

# 比较不同干燥工艺参数对大球盖菇和秀珍菇品质引起的变化

骆勇<sup>1</sup>, 陈紫麟<sup>1</sup>, 郭天敏<sup>1</sup>, 高振鹏<sup>1</sup>, 李鸣雷<sup>2</sup>, 王周利<sup>1\*</sup>, 赵子丹<sup>3\*</sup>

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)(2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)(3. 宁夏农产品质量标准与检测技术研究所, 宁夏银川 750000)

**摘要:** 大球盖菇和秀珍菇营养丰富、味道鲜美, 但是其含水量较高, 不利于保存和长距离运输。对食用菌进行干制处理是延长产业链、扩大销售半径的重要举措。该研究以真空微波干燥和热风干燥两种方式为核心, 优化建立了大球盖菇和秀珍菇两种食用菌干燥最佳工艺参数, 并系统评价了不同处理对其理化特性及营养品质影响。结果表明: 真空微波干燥对大球盖菇的最优参数为真空度 0.008 6 MPa、温度 45~55 ℃、功率 1 600 W; 对秀珍菇的真空干燥参数为真空度 0.008 6 MPa、温度为 45~55 ℃、功率 2 000 W。热风干燥对大球盖菇和秀珍菇的最优温度为 60 ℃。此条件下, 大球盖菇的蛋白质、总糖、脂肪含量分别为 39.41%、28.86% 和 3.79%,  $L^*$  为 85.51、总酚含量为 4.28 mg/g、抗氧化能力最高、堆密度为 4.72 mL/g、持水力为 4.49 g/g, 综合品质最高且优于热风干燥; 秀珍菇的蛋白质、总糖和脂肪含量分别为 42.85%、37.25% 和 3.75%,  $L^*$  为 83.90、总酚含量为 4.31 mg/g、抗氧化能力最高、堆密度为 3.88 mL/g、持水力为 4.25 g/g, 综合品质优于热风干燥。结论: 真空微波干燥干燥的食用菌相比热风干燥拥有更高的品质。

**关键词:** 大球盖菇; 秀珍菇; 真空微波干燥; 热风干燥; 品质

文章编号: 1673-9078(2025)04-248-256

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0133

## Comparison on the Changes Caused by Different Drying Process Parameters on the Quality of *Stropharia rugosoannulata* and *Pleurotus geesteranus*

LUO Yong<sup>1</sup>, CHEN Zilin<sup>1</sup>, GUO Tianmin<sup>1</sup>, GAO Zhenpeng<sup>1</sup>, LI Minglei<sup>2</sup>, WANG Zhouli<sup>1\*</sup>, ZHAO Zidan<sup>3\*</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China) (2.College of Water Resources and Architectural Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China) (3.Institute for Agri-food Standards and Testing Technology, Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** *Stropharia rugosoannulata* and *Pleurotus geesteranus* are rich in nutrients and delicious, but their water content is high, which is not conducive to storage and long-distance transport. Drying processing of edible mushrooms is an important measure to extend the industrial chain and expand the sales radius. This study took vacuum microwave drying and hot air drying as the core, optimized and established the best drying process parameters for two types of edible mushrooms, and systematically evaluated the effect of different treatments on their physicochemical properties and nutritional quality. The results showed that vacuum microwave drying was the best for *Stropharia rugosoannulata* with parameters of vacuum degree 0.008 6 MPa, temperature 45~55 ℃, and power 1 600 W; for *Pleurotus geesteranus*, the parameters were vacuum degree 0.008 6 MPa, temperature 45~55 ℃, and power 2 000 W. Hot air drying had the best temperature of 60 ℃ for both mushrooms. Under these conditions, the protein, total sugar, and fat content of *Stropharia rugosoannulata* were 39.41%, 28.86%, and 3.79%,  $L^*$  was 85.51, total phenol content was 4.28 mg/g, antioxidant capacity was the highest, bulk density was 4.72 mL/g, water holding capacity was 4.49 g/g, and overall quality was the highest and superior to hot air drying; the protein, total sugar, and fat content of *Pleurotus geesteranus* were 42.85%, 37.25%, and 3.75%,  $L^*$  was 83.90, total phenol content was 4.31 mg/g, antioxidant capacity was the highest, bulk density was 3.88 mL/g, and water holding capacity was 4.25 g/g, overall quality was superior to hot air drying. Conclusion: Edible mushrooms dried by vacuum microwave drying have higher quality than those dried by hot air drying.

**引文格式:**

骆勇,陈紫麟,郭天敏,等.比较不同干燥工艺参数对大球盖菇和秀珍菇品质引起的变化[J].现代食品科技,2025,41(4):248-256.

LUO Yong, CHEN Zilin, GUO Tianmin, et al. Comparison on the changes caused by different drying process parameters on the quality of *Stropharia rugosoannulata* and *Pleurotus geesteranus* [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 248-256.

收稿日期: 2024-01-28

基金项目: 宁夏农林科学院对外科技合作专项项目 (DW-X-2022001-05); 宁夏自然科学基金项目 (2021AAC03279); 陕西省重点研发计划项目 (2020NY-111)

作者简介: 骆勇 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与食品质量安全检测控制, E-mail: luoyong9144@163.edu.cn

通讯作者: 王周利 (1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与食品质量安全检测控制, E-mail: wzl1014@nwsuaf.edu.cn; 共同通讯作者: 赵子丹 (1985-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品质量标准及检测技术, E-mail: ddhgyjzz@163.com

contents are high which is not conducive to preservation and long-distance transportation. Drying of edible fungi is an important measure to extend the industrial chain and expand the sales radius. In this study, vacuum microwave drying and hot air drying were the focus, and the optimal drying process parameters for drying *Stropharia rugosoannulata* and *Pleurotus geesteranus* were optimized and established. The effects of different treatments on their physicochemical properties and nutritional quality were systematically evaluated. The results showed that the optimal processing parameters of vacuum microwave drying for *Stropharia rugosoannulata* were: vacuum degree, 0.008 6 MPa; temperature, 45~55 °C; power, 1 600 W. The optimal vacuum microwave drying parameters for *Pleurotus geesteranus* were: vacuum degree, 0.008 6 MPa; temperature, 45~55 °C; power, 2 000 W. Under these conditions, the protein, total sugar and fat contents of *Stropharia rugosoannulata* were 39.41%, 28.86% and 3.79%, respectively, with its  $L^*$  being 85.51, total phenol content being 4.28 mg/g, antioxidant capacity being the highest, bulk density being 4.72 mL/g, and water-holding capacity being 4.49 g/g. The contents of protein, total sugar and fat of *Pleurotus geesteranus* were 42.85%, 37.25% and 3.75%, respectively, with its  $L^*$  being 83.90, total phenol content being 4.31 mg/g, antioxidant capacity being the highest, bulk density being 3.88 mL/g, and water holding capacity being 4.25 g/g. The comprehensive quality resulted from vacuum microwave drying was better than that resulted from hot air drying. In conclusion, the edible fungi dried by vacuum microwave drying have higher quality than those dried by hot air drying.

**Key words:** *Pleurotus geesteranus*; *Stropharia rugoso-annulata*; vacuum microwave drying; hot air drying; quality

大球盖菇 (*Stropharia rugoso-annulata*) 1980年引入国内并开始大量推广栽培。2021年大球盖菇的产量超过21万t, 且还在持续增长, 大球盖菇产业还有很大的发展空间<sup>[1]</sup>。大球盖菇富含多种营养素与活性物质, 常食大球盖菇能增强人体免疫功能, 具有很强的抗病毒、抗肿瘤作用, 能够调节肠道健康<sup>[2-4]</sup>。并且大球盖菇鲜菇色泽鲜丽香气丰富, 口感很好<sup>[5]</sup>。秀珍菇 (*Pleurotus geesteranus*) 在20世纪90年代末国内引进后栽培产量逐年提升, 2021年秀珍菇产量达到了59.23万t, 较2020年提升21.69%<sup>[6]</sup>。秀珍菇营养丰富, 富含蛋白质, 氨基酸种类多样, 同时含有黄酮、多酚、活性多糖等成分<sup>[7]</sup>。研究显示, 秀珍菇的营养成分丰富, 具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节活性等功能<sup>[8]</sup>。模拟消化产生的秀珍菇水解物具有较好的抗氧化性<sup>[9]</sup>。秀珍菇与大球盖菇形态优美、营养丰富、味质鲜嫩、香气怡人, 且两种食用菌在国内产业发展迅速, 但是这两种菌的水分含量极高, 均难以在常温下储存, 需要寻找合适的方法将其干制<sup>[10,11]</sup>。

传统干燥食用菌方法往往采用自然晾晒的方法, 干燥方式对食用菌的营养成分和挥发性成分有影响, 自然晾晒出食用菌往往营养成分流失, 色泽暗沉, 品质下降<sup>[11,12]</sup>。因此需要寻找新的干燥方式来对食用菌进行干燥, 提升干制食用菌的品质。真空微波干燥技术是一种将微波干燥和真空干燥两者的优点结合起来的干燥方式, 其热传导与水分扩

散方向相同, 具有干燥速率快、能耗低等特点, 已经被广泛应用于食材、药材等方面的干制<sup>[13,14]</sup>。在Soares等<sup>[15]</sup>的研究中发现真空微波干燥技术能对胡萝卜的颜色、营养物质以及物理结构有较好的保留作用。Dai等<sup>[16]</sup>的研究中发现较高的功率密度对干燥时间和木瓜脆片的品质有好的影响。何茸茸等<sup>[17]</sup>的研究中也发现真空微波干燥能降低干燥时间并提高草莓脯的品质, 更好保留草莓脯中花色苷等营养物质。

使用真空微波干燥可以提高食品的品质, 但是目前针对大球盖菇和秀珍菇的真空微波干燥报道及应用较少。因此, 本研究旨在对比真空微波干燥和热风干燥过程中不同参数对大球盖菇和秀珍菇品质的影响, 寻找出最适合两种食用菌的干燥工艺参数, 以为食用菌原材料快速干燥及品质保真提供技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

秀珍菇大球盖菇, 购自宁夏省吴忠市晟祥菌菇种植专业合作社。

福林酚试剂、甲醇、甲酸、乙腈(色谱纯), 四川西陇科学有限公司; 乙二胺四乙酸二钠、柠檬酸、磷酸二氢钠、无水硫酸钠、氯化钠(分析纯), 广州光华科技股份有限公司; PSA(二乙胺-N-丙基

硅烷), 烟台青云仪器设备有限公司。

HC-3018R 型高速冷冻离心机, 安徽中科中佳科学仪器有限公司; XH-D 涡旋混合器, 上海汉诺仪器有限公司; CS-820 色度仪, 杭州彩谱科技有限公司; UV-1700 型紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; FW-400AD 高速万能粉碎机, 天津鑫博得仪器有限公司; CS-820 台式分光测色仪, 杭州彩谱科技有限公司; 真空微波干燥机, 江苏南京奥润微波科技公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 秀珍菇和大球盖菇菌干燥处理

将实验用秀珍菇与大球盖菇清洗沥干后, 切成 5 mm 厚的薄片, 分别放入鼓风干燥箱和真空微波干燥机中进行处理。

干燥条件: (1) 将 500 g 食用菌均匀放在鼓风干燥箱中, 分别在温度为 40、50、60、70、80 °C 进行干燥, 每小时进行一次翻面, 将食用菌含水量干燥后取出。(2) 将 500 g 食用菌均匀放入真空微波干燥设备的托盘中, 分别在 800、1 200、1 600、2 000、2 400 W 的功率下进行干燥, 干燥仓真空度为 0.008 6 MPa, 温度为 45~55 °C, 待菌粉干燥后取出。具体干燥参数与时间如表 1 所示。

取干燥后的食用菌放入粉碎机中破碎后, 过 100 目筛得到食用菌粉末。

表 1 不同干燥方式处理两种食用菌的参数和时间

Table 1 Parameters and time of two kinds of edible fungi treated by different drying methods

组别	秀珍菇		组别	大球盖菇	
1	40 °C	10 h	11	40 °C	13 h
2	50 °C	9 h	12	50 °C	11 h
3	60 °C	8 h	13	60 °C	10 h
4	70 °C	7 h	14	70 °C	8 h
5	80 °C	6 h	15	80 °C	7 h
6	800 W	40 min	16	800 W	45 min
7	1 200 W	30 min	17	1 200 W	34 min
8	1 600 W	20 min	18	1 600 W	24 min
9	2 000 W	15 min	19	2 000 W	18 min
10	2 400 W	12 min	20	2 400 W	13 min

### 1.2.2 食用菌基本营养成分的测定

含水量、灰分、脂肪基本成分参照 Das 等<sup>[18]</sup>的方法进行测定, 含水量采用直接干燥法, 灰分采用马弗炉灼烧的方法, 脂肪采用索氏抽提法测定。

蛋白质: 使用凯氏定氮法对蛋白质含量进行测定<sup>[19]</sup>。

总糖: 根据 Akram 等<sup>[20]</sup>的方法在 60 °C 下用蒸馏水 (1:25 g/mL) 提取 1 h。随后 8 000 r/min 离心 20 min, 得到上清液。再使用相同方法提取沉淀物两次, 合并上清液, 在 4 °C 下用 4 倍量的乙醇沉淀过夜。之后, 将溶液以 8 000 r/min 离心 20 min 以分离沉淀, 随后将其溶解在蒸馏水中。采用苯酚-硫酸法测定粗多糖含量。

### 1.2.3 食用菌粉体性质测定

色度: 将食用菌粉装入保鲜膜压平, 色度仪读取食用菌粉的  $L^*$  值 (白度)、 $a^*$  值 (红度)、 $b^*$  值 (黄度)。

堆密度: 称取 20.00 g 的食用菌粗粉加入到 100 mL 的刻度量筒中, 轻轻敲打外壁 120 次后, 读取量筒中粉体相应的体积, 计算粉体质量和体积的比为堆密度 (g/mL)。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中:

$\rho$ —堆密度, g/mL;

$m$ —食用菌粉末质量, g;

$V$ —食用菌粉末体积, mL。

持水力: 准确称取 0.500 g 食用菌粉于 100 mL 离心管中, 记为  $m_2$ , 加入 15 mL 蒸馏水, 室温存储 24 h, 离心 (6 000 r/min, 20 min), 倒出上清液, 吸去离心管内壁残留的水分, 室温下放置 3 min 后称取湿菌粉和离心管总重记为  $m_1$ , 平行 3 次, 计算持水力。

$$O = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (2)$$

式中:

$O$ —持水力, g/g;

$m_1$ —样品质量, g;

$m_2$ —食用菌粉末质量, g。

### 1.2.4 食用菌总酚和抗氧化能力测定

总酚含量: 根据 Li 等<sup>[21]</sup>的方法, 稍作调整, 称取 1 g 菌粉, 加入 30 mL  $\varphi=60\%$  乙醇, 300 W 超声提取 60 min, 4 °C 条件下 8 000 r/min 离心 10 min, 收集上清液定容至 50 mL 作为样品的总酚提取液, 采用福林酚法测出总酚含量。

DPPH 自由基清除率: 称取一定量的 DPPH, 用无水乙醇配制成 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液。取

10 mg/mL 菌粉溶液 2 mL 加入 2 mL DPPH 溶液中, 混合均匀, 黑暗反应 30 min, 6 000 r/min 离心 15 min, 在 517 nm 处测定上清吸光度。以无水乙醇为空白, 以维生素 C (Vc) 为阳性对照<sup>[22]</sup>。

$$S_D = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$S_D$ —DPPH 自由基清除率, %;

$A_1$ —测试组吸光度;

$A_2$ —对照组吸光度;

$A_0$ —空白组吸光度。

ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率: 使用 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率试剂盒进行测试。

·OH 清除率: 在试管中加入 2 mL 0.8 mg/mL 的菌粉溶液、2 mL 6 mmol/L 的 FeSO<sub>4</sub> 溶液和 2 mL 6 mmol/L 的水杨酸-乙醇溶液。最后加入 1 mL 8 mmol/L 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液开始反应。混合后, 系统在 37 °C 水浴中反应 30 min。冷却至室温后, 在 510 nm 处测量吸光度。水作为空白对照, Vc 作为阳性对照<sup>[22]</sup>。

$$S_O = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$S_O$ —·OH 清除率, %;

$A_1$ —测试组吸光度;

$A_2$ —对照组吸光度;

$A_0$ —空白组吸光度。

### 1.2.5 食用菌挥发性成分分析

电子鼻: 准确称取菌粉 0.5 g 于 30 mL 的电子鼻专用顶空瓶中, 加入 5.0 mL 蒸馏水混匀, 室温 (25 °C) 下静置平衡 1 h 后测定。测量参数如下: 等待时间 10 s; 设定测量时间 300 s; 传感器清洗时间 100 s; 载气流速 600 mL/min<sup>[23]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

每个实验均做 3 次平行, 使用 Origin 2018 软件作图, 采用 SPSS 18 软件对数据进行显著性检验 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干燥方式对秀珍菇和大球盖菇的基本营养成分影响

水分含量是食用菌在干燥过程最重要的指标,

不同干燥方式、参数和品种会影响食用菌干燥过程中的水分含量。热风干燥是利用高温气流对物料进行加热, 水分从内向外转移, 水分散失的速度较慢, 耗时长, 效率低。真空微波干燥技术利用微波对物料整体加热, 水分迁移速率迅速, 时间短, 效率高。两种食用菌经过干燥处理后的水分含量如表 2 所示。

大球盖菇真空微波干燥各组水分含量差异不大, 真空微波干燥的菌粉含水量较热风干燥各组含水量略低, 这是因为真空微波干燥技术干燥过程中水分迁移速率相较热风干燥更快。在真空微波干燥过程中, 800 W 功率的处理组的水分含量相较其余组较高, 因为 800 W 功率较低, 水分迁移速率较慢, 干燥不充分。热风干燥中, 更高温度的处理组的水分含量也更低一些, 热风干燥的过程中温度会直接影响干燥效果。秀珍菇的干燥规律与大球盖菇相似, 真空微波干燥处理组的水分含量随着功率升高降低, 显著小于热风干燥处理组 ( $P < 0.05$ )。

蛋白质、总糖和脂肪是食用菌重要的组成部分, 这些营养物质的保留率是评价干燥方式好坏的重要指标。从表 3 中可得, 真空微波干燥处理的大球盖菇蛋白质含量为 36.32%~39.41%、总糖含量为 23.85%~29.26% 相较热风干燥蛋白质含量为 31.47%~35.78%、总糖含量为 25.47%~29.21% 普遍较高。其中大球盖菇真空微波干燥 1 600 W 处理组的蛋白质含量 39.41% 为最高值, 总糖为 29.11% 与最高值无明显差别 ( $P > 0.05$ )。真空微波干燥处理组的脂肪含量显著高于热风干燥处理组, 1 600 W 处理组的脂肪含量显著高于其余组。因此 1 600 W 真空微波干燥处理对大球盖菇的营养成分保留较好。真空微波干燥处理的秀珍菇蛋白质含量为 39.35%~42.85%、总糖含量为 31.96%~37.5% 相较热风干燥蛋白质含量为 38.40%~39.88%、总糖含量为 28.77%~35.33% 也普遍较高。对比同一种处理方式的不同处理组来讲, 较高的处理参数和较长的处理时间会使得更多的蛋白质和糖分互相反应, 导致蛋白质和总糖含量的降低。大球盖菇真空微波干燥的脂肪含量较热风干燥较高, 在不同处理方式和参数下, 脂肪含量的变化范围较小。真空微波干燥秀珍菇处理组的脂肪含量显著高于热风干燥处理组。对于秀珍菇, 真空微波干燥 2 000 W 的基本营养成分损失较少, 处理组菌粉品质较好。有研究表明热风干燥处理时间长, 局部温度高, 糖分和蛋白质可能会发生美拉德反应导致蛋白质和总糖含量的降低, 干燥时间长也会导致脂肪的氧化从而降低脂肪含量<sup>[24]</sup>。真空微波干燥

干燥温度和真空度低,干燥时间短,食用菌中的糖和蛋白发生的美拉德反应及降解较弱,脂肪的氧化也较少。也有可能是因为微波处理能够加速多糖链中糖苷键的断裂,并加速其分解为低聚糖或单糖,因此能提高其多糖含量<sup>[25]</sup>。

表 2 不同干燥方式对食用菌基本营养成分含量

Table 2 Different drying methods on the content of basic nutrients of edible fungi

组别	水分含量	蛋白质/%	总糖/%	脂肪/%	
1	7.05 ± 0.25 <sup>ab</sup>	38.67 ± 0.08 <sup>f</sup>	28.77 ± 0.19 <sup>b</sup>	2.55 ± 0.56 <sup>c</sup>	
2	7.78 ± 0.13 <sup>a</sup>	39.54 ± 0.11 <sup>c</sup>	30.64 ± 0.07 <sup>s</sup>	2.22 ± 0.10 <sup>c</sup>	
3	6.42 ± 0.81 <sup>bc</sup>	39.95 ± 0.16 <sup>d</sup>	35.33 ± 0.05 <sup>c</sup>	2.20 ± 0.07 <sup>c</sup>	
4	6.74 ± 0.06 <sup>ab</sup>	38.59 ± 0.27 <sup>f</sup>	33.62 ± 0.04 <sup>c</sup>	2.20 ± 0.21 <sup>c</sup>	
秀珍菇	5	4.32 ± 0.28 <sup>c</sup>	38.50 ± 0.08 <sup>f</sup>	32.16 ± 0.18 <sup>f</sup>	2.10 ± 0.07 <sup>c</sup>
6	6.00 ± 0.73 <sup>bcd</sup>	39.44 ± 0.14 <sup>c</sup>	34.44 ± 0.21 <sup>d</sup>	3.30 ± 0.28 <sup>b</sup>	
7	4.98 ± 0.55 <sup>dc</sup>	40.63 ± 0.21 <sup>c</sup>	35.92 ± 0.14 <sup>b</sup>	3.75 ± 0.35 <sup>b</sup>	
8	5.98 ± 0.09 <sup>bcd</sup>	41.25 ± 0.14 <sup>b</sup>	37.20 ± 0.04 <sup>a</sup>	4.50 ± 0.28 <sup>a</sup>	
9	5.26 ± 0.64 <sup>dc</sup>	43.03 ± 0.25 <sup>a</sup>	37.25 ± 0.13 <sup>a</sup>	4.80 ± 0.42 <sup>a</sup>	
10	5.54 ± 0.16 <sup>cd</sup>	40.09 ± 0.12 <sup>d</sup>	31.96 ± 0.09 <sup>f</sup>	3.75 ± 0.35 <sup>b</sup>	
11	5.58 ± 0.23 <sup>a</sup>	31.47 ± 1.30 <sup>c</sup>	25.47 ± 0.22 <sup>c</sup>	2.63 ± 0.22 <sup>d</sup>	
12	5.09 ± 0.13 <sup>b</sup>	34.13 ± 0.07 <sup>d</sup>	27.15 ± 0.32 <sup>b</sup>	2.62 ± 0.07 <sup>d</sup>	
13	4.92 ± 0.16 <sup>bc</sup>	35.78 ± 0.62 <sup>c</sup>	29.21 ± 0.47 <sup>a</sup>	2.91 ± 0.04 <sup>c</sup>	
14	4.78 ± 0.19 <sup>c</sup>	33.80 ± 0.45 <sup>d</sup>	26.06 ± 0.81 <sup>bc</sup>	2.76 ± 0.05 <sup>cd</sup>	
大球盖菇	15	4.69 ± 0.08 <sup>c</sup>	32.02 ± 0.49 <sup>c</sup>	25.83 ± 0.93 <sup>bc</sup>	2.78 ± 0.11 <sup>cd</sup>
16	3.25 ± 0.11 <sup>d</sup>	36.32 ± 1.10 <sup>c</sup>	26.67 ± 1.28 <sup>bc</sup>	2.58 ± 0.26 <sup>d</sup>	
17	2.79 ± 0.05 <sup>c</sup>	36.54 ± 0.05 <sup>c</sup>	29.26 ± 0.09 <sup>a</sup>	3.55 ± 0.12 <sup>ab</sup>	
18	2.54 ± 0.08 <sup>f</sup>	39.41 ± 0.64 <sup>a</sup>	29.11 ± 1.01 <sup>a</sup>	3.79 ± 0.08 <sup>a</sup>	
19	2.49 ± 0.02 <sup>f</sup>	37.99 ± 0.58 <sup>b</sup>	28.86 ± 0.39 <sup>a</sup>	3.38 ± 0.16 <sup>b</sup>	
20	2.38 ± 0.05 <sup>f</sup>	36.52 ± 0.89 <sup>c</sup>	23.85 ± 0.82 <sup>d</sup>	3.31 ± 0.09 <sup>b</sup>	

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。下表同。

## 2.2 不同干燥方式对秀珍菇和大球盖菇菌粉的基本物理性质影响

不同处理方式对秀珍菇的色度影响如表 3 所示,  $L^*$  值表示亮度, 数值越高表示颜色越亮 (0 表示黑, 100 表示白)。 $a^*$  值表示从绿色 (负值) 到红色 (正值) 的颜色范围。 $b^*$  值表示从蓝色 (负值) 到黄色 (正值) 的颜色范围。真空微波干燥 800 W 处理条件下,  $L^*$  值为 82.89,  $a^*$  值为 2.04,  $b^*$  值为 18.72。随着功率的升高,  $L^*$  值和  $b^*$  值都有轻微的增加。 $a^*$  值在不同功率下变化不大, 但最大功率 (2 400 W) 下略微增加。热风干燥处理后在

不同温度下,  $L^*$  值显著减小, 说明颜色变得更暗。随着温度的增加,  $a^*$  值显著增加, 表明颜色变得更红。总体来说, 热风干燥处理导致秀珍菇的颜色变暗, 更偏向红色和黄色, 而真空微波干燥处理对颜色的影响较小, 但也有一些变化。

表 3 不同干燥方式对食用菌色度的影响

Table 3 Different drying methods on the content of basic nutrients of edible fungi

组别	$L^*$	$a^*$	$b^*$
1	72.76 ± 0.37 <sup>c</sup>	6.72 ± 0.08 <sup>d</sup>	23.62 ± 0.65 <sup>a</sup>
2	70.89 ± 0.62 <sup>d</sup>	7.43 ± 0.02 <sup>c</sup>	23.49 ± 0.73 <sup>a</sup>
3	69.66 ± 0.46 <sup>e</sup>	8.06 ± 0.02 <sup>b</sup>	23.75 ± 0.57 <sup>a</sup>
4	64.67 ± 0.87 <sup>s</sup>	9.11 ± 0.31 <sup>a</sup>	23.35 ± 0.87 <sup>a</sup>
5	67.45 ± 1.04 <sup>f</sup>	8.30 ± 0.33 <sup>b</sup>	22.65 ± 0.49 <sup>a</sup>
6	82.89 ± 0.22 <sup>ab</sup>	2.04 ± 0.09 <sup>ef</sup>	18.72 ± 1.01 <sup>b</sup>
7	82.90 ± 0.59 <sup>a</sup>	2.06 ± 0.08 <sup>ef</sup>	18.81 ± 1.58 <sup>b</sup>
8	83.81 ± 0.30 <sup>a</sup>	1.90 ± 0.09 <sup>f</sup>	16.67 ± 0.52 <sup>c</sup>
9	83.90 ± 0.52 <sup>a</sup>	2.00 ± 0.14 <sup>f</sup>	17.63 ± 0.25 <sup>bc</sup>
10	82.24 ± 0.14 <sup>b</sup>	2.34 ± 0.15 <sup>e</sup>	18.28 ± 2.14 <sup>bc</sup>
11	84.93 ± 0.34 <sup>b</sup>	0.51 ± 0.16 <sup>ef</sup>	11.21 ± 0.62 <sup>c</sup>
12	83.47 ± 0.21 <sup>c</sup>	0.74 ± 0.14 <sup>e</sup>	13.36 ± 0.57 <sup>c</sup>
13	74.84 ± 0.34 <sup>d</sup>	3.14 ± 0.24 <sup>b</sup>	15.45 ± 0.55 <sup>a</sup>
14	75.02 ± 0.32 <sup>d</sup>	2.91 ± 0.26 <sup>c</sup>	14.64 ± 0.35 <sup>b</sup>
15	74.73 ± 0.43 <sup>d</sup>	4.54 ± 0.16 <sup>a</sup>	14.70 ± 0.30 <sup>b</sup>
16	85.41 ± 0.28 <sup>ab</sup>	0.24 ± 0.13 <sup>s</sup>	11.44 ± 0.53 <sup>c</sup>
17	83.43 ± 1.26 <sup>c</sup>	1.70 ± 0.13 <sup>d</sup>	12.93 ± 0.21 <sup>c</sup>
18	85.51 ± 0.26 <sup>ab</sup>	0.71 ± 0.13 <sup>e</sup>	12.29 ± 0.26 <sup>d</sup>
19	85.10 ± 0.19 <sup>b</sup>	0.26 ± 0.05 <sup>s</sup>	10.90 ± 0.16 <sup>c</sup>
20	86.02 ± 0.37 <sup>a</sup>	0.32 ± 0.21 <sup>fs</sup>	9.73 ± 0.21 <sup>f</sup>

不同处理对大球盖菇的影响与秀珍菇较为相近, 如表 3 所示大球盖菇在热风干燥不同温度处理下,  $L^*$  值随温度的升高而减小, 粉体颜色变得较暗。 $a^*$  值和  $b^*$  值也随温度增加而增加, 粉体颜色也变得更红和更黄。在不同微波功率下进行真空微波干燥,  $L^*$  值和  $a^*$  值变化较小, 没有明显趋势。 $b^*$  值在不同微波功率下变化较小, 但在 2 400 W 下略微减小。热风干燥处理导致大球盖菇的颜色变得较暗, 这表明在热风干燥过程中, 蛋白质或氨基酸与还原糖之间发生了非酶促美拉德反应, 这可能导致热风干燥样品看起来更暗<sup>[26]</sup>。而真空微波干燥处理在不同功率下对颜色的影响相对较小颜色也较为美观。真空微波干燥过程中温度和真空度都较低, 能有效

避免食用菌干燥过程中发生的焦糖化反应和美拉德反应，色泽更加鲜亮美观。

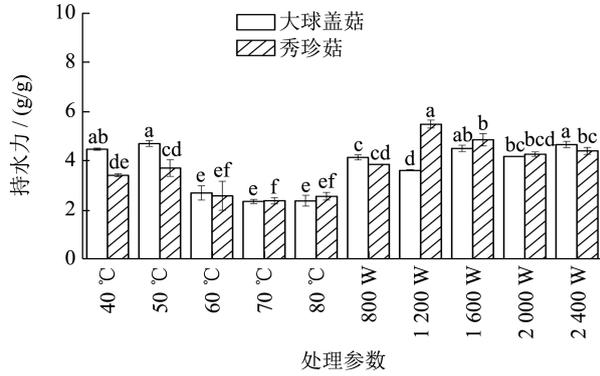


图 1 不同处理参数对食用菌持水力影响

Fig.1 Effects of different treatment parameters on water holding capacity of edible fungi

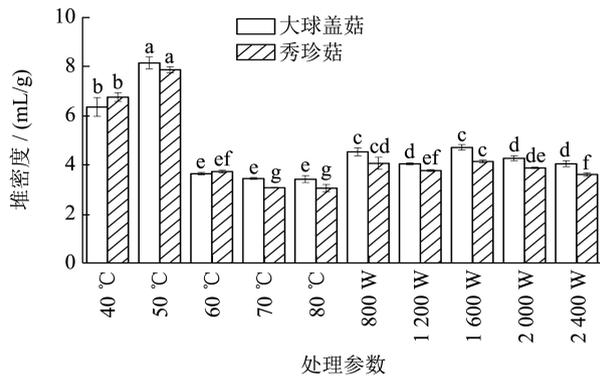


图 2 不同处理参数对食用菌堆密度影响

Fig.2 Effects of different treatment parameters on bulk density of edible fungi

同时，不同处理参数对菌粉的持水力和堆密度影响较大。如图 1 和图 2 所示，不同干燥方式和参数对菌粉的持水力明显的影响，持水力代表菌粉对水的亲和性或吸水能力，其中真空微波干燥的大球盖菇菌粉和秀珍菇菌粉的持水力强，不同功率微波处理组之间没有明显差异，热风干燥的菌粉则受温度影响较大，温度低的组持水力较强。堆密度代表了单位体积内粉末颗粒的紧密程度或密度，40 °C 和 50 °C 热风干燥处理组的堆密度远高于其余处理组，真空微波干燥的堆密度略高于其余三组热风处理组。其主要是因为真空微波干燥的菌粉组织结构比较疏松，内部还是依然保留了微孔结构，导致真空微波干燥的物理性质要优于热风干燥处理的菌粉。但是不同功率处理组之间的差别并不大，热风干燥处理的温度对物理性质的影响较大，低温干燥的各项指标都较好。Yilmaz 等<sup>[27]</sup>研究中也发现，不同干燥处理的菌粉的持水能力会有差异。

### 2.3 不同干燥方式对秀珍菇和大球盖菇的总酚含量和抗氧化性影响

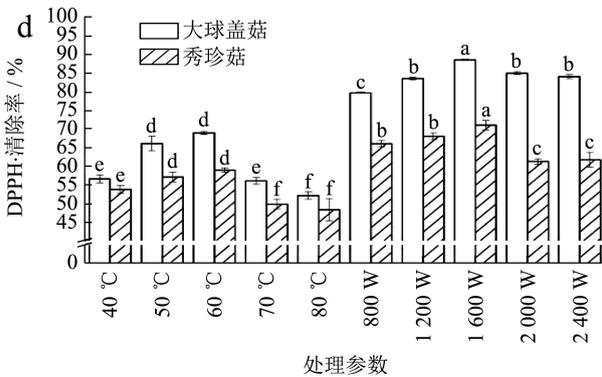
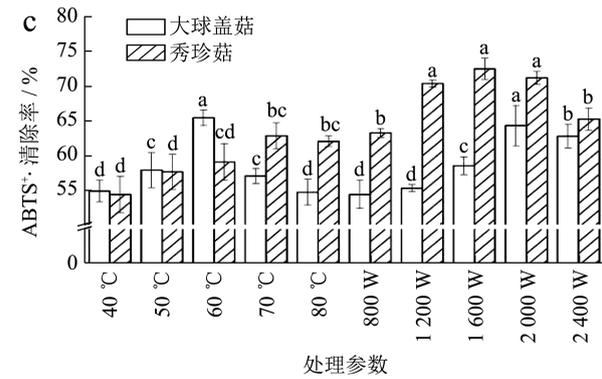
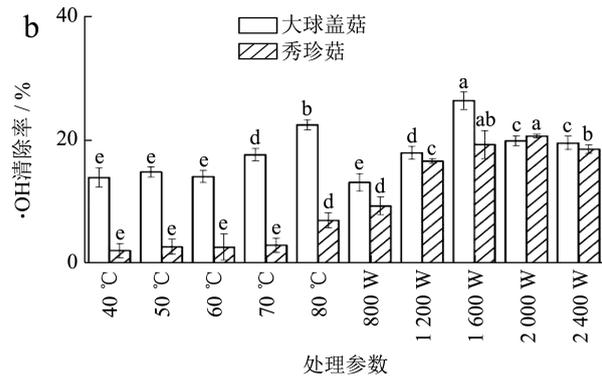
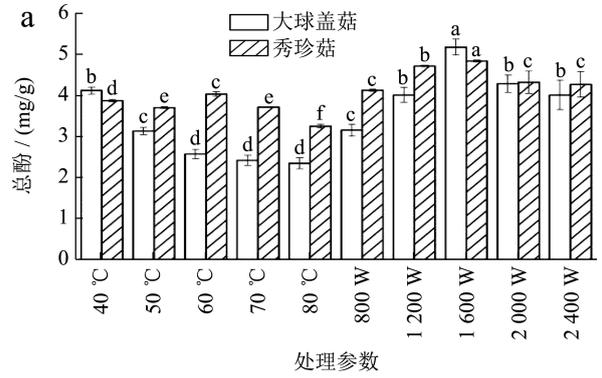


图 3 不同处理参数对总酚含量和抗氧化性的影响

Fig.3 Effects of different treatment parameters on total phenol content and antioxidant activity

不同干燥处理的总酚含量如图 3a 所示，总酚含量是菌粉营养性质的重要指标，代表了食用菌中

包括酚、类黄酮、酚酸和其他多种多样的抗氧化化合物的总量。大球盖菇的真空微波干燥处理组的总酚含量要显著高于热风干燥处理组，对于真空微波干燥，功率越大，总酚含量越高，处理时间越长总酚物质损失越少。对于大球盖菇热风干燥处理，40 °C时的总酚含量有 4.11 mg/g，80 °C时则只有 2.34 mg/g，高温处理会造成总酚物质的损失。对于秀珍菇的热风干燥 40 °C处理组的总酚含量为 3.87 mg/g，80 °C为 3.29 mg/g，任祥瑞等<sup>[28]</sup>的研究也验证总酚含量随温度处理会呈现下降趋势，总酚含量与处理时间和处理时长有关。大球盖菇真空微波干燥 800 W 的总酚含量为 4.12 mg/g，1 600 W 处理组为 5.17 mg/g，2 400 W 处理组含量则下降至 4.01 mg/g。秀珍菇真空微波干燥 800 W 的总酚含量为 3.15 mg/g，2 400 W 处理组为 4.84 mg/g，有随温度和功率变化的趋势，但是不同处理组之间差距不明显。Das 等<sup>[18]</sup>的研究与本研究的结论一致，真空微波干燥的总酚含量相较热风干燥的总酚含量较高。

不同处理方式对大球盖菇和秀珍菇的自由基清除率如图 3b~3d 所示，秀珍菇的 DPPH 自由基清除率热风干燥清除率随温度变化在 61.2%~70.9% 范围之间变化，显著高于真空微波干燥的 48.3%~58.9%。大球盖菇的真空微波干燥的清除率在 79.6%~88.5% 显著高于热风干燥，与总酚含量的结果相符合。对于 ·OH 清除率来讲，大球盖菇的的不同处理组之间差距并不明显，秀珍菇的真空微波干燥则远高于热风干燥，与总酚含量结果相符合。对于 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率，秀珍菇的真空微波干燥处理组在 63.22%~72.4%，略高于热风干燥的 54.3%~62.7%，大球盖菇的真空微波干燥处理组清除率为 54.3%~64.2%，与热风干燥处理组的清除率 54.7%~65.4% 相差不大。自由基清除率与干燥处理时间与功率相关，过长的处理时间或过高的处理温度都会导致清除能力下降<sup>[29]</sup>。综合三种自由基的清除率，结果与总酚含量结果较为相近，可以相互印证。

#### 2.4 不同干燥方式对秀珍菇和大球盖菇的挥发性成分影响

电子鼻是一种能够无损检测且快速检测样品的挥发性气味的仿生嗅觉技术。由图 4 所示对于秀珍菇的挥发性成分，不同处理之间的检测器响应值差异较小，即说明不同处理对于秀珍菇的挥发性成分影响不大。其中 W5S、W1W 和 W1S 三个感应器的响应值较大，说明在秀珍菇的挥发性成分中，氮氧

化合物、硫化物以及甲烷的成分较多。大球盖菇的电子鼻雷达图如图 5 所示，不同处理之间的雷达图形状较为相近，其中 W5S 和 W1W 的响应值尤其突出，其中真空微波干燥的 W5S 和 W1W 的响应值较热风干燥都较小，说明在经过真空微波处理后氮氧化合物和硫化物的挥发性成分含量较高，两种处理方式之间味道相近，庞凌云等<sup>[30]</sup>的研究也能表明不同干燥方式对样品的主要挥发性成分影响较小，挥发性成分相似。丁悦<sup>[31]</sup>的研究中也发现大球盖菇样品对 W1S 和 W5S 两个传感器的响应值比较明显，大球盖菇中的硫化物、吡嗪、烷烃类化合物、氮氧化合物和芳香族化合物对大球盖菇风味影响较大，与本实验结果可以相互印证。

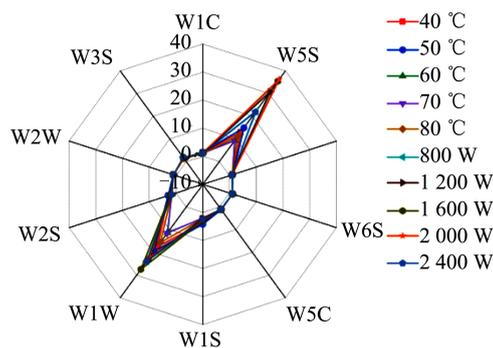


图 4 秀珍菇电子鼻雷达图

Fig.4 Electronic nose radar image of *Pleurotus geesteranus*

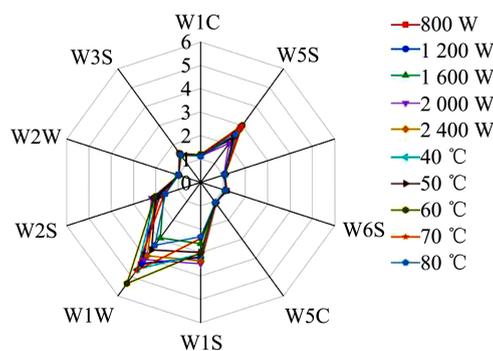


图 5 大球盖菇电子鼻雷达图

Fig.5 Electronic nose radar map of *Stropharia rugosoannulata*

如图 6 所示，对秀珍菇挥发性主成分进行 PCA 分析，第一主成分贡献率为 38.2%，第二主成分贡献率为 21.6%，两种主成分合计达到 59.8%，表示这两种主成分能反应大部分物质的挥发性信息，能够体现不同处理之间的差异，真空微波干燥 2 000 W 处理的样品位于最右侧，虽然与 2 400 W 样品重合，但是与热风干燥的样品都有差异，其余处理组基本都互有重合，说明不同处理组之间的香气差异并不大。大球盖菇主成分分析如图 7 所示，第一贡献率为

49.4%，第二贡献率为 32.1%，两种主成分合计达到 81.5%，表示这两种主成分能反应大部分物质的挥发性物质信息，在图中热风干燥的 40 °C 和 50 °C 位于图的最右侧，与其他处理组之间有较大差异，热风干燥处理组的图与真空微波干燥的样品与真空微波干燥的样品之间交集较小，说明对于大球盖菇热风干燥处理的 60~80 °C 处理组与真空微波干燥的香气成分差距并不大。

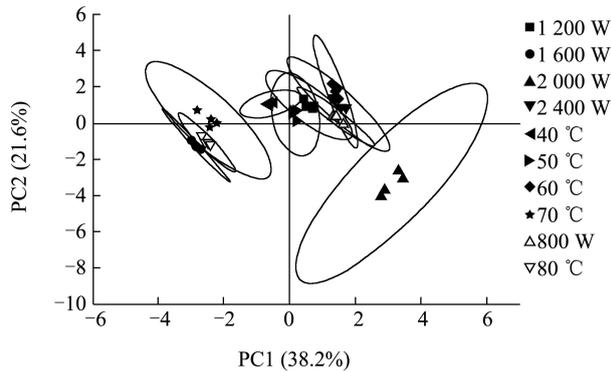


图 6 秀珍菇电子鼻主成分分析图

Fig.6 Principal component analysis of *Pleurotus geesteranus* electronic nose

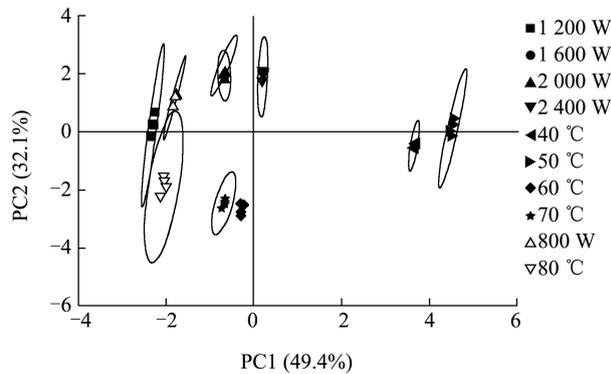


图 7 大球盖菇电子鼻主成分分析图

Fig.7 Principal component analysis of *Stropharia rugosoannulata*

### 3 结论

本研究通过比较真空微波干燥和热风干燥两种不同的处理方式对秀珍菇和大球盖菇的影响，得出了以下结论：真空微波干燥在降低水分含量方面表现出明显的优势，尤其在较高功率下。真空微波干燥的 1 200 W 和 2 000 W 处理组还更好地保留了食用菌中的蛋白质和总糖，相比之下，热风干燥的各个参数处理组的营养成分减少。真空微波干燥尤其是 1 600 W 和 2 000 W 处理组，不仅在保持食用菌的颜色上表现出更好的效果，还在物理性质方面具

有优势，包括较低的堆密度和较强的持水力，这有助于提高食用菌粉的质量和口感。真空微波干燥处理组在大球盖菇和秀珍菇的总酚含量和抗氧化能力显著高于热风干燥处理组。挥发性成分的电子鼻分析显示，不同处理组之间可能存在一些味道差异，但真空微波干燥能够保持更多的挥发性成分，气味更加浓郁，能够增加产品的风味。综上所述，真空微波干燥处理在多个方面表现出较好的性能，包括水分含量、基本营养成分、颜色、抗氧化性以及挥发性成分。在食用菌的干燥加工中，真空微波干燥是一种有潜力的技术。综合来讲对于将来的生产，大球盖菇 1 600 W 的真空微波干燥处理，秀珍菇 2 000 W 的真空微波处理有着更好的品质。然而，具体的选择应取决于生产需求、成本和产品特性，进一步的研究和优化也是必要的。此外，本研究结果可为其他食品原材料的干燥处理提供技术参考。

### 参考文献

- [1] 姚春馨,王小艳,王小蓉,等.大球盖菇栽培研究现状与绿色发展前景[J].中国食用菌,2023,42(6):90-97.
- [2] JIANG Y, ZHAO Q, DENG H, et al. The nutrients and volatile compounds in *Stropharia rugoso-annulata* by three drying treatments [J]. Foods, 2023, 12(10): 2077.
- [3] WANG Q, ZHAO Y, FENG X, et al. Effects of drying on the structural characteristics and antioxidant activities of polysaccharides from *Stropharia rugosoannulata* [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(9): 3622-3631.
- [4] ZHANG H, JIANG F, ZHANG J, et al. Modulatory effects of polysaccharides from plants, marine algae and edible mushrooms on gut microbiota and related health benefits: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 204: 169-192.
- [5] 陈荣荣,李文,吴迪,等.大球盖菇酶解液中鲜味肽的分离鉴定及其协同增鲜效果分析[J].食品科学,2024,45(1):1-13.
- [6] 柯斌榕,兰清秀,卢政辉,等.秀珍菇主栽品种遗传差异及农艺性状比较[J].东南园艺,2023,11(4):241-247.
- [7] LIU D, CHEN Y Q, XIAO XIAO W, et al. Nutrient properties and nuclear magnetic resonance-based metabonomic analysis of macrofungi [J]. Foods, 2019, 8(9): 397.
- [8] REN D, JIAO Y, YANG X, et al. Antioxidant and antitumor effects of polysaccharides from the fungus *Pleurotus abalonus* [J]. Chemo-Biological Interactions, 2015, 237: 166-74.
- [9] LIAO X, ZHU Z, WU S, et al. Preparation of antioxidant protein hydrolysates from *pleurotus geesteranus* and their protective effects on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidative damaged PC12 cells [J]. Molecules, 2020, 25(22): 5408.
- [10] 包秀婧,刘新宇,辛广,等.变温压差膨化干燥对秀珍菇鲜

- 香味的影响[J].食品科学,2019,40:243-248.
- [11] 胡思,黄文,王益,等.大球盖菇粉的热风干燥工艺研究[J].食品科技,2020,45(3):135-141.
- [12] HUO J, ZHANG M, WANG D, et al. New preservation and detection technologies for edible mushrooms: A review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(7): 3230-3248.
- [13] ZHANG D, HUANG D, ZHANG X, et al. Drying performance and energy consumption of *Camellia oleifera* seeds under microwave-vacuum drying [J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(7): 969-977.
- [14] YUE Y, ZHANG Q, WAN F, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of codonopsis pilosulae Slices [J]. Foods, 2023, 12(6): 1323.
- [15] SOARES DE MENDONÇA K, GOMES CORRÊA J L, JUNQUEIRA J R D J, et al. Peruvian carrot chips obtained by microwave and microwave-vacuum drying [J]. LWT, 2023, 187: 115346.
- [16] DAI J W, FU Q Q, LI M, et al. Drying characteristics and quality optimization of papaya crisp slices based on microwave vacuum drying [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): e16506.
- [17] 何茸茸,牛丽影,李大婧,等.真空微波干燥对草莓脯品质的影响[J].食品工业科技,2024,45(16):64-72.
- [18] DAS M, MAYOOKHA V P, GEETHA V, et al. Influence of different drying techniques on quality parameters of mushroom and its utilization in development of ready to cook food formulation [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(4): 1342-1354.
- [19] ALLEN W F. A micro-Kjeldahl method for nitrogen determination [J]. Oil and Fat Industries, 1931, 8(10): 391-397.
- [20] AKRAM K, SHAHBAZ H M, KIM G R, et al. Improved extraction and quality characterization of water-soluble polysaccharide from gamma-irradiated *Lentinus edodes* [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(2): 296-303.
- [21] LI Y, LIANG H, ZHOU D, et al. Phenolics, flavonoids content and antioxidant activities of tuber indicum at different maturity stages [J]. Chemistry & Biodiversity, 2022, 19(3): e202100830.
- [22] GONG P, HUANG Z, GUO Y, et al. The effect of superfine grinding on physicochemical properties of three kinds of mushroom powder [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(8): 3528-3541.
- [23] PEI F, YANG W, MA N, et al. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by headspace GC-MS and electronic nose [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 343-350.
- [24] PEI F, YANG W J, SHI Y, et al. Comparison of Freeze-Drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 702-710.
- [25] LU X, LI N, QIAO X, et al. Effects of thermal treatment on polysaccharide degradation during black garlic processing [J]. LWT, 2018, 95: 223-229.
- [26] WANG Q, LI S, HAN X, et al. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods [J]. LWT, 2019, 107: 236-242.
- [27] YILMAZ F M, ZUNGUR BASTIÖĞLU A. Production of phenolic enriched mushroom powder as affected by impregnation method and air drying temperature [J]. LWT, 2020, 122: 109036.
- [28] 任祥瑞,刘红开,赵晓燕,等.热风干燥温度对生姜片理化性质的影响[J].中国食品添加剂,2023,34(9):244-250.
- [29] 刘荣,刘永旭,郑志强.热风干燥对甘蓝粉持水力、持油力及抗氧化活性的影响[J].食品研究与开发,2023,44(12): 67-74.
- [30] 庞凌云,詹丽娟,李家寅,等.干燥方式对铁棍山药片挥发性风味成分的影响[J].中国食品学报,2024,24(1):301-314.
- [31] 丁悦.大球盖菇化学成分研究及基于GC-MS和智能感官技术质量评价[D].长春:吉林农业大学,2023.