Hans Journal of Food and Nutrition Science 食品与营养科学, 2026, 15(6), 657-665
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjfns
https://doi.org/10.12677/hjfns.2026.156068

Hans汉斯

光学无损检测技术在肉品掺假与新鲜度鉴别中的应用

谭　成*，杨　敏，李一诺，薛　智#，曾　淼

阿坝师范学院资源与环境学院，四川 阿坝

收稿日期：2026年9月28日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

肉品安全与质量是全球关注的焦点问题，其中掺假鉴别和新鲜度评估尤为重要。传统检测方法存在操作繁琐、耗时长且破坏样品等问题，难以满足现代肉品质量控制的快速、无损和大规模检测需求。本文系统总结了近红外光谱、高光谱成像、拉曼光谱及荧光光谱等光学无损检测技术在猪肉、牛肉等肉品掺假鉴别和新鲜度评估中的研究进展。通过分析这些技术与化学计量学方法结合构建的检测模型，展示了光学无损检测技术在多个肉品检测场景中均表现出高效、准确与环保的优势，尤其适用于复杂样品下的在线分析与实际应用，为肉品质量控制方法的相关研究提供参考。

关键词

光学无损检测，肉品掺假，新鲜度评估，近红外光谱，高光谱成像，拉曼光谱

Application of Optical Non-Destructive Detection Technologies in Meat Adulteration and Freshness Identification

Cheng Tan*, Min Yang, Yinuo Li, Zhi Xue#, Miao Zeng

College of Resources and Environment, Aba Teachers University, Aba Sichuan

Received: September 28, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 5, 2026

*第一作者。
#通讯作者。

文章引用: 谭成, 杨敏, 李一诺, 薛智, 曾淼. 光学无损检测技术在肉品掺假与新鲜度鉴别中的应用[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(6): 657-665. DOI: 10.12677/hjfns.2026.156068

Abstract

Meat safety and quality are issues of global concern, among which adulteration identification and freshness assessment are particularly important. Traditional detection methods suffer from drawbacks such as cumbersome operations, time-consuming processes, and sample destruction, making it difficult to meet the modern meat quality control demands for rapid, non-destructive, and large-scale detection. This paper systematically reviews the research progress of optical non-destructive detection technologies, including near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, Raman spectroscopy, and fluorescence spectroscopy, in the adulteration identification and freshness evaluation of meats like pork and beef. By analyzing the detection models constructed by combining these technologies with chemometric methods, it demonstrates that optical non-destructive detection technologies exhibit the advantages of high efficiency, accuracy, and environmental friendliness in various meat detection scenarios. They are especially suitable for online analysis and practical applications with complex samples, providing a theoretical reference for research related to meat quality and safety.

Keywords

Optical Non-Destructive Detection, Meat Adulteration, Freshness Assessment, Near-Infrared Spectroscopy, Hyperspectral Imaging, Raman Spectroscopy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

肉品作为重要的动物蛋白来源，其质量安全直接关系到消费者健康和市场秩序。近年来，全球范围内肉品掺假事件屡见不鲜，如以低价格肉品替代高价格肉品、冷冻–解冻肉替代冷鲜肉等。这类掺假行为不仅侵犯消费者权益，还可能引发健康问题(如无过敏原标识)、宗教冲突(如清真产品中无猪肉)和生活方式冲突(如素食或有机食品等) [1]-[3]。同时，肉品在储存、运输和销售过程中易受微生物污染，导致品质下降，甚至引发食源性疾病[4]。因此，建立快速、准确的肉品掺假鉴别和新鲜度评估方法对保障肉品质量和安全至关重要。

传统肉品检测方法包括 DNA 分析(酶联免疫吸附测定和聚合酶链式反应)、蛋白质组分析、化学分析(如挥发性盐基氮测定)和微生物培养等[5]-[10]。这些方法虽准确性较高，但存在样品破坏、操作复杂、耗时耗力等缺点，难以适应快节奏的工业生产和高频次的市场监督需求。此外，肉品经冷冻或加热后蛋白质变性和 DNA 破坏，会使部分传统方法失效。

随着光学技术的发展，无损检测技术因其快速、无损、在线检测的优势在肉品行业中得到广泛应用。近红外光谱、高光谱成像、拉曼光谱和荧光光谱等技术通过获取肉品与电磁辐射相互作用后的光谱响应，能够实现对肉品成分、品质和安全的无损评估[11] [12]。这些技术结合化学计量学方法，如偏最小二乘判别分析、人工神经网络、极端学习机和支持向量机等，可建立准确的定性判别和定量预测模型。随着人工智能和深度学习的发展，光学无损检测技术的可靠性和实用性进一步提高，为实现肉品质量的实时监测和智能控制提供了有力支持。图 1 总结了肉品光学无损检测技术：原理、特点与应用，后续部分给出更为详细的介绍。

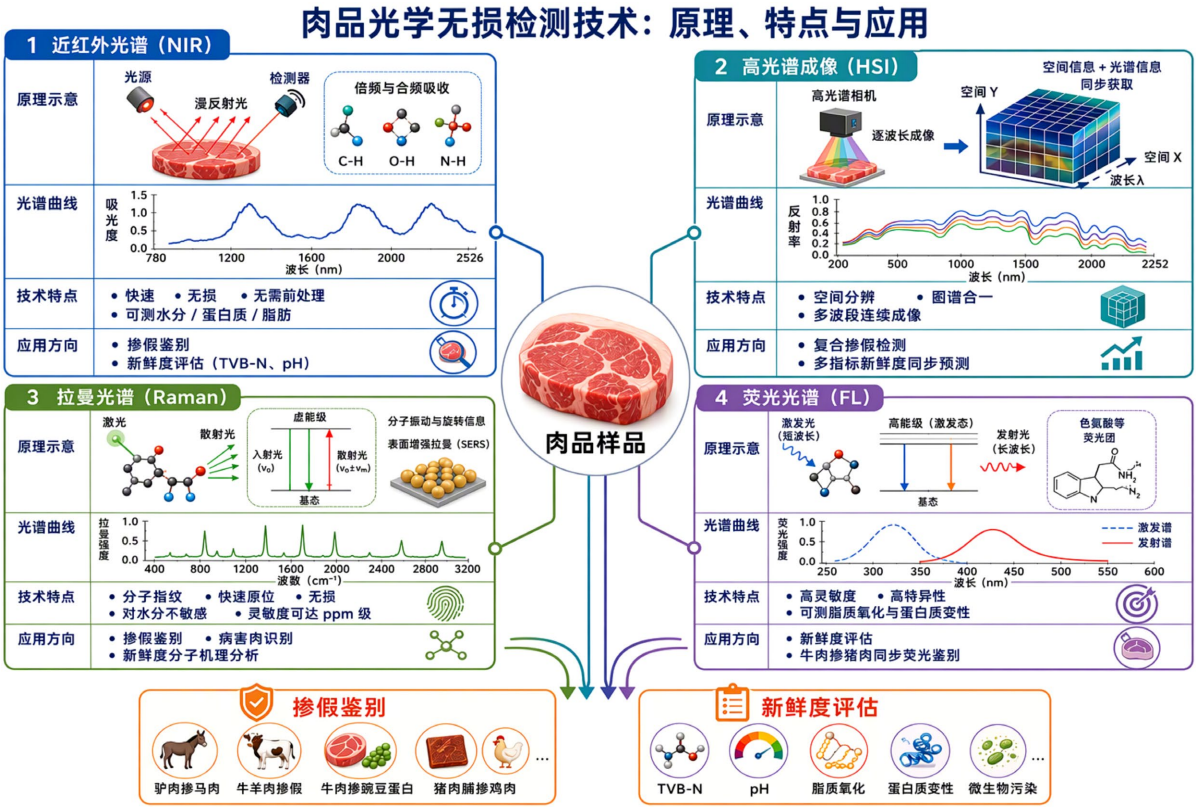


Figure 1. Optical non-destructive detection technologies for meat quality: principles, features, and applications
图 1. 肉品光学无损检测技术：原理、特点与应用

2. 近红外光谱技术

2.1. 技术原理与特点

近红外光谱技术是一种基于分子振动光谱的分析技术，其波长范围通常为 780~2526 nm (波数 12500~4000 cm^{-1})。近红外光主要吸收含氢基团(如 C-H、O-H、N-H)振动的倍频和合频，其中包含大多数有机化合物的组成和分子结构信息。在肉品检测中，近红外光谱技术能够快速获取水分、蛋白质、脂肪等成分的光谱信息，实现对肉品多种品质参数的同时分析。近红外光谱技术具有快速、无损、无需复杂前处理等优点，已被中国国家标准委员会认定为畜禽肉品质检测的标准方法。然而，该技术也面临样品不均匀性、灵敏度和准确性受限等挑战，需要精确校准和合适的参考物质以保证结果可靠性。

2.2. 在肉品掺假鉴别中的应用

近红外光谱技术在肉品掺假鉴别中已得到广泛应用。比如：对熟驴肉制品中易掺入马肉/骡肉的问题，牛晓颖等采用了近红外光谱技术进行鉴别，建立了熟驴肉、马肉、骡肉及其掺假样品的定性判别与定量分析模型。通过比较不同预处理方法下的线性判别分析、支持向量机等模型效果，并利用偏最小二乘法和神经网络优化定量模型，为熟驴肉掺假快速无损检测提供了可行方案[13]。张玉华等采用近红外光谱结合 PCA 与判别法、PLS 法，分别建立牛羊肉掺假定性、定量模型。定性模型预测准确率超 90%，定量模型验证相关系数高于 0.91，预测性能良好[14]。王婧茹等利用近红外高光谱成像技术结合偏最小二乘模型(PLSR)对牛肉掺入豌豆蛋白进行快速无损检测，取得好的结果[15]。冯嘉欣等基于近红外光谱(680~2600 nm)，采用 SG 平滑预处理和 CARS 特征波长提取，建立了 PLS 模型以快速判别冷鲜羊肉中鸡肉掺假水

平。该模型性能优异，校正集与验证集决定系数分别为 0.9993 和 0.8982，能有效定量检测不同肥瘦比羊肉的掺假情况[16]。总之，近红外光谱技术结合多种化学计量学方法，在驴肉、牛羊肉及牛肉掺假鉴别中均展现出优异的性能(见表 1)。这些研究案例充分证实了该技术作为一种快速、无损的检测手段，在肉品掺假鉴别领域具有广阔的应用前景和普适性。

Table 1. Examples of the application of near-infrared spectroscopy technology in meat adulteration detection
表 1. 近红外光谱技术在肉品掺假检测中的应用示例

应用场景	波长/波数范围	数据处理与建模方法	准确度/性能
驴肉掺马肉/骡肉	4000~12500 cm^{-1}	SNV, PLS-DA, BP-ANN	正确判别率 96.23%
牛肉和羊肉掺杂其它肉	4000~10000 cm^{-1}	SNV, MSC, PLS	正确判别率 90.76%
牛肉掺入豌豆蛋白	900~1700 nm	MAS, RC, SPA, PLS	RMSEP = 2.85%
羊肉中鸡肉	680~2600 nm	SGS-CARS-PLS, SVM	R^2 = 0.8982, RMSEP = 0.2843

2.3. 在肉品新鲜度评估中的应用

近红外光谱技术在肉品新鲜度评估中展现出显著优势，并已获得广泛应用。以猪牛肉为例，其新鲜度传统上依赖于挥发性盐基氮(TVB-N)含量和 pH 值等理化指标进行测定，而近红外光谱技术则为这些关键参数的快速、无损预测提供了高效解决方案[17]。研究表明，通过构建卷积神经网络等深度学习模型，能够从复杂的光谱数据中自动提取深层特征，显著提升 TVB-N 与 pH 值的预测精度与模型鲁棒性[18]。此外，结合支持向量回归(SVR)、偏最小二乘回归(PLSR)等机器学习算法，并辅以标准正态变量变换(SNV)、竞争性自适应重加权采样(CARS)等先进的光谱预处理与特征波长筛选策略，能够有效消除噪声干扰、浓缩核心信息，从而构建出性能稳健、预测准确的定量分析模型。这不仅为实现肉品品质的在线监控与实时评估提供了强有力的技术支撑，也进一步拓展了近红外光谱技术在食品无损检测领域的应用深度与广度。

3. 高光谱成像技术

3.1. 技术原理与特点

高光谱成像技术是一种结合成像和光谱技术的光学分析方法，可在紫外到近红外(200~2252 nm)光谱覆盖范围内，以几十至数百个波长同时对物体连续成像，实现物体的空间信息、光谱信息和光强度信息的同步获取[19]。HSI 生成的三维数据立方包含两个空间维度和一个光谱维度，能够同时提供样品的物理特性(如颜色、纹理、大小)和化学组成(如水分、脂肪、蛋白质分布)信息。与仅能捕获三个宽波段(红、绿、蓝)的传统 RGB 相机或缺乏空间信息的传统近红外光谱相比，高光谱成像技术在肉品品质评估中具有明显优势，能够实现实时和空间分辨的检测。

3.2. 在肉品掺假鉴别中的应用

高光谱成像技术在肉品掺假鉴别中表现出强大潜力。高光谱成像技术在肉制品掺假检测中的应用正从单一掺假向复杂复合掺假深入。比如，马永波等针对牛肉糜掺假，提出一种稀疏高光谱特征选择算法，有效降低了数据维度，所建模型分类准确率优于全波段及传统特征提取方法[20]。孔丽琴等则首次聚焦于生/熟牛肉丸中猪肉－鸡肉的复合掺假问题，研究发现基于 SPA 或 CARS 特征波长建立的 ELMC 模型对生、熟牛肉丸均能取得 97%以上的高分类准确率[21]。两项研究共同表明，结合智能优化算法的特征选择

是高光谱技术实现快速、精准鉴别肉品掺假的关键。近红外与高光谱技术通过耦合高效的化学计量学算法，已能实现对肉品单一及复合掺假的精准定性判别与定量分析。该领域的研究趋势正从单一物种鉴别向复杂多组分掺假检测深化，从生鲜肉品向深加工制品拓展。特征波长选择与智能优化算法的深度融合，是破解高维光谱数据冗余、提升模型稳健性与效率的关键。未来，随着深度学习等先进算法的引入以及便携式检测设备的开发，该技术有望从实验室走向生产线与市场现场，为构建更智能、高效的肉品质量安全监管体系提供核心技术支撑。

3.3. 在肉品新鲜度评估中的应用

高光谱成像技术在肉品新鲜度评估中的应用也十分广泛(见表 2)。在肉品新鲜度无损检测领域，高光谱成像与先进机器学习算法的结合持续深化。李丹阳等针对羊肉多个新鲜度理化指标，创新性地提出了 ERC-RF 多任务特征提取算法[22]。该算法通过集成回归链与随机森林，有效利用了指标间的相关性进行加权特征选择，在将特征波段从 125 个显著压缩至 31 个的同时，预测模型的决定系数(R^2)高达 0.975，实现了多指标的高精度同步预测。无独有偶，罗毅智等人则将宽度学习系统(BLS)引入猪肉 TVB-N 和 pH 值的预测中[23]，研究发现，采用混合筛选的特征波长结合 BLS 模型，取得了优异的预测性能(TVB-N 的 Rp = 0.9422，RPD = 2.80)，为快速无损检测提供了新方案。上述研究清晰地表明，高光谱技术在肉品新鲜度评估中的应用正从单一指标预测迈向多任务、多指标协同分析的新阶段。其核心发展驱动力集中于两点：一是特征波长选择算法的持续优化，旨在以更少的光谱变量承载更丰富的品质信息，从而提升模型效率与稳健性；二是预测模型的创新与引入，如多输出回归器和宽度学习系统等，这些模型在处理复杂非线性关系或实现快速计算方面展现出独特优势。未来，探索更高效的特征选择框架与更强大的轻量化算法，将是推动该技术实现现场实时检测与产业化的关键。

Table 2. Application examples of hyperspectral imaging in meat adulteration and freshness detection
表 2. 高光谱成像技术在肉品掺假与新鲜度检测中的应用示例

检测对象	数据处理与建模方法	主要结果
牛肉糜掺假	稀疏高光谱特征选择	分类效果优于全波段和传统特征提取方法
生/熟牛肉丸中猪肉–鸡肉复合掺假	SPA/CARS 特征波长 + ELMC	生、熟样品分类准确率均在 97%以上
牛肉丸掺假	高光谱成像结合化学计量学	可用于牛肉丸掺假识别
羊肉新鲜度多指标预测	ERC-RF 多任务特征提取	特征波段由 125 个减至 31 个，R^2 达 0.975
猪肉 TVB-N 与 pH 预测	混合筛选特征波长 + BLS	TVB-N 的 Rp = 0.9422，RPD = 2.80

4. 拉曼光谱技术

4.1. 技术原理与特点

拉曼光谱技术是一种基于非弹性光散射的振动光谱技术，当激光照射样品时，部分光子与分子发生非弹性碰撞，交换能量导致频率变化，从而产生拉曼散射。拉曼光谱能够提供分子振动和旋转信息，对于分析化学成分和分子结构具有独特优势。拉曼光谱技术具有快速、原位、无损伤检测和无需处理样品的特点，在肉类工业中的应用受到越来越多关注。表面增强拉曼光谱技术通过使用特殊基底增强拉曼信号，可将检测灵敏度提升至 ppm 级，适用于微量污染物检测[24]。

4.2. 在肉品掺假鉴别中的应用

拉曼光谱技术凭借其快速、无损及对水分干扰不敏感等独特优势，已成为肉类掺假无损检测领域的重要工具。研究表明，该技术结合化学计量学方法，能有效实现对不同肉类掺假情况的精准鉴别。例如，在猪肉脯中掺入鸡肉的检测中，通过多元散射校正预处理并结合竞争性自适应重加权算法筛选特征波长，所建立的偏最小二乘法定量模型性能优异，预测集决定系数高达 0.9762，判别模型对预测集样本的总体正确率也达到 98.33% [25]。类似地，该技术也被成功应用于牛肉馅中掺入鸡肉的判别，采用主成分分析结合支持向量回归所建模型也表现出色[26]。此外，拉曼光谱在区分健康与病害羊肉方面也展现出潜力，通过提取精细化光谱特征并结合卷积神经网络模型，可将识别准确率提升至 95.5% [27]。当前研究充分证实了拉曼光谱技术在肉类掺假鉴别中的有效性与应用潜力。其核心优势在于能够无损、快速地提供肉品分子指纹信息。然而，该技术的进一步发展有赖于更优的光谱预处理与特征选择算法，以提升模型的稳健性与解释性。未来，拉曼光谱技术与深度学习等更先进算法的深度融合，以及面向现场检测的便携式设备的开发，将是推动该技术实现从实验室走向产业应用的关键方向(见表 3)。

Table 3. Application examples of Raman spectroscopy in meat adulteration and freshness detection
表 3. 拉曼光谱技术在肉品掺假与新鲜度检测中的应用示例

检测对象	数据处理与建模方法	主要结果
猪肉脯中掺伪鸡肉	多元散射校正 + 竞争性自适应加权 + PLS	预测集 $R^2 = 0.9762$，判别正确率 98.33%
猪瘦肉新鲜度检测	SNV + PLSR；回归系数法筛选特征波段	TVB-N 预测 Rp = 0.948；20%变量下 Rp = 0.933
绿原酸对金枪鱼色泽的保鲜作用	拉曼光谱分析肌红蛋白 α-螺旋比例	对照组下降 39.2%，处理组下降 28.0%

4.3. 在肉品新鲜度评估中的应用

拉曼光谱技术在肉类品质检测中的应用正从掺假鉴别向新鲜度评估等核心品质指标深入拓展。研究表明，便携式拉曼光谱仪结合化学计量学模型，在猪肉新鲜度快速无损检测中展现出强大潜力。通过 SNV 等预处理方法优化光谱数据，建立的 PLSR 模型对关键指标 TVB-N 的预测相关系数高达 0.948；进一步采用回归系数法筛选特征波段，仅用 20%的变量即可达到相近的预测精度(Rp = 0.933)，显著提升了检测效率 [28]。此外，拉曼光谱的深层价值在于能够从分子层面揭示品质变化的机理，例如在研究绿原酸对金枪鱼肉色泽的保鲜作用时，该技术通过分析肌红蛋白的 α-螺旋比例变化(对照组下降 39.2%，处理组仅下降 28.0%)，直观阐明了其稳定蛋白质二级结构、延缓品质劣变的保鲜机制[29]。上述进展标志着拉曼光谱技术在肉品检测领域的应用日趋成熟和深化。其核心优势不仅体现在快速、无损的现场检测能力上，更在于其能够同时实现宏观品质的定量预测与微观机理的定性解析。该技术的进一步发展将更加侧重于便携式设备与云端模型的集成，以实现更广泛的现场实时检测；同时，光谱数据与分子结构变化的深度关联解读，将为精准调控肉品品质、开发新型保鲜剂提供至关重要的理论依据和技术支撑。

5. 荧光光谱技术

5.1. 技术原理与特点

荧光光谱属于发射光谱。样品分子吸收特定波长的激发光后跃迁到激发态，再回到基态时释放出波

长更长的荧光。肉品中本身含有多种能产生荧光的组分，比如色氨酸、核黄素、卟啉类物质，以及脂质氧化过程中生成的部分产物。这些组分的荧光行为会随着蛋白质降解、脂肪氧化和微生物繁殖而改变，所以荧光光谱能够从分子层面捕捉肉品品质劣变的信息[30]。和近红外光谱依赖含氢基团振动吸收不同，荧光光谱的特点是灵敏度高、选择性好、响应速度快，对脂质氧化和蛋白质构象变化尤其敏感。不过，荧光信号容易受温度、pH、氧气含量和样品基质的影响，荧光猝灭和自吸收也会干扰测定。因此实际应用中，通常要借助化学计量学手段来增强模型的稳定性。

5.2. 在肉品掺假鉴别中的应用

在掺假鉴别方面，李月等[1]利用同步荧光光谱对牛肉中掺杂猪肉的问题进行了研究。他们通过筛选最佳波长差(160 nm)，把牛肉和猪肉之间的荧光差异有效地放大出来，并在此基础上建立了 SVM 定性判别模型和 PLS 定量模型。结果显示，定性判别准确率达到 92.31%，定量模型的预测集相关系数为 0.9590，均方根误差为 0.0927。同步荧光的好处在于，它能把复杂的三维荧光数据简化，提取出判别力更强的信息，既保证了识别效果，也降低了操作难度，为后续开发现场快速筛查方法提供了思路。

5.3. 在肉品新鲜度评估中的应用

在新鲜度评估方面，荧光光谱已有一些值得关注的尝试。史策等[30]把氮掺杂石墨烯量子点和便携式检测装置结合起来，搭建了一套面向猪肉新鲜度的实时荧光检测系统。该系统利用量子点荧光信号对贮藏过程中挥发性盐基氮等指标的变化作出响应，实现了现场、实时的无损检测。这项工作说明，荧光光谱不一定局限于实验室台式仪器，借助纳米荧光探针和小型化装置，同样具备走向市场快检场景的潜力(见表 4)。

Table 4. Application examples of fluorescence spectroscopy in meat adulteration and freshness detection
表 4. 荧光光谱技术在肉品掺假与新鲜度检测中的应用示例

检测对象	数据处理与建模方法	主要结果
牛肉中掺杂猪肉	SVM 定性判别 + PLS 定量分析	定性判别准确率 92.31%；定量模型预测集 $R^2 = 0.9590$，RMSE = 0.0927
猪肉新鲜度	量子点荧光信号响应 TVB-N 等指标	实现现场、实时、无损检测

6. 总结与展望

6.1. 技术总结

光学无损检测技术在肉品掺假鉴别和新鲜度评估中展现出巨大潜力。近红外光谱技术已被广泛研究并应用于食品新鲜度检测领域。高光谱成像技术通过结合空间和光谱信息，能够实现更精准的掺假鉴别和品质评估。拉曼光谱技术凭借其分子特异性，在化学成分分析和微量污染物检测中具有独特优势。荧光光谱技术则对新鲜度相关指标具有高灵敏度。这些技术与化学计量学方法结合，能够建立准确的定性判别和定量预测模型，为肉品质量安全控制提供有效工具。随着人工智能和深度学习的发展，光学无损检测技术的预测可靠性和实用性进一步提高，为实现肉品质量的实时监测和智能控制提供了有力支持。

6.2. 挑战与展望

尽管光学无损检测技术在肉品检测中已经取得不少进展，但要从实验室走向生产线和市场现场，还有几道现实门槛需要跨过去。

模型转移与校正。光谱模型通常是在特定仪器和条件下建立的，一旦更换仪器或测量环境，模型性能往往明显下降。目前常用的解决思路有几类：直接校正法通过建立主仪器和从仪器之间的光谱映射关系，把从仪器光谱变换到主仪器空间，常见方法有斜率/偏差校正和分段直接标准化；模型更新法在从仪器上采集少量代表性样品，对原有模型的截距或回归系数进行修正；迁移学习法则借助域适应思想，通过特征对齐缩小主从仪器之间的分布差异。几种方法各有适用条件，实际应用中需要根据仪器差异程度和样品数量选择合适的策略。

微型化与便携化。便携设备是推动技术走出实验室的关键，但目前的手持式光谱仪还有明显短板。一是光谱范围受限，不少便携近红外设备只覆盖 900~1700 nm，而肉品中蛋白质、脂肪和水分相关的信息往往分布在更宽波段内，覆盖不全就会丢信息。二是信噪比和分辨率不足，受限于微型光栅、探测器和光源功率，短积分时间下光谱重复性和稳定性较差，影响定量精度。三是现场环境光干扰和样品表面不均匀性会进一步恶化光谱质量。因此，便携设备需要在微型光谱仪设计、光源稳定性、抗环境光算法和现场校准方法上取得突破，而不是简单把台式机做小。

经济成本。高光谱成像和拉曼光谱系统的核心部件价格较高，部分还依赖进口，设备初始投资和维护费用都不低，中小型肉品加工企业和基层监管部门很难大规模配置。相比之下，近红外和荧光光谱设备成本相对可控，更适合便携化和普及。此外，模型开发、数据标注和人员培训等隐性投入也不容忽视。如果检测成本高于掺假或品质劣变带来的潜在损失，企业就缺乏采用动力。未来一方面要推动核心部件国产化，降低硬件成本；另一方面要发展低成本的模型迁移和共享方案，减少企业重复建模的负担。

法规标准。光学无损检测属于间接检测方法，目前还不能完全替代 DNA 分析、微生物培养等法定仲裁手段。要把光谱检测纳入肉品质量安全监管体系，就需要明确它的法律效力、检测限、误判率和复检程序。目前近红外光谱已被认定为国家标准方法，但高光谱成像、拉曼光谱和荧光光谱在肉品检测中还缺少统一的样品制备、光谱采集、模型评价和仪器校准规范。不同研究之间光谱范围、预处理方法和评价指标差异较大，结果难以横向比较，也影响模型转移和仪器互换。未来需要建立覆盖仪器性能、光谱采集、数据处理和模型验证等环节的标准体系，让技术应用有据可依。

标准化与智能化。当前研究多为实验室阶段，不同团队采用的光谱范围、预处理方法和建模算法差异较大，导致结果难以横向比较，模型可重复性和可移植性也受影响。要推动规范化应用，需要统一样品制备和光谱采集流程、制定仪器性能评价和校准规范、建立公共光谱数据库和标准样品体系。同时，现有 PLSR、SVM、ELM、CNN 等模型多数依赖大量标注样本，对品种、部位、加工方式和贮藏条件变化比较敏感，换一批样品性能就可能打折扣。小样本学习、迁移学习和自监督学习是值得尝试的方向，目标是降低对大规模标注数据的依赖，提高模型在不同肉品体系中的泛化能力。

总的来看，光学无损检测技术快速、无损、环保，正在成为肉品掺假鉴别和新鲜度评估的重要工具。但技术优势要真正转化为产业应用和监管能力，还需要在模型转移、便携化、成本控制、法规标准和标准化等方面持续投入。随着技术不断成熟，这些技术在保障肉品质量安全、维护消费者权益和促进行业健康发展方面，会扮演越来越重要的角色。

基金项目

阿坝师范学院创新创业训练项目(20262101320)和阿坝师范学院——多氯联苯类污染物研究团队项目(AS-KCTD2023-08)。

参考文献

[1] 李月, 林义利, 周云云, 等. 基于同步荧光技术的牛肉中掺杂猪肉鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024,

44(10): 2968-2972.

[2] 谢心如, 张德权, 李少博, 等. 电子鼻气敏传感器的工作原理及其在肉品掺假中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(3): 60-66.

[3] 何鸿举, 王魏, 马汉军, 等. 近红外光谱技术在肉品掺假检测方面的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 345-350, 356.

[4] 陈嘉词, 肖斌, 钟轲, 等. 微流控技术在肉品质量安全检测中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(3): 51-59.

[5] 陈勇勇, 黄世会, 牛熙, 等. 11种肉及肉制品动物源性成分PCR检测技术[J]. 中国动物检疫, 2023, 40(5): 107-114.

[6] 徐文娟. 基于PCR原理的常见肉品快速真伪鉴别技术探讨[J]. 食品界, 2021(9): 123.

[7] 冯小珍. 肉类食品中掺假成分的分子检测与鉴定方法探讨[J]. 食品安全导刊, 2025, 19(28): 147-149.

[8] 刘红涛. 畅通举报渠道 统筹协调联动强力推进制售假冒伪劣肉制品专项整治[J]. 中国食品安全, 2025(8): 26-27.

[9] 程月红, 师景双, 高喜凤, 等. 肉制品源性成分检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 157-165.

[10] 徐婷钰, 杜佳特, 胡晓欣, 等. 基于qPCR进行肉类掺假检测的研究进展[J]. 中国法医学杂志, 2025, 40(4): 468-473.

[11] 柴迎慧, 俞玥, 宋嘉慧, 等. 近红外光谱技术结合化学计量学用于畜禽肉制品品质分析的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3098-3105.

[12] 肖洪兵, 郭培源, 王瑜. 基于深度学习的高光谱腊肉营养安全分级[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 275-281.

[13] 牛晓颖, 牟晓晴, 孙杰, 等. 熟驴肉掺假近红外定性及定量检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(7): 1993-2001.

[14] 张玉华, 孟一, 姜沛宏, 等. 近红外技术对不同动物来源肉掺假的检测[J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 316-319, 334.

[15] 王婧茹, 何鸿举, 朱亚东, 等. 基于近红外高光谱技术快速检测豌豆蛋白掺假牛肉[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 312-317.

[16] 冯嘉欣, 李志刚, 张小栓. 近红外光谱下冷鲜羊肉中鸡肉掺假鉴别分析[J]. 食品科技, 2022, 47(7): 284-290.

[17] 任智磊, 赵霄霄, 冯景, 等. 基于近红外光谱结合网格搜索-随机森林-自适应提升算法无损检测牛肉新鲜度[J]. 肉类研究, 2025, 39(11): 1-8.

[18] 谢安国, 纪思媛, 李月玲, 等. 基于遗传算法和深度神经网络的近红外高光谱检测猪肉新鲜度[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 345-351.

[19] 孙宗保, 王天真, 李君奎, 等. 高光谱成像的牛肉丸掺假检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(7): 2208-2214.

[20] 马永波, 彭玉, 徐艺萍, 等. 基于稀疏高光谱特征选择算法的牛肉糜掺假检测[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 51-56.

[21] 孔丽琴, 牛晓虎, 王程磊, 等. 高光谱技术在牛肉丸复合掺假类型鉴别中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(8): 2183-2191.

[22] 李丹阳, 姜新华, 李靖, 等. 基于ERC-RF高光谱波长选择的羊肉新鲜度相关指标的预测[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 1-11.

[23] 罗毅智, 唐书奇, 金青婷, 等. 高光谱成像与混合波长选择的宽度学习系统预测猪肉TVB-N含量和pH值[J]. 食品科学, 2025, 46(16): 345-352.

[24] 王耀, 孙莹莹, 景钰冰, 等. 表面增强拉曼光谱法灵敏检测鸡肉中拉沙洛西残留[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 299-305.

[25] 杨佳硕, 邵怡璐, 曾佐凤, 等. 拉曼光谱法快速检测猪肉脯中的掺伪鸡肉[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 9-15.

[26] 韩爱云, 张振冉, 解立斌, 等. 拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(7): 50-54.

[27] 王新怡, 董鹏程, 罗欣, 等. 拉曼光谱在肉品质预测与控制中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 294-302.

[28] 董鑫鑫, 杨方威, 于航, 等. 基于拉曼光谱技术的猪瘦肉新鲜度快速无损检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(2): 484-488.

[29] 朱文慧, 范茂梅, 韩梦琳, 等. 绿原酸对蓝鳍金枪鱼肌肉品质及肌红蛋白构象的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 398-408.

[30] 史策, 侯梦园, 杨信廷, 等. 基于氮掺杂石墨烯量子点的便携式猪肉新鲜度实时荧光检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 512-521.