

Peleg 方程在油炸与热风干面条吸水性比较中的应用

严勇强, 李沐生, 阮征

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文探讨了油炸与热风干面条在不同温度、时间浸泡条件下的吸水性质与动力学研究, 其中浸泡温度为 40~100℃, 浸泡时间为 0.5~20 min。试验结果表明: 两种面条在浸泡初始阶段的吸水速率较高, 随着时间的延长, 增速逐渐降低并趋于平缓。Peleg 方程对两种面条吸水曲线具有较高的拟合性, 相关系数均在 0.99 以上; 方程中的速率常数 K_1 与容量常数 K_2 均随温度升高而降低, 而且试验发现油炸面条的速率常数 K_1 随温度变化幅度小于热风干面的; 在 60~80℃ 间, 热风干面吸水速率出现突然增大的转折。对 K_1 、 K_2 与温度进行多种回归分析, 得出最佳拟合方程为对数方程, 相对系数在 0.94 以上; 在 90℃ 条件下, 将通过 Peleg 方程计算的预测值与试验值进行相对误差分析, 得出 $E(\%)$ 在 2% 左右, 相对误差远小于 10%, 具有较高的精确性。将两种面条不同温度的 K_1 值与温度进行 Arrhenius 方程拟合, 相关系数达到 0.94, 具有较好的拟合性, 同时发现在水浸泡过程中油炸面条的活化能 E 要高于热风干面。

关键词: 油炸干面; 热风干面; 吸水; Peleg 方程

文章篇号: 1673-9078(2013)1-107-111

Application of Peleg Equation in Evaluation of Water Absorption in Fried and Hot Air Dry Noodle during Soaking

YAN Yong-qiang, LI Bian-sheng, RUAN Zheng

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The water absorption properties and kinetics of fried and hot air dry noodles were investigated at the soaking temperature of 40~100℃ and soaking time of 0.5~20 min. The results showed that two kinds of noodles had a high soaking rate and decreased gradually with the extended time at the soaking initial stage. The noodles water absorption curve fit the Peleg equation very well, and the correlation coefficients were above 0.99. The rate constants K_1 and capacity constants K_2 in the equation decreased with the increasing temperature, and the difference of rate constant K_1 at different temperatures of fried dry noodle were less than that of hot air dry noodle. Within the temperature of 60~80℃, the rate constant K_1 of hot air dry noodle soaking increased suddenly to the turning point. Multiple regression analysis equations were used to fit the relation between K_1/K_2 and the temperatures, and the best fitting equation was the logarithmic equation for the high related coefficient. The predicted values and experimental values at 90℃ were used to calculate the relative error, and the value of $E(\%)$ was 2% which was much less than 10%. The Arrhenius equation was used to fit the water soaking rates of the two kinds of noodles at different temperatures and the correlation coefficient was 0.94 which meant proper suitable. The value of activation energy E of fried dry noodles was higher than that of hot air dry noodle.

Key words: fried dry noodle; hot air dry noodle; water absorption; Peleg equation

面条是中国传统主食, 深受人们喜爱, 鲜湿面条具有丰富的淀粉、蛋白质和较高的水分含量, 因此容易受到微生物污染而腐败变质, 储藏期极短^[1]。油炸和热风干燥通过把鲜湿面条的水分含量降低到微生物

收稿日期: 2012-07-25

基金项目: 广东省教育部产学研结合项目 (2011A090200041)

作者简介: 严勇强 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事食品加工和保藏研究

通信作者: 李沐生 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事食品加工和保藏研究

不易生长繁殖的水平, 大大的延长了面条的储藏期, 因此成为目前市面上最常见的面条加工方式。油炸和热风干面条水分含量极低, 食用时需要重新吸水, 以增强面条可食性, 因此油炸和热风干面条吸水性质研究对于人们日常生活和面条工业化生产均有重要意义。

吸水过程实质上属于质传递过程, 其行为符合菲克第二定律, 但由于参数较多, 计算复杂, 应用性不高, 因此常被用作理论研究。1988年 Peleg 在进行了大量的试验后提出只有两个参数的非指数经验方程模

型^[2]。此方程计算简单,且具有广泛的适用性,被后人称为 Peleg 方程。目前 Peleg 方程已证实许多食品的质传递过程中具有良好的拟合性和预测性,如 Corzo 等^[3]使用 Peleg 方程拟合和预估 NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂ 在羊肉腌制过程的渗透速率,发现 Peleg 方程具有极高相关性 ($R^2 > 0.97$) 和良好的预测性 (MRE < 10%); García-Pascual 等^[4]探讨羊肚菌(一种西班牙真菌蘑菇)在不同温度下的吸水性质,发现 Peleg 方程具有较高的拟合性,同时通过阿尼乌斯方程建立温度与参数间的关系; Turhan 等^[5]通过 Peleg 方程拟合春天和冬天产的鹰嘴豆在 20~100 °C 下水分渗透的行为,发现当温度大于 40 °C 时,方程可以有效预测两种豆最终平衡水分含量,而且发现两者吸水速率没有明显差异。在国内,余世锋等^[6]使用 Peleg 拟合和预测籼米、粳米和泰国香米的吸水性质;徐杰等^[7]采用 Peleg 方程研究了糙米和发芽糙米的吸水动力学,两者均取得较好的效果。本试验同样采用 Peleg 方程探讨油炸与热风干面条吸水性质,以找出两种加工方法对面条水分吸收性质的影响。

1 材料与方法

1.1 试验原料

油炸面条:每 100 g 含蛋白质 7.8 g、脂肪 20 g、淀粉 51.2 g、水分含量 2.71%。

热风干面条:每 100 g 含蛋白质 9.6 g、脂肪 0.6 g、淀粉 75.6 g、水分含量 13.82%。

1.2 试验方法

1.2.1 水分吸收

原料浸泡在可控温的超级恒温水浴锅内,温度分别设置为 40、60、80、100 °C,定期取出 4~6 g 吸水后的原料,用滤纸吸干表面水分后放入鼓风干燥箱中干燥,分析天平称量,计算水分含量。

1.2.2 水分含量测定

按照 GB 5009.3-2010 方法测定。

1.2.3 Peleg 方程理论基础^[8]

Peleg 模型为两参数、非指数的经验方程,其方程如下:

$$M_t = M_0 \pm \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (1)$$

式中: M_t 为原料在 t 时刻的水分含量 (%); M_0 为样品初始水分含量 (%); K_1 和 K_2 为方程的参数,其中 K_1 为速率常数 (h^{-1}), K_2 为容量常数 ($\%^{-1}$)。方程中“±”代表原料的吸水与干燥过程,本试验研究吸水过程,所以选取“+”。

对 Peleg 方程求一次导数可得原料吸水速率 (R),如式 (2) 所示:

$$R = \frac{dM}{dt} = \pm \frac{K_1}{(K_1 + K_2 t)^2} \quad (2)$$

当 t 取 0 时,式 (2) 可转化为式 (3),从式 (3) 可知, Peleg 方程中速率常数 K_1 与原料初始吸水率 (R_0) 有关。

$$R_0 = \frac{dM}{dt} \Big|_{t=0} = \pm \frac{1}{K_1} \quad (3)$$

从式 (1) 可知,当 $t=0$ 时, $M_t=M_0$, 即 M_0 为初始样品水分含量,当 $t \rightarrow \infty$ 时,可得方程 (4)。其中 M_e 为样品平衡时的水分含量,由 (4) 可知, Peleg 方程中容量常数 K_2 与样品最终饱和吸水量有关。

$$M_e = \lim_{t \rightarrow \infty} M_t = M_0 + \frac{1}{K_2} \quad (4)$$

Sopade 等证明 Peleg 方程中 K_1 与温度有显著相关性,可用阿尼乌斯方程进行拟合,具体如式 (5) 所示^[9]。将式 (5) 通过适当变换可得以 $1/T$ 为自变量, $\ln(1/K_1)$ 为应变量的线性方程,如 (6) 所示。

$$\frac{1}{K_1} = K_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\ln \frac{1}{K_1} = \ln K_0 - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

式中: K_0 为频率因子 (h^{-1}), E 为活化能 ($kJ \cdot mol^{-1}$), R 为气体常数 ($8.3145 kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$), T 为绝对温度 (K)。

1.3 数据处理

试验数据采用 SPSS statistics 14.0 进行数据回归分析,为了判定 Peleg 方程的拟合程度与预测水平,采用以下方程进行相对误差分析:

$$E(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_{exp} - M_{pre}}{M_{exp}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式 (7) 中: M_{exp} 为试验测定水分含量, M_{pre} 为 Peleg 方程预测数值。当 $E(\%) < 10\%$ 时,即可认为 Peleg 方程具有较好的拟合性和预测性^[10]。

2 结果与分析

2.1 不同浸泡温度、时间下两种面条水分含量的变化

油炸与热风干面条在不同温度、时间下水分含量变化如图 1 所示。从图 1 中可知,同一温度下,两种面条水分含量均随时间延长而增加;同一时间下,温度越高,面条水分含量越高,两种面条水分含量变化与温度和时间呈正相关。同时两种面条在浸泡起始阶段(约前 5 min)水分含量均呈现快速增长,然后随时间延长而逐渐减缓的趋势,这符合经典物质吸水曲线也与相关文献报道结果相似^[11,12]。结合张勉研究结果推测^[13],水分吸收起始阶段,面条与外界水分浓度差距极大,水分扩散速率较快,随着浸泡时间的延长,

面条内部水分含量在逐渐增加,水分浓度差不断缩小,面条内部容量空间也在减少,造成浸泡后期水分扩散较慢,这与菲克第二定律相符;同时水分扩散速率还受到温度影响,温度越高水分子运动越激烈,水分扩散也会加快,这与 Cunningham 等^[14]研究的意大利面在浸泡过程水分吸收结果一致。从图中还可以知,两种面条在浸泡 10 min 后,不同温度间的水分含量差异有所不同,油炸面条差距较小,而热风干面在浸泡后期水分含量差距较大,其中原因可能是油炸面条内部为多孔的疏松结构,水分扩散较热风干面容易所造成。

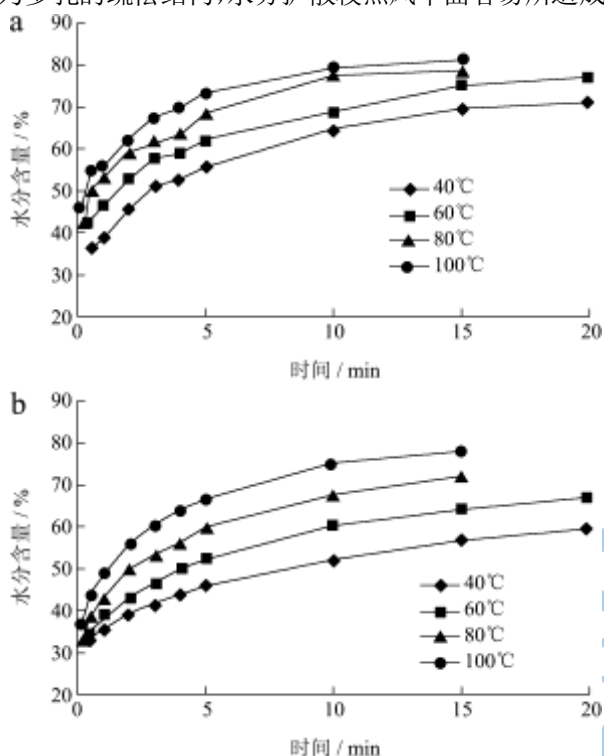


图 1 不同温度、时间浸泡对面条水分含量影响

Fig.1 Effect of different temperature and soaking time on moisture content

注: a-油炸面; b-热风干面。

2.2 Peleg 方程拟合与参数对比

将方程 (1) 进行适当变换可得到以 t 为自变量, $t(M_t - M_0)$ 为因变量的线性方程, 通过线性回归分析, 可以得出斜率 K_2 和常数 K_1 。图 2 为两种面条浸泡过程 Peleg 方程的拟合曲线, 表 1 为 Peleg 方程具体参数值表。从图 2 中可知, 两种面条各温度下的 Peleg 方程拟合曲线呈良好的线性关系, 相关系数值均在 0.990 以上。方程参数 K_1 和 K_2 分别代表水分扩散速率和平衡状态下最大保水能力, 其值越小代表扩散速率和保水能力越大。从表中可知, 两种面条的速率常数 K_1 和容量常数 K_2 均随温度升高而降低, 表示两种面条的吸水能力和保水能力均随温度升高而有所提升。这与 Maskan^[12]研究的小麦制品吸水性质, Cunningham 等^[14]

研究的意大利面水分吸收模型结果一致。

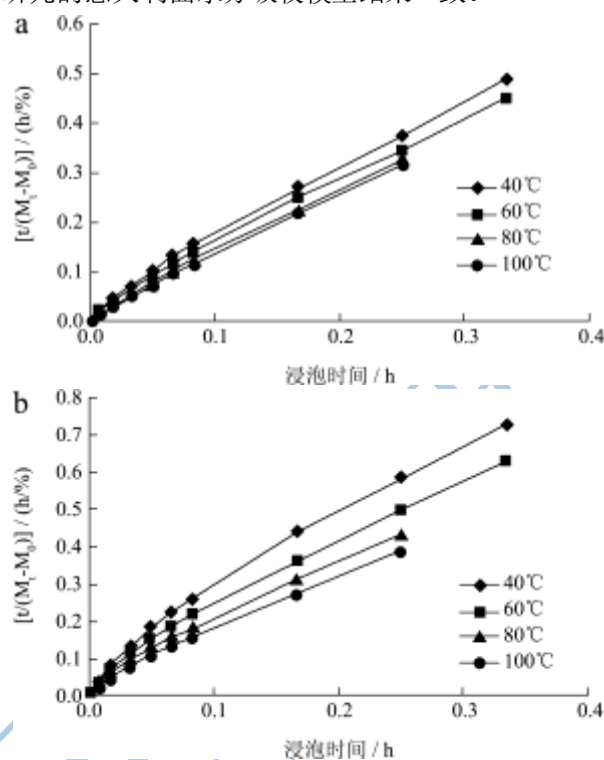


图 2 浸泡过程 Peleg 方程拟合

Fig.2 Peleg equation fitting on soaking process

注: a-油炸面; b-热风干面。

表 1 两种面条 Peleg 方程参数值

Table 1 Peleg equation parameter values of two kinds of noodles

原料	温度/°C	$K_1/(h/\%)$	$K_2/\%^{-1}$	相关系数 R^2
油炸面条	40	0.0303	1.3895	0.9966
	60	0.0239	1.2921	0.9964
	80	0.0140	1.2750	0.9952
	100	0.0108	1.2419	0.9979
热风干面	40	0.0644	2.0706	0.9896
	60	0.0531	1.7750	0.9939
	80	0.0322	1.6502	0.9902
	100	0.0246	1.4871	0.9938

从表 1 中可知, 油炸面条 K_1 值变化幅度不大, 范围均在 0.0032~0.01, 而热风干面 K_1 值变化幅度较大, 变化值在 0.008~0.021 之间, 这说明油炸面条吸水性质受温度变化影响效应小于热风干面。特别在 60 °C 与 80 °C 之间热风干面出现明显的转折, 这与徐杰等^[7]发现在 55 °C 时, 糙米的吸水速率常数 K_1 出现突变结果相似, 分析原因可能是在 60~80 °C 间, 热风干面中部分淀粉出现糊化现象, 导致吸水性增强。表 1 中, 油炸面条在 40 °C 时 K_1 值与热风干面在 80 °C 时相近, 说明油炸面条在 40 °C 下吸水能力与热风干面在 80 °C 下吸水能力接近。而在平衡状态下保水能力方

面,油炸面条在 40 °C 下 K_2 值都比热风干面在 100 °C 下的值大,说明油炸面条的保水能力远远大于热风干面,这可能由于油炸面条内部结构疏松,水分容量空间较大的原因。

2.3 Peleg 方程参数与温度关系以及 Peleg 方程验证

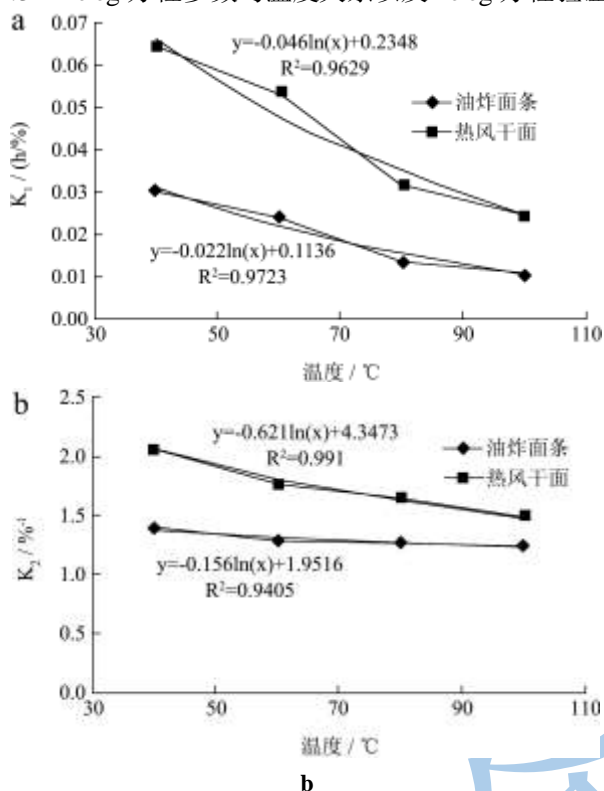


图 3 Peleg 方程参数与温度关系

Fig.3 The relationships of Peleg equation parameters and temperature

注: a- K_1 ; b- K_2 。

为探讨 Peleg 方程参数与温度关系,以便求出某一温度下 Peleg 方程具体参数,将 K_1 、 K_2 与温度做多种回归分析,以相关系数 R^2 为评判标准,得出对数方程为 K_1 、 K_2 与温度的最佳拟合方程,图 3 为两种面条 Peleg 方程参数与温度的对数拟合曲线,从图 3 中可知相关系数均在 0.94 以上,具有较好的拟合性。这与余世锋在研究籼米、粳米及泰国香米吸水性质时所得线性回归方程有所不同,分析原因可能是不同物质在不同条件下吸水性质不同所造成^[6]。通过对数方程,

表 2 K_1 与温度的 Arrhenius 方程拟合

Table 2 Arrhenius equation fitting of K_1 with temperature

原料	K_0	E/(KJ/mol)	R^2	Arrhenius 方程
油炸面条	26742.25	17577.68	0.9708	$1/K_1=26742.25*\exp(-2114.0995/T)$
热风干面	7847.105	16372.91	0.9646	$1/K_1=7847.105*\exp(-1969.1996/T)$

Peleg 方程中速率常数 K_1 与温度有密切关系,Arrhenius 方程可以进一步解析温度对 K_1 的影响。参考 Cabrera 等^[15]的方法对速率常数 K_1 与温度进行

可以直接求得某个温度下的扩散速率 K_1 和容量系数 K_2 ,然后将两参数代入 Peleg 方程 (1) 式中,就可以求得不同时间下样品的水分含量。从图 3 中还可以看出不同原料两参数间差距随温度的变化,随着温度的升高, K_1 与 K_2 之间差距在逐渐减少,说明提高温度可以有效减少不同物料间吸水速率和容量常数的差距。

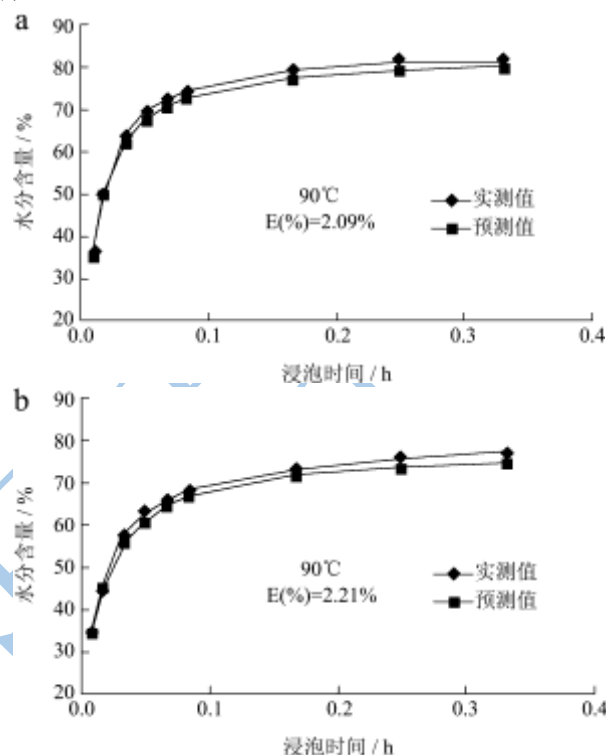


图 4 Peleg 方程预测值与试验值之间关系

Fig.4 Predicted values and experimental values of the Peleg equation

注: a-油炸面条; b-热风干面。

图 4 为 90 °C 下两种面条在不同时间下含水量的试验值与使用 Peleg 方程计算所得预测值曲线。从图 4 中可知,两种面条在 90 °C 下水分含量的试验值与预测值非常接近,平均相对误差均在 2% 左右,远远低于 10%。说明 Peleg 方程对于拟合油炸与热风干面条吸水性质具有较高的精确性。

2.4 K_1 与温度的 Arrhenius 方程拟合

Arrhenius 方程拟合,结果如表 2 所示。从表 2 可知两种面条的 Arrhenius 方程拟合程度较高,相关系数均在 0.96 以上。同时同一浸泡条件下油炸面条的活化能要

高于热风干面,说明水分渗透时需要更多的能量,原因可能在于油炸面条经过高温油炸后,面筋蛋白发生变性,吸水能力下降,造成部分结构水分渗透的困难,因此需要较多的能量。同时 Arrhenius 方程还将 K_1 与温度间建立关系,为 K_1 与温度相互求解提供另一种方法。

3 结论

3.1 两种面条水分含量均随温度的升高,时间的延长而增大,吸水性质与温度和时间呈正相关。两种面条的吸水曲线均符合经典物质吸水曲线,在起始阶段由于面条内部水分含量低,与外界水分浓度差距大,所以扩散速率较快,随着浸泡时间延长,水分浓度差的减少,扩散速率随之降低。浸泡的后期,由于两种面条的内部结构差异,造成同一温度下两种原料的水分含量差异和同一原料不同温度的水分含量差异。

3.2 Peleg 方程对两种面条吸水曲线具有较高的拟合性和适用性,相关系数均在 0.990 以上。两种面条的 Peleg 方程参数 K_1 与 K_2 均随温度提高而减少,表示吸水速率与最终平衡状态下的保水能力均随温度而提高。对比两种面条不同温度下的 K_1 值变化,发现油炸面条速率常数变化幅度在 0.0032~0.01,幅度较小;而热风干面条变化幅度较大,在 0.008~0.021 之间,说明油炸面条吸水速率受温度影响小于热风干面。同时试验发现,热风干面在 60~80 °C 间,速率常数出现明显转折,分析原因可能是热风干面中淀粉糊化所造成。

3.3 探讨 Peleg 方程参数 K_1 与 K_2 与温度关系,对两参数与温度进行多种回归分析,得出对数方程为最佳拟合方程,相关系数均在 0.94 以上。通过对数方程和 Peleg 方程求出已知温度下的预测水分含量。在 90 °C 条件下,分别将两种面条水分含量的预测值与试验值作相对误差分析,得出 E (%) 在 2% 左右,具有较高的精确性。同时将 K_1 与温度进行 Arrhenius 方程拟合,相关系数带到 0.96 以上,为进一步解析温度对 K_1 影响提供参考。

参考文献

- [1] 王超,周坚,李沛生,等.软包装即食湿面条配方优化研究[J].现代食品科技,2006,21(3):86-89
- [2] Abu-Ghannam N, McKenna B. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red

- kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 1997, 32 (4): 391-401
- [3] Corzo O, Bracho N, Rodríguez J. Comparison of Peleg and Azuara et al. models in the modeling mass transfer during pile salting of goat sheets [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 46(2): 448-452
- [4] García-Pascual P, Sanjuán N, Melis R, et al. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modeling [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(4): 346-353
- [5] Turhan M, Sayar S, Gunasekaran S. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53 (2): 153-159
- [6] 余世锋,马莺,张海玲.粳米,籼米及泰国香米吸水性质及其动力学研究[J].食品工业科技,2009,30(6):86-90
- [7] 徐杰,张晖,郭晓娜,等.糙米和发芽糙米吸水动力学研究[J].食品工业科技,2011,32(7):150-153
- [8] Jideani V A, Mpotokwana S M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92 (2): 182-188
- [9] Sopade P A, Kaimur K. Application of Peleg's equation in desorption studies of food systems: a case study with sago (*Metroxylon sagu* Rottb.) starch [J]. Drying Technology, 1999, 17: 975-989
- [10] Peng G L, Chen X G, Wu W F, et al. Modeling of water sorption isotherm for corn starch [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80 (2): 562-567
- [11] Calzetta Resio A, Aguerre R J, Suarez C. Hydration kinetics of amaranth grain [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72 (3): 247-253
- [12] Maskan M. Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(4): 337-341
- [13] 张勉,徐玉娟,刘忠义,等.盐焗鸡腿加工过程中食盐的渗透规律研究[J].现代食品科技,2011,27(8):908-911
- [14] Cunningham S E, McMinn W A M, Magee T R A, et al. Modelling water absorption of pasta during soaking [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 82(4): 600-607
- [15] Cabrera E, Pineda J C, Duran D B, et al. Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during corn nixtamalization [J]. Engineering Sciences in the Food Industry, 1984, 1: 117-125