

# TDR 法测定土壤含水量的标定研究\*

周凌云 陈志雄 李卫民

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 用波兰 EF-FOM/mts 型 TDR 水份测定仪对封丘地区两种质地土壤在不同的温度和容量条件下进行测定, 结果表明, 其介电常数的平方根( $\sqrt{\epsilon}$ )与土壤容积含水量( $\theta$ )有良好的线性关系( $r \geq 0.997$ )。标定曲线的误差( $S_{\theta, \sqrt{\epsilon}}$ )范围为 0.002~0.027  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , 其中砂质土壤在温度较低(16℃)条件下的误差最小, 壤质粘土在温度较高(26℃)条件下误差最大。

**关键词** TDR 法, 土壤含水量, 标定

**中图分类号** S152.7

TDR 法(Time Domain Reflectometry, 时域反射法)是新近发展起来的一种测定土壤含水量的方法, 具有不破坏样本、快速、容易操作等优点, 并可做到讯息转换而达到数据自动采集的目的, 因而很快为人们所接受。

土壤含水量是土壤分析的常规项目, 在水循环研究和农田灌溉排水管理中, 更是必不可少的基本资料。在当前各种含水量测定方法中, 广为人们应用的是烘干法和中子法。烘干法准确可靠, 是其它方法的基准。但其测定过程烦冗, 费事费时, 且不可避免要破坏原样本, 不能用于原位监测。中子法可以用于田间原位监测, 其测定结果也准确可靠, 但对于表层土壤, 因为中子容易散宜于大气, 其结果不甚准确。此外, 中子法迄今仍未做到既准确又便捷, 不能满足研究和生产管理的需要。

TDR 法是测定电磁波在土壤中的传播速度的一种方法。由于电磁波的传播速度与传播媒体的介电常数密切相关, 而土壤颗粒、水和空气本身的介电常数差异很大, 故一定容积土壤中水的比例不同时其介电常数便有明显的变化, 由其电磁波的传播速度便可判断其含水量, Topp<sup>[1]</sup>最早发展 TDR 法时, 曾声称此法不受土壤质地、容重、温度等物理因素的影响。后来的研究<sup>[2]</sup>表明, 在测量精度要求较低时, 这一结论是正确的。对矿质土壤, 当其误差要求为 0.05  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  时, 一般可用同一的标定曲线确定各种土壤的含水量关系。但是, 当要求误差更小时, 它们的关系受质地、容重以至温度等物理因素的影响。再者, 对于质地粘重的土壤, 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。因此, 对于待测土壤, 预先标定其含水量关系仍然是必要的。通过标定, 一方面可以确定其适用的湿度范围, 另一方面可确知其实际的测量精度, 即避免用通用的标定曲线的误差估计其实际的误差。

本文以封丘两种土壤主要质地土壤为基础, 分别对它们在不同的容重及温度条件下进行标定, 以考察其标定曲线的精度, 同时, 对不同物理条件下的标定资料加以组合, 以考察其标定曲线精度的变化, 供应用时参考。由于封丘地区土壤的性质与黄淮海冲积平原土壤近似, 因此本文的结果可供黄淮海地区应用时参考。

## 1 材料与方 法

供试土壤取自封丘试验站, 它们分别为砂质土壤和壤质粘土, 其颗粒组成如表 1。

将风干土, 过 2 mm 孔筛的土样分别按容重 1.3  $\text{g cm}^{-3}$ 、1.4  $\text{g cm}^{-3}$  和 1.5  $\text{g cm}^{-3}$  填充于 3 500  $\text{cm}^3$  的容器中, 并分别加水制成不同含水量的样品(表 2)。

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011803)和国家重大基金项目(49890330)资助

收稿日期: 2001-04-20; 收到修改稿日期: 2001-12-15

表1 供试土壤的颗粒组成

Table 1 Particle composition of soils tested

土壤 Soil	各级颗粒含量 Particle composition (%)			
	2~ 0.2 mm	0.2~ 0.02 mm	0.02~ 0.002 mm	< 0.002 mm
砂质壤土	2.0	77.5	10.1	10.4
壤质粘土	0.2	42.7	27.5	29.6

表2 试验的土壤含水量分级

Table 2 Gradation of soil water content

土壤 Soil	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	各级处理的含水量(θ) Water content (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )						
		1	2	3	4	5	6	7
砂质粘土	1.3	0.015	0.082	0.147	0.213	0.279	0.347	0.411
	1.4	0.017	0.088	0.159	0.230	0.300	0.371	
	1.5	0.018	0.094	0.170	0.246	0.322		
壤质粘土	1.4	0.036	0.108	0.180	0.251	0.323	0.395	0.467

将各种处理的试样分别置于4种不同的温度下24 h,然后用EF-FOM/mts型TDR仪及其探头测定其土壤含水量,土温和电导率。在每次测定时,均抽取若干不同级别的样本进行多点测定,以判断其读数的可靠性,若多点测定变异系数(CV) > 10%,则认为读数失准,其结果不用于标定。

EF FOM/ mts 型TDR 仪的特性如下:

脉冲:200ps 建立的针状  $\sin^2$  波(1ps= 10<sup>-12</sup> s)

读数范围:容积含水量  $\theta$ : 0% <  $\theta$  ≤ 饱和

温度  $t$ : - 20℃ ≤  $t$  ≤ 50℃

电导率  $\delta$ : 0.001 S m<sup>-1</sup> ≤  $\sigma$  ≤ 1 S m<sup>-1</sup>

读数准确度:含水量绝对误差,用经过单独校准的探头读数并计固相物质的作用后,读数误差为1%~2%或低于此值。

温度绝对误差:用经过单独校准的探头读数,误差 ≤ ±0.3℃。

电导率相对误差:用经过校准的探头读数,在0.001 S m<sup>-1</sup> <  $\sigma$  < 1 S m<sup>-1</sup>范围内相对误差 ≤ ±2%。

读数分辨率:水分,0.1%; 温度,0.1℃; 电导率,0.001 S m<sup>-1</sup>。

测定时间:小于20 s。

该仪器对矿质土壤的标定曲线为:

$$\theta_{\text{读}} = -15.8247 + 10.4397\sqrt{\varepsilon} \quad \sqrt{\varepsilon} \leq 6.0 \quad (1)$$

$$\theta_{\text{读}} = -57.2091 + 17.5311\sqrt{\varepsilon} \quad \sqrt{\varepsilon} > 6.0 \quad (2)$$

式中, $\theta_{\text{读}}$ 为TDR仪的含水量读数, $\varepsilon$ 为土样的介电常数。

据此,可将 $\theta_{\text{读}}$ 读数换算为 $\sqrt{\varepsilon}$ ,便得到 $\sqrt{\varepsilon}$ 与试样含水量( $\theta$ )的相关资料。用CPSBA统计软件<sup>[3]</sup>将 $\sqrt{\varepsilon}$ ~ $\theta$ 资料拟合出各类相关曲线,并选出最优的曲线为其标定曲线,便可对其误差加以分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 测量的准确性

本文以同一样本的多点测定结果判断其测量的准确性。结果表明,砂质土壤各级含水量多点测定的重现性很好,结果差异很小(CV < 10% 表3),说明该仪器用于砂质壤土的测量结果是可靠的。但对壤质粘土来说,当其湿度级别 ≥ 6级,即 $\theta \geq 0.039 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (参见表2)时,多点测定的重现性差,CV >

10%,表明该仪器用于壤质粘土时,在含水量高的范围内失准。因此,本文界定壤质粘土的测定范围为  $0.00 < \theta < 0.039 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ; 换言之,  $\theta \geq 0.395 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  的资料未纳入处理。

表3 TDR法的测量误差

Table 3 Measuring error of TDR technique

土壤 Soil	各级含水量的读数平均值( $\bar{\theta}_{\text{读}}$ )与标准差( $S$ ) Mean values and standard errors of soil water content( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )													
	1		2		3		4		5		6		7	
	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)	$\bar{\theta} \pm S$	CV (%)
砂质壤土	—	—	—	—	0.156 ± 0.007	4.7	0.213 ± 0.004	1.7	0.295 ± 0.004	1.3	0.336 ± 0.003	0.8	0.373 ± 0.003	0.8
壤质粘土	—	—	—	—	0.155 ± 0.003	2.2	0.218 ± 0.001	0.6	0.310 ± 0.027	8.7	0.447 ± 0.168	37.5	0.535 ± 0.165	30.8

应当指出,上述误差,不论其大小,并非完全由仪器造成,它应包括样本湿度的变异在内,在制备样本时,虽然力图使其湿度均匀,但实际仍不可避免有局部的差异,因为微团聚体内部的水分与空隙水之间达到平衡是十分困难的,对于粘土土壤尤其如此。实际上,如果把探头固定在一点上做多次测量,其重现性是非常好的;对田间土壤也是如此。因此,除非读数重现性差异大(例如  $CV > 10\%$ ),否则,由仪器因素造成的误差是很小的。

## 2.2 物理因素恒定条件下标定曲线的精确度

经统计检验,  $\sqrt{\bar{\epsilon}}$  与  $\theta$  关系以线性回归方程表征最优,其标定曲线通用式可写为

$$\bar{\theta} = a + b\sqrt{\bar{\epsilon}} \quad (3)$$

式中  $\bar{\theta}$  为含水量估计值,  $a, b$  为经验参数。

标定曲线的误差估值为:

$$S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}} = \sqrt{\frac{\sum(\theta - \bar{\theta})^2}{n - 2}} \quad (4)$$

$S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}}$  为离回归标准误差,  $n$  为样本数。

从(4)式可知,  $S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}}$  为回归曲线平均误差的估值,它是误差统计的特征值,即  $1S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}}$  占误差总体的 68.27%,  $2S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}}$  占 95.45%,故可以用它表征标定曲线的精度。

在土质、容重、温度恒定的条件下,各标定曲线的参数及  $S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}}$  值列于表4。可见,砂质土壤的  $S_{\bar{\theta}\sqrt{\bar{\epsilon}}}$  值一般很小( $\leq 0.013 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )表明在容重及温度恒定条件下其标定曲线有良好的精度,这特别值得室内的试验设计参考,因为室内试验受样本容量的限制,大都希望做不破坏样本的原位测定试验,若用其相同条件下的标定曲线进行估值,必然会取得精度较高的试验结果。

对于壤质粘土来说,在温度较低( $\leq 20^\circ\text{C}$ )时标定曲线的误差很小,温度高( $> 20^\circ\text{C}$ )时误差增大(表4)。这一效应我们将在下面讨论。

## 2.3 不同物理因素对标定曲线的精确度的影响

在田间,物理因素是随时间和空间变化的,在恒定条件下标定的曲线,显然不适用于这种变化的条件,因此通常需要标定出一条综合各种因素的曲线来加以应用。一般来说,综合的因素愈多,适用范围愈广,但其精确度也愈低。因此,为了保证标定曲线达到一定的精确度水平,综合的因素不宜过多,而应根据实际情况加以选定。故分析不同的物理因素对标定曲线的精确度的影响,对选择综合的因素是有参考价值的。为此,我们把全部测定资料分为10个组(参见表5)加以标定,其中I、II、III、IV为质地,温度恒定条件下的容重综合标定曲线;组V、VI、VII、VIII为质地,容重恒定条件下的温度综合标定曲线;组IX

为质地恒定条件下的容重, 温度综合标定曲线; 组 X 为质地、容重、温度三因素的综合标定曲线。它们的参数与误差值列表于表 5, 据此可作如下分析。

表 4 物理因素恒定条件下标定曲线的参数和误差

Table 4 Regression error and parameter of calibration curves under the condition of stable physical factors

土壤 Soil	容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	温度 Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	截距 Intercept	斜率 Slope	相关系数 Correlation coefficient	标准误差 Standard error	样本数 Sample number
砂质壤土	1.3	16	-16.597	11.466	0.999	0.006	7
		20	-15.941	11.420	0.999	0.007	7
		24	-16.525	11.713	0.997	0.012	7
		26	-17.367	12.251	0.999	0.007	7
	1.4	16	-17.084	11.226	0.999	0.006	6
		20	-17.583	11.616	0.999	0.007	6
		24	-17.972	11.648	0.997	0.012	6
		26	-16.187	11.209	0.996	0.013	6
1.5	16	-17.776	11.364	0.999	0.002	5	
	20	-17.514	11.418	0.999	0.004	5	
	24	-18.439	11.846	0.999	0.003	5	
	26	-19.276	12.185	0.998	0.007	5	
壤质粘土	1.4	16	-17.373	11.874	0.999	0.007	5
		20	-14.643	10.332	0.999	0.004	5
		24	-21.523	13.996	0.987	0.021	5
		26	-11.202	9.348	0.978	0.027	5

表 5 不同物理因素组合的标定曲线的参数与误差

Table 5 Regression error and parameter of calibration curves under different physical combinations

组 Group	因素 Factors			截距 Slope	斜率 Intercept	相关系数 Correlation coefficient	标准误差 Standard error $S_e/\sqrt{e}$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	样本数 Sample number
	土质 Soil texture	容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	温度 Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )					
I	砂质壤土	1.3, 1.4, 1.5	16	-17.252	11.409	0.998	0.009	18
II	砂质壤土	1.3, 1.4, 1.5	20	-17.107	11.563	0.998	0.009	18
III	砂质壤土	1.3, 1.4, 1.5	24	-17.574	11.741	0.996	0.012	18
IV	砂质壤土	1.3, 1.4, 1.5	26	-17.536	11.890	0.994	0.015	18
V	砂质壤土	1.3	16, 20, 24, 26	-16.455	11.659	0.997	0.010	28
VI	砂质壤土	1.4	16, 20, 24, 26	-17.151	11.407	0.997	0.010	24
VII	砂质壤土	1.5	16, 20, 24, 26	-18.154	11.690	0.998	0.007	20
VIII	壤质粘土	1.4	16, 20, 24, 26	-14.845	10.905	0.976	0.026	20
IX	砂质壤土	1.3, 1.4, 1.5	16, 20, 24, 26	-17.293	11.625	0.995	0.012	72
X	砂质壤土 壤质粘土	1.3, 1.4, 1.5	16, 20, 24, 26	-16.782	11.478	0.991	0.016	92

(1) 对砂质壤土来说,在容重恒定条件下,温度综合标定曲线(组 V、VI、VII)的误差比温度、容重综合标定曲线(组 IX)的误差小,说明容重恒定条件下可以提高标定曲线的精度。故在田间(温度变化条件下)进行定位监测时,对容重相同的土层分别进行标定,其含水量估值的精度当比用容重综合标定曲线的估值高。

(2) 对砂质壤土来说,在温度恒定为 16℃、20℃、24℃和 26℃条件下,其容重综合标定曲线(组 I、II、III、IV)的误差分别为 0.009, 0.009, 0.012 和 0.015  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ,在温度、容重综合标定曲线(组 IX)的误差(0.013  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )相比,前二者较小,后二者较大。这是否可以说明用温度、容重综合标定曲线估计含水量时,其精确度高于 24℃和 26℃的容重综合标定曲线的精确度呢?对这个问题必须加以分析。

由(4)式知道,标定曲线的误差具有平均误差的性质,它受样本数量及其方差两个因素的影响。不同温度标定时的样本数量以及它们的方差列于表 6,从表中可见。

表 6 不同温度条件下砂质壤土标定曲线的方差分析

Table 6 Variance analysis of calibration curves under different temperatures

标定曲线 Calibration curve	方差和样本数 Variance and sample number					标定曲线 误差 Calibration curves error $S_{\theta}^2/\sqrt{\epsilon}$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
	16℃	20℃	24℃	26℃	Total	
16℃: $\theta = -17.252 + 11.409 \sqrt{\epsilon}$	0.001 18/ 18					0.008 6
20℃: $\theta = -17.107 + 11.563 \sqrt{\epsilon}$		0.001 24/ 18				0.008 8
24℃: $\theta = -17.574 + 11.741 \sqrt{\epsilon}$			0.002 42/ 18			0.012 3
26℃: $\theta = -17.536 + 11.890 \sqrt{\epsilon}$				0.003 46/ 18		0.014 7
综合温度: $\theta = -17.293 + 11.478 \sqrt{\epsilon}$	0.002 04/ 18	0.001 26/ 18	0.002 46/ 18	0.004 17/ 18	0.009 92/ 72	0.011 9

四种温度标定曲线的方差均小于温度综合标定曲线中相应温度的分方差(这是用最小二乘法拟合相关曲线的必然结果)。这说明用综合标定曲线估计某一温度的含水量时,其精确度不会高于该温度的标定曲线估计的精度。

温度综合标定曲线的总方差由四种温度分方差构成,它们对总方差的贡献分别为 20.5% (16℃), 12.7% (20℃), 24.8% (24℃) 和 42% (26℃), 比重明显不同,但没有反映在综合标定曲线的误差估值中,而被其误差的平均性质所掩盖了。因此,用综合标定曲线的误差估计某一(温度)因素的测量精度时,常会发生高估或低估的偏离而导致误判,必须慎重估计。

以上结果同时显示,随着温度升高,误差有增加的趋势。可供温度综合标定曲线时参考。

(3) 对壤质粘土来说,其温度效应也与砂质壤土近似,即温度低时误差较小,温度高时误差较大(参见表 4),它们的温度综合标定曲线(组 VIII)的误差为 0.026  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ,小于 26℃单独标定的误差(0.027  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )。但方差分析表明,26℃的分方差为 0.004 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )<sup>2</sup>,比 26℃单独标定的方差 0.002 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )<sup>2</sup>大,故在 26℃的测量精度仍然低于 26℃单独标定的精度。方差分析表明,四种温度分方差对总方差的贡献分别为 8% (16℃), 12% (20℃), 46% (24℃) 和 34% (26℃),表示随着温度升高,其误差有增加的趋势,这一结果可供应用时参考。

(4) 质地综合标定曲线(组 X)的误差为 0.016  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ,它比壤质粘土标定曲线(组 VIII)的误差小,但方差分析表明,在质地综合标定曲线中,壤质粘土的分方差为 0.013 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )<sup>2</sup>,而壤质粘土单独标定的方差为 0.125 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )<sup>2</sup>,二者近似。故可以认为,用质地综合标定曲线估计壤质粘土的含水量时,其精度与壤质粘土单独标定曲线的精度相近。但另一方面,由于它的误差比砂质壤土单独标定曲线(组

IX) 的误差( $0.119 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) 高 34%, 故用它估计砂质壤土的含水量时, 其精度会显著低于用砂质壤土本身的标定曲线的精度。因此在可能条件下, 还是按质地分别进行标定为好, 这样可以比较准确地估计它们的测量精度, 避免导致误判。

### 3 结 论

1. 用波兰 EF FOM/mts 型 TDR 水分测定仪对封丘两种质地土壤在恒定的物理条件与综合的物理条件下进行标定的结果表明, 它们的介电常数的方根与含水量有良好的线性关系 ( $r > 0.997$ ), 标定曲线的误差估值为  $0.002 \sim 0.027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , 其中砂质壤土在低温条件下的误差最小, 壤质粘土在高温条件下误差最大。

2. 一般来说, 单因素标定曲线的误差小于对因素综合标定曲线的误差; 综合因素少的标定曲线的误差小于综合因素多的误差。因此, 减少标定因素可望提高含水量的测定精度。例如, 在室内恒温条件下进行标定, 在田间对容重相同的土层分别进行标定, 都可提高其测量精度。

3. 多因素综合标定曲线的误差是各因素的平均误差的反映, 它均匀了不同因素对误差贡献, 故用它估计某一特定因素下的测量精度时, 会发生高估或低估的偏离。因此若要用综合标定曲线估计含水量时, 最好对其进行方差分析, 辨明各种组合因素对误差的贡献, 以便对不同条件下的测量精度做出正确的估计。

### 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. *Water Resources Research*, 1980, 16: 574~ 582
2. Topp G C, Davis J L, Annan A P. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 19~ 24
3. 莫惠栋编著. 农业试验统计. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 305~ 356

## CALIBRATION ON MEASUREMENT OF SOIL WATER CONTENT USING TIME DOMAIN REFLECTOMETRY(TDR)

Zhou Lingyun Chen Zhixiong Li Weimin

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

### Summary

TDR soil moisture instrument (model ET-FOM/mts, made in Poland) was calibrated for two types of soil of different texture in Fengqiu region under different treatments of temperature and bulk density. The result show that the relationship between the square root value of dielectrical constant of soil and soil water content in volumetric basis can be well described by linear equations of which the correlation coefficient are equal to or greater than 0.997. Regression errors of the calibration curves range from 0.002 to  $0.027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , and sandy loam soil shows the smallest error at low temperature ( $16^\circ\text{C}$ ), while the biggest error occurs when loamy clay soil is measured at high temperature ( $26^\circ\text{C}$ ).

**Key words** TDR technique, Soil water content, Calibration