

DOI: 10.11766/trxb201506160196

# 基于高频探地雷达的土壤表层含水量测定\*

周立刚<sup>1, 2</sup> 于东升<sup>1, 2†</sup> 王玺洋<sup>1, 2</sup> 王秀虹<sup>1, 2</sup> 张海东<sup>1</sup>

(1 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 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 高精度快速探测土壤表层水分状况, 对于精准农业生产、水资源精确管理及防治坡耕地水土流失具有重要意义。现有探地雷达(ground penetrating radar, GPR)低频探测技术不能满足表层土壤含水量高精度要求, 需要发展和应用高精度探测技术。本研究采集江宁某蔬菜地水稻土表层(0~20cm)土壤(粉砂质黏壤土), 通过室内模拟试验, 利用高频(1 GHz和2 GHz)探地雷达在不同土壤含水量状况下进行探测, 获取GPR数据图像信息, 提取电磁波谱特征参数, 分析其与土壤含水量之间的定量关系。结果表明: 1 GHz和2 GHz频率GPR探测的土壤介电常数 $\epsilon$ 与实测土壤含水量 $\theta$ 拟合的 $\epsilon \sim \theta$ 模型决定系数 $R^2$ 分别为0.94与0.97, 高频探地雷达技术预测粉砂质黏壤土表层土壤含水量是可行的; 与低频探地雷达技术相比, 高频探地雷达技术能够高精度探测表层土壤含水量。

**关键词** 探地雷达; 土壤含水量; 介电常数; 电磁波波速; 土壤质地

**中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

土壤含水量是表征土壤水分状况, 反映土体组成的一个重要指标, 对农业生产、水资源精确管理及防治坡耕地水土流失均具有重要的指导作用<sup>[1]</sup>。但土壤水分的空间变异性较强, 在中尺度(100 m<sup>2</sup>)连续测定尚有一定的技术屏障<sup>[1-2]</sup>。现有的测定方法如烘干法、时域反射仪(time-domain-reflectometry, TDR)法、电容率法等不能在区域范围内连续测定, 只能通过点位信息来预测剖面 and 三维空间土壤含水量信息, 且费时费力, 破坏土壤结构<sup>[3-4]</sup>。因此, 亟待快速连续测定土壤含水量。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)作为一种高分辨率的原位探测技术, 可探测获得地下剖面连续的层位信息, 具有快速、连续和原位无损等特征, 已在水文地质领域<sup>[5]</sup>、考古学领域<sup>[6-7]</sup>、冰层冻土研究<sup>[8]</sup>、土壤层次和地下水位调查<sup>[9-11]</sup>以及环境学<sup>[12]</sup>等诸多方面进行研究。近年来, 利用土壤相对介电常数 $\epsilon$ 及电磁波波速 $v$ 间

接确定土壤含水量已逐渐应用到土壤学科领域。Huisman等<sup>[3]</sup>分析了GPR地下反射波法、电磁波波速法、钻孔雷达法及地表反射波法探测土壤含水量的基本原理、方法、应用前景和存在的问题, 提出GPR可作为一种新的方法测定土壤含水量; Roth等<sup>[10]</sup>在中国科学院封丘农田生态系统国家野外科学观测研究站农田土壤中使用100 MHz和250 MHz频率的GPR对土壤层次结构和地下水位进行探测, 在1.2 m深的土壤剖面结构中, GPR探测结果与开挖剖面实测结果相吻合, 表明低频GPR能够探测土壤剖面层次结构和浅层地下水位; Stoffregen等<sup>[13]</sup>在1 m深土壤内埋设钢管, 使用1 GHz频率屏蔽天线GPR在壤质砂土、砂质壤土、粉质黏土上精确探测土壤含水量, 结果表明只有在砂土上才能解译出雷达波信号; 胡振琪等<sup>[14]</sup>利用400 MHz频率GPR测定1 m深复垦土壤含水量, 并与重量法测定结果进行对比, 复垦土壤的介电常数与土壤含水量之间存在明显的函数相关性, 说明探地雷达测定复垦土

\* 国家自然科学基金项目(41571206, 41501296)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.41571206, 41501296)

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

作者简介: 周立刚(1989—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: lgzhou@issas.ac.cn

收稿日期: 2015-06-16; 收到修改稿日期: 2015-12-04

壤的水分含量是可行的,但用不同方法处理的复垦土壤,土壤介电常数与含水率之间存在不同的函数规律;吉丽青等<sup>[15]</sup>在黄淮海平原潮土地区使用50 MHz与100 MHz低频GPR探测1 m深砂壤土和1.5 m深砂土含水量,并与TDR测定结果对比分析,发现50 MHz频率的GPR不能解译雷达波信号,而100 MHz频率GPR在砂壤土中无地波信号,但在砂土中可以清晰解译雷达波信号,灌水前后100 MHz频率GPR测定砂土含水量分别为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。一般而言,GPR天线频率越低,探测深度越深,GPR信息采集分辨率越小,探测精度也就越低<sup>[15]</sup>。以上大部分研究均是基于低频GPR进行的,具有深层探测的优势但不可避免影响了探测精度。现有低频探测技术不能满足表层土壤含水量高精度的要求,高频GPR能否对土壤表层含水量进行高精度探测,有何特殊技术要求,目前尚不清楚。

本文拟使用高频GPR研究土壤表层含水量,对比分析1 GHz与2 GHz频率GPR电磁波波谱特征,找出该波谱特征与土壤表层含水量之间的关系;分析高频GPR测定土壤表层含水量的可行性及适用范围,对比研究低频探地雷达技术探测土壤含水量的精度,为高频率探地雷达高精度探测土壤含水量以及在土壤学和其他领域中的应用提供科学依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 GPR的基本原理

GPR发射天线向外发射电磁波,当电磁波遇到不同性质的介电材料(土壤中的侵入体、土体空洞以及不同含水量的土壤等)时,电磁波信号的振幅、频率、相位就会发生变化,从而发生散射和反射,被接收天线接收<sup>[16]</sup>。根据雷达波形的双程走时、相位、振幅等参数,就可确定该介质的介电常数及电磁波传播速度,进一步可反演出土壤含水量信息<sup>[14]</sup>。

### 1.2 实验设计

在江苏省南京市谷里地区采集蔬菜地表层(0~20 cm)土壤样品80 kg。土壤类型为水稻土,质地为粉砂质黏壤土。土壤基本理化性质:pH4.65,有机质23.24 g kg<sup>-1</sup>,全氮1.60 g kg<sup>-1</sup>,全磷1.31 g kg<sup>-1</sup>,全钾15.03 g kg<sup>-1</sup>,速效磷117.01 mg kg<sup>-1</sup>,速

效钾312.50 mg kg<sup>-1</sup>,缓效钾625.00 mg kg<sup>-1</sup>,容重1.25 g cm<sup>-3</sup>,含盐量0.24 g kg<sup>-1</sup>,砂粒9.25%,粉粒32.75%,黏粒58.00%。将供试土壤全部风干,过2~7 mm筛备用。

采用人工设计土壤模型箱进行室内试验,模型箱构建选用韧性较强的有机玻璃。为保证土壤模型高度与田间耕层土壤厚度一致,综合考虑多种试验因素,模型箱内径大小设计为:长(60 cm)宽(30 cm)高(25.4 cm)。底部及前后两侧各有8个和3个直径为2 cm的小孔(图1),便于试验过程中土壤吸水或散发。

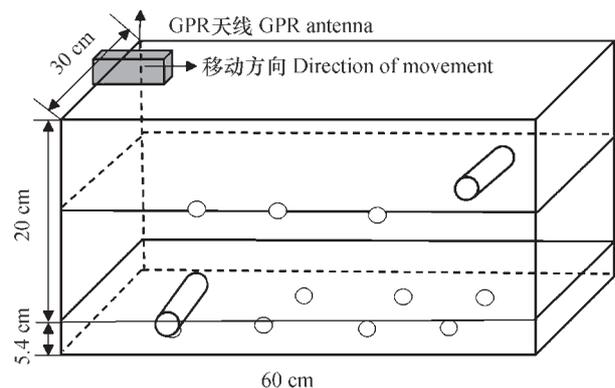


图1 人工模型箱结构示意图

Fig.1 Structure of the artificial model casing

在模型箱底部铺设10目尼龙网,按田间表层土壤容重(1.25 g cm<sup>-3</sup>)填装试验土壤,厚度与模型箱的高度一致。同时,为了准确提取电磁波的波谱特征及反射层厚度,在模型箱2个不同位置分别预埋2根相同规格的钢管(直径5.4 cm,长度10 cm),其中一根位于模型箱底部左侧15 cm处,另一根位于右侧15 cm处且钢管顶部距土壤表层10 cm。

采用烘干法测定填装土壤初始实际含水量( $\theta$ ),计算此时试验箱中烘干土质量 $M_{\text{烘干}}$ ,计算公式为:

$$\theta = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $W_1$ 为湿土加铝盒重, $W_2$ 为干土加铝盒重, $W_3$ 为铝盒重。

将模型箱放入较大水箱中,土壤吸水达到近饱和状态,称重并计算土壤含水量 $\theta$ 。以此含水量为起点,大致按含水量3%递减梯度称重并进行GPR

探测（三次重复）。有关计算公式：

$$\theta_n = \frac{M_n - M_{烘干}}{M_{烘干}} \quad (2)$$

式中， $\theta_n$ 为不同含水量梯度土壤含水量， $M_n$ 为不同含水量梯度时模型箱中湿土质量， $M_{烘干}$ 为模型箱中烘干土质量。

### 1.3 GPR数据采集及图像预处理

GPR数据采集系统为美国USRADAR公司生产的探地雷达系统，分别使用1 GHz频率和2 GHz频率的屏蔽天线进行GPR数据采集，GPR采集参数设置见表1。将GPR屏蔽天线沿模型箱土壤表层缓慢移动，系统自动记录和存储数据，每次探测操作重复三次。

表1 GPR参数设置

Table 1 GPR parameter settings

天线频率 Frequency of the antenna	材料类型 Material type	采样间隔 Interval (m)	时窗 Time window (ns)	叠加次数 Stacking fold	采样深度 Depth (m)
1 GHz	土壤 Soil	0.01	18	16	0.6
2 GHz	土壤 Soil	0.005	13	8	0.4

采用Reflexw 6.0软件对GPR采集的原始数据图像进行预处理，如去除直流漂移（subtract-DC-shift）、移动开始时间（move start time）、背景去除（background removal）、手动增益（manual gain）、巴特沃斯带通滤波（Butterworth bandpass filter）等，便于图像准确解译、判读和参数提取。

### 1.4 关键参数获取

**1.4.1 起跳点与系统延时的确定** 在进行探地雷达探测时，发射天线发出电磁波到接收天线接收电磁波的时间可以从雷达波形图像中直接读出，将其定义为“双程走时， $t_{read}$ （ns）”<sup>[17]</sup>：

$$t_{read} = t_{travel} + t_{start} \quad (3)$$

即 
$$t_{start} = t_{read} - t_{travel} \quad (4)$$

式中， $t_{travel}$ 为雷达波在介质中的旅行时间，亦称为“有效双程走时”，ns； $t_{start}$ 为雷达参数设置及系统本身消耗时间，亦称之为“系统延时”，ns。 $t_{start}$ 由雷达本身及设计的采集参数而定，不因介质类型不同而不同。计算“平均系统延时” $\overline{t_{start}}$ 以消除随机误差。

$$\overline{t_{start}} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{read} - t_{travel})}{n} \quad (5)$$

式中， $n$ 表示试验组数。

**1.4.2 电磁波波速与介电常数的确定** 在已知地下反射介质深度 $h$ （m）的情况下，根据电磁波传播理论，可以得到电磁波传播速度 $v$ （m ns<sup>-1</sup>）<sup>[18]</sup>：

$$v = \frac{2h}{t_{travel}} \quad (6)$$

对于大多数的低盐土壤，介质介电常数可由下式给出<sup>[19]</sup>：

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (7)$$

式中， $c$ 为电磁波在空气中的传播速度，值为 $3.0 \times 10^8$  m ns<sup>-1</sup>。

### 1.5 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2007计算1 GHz与2 GHz频率探地雷达平均系统延时（ $\overline{t_{start}}$ ），Origin 8.0软件对土壤介电常数与土壤含水量进行线性回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 平均系统延时

1 GHz与2 GHz探地雷达系统延时略微不同，其平均系统延时 $\overline{t_{start}}$ 分别为0.964 ns与0.841 ns（表2）。

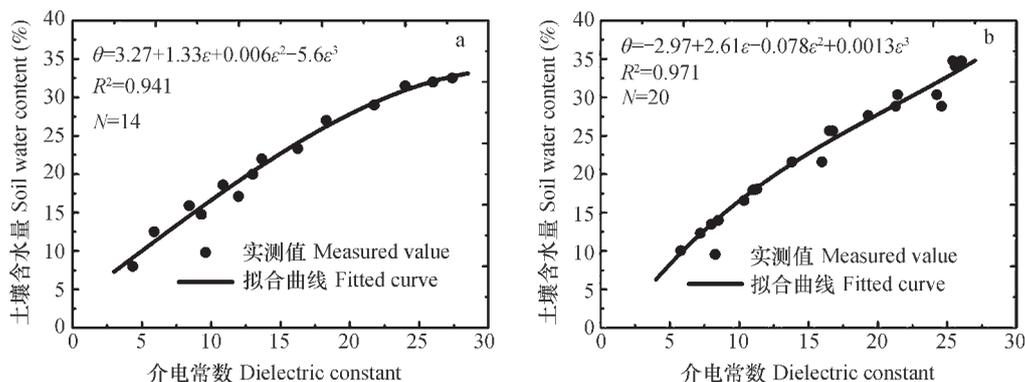
### 2.2 土壤含水量与土壤介电常数的关系特征

通过线性回归方法拟合了土壤含水量（ $\theta$ ）与土壤相对介电常数（ $\varepsilon$ ）之间的关系。拟合结果表明，对于表层（0~20 cm）土壤，土壤相对介电常数与土壤含水量之间存在明显的三次多项式关系，1 GHz频率GPR与2 GHz频率GPR测定结果拟合曲线决定系数 $R^2$ 分别为0.941与0.971（图2），进一

表2 不同频率探地雷达系统延时

Table 2 Time lag of GPR systems under different frequencies

1GHz探地雷达			2GHz探地雷达				
1 GHz-Ground Penetrating Radar			2 GHz-Ground Penetrating Radar				
编号 Number	有效双程走时 Effective two-way travel time (ns)	双程走时 Two-way travel time (ns)	系统延时 System time lag (ns)	编号 Number	有效双程走时 Effective two-way travel time (ns)	双程走时 Two-way travel time	系统延时 System time lag (ns)
1	6.055	7.043	0.987	1	6.970	7.923	0.953
2	5.922	6.912	0.990	2	6.722	7.600	0.878
3	5.699	6.690	0.990	3	6.746	7.643	0.897
4	5.793	6.802	1.009	4	4.658	5.493	0.836
5	5.774	6.746	0.972	5	4.721	5.544	0.822
6	4.658	5.493	0.836	6	4.121	4.784	0.662



注：a、b图分别代表使用1GHz频率与2GHz频率GPR探测结果Note: a and b represent the result of using 1 GHz and 2 GHz GPR in detection, respectively

图2 土壤介电常数与土壤含水量关系曲线

Fig. 2 Relation curve between soil dielectric constant and soil water content

步证实了三次多项式拟合介电常数与土壤含水量关系的可行性<sup>[20]</sup>。但1 GHz频率与2 GHz频率探测结果拟合的两个三次多项式中，它们分别对应的4个多项式系数相差较大，不具一致性。Topp等<sup>[21]</sup>使用TDR测定砂土土壤体积含水率，胡振琪等<sup>[14]</sup>使用400 MHz频率GPR测定复垦土壤体积含水率，朱安宁等<sup>[4]</sup>使用450 MHz频率测定潮土、红壤、风沙土及水稻土土壤体积含水率所建立的三次多项式 $\epsilon$ - $\theta$ 模型对应系数也不同。土壤类型和GPR天线频率对三次多项式中对应系数存在影响，因此，针对不同频率的GPR预测不同土壤类型土壤含水量时，首先要校正 $\theta$ - $\epsilon$ 模型中各个参数。

### 2.3 高频GPR与低频GPR测定土壤含水量的差异

2 GHz频率GPR测定粉砂质黏壤土表层土壤含水量时，拟合 $\epsilon$ - $\theta$ 模型的决定系数 $R^2$ 为0.94，而基于1 GHz频率的探地雷达拟合方程的决定系数 $R^2$ 为0.90，两者均超过0.90。Grote等<sup>[22]</sup>使用450 MHz频率与900 MHz频率GPR测定葡萄庄园内旱地土壤（质地类型主要为砂质壤土与砂质黏壤土）1 m深范围内土壤水分含量，并与重量法测定结果对比分析，得出 $\epsilon$ - $\theta$ 模型拟合曲线决定系数分别为0.78与0.86。Weihermüller等<sup>[23]</sup>使用450 MHz低频GPR探测农田土壤（粉砂质黏壤土）1 m深范围内土壤含水量，GPR拟合的 $\epsilon$ - $\theta$ 模型决定系数仅为0.79。

Stoffregen等<sup>[13]</sup>使用500 MHz频率GPR分别探测壤质砂土、砂质壤土、粉质黏土表面积1 m<sup>2</sup>、深1.5 m的土壤含水量, 并与重量法测定结果对比分析, 只在砂质壤土中可以得到电磁波反射信号, 拟合的 $\epsilon$ - $\theta$ 关系模型决定系数为0.87。因此, 高频GPR较低频GPR探测表层土壤含水量的精度高。一方面由于高频探地雷达较低频探地雷达分辨率高, 土体中由水分引起的微小变化均能通过雷达比信号清晰地表现出来<sup>[24]</sup>; 另一方面, 试验探测粉砂质黏壤土表层土壤深度为0~20 cm, 为高频探地雷达, 尤其为2 GHz频率GPR探测的最适宜深度。

### 3 结 论

高频探地雷达测定粉砂质黏壤土表层(0~20 cm)土壤含水量是可行的, 拓宽了GPR测定土壤含水量的频率范围。相比于已有的低频(小于1 GHz)探测技术, 高频探地雷达探测技术探测表层土壤含水量精度更高。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Wijewardana Y G N S, Galagedara L W. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 2010, 391 ( 1/2 ): 24—33
- [ 2 ] Di Matteo A, Pettinelli E, Slob E. Early-time GPR signal attributes to estimate soil dielectric permittivity: A theoretical study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51 ( 3 ): 1643—1654
- [ 3 ] Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. *Vadose Zone Journal*, 2003 ( 4 ): 476—491
- [ 4 ] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 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 ): 1039—1044
- Zhu A N, Ji L Q, Zhang J B, et al. Research progress on soil moisture measurement via ground-penetrating radar ( In Chinese ). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17 ( 5 ): 1039—1044
- [ 5 ] Harari Z. Ground-penetrating radar ( GPR ) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 1996, 36 ( 1 ): 43—52
- [ 6 ] Conyers L B. *Ground-penetrating radar for archaeology*. 3rd ed. Lanham: AltaMira Press, a division of Rowman & Littlefield Publishers, Inc., 2013
- [ 7 ] Zhao W, Forte E, Pipan M, et al. Ground penetrating radar ( GPR ) attribute analysis for archaeological prospection. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 97 ( 10 ): 107—117
- [ 8 ] Steelman C M, Endres A L. Evolution of high-frequency ground-penetrating radar direct ground wave propagation during thin frozen soil layer development. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 57 ( 2/3 ): 116—122
- [ 9 ] Boll J, van Rijn R P G, Weiler K W, et al. Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil. *Geoderma*, 1996, 70 ( 2/4 ): 117—132
- [ 10 ] Roth K, Wollschlager U, Cheng Z H, et al. Exploring soil layers and water tables with ground-penetrating radar. *Pedosphere*, 2004, 14 ( 3 ): 273—282
- [ 11 ] 于秀秀, 马兴旺, 迪力夏提, 等. 探地雷达在土层厚度调查中的试验研究. *土壤学报*, 2011, 48 ( 4 ): 874—878
- Yu X X, Ma X W, Di L X T, et al. Using ground penetrating radar in determination of soil depth ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 ( 4 ): 874—878
- [ 12 ] Jeng Y, Chen C S. Subsurface gpr imaging of a potential collapse area in urban environments. *Engineering Geology*, 2012, 147/148 ( 5 ): 57—67
- [ 13 ] Stoffregen H, Zenker T, Wessolek G. Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: Comparison of ground penetrating radar and lysimeter data. *Journal of Hydrology*, 2002, 267 ( 3/4 ): 201—206
- [ 14 ] 胡振琪, 陈宝政, 王树东, 等. 应用探地雷达测定复垦土壤的水分含量. *河北建筑科技学院学报*, 2005, 22 ( 1 ): 1—3
- Hu Z Q, Chen B Z, Wang S D, et al. Using ground penetrating radar to measure water content of rehabilitated soil ( In Chinese ). *Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology*, 2005, 22 ( 1 ): 1—3
- [ 15 ] 吉丽青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 低频探地雷达地波法测定土壤含水量的可行性研究. *土壤*, 2011, 43 ( 1 ): 123—129
- Ji L Q, Zhu A N, Zhang J B, et al. Determining soil water content by using low-frequency ground-penetrating radar ground wave techniques ( In Chinese ). *Soils*, 2011, 43 ( 1 ): 123—129
- [ 16 ] Persico R. *Introduction to ground penetrating radar\_ inverse scattering and data processing*. Hoboken, New Jersey: Wiley—IEEE Press, 2014
- [ 17 ] 武彦斌, 崔凡, 王磊, 等. 透射式探地雷达探测土壤含水率. *农业工程学报*, 2014, 30 ( 17 ): 125—131
- Wu Y B, Cui F, Wang L, et al. Detecting moisture content of

- soil by transmission-type ground penetrating radar (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (17): 125—131
- [18] Turesson A. Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity. Journal of Applied Geophysics, 2006, 58 (2): 99—111
- [19] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 不同类型土壤介电常数与体积含水量经验关系研究. 土壤学报, 2011, 48 (2): 263—268
- Zhu A N, Ji L Q, Zhang J B, et al. Empirical relationship between soil dielectric constant and volumetric water content in various soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (2): 263—268
- [20] Lauro S E, Mattei E, Barone P M, et al. Estimation of subsurface dielectric target depth for GPR planetary exploration: Laboratory measurements and modeling. Journal of Applied Geophysics, 2013, 93 (6): 93—100
- [21] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 1980, 16 (3): 574—582
- [22] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. Water Resources Research, 2003, 39 (11): 177—177
- [23] Weihermüller 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. Journal of Hydrology, 2007, 340 (3/4): 205—216
- [24] 雷少刚, 卞正富. 探地雷达测定土壤含水率研究综述. 土壤通报, 2008, 39 (5): 1179—1183
- Lei S G, Bian Z F. Review on soil water content measurement with ground penetrating radar (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39 (5): 1179—1183

## Determination of Top Soil Water Content Based on High-frequency Ground Penetrating Radar

ZHOU Ligang<sup>1, 2</sup> YU Dongsheng<sup>1, 2†</sup> WANG Xiyang<sup>1, 2</sup> WANG Xiuhong<sup>1, 2</sup> ZHANG Haidong<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Rapid high-precision determination topsoil water content is of vital importance to precision agriculture, precise water resource management and the control of slope land erosion. The technology of low-frequency ground penetrating radar (GPR) currently in use is far from the requirement in precision for determination of topsoil water content. It is, therefore, essential to develop and adopt a high-precision detection technology. In this paper, the technology of high frequency (1 GHz and 2 GHz) Ground Penetrating Radar (HFGPR) was tested to determine topsoil water content in a vegetable field of silty clay loam in soil texture in Jiangning of Nanjing, China. HFGPR was used to determine topsoil water content of farmlands under different soil water content, GPR data and images were obtained and electromagnetic spectrum characteristic parameters extracted for analysis of their quantitative relationships with soil water content. Results showed that: The coefficient  $R^2$  of  $\varepsilon$ - $\theta$  model decision in fitting the soil dielectric constant ( $\varepsilon$ ) obtained by the 1 GHz and 2 GHz frequency GPR with the soil moisture ( $\theta$ ) measured in the field was 0.94 and 0.97, respectively, which demonstrates that the technology of high frequency GPR is feasible be applied to determine the soil water content in the topsoil of vegetable fields of silty clay loam soil. The new technology is much higher than the old one in precision in determining soil water content in topsoil layers.

**Key words** GPR; Soil water content; Soil dielectric constant; Velocity of the electromagnetic wave; Soil texture

(责任编辑: 檀满枝)