

猪肉的微波干燥与能耗分析

Analysis of characteristics and energy consumption of microwave drying of pork

陈鹏飞 凌菁 袁晓红 胡甜甜 万江华

CHEN Peng-fei LING Jing YUAN Xiao-hong HU Tian-tian WAN Jiang-hua

(宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021)

(School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

摘要:目的:探究猪肉微波干燥特性,优化肉类微波干燥过程。方法:采用微波频率为 2 450 MHz,微波输出功率为 70,140,210,280,350,420 W 的微波干燥设备,对干燥质量为 20,25,30 g 的猪肉进行微波干燥处理;并选用 5 种经典薄层干燥模型对干燥数据进行非线性拟合,以均方根误差和决定系数为评价指标,筛选出最佳干燥模型。结果:Logarithmic 模型为猪肉微波干燥的最佳模型,猪肉微波干燥的最优平均单位能耗为 10.89 MJ/kg,微波干燥效率为 20.72%。结论:猪肉微波干燥最佳模型为 Logarithmic 模型,当猪肉质量为 25 g、微波功率为 210 W 时,能够明显降低微波的平均单位能耗,并且提高微波干燥效率。

关键词:猪肉;微波干燥;干燥特性;平均单位能耗;干燥效率

Abstract: Objective: Exploring the microwave drying characteristics of pork and optimizing the microwave drying process of meat. Methods: microwave drying equipment with microwave frequency of 2 450 MHz and microwave output power of 70, 140, 210, 280, 350, 420 W were used for microwave drying of pork with dry mass of 20, 25, 30 g in this paper; Five classical thin-layer drying models were selected for non-linear fitting of drying data, R^2 (coefficient of determination) and RMSE (root mean square error) were used as evaluation indexes to screen the best drying model. Results: The Logarithmic model was the best model for microwave drying of pork. The average energy consumption per unit of pork microwave drying was 10.89 MJ/kg, and the microwave drying efficiency was 20.72%. Conclusion: The best model for microwave drying of pork is the Logarithmic model, pork mass of 25 g, microwave power of 210 W, can significantly

reduce the average unit microwave energy consumption, and improve the efficiency of microwave drying.

Keywords: pork; microwave drying; drying characteristics; average unit energy consumption; drying efficiency

水分含量是影响猪肉品质的关键因素之一^[1],水分过多和久置会导致猪肉腐败变质。干制后不仅能够抑制微生物生长繁殖、延长贮藏时间,还能保存猪肉的营养物质、增加口感。

微波具有穿透力强、波长较短、干燥速度快且节能环保等优点^[2-3],被广泛应用于干燥生产中。张乐等^[4]研究发现,微波功率和真空度对微波干燥时间有显著影响。刘田子等^[5]研究表明,Page 模型为猪肉干热风干燥的最优模型。汪磊等^[6]发现,微波干燥可在改善产品品质的同时缩短干燥时间。田龙等^[7]研究表明,猪肉脯的最佳加工方式为微波法联合传统工艺加工。

文章拟结合微波干燥的优点,对猪肉进行不同功率的微波干燥,通过建立微波干燥数学模型,分析猪肉干燥过程中的水分变化、微波能耗以及干燥效率等,探讨猪肉微波干燥特性,为肉类微波干燥过程优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

猪肉:选择剔除脂肪、筋、腱的肌肉作为试样,市售。

1.2 试验设备

微波炉:G90F23MN3XLVN-A7 型,广东格兰仕集团有限公司;

电子分析天平:LQ-W50002 型,优科维特电子科技有限公司;

微波干燥系统试验平台:自制。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥条件设计 猪肉用水果刀切割成厚度相当、质量分别为 20,25,30 g 的薄片。将微波功率分别固定在 70,140,210,280,350,420 W,选取 20,25,30 g 猪肉试样,研究质量及微波功率对猪肉微波干燥特性的影响。利用

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:61663039);宁夏自然科学基金(编号:2020AAC03008)

作者简介:陈鹏飞,男,宁夏大学在读硕士研究生。

通信作者:凌菁(1982—),女,宁夏大学副教授,博士。

E-mail: lingjing0807@yeah.net

收稿日期:2021-09-06

计算机每隔 1 s 自动记录猪肉干燥过程中含水率的变化。

1.3.2 数据处理与分析 使用 Excel 2019 软件整理数据,采用 Levenberg-Marquardt 优化算法进行非线性模型拟合,采用 Origin 2018 64bit 分析处理并进行图表绘制。

1.3.3 干燥曲线的数学模型 选用 5 个较为常用的经典薄层干燥模型进行拟合对比分析,建立猪肉微波干燥数学模型。干燥模型如表 1 所示。

表 1 经典薄层干燥模型[†]

Table 1 Classical thin-layer drying model

名称	方程	文献
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[8]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[9]
Henderson	$MR = a \times \exp(-kt)$	[10]
Logarithmic	$MR = a \times \exp(-kt) + b$	[11]
Wang	$MR = 1 + at + bt^2$	[12]

[†] t 为干燥时间,s; a 、 b 、 k 、 n 为待定常数。

1.3.4 干燥含水率及水分比 按式(1)计算猪肉干基含水率^[13]。

$$M_t = (W_t - G) / G, \quad (1)$$

式中:

M_t ——猪肉干基含水率,g/g;

W_t ——任意时刻的总重,g;

G ——干重,g。

微波干燥过程中,猪肉的水分含量用水分比(MR)^[14]表示:

$$MR = (M_t - M_e) / (M_o - M_e). \quad (2)$$

由于微波干燥能量较大,对于 M_t 和 M_o 而言, M_e 又非常小,因此假定猪肉在微波干燥下的 M_e 为 0,即水分比可简化为:

$$MR = M_t / M_o, \quad (3)$$

式中:

MR ——水分比;

M_o ——猪肉初始的干基含水率,g/g;

M_t ——猪肉在 t 时刻的干基含水率,g/g;

M_e ——猪肉的平衡含水率,g/g。

1.3.5 干燥速率 按式(4)计算干燥速率^[15]。

$$D_R = (M_2 - M_1) / (t_2 - t_1), \quad (4)$$

式中:

D_R ——干燥速率,g/(g·s);

M_1 ——干燥过程中 t_1 时刻所对应的水分比,%;

M_2 ——干燥过程中 t_2 时刻所对应的水分比,%。

1.3.6 微波干燥能效测定 采用平均单位能耗和微波干燥效率^[16]来表示微波干燥能效。按式(5)计算微波干燥效率。

$$\mu = \frac{m_w \gamma_w}{pt'} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

μ ——微波干燥效率,%;

m_w ——蒸发的水蒸气质量,kg;

γ_w ——水的汽化潜热,MJ/kg;

p ——微波输出功率,W;

t' ——间隔时间,s。

当猪肉内部水分温度达到 100 ℃时,水分开始蒸发,水蒸发的汽化潜能为 2 257 MJ/kg。水分蒸发所需要的能耗为^[16]:

$$E_s = \frac{pt' \times 10^{-6}}{m_w}, \quad (6)$$

式中:

E_s ——单位能耗,MJ/kg。

1.3.7 决定系数及误差分析 选取决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)作为拟合评价指标,其中 R^2 值越大、RMSE 值越小,此模型拟合程度越好^[17]。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{MR_{\text{exp},i}} - MR_{\text{pre},i})^2}, \quad (7)$$

$$R_{\text{MSE}} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

式中:

$MR_{\text{exp},i}$ ——干燥试验实测的第 i 个水分比;

$MR_{\text{pre},i}$ ——模型预测的第 i 个水分比;

n ——试验采集点个数。

2 结果与分析

2.1 猪肉微波干燥特性分析

2.1.1 干燥质量和微波功率 由图 1 可知,微波功率越高,干燥时间越短,干燥曲线斜率越大;当微波功率为 70 W 时,20,25,30 g 猪肉干燥所需时间分别为 2 250, 2 695,2 987 s。不同干燥质量下的猪肉水分比变化关系为干燥时间随干燥质量的增大而增加。干燥质量越大,猪肉干燥时间越长,水分比干燥曲线就越平缓。

由图 2 可知,猪肉微波干燥速率为短时间加速和较长时间减速 2 个阶段,与即食慈姑片^[18]微波干燥类似。由于微波加热有别于传统加热,微波加热能在物料内部形成独特的内热源,并且水分的蒸发能够降低猪肉表面的温度,使其内部先干燥。在干燥初始预热阶段,猪肉吸收的微波能量主要使其自身温度不断上升。物料初始的水分含量比较高,随着猪肉自身温度的不断上升,微波能量主要用于干燥,使猪肉内部的水分被逐步汽化,形成一个压力梯度,从而推动其内部水分不断向外迁移,干燥速率也随之不断上升;当猪肉含水率逐渐减小时,其吸收的微波能量越来越少,导致压差减小,因此干燥速率处于减速阶段,与李秋庭等^[19]的结论一致。此外,减速期间的干燥受物料中水分扩散的影响,不仅增加了对水运动的阻力,还导致干燥速率进一步降低^[20]。

2.1.2 干燥模型曲线拟合 由表 2 可知,Logarithmic 模

型对于不同干燥质量下猪肉的微波干燥所得数据的拟合最优,其决定系数为 0.993 86~0.996 78,均方根误差为 0.321 72~0.626 78。

由表 3 可知,Logarithmic 模型对于不同微波功率下猪肉的微波干燥所得数据的拟合较优,其决定系数为 0.990 50~0.996 01,均方根误差为 0.109 55~0.646 93,

综合分析,Logarithmic 模型对于不同干燥质量、不同微波功率猪肉的微波干燥所得数据的拟合较优,说明该数学模型能较好地描述猪肉的微波干燥规律。

2.2 干燥效率与单位能耗

由表 4 可知,在猪肉的微波干燥过程中,随着干燥质量增加及干燥功率增大,干燥过程的单位能耗先降低后

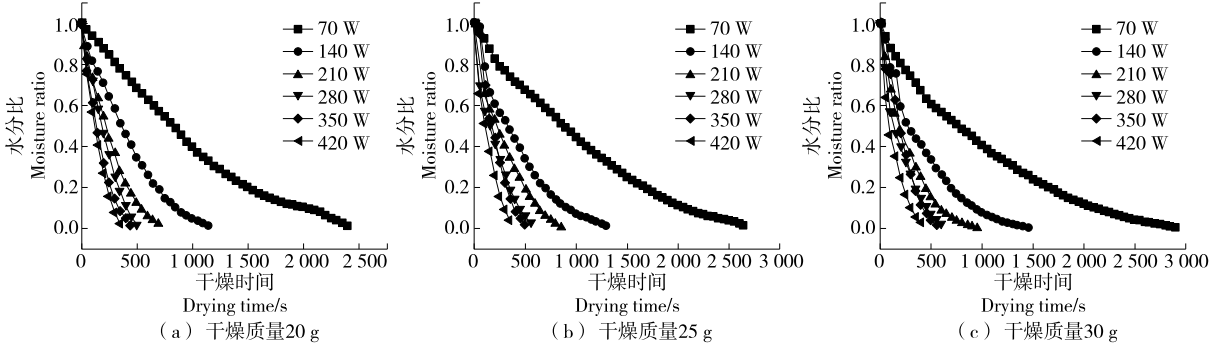


图 1 不同干燥质量下猪肉干燥曲线

Figure 1 Pork drying curve under different drying quality

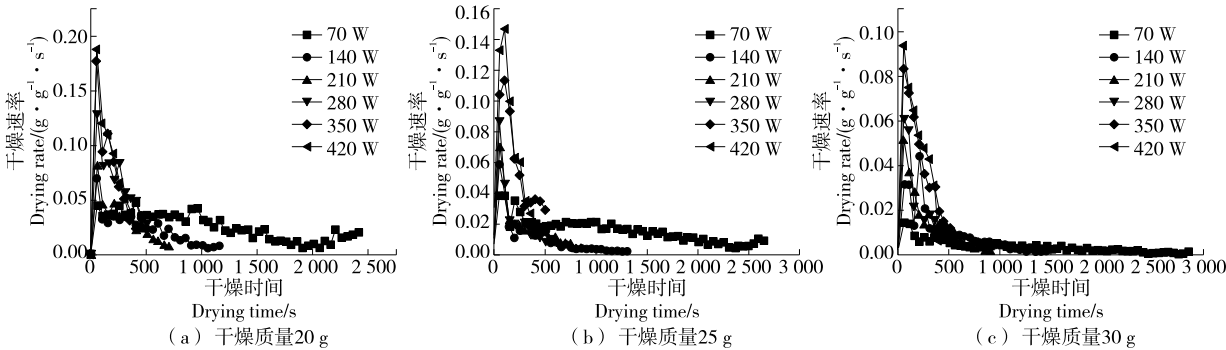


图 2 不同干燥质量下猪肉干燥速率曲线

Figure 2 Pork drying rate curve under different drying quality

表 2 不同干燥质量下 5 种数学模型的数据分析结果

Table 2 Data analysis results of 5 mathematical models with different drying quality

模型	干燥质量/g	参数	R^2	RMSE
Lewis	20	$k=0.002\ 22$	0.972 18	2.777 23
	25	$k=0.002\ 31$	0.988 09	1.216 32
	30	$k=0.002\ 38$	0.792 77	0.792 77
Page	20	$k=0.003\ 7, n=1.284\ 95$	0.993 77	0.622 14
	25	$k=0.001\ 3, n=1.091\ 72$	0.902 83	0.991 16
	30	$k=0.001\ 7, n=0.001\ 69$	0.993 79	0.667 58
Henderson	20	$k=0.002\ 46, a=1.032\ 80$	0.993 65	0.681 70
	25	$k=0.002\ 42, a=1.046\ 96$	0.984 21	0.984 21
	30	$k=0.002\ 46, a=1.032\ 80$	0.993 65	0.681 70
Logarithmic	20	$k=0.001\ 49, a=1.239\ 63, b=-0.233\ 78$	0.996 78	0.321 72
	25	$k=0.002\ 05, a=1.077\ 61, b=-0.062\ 22$	0.993 86	0.626 78
	30	$k=0.002\ 21, a=1.046\ 37, b=-0.035\ 99$	0.995 51	0.482 33
Wang	20	$a=-0.001\ 63, b=6.731\ 3\times 10^{-7}$	0.998 85	0.115 04
	25	$a=-0.001\ 69, b=7.377\ 5\times 10^{-7}$	0.983 95	1.639 32
	30	$a=-0.001\ 67, b=7.088\ 4\times 10^{-7}$	0.973 26	2.872 28

增加、干燥效率先增大后减小。当猪肉质量为 25 g、微波功率为 210 W 时,单位能耗最低为 10.89 MJ/kg,干燥效率最高为 20.72%。有研究^[21]表明,提高微波功率可以降低干燥时间。但并非微波功率越高,平均单位能耗越低,干燥效率越高^[22]。因此,在进行微波干燥时应对微波功率、干燥能耗及干燥效率进行综合考虑。

由图 3 可知,初始时刻,微波能耗呈快速增加趋势,微波的能量用于提高待干燥猪肉的温度,因此能耗较大;随后猪肉达到相应温度条件后能耗出现一个阶段的减小;最后微波能量用于蒸发猪肉内部的水分,需要的能耗逐渐

增大,最终 70 W 时的单位能耗最高(为 14.93 MJ/kg),210 W 时的单位能耗最低(为 10.89 MJ/kg)。相同的水分比条件下,微波干燥功率越高,干燥所造成的平均单位能耗越低。

由图 4 可知,干燥开始时,猪肉吸收微波能量使其自身温度不断上升,这一过程中蒸发的水分较少。因此,初始时刻的加热阶段导致干燥效率不断增加,并在很短时间内达到最高值,之后干燥效率逐渐下降,最终维持在 20% 左右。这主要归因于干燥后期猪肉含水量的降低。

表 3 不同微波功率下 5 种数学模型的数据分析结果

Table 3 Results of data analysis of 5 mathematical models at different microwave power

模型	功率/W	参数	R ²	RMSE
Lewis	70	$k=0.009\ 18$	0.980 33	5.681 89
	140	$k=0.002\ 23$	0.984 28	1.851 45
	210	$k=0.003\ 39$	0.984 26	1.033 79
	280	$k=0.004\ 81$	0.981 88	0.810 06
	350	$k=0.004\ 67$	0.953 92	2.763 07
	420	$k=0.007\ 54$	0.987 63	0.341 10
Page	70	$k=0.000\ 19,n=1.212\ 53$	0.993 56	1.859 94
	140	$k=0.000\ 84,n=1.155\ 92$	0.991 84	0.960 11
	210	$k=0.003\ 16,n=1.011\ 99$	0.984 36	1.026 23
	280	$k=0.005\ 87,n=0.964\ 23$	0.982 19	0.794 97
	350	$k=0.003\ 69,n=1.460\ 85$	0.995 77	0.253 30
	420	$k=0.006\ 89,n=1.017\ 42$	0.987 77	0.336 61
Henderson	70	$k=0.001\ 06,a=1.059\ 96$	0.983 78	1.684 18
	140	$k=0.002\ 41,a=1.082\ 07$	0.983 63	1.119 68
	210	$k=0.003\ 30,a=0.974\ 26$	0.985 02	0.983 77
	280	$k=0.004\ 62,a=0.961\ 49$	0.983 63	0.731 82
	350	$k=0.005\ 44,a=1.174\ 93$	0.979 72	0.374 88
	420	$k=0.007\ 42,a=0.984\ 84$	0.987 88	0.333 58
Logarithmic	70	$k=0.001\ 12,a=1.121\ 70,b=-0.111\ 04$	0.995 21	0.384 38
	140	$k=0.002\ 04,a=1.110\ 03,b=-0.061\ 60$	0.994 50	0.646 93
	210	$k=0.002\ 43,a=1.041\ 48,b=-0.116\ 27$	0.995 45	0.298 94
	280	$k=0.003\ 59,a=1.011\ 32,b=-0.091\ 03$	0.990 50	0.423 61
	350	$k=0.003\ 89,a=1.174\ 93,b=-0.157\ 57$	0.993 75	0.374 88
	420	$k=0.007\ 42,a=0.984\ 84,b=-0.112\ 60$	0.996 01	0.109 55
Wang	70	$a=-0.000\ 66,b=1.095\ 58$	0.996 96	0.878 44
	140	$a=-0.001\ 61,b=6.583\ 91$	0.986 96	1.534 67
	210	$a=-0.002\ 40,b=1.477\ 73$	0.970 37	1.945 28
	280	$a=-0.003\ 42,b=3.010\ 24$	0.957 35	1.904 20
	350	$a=-0.003\ 39,b=2.862\ 52$	0.990 31	0.579 79
	420	$a=-0.005\ 47,b=7.768\ 64$	0.974 28	0.707 59

表 4 不同干燥质量下单位能耗和干燥效率

Table 4 Unit energy consumption and drying efficiency under different drying quality

功率/W	干燥前质量/g	干燥后质量/g	干燥时间/s	单位能耗/(MJ · kg ⁻¹)	干燥效率/%
70	20	6.81	2 250	11.94	18.90
	25	8.98	2 695	11.78	19.17
	30	12.98	2 987	12.29	18.37
140	20	6.23	1 188	11.28	19.39
	25	8.35	1 343	11.29	19.99
	30	12.08	1 480	11.56	19.52
210	20	6.58	747	11.09	20.31
	25	8.11	876	10.89	20.72
	30	7.48	1 251	11.40	19.80
280	20	5.37	589	11.27	20.12
	25	7.52	697	11.16	20.22
	30	12.87	689	11.46	19.04
350	20	6.39	439	11.29	19.99
	25	7.91	549	11.24	20.07
	30	12.61	591	11.89	18.97
420	20	6.41	367	11.34	19.90
	25	7.99	400	11.49	19.51
	30	7.42	499	12.06	18.72

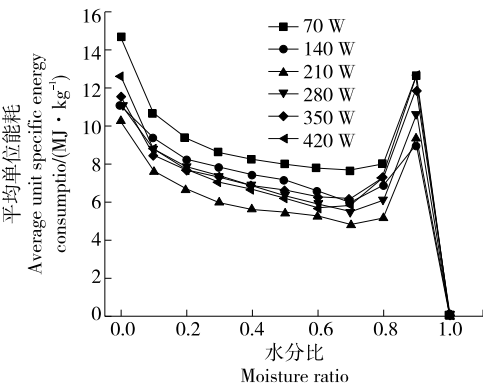


图 3 单位能耗与水分比的关系

Figure 3 Specific energy consumption versus moisture ratio

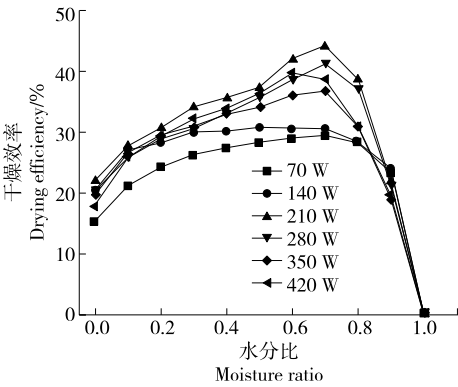


图 4 干燥效率与水分比的关系

Figure 4 Relationship between drying efficiency and moisture ratio

3 结论

通过对 5 种常用的干燥数学模型进行比较发现, Logarithmic 对数模型可以更好地描述猪肉在微波干燥过程中的水分比变化关系。微波干燥过程中, 当干燥质量增加或微波功率增大时, 猪肉的平均单位能耗先降低后增加、干燥效率先增加后降低, 且当干燥质量为 25 g、微波功率为 210 W 时达到最优, 此时平均单位能耗为 10.89 MJ/kg, 微波干燥效率为 20.72%。试验在研究微波功率和干燥质量对猪肉微波干燥特性的影响时, 未考

虑猪肉切片厚度这一因素。后续可寻求一种微波正交干燥试验, 采用正交试验的极差分析和方差分析方法, 分析猪肉切片厚度对微波干燥特性及能耗的影响, 以更好地为猪肉微波干燥参数的优化及实际干燥工艺提供参考。

参考文献

[1] 郭红霞, 王璟, 邢宝松, 等. 地方猪优良肉质性状及影响因素[J]. 畜牧兽医科学(电子版), 2019(23): 92-93.
GUO Hong-xia, WANG Jing, XING Bao-song, et al. Excellent meat quality traits and influencing factors of local pigs[J]. Animal Hus-

- bandry and Veterinary Science (Electronic Edition), 2019(23): 92-93.
- [2] 辜雪冬, 马长中, 罗章, 等. 不同干燥方式对藏猪肉干品质的影响[J]. 肉类工业, 2017(4): 19-22.
KU Xue-dong, MA Chang-zhong, LUO Zhang, et al. Effect of different drying methods on the quality of dried Tibetan pork[J]. Meat Industry, 2017(4): 19-22.
- [3] 汤小红, 李程懿, 黄丹, 等. 油茶籽微波真空干燥特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(6): 139-146, 166.
TANG Xiao-hong, LI Cheng-yi, HUANG Dan, et al. Microwave vacuum drying characteristics of oil tea seeds[J]. Journal of Central South University of Forestry Science & Technology, 2021, 41(6): 139-146, 166.
- [4] 张乐, 赵守浛, 王赵改, 等. 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 206-210.
ZHANG Le, ZHAO Shou-huan, WANG Zhao-gai, et al. Research on microwave vacuum drying characteristics of chestnut[J]. Food & Machinery, 2018, 34(4): 206-210.
- [5] 刘田子, 熊汉国. 酸辣猪肉干热风干燥动力学及其品质研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(10): 32-37.
LIU Tian-zi, XIONG Han-guo. Hot air drying kinetics of dried sour and spicy pork and its quality study[J]. China Condiment, 2021, 46(10): 32-37.
- [6] 汪磊, 庞雪凤, 王国泽, 等. 牛肉干干燥工艺优化[J]. 食品工业科技, 2012, 33(9): 328-440.
WANG Lei, PANG Xue-feng, WANG Guo-ze, et al. Optimization of beef jerky drying process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(9): 328-440.
- [7] 田龙, 张婧芸, 王丽, 等. 猪肉脯的微波法制备工艺优化研究[J]. 肉类工业, 2017(7): 1-4.
TIAN Long, ZHANG Jing-yun, WANG Li, et al. Optimization study on the preparation process of preserved pork by microwave method[J]. Meat Industry, 2017(7): 1-4.
- [8] DOYMAZ I, ISMAIL O. Drying characteristics of sweet cherry[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89: 31-38.
- [9] 盘喻颜, 段振华, 刘艳, 等. 火龙果片微波间歇干燥特性及动力学研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 195-201.
PAN Yu-yan, DUAN Zhen-hua, LIU Yan, et al. Characterization and kinetics of microwave intermittent drying of dragon fruit slices[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 195-201.
- [10] 刘兵, 李川, 段振华, 等. 罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性及动力学模型[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 30-35.
LIU Bing, LI Chuan, DUAN Zhen-hua, et al. Permeation-vacuum microwave drying characteristics and kinetic model of tilapia fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 30-35.
- [11] 员冬玲, 耿文广, 杜锐, 等. 南美白对虾过热蒸汽干燥特性及干燥数学模型[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 62-67.
YUAN Dong-ling, GENG Wen-guang, DU Rui, et al. Superheated steam drying characteristics of South American white shrimp and mathematical model of drying[J]. Food Science, 2020, 41(3): 62-67.
- [12] WANG Z, SUN J, CHEN F, et al. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 536-544.
- [13] JU H Y, ZHAO S H, MUJUMDAR A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 111: 20-29.
- [14] 宋树杰, 黄雪, 郭玉蓉. 基于温度控制的猕猴桃片微波真空干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 124-132, 244.
SONG Shu-jie, HUANG Xue, GUO Yu-rong. Study on the characteristics of microwave vacuum drying of kiwifruit slices based on temperature control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 124-132, 244.
- [15] WU Ben-gang, GUO Xiu-yu, GUO Yi-ting, et al. Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 147-152.
- [16] AZMI Seyhun Kipcak. Microwave drying kinetics of mussels (*Mytilus edulis*) [J]. Research on Chemical Intermediates, 2017, 43(3): 1 429-1 445.
- [17] 卢泽, 张大斌, 胡浩, 等. 烟秆颗粒的微波干燥动力学与能耗分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 253-258.
LU Ze, ZHANG Da-bin, HU Hao, et al. Analysis of microwave drying kinetics and energy consumption of tobacco straw pellets[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 253-258.
- [18] 唐小闲, 段振华, 任爱清, 等. 即食慈姑片微波干燥特性及动力学模型研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 177-182, 227.
TANG Xiao-xian, DUAN Zhen-hua, REN Ai-qing, et al. Microwave drying characteristics and kinetic modeling of ready-to-eat ciguatera slices[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 177-182, 227.
- [19] 李秋庭, 吴建文. 盐焗鸡微波干燥特性及数学模型[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 58-61.
LI Qiu-ting, WU Jian-wen. Microwave drying characteristics and mathematical model of salt-baked chicken[J]. Food Science, 2014, 35(11): 58-61.
- [20] 薛广. 微波真空干燥罗非鱼片工艺优化及其相关特性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020: 4-5.
XUE Guang. Microwave vacuum drying process optimization and related characteristics of tilapia fillets[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020: 4-5.
- [21] 李婧怡, 段振华, 刘怡彤, 等. 黄秋葵真空微波干燥特性及其动力学研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 285-289.
LI Jing-yi, DUAN Zhen-hua, LIU Yi-tong, et al. Vacuum microwave drying characteristics and kinetics of okra[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(22): 285-289.
- [22] ALI Motevali, SAEID Minaei, AHMAD Banakar, et al. Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2016, 15(2): 179-187.