DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260602006
引用格式: 吴家瑞, 李瑞, 燕妮, 等. 鸭血及其制品掺假检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 277–287.
Wu Jiarui, Li Rui, Yan Ni, et al. Research progress on adulteration detection technology of duck blood and its products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 277–287. (in Chinese with English abstract).

鸭血及其制品掺假检测技术研究进展

吴家瑞[1], 李　瑞[1], 燕　妮[1], 彭兰兰[1], 梁晓柯[2], 苟变丽[1], 雒　峰[1], 邢冉冉[2*]

[1. 甘肃省食品检验研究院, 兰州　730000; 2. 中国质量检验检测科学研究院, 国家市场监督管理总局重点实验室(食品真实性鉴别), 北京　100176]

摘　要: 随着人们越来越关注食品安全和质量问题, 鸭血及其制品的检测已成为重要的研究领域。鸭血及其制品由于具有独特的风味和营养价值, 因而受到广泛的青睐, 然而, 随着市场需求的增长, 掺假的情况也越来越严重, 给消费者的健康和合法权益带来了极大的危害。当前, 有关鸭血的检测技术也在不断进步, 主要有化学、物理和生物检测等多种方法。但是, 现有的检测方法还存在灵敏度不够高、耗时较长、成本较高等方面的不足。为了保证鸭血及其制品的质量安全, 亟需改善现有的检测方法, 并研发出新的检测方法。本文对鸭血及其制品掺假检测领域的研究现状进行综合分析, 主要讨论现有的检测技术的优势及存在的问题、目前的技术瓶颈及未来的研究趋势。通过对近年来的相关研究进行归纳总结, 比较各种检测方法在鸭血及制品掺假鉴别中的应用效果以及存在的局限, 在此基础上提出了对现有检测方法改进的建议, 以期为提升鸭血及其制品的安全性研究和应用提供参考, 并推进该领域安全检测工作的进一步发展。

关键词: 鸭血; 掺假; 食品安全; 检测技术
中图分类号: TS251.93　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)18–0277–11

Research progress on adulteration detection technology of duck blood and its products

WU Jia-Rui[1], LI Rui[1], YAN Ni[1], PENG Lan-Lan[1], LIANG Xiao-Ke[2], GOU Bian-Li[1], LUO Feng[1], XING Ran-Ran[2*]

[1. *Gansu Food Inspection and Research Institute*, *Lanzhou* 730000**,** *China*; 2. *Key Laboratory of the State Administration for Market Regulation* (*Food Authenticity Identification*), *Chinese Academy of Quality and Inspection & Testing*, *Beijing* 100176, *China*]

ABSTRACT: With growing public concern over food safety and quality, the detection of duck blood and its products has emerged as an important area of research. Prized for their distinctive flavor and nutritional value, duck blood and its products have gained widespread popularity. However, surging market demand has been accompanied by increasingly rampant adulteration, posing serious risks to consumer health and legitimate rights. Current detection technologies for duck blood continue to evolve and primarily encompass chemical, physical and biological methods. Nevertheless,

收稿日期: 2026-06-02
基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2024MK132); 甘肃省市场监督管理局科技计划项目(SSCJG-SP-A202413)
第一作者: 吴家瑞(1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: wujiarui1523@163.com
***通信作者:** 邢冉冉(1989—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品质量安全。E-mail: xingranrancaiq@163.com

existing approaches still suffer from shortcomings such as inadequate sensitivity, long analysis times and high costs. To safeguard the quality and safety of duck blood and its products, there is an urgent need to refine established detection methods and to develop new ones. The aim of this paper was to provide a comprehensive review of the state of research on adulteration detection in duck blood and its products, with an emphasis on the strengths and weaknesses of available techniques, prevailing technical bottlenecks and future research directions. By synthesizing relevant studied from recent years and comparing the practical performance and limitations of various methods for identifying adulteration in duck blood and its products, we put forward suggestions for improving current detection approaches. This work is intended to serve as a reference for advancing safety research and applications concerning duck blood and its products and to promote further development of safety testing in this field.

KEY WORDS: duck blood; adulterate; food safety; detecting techniques

0 引 言

近年来, “假鸭血”事件频出: 315 晚会曾曝光北京餐饮市场出现假鸭血的情况; 新浪财经网曾报道成都 4 家知名火锅店因销售掺假的“假鸭血”被处罚[1]; 2021 年, 公安部门对涉嫌使用鸡血冒充鸭血的 1 家“黑窝点”及 13 家使用“假鸭血”的餐饮单位进行立案处理[2−3]。2024 年央视《社会与法》曝光了假鸭血事件, 记者抽检的 22 份鸭血中仅 8 份是纯鸭血[4]。2020 年, 美国农业部食品安全检验局就一批进口自中国的熟制鸭血制品发布了公共卫生预警。由此可见, 鸭血及其制品的掺假事件并不是偶然的、少数的, 而是全国各地乃至国际社会普遍存在的问题。此类安全事件的频繁发生, 不仅引起了消费者的警觉, 也引发了政府监管机构的高度关注。因此, 开发和改进有效的检测技术对完善鸭血及其制品市场监管、食品安全以及保障消费者的正当权益具有重要意义。

针对鸭血制品中存在的掺假问题, 目前主要采用的检测方法有高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、近红外光谱法(near-infrared spectroscopy, NIR)、拉曼光谱法、聚合酶链反应法(polymerase chain reaction, PCR)、实时荧光 PCR、多重 PCR 等, 这些方法虽然有着较高的准确性和灵敏度, 但是在实际应用中通常面临着检测时间长、操作复杂、成本高等问题, 难以满足快速筛查和大规模应用的需求。本文系统综述了鸭血及制品掺假检测领域主要技术的原理(图 1)、特点与应用进展, 比较分析了各类方法的优劣, 并对未来该领域的技术发展方向与研究重点进行展望(表 1), 以期为相关检测技术的研发与应用提供参考。

1 鸭血及其制品研究现状

畜禽血液属于屠宰加工业的重要副产品, 其中含有大量的蛋白质、矿物质和生物活性物质, 是一种优质的蛋白质来源, 具有极大的开发利用价值。我国是畜禽产品生产和消费大国, 有着非常丰富的鸭血资源[5−6]。作为传统中华美食的鸭血因营养价值高、口感细腻而受到消费者的广泛喜爱, 是地方特色菜中常见食材, 如著名的南京小吃“鸭血粉丝汤”、江西的“莲花血鸭”及传统菜肴“重庆毛血旺”等。在国外用动物血液制作菜肴也是一种历史悠久的饮食文化, 如欧洲的“黑布丁”、瑞典、芬兰及挪威的“血煎饼”等。鸭血营养全面, 主要成分有蛋白质、水分、矿物质及各种维生素等。据报道鸭血中的蛋白质含量高达 15%~20%, 且氨基酸组成包含了多种人体必需的氨基酸[5], 所以其在营养价值方面具有一定的优势。相关的营养学研究表明, 每 100 g 鸭血含有蛋白质 13.6 g、脂肪只有 0.4 g, 其中铁元素含量为 30.5 mg, 是猪血的 1.8 倍, 因此鸭血是很好的膳食铁来源[7]。此外, 鸭血及其制品含丰富的 B 族维生素, 其中以维生素 B_{12} 最为突出, 有利于保护神经及促进红细胞的生成[8]。鸭血高蛋白、低脂肪、含有易于被吸收利用的铁元素等特点, 可预防缺铁性贫血、满足某些特殊人群的营养需求(表 2)。这些营养成分的综合作用, 使得鸭血在食品营养学中占有重要地位, 随着人们健康意识的增强, 以鸭血为代表的一些“高蛋白、低脂肪”的食品越来越受到消费者的喜爱, 市场前景广阔[9]。然而, 由于其具有较高的营养价值和高价的特点, 催生了掺假牟利的现象, 这不但损害消费者的权益, 也破坏了市场的正常秩序。

随着鸭血消费需求增长, 市场监管压力加大。违规添加工业原料、以次充好等掺假行为已成为该领域突出的食品安全问题。由于鸭血原料成本比猪血、鸡血高 30%~50%, 且鸭血收集难度较大, 品质口感更优[10]。此外, 小作坊企业逐利动机强, 掺假可使单品利润率提升 20%~40%[11]。目前最常见的掺假方式主要表现为两类: (1)将猪血、鸡血、牛血等低价动物血直接混入鸭血, 或完全替代鸭血生产。这类掺假利用物种混淆降低原料成本, 且外观难以分辨。(2)通过在鸭血中违规添加淀粉、明胶、卡拉胶等物质增加重量、改善质地和口感, 或掺入大量水分实现增重, 导致产品蛋白质等核心营养成分被稀释, 甚至部分产品使用人工

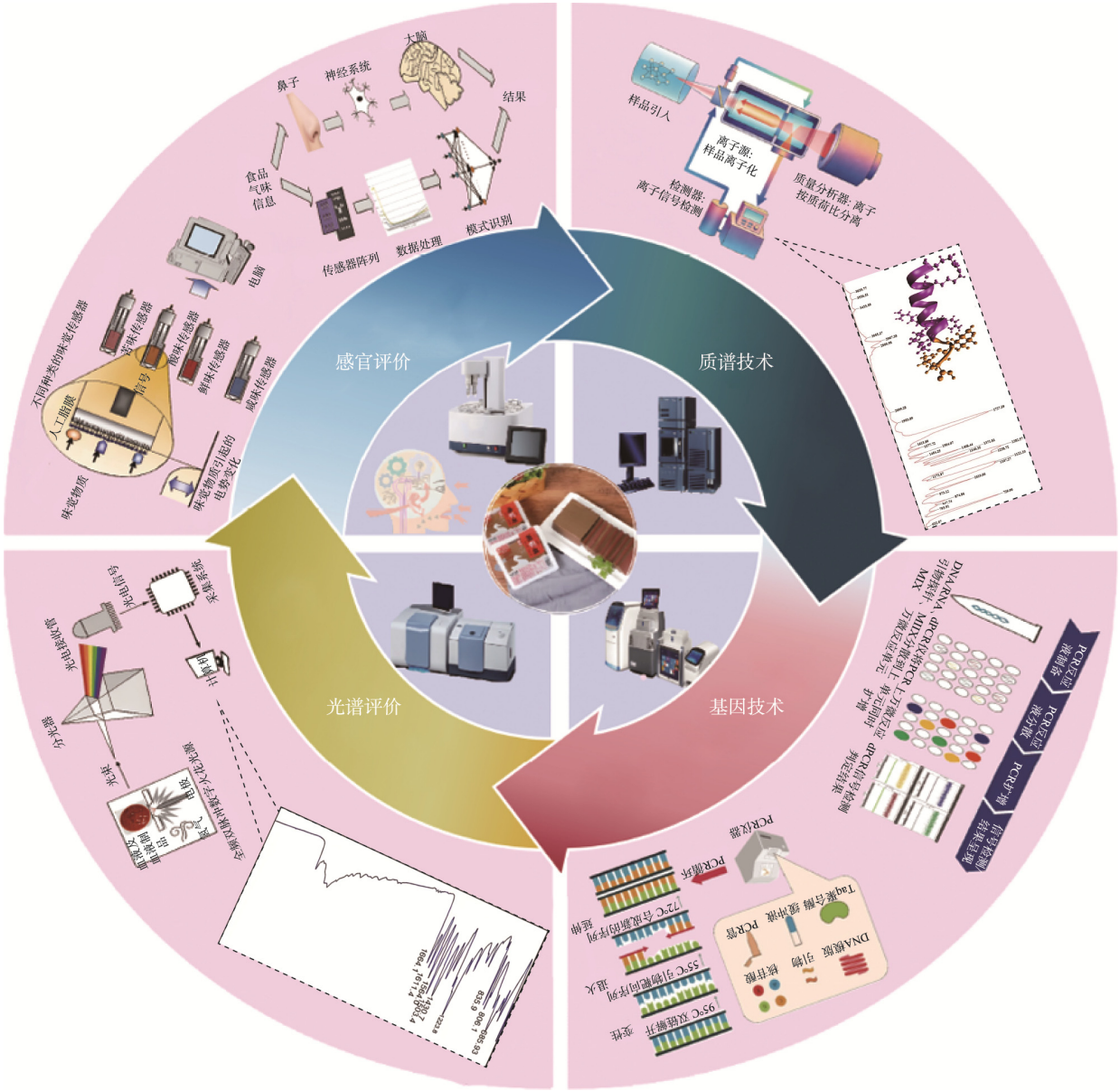


图 1　鸭血及其制品掺假检测领域主要技术

Fig.1　Major technologies in the field of adulteration detection for duck blood and its products

表 1　常见鸭血及其制品掺假鉴别分析方法比较

Table 1　Comparison of common methods for identifying and analyzing adulteration in duck blood and its products

检测技术	核心原理	代表技术	主要优点	局限性	小结
感官评价	依靠人的视觉、嗅觉、味觉等感官评价样品色泽、质地、气味；可搭配电子鼻、电子舌传感器客观采集气味、滋味信号	人工感官品鉴、电子鼻、电子舌	操作直观快速，检测成本低廉，无需复杂前处理；可快速筛查变质、明显掺假样品	主观依赖性强，评价结果受人员经验影响大；难以区分亲缘相近物种；鸭血专用电子鼻/电子舌数据库缺失	属于初筛手段，快速廉价，但主观偏差大，仅作辅助，不可单独用于真伪判定
质谱技术	识别物种特异性多肽、蛋白质、脂肪酸、挥发性组分，依靠特征质谱信号完成定性、定量；也可定量非法添加物	GC-MS、LC-MS/MS、UPLC-MS/MS、DAPCI-MS、激光消融质谱法	灵敏度高、分辨率高、特异性好，可同时完成定性+定量；抗基质干扰能力较强，可检测特征肽段与非法添加剂，降低假阳性、假阴性	大型仪器购置维护成本高；操作人员专业门槛高；难以用于基层现场快速检测；依赖特征标志物；缺少标准化数据库	检测结果精准可靠，适合实验室确证与定量，但设备昂贵，不适用于基层现场检测

表 1(续)

检测技术	核心原理	代表技术	主要优点	局限性	小结
光谱技术	NIR 基于含氢基团振动吸收; 拉曼基于分子拉曼散射效应; 结合化学计量学、机器学习解析高维光谱数据, 挖掘特征信息建模判别	FT-NIR、ATR-FTIR、拉曼光谱	检测速度快, 大多无损检测; 样品前处理简单; 可高通量批量检测	仪器易受温度、环境干扰; 复杂基质下多组分同步检测难度大; 缺少通用光谱数据库	检测速度快、样品损耗小, 适合批量初筛, 但模型泛化能力不足, 易受环境干扰
分子生物学技术	以物种特异性 DNA 序列作为识别标记, 基于核酸扩增、杂交完成物种溯源鉴别	qPCR、mPCR、基因膜芯片、DNA 条形码、LAMP-CRISPR	特异性强、灵敏度高, DNA 耐热稳定, 适合加工鸭血制品; 部分方法可实现多靶标同时检测; qPCR 已纳入国家标准	部分等温扩增易出现气溶胶污染; 高通量测序成本较高; 依赖合适引物探针数据库	特异性优异, qPCR 为国家标准; LAMP-CRISPR 适合现场快速检测, 是当前鸭血掺假鉴别主流技术

注: 液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS); 超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS); 表面解吸常压化学电离质谱技术(surface desorption atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry, DAPCI-MS); 傅里叶变换近红外光谱法(Fourier transform near infrared spectroscopy, FT-NIR); 傅里叶变换衰减全反射红外光谱法(attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR); 定量聚合酶链反应(quantitative polymerase chain reaction, qPCR); 多重聚合酶链式反应(multiplex polymerase chain reaction, mPCR); 环介导等温扩增结合 CRISPR/Cas12a 系统(loop-mediated isothermal amplification-CRISPR/Cas12a system, LAMP-CRISPR)。

表 2 鸭血主要营养成分表

Table 2 Table of main nutritional components of duck blood

营养成分	每 100 g 的含量	营养素参考值/NRV%	主要特点
蛋白质	13.6 g	23	含量高达 15%~20%, 氨基酸组成全面, 含多种人体必需氨基酸
脂肪	0.4 g	1	典型的低脂肪食品
铁	30.5 mg	203	优异的膳食铁来源, 含量约为猪血的 1.8 倍; 每 100 g 即可满足每日铁需求的 2 倍以上
维生素 B_{12}	2.4 μg	100	特别是维生素 B_{12} 含量丰富, 对维持神经系统健康及促进红细胞生成至关重要

注: NRV%依据 GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》计算。

色素调整色泽以掩盖掺假痕迹[12−13]。近来有报道指出, 掺假鸭血制品中可能含有有害物质, 部分不法厂家违法添加甲醛、过量亚硝酸盐、工业染料等有害物质以改善颜色、增加香味, 导致食物中毒和慢性疾病的发生[14]。这不仅严重危害消费者健康, 还扰乱市场秩序, 损害消费者权益, 制约行业的可持续发展。

当前鸭血制品市场监管机制尚不完善, 检测手段相对有限, 客观上增加了违规行为发生的风险。加工后的动物血制品, 细胞结构发生改变, 感官特征趋于均质化, 消费者难以直观鉴别。同时, 现有检测方法或操作复杂、耗时较长, 或设备成本高, 难以满足流通环节快速、批量筛查的现场监管需求, 导致掺假行为难以被及时发现。其次, 我国相关标准体系不够健全, 虽已颁布 GB/T 38164—2019《常见畜禽动物源性成分检测方法 实时荧光 PCR 法》, GB/T 35917—2018《常见动物源性成分快速测定 膜芯片法》, BJS 202309《鸭血中鸭鸡鹅源性成分的测定》, 但上述方法均需依赖精密仪器和专业操作人员, 且方法的准确性与操作人员的熟练程度直接相关, 导致检测效率低下且成本高昂。此外, 部分已见报道的新型检测技术尚未完成标准化转化并被纳入国家或行业标准体系, 限制了其大范围推广应用, 进一步制约了监管效能的提升。因此, 在充分认识鸭血营养与经济价值的同时, 建立准确、高效的质量鉴别方法, 对保障产业发展与消费者权益至关重要。未来需加快研发快速、便携的检测技术, 完善全面实用的质量安全标准体系, 为精准高效监管提供支撑。

2 鸭血及其制品真伪鉴别核心技术研究现状

目前, 鸭血及其制品掺假检测方法主要包括分子生物学技术[15]、光谱分析[16]以及气相色谱法[17]等。传统化学检测方法因加工后不同动物血液制品其理化性质与外观高度相似, 在特异性、灵敏度及适用性上存在局限[18]。故开发兼具快速、灵敏、准确且适用于现场或大批量筛查的鉴别技术, 对于保障鸭血及其制品真实性、维护消费者权益及促进行业规范发展具有重要意义。随着检测技术的不断发展, 新兴方法为精准鉴别提供了新的可能。

2.1 感官评价

感官评价法是用人的感觉器官(如视觉、嗅觉、味觉等)对产品的外观、气味和味道等方面进行感性评价的传统的检测方法[19]。利用感官评价的方法, 专业的品鉴组会对

比鸭血表面是否光滑、紧实度、颜色深浅、多汁性和鸭香味等因素, 从而快速分辨出掺假或变质的鸭血产品[20]。优质的鸭血一般为均匀的暗红色, 用手按压后能恢复原状, 嫩滑、有紧性和韧实感、切面整齐, 经过烹煮后不易松散, 并具有特有的鸭香味; 而掺假制品常会出现色泽不均、质地松散、气孔较大, 口感偏粗糙或风味异常等情况。研究发现, 这些感官上的差别可能与物种来源及加工添加等相关, 不同的物种血液在凝固时所释放的纤维蛋白肽也不一样, 导致了血制品结构及风味的不同[21]。虽然感官评价具有直观快速、低成本的优点, 但其受评价者的经验与主观因素的影响较大, 不能够准确地区分亲缘关系较近的物种[22]。因此, 为使感官评价更具有客观性和可靠性, 研究者们开始使用电子鼻和电子舌等新技术来辅助传统的感官评价法。这些技术利用传感器来获取食品的气味和味道等信息, 并进行分析处理后提供更为客观的评价结果[23–24]。但是到目前为止关于鸭血制品应用电子鼻与电子舌技术进行系统性分析的研究报道及相关的数据较少, 在今后的研究中若加以补充完善并建立对应的数据库, 感官技术在血液制品掺假检测中的应用会更加广泛。

2.2　质谱技术

由于质谱技术具有高灵敏度、高分辨率及强大的结构解析能力, 其已成为食品物种鉴别与掺假分析的主要技术之一[25]。该技术能够对肉类及血液样本中的物种特征性的蛋白质、多肽及氨基酸序列进行特异性检测, 具有检测快速、准确、适用范围广等优点[26], 为相关鉴别工作提供了关键技术支撑。GC-MS 可以用来分析挥发性成分和脂肪酸组成, 通过定量检测饱和脂肪酸(total saturated fatty acids, SFA)、单不饱和脂肪酸(total mono-unsaturated fatty acids, MUFA)与多不饱和脂肪酸(total poly-unsaturated fatty acids, PUFA)的谱图特征来区分物种[27]。对于蛋白质、多肽这类非挥发性大分子, LC-MS/MS 或高分辨质谱技术有着独特优势, 能够准确鉴定具有物种特异性的特征肽段[28]。近年来, 基于质谱法的蛋白质组学技术已成为肉类掺假检测热点[29–31], 通过鉴定肉类中的特征肽段判断种属来源, 为鸭血及其制品的真伪鉴别提供了重要技术支持[32]。

在血液制品检测研究中, 质谱技术常与液相色谱法、气相色谱法等联用, 此外还涉及基于液相色谱衍生的联用技术, 如 UPLC-MS/MS 及 DAPCI-MS, 进而显著提升血液制品检测的准确性与可靠性。目前, 质谱技术已在鸭血及其制品真伪鉴别中得到实际应用。如 Song 等[33]利用支链淀粉功能化的氧化石墨烯颗粒富集样品中的血红蛋白, 结合直接萃取电喷雾电离质谱技术, 成功实现了牛、鸡、鸭等不同物种血液的高灵敏度特异性鉴别。Zhang 等[34]采用 UPLC-MS/MS, 筛选多物种特征多肽作为检测靶标, 建立了猪、牛、羊、鸡及鸭血豆腐的定性、定量检测方法, 该方法检测灵敏度高、检出限低, 定量结果偏差范围为 80%~120%。王军等[32]借助 UPLC-四极杆飞行时间高分辨质谱技术, 筛选出猪血专属特征肽, 建立鸭血制品中猪血掺假的定量鉴别方法, 该方法线性相关系数在 0.999 以上, 检出限、定量限分别为 0.3~0.4 μg/L、0.9~1.2 μg/L, 信号稳定、重现性优异, 可高效灵敏地检测鸭血制品中的掺假猪血。上述研究共同表明, 质谱技术在血液制品的物种特异性鉴别方面具有显著优势, 尤其在高灵敏度、多指标同步检测方面展现出良好的应用前景。

除鸭血制品掺假鉴别外, 质谱相关技术还可用于鸭血及制品中甲醛等非法添加物的精准定量分析。甲醛是一种具有毒性与潜在致癌性的工业化学品, 我国明令禁止将其用于食品加工, 但部分不法商家为改善鸭血外观、延长保质期违规添加, 给消费者健康及食品安全带来严重隐患[35]。为此, 甘凝岚等[14]建立了鸭血制品中甲醛的 HPLC 检测方法。该方法在 0.4~6.0 μg/mL 甲醛质量浓度范围内线性关系优异(相关系数为 0.9997), 最低检出限为 0.2 mg/kg, 精密度(相对标准偏差)低于 5%, 加标回收率为 85.1%~92.7%。证实该方法灵敏度高、分离度良好, 可为鸭血制品中甲醛的检测提供准确、可靠的分析手段。

质谱技术已在氨基酸序列解析、蛋白质与多肽表征、药物分析等多个研究领域广泛应用[32]。但在鸭血等血液制品的物种鉴别中仍存在局限, 目前该技术主要依赖于对特定标志物(如脂肪、肌红蛋白、血红蛋白)的特征组分进行分析。近年来, 激光消融质谱技术与电喷雾解吸电离质谱技术等快速分析技术的发展, 为动物源性样品的直接、快速鉴别提供了新途径。有研究显示, 此类技术可用于新鲜肉类、血液及肉汁样品的有效区分[36]。此外, 顶空固相微萃取与 GC-MS 技术, 已成功实现从熟制食品中高效提取挥发性化合物并进行鉴定[37]。鸭血中含有特有的挥发性风味成分, 故针对此类成分开展靶向质谱分析, 有望为鸭血及其制品的真伪鉴别提供新的技术分析角度。

综上, 质谱技术通过识别不同物种特征多肽可实现动物源性成分的定性与定量分析, 凭借高灵敏度、强抗基质干扰的优势, 有效规避检测假阳性、假阴性问题。然而, 该技术在实际推广中仍面临仪器成本高、新型离子化技术等高新技术普及度低、专业操作要求高等局限, 难以适配基层快速检测场景。未来, 有关血液及其制品的物种鉴别研究应致力于构建多技术融合的分析体系, 采用实时荧光定量 PCR (real-time fluorescent quantitative PCR, qPCR)+UPLC-MS/MS 用于实验室精准验证, 光谱初筛+LAMP-CRISPR 快速检测组合用于现场快速筛查。同时应建立多维度标准数据库, 整合基因组序列、特征肽谱、光谱指纹、挥发性有机物特征谱库, 形成统一可溯源的比对依据。通过质谱精准鉴定、原位快速分析与核酸检测交叉验证, 从而形成多维、互补的鉴别策略, 进一步提升检测结果的准确性、特异性与实际应用可靠性。

2.3 光谱技术

光谱技术能够从不同方面提供物质的化学成分与微观结构的相关信息，被广泛应用于物种的掺伪鉴别[38]。相比于其他检测方法，光谱检测技术具有无损和快速检测的显著优势。近年来，近红外光谱技术在血液制品掺假检测中应用前景良好，其原理基于分子对近红外光的吸收特性:当样品被频率连续变化的近红外光照射后，物质中特定化学键(主要为含氢基团，如 C-H、O-H、N-H)会发生振动能级跃迁，选择性地吸收特定波长的光，从而形成反映有机物组成与结构的特征光谱[39]。不同种类食品的有机物成分差异导致不同光谱的形成[39]。但血液制品成分复杂，原始光谱重叠严重，难以直接用于掺伪分析，而光谱对不同的物种成分(如水、蛋白质、脂类等)具有特异性[40]，因此，结合化学计量学等方法可从复杂光谱数据中提取特征信息，建立定性模型，从而实现有效鉴别[40–41]。

随着化学计量学、机器学习等方法与光谱技术的结合，基于 NIR、拉曼等光谱技术的分析体系已能够实现对血液制品的高效鉴别[42–43]。Han 等[44]采用 FT-NIR 结合化学计量学方法，建立了动物血液制品的快速鉴别模型，对比了费希尔线性判别分析(Fisher linear discriminate analysis, Fisher LDA)与极限学习机(extreme learning machine, ELM)的鉴别性能，并构建优化了 4 个极限学习机回归模型用于掺假水平预测。结果表明，ELM 模型鉴别准确率可达 93.89%，鉴别性能优于 Fisher LDA，建立了鸭血及其制品快速鉴别溯源模型，验证了 FT-NIR 结合 ELM 技术的应用价值。Sandran 等[45]利用 ATR-FTIR 结合主成分分析-线性判别分析(principal component analysis-linear discriminant, PCA-LDA)，成功实现鸡、牛、鹿、鸭、猪等 7 种动物血液的精准鉴别，模型准确率超 94%，显著优于单一 PCA，进一步印证了化学计量学在解析复杂光谱信息中的关键作用。

拉曼光谱技术基于拉曼散射效应[46]，依靠分子振动-转动光谱来实现物质鉴定，具有高分辨率和抗水干扰等优势。其原理是当单色激光束与样品分子相互作用时，会发生非弹性散射，产生不同频率的光，通过测量散射光的频率变化来分析物质的信息[47]。不同物质因分子结构差异，会产生不同特征性的拉曼光谱，从而可用于物种结构的鉴别与分析[46]。该技术具有检测快速、分辨率高、信号无重叠、可原位或远距离检测以及样品无需复杂前处理(无损)等优点[41]。此外，由于拉曼光谱受水分子干扰小，具有较高的光谱分辨率，因此非常适用于像血液、肉汁等复杂水基体系的直接检测[19]。实际样品检测中，常与化学计量学方法(如多元统计分析、机器学习)结合，通过数据挖掘与特征提取来提升鉴别的特异性与准确性。Wang 等[48]通过分析动态血液与静态血液的光谱差异，建立了鸡、鸭、鹅、鸽 4 种家禽血液的鉴别方法，可有效区分 4 种家禽血液。Bian 等[49]则提出了一种基于小波变换亚光谱相关系数的新算法，用于多种动物血液进行鉴别，最优鉴别准确率高达 97.2%。综上，拉曼光谱法在血液制品的快速准确的物种鉴别方面具有显著潜力。

由于光谱分析法具有优异的组分辨别能力，在地质、化工、生化等领域中已成为主要的分析手段之一[50]，通过测定物质的特征光谱(吸收、发射或散射信号)得到样品的化学组成与结构特征。在分析时会得到含有波长与强度等信息的高维数据，因此，化学计量学方法(如多元统计分析、模式识别等)的对光谱数据的解析是十分重要的。这些方法为光谱预处理、特征筛选、数据降维、定性判别及多光谱数据融合提供了有效的数据处理方法[51]。目前，该技术在血液制品检测的实际应用中还存在一定的局限性，制约了其在血液制品检测中的广泛应用。首先，仪器购买与维护费用较高，而且模型的构建与优化非常依赖于专业的信号处理、化学计量学知识，存在较高的技术和经济门槛[52]。其次，光谱仪器容易受到温度、振动等环境因素的影响，现有预测模型没有充分考虑到参考方法本身误差，也缺少使用独立的样本集来进行严格的外部验证[53]。此外，现有研究大多建立在有限样本的基础上，很少解释模型中各个参数(如负荷、回归系数)的意义和变量间相互作用的影响，导致该类模型的可解释性较差。在鸭血制品等复杂的生物基质中，内源性杂质(如血红蛋白降解产物、脂质复合物)与外源性干扰物同时存在，加上设备检测灵敏度等原因，导致多目标成分的同时精准测定面临挑战。

为推进光谱技术在鸭血制品真实性鉴别中的实际应用，未来研究需系统构建通用性较强的光谱数据库为模型训练和验证提供数据支持。在此基础上整合优化发展多光谱融合技术，实现单光谱之间优势互补，提高对复杂基质的分析能力；引入机器学习与深度学习等智能算法处理高维、非线性的光谱数据，提高模型解释性；推进检测仪器的小型化、智能化，研发适合现场快速筛查的光谱仪。通过上述优化完善后，光谱技术将会在鸭血制品的真实性鉴别中发挥更大的作用，为构建标准化、可追溯的行业质量体系提供技术支持，进而推动鸭血制品行业的质量水平提高与规范发展(图 2)。

2.4 分子生物学技术

分子生物学技术也是基因技术，在食品检测中发挥着重要作用，尤其是在识别和鉴定物种掺假成分方面。由于食品基本来自动植物、真菌等生物农产品，且 DNA 是物种的主要遗传物质，存在于绝大多数动植物的细胞中，其含量和蛋白质相比更为丰富，并且每个物种都有其独特的 DNA 序列，可作为物种识别的显著特征[54–55]，且在高温、高压、高盐、高糖等条件下，仍能保持相对稳定[56–58]。因此，基于 DNA 的分析技术已成为当前食品成分溯源与掺假鉴别最主要、准确、可靠的方法之一。在血液制品真实性鉴定中，该技术凭借高灵敏度、强特异性的优势，已成为鉴别动物源性成分的核心技术[5]。



图 2　鸭血及制品真实性检测与未来发展方向预测

Fig.2　Authenticity detection of duck blood and its products and future prediction of development directions

qPCR 技术凭借高灵敏度、无需凝胶电泳分离即可实现核酸实时定量检测的优势，已成为分子检测的核心手段[59]。该技术主要分为荧光探针法(如 TaqMan 探针)与荧光染料法(如 SYBR Green I)，其中探针法因特异性更强应用更为广泛。基于此，以 qPCR(特别是探针法)为核心的技术体系已纳入 GB/T 38164—2019，成为鸭血制品动物源性成分鉴定的标准方法。大量研究证实，qPCR 可以成功应用于鸭血制品的掺假鉴定。陈果[60]建立了基于 qPCR 的技术可同时检测鸭血中鸭、猪、牛等动物源性成分的方法。该方法通过优化 DNA 提取流程可在 4 h 内完成检测，具有较高的时效性。李美桃等[61]运用 qPCR 技术对 28 份市售鸭血样品分别进行鹅、鸡、鸭、猪源性荧光 PCR 扩增反应，结果发现鸭血制品中掺入其他动物血液的情况较为普遍，掺假率达 67.9%，主要掺入成分为鸡血、鹅血和猪血。邓迎春等[62]进一步建立了可同步检测鸭血中鸡、鸭、鹅、猪、牛、羊等动物源性成分的定性检验方法，对 51 份市售鸭血样品检测发现鸭血掺假现象仍然严峻，尤其是羊血掺假较为突出，该方法检测灵敏度可达 1%。综上，qPCR 技术灵敏度高、特异性强，能够有效识别鸭血制品中复杂的动物源性掺假，为市场监管提供可靠技术支持。

mPCR 可在单一反应体系中加入多对特异性引物，同时扩增多个靶标序列，以实现多靶标同步检测[63]。与普通 PCR 相比，mPCR 具有高通量、操作简便、检测快速、适用范围广的优势。在物种源性成分鉴定中，mPCR 可基于特异性引物实现对不同动物 DNA 的同时检测与区分，已在相关研究中展现出良好的种属鉴别能力[64]。Gao 等[8]基于细胞色素 b 基因(*Cytb*)设计引物，构建了鸭血制品中可同步检测鸭及其他常见掺假动物猪、羊、牛、鸡血液的五重 PCR 体系，并对反应体系和条件进行了优化。结果证明该方法具有良好的特异性、重复性和灵敏度。吕二盼等[65]建立了快速鉴定鸭血制品掺假的 mPCR 方法，此方法可在 3 h 内完成几十个样品检测，且准确率高，实用性较强。于文莹等[12]同样以 *Cytb* 设计引物，建立了同步鉴定鸭血及 4 种常见掺假动物血(猪血、羊血、牛血和鸡血)mPCR 体系。结果显示，其检测灵敏度可达 1 ng/μL，且引物间无交叉干扰，重复性良好。张从党等[66]采用 TaqMan 探针多重 qPCR 技术，基于线粒体 16S rDNA 基因设计引物与探针，建立了可同步检测猪、鸡、鸭源性成分的高灵敏度方法，检出限为 0.10%。检测结果与国家标准一致且灵敏度更高。综上，mPCR 的技术可高效、精准鉴别鸭血制品中多种动物源性掺假。

除基于 PCR 的方法外，其他分子生物学技术也为动物血液制品的掺假鉴别提供了重要补充。基因芯片利用碱基互补杂交原理，将已知序列的探针固定于固相载体实现多靶标核酸并行检测，具有通量高、自动化程度好等优势[67]。其中，基因膜芯片属于低密度可视化芯片的一种，可在单次反应中同时检测出十至数十种目标成分，利用化学显色可直接观察到结果，适用于多靶标的快速筛查。金晓红等[68]采用可视化膜芯片技术将猪、牛、鸭等 13 种动物源性成分探针集成到一张膜芯片上，建立了一步法检测血制品中各种动物成分的方法，该方法灵敏度为 0.1%。除此之外，DNA 条形码技术与基于 CRISPR 的快速检测方法也在该领域起到了重要作用。DNA 条形码通过分析标准基因片段(如细胞色素 c 氧化酶亚基 I)的序列变异实现物种鉴别，通用性良好[69]。励炯等[70]利用该技术建立了一种血制品中能同时检测 7 种动物源性成分掺假鉴别的方法，该方法 DNA 扩增效率为 100%，最低掺假检出率为 5%。LAMP-CRISPR 则为现场快速检测提供了新途径，Tao 等[71]建立了一种低成本的 LAMP-CRISPR/Cas12a 比色检测方法，在大约 40 min 内就可以完成从 DNA 提取到结果呈现的整个过程，检出限可以达到 1.0 pg/μL，且不需复杂的仪器，适合于基层或现场快速筛查使用。总体来看，基因芯片与 DNA 条形码适

用于实验室里高通量、多靶标的检测, LAMP-CRISPR 系统更侧重于现场快速与便携化应用, 上述技术各具特点, 共同为动物血制品的真实性鉴定提供了多层次的技术支持。

基于 DNA 的分子生物学技术是鉴别鸭血及其制品物种来源及掺假问题的关键技术之一。现阶段, PCR 及其衍生技术的应用范围最广。PCR 是在体外对靶标 DNA 片段做特异性扩增[72−73]; qPCR 进一步实现了对目标成分的定量分析, 提升了检测的精确度和实用性, 适合大规模开展食品安全监测[74]; mPCR 能在单一反应体系中同时扩增多个靶标基因, 检测通量和效率都有提高[75]。基因芯片、高通量测序, 也为食品掺假鉴别提供了新方向。基因芯片将原本不连续的样品分析过程整合到一个芯片上完成, 可实现检测过程的自动化、高通量和微量化, 其中低密度基因膜芯片可借助可视化显色直接判断结果, 适合现场快速筛查[68]; 高通量测序需对样本进行全基因组测序, 全面了解其基因组特征后, 从而判别是否存在掺假[76]。尽管高通量测序成本较高, 但检测结果全面准确, 使其在高端检测领域有较好的应用潜力。综上, 以 PCR 为核心、多种分子生物学技术互为补充, 凭借靶向遗传物质的高特异性与灵敏度, 使其成为鸭血及其制品掺假鉴别中不可或缺的工具。未来, 优化 DNA 提取方法、建立标准化引物数据库, 推进技术集成与自动化, 可进一步增强该技术在保障鸭血制品真实性方面的作用。

3 结束语

当下食品安全备受重视, 鸭血等高价值动物源性食品的安全性、品质和真实性已成为监管与研究的重点。鸭血原料来源多样、加工链条长, 生产过程中容易出现不同物种交叉污染, 还有人为掺假的情况, 这让真伪鉴别工作难度较大。因此建立准确、高效的检测方法, 一直是该领域的研究热点。目前, 已有的鸭血及其制品掺假检测方法各有优劣。质谱技术的灵敏度和准确度都较高, 但成本与技术门槛偏高, 前处理步骤复杂又耗时, 还容易受到深加工导致的蛋白质变性影响; NIR、拉曼等光谱技术操作简单快捷, 无需复杂的前处理, 但建模与数据处理比较烦琐, 难以用于现场快速检测; 感官鉴别法操作简便、成本也低, 但受主观因素影响大, 特异性不强, 很难有效区分亲缘关系相近的动物血液; 气味和味觉的传感器技术检测快、成本低、适合大量样品筛查, 但重复性与稳定性都存在不足, 常需结合其他技术来提高准确率。相较而言, 以 PCR 及其衍生技术为核心的核酸分子检测方法, 因 DNA 物种特异性强、热稳定性相对较好、含量丰富等优势, 在特异性、灵敏度与通用性之间达到了较好的平衡, 是目前鉴别鸭血制品物种来源的主流技术。但该技术在实际应用中还存在诸多挑战, 比如深加工可能造成的 DNA 降解、低比例掺假(如小于 0.1%)时容易漏检、复杂样本难以准确定量、食品添加剂等基质会产生干扰、设备与操作门槛较高等, 这些问题阻碍了其在基层检测中的推广。基于此, 本文系统梳理了国内外掺假鸭血及其制品掺假鉴别技术的优势与局限, 为相关技术选择、方法优化及标准化建设提供参考。

4 展 望

未来鸭血及其制品的掺假鉴别, 可根据不同应用场景灵活选用或组合使用多种检测技术, 以实现优势互补。例如, 市场监管机构开展确证分析时, 可采用高特异性的 qPCR 或高精度的质谱技术; 流通环节开展现场筛查时可选用操作简便、耗时短的免疫学方法(如酶联免疫吸附测定试剂盒); 若需保持样品完整性, 则可选用 NIR 等无损检测技术。随着仪器分析技术的不断进步与多学科交叉融合, 有望发展出更灵敏、准确、快速、自动化的智能检测体系。通过将多重检测原理整合到一体化平台, 再结合数据融合与模型算法强化判别能力, 可实现鸭血及其制品全链条质量监控效能升级, 推动科学、高效、可持续的市场监管体系构建。

基于对现有研究的梳理, 本文尝试总结归纳出鸭血制品掺假检测技术的改进思路和趋势: (1)研发快速、经济、高效的 DNA 提取鉴定体系、并建立引物与探针数据库, 这将是进一步提升其在鸭血及其制品真实性鉴定中应用的关键方向。(2)通过结合数字/微滴式 PCR 等技术提升低比例掺假的检出能力, 从而发展出多重同步定量方法以应对复杂混合掺假情况。(3)为满足现场与基层监管的实际需求, 推进检测技术向便携化、自动化与智能化发展是重要方向。这包括开发小型集成化的快速检测设备, 研究如何将 CRISPR 等基因编辑技术的高特异性同 PCR 技术的高灵敏度相结合的新策略, 以构建适用于流通环节的现场快速鉴别装置。(4)完善动物血液制品相关物种的全面数据库(包括基因组序列、蛋白质谱图、光谱特征等)非常重要。该数据库除了能为各种检测方法提供标准化比对、提升鉴定效率与准确性之外, 还可以帮助监管部门进行风险预警、靶向抽检与全链条溯源。整合上述多层面的协同创新, 可建立起更加完善、高效、实用的鸭血制品质量安全的技术保障体系。

参考文献

[1] Li Xiaoman, Zang Mingwu, Li Dan, et al. Meat food fraud risk in Chinese markets 2012–2021 [J]. npj Science of Food, 2023, 7: 12.

[2] 钟楚涵, 蒋政. “假鸭血”风波再起小龙坎快速扩张下问题频发[N]. 中国经营报, 2021-05-03 (D03).
Zhong Chuhan, Jiang Zheng. The “fake duck blood” scandal resurfaces, and problems keep emerging as Xiaolongkan expands rapidly [N]. China Business, 2021-05-03 (D03).

[3] 微雨. 市场监管总局曝光三起食品领域典型案例[J]. 中国食品工业,

2021(17): 44–45.
Wei Yu. The General Administration of Market Supervision exposed three typical cases in the food field [J]. China Food Industry, 2021(17): 44–45.

[4] 新京评.假鸭血事件:老品牌更当珍视信誉[J].中国品牌与防伪,2012,(6):25.
The Beijing News. Fake duck blood incident: Old brands should value their reputation even more [J].China Brand and Anti-counterfeiting, 2012(3): 25.

[5] 张莺莺, 王洪洋, 涂尾龙, 等. 9 种畜禽血液的氨基酸组成和蛋白质营养分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(5): 150–158.
Zhang Yingying, Wang Hongyang, Tu Weilong, et al. Analysis of amino acid composition and protein nutrition in nine kinds of animal blood samples [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(5): 150–158.

[6] 陈菲. 鸭血豆腐加工工艺优化及品质改善技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012, 1.
Chen Fei. Study on process optimization of duck blood tofu and quality improvement [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012, 1.

[7] 中国疾病预防控制中心营养与健康所.《中国食物成分表》标准版第 6 版第一二册出版[J]. 营养学报, 2019, 41(5): 426.
Institute of Nutrition and Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention. The first and second volumes of the sixth edition of *China Food Composition Table* were published [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2019, 41(5): 426.

[8] Gao Lijun, Du Bingyang, Ma Qiuhe, et al. Multiplex-PCR method application to identify duck blood and its adulterated varieties [J]. Food Chemistry, 2024, 444: 138673.

[9] Cha J Y, Kim Y J, Kim T K, et al. Drying methods of duck blood: changes in volatile components and physicochemical properties [J]. Poultry Science, 2025, 104(1): 104561.

[10] 王鑫, 王道营, 徐为民, 等. 三种家禽血豆腐凝胶特性和滋味研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 76–82.
Wang Xin, Wang Daoying, Xu Weimin, et al. Study on the gel properties and taste of 3 kinds of poultry blood tofu [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 76–82.

[11] 谢海桃, 陈曦, 金净, 等. TaqMan 探针-实时荧光聚合酶链式反应技术检测羊肉卷中鸭源性成分及其相对含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 274–281.
Xie Haitao, Chen Xi, Jin Jing, et al. Determination of duck derived components and relative content in mutton rolls by TaqMan probe-real-time fluorescent polymerase chain reaction technique [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 274–281.

[12] 于文莹, 迟凯月, 徐宁, 等. 鉴定鸭血及掺假品种的多重 PCR 方法的建立及应用[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 307–312.
Yu Wenying, Chi Kaiyue, Xu Ning, et al. Establishment and application of multiple PCR methods for identifying duck blood and adulterated breeds [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(12): 307–312.

[13] Pressman P, Clemens R, Hayes W, et al. Food additive safety: a review of toxicologic and regulatory issues [J]. Toxicology Research and Application, 2017, 1: 2397847317723572.

[14] 甘凝岚, 颜春荣, 徐春祥. 高效液相色谱法测定鸭血制品中甲醛含量[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 204–207.
Gan Ninglan, Yan Chunrong, Xu Chunxiang. Determination of formaldehyde in duck blood products by high performance liquid chromatography [J]. Food Science, 2014, 35(12): 204–207.

[15] 付群, 庞幸, 丁威, 等. 苏州工业园区市售鸭血产品基于 PCR 技术的检测结果分析[J]. 食品安全导刊, 2025(9): 105–108.
Fu Qun, Pang Xing, Ding Wei, et al. Analysis of PCR based detection results for commercially available duck blood products in Suzhou industrial park [J]. Food Safety Guide Magazine, 2025(9): 105–108.

[16] Xu Xinrong, Zhong Jingjun, Su Yingying, et al. A brief review on mass/optical spectrometry for imaging analysis of biological samples [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2019, 54(1): 57–85.

[17] Quintanilla-Casas B, Torres-Cobos B, Bro R, et al. The volatile metabolome: gas chromatography–mass spectrometry approaches in the context of food fraud [J]. Current Opinion in Food Science, 2025, 61: 101235.

[18] 郭润泽, 张颖, 杨瑞琴, 等. 基于 CRISPR/Cas 技术的肉类掺假检测研究进展[J]. 肉类研究, 2026, 40(7): 73–80.
Guo Runze, Zhang Ying, Yang Ruiqin, et al. Advances in meat adulteration detection based on CRISPR/cas technology [J]. Meat Research, 2026, 40(7): 73–80.

[19] 李建勋, 刘彩霞, 武山开, 等. 中国白酒质量鉴别的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 2025-11-27. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044392.
Li Jianxun, Liu Caixia, Wu Shankai, et al. Research progress on quality identification of China liquor [J/OL]. China Industrial Economics, 2025-11-27. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044392.

[20] 耿永然, 汪建明, 鲁绯. 鸭血豆腐感官品质评价指标筛选[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 95–98.
Geng Yongran, Wang Jianming, Lu Fei. Selection of sensory quality evaluation indexs of duck blood tofu [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(23): 95–98.

[21] 杨雪松, 孙杨赢, 潘道东, 等. 阿拉伯胶、瓜尔豆胶复配对鸭血凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 26–32.
Yang Xuesong, Sun Yangying, Pan Daodong, et al. Effect of combination of gum Arabic and guar gum on duck blood gel properties [J]. Food Science, 2018, 39(5): 26–32.

[22] 孙江艳, 刘义凤, 刘磊, 等. 食品感官评价的技术手段与应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 359–366.
Sun Jiangyan, Liu Yifeng, Liu Lei, et al. Analysis on the technical means and application status of food sensory evaluation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 359–366.

[23] 刘洋, 贾文珅, 马洁, 等. 电子鼻技术在肉与肉制品检测中的研究进展和应用展望[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(4): 29–41.
Liu Yang, Jia Wenshen, Ma Jie, et al. Research progress and application prospect of electronic nose technology in the detection of meat and meat products [J]. Smart Agriculture, 2021, 3(4): 29–41.

[24] 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, 4-9.
Tian Xiaojing. Lamb quality inspection based on electronic nose and electronic tongue [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014, 4-9.

[25] Chen C W. Review of a current role of mass spectrometry for proteome research [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 624(1): 16–36.

[26] Núñez N, Lucci P, Núñez O. Mass spectrometry in food analysis: principles and applications [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2024, 5-8.

[27] Fang Guihua, Goh J Y, Tay M, et al. Characterization of oils and fats by 1H NMR and GC/MS fingerprinting: classification, prediction and detection of adulteration [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2–3): 1461–1469.

[28] 王冰峰, 徐雷, 徐贞贞, 等. 液相色谱-高分辨质谱技术在食品掺假鉴别研究中的应用[J]. 食品科学, 2021, 42(7): 301–310.
Wang Bingfeng, Xu Lei, Xu Zhenzhen, et al. Recent progress in the application of liquid chromatography-high resolution mass spectrometry in the identification of food adulteration: a review [J]. Food Science, 2021, 42(7): 301–310.

[29] Montowska M, Fornal E. Absolute quantification of targeted meat and allergenic protein additive peptide markers in meat products [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 857–864.

[30] Łuciuk A, Paszkowska E, Sumara A, et al. New approaches towards fish authentication: pollock and Hake differentiation by liquid chromatography high resolution mass spectrometry [J]. Food Control, 2025, 171: 111085.

[31] Häfner L, Kalkhof S, Jira W. Authentication of nine poultry species using high-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry [J]. Food Control, 2021, 122: 107803.

[32] 王军, 郭鑫, 黄俊杰, 等. 基于四极杆飞行时间高分辨质谱定量鉴别鸭血制品中掺假猪血[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(9): 350–358.
Wang Jun, Guo Xin, Huang Junjie, et al. Quantitative identification of adulterated pig blood in duck blood products based on quadrupole time-of-flight high-resolution mass spectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(9): 350–358.

[33] Song Lili, Xu Jiaquan, Chingin K, et al. Rapid identification of meat species by the internal extractive electrospray ionization mass spectrometry of hemoglobin selectively captured on functionalized graphene oxide [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(32): 7006–7011.

[34] Zhang Yingying, Wang Shouwei, Ma Yanhong, et al. Identification and absolute quantification of animal blood products by peptide markers using an UPLC–MS/MS method [J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(3): 581–589.

[35] 张昊. 食品中甲醛的来源及检测意义[J]. 检验检疫学刊, 2020, 30(2): 111–112.
Zhang Hao. Source of and its detection significance formaldehyde in food [J]. Journal of Inspection and Quarantine, 2020, 30(2): 111–112.

[36] Angel T E, Aryal U K, Hengel S M, et al. Mass spectrometry-based proteomics: existing capabilities and future directions [J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(10): 3912.

[37] Ahamed Z, Seo J K, Eom J U, et al. Optimization of volatile compound extraction on cooked meat using HS-SPME-GC-MS, and evaluation of diagnosis to meat species using volatile compound by multivariate data analysis [J]. LWT, 2023, 188: 115374.

[38] Baeten V, Dardenne P. Spectroscopy: developments in instrumentation and analysis [J]. Grasas y Aceites, 2002, 53(1): 45–63.

[39] Zareef M, Chen Quansheng, Hassan M M, et al. An overview on the applications of typical non-linear algorithms coupled with NIR spectroscopy in food analysis [J]. Food Engineering Reviews, 2020, 12(2): 173–190.

[40] 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, 2-4.
Qin Panzhu. Research on the rapid identification of common meat derived components based on the principles of nucleic acid amplification [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021, 2-4.

[41] Wang Wenxiu, Peng Yankun, Sun Hongwei, 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.

[42] Zhang Linna, Zhang Shengzhao, Sun Meixiu, et al. Blood species identification using Near-Infrared diffuse transmitted spectra and PLS-DA method [J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 76: 587–591.

[43] Dong Jialin, Hong Mingjian, Xu Yi, et al. A practical convolutional neural network model for discriminating Raman spectra of human and animal blood [J]. Journal of Chemometrics, 2019, 33(11): e3184.

[44] Han Fangkai, Ming Li, Aheto J H, et al. Authentication of duck blood tofu binary and ternary adulterated with cow and pig blood-based gel using Fourier transform near-infrared coupled with fast chemometrics [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 935099.

[45] Sandran D D, Zakaria Y, Md Muslim N Z, et al. Species determination and discrimination of animal blood: a multi-analytical spectroscopic-chemometrics approach in forensic science [J]. Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences, 2024, 20: 142–145.

[46] 刘晨, 陈复生, 夏义苗, 等. 拉曼光谱技术在食品分析中的应用[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 267–271.
Liu Chen, Chen Fusheng, Xia Yimiao, et al. Analysis in food using Raman spectroscopy [J]. The Food Industry, 2020, 41(4): 267–271.

[47] 吴月, 曹蕾, 何珊. 拉曼光谱技术在食品掺假检测中的应用[J]. 食品工业, 2025, 46(5): 321–326.
Wu Yue, Cao Lei, He Shan. Applications of Raman spectroscopy in food adulteration detection [J]. The Food Industry, 2025, 46(5): 321–326.

[48] Wang Hongpeng, Fang Peipei, Yan Xinru, et al. Study on the Raman spectral characteristics of dynamic and static blood and its application in species identification [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2022, 232: 112478.

[49] Bian Haiyi, Wang Xiaoyan, Yu Yinshan, et al. The identification of blood species using the correlation coefficient of sub-spectra based on Raman spectroscopy [J]. Optik, 2020, 200: 163312.

[50] Aït-Kaddour A, Jacquot S, Micol D, et al. Discrimination of beef muscle based on visible-near infrared multi-spectral features: textural and spectral analysis [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(6): 1391–1403.

[51] 王大臣, 王子杰, 姜雨珊, 等. 基于光谱和成像技术的肉类品质无损检测研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(11): 404–415.
Wang Dachen, Wang Zijie, Jiang Yushan, et al. Recent advances in nondestructive detection of meat quality based on spectroscopy and imaging techniques [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(11): 404–415.

[52] O'Reilly F J, Rappsilber J. Cross-linking mass spectrometry: methods and applications in structural, molecular and systems biology [J]. Nature Structural & Molecular Biology, 2018, 25(11): 1000–1008.

[53] Li Yuncheng, Liu Shuyan, Meng Fanbing, et al. Comparative review and the recent progress in detection technologies of meat product adulteration [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2256–2296.

[54] Samad Hosseini S, Jebelli A, Vandghanooni S, et al. Perspectives and

trends in advanced DNA biosensors for the recognition of single nucleotide polymorphisms [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 441: 135988.

[55] Kumar A, Kumar R R, Sharma B D, et al. Identification of species origin of meat and meat products on the DNA basis: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(10): 1340–1351.

[56] 覃丽红, 陈怡, 彭永秀, 等. 肉制品掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品工业, 2026, 47(3): 252–255.
Qin Lihong, Chen Yi, Peng Yongxiu, et al. Research progress on detection techniques for adulteration in meat products [J]. The Food Industry, 2026, 47(3): 252–255.

[57] 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 Ruoxin, Zhang Duoduo, Pu Bazhaxi, 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.

[58] Sentandreu M Á, Sentandreu E. Authenticity of meat products: tools against fraud [J]. Food Research International, 2014, 60: 19–29.

[59] Sakai Y, Kotoura S, Yano T, et al. Quantification of pork, chicken and beef by using a novel reference molecule [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2011, 75(9): 1639–1643.

[60] 陈果. 实时荧光 PCR 检测鸭血中的动物源性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(11): 3339–3342.
Chen Guo. Detection of animal-derived ingredients in duck blood curd by real-time PCR [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(11): 3339–3342.

[61] 李美桃, 张春鹏, 王波. 实时荧光 PCR 检测鸭血制品中掺假成分[J]. 食品工业, 2022, 43(1): 293–295.
Li Meitao, Zhang Chunpeng, Wang Bo. Identification of animal derived materials in duck blood products by real-time PCR [J]. The Food Industry, 2022, 43(1): 293–295.

[62] 邓迎春, 刘颖, 王一凡, 等. 实时荧光 PCR 法检测鸭血制品中其他动物源性成分[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 342–348.
Deng Yingchun, Liu Ying, Wang Yifan, et al. Qualitative detection methods of animal derived ingredients in duck blood by real-time fluorescence PCR [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 342–348.

[63] 王友凯, 高腾琪, 杨吉祥, 等. 生物技术在食品检验检测中的应用[J]. 中国食品工业, 2026(7): 95–99.
Wang Youkai, Gao Tengqi, Yang Jixiang, et al. The Application of Biotechnology in Food Inspection and Testing [J]. China Food Industry, 2026(7): 95–99.

[64] Iwobi A, Sebah D, Kraemer I, et al. A multiplex real-time PCR method for the quantification of beef and pork fractions in minced meat [J]. Food Chemistry, 2015, 169: 305–313.

[65] 吕二盼, 周正, 周巍, 等. 动物源性食品鸭血、猪血 DNA 提取及多重 PCR 鉴别研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 228–231, 256.
Lv Erpan, Zhou Zheng, Zhou Wei, et al. DNA extraction and multiple PCR distinction research of animal food duck blood and pig blood [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(16): 228–231, 256.

[66] 张从党, 王均华, 吴海晶, 等. 鸭血制品中猪、鸡、鸭源性成分的多重实时荧光定量聚合酶链式反应检测方法建立与应用[J]. 肉类研究, 2026, 40(3): 62–68.
Zhang Congdang, Wang Junhua, Wu Haijing, et al. Development and application of a multiplex real-time fluorescence quantitative polymerase chain reaction method for detecting porcine-, chicken-and duck-derived components in duck blood curd [J]. Meat Research, 2026, 40(3): 62–68.

[67] 吴鹏, 孙雅和, 朱旭丽, 等. 食源性致病菌快速检测技术及其标准化应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 426–437.
Wu Peng, Sun Yahe, Zhu Xuli, et al. Research progress on rapid detection technology and standardized application of foodborne pathogens [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 426–437.

[68] 金晓红, 金萍, 丁洪流. 膜芯片检测技术应用于苏州市市售鸭血制品掺假检测[J]. 食品工业, 2023, 44(9): 153–156.
Jin Xiaohong, Jin Ping, Ding Hongliu. Utilizing membrane chip technique for the detection of adulteration in Suzhou's duck blood products [J]. The Food Industry, 2023, 44(9): 153–156.

[69] 夏浩天, 张婕, 刘倩, 等. DNA 条形码技术在物种识别与产品鉴定中的应用[J]. 中国生物工程杂志, 2025, 45(4): 78–92.
Xia Haotian, Zhang Jie, Liu Qian, et al. Advances in DNA barcoding technology for species identification and product authentication [J]. China Biotechnology, 2025, 45(4): 78–92.

[70] 励炯, 吴琼, 江海, 等. DNA 条形码技术在食用血制品掺杂成分鉴别中的应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 43–48, 138.
Li Jiong, Wu Qiong, Jiang Hai, et al. Application of DNA barcoding technology in the identification of adulterated ingredients of edible blood products [J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 43–48, 138.

[71] Tao Dagang, Xiao Xiao, Lan Xiaochen, et al. An inexpensive CRISPR-based point-of-care test for the identification of meat species and meat products [J]. Genes, 2022, 13(5): 912.

[72] Chen Xiaoyun, Ji Yi, Li Kai, et al. Development of a duck genomic reference material by digital PCR platforms for the detection of meat adulteration [J]. Foods, 2021, 10(8): 1890.

[73] Yu Chengzhuang, Dai Shijie, Zhang Ziqi, et al. An integrated digital polymerase chain reaction chip for multiplexed meat adulteration detection [J]. Electrophoresis, 2023, 44(17–18): 1342–1352.

[74] Kang T S, Tanaka T. Comparison of quantitative methods based on SYBR Green real-time qPCR to estimate pork meat adulteration in processed beef products [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 549–558.

[75] Wang Yanshuang, Yuan Guangxin, Zhang Li, et al. Establishment of a multiplex-PCR detection method and development of a detection kit for five animal-derived components in edible meat [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(4): 104593.

[76] 丁清龙, 杨丹婷, 谢爱华, 等. 基于宏基因组测序技术的非靶向筛查方法检测肉类食品中的动物源性成分[J]. 食品安全导刊, 2023(33): 58–62, 67.
Ding Qinglong, Yang Danting, Xie Aihua, et al. Determination of animal-derived ingredients in meat products by non-targeted screening method based on metagenomic sequencing technology [J]. China Food Safety Magazine, 2023(33): 58–62, 67.

(责任编辑：曹岱琳　韩晓红)