

文章编号: 1000-0240(2009)02-0262-06

TDR 测定土壤含水量的标定研究

吴月茹, 王维真, 晋 锐, 王 建, 车 涛

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 探讨了 TDR 测定土壤含水量的原理, 并对黑河上游阿柔试验样地取土样进行了土壤体积含水量测定的室内标定试验, 得出相关性较好的 TDR 测定土壤体积含水量的关系式. 结果表明: 通过室内土样回填建立的 TDR 测定的体积含水量与土壤实际含水量相关性很好, 可以利用 TDR 精确的测定土壤含水量, 为黑河遥感项目提供精确的地面土壤水分数据, 为遥感反演和验证提供基础数据. 所得到的标定结果对于具有相同土质的黑河中游土壤具有参考价值.

关键词: 土壤含水量; TDR; 标定; 介电常数

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

0 引言

地表土壤水分是陆地和大气能量交换过程中的重要因子, 并对陆地表面蒸散、水分运移和碳循环有很强的控制作用, 在水文、气象和农业科学领域土壤水分含量测定是必不可少的基本资料. TDR (Time Domain Reflectometry, 时域反射仪) 法是近年来普遍采用的一种较精确测定土壤含水量的方法, 具有不破坏样本、快速和容易操作等优点, 并可做到讯息转换而达到数据自动采集的目的, 因而很快为人们所接受^[1]. Topp 等^[2]使用 TDR 对不同类型土壤的介电常数进行大量测定, 建立了土壤介电常数与土壤体积含水量的关系, 证明介电常数与许多土壤类型的土壤含水量之间具有较好的相关性. 这为通过 TDR 测定土壤含水量奠定了基础.

本研究依托于黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设项目中的子课题“黑河流域上游寒区水文遥感-地面同步观测试验”, 使用 Delta TDR 和 Stevens TDR 两种便携式 TDR 测定土壤中的含水量. TDR 在测定精度要求较低时一般不需要标定, 但当误差要求很很高时, 需进行标定或校正^[1]. 为了更加准确地测定土壤含水量, 我们

对这两种 TDR 仪器进行了室内试验标定, 并认为所采用的标定方法值得借鉴. 通过标定^[3], 一方面可以确定在特定的土壤质地下其适用的含水量范围; 另一方面还可确定其实际的测量精度, 避免采用通用标定曲线的误差估计其实际的误差. TDR 测定土壤含水量的标定其目的旨在为黑河遥感项目提供精确的地面土壤水分数据, 为遥感反演和验证提供基础数据, 所得到的标定结果对于具有相同土质的黑河中游土壤具有参考价值.

1 TDR 测量原理

TDR 测量土壤水分是基于土壤表观介电常数的测量. TDR 发射的电磁脉冲波, 经由同轴电缆传入探头内, 然后进入介质中, 通过测量电磁波沿导波探头在土壤介质中的传播并在其末端反射的时间 (电磁波在各点的反射很明确, 可以很准确地测出 t 求得理论上的介电常数. 当频率在 1 MHz~1 GHz 时电磁波的传播速度与传播媒体的介电常数呈如下关系:

$$k = (c/v)^2 = (ct/2L)^2 \tag{1}$$

式中: k 为介质的介电常数; c 为光速 ($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); v 为电磁波的传播速度; t 为电磁波的在探头

收稿日期: 2009-01-04; 修订日期: 2009-03-13
基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”子课题“黑河流域上游寒区水文遥感-地面同步观测试验”(KZCX2-XB2-09-01); 国家自然科学基金项目(40875006)资助
作者简介: 吴月茹(1983—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 2006 年毕业于内蒙古师范大学, 现为硕士研究生, 主要从事土壤水文学和气象环境水文学研究. E-mail: wuyue_qr@163.com

内的传播时间(s); L 为 TDR 探头长度.

水的介电常数是 80 (20 ℃时), 而土壤固体介电常数是 2~5, 空气的介电常数为 1. 水的介电常数比空气或土壤的介电常数大的多, 因此, 土壤的介电常数主要受土壤水分含量的影响. 可以通过测量土壤介电常数 K 来推测土壤含水量(θ), 表 1 为主要土壤成分的介电常数. Topp 等^[2]用 TDR 对大部分土壤体积含水量进行了测定, 给出了土壤体积含水量和介电常数之间关系的经验公式^[2]:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3$$
$$\theta \leqslant (0.6) \tag{2}$$

式中: K 为土壤的介电常数; θ 为土壤的体积含水量.

自从 Topp 等^[2]对 TDR 做出关键性的发展后, 便开始了大量使用 TDR 测定土壤水分的时期^[5-6]. Topp 最早发展 TDR 法时曾认为此法不受土壤质地、容重、温度等物理因素的影响^[2], 但后来的研究表明^[7], 在测量精度要求较低时这一结论是正确的. 对矿质土壤, 当其误差要求为 $0.05 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时, 可用同一的标定曲线确定各种土壤的含水量关系, 但当要求误差更小时, 它们的关系受质地、容重以至温度等物理因素的影响. 对于质地粘土占较大比重的土壤, 当含水量较高时, 由于输入电磁波的能量耗散较大, 导致反射讯息模糊, 容易造成失准. 因此, 对于待测土壤, 预先标定其含水量与介电常数的关系仍然是必要的.

2 试验仪器和标定方法

供试土壤取自黑河上游青海省海北藏族自治州境内阿柔乡的大片广袤草场地区, 其土壤颗粒组成如表 2 所示.

表 1 主要土壤成分的介电常数^[4]
Table 1 Dielectric constant of the primary soil component^[4]

物质	介电常数
空气	1
水	80 at 20 ℃
冰	3 at -5 ℃
玄武岩	12
花岗岩	7~9
砂岩	9~11
干壤土	3.5
干沙	2.5

表 2 供试土壤的颗粒组成

Table 2 Particle composition of the tested soils

沙(>0.05 mm)	粉沙(0.002~0.05 mm)	粘土(<0.002 mm)
29.45 %	69.3 %	1.25 %

试验中使用的 TDR 仪器为英国 Delta 公司生产的水分探测器和 Stevens 公司生产的便携式土壤水分传感器. Delta 水分探测器由 HH2 手持式水分读数表和 Theta Probe 探头(型号为 ML2)组成(图 1). 其中, 探头为 4 根不锈钢探针, 探针长 6 cm, 其测量范围为 0%~100%, 测量精度为 $\pm 1\%$ (标定后), 工作温度范围为 $-10 \sim 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

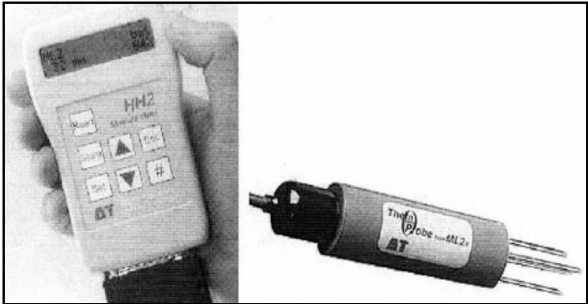


图 1 Delata-TDR 水分探测器示意图
Fig. 1 Schematic diagram for the Delta-TDR W. E. T sensor

Stevens 公司生产的便携式土壤水分传感器为频率反射仪, 工作频率为 50 MHz. 通过测量土壤的介电常数来获得其它参数. 仪器由 POGO portable soil sensor 便携式土壤传感器、Stevens Hydra probe 探针和掌上电脑 PDA 等 3 部分组成(图 2). 仪器各主要参数的测量范围见表 3.

表 3 Steven Hydra probe 探头技术规范说明
Table 3 The technical specifications of Hydra probe

测量参数	测量范围	精度
介电常数	1~80	$\pm 1.5\%$ 或 0.2
非有机质 & 矿质土壤水分	0~饱和	$> \pm 0.03$
电导率	$0.1 \sim 15 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	$\pm 2.0\%$ 或 $0.05 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$
土壤温度	$-10 \sim +65 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2008 年 3 月, 在阿柔草场的试验样地内采集具有代表性的土样(0~20cm), 将土样带回兰州实验室内进行标定. 过程如下: 1) 首先将土样自然风干, 捣碎, 搅匀, 过筛后分成若干份; 2) 分别在各



图 2 Stevens TDR 示意图

Fig. 2 Schematic diagram for Stevens TDR

个土样中加水，配制不同含水量的土样试品（土样试品的体积含水量从 3% 开始，按 3% 的梯度增加，一直到 45%）；3) 样品经过 24 h 的密封放置，使土样与水分均匀混合，将土样以接近实地土壤的容重均匀的填装于比较规整的具有一定体积的塑料容器中，以减少填塞土壤的非均质所产生的标定误差。填土的时候一定要确保接近真实的土壤容重，所以

在回填土之前应根据容重及容器体积计算好所需的土样重量（计算方法见下），逐层进行填塞。每加一定的土量需要人工压实（棒槌敲打等），直到将计算好的土样全部填塞到测量容器中，并与容器顶部保持相平。在填土过程中需要注意的是，体积含水量较小以及体积含水量较大情况下的土样填塞：含水量小时会出现容器已满但计算填充量的土样仍有剩余情况；而含水量较大时则出现土样填完后但并未达到所要求的体积，即未填满所用的容器。这两种情况都会造成土壤容重的改变。

在回填土之前计算所需土样重量的计算方法：

(1) 假设土壤容重为 ρ_d ，进行 TDR 标定容器的体积为 V ，需要配置的土样的体积含水量为 $n\%$ 。

(2) 容器中需要填装的土水样中，干土重量为 $M_1 = V \times \rho_d$ ，水量为 $M_2 = V \times n\%$ 。

(3) 容器中填筛的水土总量为： $M = M_1 + M_2$ 。

为保证填充土样的均匀性，应该事先在比较宽敞的仪器中将土样配制好，如大的塑料袋，然后将其拌匀并密封。为了防止意外的损失，配制土样时，所需的干土量 M_3 应该多于用于容器填装的干土量 M_1 ，即 $M_3 > M_1$ ，所需的含水量 $M_4 = (M_3 / \rho_d) \times n\%$ 。将配制好的土样按土壤的实际容重 ρ_d 填

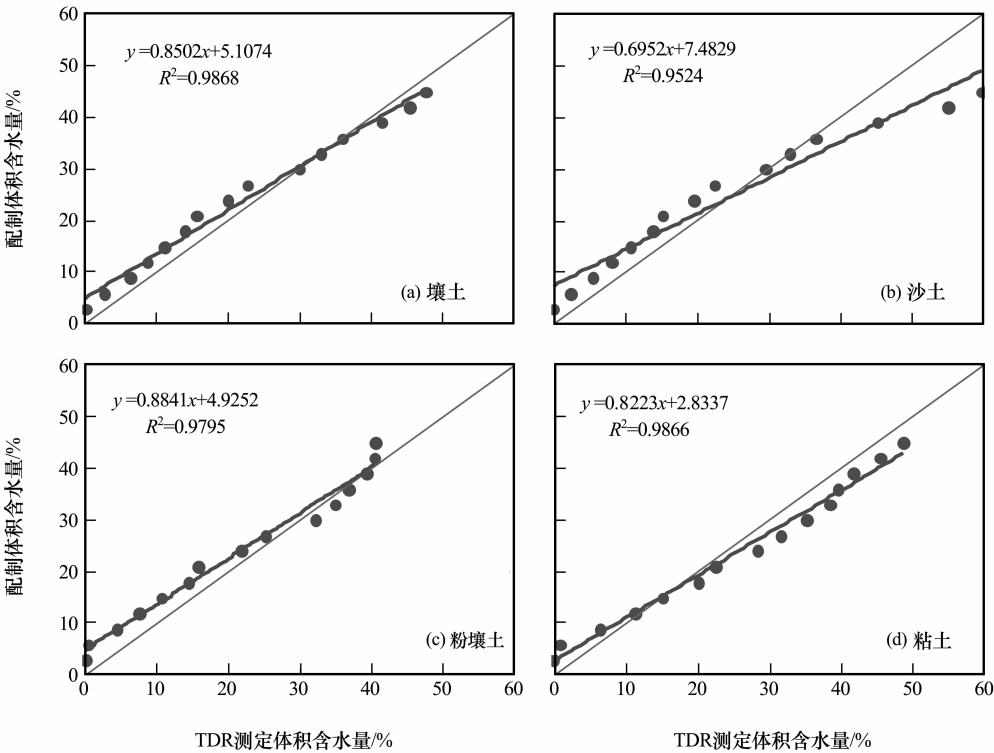


图 3 Steven TDR 标定曲线

Fig. 3 Calibration curves of Steven TDR

装于标定容器中时, 填装量应该符合计算结果, 即容器中填装的土样总量为 M 。

(4) 分别将 Dleta TDR 和 Stevens TDR 垂直插入配制好的土样中, 测量其体积含水量, 对不同含水量的土样进行多点测试, 取其平均值以确保结果的准确性。测得两组数据, 与实际配制的土壤的体积含水量进行回归分析, 求得各自的标定公式, 以此校正 TDR 的野外实际测量数据。标定不同的土样时, 标定前都需将 TDR 探头插入水中进行清洗并擦干。

3 试验结果分析

通过上述标定方法, 我们在 2008 年 4 月 29 日单独对 Delta TDR 进行了一次标定, 在 5 月 7 日对 Steven TDR 和 Delta TDR 又进行了标定, 并对仪器可供选用的不同土壤类型参数都进行了标定。Delta 提供了两种土壤类型参数, 分别为 Organic (有机土) 和 Mineral(矿物土); Steven TDR 提供了 4 种土壤类型参数, 分别为 sand(沙土)、loam(壤土)、silt(粉沙土)和 clay(粘土)。Steven TDR 的标定结果如图 3, Delta TDR 的标定结果如图 4。

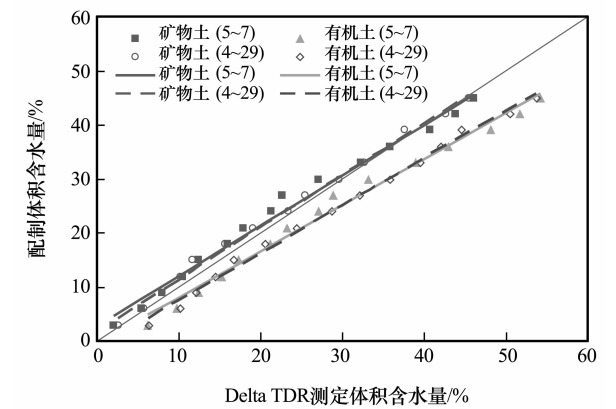


图 4 Delta TDR 标定结果

从图 3 可以看出, 对于 Steven TDR 提供的 4 种土壤类型参数的标定方程的变化趋势大致相同, 含水量较低时, TDR 测得的值偏小; 含水量较高时, 测得的值偏大。土壤类型为 Sand 和 Clay 时偏差更大, 土壤类型为 Loam 和 Silt 时偏差相对较小。根据它们的相关系数 $R^2(\text{loam})=0.9868$, $R^2(\text{silt})=0.9795$ 以及土样的颗粒组成分析, 决定采用土壤类型为 Loam 的标定曲线来校正 Steven TDR 测得的土壤体积含水量。从图 4 可以看出,

在 4 月 29 日和 5 月 7 日对于 Delta TDR 的标定中, 两种土壤类型前后两次的标定曲线几乎重合, 说明试验标定中的人为误差还是比较小的。土壤类型为 Mineral 时的标定曲线更接近真实值, 其变化趋势和 Steven TDR 的基本一致, 含水量较低时偏小, 含水量较高时偏大。土壤类型为 Organic 时测得的含水量值普遍偏大。根据两次标定方程的相关系数 $R^2(\text{mineral}, 5 \text{ 月 } 7 \text{ 日})=0.9872$ 和 $R^2(\text{mineral}, 4 \text{ 月 } 29 \text{ 日})=0.9951$, 决定采用 4 月 29 日土壤类型为 Mineral 的标定曲线校正 Delta TDR 测得的土壤体积含水量。图 5 为两种 TDR 的标定结果, 可以用两个简单的线形函数表示:

Delta TDR: $y = 0.961x + 1.8129, R^2 = 0.995$ (3)

Stevens TDR: $y = 0.8502x + 5.1074, R^2 = 0.9868$ (4)

式中: y 为土壤实际体积含水量(%); x 为 TDR 测量值(%).

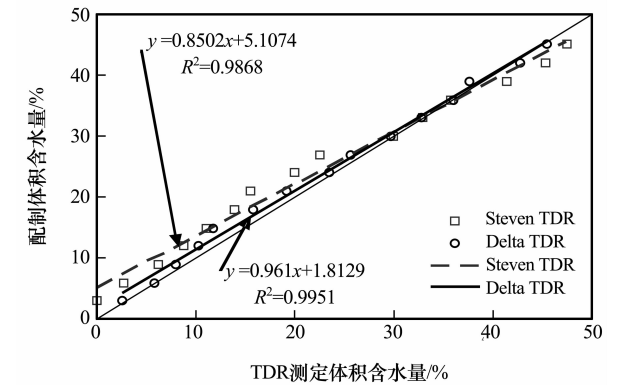


图 5 配制的土壤样品体积含水量与 TDR 测定值的关系图

Fig. 5 The relation of soil specimens' volumetric water contents between prepared and measured by TDR

表 4 给出了 Delta TDR 和 Stevens TDR 测量的土壤含水量与实际土壤含水量的对比结果, 可以看出, 在不同土壤含水量测量中, TDR 测定的土壤含水量普遍偏小。其中, Delta TDR 测定的绝对偏差范围为 0.1~3.3, 平均绝对偏差 1.1, 相对偏差范围 0.3%~22%, 平均相对偏差 6.9%。当含水量极低的情况下, TDR 的误差达到 54.4%, 甚至 100%。不考虑这两个极端值, 其测定的土壤含水量绝对偏差范围为 0.1%~5.5%, 平均绝对偏差为 2.8%, 相对偏差范围为 0.3%~30.4%; 平均相对

偏差为 14.3%。在土壤含水量较低的情况下，TDR 的相对偏差比较大。由此看来，TDR 测量粘壤质土壤含水量的偏差还是不容忽视的，使用前的标定也是非常必要的。

表 4 TDR 法测定土壤体积含水量的偏差

Table 4 Deviations of the soil volumetric water contents measured by TDR

配制 /%	Delta /%	绝对偏差 /%	相对偏差 /%	Stevens /%	绝对偏差 /%	相对偏差 /%
3	2.6	0.4	13.3	0.0	3.0	100.0
6	5.8	0.2	3.3	2.7	3.3	54.4
9	7.9	1.1	12.2	6.3	2.7	30.4
12	10.2	1.8	15.0	8.7	3.3	27.3
15	11.7	3.3	22.0	11.1	3.9	26.0
18	15.8	2.2	12.2	13.9	4.1	22.8
21	19.1	1.9	9.0	15.5	5.5	26.0
24	23.4	0.6	2.5	19.9	4.1	16.9
27	25.6	1.4	5.2	22.6	4.4	16.4
30	29.7	0.3	1.0	29.9	0.1	0.3
33	32.8	0.2	0.6	32.9	0.1	0.4
36	35.9	0.1	0.3	35.8	0.2	0.6
39	37.6	1.4	3.6	41.4	2.4	6.1
42	42.7	0.7	1.7	45.2	3.2	7.7
45	45.4	0.4	0.9	47.4	2.4	5.4

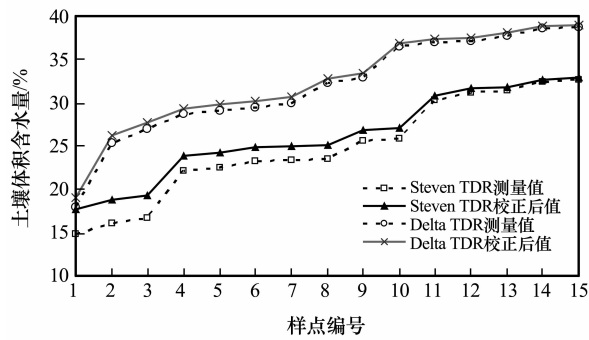


图 6 TDR 测量值与校正后的土壤水分数据对比图
Fig. 6 Soil water contents measured by TDR and corrected by calibration equation

将试验中得到的 TDR 标定方程应用于 2008 年 4 月 1 日在阿柔草场实地测量的土壤水分数据中，得到 TDR 测量值与 TDR 校正值之间的关系如图 6。图 6 中可以看出，校正后的土壤水分数据质量得到了明显的改善：含水量较低时 TDR 测得的值偏低，经过校正后，土壤体积含水量高于测量

值；含水量较高时，TDR 测量的体积含水量与校正后的含水量之间的差别不大，可以说明，TDR 更适宜用在含水量较高的地方。经过校正，使土壤水分数据更符合实际情况，从而使地面土壤水分数据质量得到保障。两种 TDR 测量数据的明显区别是由于 TDR 型号不同，更主要是因为测量的并非同一个样点，Steven TDR 测量样地内的样带 2 样点，Delta TDR 测量样带 3 的样点。

4 结论与讨论

本试验采取人工配制土壤溶液的方法代替传统的烘干称重法，土壤溶液样品中土、水质量精度都控制到 0.01 g，改善了烘干法由于烘箱温度、烘烤时间长短带来的测量误差，提高了测量精度。试验标定过程中，当含水量较低时 TDR 测得的值偏小，含水量较高时测得的值偏大，这种偏差可能是由于自由水和结合水的介电特性差异导致的。含水量较低时结合水占主导地位，其介电常数低于自由水介电常数，所以测得的值偏低。含水量较高时测定的值偏高的原因可能是因为土壤水分空间变异的影响，即在制备土壤样品时，虽然力图使其湿度均匀，但实际仍不可避免有局部的差异，使得自由水占主导地位的土壤样品的含水量表现出高于实际含水量的特点。但总的来说，本标定试验的结果较好，标定曲线的 R^2 均大于 98%。

在标定过程中，由于仪器本身的误差，以及测量时探针插孔对容重的影响，以及前、后期插孔位置重叠都会影响测量结果。实际上，如果把探头固定在同一点上做多次测量^[8]，其重现性是非常好的；对田间土壤也是如此。因此，可以认为经过室内实验标定的函数关系，误差较小，能够满足要求。利用所标定的函数关系，将 TDR 测定的体积含水量进行修正，使其更加符合实际情况。标定公式与 TDR 探头、土壤容重、土壤的电导率(EC)、有机质含量、土壤的湿润状况有关，而且土壤在地理分布上有很大的变异性，所以本试验所得的标定公式不可能对所有地区和所有土质都适用。

参考文献(References):

[1] Zhou Lingyun, Chen Zhixiong, Li Weimin. Calibration on measurement of soil water content using Time Domain Reflectometry (TDR)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1): 59—64. [周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 59—64.]

[2] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determi-

- nation of soil water content; Measurement in coaxial transmission lines [J]. *Water Resources Research*, 1980, **16**: 574—582.
- [3] Li Daoxi, Peng Shizhang, Ding Jiali, *et al.* Laboratory calibration on measurement of field soil moisture using TDR[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, **26**(1): 249—252. [李道西, 彭世彰, 丁加丽, 等. TDR 在测量农田土壤水分中的室内标定[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, **26**(1): 249—252.]
- [4] Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2001, **31**: 213—237.
- [5] Noborio K, Mcinnes K J, Heilman J L. Measurement of soil water content, heat capacity, and thermal conductivity with a single TDR probe[J]. *Soil Sci.*, 1996, **161**(1): 22—28.
- [6] Persson M, Hardy S. Estimating water content from electrical conductivity measurements with short time—domain reflectometry probes [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, **67**(2): 478—482.
- [7] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, **49**: 19—24.
- [8] Gan Zhuoting, Liu Wenzhao. Calibration on measurement of soil water content using SMS2 soil moisture probe and HH2 Meter [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, **23**(4): 69—72. [甘卓亭, 刘文兆. HH2 型土壤湿度计测定土壤含水量的标定研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, **23**(4): 69—72.]

The Calibration of Measurement of Soil Water Content Using Time Domain Reflectometry (TDR)

WU Yue-ru, WANG Wei-zhen, JIN Rui, WANG Jian, CHE Tao

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: It is necessary to calibrate Time Domain Reflectometry (TDR) for a measurement that a small error is required. By calibrating, the scope of application and accuracy of TDR can be determined. In this paper, a calibration process/method of the measurement of soil water content by TDR is discussed and analyzed. In addition, the fundamental principles and theory of the measurement of soil water content by TDR has also been generally reviewed and discussed. The designed calibration experiment processes are described in detail. This calibration experiment is based on the soil samples collected in Arou experimental field located in the

upper reaches of Heihe River. By the method of putting soil into a container, a very good correlation is found between the actual soil volume water content and that measured by TDR. Thus, it is sure that TDR can be use to measure soil water content accurately, and can offer the land surface soil water content for WATER project in a satisfied level, which is the basic data for the validation of remote sensing retrieval algorithms. The calibration result can also provide a valuable reference for the soil parameter measurement in the middle reaches of Heihe River where the soil quality is the same as in the upper reaches.

Key words: soil water content; time domain reflectometry (TDR); calibration; dielectric constant