

干燥方式对红托竹荪品质特性和微观结构的影响

郑秀艳¹, 陈曦¹, 何扬波¹, 黄磊^{2*}

(1. 贵州省农业科学院现代农业发展研究所, 贵州省农产品加工研究所, 贵州贵阳 550006)

(2. 贵州中国科学院天然产物化学重点实验室, 贵州贵阳 550014)

摘要:以新鲜红托竹荪为原料, 研究传统煤火干燥 (Coal Fire Drying, CFD)、空气源热泵干燥 (Air Source Heat Pump Drying, ASHPD)、真空微波-电热鼓风组合干燥 (Microwave Vacuum Drying in Combination with Forced Air Drying, MVD+FAD) 和真空冷冻干燥 (Vacuum Freeze Drying, VFD) 四种干燥方式对其外形、色泽、营养成分、氨基酸组成和含量、质构特性和微观结构的影响。结果表明: VFD 可以最大限度地保持竹荪菌柄和菌裙外形, 其蛋白质、粗纤维和总氨基酸含量最高, 色泽与鲜品最接近 ($\Delta E=3.60$); ASHPD 制备的竹荪菌柄和菌裙外形保持较好, 脂肪含量最高, 蛋白质保留效果较好。竹荪的鲜甜味/苦味的值为 VFD 组 (4.99%) > MVD+FAD 组 (4.66%) > ASHPD 组 (4.50%) > CFD 组 (4.37%)。VFD 制备的竹荪组织结构较脆, 组织内部结合力较小, 与鲜品相似, 而另三种干燥方式制备的竹荪内部结合力较大, 抵抗受损能力较强, 吞咽前需要更多的能量才能嚼碎。此外, VFD 和 ASHPD 制备竹荪的细胞状结构明显, VFD 更好的保持了竹荪原有的细胞状结构。干燥方式的综合评价结果为 VFD > MVD+FAD > ASHPD > CFD。综上, VFD 为红托竹荪较理想的干燥方式, 但其应用成本较高; 在实际生产中, ASHPD 是比较有推广价值的干燥方式。

关键词:红托竹荪; 干燥方式; 品质特性; 微观结构; 熵权法

文章编号: 1673-9078(2024)03-209-218

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0289

Effects of Different Drying Methods on the Quality Characteristics and Microstructure of *Dictyophora rubrovalvata* M.Zang

ZHENG Xiuyan¹, CHEN Xi¹, HE Yangbo¹, HUANG Lei^{2*}

(1. Guizhou Institute of Integrated Agriculture Development, Guizhou Institute of Farm Products Processing, Guiyang 550006, China)(2. Key Laboratory of Chemistry for Natural Products of Guizhou Province & Chinese Academic of Sciences, Guiyang 550014, China)

Abstract: Fresh *Dictyophora rubrovalvata* M.Zang was subjected to coal fire drying (CFD), air source heat pump drying (ASHPD), microwave vacuum drying combined with forced air drying (MVD+FAD), and vacuum freeze drying (VFD). The quality attributes of the dried samples, including appearance, color, nutritional composition, amino acid composition, texture properties, and microstructures, were compared. Based on the experimental results, VFD could maintain the stalk and skirt shape of *D. rubrovalvata* M.Zang to the maximum extent. The VFD-processed samples had the highest protein, crude

引文格式:

郑秀艳,陈曦,何扬波,等.干燥方式对红托竹荪品质特性和微观结构的影响[J].现代食品科技,2024,40(3):209-218.

ZHENG Xiuyan, CHEN Xi, HE Yangbo, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics and microstructure of *Dictyophora rubrovalvata* M.Zang [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 209-218.

收稿日期: 2023-03-10

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2020]1Y069 号)

作者简介: 郑秀艳 (1988-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: xiuyanzhengchan@163.com

通讯作者: 黄磊 (1988-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 功能食品研发, E-mail: xinyanghuanglei@163.com

fiber, and total acid contents, and their color was the closest to that of fresh products ($\Delta E=3.60$). The stalk and skirt shape of *D. rubrovalvata* M.Zang prepared by ASHPD were also well maintained. In addition, the ASHPD-processed sample had the highest fat content and its protein content was preserved reasonably well after ASHPD. The sweetness/bitterness value of *D. rubrovalvata* M.Zang dried by different methods was ranked as follows: VFD (4.99%)>MVD+FAD (4.66%)>ASHPD (4.50%)>CFD (4.37%). The tissue structure of the VFD sample was brittle, and its internal binding force was smaller than that of the other samples. Notably, these properties are similar to those of fresh products. However, the dried products prepared using the other three drying methods had greater internal binding strengths and higher resistance to damage. As a result, more energy is needed for chewing before swallowing. The *D. rubrovalvata* M.Zang samples prepared by VFD and ASHPD had clearer cellular structures, with VFD enabling better preservation of the original cellular structure. The comprehensive evaluation results of the drying methods appeared in the following order: VFD>MVD+FAD>ASHPD>CFD. Overall, VFD is an ideal drying method; however, this method is associated with a higher cost than the other methods. Among the methods, ASHPD has a higher promotion value in practical production.

Key words: *Dictyophora rubrovalvata* M.Zang; drying method; quality characteristics; microstructure; entropy weight method

红托竹荪 (*Dictyophora rubrovalvata* M.Zang), 属于鬼笔科 (*Phallaceae*) 竹荪属 (*Dictyophora*) 真菌^[1], 是我国非常名贵的食用菌品种。近年来, 因在贵州、四川和云南已经实现大面积人工栽培, 市场份额占比越来越高。红托竹荪外形美观, 风味清香, 口感脆嫩鲜美, 富含蛋白质、多糖、黄酮、维生素、氨基酸和不饱和脂肪酸, 具有抗氧化、抗高血脂症、抗肿瘤、免疫调节、保护肝肾等生物活性, 素有“菌中皇后”的美称^[2,3]。红托竹荪鲜品水分含量在 85% 以上, 采后细胞非常活跃, 在贮藏和运输过程中易产热、失水变黄、腐烂, 且易受机械损伤, 极不耐藏^[4], 需要在采后几小时内进行加工处理^[5]。干制加工通过减少物料水分含量、降低水分活度, 使产品不易受酶促和非酶促反应的影响和减少病原微生物的浸染实现延长贮藏期的目的^[6]。目前干制加工是红托竹荪的主要加工方式, 而市场上的竹荪干制产品大多存在外形不佳、褐变严重、品质较低、二氧化硫超标等问题。因此, 找到一种能保持竹荪外观、有效减少营养成分流失且优质品率高的加工方式, 对红托竹荪产业健康长足发展意义重大。

目前食用菌常用的干燥方式有传统的自然干燥和热风干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、真空干燥、红外辐射干燥等^[7,8]。热泵干燥技术最大的优点是高效节能, 与热风干燥相比可节能 40%~70%, 能较大程度保留食用菌的风味、色泽和营养成分, 内部较易形成疏松的结构^[9,10]。微波干燥利用高频微波电场直接到物料内部加热, 干燥速度较快, 但存在受热不均匀、控制不当物料表明易烧焦的弊端^[10,11], 而组合干燥则是提高产品品质的有

效技术^[12]。真空冷冻干燥是较低温条件下物料水分快速结冰, 然后在较高真空度下使冰直接升华去除水分的干燥技术, 低温和低压的结合可以较好地保留最终干燥产品的形状、颜色和风味, 是目前最先进的食品保鲜技术之一^[8,13]。不同的干燥方法对菌菇类的物理性质、营养成分、组织结构、生物活性以及功效均会产生较大的影响^[14]。研究表明, 干燥温度会对西藏黄蘑菇的品质产生明显的影响, 当热风干燥温度高于 60 °C 时, 黄蘑菇会发生明显褐变和严重的营养成分流失^[15]; 干燥加工会引起松茸脂肪、蛋白质和总糖含量的增加, 真空冷冻干燥可较好的保持松茸的色泽, 热风干燥和微波真空干燥则会引起褐变^[16]; 热风干燥和微波干燥制备枸杞时发生了高水平的美拉德反应但多糖含量较高, 真空冷冻干燥制备的枸杞多糖含量较低但感官品质较好^[17]。

目前关于红托竹荪的研究主要集中在栽培、营养成分分析、多糖功能成分及其功效等方面, 而关于现代干制加工技术和系统评价产品品质的研究则相对较少。本研究旨在以目前菇农普遍使用的传统煤火干燥方式为参照, 分别从外形、色泽、基本营养成分、氨基酸含量和呈味特性、质构特征和微观结构六个角度评价空气源热泵干燥、真空微波—热风组合干燥及真空冷冻干燥等现代加工技术对红托竹荪品质的影响, 以期为红托竹荪的干制加工技术升级和产品规格等级标准化提供支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜红托竹荪成熟菌蕾采自贵州省毕节市织金

县桂果镇竹荪种植基地，运回实验室后放置在温度 25.0~27.0 °C、湿度 70.00%~75.00% 条件下进行出菇，菌裙散开后及时采收，挑选完整、无污染、大小均一的红托竹荪鲜品进行干燥实验。

1.2 仪器与设备

TMS-Pro 型物性测定仪，美国 FTC 公司；FA2004 分析天平，上海精密科学仪器有限公司；MB35 卤素水分测定仪，奥豪斯国际贸易有限公司；LGJ-30G 真空冷冻干燥机，四环福瑞科仪科技发展（北京）有限公司；WBZ-10ML 微波真空干燥机，贵阳新奇微波工业有限责任公司；101 型电热鼓风干燥箱，北京科伟永兴仪器有限公司；JDYZN-5HG-13ZR II 空气源热泵烘干机，贵州九鼎新能源科技开发有限公司；NR200 色差仪，深圳市三恩驰科技有限公司；3400 扫描电子显微镜，日本日立（HITACHI）公司。

1.3 方法

1.3.1 不同干燥方法样品制备

将红托竹荪去除菌托和菌帽后，采用 4 种方式进行干燥。

传统煤火干燥（CFD）：将新鲜红托竹荪用竹签并排穿起，在干燥房内（2.50 m×2.50 m×2.50 m）置于煤火上方 1.50 m 进行干燥，温度控制在 65.0 °C 以下，时间 20.00 h。上述干燥过程重复 3 次，随机取样备用。

空气能热泵干燥（ASHPD）：将新鲜红托竹荪用竹签并排穿起，置于干燥架上，在空气能热泵烘房（1.50 m×1.20 m×1.40 m）内进行干燥，干燥条件为：0.00~4.00 h，干燥温度为 55.0 °C，湿度为 55.00%，4.00~6.00 h，干燥温度为 40.0 °C，湿度为 25.00%。上述干燥过程重复 3 次，随机取样备用。

真空微波+电热鼓风组合干燥（MVD+FAD）：将新鲜红托竹荪平放在托盘中，置于真空微波干燥机内，真空微波干燥条件为：真空度为 80.00 Pa、干燥系数为 0.85、物料水分为 88.00%、温度为 15.0 °C、时间为 35.00 min，鼓风干燥条件为：温度为 45.0 °C、时间为 6.00 h。干燥过程重复三次，随机取样备用。

真空冷冻干燥（VFD）：将新鲜红托竹荪平放在托盘中，置于冷冻干燥机内，先在 -50.0 °C 预冻 4.00 h，真空度 10.00 Pa 以下，-50.0 °C 干燥 2.00 h，-30.0 °C 干燥 2.00 h，-15.0 °C 干燥 2.00 h，0.0 °C 干燥 2.00 h，15.0 °C 干燥 4.00 h，25.0 °C 干燥 12.00 h。

上述干燥过程重复 3 次，随机取样备用。

1.3.2 尺寸测定

选择菌柄长度和直径、菌裙长度和厚度接近一致的红托竹荪鲜品，随机分成四组，每组 20 个样品，分别进行 CFD、ASHPD、MVD+FAD 和 VFD。采用游标卡尺分别测定干燥前后红托竹荪菌柄的长度和直径、菌裙的长度和厚度，其中菌柄直径和菌裙厚度的测定点分别选择菌柄和菌裙长度二分之一处，每个样品平行测定 10 次。

1.3.3 水分含量测定

采用水分测定仪在 101.30 kPa、105.0 °C 条件下进行测定，每个样品平行测定 3 次。

1.3.4 色泽测定

采用色差计测定红托竹荪的色泽，用总色差值（ ΔE ）代表被测样品的色泽（ L 、 a 、 b ）与新鲜样品色泽（ L^* 、 a^* 、 b^* ）的差异， C 表示样品的饱和度， H 表示样品的色相。 ΔE 按照以下公式计算。每组样品平行 10 次。

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2} \quad (1)$$

式中：

L 、 L^* ——样品的明度；

a 、 a^* ——样品的红绿度；

b 、 b^* ——样品的黄蓝度。

1.3.5 营养成分测定

蛋白质含量测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全质量标准食品中蛋白质的测定》，蛋白质系数 4.38。脂肪含量测定参照 GB 5009.6-2016《食品安全质量标准食品中脂肪的测定》。粗纤维含量测定参照 GB 5009.10-2003《植物类食品中粗纤维的测定》。灰分含量测定参照 GB 5009.4-2016《食品安全质量标准食品中灰分的测定》。总糖含量测定参照 GB/T 15672-2009《食用菌中总糖含量的测定》。氨基酸含量测定参照 GB 5009.6-2016《食品安全质量标准食品中氨基酸的测定》。

1.3.6 质构特性测定

1.3.6.1 样品制备

选择具有代表性的尺寸大小一致的红托竹荪干品菌柄部位，分别采用质构曲线解析法（Texture Profile Analysis, TPA）、拉伸试验和剪切试验进行质构特性测定，试验中每个样品平行测定 10 次。

TPA 测定样品制备：截取同一位置（以菌柄 1/2 处为中间点，前后各量取 2.50 cm）的红托竹荪菌

柄干品, 长度为 5.00 cm。复水样品制备, 将制备的菌柄干品置于 70.0 °C 水中浸泡 60.00 min, 滤水后备测。

拉伸试验样品制备: 截取同一位置 (以菌柄 1/2 处为中间点, 前后各量取 2.50 cm) 红托竹荪菌柄, 长度为 5.00 cm。复水样品制备方法同 TPA 试验。

剪切试验样品制备: 截取同一位置 (以菌柄 1/2 处为中间点, 前后各量取 2.50 cm) 的红托竹荪菌柄干品, 长度为 5.00 cm。复水样品制备方法同拉伸试验。

1.3.6.2 质构测定条件

TPA 测定条件: 选择 50.00 mm 圆盘, 1 000.00 N 力量感应元。经优化后, 样品测试前、测试速度和测试后速度均为 60.00 mm/min, 间隔时间为 5.00 s, 压缩比为 60.00%。

拉伸试验测定条件: 选择小型楔形固定夹具 (型号: TMS Small Wedge Grip Kit) 进行拉伸试验, 选择 1 000.00 N 力量感应元, 起始力为 1.50 N, 测试速度与回程速度相同。

剪切试验测定条件: 选择轻型单刀符合剪切探头 (型号: TMS Light Weight Blade Set) 进行剪切试验, 选择 1 000.00 N 力量感应元, 起始力为 1.50 N, 测试速度与回程速度相同。

1.3.7 微观结构观察

分别对不同干燥方式制得的红托竹荪干品进行取样, 经临界点干燥和金属离子溅射仪镀膜后, 置于扫描电子显微镜下进行观察, 并选取有代表性的视野进行拍照。

1.4 数据处理与分析

所有图表采用 Microsoft Excel 2010 软件进行绘制, IBM SPSS Statistics 软件进行显著性分析, 显著水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 干燥方式对尺寸的影响

外形是影响红托竹荪干品市场定价的重要指标。由图 1 可知, 四种干燥方式中, VFD 制备的红托竹荪菌柄长度、菌柄直径、菌柄肉质厚度、菌裙长度和菌裙肉质厚度均高于其他三种干燥方式。VFD 组竹荪菌柄长度、直径、厚度和菌裙厚度均与 ASHPD 组、MVD+FAD 组和 CFD 组存在显著性差异 ($P < 0.05$), 而 ASHPD 组、MVD+FAD 组和 CFD 组竹荪菌柄直径、厚度和菌裙厚度之间则无显

著性差异 ($P > 0.05$)。ASHPD 组竹荪菌柄长度仅次于 VFD 组, 且菌裙长度与 VFD 组无显著性差异 ($P > 0.05$)。MVD+FAD 干燥处理对竹荪菌柄和菌裙长度影响较大, 这是由于真空微波干燥阶段, 竹荪组织间的水分快速蒸发导致细胞遭受不可逆的损伤, 毛细管紧缩, 引起菌柄和菌裙外形皱缩^[18]; 空气源热泵干燥采用程序变温烘干, 且能及时排湿, 竹荪内部水分迁移速率变化较缓, 可以较好地保持菌柄和菌裙地外形; 在真空冷冻干燥条件下, 竹荪组织间的水分直接由液态升华为气态, 竹荪菌柄和菌裙没有发生皱缩, 同时预冻处理更好的维持了竹荪原有的伞状外形。综上可知, 真空冷冻干燥方式能较好的保持红托竹荪原有的外形, 空气源热泵干燥方式次之。

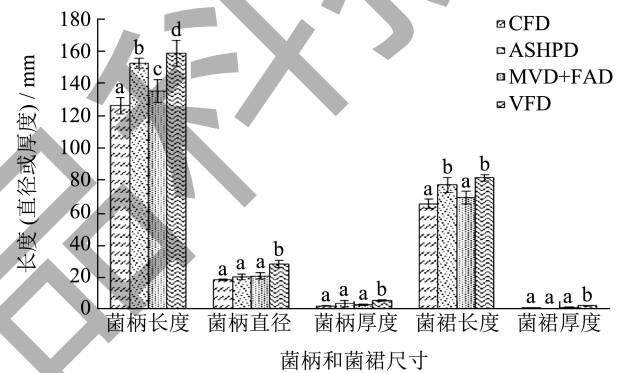


图 1 不同干燥方式对红托竹荪尺寸的影响

Fig.1 Effects of different drying methods on the size of *D. rubrovalvata* M.Zang ($n=10$)

注: 图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 干燥方式对水分和色泽的影响

食用菌干制加工时, 一般需要将水分含量控制在 10.00%~13.00%^[19]。由表 1 可知, 四种干燥方式制备红托竹荪水分含量在 8.63%~12.45% 之间, 其中真空冷冻干燥水分含量最低, 传统煤火干燥水分含量最高, 空气源热泵干燥和传统煤火干燥的竹荪水分含量无显著性差异 ($P > 0.05$)。

色泽是影响消费者可接受性和产品市场价值的重要品质属性^[20]。由表 1 可知, 不同干燥方式处理对红托竹荪色泽的影响具有显著性差异 ($P < 0.05$)。VFD 组红托竹荪亮度 L 、色相 H 与鲜品无显著性差异 ($P > 0.05$), 而 CFD、ASHPD 和 MVD+FAD 三组竹荪的亮度 L 、色相 H 与鲜品 F 存在显著性差异 ($P < 0.05$), 这表明真空冷冻干燥竹荪的亮度和色相与鲜品最接近。四种干燥方式间的总色差均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。其中 VFD 组竹荪的总色

差(3.60)最小, $\Delta E < 5$, 该色差肉眼难以识别^[21], 这主要由于真空冷冻干燥是低温干燥, 更好的保护了竹荪的原有色泽。MVD+FAD组竹荪总色差值为7.13, 肉眼能识别出该色差, 说明短时间的热暴露会对色差产生一定的影响。ASHPD组总色差最大, 值为11.67, 颜色差异明显, 主要因为空气源热泵干燥是热加工, 干制过程中热暴露时间相对较长, 竹荪含有的多糖等热敏性物质发生了美拉德反应, 导

致竹荪干品颜色微黄。上述结果表明, VFD制得竹荪色泽与鲜品最接近, 能较好地保持产品原有的色泽, 这与孟令帅等^[22]和 Zeng 等^[23]报道的结果相一致, 这主要由于低温低压条件下, 竹荪含有的游离氨基酸、糖类、醛类等物质及热敏性物质在失水过程中没有发生化学发应而生成其它物质, 能较好地保留在竹荪干制产品中, 进而保持了竹荪原有的色泽。

表 1 不同干燥方式对红托竹荪水分质量分数和色度值的影响

Table 1 Color parameters of *D. rubrovalvata* M.Zang by different drying methods

干燥方式	水分质量分数/%	L	a	b	C	H	ΔE
F	—	80.78 ± 2.87 ^a	4.61 ± 0.83 ^b	11.79 ± 0.58 ^b	12.89 ± 1.34 ^b	68.99 ± 2.71 ^e	—
CFD	12.45 ± 0.006 ^b	90.56 ± 1.66 ^c	2.73 ± 0.28 ^a	10.70 ± 1.39 ^a	11.12 ± 1.40 ^a	49.18 ± 0.10 ^b	10.02 ± 0.73 ^d
ASHPD	12.18 ± 0.01 ^b	86.70 ± 1.80 ^b	6.62 ± 0.69 ^e	21.54 ± 1.25 ^d	22.42 ± 1.39 ^e	72.96 ± 0.98 ^e	11.67 ± 0.96 ^c
MVD+FAD	10.35 ± 0.005 ^{ab}	87.22 ± 3.84 ^b	6.06 ± 1.07 ^e	14.47 ± 1.26 ^c	17.20 ± 2.26 ^d	48.63 ± 0.18 ^a	7.13 ± 1.30 ^b
VFD	8.63 ± 0.004 ^a	83.17 ± 2.06 ^a	2.91 ± 0.33 ^a	14.17 ± 0.96 ^e	14.35 ± 0.89 ^e	78.47 ± 0.78 ^e	3.60 ± 0.26 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); “—”表示此处不体现竹荪鲜品水分质量分数。

表 2 不同干燥方式对红托竹荪基本营养成分含量的影响(%, 质量分数)

Table 2 Effects of different drying methods on basic nutrient content of *D. rubrovalvata* M.Zang (%)

干燥方式	蛋白质	脂肪	粗纤维	灰分	总糖
CFD	15.80 ± 0.40 ^a	2.05 ± 0.10 ^a	7.80 ± 0.17 ^b	5.93 ± 0.06 ^c	0.39 ± 0.03 ^a
ASHPD	17.00 ± 1.00 ^{ab}	2.53 ± 0.18 ^b	6.60 ± 0.14 ^a	5.74 ± 0.05 ^b	0.39 ± 0.03 ^a
MVD+FAD	16.10 ± 0.35 ^a	2.06 ± 0.11 ^a	8.10 ± 0.14 ^{bc}	5.74 ± 0.08 ^b	0.48 ± 0.04 ^b
VFD	18.40 ± 0.45 ^b	2.08 ± 0.12 ^a	8.40 ± 0.14 ^c	5.47 ± 2.51 ^a	0.44 ± 0.04 ^{ab}

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。表 3 同。

2.3 干燥方式对营养成分的影响

由表 2 可以看出, 不同干燥方式对红托竹荪的不同营养成分会产生不同的影响。四种干燥方式中, VFD 组蛋白质含量(18.40%)和粗纤维(8.40%)最高, 蛋白质含量与 CFD 组、MVD+FAD 组存在显著性差异 ($P < 0.05$), 粗纤维含量与 CFD 组、ASHPD 组存在显著性差异 ($P < 0.05$)。ASHPD 组脂肪质量分数(2.53%)最高, 与其他三种干燥方式存在显著性差异 ($P < 0.05$), 而 CFD 组、MVD+FAD 组和 VFD 组之间则无显著性差异 ($P > 0.05$)。CFD 组竹荪的灰分含量(5.93%)明显高于其他三组, 这主要与具有海绵状纤维质结构的竹荪在干燥过程中较多地吸收煤火中的杂质和空气中的灰尘有关。与 ASHPD 组和 CFD 相比, VFD 组和 MVD+FAD 组红托竹荪多糖含量较高, 且两者没有显著性差异 ($P > 0.05$), 这可能与真空低氧环境可以抑制糖的氧化有关^[24]。

通过对比发现, VFD 方式对竹荪蛋白质、粗纤

维、总糖影响较小, ASHPD 方式对脂肪、灰分、蛋白质影响较小, MVD+FAD 方式对竹荪总糖、粗纤维影响较小。蛋白质和总糖含量是食用菌中重要的活性物质, 对人体营养物质的补充和疾病预防具有重要作用, 而真空冷冻干燥能较好的保留竹荪原有的营养物质。

2.4 干燥方式对氨基酸及呈味氨基酸含量的影响

干燥加工对食用菌风味影响较大, 红托竹荪作为竹荪家族中独具“清香”风味的食用菌品种, 干品中含有的氨基酸种类和含量是评价其营养价值、风味及口感的重要指标^[16]。由表 3 可知, 不同干燥方式对红托竹荪氨基酸含量影响显著, 总氨基酸(Total Amino Acid, TAA)含量为 VFD > ASHPD > MVD+FAD > CFD, 必需氨基酸(Essential Amino Acid, EAA)含量为 VFD 组 > ASHPD 组 > MVD+FAD 组 > CFD 组。EAA/TAA 值可以反映食

用菌中蛋白质的营养价值^[25], ASHPD 组的红托竹荪的 EAA/TAA 为 0.44, 高于其他三组。谷氨酸作为主要的兴奋性神经递质, 在神经系统疾病发病和防治中发挥重要的作用^[26], 不同干燥方式制得红托竹荪谷氨酸含量为 1.29%~1.89%, 其中 VFD 组 > MVD+FAD 组 > ASHPD 组 > CFD 组, 且不同组间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。亮氨酸具有调节中枢神经大脑、肌肉和蛋白质代谢的作用, 不同干燥方式制得竹荪亮氨酸含量为 0.66%~0.77%, VFD 组最高, ASHPD 组次之。此外, 谷氨酸在总氨基酸中占比最高的为 VFD 组, 亮氨酸在总氨基酸中占比最高的是 ASHPD 组。

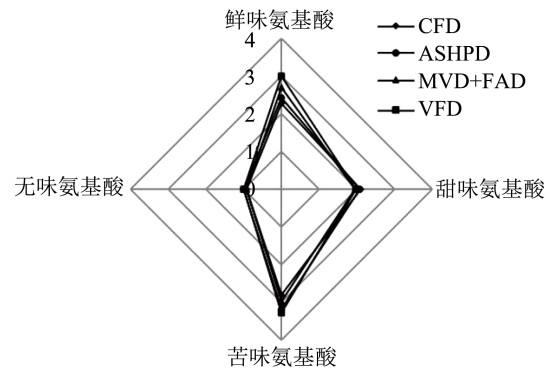


图 2 不同干燥方式的红托竹荪氨基酸的呈味特性分析

Fig.2 Analysis of the flavoring amino acids of *D. rubrovalvata* M.Zang

表 3 不同干燥方式对红托竹荪氨基酸含量的影响

Table 3 Effects of different drying methods on amino acid content of *D. rubrovalvata* M.Zang

氨基酸种类	氨基酸的质量分数/%			
	CFD	ASHPD	MVD+FAD	VFD
天冬氨酸 (asp)	0.98 ± 0.04 ^{ab}	0.88 ± 0.04 ^a	1.09 ± 0.07 ^b	1.12 ± 0.06 ^b
苏氨酸 (thr)	0.40 ± 0.04 ^a	0.36 ± 0.04 ^a	0.44 ± 0.05 ^a	0.45 ± 0.04 ^a
丝氨酸 (ser)	0.36 ± 0.04 ^b	0.26 ± 0.03 ^a	0.42 ± 0.04 ^b	0.36 ± 0.01 ^b
谷氨酸 (glu)	1.29 ± 0.03 ^a	1.54 ± 0.006 ^b	1.62 ± 0.04 ^c	1.89 ± 0.02 ^d
甘氨酸 (gly)	0.43 ± 0.02 ^{ab}	0.48 ± 0.03 ^b	0.42 ± 0.006 ^a	0.47 ± 0.02 ^{ab}
丙氨酸 (ala)	0.90 ± 0.02 ^c	0.80 ± 0.03 ^b	0.65 ± 0.02 ^a	0.64 ± 0.04 ^a
缬氨酸 (val)	0.73 ± 0.02 ^a	0.80 ± 0.007 ^b	0.76 ± 0.02 ^a	0.82 ± 0.02 ^b
蛋氨酸 (met)	0.16 ± 0.02 ^a	0.17 ± 0.02 ^a	0.16 ± 0.01 ^a	0.17 ± 0.01 ^a
异亮氨酸 (ile)	0.29 ± 0.02 ^a	0.33 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.32 ± 0.01 ^a
亮氨酸 (leu)	0.66 ± 0.04 ^a	0.77 ± 0.02 ^c	0.69 ± 0.02 ^{ab}	0.75 ± 0.005 ^{bc}
酪氨酸 (tyr)	0.48 ± 0.01 ^a	0.52 ± 0.02 ^b	0.50 ± 0.01 ^{ab}	0.50 ± 0.02 ^{ab}
苯丙氨酸 (phe)	0.52 ± 0.01 ^a	0.61 ± 0.008 ^b	0.56 ± 0.02 ^c	0.68 ± 0.03 ^d
赖氨酸 (lys)	0.45 ± 0.02 ^{ab}	0.48 ± 0.02 ^{bc}	0.43 ± 0.01 ^a	0.49 ± 0.02 ^c
组氨酸 (his)	0.20 ± 0.03 ^a	0.21 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.01 ^a	0.23 ± 0.02 ^a
精氨酸 (arg)	0.43 ± 0.02 ^a	0.50 ± 0.005 ^b	0.52 ± 0.03 ^b	0.52 ± 0.02 ^b
脯氨酸 (pro)	0.41 ± 0.03 ^a	0.54 ± 0.02 ^c	0.46 ± 0.01 ^b	0.51 ± 0.02 ^c
EAA	3.69	4.04	3.83	4.18
NEAA	5.00	5.21	5.39	5.74
TAA	8.69	9.25	9.22	9.92
EAA/TAA	0.42	0.44	0.42	0.42
EAA/NEAA	0.58	0.56	0.58	0.58

呈味氨基酸是食用菌鲜香风味的主要原因, 根据氨基酸的呈味特性, 可以将氨基酸分为鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸和无味氨基酸^[27]。图 2 为四种呈味氨基酸分布的雷达图, 不同干燥方式红托竹荪呈味氨基酸总量分别为 8.09%~9.92%, 其中 VFD 组 > ASHPD 组 > MVD+FAD 组 > CFD

组。鲜味氨基酸含量 VFD 组最高 (3.01%), 其次为 MVD+FAD 组 (2.71%); 甜味氨基酸含量为 1.98%~2.10%, 不同干燥组之间含量相差不大, 竹荪鲜甜味为 VFD 组 > MVD+FAD 组 > ASHPD 组 > CFD 组。苦味氨基酸含量 VFD 组最高 (3.26%)、ASHPD 组 (3.18%) 次之。此外, 竹荪的苦味氨

基酸含量高于鲜味氨基酸,其鲜甜味/苦味为VFD组(4.99%)>MVD+FAD组(4.66%)>ASHPD组(4.50%)>CFD组(4.37%)。不同干燥制得红托竹荪的呈味特性均以鲜甜味为主,谷氨酸和天冬氨酸呈现较强的鲜味,甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸和脯氨酸表现出醇厚的甜味,这从理论上解释了竹荪滋味鲜美的原因。

2.5 干燥方式对质构特性的影响

在干制加工过程中,食用菌的质构特性会发生明显的变化,TPA、剪切力和拉伸力测定可以较好地呈现食用菌组织结构的情况和变化规律。由表4可知,VFD组竹荪干品硬度(10.11)、内聚性(0.30)、胶黏性(2.98 N)和咀嚼性(6.85 MJ)最小,与鲜品(7.18N, 0.28, 2.03 N, 4.23 MJ)没有显著性差异($P>0.05$);CFD、ASHPD和MVD+FAD三组竹荪干品的硬度、内聚性、胶黏性和咀嚼性与鲜品相差较大($P<0.05$),这表明热制加工制备的竹荪干品抵抗受损并使之保持完整的能力较

强,内部结合力较大,吞咽前需要更多的能量才能嚼碎。

复水后,不同干燥组间复水竹荪的硬度不存在显著性差异($P>0.05$),但复水竹荪的硬度变为原来干品的2.03~3.52倍,其中VFD组竹荪复水前后硬度变化最大。此外,ASHPD组和MVD+FAD组竹荪干品和复水样品的内聚性、胶黏性、咀嚼性、最大剪切力和最大拉伸力等质构特性没有显著性差异($P>0.05$),这表明这两种干制方式制备的竹荪内部质构特征相似。VFD组竹荪的最大剪切力(5.48 N)和最大拉伸力(4.00 N)与ASHPD组(7.03 N, 4.80 N)和MVD+FAD组(6.42 N, 5.20 N)均存在显著性差异($P<0.05$),这表明,CFD组竹荪和ASHPD、MVD+FAD两组竹荪的牙齿咀嚼作用和拉伸的手感存在明显的不同。

由上述结果可以看出,VFD组制备竹荪的质构特征与ASHPD组和MVD+FAD组存在明显的不同,VFD组制备竹荪结构较脆,组织内部结合力较小,与鲜品结构比较接近。

表4 不同干燥方式红托竹荪的质构特性分析

Table 4 Analysis of texture property of *D. rubrovalvata* M.Zang by different drying methods

干燥方式	硬度/N	粘附性/MJ	内聚性/Ratio	胶黏性/N	咀嚼性/MJ	最大剪切力/N	最大拉伸力/N
鲜品	—	7.18 ± 0.91 ^a	0.021 ± 0.01 ^a	0.28 ± 0.01 ^a	2.03 ± 0.17 ^a	4.23 ± 0.42 ^a	—
干品	CFD	19.38 ± 1.50 ^b	0.018 ± 0.003 ^a	0.51 ± 0.05 ^c	8.93 ± 0.82 ^b	19.96 ± 1.46 ^b	53.70 ± 2.70 ^b
	ASHPD	18.03 ± 1.19 ^b	0.060 ± 0.005 ^c	0.45 ± 0.03 ^b	8.03 ± 1.22 ^b	16.47 ± 1.38 ^b	57.3 ± 3.47 ^b
	MVD+FAD	16.06 ± 0.11 ^b	0.032 ± 0.002 ^b	0.40 ± 0.02 ^b	7.18 ± 0.35 ^b	18.95 ± 0.25 ^b	48.56 ± 1.40 ^{ab}
	VFD	10.11 ± 0.39 ^a	0.029 ± 0.01 ^b	0.30 ± 0.02 ^a	2.98 ± 0.24 ^a	6.85 ± 1.36 ^a	41.10 ± 1.16 ^a
复水	CFD	39.31 ± 1.22 ^a	0.41 ± 0.03 ^b	0.44 ± 0.03 ^a	21.58 ± 1.71 ^b	38.28 ± 0.84 ^b	7.78 ± 0.52 ^{ab}
	ASHPD	38.47 ± 1.90 ^a	0.26 ± 0.01 ^a	0.55 ± 0.02 ^b	20.74 ± 1.26 ^b	41.81 ± 0.96 ^b	7.03 ± 0.39 ^c
	MVD+FAD	37.59 ± 0.66 ^a	0.40 ± 0.07 ^b	0.55 ± 0.03 ^b	21.96 ± 2.39 ^b	42.96 ± 0.64 ^b	6.42 ± 0.82 ^c
	VFD	35.58 ± 1.42 ^a	0.57 ± 0.04 ^c	0.44 ± 0.03 ^a	14.02 ± 0.49 ^a	27.17 ± 1.23 ^a	5.48 ± 0.38 ^a

注:鲜品和干品同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),复水同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),“—”表示无。

2.6 干燥方式对微观结构的影响

采用扫描电镜观察红托竹荪的形态。由图3可知,不同干燥方式制备竹荪的内部组织结构不同,CFD组竹荪结构表面有类似其他的团状附着物,细胞结构发生了明显的皱缩,层次结构较乱,由于在竹荪干制过程中,干制时间较长,且干制温度不恒定,导致水分迁移速率变化较大而引起的。ASHPD组竹荪细胞形态清晰可见,层次结构明显,但有部分组织结构裂开,尽管将其干制温度控制在55.0℃以下,但其热暴露时间较长,且在相对高温条件下,自由水的迁移速率较快,导致毛细管张力大于细胞壁抗拉强度,引起竹荪细胞组织破裂。

MVD+FAD组竹荪细胞状结构不太明显,组织结构形成较大褶皱,但其表面比较光滑,组织状态没有遭到明显破坏,这与竹荪在微波干燥阶段短时间内失水速率较快有关。VFD组竹荪组织结构完整,细胞结构呈水直接升华后留下的晶体状,整体结构坚实、完整,有鲜品固有的孔状结构。

比较发现,VFD和ASHPD制备竹荪的细胞状结构明显,VFD更好的保持了竹荪原有的细胞结构;MVD+FAD没有对竹荪细胞结构造成明显的破坏,但由于其失水速率较快导致竹荪整体组织结构发生了明显的改变。

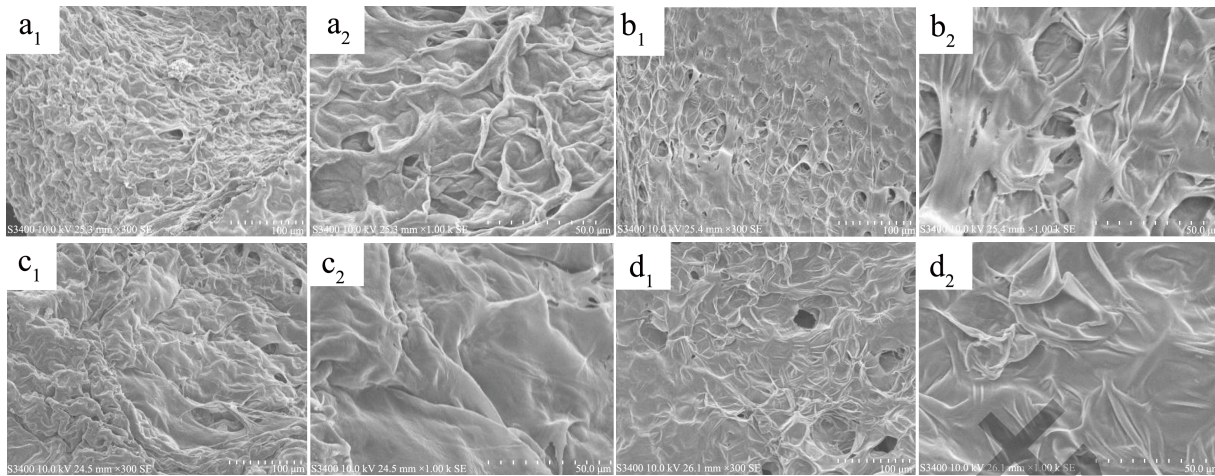


图3 不同干燥方式红托竹荪的微观结构

Fig.3 Scanning electron micrographs of *D. rubrovalvata* M.Zang dried with different drying methods

注: (a) CFD; (b) ASHPD; (c) MVD+FAD; (d) VFD。下标 1: 放大 300 倍; 下标 2: 放大 1000 倍。

表 5 红托竹荪不同评价指标相关系数

Table 5 Correlation coefficients of different evaluation indicators of *D. rubrovalvata* M.Zang

评价指标	总色差 ΔE	总氨基酸	呈味氨基酸	蛋白质	总糖	粗纤维	硬度	内聚性	咀嚼性	最大剪切力
总色差 ΔE	1									
总氨基酸	-0.759	1								
呈味氨基酸	-0.707	0.997**	1							
蛋白质	-0.606	0.923	0.936	1						
总糖	-0.676	0.425	0.372	0.055	1					
粗纤维	-0.868	0.335	0.262	0.172	0.654	1				
硬度	-0.925	-0.943	-0.917	-0.855	-0.513	-0.618	1			
内聚性	-0.889	-0.966*	-0.944	-0.822	-0.611	-0.549	0.980*	1		
咀嚼性	-0.748	-0.928	-0.925	-0.977*	-0.166	-0.374	0.929	0.877	1	
最大剪切力	-0.669	-0.905	-0.898	-0.687	-0.678	-0.278	0.808	0.909	0.682	1

注: ** 在 $P < 0.01$ 呈极显著相关; * 在 $P < 0.05$ 呈显著相关。

2.7 不同评价指标的相关性分析

以色泽(总色差 ΔE)、主要营养物质含量(总氨基酸、呈味氨基酸、蛋白质、总糖和粗纤维)和主要质构特性(硬度、内聚性、咀嚼性和最大剪切力) 10 个指标依次为自变量和因变量, 将色泽、营养物质含量和质构特性进行 Pearson 相关性分析, 结果见表 5。可以看出, 总氨基酸和呈味氨基酸呈极显著正相关, 内聚性与氨基酸总量呈显著负相关, 与硬度呈显著正相关, 咀嚼性与蛋白质含量呈显著负相关。这表明, 红托竹荪竹荪的营养物质和质构特性存在一定的相关性, 存在相互转化的可能。干燥方式对红托竹荪的总糖和蛋白质含量、咀嚼性、硬度以及菌柄外形影响较大, 在红托竹荪实际生产中, 可将营养成分或质构特征作

为竹荪在干制加工过程中需要控制的重要质量指标。

2.8 不同干燥方式下红托竹荪品质的综合评分

由于等权分配具有不客观性, 且评价指标存在量纲差异^[28], 因此选择熵权法^[29,30]对竹荪外形、色泽、主要质构指标和主要营养成分指标进行权重关系分配, 再根据指标的顺逆性计算综合评分。由表 6 可知, 红托竹荪的总糖(0.15)、咀嚼性(0.14)、菌柄直径(0.12)、蛋白质(0.12)、硬度(0.11)、菌柄厚度(0.10)和最大剪切力(0.10)权重较大, 表明这 7 个指标对红托竹荪品质评价占较大比重, 干燥方式对这 7 个指标影响较大。四种干燥方式的综合评分结果为: VFD(1.23) > MVD+FAD(0.56) > ASHPD(0.46) > CFD(0.26)。

表 6 不同干燥方式红托竹荪的指标标准化数据、权重和综合评分

Table 6 Comprehensive score of different drying methods of

D. rubrovalvata M.Zang

评价指标	权重	综合评分			
		CFD	ASHPD	MVD+FAD	VFD
菌柄长度	0.082	0.00	0.066	0.022	0.082
菌柄直径	0.12	0.00	0.021	0.028	0.12
菌柄厚度	0.10	0.00	0.042	0.018	0.10
菌群长度	0.086	0.00	0.063	0.020	0.86
菌裙厚度	0.076	0.029	0.00	0.039	0.076
总色差 ΔE	0.092	0.019	0.00	0.052	0.092
总氨基酸	0.075	0.00	0.034	0.033	0.076
呈味氨基酸	0.074	0.00	0.038	0.031	0.074
蛋白质	0.12	0.00	0.056	0.010	0.12
总糖	0.15	0.00	0.00	0.15	0.084
粗纤维	0.062	0.041	0.00	0.051	0.062
硬度	0.11	0.00	0.016	0.010	0.11
内聚性	0.068	0.068	0.048	0.032	0.00
咀嚼性	0.14	0.00	0.037	0.011	0.14
最大剪切力	0.10	0.10	0.040	0.018	0.00
综合评分	—	0.26	0.46	0.56	1.23
排序	—	4	3	2	1

注：“—”表示无。

3 结论

研究表明,不同干燥方式会对红托竹荪的外形、色泽、营养成分、质构特性和微观结构产生不同程度的影响。VFD可以最大限度地保持竹荪菌柄和菌裙外形,其蛋白质、粗纤维和总氨基酸含量最高,色泽与鲜品最接近($\Delta E=3.60$);ASHPD制备的竹荪菌柄和菌裙外形保持较好,色泽微黄,脂肪含量最高,蛋白质保留效果较好。不同干燥方式制备的竹荪均以鲜甜味为主,鲜甜味/苦味的值为VFD组(4.99%)>MVD+FAD组(4.66%)>ASHPD组(4.50%)>CFD组(4.37%)。冷冻干燥和热制干燥制备竹荪的质构特性呈现明显的不同,VFD制备的竹荪干品结构较脆,组织内部的结合力较小,而另三种热制干燥方式制备的竹荪内部结合力较大,抵抗受损能力较强,吞咽前需要更多的能量才能嚼碎。此外,VFD和ASHPD制备竹荪的细胞状结构比较明显,VFD更好的保持了竹荪原有的细胞结构。四种干燥方式的综合评分为真空冷冻干燥(VFD)>真空微波+电热鼓风组合干燥

(MVD+FAD)>空气源热泵干燥(ASHPD)>传统煤火干燥(CFD)。

综合评分结果表明,真空冷冻干燥为红托竹荪较理想的干燥方式,但其设备成本较高,且耗时耗电,不适合大批量生产;真空微波+热风组合干燥和空气源热泵干燥制得竹荪品质相差不大,真空微波干燥干燥时间短,但会存在烤焦烤糊现象,优质品率较低,实际产业化生产中同样需要解决批处理量小的问题;同比之下,空气源热泵干燥批次处理量大,设备成本低、环保节能,无任何物质残留,优质品率高达99.00%,并且新鲜的红托竹荪需要在短时间内进行加工,采摘与加工间隔时间越短,产品品质越高,因此,空气源热泵干燥是红托竹荪实际生产中比较有推广价值的干燥方式。

参考文献

- [1] 龚光禄,杨通静,桂阳,等.红托竹荪资源收集与生态分布特征[J].中国食用菌,2020,39(11):14-17,21.
- [2] BAI X W, BAI X F. Antioxidant activity of a polysaccharide from *Dictyophora indusiata* volva and MECC analysis of its monosaccharide composition [J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2021, 98: 100146.
- [3] WANG W S, SONG X L, GAO Z, et al. Anti-hyperlipidemic, antioxidant and organic protection effects of acidic-extractable polysaccharides from *Dictyophora indusiata* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 281-292.
- [4] 黄成运,刘宏宇,桂阳,等.5种不同处理对鲜红托竹荪贮藏保鲜品质的影响研究[J].热带作物学报,2023,44(8):1713-1722.
- [5] WANG J Q, WEN X F, ZHANG P P, et al. Quantitative proteomic and metabolomic analysis of *Dictyophora indusiata* fruiting bodies during post-harvest morphological development [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 127884.
- [6] SZADZINSKA J, MIERZWA D, MUSIELAK G. Ultrasound-assisted convective drying of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2022, 172: 108803.
- [7] 张越翔,刘静,吴小恬,等.食用菌干燥技术研究进展[J].中国果蔬,2022,42(1):24-33.
- [8] 倪旭东,周化斌,杨海龙.食用菌干燥技术及其干制品的贮藏研究进展[J].食品安全质量检测学报,2020,11(14):4685-4692.
- [9] 高婵.香菇热泵加工工艺及品质控制技术研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
- [10] 张振涛,杨俊玲.热泵干燥技术与装备[M].北京:化学工业出版社,2021.

- [11] PU Y Y, SUN D W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 156: 108-119.
- [12] 于宛加, 金鑫, 胡丽娜, 等. 预干燥过程水分分布对热风-真空冷冻干燥桃脆片微观结构与质构的影响 [J]. *食品科学*, 2023, 44(15): 69-79.
- [13] QIN Z, LIU H M, CHENG X C, et al. Effect of drying pretreatment methods on structure and properties of pectins extracted from Chinese quince fruit [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 801-808.
- [14] YAN J K, WU Z R, CAI W D, et al. Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter melon (*Momordica charantia* L.) slices [J]. *Food Chemistry*, 2019, 271: 588-596.
- [15] 许斌, 高洁, 于翠翠, 等. 不同热风干燥温度对西藏黄蘑菇品质的影响 [J]. *中国食用菌*, 2022, 41(3): 71-77.
- [16] 石芳, 李瑶, 杨雅轩, 等. 不同干燥方式对松茸品质的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 141-147.
- [17] TANG X M, ZHANG Y Q, LI F Y, et al. Effects of traditional and advanced drying techniques on the physicochemical properties of *Lycium barbarum* L. polysaccharides and the formation of maillard reaction products in its dried berries [J]. *Food Chemistry*, 2023, 409: 135268.
- [18] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响 [J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 150-156.
- [19] 叶金燕. 食用菌加工贮藏技术浅析 [J]. *南方农业*, 2020, 14(32): 237-238.
- [20] 付龙威, 陈建梅, 叶淑娟, 等. 不同干燥工艺对燕窝品质特性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 36-43.
- [21] 周子丹, 彭文君, 倪家宝, 等. 不同干燥方式对油菜蜂花粉色泽、酚酸和抗氧化活性的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 76-83.
- [22] 孟令帅, 王瑞, 郑婷婷, 等. 不同干燥方式对红托竹荪感官品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(7): 249-263.
- [23] ZENG Z, WANG J Q, WEN X F, et al. Metabolomic analysis provides insights into the mechanism of color and taste changes in *Dictyophora indusiata* fruiting bodies under different drying processes [J]. *Food Research International*, 2022, 162: 112090.
- [24] TIAN Y T, ZHAO Y T, HUANG J J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 714-722.
- [25] 徐傲. 18种商业化栽培食用菌营养价值及特点研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [26] 代毅聪, 陈凤蓉, 王昆华. 谷氨酸转运体的结构、功能及其在神经精神疾病中的作用 [J]. *昆明医科大学学报*, 2020, 41(9): 142-148.
- [27] YAN F J, LIN H, MAU J. Non-volatile taste components of several commercial mushrooms [J]. *Food Chemistry*, 2001, 72: 465-471.
- [28] 杨双喜, 马尧, 张海红, 等. 干燥方式对黄花菜粉营养、色泽及氨基酸含量的影响 [J]. *中国食品学报*, 2022, 22(10): 232-241.
- [29] 刘宇瑶, 廖富娟, 李雨珊, 等. 基于颜色和化学成分研究不同干燥方法对杜仲雄花品质影响 [J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(7): 1876-1884.
- [30] 轩瑞瑞, 陈艳萍, 刘春菊, 等. 基于熵权法和灰色关联度法的鲜食糯玉米品质评价 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 241-248.