

## 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质

段 续, 刘文超, 任广跃, 庞玉琪, 刘云宏

(河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023)

**摘 要:** 为获得干燥时间短、产品质量高的蘑菇制品, 采用微波冷冻干燥技术对双孢菇进行干燥处理, 研究其在不同微波比功率 (0.25, 0.5, 0.75 W/g) 和系统压强 (50, 100, 150 Pa) 下的干燥曲线、有效水分扩散系数、复水比、收缩率、白度、维生素 C 保存率、能耗及基于模糊数学推理法下感官评定的变化规律; 通过非线性拟合建立了适用于双孢菇微波冷冻干燥的数学模型; 基于干燥能耗、干燥时间及部分品质指标对不同条件下双孢菇微波冷冻干燥过程进行加权综合评价。结果表明: 微波比功率对干燥速率及干制品物理品质指标影响比其他指标的影响更显著 ( $P<0.05$ ); 系统压强对干制品营养含量指标、干燥能耗以及感官评定的影响比干燥特性的影响显著 ( $P<0.05$ ); 采用 Henderson and Pabis 模型能够准确 ( $R^2>0.9$ ) 描述干燥过程中水分变化规律; 双孢菇有效水分扩散系数在  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  数量级且受微波比功率影响更明显 ( $P<0.05$ ); 微波比功率和系统压强过高会造成双孢菇干制产品不被消费者接受; 当微波比功率和系统压强分别为 0.25 W/g 和 100 Pa 时双孢菇微波冷冻干燥的综合评分值最高为 0.67847, 该条件较适合应用于双孢菇微波冷冻干燥中。研究探索了不同微波冷冻干燥条件下双孢菇干燥及品质特性的变化规律, 为双孢菇微波冷冻干燥较优工艺参数组合的选择提供了理论依据。

**关键词:** 干燥; 模型; 品质控制; 双孢菇; 微波冷冻干燥

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.042

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0295-08

段 续, 刘文超, 任广跃, 庞玉琪, 刘云宏. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295—302. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.042 http://www.tcsae.org

Duan Xu, Liu Wenchao, Ren Guangyue, Pang Yuqi, Liu Yunhong. Drying characteristics and quality of button mushrooms during microwave freeze drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 295—302. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.042 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

双孢菇 (*Agaricus bisporus*) 含有丰富的蛋白质、矿物质, 并且脂肪含量少、能量低, 是一种理想的健康食品<sup>[1]</sup>, 它的一些生化特性, 也使其备受保健行业的关注<sup>[2-3]</sup>。中国双孢菇年产量达 250 万 t, 占世界双孢菇总产量的 70%<sup>[4]</sup>。双孢菇含水率高, 采摘后在自然环境下仅能保鲜 24 h 左右<sup>[5]</sup>。采用干制加工, 能够延长其保存期, 便于贮藏和运输, 对缓解产销矛盾具有重要意义<sup>[6]</sup>。在中国, 对流干燥是蘑菇干制品加工中较常见的干燥方式, 但是由于其干燥时间长, 易发生表面过热现象, 使得双孢菇产品的颜色变暗, 风味丢失, 复水性差<sup>[7]</sup>。相对于其他干燥方式, 冷冻干燥能够获得颜色好, 营养损失少, 复水能力高的产品, 但是这种干燥方式耗时、耗能, 不适合工业大规模生产<sup>[8]</sup>。将微波作为冷冻干燥的热源能明显降低冷冻干燥所需的时间和加工成本<sup>[9-11]</sup>。这种干燥方式称为微波冷冻干燥 (microwave freeze drying, MFD) <sup>[12]</sup>。

将微波冷冻干燥应用于高品质双孢菇制备的研究, 始于近几年。Duan Xu 等<sup>[13]</sup>对比了双孢菇 3 种不同升华干燥方式的干燥效果和干燥效率, 结果发现微波冷冻干燥得到的双孢菇干制品的品质与冷冻干燥所得产品相当, 但能耗却远低于冷冻干燥。Guang Yue Ren 等<sup>[14]</sup>研究了双孢菇玻璃化转变温度在微波冷冻干燥中的变化规律, 并测定了双孢菇微波冷冻干燥击穿放电发生时的临界微波比功率, 发现在整个干燥过程中直到双孢菇含水率低于 20% 时, 产品的平均温度才低于玻璃化转变温度, 这说明在干燥的大部分时间里双孢菇均处于橡胶态, 而且当压强在 67 Pa 左右时临界微波比功率达到最低值约为 3~4 W/g, 当微波系统压强大于 100 Pa 时随着压强的增大临界微波比功率趋于稳定, 但都在 5.5~6 W/g 之间。虽然已经有了一些关于微波冷冻干燥在双孢菇上应用的报道, 但是目前未见对双孢菇微波冷冻干燥工艺特性深入研究的报道。本文研究了双孢菇微波冷冻干燥过程中的干燥特性, 并通过部分品质指标探讨各干燥参数对双孢菇品质的影响, 以期微波冷冻干燥技术在高品质双孢菇干制品工业生产上的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材 料

双孢菇购于河南省洛阳市丹尼斯超市, 所选双孢菇外形完整, 无褐变, 置于 5℃ 的冰箱内冷藏备用。采用

收稿日期: 2016-01-07 修订日期: 2016-04-17

基金项目: 国家自然科学基金 (U1204332, 31271972, 31201399); 河南省高校科技创新人才支持计划 (14HASTII023); 河南省高校科技创新团队支持计划 (16IRTSTHN009); 河南科技大学研究生创新基金项目 (CXJJ-2015-ZR15)

作者简介: 段 续, 男, 教授, 博士, 主要从事农产品干燥技术与设备研究。洛阳 河南科技大学食品与生物工程学院, 471023。Email: duanxu\_dx@163.com

105 ℃烘箱法测得所购双孢菇的初始湿基含水率为 90.22%~91.37%。

## 1.2 仪器与设备

所用的微波冷冻干燥机由段续等<sup>[13]</sup>设计, 南京亚泰微波能研究所组装生产, 其结构示意图如图 1, 详细结构及性能介绍见文献[13]; 102-2 型电热鼓风干燥箱(北京科伟永兴仪器有限公司); X-rite Color I5 型色差计(美国爱色丽公司); JA-2003N 型电子天平(上海佑科仪器仪表有限公司); BCD-565WT/B 型电冰箱(北京海信电器有限公司); HH-S4 型电热恒温水浴锅(北京科伟永兴仪器有限公司); DT862-4 型三相四线电表(上海华立仪器仪表有限公司)。

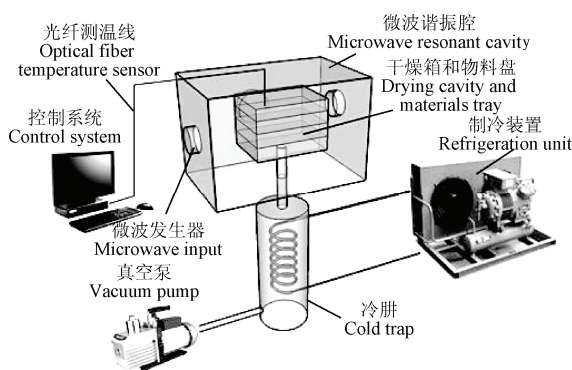


图 1 微波冷冻干燥机简图

Fig.1 Schematic diagram of microwave freeze dryer

## 1.3 方法

### 1.3.1 物料预处理

双孢菇预处理采用 Guang Yue Ren 等<sup>[4]</sup>的方法, 干燥试验前, 将双孢菇清洗干净, 切成约 5 mm×50 mm×15 mm (厚×长×宽) 的薄片, 在-25 ℃下冻结 8 h<sup>[13]</sup>, 用于微波冷冻干燥试验。

### 1.3.2 试验设计

将蘑菇片平铺于干燥箱多孔物料盘内, 每盘放入 2 kg 蘑菇片。将微波冷冻干燥机冷阱温度设定为-40 ℃, 进行以下 5 组干燥试验: 1) 固定系统压强为 100 Pa, 改变微波比功率 (0.25, 0.50, 0.75 W/g); 2) 固定微波比功率为 0.50 W/g, 改变系统压强 (50, 100, 150 Pa)。干燥过程中, 每隔 0.5 h 将物料盘取出称量, 记录数据后迅速放回继续干燥, 直至物料湿基含水率低于 5% 时, 干燥结束。每组干燥试验重复操作 3 次。

### 1.3.3 样品含水率测定

双孢菇样品含水率采用 GB/T 5009.3-2003 中的直接干燥法<sup>[14]</sup>。

### 1.3.4 干燥过程中物料湿基含水率测定

微波冷冻干燥过程中物料湿基含水率按式 (1) 计算

$$\omega_t = \frac{m_t - m_0(1 - \omega_0)}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\omega_t$ 、 $\omega_0$  分别为在任意干燥  $t$  时刻物料湿基含水率和物料的初始湿基含水率, %;  $m_t$ 、 $m_0$  分别为在任意干燥  $t$  时刻的质量和物料初始质量, g。

### 1.3.5 有效水分扩散系数测定

不同干燥时间双孢菇的水分比 (moisture ratio, MR) 按式 (2) 计算<sup>[15]</sup>

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

式中  $M_0$ 、 $M_e$ 、 $M_t$  分别为初始干基含水率、干燥到平衡时的干基含水率、在任意干燥  $t$  时刻干基含水率, g/g。  $M_e$  相对于  $M_0$  和  $M_t$  来说很小可近似为 0。因此, 式 (2) 可以改写为

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

试验所用蘑菇片的厚度远小于其直径, 所以可把蘑菇片看作大平板, 其水分扩散特性为一维轴向扩散。因此, 根据 Fick 第二扩散定律 MR 可采用式 (4) 计算<sup>[16]</sup>

$$MR = \frac{M_t}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

式中  $D_{eff}$  为有效水分扩散系数,  $m^2/s$ ;  $L$  为物料厚度的一半, m;  $t$  为干燥时间, s;  $M_0$  为初始干基含水率, g/g;  $M_t$  为在任意干燥  $t$  时刻的干基含水率, g/g;  $n$  为组数, 本试验干燥时间足够长, 因此, 可将其视为 0<sup>[17]</sup>。故

$$MR = \frac{8}{\pi^2} - \exp\left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

将 (5) 式两端取自然对数得

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (6)$$

由公式 (6) 可以看出,  $\ln MR$  与时间  $t$  呈线性关系, 有效水分扩散系数 ( $D_{eff}$ ) 可由其斜率求出<sup>[18]</sup>。

干基含水率与湿基含水率按式 (7) 转换

$$M = \frac{\omega}{1 - \omega} \quad (7)$$

式中  $M$  和  $\omega$  分别表示物料干基含水率和湿基含水率。

### 1.3.6 干燥模型及拟合

采用式 (8) — (11) 干燥模型对双孢菇微波冷冻干燥过程中水分比与时间之间的关系进行拟合<sup>[19]</sup>

Lewis (Newton) 模型

$$MR = \exp(-kt) \quad (8)$$

Page 模型

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (9)$$

Henderson and Pabis 模型

$$MR = a \exp(-kt) \quad (10)$$

Logarithmic 模型

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (11)$$

式 (8) — (11) 中 MR 为水分比;  $t$  为干燥时间, h;  $a$ ,  $k$ ,  $n$ ,  $c$  分别为各模型中的待定系数, 可由 Origin pro 8.5 软件拟合得到。

### 1.3.7 品质指标测定

复水比测定: 将不同干燥条件下得到的双孢菇干制品浸泡在 25 ℃ 的蒸馏水中 10 min, 捞出沥干, 称量。复

水比 (rehydration ratio, RR) 采用式 (12) 计算

$$RR=W_r/W_d。$$
 (12)

式中  $W_d$  和  $W_r$  分别代表复水前后双孢菇干制品的质量, g。

收缩率测定: 收缩率 (shrinkage ratio, SR) 采用 Duan Xu<sup>[13]</sup> 等的方法, 以式 (13) 计算

$$SR=\frac{V}{V_0}。$$
 (13)

式中  $V$  和  $V_0$  分别代表不同干燥条件下双孢菇的体积和新鲜双孢菇的体积,  $m^3$ 。

白度测定: 使用 X-rite Color I5 型色差计测定不同干燥条件下双孢菇的  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  值。其中  $L^*$  表示产品颜色黑 (值为 0) 和白 (值为 100) 的程度;  $a^*$  表示产品颜色红 (正值) 和绿 (负值) 的程度;  $b^*$  表示产品颜色黄 (正值) 和蓝 (负值) 的程度。白度 (whiteness index, WI) 值采用式 (14) 计算<sup>[20]</sup>

$$WI=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}}。$$
 (14)

维生素 C 保存率计算: 维生素 C 含量采用 2, 6-二氯酚靛酚滴定法<sup>[20]</sup>测定, 每组试验重复 3 次。维生素 C 保存率用式 (15) 计算

维生素C保存率=  
$$\frac{\text{不同干燥条件下干制品所含维生素C的质量分数}}{\text{新鲜原料所含维生素C的质量分数}}\times 100\%。$$
 (15)

1. 3. 8 能耗测定及加权综合评价方法

不同干燥条件下双孢菇微波冷冻干燥消耗总能量通过电表测定, 则不同干燥条件下双孢菇微波冷冻干燥能耗以去除 1 kg 水分所消耗的能量 (kJ/kg) 表示<sup>[13]</sup>。

加权综合评价参考巨浩羽<sup>[21]</sup> 等的方法, 结合本试验, 选取干燥时间、干燥能耗、复水比、白度以及维生素 C 保存率为评价指标, 对不同条件下双孢菇微波冷冻干燥过程进行加权综合评价, 通过层次分析法<sup>[22]</sup>, 得出与干燥时间、干燥能耗、复水比、白度以及维生素 C 保存率相对应的权重分别为: 0.20、0.20、0.10、0.25、0.25。

1. 3. 9 基于模糊数学推理法的感官评定

感官评定参考 Duan X<sup>[23]</sup> 等的方法, 挑选 10 名身体健康, 无吸烟等不良生活习惯的评定员, 以“非常喜欢”、“喜欢”、“中立意见”、“不喜欢”、“非常不喜欢”为评价语, 以干制品“颜色”、“外观”、“质地”、“风味”、“整体接受程度”为评价指标, 按表 1 所列评价标准对不同干燥条件下得到的双孢菇干制品进行感官评价。由于食品的颜色、外观、质地、风味、整体接受程度等评价指标在描述上很难划分出清晰的界限, 不同评定人员对同一原料可能因评定界限不同得出不同的结论, 这样的结论具有一定的模糊性, 而应用模糊数学的方法可以对这些属性进行数学化的描述和处理。试验中模糊数学推理采取 S Mukhopadhyay 等<sup>[24]</sup> 的方法。与各评价指标对应的权重集  $X=\{\text{颜色, 外观, 质地, 风味, 整体接受程度}\}=\{0.27, 0.25, 0.15, 0.13, 0.20\}$ 。

表 1 双孢菇感官评价标准  
Table 1 Sensory evaluation standards of button mushroom

评价指标 Subject factors	评语 Comments				
	非常喜欢 Like very much	喜欢 Like	中立意见 Neutral	不喜欢 Dislike	非常不喜欢 Dislike very much
颜色 Color	亮白 Bright	白 White	暗 Dark	浅褐色 Light brown	深褐色 Dark brown
外观 Appearance	无皱缩 No shrinkage	轻微皱缩 Slight shrinkage	明显皱缩 Obviously shrinkage	严重皱缩、无裂纹 Severe shrinkage, no crack	严重皱缩、有裂纹 Severe shrinkage, with crack
质地 Texture	细腻 Delicate taste	清脆 Crispy	有弹性 Springy	软 Soft	粗糙有丝状物残留 Rough with filamentous residues
风味 Flavor	新鲜、甜味 Fresh and sweet	新鲜、有较弱甜味 Fresh and little sweet	鲜味 Fresh	苦味 Bitterness	严重苦味 Severe bitterness
整体接受程度 Overall acceptability	优秀 Excellent	良好 Good	能够接受 Can accept	勉强接受 Accept reluctantly	拒绝接受 Refuse to accept

1. 3. 10 统计分析

采用 Origin pro 8.5 (美国 Origin Lab 公司) 对试验数据进行线性/非线性拟合, 并分析其拟合度; 使用 DPS 7.05 对试验数据进行方差分析, 试验中显著水平定为  $P<0.05$ 。每组试验重复 3 次, 取其平均值进行各指标统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同干燥条件对双孢菇干燥特性的影响

不同微波比功率和系统压强下双孢菇微波冷冻干燥曲线如图 2 所示。在压强为 100 Pa, 微波比功率为 0.25, 0.50, 0.75 W/g 条件下, 双孢菇干燥至终点所用的时间分别为 9.5、7 和 5 h。微波比功率为 0.75 W/g 时的干燥时间比微波比功率为 0.25 W/g 时缩短了 47.37%。这说明提高微波加载比功率能够提升干燥速率进而缩短干燥时

间。但是功率过高会引起微波真空状态下击穿放电现象的发生, 不利于双孢菇的微波冷冻干燥<sup>[23]</sup>, 根据之前的研究, 一般当系统压强在 100 Pa 时微波比功率不易超过 6 W/g<sup>[4]</sup>。当微波比功率为 0.50 W/g, 系统压强为 50, 100, 150 Pa 条件下, 双孢菇干燥所需的时间分别为 6, 7 和 7.5 h。压强为 50 Pa 时的干燥时间比压强为 150 Pa 时缩短了 20%。对比微波比功率和压强对双孢菇干燥时间的影响可以发现, 微波比功率的影响更为显著 ( $P<0.05$ )。S.K. Giri 等<sup>[25]</sup> 在研究蘑菇微波真空和对流热风干燥时同样发现, 微波比功率对蘑菇微波真空干燥的影响比真空度更明显 ( $P<0.05$ )。在实际生产中, 虽然真空度越高 (即: 系统压强越低), 水的沸点温度越低, 越容易蒸发, 但干燥时消耗的能量也会越多, 双孢菇干制品的生产成本也随之增加。

图 2 显示双孢菇微波冷冻干燥曲线有 2 个明显不同的阶段：含水率快速下降阶段（约占整个干燥时间的 55%），以及之后的含水率下降平缓阶段。Duan Xu<sup>[13]</sup> 等在对比研究双孢菇不同升华干燥时，发现在微波冷冻干燥过程中大约 55%的时间里水分是通过升华的方式去除的；而之后的水分是以蒸发为主，升华为辅的方式去除的，且水分蒸发需要将液态水迁移至物料表面，这使得双孢菇水分去除速率下降。含水率这一结果可以用来解释双孢菇微波冷冻干燥曲线呈现出不同下降阶段的现象。为了更加清楚地探究双孢菇微波冷冻干燥过程中水分变化的过程，采用 4 种常见的干燥模型对试验数据进行拟合（表 2）。通过 Origin-pro 8.5 非线性拟合发现，当采用 Henderson and Pabis 模型时，各干燥曲线的  $R^2$  值最大（如表 2 所示），且都大于 0.9，表现出较好的拟合，这意味着，可以采用 Henderson and Pabis 模型来描述双孢菇微波冷冻干燥过程中水分变化规律。

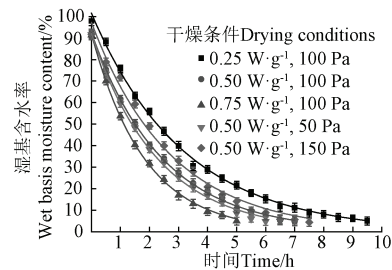


图 2 不同干燥条件下双孢菇的干燥曲线  
Fig.2 Drying curves of button mushroom under different drying conditions

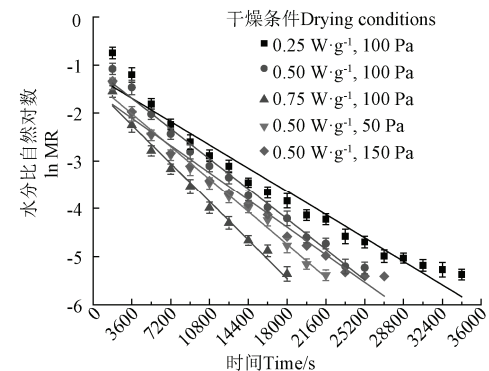
表 2 不同干燥条件下水分比和水分比自然对数随干燥时间变化的拟合结果

Table 2 Model fitting results of MR and lnMR vs drying time				
干燥条件 Drying conditions	模型方程 Model equations	模型参数 Model parameter		决定系数 $R^2$
		$a$	$b$	
0.25 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	MR= $a \exp(-bt)$	101.56	0.31	0.9681
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa		92.44	0.41	0.9911
0.75 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa		91.97	0.55	0.9825
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 150 Pa		92.04	0.44	0.9762
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 50 Pa		97.24	0.37	0.9901
0.25 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	lnMR= $a+b \cdot t$	-1.21	$-1.35 \times 10^{-4}$	0.9544
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa		-1.06	$-1.75 \times 10^{-4}$	0.9848
0.75 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa		-1.45	$-2.23 \times 10^{-4}$	0.9823
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 150 Pa		-1.33	$-1.90 \times 10^{-4}$	0.9876
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 50 Pa		-1.54	$-1.59 \times 10^{-4}$	0.9723

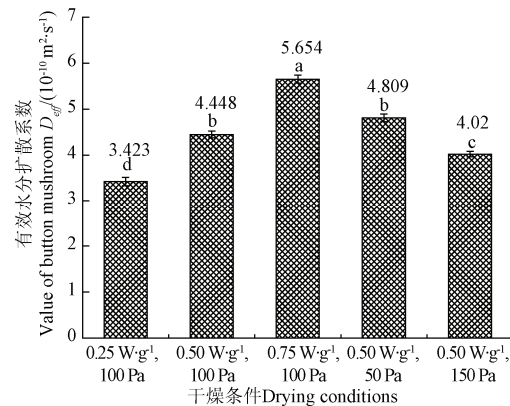
注：MR 为水分比； $a, b$  为模型参数； $t$  为干燥时间。  
Note: MR is moisture ratio;  $a, b$  is model parameter;  $t$  is drying time.

由表 2 可知，不同干燥条件下双孢菇水分比自然对数 lnMR 随时间变化规律拟合曲线的  $R^2$  均大于 0.9，表现出较好的拟合，这说明通过计算其斜率能够准确地得到双孢菇微波冷冻干燥过程中的有效水分扩散系数。图 3a 显示了不同干燥条件下双孢菇干燥水分比的自然对数 lnMR 随干燥时间的变化规律及其有效水分扩散系数，由图可知双孢菇微波冷冻干燥过程中的有效水分扩散系数在  $3.423 \times 10^{-10} \sim 5.654 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  之间，均属于  $10^{-10}$  数量

级，这符合一般食品原料干燥有效水分扩散系数  $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  的范围<sup>[15]</sup>。通过图 3b 可以发现在压强为 100 Pa，微波比功率为 0.25, 0.50 和 0.75 W/g 条件下，双孢菇有效水分扩散系数分别为  $3.423 \times 10^{-10}$ ,  $4.448 \times 10^{-10}$  和  $5.654 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ，最高值比最低值提升了 64.74%；在微波比功率为 0.50 W/g，系统压强为 50, 100, 150 Pa 条件下，双孢菇有效水分扩散系数分别为  $4.809 \times 10^{-10}$ ,  $4.448 \times 10^{-10}$ ,  $4.020 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ，最高值比最低值提升了 19.63%。以上分析说明，增加微波比功率和降低系统压强均可以强化双孢菇微波冷冻干燥过程中的传热传质行为，从而提高双孢菇的有效水分扩散系数，但微波对有效水分扩散系数提升的影响更明显 ( $P < 0.05$ )。这一现象也是增加微波比功率和降低系统压强都可以减少干燥时间，且微波对干燥时间影响较为显著 ( $P < 0.05$ ) 的原因。



a. lnMR 随干燥时间的变化规律  
a. Change tendency of lnMR vs drying time



b. 有效水分扩散系数图  
b.  $D_{eff}$  value of button mushroom

图 3 不同干燥条件下双孢菇干燥水分比自然对数随干燥时间的变化规律及其有效水分扩散系数

Fig.3 Change tendency of lnMR vs drying time and  $D_{eff}$  value of button mushroom under different drying conditions

2.2 不同干燥条件对双孢菇品质特性的影响

表 3 给出了不同干燥条件下双孢菇干制品的复水比、收缩率、白度和维生素 C 保存率的结果。固定压强，随着微波比功率的增加，产品的复水比和收缩率在不断地降低且复水比和收缩率的最低值比最高值分别降低了 25.81% 和 16.90%。同样的，固定微波比功率，随着系统压强的升高，产品的复水比和收缩率表现出下降的趋势，



但复水比和收缩率的最低值比最高值分别降低了 4.72% 和 4.41%，其降低率小于改变微波比功率相应指标的降低率。以上结果说明改变微波比功率和系统压强对复水比和收缩率均会产生影响，但微波对其影响程度更显著 ( $P<0.05$ )。可能的原因是，在食品物料升华干燥过程中，水分以气态形式去除，从而避免了由于水分迁移而引起的应力收缩现象的发生，因此升华干燥能够比蒸发干燥更好保护物料内部结构；在微波冷冻干燥过程中，当微波比功率和系统压强过高时，双孢菇内的水分子以蒸发方式扩散的比较多，导致双孢菇的内部结构破损较大，从而造成产品收缩率下降，收缩程度加重，复水比减小<sup>[26]</sup>。

从表 3 中可以看出，当固定系统压强，微波比功率在 0.75 W/g 时干燥最终产品的白度比微波比功率为 0.25 W/g 时下降了 28.14%，这表明增加微波比功率会造成褐变反应的加剧；降低系统压强同样使得双孢菇产品的白度值降低，当固定微波比功率，系统压强为 50 Pa 时双孢菇的白度值比系统压强为 150 Pa 时降低了 13.90%，其降低率小于改变微波比功率相应指标的降低率。维生素 C 保存率是衡量蘑菇产品品质的重要指标之一，由表 3 可得，改变微波比功率维生素 C 保存率的最低值比最高值下降了 18.17%，而改变系统压强维生素 C 保存率的最低值比最高值降低了 37.06%，这表明系统压强对维生素 C 保存率的影响比微波比功率的影响显著 ( $P<0.05$ )。食品物料褐变包括酶促褐变和非酶褐变 2 种方式。酶促褐变主要与物料内部酶活性相关，非酶褐变主要由物料内部成分降解引起，如维生素 C 的降解。当物料处于微波比功率大、真空度高的条件下其表面温度高且水分下降快，导致酶促褐变发生；然而，当物料在高微波加载，低真空度情况下，其表面的温度及接触的氧气含量较高，导致维生素 C 降解。对比双孢菇干制品的白度与维生素 C 保存率变化规律可以说明，在双孢菇微波冷冻干燥过程中主要发生的是酶促褐变。Barbara, S.等<sup>[27]</sup>在研究苹果热风干燥时得到苹果的褐变规律与本文的相似；在 Yunhong Liu 等<sup>[28]</sup>用氮气作为空气置换介质研究胡萝卜气调热泵干燥特性时发现当干燥温度较低、氮气填充量较大时，胡萝卜维生素 C 保存率较高，这同本研究的结果相似。另一方面，对比表 3 中各品质指标在改变微波比功率和系统压强中呈现出的趋势表明，微波在双孢菇微波冷冻干燥过程中对其物理品质指标如颜色，形状等的影响较大，而压强对于其维生素 C 营养含量指标的影响较大。

表 3 不同干燥条件下双孢菇干制品的品质特性

Table 3 Quality characteristics of button mushroom dried products under different drying conditions

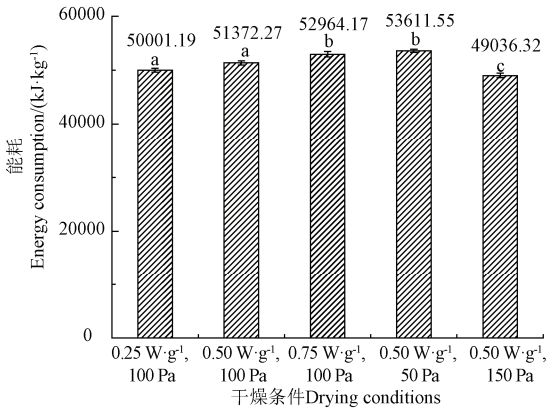
干燥条件 Drying conditions	复水比 RR	收缩率 SR	白度 WI	维生素 C 保存率 Vitamin C retention ratio/%
0.25 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	5.27±0.047a	0.71±0.017b	66.31±0.081a	59.34±0.058c
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	4.51±0.056c	0.67±0.031ab	56.58±0.052b	53.7±0.042b
0.75 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	3.91±0.015d	0.59±0.028a	47.65±0.037d	48.56±0.044d
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 150 Pa	4.66±0.036b	0.68±0.063b	50.69±0.051c	67.25±0.052a
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 50 Pa	4.44±0.024c	0.65±0.012c	58.88±0.047b	42.33±0.019d

注：不同字母 a、b、c、d 表示不同干燥条件下差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different letters of a, b, c, d indicate a significant difference ( $P<0.05$ ).

2.3 不同条件下双孢菇微波冷冻干燥能耗对比及加权综合评价

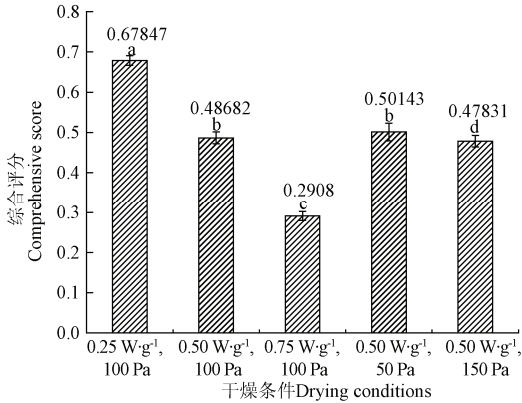
不同条件下双孢菇微波冷冻干燥能耗如图 4a 所示。当固定系统压强为 100 Pa，微波比功率为 0.25 W/g 时能耗值比微波比功率为 0.75 W/g 时的能耗值降低了 5.59%；当固定微波比功率为 0.5 W/g，系统压强为 150 Pa 时能耗值比系统压强为 50 Pa 时的能耗值降低了 8.53%。这意味着降低微波比功率和增加系统压强均能降低干燥能耗，但改变系统压强对能耗的影响程度更大 ( $P<0.05$ )。

由图 4b 各干燥条件综合评分值可知，提升微波比功率虽然能够减少干燥时间，但物料在高微波比功率的条件下颜色变暗、收缩加重、内部结构破坏严重，而降低系统压强虽然能在提升蘑菇品质方面有优势，但增加了干燥成本。在微波比功率为 0.25 W/g，系统压强为 100 Pa 条件下综合评分值最高为 0.67847。



a. 双孢菇微波冷冻干燥能耗图

a. Energy consumption of microwave freeze drying of button mushrooms



b. 加权综合评分值图

b. Comprehensive score of button mushrooms

图 4 不同条件下双孢菇微波冷冻干燥能耗和加权综合评分值

Fig.4 Energy consumption and comprehensive score of button mushrooms dried under different drying conditions

2.4 基于模糊数学推理法的感官评定

各评价员对不同干燥条件下得到的蘑菇干制品评价结果如表 4 所示。系统压强为 100 Pa，微波比功率为 0.25 W/g 时感官评价最终输出模糊集为  $Y_1=\{0.27, 0.15, 0.1, 0.13, 0\}$ ，对  $Y_1$  进行归一化处理得  $Y_1'=\{0.415, 0.231, 0.154, 0.2, 0\}$ 。同样的方法得到固定系统压强，改变微波比功率为 0.50, 0.75 W/g 时输出的归一化模糊集分别

为  $Y_2'=\{0.139, 0.208, 0.375, 0.278, 0.278\}$ ;  $Y_3'=\{0.149, 0.149, 0.299, 0.403, 0.299\}$ ; 同理, 固定微波比功率, 改变系统压强为 50, 150 Pa 时输出的归一化模糊集分别为  $Y_4'=\{0.230, 0.310, 0.230, 0.230, 0\}$ ;  $Y_5'=\{0.167, 0.167, 0.333, 0.333, 0.450\}$ 。由以上计算可以看出, 干燥条件为 0.25 W/g, 100 Pa; 0.5 W/g, 100 Pa; 0.75 W/g, 100 Pa; 0.5 W/g, 50 Pa 和 0.5 W/g, 150 Pa 时, 其对应模糊矩阵中的峰值分别为 0.415, 0.375, 0.403, 0.310 和 0.450, 且各峰值分别为相应归一化模糊集中的第 1, 第 3, 第 4, 第 2, 第 5 个数值, 对比表 4 中各评语顺序 (非常喜欢、

喜欢、中立意见、不喜欢、非常不喜欢) 能够发现, 各干燥条件对应的感官评语依次为 “非常喜欢”、“中立意见”、“不喜欢”、“喜欢” 和 “非常不喜欢”。由此可以看出随着微波比功率和系统压强的增加, 产品的接受程度降低, 且系统压强对感官评价的影响较大。此外, 在微波冷冻干燥过程中微波比功率及系统压强过高会造成干制产品不被消费者接受。对比图 4b 可以发现感官评价结果与综合加权评分结果一致。因此, 在试验范围下, 微波比功率为 0.25 W/g, 系统压强为 100 Pa 的干燥条件较适合应用于双孢菇微波冷冻干燥中。

表 4 不同干燥条件下双孢菇干制品感官评定统计  
Table 4 Panel responses for preference of each dried product obtained under different drying conditions

干燥条件 Drying conditions	评价指标 Subject factors	各评语人数统计 Population statistics					总人数 Total
		非常喜欢 Like very much	喜欢 Like	中立意见 Neutral	不喜欢 Dislike	非常不喜欢 Dislike very much	
0.25 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	颜色 Color	8	1	1	0	0	10
	外观 Appearance	9	1	0	0	0	10
	质地 Texture	8	2	0	0	0	10
	风味 Flavor	8	0	0	2	0	10
	整体接受程度 Overall acceptability	8	1	0	1	0	10
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	颜色 Color	1	1	7	1	0	10
	外观 Appearance	0	1	5	2	2	10
	质地 Texture	1	3	5	1	0	10
	风味 Flavor	0	2	6	1	1	10
	整体接受程度 Overall acceptability	1	1	7	0	1	10
0.75 W·g <sup>-1</sup> , 100 Pa	颜色 Color	0	1	1	8	0	10
	外观 Appearance	1	0	0	7	2	10
	质地 Texture	1	0	2	5	2	10
	风味 Flavor	1	1	1	6	1	10
	整体接受程度 Overall acceptability	0	0	2	7	1	10
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 150 Pa	颜色 Color	1	5	2	2	0	10
	外观 Appearance	2	7	0	1	0	10
	质地 Texture	0	6	3	1	0	10
	风味 Flavor	3	5	1	1	0	10
	整体接受程度 Overall acceptability	3	7	0	0	0	10
0.50 W·g <sup>-1</sup> , 50 Pa	颜色 Color	0	1	2	2	5	10
	外观 Appearance	0	0	2	1	7	10
	质地 Texture	0	0	1	1	8	10
	风味 Flavor	0	1	1	1	7	10
	整体接受程度 Overall acceptability	1	1	1	2	5	10

3 结 论

- 1) 微波比功率和系统压强对双孢菇微波冷冻干燥速率均有影响, 但微波比功率的影响显著 ( $P<0.05$ );
- 2) 采用 Henderson and Pabis 模型能够准确 ( $R^2>0.9$ ) 描述双孢菇微波冷冻干燥过程中水分变化规律, 且双孢菇微波冷冻干燥中有效水分扩散系数为  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s 数量级, 微波比功率对有效水分扩散系数的影响更明显 ( $P<0.05$ );
- 3) 微波对双孢菇干制品的物理品质指标 (白度、复水率、收缩率) 的影响显著 ( $P<0.05$ ), 系统压强对营养含量指标 (维生素 C 保存率)、感官评价以及干燥能耗的影响比微波比功率对相应指标的影响更显著 ( $P<0.05$ );

- 4) 微波冷冻干燥过程中微波比功率及系统压强过高会造成干制产品不被消费者接受。
- 5) 通过对干燥时间、干燥能耗、复水比、白度以及维生素 C 保存率进行加权综合评价, 发现试验范围下, 微波比功率和系统压强分别为 0.25 W/g 和 100 Pa 时综合评分值最高为 0.67847, 该条件较适合双孢菇微波冷冻干燥。

[参 考 文 献]

[1] Pei Fei, Shi Ying, Mariga Alfred, et al. Comparison of freeze-drying and freeze-drying combined with microwave vacuum drying methods on drying kinetics and rehydration characteristics of button mushroom (*agaricus bisporus*) slices[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(6): 1629—1639.

- [2] Fei Pei, Ying Shi, Xingyang Gao, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Food Chemistry, 2014, 165: 547—554.
- [3] Somayeh Taghian Dinani, Nasser Hamdami, Mohammad Shahedi, et al. Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics of mushroom slices[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 70—80.
- [4] Guang Yue Ren, Fan Lian Zeng, Xu Duan, et al. The effect of glass transition temperature on the procedure of microwave-freeze drying of mushrooms (*agaricus bisporus*)[J]. Drying Technology, 2015, 33(2): 169—175.
- [5] Oikonomopoulou Vasiliki P, Krokida Magdalini K. Structural properties of dried potatoes, mushrooms, and strawberries as a function of freeze-drying pressure[J]. Drying Technology, 2012, 30(4): 351—361.
- [6] 李波, 芦菲, 刘本国, 等. 双孢菇片微波真空干燥特性及工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 380—384.  
Li Bo, Lu Fei, Liu Benguo, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and process optimization of *Agaricus bisporus* slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 380—384. (in Chinese with English abstract)
- [7] Vasiliki P Oikonomopoulou, Magdalini K Krokida, Vaio T Karathanos. The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products[J]. Procedia Food Science, 2011, 1: 647—654.
- [8] Hande A R, Swami S B, Thakor N J. Effect of drying methods and packaging materials on quality parameters of stored kokum rind[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2014, 7(4): 114—126.
- [9] 任广跃, 任丽影, 张伟, 等. 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 12—16.  
Ren Guangyue, Ren Liying, Zhang Wei, et al. Optimizing microwave-assisted vacuum freeze-drying of dioscorea oppositifolia by orthogonal array design[J]. Food science, 2015, 36(12): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [10] Wang Rui, Zhang Min, Mujumdar A S. Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 290—297.
- [11] 朱德泉, 王继先, 钱良存, 等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 248—252.  
Zhu Dequan, Wang Jixian, Qian Liangcun, et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 248—252. (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang Rui, Zhang Min, Mujumdar A S. Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 290—297.
- [13] Duan Xu, Liu Wei, Ren Guangyue, et al. Comparative study on the effects and efficiencies of three sublimation drying methods for mushrooms[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2015, 8(1): 91—97.
- [14] GB/T 5009.3—2003, 食品中水分的测定[S].
- [15] Yunhong Liu, Yue Sun, Shuai Miao, Fang Li, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of *Flos Lonicerae*[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(8): 4955—4964.
- [16] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [17] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 269—276.  
Zhang Weipeng, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Improving quality of *Poria cocos* using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 269—276. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘云宏, 孙悦, 王乐颜, 等. 超声波强化热风干燥梨片的干燥特性[J]. 食品科学, 2015, 36(9): 1—6.  
Liu Yunhong, Sun Yue, Wang Leyan, et al. Drying characteristics of pear slices during ultrasound-assisted hot air drying[J]. Food science, 2015, 36(9): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 382—388.  
Zhang Qian, Xiao Hongwei, Dai Jianwu, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Suppl.1): 382—388. (in Chinese with English abstract)
- [20] Pankaj B, Pathare, Umezurike Linus Opara, et al. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review[J]. Food Bioprocess Technol, 2013, 6(1): 36—60.
- [21] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296—304.  
Ju Haoyu, Xiao Hongwei, Zheng Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 296—304. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317—324.  
Zhang Weipeng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Drying characteristics of *poria cocos* with different drying methods based on Weibull distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 317—324. (in Chinese with English abstract)

- [23] Duan X, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(4): 444–453.
- [24] Mukhopadhyay S, Majumdar G C, Goswami T K, et al. Fuzzy logic (similarity analysis) approach for sensory evaluation of chhana podo[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 53(1): 204–210.
- [25] Giri S K, Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms[J]. *Journal of food engineering*, 2007, 78(2): 512–521.
- [26] Huang Luelue, Zhang Min, Mujumdar A S, et al. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(3): 279–284.
- [27] Barbara S, Anna-Maria N V, Werner C H. Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2): 455–460.
- [28] Yunhong Liu, Jianye Wu, Shuai Miao, et al. Effect of a modified atmosphere on drying and quality characteristics of carrots[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2014, 7(9): 2549–2559.

## Drying characteristics and quality of button mushrooms during microwave freeze drying

Duan Xu, Liu Wenchao, Ren Guangyue, Pang Yuqi, Liu Yunhong

(College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** Button mushroom is the most widely cultivated and consumed mushroom throughout the world and it contributes about 40% of the total world production of mushroom. Button mushrooms are extremely perishable and their shelf life is only about 24 h in ambient conditions. Various physiological and morphological changes occur after harvest, which make these mushrooms unacceptable for consumption. Hence, they should be consumed or processed promptly after harvest and for this reason the mushrooms are traded mostly in dried form in the world market. The convective drying method is the most commonly used to dry mushrooms. Nevertheless, due to long drying time and high drying temperature at industrial scale, the problems of darkening in color, shrinkage, loss in flavor and decrease in rehydration ability easily occur. In recent years, microwave freeze drying (MFD) has been investigated as a potential method for obtaining high quality dried food products with low energy consumption. Thus, to achieve faster drying rate with high product quality, MFD was applied to dry button mushrooms. The drying curves, effective moisture diffusivity, rehydration ratio, shrinkage ratio, vitamin C retention ratio, energy consumption and the sensory evaluation based on the fuzzy reasoning were investigated, which were considered to reflect the drying and quality characteristics of button mushrooms under different microwave loading levels (0.25, 1.0 and 0.75 W/g) and system pressure (50, 100 and 150 Pa). The drying models were obtained by the nonlinear fitting of drying curves. The weighted comprehensive evaluation of button mushroom MFD processes were also carried out based on energy consumption, drying time, rehydration ratio, whiteness index and vitamin C retention ratio. Results showed that, when changing the microwave loading level, the reduction ratio of the minimum value to the maximum value of drying time, effective moisture diffusion coefficient, whiteness index, rehydration ratio and shrinkage ratio were higher than those obtained by changing the system pressure. It meant the microwave loading level had a more significant influence on drying rate and physical quality index than the system pressure. However, the system pressure had more obvious influence on nutritional content index, energy consumption and sensory evaluation compared to the microwave loading level. Through the nonlinear fitting function of Origin pro 8.5, we found the R-square of Henderson and Pabis model fitting curve was the highest, which implies the Henderson and Pabis model could well describe the moisture variation in drying process; the effective moisture diffusion coefficient of button mushrooms during the MFD was in the range of  $3.423 \times 10^{-10}$ – $5.654 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, and it was on the  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s order of magnitude and more influenced by microwave loading level. In addition, the products obtained under high microwave loading level and system pressure would be not accepted by consumers. Taking energy consumption, drying time, rehydration ratio, whiteness index and vitamin C retention ratio into account, 0.25 W/g microwave loading level with 100 Pa system pressure was proposed as the favorable condition for button mushroom MFD. The results provide a theoretical basis for the selection of the suitable processing technology for the MFD of button mushroom.

**Keywords:** drying; models; quality control; button mushroom; microwave freeze drying