

高光谱成像技术应用于畜禽肉品质研究进展

雷 裕¹, 胡新军^{1*}, 蒋茂林¹, 黄志雄¹, 马小燕¹, 田建平¹, 黄 丹²

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 宜宾 644005; 2. 四川轻化工大学生物工程学院, 宜宾 644005)

摘 要: 食品安全不光关乎我们身体健康而且影响着社会稳定, 做好食品安全检测是防止有毒食品进入人体的关键步骤也是维护社会稳定的重要举措。为改善传统畜禽肉质检测方法费时费力的现状, 食品安全检测方法正趋于多样化, 引入了许多高新技术, 高光谱成像技术(hyperspectral imaging, HIS)便是其中之一。其凭借超强的探测能力和分辨能力能够快速无损地检测出食品内部品质信息。附着在食品表面的有毒残留所形成的光谱曲线不同于正常的曲线, 内部品质的变化也可以通过光谱曲线反映出来。本文从畜禽肉品质安全角度出发, 围绕畜禽肉化学指标、物理属性和食用安全指标3个方面, 综述了高光谱成像技术在畜禽肉安全检测中的应用, 归纳总结了预处理, 变量筛选和建模方法。对目前高光谱成像技术应用于畜禽肉检测中所暴露的缺点进行总结, 并就未来发展方向进行展望, 为畜禽肉中各成分的检测提供了科学依据, 为延长各种类畜禽肉品及其肉制品货架期提供了新的参考。

关键词: 食品安全; 畜禽肉品; 高光谱成像技术

Research progress on application of hyperspectral imaging technology in meat quality of livestock and poultry

LEI Yu¹, HU Xin-Jun^{1*}, JIANG Mao-Lin¹, HUANG Zhi-Xiong¹, MA Xiao-Yan¹,
TIAN Jian-Ping¹, HUANG Dan²

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644005, China;
2. School of Biological Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China)

ABSTRACT: Food safety is not only related to our health, but also affects social stability. Good food safety testing is not only a key step to prevent toxic food from entering the human body, but also an important measure to maintain social stability. In order to improve the time-consuming and laborious status of traditional livestock and poultry meat quality detection methods, food safety detection methods are becoming diversified. Many high and new technologies have been introduced, including hyperspectral imaging (HSI). With its strong detection and resolution ability, it can quickly and nondestructive detect the internal quality information of food. The spectral curve formed by the toxic residues attached to the food surface is different from the normal curve, and the change of internal quality can also be reflected by the spectral curve. From the perspective of livestock and poultry meat quality and safety, this paper summarized the application of hyperspectral imaging technology in livestock and poultry meat safety detection from 3 aspects: Chemical index, physical attribute and edible safety index, and summarized the methods of pretreatment, variable screening and modeling. The shortcomings exposed in the application of hyperspectral imaging technology in the detection of livestock

基金项目: 国家自然科学基金项目(51701133)、研究生创新基金项目(y2021033)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51701133), and the Graduate Innovation Fund (y2021033)

*通信作者: 胡新军, 博士, 副教授, 主要研究方向为高光谱成像技术应用研究。E-mail: suse2021@126.com

*Corresponding author: HU Xin-Jun, Ph.D, Associate Professor, No.188, University Town, Lin-gang Economic and Technological Development Zone, Yibin 644005, China. E-mail: suse2021@126.com

and poultry meat products were summarized, and the future development direction was prospected, which provides a scientific basis for the detection of various components in livestock and poultry meat products, and provides a new reference for prolonging the shelf life of various livestock and poultry meat products and meat products.

KEY WORDS: food safety; meat quality of livestock and poultry; hyperspectral imaging

0 引言

食品安全是我们长久以来一直密切关注的热点问题, 与我们日常工作和学习生活息息相关。在 2015 年 6 月调查显示英国 73% 的鸡肉中都含有易导致人体食物中毒的弯曲杆菌^[1]。同年 12 月份世界卫生组织(World Health Organization, WHO)做了一个关于食物中毒事件调查, 调查显示每年全球约有 42 万人死于食物中毒^[2]。据研究报告显示, 2017 年 8 月 16 日在英国当地的一家超市出售的猪肉制品中检测出戊型肝炎病菌, 导致成千上万的英国市民感染此病菌^[3]。畜禽肉品是人们日常生活中常见的营养物质来源, 常常将其做成各种美味佳肴端上餐桌, 一旦畜禽肉品存在安全隐患极易导致食物中毒。因此, 如何快速、无损、高效地检验出食品内部品质情况是保证食品安全的关键。

从 20 世纪 80 年代开始, 高光谱成像技术(hyperspectral imaging, HIS)凭借强大的探测能力和超高的分辨能力受到了各国研究人员的注意, 经过几十年的发展到现在, 它不光运用于食品检测方面^[4-7], 在医学诊断^[8]、航空航天领域^[9-11]、遥感监测^[12-14]、环境保护^[15-16]、文物保护^[17-18]等方面都有所应用。高光谱成像技术是将传统检测技术与光谱技术相结合, 在获得样品光谱数据的同时可对其进行可视化观测。它不光解决了传统检测方法费时费力的问题, 还为实时监测样品成分变化提供了帮助。随着技术的持续发展, 未来高光谱成像检测技术将在数据降维及其他算法处理上不断创新。现有的关于高光谱成像技术应用于肉品质检测研究综述中, 鲜少有对畜禽肉品各检测指标进行全面概述的。因此, 本文对各检测指标进行分类, 着重介绍所采用的检测方法, 对其所存在的问题进行总结, 为相关研究人员在畜禽肉品质检测领域的突破创新提供全新的参考。

1 高光谱成像技术

1.1 高光谱成像原理

高光谱成像技术就是将光谱学和机器视觉 2 种当下最为广泛应用的技术相融合, 形成它们独有的技术优势和特点: 利用探测到的目标的二维几何空间和第三维光谱信息, 来获取具有高光谱分辨率的连续、窄波段图像数据。所获得的光谱分辨率很高, 可达几个纳米。不同的样品通过高光谱相机照射后所返回的光谱信息是不同的, 这主要

是因为分子中的官能团对波长的光吸收是有差异的^[19]。除此之外, 不同样品的外观和所构成的材质也是不同的, 通过所获得的光谱信息对样品进行分析, 可以找到样品中的物理、化学信息差异^[20]。高光谱成像系统见图 1^[21]。

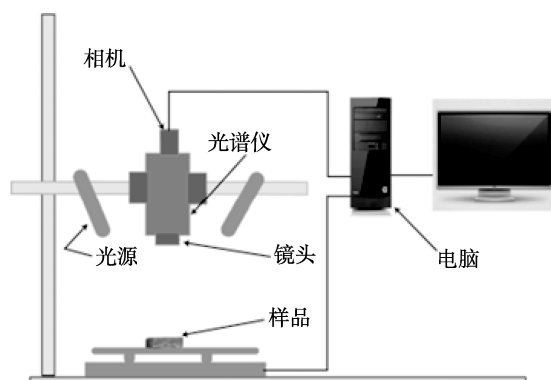


图 1 高光谱成像系统

Fig.1 Hyperspectral imaging system

1.2 未来发展趋势

高光谱成像系统所采集到的数据是一块形如长方体的 3D 数据块, 里面包含了海量信息。为筛选出有效的特征光谱信息, 会采用数据降维算法对其进行降维。当前比较常见的数据降维算法有非线性和线性 2 大类, 因为采集到的图像数据中包含了非线性数据, 所以用线性降维算法对所采集到的数据进行降维时, 会造成误差。综上所述, 对线性降维算法未来的研究中可以从这个点进行突破。从应用前景角度来看, 非线性降维算法将会成为主流, 但是目前前沿的非线性降维技术存在运算流程复杂的问题, 如何解决此问题, 提升数据降维的效果, 是需要我们去钻研的地方。

2 高光谱成像技术应用于畜禽肉品质研究

畜禽是指经过长期劳动驯化的能为我们提供蛋、肉、乳的各种动物。肉是我们生活中常见的营养食物, 除了带给我们味觉的享受, 还为我们提供了丰富的营养元素。例如猪肉, 它富含钠离子、钾离子和磷离子能促进人体新陈代谢。但由于一些不法商家为了取得更大的利益, 不惜在饲养畜禽的过程中肆意添加催长素和瘦肉精等违禁药品, 致使有毒物质残留于肉中。一旦这样的食品进入人体, 会严重危害人体健康。为防止对人体健康有害的畜禽肉品进入市场, 做好肉品质把关非常重要。现有的畜禽肉品质

质检测方法以感官检测和人工实验法为主, 这些方法一般是由专业人员进行操作、分析和评估, 所得结果容易受到主观因素影响, 且耗费人力物力, 还会破坏被检样品的完整性。其次, 这些检测方法还不能满足现代化生产所要求的高效快速在线检测, 它只适用于实验室的小数量样品检测。随着科学技术的不断发展, 在畜禽肉品检测领域引入了高光谱成像技术, 它是将图像技术与光谱技术相结合, 在获取样品光谱数据的同时不会破坏样品完整性。不仅具备了方便快捷、简单易操作的特点而且弥补了传统检测方法不能用于大批量在线检测的不足, 突破了传统检测方法的局限性。目前, 高光谱成像技术越来越多地应用于畜禽肉品品质检测中, 并取得了不错的效果。本文总结了 HIS 技术运用于畜禽肉品各检测指标中的最新进展, 主要涉及畜禽肉品化学指标、物理指标和食用安全指标。

2.1 畜禽肉品化学指标检测

畜禽肉质经宰杀以后, 随着时间、温度和环境的变化会慢慢变质, 其肉品新鲜度会遭到严重影响。挥发性盐基氮值(total volatile base nitrogen, TVB-N)、硫代巴比妥酸值(thiobarbital acid, TBA)及 pH 等指标也会随着肉质变化而变化, 所以可用它们作为指标来表征肉品新鲜度。

2.1.1 挥发性盐基氮值

TVB-N 是反映肉品新鲜度的重要指标。这些肉类食品在保存过程中由于受到酶和细菌共同作用, 导致其内部蛋白质经过分解后生成了如胺类和氨等具有碱性的含氮物质。挥发性盐基氮在肉中所占有的含量越高, 则表明其内部氨基酸被破坏的程度越高, 肉品内部品质就越糟糕, 肉类的新鲜度就越差。由表 1 统计可得, 针对不同的检测对象选择恰当的检测方法是取得成功的关键。当前最常见的

检测分析方法有偏最小二乘(partial least squares regression, PLSR)、BP 神经网络(backpropagation neural network, BPNN)和支持向量机(support vector machine, SVM), 为了得到更好的检测结果, 研究人员正在不断努力, 优化现有算法是一种常用手段以获取更好的检测效果。

2.1.2 硫代巴比妥酸值

硫代巴比妥酸也称 TBA, 它是肉中不饱和脂肪酸的氧化产物, 畜禽肉中的不饱和脂肪酸氧化会降低肉品质, 缩短货架期。XIONG 等^[33]利用高光谱成像技术(400~1000 nm)来检测冷藏鸡肉中的 TBA 活性物质含量。通过多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)对所采数据进行预处理, 可以有效地消除散射影响, 增强光谱数据之间的相关性。再采用连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)挑选出 10 个最佳波长, 采用 SPA 方法的优势在于, 所提取出的特征波长可以有效地消除原始光谱矩阵中冗余的信息。分别建立全波长的和特征波长的 PLSR 模型, 都得到了良好的预测效果(MSC-PLSR: $R_p=0.944$, RMSEP=0.081; MSC-SPA-PLSR: $R_p=0.801$, RMSEP=0.157)。通常在数据量较大的情况下会选择提取具有代表性的特征波长进行建模运算, 与全波长模型相比极大地缩短了建模时间, 提高了工作效率, 且最终得到的效果相差无几。为了对比不同的方法所取得的效果, 何鸿举等^[34]利用近红外高光谱成像技术(900~1700 nm)检测猪肉中的 TBA 值, 原始数据先经 7 种预处理方法处理, 再用回归系数法(regression coefficient method, RC)、逐步回归法(Stepwise)和 SPA 3 种方法来筛选特征波长, 建立基于特征波长的 PLSR 模型, 结果得出 RC-GFS-PLSR 模型效果最好($R_p=0.942$, RMSEP=0.034)。同时王魏等^[35]也采用了多种不同的方法来处理数据进行对比, 最终确定出了在 GFS 光谱

表 1 高光谱成像技术检测不同肉质中的挥发性盐基氮
Table 1 Detection of volatile base nitrogen in different meat qualities by hyperspectral imaging technology

肉品	肉种	波长/nm	建模	结果	文献来源
生鲜肉品	黄牛肉	700~750	BP-ANN	准确率 99%	[22]
	羊肉	400~1000	PLSR	$R_p=0.92$, $R_c=0.92$	[23]
	猪肉	400~1000	LSSVM	$R_p=0.948$, RMSEP=1.96, RPD=3.12	[24]
	猪肉	400~1000	2DPCA	$R_p=0.955$, RMSEP=1.86 mg/100 g	[25]
冷藏肉品	羊肉	400~1000	PLSR	$R_p=0.866$	[26]
	鸡肉	470~1000	BP-ANN	$R_p=0.8030$, $R_c=0.9054$	[27]
	猪肉	400~1000	PLSR	$R_p=0.921$, $R_c=0.999$	[28]
熟肉制品	鸭肉	350~1000	PLSR	$R_p=0.859$, RMSEP=1.060 mg/100 g	[29]
	牛肉	400~1000	PSO-LS-SVM	$R_p=0.955$, RMSEP=1.093	[30-31]
	牛肉	320~1100	SVR	平均准确率达 85.13%	[32]

注: 反向传播神经网络分类器(back-propagation artificial neural network classifier, BP-ANN); 最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LSSVM); 二维主成分分析(2D principal component analysis, 2DPCA); 粒子群优化的偏最小二乘支持向量机(particle swarm optimization and the least squares support vector machine, PSO-LS-SVM); 均方根误差(root mean square error for prediction, RMSEP); 剩余预测偏差(residual prediction deviation, RPD)。

中由 PLS- β 系数法筛选出来的最优波长建立的 PLS 模型对 TBA 值预测效果最好, 其中 $R_p=0.945$, $RMSEC=0.053$ 。由此说明, 筛选特征波长不但可以简化模型运算而且节省运算时间、提高工作效率, 为实现高光谱成像技术对肉质中 TBA 值实时无损检测奠定了良好的基础。

2.1.3 pH

动物肉品通常是呈现弱酸性, 可以为人体补充蛋白质。当肉质 pH 大于 6.5 时, 为腐败肉质。为探测畜禽肉品中 pH 变化情况, LIU 等^[36]采用光谱特征与纹理特征相结合的方法来检测咸肉中的 pH。通过主成分分析法(principal components analysis, PCA)从 ROI 区域(400~1000 nm)中选出 9 个光谱特征变量, 再对第一幅 PC 图像进行灰度梯度共生矩阵(gray-level gradient cooccurrence matrix, GLGCM)分析提取出 13 个纹理特征变量, 建立基于数据相结合和单独特征变量的 PLS 模型(图 2)。结果表明, 基于数据相结合的模型效果更好, 预测集 r 为 0.794, 校正集 r 为 0.853。其中 PCA 法同样也是一种特征波长选择方法, 它的区别在于当数据集在不同维度上的方差分布不均匀时, 采用它来进行降维效果最好。刘娇等^[37]则采用了另一种预测值及光谱同步校正的传递算法(sync correction spectrum and prediction value, CSPV)对畜禽肉品中 pH 进行探究, 以模型的预测集相关系数和剩余预测偏差作为判定依据, 当 $R_p \geq 0.837$ 和 $RPD \geq 1.9$ 时, 则结果可靠。胡耀华等^[38]对室温下储藏的生鲜猪肉 pH 进行预测, 由此证明了高光谱成像技术检测 pH 的可行性, 且得出选择恰当的模型可取得更好的预测效果。

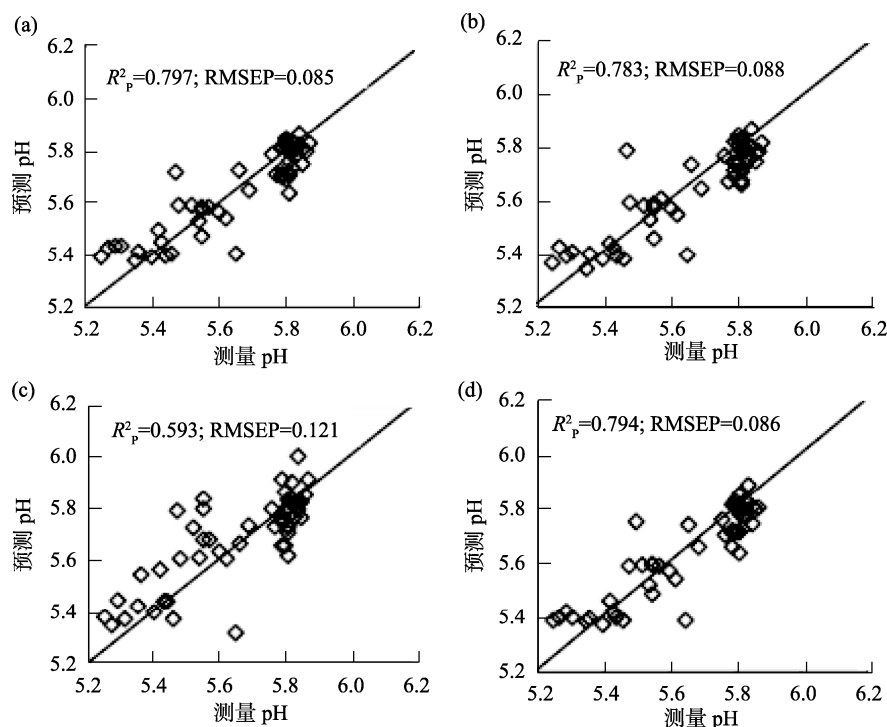
2.2 畜禽肉品物理属性检测

2.2.1 系水力

系水力也称持水性, 是指畜禽在经屠宰以后, 畜禽肉在运输、加工和保存的过程中, 凭借自身的物理形态和化学构成对水分构成一定的限制和束缚能力, 减少肉中水分流失, 它是衡量畜禽肉品质的重要指标^[39-40]。张晶晶^[41]利用 VIS/NIR 高光谱成像技术(400~1000 nm)来对冷鲜滩羊肉的持水性进行检测。运用变量组合集群分析法(variables combination population analysis, VCPA)和 SPA 对预处理后的光谱数据进行特征变量筛选, 分别建立基于全波段和特征波段的 PLSR 模型和 LS-SVM 模型, 结果表明 VCPA-LSSVM 模型最优($R_c=0.758$, $R_p=0.725$)。总结可得, 高光谱成像技术对肉的系水力检测效果未达到较高精度, 这主要是和模型选取有关, 未选取适当的建模方法将会影响最终预测效果。就目前研究来看, 对畜禽肉品系水力的研究较少, 在未来的研究中可更多地从此方面拓展。

2.2.2 肉品色泽检测

肉品色泽是消费者衡量肉质好坏的视觉指标, 好的色泽不仅能够给人们留下好的第一印象, 也能激起消费者的购买欲。过去检测肉品色度的方法采用的是色度计和色度仪对肉色进行测量评估, 这样的方法受到测量范围的限制, 不能进行大范围的色度测量, 而且极易污染样品、可行性不高。利用高光谱成像技术可高效、无损、快速地对肉品色泽进行检测, 很多学者在此方面进行了研究。



注: (a)全谱模型; (b)基于最优谱的模型; (c)基于图像的模型; (d)基于数据融合的模型。

图 2 四个模型用 PLS 方法测量和预测验证集的 pH

Fig.2 Measured and predicted pH values for validation sets by PLS methods using 4 models

目前,主要是利用高光谱成像技术对储存期和鲜肉肉品颜色的变化进行检测研究。如蒋圣启等^[42]利用高光谱技术结合 Stepwise 算法对冷鲜鸡肉色泽进行评估,选用高光谱系统所采集到的 900~1700 nm 数据,预处理后经 Stepwise 算法提取最优波长后建立预测模型对比分析,对冷鲜鸡肉的 L^* (亮度值)和 b^* (黄度值)进行预测,未对 a^* (红度值)进行建模分析,这主要是因为鸡肉中肌红蛋白含量和红肌纤维含量较少,红度值较低,检测出来误差较大结果不准确。其结果表明,预测 L^* 效果最好的是经标准正态变量方法(standard normal variable, SNV)处理以后筛选出的 14 个波长所建立的多元线性回归(multiple linear regression, MLR)模型,预测 b^* 效果最好的是经 SNV 处理以后筛选出的 13 个波长所建立的 O-PLS 模型。SNV 预处理方法的作用与 MSC 相同,都是用来校正由于散射所引起的光谱误差,但是 MSC 是用于消除理想条件下的线性散射影响,而 SNV 是用于校正因颗粒散射而引起的光谱误差,所以 SNV 的校正效果要好一些。

2.2.3 畜禽肉品纹理检测

除了对畜禽肉质系水力和色泽进行检测,其肉品纹理也有助于评估肉质好坏。精品上等肥瘦相间的肉,会带有形如大理石花纹一般的纹理,纹理越好,肉的品质越好。畜禽肉品纹理检测中多以检测牛肉大理石花纹为主,科学家们在此做了多方面探究。例如孙啸等^[43]采用图像分割的方式对牛肉大理石花纹进行检测,将脂肪区域和肌肉区域曲线对比确定了 534 nm 处反射强度有最大差值,再分别采用中值滤波、区域生长和自动取阈值 3 种特性处理方法对原始图像和 534 nm 波长图像进行大理石花纹分割处理,其中,中值滤波主要是为了在消除噪声的同时可以保留图像的边缘细节。区域生长在此所起的作用是将相同特征的联通区域分割出来,能够更好地提供边界信息和分割结果,但是此方法也存在一定的不足,噪声和灰度不均匀容易导致空洞和过分割。自动取阈值则可以有效地避免人工干预,提取出理想的梯度阈值。结果得出,在 534 nm 波长图像下进行的(图 3)图像分割效果更好一些,其均方误差小,分割精度也更接近于 1。由此可知,在特征波段下,目标区域与反射区域光谱反射强度有较大区别,从这里进行图像分割可取得最佳效果。为了更好地发挥高光谱技术在检测方面的潜能,江龙建^[44]、艾虎^[45]、郭爱玲等^[46],将机器视觉、图像技术与神经网络技术相结合,对牛肉大理石花纹进行检测分级,取得较好的效果。综上所述,将高光谱成像检测技术与其他技术相结合,取长补短,可提升其检测的广度和深度。

2.3 畜禽肉品食用安全指标

2.3.1 微生物

微生物的污染容易导致畜禽肉品变质,所以用菌落数的多少和菌种来表征微生物的含量,以此反映生物品质

质量。日常生活中所见到的冷鲜鸡肉中会存在热杀索丝菌,它会严重影响鸡肉质量,何鸿举等^[47]利用高光谱成像技术来对其含量进行检测,他们在偏最小二乘(partial least squares, PLS)算法的基础上进行改进,以热杀索丝菌作为因变量,全波段作为自变量来建立基于全波段的 PLS 回归模型(F-PLS),最终结果得出由基线校正(baseline correction, BC)处理后建立的 F-PLS 模型相比其他模型效果更好(相关系数 $R_p=0.973$, 误差为 0.295)。为不断提升模型预测效果,在原始模型的基础上进行优化是一种比较常见的方法。相比热杀索丝菌,细菌总数(total viable bacteria count, TVC)或许更能表征畜禽肉品变质情况。王伟等^[48]利用高光谱成像技术对猪肉中的 TVC 进行检测,为对比不同模型建模效果,将预处理后的光谱数据作为原始数据分别建立 PLSR、人工神经网络(artificial neural networks, ANNs)和 LS-SVM 模型对 TVC 进行预测,结果得出 LS-SVM 模型效果最好 R^2 为 0.9426。HUANG 等^[49]、TAO 等^[50]也将高光谱技术应用于猪肉菌落总数检测中并取得了较好效果。总结可得,模型不具备通用性,每当采用不同的数据或者检测的对象不同时,都要用不同的模型来建模进行预测,经对比分析后确定出一条最优处理路线。



图 3 手动提取的牛肉大理石花纹图像
Fig.3 Beef marbling image extracted manually

2.3.2 嫩度

嫩度是消费者评价肉品食用品质指标之一,当前人们多采用感官评价的方法来对畜禽肉品嫩度进行评价,此方法受主观因素影响较大,所得结果误差大。高光谱成像技术凭借它自身的特点刚好弥补了这样的不足,用于检测畜禽肉品嫩度恰到好处。在对羊肉嫩度的检测中,王婉娇等^[51]用剪切力值来表征冷鲜羊肉的嫩度,优选出特征光谱数据区域,建立 PLSR 模型,得出 SG-PLSR 模型效果最好($R_p=0.773$, $RMSEP=1.060$)。在此模型中所取得的效果还有提升空间,所以刘贵珊等^[52]总结前者的经验,用 IVISSA 算法对 PLSR 模型进行优化,最终取得了更好的预测效果($R_p=0.79$, $RMSEP=1.46579$)。鸡肉和羊肉在本质上有很大区别,所以王正伟等^[53]在对鸡肉嫩度的检测中采用的方法是 MSC-MLR,且取得了较好的效果(图 4) ($R_p=0.94$, $RMSEP=1.97$)。

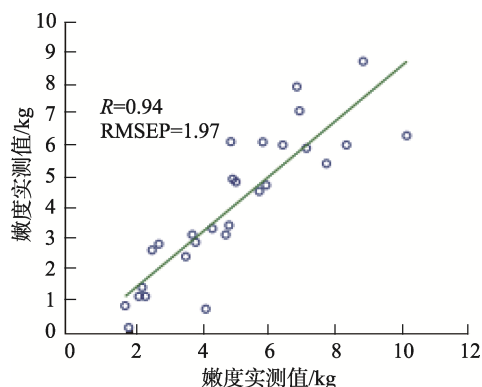


图 4 鸡肉嫩度 MLR 模型预测结果图

Fig.4 Prediction results of MLR model for chicken tenderness

2.3.3 掺假

掺假也是畜禽肉品质安全指标中备受关注的一点。在市场中一些不法商家为了谋取更大的经济利益,通常会选择价格较低的肉种掺入或冒充价格较高的肉中。为了减少此现象的发生,国内外已有研究人员将高光谱成像技术运用于畜禽肉品质检测中。KAMRUZZAMAN 等^[54-55]先后运用 VNIR 高光谱系统所采集的数据建立不同方法处理后的 PLSR 模型来检测羊肉掺假情况和牛肉中掺假鸡肉的情况,所得模型精度均 95%以上,取得了不错的效果。为探求算法和数据相结合的多样性效果,朱亚东等^[56]则是将线性回归算法和光谱数据(900~1700 nm)相结合来预测牛肉中掺假鸡肉的情况,所得结果理想。韩方凯等^[57]将近红外光谱技术与极限学习机相结合,陈伟^[58]将近红外光谱技术与生物散斑相融合对牛肉掺假情况进行检测并取得较好效果。分析可得,因为不同的肉质所呈现出的光谱曲线是不同的,所以针对肉品质掺假这种现象,将光谱数据和其他算法相结合,能够在检测中起到很好的效果。

3 结论与展望

本文综述了高光谱成像技术应用于畜禽肉品质研究的关键指标(化学指标、物理指标、食用安全指标)检测及检测方法,与传统检测方法相比检测精度有了根本上的提高,证明了高光谱成像技术运用于此的可行性。高光谱成像技术因其独有的特点,正广泛地被应用于各个领域。但是,它所存在的一些问题也是需要我们在运用过程中需要多加考虑的地方:

(1)为了提高结果准确性,需要对影响色泽的每一个参数进行分开检测再分别建立模型综合评估,过程重复、耗时长。(2)高光谱成像系统所采集到的数据是形如长方体砖块的一数据块,内容繁杂、冗余信息多。当前比较常见的减少数据维度、去除冗余信息的方法有 SPA 和 PCA 两种。其中 PCA 属于线性方法,它能提取主要信息但是对数据的区分作用不大;SPA 是前向变量选择算法,能选出具有代表性的特征波长,但是当数据比较大时,循环计算中所耗费

时间较长。如何从如此庞大的数据中挖掘出所需要的数据,开发出一种性能更优的算法是一项艰巨的任务。(3)目前高光谱技术在各个领域都有所应用,应用于数据分析的软件有所不同,所建立的模型不具备通用性。(4)缺乏一套集光谱数据采集、预处理、降维和建模的相对完整的设备。(5)所采集到的光谱数据容易受到噪声影响,如何从设备、样本数据采集环境和算法上进一步优化这一点是很重要的。

综上所述,高光谱成像技术凭借快速高效、无损环保的技术特点,为及时掌握所检样品内部营养成分变化提供了帮助,在畜禽肉品质检测中具有巨大潜力。伴随着新冠疫情肆虐全球以后,人们越来越注重食品安全。高光谱成像技术可以在不损伤样品外部的前提下,检测其内部信息,有望取代传统检测方法成为安检部门检测畜禽肉品质的新方法,为人们的食用健康安全提供保障。同时也可以有效地保证流入市场的畜禽肉品质是合格的,防止不法商贩以假乱真扰乱市场秩序。因此,高效无损、快速精准的检测方法已是发展所需,未来高光谱成像技术检测畜禽肉品质的安全性也会成为大势所趋。所以,我们要在算法上不断地创新、在技术上新益求新,才能使得高光谱成像技术得到更好的发展。

参考文献

- [1] 白阳. 英国鸡肉为啥这么“毒”[J]. 时代主人, 2015, (6): 24.
BAI Y. Why is British chicken so “poisonous” [J]. Time Master, 2015, (6): 24.
- [2] WHO. 全球每年 42 万人死于食物中毒[J]. 中国食品药品监管, 2015, (12): 6.
World Health Organization. 420000 people die of food poisoning every year in the world [J]. China Food Drug Admin Magaz, 2015, (12): 6.
- [3] 佚名. “毒猪肉”事件[J]. 今日养猪业, 2017, (5): 19.
ANON. “Poisonous pork” incident [J]. Today's Pig Ind, 2017, (5): 19.
- [4] 王飞翔, 谢安国, 康怀彬, 等. 食品光谱图像无损检测技术实用化方向研究进展[J]. 农产品加工, 2019, 483(13): 74-78.
WANG FX, XIE ANG, KANG HB, *et al.* Research progress in the practical direction of food spectral image nondestructive testing technology [J]. Farm Prod Process, 2019, 483(13): 74-78.
- [5] 刘世凯, 李子琦, 张新乐. 高光谱成像技术在食品安全检测方面的应用[J]. 食品安全导刊, 2015, (6): 124-126.
LIU SK, LI ZQ, ZHANG XL. Application of hyperspectral imaging technology in food safety detection [J]. Chin Food Saf Magaz, 2015, (6): 124-126.
- [6] MUHAMMAD Z, MUHAMMAD N, THU PH, *et al.* Development of a hyperspectral imaging technique using LA-ICP-MS to show the spatial distribution of elements in soil cores [J]. Geoderma, 2021, 385: 114831.
- [7] CHEN YZ, XU ZY, TANG WC, *et al.* Identification of various food residuals on denim based on hyperspectral imaging system and combination optimal strategy [J]. Artif Intell Agric, 2021, 5: 125-132.
- [8] LAUREEN C, SACRE P, ABDOUL K, *et al.* Comparison of hyperspectral imaging techniques for the elucidation of falsified medicines composition [J]. Talanta, 2019, 198: 457-463.
- [9] BORZOV S, POTATURKIN O. Selection of the informative feature system for crops classification using hyperspectral data [J]. Optoel Instrum Data Proc, 2021, 56(4): 431-439.

- [10] JOSEPH L, CARY S, KURT J, *et al.* Detection and community-level identification of microbial mats in the McMurdo dry valleys using drone-based hyperspectral reflectance imaging [J]. *Antarct Sci*, 2020, 32(5): 367–381.
- [11] OSTRIKOV O, PLAKHOTNIK OV. Calibration of hyperspectral data aviation mode according with accompanying ground-based measurements of standard surfaces of observed scenes [J]. *Izv Atmos Ocean Phy*, 2014, 50(9): 1016–1019.
- [12] GUILLAUME L. Monitoring natural and anthropogenic plant stressors by hyperspectral remote sensing: Recommendations and guidelines based on a meta-review [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 788: 147758.
- [13] SIMON S, UBRAVKO C, MICHELE B, *et al.* Soil monitoring for precision farming using hyperspectral remote sensing and soil sensors [J]. *AT-Autom*, 2021, 69(4): 325–335.
- [14] GOPAL K, RABI N, PRAFULL S, *et al.* Application of thermal imaging and hyperspectral remote sensing for crop water deficit stress monitoring [J]. *Geocarto Int*, 2021, 36(5): 481–498.
- [15] SHAOHUA Z, QIAO W, YING L, *et al.* An overview of satellite remote sensing technology used in China's environmental protection [J]. *Earth Sci Inform*, 2017, 10(2): 137–148.
- [16] FRASSY F, CANDIANI G, RUSMINI M, *et al.* Mapping asbestos-cement roofing with hyperspectral remote sensing over a large mountain region of the Italian western alps [J]. *Sensors*, 2014, 14(9): 15900–15913.
- [17] SANDAK J, SANDAK A, LEGAN L, *et al.* Nondestructive evaluation of heritage object coatings with four hyperspectral imaging systems [J]. *Coatings*, 2021, 11(2): 244.
- [18] COSTANZO A, EBOLESE D, RUFFOLO S, *et al.* Detection of the TiO₂ concentration in the protective coatings for the cultural heritage by means of hyperspectral data [J]. *Sustainability*, 2020, 13(1): 92.
- [19] 李金梦. 基于高光谱成像技术的柑橘叶片含氮量快速检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LI JM. Study on rapid detection method of nitrogen content in citrus leaves based on hyperspectral imaging technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [20] 赵凡, 闫昭如, 薛建新, 等. 高光谱无损识别野生和种植黑枸杞[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(1): 201–205.
- ZHAO F, YAN ZR, XUE JX, *et al.* Hyperspectral nondestructive identification of wild and cultivated black *Lycium barbarum* [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2021, 41(1): 201–205.
- [21] HE HJ, SUN DW. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2015, 46(1): 99–109.
- [22] 赵健. 高光谱成像技术检测延边黄牛肉的新鲜度[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(2): 271–276.
- ZHAO J. Detection of freshness of Yanbian yellow beef by hyperspectral imaging [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(2): 271–276.
- [23] 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 RG, YAO XD, DUAN HW, *et al.* Rapid detection of volatile base nitrogen in Mutton by hyperspectral image [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2016, 36(3): 806–810.
- [24] 朱启兵, 肖盼, 黄敏, 等. 基于特征融合的猪肉新鲜度高光谱图像检测[J]. *食品与生物技术学报*, 2015, 34(3): 246–252.
- ZHU QB, XIAO P, HUANG M, *et al.* Pork freshness hyperspectral image detection based on feature fusion [J]. *J Food Biotechnol*, 2015, 34(3): 246–252.
- [25] GUO TF, HUANG M, ZHU QB, *et al.* Hyperspectral image-based multi-feature integration for TVB-N measurement in pork [J]. *J Food Eng*, 2018, 218: 61–68.
- [26] 张晶晶, 刘贵珊, 任迎春, 等. 冷鲜滩羊肉挥发性盐基氮变化的高光谱动力学模型构建 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 245–250, 56.
- ZHANG JJ, LIU GS, REN YC, *et al.* Construction of hyperspectral kinetic model of volatile base nitrogen change in cold Xiantan mutton [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2019, 40 (04): 245–250.
- [27] 赵杰文, 惠喆, 黄林, 等. 高光谱成像技术检测鸡肉中挥发性盐基氮含量[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 158–164.
- ZHAO JW, HUI Z, HUANG L, *et al.* Detection of volatile base nitrogen in chicken by hyperspectral imaging [J]. *Prog Laser Optoelectr*, 2013, 50(7): 158–164.
- [28] HOONSOO L, MOON SK, LEE WH, *et al.* Determination of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in pork meat using hyperspectral fluorescence imaging [J]. *Sensor Act*, 2018, 259: 532–539.
- [29] LU Q, TANG XY, DONG J. A feasibility quantification study of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in duck meat for freshness evaluation [J]. *Food Chem*, 2017, 237: 1179–1185.
- [30] 杨东. 基于高光谱成像技术熟牛肉新鲜度快速检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- YANG D. Study on fast detection method of cooked beef freshness based on hyperspectral imaging technology [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [31] 杨东, 陆安祥, 王纪华. 高光谱成像技术定量可视化检测熟牛肉中挥发性盐基氮的含量[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(9): 257–264.
- YANG D, LU ANX, WANG JH. Quantitative and visual detection of volatile base nitrogen in cooked beef by hyperspectral imaging technology [J]. *Mod Food Technol*, 2017, 33(9): 257–264.
- [32] 田卫新, 何丹丹, 杨东, 等. 一种基于高光谱图像的熟牛肉 TVB-N 含量预测方法[J]. *食品与机械*, 2016, 32(12): 70–74.
- TIAN WX, HE DD, YANG D, *et al.* A prediction method of TVB-N content in cooked beef based on hyperspectral images [J]. *Food Mach*, 2016, 32(12): 70–74.
- [33] XIONG ZJ, SUN DW, PU HB, *et al.* Non-destructive prediction of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value for freshness evaluation of chicken meat using hyperspectral imaging [J]. *Food Chem*, 2015, 179: 179–181.
- [34] 何鸿举, 王魏, 李波, 等. 近红外高光谱快速无接触评估冷鲜猪肉脂质氧化[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 117–122.
- HE HJ, WANG W, LI B, *et al.* Near infrared hyperspectral rapid contactless assessment of lipid oxidation in cold and fresh pork [J]. *Food Mach*, 2020, 36(8): 117–122.
- [35] 王魏, 何鸿举, 王玉玲, 等. 基于最优光谱信息的冷鲜鸡肉 TBA 值快速检测[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(14): 222–227.
- WANG W, HE HJ, WANG YL, *et al.* Rapid detection of TBA value of cold and fresh chicken based on optimal spectral information [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2020, 41(14): 222–227.
- [36] LIU D, PU HB, SUN DW, *et al.* Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for prediction of pH in salted meat [J]. *Food Weekly News*, 2014, 160: 330–337.
- [37] 刘娇, 李小昱, 金瑞, 等. 不同品种冷鲜猪肉 pH 值高光谱检测模型的传递方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(7): 1973–1979.
- LIU J, LI XY, JIN R, *et al.* Study on transfer method of hyperspectral detection model of pH value of different varieties of cold and fresh pork [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2015, 35(7): 1973–1979.
- [38] 胡耀华, 熊来怡, 刘聪, 等. 基于近红外光谱的生鲜猪肉 pH 检测及其品质安全判别[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(3): 121–126.

- HU YH, XIONG LY, LIU C, *et al.* pH detection and quality safety discrimination of fresh pork based on near infrared spectroscopy [J]. *J Chin Agric Univ*, 2012, 17(3): 121–126.
- [39] XIONG ZJ, SUN DW, ZENG XA, *et al.* Recent developments of hyperspectral imaging systems and their applications in detecting quality attributes of red meats: A review [J]. *J Food Eng*, 2014, 132: 1–13.
- [40] XU B, ZHANG G, XU C, *et al.* Analysis of fingerprints features of infrared spectra of various processed products of *Rhizoma coptidis* and their different extracts [J]. *J Molecul Struct*, 2015, 1096: 147–156.
- [41] 张晶晶. 基于高光谱技术的滩羊肉持水性及质构剖面特性快速检测 [D]. 宁夏: 宁夏大学, 2019.
- ZHANG JJ. Rapid detection of water holding capacity and texture profile characteristics of Tan mutton based on hyperspectral technology [D]. Ningxia: Ningxia University, 2019.
- [42] 蒋圣启, 何鸿举, 王慧. 近红外高光谱联用 Stepwise 算法快速无接触评估冷鲜鸡肉色泽及嫩度 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(13): 125–133.
- JIANG SQ, HE HJ, WANG H. Fast contactless evaluation of color and tenderness of cold and fresh chicken by near infrared hyperspectral stepwise algorithm [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2019, 40(13): 125–133.
- [43] 孙啸, 逢滨, 刘德营. 基于高光谱图像光谱信息的牛肉大理石花纹分割 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 177–181.
- SUN X, PANG B, LIU DY. Beef marbling segmentation based on spectral information of hyperspectral images [J]. *J Agric Mach*, 2013, 44(1): 177–181.
- [44] 江龙建. 基于计算机视觉和神经网络的牛肉大理石花纹自动分级技术的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- JIANG LJ. Research on automatic grading technology of beef marbling based on computer vision and neural network [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [45] 艾虎. 基于计算机视觉的人工神经网络和图像处理技术的牛肉大理石花纹自动分级研究 [D]. 四川: 四川农业大学, 2009.
- AI H. Research on automatic grading of beef marbling based on computer vision artificial neural network and image processing technology [D]. Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2009.
- [46] 郭爱玲, 马世榜, 刘伟. 基于机器视觉技术的牛肉大理石花纹自动检测系统 [J]. *南阳师范学院学报*, 2017, 16(6): 13–16, 47.
- GUO AIL, MA SP, LIU W. Automatic detection system of beef marbling based on machine vision technology [J]. *J Nanyang Norm Univ*, 2017, 16(6): 13–16, 47.
- [47] 何鸿举, 蒋圣启, 王魏, 等. 高光谱快速预测冷鲜鸡胸肉中乳酸菌 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(12): 227–233.
- HE HJ, JIANG SQ, WANG W, *et al.* Fast hyperspectral prediction of lactic acid bacteria in cold fresh chicken breast [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2020, 41(12): 227–233.
- [48] 王伟, 彭彦昆, 张晓莉. 基于高光谱成像的生鲜猪肉细菌总数预测建模方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 411–415.
- WANG W, PENG YK, ZHANG XL. Study on prediction and modeling method of total bacterial count in fresh pork based on hyperspectral imaging [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2010, 30(2): 411–415.
- [49] HUANG L, ZHAO JW, CHEN QS, *et al.* Rapid detection of total viable count (TVC) in pork meat by hyperspectral imaging [J]. *Food Res Int*, 2013, 54(1): 821–828.
- [50] TAO FF, PENG YK. A nondestructive method for prediction of total viable count in pork meat by hyperspectral scattering imaging [J]. *Food Bioproc Technol*, 2015, 8(1): 17–30.
- [51] 王婉娇, 王松磊, 贺晓光, 等. NIR 高光谱成像技术检测冷鲜羊肉嫩度 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(20): 77–79, 91.
- WANG WJ, WANG SL, HE XG, *et al.* Detection of tenderness of cold and fresh mutton by NIR hyperspectral imaging [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2015, 36(20): 77–79, 91.
- [52] 刘贵珊, 张翀, 樊奈响, 等. IVISSA 算法冷鲜滩羊肉嫩度的高光谱模型优化 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(8): 2558–2563.
- LIU GS, ZHANG Z, FAN NY, *et al.* Hyperspectral model optimization of cold Xiantan mutton tenderness based on ivissa algorithm [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2020, 40(8): 2558–2563.
- [53] 王正伟, 王家云, 王松磊, 等. 基于 VIS/NIR 高光谱成像技术检测鸡肉嫩度 [J]. *食品科技*, 2015, 40(11): 270–274.
- WANG ZW, WANG JY, WANG SL, *et al.* Detection of chicken tenderness based on Vis/NIR hyperspectral imaging technology [J]. *Food Sci Technol*, 2015, 40(11): 270–274.
- [54] KAMRUZZAMAN M, SUN DW, ELMASRY G, *et al.* Fast detection and visualization of minced lamb meat adulteration using NIR hyperspectral imaging and multivariate image analysis [J]. *Talanta*, 2013, 103: 130–136.
- [55] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning [J]. *J Food Eng*, 2016, 170: 8–15.
- [56] 朱亚东, 何鸿举, 王魏, 等. 高光谱成像技术结合线性回归算法快速预测鸡肉掺假牛肉 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 184–189.
- ZHU YD, HE HJ, WANG W, *et al.* Fast prediction of chicken adulterated beef by hyperspectral imaging combined with linear regression algorithm [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2020, 41(4): 184–189.
- [57] 韩方凯, 刘璨, 黄煜, 等. 近红外结合极限学习机快速识别牛肉中掺假猪肉 [J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(13): 185–187.
- HAN FK, LIU C, HUANG Y, *et al.* Fast identification of adulterated pork in beef by near infrared combined with limit learning machine [J]. *Anhui Agric Sci*, 2019, 47(13): 185–187.
- [58] 陈伟. 基于近红外光谱与生物散斑融合的牛肉掺假检测方法 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- CHEN W. Detection method of beef adulteration based on near infrared spectroscopy and biological speckle fusion [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介

雷 裕, 硕士研究生, 主要研究方向为高光谱成像技术应用研究。

E-mail: 1145179272@qq.com

胡新军, 博士, 副教授, 主要研究方向为高光谱成像技术应用研究。

E-mail: suse2021@126.com