	1-Docosene	1599-67-3	nd	nd	0.02±0.00

续表 7

序号	类型	化合物	英文名	CAS号	相对含量(%)		
					VFD	HAD	ND
51		(+)-柠檬烯	D-Limonene	5989-27-5	4.24±0.20 ^a	2.49±0.36 ^b	2.95±0.14 ^b
52		1,3,5,7-环辛四烯	1,3,5,7-Cyclooctatetraene	629-20-9	0.70±0.04 ^a	0.67±0.09 ^a	nd
53		蒎烯	(+)-alpha-Pinene	7785-70-8	0.11±0.02	nd	nd
54		γ -松油烯	gamma-Terpinene	99-85-4	0.09±0.03 ^a	0.07±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a
55	酮类	3-辛酮	3-Octanone	106-68-3	1.37±0.11 ^b	1.12±0.12 ^c	2.83±0.06 ^a
56		2-十一酮	2-Undecanone	112-12-9	0.09±0.02 ^a	nd	0.05±0.01 ^b
57		1-辛烯-3-酮	1-Octen-3-one	4312-99-6	0.42±0.04 ^b	0.29±0.03 ^c	0.64±0.05 ^a
58		2,3-丁二酮	2,3-Butanedione	431-3-8	nd	nd	0.55±0.05
59		2-己酮	2-Hexanone	591-78-6	nd	nd	0.71±0.0
60		2-(2-氧代丙基)环戊酮	2-Acetonylecyclopentanone	60415-94-3	0.08±0.03 ^a	nd	0.06±0.01 ^a
61		2-癸酮	2-Decanone	693-54-9	0.03±0.02	nd	nd
62		苯乙酮	Acetophenone	98-86-2	0.04±0.01	nd	nd
63		9-氧杂双环[4.2.1]壬-7-烯-4-酮	9-Oxabicyclo[4.2.1]non-7-en-3-one	76400-39-0	5.03±0.15	nd	nd
64	杂环类	2-戊基呋喃	Furan, 2-pentyl-	3777-69-3	nd	0.96±0.06 ^b	2.14±0.16 ^a
65		2-庚基呋喃	2-n-Heptylfuran	3777-71-7	0.01±0.00	nd	nd
66		2-丁基呋喃	2-n-Butyl furan	4466-24-4	0.45±0.02	nd	nd
67		辛基环丙烷	Cyclopropane, octyl-	1472-9-9	nd	nd	0.02±0.00
68		2-庚基环氧乙烷	1,2-Epoxyonane	28114-20-7	nd	nd	22.31±1.16
69		十二甲基环六硅氧烷	Cyclohexasiloxane, dodecamethyl-	540-97-6	0.05±0.00	nd	nd
70		环五聚二甲基硅氧烷	Cyclopentasiloxane, decamethyl-	541-2-6	0.05±0.01 ^a	nd	0.02±0.00 ^b
71		八甲基环四硅氧烷	Cyclotetrasiloxane, octamethyl-	556-67-2	0.04±0.00	nd	nd
72		1-甲基-4-(2-甲基环氧乙烷基)-7-氧杂双环[4.1.0]庚烷	7-Oxabicyclo[4.1.0]heptane, 1-methyl-4-(2-methyloxiranyl)-	96-08-2	0.03±0.00	nd	nd
73	含硫类	二甲基三硫	Dimethyl trisulfide	3658-80-8	0.12±0.03	nd	nd
74		二甲基二硫醚	Disulfide, dimethyl	624-92-0	0.72±0.05	nd	nd
75	其他类	八甘醇单十二烷基醚	Octaethylene glycol monododecyl ether	3055-98-9	8.62±0.97	nd	nd
76		邻-正丙基羟胺	o-n-Propylhydroxylamine	5792-43-8	nd	36.31±2.49	nd
77		乙苯	Ethylbenzene	100-41-4	0.32±0.04 ^a	0.20±0.03 ^a	0.26±0.09 ^a
78		2H-1b,4-Ethanopentaleno[1,2-b]oxirene,hexahydro-,(1a-alpha-,1b-bta-,4-bta-,4a-alpha-,5a-alpha-)-(9CI)	2H-1b,4-Ethanopentaleno[1,2-b]oxirene,hexahydro-,(1a-alpha-,1b-bta-,4-bta-,4a-alpha-,5a-alpha-)-(9CI)	117221-80-4	0.02±0.00 ^b	nd	0.04±0.00 ^a
79		邻-异丙基苯	o-Cymene	527-84-4	0.10±0.04	nd	nd
80		羟胺	Hydroxylamine	7803-49-8	nd	9.90±0.88	nd
81		2-氨基乙基异丙醚	2-Isopropoxyethylamine	81731-43-3	19.33±1.23	nd	nd
82		邻二甲苯	o-Xylene	95-47-6	0.56±0.07 ^a	0.45±0.06 ^{ab}	0.42±0.03 ^b
83		1,1-双十二烷基氧基十六烷	Hexadecane, 1,1-bis(dodecyloxy)-	56554-64-4	0.30±0.08 ^a	0.04±0.00 ^b	0.35±0.02 ^a
84		十二甲基二氢六硅氧烷	Hexasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11-dodecamethyl-	995-82-4	0.02±0.00 ^a	nd	0.01±0.00 ^b
总计		-	-	-	99.96±0.01 ^a	100.00±0.02 ^a	100.00±0.03 ^a

100.00%。VFD 中相对含量最高的物质为 2-氨基乙基异丙醚,其次为正己醛、异戊醛;HAD 中相对含量最高的物质为邻-正丙基羟胺,其次为 2,2,4,15,17,17-六甲基-7,12-双(3,5,5-三甲基己基)十八烷、羟胺;ND 中相对含量最高的物质为 2-乙烯氧基乙醇,其次为 2-庚基环氧乙烷、正己醛。

三种不同干燥方式橙盖鹅膏菌中各类物质占比如图 3(a)所示,其中 VFD 中相对含量最高的为醛类(41.22%),其次是其他类(29.27%);在 HAD 中相对含量最高的是其他类(46.90%),其次是醛类(23.13%);在 ND 中相对含量最高的是醇类(41.98%),其次是杂环类(24.49%)和醛类(22.97%)。

从图 3(a)可见,醇类、醛类和其他类为 VFD 的主要组成成分,占总含量的 80.17%;醛类、烃类和其他类为 HAD 的主要组成成分,占总含量的 86.13%;醇类、醛类和杂环类为 ND 的主要组成成分,占总含量的 89.44%。

由图 3(b)可知,VFD 干燥处理的样品中挥发性成分最多,达 60 种,其次是 ND、HAD 处理,分别鉴定出 45 种和 37 种挥发性成分。在 VFD 处理的样品中,醛类物质种类最多,有 18 种,其次是烃类有 9 种,其他类有 8 种;在 HAD 处理的样品中,醛类物质种类最多,有 13 种,其次是醇类有 8 种,烃类有 6 种;在 ND 处理的样品中,也是醛类物质种类最多,

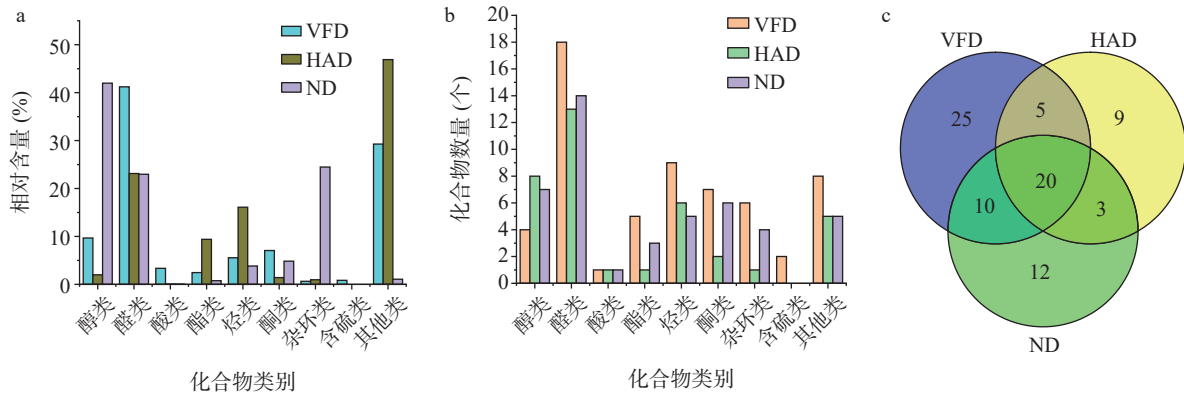


图 3 不同干燥样品挥发性成分组成含量(a)、个数(b)和韦恩图(c)

Fig.3 Composition content (a), number (b), and Venn diagram (c) of volatile components in samples subjected to different drying treatments

有 14 种, 其次是醇类有 7 种, 酮类有 6 种。由图 3(c) 可知, ND 有 12 种特有成分, HAD 有 9 种特有成分, VFD 有 25 种特有成分。84 种挥发性成分中, 有 20 种均能在三种干燥处理的样品中检测到, 分别是异丁醛、异戊醛、正戊醛、二甲基硅烷二醇、1,1-双十二烷氧基十六烷、1-辛烯、正己醛、乙苯、邻二甲苯、1-辛烯-3-酮、3-辛酮、辛醇、正辛醛、(+)-柠檬烯、2-乙基己醇、2-苯基乙醛、 γ -松油烯、正壬醛、阿托醛、癸醛。

2.5.1 不同干燥橙盖鹅膏菌中挥发性化合物主成分分析 PCA 是一种基于正交变换的多元统计分析方法, 其核心目标是通过线性投影将高维定量数据降维至低维空间, 该方法通过提取少数几个相互正交的主成分, 根据这些主成分在不同样本中的贡献率评价样本之间的规律性和差异性。它可以直观地显示不同样品之间的差异, 样本距离越大, 样本差异越明显。将 3 种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌中挥发性物质相对含量进行 PCA 处理, 结果如图 4 所示, PCA 将 3 种干燥的样品分在 3 个象限, 其中 ND 分布在第一象限, VFD 分布在第三象限, HAD 分布在第四象限。三组干燥处理的样品间相距较大, 这代表三种不同干燥的样品中挥发性成分差异性较大, 样品在干燥过程中挥发性成分含量与干燥的时间、温度、速率及

在介质中扩散系数有关, 样品受到不同温度、氧气浓度、光照等因素的影响, 导致其发生不同的反应, 如美拉德反应、脂质氧化反应以及前体物质的降解和转化, 从而使橙盖鹅膏菌中的挥发性成分种类和含量发生不同的变化^[32]。

2.5.2 不同干燥处理橙盖鹅膏菌挥发性成分 OPLS-DA 及 VIP 分析 以 84 种挥发性化合物作为因变量, 不同干燥方式作为自变量, 通过 OPLS-DA (图 5A), 可以实现 3 种不同干燥处理的橙盖鹅膏菌样品有效区分。本次分析中的自变量拟合指数(R_x^2)为 0.986, 因变量拟合指数(R_y^2)为 0.998, 模型预测指数(Q^2)为 0.996, R^2 和 Q^2 越接近 1 说明模型的拟合度和预测能力越好^[33]。经过 200 次置换检验, 如图 5B 所示, Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0, 表示模型可靠且无过拟合现象, 具有良好的可靠性与预测性。样品在得分散点图的横轴上实现了区分, 分离趋势明显, 且组内重复性良好。其中 VFD、HAD、ND 样品分别集中于第一、三、四象限, 表明三种干燥处理的样品间挥发性成分存在一定区别。

利用 OPLS-DA 形成的 VIP 值的大小进行关键变量分析, 一般来说, VIP 值越大的变量对模型贡献率越大。以 VIP 值>1 为界限得到 2-乙烯氧基乙醇、邻-正丙基羟胺、2-庚基环氧乙烷、2-氨基异丙醚、2,2,4,15,17,17-六甲基-7,12-双(3,5,5-三甲基己基)十八烷、羟胺、2-甲基庚-6-烯-3-醇、碳酸二壬基丙-1-烯-2-基酯、八甘醇单十二烷基醚、正己醛、异戊醛、9-氧杂双环 [4.2.1] 任-7-烯-4-酮、异丁醛、L-(+)-乳酸(图 5C)是三种不同干燥处理中差异贡献最大的挥发性成分。其中 2-氨基异丙醚(19.33%)、2-甲基庚-6-烯-3-醇(9.15%)、八甘醇单十二烷基醚(8.62%)、9-氧杂双环 [4.2.1] 任-7-烯-4-酮(5.03%)、L-(+)-乳酸(3.34%)是 VFD 中独有成分; 邻-正丙基羟胺(36.31%)、2,2,4,15,17,17-六甲基-7,12-双(3,5,5-三甲基己基)十八烷(12.60%)、羟胺(9.90%)、碳酸二壬基丙-1-烯-2-基酯(9.40%)是 HAD 中独有成分; 2-乙烯氧基乙醇(40.79%)、2-庚基环氧乙烷(22.31%)是 ND 中独有成分。14 种关键变量挥发性物质为区分

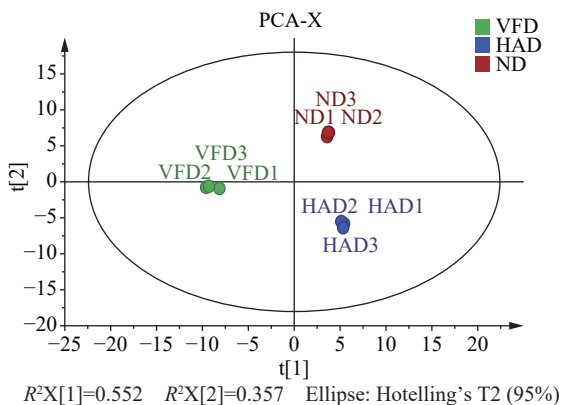


图 4 PCA 得分图

Fig.4 PCA score plot

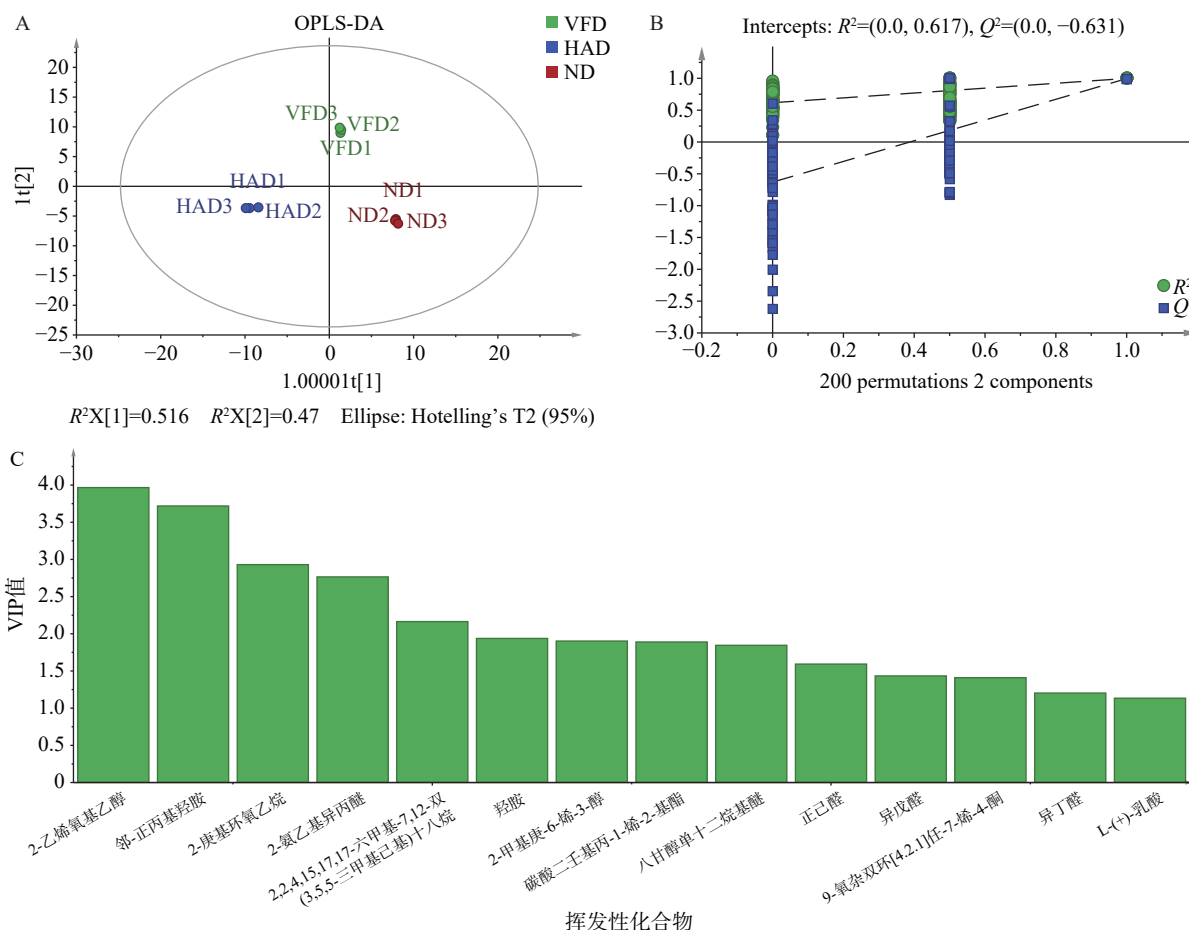


图5 样品的 OPLS-DA 得分图(A)、模型交叉验证结果图(B)和 VIP 值图(C)

Fig.5 Sample OPLS-DA score (A), model cross validation result graph (B), and VIP value graph (C)

橙盖鹅膏菌不同干燥方式选择的主要特征标志物,能够有效、全面、客观地对橙盖鹅膏菌不同干燥方法进行区分和评价。可见 VFD 对橙盖鹅膏菌样品中挥发性成分的种类与含量保留效果最好。

3 结论

不同干燥方式(真空冷冻干燥、热风干燥、自然晾晒干燥)对橙盖鹅膏菌的蛋白质、糖类、核黄素、矿物质、氨基酸、挥发性物质和脂肪酸有显著($P<0.05$)影响。其中真空冷冻干燥的橙盖鹅膏菌中粗蛋白、总糖、核黄素含量均显著($P<0.05$)高于热风干燥和自然晾晒干燥组。且不同的干燥对核黄素含量的影响很大,其在真空冷冻干燥中保留最佳。对于矿物质, Ca 在热风干燥中含量最高, Fe、Na、Mg、Zn 和 Mn 在真空冷冻干燥中含量最高, Cd 在热风干燥下含量最低。VFD 和 ND 中总氨基酸含量无显著差异,但均显著($P<0.05$)高于 HAD 处理的样品,从氨基酸评分及必需氨基酸指数来看均为 VFD>ND>HAD。挥发性物质的测定中, VFD 样品中共检测出 9 类 60 种挥发性化合物,涵盖醇类 4 种、醛类 18 种、酸类 1 种、酯类 5 种、烃类 9 种、酮类 7 种、杂环类 6 种、含硫类 2 种、其他类 8 种, HAD 样品中共检测出 8 类 37 种挥发性化合物,涵盖醇类 8 种、醛类 13 种、酸类 1 种、酯类 1 种、烃类 6 种、酮类

2 种、杂环类 1 种、其他类 5 种, ND 样品中共检测出 8 类 45 种挥发性化合物,涵盖醇类 7 种、醛类 14 种、酸类 1 种、酯类 3 种、烃类 5 种、酮类 6 种、杂环类 4 种、其他类 5 种,可见 VFD 中所含挥发性物质种类最多,其次是 ND、HAD。不同干燥中脂肪酸种类及含量均为 VFD>ND>HAD。

综上所述,真空冷冻干燥对橙盖鹅膏菌的基本营养成分及挥发性物质保留效果最佳。本研究从基本营养成分(蛋白质、糖类、矿物质、氨基酸、脂肪酸等)和挥发性物质的角度,分析了不同干燥方式对橙盖鹅膏菌营养成分间的差异影响,为橙盖鹅膏菌干燥方式的选择提供了依据。

© 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] 罗禹,袁小红,高平.橙盖鹅膏菌子实体化学成分研究[J].中药材,2016,39(1):107-109. [LUO Yu, YUAN Xiaohong, GAO Ping. Chemical constituents from fruiting bodies of *Amanita caesarea*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(1): 107-109.]
 [2] 谢龙珠,高飞,张蕾.深度学习模型法鉴别橙盖鹅膏菌[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2022,22(7):53-61. [XIE Longzhu, GAO Fei, ZHANG Lei. Identification of *Amanita cae-*

- sarea by deep learning model[J]. Journal of Jixi University, 2022, 22(7): 53-61.]
- [3] 李志平. 橙盖鹅膏菌对阿尔兹海默症的治疗作用及机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018. [LI Zhiping. Protective effects and mechanisms of *Amanita caesarea* in experimental Alzheimers disease animal model[D]. Changchun: Jilin University, 2018.]
- [4] DOĞAN H H, AKBAŞ G. Biological activity and fatty acid composition of Caesar's mushroom[J]. Pharmaceutical Biology, 2013, 51(7): 863-871.
- [5] 侯会, 陈鑫, 方东路, 等. 干燥方式对食用菌风味物质影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4877-4883. [HOU Hui, CHEN Xin, FANG Donglu, et al. Research progress on influence of drying methods on flavor compounds of edible fungus [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(15): 4877-4883.]
- [6] CHANG C K, CHENG K C, HOU C Y, et al. Development of active packaging to extend the shelf life of *Agaricus bisporus* by using plasma technology[J]. Polymers, 2021, 13(13): 2120.
- [7] ZHANG Kexin, PU Yuanyuan, SUN Dawen. Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 72-82.
- [8] 陈万超, 李文, 吴迪, 等. 基于成分轮廓数据的大球盖菇干制风味品质综合分析评价[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 311-319. [CHEN Wanchao, LI Wen, WU Di, et al. Comprehensive analysis and evaluation of flavor quality of dried *Stropharia rugosoannulata* based on component profile data[J]. Food Science, 2023, 44(6): 311-319.]
- [9] ZHANG L H, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Development of flavor during drying and applications of edible mushrooms: A review[J]. Drying Technology, 2021, 39(11): 1685-1703.
- [10] 刘芹, 胡素娟, 崔筱, 等. 不同干燥温度对金针菇菇根挥发性特征和口感特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 104-113. [LIU Qin, HU Sujuan, CUI Xiao, et al. Effect of drying temperature on the volatile profile and taste properties of *Flammulina velutipes* root[J]. Food Science, 2023, 44(7): 104-113.]
- [11] 李文, 杨焱, 陈万超, 等. 不同干燥方式对香菇含硫风味化合物的影响[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 71-79. [LI Wen, YANG Yan, CHEN Wanchao, et al. Effect of drying method on sulfur-containing components in *Lentinula edodes*[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 71-79.]
- [12] TIAN Shuge, JIANG Xiangdong. Determination of the total composition in Gallic residue[J]. Advances in Engineering Technology Research, 2022, 1(1): 36.
- [13] YUE Fangfang, ZHANG Jinrui, XU Jiabin, et al. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 963318.
- [14] 梁萌, 郭玉秋, 杨志强, 等. 碱溶液和纤维测定仪对粗纤维含量检测的影响研究[J]. 中国饲料, 2021(15): 68-71. [LIANG Meng, GUO Yuqiu, YANG Zhiqiang, et al. Study on the effects of alkali solutions and fiber analyzers on the determination of crude fiber content[J]. China Feed, 2021(15): 68-71.]
- [15] KONG Xianghe, REN Guangxi, XU Yubin, et al. Evaluation of nutritional value of *Bambusae Concretio Silicea* based on content of 15 amino acids[J]. Zhongguo Zhongyao Zazhi, 2024, 49(7): 1809-1817.
- [16] 吕浩宇. 碱水解-分光光度法测定食品中的色氨酸含量[J]. 现代食品, 2022, 28(4): 161-164. [LÜ Haoyu. Determination of tryptophan in food by alkali hydrolysis-spectrophotometry[J]. Modern Food, 2022, 28(4): 161-164.]
- [17] SELIGSON F H, MACKEY L N. Variable predictions of protein quality by chemical score due to amino acid analysis and reference pattern[J]. The Journal of Nutrition, 1984, 114(4): 682-691.
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization, United Nations University. Protein and amino acid requirements in human nutrition; Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007.
- [19] OSER B L. Method for integrating essential amino acid content in the nutritional evaluation of Protein[J]. Journal of the American Dietetic Association, 1951, 27(5): 396-402.
- [20] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价: 氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988, 10(2): 187-190. [ZHU Shengtao, WU Kun. Nutritional evaluation of protein; Ratio coefficient of amino acid[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1988, 10(2): 187-190.]
- [21] UGUR Y, KARAASLAN-AYHAN N, ICEN M S, et al. Determination of fatty acids in *Allium tuncelianum* (Tunceli garlic) by gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID)[J]. Instrumentation Science & Technology, 2022, 50(3): 233-239.
- [22] HUNG N K, TRANG N P, DU N H. Determination of saturated fat, unsaturated fat, and trans fat in commercial instant noodles based on the analysis of fatty acid composition by gas chromatography[J]. Vietnam Journal of Chemistry, 2023, 61(S2): 143-148.
- [23] GAO Hu, YANG Fang, ZHU Bangqiang, et al. Optimization of HS-SPME-GC-MS for the determination of volatile flavor compounds in Ningxiang pork[J]. Foods, 2023, 12(2): 297.
- [24] 许斌, 朱雨婷, 扎罗, 等. 西藏黄蘑菇干制品质分析[J]. 食用菌, 2019, 41(5): 68-71, 74. [XU Bin, ZHU Yuting, ZHALUO, et al. Analysis of dried quality of *Armillaria luteo-virens* from Tibet Plateau[J]. Edible Fungi, 2019, 41(5): 68-71, 74.]
- [25] ZHANG Man, XING Suhui, FU Cuncun, et al. Effects of drying methods on taste components and flavor characterization of *Cordyceps militaris*[J]. Foods, 2022, 11(23): 3933.
- [26] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 等. 食用菌风味物质及其在美拉德反应中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 188-193. [LIU Peiji, CUI Wenjia, WANG Wenliang, et al. Research progress of edible fungi flavor substances and their application in Maillard reaction[J]. Food Research and Development, 2020, 41(15): 188-193.]
- [27] ASTANOV S, SHARIPOV M Z, FAYZULLAEV A R, et al. Spectroscopic study of photo and thermal destruction of riboflavin[J]. Journal of Molecular Structure, 2014, 1071: 133-138.
- [28] WEAVER C M. Potassium and health[J]. Advances in Nutrition, 2013, 4(3): 368S-377S.
- [29] 郑晓敏, 郭宇, 田慧鑫, 等. 2 种干燥方式对鸡油菌氨基酸和矿物质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 146-149. [ZHENG Xiaomin, GUO Yu, TIAN Huixin, et al. Effect of two drying methods on amino acids and minerals of chanterelle[J]. The Food Industry, 2020, 41(12): 146-149.]
- [30] BI Yanxiang, NI Jiabao, XUE Xiaofeng, et al. Effect of different drying methods on the amino acids, α -dicarbonyls and volatile compounds of rape bee pollen[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(1): 517-527.
- [31] LI Xiaobei, FENG Tao, ZHOU Feng, et al. Effects of drying methods on the tasty compounds of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 358-364.
- [32] DENG Yun, LUO Yali, WANG Yuegang, 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.
- [33] DOU Xinjing, ZHANG Liangxiao, YANG Ruinan, et al. Adulteration detection of essence in sesame oil based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131373.