

不同干燥方式对羊肚菌品质的影响

王俊^{1,2,3} 夏伶俐⁴ 谢玲^{1,2,3} 夏志兰^{1,2,3} 闫航^{1,2,3} 吴秋云^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 2. 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410128; 3. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128; 4. 湖南迪为农业科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要 为探究不同干燥方式对羊肚菌品质的影响,以六妹羊肚菌(*Morchella sextelate*)和七妹羊肚菌(*M. eximia*)作为试验材料,采用真空冷冻干燥和热风干燥(热风温度分别为35℃、40℃、45℃、50℃、55℃)等6种干燥方式对新鲜羊肚菌进行干燥处理,分析不同干燥方式对羊肚菌外观品质、营养成分、抗氧化活性的影响。结果表明,真空冷冻干燥较热风干燥更大程度地保持了羊肚菌的外观性状及其抗氧化性,能有效抑制其蛋白质、多糖和多酚等营养成分的流失;其次,热风干燥以45℃的样品营养成分含量和DPPH自由基清除率显著高于其他温度,40℃热风干燥的样品ABTS和羟自由基清除能力较强,而55℃热风干燥的样品营养品质较差。综合考虑能耗和成本,认为45℃热风干燥方式为获得优质羊肚菌干制品较合理的方式。

关键词 羊肚菌; 热风干燥; 真空冷冻干燥; 营养成分; 抗氧化性

中图分类号: S646

文献标识码: A

文章编码: 2095-0934 (2024) 02-109-09

Effects of different drying methods on the quality of *Morchella*

WANG Jun^{1,2,3} XIA Lingli⁴ XIE Ling^{1,2,3} XIA Zhilan^{1,2,3} YAN Hang^{1,2,3} WU Qiuyun^{1,2,3*}

(1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha 410128, China; 3. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha 410128, China; 4. Hunan Diwei Agricultural Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract In order to explore the effects of different drying methods on the quality of *Morchella*, Using *M. sextelate* and *M. eximia* fruiting bodies as experimental materials in this study. Six different drying methods, vacuum freeze drying and hot air drying(35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C), were used to dry fresh *Morchella*. The effects of different drying methods on its appearance quality, nutritional components and antioxidant activity were analyzed. The results showed that vacuum freeze-drying maintained the appearance and antioxidant activity of *Morchella* to a greater extent than hot air drying, and effectively inhibited the loss of proteins, polysaccharides and polyphenols. Secondly, the nutrient content and DPPH free radical scavenging rate of the samples dried at 45 °C were significantly higher than those of the samples dried at other temperatures. The ABTS and hydroxyl radical scavenging ability of the samples dried at 40 °C was stronger, and the nutritional quality of the samples dried at 55 °C was the worst. Considering the energy consumption and cost, hot air drying at 45 °C is a more reasonable way to obtain high-quality dried products.

Key words *Morchella*; hot air drying; vacuum freeze-drying; nutritional components; antioxidation

基金项目: 湖南省现代农业产业技术体系(湘农发(2022)31号)

作者简介: 王俊(1999—), 硕士, 主要从事食用菌栽培育种研究。E-mail: 2056658812@qq.com。

*通信作者: 吴秋云(1972—), 副教授, 主要从事食用菌栽培育种研究。E-mail: 385681666@qq.com。

羊肚菌是羊肚菌属 (*Morchella*) 真菌的总称, 又名羊肚菜、羊肚蘑, 为珍稀食药兼用型菌类, 因其子实体菌盖呈蜂窝状、形似羊肚而得名^[1]。羊肚菌风味独特, 肉质肥厚, 味道鲜美, 脆嫩可口, 与鸡枞、竹荪、松茸并称中国四大名菌^[2]。羊肚菌含有丰富的蛋白质、脂肪酸、氨基酸、多糖^[3]、矿物质、麦角甾醇^[4]、维生素^[5]、膳食纤维等多种营养成分, 具有抗氧化^[6]、抗肿瘤^[7]、抗菌、调节身体机能^[8]、保肝护肾等多重功效, 深受消费者喜爱。

新鲜羊肚菌含水量高, 在常温或冷藏贮藏条件下易腐烂变质, 影响其商品价值。干燥是羊肚菌重要加工形式, 操作便捷、成本低, 不仅可延长产品保存期限, 而且能增加羊肚菌风味物质^[9-10]。目前, 食用菌的干燥方式有热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、红外干燥和热泵干燥等^[11], 相比自然风干或晒干等方式, 热风干燥和真空冷冻干燥的效率更高^[12], 更适用于工业化加工生产。相关研究表明, 干燥方式是影响干制食品品质的重要因素^[13-14]。黄健航等^[15]研究不同干燥温度对鹿茸菇品质及其抗氧化活性的影响, 结论为采用 60 °C 热风干燥, 可以保持鹿茸菇的色泽和抗氧化活性。邓加聪等^[16]研究表明, 与热风干燥相比, 真空冷冻干燥的牛肝菌物理特性及各项营养成分含量和品质更优。

本研究设置 35 °C、40 °C、45 °C、50 °C、55 °C 5 个不同温度的热风干燥, 以及真空冷冻干燥方式, 对新鲜羊肚菌进行干燥处理, 通过观察测定干制品的外观品质、营养成分和抗氧化性, 探讨不同干燥方式对品质的影响, 以期筛选出较优的干燥方式, 为羊肚菌品质提升及新产品研发提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验菌株: 六妹羊肚菌 (*Morchella sextelate*) M01、金秋武、A2、野生黑 327, 七妹羊肚菌 (*M. eximia*) M07。5 个菌株均由湖南农业大学食用菌研

究所野外采集并驯化, 并通过外观鉴定和 ITS 鉴定。5 个菌株采用相同配方和模式, 在湖南省长沙市长沙县果园镇新明村基地进行栽培, 于统一采收标准下得到新鲜羊肚菌子实体。

药品与试剂: 福林酚试剂、没食子酸、苯酚、无水乙醇、葡萄糖、DPPH、ABTS 和羟自由基试剂盒, 均购自上海茁彩生物科技有限公司。

1.2 羊肚菌鲜样的干燥处理

对 5 个菌株采用 6 种干燥方式处理, 其中热风干燥温度分别设为 35 °C、40 °C、45 °C、50 °C、55 °C; 真空冷冻干燥方式先置于冰箱中 -20 °C 预冻 12 h, 然后放入真空冷冻干燥机 LGJ-10C/E 中, 将温度设为 -80 °C。

1.3 羊肚菌供试样品的制备

试验共 30 个处理, 每处理随机选取 20 个羊肚菌干品, 3 次重复。每处理样品干燥后, 分别经粉碎机粉碎, 过 50 目筛, 收集细粉于自封袋密封包装, 暂存于洁净干燥缸内, 尽快完成指标测定。

1.4 复水比测定

每处理分别随机选取 3 个样品, 每处理重复 3 次, 通过重量法对不同干燥方式下的羊肚菌进行复水, 将完整子实体干燥后放入 40 °C 恒温水浴锅中, 每隔 10 min 沥干称重, 直至恒重, 重复 3 次取平均值。复水比按照公式 (1) 计算。

$$\text{复水比} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为复水后样品质量, 单位为 g; m_2 为干燥后样品质量, 单位为 g。

1.5 色泽测定

采用色差仪测定 5 个菌株的干制品菌盖 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每处理选取 10 个样品, 结果取平均值。白度值 WI 按照公式 (2) 计算。

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

式中: L^* 为明暗指数; a^* 为红绿指数; b^* 为黄蓝指数。

1.6 收缩率测定

每个菌株分别随机选取 36 个新鲜羊肚菌样品，将其分为 6 组，用游标卡尺分别测量菌盖长度、菌盖宽度和菌柄宽度并记录；经 6 种干燥方式处理后再次测量相应指标。收缩率按照公式 (3) 计算。

$$S(\%) = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： S 为收缩率； d_0 和 d_1 分别是干燥前后羊肚菌不同位置的长度或宽度，单位为 mm。

1.7 羊肚菌营养成分含量测定

蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》；多糖含量，先用水提醇沉法提取多糖，再采用苯酚-硫酸法测定^[17]；多酚含量采用福林酚法测定^[18]。

每组样品重复测定 3 次，分别根据标准曲线计算羊肚菌不同成分提取液中的蛋白质、多糖、多酚含量。

1.8 羊肚菌抗氧化能力的测定

分别取 6 种干燥方式的羊肚菌干制品粉末，采用试剂盒法测定其 DPPH、ABTS 和羟自由基清除能力，分析不同干燥方式对羊肚菌干品抗氧化活性的影响。

1.9 数据处理

试验重复 3 次，结果以平均值±标准误差表示，采用软件 SPSS 26.0 和 Excel 对数据进行统计分析，采用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 羊肚菌不同干燥方式所需干燥时间

羊肚菌干制品标准依据 GB 7096—2014，使用电子水分测定仪 HX-Q1 进行测定，保证其水分含量≤12%。如图 1 所示，对新鲜羊肚菌进行干燥处理，以 55℃热风干燥所需时间最短，真空冷冻干燥消耗的时间最长，二者有显著性差异($P<0.05$)。热风干燥时，随着温度的升高，干燥时间逐渐缩短；热风干燥温度从 35℃升高到 55℃，干燥时间减少 7.45 h。而真空冷冻干燥处理经历了低温预冷—抽真空—制冷降降至冷阱温度阶段—恒温干燥阶段—

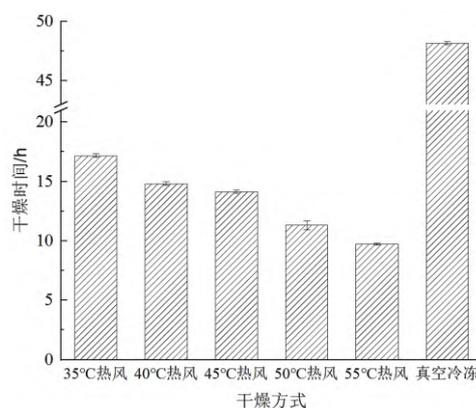
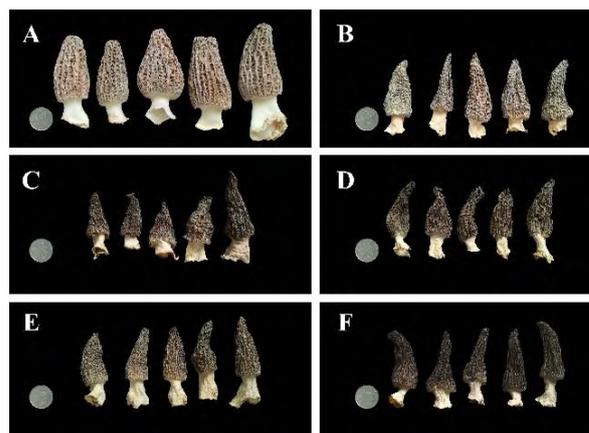


图 1 不同干燥方式制备羊肚菌干品所需时间

后期升温排汽阶段，干燥所需时间较长。

2.2 不同干燥方式对羊肚菌外观品质的影响

(1) 色泽。不同干燥方式制得的羊肚菌干品，其外观具有明显差异，以真空冷冻干燥方式的干品观感较好，表面蓬松，色泽偏亮，但易出现褪色和碎屑现象；热风干燥的干品颜色偏暗，表面皱缩严重(图 2)。



A: 真空冷冻干燥, B: 热风 35℃干燥, C: 热风 40℃干燥, D: 热风 45℃干燥, E: 热风 50℃干燥, F: 热风 55℃干燥。

图 2 不同干燥方式制得的羊肚菌干品外观

由表 1 可知，不同干燥方式得到的羊肚菌干品 L^* 值分布在 18.83~41.32 之间，各菌株 L^* 值均以真空冷冻干燥的最大，35℃和 50℃热风干燥的次之，55℃热风干燥的最小。不同干燥方式的羊肚菌干品白度值为 18.61~39.17 不等，且以真空冷冻干燥的显著大于热风干燥方式；35℃和 50℃热风干燥

的次之；40℃和45℃热风干燥方式两者间无显著性差异；55℃热风干燥的白度值较低，且与其他干燥方式间存在显著差异。

(2) 硬度。由表2可知，5个羊肚菌菌株经不同干燥方式制得的干品硬度值有显著差异，均表现为热风干燥大于真空冷冻干燥，且随着热风干燥温度的升高，硬度值增大。

(3) 复水比。由表3可知，5个羊肚菌菌株经不同干燥方式制得的干品复水比有差异，其中真空

冷冻干燥方式的复水比显著高于热风干燥方式，M01、M07、野生黑327、金秋武、A2的干品复水比分别为5.86、5.66、5.45、5.97、5.44；其次为45℃热风干燥；35℃、40℃、50℃和55℃热风干燥的复水比较低，其中40℃和50℃热风干燥两种方式间无显著性差异。

(4) 外观收缩率。对5个羊肚菌菌株经不同干燥方式制得的干品菌盖长度、菌盖宽度和菌柄宽度的收缩率进行测定，结果(表4)表明，各菌株

表1 不同干燥方式的羊肚菌色泽 (n=3)

菌株	干燥方式	L^*	a^*	b^*	白度值
M01	35℃热风干燥	31.70 ± 2.31 d	3.63 ± 0.25 b	10.54 ± 1.08 b	30.80 ± 2.45 c
	40℃热风干燥	27.40 ± 3.22 bc	3.37 ± 0.20 b	10.70 ± 1.05 b	26.54 ± 2.96 bc
	45℃热风干燥	25.19 ± 2.02 b	2.55 ± 0.17 a	7.64 ± 0.39 a	24.76 ± 2.24 b
	50℃热风干燥	29.54 ± 0.30 cd	3.45 ± 0.76 b	9.94 ± 1.04 b	28.76 ± 0.25 bc
	55℃热风干燥	19.37 ± 0.30 a	2.23 ± 0.39 a	5.86 ± 0.61 a	19.13 ± 0.96 a
	真空冷冻干燥	39.20 ± 2.96 e	5.86 ± 0.52 c	16.27 ± 0.57 c	36.78 ± 2.65 d
M07	35℃热风干燥	27.17 ± 0.97 b	2.46 ± 0.05 a	8.22 ± 0.63 ab	30.64 ± 0.69 c
	40℃热风干燥	24.96 ± 2.06 ab	2.80 ± 0.65 a	7.63 ± 1.18 a	24.52 ± 2.16 ab
	45℃热风干燥	26.43 ± 1.46 ab	2.71 ± 0.05 a	7.90 ± 0.29 a	25.95 ± 1.67 b
	50℃热风干燥	33.71 ± 1.58 c	2.86 ± 0.21 a	9.70 ± 0.47 b	32.94 ± 0.85 c
	55℃热风干燥	21.91 ± 3.92 a	3.35 ± 0.10 a	7.93 ± 0.94 a	21.43 ± 1.31 a
	真空冷冻干燥	41.32 ± 3.40 d	5.16 ± 1.17 b	15.16 ± 1.40 c	39.17 ± 2.95 d
野生黑327	35℃热风干燥	29.71 ± 6.55 c	4.25 ± 1.38 b	12.83 ± 2.71 c	28.42 ± 1.12 c
	40℃热风干燥	22.53 ± 0.84 b	2.39 ± 0.32 a	7.00 ± 0.70 ab	22.18 ± 1.80 b
	45℃热风干燥	23.83 ± 2.45 b	2.50 ± 0.05 a	7.48 ± 0.10 ab	23.42 ± 0.35 b
	50℃热风干燥	27.77 ± 2.08 c	2.73 ± 0.39 a	8.78 ± 0.70 b	27.19 ± 0.59 c
	55℃热风干燥	18.83 ± 1.29 a	1.98 ± 0.08 a	5.62 ± 0.34 a	18.61 ± 1.06 a
	真空冷冻干燥	37.75 ± 2.57 d	4.91 ± 0.47 b	16.40 ± 1.93 d	35.44 ± 2.26 d
金秋武	35℃热风干燥	25.74 ± 2.11 b	2.70 ± 0.68 a	9.44 ± 0.26 b	25.10 ± 1.64 c
	40℃热风干燥	21.89 ± 1.10 a	2.86 ± 0.21 a	7.58 ± 1.34 ab	21.47 ± 0.91 ab
	45℃热风干燥	22.65 ± 2.42 ab	2.26 ± 0.05 a	8.46 ± 2.52 ab	22.16 ± 0.31 b
	50℃热风干燥	25.70 ± 1.94 b	2.68 ± 0.54 a	9.30 ± 1.06 b	25.07 ± 0.32 c
	55℃热风干燥	20.51 ± 1.86 a	2.13 ± 0.11 a	6.28 ± 0.37 a	20.23 ± 0.36 a
	真空冷冻干燥	36.24 ± 3.27 c	6.46 ± 1.01 b	17.12 ± 0.86 c	33.67 ± 1.96 d
A2	35℃热风干燥	26.69 ± 1.82 a	3.74 ± 0.12 c	11.01 ± 0.72 d	25.77 ± 0.70 c
	40℃热风干燥	25.35 ± 2.98 a	2.86 ± 0.21 b	8.81 ± 0.46 bc	22.78 ± 1.85 b
	45℃热风干燥	23.82 ± 1.98 a	2.10 ± 0.18 a	7.94 ± 0.22 ab	23.37 ± 0.51 b
	50℃热风干燥	26.33 ± 2.67 a	2.60 ± 0.17 ab	9.40 ± 1.09 c	25.69 ± 0.12 c
	55℃热风干燥	21.09 ± 0.98 a	3.00 ± 0.19 b	7.23 ± 0.34 a	20.70 ± 0.06 a
	真空冷冻干燥	33.49 ± 2.11 b	5.35 ± 0.43 d	14.43 ± 0.76 e	31.74 ± 0.88 d

注：同品种分组内数据后无相同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

表 2 不同干燥方式的羊肚菌硬度 (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	11.46 ± 0.43 b	12.71 ± 0.26 b	11.31 ± 0.32 b	11.34 ± 0.10 b	11.28 ± 0.36 b
40 °C热风干燥	13.16 ± 0.62 c	12.29 ± 0.46 b	12.21 ± 0.23 b	11.66 ± 0.83 b	11.31 ± 0.18 bc
45 °C热风干燥	13.43 ± 0.21 c	13.97 ± 0.53 c	13.36 ± 0.18 c	13.91 ± 0.41 c	13.09 ± 0.77 c
50 °C热风干燥	15.91 ± 0.26 d	16.22 ± 0.23 d	15.68 ± 0.64 d	16.19 ± 0.40 d	14.95 ± 0.68 d
55 °C热风干燥	19.28 ± 0.48 e	20.04 ± 0.64 e	18.31 ± 0.46 e	17.35 ± 0.19 e	18.34 ± 0.62 e
真空冷冻干燥	6.29 ± 0.06 a	6.51 ± 0.22 a	6.01 ± 0.31 a	6.02 ± 0.64 a	6.19 ± 0.16 a

表 3 不同干燥方式的羊肚菌复水比 (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	2.91 ± 0.23 a	3.20 ± 0.05 a	3.30 ± 0.20 a	3.22 ± 0.07 a	2.98 ± 0.07 a
40 °C热风干燥	3.44 ± 0.10 ac	3.52 ± 0.13 b	3.34 ± 0.46 a	3.45 ± 0.43 b	3.20 ± 0.02 ab
45 °C热风干燥	3.75 ± 0.09 c	3.76 ± 0.12 c	3.88 ± 0.22 b	3.65 ± 0.18 c	3.56 ± 0.18 c
50 °C热风干燥	3.45 ± 0.16 ac	3.51 ± 0.17 b	3.48 ± 0.20 a	3.47 ± 0.03 b	3.41 ± 0.15 bc
55 °C热风干燥	3.25 ± 0.06 b	3.34 ± 0.12 ab	3.23 ± 0.16 a	3.26 ± 0.10 a	3.08 ± 0.17 b
真空冷冻干燥	5.86 ± 0.07 d	5.66 ± 0.06 d	5.45 ± 0.10 c	5.97 ± 0.18 d	5.44 ± 0.07 d

经真空冷冻干燥方式获得的干品体积收缩率均较小,整体形状基本保持不变;其次为 45 °C和 50 °C热风干燥。经热风干燥制得的 5 个菌株干品的体积收缩率均较大,且以菌盖宽度的收缩率最大,均在 20%以上,其中金秋武在热风 40 °C干燥方式下的菌盖宽度收缩率高达 65%。

2.3 不同干燥方式对羊肚菌营养成分的影响

(1) 蛋白质含量。蛋白质是反映物质营养和品质的重要指标,不同干燥方式对其有较大影响。由表 5 可知,5 个羊肚菌菌株分别采用 6 种干燥方式,其干品的蛋白质含量不同,均以真空冷冻干燥方式的最高,且与热风干燥方式的差异达显著水平,约是 55 °C热风干燥的 2 倍。在不同温度的热风干燥方式中,菌株 M07、野生黑 327、金秋武、A2 均以 45 °C热风干燥的蛋白质含量显著高于其他温度热风干燥,仅 M01 的 45 °C和 40 °C热风干燥间差异不显著。干品蛋白质含量由高到低的干燥方式顺序, M01 和金秋武为真空冷冻干燥>40 °C热风干燥>45 °C热风干燥>35 °C热风干燥>50 °C热风干燥>55 °C热风干燥; M07、野生黑 327 和 A2 为真空冷冻干燥>45 °C热风干燥>40 °C热风干燥>35 °C热风干燥>50 °C热风干燥>55 °C热风干燥。

(2) 多糖含量。5 个羊肚菌菌株的干品多糖含

量,均以真空冷冻干燥方式显著高于热风干燥方式,热风干燥又以 45 °C明显优于其他温度(表 6)。

M01、金秋武和 A2 的多糖含量从高到低的干燥方式排序为真空冷冻干燥>45 °C热风干燥>40 °C热风干燥>50 °C热风干燥>55 °C热风干燥>35 °C热风干燥,其中 M01 不同干燥方式间差异显著;金秋武在 40 °C、50 °C和 55 °C热风干燥间差异不显著;A2 在 40 °C和 50 °C热风干燥间无显著性差异。M07 和野生黑 327 的多糖含量从高到低的干燥方式排序为真空冷冻干燥>45 °C热风干燥>40 °C热风干燥>35 °C热风干燥>50 °C热风干燥>55 °C热风干燥。表明不同羊肚菌菌株经真空冷冻干燥制得的干品,多糖损失较少,45 °C热风干燥次之,35 °C和 55 °C热风干燥多糖损失较多。

(3) 多酚含量。由表 7 可知,5 个羊肚菌菌株不同干燥方式的子实体干品多酚含量从高到低排序为真空冷冻干燥>45 °C热风干燥>40 °C热风干燥>35 °C热风干燥>55 °C热风干燥>50 °C热风干燥。以真空冷冻干燥方式保留的多酚含量较高,与热风干燥有显著差异,不同温度热风干燥的干品多酚含量,以 45 °C热风干燥的较高, M01、M07、野生黑 327、金秋武、A2 的多酚含量依次为 7.97、8.11、7.90、7.90、7.64 mg/g; 35 °C和 40 °C热风干

表4 不同干燥方式的羊肚菌收缩率(%) (n=3)

各菌株干燥方式	菌盖长度	菌盖宽度	菌柄宽度
M01			
35 °C热风干燥	22 ± 0.09 c	47 ± 0.14 ab	27 ± 0.13 b
40 °C热风干燥	23 ± 0.30 c	49 ± 0.49 b	47 ± 0.05 c
45 °C热风干燥	19 ± 0.17 bc	37 ± 0.17 ab	32 ± 0.03 b
50 °C热风干燥	13 ± 0.23 b	31 ± 0.05 b	13 ± 0.04 b
55 °C热风干燥	20 ± 0.08 bc	47 ± 0.14 ab	27 ± 0.13 a
真空冷冻干燥	4 ± 0.01 a	6 ± 0.03 a	9 ± 0.02 a
M07			
35 °C热风干燥	18 ± 0.05 bc	52 ± 0.24 b	21 ± 0.04 b
40 °C热风干燥	21 ± 0.16 bc	41 ± 0.14 b	39 ± 0.15 c
45 °C热风干燥	16 ± 0.06 b	45 ± 0.12 b	29 ± 0.18 bc
50 °C热风干燥	18 ± 0.04 bc	42 ± 0.20 b	21 ± 0.09 b
55 °C热风干燥	26 ± 0.07 c	52 ± 0.24 b	38 ± 0.04 c
真空冷冻干燥	6 ± 0.04 a	6 ± 0.03 a	6 ± 0.02 a
野生黑 327			
35 °C热风干燥	33 ± 0.21 bc	61 ± 0.29 c	22 ± 0.08 b
40 °C热风干燥	38 ± 0.21 bc	63 ± 0.15 c	53 ± 0.16 c
45 °C热风干燥	18 ± 0.02 ab	35 ± 0.02 b	27 ± 0.04 b
50 °C热风干燥	23 ± 0.13 b	37 ± 0.13 b	30 ± 0.08 b
55 °C热风干燥	26 ± 0.02 b	61 ± 0.09 c	29 ± 0.08 b
真空冷冻干燥	4 ± 0.02 a	5 ± 0.03 a	9 ± 0.04 a
金秋武			
35 °C热风干燥	23 ± 0.13 ab	50 ± 0.07 b	23 ± 0.10 b
40 °C热风干燥	33 ± 0.33 b	65 ± 0.17 b	31 ± 0.08 b
45 °C热风干燥	22 ± 0.05 ab	38 ± 0.13 ab	19 ± 0.03 b
50 °C热风干燥	29 ± 0.08 ab	41 ± 0.05 ab	29 ± 0.12 b
55 °C热风干燥	48 ± 0.28 c	50 ± 0.18 b	23 ± 0.13 b
真空冷冻干燥	3 ± 0.01 a	6 ± 0.03 a	8 ± 0.03 a
A2			
35 °C热风干燥	18 ± 0.22 b	54 ± 0.19 cd	45 ± 0.08 c
40 °C热风干燥	36 ± 0.16 c	62 ± 0.10 d	33 ± 0.16 bc
45 °C热风干燥	19 ± 0.12 b	24 ± 0.11 ab	27 ± 0.02 b
50 °C热风干燥	22 ± 0.07 b	37 ± 0.05 bc	32 ± 0.16 bc
55 °C热风干燥	26 ± 0.13 b	54 ± 0.19 cd	42 ± 0.07 c
真空冷冻干燥	4 ± 0.02 a	9 ± 0.01 a	11 ± 0.08 a

燥两种方式间差异不显著; 50 °C和 55 °C热风干燥的干品多酚含量较低。

2.4 不同干燥方式对羊肚菌抗氧化性的影响

(1) DPPH 自由基清除能力。由表 8 可知, 5 个菌株不同干燥方式子实体干品的 DPPH 自由基清除率从高到低排序为真空冷冻干燥 > 45 °C热风干燥 > 40 °C热风干燥 > 35 °C热风干燥 > 55 °C热风干燥 > 50 °C热风干燥。热风干燥中, 45 °C的羊肚菌 DPPH 自由基清除能力, 除 M07 的 40 °C较高外, 其他 4 个菌株均显著高于其他温度; 50 °C与 55 °C热风干燥的 DPPH 自由基清除能力较弱, 除野生黑 327 外, 其余菌株两种方式间无显著性差异。

(2) ABTS 自由基清除能力。由表 9 可知, 5 个菌株不同干燥方式子实体干品 ABTS 自由基清除率均以真空冷冻干燥显著高于不同温度的热风干燥; 40 °C、50 °C和 45 °C热风干燥居次; 35 °C和 55 °C热风干燥的 ABTS 自由基清除率较弱, 且两者间没有显著性差异。

(3) 羟自由基清除能力。由表 10 可知, 各菌株均以真空冷冻干燥方式的干品羟自由基清除能力显著高于热风干燥方式。不同温度的热风干燥以 40 °C和 55 °C的羟自由基清除率高于其他温度; 45 °C与 50 °C居次, 二者差异不显著; 35 °C热风干燥的羟自由基清除能力较弱。

3 结论与讨论

本试验通过分析比较采用真空冷冻干燥和 35 °C、40 °C、45 °C、50 °C、55 °C不同温度热风干燥制得的 5 个羊肚菌菌株的干品外观品质、营养成分及抗氧化活性, 探究不同干燥方式对羊肚菌品质

表5 不同干燥方式的羊肚菌蛋白质含量(mg/g) (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	204.14 ± 9.93 c	205.63 ± 4.83 b	190.14 ± 4.41 b	202.58 ± 1.44 b	169.72 ± 3.64 bc
40 °C热风干燥	229.06 ± 6.29 d	226.15 ± 5.42 c	198.99 ± 5.10 b	253.69 ± 10.02 d	181.21 ± 5.36 c
45 °C热风干燥	221.94 ± 3.23 d	249.18 ± 8.57 d	217.02 ± 7.43 c	236.10 ± 5.90 c	195.00 ± 6.25 d
50 °C热风干燥	161.40 ± 9.06 b	202.66 ± 4.77 b	173.25 ± 6.33 a	176.06 ± 7.39 a	164.48 ± 1.92 b
55 °C热风干燥	138.18 ± 5.87 a	179.02 ± 7.26 a	171.56 ± 4.75 a	173.03 ± 8.93 a	150.46 ± 6.81 a
真空冷冻干燥	308.43 ± 4.32 e	320.45 ± 4.83 e	308.19 ± 7.98 d	300.23 ± 6.63 e	288.87 ± 8.09 e

的影响。

从外观品质看，真空冷冻干燥的样品颜色黄白，褐变程度低，能够更好地保持羊肚菌本身的形状和色泽，复水比大，硬度较小，无明显的收缩现象；而采用热风干燥，随着干燥温度的升高，干制品亮

度值降低，菌盖色泽加深，呈黑褐色，组织紧密，收缩率较大，复水比较低，与张海伟等^[19]对香菇干制研究的结论一致。表明不同干燥方式对不同羊肚菌菌株的干品外观有影响。真空冷冻干燥会使羊肚菌产生褪色，但对样品内部细胞和结构破坏程度小，

表 6 不同干燥方式的羊肚菌多糖含量 (mg/g) (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	4.95 ± 0.17 a	8.04 ± 0.04 b	6.48 ± 0.10 b	4.44 ± 0.23 a	4.93 ± 0.02 a
40 °C热风干燥	8.97 ± 0.29 d	9.64 ± 0.22 c	8.51 ± 0.17 c	5.49 ± 0.16 b	7.02 ± 0.14 c
45 °C热风干燥	9.64 ± 0.09 e	10.10 ± 0.35 d	9.25 ± 0.22 d	7.94 ± 0.11 c	8.07 ± 0.17 d
50 °C热风干燥	7.94 ± 0.19 c	7.45 ± 0.16 a	6.12 ± 0.19 ab	5.32 ± 0.06 b	6.91 ± 0.06 c
55 °C热风干燥	6.90 ± 0.22 b	7.44 ± 0.18 a	5.95 ± 0.06 a	5.13 ± 0.07 b	5.50 ± 0.05 b
真空冷冻干燥	11.53 ± 0.27 f	13.17 ± 0.26 e	9.76 ± 0.11 e	9.19 ± 0.17 d	9.16 ± 0.12 e

表 7 不同干燥方式的羊肚菌多酚含量 (mg/g) (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	7.06 ± 0.02 bc	7.57 ± 0.06 bc	7.17 ± 0.04 bc	7.30 ± 0.16 b	7.11 ± 0.09 ab
40 °C热风干燥	7.30 ± 0.17 c	7.72 ± 0.03 cd	7.50 ± 0.08 c	7.46 ± 0.15 b	7.20 ± 0.05 b
45 °C热风干燥	7.97 ± 0.21 d	8.11 ± 0.517 de	7.90 ± 0.10 d	7.90 ± 0.04 c	7.64 ± 0.705 c
50 °C热风干燥	6.26 ± 0.18 a	6.84 ± 0.13 a	6.25 ± 0.14 a	6.63 ± 0.13 a	6.72 ± 0.03 a
55 °C热风干燥	6.68 ± 0.14 b	7.19 ± 0.05 ab	6.96 ± 0.03 b	7.08 ± 0.01 b	7.09 ± 0.12 ab
真空冷冻干燥	7.83 ± 0.06 d	8.33 ± 0.09 e	8.31 ± 0.11 e	8.17 ± 0.09 d	7.82 ± 0.04 c

表 8 不同干燥方式的羊肚菌 DPPH 自由基清除率 (%) (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	59.43 ± 1.13 b	60.86 ± 0.46 b	51.71 ± 0.41 b	50.02 ± 0.34 b	47.05 ± 0.14 b
40 °C热风干燥	63.55 ± 0.60 c	65.32 ± 0.40 c	58.46 ± 0.57 c	54.39 ± 0.19 c	57.55 ± 0.12 bc
45 °C热风干燥	68.52 ± 0.85 d	68.43 ± 0.16 c	64.42 ± 0.15 d	60.49 ± 0.11 d	63.75 ± 0.04 d
50 °C热风干燥	50.38 ± 0.47 a	51.49 ± 0.27 a	42.19 ± 0.34 a	41.49 ± 0.40 a	40.05 ± 0.24 a
55 °C热风干燥	53.00 ± 0.56 a	53.00 ± 0.24 a	51.00 ± 0.36 b	44.13 ± 0.31 a	42.34 ± 0.08 a
真空冷冻干燥	70.21 ± 0.93 d	73.26 ± 0.32 d	71.49 ± 0.38 e	66.85 ± 0.26 e	68.19 ± 0.21 e

表 9 不同干燥方式的羊肚菌 ABTS 自由基清除率 (%) (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	43.19 ± 0.15 a	50.56 ± 0.12 a	46.77 ± 0.24 a	44.43 ± 0.15 a	40.45 ± 0.12 a
40 °C热风干燥	55.66 ± 0.13 c	61.32 ± 0.24 bc	60.32 ± 0.25 c	57.93 ± 0.13 bc	55.32 ± 0.25 b
45 °C热风干燥	50.74 ± 0.04 b	58.41 ± 0.02 b	54.87 ± 0.14 b	56.33 ± 0.24 b	52.23 ± 0.27 b
50 °C热风干燥	54.03 ± 0.10 bc	64.16 ± 0.05 c	62.24 ± 0.15 c	61.07 ± 0.07 c	59.83 ± 0.22 c
55 °C热风干燥	42.21 ± 0.31 a	48.52 ± 0.31 a	45.86 ± 0.08 a	42.07 ± 0.17 a	43.13 ± 0.14 a
真空冷冻干燥	62.00 ± 0.12 d	72.23 ± 0.27 d	70.00 ± 0.18 d	65.18 ± 0.26 d	66.74 ± 0.22 d

表 10 不同干燥方式的羊肚菌羟自由基清除率 (%) (n=3)

干燥方式	M01	M07	野生黑 327	金秋武	A2
35 °C热风干燥	40.00 ± 0.12 a	45.33 ± 0.27 a	39.00 ± 0.07 a	37.33 ± 0.05 a	32.00 ± 0.07 a
40 °C热风干燥	52.16 ± 0.32 c	62.00 ± 0.27 d	60.12 ± 0.24 d	60.33 ± 0.33 d	61.03 ± 0.24 d
45 °C热风干燥	43.64 ± 0.14 b	48.67 ± 0.08 b	43.67 ± 0.14 b	41.67 ± 0.16 b	39.67 ± 0.04 b
50 °C热风干燥	46.33 ± 0.21 b	51.67 ± 0.27 b	46.70 ± 0.18 b	44.70 ± 0.06 b	42.33 ± 0.02 b
55 °C热风干燥	47.20 ± 0.16 b	58.00 ± 0.24 c	53.33 ± 0.27 c	54.00 ± 0.13 c	56.33 ± 0.27 c
真空冷冻干燥	56.67 ± 0.27 d	71.00 ± 0.14 e	68.00 ± 0.22 e	69.33 ± 0.37 e	65.00 ± 0.33 e

复水较为容易；而高温（热风）会使羊肚菌快速失水，内部毛细孔空隙坍塌导致皱缩严重，表面硬化，复水困难。采用 45 °C 热风干燥时，其复水比相对于其他高温时较高，复水相对容易，表明在一定程度上内的温度干燥对羊肚菌的外观品质影响不大。

从营养成分看，真空冷冻干燥的样品蛋白质、多糖和多酚含量均显著高于热风干燥，说明其营养成分保留率高。不同温度（35 °C、40 °C、45 °C、50 °C、55 °C）热风干燥得到的样品蛋白质、多糖、多酚含量随温度升高呈先增高后降低的趋势，其中 40 °C 和 45 °C 热风干燥时，以上 3 项营养指标显著高于其他温度，55 °C 热风干燥的营养成分含量较低。推测原因，可能是过高的干燥温度造成蛋白质变性；而多糖在美拉德反应作用下，随温度的升高逐渐转化为低聚糖或焦糖；酚类物质在高温作用下发生聚合氧化及热降解^[20]。

从抗氧化性看，真空冷冻干燥的样品 DPPH、ABTS 和羟自由基清除能力强于热风干燥方式；而后以 45 °C 热风干燥时样品 DPPH 自由基清除能力效果较好，而 40 °C 热风干燥的样品 ABTS 和羟自由基清除能力较好。综合分析蛋白质、多糖和多酚等 3 项营养指标含量变化与 ABTS、DPPH 和羟自由基清除能力变化，可以推测羊肚菌干制品中营养成分的变化可能与其抗氧化能力存在相关性^[21-22]。

真空冷冻干燥虽然能够更好地保持羊肚菌色泽，其蛋白质、多糖和多酚保留率均显著高于热风干燥，成品具有更高的抗氧化活性，但真空冷冻干燥需要提前 12 h 在 -20 °C 冰箱中预冻，耗时较长，且操作流程复杂，单次处理样品量少，效率低，成本高。而 35 °C、50 °C、55 °C 热风干燥的效果并不理想，极大地破坏了羊肚菌的活性成分，降低了抗氧化活性。综合衡量，选择 45 °C 热风干燥为羊肚菌干品制备的最优方式，该方式能较大程度地保留羊肚菌的优良品质，且符合经济效益。本研究为明确干制方式对羊肚菌外观品质和抗氧化活性的作用机理，以及后续采用低温定型、高温烘干的分段

干燥方式提供了理论依据。

参考文献

- [1] 谭方河. 羊肚菌人工栽培技术的历史、现状及前景[J]. 食药用菌, 2016, 24(3): 140-144.
- [2] 贺立虎, 李娟丽, 王文光. 羊肚菌研究与利用现状[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(5): 93-96.
- [3] 尚千涵, 杨婷, 高其媛, 等. 羊肚菌属物种分类、系统进化和药用价值研究进展[J]. 中草药, 2021, 52(7): 2154-2162.
- [4] LI Y, CHEN H, ZHANG X. Cultivation, nutritional value, bioactive compounds of morels, and their health benefits: A systematic review[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1159029.
- [5] 谭一罗, 苏文英, 樊继伟, 等. 羊肚菌化学成分及药理作用研究进展[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(5): 1025-1028.
- [6] 田金凤, 尚远宏, 肖宗妮. 羊肚菌的营养成分、功能和加工的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 1-10.
- [7] 熊川, 李小林, 李强, 等. 羊肚菌生活史周期、人工栽培及功效研究进展[J]. 中国食用菌, 2015, 34(1): 7-12.
- [8] 李卫东. 羊肚菌生物活性成分及药理作用的研究进展综述[J]. 食药用菌, 2018, 26(3): 157-160.
- [9] 孙海澜, 裴龙英, 陈瑶, 等. 基于电子鼻和顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同干燥方式对羊肚菌挥发性化合物的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 1-9.
- [10] 涂宝军, 陈尚龙, 马庆昱, 等. 3 种干燥方式对香菇挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(19): 106-110.
- [11] 刘振东, 刘红丽, 姜静雨, 等. 不同干燥方式对林芝松口蘑挥发性风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 302-308.
- [12] 鲁加惠, 张雨露, 梁进, 等. 3 种干燥方式对香菇挥发性物质及感官特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 262-269.
- [13] 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 116-121.
- [14] 任爱清, 邓珊, 林芳, 等. 不同干燥处理对黑木耳粉理化特性和微观结构的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 75-81.
- [15] 黄健航, 郑峻, 杨斌, 等. 不同干燥温度对鹿茸菇品质及其抗氧化活性的比较分析[J]. 中国食品添

- 加剂, 2022, 33(2): 194-200.
- [16] 邓加聪, 王志辉, 童秋霞, 等. 不同干燥方式对牛肝菌品质及特性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 6-9.
- [17] 张立, 马琼, 何永利, 等. 灵芝、香菇、黄芪、枸杞提取物中多糖的含量测定[J]. 中草药, 2004(2): 167-168.
- [18] 侯文井, 王露露, 栗铭鸿, 等. 4种长白山区食用菌多酚类物质的体外抗氧化活性[J]. 食品工业, 2017, 38(1): 18-22.
- [19] 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.
- [20] 高雪, 金鑫, 毕金峰, 等. 基于主成分分析法综合评价不同干燥工艺对香菇干燥特性和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(5): 537-547.
- [21] 王悦, 姜永红, 张强, 等. 不同方式干燥对猴头菌营养成分含量及抗氧化活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(5): 159-164.
- [22] 田欢, 申雪, 布海丽且姆·阿卜杜热合曼, 等. 不同干燥方式对黑木耳质构及多糖抗氧化活性的影响[J]. 发酵科技通讯, 2023, 52(3): 151-157.

浙江庆元发现真菌新物种“直立齿菌”

一种独特的子实层体为直立齿状的真菌新物种在浙江省丽水市庆元县左溪镇发现, 经菌物领域专业人员鉴定, 这种形态特别的真菌被归为齿菌属(*Hydnum*), 并被命名为“直立齿菌”(*Hydnum erectum*), 日前, 这一研究成果已在国际权威期刊《Diversity》上发表。



图1 直立齿菌 (*Hydnum erectum*)

直立齿菌是由胡礼贵于 2023 年 8 月

首先在庆元县左溪镇印浆村的海拔 800 米的松阔林中意外发现, 他随后联系中国菌物学会科普委员会副主任林文飞, 并将样本送至海南师范大学生命科学学院曾念开教授的实验室进行鉴定。研究人员通过分子系统发育与分类学相结合的研究方法, 确定“直立齿菌”是齿菌属的一个全新物种。据了解, 齿菌属真菌广泛分布于世界各地, 目前, 中国已知的齿菌属真菌有 20 种。齿菌属是鸡油菌目 (Cantharellales) 中一个特色类群, 具有齿状的子实层, 大多数齿菌属物种是深受人们喜爱的野生食用菌, 具有重要的经济价值; 也是一类植物外生菌根真菌, 与植物形成共生关系, 对维持森林生态系统的稳定具有重要的意义。

庆元县有着丰富多样的自然资源, 为各种动植物提供了良好的生长环境和栖息条件。近年来, 科考团队和专家先后在百山祖区域发现了百山祖元蘑、近蓝紫丝膜菌、丽水丽丝盖伞、皱盖油囊蘑等较多真菌新物种。

(摘编自 2024-03-10 丽水市人民政府网 http://www.lishui.gov.cn/art/2024/3/10/art_1229218391_57355852.html)