

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250507003

引用格式: 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.

CHENG YH, SHI JS, GAO XF, *et al.* Research progress on detection technology of source components in meat products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 157-165. (in Chinese with English abstract).

肉制品源性成分检测技术研究进展

程月红¹, 师景双¹, 高喜凤¹, 朱晓萌¹, 程玲云¹, 李静¹,
杨振东¹, 盛凯^{2*}, 胡明燕^{1*}

[1. 山东省食品药品检验研究院, 国家市场监督管理总局重点实验室(肉及肉制品监管技术), 产业技术基础公共服务平台, 济南 250101; 2. 山东交通学院航空学院, 济南 250000]

摘要: 肉制品掺假现象频繁发生, 不仅影响人们生活质量而且制约行业的健康发展, 鉴别肉制品掺假技术已成为研究热点。快速、准确、可靠、简单的肉源成分检测技术是鉴别肉制品掺假的有效手段。本文针对目前研究较多的肉源成分检测技术, 包括光谱技术、色谱和质谱分析技术、免疫分析技术和基于等温扩增分析技术的原理、优点、缺点和应用研究进行综述, 并对这些技术以后的研究方向进行展望, 以期肉制品掺假鉴别技术的研究提供理论依据和参考思路。

关键词: 肉制品掺假; 光谱技术; 色谱和质谱分析技术; 免疫分析; 等温扩增; 源性成分

Research progress on detection technology of source components in meat products

CHENG Yue-Hong¹, SHI Jing-Shuang¹, GAO Xi-Feng¹, ZHU Xiao-Meng¹, CHENG Ling-Yun¹,
LI Jing¹, YANG Zhen-Dong¹, SHENG Kai^{2*}, HU Ming-Yan^{1*}

[1. Shandong Institute of Food and Drug Inspection, Key Laboratory of the State Administration for Market Regulation (Meat and Meat Products Supervision Technology), Public Service Platform for Industrial Technology Foundation, Ji'nan 250101, China; 2. School of Aeronautics, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250000, China]

ABSTRACT: The frequent occurrence of adulteration in meat products not only affects people's quality of life but also restricts the healthy development of the industry. The technology of identifying adulteration in meat products has become a research hotspot. Fast, accurate, reliable, and simple meat ingredient detection technology is an effective means of identifying adulteration in meat products. This article reviewed the principles, advantages, disadvantages and application research of various meat source component detection technologies that had been extensively studied, including spectroscopic technology, chromatographic and mass spectrometry analysis technology, immunoassay technology and isothermal amplification analysis technology. It also looked forward to the future research directions of these technologies, in order to provide theoretical basis and reference ideas for the research of meat product

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2024MB023)

第一作者: 程月红(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测与研究。E-mail: 318433415@qq.com

*通信作者: 盛凯(1983—), 男, 副教授, 主要研究方向为纳米材料。E-mail: shengkai@sdjtu.edu.cn

胡明燕(1980—), 女, 正高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测与研究。E-mail: humingyan@shandong.cn

adulteration identification technology.

KEY WORDS: meat adulteration; spectroscopic techniques; chromatographic and mass spectrometric techniques; immunoassay; isothermal amplification; source components

0 引言

随着经济的快速发展和人们生活水平的不断提高,消费者对高品质肉类的需求也在不断提升^[1]。肉及肉制品富含蛋白质、脂肪、矿物质、维生素和必需氨基酸等营养物质,是居民膳食结构中不可或缺的组成部分。但是,一些不法商贩为追逐利润,生产加工劣质肉类,导致肉制品掺杂掺假事件层出不穷^[2-4]。肉制品掺假,不仅危害消费者健康,而且扰乱正常的市场秩序,增加食品安全监管的难度和成本。因此,开发科学、有效的肉源检测方法,为市场监管提供有力的技术支持,规范肉制品行业的生产行为、维护市场的公平竞争环境、提升整个肉制品行业的质量控制水平以及推动行业的高质量发展具有重要意义。

随着技术的发展,肉制品掺假手段也在不断提高,传统的肉源成分鉴别技术已不能满足市场需求。目前,肉源检测技术的研究呈现出多样化和高灵敏度的特点。本文针对目前研究较多的肉源检测技术,包括光谱技术、色谱和质谱分析技术、免疫分析技术和基于等温扩增的分析技术,系统综述了其原理、优缺点及应用研究进展,以期为肉及肉制品真实性鉴别技术深入研究提供理论依据和参考思路。

1 光谱分析

光谱分析是根据肉类中不同成分,在特定波长下产生差异性光谱特性进而对肉制品种类进行快速检测的一种分析技术^[5-6],因其具有高灵敏度、高分辨率、快速且无污染等优点,已经成为成分分析和定量检测的重要手段^[7]。目前,多种基于光谱分析的方法已经应用于肉源鉴别检测,主要有红外光谱技术^[8-9]、拉曼光谱技术^[10-11]、高光谱成像技术^[12-13]和激光诱导击穿光谱技术^[14-15]等。

1.1 红外光谱技术

红外光谱技术是根据分子内原子在平衡位置,做相对振动和转动而对分子结构和物质组成进行鉴别分析的方法^[16]。由于不同品种肉类的官能团对红外光的吸收波长不同,致使吸收光谱呈现一定的特异性,可以根据这种特异性来鉴别肉类品种^[17]。白京等^[18]利用近红外光谱分析技术,实现了对掺假羊肉卷中猪肉掺假比例的定量检测。JIA 等^[19]联合电子鼻、近红外光谱融合数据和机器学习方法,并引入基于 F1 值的模型对掺假羊肉进行检测,使检测结果判断更简单,准确率为 98.58%。牟晓晴^[8]利用近红外光谱技术对熟肉糜中的掺假样品进行定性分析,并能够对掺假样品中驴肉含量进行定量测定,自此实现了肉源掺伪定量检

测。徐记各等^[20]利用广域照射拉曼光谱技术和簇类独立软模式法,结合多元散射校正,光谱仪降噪和波长标定降噪技术,建立了猪、羊、鸭原料肉和掺假羊肉的定性识别模型。模型的建立使掺假行为更容易被确定,快速服务食品监管。并对 37 批不同产地的原料肉、4 批掺假羊肉、5 批未掺假羊肉进行定性鉴别,正确率均为 100%。红外光谱技术因效率高、操作简单、快捷等优势,已被广泛应用于肉及肉制品掺假检测,此外由于肉制品掺假的多面性和复杂性,红外光谱和生物科学相结合以其适用于多种样品、特异性高、快速检测等优点已成为普遍使用的技术之一^[16]。

1.2 拉曼光谱技术

拉曼光谱技术是一种当光照射到样品,使其分子发生振动和转动导致其极化率变化产生散射的光谱分析方法。早期拉曼光谱技术因受传统光源限制,存在拉曼散射强度低、瑞利散射干扰强等问题,应用范围受到很大限制^[7]。1974 年, FLEISCHMANN 等^[21]通过对银电极表面进行粗糙化处理来增强拉曼光谱,显著提高了拉曼光谱的灵敏度,由此表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)产生。随着科学技术的发展, SERS 在多个领域得到广泛应用,但在实际检测过程中也存在一些问题和挑战,如被测样品受复杂组分干扰,需使用贵金属做 SERS 基底,而基底对被分析成分的富集有限,且构建 SERS 活性热点过程太复杂。为改善这些缺陷,孙梅^[22]合成了立方体状磁性 SERS 纳米复合材料,进一步优化了表面增强拉曼光谱技术。ROBERT 等^[23]利用拉曼光谱技术成功实现了对完整牛肉、羊肉和鹿肉快速辨别。李丽^[24]利用拉曼光谱对金银花有效成分进行了定性分析,在此基础上结合深度学习学习方法,建立了测定金银花有效成分的定量模型,对其有效成分实现了快速监测评估。WAN 等^[25]基于拉曼光谱数据开发了 TA-Net 分类模型,实现了对癌症的早期筛查,减少了对人员经验的依赖。与传统拉曼光谱技术相比, SERS 技术表现出诸多优势,如稳定性好,特征峰窄而尖,能够实现多重检测以及灵敏度高等特点。

1.3 高光谱成像技术

高光谱成像(hyper spectral imaging, HSI)技术是以多个窄波段的影像数据技术为基础,结合光谱学和成像原理,来分析目标物的空间分布和光谱信息,得到高光谱分辨率的连续窄波段图像数据,从而形成全面、多维的数据表示^[26]。随着科技的发展, HSI 技术在数据处理、图像特性、模型复杂度和隐私保护等方面还存在诸多挑战。为了解决这些问题,研究者将 HIS 技术与深度学习相结合^[27-28],这种融合

能够提供被测样品更多的化学成分和功能状态信息。AHMED 等^[29]利用 HIS 技术和深度学习相结合, 采用模型分析实现了甘薯的空间分布可视化, 提高了甘薯质量的检测效率。戴欧俊等^[30]论述了 HSI 技术结合深度学习的优势和在食品领域的应用, 并为该领域的研究提供了重要参考思路。ACHATA 等^[31]对高光谱成像进行优化, 用于牛肉掺假检测。MASITHOH 等^[32]采用主成分分析对光谱数据进行分析 and 可视化, 利用光谱数据建立偏最小二乘回归模型, 用来检测牛肉和羊肉中掺假的猪肉。

HSI 技术多与其他技术结合来实现对肉类掺假样品的快速鉴别。然而, 这种多种技术结合的检测手段大多需要采集大量数据并建立复杂模型, 费时费力, 且模型稳定性易受到仪器情况和外界环境影响, 难以满足现场快速鉴别肉制品掺假的需求^[33], 因此, 开发操作简单、便捷、数据可靠的检测方法或在线检测设备成为鉴别肉制品掺假的重要发展趋势和研究方向。

1.4 激光诱导击穿光谱技术

激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)技术是一种同时能够对多种元素实现光学成像的技术, 即利用超短脉冲激光聚焦到被测样品表面使其形成等离子体, 然后对等离子体发射光谱进行分析, 来确定样品的物质成分^[34]。肉制品种类不同其物质组成就会有差异, 利用 LIBS 技术形成特征光谱图, 能够实现肉制品源性成分鉴定。WU 等^[35]采用多元散射校正处理光谱来校正光谱散射, 并利用 K-最近邻(K-nearest neighbor, KNN)模型识别光谱, 建立了基于 LIBS 的肉制品种类鉴别的有效方法, 提高了检测的准确性和稳定性。VELIOGLU 等^[36]采用 LIBS 和多元数据分析对纯牛肉和牛内脏进行定性鉴别和定量分析, 检出限为 3.8%。LIBS 技术具有原位、多元素、快速检测等优点, 已被广泛应用到多个领域, 但在其应用过程中存在发射光谱信号弱和基体效应大的局限。为了解决这一问题, WU 等^[37]利用微波等离子体炬来增强 LIBS 信号强度, 从而改善了该技术。随着科技的发展, 人工智能(artificial intelligence, AI)进入人们的视野, AI 与 LIBS 技术的结合在食品工业中展现出广阔的应用前景。ALEMAYHU 等^[38]系统论述了 AI 与 LIBS 技术结合在食品工业中的应用, 为食品从业者和食品研究者提供了保障食品质量和食品安全的重要参考。尽管 LIBS 技术在前处理简单、多元素分析、检测方法快速高效等方面具有显著优势, 但其在鉴别肉制品掺假领域的应用方面还处于发展阶段, 还存在一些不足, 如检测方法灵敏度低、重复性不佳等。

1.5 小结

光谱技术具有高灵敏度、高分辨率、快速、无损且无污染的优点, 已在多个领域得到广泛应用, 但在肉制品掺假鉴别中仍面临一些挑战^[39-40]: (1)肉制品成分复杂, 其特性受肉种类、饲养条件等多种因素影响, 要建立适用性强的模型较困难。除此之外, 光谱采集参数、环境因素和光学仪器都

会对模型的稳定性产生影响; (2)拉曼光谱技术虽然无需样品处理, 但其成分之间会相互干扰, 可见光激发下产生较强荧光, 导致灵敏度降低。可以通过融合其他技术, 样品进行预处理, 优化检测条件等方式来提高灵敏度; (3)光谱技术多依靠大型昂贵仪器和国外数据库。完善国内数据库, 研制便携式、小型化仪器, 是肉及肉制品掺假鉴别技术的重要研究方向。此外, 开发具有针对性、成本低、能够与其他分离、检测设备联用的在线检测设备, 也是该领域的发展趋势。

2 色谱和质谱分析

色谱分析是基于被测物质在固定相与流动相中分配系数的不同而实现分离、分析的方法。按照流动相状态不同分为液相色谱、气相色谱和超临界流体色谱法等。近几年, 在鉴别肉及肉制品源性成分研究中应用较多的是液相色谱技术。质谱分析则是通过制备、分离、检测气相离子来鉴定化合物的一种技术, 该技术特异性好、灵敏度高, 在多个领域得到广泛应用。

液相色谱-质谱技术结合了液相色谱的分离能力和质谱的检测能力, 实现了两种技术的优势互补。检测过程是将被测样品通过液相色谱分离出目标物, 然后利用质谱对其组成和特征成分进行表征和鉴定, 从而进行定性或定量分析, 因该方法简单、灵敏、准确等优点, 已被广泛应用于肉及肉制品源性成分检测^[41-42]。JORFI 等^[43]利用反相高效液相色谱法分析猪、牛、羊、鸡肉中氨基酸组成, 确定猪肉的特征氨基酸为缬氨酸、组氨酸、丝氨酸、丙氨酸和精氨酸, 为检测清真食品中猪肉成分提供评价依据。陈柔含等^[44]利用超高效液相色谱法从蛋白质中分离出多个肽段, 并利用质谱分析其氨基酸组成和特征肽段, 确定蛋白质来源。JENNA 等^[45]利用质谱对大豆蛋白进行定量评估, 避免了样品因热处理或基质相互作用而影响到酶联免疫法对过敏源检测的灵敏度和准确性。张颖颖等^[46]从猪、马、驴肉中各选取 3 条专属性多肽链, 并将其转化为特异性离子对信息, 建立了液相色谱-质谱法, 该方法能够对 0.5% 的掺假比例准确检测。此外, 液相色谱-质谱技术还可以对多种肽标记物同时检测, 对肉源成分准确判定, 降低结果的假阳性率^[47]。潘志文等^[48]建立了超高效液相色谱-串联质谱法, 能够对牛、羊、猪、马、骆驼和鹿 6 种动物皮源性成分同时检测, 方法灵敏度高、特异性强。尽管液相色谱和质谱技术在肉源性成分检测中表现出显著优势, 但对于当下快节奏、高效运作的的生活方式, 其也存在一些不足: (1)数据分析复杂, 对人员要求高; (2)分析周期长, 且步骤烦琐; (3)设备及其维护费用昂贵。

3 免疫分析

免疫分析是利用抗原与抗体的特异性亲和反应而对目标物进行检测的技术^[49-50]。该技术具有操作简单, 检测周期短, 能够检测大量样品等优点, 已被广泛应用于多个

领域。常用的检测方法有琼脂凝胶免疫扩散法、免疫组化、对流免疫电泳法、酶联免疫吸附法和侧向层析试纸法,其中酶联免疫法吸附法(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)^[51-52]和侧向层析试纸法(lateral flow strip, LFS)^[53]在肉及肉制品掺假鉴别中研究较多。

3.1 酶联免疫吸附分析

ELISA 是将抗原或抗体固定在固相载体表面,利用抗原-抗体的特异性反应和标记酶催化底物发生显色反应,来检测目标物含量的免疫分析方法^[54]。该方法原理:首先酶与抗体或抗原结合形成酶标记物,当抗原与抗体发生特异性反应时,酶标记物催化底物分子转化为易于识别的有色产物,从而确定目标物并计算其浓度,实现对目标物定性和定量分析^[55-56]。ELISA 特异性强、成本低,可用于鉴别肉及肉制品种类^[57]。PERESTAM 等^[58]利用基于蛋白质 ELISA 试剂盒,对肉制品中牛肉和猪肉成分进行检测,该方法耗时少,易于操作,适用于肉制品的现场快速鉴定。WATCHARAVONGTIP 等^[59]设计了磁性核-金壳纳米杂化物,并将其应用到比色夹心磁免疫分析中,有效降低背景信号,优化检测方法。MENDICINO 等^[60]开发了一种 ELISA 试剂盒和智能手机联用的系统,能够对登革病毒进行简单、快速的检测,这一方法为肉源性成分检测研究提供了重要借鉴。尽管 ELISA 技术具有诸多优势,但还存在一些不足,如可能出现交叉反应,导致鉴别相近肉制品时易出现假阳性^[61]。此外,蛋白质变性会使其空间结构发生改变,严重影响抗原与抗体的特异性结合,因此寻找特异性蛋白质是 ELISA 鉴别肉及肉制品种类的困难所在^[62]。

3.2 侧向层析试纸

lateral flow strip, LFS 是一种已被商业化生产用于现场快速检测目标物的纸基检测装置。LFS 常用胶体金作为标记物,当抗原与抗体在检测线上发生特异性结合后发生颜色变化,根据颜色变化实现对目标物的快速检测。HENDRICKSON 等^[63]以胶体金作为抗体的标记物,检测鸡免疫球蛋白,据此检测肉制品中掺假的鸡肉。该方法特异性好、灵敏度高,能够在 20 min 内检测到 0.063% 的掺假鸡肉。ATEF 等^[64]建立了一种检测牛肉中掺假驴肉的侧流免疫层析快速检测方法,该方法灵敏度高且能在 2 min 内检测出牛肉中掺假 1% 的驴肉。随着技术的发展, LFS 与其他技术联用表现出更好的检测效果。尚柯等^[65]利用多酶恒温快速扩增和封闭式侧向流层析技术联用,建立了牛、羊、猪、鸡、鸭的源性成分快速检测方法,该方法假阳性率 3.49%,假阴性率 3.54%。LFS 技术以其快速、简便、单人份检测、经济实惠等优点,已被广泛应用于医学检测、食品质量监测、环境监测等多个领域。但是,传统的 LFS 技术是单检测,即一条检测线(T 线)和一条控制线(C 线),检测范围较窄,只能定性不能定量。为了拓展线性响应范围,实现定量检测,研究者开始探索多参数、多条检测线的免疫定量检测技术,虽然目前

还未见有文献报道,但为 LFS 技术实现快速定量检测提供了重要思路。

然而,免疫分析方法是以前体和抗体的特异性反应为基础,其中抗体的获得存在一定难度。此外,多数肉制品需要经过热加工和复杂加工工艺,而大多数蛋白质对热不稳定,致使肉制品特异性抗体的开发困难^[66]。

4 等温扩增技术

等温扩增技术(isothermal amplification technology, ITA),是在恒定温度条件下对目标片段进行核酸扩增的技术,即一种核酸体外扩增技术。该技术因其简便快捷已成为核酸快速检测领域新的研究方向。与传统的聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)技术相比,不需要昂贵的热循环控制仪器控制温度反复变化,具有恒温、耗时少、高效等优点^[67]。目前,在肉源性成分检测中常用的等温扩增技术主要有环介导等温扩增(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)技术^[68-70]和重组酶聚合酶扩增(recombinase polymerase amplification, RPA)技术^[71-72]。

4.1 环介导等温扩增技术

1998 年,日本 Eiken Chemical Co. Ltd.建立了 LAMP DNA 的方法^[73],使 DNA 扩增速度显著提高。LAMP 因使用 2~3 对引物(外部、内部和环)识别 DNA 或 RNA 靶上最多 8 个特定位置,所以具有高度特异性。LAMP 使用的 Bst DNA 聚合酶因具有较高的链置换活性,使得该方法省去了 DNA 变性阶段,使扩增速度明显提高, LAMP 的反应过程如图 1^[70]。LAMP 技术以其特异性强、灵敏度高、简便、快速的优点,已成为现场鉴别肉及肉制品掺假的理想工具。FANG 等^[74]以 LAMP 技术为基础,设计了一种结合 LAMP 比色和荧光检测的便携式装置。该装置能够检测出掺假肉中 0.1% 的猪肉成分,为市场上快速鉴别肉类掺假提供可靠工具。CAI 等^[75]结合 LAMP 的高效指数扩增能力和 CRISPR 的高特异性识别能力开发了快速、高灵敏度和现场检测肉制品掺假的诊断平台,该平台能够减少假阳性结果,并减少 LAMP 气溶胶污染风险,推动了等温扩增技术在食品安全领域的广泛应用,为开发更快速、便捷的肉源掺假检测方法提供新的思路。

但是, LAMP 在实际应用中还存在一些挑战^[76]: (1)使用多条引物存在弊端,引物要求高,设计难度大,引物多导致引物二聚体的出现,致使 LAMP 不适合多组分检测; (2)产物复杂,不适用长片段扩增; (3)容易被污染。

4.2 重组酶聚合酶扩增技术

RPA 技术由 PIEPENBURG 等^[77]在 2006 年首次被提出,其原理是:重组酶与引物结合形成复合物,复合物在双链 DNA 模板中寻找同源序列并促使引物与同源序列互补,被替换的 DNA 单链与单链 DNA 结合蛋白(single-stranded DNA-binding protein, SSB)结合被稳定,借助 DNA 聚合酶从引

物开始发生链交换反应, 实现对目标 DNA 的快速扩增, 如图 2 所示^[78]。相比其他方法, RPA 引物设计简单、反应耗时短^[79], 已被应用于肉及肉制品掺假成分的检测。KISSENKOTTER 等^[80]分别以猪线粒体 ND2 和马 *ATP6-8* 基因为靶基因, 基于 RPA 技术, 建立了快速检测猪和马源性成分的方法。两种方法都具有高度的特异性, 在混合肉制品中, 最低能检测到 0.1% 的目标成分。方法快速、准确, 可用于现场快速检测掺假肉制品中的猪肉和马肉。LI 等^[71]将高通量 DNA 分离与 RPA、磁分离和高通量荧光检测相结合, 开发了检测肉制品中马肉掺假的定性和定量检测方法, 该方法快速、灵敏、高通量、选

择性好, 可检测到掺假样品中 0.1% 的马肉。GANG 等^[81]采用 CRISPR/Cas12a 和 RPA 技术, 建立了快速鉴别猪源性成分的检测方法。通过对 125 种商品检测并与国家标准实时 PCR 方法对比, 证明该方法能够快速便捷地实现猪源成分的可视化识别, 可用于现场快速检测。在等温扩增技术中, RPA 以其简便性、高灵敏度、高选择性、与多种技术的兼容性等优点, 已被广泛应用于食品质量控制。但为了满足现场快速检测的需求, 该方法还需进一步优化, 如 RPA 通常需要在扩增后进行纯化, 多重扩增需要对引物浓度进行优化, 没有设计 RPA 专用引物的软件, 这会使引物序列在长时间内还需要优化等^[78]。

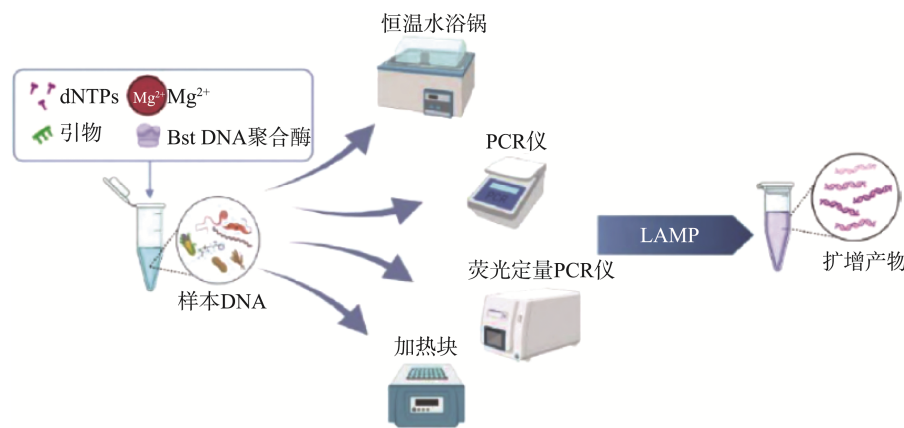
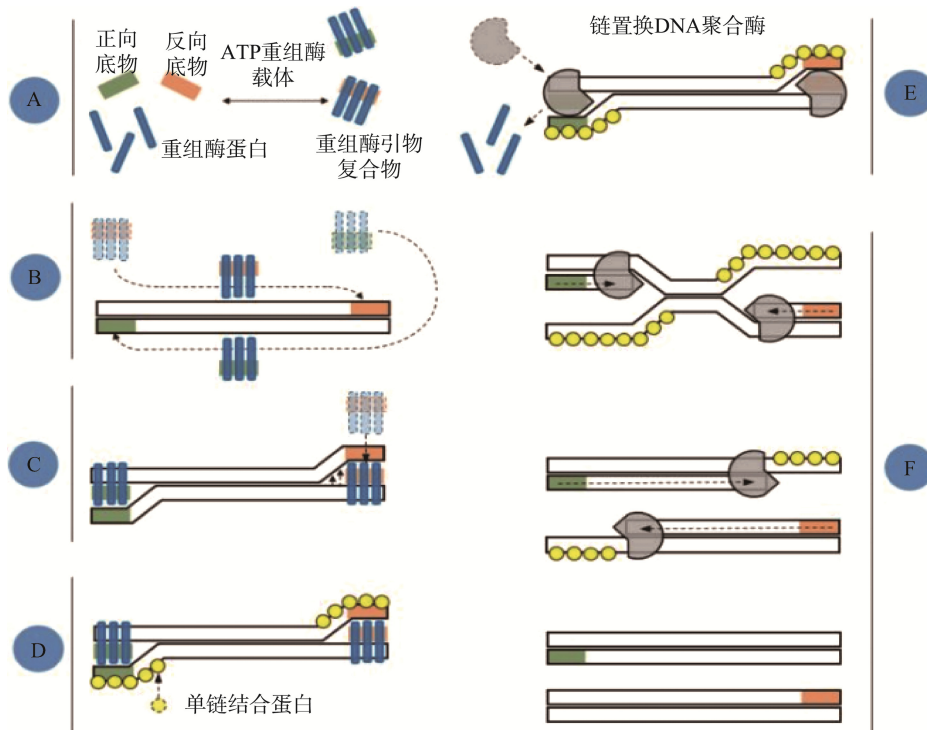


图1 LAMP的反应过程图解

Fig.1 Schematic diagram of the LAMP reaction process



注: A. 重组酶蛋白与每个引物形成复合物; B. 扫描DNA寻找同源序列; C. 利用重组酶的链置换活性将引物插入同源位点; D. 单链结合蛋白稳定被置换的DNA链; E. 重组酶解体, 链置换DNA聚合酶结合到引物上发生链置换反应; F. 重复循环实现指数扩增。

图2 RPA原理^[5]

Fig.2 Principle of RPA^[5]

5 结束语

肉及肉制品掺假是全球性的食品质量安全问题并会长期存在, 为了保障食品质量, 维护市场秩序, 保护消费者权益, 本文针对目前研究较多的肉及肉制品掺假鉴别技术: 光谱技术、色谱和质谱分析技术、免疫分析和基于等温扩增的分析技术的原理、优缺点及应用进行综述, 以期肉及肉制品真实性鉴别技术的研究提供理论依据和技术参考。

光谱技术具有高灵敏度、高分辨率、快速、无损且无污染的优点, 已在多个领域得到广泛应用, 但在肉制品掺假鉴别中还有一定挑战, 多数依赖大型仪器, 依赖复杂模型, 模型的建立费时费力, 所建模型一般适用性不强, 且数据处理烦琐。因此未来的发展方向应侧重于提高模型适用性, 融合多种检测技术, 并开发高效、便捷、低成本检测仪器, 以实现更广泛的应用。针对液相色谱技术和质谱技术在肉源性成分检测中的不足, 应开发简便、快速、准确的检测方法, 同时研制高效、低成本的分析仪器, 以适应现场快速检测需求。免疫分析具有操作简单, 检测周期短, 能够检测大量样品等优点, 但在肉及肉制品掺假鉴别中, 蛋白质在加工过程中易变性, 寻找不同肉类特异性抗体是该技术面临的主要挑战。等温扩增技术以其恒温、耗时少、高效等优点在近年来得到广泛应用, 但在肉类掺假鉴别中需解决的问题有: 优化引物设计, 避免多个引物形成二聚体, 提高扩增特异性。

参考文献

- [1] FAJARDO V, GONZÁLEZ I, ROJAS M, *et al.* A review of current PCR-based methodologies for the authentication of meats from game animal species [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(8): 408–421.
- [2] WINDARSIH A, BAKAR NKA, ROHMAN A, *et al.* Analysis of dog meat adulteration in beef meatballs using non-targeted UHPLC-Orbitrap HRMS metabolomics and chemometrics for halal authentication study [J]. *Analytical Sciences: The International Journal of the Japan Society for Analytical Chemistry*, 2024, 40(3): 385–397.
- [3] WANWAN L, XIAONAN W, JING T, *et al.* A Multiplex PCR assay mediated by universal primers for the detection of adulterated meat in mutton [J]. *Journal of food protection*, 2019, 82(2): 325–330.
- [4] 邵博宇, 徐宁, 迟凯月, 等. 基于多重 PCR 定性鉴别鹿肉掺假[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(24): 281–287.
SHAO BY, XU N, CHI KY, *et al.* Qualitative identification of adulteration in venison based on multiplex PCR [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(24): 281–287.
- [5] WANG W, PENG Y, SUN H, *et al.* Spectral detection techniques for non-destructively monitoring the quality, safety, and classification of fresh red meat [J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(10): 2707–2730.
- [6] RADY A, ADEDEJI A. Assessing different processed meats for adulterants using visible-near infrared spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2018, 136: 59–67.
- [7] 唐华, 岳俊. 国家自然科学基金视角下我国光谱信息领域发展的分析和展望[J/OL]. *中国激光*, 1–21. [2025-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20250103.1532.048.html>
TANG H, YUE J. Analysis and prospect of the development of spectral Information field in china from the perspective of the national natural science foundation of china [J/OL]. *Chinese Journal of Lasers*, 1–21. [2025-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20250103.1532.048.html>
- [8] 牟晓晴. 驴肉掺假近红外定性定量方法及成分差异分析[D]. 保定: 河北大学, 2024.
MOU XQ. Near-infrared qualitative and quantitative methods for donkey meat adulteration and analysis of component differences [D]. Baoding: Hebei University, 2024.
- [9] 邓霖. 熟制羊肉制品中鸭源性成分检测方法的建立及筛选[D]. 成都: 四川农业大学, 2023.
DENG L. Establishment and screening of detection methods for duck-derived ingredients in cooked mutton products [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [10] SHI Z, SU Y, ZI J, *et al.* Intelligent sensory of lard quality by adaptive residual attention networks and Raman spectroscopy [J]. *Microchemical Journal*, 2025, 209: 112680.
- [11] TANG W J, YUAN Q, ZHANG L, *et al.* Application of machine learning-assisted surface-enhanced Raman spectroscopy in medical laboratories: Principles, opportunities, and challenges [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 184: 118135.
- [12] ISMAIL A, PARK S, KIM JH, *et al.* Evaluation of biomarkers that influence the freshness of beef during storage using VIS/NIR hyperspectral imaging [J]. *LWT*, 2025, 216: 117302.
- [13] ZHANG Y, LIU J. Non-destructive detection of milk nutritional components based on hyperspectral imaging [J]. *Journal of Food Science*, 2024, 90(1): e17621.
- [14] WEI B, YANG C, WU S, *et al.* The signal quality improvement of laser-induced breakdown spectroscopy due to the microwave plasma torch modulation [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2024, 1328: 343183.
- [15] HAO ZQ, LIU K, LIAN QL, *et al.* Machine learning in laser-induced breakdown spectroscopy: A review [J]. *Frontiers of Physics*, 2024, 19(6): 62501.
- [16] BEĆ KB, GRABSKA J, HUCK CW. Biomolecular and bioanalytical applications of infrared spectroscopy—a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1133: 150–177.
- [17] KUANG L, TIAN X, SU Y, *et al.* Rapid identification of horse oil adulteration based on deep learning infrared spectroscopy detection method [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025, 330: 125604.
- [18] 白京, 李家鹏, 邹昊, 等. 近红外特征光谱定量检测羊肉卷中猪肉掺假比例[J]. *食品科学*, 2019, 40(2): 287–292.
BAI J, LI JP, ZOU H, *et al.* Quantitative detection of pork adulteration ratio in lamb rolls using near-infrared characteristic spectroscopy [J]. *Food*

- Science, 2019, 40(2): 287–292.
- [19] JIA W, QIN Y, ZHAO C. Rapid detection of adulterated lamb meat using near infrared and electronic nose: AF₁-score-MRE data fusion approach [J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138123.
- [20] 徐记各, 韩莹, 忻欣, 等. 广域照射拉曼光谱技术结合簇类独立软模式法快速鉴别原料肉及掺假肉[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 70–75.
- XU JG, HAN Y, XIN X, *et al.* Wide area Raman spectroscopy combined with cluster independent soft mode method for rapid identification of raw meat and adulterated meat [J]. Meat Research, 2020, 34(5): 70–75.
- [21] FLEISCHMANN M, HENDRA PJ, MCQUILLAN AJ. Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode [J]. Chemical Physics Letters, 1974, 26(2): 163–166.
- [22] 孙梅. 磁性表面增强拉曼散射纳米复合材料的制备及其传感应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- SUN M. Preparation and sensing application of magnetic surface enhanced Raman scattering nanocomposites [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [23] ROBERT C, FRASER-MILLER SJ, JESSEP WT, *et al.* Rapid discrimination of intact beef, venison and lamb meat using Raman spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128441.
- [24] 李丽. 基于“色谱-光谱”技术的金银花有效成分分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- LI L. Analysis of effective components in honeysuckle based on “chromatography spectroscopy” technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [25] WAN D, WANG Z, LIU S, *et al.* Application of an interpretable Raman-spectral classification model based on a transposed convolution and attention mechanism to tumor-tissue screening [J]. Applied Soft Computing, 2024, 154: 111320.
- [26] BHARGAVA A, SACHDEVA A, SHARMA K, *et al.* Hyperspectral imaging and its applications: A review [J]. Heliyon, 2024, 10(12): e33208.
- [27] GAËL V, VERONIKA C. Machine learning for medical imaging: methodological failures and recommendations for the future [J]. NPJ Digital Medicine, 2022, 5(1): 48.
- [28] VAN DVBH, KUIJF HJ, GILHUIJS KGA *et al.* Explainable artificial intelligence (XAI) in deep learning-based medical image analysis [J]. Medical Image Analysis, 2022, 79: 102470.
- [29] AHMED TM, VILLORDON A, KANRUZZAMAN M. Hyperspectral imaging and explainable deep-learning for non-destructive quality prediction of sweetpotato [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 222: 113379.
- [30] 戴欧俊, 蔡玥乐, 郑雨蓉, 等. 高光谱成像结合深度学习在食医领域中的应用[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 319–326.
- DAI OUI, CAI YL, ZHENG YR, *et al.* Application of hyperspectral imaging combined with deep learning in the field of food medicine [J]. Food Technology, 2024, 49(10): 319–326.
- [31] ACHATA ME, MOUSA AM, QURASHI ADA, *et al.* Corrigendum to “multivariate optimization of hyperspectral imaging for adulteration detection of ground beef: Towards the development of generic algorithms to predict adulterated ground beef and for digital sorting” [J]. Food Control, 2025, 167: 110856.
- [32] MASITHOH ER, PAHLAWAN RFM, KIM J, *et al.* Shortwave infrared hyperspectral imaging for the determination of pork adulteration in minced beef and lamb [J]. Food Control, 2024, 166: 110736.
- [33] 王勇峰, 郎玉苗, 黄必志, 等. 光谱技术鉴别冷鲜肉和冻融肉的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(11): 68–71.
- WANG YF, LANG YM, HUANG BZ, *et al.* Research progress on spectral technology for identifying fresh meat and frozen thawed meat [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2017(11): 68–71.
- [34] SHAH HKS, IQBAL J, AHMAD P, *et al.* Laser induced breakdown spectroscopy methods and applications: A comprehensive review [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 170: 108666.
- [35] WU YC, SONG ST, XIANG SM, *et al.* Accuracy and stability improvement for meat species identification using multiplicative scatter correction and laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Optics express, 2018, 26(8): 10119–10127.
- [36] VELIOGLU MH, SEZER B, BILGE G, *et al.* Identification of offal adulteration in beef by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) [J]. Meat Science, 2018, 138: 28–33.
- [37] WU S, LAI Z, YANG C, *et al.* Enhancement mechanisms analysis using microwave plasma torch-assisted laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2025, 224: 107110.
- [38] ALEMAYHU SA, JI R, ABDALLA NA, *et al.* AI and laser-induced spectroscopy for food industry [J]. Food and Humanity, 2024, 3: 100413.
- [39] 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.
- HAN AIY, ZHANG ZR, XIE LB, *et al.* Research progress on the application of Raman spectroscopy technology in meat adulteration detection [J]. Meat Research, 2021, 35(7): 50–54.
- [40] 郎玉苗, 杨春柳, 李翠, 等. 光谱技术在肉品掺杂掺假鉴别中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(2): 72–77.
- LANG YM, YANG CL, LI C, *et al.* Research progress on the application of spectroscopic technology in the identification of meat adulteration [J]. Meat Research, 2019, 33(2): 72–77.
- [41] ZHU XY, GU SQ, GUO DH, *et al.* Determination of porcine derived components in gelatin and gelatin-containing foods by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 107978.
- [42] 古淑青, 陈念念, 曾静, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法鉴定驼乳及其制品中的动物源性成分[J]. 色谱, 2024, 42(1): 13–23.
- GU SQ, CHEN NN, ZENG J, *et al.* Identification of animal derived components in camel milk and its products by ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42(1): 13–23.
- [43] JORFI R, MUSTAFA S, MAN CBY, *et al.* Differentiation of pork from beef chicken mutton and chevon according to their primary amino acids content for halal authentication [J]. African Journal of Biotechnology,

- 2012, 11(32): 8160–8166.
- [44] 陈柔含, 古淑青, 赵超敏, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定乳与乳制品中牛乳铁蛋白[J]. 色谱, 2020, 38(6): 663–671.
CHEN RH, GU SQ, ZHAO CM, *et al.* Determination of bovine lactoferrin in milk and dairy products by ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2020, 38(6): 663–671.
- [45] JENNA K, LJ B, LM D. Quantification of soy-derived ingredients in model bread and frankfurter matrices with an optimized liquid chromatography-tandem mass spectrometry external standard calibration workflow [J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(2): 311–322.
- [46] 张颖颖, 李莹莹, 李石磊, 等. 液相色谱-串联质谱法鉴别驴肉真伪[J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 294–301.
ZHANG YY, LI YY, LI SL, *et al.* Identification of authenticity of donkey meat by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(12): 294–301.
- [47] LI Y, ZHANG Y, LI H, *et al.* Simultaneous determination of heat stable peptides for eight animal and plant species in meat products using UPLC-MS/MS method [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 125–131.
- [48] 潘志文, 黄婉锋, 钱鑫, 等. 基于超高效液相色谱串联质谱法特征肽检测技术的阿胶鉴别与 6 种动物源性成分检查[J]. 中国药业, 2024, 33(11): 79–83.
PAN ZW, HUANG WF, QIAN X, *et al.* Identification of ass hide glue and examination of six animal heterologous ingredients based on the characteristic peptide detection technology of ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. China Pharmaceutical, 2024, 33(11): 79–83.
- [49] FENG R, HE Y, WU H, *et al.* Detecting adulteration of buffalo milk based on a single amino acid mutation site using immunoassay [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107180.
- [50] NAM H, LILLEHOJ SH, LEE Y. Development of antigen-capture enzyme-linked immunoassay for chicken interleukin-34 [J]. Developmental and Comparative Immunology, 2025, 105331. DOI: 10.1016/j.dci.2025.105331
- [51] ASKARI H, NABATI A, RAHIMIAN A, *et al.* Application of two novel anionic peroxidases from *Raphanus sativus* L. var niger roots in labeling antibodies and developing an enzyme-linked immunosorbent assay [J]. Heliyon, 2025, 11(1): e40894.
- [52] CARMEN PCL, CHAN J, LEE QS, *et al.* Utilization of a monoclonal antibody targeting the functional P-domain of nervous necrosis virus (NNV) coat protein: Developing an epitope-blocking ELISA to quantify viral neutralizing antibodies [J]. Aquaculture, 2025, 598: 742058.
- [53] HUANG X, AGUILAR PZ, XU H, *et al.* Membrane-based lateral flow immunochromatographic strip with nanoparticles as reporters for detection: A review [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 75: 166–180.
- [54] 刘国永, 石宇, 孙健, 等. 基于荧光体系的酶联免疫吸附分析法的研究进展[J]. 分析化学, 2023, 51(3): 331–339.
LIU GY, SHI Y, SUN J, *et al.* Research progress on enzyme-linked immunosorbent assay based on fluorescence system [J]. Analytical Chemistry, 2023, 51(3): 331–339.
- [55] PC T, JONGKIT M, AL B, *et al.* Quantitative detection of beef contamination in cooked meat products by ELISA [J]. Journal of AOAC International, 2019, 102(3): 898–902.
- [56] PC T, JONGKIT M, AL B, *et al.* Quantitative detection of horse contamination in cooked meat products by ELISA [J]. Journal of AOAC International, 2018, 101(3): 817–823.
- [57] 刘敏, 李升升, 张艳, 等. 牛肉掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 477–489.
LIU M, LI SS, ZHANG Y, *et al.* Research progress on beef adulteration identification technology [J]. Food Industry Technology, 2023, 44(7): 477–489.
- [58] PERESTAM TA, FUJISAKI KK, NAVA O, *et al.* Comparison of real-time PCR and ELISA-based methods for the detection of beef and pork in processed meat products [J]. Food Control, 2017, 71: 346–352.
- [59] WATCHARAVONGTIP P, JERMSUTJARIT P, TANTITUVANONT A, *et al.* Development of a differentiating of infected from vaccinated animal (DIVA) ELISA to detect antibodies against senecavirus a in pigs using two expression systems of non-structural proteins [J]. The Veterinary Quarterly, 2025, 45(1): 11.
- [60] MENDICINO D, AVALOS C, CHIARAVIGLIO R, *et al.* Equipmentless point-of-care testing of dengue antibodies using ELISA and smartphones [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2025, 255: 116666.
- [61] ANNE VB, BMH S, SINA K, *et al.* A case study of zoonotic chlamydia abortus infection: Diagnostic challenges from clinical and microbiological perspectives [J]. Open Forum Infectious Diseases, 2022, 9(10): 524.
- [62] 范梦晨, 韩爱云. 肉类掺假检测技术的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 236–241.
FAN MC, HAN AIY. Research progress on meat adulteration detection technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(1): 236–241.
- [63] HENDRICKSON OD, ZVEREVA EA, VOSTRIKOVA NL, *et al.* Lateral flow immunoassay for sensitive detection of undeclared chicken meat in meat products [J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128598.
- [64] ATEF O, YASSIN N, HAMED R, *et al.* Development and evaluation of a lateral flow immunochromatographic assay for the rapid detection of donkey meat in beef as a tool for meat adulteration identification [Z]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2024(prepublish): 1–11.
- [65] 尚柯, 张彪, 张敏, 等. 基于多酶恒温快速扩增-侧向层析联用技术的肉制品真实性研究[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 1–12.
SHANG K, ZHANG B, ZHANG M, *et al.* Research on the authenticity of meat products based on multi enzyme constant temperature rapid amplification lateral flow chromatography combined technology [J]. Food Science, 2024, 45(8): 1–12.
- [66] JIANG X, FULLER D, HSIEH PY, *et al.* Monoclonal antibody-based ELISA for the quantification of porcine hemoglobin in meat products [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 170–179.
- [67] 朱志伟, 赵金红. 环介导等温扩增技术在寄生虫检测中的应用进展[J]. 热带病与寄生虫学, 2020, 18(4): 234–238, 233.

- ZHU ZW, ZHAO JH. Progress in the application of loop mediated isothermal amplification technology in parasite detection [J]. *Tropical Diseases and Parasitology*, 2020, 18(4): 234–238, 233.
- [68] 盛俊升, 张晋豪, 刘思露, 等. 基于 LAMP 的肉类新鲜度检测效果评价 [J/OL]. *中国食品学报*, 1–10. [2025-01-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20241227.1650.027.html>
- SHENG JS, ZHANG JH, LIU SL, *et al.* Evaluation of meat freshness detection effect based on LAMP [J/OL]. *Chinese Journal of Food Science*, 1–10. [2025-01-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.TS.20241227.1650.027.html>
- [69] 赵雨佳, 梁亮, 范培蕾, 等. 环介导等温扩增技术在食品安全领域的应用进展 [J/OL]. *现代食品科技*, 1–14. [2025-01-11]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.1560>
- ZHAO YJ, LIANG L, FAN PL, *et al.* Progress in the application of loop mediated isothermal amplification technology in the field of food safety [J/OL]. *Modern Food Technology*, 1–14. [2025-01-11]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.1560>
- [70] 安红玉, 陶泽, 陈晨, 等. 环介导等温扩增技术在食品安全检测领域的研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(21): 388–396.
- AN HY, TAO Z, CHEN C, *et al.* Research progress of loop mediated isothermal amplification technology in the field of food safety detection [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(21): 388–396.
- [71] LI C, LAN H, WU Z, *et al.* Identification of horse ingredients based on recombinase polymerase amplification, high-throughput DNA isolation and magnetic separation [J]. *Food Control*, 2025, 167: 110837.
- [72] LEI W, DANYAN Z, MICHAEL A, *et al.* Rapid identification of salmon using a combined isothermal recombinase polymerase amplification–lateral flow strip approach [J]. *Food Analytical Methods*, 2021, 15(2): 401–412.
- [73] MAI ANNA S, BARBARA W, ANNA R. Loop-mediated isothermal amplification (LAMP): The better sibling of PCR [J]. *Cells*, 2021, 10(8): 1931.
- [74] FANG X, ZHANG W, SU H, *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.
- [75] CAI C, HOU X, HUANG B, *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.
- [76] 秦盼柱. 基于核酸扩增原理的常见肉源性成分快速鉴定研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- QIN PZ. Research on rapid identification of common meat derived components based on nucleic acid amplification principle [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [77] PIEPENBURG O, WILLIAMS CH, STEMPLE DL, *et al.* DNA detection using recombination proteins [J]. *PLoS Biology*, 2006, 4(7): e204.
- [78] LOBATO MI, OSULLIVAN KC. Recombinase polymerase amplification: Basics, applications and recent advances [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 98: 19–35.
- [79] XIA X, YU Y, WEIDMANN M, *et al.* Rapid detection of shrimp white spot syndrome virus by real time, isothermal recombinase polymerase amplification assay [J]. *PLoS One*, 2017, 9(8): e104667.
- [80] KISSENKOTTER J, BOHIKEN-FASCHET S, FORREST SM, *et al.* Recombinase polymerase amplification assays for the identification of pork and horsemeat [J]. *Food Chemistry*, 2020, 322(C): 126759.
- [81] GANG Z, JIN W, CHANYU Y, *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.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)