

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.044

基于BP神经网络的鲜鸡蛋货架期预测模型*

刘雪^{1,2} 李亚妹¹ 刘娇¹ 钟蒙蒙¹ 陈余³ 李兴民^{2,4}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;

3. 北京市畜牧总站, 北京 100107; 4. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究不同温度范围内鸡蛋的品质变化及货架期,通过实验室模拟,检测了鲜鸡蛋在5、25、35℃条件下的哈夫单位值、蛋黄系数等理化指标,分别构建了同等实验条件下的鲜鸡蛋货架期动力学预测模型和BP神经网络预测模型,并选取5、25、35℃温度下共6组数据进行模型验证。结果表明,基于BP神经网络的鲜鸡蛋货架期模型预测精度达到95.93%,动力学模型预测精度为90.79%,BP神经网络能更精确地预测鲜鸡蛋在5~35℃贮藏温度范围内的货架期。

关键词: 鲜鸡蛋 货架期 动力学模型 BP神经网络

中图分类号: S879.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0328-07

BP Neural Network Based Prediction Model for Fresh Egg's Shelf Life

Liu Xue^{1,2} Li Yamei¹ Liu Jiao¹ Zhong Mengmeng¹ Chen Yu³ Li Xingmin^{2,4}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Food Quality and Safety Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Beijing General Station of Animal Husbandry, Beijing 100107, China

4. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Eggs have become main sources of protein choice for Chinese consumers due to the fact that they are both inexpensive and rich in vitamins, minerals and protein. However, as a perishable product, the quality of fresh eggs deteriorates continuously during the period from their leaving the farm until final consumption or use in manufacturing. With consumers' increasing awareness and concern for food safety, increasing attention is being given to the shelf life of eggs through the supply chain. To develop a prediction model of the shelf life of fresh eggs, two types of model were developed and tested, including a kinetic model and a back-propagation (BP) neural network model. A sample of 115 eggs was collected on the same day from the same farm layer-hen house subsequently for use in simulating quality deterioration under laboratory conditions. The experiments were conducted at constant temperatures of 5, 25 and 35℃ to cover the normal range of temperatures that can occur under real egg storage conditions and the experimental results were used to construct the kinetic and BP neural network models, and validation of model shelf-life prediction was compared with actual egg shelf life. Three layers of BP neural network were constructed with Haugh units, yolk index and temperature as the input layer parameters, 10 nodes in the hidden layer and remaining day's duration of storage as the output layer's parameter. It was found that the BP neural network model had a superior prediction accuracy of 95.93% compared with 90.79% of the kinetic model. Hence it can be concluded that the BP neural network model could readily be integrated as part of a quality control system setting sell or use-by-dates for consumers.

Key words: Fresh eggs Shelf life Kinetic model BP neural network

收稿日期: 2014-12-08 修回日期: 2015-01-15

* 现代农业产业技术体系北京市家禽创新团队资助项目(京农发[2011]62号)

作者简介: 刘雪,副教授,主要从事农业信息管理、物流与供应链管理研究,E-mail: liusnow@cau.edu.cn

通讯作者: 李兴民,副教授,主要从事食品加工研究,E-mail: lixingmin@cau.edu.cn

引言

鸡蛋含有丰富的营养成分,是人们日常生活中必不可少的食品之一。作为食品品质的重要表征,货架期是消费者选购食品、保障饮食安全的重要依据,日益受到学术界的普遍关注。国内外学者从多个视角开展了对鸡蛋品质的研究,包括利用计算机视觉技术^[1]、鸡蛋的光谱特性^[2-4]、电子鼻^[5]等无损手段检测鸡蛋新鲜度。

鸡蛋具有易腐和易损的特性,从养殖场到餐桌的流通过程中始终伴随着品质的变化。在储藏和运输过程中易受温度、运输中的振动以及微生物的侵染等多方面因素的影响,其中,温度被公认是影响鸡蛋内部微生物的生长繁殖、引起鸡蛋内部蛋白质等的变化,进而影响鸡蛋货架期的重要因素^[6-7],因此预测鲜鸡蛋的货架期对于保护消费者权益具有重要意义。

虽然目前已经出现有关货架期预测的研究,例如采用最小二乘支持向量机 (LS-SVM)^[8-9]、神经网络^[10-11]、动力学模型^[12-14]等构建鸡蛋货架期预测模型。但有关鸡蛋货架期的研究不仅是在不同的实验条件下进行,而且只基于单个模型展开,目前还没有对同等实验条件下、不同货架期预测模型进行对比的研究。因此,本文通过实验模拟,分别构建基于动力学模型及 BP 神经网络模型的鲜鸡蛋货架期预测模型,并通过对比分析以选取精度更高的货架期预测模型,以期为企业经营者和行业主管部门提供鲜鸡蛋货架期的决策支持。

1 鸡蛋货架期的概念

货架期是指食品可以被接受并满足顾客质量要求的时间长度^[15]。当食品经过一段时间储藏后,它的一种或几种品质属性达到了不理想的状态,这种状态下它已经不适合放到货架上销售,即到达了该食品的货架期^[16]。因此,鸡蛋货架期可以定义为鸡蛋自生产后,经过包装、运输、销售等流通环节最终到达消费者手中,从新鲜到腐败变质而不能满足质量要求的时间长度,即鸡蛋从生产完成之时起到腐败变质以至于不适合食用的时间^[17]。这个概念包含以下涵义:鸡蛋是安全、可食用的;鸡蛋的理化指标、感官特性等必须在可接受的范围内;需要有鲜鸡蛋的储存条件和时间说明。

2 鸡蛋货架期预测模型的构建

2.1 鸡蛋货架期预测模型的选取

食品货架期预测方法很多,主要有以温度为基

础的 Q_{10} 法、 Z 值模型法、Arrhenius 方程;以微生物为基础的微生物动力学生长模型;威布尔危险值分析法 (WHA) 及人工神经网络等^[18]。这些模型各有特点,但根据食品性质的不同,所适用的货架期预测方法也有所不同。

以温度为基础的动力学预测模型中,Arrhenius 方程是常用的预测模型^[19];微生物动力学生长模型主要以特定腐败菌为基础,具有较高的精度,目前常用于肉类食品的货架期预测^[20];威布尔危险值分析法以感官评价为基准,主观性强^[21];BP 神经网络通过自学习、网络训练的方式较好地解决了多指标预测的问题,常用于预测模型的建立,但在鸡蛋货架期预测方面运用还较少^[22-23]。鸡蛋的品质劣变主要是由内部理化反应所致,且鸡蛋货架期受温度影响较大^[24]。

综合上述各预测模型的特点和鸡蛋品质变化的规律,本文选取动力学模型和 BP 神经网络模型作为鲜鸡蛋货架期预测模型并对 2 个模型的预测精度进行对比。

2.2 模型参数的选取和获取方法

2.2.1 模型参数的选取

构建鸡蛋货架期模型首先需要确定表征鸡蛋品质指标的模型参数。鸡蛋品质的表征指标很多,包括色泽、气味等感官指标;失重率、相对密度、气室高度、蛋黄系数、蛋白系数、浓蛋白含量、哈夫单位值、蛋白 pH 值、蛋白凝胶硬度等理化指标^[25]。其中,哈夫单位值和蛋黄系数是反映鲜鸡蛋品质的重要指标^[8-10,26],因此,选取哈夫单位值和蛋黄系数作为表征鸡蛋品质的指标。

(1) 哈夫单位值是评定鸡蛋品质的主要指标之一,也是美国农业部蛋品标准检验和表示蛋品新鲜度的指标^[8]。哈夫单位值越高,蛋清质量越好。哈夫单位值公式为

$$H_U = 100 \lg(H - 1.7m^{0.37} + 7.6)$$

式中 H_U ——哈夫单位值

H ——浓蛋白高度

m ——鸡蛋质量^[27]

(2) 蛋黄系数是表征鸡蛋品质的另一个主要指标,新鲜蛋的蛋黄膜弹性大,蛋黄高度高,蛋黄直径小。随着存放时间的延长,蛋黄膜松弛,蛋黄平塌,高度下降,直径变大。蛋黄系数是蛋黄高度与蛋黄直径的比值,即

$$Y_j = H_1 / \Phi$$

式中 Y_j ——蛋黄系数

H_1 ——蛋黄高度

Φ ——蛋黄直径^[10]

2.2.2 模型参数的测定方法

为了获取鸡蛋哈夫单位值、蛋黄系数,需要测定鸡蛋的质量、浓蛋白高度、蛋黄高度及蛋黄直径等参数。上述参数数值的测定方法如下:

质量:用电子天平称取鸡蛋质量。

浓蛋白高度:将鸡蛋打入玻璃皿,避开系带,取蛋黄边缘与浓蛋白边缘中间均匀分布的3个等距离点,用游标卡尺测定其高度,其平均值即为浓蛋白高度。

蛋黄高度:用蛋清分离器分离出蛋黄置于玻璃皿中,用游标卡尺测量蛋黄高度。

蛋黄直径:用游标卡尺测量蛋黄直径。

2.2.3 材料、仪器设备和实验方案

(1) 实验材料主要是鸡蛋,选取北京某养殖场同品种、同日龄、饲料相同的蛋鸡同日产的鲜鸡蛋115枚作为样本。

(2) 实验所用设备:PRX-350A型智能人工气候箱;百分之一天平;游标卡尺(精度0.02 mm);pH211型台式酸度计;FA25型匀浆机;法克曼蛋清分离器;标准筛40目;玻璃皿等。

(3) 实验的具体步骤为:将115枚鸡蛋随机分为23组,编号并称量;选取第1组分5次依次测定出每枚鸡蛋的质量、浓蛋白高度、蛋黄直径及蛋黄高度,作为鸡蛋品质初始值;第2~8组、9~13组分别放置于(25±1)℃和(35±1)℃恒温培养箱中,14~23组放入(5±1)℃培养箱,每3d检测一次各贮藏温度各一组鸡蛋的质量、浓蛋白高度、蛋黄直径和蛋黄高度至货架期结束。

2.2.4 数据处理

对由实验数据计算得出的哈夫单位值、蛋黄系数及剩余货架期等数据采用SPSS 20.0统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),Duncan's法进行差异显著性检验。采用多重比较法,在 $\alpha = 0.05$ 下进行分析, $p < 0.05$ 代表显著性差异,结果如表1所示。其中本文依据我国现行分级标准及美国农业部蛋品标准规定^[28-30],把鸡蛋剩余货架期定义为货架期结束日期与指标测定日期的时间间隔,并以鸡蛋哈夫单位值低于55、蛋黄系数低于0.35时的测试日期作为货架期结束日期。

表1 指标数据

Tab.1 Values of test indicators

贮藏 天数/d	哈夫单位值			蛋黄系数			剩余货架期/d		
	(35±1)℃	(25±1)℃	(5±1)℃	(35±1)℃	(25±1)℃	(5±1)℃	(35±1)℃	(25±1)℃	(5±1)℃
0	90.7±2.31 ^a	90.7±2.31 ^a	90.7±2.31 ^a	0.413±0.02 ^b	0.413±0.02 ^b	0.413±0.02 ^b	14±1.32 ^{bcd}	22±1.71 ^{acd}	29±1.17 ^{bd}
3	83.1±2.27 ^{cb}	83.8±3.24 ^{cd}	88.7±4.29 ^{bcd}	0.391±0.01 ^{db}	0.391±0.06 ^{ca}	0.408±0.01 ^{db}	11±0.89 ^{bcd}	19±1.37 ^{bd}	26±2.01 ^{acd}
6	72.1±2.21 ^{db}	74.1±3.21 ^{cd}	87.9±2.22 ^{de}	0.375±0.05 ^{ca}	0.381±0.03 ^{da}	0.404±0.05 ^{cb}	8±0.63 ^{db}	16±2.11 ^{ebcd}	23±1.92 ^{acd}
9	70.0±2.29 ^{db}	71.8±4.37 ^{cb}	87.1±2.19 ^{de}	0.373±0.03 ^{ab}	0.375±0.01 ^{ba}	0.401±0.03 ^{ab}	5±1.37 ^{ebcd}	13±2.37 ^{bb}	20±2.71 ^{bcbd}
12	64.8±3.35 ^{ba}	65.2±3.24 ^{bc}	84.3±4.28 ^{acde}	0.365±0.02 ^{bb}	0.369±0.05 ^{ca}	0.399±0.05 ^{ab}	2±1.09 ^{cd}	10±2.93 ^{da}	17±1.99 ^{bcd}
15	50.8±2.25 ^{cb}	63.0±4.29 ^{bb}	80.1±4.33 ^{bcdde}	0.333±0.05 ^{ca}	0.362±0.02 ^{da}	0.390±0.02 ^{db}	0±2.11 ^{ca}	7±3.02 ^{ba}	14±2.38 ^{cd}
18	—	60.8±3.25 ^{bdc}	75.8±3.26 ^{de}	—	0.358±0.03 ^{ca}	0.387±0.01 ^{bb}	—	4±1.98 ^{bcbd}	11±3.00 ^{abcd}
21	—	55.9±3.28 ^{cd}	70.1±3.23 ^{bde}	—	0.345±0.04 ^{ba}	0.379±0.04 ^{bb}	—	1±2.05 ^{ebcd}	8±2.31 ^{dcd}
24	—	—	65.2±4.29 ^{cde}	—	—	0.371±0.01 ^b	—	—	5±1.91 ^{cd}
27	—	—	59.9±2.89 ^{de}	—	—	0.357±0.04 ^b	—	—	2±2.78 ^{bcd}
30	—	—	53.6±5.35 ^b	—	—	0.342±0.02 ^b	—	—	0±3.31 ^a

注:表中的数据都以平均值±标准差表示。其中,“—”表示实验测定结束;小写字母代表某一品质指标同一行内差异显著;大写字母代表某一品质指标同一列内差异显著($p < 0.05$)。

实验共获取25组实验数据,其中5、25、35℃条件下鸡蛋初始品质指标均为第1组所测数据。从25组实验数据中随机选取5℃下9组、25℃下6组、35℃下5组数据用于模型构建;5℃下第3、12天;25℃下第12、15天;35℃下第15天所测数据用于模型验证。

2.3 鸡蛋货架期预测模型的构建

2.3.1 动力学模型

动力学模型能够较好地反映和描述食品品质的变化,是最常用的食品货架期预测模型之一,大多数食品的品质变化都遵循零级或一级反应动力学规

律^[31]。参照文献[10,15],零级、一级动力学模型反映的食品货架期预测公式分别为

$$t_{sz} = -(C_t - C_0) / [K_0 e^{-E_a/(RT)}] \quad (1)$$

$$t_{sf} = -(\ln C_t - \ln C_0) / [K_0 e^{-E_a/(RT)}] \quad (2)$$

式中 C_t ——贮藏 t 天后某理化指标

C_0 ——起始时刻某理化指标

T ——绝对温度, K K_0 ——常数

E_a ——活化能, J/mol

R ——气体常数,取 8.314 J/(K·mol)

t_{sz} ——零级动力学模型货架期预测结果

t_{sf} ——一级动力学模型货架期预测结果

鸡蛋货架期预测的动力学模型具体构建如下：

(1) 动力学模型级数的确定

利用 Origin 8.0 软件将哈夫单位值和蛋黄系数分别与动力学零级及一级动力学方程拟合,拟合结果如表 2 所示。其中标准的零级和一级反应动力学方程分别为

$$C_t = C_0 - kt \quad (3)$$

$$\ln C_t = \ln C_0 - kt \quad (4)$$

式中 k ——反应速率常数, d^{-1}

表 2 动力学模型拟合决定系数

Tab.2 Determination coefficients of fitting results for kinetic model

温度 / $^{\circ}C$	哈夫单位值		蛋黄系数	
	零级	一级	零级	一级
5	0.977 6	0.986 6	0.842 7	0.969 1
25	0.804 6	0.949 5	0.804 6	0.949 5
35	0.938 7	0.975 5	0.743 4	0.911 0

依据表 2 拟合结果,本文采用一级反应动力学模型构建鲜鸡蛋货架期预测模型。

(2) 一级动力学模型参数的确定

依据反应级数确定结果,对哈夫单位值和蛋黄系数取对数值,与贮藏时间线性拟合,得出反应速率常数,如表 3 所示。

表 3 动力学反应速率常数

Tab.3 Kinetic reaction rate constants d^{-1}

温度/ $^{\circ}C$	哈夫单位值	蛋黄系数
5	0.005 89	0.007 28
25	0.043 77	0.042 70
35	0.076 67	0.099 97

对表 3 中的反应速率常数取其负自然对数,与绝对温度进行线性拟合,拟合结果如图 1 所示。其中活化能 E_a 通过方程的斜率乘以 8.314 得出, K_0 通过方程的截距获得。

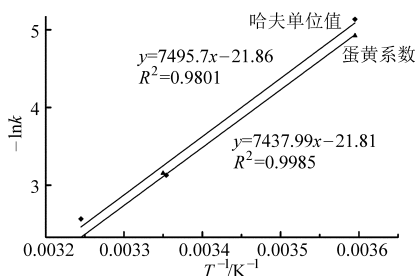


图 1 哈夫单位值、蛋黄系数变化的 Arrhenius 方程图

Fig.1 Arrhenius equation of egg's Haugh unit and yolk index changes

将计算所得活化能 E_a 及方程常数 K_0 代入式(2)得出基于哈夫单位值和蛋黄系数的鲜鸡蛋货

架期预测模型分别为

$$t_{HU} = -(\ln C_t - 4.48)/(3.1 \times 10^9 e^{-7.495.7/T}) \quad (5)$$

$$t_{YI} = -(\ln C_t + 0.81)/(2.9 \times 10^9 e^{-7.437.99/T}) \quad (6)$$

2.3.2 BP 神经网络模型

BP 神经网络即误差反向传播神经网络,是应用最广泛的学习网络,一般由输入层、隐含层和输出层构成^[32]。层与层之间多采用全互连方式,同一层单元间无相互连接^[33]。它可以很好地解决各个指标间的非线性关系,常用于构建预测模型,现已广泛应用于食品货架期预测研究^[34]。

本文所采用的 BP 神经网络模型构建过程如下：

(1) 网络结构的选择

一个 3 层的 BP 神经网络可以完成任意的从 n 维到 m 维的映射^[35],因此本文选择具有单个隐含层的 3 层 BP 神经网络结构。

(2) 输入、输出层参数的确定

本文所采用 BP 神经网络的输入层参数为哈夫单位值、蛋黄系数、温度,输出层参数为鸡蛋货架期。

由于本文所用模型输入、输出层参数具有不同的量纲,为减少货架期预测模型的误判概率^[36],需对输入、输出层参数进行归一化处理,即

$$p' = \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \quad (7)$$

式中 p' ——归一化数据

p ——原始数据

p_{\min} ——原始数据最小值

p_{\max} ——原始数据最大值

(3) 隐含层节点数的确定

BP 神经网络输入、输出层的神经元数由输入、输出层变量决定,而隐含层节点个数影响网络的非线性映射能力^[37]。隐含层节点数计算公式为

$$n = (n_1 + n_0)^{1/2} + a \quad (8)$$

式中 n_0 ——输入层节点数

n_1 ——输出层节点数

a ——1 ~ 10 之间的常数

对网络隐含层节点数在 3 ~ 12 下的性能进行测试,结果表明隐含层节点数为 10 时网络收敛速度最快,故本模型中隐含层节点数为 10。

因此本文所构建的 BP 神经网络模型具有单个隐含层的 3 层 BP 神经网络结构。其中,输入层参数为哈夫单位值、蛋黄系数、温度,隐含层节点数为 10,输出层参数为鸡蛋货架期。结构如图 2 所示。

(4) 网络函数的选择

BP 神经网络中涉及函数有隐含层传递函数、训练函数、学习函数、网络性能函数、仿真函数等。

传递函数常用 S 型的对数“logsig”、正切

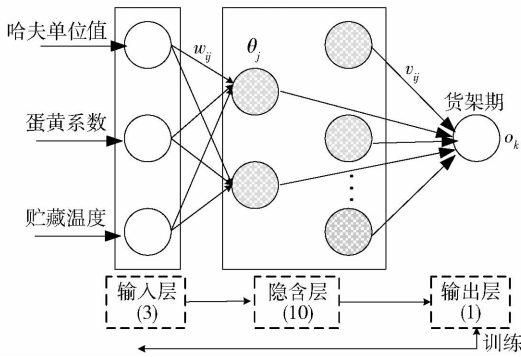


图2 BP神经网络模型

Fig. 2 BP neural network model

“tansig”或线性函数“purelin”。其中 logsig 函数将神经元的输入映射到(0,1);tansig 将神经元的输入映射到(-1,1);purelin 函数的输入、输出值为任意值。而本文输入、输出层参数归一化至(0,1)区间内,为保证 BP 神经网络模型的非线性,因此隐含层及输出层传递函数均选取为 logsig。

常用的训练函数包括:trainlm、trainrp、trainscg、trainbfg、traingdx。其中 trainlm 具有收敛快、误差小、训练效果最优的特点,因此本文采用 trainlm 作为训练函数。

常用的学习函数包括:learngd、learngdm,其中 learngdm 函数需通过神经元的输入、误差和动量常数计算权值和阈值的变化率,learngd 函数只需通过神经元的输入、误差计算权值和阈值的变化率。为提高网络训练速度,本文采用附加动量法构建 BP 神经网络,因此选取 learngdm 为学习函数。

BP 神经网络的网络性能函数、仿真函数一般设置为模型默认参数,因此本文网络性能函数选择为 mse,仿真函数为 sim。

(5) 网络训练

网络训练参数设置为:动量常数采用函数默认值为 0.9,学习速率为 0.05,网络性能目标误差为 0.001,训练的最大步数为 10 000^[38]。将模型构建数据输入设定好的网络模型中,经 7 次训练后网络性能误差为 0.000 19,满足误差设定要求停止训练。得出网络的权值及阈值为

$$w_{ij} = \begin{bmatrix} 0.908 & -0.854 & -1.805 \\ 0.525 & 0.814 & 4.606 \\ 0.179 & -3.632 & 3.952 \\ -1.173 & -0.345 & 0.840 \\ -0.829 & -1.448 & 0.480 \\ 6.376 & -6.602 & 2.273 \\ 2.995 & -1.535 & 0.672 \\ 1.131 & -1.223 & -1.879 \\ 0.318 & -1.172 & 1.347 \\ -0.399 & 0.395 & 1.194 \end{bmatrix}$$

$$\theta_j = \begin{bmatrix} -1.489 \\ -0.835 \\ -4.163 \\ 2.232 \\ 2.001 \\ 0.308 \\ -3.107 \\ -2.851 \\ -6.055 \\ -2.105 \end{bmatrix} \quad \nu_{ik} = \begin{bmatrix} -5.113 \\ 11.301 \\ 15.532 \\ 6.994 \\ 6.117 \\ 3.175 \\ 3.158 \\ 13.904 \\ 0.084 \\ -0.855 \end{bmatrix} \quad o_k = 7.061$$

式中 w_{ij} ——输入层和隐含层的权值
 θ_j ——隐含层神经元的阈值
 ν_{ik} ——训练后隐含层和输出层权值
 o_k ——输出层的阈值

3 预测结果与分析

将预留 5℃ 下第 3、12 天;25℃ 下第 12、15 天;35℃ 下第 15 天实验数据验证构建的动力学预测模型和 BP 神经网络预测模型。

(1) 将预留数据中哈夫单位值和蛋黄系数依次代入式(5)、(6),取两方程计算结果的最小值即为动力学模型预测剩余货架期预测值,即 $\min\{t_{HV}, t_{VI}\}$ 。

(2) 将预留数据代入构建的 BP 神经网络模型输入端,得出归一化货架期预测值,对预测结果进行反归一化处理得出 BP 神经网络模型剩余货架期预测值,计算公式为

$$p_1 = p'(p_{\max} - p_{\min}) + p_{\min} \quad (9)$$

式中 p_1 ——反归一化预测值

实际货架期与上述 2 种不同预测模型的预测结果的对比如表 4 所示。

表 4 BP 神经网络预测结果

Tab. 4 Prediction results of BP neural network

实际 货架期/d	预测货架期/d		误差/%	
	动力学 模型	BP 神经 网络模型	动力学 模型	BP 神经 网络模型
28	30.01	26.70	7.17	4.64
34	31.00	35.30	8.86	3.82
11	12.00	10.20	9.14	7.27
8	7.00	8.20	12.80	2.63
5	5.53	4.90	10.68	2.34
2	2.13	2.10	6.59	3.70

由表 4 可以看出,动力学模型预测误差在 13% 以内,平均误差为 9.21%,预测精度为 90.79%;BP 神经网络预测误差在 7.3% 以内,平均误差为 4.07%,预测精度为 95.93%。

2 个预测模型的结果对比表明: 基于 BP 神经网络的鸡蛋货架期预测模型的预测精度最高, 预测结果较接近真实货架期情况。

4 结束语

以鲜鸡蛋为研究对象, 选取哈夫单位值和蛋黄系数作为鸡蛋品质表征指标。在对以温度为基础的 Q_{10} 法、 Z 值模型法、Arrhenius 方程; 以微生物为基础的微生物动力学生长模型; 威布尔危险值分析法 (WHA) 及人工神经网络等食品货架期预测方法及

其特点对照分析的基础上, 结合鸡蛋品质变化的机理, 通过实验模拟鸡蛋在 $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 品质变化情况, 利用实验获得的哈夫单位值和蛋黄系数数据构建了鲜鸡蛋货架期预测的动力学方程模型和 BP 神经网络预测模型。模型验证结果表明, 3 层网络结构的 BP 神经网络模型预测精度可达 95.93%, 高于动力学模型 90.79% 的预测精度。这一结论可以为 BP 神经网络在其他食品货架期预测上的应用研究提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 郑丽敏, 杨旭, 徐桂云, 等. 基于计算机视觉的鸡蛋新鲜度无损检测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 335 - 339. Zheng Limin, Yang Xu, Xu Guiyun, et al. Nondestructive detection of egg freshness based on computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 335 - 339. (in Chinese)
- 2 Nicolas A N, Michae N, Shiv P, et al. Prediction of egg freshness and albumen quality using visible/near infrared spectroscopy[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 731 - 736.
- 3 Gerald S, Thomas B, Allison S, et al. Gender determination of fertilized unincubated chicken eggs by infrared spectroscopic imaging[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2011, 400(9): 2775 - 2782.
- 4 徐惠荣, 徐文豪, 陈华瑞, 等. 基于光谱技术的褐壳血斑蛋鉴别方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 194 - 198. Xu Huirong, Xu Wenhao, Chen Huarui, et al. Detection of blood spots in brown eggs based on spectroscopic techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 194 - 198. (in Chinese)
- 5 魏小彪, 王树才. 鸡蛋新鲜度综合无损检测模型及试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 242 - 247. Wei Xiaobiao, Wang Shucui. Test and comprehensive model for non-destructive detection of egg freshness[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 242 - 247. (in Chinese)
- 6 Jones D R. Conserving and monitoring shell egg quality [C] // Proceedings of the 18th Annual Australian Poultry Science Symposium, 2006: 157 - 165.
- 7 Samli H E, Agna A, Senkoylu N, et al. Effects of storage time and temperature on egg quality in old laying hens [J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2005, 14(3): 548 - 553.
- 8 薛建新, 张淑娟, 孙海霞, 等. 可见/近红外光谱结合软化指标快速判定沙果货架期[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 169 - 173. Xue Jianxin, Zhang Shujuan, Sun Haixia, et al. Detection of shelf life of *Malus asiatica* using near-infrared spectroscopy and softening index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 169 - 173. (in Chinese)
- 9 Lu X, Yan S M, Cai C B, et al. Nonlinear multivariate calibration of shelf life of preserved eggs by near infrared spectroscopy: stacked least squares support vector machine with ensemble preprocessing [J]. Journal of Spectroscopy, 2013(21): 279 - 300.
- 10 Wang Y W, Wang J, Zhou B, et al. Monitoring storage time and quality attribute of egg based on electronic nose[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 650(2): 183 - 188.
- 11 陈晓宇, 朱志强, 张小栓, 等. 食品货架期预测研究进展与趋势[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 192 - 199. Chen Xiaoyu, Zhu Zhiqiang, Zhang Xiaoshuan, et al. Research progress and trend of food shelf life prediction research[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 192 - 199. (in Chinese)
- 12 于滨, 王喜波. 鸡蛋贮藏过程中品质变化的动力学模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 276 - 280. Yu Bin, Wang Xibo. Kinetics of quality change for eggs during storage[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 276 - 280. (in Chinese)
- 13 彭帮柱, 岳田利, 袁亚宏, 等. 基于 NIRS 的苹果酒特征香气生成动力学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 179 - 183. Peng Bangzhu, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Kinetics of character aroma production during cider fermentation by NIRS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 179 - 183. (in Chinese)
- 14 邢少华, 张小栓, 马常阳, 等. 波动温度下罗非鱼微生物生长动力学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 194 - 198. Xing Shaohua, Zhang Xiaoshuan, Ma Changyang, et al. Microbial growth kinetics model of tilapia under variable temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 194 - 198. (in Chinese)
- 15 Cadwallader R, Hugoweenen K. Freshness and shelf life of foods[M]. Washington, DC: American Chemical Society, 2003: 35 - 38.
- 16 Kilcast D, Subramaniam P. The stability and shelf-life of food[M]. Sawston, Cambridge: Wood Head Publishing Limited, 2000.
- 17 赵梦莹, 刘雪, 张领先, 等. 鸡蛋货架期的研究进展与展望[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 376 - 379. Zhao Mengying, Liu Xue, Zhang Lingxian, et al. Research progress and prospect of egg shelf-life[J]. Science and Technology of Food

- Industry,2013,34(5):376-379. (in Chinese)
- 18 史波林,赵镭,支瑞聪. 基于品质衰变理论的食品货架期预测模型及其应用研究进展[J]. 食品科学,2012,33(21):345-350.
Shi Bolin,Zhao Lei,Zhi Ruicong. Advances in predictive shelf life models based on food quality deterioration theory and their applications [J]. Food Science,2012,33(21):345-350. (in Chinese)
- 19 佟懿,谢晶. 鲜带鱼不同贮藏温度的货架期预测模型[J]. 农业工程学报,2009,25(6):301-305.
Tong Yi,Xie Jing. Prediction model for the shelf-life of *Trichiurus haumela* stored at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(6):301-305. (in Chinese)
- 20 李苗云,孙灵霞,周光宏,等. 冷却猪肉不同贮藏温度的货架期预测模型[J]. 农业工程学报,2008,24(4):235-239.
Li Miaoyun, Sun Lingxia, Zhou Guanghong, et al. Prediction model for the shelf-life of chilled pork stored at different temperatures[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(4):235-239. (in Chinese)
- 21 曹平,于燕波,李培荣. 应用 Weibull Hazard Analysis 方法预测食品货架寿命[J]. 食品科学,2007(8):487-491.
Cao Ping, Yu Yanbo, Li Peirong. Application of Weibull Hazard Analysis for forecast of food shelf-life[J]. Food Science,2007(8):487-491. (in Chinese)
- 22 Wong W K, Yuen C W M, Fan D D, et al. Stitching defect detection and classification using wavelet transform and BP neural network[J]. Expert Systems with Applications,2009,36(2):3845-3856.
- 23 王巧华,任奕林,文友先. 基于 BP 神经网络的鸡蛋新鲜度无损检测方法[J]. 农业机械学报,2006,37(1):104-106.
Wang Qiaohua, Ren Yilin, Wen Youxian. Study on non-destructive detection method for fresh degree of eggs based on BP neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(1):104-106. (in Chinese)
- 24 Aydin R. Effect of storage temperature on the quality of eggs from conjugated linoleic acid-fed laying hens[J]. South African Society for Animal Science,2006,36(1):13-19.
- 25 Hough G, Garitta L, Gómez G. Sensory shelf-life predictions by survival analysis accelerated storage models[J]. Food Quality and Preference,2006,17(6):468-473.
- 26 Suppakul P, Jutakorn K, Bangchokedee Y. Efficacy of cellulose-based coating on enhancing the shelf life of fresh eggs[J]. Journal of Food Engineering,2010,98(2):207-213.
- 27 Haugh R R. The haugh unit for measuring egg quality[J]. US Egg Poultry Magazine,1937,43:552-555.
- 28 SB/T 10277—1997 鲜鸡蛋[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- 29 NY/T 1758—2009 鲜蛋等级规格[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- 30 No H K, Prinyawiwatkul W, Meyers S P. Comparison of shelf life of eggs coated with chitosans prepared under various deproteinization and demineralization times [J]. Journal of Food Science,2005,70(6):377-382.
- 31 Isabelle L, André L. Quantitative prediction of microbial behaviour during food processing using an integrated modelling approach: a review[J]. International Journal of Refrigeration,2006,29(6):968-984.
- 32 贺昌政,李晓峰,余海. BP 人工神经网络模型的新改进及其应用[J]. 数学的实践与知识,2002,32(4):554-561.
He Changzheng, Li Xiaofeng, Yu Hai. The new improvement of BP neural network and its application [J]. Mathematics in Practice and Theory,2002,32(4):554-561. (in Chinese)
- 33 潘治利,黄忠民,王娜,等. BP 神经网络结合有效积温预测速冻水饺变温冷藏货架期[J]. 农业工程学报,2012,28(22):276-281.
Pan Zhili, Huang Zhongmin, Wang Na, et al. Prediction of shelf life for quick-frozen dumpling based on BP neural network and effective accumulated temperature theory[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(22):276-281. (in Chinese)
- 34 Mi Chunqiao, Yang Jianyu, Li Shaoming, et al. Prediction of accumulated temperature in vegetation period using artificial neural network[J]. Mathematical and Computer Modelling,2010,51(11-12):1453-1460.
- 35 Robert H N. Theory of the back propagation neural network [C] // International Joint Conference on Neural Networks, 1989:593-605.
- 36 孙增辉,张蕾. BP 人工神经网络在酥性饼干货架期寿命预测中的应用[J]. 包装工程,2011,31(3):16-20.
Sun Zenghui, Zhang Lei. Application of BP artificial neural network in shelf life prediction of packaged cookie[J]. Packaging Engineering,2011,31(3):16-20. (in Chinese)
- 37 Moody J O, Antsaklis P J. The dependence identification neural network construction algorithm[J]. IEEE Transactions on Neural Network,1996,7(1):3-15.
- 38 潘昊,陈杰,钟洛. BP 神经网络结构与样本训练参数选取的初步探讨[J]. 湖北工学院学报,1997,12(3):1-4.
Pan Hao, Chen Jie, Zhong Luo. Discussion about BP neural network structure and selection of samples training parameters[J]. Journal of Hubei Polytechnic University,1997,12(3):1-4. (in Chinese)