

# 肉品质量无损检测技术研究进展

杨东<sup>1</sup>, 王纪华<sup>2\*</sup>, 陆安祥<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 肉类和肉类食品品质与安全检测一直是肉类行业中关注的热点。本文综述了超声波、电磁特性、电子鼻与电子舌、计算机视觉、光谱分析等几种当前主要无损检测技术在肉品质量评价中的研究进展。其中, 重点介绍了光谱分析中具有图谱合一、可同时获取样品内外部品质信息特性的高光谱成像技术及其在国内外肉品品质检测中的应用现状, 提出了该技术在肉类品质检测研究方向的几点思考, 并展望了无损检测技术在肉品品质检测中的研究前景, 以期后续研究提供参考。

**关键词:** 无损检测; 肉品质量; 高光谱成像技术

## Research development on non-destructive determination technology for meat product quality

YANG Dong<sup>1</sup>, WANG Ji-Hua<sup>2\*</sup>, LU An-Xiang<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;  
2. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China)

**ABSTRACT:** The detection of quality and safety for meat and its products have become the hot research topics in meat industry. The recent progress of the present non-destructive detection techniques for evaluation of meat product quality was summarized, including ultrasonic, electrical magnetic properties, electronic nose and electronic tongue, computer vision, and spectral analysis. Furthermore, the characteristics of hyperspectral imaging from spectral analysis was mainly analyzed, which could integrate image and spectrum and obtain both internal and external quality information from inspected objects simultaneously, and its application status in meat products quality detection at home and abroad was also reviewed. Meanwhile, some ideas in meat quality detection with hyperspectral imaging technology were put forward. Finally, the future investigation direction of non-destructive determination techniques in meat product quality detection was proposed to researchers on the related studies as a reference.

**KEY WORDS:** non-destructive determination; meat quality; hyperspectral imaging technology

## 1 引言

随着生活水平的提高和膳食结构的改变, 人们对肉

类食品品质与安全提出了更高的要求。我国是肉类生产消费大国, 由于与欧美市场膳食结构偏好不一致, 肉及肉制品质量安全事件频频爆发, 致使我国肉类产品难以进入国

基金项目: 加工过程质量安全检测关键技术和装备研发与应用项目(2014BAD04B05-2)

**Fund:** Supported by the Key Technology of the Quality and Safety Determination and Development and Application of Equipment in the Process of Machining (2014BAD04B05-2)

\*通讯作者: 王纪华, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量检测技术与信息技术的交叉与集成。E-mail: wangjh@nrcita.org.cn

\*Corresponding author: WANG Ji-Hua, Ph.D, Researcher, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, No. 9, Middle Road of Shuguanghuayuan, Haidian District, Beijing 100097, China. E-mail: wangjh@nrcita.org.cn

际市场<sup>[1]</sup>。同时肉类品质检测技术和评价方法繁琐,也降低了监管机构的工作效率。因此,实现肉类品质与安全快速检测和准确评价已成为肉品行业发展和保证食品安全的重要工作之一。传统肉品检测方法有感官评价、理化指标检测以及微生物菌落检测等<sup>[2]</sup>。其中,感官评价存在主观性强、不易量化、评价人员意见难以一致的问题;理化指标及微生物检测存在待测样品预处理繁琐、化学试剂消耗量大、检测周期长以及成本较高等问题<sup>[3]</sup>。为满足生产者、监管者和消费者对肉品质量安全的要求,无损检测技术已逐步替代传统的检测技术成功地应用到肉和肉制品检测之中<sup>[4]</sup>。特别近年来,随着成像和光谱技术的快速发展,高光谱成像技术已经广泛应用于肉品品质与安全快速无损检测之中<sup>[5]</sup>,该技术是一种图像及光谱的融合技术,可以同时获取实验对象的空间及光谱信息。图像数据能反映样品的外部特征、表面缺陷及污斑情况,而光谱数据又可以对物体内部物理结构及化学成分进行分析。大量的成功案例也已经证明了高光谱成像技术是肉品品质与安全检测的科学有效工具<sup>[6]</sup>。针对肉品品质与安全状况,本文介绍了超声波、电磁特性、计算机视觉、电子鼻与电子舌、光谱分析几种无损检测技术,并重点阐述了光谱分析中的高光谱成像技术在肉品品质检测与评价中的应用和研究进展,展望了无损检测技术未来的发展趋势。

## 2 无损检测技术在肉品品质测定中的研究进展

无损检测技术(non-destructive determination technologies, NDT)是在物理学、电子学、计算机科学、信息技术以及人工智能等学科的基础上发展起来的一门新兴的综合性应用学科<sup>[7]</sup>。该技术是在不损坏待测样品的前提下,通过样品的外部属性特征和内部组成成分所引起的对热、声、光、电、磁等的不同反应来检测样品的物理性质、机械性能以及内部结构等发生的变化,是探测其内部或外表异样的现代检验技术。针对肉品在检测过程中呈现出的光学特性、声学特性、电磁特性等,光谱、射频识别、超声波、核磁共振、X光成像、计算机视觉、高光谱成像、电子鼻与电子舌和生物传感器等快速、实时、准确、无损检测技术被应用到肉品品质检测与评价中<sup>[4]</sup>。其中,由于高光谱成像技术融合了传统的成像技术和光谱技术的优点,可同时获取肉样的内部品质信息和外部属性特征,在肉及肉制品检测上具有很大的发展潜力<sup>[5]</sup>。

### 2.1 超声波检测技术

超声波检测技术是依据声波在肉品中传播时的反射、散射、透射和吸收、以及衰减系数、传播速度和其自身的声阻抗和固有频率等特性,来反映出肉品与声波相互作用时所产生的特征信息,并据此实现对肉品品质的快速无损检测<sup>[8]</sup>。利用超声波技术可以实现对肉品的内部组成成分、

肥瘦肉厚度、肥瘦比以及胴体分级等指标的检测。Morlein等<sup>[9]</sup>采用超声波检测技术,以猪肉背最长肌中的脂肪含量为指标,对猪肉胴体进行分级检测。Fortin等<sup>[10]</sup>在已有的超声波检测胴体分级系统的基础上,改进检测方法,对猪肉胴体采用超声波扫描获得眼肌切面的结构图像,结合光学成像技术获得猪肉背面和侧面的二维图像和结构光三维重建图像,计算猪胴体的体积、背面面积、侧面面积等多个特征变量,建立猪胴体瘦肉率的预测模型。该模型融合了超声波图像特征和光学图像特征,复杂度大于超声波检测模型,但硬件系统相对简单,其预测结果也较好,预测相关系数 $r^2=0.91$ ,RSD=1.68%。

Prados等<sup>[11]</sup>利用超声波在腌制猪肉中的传播速度的变化检测肉中盐分和水分含量。通过建立的回归模型分析可知腌制肉中盐分和水分含量与超声波的传播速度线性相关,结果表明利用超声波技术预测腌制肉中盐分和水分含量是可行的。还有学者应用超声波技术探究不同的喂养方式对猪生长过程的影响及肉组织结构的变化<sup>[12]</sup>。

### 2.2 电磁特性检测技术

电磁特性检测技术是利用待测样品在电、磁场中发生变化的电、磁特性参数来反映样品的某些变化信息。肉品的电磁特性与肉的组织结构、内部成分、状态等有密切关系<sup>[13]</sup>。肉品从新鲜到腐败的过程中,其阻抗值具有一定的变化规律,可以通过检测这种变化特征对肉品品质进行分析与评价。Aalhus等<sup>[14]</sup>为了证明对新鲜胴体进行电刺激(低压<100或高压>300V)可以提高肉的嫩度和品质(肉色、大理石纹、风味、货架期等),研究了低压电刺激方法对牛肉嫩度的影响,最终确认电刺激可以提高牛肉的嫩度。

电磁特性检测技术所需设备相对简单、数据的获取和处理比较容易、具有快速准确、不受场合地点限制的优势。因此,其应用前景较广阔。Higbie等<sup>[15]</sup>采用测量胴体全身电导率的方法来检测无脂瘦肉和全脂肪含量。因为瘦肉比肥肉导电率高,通过对不同部位和不同条件下的猪胴体检测发现,可以用二项或三项多项式预测无脂瘦肉重量,复相关系数为 $r^2=0.93$ 或 $r^2=0.95$ 。通过实验可以证明,全身电导率法是方便、经济、准确测定胴体无脂瘦肉重量的可行性方法。Hanne等<sup>[16]</sup>采集屠宰后时间分别为90、140、161、182d的猪背最长肌样本41个,用核磁共振对其水分分布与水分活性进行检测,并且同时对猪肉样品进行感官评价。研究结果表明,屠宰时间对猪肉多汁性有重要的影响。

### 2.3 电子鼻与电子舌检测技术

电子鼻是一种模拟哺乳动物鼻子的嗅觉功能,对样品产生的挥发性气体进行感知与识别,并进行气味检测的智能系统。这是一种通过采集样品挥发性成分整体信息来

评价样品的方法<sup>[17]</sup>。研究表明, 不同肉类具有不同的物质组成, 使其有不同的风味和气味, 电子鼻技术是以待检测肉品在电子鼻传感器上反映出的不同的特征性响应图谱为依据, 对肉品品质进行定量分析与定性判别。电子鼻具有测定速度快、测定范围广、不需要对待测样品进行预先处理等优点, 该技术已经成功用于猪肉、牛肉、鸡肉等肉类的新鲜度评价及保藏货架期的预测中<sup>[18]</sup>。

电子舌是一种模拟哺乳动物味觉模式, 由交互式传感器阵列、信号选择装置以及模式识别算法构成的智能检测系统<sup>[17]</sup>。对于复杂呈味物质的样品, 电子舌系统可实现检测、识别及分析的功能, 并以其快速、简便、安全等特点迅速在很多领域内都得到广泛的应用。在肉以及肉制品检测中, 电子舌传感器获取其味觉物质的信号, 并将信号传至电脑, 由模式识别算法分析并对不同肉品进行鉴别, 得出不同肉品的味觉信息。

现阶段电子鼻和电子舌技术在肉与肉制品检测方法的应用主要集中在猪肉、牛肉、鸡肉羊肉等新鲜度的检测、不同种类肉的分级及模拟添加成分的肉类掺假检测。Papadopoulou 等<sup>[19]</sup>利用电子鼻技术, 以挥发性盐基氮(TVB-N)含量为评价指标, 对不同贮藏温度(0、5、10、15 和 20 °C)下的猪肉新鲜度进行研究。利用电子鼻获取的特征数据结合支持向量机(SVM)模型实现了猪肉新鲜度的定性判别。Zhang 等<sup>[20]</sup>研究了 6 个气敏传感器在检测牛肉新鲜度中的可行性, 发现其中 5 个传感器可以用于牛肉新鲜度检测, 并采用这 5 个传感器建立了牛肉新鲜度的电子鼻检测系统。贾洪锋等<sup>[18]</sup>利用电子鼻对牦牛肉、牛肉和鸭肉掺假现象进行检测, 根据肉类在电子鼻传感器上呈现的不同的特征性响应图谱, 可以有效的识别出猪肉和牛肉。

韩剑众等<sup>[21]</sup>利用课题组开发的多频脉冲电子舌对生鲜猪肉和鸡肉的品质和新鲜度进行研究, 电子舌不仅可以有效区分不同品种的猪肉和鸡肉(杜大长猪和金华猪)和不同部位的宰后猪肉(背最长肌和半膜肌), 还能检测出不同储藏温度下(室温 15 °C 和冷藏 4 °C)肉质的新鲜程度。Luis 等<sup>[22]</sup>组建了一个由 16 个电势传感器(金属传感器、金属氧化物传感器和难溶盐电极)组成的电子舌检测系统, 结合质构、色度、pH 值、菌落总数、挥发性盐基氮和生物胺等生化指标, 研究了鱼片新鲜度随时间的变化趋势。结果发现, 采用电子舌信号建立的 PLS 定量分析模型可以有效预测与肉新鲜度相关的生化指标, 且总生物胺、pH 值、挥发性盐基氮含量和菌落总数与 16 个传感器信号之间具有显著的相关性(其相关系数在 0.98 以上)。

#### 2.4 计算机视觉检测技术

计算机视觉技术是使用计算机及相关设备对生物视觉的一种模拟, 主要是基于人的视觉原理, 通过图像传感器装置获取样本的图像信息, 将颜色、像素亮度和分布等

图像信息进行数字化表达, 对图像进行特征提取, 最终通过计算机模拟人的判别准则去理解和识别目标图像<sup>[23]</sup>。作为一门融合了光学成像、计算机科学、图像信息处理技术、人工智能等诸多领域的交叉学科, 计算机视觉技术不仅具有快速、无损、自动化程度高、清晰度高、抗干扰能力强等诸多优点, 还扩展了人的视觉范围, 可代替人眼进行测量和判别。肉品的外观颜色、大理石纹、纹理等特征可以通过图像直观表达, 也是影响判定肉品质量等级的关键因素<sup>[24,25]</sup>, 利用计算机视觉技术, 通过图像获取肉品的外观特征信息, 并对肉品的新鲜度等指标进行分析与评价的无损检测方式受到了国内外学者的广泛关注。

随着计算机科学技术的不断发展、电子硬件设备成本的降低、运算速度的提升以及不同学科之间的交叉渗透, 计算机视觉技术在肉品质快速无损检测领域得到了越来越广泛的应用。Folkestad 等<sup>[26]</sup>应用图像处理技术测定大西洋鲑鱼肉的成分含量, 以偏最小二乘回归(PLSR)作为建模方法对虾青素含量预测取得了很好的效果。Lin 等<sup>[27]</sup>为了提高无损检测的精度, 采用多源信息融合技术, 将近红外光谱、计算机视觉以及电子鼻技术检测到的特征信息相结合, 建立了 BP-ANN 的猪肉新鲜度的非线性预测模型, 并与单一技术建立模型相比较, 结果表明, 将多源技术融合后的检测模型的性能有了明显的提升。

Stien 等<sup>[28]</sup>采用计算机视觉技术获取虹鳟鱼的 RGB 图像, 通过图像分析检测鱼肉的形态参数、脂肪比例和颜色, 并随机选择 50 个样本图像以人工分割肉片的方式分割出背部脂肪沉积区和红肌区, 与图像分析的形态分割结果很相关; 鱼肉图片图像分析预测出的脂肪比例, 与中红外透射光谱的脂肪测量结果比较相关; 鱼肉不同颜色变量的主成分分析结果表明, 比例、平均值等简单系数可以定量肉色的不同方面。Zheng 等<sup>[29]</sup>提出基于区域生长法计算区域元来提取纹理参数, 并将所得 8 组参数用于表征图像尺寸、方向和对对比度, 从而实现了对 3 种熟肉品的分类。结果表明, 该方法可以有效地将不同种类肉品(牛肉、猪肉和羊肉)的彩色图像进行分类, 且效果优于传统的游程矩阵方法。

#### 3 光谱检测技术

不同波段的光照射肉品时, 肉品会对光产生吸收、散射、反射和透射等现象。国内外研究学者报道, 一些特定波段的光照射至于肉品内部时, 通过透射和散射采集的光谱数据中会携带有丰富的肉品内部成分信息<sup>[30-32]</sup>; 另一些波段的光作用于肉品表面时, 所形成的光谱图像会呈现出肉品的外部特征信息<sup>[33,34]</sup>。将光谱技术与化学计量学方法、图像信息处理技术、人工智能技术有机的结合, 可实现对肉品品质与安全快速无损检测。当前, 广泛应用到肉品质安全检测的光谱技术主要有近红外光谱、拉曼光谱和 X 射线荧光光谱分析技术。

### 3.1 近红外光谱检测技术

近红外(near infrared, NIR)光是介于可见光和中红外之间的电磁辐射波,美国材料检测协会(ASTM)将近红外光的波长范围定义为780~2526 nm的区域<sup>[35]</sup>。近红外光谱主要是分子基频振动的倍频和合频的吸收,导致采集到的光谱信息比较弱。再加上样品的不均匀性、仪器测量误差、以及复杂背景等诸多不确定因素的干扰,使得如何从复杂、重叠和变动的背景中提取出有效的光谱信息,并建立最优的检测模型成为了当前研究的重点和分析的难点。

近年来,随着计算机技术和化学计量学方法的迅猛发展,对应于使近红外光谱技术以其具有客观、低成本,很少或无需样本预处理,对复杂样品可多成分同时分析等特点广泛的应用到农业、烟草业、食品业、医药行业以及石油化工行业等领域<sup>[36]</sup>。并在肉及肉制品品质检测和评价上有了突破性进展。Park等<sup>[37]</sup>采用近红外光谱技术建立了基于主成分回归(PCR)的牛肉嫩度检测模型,对牛肉嫩度进行了分析与评价。刘魁武等<sup>[38]</sup>利用可见/近红外光谱对冷鲜猪肉中的脂肪、蛋白质和水分含量进行研究,光谱数据经多元散射校正(MSC)处理后,分别建立0~4℃和-20℃下的原始光谱、一阶导数和二阶导数的偏最小二乘(PLS)定量分析模型,并对模型的性能进行分析和比较,结果表明,经过一阶导数处理后的模型性能最优。田潇瑜等<sup>[39]</sup>以块状生鲜牛肉为样本,研究了基于可见及近红外反射光谱的生鲜牛肉多品质参数检测模型。对原始光谱数据进行卷积平滑(S-G)、一阶微分(FD)及标准化校正(SNV)预处理,并建立基于PLSR的校正模型。结果表明:经过变量标准化校正(SNV)的模型效果最好。由此可见,SNV可以去除块状样品引起的散射现象。

### 3.2 拉曼光谱检测技术

拉曼光谱分析技术通常是利用激光来检测处于红外区的分子振动和转动能量,是基于拉曼散射效应而发展起来的光谱分析技术,对与入射光频率不同的散射光谱进行分析以得到分子振动、转动方面信息。与近红外光谱相比,拉曼光谱可以表征出一些在红外区域无法显示的特征信息,起到相互补充的作用。如利用水分含量对拉曼光谱吸收非常弱的特点,避免了水分变化的干扰,可以通过拉曼光谱获取更加准确的动物蛋白、脂肪等成分的含量信息<sup>[40]</sup>。Daniel等<sup>[41]</sup>利用拉曼散射光谱技术结合多元数据分析方法,以猪肉制品为检测对象,对熟肉在加工制作过程中的加热温度和持续加热时间与其存储期限的相关关系进行系统的研究。Pedersen等<sup>[42]</sup>采用拉曼光谱技术,建立了基于PLSR的新鲜猪肉滴水损失预测模型,模型型的相关系数达到( $r^2=0.97$ )。拉曼图谱表明,保水性与位于(876~951  $\text{cm}^{-1}$ )和(3071~3128  $\text{cm}^{-1}$ )波段附近的谱带有关。

### 3.3 X射线荧光光谱检测技术

X射线具有穿透能力、衍射作用和激发荧光的特性。

通过捕获X射线的穿透特性,可以得到样品的透射图像和断层图像,进一步可以分析物质的内部结构<sup>[43]</sup>。X射线荧光光谱技术主要用于检测动物结缔组织中的胶原蛋白含量<sup>[44]</sup>。还有学者将该技术用于肉类表面致病菌的定性分析。Tao等<sup>[45]</sup>提出了一种新的X射线检测厚度不均匀的肉中碎骨的图像处理方法,设计了4种不同形状的塑料模型来模拟肉及碎骨,并作为实验对象来验证这种图像处理算法的可行性。试验结果证明,无论把这4种碎骨模型放置在鸡肉的何种位置,都能被很好地检测出来。

### 3.4 高光谱成像检测技术

高光谱成像技术是新一代光电检测技术,兴起于20世纪80年代,融合光学、电子学、数字图像信息处理以及计算机科学等技术<sup>[46]</sup>。该技术将传统二维成像技术和光谱技术有机地结合在一起,具有连续多波段、光谱分辨率高和图谱合一等特点<sup>[47,48]</sup>,即同时含有图像信息和光谱信息。图像信息可以用来检测肉品的外部特征,而光谱信息则可以用来检测肉品的内部品质特性。可以对肉品的外部属性和内部品质进行高效的定性判别和定量分析。

高光谱成像技术作为一种新兴的快速无损检测技术,在农畜产品内外部品质无损检测中得到广泛的应用。它可以同时获取图像上每个像素点的连续光谱信息和每个光谱波段的连续图像信息,因此,高光谱成像技术能对检测样品的多方面物理、化学信息进行空间维的定量可视化表达。高光谱成像技术既有光谱技术的优点:快速、高效、测量简单方便、非破坏性分析、多组分同时测定、样品不需预处理或预处理简单、可实现实时分析;又融合了图像技术的特性:可视化、直观形象、再现性好、处理精度高、适用面宽、灵活性高。光谱技术和图像处理技术的融合与交叉,使得提取出的光谱信息和图像信息都能发挥出远大于自身的功用。致使其已经成功的应用到农畜产品质量与安全检测、分类与分级之中,在肉品品质检测上具有很大的发展潜力<sup>[49]</sup>。

国外学者利用光谱分析技术在肉类检测中的应用起步较早,研究也比较深入。Kamruzzaman等<sup>[50]</sup>选用900~1700 nm波段范围,利用高光谱成像技术,建立了羊肉脂肪、水分和蛋白质含量无损检测模型。应用ENVI软件从高光谱原始图像上获取感兴趣区域(ROI)的平均光谱信息,利用Usrscrambler软件对光谱信息建立偏最小二乘回归(PLSR)的多元散射校正模型,结果表明:用该模型对羊肉中水分、脂肪和蛋白质含量进行预测其决定系数分别为0.88、0.88和0.63,预测标准误差为0.40%、0.51%和0.34%。Talens等<sup>[51]</sup>利用高光谱成像技术结合偏最小二乘回归(PLSR)建立了火腿肉中蛋白质和水分含量的检测模型。从光谱图像数据中提取出平均光谱信息,利用模型相关系数法优选出能表征蛋白质含量的波长为(930、971、1051、1137、1165、1212、1295、1400、1645、1682 nm),水分

含量特征波长为(930、971、1084、1212、1645、1682 nm)。蛋白质和水分检测模型的拟合系数分别为 0.877 和 0.891, 预测标准误差为 0.994 和 0.540。在此基础上, 利用该模型以伪彩色的形式将蛋白质和水分含量在高光谱图像中进行可视化表示, 直观地呈现出蛋白质和水分在火腿肉表面的分布状况。

Qiao 等<sup>[52]</sup>采用可见/近红外高光谱成像检测系统测定猪肉表面大理石花纹分布状况, 并利用提取出的大理石花纹特征变量对猪肉品质进行分级。Elmasry 等<sup>[53]</sup>利用高光谱成像技术检测了鲜牛肉的嫩度、pH 和肉色(L\*,B\*)等品质指标。Xiong 等<sup>[54]</sup>利用高光谱成像技术对牛肉、鹅肉、鸭肉的色素总数进行分析, 利用 ENVI 从高光谱原始图像中选择感兴趣区域(ROI)获取光谱数据, 通过连续投影算法(SPA)选出最能表征色素总数的特征波长变量, 然后建立 SPA-PLSR 的检测模型, 模型的决定系数( $r^2$ )达到 0.953, 预测均方根误差(RMSEP)为 9.896, RPD 为 4.628。并将色素总数在肉表面的分布状况以可视化的形式表示。

Liu 等<sup>[55]</sup>结合光谱和质构特征来改进腌肉 pH 值预测的可行性。从高光谱图像感兴趣区域(ROI)提取平均光谱, 通过主成分分析(PCA)选择 9 个特征光谱变量。同时, 利用灰度-梯度共生矩阵分析第一主成分(PC1)图像(占总方差 96%), 并提取 13 个质构特征变量。在光谱数据、质构数据和两者数据相结合的基础上, 建立偏最小二乘回归法(PLSR)的 pH 值预测模型。结果表明: 预测样品基于数据融合的决定系数( $r^2$ )达到 0.794, 优于单独基于光谱信息( $r^2=0.783$ )或质构数据( $r^2=0.593$ )。因此, 结合光谱与质构分析的方法能有效改善肉类品质预测模型的性能。

赵娟等<sup>[56]</sup>利用高光谱成像技术提取出牛肉表面图像的纹理特征, 采用主成分分析(PCA)进行数据降维后, 分别建立了基于支持向量机(SVM)和线性判别(LDA)法的牛肉嫩度等级判别模型。经分析比较可知: 线性判别模型(LDA)识别准确率相比支持向量机模型(SVM)较高。基于主成分纹理特征建立的线性判别模型预测集判别精度为 94.44%。陈全胜等<sup>[57]</sup>利用高光谱成像系统获取 78 个猪肉样本在 400~1100 nm 范围内的高光谱图像数据, 通过 PCA 进行数据降维, 从中优选 3 幅特征图像并从每幅图像中提取出 4 个基于灰度共生矩阵的纹理特征变量, 建立基于神经网络(ANN)的猪肉嫩度等级判别模型。通过模型性能检

验的结果表明: 高光谱图像技术可以用于猪肉嫩度等级水平的检测。成芳等<sup>[58]</sup>利用傅里叶变换近红外漫反射光谱结合不同数学建模算法对不同部位取样的猪肉肉糜进行定性判别建模, 并建立猪肉肉糜中脂肪、蛋白质和水分含量的定量检测模型。研究表明利用傅里叶变换近红外漫反射光谱快速判别不同部位猪肉肉糜的方法是可行的, 脂肪和水分含量定量分析模型从预测精度、稳定性及适应性考虑均具有一定的通用性, 具有良好的市场应用前景。

朱逢乐等<sup>[59]</sup>应用可见/近红外高光谱成像技术快速检测多宝鱼肉冷藏时间并实现其可视化。采集不同冷藏时间的鱼肉样本的高光谱图像, 建立偏最小二乘回归(PLSR)模型, 对样本的冷藏时间进行预测, 预测决定系数( $r^2$ )为 0.9662, 预测均方根误差(RMSEP)为 0.6799。最后, 利用所建模型对预测集图像上每个像素点的冷藏时间加以预测, 以伪彩图的形式实现多宝鱼肉冷藏时间的可视化表达。

上述研究表明利用高光谱成像技术对肉品新鲜度、化学组分(蛋白质、脂肪、水分)含量、嫩度、pH 值和颜色等品质特性进行快速无损检测并做出适宜性评价是可行的。高光谱成像技术检测肉品品质与安全状况, 具有很大的发展潜力, 该技术完美的融合了传统图像处理技术和光谱分析技术的优点, 能够实现肉品品质无损检测的同时还可以将检测的指标数据以可视化的形式表示。该技术在未来发展需考虑以下几个问题: (1)高光谱图像三维数据信息量较大, 不同波段图像数据间具有相关性, 冗余信息多, 需要发掘一种低成本、高效率的算法来解决高光谱数据处理过程中的复杂多变现象, 进行有效数据降维处理, 并能满足肉品行业的实际需求。(2)目前多数研究只是利用高光谱数据中的光谱信息进行分析, 没有充分挖掘空间信息, 对于图像空间信息的利用还处于由定性研究向定量研究的过渡阶段。(3)当前所使用的高光谱成像系统检测设备的成本较高, 应研发出一种低成本, 并与传感器, 计算机等兼容的高光谱成像检测系统, 为现代食品加工企业实现品质在线检测、过程控制和分级定价系统提供支持。

肉与肉制品的质量标准的检测与评价具有综合性强、复杂多变的特点, 传统的检测技术不能满足现代肉类工业的发展需求, 致使无损检测技术已经成功的应用到肉品品质与安全检测之中。表 1 所示为上述几种常用无损检测技术的优缺点及应用比较。

表 1 无损检测技术性能比较  
Table 1 Comparison of non-destructive determination technologies

方法	优点	不足	主要作用
超声波技术	快速、无污染、非破坏性、检测灵敏度高、仪器使用灵活	易受肉品分布不均匀、操作人员技术、测量部位、超声波频率等因素的影响	测定肉品的组成成分、肌肉厚度、脂肪厚度、肥瘦肉比例等

续表 1

方法	优点	不足	主要作用
电子鼻与电子舌	客观、准确、快捷、重复性好、可分析有毒样品或成分、不会疲劳	过于依赖检测设备的稳定性,检测精度有待提高	鱼和肉等食品挥发气味的识别和分类,肉品新鲜度检测,肉品分级和掺假检测
电磁特性	快速、准确、操作设备简单、数据的获取和处理比较容易,不受场合地点限制	设备成本较高,检测样品品质指标范围有限,应用范围不广	测定肉内部化学成分组成、肉品新鲜度检测,通过电刺激提高肉的嫩度和品质
计算机视觉	能够获取样品的空间信息,识别样品的外部特征,检测准确度高于人工感官评价	样品外部特征信息的获取和利用有限,不能检测内部成分	判定胴体的嫩度、脂肪分布、肉色、纹理、pH值等综合指标
光谱技术	快速,无损,简单。无污染,提供样品内部成分的光谱特征信息	检测成本高,对含量较低的成分检测敏感性差,数据建模分析复杂	肉品内部化学成分和含量检测、感官品质的评定、产品鉴定等
高光谱成像技术	能够提供样品的内部成分光谱数据和外部特征的图像信息,品质参数可视化表达	成本较高。数据量较大,数据降维处理较复杂	肉品内部成分含量检测,肉的新鲜度、嫩度、腐败特征等检测

#### 4 总结与展望

每种检测技术都具有其特定的优势,如光谱技术可以有效获取样品内部丰富的成分含量信息,能实现对样品的内部组成结构进行快速无损检测。计算机视觉技术可以从样品的外观图像中挖掘出包含样品品质特征的信息,建立品质信息的定性或定量检测模型。而高光谱成像技术融合了光谱技术和计算机视觉技术的双重优势,并可以对检测到的肉品品质信息进行可视化表达。

随着光学成像技术、物联网技术以及计算机技术的不断发展和检测设备成本降低,以及系统数据处理性能的提升,开发肉类品质信息在线检测系统,特别是应用到生产线上的在线检测设备是未来所需要的。充分利用多元信息,将多种无损检测技术有机的融合,建立一个有效的肉和肉制品实时检测数据信息化系统,保证监测结果的时效性和准确性,使肉品的质量得到简单、快速、准确、全面的评价,在消费者的健康安全得到保障的同时也使商家获得利益,将是今后的研究重点。

#### 参考文献

- [1] 徐霞,成芳,应义斌. 近红外光谱技术在肉品检测中的应用和研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1876-1880.  
Xu X, Cheng F, Ying YB. Application and recent development of research on near-infrared spectroscopy for meat quality evaluation [J]. Spectrosc Spect Anal, 2009, 29(7): 1876-1880.
- [2] 彭彦昆,张雷蕾. 光谱技术在生鲜肉品质安全快速检测的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2010, 27(2): 62-71.  
Peng YK, Zhang LL. Advancement of rapid detection of meat quality and safety by using spectral imaging technology [J]. J Food Saf Qual, 2010, 27(2): 62-71.
- [3] 孔宪琴,黄素珍. 肉品品质的无损检测方法[J]. 肉类研究, 2008, (8): 66-69.  
Kong XQ, Huang SZ. Non-destructive measurement techniques for meat quality detection [J]. Meat Res, 2008, (8): 66-69.
- [4] 潘立刚,张缙,陆安祥,等. 农产品质量无损检测技术研究进展与应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 325-330.  
Pang LG, Zhang J, Lu AX, et al. Review on non-destructive determination technology for agricultural product quality [J]. T CSAE, 2008, 24(S2): 325-330.
- [5] Di W, Sun DW. Advanced applications of hyper-spectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review-Part I: fundamentals [J]. Innov Food Sci Emerg, 2013, 19: 1-14.
- [6] Di W, Sun DW. Advanced applications of hyper-spectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review-Part II: applications [J]. Innov Food Sci Emerg, 2013, 19: 15-28.
- [7] 王自明. 无损检测综合知识[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Wang ZM. Comprehensive knowledge on non-destructive determination [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [8] Abouelkaram S, Suchorski K, Buquet B, et al. Effects of muscle texture on ultrasonic measurements [J]. Food Chem, 2000, 69(4): 447-455.
- [9] Morlein D, Rosner F, Brand S, et al. Non-destructive estimation of the intramuscular fat content of the longissimus muscle of pigs by means of spectral analysis of ultrasound echo signals [J]. Meat Sci, 2005, 69: 187-199.
- [10] Fortin A, Tong AKW, Robertson WM, et al. A novel approach to grading pork carcasses: computer vision and ultrasound [J]. Meat Sci, 2003, 63(4): 451-462.
- [11] Prados M, García-Pérez JV, Benedito J. Non-destructive salt content prediction in brined pork meat using ultrasound technology [J]. J Food Eng, 2015, 154: 39-48.
- [12] Newcom DW, Baas TJ, Lampe F. Prediction of intramuscular fat percentage in live swine using real-time ultrasound [J]. J Anim Sci, 2002, 80(12): 3046-3052.

- [13] 姜晓文, 韩剑众. 生鲜肉品持水性的核磁共振研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(1): 322–325.  
Jiang XW, Hang JZ. LF-NMR studies of water-holding capacity in fresh meat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2009, 30(1): 322–325.
- [14] Aalhus JL, Larsen IL, Dubske PL, *et al*. Improved beef tenderness using a modified on-line carcass suspension method with or without low voltage electrical stimulation [J]. *J Anim Sci*, 2000, 80: 51–58.
- [15] Higbie AD, Bidner TD, Matthews JO, *et al*. Prediction of swine carcass composition by total body electrical conductivity (TOBEC) [J]. *J Anim Sci*, 2002, 80: 113–122.
- [16] Hanne CB, Idak S, Jens AJ, *et al*. Relationship between water mobility and distribution and sensory attributes in pork slaughtered at an age between 90 and 180 days [J]. *Meat Sci*, 2007, 77(2): 190–195.
- [17] 田晓静. 基于电子鼻和电子舌的羊肉品质检测[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
Tian XJ. Detection of mutton quality base on electronic nose and electronic tongue [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [18] 贾洪锋, 卢一, 何江红, 等. 肉类电子鼻识别模型的建立[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 96–99.  
Jia HF, Lu Y, He JH, *et al*. Prediction model of meat base on electric nose [J]. *Food Mach*, 2011, 27(3): 96–99.
- [19] Papadopoulou OS, Tassou CC, Schiavo L, *et al*. Rapid assessment of meat quality by means of an electronic nose and support vector machines [J]. *Procedia Food Sci*, 2011, 1(0): 2003–2006.
- [20] Zhang Z, Jin T, Donghui C, *et al*. Electronic nose with an air sensor matrix for detecting beef freshness [J]. *J Bionic Eng*, 2008, 5(1): 67–73.
- [21] 韩剑众, 黄丽娟, 顾振宇, 等. 基于电子舌的肉品品质及新鲜度评价研究[J]. 中国食品学报, 2008, 8(3): 125–132.  
Hang JZ, Huang LJ, Gu ZY, *et al*. Evaluation of quality and freshness base on the electronic tongue [J]. *J Chin Food Sci Technol*, 2008, 8(3): 125–132.
- [22] Luis G, Jose M, Isabel E, *et al*. An electronic tongue for fish freshness analysis using a thick-film array of electrodes [J]. *Microchim Acta*, 2008, 163: 121–129.
- [23] 孙大文, 吴迪, 何鸿举, 等. 现代光学成像技术在食品品质快速检测中的应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 59–68.  
Sun DW, Wu D, He HJ, *et al*. Applications of modern optical imaging technologies for rapid quality inspection of food products [J]. *J South China Univ (Nat Sci Ed)*, 2012, 40(10): 59–68.
- [24] Ngapo TM, Martin JF, *et al*. International preferences for pork appearance [J]. *Consum Choice Food Qua Prefer*, 2007, 18(1): 26–36.
- [25] Norman JL, Berg EP, Heymann H, *et al*. Pork loin color relative to sensory and instrumental tenderness and consumer acceptance [J]. *Meat Sci*, 2003, 65(2): 927–933.
- [26] Folkestad A, Wold JP, Rorvik KA, *et al*. Rapid and non-invasive measurements of fat and pigment concentrations in live and slaughtered Atlantic salmon (*Salmosalar L*) [J]. *Aquacult*, 2008, 280: 129–135.
- [27] Lin H, Jiewen Z, Quansheng C, *et al*. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision and electronic nose techniques [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 228–236.
- [28] Stien LH, Manne F, Ruohonene K, *et al*. Automated image analysis as a tool to quantify the color and composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.) cutlets [J]. *Aquacult*, 2006, 261: 695–705.
- [29] Zheng CX, Sun DW, Zheng LY. A new region-primitive method for classification of color meat image texture based on size, orientation, and contrast [J]. *Meat Sci*, 2007, 76(4): 620–627.
- [30] Xia J, Berg EP, Lee JW, *et al*. Characterizing beef muscles with optical scattering and absorption coefficients in VIS-NIR region [J]. *Meat Sci*, 2007, 75(1): 78–83.
- [31] Liu Y, Lyon BG, Windhaml WR. Prediction of color, texture, and sensory characteristics of beef steaks by visible and near infrared reflectance spectroscopy: a feasibility study [J]. *Meat Sci*, 2003, 65: 1107–1115.
- [32] 赵杰文, 翟剑妹, 刘木华, 等. 牛肉嫩度的近红外光谱法检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 640–642.  
Zhao JW, Zhai JM, Liu MH, *et al*. The determination beef tenderness using near- infrared spectroscopy [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2006, 26(4): 640–642.
- [33] Jackman P, Sun DW, Du CJ, *et al*. Prediction of beef eating quality from color-marbling and wavelet texture features [J]. *Meat Sci*, 2008, 80: 1273–1281.
- [34] Li J, Tan J, Shatadal P. Classification of tough and tender beef by image texture analysis [J]. *Meat Sci*, 2001, 57(4): 341–346.
- [35] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.  
Chu XL. Molecular spectroscopy analytical technology combined with chemometrics and its applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [36] 褚小立, 许育鹏, 陆婉珍. 用于近红外光谱分析的化学计量学方法研究与应用进展[J]. 分析化学, 2008, 36(5): 702–709.  
Chu XL, Xu YP, Lu WZ. Research and application progress of chemometrics methods in near infrared spectroscopic analysis [J]. *Chin J Anal Chem*, 2008, 36(5): 702–709.
- [37] Park B, Chen YR, Hruschka WR, *et al*. Principal component regression of near-infrared reflectance spectra for beef tenderness prediction [J]. *T CSAE*, 2001, 44: 609–615.
- [38] 刘魁武, 成芳, 林宏建, 等. 可见/近红外光谱检测冷鲜猪肉中的脂肪、蛋白质和水分含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 102–105.  
Liu KW, Cheng F, Lin HJ, *et al*. Visible/NIR analysis of fat, protein and water in chilled pork [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2009, 29(1): 102–105.
- [39] 田潇瑜, 徐杨, 彭彦昆, 等. 基于光谱技术的牛肉多品质参数快速检测模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 171–176.  
Tian XY, Xu Y, Peng YK, *et al*. Rapid detection model of beef quality base on spectroscopy [J]. *T CSAM*, 2013, 44(S1): 171–176.
- [40] Sowoidnich K, Schmidt H, Kronfeldt HD, *et al*. A portable 671 nm Raman sensor system for rapid meat spoilage identification [J]. *Vib Spectrosc*, 2012, 62: 70–76.
- [41] Daniel T, Berhe A, Anders J, *et al*. Accurate determination of endpoint temperature of cooked meat after storage by Raman spectroscopy and chemometrics [J]. *Food Control*, 2015, 52: 119–125.
- [42] Pedersen DK, Morel S, Andersen HJ, *et al*. Early prediction of water-holding capacity in meat by multivariate vibrational spectroscopy [J]. *Meat Sci*, 2003, 65(1): 581–592.
- [43] 刘木华, 蔡健荣, 周小梅. X射线图像在农畜产品内部品质无损检测中的应用[J]. 农机化研究, 2004, 02(074): 193–196.  
Liu MH, Cai JR, Zhou XM. The application of non-destructive inspection

- using X-ray imaging in internal quality of agriculture and poultry products [J]. *J Agric Mech Res*, 2004, 02(074): 193–196.
- [44] Karoui R, Blecker C. Fluorescence spectroscopy measurement for quality assessment of food systems-A review [J]. *Food Bioproc Technol*, 2011, 4: 364–386.
- [45] Tao Y, Ibarra JG. Thickness-compensated X-ray imaging detection of bone fragments in deboned poultry [J]. *Mod Anal ASAE*, 2000, 43(2): 453–459.
- [46] 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.  
Wang L, Qiao XY, Dong YE, *et al*. Application of hyper-spectral image technology in detecting agricultural product [J]. *J Appl Opt*, 2009, 30(4): 639–644.
- [47] 刘木华, 赵杰文, 郑建鸿, 等. 农畜产品品质无损检测中高光谱图像技术的应用进展[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(9): 139–143.  
Liu MH, Zhao JW, Zheng JH, *et al*. Review of hyperspectral imaging in quality and safety inspections of agricultural and poultry products [J]. *T CSAM*, 2005, 36(9): 139–143.
- [48] Di W, Dawen S, Yong H. Application of long-wave near infrared hyper-spectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2012, 16: 361–372.
- [49] Xiong ZJ, Dawen S, Xinan Z. Recent developments of hyper-spectral imaging systems and their applications in detecting quality attributes of red meats: a review [J]. *J Food Eng*, 2014, 132: 1–13.
- [50] Kamruzzaman M, ElMasry 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]. *Innov Food Sci Emerg*, 2012, 16: 218–226.
- [51] Talens P, Leticia M, Noha M, Douglas F, *et al*. Prediction of water and protein contents and quality classification of Spanish cooked ham using NIR hyper-spectral imaging [J]. *J Food Eng*, 2013, 117: 272–280.
- [52] Qiao J, Ngadi MO, Ning W, *et al*. Pork quality and marbling level assessment using a hyper-spectral imaging system [J]. *J Food Eng*, 2007, 83(1): 10–16.
- [53] Elmasry G, Dawen S, Allen P. Near-infrared hyper-spectral imaging for predicting color, pH and tenderness of fresh beef [J]. *J Food Eng*, 2012, 110: 127–140.
- [54] Xiong ZJ, Dawen S, Anguo X, *et al*. Quantitative determination of total pigments in red meats using hyper-spectral imaging and multivariate analysis [J]. *Food Chem*, 2015, 178: 339–345.
- [55] Lin D, Hongbin P, Dawen S. Combination of spectra and texture data of hyper-spectral imaging for prediction of pH in salted meat [J]. *Food Chem*, 2014, 160: 330–337.
- [56] 赵娟, 彭彦昆. 基于高光谱图像纹理特征的牛肉嫩度分布评价[J]. *农业工程学报*, 2015 31(7): 279–286.  
Zhao J, Peng YK. Distribution of beef tenderness grading based on texture feature by hyperspectral image analysis [J]. *T CSAE*, 2015, 31(7): 279–286.
- [57] 陈全胜, 张燕华, 万新民, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2602–2606.  
Chen QS, Zhang YH, Wan XM, *et al*. Study on detection of pork tenderness using hyperspectral imaging technique [J]. *ACTA Opt Sin*, 2010, 30(9): 2602–2606.
- [58] 成芳, 樊玉霞, 廖宜涛. 应用近红外漫反射光谱对猪肉肉糜进行定性定量检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2): 354–359.  
Cheng F, Fan YX, Liao YT. Qualitative and quantitative detection of minced pork quality by near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2012, 32(2): 354–359.
- [59] 朱逢乐, 章海亮, 邵咏妮, 等. 基于高光谱成像技术的多宝鱼肉冷藏时间的可视化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(7): 1938–1942.  
Zhu FL, Zhang HL, Shao YN, *et al*. Visualization of the chilling storage time for turbot flesh based on hyperspectral imaging technique [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2014, 34(7): 1938–1942.

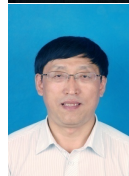
(责任编辑: 李振飞)

## 作者简介



杨东, 在读博士生, 主要研究方向为农业信息化技术。

E-mail: yangdong871216@sina.com



王纪华, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量检测技术与信息技术的交叉与集成。

E-mail: wangjh@nrcita.org.cn