

基于多光谱对不同冷冻处理牛肉的快速无损检测

余俊杰, 郝广, 刘长虹* (合肥工业大学食品科学与工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要 [目的]探讨不同冷冻处理方式对牛肉的水分、颜色和食用物理特性的影响,以及多光谱成像系统结合化学计量方法对不同冷冻处理牛肉鉴别的可行性。[方法]通过获取冷冻牛肉样本的光谱信息,提取感兴趣区域,将原始光谱数据使用主成分分析(PCA)和支持向量机(SVM)进行建模分析,同时用传统方法检测牛肉的水分、颜色和质构参数。[结果]不同冷冻牛肉的平均光谱有明显差异,建模集和预测集的准确率分别达到86.67%和83.33%。冷冻处理后的牛肉相比于对照组,自由水含量增加,结合水含量、蒸煮损失和解冻汁液流失降低。[结论]多光谱成像系统结合化学计量学方法能够实现对不同冷冻处理牛肉的快速无损检测。

关键词 牛肉;不同冷冻处理;多光谱成像;快速无损检测
中图分类号 TS251.5⁺2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)23-0161-05

Rapid and Non-destructive Detection of Different Frozen Beefs Based on Multispectrum

YU Jun-jie, HAO Guang, LIU Chang-hong (School of Food Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009)

Abstract [Objective] The research aimed to explore the effects of different freezing treatments on the moisture, color and edible physical properties of beefs, and the feasibility of using multispectral imaging system combined with chemometric methods to identify beefs with different freezing treatments. [Method] After obtaining the spectral information of the frozen beef samples, the regions of interest were extracted. The original spectral data were analyzed using principal component analysis (PCA) and support vector machine (SVM). Simultaneously the beef moisture, color and texture parameters were detected using traditional methods. [Result] There were significant differences in the average spectra of different frozen beefs, and the accuracy of the modeling set and the prediction set reached 86.67% and 83.33%, respectively. Compared with the control group, the free water content of the frozen beef was increased; the combined water content, cooking loss, and loss of thawing sap were reduced. [Conclusion] The multispectral imaging system combined with chemometrics can realize rapid and non-destructive detection of beefs with different freezing treatments.

Key words Beef; Different freezing treatments; Multispectral imaging; Rapid and non-destructive detection

牛肉因其营养丰富、食用价值高而备受国内外欢迎。水是肉类的主要成分,约占肉类总重量的75%,肉类保持水分的能力,被定义为系水力(WHC),是工业和消费者关注的一个重要质量参数^[1]。对肉类行业来说,新鲜肉类的保水力影响其技术质量,即加工产量,而对于消费者来说,低的保水力对新鲜肉类的零售减少有不利的影响,并影响肉类最终产品的感官质量。肉类中的颜色与肌肉中的肌红蛋白水平有关,并受到冷冻储存的影响。虽然肌红蛋白是负责肉类颜色的主要蛋白质,但其他蛋白如血红蛋白也可能影响颜色^[2]。冷冻储存期间的温度波动会导致不同的物理变化,如血红蛋白环境的变化从而导致颜色变化^[3]。肉的质量也受到肉的冷冻率和条件的影响。汁液损失会导致硫胺和叶酸的损失,影响肉类的外观。解冻后,肉类通常不会恢复到冷冻前的充氧水平,这种缺氧使肉变暗,当肉冻得更久的时候,颜色会变得更暗^[4]。液体的流失通常会降低食品的质量和结合能力,这些都是降低其经济价值的因素。研究者广泛研究了冷冻速率、贮藏和解冻方式对肉样品质的影响^[5-7]。牛肉冻融后流失掉很多可溶性蛋白,Ngapo等^[5]采用6种冻结率、2种贮藏时间和3种解冻率的组合研究肉的冻结,以降低在解冻过程中失去的蛋白质。在解冻过程中产生的流失量与冻融速率有关,也与冻肉中冰晶的大小和位置有关^[7],也有研究表明冷冻速率增大能减少汁液损失^[8-9]。

多光谱成像(MSI)是一种新兴的技术,它将光谱学和影

像学结合在一个系统中,同时从一个物体上同时获取空间和光谱信息。MSI系统捕捉到的三维图像是由几个特征相关的单波段图像组成的,这些包含大量信息的三维数据可以用来分析和确定样本中细微的和/或微妙的物理和化学特征。与高光谱成像相比,较少的处理时间使MSI满足了用于在线高通量筛选的工业生产线的速度要求,以评估肉类的质量、营养、安全性和真实性。近年来,MSI技术作为一种快速无损的分析方法已被广泛应用到鱼^[10]、肉^[11-13]、水果^[14]、蔬菜^[15-16]等领域。在肉制品加工和贮藏过程中,肉的化学成分和物理状态均发生较大的变化。笔者探究多光谱技术结合最佳优化化学计量方法鉴别不同冷冻处理牛肉的可行性,并结合水分、颜色和质构参数对不同冷冻处理牛肉进行综合评价。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 牛肉样本。为保证所有样本均来自同一头牛,从麦德龙买来一整块新鲜牛后腿肉,在15 min之内运回实验室,立即剔除脂肪和筋腱,然后分成两大块,第一块放置在4℃冰箱冷藏24 h,用于后续试验,第二块切成40个7 cm×4 cm×2 cm大小、约40 g的长方体样本,采集光谱信息。

1.1.2 多光谱成像系统。多光谱成像仪(Videometer A/S, Hørsholm, Denmark)主要由相机、光谱棱镜、LED光源、涂有哑光油漆的积分球式外壳和样品载物台等部件组成,如图1所示。该系统可采集19个波段的光谱图像信息(每个图像的分辨率为2 056×2 056),波长范围从可见光到近红外(405、435、450、470、505、525、570、590、630、645、660、700、780、

作者简介 余俊杰(1990—),女,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向:食品品质快速无损检测。*通讯作者,副教授,博士,硕士生导师,从事农产品加工与贮藏、果蔬采后处理研究。

收稿日期 2018-03-11

850, 870, 890, 910, 940, 970 nm)。在图像采集之前,系统要提前预热至少 30 min,然后分别使用白板、黑板和几何板进行校准^[10]。测试样本放在球形曲面中间位置,这个球体的内部涂上了一层无光的钛漆,涂层与球体的曲率确保了投射光的均匀反射。在球体的边缘,分布着 LED 光源。多光谱具有采集图像速度快、分辨率高,可同时获取可见光和近红外的光谱信息和空间信息,以及操作简单等优点。

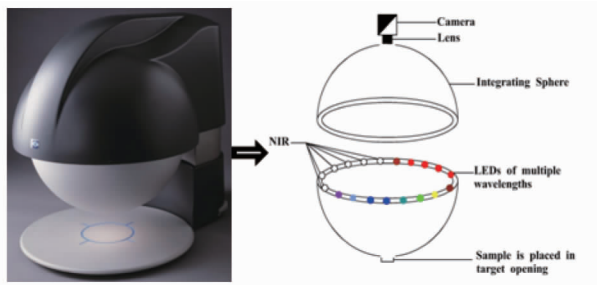


图 1 多光谱成像系统外观和内部结构

Fig. 1 Appearance and internal structure of multispectral imaging system

1.2 试验方法

1.2.1 冷冻方法。将切好的 40 个牛肉样本随机分成 4 组,每组 10 个,进行 4 种不同冷冻处理:4 ℃ 冷藏(对照组)、-4 ℃ 冷冻、-20 ℃ 冷冻、液氮处理 10 min 后-20 ℃ 冷冻。其中,4 ℃ 对照组在冰箱放置 24 h 后,拿出来进行光谱采集,进行水分、颜色、韧性、弹性以及硬度指标检测,其他 3 种冷冻处理均要在冰箱放置 3 d 后取出,参照 Xie 等^[17]的方法,在 4 ℃ 环境下解冻 24 h,之后与对照组一样进行光谱采集和其他指标的检测。第一块牛肉在放置 24 h 后取出,将表层切除厚约 5 cm(防止与第二块肉样不同,造成试验误差),重复上述第二块牛肉的操作步骤。共 80 个牛肉样本,每种处理牛肉中随机选取 6 个作为预测组,剩下的 56 个样本全部为建模组。

1.2.2 光谱采集和预处理。解冻后的样本放在干净的培养皿中,用多光谱测量仪获取上述牛肉样本和背景信息。获取的光谱图像首先用 VideometerLab 软件进行去噪处理,然后采用典型判别分析(CDA)^[18]和阈值设定完成背景剔除和图像分割,在该研究中,分割的主要目的是将牛肉作为感兴趣区域(ROI)从背景或其他不需要的区域提取出来,经过反射率动态定标板将牛肉图像信息的灰度值转换成反射率值。

1.2.3 主成分和支持向量机算法。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是一种实现几个线性组合替代绝大多数原变量信息的多元统计方法,具有降维、数据压缩和信息分离的能力^[19]。用于计算各主成分的贡献率和累积分数,分析多变量之间的相关性。总的来说,最初的几个主成分可以解释大部分的数据差异^[20]。PCA 作为一种常见的非监督识别方法,最先应用于可视化数据的初始化,并从观测结果中识别出异常值。在该研究中,PCA 降低了从牛肉样本中提取的数据矩阵维度,以消除众多信息中相互重叠和不相关部分的信息,提取多光谱记录的主要信息。利用光谱数

据,PCA 可以提供区分样品的非常重要的信息,它通过识别不同牛肉样品之间潜在的光谱异常值来评估变量之间的相似性,将数据转化为得分,最终解释样本之间的差异。

在分类研究中,最重要的是在光谱信息和支持向量机(support vector machine, SVM)识别算法的基础上,建立鉴别模型。SVM 的理论基础是统计学习理论和 Vapnik-Chervonenkis 维度推广理论。该方法采用一个简单的高斯函数,径向基函数(RBF)作为 SVM 的核函数,在没有测试集标签的情况下进行交叉验证获得最优参数(c, g)。SVM 模型可以表示为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^i \alpha_i y_i K(x_i \cdot x) + b \quad (1)$$

其中, $K(x_i \cdot x)$ 是核函数, x_i 是支持向量, α_i 是拉格朗日乘子, b 是偏差。

1.2.4 颜色提取。 L^* 、 a^* 、 b^* 颜色值从多光谱系统中提取,其中 L 表示亮度, a 表示从洋红色到绿色的范围, b 表示从黄色到蓝色的范围。 ΔE^* 按如下公式计算:

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

1.2.5 解冻汁液流失率。该指标参照 Yu 等^[21]的方法测定,冷冻组牛肉样本冷冻前称重(M_1),解冻之后倒去保鲜膜中的解冻流逝的汁液,用吸水纸轻轻地表面的水分吸干,再次称重(M_2),解冻汁液流失率按如下公式计算:

$$TL = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中, TL 为解冻汁液流失率(%); M_1 为解冻前样品质量(g); M_2 为解冻后样品质量(g)。

1.2.6 蒸煮损失率。所有样本在光谱采集之后,参照曹志超^[22]的试验方法,切出一块 3 cm×2 cm×2 cm 大小、约 11 g 的肉样在蒸煮前称重(N_1),在 85 ℃ 水浴 20 min,冷却到室温,用吸水纸吸去表面水分,再次称重(N_2)。蒸煮损失率按如下公式计算:

$$CL = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中, CL 为蒸煮损失率(%); N_1 为蒸煮前样品质量(g); N_2 为蒸煮后样品质量(g)。

1.2.7 自由水、结合水和干物质。自由水含量的检测可以参考低速离心法^[23]。切约(2.0±0.2)g 的肉样 W_1 ,在离心管中放 2 层滤纸,吸附离心下来的水分,防止水分复吸回牛肉样本中,从而使离心下来的水分与牛肉分离,1 800 r/min 离心 15 min,称重 W_2 ,自由水百分含量表示为:

$$FW = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中, FW 为自由水百分含量(%); W_1 为离心前样品质量(g); W_2 为离心后样品质量(g)。

之后参考 Devine 等^[23]的研究方法,再将肉样放在 105 ℃ 烘箱中 24 h,称重 W_3 。结合水百分含量和干物质百分含量分别表示为:

$$BW = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100\% \quad (6)$$

$$DM=\frac{W_3}{W_1}\times 100\%$$

(7)

式中, BW 为结合水百分含量($\%$); W_3 为烘干后样品质量(g); DM 为干物质百分含量($\%$)。

1.2.8 质构检测。该研究利用 TA-XT Plus 物性测试仪对不同冷冻处理后的牛肉的食品物理特性进行检测。参照文献[24]中的方法,将每个不同冷冻处理后的剩余牛肉样本(4 cm×2 cm×1 cm)置于(80±1)℃的恒温水浴锅煮 1 h,之后取出在 4℃冰箱放置 24 h,然后置于 TA-XT Plus 物性测试仪的承重台中心,沿与肌纤维垂直方向进行硬度、弹性、韧性的检测,测定参数如下:测前速度 10.00 mm/s;测试速度 2.00 mm/s;测后速度 10.00 mm/s;下压距离 10.00 mm;探头类型为 HOP/BSK 型探头。

1.3 数据统计与分析 所有数据均使用商业软件 Matlab (R2013a, The MathWorks, Inc., USA) 和 Origin 8.5 (Origin-Lab, USA) 进行分析。

2 结果与分析

2.1 水分变化 从 4 种不同处理方法对牛肉中自由水、结合水、干物质、蒸煮损失和解冻汁液流失的影响(表 1)可以看出,冷冻处理以后的牛肉样本相比于对照组的样本,自由水含量明显增高,而结合水的百分含量相对降低。说明冷冻处理对牛肉的水分存在状态会有影响,继而会影响水分活度

大小以及肉的储藏时间和品质^[25]。-20℃的冷冻处理方法相比于-4℃的方法,前者对牛肉中自由水、结合水和解冻汁液流失含量的影响小于后者,原因是在没有达到破坏性冷冻温度前,冷冻速率越高的冷冻处理方式对肉的物性影响会越小^[26]。从表中还可以发现,4 组处理方式中,液氮结合的冷冻处理方式相比于没有结合液氮的冷冻处理方式,前者对牛肉中自由水和结合水含量的影响大于后者,而蒸煮损失则小于后者,原因可能是液氮处理时温度过低,造成了对肉和细胞的破坏,导致更多结合水损失和流出,自由水的含量增加^[27];还有可能是液氮处理温度和后续冷冻储藏温度两者差异太大,造成牛肉肌肉中冰晶尺寸变大,导致解冻后更多结合水损失和流出,自由水的含量增加^[26]。牛肉的干物质在不同冷冻处理方法中并没有明显差别,不同冷冻处理方法会对牛肉中的水分含量有影响,但是不会对牛肉中的干物质有影响。试验结果表明,冷冻处理后的牛肉相比于对照组的自由水含量增加,结合水含量、蒸煮损失和解冻汁液流失降低,在不破坏细胞结构的前提下,冷冻速率越高对牛肉的物理性质影响越小。一般情况下,自由水含量与食品中水分活度(A_w)的高低呈正相关性^[28]。 A_w 又与食品质量与安全有密切联系。因此,牛肉中水分对牛肉的各种化学反应和品质有影响。

表 1 4 种不同处理方法对牛肉中水分的影响
Table 1 Effect of four different treatment methods on moisture of beef

处理 Treatment	自由水 Free water	结合水 Combined water content	干物质 Dry matter	蒸煮损失 Cooking loss	解冻汁液流失 Loss of thawing sap
4℃冷藏(对照组)Refrigerated at 4℃(control group)	23.05±2.98	57.45±2.44	19.50±0.88	45.05±2.36	
-4℃冷冻-4℃freezing	24.42±2.32	54.60±2.05	20.97±0.77	43.47±1.11	12.93±2.12
-20℃冷冻-20℃freezing	24.05±2.69	55.22±2.05	20.73±0.82	44.00±1.43	11.66±2.38
-20℃结合液氮-20℃freezing combined with liquid nitrogen	27.52±2.29	52.56±2.41	19.92±0.72	43.30±1.70	11.84±2.17

2.2 颜色 从不同冷冻处理方法对牛肉 L^* 、 a^* 、 b^* 值的影响(表 2)可以看出,4 种不同冷冻方法处理牛肉后,冷冻牛肉的 ΔL^* 值、 Δa^* 值和 ΔE^* 比新鲜牛肉更小,而两者的 Δb^* 值没有明显差异,原因可能是冷冻处理过程和解冻过程相比于对照组,冷冻肉的温度都更低些,更利于牛肉的保鲜和色泽维持,由此说明短期的冷冻储藏更易于保护牛肉的颜色,这一结果也与之之前的研究类似^[29-30]。此外,从表中还可以看

出,3 种不同冷冻处理方法之间对牛肉的总颜色变化没有显著差异,原因可能是冷冻处理时间较短(只有 3 d),因此没有体现出 3 种方法之间对于牛肉的差异影响,并且在先前的研究中,Utrera 等^[31]研究表明,牛肉饼被冷冻 20 周,-8℃冷冻储藏对牛肉饼的总的颜色变化影响最大,即 ΔE^* 值最大;其次是-18℃,最后是-80℃。

表 2 不同冷冻处理方法对牛肉 L^* 、 a^* 、 b^* 值的影响
Table 2 Effect of different freezing methods on L^* 、 a^* and b^* values of beef

处理 Treatment	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
4℃冷藏(对照组)Refrigerated at 4℃(control group)	1.35	2.24	0.52	2.67
-4℃冷冻-4℃freezing	0.26	1.43	0.35	1.27
-20℃冷冻-20℃freezing	0.12	1.75	0.47	1.82
-20℃结合液氮-20℃freezing combined with liquid nitrogen	0.27	1.05	0.49	1.19

2.3 质构分析 从不同冷冻处理方法对牛肉食用物理特性影响的结果(表 3)可以看出,肉的弹性没有显著差异,原因是每块肉在检测物性时的下切距离都是 10 mm 左右,因此没有明显区别。牛肉的韧性和硬度在不同冷冻处理过程中也没有呈现显著规律,原因是肉类的物性参数与肉类的品种有关,物性检测是一个相对比较复杂并且不是很精准的过程,因为检测过程中的很多因素都会影响物性参数的大小,比如肉类的年龄、肌肉纤维的直径尺寸、肌肉中的化学成分和含量,甚至屠宰过程和方式也会影响物性参数^[17]。该试验中牛肉的不同部位含有的结缔组织和筋腱含量不同,即使剔除了牛肉样本表面的可见结缔组织和筋腱,但是肌肉组织内部的筋腱对物性检测还是会带来很大影响和差异,因此导致检

测的韧性和硬度的结果没有呈现一定规律,这一结果与 Xie 等^[17]的研究结论一致。

表 3 不同冷冻处理方法对牛肉食用物理特性的影响
Table 3 Effect of different freezing methods on physical properties of beef

处理 Treatment	韧性 Tenacity kg/s	弹性 Elasticity mm	硬度 Hardness kg
4 ℃ 冷藏(对照组) Refrigerated at 4 ℃ (control group)	13.15±3.50	9.69±0.46	5.83±1.27
-4 ℃ 冷冻-4 ℃ freezing	12.17±2.37	9.72±0.40	5.78±1.46
-20 ℃ 冷冻-20 ℃ freezing	14.31±3.68	9.56±0.64	6.28±1.52
-20 ℃ 结合液氮-20 ℃ freezing combined with liquid nitrogen	12.02±4.88	9.82±0.33	5.69±2.31

2.4 光谱分析 从不同冷冻方法处理的牛肉在 405~970 nm 的反射光谱图(图 2)可以看出,冷冻牛肉与对照组牛肉相比,光谱有明显差异,且冷冻后牛肉的光谱反射曲线几乎整体上低于对照组;在 630~700 和 850~970 nm,呈现出处理温度越低,反射值越低,其主要原因是冻融牛肉的自由水含量比对照组牛肉高(表 1),表现为冻融牛肉的表面比对照组更湿润。有研究证明,水分中的 O-H 键在 440、570 和 970 nm 有吸收^[32-33],因此冻融牛肉的吸收光谱曲线会高于对照组,反之,其反射光谱曲线会低于对照组。此外,这种差异也可能是样品表面颜色造成的。有研究发现,肌红蛋白在 542 nm 有吸收峰^[34]。这些差异可采用多变量分类模型进行定性分类。

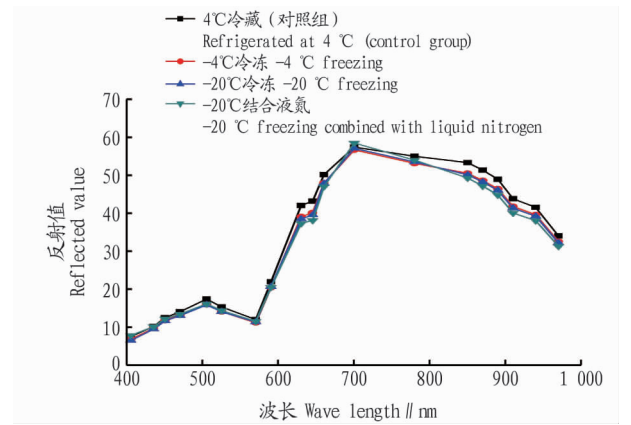
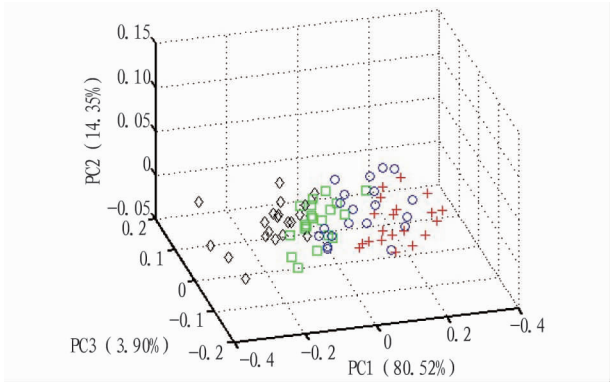


图 2 4 种不同方法处理的牛肉样本的平均反射光谱
Fig. 2 Average reflectance spectra of beef samples treated with four different methods

2.5 主成分分析 PCA 的主要目的是获得定性的视觉分化,并减少光谱数据的维数。图 3 显示了 4 种牛肉处理方式的三维主成分得分图。从结果来看,PC1、PC2 和 PC3 的得分分别为 80.52%、14.35%和 3.90%,能够解释 98.77%的光谱差异,表明不同冷冻处理的牛肉存在一定差异,且有可能达到对其的鉴别。图 3 中不同样品之间也出现了重叠,这意味着即使在三维空间,可能有一些样品不能与其他样品完全区分开。因此,研究进一步采用支持向量机完成定量分析。



注:4 ℃ (+),-4 ℃ (○),-20 ℃ (□),-20 ℃ 结合液氮(◇)
Note:4 ℃ (+),-4 ℃ (○),-20 ℃ (□),-20 ℃ combined liquid nitrogen(◇)

图 3 不同冷冻处理牛肉的前 3 个主成分三维得分
Fig. 3 Three-dimensional score of the first three principal components of different frozen beefs

2.6 分类模型建立及性能评价 在模型中,将 4 ℃ 冷藏(对照组)、-4 ℃ 冷冻、-20 ℃ 冷冻和-20 ℃ 结合液氮处理分别赋值为 1、2、3 和 4。表 4 清晰地显示了采用 SVM 鉴别不同冷冻处理牛肉的结果,图 4 反映了 SVM 模型对不同冷冻处理牛肉样本建模集的鉴别结果,结合表 4 和图 4 可以明显看出,在建模集中有 8 个样本被错判,其中对照组有 3 个被错判为-4 ℃ 组,-4 ℃ 组有 2 个被错判到对照组,1 个被错判到-20 ℃ 组,1 个-20 ℃ 组的样本被错判到-4 ℃ 组,1 个-20 ℃ 结合液氮组的样本被错判到-20 ℃ 组,建模集的鉴别准确率为 86.67%。在预测集中,定量分析的错判率为 16.67%,对照组和-20 ℃ 组分别有 1 个被错判到-4 ℃ 组,-4 ℃ 组有 2 个错判到对照组,鉴别率达到了 83.33%。试验表明,多光谱与 SVM 模型相结合获得了足够的信息来鉴别不同冷冻处理的牛肉样本。

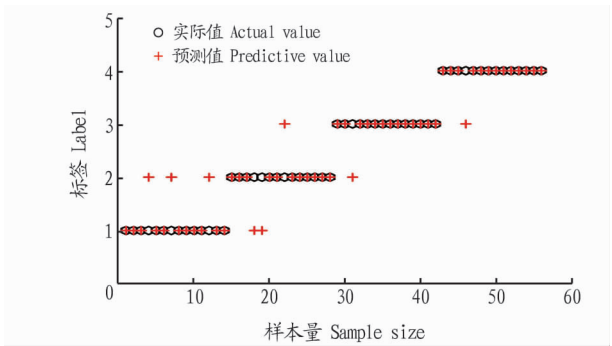


图 4 SVM 模型对不同冷冻处理牛肉样本建模集的鉴别结果
Fig. 4 SVM model identification results for different frozen beef samples in calibration set

从表 4 可看出,-4 ℃ 组发生错判的样本数最多,-20 ℃ 结合液氮错判样本数则最少,表明温度跨度越大,模型的鉴别效果越好。利用全光谱结合 SVM 模型对不同冷冻处理牛肉的鉴别分别在建模集和预测集上获得了 86.67%和 83.33%的准确度。结果表明,不同冷冻处理牛肉样本之间存在显著差异,并可根据牛肉表面获得的光谱进行分类。

表 4 采用 SVM 模型的鉴别结果和性能

Table 4 Identification results and performance using SVM model

处理 Treatment	建模集 Modeling set			预测集 Prediction set		
	样本数 Sample number	错判数 Mistake number	准确率 Accuracy rate//%	样本数 Sample number	错判数 Mistake number	准确率 Accuracy rate//%
4 ℃ 冷藏 (对照组) Refrigerated at 4 ℃ (control group)	14	3	78.57	6	1	83.33
-4 ℃ 冷冻 -4 ℃ freezing	14	3	78.57	6	2	66.67
-20 ℃ 冷冻 -20 ℃ freezing	14	1	92.86	6	1	83.33
-20 ℃ 结合液氮 -20 ℃ freezing combined with liquid nitrogen	14	1	92.86	6	0	100.00
总共 Total	56	8	86.67	24	4	83.33

3 总结

不同冷冻方法处理对肉类品质的影响是社会和消费者都很关注的问题。该研究通过 3 种不同冷冻处理方法与对照组比较,试验结果表明,冷冻处理后的牛肉相比于对照组的自由水含量增加,结合水含量、蒸煮损失和解冻汁液流失降低,在不破坏细胞结构的前提下,冷冻速率越高,对牛肉的物理性质影响越小。同时说明,多光谱成像技术结合传统化学计量学方法能够实现对不同冷冻方法处理牛肉的检测和鉴别,建模集和预测集的准确率分别达到了 86.67% 和 83.33%。在不同处理组中,-4 ℃ 处理组最容易发生错判,-20 ℃ 结合液氮组错判样本数最少,表明冷冻速率越大,模型的鉴别效果越好。

参考文献

[1] TRAORE S,AUBRY L,GATELLIER P,et al. Higher drip loss is associated with protein oxidation[J]. Meat science,2012,90(4):917-924.

[2] MANCINI R A,HUNT M C. Current research in meat color[J]. Meat science,2005,71(1):100-121.

[3] DEMAN J M. Principles of food chemistry[M]. Gaithersburg,MD: Aspen publisher Inc.,1999:239-242.

[4] BARBIN D F,SUN D W,SU C. NIR hyperspectral imaging as non-destructive evaluation tool for the recognition of fresh and frozen-thawed porcine longissimus dorsi muscles[J]. Innovative food science & emerging technologies,2013,18:226-236.

[5] NGAPO T M,BABARE I H,REYNOLDS J,et al. Freezing and thawing rate effects on drip loss from samples of pork[J]. Meat science,1999,53(3):149-158.

[6] AROEIRA C N,TORRES FILHO R A,FONTES P R,et al. Freezing,thawing and aging effects on beef tenderness from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle[J]. Meat science,2016,116:118-125.

[7] NGAPO T M,BABARE I H,REYNOLDS J,et al. Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of pork[J]. Meat science,1999,53(3):159-168.

[8] SACKS B,CASEY N H,BOSHOF E,et al. Influence of freezing method on thaw drip and protein loss of low-voltage electrically stimulated and non-stimulated sheeps' muscle[J]. Meat science,1993,34(2):235-243.

[9] LI K C,HEATON E K,MARION J E. Freezing chicken thighs by liquid nitrogen and sharp freezing process[J]. Food technology,1969,23(2):241-243.

[10] DISSING B S,NIELSEN M E,ERSBOLL B K,et al. Multispectral imaging for determination of astaxanthin concentration in salmonids[J]. PLoS One,2011,6(5):1-8.

[11] MA F,YAO J,XIE T T,et al. Multispectral imaging for rapid and non-destructive determination of aerobic plate count (APC) in cooked pork sausages[J]. Food research international,2014,62:902-908.

[12] LIU J X,CAO Y,WANG Q,et al. Rapid and non-destructive identification of water-injected beef samples using multispectral imaging analysis[J]. Food chemistry,2016,190:938-943.

[13] ROPODI A I,PAVLIDIS D E,MOHAREB F,et al. Multispectral image analysis approach to detect adulteration of beef and pork in raw meats[J]. Food research international,2015,67:12-18.

[14] LIU C H,LIU W,LU X Z,et al. Application of multispectral imaging to

determine quality attributes and ripeness stage in strawberry fruit[J]. PLoS One,2014,9(2):1-8.

[15] LIU C H,LIU W,LU X Z,et al. Potential of multispectral imaging for real-time determination of colour change and moisture distribution in carrot slices during hot air dehydration[J]. Food Chemistry,2016,195:110-116.

[16] LIU C H,LIU W,CHEN W,et al. Feasibility in multispectral imaging for predicting the content of bioactive compounds in intact tomato fruit[J]. Food chemistry,2015,173:482-488.

[17] XIE A G,SUN D W,XU Z Y,et al. Rapid detection of frozen pork quality without thawing by Vis-NIR hyperspectral imaging technique[J]. Talanta,2015,139:208-215.

[18] CRUZ-CASTILLO J G,GANESHANANDAM S,MACKAY B R,et al. Applications of canonical discriminant analysis in horticultural research[J]. HortScience,1994,29(10):1115-1119.

[19] 洪文学,李昕,徐永红,等. 基于多元统计图表示原理的信息融合和模式识别技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[20] FUNG T,LEDREW E. Application of principal components analysis to change detection[J]. Photogrammetric engineering & remote sensing,1987,53(12):1649-1658.

[21] YU X L,LI X B,ZHAO L,et al. Effects of different freezing rates and thawing rates on the manufacturing properties and structure of pork[J]. Journal of muscle foods,2010,21(2):177-196.

[22] 曹志超. 不同冷却方式对鸭肉品质的影响[D]. 南京:南京农业大学,2010.

[23] DEVINE C E,WELLS R,LOWE T,et al. Pre-rigor temperature and the relationship between lamb tenderisation,free water production,bound water and dry matter[J]. Meat science,2014,96(1):321-326.

[24] 邱思,黄妹洁,刘中科,等. 温度对藏鸡肉品质及加工性能的影响研究[J]. 食品与发酵科技,2012,48(5):62-66.

[25] CAI L Y,WU X S,LI X X,et al. Effects of different freezing treatments on physicochemical properties and microbial characteristics of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets during refrigerated storage[J]. LWT-Food Science and Technology,2014,59(1):122-129.

[26] KAALE L D,EIKEVIK T M. A study of the ice crystal sizes of red muscle of pre-rigor Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during superchilled storage[J]. Journal of food engineering,2013,119(3):544-551.

[27] KAALE L D,EIKEVIK T M. The influence of superchilling storage methods on the location/distribution of ice crystals during storage of Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Food control,2015,52:19-26.

[28] 翁航萍,徐雄新. 肉与肉制品的水分活度[J]. 肉类研究,2009(5):67-70.

[29] 王丹竹,田科雄. 冷冻肉品质与时间和温度变化的关系[J]. 中国畜禽种业,2012,8(8):24-26.

[30] 屠惠康. 肉并非新鲜的最好——谈新鲜肉,冷却肉和冷冻肉[J]. 饮食科学,2000(6):17.

[31] UTRERA M,MORCUENDE D,ESTÉVEZ M. Temperature of frozen storage affects the nature and consequences of protein oxidation in beef patties[J]. Meat science,2014,96(3):1250-1257.

[32] WU D,HE Y,FENG S J. Short-wave near-infrared spectroscopy analysis of major compounds in milk powder and wavelength assignment[J]. Analytica chimica acta,2008,610(2):232-242.

[33] BÜNING-PUFAUE H. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy[J]. Food chemistry,2003,82(1):107-115.

[34] COZZOLINO D,MURRAY I,SCAIFE J R,et al. Study of dissected lamb muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy for composition assessment[J]. Animal science,2000,70(3):417-423.