徐叶文, 朱峰豆, 孙丽平, 等. 不同预处理方式辅助真空冷冻干燥对鸡油菌品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 156−166. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060105
XU Yewen, ZHU Fengdou, SUN Liping, et al. Effect of Vacuum Freeze-drying Assisted by Different Pretreatment Methods on the Quality of Chanterelles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 156−166. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060105

·研究与探讨·

# 不同预处理方式辅助真空冷冻干燥对鸡油菌品质的影响

徐叶文[1], 朱峰豆[1], 孙丽平[1], 庄永亮[1,2,3], 顾　颖[1], 丁阳月[1], 樊雪静[1,*]
（1.昆明理工大学食品科学与工程学院, 云南昆明 650500;
2.云南省木本油料技术创新中心, 云南昆明 650201;
3.云南省高原特色食品预制化重点实验室, 云南昆明 650500）

**摘　要:** 为探究不同预处理方式对真空冷冻干燥鸡油菌干燥速率与品质的影响，本研究系统比较微波预处理（Microwave Pretreatment，MP）、漂烫预处理（Blanching Pretreatment，BP）、渗透预处理（Osmotic Pretreatment，OP）和热风预处理（Hot Air Pretreatment，HP）四种预处理方式对真空冷冻干燥鸡油菌干燥特性、微观结构、复水率、色差、总酚和总黄酮含量、抗氧化能力、游离氨基酸含量及挥发性风味的影响。结果表明，与空白对照（Control）干燥 16 h 相比，MP、BP、OP 和 HP 的干燥时间分别缩短至 13、11、11 和 13 h，MP、BP 和 OP 对鸡油菌细胞结构破坏严重，总酚和总黄酮含量、抗氧化能力和游离氨基酸总量均下降，但 HP 组织结构仍较为完整，且总酚、DPPH 自由基清除能力、$ABTS^{+}$自由基清除能力和游离氨基酸总量分别增加 12.33%、30.38%、51.15% 和 59.86%。此外，HP、BP 和 OP 的挥发性风味成分种类分别增加 8 种、4 种和 4 种，但 MP、BP 和 OP 的挥发性风味总量有所降低，仅有 HP 的挥发性风味总量增加，重要风味组成如 1-辛烯-3-醇、反-2-辛烯醛及 2-戊基呋喃的含量分别增加 13.32%、332.03% 和 184.44%。干燥后 HP 和 MP 的复水性和色差优于 BP 和 OP。因此，HP 是一种更适宜真空冷冻干燥鸡油菌的预处理方式，为干制食用菌的品质优化和工业开发提供了参考。

**关键词:** 鸡油菌, 预处理, 干燥方式, 品质特性, 营养价值
**中图分类号:** TS219　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0156−11
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025060105
本文网刊:

# Effect of Vacuum Freeze-drying Assisted by Different Pretreatment Methods on the Quality of Chanterelles

**XU Yewen[1], ZHU Fengdou[1], SUN Liping[1], ZHUANG Yongliang[1,2,3], GU Ying[1], DING Yangyue[1], FAN Xuejing[1,*]**
（1.Faculty of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2.Yunnan Technology Innovation Center of Woody Oil, Kunming 650201, China;
3.Yunnan Key Laboratory of Plateau Food Advanced Manufacturing, Kunming 650500, China）

**Abstract:** To investigate the effects of different pretreatment methods on the drying rate and quality of vacuum freeze-drying chanterelles, this study systematically compared four techniques: microwave pretreatment (MP), blanching pretreatment (BP), osmotic pretreatment (OP), and hot air pretreatment (HP). The effects of these pretreatments were evaluated based on several indicators, including drying characteristics, microstructure, rehydration capacity, color difference, total phenol and flavonoid content, antioxidant capacity, free amino acid content, and volatile flavor composition. The results demonstrated that compared to the control group (which required 16 hours of drying), the drying durations of MP, BP, OP, and HP were shortened to 13, 11, 11, and 13 hours, respectively. MP, BP, and OP significantly damaged the cellular struc-

**收稿日期:** 2025−06−11
**基金项目:** 云南省基础研究计划项目（202301AU070032, 202201BE070001-051）; 云南省高层次科技人才和创新团队专项项目（202405AS350005）。
**作者简介:** 徐叶文（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: Hoshinochi@163.com。
*** 通信作者:** 樊雪静（1991−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品科学, E-mail: fanxuejing@kust.edu.cn。

ture of chanterelles, resulting in reduced levels of total phenols, total flavonoids, antioxidant activity, and free amino acids. In contrast, HP better preserved the tissue structure and led to increases in total phenol content, DPPH radical scavenging activity, $ABTS^{+}$ radical scavenging activity, and free amino acid content by 12.33%, 30.38%, 51.15%, and 59.86%, respectively. Furthermore, the number of volatile flavor compounds increased by 8, 4, and 4 types in the HP, BP, and OP groups, respectively. However, the total content of volatile flavor compounds declined in MP, BP, and OP, with only HP exhibiting an overall increase. Notably, key flavor constituents such as 1-octene-3-ol, trans-2-octenal, and 2-pentylfuran increased by 13.32%, 332.03%, and 184.44%, respectively. In terms of product quality, the rehydration capacity and color retention of chanterelles subjected to HP and MP were superior to those treated with BP and OP. Overall, hot air pretreatment (HP) emerged as the more effective pretreatment method for vacuum freeze-drying chanterelles, providing a valuable reference for improving the quality and industrial processing of dried edible fungi.

**Key words:** chanterelle; pretreatment; drying methods; quality characteristics; nutritional value

鸡油菌（*Cantharellus cibarius*）属于鸡油菌科鸡油菌属真菌，是全球六大著名菌根性食用菌之一，常见于欧洲、北美和亚洲地区，多收获于夏秋季节[1]。具有独特的杏香味，色泽呈黄色或橙色，口感脆嫩可口，含有多种矿物质、维生素和活性成分等，具有很高的营养价值[2]。根据研究报道，鸡油菌具有潜在的抗氧化、抗菌、抗炎症、抗高血压和抗癌作用[3]。但新鲜鸡油菌含水量较高，酶活性与化学反应速率等也都处于较高水平[4]，且鸡油菌肉质娇嫩，易产生机械损伤，伤口极易感染从而引起风味和营养的损失，甚至造成腐败溃烂，导致鸡油菌品质下降。因此，对新鲜鸡油菌进行二次加工，可以保留鸡油菌的营养成分和功能活性，同时减少商业价值损失。

干燥作为一种常用的食品加工方法，可以延长食物保质期，降低包装和运输成本。真空冷冻干燥作为干燥技术的一种，其原理是通过预冻将物料中的游离水变为固体，然后在真空环境中使冰晶升华，以此降低物料水分含量[5]。该方法能最大限度保留产品的色泽、形状、风味和营养成分等。但是真空冷冻干燥效果受冷阱温度、真空度、物料自身性质、物料厚度等多种因素的影响，存在干燥时间过长，能耗高、费用昂贵等缺点。有研究表明，预处理可以改变食品的组织结构，提高真空冷冻干燥的效率和品质等[6]。因此预处理成为了改善真空冷冻干燥品质的有效措施之一。常见的预处理有冻融、超声、打孔、微波、盐渗和多方式联合等。Wang 等[7] 研究了冻融预处理对真空冷冻干燥枸杞品质的影响，发现冻融处理可以有效缩短干燥时间，改善冻干枸杞品质。Zhang 等[8] 发现，草莓片经过超声预处理后再真空冷冻干燥，可以使草莓片组织结构更加均匀，干燥时间缩短，降低干制品吸湿性等。Cai 等[9] 的研究表明适当的焯烫预处理结合真空冷冻干燥有助于提高冻干百合球茎的品质。但不同预处理辅助真空冷冻干燥对鸡油菌品质影响的研究鲜有报道。

本研究以云南野生鸡油菌为试验对象，采用微波预处理（Microwave Pretreatment, MP）、漂烫预处理（Blanching Pretreatment, BP）、渗透预处理（Osmotic Pretreatment, OP）和热风预处理（Hot Air Pretreatment, HP）四种预处理方式辅助真空冷冻干燥，并与无预处理的空白对照组（Control）进行比较，分析不同预处理对干制鸡油菌干燥特性、微观结构、复水能力、色差、总酚和总黄酮含量、抗氧化能力、游离氨基酸含量及挥发性风味成分的影响，筛选出适合鸡油菌冷冻干燥的预处理工艺，并为其他食用菌的真空冷冻干燥提供理论依据与技术参考。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

鸡油菌（选取已成熟的鸡油菌，菌盖边缘略内卷，菌褶全部伸直，菌盖开伞度 8~9 分，水分含量 91.55%±0.65%）　云南木水花野生菌交易中心；氯化钠　食品级，北京华兴食品商贸有限公司；氢氧化钠、甲醇、无水乙醇　分析纯，天津市风船化学试剂科技有限公司；芦丁标准品　北京索莱宝科技有限公司；没食子酸、福林酚、硝酸铝、2,2-联苯基-1-苦基肼基、2,2'-联氨-双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二胺（分析纯）、邻二氯苯（色谱纯）　上海麦克林生化科技股份有限公司；亚硝酸钠　分析纯，西陇科学股份有限公司；碳酸钠　分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；磺基水杨酸　分析纯，天津市光复科技发展有限公司；氨基酸标准品　美国 Sigma 公司。

101A-1E 电热鼓风干燥箱　上海实验仪器厂有限公司；GL-20G-C 高速冷冻离心机　上海安亭科学仪器厂；LC-12N-50A 真空冷冻干燥机、HH-8 数显恒温水浴锅　上海力辰邦西仪器科技有限公司；M1-L213B 微波炉　美的厨房电器制造有限公司；Na 型阳离子树脂层析柱（200 mm×4.6 mm×8 μm）、Biochrom 30+氨基酸自动分析仪　英国柏楉有限公司；ZG-TP203 松竮精密天平　上海然浩电子有限公司；UV-6100 型紫外可见分光光度计　上海美谱达仪器有限公司；SB-5200D 超声波清洗机　宁波新芝生物科技股份有限公司；CR-400 色差计　日本柯尼卡美能达公司；Oxford Quorum SC7620 离子溅射镀膜仪　英国 Quorum 公司；Regulus 8100 扫描电子显微镜　日本日立高新技术公司；HP-5MS 毛细色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）　美国安捷伦公司；GCMS-QP2010 ultra 气相色谱-质谱联用仪　日本岛津公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 鸡油菌的预处理及干燥 新鲜鸡油菌洗干净后擦去表面水分并分为 5 组, 每组三份, 每份 40 g, 分别命名为空白对照组(Control)、微波预处理(Microwave Pretreatment, MP)、漂烫预处理(Blanching Pretreatment, BP)、渗透预处理(Osmotic Pretreatment, OP)和热风预处理(Hot Air Pretreatment, HP)。预处理完成后, 将样品置于−20 ℃ 环境中预冻 12 h, 随后利用真空冷冻干燥机进行干燥处理。冷冻干燥过程的参数为: 冷阱温度−60 ℃, 真空度低于 15 Pa。样品含水量低于 12 g/100 g 时达到干燥终点。各预处理方式的具体操作如下所示: Control: 将上述干净鸡油菌均匀铺置容器内, 置于−20 ℃ 环境中预冻 12 h, 而后进行真空冷冻干燥。MP: 参考朱彩平等[10] 的方法进行微波处理, 并稍作修改。将鸡油菌铺置于皿中, 利用微波炉进行预处理, 微波功率设定为 5.25 W/g, 处理时间为 2 min。BP: 参考 Mirzaei-Baktash 等[11] 的方法对鸡油菌进行漂烫处理, 漂烫温度 80 ℃, 漂烫时间 3 min。OP: 参考 Darishi 等[12] 的方法进行渗透处理, 将鸡油菌与 7% 的 NaCl 溶液按照 1∶5(g/mL)的质量比进行处理, 渗透溶液温度为 46 ℃, 渗透时间 85 min, 保持每 30 min 一次的搅拌频率以抵消渗透过程中产生的传质阻力[13]。在达到规定渗透时间后, 快速捞出并冲洗样品, 用吸水纸轻轻吸干表面水分。HP: 参考 Sun 等[14] 的方法进行热风预处理。将鸡油菌均匀铺置于干燥箱托盘上, 避免交叠, 热风干燥预处理的温度和时间分别设置为 60 ℃ 和 30 min。

1.2.2 水分比与干燥速率的测定 干燥过程中每 2 h 进行一次称重, 直至水分降至 12 g/100 g 时结束干燥。水分比 MR(Moisture Ratio)与干燥速率 DR(Drying Rate)的计算参考 Wang 等[7] 的方法, 其中干燥速率 DR 单位以 g/(g·h)表示:

$$MR=\frac{m_t}{m_0}$$

式中: $m_t$ 为 t 时刻的干基含水量(g/100 g), $m_0$ 为初始干基含水量(g/100 g)。

$$DR=\frac{m_t-m_{t+\Delta t}}{\Delta t}\times 100$$

式中: $m_t$ 和 $m_{t+\Delta t}$ 分别为 t 时刻与 t+Δt 时刻的干基含水量(g/100 g), t 为时间(h), Δt 为时间差(h), 100 为换算系数。

1.2.3 微观结构的测定 鸡油菌干制品纵向剖开后将菌伞横断面向上粘贴至样品台上, 用离子溅射镀膜仪进行镀金处理, 并在 1000×的放大倍率下观察干燥鸡油菌的微观结构。

1.2.4 复水率的测定 参考吴坤龙等[15] 的方法进行复水率的测定, 具体如下: 称取 2 g 干制品浸入 100 mL 的水中, 水温 50 ℃, 每半个小时测定一次, 测定前用吸水纸去除表面水分, 直至恒重, 记录恒重质量, 并利用下式进行复水率的计算。

$$R_R=\frac{W_1}{W_2}\times 100$$

式中: $R_R$ 为复水率(%), $W_1$ 为复水后样品恒重的质量(g), $W_2$ 为干制样品的质量(g)。

1.2.5 色差的测定 使用色差计测定新鲜鸡油菌和不同预处理真空冷冻干燥鸡油菌的表面颜色, 每个样品选定不同的菌伞外表面进行测定。测定指标主要包括 $L^*$、$a^*$、$b^*$和总色差 $\Delta E$。$\Delta E$ 的计算公式如下:

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2}$$

式中: $L_0^*$, $a_0^*$, $b_0^*$和 $L^*$, $a^*$, $b^*$分别代表新鲜和干燥鸡油菌的亮暗度, 红绿度值和黄蓝度值。

1.2.6 抗氧化活性测定

1.2.6.1 提取液的制备 干燥鸡油菌粉碎后过 40 目筛, 精确称取 1.50 g 样品, 加入 45 mL 85% 的甲醇并使用超声仪辅助提取, 提取时间为 30 min, 提取完成后将混合物在 8000 r/min 的条件下离心 15 min 后收集上清液, 作为总酚、总黄酮、DPPH 自由基清除率和 $ABTS^+$自由基清除率的测定液。

1.2.6.2 总酚和总黄酮含量的测定 总酚含量(Total Phenols Content, TPC)采用 Folin-Ciocalteu 法进行测定。根据 Mu 等[16] 的方法确定, 并进行一些修改。取 1 mL 待测液于 25 mL 具塞比色管内, 加入 1 mL 福林酚溶液和 2 mL 12% 的碳酸钠溶液, 用超纯水补足至刻度处, 在 25 ℃ 条件下避光恒温水浴 2 h, 并在 765 nm 处测定吸光值。利用没食子酸建立总酚标准曲线 y=0.1001x+0.0636 ($R^2$=0.9974), 结果以没食子酸当量(Gallic Acid Equivalent, mg GAE/g)表示, 并通过以下公式计算鸡油菌中总酚含量:

$$TPC(\text{mg GAE/g})=\frac{C\times V\times N}{M\times 1000}$$

式中: C 为鸡油菌中总酚的质量浓度(μg/mL), V 为稀释液的体积(mL), N 为稀释倍数, M 为鸡油菌粉末的质量(g)。

使用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠法对样品中的总黄酮含量(Total Flavonoid Content, TFC)进行测定。参考 Kittibunchakul 等[17] 的方法并适当修改。称取 1 mL 待测液于 25 mL 比色管内, 再加入 9 mL 30% 乙醇、1 mL 5% 亚硝酸钠溶液, 摇匀后静置 6 min, 再加入 10% 的硝酸铝溶液 1 mL, 而后摇匀静置 6 min, 静置结束后加入 10 mL 10% 的氢氧化钠溶液, 并使用 30% 的乙醇稀释至刻度, 静置 15 min, 于 510 nm 处测定吸光值。使用芦丁建立总黄酮的标准曲线 y=0.9049x+0.0283($R^2$=0.9995), 结果以芦丁当量(Rutin Equivalent, mg RE/g)表示。具体计算公式如下:

$$TFC(\text{mg RE/g})=\frac{A\times V\times D}{M}$$

式中: A 为鸡油菌中黄酮的质量浓度(mg/mL),

V 为稀释液的体积(mL)，D 为稀释倍数，M 为鸡油菌粉末的质量(g)。

1.2.6.3　抗氧化活性的测定　通过分光光度法测定干制品的抗氧化活性，包括 DPPH 自由基清除能力和 $ABTS^+$自由基清除能力。

参考 Sun 等[14] 的方法并进行修改，将 1 mL 待测液加入 2 mL 的 DPPH 溶液(0.5 mmol/L)中，充分混合后在 37 ℃ 下避光静置 20 min；另取 1 mL 甲醇，加入 2 mL 0.5 mmol/L 的 DPPH 溶液，摇匀后同样置于 37 ℃ 避光环境中静置 20 min(空白对照)；取 1 mL 待测液与 2 mL 甲醇混合均匀，同样的条件下静置(样品对照)。以上所有的吸光度均于 514 nm 处进行测定，利用公式进行计算。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100$$

式中：$A_i$、$A_j$ 和 $A_0$ 分别表示样品、样品对照和空白对照的吸光度值。

参照 Tan 等[18] 的方法并稍作修改。$ABTS^+$自由基清除能力的测定方法如下：在试管中加入 2 mL 待测液与 3 mL 80% 甲醇溶液，混匀后避光静置 30 min，在 734 nm 处测定吸光度值；再次量取 2 mL 待测液于干净试管内，加入 3 mL ABTS 溶液(734 nm 处吸光度为 0.70±0.02)并混匀，避光放置 30 min 后，同样在 514 nm 处测定吸光度。使用如下公式进行计算：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100$$

式中：$A_1$ 为溶剂代替样品吸光度值，$A_2$ 为样品吸光度值。

1.2.7　游离氨基酸的测定　根据 Mu 等[16] 的方法进行氨基酸测定。称取 1 g 样品，溶解并定容至 10 mL，混匀，4 ℃ 下静置 24 h，取 1 mL 上清液并加入 1 mL 5% 磺基水杨酸溶液，混匀，以 6000×g 的离心力离心 10 min，取 1 mL 上清液，过 0.22 μm 滤膜后得到滤液，使用氨基酸分析仪进行检测。实验中所用到的柠檬酸缓冲液及其 pH 分别为 B1：3.2；B2：4.25；B5：6.45。实验中缓冲液的流速与反应流速设置为 25 mL/h 和 10 mL/h；使用的 Na 型阳离子树脂层析柱长度直径 200 mm×4.6 mm，颗粒大小 8 μm；检测波长 570 nm 和 440 nm；柱子升温温度按照 55-65-75 ℃ 进行，反应槽温度 138 ℃；进样量 20 μL。

1.2.8　挥发性风味成分的测定　挥发性风味成分的测定参考钟应丽[19] 的方法并稍作修改。具体如下：取 1 g 干燥鸡油菌置于 20 mL 顶空瓶中，加入 1 mL 饱和氯化钠溶液和 10 μL 200 μg/mL 的邻二氯苯溶液作为内标溶液，而后使用带 PTFE/硅胶隔垫顶部开口式螺纹瓶盖密封。将顶空瓶在置于 55 ℃ 加热装置上加热处理，并插入装有 PDMS/DVB/CA 且在 220 ℃ 老化 30 min 的萃取针萃取吸附 30 min。而后在进样口解析 10 min。使用气相色谱-质谱联用仪和 HP-5MS 毛细色谱柱进行测定。GC-MS 条件如下：载气为高纯氦气(99.999%)，气体流速 1.0 mL/min，不分流。GC 升温程序为初温 50 ℃ 保持 1 min，而后以 5 ℃/min 的升温速度升至 180 ℃ 并保持 5 min，而后以 25 ℃/min 的速度升至 280 ℃ 并保持 3 min。MS 条件为：离子源温度 220 ℃、接口温度 220 ℃，溶剂延迟时间 3.5 min，采集方式为 Scan，质量范围 32~500 m/z。将所得结果与 NIST 20 色谱库进行比对定性，筛选相似度>80 的物质，随后采用内标法进行定量。

$$\text{挥发性风味成分浓度}(\mu g/g) = \frac{\text{相关化合物峰面积}}{\text{内标物峰面积}} \times \frac{c \times V}{m} \times 1000$$

式中：c 为内标物浓度(μg/mL)，V 为内标物体积(μL)，m 为样品质量(g)，1000 为换算系数。

### 1.3　数据处理

所有数据重复测定三次，实验结果以平均值±标准差(SD)的形式表示，并采用 SPSS 27 进行分析，单因素方差分析(ANOVA)通过 Duncan 进行检验($P$<0.05)，Origin 2021 进行绘图。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同预处理方式对鸡油菌水分比与干燥速率的影响

干燥时间是评估干燥方法是否经济有效的最直观指标。不同预处理方式下，冷冻干燥鸡油菌水分比和干燥速率分别如图 1A、图 1B 所示。所有样品的水分比随干燥时间增加而呈指数下降，干燥速率在初期增长迅速，在 2 h 达到峰值，并在 4 h 后逐渐放缓。空白对照(Control)、微波预处理(MP)、漂烫预处理(BP)、盐渗预处理(OP)和热风预处理(HP)达到干燥终点时所需的时间分别为 16、13、11、11 和 13 h。与 Control 组相比，MP 组与 HP 组的干燥时间缩短了 18.75%；BP 组和 OP 组的干燥时间缩短了 31.25%。对各组样品干燥过程进行分析，Control 组无任何预处理，水分蒸发完全依赖冷冻后内部水分结冰后的升华，因此达到干燥终点需要较长的时间。MP 组的微波处理使物料内部水分子间的运动摩擦加剧，在短时间内产生大量热量，从而快速升温并促使水分迅速蒸发[20]。此外，微波处理还会对细胞结构造成一定程度的破坏，导致内部水分大量流失[21]，这也是 MP 组干燥速率较高的重要原因之一。表观上 BP 组和 OP 组在干燥过程中水分比和干燥速率的变化趋势相似，然而，从细胞结构角度分析，BP 处理会导致细胞收缩变形，甚至造成细胞壁的降解和解聚[22]；而 OP 主要依靠细胞内外渗透压差实现脱水，相较于高温焯水，对细胞结构的破坏较小。HP 处理对鸡油菌的干燥特性也产生了积极影响。在热风干燥初期，物料表面温度高于内部温度，形成温度梯度，有助于物料内部

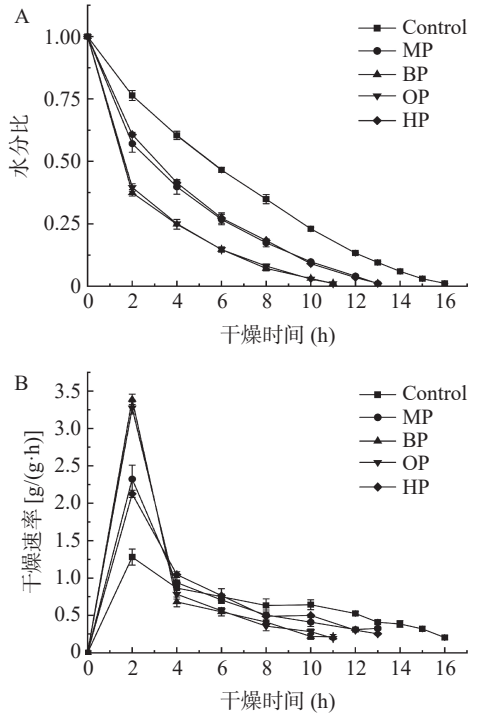



图 1 不同预处理方式对鸡油菌水分比与干燥速率的影响

Fig.1 Effect of different pretreatments on the moisture ratio and drying rate of chanterelles

注:(A)水分比,(B)干燥速率。

水分迅速向表面迁移,加快干燥速率[23]。因此,四种预处理方法均在不同程度上提升了鸡油菌真空冷冻干燥的干燥效率。

## 2.2 不同预处理方式对鸡油菌微观结构的影响

扫描电镜有助于直观评估加工工艺对微观结构的影响,揭示鸡油菌内部结构的变化。如图 2 所示,不同预处理方式下鸡油菌的微观结构表现出明显差异。图 2A 为 Control 组,其内部孔隙结构大小不一,这可能是因为在预冻时,缓慢的预冻速度使内部的水分结合形成较大的冰晶,在后续冷冻干燥过程中冰晶升华,留下大小不一的孔洞。孔洞结构的形成增大细胞间隙,但是内部纤维结构交叠,不利于水分的升华,导致干燥时间较长。图 2B 为 MP 组,具有一定的孔洞结构,内部纤维结构呈现出明显的、无规律的断裂和错位,有利于提高干燥速率[24]。图 2C 和图 2D 分别为 BP 组和 OP 组,二者微观结构相似,主要表现为细胞结构收缩坍塌、细胞壁变形。这种细胞结构的变化有利于鸡油菌内部形成微孔,加速冰晶的升华逸出,从而提升干燥速率[25]。图 2E 为 HP 组,该组样品微观结构更为完整,可能是预处理时,表层水分蒸发,避免冷冻时较大的孔洞形成而对细胞结构造成破坏。Refas 等[26] 的实验结果也表明热风干燥与冷冻干燥相比,对细胞破坏更小。因此,热风预处理有利于真空冷冻干燥的鸡油菌保持较好的细胞形态。

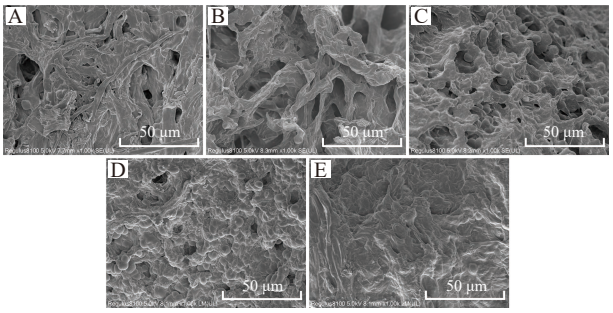



图 2 不同预处理方式对鸡油菌微观结构的影响

Fig.2 Effect of different pretreatments on the microstructure of chanterelles

注:(A)空白对照(Control),(B)微波预处理(MP),(C)漂烫预处理(BP),(D)渗透预处理(OP),(E)热风预处理(HP)。

## 2.3 不同预处理方式对鸡油菌复水率及色差的影响

复水率是衡量干制品加水后恢复原有形态和品质能力的重要指标之一。本实验中不同预处理干制鸡油菌的复水率如表 1 所示。经过预处理的干制鸡油菌其复水能力均不同程度降低,依次为:Control>HP>MP>BP>OP。Control 与 HP 组的复水率之间没有显著差异($P$>0.05),可能是因为干燥过程中二者的细胞结构受破坏程度较小,组织结构更完整[27],有利于后续的复水。MP 的复水率相较于 Control 组,下降了 3.70%,微波干燥会使产品内部形成孔洞,但是过长的微波时间可能会破坏细胞结构的完整性[28]。BP 和 OP 的复水率相比 Control,分别降低了 12.15% 和 13.63%,这可能是由于其细胞结构坍塌、细胞壁变形所致。干制品的颜色是影响商品价值,消费者食欲和购买意愿的关键指标之一。$L^*$表示颜色的明暗程度,0(纯黑)~100(纯白),$L^*$值越大,表明颜色越亮;$a^*$由负到正表示颜色由绿色向红色转变;$b^*$由负到正表示颜色由蓝色向黄色转变。如表 1 所示,不同预处理的干燥鸡油菌颜色参数具有显著差异($P$<0.05)。与新鲜样品相比,除了 BP 预处理样品

表 1 不同预处理方式对鸡油菌复水率和色差的影响

Table 1 Effect of different pretreatments on the rehydration ratio and color difference of chanterelles

| 预处理方式 | 复水率(%) | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $\Delta E$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Fresh | – | 65.61±2.36$^b$ | 25.85±2.44$^a$ | 64.40±2.13$^a$ | – |
| Control | 6.75±0.04$^a$ | 65.13±1.96$^b$ | 16.23±1.32$^c$ | 35.02±2.13$^c$ | 30.99±2.30$^b$ |
| MP | 6.50±0.05$^b$ | 65.11±2.01$^b$ | 15.82±1.17$^c$ | 42.38±1.94$^b$ | 24.31±1.80$^c$ |
| BP | 5.93±0.06$^c$ | 70.24±1.86$^a$ | 11.32±1.23$^d$ | 32.24±1.81$^d$ | 35.65±1.86$^a$ |
| OP | 5.83±0.14$^d$ | 57.82±2.38$^c$ | 18.12±1.14$^b$ | 35.85±1.43$^c$ | 30.68±1.64$^b$ |
| HP | 6.74±0.04$^a$ | 64.80±1.26$^b$ | 18.88±0.84$^b$ | 41.54±2.04$^b$ | 23.95±2.12$^c$ |

注:同列不同字母表示有显著性差异($P$<0.05);“–”表示Fresh组未涉及干燥,无复水率;且作为色差计算基准故不计算$\Delta E$。

的 $L^*$值增大外，其余组别的 $L^*$、$a^*$和 $b^*$值均降低。鸡油菌中的类胡萝卜素是其黄色色素的来源，在 BP 处理中，鸡油菌中的色素物质在高温下分解流失，致使漂烫液呈黄色[29]。此外，较高的温度可能对过氧化物酶的活性造成影响，有效遏制后续褐变反应的发生，因此 $L^*$高于其他组。所有预处理冷冻干燥后的样品 $a^*$、$b^*$值均下降，表明颜色更偏向于绿色和蓝色，可能是干燥过程中样品的细胞结构发生变化，从而导致化学物质部分的流失和改性，导致颜色发生变化[30]。$\Delta E$ 值越小，干制前后颜色变化就越小，可知短时处理的 MP 与温和处理的 HP 组经干燥后颜色变化最小。综合 $L^*$、$a^*$、$b^*$和 $\Delta E$ 进行分析，可知 HP 最大程度保留了新鲜鸡油菌的颜色，适宜作为一种干燥预处理方式。

### 2.4　不同预处理方式对鸡油菌总酚、总黄酮含量的影响

干制品中酚类物质与黄酮类化合物对细胞功能具有重要影响，是评估食品营养保健功效的关键成分。如图 3 所示，不同预处理鸡油菌干燥样品总酚与总黄酮含量具有显著差异（$P$<0.05）。其中 HP 组与 Control 组样品的总酚与总黄酮含量较高，HP 组总酚与总黄酮含量分别为 2.46 mg GAE/g、2.52 mg RE/g；Control 组总酚与总黄酮含量则分别为 2.19 mg GAE/g、2.63 mg RE/g。HP 组总酚与总黄酮含量较高的原因是低水分使其浓缩，且低温干燥的情况下，热敏性化合物不易降解[31]。有研究表明，适当的热风干燥有利于提高总酚与总黄酮含量[32−33]。真空冷冻干燥可以隔绝物料与氧气的接触并降低氧化酶活性，从而减少酚类与黄酮等的氧化[34]，因此 Control 组的总酚和总黄酮含量也处于高水平状态。MP、BP 和 OP 组多酚含量较低的原因是酚类物质具有热敏感性，处理过程中较高的温度加速了多酚物质的降解，且 BP 和 OP 预处理以水溶液为介质，加速多酚与黄酮物质的溶解浪费[35]。

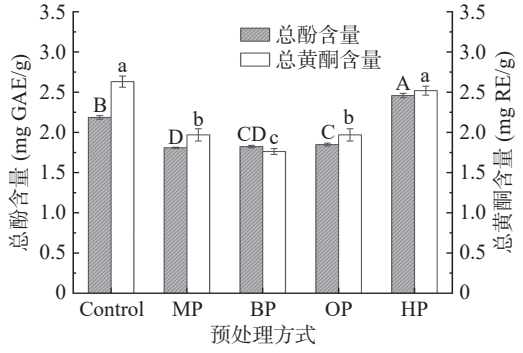



图 3　不同预处理方式对鸡油菌总酚、总黄酮含量的影响

Fig.3　Effect of different pretreatments on the total phenol and total flavonoid contents of chanterelles

注：不同大小写字母分别表示各组间总酚含量与总黄酮含量具有显著差异（$P$<0.05）。

### 2.5　不同预处理对鸡油菌 DPPH、ABTS$^+$自由基清除率的影响

DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除能力被广泛用于测定天然物质的抗氧化活性。如图 4 所示，HP 组的鸡油菌 DPPH 自由基和 ABTS$^+$自由基清除率分别为 42.02% 和 75.94%，表现出显著优于其他组的抗氧化能力（$P$<0.05）。Control 组与 MP 组在 DPPH 自由基清除率方面存在差异，在 ABTS$^+$自由基清除率方面无明显差异；BP 组和 OP 组在 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除率方面均无差异。HP 组具有高抗氧化能力的主要原因是其具有较高的总酚和总黄酮含量。多酚和黄酮类物质具有强氧化还原电位，可以作为还原剂和氢供体，从而具有高抗氧化活性[36]。Kittibunchakul 等[17] 探究冻干和对流热风干燥对毛莓果实抗氧化能力的影响，发现冻干样与 50、60 ℃ 温度下热风干燥的样品，DPPH 自由基清除率无显著差异，与本实验所得结论一致。因此，可以将温和的热风处理作为一种提高和保留干制品抗氧化能力的经济有效的干燥手段。

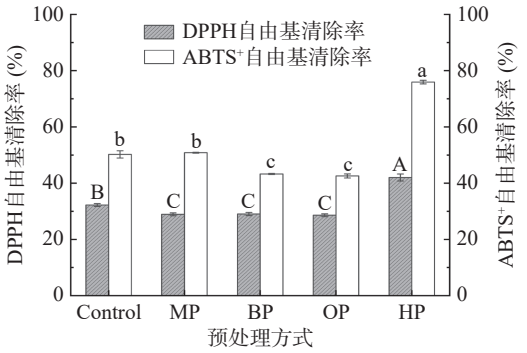



图 4　不同预处理方式对鸡油菌 DPPH、ABTS$^+$自由基清除能力的影响

Fig.4　Effect of different pretreatments on the free radical scavenging capacity of DPPH and ABTS$^+$ in chanterelles

注：不同大小写字母分别表示各组间 DPPH 自由基清除能力与 ABTS$^+$自由基清除能力具有显著差异（$P$<0.05）。

### 2.6　不同预处理方式对鸡油菌游离氨基酸的影响

游离氨基酸（FAA）的种类与含量是评价鸡油菌营养品质与风味特征的关键指标，直接关系到其食用价值与商品价值。不同预处理后冷冻干燥鸡油菌的游离氨基酸种类、含量以及风味特征如表 2 所示，本实验中检测到的游离氨基酸共计 17 种，总含量如下：热风预处理（HP，22.95±1.87 mg/g）>空白对照组（Control，14.36±1.04 mg/g）>微波预处理（MP，13.90±0.05 mg/g）>渗透预处理（OP，11.96±0.05 mg/g）>漂烫预处理（BP，9.38±0.19 mg/g），热风预处理组游离氨基酸总含量显著高于其他组（$P$<0.05）。其中，HP 组 FAA 含量相比空白对照组提高了 59.82%，这可能是因为热风预处理促进了蛋白质水解，从而提高了游离氨基酸水平[37]。而 MP 组 FAA 含量的降低可能是由于微波辐射抑制了蛋白酶活性，阻碍了蛋白质的降解与 FAA 的生成[38]。而 OP 与 BP 组中 FAA

表 2 不同预处理方式对鸡油菌游离氨基酸的影响

Table 2 Effect of different pretreatments on the free amino acid contents of chanterelles

| 游离氨基酸种类 | | 含量(mg/g) | | | | | 风味特性 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Control | MP | BP | OP | HP | |
| 必需氨基酸 | 苏氨酸 | 0.21±0.05$^{c}$ | 0.24±0.01$^{bc}$ | 0.29±0.01$^{b}$ | 0.23±0.03$^{bc}$ | 0.48±0.06$^{a}$ | 甜 |
| | 缬氨酸 | 0.28±0.01$^{c}$ | 0.29±0.03$^{c}$ | 0.37±0.02$^{b}$ | 0.30±0.02$^{c}$ | 0.54±0.01$^{a}$ | 苦 |
| | 甲硫氨酸 | 0.10±0.01$^{a}$ | 0.08±0.01$^{b}$ | 0.07±0.02$^{b}$ | 0.09±0.00$^{ab}$ | 0.10±0.02$^{a}$ | 苦 |
| | 异亮氨酸 | 0.25±0.07$^{a}$ | 0.23±0.05$^{a}$ | 0.29±0.05$^{a}$ | 0.23±0.07$^{a}$ | 0.31±0.08$^{a}$ | 苦 |
| | 亮氨酸 | 0.13±0.05$^{c}$ | 0.17±0.01$^{c}$ | 0.23±0.03$^{b}$ | 0.26±0.01$^{b}$ | 0.43±0.05$^{a}$ | 苦 |
| | 苯丙氨酸 | 0.14±0.05$^{c}$ | 0.16±0.06$^{bc}$ | 0.23±0.06$^{bc}$ | 0.26±0.05$^{b}$ | 0.38±0.06$^{a}$ | 苦 |
| | 组氨酸 | 0.11±0.01$^{b}$ | 0.17±0.03$^{b}$ | 0.15±0.02$^{b}$ | 0.26±0.04$^{a}$ | 0.26±0.02$^{a}$ | 苦 |
| | 赖氨酸 | 0.82±0.06$^{c}$ | 0.82±0.18$^{c}$ | 0.64±0.03$^{d}$ | 1.01±0.02$^{b}$ | 2.01±0.05$^{a}$ | 无味 |
| 非必需氨基酸 | 天冬氨酸 | 0.75±0.03$^{bc}$ | 1.15±0.52$^{ab}$ | 0.64±0.01$^{c}$ | 0.96±0.07$^{bc}$ | 1.55±0.06$^{a}$ | 鲜 |
| | 丝氨酸 | 0.50±0.00$^{b}$ | 1.55±1.08$^{a}$ | 0.53±0.01$^{b}$ | 1.31±0.18$^{ab}$ | 1.17±0.12$^{ab}$ | 甜 |
| | 谷氨酸 | 6.97±0.52$^{b}$ | 5.30±1.30$^{c}$ | 2.98±0.07$^{d}$ | 3.64±0.16$^{d}$ | 8.56±1.10$^{a}$ | 鲜 |
| | 甘氨酸 | 0.22±0.02$^{b}$ | 0.19±0.05$^{b}$ | 0.19±0.00$^{b}$ | 0.17±0.00$^{b}$ | 0.27±0.01$^{a}$ | 甜 |
| | 丙氨酸 | 1.56±0.31$^{b}$ | 0.95±0.40$^{c}$ | 0.81±0.01$^{cd}$ | 0.48±0.01$^{d}$ | 2.12±0.17$^{a}$ | 甜 |
| | 胱氨酸 | 0.49±0.19$^{a}$ | 0.47±0.15$^{a}$ | 0.41±0.13$^{a}$ | 0.44±0.16$^{a}$ | 0.57±0.15$^{a}$ | 无味 |
| | 酪氨酸 | 0.29±0.05$^{d}$ | 0.49±0.05$^{bc}$ | 0.40±0.06$^{cd}$ | 0.64±0.13$^{ab}$ | 0.76±0.07$^{a}$ | 无味 |
| | 精氨酸 | 1.23±0.21$^{b}$ | 1.20±0.18$^{b}$ | 0.73±0.14$^{c}$ | 1.27±0.25$^{b}$ | 3.00±0.14$^{a}$ | 苦 |
| | 脯氨酸 | 0.31±0.001$^{b}$ | 0.45±0.04$^{a}$ | 0.42±0.00$^{a}$ | 0.40±0.11$^{ab}$ | 0.45±0.01$^{a}$ | 甜 |
| UFAA | | 7.73±0.50$^{b}$ | 6.45±0.78$^{c}$ | 3.61±0.07$^{d}$ | 4.59±0.09$^{d}$ | 10.11±1.16$^{a}$ | |
| SFAA | | 2.79±0.38$^{c}$ | 3.38±0.59$^{b}$ | 2.25±0.02$^{c}$ | 2.60±0.02$^{c}$ | 4.48±0.11$^{a}$ | |
| BFAA | | 2.25±0.01$^{c}$ | 2.29±0.17$^{c}$ | 2.07±0.06$^{c}$ | 2.68±0.11$^{b}$ | 5.02±0.33$^{a}$ | |
| 总计 | | 14.36±1.04$^{b}$ | 13.90±0.05$^{b}$ | 9.38±0.19$^{c}$ | 11.96±0.05$^{c}$ | 22.95±1.87$^{a}$ | |

注: UFAA、SFAA 和 BFAA 分别表示呈鲜味、甜味和苦味的游离氨基酸总含量, 同一行中不同字母表示差异显著($P$<0.05), 表3同。

含量的下降则可能与高温处理条件下部分氨基酸发生降解, 转化为有机酸及其他风味化合物有关[39]。

不同游离氨基酸由于空间构型的差异, 具有鲜味、甜味或苦味等不同感官属性[24]。其中, 谷氨酸(Glu)是各处理组中含量最高的 FAA, 在干制品的鲜味特征中起到核心作用。BP 与 OP 处理组中 Glu 可能因在热水中的溶解导致流失严重, 因此含量较低。故这两种预处理方式不适宜用于鸡油菌的干燥前处理。此外, 多种 FAA 之间存在协同增鲜作用, 例如天冬氨酸(Asp)与 Glu 可与呈味核苷酸协同增强鲜味感知; 丙氨酸(Ala)与 Glu 联合作用亦能提升鲜味强度[40]。综上分析, HP 处理在提升鸡油菌风味氨基酸方面效果显著, 有利于改善干制品质。

### 2.7 不同预处理方式对鸡油菌挥发性风味成分的影响

挥发性风味物质的种类和含量是评价干制菌品质的重要指标之一, 对消费者购买意愿具有重要影响。在 Control 和四种不同预处理的真空冷冻干燥鸡油菌中共检测到 53 种挥发性风味成分, 包括醇类(10 种)、醛类(11 种)、酮类(12 种)、酯类(9 种)、酸类(3 种)、烃类(7 种)和其他(1 种)。其中 Control、MP、BP、OP 和 HP 分别鉴定出 24、20、28、28 和 32 种成分。图 5 显示了不同预处理方式下鸡油菌样品中挥发成分种类和含量的变化, 其中 HP 组的挥发性风味成分种类和总含量均处于较高水平, 而 MP、BP 和 OP 的挥发性风味成分种类和总含量均较低。这可能是因为 HP 的热风处理避免了水溶性风味成分的损失, 且较高的处理温度使鸡油菌发生美拉德反应, 脂肪分解等, 产生新的风味成分[41]。微波预处理的瞬时高温不利于香气物质的富集, 且会对香气物质造成破坏[42]。

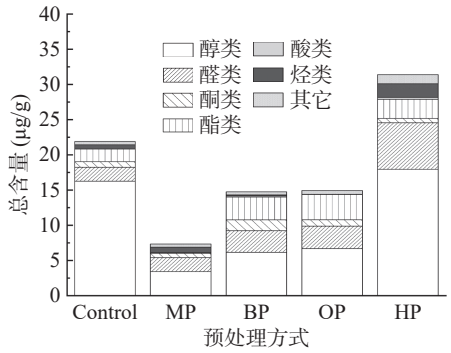



图 5 不同预处理方式对鸡油菌挥发性风味组成的影响

Fig.5 Effect of different pretreatments on the volatile flavor composition of chanterelles

根据表 3 可知, 1-辛烯-3-醇作为主要的醇类物质, 在 HP 中含量最高, 为 15.31±0.04 μg/g, 相较于 Control 增加了 15.37%, 可为 HP 提供强烈的蘑菇香[43]。醛类物质中, 具有脂肪、肉香以及黄瓜清香的反-2-辛烯醛[36] 是主要成分, 除了 MP(0.68±0.03 μg/g), 其余三种预处理组的反-2-辛烯醛含量均高于 Control 组(1.28±0.02 μg/g), 分别为 BP(2.28±0.12 μg/g)、OP(1.69±0.01 μg/g)和 HP(5.53±0.03 μg/g)。不同预处理的酮类和烃类物质组成和含

表 3　不同预处理对鸡油菌挥发性风味成分的影响

Table 3　Effect of different pretreatments on the volatile flavor compounds of chanterelles

| 编号 | 物质 | CAS | 含量(μg/g) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Control | MP | BP | OP | HP |
| | 醇类 | | | | | | |
| 1 | (2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇 | 24347-58-8 | 0.08±0.01 | – | – | – | – |
| 2 | (2Z)-2-辛烯-1-醇 | 26001-58-1 | 2.06±0.02$^{b}$ | – | – | – | 2.17±0.01$^{a}$ |
| 3 | (E)-2,5,5-三甲基-3,6-庚二烯-2-醇 | 26127-98-0 | – | – | – | 0.04±0.00 | – |
| 4 | 1-辛烯-3-醇 | 3391-86-4 | 13.27±0.21$^{b}$ | 2.41±0.03$^{e}$ | 4.97±0.07$^{d}$ | 5.82±0.03$^{c}$ | 15.31±0.04$^{a}$ |
| 5 | 2-癸烯-1-醇 | 22104-80-9 | 0.63±0.02$^{a}$ | – | 0.49±0.03$^{c}$ | 0.54±0.02$^{b}$ | – |
| 6 | 3,4-二甲基环己醇 | 5715-23-1 | 0.20±0.03$^{c}$ | 1.01±0.07$^{a}$ | 0.06±0.01$^{d}$ | 0.25±0.02$^{bc}$ | 0.27±0.02$^{b}$ |
| 7 | 3-辛醇 | 589-98-0 | – | – | 0.26±0.02$^{a}$ | – | – |
| 8 | 4,8-二甲基-1,7-壬二烯-4-醇 | 17920-92-2 | – | – | – | 0.04±0.01 | – |
| 9 | 正己醇 | 111-27-3 | – | – | – | – | 0.18±0.02 |
| 10 | 2-十二烷基-1,3-丙二醇 | 10395-09-2 | – | – | 0.36±0.02 | – | – |
| | 醛类 | | | | | | |
| 11 | 2,4-壬二烯醛 | 6750-03-4 | 0.06±0.01$^{b}$ | 0.09±0.01$^{a}$ | 0.06±0.01$^{b}$ | 0.04±0.01$^{c}$ | 0.03±0.01$^{c}$ |
| 12 | 2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛 | 432-25-7 | 0.04±0.01$^{d}$ | 0.21±0.02$^{a}$ | 0.14±0.01$^{b}$ | 0.10±0.02$^{c}$ | 0.06±0.01$^{d}$ |
| 13 | 2-丙基-2-庚烯醛 | 34880-43-8 | – | 0.02±0.00$^{b}$ | 0.07±0.01$^{a}$ | – | – |
| 14 | 2-丁基-2-辛烯醛 | 13019-16-4 | – | 0.02±0.01$^{a}$ | – | 0.01±0.01$^{b}$ | – |
| 15 | 2-庚烯醛 | 57266-86-1 | 0.22±0.02$^{bc}$ | 0.42±0.03$^{a}$ | – | 0.24±0.01$^{b}$ | 0.21±0.02$^{c}$ |
| 16 | 2-乙基己烯醛 | 645-62-5 | – | 0.11±0.01$^{a}$ | 0.07±0.01$^{b}$ | – | – |
| 17 | 苯甲醛 | 100-52-7 | – | – | – | 0.19±0.01$^{b}$ | 0.31±0.03$^{a}$ |
| 18 | 反-2-辛烯醛 | 2548-87-0 | 1.28±0.02$^{d}$ | 0.68±0.03$^{e}$ | 2.28±0.12$^{b}$ | 1.69±0.01$^{c}$ | 5.53±0.03$^{a}$ |
| 19 | 壬醛 | 124-19-6 | 0.15±0.02$^{c}$ | 0.23±0.02$^{a}$ | 0.22±0.02$^{ab}$ | 0.20±0.03$^{ab}$ | 0.19±0.02$^{b}$ |
| 20 | 辛醛 | 124-13-0 | – | – | – | 0.07±0.01$^{a}$ | 0.07±0.01$^{a}$ |
| 21 | 正庚醛 | 111-71-7 | 0.23±0.02$^{b}$ | 0.19±0.01$^{c}$ | 0.23±0.02$^{b}$ | 0.63±0.02$^{a}$ | 0.19±0.02$^{c}$ |
| | 酮类 | | | | | | |
| 22 | (Z)-6-辛烯-2-酮 | 74810-53-0 | 0.18±0.02$^{b}$ | – | – | – | 0.41±0.02$^{a}$ |
| 23 | 2-(2-氧代丙基)环戊酮 | 60415-94-3 | – | 0.30±0.02 | – | – | – |
| 24 | 2-癸酮 | 693-54-9 | 0.17±0.01$^{a}$ | 0.07±0.01$^{b}$ | 0.07±0.01$^{b}$ | 0.04±0.01$^{c}$ | 0.06±0.02$^{b}$ |
| 25 | 2-壬酮 | 821-55-6 | 0.12±0.01$^{a}$ | – | – | – | 0.06±0.01$^{b}$ |
| 26 | 4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-2-丁酮 | 17283-81-7 | – | 0.10±0.02$^{a}$ | 0.08±0.01$^{ab}$ | 0.08±0.01$^{b}$ | 0.03±0.00$^{c}$ |
| 27 | 6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮 | 689-67-8 | 0.05±0.01$^{b}$ | 0.11±0.01$^{a}$ | 0.11±0.02$^{a}$ | 0.05±0.01$^{b}$ | 0.05±0.00$^{b}$ |
| 28 | 6-甲基-6-硝基-2-庚酮 | 142963-25-5 | – | 0.04±0.01 | – | – | – |
| 29 | 3-辛烯-2-酮 | 1669-44-9 | – | – | 0.58±0.05$^{b}$ | 0.74±0.02$^{a}$ | – |
| 30 | 7-氧杂双环[2.2.1]庚烷-2-酮 | 58564-88-8 | 0.26±0.01 | – | – | – | – |
| 31 | 6-(羟基苯基甲基)-2,2-二甲基环己酮 | 5026-62-0 | – | – | 0.67±0.02 | – | – |
| 32 | 1-(1-吡咯烷基)-2,5-十八碳二烯-1-酮 | 56666-48-9 | – | – | 0.03±0.01 | – | – |
| 33 | 1-(2,3,3-三甲基环氧乙烷-2-基)乙酮 | 15120-99-7 | – | – | – | – | 0.02±0.00 |
| | 酯类 | | | | | | |
| 34 | 6,6-二甲基-2-亚甲基-二环[3.1.1]庚-3-醇乙酸酯 | 1078-95-1 | 0.10±0.02$^{a}$ | – | – | 0.10±0.01$^{a}$ | 0.09±0.01$^{a}$ |
| 35 | 辛酸甲酯 | 111-11-5 | 0.22±0.02$^{b}$ | 0.07±0.01$^{d}$ | 0.15±0.02$^{c}$ | 0.15±0.02$^{c}$ | 0.27±0.02$^{a}$ |
| 36 | 庚酸甲酯 | 106-73-0 | 0.12±0.02$^{b}$ | – | 0.08±0.01$^{c}$ | 0.24±0.02$^{a}$ | 0.12±0.02$^{b}$ |
| 37 | 己酸甲酯 | 106-70-7 | 1.35±0.02$^{d}$ | – | 2.34±0.07$^{b}$ | 2.62±0.10$^{a}$ | 1.86±0.03$^{c}$ |
| 38 | 壬酸甲酯 | 1731-84-6 | – | – | 0.02±0.00$^{c}$ | 0.07±0.01$^{b}$ | 0.10±0.03$^{a}$ |
| 39 | 泛内酯 | 599-04-2 | – | – | 0.29±0.06$^{a}$ | 0.29±0.03$^{a}$ | 0.20±0.02$^{b}$ |
| 40 | 月桂酸甲酯 | 111-82-0 | – | – | – | 0.07±0.00$^{a}$ | 0.06±0.01$^{b}$ |
| 41 | 14-甲基十五烷酸甲酯 | 5129-60-2 | – | – | – | 0.04±0.01 | – |
| | 酸类 | | | | | | |
| 42 | 己酸 | 142-62-1 | – | – | 0.16±0.01 | – | – |
| 43 | 2-甲基己酸 | 4536-23-6 | – | – | – | – | 0.22±0.02 |
| 44 | 2-甲基十一烷酸 | 24323-25-9 | – | – | – | – | 0.05±0.01 |
| | 烃类 | | | | | | |
| 45 | 3-氯-1-己烯 | 53101-38-5 | 0.52±0.04$^{b}$ | 0.75±0.02$^{a}$ | – | – | – |
| 46 | 8-甲基-1-十一碳烯 | 74630-40-3 | 0.04±0.01$^{ab}$ | – | 0.05±0.01$^{a}$ | 0.04±0.00$^{ab}$ | 0.03±0.01$^{b}$ |

**续表 3**

| 编号 | 物质 | CAS | 含量(μg/g) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Control | MP | BP | OP | HP |
| 47 | 3-甲基-1,6-庚二烯 | 50871-05-1 | − | − | − | − | 1.75±0.03 |
| 48 | 十二烯 | 112-41-4 | − | − | − | − | 0.06±0.02 |
| 49 | 丁基环丙烷 | 930-57-4 | 0.06±0.01$^{b}$ | − | 0.03±0.00$^{a}$ | − | 0.10±0.01$^{a}$ |
| 50 | 1-庚基-2-甲基环丙烷 | 74663-91-5 | − | 0.05±0.00 | − | − | − |
| 51 | 溴代环庚烷 | 2404-35-5 | − | − | 0.06±0.01 | − | − |
| | 其它类 | | | | | | |
| 52 | 2-戊基呋喃 | 3777-69-3 | 0.45±0.03$^{c}$ | 0.45±0.03$^{c}$ | 0.42±0.03$^{c}$ | 0.53±0.02$^{b}$ | 1.28±0.04$^{a}$ |

注: “−”表示未检测出。

量差异较大, 分别检测到 Control 组(酮类 5 种, 烃类 3 种)、MP(酮类 5 种, 烃类 2 种)、BP(酮类 6 种, 烃类 3 种)、OP(酮类 4 种, 烃类 1 种)和 HP(酮类 6 种, 烃类 4 种), 其中 HP 组的种类最多, 总含量最高(酮类 0.62±0.03 μg/g, 烃类 1.94±0.06 μg/g)。此外, 尽管 BP 的酮、烃类物质含量减少, 但其酮、烃类化合物种类仍较为丰富。醇和酸发生的酯化反应是酯类物质的主要来源, 该类物质在风味组成中常贡献花香味和果味[44]。不同预处理对干燥鸡油菌中酯类的组成和含量具有显著影响, 其中, MP 的酯类化合物最少, 仅有辛酸甲酯(0.07±0.01 μg/g)一种, 但其余三种预处理方式中, BP(5 种, 2.87±0.03 μg/g)、OP(8 种, 3.58±0.12 μg/g)和 HP(7 种, 2.71±0.05 μg/g)的酯类化合物种类和含量均高于 Control(4 种, 1.78±0.04 μg/g)。酸类化合物共计检测出三种, 其中 BP 中检测出己酸, HP 中检测出 2-甲基己酸和 2-甲基十一烷酸。己酸具有刺激性气味, 会对 BP 风味造成负面影响, HP 中含量较高的 2-甲基己酸, 因具有奶酪味可赋予 HP 组特殊的香气。其它化合物, 如 2-戊基呋喃, 在 HP 中含量为 1.28±0.04 μg/g, 显著高于其他四组($P$<0.05), 增加了鸡油菌的脂香和肉香[45]。

## 3 结论

本研究系统比较了四种预处理方法: 微波预处理(MP)、漂烫预处理(BP)、渗透预处理(OP)及热风预处理(HP)对真空冷冻干燥鸡油菌干燥特性、微观结构、复水能力、色差、总酚和总黄酮含量、抗氧化能力、游离氨基酸以及挥发性风味组成的影响。综合各项指标进行分析比对, HP 为最佳的预处理方式。即先将新鲜鸡油菌进行热风预处理, 而后预冻进行真空冷冻干燥。该种预处理方式可以有效缩短 18.75% 的干燥时间, 并且具有较好的复水性和颜色。同时, 营养物质如总酚和总黄酮、游离氨基酸等含量也增加。在风味方面, 其挥发性风味成分的种类与总含量也得到了提升, 大大提高了真空冷冻干燥鸡油菌的感官品质。综上, 热风预处理辅助真空冷冻干燥鸡油菌相较于其他干燥方式, 更能满足鸡油菌的工业化干燥处理, 降低干燥成本, 提高营养价值与感官品质, 为干制食用菌的工业化生产提供理论依据和技术参考。

© 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] NYMAN A A T, AACHMANN F L, RISE F, et al. Structural characterization of a branched (1→6)-$\alpha$-mannan and $\beta$-glucans isolated from the fruiting bodies of *Cantharellus cibarius*[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 146: 197−207.

[2] KAŁA K, KRAKOWSKA A, SZEWCZYK A, et al. Determining the amount of potentially bioavailable phenolic compounds and bioelements in edible mushroom mycelia of *Agaricus bisporus*, *Cantharellus cibarius*, and *Lentinula edodes*[J]. Food Chemistry, 2021, 352: 129456.

[3] NOWAKOWSKI P, MARKIEWICZ-ŻUKOWSKA R, GROMKOWSKA-KĘPKA K, et al. Mushrooms as potential therapeutic agents in the treatment of cancer: Evaluation of anti-glioma effects of *Coprinus comatus*, *Cantharellus cibarius*, *Lycoperdon perlatum* and *Lactarius deliciosus* extracts[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 133: 111090.

[4] INLA K, BUNCHAN S, KRITTACOM B, et al. Drying behavior, color change and rehydration of Lingzhi mushroom (*Ganoderma lucidum*) under convection-assisted microwave drying[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49: 103348.

[5] 龙杰, 吴昕烨, 毕金峰, 等. HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻探究渗透脱水联合干燥方式对桃脆片挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 241−251. [LONG Jie, WU Xinye, BI Jinfeng, et al. HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose to explore the effects of osmotic dehydration coupled with drying methods on the volatile compounds of peach chips[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 241−251.]

[6] ZHAO Shengnan, LÜ Jintai, LI Yan, et al. Effects of ultrasonic and high-pressure processing pretreatment on drying characteristics and quality attributes of *Angelica keiskei* slices prepared by vacuum-freeze drying[J]. LWT, 2025, 225: 117901.

[7] WANG Mengze, GAO Yiwei, HU Binfang, et al. Freeze-thaw pretreatment improves the vacuum freeze-drying efficiency and storage stability of goji berry (*Lycium barbarum* L.)[J]. LWT, 2023, 189: 115439.

[8] ZHANG Xinyue, WANG Ya, NIAN Rui, et al. Effects of ultrasonic pretreatment on drying characteristics and water migration characteristics of freeze-dried strawberry[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139287.

[9] CAI Yixi, QUAN Hong, LIU Ying, et al. The impact of thermal pretreatment on phytochemical profiles and bioactivity of

freeze-dried lily bulbs (*Lilium lancifolium*)[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101284.
[10] 朱彩平, 孙静儒, 孙红霞, 等. 平菇微波-真空冷冻联合干燥工艺优化及其品质分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 129−138. [ZHU Caiping, SUN Jingru, SUN Hongxia, et al. Optimization of the combined microwave-vacuum freezing drying process and quality analysis of *Pleurotus ostreatus*[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(6): 129−138.]
[11] MIRZAEI-BAKTASH H, HAMDAMI N, TORABI P, et al. Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying[J]. LWT, 2022, 155: 112894.
[12] DARVISHI H, AZADBAKHT M, NORALAHI B. Experimental performance of mushroom fluidized-bed drying: Effect of osmotic pretreatment and air recirculation[J]. Renewable Energy, 2018, 120: 201−208.
[13] WANG Jinru, WU Xinye, CUI Chengbi, et al. Effect of osmotic dehydration combined with vacuum freeze-drying treatment on characteristic aroma components of peach slices[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101337.
[14] SUN Mianli, XU Yuan, DING Yangyue, et al. Effect of ultrasound pretreatment on the moisture migration and quality of *Cantharellus cibarius* following hot air drying[J]. Foods, 2023, 12(14): 2705.
[15] 吴坤龙, 李彦坡, 刘标, 等. 干燥方式对大球盖菇品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 168−176. [WU Kunlong, LI Yanpo, LIU Biao, et al. Effects of different drying methods on the quality and volatile flavorcomponents of *Stropharia rugosoannulata*[J]. Food and Machinery, 2024, 40(2): 168−176.]
[16] MU Yuwen, ZHANG Bohua, ZENG Chaozhen, et al. Mechanistic and multi-parametric insights into preserving nutritional, bioactive, and flavor attributes of daylily (*Hemerocallis citrina*): A comparative evaluation of freeze-drying, hot-air drying, and sun drying[J]. LWT, 2025, 218: 117510.
[17] KITTIBUNCHAKUL S, TEMVIRIYANUKUL P, CHAIKHAM P, et al. Effects of freeze drying and convective hot-air drying on predominant bioactive compounds, antioxidant potential and safe consumption of maoberry fruits[J]. LWT, 2023, 184: 114992.
[18] TAN Si, WANG Zhuwei, XIANG Yuanyuan, et al. The effects of drying methods on chemical profiles and antioxidant activities of two cultivars of *Psidium guajava* fruits[J]. LWT, 2020, 118: 108723.
[19] 钟应丽. 金针菇香气物质的鉴定及其生物合成相关基因的功能验证[D]. 福州: 福建农林大学, 2024. [ZHONG Yingli. Identification of the aroma substances in *Flammulina filiformis* and functional verification of the genes in their biosynthesis pathways[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.]
[20] HUANG Jin, PENG Yu, JI Zhuofan, et al. Drying characteristics of *Cistanche deserticola* with different pretreatment and degradation mechanism of phenylethanoid glycosides during drying[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 204: 117339.
[21] AN Nannan, LÜ Weiqiao, LI Dong, et al. Effects of hot-air microwave rolling blanching pretreatment on the drying of turmeric (*Curcuma longa* L.): Physiochemical properties and microstructure evaluation[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133925.
[22] WANG H, KARIM M A, VIDYARTHI S K, et al. Vacuum-steam pulsed blanching (VSPB) softens texture and enhances drying rate of carrot by altering cellular structure, pectin polysaccharides and water state[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102801.
[23] ZHAO Shiyu, AN Nannan, ZHANG Kaiyan, et al. Evaluation of drying kinetics, physical properties, bioactive compounds, antioxidant activity and microstructure of *Acanthopanax sessiliflorus* fruits dried by microwave-assisted hot air drying method[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 357: 111642.
[24] SUN Mengxue, NI Liying, HUANG Yuhong, et al. Effects of different drying treatments on the microstructure, free amino acids, volatile compounds and antioxidant activity of *Flammulina velutipes* root[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100656.
[25] OSAE R, ADJONU R, APALIYA M T, et al. Freeze-thawing and osmotic dehydration pretreatments on physicochemical properties and quality of orange-fleshed sweet potato slice during hot air drying[J]. Food Chemistry Advances, 2024, 5: 100843.
[26] REFAS I, AMIALI M, GEORGE O A, et al. Bioactive composition, microstructure, and physicochemical properties of *Arbutus unedo* berries dried using different techniques[J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 111: 102501.
[27] 曹雪慧, 李倩钰, 禚秋辰, 等. 香菇复水过程品质变化研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 311−319. [CAO Xuehui, LI Qianyu, ZHUO Qiuchen, et al. Research progress on quality changes during rehydration process of shiitake mushroom[J]. Food Science, 2024, 45(20): 311−319.]
[28] 王莹. 菊花、当归和黄芪三种中药加工炮制机制及标准化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019. [WANG Ying. The study of processing mechnisms and standardization in *Chrysanthemi Flos*, *Angelicae sinensis Radix* and *Astragali Radix*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.]
[29] LIU Miao, HU Liu, DENG Na, et al. Effects of different hot-air drying methods on the dynamic changes in color, nutrient and aroma quality of three chili pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101262.
[30] JANISZEWSKA E, WITROWA-RAJCHERT D, KIDOŃ M, et al. Effect of the applied drying method on the physical properties of purple carrot pomace[J]. International Agrophysics, 2013, 27(2): 143−149.
[31] BOUAKLINE H, BRAHMI M, ZIANI I, et al. Influence of air-drying temperature on yield, volatilome content, antioxidant, antidiabetic and antimicrobial activities of *Pistacia lentiscus* leaf oil: Experimental and modeling aspects[J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105773.
[32] da SILVA G V, MACHADO B A S, de OLIVEIRA W P, et al. Effect of drying methods on bioactive compounds and antioxidant capacity in grape skin residues from the new hybrid variety "BRS Magna"[J]. Molecules, 2020, 25(16): 3701.
[33] NZIMANDE N A, MIANDA S M, SEKE F, et al. Impact of different pre-treatments and drying methods on the physicochemical properties, bioactive compounds and antioxidant activity of different tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars[J]. LWT, 2024, 207: 116641.
[34] LI Y, HAN J Y, YARLEY O P N, et al. Effects of combined drying techniques and cellulase hydrolysis on the nutritional value and sensory properties of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*)[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139387.
[35] TAO Yang, HAN Mengfan, GAO Xiaoge, et al. Applications of water blanching, surface contacting ultrasound-assisted air drying, and their combination for dehydration of white cabbage: Drying mechanism, bioactive profile, color and rehydration property[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 53: 192−201.

[36] LUO F X, NURGULI A, LIU Y, et al. Physicochemical properties and volatile compounds of *Rosa roxburghii* fruit using different drying methods[J]. LWT, 2024, 208: 116722.
[37] HE Zedong, SHEN Qiulian, WANG Lingyan, et al. Effects of different drying methods on the physical characteristics and non-volatile taste components of *Schizophyllum commune*[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 123: 105632.
[38] LI Youyou, JIANG Shui, ZHU Yiwen, et al. Effect of different drying methods on the taste and volatile compounds, sensory characteristics of *Takifugu obscurus*[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 223−232.
[39] WANG Deqing, SU Dianbin, XU Huihui, et al. New insights into the drying technology of *Pleurotus eryngii*: Effects on protein structure, properties and product flavor analysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 285: 138306.
[40] YIN M Y, MATSUOKA R, YANAGISAWA T, et al. Effect of different drying methods on free amino acid and flavor nucleotides of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133620.
[41] ALP D, BULANTEKIN Ö. The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: A review[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(6): 1333−1343.
[42] 孟令帅, 聂玉, 雷燕, 等. 不同干燥方式对红托竹荪复水特性及其品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 68−77. [MENG Lingshuai, NIE Yu, LEI Yan, et al. Effects of different drying methods on rehydration characteristics and quality of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(10): 68−77.]
[43] 曾小峰, 颜蜜, 盖智星, 等. 羊肚菌酶解工艺优化及酶解液挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 147−154. [ZENG Xiaofeng, YAN Mi, GAI Zhixing, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process of *Morchella esculenta* and analysis of volatile flavor compounds in enzymatic hydrolysate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 147−154.]
[44] 吴力亚, 吴天祥, 张榕欣. 天麻参与灰树花固态发酵对纤维素关键酶活力和不同发酵期菌质挥发性成分变化的研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 91−96. [WU Liya, WU Tianxiang, ZHANG Rongxin. Effect of *Rhizoma gastrodiae* participating in solid-state fermentation of *Grifola frondosa* on its vitality of key cellulase and variation character of volatile components of fungal substance during different stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17): 91−96.]
[45] 昝博文, 彭丛粤, 白婷, 等. 不同加热方式对牛肉品质和挥发性风味的影响[J]. 肉类研究, 2025, 39(8): 24−33. [ZAN Bowen, PENG Congyue, BAI Ting, et al. Effects of different heating methods on beef quality and volatile flavor[J]. Meat Research, 2025, 39(8): 24−33.]