

不同贮藏温度下鲜湿米线的品质变化动力学模型及其货架期预测

胡云峰, 王晓彬, 张利苹

(天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

摘要: 为了研究贮藏过程中, 鲜湿米线品质变化与贮藏时间的相关性, 本文测定了 4、10、20、25、37 °C 下贮藏的鲜湿米线的酸度、碘蓝值、pH 值和吸水率随贮藏时间的变化, 并建立了碘蓝值、pH 值和吸水率的动力学模型, 及以碘蓝值为终点的货架期预测模型。结果表明, 鲜湿米线的碘蓝值和 pH 值可以建立一级动力学模型, 吸水率可以建立零级动力学模型。且建立的三个模型的拟合系数 R^2 分别为: 0.9901 (碘蓝值), 0.9524 (pH 值) 和 0.9785 (吸水率), 并且其平均相对误差 W 分别为 7.0%, 5.8% 和 5.6%, 均小于 10%。以贮藏期间鲜湿米线碘蓝值的变化建立货架期模型, 且货架期达终点时, 碘蓝值为 1.2389, 其平均相对误差 W 为 1.06%, 小于 10%。说明本文以碘蓝值作为终点时建立的货架期模型可以较好预测鲜湿米线的货架期。

关键词: 鲜湿米线; 品质变化; 动力学模型; 货架期模型

文章编号: 1673-9078(2019)01-89-96

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.1.013

Dynamic Model of Quality Change of Fresh Rice Noodle in Different Temperatures and the Prediction of Its Shelf Life

HU Yun-feng, WANG Xiao-bin, ZHANG Li-ping

(College of Food Engineering and Biotechnology Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to study the correlation between the quality changes of fresh rice noodle and storage time, in this paper, iodine blue value, acidity, pH value and water absorption of fresh rice noodle stored at 4, 10, 20, 25 and 37 °C were fitted by statistical software. A dynamic model was established. A shelf-life prediction model was also established with iodine blue value of fresh rice noodle as the end of shelf life. The results showed that the iodine blue value and pH value could be fitted into a zero order kinetic model, and the water absorption could be fitted into a first-order kinetic model. The fitting coefficients R^2 of the three models were 0.9901 (iodine blue value), 0.9524 (pH value) and 0.9785 (water absorption) respectively. The average relative error of W was 7.0%, 5.8% and 5.6%, respectively, both less than 10%. The model of shelf-life was established based on the change of iodine blue value of fresh rice noodle during storage. At the end of shelf life, the iodine blue value was 1.2389, and the average relative error was 1.06%, which was less than 10%. The model established in this paper could predict the storage time of fresh rice noodle.

Key words: fresh rice noodle; quality change; dynamic model; shelf-life prediction model

米线是中国南方地区的一种传统食品, 主要以高直链淀粉含量的大米制作而成, 属于高淀粉类食品^[1,2]。鲜湿米线因为其爽滑、劲道、易于消化的食用特点而深受人们的喜爱^[3]。但是, 鲜湿米线由于水分含量较高, 因此在贮藏运输过程中容易出现老化现象, 米线变硬、失水, 严重影响了米线的营养价值和食用品质, 缩短了米线的货架期^[4]。因此监测和控制鲜湿米线腐败变质是米线加工和流通的重要手段。

收稿日期: 2018-08-28

基金项目: 天津市科技支撑计划项目 (16YFZCNC00680); 2016 年天津市科技支撑计划 (16YFZCNC00680)

作者简介: 胡云峰 (1966-), 女, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏

食品货架期是指当食品被贮藏推荐的条件下, 能够保持食品的食用安全, 感官、理化和微生物特性及任何营养值的时间长度。近年来, 动力学模型被广泛地应用于食品货架期模型的研究中^[5]。肖红^[6]等研究了不同贮藏温度下冷却肉品质变化的研究, 建立了 0~20 °C 范围内的菌落总数、挥发性盐基氮、色差的动力学模型。邱春强等^[7]利用 Arrhenius 方程, 以国标中用于评价肉质鲜度的唯一理化指标 TVB-N 为指示指标, 建立了预测酱卤鸡肉货架期的动力学模型。李除夕等^[8]以引起豆腐腐败的特定腐败菌库特氏菌为研究对象, 研究不同温度对其生长的影响, 建立了一级和二级生长动力学模型以及剩余货架期预测模型。田

秋实等^[9]以白鲢鱼糜为研究对象,并用菌落总数作为评判依据,建立了货架期预测模型。但是目前对于鲜湿米线的货架期预测模型基本没有研究,因此,本文以鲜湿米线为研究对象,研究 4、10、20、25、37 °C 温度下的各指标的变化规律,并以 15 °C 条件下的各指标对模型进行验证,并建立鲜湿米线的货架期模型,为鲜湿米线的贮藏和销售提供参考指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验材料

大米:采收于云南省开远市;食品级聚乙烯薄膜包装袋:天津恺瑞康科技有限公司提供。

碘化钾(分析纯),天津市北方天医化学试剂厂;碘(分析纯),上海泰坦科技股份有限公司;酚酞指示剂(分析纯),天津市化学试剂三厂;盐酸(分析纯),天津市化学试剂一厂;氢氧化钠(分析纯),天津市北方天医化学试剂厂。

1.1.2 实验设备

LK-1000A 型高速粉碎机,永康市小宝电器有限公司;DFM-65 型米线挤压机,东台市汉源食品机械制造有限公司;SJ-500BKW 型全自动包装机,温州惠利机械有限公司;JJ300 型电子天平,美国双杰(兄弟)集团有限公司;MP522 型精密 pH/电导率仪,成都锐新仪器仪表有限公司;TU-1810 型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 试验方法

1.2.1 米线制作工艺

大米→浸泡→磨制→过筛→挤压→放置→蒸煮→冷却→真空包装→成品

取新鲜的大米浸泡 6 h,沥干后使用磨粉机磨成米粉,将磨好的米粉过 100 目筛,按照米粉总量的 30% 加水后和成米团,将米团放入挤压机原料入口处,用竹筛在挤压机出口处接集,每次约 1.5~2.5 kg 即可,按照所需长度剪断,自然条件下放置 8 h 即得半干米线,将制得的半干米线在沸水中煮沸 2 min 后即得到鲜湿米线,冷却一段时间后真空包装成成品,将成品米线于 4、10、20、25 和 37 °C 条件下贮藏,同时每隔 3 h 进行品质指标的测定。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 米汤碘蓝值的测定

参照李刚凤^[10]的方法,准确称量 5.0 g 米线于 250 mL 的烧杯中,加入 100 mL 沸水浸泡 2 min,将上清

液用滤纸过滤,取 10 mL 滤液于 100 mL 的容量瓶中,加入 1 mL 0.1 mol/L 的 HCl 及 1 mL 的碘液,定容后于 620 nm 波长下比色,读取吸光值,即为提取液碘蓝值。空白采用以 1 mL 的 0.1 mol/L HCl 和 1 mL 碘液,加蒸馏水定容至 100 mL 即可。每个样品重复测定三次,取平均值。

1.2.2.2 米线酸度的测定

参照国标 GB/T 12456^[11],计算鲜湿米线的酸度。每个样品重复测定三次,取平均值。

1.2.2.3 米线 pH 值的测定

称取一定量的样品置于容器中,并加入等量煮沸过的水,浸泡约 20 min,将试样用滤纸过滤,收集滤液,用 pH 计进行测定。每个样品重复测定三次,取平均值。

1.2.2.4 米线吸水率的测定

称取一定量的米线样品 m_1 于沸水中煮沸 2 min,沥干后再次称重 m_2 ,按照下式计算米线的吸水率。每个样品重复测定三次,取平均值。

$$\text{吸水率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (1)$$

1.3 模型的建立与验证

1.3.1 确定品质变化反应速率常数 k 的确定

利用数学统计软件对试验中鲜湿米线各项品质指标变化数据进行线性和非线性拟合,得到拟合曲线,对应求出各项指标变化的零级和一级反应速率常数 k。零级反应速率常数为线性拟合的斜率,一级反应速率常数为品质指标值的对数与时间曲线的斜率^[12]。根据判定系数 R^2 的大小,选用各指标拟合度比较高的动力学模型。

1.3.2 反应活化能的确定

模型方程中的参数包括 A 和 Ea,确定两个参数常用的方法是作图法。将 Arrhenius 方程两边分别取对数,化成对数形式,如式(2)所示^[13]。以 $\ln k$ 为纵坐标, $1/T$ 为横坐标,作出 $\ln k$ 与 $1/T$ 之间的关系曲线依据可得到的直线,由直线的截距和斜率分别可确定 A 和 Ea,直线的斜率为 $\frac{Ea}{R}$,直线的截距值为 $\ln A$ 的值。

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{RT} \quad (2)$$

1.3.3 模型方程的建立

根据式(2)中的拟合结果,分别选择不同的模型方程。零级和一级反应模型方程如式(3)和(4)所示:零级反应模型方程:

$$y = y_0 - kt \quad (3)$$

一级反应模型方程:

$$\ln y = \ln y_0 + kt \quad (4)$$

结合 Arrhenius 方程, 推导得出品质指标预测模型。品质指标零级和一级动力学变化预测如式 (5) 和 (6) 所示: 零级动力学预测模型:

$$y = y_0 - A \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right) \quad (5)$$

一级动力学预测模型:

$$y = y_0 \exp\left[A \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right)t\right] \quad (6)$$

1.3.4 品质模型的验证

通过计算对比平均相对百分比误差来确定验证模型^[14,15], 其计算公式为:

$$W = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{|V_e - V_p|}{V_e} \times 100\% \quad (7)$$

式 (7) 中: V_e 、 V_p 分别为每次试验的实测值和预测值; N 为试验次数, W 均值小于 10% 时, 认为建立的品质模型符合动力学变化。

1.3.5 货架期预测模型的建立及验证

将各项理化指标与酸度进行相关性分析, 确定与酸度相关性最好的品质指标, 以其变化为标准判定货架寿命终点, 建立相关货架期预测模型。

1.3.5.1 货架期预测模型的建立

根据理化指标动力学预测模型方程恒等变形, 得到货架期与温度的关系方程即鲜湿米线在不同贮藏温度条件下的货架期预测模型。方程表达式为式 (8)。

货架期模型方程:

$$SL = \frac{F_t}{A \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right)} \quad (8)$$

式 (8) 中: SL 为货架期, d; F_t 为鲜湿米线货架期结束时的理化指标所对应的数值; T 为贮藏温度, K。

1.3.5.2 货架期预测模型的验证

根据公式 (8) 得出的货架期预测模型, 计算食品货架期, 即为货架期预测值, 将预测值与实测值进行比较, 依据平均百分比相对误差, 验证货架期预测模型的可应用性。

1.4 数据处理

用 Excel 进行数据整理及相关数据的拟合与计算, 应用 SPSS 统计软件进行相关性分析, 验证模型的合理性。

2 结果与讨论

2.1 鲜湿米线基本物质组成分析

表 1 鲜湿米线的基本物质组成

Table 1 Basic material composition of fresh rice noodle

项目	水分含量/%	蛋白质/%	脂肪/%	淀粉/%
含量	60.3±0.58	3.2±0.12	0.51±0.025	35.7±0.34

对制作的鲜湿米线进行基础物质的测定, 结果如表 1 所示。从表中可以看出, 鲜湿米线的水分含量为 60.3%, 蛋白质含量约为 3.2%, 脂肪含量为 0.51% 左右, 淀粉含量约为 35.7%。

2.2 不同温度下鲜湿米线各指标随贮藏时间变化情况

如图 1~4 所示, 随着贮藏时间的延长, 鲜湿米线的碘蓝值和酸度呈上升趋势, 而 pH 值和吸水率均呈下降趋势。且贮藏温度越高, 其变化速率越快。4、10、20、25 和 37 °C 条件下, 鲜湿米线腐败变质的时间分别为 51、42、33、27 和 18 h。显然, 低温有利于鲜湿米线的贮藏, 可以有效延长其货架期。

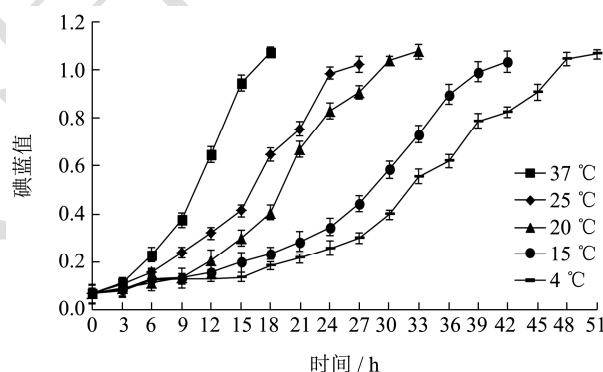


图 1 鲜湿米线碘蓝值随贮藏时间的变化

Fig.1 Changes of iodine blue value of fresh rice noodle with storage time

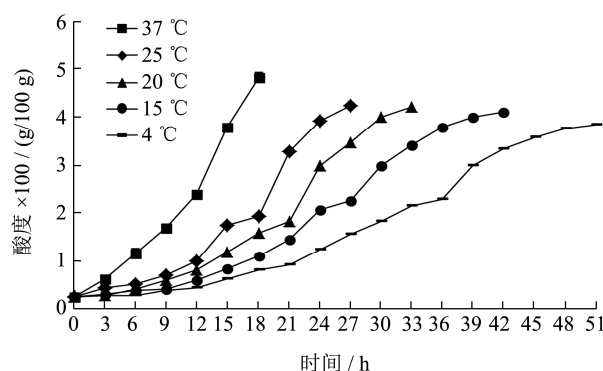


图 2 鲜湿米线酸度值随贮藏时间的变化

Fig.2 Changes of acidity of fresh rice noodle with storage time

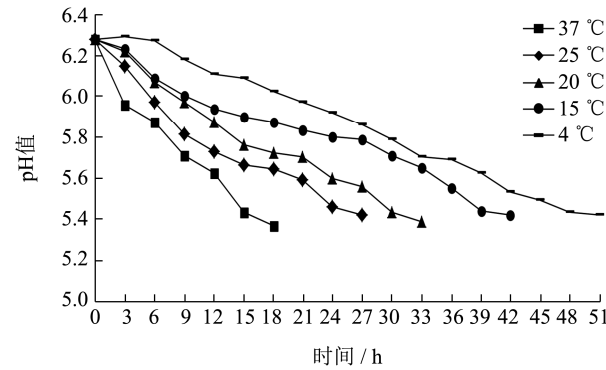


图3 鲜湿米线 pH 值随贮藏时间的变化

Fig.3 Changes of pH value of fresh rice noodle with storage time

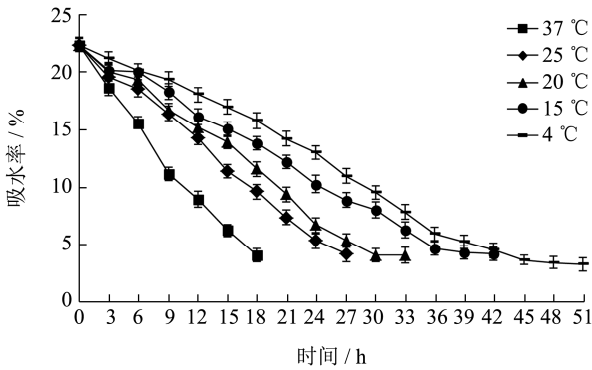


图4 鲜湿米线吸水率随贮藏时间的变化

Fig.4 Changes of water absorption of fresh rice noodle with storage time

表2 零级和一级动力学回归速率常数 k 及决定系数 R²

Table 2 Rection rate constant k and determination coefficient R² of determination for zero and first order regression

指标	温度/℃	零级		一级	
		速率常数 k	决定系数 R ²	速率常数 k	决定系数 R ²
碘蓝值	4	0.0211	0.9095	0.0579	0.9828
	10	0.0243	0.9024	0.0677	0.9912
	20	0.0353	0.9377	0.0942	0.9706
	25	0.0387	0.9529	0.1048	0.9751
	37	0.0610	0.9544	0.1642	0.9720
ΣR ²			4.6569		4.8917
pH 值	4	0.0187	0.9928	0.0032	0.9914
	10	0.0189	0.9684	0.0032	0.9687
	20	0.0267	0.9790	0.0046	0.9830
	25	0.0304	0.9432	0.0052	0.9511
	37	0.0481	0.9640	0.0083	0.9708
ΣR ²			4.8474		4.8650
吸水率	4	0.4186	0.9847	0.0418	0.9578
	10	0.4600	0.9896	0.0423	0.9667
	20	0.5954	0.9879	0.0559	0.9562
	25	0.6903	0.9951	0.0617	0.9597
	37	1.0236	0.9881	0.0928	0.9798
ΣR ²			4.9454		4.8202

2.3 鲜湿米线各指标数据拟合分析

根据实验结果所呈现的变化规律，对所得数据进行线性和非线性拟合分别可得到零级和一级动力学回归速率常数 k 和决定系数 R²。由表 2 中 ΣR² 的结果可知，碘蓝值的一级动力学模型的决定系数之和为 4.8917，大于零级动力学模型的决定系数之和 4.6569，同样，pH 值的一级动力学的决定系数之和大于零级动力学模型的决定系数之和。而吸水率的零级动力学模型的决定系数之和为 4.9454，大于一级动力学模型的决定系数之和 4.8202。因此，碘蓝值和 pH 值选用一

级动力学模型，吸水率选用零级动力学模型。

2.4 碘蓝值变化的预测模型建立与验证

2.4.1 碘蓝值变化的预测模型建立

根据不同贮藏温度下鲜湿米线碘蓝值随时间变化的规律，可以建立碘蓝值随着贮藏时间变化的一级动力学模型。用碘蓝值的回归方程的速率常数对数值 (lnK) 与对应的温度倒数 (1/T) 所做的 Arrhenius 曲线如图 5 所示，复相关系数为 0.9901。这表明本试验选用的一级动力模型跟 Arrhenius 方程结合效果较好。

由 Arrhenius 方程计算得到贮藏期间碘蓝值的活化能 E_a 2.24×10^4 kJ/mol, A 值为 919.656。

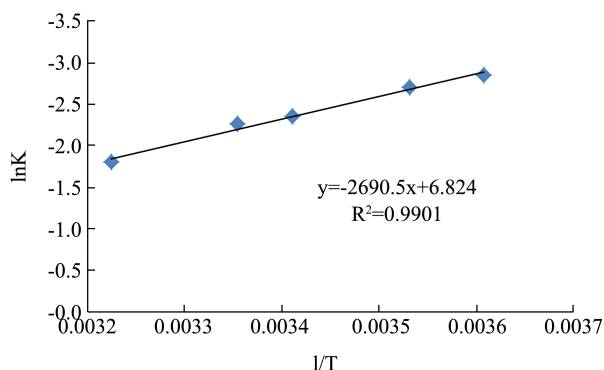


图5 鲜湿米线碘蓝值的Arrhenius曲线

Fig.5 Arrhenius curves of iodine blue value of fresh rice noodle

根据不同贮藏温度下实验数据统计能够得出碘蓝值的动力学方程,并能结合 Arrhenius 方程计算出反应速率常数 K、A 和 E_a ,可建立鲜湿米线的最终预测模型方程。最终动力学模型方程如式 (9) 所示:

酸度预测模型方程:

$$G_t = G_0 \exp \left[\left((-919.656) \times \exp \left(\frac{-2690.5}{T} \right) \right) t \right] \quad (9)$$

式中: G_t 表示贮藏 t 时间鲜湿米线碘蓝值; G_0 表示起始时间鲜湿米线碘蓝值。

2.4.2 碘蓝值变化的预测模型的验证

用鲜湿米线碘蓝值预测模型方程计算出验证组中 15 °C 条件下鲜湿米线的碘蓝值,即为碘蓝值的预测值,将其和实际值进行比较 (图 6)。结果表明,由公式计算得到的鲜湿米线碘蓝值预测值和实测值基于 1:1 曲线的决定系数为 0.9892,根据式 (7) 计算得出的平均相对误差 P 为 7.0%,小于 10%,说明模型能较好的预测 4~37 °C 条件下鲜湿米线的碘蓝值。

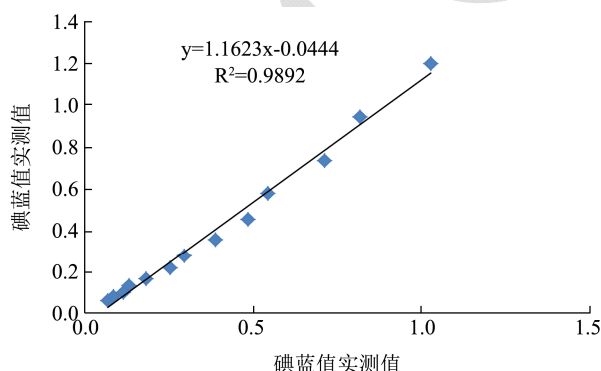


图6 碘蓝值模型实测值与预测值之间的相关性

Fig.6 Correlation between predicted values and actual values of iodine blue value

2.5 pH 值变化的预测模型建立与验证

2.5.1 pH 值变化的预测模型的建立

根据不同贮藏温度下 pH 值随时间变化的规律,可以建立 pH 值随着贮藏时间变化的一级动力学模型。用 pH 值的回归方程的速率常数对数值 (lnK) 与对应的温度倒数 (1/T) 所做的 Arrhenius 曲线如图 7 所示,复相关系数分别为 0.9524,这表明本试验选用的一级动力模型跟 Arrhenius 方程结合效果较好。

由 Arrhenius 方程计算得到贮藏期间 pH 值的活化能 E_a 为 2.14×10^4 kJ/mol, A 值为 30.45。

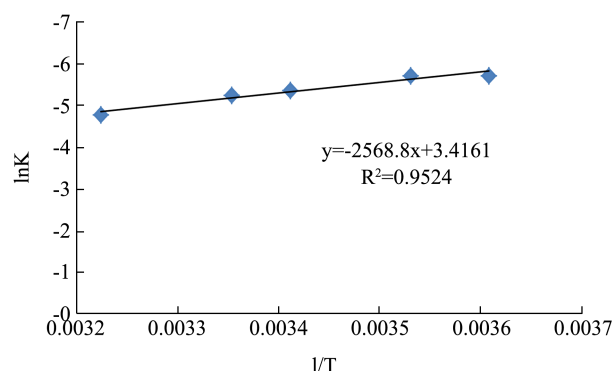


图7 鲜湿米线pH值的Arrhenius曲线

Fig.7 Arrhenius curves of pH value of fresh rice noodle

根据不同贮藏温度下实验数据统计能够得出 pH 值的动力学方程,并能结合 Arrhenius 方程计算出反应速率常数 K、A 和 E_a ,可建立 pH 值的最终预测模型方程。最终动力学模型方程如式所示:

pH 值预测模型方程:

$$Q_t = Q_0 \exp \left[\left((-30.45) \times \exp \left(\frac{-2568.8}{T} \right) \right) t \right] \quad (10)$$

式中, Q_t 表示贮藏 t 时间鲜湿米线 pH 值; Q_0 表示起始时间鲜湿米线 pH 值。

2.5.2 pH 值变化的预测模型的验证

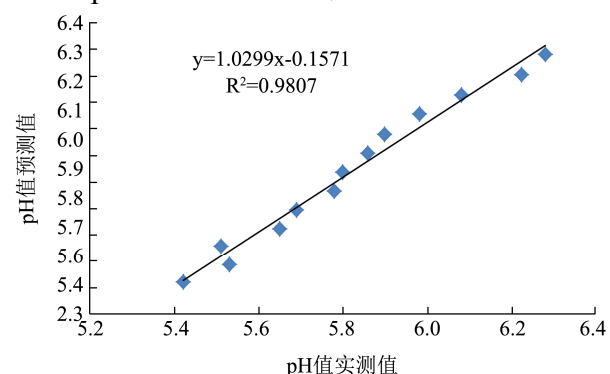


图8 pH值模型实测值与预测值之间的相关性

Fig.8 Correlation between predicted values and actual values of pH value

用 pH 值预测模型方程计算出验证组中 15 °C 条件下鲜湿米线 pH 值,即为 pH 值的预测值,将其和实测值进行比较。结果表明,由公式计算得到的 pH 值预测值和实测值基于 1:1 线的决定系数为 0.9807,计

算得出的平均相对误差 P 为 5.8%, 小于 10%, 说明模型能较好的预测 4~37 °C 条件下鲜湿米线的 pH 值。

2.6 吸水率变化的预测模型建立与验证

2.6.1 吸水率变化的预测模型的建立

根据不同贮藏温度下吸水率随时间变化的规律, 可以建立吸水率随着贮藏时间变化的一级动力学模型。用吸水率的回归方程的速率常数对数值 (lnK) 与对应的温度倒数 (1/T) 所做的 Arrhenius 曲线如图 9 所示, 复相关系数分别为 0.9785, 这表明本试验选用的零级动力学模型跟 Arrhenius 方程结合效果较好。

由 Arrhenius 方程计算得到贮藏期间吸水率的活化能 E_a 为 1.94×10^4 kJ/mol, A 值为 1814.93。

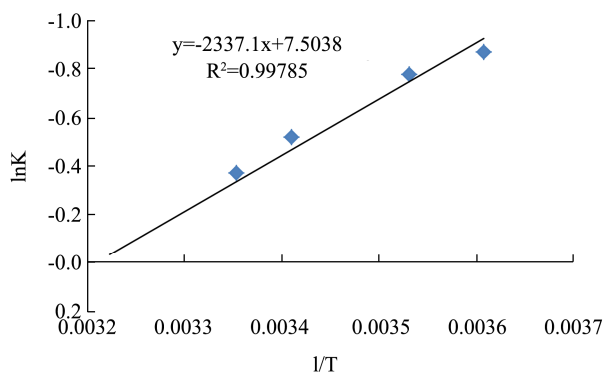


图9 鲜湿米线吸水率的Arrhenius曲线

Fig.9 Arrhenius curves of water absorption of fresh rice noodle

根据不同贮藏温度下实验数据统计能够得出吸水率的动力学方程, 并能结合 Arrhenius 方程计算出反应速率常数 K、A 和 E_a , 可建立吸水率的最终预测模型方程。最终动力学模型方程如式所示:

吸水率预测模型方程:

$$W_t = W_0 + \left[1814.93 \times \exp\left(\frac{-2337.1}{T}\right) \right] T \quad (11)$$

式中, W_t 表示贮藏 t 时间鲜湿米线吸水率; W_0 表示起始时间鲜湿米线吸水率。

2.6.2 吸水率变化的预测模型的验证

用吸水率预测模型方程计算出验证组中 15 °C 条件下鲜湿米线吸水率, 即为吸水率的预测值, 将其和实测值进行比较。结果表明, 由公式计算得到的吸水率预测值和实测值基于 1:1 线的决定系数为 0.9939,

计算出的平均相对误差 P 为 5.6%, 小于 10%, 说明模型能较好的预测 4~37 °C 条件下鲜湿米线的吸水率。

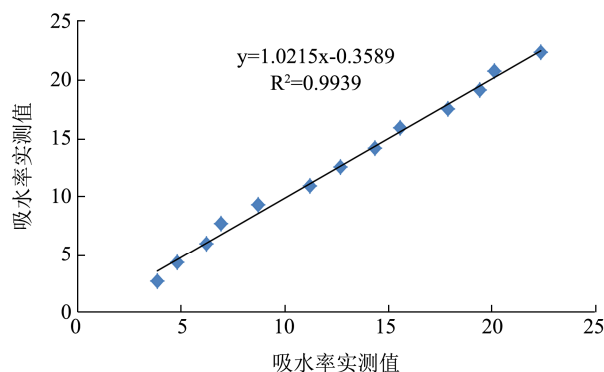


图10 吸水率模型实测值与预测值之间的相关性

Fig.10 Correlation between predicted values and actual values of water absorption

2.7 酸度与各指标之间的相关性

鲜湿米线酸度值与各指标具有一定关系, 可用皮尔逊相关系数 r 表示。r > 0.9 时就可以认为相关性是显著的。由表 3 可知, 不同温度下鲜湿米线碘蓝值、pH 值和吸水率的皮尔逊系数较为显著, $\sum|r|$ 分别为 4.940, 4.663 和 4.806。比较 $\sum|r|$ 值的大小可以看出, 碘蓝值的 $\sum|r|$ 最高。因此, 碘蓝值可用来预测鲜湿米线的货架期。

2.8 鲜湿米线货架期预测模型的建立及验证

2.8.1 鲜湿米线货架期预测模型的建立

根据以上理论及试验结果, 确定采用碘蓝值的变化来预测货架期, 由式简化得出货架期预测模型方程:

$$SL_{(N)} = \frac{\ln(G_t) - \ln(G_0)}{A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (12)$$

式中: $SL_{(N)}$ 为货架期, h; G_0 为起始时间鲜湿米线碘蓝值; G_t 为贮藏 t 时间鲜湿米线碘蓝值; R 为气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为贮藏温度 (开尔文), K。

将计算获得的各参数值代入式中, 我们可以推导出鲜湿米线货架期预测的方程:

$$SL_{(N)} = \frac{\ln(G_t) - \ln(G_0)}{919.656 \exp\left(\frac{2690.5}{RT}\right)} \quad (13)$$

表 3 酸度与各项指标之间的皮尔逊系数

Table 3 Person correlation coefficient among the various indicators and acidity

项目	4 °C	10 °C	20 °C	25 °C	37 °C	$\sum r $
碘蓝值	0.991**	0.983**	0.989**	0.996**	0.991*	4.940
pH 值	-0.982**	-0.941**	-0.930**	-0.875**	-0.935*	4.663
吸水率	-0.968**	-0.969**	-0.962**	-0.959**	-0.948**	4.806

注: **在 0.01 水平(双侧)上显著相关, *在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

表4 鲜湿米线在 15 °C 贮藏下货架期的预测值和实测值

Table 4 The predicted and observed values of shelf-life of fresh rice noodle stored at 15 °C

品质指标	贮藏温度/°C	货架期预测值/h	货架期实测值/h	相对误差/%
碘蓝值	15	36.38	36	1.06

2.8.2 鲜湿米线货架期预测模型的验证

2.8.2.1 货架寿命到达终点时碘蓝值的确定

酸度值是鲜湿米线质量评定的重要指标, 标准中规定酸度值 ≥ 0.05 g/100 g 时达到货架期极值, 不能食用, 因此以 0.05 g/100 g 作为酸度值的终点, 即为鲜湿米线货架寿命终点。应用软件对酸度值及碘蓝值进行数学回归分析, 得到酸度值与碘蓝值之间的回归方程, 如图 11 所示。

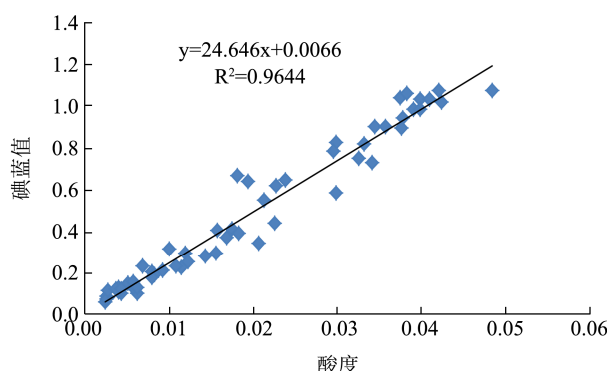


图11 酸度与碘蓝值的回归分析

Fig.11 Regression analysis between the value of acidity with iodine blue value

由图 11 可知, 酸度与碘蓝值之间存在线性回归关系, 回归方程为 $Y=24.646x+0.0066$ 。当酸度值为 0.05 时, 计算可得碘蓝值为 1.2389。货架寿命达到终点时, 碘蓝值为 1.2389, 即货架期终点碘蓝值为 1.2389。

2.8.2.2 货架期预测值与实测值比较

根据公式预测模型方程计算出验证组中 15 °C 贮藏条件下鲜湿米线的货架期 (表 4), 即为货架期预测值, 将预测值和实测值进行比较, 发现 15 °C 条件下贮藏的鲜湿米线货架期预测值跟实测值之间的相对误差的绝对值为 1.06%, 小于 10%。因此, 根据上述理论建立的鲜湿米线货架期预测模型可用来预测 4~37 °C 贮藏条件下鲜湿米线的货架寿命。相对误差的绝对值受温度影响, 温度波动, 鲜湿米线的各项生理活动明显, 对预测值的准确度产生一定的影响。

3 结论

鲜湿米线真空包装后分别贮藏于 4、10、20、25、37 °C 条件下, 贮藏期间对其碘蓝值、酸度、pH 值和吸水率进行测定。结果表明, 鲜湿米线的碘蓝值和酸度呈上升趋势, 而 pH 值和吸水率均呈下降趋势。且贮藏温度越高, 其变化速率越快。鲜湿米线的碘蓝值

和 pH 值可以建立一级动力学模型, 吸水率可以建立零级动力学模型。且建立的三个模型的拟合系数 R^2 分别为: 0.9901 (碘蓝值), 0.9524 (pH 值) 和 0.9785 (吸水率) 并且其平均相对误差 W 分别为 7.0%、5.8% 和 5.6%, 均小于 10%。货架期达终点时, 碘蓝值为 1.2389, 其平均相对误差 W 为 1.06%, 小于 10%。邱春强等^[7]利用 Arrhenius 方程, 以 TVB-N 为指示指标, 建立了预测酱卤鸡肉货架期的动力学模型。本试验同样运用 Arrhenius 方程, 以碘蓝值为预测指标, 建立了鲜湿米线的货架期预测模型, 经验证, 模型的预测结果误差较小, 因此本模型可以较好地预测贮藏于不同温度下鲜湿米线的货架期。

参考文献

- [1] 方奇林. 大米淀粉米线的研究[D]. 江南大学, 2005
FANG Qi-lin. Studies on rice starch noodles [D]. Jiangnan University, 2005
- [2] Hormdok R, Noomhorm A. Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(10): 1723-1731
- [3] Gallagher E, Gormley T R, Arendt E K. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(3-4): 143-152
- [4] 谢定, 刘永乐, 单阳, 等. 保鲜方便米粉抗老化研究[J]. 食品与机械, 2006, 22(2): 8-10
XIE Ding, LIU Yong-le, SHAN Yang, et al. Investigation of anti-retrogradation of fresh instant rice noodles [J]. Food & Machinery, 2006, 22(2): 8-10
- [5] David Kilcast, Persis Subramaniam. The Stability and Shelflife of Food [M]. England: Wood Head Publishing Limited, 2000: 6-13
- [6] 肖虹, 谢晶. 不同贮藏温度下冷却肉品质变化的实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(3): 40-45
XIAO Hong, XIE Jing. Experiment on chilled pork under different storage temperature [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(3): 40-45
- [7] 邱春强, 张坤生, 任云霞, 等. 酱卤鸡肉货架期预测的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(22): 351-354
QIU Chun-qiang, ZHANG Kun-sheng, REN Yun-xia, et al. Research of the prediction of sauce chicken shelf life [J].

- Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(22): 351-354
- [8] 李除夕,董明盛,陈晓红,等.豆腐中库特氏菌生长动力学模型和货架期预测[J].农业工程学报,2009,s1:82-86
LI Chu-xi, DONG Ming-sheng, CHEN Xiao-hong, et al. Construction of microbial growth kinetics prediction model of *Kurthia* in Tofu and shelf life prediction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, s1: 82-86
- [9] 田秋实,谢晶,励建荣.白鲢鱼糜制品货架期模型的建立[J].食品工业科技,2009, 4: 70-73
TIAN Qiu-shi, XIE Jing, LI Jian-rong. Establishment of shelf life model of silver carp surimi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 4: 70-73
- [10] 李刚凤.米粉老化的影响因素及其机理研究[D].河南工业大学,2013
LI Gang-feng. The research of retrogradation influence factors of rice noodles and its mechanism [D]. Henan University of Technology, 2013
- [11] GB/T 12456-2008. 食品中总酸的测定[S].北京:标准出版社,2008
GB/T 12456-2008. Method for Determination of Total Acid in Foods [S]. Beijing: Chinese Standard Publishing house, 2008
- [12] 余晓琴,车晓彦,张丽平.食品货架寿命预测研究[J].食品研究与开发,2007,3:84-87
YU Xiao-qin, CHE Xiao-yan, ZHANG Li-ping. Predicting Shelf-life of Food- a review [J]. Food Research and Development, 2007, 3: 84-87
- [13] 马妍,谢晶,周然,等.暗纹东方鲀在不同冻藏温度下品质变化的动力学研究[J].中国农业大学学报,2012,17(1):138-142
MA Yan, XIE Jing, ZHOU Ran, et al. Quality degradation kinetics of *Takifugu obscurus* at different storage temperatures [J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(1): 138-142
- [14] Ketelaere B D, Vanhoutte H, Baerdemaeker J D. Parameter estimation and multivariable model building for the non-destructive online determination of eggshell strength [J]. Journal of Sound & Vibration, 2003, 266(3): 699-709
- [15] Boquet R, Chirife I H A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods evaluation of various two-parameter models [J]. Journal Food Technology, 1978, 13(3): 319-327

(上接第 128 页)

- [15] Artiga-Artigas M, Acevedo-Fani A, Martín-Belloso O. Improving the shelf life of low-fat cut cheese using nanoemulsion-based edible coatings containing oregano essential oil and mandarin fiber [J]. Food Control, 2017, 76: 1-12
- [16] Ani P N, Abel H C. Nutrient, phytochemical, and antinutrient composition of *Citrus maxima* fruit juice and peel extract [J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(3): 653-658
- [17] Schalow S, Baloufaud M, Cottancin T, et al. Orange pulp and peel fibres: Pectin-rich by-products from citrus processing for water binding and gelling in foods [J]. European Food Research and Technology, 2018, 244(2): 235-244
- [18] Kumar V, Sinha A K, Makkar H P S, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review [J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 945-959
- [19] Deak N A, Murphy P A, Johnson L A. Effects of reducing agent concentration on soy protein fractionation and functionality [J]. Journal of Food Science, 2006, 71(3)
- [20] Lyu Y, Liu Q., Bao X., et al. Identification and characteristics of iron-chelating peptides from soybean protein hydrolysates using IMAC-Fe³⁺ [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(11): 4593-4597
- [21] Lin Y, Wang Y H, Yang X Q, et al. Corn protein hydrolysate as a novel nano-vehicle: Enhanced physicochemical stability and *in vitro* bioaccessibility of vitamin D3 [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 510-517
- [22] Wang Y H, Wan Z L, Yang X Q, et al. Colloidal complexation of zein hydrolysate with tannic acid: Constructing peptides-based nanoemulsions for alga oil delivery [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 40-48
- [23] Falconer R J, Penkova A, Jelesarov I, et al. Survey of the year 2008: applications of isothermal titration calorimetry [J]. Journal of Molecular Recognition, 2010, 23(5): 395-413
- [24] Ross P D, Subramanian S. Thermodynamics of protein association reactions: forces contributing to stability [J]. Biochemistry, 1981, 20(11): 3096-3102
- [25] Patel A R, Drost E, Blijdenstein T B J, et al. Stable and temperature-responsive surfactant-free foamulsions with high oil-volume fraction [J]. Chem Phys Chem, 2012, 13(17): 3777-3781