

基于理化特性、营养成分及挥发性风味探究不同干燥方式对花脸香蘑品质的影响

李本姣, 潘洪杰, 章攀, 李松*, 赵辉, 曾德权
(达州市农业科学研究院, 四川达州 635000)

摘要: 花脸香蘑是我国特色真菌, 营养丰富且市场潜力大, 但子实体采后易劣变。为明确花脸香蘑干燥加工适配工艺, 破解精深加工技术匮乏产业瓶颈, 本研究以自主选育‘达香蘑3号’为材料, 系统对比了2种传统干燥方式——自然干燥(Natural Drying, ND)、热风干燥(Hot Air Drying, HAD)与2种新型干燥方式——变温干燥(Variable Temperature Drying, VTD)、真空冷冻干燥(Vacuum Freeze Drying, VFD), 对花脸香蘑理化特性、营养品质及挥发性风味特征的影响。结果表明, 不同干燥方式对花脸香蘑品质影响显著($P<0.05$)。与ND组相比, VTD组总酚含量提升27.45%, 甜味与必需氨基酸总量最高, 风味物质更丰富, 适用于高功能化风味产品开发; 与HAD组相比, VFD组粗蛋白、多糖、总游离氨基酸及鲜味氨基酸含量分别提升30.59%、45.85%、18.97%、94.19%, 复水比提升56.39%, 可最大限度保留鲜爽风味与微观结构, 是高品质精深加工优选工艺。本研究阐明了干燥工艺对花脸香蘑品质的调控规律, 明确了不同场景适配技术, 为其干燥加工体系构建、高值化利用及产业化升级提供理论支撑。

关键词: 花脸香蘑; 干燥方式; 理化特性; 营养品质; 挥发性风味

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0459

Effects of Different Drying Methods on the Quality of *Lepista sordida*. Based on Physicochemical Properties, Nutritional Components, and Volatile Flavor

LI Benjiao, PAN Hongjie, ZHANG Pan, LI Song*, ZHAO Hui, ZENG Dequan
(Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou 635000, China)

Abstract: *Lepista sordida*, a native characteristic edible fungus in China, possesses excellent nutritional value and promising market prospects, yet its fruiting bodies are prone to quality deterioration post-harvest. A shortage of intensive processing techniques has restricted its industrial development. To screen optimal drying protocols and address this bottleneck, the self-bred cultivar ‘Daxiangmo No.3’ was adopted as the test material. Two conventional drying methods, natural drying (ND) and hot air drying (HAD), together with two innovative approaches, variable temperature drying (VTD) and vacuum freeze drying (VFD), were comparatively investigated for their impacts on the physicochemical traits, nutritional quality and volatile flavor profiles of *Lepista sordida*. The results revealed that drying method significantly affected the overall quality of *Lepista sordida*. ($P<0.05$). Relative to ND, VTD increased total phenolic content by 27.45%, and yielded the highest levels of sweet-tasting and essential amino acids as well as more abundant volatile compounds, making it well-suited for developing high-functional flavor-enriched products. Compared with HAD, VFD elevated the contents of crude protein, polysaccharides, total free amino acids and umami amino acids by 30.59%, 45.85%, 18.97% and 94.19%, respectively, while the rehydration ratio rose by 56.39%. VFD was capable of preserving the fresh taste and microstructure of samples to the greatest degree, thus being the preferred technique for high-end intensive processing. This study elucidated the regulatory effect of drying regimes on the quality formation of *Lepista sordida*. and clarified targeted drying technologies for different application scenarios. The findings offer a theoretical reference for constructing standardized drying processing systems, facilitating high-value utilization and promoting industrial upgrading of *Lepista sordida*.

Key words: *Lepista sordida*; drying methods; physicochemical properties; nutritional quality; volatile flavor

收稿日期: 2026-03-24; 修回日期: 2026-05-07; 接受日期: 2026-05-11

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川创新团队项目(SCCXTD-2024-07); 达州市对外合作项目(25DWHZ0011); 达州市重点研发项目(25ZDYF0004)

作者简介: 李本姣(1990-), 女, 硕士研究生, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: 476236119@qq.com

通讯作者: 李松(1988-), 男, 硕士研究生, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: 306368980@qq.com

花脸香蘑 (*Lepista sordida*) 俗称紫花蘑, 隶属于担子菌门 (*Basidiomycota*)、层菌纲 (*Agaricomycetes*)、伞菌目 (*Agaricales*)、口蘑科 (*Tricholomataceae*)、香蘑属 (*Lepista*) , 是我国珍稀药食兼用真菌。其野生资源多生于林缘、草地及腐殖质土壤, 子实体菌盖呈紫罗兰色, 菌肉肥厚细嫩, 口感脆滑, 兼具独特坚果香气与鲜爽风味, 素有“香蘑之王”美誉, 是食用菌市场中极具稀缺性与开发价值的特色资源。该菌富含蛋白质、多糖、矿物质等多种营养成分^[1], 同时含有多酚、黄酮等活性物质, 抗氧化^[2]、抗炎抗菌^[3]等生理活性突出, 在功能性食品与医药原料开发领域应用潜力广阔。长期以来, 花脸香蘑以野生采集为主, 资源稀缺、供应不稳, 人工驯化与规模化栽培成为产业发展的关键瓶颈。

‘达香蘑 3 号’是达州市农业科学研究院自主选育的国内首个可规模化、商业化栽培的花脸香蘑新品种, 已在江苏、安徽、四川等多地完成栽培示范, 种植规模与产量稳步提升, 打破原料依赖野生采集的困境, 为花脸香蘑产业化发展筑牢原料基础。但该品种精深加工技术滞后, 产品仍以初级干制品、鲜销为主, 高附加值产品匮乏, 产业效益偏低。同时, 花脸香蘑鲜品含水量约 90%, 采后呼吸作用强、酶活性高, 极易发生褐变、软化及微生物污染, 品质迅速劣变, 极大地限制产业链延伸与跨区域市场流通。因此, 干燥保鲜是花脸香蘑采后加工与贮藏的核心环节, 其工艺效果直接决定产品理化特性、营养保留、风味品质及市场竞争力。

自然干燥 (ND)、热风干燥 (HAD) 是食用菌传统主流干燥技术, 但缺陷显著: ND 受环境温湿度制约, 干燥周期长、产品品质稳定性与均一性差^[4]; HAD 因持续高温易降解热敏性营养成分, 引发褐变与风味流失, 难以满足高品质加工需求^[5]。近年来, 变温干燥 (VTD)、真空冷冻干燥 (VFD) 等新型干燥技术凭借控温精准、环境可控、品质保留性优等优势, 在食用菌加工中应用前景凸显。研究证实, VTD 能有效促进茶树菇多酚与黄酮释放, 显著提升挥发性成分中醛类、酯类、酮类相对含量, 有利于特征风味形成与保留^[6]; VFD 可最大限度保留香菇营养成分, 为高附加值香菇产品加工的优选方法^[7]。

不同干燥方式通过调控水分迁移速率、加工温度与环境氛围, 对食用菌微观结构、营养稳定性及风味转化产生差异化影响。花脸香蘑富含热敏性多糖、酚类及挥发性风味物质, 品质变化规律具有品种特异性, 与大宗食用菌差异显著。当前食用菌干燥相关研究多集中于香菇^[8]、金针菇^[9]等常规品种, 针对花脸香蘑干燥工艺优化、品质调控机制及风味形成规律的系统性研究匮乏, 缺乏支撑产业高质量发展的技术参数与理论基础。为此, 本研究以‘达香蘑 3 号’为试材, 系统对比 ND、HAD、VTD、VFD 四种干燥方式对其理化特性、营养成分、抗氧化活性及挥发性风味的影响, 分析指标间相关性, 填补该领域研究空白, 明确花脸香蘑加工适配工艺, 为其精深加工技术优化、高附加值产品研发及产业化升级提供理论与技术支撑, 同时为珍稀食用菌干燥工艺创新提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

试验材料为‘达香蘑 3 号’花脸香蘑, 采集自四川省达州市通川区双龙镇东岳庙村种植基地。样品采摘后即刻运回实验室, 经挑选 (无腐烂、无机械损伤) 及规格筛选 (菌柄 7.0 ± 0.5 cm、菌盖直径 4.0 ± 0.5 cm), 选取符合标准的子实体开展干燥试验。

硼酸、乙醇、氢氧化钠、碳酸钠、苯酚、甲基红-溴甲酚绿混合指示剂等均为分析纯, 中国医药集团有限公司; 没食子酸标准品、葡萄糖标准品, 北京索莱宝科技有限公司; 抗氧化试剂盒, 南京陌凡生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

S-433 型全自动氨基酸分析仪, 赛卡姆 (北京) 科学仪器有限公司; SR-64 型手持式色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司; PEN3 电子鼻, 德国埃尔森斯科技公司; HITACHI SU8020 高分辨场发射扫描电镜, 日本日立公司; FD-1A-50 型冷冻干燥机, 上海比朗仪器制造有限公司; XMTD-8222 型鼓风干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; ML-204 万分之一电子天平, Molecular Devices; TMS-Pro 型质构仪, 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; MD SpectraMax 190 型全波长酶标仪, 赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 花脸香蘑干燥方式

将新鲜花脸香蘑用流动的清水洗净泥沙,并用厨房纸吸干表面水分,随机分成质量相等的4份,进行以下干燥处理,所涉含水率均为质量分数(wt.%)。

(1) 自然干燥(ND): 将花脸香蘑置于通风向阳处干燥至含水率降至13%,其中室外平均温度为 $30\pm 2^{\circ}\text{C}$;

(2) 热风干燥(HAD): 将花脸香蘑均匀置于鼓风干燥箱内,设定干燥温度 50°C 并保持恒定,持续干燥至样品含水率降至13%;

(3) 变温干燥(VTD): 将花脸香蘑均匀置于鼓风干燥箱内,在预实验基础上选择 40°C 干燥8 h后升温至 45°C ,干燥至含水率降至13%;

(4) 真空冷冻干燥(VFD): 将洗净后的花脸香蘑鲜品置于 -80°C 冰箱预冻6 h后,再放入真空冷冻干燥机中干燥至含水率降至13%,参数设置为冷阱温度 -60°C ,真空压力60 Pa;

1.2.2 理化指标测定

1.2.2.1 色泽测定

色泽的测定参照Wang等^[10]的方法,使用便携式色差仪测定花脸香蘑干品菌盖中央的 L^* (亮度)、 a^* (红度)及 b^* (黄度)值,每组选取12个样品,剔除最大值和最小值后取平均值。

1.2.2.2 质构测定

质构的测定参照任亨等^[11]的方法并稍作修改,将复水后的花脸香蘑切成 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 0.3\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚度)的薄片,菌盖朝上菌褶朝下放置,使用TMS-Pro型质构仪进行测试,采用TPA模式,P/6探头,测试速度均为 1.5 mm s^{-1} ,压缩形变为30%,停顿时间5 s,感应力25 N。每个样品测12次,取平均值。

1.2.2.3 复水比测定

复水比的测定参照刘艳全等^[12]的方法并稍作修改:将一定量的花脸香蘑干品置于烧杯中,并加入干品质量20倍的 60°C 纯水,置于 60°C 恒温水浴锅中,每隔30 min捞出样品并用吸水纸擦干表面水分后称重,当两次称重差值 $\leq 0.05\text{ g}$ (绝对值)时表明复水完成。每个样品测定3次,复水比按照公式(1)计算。

$$R = \frac{M_1}{M_2} \quad (1)$$

式中:

R ——复水比, g g^{-1} ;

M_1 ——复水后花脸香蘑质量, g;

M_2 ——复水前花脸香蘑质量, g。

1.2.2.4 抗氧化性测定

将花脸香蘑干品置于研钵中研碎,称取0.1 g粉末样品置于离心管中,加入1.0 mL南京陌凡生物抗氧化试剂盒配套预冷提取液,混匀后,使用组织破碎仪匀浆后 4°C 离心, 8000 r min^{-1} ,10 min,得到上清液,置冰上待测。DPPH自由基清除率、ABTS自由基阳离子清除能力、羟自由基清除率及FRAP还原能力均按照南京陌凡生物科技有限公司提供的试剂盒说明书进行测定,每个样品测定3次。

1.2.2.5 微观结构测定

用液氮冷冻脆断制样法将干燥后的花脸香蘑制出整齐的横截面,再用特定的双面胶带固定在样品台上,断面朝上。经自动喷金器镀金后,在加速电压5.0 kV的条件下观察花脸香蘑菌柄的微观形态,放大倍数分别为1 000倍和2 000倍^[13]。

1.2.3 营养指标测定

1.2.3.1 多糖测定

多糖的测定参照NY/T 1676—2008《食用菌中粗多糖的测定 分光光度法》^[14]。准确称取0.3 g粉碎试样(过20 mm孔径筛)置于50 mL离心管中,加入5 mL蒸馏水充分浸润后,缓慢添加20 mL无水乙醇,涡旋振荡使体系混合均匀;经30 min超声提取后,于 4000 r min^{-1} 转速下离心10 min。收集沉淀并用10 mL 80%(v/v)乙醇溶液洗涤,重复离心操作;随后以蒸馏水将沉淀转移至圆底烧瓶,加入40 mL蒸馏水,于沸水浴中恒温提取2 h,冷却后抽滤,将所得滤液转移至50 mL容量瓶中定容后得样品待测液。精确吸取1 mL样品待测液,以蒸馏水为空白对照,于490 nm波长下测定吸光度值。以葡萄糖为标准品,设置标准品质量浓度为0、20、40、60、80、100 $\mu\text{g/mL}$,

得到回归方程为 $y=0.0041x+0.0045$ ($R^2=0.9994$, 其中 x 为葡萄糖浓度, y 为吸光度), 样品多糖含量以葡萄糖当量计, 单位为 mg g^{-1} 。每个样品测定3次, 多糖含量按照公式(2)计算。

$$P = \frac{C \times V_t \times D}{V \times m} \times 0.9 \times 0.001 \quad (2)$$

式中:

P ——样品多糖含量, mg g^{-1} ;

C ——根据标准曲线查得的比色管中样品的糖含量, μg ;

V_t ——样品提取总体积, mL ;

V ——测定取液量, mL ;

D ——稀释倍数;

0.001——将 μg 换算成 mg ;

0.9——葡萄糖换算为葡聚糖的校正系数;

m ——样品称重量, g 。

1.2.3.2 总酚测定

总酚含量的测定参照刘艳全等^[12]的方法, 采用福林酚比色法。准确称取0.1 g试样, 以20 mL蒸馏水转移至25 mL容量瓶中, 于100 °C沸水浴中恒温提取30 min, 取出待体系冷却至室温后定容, 经过滤得待测滤液。取1 mL滤液于具塞试管中, 依次加入1 mL FC显色剂、3 mL 7.5% (ϕ) 碳酸钠溶液, 混合均匀后定容至10 mL, 室温避光显色30 min; 以蒸馏水为空白对照, 在765 nm波长下测定反应液的吸光度。以没食子酸为标准品, 设置标准品质量浓度为0、10、20、30、40、50 mg L^{-1} , 得到回归方程为 $y=0.0088x+0.0027$ ($R^2=0.9980$, 其中 x 为没食子酸质量浓度, y 为吸光度), 样品总酚含量以没食子酸当量计, 单位为 mg g^{-1} 。每个样品测定3次, 总酚含量按照公式(3)计算。

$$T = \frac{C \times N \times V_t}{V_s \times m} \times 0.001 \quad (3)$$

式中:

T ——样品总酚含量, mg g^{-1} ;

C ——从标准曲线查得多酚的含量, μg ;

N ——稀释倍数;

V_t ——提取液总体积, mL ;

V_s ——测定取液量, mL ;

0.001——将 μg 换算成 mg ;

m ——样品称重量, g 。

1.2.3.3 蛋白质测定

蛋白质测定参照 GB 5009.5-2025《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[15], 采用凯氏定氮法对样品进行前处理, 借助全自动凯氏定氮仪进行测量。

1.2.3.4 游离氨基酸测定

游离氨基酸测定参照 GB/T 30987-2020《植物中游离氨基酸的测定》^[16], 采用酸水解法对样品进行前处理, 借助全自动氨基酸分析仪进行测量。

1.2.4 电子鼻分析

参照 Fu 等^[17]的方法, 采用 PEN3 型电子鼻进行测定, 该系统各传感元件的主要敏感物质如表1所示。称取0.5 g粉碎后的花脸香蘑, 置于20 mL顶空进样瓶中密封, 于25 °C恒温环境中平衡1 h, 然后插入电子鼻吸附针进行测定。仪器参数为: 数据采集频率1组/ s^{-1} , 传感器自清洁周期240 s, 基线归零时间5 s, 样品进样准备时间5 s, 载气进样流量400 mL min^{-1} , 单次样品检测分析时长60 s。为确保数据可靠性, 选取检测过程中57~59 s时段内传感器响应曲线处于稳定平台期的数据进行后续分析。

表 1 电子鼻不同传感器对应物质种类

Table 1 Corresponding Aroma Types of Different Sensors of Electronic Nose

序号	传感器	性能描述
R1	W1C	对芳香成分灵敏
R2	W5S	对小分子氮氧化物类气体敏感
R3	W3C	对氨类和芳香成分灵敏
R4	W6S	对氢化物灵敏
R5	W5C	对短链烷烃芳香成分灵敏
R6	W1S	对甲烷灵敏
R7	W1W	对硫化物灵敏
R8	W2S	对乙醇灵敏
R9	W2W	对芳香成分和有机硫化物灵敏
R10	W3S	对烷烃灵敏

1.3 数据处理

采用 SPSS Statistics 27 软件的 ANOVA 程序对实验数据进行单因素方差分析，以 Duncan 法进行多重比较，设定 $P<0.05$ 为差异显著水平，通过 Pearson 系数法进行相关性分析；利用 Origin 2024 与 Graphpad Prism 9.5 软件完成数据绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同干燥方式对花脸香蘑理化指标的影响

2.1.1 不同干燥方式对花脸香蘑色泽的影响

色泽作为花脸香蘑等食用菌加工产品的核心感官品质指标，是消费者对产品品质的首要视觉评判依据，其优劣直接关联产品的市场接受度与溢价能力^[18]。由表 2 可知，不同干燥方式处理的花脸香蘑色泽存在显著差异 ($P<0.05$)：VFD 组的亮度值 ($L^*=75.69$) 显著高于 HAD、VTD 及 ND 组，而其红绿值 ($a^*=6.78$) 与黄蓝值 ($b^*=7.23$) 则显著低于其余组。这一结果归因于 VFD 在低温 ($-40\sim-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) 真空环境下实现水分升华，既规避了高温触发的美拉德反应，又通过低温抑制了多酚氧化酶等酶系的催化活性，减少了类胡萝卜素、多酚等色素物质的氧化降解^[19]，因此样品呈现高亮度与低褐变特征。

HAD 组的 L^* 值最低 (41.06)，而 a^* (11.60)、 b^* (18.14) 值最大，表现为亮度低、色泽深，是色泽劣变最显著的处理方式。这可能是由于 HAD 的高温 ($50\sim70\text{ }^{\circ}\text{C}$) 常压环境不仅加速了还原糖与游离氨基酸的美拉德反应 (生成棕褐色类黑素)，还促进了类胡萝卜素的热氧化降解；同时，液态水向物料表面迁移引发的细胞结构收缩，削弱了物料对光线的散射作用，进一步降低了亮度并加深了色泽^[20]。VTD 与 ND 组的色泽指标介于 VFD 与 HAD 之间。VTD 通过变温过程缓解了持续高温对色泽相关物质的破坏，ND 虽温度较低，但干燥周期长，物料中残留的酶系仍可缓慢催化氧化反应，因此二者的色泽劣变程度弱于 HAD 但强于 VFD。

表 2 不同干燥方式对花脸香蘑色泽的影响

Table 2 Effects of Different Drying Methods on the Color of *Lepista sordida*.

干燥方式	L^*	a^*	b^*
ND	59.94±4.06 ^b	7.97±0.86 ^b	11.58±0.93 ^b
HAD	41.06±3.28 ^c	11.60±1.18 ^a	18.14±2.56 ^a
VTD	42.98±2.50 ^c	7.15±1.45 ^{bc}	11.35±1.58 ^b
VFD	75.69±1.63 ^a	6.78±1.30 ^c	7.23±1.75 ^c

注：数值为平均值±标准差。不同上标字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

2.1.2 不同干燥方式对花脸香蘑质构和复水比的影响

质构特性是衡量花脸香蘑加工品质与感官适口性的核心量化指标,其硬度、内聚性、弹性及咀嚼性等参数直接关联产品的市场接受度与食用体验,是干燥工艺优化的重要依据^[21]。由表 3 可知,不同干燥方式对花脸香蘑的质构特性影响不同:VFD 组的硬度(1.17 N)、胶黏性(0.48 N)及咀嚼性(0.06 mJ)显著低于 HAD、VTD 与 ND 组,而干燥方式对花脸香蘑的内聚性和弹性影响不显著($P>0.05$)。可能是因为真空冷冻干燥可最大限度保留物料内部疏松多孔的网状结构,有效避免了细胞塌陷与基质紧缩,进而呈现低硬度、低胶黏性的质构特征。

复水性是干燥花脸香蘑后续应用(如复水食用、功能组分溶出)的关键指标,其优劣直接决定产品的实际利用价值与应用潜力。干燥方式通过调控物料微观结构、孔隙率及表面特性^[22],是影响复水性的核心因素。由表 3 可知,VFD 组的复水比最大为 4.16 g g^{-1} ,与 HAD 组相比增加了 72.93%,差异性显著($P<0.05$)。这一差异主要是由于干燥后物料的微观结构和空隙特征造成的:VFD 组借助冰升华过程形成疏松多孔结构,不仅孔隙率更高,且孔径分布更均匀,为水分吸附提供了充足的界面与通道,复水过程中水分可快速渗入并充盈孔隙;而 HAD、VTD 及 ND 依赖热汽化脱水,高温引发的细胞皱缩会降低孔隙率,同时表面硬壳结构会增加水分渗透阻力,二者共同导致复水时水分难以快速扩散至物料内部,最终表现为复水性能的劣化。刘含龙等^[23]研究不同干燥方式对草菇切片品质的影响发现,真空冷冻干燥组出现较大的孔状结构,而热风干燥组空间结构明显收缩,与本研究结果相似。

表 3 不同干燥方式对花脸香蘑质构和复水比的影响

Table 3 Effects of Different Drying Methods on Texture and Rehydration Ratio of *Lepista sordida*

干燥方式	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ	复水比/(g g^{-1})
ND	2.52 ± 0.67^a	0.32 ± 0.09^a	0.18 ± 0.07^a	0.78 ± 0.23^a	0.15 ± 0.09^{ab}	3.82 ± 0.44^a
HAD	2.94 ± 0.51^a	0.29 ± 0.07^a	0.18 ± 0.08^a	0.84 ± 0.17^a	0.16 ± 0.09^{ab}	2.66 ± 0.00^b
VTD	2.92 ± 1.03^a	0.34 ± 0.14^a	0.21 ± 0.14^a	0.94 ± 0.33^a	0.21 ± 0.16^a	3.91 ± 0.10^a
VFD	1.17 ± 0.15^b	0.40 ± 0.07^a	0.12 ± 0.04^a	0.48 ± 0.13^b	0.06 ± 0.03^b	4.16 ± 0.39^a

2.1.3 不同干燥方式对花脸香蘑提取液抗氧化能力的影响

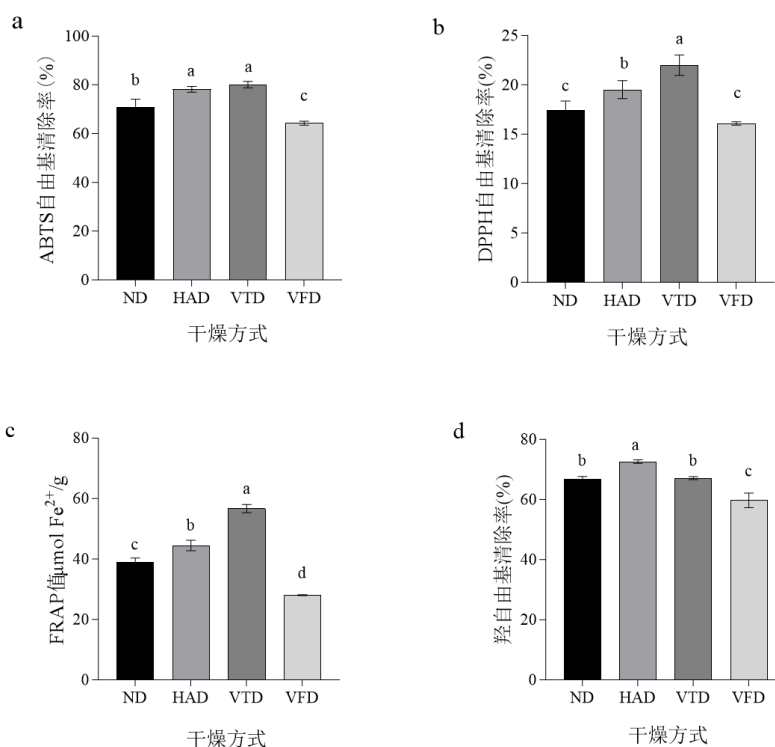


图 1 不同干燥方式对花脸香蘑抗氧化能力的影响

Fig.1 Effects of Different Drying Methods on Antioxidant Capacity of *Lepista sordida*.

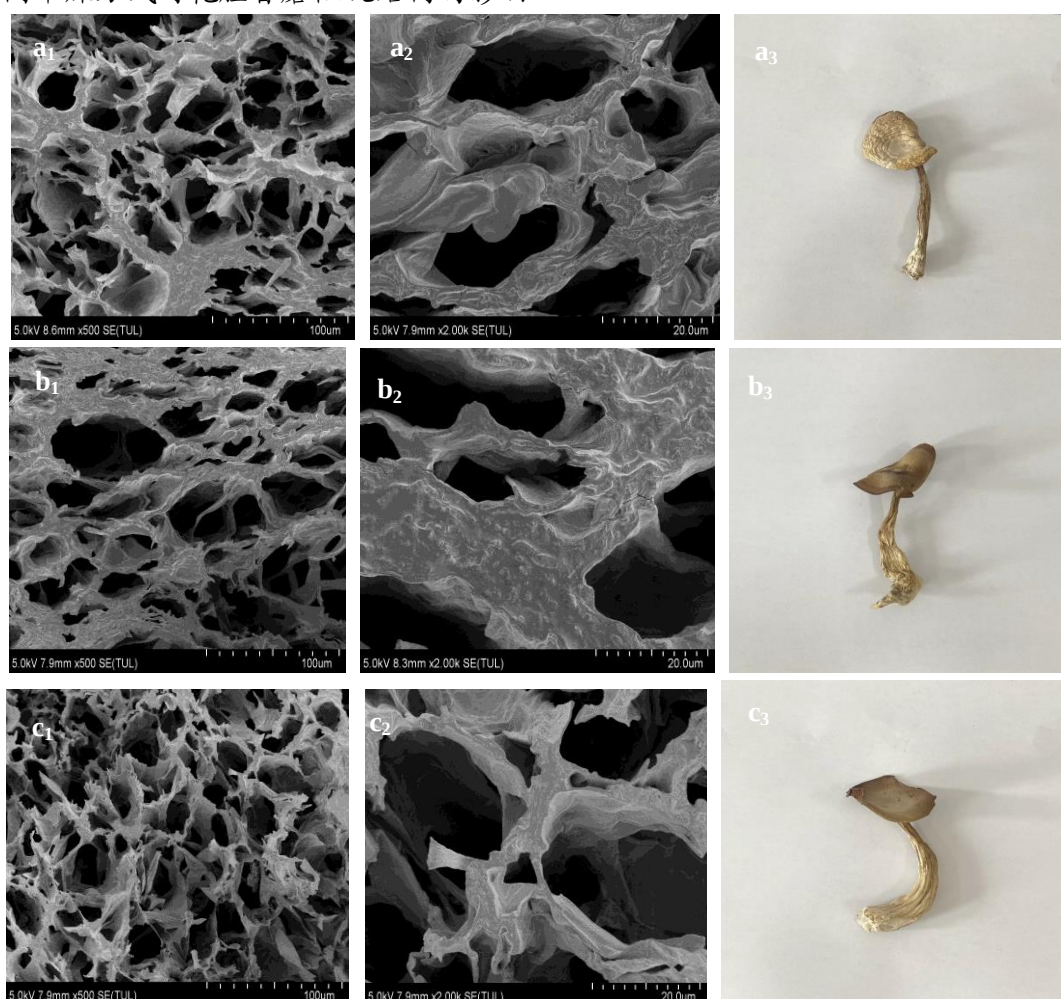
注: a~d 分别表示干燥方式对 ABTS 自由基清除率、DPPH 自由基清除率、FRAP 铁离子还原抗氧化能力和羟自由基清除率。图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

本研究采用 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率、羟自由基清除率及 FRAP 铁离子还原抗氧化能力 4 项体外抗氧化指标,系统评价不同干燥方式对花脸香蘑提取液抗氧化活性的影响。其中, DPPH 与 ABTS 自由基清除率分别表征疏水性和亲水性抗氧化物质的自由基清除能力,羟自由基清除率可反映样品对高活性氧自由基的清除效果, FRAP 值则综合体现体系的总还原能力,多指标联用可更全面评价抗氧化水平。

由图 1 可知,不同干燥方式对花脸香蘑提取液抗氧化指标均产生显著影响($P<0.05$),且不同指标呈现不同变化规律。在 ABTS 自由基清除率、DPPH 自由基清除率、FRAP 总还原能力三项指标上, VTD 组高于其他各组,数值分别为 80.11%、23.19%和 56.69 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$; VFD 组上述三项指标均为最低,分别为 64.27%、16.10%和 28.00 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$ 。该趋势与表 4 总酚含量变化一致,提示总酚是决定花脸香蘑上述抗氧化能力的关键物质基础,酚类成分作为食用菌中主要的天然抗氧化活性物质,其含量与自由基清除能力、总还原能力的正相关构效关系已得到系统的研究验证^[24]。酚类物质可通过供氢/供电子淬灭自由基并发挥还原作用, VTD 组总酚含量更高,因此表现出更优的自由基清除与还原能力。VFD 组虽粗蛋白与多糖含量更高,但此类成分对 DPPH、ABTS 及 FRAP 体系的贡献较弱,不足以弥补总酚偏低带来的抗氧化差异。

值得注意的是,羟自由基清除率的组间差异呈现与前 3 项指标完全不同的规律(图 1d): HAD 组羟自由基清除率显著高于其余各组($P<0.05$), VTD 组与 ND 组无显著差异($P>0.05$), VFD 组则显著低于其他处理组($P<0.05$)。从作用机制分析,羟自由基的清除效率主要依赖体系内羟基供体的数量、活性及与自由基的接触效率: HAD 组高温处理可促进酚羟基暴露,同时诱发美拉德反应生成类黑精等还原物质,两类物质协同提升了羟自由基清除能力; VTD 组与 ND 组处理过程中,长时间的有氧环境易导致游离酚羟基发生氧化降解,活性羟基供体数量减少,因此羟自由基清除能力弱于 HAD 组;而 VFD 组低温真空环境虽能保护酚类不降解,但细胞壁结构保持完整,活性物质被基质包裹,酚羟基与羟自由基的接触效率大幅降低^[25],且低温环境下美拉德反应几乎无法发生,无额外活性羟基供体生成,因此羟自由基清除率最低。

2.1.4 不同干燥方式对花脸香蘑微观结构的影响



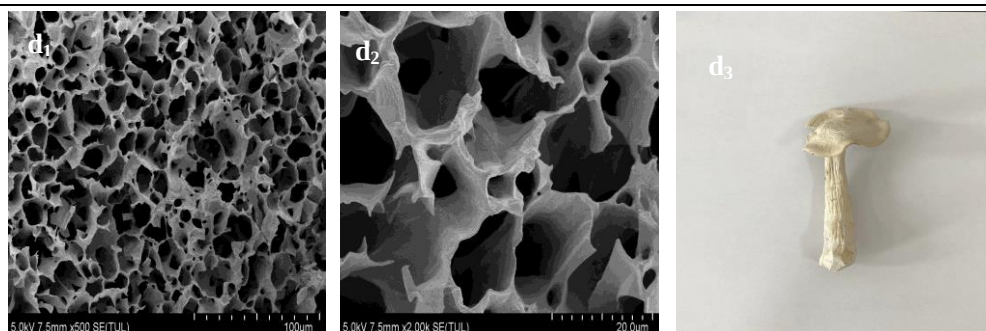


图2 不同干燥方式花脸香蘑微观结构

Fig.2 Microstructure of *Lepista sordida*. under Different Drying Methods

注: a~d 表示 ND、HAD、VTD 和 VFD 花脸香蘑干制品; 下标 1、2、3 分别表示放大 500、2 000 倍及干品。

由图 2 可知,不同干燥方式对花脸香蘑内部微观结构破坏程度差异显著。其中,VFD 对样品破坏程度最小,图 2a1 显示其呈均匀规整蜂窝状多孔结构,无明显收缩塌陷;放大 2 000 倍后(图 2a2)细胞壁完整,纤维基质排列有序,无破裂粘连。这归因于真空冷冻干燥时,可避免液态水迁移损伤细胞,冰晶直接升华后残留孔隙完整^[26]。由图 2b1 及 b2 可知,HAD 样品在长期高温干燥条件下产生严重收缩变形,菌体形成致密结块,内部孔隙大小不均,有的呈现无序闭合状态,细胞壁破裂褶皱、纤维基质不可逆粘连并形成硬壳层,这一微观结构劣变的核心诱因是持续高温介导的细胞热损伤效应,热风干燥过程中,物料内部水分快速迁移与持续热胁迫的协同作用,会造成真菌组织细胞结构的不可逆破坏,相关热损伤机理已在食药菌干燥加工的同类研究中得到系统阐释^[27]。VTD 和 ND 干燥对样品的破坏程度居中,样品虽有收缩,但多孔结构可辨,孔隙分布优于 HAD 组,细胞壁仅局部轻微破裂。细胞的内部多孔结构,可为复水时水分快速渗透提供通道,从而影响干制品的复水性能,该现象与表 3 复水比的结果一致。

2.2 不同干燥方式对花脸香蘑营养指标的影响

2.2.1 不同干燥方式对花脸香蘑营养成分含量的影响

粗蛋白、总酚及多糖是表征花脸香蘑营养品质与功能活性的核心指标,其中粗蛋白为人体必需氨基酸的重要供给载体,总酚是赋予其抗氧化活性的关键物质基础,多糖则是其发挥免疫调节等生理功能的核心活性组分。由表 4 可知,不同干燥方式对花脸香蘑营养成分含量影响显著($P<0.05$)。粗蛋白含量方面,VFD 组显著高于其他三组,其含量为 42.05 g/100 g;HAD 组含量最低 32.20 g/100 g,较 VFD 组降低 23.42%。多糖含量的变化趋势与粗蛋白高度吻合。VFD 组多糖含量最高(128.23 mg g⁻¹),显著高于 HAD (87.92 mg g⁻¹)、VTD (88.69 mg g⁻¹)及 ND 组(92.10 mg g⁻¹)($P<0.05$),而后三者间无显著差异($P>0.05$)。究其原因,VFD 组的真空环境可显著降低产品与氧气的接触程度,进而减少含硫氨基酸的氧化降解;此外,低温环境可有效抑制蛋白质的热变性过程,因此 VFD 组粗蛋白含量得以高效保留。多糖属于典型的热敏性生物活性物质,VFD 工艺可显著抑制糖苷键的水解反应及氧化损伤,而其他干燥方式的高温或有氧环境易引发多糖结构破坏与含量损耗。

花脸香蘑总酚含量的排序为:VTD>HAD>ND>VFD ($P<0.05$),其中 VTD 样品中总酚含量最高,为 8.74 mg g⁻¹,而 VFD 组的花脸香蘑总酚含量最低,仅为 6.53 mg g⁻¹。与 VFD 相比,有加热过程参与的干燥方式中总酚含量较高,这一现象可能与总酚的合成代谢特性相关:总酚作为植物的防御性次生代谢产物,其积累过程依赖相关合成酶与氧化酶的活性调控^[28]。VTD 工艺采用“低温脱水+适度高温胁迫”的复合模式,既可减少酚类物质的氧化损耗,又能激活酚类合成相关酶的活性;而 HAD 组的持续高温环境导致酚类物质降解速率大于合成速率,VFD 组的低温条件显著抑制了酚类合成酶的活性,ND 组的开放环境则加剧了酚类物质的氧化褐变,故而此三组总酚含量均处于较低水平。王玉婷等^[29]与秦丹丹等^[30]的研究结果均证实,热风干燥组总酚含量高于真空冷冻干燥组,与本研究结论相一致。

综上,干燥工艺的“温度调控”与“环境密封性”是影响花脸香蘑营养成分保留效率的核心关键因素。传统干燥方式(HAD、ND)因存在持续高温或开放环境的固有缺陷,通过加速蛋白质与多糖的降解、促进酚类物质的氧化等途径,导致核心营养成分含量显著低于新型干燥方式(VFD、VTD) ($P<0.05$);其中 VFD 通过“低温+真空”的协同作用实现粗蛋白与多糖的高效保留,VTD 则借助“变温胁迫”的调控机制达成总酚的高效积累。有

研究表明变温干燥通过阶段性升温的胁迫效应，减少酚类物质热降解并促进新酚生成，实现总酚高效积累^[31]。高低温交替可引发活性氧脉冲积累，激活苯丙烷代谢通路关键酶（PAL、C4H、CHS），促进酚类合成与积累；变温干燥可通过胁迫调控减少酚类降解、促进新酚生成，达成总酚高效富集^[32]。

表 4 不同干燥方式对花脸香蘑营养成分含量的影响

Table 4 Effects of Different Drying Methods on Nutrient Contents of *Lepista sordida*.

干燥方式	粗蛋白/(g/100 g)	总酚/(mg g ⁻¹)	多糖/(mg g ⁻¹)
ND	38.70±0.22 ^b	6.85±0.12 ^c	92.10±4.09 ^b
HAD	32.20±0.50 ^d	7.96±0.14 ^b	87.92±2.76 ^b
VTD	36.36±0.06 ^c	8.74±0.16 ^a	88.69±2.92 ^b
VFD	42.05±0.55 ^a	6.53±0.11 ^d	128.23±4.09 ^a

2.2.2 不同干燥方式对花脸香蘑游离氨基酸的影响

氨基酸作为人体不可或缺的核心营养物质，既是构成蛋白质的基本结构单元，也是花脸香蘑至关重要的呈味物质。由表 5 可知，不同干燥方式对花脸香蘑游离氨基酸含量影响显著（ $P<0.05$ ）。每组均检测出 17 种游离氨基酸，其中谷氨酸和丙氨酸含量较高，这与食用菌的鲜甜味一致。总氨基酸含量由高到低依次为：VFD>HAD>VTD>ND（ $P<0.05$ ），VFD 处理对食用菌游离氨基酸的保护效应已在同类研究中得到验证，VFD 组松茸总氨基酸含量达 35.273 mg g⁻¹，为所有干燥处理组最高^[33]。此外，17 种游离氨基酸中包括了 8 种人体必需氨基酸，它们的含量由高到低依次为：VTD>HAD>VFD>ND。

根据游离氨基酸的呈味规律，可将上述 17 种氨基酸分为鲜味氨基酸（天门冬氨酸和谷氨酸）、甜味氨基酸（苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸和丙氨酸）和苦味氨基酸（缬氨酸、蛋氨酸、亮氨酸等）。VFD 组鲜味氨基酸含量最高为 21.08 mg g⁻¹，表明真空冷冻干燥可有效减少鲜味氨基酸的降解流失，更利于保留花脸香蘑的鲜味氨基酸基础；VTD 组甜味氨基酸含量最高为 17.85 mg g⁻¹，是因为热风类干燥（尤其是变温模式）可通过促进中性氨基酸的保留或转化，增加了甜味组分的积累^[34]；HAD 组苦味氨基酸含量最高为 12.90 mg g⁻¹，这可能与热风干燥对疏水性支链/芳香族氨基酸的保留效应相关^[35]。综上所述，不同干燥方式对花脸香蘑游离氨基酸组成及呈味氨基酸分布具有显著影响，VFD 对鲜味氨基酸的保留效果最优，可为产品鲜味形成提供核心物质基础；HAD、VTD 分别在苦味氨基酸与甜味氨基酸积累上更具优势，可强化甜、苦呈味特征；ND 组各类呈味氨基酸含量整体偏低，风味物质基础相对薄弱。

表 5 不同干燥方式对花脸香蘑游离氨基酸的影响

Table 5 Effects of Different Drying Methods on Free Amino Acids of *Lepista sordida*.

氨基酸种类		含量/(mg g ⁻¹)			
		ND	HAD	VTD	VFD
必需氨基酸	苏氨酸	2.70±0.11 ^c	2.78±0.04 ^c	3.11±0.06 ^b	3.56±0.06 ^a
	缬氨酸	0.70±0.02 ^d	1.63±0.01 ^b	1.76±0.05 ^a	1.16±0.06 ^c
	蛋氨酸	0.08±0.01 ^c	0.32±0.01 ^b	0.31±0.01 ^b	0.40±0.01 ^a
	异亮氨酸	0.46±0.02 ^c	1.30±0.06 ^a	1.25±0.05 ^a	0.72±0.01 ^b
	亮氨酸	0.76±0.01 ^d	2.21±0.11 ^a	1.97±0.10 ^b	1.38±0.06 ^c
	苯丙氨酸	1.09±0.01 ^c	2.27±0.07 ^a	2.13±0.08 ^a	1.30±0.04 ^b
	赖氨酸	1.07±0.05 ^b	2.38±0.10 ^a	2.34±0.11 ^a	2.22±0.09 ^a
	组氨酸	0.36±0.00 ^b	0.26±0.00 ^d	0.31±0.01 ^c	0.80±0.03 ^a
合计	7.19±0.21 ^c	13.15±0.36 ^a	13.16±0.45 ^a	11.51±0.29 ^b	
非必需氨基酸	天门冬氨酸	0.97±0.04 ^c	1.51±0.03 ^b	0.65±0.02 ^d	2.61±0.08 ^a
	丝氨酸	3.20±0.16 ^c	4.06±0.04 ^b	3.55±0.08 ^c	4.50±0.20 ^a
	谷氨酸	11.78±0.02 ^b	9.35±0.08 ^c	7.95±0.11 ^d	18.47±0.09 ^a
	甘氨酸	0.91±0.01 ^c	1.32±0.06 ^b	1.34±0.02 ^b	1.50±0.00 ^a
	丙氨酸	6.14±0.30 ^c	7.29±0.17 ^b	9.85±0.20 ^a	5.95±0.33 ^c

	胱氨酸	0.05±0.01 ^d	0.08±0.01 ^c	0.16±0.00 ^b	0.26±0.01 ^a
	酪氨酸	0.76±0.04 ^a	0.55±0.01 ^b	0.59±0.01 ^b	0.47±0.00 ^c
	精氨酸	1.02±0.05 ^c	1.98±0.08 ^b	1.96±0.08 ^b	2.19±0.08 ^a
	脯氨酸	0.56±0.02 ^c	1.31±0.00 ^a	1.28±0.01 ^a	0.81±0.01 ^b
合计		25.37±0.41 ^c	27.43±0.48 ^b	27.31±0.51 ^b	36.74±0.43 ^a
味觉特征	鲜味	12.75±0.07 ^b	10.85±0.11 ^c	8.59±0.09 ^d	21.07±0.16 ^a
	甜味	12.94±0.55 ^c	15.44±0.31 ^b	17.85±0.36 ^a	15.5±0.58 ^b
	苦味	6.26±0.11 ^c	12.9±0.42 ^a	12.59±0.49 ^a	10.61±0.31 ^b
总氨基酸含量		32.61±0.62 ^c	40.60±0.85 ^b	40.51±0.97 ^b	48.30±0.72 ^a

2.3 电子鼻结果

2.3.1 电子鼻雷达图分析

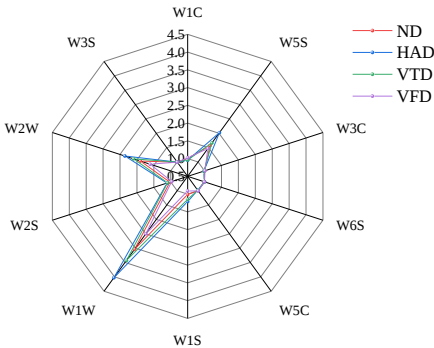


图 3 不同干燥方式下的电子鼻雷达图

Fig.3 Electronic Nose Radar Plots under Different Drying Methods

电子鼻依托多通道传感器阵列捕获花脸香蘑挥发性风味整体特征，雷达图表征传感器响应强度，其差异反映干燥方式对样品气味特征的影响。由图 3 可知，不同干燥方式下花脸香蘑样品在电子鼻传感器上的响应值存在显著差异，主要表现在 W1W、W2W 和 W5S，即硫化物、芳香成分和有机硫化物、氮氧化物，其中热干燥组（HAD、VTD 和 ND）处理的花脸香蘑样品响应值高于 VFD 组，表明热处理后花脸香蘑样品中的挥发性成分更丰富，Zhang 等^[36]的研究也表明热风干燥处理后的香菇具有更强的香菇特征香气。Qin 等^[37]研究表明，香菇热风干燥过程中特征风味的形成主要源于酶系激活，其可催化香精酸生成含硫杂环化合物。

2.3.2 电子鼻 PCA 分析

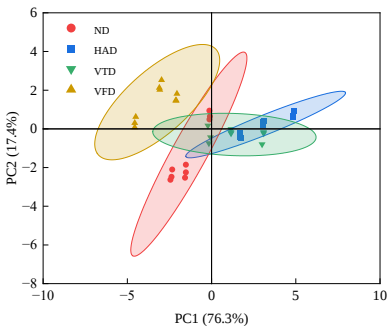


图 4 不同干燥方式下电子鼻 PCA 图

Fig.4 PCA Plots of Electronic Nose under Different Drying Methods

为进一步评价不同干燥方式下花脸香蘑风味成分的差异，将电子鼻传感器的响应值进行主成分分析。PCA 中累计贡献率越大，反映 PC 对电子鼻传感器数据的表征效能越优^[38]。由图 4 可知，各干燥组样品 PC1、PC2 贡

献率依次为 76.3%和 17.4%，累计贡献率为 93.7%，高于 85%的标准值，能充分表征样品核心信息，作为花脸香蘑干燥样品电子鼻整体信息的代表具有较高可靠性。从样品分布来看，HAD、VTD 和 ND 组样品在 PC1 上有一定的重叠区域，说明这几种干燥方式制得的样品挥发物质具有相似性，这与表 3 的结果一致，主要是硫化物、芳香成分和有机硫化物、氮氧化物。VFD 组样品主要分布在一个象限内，与其他三组差别较大，可能是因为真空环境与低温条件的协同作用：硫化物、有机硫化物及芳香成分多为低沸点组分，真空环境降低其分压，使其随水分升华或脱附挥发而流失；氮氧化物则因低温抑制美拉德反应、氨基酸氧化等生成途径，最终导致此类成分含量降低^[39]。

2.4 花脸香蘑各指标的相关性分析

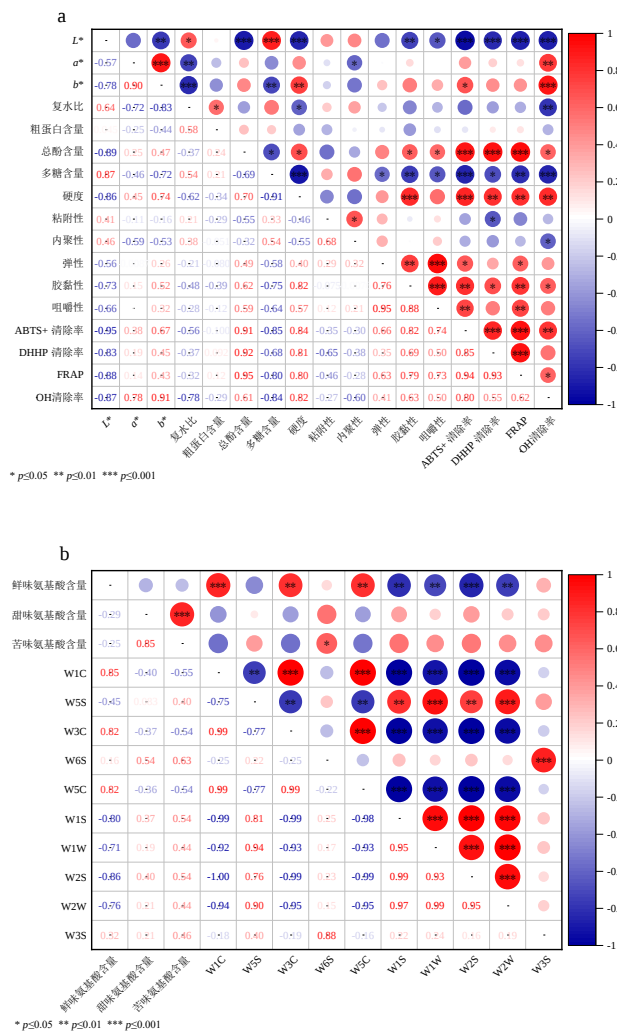


图 5 干燥花脸香蘑各指标相关性热图

Fig.5 Heatmap of Correlations among Various Quality Indicators of Dried *Lepista sordida*.

注：a 表示干燥花脸香蘑各理化指标间的相关性；b 表示干燥花脸香蘑电子鼻传感器响应值与游离氨基酸组成的相关性。

为更直观地反映花脸香蘑理化特性、营养成分和气味成分之间的内在联系，对干燥后的样品进行 Pearson 相关性分析。由理化指标相关性分析结果（图 5a）可见，其中亮度值（ L^* ）与多糖含量呈极显著正相关，而与总酚含量、硬度及抗氧化活性均呈极显著负相关（ $P<0.001$ ）。总酚作为花脸香蘑中易氧化的活性物质，在干燥过程中易发生氧化反应并生成褐色素，从而降低样品表面亮度。复水比与 a^* 、 b^* 和硬度均呈显著负相关（ $r=-0.72$ 、 -0.83 、 -0.62 ， $P<0.05$ ），表明干燥品质指标间存在内在统一性。样品复水能力越强，通常意味着干燥过程中微观结构塌陷程度越低、质地硬化现象越弱，细胞结构保持相对完整，褐变反应较轻，色泽更浅（ a^* 、 b^* 值更低）^[40]。

质构特性与抗氧化活性的关联分析表明,花脸香蘑干品的硬度、咀嚼性和胶黏性均与抗氧化活性呈极显著正相关($P<0.01$),而弹性、内聚性及粘附性与之相关性较弱,说明不同质构参数对其功能品质的表征存在明显差异。多酚可通过氢键、疏水相互作用与多糖分子交联,形成更为致密稳定的三维网络结构,这种协同凝胶强化作用可能增强花脸香蘑干品的内部结构与咀嚼特性^[41];弹性、内聚性及粘附性更多反映菌体的微观结构与水分结合状态,主要受干燥过程中细胞收缩、细胞壁完整性等物理因素影响。

图 5b 可直观反映花脸香蘑气味感知与游离氨基酸组成的内在关联。W1C (对芳香成分灵敏)、W5C (对短链烷烃芳香成分灵敏)、W3C (对氨类和芳香成分灵敏) 传感器响应值与鲜味氨基酸呈显著正相关。鲜味氨基酸(天冬氨酸和谷氨酸)既是呈味物质,也是氨类与芳香类香气物质的重要前体,可通过降解、转化等途径生成氨类与芳香类挥发性物质,增强对应的传感器响应值。W1S (对甲烷灵敏)、W1W (对硫化物灵敏)、W2S (对乙醇灵敏)、W2W (对芳香成分和有机硫化物灵敏) 与鲜味氨基酸呈显著负相关,但与甜味和苦味氨基酸相关性不强。此外, W6S 传感器主要对氢化物灵敏,其响应值与苦味氨基酸(主要为精氨酸和酪氨酸)呈显著正相关,原因可能是在花脸香蘑干燥过程中,精氨酸和酪氨酸可通过分解代谢产生含氢化物的挥发性气味物质(如胺类、酚类含氢衍生物)^[42],进而增强 W6S 的响应强度。

3 结论

本研究本研究系统对比了 ND、HAD 两种传统干燥方式与 VTD、VFD 两种新型干燥方式对花脸香蘑理化特性、营养品质及挥发性成分的影响,明确了不同干燥方式对其品质的差异化调控效应。结果表明:不同干燥方式对花脸香蘑品质影响显著($P<0.05$)。理化与微观结构方面, VTD 通过阶梯变温有效缓解了持续高温对菌体的损伤,其 ABTS、DPPH 自由基清除率及 FRAP 总还原能力居各组首位; VFD 可最大限度维持菌体细胞壁完整性,样品形成均匀多孔结构,微观损伤最小,褐变最轻、复水性能与质构适口性显著优于其余各组; HAD 持续高温导致菌体结构严重塌陷,是色泽劣变最显著、复水性能最差的处理。营养品质与呈味特性方面, VTD 总酚含量较 ND 组提升 27.59%,甜味氨基酸与必需氨基酸总量均为各组最高,实现功能活性与营养品质协同提升; VFD 可高效抑制热敏性营养成分的热降解,样品粗蛋白、多糖含量较 HAD 分别提升 30.59%、45.85%,鲜味氨基酸含量达 21.08 mg g^{-1} ,是花脸香蘑核心营养与鲜爽风味保留的最优工艺; HAD 核心营养降解最显著、苦味氨基酸含量最高,ND 营养成分整体偏低,这两种传统干燥方式的综合品质保留效果均较差。挥发性风味方面,电子鼻指纹图谱与主成分分析(累计贡献率 93.7%)显示, ND、HAD、VTD 三个热处理组的特征挥发性风味物质种类更丰富,而 VFD 的香气轮廓与其余三组存在显著差异。Pearson 相关性分析结果进一步揭示了花脸香蘑品质指标间的三大核心关联规律:其一,菌体微观结构的完整性是决定其理化品质的核心因素;其二,酚类活性物质的分子交联作用是调控菌体质构特性的关键;其三,游离氨基酸是挥发性风味物质形成的核心前体物质。

综合品质与加工成本,本研究明确了不同干燥工艺的产业化适配场景: VTD 适宜高功能化风味制品开发, VFD 适合高品质精深加工, ND 与 HAD 适用于初级干制品规模化生产。本研究填补了花脸香蘑干燥加工系统性研究的空白,为其高值化利用与产业升级提供了理论支撑与技术参数,也为其他珍稀食药菌干燥工艺优化提供了参考。

参考文献

- [1] 邓力,冯慧,赵辉,等.花脸香蘑营养成分、活性成分及药理作用研究进展[J].食药菌,2025,33(2):93-99.
- [2] 连俊辉.花脸香蘑菌丝体多糖的提取、抗氧化性及其益生活性研究[D].长春:吉林大学,2021.
- [3] HAHK S K, SOAE J, SOHYUN P, et al. *Lepistatins A–C*, chlorinated sesquiterpenes from the cultured basidiomycete *Lepista sordida* [J]. *Phytochemistry*, 2017, 143: 111-114.
- [4] YUE Y M, ZHANG Q, WAN F X, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of *codonopsis pilosulae* slices [J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1323.
- [5] 刘鹏娜,王树林,杜国英,等.不同干燥方式处理下青海黄蘑的干燥特性及褐变规律的研究[J].食品与发酵工业,2026,52(14):297-306.
- [6] 罗宸东,宋萧萧,李昱昊,等.干燥方式对茶树菇营养组分和挥发性成分的影响[J].南昌大学学报(理科版),2023,47(5):426-432.
- [7] 刘红霞,范秀芝,史德芳,等.不同干燥方式对香菇中营养及风味物质的影响[J].食品工业科技,202647(12):340-349.

- [8] HOU H, LIU C, LU X S, et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: Influence of drying techniques [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146(1):111402.
- [9] WANG J P, JIANG S Y, MIAO S, et al. Effects of drying on the quality characteristics and release of umami substances of *Flammulina velutipes* [J]. Food Bioscience, 2023, 11(51): 102338.
- [10] WANG H C, ZHANG M, ADHIKARI B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 94: 507-517.
- [11] 任亨,程亚娇,游玉明,等.干燥条件对熟化竹荪品质的影响[J].食品与机械,2016,32(8):127-131.
- [12] 刘艳全,张甜,丁真真,等.不同干燥方式对巴楚蘑菇理化指标、抗氧化性及挥发性风味物质的影响[J].食品工业科技,2025,46(14):22-32.
- [13] MIRUNA P, IOAN T, OLGA D, et al. Influence of convective and vacuum-type drying on quality, microstructural, antioxidant and thermal properties of pretreated *Boletus edulis* mushrooms [J]. Molecules, 2022, 27(13): 4063.
- [14] NY/T 1676-2023,食用菌中粗多糖的测定 分光光度法[S].
- [15] GB 5009.5-2025,食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S].
- [16] GB/T 30987-2020,植物中游离氨基酸的测定[S].
- [17] FU L J, YANG G, LIU L, et al. Analysis of volatile components of *Auricularia auricula* from different origins by GC-MS combined with electronic nose [J]. Journal of Food Quality, 2020, 11: 9.
- [18] LI Y, LI J W, FAN L P. Effects of combined drying methods on physicochemical and rheological properties of instant *Tremella fuciformis* soup [J]. Food Chemistry, 2022, 396(12): 133644.
- [19] RORATO A C, LONGHI D A, BIZ A P, et al. Enhancing quality of dried *Agaricus bisporus*: advanced techniques in vacuum impregnation and freeze-drying [J]. Drying Technology, 2024, 43(12): 653-667.
- [20] 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.
- [21] 戴竹青,孙思燕,江宁,等.不同干燥处理对荷叶离褶伞品质的影响[J].江苏农业科学,2020,48(13):220-224.
- [22] SHRUTI A, NGUYEN T H A, CLARE K, et al. The rehydration attributes and quality characteristics of ‘Quick-cooking’ dehydrated beans: implications of glass transition on storage stability [J]. Food Research International, 2022, 157: 111377.
- [23] 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.
- [24] 罗宸东.干燥方式对茶树菇营养成分、风味物质的影响及其多糖基本机构特征分析[D].南昌:南昌大学,2023.
- [25] LUO F X, NURGULI A, LIU Y, et al. Physicochemical properties and volatile compounds of *Rosa roxburghii* fruit using different drying methods [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 15(208): 116722.
- [26] YANG Q N, YI X K, XIAO H W, et al. Effects of Different Drying Methods on Drying Characteristics, Microstructure, Quality, and Energy Consumption of Apricot Slices [J]. Foods, 2024, 13(9): 1295.
- [27] ZHANG J, YAGOUR A E A, SUN Y H, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physicochemical properties of shiitake mushroom [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 214-222.
- [28] PALACIOS I, LOZANO M, MORO C, et al. Antioxidant properties of phenolic compounds occurring in edible mushrooms [J]. Food Chemistry, 2011, 128(3): 674-678.
- [29] 王玉婷,陈奕,李雨波.干燥方式对香蕉片总多酚含量及其抗氧化性的影响[J].食品科学,2013,34(23):113-117.
- [30] 秦丹丹,张生万,郭萌,等.干燥方式对无花果酚类物质及其抗氧化活性的影响[J].食品科学,2018,39(9):102-107.
- [31] 马俊杰,白梦涵,文钰,等.漂烫结合热泵变温工艺对西梅干燥特性及品质的影响[J].新疆农业科学,2025,62(12):2993-3003.
- [32] 侯帅,张祎佳,周丹丹,等.基于介质阻挡放电低温等离子体分析储藏稻谷高温胁迫下酚类代谢规律[J].中国农业科学,2024,57(6):1180-1190.
- [33] 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.
- [34] 管文强.鸡腿菇变温干燥工艺及其干制品贮藏稳定性研究[D].南京:南京农林大学,2019.
- [35] CHEN D, SHENG M L, WANG S L, et al. Dynamic changes and formation of key contributing odorants with amino acids and reducing sugars as precursors in shiitake mushrooms during hot air drying [J]. Food Chemistry, 2023, 424 (30): 136409.

- [36] ZHANG L J, DONG X B, FENG X, et al. Effects of drying process on the volatil and non-volatile flavor compounds of *Lentinula edodes* [J]. Foods, 2021, 10(11): 2836.
- [37] QIN L, GAO J X, XUE J, et al. Changes in Aroma Profile of Shiitake Mushroom (*Lentinus edodes*) during Different Stages of Hot Air Drying [J]. FoodS, 2020, 9(4): 444.
- [38] WEI G Z, DAN M L, ZHAO G H, et al. Recent advances in chromatography-mass spectrometry and electronic nose technology in food flavor analysis and detection [J]. Food Chemistry, 2023, 3(405): 134814.
- [39] ZHANG F M, LU B, HE X H, et al. Flavor variations in precious *Tricholoma matsutake* under different drying processes as detected with HS-SPME-GC-MS [J]. Foods, 2024, 13(13): 2123.
- [40] CHEN Y Q, L V Z W, LIU Z R, et al. Effect of different drying temperatures on the rehydration of the fruiting bodies of Yu Muer (*Auricularia cornea*) and screening of browning inhibitors [J]. Food Science& Nutrition, 2020, 8(11): 6037-6046.
- [41] XIE L, JIANG Y S, WANG Y B, et al. Changes in the physical properties and volatile odor characteristics of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) in far infrared radiation drying [J]. Foods, 2023, 12(17): 3213.
- [42] MOUTIA I, LAKATOS E, KOVACS A J. Impact of dehydration techniques on the nutritional and microbial profiles of dried mushrooms [J]. Foods, 2024, 13(20): 3245.