

TDR 在测量农田土壤水分中的室内标定

李道西^{1,2}, 彭世彰², 丁加丽², 徐俊增², 郁进元³

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450008; 2. 河海大学科学研究院节水研究所, 江苏 南京 210098;
3. 昆山市水利技术推广站, 江苏 苏州 215300)

摘 要: 给出了一种较简便、准确的时域反射仪(TDR)室内标定方法, 该方法工作量小, 克服了田间土壤水分空间变异的影响, 更适用于粘壤土质的 TDR 标定。通过对昆山地区粘壤土质的实例标定发现, TDR 测量值较烘干法明显偏低, 绝对偏差范围 $0.02 \sim 0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 相对偏差随着土壤含水量的减小有增加趋势。但 TDR 的测量值与真实值之间有较高的相关性 ($R^2=0.9837$, $P<0.001$), 可以用一个简单的线性函数进行校正, 校正后的 TDR 测量值中将有 98.4% 的值接近土壤含水量真实值, 说明该校正公式可以作为昆山地区进行 TDR 校正的参考。

关键词: TDR; 烘干法; 土壤含水量; 标定

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)01-0249-04

农田土壤水分的动态变化直接反映作物的水分供需状况, 快速、准确地测定土壤含水量对农田水分管理具有十分重要的意义。目前, 测定土壤含水量的方法主要有烘干法、中子仪法、 γ 射线透射法、电磁波法、电阻法、电容法、光电法等, 各种方法都有不同程度的应用。然而, 随着人们对试验结果和试验精度要求的不断提高, 在许多试验研究中, 需定点、原位、精确、连续地监测土壤水分动态。TDR(Time domain reflectometry, 时域反射仪)土壤水分测量系统由于具有方便、快速、精确、不扰动土壤等优点, 因此, 被广泛应用于现代农田土壤水分的监测。Topp^[1]最早发展 TDR 法, 认为当温度在 $10 \sim 36^\circ\text{C}$, 实际含水量在 $0 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 变化时, 此法不受土壤质地、容重、温度等物理因素的影响。当要求精度较高时, TDR 的测量值受质地、容重以至温度等物理因素的影响。另外, 在测量高有机碳含量土壤、高 2:1 型粘土矿物含量土壤、容重特别高或特别低的土壤时, 由于输入电磁波的能量耗散较大, 导致反射讯息模糊, 容易造成数据失真。因此, 在使用 TDR 测量特定土壤的含水量之前, 预先标定其与实际土壤含水量的关系是很必要的^[2]。通过标定, 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, 即避免用通用标定曲线的误差估计其实际的误差。

土壤水分测量仪器(如 TDR)的标定工作直接影响仪器的测量精度。较普遍的标定方法是将土钻

和 TDR 平行插入土壤, 同时测定含水量后进行比较^[3,4]。事实上, 这种方法存在一些缺陷: ① 田间土壤水分无论是水平方向还是垂直方向上均存在一定的空间变异性, 即便短距离取样也存在一定的误差; ② 为了使标定曲线能适应不同的水分范围, 需要进行灌水处理, 但田间灌水很难均匀, 容易造成取土点与 TDR 探针处的水分差异, 尤其是粘壤土, 灌水后下渗困难, 水分梯度及灌水量很难把握; ③ TDR 的探针有两种埋设方式: 竖埋式和横埋式, 若竖埋, 测得的土壤水分是一定深度平均值, 与土钻平均深度处取单点的土壤含水量的可比性也存在误差。若横埋, 对土壤的扰动较大, 与土钻取土烘干法的可比性更差^[5]。为此, 笔者提出了一种克服以上缺点的较简便、准确的 TDR 室内标定方法, 并比较了 TDR 与烘干法的测定结果, 结果令人满意, 对 TDR 的田间标定也具有一定指导意义。

1 测量原理

土壤水分对土壤介电特性的影响很大。自然水的介电常数(K_a)为 $80.36(20^\circ\text{C})$, 比空气($K_a=1$)或土壤($K_a=3 \sim 5$)的介电常数大得多, 土壤基质中土壤水分的介电常数处于绝对支配地位。当获得土壤介电常数和土壤体积含水量(θ_v)之间的经验关系后, 便可以很容易地由 K_a 推算出 θ_v 。TDR(时域反射仪)正是基于以上的思想, 根据电磁波在介质中传播频率计算出土壤的介电常数 K_a , 从而利用经验公

收稿日期: 2006-10-31
基金项目: 国家自然科学基金(50479022); 河海大学院士学科建设基金(2084/4021E7)
作者简介: 李道西(1978—), 男, 湖北鄂州人, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究。E-mail: ldx97042@163.com.

式得到土壤体积含水量 (θ_v)。 K_a 在电磁波频率为 1 MHz~1 GHz 时,与电磁波在电极(长度 L)中往复的传播速度 (V)呈如下关系:

$$K_a = (c/V)^2 = (ct/2L)^2 \quad (1)$$

式中: c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s; t 为电磁波的传达时间(s)。电磁波在各点的反射很明显,可以很准确地计测出 t ,从而可用(1)式计算出 K_a 。

Topp 等用 TDR 测定了电磁波的传播时间,并得出该传播时间与大部分土壤中与土壤体积含水量 (θ_v)之间关系的经验公式^[1]:

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad \theta_v \leq 0.6 \quad (2)$$

但该经验关系只适用于当 $K_a \rightarrow 1$ 或 $K_a \rightarrow 80.36$ (20℃)时,且主要适用于砂性土壤,对有机碳含量多或重粘土则需要重新标定。

具体测量时,是由同轴电缆末端波导棒(3 根不锈钢棒)插入土壤中来操作的。如果要测定土壤中某一深度的含水量,则须将波导棒事先水平地埋入这一深度;如果要测定土壤某一深度的平均含水量,只须将测定深度相同长度的 3 根波导棒平行地垂直插入地下即可。与电缆相连的主机可随时显示出 256 个测点数据,并可连续记录和储存数据。

2 材料与方法

本试验在江苏昆山市水利技术排灌试验基地 (31°15' 15"N, 120°57' 43"E)内进行,试区耕层土壤为重壤土,0~18 cm 土层土壤有机碳 30.3 g/kg,全氮 1.79 g/kg,全磷 1.4 g/kg,全钾 20.86 g/kg, pH 值 7.4。

由于该地区土壤较粘,在使用 TDR 前需要进行标定。一般认为,传统的烘干法测得的土壤水分值是可信的,可以作为其它各种土壤含水量测量方法的校正标准,因此,本试验在标定中用烘干法测得的土壤水分值作为标准值,与同步的 TDR 测定值进行对比分析。试验使用的是 Trase-TDR 系统,探针长度为 20 cm,探针的形状为三棒式,探针分别用导线与 TDR 主机相连,在主机屏幕上直接读取土壤含水量。其具体标定步骤如下:

1) 从野外采回约 20 kg 土样(若试验精度要求较高,则需分层取土),除去根系、杂草、砾石等,风干,过 2 mm 孔筛。

2) 按给定容重(如 1.10 g/cm³、1.20 g/cm³、1.30 g/cm³)将风干过筛后的土样分层(每层不超过

5 cm)均匀地夯入至柱形塑料桶(有底,直径约 20 cm、高约 25 cm)中,直至桶顶。桶的个数根据设定的重复数来定,桶的大小要适中,以减轻夯土工作量。

3) 将 TDR 探针垂直插入夯好的土柱,测定给定容重下风干土的含水量,然后在 TDR 探针没有插过的地方用环刀(100 cm³)取土,立即放入烘箱(110℃,24 h),测定其含水量,至此,第 1 组含水量较低的 TDR 和烘干法对比测量完成(试验过程中还可设置 2~3 个重复)。

4) 为了充分利用风干过筛土,将第 1 组测量完的土壤倒入塑料盆(直径 40 cm)中,加入少量风干土(环刀量),并按增长约 5%的水分梯度缓慢加水,充分搅拌和匀(人工或搅拌机)。例如,风干土含水量为 0.1 cm³/cm³,则加水配制成土壤含水量约 0.15 cm³/cm³ 即可。

5) 将加水搅拌和匀的土样重新分层夯入柱形塑料桶中,用塑料薄膜密封上桶口,放在室内阴凉处静置 2~4 h,然后重复第 3 步即可得到第 2 组含水量增加约 0.05 cm³/cm³ 的 TDR 和烘干法对比测量值。

6) 反复重复第 4 步和第 5 步,直至加水后土壤含水量增加到约 0.60 cm³/cm³ 为止,于是,可得到从凋萎湿度到饱和含水量一系列按约 5%梯度增加的 TDR 和烘干法实测土壤含水量数据。

不难看出,上述标定方法需要的风干过筛土可重复利用,减小了过筛土的工作量;每次的加水量也较好控制,水分梯度范围较广;另外,充分搅拌后的土壤含水量可认为是一致的,不存在土壤水分空间变异以及 TDR 探针竖埋和横埋等引起的误差问题。

3 实例分析与结果

通过上述标定方法,可得到如图 1 所示的结果。分析发现,TDR 与烘干法测量结果的变化趋势是完全一致的。尽管 TDR 在粘壤质土中的测量值偏低,但 TDR 的测量值与真实值之间有较高的相关性($R^2=0.9837$, $P<0.001$),可以用一个简单的线形函数进行校正:

$$y = 0.9896x + 5.3035 \quad (R^2=0.9837, P<0.001) \quad (3)$$

式中, y 为土壤体积含水量(cm³/cm³); x 为 TDR 测量值。相关系数 R^2 说明,通过(3)式校正后的 TDR 测量值中将有 98.4%的值接近土壤含水量真实值。

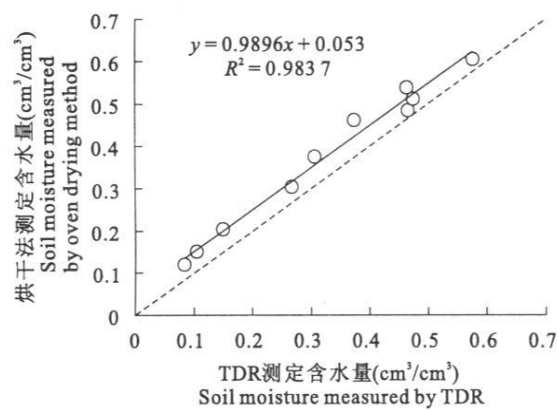


图 1 TDR 标定曲线

Fig. 1 Calibration curve of TDR

表 1 给出了 10 对 TDR 和烘干法测量的土壤含水量。可以看出,在 10 次不同土壤含水量梯度测量中,TDR 法的土壤含水量测量值较烘干法均显著偏小,绝对偏差范围 0.02~0.09 cm³/cm³,平均绝对偏差 0.05 cm³/cm³,相对偏差范围 4.1%~44%,平均相对偏差 22.1%。而且,TDR 的相对偏差随着土壤含水量的减小有增加趋势。由此看来,TDR 测量粘壤质土壤含水量的偏差还是较大的,使用前的

标定也是非常必要的。

4 结 论

虽然 TDR 在出厂时已经进行了校正,但在应用中还需要根据实际情况做进一步的校正,特别是粘壤土地区。本文给出了一种较简便、准确的 TDR 标定方法。该方法较传统的室内或田间标定方法有以下优点:① 风干过筛土可重复利用,工作量较小;② 加水易控制,水分梯度范围较广;③ 土壤充分搅拌、均匀夯实,保证了土壤水分的均匀性,不存在 TDR 探针横埋与竖插的测量差异问题,克服了田间标定时土壤水分空间变异性的缺点;④ 直接环刀取样,避免了对土壤的扰动;⑤ 更适用于水分较难下渗的粘壤土地区的 TDR 标定。

通过对昆山地区粘壤土的 TDR 标定发现,TDR 测量值较烘干法明显偏小,绝对偏差范围 0.02~0.09 cm³/cm³,平均绝对偏差 0.05 cm³/cm³,相对偏差随着土壤含水量的减小有增加趋势。但 TDR 的测量值与真实值之间有较高的相关性,可以用一个简单的线形函数进行校正,校正后的 TDR 测量值中将有 98.4%的值接近土壤含水量真实值。

表 1 TDR 法与烘干法测量结果对照

Table 1 Comparison of measured data of TDR and oven drying method(ODM)

项目 Items	处理 Treatments									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TDR 测量值(cm ³ /cm ³) Measured values by TDR	8.3	10.4	14.9	26.7	30.6	37.3	46.5	47.4	46.3	57.6
烘干法测量值(cm ³ /cm ³) Measured values by ODM	11.97	15.14	20.44	30.46	37.52	46.11	48.43	51.15	53.88	60.54
绝对偏差(cm ³ /cm ³) Absolute deviation	3.67	4.74	5.54	3.76	6.92	8.81	1.93	3.75	7.58	2.94
相对偏差(%) Relative deviation	44.27	45.61	37.20	14.09	22.63	23.63	4.15	7.91	16.37	5.10

参 考 文 献:

[1] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content; measurement in coaxial transmission lines[J]. Water Resourecs Research, 1980, 16:574—582.

[2] 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.

[3] 龚元石,李春友,李子忠. 农田土壤水分测定三种方法的比较[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(3):53—58.

[4] 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.

[5] 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, (2):242—244.

Laboratory calibration on measurement of field soil moisture using TDR

LI Dao-xi^{1,2}, PENG Shi-zhang², DING Jia-li², XU Jun-zeng², YU Jin-yuan³

(1. North China College of Hydraulic and Hydropower, Zhengzhou, He'nan 450008, China;

2. Science Research Institute of Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Kunshan Water Conservancy Technique Extension Station, Suzhou, Jiangsu 215300, China)

Abstract: A simple and exact method for laboratory calibration of TDR (Time domain reflectometry) is introduced. It has many advantages, such as less work intensity, hardly any spatial heterogeneity of soil moisture and more suitable for calibration on clay loam soil, compared with traditional calibration methods. Through the calibration for clay loam soil from Kunshan region, the results show that the measured values of TDR are obviously lower than that of the oven drying method(ODM), with a range of absolute deviation from 1.9%~8.8% (average 5.0%), and its relative deviation increases with the decrease of soil moisture. But, there is a high correlation between the measured value of soil moisture using TDR and ODM ($R^2=0.9837$, $P<0.001$), which can be described by a simple linear function. The prediction equation can be used in Kunshan region as reference.

Key words: TDR; oven drying method; soil moisture; laboratory calibration

(上接第 248 页)

Analysis on annual soil moisture change and its effect on agricultural production during winter wheat growth period

GUO Hai-ying^{1,4}, ZHAO Jian-ping², HUANG Bin⁴, WAN Xin³, YANG Xing-guo¹

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, CMA,

Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Department of Agronomy, Longdong College, Qingyang, Gansu 745000, China;

3. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou, Gansu 730020, China;

4. Xifeng Agro-meteorological Experiment Station, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: Based on analyzing the amount of water consumption of winter wheat field of the typical incomplete Yuan “DongzhiYuan” of loess plateau, the content of the soil moisture in different periods and its relation with precipitation, amount of water consumption and wheat yield, discovery was made of the characteristics of change of wheat field soil moisture and its effect on agricultural production in the Yuan area of the loess plateau in east Gansu Province. The result showed that the source of water consumption is mainly from natural precipitation. When there is sufficient precipitation, the water consumption is great and the yield is high, and the annual soil moisture can be supplemented effectively. The highest yield may not be obtained in the year with most precipitation, but the lowest yield must be in the year with least precipitation. The plentiful precipitation in the previous year and sufficient soil moisture storage can effectively prevent spring drought of the coming year, which is the foundation for a bumper harvest of winter wheat. Likewise, even when soil moisture is insufficient, so long as precipitation is sufficient in the right time in spring, a good harvest can also be made. But if the drought happens continuously in the previous autumn and the coming spring, it must cause a bad drop of yield.

Key words: wheat field; moisture change; yield of wheat