

基于超声成像技术的冷鲜与解冻牛肉鉴别方法

孙宗保 王天真 邹小波 闫晓静 梁黎明 刘小裕
(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对市场上存在以解冻牛肉冒充冷鲜牛肉售卖的问题,研究了利用超声成像技术对冷鲜与解冻牛肉进行质构分析与鉴别的可行性。首先,通过超声成像设备采集冷鲜与解冻牛肉超声图像信息,并结合质构参数、微观结构和部分理化指标分析图像差异成因。然后,采用灰度共生矩阵法提取图像纹理特征值,利用主成分分析法进行数据降维处理,分别建立线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)和支持向量机(Support vector machine, SVM)两种判别模型。结果表明,两种判别模型均有较好的分类效果,其中 LDA 模型更优,当主成分数为 5 时,模型的训练集和测试集识别率均达到 100%。说明应用超声成像技术对冷鲜与解冻牛肉进行质构分析与鉴别是可行的。

关键词: 冷鲜牛肉; 解冻牛肉; 超声成像; 判别模型

中图分类号: TS251.7; R445.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0349-06

Discrimination of Fresh and Frozen-thawed Beef Based on Ultrasound Imaging

SUN Zongbao WANG Tianzhen ZOU Xiaobo YAN Xiaojing LIANG Liming LIU Xiaoyu
(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Fresh beef is more expensive than frozen-thawed beef for its good quality and taste. Some unscrupulous traders labeled frozen-thawed beef as fresh beef for sale. The feasibility of using ultrasonic imaging technology to analyze and identify fresh and frozen-thawed beef was studied. Firstly, the texture, microstructure and some physical and chemical indexes of the fresh and frozen-thawed beef were collected to analyze their differences. Secondly, a total of 60 ultrasound images of fresh and frozen-thawed beef were collected by ultrasound imaging system. Twenty common texture characteristic values defined by grey level cooccurrence matrix were collected. Then, principal component analysis (PCA) for data dimension reduction was used, and linear discriminant analysis (LDA) and support vector machine (SVM) were used to discriminate the samples. The result showed that there were significant differences ($P < 0.01$) in texture index, L^* and cooking loss between fresh and frozen-thawed beef. These differences combined with microstructural images showed that the tissue structure of frozen-thawed beef was damaged and the internal texture of frozen-thawed beef was poor. The ultrasound images of fresh and frozen-thawed beef showed significant differences, which could be well explained by the above studies. The texture features of the ultrasound image of fresh and frozen-thawed beef were significantly different ($P < 0.01$). Both LDA and SVM had good discriminant results, especially LDA. When principal component signals were five, the precision rates of train set and test set of LDA were both 100%. The results showed that it was feasible to distinguish the fresh and frozen-thawed beef by using ultrasound imaging technology.

Key words: fresh beef; frozen-thawed beef; ultrasound imaging; discriminative model

0 引言

牛肉具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇等特点^[1]。随着社会经济的发展,我国牛肉的消费需求量逐年增加,同时人们对牛肉的品质要求也不断提高^[2]。我国肉牛行业起步较晚、起点较低,高档牛肉消费需

收稿日期: 2019-01-21 修回日期: 2019-03-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0401104)和江苏高校优势学科建设工程项目
作者简介: 孙宗保(1976—),男,副教授,博士,主要从事食品、农产品品质分析与检测研究,E-mail: zongbaos@163.com
通信作者: 邹小波(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品、食品品质与安全无损检测研究,E-mail: zou_xiaobo@ujs.edu.cn

求主要以进口为主^[3]。冷鲜牛肉和冷冻牛肉是现阶段我国主要的牛肉进口形式。冷冻牛肉在冷冻过程中由于冰晶生长,细胞和组织结构遭到机械挤压和破坏^[4],蛋白质发生变性,肉的胶体性质被破坏;在解冻过程中,肉内汁液大量流失,造成肉品食用品质下降^[5]。而冷鲜牛肉从加工到销售始终处于冷链控制下,酶的活性和大多数微生物的生长繁殖被抑制,并且冷鲜牛肉经历了较为充分的成熟过程,肉的嫩度增加,肉质得到改善,滋味鲜美。通常情况下,冷鲜牛肉比同类冷冻牛肉货架期短,价格也高。近年来,有不法商贩将冷冻牛肉解冻后充当冷鲜牛肉贩卖,从中获取非法利益,消费者从感官上难以辨别。因此有必要对冷鲜与解冻牛肉进行有效的区分。目前鉴别冷鲜和解冻肉的方法有酶法、DNA法、光谱法、生物成像法和感官评价法等^[6],这些方法存在有损、耗时或片面不直观的缺点,所以有必要研究一种全面直观、无损快速的检测方法。

超声波是指超出人耳听力范围的机械波(频率 20 kHz 以上)^[7],根据能量水平可分为高能量超声波和低能量超声波。高能量超声波常用于清洗^[8]和强化辅助^[9],低能量超声波常用于检测^[10]和诊断^[11]。当超声波传经两种声阻抗不同的相邻介质的界面时,会发生反射和折射。超声成像设备利用传感器收集处理超声波在待测物质中传播产生的反射回波,在计算机上形成图像,通过图像可对待测物质的内部结构作出评价。超声成像技术作为一项准确、快速的无损检测技术,目前广泛运用于医疗诊断^[11-12]、工业检测^[13-14]等领域。文献[15]通过采集分析超声图像,利用超声成像技术成功鉴别大西洋鲑早期性别和发育期,为超声成像技术在鱼类养殖中的应用提供参考。而超声成像技术在食品检测领域的应用报道较少。文献[16]通过插值值等方法处理优化因衍射和折射效应发生扭曲的超声图像,成功检出干酪和鸡肉中异物。解冻牛肉经冷冻又解冻的过程,质构会发生变化^[17],因此可以通过牛肉的质构信息对牛肉品质作出评价。文献[18]分别测定了冷鲜和解冻牛肉的质构参数和新鲜度指标,建立了牛肉质构参数与新鲜度之间的关系。超声成像技术可以获得待测物体内部结构声学特性的信息^[19],不同质构特性的牛肉对超声波反射强度不同,故可以通过对冷鲜与解冻牛肉超声图像的采集处理,进行冷鲜和解冻牛肉质构分析和鉴别。

本文利用超声成像技术采集冷鲜与解冻牛肉的超声图像,结合质构参数、微观结构和部分理化指标分析图像差异的成因,用灰度共生矩阵法提取图像的纹理特征变量,建立线性判别分析和支持向量机

模型,对冷鲜与解冻牛肉进行判别,以期为超声成像技术在冷鲜与解冻牛肉判别方面的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 样品准备

试验所用样本产地均为澳大利亚,活牛在澳大利亚宰杀分割包装后空运至国内,再通过冷藏车运送到镇江麦德龙超市,全程冷链运输。从镇江麦德龙超市购得 12 块真空包装的牛腱子肉,每块牛腱子肉(800 g 左右)切割出 10 个 3 cm × 3 cm × 1 cm 的肉块,共计 120 个样品。其中 60 个样品作为冷鲜肉冷藏 7 d 后进行试验,另外 60 个样品经真空包装机独立真空包装后置于 -18℃ 冰柜中冷冻 7 d 后取出,在 4℃ 下解冻 2 d 后进行试验。样品一半用于理化试验,另一半用于质构测定和超声图像采集。为了使冷鲜和解冻牛肉更具有对比性,切割出的相邻的两块牛肉其中一块作为冷鲜肉,另一块作为解冻肉进行试验。

1.2 试验方法

1.2.1 质构测定

采用 TA-XT2i 型质构仪(英国 SMS 公司)对样品进行质构测试,采用 P/50 型探头,探头垂直肌纤维方向进行测定。测试条件:环境温度 20 ~ 25℃,测前速率 5 mm/s,测试速率 1 mm/s,测后速率 5 mm/s,压缩比 35%,测定间隔时间 5 s。质构测定结果用 TPA-macro 程序分析。

1.2.2 微观结构观察

分别从冷鲜与解冻牛肉上取 0.3 cm × 0.3 cm × 0.6 cm 肉样,放入 4% 多聚甲醛中 4℃ 固定 48 h,酒精脱水,石蜡包埋,切片厚约为 5 μm,HE(苏木精-伊红染色法)常规染色,最后封片。使用 DM6000B 型显微镜进行切片观察。

1.2.3 色差和蒸煮损失率测定

采用 Hunterlab 型分光测色仪,测定样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值(明度、红度和黄度)。测试前先用标准白板和黑卡校正仪器。每个牛肉样品在不同肌肉位置测定 3 次,取平均值。

取一定量的肉样,用分析天平准确称量,记为 m_1 ,装入蒸煮袋中密封,放入 80℃ 的水浴锅中加热 20 min 后取出,冷却后用吸水纸吸干肉块表面水分,再次称量,记为 m_2 。

蒸煮损失率计算公式为

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

式中 W ——蒸煮损失率

m_1 ——蒸煮前肉样质量
 m_2 ——蒸煮后肉样质量

1.2.4 超声图像采集

通过实验室自主研发的超声显微成像系统采集样品的超声图像,系统示意图如图 1 所示。系统部件主要包括 UTEX 320 型超声波激发/接收器(加拿大 UTEX Scientific Instruments 公司),直径 10 mm、焦距 25.4 mm 的 20 MHz 点聚焦型超声波换能器(日本 Olympus Corporation 公司),高速 A/D 数据采集卡(美国 Agilent Technologies 公司),三轴精密直线电机扫描机构(珠海创峰精工机械有限公司),计算机,样品槽等。设定不同超声图像采集参数进行多次试验并采用拉普拉斯梯度法评价不同参数下图像清晰度,由此确定了牛肉超声图像采集的最佳参数。最佳参数为:脉冲电压 250 V;脉冲宽度 25 ns;脉冲频率 800 Hz;增益 55 dB;分辨率 0.1 mm;扫描速度 5 mm/s。所有样品在相同的参数和环境下进行超声图像采集。

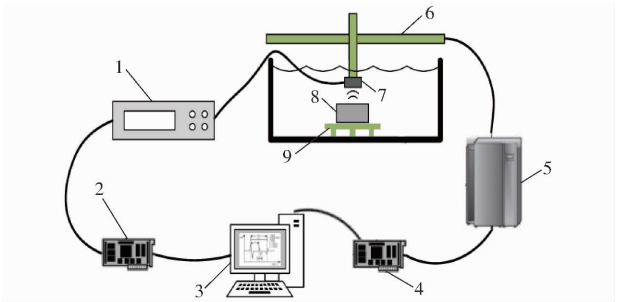


图 1 超声显微成像系统

Fig. 1 Ultrasonic imaging system

1. 超声波激发/接收器 2. 数据采集卡 3. 计算机 4. 运动控制卡 5. 主控电路 6. 三轴移动平台 7. 换能器 8. 试样 9. 水平台

1.2.5 数据处理

纹理分析是超声图像分析的重要手段。纹理信息可以反映超声回波信号分布情况,从而评价牛肉内部结构。灰度共生矩阵反映了图像灰度级空间分布二阶纹理信息。采用灰度共生矩阵法提取超声图像的纹理特征值,从 0°、45°、90°和 135°共 4 个方向计算灰度共生矩阵,提取各方向下的角二阶矩(Angular second moment, ASM)、对比度(Contrast, CON)、相关性系数(Correlation, COR)和逆差矩(Homogeneity, HOM),并计算图像的熵(Entropy, ENT)、各向异性系数(Anisotropy)、平均灰度(Average, AVG)和方差(Variance, VAR),得到共计 20 个纹理特征变量。先通过主成分分析法(Principal component analysis, PCA)对所得纹理特征变量进行降维,再分别建立线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)模型和支持向量机

(Support vector machine, SVM)模型,并比较识别效果。采用 SPSS 23.0 软件进行数据方差分析,采用 Matlab 7.0 软件提取超声图像纹理和建立判别模型。

2 结果与分析

2.1 质构测定结果

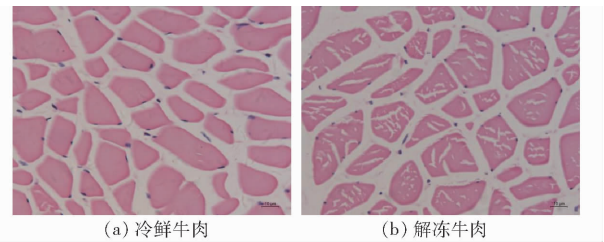
质地多面剖析法(Texture profile analysis, TPA)是质构仪利用探头模拟口腔的咀嚼运动,对样品进行两次压缩,用软件输出质构参数的方法^[20]。通过表 1 可以看出,测得的冷鲜和解冻牛肉各项质构参数有极显著差异($P < 0.01$)。硬度是使食品达到一定形变所需要的力,反映了食品保持外形结构的内部结合力。解冻牛肉的硬度小于冷鲜牛肉的硬度,这是由于冻藏过程中肌细胞间自由水形成冰晶后,肌细胞内的结合水以之为晶核使冰晶生长,而在解冻时部分冰晶解冻后的水无法回到肌细胞内,使得肉持水性变差,可溶性物质减少,使得肉块硬度减小。解冻牛肉的内聚性小于冷鲜牛肉,说明解冻牛肉结构的内部键力小,口感较差。牛肉中水化层与蛋白质形成的网状结构具有抵抗外力的能力,表现为肉的回复性^[18]。解冻牛肉比冷鲜牛肉回复性差,可能是由解冻肉系水力下降,蛋白质变性所导致。质构结果综合表明,经冷冻解冻的牛肉内部结构受损严重,汁液流失严重,原本复杂有序的结构趋向均匀。

表 1 冷鲜与解冻牛肉质构测定结果
Tab. 1 Results of texture indexes of fresh and frozen-thawed beef

质构参数	冷鲜牛肉	解冻牛肉
硬度/g	2 991.62 ± 190.76	1 727.78 ± 220.91
内聚性指数	0.65 ± 0.02	0.61 ± 0.03
回复性指数	31.69 ± 2.48	28.60 ± 2.16

2.2 微观结构

冷鲜牛肉与解冻牛肉的肌原纤维微观结构如图 2 所示,图 2a 和图 2b 分别是在光学显微镜下看到的冷鲜与解冻牛肉肌原纤维的石蜡切片图。从图中可以看出,冷鲜牛肉肌纤维结构完整,肌纤维断面呈圆形或多边形,细胞周边有较多的细胞核。肌纤维之间有一定间隙,这是因为进口牛肉经过一定时间的冷鲜储存品质略有下降。解冻牛肉肌肉组织的完整性被破坏,肌内膜和肌束膜破裂,肌纤维边界模糊,肌原纤维蛋白内部的水迁移到膜外。由于肌纤维在牛肉冷冻时受到冰晶体挤压出现裂口,解冻后细胞液流出,与组织液混合。



(a) 冷鲜牛肉 (b) 解冻牛肉

图 2 冷鲜与解冻牛肉微观结构图像

Fig. 2 Microstructure diagrams of fresh and frozen-thawed beef

2.3 色差及蒸煮损失率测定结果

除了从质构指标和微观结构上可以看出肉内组织结构的变化,肉样的一些理化指标也可以侧面反映组织结构变化情况。结合实际条件,选取 L^* 、 a^* 、 b^* 和蒸煮损失率 4 个理化指标来观察分析。

肉色是评价肉类品质的一个重要指标,它很大程度上影响了消费者的购买欲望。从表 2 可以看出,冷鲜牛肉的 L^* 极显著高于解冻牛肉 ($P < 0.01$), a^* 显著高于解冻牛肉 ($P < 0.05$), b^* 差异不显著。 L^* 表示肉样的明度,明度越大说明肉样越有光泽; a^* 表示肉样的红度,红度越大说明肉样颜色越鲜艳、品质越好^[21]。解冻牛肉由于蛋白质变性保水性下降,水分渗出导致明度减小;由于肌肉组织中肌红蛋白发生氧化导致红度减小。

表 2 冷鲜与解冻牛肉理化指标测定结果

Tab. 2 Results of physical and chemical indexes of fresh and frozen-thawed beef

理化指标	冷鲜牛肉	解冻牛肉
L^*	(34.61 ± 1.54) ^a	(32.52 ± 1.70) ^b
a^*	(18.78 ± 1.66) ^A	(17.37 ± 1.96) ^B
b^*	19.01 ± 1.94	20.05 ± 1.06
蒸煮损失率/%	(36.51 ± 1.01) ^a	(39.36 ± 1.69) ^b

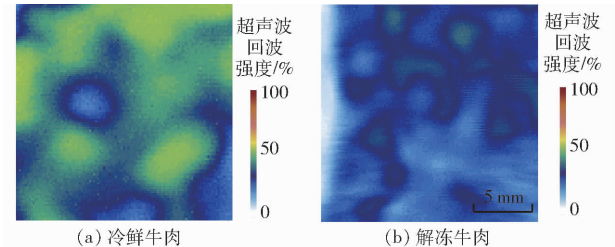
注:同一行不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$),同一行不同小写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

蒸煮损失率可以反映肌肉的持水能力,其大小与肌肉蛋白的溶解性有关。冷鲜牛肉的蒸煮损失率极显著低于解冻牛肉 ($P < 0.01$)。肉样在冻融过程中蛋白质发生变性,胶体性质被破坏,蒸煮损失增加,也表明肉样持水性变差。

2.4 牛肉超声图像及纹理特征值

图 3 为从冷鲜与解冻牛肉超声图像中各随机抽取的一幅图像。冷鲜牛肉图像整体反射回波强度较大,解冻牛肉图像整体反射回波强度较小;图像均一性较差,部分区域反射回波与相邻区域有较大差异。根据超声成像原理,当超声波传经两种声阻抗不同的相邻介质的界面时会发生反射,通过传感器收集处理反射回波在计算机上形成图像。故反射回波强

度表现了被测样品内部质构变化的程度,回波强度越大说明样品内部质构变化程度越大。根据 2.1、2.2、2.3 节的分析结果可知,冷鲜牛肉组织结构较为完好,肌纤维边界明显,肌纤维与组织液组成了质构差异大的结构,因此图像整体反射回波较大;解冻牛肉组织遭到破坏,细胞液流出与组织液混合,肌纤维边界模糊,且水分大量流失发生干缩,因而内部质构差异减小,图像整体反射回波较小。采集得到的牛肉超声反射图像均一性差,这是由于样本中有未剔净筋膜和血管存在,且生物组织样本具有多样性。表 3 为从超声图像中提取的部分纹理特征值,可以看出冷鲜与解冻牛肉纹理特征值差异极显著 ($P < 0.01$)。其中,ASM、HOM、ENT、AVG 差异最为显著。ASM 是图像均匀性的度量,反映图像灰度分布均匀的程度^[22]。其值大说明纹理较为均一、变化规则。HOM 反映图像纹理的同质性,度量图像纹理局部变化量^[23]。其值大表明图像纹理不同区域间变化小,局部比较均匀。ENT 代表了图像中纹理的非均匀程度或复杂程度。这些纹理特征值差异与所采集的超声图像差异相对应。



(a) 冷鲜牛肉 (b) 解冻牛肉

图 3 冷鲜与解冻牛肉超声图像

Fig. 3 Ultrasound images of fresh and frozen-thawed beef

表 3 冷鲜与解冻牛肉超声图像部分纹理特征值

Tab. 3 Partial results of ultrasonic image texture features of fresh and frozen-thawed beef

纹理特征值	冷鲜牛肉	解冻牛肉
角二阶矩 ASM(0°)	(2.35 ± 0.59) × 10 ⁻²	(3.69 ± 0.73) × 10 ⁻²
相关性系数 COR(0°)	0.987 8 ± 0.003 9	0.993 1 ± 0.004 1
逆差矩 HOM(0°)	0.76 ± 0.04	0.83 ± 0.03
对比度 CON(0°)	3.51 ± 0.87	1.99 ± 0.65
角二阶矩 ASM(45°)	(1.62 ± 0.54) × 10 ⁻²	(2.72 ± 0.63) × 10 ⁻²
逆差矩 HOM(45°)	0.64 ± 0.04	0.71 ± 0.03
角二阶矩 ASM(90°)	(2.39 ± 0.64) × 10 ⁻²	(3.66 ± 0.72) × 10 ⁻²
逆差矩 HOM(90°)	0.78 ± 0.03	0.82 ± 0.03
角二阶矩 ASM(135°)	(1.64 ± 0.54) × 10 ⁻²	(2.76 ± 0.63) × 10 ⁻²
逆差矩 HOM(135°)	0.64 ± 0.05	0.71 ± 0.04
熵 ENT	5.07 ± 0.17	4.66 ± 0.23
平均灰度 AVG	112.28 ± 14.47	96.02 ± 12.69

注:表中数据是经单因素方差分析筛选的具有极显著差异 ($P < 0.01$) 的纹理特征值。

2.5 主成分分析

主成分分析 (PCA) 是一种多元分析方法,可在

不丢失主要信息的前提下,选择较少的新变量来代替原来较多的变量^[24],可以达到数据降维的目的。图 4 为冷鲜与解冻牛肉超声图像纹理特征值主成分分析的结果,前 3 个主成分累计贡献率达到 99.71%,基本能够代表全部信息。从图中可以看出冷鲜牛肉和解冻牛肉大致可以各自聚为一类,有小部分区域发生重叠,表明超声成像技术结合 PCA 可以基本区分冷鲜与解冻牛肉。

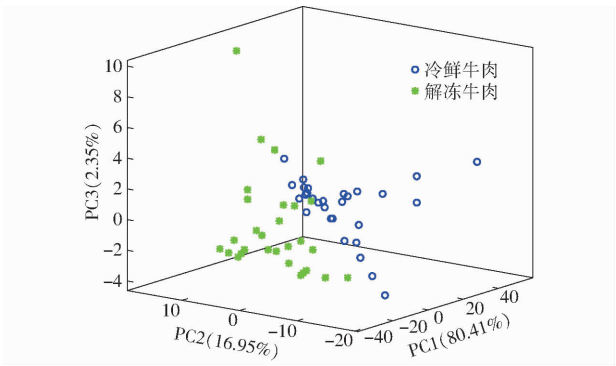


图 4 三维 PCA 主成分得分图

Fig. 4 Three-dimensional projection of PCA result

2.6 LDA 鉴别模型

线性判别分析(LDA)也称 Fisher 线性判别,是一种常用的模式识别方法,其基本思想是从高维特征空间中提取出最具辨别能力的低维特征,这些特征可以帮助同类样本聚集在一起,不同类样品尽量分离^[25]。

对牛肉超声图像纹理特征值进行主成分分析处理,随机选取总样本的 2/3 作为训练集,剩余 1/3 作为测试集,利用 LDA 进行分析。选取不同的主成分数作为模型的输入,牛肉类别(冷鲜或解冻牛肉)为模型的输出,建立 LDA 判别模型,结果如图 5 所示。当主成分数为 5 时,LDA 模型的训练集和测试集识别率均达到 100%,表明超声成像技术结合 LDA 模

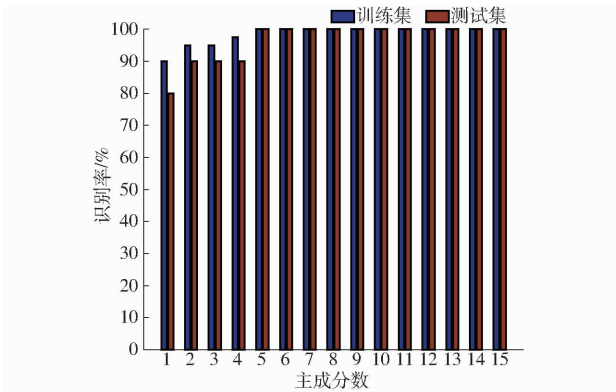


图 5 各主成分数下 LDA 的识别率

Fig. 5 Identification rate of each principal component based on LDA

型可以很好地鉴别冷鲜与解冻牛肉。

2.7 SVM 鉴别模型

支持向量机(SVM)是一种以统计学习理论和结构风险最小原理为基础的机器学习方法,它通过非线性映射将低维不可分样本转化到高维特征空间使其线性可分,较好地解决了小样本、非线性、高维度、局部极小等问题^[26-27]。选取径向基函数作为内积核函数,通过交叉验证(Cross validation, CV)寻找最佳参数(惩罚参数 c 和核函数参数 γ),选取不同的主成分数作为模型的输入。通过优化得最佳主成分数为 4,最佳参数 $c = 32, \gamma = 0.125$ 。识别率结果如图 6 所示,当主成分数为 4 时,模型预测性能最佳,训练集识别率为 95%,测试集识别率为 90%。

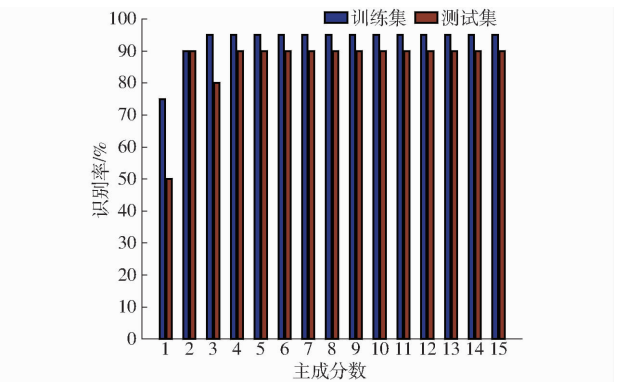


图 6 各主成分数下 SVM 的识别率

Fig. 6 Identification rate of each principal component based on SVM

3 结束语

分析了冷鲜与解冻牛肉的质构参数、微观结构和部分其他理化指标差异,解释了冷鲜与解冻牛肉超声图像差异,提取超声图像纹理特征值,建立了冷鲜与解冻牛肉鉴别模型。结果表明:冷鲜和解冻牛肉质构参数差异极显著($P < 0.01$),从质构参数、微观图像和部分其他理化指标可以看出,解冻牛肉微观结构被破坏,细胞液渗出流失,肌细胞边界模糊,内部质构变化较小,致使超声反射回波较小。冷鲜与解冻牛肉超声图像纹理特征值差异极显著($P < 0.01$),通过提取超声图像纹理特征值建立的识别模型中,LDA 模型训练集和测试集识别率均达到 100%,SVM 模型训练集识别率为 95%,测试集识别率为 90%。LDA 模型为线性模型,相对于 SVM 模型更加简单,容易实现。因此,超声成像技术结合化学计量学方法可以鉴别冷鲜与解冻牛肉,本研究可为超声成像技术应用于食品检测领域提供新的思路。

参考文献

- [1] 郑晓春, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于可见/近红外光谱的牛肉品质无损检测系统改进[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 332–339.
ZHENG Xiaochun, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Improvement of nondestructive detection system of beef quality based on visible/near infrared spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 332–339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s051&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.051. (in Chinese)
- [2] 司智陟. 我国牛肉消费现状与预测[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(9): 54–57.
SI Zhizhi. Study on the status and forecast of beef consumption in China[J]. Food and Nutrition in China, 2012, 18(9): 54–57. (in Chinese)
- [3] 邸静, 靳烨. 不同解冻方法对牛肉品质的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 174–177.
DI Jing, JIN Ye. Effect of different thawing methods on the quality of beef[J]. The Food Industry, 2015, 36(1): 174–177. (in Chinese)
- [4] SHASHA C, XIAOHUI W, RANRAN L, et al. Influence of multiple freeze-thaw cycles on quality characteristics of beef semimembranous muscle: with emphasis on water status and distribution by LF-NMR and MRI[J]. Meat Science, 2019, 147: 44–52.
- [5] 陈骋, 韩玲, 余群力, 等. 冻融对牦牛肉色、微观结构和蛋白质降解的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 290–297.
CHEN Cheng, HAN Ling, YU Qunli, et al. Impact of freeze-thaw cycles on color, microstructure and protein degradation of yak meat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 290–297. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151039&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.039. (in Chinese)
- [6] BALLIN N Z, LAMETSCH R. Analytical methods for authentication of fresh vs thawed meat—a review[J]. Meat Science, 2008, 80(2): 151–158.
- [7] 王丹丽, 马晓彬, 王文骏, 等. 高频超声波及其在食品工业中的降解改性研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 279–284.
WANG Danli, MA Xiaobin, WANG Wenjun, et al. Progress in high frequency ultrasound and its application for degradation and modification in food industry[J]. Food Science, 2016, 37(21): 279–284. (in Chinese)
- [8] 倪作恒, 王冠, 马军, 等. 超声波技术在锌银电池极片清洗中的应用[J]. 电源技术, 2018, 42(5): 674–677.
NI Zuoheng, WANG Guan, MA Jun, et al. Application of ultrasonic cleaning technology in electrode cleaning of Zn-AgO batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(5): 674–677. (in Chinese)
- [9] ZHANG L, PAN Z, SHEN K, et al. Influence of ultrasound-assisted alkali treatment on the structural properties and functionalities of rice protein[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 204–209.
- [10] ELGOHARY M A. Evaluation of treated and un-treated Nubia Sandstone using ultrasonic as a non-destructive technique[J]. Journal of Archaeological Science, 2013, 40(4): 2190–2195.
- [11] GUO Q, ZHANG L, DI Z, et al. Assessing risk category of breast cancer by ultrasound imaging characteristics[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2018, 44(4): 815–824.
- [12] STONE D E, QUIROZ L H. Ultrasound imaging of the pelvic floor[J]. Obstetrics & Gynecology Clinics of North America, 2016, 43(1): 141–153.
- [13] SONG S P, NI Y J. Ultrasound imaging of pipeline crack based on composite transducer array[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 81–91.
- [14] TRTNIK G, GAMS M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 66–75.
- [15] 仇登高, 徐世宏, 刘鹰, 等. 超声成像技术在大西洋鲑早期性别及发育期鉴别的应用研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(6): 23–29.
QIU Denggao, XU Shihong, LIU Ying, et al. The application of ultrasound imaging technology in the early determination of sex and gonadal development in Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Marine Sciences, 2016, 40(6): 23–29. (in Chinese)
- [16] CHO B K, IRUDAYARAJ J M K. Foreign object and internal disorder detection in food materials using noncontact ultrasound imaging[J]. Journal of Food Science, 2010, 68(3): 967–974.
- [17] KIM H W, MILLER D K, LEE Y J, et al. Effects of soy hull pectin and insoluble fiber on physicochemical and oxidative characteristics of fresh and frozen/thawed beef patties[J]. Meat Science, 2016, 117: 63–67.
- [18] 徐亚丹, 代丽. 牛肉低温储藏期间质构参数分析及新鲜度指标的确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 267–272.
XU Yadan, DAI Li. Analysis of texture parameters and determination of freshness index of beef in low temperature storage[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 267–272. (in Chinese)
- [19] 庞勇, 韩焱. 超声成像方法综述[J]. 测试技术学报, 2001, 15(4): 280–284.
PANG Yong, HAN Yan. A summary of ultrasonic imaging methods[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2001, 15(4): 280–284. (in Chinese)

- CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. Fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):87–91, 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141014&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.014. (in Chinese)
- [30] 袁建宁, 李显旺, 张晓文, 等. 梳脱式收获机设计理论的研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2):38–44.
YUAN Jianning, LI Xianwang, ZHANG Xiaowen, et al. Research on design theory of comb-type harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(2):38–44. (in Chinese)
- [31] 杜岳峰, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊):1–5.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Simulation on small-scale corn harvester for hilly area based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):1–5. (in Chinese)
- [32] 丛宏斌, 李明利, 李汝莘, 等. 4YQK-2 型茎秆青贮打捆玉米收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10):96–100.
CONG Hongbin, LI Mingli, LI Ruxin, et al. Design of 4YQK-2 combine harvester for corn and straw ensilage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10):96–100. (in Chinese)
- [33] 齐自成, 张进凯, 邵长敏, 等. 中小型穗茎兼收玉米联合收获机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5):25–29.
QI Zicheng, ZHANG Jinkai, SHAO Zhangmin, et al. Design and test of small and medium spike stalk corn combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5):25–29. (in Chinese)
- [34] 杜岳峰, 毛恩荣, 朱忠祥, 等. 两行玉米收获机割台设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2):22–26.
DU Yuefeng, MAO Enrong, ZHU Zhongxiang, et al. Design and experiment of two row corn harvester header[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):22–26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s205&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.005. (in Chinese)
- [35] 明博, 谢瑞芝, 侯鹏, 等. 2005—2016 年中国玉米种植密度变化分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11):1960–1972.
MING Bo, XIE Ruizhi, HOU Peng, et al. Changes of maize planting density in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11):1960–1972. (in Chinese)
-

(上接第 354 页)

- [20] 史智佳, 吕玉, 臧明伍, 等. 质地多面剖析法测定模式下取样规格对质构参数的影响[J]. 肉类研究, 2012, 26(10):26–29.
SHI Zhijia, LÜ Yu, ZANG Mingwu, et al. Effects of sample specifications on results of determination of texture profile analysis parameters of sausages[J]. Meat Research, 2012, 26(10):26–29. (in Chinese)
- [21] 夏秀芳, 孔保华, 郭园园, 等. 反复冷冻-解冻对猪肉品质特性和微观结构的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3):982–988.
XIA Xiufang, KONG Baohua, GUO Yuanyuan, et al. Effect of freeze-thawing cycles on the quality properties and microstructure of pork muscle[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3):982–988. (in Chinese)
- [22] 李龙, 彭彦昆, 李永玉, 等. 基于纹理和梯度特征的苹果伤痕与果梗/花萼在线识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):328–335.
LI Long, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Online identification of apple scarring and stems/calyxes based on texture and edge gradient features[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):328–335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181139&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.039. (in Chinese)
- [23] 李大华, 赵相飞, 许亮, 等. 基于纹理特征与 HSI 空间的苹果识别与标定[J]. 图学学报, 2016, 37(5):688–693.
LI Dahua, ZHAO Xiangfei, XU Liang, et al. Apple identification and calibration based on the texture characteristics and HSI space[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(5):688–693. (in Chinese)
- [24] 付小环, 胡军华, 李家春, 等. 应用近红外光谱技术对茯苓药材进行定性定量检测研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(2):280–286.
FU Xiaohuan, HU Junhua, LI Jiachun, et al. Qualitative and quantitative detection of *Poria cocos* by near infrared reflectance spectroscopy[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(2):280–286. (in Chinese)
- [25] 宋雅迪, 袁亚宏, 岳田利, 等. 基于红外光谱技术的高渗酵母快速鉴别方法[J]. 中国食品学报, 2016, 16(11):212–220.
SONG Yadi, YUAN Yahong, YUE Tianli, et al. Rapid discrimination of osmophilic yeasts based on infrared spectroscopic techniques[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(11):212–220. (in Chinese)
- [26] BURGESS C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2):121–167.
- [27] SÁNCHEZ V D A. Advanced support vector machines and kernel methods[J]. Neurocomputing, 2003, 55(1–2):5–20.