DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.020

荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型*

李　辉[1]　林河通[1]　袁　芳[1]　林艺芬[1]　陈艺晖[2]

(1. 福建农林大学食品科学学院，福州 350002；2. 福建农林大学农产品产后技术研究所，福州 350002)

【摘要】 研究了荔枝果肉微波真空干燥特性，探讨不同微波功率、相对压力及装载量对荔枝果肉干燥速率的影响。结果表明：微波功率和装载量对荔枝果肉干燥速率的影响较大，而相对压力的影响不明显。干燥试验数据用于对 12 种可利用的干燥模型进行非线性回归拟合求解，并确定模型系数。结果发现 Modified Henderson and Pabis 模型具有较高的决定系数 R^2、较低的残差平方和(SSE)及均方根误差(RMSE)，该模型能较准确地表达和预测荔枝果肉微波真空干燥过程的水分变化规律。

关键词：荔枝果肉　微波真空干燥　干燥特性　干燥模型

中图分类号：TS255.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2012)06-0107-06

Microwave-vacuum Drying Characteristics and Kinetics Model of Litchi Pulp

Li Hui[1]　Lin Hetong[1]　Yuan Fang[1]　Lin Yifen[1]　Chen Yihui[2]

(1. *College of Food Science*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, *Fuzhou* 350002, *China*

2. *Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, *Fuzhou* 350002, *China*)

Abstract

The microwave-vacuum drying characteristics of litchi pulp were studied and the effects of microwave power, relative pressure and loading capacity on drying rate of litchi pulp were investigated. The results showed that the drying rates of litchi pulp were markedly affected by microwave power and loading capacity, whereas, there was no obviously affected by relative pressure. The experimental drying data of litchi pulp were used to fit twelve available drying models, and coefficients of models were determined by non-linear regression analysis. It showed that Modified Henderson and Pabis model had higher correction coefficient R^2, lower square sum of error (SSE) value and root mean square error (RMSE) value and could exactly describe and predict the moisture dynamics of litchi pulp during microwave-vacuum drying process.

Key words　Litchi pulp, Microwave-vacuum drying, Drying characteristic, Drying model

引言

荔枝(*Litchi chinensis* Sonn.)汁多味美、营养丰富，深受人们的喜爱。由于荔枝果实不耐贮藏，人们经常把荔枝加工成荔枝干。目前已有关于荔枝微波干燥、真空干燥和冷冻干燥的相关报道，但这些干燥方法存在干燥时间长、成本高等缺点[1~4]。微波真空干燥是一种新型的干燥方式，是通过在真空条件下对物料进行微波加热而达到水分的蒸发，具有快速、高效和低温等优点，能较好地保持食品原有的色香味及营养成分，近年来已成为国内外食品干燥领域研究的热点[5]。国内外已有学者对香蕉、大蒜、土豆、胡萝卜、蘑菇、鳙鱼片、扇贝柱和蜂蜜等农产品的微波真空干燥工艺进行了研究，但目前尚未见荔枝果肉微波真空干燥方面的研究报道[6~13]。因此，以福建省主栽荔枝品种乌叶果实的果肉为原料，研究微波功率、相对压力、装载量对荔枝果肉干燥特性的影响，并建立荔枝果肉微波真空干燥的动力学模

收稿日期：2011-09-04　修回日期：2011-10-08

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD07B06)、农业部公益性行业科研专项资助项目(nyhyzx07-031)和福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目(闽教科〔2007〕20 号)

作者简介：李辉，博士生，主要从事现代农产品加工技术研究，E-mail：lihui32782752@163.com

通讯作者：林河通，教授，博士生导师，主要从事农产品加工及贮藏工程研究，E-mail：hetonglin@163.com

型,旨在阐明荔枝果肉微波真空干燥规律,同时为开发新型荔枝果肉干制产品提供科学依据和生产实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

以大约九成熟的福建省主栽名优荔枝品种乌叶(*Litchi chinensis* Sonn. cv. Wuye)果实为材料,采自福建省龙海市九湖荔枝园,采收当天用(3 ± 1)℃的冷藏车运至实验室(福州),选择大小均匀、色泽一致、无病虫、无损伤的健康果实进行去壳、去核处理,得到的荔枝果肉用于试验。经测定,供试验荔枝果肉平均含水率(干基)为5.25 kg/kg。

1.2 试验仪器及设备

KL-4 型微波真空干燥机(广州凯棱工业用微波设备有限公司及福建农林大学联合监制);DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);BS224S 型电子天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司)。

1.3 试验方法

选取微波功率、相对压力和装载量为试验因素,分别进行单因素试验。固定相对压力为 -80 kPa,装载量为 500 g,选取微波功率为 1、2、3 kW,研究微波功率对干燥特性的影响;固定微波功率为 1 kW,装载量为 250 g,选取相对压力为 -50、-60、-70、-80 kPa,研究相对压力对干燥特性的影响;固定微波功率为 1 kW,相对压力为 -80 kPa,选取装载量为 250、500、750 g,研究装载量对干燥特性的影响。将大小一致的荔枝果肉平铺一层在微波盘上,并使之互不影响,装载量为 250、500、750 g 时分别需 1、2 和 3 个微波盘,微波盘在干燥室中几何对称放置,并以 10 r/min 的速度转动。按试验要求设置好设备参数后,将物料放入微波真空干燥机进行干燥,每隔 5 min取出记录物料质量,直至含水率(干基)小于或等于 0.176 kg/kg。

1.4 含水率测定

物料含水率测定参照 GB/T 5009.3—2003,为便于进行试验数据分析,文中统一采用干基含水率。

1.5 干燥曲线的数学模型

在参阅国内外相关文献的基础上[14~18],采用 12 种经验或半经验的数学模型对荔枝果肉微波真空干燥的试验数据进行模拟,如表 1 所示。

表 1 选择的薄层干燥数学模型

Tab.1 Selected thin layer-drying mathematical models

模型序号	模型名称	模型方程式
1	Lewis/Newton	$M_R = \exp(-kt)$
2	Henderson and Pabis	$M_R = a\exp(-kt)$
3	Modified Henderson and Pabis	$M_R = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$
4	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
5	Modified Page	$M_R = \exp(-kt)^n$
6	Logarithmic	$M_R = a\exp(-kt) + c$
7	Two-term	$M_R = a\exp(-k_0 t) + b\exp(-k_1 t)$
8	Two-term exponential	$M_R = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
9	Diffusion approximation	$M_R = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
10	Verma et al	$M_R = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$
11	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$
12	Midilli and Kucuk	$M_R = a\exp(-kt^n) + bt$

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{1}$$

式中 M_R——水分比

M_t——物料在 t 时刻的含水率,kg/kg

M_0——物料初始含水率,kg/kg

M_e——物料平衡含水率,kg/kg

因为 M_e 相对于 M_t、M_0 来说非常小,可忽略不计。故式(1)可以简化为 $M_R = \frac{M_t}{M_0}$。

模型的精确度分析采用决定系数 R^2、残差平方和(SSE)及均方根误差(RMSE)等指标。R^2 越高,SSE、RMSE 越低,说明模型拟合度越高,以此选出最合适的干燥模型。SSE 和 RMSE 的表达式为

$$e_{\mathrm{SSE}} = \sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\mathrm{pred},i}} - M_{R_{\mathrm{exp},i}})^2 \tag{2}$$

$$e_{\mathrm{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\mathrm{pred},i}} - M_{R_{\mathrm{exp},i}})^2}{N}} \tag{3}$$

式中 e_{SSE}——残差平方和

e_{RMSE}——均方根误差

N——数据个数

$M_{R_{\mathrm{pred},i}}$——预测水分比

$M_{R_{\mathrm{exp},i}}$——实测水分比

1.6　数据处理

采用 Excel 软件对微波真空干燥试验数据作曲线图，基于 Matlab 7.0 软件，利用 Levenberg-Marquart 算法对干燥模型进行非线性拟合求解。

2　结果与分析

2.1　荔枝果肉微波真空干燥特性分析

2.1.1　微波功率

不同微波功率下荔枝果肉的干燥曲线和干燥速率曲线如图 1、图 2 所示。

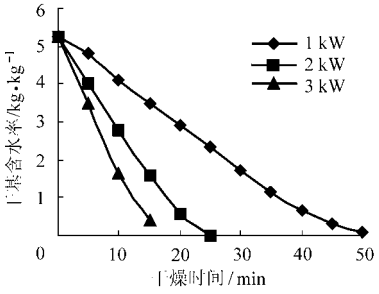

图 1　不同微波功率下荔枝果肉的微波真空干燥曲线

Fig. 1　Microwave-vacuum drying curves of litchi pulp at different microwave power levels

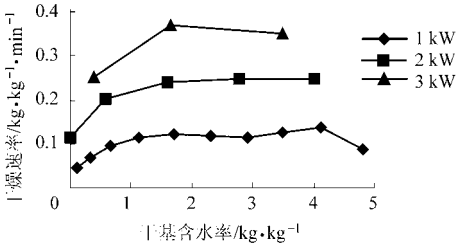

图 2　不同微波功率下荔枝果肉的微波真空干燥速率曲线

Fig. 2　Microwave-vacuum drying rate curves of litchi pulp at different microwave power levels

由图 1 可知，随着微波功率的增大，荔枝果肉的干燥曲线变陡，说明微波功率越大，荔枝果肉干燥至目标含水率所需的时间越短。1、2 和 3 kW 3 个功率条件下，荔枝果肉干燥至目标含水率所需时间分别为 45、22 和 17 min。

由图 2 可知，微波功率对荔枝果肉的干燥速率影响很大。在初始含水率相同的情况下，微波功率越大，荔枝果肉的干燥速率越快。微波的有效功率决定微波能转换为热能的效率，因此会直接影响微波真空干燥过程的干燥速率。虽然提高微波功率会明显缩短荔枝果肉的干燥时间，但功率过高会导致荔枝果肉过热而焦化，其转变往往在分秒之间，因此在实际应用中应考虑微波功率对荔枝果肉干制产品品质的影响。

2.1.2　相对压力

不同相对压力下荔枝果肉的干燥曲线和干燥速率曲线如图 3、图 4 所示。

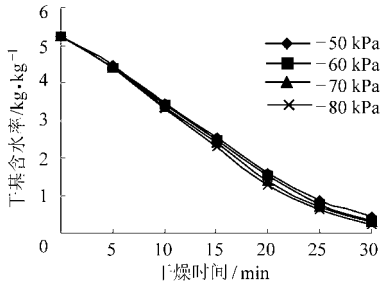

图 3　不同相对压力下荔枝果肉的微波真空干燥曲线

Fig. 3　Microwave-vacuum drying curves of litchi pulp at different relative pressures

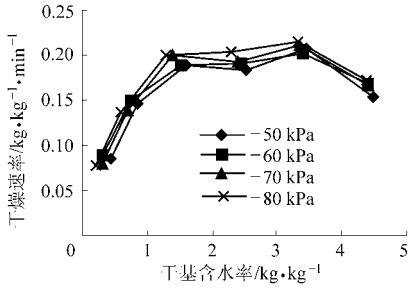

图 4　不同相对压力下荔枝果肉的微波真空干燥速率曲线

Fig. 4　Microwave-vacuum drying rate curves of litchi pulp at different relative pressures

由图 3 可知，在相对压力为 -50 ~ -80 kPa 范围内，负压增大会缩短荔枝果肉的干燥时间，提高荔枝果肉的干燥速率，但影响并不是很明显。对物料进行脱水，就必须提供使物料温度达到水沸点的显热和水分蒸发所需的潜热。负压越大，水的沸点温度越低，物料中水蒸气的扩散驱动力越大，干燥速率越快；但当压力降低时，蒸发潜热增加，这会导致在一定微波功率下干燥速率下降。上述两者的相互作用可能导致相对压力对荔枝果肉干燥时间的影响不显著。

由图 4 可知，在初始含水率相同的情况下，随着干燥室负压的提高，荔枝果肉的干燥速率也有不同程度的增加。荔枝果肉在不同相对压力条件下的干燥过程中，荔枝果肉的干燥速率都有升速、恒速和降速 3 个阶段，相对压力在恒速和降速阶段时对干燥速率的影响较大。

2.1.3　装载量

不同装载量时荔枝果肉的干燥曲线和干燥速率曲线如图 5、图 6 所示。

从图 5 可知，在装载量为 250、500 和 750 g 的条件下，荔枝果肉干燥至目标含水率所需的时间分别为 32、50 和 65 min。随着荔枝果肉装载量的增加，荔枝果肉的干燥时间延长。这是因为随着荔枝果肉

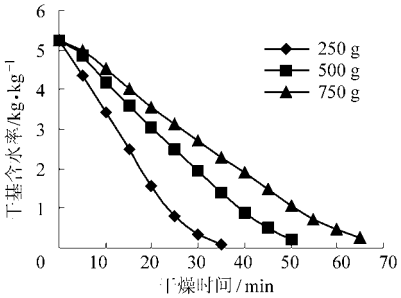

图 5 不同装载量下荔枝果肉的微波真空干燥曲线

Fig. 5 Microwave-vacuum drying curves of litchi pulp with different loading capacity

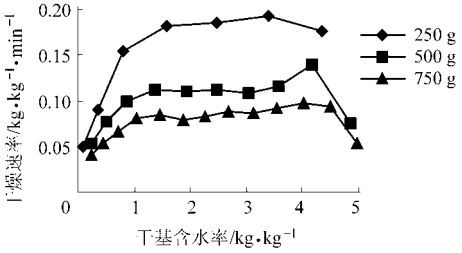

图 6 不同装载量下荔枝果肉的微波真空干燥速率曲线

Fig. 6 Microwave-vacuum drying rate curves of litchi pulp with different loading capacity

装载量的增加,干燥过程所要去除的水分也相应增加,而在微波功率相同的情况下,单位质量水分吸收的微波能量减少,因而导致荔枝果肉干燥时间延长。

从图 6 可知,荔枝果肉装载量对微波真空干燥过程有显著影响。荔枝果肉的装载量越小,则干燥速率越快。不同装载量的荔枝果肉在干燥过程中,荔枝果肉的干燥速率都有升速、恒速和降速 3 个阶段,且装载量越大恒速干燥阶段的时间越长。

2.2 荔枝果肉微波真空干燥的数学模型

2.2.1 干燥模型的选择

分别对表 1 的 12 种干燥模型进行拟合求解,并通过比较拟合优度来确定最优的干燥模型。当微波功率 1 kW、相对压力 -80 kPa,不同装载量时各数学模型的拟合结果如表 2 所示。对各模型的拟合优度统计量值进行综合分析,可得 Modified Henderson and Pabis 模型的拟合最优,其决定系数 R^2 最高,为 0.999 4 ~ 0.999 8,残差平方和(SSE)和均方根误差(RMSE)最低,分别为 0.000 2 ~ 0.000 7 和 0.004 4 ~ 0.007 8。对本文其他干燥试验数据进行分析的结果也显示 Modified Henderson and Pabis 模型的拟合效果最好。因此,该模型能很好地描述荔枝果肉的微波真空干燥过程。

2.2.2 干燥模型的验证

为验证模型拟合的准确性,对荔枝果肉在不同微波功率、相对压力和装载量条件下的微波真空干燥的预测值与试验值进行了比较,如图 7 ~ 9 所示。可知 Modified Henderson and Pabis 模型的预测值与试验值的拟合度很高。二者的决定系数 R^2 为 0.999 4 ~ 0.999 9,残差平方和(SSE)为 $2.801\,2\times10^{-19}$ ~ 0.062 8,均方根误差(RMSE)为 $2.646\,3\times10^{-10}$ ~ 0.076 5。因此 Modified Henderson and Pabis 模型能较准确地预测荔枝果肉在微波真空干燥过程中的水分变化规律,并可用于描述荔枝果肉的微波真空干燥过程。

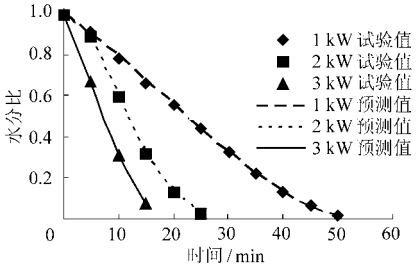

图 7 不同微波功率下荔枝果肉微波真空干燥的预测值和试验值的比较

Fig. 7 Comparison between predicted value and experimental data of microwave-vacuum drying of litchi pulp at different microwave power levels

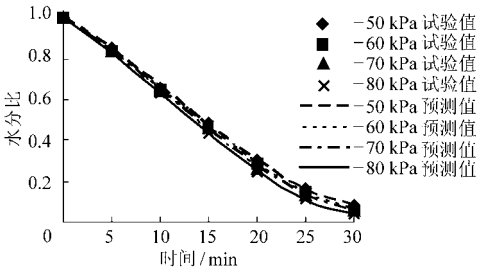

图 8 不同相对压力下荔枝果肉微波真空干燥的预测值和试验值的比较

Fig. 8 Comparison between predicted value and experimental data of microwave-vacuum drying of litchi pulp at different relative pressures

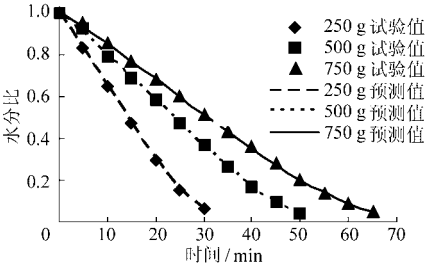

图 9 不同装载量下荔枝果肉微波真空干燥的预测值和试验值的比较

Fig. 9 Comparison between predicted value and experimental data of microwave-vacuum drying of litchi pulp with different loading capacity

3 结论

(1)荔枝果肉的微波真空干燥特性与微波功率、相对压力和装载量有关。微波功率和装载量对

表 2　不同装载量时各干燥模型的统计参数和系数

Tab. 2　Statistical parameters and coefficient values of each model with different loading capacity

模型序号	装载量/g	R^2	SSE	RMSE	模型系数
1	250	0.967 9	0.048 8	0.078 1	$k=0.060\ 3$
	500	0.964 4	0.072 0	0.080 9	$k=0.034\ 8$
	750	0.965 7	0.087 8	0.076 5	$k=0.026\ 4$
2	250	0.961 3	0.040 8	0.071 4	$a=1.075\ 0, k=0.064\ 6$
	500	0.955 3	0.054 4	0.070 4	$a=1.097\ 1, k=0.038\ 5$
	750	0.957 6	0.062 7	0.066 9	$a=1.105\ 9, k=0.029\ 5$
3	250	0.999 8	0.000 2	0.004 4	$a=-23.511\ 2, b=15.291\ 4, c=9.222\ 2, k=-0.024\ 0, g=-0.015\ 4, h=-0.032\ 0$
	500	0.999 4	0.000 7	0.007 8	$a=0.039\ 9, b=-9.351\ 3, c=10.320\ 2, k=-0.054\ 7, g=-0.007\ 4, h=-0.004\ 5$
	750	0.999 6	0.000 6	0.006 6	$a=-13.525\ 0, b=10.471\ 7, c=4.064\ 9, k=-0.011\ 7, g=-0.006\ 9, h=-0.017\ 4$
4	250	0.996 3	0.003 8	0.021 7	$k=0.010\ 8, n=1.594\ 9$
	500	0.994 4	0.006 7	0.024 7	$k=0.004\ 4, n=1.616\ 8$
	750	0.995 1	0.007 1	0.022 5	$k=0.003\ 0, n=1.604\ 2$
5	250	0.967 9	0.048 8	0.078 1	$k=0.057\ 7, n=1.006\ 0$
	500	0.964 4	0.072 0	0.080 9	$k=0.031\ 7, n=1.009\ 0$
	750	0.967 3	0.087 8	0.079 2	$k=0.026\ 1, n=1.010\ 0$
6	250	0.994 6	0.005 0	0.025 1	$a=1.732\ 4, k=0.026\ 2, c=-0.708\ 5$
	500	0.997 6	0.002 7	0.015 6	$a=2.997\ 6, k=0.008\ 2, c=-1.972\ 8$
	750	0.998 1	0.002 6	0.013 7	$a=2.956\ 8, k=0.006\ 4, c=-1.928\ 4$
7	250	0.994 9	0.004 8	0.024 4	$a=51.315\ 2, b=-50.291\ 0, k_0=0.015\ 1, k_1=0.014\ 5$
	500	0.997 6	0.002 6	0.015 5	$a=-55.969\ 4, b=56.994\ 3, k_0=0.004\ 2, k_1=0.004\ 5$
	750	0.998 1	0.002 6	0.013 6	$a=59.838\ 7, b=-58.810\ 1, k_0=0.003\ 5, k_1=0.003\ 3$
8	250	0.991 1	0.009 6	0.034 6	$a=2.033\ 6, k=0.096\ 1$
	500	0.996 3	0.004 3	0.019 7	$a=-2.468\ 5, k=-0.002\ 0$
	750	0.996 7	0.004 7	0.018 4	$a=-2.483\ 2, k=-0.001\ 5$
9	250	0.994 6	0.005 5	0.026 3	$a=-144.636\ 2, b=1.016\ 0, k=0.012\ 7$
	500	0.997 2	0.003 7	0.018 3	$a=-645.024\ 3, b=1.010\ 9, k=0.002\ 8$
	750	0.997 6	0.004 2	0.017 3	$a=-1011.251\ 1, b=1.007\ 4, k=0.002\ 0$
10	250	0.994 6	0.005 5	0.026 3	$a=-167.355\ 1, k=0.012\ 7, g=0.012\ 9$
	500	0.997 2	0.003 7	0.018 3	$a=86.375\ 9, k=0.002\ 9, g=0.002\ 7$
	750	0.997 6	0.004 2	0.017 3	$a=194.861\ 4, k=0.002\ 1, g=0.002\ 0$
11	250	0.995 8	0.004 5	0.023 7	$a=-0.041\ 5, b=0.000\ 4$
	500	0.997 4	0.003 6	0.018 1	$a=-0.022\ 5, b=5.596\ 9$
	750	0.997 7	0.004 1	0.017 1	$a=-0.017\ 1, b=3.074\ 1$
12	250	0.999 3	0.000 6	0.008 8	$a=0.998\ 7, b=-0.097\ 0, n=0.749\ 5, k=-0.085\ 4$
	500	0.999 2	0.000 9	0.009 0	$a=1.001\ 0, b=-0.004\ 0, n=1.348\ 5, k=0.007\ 5$
	750	0.999 6	0.000 6	0.006 5	$a=1.002\ 0, b=-0.003\ 1, n=1.344\ 5, k=0.005\ 3$

荔枝果肉干燥速率的影响较大，而相对压力则不明显。微波功率越大、荔枝果肉装载量越少，则荔枝果肉干燥速率越快。荔枝果肉在微波真空干燥过程中，其干燥速率可分为升速、恒速和降速 3 个阶段。

（2）运用非线性回归分析方法对 12 种经验或半经验的干燥模型进行拟合和求解，通过拟合优度评价指标对各模型进行比较研究。结果表明，Modified Henderson and Pabis 模型拟合较优，该模型能较准确地表达和预测荔枝果肉在微波真空干燥过程中的水分变化规律。

参 考 文 献

1 罗树灿,李远志,彭伟睿,等. 热风和微波结合干燥荔枝加工工艺研究[J]. 现代食品科技,2006,22(3):10~13.
Luo Shucan, Li Yuanzhi, Peng Weirui, et al. The drying processing technology of combining thermal airflow with microwave for litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2006,22(3):10~13. (in Chinese)

2 肖维强,蔡长河,张爱玉,等. 低温真空干燥焙制荔枝干、龙眼干的研究 [J]. 食品科学,2004,25(8):218~219.
Xiao Weiqiang, Cai Changhe, Zhang Aiyu, et al. Study on the vacuum drying of litchi and longan [J]. Food Science, 2004, 25(8):218~219. (in Chinese)

3 李远志,罗树灿,薛子光,等. 真空冷冻干燥荔枝果肉工艺研究 [J]. 食品与机械,2003(2):17~18.
Li Yuanzhi, Luo Shucan, Xue Ziguang, et al. Studies on vacuum freezing drying process of lychee sarcocarp [J]. Food and Machinery, 2003(2):17~18. (in Chinese)

4 张颜民,徐光,童建民,等. 荔枝真空冷冻干燥实验研究 [J]. 食品工业科技,1999,20(1):31~32.
Zhang Yanmin, Xu Guang, Tong Jianmin, et al. Studies on vacuum freezing drying process of litchi [J]. Science and Technology of Food Industry,1999,20(1):31~32. (in Chinese)

5 Sun D W. Emerging technologies for food processing [M]. London: Elsevier Academic Press, 2005: 507.

6 Drouzas E,Schubert H. Microwave application in vacuum drying of fruits [J]. Journal of Food Engineering,1996,28(2):203~209.

7 Figiel A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1):98~104.

8 Bondaruk J, Markowski M, Blaszczak W. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes [J]. Journal of Food Engineering, 2007,81(2):306~312.

9 Lin T M, Durance T D, Scaman C H. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices [J]. Food Research International, 1998,31(2):111~117.

10 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.

11 Zhang J, Zhang M, Shan L, et al. Microwave-vacuum heating parameters for processing savory crisp bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) slices [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3):885~891.

12 张国琛,毛志怀,牟晨晓,等. 微波真空干燥扇贝柱的物理和感观特性研究 [J]. 农业工程学报,2004,20(3):141~144.
Zhang Guochen, Mao Zhihuai, Mou Chenxiao, et al. Physical and sensory properties of vacuum microwave dried scallop [J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(3):141~144. (in Chinese)

13 Cui Z W, Sun L J, Chen W, et al. Preparation of dry honey by microwave-vacuum drying [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(4):582~590.

14 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价 [J]. 农业机械学报,2010,41(6):128~132.
Lin Xi'na, Wang Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):128~132. (in Chinese)

15 李汴生,刘伟涛,李丹丹,等. 糖渍加应子的热风干燥特性及其表达模型 [J]. 农业工程学报,2009,25(11):330~335.
Li Biansheng, Liu Weitao, Li Dandan, et al. Characteristic of hot air drying of candied prunes and representation model [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(11): 330~335. (in Chinese)

16 Sharma G P, Verma R C, Pathare P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices [J]. Journal of Food Engineering,2005,71(3): 282~286.

17 Sutar P P, Prasad S. Modeling microwave vacuum drying kinetics and moisture diffusivity of carrot slices [J]. Drying Technology, 2007,25(10): 1 695~1 702.

18 关志强,王秀芝,李敏,等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报,2012,43(2):151~158.
Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):151~158. (in Chinese)