

文章编号:1000-8551(2012)03-0494-06

杏鲍菇真空微波干燥特性及动力学模型

刘春泉^{1,3} 严启梅^{1,2,3} 江 宁^{1,3} 袁春新⁴ 王建华⁴ 李大婧^{1,3}

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014; 2. 南京师范大学金陵女子学院, 江苏 南京 210097;

3. 国家农业科技华东(江苏)创新中心-农产品加工工程技术研究中心, 江苏 南京 210014;

4. 南通市农副产品加工技术协会, 江苏 南通 226000)

摘要:为了解杏鲍菇在真空微波干燥过程中水分含量的变化,进行了真空微波干燥试验,获得了不同真空度(-50、-70、-85kPa)、微波功率(250、750、1250W)及装载量(50、100和150g)对杏鲍菇真空微波干燥特性的影响。结果表明,杏鲍菇真空微波干燥过程符合Page方程($P < 0.05$),该模型可较准确地预测杏鲍菇在真空微波干燥过程中的含水率和失水速率。本研究为杏鲍菇真空微波干燥过程的优化和控制提供了理论依据。

关键词:杏鲍菇;真空微波;干燥特性;动力学模型

PROPERTIES AND DYNAMICS MODEL OF VACUUM MICROWAVE
DRIED *Pleurotus eryngii*

LIU Chun-quan^{1,3} YAN Qi-mei^{1,2,3} JIANG Ning^{1,3} YUAN Chun-xin⁴ WANG Jian-hua⁴ LI Da-jing^{1,3}

(1. Institute of Farm Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014;

2. Jinling College, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097;

3. Engineering Research Center for Agricultural Products Processing, National Agricultural Science and Technology Innovation

Center in East China, Nanjing, Jiangsu 210014; 4. Agricultural Product Processing Technology Association, Nantong, Jiangsu 226000)

Abstract: The experiments of vacuum microwave drying *P. eryngii* were conducted for study rules of moisture change. The effect of different vacuum degree, microwave power and loadage on vacuum microwave drying characteristics of *P. eryngii* was researched, and a drying dynamics model was established. The results showed that the drying dynamics model of vacuum microwave drying *Pleurotus eryngii* agreed with Page equation ($P < 0.05$), which could accurately estimate the moisture contents and dehydrating rate during vacuum microwave drying process. This study provided a theoretical basis for the optimization and control of vacuum microwave drying process.

Key words: *Pleurotus eryngii*; vacuum microwave; drying characteristics; dynamics model

杏鲍菇不仅营养价值高且具有较高的药理价值^[1-4],深加工前景广阔。但杏鲍菇含水量高,在常温放置几天后菇体表面发生褐变,菌盖膜发生自溶,同时长出白色絮状霉并开始腐烂,最终失去食用价值,这种采后熟变限制了杏鲍菇的异地运输和鲜销^[5]。因此需对杏鲍菇进行干制加工,以延长其贮藏期。目前菇类传统干制方法是热风干燥和日晒,但其干燥时间长,

导致菇体色泽深暗,营养损失,复水后菇体无法保持原菇体的色泽和形态,影响食用感官^[1]。因此,将现代高新食品干燥技术应用到杏鲍菇干制生产,对提升杏鲍菇干制加工水平、促进杏鲍菇生产具有重要意义。

真空微波干燥技术将真空干燥和微波干燥技术融为一体,具有快速、高效等优点。物料含水率变化对于干燥过程意义重大,直接影响产品质量。限于现代干

收稿日期:2011-11-01 接受日期:2012-04-16

基金项目:南通市农业科学科技创新与产业化计划(HL2011010),江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(11)2064)

作者简介:刘春泉(1959-),男,江苏如东人,硕士,研究员,研究方向为农产品精深加工及产业化开发研究。E-mail: liuchunquan2009@163.com

干燥技术,实现物料在干燥过程中在线检测水分仍是个难题,所以对干燥过程中水分的变化规律进行研究将为实际生产提供更多的理论依据。目前,已有学者对草莓切片^[6]、甜菜根^[7]、荔枝^[8]、蘑菇^[9]、土豆条^[10]等物料的真空微波干燥特性和动力学模型进行了研究。本研究在不同真空度、微波功率及装载量的条件下,探讨杏鲍菇含水率随干燥时间的变化、失水速率随含水率的变化规律,并根据干燥特性研究数据建立杏鲍菇真空微波干燥的动力学模型,化解杏鲍菇干燥过程中水分在线检测难的问题,以期对杏鲍菇真空微波干燥工艺的研究和生产控制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与仪器

1.1.1 原材料 新鲜杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*),购于农贸市场,选择成熟度七八成、果型大、具有典型杏鲍菇风味、果肉具有一定硬度的杏鲍菇。将杏鲍菇清洗后斜切成7mm厚薄片,置于100℃水浴中烫漂90s,冷却后置于4%浓度的麦芽糊精溶液(添加0.2%柠檬酸和1%NaCl)中,室温下浸渍1h,沥干,备用。

1.1.2 仪器与设备 数显101A-2型电热鼓风干燥箱,上海浦东荣丰科学仪器有限公司;VMD-1型真空微波干燥设备,南京孝马机电设备厂;BS224S电子天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 真空度对杏鲍菇片干燥特性的影响 将1.1.1中备用的杏鲍菇片,在微波功率750W,装载量50g,真空度分别为-50、-70和-85kPa条件下进行真空微波干燥,并测定杏鲍菇片的干燥曲线和干燥速率曲线。

1.2.2 微波功率对杏鲍菇片干燥特性的影响 将1.1.1中备用的杏鲍菇片,在真空度-85kPa,装载量50g,微波功率分别为250、750、1250W条件下进行真空微波干燥,并测定杏鲍菇片的干燥曲线和干燥速率曲线。

1.2.3 装载量对杏鲍菇片干燥特性的影响 将1.1.1中备用的杏鲍菇片,在真空度-85kPa,微波功率750W,装载量分别为50、100和150g条件下进行真空微波干燥,并测定杏鲍菇片的干燥曲线和干燥速率曲线。

1.3 测定方法

1.3.1 干燥曲线的测定 称取一定质量的杏鲍菇片,单层均匀平铺于干燥腔内,干燥过程中定时取出样品,

快速测定物料质量变化,直到杏鲍菇干基含水率在10%左右。每组试验重复3次,取试验平均值,作出杏鲍菇含水率随干燥时间变化的干燥曲线。

1.3.2 水分含量测定 采用恒重法^[11]。水分含量=(干燥前物料质量-恒重时物料质量)/干燥前物料质量。

干基含水率和失水速率的计算公式如下:

$$\text{干基含水率}(\%) = (m_t - m_g) / m_g \times 100\%$$

式中, m_t 为物料 t 时刻对应的质量,g; m_g 为绝干时物料质量,g。

$$\text{失水速率}(\text{g}/\text{min}) = \Delta m / \Delta t$$

式中, Δm 为相邻2次测量的失水质量,g; Δt 为相邻2次测量的时间间隔,min。

1.4 数据处理

应用SPSS17.0软件进行模型拟合和回归分析。

2 结果与分析

2.1 真空度对杏鲍菇片干燥特性的影响

图1和图2分别是不同真空度下杏鲍菇片的干燥曲线和干燥速率曲线。由图1可知,在微波功率、装载量、初始含水率相同的条件下,随着真空度的升高,干燥时间缩短。当真空度为-50、-70和-85kPa时所需干燥时间分别为9、7.5和6.5min。由图2可以看出,杏鲍菇片的真空微波干燥过程分为加速、恒速、降速3个阶段。干基含水率相同的情况下,真空度越高,杏鲍菇片真空微波干燥失水速率越大。然而,真空度并非越大越好,试验发现,当真空度大于-90kPa时,随着微波时间的延长,物料水分含量减少,微波腔体内极易发生气体击穿放电现象,该现象的发生不仅会消耗微波能,而且会损坏部件并产生较大的微波反射,缩短磁控管使用寿命。因此,需选择适宜真空度进行真空微波干燥。

2.2 微波功率对杏鲍菇片干燥特性的影响

图5和图6分别是不同微波功率下杏鲍菇片的干燥曲线和干燥速率曲线。由图3干燥曲线可知,真空微波干燥杏鲍菇片至干基含水率为10%以下,在微波功率为250、750和1250W下,干燥时间分别为11.5、6.5和5.25min,即在初始含水率、真空度及装载量相同的情况下,微波功率越高,干燥时间越短。由图4失水曲线可以看出,杏鲍菇真空微波干燥过程分为3个阶段,即加速、恒速和降速干燥阶段。功率越大,加速阶段失水速率曲线越陡峭,历时较短;功率越小,加速阶段时间较长,恒速和降速阶段时间较短。

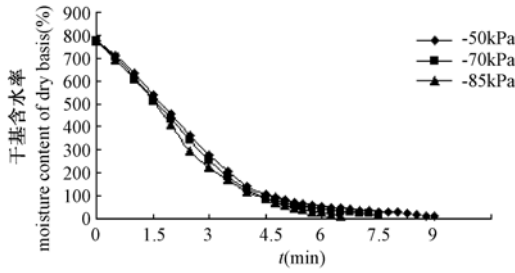


图1 不同真空度下杏鲍菇片干燥曲线
Fig.1 Drying curves of *P. eryngii* at different vacuum degree levels

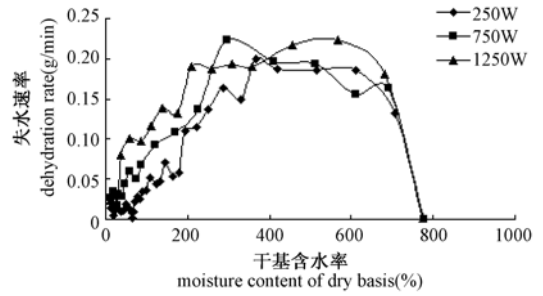


图4 不同微波功率下的杏鲍菇片干燥速率曲线
Fig.4 Curves of drying rate s of *P. eryngii* at different microwave power

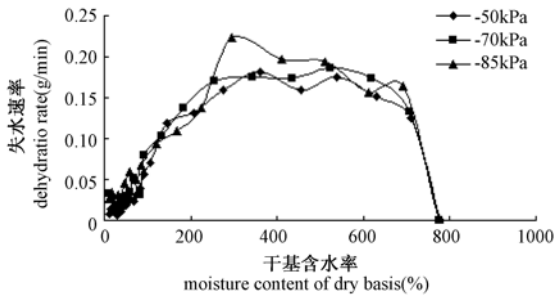


图2 不同真空度下杏鲍菇片干燥速率曲线
Fig.2 Curves of drying rate of *P. eryngii* at different vacuum degree levels

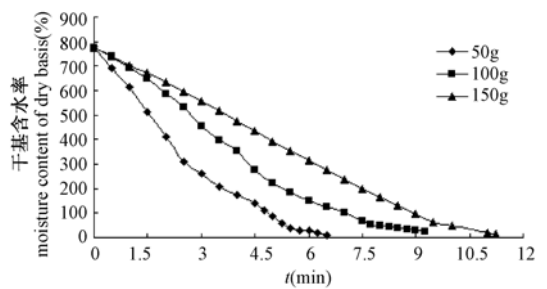


图5 不同装载量下的杏鲍菇片干燥曲线
Fig.5 Drying curves of *P. eryngii* at different loadage

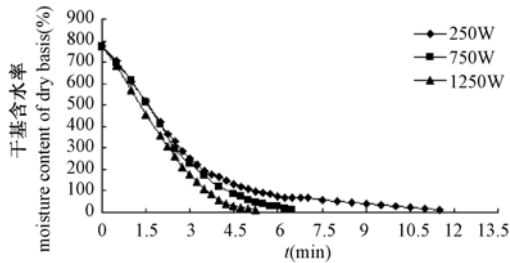


图3 不同微波功率下的杏鲍菇片干燥曲线
Fig.3 Drying curves of *P. eryngii* at different microwave power

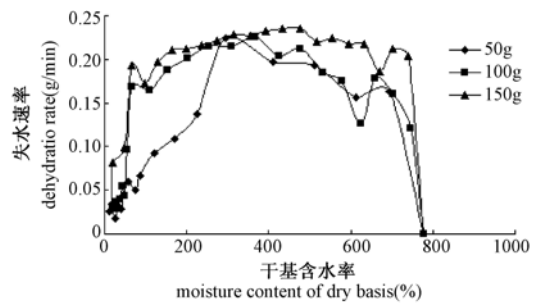


图6 不同装载量下的杏鲍菇片干燥速率曲线
Fig.6 Curves of drying rate of *P. eryngii* at different loadage

2.3 装载量对杏鲍菇片干燥特性的影响

图3和图4分别是不同装载量下杏鲍菇片的干燥曲线和干燥速率曲线。由图5可见,杏鲍菇片在真空微波干燥时,装载量越大,干燥曲线越平缓,所需干燥时间越长。装载量为50、100和150g时对应的干燥时间分别为6.5、9.25和11.25min。由图6失水速率曲线可知,失水速率随装载量的增加有所提高。但装载量为100和150g所对应的失水速率曲线变化不明显,并且装载量越大恒速阶段失水速率变化越小。

2.4 杏鲍菇片真空微波干燥动力学模型研究

2.4.1 动力学模型的选择 物料干燥是一个复杂的

传热、传质过程,建立薄层干燥模型对研究干燥规律、预测干燥工艺参数有重要的作用。目前,果蔬干燥几种常用的薄层干燥数学模型有^[14,15]:

单项扩散模型:

$$MR = Ae^{-Kt} \tag{1}$$

指数模型:

$$MR = e^{-Kt} \tag{2}$$

Page 方程:

$$MR = \exp(-Kt^N) \tag{3}$$

式中,水分比 $MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$; t :干燥时间(min); M_t : t 时刻物料含水率(干基),%; M_e :平衡含水率(干基),%; M_0 :物料原始含水率(干基),%; A, K, N :待定系数。由于其中的平衡含湿量 M_e 资料很少,并且试验获得难,因此把上述的水分比 MR 简化为: $MR = M_t / M_0^{[16]}$ 。

对模型线性化处理,式(1)、(2)、(3)线性化处理,得式(4)、(5)、(6):

$$\ln(MR) = \ln A - Kt \quad (4)$$

$$\ln(MR) = -Kt \quad (5)$$

$$\ln[-\ln(MR)] = \ln K + N \ln t \quad (6)$$

根据试验数据,分别作不同真空度、微波功率及装载量下的 $t - \ln(MR)$ 曲线(图7、9、11)和 $\ln t - \ln[-\ln(MR)]$ 曲线(图8、10、12)。

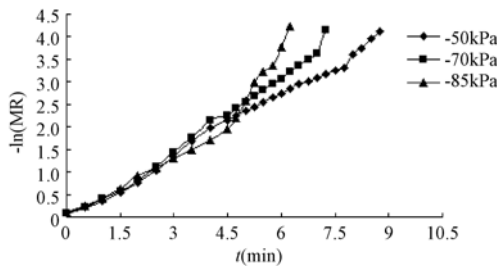


图7 不同真空度下的 $t - \ln(MR)$ 曲线
Fig. 7 Delation of t and $-\ln(MR)$ at different vacuum degree levels

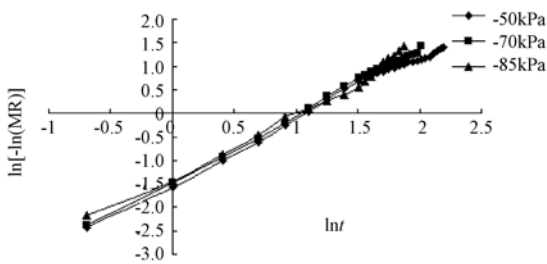


图8 不同真空度下的 $\ln t - \ln[-\ln(MR)]$ 曲线
Fig. 8 Delation of $\ln t$ and $\ln[-\ln(MR)]$ at different vacuum degree levels

由图7~12可知, $-\ln(MR)$ 与 t 呈非线性, $\ln[-\ln(MR)]$ 与 $\ln t$ 呈线性,这表明杏鲍菇片的真空微波干燥动力学模型满足:Page 方程 $MR = \exp(-Kt^N)$ 。

令:

$$\ln K = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 \quad (7)$$

$$N = e + fX_1 + gX_2 + hX_3 \quad (8)$$

式中: X_1 :真空度, kPa; X_2 :微波功率, W; X_3 :装载量, g; a, b, c, d, e, f, g, h :待定系数。

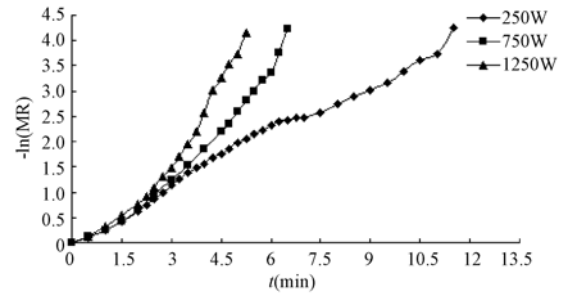


图9 不同微波功率下的 $t - \ln(MR)$ 曲线
Fig. 9 Delation of t and $-\ln(MR)$ at different microwave power

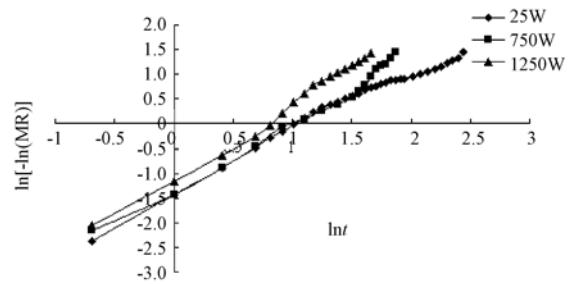


图10 不同微波功率下的 $\ln t - \ln[-\ln(MR)]$ 曲线
Fig. 10 Delation of $\ln t$ and $\ln[-\ln(MR)]$ at different microwave power

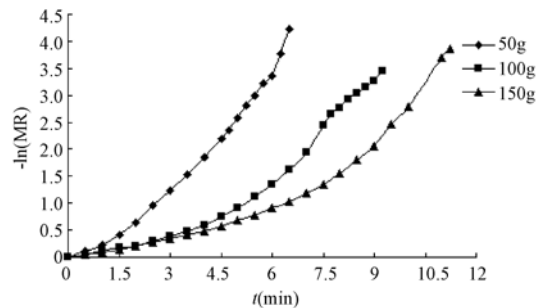


图11 不同装载量下的 $t - \ln(MR)$ 曲线
Fig. 11 Delation of t and $-\ln(MR)$ at different loadage

把式(7)、(8)带入式(6)中可得到: $\ln[-\ln(MR)] = (a + bX_1 + cX_2 + dX_3) + (e + fX_1 + gX_2 + hX_3) \ln t$

利用 SPSS17.0 软件对试验数据进行多元线性回归拟合,求得方程线性拟合各待定系数,结果见表1。

由表1可知, $F = 22.793, P < 0.05$ 表明所求方程显著;回归方程 $R^2 = 0.932$ 说明模型拟合度良好,试验误差小。得到回归方程:

$$\ln[-\ln(MR)] = (0.265 + 0.001X_1 - (1.000E - 5)X_2 - 0.002X_3) + (1.010 + 0.003X_3) \ln t。$$

表 1 杏鲍菇真空微波干燥动力学模型

Table 1 Kinetics model of *P. eryngii* by vacuum microwave drying

待定系数 undetermined coefficients	拟合方程 fitting equation	R^2	F 值及显著水平 F value and significant level
$a = 0.265$ $b = 0.001$ $c = -0.00001$ $d = -0.002$ $e = 1.010$ $f = 0$ $g = 0$ $h = 0.003$	$\ln[-\ln(MR)] = (0.265 + 0.001X_1 - (1.000E-5)X_2 - 0.002X_3) + (1.010 + 0.003X_3) \ln t$	$R^2 = 0.932$	$F = 22.793$ $P = 0.002$

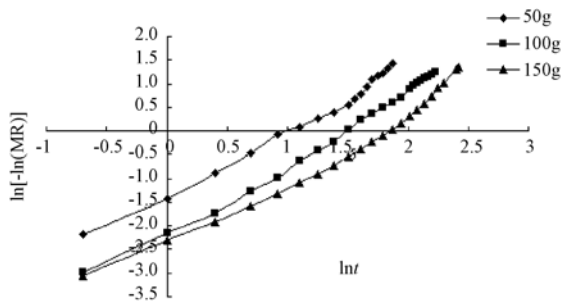


图 12 不同装载量下的 $\ln t - \ln[-\ln(MR)]$ 曲线
Fig. 12 Delation of $\ln t$ and $\ln[-\ln(MR)]$ at different loadage

2.4.2 动力学模型验证 为进一步验证动力学模型的准确性,选取试验中的一组数据进行验证,试验条件为:真空度 -50kPa ,微波功率 750W ,装载量 55g ,将该试验值与模型的预测值进行比较,结果见图 13。由图 13 看出,Page 模型的预测曲线与实际值基本拟合,说明 Page 方程能较准确地反应杏鲍菇片真空微波干燥的水分变化规律,可以用来描述杏鲍菇片真空微波干燥过程。

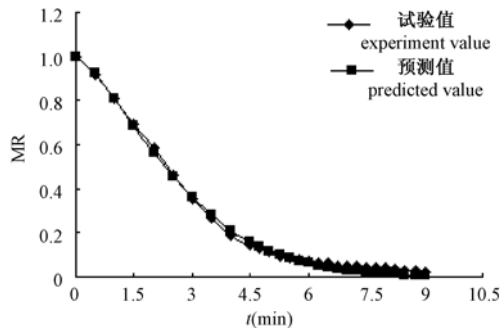


图 13 相同条件下试验值与预测值的比较
Fig. 13 Comparison between experiment and predicted value at the same condition

3 讨论

研究发现,随着真空度的提高,杏鲍菇片真空微波干燥时间缩短,这可能是由于真空度越高,水的沸点温度越低,汽化和蒸发温度降低,水分从物料表面蒸发的时间缩短,同时,真空度越大,水分从内部到表面蒸发的速率越快^[12]。但真空度不是越大越好,真空度太大杏鲍菇会出现焦糊现象,因此选择适宜的真空度进行杏鲍菇片干燥很重要。随着微波功率的提高,物料细胞受到微波破坏,细胞质壁出现裂缝,使水分从内部到表层变得容易,促进了水分的散失^[13],但在高功率 750 和 1250W 下,干燥时间相差不大,说明不是微波功率越大越好,在加工过程中选择适宜的微波功率很重要。在微波功率一定的条件下,装载量越大,单位质量水分所吸收的微波能相应减少,干燥速率也随之减小,导致所需干燥时间延长。通过研究真空度、微波功率和装载量对杏鲍菇片真空微波干燥过程含水率和干燥速率的影响规律,发现杏鲍菇片的真空微波干燥模型与 Page 方程拟合较好,这与黄姬俊和黄艳等对香菇^[5]和银耳^[14]的真空微波干燥模型研究结论相一致。

4 结论

杏鲍菇片真空微波干燥过程分为加速、恒速、降速 3 个阶段,微波功率和装载量对杏鲍菇片的干燥速率影响都较大,其次是真空度;微波功率和真空度越大,失水速率越快,干燥时间越短。装载量越大,干燥曲线越平缓,所需干燥时间越长。杏鲍菇片真空微波干燥符合 Page 模型,模型 P 值小于 0.05 ,说明拟合显著;验证试验结果显示,模型的预测值和试验值拟合良好。

参考文献:

[1] 杨武海. 杏鲍菇干制技术研究[D]. 福建农林大学硕士论文,

- 2010, 10: 1 - 9
- [2] 宋爱荣, 岳运勇, 徐 坤. 四个杏鲍菇品种的氨基酸分析与比较[J]. 菌物研究, 2005, 4(3): 11 - 14
- [3] 王凤芳. 杏鲍菇中营养成分的分析测定[J]. 食品科学, 2002, 23(4): 132 - 135
- [4] 张丽, 彭小列, 张建锋, 刘世彪. 杏鲍菇多糖的提取及其抑菌作用[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(9): 90 - 92
- [5] 黄姬俊. 香菇微波真空干燥技术的研究[D]. 福建农林大学硕士学位论文, 2010, 4: 2 - 17
- [6] 朱德全, 钱良存, 孙 磊, 丁正耀. 草莓切片微波真空干燥特性及干燥品质研究[J]. 食品科学, 2010, 31(16): 111 - 116
- [7] Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum - microwave methods [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98: 461 - 470
- [8] Janjai S, Precoppe M, Lamlet N, Mahayothee B, Bala B K, Nagle M, Muller J. Thin - layer drying of litchi (*Litchi chiensis* Sonn.) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(3): 194 - 201
- [9] Giri S K, Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave - vacuum and convective hot - air dried mushrooms [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 78(2): 512 - 521
- [10] Bondaruk J, Markowski M, Blaszczyk W. Effect of drying conditions on the quality of vacuum - microwave dried potato cubes [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 306 - 312
- [11] 毕金峰, 方 芳, 丁媛媛, 白沙沙, 王 沛. 预处理对哈密瓜变温压差膨化干燥产品品质的影响[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 15 - 18
- [12] 雷小琴. 香蕉片微波真空干燥特性及干燥工艺的研究[D]. 福建农林大学硕士论文, 2010, 10: 8 - 17
- [13] 于 勇, 王 俊, 王爱华, 罗剑毅, 傅俊杰.⁶⁰Co γ 射线辐照处理对晚粳稻低温干燥特性的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(1): 41 - 45
- [14] 黄 艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 362 - 367
- [15] 胡庆国. 毛豆热风预真空微波联合干燥过程研究[D]. 江南大学博士论文, 2006, 6: 59 - 68
- [16] 魏 巍, 李维新, 何志刚, 林晓姿. 绿茶微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 367 - 371

(责任编辑 裴 颖)



(上接第 493 页)

- [5] Jeevanandan J, Kakatkar A, Doke S N, et al. Influence of salting and gamma irradiation on the shelf - life extension of threadfin bream in ice [J]. Food Research International, 2001, 34(8): 739 - 746
- [6] Lakshmanan L, Venugopal V, Venketashvaran K, et al. Bulk preservation of small pelagic fish by gamma irradiation; studies on a model storage system using Anchovies [J]. Food Research International, 1999, 32(10): 707 - 713
- [7] Ehioba R M, Kraft A A, Molins H W, et al. Effect of low - dose (100 krad) gamma radiation on the microflora of vacuum - packaged ground pork with and without added sodium phosphates [J]. J of Food Sci, 1987, 52(6): 1477 - 1480
- [8] Mattison M L, Kraft A A, Olson D G, et al. Effect of low dose irradiation of pork loins on the microflora, sensory characteristics and fat stability [J]. J of Food Sci, 1986, 51(2): 284 - 287
- [9] 李学英, 许钟, 郭全友, 杨宪时. 大黄鱼冷藏过程中的鲜度变化 [J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 442 - 450
- [10] Castro P, Padr O, N J C P, et al. Total volatile base nitrogen and its use to assess freshness in European sea bass stored in ice [J]. Food Control, 2006, (17): 245 - 248
- [11] 傅俊杰. 脱水蔬菜辐照杀菌及贮藏保鲜效果的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 102 - 105
- [12] 黄小波, 马美湖, 李文革. 辐照杀菌对鸡蛋蛋白液特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 244 - 248
- [13] 陈忠海. 熟畜禽肉类食品辐照保鲜灭菌的工艺问题[J]. 核农学报, 1996, 17(3): 119 - 1207
- [14] 刘 伟, 杨宗渠. 低温肉制品辐照工艺剂量研究[J]. 核农学报, 2003, 17(2): 138 - 140
- [15] 朱佳廷, 冯 敏, 唐玉新, 林家彬, 杨萍, 王德宁. 辐照对桂圆干的杀菌效果及营养成分的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 79 - 82

(责任编辑 裴 颖)