

# 粮油食品中重金属检测技术发展研究

刘俊杰<sup>1</sup> 李学丽<sup>1</sup> 赵春燕<sup>2\*</sup>

1 楚雄彝族自治州检验检测认证院

2 楚雄彝族自治州乡村建设服务中心

DOI:10.32629/as.v8i12.3495

**[摘要]** 本文系统地探讨了粮油食品中重金属检测技术的演进历程、当前挑战与未来方向。首先,阐述了重金属污染对粮油食品安全构成的严峻威胁及其健康风险。接着,深入剖析了传统检测方法与新快速检测技术的原理、应用场景与局限性,并特别新增了关于重金属形态分析重要性以及样品前处理技术创新的专题讨论。文章进一步剖析了技术发展过程中面临的关键瓶颈,并对未来趋向于智能化、集成化与标准化的技术融合路径进行了展望,旨在为提升粮油食品质量安全控制体系提供坚实的理论参考与技术支撑。

**[关键词]** 粮油食品; 重金属检测; 形态分析; 前处理技术; 技术融合; 发展趋势

**中图分类号:** F768.2 **文献标识码:** A

## Research on the Development of Heavy Metal Detection Technology in Grain, Oil and Food Products

Junjie Liu<sup>1</sup> Xueli Li<sup>1</sup> Chunyan Zhao<sup>2\*</sup>

1 Chuxiong Yi Autonomous Prefecture Inspection, Testing and Certification Institute

2 Rural Construction Service Center of Chuxiong Yi Autonomous Prefecture

**[Abstract]** This paper systematically explores the evolution process, current challenges and future directions of heavy metal detection technology in grain, oil and food products. Firstly, it expounds the severe threat and health risks posed by heavy metal pollution to the safety of grain and oil food. Then, the principles, application scenarios and limitations of traditional detection methods and new rapid detection technologies were deeply analyzed. In addition, special topic discussions on the importance of heavy metal form analysis and the innovation of sample pretreatment technologies were particularly added. The article further analyzes the key bottlenecks faced in the process of technological development and looks forward to the future technological integration path tending towards intelligence, integration and standardization, aiming to provide a solid theoretical reference and technical support for improving the quality and safety control system of grain, oil and food.

**[Key words]** Grain, oil and food products Heavy metal detection Morphological analysis Pretreatment technology; Technology integration Development trend

粮油产品作为全球膳食结构的基石,其安全性是关乎国计民生的重大议题。然而,在工业化和农业现代化进程中,伴随而来的环境污染问题,使得重金属污染已成为危及粮油食品安全的主要风险因子之一。铅、镉、汞、砷等重金属元素可通过污染土壤、水源和大气在农作物中累积,并经由食物链传递和富集于人体,对健康造成慢性、潜在的严重损害。因此,发展准确、快速、灵敏的重金属检测技术,对于实现从农田到餐桌的全链条风险管控、保障消费者健康以及促进贸易公平具有不可替代的核心作用。本文旨在对现有检测技术进行全面梳理与评述,并通过对关

键领域的前瞻性分析,为该领域的未来发展提供清晰的路线图。

### 1 粮油食品中重金属污染现状及其健康风险

#### 1.1 重金属污染的主要来源与现状

粮油食品中的重金属污染贯穿于其整个生命周期。在种植环节,工业废水灌溉、含重金属农药化肥的施用以及大气沉降是主要的污染源,尤其在矿区周边和传统工业区,土壤本底值超标现象突出,导致作物富集效应显著。在采收、储运及加工过程中,机械设备磨损、不当的包装材料也可能引入额外的重金属污染。国内外多项监测数据表明,尽管总体可控,但区域性、偶发性的

粮油产品重金属超标事件仍时有发生,构成了不容忽视的食品安全隐患。

### 1.2 重金属对人体健康的潜在危害

重金属危害的严峻性在于其生物累积性和难以降解的特性。长期摄入即使低剂量的污染食品,也会导致重金属在体内器官(如肾脏、肝脏、骨骼)中蓄积,引发多种慢性疾病。例如,镉积累易导致“痛痛病”和肾功能衰竭;无机砷被国际癌症研究机构(IARC)列为I类致癌物,与皮肤癌、肺癌等发病风险密切相关;汞,特别是甲基汞,对神经系统发育具有极强的毒性;而铅暴露则会严重影响儿童智力发育<sup>[1]</sup>。因此,对粮油食品中重金属含量实施精准监控是预防公共卫生事件的关键屏障。

## 2 粮油食品中重金属检测关键技术评析

### 2.1 传统实验室检测技术

传统技术以其高准确度和精密密度,至今仍是仲裁分析和标准制定的基石。

#### 2.1.1 原子光谱技术

该类技术以原子吸收光谱法(AAS)和原子发射光谱法(AES)为代表。其基本原理是通过测量待测元素原子化后对特征光谱的吸收或发射强度进行定量。其中,石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS)因其极高的灵敏度,适用于痕量元素的精准分析;而电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)则具备多元素同时检测、线性范围宽的优点。这些方法技术成熟、结果可靠,但普遍存在设备庞大、运行成本高、分析周期长以及对操作环境要求苛刻等局限,难以满足现场快速筛查的需求。

#### 2.1.2 质谱联用技术

以电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)为典型。该技术将ICP的高温电离特性与质谱的质量分离能力完美结合,实现了极低的检出限、宽广的线性动态范围以及近乎同时的多元素分析能力,并可进行同位素比值测定,是目前最强大的痕量、超痕量元素分析工具。然而,其仪器购置和维护费用极其高昂,且易受基质干扰,需要复杂的前处理过程和专业的操作人员。

### 2.2 新兴快速检测技术

为满足现场、实时监测的迫切需求,一系列新型技术应运而生。

#### 2.2.1 生物传感技术

生物传感器利用生物识别元件(如酶、抗体、核酸适配体、全细胞)对目标重金属的特异性响应,将生物化学信号转换为可定量读取的电信号或光信号。这类技术通常具有高选择性、高灵敏度、响应快速和易于微型化的特点,在开发便携式检测设备方面潜力巨大。但生物元件的稳定性、使用寿命以及复杂食品基质对识别过程的干扰是目前推广应用的主要障碍。

#### 2.2.2 纳米材料与电化学传感技术

纳米材料(如金纳米颗粒、碳纳米管、石墨烯、金属有机框架材料等)因其独特的尺寸效应和表面效应,被广泛应用于传感界面的构建。它们能显著增大比表面积,提高电子传递速率,从而增强传感器的灵敏度和响应速度。基于纳米材料修饰的电

化学传感器已成为快速检测研究的热点,但其批间重复性、长期稳定性以及纳米材料潜在的环境与健康风险是需要持续关注的问题。

### 3 关键突破: 重金属形态分析技术的重要性与应用

重金属的毒性不仅取决于其总含量,更与其存在的化学形态密切相关。不同形态的重金属其生物可利用性和毒性差异巨大。例如,无机砷的毒性远高于有机砷;三价铬是人体必需微量元素,而六价铬则是强致癌物<sup>[2]</sup>。因此,传统的总量检测已无法满足精确风险评估的需求,形态分析成为了前沿发展方向。

#### 3.1 形态分析的核心技术: 色谱-光谱/质谱联用

当前,实现高效形态分析的主流技术是高效液相色谱(HPLC)或离子色谱(IC)与高灵敏度检测器(如ICP-MS、AAS)的联用技术。色谱系统首先根据不同形态的物理化学性质(如极性、电荷)对其进行高效分离,然后依次进入检测器进行定性与定量分析。HPLC-ICP-MS联用技术被公认为形态分析的“黄金标准”,能够精准测定粮油食品中砷、汞、铬等元素的不同形态及其含量,为进行真实的毒理学评估提供决定性数据。

#### 3.2 形态分析面临的挑战与前景

尽管技术先进,形态分析仍面临样品中形态不稳定易转化、标准物质匮乏、前处理过程要求更苛刻(需保持形态原始性)以及仪器设备更为复杂昂贵等挑战。未来,开发更温和、高效的形态提取与保存方法,研制更多形态分析标准物质,以及推动联用仪器的小型化、智能化,将是该领域取得突破的关键。

### 4 技术基石: 样品前处理技术的创新与进展

准确检测的重中之重在于高效的样品前处理。粮油食品基质复杂,含有大量蛋白质、脂肪、碳水化合物等有机物,会严重干扰仪器分析。因此,必须通过前处理将重金属从基质中提取、净化和富集。

#### 4.1 传统前处理方法的弊端

传统的干法灰化和湿法消解虽能彻底分解有机物,但存在耗时长、能耗高、易造成挥发性重金属(如汞、砷)损失以及引入污染风险等问题。

#### 4.2 现代前处理新技术

近年来,一系列新颖、高效、环保的前处理技术得到迅速发展:

##### 4.2.1 微波消解技术

利用微波加热,使样品在密闭高压容器中快速、均匀地被酸分解,大大缩短了处理时间,减少了试剂用量和挥发损失,是目前主流的消解方法。这种技术通过微波场对极性分子的直接作用,实现样品体系的内部加热,消解效率显著高于传统的外部加热方式。现代微波消解系统通常配备有多重安全防护装置和温度压力监控系统,确保了操作过程的安全可控。此外,该方法还能有效减少酸雾排放,符合绿色化学的发展理念。

##### 4.2.2 超声波辅助萃取

利用超声波的空化效应加速目标物从固体基质中释放,效率高、设备简单,特别适用于液态或易萃取样品。当超声波在液体介质中传播时,会产生周期性的压缩和膨胀,形成微小的气泡

并迅速崩溃,这一过程产生的局部高温高压和强烈的机械冲击力能够有效破坏细胞结构,促进目标物质的溶出<sup>[3]</sup>。该方法操作简便,无需复杂设备,且通常可以在常温常压下进行,有利于保持目标物的原始形态。在粮油食品分析中,超声波辅助萃取已被成功应用于植物油、粮食等样品中重金属的提取过程。

#### 4.2.3 固相萃取技术

通过选择性的吸附剂富集和净化目标物,能有效去除基质干扰并实现样品的浓缩,显著提高方法灵敏度。新型吸附材料如纳米材料、分子印迹聚合物(MIPs)的引入,进一步提升了固相萃取的选择性和效率。分子印迹聚合物因其具有与模板分子在空间结构和功能基团上完全匹配的孔穴,而对特定重金属形态表现出高度的识别能力。纳米材料如碳纳米管、石墨烯等因其巨大的比表面积和丰富的表面官能团,提供了优异的吸附性能。这些新型材料的应用使得固相萃取技术在复杂粮油食品基质中痕量重金属的分离富集方面展现出巨大潜力。

样品前处理技术的创新,直接关系到检测结果的准确性、分析速度和成本,是推动整个检测技术发展的基础性动力。

### 5 当前技术发展面临的主要挑战

#### 5.1 技术性能与实用性的平衡问题

当前检测技术领域存在明显的两极分化现象。一方面,实验室精密仪器如电感耦合等离子体质谱法能够提供极高的检测精度和灵敏度,但其昂贵的设备成本、复杂的操作流程以及对实验环境的严苛要求,使得这类技术难以在基层检测机构和现场监测中推广使用。另一方面,虽然现场快速检测方法在便捷性和时效性方面具有显著优势,但其测量结果的稳定性和准确性往往难以达到实验室级别的标准要求。这种技术性能与实际应用需求之间的差距,成为制约重金属检测技术发展的首要难题。

#### 5.2 标准体系与质量控制机制的完善

我国现行重金属检测标准体系存在明显的滞后性,难以跟上技术发展的步伐。不同部门制定的检测标准之间存在较大差异,在样品前处理方法、仪器校准规程、结果判定标准等方面缺乏统一规范。这种标准不统一的现象直接影响了检测结果的可比性和权威性。同时,对于新兴的快速检测技术,缺乏系统的验证评价体系和标准化流程,导致这些新技术难以获得官方认可并应用于实际监管工作<sup>[4]</sup>。建立科学、统一、与国际接轨的标准体系,成为推动检测技术发展的迫切需求。

#### 5.3 专业技术人才队伍的培养与建设

现代重金属检测技术对专业人才提出了更高要求。大型精密仪器的操作维护、复杂样品的预处理、检测数据的分析解读等环节都需要专业人员具备扎实的理论基础和丰富的实践经验。然而,当前基层检测机构普遍面临人才短缺问题,特别是在经济相对落后地区,专业技术人员流失严重,技术断层现象突出。这种人才队伍建设的不足,直接制约了先进检测技术的发展和推广应用。加强专业技术人才培养,建立完善的人才激励机制,成为推动行业发展的关键因素。

### 6 未来发展趋势与展望

#### 6.1 技术融合推动智能化检测平台发展

未来检测技术将呈现深度融合的发展趋势。微流控技术、纳米材料、生物传感等多项技术的交叉融合,将推动“芯片实验室”概念的实现。这种高度集成的检测平台能够将样品前处理、分离富集、信号检测等多个步骤整合在微型芯片上完成,实现检测过程的自动化、智能化。

#### 6.2 快速检测技术的创新与推广应用

随着新材料、新工艺的不断突破,快速检测技术将向更高精度、更多功能方向发展。新型纳米材料的开发应用将显著提高传感器的灵敏度和选择性,微机电技术的进步将推动检测设备向更小型化、便携化方向发展。未来快速检测技术不仅能够实现多种重金属的同时检测,还可能实现对不同形态重金属的区分测定。

#### 6.3 标准化建设与国际化合作机制的完善

面对全球化背景下食品安全问题的复杂性和关联性,加强国际间的技术交流与合作显得尤为重要。未来应积极推进检测标准的国际互认,建立统一的质量控制体系,减少技术性贸易壁垒。同时,要加强与国际组织和其他国家的技术交流,共同研发和验证新的检测方法,共享技术成果和经验。

### 7 结论与展望

#### 7.1 结论

粮油食品的重金属污染防控是一项长期而复杂的系统工程,其核心技术支撑在于检测技术的不断进步。当前,我们正站在一个从总量监测向形态分析、从离线实验室分析向在线快速筛查、从单一技术应用向多技术融合跨越的关键节点。

#### 7.2 展望

面对挑战,必须依靠持续的科技创新,打通从前端技术研发到现场实际应用的最后一公里。通过加强跨学科合作,推动标准体系建设,并重视专业人才培养,我们必将能够构建起更加灵敏、高效、可靠的粮油食品安全防护网,切实保障公众健康和食品产业的可持续发展。

#### [参考文献]

- [1]刘青,禄晶晶.粮油食品重金属污染检测现状及对策研究[J].粮油与饲料科技,2025,(07):234-236.
- [2]吴登辉.粮油食品重金属污染检测存在的问题及对策[J].现代食品,2025,(01):111-113.
- [3]张慧.粮油食品中重金属污染现状及检测方法探讨[J].食品安全导刊,2024,(08):145-147.
- [4]巩慧颖.粮油与食品中重金属检测前处理方法[J].食品安全导刊,2020,(15):86.

#### 作者简介:

刘俊杰(1982--),男,汉族,河北安国人,本科,农艺师,研究方向:农产品、畜产品、水产品、粮油产品、农业环境检测。

#### \*通讯作者:

赵春燕(1982--),女,汉族,云南禄丰人,大学本科,农艺师,研究方向:农业环境保护。