

张道宇, 赵明松, 罗方舟, 贾智慧, 菅乐, 田康, 吴华勇, 陈颂超, 王福民, 熊昌盛, 胡文友, 赵永存. 利用探地雷达技术快速识别水稻土潜育层的分布及其空间连续变化[J]. 土壤学报, 2026,

ZHANG Daoyu, ZHAO Mingsong, LUO Fangzhou, JIA Zhihui, JIAN LeTIAN, Kang WU, Huayong CHEN, Songchao WANG, Fumin XIONG, Changsheng HU, Wenyong ZHAO, Yongcun. Rapid Identification of Gley Horizon in Paddy Soil and Its Spatial Continuous Variation Using GPR Technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

利用探地雷达技术快速识别水稻土潜育层的分布及其空间连续变化*

张道宇^{1,2}, 赵明松¹, 罗方舟², 贾智慧², 菅乐², 田康^{2,5†}, 吴华勇², 陈颂超³, 王福民³, 熊昌盛⁴, 胡文友², 赵永存²

(1. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 安徽淮南 232001; 2. 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; 3. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 4. 海南大学国际旅游与公共管理学院, 海口 570228; 5. 江西鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站, 鹰潭 335211)

摘要: 准确识别和掌握土壤障碍层的分布信息对于改善土壤耕作能力具有重要意义。然而, 对于大范围的土壤障碍层测定, 传统测定方法包括土壤剖面法、土钻法等, 存在效率低、时间成本高且连续性差的问题。探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)以其无损、连续、尺度大的特点, 在识别障碍层的研究中展现了较大的应用潜力。但由于土壤结构的异质性和数据处理技术的复杂性, 利用 GPR 快速识别土壤障碍层仍存在较大挑战。本研究以海南省澄迈县典型潜育水稻土为研究对象, 利用两种频率的 GPR 探测了具有表潜特征和底潜特征的水稻土潜育层的位置及厚度。通过对比小波变换和变分模态分解对 GPR 进行信号处理, 发现后者识别土壤结构的能力更强。本研究利用变分模态分解识别土壤潜育层的垂直分布, 并分析了两种频率的 GPR 识别土壤潜育层的准确性。结果表明: 相较于小波变换, 变分模态分解在 7~36 cm 深度范围内表现出更强的波谱振幅强度, 揭示土壤结构的能力更强。在 CM02 和 CM04 田块中, 1GHz 天线探测潜育层厚度的误差(分别为 1.5 cm 和 2 cm)均小于 700MHz 的(分别为 2.4 cm 和 4 cm), 表明 1GHz 天线具有更高的潜育层识别精度。典型表潜特征和底潜特征的潜育空间分布不同, 且所有实验田的潜育层厚度变异系数均低于 3%, 700MHz 测定潜育层位置的 R^2 为 0.83, 绝对误差分布主要集中在 2~9 cm, 1GHz 测定潜育层位置的 R^2 为 0.90, 绝对误差分布主要集中在 3~5 cm。本研究可为水稻土潜育层快速识别提供一种高效、准确的方法, 以服务于水稻土障碍识别和耕地地力提升。

关键词: 探地雷达; 潜育层; 空间变化; 小波变换; 变分模态分解

中图分类号: S152

文献标志码: A

Rapid Identification of Gley Horizon in Paddy Soil and Its Spatial Continuous

* 国家重点研发计划课题(2023YFD1900102)和中国科学院前瞻战略科技先导专项课题(XDA0440405)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1900102) and Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA0440405)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: tiank@issas.ac.cn

作者简介: 张道宇(2002—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向为中低产田土壤障碍因子快速识别与时空预测。E-mail: zhangdaoyu@issas.ac.cn

收稿日期: 2025-09-23; 收到修改稿日期: 年-月-日; 网络首发日期(www.cnki.net):

http://pedologica.issas.ac.cn

Variation Using GPR Technology

ZHANG Daoyu^{1,2}, ZHAO Mingsong¹, LUO Fangzhou², JIA Zhihui², JIAN Le², TIAN Kang^{2,5†}, WU Huayong², CHEN Songchao³, WANG Fumin³, XIONG Changsheng⁴, HU Wenyong², ZHAO Yongcun²

(1. College of Spatial Information and Surveying Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui, 232001, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. College of International Tourism and Public Administration, Hainan University, Haikou 570228, China; 5. National Field Observation and Research Station (Jiangxi Yingtan) for Agro-Ecosystem, Yingtan, 335211, China)

Abstract: Accurate identification and characterization of the spatial distribution of the soil gley horizon are essential for improving soil tillage capacity and arable land quality. However, at larger spatial scales, conventional methods for gley horizon investigation—such as soil profiling and auger drilling—are constrained by low efficiency, high labor and time costs, and poor spatial continuity. Ground-penetrating radar (GPR), with its non-destructive, continuous, and large-area detection capabilities, has therefore demonstrated considerable potential for identifying soil gley horizons. Nevertheless, rapid and accurate identification of gley horizons using GPR remains challenging due to the pronounced spatial heterogeneity of soil structures and the complexity of GPR signal processing. In this study, typical gleyed paddy soils in Chengmai County, Hainan Province, China, were selected as the research object. GPR surveys using two antenna frequencies were conducted to detect the location and thickness of gley horizons in paddy soils exhibiting both surface-gley and bottom-gley characteristics. By comparing wavelet transform and variational mode decomposition (VMD) for GPR signal processing, it was found that VMD provides a stronger capability for revealing soil structural features. VMD was therefore applied to identify the vertical distribution of gley horizons, and the accuracy of gley horizon detection using the two GPR frequencies was systematically evaluated. The results indicate that, compared with wavelet transform, VMD exhibits stronger spectral amplitude intensity in the depth range of 7–36 cm, demonstrating a superior ability to characterize soil structure. In fields CM02 and CM04, the errors in gley horizon thickness detected using the 1 GHz antenna (1.5 cm and 2.0 cm, respectively) were smaller than those obtained using the 700 MHz antenna (2.4 cm and 4.0 cm, respectively), indicating higher identification accuracy at the higher frequency. The spatial distributions of gley horizons differed markedly between fields with typical surface-gley and bottom-gley features, while the coefficient of variation for gley horizon thickness across all experimental fields remained below 3%. For gley horizon depth estimation, the coefficient of determination (R^2) was 0.83 at 700 MHz, with absolute errors mainly ranging from 2 to 9 cm, whereas the R^2 increased to 0.90 at 1 GHz, with absolute errors primarily concentrated between 3 and 5 cm.

Overall, this study demonstrates that GPR combined with VMD provides an efficient and accurate approach for the rapid identification of gley horizons in paddy soils, offering strong technical support for diagnosing soil constraints and improving cultivated land quality.

Key words: Ground penetrating radar; Gley horizon; Spatial variation; Wavelet transform; Variational Mode Decomposition

随着全球人口快速增长和粮食需求的持续增加,水稻土在保障粮食安全方面的战略意义日益凸显。我国水稻种植面积约占全国耕地面积的 1/4,产量占粮食总产量的 30%以上^[1],是主要粮食作物。作为水稻生产最根本的物质基础,水稻土质量状况直接决定了水稻能否高产、稳产,进而影响国家粮食安全与农业可持续发展。潜育水稻土是我国土壤发生分类中人为土纲-人为水成土亚纲-水稻土土类的一个亚类,是在长期淹水条件下发育而成的还原性水稻土^[2];其主要分布于长江中下游低洼地、珠江三角洲湿地、太湖流域沼泽区及东北平原洼淀等稻作区,总面积约 400 万 hm^2 ,占全国水稻土面积的 10~15%^[1]。由于长期淹水,潜育

水稻土团聚体结构被破坏,土壤通透性恶化,根系环境中多层缺氧状态,有机酸、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 H_2S 大量累积^[3-4],导致水稻分蘖减少、根系浅扎、养分吸收受阻。是我国低产水稻土之一,也是增产潜力较大的水稻土之一。已有研究揭示了潜育水稻土的成因、危害与改良途径^[5],但如何快速识别水稻土潜育层分布是其改良的前提和基础。

传统潜育层识别方法主要依赖侵入式、劳动密集型技术^[6]。土壤贯入阻力测量 (cone penetrometer) 通过实时记录锥尖阻力 (qc) 和侧壁摩擦力 (fs),能够快速探测土壤机械阻力突变界面,从而间接识别潜育压实层的位置与强度;国际研究通常以 qc 为 2.0~3.0 MPa 作为水稻土潜育层或犁底层顶板的诊断阈值^[7]。电阻率层析成像 (electrical resistivity tomography, ERT) 利用潜育层因还原环境导致的低电阻率特征,实现非侵入式二维/三维压实区与潜育层空间映射^[8]。此外,土壤剖面法是通过挖掘垂直剖面,观察湿态颜色、锈斑锈纹分布 ($\geq 2\%$) 及结构特征,即可判断潜育层及其起始深度^[9]。

这些方法虽具应用价值,但局限性显著,限制田间尺度的推广。贯入阻力和容重取样具有破坏性,难以大面积重复;ERT 需布设大量电极,受盐分、温度干扰,解释易产生歧义^[10]。此外,上述技术多为点状采样,空间分辨率有限,难以高效表征潜育层的空间异质性。因此,亟需发展一种无损、快速且可扩展的方法,以实现潜育层特征的精准刻画。探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 作为一种高效的土壤探测手段,可用于土壤层次的快速识别与划分。GPR 利用电磁波无损探测土壤剖面,基于介电常数差异实现高分辨率成像^[11],支持实时、便携式、大面积扫描,克服传统局限,为土壤层次的识别提供有力数据支撑。本研究利用 GPR 技术,探讨其对水稻土潜育层识别的可行性,然而在实际应用中,土壤水分对 GPR 信号的干扰尤为突出且普遍存在。例如土壤水分导致的信号衰减、层位界面模糊等难题,一般而言,土壤水分会增加土壤的电导率和介电常数,导致电磁波在传播过程中被吸收和散射,从而引起信号强度快速减弱,导致 GPR 信号的穿透深度降低^[12],对深层潜育层探测的不确定性高;此外,土壤水分在垂直分层或梯度变化造成的垂直变异性会扭曲信号的相位、幅度和延迟,导致反射波形变形^[13]。对于高频段雷达而言,土壤水分会放大频率依赖的衰减,导致信号弥散和探测精度明显下降^[12]。针对这一核心难点,本研究通过 GPR 结合水分校正与信号优化策略,探索提升识别精度的可行途径。

GPR 是一种成熟且应用广泛的浅表层地球物理测量方法,该技术从 20 世纪 70 年代后期开始逐步应用于土壤学研究^[14]。在国际上, GPR 最早于 20 世纪 80 年代被用于探测农业土壤黏盘层^[15]。Johnson 等^[16]率先采用 80~900MHz 天线,在美国东南部沿海平原砂壤土中识别 20~40 cm 深的犁底层,5 min 内完成 100 m 剖面扫描,横向连续性分辨率达 95%。针对法国卢瓦尔河谷黏壤土,André 等^[17]使用 500MHz 天线,结合全波形反演重建压实层孔隙度 (减少 12~18%),绘制 1 hm² 的三维压实图。Jonard 等^[18]在比利时砂壤土中对比 GPR 与 EMI, GPR 对 15~35 cm 犁底层的灵敏度达 98%。Klotzsche 等^[19]和 Tosti 等^[20]指出, GPR 已从定性成像发展到定量物性反演阶段,全球累计发表的相关高影响力论文超过 300 篇,覆盖了 12 种主要农业土壤类型。国内研究也紧随科学前沿,王萍等^[21]在不同植被覆盖的土层上使用 250MHz 天线探测土壤分层,发现 GPR 可以区分出不同盐渍程度的土层。曹棋等^[22]利用 GPR 对典型红壤区网纹红土层进行了识别,发现两种低频天线 (60MHz、120MHz) 均可识别出红土层的分层界面。罗方舟等^[23]研究发现 GPR 对黑土层厚度的原位识别有较好的准确性和适用性。然而,受水稻土强烈的水分干扰与信号衰减限制,利用 GPR 精确识别潜育层的空间位置并量化其厚度,在当前研究中仍具挑战性。本文利用变分模态法将复杂的雷达回波自适应地分解为一系列中心频率确定的本质模态函数 (IMF),从而有效分离出由高频水分散射引起的干扰模态与蕴含地层结构信息的有效信号模态。通过重构剔除干扰分量,达到增强目标信号、提升图像信噪比的目的,为精准识别土壤潜育层奠定基础。

鉴于此,本研究以海南省澄迈县典型潜育水稻土为研究对象,采用变分模态分解的方法

处理多频率 GPR 信号, 利用雷达波和灰度图解译潜育层位置及其厚度, 最后利用雷达测线预测研究区潜育层的空间分布, 并进行精度评定。相关研究有助于土壤障碍层快速识别, 为耕地土壤障碍层消减和改良提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

澄迈县位于海南岛西北部, 地处 $19^{\circ} 23' - 20^{\circ} 01' \text{ N}$, $109^{\circ} 45' - 110^{\circ} 15' \text{ E}$, 澄迈县年均气温约为 23.7° C , 陆地面积 2072 km^2 , 年平均降水量约为 1786 mm , 年平均日照时数为 2059 h , 属于热带季风气候, 全年高温多雨, 光照充足, 热量丰富。澄迈县土壤资源丰富, 其土壤类型以水稻土和砖红壤为主。发展了多种特色农产品, 是海南重要的农业生产基地。澄迈县耕地面积 4.11 万 hm^2 , 水稻土面积 2.33 万 hm^2 , 其中潜育水稻土面积 2560 hm^2 。澄迈县潜育水稻土主要分布在南渡江下游冲积平原及沿海低洼地, 特别是南渡江一双林河以北的瑞溪、永发、加乐、文儒、金江等镇的低平地带。如图 1 所示, 本研究在澄迈县南渡江一双林河以北区域, 从潜育水稻土区域挑选了具有表潜特征水稻田 CM02 (图 1c) 和底潜特征水稻田 CM04 (图 1b), 土壤类型分别为均壤质青潮泥田和均黏壤青暗泥田, 主要种植方式为稻—稻轮作。在所选水稻田打土钻确定潜育层位置和厚度 (图 1d)。研究区位置及基本信息如表 1 所示。土壤发育的自然条件以及耕作、灌溉和施肥的干扰, 使得不同深度的土壤的理化性质存在一定差异。如图 2 所示, 研究区的土壤较为黏重, 且土壤随着深度的增加黏粒含量越高, 使得土壤透水能力较差, 导致土壤长期渍水, 为潜育层的形成创造条件。

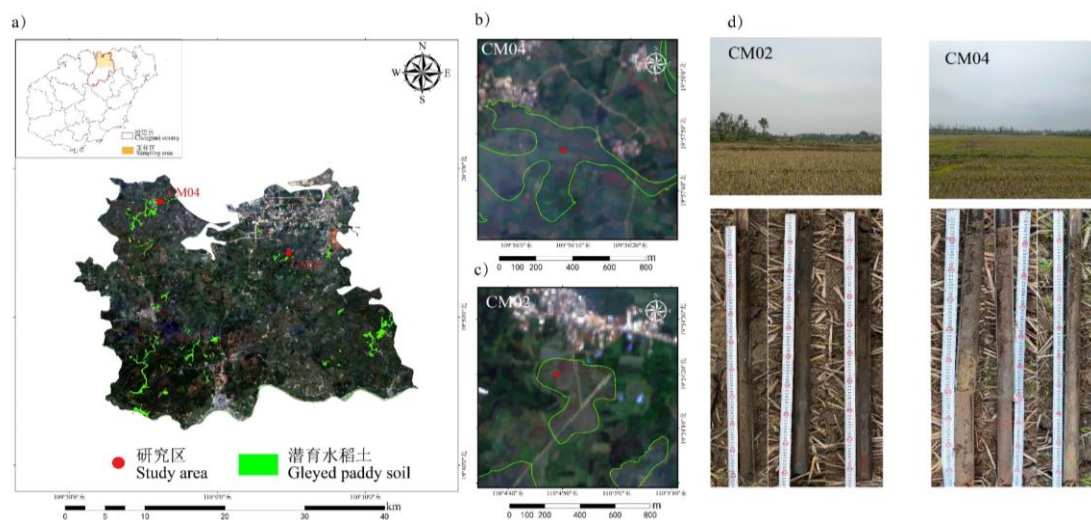
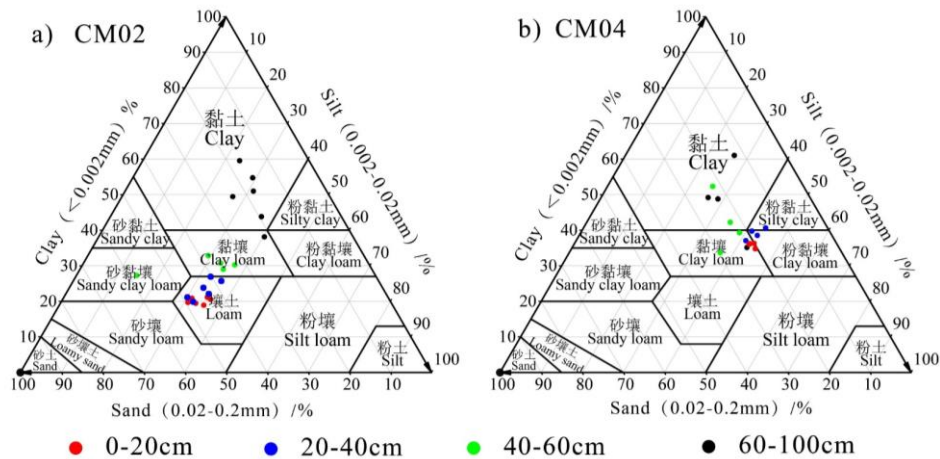


图 1 研究区位置 (a、b、c) 及其景观照片及其土钻照片 (d) (以彩图形式发表)

Fig.1 Location of the research area (a, b, c) and its landscape photo and soil drill photo (d)



注：采用美国农业部质地分类，土层分别为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm，在实验田不同位置采集。Note:The soil classification system of the United States Department of Agriculture was used, and the soil layers were 0-20cm, 20-40cm, 40-60cm, and 60-100cm, and the sampling points were collected at different locations in the experimental field.

图 2 CM02 (a) 和 CM04 (b) 不同土层的土壤质地 (以彩图形式发表)

Fig.2 Soil texture of different soil layers in CM02 (a) and CM04 (b)

表 1 研究区实验田基本信息

Table 1 Basic information of experimental fields in the study area

编号 Number	经度 Longitude	纬度 Latitude	实验田长 Length/m	实验田宽 Width/m	介电常数 Permittivity
CM-02	110° 51' 54" E	19° 54' 6" N	42	22	12.49
CM-04	109° 55' 59" E	19° 58' 10" N	32	29	10.51

1.2 探地雷达的基本原理和野外数据采集

探地雷达也称为地质雷达 (Geo Radar)，是一种基于电磁波理论的无损地下目标探测技术^[24-26]，主要由发射天线、接收天线、控制单元和主机四个部分组成^[27]。其工作原理是 GPR 通过发射天线向地下发射 1MHz~10GHz 的高频脉冲雷达波^[28]，使电磁波在介电性质不同的界面上产生反射和折射，GPR 通过向地下发射高频电磁波进行探测。该波在土壤介质中传播时，其路径、波形及强度受介质电性（如介电常数、电导率）与几何形态的制约而发生改变。经介质界面反射后，携带地层信息的回波被接收天线捕获，并转化为以时间—地面距离为坐标的雷达剖面图。最终，通过解译剖面中反射波的波形、振幅及时序等特征，即可反演并获得土壤的内部结构信息^[29]。图 3a 为雷达波在土壤中的传播路径；电磁波在土壤中的传播速度主要由土壤的电磁特性所决定^[30]。根据雷达波在土壤中的传播路径，接收天线接收到的电磁波主要分为空气波、地面直达波、反射波和折射波^[31]。目前 GPR 技术已在地质学、地球物理学、矿业工程、路面检测、市政工程等领域^[32-33]中得到广泛应用。近年来，GPR 技术也逐渐应用到土壤剖面构型^[34]、土壤含水量反演^[35]等土壤科学领域。

本研究采用 U-Explorer 探地雷达（欧美大地，中国），选择 700MHz 和 1GHz 的 GPR 分别对多个具有潜育特征的水田通过大小增益的方法对单条测线分别进行采样，单条测线采样人员需固定，避免出现操作失误；同时 GPR 数据需遵循“现测现检”的原则，采样时雷达车须慢而稳，避免因测线地形起伏而导致 GPR 信号不稳，同时通过主机雷达图初步观察 GPR 数据是否稳定。如图 3b 所示，在田间布设横竖 2×2 道的 GPR 测线，贯穿整个田块，在每条测线的中点打土钻，采用滴加邻菲罗啉试剂的方法，以化学显色反应辨别潜育层的位置与厚度，获取直接的土钻验证数据。进而，将此数据与 GPR 探测所得的波谱特征及灰度图像

进行对比分析,从而建立并提取用于识别潜育层的 GPR 特征标志,再通过 GPR 测线数据获取测线上的潜育层位置;同时图 3b 的测线上土钻点是 GPR 测线上潜育层位置的验证点。

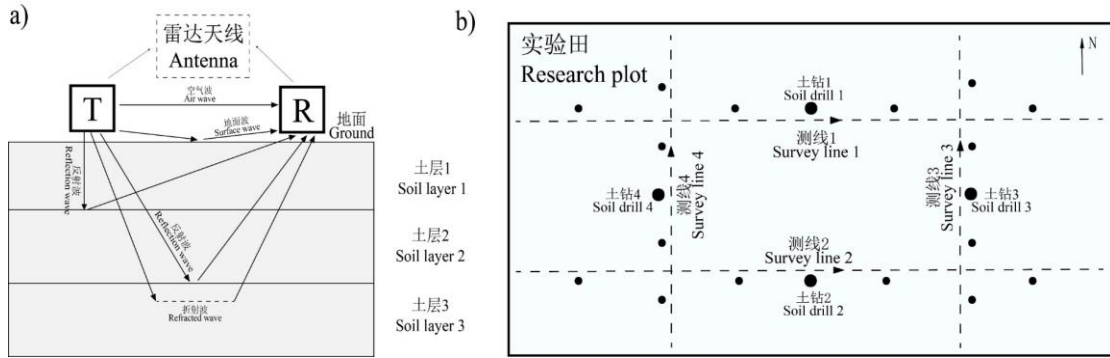


图 3 探地雷达的基本原理 (a) 和实验测线设计 (b)

Fig. 3 Basic principles of ground penetrating radar (a) and experimental survey line design (b)

1.3 数据处理

(1) 雷达数据预处理。

原始雷达数据在 GPRSoftPro 软件中进行基础滤波、去直流漂移、增益校正和背景去除等一系列预处理后, GPR 数据的原始结构为时窗和幅值的关系,即每 0.5 cm 发射和接收一道波谱,纵向为时间而非深度,因此需要通过介电常数进行时间—深度转换,估计各个分界线的深度和发生层的厚度。U-Explorer(GPR)探地雷达的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,其时间—深度转换公式为^[36]:

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

将式 (1) 转化可得到式 (2):

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

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。

利用土壤水分测试仪测出土壤水分,基于改进的三阶介电模型 (TOPP 公式) 计算介电常数,其更适用于有机质含量较高或黏土土壤^[37]:

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

式中, ε 为介电常数, θ 为土壤体积含水量。

测算出试验区采集土钻位置的介电常数,取平均值即为该水稻田的介电常数,如表 1 所示,水稻田 CM02 和 CM04 介电常数分别为 12.49 和 10.51。

(2) 雷达信号时频联合分析方法研究。

小波变换通过将信号或图像分解为由不同频率小波基函数组成的线性组合来实现分析。与傅里叶变换类似,小波变换也能将信号转换为频域表示,但其独特优势在于能够同时捕捉时间和频率的局部特征^[38]。每个小波函数对应特定频率的信号分量,可用于识别信号中的边缘、突变点或周期性等特性。通过灵活的算法将复杂信号分解为更简单的成分,以便于后续数据分析。傅里叶变换将信号完全分解到频率域,丢失了时域局部信息,而小波变换通过可伸缩和平移的小波基函数,同时保留了时间—频率局部化特性,对 GPR 信号中由潜育层界面引起的突变反射 (瞬态特征) 具有更高的分辨能力^[39]。研究表明,在高噪声背景下的土壤分层识别中,小波变换的信噪比提升可达 6~12dB,界面定位误差降低 30%~50%^[40],特别

适用于水稻土高水分、高黏土环境下的弱反射信号提取。

变分模态分解法（VMD）是一种新颖的时频分析技术，能够自适应地将复杂信号分解为多个窄带单分量调幅调频信号。该方法假定输入信号由若干个中心频率分布在窄带范围内的子信号构成，通过构建约束变分模型并采用优化算法来估算这些子信号的中心频率和带宽^[41]。VMD 通过迭代优化求解，确定每个本征模态分量（IMF）的频率中心和带宽，有效避免了端点效应和模态混叠问题。

（3）异常波波谱处理。

GPR 测定时，地面不平坦或天线自身不稳定可能造成探地雷达信号的不稳定，导致数据出现异常的波谱，如图 4a 所示，异常波谱的趋势和幅值范围与其相邻波谱信息差异巨大，主要是由扫描路线的地面不平坦或田间残留的秸秆干扰雷达信号造成的。通过波谱自适应叠加法来筛选异常波谱并将其剔除，保留信号稳定的波谱以确保后续研究的精确性。

（4）空气波消除。

GPR 波谱主要包含空气波、地面波、反射波和折射波。直达波包括空气波和地面波，直达波是探地雷达发射天线发出的电磁波，未经任何地下介质反射，直接到达接收天线的那部分能量。在对土壤潜育层的探测中，直达波被视为无用波，会影响对土壤深度的判断，因此探测土壤潜育层位置和深度时需将直达波去除。本研究采用阈值递进方法检索地面的位置，地面位置即图 4b 中的虚线，虚线前均为空气直达波波谱，虚线后均为土壤波谱，将直达波的波谱曲线去除，只保留土壤的波谱信息。

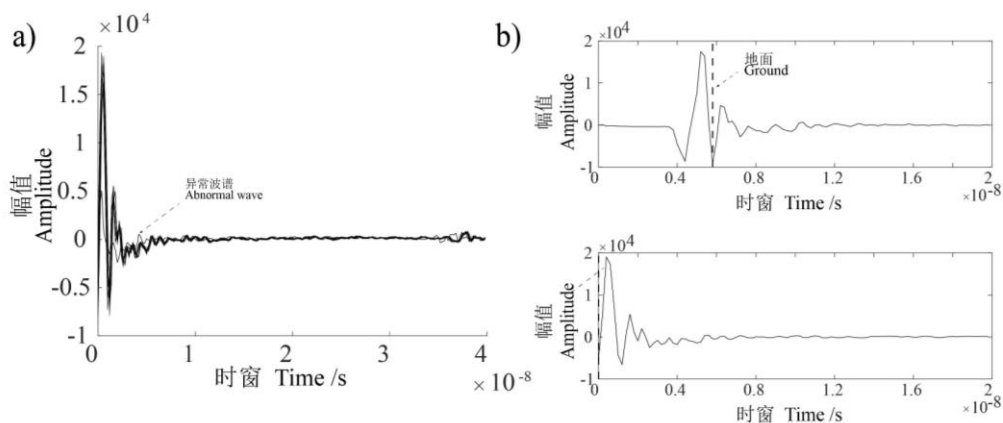


图 4 异常波剔除 (a) 和空气波去除 (b)

Fig.4 Abnormal wave removal (a) and air wave removal (b)

（5）时频域信号处理方法的优选。

小波变换（WT）和变分模态分解（VMD）均可以对 GPR 波谱数据进行去噪，提高波谱信噪比；WT 中采用小波基函数，小波分解层数为 6；VMD 设定 K 值为 6，tau 值为 0.68，波谱为 IMF1-IMF4 融合波谱（参考结果 2.1）。图 5a 中，随着探测深度的增加，WT 和 VMD 波谱的电磁波传播能量损耗均逐渐增大，波谱的幅值变化能够反映土壤分层结构的电磁波反射信息。相较于小波变换，VMD 对反射波谱的信号更强，保留的土壤分层结构信息更加完整，包络线可以突出 GPR 信号的幅度变化，反映目标反射的强度和特征。图 5b 为两种方法上下包络线之差，从探测深度为 7 cm 至 36 cm 处，VMD 波谱的振幅强度均大于小波变换，随着探测深度的增加，电磁波传播能量损耗极大，50cm 后两者波谱差异不大，两者的幅值差异逐渐变小。因此，本研究采用对土壤信息保留更强的变分模态分解法对雷达信号的时频域进行统一分析。

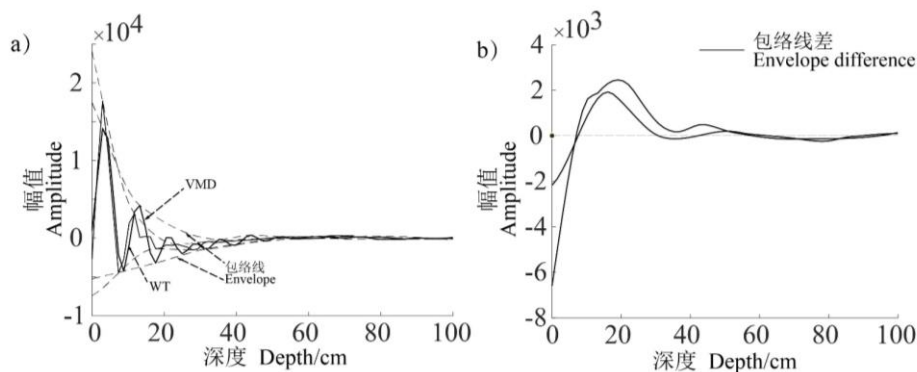


图5 VMD和WT方法下的波谱幅值(a)和VMD与WT的包络差(b)的变化规律

Fig. 5 Variation of spectral amplitude (a) and envelope difference between VMD and WT (b) under VMD and WT

2 结果

2.1 利用变分模态分解法和灰度图获取潜育层的信号特征

VMD法将原始波谱分解取前6个模态分量(IMF1-IMF6);不同GPR频率以及潜育特征不同均会影响IMF与原始波谱的相关性,将原始波谱相关性低的IMF认定为噪声并将其剔除。以CM02的1GHz天线为例(图7b),IMF6为高阶模态分量且与原始波谱相关性最弱,因此将IMF6视为噪声剔除。如图7所示,计算IMF信号与GPR原始波谱信号的相关矩阵,与原始波谱具有中强相关性($|r| > 0.4$)^[42]的分量认定为有效IMF,CM02田块,频率为700MHz的天线选取IMF1至IMF4(图6a);频率为1GHz的天线选取IMF1至IMF5(图6b);CM04田块,1GHz和700MHz的GPR均选取IMF1至IMF4(图7c、图7d),IMF之间基本不存在相关性,且低阶IMF与原始波谱的相关性要普遍高于高阶IMF。研究还发现变分模态处理后的波谱与原始波谱出现较大差异(图6a、图6b),通过对模态分量施加包络线,发现VMD波谱在浅层土壤位置与原始波谱幅值相差较大,说明浅层土壤的雷达信号噪声较多,同时增加深层次土壤的信号幅值。但随着探测深度增加,原始波谱衰减强烈,这种现象会逐渐减弱。

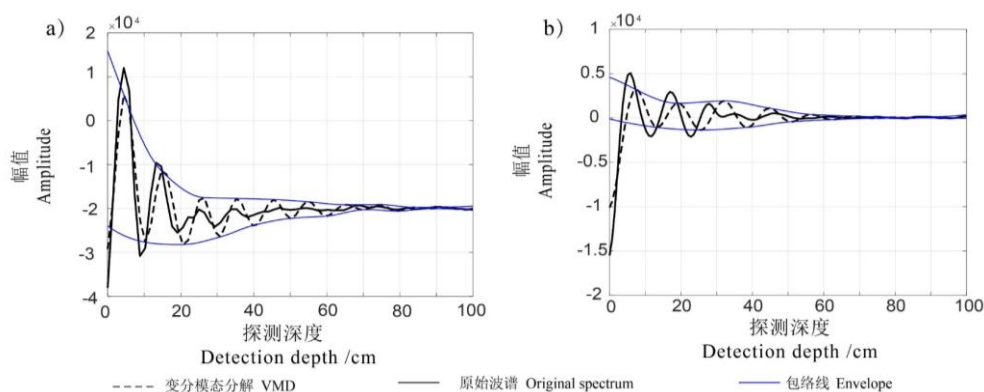


图6 700MHz(a)和1GHz(b)VMD波谱幅值和原始波谱幅值变化规律(以彩图发表)

Fig.6 Variation of VMD spectrum amplitude and original spectrum amplitude at 700MHz (a) and 1GHz (b)

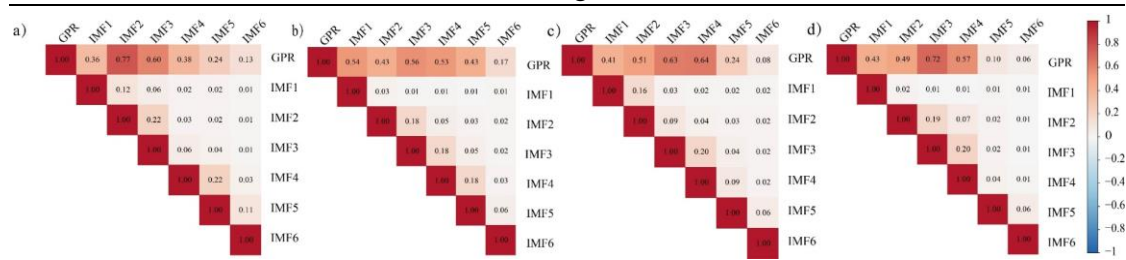


图7 700MHz 和 1GHz 下 CM02 (a, b) 和 CM04 (c, d) 的不同 IMF 与原始波谱的相关矩阵 (以彩图发表)

Fig.7. Correlation matrix of different IMFs and original spectra of CM02 (a, b) and CM04 (c, d) at 700 MHz and 1 GHz

2.2 以 VMD 和灰度图结合的方法获取潜育层的波谱特征

如图 8a 和图 8b 所示, 表层不具备潜育特征, 潜育层位置在 8~32 cm 处, 红色虚线代表土钻实测表潜下界, 该剖面的潜育层实际厚度为 24 cm, 红色实线代表 GPR 探测到潜育层上分界和下分界, 白色方框代表潜育层位置, 1GHz 的灰度图显示潜育层在 8.7~31.2 cm, 潜育层厚度为 22.5 cm, 上分界为波谱的第一特征谷, 下分界为波谱的第四特征峰, 且包络线在该特征峰的瞬时相位发生明显变化; 700MHz 的灰度图显示潜育层在 8~34.4 cm, 潜育层厚度为 26.4 cm, 上分界为波谱的第一特征谷, 下分界为波谱的第五特征峰, 同样包络线在此峰瞬时相位发生明显变化。如图 9a 和图 9b 所示, 该剖面潜育层实际厚度为 62 cm, 频率为 1GHz 的灰度图在 36 cm 处出现分层, 探测到潜育层厚度为 64 cm; 700MHz 的灰度图在 42 cm 处出现分层, 探测潜育层厚度为 58 cm, 频率为 1GHz 的 VMD 波谱在特征峰的包络线瞬时相位同样发生变化。CM02 田块中 1GHz 和 700MHz 的 GPR 探测到潜育层厚度与土钻测得潜育层厚度绝对差值分别为 1.5 cm 和 2.4 cm。CM04 田块中 1GHz 和 700MHz 的 GPR 探测潜育层厚度与土钻测得潜育层厚度绝对差值分别为 2 cm 和 4 cm, 表明 1GHz 的 GPR 对潜育层厚度的识别精度要高于 700MHz。

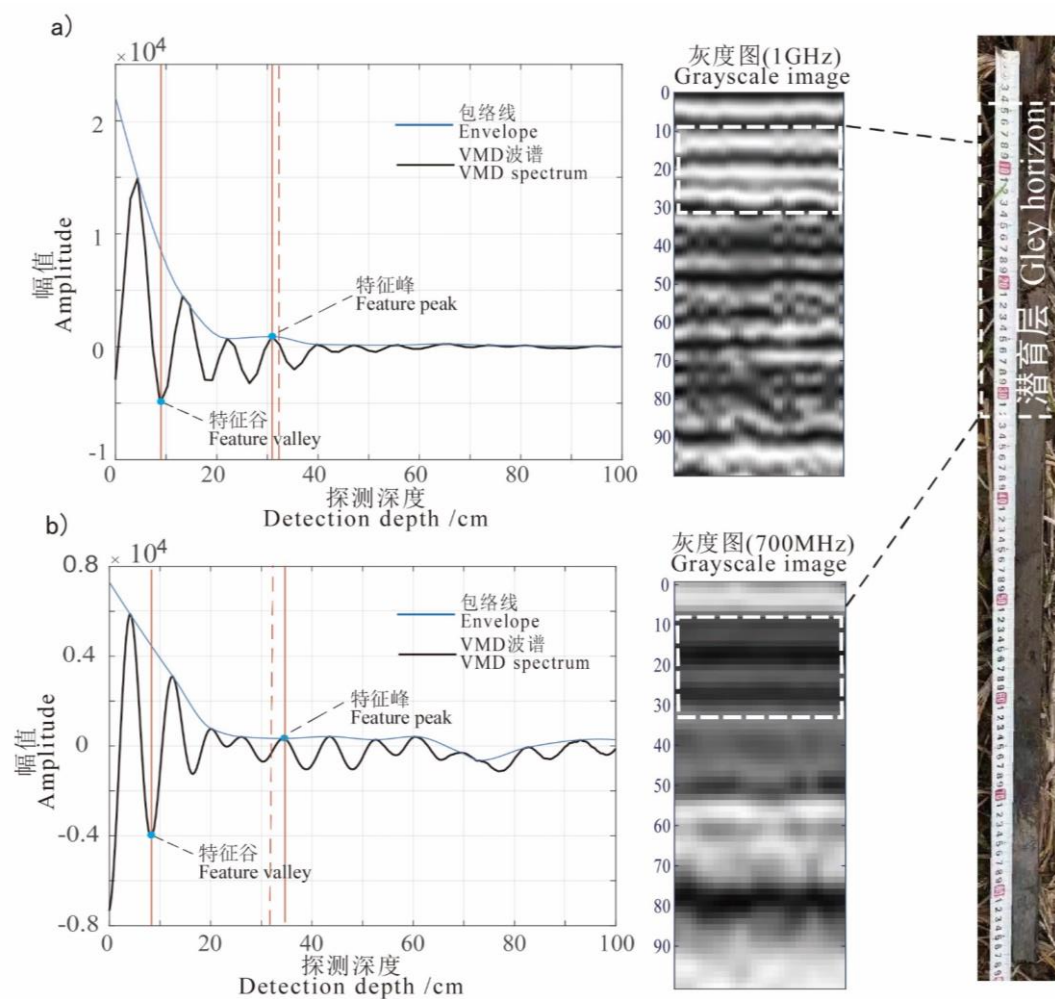


图8 1GHz (a) 和 700MHz (b) VMD 波谱、灰度图与土柱 (CM02) (以彩图形式发表)

Fig.8 1GHz (a) and 700MHz (b) VMD spectrum, grayscale image and soil drill (CM02)

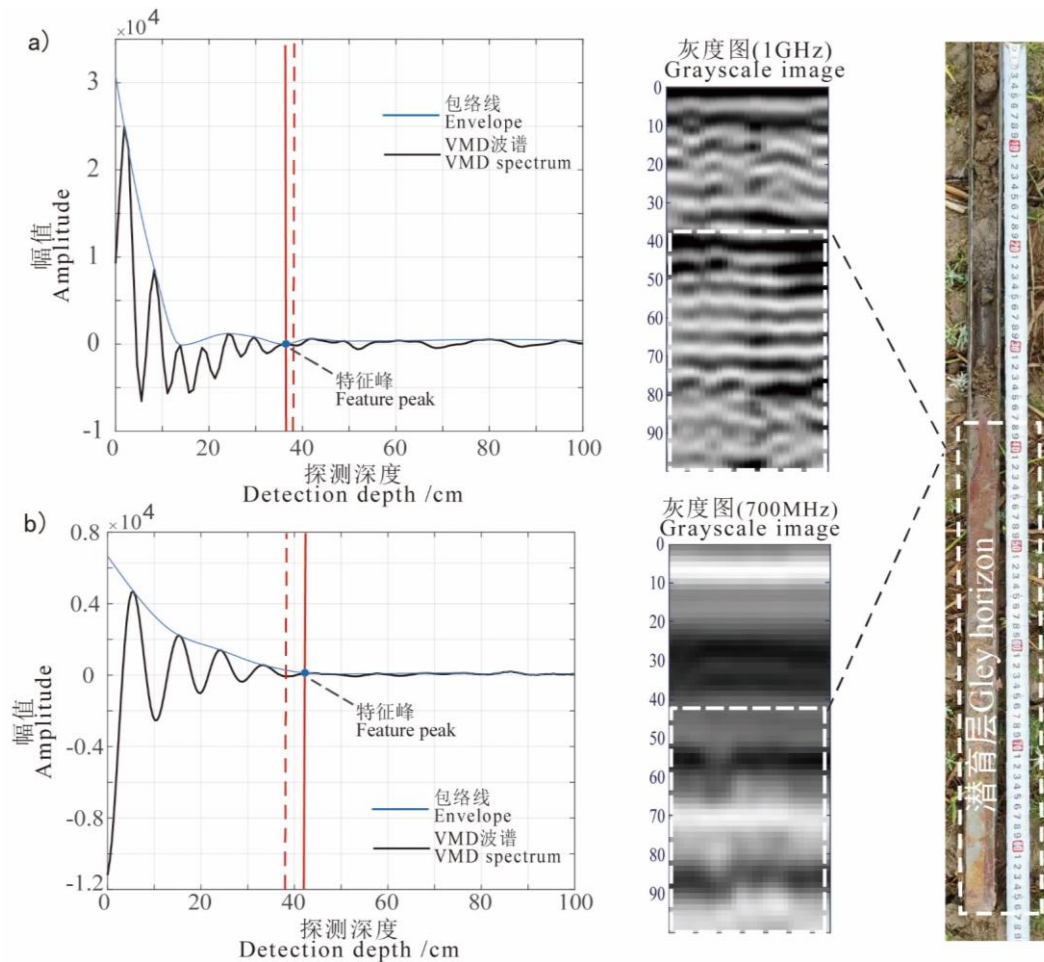


图9 1GHz (a) 和 700MHz (b) VMD 波谱、灰度图与土钻 (CM04) (以彩图形式发表)

Fig.9 1GHz (a) and 700MHz (b) VMD spectrum, grayscale image and soil drill (CM04)

2.3 田块尺度潜育层的空间变化

将 4 条测线使用 700MHz 和 1GHz 的 GPR 分别进行探测, 利用反距离权重插值获得潜育层空间网格数据集, 以土钻验证精度, 获得表潜 (CM02 田块) 和底潜 (CM04 田块) 的潜育层位置和厚度的空间连续变化图 (图 10)。在 CM02 田块中, 1GHz 天线 (图 10b) 在探测潜育上界的深度范围为 8~10 cm; 潜育下界的深度则在 32 cm 处上下波动, 700MHz 天线 (图 10a) 探测潜育上界的深度范围为 6~8 cm; 潜育下界的深度多数大于 33 cm, 只有少部分区域的深度在 32 cm 处上下波动。由于探测潜育层上下界均有误差, 两种频率的 GPR 探测潜育层的厚度时出现一定偏差, 1GHz 天线 (图 10b) 探测潜育层的厚度大面积集中在 23 cm, 700MHz 天线 (图 10a) 探测潜育层的厚度范围集中在 25~26 cm; 而 CM04 田块由于雷达信号随着探测深度的衰减, 造成大面积在相同位置但两种频率探测的潜育层厚度相差较大 (图 10c、图 10d)。如表 2 所示, CM02 田块的测线 1、测线 2、测线 3 和测线 4 在 1GHz 雷达下潜育层平均厚度为 23.12、23.26、23.17 和 22.98 cm, 田块潜育层平均厚度为 23.08 cm, 700Mhz 在测线上的潜育层平均厚度为 25.94、26.37、25.78 和 25.82 cm, 田块潜育层平均厚度为 25.88 cm。CM04 田块的 4 条测线在 1GHz 雷达下平均潜育层厚度为 58.78、60.66、59.30 和 59.00 cm, 田块平均潜育层厚度为 57.45 cm, 700MHz 在测线上的平均潜育层厚度为 59.41、58.00、59.09 和 59.97 cm, 田块潜育层平均厚度为 58.45 cm, 同时发现在单条测线上, 1GHz 的误差要小于 700MHz。同时发现在同一实验田中, 测线及田块上潜育层的变异系数均保持在 10% 以下, 且实验田潜育层厚度的变异系数不超过 3%, 说明在实验田中, 潜育层的厚度

变化并不大。

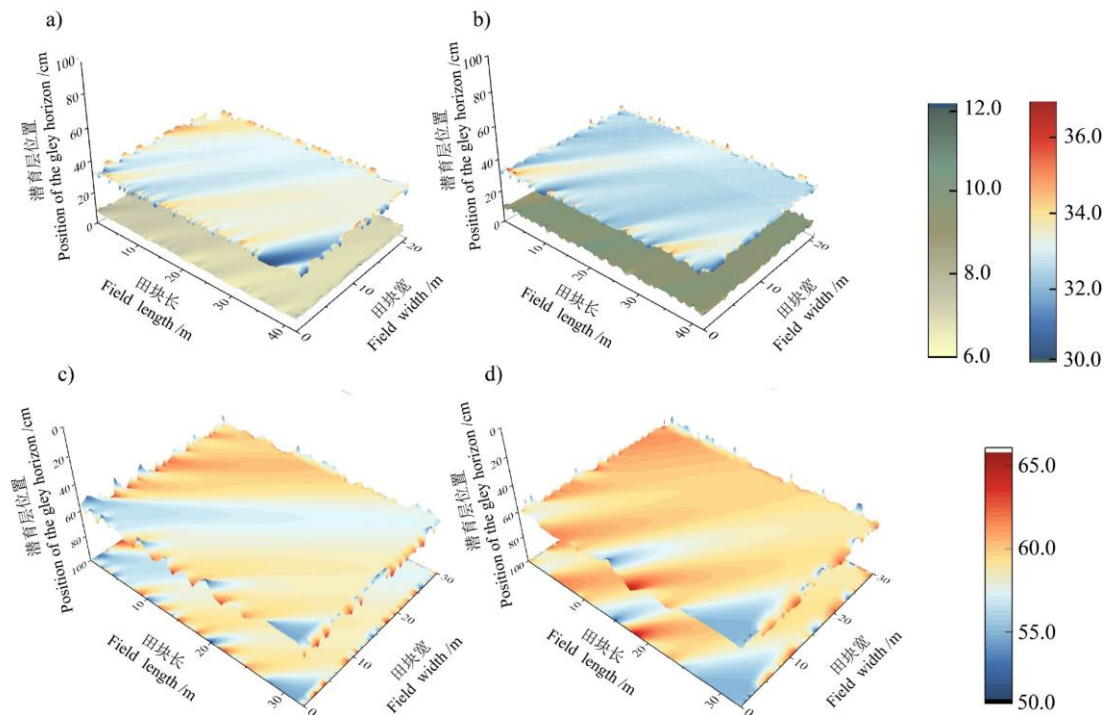


图 10 700MHz 和 1GHz 下 CM02 (a, b) 和 CM04 (c, d) 的潜育层空间分布位置 (以彩图形式发表)

Fig.10 Spatial distribution of the gley horizon of CM02 (a, b) and CM04 (c, d) at 700MHz and 1GHz

表 2 1GHz 和 700MHz 的雷达天线测定的潜育层厚度情况

Table 2 The thickness of the gley horizon measured by 1 GHz and 700 MHz radar antennas

编号 Number	探测 路线 Survey line	潜育层厚度 Grey layer thickness /cm	潜育层厚度 Grey layer thickness (1GHz) /cm	变异 系数 CV	误差 Error /cm	潜育层厚度 Grey layer thickness (700Mhz) /cm	误差 Error /cm	变异 系数 CV
CM02	测线 1	22.05	23.12±1.57	6.79	1.07	25.94±1.80	3.89	6.94
	测线 2	23.52	23.26±1.34	5.76	0.26	26.37±1.76	2.85	6.67
	测线 3	22.05	23.17±1.28	5.52	1.12	25.78±1.9	3.73	7.37
	测线 4	23.52	22.98±1.39	6.05	0.54	25.82±2.38	2.3	9.22
	田块 平均		23.08±0.49	2.12		25.88±0.72		2.78
CM04	测线 1	50.00	58.78±2.74	4.66	8.78	59.41±3.82	9.41	6.43
	测线 2	62.46	60.66±2.49	4.10	1.8	58.00±3.91	4.46	6.74
	测线 3	53.75	59.30±3.43	5.78	5.55	59.09±3.57	5.34	6.04
	测线 4	52.67	59.00±3.30	5.59	6.33	59.97±2.89	7.3	4.82
	田块 平均		57.45±1.39	2.42		58.45±1.47		2.51

2.4 两种频率 GPR 对潜育层识别的精度

不同频率的 GPR 对潜育层厚度识别能力有强弱之分,两种频率 GPR 测定的潜育层厚度与实测潜育层厚度均呈正相关(图 11),其中 1GHz(图 11b)的 GPR 对潜育层厚度的探测精度($R^2=0.905$, $RMSE=4.96$)要高于 700MHz(图 11a)的 GPR 的探测精度($R^2=0.832$, $RMSE=5.01$),与上文研究结果一致。同时研究发现,随着潜育层位置深度的增加,散点越

偏离 1: 1 线, 符合前文推测: 由于幅值随深度变弱而导致潜育层的探测能力会随着潜育层位置深度的增加而变弱。潜育层厚度的绝对误差图表明, 700MHz 对于探测潜育层厚度的绝对误差在多数情况下为 2~9 cm, 而 1GHz 探测潜育层厚度的绝对误差在多数情况下小于 5 cm, 说明对于潜育层而言, 1GHz 天线的精度要明显高于 700MHz。

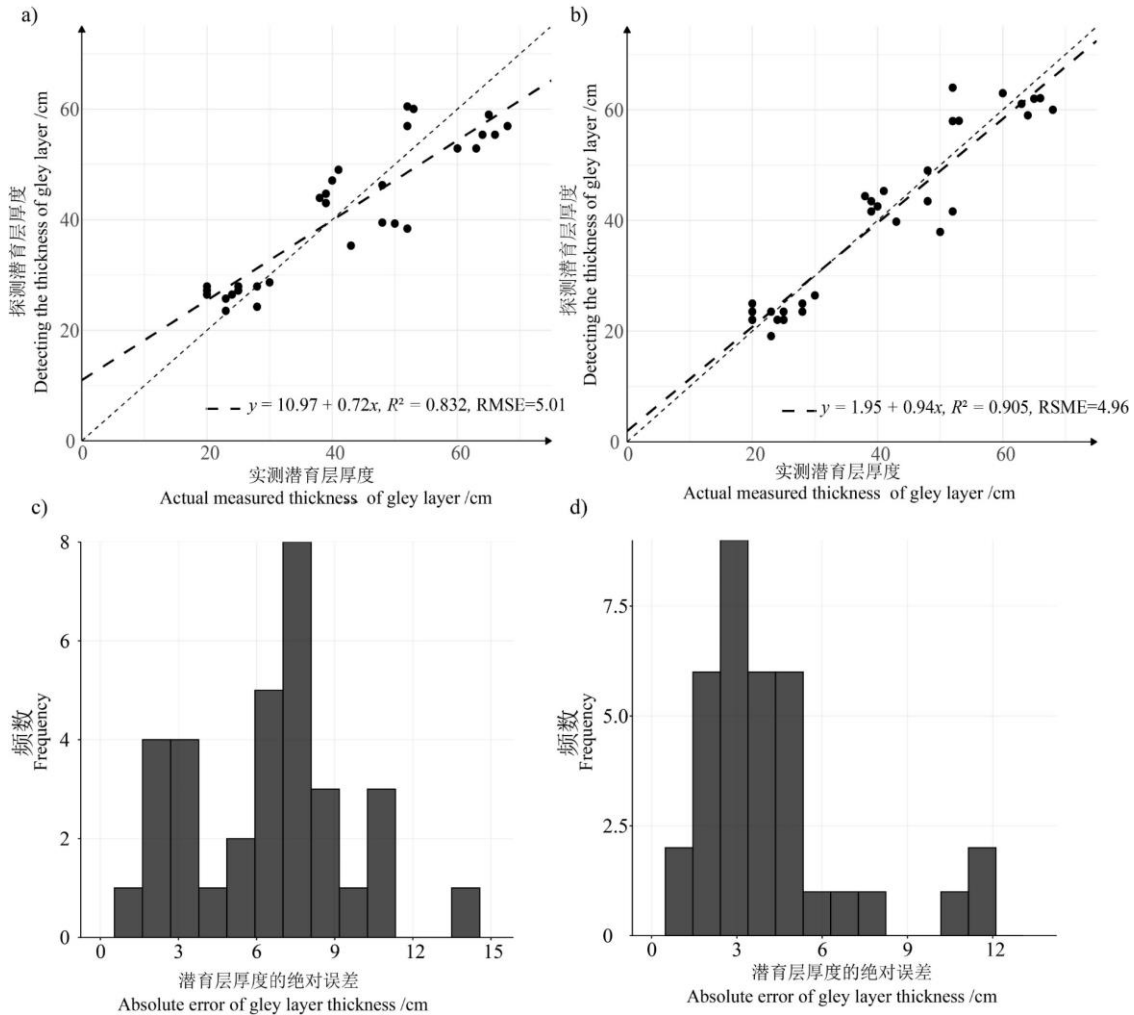


图 11 700MHz (a、c) 和 1GHz (b、d) 频率 GPR 测定潜育层界限精度评价和误差分析

Fig.11 Accuracy evaluation and error analysis of the gley horizon boundary measured by 700MHz (a, c) and 1GHz (b, d) frequency GPR

3 讨论

3.1 不同时频域分析方法的比较

传统 GPR 的时频域分析方法主要包括短时傅里叶变换 (STFT)、小波变换 (WT)、S 变换、经验模态分解 (EMD) 和变分模态分解 (VMD) 等。本研究采用变分模态分解 (VMD) 对 GPR 信号进行时频域统一分析, 该方法通过优化目标函数 (包括带宽约束和中心频率分离项) 确保模态分量在频域上的低相关性^[43], 且原始相关性最高的分量通常包含主要信号能量或特征^[44]。VMD 通过优化分解有效避免模态混叠, 从而提升 GPR 信号在噪声环境下的鲁棒性, 使保留土壤信息的有效信号更强, 最终提高土壤层识别精度^[45]。通过与小波变换的对比实验, 证实了 VMD 在保留土壤信息方面的能力更强, 为 GPR-VMD 模式下对土壤潜育

层的精准识别提供了有力支撑。然而,本研究仅进行了小波变换和 VMD 的深入讨论与比较,数据处理方法较为有限。尽管 VMD 相对于小波变换具有更强的抗噪分解能力和物理模态保留特性^[46],但其他方法仍具显著研究价值。例如 S 变换相比小波变换在时频聚焦性和相位保留方面表现出色^[47],在探测地下水位或弱反射界面时往往表现出更高的时频分辨率。近年来,一些新兴的联合时频分析方法(如同步挤压小波变换)也在 GPR 信号处理中展现出应用潜力。该方法通过对小波系数进行重分配,显著提高了时频图的能量集中度,使其在薄层与微弱界面的识别上优于传统小波变换。因此,在后续研究中,可将多种时频分析方法进行融合或级联,以充分发挥各自优势,是实现 GPR 信号更鲁棒的去噪与潜育层特征提取的重要方向;或引入深度学习框架(如一维卷积网络结合注意力机制)对 VMD 分解后的模态进行自动筛选与重构,进一步降低人为参数调节的影响。

3.2 天线频率选择和土壤环境对潜育层识别精度的影响及局限性

已有研究表明 GPR 天线频率越低,探测深度越大,分辨率越低^[48],且在湿润黏土中,700MHz 的有效探测深度约为 1.5 m,垂直精度为 7~10 cm,1GHz 的有效探测深度约为 1 m^[11],垂直精度为 3~5 cm^[49]。本研究在数据采集时,选用 200MHz、700MHz 和 1GHz 三种频率的天线,并采用大小两种增益设置,对 1 m 深度剖面内的土壤潜育层及其空间变化进行探测。由于关注的耕地土壤深度约为 1 m,为确保潜育层界限识别精度,本研究选取 700MHz 和 1GHz 天线用于潜育层位置与厚度的精细探测,为精确识别土壤潜育层提供保障。结果显示,1GHz 天线在潜育层厚度测量中的精度显著优于 700MHz,验证了有效探测范围内,天线频率越高,识别土壤层次的能力越强的规律;700MHz 和 1GHz 天线的绝对误差分别控制在 9 cm 和 5 cm 以内,与高导电土壤中雷达天线的垂直分辨率表现较为一致。潜育层识别误差主要来源于天线垂直分辨率的限制。若采用更高频率的天线,在有效探测深度内有望进一步提升潜育层位置与厚度的探测精度。然而,使用中高频率的雷达对土壤潜育层进行识别仍然存在一定的局限性,由于有效探测深度的限制,对于深埋的潜育层识别能力会变弱;而对于浅层潜育层,又可选用更高频率的天线来提高探测精度。本研究仅采用 700MHz 和 1GHz 两种频率的 GPR 对 1 m 深度剖面内的潜育层进行识别,未来可以进一步探讨随潜育层埋深变化而优选不同频率天线的探测效果。

在优化以提升潜育层识别精度的同时,本研究也需考虑 GPR 信号传播的外部环境因素,这些因素与频率的选择具有交互作用,从而影响探测精度。潜育层通常发育于黏粒含量较高且含水量相对集中的土壤层位,通常具有较高的介电常数和电导率,会显著降低雷达信号的有效传播距离和信噪比,是潜育层识别不确定性的重要来源。土壤含水量对 GPR 信号的主导作用增加了潜育层识别的不确定性。在耕地环境中,潜育层上方常因渗水受阻而形成相对高含水区,使雷达信号传播速度减慢并发生明显衰减。这种由水分变化引起的电磁响应,容易削弱潜育层界面反射特征。此外,土壤含水量在垂向剖面中并非恒定,而是呈现动态变化,这会导致雷达波传播速度随深度发生改变,从而使 GPR 信号的时深转换过程更为复杂,增加了潜育层埋深判定的不确定性。同时,土壤质地及其导电性对中高频率雷达信号的衰减效应也进一步制约了潜育层的可探测性。潜育层及其邻近土层通常具有较高的黏粒含量和富集的铁锰氧化物,这导致土壤整体电导率升高,使得中高频率雷达信号在传播过程中能量衰减加剧,信噪比显著下降^[13]。在此情况下,潜育层反射界面的振幅减弱,连续性变差,局部区域甚至难以形成稳定可识别的反射特征,从而影响潜育层界限的可靠判定。鉴于此,本研究对原始 GPR 信号实施了自动时变增益校正处理。该方法通过随深度动态增大增益,有效补偿了反射信号随深度的衰减,显著提升了深部界面的信号强度。为降低土壤水分对基线信号的干扰,野外数据采集均选择在土壤相对干燥的时段进行,以尽量减小含水量对探测结果的影响。此外,通过实测土壤含水量并采用 Topp 公式反演介电常数,进一步保证了 GPR 信号时间—深度转换的准确性。

3.3 探地雷达在水稻土潜育层无损探测中的应用价值与意义

潜育层是典型水稻土的土壤障碍之一,潜育水稻土主要分布在中国南方水稻种植区,且由于长期处于淹水状态,有机质分解较慢,容易积累。已有研究表明,潜育水稻土在适宜的管理条件下可显著提高水稻产量^[2],但潜育层位置及其厚度对水稻产量的影响有所不同。有研究表明潜育层较深时土壤在干旱年份的产量较潜育层较浅土壤高 5%~15%^[50],潜育层埋深较浅会导致表层土壤长期湿润,氧气扩散受阻,抑制根系呼吸与生长,进而降低作物产量。因此,精准识别潜育层的位置及其空间分布,是消减潜育水稻土障碍层的迫切需求。传统土钻或剖面法依赖化学试剂判断潜育层,不仅会破坏土体结构,而且仅适用于点位尺度,难以在田块乃至更大尺度上表征潜育层的空间变异与分布。而 GPR 技术弥补了这一缺陷,通过测线上的波谱信息反演潜育层位置,利用多条测线数据进一步实现区域尺度的潜育层空间反演,从而实现大面积土壤潜育层的无损、快速探测,并取得了较高的精度(图 11),为潜育水稻土障碍层消减及粮食稳产增产提供了关键数据支撑。针对中低产田土壤,利用两种频率的 GPR 完全可以实现对 1m 土体内潜育层的无损探测,可为潜育水稻土障碍层消减提供依据。然而,本研究主要侧重于潜育层空间分布的无损探测方法与精度验证,并未对其形成机制进行深入探究。在采集数据时也未针对土壤潜育层与其他发生层分别采样,从而探讨两者区别,在后续研究中可重点对其进行探究,将 GPR 反演获取的高分辨率空间分布数据与土壤理化性质(如铁锰形态、有机质组成等)进行深度融合,以期在区域尺度上定量解析潜育层的成因;或者结合长期水文监测数据,明确地下水位波动对潜育层发育与演化的驱动机制。通过以上研究,有望实现从“识别”到“预测”的跨越,为潜育水稻土的精准改良与可持续管理提供坚实的理论依据。

3.4 研究局限性与未来展望

虽然本研究利用 GPR 技术在识别潜育层方面取得了较好的效果,但仍存在一定的局限性。首先,所采用的数据处理方法较为单一,主要聚焦于 VMD 与小波变换的比较,未能全面涵盖更多时频分析技术。其次,研究尺度仍局限于田块尺度,尚未扩展至区域大尺度。此外,研究虽采用了更适用于有机质含量较高或黏土土壤的改进版 Topp 公式来计算介电常数,但这依然存在一定误差,从而影响了潜育层深度反演的准确率。最后,研究尚未对潜育层的成因机制及与其他发生层的理化性质差异展开深入分析,例如缺少基于铁锰还原形态、有机质组成或 pH 等指标的多变量综合分析,这制约了对潜育层形成动态过程的深入理解,难以作为土壤改良提供更全面的理论支持。

未来研究可从以下几个方面进一步提升和规范 GPR 在潜育层探测中的适用性。首先,可深入探究 VMD 对潜育层探测能力的强化机制,验证其更强的土壤信号保留特性是否确实能带来精度的显著提升。其次,优化天线的选择,选用更高频率的天线以提高浅层分辨率,或结合低频天线构建多频协同探测体系,以满足对潜育层不同深度的全面探测需求。此外,后续研究还可以进一步优化介电常数模型,尝试分层或动态计算方法以降低深度反演误差。最后,当前研究尺度仍较为局限,未来可扩展至区域尺度,结合地理信息系统(GIS)整合多源空间数据,提升区域尺度潜育层探测的全面性与系统性;同时构建区域尺度的潜育层空间分布预测模型。通过空间插值、机器学习(随机森林、地理加权回归)或深度学习(CNN/U-Net)等方法,实现潜育层埋深、厚度及危害程度的网格化制图,从而提升区域尺度潜育水稻土诊断的全面性、系统性和可操作性。

4 结 论

本研究采用两种频率(700MHz 和 1GHz)的探地雷达天线,预测了区域尺度典型水稻

土潜育层的空间分布。为降低土壤水分对 GPR 信号的干扰，并解决其导致的层位边界模糊问题，本研究在信号预处理阶段引入了自动增益校正，通过时变增益有效补偿了随深度衰减的信号幅度，显著恢复了深部界面的反射强度。同时，基于野外实测土壤含水量数据，采用 Topp 经验公式反演得到精确的土壤相对介电常数，从而对雷达波传播速度进行可靠校正，大幅提升了 GPR 信号时—深转换的准确性，为后续结果的可靠性奠定了坚实基础。在此基础上，研究发现变分模态分解对土壤 GPR 的信号幅值保留更多，并且幅值差随着探测深度增加而变小，为识别土壤障碍层提供保障；变分模态分解下的模态分量（IMF）是原始雷达信号的一种分解信号，研究发现高阶模态分量大多为噪声，与原始雷达信号相关性较低，而低阶模态分量多为土壤的解释信号，相关性较高；且不同频率下的噪声分量不相同；利用灰度图结合剖面可以有效判断土壤障碍层位置，在雷达信号上获取代表潜育层的特征波，捕捉其瞬时相位变化的特征峰以确定土壤障碍层位置，在剖面上的表现效果良好；两种频率的天线在 CM02 田块中识别潜育上界（耕作层）时会存在微小差异，频率高的雷达天线其误差会更小，研究发现 CM04 田块测线上潜育层厚度的偏差普遍较 CM02 田块要高，这是由于土壤结构的复杂性，识别目标越深，预测结果的误差就越大；同时研究表明天线频率越高，则预测精度更高，其中 1GHz 的预测精度更是高达 0.9，探测潜育层厚度的绝对误差也均集中在 5 cm 以下。因此，探地雷达技术可以用于探测土壤潜育层的位置和分布，且变分模态分解下的雷达信号更加适用，为土壤障碍层调查提供了一种无损、高效的探测方法。

参考文献 (References)

- [1] Li Q K. Paddy soils of China[M]. Beijing: Science Press, 1992. [李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [2] Li S, Ci E, Wen T, et al. Genetic characteristics and soil taxonomy of gleyic paddy soils in Chongqing[J]. Soils, 2019, 51(4): 813-820. [李松, 慈恩, 文婷, 等. 重庆市潜育水稻土发育特性和系统分类研究[J]. 土壤, 2019, 51(4): 813-820.]
- [3] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Annals of Botany, 2003, 91(2): 301-309.
- [4] Bravin M N, Travassac F, Le Floch M, et al. Oxygen input controls the spatial and temporal dynamics of arsenic at the surface of a flooded paddy soil and in the rhizosphere of lowland rice (*Oryza sativa* L.): A microcosm study[J]. Plant and Soil, 2008, 312(1): 207-218.
- [5] Gong Z T, Zhang X P. Characteristics of paddy soil resources in China and potential of increasing yield of low-yield paddy soil[J]. Research of Agricultural Modernization, 1988, 9(3): 33-36. [龚子同, 张效朴. 我国水稻土资源特点及低产水稻土的增产潜力[J]. 农业现代化研究, 1988, 9(3): 33-36.]
- [6] Ruan W M, Liu H J, Dong H, et al. Enhanced Ground-Penetrating radar methods for horizon and dielectric characterization of Luvisols[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 234: 110296.
- [7] Motavalli P. Use of soil cone penetrometers to detect the effects of compaction and organic amendments in claypan soils[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 74(2): 103-114.
- [8] Jayawickreme D H, Jobbágy E G, Jackson R B. Geophysical subsurface imaging for ecological applications[J]. New Phytologist, 2014, 201(4): 1170-1175.
- [9] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [10] Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 83(2): 173-193.
- [11] Jol H M. Ground penetrating radar: Theory and applications[M]. Lei W T, Tong X Z, Zhou Y, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. [Harry M. Jol. 探地雷达理论与应用[M]. 雷文太, 童孝忠, 周旻, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.]
- [12] Zhou L G, Yu D S, Wang Z Y, et al. Soil water content estimation using high-frequency ground penetrating radar[J]. Water, 2019, 11(5): 1036.
- [13] Algeo J, Slater L, Binley A, et al. A comparison of ground-penetrating radar early-time signal approaches for mapping changes in shallow soil water content[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 180001.
- [14] Liu L B, Qian R Y. Ground penetrating radar: A critical tool in near-surface geophysics[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2606-2617. [刘澜波, 钱荣毅. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2606-2617.]
- [15] Raper R L, Asmussen L E, Powell J B. Sensing hard pan depth with ground-penetrating radar[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(1): 41-46.
- [16] Johnson R W, Glasscum R, Wojtasinski R. Application of ground penetrating radar to soil survey[J]. Soil Survey Horizons, 1982, 23(3): 17-25.
- [17] André F, van Leeuwen C, Saussez S, et al. High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 78: 113-122.
- [18] Jonard F, Mahmoudzadeh M, Roisin C, et al. Characterization of tillage effects on the spatial variation of soil properties using ground-penetrating radar and electromagnetic induction[J]. Geoderma,

2013, 207/208: 310-322.

[19] Klotzsche A, Jonard F, Looms M C, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 180052.

[20] Lombardi F, Ortuani B, Facchi A, et al. Assessing the perspectives of ground penetrating radar for precision farming[J]. Remote Sensing, 2022, 14(23): 6066.

[21] Wang P, Li X J, Min X Y, et al. Experimental study on GPR measurement of coastal saline soil profile[J]. Soils, 2016, 48(6): 1261-1269. [王萍, 李新举, 闵祥宇, 等. GPR 测量滨海盐渍土剖面分层的实验研究[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1261-1269.]

[22] Cao Q, Song X D, Yang S H, et al. Identification of plinthitic red earth layers in red soil regions typical of South China with ground penetrating radar[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 813-824. [曹棋, 宋效东, 杨顺华, 等. 基于探地雷达的典型红壤区网纹红土层识别[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 813-824.]

[23] 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.]

[24] Chen Y Q, Xiao B X. On the status quo and development of ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(2): 149-155. [陈义群, 肖柏勋. 论探地雷达现状与发展[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(2): 149-155.]

[25] Hubbard S, Grote K, Rubin Y. Mapping the volumetric soil water content of a California vineyard using high-frequency GPR ground wave data[J]. The Leading Edge, 2002, 21(6): 552-559.

[26] Doolittle J A, Collins M E. Use of soil information to determine application of ground penetrating radar[J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33(1/2/3): 101-108.

[27] Luo G B, Cao Y G, Bai Z K, et al. Representation and inversion of reconstructed soil volumetric water content in loess open pit mining area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(4): 529-537. [罗古拜, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区重构土壤体积分含水率表征与反演[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(4): 529-537.]

[28] Zhao Q Q, Lei W, Deng Y, et al. Ground penetrating radar(GPR) in antenna frequency selection of engineering investigation[J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(2): 61-64. [赵倩倩, 雷宛, 邓艳, 等. 探地雷达在工程勘察中天线频率的选择[J]. 勘察科学技术, 2013(2): 61-64.]

[29] Zhang Y H. Working principle and application of ground detection radar[J]. Railway Construction Technology, 2003(4): 70-72. [张玉海. 探地雷达的工作原理和检测应用[J]. 铁道建筑技术, 2003(4): 70-72.]

[30] Curioni G, Chapman D N, Metje N. Seasonal variations measured by TDR and GPR on an anthropogenic sandy soil and the implications for utility detection[J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 141: 34-46.

[31] Paz C, Alcalá F J, Carvalho J M, et al. Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 868-885.

[32] Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43(2/3/4): 119-138.

[33] Benedetto A, Pajewski L. Civil engineering applications of ground penetrating radar[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015.

[34] Xu B S, Tian G, Zeng Z F, et al. Delimitating boundary and interface of saline soil in Baicheng area by using GPR[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(4): 408-411. [徐白山, 田钢, 曾昭发, 等. 白城地区盐碱地分层划界的地质雷达方法研究[J]. 长春科技大学学

报, 2001, 31(4): 408-411.]

[35] Huisman J A, Snehvangers J J C, Bouten W, et al. Mapping spatial variation in surface soil water content: Comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(3/4): 194-207.

[36] Davis J L, Annan A P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy[J]. Geophysical Prospecting, 1989, 37(5): 531-551.

[37] Roth K, Schulin R, Flühler H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach[J]. Water Resources Research, 1990, 26(10): 2267-2273.

[38] Wu X L, Wang Z Z, Xi B Q, et al. Ground-penetrating radar denoising based on wavelet adaptive thresholding method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4686-4692. [吴学礼, 王壮壮, 习炳权, 等. 基于小波自适应阈值方法的探地雷达去噪[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4686-4692.]

[39] Baili J, Lahouar S, Hergli M, et al. GPR signal de-noising by discrete wavelet transform[J]. NDT & E International, 2009, 42(8): 696-703.

[40] Dou Q X, Wei L J, Magee D R, et al. Real-time *Hyperbola* recognition and fitting in GPR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1): 51-62.

[41] Lu F Q, Yue X, Wang Y D, et al. Research on intelligent fault diagnosis method of planetary gearbox based on A-VMD and CNN[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(7): 15-19. [陆凤清, 岳夏, 王亚东, 等. 基于 A-VMD 与 CNN 的行星齿轮箱智能故障诊断方法研究[J]. 机电工程技术, 2022, 51(7): 15-19.]

[42] Ma Z Q, Liu X Y, Zhang J J, et al. Application of VMD-ICA combined method in fault diagnosis of rolling bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 201-207.

[43] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.

[44] Liu W, Cao S Y, Wang Z M. Application of variational mode decomposition to seismic random noise reduction[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(4): 888-898.

[45] Zhang X B, Nilot E, Feng X, et al. IMF-slices for GPR data processing using variational mode decomposition method[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 476.

[46] Xu J, Ren Q, Cao M. Study on Instantaneous Frequency Analysis of GPR Signal Using Variational Mode Decomposition[C]//Proceedings of the Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring. Hong Kong, China: NDT.net, 2019.

[47] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.

[48] Slowik. Influence of GPR measurement conditions on depth penetration and resolution of radar images illustrating lowland valley alluvial fill (field experiment)[C]//International Conference on Ground Penetrating Radar. IEEE, 2012. DOI:10.1109/ICGPR.2012.6254953.

[49] Lambot S, Slob E C, van den Bosch I, et al. Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2555-2568.

[50] Lal B, Gautam P, Nayak A K, et al. Agronomic manipulations can enhance the productivity of anaerobic tolerant rice sown in flooded soils in rainfed areas[J]. Field Crops Research, 2018, 220: 105-116.

(责任编辑: 檀满枝)