

T/GXAS

团 体 标 准

T/GXAS 1315—2026

森林土壤有机碳含量可见-近红外光谱反演 技术规程

Technical code of practice for visible—near infrared spectroscopy
inversion of organic carbon content forest soil

2026 - 05 - 15 发布

2026 - 05 - 21 实施

广西标准化协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 反演原理	1
5 反演操作流程	1
6 仪器与设备选择	2
6.1 光谱仪	2
6.2 光源	2
6.3 实验室常用仪器与设备	2
7 样品准备及建模数据收集	2
7.1 样品采集	2
7.2 样品处理	2
7.3 土壤有机碳含量测定	3
8 光谱数据采集与预处理	3
8.1 光谱数据采集	3
8.2 光谱数据预处理	3
9 特征波段筛选	4
9.1 相关性分析	4
9.2 算法筛选	4
10 反演模型构建	4
10.1 数据集划分	4
10.2 模型训练	4
10.3 模型评价指标	4
11 反演模型验证	4
11.1 模型训练结果调取	4
11.2 代入模型	4
11.3 模型应用决策	5
12 反演结果报告	5
13 档案管理	5
附录 A（资料性） 反演结果报告表	6

前 言

本文件参照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。

本文件由广西壮族自治区林业科学研究院提出和宣贯。

本文件由广西标准化协会归口。

本文件起草单位：广西壮族自治区林业科学研究院、桂林理工大学、南宁师范大学、广西森林资源与生态环境监测中心、广西华沃特集团股份有限公司、中国林业科学研究院亚热带林业研究所、四川省林业科学研究院、中南林业科技大学、广西大学、广西壮族自治区国有东门林场、广西壮族自治区国有七坡林场、广西壮族自治区林业勘测设计院、中国林业科学研究院热带林业实验中心。

本文件主要起草人：唐健、赵隽宇、唐小兰、覃祚玉、邓善宝、石媛媛、邓昀、宋贤冲、柯琴、潘桂颖、马培刚、马宏伦、刘毅、李学团、蒋湖波、程小辉、陈琳、吴立潮、陈利军、邹润彦、杨凌、倪张林、卢峰、徐占勇、罗蔚生、江锦烽、王嘉琛、杨梅、林海能、涂华龙、罗密、韦维、陈敏佼、何国政、周料、熊涛、黄永珍、费晓云、汤衍荣、韩小美。

森林土壤有机碳含量可见-近红外光谱反演技术规程

1 范围

本文件界定了森林土壤有机碳含量可见-近红外光谱反演的术语及定义，确立了利用可见-近红外光谱反演森林土壤有机碳含量的程序，规定了仪器与设备选择、样品准备及建模数据收集、光谱数据采集与预处理、特征波段筛选、反演模型构建、反演模型验证、反演结果报告等方面的操作指示，描述了反演操作过程信息的追溯方法和反演原理。

本文件适用于利用可见-近红外光谱反演森林土壤有机碳含量。

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 6005 试验筛 金属丝编织网、穿孔板和电成型薄板 筛孔的基本尺寸

GB/T 32198 红外光谱定量分析技术通则

GB/T 37969 近红外光谱定性分析通则

HJ 613 土壤 干物质和水分的测定 重量法

JB/T 15096 可见-近红外地物光谱仪

LY/T 1210 森林土壤样品的采集与制备

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 1121.6 土壤检测 第6部分：土壤有机质的测定

3 术语和定义

GB/T 32198、GB/T 37969界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可见-近红外光谱反演 *visible—near infrared spectroscopy inversion*

利用波长范围在350 nm~2 500 nm的可见-近红外光，以漫反射原理照射土壤样品，通过建立光谱数据与森林土壤有机碳含量之间的定量关系模型，实现对土壤有机碳含量的快速、无损定量分析。

4 反演原理

利用森林土壤有机碳对350 nm~2 500 nm波段的光具有特征漫反射吸收，光谱反射率与有机碳含量存在定量相关关系，利用漫反射定律拟合该关系并建立模型，实现森林土壤有机碳含量反演。

5 反演操作流程

见图1。

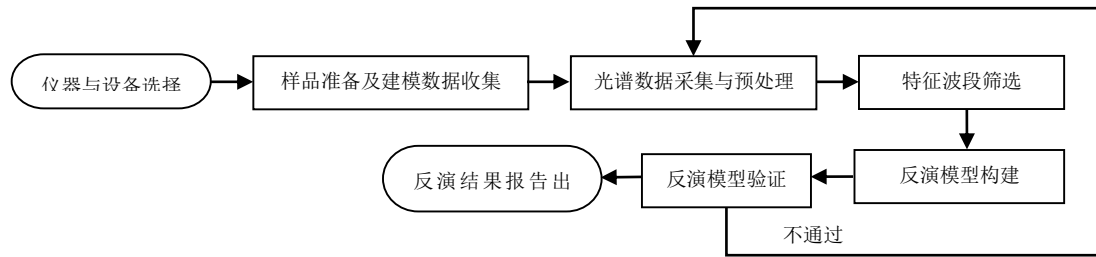


图1 反演操作流程

6 仪器与设备选择

6.1 光谱仪

选择符合JB/T 15096规定的光谱仪。技术参数覆盖350 nm~2 500 nm波段，光谱分辨率 ≤ 3 nm（350 nm~1 000 nm）和 ≤ 10 nm（1 001 nm~2 500 nm），光谱采集视角为 15° ，配套工作电脑（配制光谱分析软件）、标准白板（反射率 $\geq 99\%$ ，适用350 nm~2 500 nm波段）、专用测试软件（支持原始光谱存储与预处理）。

6.2 光源

6.2.1 应使用 50 W 卤素灯作为光源。开启后预热至少 15 min，待光谱输出稳定后使用。

6.2.2 标准测量条件下，光源入射角应设置为 $(45 \pm 2)^\circ$ 。（合并 6.2.2 和 6.2.3，以 45° 最优

6.2.3 在以下情况，可对入射角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内进行调整，并在记录与报告中说明具体角度及调整原因：

- 为避开光谱仪探头的物理遮挡或视场盲区；
- 为研究材料反射特性随入射角的变化规律；
- 为模拟特定应用场景下的光照条件。

6.2.4 光源出射光斑能均匀覆盖被测区域，光斑中心与探头视场中心重合。测量时，应屏蔽环境杂散光干扰。

6.3 实验室常用仪器与设备

直径 ≥ 7 cm、深 ≥ 1.5 cm的圆柱形聚四氟乙烯样品杯，玛瑙研钵或土壤研磨机、孔径为2.0 mm、0.25 mm、0.149 mm的标准筛符合GB/T 6005要求、干燥箱、恒温恒湿箱（湿度 $\leq 60\%$ ，温度 25°C ）、天平（精度0.001 g）、玻璃器皿、自封袋等。

7 样品准备及建模数据收集

7.1 样品采集

7.1.1 样品采集

7.1.1.1 采用网格化布点和S型采样法，采样点避开洼地、石砾区、道路、建筑周边等人为干扰区域。

7.1.1.2 按照LY/T 1210的规定采集样品。采样点布设应具有代表性，根据地形与植被状况适当调整，每个采样点采集0 cm~40 cm表层土壤，每个采样点取5个重复样品（间距 ≥ 5 m），总采样点数量 ≥ 100 个，混合后采用“四分法”保留1 000 g土壤。若采用复杂模型，样本数量宜 ≥ 200 个。

7.2 样品处理

7.2.1 风干

去除植物残体、石块等杂质，将土壤样品置于通风阴凉处自然风干至含水量 $\leq 5\%$ ，按HJ 613的规定测定森林土壤含水量。

7.2.2 研磨与过筛

7.2.2.1 将通过 2 mm 孔径筛的土样用多点取样法取 25 g，磨细，使之全部过 0.25 mm 筛用于有机碳含量测定。

7.2.2.2 将通过 2 mm 孔径筛的土样用多点取样法取 25 g，用玛瑙研钵或玛瑙球磨机磨细，过 0.149 mm 的筛，供光谱测定。

7.2.3 贮存

制备的试样按 NY/T 1121.1 规定的方法贮存。

7.3 土壤有机碳含量测定

按照 NY/T 1121.6 规定的方法，测定森林土壤有机碳含量，每个样品平行测定 3 次，相对偏差 $\leq 5\%$ ，作为建模的参考值。

8 光谱数据采集与预处理

8.1 光谱数据采集

8.1.1 环境条件

8.1.1.1 光环境：测量应在暗室或能完全屏蔽外界光干扰的密闭装置内进行。

8.1.1.2 温度与湿度：实验室环境温度与相对湿度应控制在光谱仪及被测样品所允许的范围内。宜将温度控制在 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 60\%$ 。整个测量过程中，环境温度波动应小于 $\pm 1^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

8.1.1.3 记录：应记录测量开始和结束时的环境温度与相对湿度。

8.1.2 仪器校准

测定前使用标准白板进行仪器校准，且每测定 10 个样品重新校准一次。

8.1.3 测定步骤

8.1.3.1 将过 0.149 mm 筛的土壤样品装入样品杯，填充均匀并轻轻压实，抹平表面。

8.1.3.2 调整光谱仪探头垂直于样品表面，距离控制 10 cm~30 cm，视场角 15° ，光源入射角 45° ，测定光谱反射率。

8.1.3.3 每个样品连续测定 10 次，取算术平均值作为该样品的光谱数据。

8.2 光谱数据预处理

8.2.1 噪声波段识别与处理

8.2.1.1 对原始光谱数据进行噪声评估，优先剔除信噪比过低、受强烈干扰且无法通过预处理修复的波段数据。

8.2.1.2 对于使用硅探测器与铟镓砷探测器的常规可见-近红外光谱仪（测量范围 350 nm~2 500 nm），剔除小于 400 nm 和大于 2 400 nm 的波段数据，保留 400 nm~2 400 nm 的核心波段用于建模。

8.2.1.3 最终用于建模的光谱波段范围应在数据报告中予以完整记录。

8.2.2 数学变换

采用以下一种或多种方法进行光谱变换，增强特征信号：

——一阶导数（FDR），Savitzky-Golay 平滑，窗口宽度 11 点，多项式阶数 1 阶；

——对数一阶导数（FDL），先计算 $\lg(1/R)$ ，再执行 FDR（参数同左）；

——标准正态变量变换（SNV）和一阶导数，先 SNV 处理，再执行 FDR（窗口宽度 11 点）；

——多元散射校正（MSC）和波段筛选，先 MSC 处理，再通过波段筛选标准差 > 1.5 的波段。

9 特征波段筛选

9.1 相关性分析

9.1.1 计算光谱反射率 (R、FDR、FDL) 与有机碳含量的相关系数, 筛选显著相关波段 ($P < 0.01$)。

9.1.2 森林土壤敏感波段范围宜为: 显著相关波段 R (600 nm~1 500 nm)、一阶导数 FDR (500 nm~540 nm、630 nm~680 nm)、对数一阶导数 FDL (980 nm~1 000 nm、1 250~1 350 nm、1 550 nm) 作为模型的自变量。

9.2 算法筛选

宜采用随机森林 (Random Forest) 特征筛选算法设置决策树数量 1 000 棵, 筛选重要性排名前 30% 的波段; 或递归特征消除 (RFE) 基于偏最小二乘 (PLS) 模型, 逐步剔除不重要变量, 保留 50~200 个波段。

10 反演模型构建

10.1 数据集划分

按 7:3 比例采用分层随机抽样法将样本集随机划分为训练集 (用于构建模型) 和验证集 (用于验证模型), 保证训练集与验证集的土壤类型、有机碳含量分布特征一致。

10.2 模型训练

可选择以下的化学计量学方法构建定量校正模型:

——正交偏最小二乘法 (OPLS), 采用留一交叉验证 (LOOCV) 确定最佳主成分数 (3~8 个), 迭代次数 $\leq 1\ 000$ 次;

——随机森林 (RF): 适用于非线性关系建模, 设置决策树数量为 100, 节点分裂标准为均方误差, 最小样本分裂数 2, 最小样本叶节点数 5;

——支持向量机回归 (SVR): 采用径向基核函数 (RBF) 处理光谱数据与有机碳含量间的复杂关系, 惩罚系数 C 可在 [0.1, 10, 100] 范围内寻优, 径向基核函数核参数 γ 可在 [0.001, 0.01, 0.1, 1] 范围内寻优;

——卷积神经网络 (CNN): 1~3 个卷积层, 每个卷积层后接 ReLU 激活函数和最大池化层, 之后通过展平层和 1~2 个全连接层输出有机碳含量预测值。

10.3 模型评价指标

10.3.1 训练集与验证集的决定系数 (R^2) 均应 ≥ 0.80 。

10.3.2 验证集的均方根误差 (RMSE) 应 ≤ 5.0 。

10.3.3 鲁棒性验证噪声干扰测试: 对光谱添加信噪比 (SNR) 为 35 dB 的高斯白噪声后, RMSE 增幅 $\leq 10\%$ 。

10.3.4 温度稳定性测试: 在 10 °C~35 °C 环境温度下, 模型预测偏差 ≤ 0.5 g/kg。

10.3.5 对同一均匀土壤样品进行连续 6 次测定, 通过计算测定结果的相对标准偏差 (RSD) 进行评价, 相对标准偏差 (RSD) $\leq 5\%$ 。

11 反演模型验证

11.1 模型训练结果调取

调取 10.2 模型训练得到的训练集 R^2 与 RMSE 指标, 作为模型验证的基础参考。

11.2 代入模型

用验证集代入模型, 计算验证集的 R^2 与 RMSE, 测试鲁棒性与稳定性。

11.3 模型应用决策

11.3.1 模型同时满足 10.3 所有性能指标阈值时，可用于实际检测。

11.3.2 若未满足 10.3 所有性能指标阈值，模型不应使用。应系统检查数据质量、优化预处理流程或调整模型参数后重新建模验证。

11.3.3 若经不少于 3 轮优化后仍无法达标，应终止使用当前数据集建模，并重新规划采样与建模样品集，否则重新优化模型，调整预处理方法或模型参数。

12 反演结果报告

以表格形式形成（见附录A），但不限于以下内容：

——样品信息：采样地点、土壤类型、采样日期等；

——仪器参数：光谱仪型号、波段范围、分辨率等；

——处理方法：样品预处理、光谱预处理及模型类型；

——反演结果：土壤有机碳含量（平均值±标准差）及模型评价指标（ R^2 、RMSE）。

13 档案管理

应建立样品采集、光谱采集与预处理、反演模型构建与验证等反演过程的电子和纸质档案，长期保存。



附 录 A
(资料性)
反演结果报告表

反演结果报告见表A. 1。

表A. 1 反演结果报告表

基本信息		
采样地点:	土壤类型:	样品数量 (个): 采样深度:
测试与建模配置		
仪器型号:	光谱预处理方法	<input type="checkbox"/> S-G 平滑 & 一阶导数 <input type="checkbox"/> SNV <input type="checkbox"/> MSC <input type="checkbox"/> 其他: _____
建模结果		
反演模型	<input type="checkbox"/> OPLS <input type="checkbox"/> RF <input type="checkbox"/> SVR <input type="checkbox"/> CNN 其他: _____	
样品编号	实测值 (g/kg)	反演值 (g/kg)
Sample-01		
Sample-02		
Sample-03		
...		
模型评价指标	决定系数 (R^2):	均方根误差 (RMSE):

中华人民共和国团体标准

森林土壤有机碳含量可见-近红外光谱反演技术规程

T/GXAS 1315—2026

广西标准化协会统一印制

版权专有 侵权必究