

高光谱成像技术在红肉食用品质检测中的应用研究进展

崔莹莹^{1,2}, 杨铭铎^{1,2,*}, 方伟佳¹, 孟 宁¹, 苗榕芯¹, 彭子宁¹

(1.哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江 哈尔滨 150076;

2.哈尔滨商业大学中式快餐研究发展中心博士后科研基地, 黑龙江 哈尔滨 150076)

摘 要: 高光谱成像技术是一种集光谱技术与计算机视觉技术为一体的无损检测技术, 该项技术能快速、全面、无损地获取肉品的内外部信息, 在红肉食用品质的检测中具有广泛应用。本文在简述高光谱成像原理的基础上, 详述近年来高光谱成像技术在红肉制品食用品质方面的应用, 并对该项技术存在的问题及应用前景进行概述, 以期对红肉无损检测的研究提供参考。

关键词: 高光谱成像; 红肉制品; 食用品质; 品质检测

A Review of Application of Hyperspectral Imaging Technology in Quality Detection of Red Meat

CUI Yingying^{1,2}, YANG Mingduo^{1,2,*}, FANG Weijia¹, MENG Ning¹, MIAO Rongxin¹, PENG Zining¹

(1.School of Tourism and Cuisine, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China; 2.Post-Doctoral Research Base, Center for Chinese Fast Food Research and Development, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: Hyperspectral imaging is a nondestructive testing technology that integrates spectroscopy and computer vision technology. This technology enables us to quickly, comprehensively and nondestructively obtain both internal and external information of meat products, and it has been widely used in the detection of red meat products. Beginning with a brief description of the principle of hyperspectral imaging, this paper presents a detailed review of the application of high spectral imaging technology in detecting the quality of red meat products. The existing problems and future prospects of this technology are summarized in order to provide valuable information for research on nondestructive testing of red meat.

Keywords: hyperspectral imaging; red meat products; food quality; quality inspection

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190226-042

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2019) 06-0070-07

引文格式:

崔莹莹, 杨铭铎, 方伟佳, 等. 高光谱成像技术在红肉食用品质检测中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(6): 70-76.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190226-042. <http://www.rlyj.net.cn>

CUI Yingying, YANG Mingduo, FANG Weijia, et al. A review of application of hyperspectral imaging technology in quality detection of red meat[J]. Meat Research, 2019, 33(6): 70-76. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190226-042. <http://www.rlyj.net.cn>

中国是世界上最大的肉制品生产国, 也是最大的肉制品消费国。随着红肉制品(猪肉、牛肉、羊肉等)产量和种类的增加^[1], 肉类食用品质(色泽^[2]、嫩度^[3]、多汁性^[4]及大理石花纹^[5-6]等)的检测已经引起消费者及肉类企业的高度重视。传统肉类品质的检测主要通过感官和理化方法, 感官检测主要通过人的咀嚼品尝

来评定肉类品质的好坏, 主观影响因素较大, 且容易产生误差; 理化检测(机械检测)法主要使用质构仪、色度计等仪器。质构仪是通过模拟人的牙齿切断肉的一种检测方法^[7], 通常质构仪测定的时间较长, 且对于测定的肉制品有一定的破坏作用, 使得待测肉类不能继续销售。色度计的检测面积通常较局限。基于此,

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 哈尔滨商业大学研究生创新科研项目(YJSCX2018-532HSD)

第一作者简介: 崔莹莹(1993—)(ORCID: 0000-0002-2979-7303), 女, 硕士研究生, 研究方向为烹饪科学。

E-mail: cuiyuchengfeng@163.com

*通信作者简介: 杨铭铎(1956—)(ORCID: 0000-0003-3618-9493), 男, 教授, 博士, 研究方向为烹饪科学与烹饪教育、餐饮管理与饮食美学。E-mail: yangmingduo5663@163.com

寻找一种快速、全面的无损检测技术是目前亟待解决的问题。

随着图像处理技术的不断发展,具有无损检测特征的近红外技术已经逐渐应用于肉类品质方面的研究中,然而近红外测定的区域通常是食品的某点或某片区域,一旦样品不均匀将会对测定结果产生较大的影响^[8]。高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)技术是将传统的图像技术和光谱技术相结合的一种检测技术^[9-10],它能同时获取待测肉制品每个像素点的图像及光谱信息,全面且可视化地反映样品内外品质特征,具有十分广泛的应用前景^[11-12]。近年来,国内外已经逐渐将HSI技术应用于肉类安全检测^[13]、营养品质(脂肪、蛋白质^[14]等)、肉类鉴别^[15]研究中,但对于肉食用品质方面的研究较少,尤其对于嫩度的研究更是鲜有报道。本研究简要介绍HSI系统的成像原理,重点概述其在红肉制品食用品质检测方面的应用进展^[11]。

1 HSI系统的基本原理

HSI技术是近20年间兴起的一种无损检测技术,主要融合了光学、电子学、数字图像信息处理及计算机科学等技术^[16]。按照HSI扫描方式的不同可将其分为点扫描式HSI系统、线扫描式HSI系统及区域扫描式HSI系统3种,其中线扫描式(推扫式扫描)为最常用的一种方式。HSI系统主要由光源、光源分散装置、成像高光谱仪(最核心的部件)、电荷耦合装置(charge coupled device, CCD)相机、光学镜头、数据采集卡、电荷耦合器件、图像采集系统和计算机等软件、硬件组成^[17](如图1所示),其分辨率在 $\Delta\lambda/\lambda=0.01$ 数量级,检测波长为400~2 500 nm,主要包括紫外区到近红外区甚至更远的区域^[18]。

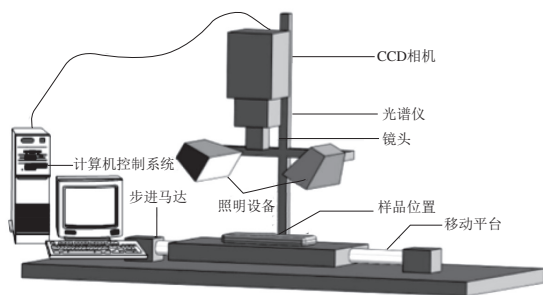


图1 HSI系统的基本组成^[17]

Fig. 1 Basic components of the HSI system^[17]

HSI技术的检测过程主要是通过图像尺寸大小调整、采集图像、建立掩膜、图像分割、感兴趣区域(region of interest, ROI)选择、噪声处理(中值滤波平滑(median filtering smoothing, MFS)处理、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、标

准正态变量校正(standard normal variable, SNV)、卷积平滑(savitzky-golay smoothing, S-G)处理、去趋势算法和傅里叶变换(fourier transform, FT)等)、感兴趣区降维处理(主成分分析法(principal component analysis, PCA)、独立元分析法(independent component analysis, ICA)及线性判别分析法(linear discriminant analysis, LDA)等)、提取特征波长(竞争性自适应重加权算法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)、连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)、遗传算法(genetic algorithm, GA)和无信息变量消除法(uninformative variables elimination, UVE))及建立判别模型(多元线性回归法(multiple linear regression, MLR)、偏最小二乘法(partial least squares, PLS)、BP神经网络法(back-propagation neural network, BPNN)和支持向量机(support vector machine, SVM))等方式完成的^[19](图2为HSI技术的检测流程图)。当光源照射到待测物体的表面时,由于不同物质的组成、性质、官能团有所不同,导致待测物质对特定波长有着不同的吸收度、分散度和反射率,因此通过分析光谱信号之间的差异可以对待测物进行定性、定量分析,从而达到区分与检测的目的^[19-20]。高光谱图像又名超立方、光谱方等,其形成的图像是一个三维的数据矩阵(x, y, λ)^[20],其中包括1个二维的空间维度和1个一维的光谱维度^[19]。高光谱成像技术的原理主要是通过将实验中所获得的三维图像与数学模型相统一,从而实现待测样品的内外部同时检测。HSI技术具有一次性采集可进行多项指标检测、分辨率高^[21-22]、不需要对样品进行前处理、不接触待测样、测定速度快、检测范围广及操作费用低等优点^[23]。因此HSI技术避免了二次污染现象的产生,为企业在线检测技术提供了支持。

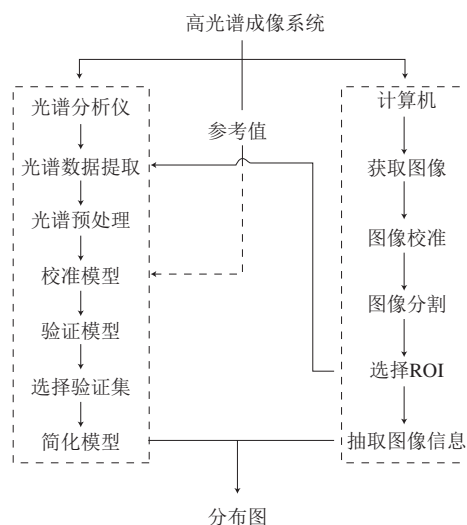


图2 HSI系统的检测过程

Fig. 2 Flow chart of the detection process with HSI system

2 HSI技术在红肉食用品质中的应用进展

2.1 嫩度检测

在肉类的品质评定中,嫩度起着主导作用,也是消费者决定购买的主要原因。Naganathan等^[24]曾提出,虽然嫩度在肉类品质中具有重要地位,但美国农业部在1926年颁布的肉类分级标准中却没有将嫩度列在其中,目前市场上也没有任何一种肉类是根据其嫩度等级进行售卖的。随着红肉制品产量的不断增多,越来越多的消费者提议将嫩度加到肉类的分级标准中。肉类嫩度(即柔韧性)的常规检测技术为感官检测,客观的检测技术为以质构仪所检测的最大剪切力代表嫩度值,剪切力是以破坏原材料为前提的检测技术,通常需要检测熟制的肉类,且操作时间较长,不适宜商业生产^[25]。Naganathan等^[26]利用HSI技术对放置14 d的114块牛排进行嫩度检测,利用质构仪对114块牛肉进行等级划分(柔软、中间及坚韧),将高光谱采集的图像信息与3种嫩度等级关系建立图像预测模型,利用留一检验交互验证法(leave-one-out cross validation, LOO-CV)对其进行验证,得出验证精度为96.4%,说明HSI技术可实现肉类嫩度的无损在线检测。

对于生鲜红肉嫩度的检测,王松磊等^[27]利用400~1 000 nm的HSI技术采集128个羊肉样品的图谱,利用最小二乘回归模型进行预处理,并建立相应的多元线性模型,用Matlab软件进行光谱图像处理,对羊肉的光谱图像进行灰度化处理,结果表明,相关系数和预测均方根误差分别为0.89和0.73。王卫等^[28]在采用HSI技术对牛肉嫩度的检测中,对所得的光谱图像进行预处理,通过灰度共生矩阵方法提取光谱图像中的纹理属性,利用MLR法建立相应的嫩度模型,结果表明,高光谱图像的纹理属性可用于牛肉嫩度分级处理,且准确度达到96%。以上研究表明,高光谱可实现生鲜红肉嫩度的无损检测,然而某些研究存在检测的精度值不高等问题,原因可能是建立模型的方法及模型评价指标不恰当,进而没有很好地降低冗余数据的干扰。

对于熟制红肉嫩度的检测,Cluff等^[29]通过测量每个牛排40个不同位置散射的光谱研发HSI系统,得出此仪器的精度可达到98.4%;此外,还利用HSI系统检测放置14 d的472块牛肉,通过PCA法分析992~1 739 nm波长范围内生牛肉的吸收光谱图像,用Warner-Bratzler剪切力值代表牛肉的标准嫩度,并建立相应的线性模型,将牛肉分成2个等级,分别为柔软和坚硬,分级准确率为75%。然而,目前对于高光谱的应用大多利用其光谱信息,对于图像信息应用的较少。Barbin等^[30]在采用HSI技术对猪肉嫩度进行检测的实验中得出,基于光谱数据建模的结果相关性为0.63,基于图像建模的结果相关性为0.48,光

谱加图像信息建立的模型相关系数为0.75。综上,HSI技术可用于预测生熟肉类制品的嫩度,且其检测精度优于近红外技术,具有内外同时检测的特点,然而目前对于HSI技术的光谱信息应用较多,未来应加大力度开发并完善HSI技术的光谱、图像组合预测模型。

2.2 水分检测

水是肉的主要组成成分,也是营养物质之一,肉中的水分含量不仅影响肉类嫩度进而影响其品质,而且影响肉类制品的货架期,因此检测水分含量直接影响着肉类的品质。孙红等^[31]利用高光谱的光谱信息与伪彩图像对马铃薯叶片的水分含量进行检测,采集862.9~1 704.2 nm波长的光谱数据,采用每类分类精度(class accuracy, CA)与递归滤波(recursive filtering, RF)2种算法进行光谱特征分析,并利用偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)进行建模,通过计算待测样每个像素点的含水率进而得出其灰度图像,将图片进行伪彩处理并用颜色空间(hue-saturation-value, HSV)进行彩色分割,结果表明,利用HSI技术可以实现马铃薯叶片含水量与分布的可视化检测,此研究也证明可用HSI技术检测食品中的水分含量。詹白勺等^[32]利用Matlab编程语言,对三文鱼不同的水分含量予以不同的颜色显示,较好地將光谱数据与图像数据结合在一起,实现了内外同时检测。HSI技术在果蔬水分检测中应用十分广泛,对于红肉水分含量的研究相对较少,主要研究进展如下。

依据水分含量进行红肉品分类研究。刘善梅等^[33]在采用HSI检测技术对不同品种冷鲜猪肉含水量的研究中,为提高HSI技术的适用性,利用高光谱信号补正方法来提高其适用性,算法经过补正后预测偏差比率从0.91提高到2.58。刘娇等^[34]通过建立PLS猪里脊肉水分含量的检测模型,并利用分段直接校正结合线性插值(piecewise direct standardization combine with linear interpolation, PDS-LI)的传递算法,实现了对茂佳山黑猪和零号土猪的无损检测,且检测精度分别为83.2%和84.8%。Kamruzzaman等^[35]通过HSI技术对红肉的水分含量进行检测,结果表明,在特征波段模型下可实现对猪肉、牛肉、羊肉的分类;此外,通过提取900~1 700 nm波长的光谱数据,利用MSC和PLS建立模型,预测羔羊肉的水分含量,模型的决定系数为0.77,通过共生矩阵提取图像结构信息,建立水分含量的伪彩图,结果表明,从高光谱图像信息可以直观观测到羔羊肉的水分含量变化。然而,在实际检测过程中,高光谱所建立的模型具有一定的专一性,因此为了有效实现模型的共享,需要对模型进行传递。目前对于模型传递的研究主要集中于2个仪器的模型传递或原始模型的更新方面,不同品种模型的适用性并未得到解决,

为了更好地解决以上问题, 实际应用中应开发一种适应性广、可应用于不同品种的模型维护算法^[36]。

依据不同的加工状态进行红肉制品水分含量及分类研究。Talens等^[37]利用HSI技术检测火腿肉中的水分, 得出HSI技术可以直观地呈现出火腿表面的水分分布情况。Ma Ji等^[38]利用HSI技术对不同加工状态下猪肉(鲜肉、解冻肉、解热脱水肉和腌制脱水肉)的含水率进行检测, 得出经PLSR模型处理后的检测精度为95%。Liu Dan等^[39]通过建立PLSR及MLR模型测定猪肉腌制处理阶段的含水量, 结果表明, 高光谱技术可用于检测腌制猪肉的水分含量, 且预测相关系数为91.7%, 均方误差值为1.48%。以上研究说明, HSI技术可用于检测生鲜红肉的水分含量, 进而实现红肉的等级划分。对于熟肉水分含量的检测, 谢安国等^[40]利用HSI技术检测不同成熟度牛肉的水分含量, 采集370~1 023 nm波长的光谱数据, 将每个像素点的光谱数据经PCA, 并通过MLR与SVM进行建模, 利用Matlab进行伪彩处理, 得出 R^2 为0.908, 预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)为1.096, 说明HSI技术可用于鉴定熟肉的水分含量; 然而, 本研究中的光谱曲线在370~800 nm波长之间的差异并不明显, 这也说明肉制品在熟化处理过程中仅在部分波段存在光谱变化, 因此未来仍需进一步训练新的模型, 研发具有特征波段的光谱成像技术、设备及分析模型。综上, HSI技术解决了传统检测技术(蒸煮损失、离心检测、加压检测和重力检测^[41-42])耗时且具有破坏性的问题, 但通常检测结果的好坏与伪彩图像是否直观及建模方法有直接关系。黄慧等^[43]采用HSI技术对干贝水分含量进行可视化测定, 实验中通过建立SPA-PLSR模型、基于权重回归系数法(weighted regression coefficient, B_w)的 B_w -PLSR模型以及PLSR的3种预测模型, 得出3种预测模型的建模集与预测集相关系数(correlation coefficient of calibration (R_c) and prediction (R_p))均高于0.95。并在最优模型(SPA-PLSR)的基础上进行伪彩处理, 可实现干贝中水分含量的定量分析。此研究也证明, 恰当的建模方法有助于提高检测精度和伪彩图像的重现性。

2.3 色泽检测

肉类颜色的好坏不仅影响消费者的购买欲望, 而且直接影响其品质。大多数消费者在购买肉制品时无法直接接触肉品, 只能通过直观观察颜色来判断肉类品质的优劣, 主观性较强^[44-45]。色差仪是一种常用的判定肉颜色的仪器, 其主要测量肉表面的亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)^[46-47]。一旦测量区域过大, 就有可能引起偏差, 因此不适合大面积检测, 难以满足市场对肉类检测的需求。随着HSI技术的推广, 越来越多的学者开始利用HSI技术来检测肉的颜色。

在国外, Wu Jianhu等^[48]利用高光谱结合MLR来检测牛肉色泽, 并用洛伦兹函数进行处理, 结果表明, L^* 、

a^* 和 b^* 的相关系数分别为0.96、0.96和0.97。Elmasry等^[49]利用900~1 700 nm波长的高光谱系统来预测牛肉颜色, 并通过PLS法进行建模, 结果表明, L^* 和 b^* 的决定系数分别为0.88和0.81, 其均方根误差分别为1.22和0.59。以上研究也说明HSI技术可用于红肉色泽检测, 但光谱数据受外界干扰较大, 因此应研发新的特征波长提取方法或多种提取方法结合使用, 进而提高检测精度。

相较于国外的研究, 国内利用HSI技术对肉类色泽检测的研究相对较少, 主要集中于贮藏期间肉颜色的变化及不同加工方式红肉的颜色变化等方面。许卫东等^[50]采用高光谱对不同贮藏时间的羊肉色泽进行检测, 结果表明, 全波段采用GA提取的特征波段经建模处理后的精度优于独立PLSR建模, 然而 b^* 的预测精度较低。王婉娇^[51]利用400~1 000 nm波长的HSI技术对羊肉色泽进行检测, 通过建立PLSR模型, 探究不同前处理对实验结果的影响, 结果表明, 经S-G平滑处理后 L^* 的相关系数最高。朱荣光等^[52]利用400~1 000 nm波长的HSI技术对78个新疆牛背肉的色泽进行检测, 通过提取特征区域, 利用S-G平滑、一阶导数及中心化等方式建立模型, 结果表明, L^* 、 a^* 、 b^* 和 C^* 预测的相关系数分别为0.91、0.84、0.92和0.86。尚梦玉等^[53]通过900~1 700 nm波长的高光谱技术对羊肉的色泽进行检测, 通过标准正态变量代换对光谱数据进行处理, 用加权算法对其降维, 并利用PLS法进行建模, 结果表明, 高光谱可用于检测肉的颜色。综上, HSI技术可通过提取特征区域来实现不同品种红肉色泽的检测, 且 L^* 的检测精度优于 a^* 和 b^* , 高光谱对生鲜红肉制品色泽的检测优于熟化过程中红肉颜色的检测, 这主要是由于加热过程中肉的内部会发生复杂的美拉德反应和焦糖化反应, 进而对预测结果产生一定的干扰, 因此应优化高光谱的检测系统, 提升其在熟肉制品中的检测精度。

2.4 纹理检测

肉的大理石样纹理是指形似于大理石条纹状的纹路, 该纹路具有红白相间的特点。肉的纹路不仅决定了其品质高低还对肉的嫩度起着一定作用, 通常来说肉的大理石条纹越丰富, 其肉质嫩度越好^[46]。因此, 检测肉的大理石纹路对于探究肉制品品质也有一定的作用。

在利用HSI技术进行光谱信息检测方面, Qiao等^[54]利用400~1 000 nm波长的HSI系统对猪肉的大理石样纹理进行检测与分级处理, 采用PCA结合人工神经网络进行检测, 用人工神经网络进行分类, HSI技术能够准确辨别肉的类型, 同时自动确定大理石样纹理等级, 结果表明, HSI技术可用于检测猪肉的大理石条纹, 并对其进行分级, 同时成功利用大理石条纹对40个猪肉样品进行分级处理, 通过该研究, 更能确定HSI技术在肉制品大理石条纹预测与分级中的应用。高晓东等^[55]通过组建HSI系统, 并采集肉类在400~1 100 nm波长的反射图像, 确定

530 nm为特征波长,结果表明,通过建立MLR模型可利用大理石花纹对猪肉进行分级处理,且其预测决定系数为0.92,预测标准差为0.45,准确率为84.8%。此外,屠康^[56]、李明静^[57]、吴海娟^[58]等应用机器和光谱技术对牛肉大理石花纹进行分级,并取得了一定的成效。艾虎^[59]也利用图像处理技术和机械技术对牛肉大理石花纹进行分级研究,得出预测结果与实测值的相关系数为0.93。以上研究说明,HSI技术的光谱信息可用来检测红肉的大理石花纹,但待测样的组织形态对实验结果有直接影响,因此在利用HSI系统检测红肉制品时应选取最好的红肉形态。

在将HSI系统的光谱信息与图像信息结合进行检测方面,王九清等^[60]对提取的信息进行初步处理,并建立光谱与彩色图像的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)预测模型,来检测鸡肉的食用品质,此模型的准确率为93.58%,且证明光谱加图像复合模型的效果优于独立CNN预测模型的效果。周彤等^[61]利用光谱图像解析,通过提取的算法对牛肉的大理石花纹进行提取,并选取10个可以代表牛肉大理石花纹的相应指标,建立主成分回归(principal component regression, PCR)模型,得出模型的相关系数为0.88。以上研究表明,图像信息在一定程度上也可以用于品质检测,但普遍存在检测精度不高的情况,因此,为了更充分利用HSI技术,应将光谱信息与图像信息结合。

通过总结国内外的研究文献可以得出,HSI技术在红肉制品嫩度、水分、色泽及大理石花纹中都有一定的应用,现今国外利用其检测肉类品质的研究较多,国内相对较少,随着无损检测技术的发展,越来越多的国内学者也开始将眼界转向HSI技术的无损检测研究。

2.5 其他检测

表1 HSI技术在红肉营养品质、安全品质中的研究
Table 1 Recent studies on nutrition, quality and safety of red meat using HSI technology

检测指标	待测样	波长/nm	模型建立	精确度/%	参考文献	常规检测方法
蛋白质	猪肉		PLSR		[62]	凯氏定氮法、双缩脲法、酚试剂法、紫外吸收法和考马斯亮蓝法
脂肪	羊肉	900~1 700	PLS	88.0	[63]	索氏提取、酸水解法、碱水解法
	猪肉	900~1 700	PLSR	92.0	[64]	
新鲜度 (TVB-N含量)	肴肉	430~960	biPLS, siPLS PLSR, iPLS	87.5	[65]	微生物法
微生物	牛肉	320~1 100	SVR	85.1	[66]	平板计数法、PCR技术、ATP生物发光法、酶联免疫法
	猪肉	400~1 000	PL-SVM	94.3	[67]	
pH	羊肉	900~1 700	PLSR		[68]	pH计、标准色管比色法
掺假检测	牛肉	400~1 000	PLSR		[69]	化学方法
TVC	牛肉	400~1 100	PLSR	95.0	[70]	
品种	牛肉	690~930	CARS-RBF-SVM	98.8	[71]	

注: TVB-N. 总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen); TVC. 菌落总数(total viable count); SVR. 支持向量回归(support vector regression); iPLS. 常规区间偏最小二乘法(interval partial least squares); biPLS. 向后区间偏最小二乘法(backward interval partial least squares); siPLS. 联合区间偏最小二乘法(subinterval partial least squares regression); PLS-DA. 偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis)。

HSI技术除了在红肉食用品质上具有广泛应用,其在红肉营养成分及食品安全等方面也有重要应用,选取部分研究进展汇总,如表1所示。

3 结 语

HSI检测技术可以同时检测肉制品相对应的内外信息,在肉类的品质检测中具有广阔的应用前景,但该技术在实际应用中还存在一些亟待解决的问题,主要问题如下: 1) 该仪器在国外的应用较多,随着该仪器的推广,国内也逐渐开始认识到该项技术的优势,然而仪器的成本较高,不能实现检测的工厂化,因此国内学者应大力研究低成本、可便携的HSI技术并进行推广使用; 2) 所获取的光谱关键峰值通常较复杂,应进行降维处理,且该项技术在建模时数据量特别大,目前的降维技术主要采用的是PCA法,此方法为无监督算法且只保留了主要特征,通常监督及无监督的学习算法都具有一定的缺陷,因此有待开发出一种更合适的降维处理、半监督、快速提取特征波长的学习算法; 3) 肉类的一些因素均为线性因素,大多数模型也是用来分析线性因素的,因此对于非线性因素的模型处理分析还需进一步研究; 4) 高光谱在检测指标前需要收集一定的样品作为校正集及检测集,所需的样品量较大,增加了提取特征信息的时间成本,且建立的模型信息不一定包含所有样品的所有个体,致使检测过程存在差异,因此应大力开发全国共享的高精度计算数据库及稳定的预测模型库; 5) HSI技术受光强、速度、待测样光滑程度等的影响,重复性较差,因此应着力改善光谱仪的性能及对相应的硬件进行简化处理,在实时在线检测时应结合其他无损检测设备,研发可以与其他无损检测技术(电子鼻等)相结合的HSI技术,进而实现对气体、液体的检测; 6) 目前高光谱的图像处理技术主要为ENVI软件等技术,该项技术目前仍主要应用于航天技术中,对于大面积、在线食品图像检测仍存在一些缺点,在展现整体图像时无法清晰地呈现光谱特性,加之光谱处理的软件较为落后,因此为了更好地将其应用于食品检测,未来仍应进一步改良HSI系统及图片处理技术; 7) 目前对于HSI技术大多仍着重利用光谱信息,对图像信息的利用并不充分,且二者间的相关性有待提高,未来仍应开发新型的数据处理方法。以上问题都是限制HSI技术在国内进一步发展的原因,未来应致力于研制价格低廉、处理能力更强的HSI检测设备。



参考文献:

- [1] MCAFEE A J, MCSORLEY E M, CUSKELLY G J, et al. Red meat consumption: an overview of the risks and benefits[J]. *Meat Science*, 2010, 84(1): 1-13. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.08.029.
- [2] 刘洋. 肉类品质无损检测技术的应用及研究现状[J]. *农产品加工*, 2018(4): 75-76. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2018.02.049.
- [3] 徐玉婷, 董华发, 曾晓房, 等. 肉品品质评定方法研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(6): 1967-1972. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2017.06.005.
- [4] MILLER M F, CARR M A, RAMSEY C B, et al. Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(12): 3062-3068. DOI:10.2527/2001.79123062x.
- [5] SHACKELFORD S D, WHEELER T L, MEADE M K, et al. Consumer impressions of tender select beef[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(10): 2605-2614. DOI:10.2527/2001.79102605x.
- [6] BOLEMAN S J, BOLEMAN L, MILLER R K, et al. Consumer evaluation of beef of known categories of tenderness[J]. *Meat Science and Technology*, 1997, 75(6): 1521-1524. DOI:10.2527/1997.7561521x.
- [7] 李同树, 刘凤民, 尹迅河. 鸡肉嫩度评定方法及其指标间的相关分析[J]. *畜牧兽医学报*, 2002, 5: 15-16. DOI:10.3321/j.issn:0366-6964.2004.02.011.
- [8] 严衍禄, 赵龙莲, 韩东海, 等. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 115-120.
- [9] GOWEN A A, O'DONNELL C P, CULLEN P J, et al. Hyperspectral imaging-an emerging process analytical tool for food quality and safety control[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2007, 18(12): 590-598. DOI:10.1016/j.tifs.2007.06.001.
- [10] 张令标, 何建国, 王松磊, 等. 高光谱成像技术在肉品无损检测中的应用及进展[J]. *河南工业大学学报*, 2014, 35(1): 101-105. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2014.01.002.
- [11] 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, 20(36): 77-91. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.20.007.
- [12] HUANG Min, WAN Xiamei, ZHANG Min, et al. Detection of insect-damaged vegetable soybeans using hyperspectral transmittance image[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(1): 45-49. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2012.11.014.
- [13] 何加伟, 王怀文, 计宏伟. 基于近红外高光谱成像技术的新鲜与冻融牛肉鉴别技术研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(9): 304-307; 316. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.09.050.
- [14] ARMENTEROS M, HEINONEN M, OLLILAINEN V, et al. Analysis of protein carbonyls in meat products by using the DNPH-method, fluorescence spectroscopy and liquid chromatography-electrospray ionisation-mass spectrometry (LC-ESI-MS)[J]. *Meat Science*, 2009, 83(1): 104-112. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.04.007.
- [15] ELMASRY G, BARBIN D F, SUN D W, et al. Meat quality evaluation by hyperspectral imaging technique: an overview[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(8): 689-711. DOI:10.1080/10408398.2010.507908.
- [16] 王雷, 乔晓艳, 董有尔, 等. 高光谱图像技术在农产品检测中的应用进展[J]. *应用光学*, 2009, 30(4): 639-644. DOI:10.3969/j.issn.1002-2082.2009.04.021.
- [17] HE Hongju, SUN Dawen. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2015, 46(1): 99-109. DOI:10.1016/j.tifs.2015.08.001.
- [18] RAJKUMAR P, WANG N, EIMASRY G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(1): 194-200. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.05.002.
- [19] 成军虎. 基于高光谱成像鱼肉新鲜度无损快速检测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 4-10.
- [20] WU Di, SUN Dawen. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review-part I: fundamentals[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 19: 1-14. DOI:10.1016/j.ifset.2013.04.014.
- [21] WU Di, SUN Dawen, HE Yong. Application of long-wave near infrared hyper-spectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2012, 16: 361-372. DOI:10.1016/j.ifset.2012.08.003.
- [22] XIONG Zhenjie, SUN Dawen, ZENG Xinan. Recent developments of hyper-spectral imaging systems and their applications in detecting quality attributes of red meats: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 132: 1-13. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.02.004.
- [23] 冯放. 现代近红外光谱分析技术及其应用[J]. *生命科学仪器*, 2007, 10: 9-13. DOI:10.3969/j.issn.1671-7929.2007.10.003.
- [24] NAGANATHAN G K, GRIMES L M, SUBBIAH J, et al. Predicting beef tenderness using hyperspectral imaging[C]//Presentation at the 2006 ASABE Annual International Meeting. Oregon: ASABE Oregon Convention Center, 2006: 9-12.
- [25] DESTEFANIS G, BRUGIAPAGLIA A, BARGE M T, et al. Relationship between beef consumer tenderness perception and Warner-bratzler shear force[J]. *Meat Science*, 2008, 78(5): 153-156.
- [26] NAGANATHAN G K, GRIMES L M, SUBBIAH J, et al. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(2): 225-233. DOI:10.1016/j.compag.2008.05.020.
- [27] 王松磊, 吴龙国, 康宁波. 基于高光谱图谱融合技术的宁夏滩羊肉嫩度检测方法研究[J]. *光电子·激光*, 2016, 27(9): 987-995. DOI:10.16136/j.joel.2016.09.0824.
- [28] 王卫, 沈明霞, 彭增起, 等. 基于图像纹理特征的牛肉嫩度预测方法研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 61-65.
- [29] CLUFF K, NAGANATHAN G, SUBBIAH J, et al. Optical scattering with hyperspectral imaging to classify *Longissimus dorsi* muscle based on beef tenderness using multivariate modeling[J]. *Meat Science*, 2013, 95(1): 42-50. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.04.014.
- [30] BARBIN D F, VALOUS N A, SUN D W. Tenderness prediction in porcine *Longissimus dorsi* muscles using instrumental measurements along with NIR hyperspectral and computer vision imagery[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 20(3): 35-42. DOI:10.1016/j.ifset.2013.07.005.
- [31] 孙红, 刘宁, 吴莉, 等. 高光谱成像的马铃薯叶片含水率分布可视化[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 910-916. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0910-07.
- [32] 詹白勺, 章海亮, 杨建国. 基于高光谱成像技术的三文鱼肉水分含量的可视化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1232-1236.
- [33] 刘善梅, 李小昱, 钟雄斌. 考虑品种差异的冷鲜猪肉含水率高光谱信号校正算法[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 272-278. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.04.033.
- [34] 刘娇, 李小昱, 郭小许. 不同品种间的猪肉含水率高光谱模型传递方法研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 276-284. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.17.035.
- [35] KAMRUZZAMAN M, EIMASRY G, DAWEN S, et al. Non-destructive prediction and visualization of chemical composition in lamb meat using NIR hyper-spectral imaging and multivariate

- regression[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16: 218-226. DOI:10.1016/j.ifset.2012.06.003.
- [36] 沈晔. 基于高光谱成像技术的干贝水分含量快速检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 62-63.
- [37] TALENS P, LETICIA M, NOHA M, et al. Prediction of water and protein contents and quality classification of Spanish cooked ham using NIR hyper-spectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(3): 272-280. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.03.014.
- [38] MA Ji, SUN Dawen, PU Hongbin. Spectral absorption index in hyperspectral image analysis for predicting moisture contents in pork *Longissimus dorsi* muscles[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 848-854. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.11.023.
- [39] LIU Dan, SUN Dawen, QU Jiahuan, et al. Feasibility of using hyperspectral imaging to predict moisture content of porcine meat during salting process[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 197-204. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.11.107.
- [40] 谢安国, 康怀彬, 王飞翔, 等. 高光谱成像检测煎制中调理牛肉品质的变化[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 20-23; 54. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.11.005.
- [41] 徐玉婷, 董华发, 曾晓房, 等. 肉品品质评定方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 1967-1972. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2017.06.005.
- [42] 刘立意, 刘影, 刘冬梅, 等. 鲜猪肉系水力与应力松弛特性相关性的试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(8): 88-93. DOI:10.3969/j.issn.1005-9369.2015.08.015.
- [43] 黄慧, 沈晔, 郭乙陆, 等. 干贝水分含量可视化检测方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3525-3529. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2017)11-3525-05.
- [44] 涂冬成. 禽肉肉色、弹性和嫩度的图像和激光诱导荧光无损检测技术研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011: 2-7.
- [45] 何加伟. 基于高光谱图像技术的冷冻食品品质的无损检测研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2016: 26-29.
- [46] 孔保华, 韩建春. 肉品科学与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 135-147.
- [47] 李媛媛, 赵钜阳, 齐鹏辉, 等. 高光谱成像技术在红肉质量特性无损检测中的应用[J]. 食品工业, 2016, 37(1): 264-269.
- [48] WU Jianhu, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Prediction of beef quality attributes using VIS/NIR hyperspectral scattering imaging technique[J]. Journal of Engineering, 2012, 109(2): 267-273. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.10.004.
- [49] ELMASRY G, SUN D W, ALLEN P. Near infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1): 127-140. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.11.028.
- [50] 许卫东, 朱荣光, 邱园园. 基于高光谱图像技术的冷却羊肉颜色检测[J]. 中国科技论文, 2016, 11(4): 454-458. DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2016.04.021.
- [51] 王婉娇. 基于高光谱成像技术的冷鲜羊肉品质无损检测研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016: 18-23.
- [52] 朱荣光, 高广娣, 葛建兵. 基于高光谱图像和逐步回归的新疆新鲜牛肉颜色分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2013, 31(2): 253-257. DOI:10.13880/j.cnki.65-1174/n.2013.02.023.
- [53] 尚梦玉, 王松磊, 何建国, 等. 基于NIR高光谱技术检测滩羊冷鲜肉颜色[J]. 食品工业, 2018, 39(9): 287-291.
- [54] QIAO J, NGADI M O, WANG N, et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system[J]. Food Emerging, 2007, 83(1): 10-16. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2007.02.038.
- [55] 高晓东, 吴建虎, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的牛肉大理石花纹的评估[J]. 农产品加工(学刊), 2009(10): 33-37. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2009.10.008.
- [56] 屠康, 王富昶. 计算机视觉在牛肉大理石花纹分级中的应用研究[J]. 粮油加工和食品机械, 2003(10): 44-45.
- [57] 李明静. 视觉在牛肉大理石花纹自动分级中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007: 24-40.
- [58] 吴海娟, 彭增起, 沈明霞, 等. 机器视觉技术在牛肉大理石花纹识别中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 10-13.
- [59] 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]. 雅安: 四川农业大学, 2009: 83-103.
- [60] 王九清, 邢素霞, 王孝义, 等. 基于卷积神经网络与高光谱的鸡肉品质分类检测[J]. 肉类研究, 2018, 32(12): 36-41. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201812007.
- [61] 周彤, 彭彦昆. 牛肉大理石花纹图像特征信息提取及自动分级方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 286-293. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.15.035.
- [62] BARBIN D F, EIMASRY G, SUN D W, et al. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2013, 138: 1162-1171. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.11.120.
- [63] KAMRUZZAMAN M, ELMASRY G, SUN D W, et al. Non-destructive prediction and visualization of chemical composition in lamb meat using NIR hyperspectral imaging and multivariate regression[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16(4): 218-226. DOI:10.1016/j.ifset.2012.06.003.
- [64] LIU L, NGADI M O. Predicting intramuscular fat content of pork using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 134: 16-23. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.02.007.
- [65] 邹小波, 李志华, 石吉勇, 等. 高光谱成像技术检测肴肉新鲜度[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 89-93. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201408017.
- [66] 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. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.12.015.
- [67] 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. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2010)02-0411-05.
- [68] 王家云, 王松磊, 贺晓光, 等. 基于NIR高光谱成像技术的滩羊肉内部品质无损检测[J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 257-262. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.06.010.
- [69] 白亚斌, 刘友华, 丁崇毅. 基于高光谱技术的牛肉-猪肉掺假检测[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2015, 28(3): 270-272. DOI:10.3969/j.issn.1674-4942.2015.03.009.
- [70] PENG Yankun, ZHANG Jing, WANG Wei, et al. Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(2): 163-169. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.08.014.
- [71] 王靖, 丁佳兴, 郭中华, 等. 基于近红外高光谱成像技术的宁夏羊肉产地鉴别[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 250-254; 260. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.047.