



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.006

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. LU Yi zhu, SONG Wen long, LU Jing xuan, et al. Soil water measurement by ground penetrating radar and its scale features[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 37-44. (in Chinese)

探地雷达测量土壤水方法及其尺度特征

卢奕竹^{1,2}, 宋文龙^{1,2}, 路京选^{1,2}, 苏志诚¹, 刘宏³, 谭亚男¹, 韩婧怡¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 山东省菏泽市牡丹区刘庄引黄灌区管理处, 菏泽 274000)

摘要: 土壤水的多尺度观测与模拟是当前国内外研究的热点问题。探地雷达作为一种测量土壤含水量的现代先进技术, 填补了传统测量方法与遥感方法之间的尺度缺口, 国内外大量研究表明: 应用探地雷达测量土壤含水量的精度较高, 测量速度快, 无需破坏土壤结构, 作为一种田间尺度的测量方法在测量中、小尺度土壤水空间分布特征等方面具有独特优势, 通过不同频率的选定能够测量深度为 0.05~50 m 的土壤含水量。对探地雷达测量土壤水的主要方法、原理、精度及优缺点等进行详尽介绍, 并讨论探地雷达的测量深度和尺度特征等问题。探地雷达在遥感反演土壤水模型率定与精度验证方面比 TDR、烘干法更有优势, 有潜力应用于遥感产品验证、土壤水模式时间稳定性分析等其他水文相关应用中, 为相关研究和探地雷达测量土壤水方法的推广提供理论参考。

关键词: 探地雷达; 土壤水; 测量深度; 尺度特征; 遥感

中图分类号: P641.7; S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0037-08

Soil water measurement by ground penetrating radar and its scale features

LU Yi zhu^{1,2}, SONG Wen long^{1,2}, LU Jing xuan^{1,2}, SU Zhi cheng^{1,2}, LIU Hong³, TAN Ya nan¹, HAN Jing yi¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood and Drought Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Management Office of Yellow River Irrigation area in Liu Zhuang, Mudan District, Heze city, Shandong Pro., Heze 274000, China)

Abstract: Multi-scale observation and simulation of soil water is a hot research topic worldwide. Ground penetrating radar (GPR), as a modern technology for measuring soil water content, has filled in the scale gap between the traditional measuring method and the remote sensing method. Domestic and foreign research has showed that GPR is highly precise and fast for the measurement of soil water content, and does not destroy the soil structure. As a field scale measurement method, it plays a unique role in determining the spatial distribution of meso- and micro-scale soil water at the depth of 0.05 m to 50 m. GPR has more advantages than TDR in precision verification and calibration of remote sensing retrieval model for soil water, and has the potential to be applied in remote sensing product validation and other hydrological applications. This paper can provide theoretical reference for related research and promotion of soil water measurement method by GPR.

Key words: GPR; soil water; measuring depth; scale features; remote sensing

收稿日期: 2016-01-16 修回日期: 2016-05-07 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金(51609259); 国家重点研发计划(2016YFC0400106-2); 中国水利水电科学研究院专项(JZ0145B472016)

Funds: Chinese National Natural Science Foundation(51609259); Chinese National Major Research Programs(2016YFC0400106-2); Research Program of China Academy of Water Resources and Hydropower Research(JZ0145B472016)

作者简介: 卢奕竹(1990-), 女, 吉林长春人, 主要从事土壤水遥感反演与验证研究。E-mail: cynthialoo@sina.com

通讯作者: 路京选(1961-), 男, 陕西人, 教授级高级工程师, 主要从事水利遥感应用研究。E-mail: lujx@iwhr.com

土壤水,分布在地面以下、地下水面上方的土壤层中,也被称作土壤中的非饱和带水分,是一种重要的水资源(在农田水利中也被称作土壤墒情或土壤湿度)。土壤水的时空分布与变化对土壤-植被-大气间水分、能量平衡具有显著影响,准确测量土壤含水量,对研究区域水循环、观测干旱的发生及发展过程、指导当地农业生产实践、合理进行水资源调控等工作均具有重要意义^[1]。

随着科学技术的发展,出现了多种土壤含水量测量技术,按测量的空间尺度可大体划分为三种:一是点尺度,主要包括烘干称重法、中子法、时域反射仪法(TDR)、频域反射仪法(FDR)等,这些方法测定的数据能较准确地反映观测点的土壤含水量,但都存在耗时费力并对土壤具有一定破坏性等问题^[2];二是区域尺度,主要包括探地雷达(GPR)技术^[3]和近地面环境宇宙射线中子法^[4]等,是无危害,非接触,不破坏土壤,不受土壤质地、密度、盐分等影响的土壤含水量测量方法,适合几十公顷等较大面积的土壤墒情观测,这些技术在快速发展;三是卫星像元尺度,卫星遥感反演土壤含水量是通过测量土壤表面反射或发射的电磁能量,建立遥感信息与土壤含水量之间的关系,从而反演出地表土壤含水量的过程,按遥感波段划分主要有可见光-近红外法(反射率法、植被指数法),热红外法(热惯量法、作物缺水指数法、温度状态指数法)和微波遥感法(主动微波法、被动微波法)等,具有快速、覆盖范围大和定期重复观测等优势^[5],但遥感方法只能对表层土壤进行观测(一般小于 20 cm),尤其是反演结果的地面同尺度验证一直是该方法推广应用的瓶颈。

探地雷达(ground penetration radar,简称 GPR)是一种快捷高效测量中、小尺度土壤水的方法,具有探测深度大、便捷快速、测量精度高、分辨率高、无损测量等优点,可以弥补传统方法和遥感方法在土壤含水量监测中的不足。对探地雷达测量土壤含水量的主要测量方法、测量原理、测量精度及各种方法的优缺点等进行介绍,对探地雷达地面直达波和反射波的测量深度,及探地雷达在多尺度土壤墒情协同观测与遥感反演、田间尺度土壤水运动模拟验证等研究中的应用进行探讨,将对丰富土壤含水量的监测手段及水资源监测评估和田间尺度的灌溉管理等具有积极意义。

1 探地雷达技术及其测量土壤水的原理、方法

1.1 探地雷达技术及发展

探地雷达是采用中心频率 10 MHz~ 3 GHz 范

围的高频电磁波探测地下或建筑物内部结构与特征的电磁探测技术^[6],主要由发射天线、接收天线和控制单元构成,它的原理与反射地震学和声呐技术相似,发射天线向地下发射高频短脉冲的电磁波,当电磁波遇到电性差异大的分界面或目标体时反射回地面被接收天线接收,根据接收天线记录的电磁波双程走时、振幅、波形等信息可以确定地层结构或目标体的埋深、位置等。接收天线接收的电磁波根据传播路径主要分为空气波、地面直达波、反射波和折射波,根据研究需要选取不同雷达波进行分析计算,图 1 为雷达波在双层土壤中的传播路径。GPR 常以脉冲反射波波形的形式记录接收到的雷达波,一条测线上不同测点的记录道构成完整的雷达记录剖面图。波形的正负峰分别以灰阶或不同颜色显示,等灰阶或等色线即表示反射层或目标体。

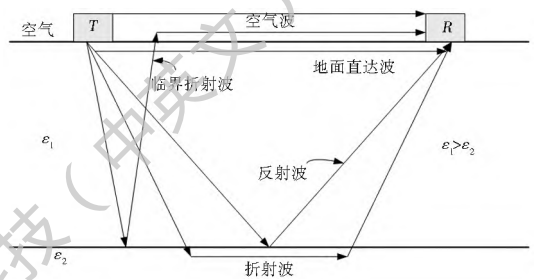


图 1 电磁波在不同介电常数双层土壤中的传播路径

Fig. 1 Propagation paths of electromagnetic waves in two layer soil with different dielectric permittivities

自 20 世纪 70 年代中期商用探地雷达投入市场以来,探地雷达技术逐渐完善,应用领域不断扩展,涉及冰川、考古、地质、水文、勘探、土壤等研究方向。20 世纪 90 年代,探地雷达技术的提高实现了波速的精确测量,探地雷达在土壤含水量测量方面的应用成为了研究热点。Basson 等^[7]发表了探地雷达在以色列测量土壤含水量的比较结果;Du 和 Rummel^[8]提出用 GPR 的地面直达波测量土壤含水量,并且不需要已知土壤的深度和反射层;Chanzy 等^[9]、Weiler 等^[10]、Dannowski 等^[11]和 Lunt 等^[12]采用反射波测量得到反射层至土壤表面间的平均含水量,但该方法需要已知反射层的深度;Huisman 等^[13]研究了单偏移距法的测量精度,为 GPR 快速测量大面积的土壤含水量奠定了理论基础;Huisman 等^[14]通过在 3 600 m² 区域的 GPR 与 TDR 对比实验,表明 GPR 单偏移距法比 TDR 测量空间土壤含水量变化的效果更好;Lambot^[15]提出基于离地探地雷达的全波形反演法。近十年间,国内外学者对探地雷达测量土壤含水量的研究日趋深入,在与 TDR、蒸渗仪、中子探测器、称重法等方法的对比

分析、不同 GPR 测量方法的比较、不同土壤质地的应用等方面都有相关研究, Deiana 等^[16]、Steelman 等^[17]、Mangel 等^[18] 在渗透实验观测、非饱和带土壤水流动模型验证等方面推广了 GPR 的应用。

1.2 探地雷达测量土壤水的原理

因为干地质材料、水和空气的介电常数值存在明显差异, 使得土壤孔隙中含水量的变化极大地改变了土壤介电常数。雷达波在非饱和带土壤中的传播速度取决于土壤介电常数, 利用 GPR 提取出地面

直达波或反射波的速度, 计算土壤介电常数, 再根据土壤介电常数与土壤含水量关系即可求得土壤含水量。在低损介质中, 电磁波波速 v 与介电常数 ϵ 的关系为

$$\epsilon = (c/v)^2 \quad (1)$$

式中: c 为电磁波在真空中的传播速度即 0.3×10^9 m/s。

土壤介电常数与土壤含水量 θ 关系可以用经验公式、半理论公式描述, 见表 1。

表 1 介电常数与土壤含水量常用关系式

Tab. 1 Relations between soil dielectric permittivity and soil water content

名称	公式	备注
Topp 公式 ^[9]	$\theta = -0.053 + 0.0293\epsilon - 0.00055\epsilon^2 + 0.0000043\epsilon^3$	θ 为土壤含水量; ϵ 为介电常数
Roth 公式 ^[20]	$\theta = 0.078 + 0.0448\epsilon - 0.00195\epsilon^2 + 0.0000361\epsilon^3$	
Herkelrath 公式 ^[21]	$\theta = b_1 + b_2\sqrt{\epsilon}$	b_1, b_2 为校正参数
CRIM 模型 ^[22]	$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon} - (1-n)\sqrt{\epsilon_s - n}}{\sqrt{\epsilon_w} - 1}$	n (m^3/m^3) 为土壤孔隙度; ϵ_w, ϵ_s 是液态水、土壤基质的相对电导率(一般假定 $\epsilon_w = 5$)

Topp 公式由 TDR 技术得到, 用于将介电常数转化成体积含水量, 是目前应用最广泛的经验公式。它只有一个参数, 计算简单、效果较好, 尤其适用于粗质地土壤, 但过高地估计了干土和湿土的土壤含水量, 对湿土尤其明显。经过校正的 Herkerlrah 公式比 Topp 公式有更高的精度, 但是 Herkerlrah 公式需要确定参数 a, b , 工作量大。当土壤含水量很低时, GPR 所测介电常数较 TDR 明显偏低使土壤含水量误差大, 此时需要对介电常数-土壤含水量关系式进行校正。

GPR 可以用不同频率对土壤含水量进行监测, 高频天线能够获取更高的空间分辨率但由于电磁波衰减快使得探测深度较小, 低频天线由于电磁波衰减较慢使得探测深度比高频天线大, 但空间分辨率比高频天线低。

1.3 探地雷达测量土壤水的方法

探地雷达通过提取雷达波信息获得土壤介电常数, 进而反演土壤含水量。根据 GPR 的不同测量方式, 有以下 5 种方法测量土壤含水量, 即多偏移距法、单偏移距法、透射零偏移距法和透射多偏移距法、地表反射法和全波形反演法。

1.3.1 多偏移距法 (Multi Offset Reflection Method)

多偏移距法是通过等距地改变收发天线间的距离进行监测的一种方法, 多偏移距法划分为两种, 分别为共中心点法和宽角法。共中心点法 (CMP) 是天线间的中心点固定, 收发天线同时向相反方向等

距移动的测量方法 (图 2(a))。宽角法 (WARR) 是发射天线保持不动, 接收天线移动使天线间距离等距增大的测量方法 (图 2(b))。这两种测量方式可以直接获取雷达波在土壤中的传播速度, 利用地面直达波或反射波的波速推求介电常数从而得到土壤含水量。

尽管多偏移距法应用广泛, 该理论仍存在一些不足。它无法控制测量深度, 单次测量对非均质土壤的土壤含水量的反映不充分, 操作费时耗力, 空间分辨率低, 不适用于大范围土壤含水量的监测和土壤含水量空间变化的绘制。

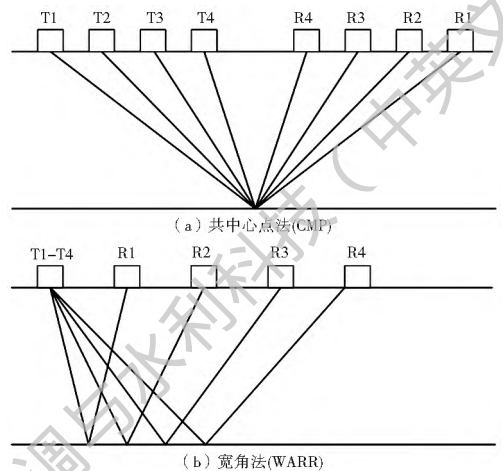


图 2 共中心点法和宽角法测量方式示意图

Fig. 2 CMP and WARR measurement methods

1.3.2 单偏移距法 (Common/single offset reflection method)

单偏移距法是收发天线间距保持不变, 以相同

间隔水平移动的测量方法。用这种方法提取地面波信息可以获取土壤含水量空间变化,绘制空间土壤含水量分布图。通过单偏移距法地面波估计土壤含水量的精确度受零时刻(t_{CW})校正和地面直达波传播时间(t_{AW})提取精度的影响。为准确提取 t_{CW} 、 t_{AW} ,在测量前需要用 CMP 或 WARR 法确定合适的天线间距使 t_{CW} 、 t_{AW} 能明显区分开。

Galagedara 等^[23]用 WARR 研究发现当天线间距为 1.5~2 m 时测量效果更好。Huisman 等^[14]给出 225 MHz GPR 单偏移距法地面波测量土壤含水量,相对于 TDR 结果的均方根误差为 $0.018 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。Grote 等^[24]人与烘干法含水量对比研究得出 450 MHz GPR 的均方根误差为 $0.017 \text{ m}^3/\text{m}^3$,900 MHz GPR 测量结果的均方根误差为 $0.011 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。Weiherm ller 等^[25]将 450 MHz GPR 和 TDR 土壤含水量测量结果对比得到 GPR 的均方根误差为 $0.076 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

单偏移距法具有高分辨率和快速、实时监测功能,适用于大范围的土壤水分时空分布监测,但用反射波求含水量时需要确定反射面深度。CMP 和 WARR 法可直接确定反射点(面)的深度,但耗时长,不适合较大范围的动态监测。可先用 CMP 法或 WARR 法确定最佳天线间距与反射界面深度,再采用 FO 法进行大范围的土壤剖面含水量测定。

1.3.3 透射零偏移距法(Trans ZOG)和透射多偏移距法(Trans MOP)

透射零偏移距法和透射多偏移距法是由钻孔雷达探测地下介质的雷达波波速发展而来的测量方法。钻孔雷达是将发射天线和接收天线分别放入平行钻孔中测量的一种探地雷达,可以探测比地表探地雷达更深的目标。透射零偏移距法(Trans ZOG)是收发天线保持同一水平面对不同深度进行测量的方法(见图 4),可以得到土壤含水量的垂向变化。透射多偏移距法(Trans MOP)是发射天线和接收天线分别在不同深度进行测量的方法(图 4),能得出两钻空间剖面土壤含水量变化图。Alumbaugh 等^[26]用钻孔雷达所得含水量的均方根误差为 2.0%~3.0%,但用钻孔雷达测量时钻孔间距不能超过 10 cm,因此只能用于小尺度监测,而且钻孔破坏土壤结构在农田实施较为困难。

透射零偏移距法(Trans MOP)和透射多偏移距法(Trans ZOP)不仅适用于钻孔雷达,而且能应用在地表探地雷达中,并绘制土壤含水量变化的二维图。Wijewardana 和 Galagedara^[27]基于该理论用 200 MHz GPR 通过地面直达波测量土壤水,研究显

示测量值与烘干法结果相关系数达 0.87,均方根误差为 $0.0184 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

透射多偏移距法较耗时,但能提供二维土壤水信息。透射零偏移距法空间分辨率高,采样体积大,操作简单,测量速度快,更重要的是在钻孔中它可以根据研究目的直接控制测量深度。

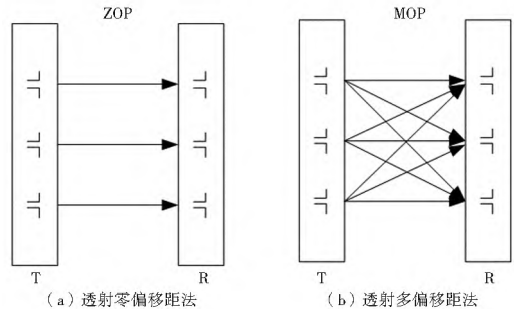


图 3 透射零偏移距法和透射多偏移距法测量方式

Fig. 3 Trans ZOP(a) and trans MOP(b) measurement methods

1.3.4 地表反射法(Surface reflection method)

地表反射法是用离地探地雷达系统(off-ground GPR/air-launched GPR)测定空气与地面界面反射系数从而推求土壤含水量的测量方式。离地探地雷达系统是用轮子或低空飞行平台将探地雷达架离地面测量的探地雷达系统,测量速度快,运输方便,在区域土壤水监测方面占有明显优势。

$$R = \frac{A_r}{A_m} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{1-R}{1+R} \quad (3)$$

式中: R 为反射系数; A_r 为测量的振幅; A_m 为测量振幅相应的理想振幅。

地表反射法测定土壤水需要准确测量振幅,振幅 1% 的测量误差就会导致土壤含水量 $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 的误差达 $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。在含水量低的条件下,反射系数较含水量高时更敏感。地表粗糙度大和剖面上土壤含水量随深度的变化造成反射系数衰减是影响地表反射法精度的主要因素,与有源遥感相似,此方法可能受益于遥感技术的发展。

1.3.5 全波形反演法(Full-wave inversion method)

全波形反演法是由 Lambot^[15]提出的一种用 GPR 确定水文特性的新方法。相对于其他 GPR 测量方法,全波反演法考虑了主要天线效应和雷达波传播中的球面发散,而且反演过程中利用了雷达信号包含的所有信息。与地表反射法相比,全波形反演法有更多优势,它过滤掉了天线距地高度对结果的影响,不需要校正天线距地高度,不需要理想电导

体作为参考测量。该方法需要将超宽带阶梯频率连续波雷达(SFCW)与离地单站横向电磁波喇叭天线结合,用矢量网络分析仪(VNA)将雷达系统连接到一个线性极化双脊宽带横向电磁波喇叭组成的天线系统上(图4)。全波反演法的原理如下:

$$S_{11}(\omega) = \frac{b(\omega)}{a(\omega)} = H_i(\omega) + \frac{H_r(\omega)G_{xx}(\omega)}{1 - H_f(\omega)G_{xx}(\omega)} \quad (4)$$

式中: $b(\omega)$ 和 $a(\omega)$ 分别是在矢量网络分析仪参考平面 $G_{xx}^{\uparrow}(\omega)$ 接收与发射信号; $H_i(\omega)$ 是天线回波损耗, $H(\omega) = H_i(\omega)H_r(\omega) \cdot H_f(\omega)$ 是天线反馈损耗,是模拟三维多层介质的空气-地下系统的转移格林函数。

Weierhiller等^[25]在0.8~1.6 GHz频率范围用全波反演法绘制土壤含水量空间变化,与TDR对比的均方根误差为 $0.053 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。Minet等^[28]用地表真实土壤采样测量评估了全波反演法测量田间尺度土壤含水量空间变化的能力,其均方根误差为 $0.0233 \text{ m}^3/\text{m}^3$,土壤含水率的整体重复性误差为 $0.0169 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。该方法的测量缺陷有待进一步研究。

式中: f 是天线频率; λ 为雷达波的波长; Z 为地面直达波的采样深度。

Van Overmeeren等^[30]用地震波近似雷达波估计地面直达波的采样深度,表述为

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{vS}{f}} \quad (6)$$

式中: v 是土壤中雷达波波速; S 是天线间距。

探地雷达采样深度在干土中较湿土大,低频探地雷达比高频的地面直达波采样深度大。Grote等^[13]研究发现该方法预测的采样深度比实际测量的采样深度小,但仍在合理范围内。Sperl^[31]建立了采样深度与雷达波波长的函数:

$$Z \approx 0.145 \lambda^{1/2} \quad (7)$$

Huisman^[13]实验结果与Sperl^[31]的结论较符合。Pallavi等^[32]的研究结果表明Van Overmeeren模型的计算结果比Sperl大。Galagedara等^[33]利用数字模拟技术模拟探地雷达CMP数据,分析得到地面直达波的采样深度 D 与频率负相关,即

$$D = 0.6015 \lambda + 0.0468 \quad (8)$$

该式表明电导率变化对深度无明显影响。当土壤含水量增大时,地面直达波的采样深度变小,与Van Overmeeren方法一致。该理论比Du和Sperl的方法确定的采样深度大。

2.2 地面反射波的测量深度

若土壤存在明显连续反射层时,提取反射波的波速能获取不同深度的土壤含水量。所测量土壤深度通过反射波的采样深度确定,可视对应反射层的深度。反射层的选择和深度测定影响GPR的测量精度,当用反射波提取波速计算土壤含水量时,反射层要选取连续、水平、清晰的界面(如潜水面),反射层的深度通过钻孔获得,或根据研究需要在已知深度处理设目标物作为反射层进行测量。GPR反射波测量的土壤深度可达到潜水面,能够测量不同深度的土壤含水量。

3 探地雷达测量土壤水的尺度特征分析

探地雷达具有探测深度大、便捷快速、测量精度高、分辨率高、无损测量等优点,作为田间尺度的测量方法已成为观测中小尺度上土壤含水量信息的重要途径,在美国、荷兰、德国、加拿大等国家以其尺度优势应用广泛,近二十年间有2万多篇的相关文章发表,其中SCI检索数量达2000篇。在国内,探地雷达测量土壤水的文章约30篇,主要集中在荒漠、沙漠、室内模拟实验方面,缺少GPR在不同下垫面条件下测量土壤含水量实际应用情况。

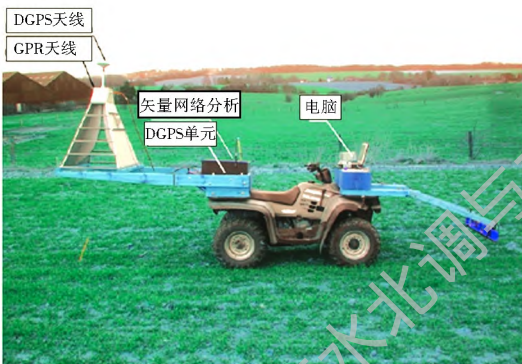


图4 全波反演法GPR设备

Fig. 4 Facility for GPR by full wave inversion method

2 探地雷达的测量深度

作为非直接测定土壤水技术,探地雷达测量土壤深度的确定对其结果验证和应用至关重要。

2.1 地面直达波的测量深度

探地雷达地面直达波测量的土壤深度,通过直达波的采样深度确定,通常在5~50 cm范围,但直达波的采样深度尚不明确。常用的估算直达波采样深度的方法有如下三种。

Du等^[29]提出地面直达波的采样深度可近似用雷达波波长的一半确定:

$$Z = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f \epsilon^{1/2}} \quad (5)$$

与点尺度测量方法相比,如烘干称重法、TDR 等应用广泛的点尺度方法测定的数据能较准确地反映观测点多层的土壤含水量,但应用它推求更大范围区域土壤含水量时,存在尺度不匹配,且耗时费力、对土壤具有一定破坏性、难于移动等问题。而探地雷达测量精度与 TDR、烘干称重法等相当,既能测量单点土壤含水量,又能通过便携移动,加密测量点实现对较大范围区域尺度土壤含水量的测量与计算,更适合测量较大范围的土壤含水量信息,且可以准确测量垂向土壤含水量自然分布,更好地描述干旱/湿润、冻结/溶解过程,且属无损测量。Sainteny 等^[34]比较了渗透过程的水力模型与模拟雷达测量,证明了 GPR 能够追踪湿润锋和饱和球状带。Steelman 等^[35]用包气带垂向土壤水流动模型(HYDRUS-1D)进一步检验 GPR 观测数据中瞬时渗透脉冲、蒸散发阶段、深层排水模式的性质,模型未经校正的结果就能与 GPR 达到很高的一致性。

与区域尺度的测量方法相比,探地雷达方法测量的空间范围可控。如宇宙射线中子法(CRS),能够实现区域尺度平均土壤含水量的长期连续监测,测量范围为 350 m 半径的区域,测量深度最深达到 70 cm。但 CRS 的测量范围是固定的,移动不便,且需要采集大量土样校正参数。而 GPR 能够根据研究目的,通过测点设置,可调整测量范围,不需要破坏土壤层状结构,并能够绘制出区域尺度的土壤含水量空间分布情况,但缺点在于不能进行连续观测。因此,探地雷达技术与其他区域尺度土壤水测量方法相配合,能够在数据校正和验证方面发挥积极作用,实现空间尺度和时间尺度的优势互补。

与遥感像元尺度反演方法相比,遥感反演法通过植被指数、地表温度、微波后向散射系数等遥感参数建立统计模型反演土壤含水量,遥感反演结果存在空间分辨率低、探测深度浅等瓶颈问题,并需要大量实测土壤水数据校正反演模型、验证反演结果精度。由于遥感影像覆盖范围广、下垫面变化多样等因素,验证数据采用烘干法、TDR 测量法等得到土壤水数据,存在尺度不匹配、投入大、费时费力等问题。蒋金豹等^[36]基于 MIMICS 模型联合光学和微波数据反演麦田的地表土壤含水量,在研究区内选取 49 个试验点用于验证,并在 10 m × 10 m 的区域内均匀选择 10 个点利用 TDR 测量土壤含水量,取 10 个点的平均值作为该试验点的土壤含水量。陈长红等^[37]用分辨率为 25 m 的 RADARSAT-2 数据反演风沙滩地区地表土壤水,根据野外 35 个采样点烘干法的实测数据进行精度验证。虞文丹等^[38]联

合 TVDI 和气象因子构建表层土壤相对含水量估算模型,并用研究区内均匀分布的 28 个土壤湿度测站数据对模型结果进行了验证。上述遥感反演模型的验证方法均是在实验区内均匀选取适量试验点,用该点土壤含水量作为所在像元的实测土壤含水量,模拟数据与实测数据尺度不同,可能导致验证结果不准确,这种验证方法存在一定问题。而探地雷达比遥感反演法测量精度更高、机动灵活、空间分辨率更高且可控、测量深度更大、测量结果具有空间分布特征等优势,可在遥感反演结果验证等方面发挥积极作用,有益于模拟结果与野外实测数据的尺度匹配问题。

除此之外,对于粗粒土,探地雷达能提供连续、高分辨率的地下水位记录,该应用减少了用于测量潜水面和确定地下水流动的观测井数量,降低观测成本。用上述方法 GPR 可以绘制潜水面深度时空分布,推断地下水运移的时空变化情况,确定地下水补给和排泄区域、井的位置,估计水力梯度,在此基础上进一步帮助提高、调整和验证水文土壤模型。

4 展望

探地雷达测量土壤水具有不破坏土壤层、精度较高、速度快、适合中、小尺度监测等优点,随着探地雷达技术的发展和测量方法的完善,它在测定土壤含水量方面的应用值得关注。

(1) 探地雷达将作为观测中小尺度土壤含水量信息的重要途径。单偏移距法能提供更高的空间分辨率和更少的测量时间,对不同灌溉结构的识别效果好,更适于中尺度观测;利用透射多偏移距法在地表 GPR 的应用虽能提供小尺度二维土壤水空间变化,该方法地面直达波的土壤水测量不确定性和采样深度有待进一步研究;特别是 GPR 的全波反演法近年来成为 GPR 测量土壤水的研究热点。

(2) 因便于空间尺度匹配,探地雷达在遥感反演土壤水模型率定与精度验证方面比 TDR、烘干法更有优势,有潜力应用于遥感产品验证、土壤水模式时间稳定性分析等其他水文相关应用中。

(3) 将探地雷达测量的一定深度和空间范围的土壤水数据,应用于分布式水文模型的参数率定与验证,将有益于提高模型模拟精度。

参考文献(References):

- [1] Vereecken H, Huisman J A, Bogaen H, et al. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4). DOI: 10.1029/

- 2008WR006829.
- [2] 宋文龙, 杨胜天, 高云飞, 等. 便携式生态水文实验与监测系统 (Eco monitors) 的集成与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 7-12. (SONG Wenlong, YANG Shengtian, GAO Yurfei, et al. Integration and application of portable experiment and monitoring system (Eco monitors) in ecohydrological field study[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 7-12. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.05007.
- [3] 李想堂, 王端宜, 张肖宁. 探地雷达技术的回顾与展望[J]. 无损检测, 2006, 28(9): 479-484. (LI Xiangtang, WANG Duanyi, ZHANG Xiaoning. Review and prospects of ground penetrating radar technology[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(9): 479-484. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6656.2006.09.011.
- [4] Zreda M, Shuttleworth W J, Zeng X, et al. COSMOS: The cosmicray soil moisture observing system [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(11): 4079-4099. DOI: 10.5194/hess-16-4079-2012.
- [5] Wang L L, Qu J J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review [J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009, 3(2): 237-247. DOI: 10.1007/s11707-009-0023-7.
- [6] 冉弥, 邓世坤, 陆礼训. 探地雷达测量土壤含水量综述[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(4): 480-486. (RAN Mi, DENG Shirun, LU Li Xun. Review of measuring soil water content with ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(4): 480-486. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2010.04.015.
- [7] Basson U, Berr Avrahm Z, Gev I. Shallow stratigraphy profiles of sand dunes with GPR and its usefulness for measuring moisture content of soil horizons within the dunes [C]. 4th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, Finland, 1992.
- [8] Du S, Rummel P. Reconnaissance studies of moisture in the subsurface with Ground Penetrating Radar [C]. 5th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, Canada, 1994.
- [9] Chanzy A, Tarussov A, Judge A, et al. Soil water content determination using a digital ground penetrating radar [J]. Soil Science Society of America, 1996, 60(5): 1318-1326. DOI: 10.2136/sssaj1996.03615995006000050005x.
- [10] Weiler K W, Steenhuis T S, Boll J, et al. Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensors [J]. Soil Science Society of America, 1998, 62(5): 1237-1239. DOI: 10.2136/sssaj1998.03615995006200050013x.
- [11] Dannowski G, Yaramanci U. Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectrics [J]. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1999, 4: 71-85.
- [12] Lunt I A, Hubbard S S, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1): 254-269. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.014.
- [13] Huisman J A, Sperl C, Bouten W, et al. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar [J]. Journal of Hydrology, 2001, 254(1/2): 48-58. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00336-5.
- [14] Huisman J A, Snepvangers J, 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: 194-207. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00239-1.
- [15] Lambot S, Rhebergen J, van den Bosch I, et al. Measuring the soil water content profile of a sandy soil with off-ground monostatic ground penetrating radar [J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(4): 1063-1071. DOI: 10.2113/3.4.1063.
- [16] Deiana R, Cassiani G, Villa A, et al. Calibration of a vadose zone model using water injection monitored by GPR and electrical resistance tomography [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 215-226. DOI: 10.2136/vzj2006.0137.
- [17] Steelman C M, Endres A L, and Jones J P. High resolution ground penetrating radar monitoring of soil moisture dynamics: field result, interpretation, and comparison with unsaturated flow model [J]. Water Resources Research, 2012, 48(9): 1-17. DOI: 10.1029/2011WR011414.
- [18] Mangel A R, Moysey S M J, Ryan J C, et al. Multi offset ground penetrating radar imaging of a lab scale infiltration test [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 16(11), 4009-4022. DOI: 10.5194/hess-16-4009-2012.
- [19] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582. DOI: 10.1029/WR016i003p00574.
- [20] Roth C H, Malicki M A, Plagge R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR [J]. Journal of Soil Science, 1992, 43(1): 1-13. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x.
- [21] Herkelrath W N, Hamburg S P, Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 857-864. DOI: 10.1029/91WR00311.
- [22] Behari J. Microwave dielectric behaviour of wet soils [M]. London: Springer, 2005. DOI: 10.1007/1402032889.
- [23] 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, 2005, 301(1): 182-197. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.031.
- [24] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground penetrating radar ground wave techniques [J]. Water Resources Research, 2003, 39(11): 1321-1335. DOI: 10.1029/2003WR002045.
- [25] Weihermiller L, Huisman J A, Lambot S, et al. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques [J]. Journal of

- Hydrology, 2007, 340: 205-216. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2007. 04. 013.
- [26] Alumbaugh D, Chang P, Paprocki L, et al. Estimating moisture contents in the vadose zone using cross-borehole ground penetrating radar: a study of accuracy and repeatability[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 451-4512, 1309. DOI: 10. 1029/2001WR000754.
- [27] Wijewardana Y G N S, Galagedara L W. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1): 24-33. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2010. 06. 036.
- [28] 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, 424-425: 112-123. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 12. 034.
- [29] Du S. Determination of water content in the subsurface with the ground wave of ground penetrating radar[D]. München: Ludwig-Maximilians-Universität, 1996.
- [30] van Overmeeren R A, Sariowan S V, Gehrels J C. Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content: results of comparative measurements at two test sites [J]. Journal of Hydrology, 1997, 197(1): 316-338. DOI: 10. 1016/S0022-1694(96)03244-1.
- [31] Sperl C. Erfassung der raumzeitlichen Variation des Boderrassergehaltes in einem Agrarökosystem mit dem Ground Penetrating Radar [D]. Germany: Technische Universität, 1999.
- [32] Pallavi B, Saito H, Kato M. Estimation depth of influence of GPR ground wave in lysimeter experiment[J]. Journal of Arid Land Studies, 2009, 19(1): 121-124.
- [33] Galagedara L W, Redman J D, Parkin G W, et al. Numerical modeling of GPR to determine the direct ground wave sampling depth[J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1096-1106. DOI: 10. 2136/vzj2004. 0143.
- [34] Saintenoy A, Schneider S, Ticholka P. Evaluating ground penetrating radar use for water infiltration monitoring[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 208-214. DOI: 10. 1109/AGPR. 2007. 386531.
- [35] Steelman C M, Endres A L. Assessing vertical soil moisture dynamics using multi-frequency GPR common midpoint soundings[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436-437: 51-66. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2012. 02. 041.
- [36] 蒋金豹, 胡丹娟, 等. 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. (JIANG Jinbao, HU Danjuan, et al. Research of soil moisture retrieval model of wheat covered surface based on MIMICS model[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(5): 707-713. (in Chinese)) DOI: 10. 7606/j. issn. 1009-1041. 2015. 05. 20.
- [37] 陈长红. 基于 RADARSAT-2 的风沙滩地区地表土壤水分遥感反演[D]. 西安: 长安大学, 2014: 1-63. (CHEN Changhong. Soil moisture inversion based on RADARSAT-2 data in blow sand region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014: 1-63. (in Chinese))
- [38] 虞文丹, 张友静, 陈立文, 等. 基于 TVDI 与气象因子的土壤含水量估算[J]. 地理空间信息, 2015, 13(1): 137-139. (YU Weidan, ZHANG Youjing, CHEN Liwen, et al. Estimation of soil water content based on TVDI and meteorological factors[J]. Geospatial Information, 2015, 13(1): 137-139. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-4623. 2015. 01. 045.
- [39] Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2: 476-491. DOI: 10. 2113/2. 4. 476.
- [40] 孙蕾, 王磊, 蔡冰, 等. 土壤水分测定方法简介[J]. 中西部科技, 2014, 13(11): 54-55. (SU N Lei, WANG Lei, CAI Bing, et al. Brief introduction of soil moisture measurement method [J]. Science and Technology of West China, 2014, 13(11): 54-55. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6396. 2014. 11. 025.
- [41] 张学礼, 胡振琪, 初士立, 等. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 118-122. (ZHANG Xue li, HU Zhen qi, CHU Shi li, et al. Methods for measuring soil water content: a review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 118-122. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0564-3945. 2005. 01. 034.
- [42] Dix C H. Seismic velocities from surface measurements[J]. Geophysics, 1955, 20(1): 68-86. DOI: 10. 1190/1. 1438126.
- [43] 董航, 刘四新, 王春晖, 等. 探地雷达测量近地表含水量的研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(1): 163-167. (DONG Hang, LIU Si xin, WANG Chun hui, et al. Study on near surface water content measurement by ground penetrating radar [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(1): 163-167. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-5888. 2009. 01. 026.
- [44] Stoffregen H, Yaramanci U, Zenker T, et al. Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data [J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(3-4): 201-206. DOI: 10. 1016/S0022-1694(02)00150-6.