

DOI: 10.11766/trxb202511250565

CSTR: 32215.14.trxb202511250565

贾智慧, 罗方舟, 于东升, 胡文友, 张道宇, 姜军, 高张, 徐英德, 饶文波, 匡恩俊, 张久明. 基于探地雷达和变分模态分解法的黑土层厚度快速识别与空间预测研究[J]. 土壤学报, 2026,

JIA Zhihui, LUO Fangzhou, YU Dongsheng, HU Wenyu, ZHANG Daoyu, JIANG Jun, GAO Zhang, XU Yingde, RAO Wenbo, KUANG Enjun, ZHANG Jiuming. Rapid Identification and Spatial Prediction of the Black Soil Layer Thickness Based on GPR and VMD Integrated Methods[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

基于探地雷达和变分模态分解法的黑土层厚度快速识别与空间预测研究*

贾智慧^{1,2}, 罗方舟¹, 于东升^{1,3}, 胡文友^{1,3†}, 张道宇¹, 姜军^{1,3}, 高张^{1,3}, 徐英德⁴, 饶文波^{2†}, 匡恩俊⁵, 张久明⁵

(1. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 5. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 哈尔滨 150086)

摘要: 黑土层变薄是黑土地退化的主要问题之一, 准确识别其厚度及空间变化对黑土地保护与可持续利用意义重大。本研究融合探地雷达(Ground penetrating radar, GPR)与变分模态分解(Variational mode decomposition, VMD)技术, 构建黑土层厚度原位识别与空间预测方法。以黑龙江省嫩江市3个典型坡面(厚、中、薄层黑土)为研究对象, 采用700 MHz探地雷达沿坡面探测黑土层厚度, 结合土钻和剖面调查数据验证探地雷达的识别精度。采用VMD分解GPR信号, 通过频谱分析选取关键模态分量, 结合包络线分析精确识别黑土层厚度, 并基于稀疏采样(横向50:1, 纵向100:1)和自然邻域插值法预测坡面尺度黑土层厚度空间分布。结果显示, GPR-VMD方法有效分离噪声, 剖面尺度黑土层厚度探测均方根误差(RMSE)为2.03~6.86 cm; 田块尺度厚、中、薄层黑土平均均方根误差分别为6.26、4.30、3.73 cm, 综合全部验证样点, 该方法的总体探测均方根误差为6.08 cm, 总体预测误差控制在9.7%以内, 总体决定系数(R^2)达0.94; 坡面尺度黑土层厚度空间预测与实测数据显著相关, 可实现黑土层厚度高效、无损、连续探测; 空间分布图揭示了黑土层厚度与坡位、地形的关联, 展现了侵蚀作用导致的黑土层厚度梯度变化及空间分异规律。融合GPR与VMD方法实现了对东北典型黑土区黑土层厚度的高效、无损、高精度原位识别与空间预测, 可为揭示黑土层厚度时空变化及影响机制提供重要方法和技术支持。

关键词: 黑土层厚度; 探地雷达; 变分模态分解; 原位探测; 空间制图

中图分类号: S155.27

文献标志码: A

Rapid Identification and Spatial Prediction of the Black Soil Layer Thickness Based on

*国家重点研发计划项目(2024YFD1501102)、江苏省科技计划“一带一路”创新合作项目(BZ2023003)和中国科学院南京土壤研究所“十四五”自主部署项目(ISSAS2418)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2024YFD1501102), the Science and Technology Plan for the Belt and Road Innovation Cooperation Project of Jiangsu Province, China (No.BZ2023003), and the "14th Five-Year Plan" Self-deployment Project of the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No.ISSAS2418)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wyhu@issas.ac.cn, raowenbo@163.com

作者简介: 贾智慧(2001-), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事区域土壤质量调查与评价研究。E-mail: zhihjj@123.com

收稿日期: 2025-11-25; 收到修改稿日期: 2026-05-29; 网络首发日期(www.cnki.net):

GPR and VMD Integrated Methods

JIA Zhihui^{1,2}, LUO Fangzhou¹, YU Dongsheng^{1,3}, HU Wenyu^{1,3†}, ZHANG Daoyu¹, JIANG Jun^{1,3}, GAO Zhang^{1,3}, XU Yingde⁴, RAO Wenbo^{2†}, KUANG Enjun⁵, ZHANG Jiuming⁵

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 5. Heilongjiang Academy of Black Soil Protection and Utilization, Harbin 150086, China)

Abstract: **【Objective】** The thinning of the black soil layer is one of the primary issues in black soil degradation. Therefore, the accurate identification of its thickness and spatial variations holds significant importance for the protection and sustainable utilization of black soils. This study aimed to integrate Ground Penetrating Radar (GPR) and Variational Mode Decomposition (VMD) technologies to develop methods for in-situ identification and spatial prediction of black soil layer thickness. **【Method】** Three typical slope surfaces with thick, medium, and thin black soil layers in Nenjiang, Heilongjiang Province, were selected as the study sites. The 700 MHz GPR was used to detect the black soil layer thickness along the slope surfaces and validated the GPR identification accuracy using data from soil drilling and profile surveys. VMD was applied to decompose GPR signals, and key modal components were selected through spectrum analysis. Combined with envelope analysis, this approach enabled accurate identification of black soil layer thickness. Furthermore, sparse sampling (lateral ratio of 50:1 and longitudinal ratio of 100:1) and natural neighbor interpolation were applied to predict the spatial distribution of black soil layer thickness at the slope scale. **【Result】** The GPR-VMD method effectively separated noise from the signals, resulting in root mean square errors for black soil layer thickness detection at the profile scale ranging from 2.03 to 6.86 cm. The average root mean square errors for the thick, medium, and thin black soil layers were 6.26, 4.30, and 3.73 cm, respectively. Across all validation points, the overall detection root mean square error was approximately 6.08 cm, the overall prediction error was controlled within 9.7%, and the overall coefficient of determination (R^2) reached 0.94. At the slope scale, the spatial predictions of black soil layer thickness showed significant correlations with measured data ($R^2 > 0.87$), enabling efficient, non-destructive, and continuous detection of black soil layer thickness. The generated spatial distribution maps revealed associations between black soil layer thickness and factors such as slope position and terrain, illustrating gradient changes and spatial differentiation patterns induced by erosion processes. **【Conclusion】** The integration of GPR and VMD methods achieved efficient, non-destructive, and high-precision in-situ identification and spatial prediction of black soil layer thickness in typical black soil regions of Northeast China. This study provides important methodological and technical support for revealing the spatial-temporal variations and underlying mechanisms influencing black soil layer thickness.

Keywords: Black soil layer thickness; Ground penetrating radar; Variational mode decomposition; In-situ detection; Spatial mapping

东北黑土区是我国重要的商品粮基地和粮食战略保障基地^[1], 其耕地面积约占全国耕地的 1/4, 商品粮占全国的 1/3 以上, 对保障国家粮食安全至关重要^[2]。然而, 长期的高强度垦殖与土壤侵蚀等导致黑土层以每年约 0.4~0.5 cm 的速度下降, 部分地区厚度已由初垦期的 60~70 cm 锐减至 20~30 cm, 严重威胁黑土地的可持续利用和国家粮食安全^[3]。黑土层厚度是衡量土壤肥力与退化程度的关键指标, 实现其快速、精准、无损监测是黑土地退化诊断与阻控的关键。

传统黑土层厚度调查主要依赖剖面挖掘和土钻采样等破坏性方法, 不仅成本高、效率低, 难以实现区域大范围连续监测, 而且点状采样无法准确反映黑土层空间异质性, 频繁扰动还会加剧土壤退化^[4]。探地雷达 (Ground penetrating radar, GPR) 技术因其无损、快速、连续探测的显著优势^[5], 被认为是替代传统方法的理想选择。近年来, GPR 技术在黑土层厚度识别及坡面空间分布预测中也取得显著进展。Ratto 等^[6]通过线性预测技术, 利用 GPR 数据中的低维特征集指示土壤属性。Yang 等^[7]研究也表明高频 GPR 在浅层精细结构识别中的优势。罗方舟等^[8]进一步研究和探讨了 GPR 技术在黑土层厚度原位识别中的精度和适用性, 发现其对薄层 (<30 cm) 和中层 (30~60 cm) 黑土探测

精度较高,但对厚层(>60 cm)效果较差,且探测精度受多种因素影响。刘畅等^[9]利用 GPR 探测了黑土区不同坡型坡面的黑土层厚度,精确度达 87.05%~95.58%,并揭示了黑土厚度在坡面的空间变化特征。现有研究证实了 GPR 在黑土层厚度快速调查和空间预测方面的潜力,但也指出面临的严峻挑战。复杂田间环境(如介质异质性、浅层噪声)易导致回波信号信噪比低,尤其在黑土层与下伏母质层过渡界面相对平缓时,反射信号微弱模糊,受地形条件影响较大,且厚层黑土信号解译精度不足,难以稳定、高精度地提取黑土层的深层反射特征和精确厚度^[10]。因此,开发一种能够自适应降噪和增强信号特征的高效 GPR 信号解译技术,以突破现有 GPR 技术应用瓶颈,实现黑土层厚度的快速高精度无损探测。

为提升地球物理信号解析精度和去噪能力,新引入一种变分模态分解(Variational mode decomposition, VMD)数据处理方法。VMD 能够自适应将信号分解为一系列固有模态函数分量(Intrinsic mode function, IMF),有效分离噪声并提升信号分辨率。刘财等^[11]、阮伟民^[12]均利用 VMD 成功识别了地下介质分层信息。鉴于变分模态分解(VMD)法在信号去噪和特征增强方面的潜力,能否融合 GPR 与 VMD 技术实现黑土层厚度从样点(剖面)、线(测线)、面(田块)多尺度高精度快速识别,是急需研究解决的问题。本研究选取东北典型黑土区,进一步融合 700 MHz GPR 与 VMD 技术,基于 VMD 方法有效抑制复杂探地雷达数据的信号噪声和增强黑土层界面反射特征,通过优化信号处理,解决 GPR 信号解析精度不足的问题,建立基于 GPR-VMD 的多尺度黑土层厚度快速识别与空间预测方法,为黑土层厚度原位快速诊断与评价提供新的思路和技术手段。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于黑龙江省嫩江市,地处大小兴安岭与松嫩平原过渡带,在土壤类型、地形、高程等方面具有显著梯度特征与区域代表性^[13]。区域地势总体呈北高南低、东高西低,属寒温带大陆性季风气候,年平均气温较低,无霜期较短,雨热同季。多年平均降水量介于 480~512 mm,积温约 22°C~30°C^[14]。根据高程信息,区域内高程范围从 197 m 至 733 m 不等,反映了从低山丘陵到平原的多样性:北、东部低山丘陵区高程较高(约 733 m),以暗棕壤为主;中部丘陵漫岗及波状平原区高程介于 310.43 m 至 342.54 m,坡顶多为暗棕壤,岗坡下部发育为黑土和草甸土;嫩江及河流沿岸高程较低(约 273.24 m 至 396.5 m),分布有草甸土、沼泽土等。

在研究区选取 3 个分别为厚层(NJ01)、中层(NJ02)和薄层(NJ03)的典型黑土地耕地田块作为调查研究对象(图 1),坡度为 3°~5°,土壤类型分别为草甸黑土(NJ01)、白浆化黑土(NJ02)和暗棕壤(NJ03)(表 1)。其中,暗棕壤成土母质为坡积物,其余为黄土状母质。土壤 pH 范围为 4.73~6.16,呈酸性至微酸性特征;土壤侵蚀类型主要为水蚀。

表 1 研究区代表性坡面基本情况

Table 1 Basic information of representative slope surfaces in the study area

代表性坡面 Representative slope surface	经度 Longitude /°	纬度 Latitude /°	坡宽 Slope width /m	坡长 Slope length /m	黑土层厚度范围 Black soil thickness range /cm	平均黑土层厚度 Average black soil layer thickness /cm	土地利用 类型 Land use type
厚层黑土(NJ01) Thick-layer black soil (NJ01)	125°37'52"E	49°8'16" N	53	539	43~120	67.83	玉米
中层黑土(NJ02) Medium-layer black soil (NJ02)	125°27'22" E	49°16'59" N	70	643	25~100	44.41	大豆
薄层黑土(NJ03)	125°44'15" E	49°44'5" N	52	453	7~48	31.44	玉米

Thin-layer black soil (NJ03)

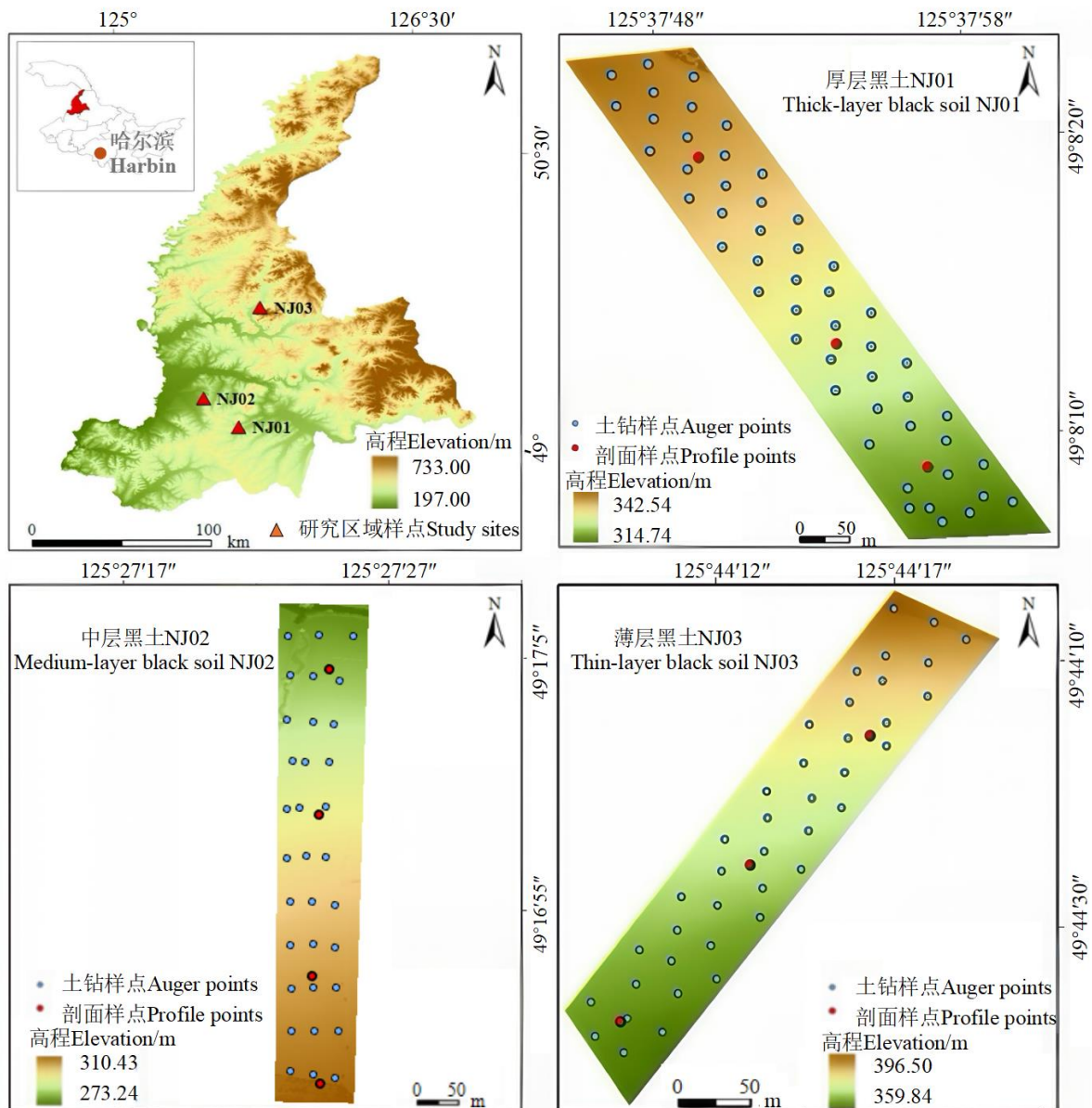


图 1 研究区域及黑土层厚度调查样点空间分布图（以彩图发表）

Fig. 1 Study area and spatial distribution of black soil layer thickness sampling points

1.2 野外调查与数据采集

2024 年 10 月在黑龙江省嫩江市开展野外调查和采样，综合采用传统剖面调查、土钻调查和探地雷达（GPR）调查协同网格化获取田块尺度的黑土层厚度数据。在选定的坡面上，自坡上至坡下均匀布设 3~4 个典型土壤剖面，人工挖掘后按自然发生层进行分层记录黑土层厚度^[15]，并按发生层分别采集土壤样品及环刀原状土样，用于实验室理化性质分析；同时利用 GPR 在剖面的正面边缘采集数据，便于验证。

按网格布设土钻采样点（图 2），使用 C 型土钻（长度 1 m，内径 5 cm）垂直打入地下，提取土芯后现场清理截面、划分黑土层并记录黑土层厚度^[16]。在各土钻点采集表层（0~20 cm）和亚表层（20~40 cm）环刀样本，采用烘干法测定土壤含水量（ θ ）及土壤容重（BD）。本研究野外调查最大深

度为 1 m^[17]。

在每个田块顺坡布设 3 条 400~600 m 长 GPR 纵向测线，间距约为 20 m；同时布设 3~4 条 50~60 m 长横向测线，相邻间距为 100~200 m；各条测线尽可能紧邻实际调查样点，便于检验 GPR 探测黑土层厚度（图 2）。采用欧美大地公司 U-Explorer 探地雷达，配备 700 MHz 高频天线，通过剖面法（Fixed Offset, FO）沿坡面进行数据采集^[18]。数据采集前进行地面整平，以降低地形起伏对地耦式天线探测及黑土层厚度计算的影响。根据实地探测情况和预估最大厚度，将探测时窗设定为 60 ns，采样点数设为 600 点，平衡探测效率和精度；采用时变增益（增益控制点为 6）来补偿电磁波在深部传播时的能量衰减，并使用固定的偏移量 26，以便准确获取空气波，进行精确的深度换算^[19]。

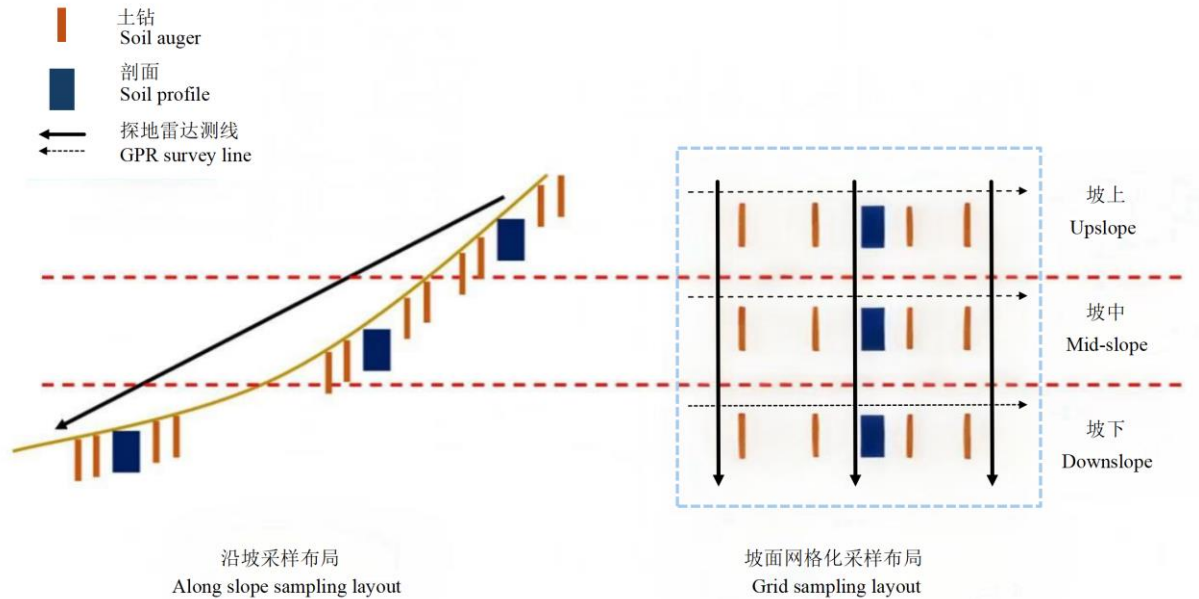


图 2 坡面尺度 GPR 测线与验证点位置示意图

Fig. 2 Location of GPR survey lines and verification points in the selected slope surfaces

1.3 探地雷达数据预处理

原始 GPR 数据经基础滤波和地形校正后，再进行深度换算和信号增强处理。首先，通过介电常数将双程旅时转换为深度，计算土层界面位置和黑土层厚度。介电常数 (ϵ) 反映介质对电磁场的响应能力，其值介于空气的 1 至水的 80 之间，影响电磁波在介质中的传播速度^[20]。电磁波在介电特性突变的界面反射，其双程走时由系统记录，深度 (H , m) 计算公式为：

$$\epsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (1)$$

将式 (1) 转化可得到式 (2)：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

计算电磁波双程旅时，深度 (H , m) 计算公式如式 (3) 所示：

$$H = \frac{1}{2}vt \quad (3)$$

式中， ϵ 为介电常数， c 为光速 ($3.00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)， v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为电磁波在介质中传播的速度。

介电常数实测标定采用实验室测定的土壤含水量与容重数据，基于 Topp 经验公式^[21]：

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (4)$$

算出 3 个厚、中、薄层黑土坡面介电常数分别为 18.5、18.68、20，雷达波速统一为 $0.0671 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ，针对纵向测线，后期数据处理按每 100 道抽取 1 道（约 $1 \text{ m} \cdot \text{trace}^{-1}$ ），而横向测线每 50 道抽取 1 道（约 $0.5 \text{ m} \cdot \text{trace}^{-1}$ ），以此平衡数据量与空间分辨率需求。原始雷达数据使用 GPRSoftPro 软件进行预处理后，使用 Matlab 进行后续的数据处理^[22]。

1.4 变分模态分解（VMD）法的分解过程

探地雷达（GPR）采集的原始信号经 Matlab 预处理后，直接输入 VMD 算法进行模态分离^[23]。该信号特征包括：浅层高频噪声干扰（频率 > 50 MHz，主要源于地表起伏和根系残留）、中频有效反射成分（频率约 20~40 MHz，对应黑土层与母质界面介电特性渐变，导致反射信号微弱模糊）和深层低频衰减（频率 < 10 MHz，受土壤含水量 θ 和容重 BD 影响，能量衰减显著）。VMD 的目标是通过自适应分解，将这些多成分 GPR 信号分离为有限带宽的固有模态函数（IMF），以抑制噪声、增强黑土层界面反射特征，从而提升厚度识别精度。具体到剖面尺度黑土层厚度原位识别，我们通过 VMD 分解确定各模态函数分量（Intrinsic mode function, IMF），并基于频谱分析识别与黑土层与母质界面相关的关键模态分量（如中心频率接近频谱转折点的 IMF），随后将关键模态分量组合为优化信号并进行包络处理，依据包络幅值出现极值的位置判断黑土层界面深度，实现高精度原位识别。

在实际处理中，我们首先将预处理后的 GPR 单道信号（例如，中层黑土剖面 NJ02-1 的第 10 道迹，包含显著频率峰值在 26.88 MHz 附近）作为输入信号 $f(t)$ ，假设多成分信号由 K 个有限带宽的模态分量组成 $v_k(t)$ （ $k=1,2,\dots,K$ ；在本研究中，基于频谱分析预设 $K=6$ ，以覆盖 GPR 信号的典型频率分布），每个 IMF 的中心频率为 ω_k ，约束条件是模态和等于输入信号，具体构造步骤^[24]如下：

- ① 通过希尔伯特变换得到 $v_k(t)$ 的分析信号，结合 $e^{-j\omega_k t}$ 调整至基带：

$$((\delta(t) + \frac{j}{\pi t} * v_k(t))e^{-j\omega_k t} \quad (5)$$

式中， $\delta(t)$ 为狄拉克脉冲函数； $*$ 表示卷积； j 为虚数单位； ω_k 为角频率； e 为自然指数；

- ② 计算解调梯度的平方范数 L^2 ，估计带宽，约束变分问题为：

$$\begin{cases} \min_{\{v_k\}, \{\omega_k\}} \{ \sum_k \|\partial_t ((\delta(t) + \frac{j}{\pi t} * v_k(t))e^{-j\omega_k t})\|^2 \} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k v_k = s \end{cases} \quad (6)$$

式中， v_k 代表分解后的 IMF 组件， ω_k 代表各组成部分的中心频率； s 为原信号；

- ③ 引入拉格朗日乘子 $\tau(t)$ 和二阶惩罚因子 a ，转化为无约束变分问题，扩展拉格朗日表达式：

$$L(\{v_k\}, \{\omega_k\}, \tau) := a \sum_k \left\| \partial_t \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} * v_k(t) \right) e^{-j\omega_k t} \right\|^2 + \|s(t) - \sum_k v_k(t)\|^2 + \langle \tau(t), s(t) - \sum_k v_k(t) \rangle \quad (7)$$

- ④ 利用交替方向乘子法 (ADMM) 更新分量和中心频率，频域更新公式为：

$$\hat{v}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{s}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{v}_i(\omega) + \hat{\tau}(\omega)/2}{1 + 2a(\omega - \omega_k)^2} \quad (8)$$

$\hat{v}_k^{n+1}(\omega)$ 为 $\hat{s}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{v}_i(\omega)$ 经过维纳滤波后的剩余量，算法根据各分量的功率谱重心重新估计重心频率，具体步骤如下：

- $\{\hat{v}_k^1\}, \{\hat{\omega}_k^1\}, \{\hat{\tau}_k^1\}$ 和 n ;
- 周期: $n = n + 1$;
- $\omega > 0$ 时，根据 (8) 更新 v_k ;
- 据 (9) 更新 ω_k ;

$$\hat{\omega}_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{p}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{p}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (9)$$

e) 根据式 (10) 更新 $\hat{t}$;

$$\hat{t}_k^{n+1}(\omega) = \hat{t}_k^n(\omega) + \gamma(\hat{s}(\omega) - \sum_k \hat{p}_k^{k+1}(\omega)) \quad (10)$$

⑤ 迭代至停止条件, 停止条件如式 (11) 所示;

$$\frac{\sum_k \|\hat{p}_k^{n+1} - \hat{p}_k^n\|_2^2}{\|\hat{p}_k^n\|_2^2} < \varepsilon \quad (11)$$

设置迭代次数 $N=1000$, 时间步长 $\tau=0.24$, 收敛容差为 1×10^{-6} 。

1.5 黑土层厚度空间预测和制图方法

为实现黑土层厚度的坡面尺度连续预测, 本研究以 GPR-VMD 方法从点 (剖面) 和线 (测线) 尺度获取的黑土层厚度数据作为输入。具体而言, 剖面数据提供局部验证点 (例如, 3~4 个典型土壤剖面的黑土层厚度), 测线数据则通过稀疏采样转换为散点数据集 (每个点包含空间坐标 X : 坡长, m ; Y : 坡宽, m ; 以及对应 Z : 黑土层厚度, cm)。这些点数据覆盖坡面上的关键位置, 将点和线数据统一整合为二维散点数据集 (总点数约数百至数千, 视坡面长度 400~600 m 而定), 作为空间插值的输入变量, 从而从离散点/线扩展到连续面预测^[25]。

数据处理流程如下: 首先, 对采集的散点数据 (X, Y, Z) 进行预处理, 包括数据清洗 (去除重复或无效点) 和异常值剔除 (例如, 使用 Z -分数方法剔除偏离均值 3 倍标准差以上的点), 确保数据质量。其次, 将坡长 (X) 和坡宽 (Y) 坐标范围分别划分为均匀网格 (分辨率 $0.5 m \times 0.5 m$, 以匹配 GPR 采样精度并捕捉细微空间变异), 利用 Matlab 的 `meshgrid` 函数生成网格点矩阵, 作为待插值位置。空间插值采用自然邻域插值方法 (基于 Matlab 的 `griddata` 函数, 指定 'natural' 选项)^[26], 其目的是通过构建 Voronoi 图并计算邻近样本的面积权重, 对非规则分布的散点数据进行内插, 生成连续的黑土层厚度表面。该方法有效反映坡面黑土层厚度的空间异质性和局部细节特征 (如坡位梯度变化), 适用于侵蚀诱发的非均匀分布。为处理网格边缘区域 (数据稀疏处可能出现内插空值), 采用最近邻法作为外推策略^[27], 在 Matlab 中通过 'nearest' 选项辅助实现, 即将边缘网格点赋值为最近采样点的厚度值, 从而避免无效值并确保坡面全覆盖。通过插值函数计算各网格点的黑土层厚度预测值^[28], 最终得到高分辨率的空间分布栅格。

为提升预测结果的平滑性和稳健性, 对插值栅格进行高斯滤波后处理 (使用 Matlab 的 `imgaussfilt` 函数, 标准差 $\sigma=2$, 单位: 网格单元)。高斯滤波通过二维高斯核实现邻域加权平均, 在保留主体空间变异特征 (如厚度梯度) 的前提下, 有效抑制随机噪声和残留异常值的影响^[29]。为客观评价预测精度, 采用 10 折交叉验证法, 以均方根误差 (RMSE) 作为指标, 验证模型在点、线到面的扩展可靠性。

2 结果

2.1 剖面尺度黑土层厚度原位识别

对探地雷达原信号进行地面校正和滤波等预处理后, 采用快速傅里叶变换 (FFT) 获取信号频谱 (图 3a), 以中层黑土剖面 1 (NJ02-1) 道数 10 为例, 发现该剖面信号在 26.88 MHz 附近出现显著频率峰值, 表明此处存在明显的频率转折特征 (图 3b)。采用变分模态分解法 (VMD) 对信号进行分解 (图 3c), 得到 6 个固有模态函数分量 (IMF)。其中, IMF3 分量的中心频率最接近频谱转折频率, 表明该模态可能包含了与黑土层厚度密切相关的有效信息。IMF1 为低频分量, 振幅变化范围较小, 主要反映土层整体趋势, 难以用于黑土层界面的精确定位。IMF3 在 20~30 cm 深度范围内振幅变化显著, 与实测黑土层厚度 25 cm 高度吻合, 认为该分量为识别黑土与母质界面的关键模态。IMF4、

IMF5 和 IMF6 则表现出明显的高频振荡特征, 振幅较小且波动剧烈, 属于噪声或浅层干扰成分, 对黑土层厚度识别贡献有限^[30]。

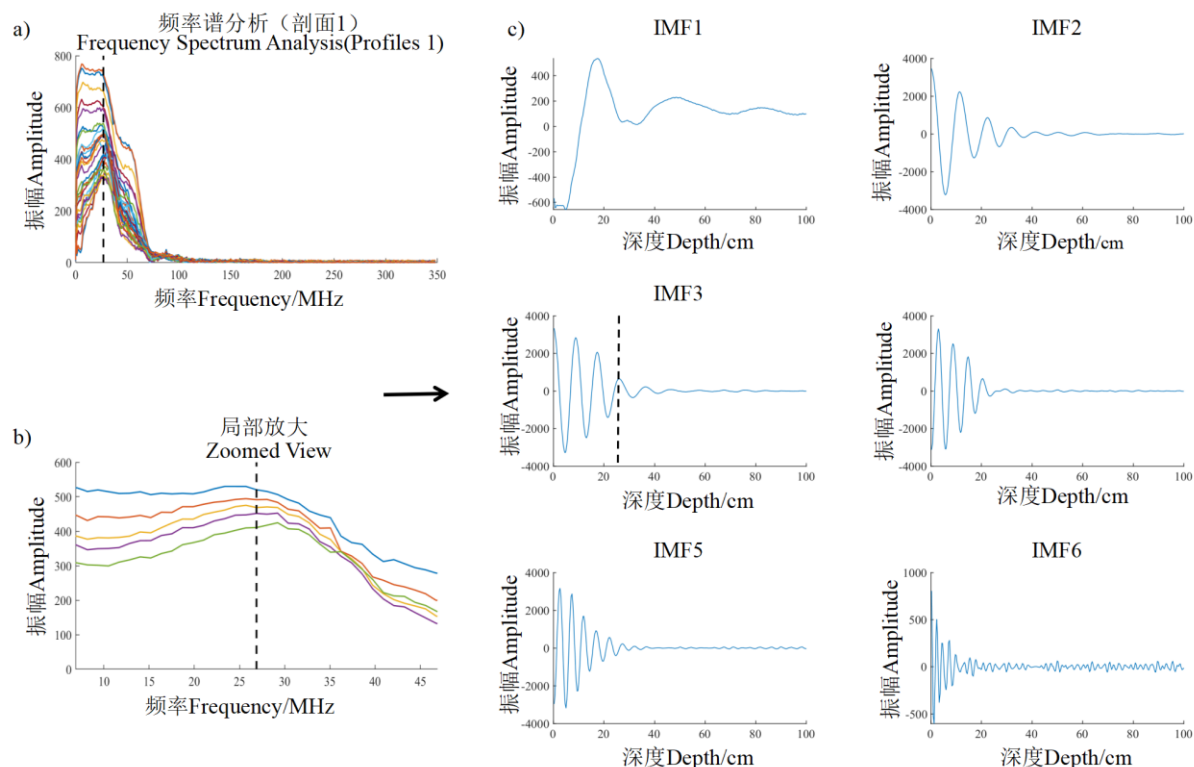


图3 土壤剖面单道频谱图(a,b)和VMD模态分解图(c) (以坡面NJ02剖面1为例)

Fig. 3 Single-trace spectrum (a, b) and VMD decomposition (c) of the soil profile (Using Profile 1 on Slope surface NJ02 as an example)

将 IMF1–IMF3 组合为优化信号并进行包络处理, 结果显示在 25 cm 深处包络幅值出现极值, 与 VMD 灰度图及剖面实际厚度一致 (图 4)。将剖面整体分解信号与实际黑土层厚度进行对比, 中层黑土剖面 1 (NJ02-1) 所有测道的均方根误差 (RMSE) 为 5.12 cm, 表明 VMD 结合振幅包络分析法在黑土层厚度识别中具有较高准确性。将本方法应用至全部 10 个剖面, 厚、中、薄层黑土代表性剖面的平均均方根误差 (RMSE) 分别为 6.26、4.30 和 3.73 cm, 识别精度总体较高 (表 2)。

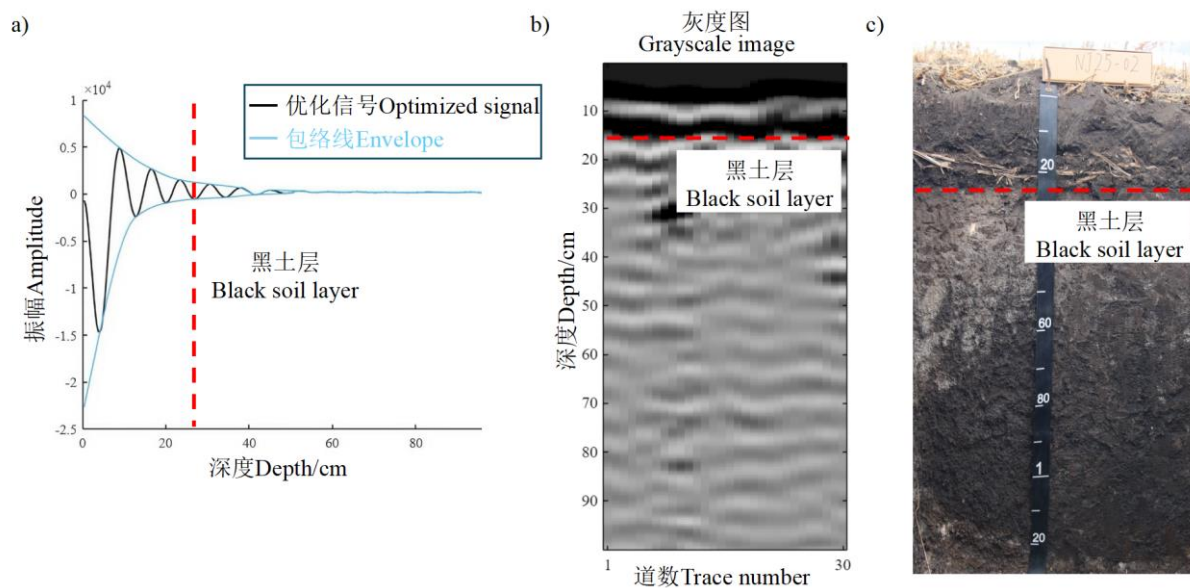


图 4 VMD 优化信号包络线图(a)、灰度图(b)和土壤剖面图(c) (以坡面 NJ02 剖面 1 为例) (以彩图发表)

Fig. 4 VMD optimized signal envelope (a), grayscale image (b), and soil profile (c) (Using Profile 1 on Slope surface NJ02 as an example)

从 GPR 对黑土层厚度的识别精度来看,不同黑土厚度的识别效果存在差异。薄层黑土 (NJ03) 平均 RMSE 最低,识别效果最佳,值得注意的是,中坡剖面 (NJ03-2) 表现出极高的识别精度 (RMSE 为 2.03 cm, 相对误差为 0.45%)。该点位预测值与实测值高度吻合,可能得益于其属于薄层,雷达波传播路径短、能量衰减较小,且介质相对均一,从而形成了清晰的反射界面,这在一定程度上代表了本研究方法在最佳场景下的探测潜力;中层黑土 (NJ02) 识别精度次之,其厚度变异性较大,部分剖面因坡度较大导致雷达波散射增强,对识别精度产生一定影响;厚层黑土 (NJ01) 识别误差相对较高,可能由于电磁波在较厚土层中传播时衰减显著,深层信号较弱,加之黑土与母质界面为渐变特征,导致界面识别不确定性增大,仍需结合多频率天线数据与地层先验信息进行联合反演,以提升探测精度与稳定性。综上,在点位 (剖面) 尺度上, GPR-VMD 方法对黑土层厚度的预测结果与实地测量结果表现出高度一致性。从全部 10 个代表性剖面调查样点的验证结果来看,该方法的测定均方根误差 (RMSE) 范围严格控制在 2.03 cm~6.86 cm 之间。这一明确的误差范围界定了 GPR-VMD 技术在单点原位探测条件下的基础测定精度,充分证实了该方法在不同厚度的黑土层条件下均具备可靠的高精度识别能力,为后续田块及坡面尺度的空间预测奠定了可靠的数据基础。

表 2 代表性土壤剖面的黑土层厚度识别结果

Table 2 Identification results of black soil layer thickness in representative soil profiles

代表性坡面 Representative slope surface	剖面调查坡位 Profile survey slope position	预测黑土层厚度 Predicted black soil layer thickness/cm	实测黑土层厚度 Measured black soil layer thickness/cm	均方根误差 RMSE/cm
厚层黑土 Thick-layer black soil (NJ01)	上坡 (NJ01-1)	62.30	68	5.71
	中坡 (NJ01-2)	55.86	62	6.21
	下坡 (NJ01-3)	63.32	70	6.86
中层黑土 Medium-layer black soil (NJ02)	上坡 (NJ02-1)	28.31	25	5.12
	中上坡 (NJ02-2)	19.68	22	4.66
	中下坡 (NJ02-3)	27.56	28	4.60
	下坡 (NJ02-4)	48.14	50	2.80
薄层黑土	上坡 (NJ03-1)	29.60	27	3.81

Thin-layer black soil (NJ03)	中坡 (NJ03-2)	22.10	22	2.03
	下坡 (NJ03-3)	24.50	22	5.35

2.2 田块尺度黑土层厚度快速识别与精度验证

基于剖面的 VMD 应用和验证结果对田块尺度下的探地雷达信号进行处理, 分析 3 个典型耕地坡面的横向和纵向测线数据。通过希尔伯特变换提取雷达信号包络线, 根据包络极值位置识别黑土层分界面深度。横向测线数据显示, 黑土层厚度变化呈现一定的空间相关性, 可能与地表沉积过程密切相关, 而纵向测线进一步揭示了黑土层厚度变化与地下水位或土壤结构差异的潜在关联。将 VMD 预测黑土层厚度与土钻实测的黑土层厚度进行对比, 精度验证结果表明 (图 5), VMD 方法连续探测黑土层厚度仍保持着较高的识别精度; 坡面整体的 GPR 探测精度优于剖面, 表明该方法具备良好的适用性与稳定性。值得注意的是, 回归模型存在一定系统性偏差: 厚层黑土和中层黑土田块预测值总体偏低 (截距分别为 -1.70 cm 和 -4.43 cm), 而薄层黑土田块预测值系统性偏高 (截距为 9.99 cm), 该偏差可能与地表地形微起伏、土壤介电特性空间变异及测量过程中人为误差等因素有关。

不同黑土层厚度坡面的 GPR 探测精度存在明显差异^[31], 为了更客观地衡量探测精度, 本研究结合各田块平均绝对误差 (MAE) 与实测平均厚度, 进一步计算了预测误差的百分数 (即平均相对误差)。统计结果表明: 薄层黑土田块识别精度最高 (RMSE 为 3.60 cm, MAE 为 2.90 cm), 预测误差百分数约为 9.2%, 主要由于该田块黑土层较薄, 界面清晰, 雷达波衰减较小, 信号分辨率高; 中层黑土田块精度较高 ($R^2=0.92$), 但绝对误差最大 (RMSE 为 7.59 cm, MAE 为 6.20 cm), 预测误差百分数最高 (约 14.0%), 其厚度变异性大且田块内存在明显坡度变化, 导致雷达波传播路径更为复杂化, 增加了界面识别的不确定性; 厚层黑土田块的绝对误差居中 (RMSE 为 5.80 cm, MAE 为 5.09 cm), 电磁波衰减虽导致深部信号略微减弱, 但得益于黑土层自身厚度较大, 其预测误差百分数最低, 仅约为 7.5%。

综合以上分析明确了 GPR-VMD 方法从绝对误差指标来看最适合于薄层黑土 (厚度 < 40 cm) 的快速无损探测。在薄层条件下, 其界面分辨率极高, 绝对误差最小, 能够精准捕捉微小的厚度变化, 这对于预警黑土地严重退化及侵蚀临界点具有极高的应用价值。同时, 在厚层黑土探测中, 该方法表现出最低的预测误差百分数, 说明其在大厚度均质土壤中同样具备高度的宏观评估可靠性。此外, 将所有厚、中、薄层黑土田块的全部验证样点进行汇总, 结果表明, 全部样点预测厚度与实测厚度整体高度相关 (总体 $R^2 = 0.94$), 总体均方根误差 (RMSE) 为 6.08 cm, 平均绝对误差 (MAE) 为 4.90 cm (图 5d), 总体预测误差百分数约为 9.7%。该综合结果进一步验证了 GPR-VMD 方法在应对包含不同厚度梯度的整体复杂环境时, 依然具有稳健且极高精度的综合识别能力。

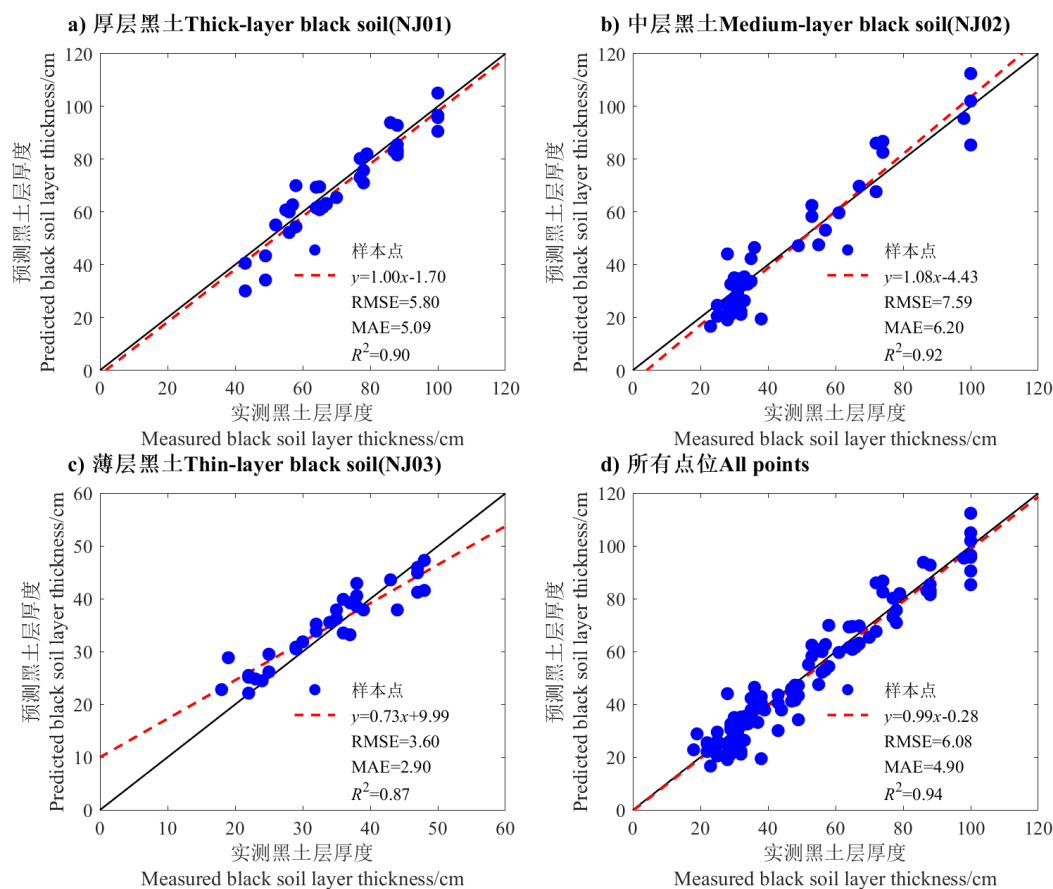


图 5 田块尺度黑土层厚度预测值与实测值散点图

Fig. 5 Scatter plots of predicted versus measured black soil layer thickness at the field scale

2.3 坡面尺度黑土厚度快速识别与空间预测

基于点（剖面）尺度和线（测线）尺度的 GPR-VMD 方法探测结果，利用散点插值方法（自然邻域结合最近邻外推）和高斯平滑生成典型坡耕地黑土层厚度空间分布图（图 6）。图 6 结合三维表面图和二维热力图展示了黑土层厚度在不同代表性坡面的空间分布情况。厚层黑土坡面（图 6a）黑土层厚度整体较大，分布于 50~100 cm 之间，坡中和坡下区域黑土层厚度显著高于坡上，呈现“坡下厚、坡上薄”的格局，说明在相对平缓的地形与良好的排水条件下黑土层发育较充分；中层黑土坡面（图 6b）厚度分布差异明显，整体范围为 40~90 cm，由坡上向坡下逐渐增厚，厚度梯度清晰，反映出典型的水力侵蚀-沉积重分布效应，即坡上土壤被剥蚀、坡下沉积加厚；薄层黑土坡面（图 6c）黑土层厚度较小，主要集中在 20~50 cm 之间，整体变化平缓、厚度相对均匀，空间异质性最低，说明该区域土体发育程度有限、母质均质且长期受耕作扰动较弱。总体上，厚层黑土区厚度分布均一、剖面形态平缓；中层黑土表现出显著的坡向梯度；薄层黑土则厚度稳定但整体偏薄，表征了不同坡面黑土层发育与侵蚀沉积过程的空间响应特征。

在黑土厚度空间预测精度方面，基于 GPR-VMD 融合方法的空间预测值与土钻实测值交叉验证具有较高一致性（ $R^2 > 0.87$ ），表明插值模型有效捕捉了坡面厚度变异。空间插值采用 0.5 m × 0.5 m 网格分辨率，能够清晰识别出田块内部黑土厚度的细微变化，满足坡面尺度制图需求。

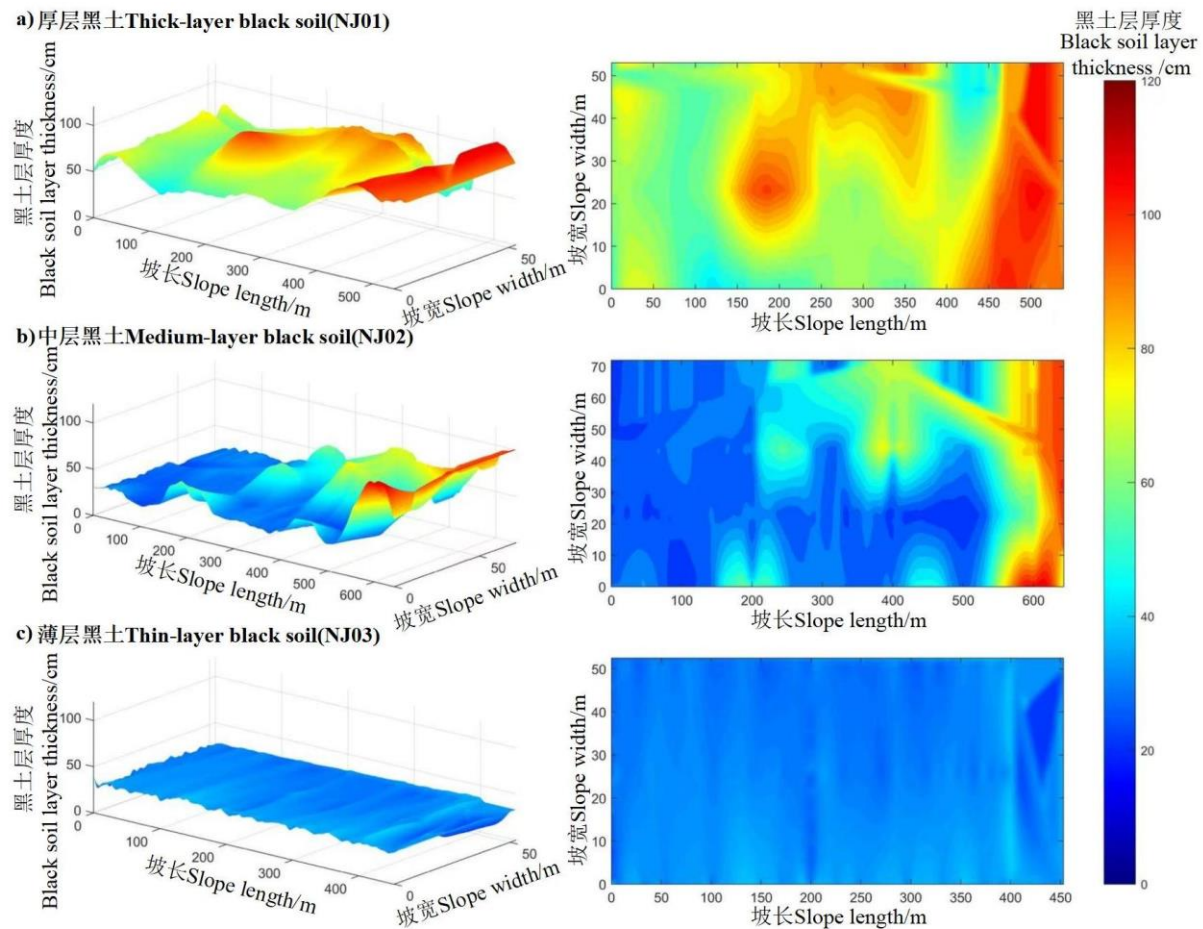


图 6 典型坡面黑土层厚度空间预测图 (以彩图发表)

Fig. 6 Spatial prediction maps of black soil layer thickness on typical slope surfaces

3 讨论

3.1 GPR-VMD 方法快速识别黑土层厚度的影响因素

GPR 电磁波的传播速度和能量衰减, 直接受土壤介电常数影响, 介电常数与土壤的含水量、容重和有机质含量等理化性质密切相关, 这些因素共同决定了黑土层厚度识别的准确性^[32-33]。土壤含水量是影响探测精度的首要因素。水具有很高的介电常数 (约为 81), 其含量微小的变化都会显著改变土壤的整体介电常数, 从而影响电磁波的传播速度并影响其能量衰减^[34]。从表 2 和表 3 的数据来看, 含水量与均方根误差 (RMSE) 呈现一定的正相关趋势 ($r \approx 0.63$, $P \approx 0.05$, 弱相关), 含水量均值较高的剖面 (如厚层黑土 NJ01-3 和 中层黑土 NJ02-3) 的识别误差也相对较高; 而含水量均值较低的剖面 (如薄层黑土 NJ03-1 和 NJ03-2) 的识别误差则较低。这表明较高的含水量导致电磁波在传播过程中能量显著衰减, 深层信号变弱, 最终导致识别误差增大。土壤容重和有机质含量是形成黑土层与下伏母质层之间界面介电性差异的关键理化指标, 容重与识别误差之间呈负相关关系 ($r \approx -0.64$, $P < 0.05$, 显著), 但更重要的是容重在黑土层与下伏母质层之间的突变差异。例如, 虽然中层黑土 NJ02-3 的土壤容重较高 ($1.407 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 但如果黑土层容重偏高导致与下伏母质没有明显区别, 则 GPR 难以获得清晰反射界面, 误差相对较高 (4.60 cm)。相反, 薄层黑土 NJ03-2 的容重虽高 (1.514

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),但其下伏母质层的容重更高,这种显著差异为 GPR 信号提供了清晰的反射界面,最终使得识别精度最高 (RMSE 为 2.03 cm)。有机质本身具有较低的介电常数,其含量与识别误差也呈现一定的负相关趋势 ($r\approx-0.41$, $P>0.05$, 未显著),在薄层黑土中带来的高介电对比度,有利于界面识别。例如,薄层黑土 NJ03-1 和 NJ03-2 的平均有机质含量最高 (分别为 $84.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $85.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),对应误差较低 (3.81 cm 和 2.03 cm)。而在厚层黑土中,尽管有机质含量也很高 (如 NJ01-1 为 $61.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),但由于电磁波在较厚土层中的传播路径更长,能量衰减加剧,有机质带来的积极作用可能被削弱,导致其探测精度降低 (RMSE 为 5.71 cm)。

本研究探究了这些关键环境因子对 GPR-VMD 探测精度的影响,并揭示了方法存在的潜在不确定性。在这些因子中,土壤含水量从空间和时间尺度上对实际探测的制约尤为突出。正如刘可欣^[35]在探地雷达探测土壤水分机理研究中所指出的,含水量的升高会显著提升介电常数,导致雷达波速降低并加速能量衰减,这证实了高含水量区域容易导致黑土层厚度低估的系统性偏差。结合表 3 实测理化性质可知,本研究区位于具有一定坡度的耕地,各坡面的土壤含水量相对较低且变异较小 (介于 0.222~0.283 之间),有效规避了地下水分布不均带来的强干扰。然而,若将该方法扩展至地下水位较高或地势低洼的平原地区,土壤趋于水分饱和将导致介电常数骤增,不仅极大限制探测深度,且地下水位的高空间异质性会改变波速,进而严重影响反演精度。同时,针对东北地区不同季节探测适用性的探讨,邹文秀等^[36]和陈学文等^[37]的长期观测研究表明,受冻融循环及季风气候影响,黑土垂直方向的水分和理化结构存在极大的季节性动态变异。具体表现在实际探测中:春季融雪期或夏季集中雨季,表层土壤极度湿润会强烈屏蔽深层雷达信号;此外,借鉴史浩言^[38]关于冻土区探地雷达监测的最新结论可知,冬季土壤大范围深层冻结会导致介电特性发生根本性改变。因此,运用 GPR 探测必须选择在土壤墒情适中且垂直水分分布稳定的时间窗口 (如本研究选取的 10 月份秋收后)进行。为了克服不同地形和季节水分条件带来的限制,在实际应用中,需对土壤含水量进行同步监测,依据刘可欣^[35]提出的结合先进的反演算法建立动态的介电模型校正机制,以提高不同水分条件下厚度反演的准确性。此外,有机质含量和容重对探测精度的影响更为复杂,且存在空间异质性:在薄层黑土中,高有机质含量和显著的容重差异会增强黑土层与母质层的介电性差异,从而有利于界面识别;而在厚层黑土中,信号在更长的传播路径中衰减加剧,其正面效应可能被削弱。这种复杂机制表明,单一的 GPR-VMD 模型可能无法适用于所有黑土类型,未来应将这些土壤属性作为辅助变量,构建更具普适性的厚度预测模型,并在数据处理中进行动态校正,以进一步提高方法的准确性和适用性。同时,本研究在介电常数计算上存在局限性^[39],采用的 Topp 经验公式基于中低黏土和有机质含量的矿质土壤,在富含有机质的黑土区域可能产生误差,导致雷达波速计算不准,进而影响预测精度。

表 3 不同坡位代表性剖面土壤理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties of typical soil profiles at different slope positions

代表性坡面 Representative slope surface	剖面调查坡位 Profile survey slope position	含水量均值 Mean water content/%	容重均值 Mean bulk density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	有机质含量均值 Mean organic matter content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
厚层黑土 Thick-layer black soil (NJ01)	上坡 (NJ01-1)	0.271	1.298	61.82
	中坡 (NJ01-2)	0.267	1.303	59.47
	下坡 (NJ01-3)	0.283	1.306	58.55
中层黑土 Medium-layer black soil (NJ02)	上坡 (NJ02-1)	0.252	1.314	42.70
	中上坡 (NJ02-2)	0.268	1.352	52.89
	中下坡 (NJ02-3)	0.274	1.407	54.00
薄层黑土 Thin-layer black soil (NJ03)	下坡 (NJ02-4)	0.256	1.307	47.47
	上坡 (NJ03-1)	0.222	1.317	84.04
	中坡 (NJ03-2)	0.244	1.514	85.22

3.2 GPR-VMD 方法快速识别黑土层厚度的技术优势

本研究将探地雷达 (GPR) 与变分模态分解 (VMD) 这两种技术进行了深度融合, 成功克服了传统 GPR 技术在复杂土壤环境中面临的信号解析难题^[40]。GPR 信号在采集过程中极易受到地表起伏、耕作层扰动、浅层根系残留以及地下介质异质性等多种因素的干扰, 导致信噪比低, 尤其是在识别黑土层与下伏母质层之间相对平缓的过渡界面时, 反射信号微弱且模糊。VMD 作为一种非递归、自适应的信号处理方法, 其独特的优势在于能够将多成分信号分解为一系列具有特定中心频率和有限带宽的固有模态函数 (IMF)。本研究通过对 GPR 信号频谱的分析, 精准定位了与黑土层界面反射相对应的频率范围, 并有针对性地选取了关键 IMF 分量, 从而实现了对有效信号的强化和对噪声的有效剔除。这一技术创新带来了显著的精度提升, 在剖面验证环节, 本方法识别黑土层厚度的均方根误差 (RMSE) 控制在 3.73 cm 至 6.26 cm 之间, 相较于罗方舟等^[8]和刘畅等^[9]基于常规探地雷达技术探测黑土层厚度的相关研究, 本方法 (GPR-VMD) 对黑土层厚度的原位识别精度具有明显的提升。尤为重要的是, 即使在土壤含水量较高、信号衰减显著的厚层黑土区域, 该方法仍能保持相对稳定的识别精度, 保证了 GPR-VMD 融合技术在复杂环境下的鲁棒性。相比之下, 传统的 GPR 信号处理, 如简单的带通滤波或小波去噪, 往往难以在保留有效信号的同时彻底去除噪声, 且无法自适应地应对不同介质界面带来的频率变化。

除了算法层面的精度提升, 在实际野外应用中, GPR-VMD 方法相较于传统土钻调查亦展现出巨大的综合优势。首先在空间预测能力上, 传统黑土层厚度调查通常依赖土钻或剖面挖掘获取点状数据, 其空间分布较为离散, 难以准确反映黑土层厚度在坡面尺度上的连续变化特征^[4]; 而 GPR 连续测线能够实时获取地下结构信息, 并配合空间插值方法, 能更全面、精准地刻画黑土层厚度的空间变异规律^[9]。其次, 从调查效率和经济成本角度, GPR 技术在黑土层厚度快速调查中同样具有显著优势。本研究中单条 (约 400~600 m) GPR 测线的数据采集仅需 20~30 min, 若采用传统土钻达到同等空间数据密度, 则需耗费数小时乃至数天的时间和庞大的人力成本^[4]。同时, GPR 属于无损探测技术, 在数据获取过程中不会破坏土壤结构, 也不会对耕作层产生明显扰动。综上所述, 相较于传统调查方法, 本研究建立的 GPR-VMD 方法在测定精度、空间连续性、调查效率及生态保护等方面均表现出明显优势, 为区域大范围、高分辨率的黑土地资源调查与退化诊断提供了一种全新的、高效可行的技术模式。

3.3 GPR-VMD 方法快速识别区域尺度黑土层厚度的应用前景

本研究创新之处在于将黑土层厚度探测从离散的点和线扩展到了连续的坡面尺度, 并通过空间预测制图直观地展示了其空间分布规律^[41]。这解决了传统方法无法准确反映黑土层厚度空间变异性的局限, 具有重要的科学价值与应用前景。黑土层厚度空间预测图清晰地揭示了黑土层厚度与坡位、地形之间的内在联系 (图 6)。例如, 中层黑土坡面表现出自坡上至坡下厚度由薄到厚的清晰递增梯度变化 (图 6b), 充分反映了水力侵蚀导致的“上部剥蚀-下部沉积”过程, 这对于理解和量化黑土侵蚀退化机制至关重要。而薄层黑土坡面 (图 6c) 的厚度分布则相对平缓且缺乏明显的宏观梯度, 其空间变异主要表现为局部细微的波动, 这可能与该区域地形起伏极小、侵蚀作用不显著或土壤母质的局部差异等因素有关。这种高分辨率的黑土层厚度空间分布图可为黑土地退化诊断与精准阻控提供重要科学依据。通过空间分布图, 可以识别出黑土层较薄、侵蚀风险较高的“脆弱区域”, 从而有针对性地采取保护性耕作、等高种植或增施有机肥等措施。

总体而言, GPR-VMD 方法对黑土层厚度的快速识别能力强且可靠, 尽管在某些复杂条件下 (如数据稀疏区或坡度突变区) 可能存在轻微不确定性, 但通过引入协同克里金等先进方法^[42]并融合高精度地形 (如坡度、坡长因子) 和土壤类型等辅助变量, 可进一步提升空间预测精度, 实现更加全面和可靠的量化评估。未来, 应进一步结合人工智能、遥感数据、高精度地形数据以及高精度数字制图技术, 实现对不同空间尺度黑土层厚度的快速获取及其时空动态诊断与评价, 为黑土地退化精

准阻控及黑土地保护与可持续利用提供技术支撑和决策依据^[43]。

4 结 论

本研究基于 GPR 与 VMD 融合技术,采用由点到线再到坡面三维空间的递进式探测方法,实现了黑土层厚度的高精度、多尺度快速识别。在点(剖面)尺度上,基于探地雷达(GPR)与变分模态分解(VMD)的融合方法,通过提取中心频率为 31.69~57.66 MHz 的关键模态分量,有效识别黑土-母质界面,其厚度识别的均方根误差(RMSE)为 2.03~6.86 cm,显示出高精度的原位探测能力。在将 GPR-VMD 模型扩展至田块测线尺度过程中,黑土层厚度预测值与土钻实测值仍保持高度一致(各坡面 $R^2 \geq 0.87$,所有样点 $R^2 = 0.94$),其预测的 RMSE 范围介于 3.60~7.59 cm 之间,总体 RMSE 为 6.08 cm,MAE 为 4.90 cm,总体相对误差控制在 9.7%以内,这一结果显示该方法具备良好的跨尺度稳健性与实用性。在此基础上,基于 GPR-VMD 方法的稀疏采样数据,结合自然邻域插值生成坡面尺度黑土层厚度空间分布图,清晰揭示了黑土层厚度沿坡位呈现梯度分布规律以及由侵蚀作用主导的空间分异特征。本研究建立的基于 GPR-VMD 融合的“点-线-面”多尺度黑土层厚度快速识别与空间预测方法,可为东北黑土区黑土层厚度的快速监测与评价提供重要技术支撑。

参考文献(References)

- [1] Zhang S X, Jia S X, Chang L, et al. Conservation tillage improves soil biodiversity and its ecological function in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1360-1369. [张士秀, 贾淑霞, 常亮, 等. 保护性耕作改善东北农田黑土土壤生物多样性及其生态功能[J]. *地理科学*, 2022, 42(8): 1360-1369.]
- [2] Wei D, Kuang E J, Chi F Q, et al. Status and protection strategy of black soil resources in northeast of China[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(1): 158-161. [魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. *黑龙江农业科学*, 2016(1): 158-161.]
- [3] Xu X B, Wang Q. The current status and prospects of research in black earth degradation in Northeast China[J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(B10): 588-592. [徐晓斌, 王清. 我国黑土退化研究现状与展望[J]. *地球与环境*, 2005, 33(B10): 588-592.]
- [4] Gao Z, Ma L X, Yu D S, et al. Study on rapid survey and prediction methods of multi-point black soil layer thickness reflecting micro-spatial variability of sample points[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(6): 1506-1523. [高张, 马利霞, 于东升, 等. 反映样点微域空间变异的多点位黑土层厚度快速勘察与预测方法研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(6): 1506-1523.]
- [5] Liu R X, Wang Z Q, Tan Y P. The thickness of black soil layer and its influencing factors in a small watershed of typical black soil region in Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 346-353, 361. [刘若轩, 王志强, 谭玉萍. 东北典型黑土区小流域黑土层厚度及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 346-353, 361.]
- [6] Ratto C R, Morton K D, Collins L M, et al. Analysis of linear prediction for soil characterization in GPR data for countermining applications[J]. *Sensing and Imaging*, 2014, 15(1): 86.
- [7] Yang J H, Li T T, Long F Q, et al. Effectiveness of ground penetrating radar for the detection of root features of *Larix gmelinii*[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(6): 1715-1721.
- [8] Luo F Z, Hu W Y, Yang S H, et al. *In-situ* identification of the thickness of black soil layer based on ground penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(4): 941-952. [罗方舟, 胡文友, 杨顺华, 等. 基于探地雷达技术的黑土层厚度原位识别[J]. *土壤通报*, 2025, 56(4): 941-952.]
- [9] Liu C, Liu Q, Zhang Q, et al. Spatial variation of black soil thickness on slope measured by using ground penetrating radar in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 952-963. [刘畅, 刘勤, 张琼, 等. 利用探地雷达测定东北黑土层厚度在坡面的空间变化[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 952-963.]

- [10] Xie Z H, Li J M. The application status and its prospect of ground penetrating radar(GPR) in China[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2007, 35(11): 71-75. [谢昭晖, 李金铭. 我国探地雷达的应用现状及展望[J]. *工程勘察*, 2007, 35(11): 71-75.]
- [11] Liu C, Shang Y D, Lu Q, et al. Variational mode decomposition for GPR signal denoise[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2024, 54(3): 1042-1053. [刘财, 商耀达, 鹿琪, 等. GPR信号去噪的变分模态分解[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(3): 1042-1053.]
- [12] Ruan W M. Research on identification of luvisols barrier layers based on ground-penetrating radar[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2023. [阮伟民. 基于探地雷达的白浆土障碍层次识别研究[D]. 哈尔滨:中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2023.]
- [13] Liu E Z. Study on quality evaluation of black soil cultivated land in Nenjiang County[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. [刘恩泽. 嫩江县黑土耕地质量评价研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.]
- [14] Liu X J. Analysis on the advantages of agricultural development in Nenjiang County[J]. *Modern Agriculture Research*, 2012, 18(5): 105. [刘晓晶. 嫩江县农业发展优势条件分析[J]. *农村实用科技信息*, 2012, 18(5): 105.]
- [15] Jiang T Q, Liu W M, Zeng J H, et al. Sampling and quality control of soil background points[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019, 21(14): 139-140, 144. [姜同强, 刘维明, 曾健华, 等. 土壤背景点样品采集与质量控制[J]. *绿色科技*, 2019, 21(14): 139-140, 144.]
- [16] Jia S G, Yang X M, Wang S P, et al. Present situation, development and future of soil drilling[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1993, 15(4): 63-66, 77. [贾书刚, 杨学明, 王淑平, 等. 取土钻的现状、发展及未来[J]. *吉林农业大学学报*, 1993, 15(4): 63-66, 77.]
- [17] Zhu Y T, Qian T W, Dan D Z. Measurement of soil bulk density by time domain reflectometry combined with soil sampling[J]. *Resource Development & Market*, 2006, 22(3): 213-215, 219. [祝艳涛, 钱天伟, 但德忠. 时域反射仪结合土钻法测定土壤容重[J]. *资源开发与市场*, 2006, 22(3): 213-215, 219.]
- [18] Bai B, Zhou J. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(4): 527-531. [白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(4): 527-531.]
- [19] Li J, Guo C C, Wang F M, et al. The summary of the surface ground penetrating radar applied in subsurface investigation[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 629-637. [李嘉, 郭成超, 王复明, 等. 探地雷达应用概述[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 629-637.]
- [20] Fan J W, Ma T, Zhu Y J, et al. Ground penetrating radar detection of buried depth of pavement internal crack in asphalt surface: A study based on multiphase heterogeneous model[J]. *Measurement*, 2023, 221: 113531.
- [21] Owenier F, Hornung J, Hinderer M. Substrate-sensitive relationships of dielectric permittivity and water content: Implications for moisture sounding[J]. *Near Surface Geophysics*, 2018, 16(2): 128-152.
- [22] Xu Y, Khan N M, Rehman H, et al. Research on leakage detection at the joints of diaphragm walls of foundation pits based on ground penetrating radar[J]. *Sustainability*, 2023, 15(1): 506.
- [23] Xu J C, Ren Q W, Huang L P. GPR signal analysis method based on variational mode decomposition[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(6): 545-550. [许军才, 任青文, 黄临平. 基于变分模态分解的探地雷达信号分析方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 545-550.]
- [24] Zhou G Q, Luo S L, Wang Y F, et al. Automated first-arrival picking and source localization of microseismic events using OVMD-WTD and fractal box dimension analysis[J]. *Fractal and Fractional*, 2025, 9(8): 539.
- [25] Liu Q L, Yang J, Mao X C, et al. Yang Chizhong filtering and estimation methods for spatial data interpolation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2025, 54(8): 1501-1517. [刘启亮, 阳洁, 毛先成, 等. 空间数据插值的杨赤中滤波与推估法[J]. *测绘学报*, 2025, 54(8): 1501-1517.]
- [26] Feng B, Chen M T, Yue D D, et al. Comparison of 3D geological modeling based on two different interpolation

- methods[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2019, 49(4): 1200-1208. [冯波, 陈明涛, 岳冬冬, 等. 基于两种插值算法的三维地质建模对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 1200-1208.]
- [27] Xie X. Implementation of an automatic seismic phase picking method based on nearest neighbor method using TensorFlow[D]. Beijing: Institute of Geophysics China Earthquake Administration, 2020. [解析. 使用TensorFlow实现一种基于最近邻法的震相自动拾取方法[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2020.]
- [28] Zhang Y Y. Data sources analysis of 3D painting on MATLAB and study of piercing technology[J]. Value Engineering, 2010, 29(34): 174-175. [张玉叶. MATLAB三维绘图数据源分析及镂空研究[J]. 价值工程, 2010, 29(34): 174-175.]
- [29] Wu P, He Z H, Chen X H, et al. Curvature attribute of two-dimensional Gaussian iterated smoothing filtering and applications[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(6): 2144-2149. [伍鹏, 贺振华, 陈学华, 等. 二维高斯迭代平滑滤波曲率属性及其应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 2144-2149.]
- [30] Guo Q H, Li Y, Xing Z X. Signal noise reduction method based on optimized variational mode decomposition combined with wavelet threshold[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2025, 45(6): 1687-1700. [郭庆辉, 李媛, 邢作霞. 基于优化变分模态分解联合小波阈值的信号降噪方法[J]. 系统科学与数学, 2025, 45(6): 1687-1700.]
- [31] Fu M L, Zhu X M, Duan W B. Research progress of application of ground penetrating radar technology in soil properties detection[J]. Journal of Agriculture, 2024, 14(4): 93-100. [富美玲, 朱向明, 段文标. 探地雷达技术在土壤性质探测应用中的研究进展[J]. 农学学报, 2024, 14(4): 93-100.]
- [32] Liu X N, Qin S H, Li D C, et al. The spatiotemporal variation and driving factors of soil organic matter and bulk density in Nenjiang City over the past 40 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1598-1610. [刘星诺, 秦诗涵, 李德成, 等. 40年来嫩江市耕地土壤有机质和容重时空变异特征及驱动因素[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1598-1610.]
- [33] Wang X, Zhang Z X, Zhao X L, et al. A review of researches on monitoring of soil moisture by remote sensing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 157-163. [汪潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 157-163.]
- [34] Yang X P, Cao Y J, Liang S B, et al. An automatic GPR noise suppression method based on two-dimensional variational mode decomposition[J]. Modern Radar, 2023, 45(12): 1-6. [杨小鹏, 曹彦杰, 梁舒博, 等. 基于二维变分模态分解的GPR噪声自动抑制方法[J]. 现代雷达, 2023, 45(12): 1-6.]
- [35] Liu K X. Research on methods of detecting soil water content and electrical conductivity using ground penetrating radar[D]. Changchun: Jilin University, 2024. [刘可欣. 探地雷达探测土壤含水量和电导率的方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.]
- [36] Zou W X, Han X Z, Jiang H, et al. Dynamics of water contents in arable black soil as affected by fertilization practices[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1335-1341. [邹文秀, 韩晓增, 江恒, 等. 施肥管理对农田黑土土壤水分动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1335-1341.]
- [37] Chen X W, Zhang X Y, Sui Y Y, et al. Study pH variation of northeast black soil and its influencing factors by soil removal method[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(3): 365-367. [陈学文, 张兴义, 隋跃宇, 等. 利用空间移位法研究东北黑土pH季节变化及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(3): 365-367.]
- [38] Shi H Y. Ground penetrating radar monitoring and forward modeling of active layer thickness and soil moisture in typical permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2025. [史浩言. 青藏高原典型多年冻土区活动层厚度与土壤水分的探地雷达监测与正演模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2025.]
- [39] Wei K Y, Zhang H B, Zhu S B, et al. Characteristics of multiples in GPR surveys and the influencing factors in horizontal strata[J]. Pure and Applied Geophysics, 2022, 179(12): 4595-4607.
- [40] Metwaly M, Ismail A, Matsushima J. Evaluating some factors that affect feasibility of using ground penetrating radar for landmine detection[J]. Applied Geophysics, 2007, 4(3): 221-230.
- [41] Guo J H, Liu F, Xu S X, et al. Comparison of digital mapping methods for the thickness of black soil layer of cultivated land in typical black soil area of Songnen Plain[J]. Journal of Geo-Information Science, 2024, 26(6): 1452-1468. [郭俊辉,

刘峰, 徐胜祥, 等. 松嫩典型黑土区耕地黑土层厚度数字制图方法比较[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(6): 1452-1468.]

[42] Li H T, Shao Z D. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(7): 1-8. [李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(7): 1-8.]

[43] Liu K, Wei M H, Dai H M, et al. Spatiotemporal variation of black soil layer thickness in black soil region of Northeast China[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 434-442, 394. [刘凯, 魏明辉, 戴慧敏, 等. 东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 434-442, 394.]

(责任编辑: 檀满枝)