

刺参远红外干燥实验研究

赵海波¹, 戴家傲², 乔玲敏², 张玲玲², 吴坤³

(1. 烟台大学海洋学院, 山东烟台 264005) (2. 烟台大学土木学院, 山东烟台 264005)

(3. 烟台顿汉布什工业有限公司, 山东烟台 264003)

摘要: 为寻找新型刺参干燥技术, 本文采用实验方法研究了刺参在远红外干燥条件下的干燥特性, 分析了相对含水率、干燥速率、收缩率和复水率等参数的动态变化规律, 以及干燥温度对干制刺参品质的影响, 比较分析了 13 种预测刺参远红外干燥特性的薄层干燥模型。结果表明, 温度对刺参相对含水率、干燥速率、收缩率和复水率均有重要影响。在干燥初期, 刺参的干燥速率与温度呈正相关, 而到了干燥中后期, 温度对干燥速率的正相关影响不太明显, 甚至温度低的干燥速率反而更高。刺参收缩率和复水率均随干燥温度的升高逐渐增加, 且温度越高增加越明显。60 °C 条件下干燥时间为 14 h, 干制品复水率可达 5.0, 且质量较好, 是较理想的远红外干燥温度值。在干燥模型方面, Two-term exponential 模型精度最好, R^2 可达 0.993, 能更好地预测远红外干燥中刺参相对含水率的变化。

关键词: 刺参; 远红外干燥; 薄层模型; 含水率

文章编号: 1673-9078(2018)03-101-107

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.03.015

Far Infrared Drying of Sea Cucumber

ZHAO Hai-bo¹, DAI Jia-ao², QIAO Ling-min², ZHANG Ling-ling², WU Kun³

(1.Ocean School Yantai University, Yantai 264005, China)(2.Civil Engineering School Yantai University, Yantai 264005, China)(3.Yantai Dunham-bush Industrial Co., LTD, Yantai 264003, China)

Abstract: In order to find new drying technologies of sea cucumber, the drying characteristics of sea cucumber with far infrared drying were studied in this paper. The variation disciplines of relative moisture content, drying rate, shrinkage ratio and rehydration ratio of sea cucumber were analyzed, and the effects of drying temperatures on dried sea cucumber products were also studied. 13 kinds of drying models were selected for the best one to simulate the drying kinetics of sea cucumber with far infrared drying. The results showed that the drying temperatures have important influence on the relative moisture content, drying rate, shrinkage ratio and rehydration ratio. During the early stage of drying, the drying rates have positive correlation with the temperature, while negative correlation between the drying rate and temperature appeared in the middle and later stage. The shrinkage ratios and rehydration ratios increased with the increase of drying temperature, and higher temperature resulted in higher shrinkage ratio and rehydration ratio. In conclusion, for sea cucumber, the far infrared drying at 60 °C for 14 h was a preferable drying process, while the rehydration ratio reached 5.0 and had good quality. The two-term exponential model had the best precision among the drying models with R^2 of 0.993, which could better predict of the changes of relative moisture contents of sea cucumber in far infrared drying.

Key words: sea cucumber; far infrared drying; thin layer model; moisture content

刺参具有非常高的营养价值和药用价值^[1], 然而刺参极易自溶, 采捕后需尽快加工。干制是目前采用的主要加工方法^[2]。干制加工有盐干^[3]、冻干^[4,5]、微波真空^[6-8]、微波冻干^[9]、热泵干燥^[10]和电流体动力学干燥^[11]等多种方式, 但不同干燥方式又各有不足, 如盐干营养成分损失大、冻干能耗大、微波干燥不均匀和热泵干燥耗时过长等^[12,13]。因此, 开发新型刺参

干燥技术是近年来刺参加工领域一个主要研究趋势。

远红外干燥是基于红外线的热作用和物质对辐射的选择性吸收原理^[14], 红外线发射到物体表面时, 物质会吸收特定波长的辐射光谱, 加速内部微观粒子振动碰撞, 引起温度升高, 驱动内部水分向外扩散转移, 实现快速干燥。远红外干燥具有干燥成本低、速度快、品质好和耗能少等特点^[15], 是一种比较理想的干燥方式。已在果蔬^[16]、水产品^[17]和草药^[18]等物料干燥中获得了成功的应用, 但在刺参干燥中的应用尚未见有报道。

研究刺参的干燥动力学特性, 分析刺参含水率的

收稿日期: 2017-09-22

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2014EL029); 山东省高等学校科技计划 (J12LB55)

作者简介: 赵海波 (1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 刺参干燥技术

动态变化规律,是设计远红外干燥装置、确定最优干燥工艺的重要依据。干燥动力学特性可用薄层干燥模型来描述。研究人员采用了不同的模型来研究分析不同物料的远红外干燥特性。汤尚文等^[19]研究了南瓜红外干燥半经验模型,发现 Page 模型可以作为南瓜片红外干燥的基础模型。周冰^[20]、郑霞^[21]和曾目成等^[22]研究认为 Weibull 分布函数模型能够描述白芷药材、红枣泥片、猕猴桃切片的红外干燥特性。考虑到不同物料的结构、热物性参数的差异,上述模型是否适合刺参的远红外干燥也有待进一步的研究。为此,本文将通过实验方法研究刺参的远红外干燥特性,为刺参干燥技术和干燥工艺的发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

刺参,采购于烟台一市场,体重(18±4.5)g。

1.2 仪器与设备

电子天平,游标卡尺,远红外线干燥箱(功率2 kW)。

1.3 试验方法

试验前,将鲜活刺参去除内脏后,迅速放入锅内煮沸,15 min 后取出去除参嘴石灰质,用滤纸吸干表面水分,将整只刺参作为试验样品。取3个试验样品置于干燥箱支架上,设定实验温度后,开始干燥实验。每隔20 min 将刺参取出称重,测量尺寸,烘干至前后两次质量差不超过0.01 g。干燥温度设定40℃、60℃和80℃三个温度。

复水试验参照文献^[7]的方法,将干刺参浸泡于蒸馏水中,置于冰箱内,实验72 h,每隔24 h 取出称重,测定其质量增大倍数作为复水率。

干基含水量的测定采用 GB/T 5009.3-2016 食品安全国家标准-食品中水分的测定中规定的常压干燥法^[23]。将刺参置于远红外线干燥箱内,设定温度为105℃,持续加热,使海参完全干燥,作为全干质量,再由测得的质量计算每个测量时刻的干基含水率。

试验时,每组设三个平行样本,测量上述参数后分别取平均值。

1.4 试验指标

(1)干基含水率 X:

$$X = \frac{m_t - m_g}{m_g} \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_t 为干燥进行到t时刻时的刺参质量,kg; m_g 为全干刺参质量,kg。

(2)相对含水率 M:

$$M = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \times 100\% \quad (2)$$

式中, X_0 为刺参初始含水率; X_e 为刺参平衡含水率。相对比干基含水率,该指标更有利于比较刺参不同初始含水率和干燥条件下的干燥特性。

(3)干燥速率

$$dM/dt = (M_t - M_{t+dt})/dt \quad (3)$$

式中, M_t 为t时刻刺参相对含水率, M_{t+dt} 为t+dt时刻刺参相对含水率。

(4)收缩率 ε

采用游标卡尺测量干燥前后刺参的体长,按下式计算收缩率^[7]:

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L_t}{L_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中, L_0 为刺参的初始长度, L_t 为刺参在每一时刻的长度。

(5)复水率 β

$$\beta = \frac{m_1}{m_2} \quad (5)$$

式中, m_1 为刺参复水后的质量, m_2 为刺参烘干后的质量。

2 干燥模型

为了获得适合不同干燥温度的薄层干燥模型,本文结合实验数据,采用 Matlab 软件的非线性拟合法,将常用薄层干燥模型^[24-26]中的系数表示为温度的函数,从而获得了适用于不同干燥温度的薄层干燥模型,如表1。

为了比较不同模型的优劣并从中选择最合适的干燥模型,本文选择并确定了以下4个检验指标^[19,27]:

(1)决定系数

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

(2)均方根误差

$$E_{RMS} = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

(3)平均相对偏差百分比

$$E_{MD} = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \quad (8)$$

(4)卡方误差

$$\chi^2 = \frac{1}{m-j} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

式中, y 为拟合值, \hat{y} 为对应的实验值, m 为数据个数,
 i 为第 i 组实验, j 为常数的个数。
 4 个统计指标中, R^2 越接近于 1, E_{MD} 、 χ^2 和 E_{RMS}

越接近于 0 的模型拟合精度越高。计算时, 先由实验数据拟合确定各模型中的所有系数, 再用实验数据和模型计算结果计算得上述 4 个检验指标, 最终根据指标值选择精度最高的模型。

表 1 常用薄层干燥模型

Table 1 Thin layer drying models commonly used

模型名称	模型表达式	参数拟合公式
Newton	$M=e^{-kt}$	$k=-0.00438+0.000162T$
Henderson and Pabis	$M=ae^{-kt}$	$a=1.1597-0.0042T$ $k=-0.003+0.000128T$
Page	$M = e^{-kt^n}$	$k=-0.0036+0.000179T$ $n=0.8358+0.0013T$
Modified Page Model	$M = e^{(-kt)^n}$	$k=-0.0049+0.000175T$ $n=1.2073+0.0055T$
Logarithm Model	$M=ae^{-kt}+b$	$a=1.196-0.0047T$ $k=-0.0028+0.00012T$ $b=-0.0416+0.000362T$
Two-term Model	$M=ae^{-k_1t}+be^{-k_2t}$	$a=-0.8322+0.0155T$ $b=1.7225-0.0142T$ $k_1=-0.033+0.00096T$ $k_2=-0.0014+0.000093T$
Two-term exponential Model	$M = ae^{-bt} + (1-a)e^{-abt}$	$a=1.857-0.0094T$ $b=-0.0039+0.000159T$
Wang and singh Model	$M=1+at+bt^2$	$a=0.0011-6.96e-5T$ $b=-2.95e-6+9.138e-8T$
diffusion approach	$M=ae^{-bt}+(1-a)e^{-bct}$	$a=1.3702-0.0094T$ $b=-0.0017+9.491e-5T$ $c=22.3346-0.1746T$
Verma et al	$M=ae^{-bt}+(1-a)e^{-ct}$	$a=-0.2749+0.0071T$ $b=0.072+0.05T$ $c=-0.0022+1.0797e-4T$
Modified Henderson and Pabis	$M=ae^{-kt}+be^{-gt}+ce^{-ht}$	$a=45.409-0.444T$ $b=-0.1896+0.0071T$ $c=-44.21+0.4369T$ $k=-0.057+0.0099T$ $g=10.6479+0.0155T$ $h=-0.056+0.0101T$
Midilli et al.	$M = ae^{-kt^n} + bt$	$a=1.1109-0.0193T$ $k=-0.4135+0.1696T$ $n=0.8703-0.0263T$ $b=-0.0133+7.616e-4T$
Weibull 分布函数	$M = e^{-(t/\alpha)^\beta}$	$\alpha=785.07-8.855T$ $\beta=1.2726+0.0069T$

3 结果与分析

3.1 干燥特性

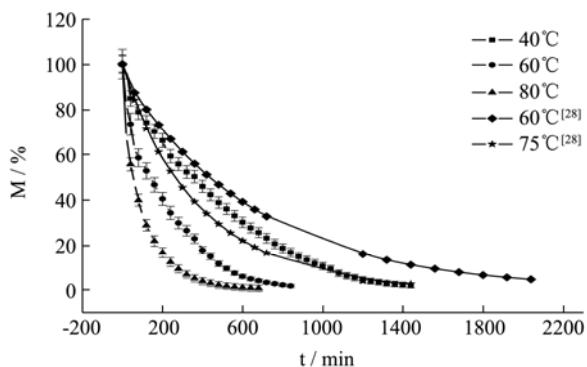


图1 刺参相对含水率随干燥时间的变化情况

Fig.1 Variation of relative moisture content of sea cucumber with the drying time

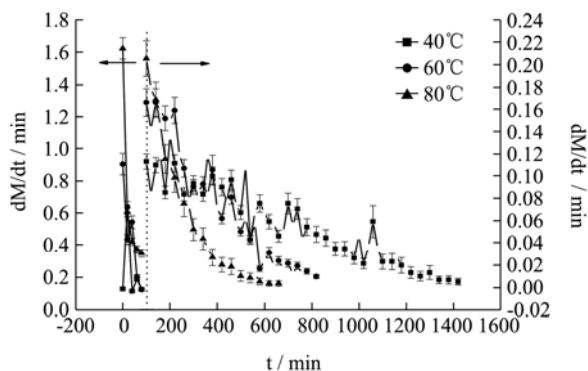


图2 刺参干燥速率随干燥时间的变化情况

Fig.2 Variation of drying rates of sea cucumber with the drying time

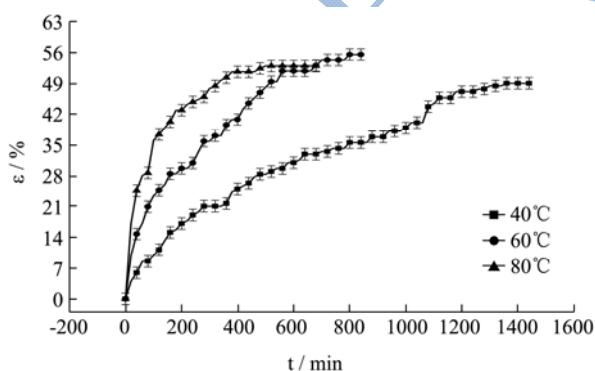


图3 刺参收缩率随干燥时间的变化情况

Fig.3 Variation of shrinkage ratio of sea cucumber with the drying time

图1为远红外干燥过程中,刺参相对含水率的动态变化情况。可以看出,刺参在干燥中含水率逐渐降低,且干燥温度越高,所需干燥时间越短,40℃时,干燥时间最长为24 h,60℃时为14 h,到80℃时,干燥时间最短为10.1 h。说明温度对刺参干燥进程具

有重要作用。本实验中所需的远红外干燥时间也远小于热风干燥。文献[28]研究结果表明,75℃热风干燥下,刺参干燥时间均超过20 h,60℃条件下甚至超过40 h,如图1所示。这说明刺参在远红外干燥条件下效率更高。

图2为远红外干燥过程中,刺参干燥速率变化情况。可以看出,刺参的干燥速率在干燥初期比较大,在三种干燥条件下分别为0.65%/min、0.9%/min和1.65%/min,接着迅速下降,在干燥中后期基本低于0.2%/min。整个干燥过程中不存在恒速干燥,说明刺参与青豆等^[25,26]物料干燥一样,其干燥均属于降速干燥。从图中还可以看出,在不同的干燥阶段,温度对干燥速率的影响不一样。在干燥初期,干燥速率与温度呈正相关,干燥温度越高,干燥速率越大,而到了干燥中后期,温度与干燥速率就不是正相关,计算三种干燥条件下50%~100%干燥进程的干燥速率均值,分别为0.0353%/min、0.032%/min和0.0167%/min,表明温度低的干燥速率反而更高,进一步地,计算得35℃与40℃和45℃条件下的显著性P值分别为0.584和0.192,均大于0.05,说明其干燥速率差别不显著。分析其原因,在刺参的远红外干燥过程中,主要驱动力应为水分的内部扩散,刺参内部水分子(尤其是自由水)在干燥初期受到温度越高,运动速度越快,更容易向外扩散,而到了干燥中后期,刺参内部含水率已处于较低水平,且大部分为结合水,且较低温度干燥条件下的刺参内部含水率相对较高,其含水率梯度更大,在此驱动下水分扩散反而能更快。

图3为刺参收缩率在远红外干燥过程中的变化情况。从图中可以看出,在三个干燥温度下,刺参收缩率均随干燥的进行而逐渐增加,且干燥温度越高,收缩的更快。证明远红外干燥温度对刺参干燥中的收缩具有决定性的影响。其原因应归于干燥温度对刺参体壁组织结构和胶原纤维结构的影响^[29]。随着干燥温度的升高,刺参肌肉组织中的纤维会发生聚集交联,且胶原蛋白出现热变性,使得胶原纤维结构收缩,排列更紧密,刺参整体逐渐收缩。

图4为刺参复水率随复水时间的变化情况。从图中可以看出,随着复水时间的增加,复水率逐渐增加,如60℃干燥条件下得到的干刺参,复水时间从24 h增加到72 h后,复水率从4.0增加到5.0。80℃条件下从7.0增加到7.9。干燥温度越高,复水率越大。该结论与文献30中红枣的复水结果相反,但与文献31中对流干燥海参的复水率结论一致。原因应是高温干燥条件下得到的海参其内部的亲水性基团更多,使得复水率不断升高。

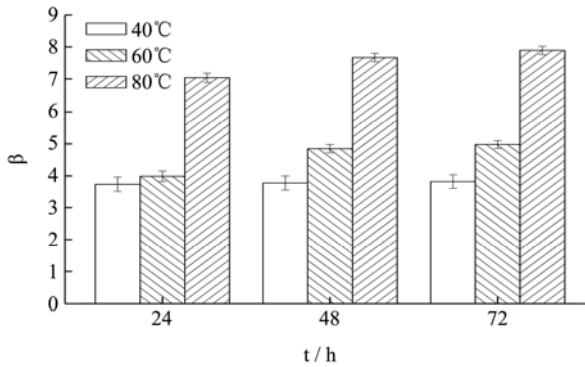


图4 刺参复水率随复水时间的变化情况

Fig.4 Variation of rehydration ratio of sea cucumber with the rehydration time

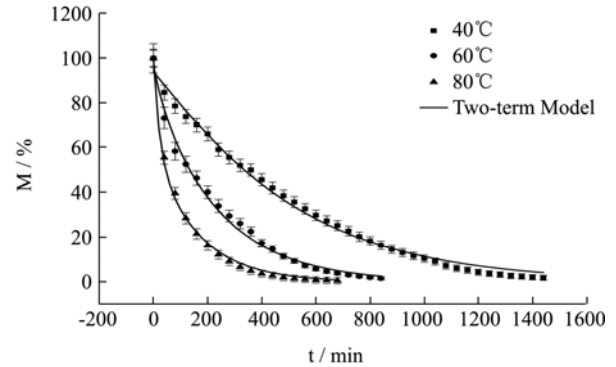


图5 不同温度下, 相对含水率的模拟值和试验值随干燥时间的变化情况

Fig.5 Variation of simulated and experimental relative moisture content with the drying time under different drying temperatures

3.2 干制品品质

为了进一步比较不同干燥条件的干燥效果, 我们建立了5人小组对干刺参的外观、硬度、弹性进行了评定。结果如表2。由表2可知, 60℃条件下得到的干刺参, 质量较好, 表现为表面完整, 富有光泽, 按压有较好弹性; 40℃时, 干刺参有弹性, 表面有褶皱, 硬度一般; 80℃时, 干刺参表面焦黑、变形严重, 硬度过大, 弹性变差。

表2 刺参干制品品质随远红外干燥温度的变化情况

Table 2 Variation of dried sea cucumber quality with the far infrared drying temperature

干燥温度/℃	外观	硬度	弹性
40	表面有褶皱	一般	有弹性
60	表面较好, 形状良好、刺突出	较大	整体弹性较好
80	焦黑、变形严重、刺突出	大	较差

3.3 干燥动力学模型

表3列出了不同干燥模型的检验指标值。可以看出, Two-term模型具有最高的 R^2 , 最低的 E_{MD} 、 χ^2 、 E_{RMS} , 模拟精度最高, 这与文献28得出的结论一致。图5是该模型计算得到的三个远红外干燥温度下刺参相对含水率随干燥时间的变化情况, 可以看出计算值与试验值吻合很好, 可以用来预测刺参在远红外干燥过程中的动力学特性。

从图1~5中还可看出, 各参数的测量误差绝对值均随干燥的进行而减小, 相对误差绝大部分在10%以内, 少数时刻相对误差较大, 在后续研究中可采用更高精度的测量仪器、增加平行样本数量以及实验测试次数等方法改善。

表3 各干燥模型检验指标值

Table 3 Test index values of thin layer drying models

模型名称	R^2	E_{RMS}	$E_{MD}/\%$	χ^2
Newton	0.975	0.041	26.9	0.002
Henderson and Pabis	0.984	0.033	22.6	0.001
Page	0.979	0.037	29.8	0.001
Modified Page Model	0.981	0.035	38.9	0.001
Logarithm Model	0.984	0.032	24.5	0.001
Two-term Model	0.993	0.021	24.7	0.0005
Two-term exponential Model	0.976	0.0397	23.7	0.0016
Wang and singh Model	0.867	0.0937	141.9	0.009
diffusion approach	0.992	0.0236	31.5	0.0006
Verma et al	0.991	0.025	27.9	0.0006
Modified Henderson and Pabis	0.993	0.023	21.9	0.0005
Midilli et al.	0.992	0.022	27.3	0.0005
Weibull 分布函数	0.975	0.041	35.40	0.0017

4 结论

为了探究远红外干燥技术在刺参加工中的应用, 本文通过实验方法研究了刺参的远红外干燥特性, 比较分析了不同的薄层干燥模型, 得到的主要结论如下:

4.1 刺参的远红外干燥属于降速干燥, 含水率随干燥的进行逐渐降低, 且温度对刺参干燥进程具有决定作用, 温度越高, 降低速度越快。与热风干燥相比, 刺参在远红外干燥条件下耗时更短, 干燥效率更高。

4.2 在干燥初期, 刺参的干燥速率与温度呈正相关, 干燥温度越高, 干燥速率越大, 而到了干燥中后期, 温度对干燥速率的正相关影响不太明显, 甚至温度低的干燥速率反而更高。

4.3 刺参收缩率随干燥温度的升高逐渐增加, 且温度

越高,收缩越严重。复水率随着复水时间的增加逐渐增加,且干燥温度越高,复水率越大。

4.4 比较干刺参的外观、硬度和弹性等因素发现,相对于其余两个温度,60℃条件下得到的干刺参,表面完整,富有光泽,按压有较好弹性,质量更好。

4.5 在干燥动力学模型方面,在研究的13种薄层模型中,Two-term模型能更好地预测刺参相对含水率随干燥时间的变化情况,应优先用于预测刺参在远红外干燥过程中的动力学特性变化。

参考文献

- [1] 薛长湖.海参精深加工的理论与技术[M].北京:科学出版社,2015
XUE Chang-hu. Profound-processing theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2015
- [2] 段续,王辉,任广跃,等.海参的干制技术及其研究进展[J].食品工业科技,2012,33(2):427-431
DUAN Xu, WANG Hui, REN Guang-yue, et al. Research progress of dry-cure technology of sea cucumber [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(2): 427-431
- [3] 隋莎莎,殷晏升.干制即食海参的加工工艺优化研究[J].保鲜与加工,2016,6(3):41-44
SUI Sha-sha, YIN Yan-sheng. Optimization of processing technology of dried instant sea cucumber [J]. Storage and Process, 2016, 6(3): 41-44
- [4] Hae-Won Lee, Na-Lae Lim, Kichul Cho, et al. Characterisation of inorganic elements and volatile organic compounds in the dried sea cucumber *Stichopus japonicus* [J]. Food Chemistry, 2014, 147: 34-41
- [5] 云霞,韩学宏,农绍庄,等.海参真空冷冻干燥工艺[J].中国水产科学,2006,13(4):662-666
YUN Xia, HAN Xue-hong, NONG Shao-zhuang, et al. Technological condition of vacuum freeze-drying in *Stichopus japonicus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(4): 662-666
- [6] S Chandrasekaran, S Ramanathan, Tanmay Basak. Microwave food processing -A review [J]. Food Research International, 2013, 52: 243-261
- [7] 张国琛,母刚,王隽冬,等.仿刺参微波真空干燥工艺的研究[J].大连海洋大学学报,2012,27(2):186-189
ZHANG Guo-chen, MU Gang, WANG Juan-dong, et al. Microwave vacuum drying process of sea cucumber [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(2): 186-189
- [8] 孙妍,杨伟克,林爱东,等.海参微波真空干燥特性的研究[J].食品工业科技,2011,32(6):99-101
SUN Yan, YANG Wei-ke, LIN Ai-dong, et al. Study on the microwave-vacuum drying characteristics of sea cucumber [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(6): 99-101
- [9] Xu Duan, Min Zhang, Arun S Mujumdar, et al. Microwave freeze drying of sea cucumber(*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96: 491-497
- [10] 母刚,张国琛,邵亮.热泵干燥海参的初步研究[J].渔业现代化,2007,34(5):47-52
MU Gang, ZHANG Guo-chen, SHAO Liang. Pilot study of sea cucumber drying with heat pump [J]. Fishery Modernization, 2007, 34(5): 47-52
- [11] Yaming Bai, Min Qu, Zhongqi Luan, et al. Electrohydrodynamic drying of sea cucumber(*Stichopus japonicus*) [J]. LWT- Food Science and Technology, 2013, 54: 570-576
- [12] 员冬玲,邵敏,蔡中盼,等.海参的干制技术研究进展[J].干燥技术与设备,2015,13(6):1-9
YUAN Dong-ling, SHAO Min, CAI Zhong-pan, et al. Research progress of drying technology for sea cucumber [J]. Drying Technology and Equipment, 2015, 13(6): 1-9
- [13] 侯志刚,王茂剑,张健,等.海参加工工艺的研究现状[J].食品工业,2015,36(4):247-251
HOU Zhi-gang, WANG Mao-jian, ZHANG Jian, et al. The research progress of sea cucumber processing technology [J]. Food Industry, 2015, 36(4): 247-251
- [14] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006
- [15] 张丽丽.红外干燥蔬菜的试验研究及分析[D].北京:中国农业大学,2014
ZHANG Li-li. Experimental study and analysis of vegetables with infrared drying [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014
- [16] 王迪,李大婧,江宁,等.不同干燥方式对黄秋葵脆条品质及能耗的影响[J].食品工业科技,2017,38(1):101-105
WANG Di, LI Da-jing, JIANG Ning, et al. Effect of drying methods on quality and energy consumption of okra crisp bar [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(1): 101-105
- [17] 郑烟梅,刘智禹,路海霞,等.水产品干燥技术研究进展[J].食品安全质量检测学报.2017,8(1):27-32
ZHENG Yan-mei, LIU Zhi-yu, LU Hai-xia, et al. Research progress on drying technology of aquatic product [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(1): 27-32

- [18] 黄敬,朱文学,刘云宏,等.基于 Weibull 分布函数的百合真空远红外干燥过程模拟及应用[J].食品与机械,2017, 33(5): 71-77
HUANG Jing, ZHU Wen-xue, LIU Yun-hong, et al. Simulation and application on vacuum far-infrared radiation drying of lily based on Weibull distribution function [J]. Food & Machinery, 2017, 33(5): 71-77
- [19] 汤尚文,马雪伟,于博,等.南瓜红外干燥模型及关键参数计算[J].食品与发酵工业,2017,43(1):124-129
TANG Shang-wen, MA Xue-wei, YU Bo, et al. Infrared radiation drying model and key parameters of pumpkin [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(1): 124-129
- [20] 周冰.白芷药材品质评价与适宜干燥加工方法优化研究[D].南京:南京中医药大学,2015
ZHOU Bing. Study on the quality evaluation and optimization of suitable drying processing methods of angelica dahuricae radix [D]. Nanjing: Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2015
- [21] 郑霞.基于不同干燥技术的红枣泥片干燥特性及品质研究[D].北京:中国农业大学,2015
ZHENG Xia. The drying characteristics and quality of red jujube tablets based on different drying techniques [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015
- [22] 曾目成,毕金峰,陈芹芹,等.基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用[J].现代食品科技,2014,30(6):146-152
ZENG Mu-cheng, BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, et al. Weibull distribution for modeling microwave vacuum drying of kiwifruit slices and its application [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 30(6): 146-152
- [23] 吴娟,马强,程美蓉,等.远红外辅助热泵干燥鳕鱼片工艺[J].上海交通大学学报(农业科学版),2011,29(5):87-91
WU Juan, MA Qiang, CHENG Mei-rong, et al. Study on far-infrared radiation assisted heat pump drying technology for skate fillets [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2011, 29(5): 87-91
- [24] Erbay Zafer, Icier Filiz. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(5): 441-464
- [25] 赵海波,杨昭.白菜种子热泵干燥过程动态模型研究[J].农业机械学报,2011,42(11):118-123
ZHAO Hai-bo, YANG Zhao. Dynamic model of heat pump drying for cabbage seeds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 118-123
- [26] 沙秀秀,朱邵晴,段金傲,等.基于 Weibull 分布函数的当归干燥过程模拟及其动力学研究[J].中国中药杂志,2015,40(11):2117-2122
SHA Xiu-xiu, ZHU Shao-qing, DUAN Jin-ao, et al. Weibull distribution for modeling drying of angelicae sinensis radix and its application in moisture dynamics [J]. China Journal of Chinese Material Medica, 2015, 40(11): 2117-2122
- [27] Apichart Artnaseaw, Somnuk Theerakulpisut, Chatchai Benjapiyaporn. Drying characteristics of shiitake mushroom and jinda chili during vacuum heat pump drying [J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88: 105-114
- [28] 马赛.海参加工贮藏适宜温度条件的研究[D].济南:山东大学,2012
MA Sai. Studies on the suitable temperatures in the manufacturing and storage of sea cucumber [D]. Jinan: Shandong University, 2012
- [29] 高昕,刘莲凤,刘倩,等.不同加热温度下刺参肌肉组织与胶原蛋白纤维结构的变化[J].水产学报,2012,36(9):1465-1472
GAO Xin, LIU Lian-feng, LIU Qian, et al. Changes of muscle tissues and collagen fibers structure of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during heated treatment [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(9): 1465-1472
- [30] 高飞.微波、远红外、真空冷冻及其与热风联合干燥对红枣品质的影响[D].晋中:山西农业大学,2013
GAO Fei. Effects of microwave, far infrared, vacuum freezing and drying on the quality of red jujube [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2013
- [31] 孙妍,薛长湖,齐祥明,等.海参最佳对流干燥温度的研究[J].农业工程学报,2007,23(5):205-211
SUN Yan, XUE Chang-hu, QI Xiang-ming, et al. Experimental studies on the optimum convection drying temperature of sea cucumber [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(5): 205-211