

团 体 标 准

T/CAGDRS XX—2026

基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机 质三维反演技术规程

Technical procedure for three-dimensional digital mapping of
organic matter in upland red soil based on UAV and proximal
hyperspectral sensing

征求意见稿

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施



中国农业绿色发展研究会 发布

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 2

5 技术流程图 2

6 数据获取和预处理 3

7 不同深度土壤有机质光谱反演 5

8 不同深度土壤有机质预测制图 6

9 三维空间表达 7

10 质量控制 8

附 录 A （资料性） 推荐特征变量及验证方法..... 9

附 录 B （资料性） 反演模型精度验证指标..... 10

参考文献 11

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。

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并组织实施。

本文件由本文件由中国农业绿色发展研究会归口。

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所，南京信息工程大学，江苏第二师范学院，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所。

本文件主要起草人：解宪丽，郑光辉，邱诺曦，李开丽，刘杰，陆苗，赵玉国，史泽峰，方乐雅。

引 言

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到6.2条与基于可见-短近红外光谱反射率的红壤有机质含量估算方法及设备相关的专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：解宪丽，邱诺曦，管浪，李安波，赵玉国，殷彪

地址：中国科学院南京土壤研究所，南京师范大学

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术规程

1 范围

本技术规程规定了基于无人机和地面高光谱进行旱地红壤有机质三维反演的技术流程、数据获取与预处理、不同深度土壤有机质光谱反演、不同深度土壤有机质预测制图、三维空间表达及质量控制等技术要求。

本文件适用于使用地面分辨率 $\leq 10\text{cm}$ 、光谱分辨率 $\leq 10\text{nm}$ 、光谱范围包含 $400\text{--}900\text{nm}$ 的无人机成像高光谱数据，和光谱分辨率 $\leq 10\text{nm}$ 、光谱范围包含 $400\text{ nm}\sim 900\text{ nm}$ 的近地高光谱数据，在田块尺度旱地红壤的有机质含量三维反演工作。

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 14950 摄影测量与遥感术语
- GB/T 23236 数字航空摄影测量 空中三角测量规范
- GB/T 36197 土壤质量 土壤采样技术指南
- CH/T 3006 数字航空摄影测量 控制测量规范
- NY/T 1121.6 土壤检测 第6部分：土壤有机质的测定
- NY/T 4151 农业遥感监测无人机影像预处理技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光谱分辨率 spectral resolution

光谱传感器能够分辨的最小波长间隔。

3.2

空间协变量 spatial covariate

用于解释土壤属性空间变异的环境变量，如遥感光谱变量和地形因子。

3.3

土壤有机质光谱反演 spectral inversion of soil organic matter

利用光谱信息及统计或机器学习模型估算土壤有机质含量的过程。

3.4

土壤有机质三维制图 three-dimensional mapping of soil organic matter

基于样点不同深度土壤有机质含量信息，通过空间建模方法获取土壤有机质三维空间分布的过程。

3.5

遥感 remote sensing

不接触物体本身，用传感器收集目标物的电磁波信息，经处理、分析后，识别目标物、揭示其几何、物理特征和相互关系及其变化规律的现代科学技术。

[来源：GB/T 14950—2009, 3.1]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DEM：数字高程模型（Digital Elevation Model）PLSR：偏最小二乘回归（Partial Least Squares Regression）

RF：随机森林（Random Forest）

RK：回归克里格（Regression Kriging）

RTK：实时动态测量（Real Time Kinematic）

SOM：土壤有机质（Soil Organic Matter）

SVM：支持向量机（Support Vector Machine）

5 技术流程图

基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术流程包括数据获取与预处理、不同深度土壤有机质光谱反演模型、不同深度土壤有机质预测制图、三维空间表达及质量控制，技术流程见图1。

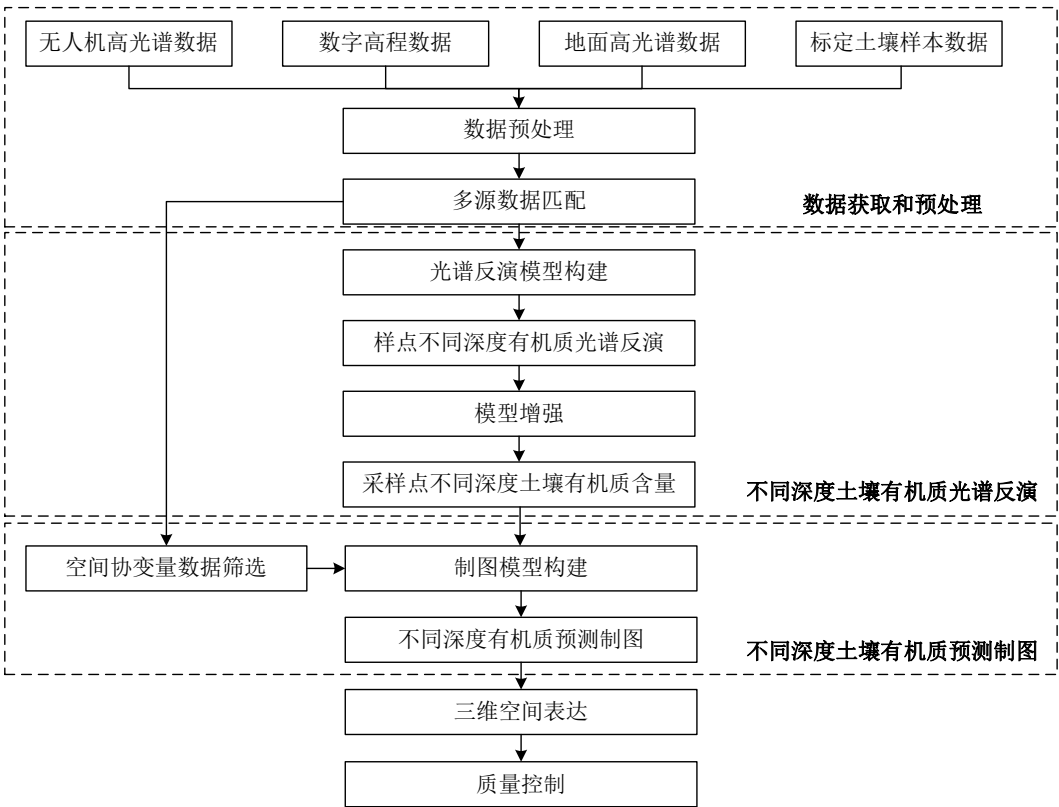


图1 基于无人机和地面高光谱的旱地红壤有机质三维反演技术流程图

6 数据获取和预处理

6.1 数据获取

6.1.1 无人机高光谱数据

用于提取土壤光谱信息和相关光谱指数,并作为空间预测模型的协变量,其传感器选择及数据获取、处理如下:

- a) 选择地面分辨率 ≤ 10 cm、光谱分辨率 ≤ 10 nm、光谱范围包含 400 nm~900 nm 的无人机高光谱传感器;
- b) 无人机高光谱影像的控制点布设、测量及质量控制,按 CH/T 3006 的规定执行;
- c) 按 NY/T 4151 规定的方法和步骤,获取无人机高光谱影像;
- d) 参考 NY/T 4151 辐射校正的具体方法,对无人机高光谱影像进行辐射校正,将原始数字量化值转换为地表反射率数据,校正时需包含黑帧(镜头盖关闭状态)和白帧(标准白板)的采集,以消除传感器噪声和光照影响;
- e) 参考 NY/T 4151 和 GB/T 23236 几何校正的步骤,利用地面控制点(通过 GPS/RTK)和多项式模型(如二次或三次多项式),结合 DEM 进行几何校正,消除因无人机姿态、地形起伏等引起的几何变形,确保影像空间位置与实际空间坐标一致;
- f) 将多幅无人机影像拼接成覆盖整个田块的完整影像,确保影像在同一坐标系下,空间分辨率和光谱分辨率一致,相邻条带间光谱差异小于 5%;
- g) 根据田块边界进行裁剪,去除冗余数据,保留有效区域。

6.1.2 数字高程数据

用于提取地形因子,并作为空间预测模型的协变量,数据获取及要求如下:

- a) 地形数据宜采用无人机 RTK 数据生成的数字高程模型(DEM)或其他高精度 DEM 数据,地面分辨率应 ≤ 10 cm;
- b) 基于 DEM 可计算的地形因子包括:坐标、高程、坡度、坡向、曲率、地形湿度指数等。

6.1.3 地面高光谱数据

6.1.3.1 地面高光谱数据用于建立土壤有机质光谱反演模型,可通过实验室测量或现场测量方式获取。

6.1.3.2 实验室光谱测量宜在暗室环境中进行,并符合以下要求:

- a) 选择光谱分辨率 ≤ 10 nm、光谱范围包含 400 nm~900 nm 的光纤光谱传感器,配备 1° ~ 25° 视场角探头,以及卤素灯、标准白板、测试软件和笔记本电脑;
- b) 测量前提前启动光谱仪,连接工作笔记本电脑,预热 0.5 小时以上;
- c) 测量在常温暗室环境进行,控制外部光源干扰;
- d) 使用卤素灯作为光源,根据光强需求调整灯与样品的距离及角度,确保光线均匀覆盖样品;
- e) 保持探头与样品表面垂直,根据探头视场角设置探头至样品表面距离,确保样品表面没有阴影、视场范围小于样品表面;
- f) 将处理好的土壤样品放置位于探头视场范围之内的培养皿(如直径 10cm、深度 2cm),表面刮平,湿态土样应捏碎并除去混杂的动植物残体等,风干土样应研磨过筛(2mm 以下);
- g) 传感器工作温度波动需控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内;
- h) 暗电流噪声占总信号的比例不超过 1%;

- i) 使用反射率 $\geq 95\%$ 的标准白板在与样本相同的光照条件下采集数据，归一化消除光照和传感器响应差异；
 - j) 测量前要消除暗电流并测定标准白板，测量中间隔 1 小时对光谱仪进行 1 次优化和白板校正；
 - k) 由于土样表面不均一会导致光谱各向异性，测量每件土样时需转动样品进行多次测试，每件样品至少测量 4 个方向，至少采集 20 条光谱曲线，算术平均后得到该土样的反射光谱数据。
- 6.1.3.3 现场光谱测量可采用接触式探头或近距离光谱传感器进行，并符合以下要求：
- a) 测量前应进行暗电流校正和标准白板校正；
 - b) 探头应保持与土壤表面垂直，并确保视场范围完全覆盖测量区域；
 - c) 测量时应尽量避免强烈直射光或阴影干扰；
 - d) 土壤样品可为田间自然状态土样或潮湿土样，测量前应去除明显的植物残体、石块等杂质；
 - e) 每个样本宜进行多次测量，并取平均值作为该样本的光谱反射率。

6.1.4 土壤样本数据

6.1.4.1 土壤样本数据采集应符合 GB/T 36197 的规定。

6.1.4.2 采样时间应在旱地红壤的轮作间隙或者大部分为裸土时期；

6.1.4.3 采样位置：

- a) 水平方向采样应保证样点均匀分布，反映田块的土壤空间变异特征；
- b) 垂直方向采样可分为剖面整段样本采集或离散分层样本采集，剖面整段标本采集需使用特殊采样工具，采集地下 1 m~1.2 m 的整段样本，不破坏土壤结构；剖面离散样本采集应分层采集，至少包括表层土、亚表层土和底层土，每个层次采集的土样应独立标记，记录每个采集深度的垂直距离（h）。

6.2 数据预处理

6.2.1 无人机高光谱数据

对无人机高光谱数据处理，遵循以下步骤：

- a) 根据采样区域土壤表面实际情况，必要时进行去除植被、阴影等无效像元处理；
- b) 根据噪声类型选择合适算法进行去噪，推荐使用滤波算法（如高斯滤波、小波滤波），提升数据质量；
- c) 可对光谱特征进行去铁处理，推荐使用的特征变量及验证方法参见附录 A（资料性）；
- d) 使用专业软件（如 ENVI、SpecAnalysis）提取土壤采样点附近一定范围内像元平均反射率作为表层样点反射率数据。

6.2.2 数字高程数据

对 DEM 数据进行重采样，使其地面分辨率与无人机获取的成像光谱数据相匹配。

6.2.3 地面高光谱数据

包括光谱除噪平滑、异常值剔除与光谱特征去铁处理：

- a) 推荐采用 Savitzky-Golay 滤波（窗口宽度建议 7~15 波段）或中值滤波（窗口宽度 ≤ 3 个波段）去除噪声，确保光谱特征峰完整性；
- b) 可对光谱特征进行去铁处理，推荐使用的特征变量及验证方法参见附录 A（资料性）。

6.2.4 标定土壤样本数据

按 NY/T 1121.6 的规定测定标定土壤样本有机质含量，处理要求如下：

- a) 按标准要求进行风干、研磨和过筛；
- b) 采用重铬酸钾氧化-外加热法，测定有机质含量，记录结果；
- c) 按比例划分为训练样本和验证样本，训练样本宜占 70%~80%，验证样本宜占 20%~30%，样本划分以采样点（或剖面）为单位进行，即同一采样点不同深度土层样本应同时划入训练样本或验证样本。

6.3 多源数据匹配

将无人机高光谱数据、DEM数据、地面土壤高光谱数据和土壤有机质数据进行空间匹配，基于采样点地理位置信息与无人机影像及DEM数据中的对应像元建立对应关系。

7 不同深度土壤有机质光谱反演

7.1 光谱反演模型构建

7.1.1 建模方式

以土壤样本实测有机质含量为因变量，以近地高光谱反射率或其衍生光谱特征变量为自变量，构建土壤有机质光谱反演模型。光谱反演模型可采用以下方式构建：

- a) 全局建模：将不同深度土层样本合并构建统一的光谱反演模型；
- b) 分层建模：当不同深度土层的光谱特征或土壤属性差异明显时，可分别构建不同深度土层的光谱反演模型。

7.1.2 建模算法

光谱反演模型可采用PLSR、SVM、RF等方法构建。在满足模型精度要求的前提下，也可采用其他适宜的统计或机器学习方法。

7.1.3 模型参数优化

模型参数宜通过交叉验证或网格搜索等方法进行优化，其中交叉验证可采用k折交叉验证（k=5或k=10）。

7.1.4 精度评价

7.1.4.1 当样本数量充足时，采用验证样本评价光谱反演模型精度。当样本数量较少时，建议采用留一交叉验证方法评价光谱反演模型精度。

7.1.4.2 评价指标包括决定系数（ R^2 ）、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）。计算方法参见附录 B（资料性）。

7.1.4.3 模型精度应结合 R^2 、RMSE 和 MAE 等指标综合评价，并满足应用需求。

7.1.4.4 当同一深度土层样本取值范围较窄时，模型评价不宜仅以 R^2 作为唯一判据，还应结合 RMSE、MAE 等指标综合评价模型性能。

7.1.4.5 当模型精度不满足应用要求时，可通过调整建模算法、优化模型参数或引入样本增强等方式进行改进。

7.2 样点不同深度有机质光谱反演

7.2.1 利用经验证的光谱反演模型对采样点不同深度土壤样本的有机质含量进行预测。不同深度土层宜按固定深度层进行预测，例如：0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm 等。

7.2.2 预测得到的采样点不同深度土壤有机质含量作为后续空间预测制图的基础数据。

7.3 模型增强

当目标深度土层样本数量不足、样本取值范围较窄或模型预测精度不理想时，宜采用样本增强方法提高模型稳定性和预测能力。

——样本加标：可从目标深度土层中选取少量具有代表性的样本加入光谱反演精度较高的建模样本集中（如表层样本集），对模型进行重新校准，以增强模型对目标深度土层样本特征的适应能力。

——样本迁移：当本地样本数量不足时，可引入外部土壤光谱库样本辅助建模。迁移样本的筛选宜综合考虑光谱相似性、环境条件相似性、土壤有机质含量范围一致性等因素，并通过本地验证样本评价模型性能。

8 不同深度土壤有机质预测制图

8.1 空间协变量数据与筛选

8.1.1 协变量数据

空间预测制图宜选取无人机高光谱影像和数字高程模型（DEM）衍生数据作为空间协变量。协变量可包括：无人机高光谱反射率；光谱指数；地形因子；空间坐标和深度信息等。常用地形因子包括高程、坡度、坡向、曲率和地形湿度指数等。

8.1.2 协变量筛选

协变量宜进行相关性分析或特征筛选，以减少变量冗余和共线性，提高模型稳定性。特征筛选方法可包括相关性分析、共线性检验、递归特征消除等。

8.2 制图模型训练样本

空间预测制图所使用的训练样本为采样点不同深度土层土壤有机质含量数据。该数据可包括实验室实测结果和第7章光谱反演预测结果，并应与对应位置的空间协变量进行匹配，用于构建空间预测模型。

8.3 制图模型构建

8.3.1 建模方式

制图模型可采用以下方式构建：

8.3.1.1 分层建模

以采样点各深度土层土壤有机质含量为因变量，以筛选后的空间协变量和空间坐标为自变量，分别构建各深度土层的空间预测模型。

8.3.1.2 全局建模

将所有深度土层样本合并，以土壤有机质含量为因变量，以筛选后的空间协变量、空间坐标及深度信息为自变量，构建统一的空间预测模型。

8.3.1.3 表层建模与深度函数参数建模

当采样点不同深度土层土壤有机质与深度关系可稳定拟合时，可采用表层建模与深度函数参数建模相结合的方式构建三维空间预测模型。具体步骤如下：

- a) 以采样点表层土壤有机质含量为因变量，以筛选后的空间协变量和空间坐标为自变量，构建表层土壤有机质预测模型；
- b) 对采样点不同深度土层土壤有机质含量与深度关系进行拟合，提取有机质深度函数参数；
- c) 以采样点的深度函数参数为因变量，以筛选后的空间协变量和空间坐标为自变量，构建深度函数参数预测模型；
- d) 结合表层土壤有机质预测值和深度函数参数，构建三维空间预测模型。

8.3.2 建模算法

空间预测模型与深度函数参数预测模型可采用RF、SVM、RK等方法。深度函数可采用指数函数、幂函数、等积样条函数等。在满足预测精度要求的前提下，也可采用其他适宜的预测方法或深度函数。

8.3.3 模型参数优化

模型参数宜通过交叉验证或网格搜索等方法进行优化，其中交叉验证可采用k折交叉验证（k=5或k=10）。

8.3.4 精度评价

8.3.4.1 空间预测模型精度宜通过交叉验证方法进行评价，常用方法包括k折交叉验证（k=5或k=10）或留一交叉验证。当样本数量较少时，宜采用留一交叉验证。

8.3.4.2 评价指标可包括决定系数（ R^2 ）、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）。计算方法参见附录B（资料性）。模型精度应结合 R^2 、RMSE和MAE等指标综合评价，并满足应用需求。

8.3.4.3 当模型精度不满足应用要求时，可通过调整建模算法、优化模型参数或改进协变量选择等方式进行改进。

8.3.4.4 当进行不同深度土层土壤有机质预测制图时，应分别对各深度土层的预测精度进行评价。

8.4 不同深度有机质预测制图

基于空间协变量，利用制图模型对研究区不同深度土壤有机质进行空间推测，生成不同深度土壤有机质分布图。不同深度土层宜分别进行预测制图，例如：0 cm~20 cm、20 cm~40 cm、40 cm~60 cm等。

9 三维空间表达

旱地红壤有机质三维结果表达方式主要包括：

- a) 采用三维可视化软件（如ArcScene、Surfer等）展示反演结果，直观呈现田块内SOM含量的三维空间变化；
- b) 绘制SOM含量等值线图和专题地图，展示不同深度SOM含量的水平分布特征，为农业生产管理提供决策依据。

10 质量控制

10.1 数据质量控制

数据质量要求包括：

- a) 定期检查无人机和近地高光谱设备的校准参数，确保辐射校正和几何校正的准确性；
- b) 对土壤样品进行平行样检测，相对偏差应 $\leq 5\%$ 。

10.2 模型质量控制

模型质量具体要求包括：

- a) 光谱反演模型应进行精度评价，评价方法见 7.1.4；
- b) 空间预测模型应进行精度评价，评价方法见 8.3.4；
- c) 模型训练过程中应避免过拟合（验证集 RMSE 与训练集差异 $\leq 10\%$ ），必要时可对模型预测结果进行不确定性评估，不确定性评估方法可包括 Bootstrap 重采样等方法。
- d) 定期对模型进行更新和改进，根据新采集的数据和研究区域土壤特性的变化，调整模型结构和参数，模型更新需记录版本号、更新原因、验证结果，并存档旧版本以备追溯。

10.3 结果质量控制

结果质量具体要求包括：

- a) 对反演结果进行质量检查，通过与实际调查数据对比、专家评估等方式，验证反演结果的合理性和准确性；
- b) 在结果表达过程中，空间分布图应检查是否存在明显异常值或不合理空间模式，保证图件和报告的规范性和准确性，对关键信息进行标注和说明（如坐标系、空间分辨率、数据来源等）。

附 录 A
(资料性)
推荐特征变量及验证方法

A.1 特征变量范围

基于案例的光谱数据及离散小波分解结果，推荐以下特征波段（单位：nm）：

小波细节系数第四层：545、577、586、607-609、616 - 620、625-631、634 - 640、642 - 647、652 - 656、665 - 667、684、685、690、691、692、700、701、703、704、709、711 - 715、722、733 - 736、742 - 747、755、764、771、778、788；

小波细节系数第五层：542、603、627、628、643 - 646、681 - 689、707 - 716、819；

小波细节系数第六层：626、627、697、824、870；

小波细节系数第七层：590 - 592、674 - 677、765、766、855、856；

小波细节系数第八层：646 - 648、822 - 824。

A.2 适用条件

本特征波段范围适用条件如下：

- a) 无人机飞行高度：500 m±50m；
- b) 无人机传感器波段范围：520-870nm；
- c) 算法参数：
 - ① 离散小波分解算法：MODWT；
 - ② 基函数：sym5；
 - ③ 分解层数：8层。

A.3 验证方法

若其他研究的波段范围或实验条件与本标准不同，建议通过以下步骤验证特征波段适用性：

- a) 计算目标波段与 SOM 含量的皮尔逊相关系数（ r ），要求 $r \geq 0.6$ ；
- b) 采用交叉验证（如留一法）评估模型预测精度，要求均方根误差（RMSE） $\leq 2\text{g/kg}$ 、平均绝对误差（MAE） $\leq 1.5\text{g/kg}$ ；
- c) 对比实测值与预测值的差异，要求绝对偏差 $\leq 30\%$ ；
- d) 若验证未通过，需重新优化模型参数或调整特征波段，并重复验证流程。

附 录 B
(资料性)
反演模型精度验证指标

B.1 决定系数 (R^2)

决定系数 (R^2) 按公式 B.1. 计算

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

式中:

y ——观测值;

\hat{y} ——预测值;

\bar{y} ——观测值平均值;

n ——验证集样本个数。

B.2 均方根误差 (RMSE)

均方根误差 (RMSE) 按公式 B.2. 计算

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

式中:

y ——观测值;

\hat{y} ——预测值;

n ——验证集样本个数。

B.3 平均绝对误差 (MAE)

平均绝对误差 (MAE) 按公式 B.3. 计算

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

y ——观测值;

\hat{y} ——预测值;

n ——验证集样本个数。

参 考 文 献

- [1] NY/T 3527—2019 农作物种植面积遥感监测规范[S].
 - [2] DB1301/T 501—2024 耕地表层土壤有机质含量遥感监测规程[S].
 - [3] DB50/T 1449—2023 茶园土壤有机质高光谱检测技术规程[S].
 - [4] 李庆逵, 熊毅. 中国土壤(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1–39.
 - [5] 解宪丽, 邱诺曦, 管浪, 李安波, 赵玉国, 殷彪. 一种去除游离铁影响的红壤有机质光谱反演方法及设备[p]. 专利号: ZL 2024 1 1749088.7. 申请日2024 年12月02日.
 - [6] McBratney A B, Mendonça Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2003, 117(1–2): 3–52.
 - [7] Viscarra Rossel R A, Adamchuk V I, Sudduth K A, McKenzie N J, Lobsey C. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time[J]. *Advances in Agronomy*, 2011, 113: 243–291.
 - [8] Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. Proximal Soil Sensing[M]. Dordrecht: Springer, 2010.
 - [9] Stenberg B, Viscarra Rossel R A, Mouazen A M, Wetterlind J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 107: 163–215.
 - [10] Wang J, Zhao X, Deuss K E, Cohen D R, Triantafilis J. Proximal and remote sensor data fusion for 3D imaging of infertile and acidic soil[J]. *Geoderma*, 2022, 424: 115972.
 - [11] Zhang Y, Ji W J, Saurette D D, Easher T H, Li H Y, Shi Z, Adamchuk V I, Biswas A. Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field scale using regression kriging[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114253.
 - [12] Zhang Y, Biswas A, Ji W, Adamchuk V I. Depth-specific prediction of soil properties in situ using vis–NIR spectroscopy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81: 993–1004.
 - [13] Zhao D, Arshad M, Wang J, Triantafilis J. Soil exchangeable cations estimation using Vis–NIR spectroscopy in different depths: Effects of multiple calibration models and spiking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 105990.
 - [14] Jiang Q, Li Q, Wang X, Wu Y, Yang X, Liu F. Estimation of soil organic carbon and total nitrogen in different soil layers using VNIR spectroscopy: Effects of spiking on model applicability[J]. *Geoderma*, 2017, 293: 54–63.
 - [15] Zhou Y, Biswas A, Hong Y, et al. Enhancing soil profile analysis with soil spectral libraries and laboratory hyperspectral imaging[J]. *Geoderma*, 2024, 450: 117036.
-