

土壤电导率对时域反射仪 测定土壤水分的影响*

曹巧红 龚元石

(中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094)

摘 要 试验通过往土壤中加入电介质溶液, 以及在不同粘粒含量土壤上用时域反射仪(TDR)测定土壤含水量, 研究结果表明: 在较低含水量情况下(砂土 $< 0.15\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, 砂质壤土 $< 0.18\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), 电导率的增加不易引起 TDR 测定值的明显偏差; 但在较高含水量下, 当溶液电导率增加到 8dS m^{-1} (砂质壤土) 和 11dS m^{-1} (砂土) 时, TDR 测得的含水量值明显高于实际值。在较高电导率($< 16\text{dS m}^{-1}$) 下, $K_a^{0.5}$ 与实际含水量仍呈较好的线性关系, 但电导率引起的介电损失影响了 $K_a^{0.5} \sim \theta$ 线性关系的斜率和截距。本文给出了考虑电导率影响的 $K_a^{0.5} \sim \theta$ 线性关系的校正方程。土壤粘粒含量的增加也会引起 TDR 测定偏差, 在低含水量时测定值偏低, 在高含水量时测定值偏高。粘粒含量 $< 50\%$ 时, 测定偏差 $< 0.02\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ 。

关键词 时域反射仪, 土壤水分, 电导率, 介电损失

中图分类号 S152.7

应用时域反射仪(TDR)测定土壤水分从 80 年代初就开始了, 早期的研究认为, 测定值与土壤质地、类型等无关, 土壤含水量(θ)与表观介电常数(K_a)的关系可用一个“通用公式”来表示^[1]。后继的研究结果表明^[2], 对于一些高比表面的介质如粘土及高电导率的盐碱土, 并不服从这种所谓的“通用公式”。

Dalton 在 90 年代初已经注意到了电导率对 TDR 测定含水量的影响^[3], 他们通过试验得出结论, 当土壤孔隙水溶液电导率接近或大于 8dS m^{-1} 时, 测定的土壤含水量偏高。他们认为需要通过试验进一步验证和解释电导率引起介电损失这一现象。White 等在进行理论分析的同时, 进行了初步试验, 认为固相物质电导率增加(往砂土中加石墨)时, $K_a^{0.5} \sim \theta$ 的线性关系依然存在, 但其斜率发生了明显的变化, 由此推测固相介电性质的改变可能会影响土壤的土-水相的介电特性^[4]。这些研究虽然是初步的, 但从中可以得到启示, 即电导率对 TDR 测定含水量的影响机理较为复杂。

为进一步揭示电导率引起的介电损失对 TDR 测定土壤含水量的影响机理, 我们通过往土壤中加入电介质溶液, 以及在不同粘粒含量的土壤上用 TDR 测定土壤含水量的试验研究, 试图解释 TDR 测定值产生偏差的原因, 为 TDR 精确测定土壤含水量(尤其在粘土和盐碱土)和溶质运移参数研究提供理论依据。

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011709)和国家科技攻关专题(95-001-02-09)资助

收稿日期: 2000-08-15; 收到修改稿日期: 2001-03-01

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传播,其信号在探针末端反射回来,土壤的表现介电常数可用下式计算^[1]:

$$K_a = (CT/2L)^2 \quad (1)$$

式中 C 为真空中的光速,相当于沿探针传播的脉冲波速度, L 为探针长度, 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:

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

代入公式(1)中,则有:

$$K_a = (T/T_a)^2 \quad (3)$$

土壤这类多孔介质被看成是三相混合物,即:土壤颗粒、水和空气。已有的试验结果表明,土壤介质遵循如下半理论、半经验的公式^[5]:

$$\theta = (T/T_a - T_s/T_a)/(K_w^{0.5} - 1) \quad (4)$$

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,土壤固相的介电常数 $K_s = (T_s/T_a)^2$ 。 K_w 为水(假定为纯水)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(4)可计算土壤体积含水量(θ , cm^3/cm^3),由公式(3)和公式(4)可得:

$$\theta = (K_a^{0.5} - K_s^{0.5})/(K_w^{0.5} - 1) \quad (5)$$

公式(5)表明, $K_a^{0.5} \sim \theta$ 之间是以 $1/(K_w^{0.5} - 1)$ 为斜率和 $K_s^{0.5}/(K_w^{0.5} - 1)$ 为截距的直线关系。对于纯水(在 20℃ 时), $K_w = 80.36$ 。因此,直线关系的斜率应为 0.1256。截距值不仅决定于质地、容重等土壤特性^[6],而且与孔隙水的介电常数也有关。作者曾就土壤容重和温度对 TDR 测定土壤水分的影响进行了分析^[6],在应用 TDR 测定土壤水分的实践中,对溶液电导率较高或粘粒含量较高的土壤,由于土壤液态水既与带电电荷表面紧密相联,又将各种离子溶解其内,对 TDR 探针来说,这两者都可产生介电损失,使得 TDR 测得的表现介电常数 K_a 与同样含水量(但不含电介质溶液)条件下的 K_a 值可能发生偏差。另外,在较高电导率下孔隙水的介电常数已不再是纯水的 K_w 值,公式(5)中的斜率和截距值不再是常数,有可能随电导率的变化发生改变。

1.2 测定方法

1.2.1 电导率影响 TDR 测值试验 准确称取一定量的 KCl 固体(分析纯),溶解于蒸馏水,配制成已知浓度的 KCl 溶液。本试验所要求溶液浓度范围为 0.00~0.16 mol L⁻¹, 间隔为 0.02 mol L⁻¹。用电导仪(DJS-上海生产)测定各溶液电导率。测定结果如表 1 所示。

表 1 不同浓度 KCl 溶液的电导率

Table 1 Electrical conductivity of solutions different in KCl concentration

KCl 浓度(mol L ⁻¹)	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
电导率($\mu\text{S m}^{-1}$, 20℃)	0.00	2.55	4.48	6.52	8.55	10.48	12.32	14.11	15.91

供试土壤为砂土和砂质壤土(表 2 中样品 1,2)。将土壤烘干 24h 后按一定容重(砂土 1.5 g cm⁻³, 砂质壤土 1.4 g cm⁻³)装入 PVC 土柱(长 35cm, 直径 10cm, 填装土实际高度为 30cm, 下同),用马氏瓶自下而上加入一定浓度的 KCl 溶液以改变土柱含水量,以 0.03 cm³ cm⁻³ 梯度递增,砂土最高含水量至 0.33 cm³ cm⁻³, 砂质壤土最高含水量至 0.42 cm³ cm⁻³。每一含水量值时分别用 TDR 和称量法测定土柱含

水量, TDR 测定值取 20 次的平均值。重新填装相同条件的土柱, 更换为另一浓度的 KCl 溶液增加土柱含水量, 重复以上测定过程, 依次获得每一溶液浓度、不同含水量时的称量法测定值和 TDR 测定值。试验装置如图 1。

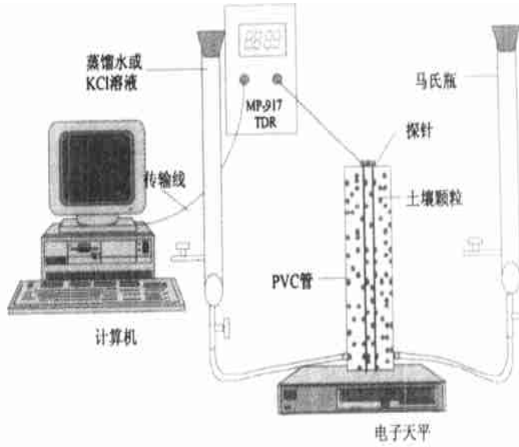


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

PVC 土柱中的实际含水量用称量法测定, 测定仪器为 Precisa 30 000D(瑞士产), 最大称量 30kg, 感量 0.1g。试验采用加拿大 ESI 公司的 MP-917 型 TDR, 探针长度 30cm, 仪器所用的标定曲线为公式(4), 由 TDR 主机直接读取每次测定的传播时间(T), 对于 30cm 长的探针, $T_a = 2ns$ (纳秒)。 T_s 值由 TDR 在土样完全烘干时测得。

表 2 供试土壤粒径分布

Table 2 Particle distribution of tested soils

样品号 Sample No.	质地名称 Texture	砂粒含量(%) Sand ($> 0.05mm$)	粉粒含量(%) Silt ($0.05 \sim 0.002mm$)	粘粒含量(%) Clay ($< 0.002mm$)
1	砂土	88.8	4.0	7.2
2	砂质壤土	68.8	21.0	10.2
3	壤土	40.8	38.0	21.2
4	粉砂质粘壤土	6.8	58.4	34.8
5	粉砂质粘土	0.8	50.4	48.8

本试验选用砂土和砂质壤土, 一是含粘粒较少, 其表面电荷和吸附离子对土壤液相的影响作用较小, 可认为加入的土壤溶液电导率近似于土壤孔隙水电导率值, 二是为了比较不同土壤上加入电解质溶液后, 对 TDR 测定含水量的影响是否有差异。

1.2.2 粘粒含量影响 TDR 测定值试验 供试土壤为壤土、粉砂质粘壤土及粉砂质粘土(表 2 中样品 3、4、5), 三种土壤分别按相同容重($1.33g\ cm^{-3}$)装入 PVC 土柱, 依次按前述方法增加含水量值, 并分别用称量法和 TDR 法测定含水量(取 20 次测定的平均值)。

2 结果与讨论

2.1 不同溶液电导率时 TDR 测定的含水量

试验结果表明, 在较低含水量情况下(砂土 $< 0.15cm^3\ cm^{-3}$, 砂质壤土 $< 0.18cm^3$

cm^{-3}), 溶液电导率增加不易引起 TDR 测定的含水量值偏高, 可能是低含水量时, 土壤中束缚水介电常数低于自由水介电常数, 抵消了部分电导率引起的介电常数增加。另外, 砂质壤土出现偏高测定值时的实际含水量要高于砂土, 这可能因砂质壤土含粘粒要多一些, 当土壤含水量不断增加时, 被粘粒吸附的“束缚水”逐渐增多, 因此, 在较高含水量时, 溶液电导率的介电损失才明显引起 TDR 测定值偏高。

当土壤溶液电导率达到一定值时, TDR 测定的含水量值高于实际含水量(图 2)。对砂土, 当含水量为 $0.15\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ 以上, 加入的溶液电导率大约为 11dS m 或更大时, TDR 测得的含水量开始偏大。对砂质壤土, 当含水量在 $0.18\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ 时, 加入溶液电导率大约为 8dS m 或更大时, TDR 测得的含水量也开始偏大。该试验结果与 Dalton 的结论相符^[3]。但是, 对于不同土壤, 引起 TDR 测定值发生突变时的临界电导率值不同, 这显然与土壤粘粒含量有关。土壤粘粒可吸附一定的电解质离子, 在向土壤中加入水溶液时, 粘粒上电解质离子可解吸溶解于水中或者其本身的表面电荷, 增加了混合介质对电磁波的介电损失。粘粒含量越高的土壤, 引起 TDR 测定值偏高的临界电导率值越小。

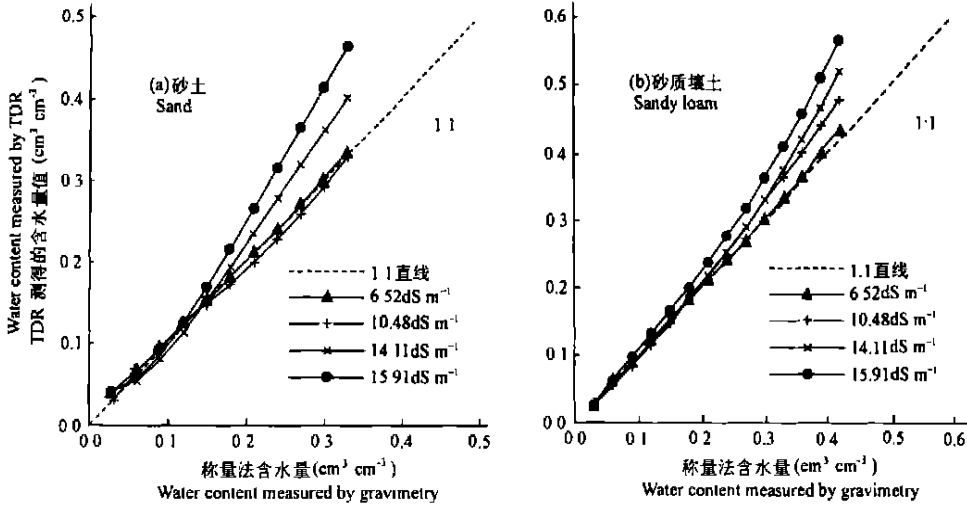


图 2 不同电导率时 TDR 测得的含水量

Fig.2 Water content determined by TDR in soils with different electrical conductivities

尽管溶液电导率导致 TDR 测定的土壤含水量偏高, 但同一电导率下, 测得的 $K_a^{0.5}$ 与实际含水量之间仍呈很好的线性关系。因此, 在一定的土壤溶液电导率范围内, 仍可用线性模型描述 $K_a^{0.5}$ 与含水量的关系, 只是斜率和截距均发生了变化, 如图 2 所示。

以砂质壤土为例, 根据计算的不同电导率下 $K_a^{0.5}$ 与含水量直线的斜率、截距, 结合公式(公式 5) 可求出不同电导率下液相介电常数($K_{a,w}$) 及固相介电常数(K_s)。由表 3 可知, 斜率值要小于原直线模型中采用的理论值 0.1256, 也就是说土壤中实际测得的 $K_{a,w}$ 大于实际采用的 80.36。同时, 当土壤溶液电导率增加时, 求得的液相介电常数也增加, 而固相介电常数减小。当土壤孔隙水为一定的含盐溶液时, 溶液电导引起介电损失; 测得的土壤孔隙水介电常数不等于 80.36。而且土壤液相离子与固相表面之间存在复杂的相

互作用, 当土壤液相离子电导起主要作用时, 固相表面离子电导相对减弱或受到“掩蔽”。因此, 当土壤液相电导率增大时, 测得的液相介电常数增大, 而固相介电常数减小。

表 3 不同电导率下计算的 $K_a^{0.5}$ 与实际含水量关系的斜率和截距(砂质壤土)

Table 3 Slope and intercept of the correlation line between $K_a^{0.5}$ calculated under different electrical conductivities and the actual water content (sandy soil)

电导率(dS m^{-1}) Electrical conductivity	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2	$K_{a,w}$	K_s
0	0.120 8	0.194 1	0.997 3	86.08	2.6
2.37	0.121 0	0.197 6	0.999 5	85.83	2.7
4.48	0.121 4	0.197 5	0.999 5	85.33	2.7
6.52	0.121 6	0.196 2	0.999 4	85.08	2.6
8.55	0.116 5	0.180 9	0.996 2	91.85	2.4
10.48	0.107 2	0.157 7	0.996 8	106.67	2.2
12.32	0.101 5	0.148 3	0.997 0	117.77	2.1
14.11	0.097 8	0.135 0	0.987 2	126.00	1.9
15.91	0.085 8	0.111 3	0.987 3	160.15	1.7

2.2 电导率引起的含水量偏差校正方法

通过以上分析得知, 由于具有一定电导率的土壤水溶液的存在, 使得在 TDR 测定过程中, 混合介质水溶液中的介电损失与纯水中的介电损失不同, 以致式(5)的斜率与截距发生了变化, 且当电导率大于 8dS m (砂质壤土)和 11dS m (砂土)时, 随着电导率的增加, 斜率和截距呈明显的下降趋势。因此, 用 TDR 对电导率较大的土壤含水量测定时, 应作必要的校正。本试验根据表 3 中斜率和截距与电导率(σ)的关系, 可拟合成如下的经验关系式(砂质壤土):

$$\theta = (-0.002\sigma^2 + 0.0012\sigma + 0.1205)K_a^{0.5} - (-0.0005\sigma^2 + 0.0022\sigma + 0.1957) \quad (6)$$

同理, 对砂土, 拟合的经验关系式:

$$\theta = (-0.0004\sigma^2 + 0.0032\sigma + 0.1243)K_a^{0.5} - (-0.0009\sigma^2 + 0.0074\sigma + 0.2197) \quad (7)$$

在高电导率土壤上用 TDR 测定含水量时, 应对不同土壤条件下测定的 $K_a^{0.5}$ 与实际含水量作校对方程, 对砂土和砂质壤土可参考如上校正式, 对其他质地类型的土壤, 应另作校对方程。

2.3 粘粒含量对 TDR 测定含水量的影响试验结果

对于三种粘粒含量不同的土壤, 以某一临界含水量为界, 在该临界值之下, TDR 测定值要比称量法含水量值小, 在该临界值以上, 则大都大于称量法含水量值(图 3)。该临界值分别为 $0.27\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (壤土), $0.32\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (粉砂质粘壤土), $0.24\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (粉砂质粘土)。

在含水量较低时, 测定的含水量值小于实际含水量, 这是由于束缚水的存在^[7], 束缚水介电常数类似于冰的介电常数或处于冰和自由水之间, 对电磁波在介质中传播影响很小^[8]。然而在高含水量时, 测定值却高于实际含水量。可能的原因是, 束缚水所占比例

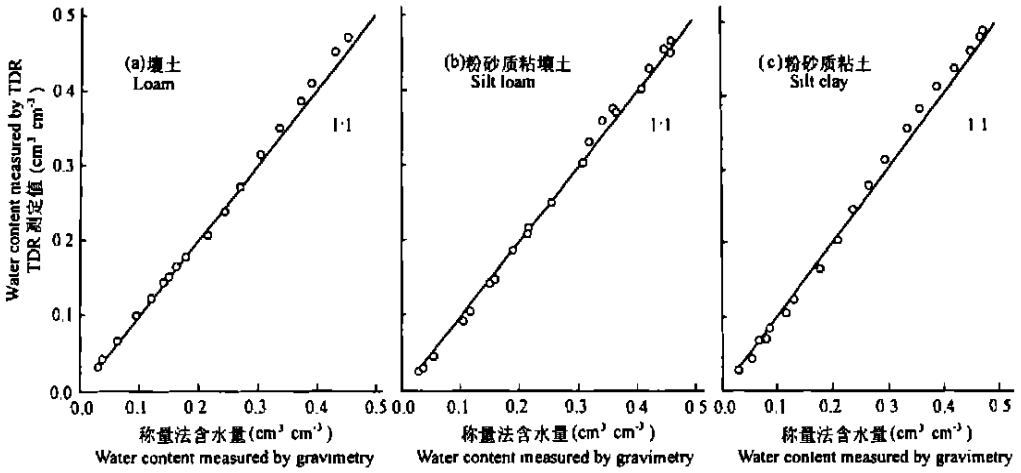


图 3 不同粘粒含量的土壤上 TDR 测定的含水量与称量法测定结果比较

Fig.3 Comparison between water contents of soils with different clay contents determined by TDR and by gravimetry

小,不再是影响 TDR 测定值的主要因素。根据 White 等提出的设想及试验结果^[4],土壤中液相是固相颗粒间便利的传导通道。如果是这样,在逐渐加水的过程中,先加入的少量水首先被土壤颗粒吸附而成为束缚水,直到水的“互联网”形成,整个土体系统成为连续导体,再加入的水成为自由水。这种连续导体很好的传导性以及自由水中溶释了固相带电表面吸附的部分离子,引起电磁波传播过程中的介电损失,使得测定值高于实际含水量。本试验供试土壤的粘粒含量均小于 50%, TDR 测定值与实际含水量之间的误差 < ±0.02 cm³ cm⁻³。

电磁波在土壤中传播,介电损失可能由水溶液中电解离子引起,也可能由固相表面电荷引起,低含水量时束缚水作用抵消了部分电导损失;高含水量时,测得的含水量值主要依赖于水溶液介电常数。试验结果表明,高含水量时粘粒含量对 TDR 测定值的影响更体现在粘粒对孔隙水介电性质的改变,而不是仅作为固相导体的作用(见表 4,表中各参数确定方法同表 3)。

表 4 粘粒含量不同土壤上测得的 $K_a^{0.5} \sim \theta$ 直线关系参数

Table 4 Parameters of the measured linear correlation between $K_a^{0.5}$ and actual water content in soils with different clay contents

样品号 Sample No	斜率 Slope	截距 Intercept	R^2	$K_{a,w}$	K_s
3	0.119 2	0.192 1	0.998 3	88.16	2.60
4	0.120 7	0.197 4	0.997 6	86.21	2.67
5	0.117 6	0.184 4	0.997 8	90.31	2.46

表 4 显示对于以上三种土壤 $K_a^{0.5}$ 与实际含水量之间仍存在很好的直线关系。在此基础上求出的土壤液相介电常数均大于理论值 80.36,同时求得的 K_s 值均小于各自容重

条件下的理论值 2.96。表明土壤固、液相间相互作用确实引起了各相介电性质的改变。粘壤土和粘土上的结果表明, 增加土壤中粘粒含量, 尽管也改变了液相介电性质, 但更大程度上改变了土壤中固相的介电性质, 这与人们通常的认识一致, 加入带表面电荷的粘粒, 首先改变的是土壤固相的介电性质。

3 结 论

电导率引起的含水量测定值偏差首先与土壤含水量有关, 在较低含水量下, 电导率增加不易引起 TDR 测定值偏高。当含水量较高且溶液电导率增加到 $8 \sim 11 \text{ dS m}^{-1}$ 时, TDR 测得的含水量值明显高于实际值。不同的土壤, 该临界值不同, 砂土为 11 dS m^{-1} , 砂质壤土为 8 dS m^{-1} 。随土壤液相电导率增加, 增加了土壤孔隙水的介电常数, 降低了土壤固相介电常数。土壤溶液中电解离子不仅引起介电损失, 而且固液相相互作用会改变土壤的介电性质。

电导率影响了 $K_a^{0.5}$ 与含水量直线关系的斜率和截距。斜率、截距均随电导率增加呈二次曲线式下降, 对于一定的土壤, 可根据建立的关系式校正测定结果。

土壤中粘粒含量作为带电固相, 其含量的增加也会引起介电损失从而出现偏高的含水量值。试验结果表明粘土在低含水量时主要表现为束缚水的影响, 测定值偏低; 在高含水量时由于固相及其影响了液相引起的介电损失影响, 测定值偏高。在本研究中, 供试土壤粘粒含量小于 50%, 测定偏差小于 $\pm 0.02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 。若从实用角度出发, 对于以上几种土壤, 可以不考虑粘粒含量对 TDR 测定值的影响。

土壤溶液电导率和土壤粘粒含量的变化能够导致土壤介电性质发生变化, 从而引起 TDR 测定结果的偏差。在使用 TDR 进行精确测定过程中, 这些因素的影响作用应予以考虑。

致 谢 感谢加拿大 E. S. I (Environmental Sensors INC.) 公司孙宗嘉博士的指导和帮助

参 考 文 献

1. Topp G C, Davis J L, Aman A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 1980, 16: 574~ 582
2. Dirksen C, Dasberg S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 660~ 667
3. Dalton F N. Development of time domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. In: Topp G C. ed. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bring Theory into Practice*. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, SSSA Spec. Publ. 30, 1992. 143~ 167
4. White I, Zegelin S J, Topp G C, Fish A. Effect of bulk electrical conductivity on TDR measurement of water content in porous media. In: *Symposium and workshop led. Time Domain Reflectometry In Environmental, Infrastructure, and Mining Application*; Illinois, Sept., 7~ 9, 1994. 294~ 308
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. 龚元石, 曹巧红, 黄满湘. 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~ 152

7. Hook W R, Livingston N J. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59: 35~ 41
8. Dobson M C, Uklby F T, Hallikainen M T., El-Rayes M A. Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*. 1985, GE 23: 35~ 46

EFFECT OF SOIL BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY ON TIME DOMAIN REFLECTOMETRY MEASUREMENT OF SOIL WATER CONTENT

Cao Qiao hong Gong Yuan-shi

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

Summary

Time domain reflectometry (TDR) is widely used in determining water content for general agricultural soils. But for soils with high bulk electrical conductivity, such as saline soils or heavy clay soils, the TDR measurement was not ideal because of dielectric losses. Based on experiments, this work intended to explain the phenomenon of TDR measured value deviating from actual water content. The result showed: when the water content was low (sand, $< 0.15\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$; sandy loam, $< 0.18\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), increasing electrical conductivity was not likely to induce a higher measured value. While the water content was high and the electrical conductivity up to 8dS m^{-1} (sandy loam) and 11dS m^{-1} (sand), TDR measured value was apparently higher than the actual water content. In the case of higher electrical conductivity ($< 16\text{dS m}^{-1}$), K_a was still in linear relationship with the actual water content, while the slope and intercept were influenced by dielectric loss. In this study, a calibration equation was set up, considering the influence of electrical conductivity was set up. The increase in soil clay particle content also induced TDR measurement deviation. When the soil water content was low, the measured value was lower, and when the soil water content was high, the measured value was higher. If the clay content was $< 50\%$, the measured error would be $< \pm 0.02\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$.

Key words TDR, Soil water content, Electrical conductivity, Dielectric loss