

基于MFO优化BP神经网络构建冷鲜肉品质预测模型

王 丽, 闫子康, 杜 金, 王远亮

Establishment of a Predictive Model for the Quality Assessment of Chilled Meat Using a Moth-Flame Optimization BP Neural Network

WANG Li, YAN Zikang, DU Jin, and WANG Yuanliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120367>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于BP神经网络的UHT纯牛奶包装货架期预测

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

食品工业科技. 2024, 45(4): 205-210 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020107>

基于人工神经网络耦合遗传算法(BP-GA)优化茶氨酸-葡萄糖美拉德反应的条件

Optimization of Theanine-Glucose Maillard Reaction Conditions Based on Artificial Neural Network Coupled Genetic Algorithm (BP-GA)

食品工业科技. 2023, 44(24): 183-192 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020165>

基于电子鼻和BP神经网络对‘黑珍珠’鲜食玉米产地的区分和识别

Distinction and Recognition of the 'Black Pearl' Fresh Corn Origin Based on Electronic Nose and BP Neural Network

食品工业科技. 2024, 45(13): 239-245 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070135>

基于人工神经网络耦合遗传算法(BP-GA)优化干酪乳杆菌LTL1361冻干保护剂配方

Optimization of Lyophilized Protective Agent Formulation of *Lactobacillus casei* LTL1361 Based on Artificial Neural Network Coupled Genetic Algorithm (BP-GA)

食品工业科技. 2022, 43(21): 175-184 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022010143>

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

Application of Artificial Neural Network in Prediction of *Salmonella* Incidence in Chicken Breast Chilling Process

食品工业科技. 2020, 41(18): 212-217 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.034>

响应面和粒子群-人工神经网络模型优化微波辅助提取赤芍总苷工艺

Response Surface and Particle Swarm-Artificial Neural Network Model Optimize the Microwave-assisted Extraction of Paeoniflorin

食品工业科技. 2023, 44(15): 248-257 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110133>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王丽, 闫子康, 杜金, 等. 基于 MFO 优化 BP 神经网络构建冷鲜肉品质预测模型 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 310–321. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120367

WANG Li, YAN Zikang, DU Jin, et al. Establishment of a Predictive Model for the Quality Assessment of Chilled Meat Using a Moth-Flame Optimization BP Neural Network[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 310–321. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120367

· 贮运保鲜 ·

基于 MFO 优化 BP 神经网络构建冷鲜肉品质预测模型

王 丽, 闫子康, 杜 金, 王远亮*

(湖南农业大学食品科学与技术学院, 湖南长沙 410128)

摘 要: 为能准确预测冷鲜肉在贮藏中品质的变化规律及质量安全, 本文探究贮藏温度 (0、4 和 25 °C) 对冷鲜肉菌落总数、TVB-N、pH、水分含量、色度和生物胺含量的影响, 确定冷鲜肉的特征品质指标。基于反向传播 (Backpropagation, BP) 神经网络和飞蛾火焰优化 (Moth-Flame Optimization, MFO) BP 神经网络, 利用特征指标作为训练数据, 构建不同贮藏温度下冷鲜肉的品质预测模型, 快速准确评价和预测食品的质量安全。结果表明, 不同贮藏温度下冷鲜肉的菌落总数、pH、TVB-N、色泽和生物胺含量随着贮藏时间的延长均呈上升趋势 ($P<0.05$), 且各指标在不同贮藏温度下的变化规律不一致, 温度越高, 腐败变质的速度越快。通过相关性分析得出菌落总数和 TVB-N 为冷鲜肉品质特征指标, 以特征指标为训练数据构建 BP 神经网络和 MFO 优化 BP 神经网络模型。结果显示, MFO 优化 BP 神经网络优于单一的 BP 神经网络模型, 指标菌落总数和 TVB-N 通过 BP 神经网络模型训练后的 R 值分别为 0.95018、0.94283, 通过 MFO 算法优化训练后的 R 值分别为 0.97538、0.98001, 更接近于 1, 且优化后的 RMSE、MSE 和 MAE 值相对较小, 其模型拟合度更好, 在整个贮藏期的预测性能更好, 准确率更高。因此, MFO 优化 BP 神经网络可用于预测冷鲜肉在贮藏过程中品质的变化规律。

关键词: 冷鲜肉, 松鼠葡萄球菌, 预测模型, 反向传播 (BP) 神经网络, 飞蛾火焰优化 (MFO)

BP 神经网络

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)21-0310-12

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120367



Establishment of a Predictive Model for the Quality Assessment of Chilled Meat Using a Moth-Flame Optimization BP Neural Network

WANG Li, YAN Zikang, DU Jin, WANG Yuanliang*

(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: To quickly and accurately evaluate and predict the quality and safety of food products, in this study, storage temperatures (0, 4 and 25 °C) were used to investigate the effects on the total number of colonies, TVB-N, pH, moisture content, color, and biogenic amine content of chilled meat. It aimed to accurately predict the pattern of change in the quality of chilled meat in storage, as well as its quality and safety, and determined the characteristic quality indexes of chilled meat. Based on Backpropagation (BP) neural network and Moth-Flame Optimization (MFO) BP neural network, the quality prediction model of chilled meat under different storage temperatures was constructed using characteristic indexes as the training data to quickly and accurately evaluate and predict the quality and safety of food. The results showed that the total number of colonies, pH, TVB-N, color and biogenic amine content of chilled meat under different storage temperatures showed an increasing trend with the extension of storage time ($P<0.05$), and the pattern of change of each index under

收稿日期: 2023-12-31

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2022NK2035); 2022 湖南省农业产业技术体系项目 (湘农发 2022-67); 湘沙猪配套系持续选育及健康养殖技术研究项目 (2022NK2027)。

作者简介: 王丽 (1998-), 女, 硕士, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 15285223720@163.com。

* 通信作者: 王远亮 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: wangyuanliang@hunau.edu.cn。

different storage temperatures was inconsistent, and the higher the temperature, the faster the rate of corruption and deterioration. Based on the results of this part of the experiment, the total number of colonies and TVB-N as feature indicators were used as training data by the Backpropagation (BP) neural network and Moth-Flame Optimization (MFO) BP neural network to construct a quality prediction model for chilled meat under different storage temperatures. The findings demonstrated that the MFO-optimized BP neural network outperforms the standalone BP neural network model. Specifically, the R -values for the colony count and TVB-N indicators achieved through training with the BP neural network model were 0.95018 and 0.94283, respectively. In contrast, the R -values obtained through the optimized MFO algorithm reached 0.97538 and 0.98001, respectively, which closely approached 1. Furthermore, the optimized values of RMSE, MSE, and MAE indicated smaller discrepancies, indicating a better fit of the model. Consequently, the MFO-optimized BP neural network exhibited superior prediction performance throughout the entire storage duration, showcasing heightened accuracy. Hence, this model can effectively forecast the patterns of change in chilled meat quality during storage.

Key words: chilled meat; *Staphylococcus sciuri*; prediction model; BP neural network; Moth-Flame optimization BP neural network

冷鲜肉肉质嫩、味鲜美且富含人体所需的营养物质,深受消费者喜爱。在贮藏过程中,由于微生物的繁殖和内源酶的作用,肉中的蛋白质和脂肪会氧化降解,使肉嫩度下降、色泽暗淡、产生异味和酸败等现象,导致肉类变质而引发食品安全问题^[1-2]。因此,为了确保食品的安全和质量,食品行业需要预测其在贮藏过程中的品质变化,通过数学模型可以快速准确评价和预测食品的质量和安全性^[3-5]。

对于传统的预测微生物学模型,通常采用经验数学回归的方法描述微生物的生长失活行为以及环境条件与致病菌特定行为之间的定量关系。传统模型得到的预测结果多为确定性的点估计,但由于可变性的存在,病原体的实际行为通常是一个特定的范围,而不是一个单一确定值,这使得在复杂环境中很难准确预测^[6]。反向传播(Backpropagation, BP)神经网络是由大量神经元作为基本处理单元组成,每个神经元通过接收来自其他 n 个神经元的信号来模拟神经冲突过程,这些信号通过加权连接传输,将接收到的总输入值与神经元的阈值进行比较,然后通过激活函数对输出信号进行处理。对于输入信号,必须传播到隐藏节点,隐藏节点的输出信息通过激活函数传播到输出节点,最后得到输出结果^[7]。BP 神经网络作为一种新的食品质量预测模型,具有自适应学习能力、大规模并行处理、适应性强、容错性高以及较强的处理性能,包括优化、模拟和控制等优点,是预测微生物学中一种新型的方式^[8],但 BP 神经网络是随机初始权值和阈值的。而基于飞蛾火焰优化(Moth-Flame Optimization, MFO)BP 神经网络作为一种新型群智能优化算法,算法并行优化能力强,总体特性好,具有收敛速度快、结构简单等优点,能够广泛探索搜索空间,还可以通过找到神经网络最佳的权值和阈值^[9],是一种比较理想的预测模型, MFO 优化 BP 神经网络流程如图 1 所示。目前, BP 神经网络已广泛应用于食品种类和质量的分类、元素含量检测和风险管理等方面^[10-11],且大量研究只采取单一

BP 神经网络进行比较的研究较少。因此,通过比较 BP 神经网络和 MFO 优化 BP 神经网络对冷鲜肉品质预测中的准确性,并选择合适的模型进行应用,对产品具有重要价值^[14-16]。

基于上述背景,本研究通过对冷鲜肉进行表面灭菌再接种松鼠葡萄球菌,探究贮藏温度对冷鲜肉品质的影响。根据数据相关性分析,选择关键指标利用 BP 神经网络和 MFO 优化 BP 神经网络来构建冷鲜肉贮藏期间品质的预测模型,并验证该模型的有效性,为快速准确地预测冷鲜肉在贮藏过程中的品质提供方法和支持,从而对肉类的品质安全进行评价和预测。

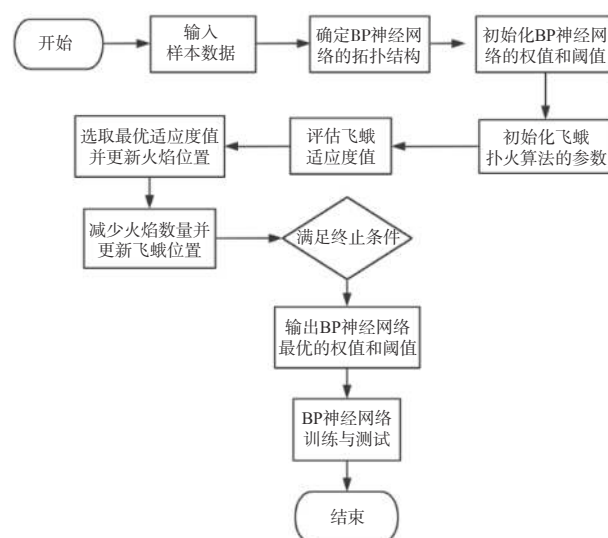


图 1 MFO 优化 BP 神经网络流程图

Fig.1 Flowchart of BP neural network for MFO optimisation

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜里脊猪肉 湖南省长沙市步步高超市; 松鼠葡萄球菌 从冷鲜肉中分离筛选; 乙腈 色谱纯, 美国天地试剂公司; 8 种生物胺标准品 CATO 佳途科技股份有限公司; LB 培养基 青岛海博生物技术有限公司; 氯化钠、硼酸、氢氧化铵、三氯乙酸、盐

酸、甲基红、亚甲基蓝、丙酮、氧化镁、氢氧化钠、高氯酸、碳酸氢钠、乙丹磺酰 分析纯, 上海国药集团化学试剂有限公司。

ZYS-50B 智能水分含量测定仪 湘仪天平仪器设备有限公司; NR200 色差仪 深圳市三恩时科技有限公司; PHS-3E pH 计 上海仪电科学仪器股份有限公司; Agilent 1260 InfinityII 高效液相色谱仪 安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌悬液的制备 将样品进行梯度稀释, 选取适宜的浓度涂布于 MSA(甘露醇琼脂培养基), 37 ℃ 培养 48 h, 之后根据形态差异挑选不同的单菌落于选择性培养基上进行纯化。再用细菌基因组 DNA 提取试剂盒提取菌株的 DNA, 以 16S rDNA 为模板进行 PCR 扩增, 再将 PCR 产物送测序公司进行测序, 并将结果与美国国家生物技术信息中心(NCBI) 菌种信息进行 BLAST 分析, 完成菌种鉴定。综合分析分离与鉴定的菌株, 松鼠葡萄球菌对冷却肉的食用品质或安全影响较大, 因此, 本试验选择机会性食源性病原微生物松鼠葡萄球菌作为研究对象。

将纯化的松鼠葡萄球菌在 LB 培养基斜面上进行平板划线, 于 37 ℃ 培养 48 h。挑取单个菌落接种于 50 mL 的 LB 液体培养基中培养 8 h 左右, 再吸取 0.5 mL 于 100 mL LB 液体培养基中扩大培养, 使菌液浓度达到 10^6 CFU/mL 时, 取 10 mL 菌液以 5000 r/min 的速度离心 15 min, 弃去上清液, 将菌体沉淀经 500 mL 无菌生理盐水将细菌沉淀物稀释成菌悬液, 用于接种无菌肉, 使肉初始接种量达到 3~3.5 lg(CFU/g)。

1.2.2 样品制备 将新鲜里脊猪肉分割成 100 g 左右, 悬浮于无菌水中 1 min, 沥干水分并用 75% 酒精棉将肉表面进行擦拭, 再用紫外灭菌照射 10 min, 随后将整块肉浸入菌悬液中 30 s 接种, 之后将样品进行无菌托盘包装, 以未接种松鼠葡萄球菌的新鲜里脊无菌猪肉为对照组, 分别置于 0、4 和 25 ℃ 环境中进行贮藏, 每隔 48 h 进行一次取样测定, 共贮藏 18 d, 检测指标为菌落总数、挥发性盐基氮(TVB-N)、pH、水分含量、色度、生物胺。

1.2.3 菌落总数的测定 按照 GB 4789.2-2022《食品微生物学检验菌落总数测定》执行。

1.2.4 挥发性盐基氮(TVB-N)的测定 按照 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》执行。

1.2.5 pH 的测定 按照 GB 5009.237-2016《食品 pH 值的测定》执行。

1.2.6 水分含量的测定 按照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》执行。

1.2.7 色度的测定 根据文献 [17], 使用色差仪测定其色差值 L^* 、 a^* 和 b^* , 每次测量前用白板对色差计进行校正。

1.2.8 生物胺的测定 根据文献 [18], 标准曲线的制作: 称取生物胺标准品各 50 mg, 用 0.4 mol/L 高氯酸为溶剂定容至 50 mL, 分别稀释为 1、0.5、0.4、0.25、0.125、0.1 mg/mL 标准混合液。分别取 1 mL 标准混合液于 5 mL 容量瓶中, 加入 2 mol/L 的 NaOH 溶液 200 μ L、饱和 NaHCO_3 溶液 300 μ L、含 10 mg/mL 丙酮的 DNS-Cl 溶液 2 mL, 40 ℃ 水浴衍生 45 min, 之后加入 100 μ L 氨水, 最后用乙腈定容。在上机检测之前过 0.22 μ m 有机滤膜。高效液相色谱条件: 色谱柱: SHIMADZU C₁₈-AQ; 流动相 A: 水; 流动相 B: 乙腈; 进样量 20 μ L; 流速 0.9 mL/min; 柱温 35 ℃; 紫外检测波长 254 nm。梯度洗脱程序如表 1 所示。

表 1 HPLC 测定生物胺梯度洗脱程序
Table 1 Determination of biogenic amines gradient elution procedure by HPLC

时间(min)	A(%)	B(%)
0	35	65
5	25	75
20	0	100
24	0	100
25	35	65
30	35	65

1.2.9 BP 神经网络及算法优化 MFO-BP 神经网络模型的建立 利用 MATLAB 对 BP 神经网络及 MFO 算法优化 BP 神经网络进行训练建模。为了提高 BP 神经网络的预测精度, 在输入层和输出层分别采用 tansig 和 purelin 函数作为激活函数^[10]。BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型的建立包含两个输入层(贮藏温度和贮藏时间)和两个输出层(菌落总数和 TVB-N 含量), 通过经验方程和试错法^[19], 确定隐藏层神经元的个数为 12, 模拟冷鲜肉在不同贮藏温度下的品质变化。为了减少输入样本数据的范围变化, 提高模型的稳定性和准确性, 数据在通过输入层前应通过 mapminmax 函数进行归一化, 之后使用统计方法来评估 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络的预测性能。

1.3 数据处理

使用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析, 用 Origin2021 软件绘图, 并使用 MATLAB 软件建立 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型。数据为 3 次重复试验的平均值, 以平均数 $\pm$ 标准差表示, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 贮藏温度对冷鲜肉菌落总数的影响

菌落总数是评价肉品质量的重要指标, 当菌落总数 >6 lg(CFU/g)时, 即肉超过二级鲜度, 达到了腐败标准^[20]。如图 2 所示, 在贮藏过程中, 菌落总数随着时间延长呈上升趋势, 接种微生物样品在贮藏温度为 25 ℃ 时, 菌落总数在贮藏第 2 d 达到 7.45 lg(CFU/g),

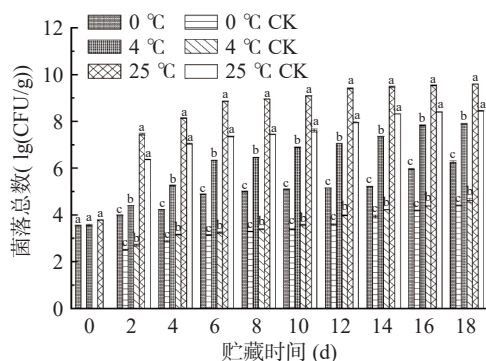


图 2 贮藏温度对冷鲜肉菌落总数的影响

Fig.2 Effect of storage temperature on colony count of chilled meat

注: 小写字母不同表示同一贮藏时间下同组间数值存在显著性差异($P<0.05$); 图 3~图 6、图 8、图 10 同。

即肉已超过二级鲜度。4 °C 组则在贮藏第 6 d 超过 6 lg(CFU/g)。而 0 °C 组直到第 18 d 才达到腐败标准, 为 6.25 lg(CFU/g)。当贮藏结束时, 接种微生物样品在 0、4 和 25 °C 各组冷鲜肉菌落总数分别达到了 6.25、7.89、9.60 lg(CFU/g), 其对照组分别为 4.40、4.63、8.45 lg(CFU/g), 不同贮藏温度下冷鲜肉中菌落总数的变化具有显著性差异($P<0.05$), 与对照相比, 接种微生物冷鲜肉中的菌落总数含量相对较高。贮藏温度越高, 菌落总数增殖越快, 这与林建城等^[21]、靳玉龙等^[22]研究一致。

2.2 贮藏温度对冷鲜肉挥发性盐基氮含量的影响

挥发性盐基氮(TVB-N)为肉中蛋白质在内源酶和微生物的作用下分解产生的氨、二甲胺、三甲胺等含氮挥发性物质的总和, 是判定鲜肉新鲜度的重要指标。通过查找国标和文献可知, 当 TVB-N 值超过 15 mg/100 g 时为变质肉^[20]。如图 3 所示, 冷鲜肉在贮藏过程中的 TVB-N 值随时间的延长呈上升趋势。接种微生物样品在贮藏温度为 25 °C 时冷鲜肉于第 2 d 达到 18.48 mg/100 g, 已为变质肉, 而对照组在第 4 d 才超过 15 mg/100 g。接种微生物样品在 4、0 °C 组冷鲜肉 TVB-N 值分别在第 6 d 和第 12 d 达到变质肉标准, 且 4、0 °C 对照组分别在第 10 d、第 14 d 才达到腐败标准。由此可得, 不同贮藏

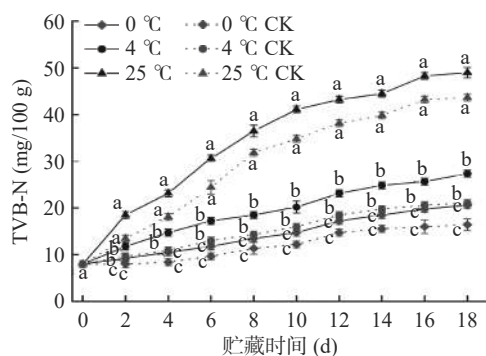


图 3 贮藏温度对冷鲜肉 TVB-N 含量的影响

Fig.3 Effect of storage temperature on TVB-N content of chilled meat

温度下冷鲜肉中 TVB-N 的含量具有显著性差异, 且温度越高, 酶和微生物的作用强度越大, 蛋白质降解速度就越快, 从而产生更多的碱性含氮物质, 导致 TVB-N 值增加^[23-24]。

2.3 贮藏温度对冷鲜肉 pH 的影响

pH 也是评价肉质的一个重要指标, 冷鲜肉的一级鲜度 pH 为 5.8~6.2, 二级鲜度 pH 为 6.3~6.6, 而变质肉的 pH 则达到 6.7 以上^[20]。如图 4 所示, pH 随时间延长呈先下降后上升的趋势。贮藏结束时, 接种微生物样品 25 °C 组的 pH 为 6.87, 已达到腐败, 而对照组的为 6.61, 肉达到二级鲜度; 接种微生物样品 4 °C 组的 pH 为 6.25, 仍保持在一级鲜度与二级鲜度之间, 而对照组的为 6.08, 保持在一级鲜度; 接种微生物样品 0 °C 组的 pH 均保持在一级鲜度。其主要原因是, 动物屠宰后, 由于氧气不足, 肌糖原在糖酵解酶的作用下进行无氧呼吸, 产生乳酸、丙酮酸等, 使 pH 降低^[25]; 在贮藏后期, 由于肌肉纤维中的蛋白质水解降解, 肉中的蛋白质、氨基酸及其他含氮化合物被内源酶和微生物分解, 产生碱性物质, 导致 pH 升高^[26-27], 且不同贮藏温度条件下冷鲜肉的 pH 具有显著性差异($P<0.05$), 温度越高, 对冷鲜肉的 pH 影响越大。

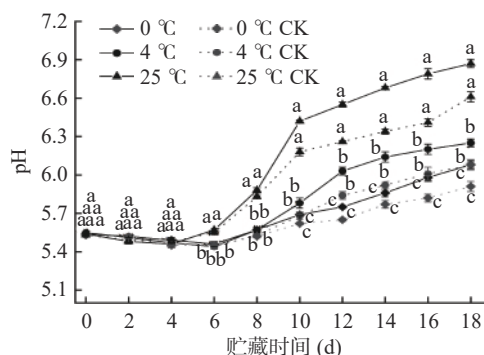


图 4 贮藏温度对冷鲜肉 pH 的影响

Fig.4 Effect of storage temperature on pH of chilled meat

2.4 贮藏温度对冷鲜肉水分含量的影响

肉的水分含量与肉的新鲜度之间存在一定的关系, 按 GB18394-2020 规定新鲜肉水分含量应≤77%。如图 5 所示, 冷鲜肉水分含量随贮藏时间延长整体都在 71%~74% 之间变化, 无显著差异($P>0.05$)。但由于肉品自身性质及微生物作用会影响肉样的最终水分含量^[28], 因此, 基于水分含量判断肉类新鲜度的方法仍有待探索。

2.5 贮藏温度对冷鲜肉色泽的影响

色泽也是表示肉新鲜度的重要指标^[29-30]。由图 6 可得, 冷鲜肉的 L^* 随时间延长逐渐增加。其中, 4、0 °C 条件下 L^* 变化趋势比较缓慢, 而 25 °C 条件下肉样的 L^* 值上升最快, 但在不同贮藏温度下冷鲜肉中色泽的变化具有显著性差异($P<0.05$)。在贮藏 18 d 的过程中, 第 18 d 时 L^* 值达到最大值。 L^* 增加是受蛋白溶解、汁液流失的影响, 使冷鲜肉颜色逐渐

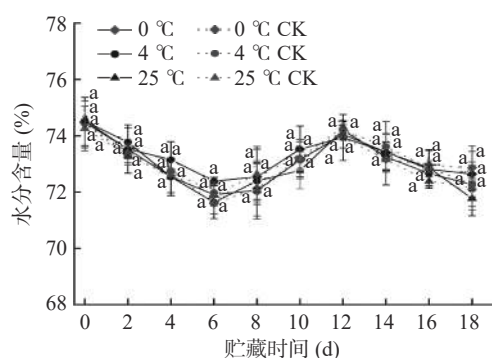


图5 贮藏温度对冷鲜肉水分含量的影响

Fig.5 Effect of storage temperature on moisture content of chilled meat

变浅^[31]。 a^* 值和 L^* 值的变化趋势一致,在25 °C贮藏条件下, a^* 值上升较快。 a^* 增加是贮藏初期,新鲜肉表面逐渐渗透一部分氧气,肉中肌红蛋白血红素会形成氧合肌红蛋白,且贮藏过程较短,才使肉呈鲜红色。 b^* 值和pH变化趋势一致,也许是由于pH的变化引起蛋白质结构改变所致,蛋白质发生氧化会导致色素的结构改变和颜色褪色,还会与食品中的金属离子形成螯合物,促进金属离子催化引发的色素氧化反应,加速食品色泽的劣变。还可能是肌红蛋白中的亚铁离子(Fe^{2+})氧化成高铁离子(Fe^{3+})^[32-33]。在贮藏后期,样品表面逐渐变黄,并产生大量粘液,这与 b^* 值的增加是一致的,且温度越高,变化越明显。

2.6 贮藏温度对冷鲜肉生物胺含量的影响

生物胺是一种碱性有机含氮化合物,主要由微生物氨基酸脱羧酶作用于氨基酸脱羧而生成^[34]。其生物胺含量的变化可反映冷鲜肉的腐败过程,当生物胺达到较高水平时,会产生毒性作用^[35-36]。

2.6.1 生物胺标准曲线的绘制 生物胺混合标准品的HPLC色谱图如图7所示,在30 min内分离出8种生物胺标准品,并能确定其保留时间,表明该方法可以有效地分离和检测生物胺。线性回归方程和决定系数见表2。

2.6.2 生物胺含量(尸胺、腐胺、精胺)的变化 由图8

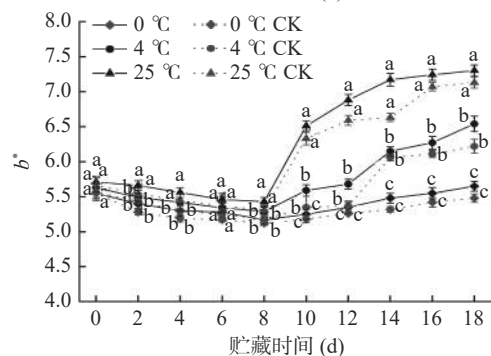
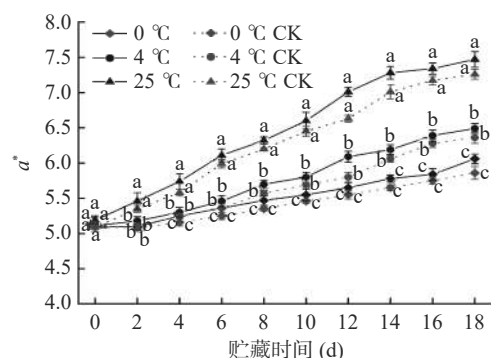
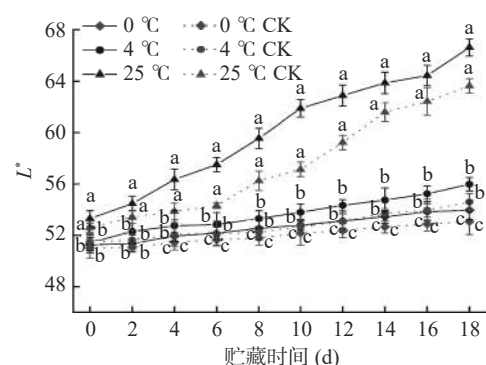


图6 贮藏温度对冷鲜肉色泽的影响

Fig.6 Effect of storage temperature on color of chilled meat

可知,在贮藏过程中,样品中尸胺含量的变化随着时间的延长而显著增加。不同贮藏温度下冷鲜肉中尸胺含量变化具有一定差异。在贮藏前期温度为0 °C时,检测不到尸胺,4 °C和25 °C条件下,冷鲜肉尸胺含量逐渐增加。贮藏结束时,接种微生物样品中尸胺

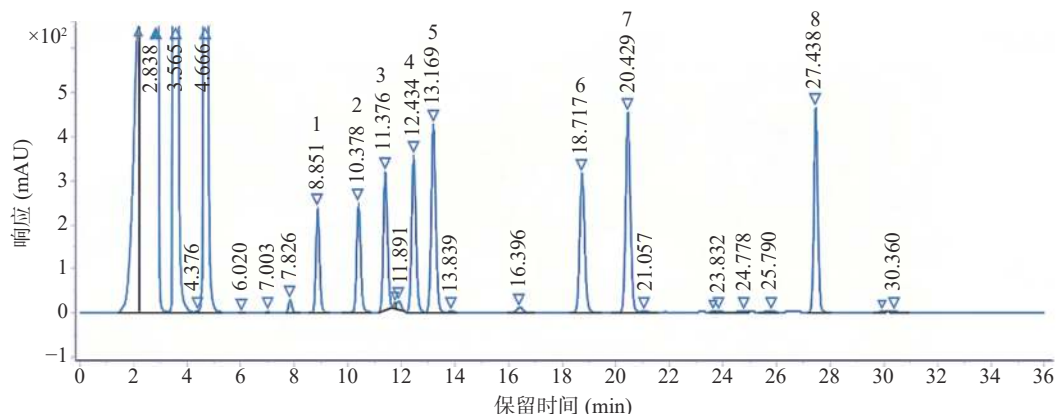


图7 生物胺混合标准品的HPLC色谱图

Fig.7 HPLC chromatogram of biogenic amines mixed standards

注:1-色胺;2-苯乙胺;3-腐胺;4-尸胺;5-组胺;6-酪胺;7-亚精胺;8-精胺。

表 2 生物胺的回归方程和决定系数

Table 2 Regression equations and determination coefficients for biogenic amines			
生物胺	出峰时间(min)	回归方程	R^2
色胺	8.85	$y=22.697x-19.516$	0.9999
苯乙胺	10.38	$y=24.910x+11.043$	0.9998
腐胺	11.38	$y=34.063x+103.03$	0.9998
尸胺	12.43	$y=40.219x+10.992$	0.9998
组胺	13.17	$y=50.132x-17.824$	0.9999
酪胺	18.72	$y=40.476x+6.2351$	0.9998
亚精胺	20.43	$y=56.017x-17.544$	0.9999
精胺	27.44	$y=45.121x+6.3264$	0.9999

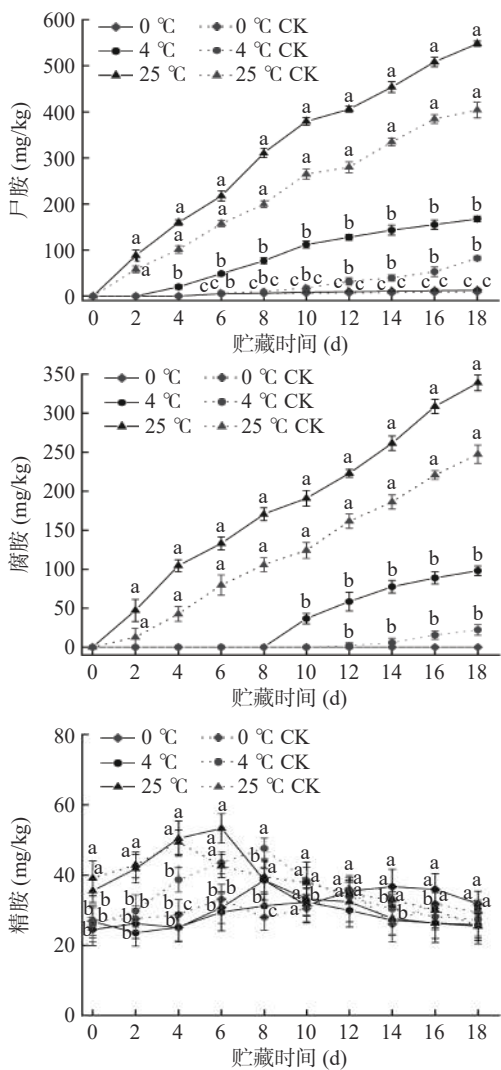


图 8 贮藏温度对冷鲜肉尸胺、腐胺、精胺含量的影响

Fig.8 Effect of storage temperature on the content of cadaverine, putrescine and spermine in chilled meat

含量在 0、4 和 25 °C 条件下分别达到 12.96、167.72、547.90 mg/kg, 不同贮藏温度下尸胺含量显著增加 ($P<0.05$)。腐胺含量的变化与尸胺含量变化趋势一致, 随时间的延长呈上升趋势。接种微生物样品在贮藏温度为 25 °C 时, 腐胺的含量第 2 d 达到 47.14 mg/kg, 而温度为 4 °C 时, 则第 10 d 才检测到腐胺, 为 36.75 mg/kg。当贮藏结束时, 接种微生物样品腐胺含量在 4、25 °C 条件下分别达到 98.20、338.95 mg/kg,

具有显著性差异 ($P<0.05$)。温度为 0 °C 时, 由于贮藏温度较低未检测到腐胺。与对照相比, 接种微生物样品中腐胺含量相对较高。精胺含量随着贮藏天数增加呈先增高后降低的变化趋势, 整体都在 20~60 mg/kg 之间变化。研究表明精胺是新鲜肉中天然存在的生物胺, 与肉品的腐败变质无关^[37], 且不同贮藏温度下样品之间差异不显著 ($P>0.05$), 与杨春婷等^[34] 研究相似。因此, 精胺不能作为评价冷鲜肉新鲜度的指标。

2.6.3 生物胺含量(色胺、组胺、酪胺)的变化 腐胺、尸胺和酪胺是肉中腐败特征性生物胺, 因此这三种胺常被用作评价肉类新鲜度的指标^[38]。由图 9 可知, 当贮藏温度为 25 °C 时, 样品中色胺、组胺和酪胺含量随时间延长呈逐渐上升趋势。当贮藏结束时, 接种微生物样品中色胺、组胺和酪胺含量分别为 73.58、88.20、158.45 mg/kg, 而对照组的含量分别为 56.36、74.40、133.07 mg/kg, 与对照相比, 接种微生物样品中色胺、组胺和酪胺的含量显著增加 ($P<0.05$)。通过对 8 种生物胺含量的检测发现, 当贮藏温度为 0 °C 时, 只检测到尸胺和精胺的含量; 温度为 4 °C 时, 只检测到尸胺、腐胺和精胺的含量; 而温度为 25 °C 时, 检测到了尸胺、腐胺、精胺、色胺、组胺和酪胺的含量, 说明贮藏温度越低, 越不容易产生生物胺, 温度越高, 冷鲜猪中生物胺的含量越高。

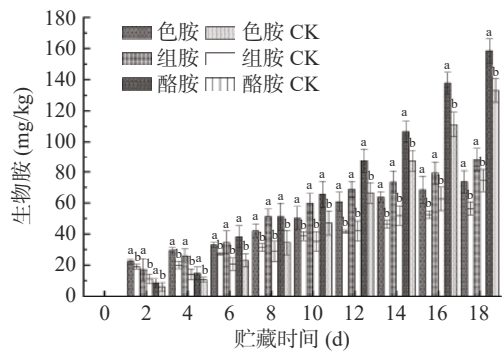


图 9 贮藏温度为 25 °C 条件下冷鲜肉色胺、组胺、酪胺含量的变化

Fig.9 Changes in tryptamine, histamine and tyramine contents of chilled meat at storage temperature of 25 °C
注: 小写字母不同表示 25 °C 条件下, 同一贮藏时间接种组与对照组数值存在显著性差异 ($P<0.05$)。

2.6.4 生物胺含量总量的变化 食品中的生物胺总量超过 1000 mg/kg 会对人体造成损害^[39]。由图 10 可知, 不同贮藏温度下冷鲜肉中生物胺总量的变化具有显著性差异, 当贮藏温度为 25 °C 时, 微生物接种的冷鲜肉在贮藏第 16 d 的生物胺总量超过 1000 mg/kg, 其余在贮藏 18 d 内均低于 1000 mg/kg。与对照相比, 接种微生物冷鲜肉中生物胺的含量相对较高, 其接种微生物会加速肉质腐败。

2.7 各指标的相关性分析

皮尔逊积矩相关系数通常用来反映两个随机变量之间的相关密切程度。如表 3、表 4、表 5 所示,

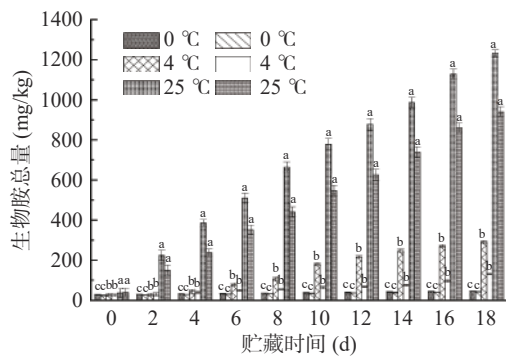


图 10 贮藏温度对冷鲜肉生物胺总量的影响

Fig.10 Effect of storage temperature on total biogenic amines in chilled meat

表 3 贮藏温度为 0 °C 下冷鲜肉各指标的皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficients for each index of chilled meat at storage temperature of 0 °C

指标	菌落总数	TVB-N	pH	水分含量	尸胺	精胺	L^*	a^*	b^*
菌落总数	1	0.968**	0.845**	-0.586	0.948**	0.709*	0.963**	0.960**	0.375
TVB-N		1	0.925**	-0.347	0.974**	0.734*	0.994**	0.988**	0.390
pH			1	-0.171	0.878**	0.512	0.807**	0.907**	0.673
水分含量				1	-0.363	-0.406	-0.405	-0.398	0.194
尸胺					1	0.735*	0.833**	0.842**	0.313
精胺						1	0.738*	0.695*	-0.135
L^*							1	0.840**	0.348
a^*								1	0.409
b^*									1

注: **表示在 0.01 水平显著相关, *表示在 0.05 水平显著相关; 表 4~表 5 同。

表 4 贮藏温度为 4 °C 下冷鲜肉各指标的皮尔逊相关系数

Table 4 Pearson's correlation coefficients of the indicators of chilled meat at a storage temperature of 4 °C

指标	菌落总数	TVB-N	pH	水分含量	尸胺	精胺	腐胺	L^*	a^*	b^*
菌落总数	1	0.982**	0.785**	-0.496	0.951**	0.334	0.909**	0.939**	0.936**	0.606
TVB-N		1	0.873**	-0.382	0.975**	0.203	0.910**	0.981**	0.976**	0.715*
pH			1	0.029	0.894**	-0.038	0.911**	0.902**	0.915**	0.901**
水分含量				1	-0.253	-0.200	-0.063	-0.335	-0.249	-0.026
尸胺					1	0.267	0.906**	0.915**	0.939**	0.761*
精胺						1	-0.070	0.065	0.147	-0.330
腐胺							1	0.906**	0.921**	0.731*
L^*								1	0.863**	0.715*
a^*									1	0.712*
b^*										1

表 5 贮藏温度为 25 °C 下冷鲜肉各指标的皮尔逊相关系数

Table 5 Pearson's correlation coefficients of the indicators of chilled meat at a storage temperature of 25 °C

指标	菌落总数	TVB-N	pH	水分含量	尸胺	精胺	腐胺	酪胺	组胺	色胺	L^*	a^*	b^*
菌落总数	1	0.974**	0.835**	-0.576	0.953**	-0.234	0.936**	0.697	0.840**	0.878**	0.929**	0.804**	0.716
TVB-N		1	0.899**	-0.406	0.988**	-0.601	0.969**	0.914**	0.988**	0.984**	0.972**	0.974**	0.784**
pH			1	-0.077	0.912**	-0.721*	0.856**	0.920**	0.921**	0.878**	0.912**	0.924**	0.913**
水分含量				1	-0.372	-0.235	-0.420	-0.322	-0.358	-0.368	-0.321	-0.300	0.071
尸胺					1	-0.688*	0.951**	0.921**	0.954**	0.941**	0.954**	0.950**	0.729*
精胺						1	-0.669	-0.765**	-0.689*	-0.639*	-0.727*	-0.705*	-0.736*
腐胺							1	0.913**	0.928**	0.902*	0.916**	0.926**	0.728*
酪胺								1	0.826**	0.852**	0.821**	0.834**	0.723*
组胺									1	0.872**	0.894**	0.871**	0.848**
色胺										1	0.733*	0.833**	0.842**
L^*											1	0.734*	0.732*
a^*												1	0.724*
b^*													1

在不同贮藏温度下,冷鲜肉品质指标除水分含量、精胺和 b^* 外的各项指标均呈极显著相关 ($P < 0.01$),贮藏温度为 25 °C 条件下的 Pearson 相关系数较高,其相关性较强。其中,菌落总数、TVB-N、尸胺、腐胺、 L^* 和 a^* 与各指标的相关系数均在 0.9 左右,色泽虽是冷鲜肉新鲜度的重要评价指标,但肉的腐败变质不能单凭色泽这一指标来评价,并且色泽在测定时因其主观性对结果的影响较大,还由于贮藏温度为 0 °C 和 4 °C 时,有些生物胺未能检测出来,且通过相关系数的大小综合得出菌落总数和 TVB-N 是冷鲜肉腐败变质的主要原因。因此,选择菌落总数和 TVB-N 为

关键指标来构建不同贮藏温度下冷鲜肉品质的预测模型。

2.8 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型的建立

通过对各指标的相关性分析可知,菌落总数和 TVB-N 是构建冷鲜肉品质预测模型最重要的指标。利用 MATLAB 对 BP 神经网络及 MFO 算法优化 BP 神经网络进行训练建模,模型的建立包含两个输入层(贮藏温度和贮藏时间)和两个输出层(菌落总数、TVB-N 含量)。由于贮藏温度对冷鲜肉品质的影响较大,因此该模型的构建可以准确有效地预测不同贮藏温度下冷鲜肉品质的变化规律。将冷鲜肉在 0、4 和 25 ℃ 贮藏过程中菌落总数和 TVB-N 含量变化的实验数据分别输入 BP 神经网络和 MFO 优化 BP 神经网络进行训练。结果如图 11 和图 12 所示,模型训练结果表明,与 BP 神经网络相比,MFO 优化 BP 神经网络模型在不同贮藏温度下冷鲜肉菌落总数和 TVB-N 的实际值更接近预测值,且通过 MFO 优化后的预测结果更好。

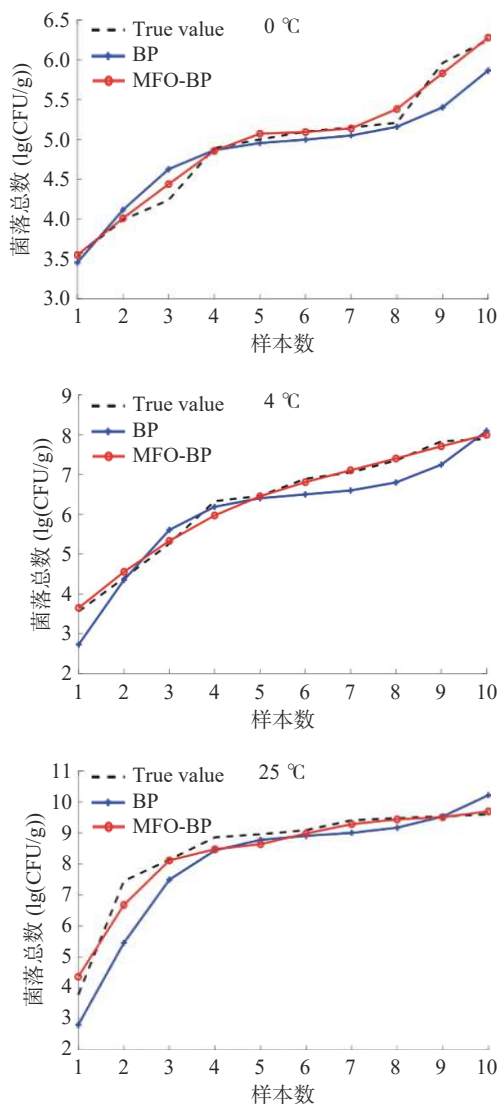


图 11 菌落总数实际值和模型预测值的对比结果

Fig.11 Comparison of the actual values of total colony count and the predicted values of the model

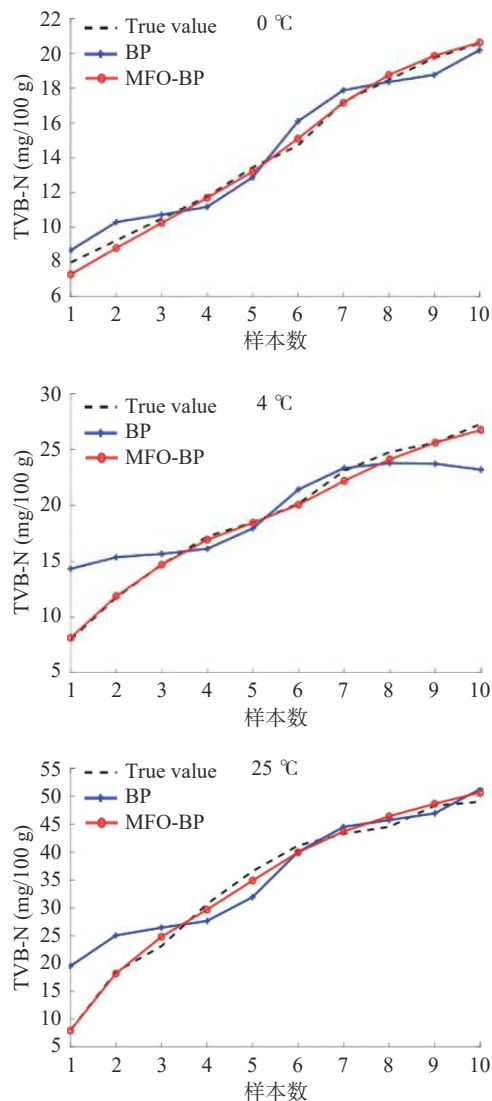


图 12 TVB-N 实际值和模型预测值的对比结果

Fig.12 Comparison results between actual TVB-N values and model predictions

通过 BP 神经网络训练,如图 13 所示,指标菌落总数在整个训练集、测试集和验证集的相关系数分别为 0.95576、0.92574 和 0.9402,而通过 MFO 优化 BP 神经网络训练后,整个训练集、测试集和验证集的相关系数分别为 0.97539、0.98036 和 0.9587,总体得出,MFO 优化 BP 神经网络训练后的 R 值更接近于 1,表明模型拟合效果更好。同理,从图 14 可以看出,指标 TVB-N 在整个训练过程中,MFO 优化 BP 神经网络训练后的训练集、测试集和验证集的 R 值均高于 BP 神经网络训练后的 R 值,其拟合效果更好。结果表明,建立的 BP 神经网络模型不存在欠拟合状态^[13],且通过 MFO 优化 BP 神经网络训练后的模型与实验数据拟合度更高,其拟合效果更好,并具有更好的准确性和稳定性。

2.9 BP 神经网络及 MFO-BP 神经网络模型的验证

为进一步比较两个模型的准确性和拟合效果,采用均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)、均方误差(Mean Squared Error, MSE)、平均绝对误

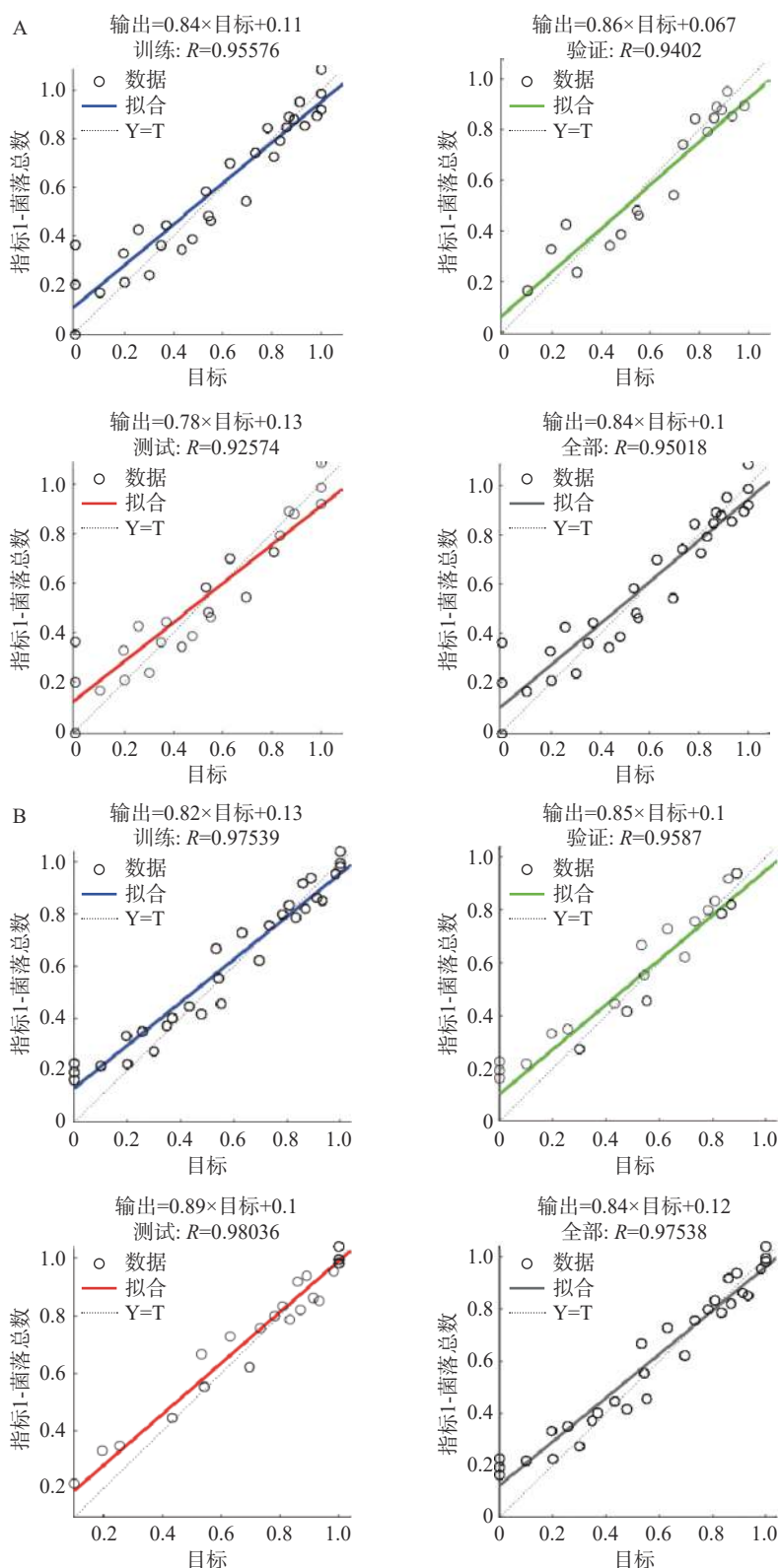


图 13 菌落总数的 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型的训练及拟合结果

Fig.13 Training and fitting results of BP neural network and MFO optimised BP neural network model for colony counts

注: A 为 BP 神经网络模型的训练及拟合结果, B 为 MFO-BP 神经网络模型的训练及拟合结果; 图 14 同。

差 (Mean Absolute Error, MAE) 对模型进行验证^[40-41]。RMSE 是表示预测值与真实值之间的平均偏差程度, RMSE 越小, 模型预测越准确。MSE 是参数估计值与真值之差平方的期望值, MSE 的值越小, 说明预测更精确。MAE 即误差绝对值的平均值, 可以准确反映实际预测误差的大小, 评估真实值和预测

值的偏离程度, MAE 值越小, 说明模型质量越好, 预测越准确。从表 6 和表 7 中可以看出, 在不同贮藏温度下, MFO 算法优化 BP 神经网络训练的 RMSE、MSE 和 MAE 值与 BP 神经网络模型相比相对较小, 其模型拟合度更好, 模型更准确。由于单一的 BP 神经网络是随机初始权值和阈值的, 通过

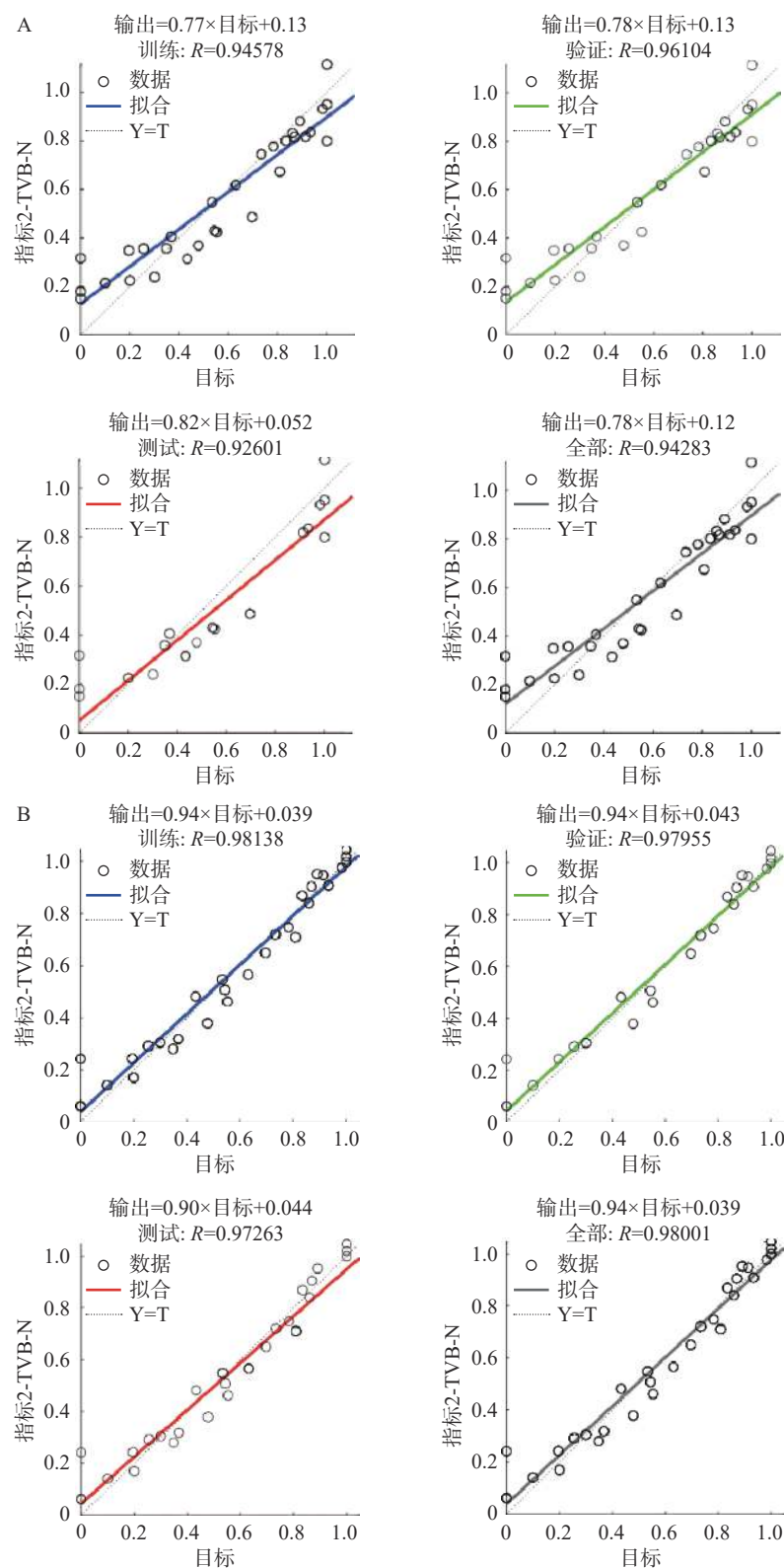


图 14 TVB-N 的 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型的训练及拟合结果

Fig.14 Training and fitting results of BP neural network and MFO optimised BP neural network model for TVB-N

表 6 菌落总数的 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型的评价

Table 6 Evaluation of BP neural network and MFO optimised BP neural network models for colony counts

预测模型	模型的评价/误差								
	0 ℃ RMSE	0 ℃ MSE	0 ℃ MAE	4 ℃ RMSE	4 ℃ MSE	4 ℃ MAE	25 ℃ RMSE	25 ℃ MSE	25 ℃ MAE
BP神经网络	0.2564	0.0658	0.1865	0.4337	0.1881	0.3606	0.7893	0.6230	0.5738
MFO-BP神经网络	0.0969	0.0094	0.0683	0.1432	0.0205	0.1100	0.3499	0.1224	0.2478

表 7 TVB-N 的 BP 神经网络及 MFO 优化 BP 神经网络模型的评价
Table 7 Evaluation of BP neural network and MFO optimised BP neural network models for TVB-N

预测模型	模型的评价/误差								
	0 ℃ RMSE	0 ℃ MSE	0 ℃ MAE	4 ℃ RMSE	4 ℃ MSE	4 ℃ MAE	25 ℃ RMSE	25 ℃ MSE	25 ℃ MAE
BP神经网络	0.7628	0.5818	0.6669	2.8053	7.8696	2.1054	4.7867	22.9122	3.6359
MFO-BP神经网络	0.3241	0.1050	0.2605	0.4095	0.1677	0.2799	1.2210	1.4908	1.0242

MFO 算法优化 BP 神经网络可以找到网络最佳的权值和阈值,模型预测会更加准确。综上所述,MFO 算法优化 BP 神经网络优于单一的 BP 神经网络模型,在不同贮藏温度下冷鲜肉菌落总数和 TVB-N 的实际值更接近预测值,在整个贮藏期内具有更好的预测性能,且预测精度相对较高。因此,MFO 算法优化 BP 神经网络可用于预测冷鲜肉在贮藏过程中品质的变化规律。

3 结论

通过研究不同贮藏温度(0、4 和 25 ℃)下冷鲜肉品质的变化规律。结果表明,不同贮藏温度下冷鲜肉的菌落总数、pH、TVB-N、色泽和生物胺含量变化速率不一致,且温度越高,冷鲜肉变质越快。通过分析利用特征指标菌落总数和 TVB-N 为训练数据,基于 BP 神经网络和 MFO 优化 BP 神经网络构建不同贮藏温度下冷鲜肉品质的预测模型。结果显示,MFO 优化 BP 神经网络的预测结果要优于单一的 BP 神经网络模型,指标菌落总数和 TVB-N 通过 MFO 算法优化训练后的 *R* 值更接近于 1,且优化后的 RMSE、MSE 和 MAE 值相对较小,其模型拟合度更好,准确率更高。因此,MFO 优化 BP 神经网络可用于预测冷鲜肉在贮藏过程中品质的变化规律,是一种较为理想的预测模型。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] NOORI S, ZEYNALI F, ALMASI H. Antimicrobial and antioxidant efficiency of nanoemulsion-based edible coating containing ginger (*Zingiber officinale*) essential oil and its effect on safety and quality attributes of chicken breast fillets[J]. *Food Control*, 2018, 84: 312–320.

[2] KATIYO W, DE KOCK H L, COOREY R, et al. Sensory implications of chicken meat spoilage in relation to microbial and physicochemical characteristics during refrigerated storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 128: 109468.

[3] 王辉, 庄子通, 曾晓芳, 等. 鸡肉贮藏品质变化和货架期预测模型[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(14): 185–188,224. [WANG Hui, ZHUANG Zitong, ZENG Xiaofang, et al. Storage quality changes and shelf life prediction model of pigeon meat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(14): 185–188,224.]

[4] 牛耀星, 王霆, 毕阳, 等. 温度对金针菇贮藏品质的影响及货架期的预测模型[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 264–271. [NIU Yaoming, WANG Ting, BI Yang, et al. Effect of storage temperature on the quality of *Flammulina velutipes* and shelf life predictive

modeling[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 264–271.]

[5] 段依梦, 宋玉, 曹磊, 等. 温度对高水分稻谷储藏品质的影响及其预测模型研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 304–308, 326. [DUAN Yimeng, SONG Yu, CAO Lei, et al. Effect of temperature on storage quality of high-moisture paddy and its prediction model[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(19): 304–308, 326.]

[6] 林梓杰, 董庆利. 机器学习在肉类微生物安全中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2022, 36(11): 36–41. [LIN Zijie, DONG Qingli. Progress in application of machine learning in meat microbial safety[J]. *Meat research*, 2022, 36(11): 36–41.]

[7] ZARRA T, GALANG M G, JR F B, et al. Environmental odour management by artificial neural network-A review[J]. *Environment International*, 2019, 133(2): 105189.

[8] LOGIST F, HOUSKA B, DIEHL M, et al. Robust multi-objective optimal control of uncertain (bio)chemical processes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(20): 4670–4682.

[9] 于佰文, 薛鹏, 姜长泓, 等. 冷蠕成形系统飞蛾火焰算法的优化控制[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(19): 88–93. [YU Baiwen, XUE Peng, JIANG Changhong, et al. Optimal control of moth-flame algorithm for cold extrusion forming system[J]. *Modern Electronic Technology*, 2020, 43(19): 88–93.]

[10] TAKAHASHI M B, OLIVEIRA H D, NUNEZ E F, et al. Brewing process optimization by artificial neural network and evolutionary algorithm approach[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(5): 131031.

[11] HAJEH M, BARKHORDAR A. Modelling of solid-phase tea waste extraction for the removal of manganese from food samples by using artificial neural network approach[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(2): 712–717.

[12] FU Z T, ZHAO S, ZHANG X S, et al. Quality characteristics analysis and remaining shelf life prediction of fresh Tibetan tricholoma matsutake under modified atmosphere packaging in cold chain[J]. *Foods*, 2019, 8: 136–150.

[13] ZHU N, WANG K, ZHANG S L, et al. Application of artificial neural networks to predict multiple quality of dry-cured ham based on protein degradation[J]. *Food Chemistry*, 2020, 344(12): 128586.

[14] 范志文, 光翠娥, 干建平. 基于反向传播人工神经网络的酱牛肉中金黄色葡萄球菌的生长模型[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(7): 83–90. [FAN Zhiwen, GUNAG Cuie, GAN Jianping. Growth model of *Staphylococcus aureus* in sauced beef based on the back propagation artificial neural network[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2020, 39(7): 83–90.]

[15] ALGHOONEH A, ALIZADEH BEHBAHANI B, NOOR-BAKSH H, et al. Application of intelligent modeling to predict the population dynamics of *Pseudomonas aeruginosa* in Frankfurter sausage containing *Satureja bachtiarica* extracts[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2015, 85: 58–65.

[16] GOSUKONDA R, MAHAPATRA A K, LIU X, et al. Application of artificial neural network to predict *Escherichia coli* O157: H 7 inactivation on beef surfaces[J]. *Food Control*, 2015, 47: 606–614.

- [17] 张莉,孙佳宁,朱明睿,等.解冻方式对羊肉品质及微观结构的影响[J].核农学报,2022,36(8):1607-1617. [ZHANG Li, SUN Jianing, ZHU Mingrui, et al. Effects of thawing methods on quality and microstructure of frozen mutton[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2022, 36(8): 1607-1617.]
- [18] 段雨帆,钟媛媛,肖愈,等.一株具有降生物胺能力葡萄球菌的筛选及其降解特性[J].现代食品科技,2023,39(10):104-112. [DUAN Yufan, ZHONG Aiai, XIAO Yu, et al. Selection of a biogenic amine-degrading *Staphylococcus* strain and evaluation of its degradation properties[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(10): 104-112.]
- [19] SUN Y F, CHANG H T, MIAO Z J. Research on BP neural network model for water demand forecasting and its application[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 170: 2352-2355.
- [20] 刘文.不同贮藏环境下冷鲜猪肉微生物及品质预测模型构建[D].武汉:武汉轻工大学,2021. [LIU Wen. Establishment of microbial and quality prediction model for chilled fresh pork in different storage environments[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.]
- [21] 林建城,方静,吕田星,等.不同温度贮藏对黄鳍鲷鱼肉鲜度与品质的影响[J].食品研究与开发,2022,43(24):102-109. [LIN Jiancheng, FANG Jing, LÜ Tianxing, et al. Effects of storage temperature on the freshness and quality of Yellowfin Seabream *Acanthopagrus latus* [J]. Food Research and Development, 2022, 43(24): 102-109.]
- [22] 靳玉龙,白婷,刘变芳,等.冷鲜猪肉中细菌总数 Gompertz 生长预测模型的建立[J].肉类工业,2016(5):22-25. [JIN Yulong, BAI Ting, LIU Bianfang, et al. Construction of Gompertz growth predictive model of total bacterial count in chilled pork[J]. Meat Industry, 2016(5): 22-25.]
- [23] WEN X, LIANG C, ZHANG D, et al. Effects of hot or cold boning on the freshness and bacterial community changes of lamb cuts during chilled storage[J]. LWT, 2022, 170: 114063.
- [24] 徐慧文,谢晶,汤元睿,等.冰藏和冷藏条件下金枪鱼品质变化的研究[J].食品工业科技,2014,35(13):321-326. [XU Huiwen, XIE Jing, TANG Yuanrui, et al. Study on the quality changes of tuna at ice and refrigerated storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(13): 321-326.]
- [25] SAUVALA M, JOHANSSON P, BJORKROTH J, et al. Microbiological quality and safety of vacuum-packaged white-tailed deer meat stored at 4 °C [J]. International Journal of Food Microbiology, 2023, 390: 110110.
- [26] JASPAL M H, BADAR I H, AMJAD O B, et al. Effect of wet aging on color stability, tenderness, and sensory attributes of *Longissimus lumborum* and *Gluteus medius* muscles from water buffalo bulls [J]. Animals, 2021, 11(8): 2248.
- [27] 张家源,张洪才,陈舜胜.鱼精蛋白复配保鲜剂对南美白对虾的保鲜效果[J].食品与发酵工业,2020,46(2):142-149. [ZHANG Jiayuan, ZHANG Hongcai, CHEN Shunsheng. Study on the fresh-keeping effect of protamine complex preservative on *Penaeus vannamei* [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(2): 142-149.]
- [28] 顾赛麒,赵勇,谢晶,等.冷却肉新鲜度变化研究[J].食品工业科技,2010,31(1):102-104. [GU Saiqi, ZHAO Yong, XIE Jing, et al. Research on the freshness variation of cooled pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(1): 102-104.]
- [29] 李迎楠,刘文营,贾晓云,等.杀菌温度对清酱肉色泽和风味品质的影响[J].肉类研究,2017,31(5):34-40. [LI Yingnan, LIU Wenying, JIA Xiaoyun, et al. Effect of sterilization temperature on color and flavor properties of pickled sauced meat [J]. Meat Research, 2017, 31(5): 34-40.]
- [30] KONO S, KON M, ARAKI T, et al. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 158-165.
- [31] 苑闪闪,卢素芳,雷跃磊,等.不同贮藏温度鳊鱼片品质变化规律[J].肉类研究,2023,37(1):26-30. [YUAN Shanshan, LU Sufang, LEI Yuelei, et al. Quality changes of mandarin fish fillets under different temperature storage conditions [J]. Meat Research, 2023, 37(1): 26-30.]
- [32] ZHUANG Shuai, LI Yan, JIA Shiliang, et al. Effects of pomegranate peel extract on quality and microbiota composition of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets during chilled storage [J]. Food Microbiology, 2019, 82: 445-454.
- [33] 钟萍,陈鲜丽,罗威,等.不同贮藏温度对鱼肉嫩度和菌落总数的影响研究[J].食品研究与开发,2021,42(7):45-49. [ZHONG Ping, CHEN Xianli, LUO Wei, et al. Effects of different storage temperature on tenderness and total number of bacterial colonies of fish [J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 45-49.]
- [34] 杨春婷,赵晓娟,白卫东.肉类中的生物胺形成及其在肉类新鲜度评价中的应用研究进展[J].肉类研究,2017,31(1):55-59. [YANG Chunting, ZHAO Xiaojuan, BAI Weidong, et al. Formation of biogenic amines during meat storage and their application in assessment of meat freshness [J]. Meat Research, 2017, 31(1): 55-59.]
- [35] TONG R X, PANSS, PAN L Q, et al. Effects of biogenic amines on the immune response and immunoregulation mechanism in hemocytes of *Litopenaeus vannamei* in vitro [J]. Mol Immunol, 2020, 128: 1-9.
- [36] SHUKLA S, LEE J S, BAJPAI V K, et al. Toxicological evaluation of lotus, ginkgo, and garlic tailored fermented Korean soybean paste (Doenjang) for biogenic amines, aflatoxins, and microbial hazards [J]. Food Chem Toxicol, 2019, 133: 133110729.
- [37] 李苗云,张秋会,高晓平,等.冷却猪肉贮藏过程中腐败品质指标的关系研究[J].食品与发酵工业,2008(7):168-171. [LI Miaoyuan, ZHANG Qiuhui, GAO Xiaoping, et al. Study on the relationship of spoilage quality Indexes of chilled pork during storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2008(7): 168-171.]
- [38] 杨春婷.基于生物胺的冷鲜猪肉新鲜度评价方法及腐胺传感器研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2019. [YANG Chunting. Evaluation method of fresh pork freshness based on biogenic amine and research on putrescine sensor [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2019.]
- [39] 胡鹏,刘叶飞,李福元.高效液相色谱法测定腊肉中生物胺含量[J].现代食品,2022,28(3):167-170,183. [HU Peng, LIU Yefei, LI Fuyuan. Determination of biogenic amines in bacon by HPLC [J]. Modern Food, 2022, 28(3): 167-170, 183.]
- [40] ZHU H, YE Y, HE H, et al. Evaluation of green tea sensory quality via process characteristics and image information [J]. Food and Bioprocess Processing, 2017, 102: 116-122.
- [41] 牛会敏.冷却猪肉假单胞菌生长模型比较分析及货架期模型建立[D].郑州:河南农业大学,2012. [NIU Huimin. Comparison of kinetic models fitting *Pseudomonas* and the study of the shelf life of chilled pork [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012.]