高光谱成像技术在肉类安全无损检测的应用研究进展

夏杨毅[1,2]，　赵　鸾[*1]

(1. 西南大学 食品科学学院，重庆 400715；2. 重庆市特色食品工程技术研究中心，重庆 400715)

摘要：高光谱成像技术在肉类安全品质预测及分选分级方面已取得了诸多成果。作者重点综述了其在肉类有毒有害物质检测、肉类掺假检测、肉类分选分级中的研究现状，讨论了其存在的不足及发展趋势，以期为肉类安全无损检测方法的研究提供参考。

关键词：高光谱成像；肉类；无损检测

中图分类号：TS 251.1　　**文章编号**：1673-1689(2020)12-0006-08　　**DOI**：10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.12.002

Advances in Application of Hyperspectral Imaging in Nondestructive Testing for Meat Safety Evaluation

XIA Yangyi[1,2]，　*ZHAO Luan*[*1]

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Special Food Programme and Technology Research Center, Chongqing 400715, China)

Abstract: At present, hyperspectral imaging technology has made lots of achievements in meat safety quality prediction and classification. Research progress in meat toxic and hazardous substances detection, meat adulteration detection as well as meat sorting and grading was summarized, and the deficiency and development were discussed, in order to provide a reference for the research on nondestructive testing for meat safety evaluation.

Keywords: hyperspectral imaging, meat, nondestructive testing

肉类是人类饮食中的重要组成部分，可以提供人体所需的营养物质如维生素、矿物质及必需氨基酸等[1]。然而肉类在生产和销售过程中易受微生物及其他有毒、有害物质污染和自身物理、化学以及生物学变化引发腐败变质，危害人体健康，故实现肉类安全无损检测意义重大。高光谱成像(hyperspectral imaging，HSI)技术作为一种新型无损检测技术，融合了传统光谱学技术和计算机视觉技术的优势，可同时获取样品的光谱信息和图像信息，目前已有多篇文献报道其在肉类营养品质(如蛋白质、水分、脂肪)[2-3]、食用品质(如颜色、嫩度)[4-6]、技术品质(如 pH、持水力)[7-8]以及安全品质(如微生物含量、TVB-N 值)[9-10] 无损检测方面具有重大潜力。

为追踪 HSI 技术在肉类安全无损检测方面的最新应用进展，作者重点综述了其在肉类有毒有害物质检测、肉类掺假检测、肉类分选分级中的研究现状，讨论了其存在的不足及发展趋势，以期为肉

收稿日期：2019-11-17

基金项目：公益性行业(农业)科研专项项目(201303082-7)；四川省科技支撑计划项目(2016NZ0003-05)。

作者简介：夏杨毅(1970—)，男，博士，副教授，主要从事食品加工过程质量与安全控制方向研究。E-mail：2658355128@qq.com

*通信作者：赵　鸾(1995—)，女，主要从事食品加工过程质量与安全控制研究。E-mail：1256839353@qq.com

类安全无损检测方法的研究提供参考。

1 HSI 技术

HSI 技术是基于食品化学成分和物理特征的差异,致使特定波长的吸收度、分散度、反射率以及电磁能量等光谱信号差异,进行定性或定量分析的无损检测技术,系统主要由光源、分光设备、CCD 图像采集系统、计算机硬件及软件等构成。HSI 系统有点扫描、线扫描、面扫描、单镜头扫描等 4 种成像方式,点扫描方式精确度最高,线扫描方式应用最广泛[3,11]。光谱范围涵盖了紫外至近红外波段,以及波长大于 2 560 nm 的波段[12],其中,光谱范围 380~800 nm 和 400~1 000 nm 的可见光/近红外(visible near-infrared,VIS/NIR)已广泛应用于食品分析,光谱范围 900~1 700 nm 能满足食品分析的精确性[13];输出的高光谱图像是一个三维数据立方体,也称超立方,可以看作二维空间维度(X、Y)和一维光谱维度(λ)组成的一个三维数据矩阵(X、Y、λ),提供了海量信息数据包括定性信息、定量信息和冗余信息[14]。

HSI 技术通过 SG(savitzky-golay)平滑[15-18]、导数法[6,17-21]、标准正态变量(standard normal variate,SNV)[22]、多元散射校正(multiplicative scatter correction,MSC)[23-27]等对原始光谱进行标定,通过回归系数(regression coefficient,RC)[15]、稀疏表示(sparse representation,SR)[14]、主成分分析(principal component analysis,PCA)[6,14,20,22-24,28]、遗传算法(genetic algorithm,GA)[20]、灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix,GLCM)[22-23]、连续投影算法(successive projections algorithm,SPA)[29]、入侵杂草优化(invasive weed optimization,IWO)[30]等筛选特征波长,通过多元线性回归(multivariable linear regression,MLR)[15,29]、支持向量机(support vector machine,SVM)[18,21,24]、最小二乘支持向量机(least squares support veotormaohine,LS-SVM)[14,30]、偏最小二乘回归(partial least squares regression,PLSR)[9,16-17,19,25,27,31]、人工神经网络(artificial neural network,ANN)[6,20]、反向传播人工神经网络(backpropagation artificial neural network,BP-ANN)[22]、反向传播神经网络(backpropagation neural network,BPNN)[26,32]、线性判别分析(linear discriminant analysis,LDA)[28]建立分类模型或预测模型。

2 HSI 技术在肉类有毒有害物质无损检测中的应用

2.1 微生物

肉类的腐败变质进程与贮藏环境内微生物含量密切相关,微生物从肉类中汲取生长所需营养成分,且其降解产物会降低肉类的食用品质,故实现微生物无损检测对维护肉类安全至关重要。肉类组成成分的化学变化与贮藏期间的微生物代谢密切相关,HSI 技术可将光谱的变化情况与实际细菌负荷进行关联,实现无损预测肉类细菌总数[9]。BARBIN 等[31]采用 HSI 技术(900~1 700 nm)研究了不同冷藏温度下猪肉腐败过程中细菌总数和嗜冷菌总数,通过加权系数法筛选特征波长建立 PLSR 模型。结果表明,模型的 R^2_p 均高达 0.81,RMSEP 分别是 1.0、1.5,并获得了猪肉腐败过程细菌总数和嗜冷菌总数的可视化分布图。基于相同波段,FENG 等[9]采用 HSI 技术研究了鸡肉腐败期间细菌总数及可视化分布,将反射率图像转化为 Kubelka-Munk 单位的超立方,经逐步回归法筛选 7 个特征波长建立 PLSR 模型,其 R^2_{cv} 和 RMSECV 分别为 0.883 6、0.50 lg(CFU/g)。HUANG 等[22]开发了一种基于光漫反射的 HSI 技术(450~900 nm)来预测冷藏期间猪肉的细菌总数,利用 PCA 算法从 126 个融合特征中提取主成分建立 BP-ANN 预测模型,其 R^2_p 和 RMSEP 分别是 0.830 8、0.243 lg(CFU/g),效果优于基于单一特征建立的预测模型。近年来,相关学者持续深入研究,HSI 技术也在牛肉[32]、羊肉[33-36]、鱼肉[37-38]、香肠[39-40]、腊肉[41]等微生物污染检测及可视化方面取得了累累硕果。

2.2 生物胺

生物胺与肉类腐败程度有关,主要来源于微生物生长和代谢产物,包括精胺、亚精胺、腐胺、尸碱、酪胺和组胺等[42],广泛存在于生鲜肉、熟肉制品[43],与肉类安全程度息息相关。新鲜肉腐败期间,其主要化学成分发生降解,光谱反射率下降,致使新鲜肉和腐败肉光谱存在显著差异性[15]。基于这一特性,CHENG 等[15]将 HSI 数据与猪肉腐胺、尸胺、酪胺及组胺总含量进行关联,建立 SPA-MLR、RC-MLR、SPA-MLR、RC-MLR 4 类预测模型,比较后发现 RC-MLR 模型是定量预测猪肉生物胺指数并实现其可视化分布的最佳模型,R^2_p 和 RMSEP 分别是

0.957 和 4.866 mg/kg。YANG 等[14]采用PCA 和 SR 算法分别处理 400~1 000 nm 及 1 000~1 800 nm 两波段 HSI 数据,建立 LS-SVM 模型预测牛肉贮藏过程生物胺含量,发现基于 400~1 000 nm 波段的 SR-LS-SVM 模型取得了最佳的预测效果,其 R^2_p 和 RMSEP 分别为 0.943 和 1.026,在此基础上融合 2 种算法建立 SR-PC-LS-SVM 模型,模型的预测能力提高至 0.969。上述文献表明,波长范围的选择关系到模型最终预测效果,HSI 技术有望用于评估肉类贮藏期间生物胺含量。

2.3 亚硝酸盐

肉制品中亚硝酸盐的规范使用可以增加肉的风味和防止腐败,违规使用则会对人类身体健康造成严重威胁[44]。HSI 系统中光谱吸收峰的高度与肉类中亚硝酸盐含量成正相关,故可通过建立数学模型将 HSI 数据与国标实测亚硝酸盐含量进行关联可实现肉类亚硝酸盐含量的无损检测。杨昆程等[19]基于 HSI 系统(900~1 700 nm)探讨了腊肉贮藏期间亚硝酸盐含量的快速预测方法,发现联合一阶导数和矢量归一化处理原光谱建立的 PLSR 模型具有较好的预测效果,R^2_{cv} 和 RMSECV 分别是 0.972 和 0.251。陈晓东等[20]利用 HSI 技术(400~1 000 nm)对香肠贮藏期间的亚硝酸盐含量进行预测,先后建立了 PLSR 模型及 GA-ANN 模型,其中 GA-ANN 模型的 R^2_{cv} 和 RMSECV 分别是 0.918 和 0.365。在此研究基础上,刘峥等[16]分别使用特征波长和全光谱建立 PCA 模型及 PLSR 模型预测香肠贮藏期间的亚硝酸盐含量,对比后发现基于全光谱建模的预测效果更好,其中 PLSR 模型的 R^2_{cv} 和 RMSECV 分别是 0.982 9 和 0.059 2,提升了预测模型的准确度。以上研究初步证明,HSI 技术在检测肉制品亚硝酸盐含量方面是可行的,然而鲜有文献获得肉制品亚硝酸盐含量的可视化分布图像。

HSI 技术在肉类有毒有害物质无损检测的应用如表 1 所示。

表 1 HSI 技术在肉类有毒有害物质无损检测方面的应用

Table 1 Application of HSI technology in nondestructive testing of toxic and hazardous substances in meat

样品	指标	波长范围/nm	建模方法	特征波长数	模型精度	参考文献
猪肉	细菌总数	900~1 700	PLSR	11	R^2_p= 0.81, RMSEP= 1.0	BARBIN 等[31]
	嗜冷菌总数			10	R^2_p= 0.81, RMSEP= 1.5	
鸡胸肉	细菌总数	910~1 700	PLSR	7	R^2_{cv}= 0.883 6,RMSECV= 0.50 lg(CFU/g)	FENG 等[9]
猪肉	细菌总数	450~900	BP-ANN	—	R^2_p= 0.830 8, RMSEP= 0.243 lg(CFU/g)	HUANG 等[22]
猪肉	生物胺指数	400~1 000	MLR	9	R^2_p= 0.957, RMSEP= 4.866 mg/kg	CHENG 等[15]
熟牛肉	生物胺	400~1 000	LS-SVM	—	R^2_p= 0.96 9, RMSEP= 1.039	YANG 等[14]
腊肉	亚硝酸盐	900~1 700	PLSR	—	R^2_{cv}= 0.972, RMSECV= 0.251	杨昆程等[19]
香肠	亚硝酸盐	400~1 000	GA-ANN	4	R^2_{cv}= 0.918, RMSECV= 0.365	陈晓东等[20]
香肠	亚硝酸盐	371~1 024	PLSR	—	R^2_{cv}=0.982 9, RMSECV= 0.059 2	刘峥等[16]

3 HSI 技术在肉类掺假无损检测中的应用

3.1 掺假肉

掺假肉与肉类原本品质不同,极易导致严重的安全、经济以及宗教问题[45]。当电磁辐射与肉类发生相互作用时,肉类的不同成分在特定波段具有典型的反射特征,致使种类不同的异种肉或新鲜度不同的同种肉光谱反射率差异明显[46],基于这一特性可将 HSI 技术用于杂肉掺假检测和同源肉掺假检测。过去主要利用 HSI 技术检测杂肉掺假,包括猪肉掺假羊肉[47]、鸡肉掺假牛肉[48]、马蹄掺假牛肉[46]、猪肉掺假牛肉[49]等。近年来,杨清华等[25]基于 HSI 技术(400~1 000 nm)对掺加猪肉的牛肉进行检测,该法利用阈值提取光谱和光谱-理化值共生距离法分割图像建立 PLSR 模型评估牛肉掺加猪肉情况,其 R^2_p 和 RMSEP 分别是 0.951 5、0.032 9。ZHENG 等[17]基于 HSI 系统(400~1 000 nm)建立了鸭肉掺假羊肉的 PLSR 预测模型并实现了掺假肉分布的可视化,模型的 R^2_p 和 RMSEP 分别是 0.995 0、2.51,再次拓宽了 HSI 技术的肉类掺假检测范围。基于 HSI 技术的同源肉掺假检测也初见起色,ZHAO 等[30]采用相同波段对掺加变质牛肉的鲜牛肉糜进行检测,由 IWO 提取 7 个特征波长建立 LS-SVM 模型,其 R^2_p

和 RMSEP 分别是 0.95%、5.67%，并获得了牛肉掺假的可视化分布图像。以上研究充分证明,HSI 技术是检测肉品掺假的有利工具,未来需要继续研究利用 HSI 技术鉴别杂肉掺假、同源肉掺假,构建既精准又稳定的预测模型,同时开发用于实时检测肉类掺假的便携式手持设备。

3.2 注水肉

注水肉对肉类营养价值、嫩度、色泽、风味等均有一定程度的影响,降低了肉类的食用品质[50]。此外,还有部分不法商贩使用不合格水源,极易导致病原微生物污染肉类，加速肉类的腐败变质进程。因此,实现注水肉的无损检测对维护肉类安全至关重要。由于正常肉和注水肉的含水率不同,注水肉的光谱反射率显著高于正常肉,将 HSI 数据的差异与肉类含水率的不同进行关联可区分正常肉和注水肉。於海明等[26]采用 HSI 技术(358~1 021 nm)对正常猪肉和注水猪肉进行区分,该法通过回归系数权重法筛选与含水率相关的特征波长,再经傅里叶变换获取频谱特征参数,根据全波长、特征波长以及频谱特征参数建立 BPNN 分类模型区分正常猪肉和注水猪肉,结果显示,基于频谱特征构建的模型分类正确率高达 98.8%，可用于注水猪肉的快速识别。未来相关学者应把握该契机联合 HSI 技术和化学计量学方法深入研究猪肉以及其他品种肉类注水肉的检测方法,同时,利用注胶肉和正常肉的光谱差异研究注胶肉的检测方法。

3.3 冻融肉

市场中冻融肉和非冻融肉的混淆容易引发肉类掺假行为。其中,肉类在冻融过程脂类氧化产物、冰晶、甲醛等存在会对光谱的反射率产生影响;肉类在解冻过程中营养成分大量流失,理化指标和微生物指标的改变也会影响光谱的反射率。新鲜肉的光谱反射率明显高于冻融肉,将肉类冻融过程发生的变化与 HSI 数据进行关联可用于区分冻融肉和非冻融肉。过去 HSI 技术已被报道可用于区分猪肉[51-52]、鱼肉[53]、虾[54-55]等品种新鲜肉和解冻肉。近年来,HSI 技术也被报道可用于鉴别新鲜牛肉与冻融牛肉、成熟牛肉与成熟冻融牛肉等,何加伟等[27]利用 HSI 技术(950~1 500 nm)建立 PLSR 分类模型对包含新鲜牛肉与冻融牛肉的 45 个样品进行分类,其判别正确率高达 94.4%。CRICHTON S 等[18]基于 HSI 系统(500~1 010 nm)对新鲜牛肉和新鲜冻融牛肉、成熟牛肉和成熟冻融牛肉、新鲜牛肉和成熟牛肉等分类方法进行研究，发现在全波长下建立的 SVM 分类模型精确度最高，其分类正确率分别高达 100%、98%、100%，该研究指出下一步可选择 400~500 nm 波段研究冻融牛肉分类方法。综上所述,HSI 技术和分类算法相结合在冻融肉类检测具有极大潜力。HSI 技术在肉类掺假无损检测的应用如表 2 所示。

表 2 HSI 技术在肉类掺假无损检测方面的应用

Table 2 Application of HSI technology in non-destructive testing of meat adulteration

样品	应用	波长范围/nm	建模方法	模型精确度,分类准确率	参考文献
牛肉(猪肉)	掺假检测	400~1 000	PLSR	R^2_p=0.951 5, RMSEP=0.032 9	杨清华等[25]
羊肉(鸭肉)	掺假检测	400~1 000	PLSR	R^2_p=0.995 0, RMSEP=2.51	ZHENG 等[17]
新鲜牛肉(变质牛肉)	掺假检测	400~1 000	LS-SVM	R^2_p=0.95, RMSEP=5.67%	ZHAO 等[30]
正常猪肉(注水猪肉)	掺假检测	358~1 021	BPNN	98.8%	於海明等[26]
新鲜牛肉(冻融牛肉)	掺假检测	950~1 500	PLSR	94.4%	何加伟等[27]
新鲜牛肉(冻融牛肉)	掺假检测	500~1 010	SVM	100%	CRICHTON S 等[18]
成熟牛肉(冻融牛肉)				98%	
新鲜牛肉(成熟牛肉)				100%	

4 HSI 技术在肉类分选分级无损检测的应用

对生鲜肉和加工肉进行分选分级不仅是评价其品质的重要方面，也是保证食品安全的重要举措。HSI 技术包含的光谱信息可提供肉类的水分、脂肪、蛋白质等化学特征,图像信息可提供肉类的大小、形状、颜色、纹理等物理及几何特征,将 HSI 数据与肉类的颜色、持水力、质地等内外特征进行关联可实现生鲜肉和加工肉的分选分级。在早期的研

究中,HSI 技术已被用于生鲜肉品质分选分级,如 QIAO 等[6]基于 HSI 技术(430~1 000 nm)探讨了猪肉品质的分类方法,该法利用主成分分析和聚类分析评估不同组别的猪肉质量,建立 ANN 模型对猪肉质量等级进行分类。结果显示,该法成功将猪肉品质分为 RFN、RSE 两类,总校正率为 75%~80%。LIU 等[28]采用基于 Gabor 滤波的 HSI 技术(400~1 000 nm)对猪肉品质进行分类,建立 LDA 分类模型将猪肉分为 RFN、PFN、PSE、RSE 4 类,平均分类精度高达(84±1)%,研究指出后期可结合特征波长和调谐 Gabor 滤波器实现对猪肉品质实时分类。邢素霞等[23]基于 HSI 技术提取 6 个鸡胸肉光谱、5 个纹理及 12 个颜色特征建立 K-means-RBF 模型将鸡胸肉品质按可食性分为 4 类,分类准确率高达 100%。

目前,HSI 技术也初步应用于加工肉分选分级,如龚爱平等[29]基于 HSI 系统(874~1730 nm)对腊肠品质进行分级,采用 SPA 提取 10 个特征波长构建 SPA-MLR 腊肉品质分类模型,判别准确率高达 100%。陈晓东等[21]采用 HSI 技术(400~1 000 nm)建立 SVM 分类模型将香肠分为可食用及不可食用两类,分类准确率为 82.3%。基于同一波段,董小栋等[24]开发了一种深入融合光谱信息的肉品分类及检索方法,该法融合光谱特征和图像特征建立 SVM 分类模型,将腊肉分为新鲜腊肉和腐败腊肉两类,分类准确率高达 99.2%。上述文献表明,HSI 技术在肉类分选分级无损检测中具有极大潜力,多源数据融合有助于提高模型的精确性。

HSI 技术在肉类分选分级无损检测的应用如表 3 所示。

表 3 HSI 技术在肉类分选分级无损检测方面的应用

Table 3 Application of HSI technology in nondestructive testing of meat sorting and grading

样品	应用	波长范围/nm	建模方法	分类准确率	参考文献
猪肉	品质分选分级	430~1 000	ANN	(75~80)%	QIAO 等[6]
猪肉	品质分选分级	400~1 000	LDA	(84±1)%	LIU 等[28]
鸡胸肉	品质分选分级	1 000~2 500	K-means-RBF	100%	邢素霞等[23]
腊肠	品质分选分级	874~1 730	MLR	100%	龚爱平等[29]
香肠	品质分选分级	400~1 000	SVM	82.3%	陈晓东等[21]
腊肉	品质分选分级	400~1 000	SVM	99.2%	董小栋等[24]

5 HSI 技术应用过程中存在的问题

与此同时,HSI 技术在发展过程中尚存一些不足亟须解决和突破:一是系统成本高,初期投入较大,具有高空间分辨率和光谱分辨率的系统成本更高,限制了普通中小企业的使用,故后期降低成本是发展的必要条件;二是高光谱超立方体结构不仅包含与变量参数相关的有用信息还包含大量冗余和无关信息如噪声等,故需要高效程序工具来处理数据以及显示图像;三是图像采集时间的限制和图像前后处理程序的限制,故需要开发更精确的硬件系统和先进的数据处理算法;四是光谱采集受采集参数及环境条件的影响,故应通过偏差校正确定最佳的匹配参数;五是大部分学者侧重于研究光谱信息,忽视了空间信息如纹理特征和结构特征等,同时人为干预、方法不当等原因导致了图像特征的提取效果不佳,构建的模型泛化能力较差,故如何提取空间特征也是急需解决的问题,关系到实现 HSI "图谱合一";六是提取关键波长的算法尚不完善,部分文献报道全光谱下建模效果优于特征波长下的,故应尝试更多特征波长的提取方法,确定与检测参数相关性的特征波长;七是系统只能获取表面的成分信息,因为样品和波段限制了光的穿透深度;八是系统更适用于分析异质样品,因为成像功能在于实现不均匀分布空间的可视化[13]。

6 展 望

HSI 作为一种高效、无损、环保、非破坏的检测技术,在肉类有毒有害物质检测、肉类掺假检测、肉类分选分级等方面均展现了巨大的发展潜力,为食品工业在线实时检测肉类安全提供了一种有效替代方法。综上所述,HSI 技术的后续发展可从以下几方面入手:一是着重研究注水肉检测、注胶肉检测、非法添加物质检测、缺陷肉检测以及其他有害菌检测,全方面发展 HSI 技术在肉类品质预测与分类方面的潜力;二是增加研究波段并开发多种提取特征

波长的算法,基于选定波长建立一系列多光谱成像系统用于食品工业的在线实时检测;三是开发更多的建模方法,考虑空间信息和光谱信息之间的相关影响建立肉类品质预测或分类模型;四是基于快照HSI系统研发手持在线检测设备用于食品工业的在线实时检测;五是开发获取光谱特征和空间特征的深度学习算法以及改进计算机硬件及软件的实用性。展望未来,HSI技术极有可能取代传统检测方法成为肉类加工监测和食品安全与质量控制的一种常规方法。

参考文献:

[1] DE-SMET S,VOSSEN E. Meat:The balance between nutrition and health. a review[J]. **Meat Science**,2016,120:145-156.
[2] 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 & Emerging Technologies**,2012,16:218-226.
[3] MA J,SUN D W,NICOLAI B,et al. Comparison of spectral properties of three hyperspectral imaging(HSI) sensors in evaluating main chemical compositions of cured pork[J]. **Journal of Food Engineering**,2019,261:100-108.
[4] LIU Y W,SUN D W,CHENG J H,et al. Hyperspectral imaging sensing of changes in moisture content and color of beef during microwave heating process[J]. **Food Analytical Methods**,2018,11(9):2472-2484.
[5] SUN H,PENG Y,ZHENG X,et al. Comparative analysis of pork tenderness prediction using different optical scattering parameters [J]. **Journal of Food Engineering**,2019,248:1-8.
[6] QIAO J,NGADI M O,WANG N,et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system[J]. **Journal of Food Engineering**,2007,83(1):10-16.
[7] JIANG H,YOON S C,ZHUANG H,et al. Non-destructive assessment of final color and pH attributes of broiler breast fillets using visible and near-infrared hyperspectral imaging:a preliminary study[J]. **Infrared Physics & Technology**,2018,92:309-317.
[8] KAMRUZZAMAN M,MAKINO Y,OSHITA S. Hyperspectral imaging for real-time monitoring of water holding capacity in red meat[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2016,66:685-691.
[9] FENG Y Z,SUN D W. Determination of total viable count(TVC) in chicken breast fillets by near-infrared hyperspectral imaging and spectroscopic transforms[J]. **Talanta**,2013,105:244-249.
[10] YANG Q,SUN D W,CHENG W. Development of simplified models for nondestructive hyperspectral imaging monitoring of TVB-N contents in cured meat during drying process[J]. **Journal of Food Engineering**,2017,192:53-60.
[11] MA J,SUN D W,PU H,et al. Protein content evaluation of processed pork meats based on a novel single shot(snapshot) hyperspectral imaging sensor[J]. **Journal of Food Engineering**,2019,240:207-213.
[12] 田有文,王晓娟. 基于高光谱图像技术的农产品品质无损检测[J]. 农机化研究,2009,31(10):220-222.
[13] 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.
[14] YANG D,LU A,REN D,et al. Rapid determination of biogenic amines in cooked beef using hyperspectral imaging with sparse representation algorithm[J]. **Infrared Physics & Technology**,2017,86:23-34.
[15] CHENG W,SUN D W,CHENG J H. Pork biogenic amine index (BAI) determination based on chemometric analysis of hyperspectral imaging data[J]. **LWT**,2016,73:13-19.
[16] 刘峥,殷勇. 基于高光谱技术的香肠亚硝酸盐快速检测方法[J]. 食品与机械,2019,35(5):78-82.
[17] ZHENG X,LI Y,WEI W,et al. Detection of adulteration with duck meat in minced lamb meat by using visible near-infrared hyperspectral imaging[J]. **Meat Science**,2019,149:55-62.
[18] CRICHTON S O J,KIRCHNER S M,PORLEY V,et al. Classification of organic beef freshness using VNIR hyperspectral imaging[J]. **Meat Science**,2017,129:20-27.
[19] 杨昆程,郭培源,刘硕,等. 高光谱技术在腊肉亚硝酸盐含量检测的应用[J]. 科技通报,2016,32(11):223-227.
[20] 陈晓东,郭培源. 基于主成分分析法提取高光谱图像特征检测香肠亚硝酸盐含量[J]. 肉类研究,2016,30(12):22-27.
[21] 陈晓东,郭培源. 基于高光谱智能检测及支持向量机分类的香肠品质判定[J]. 中国食品添加剂,2018(8):180-187.

[22] HUANG L,ZHAO J,CHEN Q,et al. Rapid detection of total viable count(TVC) in pork meat by hyperspectral imaging[J]. **Food Research International**,2013,54(1):821-828.
[23] 邢素霞,王九清,陈思,等. 基于 K-means-RBF 的鸡肉品质分类方法研究[J]. 食品科学技术学报,2018,36(4):93-99.
[24] 董小栋,郭培源,徐盼,等. 融合高光谱和图像深度特征的腊肉分类与检索算法研究[J]. 食品工业科技,2018,39(23):255-260.
[25] 杨清华,彭彦昆,郑晓春. 基于阈值选取高光谱感兴趣区域的牛肉掺假检测[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(11):2710-2715:
[26] 於海明,徐佳琪,刘浩鲁,等. 基于高光谱和频谱特征的注水肉识别方法研究[J]. 农业机械学报,2019,50(11):367-372.
[27] 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.
[28] LIU L,NGADI M O,PRASHER S O,et al. Categorization of pork quality using Gabor filter-based hyperspectral imaging technology[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,99(3):284-293.
[29] 龚爱平,王琦,邵咏妮. 利用高光谱近红外波段的腊肠品质分级研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(8):2556-2559.
[30] ZHAO H T,FENG Y Z,CHEN W,et al. Application of invasive weed optimization and least square support vector machine for prediction of beef adulteration with spoiled beef based on visible near-infrared(Vis-NIR) hyperspectral imaging[J]. **Meat Science**,2019,151:75-81.
[31] BARBIN D F,ELMASRY G,SUN D W,et al. Non-destructive assessment of microbial contamination in porcine meat using NIR hyperspectral imaging[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2013,17:180-191.
[32] TAO F,PENG Y,GOMES C L,et al. A comparative study for improving prediction of total viable count in beef based on hyperspectral scattering characteristics[J]. **Journal of Food Engineering**,2015,162:38-47.
[33] DUAN H W,ZHU R G,YAO X D,et al. Sensitive variables extraction,non-destructive detection and visualization of total viable count(TVC) and pH in vacuum packaged lamb using hyperspectral imaging[J]. **Analytical Methods**,2017,9(21):3172-3183.
[34] 王莉,马天兰,贺晓光,等. 基于高光谱成像的滩羊肉菌落总数和挥发性盐基氮的无损检测[J]. 食品工业科技,2017,38(22):235-241.
[35] 段宏伟,朱荣光,许卫东,等. 基于 GA 和 CARS 的真空包装冷却羊肉细菌菌落总数高光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(3):847-852.
[36] 魏菁,郭中华,徐静. 基于高光谱和极限学习机的冷却羊肉表面细菌总数检测[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):211-214.
[37] WU D,SUN D W. Potential of time series-hyperspectral imaging (TS-HSI) for non-invasive determination of microbial spoilage of salmon flesh[J]. **Talanta**,2013,111:39-46.
[38] KHOSHNOUDI-NIA S,MOOSAVI-NASAB M,NASSIRI S M,et al. Determination of total viable count in rainbow-trout fish fillets based on hyperspectral imaging system and different variable selection and extraction of reference data methods[J]. **Food Analytical Methods**,2018,11(12):3481-3494.
[39] 郭培源,徐盼,董小栋,等. 高光谱技术结合迭代决策树的香肠菌落总数预测[J]. 食品科学,2019,40(6):312-317.
[40] 董小栋,郭培源,徐盼. 基于高光谱成像的香肠菌落总数回归预测及数据可视化[J]. 现代食品科技,2017,33(7):308-314.
[41] 赵俊华,郭培源,邢素霞,等. 基于高光谱成像的腊肉细菌总数预测建模方法研究[J]. 中国调味品,2016,41(2):74-78.
[42] FRAQUEZA M J,ALFAIA C M,BARRETO A S. Biogenic amine formation in turkey meat under modified atmosphere packaging with extended shelf life:Index of freshness[J]. **Poultry Science**,2012,91(6):1465-1472.
[43] SMITH T A. Amines in food[J]. **Food Chemistry**,1981,6(3):169-200.
[44] 赵静,王娜,冯叙桥,等. 蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐检测方法的研究进展[J]. 食品科学,2014,35(8):42-49.
[45] MEZA-MáRQUEZ O G,GALLARDO-VELáZQUEZ T,OSORIO-REVILLA G. Application of mid-infrared spectroscopy with multivariate analysis and soft independent modeling of class analogies (SIMCA) for the detection of adulterants in minced beef[J]. **Meat Science**,2010,86(2):511-519.
[46] KAMRUZZAMAN M,MAKINO Y,OSHITA S,et al. Assessment of visible near-infrared hyperspectral imaging as a tool for detection of horsemeat adulteration in minced beef[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2015,8(5):1054-1062.
[47] KAMRUZZAMAN M,SUN D W,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.

[48] 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]. **Journal of Food Engineering**,2016,170:8-15.
[49] 白亚斌,刘友华,丁崇毅,等. 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):270-273.
[50] 张中会,盖圣美,邹玉峰,等. 不同注水量对猪肉食用品质的影响[J]. 食品工业科技,2018,39(3):1-5.
[51] PU H,SUN D W,MA J,et al. Classification of fresh and frozen-thawed pork muscles using visible and near infrared hyperspectral imaging and textural analysis[J]. **Meat Science**,2015,99:81-88.
[52] MA J,PU H,SUN D W,et al. Application of Vis-NIR hyperspectral imaging in classification between fresh and frozen-thawed pork longissimus dorsi muscles[J]. **International Journal of Refrigeration**,2015,50:10-18.
[53] CHENG J H,SUN D W,PU H B,et al. Integration of classifiers analysis and hyperspectral imaging for rapid discrimination of fresh from cold-stored and frozen-thawed fish fillets[J]. **Journal of Food Engineering**,2015,161:33-39.
[54] DAI Q,CHENG J H,SUN D W,et al. Potential of visible/near-infrared hyperspectral imaging for rapid detection of freshness in unfrozen and frozen prawns[J]. **Journal of Food Engineering**,2015,149:97-104.
[55] QU J H,CHENG J H,SUN D W,et al. Discrimination of shelled shrimp (*Metapenaeus ensis*) among fresh,frozen-thawed and cold-stored by hyperspectral imaging technique[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2015,62(1):202-209.

科 技 信 息

欧盟评估乳糖-N-新四糖作为新型食品的安全性

2020 年 11 月 19 日,据欧盟食品安全局(EFSA)消息,欧盟营养、新型食品和食物过敏源(NDA)研究小组就乳糖-N-新四糖(lacto - N - neotetraose)作为新型食品的安全性发表科学意见。

据了解,乳糖-N-新四糖是由大肠杆菌 BL21 的衍生菌株生产的。经过评估,专家小组得出结论,在提议的使用条件下,乳糖-N-新四糖作为新型食品是安全的。

[信息来源] 食品伙伴网. 欧盟评估乳糖-N-新四糖作为新型食品的安全性 [EB/OL]. (2020-11-20). http://news.foodmate.net/2020/11/577632.html