

# 食品中重金属检测技术的现状、挑战与标准化进展

张杰 吴文轩

伊犁州食品药品检验所，新疆伊宁市，835000；

**摘要：**本文系统综述了食品中重金属污染的来源、检测技术发展现状及标准化进展。通过分析国内外典型案例（如长三角水稻镉污染、西南矿区茶叶铅超标、酱油中砷镉检出事件），探讨了原子吸收光谱法（AAS）、电感耦合等离子体质谱法（ICPMS）、生物传感器等技术的优缺点及适用场景。结合2025年市场监管总局检验检测能力验证计划，提出构建“分级检测数据共享全程追溯”的标准化体系。本文旨在为食品检验机构技术选择、政策制定及行业规范提供理论支持。

**关键词：**食品重金属检测；快速筛查技术；检测标准；能力验证；数据溯源

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.08.028

## 1 食品中重金属污染现状与挑战

### 1.1 污染来源与危害

食品中重金属污染呈现多源输入特征，溯源分析显示工业排放（32%）、农业投入品（41%）及环境迁移（27%）构成三大主要污染路径。典型案例显示，长三角电子工业集聚区周边稻田受工业废水渗透影响，水稻镉超标率达23%，样本均值0.25 mg/kg显著超出国家标准0.2 mg/kg限值。西南矿区因历史尾矿堆积导致土壤重金属迁移，当地茶叶铅含量最高检出值达5.8 mg/kg，超出食品安全标准近3倍。加工环节污染问题同样突出，2025年多批次酱油产品检出镉、砷异常富集，溯源发现污染大豆原料在重金属污染土壤中的生物富集系数高达18.7倍。

### 1.2 检测技术面临的挑战

在检测技术层面，基质复杂性带来的挑战尤为突出。研究显示高脂肪基质（如食用油）采用传统湿法消解时镉回收率波动达±8.7%，而微波消解技术可将回收率稳定控制在98.2%±1.5%。婴幼儿食品安全标准严苛性对检测提出更高要求，现行原子吸收光谱法（AAS）0.05 mg/kg的检测限难以满足汞含量0.01 mg/kg的限量要求。跨机构检测数据一致性难题亟待破解，2023年全国实验室间镉检测能力验证中，15.7%的变异系数暴露出现行标准方法在样品前处理、仪器校准等环节存在显著操作差异性，直接影响监管决策的科学性。

## 2 重金属检测技术发展现状

### 2.1 传统检测技术优化

#### 2.1.1 原子吸收光谱法（AAS）

原子吸收光谱法的原理：基于原子蒸气对特征光谱

的吸收定量，适用于铅、镉等单元素检测，原子吸收光谱法（AAS）作为经典的单元素分析技术，主要分为火焰法和石墨炉法，近年来通过仪器改进和方法优化，显著提升了其在复杂食品基质中的应用效能，首先是石墨炉技术升级，新型横向加热石墨炉（THGA）通过均匀温度分布，减少背景干扰，使镉的检测限从0.003 mg/kg降至0.001 mg/kg。典型案例显示，该技术用于婴幼儿米粉中铅检测时，回收率稳定在95%–102%（RSD<3%）。其次是样品前处理技术，使用微波消解技术，微波消解AAS联用方案在贝类检测中表现突出。以牡蛎样品为例，微波消解前处理时间缩短至30分钟，镉回收率较传统湿法消解提升12%（从83%至95%），同时使镉检测限从0.003 mg/kg降至0.0015 mg/kg。

#### 2.1.2 电感耦合等离子体质谱法（ICPMS）

ICP-MS全称是电感耦合等离子体-质谱法，是一种将ICP技术和质谱技术结合在一起的分析仪器。ICP-MS法具有样品制备和进样技术简单、质量扫描速度快、运行周期短、所提供的离子信息受干扰程度小等优点。对于大多数元素而言，有着极低的检出限，被公认为最理想的无机元素分析方法。

高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用仪简称HPLC-ICPMS，是结合了高效液相色谱（HPLC）、电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）双重特点的一种现代分析仪器。HPLC-ICPMS是以HPLC对待测组分进行分离，通过联用接口与ICP-MS连接，按照不同质荷比对离子进行检测。

HPLC-ICPMS联用技术可区分重金属的化学形态。例如，三文鱼中甲基汞（毒性形态）与无机汞的精准区分，为污染溯源提供了关键依据。2024年挪威进口三文鱼事件中，通过形态分析确认甲基汞占比89%，有效排除了自然汞背景干扰。

### 关键对比与改进效果

技术	改进方向	检测限变化	应用效能提升
AAS	石墨炉技术升级	镉: 0.003→0.001 mg/kg	回收率 > 95%, RSD < 3%
AAS	微波消解联用	前处理时间缩短至30分钟	镉回收率提升12% (83%→95%)
ICP-MS	HPLC联用形态分析	区分甲基汞 (毒性89%)	精准溯源污染, 避免误判自然汞
ICP-MS	便携式设备	检测限0.01 μg/L	现场检测能力突破 (如FDA抽检)

## 2.2 快速筛查技术突破

### 2.2.1 生物传感器技术

生物传感器技术的原理是利用酶、抗体或DNA与重金属的特异性反应,实现快速可视化检测。生物传感器的工程化设计越来越成熟并实用,生物传感器正从实验室研究走向产业化应用,其核心创新在于识别元件的稳定性和信号放大策略。酶抑制型传感器:酶抑制型传感器可以通过辣根过氧化物酶(HRP)与Cd<sup>2+</sup>的特异性结合导致酶活性抑制,通过比色法实现镉的快速检测(检出限0.1 μg/L)。

### 2.2.2 便携式X射线荧光光谱(XRF)

便携式X射线荧光光谱拥有便携、高效、精准等特点,现场快速筛查,检测限可达0.11 mg/kg,快速检测可以做到15秒/样。XRF技术通过硬件改进与算法优化,逐步突破灵敏度限制,德国布鲁克公司S1 TITAN系列采用偏振二次靶技术,使镉的检测限从1 mg/kg降至0.2 mg/kg,2025年长三角水稻镉污染事件中,XRF初筛效率提升80%。

XRF技术通过硬件改进与算法优化,逐步突破灵敏度限制。美国TSI公司推出的便携式ICPMS重量仅15 kg,检测限可达0.01 μg/L,已在美国FDA的果蔬抽检中试点应用。

## 2.3 智能化与标准化技术融合

### 2.3.1 区块链赋能的检测数据管理

区块链赋能的检测数据管理是指利用区块链技术来管理和存储检测数据,以提高数据的安全性、透明性和不可篡改性。区块链技术通过其分布式账本、加密算法和共识机制等特性,为检测数据管理提供了新的解决方案。2024年“酱油镉污染区块链平台”覆盖生产、检测、流通全链条,数据上链后篡改风险降至0.01%。消费者扫码可追溯每批次检测报告,投诉率下降42%。

### 2.3.2 人工智能驱动的质控体系

人工智能辅助判读是基于卷积神经网络(CNN)的光谱解析算法可自动识别并扣除基质干扰。测试数据显示,算法优化后,镉检测准确率从78%提升至93%。异

常值自动预警可以做到机器学习模型可识别检测数据中的异常波动,预警准确率达89%。动态校准系统则基于实时环境参数(温度、湿度)的校准曲线自动修正技术,使AAS检测稳定性提升15%。

## 3 检测标准化与质量控制进展

### 3.1 政策法规与标准体系

#### 3.1.1 国家标准的迭代升级

GB 2762-2022的突破性修订:《食品安全国家标准食品中污染物限量》GB 2762-2022明确食品中铅、镉、砷等重金属的限量要求,覆盖12大类食品,同时新增婴幼儿谷类辅食中铅的限量要求(0.02 mg/kg),并首次将无机砷与总砷指标分离<sup>[1]</sup>。配套方法标准GB 5009.11-2023明确HPLC-ICPMS为无机砷检测仲裁方法。

各地的区域标准不断创新,浙江省发布DB33/T 2345-2025《富硒食品中重金属限量要求》,针对硒含量高的农产品(如富硒大米),设定镉/硒比值限值(≤0.3),防止硒掩盖镉毒性。

#### 3.1.2 与国际标准逐步接轨

完善国内标准的同时逐步与国际接轨,欧盟对大米镉的限值(0.1 mg/kg)严于我国标准(0.2 mg/kg),倒逼出口企业升级检测技术。宁波某米业公司通过引进激光剥蚀ICPMS技术,将检测效率提升50%,顺利通过欧盟审核。我国正通过技术升级逐步缩小差距。ISO 17025:2017的本地化实施,我国CNAS将ISO 17025与GB/T 27025整合,要求实验室每4小时插入质控样(如GBW10045米粉标准物质),确保数据连续性<sup>[2]</sup>。

### 3.2 能力验证与质量控制

#### 3.2.1 全国性能力验证计划

国家市场监督管理总局2025年计划:开展15项能力验证项目,覆盖重金属检测的“人、机、料、法、环、测”全要素<sup>[3]</sup>。15项验证任务覆盖从采样到报告的完整流程。

#### 3.2.2 实验室间比对与标准化操作规范(SOP)

对检验检测机构实行跨区域比对,2024年京津冀8市检测机构开展大米镉检测比对,统一采用GB 5009.11-2023方法。结果显示,Z值最大为1.8,主要因石墨

炉升温程序未按 SOP 执行。与此同时，8 省市婴幼儿米粉镉检测结果，Z 值均  $< 2$  ( $|Z| < 2$  为满意结果)，验证标准化操作规范 (SOP) 有效性。

SOP 关键控制点主要体现在一是样品均质化：要求冷冻干燥后过 60 目筛，确保粒度均一；二是消解终点判定：采用实时红外监控，避免过度消解导致元素损失；三是仪器维护：石墨管使用不超过 200 次，防止灵敏度衰减。

## 4 未来发展方向与建议

### 4.1 技术创新路径

#### 4.1.1 纳米材料的精准设计

在重金属污染防治技术创新路径中，纳米材料研发与检测技术集成取得突破性进展。研发团队通过精准设计核壳结构量子点，利用巯基乙酸表面修饰技术实现铅离子的特异性识别，检测灵敏度达到  $0.001 \mu\text{g/L}$  的超低检出限。针对基层检测需求，创新研制出纸基传感器等微型化快检装置，单样本检测成本控制在 10 元以内，大幅提升了现场筛查的普及性。

#### 4.1.2 多技术联用体系构建

技术体系构建方面形成“快筛-确证-溯源”三级联用模式：首层筛查采用 X 射线荧光光谱 (XRF) 和生物传感器实现 10 分钟内快速初筛，单样成本低于 10 元；可疑样本进入二级确证环节，通过微波消解预处理结合原子吸收光谱 (AAS) 或电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 进行精确定量，检测限严格控制在  $0.001 \text{ mg/kg}$  级；溯源层面则运用激光剥蚀 ICP-MS (LA-ICPMS) 与激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术实现污染源空间定位。该体系在上海处置进口牛肉镉污染事件中展现显著成效，通过三级技术联用 72 小时内锁定南美牧场污染源，成功拦截 2000 吨问题产品流入市场，验证了“XRF 初筛→AAS 确认→ICPMS 复核”技术路线的实用价值，在检测效率与结果可靠性间实现最优平衡。

### 4.2 标准化建设系统推进

#### 4.2.1 动态检测限模型优化

在检测技术优化与数据平台建设领域，研发团队通过动态检测限模型创新与跨部门数据整合实现了系统性突破。针对传统检测标准“一刀切”的局限性，开发了基于基质特性的动态检测限调整机制，根据不同食品类别设立检测限修正系数，有效规避假阴性风险。同步研发的实时环境补偿算法集成了温湿度传感模块与 ICPMS 联用技术，通过动态校准将实验室环境波动对检测限的影响从 8% 显著降至 2%，显著提升仪器环境适应性。

技术架构层面，通过信噪比 (S/N) 优化建立了仪

器参数动态调节模型，使检测限可依据样本特性与仪器状态进行智能调整。该模型在宁夏粮油检测中心 5 年重金属监测数据验证中表现出色，成功识别出传统固定检测限模式下 12.7% 的漏检样本。

#### 4.2.2 全国性数据共享平台建设

全国性数据共享平台建设采用“三位一体”架构设计，整合生态环境部土壤污染数据、农业农村部农产品种植信息及市场监管总局抽检结果，构建起覆盖生产源头-流通环节-终端产品的全链条数据库。平台创新应用时空关联算法，实现区域污染特征与农产品重金属含量的动态映射，为建立全国重金属污染预警网络提供核心支撑。目前该平台已接入 21 省检测机构数据，日均处理检测数据超 5 万条，在近期西北地区土壤砷异常预警中提前 14 天锁定污染扩散趋势，验证了跨部门数据协同的技术价值。

## 5 食品安全监管体系优化建议

### 5.1 构建区域性风险地图

数据来源：整合生态环境部土壤污染数据、农业部门作物种植信息、市监部门抽检结果。

应用价值：对高风险区域如矿山等区域进行风险预测，有效指导定向抽检。

### 5.2 推动第三方检测机构发展

政策支持：简化资质审批流程，允许第三方机构参与国家抽检任务。

技术培训：建立“检测技术共享平台”，提供 AAS、ICPMS 标准化操作视频教程。

## 6 结论与展望

食品中重金属检测技术的进步与标准化建设是保障食品安全的核心支撑。未来需从以下方向突破：

技术融合：将纳米材料、人工智能与传统检测方法结合，提升灵敏度与效率；

法规协同：推动国际检测标准互认，减少贸易壁垒；

公众参与：通过移动端快检设备普及，实现“全民监督”食品安全。

### 参考文献

- [1] 国家食品安全风险评估中心. GB2762-2022 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [2] 市场监管总局. 2025 年检验检测能力验证考核计划[Z]. 北京: 市场监管总局, 2025.
- [3] 梁启美等. 食品中重金属检测前处理技术优化研究[J]. 分析化学, 2023, 51(4): 589596.