

TRIME-T3 管式 TDR 在测量土壤水分时的误差及校正

沈新磊^{1,2}, 王 锐^{2,3}, 王全九^{2,4}

(1. 漯河市土壤肥料站, 河南 漯河 462300; 2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;
3. 河南理工大学测绘学院, 河南 焦作 454000; 4. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要: TRIME-T3 管式 TDR (Time domain reflectometry) 系统线路简单、能耗小、价格便宜、可实现非扰动定位瞬时剖面观测, 广泛用于测量土壤水分。但是, 在安装和使用过程中, 受土壤空隙、温度、类型、电导率、含水量等因素的影响, 测定土壤水分会产生误差。为提高土壤水分数据的准确性, 系统总结国内外研究成果和笔者实际操作经验, 提出了经验公式、室内校正、野外校正和其他校正等方法。

关键词: TRIME-T3 管式 TDR; 土壤水分; 误差; 校正

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 0439-8114(2013)13-3015-03

The Error and Correction of TRIME-T3 Tubular TDR for Measurement of Soil Water Content

SHEN Xin-lei^{1,2}, WANG Rui^{2,3}, WANG Quan-jiu^{2,4}

(1. Soil and Fertilizer Station of Luohe City, Luohe 462300, Henan, China;
2. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Institute of Surveying and Mapping, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;
4. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The TRIME-T3 tubular TDR system was with simple circuits, low energy consumption, cheap cost, and could realize undisturbed positioning instantaneous profile observation, which was widely used in measuring soil moisture. However, data error often occurred due to factors such as soil interstices, soil temperature, soil type, electrical conductivity, soil water content and so on during the process of installation and measurement. In order to obtain soil moisture data more accurately, the error of measurement was reduced as much as possible based on research results indoor and outdoor as well as practical experiences.

Key words: TRIME-T3 tubular TDR; soil moisture; error; correction

土壤水分是土壤的一个重要物理参数, 测定土壤水分的方法很多, 传统的测定土壤水分的方法如烘箱法、石膏电阻块法、张力计法和中子仪法^[1]等具有过程繁冗、受环境影响大、不能连续监测、表层含水量不易测定且具有辐射性等不足^[2,3]。TDR (Time domain reflectometry) 因其快速、准确、便携、易操作、能自动监测土壤水分及其变化等优点越来越多地被用于土壤水分的测量工作中^[4,5]。作为 TDR 家族中的新秀, TRIME-T3 管式 TDR 又以其能耗小、

线路简单、价格便宜、可实现非扰动定位瞬时剖面水分监测^[6]等优点在国内外得到越来越多地应用。然而, 在使用 TRIME-T3 管式 TDR 测定土壤水分的过程中尚有不少容易产生误差的环节, 必须充分了解所有误差的来源并对其进行校正, 才能尽量减少误差, 提高土壤水分数据测量的准确性, 进而保证农业、水文、环境和水土保持等研究工作的准确度和可靠性。

收稿日期: 2013-02-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2005CB121103)

作者简介: 沈新磊 (1978-), 男, 河南漯河人, 农艺师, 博士, 主要从事土壤水分和植物营养方面的研究, (电话) 13733956623 (电子信箱)

shenxinlei78@tom.com。

1 TRIME-T3 管式 TDR 的基本结构和测量原理

德国 IMKO 公司的专利产品 TRIME-T3 管式 TDR 系统包括 FM3 读数表、T3 探头和探管等配置,表层含水量可选配 P3 系列表层探头配合使用。TRIME-T3 管式 TDR 的安装使用方法与中子仪相近,所不同的是可实现非扰动定位瞬时观测,TRIME-T3 管式 TDR 采用 TECANAT 制成的透明塑料管代替中子仪的铝管,只需移动圆柱式探头(外包 PVC 外壳,4 个反向弹性铝条为 TDR 波导体)在塑料管中的位置,就可以从 FM 水分表离线式读出探头水分测量值,即不同深度土壤的体积含水率,测量深度可达 3 m。

该仪器的测量原理为:TDR 发射频率为 1 MHz~1 GHz 的电磁脉冲,经过同轴电缆进入波导探针进行传播,遇到障碍物后产生反射并返回到仪器,通过测量电磁脉冲沿波导探针在土壤介质中传播并在其末端反射所需时间就可以计算出被测物质含水量的大小^[7]。

2 TRIME-T3 管式 TDR 的误差来源

1980 年 Topp 等^[8]对各类不同粒级土壤的研究表明,土壤的介电常数强烈地依赖土壤中液态水含量,而对土壤类型、密度和温度(>0 ℃)的依赖性很小。但后来的研究表明,在测量精度要求较高时这一结论是不正确的^[9-11]。TRIME-T3 管式 TDR 系统作为 TDR 的一种,在安装和使用过程中受多种因素影响,且各因素间可能相互作用。下面就各个因素分别进行论述。

2.1 土壤空隙产生的误差

TRIME-T3 管式 TDR 的探管和土壤之间不能存在空隙,因为空气具有最低的介电常数。如果存在空隙,TDR 测出的水分含量就比实际的土壤水分含量要低得多,且土壤含水量越高时空隙造成的误差越大。1 mm 的空隙,在土壤体积含水量为 15%时,误差±(1%~2%);土壤体积含水量为 25%时,误差±5%;在更高体积含水量下,误差可高达±10%^[12]。另外,空隙对于具有膨胀和收缩性质的土壤产生的误差更大^[6]。

2.2 土壤温度产生的误差

应用 TDR 野外测定土壤水分时会受土壤温度的影响,并且土壤各层次的影响程度和大小各不相同。姜小三等^[13]研究表明,在温度 23~31 ℃下,对黄土高原土壤用 TDR 所测土壤含水量比土钻法所测值偏高;温度低于 23 ℃或高于 31 ℃时,TDR 所测土

壤含水量比土钻法所测值偏低;而在 23 ℃和 31 ℃附近时,这两种方法测得的土壤含水量的差异不显著。

2.3 土壤类型产生的误差

土壤类型对测值影响不大,通常情况下,如若对精度要求不高,可直接使用其出厂标定。但对于一些特殊的土壤,测值就不够准确^[5,14],如黏土(土壤体积含水量>40%,尤其是膨胀性黏土)和有机质含量较高的土壤(黑泥土、腐殖质、无土栽培基质等),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。周凌云等^[7]利用 Steven TDR 在室内分别测定了沙土、壤土、粉沙土和黏土 4 种土壤类型的土壤含水量,结果表明沙土和黏土的 TDR 测量值与烘箱法测量值之间的偏差较大,壤土和粉沙土的测量偏差相对较小。李道西等^[15]的研究表明,在黏壤质土中,TDR 法的土壤含水量测值较烘箱法显著偏小,绝对偏差范围在 0.02~0.09 cm³/cm³,相对偏差范围 4.1%~44.0%。

2.4 土壤电导率产生的误差

土壤电导率作为土壤盐分的一个指标反映了土壤中离子的含量。最初的一些研究认为土壤电导率不对 TDR 测定结果产生影响^[8],但后来的一些研究者对此持不同意见。Dalton 等^[16]认为,当土壤孔隙水溶液电导率接近或大于 8 dS/m 时会使土壤含水率的测量值偏高。曹玉鹏等^[17]研究了电导率为 20~66 dS/m 的海相淤泥,结果表明 Topp 等^[8]建立的土体介电常数与体积含水率的经验关系式不适用于含盐量为 1.5%~4.5%、质量含水率为 120%~320%的海相淤泥。谭秀翠等^[18]的研究也表明,在同一含水率条件下,TDR 测量得到的含水率与烘箱法得到的含水率之间的差值随土体中盐分质量浓度的增加而增加。当盐分含量过高时还会导致仪器测量结果异常,出现负值或是无法读取数据。

2.5 土壤密度产生的误差

TRIME-T3 管式 TDR 在出厂前已通过密度为 1.4 g/cm³ 的石英砂进行了标定,一般情况下,当土壤密度在 1.1~1.7 g/cm³ 范围内时,土壤密度对 TRIME 水分测量的影响可以不予考虑,无需再次标定^[3]。但是如果土壤密度过大(>1.7 g/cm³),测量的结果就会偏高;密度过小(<1.1 g/cm³),则结果偏低^[6]。这是因为土体密度很大时,就意味着土体基质增加,土体空气减少,而土体基质的介电常数大于空气的介电常数就导致测出的水分含量高出了实际的水分含量^[19]。

2.6 土壤含水量产生的误差

当土壤含水量较低时 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。周凌云等^[7]的研究表明,在土壤含水量较低的情况下,TDR 的相对偏差比较大。当含水量极低的情况下,TDR 的误差可以达到 54.4%,甚至 100.0%。

2.7 其他原因产生的误差

1)TRIME-T3 管式 TDR 不能很好地反映固态水含量,因而测量冻土所得到的值实际上并不是真正的含水量,而仅仅是土壤孔隙中贮存的液态水含量。

2)由于 TDR 是在出厂时连同电缆、探针等装置在内进行了严格标定的,标定后的参数被专门的软件写在探针连接器里面,所以用户对其延长电缆、更换探针等会导致仪器产生误差。

3)实际应用过程中,不同层次土壤密度不同,管壁与周围土壤之间的空隙大小也不同,都会产生测量误差。

4)在实际应用过程中,经常发现测管内壁有小水珠,可能会影响测量结果。

3 TRIME-T3 管式 TDR 的校正方法

首先,采用正确的安装方法可以尽可能地减少误差。安装时要使用 TRIME 配套的专用工具精细操作,TRIME-T3 管式 TDR 中的探管埋入土壤中并不能马上使用,需在管壁与土壤空隙处做灌浆处理,约 4 周后方能正常使用^[12]。

其次,在使用前进行必要的标定。虽然 TRIME-T3 管式 TDR 在出厂前连同电缆、探针、探头等装置已进行了标定^[3],但是当要求误差更小时,仍需预先标定,标定方法有^[7,14]:

1) 经验公式。校正水分=实测水分+(12.12×密度-17.05)。

2)室内校正方法。①取土。从试验区采回表层土,将取来的土样充分风干、粉碎,过筛(筛孔 2 mm),并将土样充分混匀 2~3 次,使含水量均匀一致。②回填。在标定土桶(直径 60 cm,高 100 cm)的中部放好 TDR 探管后逐层回填土,每加一定量的土样,人工压实至接近田间容重值(1.35 g/cm³)。每层保持相同的装土厚度和压实重量,使测管周围的容重与其他地方保持一致。当土样达到一定高度时,将表面夯实、刮平。③测定。分别在 10、15、20、30、40、50、60 cm 土壤深处进行 TDR 读数,然后在读数深度处用环刀取土样 4~6 个,为避免因蒸发引起的土壤含

水量减少,及时将土样带回实验室进行称重、烘干,并计算体积含水量。④加水。为了得到 6 组从干土到湿土的数据,试验过程中共需加 5 次水,直至土壤体积含水量接近最大值(约 40%)。为了使各层的土壤含水量均匀一致,每次加水时,都需要从桶内倒出标定土壤并摊开,每摊开一层,一边用喷水壶洒水,一边搅拌。⑤每次加水后重复步骤②、③,这样便得到一组相应的体积含水量与 TDR 读数记录,进而作出回归曲线。

3)野外校正方法。在使用 TRIME-T3 管式 TDR 逐层进行测量,测量后原深度旋转探头,每层测 3 次取其平均值;同时,用环刀(体积为 100 cm³)在探头埋设地点周围相同深度取原状土样,每次取 3 个,将样品带回实验室用烘箱法测定相应的体积含水量,取平均值与 TDR 测值进行标定。野外校正同样需要用烘箱法和 TDR 测定从凋萎湿度到饱和含水量的数据对。

4)结合笔者实际操作经验,对其他原因造成的误差进行相应地处理。①在冬季适当增加冻土层土壤含水率的烘箱法测定频率,以解决 TDR 不能很好地反映固态水含量的问题。②按照要求使用 TDR 出厂时的原装电缆、探针等装置。③采用依照实际情况分层标定的办法,把同一测管规律一致的相邻层次放在一起用同一方程标定。④用细绳拴住装了干燥变色硅胶的布袋置入 TDR 测管中以干燥测管,并定期取出变色硅胶烘干再用。

参考文献:

- [1] 李玉琪.负压计在测定土壤水分中的应用与分析[J].人民黄河,1998,20(12):30-31.
- [2] 张书函,康绍忠,张富仓,等.6050X1 型时域反射仪的测定原理与灵敏性[J].西北农业大学学报,1996,24(3):10-15.
- [3] 龚元石,李子忠.应用时域反射仪测定农田土壤水分[J].水科学进展,1997,8(4):329-334.
- [4] HEIMOVAARA T J, BOUTEN W. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents[J]. Water Resource Research, 1990, 26(10): 2311-2316.
- [5] 王绍令,杨梅学.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.
- [6] 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.
- [7] 周凌云,陈志雄.TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J].土壤学报,2003,40(1):59-64.
- [8] 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.
- [9] SKIERUCHA W, WILCZEK A, ALOKHINA O. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(2):544-552.

(下转第 3082 页)

境良好的种群出苗当年只进行扩展空间的营养生长;不良生境的种群营养生长期很短,而生殖生长持续 150 d 左右^[12],并且种群中匍匐茎交织,很难明确区分出完整的雌、雄单株来。在盆栽下进行试验,目的是为了调控生境与便于理顺单株的匍匐茎,以便更好地把控营养生长期的终点和参数的测定。但盆栽使菵草遭遇了土层厚度与地下空间带来的胁迫,致使 CK 处理的株型、生物量结构、营养生长持续期等性状与野生种群存在一定的差异。但在同样规格的盆中试验,可以忽略水分之外其他因素带来的影响。本研究仅仅说明在菵草营养生长期雌、雄株对干旱胁迫的响应机理存在着性别差异。营养生长是生殖生长的基础,干旱胁迫对菵草营养生长期植株含水量及水分分配的影响,实质是其体内结构物质、营养物质、生理活性物质组成与含量差异的外在表现,必然对雌雄菵草生殖生长持续期、生殖投入与收益、种子活性、种群结构及扩散等产生影响,由此带来的相关问题,有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孙跃春,徐彤宝,王艳珍. 菵草的综合开发利用[J].中国林副特产,2003(3):57.
- [2] 王桃云,马红昌,刘江颖. 菵草叶蛋白提取工艺的优化[J].苏州科技学院学报(自然科学版),2005,22(1):59-64.
- [3] 高振华,何瑞国,李英,等. 菵草饲喂獭兔效果研究[J].草业科学,2005,22(3):72-74.
- [4] 李守阳,任相泉. 菵草饲喂畜禽[J].中国畜牧兽医,2003,30(6):48-49.
- [5] 江苏新医学院. 中药大辞典[M].上海:上海人民出版社,1977. 231.
- [6] 孙平阳,王延平. 黄土残塬区荒坡地林草优化组合治理模式研究[J].西北农业学报,2004,13(4):124-129.
- [7] 胥晓,杨帆,尹春英,等. 雌雄异株植物对环境胁迫响应的性别差异研究进展[J].应用生态学报,2007,18(11):2626-2631.
- [8] 尹春英,李春阳. 雌雄异株植物与性别比例有关的性别差异研究现状与展望[J].应用与环境生物学报,2007,13(3):419-425.
- [9] 张劫,张鲲,刘湘桂,等. 菵草的形态组织鉴定[J].中药材,1998,21(12):605-609.
- [10] 雷青娟,刁治民,张正国,等. 菵草的开发利用及防治对策的研究[J].安徽农学通报,2005,11(7):68-69.
- [11] 刘金平,王艳. 南充地区野生菵草构件性状多样性分析[J].草业科学,2009,26(8):68-71.
- [12] 刘金平,康军利. 野生菵草种群有性生殖投入与收益差异性分析[J].西南农业学报,2010,23(3):872-875.
- [13] 刘金平,欧阳梅. 成熟度与贮藏期对野生菵草种子发芽力的影响[J].安徽农业科学,2009,38(4):1817-1818.
- [14] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994,30(3):207-210.
- [15] 邹琦. 植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [16] BARRETT S C H. Gender variation in *Vurmba dioica* (Liliaceae) and the evolutionary analysis [J]. Journal of Evolutionary Biology, 1992, 5(3):423-444.
- [17] CORREIA I O, BARRADAS M C D. Ecophysiological differences between male and female plants of *Pistacia lentiscus* L. [J]. Plant Ecology, 2000, 149(2):131-142.
- [18] DAWSON T E, EHLERINGER J R. Gender specific physiology, carbon isotope discrimination, and habitat distribution in boxelder *Acer negundo* [J]. Ecology, 1993, 74(3):798-815.
- [19] SILVERTOWN J, CHARLESWORTH D. 简明植物种群生物学[M].第四版.李博,译.北京:高等教育出版社,2003.219.
- [20] 贺竹梅,寸守铄. 植物实验胚胎学及其在农业上的应用[J].西南农业学报,1993,6(2):104-110.
- [21] 刘金平,吴蕾. 野生菵草开花习性及其影响开花生态因子分析[J].草业与畜牧,2009(11):6-8.
- [22] WARD J K, DAWSON T E, EHLERINGER J R. Responses of *Acer negundo* genders to interannual differences in water availability determined from carbon isotope ratios of tree ring cellulose [J]. Tree Physiology, 2002, 22(5):339-346.
- [23] FREEMAN D C, MCARTHUR B D. A comparison of twig water stress between males and females of six species of desert shrubs [J]. Forest Science, 1982, 28(2):304-308.
- [24] LI C Y, REN J, LUO J X, et al. Sex specific physiological and growth responses to water stress in *Hippophaerham noides* L. populations [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2004, 26(2):123-129.

(责任编辑 曾德芳)

(上接第 3017 页)

- [10] 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 Journal, 1985, 49(1):19-24.
- [11] 杨直毅,樊军. TDR 和 FDR 测定黄绵土土壤含水量的标定[J].土壤通报,2009,40(4):740-742.
- [12] 李笑吟,毕华兴,刁锐民,等. TRIME-TDR 土壤水分测定系统的原理及其在黄土高原土壤水分监测中的应用[J].中国水土保持科学,2005,3(1):112-115.
- [13] 姜小三,倪绍祥,潘剑君,等. 温度条件对 TDR 测定土壤水分的影响[J].江苏农业科学,2004(4):102-104.
- [14] 郑茹梅,李子忠,龚元石,等. 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[J].中国农业大学学报,2011,16(1):100-104.
- [15] 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.
- [16] DALTON F N, HERKELRATH W N, RAWLINS D S, et al. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe [J]. Science, 1984, 224:989-990.
- [17] 曹玉鹏,邓永锋,洪振舜. 高盐分环境下 TDR 测试高含水率方法研究[J].岩土工程学报,2010,32(12):1916-1921.
- [18] 谭秀翠,杨金忠,查元源. 土壤含盐量对 TDR 含水率测试结果的影响及校正方法[J].灌溉排水学报,2010,29(6):1-6.
- [19] 潘宗俊,谢永利,文明勇,等. 基于 TDR 技术的水分测量系统量测膨胀土含水量偏差分析[J].公路交通科技,2009,26(7):59-63.

(责任编辑 吕海霞)