

# 探地雷达技术探测土壤特性的研究进展

王敬朋<sup>1</sup>, 王金满<sup>1,2\*</sup>, 张雅馥<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘要:**总结了探地雷达技术(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)使用反射波、地波、反射系数、全波形反演和早期信号分析进行土壤特性研究的方法,在详细介绍基本原理的基础上,通过分析近年来的研究实例展示 GPR 探测土壤特性的能力和局限性:基于信号速度的分析方法应用广泛,数据获取和处理简单,但结果具有主观性,受实验环境的限制;基于信号幅度的分析方法受水分分布和表面粗糙度的影响,容易出现低估的现象;全波形反演和早期信号分析方法的提出强调了 GPR 探测中数据获取和处理的重要性,为此应设计新的数值分析模型和数据处理方法,提高数据采集速度和雷达测量精度。

**关键词:** GPR; 土壤含水率; 土壤层深度; 土壤盐分; 土壤质地; 根系

**中图分类号:** S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)01-0242-11

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020042701

王敬朋, 王金满, 张雅馥. 探地雷达技术探测土壤特性的研究进展 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 242-252

WANG Jing-peng, WANG Jin-man, ZHANG Ya-fu. Soil Characteristics Measurements with Ground Penetrating Radar: A Review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 242-252

地球物理方法是具有无损性和可重复性的测量方法,已在众多地球科学地下勘测中得到关注和应用。该方法的开发最初是为了进行地下深层测量,现已扩展到浅层土壤中<sup>[1-2]</sup>。电磁感应技术(EMI)可以通过监控土壤电导率的变化表征土壤特性,但只能应用于特定地点且误差较大,对于复杂多样的土壤特性来说具有局限性<sup>[2]</sup>。探测土壤特性的传统方法可以针对特定深度或空间、选择特定精度进行测量,但具有破坏性,并不允许进行长期重复的测量<sup>[3]</sup>;土壤湿度传感器、土壤电导率仪、土壤压实仪等实现了结合传统方法和新技术采集土壤特性数据的进步,但其结果大都是点信息<sup>[4-8]</sup>,不能满足研究具有强空间变异性土壤的需求。微波遥感技术是绘制更大尺度的土壤含水量的有效手段,但是测量深度偏浅(小于 0.1 m)<sup>[9]</sup>。探地雷达技术(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)可以实现点测量和微波遥感技术的折衷<sup>[10]</sup>,通过测定土壤的电磁特性来定位土壤中的物体或界面,实现对土壤水分、结构、质地或植物根系的高精度探测<sup>[2]</sup>。现行的研究均已表明,GPR 可以针对特定的研究目标和研究区域以不同的测量方法探测土壤特性。GPR 可以探测的土壤特性

有很多,主要包括土壤含水率、土壤层深度、土壤有机物厚度、土壤盐分、土壤质地、土壤中的砾石含量、生物气体、植物根系及根直径、根生物量等(表 1)。

本文将通过总结 GPR 在不同范围内的应用研究,展示 GPR 探测土壤特性的方法原理、优缺点和应用情况,为不同土壤特性的雷达探测提供依据和参考。

## 1 探地雷达技术

GPR 系统主要包含发射和接收天线、控制单元和显示单元等<sup>[11-12]</sup>,发射天线向地下发射高频短脉冲的电磁波,中心频率一般在 10 MHz ~ 3 GHz 之间<sup>[13]</sup>,电磁波在遇到电性差异大的分界面或目标体后会反射回地面被接收天线接收,根据传播路径电磁波主要分为空气波、地波、反射波和折射波,根据获取的电磁波双程走时、振幅、波形等信息可以确定地层结构或目标体的深度位置。电磁波在非饱和土壤中的传播速度取决于土壤介电常数,可以基于地波或反射波速度计算土壤介电常数,在低损介质中电磁波波速 $v$ 和介电常数 $\epsilon$ 的关系为:

$$\epsilon = (c/v)^2$$

收稿日期: 2020-04-27; 修订日期: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(50749032)资助

作者简介: 王敬朋(1996-),男,山东省济宁市人,硕士,主要从事土地整治与生态恢复研究。E-mail: wangjingpeng@cugb.edu.cn

\*通讯作者: E-mail: wangjinman@cugb.edu.cn

表 1 探地雷达技术探测土壤特性的研究汇总  
Table 1 Summary of soil characteristics detected using GPR methods.

应用范围 Application	方法 Method	参考文献 Reference
土壤含水率	反射波速度	刘等, 2020; 赵贵章等, 2020; 罗古拜等; 2019; 刘等, 2018; Ercoli等, 2018; 吴志远等, 2017; 陆等, 2017; Koyama等, 2017年; 刘成禹等, 2016; 王前锋等, 2013; 潘等, 2012; Steelman等, 2012; Wollschlager等, 2010; Bradford等, 2008.
	地波速度	曹棋等, 2020; Koyama等, 2017; 陆等, 2017; Mangel等人; 2017; Terry等, 2017; Paz等, 2017; Mertens等, 2016; Ardekani等, 2013; Steelman等, 2012; Pallavi等, 2010; van der Kruk等, 2010.
土壤层深度	表面反射系数	金光来等, 2020; 崔凡等, 2018; 吴志远等, 2017; 卢奕竹等, 2017; 马福建等, 2014; Ardekani等, 2013; 王前锋等, 2013; Reppert等, 2000.
	全波形反演	Klotzsche等, 2018; 齐等人; 2018; Gueting等, 2017; Tran等, 2015; Ardekani等, 2014; Mourmeaux等, 2014; Ardekani等, 2013; Minet等, 2012; Minet等, 2011; Meles等, 2010; Muller等, 2010; Lambot等, 2008; Weihermüller等, 2007; Lambot等, 2004.
有机层厚度	早期信号分析	崔凡等, 2018; Algeo等, 2016; Comite等, 2016; 吴志远等, 2015; Comite等, 2014; Ardekani等, 2013; Di Matteo等, 2013; Ferrara等, 2013; Pettinelli等, 2007; Grote等, 2003.
	信号反射技术	李刚等, 2020; 高强山等, 2019; Comas等, 2017; Rodriguez-Robles等, 2017;
土壤盐分和质地	信号反演技术	Comas等, 2017; Simms等; 2017张昊等, 2016; 夏银行等, 2016; Andre等, 2016; 李等, 2016; 张等, 2014; Novakova等, 2013; Simeoni等, 2009.
	早期信号分析表面反射系数	André等, 2016; André等, 2015; Buchner等, 2012.
土壤根系	信号反射技术	André等, 2016; Li等, 2015; André等, 2015; André, 2014; Winkelbauer等, 2011.
	信号反射技术	马永辉等, 2020; 刘成禹等, 2016; Rejsek等, 2015; Busch等, 2014; Benedetto等, 2013; Tosti等, 2013; 何瑞珍等, 2011; Meadows等, 2006.
根直径和生物量	信号反射技术	刘等, 2018; Rodriguez-Robles等, 2017; Simms等, 2017; Tanikawa等, 2016; Stover等, 2016; Borden等, 2016; 李等, 2016; Tardio等, 2016; Freeland等, 2015; 吴等, 2014; 朱等, 2014; 郭等, 2013; Raz-Yaseef等, 2013; 崔等, 2011.
	信号反射技术	王明凯等, 2020; 刘等, 2018; Rodriguez-Robles等, 2017; Simms等, 2017; 李等, 2016; Stover等, 2016; Tanikawa等, 2016; Borden等, 2016; 崔等, 2011.
其他内容		张迪等, 2020; 罗古拜等, 2019; 刘等, 2018; Comas等, 2017; Terry等, 2017; 刘等, 2016; Walter等, 2016.

土壤的电磁特性主要指土壤介电常数和电导率, 它们和水文参数如 SWC、土壤孔隙、黏土含量和土壤盐分等有关, 介电常数和电导率关系为:

$$v = 1 / \sqrt{\mu\epsilon}$$

介电常数通常用来获取 SWC 或孔隙率, 根据电导率的变化可以获取黏土含量或土壤盐分。土壤介电常数和 SWC ( $\theta$ ) 具有很多经验公式, 使用最广泛的是 Topp 方程<sup>[11]</sup>:

$$\theta = -0.053 + 0.0293\epsilon - 0.00055\epsilon^2 + 0.0000043\epsilon^3$$

GPR 的输出结果通常以 2D 雷达图显示, 在探测根系等需要进行更为详细解释的工作中需要进行 3D 图像建模 (图 1), 建立 3D 模型需要更为严格的数据收集和处理方法<sup>[14-16]</sup>。基本的 GPR 数据处理步骤为: 原始数据编辑、常规滤波、时间增益、数字处理、地形处理、图像显示和地质解释, 随着建模模拟思想的介入, GPR 数据处理的思路也从图像处理过渡到了数值分析, 分析结果更为客观准确<sup>[17-20]</sup>。

## 2 GPR 在探测土壤含水率中的应用

探测土壤含水率 (SWC) 是 GPR 最常见的应用。本文将重点介绍 5 种方法的原理、应用以及近年来

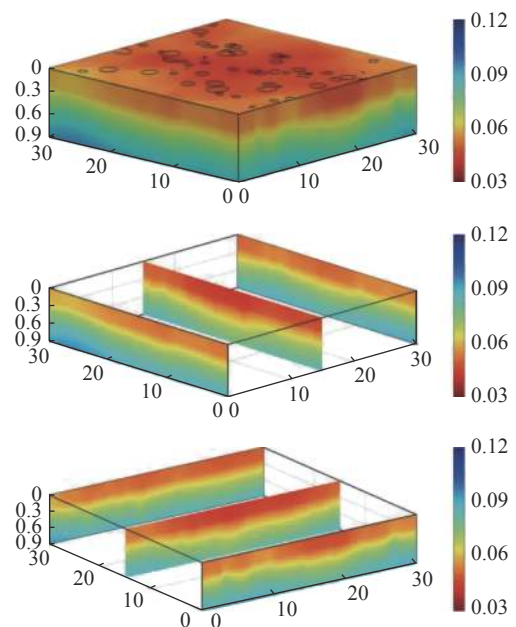


图 1 土壤含水率的 3D 可视化, 表面空心椭圆为覆盖植被的位置和大小<sup>[16]</sup>

Fig.1 The 3D visualization of soil water content. Open ovals on the surface represent the distribution and size of shrub canopies

的更新情况: 基于电磁波信号反射, 可以根据反射波或地波的速度进行反射速度分析, 反射系数法是

基于反射幅度分析的方法；全波形反演是通过使用雷达信号的全部信息进行数据反演的方法；早期信

号分析则通过分析信号包络幅度获取土壤的电磁特性（表 2）。

表 2 GPR 探测土壤含水率的 5 种方法  
Table 2 Five methods of soil moisture estimation using GPR

方法 Methods	适用条件 Applicable conditions	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
信号速度分析方法 ——反射波	足够的信号穿透力 清晰的介电常数对比度 明确反射器深度	理论简单易懂 广泛用于探测 SWC	无法控制测量深度分辨率 多偏移量测量操作复杂 多通道测量需较大偏移量，会促进电磁波衰减 空气波和地波难以区分
信号速度分析方法 ——地波	不需要清晰的反射层 导波的分散特性	-	地波振幅衰减较快 出现导波时可能无法识别
信号幅度分析方法 ——表面反射系数	精确的幅度测量 高频率天线	-	容易低估介电常数
全波形反演	-	提高地下特征分辨率 数据反演计算精度高 解决地波空气波难以识别的问题 检查波形属性与土壤电磁特性的关系	受土壤粗糙度和异质性的影响
早期信号分析	GPR 信号的早期部分	-	-

## 2.1 基于反射波速度确定土壤含水率

电磁波在土壤中传导时遇到介电常数对比时会发生反射，土壤干地质材料和水、空气的介电常数差异明显，因此土壤水分在时间或空间上的任意微小变化都可以对电磁波的速度和幅度产生显著的影响。基于反射波速度确定含水率时有两种主要的方法：

一种是保持发射和接收天线间距不变的单偏移量测量方法，如固定偏移方法（FO），这种方法具有较高的分辨率，可以进行实时快速的监测，但是很难校准零时间、无法确定反射器深度，因此夏银行等在监测 SWC 运动时进行了水分均匀分布的假设<sup>[21]</sup>，Jan 等在已知反射器深度的情况下获取到了 SWC<sup>[22]</sup>。罗古拜等通过人工放置反射器获取的数据与采样实测相比最大误差为 3.2%，这种方法可以有效地解除限制，但是反射器深度较浅<sup>[12]</sup>。刘欣博等人选择粗根作为反射器，使用自动双曲线检测算法识别出了电磁反射速度，获取了平均土壤含水率（ASWC）和一定深度间隔内的土壤含水率（ISWC），野外实验数据表明均方根误差分别低至  $0.003 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  和  $0.012 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ <sup>[16, 23]</sup>。粗根是随机自由分布的自然反射器，使用这种方法可以在不需要反射器的先验深度、不干扰土壤环境的情况下计算反射波速度<sup>[24-26]</sup>。

另一种是可以改变发射和接收天线间距的多偏移量测量方法，分为共中点法（CMP）和宽角法（WARR），CMP 是天线中心固定、发射和接收天线同时向相反方向等距移动的测量方法，WARR 是发射天线保持不动、移动接收天线使天线间距等距

增大的测量方法，这两种方法均可以通过电磁波速度推求土壤介电常数和含水率（图 2）。Steelman 等基于正态移动速度分析方法和 CMP 使用多频 GPR 监测了中纬度气候高度动态的 SWC 垂直状况<sup>[27]</sup>；Koyama 等应用 CMP 在不同环境中获取了土壤介电常数和反射器深度，和时域反射仪（TDR）测量相比误差分别为 1.9% 和 5 cm，在 P 波段比 TDR 测量更加有效，可以获取土壤水分的垂直分布状况<sup>[28]</sup>。多偏移量测量可以在反射器深度未知的情况下获取电磁波速度，并可以通过数值模型自动识别反射器深度，但也容易产生偏移误差：CMP 偏向共中点位置，WARR 偏向固定天线位置，并且由于需要手动改变天线偏移，数据获取相对困难，在实际应用中受到很多限制<sup>[29-31]</sup>。

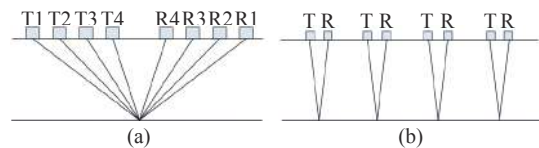


图 2 CMP 方法(a)和 WARR 方法(b)的差异  
Fig.2 The differences between the CMP method (a) and the WARR method (b)

## 2.2 基于地波速度确定土壤含水率

地波是通过土壤表层从发射源直接传播到接收器的信号<sup>[32]</sup>，在没有清晰反射器的条件下，使用 GPR 地波是探测 SWC 的最佳方法。地波信息由天线间距和传播时间之间的线性关系表达，此时电磁波速度可以根据地波传播时间和天线间距（或多偏移测量中地波斜率）计算。地波的识别可以使用 CMP

或 WARR, 但由于多偏移测量比较麻烦, 且空气波和地波在干燥条件下较难区分<sup>[33]</sup>, 可以首先使用多偏移测量来确定地波在不同天线间隔的到达时间, 选择可以将其与空气波分开的天线间隔, 再使用 FO 方法获取土壤介电常数<sup>[34]</sup>。

地波在地表最上部传播, 振幅随距离衰减很快, 测量深度和天线频率成负相关。Tardío 等认为 225 ~ 450 MHz 天线为 10 cm<sup>[35]</sup>, Catarina 等认为 450 ~ 900 MHz 天线为 17 ~ 25 cm<sup>[36]</sup>。Galagedara 等使用 GPRMAX2D 建立双层土壤模型对电磁波进行了数值模拟, 发现采样深度随天线频率和 SWC 变化而变化、和波长存在强线性关系<sup>[33]</sup>, 并随天线间隔的增加而增加<sup>[37]</sup>。天线距离的增加也会降低空间分辨率, Keslinen 认为最优天线间隔为 1.0 ~ 2.0 m<sup>[32]</sup>, 吴志远在 74 组数据中选择的分别为 1.02 m、1.14 m<sup>[38]</sup>。

地波的识别同样需要水分均匀分布的假设, 在动态水文过程中, 或土壤剖面具有不同环境和强反射层的情况下, 基于地波获取土壤含水率不太理想<sup>[39]</sup>。当冻土层深处或者降水在均质土壤中形成湿润锋面时会出现低速层, 低速层捕获的雷达信号是角度超过 Snell 临界角、最终发生水平扩散的电磁波, 将其视为波导<sup>[40-44]</sup>。波导具有分散特性, 取决于介电常数、波导层厚度和底层介电常数<sup>[41]</sup>, 因此可以根据波导的分散特性探测 SWC, Strobbia 等在山坡获取了波导的分散关系和波导层属性, 建立了单层正向模型估算 SWC 的时间变化状态, 使用了多层正向模型估计湿润土壤层的 SWC, 强调了反演等价问题的重要性<sup>[42]</sup>。Van 等提出了一种从分散的横向电 (TE) 和横向磁 (TM) GPR 数据通过计算相速度谱、选取色散曲线、合成色散曲线来估算参数的方案<sup>[22]</sup>, 在更加异构的环境中需要通过反演 TE 和 TM 分散波获取单层低速波导厚度和介电常数, 实验结果表明至少使用两种反演模型才能够减少拾取色散曲线与合成色散曲线之间的失配、重建两层波导的属性。Mangel 等通过 HYDRUS-1D 调整 Mualem-van Genuchten 方程参数后进行渗透模拟发现, 波导的分散程度取决于水在波导中的分布<sup>[40-43]</sup>; 当湿润区域分为两层时, 基于单纯形法的全局网格搜索可以有效估计 SWC, 经过改组的复杂演化算法可以约束分段线性函数以匹配 SWC 曲线。这项研究在有效地改善 Strobbia 多层 GPR 波导模型的同时, 表明了基于波导分散特性进行 GPR 数据反演获取土壤水分渗透早期动态的优越

性, 为未来研究提供了积极的理论支撑。

### 2.3 基于表面反射系数确定土壤含水率

表面反射系数 (SRC) 是与土壤介电常数相关的特性, 它通过地面上方车辆或低空飞行器安装的 GPR 向空气发射的表面反射探测 SWC, 需要进行精准的信号幅度测量<sup>[44]</sup>。介电常数可以基于采集与理想的反射振幅对比确定, 是随深度变化的非线性平均值, 因此采用高频天线测量效果更佳<sup>[44-46]</sup>:

$$R = -A_R/A_M$$

$$\varepsilon = \left( \frac{1-R}{1+R} \right)^2$$

其中 R 为反射系数,  $A_R$  为采集振幅,  $A_M$  为理想振幅。SRC 方法需要准确的信号幅度测量, 研究表明振幅 1% 的误差可以导致 SWC 为  $0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  的误差达  $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 当水分更低时误差更高。Ardekani 等运用 SRC 在野外裸土探测了 SWC, 得到了和地波、全波形反演方法相似的结果, 但受环境因素的影响较大<sup>[47]</sup>, 主要因素是剖面上 SWC 随深度的变化和地表粗糙度<sup>[48]</sup>; SWC 可以在短距离内产生巨大波动, 导致反射系数衰减。根据瑞利准则, 表面的突起高度超过波长八分之一时认为是粗糙<sup>[49]</sup>, 因此表面粗糙度对于 1 GHz 频率天线应低于 0.038 m, 对于 225 MHz 频率天线应低于 0.167 m<sup>[50]</sup>。

### 2.4 基于全波形反演方法确定土壤含水率

全波形反演方法 (FWI) 是高精度要求下进行 GPR 数据分析的产物, 是计算机用于 GPR 数据反演领域的典型标志。FWI 最初应用于地震勘探工作中, 由于具有不需要到达时间、第一周期幅度数据、可以有效提高地下特征分辨率的优点<sup>[51]</sup>, 在 GPR 领域得到了越来越多的应用和改进。

Lambot 等基于信号响应数值模型提出反转雷达信号完整波形的方法, 建议使用超宽带阶梯频率天线来代替多偏移天线应用于 SRC 改善<sup>[52]</sup>:

$$S_{11}(\omega) = \frac{b(\omega)}{a(\omega)} = H_f(\omega) + \frac{H(\omega)G_{xx}^\dagger}{1 - H_f(\omega)G_{xx}^\dagger(\omega)}$$

Walter 等在估算田间尺度 SWC 时使用 FWI 方法进行了验证, 但在粉质土壤中受高电导率的影响没有获得理想结果<sup>[53]</sup>。Lambot 等在使用超宽带步进频率连续波雷达的 FWI 模型测量 SWC 的研究中表明, 除含水率接近饱和之外, 测量结果和 TDR 方法具有良好的一致性, 比 SRC 更实用和准确<sup>[54]</sup>, 同时

证实了高电导率带来的显著影响。Tran 等结合 Lambert 的模型观察了山坡 SWC 的时空变化, 结合土壤电介质混合模型和 Debye 方程可以有效地重现 GPR 数据<sup>[55]</sup>。Mourmeaux 等在使用 FWI 处理低频近地雷达数据后重新构建了土壤介电常数和电导率模型, 与全波电磁模型具有很好的一致性, 但由于雷达系统的不稳定, 天线传递函数存在较大误差<sup>[56]</sup>。Minet 等在田间粉质土壤中探测均方根误差为  $0.0233 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , SWC 整体重复性误差为  $0.0169 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 主要受土壤粗糙度、SWC 的小范围变化和模型差值的影响<sup>[57-58]</sup>, 与 Mourmeaux 的低频率天线受土壤粗糙度和局部异质性影响较小的结论相同。

FWI 方法一直在得到改进。Busch 等使用 WARR 提出了 FWI 反转地波的方法, 通过加入自动时域滤波器抵抗电波和其他反射的干扰来获取介电常数、电导率值等信息, 并为土壤质地的研究提供了可行方向<sup>[59-60]</sup>。Klotzsche 等通过 FWI 开发多偏移井孔 GPR 数据实现了在分米尺度上表征土壤地下特征的进步<sup>[61-63]</sup>。土壤高孔隙度层空间受限, 电磁结构复杂, Klotzsche 等基于 FWI 扩展了反射幅度分析方法, 建立了使用 GPR 数据能量分布图的最大和最小位置检测连续低速波导及其在井眼之间边界的模型, 实现对波导的高分辨率成像<sup>[61]</sup>。在砾石层的高渗透性区域中, Klotzsche 等使用井孔 FWI 方法和波导检测技术进行了 3D 表征, 与基于射线的方法相比介电常数和电导率图像分辨率有显著提高<sup>[62-63]</sup>。这些结果表明 FWI 能够有效识别具有高介电常数和孔隙度的含水层, 解析对含水层流动和传输具有重要作用的小规模相连结构。Gueting 等人进行了一次大规模实验, FWI 数据和实测数据具有良好的拟合度<sup>[64]</sup>, 并且基于聚类分析以及和孔隙度的对比识别出了不同岩相, 包括具有低传导性的沙层 (该砂层的识别通常由 ERT 测量), 表明 FWI 的高空间分辨率对于检测含水层结构、获取孔隙度和水力传导率具有重要意义。

## 2.5 早期信号分析

早期信号 (ETS) 是由于发射和接收天线间距过小导致空气波和地波叠加而产生的信号<sup>[65]</sup>, 它和地波同样能够反应土壤介质的物理性质, 其振幅、波形等属性与 SWC 具有一定的相关性<sup>[66]</sup>。ETS 分析是指在几个时间窗口中对雷达迹线的包络幅度进行分析, 检查波形与土壤电磁特性的关系。波形的变化与介电常数和电导率有关, 反射幅度随其增加而降低

(图 3)<sup>[67]</sup>。通过分析 ETS 属性与砂层介电性质的相关性, Pettinelli 等建议在研究中利用较小固定偏移距 GPR 配置, 结合校准工具 (如 TDR) 进行 ETS 分析<sup>[67]</sup>。

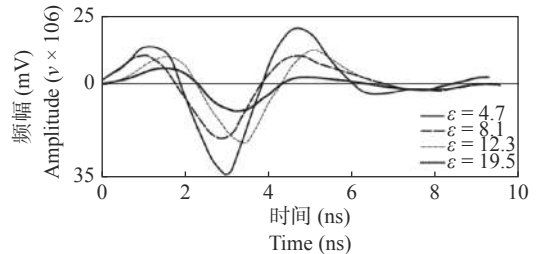


图 3 土壤介电常数对早期信号幅度的影响<sup>[67]</sup>  
Fig.3 Influence of soil dielectric constant on the amplitude of the early-time signal

Matteo 等人建立同质半空间模型获取了 ETS 的幅度属性、土壤介电常数和 SWC 的分布状况, 验证了振幅与介电常数之间的线性反比关系, 发现电导率对 ETS 波峰具有强烈影响, 但对振幅基本没有影响<sup>[68]</sup>。Matteo 等认为 ETS 的第一个正半周期可以减小反射器和局部异质性的影响, 最大程度地防止反射波与地波的干扰。Ferrara 等在自然野外条件下进行 ETS 分析, 与 CMP 和地波方法具有较高的一致性, 显示了 ETS 对土壤介电性质变化的高敏感性<sup>[69]</sup>。Algeo 等使用 ETS 监测了灌溉黏土 SWC 的变化情况, 在 CMP 和 FO 均无效的情况下产生了清晰响应<sup>[66]</sup>; 吴志远等使用早期信号振幅包络平均值获取了黏土表层 SWC, 解决了 CMP 和 WARR 无法探测黏性土壤含水率的问题, 证实了 ETS 获取黏土特性的可行性和优越性<sup>[70]</sup>。崔凡等使用滑动功率谱分析方法解决了野外复杂条件下地波难以识别的问题<sup>[71]</sup>, 精确计算出了电磁波速度<sup>[72-73]</sup>; Comite 等开展比较数值分析实验探究了 ETS 幅度属性之间的关系, 发现信号对雷达系统配置 (如天线类型位置、信号参数、环境参数) 具有高度复杂的敏感性, 提出了在研究中精准校对 GPR 仪器、提供最佳拟合插值以准确获得介电常数和电导率的建议<sup>[73-74]</sup>。

## 3 GPR 在探测土壤层中的应用

获取土壤层信息是 GPR 研究土壤特性的重要内容。土壤层是影响 SWC 的重要因素, 两个相邻层土壤间的微小变化都可以改变 SWC 的分布状况, 尤其在倾斜土层中, 当 SWC 差别超过  $0.055 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  时

GPR 便可以识别不同土壤层<sup>[75]</sup>, 因此可以基于探测 SWC 的方法来研究土壤层特征。

研究方法大多基于信号反射技术。因此 GPR 更加适用于地表平坦的砂土, 误差可以低于 2%<sup>[76]</sup>, 雷达信号在黏土中受高电导率影响会降低穿透力。Simms 等使用 GPR 和 Kriging 方法获取了地层图, 误差为  $\pm 0.1$  m, 主要受黏土表面的强反射对信号响应的阻碍<sup>[77]</sup>, 掩盖了深层的雷达信号反射<sup>[78]</sup>。针对于此, Novakova 等配合钻孔对土壤剖面进行了成像<sup>[79]</sup>, 有效地消除了信号反射的影响。张等通过进行季节性 GPR 调查和土壤湿度传感器监测到了两个站点的土层深度, 在 Rush Town 中基于 SWC 差异获取的 Bw~BC、BC~C 土层间的深度分别为 0.41 m、0.9 m, 和实际深度 0.45 m、0.9 m 非常接近。此外还发现, 随着 SWC 的增加 Bw~BC 层出现了更多的双曲线反射, 说明水分可以促进反射系数的增加, 因此提出了不同土壤的最佳监测时间不同、应当在不同季节进行重复土壤调查的建议<sup>[80]</sup>。André 等在论证人为土壤压实是造成葡萄藤活力问题的关键因素时使用了 GPR、EMI 和 ERT 调查, 使用信号反射的 2D 和 3D 可视化获取到在 25 cm 处出现强烈反射, 而在 25 cm 位置附近葡萄藤存在生长问题且 NDVI 值偏低, 展现了 GPR 优于 EMI 和 ERT 数据的、可以提供土壤层详细信息的能力<sup>[81-82]</sup>。李俐等通过包络检波和 STFT 谱分析实现了 94.5% 的高检出率, 但随着土壤深度的增加逐渐变小, 提出了采用低频雷达、从弱信号中检测土层信息的建议<sup>[75, 83]</sup>。

基于信号反转方法, Buchner 等提出对 CMP 测量数据反演土壤剖面, 反演方法介于使用射线追踪对拾取反射器反演和 FWI 之间, 这项方案的实现需要获取清晰的反射和多偏移天线数据, 操作相对复杂但可以实现绝对误差小于 5 cm 的高精度<sup>[84]</sup>。

## 4 GPR 在探测其他土壤特性中的应用

### 4.1 土壤盐分

土壤盐分和电导率具有正比关系, 因此可以使用反射系数和反射幅度分析方法来估算土壤盐分, 但是受反射幅度易消除的影响受到很多限制。Müller 等使用从频域和时域的振幅获得的反射系数进行了研究, 结果表明反射系数随盐分的增加而增加, 为环境污染研究和地下水探测开辟了新方法<sup>[85]</sup>; Rejšek 等检测了城市道路盐污染土壤, 根据反射率变化获

取了盐分在 6 个时期的变化情况, 并结合 3D 建模获取了盐分的分布面积和渗透深度, 受后 3 次探测效果不佳的启发, 作者认为仍需要进行现场测试来验证和解释 GPR 的探测结果<sup>[86]</sup>。

### 4.2 土壤质地

GPR 可以用来监测土壤中的黏土含量。Meles 等通过早期信号分析使用电导率引起的信号衰减获取了黏土含量, 这种方法排除了土壤异质性的影响, 但雷达信号需要具有更高的分辨率<sup>[87]</sup>。Benedetto 等使用谱分析弥补了这项缺点, 他们在 GPR 谱的频率峰值位置获取了黏土含量<sup>[88]</sup>, 但峰值位置的确定存在问题: Tosti 等在对信号处理时使用瑞利散射法、全波形反演和信号拾取技术三种方法一致发现, 随着黏土含量的增加, 频率峰值向低频区域进行偏移<sup>[89]</sup> (图 4)。Benedetto 认为可以使用正弦插值来确定峰值位置。频移对黏土含量估计影响重大<sup>[90]</sup>, 下面研究可以集中在频移原因 (信号的传播效应、电磁波的初始产生) 上面。

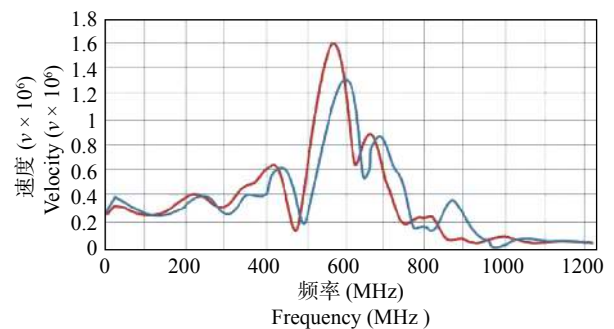


图 4 频率峰值的偏移<sup>[89]</sup>

Fig.4 The shift in the frequency peak

### 4.3 根系

GPR 探测根系的研究主要集中在根系结构和根系生物量。根在雷达图中由双曲线反射表示, 其位置的识别相对简单, 大小、形状和体积等参数的识别较为复杂, 因此研究主要集中于粗根, 受信号衰减、土壤质地、SWC 的影响, 大多研究都是在人工可控的实验条件下进行的<sup>[16, 91-92]</sup>。

根系的检测精度随直径的减小和深度的增加而降低, 在 SWC 过高或黏性土壤中的可行性甚至为零, 但刘等人使用 1.6 GHz 天线检测到了冬小麦和甘蔗的细小根系, 且在黏土中的精度更高<sup>[10]</sup>; Rodríguez-Robles 等在森林土壤中获取了不同深度直径在 0.6 ~ 7.5 cm 间的细根<sup>[93]</sup>。Borden 等基于树木间作系统检测出了 5 种树木约 58% 的粗根, 在 0.1 m 和 0.2 m

处的检出率均大于 94%，证实了 GPR 表征活树根系垂直剖面的可行性<sup>[94]</sup>。Tardío 等人使用 GPR 获取了自然边坡倾斜地形中的根系不对称性状，但对土壤质地、水分、GPR 设备和数据处理的要求很高<sup>[35]</sup>；Tanikawa 等发现落叶的影响可以显著地降低检出率，但不会破坏双曲线的形状，因此可以使用所有反射波形的总和来计算<sup>[95]</sup>。

对根进行自动定位和识别是处理 GPR 数据的重要内容：吴等建立了一种自动跟踪根点至最佳生长源点、使用样条曲线平滑插值构建 3D 根系统的方法，结果和真实拓扑的相似度为 82.75%<sup>[96]</sup>；李文涛等基于随机霍夫变换算法识别到了剖面树根<sup>[97]</sup>，准确性大于 80%，但这个算法当根的方向平行于雷达探测方向、根与根间距过小时是失效的，Tanikawa 等认为根与测量方向呈现 45 ~ 135° 的角度最佳<sup>[95]</sup>，Hirano 等建议根与根间距应超过 20 cm<sup>[98]</sup>。另外研究表明，根的介电常数可以从 4.5 增加至 22 以上，与 SWC 具有明显的函数关系<sup>[36, 99]</sup>，致使介电常数的对比度降低，这就解释了 Hirano 无法检测到含水量少于 20% 的根的问题，郭等在中国北部的沙质地区对此关系进行了实证研究<sup>[97, 100]</sup>。

## 5 结论与展望

GPR 可以成功地实现对土壤含水率、剖面、盐分、质地和根系等特性的无损探测，获取数据进行土壤研究，但需要根据实际研究目的和现场条件选择合适的 GPR 设备、天线频率、数据采集和处理方法。

(1) 基于信号速度探测土壤特性是应用最为广泛的方法，数据获取和处理难度较低，但结果具有较大主观性，受实验环境的诸多限制，在杂质较少、土壤表面粗糙度和电导率偏低、具有明显介电常数对比的砂土中效果更好。

(2) 基于信号幅度的表面反射系数对探测土壤含水率和盐分具有更大优势，主要的影响因素是 SWC 随深度的变化和表面粗糙度，研究二者对 GPR 探测深度和精度的影响具有重大意义。

(3) 一些特定方法的提出，如连续多偏移测量技术、地波方法、FWI 和早期信号分析，可以使 GPR 在不理想的状态获得成功，这取决于数据处理方法、计算机性能和计算速度的提升。基于导波的分散特性进行数据反演获取土壤特性具有巨大的潜力和优

越性；FWI 可以提供更高的空间分辨率，是目前允许在最宽广范围内探测土壤特性的方法；进行早期信号分析，建立提供最佳拟合插值的数值模型，优化雷达系统配置，可以解决雷达信号难以分辨的问题。

(4) GPR 方法的进步依赖于高级的数据处理和计算能力，为此需要设计使用更为复杂的数值模型，但现在尚未达到理想水平，这为非专业人员的学习提供了便利。GPR 电子组件的快速稳定和精准定位可以提高数据采集速度和质量，为此应对雷达产品进行改进，连接 GPS 系统共同使用。尽管 GPR 在探测土壤特性中具有很高潜力，但并非永远具有最佳性能，当不满足应用条件时，其他地球物理方法可能更适用。

## 参考文献：

- [1] Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies[J]. *Geoderma*, 2014, 223: 33 – 45.
- [2] Liu X, Dong X, Leskovar D I. Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review[J]. *International Agrophysics*, 2016, 30: 533 – 543.
- [3] Castro A C M, Meixedo J P, Santos J M, et al. On sampling collection procedure effectiveness for forest soil characterization[J]. *Flamma*, 2015, 6: 98 – 100.
- [4] Nanni M R, Dematte J A M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 393 – 407.
- [5] Novakova E, Karous M, Zajicek A, et al. Evaluation of ground penetrating radar and vertical electrical sounding methods to determine soil horizons and bedrock at the locality Dehtáře[J]. *Soil and Water Research*, 2013, 8: 105 – 112.
- [6] Liu X, Zhang X, Chen S, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 154: 59 – 67.
- [7] Liu X, Feike T, Shao L, et al. Effects of different irrigation regimes on soil compaction in a winter wheat-summer maize cropping system in the North China Plain[J]. *Catena*, 2016, 137: 70 – 76.
- [8] Sharma S P, Leskovar D I, Crosby K M, et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of *reticulatus* and *inodorus* melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 136: 75 – 85.
- [9] Kumar S V, Dirmeyer P A, Peters-lidar C D, et al. Information theoretic evaluation of satellite soil moisture retrievals[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 392 – 400.
- [10] Liu X, Dong X, Xue Q, et al. Ground penetrating radar (GPR) detects fine roots of agricultural crops in the field[J]. *Plant and Soil*, 2018, 423: 517 – 531.

- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 罗古拜, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区重构土壤体积含水率表征与反演[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(4): 529 – 537.
- [ 13 ] 约翰克劳斯. 天线[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [ 14 ] 张 迪, 李家存, 赵光兴, 等. 利用差分GPS的探地雷达图像精确定位方法[J]. 地球物理学进展, 2020: 1 – 8.
- [ 15 ] 杨道学, 赵 奎, 曾 鹏, 等. 基于露天开采地下盲空区探地雷达正演模拟及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2288 – 2298.
- [ 16 ] Liu X, Chen J, Butnor J R, et al. Noninvasive 2D and 3D Mapping of Root Zone Soil Moisture Through the Detection of Coarse Roots With Ground-Penetrating Radar[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(5): 1 – 24.
- [ 17 ] 李洪丽, 鹿 琪. 探地雷达在LNAPL污染土壤探测中的应用进展研究[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(03): 1141 – 1148.
- [ 18 ] 陶春康, 汪海勇, 瞿诗华. 步进扫频宽带探地雷达信号处理[J]. 微波学报, 2020, 36(02): 67 – 70+78.
- [ 19 ] Looms M C, Klotzsche A, Van Der Kruk J, et al. Mapping sand layers in clayey till using crosshole ground-penetrating radar[J]. *Geophysics*, 2018, 83: A21 – A26.
- [ 20 ] 赵贵章, 闫永帅, 闫亚景, 等. 介质含水率与探地雷达电磁波特征参数关系[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(03): 85 – 90.
- [ 21 ] 夏银行, 黎 蕾, 邓少虹, 等. 基于探地雷达的喀斯特峰丛洼地土壤深度和分布探测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 129 – 135.
- [ 22 ] Van Der Kruk J, Jacob R W, Vereecken H. Properties of precipitation-induced multilayer surface waveguides derived from inversion of dispersive TE and TM GPR data[J]. *Geophysics*, 2010, 75: WA263 – WA273.
- [ 23 ] Liu X, Cui X, Guo L, et al. Non-invasive estimation of root zone soil moisture from coarse root reflections in ground-penetrating radar images[J]. *Plant and Soil*, 2019, 436: 623 – 639.
- [ 24 ] 崔 凡, 李 帅, 原炯轩, 等. 基于GPR逆时偏移成像技术的西部矿区植物根系直径估算试验研究(英文)[J]. *Applied Geophysics*, 2020, 17(01): 154 – 166.
- [ 25 ] 王明凯, 李文彬, 文 剑. 基于探地雷达对粗根的识别技术研究[J]. *森林工程*, 2020, 36(03): 21 – 27.
- [ 26 ] 彭士有, 吴 洁, 彭 俊. 拉普拉斯边缘检测算法的改进及其在探地雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2020, 42(08): 41 – 45.
- [ 27 ] Steelman C M, Klazinga A G, Cahill A L, et al. Monitoring the evolution and migration of a methane gas plume in an unconfined sandy aquifer using time-lapse GPR and ERT[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 205: 12 – 24.
- [ 28 ] Koyama C N, Liu H, Takahashi K, et al. In-situ measurement of soil permittivity at various depths for the calibration and validation of low-frequency SAR soil moisture models by using GPR[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9: 1 – 14.
- [ 29 ] Lu Y, Song W, Lu J, et al. An examination of soil moisture estimation using ground penetrating radar in dessert steppe[J]. *Water*, 2017, 521: 1 – 11.
- [ 30 ] 刘成禹, 余世为. 基于探地雷达单道信号处理的岩溶分析方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3618 – 3626.
- [ 31 ] 吴群英, 王宏科, 倪建宇, 等. 基于GPR波速标定方法西部砂壤介质含水率精确计算研究[J]. 煤炭科学技术, 2020: 1 – 8.
- [ 32 ] Keslinen J, Klotzsche A, Looms M C, et al. Full-waveform inversion of crosshole GPR data: Implications for porosity estimation in chalk[J]. *Applied Geophysics*, 2017, 140: 102 – 116.
- [ 33 ] Galagedara L W, Parkin G W, Redman J D, et al. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 301: 182 – 197.
- [ 34 ] 卢奕竹, 宋文龙, 路京选, 等. 探地雷达测量土壤水方法及其尺度特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 37 – 44.
- [ 35 ] Tardio G, Gonzalea-ollauri A, Mickovski S B. A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 46 – 57.
- [ 36 ] 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.
- [ 37 ] Binley A, Hubbard S S, Huisman J A, et al. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51: 3837 – 3866.
- [ 38 ] 吴志远, 尹尚先, 马丽红. 基于探地雷达的煤矿开采区地表土壤含水率变化研究[J]. *华北科技学院学报*, 2017, 14(6): 17 – 23.
- [ 39 ] Mertens L, Persicoo R, Marera L, et al. Automated detection of reflection hyperbolas in complex GPR images with no a priori knowledge on the medium[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54: 580 – 596.
- [ 40 ] Mangel A R, Moysey S M J, Van Der Kruk J. Resolving precipitation induced water content profiles by inversion of dispersive GPR data: a numerical study[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 496 – 505.
- [ 41 ] Terry N, Slater L. Water resources research[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53: 2755 – 2769.
- [ 42 ] Strobbia C, Cassiani G. Multilayer ground-penetrating radar guided waves in shallow soil layers for estimating soil water content[J]. *Geophysics*, 2007, 72(4): J17 – J29.
- [ 43 ] Mangel A, Moysey S M J, Van Der Kruk J. Resolving infiltration induced water content profiles by inversion of dispersive ground-penetrating radar data[J]. *Vadose Zone Journal*, 2017, 16(10): 496 – 505.
- [ 44 ] 马福建, 雷少刚, 杨 赛, 等. 土壤含水率与探地雷达信号属性的关系研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 809 – 815.
- [ 45 ] 曹 棋, 宋效东, 吴华勇, 等. 探地雷达地波法测定红壤区土壤



- 水分的参数律定研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(02): 332 – 342.
- [ 46 ] 金光来, 臧国帅, 蔡文龙, 等. 基于探地雷达的路面结构完整性定量评价方法[J]. 公路, 2020, 65(05): 16 – 20.
- [ 47 ] Ardekani M R. Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping[J]. *Geoderma*, 2013, 200: 55 – 66.
- [ 48 ] Ardekani M R, Neyt X, Benedetto D, et al. Soil moisture variability effect on GPR data[J]. *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2014, 1: 214 – 217.
- [ 49 ] 蒋金豹, 胡丹娟. 基于MIMICS模型的麦田地表土壤含水量反演研究[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(5): 707 – 713.
- [ 50 ] 刘宗辉, 吴一帆, 刘保东, 等. 隧道地质预报探地雷达信号干扰消除方法[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(03): 390 – 398.
- [ 51 ] Qianci R. Inverts permittivity and conductivity with structural constraint in GPR FWI based on truncated Newton method[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 151: 186 – 193.
- [ 52 ] Lambot S, Slob E, Rhebergen J, et al. Remote estimation of the hydraulic properties of a sand using full-waveform integrated hydrogeophysical inversion of time-lapse, off-ground GPR data[J]. *Vadose Zone Journal*, 2009, 8: 743 – 754.
- [ 53 ] Walter J, Hamann G, Luck E, et al. Stratigraphy and soil properties of fens: geophysical case studies from northeastern Germany[J]. *Catena*, 2016, 142: 112 – 125.
- [ 54 ] Lambot S, Andre F. Full-wave modeling of near-field radar data for planar layered media reconstruction[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52: 2295 – 2303.
- [ 55 ] Tran A P, Bogaert P, Wiaux F, et al. High-resolution space-time quantification of soil moisture along a hillslope using joint analysis of ground penetrating radar and frequency domain reflectometry data[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 252 – 261.
- [ 56 ] Mourmeaux N, Tran A P, Lambot S. Soil permittivity and conductivity characterization by full-wave inversion of near-field GPR data[J]. *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2014, 1: 497 – 502.
- [ 57 ] Minet J, Wahyudi A, Bogaert P, et al. Mapping shallow soil moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data[J]. *Geoderma*, 2011, 161: 225 – 237.
- [ 58 ] Minet J, Bogaert P, Vanclooster M, et al. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 424: 112 – 123.
- [ 59 ] Busch S, Van Der Kruk J, Vereecken H. Improved characterization of fine-texture soils using on-ground GPR full-wave form inversion[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52: 3947 – 3958.
- [ 60 ] Busch S, Weihermuller L, Huisman J A, et al. Coupled hydrogeophysical inversion of time-lapse surface GPR data to estimate hydraulic properties of a layered subsurface[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49: 8480 – 8494.
- [ 61 ] 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: 180052.
- [ 62 ] Klotzsche A, Van Der Kruk J, Bradford J, et al. Detection and identification of waveguides with limited lateral extent using an amplitude analysis approach and crosshole GPR full-waveform inversion: Synthetic and experimental data[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50: 6966 – 6985.
- [ 63 ] Klotzsche A, Van Der Kruk J, Linde N, et al. 3-D characterization of high-permeability zones in a gravel aquifer using 2-D crosshole GPR full-waveform inversion and waveguide detection[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195: 932 – 944.
- [ 64 ] Gueting N, Vienken T, Klotzsche A, et al. High resolution aquifer characterization using crosshole GPR full-waveform tomography: Comparison with direct-push and tracer test data[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53: 49 – 72.
- [ 65 ] Hans G, Redman D, Leblon B, et al. Determination of log moisture content using early-time ground penetrating radar signal[J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2015, 10(1): 112 – 129.
- [ 66 ] Algeo J, Dam R L V, Slater L. Early-Time GPR: A method to monitor spatial variations in soil water content during irrigation in Clay Soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(11): 55 – 66.
- [ 67 ] Pettinelli E, Di Matteo A, Beaubien S E, et al. A controlled experiment to investigate the correlation between early-time signal attributes of ground-coupled radar and soil dielectric properties[J]. *Applied Geophysics*, 2014, 101: 68 – 76.
- [ 68 ] Di Matteo A, Pettinelli E, Slob E. Early-time GPR signal attributes to estimate soil dielectric permittivity: a theoretical study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51: 1643 – 1654.
- [ 69 ] Ferrara C, Barone P M, Steelman C M, et al. Monitoring shallow soil water content under natural field conditions using the early-time GPR signal technique[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12: 1 – 9.
- [ 70 ] 吴志远, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 基于探地雷达波振幅包络平均值确定土壤含水率[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 158 – 164.
- [ 71 ] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于CT分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 229 – 236.
- [ 72 ] 崔凡, 吴志远, 武彦斌. 探地雷达在西部煤矿砂壤地层含水率时空变化中的应用[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(10): 2437 – 2444.
- [ 73 ] 崔凡, 陈柏平, 吴志远, 等. 基于探地雷达功率谱和雷达波振幅包络估算砂壤含水率[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 121 – 127.
- [ 74 ] Comite D, Galli A, Lauro S E, et al. Analysis of GPR early time signal features for the evaluation of soil permittivity through numerical and experimental surveys[J]. *IEEE Journal of Selected*

- Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9: 178 – 187.
- [ 75 ] 李 俐, 付 雪, 崔 佳, 等. 基于包络检波和STFT谱分析的探地雷达土壤分层信息识别[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(2): 316 – 327.
- [ 76 ] 高强山, 彭 韬, 付 磊, 等. 探地雷达技术对表层岩溶带典型剖面组构刻画与界面识别[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(05): 759 – 765.
- [ 77 ] Simms J E, Mckay S K, Mccomas R W, et al. In situ root volume estimation using ground penetrating radar[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2017, 22: 209 – 221.
- [ 78 ] 冯 强, 段宝玲, 姜 硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(1): 39 – 45.
- [ 79 ] Novakova E, Karousarou M, Zajicek A, et al. Evaluation of ground penetrating radar and vertical electrical sounding methods to determine soil horizons and bedrock at the locality Dehtáře[J]. *Water Resources Research*, 2013, 8: 105 – 112.
- [ 80 ] Zhang J, Lin H, Doolittle J. Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 560 – 569.
- [ 81 ] Andre F, C Van Leeuwen, S Saussez, 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.
- [ 82 ] Andre F, Jonard F, Jonard M, et al. In situ characterization of forest litter using ground-penetrating radar[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 121: 879 – 894.
- [ 83 ] 张海如, 王国富, 张法全. 联合瞬时参数分析用于探地雷达目标增强[J]. *微波学报*, 2017, 33(1): 16 – 20.
- [ 84 ] Buchner J S, Wollschlager U, Roth K. Inverting surface GPR data using FDTD simulation and automatic detection of reflections to estimate subsurface water content and geometry[J]. *Geophysics*, 2012, 77: H45 – H55.
- [ 85 ] Chen X, Slaster L. Gas bubble transport and emissions for shallow peat from a northern peatland: the role of pressure changes and peat structure[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51: 151 – 168.
- [ 86 ] Rejsek K, Hruska J, Kuba L, et al. A methodological contribution to use of Ground-Penetrating Radar (GPR) as a tool for monitoring contamination of urbansoils with road salt[J]. *Urban Ecosystems*, 2015, 18: 169 – 188.
- [ 87 ] Meles G A, Van Der Kruk J, Greenhalgh S A, et al. A new vector waveform inversion algorithm for simultaneous updating of conductivity and permittivity parameters from combination crosshole/borehole-to-surface GPR data[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48: 3391 – 3407.
- [ 88 ] Benedetto F, Tosti F. GPR spectral analysis for clay content evaluation by the frequency shift method[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 97: 89 – 96.
- [ 89 ] Tosti F, Patriarca C, Slob E, et al. Clay content evaluation in soils through GPR signal processing[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 97: 69 – 80.
- [ 90 ] 马永辉, 郑文青, 迟晓双. 基于GPRSIM的道路地下病害体探地雷达正演模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(22): 8898 – 8903.
- [ 91 ] 刘 颖, 郭立新. 地下埋藏目标与分层粗糙面复合散射探地雷达回波特性研究[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(01): 111 – 118.
- [ 92 ] 周广行, 朱清科, 任正龔, 等. 基于GPR的陕北黄土区河北杨粗根分布特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(02): 346 – 351.
- [ 93 ] Rodriguez-robles U, Arredondoo T, Huber-sannwald E, et al. Technical note: application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14: 5343 – 5357.
- [ 94 ] Borden K A, Thomas S C, Isaac M E. Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar[J]. *Plant and Soil*, 2016: 1 – 12.
- [ 95 ] Tanikawa T, Ikeno H, Dannoura M, et al. Leaf litter thickness, but not plant species, can affect root detection by ground penetrating radar[J]. *Plant and Soil*, 2016, 408: 271 – 283.
- [ 96 ] Wu Y, Guo L, Cui X, et al. Ground-penetrating radar-based automatic reconstruction of three-dimensional coarse root system architecture[J]. *Plant and Soil*, 2014, 383: 155 – 172.
- [ 97 ] Li W, Cui X, Guo L, et al. Tree Root Automatic Recognition in Ground Penetrating Radar Profiles Based on Randomized Hough Transform[J]. *Remote Sens*, 2016, 8: 430.
- [ 98 ] Hirano Y, Dannoura M, Aono K, et al. Limiting factors in the detection of tree roots using ground penetrating radar[J]. *Plant and Soil*, 2009, 319: 15 – 24.
- [ 99 ] 郭 立, 范碧航, 吴 渊, 等. 探地雷达应用于植物粗根探测的研究进展[J]. *中国科技论文*, 2014, 9(04): 494 – 498.
- [ 100 ] Guo L, Chen J, Cui X, et al. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review[J]. *Plant and Soil*, 2013, 362: 1 – 23.

## Soil Characteristics Measurements with Ground Penetrating Radar: A Review

WANG Jing-peng<sup>1</sup>, WANG Jin-man<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Ya-fu<sup>1</sup>

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China*)

**Abstract:** This review summarized the methods of estimating soil characteristics using ground penetrating radar (GPR), such as analyses of reflections, ground wave, surface reflection coefficient, full-waveform inversion and early-time signal analysis. This study analyzed the basic principle and method using GPR to detect soil characteristics in detail, and reviewed the ability and limitation of GPR by summarizing latest studies. The approaches based on signal velocity analysis were widely used; however, the results were subjective and limited by the experimental environment. The approaches based on reflection amplitude analysis were limited by varying soil water contents with depths and surface roughness, and which led to a decrease in reflection coefficient. The full waveform inversion and early-time signal analysis methods emphasized the importance of data acquisition and processing in detection. More complex numerical analysis models and data processing approaches should be developed to improve data acquisition speed and measurement accuracy.

**Key words:** GPR; Soil water content; Soil layer thicknesses; Soil salinity; Soil texture; Root system

[ 责任编辑: 孙福军 ]