DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250919001
引用格式: 杨若歆, 张朵朵, 普巴扎西, 等. 肉及肉制品掺假快速检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 279–288.
YANG RX, ZHANG DD, PUBA ZX, *et al*. Research progress of rapid detection technologies for adulteration of meat and meat products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 279–288. (in Chinese with English abstract).

肉及肉制品掺假快速检测技术研究进展

杨若歆[1], 张朵朵[1], 普巴扎西[2], 李　昱[2], 刘永峰[*]

(1. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安　710119;
2. 西藏自治区食品药品检验研究院, 拉萨　850000)

摘　要: 我国肉类消费总量持续位居世界首位, 且随着人均消费量稳步增长, 肉类食品安全与真实性已超越单纯的产品质量问题, 成为关乎公共健康、市场秩序、消费者权益乃至社会稳定的重大民生议题。掺入劣质肉、廉价肉是目前市面上肉及肉制品掺假的主要表现形式, 隐藏着潜在的食品安全性问题和宗教冲突隐患。传统检测技术在肉及肉制品掺假鉴别应用中存在显著局限性, 主要表现为对设备要求高、检测效率低下和结果可靠性和精确度不足, 这严重制约了现场质量控制工作的深入开展。本文重点介绍了针对掺入劣质肉、廉价肉的肉及肉制品的快速检测方法并根据检测目标进行分类, 并综述了各检测方法原理及其研究现状、应用进展和展望, 以期为研发更加快速、准确的检测技术提供依据。

关键词: 肉; 掺假; 快速检测

Research progress of rapid detection technologies for adulteration of meat and meat products

YANG Ruo-Xin[1], ZHANG Duo-Duo[1], PUBA Zha-Xi[2], LI Yu[2], LIU Yong-Feng[*]

(1. *College of Food Engineering and Nutritional Science*, *Shaanxi Normal University*, *Xi'an* 710119, *China*;
2. *Xizang Institute for Food and Drug Control*, *Lhasa* 850000, *China*)

ABSTRACT: China has consistently ranked first in the world in total meat consumption, and with steady growth in per capita consumption, meat safety and authenticity have evolved beyond mere product quality concerns to become public livelihood issues impacting public health, market order, consumer rights and even social stability. The adulteration of meat and meat products by incorporating inferior or cheaper meats represents the primary form of adulteration in the current market, posing potential food safety risks and even religious conflict concerns. Traditional detection technologies exhibit notable limitations in identifying such adulteration, mainly characterized by high equipment requirements, low detection efficiency and insufficient reliability and accuracy of results, which severely restrict their practical application in in-field quality control. This article focused on rapid detection methods for meat

收稿日期: 2025-09-19
基金项目: 西藏自治区科技计划项目(XZ202402ZY0006); 陕西省科技计划项目(2025NC-YBXM-179); 陕西省农业科技创新项目(NYKJ-2025-(XA)28); 西安市科技计划项目(24NYGG0017)
第一作者: 杨若歆(2003—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为肉品科学与营养。E-mail: 20252707@snnu.edu.cn
***通信作者:** 刘永峰(1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为畜产品科学与营养。E-mail: yongfeng200@126.com

and meat products adulterated with inferior or cheap meats, categorizing them based on detection targets, and reviewed the principles, research status, application progress and future prospects of various detection techniques, aiming to provide a foundation for developing faster and more accurate detection technologies.

KEY WORDS: meat; adulteration; rapid detection

0 引 言

如今肉及肉制品的生产流通环节日趋复杂，掺假现象也随之成为行业监管与学术研究的突出问题，其品质和安全直接关系到公众的健康与消费权益。掺假既包括成分代替，如将低价肉类混入高价品种以牟取暴利，也涉及非法添加非食用肉类成分、来源欺诈、加工过程改变等行为[1]。其中，成分代替和添加非肉类成分最为普遍，尤其是掺入廉价肉或非肉类成分的牛羊肉制品。这些行为不仅造成了巨大的经济损失、破坏了市场的公平竞争，更可能对特定民族的宗教信仰构成侵害，进而导致民族关系紧张。

目前，已广泛使用的肉及肉制品掺假检测方法如传统聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)技术和质谱法等，主要存在着效率低下、样本前处理复杂、检测方法覆盖范围有限、检测结果准确性不稳定、设备成本与便携性矛盾、标准化与智能化程度低等问题，已不能满足快速高精度检测及现场检测的需求。

本文系统综述了肉及肉制品中劣质肉、廉价肉类掺假的快速检测方法，深入分析当前技术发展水平、应用现状及进展，旨在为开发高效精准的快速检测体系提供理论支撑和技术参考。

1 基于 DNA 的肉品掺假快速检测技术

1.1 荧光实时定量 PCR 技术

由于肉中蛋白质在加工处理过程中遇到高温或高压易变性和降解，因此基于 DNA(脱氧核糖核酸)的检测方法对于加工肉制品来说更为稳定和可靠[2]。PCR 技术基于其快速、灵敏度高、简便、可靠等特点，已经发展成为一种成熟的食品掺假检测技术[3]。其中，PCR 技术及其衍生出的相关技术，尤其是荧光实时定量聚合酶链式反应(real-time quantitative PCR, qPCR)技术已成为肉制品掺假快速检测的常规方法。尽管传统 PCR 方法已被广泛应用，但其操作流程复杂，检测周期较长，对实验人员技能要求高，限制了其进一步应用。相比之下，qPCR 技术更能够快速准确地鉴定肉品中的物种来源成分，在扩增的同时即可进行检测，通常在 1.5 h 内即可完成检测，无需后续的电泳步骤，并实现掺假比例的定量分析。

JONKER 等[4]使用 qPCR 技术用于牛肉、猪肉、马肉、羊肉、鸡肉和火鸡肉的混合物检测，该法能够将检测灵敏度降至 0.05%，通过调整循环次数后甚至可检测到低至 0.01% (wt%)的物种含量。YANG 等[5]建立了一种能够快速定量的 qPCR 法，能够在 4 min 内完成核酸提取，随后在 25 min 内直接扩增 DNA 样本，最终检测精度变异系数小于 4%，还能识别出 0.00001% (wt%)的牛肉成分，具有高特异性，为现场检测食品中的牛肉成分提供了一种快速方法。WANG 等[6]使用 qPCR 技术检测掺入猪肉的山羊肉，排除了传统定性方法的假阳性干扰，且在山羊肉含量 5%~80% (wt%)内均可准确检测出结果。作为核酸检测的“金标准”，该法目前已被广泛应用于食品来源定量检测及其他检测方法的准确性验证实验。

目前，qPCR 技术也常用于与多种技术结合检测掺假肉及肉制品，如与 TaqMan 探针技术结合。YADAV 等[7]使用基于 TaqMan 多重探针的 qPCR 技术快速鉴定鸡肉、猪肉、绵羊肉和山羊肉等肉类的 DNA，并显示出高灵敏度，检出限低至 0.1 pg/μL，后续成功应用于 19 种商业肉制品分析。此外，基于 TaqMan 探针的 qPCR 技术也成功应用于市售牦牛肉制品的真实性鉴定。WANG 等[8]建立了一种基于 TaqMan 探针技术的 qPCR 体系的方法，以实现肉及加工肉制品中牦牛源性成分的高效鉴别，该法可检出混合掺假肉样中质量分数低至 0.001%的牦牛成分所对应的微量 DNA 目标序列。这样的结合技术能够快速、特异地发出荧光信号，使检测结果更加可视化，甚至同时精准检测多个物种样品，已越来越得到广泛应用。

qPCR 技术凭借高灵敏度和定量精准的核心优势，目前仍是肉类掺假鉴定的主流技术。然而，该技术对仪器依赖高、流程复杂，难以满足现场快速检测需求。未来应当通过深度融合人工智能技术革新，可优化引物设计、自动判读结果，并与微型化 qPCR 设备结合，将有力推动该技术向智能化、便携化方向发展，实现对更广泛食源性成分的精准、快速、现场检测。

1.2 多重 PCR 技术和多重 qPCR 技术

随着 PCR 技术在肉制品检测领域的引入，多重 PCR 法也逐渐成为肉类掺假鉴别的重要方法。与常规 PCR 法的根本区别在于，多重 PCR 在单一反应中可同时扩增多个不同的靶基因/DNA 序列，因而只需一次运行即可获得多种信息，效率更高。SOARES 等[9]使用双重 PCR 较为准确地检测出了掺假比例为 1.0%、2.5%、7.5%、20.0%和 40%的猪肉，检测灵敏度为 0.1%，并且具有较高的可重复性(变异系数从 4.1%到 7.6%)。LI 等[10]使用多重 PCR 技术，根据不同物种在线粒体 12S rRNA 上的特异性变异位点，成功

实现了对牦牛、水牛、黄牛、猪、羊、鸡、兔、鸭、狗 9 个物种的鉴定。蒋志伟等[11]开发了一种灵敏快速的多重 PCR 检测技术, 用于同时鉴定 6 种常见食用肉类(包括牛肉、羊肉、鸡肉、猪肉、鹅肉及鸭肉), 并进行模拟混合样品检测, 结果表明该法在鸭肉和牛肉混合比例低至 0.5%的情况下, 仍能有效检出鸭肉成分。

与定性和半定量为主的多重 PCR 技术不同, 多重 qPCR 技术是在多重 PCR 的基础上, 在扩增反应的每个循环中实时监测荧光信号, 并以实现精确定量为目标的一种检测方法。李宇等[12]针对牛肉及其深加工制品中掺假鸭肉、猪肉等建立了一种四重 qPCR 方法的肉类掺假检测体系, 该法快速精准、灵敏稳定, 对生肉样品最低检出限可达 10 fg/μL, 对各烹饪处理(包括油炸、烧烤、水煮及微波处理)的样品添加比例最低检出限度为 0.1%, 能够实现对多种肉类成分的同步鉴别。LIU 等[13]提出了一种新型多重聚合酶链式反应-三侧流试纸集成方法, 能够同时准确地定量检测掺假肉类样本中的鸡肉、鸭肉和猪肉成分, 这 3 种目标成分的检出限分别为 0.1%、0.5%和 0.05% (wt%), 对非目标成分也未显示出假阳性, 具有良好的可靠性和应用前景。CHANG 等[14]采用多重 qPCR 法检测加工牛肉制品, 并在从 11 个参考样品中获得了预期结果, 并在 34 种牛肉制品中识别出两个标示为不含牛肉的牛肉样本, 显示出强大的可靠性和准确性。总的来说, 该法不仅自动化程度高, 无需后续处理, 速度更快, 且污染概率极低, 能够做到同时精确定量多种样品成分。

多重 PCR 技术和多重 qPCR 技术虽能检同步检测多种靶标, 但检测中必经的两大步骤——定量从检查标本中分离的 DNA, 以及在 qPCR 扩增中测定 DNA 量——仍然使其相对其他快速检测技术耗时较长, 且其复杂的 DNA 提取方式限制了其在现场快速检测中的应用, 未来需要将朝着一体化、自动化的方向发展, 致力于将核酸提取、扩增与检测步骤集成于微流控芯片或便携式设备中, 实现“样本进-结果出”的快速检测目标。

1.3　等温扩增技术

等温扩增技术是一类在恒定温度下实现核酸高效扩增的技术体系, 主要包括重组酶聚合酶扩增(recombinase polymerase amplification, RPA)、环介导等温扩增(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)、核酸序列依赖扩增、滚环扩增、解旋酶依赖扩增、交叉引物扩增、指数扩增反应技术。这些技术通过不同机制实现核酸扩增, 在肉品检测中各具特点, 其中以 RPA 技术与 LAMP 技术在检测速度方面更具优势。

1.3.1　RPA 技术

在以上技术中, RPA 技术以其反应速度快(15~20 min)并兼具操作简便、成本低廉、常温可操作等优点, 已成为现场快速筛查的选择, 但其引物设计的复杂、对抑制物敏感, 导致在复杂肉制品基质中检测的稳定性和重现性可能不足, 且试剂成本较昂贵。程雅妮等[15]使用基于 RPA 技术结合核酸杂交侧流层析试纸条的多重可视化检测技术, 通过重组酶介导的恒温核酸扩增(25~42 ℃)结合胶体金标记的核酸杂交试纸条, 实现肉眼可视化的多重检测, 成功鉴别出了驴肉及其制品中的鸡、猪、马源性成分, 为其他肉类及其制品的快速检测提供理论参考与实践可行的解决方案。LIU 等[16]开发了一种能在 21 min 内完成的检测工作流程, 集成了基于微针的 DNA 提取、RPA 技术和多色核酸杂交侧向流动条, 非常适用于非专业操作员进行现场快速检测。JANUDIN 等[17]使用结合 RPA 与碘化丙烷染料的独特方法, 实现了 0.005~100 ng/μL 的线性检测范围, 且对无交叉反应的猪 DNA 检出限低至 0.005 ng/μL, 快速且灵敏, 已成功得到市场应用。

与定性或半定量的 RPA 技术存在些许不同, 双链重组酶聚合酶扩增(digital recombinase polymerase amplification, dRPA)及多重复合酶聚合酶扩增(multiplex recombinase polymerase amplification, mRPA)技术能够对掺假比例进行精确定量分析, 在 RPA 的基础上更加数字化地监测变化趋势或检测微小差异。ZHAO 等[18]建立了一种 dRPA 结合规律成簇间隔短回文重复序列(CRISPR/Cas12a-Cas12a)检测分析方法, 对 36 份牦牛肉制品的盲样进行检测并确认, 该 dRPA-Cas-Cas 系统可在 1 h 内快速准确地鉴定牦牛肉制品中的牛和牦牛成分, 且对牛源性和牦牛源性成分均具有良好的鉴定特异性, 为牦牛肉制品现场快速检测提供了一种可行性方法。LIU 等[19]开发了一种能同时准确检测猪肉和马肉在驴肉中掺假的多重 RPA-表面增强拉曼散射-双色侧流核酸杂交试纸一体化检测验证平台, 对马肉和猪肉的最低检出率为 0.01% (wt%), 成功在 26 min 内完成真驴产品的鉴定。LIU 等[20]将 mRPA 分析法与多色核酸杂交侧流试纸结合, 同时检测羊肉中鸡肉和鸭肉成分, 对鸡肉和鸭肉的最低检出限都为 0.01%, 并成功用于鉴定 59 种商业肉类制品, 有望得到大规模应用。RPA 与核酸杂交侧流试纸结合的方法能够将检测结果更加快速、可视化, 这使得 RPA 技术在未来现场快速检测应用中具有巨大潜力。

在食品掺假检测领域, RPA 技术与便携式荧光探测器的联用技术正日益受到关注, 二者能够协同实现检测流程的自动化。为进一步提升该系统的效能与智能水平, 未来研究的关键在于与人工智能技术深度融合: 利用机器学习算法深度解析复杂的光谱数据, 并借助计算机视觉识别和预测检测过程中的异常, 从而突破其在智能危害预测和诊断方面的瓶颈。

1.3.2　LAMP 技术

LAMP 技术是一种新型核酸扩增技术, 其核心机制依赖于具有链置换特性的 Bst DNA 聚合酶, 该酶可在恒定温

度下催化模板 DNA 的解链, 无需热循环步骤就可通过设计 4~6 条特异性引物, 识别靶标模板上的 6~8 个不同区域, 从而实现高效、高特异性的核酸扩增[21]。该技术显著简化了操作流程, 试剂消耗量低, 检测时间仅 40 min。但 LAMP 检测技术中的引物设计较复杂, 并且容易受到少量非特异性扩增或引物二聚体的影响而形成假阳性的情况, 干扰实验结果。

ZHAO 等[22]使用 LAMP 技术与羟基萘酚蓝联合的方法针对牦牛肉中可能存在的掺假成分进行鉴定, 该方法对肉样中牦牛源性 DNA 的检出限可达 1 pg/μL。陈珍金[23]创新性地将 LAMP 技术与微流控芯片技术相整合, 设计了一种基于恒温扩增原理的、适用于检测肉及肉制品中牛、羊、鼠源性成分的 LAMP 检测方法, 对黄牛肉、山羊肉的最低检出限为 0.1 fg/μL, 对水牛肉、绵羊肉的最低检出限为 1 fg/μL, 不仅能够同时鉴别牛源性和羊源性成分, 还优化了实验操作, 降低了检测成本。XIONG 等[24]使用 LAMP 技术与通用分子信标耦合的方式, 对大西洋鳕鱼进行快速和序列特异性鉴定, 不仅能够快速、视觉可辨别目标鱼种, 还能够很大程度地减小引物二聚体引起的假阳性症状, 最低可检测含量低至 0.1 pg 的大西洋鳕鱼。FANG 等[25]设计了一种集成 LAMP 技术放大和检测的装置, 能检测到掺假样品中低至 0.1%的猪肉, 并在便携性、成本效益和多功能性方面具有巨大优势。CHONG 等[26]构建了一个基于 LAMP 技术与簇状规则间隔短回文重复序列系统(CRISPR)耦合的即时检测平台, 不仅集成了 LAMP 的高效指数扩增能力和 CRISPR 的高特异性识别能力, 减少了假阳性结果, 并且从样品采集到 1 h 内即可实现肉眼定性检测, 对牛肉中猪肉二元混合物的检测灵敏度高达 0.05%, DNA 检出限为 50 pg/μL, 是单个 LAMP 检测的 10 倍。该技术尤其适用于资源有限或需要快速现场决策的场景, 为传统 PCR 技术提供了强有力的互补和替代方案。

总体来说, LAMP 技术虽具快速、便携优势, 但其引物设计复杂、假阳性严重, 但在多重靶标检测、复杂样本适应性及结果智能判读方面仍存在许多不足。当前在“大食物观”的倡导下, 随着新资源食品的不断涌现, 更加复杂的样本将给 LAMP 技术带来很大的挑战。未来, 应将 LAMP 与人工智能深度融合: 利用机器学习模型优化引物设计以覆盖新资源物种, 并通过计算机视觉自动分析荧光曲线, 最终集成于便携设备, 实现非实验室环境下的快速精准、智能、现场检测, 为其实现进一步扩大市场应用开辟道路。

以上这些技术组合在一起, 构成了多层次的核酸快速检测技术体系, 丰富并完善了肉及肉制品掺假快速检测的可行性方法。上述方法的详细原理及优缺点对比见表 1。

2 基于化学成分组分的肉品掺假快速检测技术

2.1 光谱法

光谱法包括近红外光谱法、拉曼光谱法、高光谱成像技术等, 这些方法的基本原理都是利用不同肉类内组分(如蛋白质、脂质等)对特定波长光的吸收、反射或散射特性的差异, 并通过分析光谱特征来鉴别肉类的种类和掺假情况。光谱法的普遍优势在于快速、对样品无损、适合大批量筛查, 但需建立标准数据库, 对复杂混合样本的定量分析仍存在挑战。

2.1.1 近红外光谱法

近红外光谱法使用波长范围 700~2500 nm 的红外光谱, 对肉品内组分(如水分、脂肪含量)进行快速、无损的定量分析, 该法的核心优势在于其能够迅速地分析, 单个样品的实际光谱采集时间仅需 30 s 至 2 min。

张宁等[27]使用近红外光谱法结合簇类独立软模式法, 有效区分了来自 4 类产地的羊肉, 该方法不仅解决了羊肉产地真实性鉴定的技术难题, 同时为保障羊肉产品质量安全开辟了新的技术途径。陈迎丽等[28]开发了一种结合欧氏距离法或因子化法的近红外光谱技术, 以实现牛肉掺假成分的快速、高精度鉴别, 在分别对掺有猪肉和鸡肉的两组牛肉样本中的掺假成分进行定性分析时, 达到了 94%与 96.67%的准确率, 展现出优异的识别性能。CHEN 等[29]结合近红外光谱法和根基函数基于网络的集合算法识别掺假牛肉, 准确率、灵敏度和特异性分别高至 91.9%、95.7%和

表 1 基于 DNA 的肉及肉制品掺假快速检测技术优缺点对比

Table 1 Comparison of the advantages and disadvantages of DNA-based rapid detection technologies for meat and meat products adulteration

技术名称	原理	优点	缺点	
qPCR 技术	DNA 的半保留复制	高灵敏度、高特异性、污染风险低	试剂成本高、操作流程复杂、需专业操作人员、耗时相对较长	[4–8]
多重 PCR 技术、多重 qPCR 技术	DNA 的半保留复制	高灵敏度、高特异性、适用范围广	耗时相对较长、操作流程复杂、需专业操作人员	[9–14]
RPA 技术	在常温下的核酸快速扩增	快速、操作简便、设备便携、常温可操作	引物设计复杂、易受到污染、试剂成本较高	[15–20]
LAMP 技术	在恒定温度下的 LAMP 技术	快速、特异性高、成本低廉、效率高	难适应复杂样品、引物设计复杂、易假阳	[21–26]

94.3%。WANG 等[30]的研究表明, 采用该方法检测掺有不同比例猪肉、牛心及牛脂的牛肉样品时, 其识别准确率高达 99%, 从而验证了该技术在鉴定牛肉中同源掺假物的可行性。BAI 等[31]基于近红外光谱构建了羊肉中猪脂掺假量的定量分析模型, 其预测值与真实值高度相关(R=0.9138), 不仅实现了掺假比例的准确识别, 也证实了该方法在鸭肉掺假鉴定中的适用性。该技术凭借其快速、无损、绿色环保的核心优势, 已成为肉品掺假现场筛查与在线监控领域极具潜力的工具之一, 为保障肉品真实性与质量安全提供了高效的技术支撑。

近红外光谱技术目前主要面临着模型普适性差及易受污染等难题。未来, 应当通过与人工智能技术深度融合, 并利用深度学习挖掘潜藏特征、优化建模以实现模型更新, 推动该技术向高精度、通用化的智能分析系统演进, 为食品真实性监管提供更强大的技术支撑。

2.1.2　拉曼光谱法

拉曼光谱法是基于非弹性散射原理建立起来的分子结构表征光学测量技术, 通过检测分子振动和转动引起的拉曼散射信号, 分析肉类中的蛋白质、脂肪等成分, 具有显著的高特异性。拉曼光谱法还具有无损、快速的特点, 已处理好的单个样品, 其光谱采集和初步分析可在 1~10 min 内完成。但拉曼光谱法在检测过程中易受到复杂食品基质的潜在光谱干扰, 制约了该方法在微量分析中的敏感性。拉曼光谱法在肉类掺假检测方面的应用起步较晚[32], 目前文献报道多集中在牛肉的品质检测和掺假检测, 其他肉类掺假检测较少[33]。

张延宁[34]开发了一种基于主成分分析-支持向量机方法的拉曼光谱分类模型, 用于检测牛肉糜中的掺假猪肉, 结果显示该法对质量分数为 10%以上的掺假样本具有可靠的检出能力, 在测试集中准确度达到 98.9%, 为肉类真实性快速鉴别提供了新的分析策略。SOWOIDNICH 等[35]开发了一种对特定动物肉类进行无损鉴定的拉曼结合主成分分析法, 根据不同肉类肉肌红蛋白含量, 以及芳香氨基酸色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸的拉曼波段强度不同和位置的微小差异, 实现了对牛肉、鸡肉、火鸡肉与猪肉的准确鉴别, 在两个激发波长下, 肉类物种明显分为 4 个不同的组。IQBAL 等[36]使用近红外光谱法和拉曼光谱法针对掺假猪肉丸(3%~100%)和纯牛肉肉丸进行检测, 结果显示拉曼光谱法比近红外光谱法在检测掺假和未掺假样本方面表现更为平衡, 并且能提供更多的脂肪和蛋白质含量化学信息。综上可知, 该技术不仅能有效区分不同动物物种, 还能灵敏地检测出肉品中的外来蛋白, 在成分溯源与化学性掺假识别方面展现出显著潜力。

目前, 拉曼光谱技术仍受限于荧光干扰弱、复杂基质中信号解析困难等瓶颈。未来, 其发展方向可瞄准利用深度学习算法自动识别并扣除荧光背景, 智能精准鉴别多组分, 从而使其更适用于复杂新型食品基质的快速、智能分析工具。

2.1.3　高光谱成像技术

高光谱成像技术可将光子和化合物之间相互作用产生的光谱特征与空间特征相结合, 可同时分析肉类的化学成分和空间分布, 提高检测准确性[37]。使用该技术完成一个样品的扫描仅需几秒到几分钟, 在食品真实性鉴别领域具有重要应用价值, 目前已被广泛应用于肉类、谷物等农产品的品质监控与真伪鉴别研究。

孔丽琴等[38]利用高光谱成像技术, 首次提出了对熟牛肉丸复合掺假的快速检测, 建立的极限学习机分类和支持向量分类的掺假鉴别模型对熟牛肉丸的校正集和预测集的分类准确率分别为 97.17%和 96.23%, 对生牛肉丸的校正集和预测集的分类准确率均为 97.17%。LI 等[39]开发了一种基于高光谱反射和透射融合技术的牛肉糜掺假检测技术, 基于该原理构建的多元散射校正-支持向量机模型对牛肉与分别掺入鸡肉、鸭肉和猪肉的牛肉样品进行定性判别的准确率高达 99.73%, 能够快速灵敏地将牛肉和各个掺假样品进行区分。RADY 等[40]使用高光谱成像技术定量检测牛肉糜和猪肉糜中植物和动物源性掺假成分, 对除了牛肉样品外的所有掺假物都显示出相对较强的预测性能, 且样本数量越大, 结果就越好。孔丽琴等[38]使用高光谱成像技术结合极限学习机模型识别和分析掺入不同比例鸡/猪肉的生/熟牛肉丸的掺假状况, 该法分类精度达 97, 校准集和预测集分别为 17%和 96.23%。PU 等[41]结合高光谱成像技术与卷积神经网络来区分新鲜和冷冻解冻牛肉样本, 准确率达 88.89%, 且不同州的牛肉样本均得到了良好的可视化, 为不同州的牛肉提供了非破坏性快速追踪的检测方法。综上所述, 高光谱成像技术通过同步获取样本的空间形态信息与光谱信息, 实现了对肉品品质与真伪的无损检测, 在肉品品种精准鉴别方面展现出独特价值。

高光谱成像技术设备成本高昂、操作相对复杂, 限制了其在生产线和市场监管现场的快速普及。此外, 该技术也面临数据量大、解析速度慢及复杂新资源食品特征提取等困难, 该困难可通过利用人工智能自动挖掘光谱-空间特征、实现快速精准鉴别, 推动其发展为搭建高通量、智能化食品真伪与品质分析平台。

2.2　核磁共振波谱法

核磁共振波谱法广泛应用于食品鉴定和食品质量监测[42]。该法能够提供丰富的分子结构信息, 为肉类真实性鉴别提供了新的技术途径。核磁共振波谱法可保持样品完整性, 同时实现多组分同步测定, 具有优异的实验重现性, 且单次检测耗时较短。

胡艺骞等[43]利用低场核磁共振二维指纹谱技术对市售多类肉松制品实现了快速鉴别与检测, 成功以非破坏性方式有效区分了猪肉、鸡肉、牛肉、鱼肉等单一或混合肉源制成的丝状产品, 识别过程迅速且结果可靠, 较好地契合了当前食品行业与政府监管机构在产品质量控制与真伪

鉴别方面的实际需求。WAGNER 等[44]使用非靶向 ^{1}H 核磁共振光谱法和基质辅助激光解吸电离技术结合多元统计法，以 N-3 脂肪酸、多元不饱和脂肪酸、一些特定氨基酸、富马林酸和苹果酸作为区分野猪肉的显著标志成分，成功清晰地区分出了野猪和家猪及其加工肉制品。DECKER 等[45]通过 ^{1}H 核磁共振光谱和后续多变量数据成功鉴别了实验中选用的 98%的分析生肉样本和 97%的加工肉类产品，证明该法能够有效确定生肉和加工肉制品的动物种类。YANG 等[46]同样使用 ^{1}H 核磁共振技术和多元统计方法证明生河豚肉与熟河豚肉中的 11 种代谢物具有显著差别(P<0.05)，解释了生肉和熟河豚肉的味道差异。JAKES 等[47]使用基于 60 MHz ^{1}H 核磁共振波谱获得的甘油三酯特征，成功区分鲜牛肉(76 次萃取)和马(62 次提取物)样本，且冷冻保存不会对分析结果产生不利影响，证明其是一种可行的高通量生肉筛选方法。可见，该法已成为肉品掺假与真实性研究中定性与定量分析的可靠方法，为识别复杂、未知的掺假形式提供了可行方式。

核磁共振波谱法凭借其无损、高重现性等优势，在肉类掺假鉴别领域展现出巨大潜力，未来的应用重心应从实验室精准鉴别向现场快速筛查过渡。通过建立标准化数据库并与人工智能深度结合，该技术有望实现对复杂掺假模式的智能解析与预警，成为构建全链条食品安全监管体系的有力支撑。

以上 4 种基于化学成分组分的快速检测方法的原理及优缺点对比结果如表 2 所示。

3 其他肉品掺假快速检测技术

3.1 传感器技术

3.1.1 生物传感器技术

生物传感器技术在肉类掺假检测领域展现出显著的技术优势，其核心原理在于利用高度特异性的生物识别元件(如抗体、核酸探针或适体)，通过与目标物种的特征性生物标志物(如物种特异性蛋白质或 DNA 序列)的特异性结合，并将结合产物通过换能器转化为可定量检测的物理化学信号(如电信号、光学信号)，再借助智能化的信号处理系统进行分析和判断，从而实现对肉类物种成分的精准、灵敏鉴别。但该技术对温度较敏感，可适用的样品较局限，且高精度的仪器设备较昂贵。

王心一等[48]基于不对称 PCR 技术(asymmetric PCR, As-PCR)与 G-四链体的结构特性，建立了一种 G-四链体比色生物传感器，能够快速、精准地鉴定肉制品中的羊源性成分，在混合肉样中对羊源性物质的检测稳定性良好，最低能够可靠检出的质量分数为 5%。LI 等[2]开发了一种荧光生物传感器，并以 MIL-101(Cr)作为纳米猝灭剂；该传感器对于骆驼肉中掺杂的猪肉残留物，显示出 42 pmol/L 猪源性特异性基因的低检出限和 0.45%的掺假猪肉质量比。ZHAO 等[49]开发了一种机器学习支持的 CRISPR/Cas12a 数字单分子微滴生物传感器，可在 80 min 内完成对深加工肉类中的猪肉和鸭肉成分，未来有望用于快速食品的真实性检测及其他核酸检测。该技术将生物识别与信号转换一体化，在现场化、快速化检测具有革命性应用潜力。

与化学传感器(如电子鼻/舌)相比，生物传感器最大的优势在于其极高的特异性和出色的灵敏度。它直接针对物种独有的生物标志物(特定蛋白质或 DNA 序列)，因此结果准确可靠，抗干扰能力强，是进行定性检测的强大工具，未来可通过与微流控、人工智能技术融合，并向精准化、智能化方向发展，有望在现场监管中得到进一步应用。

3.1.2 化学传感器技术

化学传感器通过识别肉类在掺假后产生的具有特征性的挥发性有机物或化学成分变化，并将其转换为可读的电信号，从而实现快速鉴别。化学传感器中适用于检测掺假肉类的主要是电子鼻技术和电化学传感器技术，该两种技术都拥有检测速度快、重现性好、准确率高等优点，但目前只用于进行掺假定性检测，并不能准确检测出掺假比例。

(1)电子鼻技术

许文娟等[50]采用电子鼻检测技术，并结合主成分分析方法，成功对牛肉、猪肉以及掺入猪肉的假牛肉样品实现了有效区分，只需对试样进行 70 s 的检测就能达到高达 97.5%的准确率，适用于现场快速检测。JIA 等[51]提出了一种基于数据融合方法，将电子鼻技术与近红外光谱法联用，以准确

表 2 基于化学成分组分的肉及肉制品快速检测技术优缺点对比

Table 2 Comparison of the advantages and disadvantages of rapid detection technologies for meat and meat products based on chemical components

技术名称	原理	优点	缺点	参考文献
近红外光谱法	物质对 700~2500 nm 近红外光的吸收特性	快速、操作简便、绿色环保、无损	普适性差、易受干扰	[27–31]
拉曼光谱法	拉曼散射效应	无损快速、样品适应性广、简单、易使用	易受干扰、仪器成本较高	[32–36]
高光谱成像法	光谱技术、成像技术	快速准确、能够无损大面积检测	数据量庞大、设备成本高、体积大	[37–41]
核磁共振波谱法	基于蛋白质、脂质组分差异	可保持样品完整性、可多组分同步测定、实验重现性好、单次检测耗时短	缺乏统一标准、设备价格昂贵	[42–47]

识别掺假羊肉, 检测准确率达到 98.59%, 均高于电子鼻技术和近红外光谱法单独分析时的准确率。ZHANG 等[52]通过结合电子鼻技术与近红外光谱法构建定量模型, 精准鉴定了猪肉、鸡肉与鸭肉的不同混合比例(0%、20%、40%、60%、80%、100%), 整体识别准确率超 96%。该技术为肉品真实性与品质的无损筛查提供了一种新颖且高效的技术途径。

电子鼻能够灵敏地检测肉类挥发物因组织成分变化而产生的变化[53], 但其不能定量检测的缺点, 需要用与其他技术结合(如近红外光谱法)的方式弥补。这种结合方法能够有效提升结果的准确性与可靠性, 并为食品行业提供更优越的决策支持, 但电子鼻与近红外光谱联用技术在肉类掺假等领域的研究基础仍较为薄弱, 有待更加系统、深入的后续研究。

(2)电化学传感器技术

电化学传感器技术通过将目标分析物的特异性识别过程直接转化为可量化的电流、电位或阻抗信号。MANSOURI 等[54]开发了基于锁核酸探针的电化学基因传感器用于驴肉掺假鉴定, 锁核酸探针能够固定于电极表面捕获目标 DNA 并产生可测电信号, 从而快速识别目标序列, 该法定量限低至 148 pmol/L。FLAUZINO 等[55]提出了一种基于石墨烯酸的无标记阻抗型基因传感器用于猪肉成分鉴定, 可检测出牛肉样本中 9% (*m*/*m*)的猪肉掺假, 且能够在 45 min 内完成检测。可见该技术为肉品掺假检测提供了一种灵敏度高、响应快速、设备成本低且易于微型化的解决方案, 在痕量化学掺假物筛查和便携式现场检测领域显示出巨大潜力。

目前已有多种电化学生物传感器被开发用于食品的掺假鉴别, 该技术在食品真实性鉴别领域具有良好的发展前景。未来研究可聚焦于传感器微型化发展, 例如将电化学发光生物传感器与智能手机等移动设备集成, 实现实时分析, 提升食品鉴定的便捷性与效率。

3.2　电子显微镜技术

电子显微镜技术, 是指用形态学的方法, 通过电子显微镜(包括扫描电镜和透射电镜)对肌肉样本的超微结构进行观察, 系统比较不同物种骨骼肌纤维排列方式、结缔组织分布特征以及骨组织显微构造等关键形态学指标。该法因其操作简单常作为对肉类来源鉴定的初步判断, 但需要固定、脱水等复杂的前处理过程及配备高精度设备和专业操作人员, 并不适用于大批量筛查, 且只适用于定性分析, 故尚未实现规模化应用, 在肉及肉制品检测研究上的应用也较少。目前该技术主要作为辅助验证手段, 与分子生物学方法形成互补。在欧盟法规中, 是唯一被欧盟认可的检测动物源性成分的官方方法(EU 2017/2468)[56], 用于区分各种哺乳类、禽类、鱼类等及其肉制品。ABD-ELHAFEEZ 等[57]使用特殊组织化学染色法对样品进行处理, 并在扫描电子显微镜下检查不同细胞类型、结构和微生物, 成功识别出肉制品中的食品添加剂晶体, 且相同种类的低价和高价肉类产品在质量上没有显著差异。该技术能够清晰揭示不同物种肌肉纤维的微观形态差异(如直径、横纹结构)、结缔组织分布特征, 并可直接识别掺入的外源性非肉组分, 在基于形态学差异的掺假鉴别与确证方面具有无可辩驳的权威性。

电子显微镜技术虽能提供高分辨率图像, 但其样本制备复杂、检测过程耗时且难以捕捉动态生物信息制约了其进一步应用。未来可与人工智能图像分析技术深度融合, 对大量的电子显微镜图像进行训练, 建立自动识别和分类模型, 以提升其在食品微观结构研究中的效率和分析能力。

以上几种快速检测方法的原理及优缺点对比结果如表 3 所示。

表 3　其他技术应用于肉及肉制品掺假快速检测技术的优缺点对比

Table 3　Comparison of the advantages and disadvantages of other technologies for meat and meat product adulteration

技术名称	原理	优点	缺点	参考文献
生物传感器技术	生物分子识别元件与物理化学换能器的协同作用	分析时间短、灵敏度高、特异性好、抗干扰能力强	温度敏感性高、实际样本适用性低、高精度设备成本高	[2,48–49]
化学传感器技术	识别特征性挥发性有机物或化学成分变化, 转换为可读电信号并鉴别	无需对样品前处理、检测速度快、重现性好、准确率高	只能定性检测	[50–55]
电子显微镜技术	不同物质的超微结构存在区别	快速、高分辨率, 可进行多组分检测	难以计算掺假比例、单个样品耗时长、需要专业操作人员和高精度设备	[56–57]

4　结束语

本文系统综述了当前肉及肉制品掺假检测的快速检测技术, 包括 qPCR、多重 PCR、光谱法、核磁共振波谱法、传感器技术、电镜技术。目前这些方法在检测速度、灵敏度和便携性等方面已取得显著进展, 能够有效支撑市场监管与安全保障。然而, 各类技术仍存在其固有瓶颈, 如快速与准确定量、高通量与开发难度、无损快速与模型依赖性、现场便捷与测量精度之间的矛盾, 制约了其更广泛的应用。

随着“大食物观”顶层战略的引领，新食物资源的不断涌现，以及以人工智能为代表的新兴技术的深度融合，未来的检测对象将远超传统的畜禽类动物，昆虫蛋白、人造培养肉、植物基肉制品等新食物资源走向市场，势必增加食品安全监管的难度和复杂性，这对掺假检测技术的准确度、灵敏度、速度要求也将更加严格。肉及肉制品掺假检测未来的研究方向应当向着一体化、自动化持续推进，不仅要开发高灵敏度、准确度的现场快速检测技术，还要推动检测设备向着便携式、易操作，和低成本的方向发展，以促进其在市场监管、企业自控等场景中的实际应用；研究精确定量掺假的技术将是下一阶段的重中之重，更为精确的量化数据可为监管和司法实践提供有力的支撑；同时，为了弥补单一技术的缺陷，“联用技术”(如电子鼻技术与近红外光谱法联用)将成为未来的主流，为保障肉类食品安全提供更加有力的技术支撑。

参考文献

[1] BALLIN NZ. Authentication of meat and meat products [J]. Meat Science, 2010, 86(3): 577–587.

[2] LI JM, SUN Q, TUYATSETSEG J, *et al*. Rapid identification of adulterated camel meat by MIL-101(Cr)-based fluorescent sensing platform: Surface potential adjustment to optimize detection performance [J]. Microchemical Journal, 2024, 200: 110476.

[3] KIM M, YOO I, LEE SY, *et al*. Quantitative detection of pork in commercial meat products by TaqMan® real-time PCR assay targeting the mitochondrial D-loop region [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 102–106.

[4] JONKER KM, TILBURG JJHC, HAGELE GH, *et al*. Species identification in meat products using real-time PCR [J]. Food Additives and Contaminants, 2008, 25(5): 527–533.

[5] YANG YY, WANG JN, SUN YJ, *et al*. Simple and rapid identification of beef within 30 min using a new food nucleic acid release agent combined with direct-fast qPCR [J]. Food Chemistry, 2024, 46(1): 140473.

[6] WANG ZC, WANG ZY, LI TT, *et al*. Real-time PCR based on single-copy housekeeping genes for quantitative detection of goat meat adulteration with pork [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55(2): 553–558.

[7] YADAV SS, TARIQ R, PADHY PK, *et al*. A multiplex DNA probe-based method for simultaneous identification of adulteration in meat samples [J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2024, 8: 100200.

[8] WANG P, YUE H, YANG HR, *et al*. DNA-based authentication method for detection of yak (*Bos grunniens*) in meat products [J]. Food Composition and Additives, 2013, 96(1): 142–146.

[9] SOARES S, AMARAL JS, MAFRA I, *et al*. Quantitative detection of poultry meat adulteration with pork by a duplex PCR assay [J]. Meat Science, 2010, 85: 532–536.

[10] LI ZN, JIANG MF, WEN YL, *et al*. Multiplex assay for identifying animal species found in the tibetan area using the mitochondrial 12S rRNA gene [J]. Animal Biotechnology, 2018, 29(1): 75–80.

[11] 蒋志伟, 夏若成, 陶瑞旸, 等. 鉴别6种常见食用肉类的多重PCR检测体系的构建及验证[J]. 法医学杂志, 2024, 40(3): 254–260.
JIANG ZW, XIA RC, TAO RY, *et al*. Establishment and validation of a multiplex PCR detection system for the identification of six common edible meat components [J]. Journal of Forensic Medicine, 2024, 40(3): 254–260.

[12] 李宇, 时国强, 柳梦思, 等. 一种牛肉及其制品掺假的快速鉴定方法[J]. 食品科技, 2023, 48(11): 268–275.
LI Y, SHI GQ, LIU MS, *et al*. A rapid identification method for adulteration of beef and its products [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(11): 268–275.

[13] LIU RL, LAN HZ, WU Z, *et al*. A triple lateral flow strip assay based on multiplex polymerase chain reaction for simultaneous detection of chicken, pork and duck in adulterated meat [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 137: 106968.

[14] CHANG LJ, FU CP, HUANG P, *et al*. Reliable multiplex real-time PCR method for detecting adulteration in processed beef products [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 143: 107595.

[15] 程雅妮, 孙林瑶, 王晴, 等. 双拖尾恒温扩增结合核酸杂交侧流层析试纸条高通量快速检测驴肉中的掺假动物源性成分[J/OL]. 食品工业科技, 1-17. [2025-07-19]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040095
CHENG YN, SUN LY, WANG Q, *et al*. Nucleic acid hybridization-lateral flow strip combined with double tailed isothermal amplification for high-throughput rapid detection of adulterate animal-derived components in donkey meat [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-17. [2025-07-19]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040095

[16] LIU HB, YUAN Y, TIAN H, *et al*. Lateral flow biosensor utilizing self-assembled DNA-multicolor Au/Ag nanoassemblies and dual-tailed RPA for on-site triplex detection of chicken duck and pork adulteration in beef [J]. LWT, 2025, 232(15): 118425.

[17] JANUDIN AAS, MOHD-NAIM NFB, CHEE LY, *et al*. A novel recombinase polymerase amplification approach with propidium iodide reporter for rapid detection of porcine adulteration in food [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 135: 106620.

[18] ZHAO G, WANG J, YAO CY, *et al*. Alkaline lysis-recombinase polymerase amplification combined with CRISPR/Cas12a assay for the ultrafast visual identification of pork in meat products [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132318.

[19] LIU HB, CAO TT, WANG J, *et al*. Accurate and simultaneous detection of pork and horse meat adulteration by double tailed recombinase polymerase amplification integrated with SERS based two-color lateral flow nucleic acid hybridization strip [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 134: 106562.

[20] LIU HB, CAO TT, CHEN HS, *et al*. Two-color lateral flow nucleic acid assay combined with double-tailed recombinase polymerase amplification for simultaneous detection of chicken and duck adulteration in mutton [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 118: 105209.

[21] 王一凡. 基于环介导等温扩增技术的羊乳中掺假牛乳的可视化快速检测方法研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
WANG YF. Research on a visual rapid detection method for adulterated cow milk in goat milk based on loop-mediated isothermal amplification technology [D]. Xi’an: Shaanxi Normal University, 2020.

[22] ZHAO WW, TAN YF, WANG SS, *et al*. The identification of yak meat using loop-mediated isothermal amplification method coupled with hydroxy naphthol blue for the prevention of food fraud [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2024(1): 6549138.

[23] 陈珍金. 基于恒温微流控技术的肉源性成分快速鉴别研究[D]. 广州: 暨南大学, 2021.
CHEN ZJ. Research on rapid identification of meat-derived comp [D]. Guangzhou: Jinan University, 2021.

[24] XIONG X, GUO Y, WANG TL, *et al*. Rapid and sequence-specific identification of atlantic cod (*Gadus morhua*) using loop-mediated isothermal amplification (LAMP) coupled with a universal molecular beacon (uMB) [J]. Microchemical, 2025, 219: 116154.

[25] FANG X, ZHANG WY, SU HH, *et al*. A LAMP-based colorimetric and fluorescence dual-channel assay for on-site identification of adulterated meat by a portable device [J]. Food Control, 2025, 169: 110984.

[26] CHONG C, HOU XQ, HUANG BH, *et al*. LAMP assay coupled CRISPR/LbCas12a system in a single-tube method for visual detection of meat adulteration [J]. Food Control, 2025, 167: 110809.

[27] 张宁, 张德权, 李淑荣, 等. 近红外光谱结合 SIMCA 法溯源羊肉产地的初步研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 309–312.
ZHANG N, ZHANG DQ, LI SR, *et al*. Preliminary study on origin traceability of mutton by near infrared reflectance spectroscopy coupled with SIMCA method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 309–312.

[28] 陈迎丽, 何钰, 龚会琴, 等. 基于欧式距离法或因子化法的近红外光谱技术对牛肉掺假鉴定的研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 141–146.
CHEN YL, HE Y, GONG HQ, *et al*. Study on identification of beef adulteration by near infrared spectroscopy based on euclidean distance method or factorization method [J]. Food Research and Development, 2019, 40(15): 141–146.

[29] CHEN H, TAN C, LIN Z. Identification of beef adulteration based on near-infrared spectroscopy and an ensemble of radical basis function network [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 143: 107633.

[30] WENG SZ, GUO BQ, TANG PP, *et al*. Rapid detection of adulteration of minced beef using Vis/NIR reflectance spectroscopy with multivariate methods [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 230: 118005.

[31] BAI J, LI JP, ZOU H, *et al*. Quantitative detection of pork in adulterated mutton rolls based on near infrared spectroscopy [J]. Food Science, 2019, 40: 287–292.

[32] 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.
YANG JS, SHAO YL, ZENG ZF, *et al*. Rapid detection of adulterated chicken meat in dried pork slice by Raman spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 9–15.

[33] 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[J]. 肉类研究, 2021, 35(7): 50–54.
HAN AIY, ZHANG ZR, XIE LB, *et al*. Progress on the application of Raman spectroscopy in meat adulteration detection [J]. Meat Research, 2021, 35(7): 50–54.

[34] 张延宁. 基于光谱技术的肉品掺假检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
ZHANG YN. Study on the detection method of meat adulteration using spectral technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[35] SOWOIDNICH K, KRONFELDT HD. Shifted excitation Raman difference spectroscopy at multiple wavelengths for in-situ meat species differentiation [J]. Applied Physics B, 2012, 108(4): 975–982.

[36] IQBAL Z, AFSETH NK, POSTELMANS A, *et al*. Detection and quantification of pork adulteration in beef meatballs with Raman spectroscopy and near infrared spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 337: 126069.

[37] 陈燕雨. 高光谱成像技术在食品掺假检测中的应用研究综述[J]. 食品安全导刊, 2025(3): 144–147.
CHEN YY. Review of the application of hyperspectral imaging technology in food adulteration detection [J]. China Food Safety Magazine, 2025(3): 144–147.

[38] 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.
KONG LQ, NIU XH, WANG CL, *et al*. Application of hyperspectral imaging technology in the identification of composite adulteration type in beef balls [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(8): 2183–2191.

[39] LI B, LU YJ, LIU YD, *et al*. Detection of adulteration of minced beef based on hyperspectral reflectance and transmission fusion technique [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(16): 251–260.

[40] RADY A, ADEDEJI AA. Application of hyperspectral imaging and machine learning methods to detect and quantify adulterants in minced meats [J]. Food Analytical Methods, 2020, 13(4): 970–981.

[41] PU HB, YU JX, SUN DW, *et al*. Distinguishing fresh and frozen-thawed beef using hyperspectral imaging technology combined with convolutional neural networks [J]. Microchemical Journal, 2023, 189: 108559.

[42] PRAKASH C, MAHAR R. Chemical profiling and quality assessment of food products employing magnetic resonance technologies [J]. Foods, 2025, 14(14): 2417.

[43] 胡艺骞, 徐成, 胡涛, 等. 低场核磁共振二维指纹谱技术在肉松种类快速检测中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 238–244.
HU YQ, XU C, HU T, *et al*. Application of low-field nuclear magnetic resonance 2D fingerprint spectroscopy technology in rapid quality detection of pork floss products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 238–244.

[44] WAGNER L, KAUFMANN M, LANGE F, *et al*. Differentiation of pork (*Sus scrofa domesticus*) and wild boar (*Sus scrofa*) meat using ^{1}H NMR spectroscopy and MALDI-ToF mass spectrometry [J]. European Food Research and Technology, 2025, 251(5): 747–766.

[45] DECKER C, KRAPF R, KUBALLA T, *et al*. Nontargeted analysis of lipid extracts using ^{1}H NMR spectroscopy combined with multivariate

statistical analysis to discriminate between the animal species of raw and processed meat [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(23): 7130–7239.

[46] YANG L, DAI BN, AYED C, *et al*. Comparing the metabolic profiles of raw and cooked pufferfish (*Takifugu flavidus*) meat by NMR assessment [J]. Food Chemistry, 2019, 290: 107–113.

[47] JAKES W, GERDOVA A, DEFERNEZ M, *et al*. Authentication of beef versus horse meat using 60 MHz 1H NMR spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2015, 175: 1–9.

[48] 王心一, 刘榜, 谌阳, 等. 基于 G-四联体比色生物传感器检测肉制品中羊源性成分[J]. 生物技术进展, 2019, 9(6): 641–646.
WANG XY, LIU B, CHEN Y, *et al*. A colorimetric biosensor based on G-quadruplex for detection of sheep-derived components [J]. Current Biotechnology, 2019, 9(6): 641–646.

[49] ZHAO ZY, WANG RM, YANG XQ, *et al*. Machine learning-assisted, dual-channel CRISPR/Cas12a biosensor-in-microdroplet for amplification-free nucleic acid detection for food authenticity testing [J]. ACS Nano, 2024, 18(49): 33505–33519.

[50] 许文娟, 韩芳, 赵晗, 等. 电子鼻结合主成分分析法快速鉴别掺假牛肉[J]. 肉类工业, 2021(10): 33–35.
XU WJ, HAN F, ZHAO H, *et al*. Quick identification of adulterated beef by electronic nose and principal component analysis [J]. Meat Industry, 2021(10): 33–35.

[51] JIA WS, QIN YD, ZHAO CT. Rapid detection of adulterated lamb meat using near infrared and electronic nose: A F1-score-MRE data fusion approach [J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138123.

[52] ZHANG CJ, ZHENG XC, GU MH, *et al*. Authenticity identification of mutton based on electronic nose and visible/near-infrared spectroscopy [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38: 383–393.

[53] SUN X, WANG SL, JIA WS. Research progress of electronic nose and near-infrared spectroscopy in meat adulteration detection [J]. Chemosensors, 2024, 12(3): 35.

[54] MANSOURI MF, FATHI R, JALILI S, *et al*. SPR enhanced DNA biosensor for sensitive detection of donkey meat adulteration [J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127163.

[55] FLAUZINO JMREP, NGUYEN Q, YANG G, *et al*. Label-free and reagentless electrochemical genosensor based on graphene acid for meat adulteration detection [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 195: 113628.

[56] 吕二盼. 动物源性食品中各种动物源性肉及肉制品鉴别检验的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
LV ERP. Study on identification and inspection of meat and meat products in animal derived food [D]. Baoding: Agricultual University of Hebei, 2012.

[57] ABD-ELHAFEEZ HH, EL-SAYED AM, AHMED AM, *et al*. Detection of food fraud of meat products from the different brands by application of histological methods [J]. Microscopy Research and Technique, 2022, 85(4): 1538–1556.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)