

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80617

# 切分方式与干燥温度对羊肚菌热风干燥动力学与品质的影响

林 芳<sup>1</sup> 吴钊龙<sup>2</sup> 吴 莹<sup>3</sup> 马蓝字<sup>2</sup> 刘忠林<sup>2</sup>

(1. 广西体育高等专科学校运动健康学院, 广西 南宁 530012; 2. 广西科学院广西微波先进制造技术重点实验室, 广西 南宁 530007; 3. 合浦果香园食品有限公司, 广西 北海 536100)

**摘要:** [目的]提升羊肚菌附加值, 优化热风干燥工艺。[方法]系统研究切分方式(整菇、1/2 切分、1/4 切分)和干燥温度(50, 60, 70 °C)对其干燥特性、营养品质(复水比、蛋白质、总酚含量)及抗氧化活性的影响, 建立干燥动力学模型。[结果]羊肚菌在热风干燥过程可分为加速和降速 2 个阶段, Page 模型能准确地描述其水分变化规律( $R^2=0.980$ )。随着切分程度的增加, 干燥速率加快, 干燥时间缩短。然而, 有效水分扩散系数( $D_{\text{eff}}$ )、总酚质量分数和 DPPH 自由基清除率显著降低, 复水效果无明显差异( $P>0.05$ )。随着干燥温度升高, 干燥时间缩短, 干燥速率加快,  $D_{\text{eff}}$  增大, 复水比先下降后上升, 蛋白质量分数、总酚质量分数和 DPPH 自由基清除率均呈先上升后下降趋势。[结论]确定整菇在 60 °C 下干燥为最佳工艺, 此时干燥时间(240 min)和复水比(2.31 g/g)较低, 而  $D_{\text{eff}}$  ( $1.2969 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )、蛋白质质量分数(26.97%)、总酚质量分数(5.32%)和 DPPH 自由基清除率(78.07%)均维持在较高水平。

**关键词:** 羊肚菌; 热风干燥; 切分方式; 干燥温度; Page 模型; 品质

## Effects of cutting methods and drying temperatures on hot-air drying kinetics and quality of *Morchella esculenta*

Lin Fang<sup>1</sup> Wu Zhaolong<sup>2</sup> Wu Ying<sup>3</sup> Ma Lanyu<sup>2</sup> Liu Zhonglin<sup>2</sup>

(1. College of Exercise and Health, Guangxi College of Sports Education, Nanning, Guangxi 530012, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Advanced Microwave Manufacturing Technology, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 3. Hepu Guoxiangyuan Food Co., Ltd., Beihai, Guangxi 536100, China)

**Abstract:** [Objective] To enhance the added value of *Morchella esculenta* and optimize its hot-air drying process. [Methods] The effects of cutting methods (whole mushroom, 1/2 cut, and 1/4 cut) and drying temperatures (50, 60, and 70 °C) on drying characteristics, nutritional quality (rehydration ratio, protein content, and total phenolic content), and antioxidant activity were systematically investigated, and a drying kinetic model was established. [Results] The hot-air drying process of *M. esculenta* could be divided into two stages: an accelerating drying stage and a falling-rate drying stage. The Page model accurately described the moisture variation during drying ( $R^2=0.980$ ). With increasing cutting degree, the drying rate increased and the drying time decreased. However, the effective moisture diffusivity ( $D_{\text{eff}}$ ), total phenolic content, and DPPH radical scavenging activity significantly decreased, while the rehydration ratio showed no significant difference ( $P>0.05$ ). With increasing drying temperature, the drying time decreased, the drying rate increased, and  $D_{\text{eff}}$  increased. The rehydration ratio first decreased and then increased, while the protein content, total phenolic content, and DPPH radical scavenging activity all showed an

**基金项目:** 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(编号: 2022KY0921); 广西自然科学基金青年基金项目(编号: 2025GXNSFBA069267); 来宾市科学研究与技术开发计划项目(编号: 来科产 241527)

**通信作者:** 吴钊龙(1995—), 男, 广西科学院助理研究员, 硕士。E-mail: wuzhaolong@gxas.cn

刘忠林(1995—), 男, 广西科学院助理研究员, 硕士。E-mail: liuzhonglin@gxas.cn

**收稿日期:** 2025-07-02 **改回日期:** 2026-06-04

**引用格式:** 林芳, 吴钊龙, 吴莹, 等. 切分方式与干燥温度对羊肚菌热风干燥动力学与品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 197-204.

**Citation:** Lin Fang, Wu Zhaolong, Wu Ying, et al. Effects of cutting methods and drying temperatures on hot-air drying kinetics and quality of *Morchella esculenta*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 197-204.

increasing trend followed by a decreasing trend. [Conclusion] Drying whole *M. esculenta* at 60 °C was identified as the optimal processing condition. Under this condition, the drying time (240 min) and rehydration ratio (2.31 g/g) were relatively low, while  $D_{\text{eff}}$  ( $1.296\ 9 \times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$ ), protein content (26.97%), total phenolic content (5.32%), and DPPH radical scavenging activity (78.07%) were maintained at relatively high levels.

**Keywords:** *Morchella esculenta*; hot-air drying; cutting methods; drying temperature; Page model; quality

羊肚菌(*Morchella esculenta* (L.) Pers.)是一种珍贵的食药两用真菌,富含多糖、蛋白质和多酚等活性成分<sup>[1-3]</sup>,具有抗氧化<sup>[4]</sup>、抗肿瘤<sup>[5]</sup>、抗菌消炎<sup>[6]</sup>、降血压<sup>[7]</sup>等多种生理功能。然而,鲜品羊肚菌含水量高、易腐烂变质、货架期短,干燥成为延长其货架期的关键加工方式<sup>[8]</sup>。目前常用的干燥方法包括自然晒干、热风干燥与真空冷冻干燥等<sup>[9]</sup>。其中,热风干燥以热空气为介质,通过由外向内的传热方式实现脱水,因成本低、操作简便,被广泛应用于食用菌加工<sup>[10]</sup>。

尽管已有研究探讨了热风干燥在不同食用菌中的应用,顾可飞等<sup>[11]</sup>研究对比了羊肚菌烘干前后营养成分和风味物质,发现烘干对羊肚菌基本营养价值影响不大,但烘干前后风味各具特色;杨琴等<sup>[12]</sup>研究发现,在 40 °C 1 h, 45 °C 1 h, 50 °C 1 h, 70 °C 2 h, 80 °C 1 h 的热风干燥条件下羊肚菌在收缩率和复水速率方面最优;李果等<sup>[13]</sup>研究发现,羊肚菌在不同水分含量阶段的烘干温度对其饱满度、色泽方面的影响较大。但针对羊肚菌在不同切分方式和干燥温度下的系统研究仍较为缺乏。

研究拟系统探究不同切分方式(整菇、1/2 切分、1/4 切分)和干燥温度(50, 60, 70 °C)对羊肚菌热风干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响,通过建立干燥动力学模型,筛选较优干燥工艺,以期羊肚菌的高值化加工提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 原料

新鲜‘六妹’羊肚菌:广西南宁市西乡塘区科德市场。

1.2 主要仪器设备

热风干燥箱:PH-070A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

电子天平:JJ1000 型,常熟市双杰测试仪器厂;

紫外分光光度计:752N 型,上海仪电分析仪器有限公司。

1.3 原料处理与干燥

挑选同一批次、大小均一和无机械损伤的新鲜羊肚菌,用切片机对其进行切分处理:未切分(整菇)、沿菌体纵轴单刀切分(1/2 切分)或三刀切分(1/4 切分)。将处理后的样品单层铺于不锈钢网盘上,置于热风干燥箱中并按表 1 的参数组合依次进行干燥试验,每隔 20 min 测定羊肚菌质量,直至其干基含水量 $\leq 0.08\ \text{g/g}$ 时终止干燥。

表 1 试验设计

| Table 1 Experimental design |        |         |
|-----------------------------|--------|---------|
| 试验号                         | 切分方式   | 干燥温度/°C |
| 1                           | 整菇     | 60      |
| 2                           | 1/2 切分 | 60      |
| 3                           | 1/4 切分 | 60      |
| 4                           | 1/2 切分 | 50      |
| 5                           | 1/2 切分 | 70      |

1.4 干燥参数的测试与计算方法

1.4.1 初始含水量 按 GB 5009.3—2016 中的直接干燥法执行,羊肚菌平均初始含水量为 80.45%。

1.4.2 干基含水量 按式(1)计算羊肚菌干基含水量。

$$M = \frac{m_t - m}{m}, \tag{1}$$

式中:

$M$ —— $t$ 时刻羊肚菌干基含水量, g/g;

$m_t$ —— $t$ 时刻羊肚菌质量, g;

$m$ ——羊肚菌干燥后恒重质量, g<sup>[14]</sup>。

1.4.3 干燥速率 参照吴钊龙等<sup>[15]</sup>的方法。

1.4.4 水分比 参照吴钊龙等<sup>[16]</sup>的方法,按式(2)计算水分比。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \tag{2}$$

式中:

$M_R$ ——水分比;

$M_t$ —— $t$ 时刻羊肚菌干基含水量, g/g;

$M_0$ ——羊肚菌初始干基含水量, g/g;

$M_e$ ——平衡时羊肚菌干基含水量, g/g。

1.4.5 有效水分扩散系数 参照 Huang 等<sup>[17]</sup>的方法。

1.4.6 干燥活化能 根据羊肚菌的水分扩散系数和干燥温度的关系,物质的活化能可以通过 Arrhenius 方程(见式(3))进行推算。

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T + 273.15)} k, \tag{3}$$

式中:

$D_{\text{eff}}$ ——有效水分扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$D_0$ ——指前因子,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$E_a$ ——活化能, kJ/mol;

$R$ ——气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;

$T$ ——热力学温度,  $\text{K}$ 。<sup>[18]</sup>

1.4.7 干燥模型的拟合 选用5种常用且具有代表性的动力学模型(见表2)进行拟合<sup>[19]</sup>,以决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和误差平方和(SSE)评估模型适用性。

表2 5种动力学模型及其表达式<sup>†</sup>

Table 2 Five kinetic models and their expressions

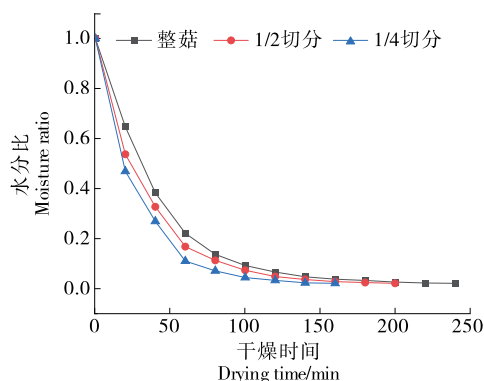
| 模型序号 | 模型名称                | 模型表达式                   |
|------|---------------------|-------------------------|
| 1    | Logarithmic         | $M_R = a \exp(-kt) + c$ |
| 2    | Handerson and Pabis | $M_R = a \exp(-kt)$     |
| 3    | Newton              | $M_R = \exp(-kt)$       |
| 4    | Page                | $M_R = \exp(-kt^n)$     |
| 5    | Wang and Singh      | $M_R = 1 + at + bt^2$   |

<sup>†</sup>  $n, k, a, b, c$  表示待定常数;  $t$  表示时间, min。

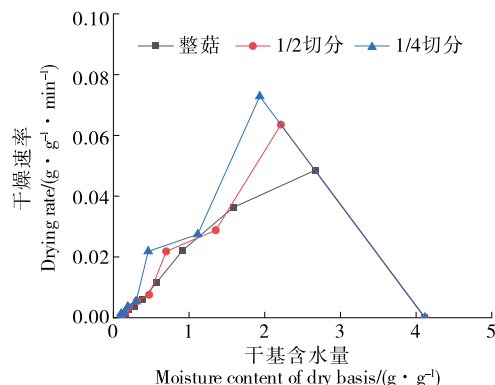
## 1.5 羊肚菌品质指标测定

1.5.1 复水比 参照李晓云等<sup>[20]</sup>的方法。

1.5.2 蛋白质含量 采用BCA法(Thermo Scientific试剂盒)进行定量分析,将样品经12 000 r/min离心10 min后取20  $\mu\text{L}$ 上清液,按试剂盒说明加200  $\mu\text{L}$  BCA工作液后混匀,37  $^{\circ}\text{C}$ 孵育30 min,测定562 nm处吸光度,并根据标准曲线计算浓度。



(a) 干燥曲线



(b) 干燥速率曲线

图1 不同切分方式下的干燥曲线和干燥速率曲线

Figure 1 Drying curves and drying rate curves under different cutting methods

2.1.2 干燥温度对干燥特性的影响 由图2(a)可知,尽管不同温度下的水分比—时间曲线趋势相似,但温度升高增大了曲线斜率,缩短了干燥时间。干燥温度为50, 60, 70  $^{\circ}\text{C}$ 时的干燥时间分别为280, 200, 140 min,其中干燥温度70  $^{\circ}\text{C}$ 较干燥温度50  $^{\circ}\text{C}$ 缩短50%。

由图2(b)可知,各温度下均呈现明显的加速和降速阶段。干燥速率随温度升高而增加,50, 60, 70  $^{\circ}\text{C}$ 下的最大干燥速率分别为0.05, 0.06, 0.08  $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。这主要是因为较高的干燥温度不仅降低了热空气的相对湿度,增

1.5.3 总酚含量 参照林芳等<sup>[21]</sup>的方法。

1.5.4 DPPH自由基清除率 参照Lee等<sup>[22]</sup>的方法。

## 1.6 数据分析

每组试验均重复3次,数据采用SPSS 17.0软件进行统计分析,使用单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan多重极差检验比较不同处理组间的差异显著性( $P < 0.05$ 表示差异显著),用JMP15.0进行线性/非线性回归拟合处理,Origin 8.0软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 羊肚菌热风干燥特性

2.1.1 切分方式对干燥特性的影响 由图1(a)可知,不同切分羊肚菌的水分比随着干燥时间的延长持续降低。干燥时间从小到大顺序为1/4切分(160 min) < 1/2切分(200 min) < 整菇(240 min)。与整菇相比,1/4切分的干燥时间缩短了33%,主要归因于切分处理增大了物料与热空气的接触面积,显著提升了水分迁移效率。

由图1(b)可知,所有切分方式下羊肚菌的干燥过程均包含加速和降速阶段,但未出现明显的恒速阶段。干燥速率顺序为:整菇 < 1/2切分 < 1/4切分。这主要是因为切分处理有效缩短了热量向物料内部传递以及内部水分向表面迁移的路径,降低了水分扩散的内部阻力,从而强化了传热传质过程<sup>[23]</sup>。

强了传热驱动力,还增大了羊肚菌表面与内部的水分浓度梯度,从而加速了水分的扩散与蒸发<sup>[24]</sup>。

2.1.3 有效水分扩散系数( $D_{\text{eff}}$ ) 由表3可知,不同干燥条件下的 $D_{\text{eff}}$ 为 $0.1216 \times 10^{-9} \sim 1.2969 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,均处于食品物料典型的 $D_{\text{eff}}$ 范围( $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ )内<sup>[25]</sup>。值得注意的是,在60  $^{\circ}\text{C}$ 下干燥的整菇样品获得了最高的 $D_{\text{eff}}$  ( $1.2969 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )。切分处理可能导致羊肚菌表面细胞结构快速皱缩甚至形成硬壳,反而阻碍了内部水分的进一步扩散。而整菇干燥在适宜的60  $^{\circ}\text{C}$ 下,既能维持较

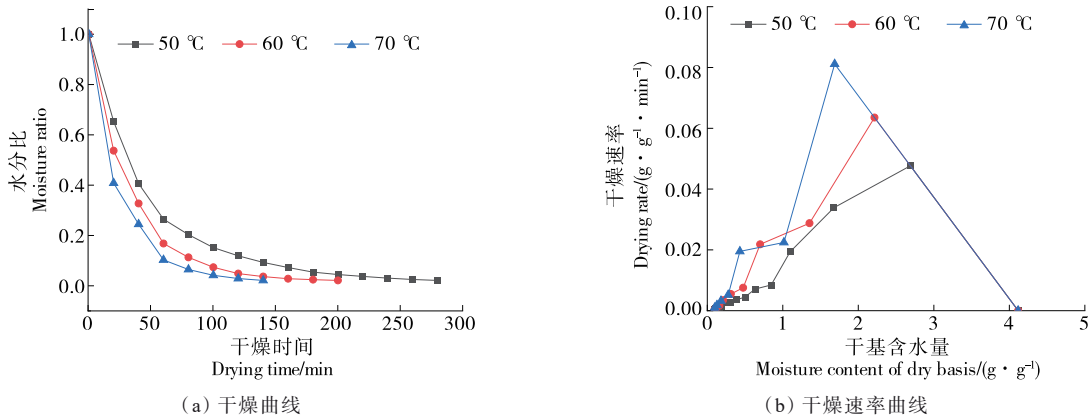


图 2 不同干燥温度下的干燥曲线和干燥速率曲线  
Figure 2 Drying curves and drying rate curves under different drying temperatures

合适的干燥速率,又可能避免了表面结构的过早破坏,为内部水分的持续迁移提供了更优条件。同时, $D_{\text{eff}}$ 随干燥温度升高而增大的趋势,与楚文靖等<sup>[26]</sup>和方良材等<sup>[27]</sup>的研究结论一致,证实了温度对水分迁移的促进作用。

表 3 不同干燥条件下的有效水分扩散系数  
Table 3 Effective moisture diffusion coefficients on different drying conditions

| 试验号 | 关系式                               | $R^2$    | $D_{\text{eff}}/(\times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----|-----------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------|
| 1   | $\ln M_R = -0.000\ 2t - 0.418\ 9$ | 0.949\ 7 | 1.296\ 9                                                          |
| 2   | $\ln M_R = -0.000\ 2t - 0.391\ 6$ | 0.960\ 2 | 0.324\ 2                                                          |
| 3   | $\ln M_R = -0.000\ 3t - 0.369\ 1$ | 0.956\ 5 | 0.121\ 6                                                          |
| 4   | $\ln M_R = -0.000\ 1t - 0.377\ 9$ | 0.978\ 6 | 0.162\ 1                                                          |
| 5   | $\ln M_R = -0.000\ 3t - 0.317\ 7$ | 0.972\ 6 | 0.486\ 3                                                          |

2.1.4 羊肚菌干燥过程的干燥活化能( $E_a$ ) 基于 Arrhenius 方程拟合结果(图 3) $\ln D_{\text{eff}}$ 与  $1/(T+273.15)$ 呈线性关系,线性函数为  $Y = -6\ 279.4X + 10.734$ ,  $R^2 = 0.982\ 9$ ,拟合效果较好。计算得羊肚菌  $E_a$  为 52.206 9 kJ/mol,在食品物料  $E_a$  范围(12~110 kJ/mol)内。

2.2 羊肚菌热风干燥模型的拟合和建立

2.2.1 模型的建立和筛选 由表 4 可知,5 种模型中 Page 的  $R^2$  最高,均在 0.998 以上,其 RMSE(0.011 1~0.016 0)和 SSE(0.001 1~0.003 3)均低于 Logarithmic 等对比模型,表明 Page 模型最能表征羊肚菌水分比变化规律,该模型亦被证实适用于香菇<sup>[28]</sup>、白玉菇<sup>[29]</sup>等食用菌干燥过程。建立 Page 模型方程:

$$\ln k = a + bH + cT, \tag{4}$$

$$n = d + eH + fT, \tag{5}$$

式中:

$H$ ——切分方式;

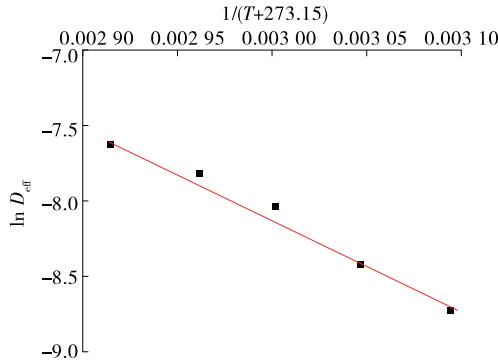


图 3  $\ln D_{\text{eff}}$ 与  $1/(T+273.15)$ 的关系  
Figure 3 Relationship between  $\ln D_{\text{eff}}$  and  $1/(T+273.15)$

$T$ ——干燥温度,°C;

$a, b, c, d, e, f$ ——待定系数。

通过将式(4)和式(5)代入 Page 模型  $M_R = \exp(-kt^n)$ ,可得:

$$\ln(-\ln M_R) = a + bH + cT + (d + eH + fT) \ln t. \tag{6}$$

将不同切分方式和不同干燥温度试验所得的数据依次代入,通过 SPSS 拟合试验数据得  $a = -3.910$ ,  $b = -0.125$ ,  $c = 0.021$ ,  $d = 0.642$ ,  $e = 0.016$ ,  $f = 0.002$ 。

将求得的系数代入,得到回归方程:

$$\ln(-\ln M_R) = -3.910 - 0.125H + 0.021T + (0.642 + 0.016H + 0.002T) \ln t. \tag{7}$$

由于  $\ln(-\ln M_R) = \ln k + n \ln t$ ,求得

$$k = \exp(-3.910 - 0.125H + 0.021T), \tag{8}$$

$$n = 0.642 + 0.016H + 0.002T. \tag{9}$$

回归方程的  $F = 535.152$ ,  $P < 0.001$ ,  $R^2 = 0.980$ ,说明所求得的回归方程极显著,且拟合度较高,证明 Page 模型适用于描述羊肚菌热风干燥过程。

2.2.2 模型检验 为了检验 Page 模型的准确性,采用 1/2 切分羊肚菌在干燥温度 60 °C 下进行验证。由图 4 可知,

表4 5种动力学模型非线性回归拟合结果

Table 4 Non-linear regression fitting results of five kinetic models

| 模型序号 | 切分方式  | 干燥温度/℃ | 模型参数                                 | $R^2$    | RMSE     | SSE      |
|------|-------|--------|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| 1    | 整菇    | 60     | $a=0.995\ 4, k=1.005\ 2, c=0.016\ 5$ | 0.998\ 7 | 0.012\ 0 | 0.001\ 4 |
|      | 1/2切分 | 60     | $a=0.974\ 0, k=1.219\ 8, c=0.022\ 1$ | 0.999\ 2 | 0.009\ 5 | 0.000\ 7 |
|      | 1/4切分 | 60     | $a=0.977\ 7, k=1.481\ 3, c=0.019\ 1$ | 0.998\ 5 | 0.014\ 6 | 0.001\ 3 |
|      | 1/2切分 | 50     | $a=0.960\ 6, k=0.900\ 5, c=0.034\ 9$ | 0.997\ 8 | 0.014\ 3 | 0.002\ 4 |
|      | 1/2切分 | 70     | $a=0.965\ 1, k=1.695\ 2, c=0.027\ 9$ | 0.996\ 4 | 0.023\ 9 | 0.002\ 9 |
| 2    | 整菇    | 60     | $a=1.006\ 1, k=0.952\ 4$             | 0.998\ 1 | 0.015\ 9 | 0.002\ 8 |
|      | 1/2切分 | 60     | $a=0.988\ 9, k=1.131\ 1$             | 0.998\ 2 | 0.017\ 4 | 0.002\ 7 |
|      | 1/4切分 | 60     | $a=0.992\ 1, k=1.390\ 2$             | 0.997\ 8 | 0.018\ 9 | 0.002\ 5 |
|      | 1/2切分 | 50     | $a=0.977\ 8, k=0.789\ 7$             | 0.994\ 7 | 0.026\ 4 | 0.009\ 0 |
|      | 1/2切分 | 70     | $a=0.986\ 4, k=1.539\ 1$             | 0.995\ 0 | 0.029\ 0 | 0.005\ 0 |
| 3    | 整菇    | 60     | $k=0.947\ 0$                         | 0.998\ 0 | 0.015\ 3 | 0.002\ 8 |
|      | 1/2切分 | 60     | $k=1.143\ 4$                         | 0.998\ 5 | 0.016\ 9 | 0.002\ 9 |
|      | 1/4切分 | 60     | $k=1.400\ 2$                         | 0.998\ 0 | 0.017\ 9 | 0.002\ 6 |
|      | 1/2切分 | 50     | $k=0.808\ 5$                         | 0.995\ 7 | 0.026\ 3 | 0.009\ 7 |
|      | 1/2切分 | 70     | $k=1.558\ 5$                         | 0.995\ 3 | 0.027\ 3 | 0.005\ 2 |
| 4    | 整菇    | 60     | $k=0.944\ 2, n=1.011\ 6$             | 0.998\ 1 | 0.016\ 0 | 0.002\ 8 |
|      | 1/2切分 | 60     | $k=1.158\ 6, n=0.889\ 8$             | 0.998\ 9 | 0.011\ 1 | 0.001\ 1 |
|      | 1/4切分 | 60     | $k=1.392\ 8, n=0.894\ 6$             | 0.998\ 4 | 0.014\ 2 | 0.001\ 4 |
|      | 1/2切分 | 50     | $k=0.865\ 8, n=0.840\ 9$             | 0.998\ 0 | 0.016\ 0 | 0.003\ 3 |
|      | 1/2切分 | 70     | $k=1.523\ 3, n=0.799\ 8$             | 0.998\ 4 | 0.014\ 3 | 0.001\ 2 |
| 5    | 整菇    | 60     | $a=-0.515\ 1, b=0.062\ 2$            | 0.929\ 2 | 0.102\ 7 | 0.116\ 1 |
|      | 1/2切分 | 60     | $a=-0.611\ 7, b=0.087\ 9$            | 0.926\ 2 | 0.109\ 2 | 0.107\ 4 |
|      | 1/4切分 | 60     | $a=-0.756\ 7, b=0.134\ 4$            | 0.933\ 4 | 0.107\ 6 | 0.081\ 1 |
|      | 1/2切分 | 50     | $a=-0.434\ 2, b=0.044\ 8$            | 0.910\ 5 | 0.113\ 5 | 0.167\ 5 |
|      | 1/2切分 | 70     | $a=-0.846\ 2, b=0.169\ 5$            | 0.928\ 9 | 0.113\ 3 | 0.077\ 1 |

Page模型的试验值与拟合值高度拟合(Pearson相关系数为0.999),证实Page模型能够较好地反映和预测羊肚菌热风干燥动力学行为。

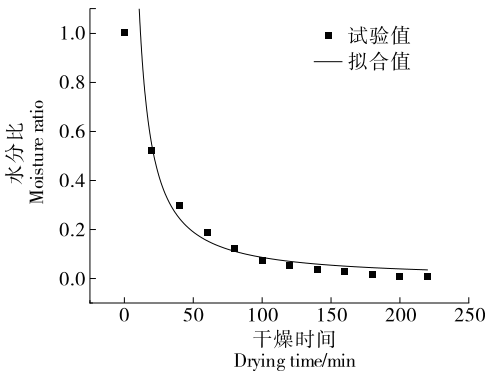


图4 动力学模型检验曲线  
Figure 4 Kinetic model test curve

2.3 不同热风干燥条件下羊肚菌的复水比、营养成分及抗氧化活性

由表5可知,羊肚菌复水比随切分程度增加呈下降趋势,但差异不显著( $P>0.05$ ),而蛋白质量分数、总酚质量分数及1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除率显著降低。整菇样品品质最优,其蛋白质量分数、总酚质量分数和DPPH自由基清除率最高,分别为26.97%,5.32%,78.07%。这主要是因为切分增大比表面积导致干燥速率加快,水分蒸发加速的同时也加剧了对蛋白质和总酚等热敏性营养成分的破坏<sup>[30]</sup>。

在同一切分方式下,干燥温度对羊肚菌复水比和营养成分均有显著影响( $P<0.05$ )。随干燥温度升高,复水比先下降后上升。这主要是因为干燥温度升高,表面组织结构硬化,阻碍水分渗透吸收<sup>[31]</sup>;但温度升至70℃时,表面破坏严重出现坍塌,水分易于进入组织内部,复水比

上升<sup>[32]</sup>。蛋白质质量分数、总酚质量分数和 DPPH 自由基清除率随干燥温度升高呈先上升后下降的趋势。50℃干燥时,多酚氧化酶未完全失活,导致酚类物质分解较多;60℃时,各项指标值较高,蛋白质质量分数、总酚质量分数、DPPH 自由基清除率分别为 24.46%,5.22%,75.42%;而 70℃时,因长时间高温导致蛋白质变性 & 酚类物质分解聚合,值分别降低至 20.96%,4.47%,68.94%。这可能是因为长时间高温使蛋白质易变性,酚类物质发生分解、聚合等反应,导致蛋白质质量分数和总酚质量分数降低<sup>[27]</sup>。

综上所述,最佳切分方式为整菇干燥,最佳干燥温度为 60℃,在此条件下,干燥时间为 240 min,  $D_{\text{eff}}$  为  $1.296\ 9\times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$ ,复水比为 2.31 g/g,蛋白质量分数为 26.97%,总酚质量分数为 5.32%,DPPH 自由基清除率为 78.07%。

表 5 不同热风干燥条件下羊肚菌的复水比、营养成分及抗氧化活性<sup>†</sup>

Table 5 Rehydration ratio, nutritional composition, and antioxidant activity of *Morchella esculenta* under different hot-air drying conditions

| 试验号 | 复水比/<br>( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 蛋白质量<br>分数/%                | 总酚质量<br>分数/%              | DPPH 自由<br>基清除率/%          |
|-----|------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1   | $2.31\pm 0.11^{\text{c}}$                | $26.97\pm 0.71^{\text{a}}$  | $5.32\pm 0.15^{\text{a}}$ | $78.07\pm 1.10^{\text{a}}$ |
| 2   | $2.41\pm 0.05^{\text{bc}}$               | $24.46\pm 0.46^{\text{b}}$  | $5.22\pm 0.16^{\text{a}}$ | $75.42\pm 1.22^{\text{a}}$ |
| 3   | $2.44\pm 0.10^{\text{bc}}$               | $22.80\pm 0.33^{\text{bc}}$ | $4.79\pm 0.10^{\text{b}}$ | $71.68\pm 1.00^{\text{b}}$ |
| 4   | $2.59\pm 0.03^{\text{ab}}$               | $21.78\pm 0.33^{\text{cd}}$ | $4.79\pm 0.11^{\text{b}}$ | $71.80\pm 0.80^{\text{b}}$ |
| 5   | $2.72\pm 0.04^{\text{a}}$                | $20.96\pm 1.14^{\text{d}}$  | $4.47\pm 0.06^{\text{c}}$ | $68.94\pm 1.15^{\text{c}}$ |

† 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

2.4 相关性分析

采用 Pearson 相关分析法评估复水比、蛋白质质量分数、总酚质量分数与 DPPH 自由基清除率间的关联性。由表 6 可知,羊肚菌的复水比、蛋白质质量分数、总酚质量分数及 DPPH 自由基清除率之间存在相关性。其中,复水比与蛋白质质量分数、总酚质量分数和 DPPH 自由基清除率呈

表 6 羊肚菌干片品质和抗氧化活性指标相关性分析

Table 6 Correlation analysis between quality attributes and antioxidant activity indices of dried *Morchella esculenta* slices

| 品质指标        | 复水比      | 蛋白质<br>量分数 | 总酚质<br>量分数 | DPPH 自由<br>基清除率 |
|-------------|----------|------------|------------|-----------------|
| 复水比         | 1.000 0  |            |            |                 |
| 蛋白质质量分数     | -0.830 9 | 1.000 0    |            |                 |
| 总酚质量分数      | -0.807 2 | 0.845 8    | 1.000 0    |                 |
| DPPH 自由基清除率 | -0.801 5 | 0.898 9    | 0.964 3    | 1.000 0         |

极显著负相关,主要归因于干燥过程中组织结构的不可逆损伤,追求过高的干燥效率往往以牺牲营养品质为代价。蛋白质量分数、总酚质量分数、DPPH 自由基清除率呈高度显著正相关。结果表明,在羊肚菌热风干燥过程中,蛋白质和总酚的共同变化是决定其最终抗氧化活性的关键。这与魏盟想等<sup>[33]</sup>在灵芝茸中的研究结论相互印证,说明在不同食用菌的干燥过程中,多酚等活性成分与抗氧化活性的紧密关联具有一定的普适性。

3 结论

与切分处理相比,采用整菇进行热风干燥能够在保证较高干燥效率的同时,更好地保留羊肚菌的营养品质及抗氧化活性,其中干燥温度为 60℃时所需干燥时间为 240 min。羊肚菌热风干燥过程主要包括加速和降速两个阶段,通过计算决定系数、均方根误差和误差平方和,得出 Page 模型能够很好地模拟羊肚菌热风干燥过程的水分变化规律( $R^2=0.980$ )。与切分处理相比,整菇干燥条件下的有效水分扩散系数( $1.296\ 9\times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$ )显著高于切分处理。选用整菇在 60℃下进行热风干燥,此时羊肚菌的蛋白质质量分数、总酚质量分数和 DPPH 自由基清除能力最高,分别为 26.97%,5.32%,78.07%,干燥时间(240 min)和复水比(2.31 g/g)均处于较理想水平。因此,可以采用整菇在 60℃下进行热风干燥,但对于该工艺下不同品种羊肚菌的干燥适应性及产业化应用中的能耗与经济性等问题,还需进一步研究探讨。

参考文献

[1] 龚频,王佳婷,龙辉,等.羊肚菌物理、化学保鲜方法及作用机制研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(24):312-320.  
Gong P, Wang J T, Long H, et al. Advance in physical and chemical preservation methods and mechanism of *Morchella esculenta*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(24): 312-320.  
[2] 张谦,许瀛引,董茜,等.不同羊肚菌菌株的子实体挥发性风味成分分析及其香气评价[J].菌物学报,2025,44(1):149-169.  
Zhang Q, Xu Y Y, Dong X, et al. Analysis and evaluation of volatile compounds in different fruiting bodies of different strains of *Morchella*[J]. Mycosystema, 2025, 44(1): 149-169.  
[3] 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):419-428.  
Tian J F, Shang Y H, Xiao Z N. Research progress on nutrient composition, function and processing of *Morels*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 419-428.  
[4] Tietel Z, Masaphy S. True morels (*Morchella*)-nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58 (11): 1 888-1 901.  
[5] 李贝贝,王慧琴,孙仪征.富硒羊肚菌多糖的制备及其体外抗

- 肿瘤活性探究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 213-222.
- Li B B, Wang H Q, Sun Y Z. Preparation of selenium-enriched *Morchella* polysaccharide and its antitumor activity *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 213-222.
- [6] Wan L, Zheng N C, Shomaila M, et al. Anti-inflammatory effects of *Morchella esculenta* polysaccharide and its derivatives in fine particulate matter-treated NR8383 cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 904-915.
- [7] 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.
- Ma J J, Dong M H, Quan X Y, 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, 2024, 40(20): 288-297.
- [8] 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 Y Z, Xie Y K, Wang F, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics of *Morchella*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 111-119.
- [9] 张越翔, 刘静, 吴小恬, 等. 食用菌干燥技术研究进展[J]. 中国果菜, 2022, 42(1): 24-33.
- Zhang Y X, Liu J, Wu X T, et al. Research progress on drying technology of edible fungus[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(1): 24-33.
- [10] 骆勇, 陈紫麟, 郭天敏, 等. 比较不同干燥工艺参数对大球盖菇和秀珍菇品质引起的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(4): 248-256.
- Luo Y, Chen Z L, Guo T M, et al. Comparison on the changes caused by different drying process parameters on the quality of *Stropharia rugosoannulata* and *Pleurotus geesteranus*[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 248-256.
- [11] 顾可飞, 周昌艳. 烘干对羊肚菌营养成分影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 47-51.
- Gu K F, Zhou C Y. Effects of drying on nutritional components of morel[J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 47-51.
- [12] 杨琴, 张晋铭, 杨斌, 等. 不同热风干燥技术对羊肚菌品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(2): 52-58.
- Yang Q, Zhang J M, Yang B, et al. Effects of different hot air drying techniques on quality of *Morchella*[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(2): 52-58.
- [13] 李果, 李承承, 王小娟, 等. 羊肚菌烘干工艺技术流程探索[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 181-183.
- Li G, Li C C, Wang X J, et al. Study on the drying technology process of *Morehella esculenta* (L.) Pers[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(14): 181-183.
- [14] 吴钊龙, 李欣慧, 蒙莉, 等. 3种微波干燥模式下板栗片的干燥特性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(17): 53-60, 177.
- Wu Z L, Li X H, Meng L, et al. Drying characteristics of chestnut slices under three microwave drying modes[J]. Food Research and Development, 2023, 44(17): 53-60, 177.
- [15] 吴钊龙, 林芳, 陈振林, 等. 蚕蛹热泵干燥特性及其动力学模型研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18): 1-6.
- Wu Z L, Lin F, Chen Z L, et al. Heat pump drying characteristics and kinetic modeling of silkworm pupa[J]. Food Research and Development, 2020, 41(18): 1-6.
- [16] 吴钊龙, 巫腾钰, 邱展鸿, 等. 基于干燥动力学结合 LF-NMR 分析的不同干燥过程中天麻切片水分变化[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(4): 433-444.
- Wu Z L, Wu T Y, Qiu Z H, et al. Determination of moisture changes in *Gastrodia elata* blume slices during different drying processes based on drying kinetics and LF-NMR analysis[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2023, 39(4): 433-444.
- [17] Huang D, Tao Y C, Li W, et al. Heat transfer characteristics and kinetics of *Camellia oleifera* seeds during hot-air drying [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2020, 12(3): 031017.
- [18] 陈家鼎, 李爱军, 耿宗泽, 等. 初烤烟叶干燥动力学与水分扩散特性分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(8): 2 269-2 278.
- Chen J D, Li A J, Di Z Z, et al. Analysis of drying dynamics and moisture diffusion characters of primary cured tobacco leaves[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(8): 2 269-2 278.
- [19] 吴钊龙, 林芳, 陈振林, 等. 蚕蛹变温压差膨化干燥特性及其动力学模型研究[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 88-95.
- Wu Z L, Lin F, Chen Z L, et al. Drying characteristics and kinetic modeling of silkworm pupa by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 88-95.
- [20] 李晓云, 谢荣华, 陈胜, 等. 干燥方式对香芋条干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 196-202.
- Li X Y, Xie R H, Chen S, et al. Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of taro strips[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 196-202.
- [21] 林芳, 吴钊龙, 韦忠宇, 等. 羊肚菌片微波干燥过程中水分变化及其品质分析[J]. 食品科学, 2025, 46(16): 313-321.
- Lin F, Wu Z L, Wei Z Y, et al. Moisture changes and quality analysis of *Morchella esculenta* slices during microwave drying[J]. Food Science, 2025, 46(16): 313-321.
- [22] Lee D Y, So J D, Jung H M, et al. Microwave drying characteristics of squash slices[J]. Korean Journal of Agricultural Science, 2018, 45(4): 847-857.
- [23] 黄纪民, 王溱兰, 邱展鸿, 等. 干燥方式对黄精片干燥特性和微观结构的影响[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(4): 445-451.

- Huang J M, Wang Z L, Qiu Z H, et al. Effects of drying methods on drying characteristics and microstructure of *Polygonatum kenzanum* coll. et hemsl. slices[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2023, 39(4): 445-451.
- [24] 黄敏, 甘婷, 易萍, 等. 芒果切片热风干燥特性及模型[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 179-186, 209.
- Huang M, Gan T, Yi P, et al. Hot air drying characteristics and model of Mango slices[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 179-186, 209.
- [25] 黄纪民, 吴钊龙, 李浩, 等. 西林火姜片微波间歇干燥特性及品质变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 61-70.
- Huang J M, Wu Z L, Li H, et al. Intermittent microwave drying characteristics and quality changes of Xilin fire ginger slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 61-70.
- [26] 楚文靖, 邵海燕, 钟华玲, 等. 切分方式对蓝莓热风干燥特性及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2): 270-279.
- Chu W J, Gao H Y, Zhong H L, et al. Effects of cutting method on hot-air drying characteristics and quality of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2): 270-279.
- [27] 方良材, 吴钊龙, 刘梦姣, 等. 牛大力切片热风干燥特性及其动力学模型建立[J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1 683-1 691.
- Fang L C, Wu Z L, Liu M J, et al. Hot-air drying characteristics of *Millettia speciosa* champ. slice and establishment of the kinetic model[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(6): 1 683-1 691.
- [28] 杨伊琳, 丁俊雄, 吴小华, 等. 香菇热风干燥特性及动力学模型[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 135-144.
- Yang Y L, Ding J X, Wu X H, et al. Characteristics of *Lentinus edodes* hot-air drying and its kinetic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 135-144.
- [29] 陈建福, 汪少芸, 林梅西. 白玉菇中短波红外干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 46-53.
- Chen J F, Wang S Y, Lin M X. Drying characteristics and kinetics model of white *Hypsizygus marmoreus* with medium and short wave infrared radiation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(1): 46-53.
- [30] 袁林, 梁旭娟, 程瑞华, 等. 高静压和热预处理对真空冷冻干燥重组果蔬块品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 201-209.
- Yuan L, Liang X J, Cheng R H, et al. Effects of high hydrostatic pressure versus thermal pretreatment on the quality of vacuum freeze-dried reconstituted fruit and vegetable cubes [J]. Food Science, 2024, 45(5): 201-209.
- [31] Li X L, Liu J, Cai J X, et al. Drying characteristics and processing optimization of combined microwave drying and hot air drying of *Termitomyces albuminosus* mushroom[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): e16022.
- [32] 李湘利, 王婷, 王贝贝, 等. 不同干燥温度和切片厚度对黑蒜热风干燥特性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 144-152.
- Li X L, Wang T, Wang B B, et al. Effects of different drying temperature and slice thickness on hot air drying characteristics and quality of black garlic[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 144-152.
- [33] 魏盟想, 贺黎铭, 罗舒, 等. 不同干燥方式下灵芝茸干燥特性和品质的比较[J]. 现代食品科技, 2025, 41(11): 222-230.
- Wei M X, He L M, Luo S, et al. Comparison of the drying characteristics and quality of baby *Ganoderma lucidum* dried by different drying methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 222-230.