

基于BP神经网络的UHT纯牛奶包装货架期预测

习鸿杰, 宋利君, 邓玉明, 李泽鹏, 卢立新, 曾 科

Shelf Life Prediction of UHT Milk Packaging Based on BP Neural Network

XI Hongjie, SONG Lijun, DENG Yuming, LI Zepeng, LU Lixin, and ZENG Ke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

习鸿杰, 宋利君, 邓玉明, 等. 基于 BP 神经网络的 UHT 纯牛奶包装货架期预测 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 205–210. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020107

XI Hongjie, SONG Lijun, DENG Yuming, et al. Shelf Life Prediction of UHT Milk Packaging Based on BP Neural Network[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 205–210. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020107

· 包装与机械 ·

基于 BP 神经网络的 UHT 纯牛奶 包装货架期预测

习鸿杰^{1,2}, 宋利君³, 邓玉明³, 李泽鹏^{1,2}, 卢立新^{1,2,*}, 曾 科³

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122;

3. 内蒙古乳业技术研究院有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010100)

摘 要: 为探究初始蛋白质与脂肪含量、贮藏温度对 UHT 纯牛奶包装货架期的影响, 以三种 UHT 纯牛奶为研究对象, 试验测定 23、30 和 37 °C 贮藏过程中样品褐变指数、蛋白水解度指标。将数据集整合, 根据其在预测集上的表现确定具体的输入参数, 开展基于 BP 神经网络的 UHT 纯牛奶包装货架期预测。结果表明, BP 神经网络模型对 UHT 牛奶褐变指数、蛋白水解度指标的拟合度为 0.9412、0.9527, 相较于传统多元线性回归模型的 0.8799 和 0.9211, 经优化隐含层神经元数的 BP 神经网络模型对 UHT 纯牛奶贮藏期间的特征指标变化预测精度更高, 为不同配方 UHT 纯牛奶货架期的快速准确预测提供技术支持。

关键词: UHT 纯牛奶, 蛋白质含量, 脂肪含量, 货架期, 预测模型, BP 神经网络

中图分类号: TS206.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)04-0205-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020107



本文网刊:

Shelf Life Prediction of UHT Milk Packaging Based on BP Neural Network

XI Hongjie^{1,2}, SONG Lijun³, DENG Yuming³, LI Zepeng^{1,2}, LU Lixin^{1,2,*}, ZENG Ke³

(1. College of Mechanical Engineering of Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Department of Packaging Engineering,
Wuxi 214122, China;

3. Inner Mongolia Dairy Technology Research Institute Co., Ltd., Hohhot 010100, China)

Abstract: To investigate the effects of initial protein, fat content, and storage temperature on the shelf life of UHT pure milk packaging, three types of UHT pure milk were used as research objects to experimentally measure sample browning index and protein hydrolysis index during storage at 23, 30, and 37 °C. Integrate the dataset and determine specific input parameters based on its performance on the prediction set, and carry out UHT pure milk packaging shelf life prediction based on BP neural network. The results showed that the fitting degrees of the BP neural network model for the browning index and protein hydrolysis index of UHT milk were 0.9412 and 0.9527, respectively, and compared with traditional multiple linear regression model's number of 0.8799 and 0.9211, the BP neural network model with optimized hidden layer neuron numbers had higher prediction accuracy for the changes in characteristic indicators during the storage period of UHT pure milk, providing technical support for rapid and accurate prediction of the shelf life of UHT pure milk with different formulas.

Key words: UHT milk; fat content; protein content; shelf life; prediction model; BP neural network

收稿日期: 2023-02-13

作者简介: 习鸿杰 (1997-), 男, 硕士, 研究方向: 食品货架期预测, E-mail: 282674881@qq.com。

* 通信作者: 卢立新 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品包装技术与安全, 包装系统及装备, Email: lulx@jiangnan.edu.cn。

超高温灭菌(Ultra-high Temperature, UHT)纯牛奶味道醇厚, 口感细致柔密且营养丰富, 深受消费者喜爱。但这些营养物质在贮藏过程中易受到光、热、氧气、微生物等影响, 发生物理和化学变化, 产生各种风味物质, 导致 UHT 纯牛奶腐败变质, 影响营养安全、口感及味道^[1]。

UHT 纯牛奶包装货架期预测是产品保质、销售的基础。长期以来 UHT 纯牛奶货架期预测方法常用于酒精稳定性、TBA、黏度等单一独立指标预测的动力学模型, 能较快速地将温度与反应速率构建起数学关系^[2]。然而随着销售产品种类越来越多, 各产品间的配方、营养物质含量越发多样, 传统动力学模型已不能满足多因素货架期预测模型的建立。近年来, 新兴的机器学习模型在食品货架期评估中逐步得到应用, 如人工神经网络算法、偏最小二乘回归算法和支持向量回归算法等, 它们可通过综合多个指标共同作用以提高货架期预测的准确性^[3]。刘雪等^[4]结合哈夫单位、气室高度、蛋黄指数、蛋清 pH 和失重率等指标, 构建基于 BP 神经网络的鸡蛋货架期和贮藏时间预测模型。易甜等^[5]利用 BP 神经网络对酸奶奶理化指标、微生物指标、感官评价等指标建立预测模型, 对比传统动力学模型其拟合度显著提高。由于 UHT 纯牛奶成分多样, 变化机制复杂, 影响其包装货架期的因素较多, 截止目前关于 UHT 纯牛奶包装货架期的机器学习研究未见报道。因此, 构建基于多影响因素的机器学习模型, 实现对 UHT 纯牛奶货架期更为精准全面预测是必要的。

本文针对不同配方 UHT 纯牛奶, 开展不同贮藏温度条件下的货架期研究, 将褐变指数和蛋白水解度作为新鲜度指标, 并将其设置为输入参数构建基于 BP 神经网络的 UHT 纯牛奶贮藏时间和新鲜度指标预测模型。根据模型在预测集上的表现以确定最优输入参数, 并对隐含层神经元个数进行优化, 最后将最优模型与传统的动力学模型进行对比。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

纯牛奶 为某品牌公司最新生产的不同初始蛋白质含量的盒装 UHT 纯牛奶, 样品编号与主要成分见表 1; 无水乙醇、邻苯二胺、三氯乙酸、四硼酸钠、十二烷基硫酸钠 SDS、邻苯二甲醛 OPA、1,4-二巯基苏糖醇 DTT、甘氨酸标准品 国药集团化学试剂有限公司。

表 1 试验产品基本信息
Table 1 Basic information of test products table

代号	初始脂肪含量(g/100g)	初始蛋白质含量(g/100g)
UM	3.8	3.2
JM	4.4	3.8
CM	1.5	6.0

RQH-350 人工气候箱 上海右一仪器有限公司;

XW-80A 微型旋涡混合仪 上海沪西分析仪器有限公司; UV-1800 紫外分光光度计 日本岛津国际贸易公司; RJ-TDL-50A 低速台式大容量离心机 无锡市瑞江分析仪器有限公司; CR-400 色差仪 日本柯尼卡美能达公司。

1.2 实验方法

1.2.1 取样贮藏 参考国内外研究及牛奶日常使用、贮存条件及企业需求等将 3 种 UHT 纯牛奶放入 23、30、37 °C 条件^[6]下恒温无光照贮藏, 3 个月内每 10 d 对其进行色差和蛋白水解度测试^[7], 每个指标共计 81 组训练数据。

1.2.2 指标的测定

1.2.2.1 色差(褐变指数) 选择 100 mL 的烧杯作为样品的盛放容器, 将样品倒入烧杯中。在避光环境下将色差仪仪器探头伸入杯内样品中进行测量, 读数 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 样品的褐变指数^[8](Browning index, BI)为:

$$x = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \quad \text{式 (1)}$$

$$BI = \frac{[100 \times (x - 0.31)]}{0.17} \quad \text{式 (2)}$$

1.2.2.2 蛋白水解度 参考孙琦等^[9]的方法, 对试样进行离心提取蛋白后, 与配制的 OPA 溶液混合, 运用甘氨酸制作标准曲线进行读数。

OPA 试剂配制: 将 3.81 g 四硼酸钠和 100 mg 十二烷基硫酸钠溶解于 70 mL 去离子水中, 溶解完全; 将 80 mg 邻苯二甲醛 OPA 溶解在 2 mL 无水乙醇中, 溶解完全后加入之前溶液中, 并用去离子水转移; 将 88 mg 1,4-二巯基苏糖醇 DTT 加入到上述溶液中, 去离子水冲洗转移; 将上述溶液用去离子水定容到 100 mL, 避光保存, 现配现用。

牛奶样品处理与测定^[10]: 取 10 mL 样品在 5000 r/min 离心 20 min 除去脂肪, 取 2 mL 上清液加入离心管中, 加入 2 mL 12% TCA, 12000 r/min 离心 20 min, 取上清液 400 μ L, 加 3 mL OPA 试剂使混合物反应 2 min 后在 340 nm 处测吸光度值。

甘氨酸标准曲线的测定^[11]: 配制一系列浓度梯度的甘氨酸标准品溶液, 除不需要离心外操作与上述相同, 340 nm 处测吸光度值, 并绘制标准曲线, 拟合公式 $y=0.4041x+0.0289$, ($R^2=0.9996$), 可用于样品浓度测定。

1.3 数据处理

1.3.1 BP 神经网络建模方法 BP 神经网络是一个多层感知系统, 一般分为三部分: a. 一个输入节点代表输入变量; b. 一个输出节点代表输出变量, 也就是预测输出的目标变量; c. 包括一个或多个节点的隐藏层, 能够捕捉非线性数据^[12]。BP 神经网络基于训练过程来校正误差的方法向后传播, 即误差计算是在输出层, 向后传播至隐藏层, 最后传播至输入层^[13]。隐

藏层通常包含充足、连续的预测问题^[14]。试验将设计一个含有三个层面的 BP 神经网络模型,针对 UHT 纯牛奶贮藏过程中褐变指数与蛋白水解度的变化,预测其变化规律,从而对 UHT 纯牛奶包装货架期进行预测,设计模型如图 1 所示。将整体的 81 组数据导入数据集中,随机选取 70% 的数据作为训练集,15% 的数据作为验证集,15% 的数据作为测试集^[15]。模型中的输入变量包括 UHT 纯牛奶的初始蛋白质含量、初始脂肪含量、环境温度、贮藏天数;输出变量是贮藏过程中试样的褐变指数和蛋白水解度。

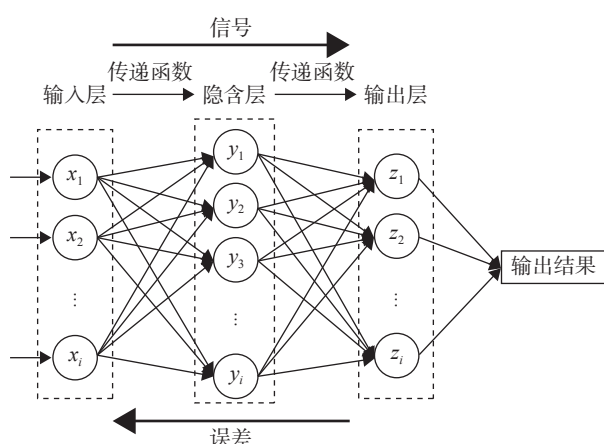


图 1 BP-ANN 结构图

Fig.1 Structure diagram of BP-ANN

1.3.2 分析与评价方法 采用 Origin 2022b 学习版软件绘制实验数据图像。通过数据拟合处理,建立牛奶风味预测模型,并使用决定系数 R^2 对所建模型进行准确性分析。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{式 (3)}$$

式中, Y_i 为观测参数值; \bar{Y} 为观测均值; \hat{Y} 为预测参数值。

2 结果与分析

2.1 样品贮藏期间褐变指数变化

美拉德反应是 UHT 纯牛奶贮藏过程中发生的非酶棕色化反应,是羰基化合物(还原糖类)和氨基化合物(氨基酸和蛋白质)间的反应,经过复杂的历程最终生成棕色甚至是黑色的大分子物质类黑精或称拟黑素^[16],严重影响 UHT 纯牛奶的感官品质,其程度通常由色差(褐变指数)来反映^[6]。贮藏温度对不同配方 UHT 纯牛奶褐变指数的影响如图 2 所示。各样品褐变指数初始值与初始脂肪含量呈相反变化规律,贮藏期间,褐变指数随时间呈上升变化规律,同时,贮藏温度越高,其上升速率越快,尤其 30、37 °C 变化较为明显;蛋白质含量最高的 CM 牛奶褐变指数随时间增长速率更快,这与 Sunds 等^[17] 研究中相同温度下牛奶蛋白质含量越高褐变越明显的规律相似。

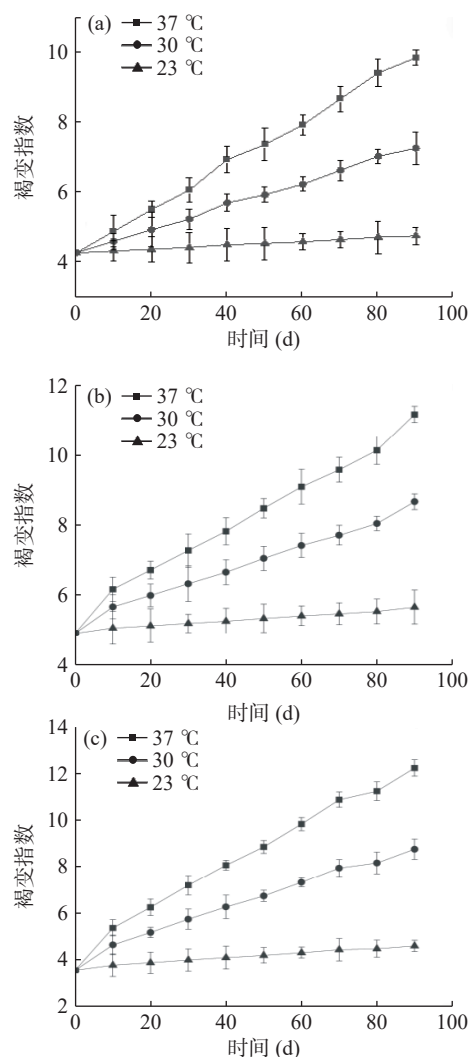


图 2 温度对贮藏期间牛奶褐变指数的影响

Fig.2 Effect of temperature on Browning index of milk during storage period

注: (a) 为 UM 奶; (b) 为 JM 奶; (c) 为 CM 奶。

2.2 样品贮藏期间蛋白水解度变化

蛋白质在牛奶中不稳定,随着贮藏时间的延长,牛奶中蛋白酶、纤溶酶等会降解牛奶中的蛋白质,使牛奶中产生游离氨基酸^[18],游离氨基酸互相再结合形成苦肽,这会导致牛奶中产生苦味并伴随絮状物析出,通过测量游离氨基酸的含量可以反应牛奶蛋白水解的程度^[19]。不同配方样品于不同温度贮藏下的蛋白水解度变化如图 3 所示。各样品在贮藏期间蛋白水解度总体呈上升趋势,且贮藏温度越高,变化速率越快,同时,蛋白质含量越高,贮藏期间蛋白水解度的增幅越大,与 López-Fandiño 等^[20] 的研究结果类似。

2.3 基于 UHT 纯牛奶关键指标的 BP 神经网络模型建立

2.3.1 BP 神经网络参数的确定 隐藏层的激活函数(或称为传递函数)有着严密的逻辑关系,而输出层是典型的线性函数^[21]。不同函数的差异,由相对误差和绝对误差来体现^[22]。设置初始值为学习效率 $\eta=0.4$,训练过程中动量常数 $m=0.9$,迭代次数代表训练的最大步数 $n=1000$ ^[23]。根据经验,隐藏层个数 N 的测试

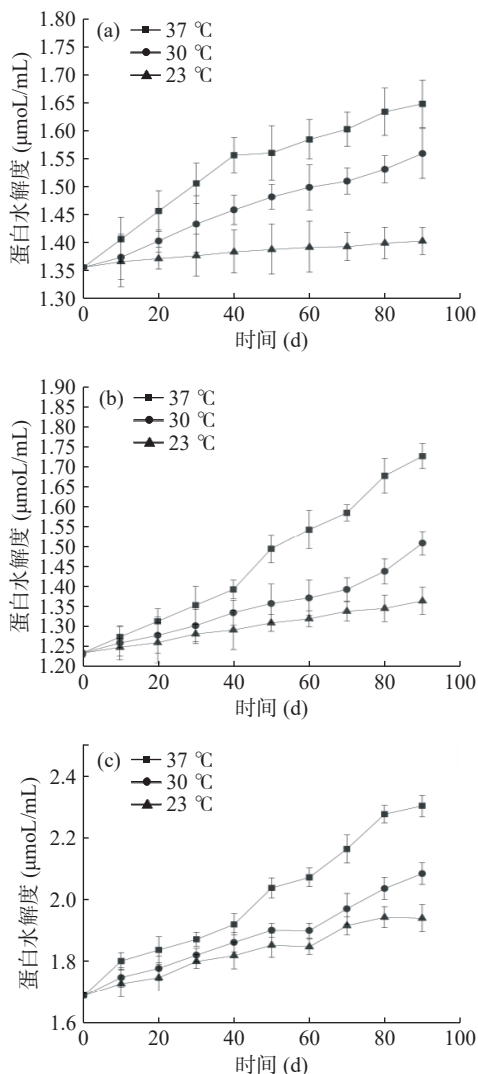


图 3 温度对贮藏期间牛奶蛋白水解度变化的影响
Fig.3 Effect of temperature on proteolysis degree of milk during storage
注: (a)为 UM 奶, (b)为 JM 奶, (c)为 CM 奶。

范围为 1~10 个, 目标误差为 0.5^[24], 具体网络信息见表 2。

表 2 BP 神经网络基本参数信息

Table 2 Basic parameter information of BP neural network				
结构	参量	数量	变量	数值
输入层	因子	1	贮藏时间	
		2	环境温度	
		3	脂肪含量	
		4	蛋白质含量	
隐藏层	单元数			18
	单元数			9
	激活函数		Softmax	
	因变量	1	褐变指数	
输出层		2	蛋白水解度	
	单元数			2
	标度因变量的重新标度方法		标准化	
	激活函数		恒等式	
	误差函数		平方和	

注: 由检验数据条件决定; 隐藏单元的“最佳”数目是指在检验数据中产生误差的最小数目。

2.3.2 模型的拟合 经过训练和校验迭代, 最终拟合模型参数见表 3。结果发现, 所得模型训练标准相对误差较小, 检验时的标度校对误差在 10% 左右。同时, 经过自变量正态化重要性分析(图 4)可知, 初始的蛋白质含量对于样品褐变指数、蛋白水解度变化影响较高, 而初始脂肪含量影响则较低, 其原因是蛋白质参与了贮藏过程中的美拉德反应和氨基酸水解反应^[25-26], 反应过程中也产生了黑色素和絮状物的析出, 故褐变指数和蛋白水解度随之升高。

Table 3 Basic parameter information of model			
步骤	项目	指标	数值
训练	平方和误差		4.859
	平均总体相对误差		0.082
	标度因变量的相对误差	褐变指数	0.059
		蛋白水解度	0.105
	使用的中止规则		误差在1个连续步骤中没有减小
	训练时间		0:34:45.00
检验	平方和误差		2.677
	平均总体相对误差		0.107
	标度因变量的相对误差	褐变指数	0.108
		蛋白水解度	0.106

注: 误差计算基于检验样本。

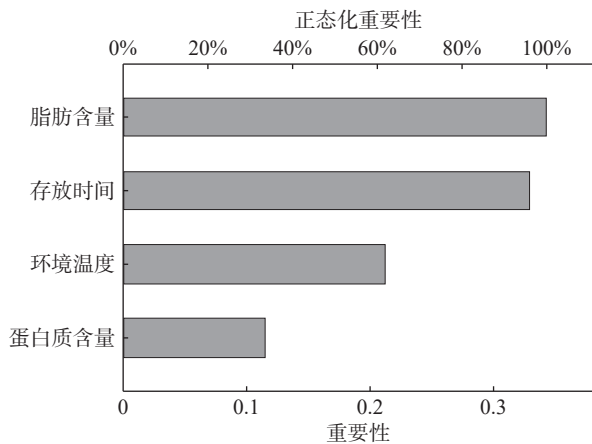


图 4 自变量正态化重要性分析
Fig.4 Normalization importance analysis of independent variables

2.3.3 BP 神经网络模型验证 进一步对所建 BP 神经网络模型进行验证, 评价预测准确性的方法是对照传统多元线性回归模型^[27]的预测效果。根据 t 检验, 将预测数据和实际数据画成 45° 夹角的线性拟合, 用 R^2 表示拟合系数^[28]。根据前期建立的 UHT 纯牛奶多因素动力学货架期预测模型^[29]对原样本库样品进行预测, 其如图 5 所示, 基于 BP 神经网络的褐变指数、蛋白水解度模型拟合系数分别为 0.9412、0.9527, 而传统线性回归模型对应的拟合系数分别为 0.8799、0.9211, 表明 BP 神经网络模型较传统线性回归模型能更加准确地拟合 UHT 纯牛奶的特征

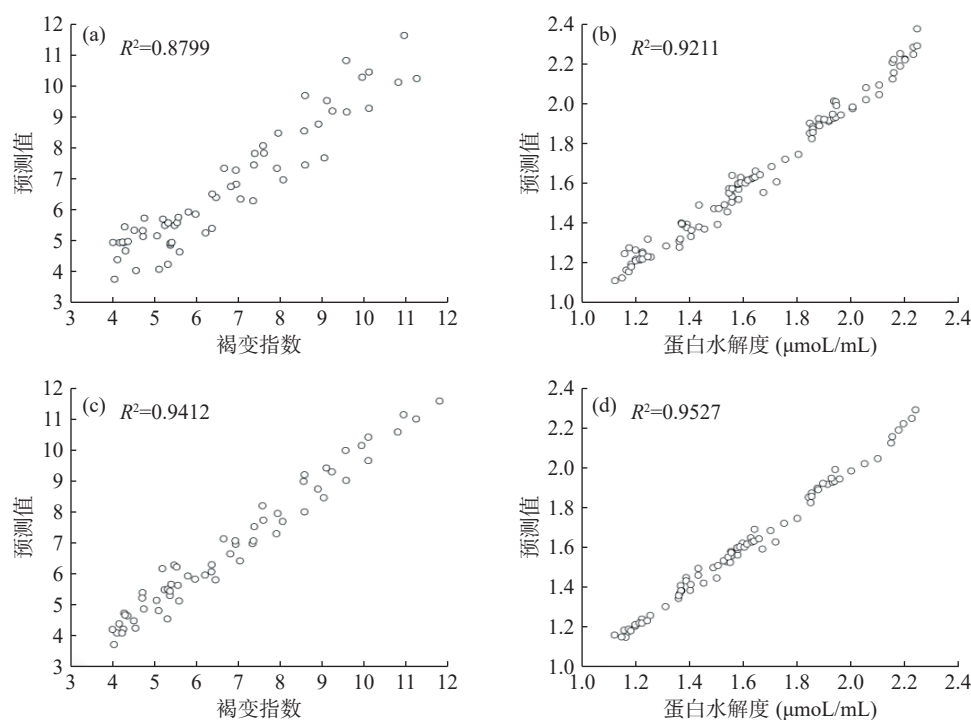


图 5 神经网络与线性回归预测结果对比

Fig.5 Comparison of neural network and linear regression prediction results

注: (a)为线性回归法—褐变指数模型; (b)为线性回归—蛋白水解度模型; (c)为 BP 神经网络—褐变指数模型; (d)为 BP 神经网络—蛋白水解度模型。

指标变化,同时由于 BP 神经网络是一个动态数据库模型^[30],随着未来更多样品实验数据的录入,网络不断迭代,模型将涵盖更大范围,拥有更高的自适应精度。

3 结论

将初始脂肪含量、初始蛋白质含量和贮藏温度、褐变指数、蛋白水解度归一化后整理成训练集,利用 BP 神经网络对其进行迭代训练得到不同配方牛奶贮藏时间与褐变指数、蛋白水解度的关系,将其与基于传统动力学的多元线性回归模型进行对比。结果表明,经优化隐含层神经元数的 BP 神经网络模型对 UHT 纯牛奶贮藏期间的特征指标变化预测精度更高,可用于该类包装货架期的预测。本研究为 UHT 牛奶多因素货架期预测模型提供了一种新的建模思路,今后随着理化指标的不断扩充,神经网络算法性能的不断优化,构建的模型可涵盖更多变量,实现对 UHT 纯牛奶货架期更为精准的预测。

参考文献

- [1] 孙静丽,杜瑶,朱莉莉,等.牛乳粉中乳蛋白糖基化分析及其水解程度研究[J].食品与发酵工业,2018,44(7):110-115. [SUN Jingli, DU Yao, ZHU Lili, etc Glycosylation analysis and hydrolysis degree of milk and egg white in milk powder[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44 (7): 110-115.]
- [2] LÓPEZ-FANDIÑO R, OLANO A, CORZO N, et al. Proteolysis during storage of UHT milk: Differences between whole and skim milk[J]. Journal of Dairy Research, 1993, 60(3): 339-347.
- [3] 靳啸.基于神经网络的牛奶运销过程新鲜度检测系统的研究[D].太原:太原理工大学,2020. [JIN Xiao. Research on the freshness detection system for milk transportation and sales process

based on neural networks[D] Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.]

- [4] 刘雪,李亚妹,刘娇,等.基于 BP 神经网络的鲜鸡蛋货架期预测模型[J].农业机械学报,2015,46(10):7-12. [LIU Xue, LI Yamei, LIU Jiao, et al. A fresh egg shelf life prediction model based on BP neural network[J] Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 7-12.]
- [5] 易甜,程鹏飞. BP 人工神经网络对酸奶货架期的预测[J].绿色科技,2017(10):242-246. [YI Tian, CHENG Pengfei. Prediction of yogurt shelf life using BP artificial neural network[J] Green Technology, 2017(10): 242-246.]
- [6] JIANG Yujun, YANG Xinyan, JIN Haonan. Shelf-life prediction and chemical characteristics analysis of milk formula during storage[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 144(1): 1-10.
- [7] RANVIR S, SHARMA R, GANDHI K, et al. Assessment of physico-chemical changes in UHT milk during storage at different temperatures[J]. Journal of Dairy Research, 2020, 87(2): 1-5.
- [8] SAHOO P K, ANSARI M, DATTA A K. Color variation of Ultra-High Temperature (UHT) processed milk using CIE L, a, b, color scale[J]. Indian Journal of Dairy Science, 2003(3): 56-62.
- [9] 孙琦,刘鹭,张书文,等.不同贮藏温度对 UHT 乳品质的影响[J].北京工商大学学报:自然科学版,2012,30(4):12-18. [SUN Qi, LIU Lu, ZHANG Shuwen, et al. Effects of different storage temperatures on the quality of UHT milk[J] Journal of Beijing Business University: Natural Science Edition, 2012, 30(4): 12-18.]
- [10] 贾凌云,胡志和,程凯丽.基于 Arrhenius 模型预测无牛奶糖超高温牛奶的货架期[J].食品工业科技,2020(19):232-239. [JIA Lingyun, HU Zhihe, CHENG Kaili. Predicting the shelf life of milk sugar free ultra-high temperature milk based on the Arrhenius model[J] Food Industry Technology, 2020(19): 232-239.]
- [11] CHAPMAN K W, LAWLESS H T, BOOR K J. Quantitative descriptive analysis and principal component analysis for sensory

- characterization of ultrapasteurized milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2001, 84(1): 12–20.
- [12] JIANG Yujun, YANG Xinyan. Shelf-life prediction and chemical characteristics analysis of milk formula during storage[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021(144): 111268.
- [13] 王少雷, 谭冬飞, 张清阳, 等. 光氧化对超高温灭菌乳感官品质的影响研究[J]. *中国食物与营养*, 2021, 27(4): 35–38. [WANG Shaolei, TAN Dongfei, ZHANG Qingyang, et al. Study on the effect of photooxidation on the sensory quality of ultra high temperature sterilized milk[J]. *Chinese Food and Nutrition*, 2021, 27(4): 35–38.]
- [14] 刘海燕, 任青兮, 李启明, 等. UHT乳贮藏期间理化特性和感官品质的变化[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(5): 7–13. [LIU Haiyan, REN Qingxi, LI Qiming, et al. Changes in physicochemical properties and sensory quality of UHT milk during storage[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(5): 7–13.]
- [15] SINGH R R B, RUHIL A P, JAIN D K, et al. Prediction of sensory quality of UHT milk-A comparison of kinetic and neural network approaches[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92(2): 146–151.
- [16] RICHARDS M, DE KOCK H L, BUYS E M. Multivariate accelerated shelf-life test of low fat UHT milk[J]. *International Dairy Journal*, 2014, 36(1): 38–45.
- [17] SUNDS A V, RAUH V M, SØRENSEN J, et al. Maillard reaction progress in UHT milk during storage at different temperature levels and cycles[J]. *International Dairy Journal*, 2017(77): 56–64.
- [18] AN D S, LEE J H, LEE D S. Shelf life model of powdered infant formula as function of temperature and oxygen concentration[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 15: 130–133.
- [19] 武建新, 梁淑芳. UHT灭菌牛奶在贮藏过程中的质量变化[J]. *中国牛奶品工业*, 1989, 17(1): 17–24. [WU Jianxin, LUAN Shufang. Quality changes of UHT sterilized milk during storage[J]. *China Milk Industry*, 1989, 17(1): 17–24.]
- [20] LOPEZ-FANDINO R, OLANO A, SAN J C, et al. Short communications application of reversed-phase hplc to the study of proteolysis in UHT milk[J]. *Journal of Dairy Research*, 1993, 60(1): 111–116.
- [21] 李星, 顾雨香, 任青兮. 贮藏期UHT奶中蛋白质组成结构及其糖基化的变化[J]. *中国牛奶品工业*, 2021, 49(3): 10–14. [LI Xing, GU Yuxiang, REN Qingxi. Changes in protein composition, structure, and glycosylation in UHT milk during storage[J]. *China Milk Industry*, 2021, 49(3): 10–14.]
- [22] 陈美霞, BROWNING E, LEWIS M, 等. 评估超高温灭菌奶安全性和质量的2个重要参数[J]. *中国牛奶业*, 2016(5): 60–68. [CHEN Meixia, BROWNING E, LEWIS M, et al. Two important parameters for evaluating the safety and quality of ultra-high temperature sterilized milk[J]. *China Milk Industry*, 2016(5): 60–68.]
- [23] 肖立中, 费玉刚, 田怀香, 等. 基于BP神经网络的鸡精货架期模型研究[J]. *中国调味品*, 2017, 42(7): 5–9. [XIAO Lizhong, FEI Yugang, TIAN Huaixiang, et al. A study on the shelf life model of chicken sperm based on bp neural network[J]. *Chinese Seasonings*, 2017, 42(7): 5–9.]
- [24] 侯温甫, 王宏勋, 艾有伟, 等. 基于神经网络的冷鲜猪肉的货架期预测方法: 中国, 112345716A[P]. 2021-02-09. [HOU Wenfu, WANG Hongxun, AI Youwei, et al. A shelf life prediction method for cold fresh pork based on neural networks: China, 112345716A [P]. 2021-02-09.]
- [25] 马惠玲, 曹梦柯, 王栋, 等. 苹果货架期GAN-BP-ANN预测模型研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 367–375. [MA Huiling, CAO Mengke, WANG Dong, et al. Research on the GAN-BP-ANN prediction model for apple shelf life[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 367–375.]
- [26] 沈旺旺, 高振洪, 樊沁昕, 等. 温度对自热食品理化指标影响及其货架期预测方法[J]. *包装工程*, 2021, 42(9): 141–151. [SHEN Wangwang, GAO Zhenhong, FAN Qinxin, et al. The influence of temperature on the physicochemical indicators of self heating food and its shelf life prediction method[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(9): 141–151.]
- [27] 路洋翔. 速冻汤圆贮藏及流通过程中品质变化及货架期预测研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019. [LUO Yangxiang. Study on quality change and shelf life prediction of quick frozen rice dumpling during storage and circulation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.]
- [28] GOYAL S. Radial basis artificial neural network computer engineering methodology for predicting shelf life of brown milk cakes decorated with almonds[J]. *International Journal of Latest Trends in Computing*, 2011: 100–105.
- [29] 习鸿杰, 宋利君, 邓玉明, 等. 初始脂肪含量对超高温灭菌牛奶贮存品质变化及货架期的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1–11 [2024-01-02]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034566>. [XI Hongjie, SONG Lijun, DENG Yuming, et al. The effect of initial fat content on the storage quality changes and shelf life of ultra-high temperature sterilized milk[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*, 1–11 [2024-01-02]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034566>.]
- [30] GOYAL S, GOYAL G K. Intelligent artificial neural network computing models for predicting shelf life of processed cheese[J]. *International Journal of Intelligent Systems & Applications*, 2012, 4(2): 107–111.