



法庭科学中光谱成像技术的应用与展望： 聚焦高光谱、拉曼与太赫兹

陈浩洋，高树辉*

(中国人民公安大学 侦查学院，北京 100038)

摘要：光谱成像技术通过融合光谱分析与空间成像能力，实现了对物证化学成分与形态分布更为全面的多维表征，已成为推动法庭科学物证检验发展的前沿光学力量。该技术凭借快速、非侵入式、无需预处理等优势，在多种现场物证的显现、识别与分类中发挥核心作用。该文基于文献计量学结果系统综述了高光谱成像、拉曼光谱成像及太赫兹时域光谱成像等主流光谱成像技术的基本原理与最新研究进展，重点探讨其在生物物证、微量物证及文件检验中的典型应用场景与成效。此外，文章还针对当前该技术在实际应用中所面临的灵敏度、标准体系缺失、环境干扰等关键问题进行分析，并对其未来发展趋势——包括多模态联用、智能化分析及便携式设备开发等方面作出展望，以期构建新一代法庭科学物证光谱精准检验技术体系提供技术路径。

关键词：光谱成像技术；法庭科学；光学无损检测；物证检验；光谱分析

中图分类号： O657.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1004-4957(2026)04-0900-17

Applications and Prospects of Spectral Imaging Technology in Forensic Science: Focus on Hyperspectral, Raman, and Terahertz Imaging

CHEN Hao-yang, GAO Shu-hui*

(School of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China)

Abstract: Spectral imaging technology integrates spectral analysis with spatial imaging capabilities, enabling comprehensive multidimensional characterization of the chemical composition and morphological distribution of forensic evidence. It has emerged as a cutting-edge optical force driving advancements in forensic science evidence examination. Leveraging advantages such as speed, non-invasiveness, and minimal pretreatment requirements, this technology plays a pivotal role in the visualization, identification, and classification of diverse field evidence. This paper systematically reviews the fundamental principles and latest research advances of mainstream spectral imaging technologies—including hyperspectral imaging, Raman imaging, and terahertz time-domain imaging—based on bibliometric analysis. It focuses on exploring their typical application scenarios and effectiveness in examining biological evidence, trace evidence, and document analysis. Furthermore, the paper analyzes critical challenges in practical application, including sensitivity limitations, lack of standardized protocols, and environmental interference. It also outlines future development trends—such as multimodal integration, intelligent analysis, and portable device development—to provide a technical roadmap for establishing a new generation of spectroscopic precision forensic evidence examination systems.

Key words: spectral imaging technology; forensic science; optical non-destructive testing; evidence examination; spectral analysis

物证检验作为法庭科学实践的关键环节，其检验结果的精确性与可靠性对司法审判的公正性具有

收稿日期：2025-11-16；修回日期：2026-01-23

基金项目：中央高校基本科研业务费项目(2023JKF01ZK11)

*通讯作者：高树辉，博士，教授，研究方向：刑事图像技术，E-mail: gaoshuhui@ppsuc.edu.cn

网络首发日期：2026-02-14

直接影响。长期以来，现场物证检验技术多依赖于物理检验、化学处理、显微观察及实验室仪器设备分析等手段，这些方法虽较为成熟，却常面临样本破坏、操作繁琐、难以原位实施等问题，无法充分满足犯罪现场快速、无损勘查的现实需求。在此背景下，光学检测技术凭借其非侵入、高分辨率等优势被广泛重视。尤其是光谱成像技术，有机融合了光谱分析与空间成像能力，实现了从形态表征到成分识别的跨越，为物证检验提供了全新的技术路径，也推动法庭科学逐步由宏观形态鉴定走向微观化学成像。近年来，高光谱成像^[1]、拉曼成像^[2]和太赫兹成像^[3]等光谱成像方法发展迅速，相继应用于纤维识别^[4]、墨水区分^[5-8]、指纹增强^[9]等实际场景，展现出良好的应用前景。它们不仅能够实现潜在痕迹的可视化提取，还可对微量附着物进行原位成分分析，在避免物证破坏的同时显著提升证据信息量，已成为现场物证检验中极具价值的研究方向。尽管如此，光谱成像技术在实际应用中仍面临诸多瓶颈。例如复杂基体干扰、痕量物质检测灵敏度不足、数据处理流程标准化缺失等关键问题尚未彻底解决，制约了其在司法实践中的进一步推广。因此，有必要对该技术的发展现状与面临的挑战进行系统梳理，明确其适用边界与演进方向。本文立足于法庭科学中的应用需求，系统回顾光谱成像技术在生物物证、微量物证及文件检验等领域的研究进展(图1)，结合典型案例剖析其技术优势与现存不足，并对未来技术融合、方法标准化及设备集成化等发展方向作出展望，以期为该技术在法庭科学中的深入应用提供参考。

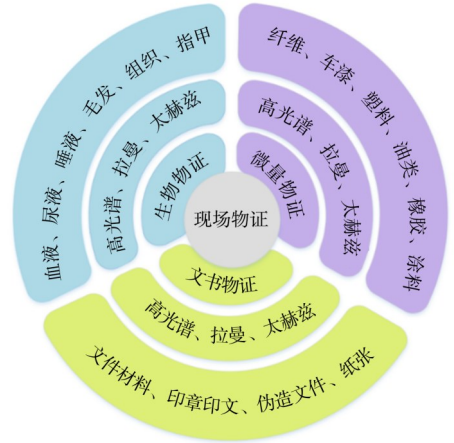


图1 光谱成像技术现场物证检验应用
Fig. 1 Application of spectral imaging technology in on-site forensic evidence examination

1 研究方法

本文采用文献计量研究法，对“Web of Science Core Collection”数据库的相关文献进行分析，在2000~2025年的时间设定中使用关键词组合“Hyperspectral” AND “forensic science”、“Raman Spectroscopy” AND “forensic science”、“Terahertz Spectroscopy” AND “forensic science”等进行高级检索，在数据的预处理过程中去重并剔除没有光谱检验和鉴定目的的文献，最终获得相关文献数据281篇，利用CiteSpace软件对获得的文献数据进行知识图谱绘制并分析，形成关键词时间线图(图2)和关键词突现图谱(图3)。

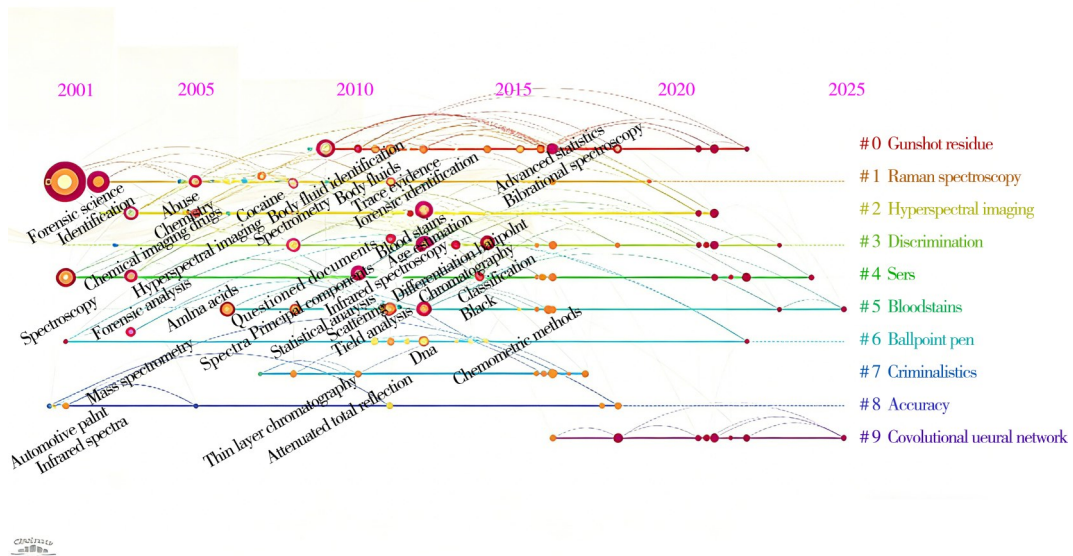


图2 关键词时间线图
Fig. 2 Keyword timeline map

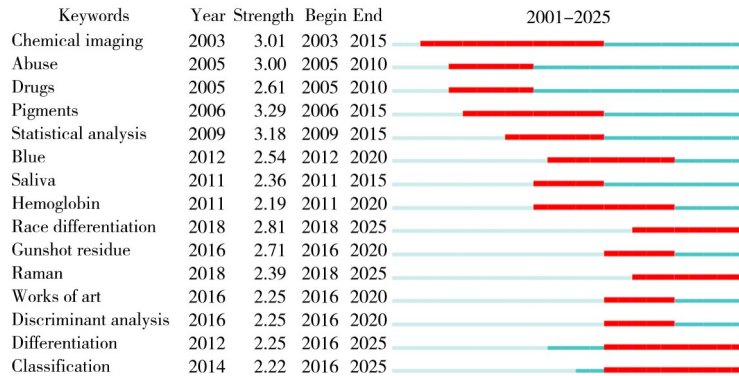


图3 关键词突现图谱

Fig. 3 Keyword salience map

从关键词时间线图谱中可以看出^[10], 近 20 年间光谱学在法庭科学物证检验中的应用受到国内外学者的重视, 研究主要聚焦于物证成像、化学成分检验、种类识别等方向。其中“生物物证(biological evidence)”“血迹(bloodstain)”“体液(body fluid)”“纤维(fiber)”“油漆(paint)”“墨水(ink)”“文件检验(document examination)”等关键词在时间演化中呈现高频出现和持续关注特征, 形成了明显的聚类分布。结合关键词突现图谱进一步显示, “成像(imaging)”“拉曼(Raman)”“识别(identification)”“分类(classification)”等关键词具有较高的突现强度和持续时间, 表明这些主题在光谱成像技术的法庭科学应用中具有突出的研究活跃度和影响力。基于上述文献计量分析结果, 可归纳出当前光谱成像技术在法庭科学领域的研究主要围绕 3 类物证展开, 即生物物证: 如血液、体液、组织等, 关键词集中体现在“biological evidence”“bloodstain”“body fluid”等; 微量物证: 如纤维、油漆、塑料、爆炸物残留等, 关键词体现在“fiber”“paint”“explosive”“trace evidence”等; 文件物证: 如墨水鉴别、篡改文件、朱墨时序等, 关键词体现在“ink”“document examination”“forgery”等。

因此, 本文围绕上述 3 类物证, 系统综述光谱成像技术在成像、识别与成分检验方面的应用进展, 从而为推动该技术在法庭科学物证检验中的应用提供参考。

2 光谱成像技术概述

光谱成像技术通过融合光谱分析与空间成像, 实现对物证化学成分与形态分布的多维表征。该技术基于不同波段电磁波与物质的相互作用机制: 在可见-近红外波段(如 400~2 500 nm), 光谱特征主要反映分子的电子跃迁与振动信息; 在太赫兹波段(0.1~10 THz, 对应波长约 30 μm ~3 mm), 则主要对应于分子转动、晶格振动及弱相互作用等低频模式。通过空间扫描与光谱分光, 系统可获取包含二维空间信息与一维光谱信息的三维数据立方体(x, y, λ)^[11], 如图 4 所示, 从而同时提供物证的形态分布与“光谱指纹”。

基于国内外相关研究, 下文就高光谱成像、拉曼光谱成像及太赫兹成像 3 类主流技术, 系统综述其基本原理与研究进展, 构建其在法庭科学物证检验中的应用体系, 并对该领域的研究方向提出全新展望。

2.1 高光谱成像技术

高光谱成像(HSI)是一种使每个像素获取连续窄波段光谱信息的技术。其核心在于通过成像光谱仪将目标反射或辐射的光信号在空间维和光谱维同时分割, 形成“图谱合一”的三维数据立方体。典型 HSI 系统由光源(如卤素灯, 覆盖 300~2 500 nm)、分光系统(如液晶可调谐滤波器^[12]、光栅或棱镜)、探测器(如电荷耦合器件)和计算机数据采集与处理系统组成。HSI 在 400~2 500 nm 范围内可捕获数百

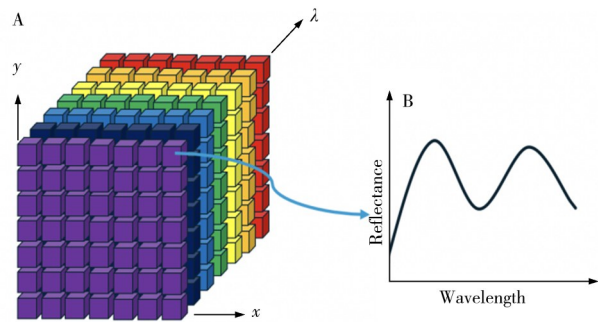


图4 光谱成像原理示意图: 光谱图像数据集(A)及像素点处的光谱曲线图(B)

Fig. 4 Schematic diagram of spectral imaging principle: spectral image dataset(A) and spectral curve at a pixel point(B)

个连续波长的光谱^[13]，光谱分辨率通常可达几个纳米，为每个像素提供独特的“指纹”级特征。与传统的RGB成像相比，HSI的多通道数据^[14]避免了在复杂场景下数据收集的局限性，实现了基于连续光谱的材料精确识别与分类，成为一种强大的分析工具^[15]。其技术优势包括非接触、大面积快速成像、光谱信息丰富，适用于宏观痕迹分布分析及材质初步分类；但同时也存在数据量大、处理复杂、易受环境光照影响、对微量成分灵敏度有限等挑战。

2.2 拉曼光谱与成像技术

拉曼光谱与成像技术是一种结合光谱与空间成像的分析手段，能够实现化学成分与分子结构的高分辨率空间定位。其原理基于拉曼效应^[16]，即光子与分子发生非弹性散射，因能量交换而产生频率偏移。该过程主要产生3种现象^[17]（如图5）：斯托克斯散射（能量损失，频率降低）、反斯托克斯散射（能量增益，频率升高）和瑞利散射（弹性散射，频率不变），由此形成的特征拉曼位移构成了物质的“分子指纹”。拉曼光谱对分子振动、转动模式敏感，能提供化学键、官能团及晶体结构等精细信息，特别适用于有机物、高分子材料及无机物的鉴别。典型的拉曼成像系统通常集成光学显微镜，将单色激光（常见波长如532、785、1 064 nm）聚焦于样品微区，通过物镜收集散射光，经光谱仪分光后由CCD探测器探测^[18]，通过点扫描、线扫描或全局成像方式，最终在微米或纳米尺度上实现化学成分的定性、定量^[19]及空间分布的可视化表征。拉曼成像具有空间分辨率高（可达亚微米级）、化学特异性强、无需样品制备等优点，但对荧光干扰敏感、信号较弱、对某些深色材料吸收强，且扫描速度相对较慢。

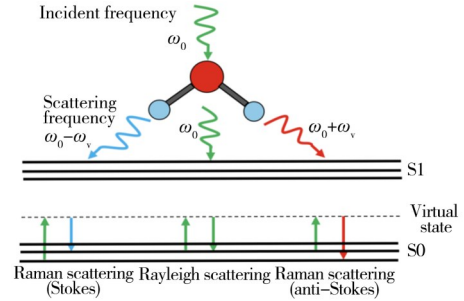


图5 拉曼散射原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Raman scattering principle

2.3 太赫兹成像技术

太赫兹成像技术利用0.1~10 THz频段的电磁波实现对样品的非破坏性检测。该技术融合了微波的穿透能力与红外的分子识别特性，具备介电穿透性强、化学特异性高、空间分辨率优于微波，以及生物安全性好^[20]等优势，广泛应用于安检、生物医学及材料分析等领域^[21]，其物理基础是太赫兹波与物质中分子间振动、晶格振动、偶极子取向以及弱相互作用（如氢键）的共振耦合。太赫兹成像的基本原理是通过分析样品透射或反射太赫兹波后的振幅、相位与强度信息，重建出样品图像。系统通常包括太赫兹源（如光电导天线、量子级联激光器）、探测系统（如光电导采样、焦平面阵列）和扫描或成像模块。根据技术特点，主要可分为4类：脉冲太赫兹成像（时域光谱成像）、连续太赫兹成像、近场成像与实时成像^[3]。成像模式则包括透射^[22]、反射^[23]、层析^[24]和近场^[25-26]。4种成像类型的比较见表1。

表1 太赫兹成像技术的分类、原理和应用

Table 1 Classification, principles and applications of terahertz imaging techniques

Imaging type	Principle	Applicable object
透射成像	理论模型 太赫兹波穿透样品后，测量其振幅衰减和相位延迟，计算样品的折射率(n)和吸收系数(α)。单色平面波在均匀、线性、吸收和色散介质中传播时，电场振幅衰减和相位变化的描述公式 ^[28] ： $E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) \cdot e^{-\alpha(\omega)d/2} \cdot e^{i\alpha(\omega)d/c}$ 。	薄层材料（如薄膜、生物组织）和透明、半透明介质（如塑料、纸张）
	参数释义 $E_{out}(\omega)$ 为输出电场的频率域表示。 $E_{in}(\omega)$ 为输入电场的频率域表示， ω 是角频率。 $\alpha(\omega)$ 是介质的吸收系数，与频率有关。 d 是传播距离。 $n(\omega)$ 是介质的折射率，通常是频率的函数。 c 表示真空中的光速。 i 为虚数单位。	
反射成像	测量样品表面或内部界面的反射信号，通过时域分析区分不同深度的反射界面。	不透明物体（如包裹安检等）和多层结构检测（如涂层厚度测量等）
层析成像	结合多角度扫描，利用Radon变换或衍射断层成像算法重建样品的3D内部结构。	复杂内部结构（如复合材料、文物）
近场成像	亚波长成像 在波长或亚波长尺度下，通过纳米级精度的电磁波局域场调控，可以突破传统光学衍射极限的限制，实现亚波长分辨率的成像。	半导体器件纳米级缺陷检测和生物细胞超微结构观测
	衍射极限原理 衍射极限是指理想点光源通过光学系统成像时，由于光的波动性产生的衍射效应导致无法完美聚焦为一点，这一物理现象从根本上制约了光学系统对两个相邻物点的最小可分辨距离。衍射极限公式 ^[29] 为： $d = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}$ ，式中： d 为两个物体能够被光学系统分辨开的最小距离， λ 为波长， n 为折射率， θ 为入射角。	

太赫兹成像技术的优势源于THz波段的独特物理特性:光子能量低,不会引发物质电离,安全性高;对非极性介质(如陶瓷、塑料、纸张等)穿透性强;频段与生物大分子振动/转动能级匹配,可实现分子指纹识别;同时对水分子高度敏感^[27],可用于含水率分析。太赫兹成像在法庭科学中的价值主要体现在对非金属包裹内物品的探测、多层结构分析、隐藏字迹或涂层的识别等方面。然而,其空间分辨率受衍射极限限制(通常为百微米至毫米级),成像速度相对较慢,且易受环境湿度及样品厚度影响,信号处理与解释也较为复杂。

2.4 光谱成像技术的研究现状及存在问题

高光谱成像、拉曼光谱成像及太赫兹时域光谱成像等技术,凭借其各自独特的无损分析能力,展现出强大的应用潜力与独特的价值。高光谱成像擅长宏观形态与化学成分的分析,拉曼成像提供待测物分子指纹的精准识别,而太赫兹成像则对非极性材料具有卓越的穿透能力,三者共同构成了覆盖宏观至分子级证据的检验技术体系。表2系统梳理了近年来相关研究文献所采用的光谱范围、分析方法、技术优势、存在局限及提出的解决方案。综合来看,这些技术在实际应用中仍面临一系列共性与特性的关键问题与挑战,主要包括复杂基质干扰、痕量检测灵敏度不足、环境噪声影响、数据处理标准化缺失以及设备便携性与成本限制等。

表2 研究概况

Table 2 Research overview

Literature	Spectral range	Method	Advantage	Limitations exist	Solution
[34]	400~800 nm	KNN、SVM、ANN、Decision Tree	高分类准确率、判别性强、非破坏性检测、多模型验证	部分波段噪声大、系统依赖专业操作、数据量有限、未拓展至红外波段	提升系统信噪比、推进自动化检测、扩大样本库、扩展光谱范围
[37]	500~1 800 cm ⁻¹	PLS-DA、SVM-DA	多体液同时鉴别、高准确性、适应样本异质性、适用于复杂体系	实验理想条件、未处理混合物、变量选择依赖训练集	扩展样本类型、优化变量选择策略、建立检出限与定量能力
[42]	0.1~10 THz	参数提取、图像重建	实时成像能力、高空间分辨率、大视场、无标记检测、多参数成像	样品制备复杂、成像均匀性差、对比度受限、边缘衍射效应、水分敏感性高	优化样品保存与成像条件、信号处理与图像增强、光谱分析与对比机制研究、系统硬件优化
[43]	0~8.0 THz	FDA、SVM、MLPNN	高判别准确率、非破坏性检测、无需复杂前处理、快速分析、多算法验证	低频段信号重叠、模型泛化能力待验证、样本量有限且仅限男性样本	频段筛选、扩大样本量和地域范围、数据融合提升判别力、多算法比较优选
[47]	387~1 035 nm	CatBoost、GBDT、RF、LightGBM	快速高效、信息量大、高精度识别、适合现场筛查	噪声干扰、样本局限性、波长范围限制	数据预处理多样化、扩展样本类型、多光谱融合
[49]	500~1 650 cm ⁻¹	BSUB、NSSUB	便携性、高特异性、灵敏度提升、多组分同时检测	便携设备灵敏度低、光谱干扰、SERS应用难度、多组分重叠	开发NSSUB数据处理方法、引入SERS技术、优化实验条件、理论计算辅助
[52]	200~3 000 cm ⁻¹	图形融合、构建成像	高空间分辨率、化学特异性强、可视化能力强、适用于复杂样品、多焦点成像能力	荧光干扰、样品损伤风险、图像模糊、样品限制、未量化荧光影响	优化激光波长、调整激光功率、多焦点扫描与图像融合、扩大样本量
[53]	500~1 800 cm ⁻¹	CNN、KNN、LR、RF、SVM、DT	高准确率、无需预处理、高效快速、多标签分类能力强、鲁棒性强	样本种类有限、混合比例固定、对弱特征敏感度有限、模型依赖超参数调优	扩大样本多样性、变比例混合实验、优化模型结构、引入迁移学习、自动超参数优化
[55]	0.3~2.0 THz	PCA、t-SNE、LargeVis、KNN、DT	无损检测、快速识别、高区分能力、适用性强	苎麻与大麻吸收峰相似、原始光谱噪声大、PCA不适分非线性数据、t-SNE分类效果一般	引入LargeVis(LV)降维、多步骤预处理、结合决策树(DT)分类器、对比多种模型
[57]	0.1~1.2 THz	CNN、PCA-SVM	高精度分类、高效识别、适应性强、鲁棒性好	数据量小、光谱重叠、无特征吸收峰、环境干扰	使用改进CNN模型、数据预处理、模型结构优化、对比验证
[8]	400~1 000 nm	t-SNE、PCA、K-Means	优异的可视化效果、非线性处理能力强、高区分能力、保留局部与全局结构	计算复杂度高、对相似光谱敏感、参数调优复杂、无法直接用于分类	算法优化、预处理筛选、自动化参数选择、集成分类模型
[64]	450~950 nm	PCA、NMF、BPNN、1D-CNN	高分类准确率、非破坏性分析、自动化程度高、适用于多类别分类	相似油墨难以区分、数据量依赖性强、模型可解释性差、光谱差异小、硬件与计算资源要求高	多模态分析、数据增强、模型优化、特征融合、轻量化模型
[67]	400~720 nm	SVM	多机制显现、高分类精度、深入机理研究、适用性强	环境要求高、部分字迹显现效果依赖光谱特性、背景干扰	优化光源与成像系统、融合多模态数据、开发自适应滤波方法

(续表2)

Literature	Spectral range	Method	Advantage	Limitations exist	Solution
[68]	400~1 015 nm	LR、SVM、RF、DT、XGBoost、LightGBM	高精度、自动化与客观性、高效性、适用于复杂情况	模型泛化能力待验证、数据依赖性、计算复杂度	扩展数据集、模型优化、多技术融合
[70]	80~3 200 cm^{-1}	OMNIC、特征峰拟合	高分辨率与灵敏度、可推断书写时间、抗干扰强	无法判断绝对书写时间、依赖单一特征峰、样品可能受损、未建立统一标准	结合色谱法定量、使用多变量分析或机器学习、选择合适的激光功率、建立样本数据库
[72]	100~2 000 cm^{-1}	PLS-DA、CNN、CNN-RNN	高精度识别、强抗噪能力、自动化程度高、老化时间识别	数据量依赖性强、模型复杂且训练成本高、无法判断绝对时间、泛化能力待验证	使用高斯噪声增强、采用CNN-RNN联合结构、引入回归模型、扩大样本库
[74]	280~1 740 cm^{-1}	K-Means、MCR-ALS、PLS-DA	客观可靠、高空间分辨率、适用性广、结果可量化	依赖光谱差异性、阈值选择影响结果、分析时间长、仅限于中性笔	结合多种光谱技术、优化阈值选择、优化扫描参数、扩展书写材料研究
[75]	80~3 200 cm^{-1}	光谱对比分析	快速简便、高灵敏度与准确性、抗干扰强、客观性强、适用性广	材料多样性限制、交叉部位特征重叠、仪器依赖性强、打印字迹的适用性需验证	扩大样本库、结合其他分析技术、开发智能分析算法、建立标准化数据库
[76]	161~1 660 cm^{-1}	Origin、特征峰比对、相对强度分析	高空间分辨率、直观快速、区分成分、动态过程研究	仅定性分析、受纸张干扰大、无法判断绝对时间、样本代表性有限	结合图像分析或光谱积分面积、采集空白纸张光谱、结合老化特征成分变化、扩大样本范围
[77]	571~1 668 cm^{-1}	OPLS-DA	高精度分类、时间分辨能力强、动力学机制研究、多纸张适用性	仅适用于短期扩散、依赖纸张背景信号、无法判断绝对时间、环境控制要求高	扩大时间跨度、选择其他稳定的纸张成分峰、结合成分变化、集成温湿度监控与补偿
[80]	0.22~0.325 THz	图像重建	非电离辐射、非接触式检测、穿透性强、对含金属或炭黑墨水敏感、适用于多层结构	分辨率有限、扫描速度慢、墨水依赖性强、信噪比随层数增加下降、阴影效应	优化系统设计与扫描策略、扩展墨水类型数据库、采用合成聚焦技术、开发覆盖层抑制算法
[82]	0.22~0.325 THz 0.074~0.079 THz	CycleGAN、Pix2Pix-GAN	非破坏性、高去噪性能、解决数据稀缺问题、感知质量高、适用于多层文档	双面书写识别困难、纸张类型影响大、模型泛化能力有限、结构化伪影难以去除、字符出现碎片化问题	多模态融合、构建物理模型的神经网络、结合深度学习算法、改进网络架构

为进一步量化评估不同光谱方法的综合表现与发展趋势，本文基于表2所列文献，绘制了光谱分析方法发展趋势图(图6)。该图横轴为不同光谱区域，纵轴为方法表现评分。评分计算公式为：优势数量 + 解决方法数量 - 存在局限数量，评分越高表示方法综合表现越好。分析表明，光谱分析方法在不同波长区间呈现显著性能差异。其中，400~1 000 nm范围的机器学习方法(如SVM、KNN、ANN)表现最为优异，技术成熟度高；500~1 800 cm^{-1} 范围的判别分析方法(PLS-DA、SVM-DA)适用于复杂体系分析，表现稳定；而<2.0 THz和80~3 200 cm^{-1} 范围分别受限于样品制备复杂性、环境干扰及标准化问题，评分呈现波动或中等水平。技术发展呈现出从传统统计向机器学习演进、从单一技术向多模态融合、从定性分析向定量预测的清晰轨迹。

基于上述文献综述与趋势分析，未来的技术发展将主要围绕以下3个方面展开：一是开发多模态联用模型，克服单一技术的固有局限；二是利用人工智能与机器学习算法，构建智能光谱解析系统，提升自动化水平与准确性；三是推动技术体系从先进的实验室方法走向标准化、可推广的法庭实践，构建完善的标准数据库与操作规程。

3 光谱成像技术在法庭科学领域中的研究进展

3.1 生物物证检验

生物物证是指案件中发现的可提供生物学信息的物质或痕迹，来源于人体、动植物，包含DNA、蛋白质、细胞等生物成分。在刑事侦查与法庭科学中，它们对认定嫌疑人、受害者或生物来源具有重要价值。根据来源可分为人源与非人源两类：人源包括血液斑、唾液斑、精斑、组织、毛发等；非人源涵盖动物体液、植物组织及其微生物等。生物物证检验是物证鉴定的关键环节。近年来，光谱成像技术结合智能分析方法被引入该领域，实现了对复杂光谱数据的高效解析与特征提取，显著提升了检验的准确度与效率。

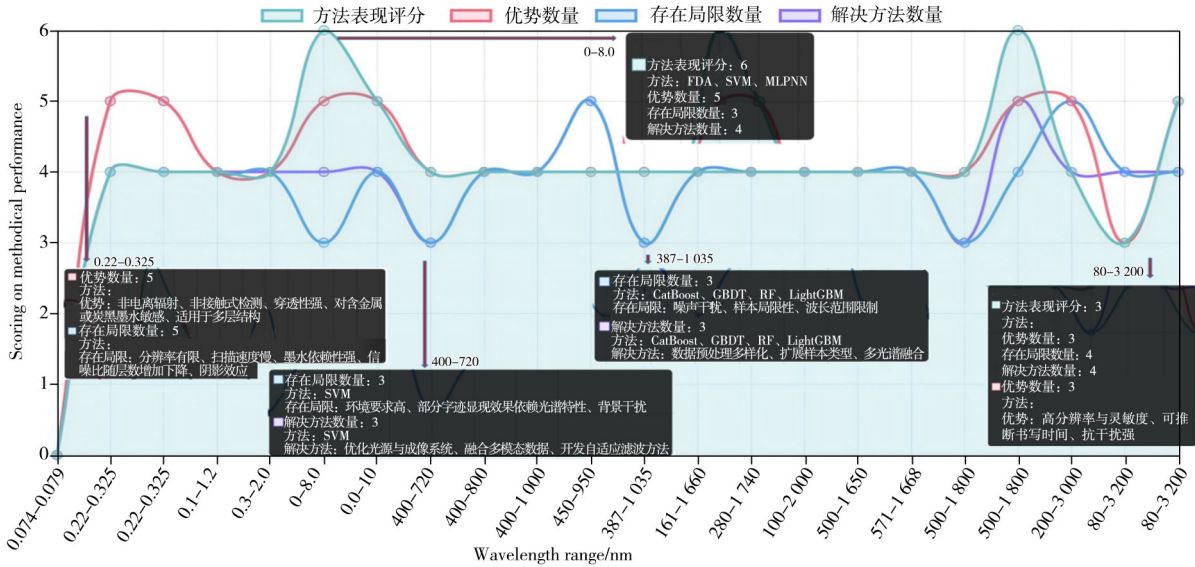


图 6 光谱分析方法发展趋势分析图
 Fig. 6 Development trends in spectral analysis methods

高光谱成像技术在不同物证类型中具有广泛应用，多项研究展现了其在生物样本识别与分类中的有效性，并形成层层推进的研究脉络。在血液检验方面，早期研究主要集中于血液与相似颜色物质的区分问题。Edelman 等^[30]采用非线性最小二乘多组分拟合方法，通过计算模拟血迹光谱与番茄酱、红酒和口红等干扰物质光谱之间的决定系数，实现了血迹与视觉相似物质的初步区分，但其方法在复杂混合血痕的适用性上存在局限。随后，Li 等^[31]基于血红蛋白在 400~500 nm 波段的特征吸收光谱进行识别，成功从多种红色物质中区分出血迹，并在盲测中准确检出衣物上的血迹，进一步提升了复杂载体上血迹识别的可靠性，然而对血迹陈旧度的判断并未涉及。为弥补这一缺陷，冯颖等^[32]针对血迹陈旧度问题，通过构建人工神经网络预测模型，实现了不同介质上短期血迹陈旧度的无损预测，从而拓展了高光谱在血迹时序分析中的应用。更进一步，庄园等^[33]则系统考察了种属鉴定这一关键问题，通过在 30 种载体上制备多样本并分析光谱曲线秩均值差，实现了人血、鸡血、牛血及其混合血痕的无损种属鉴别，使高光谱在血液检验中的应用层次更为完整。

在尿液检验方面，相关研究则从成分识别的基础问题逐步展开。邓颖佼等^[34]利用显微高光谱成像系统，率先获取了 5 类常见尿沉渣结晶的光谱数据，并借助支持向量机(SVM)、K 最邻近(KNN)等多种机器学习算法进行分类，有效验证了该技术在结晶类型识别中的可行性，为尿液成分分析奠定了方法学基础，然而其研究尚未扩展至尿液其他成分或更复杂的临床样本，显示出该方向仍有进一步推进的空间。

拉曼光谱技术为法医物证鉴定提供了一种新型、高效的分析手段，尤其适用于体液的快速无损识别。Virkler 等^[35]结合拉曼光谱与高级统计方法，首次实现了人类、犬类和猫类干燥血液样本的准确鉴别，初步证明了该技术在体液分类中的可行性。然而，该方法尚不能有效区分不同种类的体液，尤其是形态相似但来源不同的生物样本。针对上述局限，Virkler 等^[36]进一步采用近红外拉曼光谱技术，基于精液的异质化学成分建立了人类干燥精液的光谱特征。研究发现，不同供体的精液光谱具有高度一致性，但与干燥血液及唾液光谱呈现显著差异，从而实现了犯罪现场中体液类型的初步辨别。尽管如此，该研究仍未覆盖更多类型的常见体液，在实际多元体液混合的复杂场景中应用受限。为拓展拉曼光谱在体液识别中的覆盖范围与可靠性，Muro 等^[37]进一步整合化学计量学方法，系统分析了外周血、唾液、精液、汗液及阴道分泌物 5 类共 75 例体液样本。该方法不仅实现了多类别体液的有效区分，而且进一步验证了拉曼光谱在复杂样本体系中的高度可靠性与非破坏性优势。

在毛发检验方面，李鹏飞^[38]率先利用拉曼光谱对人发角蛋白进行分析，证实其可检测毛发中的二硫键结构，并初步实现了人发与动物毛发的区分。这为犯罪现场遗留毛发提供了一种新的分析路径，也为后续研究基于角蛋白结构差异进一步细化毛发来源分类奠定了方法基础。

太赫兹光谱在法医物证分析中展现出独特的非破坏性、高分辨检测优势。在组织形态学检验方面，其核心能力在于对生物组织微结构与水分分布进行精准成像。郭力菡等^[39]利用太赫兹数字全息成像技术对猪肉和羊肉组织切片进行检测，通过菲涅耳衍射重建与主成分分析(PCA)，成功实现了肌肉与脂肪组织的区分。该研究初步验证了太赫兹成像在区分组织结构上的潜力。然而，其基于离轴全息的成像方式在空间分辨率和成像速度上存在一定局限，难以满足复杂组织或快速检验的需求。为提升成像的细节分辨能力，孙卫东等^[40]进一步采用基于光电导微探针的近场太赫兹系统，对新鲜猪肉组织进行扫描成像。该方法显著提升了空间分辨率，能够更清晰地界定脂肪与肌肉组织的精细边界(图7，肌肉组织呈黄红色，脂肪组织呈暗蓝色)，从而推进了对生物组织显微结构的识别精度。但上述研究多集中于正常组织的区分，尚未涉及对病变组织的诊断能力，而这在法医病理实践中具有重要意义。针对这一不足，Reid等^[41]将太赫兹脉冲成像技术应用于病理组织分析，通过对比30例患者癌变、非典型增生及健康结肠组织的吸收与折射率光谱，构建了基于统计模型的分类方法。结果证实，太赫兹成像能有效鉴别不同病理状态的组织类型。这为法医学中损伤性质判定(如生前与死后损伤鉴别)及病理时间轴重建提供了新的技术可能。为进一步推动该技术的临床与法医学应用，Yang等^[42]开发了实时高分辨率太赫兹近场光谱成像系统，并将其用于口腔组织检测。研究表明，该技术可通过折射率图像清晰区分正常上皮、疏松结缔和肌肉组织，实现了对更复杂、更精细生物组织结构的快速、无损识别。综合而言，上述研究形成了从正常组织区分到病理组织诊断、从离轴成像到近场高分辨成像的技术演进路径，共同奠定了太赫兹成像在法医组织检验中客观量化分析与物证保全的应用基础。

在毛发与指甲等角质物证的地理溯源方面，太赫兹光谱亦展现出重要价值。Qiu等^[43]基于太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术，结合Fisher判别分析(FDA)与数据融合策略，对中国5个地区共196份头发与指甲样本进行了系统分析。该研究不仅成功实现了不同地理来源样本的区分，更建立了一种高效、精准的物证溯源方法，为法医学实践中涉及人体角蛋白检材的快速地理来源推断提供了可靠的新范式。

高光谱、拉曼和太赫兹成像技术是法医科学领域极具潜力的革新力量。然而，要将这种潜力转化为在法庭上普遍接受的、可靠的常规鉴定手段，未来还需要在方法标准化、数据库建设、抗干扰能力提升、设备小型化与成本控制等方面进行大量深入的研究和验证工作。目前，它们更可能作为传统方法的有效补充，而非替代。

3.2 微量物证检验

微量物证是指量小体微，难以用肉眼发现，但能通过其存在状况、外部特征、品质和性能证明案情的客观实在的一切物质，或检材中证据价值成分含量低的物质。因此，微量物证包含质量小、体积小和待检成分含量低两层含义。其形成方式包括物质重复再现和物质转移。按检验对象分类，主要分为爆炸物及射击残留物、高分子材料(如纺织纤维、涂料、塑料、橡胶)、油脂类物质(如动植物油、矿物油)和其他物证(如金属、玻璃、化妆品、烟蒂等)。光谱成像技术通过其非破坏性、原位性和丰富的化学信息获取能力，改变了微量物证检验模式，解决了传统方法在证据保全、效率、隐藏信息发现、空间分布分析及特殊物证处理上的局限。该技术能发现更微弱证据，精准揭示化学本质和空间关联，提升法庭科学微量物证检验的能力、效率和证据价值。

高光谱成像技术在微量物证检验中应用广泛，其在不同物证类型中的应用研究从基础鉴别向复杂问题不断深化。在纺织品成分鉴别中，金肖克等^[44]利用HSI，通过对10类纺织品光谱数据进行一阶导数预处理以消除基线漂移，并建立偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)模型，实现了测试集96.78%的鉴别准确率。该研究初步证实了该技术对纺织品成分进行无损快速鉴别的可行性，解决了材质类别识别这一基础挑战。然而，物证鉴别不仅需要区分材质类别，往往还需对同材质的细微差异进行精准识别，例如区分不同品牌或型号的同类物证。张浩等^[44]在车漆物证识别中的研究正是对此问题的深化。他们采用HSI与一维深度残差收缩网络(1D-DRSN)模型，实现了54个覆盖18种车型的白色车漆样本的精准

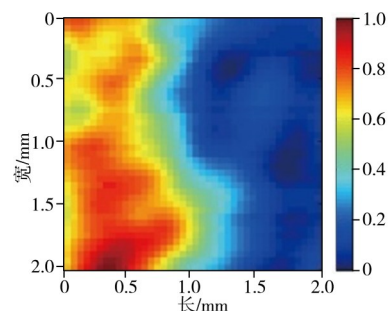


图7 猪肉组织切片的近场THz图像^[40]
Fig. 7 Near-field THz image of a pork tissue section^[40]

识别(图 8)。该工作通过深度挖掘光谱特征,有效解决了不同品牌或型号车漆的区分难题,是对前一研究鉴别维度的有力拓展。

从“类别区分”到“子类精细识别”的逻辑同样体现在塑料检测领域。胡锡敦等^[45]利用近红外高光谱成像技术,基于 KNN 及遗传算法优化的 SVM 算法,在 1 100~1 650 nm 波段有效区分了 9 种常见塑料,解决了塑料种类判别问题。而姜红等^[46]的研究则进一步聚焦于更具挑战性的同材质内部鉴别:

他们结合高光谱技术与无监督聚类(K-means)和长短期记忆网络(LSTM)模型,对 50 个汽车塑料保险杠样品进行检验,经标准正态变换(SNV)预处理后,成功实现了对同种塑料(保险杠)中不同样本的分类,正确率达 83.33%,从而在种类识别的基础上,向来源追溯迈进了一步。在更复杂的物证体系分析中,研究则侧重于通过特征优化提升鉴别效果。例如在食用油掺假检测中,Zou 等^[47]的研究展示了对复杂混合体系的分析策略。他们利用 HSI,经中值滤波预处理后,采用梯度提升决策树模型,实现了对红花籽油掺假植物油的精准鉴别,识别率达 100%。该工作通过有效的预处理与先进的分类算法组合,为解决物证中成分混杂、光谱重叠的难题提供了范例。与此同时,高光谱技术也在为犯罪现场新型物证的勘查提供全新手段。张宇帆等^[48]将其应用于烟蒂物证分类(图 9),通过光谱特征提取和 PCA 降维,构建了 PCA-BP 分类模型,拓展了该技术的实战应用场景。高光谱成像技术在微量物证检验中的应用研究,呈现出清晰的递进关系:从验证基础鉴别可行性,到解决同材质的精细区分,再发展到应对复杂混合体系及拓展新型物证应用,各研究在问题聚焦和方法创新上相互衔接与深化,共同推动了该技术在该领域的纵深发展。

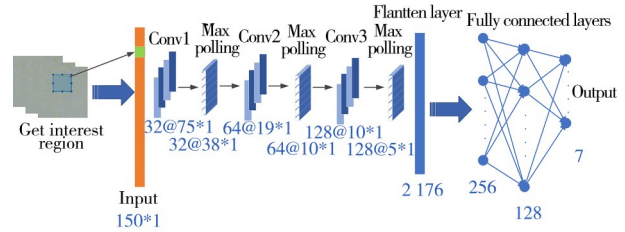


图 8 车漆物证 1D-CNN 识别网络模型^[44]

Fig. 8 1D-CNN recognition network model for automotive paint forensic evidence^[44]

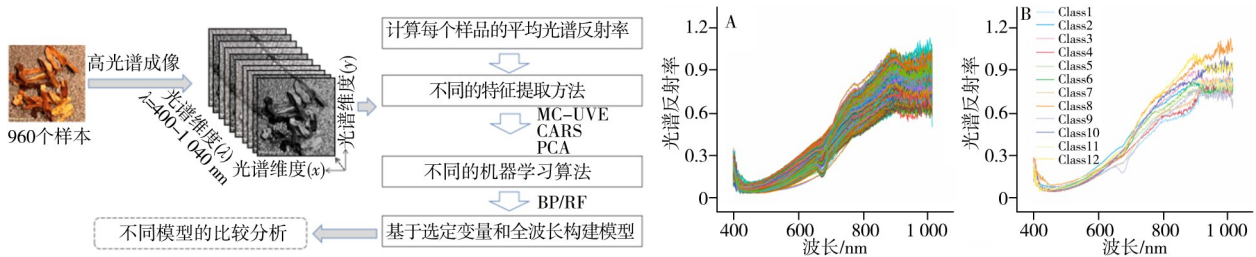


图 9 烟蒂物证高光谱图像分析光谱反射率曲线^[48]

Fig. 9 Spectral reflectance curve in hyperspectral image analysis of tobacco evidence^[48]

在射击残留物检测方面,Shafirovich 等^[49]开发了一种用于便携式拉曼光谱的先进光谱处理方法,成功实现了对 6 种有机射击残留物(OGSR)分析物混合液的同时检测,初步证明了便携式拉曼技术在复杂混合物现场分析中的可行性。然而,该方法仍受限于荧光干扰和低浓度样本的检测灵敏度,难以应对实际案件中残留物微量且基质复杂的挑战。针对荧光干扰问题,在口红物证鉴定中,张进等^[50]采用差分拉曼光谱结合化学计量学,通过双波长差分技术有效抑制了荧光背景,实现了 50 个口红样本的高区分度无损分析。这一技术为弱信号、强荧光背景下的痕量物证检测提供了新思路,但尚未广泛用于混合残留物的原位识别。在爆炸物残留检测方面,Ali 等^[51]利用共聚焦显微拉曼光谱,对附着于纺织纤维上的单个爆炸物微粒进行了原位检测,即使在染色纤维的强荧光背景下仍能解析特征拉曼谱带,显著提升了复杂基质中痕量危险物质的检出能力,弥补了传统方法在基底干扰方面的不足。

在纤维鉴别方面,Liu 等^[52]基于拉曼光谱成像技术,依据棉、羊毛、丝及涤纶等纤维的独特拉曼特征峰,实现了对单一组分、多组分及染色混纺纤维的精准识别与空间分布可视化。图 10 是多组分纺织纤维的拉曼成像,该研究虽凸显了拉曼成像在形态与成分同步分析中的优势,但对光谱重叠严重的多组分体系仍面临分类模型普适性不足的限制。为此,在食用油真伪鉴别中,Zhu 等^[53]将一维 CNN 模型应用于拉曼光谱,通过深度学习实现了混合物中 5 种食用油的高精度分类,展现了复杂谱图解析与自动特征提取方面的潜力,为多组分纤维的系统识别提供了可借鉴的分析方法。

在油漆涂料检验方面,Zieba-Palus 等^[54]应用拉曼光谱分析了 66 份蓝色汽车金属漆和固体漆样本,

通过 785 nm 长波长激光及光漂白预处理有效克服荧光干扰, 实现了固体漆 97%、金属漆 99% 的区分能力。该工作证实了拉曼光谱在涂料区分中的实用性, 但其依赖特定颜料特征, 对成分相近或经过改性的油漆体系仍需进一步结合化学计量学方法以提高鉴别力。

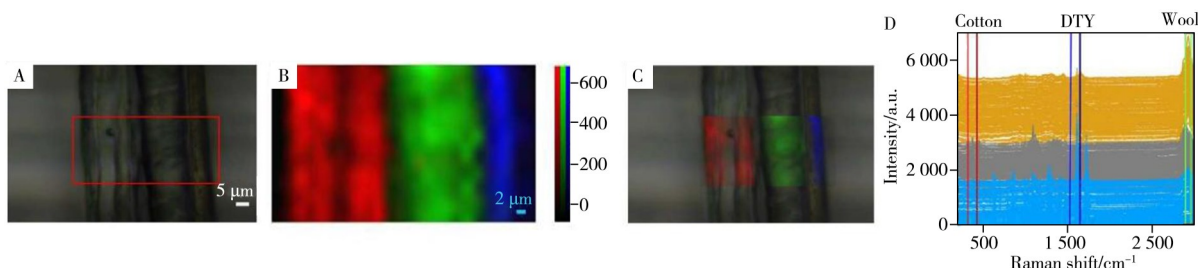


图 10 DTY、棉和羊毛纤维的拉曼成像采集^[52]

Fig. 10 Raman imaging acquisition of DTY, coon, and wool fibers^[52]

A. microscopic image and selected scanning area; B. Raman image; C. overlay of Raman image and microscopic image; D. collected Raman spectra of the mixed fibers and selected characteristic peak range (A. 显微图像和选定的扫描区域; B. 拉曼图像; C. 拉曼图像和显微图像的叠加; D. 混合纤维的收集到的拉曼光谱和选定的特征峰范围)

基于太赫兹光谱的材料鉴别研究在不同领域均展现出显著优势, 且相关研究呈现出明确的递进与互补关系。在纺织纤维鉴别领域, Song 等^[55]将太赫兹时域光谱与 LargeVis 降维技术相结合, 构建了新型大麻纤维识别模型, 对汉麻、亚麻和苧麻实现了 100% 的鉴别准确率, 为纤维材料的无损鉴定提供了高效方案。然而, 该研究主要针对少数天然纤维, 对合成纤维及混合材质体系的适用性仍有待验证。在塑料检测方面, 王鹤等^[56]利用 THz-TDS 技术系统测量了聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP) 等 5 种常见塑料的光学参数, 发现其折射率与吸收系数差异显著, 为多类高分子材料的无损区分奠定了实验基础。尽管该方法能够依据光谱特征进行种类判别, 但对成分相近或共混工程塑料仍缺乏高精度的分类能力。针对这一局限, 郑志杰等^[57]进一步引入改进的 CNN 分类模型, 结合 THz-TDS 实现了对 PEEK (聚醚醚酮)、PPS (聚苯硫醚)、ABS (丙烯腈、丁二烯、苯乙烯三种单体的三元共聚物) 等工程塑料的高精度识别, 有效提升了复杂体系下的鉴别效率与模型泛化能力, 为无特征峰物质的光谱分析提供了新方法, 也为纺织纤维领域处理更多样、更复杂的纤维混合物鉴别提供了可迁移的技术路径。

在爆炸物检测领域, 相关工作的递进关系尤为清晰, 完整展现了从原理验证、灵敏度提升到抗干扰优化的技术发展链条。Shen 等^[58]首次利用反射太赫兹脉冲光谱成像技术, 在 5~120 cm^{-1} 波段内识别出黑索金 (RDX) 的 7 个特征吸收峰, 并实现了多组分样品中 RDX 的空间分布可视化, 初步证明了太赫兹技术对爆炸物的检测潜力。然而, 面向现场痕量检测的实际需求, 其检测灵敏度与实用性有待提高。为此, Dikmelik 等^[59]进一步系统获取了 RDX、奥克托今 (HMX) 等 4 种炸药在 0.5~6.0 THz 频段的完整透射光谱, 并成功检测到金属表面低至 0.4 mg 的 RDX 痕量残留, 显著提升了太赫兹技术对微量爆炸物的检出能力。为进一步抑制噪声干扰、提高检测可靠性, Michalopoulou 等^[60]开发了结合样条平滑与形状约束最小二乘算法的反射光谱处理方法, 有效增强了 RDX 等爆炸物光谱特征的信噪比, 推动了该技术在实际复杂环境中的应用。

在橡胶与油品分析领域, 太赫兹技术同样证明了其基础鉴别能力。苗青等^[61]利用 THz-TDS 成功区分了氯丁橡胶、丁腈橡胶等三类橡胶, 彰显了该技术快速区分不同聚合物材料的潜力。Karaliūnas 等^[62]则通过对 11 种油品的检测, 实现了类型鉴别与严重变质判断。尽管这些研究取得了积极成果, 但其分析方法相对传统, 多依赖于直接的光谱参数比较。未来, 若借鉴爆炸物检测中发展的高灵敏度痕量探测技术与塑料检测中采用的先进算法模型, 有望在橡胶老化程度定量评估、油品轻微变质或掺假识别等更精细的分析任务上取得突破。

高光谱、拉曼和太赫兹光谱构成了现代微量物证分析的技术基石, 它们各有物理原理上的优势, 共同覆盖了从紫外、可见光、近红外到太赫兹的宽广电磁波谱。无需对物证进行破坏性前处理, 最大限度地保留了物证的原始状态和证据价值, 这是传统化学分析方法无法比拟的。研究的最终目标非常明确——服务于法庭科学实践, 无论是解决车漆、塑料的品牌溯源, 还是实现爆炸物、射击残留物的现场快速检测, 都体现了从实验室研究向实战应用的强烈趋向。但单纯的光谱数据采集已不足以解决

复杂的物证区分问题,与化学计量学和多维度机器学习/深度学习模型的深度结合,是实现高精度鉴别和深度特征挖掘的关键。

3.3 文件检验

文件物证是指以其记载的内容和本身的物质属性(载体、痕迹、状态等)共同证明案件事实的书面文件或物品,常见类型包括合同、遗嘱、借据、发票、被涂改或伪造的文件等。作为一种独特的证据形式,文件物证强调对原件的审查,并需结合内容分析与物证技术检验。文件检验主要以“笔迹、言语、印迹、物质材料、制作时间、篡改(污损)”6类构成要素为检验对象^[63]。高光谱、拉曼和太赫兹光谱技术为文件检验提供了互补的无损分析手段,能够有效识别文件篡改、伪造等行为,为司法活动提供技术支持。

高光谱成像技术在文件检验中应用广泛,其核心优势在于能够同时获取空间与连续光谱信息,实现对文件材料成分的无损鉴别。在笔迹材料检验方面,研究呈现出从传统机器学习向深度学习发展、从单色笔迹向多色墨水拓展的清晰路径。早期研究侧重于利用经典分类模型处理黑色笔墨。例如,王书越等^[5]针对36种黑色签字笔,建立随机子空间-线性判别分析(RSM-LDA)模型,取得了99.09%的交叉验证准确率,初步证实了HSI结合机器学习在笔迹无损鉴别上的可行性。然而,高光谱数据固有的噪声和冗余信息影响了模型的泛化能力。为此,高树辉等^[6]引入了一维深度残差收缩网络1D-DRSN(图11A)处理30种黑色中性笔数据(图11B),该模型能自适应滤除噪声,训练集准确率达99.5%(图11C、D),显著提升了模型对复杂光谱特征的稳健性。上述研究主要针对黑色墨水,但实践中多色墨水的鉴别需求同样迫切。Reed等^[7]系统评估了HSI对蓝、红、黑三色中性笔墨水的区分能力,发现其区分效果与墨水颜色密切相关(红色最佳DP=1.00,黑色最弱DP=0.40),这揭示了仅靠原始光谱数据鉴别某些颜色(尤其是黑色)墨水的局限性。为了更有效区分光谱特征相似的墨水,Devassy等^[8]进一步采用t-SNE非线性降维算法处理高光谱墨水数据,其可视化与聚类效果均优于传统的PCA,为复杂墨水样本的区分提供了更优的特征提取手段。

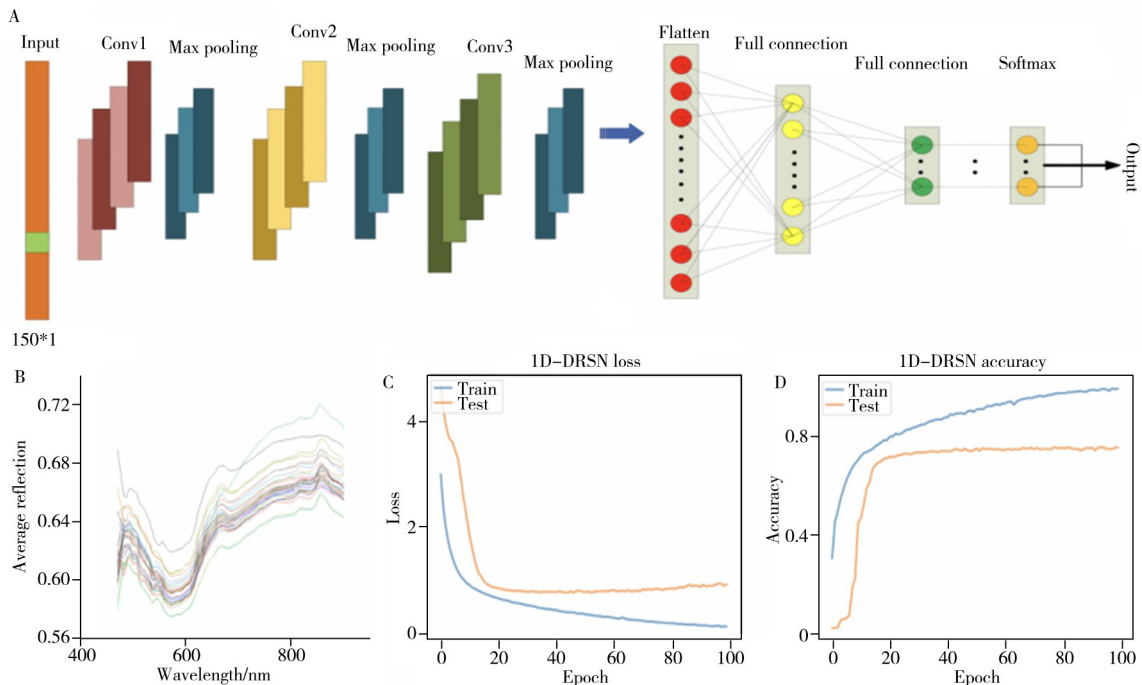


图 11 高光谱成像技术结合深度残差收缩网络鉴别黑色中性笔字迹油墨^[6]

Fig. 11 Hyperspectral imaging technology combined with deep residual shrinkage networks for identifying black gel pen ink^[6]
A. 1D-CNN network model; B. average reflectance spectra of 30 gel pen inks; C. loss function curve of 1D-DRSN training results; D. accuracy curve (A. 1D-CNN 网络模型; B. 30 种中性笔墨水的平均反射光谱; C. 1D-DRSN 训练结果的损失函数曲线; D. 准确率曲线)

在印章印文检验中,研究方法体现了从线性降维、浅层网络到深度特征学习的性能跃升。Wang等^[64]系统比较了PCA、非负矩阵分解(NMF)、反向传播神经网络(BPNN)和一维卷积神经网络(1D-CNN)对20种印台油墨的分类效果。结果显示,1D-CNN凭借其强大的局部特征提取能力,在准确率

与稳定性上均显著优于其他方法，标志着深度学习在该细分领域应用的有效性。

在伪造文件检验方面，不同研究针对篡改的不同形态(涂抹、添改)提出了各有侧重的解决方案，其效果差异凸显了检验难题的复杂性。Silva等^[65]针对文本涂抹与添改两种类型，采用PCA结合多元曲线-交替最小二乘法(MCR-ALS)进行分析，对文本添改的识别正确率达82%，但对涂抹的识别率仅为43%，表明单纯基于光谱分解的方法对物理覆盖型篡改的识别效果有限。与此互补，王鸣久等^[66]则直接面向被涂抹字迹的显现问题，通过在450~950 nm波长范围内分析原字迹与空白处光谱的差异，有效实现了字迹复原。对于更广泛的隐性字迹(如擦除、密写、掩盖)的自动识别与分类，李云鹏等^[67]利用HSI结合SVM进行分类，取得了99.28%的总精度，为批量、快速鉴定提供了自动化方案。

在朱墨时序检验这一关键难题上，研究重点在于如何构建能够敏锐捕捉交叉点微量层次信息的光谱特征模型。Li等^[68]利用可见-近红外高光谱成像对印章印油与激光打印墨粉的交叉顺序进行无损鉴定。研究的关键突破在于，通过iVISSA算法(区间变量迭代空间收缩法)进行特征波长选择并结合SNV预处理，构建了基于对数比差异的光谱特征，再输入SVM建模，最终实现了高达99.47%的分类精度。图12为构建的高光谱分类模型流程图。该方法凸显了特征工程与预处理对于提升模型鉴别细微物理化学差异能力的重要性。

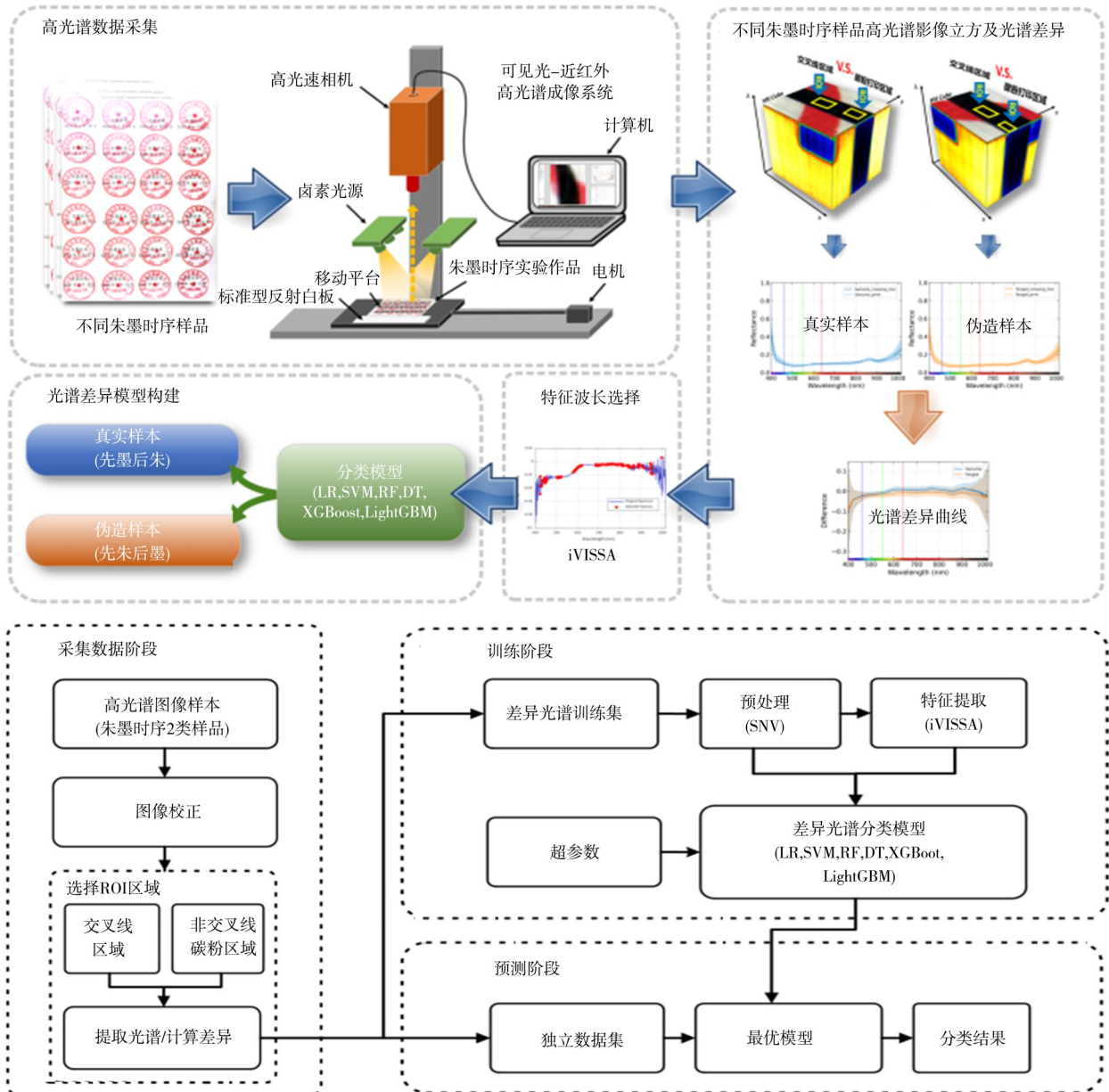


图12 基于高光谱技术的朱墨时序光谱差异特征分析流程图^[68]

Fig. 12 Flowchart of time-series spectral difference features analysis of vermilion ink based on hyperspectral technology^[68]

拉曼光谱技术在文件检验中具有重要应用。该技术在各类文件物证的检验中均有研究报道, 这些研究呈现出由种类鉴别向时序判断深化、由单一分析向多方法联用发展、由主观判断向客观量化改进的趋势, 文献之间往往体现出对前人研究不足的改进与补充。

在墨水与油墨的种类鉴别方面, 研究从实现基本分类向提升分类精度与效率演进。Borba 等^[69]通过拉曼光谱结合化学计量学, 对 14 种蓝色圆珠笔墨水进行无损区分, 经预处理后利用 PCA 和 HCA 探索分组结构, 并构建 PLS-DA 模型, 分类准确率超过 97%。万敬伟等^[70]通过建立特征峰分析方法, 实现了利用拉曼光谱对单一蓝、黑色墨水的高精度分类, 然而, 在面对更复杂样本或追求更高效率时可能存在局限。后续研究则致力于提升方法的区分能力或简化流程, Lee 等^[71]基于特征峰比较, 为蓝、黑墨水构建了更直观的分类流程图, 区分能力分别达 94% 与 95%。而为了处理更复杂的分类挑战, 如低信噪比数据, Lyu 等^[72]在印章印文检验中提出 CNN 与 RNN 联合模型, 对 16 种油墨品牌与老化时间的识别准确率接近 100%, 且在低信噪比条件下的表现优于传统的 PLS-DA 模型。这项研究解决了在复杂条件(如老化、噪声)下保持高分类准确率的难题, 展现出更强的鲁棒性。

在文件形成过程及篡改检验方面, 研究重点从显现残留痕迹转向判断形成顺序, 并追求判定方法的客观量化。例如, 张辉等^[73]利用显微成像拉曼光谱, 有效显现了热可擦笔擦除后的残留字迹。此例解决了特定擦除字迹的显现问题。然而, 对于文件检验中更具挑战性的交叉笔画时序判定, 传统方法往往主观性强。Brito 等^[74]的研究则在此基础上更进一步, 他们基于拉曼高光谱成像与化学计量学, 采用 k-means、MCR-ALS 和 PLS-DA 等方法分析交叉墨线, 并提出了像素定量阈值的客观判定方法, 其时序判定正确率超过 70%, 优于传统主观检验。该研究针对的是更复杂的交叉时序判定。类似地, 在朱墨时序检验中, 万敬伟等^[75]通过共焦显微拉曼分析, 发现了后形成字迹或印文的拉曼特征峰更明显的规律, 提供了一种准确率高且操作简便的时序判断方法。

此外, 一些研究关注了材料与载体相互作用的动力学过程, 为理解检验的物理化学基础提供了支撑。例如, 李开开等^[76]分析了印油在纸张上的扩散行为, 发现其受印油种类与纸张类型影响。此研究揭示了影响文件形成状态的一个重要变量。紧接着, Su 等^[77]采用拉曼光谱结合 OPLS-DA, 对多种油墨在纸张上的扩散进行时间分辨分析, 最终实现了油墨类型的 100% 准确分类。该研究利用揭示的扩散动力学差异, 反向强化和提升了种类鉴别的准确性与科学性。

太赫兹光谱技术在文件检验中展现出独特优势。在纸张检验方面, 相关研究逐步推进, 不断克服技术挑战。Seco-Martorell 等^[78]利用太赫兹时域成像分析 18 世纪画作, 首次展示了该技术揭示隐藏笔触与签名的能力, 为画作真实性鉴定提供了新路径。然而, 该研究主要针对历史艺术品, 对现代日常文件如钞票等的适用性尚未验证。为此, 刘海玲等^[79]进一步通过透射式太赫兹脉冲成像鉴别百元人民币真伪, 基于水印与安全线区域成像差异实现快速准确识别, 证明该技术可用于多区域、多模式的人民币真伪鉴别, 从而拓展了太赫兹成像在实际防伪文件检验中的应用范围。

在伪造文件检验方面, 研究逐步从单层书写向复杂覆盖情形深入。Ullmann 等^[80]使用太赫兹成像系统在透射模式下对书写样本进行扫描, 发现太赫兹波可穿透纸张并且能清楚地分辨出纸上含金属或炭黑墨水的字迹, 即使书写被遮盖仍可部分识别文字。但该研究对于双层书写叠加等更复杂情况的识别难度显著增加。这一局限促使后续研究转向成分分析与图像增强方法。Fukunaga 等^[81]利用太赫兹时域光谱成像结合成分空间模式分析, 对羊皮纸手稿中的字符进行非侵入式识别, 通过光谱比对确定红色颜料为朱砂, 并成功区分墨迹与污渍, 显示出太赫兹技术在字迹成分识别与文本提取方面的潜力。然而, 复杂背景噪声仍会影响图像质量与识别准确率。为此, Dutta 等^[82]进一步引入基于深度学习的太赫兹图像去噪方法, 采用有监督的 Pix2PixGAN 模型对噪声图像进行增强。实验表明, 该方法能显著提升图像质量, 在单面宣纸文件中字符识别率达到 99%, 在标准纸张中达到 61%。尽管对双面书写文件的识别仍具挑战, 但该研究为太赫兹成像提供了重要的深度学习增强方案, 与前人工作形成递进, 共同推动了太赫兹技术在复杂文件检验场景中的实用化发展。

总而言之, 这些研究描绘了光谱技术在文件检验领域从传统形态学分析向智能化、精细化、无损化方向发展的图景。高光谱、拉曼和太赫兹技术凭借其独特优势, 正在成为解决传统难题的利器。然而, 当前的研究仍主要处于“方法验证”阶段, 其向“日常实践”的过渡仍面临方法学鲁棒性、实际

操作可行性和法律证据标准等多重挑战。最终，这些先进技术的价值在于作为文件检验人员的强大辅助工具，以提高鉴定的科学性、客观性和效率，并结合案件其他证据进行综合判断。

3.4 机器学习与深度学习在法庭科学中的应用进展

光谱成像技术产生的高维数据为物证检验提供了丰富信息，而机器学习(ML)与深度学习(DL)方法则是从这些数据中高效、精准提取证据价值的关键工具。二者在应用逻辑上存在承接与互补关系：传统ML方法通常依赖于人工特征工程与浅层模型，在数据量适中、特征物理意义明确的场景中表现稳健；而DL方法通过深层神经网络自动学习数据的层次化特征表达，在处理海量数据、复杂非线性问题及图像/序列数据时展现出更强能力。以下系统梳理ML与DL在法庭科学生物物证、微量物证和文件检验3个领域中的应用进展。

机器学习方法，特别是监督学习与化学计量学方法，在光谱数据分析中历史悠久，其核心优势在于模型可解释性较强、对中小规模数据集友好，常用于建立分类、回归和聚类模型。在生物物证检验中，ML主要用于体液识别与分类和血迹陈旧度预测与回归。在微量物证检验中，ML在此领域的应用以材料种类鉴别和来源细分为主。例如，鉴别纺织品成分、区分不同塑料种类、识别掺假食用油以及复杂混合物解析(特征提取与模式识别)。在文件检验领域，ML是笔迹与油墨鉴别的经典工具，应用于黑色签字笔鉴别、篡改与时序检验和建立交叉笔画时序的客观判定。

深度学习方法通过构建多层神经网络自动学习数据的深层特征表示，特别擅长处理图像、序列和高维光谱数据，在需要捕捉细微、抽象模式的任务中表现卓越。在生物物证检验方面，当前DL在生物物证光谱分析中的直接应用案例较ML少，但其潜力体现在高维特征学习和图像分析方面。例如基于太赫兹获取的组织图像的CNN自动分割(如区分肌肉与脂肪)与病理分类。在微量物证检验中，DL在实现精细化识别和处理复杂数据方面优势显著。例如引入1D-DRSN自适应降噪，提升同色系不同车型车漆的区分精度；利用LSTM挖掘塑料保险杠光谱中的时序差异以追溯来源；借助一维CNN解析食用油拉曼光谱中的重叠混合特征。在文件检验方面，DL在该领域的应用主要致力于提升鉴别精度与模型鲁棒性，包括采用1D-DRSN增强去噪能力、使用1D-CNN改善分类效果，以及利用生成对抗网络(如Pix2PixGAN)进行图像去噪与增强。

总结而言，机器学习与深度学习已深度融入光谱成像技术在法庭科学的3大检验领域。其应用模式呈现以下趋势：从基础的分类向更难回归、分割和生成扩展；从依赖专家经验的传统化学计量学(PLS-DA等)和经典机器学习(SVM、RF等)，向能够自动学习高维抽象特征的深度学习(CNN、DRSN、LSTM等)发展；ML/DL不仅可用于最终的识别分类模型，也广泛用于数据降维、特征选择、噪声滤除、图像增强等前处理和后处理环节，形成了完整的数据智能分析流水线；针对光谱成像技术在实际应用中面临的灵敏度不足、环境干扰、混合样本解析难、主观判断强等痛点，智能算法提供了数据驱动的解决方案，推动技术向自动化、客观化、精准化方向发展。

4 总结与展望

高光谱成像技术擅长宏观、快速筛查和大面积成像，可非接触识别血迹、精斑等痕迹物证的空间分布，并可对篡改文件、油漆碎片、纤维等初步分类，显著提升现场勘查效率。拉曼光谱能提供分子指纹信息，特异性高，可对微量毒品、爆炸物等精准定性。太赫兹光谱凭借独特穿透性及对弱相互作用的高灵敏度，在内部结构成像与多层物证分析中的作用不可替代，广泛用于封装危险品探测、掩盖信息识别等领域。3种技术共同推动现场物证分析从“有损采样-实验室分析-结果反馈”的传统模式，向“现场原位无损检测-实时研判-精准导向采样”的现代模式转变，大幅提升勘查效率并保障物证原始性与证据链完整。尽管应用前景广阔，上述技术的现场规模化、常规化应用仍面临挑战。未来发展将聚焦以下方面：

(1)多模态光谱成像与硬件集成。持续推进设备小型化、便携化，重点突破太赫兹源与探测器微型化，开发集成度高、操作简化的“一键式”智能设备，降低专业依赖，实现结果实时显示与报警。集成高光谱、拉曼及LIBS等多传感器的勘查平台，实现多源信号同步采集，通过单次扫描获取互补信息，缩短检测时间并解决异源数据配准问题。

(2)智能算法深度应用。利用深度学习与机器学习算法实现光谱数据自动预处理、特征提取与识别,有效应对太赫兹噪声与高光谱维度挑战,提升复杂混合物解析能力。构建基于深度学习的融合算法与层次化解析框架,形成特征互补的“超光谱”表征,增强物证鉴别能力。由于大多数现场物证的光谱成像集中在二维空间,不能反映物证与现场之间的空间关系,因此可结合三维场景建模,实现犯罪现场高精度重建。

(3)复杂现场环境适应性提升。环境的干扰一直是光谱分析的难题,高光谱成像易受光照的影响,拉曼光谱受环境荧光的干扰,太赫兹光谱易受噪声影响,故需提升设备在不同温度、湿度条件下的稳定性与可靠性。

(4)标准数据库构建与完善。随着社会的发展和进步,科技使生活中的各种物品快速更新,为高效准确识别未知待测物质,构建基于光谱特征的高鲁棒性模型算法,需要完备的光谱数据库给予支撑^[83]。建立覆盖更全面、标准化的物证光谱数据库是实现精准自动识别的基石,需要全球执法机构的协作,共享数据,建立权威标准。

本文系统梳理了高光谱成像、拉曼光谱和太赫兹光谱在现场物证检测中的应用。这些技术凭借无损、快速、原位、信息丰富的优势,正深刻改变传统现场勘查模式,将实验室部分分析能力前置到犯罪现场,为侦查人员提供了前所未有的技术工具。随着微型化传感器和深度学习算法的发展,未来有望实现“口袋实验室”级智能检测设备,彻底变革传统刑事侦查工作模式。

参考文献:

- [1] Liu K K, Luo Y P. *Laser Optoelectron. Prog.* (刘康康, 罗亚平. 激光与光电子学进展), **2024**, 61(4): 0400005.
- [2] Lu J, Zhu S S, Cui X Y, Chen S, Yao Y D. *Chin. J. Lasers* (路交, 朱姗姗, 崔笑宇, 陈硕, 姚育东. 中国激光), **2018**, 45(3): 0307007.
- [3] Wang Y Y, Li H B, Ge M L, Xu D G, Yao J Q. *Laser Optoelectron. Prog.* (王与焯, 李海滨, 葛梅兰, 徐德刚, 姚建铨. 激光与光电子学进展), **2023**, 60(18): 1811004.
- [4] Jin X K, Tian W, Zhu W J, Jiang J J, Zhu C Y. *J. Text. Res.* (金肖克, 田伟, 朱炜婧, 蒋晶晶, 祝成炎. 纺织学报), **2018**, 39(10): 50-57.
- [5] Wang S Y, Yang Y Z, He W W, Li R K. *J. Instrum. Anal.* (王书越, 杨玉柱, 何伟文, 李润康. 分析测试学报), **2021**, 40(10): 1489-1496.
- [6] Gao S H, Zhang H. *J. People's Public Secur. Univ. China: Sci. Technol.* (高树辉, 张浩. 中国人民公安大学学报: 自然科学版), **2024**, 30(1): 1-7.
- [7] Reed G, Savage K, Edwards D, Nic Daeid N. *Sci. Justice*, **2014**, 54(1): 71-80.
- [8] Melit Devassy B, George S. *Forensic Sci. Int.*, **2020**, 311: 110194.
- [9] Huang W, Luo X D. *Police Technol.* (黄威, 罗旭东. 警察技术), **2014**, (6): 41-43.
- [10] Wu D, Gao S H, Zhang N, Lu Y F, Xie F, Zhang H, Ju S Y, Zeng H R, Wang C M. *Laser Optoelectron. Prog.* (吴迪, 高树辉, 张宁, 陆一帆, 谢菲, 张浩, 琚三元, 曾浩然, 王成铭. 激光与光电子学进展), **2023**, 60(12): 1200002.
- [11] Bhargava A, Sachdeva A, Sharma K, Alsharif M H, Uthansakul P, Uthansakul M. *Heliyon*, **2024**, 10(12): e33208.
- [12] Yu L. *Infrared Laser Eng.* (于磊. 红外与激光工程), **2022**, 51(1): 20210940.
- [13] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, Rock B N. *Science*, **1985**, 228(4704): 1147-1153.
- [14] Transon J, D'Andrimont R, Maignard A, Defourny P. *Remote. Sens.*, **2018**, 10(2): 157.
- [15] Mukhtar S, Arbabi A, Viegas J. *IEEE Access*, **2025**, 13: 35848-35902.
- [16] Raman C V, Krishnan K S. *Nature*, **1928**, 121(3048): 501-502.
- [17] Zhang X X, Li M X, Li N. *Instrumental Analysis*. 3rd ed. Beijing: Peking University Press (张新祥, 李美仙, 李娜. 仪器分析教程. 3版. 北京: 北京大学出版社), **2022**.
- [18] Cialla-May D, Krafft C, Rösch P, Deckert-Gaudig T, Frosch T, Jahn I J, Pahlow S, Stiebing C, Meyer-Zedler T, Bocklitz T, Schie I, Deckert V, Popp J. *Anal. Chem.*, **2022**, 94(1): 86-119.
- [19] Das R S, Agrawal Y K. *Vib. Spectrosc.*, **2011**, 57(2): 163-176.
- [20] Bandyopadhyay A, Sengupta A. *IETE Tech. Rev.*, **2022**, 39(2): 471-489.
- [21] Pawar A Y, Sonawane D D, Erande K B, Derle D V. *Drug Invent. Today*, **2013**, 5(2): 157-163.
- [22] Zinov'ev N N, Andrianov A V, Gallant A J, Chamberlain J M, Trukhin V N. *JETP Lett.*, **2008**, 88(8): 492-495.
- [23] Johnson J L, Dorney T D, Mittleman D M. *Appl. Phys. Lett.*, **2001**, 78(6): 835-837.
- [24] Rong L, Liu Y M, Ning R, Zhao J, Wang Y X, Wang D Y. *Laser Optoelectron. Prog.* (戎路, 刘义铭, 宁冉, 赵洁, 王云新, 王大勇. 激光与光电子学进展), **2024**, 61(2): 0211012.

- [25] Ge H Y, Wang S, Jiang Y Y, Guo C Y, Bu Y W, Wei S L, Zhang Y, Wang Y X. *Laser Optoelectron. Prog.* (葛宏义, 王顺, 蒋玉英, 郭春燕, 补雨薇, 魏石磊, 张元, 王雨欣. 激光与光电子学进展), **2025**, 62(16): 1600003.
- [26] Zhang Z L, Qi P F, Guo L J, Zhang N, Lin L, Liu W W. *Acta Opt. Sin.* (张泽亮, 齐鹏飞, 郭兰军, 张楠, 林列, 刘伟伟. 光学学报), **2023**, 43(6): 0600001.
- [27] Cao B H, Li S Z, Cai E Z, Fan M B, Gan F X. *Spectrosc. Spectr. Anal.* (曹丙花, 李素珍, 蔡恩泽, 范孟豹, 淦方鑫. 光谱学与光谱分析), **2020**, 40(9): 2686-2695.
- [28] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. *Laser Photonics Rev.*, **2012**, 6(3): 418.
- [29] Hell S W. *Science*, **2007**, 316(5828): 1153-1158.
- [30] Edelman G J, van Leeuwen T G, Aalders M C G. *Algorithms. Technol. Multispectral Hyperspectral Ultraspectral Imag. XIX*, **2013**, 8743: 87430A.
- [31] Li B, Beveridge P, O'Hare W T, Islam M. *Sci. Justice*, **2014**, 54(6): 432-438.
- [32] Feng Y, Cai J. *Laser Optoelectron. Prog.* (冯颖, 蔡竞. 激光与光电子学进展), **2020**, 57(5): 053004.
- [33] Zhuang Y, Gao S H, Xie F, Huang W, Cai N B. *Laser Optoelectron. Prog.* (庄园, 高树辉, 谢菲, 黄威, 蔡能斌. 激光与光电子学进展), **2022**, 59(16): 1630001.
- [34] Deng Y J, Chen J, Wang J S, Hu L P, Zhang Q, Du Y Z, Wang Y, Li Q L. *Spectrosc. Spectral Anal.* (邓颖佼, 陈军, 王健生, 胡刘平, 张晴, 杜玉珍, 王妍, 李庆利. 光谱学与光谱分析), **2025**, 45(5): 1243-1250.
- [35] Virkler K, Lednev I K. *Anal. Chem.*, **2009**, 81(18): 7773-7777.
- [36] Virkler K, Lednev I K. *Forensic Sci. Int.*, **2009**, 193(1/2/3): 56-62.
- [37] Muro C K, Doty K C, de Souza Fernandes L, Lednev I K. *Forensic Chem.*, **2016**, 1: 31-38.
- [38] Li P F. *Extraction of Human Hair Keratin and Its Biomedical Applications*. Nanjing: Nanjing Normal University (李鹏飞. 人发角蛋白的提取及其生物医学应用研究. 南京: 南京师范大学), **2015**.
- [39] Guo L H, Wang X K, Zhang Y. *Opt. Precis. Eng.* (郭力菡, 王新柯, 张岩. 光学精密工程), **2017**, 25(3): 611-615.
- [40] Sun W D, Geng G S, Yang Z B, Li D D, Wang Y, Xu H M, Cui H L, Wang H B. *J. Infrared Millim. Waves* (孙卫东, 耿国帅, 杨忠波, 李丹丹, 王岩, 许红梅, 崔洪亮, 王化斌. 红外与毫米波学报), **2018**, 37(6): 769-774.
- [41] Reid C B, Fitzgerald A, Reese G, Goldin R, Tekkis P, O'Kelly P S, Pickwell-MacPherson E, Gibson A P, Wallace V P. *Phys. Med. Biol.*, **2011**, 56(14): 4333-4353.
- [42] Yang S X, Ding L, Wang S, Du C, Feng L C, Qiu H S, Zhang C H, Wu J B, Fan K B, Jin B B, Chen J, Wu P H. *Phys. Rev. Appl.*, **2023**, 19(3): 034033.
- [43] Qiu W L, Guo Y N, Li Y X. *Microchem. J.*, **2024**, 201: 110543.
- [44] Zhang H, Gao S H. *J. Instrum. Anal.* (张浩, 高树辉. 分析测试学报), **2023**, 42(7): 817-824.
- [45] Hu X D, Yin L, Yang Q C, Wang L. *Laser Optoelectron. Prog.* (胡锡敦, 尹禄, 杨钦晨, 王乐. 激光与光电子学进展), **2024**, 61(2): 0211031.
- [46] Jiang H, Kang R X, Wang J H. *China Meas. Test* (姜红, 康瑞雪, 王锦辉. 中国测试), **2024**. <https://link.cnki.net/urlid/51.1714.tb.20240914.1121.002>.
- [47] Zou Z Y, Long T, Chen J, Wang L, Wu X W, Zou B, Xu L J. *Spectrosc. Lett.*, **2021**, 54(9): 675-684.
- [48] Zhang Y F, Gao S H. *Appl. Chem. Ind.* (张宇帆, 高树辉. 应用化工), **2025**, 54(3): 667-675.
- [49] Shafirovich T, Aligholizadeh D, Johnson M, Hondrogiannis E, Devadas M S. *Vib. Spectrosc.*, **2024**, 131: 103669.
- [50] Zhang J, Jiang H, Duan B, Liu F. *Laser Optoelectron. Prog.* (张进, 姜红, 段斌, 刘峰. 激光与光电子学进展), **2021**, 58(24): 2430002.
- [51] Ali E M A, Edwards H G M, Scowen I J. *Talanta*, **2009**, 78(3): 1201-1203.
- [52] Liu K L, Chen H C. *Materials*, **2025**, 18(7): 1682.
- [53] Zhu J H, Su W, Yin C, Yue J, Wu H. *Opt. Laser Technol.*, **2025**, 192: 113783.
- [54] Zięba-Palus J, Michalska A. *J. Forensic Sci.*, **2014**, 59(4): 943-949.
- [55] Song Z Z, Zhang S R, Tu S, Chen C J, Xiao H P, He Q L, Pang S H, Li Y P, Zhang W T. *Spectrochim. Acta A*, **2025**, 325: 125104.
- [56] Wang H, Zhao G Z. *Acta Photonica Sin.* (王鹤, 赵国忠. 光子学报), **2010**, 39(7): 1185-1188.
- [57] Zheng Z J, Lin Z H, Xie H H, Nie Y Z. *Spectrosc. Spectral Anal.* (郑志杰, 林振衡, 谢海鹤, 聂泳忠. 光谱学与光谱分析), **2023**, 43(5): 1387-1393.
- [58] Shen Y C, Lo T, Taday P F, Cole B E, Tribe W R, Kemp M C. *Appl. Phys. Lett.*, **2005**, 86(24): 241116.
- [59] Dikmelik Y, Fitch M J, Leahy-Hoppa M R, Osiander R. *Terahertz Mil. Secur. Appl. V*, **2007**, 6549: 654901.
- [60] Michalopoulou Z H, Mukherjee S, Hor Y L, Su K, Liu Z W, Barat R B, Gary D E, Federici J F. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **2010**, 31(10): 1171-1181.
- [61] Miao Q, Tian L, Zhao K, Zhu S M, Zhao G Z, Liu L M. *Mod. Sci. Instrum.* (苗青, 田璐, 赵昆, 朱守明, 赵国忠, 刘立明. 现代科学仪器), **2011**, (5): 110-113.
- [62] Karaliūnas M, Nasser K E, Urbanowicz A, Kašalynas I, Bražinskienė D, Asadauskas S, Valušis G. *Sci. Rep.*, **2018**, 8: 18025.

- [63] Wang Y. *Document Examination*. Revised ed. Beijing: Intellectual Property Publishing House(王跃. 文件检验. 修订版. 北京: 知识产权出版社), **2022**: 8-14.
- [64] Wang S Y, He H Y, Lv R L, He W W, Li C Y, Cai N B. *J. Forensic Sci.*, **2022**, 67(2): 550-561.
- [65] Silva C S, Pimentel M F, Honorato R S, Pasquini C, Prats-Montalbán J M, Ferrer A. *Analyst*, **2014**, 139(20): 5176-5184.
- [66] Wang M J, Dai X J, Tang C Q, Lu Z Y. *Infrared Technol.* (王鸣久, 代雪晶, 汤澄清, 卢兆一. 红外技术), **2023**, 45(1): 56-63.
- [67] Li Y P, Dai X J, Wang M, Wang D, Gao Y, Wang M J, Shi X L, Li M Z. *Spectrosc. Spectral Anal.* (李云鹏, 代雪晶, 王猛, 王丹, 高毅, 王鸣久, 师鑫林, 李明泽. 光谱学与光谱分析), **2021**, 41(11): 3524-3531.
- [68] Li C S, Gao S H. *Microchem. J.*, **2025**, 214: 114125.
- [69] Borba F S L, Saldanha Honorato R, de Juan A N. *Forensic Sci. Int.*, **2015**, 249: 73-82.
- [70] Wan J W, Cui S F, Chen L, Ma X B. *Spectrosc. Spectral Anal.* (万敬伟, 崔胜峰, 陈蕾, 马学兵. 光谱学与光谱分析), **2020**, 40(4): 1156-1161.
- [71] Lee L C, Samad M I A, Ismail M A M. *J. Anal. Chem.*, **2016**, 71(7): 723-729.
- [72] Lyu R L, He H Y, Wang X B, He W W, Wang S Y, Yang L, Kong W G. *J. Raman Spectrosc.*, **2022**, 53(11): 1996-2008.
- [73] Zhang H, Wang X. *J. Yunnan Police Coll.* (张辉, 王翔. 云南警官学院学报), **2021**, (4): 118-123.
- [74] Brito L R, Chaves A B, Braz A, Pimentel M F. *Spectrochim. Acta A*, **2019**, 223: 117287.
- [75] Wan J W, Chen L, Chai W, Kong W G, Cui S F. *Spectrosc. Spectral Anal.* (万敬伟, 陈蕾, 柴威, 孔维刚, 崔胜峰. 光谱学与光谱分析), **2024**, 44(9): 2501-2505.
- [76] Li K K, Su D B. *Spectrosc. Spectral Anal.* (李开开, 苏东斌. 光谱学与光谱分析), **2023**, 43(S1): 163-164.
- [77] Su D B, Li K K. *Microchem. J.*, **2023**, 190: 108727.
- [78] Seco-Martorell C, López-Domínguez V, Arauz-Garofalo G, Redo-Sanchez A, Palacios J, Tejada J. *Opt. Express*, **2013**, 21(15): 17800.
- [79] Liu H L, Zhai D W, Yang Y P, Cui B, Zhang Z W, Zhang C L. *Spectrosc. Spectral Anal.* (刘海玲, 翟东为, 杨玉平, 崔彬, 张振伟, 张存林. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(7): 2021-2025.
- [80] Ullmann I, Root K, Schür J, Scheuble L, Vossiek M. *IEEE*, **2022**: 349-352.
- [81] Fukunaga K, Ogawa Y, Hayashi S, Hosako I. *IEICE Electron. Express*, **2008**, 5(7): 223-228.
- [82] Dutta B, Root K, Ullmann I, Wagner F, Mayr M, Seuret M, Thies M, Stromer D, Christlein V, Schür J, Maier A, Huang Y X. *Sci. Rep.*, **2022**, 12: 22554.
- [83] Zhou Y H, Cui L, Zhang C, Li S, Fu P. *Laser Optoelectron. Prog.* (周奕含, 崔岚, 张程, 李硕, 付沛. 激光与光电子学进展), **2025**, 62(16): 1600001.

(责任编辑: 盛文彦)