

便携式X射线荧光土壤重金属检测仪： 更安全、更精准的土壤污染探测器

刘 勇¹ 刘芳宏² 何卢叶² 刘 雪² 杨文佳²

1. 青岛博睿光电科技有限公司 山东青岛 266000

2. 青岛恒星科技学院 山东青岛 266000

摘要：土壤重金属污染威胁环境与健康，快速检测是应对关键。便携式X射线荧光（pXRF）技术能无损检测土壤中的铅（Pb）、锌（Zn）、铜（Cu）、砷（As）等元素，但辐射安全和检测精度问题限制其应用。本研究设计了一种无铅屏蔽结构，增强设备安全性与便携性；并开发智能校准算法，提升检测精度。实验显示，辐射泄漏低于国际安全标准，检测精度提高15-20%。这项技术为青岛等地的污染监测提供高效工具，助力土壤治理。

关键词：便携式X射线荧光；重金属检测；射线屏蔽；检测精度；土壤污染

一、土壤污染的隐形挑战

土壤是人类生存的基石，但工业、采矿和农业活动让重金属污染日益严重。铅、锌、铜、砷等元素可能通过农作物进入食物链，危害健康，例如铅影响儿童发育，砷与癌症相关。在中国，青岛等工业城市因采矿和港口活动，土壤污染问题突出。传统土壤检测依赖实验室分析，如电感耦合等离子体质谱（ICP-MS），耗时长、成本高。便携式X射线荧光（pXRF）技术则像“便携X光机”，能在现场快速识别土壤中的重金属，操作简单。pXRF通过X射线激发土壤原子，产生独特荧光信号，每种元素有特定“指纹”。然而，pXRF面临挑战。X射线可能泄漏，威胁安全；土壤湿度、有机质等干扰信号，造成误差。传统设备用铅屏蔽辐射，但材料沉重且不环保。某些元素（如铅和砷）的信号重叠，也导致误判。我们研发了一种新型pXRF，采用无铅屏蔽和智能校准技术，提升安全性和精度。本研究在青岛采矿污染场地测试，验证其应用潜力。

二、方法：打造安全的“土壤探针”

（一）新型屏蔽设计

我们开发了一款pXRF原型机，配备50 kV/1.0 mA X射线管，发射强力X射线，搭配高灵敏硅漂移探测器（SDD）捕捉荧光信号。为确保安全，我们设计了一种无铅复合材料，制成5毫米厚的模块化外壳，包裹X射线管和检测窗口，能有效阻挡辐射。模块化设计便于维护，设备还配有可伸缩窗口屏蔽，非测量时自动关闭，防止泄漏。

我们用盖革-穆勒计数器测试辐射水平，测量点距设备10 cm、30 cm、50 cm，运行10分钟，参照国际辐射防护标准（1 μ Sv/h）。

（二）青岛土壤测试

青岛的采矿历史留下重金属污染隐患。我们在一处污染场地采集100份土壤样品，深度0-5 cm，覆盖不同区域。样品风干、筛分（粒径<2 mm）并均匀化，用pXRF测量三次，每次60秒。为验证结果，样品经硝酸和盐酸（3:1）消化，用ICP-MS分析，作为“金标准”。

（三）智能校准算法

土壤成分复杂，湿度、有机质削弱信号，铅和砷的信号可能重叠。我们开发了一种软件算法，包含四步：

1. 去除背景噪声：滤除无关信号，如康普顿散射干扰。
2. 分离重叠信号：用数学模型区分铅和砷的荧光峰。
3. 校正土壤干扰：根据密度和轻元素（碳、氧）含量，调整湿度影响。
4. 精准标定：用标准样品为铅、锌、铜、砷建立校准曲线。

算法嵌入设备软件，实时优化结果。精度通过 R^2 （相关系数）和RMSE（均方根误差）与ICP-MS对比评估。

（四）数据分析

我们用线性回归比较pXRF和ICP-MS结果，用t检验检查浓度差异。布兰德-奥特曼图展示偏差和一致性，确保技术可靠性。

三、结果与讨论：安全与精准并进

(一) 更安全的辐射防护

测试表明，无铅屏蔽设计将30 cm处辐射泄漏降至 $0.8 \pm 0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，50 cm处为 $0.5 \pm 0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，远低于安全标准（ $1 \mu\text{Sv/h}$ ）。模块化外壳便于维护，可伸缩窗口屏蔽在非测量时消除泄漏。相比放射性同位素的pXRF，我们的设计更安全，符合绿色技术趋势。无铅材料减少环境负担，适合青岛等地的现场使用。

(二) 更高的检测精度

校准算法显著提升精度。未经校正时，铅和锌的 R^2 分别为0.80和0.82；校正后升至0.97和0.95，误差降低15-20%。铜和砷的 R^2 从0.85和0.75提高到0.92和0.89，误差降低10-12%。铅、锌、铜的结果与ICP-MS无显著差异（ $p>0.05$ ），砷略有偏差（ $p=0.03$ ），可能因铅信号干扰。

(三) 青岛土壤湿度常超20%，削弱X射线，降低精度8-10%。用场地标准样品校准后，砷精度提高12%。算法分离铅和砷信号，误报率降15%，对青岛的复合污染尤为有效。

(四) 青岛应用：助力土壤治理

青岛胶州湾附近的废弃矿区受重金属污染，威胁农田安全。pXRF在几分钟内完成单点检测，生成污染分布图，节省数天时间，成本降低一半以上。结果与ICP-MS高度一致，为修复提供依据。设备便携性让监测人员深入矿区，覆盖偏远区域，助力青岛制定精准治理方案。

(五) 技术价值

新pXRF兼顾安全与精度。无铅屏蔽响应环保需求，校准算法接近实验室水平。在青岛，它可监测采矿区、

工业园区，保护农业安全。全球范围内，pXRF为发展中国家提供低成本污染监测工具。

四、局限与展望

屏蔽材料的长期耐用性需测试，特别是在青岛潮湿环境。算法计算量大，可能拖慢设备速度。pXRF对镉等轻元素检测较弱。未来，我们将用机器学习优化算法，检测更多元素，并结合红外光谱仪评估土壤pH，全面监测健康。云端平台可实时上传数据，生成污染热力图，提升青岛治理透明度，助力全球土壤保护。

五、结论：守护土壤的科技力量

新型pXRF通过无铅屏蔽和智能校准，实现安全与精准突破。辐射泄漏低于标准，检测精度提升15-20%，为青岛污染监测提供高效方案。这项技术环保、便携，适合采矿区和农田监测。未来，优化算法和多传感器融合将使pXRF成为土壤健康的“守护者”，为青岛乃至全球环保注入动力。

参考文献

- [1] 王琼.X射线荧光分析法在土壤重金属检测中的可行性研究[J].世界有色金属, 2024, (03): 229-231.
- [2] 朱桂军, 张佑云, 徐祥云.波长色散-X射线荧光光谱法在土壤重金属检测中的应用研究现状[C]//广西写作学会教学研究专业委员会.2019年广西写作学会教学研究专业委员会第二期座谈会资料汇编(上).湖南省地质测试研究院; 曲靖医学高等专科学校, 2019: 459-461.
- [3] 程烜, 周闽敏.X射线荧光光谱在土壤重金属检测中的应用研究进展[J].中国资源综合利用, 2018, 36(10): 98-100.