食品中生物毒素的检测与防控专题

陈苗苗

(湖北大学食品安全研究院, 武汉 430062)

Special topic on detection, prevention and control of biological toxins in foods

CHEN Miao-Miao

(*Food Safety Institute*, *Hubei University*, *Wuhan* 430062, *China*)

食品中生物毒素是指由微生物(如真菌、细菌等)在生长繁殖过程中产生的、对人和动物具有毒害作用的天然有毒物质, 其中以真菌毒素污染最为普遍且危害突出。真菌毒素主要由曲霉属、镰刀菌属、青霉属等丝状真菌在适宜温湿度条件下产生, 包括黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, AFB_1)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)等, 具有强致癌性、致畸性、免疫毒性和神经毒性, 可通过食物链累积并引发肝脏损伤、免疫抑制及生殖毒性等严重健康风险。据统计, 全球每年约有 25%的农作物受到真菌毒素污染, 我国作为全球最大的小麦生产国和农产品消费国, 花生、玉米、小麦、坚果及水果干制品等粮油作物面临的生物毒素复合污染风险尤为突出。GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》对 AFB_1、OTA、DON、ZEN 等生物毒素在各类食品中的残留限量作出了明确规定, 世界卫生组织(World Health Organization, WHO)及国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)也建立了严格的限量标准体系。随着《“健康中国 2030”规划纲要》和食品安全监管趋严, 食品中生物毒素的精准检测、快速筛查与源头防控已成为保障粮食安全与公众健康的核心议题。

目前, 我国在食品中生物毒素检测与防控领域开展了大量前沿研究, 主要聚焦于高灵敏确证分析技术、现场快速检测方法、生物防治菌株开发及快速检测产品科学评价体系构建等方面。在实验室确证分析领域, 超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)凭借其高分离效率与质谱精准定性的双重优势, 已成为多毒素同步筛查的主流技术, 检测通量从早期的几种毒素同步检测逐步扩展至数十种毒素的高通量分析。在快速检测领域, 基于抗原-抗体特异性识别的免疫层析技术不断迭代, 量子点荧光、电化学发光(electrochemiluminescence, ECL)、分子印迹-表面增强拉曼光谱(molecularly imprinted surface-enhanced Raman spectroscopy, MIPs-SERS)等新型传感策略显著提升了现场检测的灵敏度与特异性, 实现了从“有或无”的定性筛查向皮摩尔甚至飞摩尔级别准确定量的跨越。在源头防控方面, 生物防治因其绿色安全特性备受关注, 芽孢杆菌属、伯克霍尔德菌属、木霉菌属等拮抗菌株的筛选及其作用机制解析取得了显著进展。此外, 随着市售快速检测产品品牌日益增多, 基于多属性决策模型的科学评价方法也开始应用于快速检测产品综合性能的量化评估, 为基层选型和监管质控提供了新的技术工具。

基于上述背景, 本期《食品中生物毒素的检测与防控》专题收录了 8 篇以真菌毒素为研究对象的研究论文, 涵盖了精准检测、快速筛查、生物防治及快速检测产品评价等多个维度, 为食品中生物毒素的监控与风险评估提供了重要的技术支撑。在精准检测技术方面, 3 篇文章基于 UPLC-MS/MS 平台建立了针对不同食品基质的多毒素同步检测方法。其中, 采用直接萃取法结合 UPLC-MS/MS 可实现小麦及制品中 7 种常见真菌毒素的高通量筛查, 通过基质匹配标准曲线有效补偿了基质效应, 避免了昂贵的同位素内标和免疫亲和柱。针对面条基质(含新鲜湿面条与干面条)的 16 种真菌毒素同步检测方法, 首次解析了重庆小面等特色湿面制品中 DON、伏马毒素及 ZEN 的污染分布

特征，揭示了加工工艺对毒素迁移转化的影响。此外，研究人员通过采用对比不同净化方式，选择性除去杂质降低了基质效应，实现了龙眼及干制品中 50 种真菌毒素的超高通量筛查，发现龙眼干制品较鲜果更易受到真菌毒素污染且污染主要集中于果皮。在快速检测技术方面，3 篇文章分别开发了各具特色的现场检测方法：量子点荧光免疫层析系统通过聚苯乙烯微球负载量子点技术构建了高荧光强度探针，实现了粮油作物及坚果中 OTA 的定量检测，检出限低至 0.5 ng/mL；电化学发光试纸条通过将图案化碳油墨电极与侧向流动免疫层析组装，以 Ru-PEI/$Ti_3C_2T_x$@Au 复合材料为信号探针，实现了 AFB_1 的比色-ECL 双模式检测，ECL 模式检出限达 319 fg/mL；分子印迹-表面增强拉曼光谱技术则采用双模板分子印迹聚合物进行样品前处理净化，结合纳米银 SERS 活性基底，建立了玉米中 AFB_1 和 ZEN 的无标记快速检测方法。在生物防治方面，研究从花生根系土壤中筛选获得一株伯克霍尔德菌 G10，通过转录组测序深入解析了其与黄曲霉的相互作用机制，发现该菌株可通过干扰黄曲霉的代谢过程、DNA 复制及蛋白质加工等关键通路显著抑制其生长，并在花生与玉米侵染实验中验证了其显著拮抗效果。在快速检测产品评价方面，研究将熵权-逼近理想解排序法耦合模型(entropy weight-technique for order preference by similarity to an ideal solution, EW-TOPSIS)引入 $AFTB_1$ 快速检测产品评价领域，通过食品基质、极端温度、操作人员等多维度实验设计，实现了对市售胶体金免疫层析产品综合性能的客观量化排序，为基层选型和监管质控提供了科学的量化决策依据。

近年来，虽然食品中生物毒素检测与防控技术研究取得了长足进展，但仍存在复杂基质前处理标准化不足、现场快速检测技术稳定性参差、生物防治菌安全性评价缺失、快速检测产品评价体系不完善等问题。具体而言，UPLC-MS/MS 虽灵敏准确，但前处理过程对复杂食品基质(如高脂坚果、高糖果蔬制品)的适用性仍需拓展；快速检测技术虽操作简便，但不同品牌产品在实际应用场景中的稳定性与抗干扰能力参差不齐，且缺乏统一的性能评价标准；生物防治方面，多数研究停留在抑菌效果的表观评价层面，对拮抗菌株的分子作用机制、田间应用效果及非靶标生物安全性研究相对薄弱。希望以本期专题为契机，未来食品中生物毒素研究进一步聚焦于：①复杂食品基质中多毒素同步前处理技术的标准化与绿色化；②快速检测技术与智能手机、物联网的集成，实现“现场采样-实时检测-数据上传”的智能化监管；③拮抗菌及其活性代谢产物的安全性系统评价与田间应用验证；④建立涵盖多评价指标的快速检测产品动态数据库，推动食品中生物毒素防控技术从实验室走向田间与市场，切实保障粮食安全与人民健康。

特邀专题主编介绍



陈苗苗，女，湖北大学食品安全研究院/化学化工学院教授，博士生导师，湖北大学高层次杰出人才，生命学部副主任。长期致力于食品真菌毒素传感检测方法与阻控机制研究。近 5 年主持国家青年科学基金项目(B 类)、湖北省自然科学基金杰出青年项目、国家自然科学基金面上项目等科研项目 7 项，相关成果以第一作者或通讯作者发表在 Chemical Society Reviews、Advanced Functional Materials、Analytical Chemistry、Food Chemistry 等国际学术期刊，获授权专利 3 项。担任 Chinese Chemical Letters 青年编委、中国农业工程学会农产品质量与营养工程专业委员会委员、湖北省食品科学技术学会理事。2026 年获中国青年五四奖章暨新时代青年先锋奖。