

不同干燥方式对羊肚菌品质特性及复水性能的影响

马佳佳, 董明辉*, 全鑫瑶, 邵千朔, 金梅娟, 王毓宁

(江苏太湖地区农业科学研究所, 苏州 215105)

摘要: 为探究羊肚菌在不同干燥方式及复水后的品质变化与成因, 以六妹羊肚菌为试材, 采用自然干燥 (natural drying, ND), 恒温干燥 (constant temperature drying, CTD), 真空冷冻干燥方式 (vacuum freeze-drying, VFD) 对羊肚菌进行干制, 探讨 3 种干燥方式对微观结构、滋味、营养品质及复水性能的影响, 并研究羊肚菌复水前后质地、色泽、风味的差异分析, 分析判断不同方式的干燥特性。结果表明: VFD 羊肚菌氨基酸、粗多糖与甜味值分别为 944 mg/100 g、6.26 g/100 g、19.73, 显著 ($P < 0.05$) 高于其他 2 种方式, 其菌柄与菌盖的明亮度 (L^* 值) 显著 ($P < 0.05$) 提升, 菌盖色差最小, ΔE 值为 5.83。电子鼻数据结合主成分分析 (principal component analysis, PCA) 发现干燥与复水前后不同羊肚菌样品在气味轮廓上存在差异且对风味进行很好地区分。VFD 由于其孔隙均匀分布的疏松状微观结构保持最佳的复水比, 低场核磁共振 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 结合核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 分析结果显示 VFD 羊肚菌在复水 20 min 内不易流动水显著增加, 复水速率快速上升, 复水均匀性最好。VFD 复水后菌柄与菌盖色差 (ΔE) 分别为 12.28 和 11.47, 显著 ($P < 0.05$) 小于其他 2 种干燥方式, 菌柄和菌盖的脆度分别为 35.87 N/mm 和 10.42 N/mm, 与 CTD 相近。聚类分析与相关性分析结果直观地展示了感官变量与营养变量在不同干燥方式样品中的分布, 进一步说明真空冷冻干燥在羊肚菌干燥应用的可行性。该研究结果为羊肚菌干制品加工方式优选提供参考。

关键词: 羊肚菌; 干燥方式; 复水性能; 感官品质; 营养品质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403183

中图分类号: S646.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0288-10

马佳佳, 董明辉, 全鑫瑶, 等. 不同干燥方式对羊肚菌品质特性及复水性能的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 288-297. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403183 <http://www.tcsae.org>

MA Jiajia, DONG Minghui, QUAN Xinyao, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics and rehydration performance of *Morchella esculenta*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 288-297. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403183 <http://www.tcsae.org>

0 引言

羊肚菌 (*Morchella esculenta* (L.) Pers.) 隶属于子囊菌门盘菌目羊肚菌属, 是珍稀食药兼用真菌, 有“素中之荤”和“软黄金”的美誉。羊肚菌具有非常高的食用价值与药用潜力, 肉质脆嫩鲜美, 氨基酸的含量极其丰富, 野生羊肚菌含人体所必需的氨基酸较一般食用菌高出 25%~40%^[1-2]。羊肚菌也是重要的药用菌, 含有多糖、生物酶类、钙、锌、铁等多种矿物质等, 具有抗氧化、调节机体免疫力、抗疲劳、抑制肿瘤、抗菌、降血脂等多种功效^[3-4]。

羊肚菌鲜品新鲜脆嫩, 保鲜困难且货架期短, 目前羊肚菌干品占消费总量 90% 以上^[5], 自然晒干和风干为传统羊肚菌干燥方法, 易受天气等自然因素限制, 采用

热风、微波、冻干等干制工艺提升羊肚菌干制品品质和干制效率已成必然趋势, 热风干燥 (hot-air drying, HAD) 具有易于控制、成本低以及对环境、场地和设备要求低等特点在食用菌干制加工中被广泛应用, 真空冷冻干燥 (vacuum freeze-drying, VFD) 能够保持食用菌原品特性, 是目前生产高品质食品最好的干制方法, 也通常用于果蔬脆片应用中的一种预干燥方式^[6]。吴素蕊等^[7]对冻干羊肚菌和传统风干羊肚菌理化及感官指标进行比较, 证实了冻干工艺的优越性。李淑芳等^[8]研究发现冻干羊肚菌复水时间、复水后颜色和形状、风味物质和种类等性能均显著优于烘干羊肚菌; 段丽丽等^[9]研究证实真空冷冻干燥能够有效保留羊肚菌的色、香、味、形及食品营养成分。张楠等^[10]对猴头菇采用日晒干燥 (solar drying, SD)、VFD、HAD 三种方式发现对营养物质变化影响具有显著差异。对于干制羊肚菌的复水性能、滋味、质地等鲜有综合研究, 不同的干燥方式对羊肚菌质量的影响尚不清楚。

本研究旨在通过微观结构、营养物质、色泽、滋味变化筛选并获得羊肚菌的最佳干燥方式, 同时对 3 种干燥方式制备的羊肚菌进行复水研究, 对比了不同干制羊肚菌的复水性能、外观、质地、风味的差异性, 为其工

收稿日期: 2024-03-26 修订日期: 2024-07-30

基金项目: 江苏省重点研发计划 (现代农业) 项目 (BE2021315), 江苏省自主创新项目 (CX(22)3064)

作者简介: 马佳佳, 硕士, 副研究员, 研究方向为农产品 (食用菌) 保鲜与加工。Email: mjj20120326@163.com

※通信作者: 董明辉, 博士, 研究员, 研究方向为作物高产优质形成机理与稻菌综合种养技术研究。Email: mhdong@yzu.edu.cn

业化生产方式优选提供数据支撑和参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

六妹羊肚菌, 采收于苏州市吴江区羊肚菌种植基地, 挑选大小一致, 无病虫害, 菌柄保留 2 cm 的羊肚菌作为试验原料。所有试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

LRH-150CL 低温恒温干燥箱, 一恒实验仪器有限公司; FD-B12N-80 真空冷冻干燥设备, 上海胜卫电子科技有限公司; SU3500 扫描电子显微镜, 日立科学仪器(北京)有限公司; MZsoMR23-060H-I 核磁共振成像分析仪, 苏州纽迈电子科技有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 有限公司; SA402B 电子舌, 日本 INSENT 有限公司; CR400 色差计, 柯尼卡美能达有限公司; TMS-PRO 质构仪, 美国 FTC 有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 不同干燥方式羊肚菌的制备

ND: 将 1 kg 羊肚菌鲜品单层平铺在塑料托盘中, 模拟农户置于自然环境(白天晒+晚上晾)晾晒的模式, 用时 32 h, 终了水分含量保持在 6.4%; CTD: 将 1 kg 羊肚菌单层平铺在低温干燥箱的不锈钢晾架中, 42 °C 恒温连续干燥, 用时 15 h; 干燥至羊肚菌水分含量约为 6.5% 时取出, 冷却, 密封于牛皮纸质包装袋。VFD: 将 1 kg 羊肚菌在 -80 °C 下预冻 12 h, 立即放置于真空冷冻干燥箱的干燥室内, 真空度 0 Mpa, 冷阱温度为 -78 °C, 干燥 24 h, 至羊肚菌最终水分含量为 6.5% 时取出, 密封于牛皮纸质包装袋。

1.3.2 复水性的测定

1) 复水比的测定^[11]

取 4~5 g 羊肚菌干制品于烧杯中, 加 250 mL 蒸馏水, 将烧杯置于 40 °C 恒温水浴锅中, 复水 5 min 后取出样品, 沥水 5 min, 用剪刀将样品竖直剪开, 用吸水纸拭干内外表面水分后称量, 然后将样品放回原烧杯, 之后每隔 5 min 取出, 重复沥水、拭干、称量, 直至称量结果差值小于 0.5 g, 平行 3 组取平均值。

$$R = m_1 / m_0 \quad (1)$$

式中: R 为复水比, m_1 为干制品复水后的质量, g; m_0 为干制品质量, g。

2) T_2 图谱和伪彩图的测定

对 3 种不同干燥方式的羊肚菌在 40 °C 进行复水, 对复水 10、20、90 min 的羊肚菌分别采用核磁共振成像分析仪进行横向弛豫时间(T_2)及其对应的弛豫信号分量采集。称取羊肚菌样品(1±0.1) g 放入样品管, 再于核磁管中进行测试。CPMG 脉冲序列参数为: 主频(spectrometer frequency, SF) 21 MHz, 偏移频率(sampling bandwidth, SW) 200 kHz, 90°脉冲时间($P1$) 24 μs, 180°脉冲时间($P2$) 48 μs, 采样点数(TD) 400 008, 重复时间(TW) 5 000 ms, 累加次数(NS) 8 次, 回波数(NECH) 10 000。

1.3.3 外观色泽的测定^[12]

采用色差计对羊肚菌干制品及复水制品的菌盖与菌柄分别进行颜色测定。主要测定明度指数(L^*)、红绿指数(a^*)和黄蓝指数(b^*)。并计算复水前后的色差值 $\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$

1.3.4 整体挥发性风味的测定

1) 样品准备

准确称取 2 g 干制品和复水制品(复水后用吸水纸擦干)于 20 mL 的顶空瓶中, 在 25 °C 下加盖密封, 静置 60 min 使顶空瓶气体达到平衡, 待测。

2) 电子鼻测定

分析参数: 手动进样, 采样间隔 1 s, 零点微调时间 10 s, 预采样时间 5 s, 清洗时间 60 s, 数据采集时间为 60 s, 数据采集流量 300 mL/min。每个样品做 3 个平行, 取传感器在 55~57 s 时获得的稳定信号进行分析。

1.3.5 质构的测定

1) 微观结构观察

将羊肚菌干制品纵向折断, 横断面向上粘贴在扫描电子显微镜的样品台上, 用离子溅射镀膜仪溅射喷金约 2 min 后, 进行放大倍数分别为 250、500 和 1 000 倍的扫描观察。

2) 物性分析

羊肚菌干制品与复水制品的菌柄与菌盖均进行脆度测定, 即最大剪切力与对应位移的比值。测试采用剪切模式, 分别从菌柄与菌盖的中部进行剪切, 起始力 3.0 N, 位移 43 mm, 测试速度和回程速度均为 30 mm/min, 每组处理做 5 个样品平行。

1.3.6 滋味的测定

1) 样品准备

称取(8.5±0.5) g 羊肚菌干制品, 料液比 1:25, 剪碎后放在 40 °C 恒温水浴锅复水 0.5 h, 煮 10 min 后对样品过滤, 冷却待测。新鲜样品称取(75±5) g, 清洗干净, 煮处理同前。

2) 电子舌测定

移取液体 105 mL 用于苦味、涩味、酸味、咸味、鲜味、甜味和苦的回味、涩的回味、鲜的回味指标的测定。用 KCl 与酒石酸溶液配成基准液作为参比溶液。负极清洗液为水+乙醇+HCl, 正极清洗液为 KCl+水+乙醇+KOH。将传感器置于参比溶液中归零 30 s, 测试时间为 30 s, 测试完毕后用参比溶液清洗 3 s, 再次进行测定, 测试时间 30 s。每个样品重复 4 次, 取后 3 次做为测试结果。

1.3.7 干制品的营养物质测定

氨基酸总量的测定采用茚三酮比色法, 粗多糖的测定依据 NY/T1676-2008《食用菌中粗多糖含量的测定》。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 和 origin 整理分析制图, 由 SAS 9.0 软件进行 Duncan 方差分析, 聚类分析热图采用 TBtools v2.096 绘制, 主成分分析与线性判别分析结果从电子鼻和电子舌的软件截取。

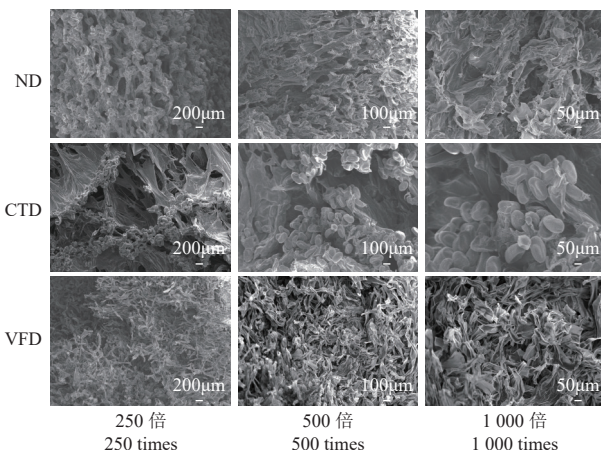
2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对羊肚菌微观结构的影响

不同干燥方式的羊肚菌表型结构和扫描电镜结果如图1所示,经过ND、CTD、VFD后发生了皱缩现象,产生不同疏松程度的多孔结构。ND由于干燥时间较长导致菌体向内部挤压,引起组织结构变形,结构呈现相对均匀。CTD样品显示出受热不均导致失水引起的细胞组织塌陷和收缩,纤维结构排列紧密,可以观察到菌丝脱落,使其结构化外观变平,形成了片层状结构。VFD不同于ND和CTD,呈现了孔隙均匀分布的疏松状结构,超低温的预处理使得内部形成了规则孔隙,使气体排出速度加快^[13],同时在冻干过程的真空条件造成样品中水分从产品内部扩散到周围区域,导致细胞肿胀并且在样品内部形成更大的通道,减少了因水分扩散带来的物质迁移^[14-15]。



a. 不同干燥方式的羊肚菌的表型结构
a. The phenotypic structure of *Morchella esculenta* with different drying methods



b. 不同干燥方式的羊肚菌在250、500和1000倍的微观结构变化
b. The microstructural changes of *Morchella esculenta* at 250, 500, and 1000 times magnification with different drying methods

注: ND为自然干燥,CTD为恒温干燥,VFD为真空冷冻干燥,下同。
Note: ND represents natural drying, CTD represents constant temperature drying, VFD represents vacuum freeze-drying, the same below.

图1 不同干燥方式的羊肚菌的表型结构与在250、500倍和1000倍的微观结构变化

Fig.1 The phenotypic structure and microstructural changes of *Morchella esculenta* at 250, 500, and 1000 times magnification with different drying methods

2.2 不同干燥方式对羊肚菌营养物质含量的影响

羊肚菌所含氨基酸种类齐全,是极好的蛋白质来源。多糖是羊肚菌的主要活性成分之一,诸多生物活性和药理作用都与多糖有关^[2]。氨基酸和多糖是羊肚菌重要的营养组成成分。不同干燥方式的羊肚菌氨基酸和粗多糖含量如表1所示,3种干燥方式羊肚菌的氨基酸和粗多糖含量差异显著 ($P<0.05$),VFD与ND的粗多糖含量

比CTD分别高10.6%与8.1%,游离氨基酸含量比CTD分别高2.1%与0.37%,烘干的鸡枞菌与自然晾干相比,氨基酸总量有少许降低^[16],主要是热力学因素引起蛋白质结构和功能部分丧失,蛋白质降解产生氨基酸途径受到阻碍。黄伞子实体采用热风干燥后粗多糖含量显著低于真空冷冻干燥,干燥过程温度较高加速糖类降解,后者因为创造的低温环境减少了糖类物质氧化进程,因此最大限度地保持了粗多糖含量^[17]。

表1 不同干燥方式的羊肚菌的营养物质

Table 1 The nutrients of *Morchella esculenta* with different drying methods

干燥方式 Drying methods	营养物质 Nutrients	
	氨基酸 Amino acids/ (mg·100 g ⁻¹)	粗多糖 Polysaccharides/ (g·100 g ⁻¹)
FS	159.3±0.16d	0.60±0.04d
ND	928.2±1.99b	6.12±0.33b
CTD	924.8±2.81c	5.66±0.04c
VFD	944.4±1.22a	6.26±0.16a

注: FS为新鲜样品,同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note: FS represents fresh samples, different letters in the same co-column indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

2.3 不同干燥方式对羊肚菌滋味的影响

通过电子舌反映了羊肚菌干制品的味觉(苦味、涩味、鲜味、咸味、甜味)变化,比较干制品之间与鲜品的滋味差异。与新鲜样品相比,干制品蒸煮后的苦味、涩味、甜味增加,可能与组成苦味主要成分的组氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸,组成甜味主要成分的丝氨酸和丙氨酸^[18]等呈味氨基酸的种类与含量相关,苦味回味、鲜味、鲜味回味、咸味有所下降,可能是羊肚菌中甘氨酸易于溶解且具有调味的功能,缓和了咸味的产生^[19]。呈味游离氨基酸和呈味核苷酸协同作用产生鲜味,鲜味的下降与这两类物质含量均相关。由图2显示,VFD变化最为明显,鲜味回味下降的同时,甜味较新鲜样、ND,CTD分别增加了3.79倍、1.44倍和41.6%。

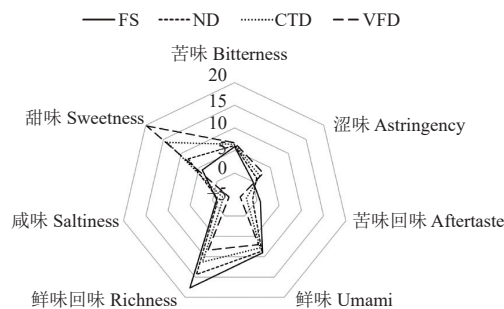


图2 不同干燥方式的羊肚菌的味觉变化

Fig.2 The taste changes of *Morchella esculenta* with different drying methods

为观察羊肚菌不同干燥方式之间以及与鲜品的滋味特征是否有明显区别,采用主成分分析方法对基于电子舌味觉值的羊肚菌进行分析。如图3所示,第一主成分贡献率为99.8%,能反映绝大部分羊肚菌电子舌味觉值信息。不同干制品之间基本得到有效区分,与鲜品之间有显著的差异。结果表明,羊肚菌干制后煮汤的化学成分发生明显的变化,导致味道形成了较大差异。

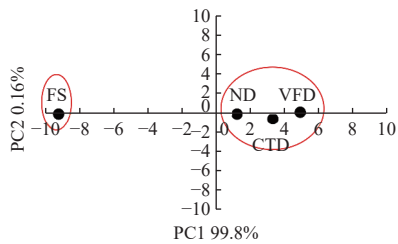


图 3 不同干燥方式的羊肚菌味觉主成分分析

Fig.3 The principal component analysis of taste in *Morchella esculenta* with different drying methods

2.4 不同干燥方式对复水比和复水性能的影响

羊肚菌干制品的复水性是指复水后恢复原来新鲜状态的程度，它是衡量干制品品质的重要指标^[11]。干制品对水的吸收包括水在纤维基质的扩散和水渗透到毛细管两种路径^[20]。图 4 可知，不同干燥方式的复水比大小依次是 VFD>CTD>ND，VFD 的复水比分别比 ND、CTD 高 8.0%、6.2%，其羊肚菌多孔结构疏松，有利于水分重新快速进入组织。

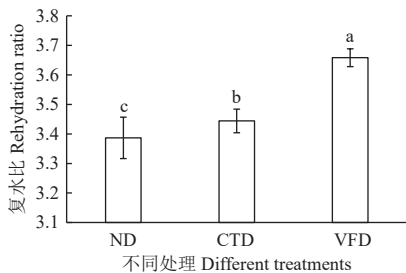


图 4 不同干燥方式的羊肚菌复水比

Fig.4 The rehydration ratio of *Morchella esculenta* with different drying methods

不同干燥方式的羊肚菌复水过程的横向弛豫图谱如图 5 所示，通过低场核磁共振分析可获得弛豫时间与信号振幅之间的关系^[21]，弛豫过程受羊肚菌含水率和大分子与水分子之间不同形式的结合能力的影响^[22]。 T_2 反映样品水自由度的高低，羊肚菌在复水过程中产生了 2~3 个组分峰，根据峰出现的时间分别为 T_{21} 峰、 T_{22} 峰、 T_{23} 峰，依次为结合水、不易流动水、自由水。复水时间延长，整个图谱向右迁移，不易流动水和自由水的自由度持续上升，水分的流动性增加；其中不易流动水的含量随着复水时间的延长不断升高，说明总的相对水分

含量的增加主要是由不易流动水引起的，VFD 体现尤为突出。ND 和 CTD 的弛豫时间要低于 VFD，氢质子的自由度相对较小，与 ND 和 CTD 的羊肚菌内部致密结构有关。

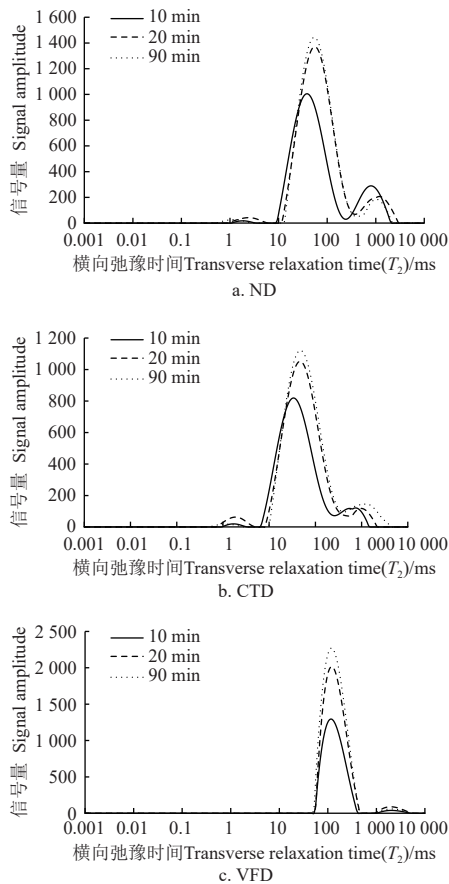


图 5 不同干燥方式的羊肚菌 T_2 图谱

Fig.5 The T_2 spectrum of *Morchella esculenta* with different drying methods

如表 2 显示，复水过程中，3 种不同干燥方式的羊肚菌水分由外向内迁移，主要增加的为不易流动水 A_{22} 和自由水 A_{23} 。不易流动水峰面积随着复水时间延长不断增加，自由水峰面积变化趋势各不一致，其中 VFD 的 T_{22} 弛豫峰逐渐右移，弛豫时间增加，不易流动水峰 A_{22} 和水分弛豫峰总积分面积快速上升，复水速率快速上升，至复水中后期，自由水 T_{23} 含量降低，水分流动性变小，复水速率放缓。

表 2 不同干燥方式的羊肚菌复水过程中 T_2 图谱峰面积及比例变化								
Table 2 The change in peak area and proportion of T_2 spectra during rehydration of <i>Morchella esculenta</i> using different drying methods								
干燥方式 Drying methods	复水时间 Rehydration time /min	峰面积 Peak area				峰面积比例 Peak area ratio /%		
		$A_{总}$	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
ND	10	11543.704c	70.267c	9509.317c	1964.120a	0.609c	82.377c	17.015a
	20	15274.892a	266.857a	13482.91b	1525.124b	1.747a	88.268b	9.985b
	90	15167.429b	149.115b	14020.17a	998.148c	0.983b	92.436a	6.581c
CTD	10	11694.305c	103.734c	10986.55c	604.018c	0.854b	90.492b	4.975b
	20	15864.941b	473.187a	14673.46b	718.296b	2.983a	92.490a	4.528b
	90	17157.789a	134.391b	15444.48a	1578.921a	0.783c	90.014b	9.202a
VFD	10	13730.809c	/	13390.97c	339.839c	/	97.525a	2.475b
	20	22215.255b	/	21401.59b	813.663a	/	96.337b	3.663a
	90	25717.915a	/	25180.64a	537.277b	/	97.911a	2.089b

注：“/”表示 VFD 复水在 A_{21} 不出峰。
Note: “/” represents no peak was appeared in A_{21} of VFD rehydration.

2.5 不同干燥方式羊肚菌复水过程的 MRI 变化

核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术测定的质子密度加权图像可以直观显示羊肚菌样品复水以后的内部水分信息, 其轮廓分明清晰, 亮度高, 说明 H 质子密度大, 样品持水性高, 亮度低说明样品持水性低^[23]。不同复水时间羊肚菌横切面的 MRI 伪彩图见图 6, 含水量高的区域用红色表示, 含水量低的区域用蓝色表示。

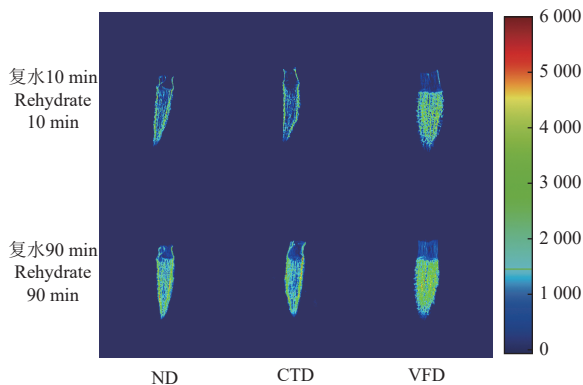


图 6 不同干燥方式的羊肚菌复水 10 min 与 90 min 的 MRI 图像

Fig.6 The MRI images of *Morchella esculenta* rehydrated with different drying methods for 10 minutes and 90 minutes

不同干燥方式的羊肚菌随着复水时间延长, 黄色部分面积逐渐由外圈向内增加, 吸水速度不一致呈现出不同的水分含量, 表明复水过程是从羊肚菌四周轮廓依次向中间结果推进, VFD 羊肚菌显示出了良好的恢复能力, 复水后菌体几乎完全恢复成鲜样状态。CTD 羊肚菌纤维束因受到长时间的加热后, 吸水能力减小, 复水后纤维

束仍呈现干瘪的状态, 由图 1 也反映出通道狭窄使其复水困难, ND 和 CTD 的复水速度低于 VFD。复水 90 min 时, 复水均匀性的顺序依次为 VFD>ND>CTD。不同干燥方式对羊肚菌复水性能的影响差异可能与内部结构的变化密切相关, 在香菇复水上也有相似的结论^[24]。真空冷冻干燥的复水主要是由于毛细管作用, 在空气和热风干燥的复水是由扩散控制^[25]。

2.6 不同干燥方式对羊肚菌复水前后外观色泽的影响

外观色泽的变化会关系到食用菌的商品性和市场的接受度。光环境、温度和水分能直接影响食用菌色素的积累量与色泽的变化^[26]。由表 3 可知, ND、CTD 及复水后的羊肚菌菌柄与菌盖的 L^* 值均呈下降趋势, 与新鲜样品相比, ND 和 CTD 菌柄的降低程度分别为 2.82% 和 19.69%, 菌盖降低程度分别为 9.67% 和 11.94%; ND 和 CTD 复水后菌柄的降低程度分别为 26.77% 和 47.38%, 菌盖的降低程度分别为 36.92% 和 38.26%。相对羊肚菌鲜品, VFD 的羊肚菌菌柄与菌盖的 L^* 值均上升, 明亮度增加, 分别升高 20.86%、16.13%, 低温真空环境下减少酚类物质与氧气的氧化聚合反应和美拉德反应的产生^[27], 复水后的羊肚菌菌柄与菌盖的 L^* 值均降低, 下降幅度分别为 17.37%、34.08%, 水是色素类物质形成与转化的介质, 复水过程是水分子与大分子物质的结合过程, 物质在溶解的过程中伴随着表面亮度的改变^[28]。羊肚菌干制品与复水后的菌柄 ΔE 顺序分别为 VFD>CTD>ND 与 VFD<ND<CTD, 菌盖均为 VFD<ND<CTD。VFD 能够保证羊肚菌干制品且复水以后的外观色泽, 有利于商品性的提升。这与杨斌^[29] 研究的热风干燥、热风真空联合干燥以及真空冷冻干燥三种方式中 VFD 的色差值较小表现一致。

表 3 不同干燥方式的羊肚菌菌柄与菌盖复水前后的色泽变化

Table 3 The color changes of *Morchella esculenta* stalks and caps with different drying methods before and after rehydration

干燥方式 Drying methods		菌柄 Stipe				菌盖 Cap			
		L^*	a^*	b^*	ΔE	L^*	a^*	b^*	ΔE
	新鲜样品 Fresh samples	63.80±6.43Ba	2.55±0.66Bd	15.93±2.42Ab		24.62±1.16Ba	3.02±0.49Aa	12.44±1.05Aa	
ND	复水前 Before rehydration	62.00±3.59B	4.21±0.63A	16.15±2.00A	2.46C	22.24±1.99C	1.60±0.39C	5.36±0.56C	7.60B
CTD		51.24±1.20C	4.16±1.16A	13.99±2.64C	12.88B	21.68±2.14C	1.44±0.17D	4.45±0.74D	8.66A
VFD		77.11±5.56A	2.14±1.19C	14.90±3.22B	14.59A	28.59±1.41A	2.08±0.37B	8.28±0.40B	5.83C
ND	复水后 After rehydration	46.72±0.66c	6.95±0.85b	14.57±1.31c	17.37b	15.53±1.73c	2.36±0.73b	4.06±0.86c	12.38a
CTD		33.57±3.02 d	7.34±1.33a	11.95±0.61 d	30.47a	15.20±1.46c	2.08±0.65c	3.69±0.60 d	12.89a
VFD		52.72±1.19b	6.48±0.76c	17.94±0.96a	12.28c	16.23±0.47b	2.56±0.88b	4.63±0.97b	11.47b

注: 同列不同大写字母表示不同干制品复水前的差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同小写字母表示不同干制品复水后的差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different uppercase letters in the same column indicate significant differences before rehydration for different dried products ($P < 0.05$), different lowercase letters in the same column indicate significant differences after rehydration for different dried products ($P < 0.05$).

2.7 不同干燥方式对羊肚菌复水前后质地的影响

质地是干制品重要的品质评价指标, 质地形成受到干燥过程和物料本身组织结构的影响, 常用于果蔬干制品的评价。一般果蔬细胞中的果胶物质与孔隙规则度和脆性相关^[30]。不同干燥方式的羊肚菌不同部位在复水前后的脆度如图 7 所示, 脆度反映了菌菇干制品的韧性, 菌柄的脆度显著 ($P < 0.05$) 高于菌盖, 菌盖的凹坑结构促进了水分的蒸发, 而菌柄的组织致密, 且厚度远大于菌盖, 水分在孔道迁移阻力增大^[31]。ND 羊肚菌的菌盖、菌柄脆度在复水后分别下降 33.9%、30.6%, CTD 羊肚菌在复水后上升 42.8% 和 16.8%, VFD 的菌盖脆度上升

了 4.04 倍, 菌柄下降了 18.8%。

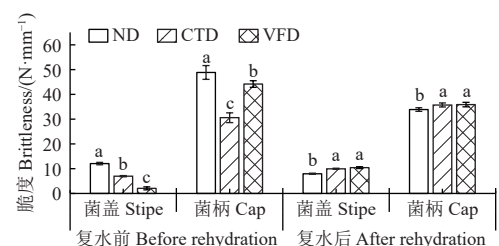


图 7 不同干燥方式的羊肚菌复水前后质地的变化

Fig.7 The changes in texture of *Morchella esculenta* before and after rehydration using different drying methods

VFD 和 CTD 复水后的羊肚菌菌盖韧性增强, 由于其内部细胞和结构的破坏程度较小, 且复水比均高于 ND。ND 与 VFD 复水后的菌柄韧性有所下降, 可能与菌柄细胞背部的毛细管收缩有关, 菌柄亲水性能下降所致。

2.8 不同干燥方式对羊肚菌复水前后整体挥发性风味的影响

香气是影响羊肚菌质量和消费者接受度的决定性因素之一, 复杂的香气特征由碳氢化合物、醇类、酯类、酮类、醛类、酸类、酚类和呋喃类共同作用引起, 这些化合物的差异和丰度在很大程度上决定了羊肚菌的香气特性^[32]。不同干燥方式的羊肚菌在复水前后的整体挥发性风味如图 8 所示, 较新鲜样品和 ND, CTD 和 VFD 在 W5S(氮氧化物)、W1W(硫化物、萜烯类物质)、W2W(芳香成分、有机硫化物)的响应值增强, W6S(氢化物)略有降低, 说明恒温和真空冷冻干燥含有更多的硫化物、吡嗪类、萜烯等挥发性气味物质, 含硫化物常可通过含硫氨基酸经美拉德反应中 Strecker 降解或微生物代谢产生^[33], 自然晾晒在长时间光照下影响了挥发性气味化合物的形成^[34]。复水处理是利用羊肚菌干制品进行调味品加工的重要环节, 直接影响羊肚菌调味品的风味。复水以后的羊肚菌在传感器 W1W、W2W、W5S、W1S(短链烷烃类化合物)的响应值显著增强, 这与香菇复水后挥发性硫化物明显增加的表现一致^[35], 与羊肚菌中存在二甲基硫醚等物质有关, 通过 γ -谷氨酰转氨酶和半胱氨酰亚砷裂解酶的作用逐渐产生。不同干燥方式的羊肚菌复水后气味轮廓相似, 但传感器响应值差异明显, 其中 VFD 复水样品的主要传感器响应值介于 CTD 和 ND 之间, 这与复水过程中微生物活动、脂质分解、细胞结构变化以及一些化学反应过程均有关^[36]。因此仅从传感器响应值大小很难区分不同复水样品, 需要进一步结合气相色谱-质谱联用技术探究不同样品在复水后的香气成分的变化特征。

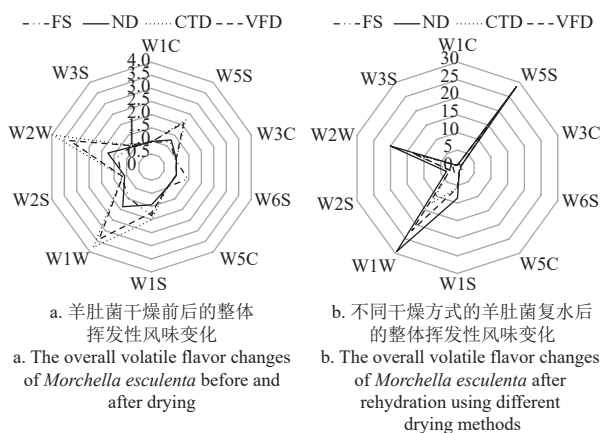


图 8 羊肚菌干燥与复水后的整体挥发性风味变化
Fig.8 The overall volatile flavor changes of *Morchella esculenta* after drying and rehydration

不同干燥方式和复水后的羊肚菌整体挥发性风味差异如图 9 所示, 通过 PCA 分析显示复水以后的样品整体挥发性风味与新鲜样品和干燥制品有区别, 尚未完全还

原到其新鲜的风味, 与羊肚菌干制品浸泡时间、温度以及风味测试条件等均有关系。线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 显示新鲜样品与干制品和复水品有较大的区分度, 干制品和复水品之间有一定的区分度。

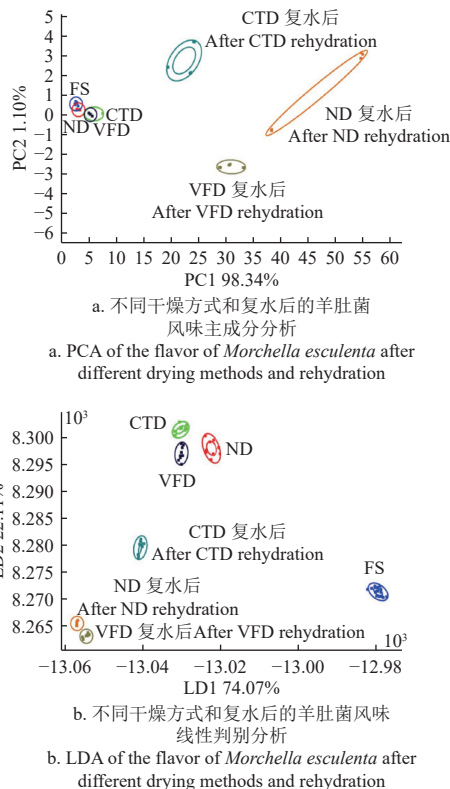


图 9 不同干燥方式和复水后的羊肚菌整体风味 PCA 和 LDA 分析

Fig.9 PCA and LDA of the overall flavor of *Morchella esculenta* after different drying methods and rehydration

2.9 羊肚菌鲜品与干制品的色、香、味、型、营养品质的聚类与相关性分析

为了更为直观地表述羊肚菌鲜品与不同干燥方式的干制品在外观色泽、质地、挥发性风味、滋味以及营养物质的分布情况。热图作为可视化手段, 能够直观地显示不同干燥方式下羊肚菌中各种指标的变化。如图 10a 所示, VFD 表现在外观明亮度 (L^*)、滋味和营养物质的特性和优势, 菌盖脆度和风味传感器 W1C 等变量在 ND 样本中丰度较高, CTD 主要在风味传感器 W5S、W1S、W1W 和 W2W 较为突出, 说明恒温干燥产生更多的氮氧化物、短链烷烃类化合物、硫化物、萜烯类物质及芳香成分等。羊肚菌干燥前后的感官品质与营养品质的相关性分析结果如图 10b 所示, 电子鼻传感器 W1C (芳烃化合物)、W3C (氨类、芳香型化合物)、W5C (烃类、芳香型化合物), 味觉指标中的苦味、涩味、甜味与氨基酸、粗多糖显著正相关, 电子鼻传感器 W5S 与苦味、涩味、甜味显著正相关, W6S、W1W 与氨基酸、粗多糖显著负相关。菌盖脆度与 W1W、W2W、苦味、涩味、甜味显著正相关。相关性分析结果表明, 羊肚菌的营养品质影响了羊肚菌的风味、质地、色泽等感官品质^[37]。

- Research, 2022, 36(23): 6101-6105.
- [5] 曾小峰, 高伦江, 曾顺德, 等. 羊肚菌保鲜与加工研究进展[J]. 南方农业, 2022, 16(9): 224-227.
- ZENG Xiaofeng, GAO Lunjiang, ZENG Shunde, et al. Research progress on preservation and processing of *Morchella esculenta*[J]. South China Agriculture, 2022, 16(9): 224-227. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘春菊, 项可心, 李越, 等. 真空冷冻预干燥对压差膨化干燥果蔬脆片质地特性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 144-154.
- LIU Chunju, XIANG Kexin, LI Yue, et al. Effects of vacuum freezing predrying on the textural properties of explosion puffing dried fruit and vegetable crisps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 144-154. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吴素蕊, 朱立, 马明, 等. 羊肚菌冷冻干燥加工技术研究[J]. 中国食用菌, 2012, 31(5): 49-51.
- WU Surui, ZHU Li, MA Ming, et al. Investigation of vacuum freeze drying process of *Morchella esculenta* [J]. Edible Fungi of China, 2012, 31(5): 49-51. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李淑芳, 陈晓明, 丁舒, 等. 羊肚菌干制方法对产品品质的影响研究[J]. 天津农林科技, 2021(5): 6-9.
- LI Shufang, CHEN Xiaoming, DING Shu, et al. Drying method of morchella on product quality[J]. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, 2021(5): 6-9. (in Chinese with English abstract)
- [9] 段丽丽, 杨滢仪, 周亚钧, 等. 羊肚菌真空冷冻干燥特性的研究[J]. 四川旅游学院学报, 2019(3): 19-23.
- DUAN Lili, YANG Yingyi, ZHOU Yajun, et al. Study on vacuum freeze-drying characteristics of *Morchella*[J]. Journal of Sichuan Higher Institute of Cuisine, 2019(3): 19-23. (in Chinese with English abstract)
- [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 Nan, ZHANG Zhaofeng, LI Bin, et al. Comparison of nutritional components in *Hericium erinaceus* prepared by different drying method[J]. Northern Horticulture, 2021(8): 92-98. (in Chinese with English abstract)
- [11] 卢营蓬, 王春霞, 易文裕, 等. 羊肚菌分段式变温热风干燥试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(4): 111-116.
- LU Yingpeng, WANG Chunxia, YI Wenyu, et al. Experimental study on hot-air drying of morchella under stages-varying temperatures process[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(4): 111-116. (in Chinese with English abstract)
- [12] 代建武, 周厚彬, 黄杰, 等. 不同干燥方式对红托竹荪干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 90-100.
- DAI Jianwu, ZHOU Houbin, HUANG Jie, et al. Effects of different drying technologies on the drying characteristics and quality of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(6): 90-100. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李洋, 李国庆, 袁迪, 等. 组合浸渍和超低温冻融预处理对真空冷冻干燥蓝莓品质的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 82-92.
- LI Yang, LI Guoqing, YUAN Di, et al. Effects of mixed immersion and ultra-low temperature freeze-thaw pretreatment on the quality of vacuum freeze-drying blueberry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 82-92. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 101-108.
- ZHAO Yuanyuan, YI Jianyong, BI Jinfeng, et al. Sensory, texture and nutritional quality of dried shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) as affected by different drying methods[J]. Food Science, 2019, 40(3): 101-108. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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.
- [16] 郭宇, 高锦荣, 郑晓敏, 等. 两种干燥方式对鸡油菌氨基酸组成及评价的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 295-299.
- GUO Yu, GAO Jinrong, ZHENG Xiaomin, et al. Effects of two kinds of drying methods on amino acid composition and evaluation in wild *Cantharellus cibarius* Fr.[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 295-299. (in Chinese with English abstract)
- [17] 朱金霞, 田莉, 冯锐, 等. 不同干燥方式对黄伞子实体营养品质及抗氧化活性的影响[J]. 中国食用菌, 2023, 42(5): 99-104, 115.
- ZHU Jinxia, TIAN Li, FENG Rui, et al. Effects of different drying methods on nutritional quality and antioxidant activity of fruit bodies of *Pholiota adiposa*[J]. Edible Fungi of China, 2023, 42(5): 99-104, 115. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张璐, 弓志青, 王文亮, 等. 7 种大宗食用菌的呈味物质分析及鲜味评价[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 274-278, 283.
- ZHANG Lu, GONG Zhiqing, WANG Wenliang, et al. Analysis of flavor components and evaluation on umami of seven kinds of edible fungi[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 274-278, 283. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李想, 邓静, 易宇文, 等. 电子舌和气相色谱-离子迁移谱技术分析炖煮时间对松茸鸡汤风味的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 336-348.
- LI Xiang, DENG Jing, YI Yuwen, et al. Analysis of the effect of stewed time on the flavor of fresh matsutake chicken soup using electronic tongue and gas chromatography-ion mobility spectrometry techniques[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 336-348. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [20] QIU Y, BI J F, JIN X, et al. Investigation on the rehydration mechanism of freeze-dried and hot-air dried shiitake mushrooms From pores and cell wall fibrous material[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132360.
- [21] 冯蕾. 基于电子鼻及低场核磁共振的黄瓜与樱桃番茄新鲜度智能检测研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- FENG Lei. Research on Freshness Intelligent Recognition of Cucumbers and Cherry Tomatoes Based on Electronic Nose and Low-field Nuclear Magnetic Resonance[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吴靖娜, 陈晓婷, 苏永昌, 等. 基于低场核磁共振技术对不同干燥方式的海马品质研究[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(3): 495-502.
- WU Jingna, CHEN Xiaoting, SU Yongchang, et al. Effects of different drying methods on quality of sea horse *Hippocampus* based on low-field nuclear magnetic resonance technology[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(3): 495-502. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李然然. 基于低场核磁技术研究香菇干燥及贮藏过程中的品质变化[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
- LI Ranran. Quality Changes of Shiitake Mushrooms in Drying and Storing Based on Low Field Nuclear Magnetic Technology[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [24] QIU Y, BI J F, JIN X, et al. An understanding of the changes in water holding capacity of rehydrated shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) from cell wall, cell membrane and protein[J]. *Food Chemistry*, 2021, 351: 129230.
- [25] ARAVINDAKSHAN S, NGUYEN T H A, K YOMUGASHO C, et al. The Impact of drying and rehydration on the structural properties and quality attributes of pre-cooked dried beans[J]. *Foods*, 2021, 10: 1665.
- [26] 杨奇, 谢小玉, 李清明, 等. LED 光质对辣椒果实色泽品质的影响[J]. *核农学报*, 2024, 38(4): 794-803.
- YANG Qi, XIE Xiaoyu, LI Qingming, et al. Effect of LED light quality on color and quality of pepper fruit[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(4): 794-803. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘梦, 毕金峰, 刘璇, 等. 浸胀与干燥过程对桃胶色泽及总酚含量的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(11): 105-111.
- LIU Meng, BI Jinfeng, LIU Xuan, et al. Effect of the process of soaking and drying on color and total phenolic content of peach gum[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(11): 105-111. (in Chinese with English abstract)
- [28] 季蕾蕾, 木泰华, 孙红男. 不同干燥方式对甘薯叶片水分迁移、微观结构、色泽及复水性能影响的比较[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 90-96.
- JI Leilei, MU Taihua, SUN Hongnan. Comparative effect of different drying processes on mass migration, microstructure, color and rehydration property of sweet potato leaves[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杨斌. 干燥方式对荷叶离褶伞品质及水分迁移规律的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- YANG Bin. Effects of Drying Methods on Quality and Moisture Migration of *Lyophyllum decastes*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭嘉. 微粒化大分子物质对冻干草莓质地形成的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- GUO Jia. Effects of Micronized Macromolecules on Texture Formation of Freeze-dried Strawberries[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [31] 任广跃, 朱乐雯, 段续, 等. 苹果冷冻-热风联合干燥体积收缩机制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 63-71.
- REN Guangyue, ZHU Lewen, DUAN Xu, et al. Study on volume shrinkage mechanism of combined vacuum freeze drying - hot air drying of apples[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(2): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- [32] HOU Z S, XIA R R, LI Y T, et al. Key components, formation pathways, affecting factors, and emerging analytical strategies for edible mushrooms aroma: A review[J]. *Food Chemistry*, 2024, 438: 137993.
- [33] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6 类常见食品中含硫化物风味特征及形成机理研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(6): 13-25.
- WANG Bei, HAN Zhaosheng, YANG Zhijie, et al. Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(6): 13-25. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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): 261-269.
- SUN Hailan, PEI Longying, CHEN Yao, et al. Analysis the effects of different drying methods on the volatile compounds in *Morchella esculenta* based on electronic nose and headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(7): 261-269. (in Chinese with English abstract)
- [35] 董晓博, 于慧萍, 高沁, 等. 不同复水条件对香菇特征香味物质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(15): 4914-4920.
- DONG Xiaobo, YU Huiping, GAO Qin, et al. Effects of rehydration on the characteristic aroma compounds in *Lentinula edodes*[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(15): 4914-4920. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王永伦, 李兴, 杨苗, 等. 干燥方式对真姬菇菌柄和菌盖挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 268-276.
- WANG Yonglun, LI Xing, YANG Miao, et al. Effect of drying

methods on the volatile flavor compounds of the pileus and stipe of *Hypsizygus marmoreus*[J]. *Food Science*, 2023, 44(8): 268-276. (in Chinese with English abstract)

[37] 张艳珍, 谢永康, 王菲, 等. 不同干燥方式对羊肚菌品质特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 111-119.

ZHANG Yanzhen, XIE Yongkang, WANG Fei, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics of *Morchella*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(6): 111-119. (in Chinese with English abstract)

Effects of different drying methods on the quality characteristics and rehydration performance of *Morchella esculenta*

MA Jiajia , DONG Minghui[✉] , QUAN Xinyao , SHAO Qianshuo , JIN Meijuan , WANG Yuning

(*Jiangsu Taihu Agricultural Science Research Institute, Suzhou 215105, China*)

Abstract: *Morchella esculenta* was prone to decay and deterioration after harvesting and they were mainly circulated in the market as dried products. The choice of different drying methods was related to the quality characteristics of dried and rehydration products of *Morchella esculenta*, mainly including sensory and nutritional characteristics. The color, aroma, taste, type, and qualities of *Morchella esculenta* were mainly evaluated through five dimensions. In this study, *Morchella sextelata* (Mel-6) was used to explore the effect of different drying methods and rehydration treatments on its quality changes. Three strategies including natural drying (ND), constant temperature drying (CTD), and vacuum freeze-drying (VFD) were used to study their effects on the microstructure, taste, nutritional qualities, and rehydration performance of *Morchella esculenta*. The differences in texture, color, and flavor before and after rehydration, and their drying characteristics were analyzed. The results showed that the amino acids, crude polysaccharide, and sweetness of *Morchella esculenta* under VFD treatment were 944 mg/100 g、6.26 g/100 g、19.73 respectively, significantly higher ($P<0.05$) than the other two drying methods. The brightness of the stem and cap of *Morchella esculenta* under VFD treatment was significantly improved ($P<0.05$) with less color difference, the value of ΔE was 5.83. Moreover, the volatile profiles analysis of *Morchella esculenta* before and after drying and rehydration treatment suggested a clear difference with distinguishable flavor components, according to the principal component analysis (PCA) of electronic nose data. The VFD-treated *Morchella esculenta* maintained the optimal rehydration ratio due to its porous microstructure with uniform pores distribution. The low-field nuclear magnetic resonance(LF-NMR) combined with magnetic resonance imaging (MRI) showed that the immobilized water of *Morchella esculenta* during the rehydration process was increased continuously with faster rehydration speed within 20 minutes and the best rehydration uniformity under VFD treatment. The color difference (ΔE) of the stem and cap after VFD rehydration were 12.28 and 11.47 respectively, they changed less significantly ($P<0.05$) compared to the other two drying methods. The brittleness of the stem and cap of *Morchella esculenta* after VFD rehydration were 35.87N/mm and 10.42N/mm, they remained similar with CTD. The distribution of sensory and nutritional variables in samples with different drying methods was intuitively demonstrated by the results of cluster and correlation analysis, The high-quality characteristics were maintained with vacuum freeze-drying technology during the drying and rehydration process of *Morchella esculenta*, further demonstrating the feasibility of vacuum freeze-drying in the drying of *Morchella esculenta*. These results would provide solid guidelines for the optimal processing method of dried *Morchella esculenta* products.

Keywords: *Morchella esculenta*; drying method; sensory quality; nutritional quality; rehydration performance