

基于生物阻抗的即配羊肉货架期无损检测方法

李鑫星¹ 张子怡¹ 梁步稳¹ 黄晓燕¹ 张国祥¹ 马瑞芹²

(1. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学模式动物重大设施建设办公室, 北京 100083)

摘要: 货架期是判断羊肉新鲜度的重要标准。为探讨生物阻抗技术在食品货架期检测方面的应用前景,提出了一种即配羊肉货架期无损检测方法。结合影响即配羊肉新鲜度变化的关键因素及生物阻抗的测量原理,针对电极数量、电极材料、电极排列方式等测试条件的不同,自主设计了电极作为生物阻抗测试前端。揭示了在 0、4、8℃ 的 3 个贮藏温度下即配羊肉阻抗参数和 TVB-N 含量的变化规律及即配羊肉阻抗与 TVB-N 含量、货架期的相关性;以 TVB-N 含量为关键参考指标,建立基于 BP 神经网络的即配羊肉货架期预测模型和评价方法,并将其与支持向量机模型、决策树模型进行对比,BP 神经网络模型的 F1 分数可达 95.9%。基于 BP 神经网络模型设计即配羊肉货架期检测系统,可实现用户友好的数据可视化与即配羊肉货架期的即时检测。

关键词: 即配羊肉; 货架期检测; 生物阻抗; BP 神经网络; 可视化系统

中图分类号: TS207 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0379-08 OSID: 

Bioimpedance-based Nondestructive Detection Method for Shelf-life of Ready-to-prepare Mutton

LI Xinxing¹ ZHANG Ziyi¹ LIANG Buwen¹ HUANG Xiaoyan¹ ZHANG Guoxiang¹ MA Ruiqin²

(1. *Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, China Agricultural University, Beijing 100083, China*

2. *National Research Facility for Phenotypic and Analysis of Model Animals, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

Abstract: Shelf life is an important indicator for evaluating the freshness of mutton, which is directly related to its quality. To explore the application prospects of bioimpedance technology for shelf-life detection of food, a nondestructive and efficient shelf-life detection method was proposed for ready-to-prepare mutton. Combining the key factors affecting the change of freshness of ready-to-prepare mutton and the measurement principle of bioimpedance, the electrodes were designed independently for measuring bioimpedance according to the different testing conditions such as the number of electrodes, electrode materials, and electrode arrangement. The changes of impedance and TVB-N content of ready-to-prepare mutton at three storage temperatures of 0℃, 4℃ and 8℃ and the correlation of impedance with TVB-N content and shelf life were revealed; a shelf-life prediction model and evaluation method of ready-to-prepare mutton based on BP neural network was established with TVB-N content as the key indicator, and it was compared with SVM (support vector machine) model and decision tree model. The F1-score of the BP neural network model was up to 95.9%. Based on the BP neural network model established above, a shelf-life detection system of ready-to-prepare mutton was developed by using Java language, which realized user-friendly data visualization and real-time detection of the shelf life of ready-to-prepare mutton. The research result can provide theoretical basis and software tool for the rapid and nondestructive detection of the shelf life of ready-to-prepare mutton, which can ensure the quality and safety of ready-to-prepare mutton and promote the sustainable and healthy development of the food industry.

Key words: ready-to-prepare mutton; shelf-life detection; bioimpedance; BP neural network; visualization system

收稿日期: 2021-07-14 修回日期: 2021-08-28
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-38)和欧盟 Switch Asia 项目(DCI:ASIE/2012/307-186)
作者简介: 李鑫星(1983—),男,副教授,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: lxxcau@cau.edu.cn
通信作者: 马瑞芹(1978—),女,高级工程师,主要从事农村建筑与农业生物环境工程研究,E-mail: maruiqin@cau.edu.cn

0 引言

羊肉富含优质蛋白质以及人体各种必需氨基酸等多种营养成分,而脂肪含量仅为猪肉的 1/2^[1]。近年来,我国羊肉产量稳步提升,截止到 2020 年,羊肉年产量已达到 492 万吨^[2],羊肉及其制品的市场需求将越来越大^[3]。然而,消费结构的变化和消费水平的提高使人们对羊肉的品质要求更加严格,货架期是衡量羊肉新鲜度的重要指标,关系到羊肉品质的优劣。

目前,肉品货架期检测手段主要以数学方法为主,如基于 Gompertz 方程、Arrhenius 方程建立的动力学模型等^[4]。挥发性盐基氮(TVB-N)含量通常被作为评价肉品新鲜度的关键参考指标^[5-6],可为货架期检测提供依据。文献[7]采用二阶多项式建立数学模型拟合不同环境温度、不同抑菌剂浓度和气调包装下鲶鱼片中铜绿假单胞杆菌的迟滞期,准确预测了鲶鱼片的剩余货架期。文献[8]以 TVB-N 为品质表征参数,利用 Arrhenius 方程建立了不同温度下冷鲜鸡货架期预测模型。但此类方法对实际操作条件要求较高,耗时长,计算过程复杂,且感官评分不具有客观性,难以满足肉品货架期的可靠性检测与食品生产现代化的要求。因此,亟需开发一种新的高效方法用于检测肉品的货架期。

随着肉品贮藏时间的增加,其生物组织会发生变化,通过阻抗幅值和相位角可以反映其变化情况^[9-11]。生物阻抗技术可实现对食品的快速无损检测^[12-15]并能避免传统试验和工业中化学试剂对食品的污染和浪费^[16]。

肉品阻抗的测量值主要取决于其肌肉组织内体液含量、细胞膜活性、细胞内外电阻的分布以及广泛存在的分布电容^[17]。不同种类的肉品测量数据之间的差异主要体现了肉品自身结构不同而带来的阻抗特性的差异^[18]。羊肉组织与大多数动物组织一样,由大量形状各异的细胞组成,细胞被细胞外液包裹着,这些细胞外液可视为电解质,具有良好的导电性,其生物阻抗主要由组织细胞结构和细胞内离子导电特性共同决定。生物阻抗法应用于检测即配羊肉的货架期,能更好地满足消费者的需求,更有利于整个行业的发展。

本文以即配羊肉为研究对象,对即配羊肉的生物阻抗特性进行试验研究。以 TVB-N 含量作为关键参考指标,探究即配羊肉生物阻抗特性(幅值和相位角)与 TVB-N 含量之间的关系,建立以生物阻抗参数为输入,货架期为输出的反向传播(BP)神经网络预测模型,并将其与支持向量机(SVM)、决策

树模型进行对比分析,最终基于 Web 构建用户友好的即配羊肉货架期检测系统。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为市售草原羔羊的里脊肉,作为肉羊胴体中肉质最为均匀的部位,能够有效消除筋骨、脂肪、筋膜等其它组织结构对试验结果的影响。

首先将羊肉切成 60 mm × 60 mm × 30 mm 的样本 33 个,装入塑封袋,随机分成 A、B、C 共 3 组。综合考虑 GB 20799—2016《食品安全国家标准 肉和肉制品经营卫生规范》与实际销售期间肉品的贮藏环境,选定 0、4、8℃ 作为即配羊肉样品的贮藏试验温度,以对比不同贮藏温度对即配羊肉货架期的影响。A、B、C 组分别放入 3 个温度下的恒温箱中冷藏,制样当天起,每过 24 h 分别从 3 组剩余样本中取用样本进行检测,将羊肉样本分割出 2 块尺寸为 30 mm × 30 mm × 10 mm 的肉片分别测量其阻抗参数值与 TVB-N 含量,试验周期在预试验基础上确定为 0 ~ 10 d。

1.2 电极设计

不同类型电极的阻抗测量结果存在差异^[19]。目前肉类阻抗检测所采用电极类型差异主要表现在电极数量、材料和排列方式等方面。最基本的测量方法是用两个电极去诱导电流和测量电压^[20-21]。近年来,学者们先后研究了四电极法^[22]、六电极法^[23]等多电极法^[24-25]测量生物体电阻抗。目前,临床医学对阻抗测量的多电极法进行了初步研究^[26],食品检测方面仍较多使用双电极测量方法。

本文采用双电极法测量即配羊肉的电阻抗,针管的材质为黄铜,将两根电极针串联作为激励电极,另外两根电极针串联作为测量电极。电极针长 2 cm,分布在一个边长为 1 cm 的正方形上。采用双电极测量方法进行即配羊肉的阻抗检测时,由于羊肉样品肌肉细胞的容抗特性,以及细胞结构和肌肉组织形成的方向特异性,随着激励频率的增加,接触阻抗和各向异性对阻抗测量的影响会逐渐减弱,所以可以忽略不计。

1.3 方法

1.3.1 生物阻抗测量

生物阻抗测量采用常州同惠电子股份有限公司的 TH2829A 型数字电桥测试仪,采用自制电极,测量时沿肌纤维组织横向插入电极约 10 mm,插入后保持羊肉样品和检测前端的相对稳定。将仪器的测试导线与测试前端的两个电极尾端相

连,选择 $Z-\theta$ 阻抗测量功能, Z 表示阻抗, θ 表示相位,设置电压为 1 V,偏置 0 V,选择不同的频率点进行扫频。

随着激励频率的上升,阻抗幅值与相位角会分别呈不同的变化趋势,阻抗幅值呈下降趋势,相位角则

呈上升趋势^[10]。本研究从 0.1 ~ 200 kHz 取 10 个频率点(0.1、0.5、1、5、10、50、100、125、150、200 kHz),测定每个样品的阻抗幅值和相位角特性,扫频后的结果将直接传送到与仪器相连的计算机上。

数据获取的整个流程如图 1 所示。

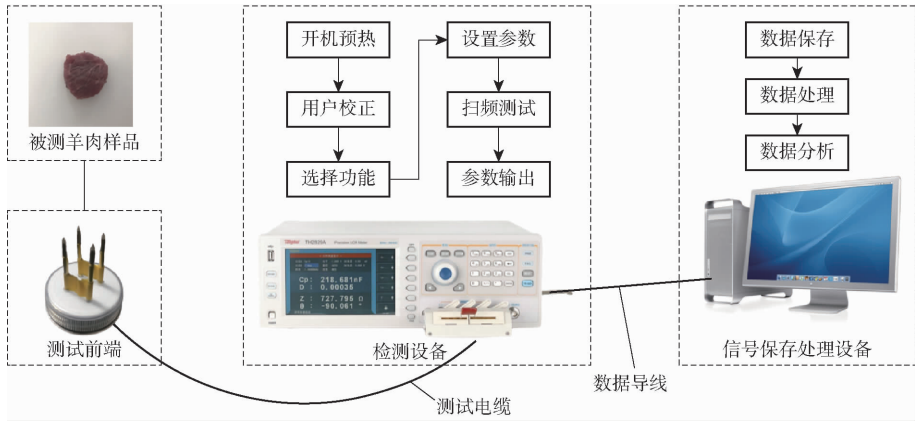


图 1 即配羊肉生物阻抗数据采集流程

Fig.1 Impedance collection process of ready-to-prepare mutton

1.3.2 TVB-N 含量测量

挥发性盐基氮(TVB-N)是动物性食品由于酶和细菌的作用,在腐败过程中,使蛋白质分解而产生的氨以及胺类等碱性含氮物质。即配羊肉样本中挥发性盐基氮含量按照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》进行测定。采用凯氏定氮法,取(10.00 ± 0.10) g 羊肉样品至 50 mL 离心管中,再添加 0.6 mol/L 高氯酸溶液至总体积为 25 mL,充分混合。然后加 0.6 mol/L 高氯酸溶液并定容至 40 mL。使用 LSC-50H 型离心机,于 4 000 r/min 离心 10 min 后过滤混合液。取 20 mL 上清液于消化管中,测定 TVB-N 含量,每个样品均测量 3 次,取 3 次测量的均值。TVB-N 含量(质量比)计算公式为

$$X = \frac{0.14(V - V')F}{m}$$

式中 X ——TVB-N 含量,mg/g
 V ——样品消耗的 0.010 0 mol/L 标准酸体积,mL
 V' ——空白对照消耗的 0.010 0 mol/L 标准酸体积,mL
 m ——样品质量,g
 F ——样品稀释系数

1.4 数据分析

1.4.1 阻抗变化趋势

图 2a ~ 2c 分别展现了在贮藏温度 0、4、8℃ 下即配羊肉在 0、2、4、6、8、10 d 时测量得到的阻抗幅值随激励频率的变化趋势。从图中可以看出,当激励频率低时,即配羊肉的阻抗幅值较高,这是由于低

频时细胞膜容抗大,可视为开路,电流只流经细胞外液;但是随着频率的升高,即配羊肉阻抗逐渐下降。电流流经细胞内外液,细胞膜容抗减小,阻抗幅值的变化也反映了生物组织电容性的特点。阻抗幅值在频率 0.1 ~ 0.5 kHz 下降趋势最为明显,0.5 kHz 后的阻抗幅值趋于恒定。在同一频率下,随着贮藏时间的增加,即配羊肉的阻抗幅值逐渐减小,而频率超过 5 kHz 后,不同贮藏时间的羊肉组织阻抗幅值变化趋势趋于一致。这是由于羊肉在贮藏过程中逐渐腐败变质,细胞的完整性缺失,细胞膜损坏,细胞内液流出,导致细胞整体阻抗的下降。

图 2d ~ 2f 分别展示了在贮藏温度 0、4、8℃ 下相位角随激励频率的变化趋势,随着激励频率的增加,即配羊肉的阻抗相位角呈现先减小后趋于平缓或略微呈现增大的稳定变化趋势。低频段从 0.1 kHz 到 5 kHz,阻抗相位角的减小十分明显。5 kHz 之后的中高频激励频率下相位角趋于平稳。在贮藏温度 0℃ 和 4℃ 下,随着贮藏时间的增加,其相位角基本重合,无显著差异。贮藏温度 8℃ 下各个贮藏时间的相位角呈先上升后下降的趋势,这是由于较高的温度使得羊肉在贮藏的过程中逐渐腐败,细胞结构发生变化。

1.4.2 TVB-N 含量变化趋势

随着贮藏时间的增加,羊肉逐渐腐败变质,羊肉样本中 TVB-N 含量会逐步增加。如图 3 所示,即配羊肉样品的 TVB-N 含量总体上呈现先增加后小幅下降的趋势,这主要是由于在酶和细菌的作用下,其含有的蛋白质、糖原等大分子物质降解为氨以及胺类等碱性含氮物质,导致其 TVB-N 含量的增加。

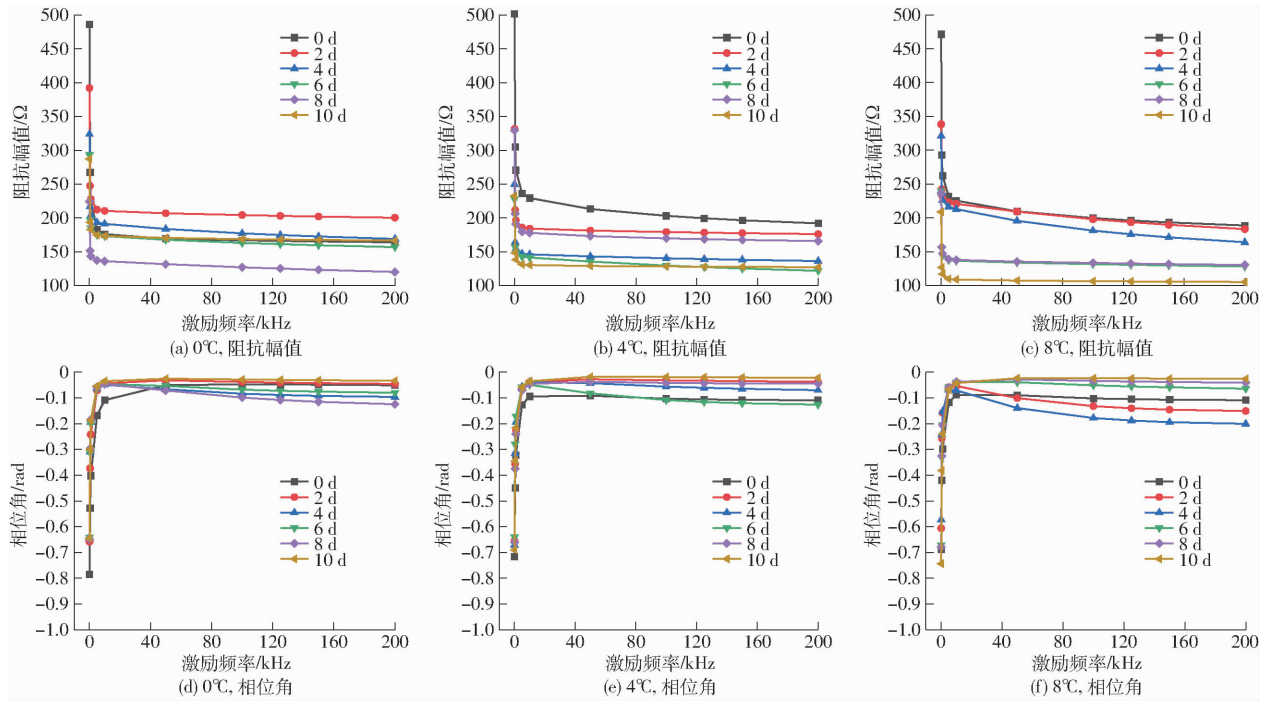


图2 不同温度下即配羊肉阻抗随激励频率变化曲线

Fig.2 Trend of impedance of ready-to-prepare mutton with excitation frequency at different temperatures

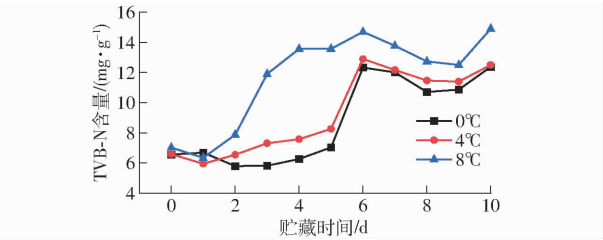


图3 不同温度下即配羊肉 TVB-N 含量随贮藏时间变化曲线

Fig.3 Trends of TVB-N content of ready-to-prepare mutton with storage time at different temperatures

1.4.3 阻抗参数与 TVB-N 含量的相关性分析

为了进一步研究即配羊肉新鲜度,使用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件,分别对阻抗幅值和相位角的变化与即配羊肉的 TVB-N 含量、货架期进行 Pearson 相关性分析,结果如表 1、2 所示。

由表 1、2 可以看出,在所选频率范围内,即配羊肉样本阻抗幅值与 TVB-N 含量在 0、4、8℃时均极显著相关($P < 0.01$)。0℃时,频率 0.1 ~ 10 kHz 范围内,相位角与 TVB-N 含量、货架期极显著相关($P <$

表 1 即配羊肉阻抗与 TVB-N 含量的相关系数

参数		激励频率/kHz									
		0.1	0.5	1	5	10	50	100	125	150	200
阻抗幅值	0	-0.511 **	-0.464 **	-0.414 **	-0.321 **	-0.308 **	-0.316 **	-0.328 **	-0.332 **	-0.335 **	-0.340 **
	4	-0.597 **	-0.581 **	-0.558 **	-0.520 **	-0.518 **	-0.540 **	-0.560 **	-0.566 **	-0.571 **	-0.576 **
	8	-0.598 **	-0.570 **	-0.554 **	-0.533 **	-0.532 **	-0.538 **	-0.534 **	-0.530 **	-0.525 **	-0.516 **
相位角	0	0.289 **	0.391 **	0.370 **	0.322 **	0.273 **	-0.022	-0.073	-0.084	-0.092	-0.103
	4	0.036	0.295 **	0.340 **	0.427 **	0.414 **	0.205 **	0.184 *	0.183 *	0.183 *	0.187 *
	8	-0.121	0.051	0.150	0.380 **	0.362 **	0.316 **	0.317 **	0.318 **	0.318 **	0.318

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。下同。

表 2 即配羊肉阻抗与货架期的相关系数

参数		激励频率/kHz									
		0.1	0.5	1	5	10	50	100	125	150	200
阻抗幅值	0	-0.654 **	-0.546 **	-0.448 **	-0.279 **	-0.254 **	-0.249 **	-0.253 **	-0.254 **	-0.255 **	-0.257 **
	4	-0.636 **	-0.598 **	-0.560 **	-0.500 **	-0.492 **	-0.498 **	-0.505 **	-0.507 **	-0.507 **	-0.506 **
	8	-0.712 **	-0.713 **	-0.705 **	-0.693 **	-0.693 **	-0.694 **	-0.683 **	-0.676 **	-0.668 **	-0.653 **
相位角	0	0.452 **	0.600 **	0.598 **	0.561 **	0.500 **	0.068	-0.009	-0.024	-0.035	-0.050
	4	0.110	0.368 **	0.423 **	0.552 **	0.562 **	0.322 **	0.293 **	0.289 **	0.287 **	0.287 **
	8	-0.347 **	-0.115	0.016	0.396 **	0.471 **	0.493 **	0.506 **	0.510 **	0.513 **	0.519 **

0.01);4℃时,在频率 0.5 ~ 50 kHz 范围内,相位角与 TVB-N 含量极显著相关,在频率 100 ~ 200 kHz 范围内,相位角与 TVB-N 含量显著相关,在频率 0.5 ~ 200 kHz 范围内,相位角与货架期极显著相关($P < 0.01$);8℃时,在频率 5 ~ 150 kHz 范围内,相位角与 TVB-N 含量极显著相关($P < 0.01$),在频率 0.1 kHz 与 5 ~ 150 kHz 范围内,相位角与货架期极显著相关($P < 0.01$)。从相关性分析来看,不同贮藏温度下,即配羊肉阻抗与 TVB-N 含量、货架期具有较好的相关性。

综上所述,以 TVB-N 含量为关键参考指标,选择快速无损的生物阻抗方法对即配羊肉货架期进行检测具有较高的可行性。

2 基于 BP 神经网络的即配羊肉货架期预测模型

BP(Back propagation)神经网络具有输入正向传递、误差反向传播的特点,在回归预测等非线性动态问题中被广泛应用。本研究基于 BP 神经网络进行建模,为突出 BP 神经网络模型的高度自学习和自适应能力与泛化能力,将其与 SVM、决策树模型进行了对比分析。

2.1 模型设计

BP 神经网络的设计主要包括激活函数、输入层和输出层节点、隐含层节点以及优化函数选取等方面。

- (1)激活函数
- 即配羊肉的货架期有多种情况,即本研究属于多分类问题。因此,选用 Softmax 作为激活函数。
- (2)输入层
- 本研究的目的是探究即配羊肉生物阻抗特性(阻抗幅值和相位角)与货架期之间的关系,由于输入数据为阻抗幅值与相位角,因此选择输入节点的数量为 20 个,分别代表 10 个激励频率下的阻抗幅值和相位角。
- (3)输出层
- 根据即配羊肉货架期的实际需要,输出层选择 1 个节点,表示即配羊肉的货架期, N 的取值为 0 ~ 10,分别表示即配羊肉的货架摆放时间(单位:d)。
- (4)隐含层
- 为了选择神经网络模型性能最优化的隐含层节点数,基于交叉验证方法,以误差精度为评估指标,对模型进行性能测试并确定隐含层节点数为 20 个。
- (5)优化函数
- 初始权重采用随机初始化,基于交叉验证选择 L-BFGS 算法进行参数调优。L-BFGS 是解决无

约束非线性规划问题最常用的方法,具有收敛速度快、消耗内存少等优点。

2.2 模型建立

首先对得到的 495 组羊肉阻抗数据随机分配构建训练样本集和测试样本集,每 5 个样本中随机选取一个作为预测集样本,其余 4 个作为校正集样本。以检测系统前端采集到的生物阻抗作为输入,羊肉货架期作为期望输出,图 4 为即配羊肉货架期预测模型建模原理图。

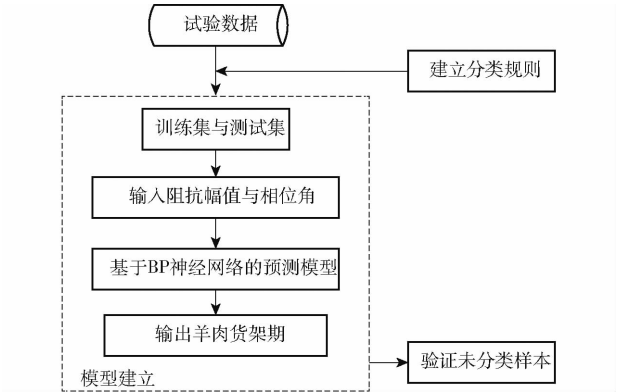


图 4 即配羊肉货架期预测模型建模原理图
Fig. 4 Construction principle of shelf-life prediction model of ready-to-prepare mutton

2.3 模型对比与结果分析

本研究建立 BP 神经网络模型对即配羊肉的货架期进行预测,并同时基于 SVM、决策树进行建模以对比分析不同模型预测的性能,模型对比结果如表 3 所示。

表 3 模型对比结果			
Tab. 3 Results comparison of different models %			
模型	精确率	召回率	F1 分数
SVM	90.6	89.9	89.8
决策树	92.8	91.8	91.8
BP 神经网络	96.4	96.0	95.9

本研究建立的基于 SVM 的即配羊肉货架期预测模型,使用网格搜索法,经 5 重交叉验证后,确定最佳的惩罚系数为 100,最佳的核函数为径向基核函数,整体分类效果较为稳定,然而模型仅能较为准确地预测货架期为 0、1、2 d 的样本,对于其余货架期的分类精度不高,模型的 F1 分数仅为 89.8%。

相较于 SVM 模型,基于决策树的预测模型分类效果有所提升,模型 F1 分数可达 91.8%,其对 0 ~ 4 d、7 ~ 10 d 货架期具有较好的分类效果,这些货架期的 F1 分数可达 90% 以上,但是对 5、6 d 的货架期分类不准确。这主要由于羊肉在贮藏过程中逐渐腐败变质,细胞的完整性缺失,细胞膜损坏,细胞内液流出,细胞的结构发生了改变,导致细胞整体的阻抗

波动较大,对模型的分类效果产生了一定的影响。

由表 3 可以看出,即配羊肉货架期预测的最优模型为 BP 神经网络模型,模型 F1 分数达到 95.9%。本研究建立的 BP 神经网络模型含 3 层隐含层,隐含层节点数均为 20 个,设置该模型的迭代次数为1 000,表 4 为 BP 神经网络模型的性能指标,模型对 0、1、2、3、6、9、10 d 货架期的分类精确率均达到了 100%,除第 3 天外,F1 分数均达到了 90%以上,且召回率与精确率得分接近,精确度、可靠性、稳定性都有了很大的提高,对于即配羊肉的货架期具有较好的拟合效果,能够实现即配羊肉货架期的精准预测,因此可以作为预测即配羊肉货架期的模型。

表 4 BP 神经网络模型性能指标

performance metrics			%
货架期/d	精确率	召回率	F1 分数
0	100	100	100
1	100	100	100
2	100	88.9	94.1
3	100	77.8	87.5
4	90.0	100	94.7
5	90.0	100	94.7
6	100	100	100
7	90.0	100	94.7
8	90.0	100	94.7
9	100	100	100
10	100	88.9	94.1
宏平均	96.4	96.0	95.9

3 系统构建与应用

3.1 设计目标

传统的羊肉货架期检测方法过程繁琐、效率低、耗时长,检测过后的样本被破坏且对操作人员的素质要求高。为实现对即配羊肉货架期的快速无损检测,基于生物阻抗技术的即配羊肉新鲜度变化机理,结合 BP 神经网络模型,设计用户友好的即配羊肉货架期检测系统。

3.2 结构与功能

本系统基于 Web 开发中典型的 B/S 结构,采用 MVC 模式分离视图层和业务逻辑层,以简化系统的维护与修改,主要使用 Java 语言开发,采用面向全层次的前后端开发者的开源框架 layui 构建友好的用户界面,同时使用 tomcat 作为 Web 服务器,使用 MySQL 数据库来存储数据。

根据设计目标,本系统设计了 3 个功能模块,包括用户管理、数据查询与可视化、即配羊肉评价,如图 5 所示。

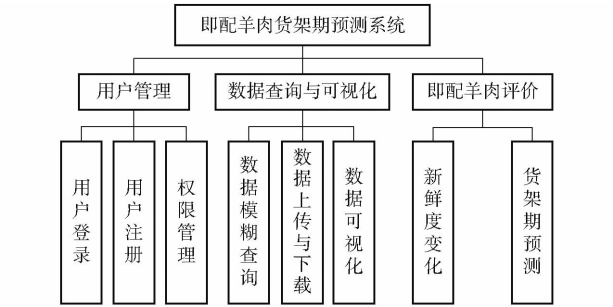


图 5 即配羊肉货架期检测系统功能结构图

Fig.5 Structure diagram of shelf-life detection system of ready-to-prepare mutton

(1)用户管理功能。用户管理功能主要包括登录、注册、权限管理,系统管理员对用户进行管理,根据用户需求为其分配权限,如图 6 所示。

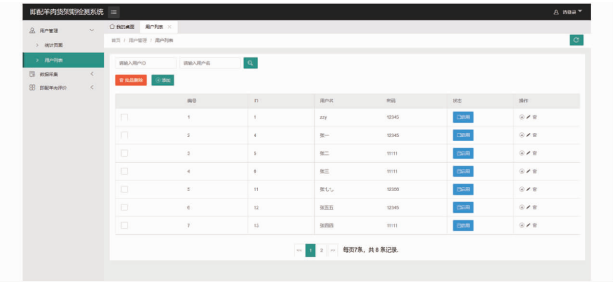


图 6 用户管理界面

Fig.6 User management interface

(2)数据查询与可视化功能。用户可通过系统对阻抗数据进行模糊查询,上传新的阻抗参数及新鲜度数据,并查看数据的可视化折线图,如图 7~9 所示。



图 7 数据查询界面

Fig.7 Data query interface

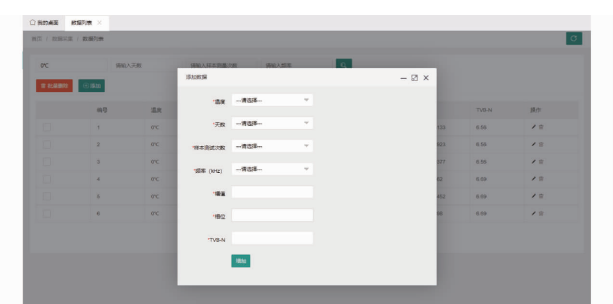


图 8 数据上传界面

Fig.8 Data upload interface

(3)即配羊肉评价功能。系统根据用户上传的



图 9 新鲜度变化趋势可视化界面

Fig.9 Visualization interface of freshness trend

羊肉阻抗参数数据,调用已建立的 BP 神经网络预测模型,可即时给出该即配羊肉样本的货架期,实现羊肉货架期的快速检测,如图 10 所示。

4 结论

(1)结合影响即配羊肉新鲜度变化的因素及生物阻抗的测量原理,针对电极数量不同、电极材料不同等测试条件,设计选择了最优的生物阻抗测试前端。对采集得到的数据进行分析,揭示在 0、4、8℃ 的 3 个温度下即配羊肉阻抗和 TVB-N 含量的变化规律以及它们的相关性。

(2)以即配羊肉的阻抗幅值和相位角作为输

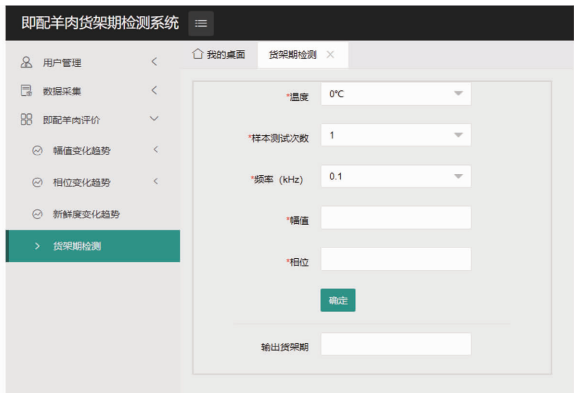


图 10 即配羊肉货架期检测界面

Fig.10 Shelf-life detection interface of ready-to-prepare mutton

入,TVB-N 含量作为关键参考指标,以货架期作为期望输出,基于 BP 神经网络、SVM、决策树建立预测模型,经模型对比与改进,最终确定 BP 神经网络模型作为本研究的预测模型,模型 F1 分数达 95.9%,可实现即配羊肉货架期的精确预测。

(3)基于 layui 框架,以 BP 神经网络为算法核心,构建了即配羊肉货架期检测系统,为实现对即配羊肉货架期的快速无损检测,建立合理的羊肉货架期的检测体系提供了有效的理论依据与软件工具。

参 考 文 献

[1] 秦瑞升,谷雪莲,刘宝林,等.不同贮藏温度对速冻羊肉品质影响的实验研究[J].食品科学,2007,28(8):495-497.
QIN Ruisheng, GU Xuelian, LIU Baolin, et al. Experimental study on effects of storage temperature on quality of frozen lamb [J]. Food Science, 2007,28(8):495-497. (in Chinese)

[2] 2020 中国统计年鉴[J].统计理论与实践,2021(1):2.

[3] 刘文营,王守伟.羊肉生产及加工工艺对肉及肉制品品质的影响研究进展[J].食品科学,2020,41(1):304-311.
LIU Wenyong, WANG Shouwei. Recent progress in understanding the effect of mutton production and processing technologies on the quality of meat and meat products[J]. Food Science, 2020,41(1):304-311. (in Chinese)

[4] 史策,钱建平,韩帅,等.水产品货架期预测模型的研究进展[J].食品科学,2017,38(15):294-301.
SHI Ce, QIAN Jianping, HAN Shuai, et al. Progress in shelf life prediction models for aquatic products[J]. Food Science, 2017,38(15):294-301. (in Chinese)

[5] 朱荣光,姚雪东,段宏伟,等.羊肉挥发性盐基氮的高光谱图像快速检测研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(3):806-810.
ZHU Rongguang, YAO Xuedong, DUAN Hongwei, et al. Study on the rapid evaluation of total volatile basic nitrogen (TVB-N) of mutton by hyperspectral imaging technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(3):806-810. (in Chinese)

[6] QIAO Lu, TANG Xiuying, DONG Jun. A feasibility quantification study of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in duck meat for freshness evaluation[J]. Food Chemistry, 2017,237:1179-1185.

[7] PANG Y H, ZHANG Li, ZHOU Siyuan, et al. Growth behavior prediction of fresh catfish fillet with *Pseudomonas aeruginosa* under stresses of allyl isothiocyanate, temperature and modified atmosphere[J]. Food Control, 2015,47:326-333.

[8] 瞿洋,索玉娟,蔡祥,等.基于挥发性盐基氮快速预测冷鲜鸡货架期[J].食品工业科技,2021,42(16):311-316.
QU Yang, SUO Yujuan, CAI Xiang, et al. Shelf-life prediction of chilled chicken based on total volatile basic nitrogen[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021,42(16):311-316. (in Chinese)

[9] AFONSO J, GUEDES C, SANTOS V, et al. Utilization of bioelectrical impedance to predict intramuscular fat and physicochemical traits of the beef *longissimus thoracis et lumborum* muscle[J]. Foods, 2020,9(6):836.

[10] 王政纲,赵丽华,苏琳,等.冰温贮藏羊肉电阻抗特性及肉品质相关性分析[J].食品科学,2019,40(1):249-255.
WANG Zhenggang, ZHAO Lihua, SU Lin, et al. Correlation analysis between electrical impedance and quality of mutton during controlled freezing-point storage[J]. Food Science, 2019,40(1):249-255. (in Chinese)

[11] DAMEZ J L, CLERJON S, ABOUELKARAM S, et al. Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing[J]. Journal of Food Engineering, 2008,85(1):116-122.

[12] NGUYEN H B, NGUYEN L T. Rapid and non-invasive evaluation of pork meat quality during storage via impedance

measurement[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015,50(8):1718–1725.

[13] SHAIK S, SAMINATHAN A, SHARMA D, et al. Monitoring microbial growth on a microfluidic lab-on-chip with electrochemical impedance spectroscopic technique[J]. Biomedical Microdevices, 2021,23(2):1–12.

[14] 李伟明, 王鹏, 陈天浩, 等. 基于阻抗特性和神经网络的鸡胸肉冻融次数鉴别方法[J]. 农业工程学报, 2014,30(7):250–257.

LI Weiming, WANG Peng, CHEN Tianhao, et al. Classification of chicken breasts with different freezing-thawing cycles by impedance properties and artificial neural networks[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(7):250–257. (in Chinese)

[15] ZHAO Xin, ZHUANG Hong, YOON S C, et al. Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: a review on basic principles, measurement methods, and recent advances[J]. Journal of Food Quality, 2017,2017:1–16.

[16] 彭见林, 李慧勤, 高瑞萍, 等. 电阻抗技术在肉品品质控制中的应用[J]. 食品科学, 2011,32(5):326–330.

PENG Jianlin, LI Huiqin, GAO Ruiping, et al. A review on applications of electrical impedance technology in quality control of meat[J]. Food Science, 2011,32(5):326–330. (in Chinese)

[17] BAI Xue, HOU Jumin, WANG Lu, et al. Electrical impedance analysis of pork tissues during storage[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018,12(1):164–172.

[18] 沈慧星, 陶涵斌, 潘慧瑶, 等. 基于单片机系统和生物阻抗的鱼体贮藏方式检测技术[J]. 农业机械学报, 2021,52(1):333–337.

SHEN Huixing, TAO Hanxiao, PAN Huiyao, et al. Detection technology for fish storage method based on single-chip computer system and biological impedance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(1):333–337. (in Chinese)

[19] JONES D M, SMALLWOOD R H, HOSE D R, et al. Modelling of epithelial tissue impedance measured using three different designs of probe[J]. Physiological Measurement, 2003,24(2):605–623.

[20] DE JESÚS C, HERNÁNDEZ-CORONADO G, GIRÓN J, et al. Classification of unaltered and altered dry-cured ham by impedance spectroscopy: a preliminary study[J]. Meat Science, 2014,98(4):695–700.

[21] 王智运, 赵硕峰, 邓亲恺, 等. 生物组织穿刺电极的设计及其结构对电阻抗测量的影响[J]. 中国生物医学工程学报, 2011,30(3):468–471.

WANG Zhiyun, ZHAO Shuofeng, DENG Qinkai, et al. Implementation of impedance measurement electrode for biologic tissue puncture and initial measurement[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2011,30(3):468–471. (in Chinese)

[22] 张军, 李小昱, 王为华, 等. 淡水鱼鲜度检测系统的阻抗特性测试[J]. 农业机械学报, 2007,38(9):103–107.

ZHANG Jun, LI Xiaoyu, WANG Weihua, et al. Measurement of bio-impedance characteristic of freshwater fish based on virtual instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(9):103–107. (in Chinese)

[23] 黄仲曦, 邓亲恺, 郭云波, 等. 一种新的六电极人体阻抗测量方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2000,17(3):189–191.

HUANG Zhongxi, DENG Qinkai, GUO Yunbo, et al. A new technique of bioelectrical impedance measure with six electrode[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2000,17(3):189–191. (in Chinese)

[24] KARKI B, WI H, MCEWAN A, et al. Evaluation of a multi-electrode bioimpedance spectroscopy tensor probe to detect the anisotropic conductivity spectra of biological tissues[J]. Measurement Science and Technology, 2014,25(7):75702.

[25] 单珂, 刘照阳, 王芳, 等. 基于八电极的生物电阻抗分析检测系统设计[J]. 软件导刊, 2018,17(8):141–143.

SHAN Ke, LIU Zhaoyang, WANG Fang, et al. Design of electrical impedance analysis system based on eight electrodes[J]. Software Guide, 2018,17(8):141–143. (in Chinese)

[26] NGUYEN D T, KOSOBRODOV R, BARRY M A, et al. Electrode-skin contact impedance: in vivo measurements on an ovine model[J]. Journal of Physics Conference Series, 2013,434(1):012023.

(上接第 369 页)

[24] YE W, HUANG J, LIN J, et al. Environmental evaluation of bipolar membrane electrodialysis for NaOH production from wastewater: conditioning NaOH as a CO₂ absorbent[J]. Separation and Purification Technology, 2015,144:206–214.

[25] DANANJAYAN R R T, KANDASAMY P, ANDIMUTHU R. Direct mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,112:4173–4182.

[26] REDDY K J, WEBER H, BHATTACHARYYA P, et al. Instantaneous capture and mineralization of flue gas carbon dioxide: pilot scale study[J]. Nature Precedings, 2010,5404(1):1–11.

[27] DRI M, SANNA A, MAROTO-VALER M M. Mineral carbonation from metal wastes: effect of solid to liquid ratio on the efficiency and characterization of carbonated products[J]. Applied Energy, 2014,113(3):515–523.

[28] WANG W, ZHENG Y, LIU X, et al. Characterization of typical biomass ashes and study on their potential of CO₂ fixation[J]. Energy & Fuels, 2012,26(9):6047–6052.

[29] POLETTINI A, POMI R, STRAMAZZO A. Carbon sequestration through accelerated carbonation of BOF slag: influence of particle size characteristics[J]. Chemical Engineering Journal, 2016,298:26–35.

[30] JI L, YU H, ZHANG R, et al. Effects of fly ash properties on carbonation efficiency in CO₂ mineralisation[J]. Fuel Processing Technology, 2019,188(1):79–88.