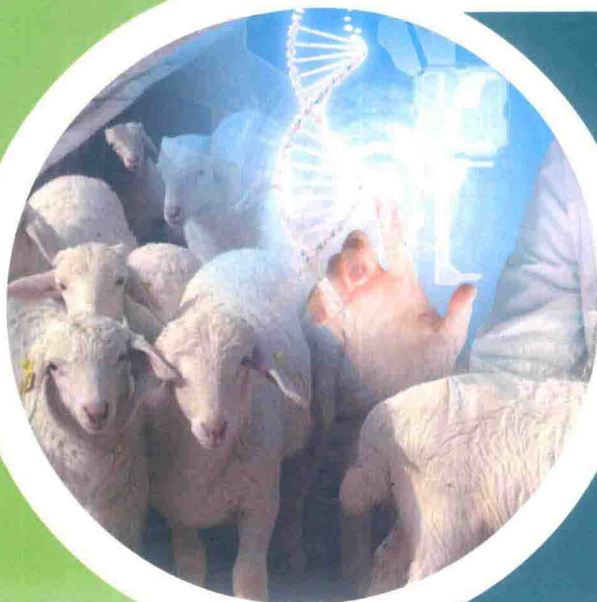


羊肉储藏品质^的

光学快速无损检测机理及方法

——以新疆羊肉为例

朱荣光 著



中国农业科学技术出版社

羊肉储藏品质①

光学快速无损检测机理及方法

——以新疆羊肉为例

朱荣光 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

羊肉储藏品质的光学快速无损检测机理及方法: 以新疆羊肉为例 / 朱荣光著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-5116-3623-2

I. ①羊… II. ①朱… III. ①羊肉-食品贮藏-食品安全-光电检测
IV. ①TS201.6②TS251.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 081261 号

责任编辑 贺可香
责任校对 李向荣

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
电 话 (010) 82109194 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)
传 真 (010) 82106625
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 全国各地新华书店
印 刷 者 北京建宏印刷有限公司
开 本 880mm×1 230mm 1/32
印 张 5.375
字 数 150 千字
版 次 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷
定 价 29.80 元

— 版权所有 · 翻印必究 —

前 言

羊肉因其营养丰富、高蛋白、低脂肪、低胆固醇逐渐成为保健佳品。我国是羊肉生产与消费第一大国，产量、消费量均超过世界的1/3。新疆地处我国西北地区，牧草场自然环境优越，其产出的羊肉色泽鲜红、纹理细致、富有弹性、大理石花纹适中。与国内羊肉平均水平相比，其营养价值较高。新疆羊肉越来越受全国消费者的青睐，已经形成了羊肉串、烤全羊等具有新疆地域风味的羊肉产业体系。但羊肉在储藏、运输和流通过程中的品质会逐步降低，而传统检测方法主要包括感官评价、微生物检测和理化实验分析，存在主观性较强、实验操作繁琐、耗时耗力，无法满足羊肉大批量生产、品质化分级快速无损检测。因此，本书对实现羊肉储藏品质的光学快速无损检测具有重要意义。

针对我国目前的羊肉品质快速无损检测需求，本书以新疆羊肉为对象，系统地阐述了羊肉品质的近红外和高光谱图像等光学快速无损检测技术的国内外研究现状、羊肉品质光学检测模型的建立方法、羊肉 pH 值的光学定量分析检测、羊肉挥发性盐基氮（TVB-N）的高光谱图像定量分析检测、羊肉细菌总数（TVC）的高光谱图像定量分析检测、羊肉颜色参数的光学定量分析检测和羊肉新鲜度的高光谱图像定性分析检测，揭示并建立了 pH 值、TVC、TVB-N、颜色和新鲜度等羊肉储藏品质指标的光学快速无损检测机理及方法。全书理论扎实，内容翔实新颖，融知识性和实用性于一体，不仅可供关注羊肉品质的用户、企业和质检部门使用，还可以作为相关农业院校师生以及相关检测研究人员的参考书籍。

本书得到国家自然科学基金项目“新疆冷却羊肉储藏品质的动力学及不同光学速测技术融合研究（31460418）”、石河子大学青年创新

人才培育计划项目“基于多源光学信息的羊肉新鲜度快速检测机理及系统开发研究(CXRC201707)”和石河子大学“一省一校工程”的资助。本书由朱荣光撰写,参加本书修订工作的有阎聪(第一章至第三章),孟令峰(第四章至第六章),另外,在本书编写过程中得到了李景彬、范中建、邱园园、段宏伟、许卫东和黄昆鹏等给予的支持和帮助,在此一并致谢。

由于光学快速无损检测技术所涉及的内容较为广泛,发展较快,加之编者的经验和水平有限,书中难免会存在一些不足之处,敬请专家及读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 研究背景与意义	(1)
第二节 肉品品质光学快速无损检测的国内外研究现状	(4)
第三节 羊肉储藏品质光学快速无损检测研究的现状分析	(14)
第四节 研究目标	(15)
第五节 研究内容	(15)
第二章 羊肉品质光学检测模型的建立方法	(18)
第一节 光谱预处理方法	(18)
第二节 特征波段筛选及降维方法	(21)
第三节 样本集划分方法	(25)
第四节 常用化学计量学分析方法	(27)
第五节 模式识别方法	(29)
第六节 模型验证与评价	(34)
第三章 羊肉 pH 值的光学定量分析检测	(36)
第一节 pH 值在羊肉储存过程中的变化规律	(36)
第二节 pH 值的近红外定量检测	(37)
第三节 pH 值的高光谱图像定量检测	(48)
第四节 pH 值空间分布的可视化	(74)
第四章 羊肉细菌总数 (TVC) 的高光谱图像定量分析检测	(76)
第一节 TVC 在羊肉储藏过程中的变化规律	(76)
第二节 基于全波段 TVC 检测模型的建立与比较	(77)
第三节 基于特征波段 TVC 检测模型的建立与比较	(81)

第四节 TVC 空间分布的可视化	(89)
第五章 羊肉挥发性盐基氮 (TVB-N) 的高光谱图像定量分析 检测	(90)
第一节 TVB-N 在羊肉储藏过程中的变化规律	(90)
第二节 基于全波段 TVB-N 检测模型的建立与比较	(91)
第三节 基于特征波段 TVB-N 检测模型的建立与比较	(97)
第四节 TVB-N 空间分布的可视化	(103)
第六章 羊肉颜色参数的光学定量分析检测	(105)
第一节 颜色参数在羊肉储存过程中的变化规律	(105)
第二节 羊肉颜色参数的近红外定量检测	(107)
第三节 羊肉颜色参数的高光谱图像定量检测	(116)
第七章 羊肉新鲜度的高光谱图像定性分析检测	(134)
第一节 羊肉新鲜度评价准则的建立	(134)
第二节 热鲜羊肉新鲜度的高光谱图像定性分析检测	(134)
第三节 冷却羊肉新鲜度的高光谱图像定性分析检测	(142)
第八章 结论与展望	(148)
第一节 结论	(148)
第二节 展望	(151)
参考文献	(152)

第一章 绪 论

第一节 研究背景与意义

羊肉因其营养丰富、高蛋白、低脂肪、低胆固醇逐渐成为保健佳品。我国是羊肉生产与消费第一大国，产量、消费量均超过世界的1/3。新疆维吾尔自治区（以下简称新疆）地处我国西北地区，牧草场自然环境优越，其产出的羊肉色泽鲜红、纹理细致、富有弹性、大理石花纹适中。与国内羊肉平均水平相比，其营养价值较高。新疆羊肉越来越受全国消费者的青睐，已经形成了羊肉串、烤全羊等具有新疆地域风味的羊肉产业体系。自1996年以来新疆羊肉产量一直保持在新疆肉类总产量40%左右。根据2001—2016年中国统计年鉴畜产品产量统计结果的分析表明：2016年新疆羊肉年产量达到58.32万t，年增长速度为5.2%，而2016年全国羊肉年产量达441万t，年增长速度为5.48%（图1-1、图1-2）。由此可见，仅2016年新疆羊肉的年增长速度就已高于全国平均增长速度2.28%，消费者对新疆羊肉的需求正在逐渐增加。

另一项研究数据表明，新疆作为我国五大牧区之一，牧区总产值位列全国第16，而养羊业作为牧区的主导产业，却未能提供其应有的主导作用。其中一个主导因素在于加工、检测、分级等宰后处理手段落后，深加工不足、价格低、出口量较小，国际市场竞争能力明显不足。另外，随着人们生活水平的提高，对食品的安全问题更加关注。然而目前羊肉检测过程中，质监局等部门主要针对现宰杀的羊进行病理检查，而对羊肉在运输过程中、市场流通过程中的

肉品品质检测存在很多漏洞，这些因素极大地限制了新疆羊肉市场的发展。

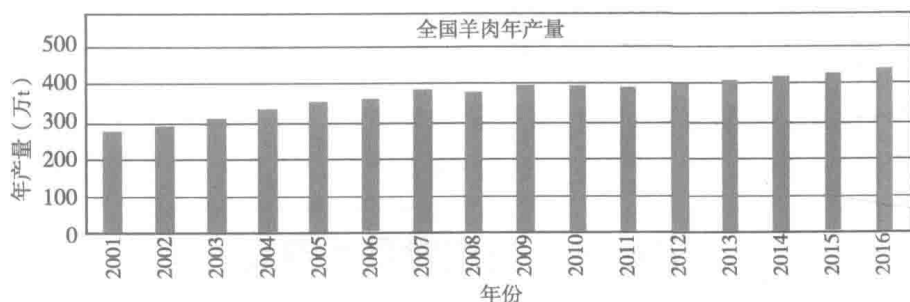


图 1-1 近 16 年全国羊肉年产量情况



图 1-2 近 16 年新疆羊肉产量情况

羊肉在储藏过程中品质会发生变化，为保证流入市场的羊肉品质安全，就需要对其进行检测。评价储藏过程中羊肉品质的主要指标有 pH 值、细菌总数 (TVC)、挥发性盐基氮 (TVB-N)、颜色 and 新鲜度等。其中羊肉 pH 值的变化即酸碱度失衡将影响肉的口感，从而影响消费者对其品质的认可度。细菌总数能否准确测定直接关系到羊肉食用的安全性，有些微生物会产生毒素致使人中毒，严重影响人身健康。挥发性盐基氮是动物性食品在腐败变质的过程中，由于酶和细菌的作用，将蛋白质分解而产生的氨以及胺类等碱性含

氮物质、肉制品中所含有的挥发性盐基氮含量,随着腐败程度的进行而不断增加,与腐败程度之间有着显著的相关关系。颜色是肉新鲜与否的直观外在表现,直接影响着消费者的购买意愿。新鲜度是指肉品的新鲜程度,一般分为新鲜、次鲜和腐败,是衡量肉品是否符合食用要求的定性标准。当前,对上述储藏品质检测的传统手段主要包括:感官评定,容易操作但结果因人而异;理化测定法和微生物检测法等手段,结果准确但操作繁琐,费时费力,不能满足大批量、大规模的快速检测任务,从而限制了新疆羊肉走高端化、品牌化的产业道路。

由此可见,新疆羊肉市场要走高端化、品牌化的产业道路,就必须对羊肉储藏品质安全进行快速检测,以确保新疆羊肉的市场竞争力。而近红外光谱和高光谱图像技术作为新兴的光学无损检测技术,具有快速、无损和绿色等特点,可以对羊肉储藏品质进行快速检测。近红外光谱分析技术(NIRS)是利用不同样品在近红外谱区包含的光学反射或透射特性的不同,来测定样品化学组成及物理特性的一种快速检测技术。高光谱图像技术(HSI)能够同时获取样品的图像和光谱信息,通过样品的特征信息和理化数据之间的相关关系,能够准确、快速、无损地预测样品的品质指标。

针对我国现在的羊肉品质的快速无损检测需求,本书以新疆羊肉为对象,系统地阐述了羊肉储藏品质的近红外和高光谱图像等光学快速无损检测技术的国内外研究现状和羊肉品质光学检测模型的建立方法,通过试验寻找羊肉储藏过程中品质的变化规律,然后采集400~1 000nm可见短波高光谱图像和900~2 500nm长波近红外光谱,通过对上述光学信息进行预处理、ROIs选取、特征光谱提取、模型比较建立最优光学快速检测模型和可视化分布图及揭示检测机理,完成对羊肉pH值、TVC、TVB-N、颜色和新鲜度等储藏品质指标的定量和定性分析。

第二节 肉品品质光学快速无损检测的国内外研究现状

一、肉品品质近红外光谱检测的国内外研究现状

(一) 国外研究现状

2007年, Viljoen 等采用近红外光谱技术对冷冻干燥羊肉化学和矿物成分进行分析。结果表明化学和矿物的偏最小二乘回归(PLSR)模型预测相关系数和标准差(SEP)分别为:灰度(0.97, 0.15%)、干物质(0.96, 0.38%)、粗蛋白(1, 0.92%)、脂肪(1, 0.43%), K、P、Na、Mg 和 Fe 的 SEP 分别为 600mg/kg、900mg/kg、77.89mg/kg、40mg/kg 和 3.15mg/kg。

2007年, Sheridan 等采用光纤传感器技术结合主成分分析和神经网络以测量色彩模型(CIE L^* 、 a^* 和 b^*)和分析光谱反射率两种方法对切片火腿褪色进行研究, CIE L^* 、 a^* 和 b^* 的重复再现非常困难, 在粉红色和灰色中 L^* 和 a^* 谱线重叠严重, 采用光谱反射率区分褪色火腿比检测 CIE L^* 、 a^* 和 b^* 效果更好。

2012年, Kapper 等应用近红外光谱技术对猪肉滴水损失、颜色和 pH 值进行研究, 滴水损失率、 L^* 、 B^* 和 pH 值的预测决定系数分别为 0.75、0.51、0.55 和 0.75; 相对分析误差(RPD)分别为 1.9、1.4、1.5 和 1.9。

2013年, Wang 等利用光纤传感器结合小波去噪的人工神经网络方法研究分析了肉类新鲜度的复杂频谱信息, 该方法能够实现对物种和肉类新鲜度的较好辨别。

2013年, De Marchi 利用可见/近红外光谱技术对牛肉胴体 pH 值、颜色、蒸煮损失和剪切力进行在线检测研究, 其中 pH 值、颜色和蒸煮损失模型预测效果较好, 剪切力较差。

2015年, Mourrot 等采用近红外反射光谱技术对牛肉脂肪酸(FA)的组成进行预测, 除不饱和脂肪酸增加个体或团体的脂肪酸含量均可以

增加校正集的可靠性,当没有半腱肌脂肪酸时,胸最长肌 FAS 的预测性能比腹直肌 FAS 好。

2015 年,Teixeira 等采用近红外反射光谱对山羊背最长肌中的蛋白质和水分进行预测,结果表明校准模型对蛋白质(预测标准误差 SEP=0.43)和水分(SEP=0.48)具有较好的预测性能。

2015 年,Qiao 等在工业大样本数据的条件下利用可见/近红外光谱结合主成分分析建立 PLSR 模型和支持向量机(SVM)模型对牛肉品质进行预测,结果表明 SVM 对牛肉食用品质的预测能力比 PLSR 好,特别是对年轻的公牛肉嫩度预测的准确率最高。

2016 年,Ghazali 等采用可见近红外和短波的组合结合主成分回归对原料肉的剪切力进行研究,主成分数为 4 时所建主成分回归(PCR)模型校正集(R_c)、均方根误差(RMSEC)分别为 0.46 和 0.06,预测集(R_p)和预测误差均方根(RMSEP)分别为 0.42 和 0.09。

2016 年,Alamprese 等采用傅立叶变换近红外光谱技术对意大利不同相对湿度下猪肉的调理效果进行研究。结果表明猪肉在空调 80% RH 时比 95% RH 的重量损失率高了 1.6 倍。

2016 年,Wang 等基于双波段可见/近红外光谱技术的肉品质量参数检测装置对猪肉颜色、pH 值、挥发性盐基氮、水分、蒸煮损失和弹性进行检测,所建 PLSR 模型各组分预测集的相关系数为 0.90~0.96,预测误差分别为 0.63mg、0.76mg、0.55mg、0.08mg、2.80mg/(100g)、0.38%、2.56%和 6.90N。

2016 年,Dixit 等采用多点近红外光谱仪结合准直镜在不同检测距离下对碎牛肉脂肪进行测量。在三种不同距离下(1cm、2.5cm 和 4cm)脂肪校正集 R_c 为 0.96~0.99, RMSEC 为 0.03~4.25,预测集 RMSEP 为 0.03~5.67。表明准直镜可以增加近红外光谱技术对牛肉的检测距离。

2017 年,Reis 等采集新鲜鱼片可见近红外光谱后分别冷冻 5d、21d 和 35d 解冻再次扫描,建立偏最小二乘回归模型并进行反复双交叉验证,新鲜鱼片和冷冻/解冻样品判别准确率分别为 92%和 82%。

(二) 国内研究现状

2004年,孟宪江等利用光纤探头采集肉的光谱利用神经网络方法建立肉品新鲜度判别模型,准确率达到93.3%。

2010年,廖宜涛等利用近红外光谱技术对新鲜猪肉肌内脂肪含量在线检测研究。对采集背最长肌肉460~920nm的光谱进行小波降噪处理,利用MSC和一阶微分建立PLSR预处理模型结果良好,预测相关系数为0.93,预测均方根误差RMSEP为0.05。

2012年,刘晓晔利用近红外光谱技术在线测定成熟2d和7d后牛肉外脊的pH值和颜色。使用多元散射校正、标准正态化、去趋势化及多种处理方法来消除高频噪声和基线偏移,建立偏最小二乘回归模型。结果表明,波长为1000~1300nm时,2d的模型相关系数较好,均大于0.8。

2013年,周令国等采用FNIR对粉碎均质腊肉中亚硝酸盐进行研究,PLSR模型的校正集和交叉验证集分别为1.00和0.96,校正集(RMSEC)和交叉验证集(RMSECV)分别为0.18和0.88。

2013年,谷芳等利用近红外光谱检测猪肉在室温和冷藏贮藏过程中细菌菌落总数,实现了无损、快速检验猪肉品质。

2014年,徐文杰等采用近红外光谱技术结合PLSR模型对211个草鱼鱼肉的质构参数和持水性进行分析,咀嚼性模型参数相比较于其他参数模型系数略低,持水性、硬度、回复性、弹性、咀嚼性和剪切力的模型相关系数分别为0.92、0.98、0.98、0.99、0.77和0.99。

2014年,杨勇等采用近红外光谱技术结合PLSR模型对鹅肉TVB-N和pH值进行研究分析,两者的校正模型 R_c 分别为0.73和0.99,内部交互验证均方根误差分别为3.67和0.03,预测集的预测值和实测值相关系数分别为0.97和0.71。

2014年,陈伟华采用近红外光谱技术对罗非鱼片挥发性盐基氮、硬度、弹性、凝聚性、解冻损失、蒸煮损失、水分含量及质构特性进行研究,均取得较好的检测效果。

2016年,邹昊等通过调整算法参数和算法组合成功消除了近红外光谱仪对生鲜羊肉挥发性盐基氮模型稳定性和预测准确率的影响。

2016 年,郑晓春等采用环形光源双通道可见/近红外光谱系统检测牛肉含水率、颜色和 pH 值并取得较好效果。

2016 年,王文秀等采用双波段可见/近红外光谱系统对猪肉颜色、蒸煮损失率进行建模分析, L^* 、 a^* 、 b^* 、pH 值及蒸煮损失率预测集相关系数分别为 0.95、0.92、0.95、0.93 和 0.90。

2016 年,李志刚等采用近红外光谱技术对牛肉硬度、弹性、咀嚼性和黏附性等进行检测,经小波消噪后采用的二阶微分预处理建立的牛肉硬度、弹性、咀嚼性模型效果较优,能够有效地预测牛肉硬度、咀嚼性,但弹性和黏附性不好。

2016 年,邹昊等采用便携式近红外光谱技术以猪肉血液中的葡萄糖浓度和皮质醇浓度两指标对白肌肉和黑干肉劣质猪肉进行预判研究并取得较好结果,PSE 和 DFD 肉的预判准确率分别达到 92%和 96%。

2016 年,王辉等基于中波近红外光谱对生鲜牛肉胆固醇建立 PLSR 模型,独立验证集的预测效果较好($P>0.05$)满足国家标准。

2016 年,黄伟等采用 NIRS 对滇南小耳猪整块或均质肉糜的水分、脂肪和蛋白质含量进行研究。整块肉的水分 PLSR 模型较好 R^2 、RMSEC、预测标准差(RMSECP)分别为 0.98、0.40 和 1.64;肉糜的脂肪和蛋白质模型效果较好, R^2 分别为 0.91 和 0.95,RMSEC 分别为 0.41 和 0.27;RMSEP 分别为 1.64 和 1.11。

2017 年,赵文英等采用近红外光谱技术结合偏最小二乘法对 300 份鲜肉(牛肉、羊肉、猪肉各 100 份)单独的不同种类和混合鲜肉糜进行蛋白质测定分析。三者所建模型校验相关系数都在 0.90 以上,肉类样品混合建模集和预测集相关系数分别为 0.95 和 0.93,RMSEC、RMSEP 分别为 0.50 和 0.67。

2017 年,刘功明等利用近红外光谱技术分析鸡、鱼肉加热终点温度机理,鸡肉和鱼肉主成分数分别为 9 和 11 时其 PLSR 模型 RMSEC_V最小,预测值的相关系数分别为 1.00 和 0.98,预测均方差分别为 3.02%和 2.94%,预测误差分别为 0.97 和 1.63。

二、肉品品质高光谱图像检测的国内外研究现状

(一) 国外研究现状

2007年, Qiao等利用430~1 000nm的HSI技术对猪肉的大理石花纹水平进行了定性判别分析, 采用主成分分析法(PCA)选取了460nm、580nm、661nm、720nm、850nm和950nm下的特征图像参数, 判别准确率达到了75%。对猪肉滴水损失、pH值和颜色参数(L^*)进行了定量预测分析, 其预测相关系数分别为0.77、0.55和0.86, 预测标准差分别为2.34、0.21和3.89。

2007年, Cho等进行了基于高光谱图像技术对肉制品生产加工机械上遗留污染物的检测研究, 对多个特征波长建模, 最终检测判别率可达99.7%

2008年, Naganathan等通过900~1 700nm近红外HIS技术开展了牛肉嫩度的分级研究, 利用PCA降维获取两个主成分, 并提取提取图像二阶统计矩纹理特征, 采用典型判别分析(CDA)方法建模, 分类准确率达到了77.0%。

2008年, Cluff等基于HSI光散射技术对牛肉嫩度进行了定量分析研究, 采用逐步回归分析筛选出7个有效波长点, 其预测相关系数仅为0.67, 发现HSI光散射技术对于牛肉嫩度的检测效果还有待提高。

2010年, Liu等基于高光谱图像技术对猪肉品质的分类进行研究, 通过Gabor滤波函数对获得的高光谱图像进行处理, 使用PCA获得特征波长, 通过线性判别法(LDA)进行判别分析获得了较高的分类率。

2011年, Peng等基于HSI光散射技术对牛肉的微生物腐败状况进行了预测, 采用光散射参数, 分别比较了不同洛伦兹参数 a 、 b 和 $a \times b$ 提取的特征光谱的建模效果, 发现参数 $a \times b$ 所提取的9个波长点592nm、596nm、602nm、659nm、803nm、825nm、838nm、905nm和913nm建立的PLSR模型效果最优, 其预测相关系数和标准差分别达到了0.92和0.63。

2012年, Eimasry等应用900~1 700nm的高光谱系统预测新鲜牛肉的新鲜度, 结果表明: 建立全波段下的偏最小二乘回归模型中 L^* 和 b^*

的决定系数为 0.88 和 0.81, 应用偏最小二乘回归的权重系数选择特征波长建立的偏最小二乘回归模型中 L^* 和 b^* 决定系数为 0.88 和 0.80, 均方根误差为 1.22 和 0.59。

2012 年, Wu 等应用 900~1 700nm 近红外高光谱图像检测大马哈鱼颜色分布, 采用连续投影算法提取特征波长, 建立特征波长下多元线性回归模型。结果表明, 颜色参数 L^* 、 a^* 和 b^* 的相关系数分别为 0.88、0.74 和 0.80。

2011—2013 年, ElMasry 等采用 900~1 700nm 近红外 HSI 技术对不同饲养条件下不同取样部位的牛肉持水性 (WHC) 进行预测研究, 利用回归系数法分别提取与 WHC、水分、脂肪以及与蛋白相关的特征波长点, 建立这四组波长点下的偏最小二乘回归 (PLSR) 模型, 预测相关系数分别达到了 0.87、0.89、0.84 和 0.86, 预测标准差分别为 0.28%、0.46%、0.65% 和 0.29%。

2011—2013 年, Kamruzzaman 等研究了羊肉不同部位的近红外 HSI (900~1 700nm) 判别分析, 基于 PCA 提取的 6 个特征波长点建立 LDA 判别模型, 其识别率达到了 100%。利用 GLCM 提取图像纹理特征参数并建立 LDA 判别模型, 其识别率分别为 94% 和 91%。随后相继开展了羊肉中水分、脂肪、蛋白、pH 值、颜色和滴水损失的近红外 HSI 预测研究, 选取了回归系数较大的 6 个特征波长点进行建模分析, 其预测决定系数分别达到了 0.88、0.88、0.63、0.65、0.91 和 0.77。

2012—2013 年, Barbin 等相继开展了猪肉中微生物、颜色 (L^*)、pH 值、滴水损失、蛋白质、水分和脂肪含量的 HSI (900~1 700nm) 预测分析研究, 其预测相关系数均达到了 0.85, 该项研究是 HSI 技术第一次比较系统应用到猪肉品质的评价分析过程中。

2012—2013 年, Wu 等继续探讨了 HSI 光散射技术对牛肉嫩度、颜色 (L^* 、 a^* 和 b^*) 和水分进行预测的可行性, 基于洛伦兹函数 (LD) 分别提取了各自的特征波长点, 并建立对应的多元线性回归 (MLR) 模型, 其嫩度的预测相关系数达到了 0.91, 且其颜色参数和水分的预测相关系数分别为 0.96、0.96、0.97 和 0.95, 表明 HSI 光散射技术能够较好地用于牛肉品质的检测研究。

2013年, Iqbal 等基于 900~1 700nm 近红外 HSI 技术对熟切片火鸡腿的水分、颜色和 pH 值进行预测, 偏最小二乘回归 (PLSR) 模型的决定系数分别为 0.88、0.81 和 0.74, 预测均方根误差分别为 2.51、0.02 和 0.35。

2013年, Liu 等将腌制猪肉作为主要的研究对象, 利用 HSI 技术分别对其腌制过程中的 pH 值、含盐量和水分含量进行了预测, 其预测相关系数分别为 0.79、0.93 和 0.91。

2013年, Huang 等利用 HSI 技术对猪肉中的细菌总数 (TVC) 含量进行了预测, 其预测决定系数和均方根误差分别达到了 0.83 和 0.24。

2013年, Barbin 等利用高光谱系统评估猪肉微生物含量, 采用偏最小二乘回归法建立细菌总数和平板计数的预测模型。结果表明, 在 900~1 000nm 的谱区范围内, 模型的精度分别达到 0.86 和 0.89。

2013—2014年, He 等首先比较了不同波段选择下的三文鱼水分含量 HSI 模型效果, 发现 400~1 000nm 范围提取的 8 个特征波长点建立的 PLSR 模型效果最优。同时利用 900~1 700nm 近红外 HSI 技术对冷藏期间的三文鱼表面乳酸菌 (LAB) 含量进行了预测, 采用竞争性自适应重加权法 (CARS) 提取了 8 个特征波长点并建立对应的偏最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 模型, 其预测相关系数和均方根误差分别为 0.93 和 0.53。

2016年, Li 利用高光谱成像 (HSI) 和基于比色传感器阵列的人造嗅觉系统两种无损检测工具相结合来量化猪肉中的 TVC 含量。对采集的数据进行特征变量的提取后, 采用非线性支持向量机回归 (SVMR) 模式识别方法, 并通过交叉验证进行优化。预测均方根误差为 2.99, 决定系数为 0.91。

2017年, Yang 利用高光谱图像来测定熟牛肉的细菌总数。利用 RF 提取了 15 个特征光谱变量后通过相关分析 (CA) 进一步筛选出六个最佳波长变量, 利用不同的光谱变量建立最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 分类模型。结果表明, RF-CA-LS-SVM 分类模型的整体分类精度高达 97.14%。