

# 团 体 标 准

T/GDNB XXXX—2026

## 华南地区红黄壤耕地土壤重金属污染监测 与评价技术规程

Technical Regulations for Monitoring and Assessment of Heavy Metal  
Contamination in Red-Yellow Soil Cultivated Land in South China Region

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

广东省农业标准化协会 发布



## 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。

本文件由中山大学提出。

本文件由广东省农业标准化协会归口。

本文件起草单位：中山大学、华南农业大学、广东省农业科学院农业质量标准与监测技术研究所、广西大学

本文件主要起草人：汤叶涛、刘畅、曹越、孙孝林、邓腾灏博、王诗忠、晁元卿、仇荣亮



# 华南地区红黄壤耕地土壤重金属污染监测与评价技术规程

## 1 范围

本文件规定了利用地物光谱仪、无人机高光谱、卫星遥感光谱技术开展华南地区红黄壤耕地土壤重金属（镉、铅、砷、汞、铬等）污染监测的术语和定义、总体要求、土壤样品采集、数据处理、特征提取与模型构建和重金属污染监测指标体系构建等要求。

本文件适用于华南地区（广东、广西、福建、海南、江西南部、湖南南部）红黄壤集中分布区域的耕地土壤重金属污染监测，涵盖高密度植被覆盖区、工业区周边、污灌区等典型场景，可为耕地土壤环境保护、农产品质量安全评估及农业可持续发展提供技术支撑。

## 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，仅该日期对应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/T 13580.4 大气降水pH值的测定（电极法）
- GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
- GB/T 17767.1 有机-无机复混肥料的测定方法 第1部分：总氮含量
- GB/T 18834 土壤环境 词汇
- GB/T 19524.1 肥料中砷、镉、铅、铬、汞含量的测定
- GB/T 33469 耕地质量等级
- HJ 777 空气和废气 颗粒物中金属元素的测定
- HJ 803 土壤和沉积物12种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法
- HJ 1074 土壤重金属有效态提取
- HJ 1075 土壤重金属形态连续提取法
- HJ 1233 入河（海）排污库排查治理 无人机遥感航测技术规范
- NY/T 1121.1 土壤检测 第1部分：土壤样品的采集、处理和贮存
- NY/T 1121.4 土壤检测 第4部分：土壤容重的测定
- NY/T 1121.6 土壤检测 第6部分：土壤有机质的测定
- NY/T 1121.7 土壤有效磷测定
- NY/T 1121.15 土壤检测 第15部分：土壤饱和导水率的测定
- NY/T 1121.16 土壤检测 第16部分：土壤毛管孔隙度的测定
- NY/T 1121.19 土壤检测 第19部分：土壤水稳性大团聚体组成的测定
- NY/T 1377 土壤pH的测定
- NY/T 1976 有机质含量测定法
- NY/T 3527 农作物种植面积遥感监测规范
- NY/T 3952 农产品质量安全监测技术规范
- NY/T 4151 农业遥感监测无人机影像预处理技术规范
- NY/T 4691 农产品产地土壤环境监测质量控制技术规范
- T/ACEF154 有色金属矿山污染场地生态修复效果评估技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**天空地一体化** space air ground integrated monitoring

以地面实地采样与光谱测定为地面验证、无人机高光谱遥感为局域精细观测、卫星多光谱与SAR遥感为区域覆盖，多源数据协同融合，实现土壤环境要素空间全覆盖、高精度、动态化的综合监测技术体系。

3.2

**地物光谱** ground object spectrum

地面便携式光谱仪在可见光 - 近红外 - 短波红外波段 400 nm~2500 nm 内测定的土壤或植被反射率光谱。

3.3

**高光谱遥感** hyperspectral remote sensing

将成像与光谱技术结合，在紫外到微波波段内获取连续、窄波段、高分辨率光谱信息的遥感技术。

3.4

**有效波段** effective band

剔除低信噪比、水汽吸收、噪声干扰后，用于建模与反演的可用光谱波段。

3.5

**SG滤波** savitzky golay filter

基于局部多项式最小二乘拟合的光谱平滑降噪方法，用于去除随机噪声并保留光谱吸收特征。

3.6

**重采样** resampling

将原始高分辨率光谱按指定间隔如10 nm重新抽取，形成统一光谱分辨率数据的过程。

3.7

**大气校正** atmospheric correction

消除大气散射、吸收对遥感影像辐射亮度影响，恢复地表真实反射率的处理过程。

3.8

**几何配准** geometric registration

将遥感影像与空间基准精准匹配，使像元坐标与实地位置一一对应的处理过程。

3.9

**正射影像** orthophoto image

经过地形校正、几何校正、辐射校正后，消除投影差与畸变，可直接量测的遥感影像。

3.10

**植被指数** vegetation index

利用遥感不同波段反射率组合构建，用于表征植被覆盖、长势、结构的无量纲指标。

3.11

**SAR极化** SAR polarization

合成孔径雷达不同发射与接收极化方式如 VV、VH 获取的后向散射信息。

3.12

**连续小波变换** continuous wavelet transform

将光谱信号分解为不同尺度小波系数，增强微弱光谱特征并提取与重金属相关特征的方法。

3.13

**特征波段** characteristic band

与土壤重金属含量显著相关、对反演模型贡献度高的光谱波段。

3.14

**Boruta 算法** Boruta algorithm

基于随机森林的特征筛选算法，用于识别与因变量显著相关的有效变量。

3.15

**方差膨胀因子** variance inflation factor

用于判断变量间多重共线性程度的统计指标，数值大于10表示存在严重共线性。

## 3.16

**SHAP分析 SHAP analysis**

基于合作博弈理论，解释机器学习模型变量贡献、重要性及阈值的方法。

## 3.17

**重金属有效态 available heavy metal**

土壤中可被植物吸收利用或具有环境有效性的重金属形态。

## 3.18

**对照点 control site**

未受人为污染、代表区域土壤背景值的监测样点。

## 4 总体要求

## 4.1 气象条件

地物光谱测定：暗室或遮阳条件下进行，避免强光直射和环境湿度剧烈变化（相对湿度 $\leq 60\%$ ）。

无人机飞行：选择作物成熟期、无云窗口期（10:00-15:00），风力小于3级，避开雨天后24 h内及施肥后15天内。

卫星影像获取：选择云量 $< 10\%$ 的影像，优先获取与地面采样同期或相近季节的数据。

## 4.2 空间基准

采用2000国家大地坐标系（CGCS 2000），高斯-克吕格或UTM投影，确保各类数据空间坐标一致。

## 4.3 监测指标

重金属指标：镉（Cd）、铅（Pb）、砷（As）、汞（Hg）、铬（Cr）的全量及有效态含量。

光谱指标：地物光谱仪测定的土壤/植被光谱反射率、无人机高光谱影像波段反射率、卫星遥感植被指数及SAR极化参数。

辅助指标：土壤pH值、有机质含量、阳离子交换容量（CEC）、植被类型及生长状况。

## 5 土壤样品采集

## 5.1 样品采集

## 5.1.1 样点布设

采用网格法结合重点区域加密布点，常规区域网格大小 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ ，工业区周边、污灌区等污染疑似区加密至 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ，坡度 $> 15^\circ$ 区域加密至 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。样点数量满足：区域普查 $\leq 1000$ 公顷/点，耕地质量类别划分 $\leq 100$ 公顷/点，污染事故调查 $\leq 1$ 公顷/点，并设3-5个对照点。

## 5.1.2 样品采集

按照NY/T 1121.1—2006规定的方法进行土壤样品的处理和贮存。用GPS精准定位（误差 $\leq 5\text{ m}$ ），记录采样点行政区划、土壤类型、农作物种类等信息，拍摄样点全景照片。按照HJ 803-2016规定的方法对土壤中元素含量进行测定。按照NY/T 1121.6-2006规定的方法对土壤中总有机质进行测定

## 5.2 地物光谱数据获取

采用便携式地物光谱仪，波段 $400\text{ nm} \sim 2500\text{ nm}$ ，分辨率 $\leq 1\text{ nm}$ ，配50 W卤素光源，以BaSO<sub>4</sub>白板定标。土壤地物光谱数据在暗室测定，光源距样品 $50\text{ cm}$ ，入射角 $25^\circ$ ，光纤垂直距样品 $10\text{ cm}$ 。剔除 $350\text{ nm} \sim 400\text{ nm}$ 、 $2400\text{ nm} \sim 2500\text{ nm}$ 波段，经SG滤波（2阶，窗口11）降噪，重采样至 $10\text{ nm}$ 。

## 5.3 无人机高光谱数据获取

## 5.3.1 设备配置

无人机：Matrice 300 RTK或同等性能机型，搭载高光谱成像仪（如GaiaSky-mini3-VN）。

光谱参数：波段范围400–1000 nm，光谱分辨率 $\leq 2.7$  nm，有效波段数 $\geq 214$ 个（剔除400–410nm、990–1000 nm低信噪比波段）。

飞行参数：飞行高度240 m，地面分辨率0.15 m；航向重叠度60%，旁向重叠度60%；飞行时同步记录光照强度、大气湿度。

### 5.3.2 数据采集

在作物成熟期飞行，覆盖整个监测区域，获取 $\geq 300$ 幅高光谱影像。飞行前用标准白板校准仪器，每飞行1 h重新校准1次。

## 5.4 卫星遥感数据获取

### 5.4.1 数据源选择

多光谱数据：Sentinel-2（10 m分辨率，波段范围490–2330 nm）、高分五号（30 m分辨率，波段400–2500 nm），获取作物生长周期内8–10幅云量 $< 10\%$ 的影像。

SAR 数据：Sentinel-1（10 m分辨率，双极化 VH/VV），获取同期30–35幅影像，捕捉植被结构动态变化。

### 5.4.2 数据下载

从欧洲空间局（ESA）或国家地理信息公共服务平台下载影像数据，确保数据时间与地面采样时间间隔 $\leq 5$ 个月。

## 6 数据处理

### 6.1 地物光谱数据处理

噪声去除：采用SG滤波对原始光谱进行平滑处理，消除随机噪声，保留特征吸收峰。

反射率校准：以BaSO<sub>4</sub>板的反射率为标准，将原始光谱转换为相对反射率。

波段筛选：剔除信噪比 $< 3$ 的波段，保留400–2400 nm有效波段，最终有效波段数 $\geq 205$ 个。

### 6.2 无人机高光谱数据处理

影像校正：用SpecView软件依次完成镜头校正、反射率校正（消除光照变化影响）、大气校正（FLAASH模型）。

几何配准：通过HiRegistrator软件实现全波段影像几何精校正与配准，误差 $\leq 1$ 个像素。

影像镶嵌：利用Agisoft PhotoScan软件完成三角测量、密集点云计算、表面模型生成及高光谱正射影像镶嵌。

光谱提取：从正射影像中提取采样点对应像素的光谱数据，与地面采样点坐标精准匹配。

### 6.3 卫星遥感数据处理

#### 6.3.1 多光谱数据处理

大气校正：采用Sen2cor v2.8插件进行大气校正，消除大气散射和吸收影响。

分辨率统一：将20 m分辨率波段重采样至10 m，与其他波段保持一致。

植被指数计算：基于有效波段计算NDVI、SAVI、RENDVI（红边归一化植被指数）等，具体公式见附表 A.1。

#### 6.3.2 SAR数据处理

预处理流程：用SNAP 10.0软件完成轨道校正、热噪声去除、辐射定标、 $3 \times 3$ 窗口speckle噪声去除、地形校正（基于DEM），将后向散射系数转换为dB格式。

植被指数计算：基于VH/VV极化参数计算DPSVI、RVIm等SAR植被指数，具体公式见附表 A.2

## 7 特征提取与模型构建

### 7.1 特征提取

采用连续小波变换（CWT）进行光谱特征提取，具体步骤如下：

基小波选择：选用墨西哥帽小波（Mexican hat wavelet），适配植被与土壤光谱特征。

分解尺度：设置7个分解尺度（ $2^1$ - $2^7$ ），对预处理后的地物光谱、无人机高光谱、卫星遥感光谱数据进行分解。

特征筛选：计算各尺度小波系数与重金属含量的斯皮尔曼相关系数，提取相关系数绝对值前 1% 的波段作为特征波段（每类光谱提取15-20个特征波段）。

地物光谱特征波段：主要集中在2310-2450 nm（与有机质官能团吸收相关）。

无人机高光谱特征波段：主要集中在470-680 nm、750-980 nm。

卫星多光谱特征波段：主要集中在红边波段（698-793 nm）和近红外波段。

### 7.2 变量优化

冗余变量剔除：采用Boruta算法筛选与重金属含量相关的潜在变量，去除无意义变量。

多重共线性处理：通过方差膨胀因子（VIF）分析，剔除VIF>10的高度相关变量，保留独立且信息丰富的变量。

### 7.3 模型构建

根据选择的变量和训练样本，通过机器学习，如支持向量机、XGBoost、随机森林、神经网络等，建立变量和土壤重金属含量之间的映射关系，同时进行模型参数的优化和调整，使模型能更好地预测土壤重金属含量。

### 7.4 精度评价

采用决定系数（ $R^2$ ）、均方根误差（RMSE）、一致性相关系数（CCC）、性能偏差比（RPD）作为评价指标，精度等级要求： $R^2 \geq 0.60$ ， $RMSE \leq 3.60$  mg/kg， $CCC \geq 0.68$ ， $RPD \geq 1.50$ ；最优模型需满足 $R^2 \geq 0.70$ ， $CCC \geq 0.80$ ， $RPD \geq 1.80$ 。计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$CCC = \frac{2\rho\sigma_y\sigma_{\hat{y}}}{\sigma_y^2 + \sigma_{\hat{y}}^2 + (\mu_y - \mu_{\hat{y}})^2}$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE}$$

式中，

$n$  为样本数量；

$y_i$  为实测值；

$\hat{y}_i$  为预测值；

$\bar{y}$  为实测值平均值；

$\rho$  为实测值与预测值的皮尔逊相关系数；

$\sigma_y$ 、 $\sigma_{\hat{y}}$  为实测值与预测值的标准差；

$\mu_y$ 、 $\mu_{\hat{y}}$  为实测值与预测值的均值；

SD为实测值标准差。

### 7.5 关键变量阈值确定

采用SHAP (SHapley Additive exPlanations) 技术分析最优模型的关键变量及阈值。变量重要性排序：通过平均绝对SHAP值排序，识别对重金属含量反演贡献最大的关键变量（如 RENDVI3、蓝光波段反射率）。阈值确定：基于SHAP依赖图，当SHAP值=0时对应的变量值即为阈值，低于该阈值时重金属含量显著累积（如 RENDVI3\_Aug 7 $\leq$ 0.018时，土壤砷含量显著升高）。

## 8 重金属污染监测指标体系构建

### 8.1 指标选取原则

针对性原则：聚焦华南红黄壤酸性（pH 4.5-6.5）、黏粒含量高、阳离子交换容量低的特性，优先选择与重金属（Cd/Pb/As/Hg/Cr）迁移转化、光谱响应密切相关的指标。

技术匹配原则：指标需与前文天空地一体化监测技术流程衔接，确保数据可通过标准化方法获取。

实操性原则：优先选取有明确国标/行标监测方法、精度可量化的指标，避免无实操性的抽象指标。

核心性原则：必选指标覆盖“土壤理化-光谱特征-重金属含量-作物响应”全链条，可选指标用于大面积动态监测、深度污染溯源等延伸场景。

### 8.2 指标结构

评价指标体系应以土壤环境质量、土壤污染情况、农作物生产情况为目标层，应以污染场地特征污染物、污染扩散、土壤物理性质、土壤肥力、作物产能、作物质量为准则层，指标层应包括11个必选指标与13个可选指标。目标层：土壤环境质量、土壤污染情况、农作物生产情况

### 8.3 指标体系

#### 8.3.1 必选指标体系应符合表1的规定。

表 1 红黄壤耕地污染与酸化协同退化监测必选指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标类型
土壤环境质量	土壤物理性质	pH值	正向指标
		交换性酸总量	负向指标
	土壤肥力	有效氮	正向指标
		有效磷	正向指标
		有效钾	正向指标
有机质	正向指标		
土壤污染指标	特征污染物	重金属全量	负向指标
	污染扩散	重金属有效态	负向指标
		重金属形态分布	负向指标
农作物生产	作物产能	株高/生物量	正向指标
		产量构成因素	正向指标
	作物质量	作物重金属全量	负向指标

#### 8.3.2 可选指标体系应符合表2的规定。

表 2 红黄壤耕地污染与酸化协同退化监测可选指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标类型
土壤环境指标	土壤物理结构	团聚体稳定性	正向指标
		容重	正向指标
		饱和导水率	正向指标
		孔隙度	正向指标
	土壤生物指标	微生物群落结构	正向指标

	遥感监测指标	功能基因丰度	正向指标
		植物响应指标	正向指标
		土壤酸化光谱指数（无人机高光谱）	正向指标
		土壤重金属光谱响应值（无人机高光谱）	负向指标
农作物生产	作物质量	作物胁迫光谱指数（无人机高光谱）	正向指标
环境驱动因子	大气沉降	湿沉降pH值	正向指标
		重金属沉降量	负向指标
	灌溉水质量	重金属离子浓度	负向指标
	农业投入品	氮肥用量	负向指标
有机肥重金属含量		负向指标	

## 8.4 指标选取

### 8.4.1 专家调查法

#### 8.4.1.1 专家组组建

专家组组建时，应根据农田污染修复的专业需求，确定涵盖必要知识领域的专家人选。专家小组人数不应少于5人。

#### 8.4.1.2 背景资料提供与意见征询

背景资料提供与意见征询时，应向专家小组成员阐述修复目标及相关要求，收集专家的书面答复。每位专家应明确说明意见的选择理由与依据，应确保意见具有可追溯性。

#### 8.4.1.3 循环修订与指标确定

循环修订与指标确定时，应将首次收集到的专家意见汇总，制作对比图表供全体专家参考。专家应据此进行第一次意见修订，在整理他人评论的基础上调整看法。重复此过程，直至每位专家意见一致，确定评估指标体系。

### 8.4.2 指标筛选与整合

根据T/ACEF154-2024规定的方法，对候选指标初步筛选，剔除不符合要求的指标。对余下的指标整合，避免重复或冲突，确保指标体系的简洁性和有效性。邀请利益相关者代表、行业专家等对整合后的指标体系评审，提供反馈意见。基于专家打分结果，对三级指标层的打分构造判断矩阵，计算三级指标平均得分，作为指标筛选的依据。

表3 监测指标测定方法

序号	指标项目	指标操作方法	标准编号
1	土壤pH值	土壤pH的测定	NY/T 1377-2021
2	土壤交换性酸总量	土壤交换性酸测定（电位滴定法）	NY/T 1377-2021
3	土壤有效氮	土壤碱解氮测定（扩散法）	NY/T 1121.4-2006
4	土壤有效磷	土壤有效磷测定（碳酸氢钠法）	NY/T 1121.7-2014
5	土壤有效钾	土壤速效钾测定（乙酸铵提取-火焰光度法）	NY/T 1121.6-2006
6	土壤有机质	有机质含量测定法（重铬酸钾容量法）	NY/T 1976-2010
7	重金属全量	土壤和沉积物12种金属元素的测定	HJ 803-2016
8	重金属有效态	土壤重金属有效态提取	HJ 1074-2019
9	重金属形态分布	土壤重金属形态连续提取法（BCR法）	HJ 1075-2019
10	株高/生物量	耕地质量等级	GB/T 33469-2016
11	产量构成因素	耕地质量等级	GB/T 33469-2016
12	作物重金属全量	农产品质量安全监测技术规范	NY/T 3952-2021
13	团聚体稳定性	土壤检测 第19部分：土壤水稳性大团聚体组成的测定（湿筛法）	NY/T 1121.19-2008
14	容重	土壤检测 第4部分：土壤容重的测定（环刀法）	NY/T 1121.4-2006
15	饱和导水率	土壤检测 第15部分：土壤饱和导水率的测定（定水）	NY/T 1121.15-2006

		头渗透仪法)	
16	孔隙度	土壤检测 第16部分：土壤毛管孔隙度的测定	NY/T 1121.16-2006
17	土壤酸化光谱指数(无人机高光谱)	按本文件第6-8章规定的无人机高光谱数据获取与反演方法执行	
18	土壤重金属光谱响应值(无人机高光谱)	按本文件第6-8章规定的无人机高光谱数据获取与反演方法执行	
19	湿沉降pH值	大气降水pH值的测定 电极法	GB/T 13580.4-1992
20	重金属沉降量	空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法	HJ 777-2015
21	氮肥用量	有机-无机复混肥料的测定方法 第1部分：总氮含量	GB/T 17767.1-2008
22	有机肥重金属含量	肥料中砷、镉、铅、铬、汞含量的测定	GB/T 19524.1-2004

附录 A  
(资料性/规范性)  
卫星多光谱植被指数计算公式

表 A.1 常用卫星多光谱植被指数计算公式

指数名称	计算公式	波段说明
归一化差值植被指数 (NDVI)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	NIR: 近红外波段 (855-875 nm); R: 红光波段 (650-680 nm)
土壤调整植被指数 (SAVI)	$SAVI = (1 + L) (NIR - R) / (NIR + R + L)$	L: 土壤调节系数 (取 0.5)
红边归一化植被指数 3 (RENDVI3)	$RENDVI3 = (NIR - RE3) / (NIR + RE3)$	RE3: 红边 3 波段 (773-793 nm)

表 A.2 SAR 植被指数计算公式

指数名称	计算公式	说明
双极化 SAR 植被指数 (DPSVI)	$DPSVI = VH \times \sqrt{\left[ \frac{VV_{max} - VV}{VH + VH^2 \times (VV_{max} - VV^2 + VH \times VV)} \right]} + 2VV$	$VV_{max}$ : VV 极化最大后向散射系数; VH、VV: 对应极化后向散射系数
雷达植被指数 (RVI <sub>m</sub> )	$RVI_m = \frac{4VH}{VV + VH}$	-