

ICS 01.040.13
CCS Z10

T/SSSC

中国土壤学会团体标准

T/SSSC 0 —2026

基于厘米级定位的土壤重金属 X 射线荧光原位监测规范

Technical Specification for In-Situ X-Ray Fluorescence Monitoring of Soil
Heavy Metals Based on Centimeter-Level Positioning

(征求意见稿)

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中国土壤学会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 系统组成与技术要求	3
5 现场原位监测	5
6 数据处理与成果表达	6
7 质量保证与质量控制	8
8 成果报告编制	8
附录 A 现场监测系统设备选型与验证核查表	10
附录 B 原始监测数据记录表结构	12
附录 C 厘米级定位点复现与偏移评估方法	13
附录 D 现场工作常用表格范例	14

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院南京土壤研究所提出，中国土壤学会归口。

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所、北京市农林科学院智能装备技术研究中心、江苏萤火虫环境有限公司、苏州佳谱科技有限公司、生态环境部环境规划院、浙江大学。

本文件主要起草人：李柱、吴龙华、王文勇、郇允兵、李奥伟、田康、宋础、王晶晶、卞永荣、刘瑞平、周炼清、宋志晓、胡文友。

基于厘米级定位的土壤重金属 X 射线荧光原位监测规范

1 范围

本文件规定了基于厘米级定位技术的土壤重金属X射线荧光（XRF）光谱仪原位监测系统的组成、技术要求、现场原位监测、数据处理与成果表达、质量控制以及成果报告编制等内容。

本文件适用于工业场地、矿区周边、城市绿地等陆域表层土壤（0-2 cm）中铜（Cu）、锌（Zn）、铅（Pb）、镍（Ni）、砷（As）等常见重金属或类重金属元素的原位、非破坏性、高密度监测及长期动态变化评估。

本文件不适用于农用地土壤、经人为开挖翻填扰动破坏表层原状结构的土壤；亦不适用于水体沉积物、土层厚度超出 0-2 cm、极端含水量、高有机质含量、湿地滩涂、冻土、厚杂物覆盖层等易显著干扰 XRF 检测信号的特殊表层土体定量分析，不适用于突发环境事件应急响应场景。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

HJ 680 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法

HJ 1425 土壤和沉积物 11种元素的测定 能量色散X射线荧光光谱法

GB/T 39267 北斗卫星导航系统测量型GNSS接收机通用规范

HJ166 土壤环境监测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

土壤原位监测 in-situ monitoring

在不扰动或最小扰动土壤原始状态的前提下，在现场直接对目标介质进行检测和数据采集的技术过程。

3.2

厘米级精确定位 centimeter-level precise positioning

采用实时动态差分定位（RTK）等增强型全球导航卫星系统（GNSS）技术，实现水平定位精度为 $\pm (8+1\times 10^{-6}D)$ mm，总体优于 ± 2 cm（RMS）的空间坐标获取能力。

3.3

重金属指纹图 heavy metal fingerprint map

基于高密度、高精度空间采样点的重金属含量数据，经空间插值生成的反映特定区域土壤重金属空间分布特征的可视化图件。

3.4

时间序列可比性 temporal comparability

在不同时间点对同一地理坐标位置进行重复监测时，因位置一致性、方法一致性及仪器稳定性保障而获得的具有统计可比性的数据特性。

3.5

监测点位 monitoring point

在监测区域内由厘米级定位系统精确记录的地理坐标（X, Y, Z），作为XRF检测的基本空间单元，用于实现长期复测与数据比对。

3.6

在线模式 online mode

仪器通过无线通信链路与外部终端实时互联，检测数据、时间戳、点位信息同步实时传输至外接终端的工作模式。

3.7

离线模式 offline mode

仪器断开外部实时通信链路，依靠本机存储独立完成现场检测，所有检测数据、时间戳本地缓存，后续统一导出的独立作业模式。

4 系统组成与技术要求

4.1 总体架构

土壤重金属原位监测应由以下三个核心模块构成，并通过集成化平台实现数据同步与协同控制：1. XRF分析模块、2. 厘米级精确定位模块、3. 数据集成与处理单元

各模块间应具备实时通信接口（如蓝牙、Wi-Fi或串口），确保检测数据与位置信息的毫秒级同步绑定。

4.2 XRF 分析模块

4.2.1 功能要求

具备对土壤表层（0–2 cm）中Cu、Zn、Pb、Ni、As等至少五种常见重金属元素的现场快速检测能力；支持非破坏性原位测量，无需样品前处理；单次测量时间宜 ≤ 120 s，推荐多次测量取平均值以提高稳定性。

4.3 样点要求

检测样点选择：原位分析时，需先清除土壤表面所有体积较大或不具代表性的杂物，如石块、卵石、落叶、植被、根系及混凝土等。同时，土壤表面须尽量平整，使探头窗口能与表面良好接触，必要时可用木铲稍作修整，但不得翻动土壤，且表层土壤为干燥状态。

空间位置准确性：样点布设应基于统一坐标系统（如CGCS2000或地方坐标系），使用高精度GNSS设备（如RTK）定位，水平定位误差应 $\leq \pm 2\text{cm}$ 。每个样点需记录精确经纬度，确保可追溯性与复测一致性。

4.4 技术指标

检测限（LOD）：应满足GB 15618及GB 36600中对目标元素的最低限值要求；重复性：同一均匀样品连续测量6次，金属浓度 ≥ 4 倍定量限：RSD $\leq 10\%$ ；定量限 ~ 4 倍定量限：RSD $\leq 15\%$ ；定性检出限 $\sim$ 定量限：RSD $\leq 25\%$ ；能量分辨率：对于 ^{55}Fe 源的Mn K α 线，FWHM $\leq 180\text{ eV}$ （适用于便携式XRF）；探测器类型：推荐使用硅漂移探测器（SDD）；校准方式：支持基本参数法校准或经验系数法校准，并定期使用标准土壤样品进行性能验证。

4.5 厘米级精确定位模块

4.5.1 功能要求

集成支持北斗、GPS、GLONASS等多星系统的GNSS接收机；支持RTK（实时动态差分）或PPK（后处理动态差分）模式；可实时输出NMEA 0183格式或专有协议的定位信息，包含经度、纬度、海拔、PDOP值、定位模式等。

4.5.2 技术指标

水平定位精度：静态RTK模式下，平面定位误差 $\leq \pm 2\text{ cm}$ （RMS）；高程定位精度： $\leq \pm 5\text{ cm}$ （RMS）；数据更新频率： $\geq 1\text{ Hz}$ ；PDOP值阈值：操作时应控制在 ≤ 6 ，理想情况下 ≤ 4 ；定位初始化时间：冷启动 $\leq 10\text{ min}$ ，热启动 $\leq 1\text{ min}$ 。定位设备性能应满足 GB/T 39267 的相关规定。

4.6 数据集成与处理单元

4.6.1 功能要求

具备数据采集、绑定、存储、时间戳标记、空间可视化与趋势分析功能；支持监测点位坐标预设与导航复现功能，用于长期跟踪监测；提供用户友好的操作界面，支持离线/在线模式运行；具备数据导出接口（如CSV、Shapefile、GeoJSON等格式）。

4.6.2 技术要求

时间同步精度：系统时间与UTC时间偏差 $\leq \pm 1$ s；数据存储容量：本地存储 ≥ 32 GB，支持扩展；数据结构：每条记录应包含但不限于以下字段：时间戳（UTC+8）、经度、纬度、高程（CGCS2000坐标系）、PDOP值、XRF原始光谱数据（或元素浓度值）、测量次数与均值、操作员编号、备注信息

5 现场原位监测

5.1 准备阶段

确认待测区域边界及监测目标（如污染热点追踪、修复效果评估等）；

检查设备电量、校准状态及定位信号质量；

对XRF仪器进行现场与测试样品土壤类型相似的标准样品验证；

设置监测单元，监测点布设原则可参照HJ 166 中关于点位布设的一般性指导，监测单元面积推荐 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 至 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ，视污染复杂程度而定；

在数据集成单元中创建项目，设定坐标系（建议使用CGCS2000）。

5.2 现场监测步骤

(1) 定位获取：到达目标点位，启用厘米级定位模块，记录当前精确坐标 (X, Y, Z)，并标记为监测点 P_1 ；

(2) XRF检测：将XRF探头垂直紧贴土壤表面，在直径5 cm范围内进行3–5次重复测量，每次持续60 s；

(3) 数据绑定：数据集成单元自动将本次所有XRF测量结果与当前坐标、时间戳进行绑定，生成一条完整监测记录；

移动与复测：按预设网格路径移动至下一目标点，重复步骤1–3，直至完成全部点位；

数据备份：当日监测结束后，及时导出并备份原始数据。

> 注：选择的监测点应避免土壤表面覆盖植被、石块或潮湿，且监测点应平整、干燥，避免扰动深层土层。

5.3 长期动态监测

在后续监测周期 ($T_2, T_3, \dots, T_n$) 中，利用系统导航功能引导操作人员复现 T_1 时期的各监测点坐标；

在相同环境条件下（干燥时测量）执行相同检测流程；

所有历史点位应保持坐标一致，允许最大偏移 ≤ 5 cm（超出则需记录偏移原因并评估影响）。

5.4 现场安全与二次污染防治措施

- 1) 操作人员应佩戴防护手套、口罩，避免直接接触污染土壤；
- 2) XRF 设备应符合国家放射安全标准，禁止对人或动物照射；
- 3) 监测过程不得生态敏感区地表结构；
- 4) 废弃电池、包装材料应分类回收处理。

6 数据处理与成果表达

6.1 数据预处理

剔除PDOP > 6或定位模式为“Float”的异常记录；同一点位多次测量结果取算术平均值作为最终浓度值；建立时空数据库，按时间序列管理各期监测数据。

6.2 空间插值与制图

采用克里金（Kriging）、反距离权重（IDW）等空间插值算法生成重金属“微域”空间分布图；成果图应包含图例、坐标系、比例尺、指北针、采样日期、检测方法说明等要素；输出“重金属指纹图”及“变化趋势图”（如 $\Delta C = C_n - C_1$ ）。图中应以不同色阶或符号标识超过 GB 15618 或 GB 36600 规定风险筛选值的区域。

6.3 变化分析

时序统计计算：计算各点位重金属浓度时间变化量与变化率；统计区域均值、最大值、超标率等指标的演变趋势；结合风向、地表径流、土地利用、污染源分布等辅助信息分析重金属迁移、累积或消减规律。超标判定与风险提示依据 GB 15618、GB 36600 规定的筛选值、管制值进行分类标注。

基于仪器精密度分级的变化判别规则：依据手持 XRF 重复测试精密度分级要求区分仪器测量波动与土壤真实含量变化，分级标准如下：（1）含量 ≥ 4 倍定量限：允许 RSD $\leq 10\%$ ，两期监测相对变化幅度 $\leq 10\%$ 时，视为仪器正常检测波动，不判定土壤重金属发生实质性变化；变化幅度 $> 10\%$ ，判定存在真实污染增减；（2）定量限 $\leq$ 含量 < 4 倍定量限：允许 RSD $\leq 15\%$ ，两期监测相对变化幅度 $\leq 15\%$ 时，归为检测误差，不认定存在真实变化；变化幅度 $> 15\%$ 可判定为土壤重金属时序显著改变；（3）检出限 $\leq$ 含量 $<$ 定量限：允许 RSD $\leq 25\%$ ，该区间数据仅作定性筛查参考，不开展精准定量变化分析，不依据浓度差值判定污染升降；（4）含量 $<$ 检出限：无可靠定量数据，不进行时序变化量、变化率计算。

临界点位管控要求 监测浓度处于筛选值 / 管制值附近、且落在仪器误差区间内的点位，评价结论需标注数据不确定性，审慎开展污染风险演变判定。

7 质量保证与质量控制

7.1 仪器校准

每次开机测试待测样品之前测定1个有证标准样品，测定值与标准值相对误差不超过4.2.3规定的相对误差。

7.2 现场质控

每10个样品或每批次样品应至少测定1个平行样，测定结果的相对误差不超过4.2.3规定的相对误差；设置1–2个固定质控点（QC point），用于跨期监测一致性检验；记录现场环境参数（温度、湿度、天气状况）。

7.3 数据审核

所有数据应经过三级审核：现场操作员初审、技术主管终审、项目负责人复核；异常值需标注并说明原因。

8 成果报告编制

监测完成后对原位监测过程和结果进行分析、总结和评价，内容包括但不限于项目背景与目标、监测区域概况与网格设计、使用设备型号与校准信息、现场工作流程与质量控制措施、各重金属元素的空间分布图与统计分析、时间序列变化分析结果、结论与建议、附件。

- 1) 项目背景与目标
- 2) 监测区域概况与网格设计
- 3) 使用设备型号与校准信息

- 4) 现场工作流程与质量控制措施
- 5) 各重金属元素的空间分布图与统计分析，污染水平评价应结合 GB 15618 或 GB 36600 的适用标准进行说明。
- 6) 时间序列变化分析结果（如适用）
- 7) 主要发现与建议，针对疑似污染区域，建议按照 HJ 680、HJ 803 等标准开展实验室确证分析。
- 8) 原始数据附件（可选）

附录 A 现场监测系统设备选型与验证核查表

本附录为用户选择、验证及现场检查监测系统各模块是否符合本标准要求提供操作性指导

A.1 X射线荧光光谱（XRF）分析模块核查表

序号	核查项目	技术要求（参考本标准 4.2）	验证方法/合格判据	核查结果 (是/否/备注)
1	检测能力	具备对 Cu, Zn, Pb, Ni, As 等至少 5 种目标元素的现场检测能力。	查验仪器说明书或使用土壤标准样品测试，能稳定输出上述元素结果。	
2	测量模式	支持非破坏性原位测量模式。	仪器具备直接接触土壤测量的模式，无需制样。	
3	单次测量时间	推荐单次测量时间≤120 秒。	现场实测，记录单点测量耗时。	
4	检出限（LOD）	满足 GB 15618 及 GB 36600 中对目标元素的最低限值要求。	依据 HJ 168 附录 A.1.1，对浓度值或含量为估计方法检出限 3-5 倍的样品进行 7 次测定，7 次测定值的标准偏差的 3 倍记为检出限。	
5	重复性（精密度）	金属浓度 ≥4 倍定量限： RSD≤10%；定量限~4 倍定量限：RSD≤15%；定性检出限~定量限：RSD≤25%。	现场选择一块均匀土壤区域，连续测量 6 次，计算目标元素浓度的 RSD。	
6	校准与验证	支持基本参数法校准或经验系数法校准	查验仪器校准菜单或功能。每次开机测试待测样品之前测定 1 个有证标准样品，测量值应在标准值不确定度范围内。	
7	探测器类型	使用硅漂移探测器（SDD）。	查验仪器技术参数表	

A.2 厘米级精确定位模块核查表

序号	核查项目	技术要求（参考本标准 4.3）	验证方法/合格判据	核查结果 (是/否/备注)
1	定位模式	支持 RTK 或 PPK 模式。	查验设备功能清单，并在现场设置为 RTK 模式。	
2	水平定位精度	静态 RTK 模式下，平面定位误差 ≤ ±2 cm (RMS)。	在已知高精度坐标的控制点上，静态测量 ≥60 个历元，解算坐标与已知坐标差值应符合要求。	
3	卫星系统	集成支持北斗、GPS、GLONASS 等多系统。	查验设备说明书，并观察现场搜星数量。	
4	PDOP 值	操作时宜控制在≤6，理想≤4。	现场观察设备显示的 PDOP 值。	
5	数据输出	可实时输出 NMEA-0183 格式（如 GGA 语句）或专有协议定位信息。	查验设备输出设置，并使用串口调试工具或专用软件测试数据流。	
6	数据更新频率	≥1 Hz。	查验技术参数，并观察坐标刷新速度。	

A.3 数据集成与处理单元核查表

序号	核查项目	技术要求（参考本标准 4.4）	验证方法/合格判据	核查结果 (是/否/备注)
1	数据绑定	能自动、实时将 XRF 数据与定位坐标、时间戳绑定为一条记录。	现场进行一次测量,检查生成的数据记录是否同时包含浓度、坐标、时间。	
2	时间同步	系统时间与 UTC 时间偏差 $\leq \pm 1$ 秒。	核对设备系统时间与网络 UTC 时间。	
3	导航复现功能	支持导入历史坐标,并导航引导至该点位。	导入一个已知坐标点,测试导航指引功能(如方向、距离提示)。	
4	数据导出	支持导出为 CSV、Shapefile 等通用格式。	现场操作导出功能,验证文件可被常用软件(如 Excel, ArcGIS)打开。	
5	数据字段	记录包含时间、坐标、PDOP、元素浓度、测量次数等必备字段。	导出一条数据记录,核对字段完整性。	

附录 B 原始监测数据记录表结构

每条记录对应一个监测点位（一个坐标点）的一次完整测量过程（可能包含多次XRF读数平均）。

字段名	数据类型	单位/格式	是否 必选	说明与示例
Project_ID	文本	-	是	项目唯一标识。例：SH_2023_Park_01
Point_ID	文本	-	是	监测点位唯一标识，可与编号结合。例：P001, G01-02
Timestamp	日期 时间	YYYY-MM-DD HH:MM:SS (UTC+8)	是	数据采集的北京时间。例：2023-10-27 14:05:30
Longitude	浮点 数	度 (°)	是	经度，CGCS2000 坐标系。例：121.472345
Latitude	浮点 数	度 (°)	是	纬度，CGCS2000 坐标系。例：31.231456
Altitude	浮点 数	米 (m)	是	椭球高。例：5.2
Pos_Mode	文本	-	是	定位模式。例：RTK_Fixed, RTK_Float, Single
HDOP/PDOP	浮点 数	-	是	水平/位置精度因子。例：1.2
Num_Sat	整数	-	是	可视卫星数。例：15
Cu_Conc	浮点 数	mg/kg	是	铜的测量浓度。
Zn_Conc	浮点 数	mg/kg	是	锌的测量浓度。
Pb_Conc	浮点 数	mg/kg	是	铅的测量浓度。
Ni_Conc	浮点 数	mg/kg	是	镍的测量浓度。
As_Conc	浮点 数	mg/kg	是	砷的测量浓度。
..._Conc	浮点 数	mg/kg	可选	其他检测元素浓度。
Measurement_Count	整数	-	是	该点位 XRF 重复测量次数。例：3
Avg_Duration	整数	秒 (s)	是	单次 XRF 测量持续时间。例：60
Operator_ID	文本	-	是	操作员标识。例：OP01
Soil_Condition	文本	-	可选	现场土壤状况简码。例：Dry(干燥)， Moist (微潮)
Remarks	文本	-	否	备注信息。例：“点位有细小根系，已清除

附录 C 厘米级定位点复现与偏移评估方法

C.1 导航复现操作流程

1. 在数据集成单元中，加载历史监测项目文件。
2. 选择需要复测的监测点位或区域，启动“导航至点位”功能。
3. 跟随设备提供的视觉（地图箭头）或听觉（距离提示）指引，移动至目标点位附近。
4. 当设备显示与目标点的平面距离小于 0.5 米时，减缓移动速度，观察坐标更新。
5. 当显示的实时坐标与历史坐标差值稳定在 ± 2 厘米范围内，且定位模式为“RTK_Fixed”时，判定为成功到达复测点位。

C.2 现场偏移简易评估方法

若对复现精度有疑虑，可采用以下方法进行简易评估：

1. 参照物法：首次监测时，在测量点旁不影响测量的位置，放置一个永久或半永久的小型标志物（如非金属桩、油漆点）并记录其与测量中心的相对方位和距离（如“北侧 30cm”）。复测时，先导航至坐标点，再根据参照物位置微调，确保测量中心与历史的相对位置一致。

2. 测量尺复核：复测时，在到达导航指示点后，使用卷尺测量该点与附近两个（或以上）固定地物（如墙角、电线杆）的距离，与历史记录进行比对。

C.3 点位偏移超限记录表

当复测点实际坐标与历史坐标的平面偏移量估计 >5 cm 时，应填写下表：

项目名称		历史监测日期	
点位 ID		复测日期	
历史坐标 (经度, 纬度)		复测到达坐标 (经度, 纬度)	
估计偏移距离	cm	偏移主要原因 (可多选)	☐ 地表障碍物覆盖 ☐ 设备信号不佳 ☐ 操作误差 ☐ 其他: _____
对数据可比性影响的初步评估	☐ 影响轻微，可忽略。 ☐ 可能引入一定空间代表性误差，需在报告中备注说明。 ☐ 影响显著，建议将此点视为新点或重新尝试复现。		
处理决定	☐ 按现坐标记录，并备注偏移情况。 ☐ 清理障碍物后重新导航复现。 ☐ 放弃此点本次复测。		
记录人		日期	

附录 D 现场工作常用表格范例

D.1 设备日检与校准记录表

项目名称:		日期:	年 月 日	天气:
设备信息	XRF 仪器型号/编号:	定位设备型号/编号:	数据终端编号:	
检查项目	要求	结果记录	确认(√)	
1. 设备电量	所有设备电量>50%	XRF: __%, RTK: __%, 终端: __%		
2. XRF 标准样验证	使用[标准样品编号]测量值在允差范围内	标准值: __ mg/kg, 实测值: __ mg/kg		
3. 定位信号与 PDOP	PDOP ≤ 6, 定位模式为 Fixed	启动后 PDOP: , 模式:		
4. 系统时间同步	与北京时间误差≤1 分钟	终端时间: _____		
5. 数据绑定测试	成功生成一条包含坐标和浓度的测试记录	测试点 ID: _____		
校准/异常情况记录				
检查人:		审核人:		

D.2 现场监测点位记录表 (纸质备份)

序号	预设点 ID	计划坐标 (经度, 纬度)	实际到达坐标 (经度, 纬度)	现场状况简描/照片编号	测量元素	操作员	备注
1	A01			干燥, 平整, PHOTO001	Cu, Zn, Pb...	张三	
2	A02			微潮, 有小石, 已清除, PHOTO002	Cu, Zn, Pb...	张三	
...	...						