

反向传播-人工神经网络在辐照黑椒牛肉品质预测中的应用

游云¹, 黄晓霞¹, 肖斯立¹, 刘巧瑜^{1*}, 蓝碧锋², 胡昕³, 吴俊师², 杨娟¹, 曾晓房^{1*}

(1.仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 现代农业工程创新研究院, 广东 广州 510225; 2.广东省工业钴-60伽玛射线应用工程技术研究中心, 广东 广州 511400; 3.广州皇上皇集团股份有限公司, 广东 广州 510170)

摘要: 为探究不同辐照处理对贮藏过程中黑椒牛肉品质变化的影响, 建立基于理化指标的多种品质预测模型。3~4 kGy的辐照剂量能够有效延缓黑椒牛肉在贮藏过程中的汁液流失、脂质氧化和蛋白质降解, 保持其硬度和微观结构, 在一定程度上增加呈鲜味(Asp)和甜味(Gly、Ala、Ser)游离氨基酸的含量。以辐照黑椒牛肉的汁液流失率、硫代巴比妥酸反应产物值、总挥发性盐基氮值、原肌球蛋白条带强度比率、肌球蛋白重链条带强度比率和总游离氨基酸含量为输入变量, 优化了反向传播-人工神经网络(backpropagation-artificial neural network, BP-ANN)模型。训练函数为ReLU函数, 隐藏层神经元个数为14个, 迭代次数100次。结果表明, 6-14-6 BP-ANN模型可以较好地预测辐照黑椒牛肉的品质变化, 该模型在预测辐照肉制品的多种品质方面具有很大潜力。

关键词: 黑椒牛肉; ⁶⁰Co-γ射线; 品质; 反向传播-人工神经网络; 预测模型

Application of Backpropagation-Artificial Neural Network in Quality Prediction of Irradiated Black Pepper Beef

YOU Yun¹, HUANG Xiaoxia¹, XIAO Sili¹, LIU Qiaoyu^{1*}, LAN Bifeng², HU Xin³, WU Junshi², YANG Juan¹, ZENG Xiaofang^{1*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Academy of Contemporary Agricultural Engineering Innovations, College of Light Industry and Food Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Industrial Cobalt-60 Gamma-ray Application Engineering Technology Research Center, Guangzhou 511400, China; 3. Guangzhou Huang-shanghuang Group Co. Ltd., Guangzhou 510170, China)

Abstract: To investigate the effects of different irradiation treatments on the quality of black pepper beef during storage, a backpropagation-artificial neural network (BP-ANN) model for predicting various quality attributes of black pepper beef was developed based on physicochemical indicators. Irradiation at a dose of 3–4 kGy effectively delayed the loss of juice, lipid oxidation, and protein degradation in black pepper beef during storage, maintained its hardness and microstructure, and increased the contents of umami (Asp) and sweet (Gly, Ala and Ser) amino acids. The BP-ANN model was optimized with the juice loss, thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value, total volatile basic nitrogen (TVB-N) content, tropomyosin band intensity ratio, myosin heavy chain band intensity ratio, and total free amino acid content of irradiated black pepper beef as input variables. The ReLU function was used as the activation function, with 14 neurons in the hidden layer and 100 iterations. The results showed that the 6-14-6 BP-ANN model could predict the quality changes of irradiated black pepper beef well, and have great potential in predicting various qualities of irradiated meat products.

Keywords: black pepper beef; ⁶⁰Co-γ radiation; quality; backpropagation-artificial neural network; predictive model

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230514-122

中图分类号: TS251

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 08-0228-10

收稿日期: 2023-05-14

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2019B020212002); 广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX4016);

广东省教育厅2020年广东省研究生教育创新计划项目(粤教研函[2020]1号)

第一作者简介: 游云(1999—)(ORCID: 0000-0003-4764-5749), 女, 硕士研究生, 主要从事食品加工与安全研究。

E-mail: Yy15971457530@163.com

*通信作者简介: 刘巧瑜(1977—)(ORCID: 0000-0002-1719-6252), 女, 副教授, 博士, 主要从事中式传统肉制品加工、保鲜及呈味机理研究。E-mail: qiaoyuliu123@163.com

曾晓房(1979—)(ORCID: 0000-0002-9512-7009), 男, 教授, 博士, 主要从事肉品加工和质量控制研究。

E-mail: xiaofang_zeng2015@163.com

引文格式:

游云, 黄晓霞, 肖斯立, 等. 反向传播-人工神经网络在辐照黑椒牛肉品质预测中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 228-237. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230514-122. <http://www.spkx.net.cn>

YOU Yun, HUANG Xiaoxia, XIAO Sili, et al. Application of backpropagation-artificial neural network in quality prediction of irradiated black pepper beef[J]. Food Science, 2024, 45(8): 228-237. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230514-122. <http://www.spkx.net.cn>

黑椒牛肉是以牛腱肉为原料, 经适当加工(分切、调味、腌制)包装后冷冻或冷藏贮运、销售, 经简单加热即可食用的肉制品^[1]。肉制品在贮运过程中极易受到微生物的污染, 常用的高温杀菌方式虽然杀菌效果好, 但对肉制品的风味和质地都有很大影响, 易造成产品品质下降^[2]。辐照作为一种冷杀菌技术, 可以直接通过破坏微生物DNA的磷酸二酯键杀死肉类中的微生物, 对肉品质影响较小^[3], 且辐照还具有节约能源、易实现规模化应用等优点, 目前已成熟地应用于肉类的保鲜处理^[4-5]。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)作为模拟人脑神经反馈的数学模型, 具有自学能力、自适应性、强容错性, 可以处理复杂的非线性问题。随着人工智能的快速发展, ANN已经成熟应用于复杂工艺过程的预测和建模。ANN通过调整输入层、输出层、隐含层中有关联的相关神经元所对应的阈值反映相互之间的非线性关系^[6]。目前, 一些研究人员已将ANN与食品工业结合, 获得较为准确的预测。Xing Wei等^[7]基于ANN模型预测烟熏香肠多品质指标和苯并芘含量; Malfatti等^[8]通过ANN评估了环境参数(温度、贮藏时间和相对湿度)对鸡蛋蛋白质的影响, 但将其应用于辐照肉制品的研究较少, 因此利用ANN对辐照肉制品质量进行预测有非常广阔的发展空间。本实验基于硫代巴比妥酸反应产物(thiobarbituric acid reaction substances, TBARS)值、总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值、蛋白条带强度和游离氨基酸(free amino acids, FAA)含量建立了ANN模型预测辐照黑椒牛肉的多种品质, 以期对辐照肉制品的品质预测提供了理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑椒牛肉由广州皇上皇集团股份有限公司提供。

硫代巴比妥酸(>99%)、氢氧化钠、氢氧化钾、石油醚、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、对苯二酚(butylated hydroxytoluene, BHT)(>99.0%) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 硫代硫酸钠 广东铭固化学有限公司; 三氯甲烷、乙醚 广州化学试剂厂; 十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、二硫苏糖醇(dithiothreitol, DTT)、三羟甲基氨基甲烷、30%丙

烯酰胺、过硫酸铵、四甲基乙二胺(均为分析纯) 美国Sigma公司; 营养琼脂培养基 广东环凯微生物科技有限公司; 氨基酸混合物标准溶液AN-II型和B型(色谱级, >99%) 日本和光纯药株式会社。

1.2 仪器与设备

RE-52A旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器公司; K9860全自动凯氏定氮仪 山东海能科学研究仪器设备公司; LDZM-40KCS-11立式高压蒸汽灭菌锅 上海市申安医疗器械厂; RT-600酶标分析仪 深圳雷杜生命科学股份有限公司; JY04S-3C电泳凝胶成像分析系统 北京君意东方电泳设备有限公司; LA8080氨基酸全自动分析仪 日本日立公司; Q(H)型⁶⁰Co-γ射线固定源室湿存储源γ辐照装置 广州辐锐高能技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

将黑椒牛肉(100 g/袋, 真空包装)分别以0 kGy(对照组)及2、3、4、6 kGy(辐照组)⁶⁰Co-γ射线辐照后4℃冷藏, 第0、14、28天取样, 测定相关指标。

1.3.2 汁液流失率测定

参考刘巧瑜等^[9]的方法测定汁液流失率, 计算如式(1)所示:

$$\text{汁液流失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_1 为真空袋加黑椒牛肉的质量/g; m_2 为盛有汁液的真空袋质量/g; m_3 为干净真空袋的质量/g。

1.3.3 TBARS值测定

参考Ulu^[10]的方法, 稍作修改。称取搅碎的黑椒牛肉5 g加入30 mL 7.5%的三氯乙酸溶液(含0.1%的EDTA和0.1% BHT)后均质混匀, 静置20 min, 8 000 r/min离心10 min, 吸取5 mL上清液, 加入5 mL 0.02 mol/L硫代巴比妥酸溶液, 100℃水浴30 min, 流水降温, 于532 nm波长处测定样品溶液的吸光度。利用丙二醛标准溶液绘制标准曲线方程: $y = 0.7007x - 0.0019$ ($R^2 = 0.999$)。TBARS值计算公式如下:

$$\text{TBARS值}/(\text{mg}/\text{kg}) = \frac{c \times V \times 1000}{m \times 1000} \quad (2)$$

式中: c 为从标准曲线中得到的试样溶液中丙二醛的质量浓度/ $\mu\text{g}/\text{mL}$; V 为试样溶液定容体积/ mL ; m 为称取的试样质量/g; 1 000为换算系数。

1.3.4 TVB-N值测定

根据GB 5009.228—2016《食品中挥发性盐基氮的测定》中自动凯氏定氮仪法进行测定。

1.3.5 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (polyacrylamide gel electrophoresis, PAGE)

1.3.5.1 蛋白提取

参照魏燕超等^[11]的方法,称取2 g样品于离心管,加入6 mL缓冲溶液(0.1 mol/L Tris (pH 8.3)、0.01 mol/L DTT),均质涡旋后离心,取沉淀物,加入20 mL 5% SDS缓冲溶液,涡旋、混匀,80 °C水浴30 min,分装并置于-20 °C保存,用于肌原纤维蛋白(myofibrillar proteins, MP)的分析。通过双缩脲法测定蛋白质量浓度,调节蛋白质量浓度为5 mg/mL。

1.3.5.2 SDS-PAGE

制备12%分离胶和5%浓缩胶,MP样品与2×上样缓冲液1:1(V/V)混匀,100 °C水浴5 min,5 000 r/min离心3 min,每孔上样8 μL。取出凝胶片用考马斯亮蓝快速染色液染色1 h,脱色过夜至凝胶澄清,拍照成像。

1.3.6 FAA含量测定

参考Qi Jun等^[12]的方法并加以修改,4 g黑椒牛肉样品加入20 mL 3%碘基水杨酸溶液,均质、离心。上清液与2 mL正己烷混合振荡静置分层,将水相过0.22 μm膜,氨基酸全自动分析仪检测,进样量20 μL。

1.3.7 色差值测定

使用便携式色差仪测定黑椒牛肉不同部位的L*值、a*值和b*值,每个样品重复5次。

1.3.8 质构参数分析(texture parameters analysis, TPA)

取3 cm×3 cm×3 cm的黑椒牛肉,使用TPA模式测定黑椒牛肉的硬度。

1.3.9 肌纤维形态观察

参考刘巧瑜等^[9]的方法,利用苏木素-伊红(hematoxylin-eosin, HE)染色分析肌纤维形态变化。

1.3.10 反向传播(backpropagation, BP)-ANN模型设计

建立一种基于理化指标的三层全连接BP神经网络模型预测贮藏过程中辐照黑椒牛肉的多种品质变化。BP-ANN模型由输入层(汁液流失率、TBARS值、TVB-N值、原肌球蛋白条带强度比率、肌球蛋白重链条带强度比率和FAA含量)、输出层(硬度、L*、a*、b*和肌纤维间隙、肌纤维直径)以及隐藏层组成。

构建模型前,使用均值-方差标准化将数据量纲定义在0~1内,转化如式(3)所示:

$$X_i^* = \frac{X_i - \text{mean}(X_n)}{\sqrt{\text{Var}(X_n)}} \quad (3)$$

式中: X_i^* 为标准化后数据; X_i 表示原数据; $\text{mean}(X_n)$ 表示原数据序列平均值; $\text{Var}(X_n)$ 表示原数据序列方差。

随后以0.7:0.15:0.15的比例将数据集分为训练集、验证集和测试集。

在BP-ANN设计过程中,需要确定合适的神经元个数,过多的神经元会造成神经网络过拟合,即模型过度适应训练数据,导致测试数据表现不佳;神经元个数过少会导致模型的表达能力受到限制,无法很好地捕捉数据的复杂特征,导致模型的性能较差,出现欠拟合的问题。因此隐藏层神经元个数在12~20中选取。为了提高BP神经网络的预测精度,在使用梯度下降法优化参数的基础上,设置“输入-隐藏层”和“隐藏-输出层”在激活函数ReLU和Tanh中选取,ReLU函数收敛速度快,计算速度快,无论是其函数还是导数都不存在复杂的数学运算,在输入值 ≥ 0 时,输出等于输入(式(4)),此时梯度为1,能够完整地传递梯度,不存在梯度消失和梯度爆炸问题;Tanh函数的输出是S型曲线(式(5)),可以打破网络层与网络层之间的线性关系,将非线性输入映射到(-1, 1)区间上。

$$\text{ReLU}(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Tanh}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (5)$$

式中: x 表示输入值。

模型在测试集上的预测精度用均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)表示。拟合过程中保持学习率为0.1,动量系数为0.5,进行100次迭代,定义均方误差(mean square error, MSE)为损失函数,用于衡量网络输出结果与实际输出结果之间的差异,帮助神经网络优化参数,使得网络输出结果更接近实际结果。其计算如式(6)~(9)所示:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (7)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (8)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

式中: y_i 为实际输出值; \hat{y}_i 为预测输出值; n 表示样本量。

1.4 数据处理

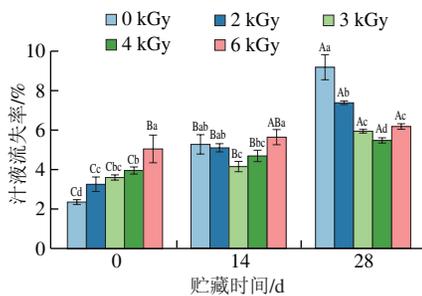
采用SPSS 26.0软件进行方差分析和显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著,使用Origin 2021软件作图,HE肌纤维染色用Case Viewer 2.0软件进行图像采集分析,SDS-PAGE图利用ImageJ软件分析蛋白条带强度,采用Python 3.9.7进行BP-ANN神经网络模型的构建。

2 结果与分析

2.1 辐照处理对黑椒牛肉冷藏过程中品质的影响

2.1.1 汁液流失率

汁液流失率是用来衡量肉制品持水性的指标，肉制品的质量伴随汁液流失而降低^[13]。由图1可知，黑椒牛肉的汁液流失率随辐照剂量的增加显著增加 ($P < 0.05$)，由对照组的 (2.36 ± 0.11)% 上升至 (5.04 ± 0.71)%。辐照处理能够使鸡肉蛋白结构变性，促进肌球蛋白与肌动蛋白融合，使可贮存水分的空间网格结构变小，影响肌肉组织的保水能力，汁液流失率增加^[14]。整个贮藏期，对照组和辐照组的汁液流失率均显著增加 ($P < 0.05$)，而辐照组比对照组的汁液流失率上升缓慢。贮藏28 d时，对照组和2 kGy组的汁液流失率分别上升至 (9.18 ± 0.64)% 和 (7.39 ± 0.08)%，而 ≥ 3 kGy组的汁液流失率仅上升至5.8%左右。说明 ≥ 3 kGy辐照能够有效延缓黑椒牛肉在贮藏过程中的汁液流失。



大写字母不同表示不同贮藏时间同一辐照剂量黑椒牛肉之间差异显著 ($P < 0.05$)，小写字母不同表示同一贮藏时间不同辐照剂量黑椒牛肉之间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

图1 辐照剂量对黑椒牛肉贮藏过程中汁液流失率的影响

Fig. 1 Effect of irradiation dose on the juice loss of black pepper beef during storage

2.1.2 TBARS值和TVB-N值

TBARS值是衡量肉制品脂质次级氧化程度的指标^[15-16]。如图2a所示，辐照处理后，黑椒牛肉的TBARS均显著增加 ($P < 0.05$)。可能是因为辐照加快生成自由基，促进自由基的链式反应，而自由基则通过改变脂肪酸或甘油三酯的构成诱导脂肪氧化^[17]。贮藏过程中，对照组和辐照组的TBARS值总体呈上升趋势。对照组和2 kGy组的TBARS值显著上升 ($P < 0.05$)，而 ≥ 3 kGy组的TBARS值上升缓慢。可能是因为随着贮藏期延长，较高辐照剂量促使丙二醛与蛋白质、核酸等反应进一步氧化成羧酸^[18]。蓝碧锋等^[19]发现辐照处理的鲈鱼在贮藏后期硫代巴比妥酸值下降可以解释这一现象。

TVB-N是指微生物和酶分解蛋白质后生成氨以及胺类等可挥发性碱性含氮物质，其含量被视为与食物腐败程度相符率最大的生化指标之一^[20-22]。从图2b可知，

对照组的TVB-N值为 (7.32 ± 0.94) mg/100 g，经2、3、4、6 kGy辐照处理后，黑椒牛肉TVB-N值分别上升至 (7.99 ± 0.33)、(8.23 ± 0.41)、(8.66 ± 0.77)、(9.35 ± 0.82) mg/100 g。随着贮藏时间的延长，对照组和辐照组的TVB-N值均显著上升 ($P < 0.05$)。尤其是当贮藏时间为28 d时，对照组的TVB-N值达到 (23.07 ± 0.99) mg/100 g，这可能是因为贮藏后期微生物大量增殖，氨基酸被微生物降解，导致TVB-N值升高^[23]。辐照组的TVB-N值上升速率小于对照组，4 kGy组和6 kGy组在贮藏第28天TVB-N值分别为 (14.92 ± 0.91) mg/100 g 和 (13.60 ± 0.76) mg/100 g，符合国标二级新鲜度要求，可能是由辐照杀灭微生物抑制蛋白质降解导致^[24]。

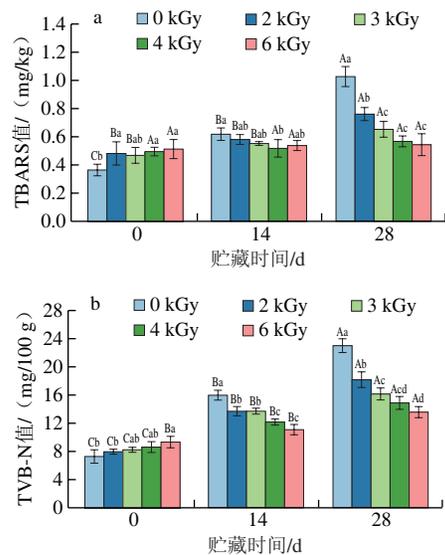
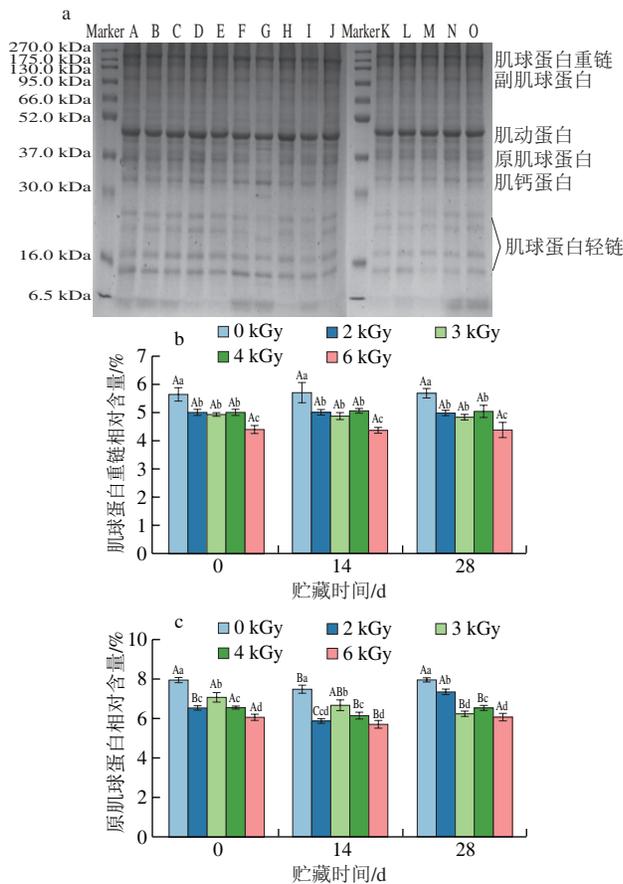


图2 辐照剂量对黑椒牛肉贮藏过程中TBARS (a) 和 TVB-N (b) 的影响

Fig. 2 Effect of irradiation dose on TBARS (a) and TVB-N (b) values of black pepper beef during storage

2.1.3 SDS-PAGE分析

由图3a可知，黑椒牛肉MP有清晰的肌球蛋白重链 (220 kDa) 和轻链 (17~22 kDa)、肌动蛋白 (43 kDa)、原肌球蛋白 (40 kDa)、肌钙蛋白 (35 kDa) 以及尚不明确的结构性调节蛋白条带^[25]。除肌动蛋白条带强度差异不大外，各蛋白条带强度都不同程度地随辐照剂量的增加而减弱，Xie Yong等^[26]也得出相似结论。如图3b和3c所示，随着辐照剂量增加，肌球蛋白重链和原肌球蛋白含量显著减少 ($P < 0.05$)，但贮藏过程中两者变化不显著 ($P > 0.05$)。Shi Yan等^[27]发现草鱼经辐照处理后，肌球蛋白重链发生有序性结构变化，降解成更小的蛋白分子或肽链结构。电泳图表明辐照影响大分子蛋白空间结构使其降解，但贮藏过程中蛋白无显著变化。



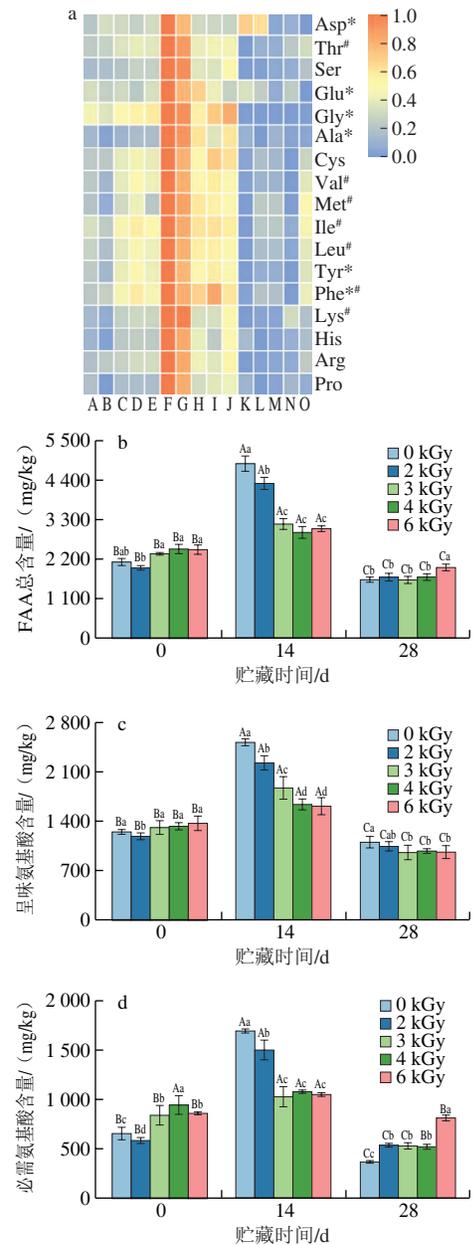
a图中, A~E为贮藏0 d辐照0、2、3、4、6 kGy处理; F~J为贮藏14 d辐照0、2、3、4、6 kGy处理; K~O为贮藏28 d辐照0、2、3、4、6 kGy处理。图4同。

图3 辐照黑椒牛肉贮藏过程蛋白SDS-PAGE图(a)及肌球蛋白重链(b)、原肌球蛋白(c)含量变化

Fig. 3 SDS-PAGE patterns (a) and changes in contents of myosin heavy chain (b) and tropomyosin (c) during the storage process of irradiated black pepper beef

2.1.4 FAA含量

由图4a可知, 辐照黑椒牛肉共检出17种FAA, 其中必需氨基酸7种, 呈味氨基酸6种。呈味氨基酸中天冬氨酸(Asp)和谷氨酸(Glu)、甘氨酸(Gly)呈鲜味, 丙氨酸(Ala)呈甜味, 其余呈苦味^[28]。与对照组相比, 除2 kGy辐照处理外, 黑椒牛肉的FAA含量(图4b)和呈味氨基酸(图4c)增加但不显著($P>0.05$), 必需氨基酸含量(图4d)显著增加($P<0.05$), 说明辐照对黑椒牛肉的营养及滋味起到了积极的改善作用^[29]。而不同的FAA含量随着辐照剂量的增加呈增减现象变化趋势, 这是由于辐照产生自由基, 攻击蛋白质多肽链使其断裂, 肽链中氨基酸残基的脱氨、脱羧和氧化作用增强, 又由于氨基酸结构及其对 γ 射线敏感程度不同, 辐照对各种氨基酸的影响程度不一样^[30]。随着贮藏时间的延长, 对照组的总FAA含量呈先增加后减少的现象, 由0 d的2 113.81 mg/kg上升至4 856.98 mg/kg再下降至1 632.45 mg/kg。这可能是辐照产生自由基或水合离子引起蛋白质分解, 而贮藏后期又因微生物大量增殖, 导致氨基酸被微生物降解。



* 呈味氨基酸; # 必需氨基酸。a. FAA热图; b. FAA总含量; c. 呈味氨基酸含量; d. 必需氨基酸含量。

图4 辐照黑椒牛肉贮藏期FAA含量变化

Fig. 4 Changes in FAA contents in irradiated black pepper beef during storage

2.1.5 色差值

色差是反映肉制品品质的重要指标之一, 通过色差的变化能够评价黑椒牛肉的新鲜度。由表1所示, 经辐照处理后, 黑椒牛肉的 L^* 值呈上升趋势($P<0.05$), a^* 值呈下降趋势($P<0.05$), b^* 值在辐照后无显著变化。当辐照剂量 ≥ 3 kGy时, 黑椒牛肉的 L^* 值由 40.11 ± 1.27 分别增加了3.90、2.95和5.28。当辐照剂量 ≥ 4 kGy时, a^* 值分别下降了1.26和2.54。这可能是辐照能够促使蛋白质变性, 从而导致牛肉保水性下降, 自由水流出后积累在

表面, 增强了黑椒牛肉表面对光的反射^[31]。随着贮藏时间的延长, 对照组和辐照组的 L^* 、 a^* 和 b^* 值均显著下降 ($P<0.05$), 但辐照组的 L^* 和 a^* 值较对照组下降缓慢, 而对照组的 b^* 值较辐照组下降缓慢。贮藏过程中肉制品微生物繁殖分解蛋白质能够影响其 L^* 值^[32], 而辐照具有杀菌功效, 能有效降低其对黑椒牛肉 L^* 值的影响。高立红等^[33]发现牛肉在贮藏过程中, 肌红蛋白与氧合肌红蛋白能够再次结合被氧化生成高铁肌红蛋白, 通过与微生物代谢产生的过氧化物和硫化氢的共同作用使牛肉呈褐色。郑维莎^[34]也发现辐照可降低鸡脯肉的 a^* 值, 而辐照能够促进黑椒牛肉的蛋白质降解和脂质氧化, 使黑椒牛肉 b^* 值下降^[35]。

表 1 辐照剂量对黑椒牛肉冷藏过程中色差的影响

Table 1 Effect of irradiation dose on color parameters of black pepper beef during refrigeration

色差	贮藏时间/d	0 kGy	2 kGy	3 kGy	4 kGy	6 kGy
L^*	0	40.11±1.27 ^{ac}	40.63±2.84 ^{abc}	44.01±0.39 ^{ab}	43.06±2.54 ^{abc}	45.39±1.93 ^{Aa}
	14	36.50±1.37 ^{Bab}	33.07±1.36 ^{Bc}	33.08±0.90 ^{Bc}	39.02±1.29 ^{Ba}	35.38±2.29 ^{Bbc}
	28	27.74±0.58 ^{Cc}	34.10±0.86 ^{Ba}	31.04±0.46 ^{Cb}	30.79±1.37 ^{Cb}	31.86±0.56 ^{Cb}
a^*	0	14.68±0.63 ^{Aa}	14.37±0.97 ^{Aa}	13.62±0.39 ^{Aa}	13.42±0.26 ^{Ab}	12.14±1.02 ^{Ab}
	14	13.68±0.78 ^{ABa}	13.15±0.97 ^{ABa}	13.49±0.66 ^{Aa}	12.94±1.39 ^{Aa}	12.22±0.45 ^{Aa}
	28	12.94±0.43 ^{Aa}	12.64±0.21 ^{Aa}	12.85±0.33 ^{Aa}	12.31±1.10 ^{Aa}	11.61±1.18 ^{Aa}
b^*	0	16.59±0.60 ^{Aa}	16.48±0.41 ^{Aa}	16.18±0.81 ^{Aa}	15.75±0.49 ^{Aa}	15.65±0.64 ^{Aa}
	14	15.16±0.46 ^{Ba}	13.45±0.58 ^{Bb}	13.83±1.20 ^{Bab}	13.39±0.35 ^{Bb}	13.95±0.96 ^{Bab}
	28	14.12±0.76 ^{Ba}	10.32±0.42 ^{Cb}	10.80±1.17 ^{Cb}	10.39±0.37 ^{Cb}	11.03±0.60 ^{Cb}

注: 大写字母表示不同贮藏时间黑椒牛肉之间差异显著 ($P<0.05$), 小写字母表示不同辐照剂量黑椒牛肉之间差异显著 ($P<0.05$)。

2.1.6 质构特性

硬度是肉制品的内部结合力, 能够保持肉制品的自身形状。由图5可知, 经辐照处理的黑椒牛肉的硬度随辐照剂量的增加均有所下降。辐照促使黑椒牛肉肌肉蛋白分解, 肌肉纤维渗透压增高, 内部纤维结构变得疏松, 硬度下降^[36]。当贮藏时间为14 d时, 各组的硬度仍无显著变化。当贮藏时间为28 d时, 对照组的硬度显著下降 ($P<0.05$), 由原本的 ($3\ 375.77\pm207.97$) g下降至 ($2\ 080.67\pm275.59$) g。这是因为随着时间延长, 黑椒牛肉开始腐败变质, 蛋白降解, 持水能力下降, 造成肉质变软, 硬度减小^[37]。

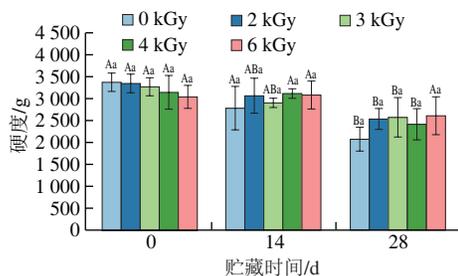
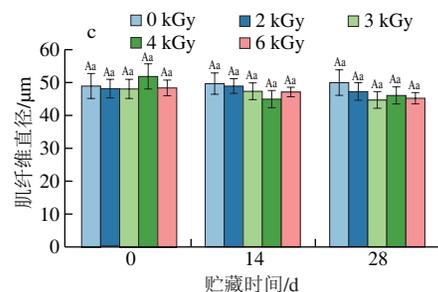
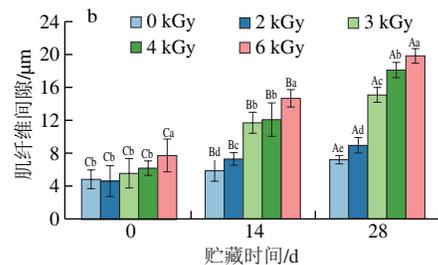
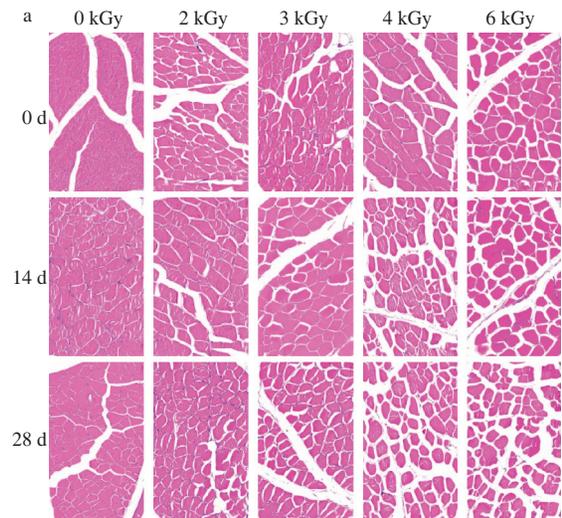


图 5 辐照剂量对黑椒牛肉贮藏期硬度的影响

Fig. 5 Effect of irradiation dose on hardness of black pepper beef during storage

2.1.7 肌纤维形态

为了解辐照处理对黑椒牛肉肌纤维变化的影响, 对黑椒牛肉的垂直肌纤维切片进行HE染色, 图6a为Case Viewer放大20倍拍照图。由图6b、c可知, 对照组的肌纤维形态整体相对完整紧密。辐照处理后, 黑椒牛肉的肌纤维开始分离歪曲, 形状不均匀, 且肌束间隙随辐照剂量增大而变大, 辐照剂量 ≥ 4 kGy时有显著性差异 ($P<0.05$)。随着贮藏时间的延长, 各组的肌纤维间隙增大, 辐照组比对照组的肌纤维间隙增长显著 ($P<0.05$)。可能是因为随着贮藏时间的延长和辐照剂量的增加, 微生物和辐照对蛋白骨架结构的破坏程度加大, MP的持水性降低, 导致汁液流失、肌纤维间隙变大^[38]。肌纤维直径在贮藏过程中无显著变化 ($P>0.05$)。当辐照剂量 ≥ 4 kGy时, 黑椒牛肉的肌原纤维结构模糊, 细胞排列不整齐, 与Huang Xiaoxia等^[39]探究辐照鸡胸肉保鲜品的结论相似。



a.黑椒牛肉肌纤维切片; b.肌纤维间隙; c.肌纤维直径。

图 6 辐照黑椒牛肉贮藏期肌纤维形态的变化

Fig. 6 Changes in muscle fiber morphology of irradiated black pepper beef during storage

2.2 BP-ANN模型

为了预测贮藏过程中辐照黑椒牛肉的品质变化，利用BP算法构建了多层前馈网络结构的ANN模型。表2为不同激活函数、不同隐藏层神经元个数下测试的预测结果。从测试集的RMSE、MAE和MAPE看，当激活函数为ReLU，并且神经元个数为14时，测试集的RMSE最小，为0.612 8；当神经元个数为15时，MAE最小，为0.412 1；神经元个数为13时，测试集的MAPE最小，为1.430 8%。与之相比，激活函数Tanh的效果较差，确定激活函数为ReLU，隐藏层神经元个数为14，构建6-14-6全连接BP-ANN模型，如图7所示。

表2 不同神经元个数的BP-ANN拟合效果

Table 2 Results of BP-ANN fitting with different numbers of neurons

激活函数	神经元个数	测试集RMSE	测试集MAE	测试集MAPE/%
ReLU	12	0.624 6	0.430 0	1.514 0
	13	0.650 7	0.458 8	1.430 8
	14	0.612 8	0.416 4	1.459 6
	15	0.618 8	0.412 1	1.549 2
	16	0.641 7	0.430 1	2.002 7
	17	0.662 8	0.452 7	2.168 5
	18	0.657 0	0.446 6	2.327 6
	19	0.671 2	0.475 4	1.826 6
	20	0.683 1	0.487 1	2.708 6
	Tanh	12	0.646 3	0.432 1
13		0.643 3	0.430 3	1.718 8
14		0.638 9	0.427 8	1.589 3
15		0.667 7	0.462 0	1.938 1
16		0.686 3	0.489 7	1.501 5
17		0.691 4	0.488 4	2.420 6
18		0.697 3	0.507 5	2.344 4
19		0.642 2	0.444 2	2.259 9
20		0.708 8	0.516 8	2.880 9

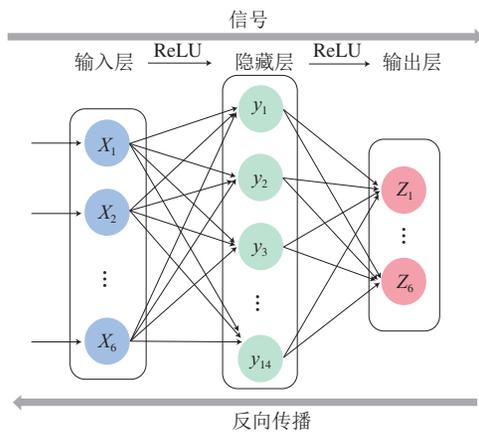


图7 6-14-6 BP-ANN模型结构图

Fig. 7 Six-fourteen-six structure of the BP-ANN model

MSE为损失函数，用于衡量网络输出结果与实际输出结果之间的差异，帮助神经网络优化参数，使得网络输出结果更接近实际结果。构建6-14-6 BP-ANN神经网络

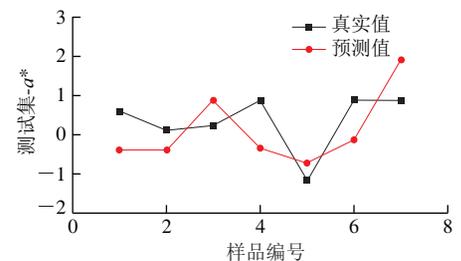
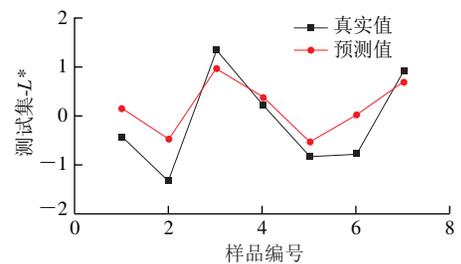
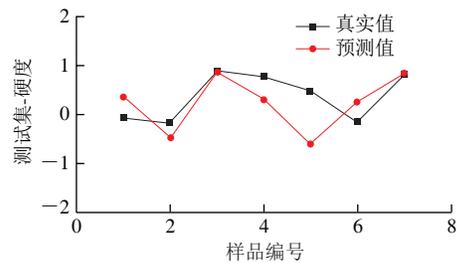
时，模型在训练集和验证集的损失变化如表3所示。迭代过程中，损失函数的值不断下降，经过100次迭代优化参数后，训练集和验证集的MSE都到达了一个较低的数值，可以认为模型预测的精度较高。

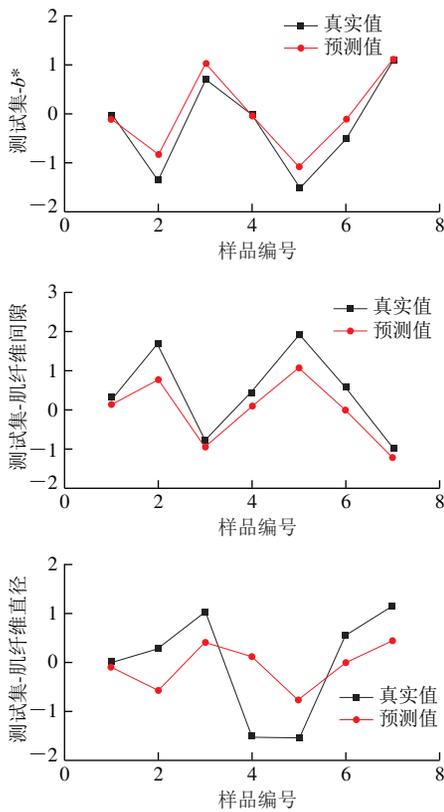
表3 训练集、验证集损失函数值变化

Table 3 Variations in loss function values of the training and validation sets

迭代次数	训练集MSE	验证集MSE
10	0.816 5	0.997 2
20	0.627 7	0.968 5
30	0.545 2	0.847 2
40	0.486 6	0.719 9
50	0.444 0	0.619 8
60	0.411 5	0.539 1
70	0.385 0	0.477 1
80	0.362 9	0.435 0
90	0.344 8	0.406 2
100	0.330 4	0.386 3

根据训练集和验证集中得到的BP-ANN模型，使用测试集数据对模型的精度进行评价，真实值与预测值之间的比较如图8所示。从预测结果可以发现，虽然模型在个别成分上的预测值不是特别好，但整体趋势基本一致；模型的RMSE、MAE、MAPE分别为0.612 8、0.416 1、1.459 6%，综合以上信息可以认为模型预测精度良好，且没有过拟合。





纵坐标为标准化后的数值, 图9、10同。

图8 测试集预测效果

Fig. 8 Prediction results for the testing set

模型在训练集中的预测效果与实际值比较如图9所示, 可以发现预测值与实际值的差距不大, 可以认为模型具有较好的预测精度和泛化能力。由图10可以发现, 模型对原肌球蛋白条带强度比率的预测精度优于其他输入值, 但其他输入值的预测结果也都符合实际值的变化趋势。全集的RMSE为0.573 5, MAE为0.468 1, MAPE为1.247 7%, 可以认为模型的精度较高。

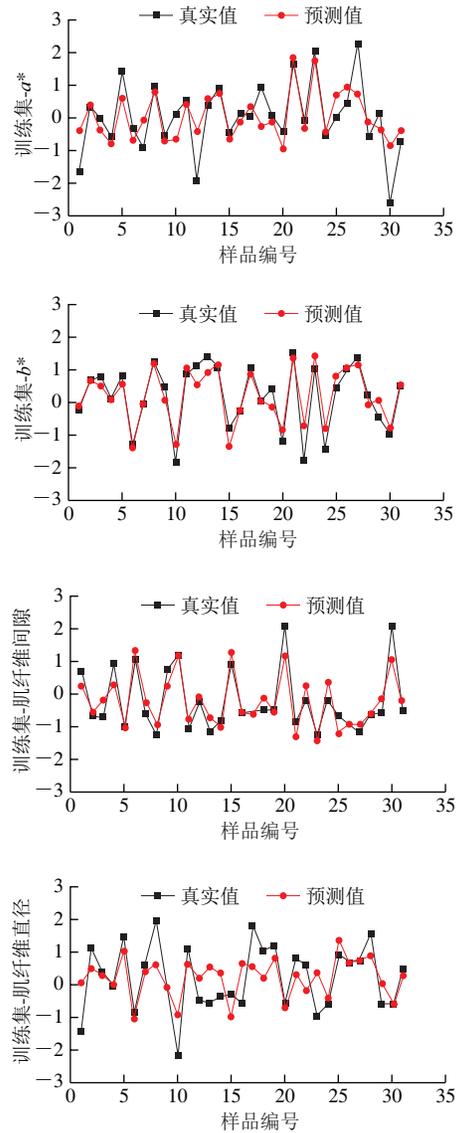
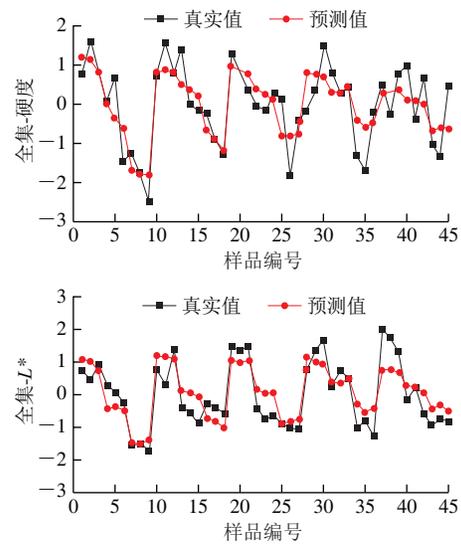
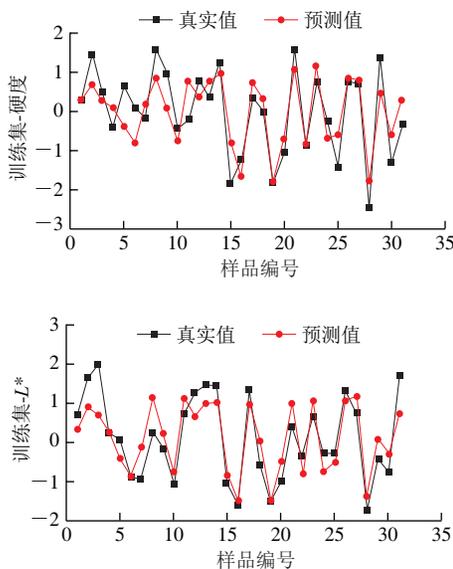


图9 训练集预测效果

Fig. 9 Prediction effect for the training set



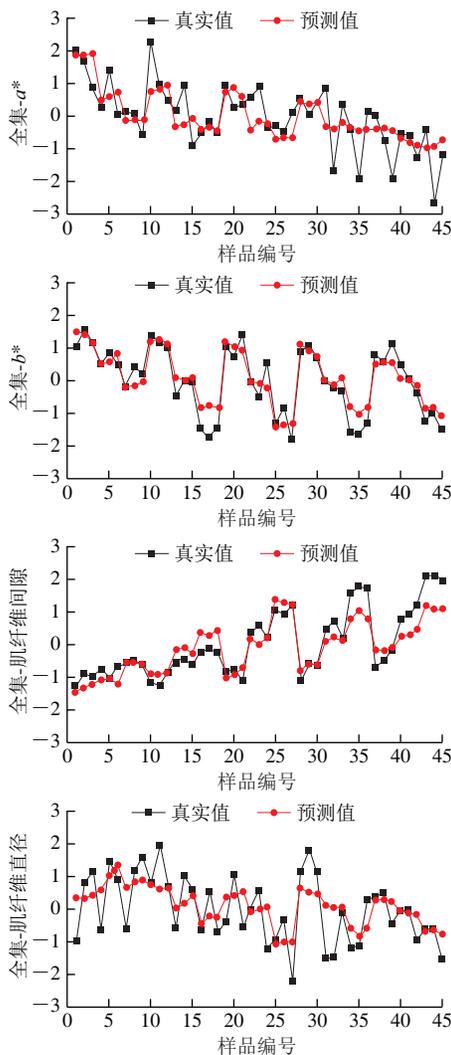


图10 全集预测效果

Fig. 10 Prediction results for the full set

3 结论

贮藏初期,辐照对黑椒牛肉的汁液流失率、TVB-N值、TBARS值有少许不利影响,但在贮藏过程中辐照能够有效延缓其品质的变化,且FAA的数据显示辐照对黑椒牛肉营养和滋味有积极影响。综合辐照对黑椒牛肉冷藏过程中的影响,确定3~4 kGy为最优的辐照剂量,能够保障黑椒牛肉在冷藏过程中的品质。

汁液流失率、TBARS值、TVB-N值、蛋白含量和FAA含量作为理化品质指标在辐照黑椒牛肉贮藏过程中差异显著,作为输入层建立黑椒牛肉品质预测模型。结果表明,采用6-14-6结构的BP-ANN模型能够获得较高准确的预测效果,其中“输入-隐藏层”和“隐藏-输出层”的激活函数为ReLU函数,隐藏层神经元个数为14,输入值的预测结果都符合实际值的变化趋势,该模型可以较好的预测辐照黑椒牛肉的品质变化。这些结果不仅为辐照在黑椒牛肉贮藏和保鲜的应用提供了数据支撑,也为肉类行业的智能升级提供了参考。

参考文献:

- [1] 管博文, 王卫, 唐丽, 等. 调理肉制品风味形成机制及其调控研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(2): 307-316. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2023.02.038.
- [2] 王立强. 黑椒牛肉粒的工艺优化及杀菌、冷藏和复热对其品质影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021: 13-14. DOI:10.27787/d.cnki.ghrbs.2021.000401.
- [3] 张晗, 高星, 宣仕芬, 等. 电子束辐照对鲈鱼肉肌原纤维蛋白生化特性及其构象的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 81-86. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180518-265.
- [4] 程述震, 王晓拓, 张洁, 等. 电子束剂量率对牛肉蛋白结构和理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 150-156. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803023.
- [5] 刘巧瑜, 陈俊文, 黄晓霞, 等. 基于脂质组学探究辐照对冷鲜乳鸽风味的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 270-277. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220517-223.
- [6] 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, 2021, 344: 128586. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128586.
- [7] XING W, LIU X Y, XU C Y, et al. Application of artificial neural network to predict benzo[a]pyrene based on multiple quality of smoked sausage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 163: 113571. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113571.
- [8] MALFATTI L H, ZAMPAR A, GALVÃO A C, et al. Evaluating and predicting egg quality indicators through principal component analysis and artificial neural networks[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 148: 111720. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111720.
- [9] 刘巧瑜, 陈俊文, 游云, 等. 辐照处理对冷鲜乳鸽品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 96-103. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220403-035.
- [10] ULU H. Evaluation of three 2-thiobarbituric acid methods for the measurement of lipid oxidation in various meats and meat products[J]. Meat Science, 2004, 67(4): 683-687. DOI:10.1016/j.meatsci.2003.12.014.
- [11] 魏燕超, 曹建昕, 刘满顺, 等. 陕西特色牛、羊肉食用品质及蛋白稳定性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 24-29. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.09.006.
- [12] QI J, WANG H H, ZHOU G H, et al. Evaluation of the taste-active and volatile compounds in stewed meat from the Chinese yellow-feather chicken breed[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(Suppl 3): S2579-S2595. DOI:10.1080/10942912.2017.1375514.
- [13] 张亚明, 丁昌江, 曹志远, 等. 红外光谱解析高压电场中牛肉的解冻特性[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 263-274. DOI:10.16429/j.1009-7848.2022.01.028.
- [14] 许萍, 黄敏, 廖涛, 等. 大蒜素复配保鲜剂对大口黑鲈保鲜效果的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(4): 148-155. DOI:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.04.017.
- [15] ESPE M, NORTVEDT R, LIE Ø, et al. Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) as raw material for the smoking industry. II: effect of different smoking methods on losses of nutrients and on the oxidation of lipids[J]. Food Chemistry, 2002, 77(1): 41-46. DOI:10.1016/s0308-8146(01)00320-x.
- [16] 程述震, 王宁, 王晓拓, 等. 电子束和 γ 射线辐照对冷鲜猪肉保鲜效果的研究[J]. 核农学报, 2016, 30(5): 897-903. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2016.05.0897.
- [17] 魏文婧. 低能电子束处理对冷鲜牛排品质及货架期的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 19-20. DOI:10.27277/d.cnki.gsdnu.2022.000802.

- [18] 陈谦, 杨敏, 高鹏, 等. ^{60}Co - γ 辐照对中式传统菜肴方便食品品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 249-253; 262. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.21.060.
- [19] 蓝碧锋, 刘宗敏, 白婵, 等. 不同剂量辐照对鲈鱼调理品保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 118-122. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.05.024.
- [20] LIU B, GURR P A, QIAO G G. Irreversible spoilage sensors for protein-based food[J]. ACS Sensors, 2020, 5(9): 2903-2908. DOI:10.1021/acssensors.0c01211.
- [21] 马利华, 王卫东, 宋慧, 等. 不同包装对肉品贮藏期间蛋白质氧化影响的研究[J]. 食品科技, 2017, 42(5): 106-110. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2017.05.022.
- [22] 王超, 刘言, 夏珍珍, 等. 基于近红外光谱技术的小龙虾新鲜度快速检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(1): 156-161. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2023)01-0156-06.
- [23] 王莹, 李茜, 朱迎春. 不同贮藏条件下牛肉的理化性质及感官品质的对比分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 119-127. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.2.0514.
- [24] 洪奇华, 王梁燕, 孙志明. 辐照技术在肉制品加工保鲜中的应用[J]. 核农学报, 2021, 35(3): 667-673. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2021.03.0667.
- [25] LIU Q Y, LIN Z Q, CHEN X M, et al. Characterization of structures and gel properties of ultra-high-pressure treated-myofibrillar protein extracted from mud carp (*Cirrhinus molitorella*) and quality characteristics of heat-induced sausage products[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113691. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113691.
- [26] XIE Y, CHEN B, GUO J, et al. Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process[J]. Meat Science, 2021, 179: 108527. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108527.
- [27] SHI Y, LI R Y, TU Z C, et al. Effect of γ -irradiation on the physicochemical properties and structure of fish myofibrillar proteins[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, 109: 70-72. DOI:10.1016/j.radphyschem.2014.12.016.
- [28] KONG Y, ZHANG L L, SUN Y, et al. Determination of the free amino acid, organic acid, and nucleotide in commercial vinegars[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(5): 1116-1123. DOI:10.1111/1750-3841.13696.
- [29] 瞿桂香, 马文慧, 钱文霞, 等. 不同剂量电子束辐照即食小龙虾的品质分析[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 155-161. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.10.026.
- [30] 梅卡琳, 宣仕芬, 谭贝贝, 等. 电子束辐照对细点圆趾蟹肉营养及滋味成分的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 169-174. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180424-313.
- [31] 何立超, 李成梁, 马素敏, 等. 辐照对猪肉火腿肠风味与品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 34-39. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709006.
- [32] ALI S, ZHANG W, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 808-814. DOI:10.1111/1750-3841.13696.
- [33] 高立红, 郑艳. 涂膜保鲜剂中添加乳糖酸对冷鲜肉的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2018, 39(14): 244-247; 251. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.14.046.
- [34] 郑维莎. 即食鸡脯肉软罐头的加工工艺研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 50.
- [35] FADHEL Y B, LEROY V, DUSSAULT D, et al. Combined effects of marinating and γ -irradiation in ensuring safety, protection of nutritional value and increase in shelf-life of ready-to-cook meat for immunocompromised patients[J]. Meat Science, 2016, 118: 43-51. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.03.020.
- [36] 吴俊师, 缪承杜, 温晓梅, 等. 辐照技术在肉及肉制品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 437-444. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022080293.
- [37] 崔晓颖, 赵鑫琦, 刘春云, 等. 冰晶形貌对反复冻融肉体系稳定性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 214-221. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210410-139.
- [38] 赵波, 应晓国, 张美超, 等. 贮运过程中刺身鱼水分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 184-190. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027048.
- [39] HUANG X X, YOU Y, LIU Q, et al. Effect of gamma irradiation treatment on microstructure, water mobility, flavor, sensory and quality properties of smoked chicken breast[J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136174. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.136174.