

干燥方法对黄蘑菇品质及微观结构的影响

Effects of drying methods on the quality and microstructure of *Armillaria luteo-virens*

孟迪^{1,2} 党斌² 张杰² 解晓霞³ 孙松成林⁴

MENG Di^{1,2} DANG Bin² ZHANG Jie² XIE Xiao-xia³ Gasongchenglin⁴

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省农林科学院青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 玉树藏族自治州农牧业综合服务中心, 青海 玉树 815000; 4. 青海天上玉树互联网科技实业有限公司, 青海 玉树 815000)

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. Qinghai Key Laboratory of Agricultural Products Processing in Qinghai Tibet Plateau, Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Agricultural and Animal Husbandry Comprehensive Service Center of Yushu Tibetan Autonomous Prefecture, Yushu, Qinghai 815000, China;

4. Qinghai Tiantian Yushu Internet Technology Industry Co., Ltd., Yushu, Qinghai 815000, China)

摘要:目的: 确定最适合黄蘑菇干制的干燥方法。方法: 比较自然晒干、热风干燥、真空冷冻干燥、真空干燥、微波—热风联合干燥 5 种方法对黄蘑菇营养、功能成分、色泽、复水比、收缩率、复水质构和微观结构的差异。结果: 真空冷冻干燥组的粗蛋白、粗多糖和总黄酮含量最高, 总酚含量仅次于真空干燥组, 其色差值最小, 复水比高, 收缩程度小, 内部组织完整性好, 复水质构表现为硬度、弹性和咀嚼性低。与热风干燥相比, 微波—热风联合干燥显著提高了黄蘑菇粗蛋白和粗多糖含量, 干燥时间缩短了 11%, 并显著提高了黄蘑菇的 b^* 值, 复水后其硬度、弹性、内聚性和咀嚼性最大。真空干燥组不利于总黄酮的保留, 并在收缩率和复水方面表现最差。自然晒干组的粗纤维含量最高, 而总酚含量最低。结论: 干燥方法对黄蘑菇的品质影响显著, 试验研究的 5 种干燥方式中真空冷冻干燥的黄蘑菇整体品质最好。

关键词: 黄蘑菇; 干燥; 品质; 微观结构

Abstract: **Objective:** This study aimed to determine the most suitable drying method for *Armillaria luteo-virens*. **Methods:** The effects of solar drying, hot air drying, vacuum-freeze drying, vacuum drying and microwave-hot-air combined drying on the nutrition, functional components, color, rehydration ratio, shrinkage ratio, rehydration structure and microstructure

of *A. luteo-virens* were compared. **Results:** The content of crude protein, crude polysaccharide and total flavonoids in vacuum-freeze drying group was the highest, and the content of total phenol was second highest and lower than the vacuum drying group. Its color difference was the smallest, with high rehydration ratio, and the shrinkage degree was small, with good internal tissue integrity. Moreover, its rehydration structure was characterized by low hardness, elasticity and chewability. Compared with hot-air drying, microwave-hot-air combined drying significantly increased the content of crude protein and crude polysaccharide of *A. luteo-virens*, shortened the drying time by 11%, and significantly improved the b^* value; after rehydration, its hardness, elasticity, cohesion and chewability were the largest. However, the vacuum drying group was not conducive to the retention of total flavonoids, and had the worst performance in shrinkage and rehydration; the crude fiber content was the highest and the total phenol content was the lowest in the solar drying group. **Conclusion:** Different drying methods have significant effects on the quality of *A. luteo-virens*, and the overall quality of vacuum-freeze drying *A. luteo-virens* is optimal.

Keywords: *Armillaria luteo-virens*; drying; quality; microstructure

基金项目: 青海省科技厅科技成果转化专项(编号: 2021-NK-125)

作者简介: 孟迪, 女, 青海大学在读硕士研究生。

通信作者: 党斌(1980—), 男, 青海省农林科学院副研究员, 在读博士。E-mail: 156044168@qq.com

收稿日期: 2022-04-25 **改回日期:** 2022-09-15

黄蘑菇, 学名黄绿蜜环菌(*Armillaria luteo-virens*), 主要分布于中国河北、陕西、甘肃、青海、四川、西藏等地区^[1]。产于青海的野生黄蘑菇, 风味独特, 含有丰富的蛋白质、多糖、氨基酸、矿物质和维生素等, 具有抗氧化、抗肿瘤等作用^[2-4], 是一种珍贵的药食兼用真菌。

黄蘑菇子实体生长的季节性较强,采后处理不及时,极易发生失水、软化、腐烂和褐变等现象,严重降低其食用价值和商品价值。干制是一种传统的食品贮藏与加工方法,目前食用菇类常用的干燥方法有自然晒干、热风干燥和真空冷冻干燥等^[5]。自然晒干成本低,操作方便,但易受环境影响,且干燥时间长。热风干燥成本低,适用于大批量干燥,但对热敏感成分破坏较大^[6]。真空冷冻干燥对含水量较高的物料干燥效果较好,且具有良好的品质和色泽,但其干燥时间长、耗能大、成本高^[7]。目前这些干燥方法已被应用于金针菇^[8]、猴头菇^[9-10]、香菇^[11]和草菇^[12]等干燥中,但不同食用菇以及采用不同干燥方式,对产品的感官品质、营养成分、功能因子等的影响程度不同。杨婷等^[13]研究了自然晒干、真空干燥、真空冷冻干燥和热风干燥对黄蘑菇复水比、还原糖、总糖、可溶性蛋白、维生素 C 含量的影响。而关于不同干燥处理的黄蘑菇物理特性、营养、功能品质及其微观结构差异的研究尚未见报道,且目前还未见对黄蘑菇联合干燥方法的研究。

研究拟以青海野生黄蘑菇为原料,比较自然晒干(SD)、热风干燥(HAD)、真空冷冻干燥(VFD)、真空干燥(VD)和微波—热风联合干燥(MD-HAD)对黄蘑菇品质及微观结构的影响,明确不同干燥方法下的黄蘑菇品质特性差异,筛选出一种或几种适合黄蘑菇干燥的方法,为延长黄蘑菇的贮藏时间和干制黄蘑菇工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜黄蘑菇:采摘于青海省刚察县;

食盐:青海省盐业股份有限公司;

甲醇、正己烷、乙酸乙酯、石油醚、盐酸:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;

氢氧化钠、碳酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

福林酚试剂:优级纯,北京索莱宝科技有限公司;

试验用水为去离子水。

1.2 主要仪器设备

鼓风干燥箱:DHG-9240A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-6020 型,上海中友仪器设备有限公司;

真空冷冻干燥器:Alpha 1-4 LDplus 型,德国 Christ 公司;

微波炉:格兰仕 G80F20CN1L-DG(S0)型,佛山市格兰仕微波炉电器有限公司;

食品物性分析仪:TMS-PRO 型,美国 FTC 公司;

色差计:WSC-S 型,上海精科仪器有限公司;

高分辨扫描电子显微镜:JSM-6610 型,日本 HITACHI 公司;

高速万能粉碎机:FW-100 型,上海科恒实业发展有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-4 型,常州国华电器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 黄蘑菇干燥方法 将黄蘑菇用 0.5% 盐水浸泡 5 min,沥干。选取大小较均一的黄蘑菇,分为 5 组,每组 100 g 左右,采用 5 种方法干燥,以水分质量分数 $\leq 12\%$ 为干燥终点(根据 GB 7096—2014《食品安全国家标准 食用菌及其制品》)。

(1) 自然晒干:将新鲜黄蘑菇均匀摆放至网盘上,10:00~19:00 放于太阳光下晾晒,其他时间置于阴凉通风处。

(2) 热风干燥:将新鲜黄蘑菇均匀摆放至鼓风干燥箱网盘上,干燥温度为 60 ℃。

(3) 真空冷冻干燥:将新鲜黄蘑菇于 -18 ℃ 预冻 1 h,然后迅速放入冻干机的搁板上,冷阱温度为 -46 ℃、真空度为 0.1 MPa。

(4) 真空干燥:将新鲜黄蘑菇均匀摆放至真空干燥箱不锈钢盘上,干燥温度为 50 ℃、真空度为 0.08 MPa。

(5) 微波—热风联合干燥:先将新鲜黄蘑菇于微波功率 640 W 下干燥 85 s,后快速移入鼓风干燥箱中,干燥温度为 60 ℃。

1.3.2 含水率 按 GB 5009.3—2016 执行。

1.3.3 营养成分

(1) 粗蛋白含量:按 GB 5009.5—2016 执行。

(2) 脂肪含量:按 GB 5009.6—2016 执行。

(3) 灰分含量:按 GB 5009.4—2016 执行。

(4) 粗纤维含量:按 GB/T 5009.10—2003 执行。

1.3.4 功能成分

(1) 粗多糖含量:按 NY/T 1676—2008 执行。

(2) 多酚的提取:游离酚提取参照杨希娟等^[14]的方法。结合酚提取参照张小利等^[15]的方法并稍作修改,向残渣中加入 20 mL 正己烷,震荡后静置弃去上清液,加入 20 mL 浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液,充入氮气后密封震荡 1.5 h,所得水解液用盐酸调 pH 至中性,再用 20 mL 乙酸乙酯萃取 3 次,离心,合并乙酸乙酯萃取相,旋转蒸干,用甲醇定容至 10 mL,避光保存备用。

(3) 总酚含量:采用 Folin-Ciocalteu 法^[16],吸取 125 μ L 提取液,加入 500 μ L 蒸馏水及 125 μ L 福林酚,摇匀,6 min 后加入 7% 碳酸钠溶液,室温避光放置 1.5 h 后,测定 765 nm 处吸光度,重复测定 3 次,以甲醇作为空白调零。以没食子酸为标准品,根据标准曲线计算多酚含量。

(4) 总黄酮含量:参照 Adom 等^[16]的方法并稍作修改,吸取 100 μL 提取液,加入 200 μL 质量分数为 5% 的亚硝酸钠溶液,摇匀,6 min 后加入 200 μL 质量分数为 10% 的硝酸铝溶液,摇匀,6 min 后再加入 2 mL 质量分数为 4% 的氢氧化钠溶液,室温避光放置 15 min,测定 510 nm 处吸光度,重复测定 3 次,以甲醇作为空白调零。以芦丁为标准品,根据标准曲线计算黄酮含量。

1.3.5 色泽 参照 Wang 等^[17]的方法,按式(1)计算色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}, \quad (1)$$

式中:

ΔE ——色差值;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——鲜黄蘑菇的色度值;

L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥处理后黄蘑菇的色度值。

1.3.6 扫描电镜 将黄蘑菇纵切成 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 2 mm 的小块,于真空镀膜仪内喷金,用扫描电子显微镜观察样品表面结构,电压为 10 kV,放大倍数为 500。

1.3.7 复水比 参照杨婷等^[13]的方法并稍作修改。称量干燥后的黄蘑菇整菇质量,放入盛有 250 mL 蒸馏水的烧杯中,60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴,每隔 30 min 取出沥水,并快速用滤纸吸取表面多余的水分,称重;重新放入原烧杯中,60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴 30 min,取出称重;重复操作,直到黄蘑菇吸水完全。每种干制品平行测定 3 次,并按式(2)计算复水比。

$$R_R = \frac{W_t}{W_0}, \quad (2)$$

式中:

R_R ——复水比;

W_t ——复水沥干后的质量,g;

W_0 ——复水前干品的质量,g。

1.3.8 收缩率 采用体积排除法^[18],以小米为介质,按式(3)计算收缩率。

$$S_R = \frac{V_0 - V_k}{V_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

S_R ——收缩率,%;

V_k ——干燥后黄蘑菇的体积, cm^3 ;

V_0 ——干燥前黄蘑菇的体积, cm^3 。

1.3.9 质构特性 以“二次压缩”模式进行分析,取 3 个黄蘑菇样品,将每个黄蘑菇菌盖切成 3 个边长为 1 cm 的正方体,结果取平均值。采用 TPA 探头,测试速度 60 mm/min,触发力 0.5 N,压缩比 40%。测定指标为硬度、弹性、内聚性及咀嚼性。

1.4 数据分析

数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,采用 Excel、Origin

2018、SPSS 25 进行数据统计分析及作图,显著性差异采用 LSD 多重比较法。

2 结果与分析

2.1 干燥方法对黄蘑菇干燥时间和含水率的影响

由表 1 可知,5 种干燥方法处理的黄蘑菇含水率均在 12% 以下,MD-HAD 组的干燥时间最短,而 VFD 组的干燥时间仅次于 SD 组,存在干燥时间长的问題。有研究^[5,19]报道,真空冷冻干燥不仅干燥时间长,还存在能耗高、处理量少以及设备投资大等问題,限制了其工业化应用。

表 1 干燥方法对黄蘑菇干燥时间和含水率的影响[†]

Table 1 Effects of drying methods on drying time and moisture content of *A. luteo-virens*

干燥方法	干燥时间/h	含水率/%
新鲜		89.86 $\pm$ 1.27 ^a
VD	13.5	5.35 $\pm$ 0.15 ^c
SD	20.0	4.94 $\pm$ 0.12 ^c
HAD	9.0	6.01 $\pm$ 0.18 ^{bc}
VFD	17.0	7.08 $\pm$ 0.10 ^b
MD-HAD	8.0	5.61 $\pm$ 0.15 ^c

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 干燥方法对黄蘑菇营养成分的影响

由表 2 可知,不同干燥方法处理的黄蘑菇的营养成分存在差异。与 SD 组相比,HAD 组的蛋白含量略有下降,但差异不显著,其他干燥组蛋白含量均在一定程度上增加,VFD 组和 MD-HAD 组的含量相对较高,且两组之间差异不显著。持续较高的干燥温度会破坏蛋白质结构,且蛋白质可能因美拉德反应而损失,所以 HAD 组蛋白含量最低。MD-HAD 组前期微波干燥能较好地保留蛋白质,可能因蛋白质的介电常数和介电损耗值比水的小,吸收的微波能也较少^[20]。这与王振帅等^[21]的研究结果相似。与 SD 组相比,HAD 组和 VFD 组脂肪含量较高,VD 组和 MD-HAD 组小幅度下降,HAD 组脂肪含量最高,可能是黄蘑菇中的复合脂肪在干热条件下游离出来^[22]。与 SD 组相比,HAD 组和 VD 组的灰分含量较高,VFD 组和 MD-HAD 组的较低。干燥处理后黄蘑菇的粗纤维含量显著降低,SD 组的粗纤维含量显著高于其他干燥组。综上,VFD 组和 MD-HAD 组蛋白的保留效果较好;HAD 组和 VFD 组的脂肪含量相对较高;VD 组和 HAD 组的灰分高于其他干燥组;在粗纤维含量上,SD 组和 HAD 组较有优势。

2.3 干燥方法对黄蘑菇功能成分的影响

由表 3 可知,粗多糖含量从高到低为新鲜 $>$ VFD $>$ MD-HAD $>$ SD $>$ VD $>$ HAD。MD-HAD 组多糖含量仅

表 2 干燥方法对黄蘑菇营养成分的影响[†]

Table 2 Effects of drying methods on the nutrient retention of *A. luteo-virens*
g/100 g

干燥方法	粗蛋白含量	脂肪含量	灰分含量	粗纤维含量
新鲜	45.89±0.95 ^a	2.46±0.12 ^d	8.81±0.06 ^c	27.37±0.10 ^a
VD	42.07±1.59 ^{bc}	3.09±0.01 ^c	10.33±0.02 ^a	16.70±0.03 ^d
SD	41.25±0.34 ^c	3.14±0.06 ^c	9.33±0.03 ^b	18.48±0.02 ^b
HAD	40.86±0.02 ^c	3.87±0.03 ^a	10.36±0.04 ^a	17.11±0.04 ^c
VFD	45.36±0.97 ^a	3.40±0.10 ^b	8.54±0.01 ^d	16.68±0.02 ^d
MD-HAD	43.92±1.23 ^{ab}	3.06±0.02 ^c	8.42±0.02 ^e	16.71±0.03 ^d

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

次于 VFD 组,显著高于 HAD 组,表明微波干燥有利于黄蘑菇多糖的维持。较长干燥时间和较高温度的干燥,可能会将一部分多糖转化为低聚糖和部分焦糖使含量下降^[23-24],所以 HAD 黄蘑菇粗多糖含量最低,与倪旭东^[25]的结果一致。SD 组总酚含量最低,表明自然晒干对黄蘑菇中酚类物质破坏较大。VD 组的总酚含量显著高于其他干燥组,并与新鲜黄蘑菇的最接近,可能为真空干燥隔绝了氧气,减少了酚类物质的氧化损失,且加热过程可能会使酚醛分子(酚类物质的前体)发生非酶转化,生成酚类物质,还会导致多酚氧化酶失活,且加热程度不同也会导致酚类物质含量的差异^[26-28]。新鲜黄蘑菇的总黄酮含量低于 SD 组、HAD 组和 VFD 组,可能是干燥能够导致细胞壁破裂,使黄酮类化合物更易释放,溶于提取剂^[29]。VFD 组总黄酮含量最高,可能与其真空低温的干燥条件有关,相较于 SD 组,VD 组和 MD-HAD 组的总黄酮含量显著降低,VD 组可能是加热时间较长,对黄酮类物质降解的影响较大,而 MD-HAD 组可能是微波功率较高,吸收的微波能较多,加速了黄酮化合物的降解^[30]。综上,VFD 组和 MD-HAD 组利于多糖的保留,VD 组和 VFD 组的总酚含量相对较高,且 VFD 组显著提高了总黄酮含量。

表 3 干燥方法对黄蘑菇功能成分的影响[†]

Table 3 Effects of drying methods on functional components of *A. luteo-virens*

干燥方法	粗多糖含量/ ($10^{-2} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$)	总酚含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总黄酮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
新鲜	6.42±0.45 ^a	7.56±0.18 ^a	0.42±0.03 ^c
VD	5.12±0.03 ^{bc}	7.65±0.01 ^a	0.09±0.01 ^e
SD	5.17±0.41 ^{bc}	5.72±0.23 ^d	0.63±0.01 ^b
HAD	4.93±0.04 ^c	6.63±0.05 ^c	0.63±0.02 ^b
VFD	6.38±0.26 ^a	7.21±0.10 ^b	1.47±0.01 ^a
MD-HAD	5.62±0.06 ^b	6.44±0.21 ^c	0.13±0.02 ^d

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 干燥方法对黄蘑菇色泽的影响

由表 4 可知,与新鲜样相比,干燥后黄蘑菇的 b^* 值,除 VFD 组显著降低外,其他干燥组均显著升高,其中 MD-HAD 组的 b^* 值最大。VFD 黄蘑菇干制品的色差值(ΔE)最小,表明 VFD 干燥的黄蘑菇与新鲜黄蘑菇的色泽最接近,褐变程度最小,但其 b^* 值最小,金黄色表现不明显。HAD 干制品的 L^* 最小, ΔE 最大,可能是氧气、温度^[31]增加了褐变程度。与 HAD 组相比,MD-HAD 组的 L^* 、 a^* 、 ΔE 无显著变化,其 b^* 值显著增加。VD 组与 SD 组的 L^* 、 b^* 和 ΔE 之间无显著差异。综上,VFD 组能较大程度地保持新鲜黄蘑菇的色泽,MD-HAD 组可显著提高黄蘑菇的 b^* 值。

2.5 干燥方法对黄蘑菇微观结构的影响

由图 1 可知,VFD 干制品呈多孔性网状结构,孔隙较大,组织较疏松,结构完整性较好;−18℃下预冻,其冻结速度较慢,形成的冰晶大,孔隙大^[32],也可能存在易碎、易吸潮等问题^[33-34]。HAD 干制品孔隙小,组织致密,立体性较差,有塌陷现象,可能是干燥温度较高,破坏了细胞的组织结构。SD 干制品孔隙较小,分布均匀;由于在自然环境中未受到较强外界作用力的影响,所以其结构较完整^[8]。VD 干制的黄蘑菇孔隙分布不均匀,有些部分网状结构不明显。菌盖内部由许多膨胀的管状菌丝组成,

表 4 干燥方法对黄蘑菇色泽的影响[†]

Table 4 Effects of drying methods on color parameters of *A. luteo-virens*

干燥方法	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜	57.58±2.09 ^a	4.91±0.98 ^{ab}	31.09±2.23 ^c	
VD	58.91±0.06 ^a	3.45±1.15 ^{bc}	34.01±0.69 ^b	7.85±0.17 ^b
SD	58.45±2.04 ^a	4.46±0.19 ^{ab}	35.87±0.74 ^b	7.18±0.79 ^b
HAD	49.42±0.76 ^b	5.09±1.53 ^{ab}	34.70±0.54 ^b	10.47±0.88 ^a
VFD	60.04±0.66 ^a	2.05±0.06 ^c	27.79±0.42 ^d	5.13±0.03 ^c
MD-HAD	52.28±2.01 ^b	6.22±1.12 ^a	38.81±0.37 ^a	9.60±1.23 ^a

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

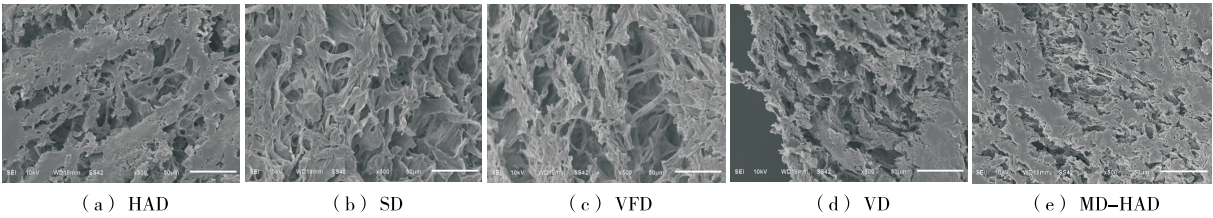


图1 不同方法干燥黄蘑菇的微观结构

Figure 1 Microstructure of *A. luteo-virens* with different drying methods(500×)

这些菌丝很脆弱易变形^[35],可能因真空状态产生负压,破坏了其内部结构,导致局部结构致密。陈鑫^[36]发现,HAD和VD表面的组织结构较差,VFD干燥能较好保持姬松茸的结构完整性。MD-HAD干制品有较多小孔隙,结构较致密,有塌陷现象,可能是前期微波干燥过程中细胞迅速脱水,组织发生畸变,造成结构塌陷。

2.6 干燥方法对黄蘑菇复水能力的影响

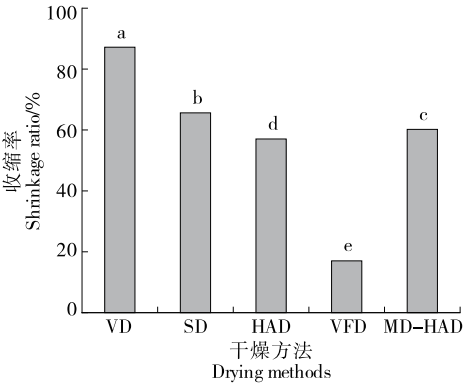
由图2可知,VFD黄蘑菇复水比最大,且复水速度较快,这与其大孔隙,疏松的内部结构有关。SD组和MD-HAD组的复水速度较慢,1.5 h后才趋于平稳。复水初期,水快速填满黄蘑菇内部空腔,复水比急剧增加,然后逐渐趋于稳定。最终VFD、MD-HAD、HAD、SD、VD黄蘑菇复水比分别为4.68、3.08、2.96、2.83、2.39,MD-HAD组和HAD组的最终复水比差异不明显,与邓加聪等^[37]的结论相似。

2.7 干燥方法对黄蘑菇收缩率的影响

由图3可知,5种方法干燥的黄蘑菇收缩率存在显著差异,从大到小依次为VD>SD>MD-HAD>HAD>VFD。其中,VFD组的收缩率最小,因其干制品孔隙大,结构完整性好,体积收缩不明显。这与江宁等^[38]研究结果相似。

2.8 干燥方法对黄蘑菇干复水后质构的影响

水分变化在植物性食品材料的质地中起着重要作用^[39]。随着黄蘑菇的复水,质地有了不同的变化。由



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图3 干燥方法对黄蘑菇收缩率的影响

Figure 3 Effects of drying methods on shrinkage ratio of *A. luteo-virens*

表5可知,干燥复水后的黄蘑菇弹性,咀嚼性均减小;MD-HAD组和HAD组硬度与新鲜黄蘑菇的硬度无显著差异,而其他干燥组的均显著减小;在内聚性方面,除MD-HAD组稍有增加外,其他干燥组的内聚性与新鲜黄蘑菇的无显著差异。VFD组黄蘑菇的硬度、弹性和咀嚼性均最小,主要表现为口感柔软,无嚼劲,压缩后较难复原,与邓加聪等^[37]的研究结果相似。MD-HAD组的黄蘑菇硬度、弹性、内聚性和咀嚼均最大,与其较为致密的结构有关,而且在其热风干燥阶段,可能因表面水分蒸发的速度较快,内部水分的转移速度较慢,表面形成硬膜,使硬度变大。咀嚼性是硬度、内聚性、弹性的乘积,反映了

表5 干燥方法对黄蘑菇复水质构的影响[†]

Table 5 Effects of drying methods on the texture of *A. luteo-virens*

干燥方法	硬度/N	弹性/mm	内聚性	咀嚼性/mJ
新鲜	7.68±1.04 ^{ab}	1.82±0.20 ^a	0.40±0.02 ^{bc}	5.73±0.08 ^a
VD	5.01±0.77 ^c	0.77±0.18 ^{bc}	0.44±0.03 ^b	1.92±0.64 ^c
SD	4.31±1.05 ^c	0.86±0.23 ^b	0.39±0.01 ^c	1.37±0.27 ^{cd}
HAD	5.62±0.55 ^{bc}	0.68±0.14 ^{bc}	0.42±0.05 ^{bc}	1.71±0.50 ^c
VFD	3.68±0.68 ^c	0.46±0.03 ^c	0.44±0.01 ^{bc}	0.71±0.27 ^d
MD-HAD	8.45±2.12 ^a	0.91±0.14 ^b	0.53±0.02 ^a	4.43±0.84 ^b

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

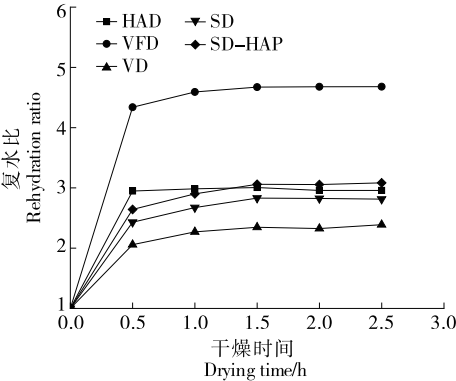


图2 不同方法干燥黄蘑菇的复水曲线

Figure 2 Rehydration curve of *A. luteo-virens* with different drying methods

食品对咀嚼的持续抵抗性,从表 5 可得出,VD 组、SD 组和 HAD 组之间差异不显著。

3 结论

自然晒干、热风干燥、真空冷冻干燥、真空干燥和微波—热风联合干燥 5 种干燥方法对黄蘑菇的物理特性、营养、功能成分和微观结构均有显著影响。真空冷冻干燥黄蘑菇的营养成分和功能成分的保留较好,色泽与新鲜黄蘑菇颜色最接近且复水性好,收缩程度低,组织完整性好,复水质构表现为硬度、弹性和咀嚼性低。微波—热风联合干燥组粗蛋白和粗多糖含量显著高于热风干燥组,并显著提高了黄蘑菇的 b^* 值,较热风干燥组干燥时间缩短了 11%,提高了干燥效率,相较于其他干燥组,其复水后硬度、内聚性和咀嚼性显著增加。真空干燥组的总酚含量最高,但不利于总黄酮的保留,并在收缩率和复水方面表现最差。自然晒干组粗纤维含量最高,但对总酚的破坏程度最大。综上所述,真空冷冻干燥的黄蘑菇整体品质最好,但存在干燥时间长、能耗高等问题,微波—热风联合干燥的干燥时间相对较短,建议黄蘑菇工业化生产使用此方式。由于不同的干燥方法对黄蘑菇的营养功能成分及结构和物理特性影响不尽相同,因此在实际生产中,可以根据干制黄蘑菇的用途,选择适合的干燥方式。后续可考虑将不同干燥方法组合,探索干燥方法联合对黄蘑菇品质的影响。

参考文献

- [1] 刁治民. 青海草地黄绿蜜环菌生态学特性及营养价值的研究[J]. 中国食用菌, 1997, 16(4): 21-22.
DIAO Z M. Study on ecological characteristics and nutritional value of *armillaria luteo-virens* in Qinghai grassland[J]. Chinese Edible Fungi, 1997, 16(4): 21-22.
- [2] 王文颖, 王启基, 姜文波, 等. 黄蘑菇的生长对草地植被及土壤的影响[J]. 草业学报, 2004, 13(4): 34-38.
WANG W Y, WANG Q J, JIANG W B, et al. Effects of the growth of *armillaria luteo-virens* on grassland vegetation and soil [J]. Journal of Prataculture, 2004, 13(4): 34-38.
- [3] 白世俊, 包锦渊. 黄绿蜜环菌有效成分的定性分析[J]. 北方园艺, 2012(3): 161-163.
BAI S J, BAO J Y. Qualitative analysis of effective components of *Armillaria lutea*[J]. Northern Horticulture, 2012(3): 161-163.
- [4] 李世峰, 陈桂琛, 毕玉蓉. 两种野生食用菌抗氧化及抗肿瘤活性研究[J]. 中国食用菌, 2005, 24(3): 58-63.
LI S F, CHEN G C, BI Y R. Study on antioxidant and antitumor activities of two wild edible fungi[J]. Chinese Edible Fungi, 2005, 24(3): 58-63.
- [5] 陶盛昌, 李文佳, 邱健健, 等. 食药真菌干燥技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 171-178.
TAO S C, LI W J, QIU J J, et al. Research progress on drying tech-

- nology of edible and medicinal fungi [J]. Preservation and Processing, 2019, 19 (1): 171-178.
- [6] OMARI A, BEHROOZI-KHAZAEI N, SHARIFIAN F. Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer[J]. J Food Process Eng, 2018, 41(7): 1-10.
- [7] 孙红霞, 孙静儒, 朱彩平. 农副产品干燥及其联合技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4 982-4 987.
SUN H X, SUN J R, ZHU C P. Research progress on drying and combined technology of agricultural and sideline products [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2019, 10(15): 4 982-4 987.
- [8] 王晓敏, 吕瑞娜, 黄静, 等. 不同干燥方式对金针菇品质及多酚氧化酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 77-81.
WANG X M, LU R N, HUANG J, et al. Effects of different drying methods on quality and polyphenol oxidase activity of *Flammulina velutipes*[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(22): 77-81.
- [9] 韩兴鹏. 干燥方式对猴头菇品质及抗氧化活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018: 17-27.
HAN X P. Effects of drying methods on quality and antioxidant activity of *Heridium erinaceus*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018: 17-27.
- [10] 张楠, 张照锋, 李斌, 等. 不同干燥方式猴头菇营养成分比较[J]. 北方园艺, 2021(8): 92-98.
ZHANG N, ZHANG Z F, LI B, et al. Comparison of nutritional components of *Heridium erinaceus* with different drying methods[J]. Northern Horticulture, 2021(8): 92-98.
- [11] 李艳杰, 高衍红, 王鹏, 等. 香菇热风干燥工艺优化及其对主要营养物质和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 209-214.
LI Y J, GAO Y H, WANG P, et al. Optimization of hot air drying process of *Lentinus edodes* and its effects on main nutrients and antioxidant activity[J]. Food Science, 2017, 38(6): 209-214.
- [12] 刘含龙, 王金庆, 杨帆, 等. 不同干燥方式对草菇切片品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 160-168.
LIU H L, WAN J Q, YANG F, et al. Effects of different drying methods on the quality of *Volvariella volvacea* slices[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(6): 160-168.
- [13] 杨婷, 朱天霞, 曹英, 等. 不同干燥方法对黄绿蜜环菌品质的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 68-72.
YANG T, ZHU T X, CAO Y, et al. Effects of different drying methods on the quality of *Armillaria mellea*[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 68-72.
- [14] 杨希娟, 党斌, 徐菲, 等. 不同粒色青稞酚类化合物含量与抗氧化活性的差异及评价[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 34-42.
YANG X J, DANG B, XU F, et al. Difference and evaluation of phenolic compounds content and antioxidant activity in different grain colors of highland barley[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2017, 32(9): 34-42.

- [15] 张小利, 夏春燕, 王慧清, 等. 超微粉碎对香菇多酚组成及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 42-49.
ZHANG X L, XIA C Y, WANG H Q, et al. Effects of ultra-fine grinding on polyphenol composition and antioxidant activity of *Lentinus edodes*[J]. Food Science, 2015, 36(11): 42-49.
- [16] ADOM K K, SORRELLS M E, LIU R H. Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(26): 7 825-7 834.
- [17] WANG H, ZHANG M, ADHIKARI B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 507-517.
- [18] 张慧, 张裕仁, 杨佳, 等. 响应面法优化香菇热风—微波联合干燥工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 214-221, 232.
ZHANG H, ZHANG Y R, YANG J, et al. Optimization of hot air microwave combined drying process of *Lentinus edodes* by response surface methodology[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(14): 214-221, 232.
- [19] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同干燥技术对核桃粕蛋白粉品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 92-98.
LI M J, ZHANG Y Y, YOU X R, et al. Effects of different drying techniques on the quality characteristics and microstructure of walnut meal protein powder[J]. Food Science, 2021, 42(5): 92-98.
- [20] 杨国峰, 夏宝林, KINGSLEY A R P, 等. 间歇干燥及缓苏对高水分稻谷干燥品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(1): 102-106, 111.
YANG G F, XIA B L, KINGSLEY A R P, et al. Effects of intermittent drying and slow drying on drying quality of high moisture rice[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2015, 30(1): 102-106, 111.
- [21] 王振帅, 陈善敏, 盛怀宇, 等. 不同干燥方法对朝鲜蓟粉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 119-124.
WANG Z S, CHEN S M, SHENG H Y, et al. Effects of different drying methods on the quality of artichoke powder[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(19): 119-124.
- [22] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25-30.
TANG Q S, LIU X M, CHI J W, et al. Effects of different drying processes on the quality and volatile flavor components of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Science, 2016, 37(4): 25-30.
- [23] ZHANG J, YAGOUB A E G A, SUN Y, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physico-chemical properties of shiitake mushroom [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 214-222.
- [24] TIAN Y, ZHAO Y, HUANG 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] 倪旭东. 香菇和秀珍菇干品理化特征及其抗氧化活性的研究[D]. 温州: 温州大学, 2020: 17-18.
NI X D. Study on physicochemical characteristics and antioxidant activity of dried *Lentinus edodes* and *Pleurotus ostreatus* [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020: 17-18.
- [26] 夏磊, 黄昭, 欧阳华峰, 等. 淮山微波真空干燥工艺优化及功能活性评价[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 188-194.
XIA L, HUANG Z, OUYANG H F, et al. Optimization of microwave vacuum drying process and evaluation of functional activity in Huaishan[J]. Food & Machinery, 2019, 35(6): 188-194.
- [27] QUE F, MAO L, FANG X, et al. Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43(7): 1 195-1 201.
- [28] PAPOUTSIS K, PRISTIJONO P, GOLDING J B, et al. Effect of vacuum-drying, hot air-drying and freeze-drying on polyphenols and antioxidant capacity of lemon (*Citrus limon*) pomace aqueous extracts[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017, 52(4): 880-887.
- [29] HAMROUNI-SELLAMI I, RAHALI F Z, REBEY I B, et al. Total phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of sage (*Salvia officinalis* L.) plants as affected by different drying methods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 806-817.
- [30] 赵梦月, 段续, 任广跃, 等. 山茱萸微波冷冻干燥动力学及品质变化分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 111-117, 129.
ZHAO M Y, DUAN X, REN G Y, et al. Microwave freeze drying kinetics and quality change analysis of *Cornus officinalis*[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 111-117, 129.
- [31] 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.
HU S, HUANG W, WANG Y, et al. Study on hot air drying technology of mushroom powder[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(3): 135-141.
- [32] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 241-250.
MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effect of pre freezing on vacuum freeze drying characteristics and quality of apple slices[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 241-250.
- [33] 孙静儒. 平菇微波—真空冷冻干燥工艺研究及其脆皮的研制[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019: 17-18.
SUN J R. Study on microwave vacuum freeze drying technology of *Pleurotus ostreatus* and preparation of its crispy skin[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019: 17-18.
- [34] 宋悦. 基于不同预处理的桃脆片真空冷冻联合干燥工艺优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 4-5.
SONG Y. Optimization of vacuum freeze-drying process of peach chips based on different pretreatment [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 4-5.
- [35] HERNANDO I, SANJUÁN N, PÉREZ-MUNUERA I, et al. Rehydration of freeze-dried and convective dried *boletus edulis* mushrooms: Effect on some quality parameters[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(8): E356-E362.

(下转第 234 页)