

基于相位差的时域反射仪测定土壤含水量的标定和田间验证

郑茹梅¹ 李子忠^{1*} 龚元石¹ 王一鸣² 杨新明¹ 王克栋²

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要 为了检验具有我国自主知识产权的基于相位差检测原理的时域反射仪(TDR)测定土壤水分的性能,利用室内土柱试验,获得了该仪器测定土壤含水量的标定曲线,分析了影响因素,并在田间对标定曲线进行了实际验证。结果表明,容重对仪器测定土壤含水量的影响不显著;土壤质地对校正结果有明显影响,供试的砂质土类,壤质黏土类和黏土类分别可以使用一个特定标定公式, R^2 均大于0.98,估计标准误差均小于 $0.020\text{ cm}^3/\text{cm}^3$;该仪器用于田间测定含水量的均方根误差小于 $0.035\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。因此,经过室内标定后,将新型时域反射仪用于测定田间土壤含水量是可靠的。

关键词 土壤含水量; 时域反射; 相位差

中图分类号 S 151.9

文章编号 1007-4333(2011)01-0100-05

文献标志码 A

Calibration and field verification of TDR based on phase difference for measuring soil water content

ZHENG Ru-mei¹, LI Zi-zhong^{1*}, GONG Yuan-shi¹, WANG Yi-ming²,
YANG Xin-ming¹, WANG Ke-dong²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract The objective of this study is to test the performance of time domain reflectometry (TDR) based on phase difference detecting with independent intellectual property rights measuring soil water content. A laboratory calibration experiment using soil column was conducted to obtain the calibration equations for TDR measuring soil water content, and field test was also conducted to validate these calibration equations. The results showed that, there was no significant effect of bulk density on the calibration relationship between time measured by TDR and soil water content, but the soil texture had a significant effect. It could be calibrated using three calibration formulas in sandy soil, loamy clay soil and clay soil, respectively. All of R^2 were greater than 0.98, and the estimated standard errors were less than $0.020\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. The root mean square errors were less than $0.035\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ for TDR measuring soil water content in the field. Therefore, this new TDR instrument was reliable to measure soil water content in the field using calibration equations from the laboratory experiments.

Key words soil water content; time domain reflectometry; phase difference

时域反射仪技术(Time Domain Reflectometry, TDR)是当今世界上最先进的土壤水分快速测量技术之一。该技术具有快速、准确、操作简便、对土壤结构影响轻微,并可实现定点自动监测土壤水分动

态变化等特点。我国自上世纪九十年代年开始从国外引进时域反射仪,如 Tekronix 公司 1502B TDR 电缆测试仪、TDR-TRASE 和 TDR100 等,主要由一些大学和科研单位购买,应用在土壤水分测定和

收稿日期: 2010-05-27

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA10Z264)

第一作者: 郑茹梅, 博士研究生, E-mail: zhengrumei2004@163.com

通讯作者: 李子忠, 副教授, 博士, 主要从事农业水土资源利用和土壤物理学研究, E-mail: zizhong@cau.edu.cn

长期监测等方面的研究上^[1-14]。而大部分地市级灌溉试验站,土肥站等,测定土壤含水量时使用最普遍的方法仍是传统的烘干法。在实际的农业生产中,TDR 技术更是得不到应有的普及。原因:1) TDR 仪器价格昂贵,单机价格约 1 万美元,成套设备价格为几万美元^[15]。2)掌握设计制造 TDR 土壤水分测试仪核心技术的少数发达国家对外采取严格的技术出口限制,使我国无法获得必需的尖端电子部件和芯片,因此我国还不能制造传统的 TDR 土壤水分测试仪。3)对使用者的操作水平要求比较高,使得该技术不能在普通农业生产者中得到广泛应用。4)购买仪器和配件只能依赖于国外进口,国内缺乏仪器故障的维修技术,给仪器维修带来不便。因此,这些因素一定程度上限制了 TDR 技术在农业生产中普及,从而影响了农业生产中水分监测自动化、高效化的实现。为此,王克栋等^[16]新研制了与传统 TDR 原理完全不同的、基于相位检测原理的时域反射仪,用于检测土壤水分,大大降低了成本。本研究旨在通过室内土柱试验对该仪器进行标定,并分析容重、土壤质地等因素对标定结果的影响,

最后在田间进行实际验证,为基于相位差原理的时域反射仪的推广和应用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 时域反射仪系统原理简介

系统主要由高频电路、低频电路和传感探头 3 个部分组成(图 1)。高频电路中的信号源产生单一频率的正弦电压信号,输出信号的频率在 320~480 MHz 之间可调。高频信号通过信号分配器后被分成两路:一路经过延时电缆延迟一段时间后到达相位检测器作为参考信号,另一路通过环形器后沿同轴电缆传播到探头作为测试信号。由于探针的末端开路,测试信号在此发生反射,反射回去的信号通过环形器,环形器将探针末端反射回来的信号与入射信号分离,分离后的反射信号也到达相位检测器。相位检测器将反射信号与参考信号之间的相位差转换为与之成比例的直流电压信号。低频部分的模数转换电路将相位检测器和检波器的输出电压数字化并送入微处理器,微处理器根据相位差计算出电磁波在探针上往返传播的时间。探头由 3 根平行的不



图 1 时域反射仪系统和探针
Fig. 1 TDR system and its probe

锈钢棒构成,棒长 15 cm、直径 0.4 cm、相邻两棒中心间距 2 cm,探头测定的土壤最小体积范围是半径 3 cm 长 15 cm 的圆柱体。探头通过特征阻抗为 50 Ω 的同轴电缆与主机连接。3 根不锈钢棒上都覆盖了 1 mm 厚的 PVC 涂层,以减小因土壤含水量的变化引起的探头阻抗变化的范围。另外,绝缘涂层还能降低土壤电导率对相位测量的影响。在同轴电缆与探头的连接处有一个阻抗变换结构,实现阻抗匹配。这种设计减少信号在探针首端的反射,使得阻抗不连续部位的范围大大缩小,从而提高土壤含水量测量的精度。

1.2 试验土样

试验所用土壤样品共有 6 种。土壤样品经过风干,去除杂物,过 2 mm 筛后保存。土壤样品的类型、采集地点、土地利用方式和基本土壤性质见表 1。其中,颗粒组成用吸管法测定,质地类型按照国际制划分,有机质含量用重铬酸钾法测定,电导率用上海光学仪器厂生产的 DJS 电导仪按照水土质量比 5 : 1 测定,pH 用上海精密科学仪器有限公司生产的 PHS-3B 精密 pH 计(201-C 型 pH 复合电极)按照水土质量比 2.5 : 1 测定。

表 1 供试土壤及其基本性质

Table 1 Tested soils and their properties in laboratory experiment

编号	土壤类型	质地	取样地点	土地利用方式	颗粒组成/%			w(有机质)/ (g/kg)	r(电导率)/ (dS/m)	pH
					2~0.02 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm			
1	风沙土	砂土	河北省怀来县官厅水库	沙地	93	0	7	0.9	0.09	7.21
2	褐土	砂壤	中国农业大学上庄试验站	农田	77	11	12	6.4	0.18	8.35
3	潮土	砂质粘壤	河北省吴桥县	农田	59	23	18	8.4	0.13	9.02
4	褐土	壤黏	中国农业大学科学园	农田	51	20	29	10.5	0.16	8.12
5	潮土	壤黏	河北省曲周试验站	农田	33	31	37	13.9	0.14	8.49
6	赤红壤	黏土	广东省广州市	农田	31	19	50	4.8	0.32	4.51

1.3 校正和验证试验

1.3.1 室内校正试验

将土样平铺在托盘内,用喷壶均匀的加一定量的去离子水湿润,然后混合均匀,放入密封袋中充分平衡。平衡 6~8 h 以后,将湿土样按照一定的容重填装到有机玻璃土柱中(直径 15 cm,高 20 cm),分 5 层填装,填装要尽可能均匀。装好土柱后,垂直匀力插入探针,尽可能减小对土壤的扰动。连接探针和主机。打开主机开关,测定仪器的输出,重复 3 次。测定结束后,取出探针。分别从土柱上中下层取适量土样置于铝盒,用烘干法测定质量含水量(105 ℃,8 h 以上至恒重),取 3 层土壤含水量的平均值。根据填装土柱的平均容重计算得到实际的土壤体积含水量。完成一组试验后,增加用来湿润土壤的水量,重复上述步骤,每次加水时含水量大约间隔 0.03 cm³/cm³,直到近饱和。饱和土柱制备是填装好土柱后利用马氏瓶从土柱下端进水孔缓慢加水,调节水头确保土柱完全饱和,然后用仪器测定时间,利用称重法获得实际含水量。

1.3.2 田间验证试验

田间验证试验在 3 块试验地进行。试验地位

置:1)中国农业大学西校区科学园。试验区属华北平原北部山前冲积平原区,为暖湿带半湿润大陆季风气候区。地处东经 116°18′,北纬 39°57′。年均气温 11.5 ℃,年平均降雨量为 640 mm,降雨主要集中在夏季(6—8 月),夏季降水占年总降水量的 70%。土壤类型为草甸褐土,土壤质地表层为壤土。2)中国农业大学上庄实验站。试验区位于北京市海淀区上庄镇辛力屯村东,地貌属于华北山前冲积平原。地处东经 116°10′,北纬 40°08′。气候条件与中国农业大学科学园试验田近似,土壤质地为砂壤土。3)河北省坝上地区的“河北沽源草地生态系统国家野外科学观测研究站”的鱼儿山牧场。试验区地处丰宁满族自治县西北部,东经 116°11′,北纬 41°45′,海拔 1 460 m。属于半干旱大陆季风气候带,年平均降水量在 300~400 mm,主要集中在 6—9 月。年平均蒸发量 1 735.7 mm,年日照时数 2 930.9 h。主要土壤类型为栗钙土,土壤质地为砂壤土。各试验地的土壤基本理化性质如表 2。

试验过程是选择平坦地块挖一剖面,垂直面进行削平处理后,将 TDR 探头水平、小心稳定地插入剖面 5 cm 处,利用新型 TDR 测定传播时间(ns),重

表 2 田间试验点土壤的基本性质

Table 2 The soil properties in the field test experiments

田间试验点	土壤层次/cm	δ (容重)/ (g/cm ³)	颗粒组成/%			w(速效氮)/ (mg/kg)	w(速效磷)/ (mg/kg)	w(速效钾)/ (mg/kg)	w(有机质)/ (g/kg)	γ(电导率)/ (mS/cm)	pH
			2~0.02 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm						
科学园	0~15	1.32	51	20	29	93.0	41.9	95.5	10.5	0.16	8.12
上庄试验站	0~15	1.63	77	11	12	19.8	11.0	71.7	6.4	0.18	8.35
鱼儿山牧场	0~15	1.40	69	18	13	99.2	2.7	90.9	28.9	0.15	8.20

复 4 次。测定完毕后在探头周围相同深度处利用 100 cm³ 环刀取样(重复 4 次),密封后带回实验室,用烘干称重法测定其体积含水量。

1.4 数据处理

用决定系数 R^2 反映回归方程的拟合程度, R^2 无量纲,其取值范围为 0~1, R^2 值越大说明拟合优度越好,反之越差。回归方程的拟合优度用估计标准误差 SEE(standard error of estimate)衡量:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (\theta_v - \hat{\theta}_v)^2}{n - 2}} \tag{1}$$

式中: θ_v 表示称重法测定的土壤含水量,cm³/cm³; $\hat{\theta}_v$ 表示回归方程估计的土壤含水量,cm³/cm³; n 表示观测点数目。

TDR 仪器测定的含水量和烘干法得到的实际含水量进行比较时,用均方根误差 RMSE (root mean square error)衡量两者的差异大小。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\theta_{TDR} - \theta_v)^2}{n}} \tag{2}$$

式中: θ_{TDR} 表示新型 TDR 测定的土壤体积含水量,cm³/cm³; θ_v 表示烘干法得到的体积含水量,cm³/cm³; n 表示观测点数目。

2 结果与分析

2.1 容重对 TDR 测定土壤含水量标定曲线的影响

考虑容重因素对 TDR 测定土壤含水量时,我们初步选用壤黏土(4 号)作为供试土样,探索在该质地的土壤上仪器对容重条件变化的反应规律。试验中设置 3 个不同的填装容重(1.178、1.277 和 1.346 g/cm³),测定电磁波传播时间 t 和土壤体积含水量 θ 的关系。结果表明,每个容重条件下, θ - t 关系都可以用 3 次多项式拟合(图 2),回归方程的估计标准误差(SEE)分别为 0.008、0.008 和 0.011 cm³/cm³。通过统计检验,3 个容重条件下, θ - t 关系差异不显著,如果忽略容重因素用一个校正关系计算含水量,SEE 为 0.012 cm³/cm³,说明在供试土壤上,容重对 TDR 土壤参数测试仪的测量结果影响不显著,因此使用 TDR 实测该壤黏土土壤体积含水量时,在允许的误差范围内(0.02 cm³/cm³)可忽略土壤容重的影响。

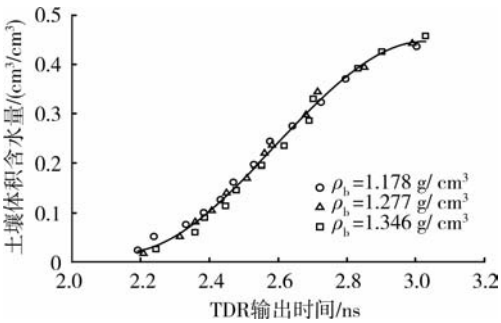


图 2 容重对 TDR 测定土壤含水量的影响

Fig. 2 Effect of bulk density on the calibration relationship for TDR measuring soil water content

2.2 质地对 TDR 测定土壤含水量标定曲线的影响

不同质地的土壤上体积含水量和 TDR 输出时间的关系存在差异(图 3)。试验所用的六种土壤可以分为 3 类:砂土和砂壤土可以用一个校正关系式进行含水量测定,校正关系呈 3 次多项式(表 3), R^2 是 0.98,SEE 是 0.016 cm³/cm³;砂质黏壤土和壤黏土可以合并为一类,用一个校正关系式进行含水量测定, R^2 是 0.99,SEE 是 0.015 cm³/cm³;对粘粒含量 50% 的黏土可以单独校正, R^2 是 0.99,SEE 是 0.019 cm³/cm³。

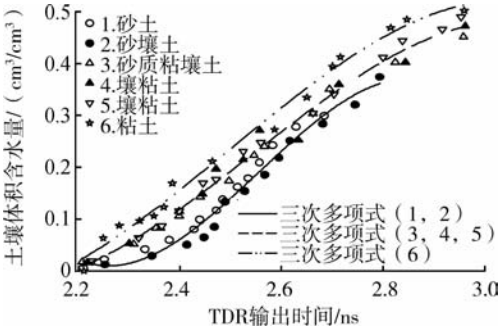


图 3 不同质地上 TDR 测定土壤含水量的校正关系

Fig. 3 Calibration relationship of different soil textures for TDR soil water content measurement

不同质地的土壤上含水量测定的校正公式不同是与土壤粘粒含量有关的。由图 4 可以看出,相同含水量的情况下,TDR 仪器在质地粘重的土壤(黏土 6 号)上输出的传输时间要比在质地轻质的土壤(砂土 1 号,砂壤土 2 号)上小。这是由于黏土中粘粒含量高,土壤水会有一部分以束缚态存在,束缚水的介电常数小于自由水所致。

表3 TDR测定土壤含水量的校正关系 $\theta_v = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d$ 系数表

Table 3 Coefficients of the calibration relationship $\theta_v = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d$ for TDR soil water content measurement

土 样	公式代码	a	b	c	d	R ²	SEE(cm ³ /cm ³)
砂土 砂壤	S	−3.033 7	23.393 4	−59.269 2	49.492 1	0.98	0.016
砂质粘壤 壤粘	LC	−0.871 0	6.688 5	−16.405 6	12.999 5	0.99	0.015
黏土	C	−0.796 7	5.998 1	−14.298 0	10.927 1	0.99	0.019

2.3 TDR 测定土壤含水量的田间验证

在中国农业大学科学园(应用公式 LC)、上庄试验站(应用公式 S)和鱼儿山牧场(应用公式 S)进行

的田间测试结果表明,新型 TDR 仪器测定的土壤含水量和环刀取样烘干法测定的结果相比(图 4),均方根误差分别是 0.032、0.011 和 0.028 cm³/cm³。

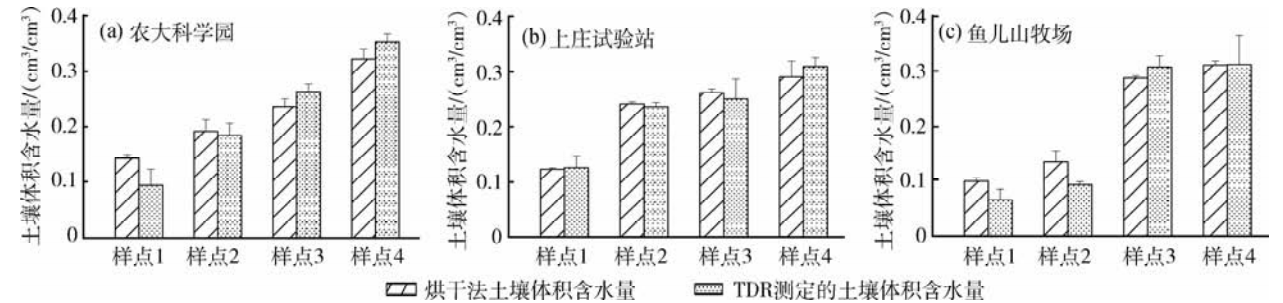


图4 田间验证新型 TDR 测定土壤含水量的性能

Fig. 4 Validation of new TDR performance for soil water content measurement in the field

3 结 论

1) 容重对新型 TDR 测定土壤含水量的标定曲线影响不显著,而土壤质地具有显著影响。可将土壤分为砂质土类,壤质黏土类和黏土类,每一类型的土壤可以使用一个特定标定公式, R² 均大于 0.98, SEE 均小于 0.02 cm³/cm³。如果要获得更高的精度,需要对特定的土壤需要进行单独的标定。

2) 运用室内获得的相应土壤的标定曲线,用新型 TDR 测定田间土壤水分的结果可以和烘干法较好吻合, RMSE 小于 0.035 cm³/cm³, 因此该仪器用于田间土壤水分的测定是可靠的。

参 考 文 献

[1] 伍永秋, 刘宝元, Erikvanden Elsen, 等. 黄土高原土壤水分的自动监测: TDR 系统及其应用[J]. 水土保持学报, 2001, 2: 108-111

[2] 王绍令, 杨梅学, 小池俊雄, 等. 时域反射仪在监测青藏高原活动层水分变化过程中的应用[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 78-84

[3] 张智慧, 康尔泗, 金博文, 等. TRIME - TDR 技术在黑河流域观测试验中的应用[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 574-579

[4] 龚元石, 李子忠. TDR 探针两种埋设方式下土壤水分的测定及其比较[J]. 农业工程学报, 1997, 13(2): 242-244

[5] 张书函, 康绍忠, 聂光镛. 时域反射仪的测定精度及其与中子仪的对比[J]. 西北农业大学学报, 1996, 24(4): 98-101

[6] 龚元石, 李子忠, 李春友. 应用时域反射仪测定土壤水分来估算农田蒸散量[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 72-78

[7] 曹巧红, 龚元石. 土壤电导率对时域反射仪测定土壤含水量的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 145-153

[8] Nadler A, Dasberg S, Lapid I. Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55(4): 938-943

[9] Dasberg S, Hopmans J W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56(6): 1341-1345

[10] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resour Res, 1980, 16(3): 574-582

[11] Roth K, Shulin R, Flüßler H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach[J]. Water Resour Res, 1990, 26(10): 2267-2273

[12] Schaap M G, de Lange L, Heimovaara T J. TDR calibration of organic forest floor media[J]. Soil Tech, 1996, 11(2): 205-217

[13] 郑茹梅, 李子忠, 龚元石. 时域传输技术测定盐土含水量的应用研究[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(2): 18-23

[14] Topp G C, Davis J L. Measurement of soil water content using Time Domain Reflectometry (TDR): A field evaluation [J]. Soil Science Society of America, 1997, 61(6): 1576-1585

[15] Robinson D A, Jones S B, Wraith J M, et al. A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry[J]. Vadose Zone J, 2003, 2(4): 444-475

[16] 王克栋, 王一鸣, 冯磊, 等. 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 72-76