

基于人工神经网络的大西洋鲭鱼烘烤过程中水分和色度值预测模型

姜鹏飞, 吴吉玲, 黄一珍, 于文静, 温成荣, 祁立波, 董秀萍*

(大连工业大学 食品学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁 大连 116034)

摘要: 以大西洋鲭鱼为原料, 研究不同烘烤条件下, 大西洋鲭鱼水分含量和色度值(L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE)的变化情况, 并利用试验所得的数据以大西洋鲭鱼烘烤温度和烘烤时间作为模型输入值, 水分含量和色度值(L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE)同时作为输出值, 建立人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型, 并对模型性能进行测试。结果表明, 随着烘烤时间的增加, 水分含量和 L^* 值逐渐下降, 烘烤温度越高, 下降越迅速。而 a^* 和 ΔE 与水分含量和 L^* 的趋势正好相反。 b^* 值先升高后下降。通过试验可知, 当隐含层神经元个数为 14 时, ANN 模型的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 0.07, R^2 全部大于 0.98, 模型整体拟合程度最高。因此选择 2-14-5 作为 ANN 模型最佳拓扑结构。

关键词: 大西洋鲭鱼; 人工神经网络; 水分含量; 烘烤; 色度值

Prediction Baking Process Effects on Moisture Content and Colorimetric Values of Atlantic Mackerel Using Artificial Neural Network Based Modeling

JIANG Peng-fei, WU Ji-ling, HUANG Yi-zhen, YU Wen-jing, WEN Cheng-rong, QI Li-bo, DONG Xiu-ping*

(School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, National Research Center for Marine Engineering Technology, Dalian 116034, Liaoning, China)

Abstract: These experiments found that baking conditions influenced moisture content and colorimetric values (L^* , a^* , b^* and ΔE) of Atlantic mackerel. Atlantic mackerel baking times and temperatures used in these experiments were provided as model input values, and measured moisture content and colorimetric values (L^* , a^* , b^* and ΔE) were used as output values to establish an artificial neural network (ANN) based model. Model performance was subsequently tested. The results showed that proportional to increases in heating temperature and decreases in moisture content, the value of L^* decreases with increasing heating time. By contrast, a^* and ΔE displayed an opposite trend to that of moisture content and L^* . The value of b^* was raised and then lowered. Throughout the experiment, when the number of hidden layer neurons was 14, the root mean square (RMSE) value of the ANN model was 0.07, and R^2 was always greater than 0.98 in the model with the highest overall fit. Therefore, 2-14-5 was selected as the best topology for the ANN model.

Key words: Atlantic mackerel; artificial neural network (ANN); moisture content; baking; colorimetric values

引文格式:

姜鹏飞, 吴吉玲, 黄一珍, 等. 基于人工神经网络的大西洋鲭鱼烘烤过程中水分和色度值预测模型[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 13-19.

JIANG Pengfei, WU Jiling, HUANG Yizhen, et al. Prediction Baking Process Effects on Moisture Content and Colorimetric Values of Atlantic Mackerel Using Artificial Neural Network Based Modeling [J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 13-19.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0902000)

作者简介: 姜鹏飞(1986—), 男(汉), 高级工程师, 硕士, 研究方向: 水产加工。

* 通信作者: 董秀萍(1977—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 水产加工。

大西洋鲭鱼(*Scomber scombrus*),属于鲭科,鲈属,鲈形目,是一种重要的暖水性洄游鱼类^[1]。2017年全球产量达到122万吨^[2]。大西洋鲭鱼因可食肉质多、价格相对较低且富含脂肪、蛋白质、磷、钙、铁等营养成分而广受欢迎^[3]。近期鲭鱼的研究包括生物保鲜剂、茶多酚等对鲭鱼保鲜及品质的影响^[4-5]、热加工对鲭鱼品质及水分分布的影响^[6-7],研究大西洋鲭鱼烘烤过程中的品质变化对丰富产品具有一定意义。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是机器学习和人工智能的经典基础技术,得到了广泛的应用和认可^[8]。ANN模型是一个具有大量单连通分量和高度非线性的复杂网络,该系统能够执行具有非线性关系的复杂逻辑操作^[9],且具有强大的模式识别、数据运算和拟合、预测的能力^[10]。其预报方法与一般的多因子预报方法比较,具有容错能力强、可靠性高、预报速度快等优点,是目前应用最广泛的神经网络模型之一^[11]。人工神经网络适用于非线性和非稳态系统食品加工过程的仿真和控制^[12]。THERDTHAI等^[13]描述了人工神经网络已经成功应用于食品加工系统的建模,如烘干、烘烤、渗透脱水和高压处理,以及一些食品属性和质量指标的预测。Mohsen等^[14]将人工神经网络应用在马铃薯的干燥动力学中,采用不同隐层神经元、不同传递函数的前馈型神经网络,得到隐含层为20、相关系数为0.99的最优结果。肖兴宁等^[15]建立以初始污染水平、初始污染率、次氯酸钠浓度为输入值,鸡胸肉预冷清洗环节的沙门氏菌污染率为输出值的神经网络模型,得到相关系数 r 值和预测标准误差(standard error of prediction, SEP)值分别为0.93和10.8%,拟合良好。

通过对ANN相关文献的查阅,在鱼类烘干过程中鲜见应用ANN模型对烘干过程中水分和色泽同时预测的研究。本研究以烘烤温度和烘烤时间作为输入值,水分含量、 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 同时作为输出值建立ANN模型,预测烘干后水分含量和色度值,为优化大西洋鲭鱼烘干工艺和提升产品品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大西洋鲭鱼:青岛益和兴食品有限公司,2018年10月22日捕捞并于-35℃储存,2019年9月30日在工厂进行分割、清洗等处理;茶多酚(食品级):河南万邦实业有限公司。

SCC-WE101型万能蒸烤箱:德国Rational公司;UltraScan PRO测色仪:美国HunterLab公司;PH070A型干燥箱:上海一恒科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 鱼片去腥处理

将整片鱼片从冷库中取出,放入水中缓化30 min,将缓化后的样品沥干。采用茶多酚抗氧化法对解冻样品去腥,茶多酚浸泡液浓度为0.3%,在室温(25℃)条件下浸泡90 min。样品与茶多酚溶液的比例为1:3(g/mL)。浸泡后的样品使用纯净水清洗2次,用厨房用纸将鱼片表面的水分吸干备用^[16]。

1.2.2 鱼片干燥

将经过1.2.1方法去腥的鱼片放入多功能热风干燥箱进行烘烤,烘烤条件:烘烤温度100、110、120、130、140、150、160、170、180℃,烘烤时间5、10、15、20、25、30、35、40 min,空气相对湿度20%,空气流动速度16 m/s。

1.2.3 鱼片水分含量测定

水分含量采用GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中第一法直接干燥法进行测定^[17]。

1.2.4 色度值测定

使用测色仪对烘烤鱼片的色度值进行测量, L^* 表示亮度, a^* 表示红色或绿色, b^* 表示蓝色或黄色。使用公式(1)来计算色差(ΔE),用色差来评价鱼片烘烤过程中色度值的变化^[18]。随机选取3个样品进行色度值测试,每个样品测试5个不同部位。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

式中: $\Delta L = L - L_0$, $\Delta a = a - a_0$, $\Delta b = b - b_0$, L_0 、 a_0 、 b_0 和 L 、 a 、 b 分别为新鲜样品和烘烤样品的色度值。

1.2.5 人工神经网络模型

1.2.5.1 人工神经网络模型的结构

本研究主要探讨人工神经网络在烘焙性能预测中的适用性,建立了大西洋鲭鱼烘烤过程中水分含量和色度值变化的ANN模型。在本研究中,ANN模型的输入为烘烤时间和烘烤温度,输出为水分含量、 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 。使用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法对网络进行教学。单隐含层人工神经网络模型结构图见图1。

图1a为ANN结构,图1b所示的是一个3层ANN结构,分别是输入层、隐藏层和输出层。公式(2)~公式(4)表示输入层的输入。

$$H_i^{i1} = [(I_1 \times w_{i1}) + b_{i1}] + [(I_2 \times v_{21}) + b_{21}] + \cdots + [(I_i \times u_{i1}) + b_{i1}] \quad (2)$$

$$H_i^{i2} = [(I_1 \times w_{i2}) + b_{i2}] + [(I_2 \times v_{22}) + b_{22}] + \cdots + [(I_i \times u_{i2}) + b_{i2}] \quad (3)$$

$$H_i^{ij} = [(I_1 \times w_{ij}) + b_{ij}] + [(I_2 \times v_{2j}) + b_{2j}] + \cdots + [(I_i \times u_{ij}) + b_{ij}] \quad (4)$$

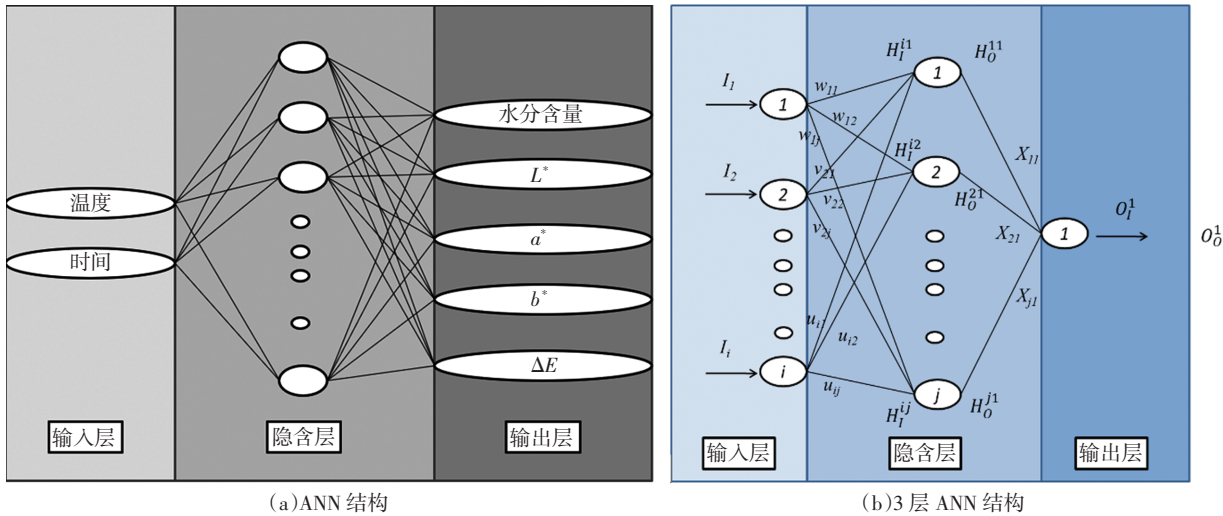


图 1 单隐含层人工神经网络模型结构图

Fig.1 The ANN structure for the single layer network

公式(5)表示隐含层的输出。

$$H_o^1 = f(H_i^j) \quad (5)$$

应用公式(6)计算输入信号到输出层。

$$O_l^1 = [(H_o^1 \times X_{11}) + b_{11}^*] + [(H_o^2 \times X_{21}) + b_{21}^*] + \dots + [(H_o^j \times X_{j1}) + b_{j1}^*] \quad (6)$$

最终的输出可以表示为公式(7)。

$$O_o^1 = f(O_l^1) \quad (7)$$

1.2.5.2 人工神经网络模型的设计

在大西洋鲭鱼烘烤试验中,共进行 72 组试验。随机选取 50 组(70%)为模型训练数据,11 组(15%)为模型检验数据,其余 11 组(15%)为模型验证数据。模型统计参数为确定系数 (R^2) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE),分别使用公式(8)和公式(9)进行计算^[14, 19-20]。 R^2 值越高同时 RMSE 值越低,说明 ANN 模型的性能越好。然后将统计方法的预测结果与试验结果进行比较,来验证模型性能。

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{ANN,i} - P_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{P}_{ANN} - P_{exp,i})^2}} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{ANN,i} - P_{exp,i})^2}{N}} \quad (9)$$

式中: $P_{exp,i}$ 和 $P_{ANN,i}$ 分别为第 i 次试验的试验实际测量值和人工神经网络预测值; $\bar{P}_{ANN}$ 为人工神经网络预测值的平均值; N 为试验共进行的组数。

为了保证数据准确性,将输入数据和输出数据根据公式(10)进行一般权值的归一化处理,使数据全部在[0, 1]之间^[21-22]。

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

式中: x_i 和 $\bar{x}_i$ 分别为数据 i 处理前和处理后的数值; $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为被处理组数据的最大值和最小值。

1.3 数据处理

采用 MARLAB 7.14.0.739, R2012a 软件中的神经网络工具箱对数据进行处理,建立人工神经网络模型。采用 OriginPro 8.5.0 SR1 软件进行数据处理以及绘图。

2 结果与分析

2.1 鱼片烘烤过程中水分含量的变化

在水产品的烘烤处理过程中,温度和时间是影响品质的重要条件因素。烘烤温度和烘烤时间对鱼片水分含量的影响见图 2。

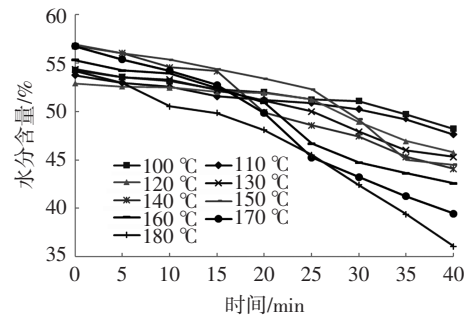


图 2 烘烤温度和烘烤时间对鱼片水分含量的影响

Fig.2 Effect of baking time and temperature on moisture content of fish fillets

由图 2 可知,在烘烤温度一定的情况下,随着烘烤时间的增加,水分含量曲线总体呈下降趋势。温度越高,水分含量下降速度相对就越快^[23]。在 100 °C 和 110 °C 相对低温时,烘烤时间对鱼片水分含量的影响不明显,分析是在较低的烘干温度下,水分子无法获得充足的

动力由中心向鱼体表面迁移,因此鱼片体内仍然保持较高水分含量。升高温度可以加快鱼体表面水分蒸发和中心水分向外迁移速率,使水分含量下降。

在 160 ℃ 烘烤条件下,水分含量曲线下下降速度呈先缓慢后加快再缓慢的趋势。这与李果^[24]研究得到的水分含量等温干燥曲线趋势相同。分析是由于干燥时间在 5 min~20 min 时,散失的水分作为鱼片表面的自由水,而表皮的结合水仍然与肌肉蛋白紧密结合;而在 20 min~30 min 时由于鱼片表面少量结合水与肌肉蛋

白分离散失,肌肉纤维纵向收缩,从而使大量的水分从间隙流出,并快速扩散到空气中,水分含量下降速度加快;在 30 min~40 min 时,鱼片表面自由水和鱼片内自由水均散失,但鱼片内部分结合水与肌肉蛋白不易分散,水分下降趋势缓慢。

2.2 鱼片烘烤过程中色度值的变化

不同烘干温度下 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 值随干燥时间的变化曲线如图 3 所示。

图 3(a)显示 L^* 值随着干燥时间的增加而降低,所

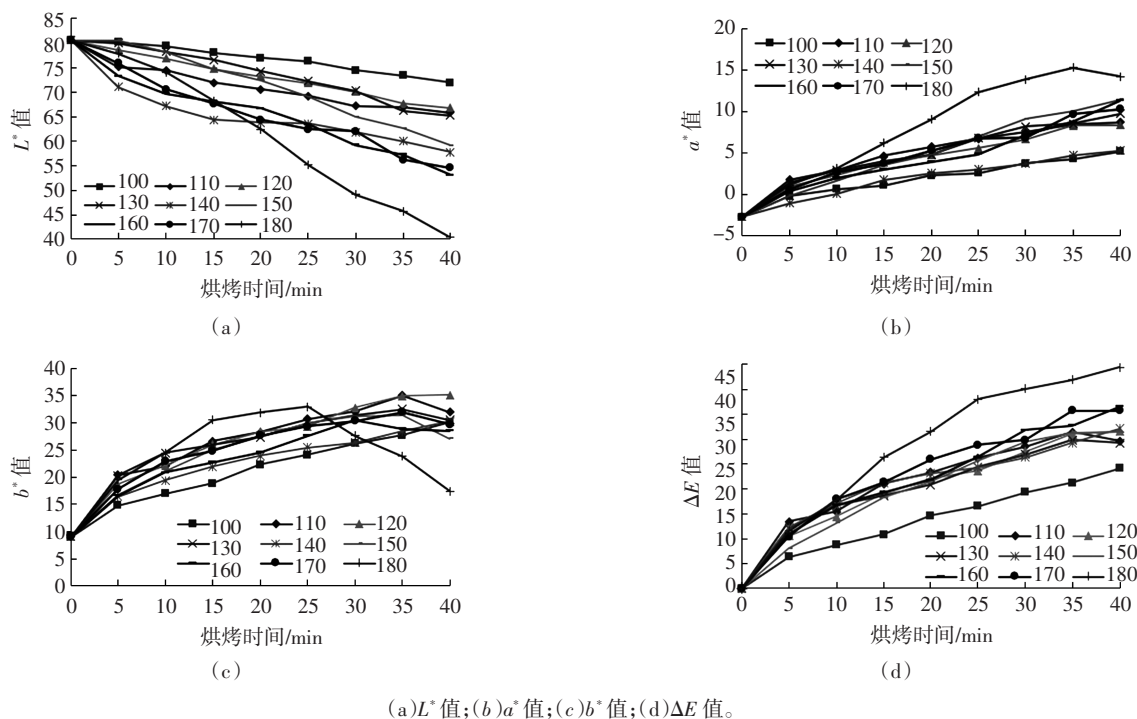


图 3 不同烘烤温度、时间条件下鱼块色度值的变化

Fig.3 Change in chroma value in fish baked at different temperatures for varying times

有大西洋鲭鱼的干燥色度值明显比未干燥样本深。研究表明,干燥样品的亮度降低可以作为褐变的一个指标^[25-26]。随着烘干温度的升高, L^* 值明显降低,特别是在 180 ℃ 时,干燥 40 min 后 L^* 值达到 40.45。这些差异可能是由于在较高的温度加速了美拉德反应导致的^[27-28]。

从图 3(b)可以看出, a^* 值在试验开始时为负值,烘烤 5 min 后, a^* 值为正值并开始增大。随着温度的升高 a^* 值变大,这是由于美拉德反应开始时产生的红褐色色素。但样品在 180 ℃ 下干燥时,干燥时间在 35 min~40 min 时, a^* 值为下降趋势,可能的原因是随着反应的进行,美拉德反应产生了黑素体,所以 a^* 值开始下降。

大西洋鲭鱼干燥 b^* 值的结果如图 3(c)所示,在不同的烘干温度下,随着时间的延长, b^* 值先增大后减小。可以看到,经过干燥的过程,样品逐渐变成金黄色。达到最大值后,样品表面开始变成褐色。

总色差 ΔE 值为亮度、红色、黄色等色度值参数的组合,反映了烘焙过程中食物色度值的变化^[18]。从图 3(d)可以看出, ΔE 值随着干燥过程而增大。 ΔE 值的增加可能主要是由于美拉德反应。

2.3 人工神经网络模型分析

2.3.1 隐含层神经元个数

用于确定隐藏层神经元数量的试验结果见图 4。

在建模过程中,测试了隐藏层中不同神经元的数量,以选择最优的拓扑结构。从图 4 的结果可以看出, RMSE 呈下降趋势,当神经元数量大于 10 时, RMSE 开始小于 0.1。 R_{training}^2 (训练集的 R^2), $R_{\text{validation}}^2$ (验证集的 R^2), R_{test}^2 (测试集的 R^2) 和 R_{all}^2 (所有数据的 R^2) 呈现先升后降的趋势,变化幅度较大。当神经元为 13 时, $R_{\text{validation}}^2$ 为 0.99, 达到最大值, RMSE 为 0.04, 达到最小值。但是 R_{test}^2

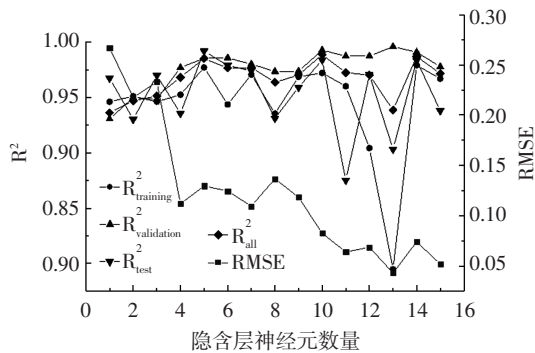


图4 用于确定隐藏层神经元数量的试验结果

Fig.4 Experimental results used to determine the number of hidden layer neurons

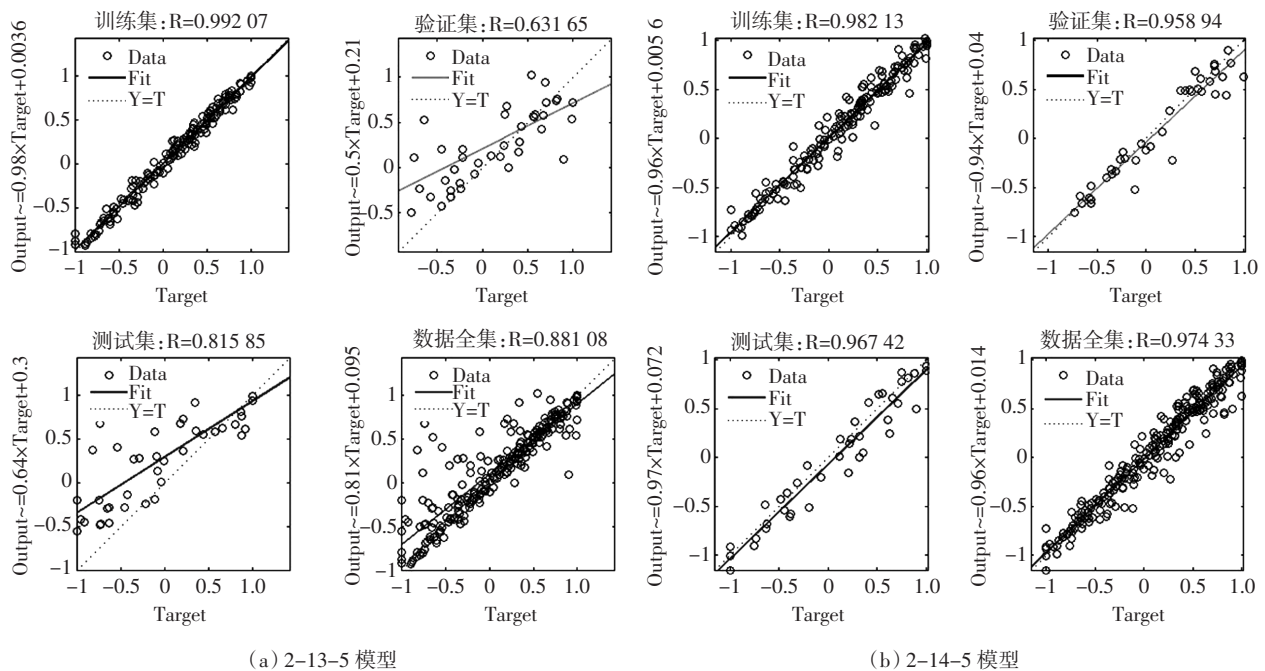


图5 ANN模型在训练、验证和测试过程中的试验值与预测值的比较

Fig.5 Comparison between experimental and predicted values during training, validation, and testing of the ANN model

图5(a)和图5(b)分别代表了两种人工神经网络的模型,图5(a)显示包含13个隐藏神经元的网络,图5(b)显示包含14个隐藏神经元的网络。通过比较两种ANN模型在训练、验证和测试期间的烘烤时间的试验值和预测值,可以更直观地看出,当神经元为13时, R_{training} 拟合度较高,但 R_{test} 和 $R_{\text{validation}}$ 偏差较大。当神经元为14时,个体数据有偏差,但整体拟合程度较高。从另一个方面证明了 R^2 和RMSE可以作为验证指标。

图6为2个输入层神经元、14个隐层神经元和5个输出层神经元的最佳网络拓扑结构,采用tansig传递函数和Levenberg-Marquardt训练算法得到优化结果。

2.3.3 人工神经网络运算中权值与偏差值的确定

针对大西洋鲑鱼品质评估预测的ANN模型拓扑,获得最佳网络的权值和阈值见表1。

和 R_{all} 都很低,尤其是 R_{training}^2 只有0.80,达到了最小值,所以模型无法拟合。当神经元为14时 R_{training}^2 、 $R_{\text{validation}}^2$ 、 R_{test}^2 和均大于0.98,特别是 R_{all}^2 为0.99,达到最大值,RMSE为0.07,可以拟合模型。因此,在建立模型时,如果只考虑 R^2 或RMSE作为评价参数,将会发生过拟合或不拟合。结合这两个参数,可以得到较好的神经网络模型。

2.3.2 人工神经网络性能

ANN模型在训练、验证和测试过程中的试验值与预测值的比较见图5。

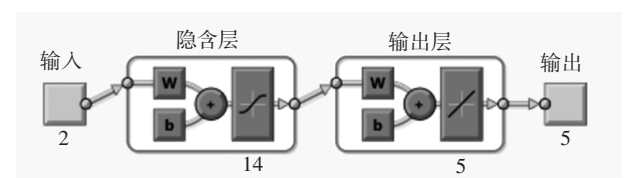


图6 最佳网络拓扑结构图

Fig.6 Optimal network topology diagram

由表1可知,权值和偏差估计模型数据由ANN工具MATLAB R2012a获得。ANN准确预测了大西洋鲑鱼干燥过程的质量评价。选择适合本研究的人工神经网络模型不仅是因为它的准确性,还因为它的通用性,能够预测整个试验范围的行为^[29]。模型参数以及定义的其他参数对于将该模型应用于其他食品的水分含量和色度值变化预测几乎肯定是有用的^[30]。

表1 针对大西洋鲭鱼品质评估预测的 ANN 模型拓扑,获得最佳模型的权值和阈值

Table 1 ANN model topology for Atlantic mackerel's quality evaluation prediction, with weights and bias values obtained for an optimized model

权值(源:输入层到隐藏层)	阈值(源:隐含层内部计算)	权值(源:隐藏层到输出层)	阈值(源:输出层)
$IW^{(1,1)} = \begin{bmatrix} -2.129 & 2 & -1.539 & 0 \\ -4.856 & 5 & 2.316 & 9 \\ 0.551 & 2 & 3.494 & 9 \\ 2.033 & 9 & -4.213 & 2 \\ -1.583 & 6 & -3.149 & 4 \\ -4.400 & 6 & -3.647 & 5 \\ 1.473 & 1 & 0.346 & 2 \\ -3.057 & 5 & 3.050 & 9 \\ 2.024 & 1 & -7.963 & 4 \\ -3.244 & 8 & -0.598 & 6 \\ 3.412 & 2 & 3.194 & 4 \\ -2.827 & 1 & 4.027 & 3 \\ -0.030 & 5 & -4.833 & 6 \\ -1.852 & 3 & 8.379 & 0 \end{bmatrix}$	$b^{(1)} = \begin{bmatrix} 1.988 & 4 \\ 4.093 & 3 \\ -4.777 & 1 \\ -2.758 & 4 \\ 2.360 & 8 \\ 1.233 & 4 \\ -0.995 & 1 \\ -0.242 & 8 \\ 1.290 & 8 \\ -1.510 & 7 \\ 2.864 & 4 \\ -3.913 & 9 \\ -4.464 & 9 \\ -8.411 & 0 \end{bmatrix}$	$LW^{(2,1)} = \begin{bmatrix} -0.033 & 9 & 0.460 & 8 & -0.181 & 0 & 1.056 & 8 & 0.701 & 6 \\ -0.146 & 6 & 0.021 & 3 & -0.227 & 3 & -0.223 & 8 & 0.008 & 6 \\ -0.931 & 9 & -0.613 & 6 & 1.669 & 7 & -1.733 & 7 & 1.087 & 7 \\ -0.021 & 4 & -0.066 & 4 & 0.025 & 7 & 0.104 & 8 & 0.051 & 5 \\ 0.108 & 7 & 0.281 & 7 & -0.226 & 6 & -0.712 & 6 & -0.642 & 9 \\ 0.098 & 8 & 0.174 & 3 & 0.006 & 1 & -0.046 & 7 & -0.025 & 8 \\ -0.561 & 8 & 0.440 & 1 & -0.185 & 1 & 0.203 & 1 & 0.526 & 8 \\ 0.045 & 3 & -0.051 & 3 & -0.204 & 4 & -0.223 & 9 & -0.053 & 7 \\ -0.012 & 7 & -0.088 & 2 & -0.039 & 3 & 0.019 & 5 & 0.039 & 3 \\ 0.104 & 8 & -0.057 & 6 & -0.311 & 4 & -0.347 & 6 & -0.073 & 1 \\ 0.078 & 7 & -0.314 & 1 & -0.181 & 9 & -0.109 & 7 & 0.113 & 4 \\ 0.020 & 7 & 0.117 & 9 & 0.048 & 7 & -0.090 & 9 & -0.160 & 5 \\ 0.072 & 5 & 0.051 & 2 & -0.459 & 0 & -0.631 & 7 & -0.278 & 9 \\ -0.019 & 1 & 0.211 & 8 & -0.008 & 8 & 0.116 & 0 & -0.098 & 1 \end{bmatrix}^T$	$b^{(1)} = \begin{bmatrix} -0.744 & 6 \\ -0.087 & 3 \\ 1.307 & 0 \\ -2.120 & 3 \\ 0.660 & 0 \end{bmatrix}$

3 结论

通过本试验发现干燥过程中烘干温度和时间对大西洋鲭鱼片色度值、水分含量起着重要作用。采用人工神经网络建模对大西洋鲭鱼的水分含量和色度值参数(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE)进行预测,结果表明,人工神经网络方法能够准确地对大西洋鲭鱼在烘烤过程中的品质评价进行建模,优选隐含层神经元个数为14,采用tansig传递函数和Levenberg-Marquardt训练算法得到优化结构。确定网络网格结构为2-14-5,且相关系数大于0.98。所选择的人工神经网络拓扑具有可接受的预测网络输出的能力,且误差较小。

参考文献:

- [1] 孙项丽,郭莹莹,于秀娟,等. 鲭鱼品质评价及品质变化与组胺含量研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(12): 3708-3713.
- [2] Global Production. Atlantic mackerel. (FAO Fisheries and Aquaculture Department, 2017) [EB/OL] [2020-07-01]. http://www.fao.org/figis/servlet/SQServlet?file=/usr/local/tomcat/8.5.16/figis/webapp/figis/temp/hqp_7176865668626841984.xml&outtype=html.
- [3] CROPOTOVA J, MOZURAITYTE R, STANDAL I B, et al. Assessment of lipid oxidation in Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) subjected to different antioxidant and sous-vide cooking treatments by conventional and fluorescence microscopy methods [J]. Food Control, 2019, 104: 1-8.
- [4] 欧阳锐,王志辉,李立鹏,等. 生物保鲜液结合真空包装对鲭鱼保鲜的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 141-144, 170.
- [5] 施源德,蔡碧云,欧阳锐,等. 茶多酚乳化冰对鲭鱼品质的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(9): 53-57.
- [6] 张永杏,唐峰华,郭全友,等. 轻微加工熟制鲈鱼品质特性及腐败菌鉴定[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 207-213.
- [7] 孙瑜嵘,范三红,冯雨薇,等. 加热处理对3种鱼肉水分分布的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(4): 585-588.
- [8] SUN Q, ZHANG M, YANG P Q. Combination of LF-NMR and BP-ANN to monitor water states of typical fruits and vegetables during microwave vacuum drying[J]. LWT, 2019, 116: 108548.
- [9] CHEN G F, WU G F, YILDIZ F. Research on the classification method of different quality dry alfalfa based on scanning electron microscopy (SEM) image texture analysis [J]. Cogent Food & Agriculture, 2019, 5(1): 1697073.
- [10] FAN F H, MA Q, GE J, et al. Prediction of texture characteristics from extrusion food surface images using a computer vision system and artificial neural networks[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(4): 426-433.
- [11] ASSIDJO E, YAO B, KISSELMINA K, et al. Modeling of an industrial drying process by artificial neural networks [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2008, 25(3): 515-522.
- [12] KONDAKCI T, ZHOU W B. Recent applications of advanced control techniques in food industry [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(3): 522-542.
- [13] THERDTHAI N, ZHOU W B. Hybrid neural modeling of the electrical conductivity property of recombined milk[J]. International Journal of Food Properties, 2002, 5(1): 49-61.
- [14] MOHSEN A, TORSHIZI M V, AGHILI H, et al. Application of artificial neural network (ANN) in drying kinetics analysis for potato cubess [J]. Carpathian Journal of Food Science and Technology, 2018, 10(2): 96-106.
- [15] 肖兴宁,杨力,张建民,等. 人工神经网络在鸡胸肉预冷清洗环节

- 中沙门氏菌污染率的预测[J/OL].食品工业科技:1-8[2020-04-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200327.1014.004.html>.
- [16] 徐永霞,姜程程,刘滢,等.带鱼脱腥工艺及脱腥前后的理化性质[J].食品与发酵工业,2013,39(12):68-72.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016 [S].北京:中国标准出版社,2017.
- [18] NADIAN M H, RAFIEE S, AGHBASHLO M, et al. Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying [J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 263-274.
- [19] ÖZDEMİR M B, AKTAŞ M, ŞEVIK S, et al. Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(28): 18005-18013.
- [20] MAHJOORIAN A, MOKHTARIAN M, FAYYAZ N, et al. Modeling of drying kiwi slices and its sensory evaluation[J]. Food Science & Nutrition, 2017, 5(3): 466-473.
- [21] PEZO L L, ŠUPUT D Z, LEVIĆ L B, et al. Effects of temperature and immersion time on rehydration of osmotically treated pork meat [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2014, 53(3):260-270.
- [22] TATAR F, CENGİZ A, KAHYAĞLU T. Effect of hemicellulose as a coating material on water sorption thermodynamics of the microencapsulated fish oil and artificial neural network (ANN) modeling of isotherms[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(10): 2793-2802.
- [23] 陈迪丰.带鱼联合干燥技术优化及货架期预测[D].舟山:浙江海洋大学,2018.
- [24] 李果.两种经济鱼类即食食品的制备工艺研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
- [25] DEMIRHAN E, ÖZBEK B. Color change kinetics of microwave-dried basil[J]. Drying Technology, 2009, 27(1): 156-166.
- [26] BAI J W, XIAO H W, MA H L, et al. Artificial neural network modeling of drying kinetics and color changes of *Ginkgo biloba* seeds during microwave drying process [J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1-8.
- [27] DADALI G, DEMIRHAN E, ÖZBEK B. Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying[J]. Drying Technology, 2007, 25(10): 1713-1723.
- [28] ELÇİNEL Demirhan, BELMA Özbek. Color change kinetics of tea leaves during microwave drying [J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(2):255-263.
- [29] SARİMESELI A, COSKUN M A, YUCEER M. Modeling microwave drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris* L.) leaves using ANN methodology and dried product quality [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(1): 558-564.
- [30] AYON Tarafdar, NAVIN Chandra Shahi, ANUPAMA Singh. Artificial neural network modeling of water activity: a low energy approach to freeze drying[J]. Food and Bioprocess Technology. 2018, 11(1):164-171.

加工编辑:冯娜

收稿日期:2020-07-17