现代分析仪器在食品检测中应用的领域前沿

卢明华

(河南大学化学与分子科学学院, 开封 475004)

Frontiers in the application of modern analytical instruments in food detection

LU Ming-Hua

(*College of Chemistry and Molecular Sciences*, *Henan University*, *Kaifeng* 475004, *China*)

民以食为先, 食以安为先, 食品安全不仅事关公众的身体健康和生命安全, 而且还关乎整个社会经济的稳定。据世界卫生组织统计, 全球每年约有 6 亿人因食用受细菌、病毒、寄生虫或化学物质污染的食物而患病, 其中 42 万人因此死亡。在全球化食品供应链日益复杂的背景下, 传统分析检测方法如基础化学分析、微生物培养等虽提供基准精度, 却普遍存在样品前处理烦琐、分析周期长达数小时乃至数天、运营成本高昂且依赖专业人员等固有局限。现代分析仪器的兴起与普及, 正在深刻重塑食品检测的技术格局。然而, 分析检测仪器设备技术的进步并未消除所有问题, 反而在更高层面上提出了新的需求和挑战。

现代分析仪器在食品检测中的应用可大致归为色谱-质谱技术、光谱分析技术、生物传感技术及新兴智能化检测平台 4 大类别。色谱-质谱技术(如液相色谱-串联质谱法、气相色谱-串联质谱法)凭借超高的灵敏度、特异性和通量, 已超越传统分析技术的局限, 在食品营养成分分析, 食品中污染物质检测, 食品辅助材料及食品添加剂分析中发挥着核心作用。近年来, 多维色谱技术(如二维液相色谱)已实现对复杂食品体系中低至 1 ppb 浓度物质的检测。光谱分析技术包括近红外光谱技术、拉曼光谱技术、高光谱成像技术等则以其无损、快速的特点异军突起。例如, 高光谱成像技术融合光谱与空间信息, 可在不破坏样品的前提下同时评估水果成熟度、内部缺陷、蔬菜新鲜度及农药残留; 宽线表面增强拉曼散射技术则将灵敏度提升了十倍, 能够检测出原料奶中远低于常规阈值的三聚氰胺等有害物质。生物传感器技术则代表了另一条技术路径, 通过纳米材料增强的电化学、光学传感器及微流控芯片等平台, 实现对重金属、农药残留、过敏原、真菌毒素及食源性致病菌的快速检测。3 类技术各有所长, 但正日益走向融合, 混合平台如高光谱成像-表面增强拉曼散射光谱联用、电化学-荧光联用系统已展现出协同增效优势。

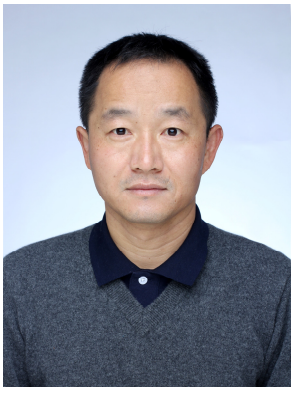
现代分析仪器对食品检测的最深刻影响, 不在于某一项具体技术的突破, 而在于检测范式的整体转换。(1)从破坏性检测向无损检测的转变。传统方法需对样品进行物理或化学处理, 不仅消耗样品, 更排除了对同一批次产品进行连续监测的可能性。近红外光谱技术、高光谱成像技术等无损技术的成熟, 使实时、在线监测成为可能。(2)从实验室向现场的场景迁移。便携式食品安全检测仪正经历从单一功能向智能化、集成化、微型化的变革, 主流便携仪器重量已降至 3 kg 以下, 部分机型实现“口袋式”尺寸, 单台仪器可支持农药残留、兽药残留、重金属、微生物等数十项指标的检测。(3)从人工判读向人工智能驱动的智能化转型。人工智能与机器学习正在重新定义食品质量评估的方式, 卷积神经网络等模型在掺假物识别中已达到 99.85%的准确率。人工智能与近红外光谱的融合不仅可将校准误差降低 10%至 20%, 更能在数分钟内完成食品质量与安全评估的快速筛查。

基于上述背景, 本期《现代分析仪器在食品检测中的应用》专题收录了 8 篇现代分析仪器在食品检测中的应用相关的研究论文, 相关研究工作围绕“精准、快速、无损、多残留、高通量”等关键词, 构建了从光谱到质谱、从定性到定量、从靶向到非靶向的多元检测技术体系, 充分体现

了现代分析仪器在食品检测中的优势。光谱成像技术如太赫兹图谱(terahertz, THz)、近红外光谱，强调无损、快速、无需前处理或仅需简单处理，适用于种子品质、杂质筛查和液态饮品成分预测等场景。基于光谱类方法，俞佳等利用 THz 透射成像研究西瓜种子突破了可见光仅能获取外部形态的限制，实现了种皮与种仁的双重表型提取，是一项具有原创性的表型组学研究。海苔杂质检测与番茄红素饮品分析则分别发挥近红外高光谱和近红外光谱“光谱+影像”或“光谱+化学计量学”的优势，前者强调在复杂背景下高效区分不同材质杂质，后者则通过组合预处理策略显著提升多组分同时预测的能力。质谱检测中的无机质谱和有机质谱两者互为补充，构成了食品安全检测中“元素安全”与“化学物安全”两大防线。籍术良等建立的微波消解-电感耦合等离子体质谱法可同步测定芹菜粉中 25 种元素，经标准物质和国家级质控考核(Z 比分数)验证，方法灵敏可靠。样品前处理技术不仅会影响仪器设备的稳定性和重现性，而且还会影响方法的灵敏度和结果的准确性，因此快速、简便、经济、高效、耐用和安全(QuEChERS)的样品前处理技术在现代仪器分析和食品安全检测中备受关注。基于 QuEChERS 样品前处理技术，分别实现了小龙虾中 48 种农兽药检测与植物源性食品中氰氟草酯及其代谢物检测，实际样品分别覆盖了稻虾共养和谷物/果蔬/茶叶等多基质场景，方法学验证全面，定量限达 μg/kg 级，体现了现代仪器设备良好的应用性能。灵芝三萜分析则借助超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法的高分辨优势，结合裂解规律和自建谱库，首次系统归纳了不同类型灵芝三萜的质谱碎裂行为，兼具方法学创新与成分发现潜力。纸基复合材料迁移物研究则代表了食品接触材料安全评估中非靶向筛查的发展趋势，风险评价逻辑清晰，为纸/塑类包装的安全监管提供了科学依据。

现代分析仪器在食品检测中的应用，已从辅助性工具演变为食品安全保障体系的核心支柱。色谱-质谱技术提供了无可替代的精准定量能力，光谱技术开创了无损、快速的检测新范式，生物传感器与智能化平台则将检测能力从实验室推向全产业链。然而，技术的繁荣不应掩盖现实的困境，如成本壁垒、操作门槛、标准化缺失等问题若不能有效解决，再先进的技术也难以转化为守护公众健康的实际力量。未来的方向，不仅在于追求更低的检测限和更高的灵敏度，更在于让先进技术变得可及、可用、可信，让每一份食品的安全，都能被科技切实守护。

特邀专题主编介绍



卢明华，教授，博导，河南省特聘教授，河南省杰出青年基金、河南省优秀青年基金获得者，河南省高校科技创新人才，河南省教育厅学术技术带头人，河南省高等学校青年骨干教师。主持获批 5 项国家自然科学基金及 10 多项省部级项目。目前主要研究方向为基于纳米材料的样品前处理新技术、基于现代分析仪器的痕量物质的高灵敏检测新方法开发，研究领域涉及环境污染物分析、食品安全检测等。在 Angew. Chem. Int. Ed.; Coord. Chem. Rev.; TrAC Trends Anal. Chem.; Chem. Eng. J.; J. Hazard. Mater.; Food Chem.; Chin. Chem. Lett.; Anal. Chem.等 SCI 学术期刊上发表研究论文 120 余篇，累计被引用 4000 余次。授权国家发明专利 7 项。2016 年获得中国分析测试协会科学技术奖一等奖，现任 SCI 期刊 Chinese Chemical Letter、《中国化学快报》、Journal of Analysis and Testing、《环境化学》青年编委，以及中国环境科学学会环境化学分会委员、中国分析测试协会样品制备分会常务委员。