

食品检验中重金属的检验方法研究

金晓敏

伊犁州检验检测认证研究院, 新疆 伊宁 835000

[摘要] 食品安全已成为全球公共卫生领域关注的核心议题, 其中, 重金属污染因其毒性强、生物富集效应明显且不易降解, 对食品质量及人体健康构成了严峻威胁。汞、镉、铅、砷等重金属元素可通过环境污染、农药及化肥使用、食品加工等途径进入食物链, 长期摄入可能诱发神经损伤、肾功能衰竭甚至癌症。现有检测方法中, 火焰原子吸收光谱法 (FAAS)、电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 以及电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 应用广泛, 其中 ICP-MS 凭借较高的灵敏度及多元素同步检测能力, 在食品安全检测领域发挥了关键作用。与此同时, 电化学传感、纳米材料检测及微流控芯片等新兴技术的快速发展, 使得食品中重金属的现场检测精度得到提升。为了保证食品质量安全, 检测方法的精确性、稳定性及灵敏度均需经过严格验证, 以确保符合相关食品安全标准。本研究围绕食品重金属污染现状, 分析传统与新型检测技术的应用优势, 并结合实验数据对不同检测手段的可靠性进行验证, 以期为食品安全监管提供科学依据。

[关键词] 食品安全; 重金属检测; 光谱分析; 质谱联用; 纳米传感器

DOI: 10.33142/nsr.v2i1.15903

中图分类号: TS207.51

文献标识码: A

Research on Testing Methods for Heavy Metals in Food Inspection

JIN Xiaomin

Yili Inspection and Certification Research Institute, Yining, Xinjiang, 835000, China

Abstract: Food safety has become a core issue of concern in the global public health field. Among them, heavy metal pollution poses a serious threat to food quality and human health due to its strong toxicity, obvious bioaccumulation effect, and difficulty in degradation. Heavy metal elements such as mercury, cadmium, lead, and arsenic can enter the food chain through environmental pollution, pesticide and fertilizer use, food processing, and other pathways. Long term intake may induce nerve damage, kidney failure, and even cancer. Among the existing detection methods, flame atomic absorption spectroscopy (FAAS), inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES), and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) are widely used. Among them, ICP-MS plays a key role in the field of food safety detection due to its high sensitivity and multi-element synchronous detection capability. At the same time, the rapid development of emerging technologies such as electrochemical sensing, nanomaterial detection, and microfluidic chips has improved the accuracy of on-site detection of heavy metals in food. In order to ensure food quality and safety, the accuracy, stability, and sensitivity of the testing methods must be rigorously validated to ensure compliance with relevant food safety standards. This study focuses on the current situation of heavy metal pollution in food, analyzes the application advantages of traditional and new detection technologies, and verifies the reliability of different detection methods based on experimental data, in order to provide scientific basis for food safety supervision.

Keywords: food safety; heavy metal detection; spectral analysis; mass spectrometry; nanosensors

伴随工业化进程的推进, 重金属污染问题日益严峻, 食品安全风险也随之增加。食品中的重金属来源广泛, 包括工业废水排放、大气沉降、农田灌溉、化肥及农药使用等, 其中, 大气颗粒物、污水渗透及土壤累积, 使得污染物不断积聚并最终进入食物链。已有研究表明, 汞主要由燃煤、工业废水及含汞农药排放产生, 极易在水产品中富集, 并以甲基汞形式进入人体, 长期摄入可能引发神经系统损伤; 镉污染主要来自电镀、矿业冶炼及磷肥施用, 其在农产品尤其是稻米中富集程度较高, 进入人体后容易导致肾脏损害及骨质疏松; 铅则通过汽车尾气、含铅器具及工业排放进入食品, 对儿童神经系统发育影响尤为显著; 砷污染与地下水环境及受污染农作物密切相关, 其中无机砷的毒性远高于有机砷, 长期摄入可能诱发慢性中毒甚至癌

症。食品中重金属污染的隐匿性较强, 难以通过感官识别, 仅依赖高精度仪器检测才能实现准确测定。食品贸易的全球化, 使得各国对食品重金属限量标准的要求日趋严格, 推动了检测方法的不断升级。实验室检测主要依靠 ICP-MS、ICP-AES 等光谱与质谱分析手段, 而新型传感器及微流控芯片的推广, 使得食品重金属的现场检测更加高效、便捷。

1 食品中主要的重金属污染

1.1 汞

汞是一种常见的重金属, 在常温下呈液态。它在自然环境中主要以无机汞的形式存在于生物体内, 一旦人体摄入, 便可能导致汞中毒, 直接危害健康。汞中毒的症状包括休克、神经混乱等, 严重时甚至可能危及生命。由于汞的存在形态多样, 其中有机汞的污染尤为严重, 极易引发

食品中汞污染问题,进而造成严重的食品安全隐患。随着现代工业的不断发展,工业污染产生的汞废物流入食品原料及加工生产环节,使得汞污染的防控在食品安全管理中显得尤为重要,因此应将其作为重金属检测的重要内容之一。

1.2 镉

镉的污染来源包括冶金、电镀、电池制造、塑料生产等工业活动,以及磷肥施用导致的土壤镉积累。农作物可吸收镉,使其进入食物链,尤其在水稻、叶类蔬菜、海产品中含量较高。镉的生物半衰期长达 10-30 年,即使低剂量摄入,仍可能引发慢性中毒,导致肾损伤、骨质软化、钙磷代谢紊乱,部分患者甚至患上痛痛病 (Itai-Itai 病)。食品中镉的检测需要高灵敏度及抗干扰能力。当前,电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 因检测限低 (可达 $0.01\mu\text{g/L}$)、选择性强,广泛用于痕量测定。石墨炉原子吸收光谱法 (GFAAS) 灵敏度高,为精准分析提供技术支持。纳米材料传感器与电化学检测技术的发展,使镉的快速检测成为可能,提升了食品安全监测效率。

1.3 铅

铅对人体神经系统危害较大,污染来源涵盖燃煤、含铅涂料、蓄电池生产及食品加工器具 (如铅釉陶瓷)。儿童对铅更为敏感,即便低剂量暴露,也可能影响神经发育,引发认知能力下降、注意力缺陷、多动症等问题。食品中铅主要以无机盐形式存在,检测时若前处理不当,可能导致铅损失或污染。火焰原子吸收光谱法 (FAAS) 因成本低、操作简便,在基层实验室应用广泛,但灵敏度有限,难以满足低浓度铅的检测需求^[1]。石墨炉原子吸收光谱法 (GFAAS) 及电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 检测精度更高,已成为主要方法。X 射线荧光光谱法 (XRF) 与便携式电化学传感技术的发展,使铅污染的快速筛查更加高效,提升了食品安全检测能力。

1.4 其他重金属污染 (砷、铬等)

砷污染同样值得关注。食品中的砷以无机砷和有机砷两种形态存在,其中无机砷毒性更强。水稻对无机砷富集能力较高,使大米成为砷污染的主要载体之一。长期摄入砷超标食品,可能导致皮肤病变、神经损伤,甚至增加膀胱癌、肺癌等恶性疾病风险。食品中砷的检测不仅要求高灵敏度,还需具备形态区分能力。氢化物发生-原子荧光光谱法 (HG-AFS) 在砷形态分析中表现优异,广泛应用于定量测定。液相色谱-ICP-MS 联用技术 (LC-ICP-MS) 可精确区分砷的不同化学形态,为食品安全检测提供可靠数据。

铬污染主要涉及皮革加工、电镀、染料生产等工业过程,其中六价铬 (Cr^{6+}) 毒性最强,具有致癌性与致突变性。食品中铬污染常见于海产品、动物内脏及部分饮用水源。六价铬浓度通常较低,检测方法需具备高灵敏度及良好选择性。分光光度法因设备简便、成本较低,适用于六价铬的快速筛查,但检测易受共存离子干扰,影响准确性^[2]。近年来,离子色谱-ICP-MS 联用技术被用于食品铬污染检测,可有效分离 Cr^{3+} 与 Cr^{6+} ,结合 ICP-MS 的高灵敏度,实现复杂基质中

的精准测定。纳米材料电化学传感器在食品重金属检测中的应用增加,为未来食品安全监测提供更高效的解决方案。

食品中的重金属污染问题日益严重,涉及多种元素,污染来源复杂,检测难度较大。不同金属的毒理作用存在差异,检测方法的选择需依据具体元素特性优化。分析技术不断升级,使食品重金属检测的灵敏度、特异性、便捷性提升,使食品安全监管更加科学化。食品基质复杂,污染来源多样,检测技术仍有待进一步改进。通过优化现有分析手段,并研发高效便捷的检测技术,可提升食品重金属监测水平,降低食品安全风险,为公共健康提供保障。

2 食品中重金属检验方法

2.1 传统检测方法

食品中重金属的检测以传统分析手段为主,常见的方法包括火焰原子吸收光谱法 (FAAS)、电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-AES) 及电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)。FAAS 依靠火焰将待测元素原子化,并测量其对特征光的吸收情况以实现定量分析。由于操作简便、仪器成本较低,该方法被广泛应用于铅、镉等重金属的常规检测。然而,检测灵敏度受限,检出限通常处于 $\mu\text{g/mL}$ 级,同时仅能测定单一元素,难以满足复杂食品样品的多元素同步分析需求。相比之下,ICP-AES 利用高温等离子体激发元素,使其产生特征发射光谱,依据光强变化进行定量测定。更低的检测限 (可达 ng/mL 级) 以及较高的检测效率,使其在食品重金属分析中应用更为广泛。然而,设备昂贵,且对氩气的持续供应有较高要求,使用成本远高于 FAAS。ICP-MS 在 ICP 的高效电离作用基础上,结合了质谱的高分辨率,使得多种痕量金属能够同时检测,最低检出限可达 pg/mL 级,因此被广泛应用于高灵敏度分析。然而,基体效应及多原子离子的干扰可能影响检测准确性,通常需要借助碰撞反应池或内标校正来优化测定结果。虽然这些传统技术仍在食品重金属检测领域发挥关键作用,但部分方法灵敏度有限、仪器造价高、操作复杂,在特定检测场景中的适用性仍受一定限制。随着技术进步,基于新型分析方法的检测手段不断优化,进一步提升了食品重金属检测的精准度和检测效率。

2.2 新型与发展中的检测技术

食品重金属检测技术向高灵敏度、便捷化方向发展,其中电化学检测、纳米传感器、微流控芯片及光谱-质谱联用技术已成为研究热点。电化学检测基于重金属离子在修饰电极表面的氧化还原反应,通过电流信号的变化实现定量测定。设备小型化程度高,检测成本较低,适用于食品安全现场监测。然而,测试结果受电极修饰材料影响较大,重现性仍需进一步提升。纳米传感器依赖金纳米粒子、量子点等纳米材料的光学或电学特性,以表面等离子共振、荧光猝灭效应等方式,实现对汞、砷等重金属的高选择性检测。相较于传统方法,检测灵敏度可提升 1~2 个数量级,使痕量污染物的快速识别成为可能。然而,纳米材料的合成过程复杂,环境因素对其稳定性也存在一定影响,

实际应用仍面临挑战。微流控芯片技术集成样品前处理、分离、检测等多个功能模块,在缩短检测时间的同时降低样品消耗,适用于食品生产及市场监管中的快速筛查。光谱-质谱联用技术(如激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱法,LA-ICP-MS)结合了原位采样与高分辨率分析,不仅可避免湿法消解导致的元素损失,还能直观呈现食品基质中重金属的空间分布情况。高灵敏度与精准度使该方法在食品安全检测中展现出巨大潜力,但设备昂贵、操作要求高,在大规模检测中推广仍存在一定困难。随着检测方法的不断优化,食品重金属污染的监测精度和效率持续提升^[3]。未来,优化检测稳定性、降低成本、针对不同食品基质完善检测流程,将成为进一步研究的重要方向。

3 实验设计与方法

3.1 样品采集与前处理

本研究选取大米、鱼类及蔬菜作为分析对象,以探究不同食品类型中的重金属污染水平。依据《GB 5009.15-2014 食品安全国家标准》,采用分区随机抽样方法获取代表性样本,以提高检测数据的科学性。采集完成后,所有样品均立即密封于聚乙烯袋中,并在-20℃条件下保存,以降低外部环境对重金属含量的影响。检测前,鱼类去鳞、去内脏后切块,蔬菜经清洗晾干备用,大米研磨至粒径小于0.5mm,以确保样品均匀性。微波消解系统用于前处理,硝酸-过氧化氢混合液作为消解试剂。消解温度从120℃逐步升至180℃,并维持30min,以减少挥发性元素(如汞)的损失。冷却至室温后,消解液用超纯水定容至50mL,并经0.45μm聚四氟乙烯滤膜过滤,以去除未完全消解的颗粒。整个实验过程中,所有实验器皿需浸泡于10%硝酸溶液24h,随后使用超纯水冲洗干净并烘干,以防外源污染对测定结果的干扰。

3.2 分析仪器与检测参数

实验采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7900)进行重金属元素的同步检测。ICP-MS因具备高灵敏度、宽线性范围及多元素分析能力,在食品安全检测领域得到广泛应用。实验设定射频功率为1550W,以维持等离子体的稳定状态;采样深度调整至8mm,以优化离子传输效率。食品基质复杂,基体效应及多原子离子干扰可能影响测定精度,实验采用氦气碰撞池(He4.0mL/min)技术,以降低信号干扰,提高分析准确性。信号漂移的存在可能导致实验误差,因此铑(Rh)与铼(Re)被选为内标元素,同时利用标准加入法绘制校准曲线。所有样品均进行三次测定,以确保数据的稳定性。仪器长期稳定性通过定期校准国家标准物质(GBW10045)得以保证,质量控制样品(QC)的应用也使实验过程中仪器检测性能得到持续监测。

3.3 实验流程与数据记录

所有实验严格按照标准化操作流程(SOP)执行,前处理及检测均在同一批次完成,以减少实验误差。每个样品需独立测定三次,并检测空白对照及国家标准物质(GBW10045),以验证数据的准确性及重复性。实验过程中,仪器信号稳定性持续监测,所有实验参数与环境条件均

详细记录。所得数据由Excel整理,异常值剔除后,使用SPSS软件进行统计分析,包括方差分析(ANOVA)及回归建模,以评估不同食品类别间重金属含量的显著性差异。所有实验数据经标准化处理后存入数据库,便于进一步分析及溯源。数据审核严格遵循实验室质量管理体系,若发现异常值,需进行复测确认,以确保数据的科学性及可靠性。

3.4 方法验证与质量控制

检测方法的可靠性从准确性、精密度及灵敏度三个方面进行验证。准确性评估采用加标回收实验,在0.5、5.0、10.0μg/L三种浓度水平下进行测定。实验结果表明,各重金属元素的回收率介于85%~112%之间,符合食品安全检测要求。精密度以相对标准偏差(RSD)表征,五次重复测定后,RSD均低于5%,表明方法重复性良好。方法检出限(MDL)按 $3\sigma/S$ 计算,其中 σ 为空白测定的标准偏差,S为标准曲线斜率。实验结果显示,ICP-MS适用于食品中痕量重金属检测,灵敏度达到食品安全限量标准要求^[4]。定量限(LOQ)基于 $10\sigma/S$ 计算,以确保测定结果的准确性。检测过程中,每批次均设置质量控制样品,以监测仪器信号稳定性,并降低因环境或实验操作误差导致的系统性偏差。标准物质用于交叉比对分析,以确保数据的可溯源性。严格的质量控制及方法学验证,使ICP-MS食品重金属检测方法在灵敏度、准确性及精密度方面均表现优异,为食品安全风险评估提供可靠的技术支持。

4 结语

食品中重金属污染问题的加剧,使得高效精准的检测方法在食品安全监管中占据了重要地位。传统实验室分析手段,如ICP-MS、ICP-AES等,以其高精度、高灵敏度的优势,在食品检测领域得到了广泛应用。然而,高昂的仪器成本及复杂的操作流程,使其在大规模食品检测中的推广受到了限制。近年来,电化学传感、纳米传感器及微流控芯片等新兴技术的快速发展,为食品中重金属的现场检测提供了更具便捷性的解决方案。未来,检测技术的发展趋势将更加侧重于多技术集成,以提高灵敏度、稳定性及高通量检测能力,构建更为精准高效的食品重金属污染监测体系,为食品安全管理提供更科学的技术支撑。

[参考文献]

- [1]袁贝,刘虎鹏,杜平,等.基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估[J].环境科学,2024,45(2):1049-1057.
 - [2]靳玮.原子吸收法在土壤重金属检测中的应用[J].化工管理,2024,5(2):29-31.
 - [3]徐蕊.食品检验中常见污染物的检测方法[J].食品安全导刊,2024,8(29):125-127.
 - [4]李姗姗.石墨炉原子吸收光谱法检测食品中重金属铅——以大米粉质控为例[J].中国食品工业,2024,6(23):92-94.
- 作者简介:金晓敏(1987.6—),毕业院校:石河子大学,所学专业:制药工程,当前就职单位:伊犁州检验检测认证研究院,职务:检验员,职称级别:工程师。