

土壤容重和温度对时域反射仪测定 土壤水分的影响*

龚元石 曹巧红 黄满湘

(中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094)

摘要 土壤含水量(θ_v)与电磁波在插入土壤的时域反射仪(TDR)探针中传播时间(T)的半理论、半经验标定曲线 $\theta_v = (T/T_0 - T_s/T_0) / (K_w^{0.5} - 1)$ 通常用于计算土壤含水量。本项试验应用 TDR 测定了不同质地及不同容重条件下烘干土壤的 T_s/T_0 值。结果表明,四种被测土壤的 T_s/T_0 值介于 1.61~1.80,且土壤容重大, T_s/T_0 值也大,三种农业土壤的 T_s/T_0 平均值可取 1.68。用烘干至饱和含水量的砂质壤土和壤土的土柱试验结果表明,选用不同的 T_s/T_0 值,引起的含水量偏差分别为 $0.001 \sim -0.005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 $0.007 \sim -0.006 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。对于砂质壤土,在实际含水量不变但改变土壤温度的情况下, TDR 测定的含水量在实际含水量大于 $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时有明显的偏差,且温度升高, TDR 测定的含水量偏低,反之亦然。本文还给出了温度每增加(或减少) 1°C 引起的含水量测定值的偏差范围以及进行修正的方法。

关键词 时域反射仪, 土壤水分, 容重, 温度

中图分类号 S152.7

时域反射仪(Time domain reflectometry, 简称 TDR)是一种远程遥感测定技术,早期它主要应用于通讯方面的线路检测。本世纪 70 年代末期,科学家们才开始把它应用于土壤电特性的测定,并由测定的土壤介电常数来推算土壤含水量^[1]。由于 TDR 能精确、快速和连续测定土壤水分,因此,它正逐渐成为土壤水分测定的一个新的工具^[2,3]。

Topp 等最早通过对四种土壤用烘干法测定的含水量(θ)与 TDR 测定的土壤(表观)介电常数(K)建立了通用的 $K(\theta)$ 标定曲线^[1],其它一些研究者也相继在各自的实验条件下建立了 $K(\theta)$ 关系^[4~6]。早期的研究结果认为,对于一般轻质地砂土和壤土,可用 Topp 等建立的“通用”标定曲线来推算含水量, TDR 测定值与土壤质地、类型等无关^[1]。然而后继的一些研究结果表明, TDR 测定的含水量还受土壤容重等因素的影响^[7,8]。Ledien 等曾指出,尽管容重对测定含水量的影响较小,但考虑容重后的影响可使标定曲线得到改进^[9]。Jacobsen 等甚至在 $K(\theta)$ 关系式中加入了土壤容重、粘粒含量和有机质含量的影响因子,以提高 TDR 测定含水量的精度^[7]。

已经建立的 $K(\theta)$ 标定曲线都假设土壤孔隙中水的性质与自由水相似,而且都是在常温(20°C)下。在土温有大幅度不规则变化的情况下,必须考虑温度对水的介电性质的

* 国家自然科学基金重大项目(批准号:49391600)的部分内容

收稿日期:1998-05-08;收到修改稿日期:1998-10-30

影响。Weast 曾指出,虽然自由水的介电常数随温度变化较小,但很重要^[10]。土壤中固相、气相的介电特性随温度变化比水要小得多^[4]。当温度改变时,自由水的介电特性发生变化,而土壤孔隙中的水不仅会改变本身的介电特性,而且由于孔隙水与土壤颗粒间的相互作用,使得混合物的介电特性变化相当复杂。已有的温度(t)与自由水介电常数(K_w)的经验公式如下^[10]:

$$K_w = 78.54[1 - 4.579 \times 10^{-3}(t - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(t - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(t - 25)^3] \quad (1)$$

Topp 等认为,温度在 10~36℃ 之间,实际含水量在 0~0.35cm³/cm³ 之间变化时温度改变对含水量的测定结果没有什么影响^[1]。Zagorskii 等也认为温度在 5℃ 以上时,测定的含水量不会改变,但温度低于 5℃ 时,由于水的密度变化较大,影响了含水量的测定值^[11]。

虽然已有的几个 $K(\theta)$ 标定公式中用到了基于土壤温度的水的介电常数,但他们未曾给出温度校正后的实验结果^[4,12]。直到最近,Pepin 等用 TDR 在不同温度下测定了几种土壤的含水量^[13],为了提高测定精度,建议在含水量较高时,温度的校正值采用 0.00175 θ_v /℃。

本项试验的目的在于通过 TDR 在不同容重和不同温度条件下测定的土壤含水量与实际含水量比较,提出土壤容重和土壤温度的变化对 TDR 测定含水量的偏差范围和校正方法。

1 测定原理与方法

1.1 测定原理

TDR 主机发射的一个高频阶梯状脉冲波沿着土壤中放置或插入的金属探针中传播,其信号在探针末端反射回来,土壤的介电常数可用下式计算^[1]:

$$K = (CT/2L)^2 \quad (2)$$

式中 C 为真空中的光速,相当于沿探针的脉冲波速度, T 为电磁波沿探针来回传播的时间,假设探针在真空中的传播时间为 T_a ,则:

$$T_a = 2L/C \quad (3)$$

代入公式(2)中,则得:

$$K = (T/T_a)^2 \quad (4)$$

土壤这类多孔介质被看成是三相混合物,即土壤、水和空气。为了能够获得介电常数与含水量的定量关系,研究者们一直在试图用介质混合定律来描述多相混合物总的介电常数与各组分介电常数的关系^[4]。已有的实验结果表明,土壤介质遵循如下半理论、半经验的公式^[5]:

$$T/T_a = T_s/T_a + \theta_v(K_w^{0.5} - 1) \quad (5)$$

也即:

$$\theta_v = (T/T_a - T_s/T_a) / (K_w^{0.5} - 1) \quad (6)$$

式中 T_s 为探针在具有一定孔隙度的完全干燥土壤中的传播时间, K_w 为水的介电常数。通过 TDR 探针测定它在土壤介质中的传播时间(T),应用公式(6)可计算土壤体积含水量(θ_v)。由公式(6)可知,土壤容重和温度对 TDR 测定土壤含水量的影响主要表现在 T_s/T_a 值和 K_w 值的变化对 θ_v 的影响。

1.2 测定方法

1.2.1 不同土壤和不同容重 T_s/T_a 值的测定 本项试验用四种土壤: 砂土、砂质壤土、壤土和粉砂质粘壤土, 其中后三种为一般农业矿质土壤, 土壤粒径分布如表 1 所示。

表1 四种土壤的粒径分布

Table 1 The particle size distribution of four soils

质地 Texture	砂粒含量 (%) Sand (>0.05mm)	粉粒含量 (%) Silt (0.05~0.002mm)	粘粒含量 (%) Clay (<0.002mm)
砂土	89	4	7
砂质壤土	69	21	10
壤土	41	38	21
粉砂质粘壤土	16	53	31

将上述四种土壤在 105℃ 下烘干 24h, 在干燥器中冷却至 20℃, 按照一定容重装入 PVC 土柱 (长 35cm, 直径 10cm, 填装土实际高度为 30cm, 下同), 试验采用加拿大 ESI 公司的 MP-917 时域反射仪, 探针长度为 30cm, 仪器所用的标定曲线采用公式 (6), 由 MP-917 主机也可直接读取每次测定的传播时间 (T_s), 对于 30cm 长的探针, $T_a = 2ns$, T_s/T_a 值用 50 次测定的平均值。

1.2.2 不同土壤的含水量测定试验 选砂质壤土和壤土为供试土壤, 将其按一定的容重 (砂质壤土 1.3g/cm³, 壤土 1.4g/cm³) 装入如上所述的 PVC 土柱, 自下而上用马氏瓶加蒸馏水使土壤至饱和, 每隔一定时间 (视蒸发状况而定) 用 TDR 测定土壤含水量, 每次测定值用 20 个测定的平均值。PVC 土柱中的实际含水量用称重法测定, 测定仪器为 Precisa 30000D (瑞士产), 最大称量 30kg, 感量 0.1g。

1.2.3 不同温度下 TDR 测定土壤含水量 将砂质壤土按容重 1.3g/cm³ 装入 PVC 土柱, 用马氏瓶自下而上加水, 土柱含水量依次上升至 0.06、0.12、0.18、0.24、0.30、0.36、0.42cm³/cm³ 时密封土柱以防止蒸发, 并将土柱放入恒温箱, 恒温箱的温度从 5℃ 升至 45℃, 每隔 5℃ 对土柱分别用 TDR 和称量法测定一次含水量。为确保土柱中的温度与恒温箱内的温度一致, 土柱中插有温度计, 以土柱中的温度达到所要求的温度为准。

2 结果与讨论

2.1 不同土壤的 T_s/T_a 值

测定结果表明 (表 2), 在本试验土壤容重的条件下, T_s/T_a 值的变化范围依次为, 砂土: 1.73~1.80; 壤土: 1.68~1.79; 砂质壤土: 1.66~1.71; 粉砂质粘壤土: 1.61~1.66。四种土壤的 T_s/T_a 值变化范围为 1.61~1.80。实际上这也反映了不同质地土壤颗粒完全干燥时的介电常数 $K_s = (T_s/T_a)^2$ 的大小。同一种土壤在不同容重下的 T_s/T_a 值也有差异, 容重越大, T_s/T_a 值也大。如果对后三种质地的土壤 (代表一般农业土壤) 的容重取中间值, 则壤土的 T_s/T_a 值为 1.74, 砂质壤土的 T_s/T_a 值为 1.67, 粉砂质粘壤土的 T_s/T_a 值为 1.63, 其平均 T_s/T_a 值为 1.68。在应用公式 (6) 计算土壤含水量时, $T_s/T_a = 1.68$ 可作为一般农业土壤的 T_s/T_a 值。如果农田土壤剖面上下层次容重差异较大或者土壤质地层次明显, 则应对应的土壤层次 (容重) 取不同的 T_s/T_a 值, 以获得准确的 T_s/T_a 值。如有必要, 可在实验室下测定不

表 2 不同土壤质地和容重的 T_s/T_a 和 K_s 值

Table 2 T_s/T_a and K_s values of soils with different textures and bulk densities

质地 Texture	容重 (g/cm ³) Bulk density	T_s/T_a	K_s
砂土	1.5	1.73	2.99
	1.6	1.78	3.17
	1.7	1.80	3.24
壤土	1.3	1.68	2.82
	1.4	1.74	3.03
	1.5	1.79	3.20
砂质壤土	1.1	1.66	2.76
	1.3	1.67	2.79
	1.5	1.71	2.92
粉砂质粘壤土	1.1	1.61	2.59
	1.2	1.63	2.66
	1.3	1.66	2.76

同土壤的 T_s/T_a 值。

2.2 不同 T_s/T_a 值对 TDR 测定含水量的偏差

为了验证所测定的 T_s/T_a 值的可靠性,以及探讨由于 T_s/T_a 值的改变可能引起的土壤含水量测定误差,用 TDR 分别对两种土壤的含水量进行了测定,并与称重法实测的含水量(准确值)进行了比较(图 1a, b)。结果表明,TDR 测定的含水量与称重法实测的含水量基本上是一致的,对砂质壤土的测定结果似乎比壤土要好一些,这也与 Topp^[1]和 Zegelin^[14]等的结论是完全一致的。对壤土而言,在含水量大于 0.30cm³/cm³时测定值要偏高 10%~20%,这可能由于土壤中粘粒与土壤孔隙水的作用而改变了孔隙水的介电性质所致。

上述 TDR 测定含水量的结果是用实测的 T_s/T_a 值,实际上,对于田间土壤,选定合适的

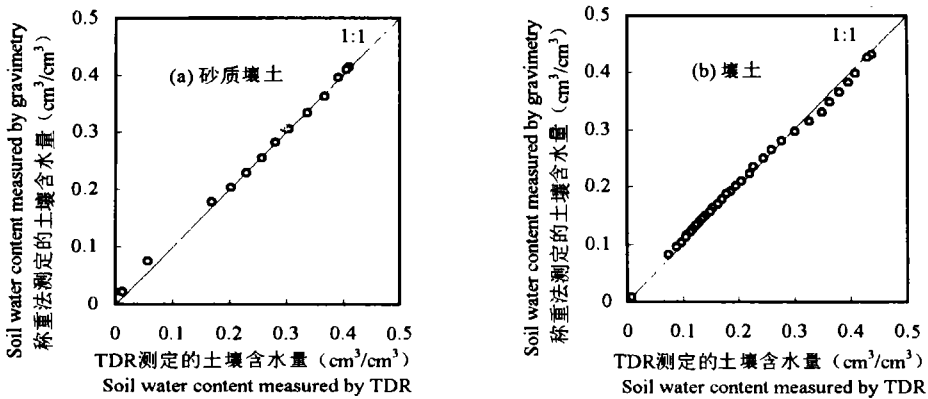


图1 TDR与称重法测定的土壤含水量比较(a.砂质壤土, b.壤土)

Fig.1 Comparison of soil water contents determined by TDR and gravimetry respectively (a. Sandy loam, b. Loam)

T_s/T_a 有一定的困难(除非土壤容重已知),由于不同容重的土壤其 T_s/T_a 值是不同的(表 2),那么,对同一种土壤,不同的 T_s/T_a 值引起 TDR 测定的土壤含水量的偏差有多大? 根据 TDR 实测的 T/T_a , 改变公式(6)中的 T_s/T_a 值,即可得到不同的 T_s/T_a 值的含水量,以实际容重(T_s/T_a 值)下的含水量测定值为标准(砂质壤土 $T_s/T_a = 1.67$,壤土 $T_s/T_a = 1.74$),可求得不同 T_s/T_a 值的含水量偏差(表 3)。

表 3 不同 T_s/T_a 值引起的含水量测定值的偏差¹⁾

Table 3 The deviations of determining water content affected by various T_s/T_a values

砂质壤土 Sandy loam		壤土 Loam	
T_s/T_a	含水量偏差 Deviation of water content (cm^3/cm^3)	T_s/T_a	含水量偏差 Deviation of water content (cm^3/cm^3)
1.66	0.001	1.68	0.007
1.67	0.0	1.74	0.0
1.71	-0.005	1.79	-0.006

1) 砂质壤土的实际含水量范围为 $0.022 \sim 0.413 \text{cm}^3/\text{cm}^3$, 壤土为 $0.008 \sim 0.431 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

表 3 结果显示,对砂质壤土,由于选用不同 T_s/T_a 值引起的含水量偏差为 $0.001 \sim -0.005 \text{cm}^3/\text{cm}^3$;对壤土,不同 T_s/T_a 值引起的含水量偏差为 $0.007 \sim -0.006 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。该偏差值并不是由仪器的系统误差造成,而是由于 T_s/T_a 值选取不准确所引起的。因此,对于在实验室条件下应用 TDR 测定含水量,建议首先测定土壤 T_s/T_a 值,这样可以提高测定结果的精度。

2.3 不同温度下 TDR 测定的土壤含水量

图 2 为 TDR 测定的含水量随温度的变化曲线,土壤实际含水量大于 $0.30 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时, TDR 测定的含水量随温度的变化呈线性关系,且温度升高,测定的含水量偏小,温度降低,测定的含水量偏大。原因是由于温度的变化改变了土壤孔隙中水的介电常数,因为不同温度下水的介电常数是不同的。虽然不同温度下土壤矿物本身的介电常数也有变化,但

表 4 不同温度下 TDR 测定的土壤含水量 (cm^3/cm^3)

Table 4 Soil water content measured by TDR under different temperature

含水量 Water content (cm^3/cm^3)	温度 Temperature ($^{\circ}\text{C}$)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0.06	0.052	0.052	0.053	0.052	0.051	0.051	0.050	0.051	0.050
0.12	0.104	0.102	0.103	0.092	0.094	0.092	0.104	0.104	0.103
0.18	0.171	0.169	0.170	0.171	0.172	0.172	0.172	0.171	0.163
0.24	0.236	0.237	0.237	0.243	0.241	0.237	0.238	0.234	0.232
0.30	0.302	0.301	0.300	0.301	0.298	0.297	0.296	0.295	0.291
0.36	0.367	0.364	0.363	0.360	0.358	0.355	0.354	0.351	0.350
0.42	0.431	0.427	0.426	0.420	0.419	0.415	0.413	0.410	0.404

与水的介电常数的变化相比是微不足道的^[4],这一点也可以从本实验在低含水量条件下 TDR 测定结果中得到证实,结果显示了含水量小于 $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时, TDR 测定的含水量基本上不随温度的变化而变化(表 4)。

那么能否用公式(1)中不同温度下的 K_w 代入公式(6)中推算不同温度下的含水量? 答案是否定的。原因是公式(1)的 $K_w \sim T$ 关系式指自由水,而土壤孔隙中的水的介电性质在不同温度下的变化要复杂得多。实际上,我们也试图用公式(1)的 $K_w \sim T$ 关系式来校正不同温度下含水量的测定误差,但结果并不理想。现在看来,要想对所有的土壤或所有的含水量范围得到一个通用的校正公式比较困难。原因是,在不同温度下 TDR 测定的含水量值既与土壤矿物本身特性有关,也与土壤含水量有关。本项试验对由温度改变引起的测定偏差进行了分析,图 2 表示了实际含水量分别为 $0.42, 0.36, 0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时 TDR 测定的含水量与温度的相关曲线,由相关曲线的斜率,可以得到在各自含水量条件下温度每增加(或减少) 1°C 引起的含水量变化值,分别为 0.06×10^{-2} 、 0.04×10^{-2} 和 $0.02 \times 10^{-2}\text{cm}^3/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。以 20°C 下 TDR 测定的含水量为标准值(与称重法实测的含水量完全一致),由此得到温度改变引起 TDR 测定的含水量偏差见表 5。从表中可以看出,温度在 5°C 时比 20°C 时测定的含水量偏高 $0.0037 \sim 0.0095\text{cm}^3/\text{cm}^3$, 温度在 45°C 时比 20°C 时测定的含水量偏低 $0.0061 \sim 0.016\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。在实际应用过程中,特别是在炎热的

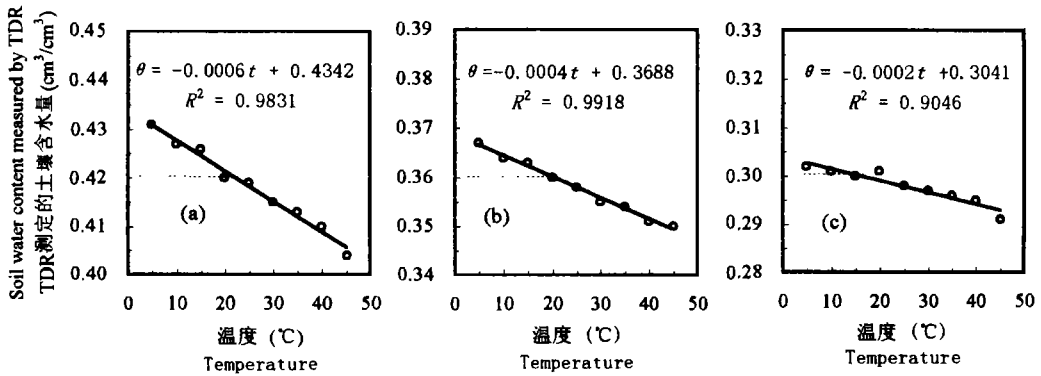


图2 TDR测定的含水量随温度的变化

Fig.2 Variations of water content measured by TDR with temperature

表5 砂质壤土在不同温度下TDR测定的含水量偏差¹⁾ ($\times 10^{-2}$, cm^3/cm^3)

Table 5 The deviations of soil water content measured by TDR for sandy loam under different temperature

含水量 Water content (cm^3/cm^3)	温度 Temperature ($^\circ\text{C}$)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0.30	+0.37	+0.25	+0.12	0.0	-0.12	-0.25	-0.37	-0.49	-0.61
0.36	+0.65	+0.43	+0.22	0.0	-0.22	-0.43	-0.65	-0.87	-1.09
0.42	+0.95	+0.63	+0.32	0.0	-0.32	-0.63	-0.95	-1.27	-1.59

1) 以 20°C 为准,正号表示偏高,负号表示偏低。

夏季或寒冷的冬天,应用 TDR 测定农田表层土壤含水量时应该考虑温度的校正。

图 2 和表 5 虽然给出了实际含水量为 0.42 、 0.36 、 $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时 TDR 测定结果随变化的趋势及偏差值,但从实际应用的角度,仍不便于对不同温度下 TDR 测定的含水量进行修正。原因是,如果实际含水量已知,则无须用 TDR 方法测定;另一方面,测定的土壤含水量不一定正好是上述三种含水量的情形。但对所有含水量用一个修正公式来表示也是不现实的。因此,必须寻求一种近似的办法。较合理的做法是在修正值中包含 TDR 实测含水量的大小,即将修正值表示为实测含水量的函数。

设温度 t 下称重法和 TDR 法的测定结果分别为 θ_g 和 θ_T , 则 $\Delta\theta_r = \theta_T - \theta_g$ 为绝对偏差, $\Delta\theta_r/\theta_T$ 为相对偏差。对 $(\theta_T - \theta_g)/\theta_T$ 与温度 t 进行相关分析,假定两者有如下关系:

$$(\theta_T - \theta_g) / \theta_T = a \cdot t + b$$

其中 a , b 为回归系数,则 $\Delta\theta_r = (a \cdot t + b)\theta_T$ 。若 $\Delta\theta_r > 0$, 表示测定值偏大,修正后 $\theta = \theta_T - |\Delta\theta_r|$, 若 $\Delta\theta_r < 0$, 表示测定值偏小,修正后 $\theta = \theta_T + |\Delta\theta_r|$ 。

对于砂质壤土的实际含水量为 0.42 、 0.36 和 $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时,在不同温度下 TDR 测定值的相对偏差与温度 t 的回归直线见图 3。不同温度下 TDR 测定值的绝对偏差可用下列修正方程式:

$$\Delta\theta = (-0.0015t + 0.0337)\theta_T \quad (\theta_g = 0.42\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (7-1)$$

$$\Delta\theta = (-0.0012t + 0.0245)\theta_T \quad (\theta_g = 0.36\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (7-2)$$

$$\Delta\theta = (-0.0008t + 0.0133)\theta_T \quad (\theta_g = 0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (7-3)$$

在实际应用中,应根据 TDR 测定值的大小,建议选择含水量最接近实际含水量的修

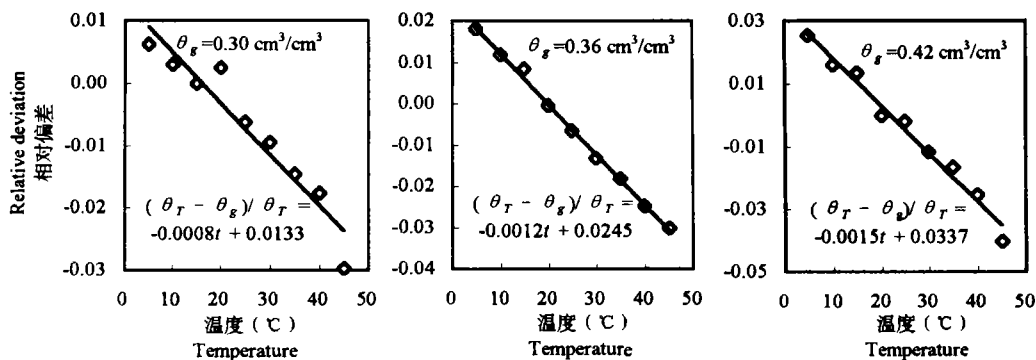


图3 温度与TDR测定值相对偏差的关系

Fig.3 The relationships between temperature and relative deviation of soil water content determined by TDR

正方程式来对由温度引起的测定误差进行修正。

3 结论

T_s/T_a 是用公式 (6) 计算土壤含水量的一个必要参数,四种被测土壤的 T_s/T_a 变化范围为 $1.61 \sim 1.80$, 容重大的土壤其 T_s/T_a 值也大, $T_s/T_a = 1.68$ 可作为三种农业土壤的 T_s/T_a 平均值。用 TDR 测定土壤水分的土柱试验表明,用公式 (6) 计算的含水量与称重法得到的实

际含水量相吻合,尤其在含水量 $0.10 \sim 0.30 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内。对砂质壤土,选用不同 T_s/T_a 值引起的含水量偏差为 $0.001 \sim -0.005 \text{cm}^3/\text{cm}^3$; 对壤土,不同 T_s/T_a 值引起的含水量偏差值为 $0.007 \sim -0.006 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

TDR 测定的含水量随温度变化呈直线关系,且温度升高,测定的含水量偏低,温度降低,测定的含水量值偏大。含水量越高,温度的影响也越大。本项试验对砂壤土不同温度 ($5 \sim 45^\circ\text{C}$) 下 TDR 测定的含水量偏差表明,含水量低于 $0.30 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时温度对 TDR 测定的含水量没有什么影响,土壤含水量在 0.42 、 0.36 和 $0.30 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 时温度每增加 (或减小) 1°C 引起的含水量偏差分别为 0.06×10^{-2} 、 0.04×10^{-2} 和 $0.02 \times 10^{-2} \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

参 考 文 献

1. Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 1980, 16:574~582
2. 龚元石,李子忠,廖超子等. 应用时域反射仪测定农田土壤水分. *水科学进展*, 1997, 8(4): 329~334
3. 龚元石,李子忠. 利用时域反射仪测定的土壤水分估算农田蒸散量. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 72~78
4. Roth K, Schulin R, Fluehler H, Attinger W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.*, 1990, 26:2267~2273
5. Herkelrath W N, Hamburg S P, Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, 1991, 27:857~864
6. Nadler A, Dasberg S, Lapid I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55:938~943
7. Jacobsen O H, Schjonning P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology*, 1993, 151:147~157
8. Dirksen C, Dasberg S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 660~667
9. Ledieu J, de Ridder P, de Clerck P, Dautrebande S. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *J. Hydrol.*, 1986, 88:319~328
10. Weast R C ed. *Handbook of Physics and Chemistry*. 67th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1986
11. Zogoskii V V, Nesterov V M, Zamotrinskaya E A, Mikhailova T G. Dependence of dielectric permittivity of moist disperse material on the temperature. *Sov. Phys. J. (Engl. Transl)*, 1982, 25:62~65
12. Alharthi A, Lange J. Soil water saturation: Dielectric determination. *Water Resour. Res.*, 1987, 23:591~595
13. Pepin S, Livingston N J, Hook W R. Temperature dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. A. J.*, 1995, 59:38~43
14. 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

A LABORATORY EXPERIMENT OF TIME DOMAIN REFLECTOMETRY FOR SOIL WATER MEASUREMENT INCLUDING EFFECTS OF BULK DENSITY AND TEMPERATURE

Gong Yuan-shi Cao Qiao-hong Huang Man-xiang

(Department of Soil and Water Sciences of China Agricultural University, Beijing 100094)

Summary

The semi-theoretical and -empirical calibration curve, $\theta_v = (T / T_a - T_s / T_a) / (K_w^{0.5} - 1)$, soil water content (θ_v) versus propagation time (T) of electromagnetic wave along TDR probe inserted in soil, is used to calculate soil water content. In this experiment TDR is used to measure T_s / T_a value of oven-dried soils with different texture and bulk density. The result showed that T_s / T_a value from 1.61 to 1.80 for four soils, and the larger bulk density, the larger T_s / T_a value. For three agricultural soils the average T_s / T_a can be used as 1.68. The column experiments on sandy loam and loam showed (water content from oven-dry to saturation) that different T_s / T_a values lead to water content deviation $0.001 \sim -0.005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and $0.007 \sim -0.006 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ respectively. For sandy loam with varied soil temperature, water content measured by TDR deviated from real values when it is higher than $0.30 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$. The higher temperature, the lower water content measured. This paper also indicates the deviation range of measured water content with temperature increasing (or decreasing) 1°C and its modification method.

Key words TDR, Soil water, Bulk density, Temperature