DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240912006

# 肉制品中动物源性成分鉴别研究进展

刘 瑞*, 白李薇薇

(中国人民公安大学侦查学院, 北京 100083)

**摘 要:** 随着人们对肉及肉制品的需求不断增长, 在利益的驱使和科技的加持下, 肉制品掺假问题日趋严重, 严重损害了消费者的身体健康和合法权益, 阻碍了我国进出口贸易的顺利进行。因此肉制品中动物源性成分的鉴别技术逐渐成为研究热点。本文从形态学鉴定、核酸分析技术、蛋白质分析技术、无损检测技术和快速检测技术 5 个方面, 对肉及肉制品中动物源性成分的鉴别方法现状进行了综述, 并对其进行总结与比较, 深入分析每种技术的优缺点。同时总结了近年来掺假鉴别技术在公安机关与食品企业的应用实践, 旨在为肉制品掺假鉴别研究提供有益的参考, 为有效打击肉制品掺假行为提供强有力的技术支持和坚实的理论依据。

**关键词:** 动物源性成分鉴别; 肉制品掺假; 基因组学技术; 蛋白质组学技术; 无损检测技术

## Research progress on identification of animal-derived components in meat products

LIU Rui*, BAI LI-Wei-Wei

(*College of Investigation*, *People's Public Security University of China*, *Beijing* 100083, *China*)

**ABSTRACT:** With the growing demand for meat and meat products, the issue of adulteration in meat products has become increasingly severe under the drive of interests and the addition of science and technology. It has seriously damaged the health and legitimate rights and interests of consumers and hindered the smooth progress of China's import and export trade. Therefore, the identification technology of animal-derived components in meat products has gradually become a research focus. This paper reviewed the identification methods of animal-derived components in meat and meat products from 5 aspects: Morphological identification, nucleic acid analysis, protein analysis, non-destructive testing and rapid detection. Summarized and compared the advantages and disadvantages of each technique. Simultaneously, the article summarized the practical applications of adulteration identification technologies in public security organs and food enterprises in recent years. In order to provide valuable references for research on the identification of adulteration in meat products.

**KEY WORDS:** identification of animal-derived components; adulteration of meat products; genomics techniques; proteomics technology; non-destructive detection technology

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022JKF435)

**Fund:** Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities Project (2022JKF435)

***通信作者:** 刘瑞, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品真实性鉴定。E-mail: liurui1987110@126.com

***Corresponding author:** LIU Rui, Ph.D, Lecturer, People's Public Security University of China, No.1, Muxidi Nanli, Xicheng District, Beijing Municipality, Beijing 100083, China. E-mail: liurui1987110@126.com

## 0　引　言

从古至今, 肉类在人类的饮食结构中都发挥着重要作用。尤其是反刍动物(牛肉和羊肉)和家禽(鸡肉和鸭肉)更是受世界各地欢迎的肉类资源, 其能够提供必要的营养, 如蛋白质、亚油酸、维生素、矿物元素等[1]。然而, 随着消费者对肉以及肉制品的需求不断增长, 在利益的驱使和科技的加持下, 肉制品掺假掺杂事件发生的比例仍在不断提升, 已经成为严重的全球性问题。2013 年涉及英国、法国、爱尔兰等 16 个国家的“马肉风波”, 在牛肉制品中检出马源性成分, 甚至部分制品未检出牛源性成分。这件事虽然使得不少消费者改变了消费习惯, 各国也出台了相应的法律法规, 但掺假事件仍屡禁不止[2]。

2017 年, 媒体曝光一种“牛肉膏”添加剂, 可在 1 h 内将鸡肉、猪肉加工成“牛肉”, 并通过注射牛肉脂肪赋予掺假肉牛肉风味。2018 年 9 月, 英国食品标准局(Food Standards Agency, FSA)披露的一份调查报告显示, 抽检的 665 份含肉食品有五分之一掺假。2023 年 9 月初, 有博主在社交平台发布视频, 曝光巴奴旗下子品牌“超岛自选火锅”北京合生汇店卖“假羊肉”[3]。经检测机构检测, 包含涉事产品高钙羊肉卷在内的 2 种精选羔羊肉原材料样品中检出羊源性、牛源性及鸭源性成分。肉类掺假, 无论是有意还是无意, 都违反市场规则, 也违背道德规范和宗教法律。例如, 在伊斯兰教和犹太教中, 猪肉的消费受到严格限制; 印度教徒禁食牛肉[4–5]。

目前, 肉制品的掺假主要有以下形式: 原料肉掺假, 用低价肉代替高价肉, 如在羊肉卷里掺鸭肉; 组织替换, 用其他动物组织、脂肪等替换肌肉组织成分或者添加进去; 非肉成分添加, 如注水肉、注胶肉及掺入植物蛋白等。动物源性食品安全问题深刻影响着社会的整体稳定与发展, 这不仅直接关系到国人的生命健康质量, 更牵动着我国食品工业的繁荣与肉制品进出口贸易的顺畅进行, 其重要性已不容忽视。因此, 借助科学技术手段鉴别肉制品中动物源性成分, 保障肉类食品质量和安全至关重要。本文综述了肉制品中动物源性成分鉴别技术的最新进展, 包括核酸分析技术、蛋白质分析技术、无损检测技术、快速检测技术等多个方面, 并对这些技术的优缺点进行深入对比分析。旨在为肉制品掺假鉴别研究提供参考, 为有效打击肉制品掺假行为提供强有力的技术支持和坚实的理论依据。

## 1　形态学鉴定

用形态学的方法进行肉源鉴定主要是根据不同肉类的组织学特性, 采用电镜技术对比观察样品中骨骼肌、结蹄组织、骨骼组织等细胞组织结构进行判定, 并判断其中是否混有植物成分。

20 世纪 60 年代, 电镜技术开始应用于肉类科学研究领域, 其高分辨率成像能力可以清晰地显示出肌肉细胞内部的超微细结构甚至分子形态。该方法具有假阳性率低、检出限低、分析热稳定性好的优点[6]。但分析结果往往具有较强的主观性, 对检测者的专业经验和判断能力有较高的依赖, 如在含有细胞碎片的肉骨粉样本中, 虽然可以检测到微量的动物源性成分, 但却不能区分动物品种, 通常只能宽泛地将其归类为哺乳动物、禽类或鱼类, 无法进一步细化[7]。21 世纪初期, PRAYSON 等[8]采用光学显微镜、电子显微镜等形态学方法评估部分热狗品牌的肉和水含量, 以确定包装标签是否准确。结果表明大多数品牌都含超 50%的水, 而肉(骨骼肌)含量不到 10%, 所有热狗都含有其他组织成分, 如骨骼和软骨。

随着扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、共聚焦激光扫描显微镜(confocal laser scanning microscope, CLSM)等显微分析技术的不断发展与广泛使用, 逐渐克服了形态学鉴定主观性强的缺点, 极大地提升了检测的精确性与可靠性。20 世纪七八十年代 SEM 就已被用于揭示肉类结构中与工艺相关的变化[9–10]。随后, CLSM 也被用于观察肉类结缔组织、肌纤维和肌丝, 并监测猪肉肌肉、猪绞肉、牛肉的鲜肉与熟肉之间的结构差异[11–12] 。

## 2　核酸分析技术

近年来, 基于核酸的 DNA 生物分析技术得到了快速发展。DNA 具有较高的稳定性和灵敏度, 可以有效避免加工方法对肉类产品造成的影响, 目前已经逐步成为动物源性检测的主要手段。

### 2.1　实时荧光定量聚合酶链式反应

基因组 DNA 具有特异性与稳定性, 因此可以用具有物种特异性的 DNA 序列作为靶标进行聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)反应, 这是一种灵敏度很高的方法, 已经逐渐成为检测肉制品掺假的一种重要手段[13–14]。但常规 PCR 只能进行定性检测, 为定量分析 DNA 扩增以及有效解决因 DNA 含量太低而难以对样品进行分析研究的问题, 实时荧光定量 PCR (quantitative real-time PCR, qPCR)逐渐用于食品安全检测, 可通过挖掘动物物种种间变异、种内高度保守目标基因, 构建高特异高分辨靶标基因判别及分子生物标记识别方法。

qPCR 是在 PCR 扩增反应体系中加入 DNA 荧光染料或标记荧光染料的基因特异寡核苷酸探针, 对每一个循环产物荧光信号进行实时检测, 通过标准曲线对未知样品进行定量分析的技术。与 TaqMan 探针的高特异性不同, 荧光染料与 DNA 是非特异性结合, 可能产生假阳性的结果,

因此需要根据实际情况选择合适的染料。在常用的染料中，EvaGreen 和 SYTO-9、SYTO-13、SYTO-82 比 SYBR Green I (SG)灵敏度更高、更稳定、结果重现性更好。此外，EvaGreen 对 PCR 的抑制作用比 SG 小得多，可在较高的浓度下使用，使 PCR 扩增产物通过熔融曲线分析，达到更加优越的鉴别[15]。

考虑到熟肉及加工制品的 DNA 稳定性可能受到一定程度的破坏，李亮等[16]根据牛线粒体差异序列以及 16S rDNA 内参基因设计引物和探针，并计算出了总 DNA 浓度以及牛源性成分 DNA 浓度，该方法灵敏度较高，最低检出限为 10 pg/μL，平均回收率高达 98.62%，为牛肉的掺假检测提供重要参考。HAI 等[17]开发了一种针对 12S rDNA 的三重实时 PCR 技术，可以准确检测出各种肉类食品中 0.1%骆驼源性成分和牛源性成分。WANG 等[18]开发了一种多重实时 PCR 技术，用于鉴别绵羊/山羊、狐狸和鼠，灵敏度为 0.05 ng。KUSNADI 等[19]通过优化裂解条件，利用裂解缓冲液提取基因组，测定粗 DNA 的浓度和纯度。然后，将结果与多种方法进行比较，得出在猪肉检测过程中，直接 qPCR 法具有简便性、精确性、快速性以及适用性的结论。

### 2.2 数字 PCR 定量

虽然实时荧光定量 PCR 法已经广泛应用，但只能达到相对定量分析，其检测灵敏度和准确性还达不到精细定量要求，对于肉制品掺假的检测具有一定的局限性。而数字 PCR (digital PCR, dPCR)弥补了这一不足，将传统 PCR 的指数倍信号转换成线性数字信号通过特定的仪器读值，并利用统计学方法来分析 PCR 产物，对核酸达到精准定量。将 PCR 反应体系中含有的 DNA 或 RNA 分成约 20000 个微滴，经过 PCR 扩增后，逐一检测每个微滴的反应。当微滴发出荧光信号时判读为 1，没有荧光信号时判读为 0，根据泊松分布原理以及阳性微滴的数量和比例，即可确定靶分子的初始拷贝数[20]。但难点在于其不同组织中选择的目标基因的拷贝数不同、不同组织中 DNA 提取效率不同等，这些都会影响到最终的转化率。因此，找到合适的转化系数、DNA 浓度以及质量百分比等参数尤为重要。

刘立兵等[21]以牛的生长激素基因和猪的阮蛋白基因为靶基因合成引物和探针建立了牛肉中猪源性成分检测的微滴式数字 PCR (droplet digital PCR, ddPCR)方法，检出限达到 0.625 ng/μL，绝对误差不超过 1.28%，猪肉成分的回收率在 99.09%到 102.80%之间。吴海晶等[22]选择羊和鸭基因组中单拷贝基因 RPA1 作为靶基因，设计引物和探针，建立了能够同时对羊和鸭源性成分定量检测的 ddPCR 检测方法。绝对误差范围在–0.68%到 0.35%范围内，具有较高的准确性和重复性。王溪桥等[23]以猪的肌肉组织为研究靶标，选取羊、牛、马、驴、鸭等物种的肌肉组织作为特异性鉴定的研究对象，基于 ddPCR，建立了检测猪肉掺假的方法。检测发现数字 PCR 检测体系特异性较强，且在 10~2000 copies/μL 的范围内具有较高的检测线性，在实际应用中具有较高的价值。

### 2.3 基因芯片高通量鉴别

基因芯片，亦称作 DNA 微阵列，是一种现代分子生物学的工具。它将一系列已知的基因序列探针集成在同一基片上，经过特异性标记的靶核苷酸序列会与芯片上特定位点的探针进行杂交反应，通过捕捉杂交信号，实现对细胞或组织中大量基因信息的分析。基因芯片拥有高度并行性，能够同时检测和分析大量样本，极大提高了实验效率；具有多样性，可以适应不同的研究需求。另外芯片本身的微型化设计使得数据采集更加便捷，且自动化程度高，易于操作，降低了实验的复杂性和成本，提高了数据分析的准确性。随着悬浮芯片、膜芯片等技术的发展，检测通量显著提高，对未知肉品中牛、羊、猪、马、鹿、兔、驴、牦牛等成分的定性检测最低检出限可达 0.01% (*w*/*w*)[24–25]。

### 2.4 DNA 指纹图谱技术

DNA 指纹图谱技术是由英国科学家 JEFFREYS 于 1986 年开发，具有通量高，重现性好，灵敏度高等优点，可以区分序列中小至单个碱基的差异，是鉴定物种的有力工具。目前，食品检测中常用的 DNA 标记技术有扩增片段长度多态性、限制性片段长度多态性、单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)、多核苷酸多态性(multiple nucleotide polymorphism, MNP)等。当需要精确区分不同地域品种时，SNP、MNP 能够捕捉到这些种群间因生存环境、驯化条件等不同所产生的细微遗传差异。这些差异虽然仅体现在 DNA 序列的单个或少数几个碱基上，却足以成为区分不同亚种或生态型的可靠标志，这为 SNP 和 MNP 技术的应用提供了理论基础。

吴华莉等[26]检测了 13 个基因在梅山猪、申农猪群体内 14 个 SNP 位点的多态性，确定了 MMP19、PSMB10、NR4A1 和 GRN 4 个基因共 5 个 SNP 位点的猪肉溯源 SNP 指纹图谱，为这两个品种猪肉溯源提供了保障。YI 等[27]采用 MNP 标记技术，建立了针对肉及肉制品中牛、山羊、绵羊、驴、马、鸡、鸭、鹅、鸽、鹌鹑的多位点动物源性成分鉴定方法，能够同时检测多个物种，在鸡、鸭和马的模拟样品中检出限为 0.1% (*w*/*w*)。

此外这些技术在药用动物品种的鉴别中也发挥了重要作用。以马鹿与梅花鹿为例，两者均被收录于中国药典，其鹿茸具有较高的药用价值。然而，市场上存在驯鹿、白唇鹿、水鹿等常见鹿种茸片的混伪品，以及用马·花杂交、花·马杂交等杂交鹿茸进行掺假的情况[28]，这些品种的鹿茸药效往往不及正宗马鹿或梅花鹿。通过 SNP、MNP 技术

构建 DNA 指纹图谱, 可以有效鉴别这些药用动物的品种纯度及杂交情况, 确保药材的质量与药效。

### 2.5　基因条码非靶标鉴别

大多数基于DNA的检测方法都是针对特定靶向目标的检测, 但对于混合物中的未知物种无法进行分析。为了克服这些方法的局限性, DNA 条形码技术由此诞生, 为物种鉴定提供了一种非靶向鉴定的解决方案[29]。该技术以 Sanger 测序法为基础, 通过将未知样本的 DNA 条码与参考序列进行比较, 对未知样本进行物种鉴定[30]。目前该方法已被广泛应用于生物多样性分析、物种鉴定、食品安全检测等各领域, 也成为肉制品检测的重要工具。早期的 DNA 条形码技术主要在 *COI* 和 *CtyB* 基因的一个约 650 bp 的区域进行检测, 不适用小于 200 bp 的 DNA 小片段, 且当肉制品中存在多个掺假成分时, 传统的 Sanger 测序会产生多个或叠加的测序峰, 从而导致错误的序列信息[31]。因此基于一代测序(Sanger 测序)的 DNA 条码技术可以用于检测成分单一、未进行过深加工处理的食品。目前已筛选出物种分辨率高、边界保守的通用 DNA 长条码(*COI*、16S rRNA 等), 并以此开发了肉制品、鲑科鱼、海参、果汁等 200 余种特色高值食品的非靶向鉴别方法。然而针对物种成分复杂、掺假隐蔽、深度加工的特色食品, 基于高通量测序技术测序(next-generation sequencing, NGS)的 DNA 条形码组合则更有望实现高通量、更精准的多物种成分鉴定。

夏若成等[32]基于 16S rRNA 基因构建了一套基本局部比对搜索工具(basic local alignment search tool, BLAST)同源性比对联合系统进化树分析的动物种属鉴定检测方法, 成功协助公安机关破获猪肉冒充牛肉销售的食品掺假案件一例。XING 等[33]将 *COI* 基因区域和 16S rRNA 区域分别用作 DNA 条形码和 DNA 微型条形码标记, 共生成了 49 个条形码序列, 以测试中国市场销售的各种动物源性食品是否存在潜在的错误标签。调查显示, 23%的动物源性食品存在标签不当的问题, 且在大多数情况下包含未申报的物种。COTTENET 等[34]评估了投入市场使用的 NGS 方法的性能。该方法能够正确识别所有纯肉样品, 在源性成分低至 1% (*m*/*m*)的混合物中成功检测和鉴定到指定物种。MAHAMA 等[35]将 NGS 与 rRNA 基因结合, 鉴定牛、鸡、鱼和猪四种肉类物种。结果表明, NGS 与 16S-KH 引物结合对四类肉类物种都有阳性作用, 这对于监测肉类掺假具有重要意义。

## 3　蛋白质分析技术

蛋白质组学是一种大规模、高通量的蛋白质分析技术, 被视为后基因组时代全面分析基因及蛋白质功能结构的重要手段。在食品领域, 加工条件和高温烹饪导致 DNA 分子分解成越来越小的碎片, 增加了产生非特异性片段的机会, 而肽生物标志物的氨基酸序列比 DNA 序列更能抵抗食品加工, 因此蛋白质组学方法开始用于检测和鉴定肉制品品质[36]。

近二十年来, 随着二维凝胶电泳、液相二级质谱等蛋白质分离和鉴定技术的不断改进, 蛋白质组学在肉类科学领域的应用越发成熟, 为研究肉质的分子机制和生物标志物的功能特性做出了巨大贡献。蛋白质组学技术包括低通量方法, 如基于抗体的方法、基于凝胶的方法、基于色谱的方法; 高通量方法, 如分析微阵列、功能微阵列和反相微阵列、基于质谱的蛋白质组学。酶联免疫吸附试验(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)是基于抗体的方法, 依靠特定蛋白质或表位的抗体的可用性识别蛋白质并量化其表达水平。与 DNA 检测技术相比, ELISA 具有样品制备简单、成本低、时间消耗少的优势。此外, ELISA 不需要复杂的设备, 更适用于现场检测[37]。MANDLI 等[38]开发了 ELISA/免疫传感器用于灵敏检测肉类中的猪肉掺假, 进行了竞争 ELISA 和直接 ELISA 两种形式。直接免疫传感器能够在 2 h 内分别识别生肉和熟肉中的 0.1%和 1%; 竞争性免疫传感器能够在 20 min 内检测 0.01%的猪肉掺假。两种传感器灵敏度高、特异性好、分析时间短, 为食品和饲料生产过程中肉类质量控制和政府机构执法提供重要参考。但由于 ELISA 依赖于抗原抗体特异性反应, 因此只能检测已经开发出特异性抗体的肉类物种[39]。

二维凝胶电泳(two-dimensional gel electrophoresis, 2-DE)是经典的基于凝胶的方法, 其原理是利用电信号将蛋白分子按一定的电荷和质量进行分离。MONTOWSKA 等[40]使用 2-DE 和质谱法证明了使用肌球蛋白轻链异构体作为标记鉴定 6 种肉类产品的潜力, 即牛肉、猪肉、鸡肉、火鸡、鸭肉和鹅。研究人员还证明了使用一些调节蛋白、代谢酶、肌原纤维和血浆蛋白作为标记鉴定牛、猪、鸡、鸭、火鸡和鹅肉的潜力。NAVEENA 等[41]开发了基于 2-DE 和等电聚焦(isoelectric focusing, OFFGEL)分级分离的蛋白质组学方法, 用于鉴定生水牛和熟水牛、绵羊和山羊肉及其混合物。基于 2-DE 和质谱的凝胶法可检测出水牛肉中高达 1.0%的绵羊和山羊肉, 而基于 OFFGEL 电泳系统与质谱的方法则能检测出更低至 0.1%的羊肉含量。近年来, 基于质谱的蛋白质组学方法已成为食品认证的强大工具, 是蛋白质研究的主要驱动力。相较于传统的 ELISA 和基于 PCR 的方法, 质谱技术能够实现在单个实验中对数千种蛋白质进行全面、快速的鉴定与定量分析, 极大地提高了研究效率与准确性。ZHANG 等[42]建立了一种基于高效液相色谱串联质谱联用技术的方法, 使用高分辨率质谱仪筛选了猪、牛、羊、鹿等 7 个物种的 35 种物种特异性肽。该方法从样品接收到得出结果仅需 3 h, 在快速鉴定肉制品成分方面具有较高的灵敏度、特异性和实用性。

在质谱技术的基础上，一系列“无凝胶”蛋白质分离技术出现，靶标多肽的物种成分定量检测技术逐渐成熟。这些技术不仅简化了样品处理流程，还显著提高了蛋白质定量的精确度和可重复性，为食品安全检测提供了更加全面、深入的数据支持。2020 年底，辽阳市公安局利用靶标多肽技术对 22 份狐狸肉及肉冻开展了定性定量测定，成功侦破狐狸肉充当其他肉类售假一案，保护了消费者的合法权益，维护了食品市场的公平竞争秩序，进一步提升了公众对食品安全的信心。

## 4 无损检测技术

### 4.1 高光谱成像技术

高效液相色谱、质谱、PCR 等检测技术在肉制品掺假检测方面已经较为成熟。然而，这些技术需要复杂的样品制备过程，对样品有损，成本高、耗时且费力。因此近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱、高光谱等光谱技术逐渐在检测肉类掺假方面展现出巨大潜力。

高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)融合了光谱学和成像技术，光谱分辨率较高、波长覆盖范围较广，可以无损获取样品的光谱信息和空间信息做到同时检测样品的外部品质和内部成分[43]，在检验生肉和加工肉制品方面很受欢迎。曾用于检测掺有明胶的虾[44]、掺有猪肉的羊肉[45]、掺有老鼠肉或火鸡肉的牛肉等[46–47]。JIANG 等[48]使用反射模式下的可见光和近红外(400~1000 nm) HSI 系统，在 0%~100% (*m*/*m*)的范围内以 10%的增量从掺假肉类样品中获得了 176 张高光谱图像，建立了偏最小二乘回归模型。该技术成功实现了淋巴肉掺假猪绞肉的识别与检测，并提供了比传统成像和近红外光谱更详细的可视化信息。孔丽琴等[49]基于高光谱的快速检测技术，利用连续投影算法筛选的 44 个特征波长和竞争性自适应重加权算法筛选的 38 个特征波长，分别构建了极限学习机分类模型对熟牛肉丸复合掺假进行检测，校正集和预测集分类准确率均高于 96%。此技术为生肉熟肉复合掺假检测提供了高效、准确的方法，并促进了便携式检测设备的研发。此外高光谱成像技术还可用于对注水牛肉的鉴别，基于水分分布异常及肌肉组织光学特性的微妙变化，通过图像处理技术，可以精确区分自然状态与注水后的牛肉组织差异，为食品安全监管提供科学依据。对于辐照处理过的肉制品，高光谱技术同样展现出强大的鉴别能力。辐照处理虽能有效延长肉类的保质期并杀灭致病菌，但也会对其肌肉组织的质构和生物化学特性造成影响。利用高光谱图像中特定波段的反射或吸收特性变化，可以精准识别出辐照处理过的肉类，有助于保障消费者的知情权和健康权益。

深度学习的快速发展不仅使高光谱图像分类更加精细，还推动了高光谱图像解译的智能化，提高了解译的效率和准确性。AL-SARAYREH 等[50]建立了一种基于 3D 卷积神经网络的红肉种类检测模型。该模型在红肉分类方面表现出稳健性，近红外和可见光高光谱成像的总体准确率分别为 96.9%和 97.1%。AYAZ 等[51]用深度学习算法对样品进行分类来识别碎肉。使用 Fx10 高光谱传感器获取了 60 个 HSI 图像，用于训练 3D 卷积神经网络模型，总体准确率为 94.0%。

### 4.2 生物传感器

随着纳米材料与电子技术的快速发展，石墨烯场效应晶体管生物传感器在食品安全检测中展现出极大的发展前景。其工作原理是利用电荷掺杂效应和静电效应[52]。当食物中携带电荷的生物大分子接近石墨烯表面时，会引起石墨烯电荷分布的变化，从而影响其导电性或狄拉克点的改变，通过电信号的变化完成对生物分子的定性和定量分析。该技术具有高灵敏度、高选择性、快速分析、无需复杂标记、无损、易微型化和集成化等优点，有望成为掺假食品快速无损检测的重要工具[53–54]。GAO 等[55]构建了判别冷冻、解冻牛肉的溶液栅石墨烯晶体管传感器。其检测机理主要为血红素分子通过 π-π 相互作用吸附在石墨烯表面，从而导致石墨烯掺杂水平的变化。该传感器对血红素检测具有良好的选择性，显示出 10 nm 的极低检出限和 10~100 nm 的线性范围，并成功通过牛肉样品中的血红素流失率确定了冷冻和解冻循环次数，进而准确识别出冷冻牛肉的质量，为揭露冷冻牛肉冒充新鲜牛肉的欺诈行为提供技术支撑。

## 5 快检技术

传统的肉类检测技术，尽管在保障食品安全和质量控制方面发挥着重要作用，但其流程往往烦琐复杂，且前处理周期长，在面对大批量肉制品快速筛查的需求时显得力不从心，随着科技的飞速进步，一系列新兴技术应运而生，为肉类检测领域带来了革命性的变化，流控技术、快速蒸发电离质谱法等先进技术的应用，不仅克服了传统检测方法的弊端，还为实现肉制品的快速、廉价、准确的大规模筛查提供了强有力的技术支持。随着这些技术的不断成熟和完善，相信未来在保障食品安全和推动食品工业发展方面将发挥更加重要的作用。

微流控技术以对微小尺度流体进行精密操控的技术手段为核心，构建了一个功能强大的微型分析平台，又称芯片实验室或微流控芯片技术[56]。这项技术将生物、化学、医学分析中的样品预处理、反应、分离及检测等步骤，巧妙地集成于一块微米尺度的芯片上，实现了分析流程的自动化与集成化。NIEBLING 等[57]提出了一种的离心微流控方法来快速识别肉制品中的动物物种。该方法能够在一小时内识别六种物种，且在含有马肉、火鸡肉、羊肉、鸡肉

和牛肉的猪肉萨拉米香肠中, 可以鉴定出低至 0.01%的动物源性成分。在牛肉萨拉米香肠和熟猪肉香肠中, 可以检测到 0.1%的外来肉类。XIAO 等[58]开发了一种检测多种肉类掺假的便携式分析仪。只需用牙签提取 DNA 放入仪器, 然后用智能手机驱动, 便可进行分析检测。该便携式设备包括微控制器、荧光检测模块、步进扫描模块和加热模块。该设备方便携带、操作简便、响应速度快, 可在 40 min 内快速检测出低至 1%的模拟掺假样品, 且每次检测的成本不到 1 美元。

快速蒸发电离质谱法(rapid evaporation ionization mass spectrometry, REIMS)是一种环境电离—质谱技术, 通过电离切割样品组织使其释放气溶胶, 气溶胶通过导管迅速导入质谱仪内, 实现对样品进行分析与检测[59]。该技术分析速度快, 从样品处理到最终数据生成仅需数秒即可完成, 极大地提升了分析效率。同时, 借助质谱技术高分辨率的特性, REIMS 能够精确鉴定出样品中的标志性差异成分。因此, REIMS 在肉制品掺假快速检测方面具有独特的优势。ROBSON 等[60]使用 REIMS 系统对传统牛肉和有机牛肉进行了分析。根据所得的非靶向脂质组学数据, 建立了生产系统和肌肉类型的分析模型。其中, 生产系统模型可以以 84%的准确率区分有机牛肉和传统牛肉, 而肌肉类型模型以 98%的准确率识别肉块。此外, 样品可以同时针对多个模型进行评估, 从而减少分析时间和样品数量。BALOG 等[61]使用 REIMS 检测肉馅饼中的马肉、牛肉和鹿肉。能够在 5 s 以内范围内记录肉类样本的质谱曲线, 在物种上准确率达到 100%, 在品种水平上准确率高达 97%。HE 等[62]将智能手术刀(intelligent knife, iKnife)与 REIMS 结合, 对新鲜牛肉和冷冻—解冻牛肉进行脂质组学分析, 建立了主成分分析—线性判别分析 、正交偏最小二乘法判别分析模型, 新鲜和冷冻—解冻牛肉的实时识别准确率为 92%~100%。这一成果不仅证明了 iKnife 与 REIMS 结合在食品分析领域的潜力, 也为牛肉品质快速检测提供了一种新的可靠方法。

## 6　应　用

保障食品安全是社会各界的共同责任, 从公安机关的严格执法到食品企业的严谨品控, 共同构筑起了守护消费者健康的坚固防线。公安机关凭借其技术实力与专业保障, 为打击食品违法违规行为提供了强有力的支撑; 而食品企业则在质量控制上的不懈努力, 推动了整个行业向高质量发展的迈进。这些举措不仅维护了食品市场的公平竞争环境, 也促进了食品产业的健康发展, 为构建一个安全、优质的食品环境奠定了坚实的基础。

在深入推进食品安全专项整治的过程中, 全国公安机关紧密协作, 充分利用现代科技手段, 加强与行政执法部门的沟通协调, 并积极争取食品药品监管、农业农村等相关职能部门的支持与合作, 共同构建了一套高效的案件侦办体系, 为打击食品犯罪活动提供了有力的技术支持和保障。以山东省为例, 自 2020 年 10 月起, 开展了一为期一年的打击农村假冒伪劣食品专项执法行动。山东省公安厅以坚定的决心和高效的执行力, 与相关部门紧密合作, 成功侦破了 116 起涉及假冒伪劣肉制品的案件, 涉案总金额高达 1.2 亿元。这一行动有力维护了消费者的合法权益, 对不法分子形成了有效的震慑和打击, 为维护食品安全和市场经济秩序作出了显著贡献。此外, 在安徽宿松“未知粉末”投毒致死案和辽宁省公安厅处理的鹿茸样品物种鉴定案中, 执法机关均依靠现有技术成果, 迅速锁定关键证据, 为案件的侦破提供了有力支持。

在食品产业的高质量发展中, 各相关机构和企业也发挥了举足轻重的作用。中国海关在监督检查和风险监测方面发挥了核心作用, 对进口燕窝进行了严格的质量安全监管, 保障了消费者的健康权益和市场的正常秩序。飞鹤乳品公司、顺鑫农业和北京同仁堂等知名企业, 则通过建立严格的品控体系和标准, 不断提升产品的真实性和品质, 增强了产品的市场竞争力。

随着电商行业的蓬勃发展, 消费者对食品安全和质量的要求也日益提高。京东长期致力于确保网络购物中食品的真实性和安全性。他们采取多项技术手段提高审核标准、完善检测流程, 确保每一份食品都经过严格的质量把关。这些举措不仅提升了消费者对网络食品安全的信心, 也为构建一个更加透明、安全的电商环境做出了积极贡献。通过这样的检测监管措施, 京东进一步巩固了其在网络零售行业中的领先地位, 并赢得了广大消费者的信赖与支持。

## 7　总结和展望

肉制品中动物源性成分的鉴别研究在近年来取得了显著进展, 但面临的挑战依然严峻。形态学鉴定、核酸分析技术、蛋白质分析技术、无损检测技术等多种方法的应用, 极大地提高了鉴别的准确性和灵敏度。微流控技术、REIMS 等新技术的运用为肉类产品中的动物源物质分析提供了更为准确、有效、快速的方法, 对提升我国的食品安全性具有重要意义。然而, 现有技术仍存在局限, 如建立的模型通用性不强、复杂样本处理流程繁琐、便携性快速性不足等问题亟待解决。随着大数据、人工智能等计算机信息技术的发展, 肉类成分鉴别将迎来新的机遇。通过数据分析与模型预测, 可以更精准地揭示肉类成分在不同条件下的变化规律, 指导工艺优化与标准制定。

未来, 应持续推动技术创新, 加强国际交流与合作, 推动肉类鉴别技术的标准化与规范化。同时, 完善法律法规, 提升公众意识, 形成全社会共同关注食品安全的良好

氛围。通过综合施策，确保肉类食品的安全与质量，为消费者提供更加健康、放心的食品选择。

## 参考文献


[1] DE SMET S, VOSSEN E. Meat: The balance between nutrition and health. A review [J]. Meat Sci, 2016: 145–156.

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

[3] 中国消费者报·中国消费网. 羊肉卷检出牛肉和鸭肉成分 巴奴旗下超岛自选火锅被立案调查 [EB/OL]. [2023-09-11]. https://www.ccn.com.cn/Content/2023/09-11/1532070486.html [2023-09-11].
China Consumer Daily·China Consumer Network. Beef and duck ingredients were detected in the lamb rolls Banu's Chaodao self-selected hot pot was placed on file for investigation [EB/OL]. [2023-09-11]. https://www.ccn.com.cn/Content/2023/09-11/1532070486.html [2023-09-11].

[4] LI TT, JALBANI YM, ZHANG GL, *et al.* Detection of goat meat adulteration by real-time PCR based on a reference primer [J]. Food Chem, 2019, 277: 554–557.

[5] LI J, LI J, XW S, *et al*. A rapid and reliable multiplex PCR assay for simultaneous detection of fourteen animal species in two tubes[J]. Food Chem, 2019, 295: 395–402.

[6] 任君安, 黄文胜, 葛毅强, 等. 肉制品真伪鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 247–257.
REN JAN, HUANG WS, GE YQ, *et al*. Research progress on authentication technology of meat products [J]. Food Sci, 2016, 37(1): 247–257.

[7] 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. Research on the identification of various animal-derived meat and meat products in animal-derived food [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012.

[8] PRAYSON BE, MCMAHON JT, PRAYSON RA. Applying morphologic techniques to evaluate hotdogs: What is in the hotdogs we eat? [J]. Ann Diagn Pathol, 2008, 12(2): 98–102.

[9] HEARNE LE, PENFIELD MP, GOERTZ GE. Heating effects of bovine semitendinosus: Phase contrast microscopy and scanning electron microscopy [J]. J Food Sci, 1978, 43(1): 13–16.

[10] WU FY, DUTSON TR, SMITH SB. A scanning electron microscopic study of heat-induced alterations in bovine connective tissue[J]. J Food Sci, 1985, 50(4): 1041–1044.

[11] DU CJ, SUN DW. Retrospective shading correction of confocal laser scanning microscopy beef images for three-dimensional visualization [J]. Food Bioprocess Technol, 2009, 2: 167–176.

[12] LIU W, LANIER TC. Combined use of variable pressure scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy best reveal microstructure of comminuted meat gels [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 62(2): 1027–1033.

[13] FANG X, ZHANG C. Detection of adulterated murine components in meat products by TaqMan© real-time PCR [J]. Food Chem, 2016, 192: 485–490.

[14] KIM MJ, KIM HY. A fast multiplex real-time PCR assay for simultaneous detection of pork, chicken, and beef in commercial processed meat products [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 114: 108390.

[15] ŞAKALAR E, KAYNAK A. Practical molecular detection method of beef and pork in meat and meat products by intercalating dye based duplex real-time polimerase chain reaction [J]. Int J Food Prop, 2016, 19(1): 31–40.

[16] 李亮, 赵新, 刘娜, 等. 肉制品中牛源性成分 Taqman 荧光定量 PCR 检测法的建立[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 251–254.
LI L, ZHAO X, LIU N, *et al.* Establishment of Taqman fluorescence quantitative PCR assay for bovine-derived components in meat products [J]. Food Ind Sci Technol, 2018, 39(10): 251–254.

[17] HAI X, LIU GQ, LUO JX, *et al.* Triplex real-time PCR assay for the authentication of camel-derived dairy and meat products [J]. J Dairy Sci, 2020, 103(11): 9841–9850.

[18] WANG W, WANG X, WEI T, *et al.* A multiplex real-time PCR approach for identification and quantification of sheep/goat, fox and murine fractions in meats using nuclear DNA sequences [J]. Food Control, 2021, 126: 108035.

[19] KUSNADI J, SARASWATI MA, WARDANI AK, *et al.* Development and validation of a direct qPCR method for the detection of pork adulteration in processed meat products [J]. Appl Food Biotechnol, 2023, 10(3): 165–176.

[20] DUBE S, QIN J, RAMAKRISHNAN R. Mathematical analysis of copy number variation in a DNA sample using digital PCR on a nanofluidic device [J]. PLoS One, 2008, 3(8): e2876.

[21] 刘立兵, 石蕊寒, 项佳林, 等. 应用微滴式数字聚合酶链式反应定量检测牛肉制品中的猪源性成分[J]. 肉类研究, 2018, 32(9): 29–34.
LIU LB, SHI RH, XIANG JL, *et al*. Application of microtitre digital polymerase chain reaction for quantitative detection of porcine-derived components in beef products [J]. Meat Res, 2018, 32(9): 29–34.

[22] 吴海晶, 冯秋实, 刘延. 基于微滴式数字 PCR 的羊肉中鸭源性成分定量检测[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 288–293.
WU HJ, FENG QS, LIU Y. Quantification of duck-derived components in mutton based on microtitre digital PCR [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(12): 288–293.

[23] 王溪桥, 解迎双, 周小平, 等. 基于微滴数字 PCR 技术鉴别猪肉掺假方法的建立及评估[J]. 农产品加工, 2021(11): 77–80.
WANG XQ, XIE YS, ZHOU XP, *et al.* Establishment and evaluation of a method to identify pork adulteration based on microtitre digital PCR [J]. Agric Prod Process, 2021(11): 77–80.

[24] 朱业培, 王玮, 吕青骏, 等. 基于基因芯片技术检测 6 种动物源性成分[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(6): 1003–1008.
ZHU YP, WANG W, LV QQ, *et al.* Detection of six animal-derived ingredients based on gene chip technology [J]. J Nanjing Agric Univ, 2015, 38(6): 1003–1008.

[25] 范宏伟, 吴鑫, 朱应飞, 等. 膜芯片用于肉制品中动物源性成分检测的研究[J]. 食品安全质量检测学报,2017, 8(9): 3479–3484.
FAN HW, WU X, ZHU YF, *et al*. Application of film chip for detection of animal-derived components in meat products [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(9): 3479–3484.

[26] 吴华莉, 涂尾龙, 曹建国, 等. SNP 技术在猪肉溯源过程中的应用[J]. 畜牧与饲料科学, 2020, 41(6): 84–89.
WU HL, TU WL, CAO JG, *et al*. Application of SNP technology in pork traceability [J]. Anim Husb Feed Sci, 2020, 41(6): 84–89.

[27] YI Y, JIANG Z, MA L, *et al.* Simultaneous identification of multiple animal-derived components in meat and meat products by using MNP marker based on high-throughput sequencing [J]. Food Sci Hum Well, 2024. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1750.ts.20240625.1539.005.html.

[28] 魏艺聪, 蒋超, 袁媛, 等. 基于 COI 与 SRY 序列建立梅花鹿, 马鹿及其杂交鹿茸的分子鉴别方法[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(23): 4588–4592.
WEI YC, JIANG C, YUAN Y, *et al.* Establishment of a molecular identification method based on COI and SRY sequences for the antlers of Sika deer, red deer and their hybrids [J]. Chin J Tradit Chin Med, 2017, 42(23): 4588–4592.

[29] PDN H. Biological identifications through DNA barcodes [J]. Proc R Soc Lond B Biol Sci, 2003, 270: 313–321.

[30] WONG EHK, HANNER RH. DNA barcoding detects market substitution in North American seafood [J]. Food Res Int, 2008, 41(8): 828–837.

[31] BÖHME K, CALO-MATA P, BARROS-VELÁZQUEZ J, *et al.* Review of recent DNA-based methods for main food-authentication topics [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(14): 3854–3864.

[32] 夏若成, 陶瑞旸, 袁春艳, 等. 应用 16S rRNA 基因测序鉴定肉类掺假 1 例[J]. 中国法医学杂志, 2022, 37(2): 135–136.
XIA RC, TAO RY, YUAN CY, *et al.* A case of meat adulteration identified by 16S rRNA gene sequencing [J]. Chin J Forensic Med, 2022, 37(2): 135–136.

[33] XING RR, HU RR, HAN JX, *et al.* DNA barcoding and mini-barcoding in authenticating processed animal-derived food: A case study involving the Chinese market [J]. Food Che, 2020, 309: 125653.

[34] COTTENET G, BLANCPAIN C, CHUAH PF, *et al.* Evaluation and application of a next generation sequencing approach for meat species identification [J]. Food Control, 2020, 110: 107003.

[35] MAHAMA S, CHEBAKO H, SIRIKWANPONG S, *et al.* Simultaneous identification of four meat species (cattle, chicken, fish, and pig) using next generation sequencing (NGS) [C]. Proceedings of the international halal science and technology conference, 2022.

[36] SENTANDREU MA, FRASER PD, HALKET J, *et al*. A proteomic-based approach for detection of chicken in meat mixes [J]. J Phys Chem Lett, 2010, 9(7): 3374–3383.

[37] THIENES CP, MASIRI J, BENOIT LA, *et al.* Quantitative detection of beef contamination in cooked meat products by ELISA [J]. J AOAC Int, 2019, 102(3): 898–902.

[38] MANDLI J, FATIMI IEL, SEDDAOUI N, *et al.* Enzyme immunoassay (ELISA/immunosensor) for a sensitive detection of pork adulteration in meat [J]. Food Chem, 2018, 255: 380–389.

[39] LI YC, LIU SY, MENG FB, *et al.* Comparative review and the recent progress in detection technologies of meat product adulteration [J]. Comp Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(4): 2256–2296.

[40] MONTOWSKA M, POSPIECH E. Myosin light chain isoforms retain their species-specific electrophoretic mobility after processing, which enables differentiation between six species: 2DE analysis of minced meat and meat products made from beef, pork and poultry [J]. Proteomics, 2012, 12(18): 2879–2889.

[41] NAVEENA BM, JAGADEESH DS, KAMUNI V, *et al.* In-gel and OFFGEL-based proteomic approach for authentication of meat species from minced meat and meat products [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(3): 1188–1196.

[42] ZHANG M, LI Y, ZHANG Y, *et al*. Rapid LC-MS/MS method for the detection of seven animal species in meat products [J]. Food Chem, 2022, 371: 131075.

[43] AMIGO JM, MARTÍ I, GOWEN A. Hyperspectral imaging and chemometrics: A perfect combination for the analysis of food structure, composition and quality [J]. Data Hand Sci Technol, 2013, 28: 343–370.

[44] WU D, SHI H, HE Y, *et al.* Potential of hyperspectral imaging and multivariate analysis for rapid and non-invasive detection of gelatin adulteration in prawn [J]. J Food Eng, 2013, 119(3): 680–686.

[45] 刘友华, 白亚斌, 邱祝福, 等. 基于高光谱图像技术和波长选择方法的羊肉掺假检测方法研究[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 28(3): 265–269.
LIU YH, BAI YB, QIU ZF, *et al*. Research on lamb adulteration detection method based on hyperspectral image technology and wavelength selection method [J]. J Hainan Normal Univ: Nat Sci Ed, 2015, 28(3): 265–269.

[46] RAHMANIA H, ROHMAN A. The employment of FTIR spectroscopy in combination with chemometrics for analysis of rat meat in meatball formulation [J]. Meat Sci, 2015, 100: 301–305.

[47] ALAMPRESE C, AMIGO JM, CASIRAGHI E, *et al.* Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics [J]. Meat Sci, 2016, 121: 175–181.

[48] JIANG H, CHENG F, SHI M. Rapid identification and visualization of jowl meat adulteration in pork using hyperspectral imaging [J]. Foods, 2020, 9(2): 154.

[49] 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 technology in the identification of compound adulteration types of beef meatballs [J]. Spectrosc Spect Anal, 2024, 44(8): 2183–2191.

[50] AL-SARAYREH M, REIS MM, YAN WQ, *et al*. Potential of deep learning and snapshot hyperspectral imaging for classification of species in meat [J]. Food Con, 2020, 117: 107332.

[51] AYAZ H, AHMAD M, MAZZARA M, *et al*. Hyperspectral imaging for minced meat classification using nonlinear deep features [J]. Appl Sci, 2020, 10(21): 7783.

[52] LIN P, YAN F. Organic thin-film transistors for chemical and biological sensing [J]. Adv Mater, 2012, 24(1): 34–51.

[53] HE RX, LIN P, LIU ZK, *et al*. Solution-gated graphene field effect transistors integrated in microfluidic systems and used for flow velocity detection [J]. Nano Lett, 2012, 12(3): 1404–1409.

[54] LIN CT, LOAN PTK, CHEN TY, *et al*. Label free electrical detection of DNA hybridization on graphene using hall effect measurements: Revisiting the sensing mechanism [J]. Adv Funct Mater, 2013, 23(18): 2301–2307.

[55] GAO S, WANG R, BI Y, *et al*. Identification of frozen/thawed beef based on label-free detection of hemin (Iron porphyrin) with solution-gated graphene transistor sensors [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2020, 305: 127167.

[56] 陈嘉诃, 肖斌, 钟轲, 等. 微流控技术在肉品质量安全检测中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(3): 51–59.
CHEN JC, XIAO B, ZHONG K, *et al*. Progress of microfluidic technology in meat quality and safety inspection [J]. Meat Res, 2023, 37(3): 51–59.

[57] NIEBLING L, NITZSCHE R, SIEKSMEYER T, *et al*. Fast and on-site animal species identification in processed meat via centrifugal microfluidics and isothermal amplification [J]. Lab Chip, 2024, 24(4): 975–984.

[58] XIAO B, ZHOU T, WANG N, *et al*. Toothpick DNA extraction combined with handheld LAMP microfluidic platform for simple and rapid meat authentication [J]. Food Chem, 2024, 460: 140659.

[59] ROSS A, BRUNIUS C, CHEVALLIER O, *et al*. Making complex measurements of meat composition fast: Application of rapid evaporative ionisation mass spectrometry to measuring meat quality and fraud [J]. Meat Sci, 2021, 181: 108333.

[60] ROBSON K, BIRSE N, CHEVALLIER O, *et al*. Metabolomic profiling to detect different forms of beef fraud using rapid evaporative ionisation mass spectrometry (REIMS) [J]. Npj Sci Food, 2022, 6(1): 9.

[61] BALOG J, PERENYI D, GUALLAR-HOYAS C, *et al*. Identification of the species of origin for meat products by rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(23): 4793–4800.

[62] HE Q, YANG M, CHEN X, *et al*. Differentiation between fresh and frozen-thawed meat using rapid evaporative ionization mass spectrometry: The case of beef muscle [J]. J Agric Food Chem, 2021(20): 69.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

## 作者简介

刘 瑞, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品真实性鉴定。
E-mail: liurui1987110@126.com