

# 运用时域传输技术测定不同类型土壤的含水率

郑茹梅, 李子忠<sup>\*</sup>, 龚元石

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘 要:** 针对时域反射 (TDR) 技术测定含盐土壤、有机质质量分数高的土壤和红壤含水率过程中存在不适用的问题, 该文应用一种基于时域传输 (TDT) 原理的水分测试仪, 通过室内土柱试验, 研究该仪器在不同类型的土壤上测定土壤含水率的适用性。研究表明: 在风沙土、褐土和潮土 3 种类型的土壤上, 土壤体积含水率和 TDT 输出的电压之间存在显著的线性关系, 且可以用统一的线性关系计算土壤含水率, 其估计标准误差是  $0.026 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 在盐土 ( $EC$  值为  $11.12 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ , 含盐量为  $59.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 上, 土壤体积含水率和 TDT 输出电压值之间的线性关系仍然存在, 其估计标准误差是  $0.025 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 在栗钙土 (有机质质量分数  $67.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和红壤上, 土壤体积含水率和 TDT 输出的电压值之间的关系可以用三次多项式表示, 校正关系式估计标准误差分别是  $0.028$  和  $0.015 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。因此, 基于 TDT 原理的水分测试仪能被广泛地应用于不同类型土壤的含水率测定, 尤其在盐土、有机质质量分数高的土壤和红壤含水率的测定上表现出优于 TDR 技术的特点。

**关键词:** 土壤, 土壤测试, 含水率, 质地, 时域传输

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.002

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0008-06

郑茹梅, 李子忠, 龚元石. 运用时域传输技术测定不同类型土壤的含水率[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 8-13.

Zheng Rumei, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Measurement of soil water content for different soil types by using time domain transmission technology[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 8-13. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

在农业科学、水文科学和气象科学等领域, 土壤水分状况是一个重要参数, 实时监测土壤含水率, 在上述各领域的研究和应用中是必不可少的。测量土壤含水率有很多方法。其中, 时域反射 (time domain reflectometry, 简称 TDR) 技术以其快速、准确、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, 一直受到各领域研究者和用户的重视。但是在实际应用中 TDR 技术也存在一些限制和弊端, 例如, 在含盐分较多的土壤中 TDR 信号会发生严重的衰减, 导致获取的波形不清晰, 甚至无法获取反射波<sup>[1-3]</sup>; 在有机质质量分数较高的土壤上 TDR 技术测定含水率需要重新校正含水率和介电常数的关系以提高测定精度<sup>[4-5]</sup>; TDR 技术测定红壤含水率的结果明显偏低<sup>[5-7]</sup>。这些实际应用中存在的问题限制了 TDR 技术在农业生产中的使用和推广。

近年来, 一种新型的电磁技术——时域传输 (time domain transmission, 简称 TDT) 技术在介质水分测定方面受到极大关注。和 TDR 技术一样, TDT 技术也是基于土壤固液气三相介电常数的差异性来准确测定土壤含水

率的。与 TDR 技术不同的是, TDT 技术中电磁波在介质中是单程传播的, 检测的是电磁波单向传输后的信号, 不要求获取反射后的信号<sup>[8-9]</sup>。因此, 以 TDT 原理研制出的水分测定仪工作频率较低, 一般只有几百兆赫兹<sup>[10]</sup>。仪器的线路设计比较简单, 操作方便<sup>[10]</sup>。成本大概也只有 TDR 仪器的五分之一到十分之一。

目前, 对基于 TDT 原理的水分测试仪的研制和研究发展很快。加拿大 E.S.I 公司 (Environmental Sensors Inc.) 设计开发了两种基于 TDT 原理的水分测试仪。一种是集土壤含水率和阻力测定为一体的复合式 Terra.Point 测定仪, 仪器的水分传感部分是一个不锈钢芯, 传输线呈螺旋状埋设于不锈钢表面的凹槽内, 这种螺旋排列方式可以有效延长信号传输路径, 同时达到缩短传感器长度的目的<sup>[11-13]</sup>。另外一种 Gro.Point TDT 水分测试仪, 它的传感部分是呈 U 型的裸露的不锈钢线圈, 主机包裹在树脂块中置于线圈顶端, 测定含水率时要将仪器埋入土壤<sup>[10, 14]</sup>。类似的仪器还有美国 Acclima 公司开发生产的数字 TDT 湿度传感器<sup>[15]</sup>。新西兰生产的 AQUAFLEX TDT 带状水分测定仪, 区别于其他 TDT 仪器的是这种测定仪的探头分布于长的柔性软管内, 可以使探头灵活地以各种形状埋于植物的根区内, 这种带状设计可以方便实现大面积土壤水分的测定和监测<sup>[16]</sup>。

不同设计特点的 TDT 仪器测定土壤含水率的性能已有研究。Young 等研究指出 Terra.Point 测定仪室内测定砂壤土含水率的误差是  $0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , 田间测试结果表明 Terra.Point 测定仪的测定结果和 TDR 的测定结果很相近<sup>[13]</sup>。Acclima 公司研究指出数字 TDT 湿度传感器计算

收稿日期: 2008-12-08 修订日期: 2009-07-20

基金项目: 国家科技部“863”项目 (2006AA10Z264)

作者简介: 郑茹梅 (1982—), 女, 天津人, 博士生, 主要从事农业水土资源利用研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: zhengrumei2004@163.com

\*通讯作者: 李子忠 (1972—), 男, 山东人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土资源利用和土壤物理学研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: zizhong@cau.edu.cn

的含水率和称质量测得的含水率吻合很好， $R^2$  均大于 0.98<sup>[15]</sup>。Sun 和 Young 表明 Gro.Point TDT 水分测试仪经砂壤土校正得到的公式用来估算砂土和黏土的含水率误差小于  $0.02\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ <sup>[10]</sup>。但是，TDT 仪器在不同类型土壤上测定含水率情况尚无系统的研究，尤其是在 TDR 技术应用受限的盐土，高有机质质量分数的土壤和红壤上 TDT 仪器的应用情况还不清楚。

因此，本文运用自行研制的一种基于 TDT 原理的水分测定仪器，通过室内土柱试验研究该仪器在一般农业土壤类型上测定土壤含水率的性能，并探究这种 TDT 仪

器在盐土，高有机质质量分数的土壤和红壤上测定含水率的适用性，为时域传输技术的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验土样

试验所用土壤样品共有 6 种，土壤类型包括风沙土、褐土、潮土、盐土、栗钙土和红壤。采集土壤样品后进行风干，去除杂物，过 2 mm 筛后保存备用。取样地点、土地利用方式和基本土壤性质见表 1。

表 1 供试土壤类型及其基本性质  
Table 1 Types and properties of tested soils

土壤类型	质地	取样地点	土地利用方式	颗粒组成/%			有机质质量分数 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	电导率 ( $EC$ ) ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )	pH 值
				2~0.02 mm	<0.02~0.002 mm	<0.002 mm			
风沙土	砂土	内蒙古腾格里沙漠	沙地	100	0	0	0.90	0.13	8.92
褐土	砂壤土	河北省廊坊市	农田	81	9	10	4.91	0.08	8.77
潮土	壤黏土	河北省邯郸市	农田	33	31	37	13.90	0.14	8.49
盐土	粉壤土	天津市塘沽区	荒地	37	51	12	4.52	11.12	8.19
栗钙土	壤黏土	河北省丰宁县	河滩	50	23	27	67.95	0.30	8.17
红壤	黏土	云南农业大学	林地	21	43	36	8.20	0.05	6.34

1.2 TDT 仪器工作原理

时域传输水分测试仪中电磁波的发射端和接受端位于传输线的两端，形成一个闭路。通过测定电磁波单程传播到接受端时接收信号和初始发射信号之间的相位差大小来反映土壤三相体系的介电性质，进而准确反映土壤含水率。在传输线（探针）长度固定，脉冲的频率一定的情况下，相位差的大小取决于探针周围介质的介电常数，对于土壤来说，就取决于土壤的水分。土壤水分越高，其介电常数越大，电磁波传播越慢，相位延迟越大，输出的电压就越大。

TDT 水分测试仪利用的是周期性的方形脉冲波，电磁波发射器发射方波，将发射波和接收波经相位比较器进行鉴相处理产生相位差信号，相位差信号经转换器处理产生相对应的电压输出。电路设计的集成板置于探头内部，外面螺旋等距缠绕铜箔片作为传输线，整个电路和传感探头集成一体，呈直径 3 cm，长 20 cm 的棒状（图 1）。探头表面涂有超薄绝缘材料。仪器工作电源由 6 V 直流电源提供，工作温度范围在 0~65℃，TDT 探头通过标准电缆连接到万用表，输出 0~5 V 的电压信号。

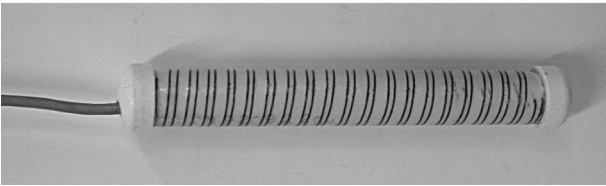


图 1 时域传输水分测试仪  
Fig.1 Time domain transmission(TDT) sensor for measuring soil water content

1.3 试验方法

将风干过筛后的土样在 105℃ 下烘干 24 h，在干燥器

中冷却至室温备用。试验所用土柱为有机玻璃柱，内径 11 cm，高 33 cm，土柱下端设有对称的两个进水孔。根据 TDT 探头长度（20 cm）确定拟填装的土壤高度也为 20 cm，结合土柱内径，扣除探头所占的部分，可计算出需要填装土壤的体积。然后，不同质地的土壤按照容重计算出需要填装的土样质量，风沙土、褐土、潮土、盐土、栗钙土和红壤的容重分别为 1.60、1.68、1.29、1.33、1.17 和  $1.07\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

装土前先将 TDT 探头垂直放置于有机玻璃土柱中固定，然后平均分 5 次将称量好的土样装入土柱，每次填装高度为 4 cm，填装要尽可能均匀。填装好土样，用塑料薄膜密封土柱上端。利用马氏瓶自下而上往土柱内加去离子水，在不断加水过程中每间隔约  $0.05\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  土壤体积含水率停止供水一次，平衡后通过万用表读取 TDT 输出的电压值，重复 5 次取平均值。用称重法计算出土壤实际的平均体积含水率 ( $\theta_v$ )。

1.4 数据处理

用 SPSS 软件进行统计分析，回归方程的拟合优度用估计标准误差 SEE（standard error of estimate）衡量：

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

(1)

式中： $\theta_v$ ——称重法测定的土壤体积含水率， $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ；  
 $\hat{\theta}_v$ ——回归方程估计的土壤体积含水率， $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ；  
 $n$ ——观测点数目。

2 结果与分析

2.1 风沙土、褐土和潮土上体积含水率和 TDT 输出电压值的关系

不同类型的土壤上测得的土壤体积含水率与输出电压值之间的关系均呈显著的线性关系(图 2),这一规律和先前一些研究者的发现相吻合。Young 等用 Terra.Point 测试仪在砂壤土上发现在体积含水率  $0.16 \sim 0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  范围内体积含水率和输出电压值存在线性关系,用这一关系计算含水率的误差是  $0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ [13]。Sun 和 Young 用 Gro.point TDT 在砂土上测试得到 TDT 电流输出与体积含水率间也存在着线形关系,这个线形关系从体积含水率  $0.08 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  持续到饱和含水率[10]。Topp 等在粉壤土、砂壤土和黏土土柱的相同位置同时用 TDR 和 TDT 技术测定,发现 TDR 测定的介电常数平方根和 TDT 输出的电压信号之间存在着线性关系[11-12]。目前,运用 TDT 技术研制出的土壤水分测试仪输出信号多是电压或是电流,准确建立输出信号和土壤含水率之间的关系对 TDT 仪器的应用十分重要。先前研究者的发现和我们的试验结果都说明线性关系可以在 TDT 仪器校正一般农业土壤含水率时使用。

对于风沙土、褐土和潮土三种类型的土壤,体积含水率和 TDT 输出电压值之间线性关系的差异不显著,可以通过校正获得一个统一的线性关系式(图 2)。拟合得到的线性关系  $R^2$  是 0.97,估计标准误差是  $0.026 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,回归方程拟合优度较好,可以满足土壤含水率测定的精度要求。

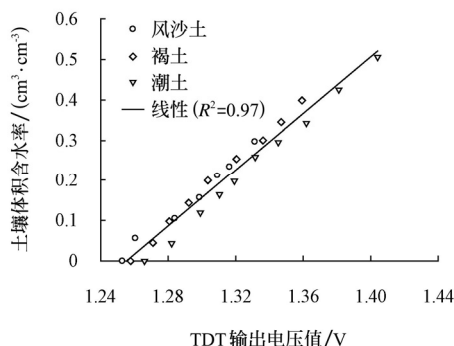


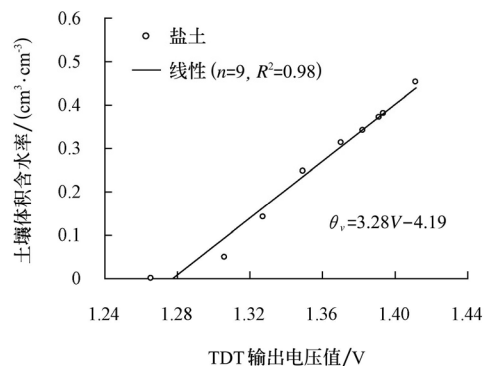
图2 风沙土、褐土和潮土土壤体积含水率和 TDT 输出电压值的关系

Fig.2 Relationship between soil volumetric water content and TDT output voltage for aeolian soils, cinnamon soils and fluvo-aquic soils

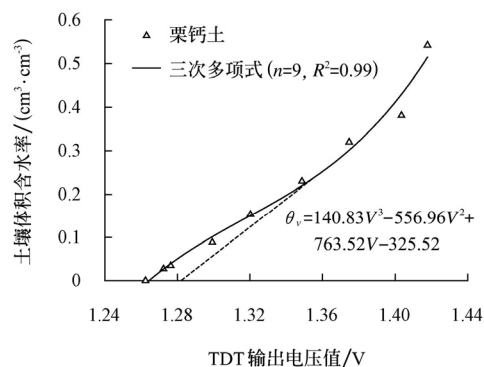
## 2.2 盐土、栗钙土和红壤上体积含水率和 TDT 输出电压值的关系

在含盐量为  $59.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的供试盐土上测定得体积含水率与 TDT 输出的电压值之间仍可保持线性关系,决定系数  $R^2$  是 0.98,估计标准误差是  $0.025 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,回归方程拟合优度较好(图 3a)。但是,从图 3a 中也可看出,在土壤体积含水率为  $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  到  $0.45 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  这一范围内,线性关系显著;当土壤体积含水率小于  $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  时这种线性拟合导致的偏差较大。在风沙土、褐土和潮土的测定结果中也存在同样的问题,在含水率较低时(含水率小于  $0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )拟合产生偏差较大。Sun 和 Young 研究中也发现,在非常低的含水率范围内,即使在砂质土中含水率和 TDT 输出值之间的线性

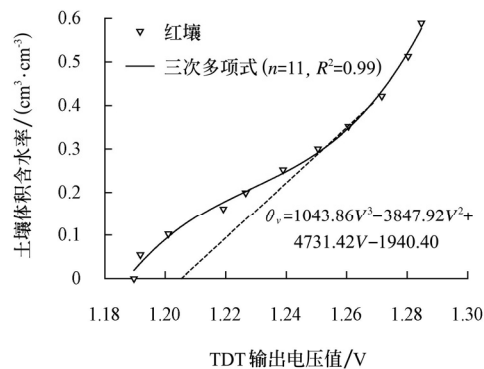
关系也不显著[10]。White 等发现,当土壤和石墨混合物的湿度水平小于  $0.05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  时,在介电常数与土壤体积含水率之间存在着很明显的非线性偏差,其中原因与束缚水的比例较高有关,因为束缚水的介电常数小于固相介电常数[17]。



a. 盐土



b. 栗钙土



c. 红壤

图3 盐土、栗钙土和红壤土壤体积含水率和 TDT 输出电压值的关系

Fig.3 Relationship between soil volumetric water content and TDT output voltage for saline soils, chestnut soils and red soils

栗钙土体积含水率和 TDT 输出的电压值之间呈非线性关系。当含水率超过  $0.30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  这一界限,曲线的斜率增大,即单位含水率的变化引起 TDT 输出电压值的变化减小。如果用线性关系拟合体积含水率和 TDT 输出电压值之间的关系偏差较大,估计标准误差是  $0.035 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。因此,尝试用多项式拟合,得到一个三次多项式(图 3b), $R^2$  是 0.99,估计标准误差是

$0.028 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。巨兆强等运用 TDR 测定栗钙土含水率, 选用 Topp 公式、Hook-Livingston 公式以及三相介电混合模型计算含水率的均方根误差 (RMSE) 分别为 0.066, 0.050 和  $0.045 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3[7]}$ 。和 TDR 测定结果相比, 校正后的 TDT 可以用于测定栗钙土等有机质质量分数较高的土壤含水率。

在红壤土上, 体积含水率和 TDT 输出的电压值之间关系也可以用一个三次多项式来拟合(图 3c),  $R^2$  是 0.99, 估计标准误差是  $0.015 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。和其他土壤相比较, 在红壤含水率变化的范围内, TDT 输出电压值的变化区间较小, 从 1.18 V 变化至 1.30 V。即同一含水率水平下, 红壤上 TDT 输出的电压值要明显小于其他 5 种土壤。这可能与红壤特殊的物理化学性质有关。Bridge 等研究发现红壤的体积含水率和介电常数的拟合曲线位于 Topp 曲线下方, 用 Topp 曲线计算含水率会产生很大误差<sup>[18]</sup>。Zhang 等(1997)研究发现 Trase 和 FOM/mts 探头在中国南方第四纪红黏土发育的普通红壤上测定土壤体积含水率比烘干法的测定结果小, 两种仪器测红壤含水率的绝对偏差分别在  $0.0112 \sim 0.0591 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.0302 \sim 0.0921 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3[6]}$ 。巨兆强等运用 Tectronix1502C 也得到相同的结果, 测定红壤含水率误差大于  $0.067 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3[7]}$ 。和 TDR 测定结果相比, 提前校正的 TDT 可以准确测定红壤含水率。

### 3 讨 论

#### 3.1 盐分对 TDT 测定含水率的影响

和一般农业土壤上获得的含水率校正关系相比, 盐土体积含水率和 TDT 输出电压值之间线性关系的斜率较小, 说明在同一含水率水平下, TDT 仪器在盐土上输出的电压值较大。盐土中土壤电导率较大, 电导率导致的介电损失影响了电磁波在土壤中传播的时间。电导率增大, 电磁波在土壤中传播的时间延长, 导致检测的相位差增大, 所以表现出 TDT 输出的电压值较大。

#### 3.2 影响 TDT 测定栗钙土含水率的因素

当含水率小于  $0.30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 同一含水率水平下, 实测的 TDT 电压值较小(图 3b)。这可能与栗钙土中土壤腐殖质大量存在有关, 腐物质具有巨大的比表面积和亲水基团, 吸水量是黏土矿物的几倍, 这就使得栗钙土和水分接触后会形成大量的束缚水。由于束缚水的介电常数小于自由水, 它的存在会影响到介质的介电性质。尤其在低含水率阶段, 束缚水所占比例较大, 作用尤为明显。这种影响在 TDR 研究中已有发现, 巨兆强等运用 TDR 测定高有机质土壤的含水率, 发现有机质的质量分数会对 TDR 测定产生一定影响, 计算含水率会低于实测值<sup>[7]</sup>。这种低估与 Schaap 等的结论相吻合<sup>[19]</sup>。另外, 栗钙土容重较小这一特点可能也是造成上述现象的原因, 容重反映了土壤孔隙度, 孔隙体积大, 对土壤三相体积整体的介电常数产生影响。这种观点与 Roth 相同, 他认为有机质土或是材料的介电常数明显低于相同水分的矿物质土壤是容重的影响<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 影响 TDT 测定红壤含水率的因素

当含水率小于  $0.30 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 同一含水率水平下, 实测的 TDT 电压值较小(图 3c)。这种影响在 TDR 测定红壤含水率的研究中也有发现, Dirksen 和 Dasberg 解释其原因是红壤中粉、黏粒所占质量分数远远大于其他土壤, 它们能束缚较多的土壤水, 使其损失双极性, 导致土壤介电常数值减小到 30~50 而不是自由水的 80<sup>[5]</sup>。巨兆强等认为红壤中 Fe、Al 所占质量分数高, 会改变土壤颗粒的介电特性, 从而影响 TDR 测定<sup>[7]</sup>。Zhang 等认为 TDR 测定红壤含水率误差是由于土壤的特殊化学组成、电化学特性或者是一些机械特性发生变化, 这些特性导致了电磁波衰减<sup>[6]</sup>。我们分析认为造成 TDT 仪器测定红壤含水率校正关系呈现非线性的原因一方面是红壤黏粒和铁铝氧化物所占质量分数大, 导致土壤胶体比表面积大, 形成较多的束缚水。另一方面可能是红壤中铁铝物质大量存在, 导致土壤的电化学组成发生变化, 从而影响到电磁波在红壤介质中的传播。另外, 铁铝氧化物的存在可能会增加土壤固相的介电常数。因此, 以上因素综合影响了 TDT 在红壤含水率测定上的精度。

### 4 结 论

1) 在风沙土、褐土和潮土 3 种类型的土壤上, 土壤体积含水率和所研制的 TDT 仪器输出电压值之间呈显著的线性关系, 且可以用统一的线性关系进行校正, 校正关系式的估计标准误差是  $0.026 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , 可以满足土壤含水率测定的精度要求。

2) 在盐土 (EC 值为  $11.12 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ , 含盐量为  $59.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 上, 土壤体积含水率和 TDT 输出电压值之间的线性关系仍然存在, 校正关系式估计标准误差是  $0.025 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由于土壤电导率导致的介电损失影响了电磁波在土壤中的传播时间, 所以和风沙土、褐土和潮土 3 种类型的土壤上获得的含水率校正关系相比, 盐土上含水率校正关系的斜率减小。和 TDR 技术相比, TDT 仪器在含盐土壤含水率的测定上具有一定的优势, 经过提前校正后可以被用于盐土含水率的测定。

3) 在栗钙土和红壤土上, 土壤体积含水率和 TDT 输出的电压值之间的关系可以用三次多项式表示, 校正关系式估计标准误差是分别是  $0.028 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.015 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。栗钙土有机质质量分数高和低容重的特点可能是导致校正曲线呈现非线性的原因。红壤中黏粒和铁铝氧化物大量存在可能是导致校正曲线呈现非线性的原因。和 TDR 技术相比, TDT 仪器经过提前校正可被用于测定栗钙土和红壤含水率。

#### [参 考 文 献]

- [1] 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): 483—490.  
Cao Qiaohong, Gong Yuanshi. Effect of soil bulk electrical conductivity on time domain reflectometry measurement of soil water content[J]. Acta pedologica sinica, 2001, 38(4): 483—490. (in Chinese with English abstract)

- [2] Persson M, Bendz D, Flyhammar, P. Time-domain reflectometry probe for water content and electrical conductivity measurements in saline porous media[J]. *Vadose Zone J*, 2004, 3: 1146—1151.
- [3] Sun Z J, Young G D, McFarlane R A, et al. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil[J]. *Can J Soil Sci*, 2000, 80(1): 13—22.
- [4] Kim D J, Choi S I, Ryszard O, et al. Determination of moisture content in a deformable soil using time domain reflectometry (TDR)[J]. *Eur J Soil Sci*, 2000, 51(1): 119—127.
- [5] Dirksen C, Dasberg S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57(3): 660—667.
- [6] Zhang B, Gao G Z, Zhang T L, et al. Determination of water content in clayey red soil using techniques based on measurement of dielectric constant[J]. *Pedosphere*, 1997, 7(2): 149—154.
- [7] 巨兆强. 中国几种典型土壤介电常数及其与含水量的关系 [D]. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2005.  
Ju Zhaoqiang. Dielectric Permittivity and its Relationship with Water Content for Several Soils in China[D]. Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [8] Blonquist J M Jr, Jones S B, Robinson D A. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics[J]. *J Hydrology*, 2005, 314(1/4): 235—245.
- [9] Blonquist J M Jr, Jones S B, Robinson D A. Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1/2): 153—165.
- [10] Sun Z J, Young G D. A cost effective soil moisture instrument based on time-domain transmission measurement[R]. Evanston: Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, 2001.
- [11] Topp G C, Lapen D R, Young G D, et al. Evaluation of shaft-mounted TDT readings in disturbed and undisturbed media[R]. Evanston: Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, 2001.
- [12] Topp G C, Lapen D R, Edwards M J, et al. Laboratory calibration, in-field validation and use of a soil penetrometer measuring cone resistance and water content[J]. *Vadose Zone J*, 2003, 2(4): 633—641.
- [13] Young G D, Adams B A, Topp G C. A portable data collection system for simultaneous cone penetrometer force and volumetric soil water content measurements[J]. *Can J Soil Science*, 2000, 80(1): 23—31.
- [14] Burke E J, Harlow R C, Ferre T P A. Measuring the dielectric permittivity of a plant canopy and its response to changes in plant water status: An application of Impulse Time Domain Transmission[J]. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 123—133.
- [15] Adhikari D, Gooraho D. Response of Acclima Digital TDT probe to soil moisture and electrical conductivity[EB/OL]. <http://www.acclima.com/Products/Sensor.htm>, 2008-10-09.
- [16] Soil Moisture Sensors[EB/OL]. [http://www.adcon.at/english/produkte\\_sensoren\\_bodenfeuchte\\_aquaflux\\_en.html](http://www.adcon.at/english/produkte_sensoren_bodenfeuchte_aquaflux_en.html), 2008-10-09.
- [17] White I, Zegelin S J, Topp G C, et al. Effect of bulk electrical conductivity on TDR measurement of water content in porous media[R]. Evanston: Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining States Department of Interior Bureau of Mines, 1994.
- [18] Bridge B J, Sabburg J, Habash K O, et al. The dielectric behaviour of clay soils and its application to time domain reflectometry[J]. *Aust J Soil Res*, 1996, 34(4): 825—835.
- [19] Schaap M G, de Lange L, Heimovaara T J. TDR calibration of organic forest floor media[J]. *Soil Tech*, 1996, 11(2): 205—217.
- [20] Roth K, Shulin R, Flühler 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.

## Measurement of soil water content for different soil types by using time domain transmission technology

Zheng Rumei, Li Zizhong<sup>\*</sup>, Gong Yuanshi

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** According to the disadvantages of time domain reflectometry (TDR) on measuring water content for saline soils, high organic matter soils and red soils, a laboratory experiment was conducted to study the applicability of time

domain transmission (TDT) instrument for measuring soil water content for different soil types. The results showed that there was a good linear relationship between soil volumetric water content and TDT voltage output for aeolian soils, cinnamon soils and fluvo-aquic soils. An uniform calibration relationship could be established for above soil types with a standard error of estimate of  $0.026 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ; The linear relationship between soil volumetric water content and TDT voltage output was still hold for saline soils ( $EC$  value of  $11.12 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ , salinity content of  $59.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) with a standard error of estimate of  $0.025 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ; For chestnut soils (organic matter content of  $67.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and red soils, the relationships between soil volumetric water contents and TDT voltage outputs were the cubic polynomials, with the standard errors of estimate of  $0.028 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  and  $0.015 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , respectively. Therefore, TDT instrument can be used to measure soil water content for many types of soils, and presents more superior performance for saline soils, high organic matter soils and red soils comparing with TDR.

**Key words:** soils, soil testing, water content, textures, time domain transmission

---

## 关于我刊取消简报形式及选择性刊登综述性论文的声明

经研究决定,《农业工程学报》不再刊登简报形式的论文,对于之前决定以简报形式录用的论文,编辑部将集中讨论,视论文研究水平和成果价值决定论文发表或退稿。

我刊主要刊登农业工程领域具有创新性研究成果的论文,对一般性综述论文,即对问题分析不够深入、对研究没有重大指导价值的综述类论文将不予刊登,特此敬告。

本刊编辑部

2009 年 8 月