

罗非鱼片的热风干燥模型及能耗研究

段振华^{1,2}, 冯爱国¹, 向东¹, 王志国¹

(1. 海南大学海洋学院, 海南 海口

570228 2. 海南大学 热带生物资源教育部重点实验室, 海南 海口

570228)

摘要: 对罗非鱼片进行了热风薄层干燥实验, 通过实验数据建立了罗非鱼片的热风干燥的水分比与干燥时间关系的数学模型, 根据建立的模型进行了拟合检验, 结果显示模型的预测值与实测值拟合良好。此外, 还研究了罗非鱼片热风薄层干燥过程中的能耗特点, 结果表明, 热风薄层干燥罗非鱼片的单位能耗降湿量最低为 423.4 g/kW·h, 最高为 1147.7 g/kW·h。鱼片越小, 每批干燥量越少, 则单位能耗降湿量越大。

关键词: 罗非鱼; 热风干燥; 数学模型; 能耗

Study on Model and Energy Consumption of Hot-air Drying of Tilapia Fillets

DUAN Zhen-hua^{1,2}, FENG Ai-guo¹, XIANG Dong¹, WANG Zhi-guo¹

(1. Ocean College, Hainan University, Haikou 570228, China

2. Key Laboratory of Tropical Biological Resources, Ministry of Education, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Thin layer hot-air drying of fresh tilapia fillets at different temperatures was investigated. Meanwhile the suitable mathematical model which can be used to describe the relationship of moisture ratio and drying time was established in this paper. The proof test results showed that the model was good due to the predicted values consistent with the observed values. In addition, the characteristics of energy consumption of the thin layer hot-air drying of tilapia fillets were also researched. It was

收稿日期: 2007-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(30660145)

作者简介: 段振华(1965-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为水产食品科学技术。

2.3 黄精多糖提取工艺条件的确定

通过软件 Design-Expert 6.0 求解方程, 得出了最优提取工艺条件为: 料液比为 21.5:1, 提取温度为 73.5℃, 提取时间为 2.64h, 此时黄精多糖的提取率可达 12.25%。

考虑到实际操作的可行性, 同时又达到节省时间与能耗并取得最佳效果的目的, 将黄精多糖的提取工艺条件修正为: 料液比 20:1, 提取温度 75℃, 提取时间为 2.5h。为检验结果的可靠性, 采用修正条件进行提取实验, 结果得出黄精多糖的实际提取率为 12.16%, 与理论预测值基本吻合, 比单因素试验最高提取率高出 4.5%。因此, 利用响应面分析法得到的黄精多糖提取工艺参数真实可靠, 具有实用价值。

3 结论

应用响应面分析法优化黄精多糖的提取工艺, 结果显示, 黄精多糖提取率的最佳提取工艺参数为: 料液比 20:1, 提取温度 75℃, 提取时间为 2.5h, 黄精多糖的提取率为 12.16%。

参考文献:

- [1] 刘庆华, 刘彦辰. 实用植物本草[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998.
- [2] 李友元, 邓洪波, 何大雄, 等. 黄精多糖的降血脂及抗动脉粥样硬化作用[J]. 中国动脉硬化杂志, 2005, 13(4): 429-431.
- [3] 王红玲, 张渝侯, 洪艳, 等. 黄精多糖对小鼠血糖水平的影响及机制初探[J]. 儿童药学杂志, 2002, 8(1): 14-15.
- [4] WANG Z J, ZHOU Y J, ZHANG H. Effects of two saponins extracted from the *Polygonatum zanlanscianense* pamp on the human leukemia (HL-60) cells[J]. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 2001, 24(2): 159-162.
- [5] CHOU S B, PARK S. A steroidal glycoside from *Polygonatum odoratum* (Mill) Druce improves insulin resistance but does not alter insulin secretion in 90%pancreatectomized rats[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2002, 66(10): 2036-2043.
- [6] MIURA T, KATO A. The difference in hypoglycemic action between polygonati rhizome and polygonati officinalis rhizome [J]. Biol Pharm Bull, 1995, 18(11): 1605-1606.
- [7] 王冬梅, 宋旭辉, 李娟丽, 等. 卷叶黄精多糖提取分离工艺研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 158-161.
- [8] 夏泉, 谢永忠, 黄赵刚, 等. 正交设计优化黄精多糖的水提醇沉工艺[J]. 中国药师, 2006, 9(10): 905-906.
- [9] 卢时勇, 钱俊青, 邹小明, 等. 响应面法优化超声提取白术有效成分的研究[J]. 中国中药杂志, 2006, 31(7): 549-552.

found that the minimum and maximum moisture removal quantity per energy consumption was 423.4 g per kilowatt and 1147.7 g per kilowatt, respectively. The fewer quantities of fillets during drying were, the higher moisture removal quantity per energy consumption was.

Key words tilapia; hot-air drying; mathematic model; energy consumption

中图分类号 TS205.1

文献标识码 A

文章编号 1002-6630(2007)07-0201-05

干燥被认为是发展中国家鱼类保藏常用的技术^[1-3],世界上每年干制鱼的产量在320万吨以上。干燥是很多食品加工过程中不可缺少的一个环节,也是一个复杂的工艺过程^[4-6]。物料不同,其干燥特性变化很大^[7-10]。干燥技术的发展既需要工业实践,也需要学术研究^[4],人们一直希望通过干燥理论的研究建立干燥的模型,以期在计算机控制上取得最佳结果,为生产实践带来变革。

近年来,中国的罗非鱼产量每年以30%的幅度增长,而海南省的罗非鱼产量已经超过了淡水养殖产量的半数,占淡水养殖产量的59%。罗非鱼被视为传统白肉鱼种的替代品种,正日渐受到欧美市场的青睐,但是我国主要以出口冷冻和新鲜鱼为主,加工品种单一,将会严重制约罗非鱼产业的发展。我们曾经以罗非鱼为原料,对不同罗非鱼片的热风干燥特点进行了研究^[10-11]。但是到目前为止,有关罗非鱼片的干燥模型研究尚没有报道。本研究通过罗非鱼片的热风薄层干燥实验,建立罗非鱼片的热风干燥的水分比与干燥时间关系的数学模型,同时还研究热风干燥过程中的能量消耗特点,旨在为罗非鱼等鱼片的脱水干燥工艺研究和生产控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

罗非鱼 海口市当地市场。

1.2 仪器与设备

BS124S型电子天平(精度 $\pm 0.1\text{mg}$) Sartorius公司;
101-2型电热鼓风恒温干燥箱 常州市华普达仪器有限公司;
DS-1高速组织捣碎机 上海标本模型厂;干燥器
海口市玻璃仪器试剂公司。

1.3 方法

1.3.1 水分比(MR)的测定

水分比(MR)用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被干燥除去,可以用来反应物料干燥速率的快慢。其计算公式为^[5]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

式中, M_e 为物料平衡含水率; M_0 为初试含水率; M_t 为干燥中某时刻的含水率。

1.3.2 干燥实验前的预处理方法

新鲜原料经“三去”(去头、去内脏和去鳞皮)处理后,清洗干净,从鱼脊骨上方开始采肉切片,控制鱼片大小为 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ 、 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 3\text{mm}$,清水漂洗,用滤纸吸去表面水分,然后将鱼片摊放在洁净干燥的并已编号的不锈钢丝网上,待干燥实验。

1.3.3 热风干燥实验方法

将以上不同厚度的罗非鱼片分别在40、50和60℃的热风温度下,进行干燥实验,热风风速为1.5m/s,干燥过程中定期取样测量样品的水分含量,直到样品中的湿基含水率达到12%为止。物料的水分测定按照GB/T14769中的常压加热干燥法进行,测得其初始含水率为81.2%。每个实验重复五次,结果取其算术平均值。

1.3.4 干燥能耗实验方法

以两种规格相差很大的罗非鱼片为对象,进行干燥能耗实验。大型鱼片为整条鱼上下各采一片,一条鱼得到两片,由于鱼片的形状不规则,取其几何尺寸中间的长、宽和厚来表示鱼片的大小。小型鱼片为规则形状,取 $30\text{mm} \times 20\text{mm} \times 3\text{mm}$ 为实验对象。以电为能源,研究不同鱼片在温度为40℃,风速1.5m/s的热风干燥条件下的单位能耗降湿情况。

2 结果与分析

2.1 数学模型

2.1.1 常见的薄层干燥数学模型

表1为常见的用于描述农产品物料薄层干燥的数学模型^[5,12-14]。Lewis模型是描述农产品物料薄层干燥的最简单的模型,这种模型考虑了物料表面边界层对水分运动的阻力。Page模型用了两个常数来描述物料的薄层干燥,可以用于描述稻谷、大豆、向日葵、玉米、人参及鳙鱼鱼片等多种物料的薄层热风干燥特性。Henderson-Pabis模型也用了两个常数来反映物料的薄层干燥,被用来描述带穗谷物、小麦和玉米等物料的干燥。为了确定能够较好地描述罗非鱼片热风薄层干燥动力学的数学模型,首先对表1中的模型进行线性化处理,经过数学转换后的结果列于表2。

2.1.2 罗非鱼片的薄层热风干燥数学模型的建立

图1为不同厚度的罗非鱼片在40~60℃的热风条件

表1 描述干燥曲线的常见数学模型
Table 1 Common mathematical models for MR

模型编号	模型名称	模型
A	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
B	Page	$MR = \exp(-ktn)$
C	Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
D	Logarithmic	$MR = b + a \ln t$

注：模型中， t 为干燥时间； a 、 b 、 k 、 n 为待定常数。

表2 经过线性化处理后的数学模型
Table 2 Mathematical models after linearization

模型编号	模型
A	$-\ln MR = kt$
B	$\ln[-\ln(MR)] = \ln k + n \ln t$
C	$-\ln MR = -\ln a + kt$
D	$MR = b + a \ln t$

下，水分比与干燥时间的关系图。从表2中经过线性化处理后的模型结果可以看出，各个模型可以看成是 $[-\ln(MR)] \sim t$ 、 $\ln[-\ln(MR)] \sim \ln t$ 和 $MR \sim \ln t$ 之间的任何一种函数关系。因此，只要将图1中所得的实验数据分别代入以上方程，经过计算后，将计算结果按照 $[-\ln(MR)] \sim t$ 、 $\ln[-\ln(MR)] \sim \ln t$ 和 $MR \sim \ln t$ 的关系绘成曲线关系图(见图2~4)，比较这些图中的曲线，不难发现图3中的曲线比图2和图4的更呈线性关系。由此可以初步推断，模型A、C和D(即Lewis模型、Henderson-Pabis模型和Logarithmic模型)均不适合作为本实验条件下的目标模型，而模型B(即Page模型)则适合用来描述罗非鱼片的热风干燥动力学规律。

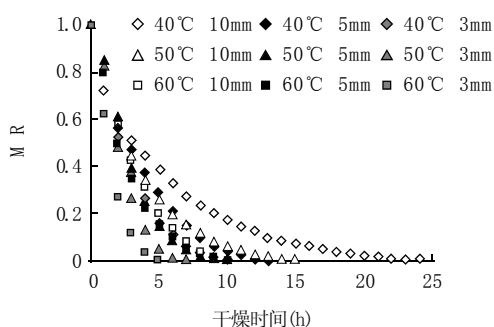


图1 热风干燥条件下MR-t关系图
Fig.1 Relationship curves between MR and t under hot-air drying condition

为了进一步探明Page模型对罗非鱼片薄层热风干燥的适用性，确定不同厚度的鱼片在40~60℃的热风温度下的模型系数，采用了SPSS回归软件对图3中的数据进行分析，分析结果见表3。在使用线性回归分析法确定模型方程时，常常用复相关系数 R 来表示变量之间的密切关系，用方差分析对回归关系进行显著性检验。如果 R 越接近1，那么变量之间的线性关系越密切；如果方差分析结果显著，那么

说明所得到的回归方程的回归效果好。从表3可以看出，模型的相关系数为0.983~0.999，方差分析结果均达极显著水平，说明所得到的回归模型的拟合程度高，回归效果显著。为了验证模型的可行性，以5mm厚的鱼片在40℃的热风条件下干燥为例，将实验结果同根据模型 $MR = \exp(-0.207t^{1.186})$ 进行预测的数据进行比较，结果见图5，实验值同预测值拟合良好。因此，Page模型最适合用于描述罗非鱼片的热风薄层干燥条件下的动力学变化规律。

2.2 干燥中的能耗

热风干燥是以热空气为传热媒介，加热物料，蒸发水分，同时去除物料表面水分的一种常用脱水干燥方法。其优点是所需的设备投资少，适应性强，操作简单。但是，热风干燥所需的时间一般较长。无论研究哪一种干燥技术，干燥中的能耗始终是必须考虑的问题。研究表明^[15]，如果均以电为能源计算的话，热风干燥和微波真空干燥生产脱水蔬菜的单位能耗成本，远

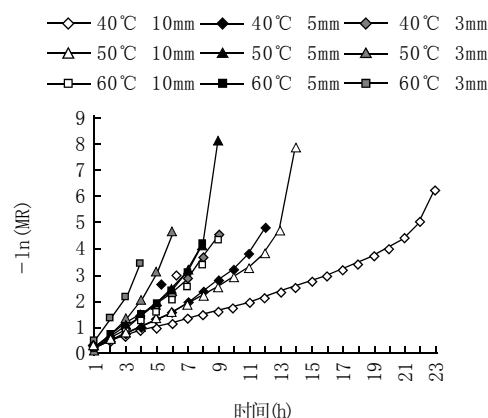


图2 热风干燥条件下 $[-\ln(MR)]-t$ 关系图
Fig.2 Relationship curves between $-\ln(MR)$ and t under hot-air drying condition

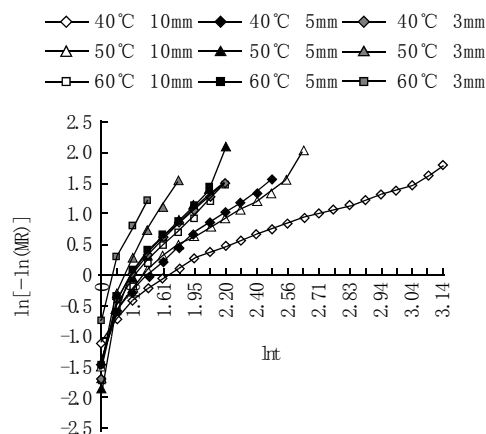


图3 热风干燥条件下 $\ln[-\ln(MR)]-lnt$ 关系图
Fig.3 Relationship curves between $\ln[-\ln(MR)]$ and $\ln t$ under hot-air drying condition

表3 罗非鱼片的热风干燥数学模型B的待定系数和评价指标
Table 3 Comparison of parameters of the model B for hot-air drying

参数和评价指标	40℃			50℃			60℃		
	10 mm	5 mm	3 mm	10 mm	5 mm	3 mm	10 mm	5 mm	3 mm
k	0.249	0.207	0.232	0.188	0.159	0.195	0.210	0.242	0.247
n	0.901	1.186	1.315	1.239	1.611	1.744	1.308	1.315	1.420
R	0.983	0.995	0.997	0.988	0.989	0.998	0.997	0.996	0.999
F	618.766**	965.889**	1220.788**	417.148**	315.386**	1175.904**	1000.044**	677.137**	1325.342**

注：模型中，**表示显著水平极显著。

表4 小型罗非鱼片的热风干燥能耗试验结果
Table 4 Comparison of energy consumption for hot-air drying of tilapia fillets

鱼片	小鱼片				大鱼片			
干燥时间(h)	3	5	10	14	3	5	10	14
降湿量(g)	288.3	734.5	1134.6	1366.0	166.5	291.0	554.0	705.0
单位时间降湿(g·h)	96.1	146.9	113.4	97.57	55.5	58.2	55.4	54.2
单位能耗降湿(g/kW·h)	750.8	1147.7	886.7	762.3	433.6	454.7	432.8	423.4

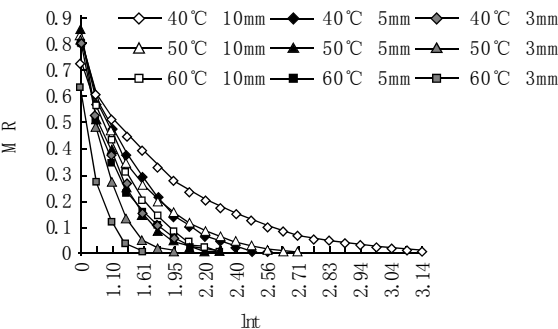


图4 热风干燥条件下MR - ln t关系图

Fig.4 Relationship curves between MR and ln t under hot-air drying condition

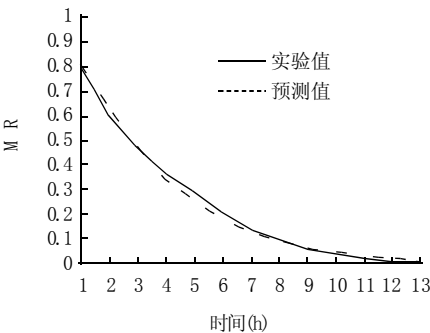


图5 实验值与预测值的比较

Fig.5 Comparison of observed and predicted values

远低于冷冻干燥。其中的热风干燥如果以煤为能源，则单位能耗成本为三种干燥技术中最低的一种。热风干燥过程中，水分蒸发和废气排空等所需的热量为热风干燥装置的主要能耗，而一些附属设备如风机的耗能所占比例很小。

为了探明罗非鱼片的热风干燥的能量消耗特点，考虑到鱼片的规格和每批干燥处理量都是影响能耗的重要因素，比较了两种规格相差很大的罗非鱼片的干燥能耗

情况。大型鱼片的平均规格为188mm×99mm×23mm，每批平均处理量3274.5g。小型鱼片为30mm×20mm×3mm，平均每批处理量为2445.3g。实验结果见表4，可以看出，热风薄层干燥罗非鱼片的单位能耗降湿量差异很大，最低为423.4g/kW·h，最高为1147.7g/kW·h。鱼片越小，每批干燥处理量越少，则单位能耗降湿量越大。

3 结 论

3.1 开展了罗非鱼片的热风薄层干燥实验，并根据实验数据建立了罗非鱼片的热风干燥的水分比与干燥时间关系的数学模型。研究发现，Page模型最适合描述罗非鱼片的热风薄层干燥动力学规律。

3.2 确定了罗非鱼片在不同热风干燥条件下模型中的参数值，并进行了验证实验，结果表明模型的拟合效果良好。

3.2 能耗实验结果表明，热风薄层干燥罗非鱼片的单位能耗降湿量最低为423.4g/kW·h，最高为1147.7g/kW·h。鱼片越小，每批干燥处理量越少，则单位能耗降湿量越大。

参考文献：

[1] PENGPAD S, RAKWICHIAN W. Drying fish and meat by using solar dryer for the cottage industrial scale[J]. Journal of the National Research Council of Thailand, 1996(1): 1-15.
[2] MUKHERJEE S, BANDYOPADHYAY S, BOS A N. An improved solar dryer for fish drying in the coastal belt[J]. Journal of Food Science and Technology, 1990, 27(3): 175-177.
[3] ZAKHIA N, BOHUON P, COLLIGNAN A. Modelling of fish drying kinetics using a combination of surface methodology and diffusional models[J]. Drying Technology, 1995, 13(8/9): 2083-2096.
[4] 潘永康. 中国现代干燥技术发展概况[J]. 通用机械, 2005(8): 42-

磁性壳聚糖微球对大豆乳清废水中蛋白质的吸附作用

董海丽, 任晓燕

(淮南联合大学化工系, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 采用磁性壳聚糖微球吸附的方法吸附大豆乳清废水中蛋白质。实验结果表明, 当磁性壳聚糖微球投入量为 25g/L, 接触时间为 10min, 温度为 30℃, pH 值 5.0 的条件下能有效吸附大豆乳清废水中蛋白质, 吸附大豆乳清废水中蛋白质去除率最高达 95.6%。

关键词: 磁性壳聚糖微球; 大豆乳清; 废水; 吸附; 蛋白质

Adsorption Effects of Magnetic Chitosan Microsphere on Protein in Soy Whey Wastewater

DONG Hai-li, REN Xiao-yan

(Department of Chemical Engineering, Huainan Union University, Huainan 232001, China)

Abstract: Adsorption effects of magnetic chitosan microsphere on protein of soy whey waste water were studied in this paper. The results showed that the maximum removing rate of protein reaches 95.6%. The effective treatment conditions are: addition amount of magnetic chitosan microsphere 25 g/L, contacting time 10 min, temperature 30 °C, and pH5.0.

Key words: magnetic chitosan microsphere; soy whey; waste water; adsorption; protein

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2007)07-0205-03

豆制品是中华传统优质植物蛋白食品, 深受百姓喜爱。而豆制品加工中会产生大量乳清, 至今仍作废液排放。据报道乳清含有原料大豆蛋白质的 8.2%, 脂肪的 2.2%, 碳水化合物的 31.8%, 矿物质的 56.6%, BOD 高达 1000mg/L 以上。因此回收其有用组分不仅可提高原料利用率, 而且将大大减轻废液对环境的污染^[1]。

壳聚糖(chitosan, β -1, 4-2-氨基葡萄糖)是一种碱性氨基多糖, 其具有优良的生物亲和性、无毒和易于化学改性^[2]。壳聚糖可从食品加工废水中回收蛋白质^[3], 但直接将壳聚糖添加到含蛋白质的废水中絮凝蛋白质, 回收困难。磁分离技术作为一种新颖的分离技术, 它的最大特点就是分离效率高, 分离速度快, 占地面积

收稿日期: 2007-05-12

作者简介: 董海丽(1970-), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为化学工程在食品工业中应用。

- 43.
- [5] 段振华, 张慙, 汤坚. 鲮鱼的热风干燥规律研究[J]. 水产科学, 2004 (3): 29-32.
- [6] 段振华, 汪菊兰. 微波干燥技术在食品工业中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2007 (1): 155-158.
- [7] BALA B K, MONDOL M R. Experimental investigation on solar drying of fish using solar tunnel dryer[J]. Drying Technology, 2001, 19 (2): 427-436.
- [8] BELLAGHA S, AMAMI E, FARHA A. Drying kinetics and characteristic drying curve of lightly salted sardine (*Sardinella aurita*) [J]. Drying Technology, 2002, 20 (7): 1527-1538.
- [9] DUAN Z H, ZHANG M, HU Q G. Characteristics of microwave drying of bighead carp[J]. Drying Technology, 2005, 23 (3): 637-643.
- [10] 段振华, 尚军, 徐松等. 罗非鱼的热风干燥特性及其主要成分含量变化研究[J]. 食品科学, 2006, 27 (12): 479-482.
- [11] 尚军, 段振华, 冯爱国. 低盐处理对罗非鱼片热风干燥的影响[J]. 食品科技, 2007 (4): 111-114.
- [12] MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying [J]. Drying Technology, 2002, 20 (7): 1503-1513.
- [13] YALKIZ O, ERTEKIN C. Thin layer solar drying of some vegetables[J]. Drying Technology, 2001, 19 (3/4): 583-597.
- [14] ALKPINAR E K, BICER Y. Modeling of the drying of eggplants in thin-layers[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2005, 40: 273-281.
- [15] 崔政伟. 微波真空干燥的数学模拟及其在食品加工中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2004.