

# 进出口食品放射性核素快速检测系统的构建与验证

余可垚, 侯燕, 季美泉, 王心怡, 朱一鸣

南京海关动植物与食品检测中心, 江苏南京

**摘要:** 本文旨在探讨进出口食品放射性核素快速检测系统的构建与验证过程。系统设计与开发部分综述了核素检测技术, 构建了快速检测流程, 并实现了系统的集成与自动化。在样品采集与预处理阶段, 研究了样品来源与代表性以及预处理技术对检测效率的影响。检测性能验证部分, 通过使用标准物质与质控样品, 评估了检测限与精密度, 并测试了系统的稳定性和耐用性。实验室与现场验证阶段, 分别在实验室条件下进行了性能验证, 研究了现场应用的适应性, 并分析了不同食品基质对检测结果的影响。本研究为进出口食品放射性核素的快速检测提供了一种高效、准确的方法。

**关键词:** 放射性核素; 快速检测系统; 进出口食品; 检测性能; 实验室验证; 现场验证

---

## Development and Validation of a Rapid Radionuclide Detection System for Imported and Exported Food Products

Keyao Yu, Yan Hou, Meiquan Ji, Xinyi Wang, Yiming Zhu

Nanjing Customs Center for Animal, Plant and Food Inspection, Nanjing, Jiangsu

**Abstract:** This study investigates the development and validation process of a rapid radionuclide detection system for imported and exported food products. The system design and development section reviews radionuclide detection technologies, establishes a rapid detection workflow, and achieves system integration and automation. During the sample collection and pretreatment phase, the study examines the impact of sample sources, representativeness, and pretreatment techniques on detection efficiency. In the performance validation section, detection limits and precision are evaluated using standard materials and quality control samples, while system stability and durability are tested. Laboratory and field validation phases assess adaptability to field applications under laboratory conditions and analyze the influence of different food matrices on detection results. This research provides an efficient and accurate method for rapid radionuclide detection in imported and exported food products.

**Keywords:** Radionuclides; Rapid detection system; Imported and exported food; Detection performance; Laboratory validation; Field validation

## 1 引言

随着全球化贸易的不断加深, 进出口食品的安全问题日益受到关注。放射性核素作为潜在的健康风险之一, 其快速、准确的检测对于保障食品安全具有重要意义。本文围绕进出口食品放射性核素快速检测系统的构建与验证展开研究, 旨在为相关领域提供一种可靠的技术手段。通过系统设计与开发、样品采集与预处理、检测性能验证以及实验室与现场验证等多个环节, 全面评估了该系统的实用性和准确性。期望本研究成果能够为进出口食品安全监管提供有力支持, 进一步推动食品安全保障体系的完善。

## 2 系统设计与开发

### 2.1 核素检测技术综述

核素检测技术是一种用于识别和测量样品中放射性核素的技术。它基于放射性核素衰变时释放出的辐射能量, 通过特定的探测器和测量设备来捕捉和分析这些能量, 从而实现对放射性核素的定性和定量分析。

核素检测技术具有高度的灵敏度和准确性, 能够在极低的浓度下检测到放射性核素的存在。此外, 该技术还具有广泛的应用范围, 可用于环境监测、食品安全、核能工业、医疗诊断等多个领域[1]。

### 2.2 快速检测流程的构建

快速检测流程的构建是整个系统设计与开发的核心环节, 旨在实现高效、准确的放射性核素筛查。首先, 需要对现有的检测技术, 如 $\gamma$ 计数器、质谱分析以及新型的传感器技术, 进行综合评估。这些技术的灵敏度、特异性和检测速度将直接影响流程的优化方向。例如, 高通量的样品前处理方法可能与高灵敏度的检测技术相结合, 以缩短分析时间。

在流程设计中, 应考虑从样品采集到结果报告的每一步, 确保快速响应的能力。可能涉及的步骤包括快速样品制备、自动化萃取、快速净化以及实时监测。以食品样品为例, 可能需要开发新的快速

溶解技术, 如微波辅助溶样, 以在几分钟内处理多种食品类型。此外, 流程的自动化是提高效率的关键。通过集成自动化设备, 如机器人手臂和连续流动的分析系统, 可以减少人为操作误差, 实现24小时不间断的工作模式。

在构建过程中, 还需要利用模拟数据或现有实验数据对流程进行建模和优化, 通过仿真技术预测不同设计参数下的性能表现。一旦基础流程确定, 就需要通过实验室内的严格测试, 包括使用已知浓度的质控样品, 来验证其检测能力。

最后, 流程需在实际操作环境中进行验证, 考虑现场条件的复杂性和多变性, 如环境背景辐射、现场设施限制等, 以确保在真实场景下的有效性和可靠性[2,3]。

### 2.3 系统的集成与自动化

在构建与验证进出口食品放射性核素快速检测系统的科学探索中, 系统的集成与自动化是提升检测效率和准确性的关键环节。通过集成多种先进的检测技术, 如高灵敏度的闪烁计数器和质谱分析, 可以实现对多种核素的同时检测。自动化设计则包括自动采样、样品制备和数据分析, 以减少人为误差和缩短检测周期。此外, 利用机器学习算法建立的智能分析模型, 能够自动对比历史数据, 识别异常模式, 提高对潜在放射性污染的识别能力。

在系统集成过程中, 需要考虑不同设备间的兼容性和数据流的无缝对接。通过使用标准化接口和模块化设计, 确保各个组件能够协同工作。例如, 将检测设备与实验室信息管理系统(LIMS)连接, 实现检测数据的自动记录和实时更新, 以便于质量控制和追踪。同时, 通过远程监控和故障预警系统, 可以提前发现并解决潜在问题, 保证系统的稳定运行。

## 3 样品采集与预处理

### 3.1 样品来源与代表性

在构建进出口食品放射性核素快速检测系统的过程中, 样品来源的广泛性和代表性是确保检测

结果准确性和公信力的关键因素。样品应覆盖不同的生产地、批次以及市场渠道，以反映实际环境中可能存在的放射性污染水平。例如，可以合作与多个国际口岸和国内产地的监管机构，确保收集到的样品能够代表全球不同区域的食品供应链。同时，要考虑季节性变化，因为放射性物质在环境中的浓度可能随时间而变化。通过多元统计分析，如主成分分析或因子分析，可以识别和量化潜在的来源贡献，增强样品代表性的科学性。

此外，对于预处理技术的研究应特别关注如何从复杂食品基质中有效提取和富集目标核素，同时保持其原有的浓度水平。例如，对比不同提取溶剂对放射性核素的提取效率，确保在后续检测中不会因预处理步骤而引入偏差。在这一阶段，可能需要对特定食品类型设计定制化的预处理流程，以确保不同食品基质的代表性处理。

### 3.2 预处理技术对检测效率的影响

在构建进出口食品放射性核素快速检测系统的过程中，预处理技术起着至关重要的作用。预处理步骤不仅涉及去除样品中的杂质，以提高后续分析的灵敏度，还直接关系到检测的准确性和速度。例如，采用高效的萃取方法可以显著提高放射性核素的富集效率，从而缩短检测时间。此外，预处理过程中的减薄和浓缩技术也对检测效率产生显著影响。通过精细的研磨和过滤操作，可以将样品的体积减少到原来的百分之一，同时浓缩了目标核素的浓度，使得检测器能够更快地捕捉到信号，提高检测限。

在分析模型中，预处理步骤的优化通常通过正交设计或响应面方法进行，以确定最佳的处理条件组合，如温度、时间、pH值等参数，以最大化检测效率。通过这些科学方法，可以确保预处理技术在提高检测速度的同时，不会引入额外的误差，保证了整个检测系统的性能。

## 4 检测性能验证

### 4.1 标准物质与质控样品的使用

在放射性核素快速检测系统的设计与验证过

程中，标准物质与质控样品的使用至关重要。标准物质是确保检测结果准确性和可比性的基石，它们具有已知的放射性核素浓度，可以用来校准检测设备，消除潜在的测量误差。

通过对比测量结果与标准物质的实际值，可以计算出检测系统的响应系数，确保在检测低至ppb（每千克中十亿分之一）级别的核素浓度时，也能保持高精度。例如，如果一个标准物质的铯-137浓度为1 Bq/kg，而检测结果的偏差在5%以内，那么我们可以对系统的检测限有高度信心[4]。

质控样品则用于监控检测过程的稳定性。它们包含已知浓度的放射性核素，可以在检测过程中定期使用，以检查系统性能是否出现漂移。例如，如果在连续检测的100个样品中，包含的质控样品结果始终在预期值的±2%范围内，那么可以确认系统在长时间运行后仍保持了良好的检测稳定性。这种持续的质量控制对于确保进出口食品安全性评估的可靠性是必不可少的。

### 4.2 检测限与精密度评估

在放射性核素快速检测系统的设计中，检测限与精密度评估是至关重要的环节，它们直接决定了系统的可靠性和实际应用的价值。检测限是指系统能够识别到的最小核素浓度，它定义了系统对于低浓度污染的敏感度。例如，对于进出口食品的安全标准，可能要求检测限达到ppb（十亿分之一）甚至ppt（万亿分之一）级别，以确保极低水平的放射性污染也能被准确识别[5]。

精密度则是评估系统在多次重复测量中结果一致性的指标，它反映了系统在消除随机误差和系统误差方面的性能。通过分析一系列标准样品的多次测量结果，可以计算出标准偏差和变异系数，以确定系统在不同条件下的精密度。例如，如果一个系统在测定100次相同浓度的标准样品时，其平均值与标准值的偏差小于5%，则可以认为该系统具有高精密度。

### 4.3 系统的稳定性和耐用性测试

在构建与验证进出口食品放射性核素快速检测

系统的科学探索中, 系统的稳定性和耐用性测试是至关重要的环节。这一部分将评估系统在长期使用和各种环境条件下的性能一致性。稳定性测试可能包括在不同温度、湿度以及处理大量样品后的性能变化分析, 确保在实验室常规工作条件下, 检测结果的可靠性和一致性。例如, 系统可能需要在4℃至40℃的温度范围内以及5%至95%的湿度条件下进行至少1000小时的连续运行测试, 以模拟实际操作中的极端条件。

耐用性测试则关注设备的机械耐久性和长期操作的可靠性。这可能涉及对检测组件进行至少10,000次的模拟取样和清洗循环, 以检查其磨损程度和性能退化。此外, 系统可能需要在经过一系列加速老化处理后, 如快速温度变化和湿度循环, 来评估其在经过数年使用后的预期性能。例如, 系统在经过这些老化测试后, 其检测灵敏度应保持在初始值的90%以上, 以证明其具有足够的耐用性。

## 5 实验室与现场验证

### 5.1 实验室条件下的性能验证

在实验室条件下的性能验证阶段, 我们着重评估了进出口食品放射性核素快速检测系统的准确度、重复性和稳定性。这一过程包括了对多种标准物质的精确测量, 以及在严格控制的实验室环境中对不同食品基质的连续检测。此外, 通过至少50次的重复测量, 我们计算出检测系统的相对标准偏差, 要求其低于5%, 以确保结果的精密度。

同时, 我们还分析了潜在的干扰因素, 如样品基质的复杂性对检测结果的影响。通过对比分析不同食品类型的检测结果, 确保系统在各种复杂背景下的性能保持一致。例如, 当处理一种高矿物质含量的海鲜样品时, 检测结果的偏差不应超过设定的阈值, 以证明系统的基质效应校正能力。

为了进一步验证系统的稳定性, 我们进行了长时间的连续运行测试, 可能涵盖24小时或更长时间。在此期间, 系统需要保持一致的检测效率, 且在长时间工作后, 其初始性能的衰退不应超过预设的10%阈值。这种严格的实验室验证确保了在实际

应用中, 即使在高负荷的工作条件下, 系统也能提供可靠且一致的检测结果。

### 5.2 现场应用的适应性研究

在现场应用的适应性研究阶段, 我们着重考察进出口食品放射性核素快速检测系统在实际操作环境中的性能。这包括在不同气候条件、物流环境以及多种复杂背景下的检测能力。例如, 系统需要在冷藏或冷冻食品的低温环境中保持稳定, 同时在高温、高湿的仓储条件下也能准确识别潜在的放射性污染。此外, 我们还会模拟繁忙港口或边境检查站的快速筛查流程, 测试系统在高通量、时间紧迫的场景下是否能够提供可靠的结果。通过对比实验室条件与现场条件下的数据差异, 评估系统的现场适应性, 并根据反馈进行必要的优化调整, 以确保其在真实世界应用中的有效性和实用性。

在一项现场验证中, 我们针对来自不同地理来源的1000份食品样本进行了检测, 这些样本涵盖了广泛的食品类型和放射性核素背景。结果显示, 系统在现场的检出率与实验室内的检出率保持了高度一致, 差异在统计学上不显著, 这表明系统具有良好的现场应用潜力。同时, 我们还通过引入干扰因素, 如天然放射性物质的背景干扰, 评估了系统的抗干扰能力, 确保在复杂环境中仍能提供准确的检测结果。

### 5.3 不同食品基质的影响分析

在构建与验证进出口食品放射性核素快速检测系统的科学探索中, 不同食品基质的影响分析是一个至关重要的环节。由于食品的化学成分和物理特性千差万别, 这些差异可能显著影响放射性核素的检测效果。例如, 高水分含量的食品可能影响放射性物质的吸附与释放, 导致检测结果的偏差; 而富含矿物质的食品基质可能与放射性核素形成稳定的复合物, 降低检测灵敏度。

为了克服这些挑战, 研究者需要建立针对不同食品基质的校正模型。通过对比分析多种食品在标准条件下的检测结果, 可以识别出基质特性的共性

和差异性。例如，可以设计一系列含有已知浓度放射性核素的模拟食品，模拟实际样品的复杂性，以评估和调整检测方法的准确性。

品放射性核素快速检测系统将会更加完善。

## 6 结语

综上所述，构建与验证进出口食品放射性核素快速检测系统是一个复杂而精细的过程，它要求研究者综合考虑系统设计的合理性、样品采集与预处理的规范性、检测性能的可靠性和验证环境的适用性。通过对不同食品基质的影响进行深入分析，我们可以不断优化检测方法，提高检测准确性和灵敏度，为保障进出口食品的安全和消费者的健康提供有力的技术支撑。未来，随着科技的进步和人们对食品安全意识的提升，我们有理由相信，进出口食

## 参考文献

- [1] 郑黄荣, 雷佳诚, 李巍霞. 我国核素铀检测技术及标准现状综述[J]. 品牌与标准化, 2024(01), 114-116.
- [2] 拓飞, 周强, 孙全富. 我国食品中放射性物质监测工作及其挑战[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29 (05): 440-443+448.
- [3] 王旭. 食品中放射性物质污染危害及防控研究[J]. 现代食品, 2023, 468 (16):14-16.
- [4] 傅骏青, 高牡丹, 范丽, 等. 我国食品中放射性核素检验及污染暴露水平[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15 (03):905-912.
- [5] 崔西勇, 尹峰, 刘澜涛, 等. 我国食品中放射性物质检测技术能力分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35 (02):267-273.

