

低频探地雷达地波法测定土壤含水量的可行性研究^①

吉丽青^{1,2}, 朱安宁^{1*}, 张佳宝¹, 信秀丽¹, 李晓鹏^{1,2}

(1 封丘农业生态实验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用地波法来探讨低频探地雷达 (GPR) 在土壤含水量测定方面的可行性。分别采用 50 MHz 和 100 MHz 天线的探地雷达地波法对黄淮海平原潮土地区砂壤土和砂土中的含水量进行了探测研究。结果表明, 50 MHz 天线 GPR 分辨率过低, 在砂土和砂壤土中均无地波信号。100 MHz 天线在砂壤土中无地波信号, 但在砂土中可清晰读取空气波和地波。TDR 测得含水量为 6.3% 的砂土, 用 100 MHz 天线地波法 3 次测定结果分别为 5.9%, 6.2% 和 6.5%, 绝对误差均在 0.4% 以内。采用共中点法 (CMP) 和固定间距法 (FO) 相结合探测土壤含水量, 在 FO 最佳天线间距 1 m 时测得灌水前后的砂土含水量分别为 6.5% 和 20.2%, 与 TDR 测定结果 6.3% 和 19.7% 相比, 绝对误差在 0.5% 以内。100 MHz 天线 CMP 和 FO 相结合的方法兼顾了 CMP 法读取地波的精确和 FO 法的快速便捷, 在砂土的含水量测定应用中是可信、可行的。

关键词: 探地雷达; 低频; 地波法; 土壤含水量

中图分类号: S152.7

长期以来, 小尺度土壤含水量的测定方法主要有烘干法、中子法以及时域反射仪 (TDR) 法等, 这些方法能较准确地测定土壤含水量, 但都存在着耗时费力并对土壤具有一定的破坏性等问题^[1-2]。20 世纪 90 年代中期, 遥感技术开始应用于区域尺度上的土壤水分监测, 该方法能快速测定区域乃至全球的土壤表层含水量, 信息量大, 但是, 遥感法的空间分辨率较低, 而且通过遥感数据只能估计表层 0.05 m 深度的土壤含水量, 受植被覆盖的影响也较大^[3-5]。由此可见, 在测定土壤含水量方法的选择上, TDR 和遥感方法存在着一个空间尺度上的技术空白, 即在农田和小流域等中小尺度上, 上述方法已经远远不能满足日益发展的土壤科学研究和现代化精准农业对大量、快速、准确的农田土壤水分动态信息的需求。因而, 发展科学依据充分, 适用于农田和小流域的方便、快捷、准确、无破坏性的土壤含水量测定技术是一个需要重视和亟待解决的问题。近年来, 欧美一些地球物理学家以及水文地质学家开始尝试将探地雷达 (GPR, ground penetrating radar) 技术应用到土壤含水量的测定中来^[6-11], 在国内, GPR 在土壤学中的应用处于起步阶段^[12]。GPR 技术通过获取雷达波在土壤中的运行时间、波速

等信息来估计土壤的介电常数, 进而利用土壤介电常数和土壤含水量的经验公式或半理论关系式来计算土壤的含水量^[13]。按电磁波的传播类型, 现有的 GPR 探测土壤含水量的方法主要有 4 种: 反射波法、地波法、反射系数法及钻孔雷达法。其中根据发射和接收天线距离以及 GPR 测定的地波运行时间来确定浅层土壤含水量的地波法, 是当前国际上认为最具有潜力的土壤含水量测定方法^[10,14-17]。Du 和 Rummel^[18]认为在没有明确地下反射层的条件下, 地波法是测定浅表层土壤含水量的最佳方法。Huisman 等^[19]研究发现, 地波法与 TDR 法确定的土壤含水量在 0.1 m 深度内有很好的相关性。

目前, 国际上应用地波法探测土壤含水量时采用的电磁波频率主要范围为 225 ~ 900 MHz^[2,6,8,10,14]。由于低频电磁波的分辨率低, 并受土壤质地、含水量等的影响, 雷达图像中不易识别出空气波和地波, 因此国内外关于低频 GPR 地波法的研究还较少, 但与高频电磁波相比, 低频电磁波具有穿透能力强、探测深度大等特点。本研究利用 50 MHz 和 100 MHz GPR 探讨砂土和砂壤土上低频 GPR 地波法测定土壤含水量的可行性, 并通过结合共中点法 (common middle point,

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2011CB100506), 中国科学院知识创新重要方向项目 (KZCX2-YW-JS408) 和国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA10Z208) 资助。

* 通讯作者 (anzhu@issas.ac.cn)

作者简介: 吉丽青 (1985—), 女, 江苏金湖人, 硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达数据解译与应用。E-mail: ljqi@issas.ac.cn

CMP)和固定间距法(fixed offset, FO)测定的灌水前后的不同土壤含水量进行验证,以期为今后低频GPR在土壤学中的进一步应用提供科学依据。

1 试验设计及测量原理

1.1 试验仪器

本研究数据采集采用瑞典 Mala GeoScience 公司生产的 RAMAC/GPR CUII 通用主机系统,主要部件包括:两对频率分别为 50 MHz 和 100 MHz 的非屏蔽接收和发射天线(通过光缆连接到主机)、主机、电脑、光缆和其他配件。采集软件为 RAMAC Groundvision,图像滤波处理采用 REFLEXW 软件。

1.2 试验场地

该试验在黄淮海平原豫北封丘地区进行,该地区土壤多为在黄河沉积物上发育的潮土。按国际制分类标准,分别选砂土和砂壤土进行试验,砂土层厚 1.5 m 以上,黏粒含量 45.9 g/kg,粉粒含量 16.9 g/kg,砂粒含量 937.2 g/kg,地表无植被覆盖。砂壤土层厚 1 m 以上,黏粒含量 129.6 g/kg,粉粒含量 101.7 g/kg,砂粒含量 757.5 g/kg,地表 1~2 cm 处有少量植被覆盖。

1.3 试验方法

目前国际上采用GPR地波法测定土壤剖面平均含水量最常用的数据采集方法是共中点法(CMP, common midpoint)^[10,14-15,18]。CMP法测定的图像中能直接读取空气波和地波,计算过程简单并且误差较小,但需要耗费大量的时间和人力,而固定间距法(FO, fixed offset)省时省力。将CMP法和FO法相结合来探测地下介质,兼顾了两种方法的优点,既能得到准确的结果又省时省力。本研究中分别采用CMP法以及CMP-FO相结合的方法进行试验,对比验证两种方法的精度,并对应用低频GPR测定土壤含水量测定方面的可行性展开研究。

试验一:通过CMP法采集GPR数据测定土壤含水量。即发射天线和接收天线按固定步长沿着测线向相反方向对称地移动,保持一个共中心点,其雷达记录为天线间距与雷达波的走时关系。试验中测线为南北向,长 15 m,发射和接收天线的起始位置在测线中点南北各 10 cm 处,起始间距 20 cm,采集步长 20 cm,即两个天线每次各沿测线向外移动 10 cm。为验证GPR对土壤含水量的预测结果,试验中在测线一侧 1 m 处开挖长 1.5 m、深 1.5 m 的剖面,在剖面上选择距地表 10、40、70、100 和 130 cm 5 个深度,在每个深度上随机选取 5 个点用TDR100 便携式土壤水分测定仪测定土壤含水量。

试验二:通过CMP法与FO法相结合测定土壤含水量。FO法是保持GPR发射天线和接收天线的间距不变,按固定步长沿着测线方向同时移动的获取雷达图像的测定方法,其雷达图像记录为测线与雷达波走时关系。CMP法作为一种变天线间距方法需耗费大量的时间和人力,不适合在较大范围内(10~1000 m)应用。将CMP法与FO法相结合来测定土壤含水量,则省时省力得多^[15]。Sperl等^[16]提出先通过CMP法获取不同天线间距的地波走时,然后选择一个能分离出空气波和地波的最佳天线间距,再利用FO法探测含水量。该方法的最大局限性在于,CMP法与FO法的最佳天线间距不统一。在CMP图像中,天线间距越小,图像中的空气波和地波越接近,界面不清晰,难以拾取准确的空气波和地波;而在FO图像中,天线间距越大,雷达波信号越弱,异常信号增多,误差越大。因此,如何找到兼顾CMP法和FO法的最佳天线间距尤为关键。本研究中首先采用CMP法获得GPR图像,获取能清晰分离出空气波和地波的不同天线间距(x)对应的空气波走时(t_{AW})和地波走时(t_{GW}),回归获取 $t_{AW}-x$ 和 $t_{GW}-x$ 关系式。再根据 $t_{AW}-x$ 和 $t_{GW}-x$ 关系式计算出FO最佳天线间距时的 t_{AW} 和 t_{GW} ,然后在测线 5~9 m 处布置灌水区域,采用FO法以 20 cm 步长探测整条测线。用TDR测定相应时刻的土壤含水量方法同试验一。

1.4 GPR 图像处理与解译

原始的雷达图像需经过滤波和图像校准等预处理才能进行图像的判读、解译及目标体识别,从而获得更精确的目标信息。采用REFLEXW软件进行预处理,基本步骤为:①去直流漂移,作用是去除零点漂移;②静校正,移动开始时间;③增益,放大深部信号;④抽取平均道,水平滤波,即去除直达波和其他水平的固有信号;⑤巴特沃斯带通滤波,去除不需要的低频和高频成分;⑥滑动平均,对图像做平滑^[20]。

1.5 地波测定土壤含水量的方法

当放置在地表的发射天线发出高频电磁波时,电磁波以球状波的形式进入空气和地下,在地上部沿地表运行的部分称为空气波,在地下沿地表运行的为地波^[21]。雷达波在土壤中的传播速度主要由土壤的相对磁导率和介电常数决定,大多数土壤(低盐)的相对磁导率近似为 1,雷达波速率 v 主要受土壤的介电常数控制,因而,土壤的介电常数 ϵ 可由下式给出^[15]:

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

式中, c 为电磁波在真空中的速度(0.3 m/ns)。通过GPR接收天线接收到的空气波和地波到达时间的差值可以

计算出地波在近地表土壤层中的平均运行速度 (v), 从而得到土壤的介电常数^[20]。

$$v = \frac{x}{x/c + (t_{GW} - t_{AW})} \quad (2)$$

由 (1), (2) 式得,

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v} \right)^2 = \left(\frac{c(t_{GW} - t_{AW}) + x}{x} \right)^2 \quad (3)$$

式 (3) 中, 不同天线间距 x 条件下, 接收天线接收到的地波到达时间 t_{GW} 和空气波到达时间 t_{AW} 可通过 REFLEXW 软件读取^[20]。

Topp 等^[13]发现, 土壤的介电常数和含水量紧密相关, 受土壤质地、土壤体积质量、土壤温度、土壤溶液含盐量等影响较小, 并证实了通过测定土壤介电常数, 再利用 $\theta - \varepsilon$ 关系式可以精确地计算土壤体积含水量, 并提出了如下的经验关系式:

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

由公式 (3)、(4) 可得土壤含水量。

2 结果与讨论

2.1 CMP 法测定土壤含水量

经过处理后的 GPR 图像显示, 50 MHz 天线 GPR 在砂土和砂壤土上均无地波信号; 100 MHz 天线 GPR 在砂壤土上无地波信号, 在砂土上的 3 次试验 GPR 图像均可清晰识别空气波和地波 (图 1)。由于电磁波的频率对穿透深度和分辨率有很大的影响, 因此 GPR 天线的中心频率越高, 介质的相对介电常数和磁导率越大, GPR 所能达到的探测深度越小^[22], 而低频电磁波较高频电磁波其穿透能力增加、分辨率降低^[17]。50 MHz 电磁波频率低、分辨率低, 从而在 GPR 图像中无法识别地波信号。本次试验中砂壤土含水量较大 (14.3%), 介电常数较高, 导致雷达波信号衰弱明显, 无地波信号; 而砂土含水量和介电常数均较小, 所以 100 MHz 天线 GPR 在砂壤土中无地波信号, 但在砂土中

地波信号清晰可见。

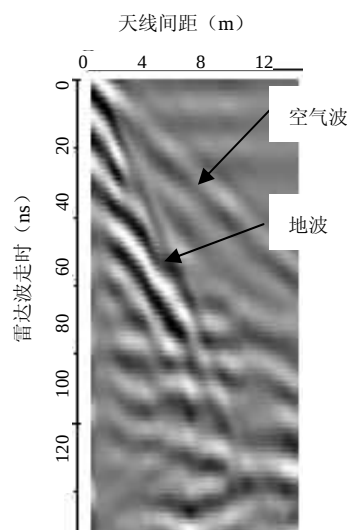


图 1 100 MHz 天线 GPR 在砂土中的探测图

Fig. 1 CMP-measurement with 100 MHz antenna in sand soil

100 MHz 天线 GPR 在砂土上进行 3 次探测试验, 并通过 REFLEXW 软件获取天线间距、地波和空气波走时, 根据上述步骤计算得到介电常数以及 Topp 公式对应的土壤含水量 (表 1)。GPR 地波方法有效探测深度的确定依然是当前一个很重要但较难进行的研究课题。Galagedara 等^[15]的研究结果认为, 在不同的土壤含水量条件下, 其有效测深在 0.2 ~ 0.5 m 范围内变化。van Overmeeren 等^[19]认为地波在波速较快的干土和砂性土壤中的有效探测深度大于湿土和黏性土壤。本研究在砂土的含水量较低, 且土壤质地均一, 在开挖剖面距地表 0 ~ 0.5 m 处用 TDR 测定砂土剖面平均含水量为 6.3%。CMP 法 3 次测得的砂土含水量的结果分别为 5.9%、6.2% 和 6.5%, 与 TDR 测得的土壤含水量相比, 绝对误差均在 0.4% 以内。试验结果表明: 100 MHz GPR 地波法测定砂土的含水量较为精确。由于地波能够直观地反映在雷达图像中, 斜率即为地波波速, 因此能快速获取土壤含水量。

表 1 CMP 法测定砂土表层含水量

Table 1 Sand soil moisture measured with CMP method

试验	天线间距 (m)	地波走时 (ns)	空气波走时 (ns)	介电常数	含水量 (%)
1	8.9	61.0	30.2	4.2	5.9
2	7.5	63.6	37.0	4.2	6.2
3	6.1	46.2	24.0	4.4	6.5

2.2 CMP-FO 法测定砂土含水量

由于 100 MHz GPR 在砂壤土上无地波信号, 因此该部分试验只在砂土上进行。本研究中首先采用 CMP 法获得 GPR 图像, 获取几个能清晰分离出空气波和地波的不同天线间距对应的地波和空气波走时, 如图 2 所示。CMP 图像中地波和空气波均为天线间距 x 和走时 t 的线性关系, 回归获取 $t_{AW}-x$ 和 $t_{GW}-x$ 关系式。

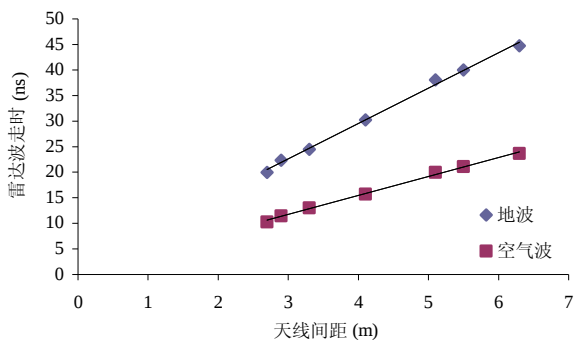


图 2 天线间距-电磁波走时图

Fig. 2 Relationship between antenna separation and wave travel time

$$t_{AW}=3.71x+0.60, \quad R^2=0.997 \quad (5)$$

$$t_{GW}=6.97x+1.70, \quad R^2=0.996 \quad (6)$$

根据公式 (5), 当天线间距 $x=1\text{ m}$ 时, 空气波走时 $t_{AW}=4.31\text{ ns}$; $x=3\text{ m}$ 时, $t_{AW}=11.73\text{ ns}$ 。

在测线 5~9 m 处布置灌水区域后, 采用 FO 法探测整条测线, 天线间距分别设置为 1 m 和 3 m。试验初始 (未灌水) 状态的土壤含水量基本一致, 其 GPR 图像为水平直线, 天线间距为 1 m 时的 GPR 图像如图 3 (左) 所示。灌水后, 从测线 5 m 处起, 灌水区域由于含水量增大导致介电常数增大, 从而导致地波的走时 t_{GW} 增大, GPR 图像渐渐下凹, 如图 3 (右), 随着发射天线和接收天线都进入灌水区域, 双程走时逐渐稳定。由于空气波走时 t_{AW} 不受土壤含水量变化的影响保持不变, 因此根据固定的天线间距 x 与空气波走时 t_{AW} , 并采用 REFLEXW 软件读取灌水区域相应的地波走时 t_{GW} , 由公式 (3)、(4) 计算出土壤含水量。

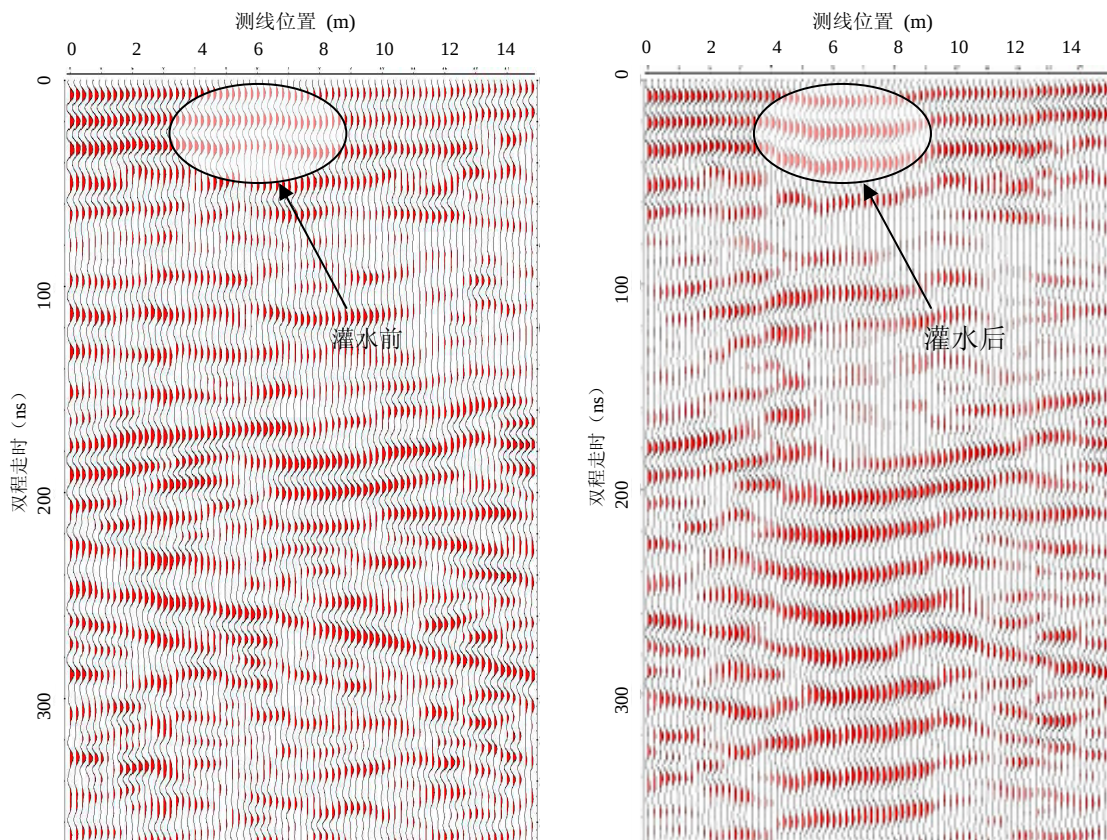


图 3 砂土初始 (左) 和灌水处理 (右) 的 FO 法测定图像 ($x=1\text{ m}$)

Fig. 3 Schematic FO-measurement in sand soil before (left) and after (right) irrigation (antenna separation $x=1\text{ m}$)

表2为不同天线间距条件下CMP-FO法测定的灌水前后砂土含水量。由表2可以看出,在未灌水条件下,CMP-FO法测得砂土剖面平均含水量在天线间距为1 m时为6.5%,在天线间距为3 m时为6.0%,TDR测得0~50 cm深度处砂土剖面平均含水量为6.3%。因此在未灌水条件下,CMP-FO法在天线间距分别为1 m和3 m时的测值与TDR测值相比,绝对误差分别为0.2%和0.3%,结果均较为精确。灌水条件下,CMP-FO法测得砂土剖面平均含水量在天线间距1 m

时为20.2%,在天线间距3 m时为17.1%,TDR测得0~50 cm深度处的砂土剖面平均含水量为19.7%。因此在灌水条件下,CMP-FO法在天线间距为1 m和3 m时的测值与TDR测值相比,绝对误差分别为0.5%和2.6%,结果表明在灌水条件下,当天线间距为1 m时,接近FO的最佳天线间距,测得含水量结果较为精确,当天线间距为3 m时,由于天线间距过大,FO图像中雷达波信号衰减严重,导致误差增大。

表2 CMP-FO法测定灌水前后砂土含水量

Table 2 Comparison of sand soil moisture measured with CMP - FO method under different antenna separations before and after irrigation

天线间距 x (m)	水分状态	空气波走时 t_{AW} (ns)	地波走时 t_{GW} (ns)	介电常数 ϵ	含水量 (%)	绝对误差 (%)
1	未灌水	3.76	7.42	4.40	6.5	0.2
	灌水	3.76	11.35	10.72	20.2	0.5
3	未灌水	11.61	22.17	4.20	6.0	0.3
	灌水	11.61	31.84	9.14	17.1	2.6

通过获取CMP图像中能清晰分离出空气波和地波的不同天线间距对应的 t_{AW} 和 t_{GW} ,回归获取 $t_{AW}-x$ 和 $t_{GW}-x$ 关系式,再计算出FO最佳天线间距1 m时的 t_{AW} 和 t_{GW} ,兼顾了FO法和CMP法的最佳天线间距,与直接由CMP最佳天线间距3 m进行的FO法测量相比,结果更精确。值得一提的是,目前对于GPR的探测深度的精确确定仍然是一个难题,还需要展开大量的基础性研究工作。

3 结论

50 MHz天线GPR图像在砂土和砂壤土中均无法拾取地波信号,50 MHz天线GPR频率过低,不适合应用于土壤含水量的测定。100 MHz天线GPR在砂壤土中无地波信号,在砂土中可清晰读取空气波和地波。通过100 MHz天线GPR地波法3次测得的砂土含水量分别为5.9%、6.2%和6.5%,与TDR测得的砂土含水量6.3%相比,绝对误差分别对应为0.4%、0.1%和0.2%,结果表明地波法测得的土壤含水量较为精确,为今后的表层土壤平均含水量的确定提供一种比较可行的方法。

与CMP地波法相比,CMP-FO法同时具有CMP法读取地波的精确和FO法的快速便捷,在不同水分处理的砂土中均取得了较为准确的测定结果。通过获取CMP图像中不同天线间距对应的 t_{AW} 和 t_{GW} ,回归

得到 $t_{AW}-x$ 和 $t_{GW}-x$ 关系式,再计算出FO最佳天线间距1 m时的 t_{AW} 和 t_{GW} ,与直接由CMP最佳天线间距3 m进行的FO法测量相比,结果更精确。在今后CMP-FO法的应用中,可参考该方法获得最佳的天线间距。

GPR在土壤学领域中的应用在国内尚处于起步阶段。本研究仅在砂土和砂壤土上对低频GPR地波法测定土壤含水量的可行性进行了探讨,在其他类型土壤中的应用及其有效测深等还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Herkelrath WN, Hamburg SP, Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resource Research*, 1991, 27: 857-864
- [2] Huisman JA, Snepvangers JJJC, Bouten W, Heuvelink GBM. Mapping spatial variation in surface soil water content: Comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 2002, 207: 194-207
- [3] Jackson TJ, Schmugge J, Engman ET. Remote sensing applications to hydrology: Soil moisture. *Hydrology Science Journal*, 1996, 41: 517-530
- [4] Van Oevelen PJ. Estimation of areal soil water content through microwave remote sensing. The Netherlands: Wageningen University, 2000

- [5] Entekhabi DGR, Asrar AK, Betts KJ, Beven RL, Bras CJ, Duffy T, Dunne RD, Koster DP, Lettenmaier DB, McLaughlin WJ, Shuttleworth MT, van Genuchten MY, Wei EF, Wood EF. An Agenda for land-surface hydrology research and a call for the second International Hydrological Decade. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(10): 2 043–2 058
- [6] Davis JL, Annan AP. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 1989, 37: 531–551
- [7] Coptly N, Rubin Y, Mavko G. Geophysical-hydrological identification of field permeabilities through Bayesian updating. *Water Resource Research*, 1993, 29(8): 2 813–2 825
- [8] Weiler KW, Steenhuis TS, Boll J, Kung KJS. Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensors. *Soil Science Society of American Journal*, 1998, 62: 1 237–1 239
- [9] Hagrey SA, Muller C. GPR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*, 2000, 48: 63–85
- [10] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water Resource Research*, 2003, 39(11): 1 321–1 335
- [11] Chaplot V, Walter C. Combining geophysical methods to estimate the spatial distribution of soils affected by water saturation. *Comptes Rendus Geoscience*, 2004, 336: 553–560
- [12] 刘恒柏, 朱安宁, 张佳宝, 刘建立, 信秀丽. 不同水分条件下粗砂土剖面中目标物的 GPR 图像特征及其解译. *土壤*, 2009, 41(1): 112–117
- [13] Topp GC, Davis JL, Annan AP. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmissions lines. *Water Resource Research*, 1980, 16: 574–582
- [14] Galagedara LW, Parkin GW, Redman JD, von Bertoldi P, Endres AL. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of Hydrology*, 2005, 301: 182–197
- [15] Huisman JA, Hubbard SS, Redman JD, Annan AP. Measuring Soil water content with ground penetrating radar: A review. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 476–491
- [16] Sperl C. Determination of spatial and temporal variation of the soil water content in an agro-ecosystem with ground-penetrating radar. Technische Universitat Munich. Germany, 1999
- [17] Weihermüller L, Huisman JA, Lambot S, Herbst M, Vereecken H. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques. *Journal of Hydrology*, 2007, 340: 205–216
- [18] Du S, Rummel P. Reconnaissance Studies of Moisture in the Subsurface with GPR. Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, 1994: 1 241–1 248
- [19] Huisman JA, Sperl C, Bouten W, Verstraten JM. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 2001, 254 (1/2): 48–58
- [20] Huisman JA, Snepvangers JJC, Bouten W, Heuvelink GBM. Monitoring temporal development of spatial soil water content variation: Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 519–529
- [21] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 信秀丽, 刘建立. 基于探地雷达的土壤水分测定方法研究进展. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 1 039–1 044
- [22] 李嘉, 郭成超, 王复明. 探地雷达应用概述. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 629–637

Determining Soil Water Content by Using Low-frequency Ground-penetrating Radar Ground Wave Techniques

JI Li-qing^{1,2}, ZHU An-ning¹, ZHANG Jia-bao¹, XIN Xiu-li¹, LI Xiao-peng^{1,2}

(1 *State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;* 2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The feasibility of low-frequency ground-penetrating radar (GPR) in measuring soil water content by using ground wave technique was investigated in order to provide a new method for soil water content measurement in small-scale region. Water contents of sandy loam and sandy soils with GPR ground wave technique were measured in Huang-Huai-Hai Plain. Antenna separations of GPR were 50 MHz and 100 MHz respectively. The results showed that ground wave can neither be interpreted in sandy soil nor sandy loam with 50 MHz antenna and in sandy loam with 100 MHz antenna due to the strong attenuation of the GPR signal, but can be clearly read out in sandy soil with 100 MHz antenna. Sandy soil water content measured with 100 MHz antenna GPR ground wave techniques were 5.9%, 6.2% and 6.5% respectively for three replicates, while 6.3% with TDR measurement, absolute error was within 0.4%. Soil water content before and after irrigation were 6.5% and 20.2% respectively determined by CMP-FO (the combination of Common Mid-Point and Fixed Offset) method and were 6.3% and 19.7% respectively by TDR, the absolute error was within 0.5%. CMP-FO method is accurate and time-saving, it is feasible and credible to determine soil water content in arid area with 100 MHz antenna GPR.

Key words: Ground-penetrating radar, Low-frequency, Ground wave techniques, Soil water content