

TDR 研制与应用方面的若干进展*

柴世伟 刘文兆

张聚庭

(中国科学院水土保持研究所 杨陵 712100) (北京核安核子仪器有限公司 北京 100083)

摘要 通过分析近年来国内外关于 TDR 的文献,总结了 TDR 研制与应用方面的若干新进展,概括了在使用 TDR 时应注意的几个问题。结果表明,线圈型 TDR 探针可很好地解决 TDR 探针在物理长度上的限制;多功能 TDR 探针可用来同时测定含水量与基质势、含水量与土壤热学性质、含水量与盐度和温度。当温度在 5~45℃ 之间变化时随着温度的升高,TDR 在沙壤土中测定的土壤含水量降低,而在粘壤土和有机质含量高的土壤测定的土壤含水量值升高。TDR 探针应以合适的角度插入土壤,同时尽量避免摇摆、两探针不平行插入等误操作。

关键词 时域反射仪(TDR) 土壤含水量 测量

Some progress in TDR manufacture and application. CHAI Shi-Wei, LIU Wen-Zhao (Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100), ZHANG Ju-Ting (Beijing Limited Corporation of Nuclear Instrument, Beijing 100083), *CJER*, 2001, 9(2), 97~99

Abstract Through analyzing the TDR literature, some new progress in TDR manufacture and application were summarized and the several problems in using TDR were generalized. The result shows that the coil type of probe can solve the problem of too long or too short TDR probe; multiplex TDR probe can measure both soil water content and potential or thermal properties or temperature and salinity simultaneously. With the temperature rising from 5℃ to 45℃, the soil water content detected by TDR will decline in sandy loam soil, and rise in clay loam and organic soil. The TDR probe should insert into soil with an angle and avoid the wrong operation, such as swaying or un-parallelism.

Key words Time domain reflectometry (TDR), Soil water content, Measure

20 世纪 70 年代末 TDR 成为测定土壤水分含量的 1 种新工具^[3],它具有快速、可连续原位测定及无辐射等优点,在水分测定方法方面表现出良好的发展势头。TDR 测定土壤含水量是基于对土壤的表观介电常数的测量,自然水的介电常数为 80.36(20℃),空气的介电常数为 1,土壤的介电常数为 3~7,这种巨大的差异表明可通过测量土壤介电特性来推测土壤含水量。TDR 测试仪利用测量电磁波通过土壤介质沿探针传播并在其末端反射的时间来确定土壤介电常数。目前使用的 TDR 土壤水分仪主要有美国土壤水分设备公司生产的 Trase 系统、加拿大生产的型号为 MP-917MOISTURE. POINT 的 TDR 和波兰 EASY TEST 公司生产的 FOM/mts 型 TDR,国产 TDR 正在研制之中。

1 TDR 探针设计

TDR 探针设计有不对称同轴探针、含有 Balun 的对称双棒探针、无 Balun 的对称双棒探针及对称多棒探针^[4]。目前所有的探针工作原理都以电磁波在传输线中的传播为理论,几乎没有关于 TDR 探针设计标准的文献。这些常规的 TDR 探针由于长度等方面的因素,又由于其测定值是一段距离的平均值,故在实际应用中测定微域土壤水分变化时遇到了困难,探针长度太短,则没有足够的传播时间以精确地区分电磁波在始端和终端的反射;探针太长,由于电导率的影响,电磁波信号的衰减将增加,从而影响测定结果。Nissen 等应用线圈探针测定含水量使探针设计迈上新台阶,这种时域反射仪线圈探针长 0.015m,直径为 0.0036m,不仅解决了微域变化范围内土壤含水量的测定,也解除了 TDR 探针物理长度上的限制,同时这种探针容易生产,成本较低^[5]。TDR 主要被用来测定含水量和电导率,同时测定含水量和土壤基质势的 TDR 探针最近已经有人使用^[6]。这种新的基质势-含水量 TDR 探针一部分被塞入石膏中,另一部分被塞入土壤中,直至石膏

* “九五”国家自然科学基金重大项目(49890330)与中国科学院重大项目(KZ951-A1-301)和特别支持项目(KZ95T-04-01)资助
收稿日期:2000-08-03 改回日期:2000-09-06

中的基质势与周围土壤的基质势相平衡。这种技术可用来确定石膏和土壤的介电常数,在石膏和土壤的基质势(φ)处于 -1000kPa 和 -10kPa 之间时,用粘质壤土中压力盘产生的介电常数-基质势关系检验这种 TDR 探针,结果表明,石膏的介电常数值在 -1000kPa 和 -30kPa 之间时相符性能很好,但当 $\varphi > -30\text{kPa}$ 时,介电常数的变化不明显;而土壤介电常数的变化在整个 φ 值范围内一直很好。当含水量逐渐降低或升高时,这种探针可精确地测出含水量和基质势。但当土壤表面附近的湿度急剧变化时,测出的基质势值尚不如意,这种局限在其他基质势测定方法中也存在。基于热脉冲理论的发展,1种新装置 DPHP 近年来被用于同时测定土壤热扩散、体积热容量和热传导,由于 DPHP 与 TDR 探针的材料和结构相似,结合这2种仪器可同时测定含水量、电导率和热学性质。Noborio 依靠热脉冲方法测定热扩散系数、体积热容量和热传导,依靠 TDR 方法测定含水量,制造了1种多功能探针,该探针在测定含水量时结果很理想,但在测定热学性质时结果不是很好,这在某种程度上与设计本身有关^[6]。现在根据 TDR 探针和 DPHP 装置的设计要求,1种新型结构探针已被设计出来,该探针在测定含水量和电导率时结果都令人满意,但必须进行含水量和介电常数关系的重新校正,目前这个结果尚处在实验室阶段。

2 影响 TDR 测定值的因素

温度和质地对 TDR 测定数据的影响。Topp 等认为,温度在 $10\sim 36\text{℃}$ 之间,实际含水量在 $0\sim 0.35\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 之间变化时,温度改变对含水量的测定结果无影响;Zagoskii 等也认为温度 $>5\text{℃}$ 时,测定的含水量不会改变,但当温度 $<5\text{℃}$ 时,由于水的密度变化较大,影响了含水量的测定值。陈志雄等^[2]通过对 FOM/mts 型 TDR 的标定研究认为,在砂质壤土中其各级含水量多点测定的重现性很好,且在温度较低时(16℃)标定曲线的误差最小;在壤质粘土中当含水量 $>0.3949\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时其多点测定的重现性差,且在温度较高(26℃)条件下误差最大。龚元石等^[1]认为在沙质壤土中随着温度在 $5\sim 45\text{℃}$ 之间的升高,TDR 测定的土壤含水量降低,而在粘土和有机质含量高土壤中由于高盐分电导率的影响,随着温度的升高,水含量的测定值也增高;同时含水量越高,温度的影响也越大,当含水量 $<0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时,温度对 TDR 测定的含水量无影响;当含水量 $>0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时影响较大,这表明当温度、质地等因素有较大幅度的变化时,在实际应用中要考虑它们的影响。TDR 探针不同埋设方式对其测定结果的影响。Zegelin S. J.、龚元石等认为由于土壤含水量的垂直变化(尤其是表层)较大,土壤表层($<40\text{cm}$)的测定值之间差异明显大于下层,同时由于探针在竖埋和横埋方式下被测土壤体积的范围不一致,测定值亦有差异,竖埋方式的较大,竖埋方式下土壤剖面扰动比较大,扰动后的农田土壤水分运动受到一定程度的影响,因此在测定农田贮水量时,表层可用竖埋式,下层可用横埋式。另外有人将探针以一定的角度(30° 或 45°)插入土壤,既对土壤的扰动小,而且测定的值也较准确,但这还需要进一步研究。

3 TDR 在溶质运移中应用及其测量空间的敏感性

TDR 在溶质运移中被认为是1种有潜力的测定手段,因为它能够同时测定含水量和电导率。TDR 监测溶质运移特性曾被人^[6]分别用垂直埋设探针的方法和水平埋设方式验证,用的都是直线式的探针;也有人^[7]用弯曲的 TDR 探针监测三维空间的溶质运移,同时用水平安装方式来监测一维方向的运移变化;还有人^[8]同时使用垂直和水平安装探针,用水平探针来估计运移参数,用垂直探针来分别验证这些估计。近年来大多数的研究^[7]是使用 TDR 在稳流状态下测定离子的穿透曲线(BTC)。Risler 等人拓展了这种技术,在自然流体状态下监测溶质运移。TDR 虽能监测溶质运移,但它不能区分各个溶质组分的特性。

TDR 测量空间的敏感性曾被许多研究人员所注意。Topp G. C. 认为^[3],1个双棒探针的测定范围是1圆柱体,该圆柱体的轴位于2棒间的中线上,圆柱体的直径为2棒间距离的1.4倍。Knight J. H. 等提出了2棒探针周围电磁波的理论分析,他们认为94%的可获得电磁波能量存在于2棒的中线附近,试验结果也证明了这一点,而多线探针电磁波能量的范围则更为减小,因此一般认为3棒探针具有比2棒探针较小的感应范围。同时探针直径与探针间距离的比率也影响着 TDR 探针的空间敏感性。有资料表明如果保持探针间距离不变时,加粗探针直径将增大感应范围。

4 其他有关研究与使用应注意的问题

随着 Topp G. C. 等人提出了介电常数与体积含水量的3次多项式方程经验公式后,其他的校正技术,如介电常数混合模型、传播速度误差分析模型和用 TDR 校正的溶质浓度线性模型^[9]等也得到快速发展。电磁波在土壤中沿着探针传播时减弱的原因是由于土壤中盐度和粘粒含量的影响,这种影响曾被 Topp G. C.

等在理论上所证明。在 TDR 的应用中垂直放置探针有以下优势,首先容易安置和移动,另外测定的是某个范围内的平均值;而水平放置时在水平方向上的空间变异性可能被平均,其最大缺点是要挖 1 个剖面坑,故建议以一定角度(30°或 45°)插入导波棒;在插入导波棒时引起的任何“摇摆”都会产生空气间隙并导致在测定含水量时的“系统性偏差”,建议使用小直径波导棒、渐尖的波导棒或专用的导向装置将空气间隙的影响降低到最小程度;在探针的外围镀上 1 层绝缘材料可使 TDR 的测定精度提高;应尽可能保证 2 根探针平行插入土中,否则造成较大测定误差,甚至导致完全不合理的测定结果^[4];TDR 探针的安装使探针附近的土壤被压紧,这是导致测定结果产生误差的一个来源,尤其是大直径的探针(>6mm)。

5 小 结

线圈型 TDR 探针能较好地解决 TDR 探针物理长度上的限制;同时测定含水量与基质势、含水量与土壤热学性质、含水量与盐度和温度的多功能 TDR 探针在实践中已分别得到应用;温度和容重等因素对 TDR 测定值的影响虽小,但当这些因素有较大幅度的变化时,也应考虑它们的影响;TDR 探针应以一定的角度(30°或 45°)插入土壤,同时应尽量避免摇摆、两探针不平行插入等误操作;TDR 在溶质运移中的应用及其校正模型近年来也得到较快的发展。

参 考 文 献

- 1 龚元石,曹巧红,黄清湘.土壤容重和温度对时域反射仪测定土壤水分的影响.土壤学报,1999,36(2):145~153
- 2 陈志雄,Sobczuk Henryk. TDR 法测定土壤含水量的标定研究.SPAC 系统水分运动实验研究.北京:气象出版社,1997
- 3 Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P. Electromagnetic determination of soil water content; Measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 1980, 16: 574~582
- 4 Zegelin S. J., White I., Jenkins D. R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using time-domain reflectometry. Water Resour. Res., 1989, 25: 2367~2376
- 5 Nissen H. H., Moldrup P., De Jonge L. W., Jacobsen O. H. Time Domain Reflectometry Core Probe Measurements of Water Content during Fingefred Flow. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 493~500
- 6 Ren T., Noborio K., Horton R. Measuring soil Water Content, Electrical Conductivity, and Thermal Properties with a Thermo-Time Domain Reflectometry Probe. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 450~457
- 7 Starr G. C., Lowery B., Cooley E. T., Hart G. L. Development of a Resonant Length Technique for Soil Water content Measurement. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 278~285
- 8 Iris Vogeler, et al. Characterizing water and solute Movement By Time Domain Reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 5~12
- 9 Kim D. J., Vanclooster M., Feyen J., Vereecken H. Simple Linear Model for Calibration of Time Domain Reflectometry Measurements on Solute Concentration. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62: 83~89
- 10 Knight J. H. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. Water Resour. Res., 1992, 28: 2345~2352

欢迎订购《新时期党和国家领导人论林业与生态建设》

中央文献研究室与国家林业局共同编写的《新时期党和国家领导人论林业与生态建设》一书近日已由中央文献出版社出版,该书收录了邓小平、江泽民、李鹏、朱镕基、李瑞环等党和国家领导人 1979~2000 年 12 月期间关于林业与生态建设方面的指示、批示、题词、书信和谈话节录等 70 件,其中多数为首次公开发表,同时编入了这一时期党中央、全国人大、国务院和有关部委发布的重要文件、法律、法规 17 篇。该书是新世纪指导我国生态建设和林业发展的一部重要理论著作,对进一步明确林业发展思路,谋求林业在新世纪实现跨越式发展,大胆探索和发展具有中国特色的社会主义林业理论与实践,增强执行各项方针政策的自觉性有深远的指导意义。每册 22.00 元(含邮资),需订购者请将书款邮汇(100714)北京市和平里东街 18 号国家林业局宣传办公室刘春华、杨玉芳收(款到即寄书,需正式发票者请在汇款单中注明或来函来电说明);电话:(010)84238927,传真:(010)84239223。