

# 燕麦生鲜湿面贮藏品质变化及货架期预测模型研究

金露达<sup>1</sup>, 衣然<sup>1</sup>, 张关涛<sup>1</sup>, 王洪江<sup>1\*</sup>, 张东杰<sup>1,2</sup>, 李娟<sup>1</sup>

(1.黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319; 2.国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** **目的** 构建一种新的径向基函数神经网络货架期预测模型。**方法** 研究不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面的微生物、理化等指标的变化情况, 通过 Pearson 相关性分析, 筛选影响燕麦生鲜湿面货架期的主要因素, 利用微生物生长动力学模型和径向基函数神经网络模型对燕麦生鲜湿面的剩余货架期进行预测。**结果** 微生物生长动力学模型不能很好地拟合燕麦生鲜湿面菌落总数的变化情况, 预测精度较差, 径向基函数神经网络预测模型的预测值与实际值的相对误差为 2.66%。**结论** 径向基函数神经网络预测模型的效果较好, 为以后食品货架期的预测提供了一定的参考依据。

**关键词:** 燕麦生鲜湿面; 贮藏品质; 径向基函数神经网络; 货架期预测模型

**中图分类号:** TS213.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0075-10

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.010

## Storage Quality Change and Shelf Life Prediction Model of Oat Fresh Wet Noodles

JIN Lu-da<sup>1</sup>, YI Ran<sup>1</sup>, ZHANG Guan-tao<sup>1</sup>, WANG Hong-jiang<sup>1\*</sup>, ZHANG Dong-jie<sup>1,2</sup>, LI Juan<sup>1</sup>

(1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Heilongjiang Daqing 163319, China;

2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Daqing 163319, China)

**ABSTRACT:** The work aims to construct a new radial basis function (RBF) neural network shelf life prediction model. The microbial, physical and chemical indexes of oat fresh wet noodles at different storage temperatures were studied, and the main factors affecting the shelf life of oat fresh wet noodles were screened out through Pearson correlation analysis. The remaining shelf life of oat fresh wet noodles was predicted by models of microbial growth kinetics and the RBF neural network, respectively. The microbial growth kinetics model could not fit the change of the total bacterial count of oat fresh wet noodles very well, and the prediction accuracy was poor. On the contrary, the relative error between the predicted value and the actual value of the RBF neural network prediction model was 2.66%, which was very little. The RBF neural network prediction model is effective, which provides a certain reference for the future prediction of food shelf life.

**KEY WORDS:** oat fresh wet noodles; storage quality; radial basis function neural network; shelf life prediction model

燕麦生鲜湿面的生产历史悠久, 它是中国西北地区的传统主食之一, 燕麦生鲜湿面由燕麦粉、小麦粉、水等制成。燕麦粉中富含  $\beta$ -D 葡聚糖, 可以降低胆固醇水平和血糖反应, 还含有大量不饱和脂肪酸、蛋白质、矿物质、维生素和抗氧化剂化合物<sup>[1-2]</sup>。燕麦生鲜湿面具有营养价值高、新鲜健康等优点, 广受消费者喜爱<sup>[3]</sup>。在贮藏过程中, 由于细菌、霉菌等微生物的生长繁殖, 燕麦生鲜湿面易发生腐败变质。这些微

生物的生长繁殖受到温度、湿度、水分含量、水分活度、pH 值、包装方式等因素的影响, 进而影响食品的货架期。货架期预测模型可以根据这些因素来预测食品的剩余货架期。货架期是决定生鲜食品质量和安全的关键指标, 因此开发一个可靠的模型来预测燕麦生鲜湿面的货架期显得至关重要。

目前, 面制品的货架期预测模型多采用传统模型, 如化学动力学模型 (Arrhenius 模型)、微生物生

长动力学模型(三相线性模型、修正的 Gompertz 模型、修正的 Logistic 模型)等<sup>[4-5]</sup>。随着科技的发展,传统模型存在诸多问题:传统的货架期预测模型的范围通常有限,可能不适用于所有食品;缺乏灵活性,只考虑影响货架期的单一指标,不能适应复杂多变的情况;预测精度较低。近年来,人工智能(Artificial Intelligence)和机器学习(Machine Learning)已被广泛应用于预测领域。这些技术中的径向基函数神经网络在预测食品货架期方面表现出巨大潜力。

径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network)是一种由多个并行人工神经元组成的前馈性神经网络。RBF 神经网络在预测方面具有多项优势,使其成为预测食品货架期的热门选择。RBF 神经网络模型可以高精度地逼近非线性函数,这对于预测燕麦生鲜湿面的货架期很重要,因为输入变量(如温度、湿度、pH 值)与输出变量(货架期)之间的关系通常为非线性。生鲜湿面的货架期受到大量变量的影响,而 RBF 神经网络模型可以有效处理这些复杂关系。RBF 神经网络模型具有快速高效的学习能力,能够快速准确地预测生鲜湿面的货架期。与其他神经网络模型相比,RBF 神经网络模型不太容易发生拟合。这里以燕麦生鲜湿面的贮藏品质指标为研究对象,探讨不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面品质的变化规律,并根据贮藏品质指标建立 RBF 神经网络货架期预测模型,拟为 RBF 神经网络货架期预测模型在食品上的应用提供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料

主要材料:燕麦粉(蛋白质 11.2%,脂肪 7.2%,碳水化合物 63.8%,均为质量分数),山西晋芳米业有限公司;小麦粉(蛋白质 9%,脂肪 1.5%,碳水化合物 75%,均为质量分数),中粮国际(北京)有限公司;谷朊粉(蛋白质 77.5%,脂肪 0.7%,碳水化合物 12.8%,均为质量分数),封丘县华丰粉业有限公司;营养琼脂、孟加拉红琼脂,青岛高科技工业园海博生物技术有限公司。

### 1.2 仪器

主要仪器:DT-6D 型气调保鲜包装机,上海众林机电设备有限公司;SPX-150B 型生化培养箱,天津市宏诺仪器有限公司;LHS-2413 型手提式压力蒸汽灭菌锅,宁波凌宏医疗器械科技有限公司;YP200001 型电子天平,上海越平科学仪器制造有限公司;Scientz-04 型拍打式均质器,宁波新芝生物科技股份有限公司;VL-888D 家用面条机;100~1 000  $\mu\text{L}$  单道可调移液枪;TMS-PRO 型食物物性分析仪,美国 FTC 公司;Y98109 固体 pH 计,济南长存电子科技有限公司;LHS-10A 快速水分测定仪,上海仪昕科学仪器有限公司。

### 1.3 燕麦生鲜湿面的制备

1) 样品的制备。为了防止微生物污染,在每次实验前,将实验台、菜板、面条机,以及与面条接触的镊子、刀具、保鲜盒等的表面用含 75%(体积分数)酒精的医用棉球清洗 2 次,以保证操作环境卫生。燕麦生鲜湿面的配方:燕麦粉 140 g,小麦粉 60 g,谷朊粉 14.9 g,蒸馏水 74 mL。将称量好的材料放入面条机中,将蒸馏水放入面条机上方的容量滴水杯中,启动面条机,经过 15 min 后,面条机自动出面。

2) 样品的包装。将做好的面条称取 50 g 放入聚丙烯(PP)材质保鲜盒(19.5 cm×13.5 cm×4.0 cm)中,然后置于气调包装机的模具中,将模具推入气调包装机进行气调包装(体积分数 70%的  $\text{CO}_2$  + 体积分数 30%的  $\text{N}_2$ ),包装完毕后,拉出模具,取出包装完毕的燕麦生鲜湿面。

3) 样品的贮藏。将包装完毕的燕麦生鲜湿面在 3 种温度(5、15、25  $^{\circ}\text{C}$ )下贮藏,并每隔 24 h 进行分析。每个处理组包括 3 个平行试样。

### 1.4 指标的测定

#### 1.4.1 微生物的测定

根据 GB 4789.2—2016 的方法测定菌落总数。根据 GB 4789.15—2016 的方法测定霉菌和酵母菌总数。

#### 1.4.2 色泽的测定

取保鲜盒中的面条,每隔 24 h 用色差仪测定其颜色的变化情况,并记录  $L^*$ 。

#### 1.4.3 pH 的测定

取保鲜盒中的面条,用固体 pH 计测量面条的 pH 值。

#### 1.4.4 水分的测定

取 3 g 面条并平铺于托盘中,用快速水分测定仪测量面条的水分。取 1 g 保鲜盒中的面条并平铺于托盘中,用水分活度仪进行测量。

#### 1.4.5 蒸煮特性的测定

取面条  $m_1$ ,加入 500 mL 沸水中,煮制 2 min 后捞出。拿漏勺沥干,置于滤纸上 10 min,然后称量,记为  $m_2$ 。计算蒸煮吸水率  $W$ ,见式(1)。

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

取面条 10 g,加入 500 mL 沸水中,煮制 2 min 后捞出。把煮后的面汤取 100 mL 于烧杯中,烧杯质量为  $m_3$ 。将烧杯放入烘箱,在 105  $^{\circ}\text{C}$  下烘干至质量恒定,此时质量为  $m_4$ 。蒸煮损失率  $C$  的计算见式(2)。

$$C = \frac{(m_4 - m_3) \times 5}{10} \times 100\% \quad (2)$$

#### 1.4.6 质构特性

采用 TA0.x 探头,测试模式为 TPA(100 N),暂

停时间为 1 s, 力量感应元量程为 100 N。探头回升到样品表面的高度为 15 mm, 形变量为 75%, 检测速度为 48 mm/min, 起始力为 0.05 N。

## 1.5 货架期预测模型的构建

### 1.5.1 微生物生长动力学模型的构建

修正的 Gompertz 模型、Baranyi 模型、修正的 Logistic 模型是描述食品微生物生长曲线的经典模型。修正的 Gompertz 模型见式 (3)。

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) \times \exp\{-\exp[2.718\mu_{\max}/(N_{\max} - N_0) \times (\lambda - t)]\} \quad (3)$$

式中:  $t$  为贮藏时间;  $N_0$  为初始菌落总数;  $N_{\max}$  为最大菌落总数,  $\mu_{\max}$  为最大比生长速率<sup>[5]</sup>。

Baranyi 模型见式 (4)。

$$N(t) = N_0 + \mu_{\max} \times t + \ln(\exp(-\mu_{\max} \times t) + \exp(-d)) - \exp(-\mu_{\max} - d) - \ln\left[1 + \frac{\exp(\mu_{\max} \times t - d) - \exp(-d)}{\exp(N_{\max} - N_0)}\right] \quad (4)$$

式中:  $d$  为最大比生长速率  $\mu_{\max}$  与延滞期  $\lambda$  的乘积。修正的 Logistic 模型见式 (5)。

$$N_t = N_0 + (N_{\max} - N_0) / [1 + \exp[4\mu_{\max}/(N_{\max} - N_0) \times (\lambda - t) + 2]] \quad (5)$$

### 1.5.2 相关性分析

Pearson 相关性分析是一种统计方法, 用于测量 2 个连续变量之间的线性关联程度。应用 Pearson 相关性分析评价不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面中菌落总数与其他理化指标的相关性。

### 1.5.3 径向基函数神经网络模型的构建

径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network)是一种由多个并行人工神经元组成的前馈性神经网络<sup>[6]</sup>, 如图 1 所示。RBF 神经网络预测模型一般由 3 层组成, 即输入层、隐含层、输出层<sup>[7]</sup>, 他们由大量链接和互联的神经元组成。输入层将主要信息传入隐含层。隐含层是 RBF 神经网络的核心, 隐含层利用激活函数传播信息, 并识别数据和对数据分类。通过输出层汇总计算, 得到最终结果<sup>[8]</sup>。3 个层次相互配合, 实现 RBF 神经网络模型的构建。

通过 RBF 神经网络预测模型隐含层的激活函数, 一般选取高斯函数为隐含层的激活函数, 见式 (6)。

$$\Phi_i(X - c_i) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \|X - c_i\|^2\right) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中:  $X$  为数据样本;  $c_i$  为隐含层第  $i$  个径向基函数的数据中心;  $\|X - c_i\|$  为范数, 用来表示数据样本与数据中心的距离;  $\sigma^2$  为高斯函数的方差, 用来描述数据分布的分散程度, 即第  $i$  个径向基函数的宽度。

RBF 神经网络预测模型输出的计算见式 (7)。

$$y = \sum_{i=1}^M \Phi_i(\|X - c_i\|) w_i + b \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

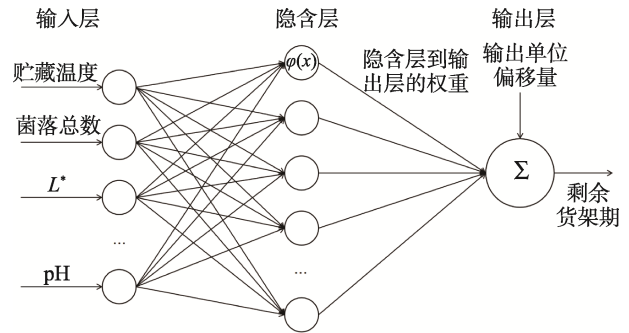


图 1 径向基函数神经网络结构  
Fig.1 Structure of radial basis function neural network

式中:  $\Phi_i(\|X - c_i\|)$  为径向基函数;  $n$  为隐含层神经节点数量;  $w_i$  为隐含层神经元节点连接到输出层神经元节点的权重值;  $b$  为输出层神经元的阈值。

RBF 神经网络需要计算的参数有 3 个: 径向基函数中心 ( $c_i$ )、径向基函数宽度 ( $\sigma$ )、径向基函数神经网络隐含层到输出层权值 (输出节点的权值  $w$ )。径向基函数中心的选取方法有随机算法、自组织学习算法、最近邻聚类算法、K-means 聚类算法等。径向基函数宽度 ( $\sigma$ ) 的确定一般采用固定法、平均法、系数法等。隐含层到输出层权值的算法有最小均方法、最小二乘法等<sup>[9]</sup>。

### 1.6 数据预处理

为了消除数据冗余, 并减少异常现象, 确保数据的一致性、准确性和可靠性, 对数据进行归一化和标准化处理。经实验分析, 采用归一化方法处理数据, 见式 (8)。

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

式中:  $x$  为原始数据;  $x^*$  为归一化数据;  $x_{\min}$  为最小值;  $x_{\max}$  为最大值。

### 1.7 货架期预测模型的验证

利用相对误差  $\delta$  来评估 RBF 神经网络预测模型的准确性, 见式 (9)。

$$\delta = \frac{C_{\text{pre}} - C_{\text{exp}}}{C_{\text{exp}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $C_{\text{pre}}$  为预测值;  $C_{\text{exp}}$  为实测值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面微生物的变化

燕麦生鲜湿面腐败变质的主要因素是微生物的生长繁殖。菌落总数是评价食品微生物质量的重要参数。当菌落总数  $> 5.58 \lg(\text{CFU/g})$  时, 货架期达到终点<sup>[10]</sup>。如图 2 所示, 在贮藏过程中, 不同温度下菌落总数随着

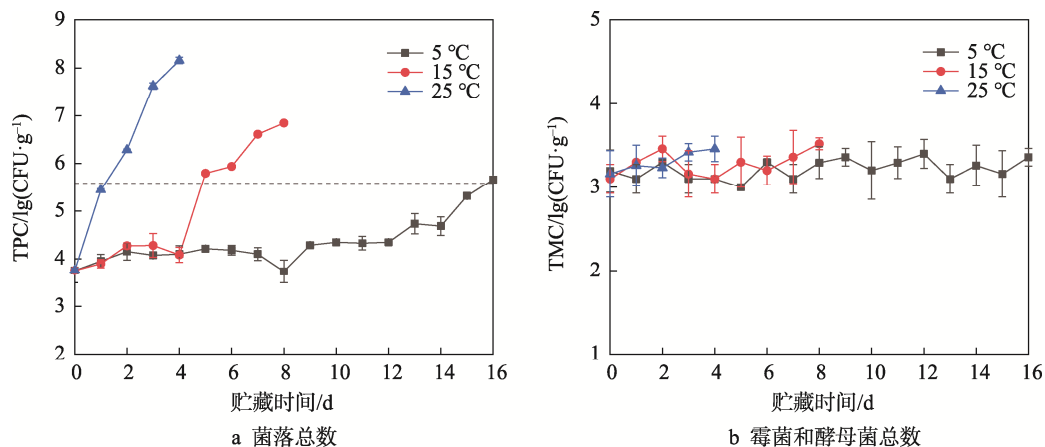


图2 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面微生物的变化  
Fig.2 Changes of microorganisms of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

贮藏时间的延长呈上升趋势,且温度越高,其生长速度越快。25 °C组的菌落总数在第2天达到6.28  $\lg(\text{CFU/g})$ , 15 °C组的菌落总数在第5天达到5.85  $\lg(\text{CFU/g})$ , 5 °C组的菌落总数在第16天达到5.66  $\lg(\text{CFU/g})$ 。在贮藏过程中,不同温度下的霉菌和酵母菌随着贮藏时间的延长呈平稳波动趋势。燕麦生鲜湿面含有水、淀粉、蛋白质、微生物、矿物质等各类营养物质,为微生物的生长繁殖提供了适宜的环境<sup>[11]</sup>。

姜东辉<sup>[12]</sup>研究了生鲜湿面在贮藏过程中的微生物变化情况,发现微生物之间存在竞争关系,微生物迅速繁殖,尤其是细菌的基数大、增殖速度快,它迅速成为优势菌群,占据大量的营养物质和生存空间。相反,霉菌受到细菌等其他微生物生长的竞争抑制,不能有效地利用营养物质和占据更多的生存空间,所以它的数量级在贮藏过程中一直维持较低水平,且未见增殖。

## 2.2 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面色泽的变化

颜色在生鲜湿面的销售中起着重要作用,它是影响消费者购买商品的直观指标。通过实验发现,在贮藏过程中鲜湿面的 $a^*$ 和 $b^*$ 未发生显著变化,代表明暗亮度的 $L^*$ 显著变化。由图3可知, $L^*$ 随着贮藏时间的延长呈降低趋势,褐变发生在贮藏初期。在贮藏温度5 °C下, $L^*$ 在第1天从47.46显著降至43.95 ( $P < 0.05$ ),然后在第4天降至42左右,趋于稳定。在15 °C下, $L^*$ 在第1天从47.46显著降至43.49 ( $P < 0.05$ ),然后在第5天降至40左右。在贮藏温度25 °C下, $L^*$ 在第1天从47.46显著降至39.99 ( $P < 0.05$ ),然后不断降低,第4天时 $L^*$ 为38.17。

吴欣婷<sup>[13]</sup>研究了鲜湿面贮藏期间的褐变机制,发现在贮藏过程中随着温度的升高,鲜湿面的褐变速率越来越快,与褐变相关的酶活性越来越高,同时也会导致非酶促褐变加剧。

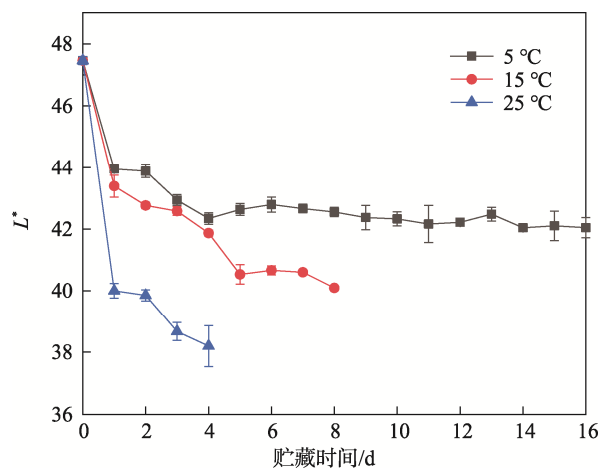


图3 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面色泽的变化  
Fig.3 Changes of color of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

## 2.3 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面 pH 的变化

由图4可知,在不同温度下燕麦生鲜湿面的pH值随着贮藏时间的延长呈下降趋势。刚制作出的燕麦生鲜湿面的初始pH在6.43左右,非常适宜于细菌的增殖。在贮藏过程中,其pH值呈下降趋势与菌落总数的变化呈极显著相关( $P < 0.01$ ),说明微生物在繁殖过程中的发酵产酸是生鲜面条腐败变质的重要类型。在5 °C下贮藏时,其蛋白质分解后会产生碱性物质(如胺和氨),它们可中和一部分酸,因此当pH降至一定程度后,会出现pH的回升趋势,或趋于相对平稳。

Hong等<sup>[14]</sup>研究了热处理面粉面条在贮藏过程中的变化情况,发现面条含有高水分含量和营养物质(碳水化合物和蛋白质),微生物利用这些营养物质产生酸性代谢物,导致生鲜湿面在贮藏过程中的pH值下降。

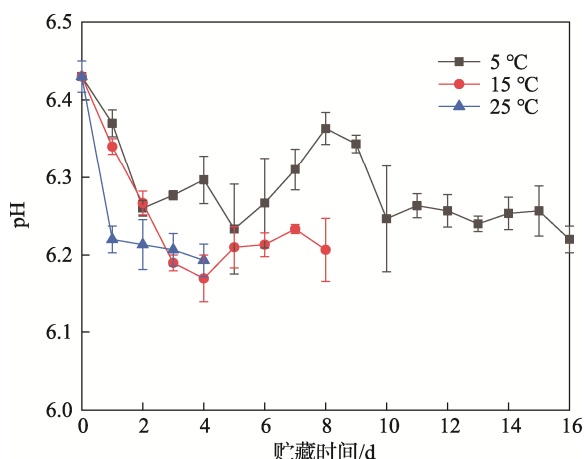
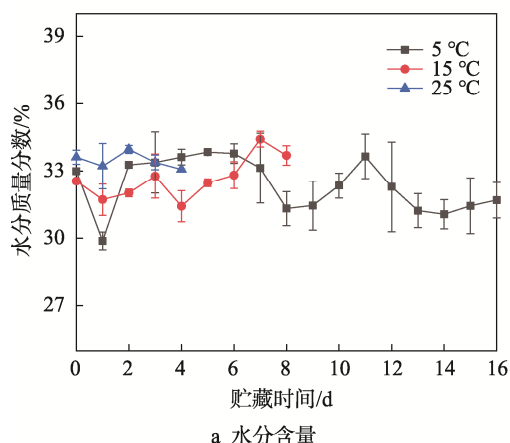


图4 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面pH值的变化

Fig.4 Changes of pH of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

## 2.4 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面水分的变化

水是食品的主要成分,水的含量、分布和状态对食品的结构、外观、质地、风味、色泽、流动性、新



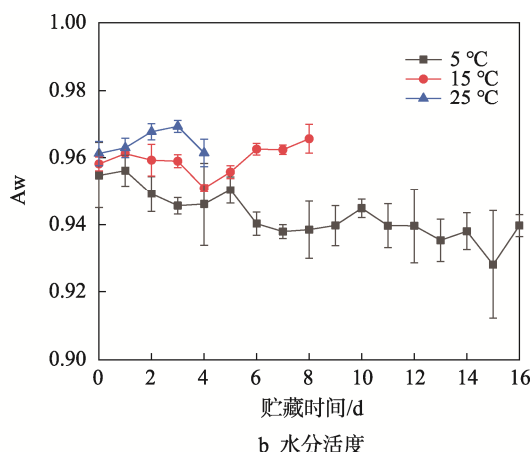
a 水分含量

鲜程度、腐败变质的敏感性会产生极大影响。水是决定生鲜湿面质量和稳定性的关键因素,因为它参与许多化学、酶促和物理降解等反应,尤其是腐败微生物的生长<sup>[15]</sup>。如图5所示,在5 °C下贮藏时,燕麦生鲜湿面的初始含水量(均用质量分数表示)为33%,水分活度为0.954 8,在贮藏16 d时,其含水量为31.7%,水分活度为0.939 8,无显著变化( $P > 0.05$ )。在15 °C下贮藏期间,燕麦生鲜湿面的初始含水量为32.55%,在贮藏8 d时其含水量为33.7%,并无显著变化( $P > 0.05$ );初始水分活度为0.958 2,在贮藏8 d时水分活度为0.965 6,略有上升( $P < 0.05$ )。在25 °C下贮藏期间,燕麦生鲜湿面的水分含量、水分活度无显著变化。

张春红等<sup>[16]</sup>研究了采用气调包装对生鲜湿面保鲜效果的影响,发现采用体积分数为70%的CO<sub>2</sub>气调包装时其水分保持效果较好,能有效减少水分的流失。随着贮藏时间的延长,水分含量的变化不明显。

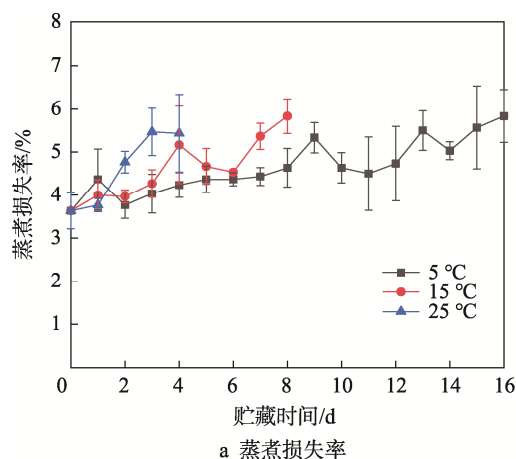
## 2.5 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面蒸煮特性的变化

由图6可知,不同温度下的蒸煮损失率随着贮藏时间的延长呈上升趋势,但仍具有良好的蒸煮损失

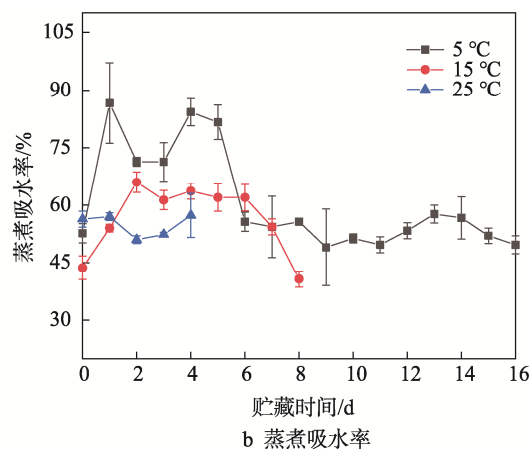


b 水分活度

图5 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面水分的变化  
Fig.5 Changes of water of oat fresh wet noodles at different storage temperatures



a 蒸煮损失率



b 蒸煮吸水率

图6 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面蒸煮特性的变化  
Fig.6 Changes of cooking quality of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

率(3%~6%),蒸煮吸水率呈先上升后下降的趋势。Yang等<sup>[17]</sup>研究了长期贮藏和贮藏温度对湿淀粉面条的影响,发现面条的蒸煮损失率随着贮藏时间的增加而增加,面条的吸水能力随着贮藏时间的增加而降低。在贮藏过程中,淀粉回生程度增加,淀粉的网络结构遭到破坏,导致水分流失、吸水率下降。燕麦生鲜湿面淀粉凝胶结构的破坏和吸水能力的降低可能是由微生物的生长和繁殖所致。面条的蒸煮品质下降可能因微生物的生长繁殖破坏了面筋网络,从而削弱了对淀粉的包埋作用,增大了蒸煮损失。

## 2.6 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面质构特性的变化

面条的硬度和弹性主要由面筋蛋白含量和淀粉糊化特性决定<sup>[18-19]</sup>。由图7可知,随着贮藏时间的延长,不同贮藏温度下硬度的变化呈现先上升后下降的趋势。在贮藏初期,随着面筋网络的形成,其硬度增加。在贮藏中期,微生物对面筋网络结构产生了破坏作用,导致面条硬度下降。在贮藏后期,由于水分向表面迁移,导致面条中的水分分布不均,使得生鲜湿面损失了部分水分,导致贮藏后期面条的硬度变大。生鲜湿面在贮藏过程中会发生粘连现象,这会降低其

感官品质。在不同温度下,生鲜湿面的胶黏性随着贮藏时间的延长,呈现不同的趋势。在5℃下贮藏期间,生鲜湿面的胶黏性变化不明显,呈平稳波动趋势,说明低温能够在一定程度上抑制生鲜湿面的粘连。随着贮藏时间的延长,微生物的活动导致面条内部的水分迁移到表面,蛋白质的水合能力降低,生鲜湿面的表面黏性增大。在15℃下贮藏期间,生鲜湿面的胶黏性呈上下波动趋势。不透气的包装材料可能会使面条潮湿,增加胶黏性,降低咀嚼性。

## 2.7 不同贮藏温度下主要品质指标变化的相关性分析

由表1可知,在不同贮藏温度下,菌落总数与 $L^*$ 和蒸煮损失率呈极显著相关。菌落总数与霉菌数量、水分含量、水分活度、蒸煮吸水率、硬度、弹性、咀嚼性在不同温度下的相关性不一致。在5℃下贮藏时,面条的菌落总数与 $L^*$ 、pH、水分活度、蒸煮吸水率、蒸煮损失率、硬度、胶黏性呈显著相关。在15℃下贮藏时,面条的菌落总数与霉菌数量、 $L^*$ 、pH、水分含量、水分活度、蒸煮损失率、硬度、弹性、胶黏性呈显著相关。在25℃下贮藏时,菌落总数与霉菌数量、 $L^*$ 、pH、蒸煮损失率、弹性、胶黏性、咀嚼性呈显著相关。

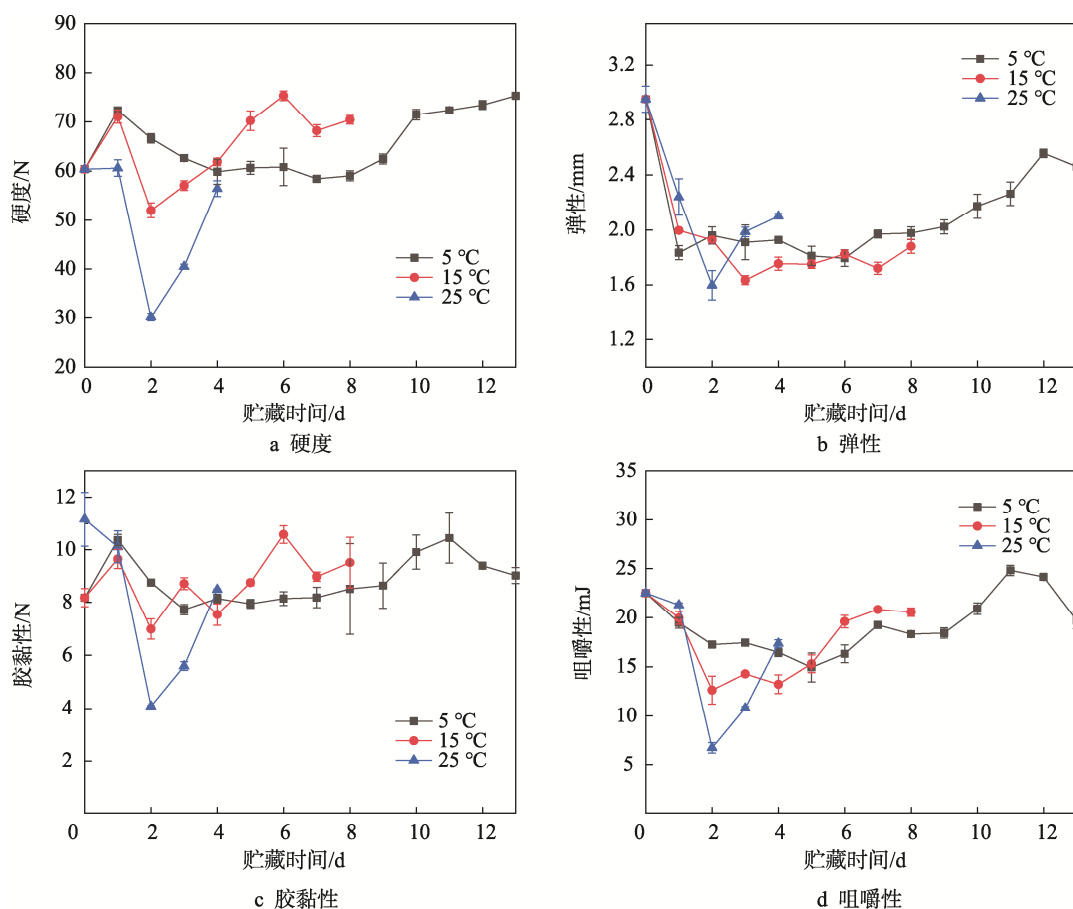


图7 不同贮藏温度下质构特性的变化

Fig.7 Changes of texture of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

通过对菌落总数和其他理化指标进行 Pearson 相关性分析发现, 菌落总数与  $L^*$ 、蒸煮损失率、pH 之间存在较强的相关性。由此可见, 这些指标可以很好地反映燕麦生鲜湿面在不同贮藏温度下的品质情况, 可以采用这些指标构建 RBF 神经网络模型, 并作为后续评价的参考。

2.8 燕麦生鲜湿面主要理化指标的归一化处理

在建立 RBF 神经网络模型前, 需要先将实验数据进行归一化处理, 具体情况见表 2。

2.9 微生物生长动力学模型的建立

3 种微生物生长动力学模型的拟合结果如表 3

所示。 $R^2$  (拟合优度或决定系数) 是一个统计量, 表示模型的预测结果与试验结果之间的相关程度。RMSE (均方根误差) 可以度量模型的预测误差。结果表明, 3 种模型并不能同时在 3 种温度下拟合燕麦生鲜湿面的菌落总数变化, 因此这 3 种微生物生长动力学模型并不适于燕麦生鲜湿面的货架期预测。

2.10 RBF 神经网络的建立

在 5、15、25 °C 下贮藏过程中, 将燕麦生鲜湿面的温度、菌落总数、 $L^*$ 、pH、蒸煮损失率的实验值用于建立 RBF 神经网络模型。隐含层神经元的数量由 SPSS 软件得出, 最终的 RBF 神经网络结构为 5-6-1, 如图 1 所示。

表 1 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面各指标与菌落总数的 Pearson 相关系数  
Tab.1 Pearson correlation coefficient of each index and total bacterial count of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

| 品质指标  | 贮藏温度     |           |     |          |           |     |          |           |     |
|-------|----------|-----------|-----|----------|-----------|-----|----------|-----------|-----|
|       | 25 °C    |           |     | 15 °C    |           |     | 5 °C     |           |     |
|       | 皮尔逊相关性   | Sig. (双尾) | 个案数 | 皮尔逊相关性   | Sig. (双尾) | 个案数 | 皮尔逊相关性   | Sig. (双尾) | 个案数 |
| 菌落总数  | 1        |           | 15  | 1        |           | 27  | 1        |           | 51  |
| 霉菌数量  | 0.570*   | 0.027     | 15  | 0.395*   | 0.041     | 27  | 0.207    | 0.145     | 51  |
| $L^*$ | -0.891** | 0         | 15  | -0.769** | 0         | 27  | -0.454** | 0.001     | 51  |
| pH    | -0.824** | 0         | 15  | -0.454*  | 0.017     | 27  | -0.541** | 0         | 51  |
| 水分含量  | -0.242   | 0.385     | 15  | -0.746** | 0         | 27  | -0.172   | 0.227     | 51  |
| 水分活度  | 0.321    | 0.243     | 15  | 0.523**  | 0.005     | 27  | -0.373** | 0.007     | 51  |
| 蒸煮吸水率 | 0.164    | 0.558     | 15  | -0.233   | 0.243     | 27  | -0.332*  | 0.017     | 51  |
| 蒸煮损失率 | 0.836**  | 0         | 15  | -0.704** | 0         | 27  | 0.660**  | 0         | 51  |
| 硬度    | -0.371   | 0.173     | 15  | 0.607**  | 0.001     | 27  | 0.571**  | 0         | 42  |
| 弹性    | -0.678** | 0.005     | 15  | -0.414** | 0.032     | 27  | 0.103    | 0.515     | 42  |
| 胶黏性   | -0.565*  | 0.028     | 15  | 0.502**  | 0.008     | 27  | 0.317*   | 0.041     | 42  |
| 咀嚼性   | -0.525*  | 0.045     | 15  | -0.052   | 0.798     | 27  | 0.131    | 0.409     | 42  |

注: \*\*表示在 0.01 水平显著相关, \*表示在 0.05 水平显著相关。

表 2 燕麦生鲜湿面归一化样本数据  
Tab.2 Normalized sample data of oat fresh wet noodles

| 样本编号 | 贮藏温度 | 菌落总数    | $L^*$   | pH      | 蒸煮损失率   | 剩余货架期 |
|------|------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1    | 0    | 0.106 4 | 0.99    | 1       | 0.242 4 | 1     |
| 2    | 0    | 0.106 4 | 0.971 3 | 0.935 5 | 0       | 1     |
| ...  | ...  | ...     | ...     | ...     | ...     | ...   |
| 79   | 1    | 0.985 8 | 0       | 0.161 3 | 0.454 5 | 0     |

表 3 3 种模型的拟合结果  
Tab.3 Fitting result of 3 models

| 模型          | 温度/°C | RMSE | $R^2$ |
|-------------|-------|------|-------|
| Gompertz 模型 | 5     | NA   | NA    |
|             | 15    | 0.32 | 0.95  |
|             | 25    | NA   | NA    |
| Baranyi 模型  | 5     | NA   | NA    |
|             | 15    | 0.36 | 0.93  |
|             | 25    | 0.24 | NA    |
| Logistic 模型 | 5     | NA   | NA    |
|             | 15    | 0.39 | 0.92  |
|             | 25    | NA   | NA    |

注：NA 表示该模型不适用于当前温度。

2.11 RBF 神经网络模型的验证

剩余货架期实际值与预测值的相对误差可以评价 RBF 神经网络货架期预测模型的准确性。计算表 4 中所有相对误差的平均值, 相对误差低于 10%的预测模型可接受<sup>[20]</sup>。由表 4 可知, RBF 神经网络预测模型的平均相对误差为 2.66%, 因此 RBF 神经网络模型可以准确预测燕麦生鲜湿面的货架期。

张婉<sup>[5]</sup>研究了鲜熟面的货架期预测模型, 利用 Logistic 方程结合平方根方程建立了鲜熟面的货架期预测模型, 并对在温度为 8、13、16 °C 条件下贮藏的鲜熟面建立的模型进行验证, 其预测货架期与实测货架期的相对误差为 8.67%。

表 4 不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面剩余货架期实际值与预测值的相对误差  
Tab.4 Relative error between the actual value and the predicted value of oat fresh wet noodles at different storage temperatures

| 贮藏温<br>度/°C | 剩余货架期/d |       | 相对误<br>差 1/% | 剩余货架期/d |       | 相对误<br>差 2/% | 剩余货架期/d |       | 相对误<br>差 3/% |
|-------------|---------|-------|--------------|---------|-------|--------------|---------|-------|--------------|
|             | 实际值 1   | 预测值 1 |              | 实际值 2   | 预测值 2 |              | 实际值 3   | 预测值 3 |              |
| 5           | 0       | 1.58  | 0            | 0       | 1.58  | 0            | 0       | 1.58  | 0            |
|             | 1       | 1.58  | 57.94        | 1       | 1.97  | 97.25        | 1       | 1.59  | 58.57        |
|             | 2       | 1.92  | -3.78        | 2       | 2.09  | 4.51         | 2       | 2.6   | 30.05        |
|             | 3       | 1.92  | -36.08       | 3       | 1.59  | -47.16       | 3       | 1.75  | -41.62       |
|             | 4       | 2.52  | -37.04       | 4       | 8.73  | 118.3        | 4       | 3.31  | -17.14       |
|             | 5       | 2.77  | -44.64       | 5       | 8.23  | 64.54        | 5       | 7.18  | 43.66        |
|             | 6       | 6.22  | 3.66         | 6       | 8.34  | 38.95        | 6       | 2.81  | -53.14       |
|             | 7       | 5.23  | -25.33       | 7       | 7.11  | 1.6          | 7       | 7.41  | 5.88         |
|             | 8       | 9.83  | 24.1         | 8       | 8.94  | 11.75        | 8       | 11.56 | 44.53        |
|             | 9       | 11.66 | 29.56        | 9       | 9.43  | 4.81         | 9       | 9.54  | 5.96         |
|             | 10      | 10.66 | 6.63         | 10      | 11.32 | 13.2         | 10      | 5.21  | -47.92       |
|             | 11      | 8.87  | -19.34       | 11      | 6.08  | -44.72       | 11      | 5.35  | -51.41       |
|             | 12      | 12.59 | 4.88         | 12      | 9.89  | -17.55       | 12      | 9.02  | -24.83       |
|             | 13      | 12.69 | -2.35        | 13      | 9.98  | -23.25       | 13      | 11.33 | -12.85       |
|             | 14      | 13.13 | -6.19        | 14      | 12.06 | -13.86       | 14      | 12.37 | -11.65       |
|             | 15      | 15.56 | 3.73         | 15      | 10.3  | -31.34       | 15      | 13.68 | -8.83        |
| 15          | 16      | 16.17 | 1.06         | 16      | 16.19 | 1.18         | 16      | 16.26 | 1.61         |
|             | 0       | 0.17  | 0            | 0       | 0.16  | 0            | 0       | 0.15  | 0            |
|             | 1       | 1.69  | 69.16        | 1       | 2.23  | 123.41       | 1       | 2.31  | 130.64       |
|             | 2       | 2.32  | 15.97        | 2       | 2.31  | 15.71        | 2       | 2.34  | 16.96        |
|             | 3       | 2.55  | -5.03        | 3       | 2.51  | -16.18       | 3       | 2.45  | -18.31       |
|             | 4       | 3.68  | -8.03        | 4       | 3.38  | -15.6        | 4       | 3.04  | -23.97       |
| 25          | 5       | 3.5   | -30          | 5       | 3.5   | -29.99       | 5       | 3.5   | -29.91       |
|             | 0       | 0.13  | 0            | 0       | 0.13  | 0            | 0       | 0.13  | 0            |
|             | 1       | 0.13  | -86.92       | 1       | 0.13  | -86.9        | 1       | 0.13  | -86.95       |
|             | 2       | 3.5   | 74.9         | 2       | 3.5   | 74.9         | 2       | 3.5   | 74.9         |

注：每个温度有 3 组平行样本数据, 共计 78 个货架期实验数据, 模型平均相对误差为所有相对误差的平均值。

### 3 结语

构建了一种新的 RBF 神经网络模型,并将其作为燕麦生鲜湿面的剩余货架期预测模型。首先,测定燕麦生鲜湿面货架期的微生物指标、理化指标,探究了燕麦生鲜湿面的品质变化规律。在贮藏过程中,燕麦生鲜湿面的菌落总数呈上升趋势,霉菌和酵母菌的数量维持在同一量级。随着贮藏时间的延长, $L^*$ 、pH 不断下降,蒸煮吸水率下降,蒸煮损失率上升,水分含量、水分活度波动较平稳,质构特性发生了一定变化。通过 Pearson 相关性分析得出,菌落总数、 $L^*$ 、pH、蒸煮损失率为燕麦生鲜湿面腐败变质的主要影响因素。其次,以主要影响因素为基础,通过 SPSS 确定了 RBF 神经网络的结构为 5-6-1。比较了微生物生长动力学和 RBF 神经网络模型的预测精度,RBF 神经网络预测模型的准确性较高,优于微生物动力学模型。该模型可以准确预测不同贮藏温度下燕麦生鲜湿面的剩余货架期,为进一步研究其他食品在贮藏过程中的品质变化提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] GUO Xiao-na, GAO Feng, ZHU Ke-xue. Effect of Fresh Egg White Addition on the Quality Characteristics and Protein Aggregation of Oat Noodles[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127319.
- [2] NGUYEN T T L, FLANAGAN B M, TAO Ke-yu, et al. Effect of Processing on the Solubility and Molecular Size of Oat  $\beta$ -Glucan and Consequences for Starch Digestibility of Oat-Fortified Noodles[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131291.
- [3] CAO Zong-bao, YU Chen, YANG Zhen, et al. Impact of Gluten Quality on Textural Stability of Cooked Noodles and the Underlying Mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106842.
- [4] 陈阳. 鲜湿鱼面配方优化研究及复合保鲜技术对其货架期的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 80-105.  
CHEN Yang. Research on the Formulation Optimization of Fresh Wet Fish Noodles and the Effect of Compound Fresh-keeping Technology on Its Shelf Life[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 80-105.
- [5] 张婉. 鲜熟面贮藏品质及货架期预测模型研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 23-29.
- ZHANG Wan. Study on Storage Quality and Shelf Life Prediction Model of Fresh Cooked Noodles[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 23-29.
- [6] SHI Ce, QIAN Jian-ping, ZHU Wen-ying, et al. Nondestructive Determination of Freshness Indicators for Tilapia Fillets Stored at Various Temperatures by Hyperspectral Imaging Coupled with RBF Neural Networks[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 497-503.
- [7] BEKESIENE S, MEIDUTE-KAVALIAUSKIENE I, VASILIAUSKIENE V. Accurate Prediction of Concentration Changes in Ozone as an Air Pollutant by Multiple Linear Regression and Artificial Neural Networks[J]. Mathematics, 2021, 9(4): 356.
- [8] LI Yue, CHU Xiao-quan, FU Ze-tian, et al. Shelf Life Prediction Model of Postharvest Table Grape Using Optimized Radial Basis Function (RBF) Neural Network[J]. British Food Journal, 2019, 121(11): 2919-2936.
- [9] 求森. 基于小波分析和神经网络的城市轨道交通客流时间序列预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 39-50.  
QIU Sen. Time Series Prediction of Urban Rail Transit Passenger Flow Based on Wavelet Analysis and Neural Network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 39-50.
- [10] NY/T 1512—2014, 绿色食品 生面食、米粉制品[S].  
NY/T 1512-2014, Green Food—Uncooked Processes Food Made of Cereal[S].
- [11] 金露达, 张关涛, 李娟, 等. 鲜湿面货架期影响因素和保鲜技术研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 1-10.  
JIN Lu-da, ZHANG Guan-tao, LI Juan, et al. Research Progress on Shelf Life Influencing Factors and Fresh-Keeping Technology of Fresh Wet Noodles[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 1-10.
- [12] 姜东辉. 生鲜湿面微生物控制及品质保持研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.  
JIANG Dong-hui. Study on Microbial Control and Quality Maintenance of Fresh Wet Noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [13] 吴欣婷. 鲜湿面的褐变机制及控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 1-6.  
WU Xin-ting. Study on Browning Mechanism and Control of Fresh and Wet Noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 1-6.

- [14] HONG Ting-ting, ZHAO Qi-yan, XU Dan, et al. Effect of Heat-Treated Flour on the Quality and Storage Stability of Fresh Noodles[J]. LWT, 2021, 146: 111463.
- [15] KAMBLE D B, SINGH R, KAUR B P, et al. Storage Stability and Shelf Life Prediction of Multigrain Pasta under Different Packaging Material and Storage Conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(8): e14585.
- [16] 张春红, 史依沫, 王丽, 等. 气调包装对生湿面条保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 86-91.
- ZHANG Chun-hong, SHI Yi-mo, WANG Li, et al. Effects of Modified Atmosphere Package on Fresh-Keeping Effect of Wet Raw Noodles[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 86-91.
- [17] YANG Sha, JIN Lu, XU Xia-hong, et al. Long-Term Storage and Temperature Induced Quality Changes of Industrial-Scale Wet Starch Noodles[J]. LWT, 2022, 153: 112504.
- [18] HUANG Jiang-nan, QI Ya-jing, FAISAL MANZOOR M, et al. Effect of Superheated Steam Treated Wheat Flour on Quality Characteristics and Storage Stability of Fresh Noodles[J]. Food Control, 2022, 133: 108666.
- [19] XING Jun-jie, JIANG Dong-hui, GUO Xiao-na, et al. Effect of Dough Mixing with Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Shelf-Life and Quality Characteristics of Fresh Wet Noodles[J]. Food Control, 2021, 124: 107891.
- [20] WANG Hong-li, ZHENG Yao, SHI Wen-zheng, et al. Comparison of Arrhenius Model and Artificial Neuronal Network for Predicting Quality Changes of Frozen Tilapia (*Oreochromis Niloticus*)[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131268.

责任编辑: 彭颀