DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260225006
引用格式: 于艳艳, 杨振东, 陆垣宏, 等. 胡椒掺假检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 156–164.
Yu Yanyan, Yang Zhendong, Lu Yuanhong, et al. Research progress on detection technologies for pepper adulteration [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 156–164. (in Chinese with English abstract).

胡椒掺假检测技术研究进展

于艳艳, 杨振东, 陆垣宏, 徐大玮*

(山东省食品药品检验研究院, 产业技术基础公共服务平台, 济南 250101)

摘 要: 胡椒作为栽培历史悠久的热带香辛料, 其制品是餐饮及食品调味的核心原料, 市场需求旺盛。然而近年来, 胡椒市场掺假乱象频发, 不法商家通过添加淀粉类物质、人工合成色素及廉价香辛料粉末等手段以次充好, 严重破坏食品真实性, 危害消费者健康, 扰乱市场秩序并阻碍产业高质量发展。快速、准确鉴定胡椒掺假的检测技术已成为食品安全监管关注的重点。现代光谱、色谱及分子生物学技术在胡椒掺假鉴别中应用日益深入。本文以胡椒掺假检测技术为核心, 系统梳理主流检测手段, 阐述其原理、优缺点、应用场景、适用范围与局限, 并提出多技术融合、便携化设备研发与标准体系构建是未来发展的关键方向, 以期为胡椒掺假鉴别的检测技术优化、标准体系构建提供理论依据, 为食品真实性监管提供技术支撑, 助力胡椒产业健康发展。

关键词: 胡椒掺假; 光谱技术; 色谱技术; 聚合酶链式反应技术; 热分析技术; 食品真实性
中图分类号: TS2 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)13–0156–09

Research progress on detection technologies for pepper adulteration

YU Yan-Yan, YANG Zhen-Dong, LU Yuan-Hong, XU Da-Wei*

(*Industrial Technology Foundation Public Service Platform*, *Shandong Institute for Food and Drug Control*, *Ji'nan* 250101, *China*)

ABSTRACT: As a tropical spice with a long cultivation history, pepper and its processed products act as essential raw materials for catering and food seasoning, sustaining strong market demand. Nevertheless, frequent adulteration incidents have troubled the pepper market in recent years. Unscrupulous vendors pass off adulterated products as genuine commodities by incorporating starchy fillers, artificial synthetic pigments and low-cost spice powders. Such malpractices severely compromise food authenticity, threaten consumer health, disrupt market order, and impede the high-quality development of the pepper industry. Accordingly, rapid and accurate detection technologies for identifying pepper adulteration have become a major focus in food safety supervision. Modern spectroscopic, chromatographic and molecular biological techniques have been increasingly and extensively adopted for the discrimination of adulterated pepper. Centered on detection technologies for pepper adulteration, this paper systematically sorted out mainstream analytical methods and elaborated on their principles, merits and demerits, application scenarios, applicable scopes and inherent limitations. It further proposes that multi-technology integration, the research and development of portable testing devices, and the establishment of standardized systems represent the core directions for future research. This work is expected to provide a theoretical reference for optimizing

收稿日期: 2026-02-25
第一作者: 于艳艳(1985—), 女, 硕士, 主要研究方向为食品安全检测与质量控制。E-mail: sdifdc_yyy@163.com
***通信作者:** 徐大玮(1981—), 男, 硕士, 主要研究方向为食品质量安全检测。E-mail: sdyjzb@163.com

detection methodologies and constructing standard frameworks for pepper adulteration identification, deliver technical support for food authenticity supervision, and promote the sound development of the pepper industry.

KEY WORDS: pepper adulteration; spectral technology; chromatographic technology; polymerase chain reaction technology; thermal analysis technology; food authenticity

0　引　言

胡椒, 是一种栽培历史悠久的著名热带香辛料植物, 素有“香料之王”的美誉, 兼具药食两用属性, 被广泛应用于食品加工、医药制剂、保健产品等多个领域[1–3]。在食品行业中, 胡椒粒、胡椒粉等产品因独特的风味特质, 成为餐饮烹饪及食品调味的核心原料, 深受市场青睐。但近年来, 胡椒市场掺假现象日益突出, 相关问题被报道[4–5]。胡椒掺假不仅严重破坏食品真实性, 威胁消费者身体健康, 还扰乱市场公平竞争秩序, 削弱优质胡椒产品的溢价能力, 阻碍胡椒产业甚至调味品行业可持续、高质量发展。胡椒粉颗粒细小, 纤维组织较细, 呈均匀粉态, 不法商家常采用掺假手段以次充好, 降低成本, 常用的掺假方式有添加与胡椒粉色泽、组织形态相近的大米粉、玉米粉、小麦粉淀粉类物质, 掺入人工合成色素、廉价香辛料粉末等外源物质, 模仿胡椒或胡椒粉的色泽、气味及质地特征, 误导检测[2,6–7]。随着胡椒掺假手段的不断多样化, 针对不同掺假类型的检测技术也逐步发展完善。传统检测方法主要包括感官鉴定、显微镜检查及常规理化分析等[2], 其中感官鉴定与显微镜检查均高度依赖人工经验, 存在主观性强、检测准确性偏低的弊端; 凯氏定氮法、显色反应则存在特异性较差的问题, 难以精准识别复杂掺假成分及掺假量。近年来, 光谱、色谱及分子生物学等现代检测技术及联用技术在胡椒掺假鉴别检测领域的应用日益深入, 相关研究成果持续涌现[2,6–12]。基于此, 本文以胡椒掺假检测技术为核心研究对象, 系统梳理并归类当前研究较为广泛的检测手段, 详细阐述各类技术的检测原理、优缺点及实际应用场景, 通过对比分析明确不同技术的适用范围与局限性, 旨在为胡椒掺假检测技术的进一步优化创新、检测标准体系的构建完善提供理论依据, 同时为食品真实性监管工作提供技术支撑, 助力推动胡椒产业的健康发展。

1　传统检测方法

1.1　感官鉴定

感官鉴定依靠视觉、味觉、嗅觉、触觉鉴别胡椒或胡椒粉的外观形态、颜色、气味等特征[13–15], 主要依赖操作者专业经验[15–18], 主观判断易受个体差异、环境因素、情绪状态等多因素干扰, 难以标准化, 且对染色、低比例掺杂样品灵敏度不足。

1.2　显微镜检查

显微镜检查是将样品制作成组织片, 通过显微镜观察其组织形态、细胞及内含物特征[2,16–18], 也是 2025 年版《中国药典》规定的胡椒鉴别方法之一。检测时需制备胡椒粉及各类掺假物质的标准组织片作为对照, 通过形态对比确定掺假情况, 但胡椒及掺入物品种繁多、对照组织片难以收集齐全, 且制片操作复杂烦琐、对检验人员的植物组织形态学专业能力要求较高, 导致该方法难以广泛应用。

1.3　常规理化方法

凯氏定氮法是早期测定胡椒粉中胡椒碱含量的方法[1], 曾被美国香料贸易协会(American Spice Trade Association, ASTA)引用。胡椒碱是胡椒中主要生物碱, 含量为 2%~7.4%[3]。但该方法通过测定总氮量折算结果, 会将非胡椒碱含氮物计入, 导致检测值高于实际含量[8], 无法识别小麦粉、米粉等氮含量与胡椒粉接近的掺假情况。

显色反应是常用的定性鉴别方法, 其中 2025 年版《中国药典》明确的胡椒鉴别方法之一为浓硫酸显色反应: 取少量胡椒粉末加 1 滴硫酸, 会依次呈现红色、红棕色、棕褐色, 其原理是胡椒碱在强酸性条件下发生质子化与结构重排, 形成具有共轭发色体系的中间产物, 进而呈现特征性颜色变化。此外, 网络上有“打假博主”使用碘伏显色反应演示辨识真假胡椒粉, 利用淀粉遇碘变蓝或变黑的原理检测淀粉、纤维素类掺假物质[19], 但因胡椒天然含有淀粉, 该方法并不适用。

2　光谱技术

2.1　化学比色法和分光光度法

化学比色法和分光光度法(spectrophotometry, SP)都是基于待测物质溶液颜色对光的吸收原理进行物质含量测定的方法。胡椒中主要化学活性物质胡椒碱, 属于桂皮酰胺类生物碱, 结构上的苯环以及共轭双键在 343 nm 左右的波长下吸收最大, 可用于定量[7,20]。化学比色法是早期用于检测胡椒碱的方法[21], 也是 ASTA 和国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)曾采用的方法[8]。SP 利用分光光度计进行测量, 相较于化学比色法灵敏度高, 应用范围更广泛。张沛玲[22]、王文忠等[23]分别研究建立使用分光光度计测定胡椒中胡椒碱含量的方法, 平均回收率分别达到 94.5%和 102.2%, 各自在 0~70 μg/mL、0.85~6.80 μg/mL 范围内线性良好, 其中张沛玲方法的最低检出限为 5 μg/mL。我国 GB/T 45316—2025《胡椒碱含量的测定 分光光度法》利用分光光度计测定黑、白胡

椒和黑、白胡椒粉中胡椒碱含量, 且明确测定目标物为辛辣性化合物, 即胡椒碱和类似物, 检出限为 0.01%。林丽君[2]研究使用紫外可见吸收光谱扫描胡椒粉的乙醇浸出液, 再通过一阶导数和二阶导数谱图进行深入分析和鉴别, 能够进一步筛查紫外可见吸收谱图和纯品差异较小的掺假样品。

化学比色法作为胡椒碱检测的传统光谱技术, 操作便捷、检测成本较低; SP 在检测灵敏度与应用范围上较化学比色法显著提升, 且已转化为国家标准, 具备良好的实用性与规范性, 为胡椒品质评价提供了标准技术支撑。但化学比色法和 SP, 在测定过程中均将具有与胡椒碱相同官能团的其他胡椒生物碱类物质及能在 343 nm 波长下发色的物质计入计算结果, 导致检测含量高于实际含量。紫外可见吸收光谱与导数谱图联用技术, 有效弥补了常规光谱技术对紫外吸收谱图与纯品胡椒碱差异较小的掺假样品识别能力薄弱的缺陷, 进一步拓展了光谱技术在胡椒掺假检测中的应用场景, 为低比例、相似成分掺假样品的快速筛查提供了高效可行的技术路径。然而, 该联用技术仍未彻底解决官能团相似物质的干扰问题, 其在复杂掺假体系中的检测性能仍有进一步提升的空间。

2.2 近红外光谱法

近红外光谱技术(near-infrared spectroscopy, NIRS), 通过检测物质在 780~2526 nm 波长范围的吸收光谱开展分析, 核心原理在于捕捉样品中 C-H、N-H 及 O-H 等官能团的特征吸收信号, 实现对基质成分的指纹图谱构建, 具备快速、无损、易操作的显著特点。目前, 该技术已在食品真实性鉴别领域得到广泛应用, 尤其在香料掺假检测中展现独特优势[24–27]。Shah 等[28]利用 NIRS 结合偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)与主成分分析(principal component analysis, PCA)等化学计量学方法检测黑胡椒中胡椒碱的含量, 在短时间内完成掺杂物的定性与定量分析。Wilde 等[29]使用 NIRS 与傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)技术, 建立非靶向指纹识别模型, 识别胡椒中掺入果壳、木瓜籽、辣椒籽等掺假物, 最高分类准确率达 100%。Lima 等[30]聚焦黑胡椒掺入木薯淀粉、玉米淀粉的问题, 结合 NIRS 与多变量分析技术构建偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)模型, 模型决定系数(R^2)介于 0.9739~0.9915 之间, 能够精准预测香辛料中淀粉类掺假物含量。Sari 等[31]利用 FTIR 结合 PLS-DA 鉴别白胡椒中掺入绿豆粉, 校正的决定系数(R^2)为 0.9535, 而预测的决定系数为 0.9943。Chen 等[32]尝试使用便携式 NIRS 仪结合多种分类算法建立胡椒等级识别模型, 胡椒碱最优定量模型校验决定系数(R^2_c)为 0.979, 预测决定系数(R^2_p)为 0.973, 剩余预测偏差达 6.05。便携式 NIRS 为现场快速筛查胡椒掺假提供了可行性。

NIRS 技术凭借快速、无损、便捷的核心优势, 已成为胡椒掺假检测领域的主流现代检测技术。该技术与 PCA、PLSR、PLS-DA 等化学计量学方法联用, 可显著提升胡椒掺假定性识别与定量分析的精准度, 构建的模型展现出良好的检测稳定性与可靠性。便携式 NIRS 仪器的应用, 突破了实验室检测环境的局限, 实现现场快速筛查, 适配工业生产质控、市场监管抽检等多场景需求。但该技术对检测人员专业素养要求较高, 需熟练掌握化学计量学模型的构建与优化, 且高比例复杂掺假体系中易出现光谱信号重叠, 影响检测准确性, 未来可考虑通过与其他光谱技术联用进一步优化检测性能。

2.3 荧光光谱法

荧光光谱法(fluorescence spectroscopy, FS), 以高灵敏度、高选择性及操作简便性的显著优势脱颖而出, 在食品领域被用于鸡蛋新鲜度判定、谷物掺假辨别等场景[33–34]。其中, 基于分子光子激发荧光特性发展而来的前表面荧光光谱法(front-face fluorescence spectroscopy, FFFS), 针对非透明或非澄清样品, 通过捕获其表面荧光信号实现固有荧光特征分析, 具备无损、快速的技术特点, 能有效突破传统荧光光谱法的浓度限制, 适用于高浓度或固体食品基质的成分与添加物检测[9]。该技术已用于肉品品质判别、乳制品掺假、水产品新鲜度鉴别等[35–43]。刘昭希[9]采用 FFFS 检测胡椒粉中胡椒碱含量, 并基于光谱检测数据与色谱标准数据的关联性, 构建胡椒粉掺假判别模型, 采用 PCA 开展样品定性鉴别, 结合 PLSR 进行定量分析, 模型决定系数大于 0.82。同时, 将该模型应用于黑胡椒粉、白胡椒粉、三七粉中分别掺入木瓜籽粉、荞麦粉、全麦粉、玉米粉、莪术粉的定性鉴别与定量分析等场景。

FS 技术具有高灵敏度、高选择性及操作简便的特性, 可精准捕捉微量成分特征荧光信号, 适用于低含量胡椒碱定量及微量掺假物定性检测。FFFS 技术突破了传统荧光光谱法检测固体胡椒粉样品的浓度限制与信号干扰瓶颈, 实现固体样品无损快速检测, 拓宽了应用范围。结合 PCA、PLSR 构建模型的定性与定量性能优良, 可适配多种掺假检测。但该技术荧光信号易受温度、pH 等外界因素影响, 且对掺假物的特异性识别依赖特征荧光峰差异, 荧光特性相似掺假物会降低检测准确性, 后续需通过优化检测条件、改进化学计量学模型提升稳定性。

2.4 高光谱成像法

高光谱成像技术(hyperspectral imaging technology, HSI), 是基于非常多窄波段的影像数据技术, 将成像技术与光谱技术相结合, 探测目标的二维几何空间及一维光谱信息, 获取高光谱分辨率的连续、窄波段的图像数据, 具

备空间分辨与光谱分辨的双重优势, 是食品品质评定、真实性检测方面新兴的绿色、无损检测技术[7,44–48]。HSI 通过获取样品在连续波长范围内的图像信息, 能够实现样品中异物的空间分布可视化, 尤其适用于非均匀掺假模式的识别。相较于其他光谱检测技术, HSI 具有精准度高、参数多的特点, 结合化学计量学方法可有效提升对微量外来物质的检测灵敏度[45]。黄华等[7]利用 HIS 搭建 PLSR 定量分析模型, 预测白胡椒粉中面粉掺假量及识别掺假位置。该模型校正集均方根误差为 0.83%, 预测集均方根误差为 2.73%; 校正集相关系数(R_C)与预测集相关系数(R_P)分别为 0.99 和 0.98, 为快速、无损及可视化鉴别胡椒粉掺假提供新的参考思路。

HSI 技术作为绿色无损检测技术, 在胡椒掺假检测中具有广阔应用前景。但其目前存在设备成本偏高、检测速率迟缓、数据处理复杂等局限, 因而该技术尚处于实验室研究阶段, 难以规模化应用于现场检测。未来需通过研发便携式设备、优化数据处理算法等手段, 推动 HSI 技术向工业化、现场化应用转型, 释放其应用潜力。

3　色谱技术

3.1　薄层色谱法

薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)是以涂布于支持板上的支持物作为固定相, 以适宜溶剂为流动相, 利用混合样品各成分对固定相吸附能力不同, 对各成分进行分离、鉴定和定量的一种层析分离技术。TLC 具有样品用量少、无固定相污染等优势, 在中药鉴别行业仍广泛使用[49–50]。Anagha 等[51]曾以 GF_{254} 硅胶板为载体, 甲苯-乙酸乙酯-乙醚(6:3:1)为展开剂分离胡椒碱, 在 337 nm 波长下扫描测定胡椒碱含量, 方法线性范围为 15~75 ng, 加标回收率 94.53%, 在当时成为一种简便、快速的胡椒碱定量手段, 但相较于现代仪器分析技术, 其定量精度与重复性仍存在明显不足。2025 年版《中国药典》仍采用 TLC 鉴别胡椒碱, 同时采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定胡椒碱含量, 并规定胡椒中胡椒碱含量不得少于 3.3%(以干燥品计)。

TLC 技术凭借操作简便、成本低的优势, 在胡椒碱定性鉴别领域仍具有不可替代的应用价值, 尤其适用于基层实验室, 但受限于定量性能的短板, 难以满足胡椒掺假精准定量及高灵敏度检测的需求, 目前多作为辅助鉴别手段, 与其他定量检测技术联用。

3.2　液相色谱法

液相色谱法(liquid chromatography, LC), 是用液体作为流动相, 基于混合物中各组分对两相亲和力的差异, 实现组分分离、定性与定量的分析方法。在液相柱色谱系统上加上高压液流系统, 使流动相在高压下快速流动以提高分离效果, 即为 HPLC, 该方法具有高压、高效、高速、高灵敏度和应用范围广的特点。已有研究者以胡椒碱含量为核心指标, 借助 HPLC 技术开展胡椒真伪鉴别研究[52–57]。其中, 陈家华等[8]通过 HPLC 测定胡椒碱含量判别胡椒真伪, 相关系数达 0.999, 掺入最小检知量为 5%。朱映浩等[55]建立 HPLC 测定胡椒粉中胡椒碱含量的方法, 胡椒碱质量浓度在 0.5~10 μg/mL 区间内与色谱峰面积呈现良好的线性关系(r=0.9998), 检出限 25 mg/kg。叶玲等[56]改进胡椒碱提取方法后使用二极管阵列检测器检测, 胡椒碱在 40~400.0 mg/L 质量浓度范围内线性关系良好(r=0.9997), 方法检出限为 1.35 mg/L, 其改进后的混合溶剂超声提取法兼具操作简单、检测成本低、批量处理效率高的优势。我国 GB/T 17528—2009《胡椒碱含量 高效液相色谱法》采用紫外检测器测定胡椒(粉)及其含油树脂抽提产物中胡椒碱含量, 检出限 0.008 g/100 g。

HPLC 操作简便、定量准确、重现性好, 不受其他生物碱的干扰, 已成为目前胡椒碱定量检测及胡椒掺假鉴别中最常用、最成熟的技术之一, 既能够满足实验室精准检测需求, 也可适配工业生产质控、市场监管抽检等规模化应用场景, 其技术稳定性与可靠性已得到行业及标准的广泛认可。

3.3　高效毛细管电泳法

高效毛细管电泳法(high performance capillary electrophoresis, HPCE)是一类以弹性石英毛细管作为分离通道, 以高压直流电场为驱动力, 依据样品中各组分在电泳淌度与分配行为上的固有差异实现高效分离的电泳分析技术。该技术具备分离效率高、分析速度快、检测灵敏度高、样品消耗量少及运行成本低等显著优势, 广泛应用于食品、医药、生物等领域的成分分析[1]。李和光等[58]建立 HPCE 测定胡椒粉中胡椒碱含量的方法, 胡椒碱在 0.05~0.30 mg/mL 范围内呈良好的线性关系(r=0.9995), 平均回收率 99.82%~100.20%, 成功应用于白胡椒中胡椒碱的定量检测, 检测结果准确可靠。

HPCE 在胡椒碱检测中展现出良好的应用潜力, 具备低样品消耗、高分离效率的特点。但相较于 HPLC, HPCE 在胡椒掺假检测中的应用研究相对较少, 且其检测稳定性易受毛细管柱性能、缓冲液体系等因素影响, 未来需通过优化检测条件、完善技术体系, 进一步推动其在胡椒掺假检测领域的规模化应用。

4　分子生物学技术

分子生物学技术在植物源性掺假鉴别方面的应用日益广泛, 有学者认为分子生物学技术更适合发现香辛料掺

假[59–61]。实际操作时，常规聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)与实时荧光定量 PCR (quantitative real-time polymerase chain reaction, qPCR)的性能差异成为方法选择的关键。常规 PCR 虽能通过特异性引物扩增目标 DNA 片段实现物种鉴别，但其终点检测模式限制了对初始模板浓度的精确评估，难以满足定量需求。相较之下，qPCR 依托荧光信号累积动力学模型，可实时监测扩增进程，结合标准曲线实现掺假成分准确定量，检出限可达 0.1%以下，灵敏度与重复性显著提升。Parvathy 等[11]研究选取 *psbA-trnH*、*rbcL*、*rpoC1* 3 个条形码基因位点作为检测靶标，通过 PCR 分别对黑胡椒原种及市售黑胡椒粉样品进行特异性扩增，实现对黑胡椒粉中 0.5%最低掺杂量的精准识别。该方法兼具简便性、可靠性与高效性，可作为监管机构开展黑胡椒粉质量管控的技术支撑。杨晴丽等[62]基于 SYBR GREEN I 染料 qPCR 技术，建立了八角、茴香、胡椒及花椒的特异性检测方法，在标准品含量 0.001%~10%的范围内 Ct 值线性关系良好，最低检出限为 0.001%，特异性强、灵敏度高、重复性好，适用于实际样品和复杂掺假情况的快速鉴定。

基于 PCR 的分子生物学技术，凭借高特异性、高灵敏度、高准确性等特点在食品真实性鉴别方面具有较高优势，但仍存在短板，如近缘物种的基因序列同源性较高，特异性引物和探针设计存在困难；酶制剂易受扩增温度条件影响而降低活性，从而影响扩增效果；探针、荧光标记物、酶制剂等试剂耗材价格较高，保质期短，检测成本高等。

5 其他方法

5.1 热分析技术

热分析技术，是在受控程序温度条件下，测量物质的物理性质或热力学参数随温度或时间变化的一类技术，用于分析物质的结构、组成及热行为。其中，差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)是在程序升温的条件下，测量试样与参比物之间的能量差随温度变化的一种分析方法，已被广泛应用于食品基质中复杂组分的物理状态转变表征。热重分析法(thermogravimetric analysis, TG)通过监测样品在程序控温条件下质量随温度或时间的变化，能够有效揭示其热稳定性、组分挥发性及分解行为特征[2]。已有学者[2,18]将 DSC 与 TG 联用(DSC-TG)，构建常见香辛料调味粉的掺假鉴别体系。该技术基于不同物质具有独特的特征峰形与热图谱这一原理，通过测定香辛料调味粉的热稳定性与热降解过程，绘制热分析图谱，提取特征峰，结合一阶微分曲线综合判别待测样品是否存在掺假。

对比其他方法，DSC-TG 法具有图谱易分辨、分析速度快、样品用量少、准确度高、再现性好等特点，所获得的完整热分析图谱更具特异性与客观性，为辛香调味粉的掺假鉴别提供科学的依据，但对掺假比例较低的样品分辨能力有限。

5.2 深度学习模型

深度学习，指基于深层神经网络模型和方法的机器学习方法，是在统计机器学习、人工神经网络等算法模型基础上，结合当代大数据和大算力的发展而发展出来的。深度学习通过简单堆叠多层基本计算模块对复杂函数进行建模，并通过提升数据抽象程度的方式进行学习[63]。Fatima 等[64]建立计算机视觉检测方法，基于 4000 张掺假图像数据集构建连体网络模型鉴别黑胡椒中木瓜籽掺假情况。模型训练准确率达 96%、测试准确率达 92%，可在销售环节快速、无人工干预地完成黑胡椒掺假筛查，为规范黑胡椒市场提供新的技术手段。潘嘉勋[63]研究结合计算机视觉系统和图像处理技术，构建深度学习掺假分析模型，探究其在八角粉、花椒粉掺假鉴别中的应用，模型识别性能可分别达到 98.64%和 97.67%，误差率分别低于 1.36%和 2.33%。该模型可快捷高效地检测八角粉、花椒粉掺假，为香辛料粉掺假检测技术发展提供新的思路和研究参考。相比检测技术，该模型具有操作简单、精度高和速度快的优势，但试验对象品种较少，掺假物为玉米壳和稻谷壳这类典型物质，模型的应用范围还需扩大(表 1)。

表 1 用于胡椒掺假检测的核心技术方法对比

Table 1 Comparison of core techniques for pepper adulteration detection

技术类别	代表方法	优点	局限性	适用场景
传统检测方法	感官鉴定	简便快速、无需仪器、成本极低	主观性强、灵敏度低、易受外界干扰	现场初步筛查、粗略判断
	显微镜检查	直观观察组织形态、可识别部分掺杂物	操作烦琐、对照样本难齐全、人员要求高	定性鉴别淀粉、谷物粉等掺假
	凯氏定氮法	方法经典、曾为行业标准	特异性差、结果易偏高、难以识别米面掺假	早期总氮及胡椒碱粗略测定
	浓硫酸显色反应	操作简便、速度快、成本低	定性方法、浓硫酸强腐蚀性	胡椒碱快速定性、现场初筛
光谱技术	SP	速度较快、灵敏度适中、有国标支撑	易受结构类似物干扰、定量结果偏高	胡椒碱批量测定、常规掺假筛查

表 1(续)

技术类别	代表方法	优点	局限性	适用场景
光谱技术	NIRS	无损快速、便携现场检测、可定性定量	需建立校正模型、仪器成本较高	原料快速筛查、现场无损鉴别
	FS	灵敏度高、适用于固体样品、无损检测	设备专业、建模复杂、普及度较低	胡椒粉掺假判别、胡椒碱分析
	HSI	可视化定位掺假区域、准确度高、无损	设备昂贵、数据处理复杂	不均匀掺假识别、可视化检测
色谱技术	TLC	样品用量少、成本较低、药典收载方法	定量精度有限、重复性一般	胡椒碱定性鉴别、快速分离
	HPLC	定量精准、特异性强、重现性好、国标方法	前处理较复杂、检测时间较长	胡椒碱精准定量、仲裁检测
	HPCE	分离效率高、试剂消耗少、结果准确	方法优化复杂、应用普及度较低	实验室精准定量胡椒碱
分子生物学技术	PCR/qPCR	特异性与灵敏度极高、可准确定量	试剂昂贵、操作复杂、近缘物种鉴别困难	植物源性掺假、低含量掺杂物检测
其他方法	DSC-TG	图谱易分辨、分析速度快、样品用量少、准确度高、再现性好	对低比例掺假分辨能力有限	香辛料粉整体掺假鉴别
	深度学习模型	操作简单、精度高和速度快	模型通用性有限、依赖数据集	市场流通环节快速视觉筛查

6　结束语

胡椒掺假问题由来已久, 也是社会普遍关注的食品真实性问题。为保障行业健康有序发展, 维护市场公平秩序, 保护消费者合法权益, 本文针对目前研究较集中的胡椒掺假检测技术的原理、优缺点和应用场景进行梳理综述, 以期能为胡椒掺假检测技术深入研究及推广使用提供理论依据和技术支撑。

传统检测方法原理简单、操作门槛低, 可初步筛查胡椒掺假, 但胡椒碱测定精度不足, 适用的掺假场景有限, 难以满足产业规模化监管和隐蔽掺假的检测需求。光谱技术凭借高灵敏度、快速无损优势广泛应用于食品、医药、材料等多领域, SP 测定胡椒碱含量已转化为国家标准, 在基层应用, 但其他光谱技术依赖大型仪器、模型构建烦琐、数据处理复杂, 难以适配胡椒销售等基层监管场景快速检测的需求, 无法有效解决“检测周期长、成本高”的核心难题。未来可融合色谱、质谱等多种检测技术开发高效便携、低成本一体化检测设备, 同时强化与人工智能的深度融合, 优化光谱数据处理流程, 简化模型构建步骤, 推动该技术在胡椒掺假鉴别领域的规模化应用、标准化落地, 解决基层监管“检测难、落地难”的现实问题。色谱技术中, HPLC 因分离效果好、定性定量准确, 在胡椒掺假检测中研究和应用最广, 但存在样品前处理复杂、操作流程烦琐、设备成本高、检测周期长等问题, 难以满足产业和监管对“快速、高效、低成本检测”的核心诉求。未来可重点推动色谱技术与人工智能、质谱技术的联用, 利用人工智能算法优化样品前处理参数, 降低对前处理操作的技术要求, 同时借助质谱技术的高灵敏度优势, 提升胡椒掺假检测的精准度和定性能力; 同时依托产业、监管实际需求, 开发低成本、高效便捷的小型化色谱检测设备, 适配现场快检的监管场景, 解决基层监管中“大型仪器难以移动、检测成本过高”的难题, 助力产业质量管控提质增效。PCR 及衍生的 qPCR, 具有高特异性、高灵敏度、高准确性优势, 是目前食品真实性检测中应用最广泛的分子生物学技术, 可精准鉴别胡椒中掺杂的其他植物源性成分, 有效解决传统方法无法区分近缘物种掺假的痛点, 适配胡椒高端市场对掺假鉴别精准度的高要求。但该技术对酶制剂的活性、扩增温度条件要求较严格, 试剂耗材成本高, 难以在基层监管和中小企业中普及应用, 无法覆盖胡椒产业全链条监管需求。未来可聚焦考虑融合等温扩增技术, 或利用人工智能算法优化扩增反应条件, 降低温控要求、试剂耗材成本, 提升技术的普及性, 满足基层监管现场快速检测的需求。基于 DSC-TG 的热分析技术和深度学习模型尚处于探索研究阶段, 目前已初步实现对部分掺假类型的鉴别, 但存在测试范围较窄、数据分析复杂、模型通用性不强等问题, 尚未实现产业化应用。未来可结合胡椒产业掺假现状, 扩大测试范围, 覆盖产业中常见的掺假类型及复杂掺假场景, 同时强化深度学习模型与胡椒产业监管需求的耦合, 结合光谱技术、色谱技术、分子生物学技术等, 优化模型算法, 推动数据分析简便化、模式化、标准化发展, 加快向实际应用转化的步伐, 提升对复杂掺假场景的分辨力, 适配胡椒产业全链条、多场景的监管需求, 为产业质量管控提供更全面的技术支撑。

参考文献

[1] 李萍萍, 吕岱竹, 吴南村. 胡椒碱的提取工艺及分析方法研究进展[J]. 热带农业科学, 2012, 32(7): 75–78, 83.
Li Pingping, Lu Daizhu, Wu Nancun. Research progress on extraction and

measurement of piperine [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2012, 32(7): 75–78, 83.

[2] 林丽君. 辛香调味粉的热稳定性分析及掺假鉴别[D]. 福州: 福州大学, 2017.
Lin Lijun. Thermal stabilities of spicy condiments and their identifications from adulteration [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.

[3] 高兴, 赵凤平, 王文涛, 等. 胡椒的化学成分及其生物活性研究[J]. 药学实践与服务, 2025, 43(7): 313–319.
Gao Xing, Zhao Fengping, Wang Wentao, et al. Research on the chemical compositions and their biological activities of *Pipernigrum* L. [J]. Journal of Pharmaceutical Practice and Service, 2025, 43(7): 313–319.

[4] 中国食品报社融媒体. 低价白胡椒粉乱象调查: 面疙瘩充颗粒、添加不足 5% 造假链条触目惊心[EB/OL]. (2025-11-28) [2026-01-06]. https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309405238007535108296
Convergence Media Center of China Food Newspaper. Investigation into the chaos of low-price white pepper powder: dough pellets pass for pepper granules, authentic content under 5%-the fraud chain is shocking [EB/OL]. (2025-11-28) [2026-01-06]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1850016564886793037&wfr=spider&for=pc

[5] 金羊网-新快报. 番禺一女子买白胡椒煲猪肚 泥做胡椒一捏变成土[EB/OL]. (2014-11-06) [2026-01-06]. https://gd.sina.cn/news/sz/2014-11-06/detail-iavxeafr4440480.d.html?from=wap
Jinzhou Network-New Express Daily. Woman in panyu buys white pepper for pork tripe soup: pepper made of clay turns to soil when pinched [EB/OL]. (2014-11-06) [2026-01-06]. https://gd.sina.cn/news/sz/2014-11-06/detail-iavxeafr4440480.d.html?from=wap

[6] Bansal S, Singh A, Mangal M, et al. Food adulteration: sources, health risks, and detection methods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(6): 1174–1189.

[7] 黄华, 祝诗平, 卓佳鑫, 等. 高光谱成像识别白胡椒粉末中掺杂的面粉[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2851–2855.
Huang Hua, Zhu Shiping, Zhuo Jiaxin, et al. Hyperspectral imaging for identifying flour adulterated in white pepper powder [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(9): 2851–2855.

[8] 陈家华, 沈礼兵. 胡椒粉掺假的鉴别研究[J]. 中国食品添加剂, 2000(4): 1–5.
Chen Jiahua, Shen Libing. Research on identification of adulterated pepper powder [J]. China Food Additives, 2000(4): 1–5.

[9] 刘昭希. 前表面荧光光谱用于胡椒粉中胡椒碱的测定及其掺假检测[D]. 天津: 天津商业大学, 2023.
Liu Zhaoxi. Front-face synchronous fluorescence spectroscopy for the determination of piperine in pepper powder and its adulteration detection [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2023.

[10] Marcia V M, Vincius M S, Barbara J, et al. Co-quantification of curcuminoids and piperine by RP-HPLC/DAD from spray-dried microparticles for routine quality control [J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2025, 68. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2025250760.

[11] Parvathy V A, Swetha V P, Sheeja T E, et al. DNA barcoding to detect chilli adulteration in traded black pepper powder [J]. Food Biotechnology, 2014, 28(1): 25–40.

[12] Sasikumar B, Swetha V P, Parvathy V A, et al. Advances in adulteration and authenticity testing of herbs and spices [M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2016: 585–624.

[13] 吴远恒, 胡亚平, 曾璐, 等. 基于电子鼻与 GC-MS 的市售剁辣椒挥发性风味成分和感官品质及相关性分析[J]. 中国调味品, 2026, 51(11): 1–7.
Wu Yuanheng, Hu Yaping, Zeng Lu, et al. Correlation analysis of volatile flavor components, sensory quality of commercial chopped chili based on electronic nose and GC-MS [J]. China Condiment, 2026, 51(11): 1–7.

[14] 付海波, 李婷, 陈强. 感官鉴定在调味品新产品开发中的应用探索[J]. 中国酿造, 2008(18): 105–106.
Fu Haibo, Li Ting, Chen Qiang. Exploration of the application of sensory evaluation in the development of new condiment products [J]. China Brewing, 2008(18): 105–106.

[15] 许敬东, 李月娟. 对 125 份掺伪调味粉的检验方法及结果的讨论分析[J]. 中国酿造, 2004(5): 31–33.
Xu Jingdong, Li Yuejuan. Discussion and analysis on the inspection methods and results of 125 adulterated seasoning powder samples [J]. China Brewing, 2004(5): 31–33.

[16] 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, 1–12. 2026-01-19. 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 Chinese Baijiu [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1–12. 2026-01-19. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044392.

[17] 李月娟. 六种调味粉的掺伪种类和比例[J]. 中国调味品, 2008(8): 81–83.
LI Yuejuan. Adulteration types and proportions of six kinds of seasoning powders [J]. China Condiment, 2008(8): 81–83.

[18] 林丽君, 彭奇. 辛香调味粉在热环境下的稳定性分析及掺假鉴别[J]. 中国调味品, 2017, 42(7): 90–93.
Lin Lijun, Peng Qi. Stability analysis and adulteration identification of pungent seasoning powders under thermal conditions [J]. China Condiment, 2017, 42(7): 90–93.

[19] 新京报. “纯正胡椒粉”不纯, 掺杂米粉、面粉比例多过胡椒[EB/OL]. (2026-03-15) [2026-04-09]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1859723210722488614&wfr=spider&for=pc.
The Beijing News: “Pure pepper powder” not pure at all; adulterated with rice and wheat flour in proportions exceeding the pepper content [EB/OL]. (2026-03-15) [2026-04-09]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1859723210722488614&wfr=spider&for=pc.

[20] 呼日乐巴根. 胡椒碱的药理作用研究概况[J]. 中国民族医药杂志, 2009, 15(2): 68–69.
HU Rilebagen. Research overview on the pharmacological effects of piperine [J]. Journal of Medicine & Pharmacy of Chinese Minorities, 2009, 15(2): 68–69.

[21] Gorgani L, Mohammadi M, Najafpour G D, et al. Piperine—the bioactive compound of black pepper: from isolation to medicinal formulations [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(1): 124.

[22] 张沛玲. 紫外分光光度法测定胡椒碱[J]. 中国卫生检验杂志, 2001(6): 693.
Zhang Peiling. Determination of piperine by ultraviolet spectrophotometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2001(6): 693.

[23] 王文忠, 孙瑛, 何春龙. 紫外分光光度法测定胡椒中胡椒碱的含量[J].

北方药学, 2014, 11(5): 1–2.
Wang Wenzhong, Sun Ying, He Chunlong. Determination of piperine content in pepper by ultraviolet spectrophotometry [J]. Journal of North Pharmacy, 2014, 11(5): 1–2.

[24] 张浩, 刘振, 王玲, 等. 基于近红外光谱结合机器学习算法检测食用明胶品种溯源的研究[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(3): 460–467.
Zhang Hao, Liu Zhen, Wang Ling, et al. Research on variety traceability of edible gelatin detected by near-infrared spectroscopy combined with machine learning algorithms [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(3): 460–467.

[25] 杨霏, 宋茂江, 龙波, 等. 近红外光谱技术在白酒行业中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(24): 199–208.
Yang Fei, Song Maojiang, Long Bo, et al. Research progress on the application of near-infrared spectroscopy in the Baijiu industry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(24): 199–208.

[26] 张永辉, 周欣睿, 邓莉, 等. 近红外光谱检测技术在天然香辛料品质鉴定中的应用[J]. 中外食品工业, 2024(8): 70–72.
Zhang Yonghui, Zhou Xinrui, Deng Li, et al. Application of near-infrared spectroscopy detection technology in quality identification of natural spices [J]. Chinese and Foreign Food Industry, 2024(8): 70–72.

[27] Mcgoverin C M, September D J, Geladi P, et al. Near Infrared and mid-infrared spectroscopy for the quantification of adulterants in ground black pepper [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2012, 20(5): 521.

[28] Shah U, Patel S, Raval M, et al. Chemometric assisted spectrophotometric methods for the simultaneous determination of rifampicin and piperine in bulk and capsule [J]. Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research, 2015, 49(3): 200.

[29] Wilde A S, Haughey S A, Galvin-King P, et al. The feasibility of applying nir and ft-ir fingerprinting to detect adulteration in black pepper [J]. Food Control, 2019, 100: 1–7.

[30] Lima A B S D, Batista A S, Jesus J C D, et al. Fast quantitative detection of black pepper and cumin adulterations by near-infrared spectroscopy and multivariate modeling [J]. Food Control, 2020, 107(C): 106802.

[31] Sari Y P, Putri A R, Irnawat I, et al. Fast detection of white pepper adulteration using FTIR-ATR spectroscopy and chemometrics [J]. Malaysian Journal of Science and Advanced Technology, 2025, 5(1): 66-71.

[32] Chen Rui, Mei Jianhua, Du Guorong, et al. Convenient detection of white pepper adulteration by portable NIRS and spectral imaging with chemometrics[J]. Microchemical Journal, 2022, 182: 107925.

[33] Karoui R, Kemps B, Bamelis F, et al. Methods to evaluate egg freshness in research and industry: a review [J]. European Food Research and Technology, 2005, 222(5-6): 727–732.

[34] Ahmad M H, Nache M, Waffenschmidt S, et al. Characterization of farinographic kneading process for different types of wheat flours using fluorescence spectroscopy and chemometrics [J]. Food Control, 2016, 66: 44–52.

[35] 黄海峰, 陈秀珊, 刘凤银, 等. 前表面荧光光谱法在食品质量分析中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 309–316.
Huang Haifeng, Chen Xiushan, Liu Fengyin, et al. Research progress on the application of front-surface fluorescence spectroscopy in food quality analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(12): 309–316.

[36] 谢婧雅. 同步前表面荧光光谱法用于咖啡粉与姜黄粉的掺假检测[D]. 天津: 天津商业大学, 2021.
XIE Yajing. Adulteration detection of coffee powder and turmeric powder by synchronous front-surface fluorescence spectroscopy [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021.

[37] Wold J, Mielnik M, Pettersen M, et al. Rapid assessment of rancidity in complex meat products by front face fluorescence spectroscopy [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(6): 2397–404.

[38] Møller J K, Parolari G, Gabba L, et al. Monitoring chemical changes of dry-cured Parma ham during processing by surface autofluorescence spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(5): 1224–30.

[39] Liu Huan, Liu Wen, Han Donghai, et al. Detection of the presence of reconstituted milk in raw milk and in pasteurized milk using synchronous fluorescence spectroscopy [J]. Food Analytical Methods, 2017, 10: 2078–2084.

[40] 刘欢, 韩东海, 王世平. 同步荧光技术检测鲜牛乳中掺杂复原乳的可行性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2685–2689.
Liu Huan, Han Donghai, Wang Shiping. Feasibility study on the detection of reconstituted milk adulterated in fresh milk by synchronous fluorescence technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2685–2689.

[41] Kokawa M, Nishi K, Ashida H, et al. Predicting the heating temperature of soymilk products using fluorescence fingerprints [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10: 462–468.

[42] Kamal M, Karoui R. Monitoring of mild heat treatment of camel milk by front-face fluorescence spectroscopy [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 586–593.

[43] 高亚文, 汤海青, 欧昌荣, 等. 基于前表面荧光光谱鉴别新鲜与冻融大黄鱼[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 279–285.
Gao Yawen, Tang Haiqing, Ou Changrong, et al. Identification of fresh and frozen-thawed large yellow croaker based on front-surface fluorescence spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 279–285.

[44] 贾芳慧, 穆迎春, 徐锦华, 等. 高光谱成像技术在水产品品质检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 196–204.
Jia Fanghui, Mu Yingchun, Xu Jinhua, et al. Research progress on the application of hyperspectral imaging technology in quality detection of aquatic products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 196–204.

[45] 洪旭东, 王超, 张德钧, 等. 光谱检测技术在食品安全检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2684–2689.
Hong Xudong, Wang Chao, Zhang Dejun, et al. Application of spectral detection technology in food safety inspection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(11): 2684–2689.

[46] 杨清华, 彭彦昆, 郑晓春. 基于阈值选取高光谱感兴趣区域的牛肉掺假检测[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2710–2715.
Yang Qinghua, Peng Yankun, Zheng Xiaochun. Beef adulteration detection based on threshold selection for hyperspectral region of interest [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(11): 2710–2715.

[47] 王大臣, 李文龙, 姜洪喆, 等. 生熟羊肉卷中鸭肉掺假的高光谱成像定性判别与可视化[J/OL]. 现代食品科技, 1–9. 2026-01-19. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.12.1304.

Wang Dachen, Li Wenlong, Jiang Hongzhe, et al. Qualitative discrimination and visualization of duck meat adulteration in raw and cooked mutton rolls by hyperspectral imaging [J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1–9. 2026-01-19. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.12.1304.

[48] 侯畅, 李开开. 基于高光谱成像技术的掺伪食用油快速鉴别研究[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(6): 1487–1496.
Hou Chang, Li Kaikai. Rapid identification of adulterated edible oil based on hyperspectral imaging technology [J]. Chemical Research and Application, 2025, 37(6): 1487–1496.

[49] 李绮婷, 林信亨, 沈雅婕, 等. 活血跌打酒薄层色谱鉴别及 3 种成分含量测定的研究[J]. 中国处方药, 2025, 23(24): 23–26.
Li Qiting, Lin Xinheng, Shen Yajie, et al. Study on thin layer chromatography identification and content determination of three components in Huoxue Dieda Wine [J]. China Prescription Drug, 2025, 23(24): 23–26.

[50] 董亚蕾, 林思静, 王海燕, 等. 基于薄层色谱与一测多评法的积雪草提取物质量评价研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(21): 149–157.
Dong Yalei, Lin Sijing, Wang Haiyan, et al. Quality evaluation of *Centella asiatica* extract based on thin layer chromatography and quantitative analysis of multi-components by single marker [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(21): 149–157.

[51] Anagha A, Rajopadhy E, Anuradha S, et al. HPTLC method for analysis of piperine in fruits of piper species [J]. Journal of Planar Chromatography, 2011, 24(1): 57–59.

[52] Brusa C, Edvi N, Jelici C, et al. Determination of curcuminoids, piperine, boswellic acids and andrographolides in food and dietary supplements by HPLC [J]. Food Technology and Biotechnology, 2022, 60(4): 434–448.

[53] 胡家敏, 彭绍忠, 曾惠芳, 等. HPLC 法测定胡椒根中胡椒碱的含量[J]. 中药新药与临床药理, 2009, 5, 20(3): 260–262.
Hu Jiamin, Peng Shaozhong, Zeng Huifang, et al. Determination of piperine content in *Piper nigrum* roots by HPLC [J]. Traditional Chinese Drug Research & Clinical Pharmacology, 2009, 20(3): 260–262.

[54] 林先哲, 黄雪松. HPLC 法测定胡椒花、幼果和成熟果中胡椒碱的含量[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(3): 141–143.
Lin Xianzhe, Huang Xuesong. Determination of piperine content in pepper flowers, young fruits and mature fruits by HPLC [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(3): 141–143.

[55] 朱映浩, 刘波, 黄为红. 高效液相色谱法测定胡椒粉中胡椒碱的含量[J]. 中国调味品, 2018, 43(7): 150–153.
Zhu Yinghao, Liu Bo, Huang Weihong. Determination of piperine content in pepper powder by high performance liquid chromatography [J]. China Condiment, 2018, 43(7): 150–153.

[56] 叶玲, 杜伟锋, 张瑞瑞, 等. 高效液相色谱-二极管阵列检测法测定胡椒中胡椒碱[J]. 当代化工, 2019, 48(5): 1113–1116.
Ye Ling, Du Weifeng, Zhang Ruirui, et al. Determination of piperine in pepper by high performance liquid chromatography-diode array detection [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(5): 1113–1116.

[57] 冯真英, 李嘉敏, 吴春玲, 等. HPLC 法测定海南产白胡椒中胡椒碱的含量[J]. 北方药学, 2022, 19(3): 11–14.
Feng Zhenying, Li Jiamin, Wu Chunling, et al. Determination of piperine content in Hainan white pepper by HPLC [J]. Journal of North Pharmacy, 2022, 19(3): 11–14.

[58] 李和光, 周洪雷, 蒋海强, 等. 高效毛细管电泳法测定白胡椒中胡椒碱的含量[J]. 辽宁中医杂志, 2010, 37(1): 134–135.
Li Heguang, Zhou Honglei, Jiang Haiqiang, et al. Determination of piperine content in white pepper by high performance capillary electrophoresis [J]. Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine, 2010, 37(1): 134–135.

[59] 张明娟, 余秋地, 王娟, 等. 五重实时荧光聚合酶链式法快速筛查食用淀粉及其制品中植物源性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 207–214.
Zhang Mingjuan, Yu Qiudi, Wang Juan, et al. Rapid screening of plant-derived components in edible starch and its products by pentaplex quantitative real-time polymerase chain reaction [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 207–214.

[60] 王迪, 彭庆娟, 孙晓. 分子生物学检测技术在食品掺假鉴别中的应用局限与完善建议[J]. 中外食品工业, 2025(23): 113–115.
Wang Di, Peng Qingjuan, Sun Xiao. Application limitations and improvement suggestions of molecular biological detection technology in food adulteration identification [J]. Chinese and Foreign Food Industry, 2025(23): 113–115.

[61] 江丰, 吴婉琴, 黎星, 等. 咖啡真实性鉴别技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 9–16.
Jiang Feng, Wu Wanqin, Li Xing, et al. Research progress on authenticity identification technology of coffee [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(20): 9–16.

[62] 杨晴丽, 王仁静, 张茹, 等. 香辛料 SYBR GREEN I 染料荧光定量 PCR 检测方法的建立及应用[J/OL]. 食品科学, 1-14. 2026-01-15. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20240226.1752.012.
Yang Qingli, Wang Renjing, Zhang Ru, et al. Establishment and application of SYBR GREEN I Dye-based fluorescent quantitative PCR detection method for spices [J/OL]. Food Science, 1-14. 2026-01-15. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20240226.1752.012.

[63] 潘嘉勋. 基于深度学习的检测方法的构建及其在香辛料掺假鉴别中的应用[D]. 福州: 福州大学, 2022.
Pan Jiaxun. Construction of deep learning-based detection method and its application in adulteration identification of spices [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022.

[64] Fatima N, Areeb Q M, Khan I M, et al. Siamese network-based computer vision approach to detect papaya seed adulteration in black peppercorns [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): 16043.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)