

利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 II. 应用*

任图生 邵明安

(中国科学院地理资源所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

巨兆强

(中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094)

Horton Robert

(Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, IA 50010, USA)

摘要 土壤含水量、温度、热特性以及其它物理参数的动态监测是描述土壤中各种物理、化学和生物过程的基础。本文利用热脉冲-时域反射技术(Thermo-TDR)对不同质地土壤的含水量、电导率、温度、容积热容量、导热率和热扩散系数进行了测定,并利用土壤容积热容量与容重和含水量的关系,计算了土壤容重、通气孔度和饱和度。结果表明,Thermo-TDR 技术能够提供可靠的土壤含水量、温度、容重、通气孔度和饱和度的信息。本文也分析了 Thermo-TDR 技术的测定误差并探讨了降低误差的对策。

关键词 热脉冲-时域反射;土壤物理性质;定位测定

中图分类号 S152 文献标识码 A

随着电子技术的进步,土壤水热动态以及物理参数的测定技术在过去 20 年中取得了长足的进展。时域反射技术(Time Domain Reflectometry, TDR)能够自动监测土壤含水量和电导率^[1-4],热脉冲技术则完成了土壤导热率、容积热容量和热扩散系数的实时定位测定^[5,6]。TDR 技术和热脉冲技术不仅自动化程度高,而且对土壤结构影响轻微,正在广泛应用于土壤水分空间变异性、溶质运移、水流速率等方面的研究^[7-9]。Ren 等将热脉冲技术和 TDR 技术结合起来,利用热脉冲-时域反射技术(Thermo-TDR)实现了同一位置、相同体积土壤上含水量、电导率、导热率、容积热容量和热扩散系数的连续定位测定^[10]。文献[11]介绍了 Thermo-TDR 的原理、探头结构和计算方法,并建立了利用 Thermo-TDR 技术计算土壤容重、通气孔度以及饱和度的方程:

$$\theta = -0.16 + 7.01 \times 10^{-2} K_a - 4.03 \times 10^{-3} K_a^2 + 8.76 \times 10^{-5} K_a^3 \quad (1)$$

式中, θ 代表土壤含水量($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), K_a 为从 TDR 得到的土壤介电常数。

$$EC_b = \frac{K_c}{R_s} f_T \quad (2)$$

式中, EC_b 表示土壤电导率(dS m^{-1}), K_c 是 TDR 探头的几何参数(m^{-1}), R_s 是样品电阻(Ω), f_T 是温度系数。

$$\alpha = \frac{r^2}{4} \left[\frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m} \right] / \ln \left[\frac{t_m}{(t_m - t_0)} \right] \quad (3)$$

$$\rho c = \frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_m - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m} \right) \right] \quad (4)$$

$$\lambda = \alpha \rho c \quad (5)$$

式(3)~(5)中, λ 、 ρc 和 α 分别表示土壤导热率($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)、容积热容量($\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)和热扩散系数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), r 是热电偶距线性热源的垂直距离(m), t_0 是热脉冲的时长(s), q 是单位时间内单位长度加热丝释放的热量(W m^{-1}), ΔT_m 是 r 处的最大温度升高值(K), t_m 是 ΔT_m 对应的时间(s)。

$$\rho_b = \frac{\rho_c - \rho_w c_w \theta}{c_s} \quad (6)$$

* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-411, U871)、国家自然科学基金项目(40025106)和河北省自然科学基金项目(300309)资助

作者简介:任图生,男,土壤物理学博士,从事土壤与环境物理研究。E-mail:rents@igsnr.ac.cn

收稿日期:2003-05-16;收到修改稿日期:2003-11-20

$$n_a = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} - \theta \quad (7)$$

$$S = \frac{\theta}{1 - (\rho_b/\rho_s)} \quad (8)$$

式(6)~(8)中, ρ_b 、 n_a 和 S 分别代表土壤容重 (Mg m^{-3})、通气孔度和饱和度, c_s 和 c_w 分别是土壤固体和水的比热 ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), ρ_s 和 ρ_w 分别是土壤固体和水的比重 (Mg m^{-3})。

本文介绍了 Thermo-TDR 技术在不同质地土壤上测定水热动态以及物理参数的应用, 通过对 Thermo-TDR 测定值与其它技术测定值以及模型预测值的比较, 检验了该技术的可靠性, 并指出了可能的误差来源和提高途径。

1 材料与方法

1.1 Thermo-TDR 探头标定

TDR 探头几何参数 K_c 采用 Heimovaara 等介绍的方法标定^[8]。将探头依次放入一组已知电导率的标准溶液中, 利用 WinTDR 软件自动记录 TDR 波形^[12]。通过波形数据计算反射率 ρ_∞ 和负载总电阻 (R_L)。最后, 对电导率及对应的 R_L 进行线性回归

分析得到 K_c 和 R_{cable} (电缆测试仪、连接器以及同轴电缆的电阻)。

两侧温度探针与中部加热探针间的距离 (r) 利用热脉冲技术在浓度为 5 g L^{-1} 的琼脂溶液中标定。琼脂的作用是防止加热时水的自然对流^[13]。取琼脂溶液的容积热容量为 $4.18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, 通过非线性拟合温度-时间曲线得到 r ^[14]。标定过程重复 10 次。

1.2 供试土壤

土壤含水量和热特性的供试土壤取自河北省石家庄市附近的农田和滩地。土壤质地分砂土、粉质粘壤土和两种粉壤土。对砂土、粉质粘壤土和其中一种粉壤土, 首先将样品进行风干和过筛 (2 mm) 处理, 然后与蒸馏水均匀混合, 按不同含水量和容重分别装填于容积为 100 cm^3 、一边开口的环刀中, 得到一系列含水量和容重的装填土柱。最后, 将环刀用保鲜纸密封并放置于恒温室中使其与环境温度平衡。对另外一种粉壤土, 用环刀直接在田间不同含水条件下取原状土样, 然后放置于室内平衡温度。装填土柱和原状土柱的每个容重都重复三次。表 1 是测试土壤的颗粒组成 (比重计法)、有机质含量以及装填土柱的容重和含水量范围。

表 1 土壤质地、有机质含量以及土柱的容重和含水量

Table 1 Particle-size distribution and organic matter (OM) content of the soils, and bulk density (ρ_b) and water content (θ) of the soil columns

质地 Texture	颗粒组成 Particle-size distribution (%)			有机质 Organic matter (g kg^{-1})	容重 Bulk density (Mg m^{-3})	含水量 Water content ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
	> 0.05 mm	0.002 ~ 0.05 mm	< 0.002 mm			
粉质粘壤土 Silty clay loam	12.1	55.5	32.4	11	1.06 ~ 1.47	0.05 ~ 0.40
粉壤土 (装填土) Silt loam (packed)	23.5	63.5	13.0	9.0	0.91 ~ 1.45	0.07 ~ 0.40
粉壤土 (原状土) Silt loam (intact)	17.0	58.1	24.9	23.0	1.24 ~ 1.41	0.07 ~ 0.29
砂土 Sand	97.5	0.2	2.3	0.0	1.01 ~ 1.44	0.04 ~ 0.20

为了计算土壤容重、通气孔度和饱和度, 用烘干土对上述 4 种土壤固体的比热和比重进行了测定。土样烘干后, 采用相同方法制作装填土柱, 用热脉冲

技术测定其容积热容量, 然后根据容积热容量、含水量、容重和比热的关系, 计算土壤固体的比热^[13]。土壤固体的比重采用比重瓶法测定。结果见表 2。

表 2 土壤固体部分的比重 (ρ_s)、比热 (c_s) 和容积热容量 ($\rho_s c_s$)

Table 2 Measured particle density (ρ_s), specific heat (c_s), and volumetric heat capacity ($\rho_s c_s$) of the soil solids

质地 Texture	ρ_s (Mg m^{-3})	c_s ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	$\rho_s c_s$ ($\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
粉质粘壤土 Silty clay loam	2.69	0.973	2.617
粉壤土 (装填土) Silt loam (packed)	2.67	0.913	2.438
粉壤土 (原状土) Silt loam (intact)	2.59	0.913	2.365
砂土 Sand	2.74	0.881	2.414

土壤电导率研究在美国阿华州立科技大学完成。供试土壤为粘壤土, 砂粒含量 37.3%, 粘粒含量 28.4%, 有机质含量 11 g kg^{-1} 。将土样风干、过筛(2 mm)后, 与不同浓度的 NaCl 溶液混合, 并按照不同含水量装填于内径 5.2 cm、高 6.0 cm 的带底环刀中。装填土柱的容重保持在 $1.05 \sim 1.10 \text{ Mg m}^{-3}$ 。最后, 将密封土柱放置于恒温室待测。

1.3 测试及分析

图 1 是实验室测试装置。土样在室温下与环境平衡 24 h 后, 把 Thermo-TDR 探头垂直向下匀力插入土样。将同轴电缆、热电偶和加热丝引线分别与电

缆测试仪、数据采集仪、直流电源以及继电器相连接。测试开始后, 利用 WinTDR 软件定时自动记录 TDR 波形、介电常数、含水量和电导率。数据采集仪在设定时间向中部探针提供 15 秒热脉冲, 并记录通过线性热源的电流以及两侧探针的温度变化。加热能量的大小根据土壤含水量调节, 一般保持两侧探针温度的最大升高值为 $0.8 \sim 1.0 \text{ K}$ 。每个样品重复测定 3 次, 测定间隔为 60 min。测定完毕后, 将样品转入铝盒, 用烘干法测定其容重和含水量。测试期间实验室温度保持在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

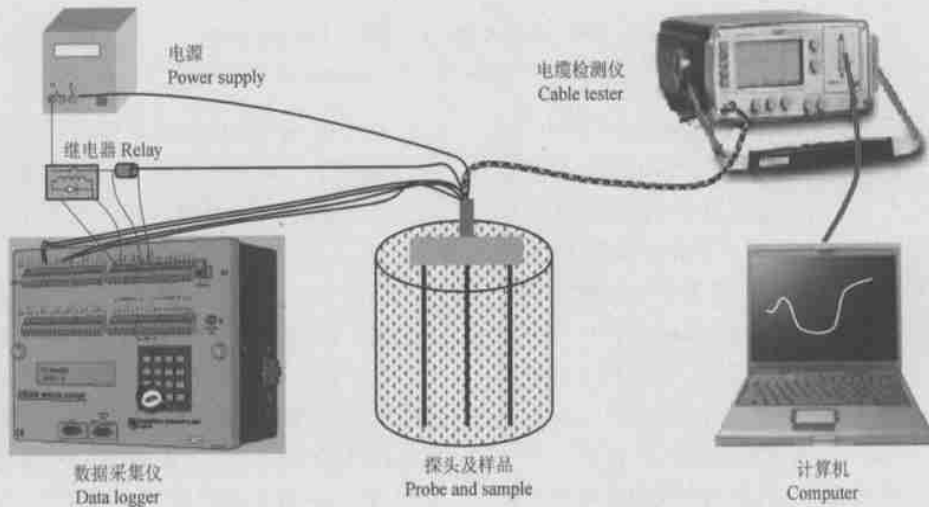


图 1 实验室测试装置

Fig.1 Laboratory equipment used for Thermo-TDR measurement

土壤热特性利用文献[12]介绍的方法, 通过非线性拟合温度-时间曲线得到。土壤容重、通气孔度和饱和度利用公式(6)~(8)计算。

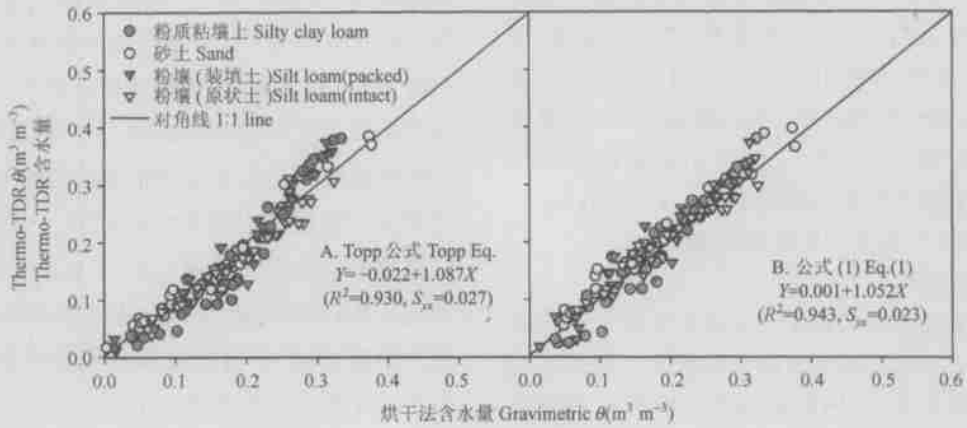
2 结果与讨论

2.1 土壤含水量

图 2 是不同容重下 4 种土壤 Thermo-TDR 含水量数据与烘干法测定结果的比较。为了便于分析, 分别以图 2A 和图 2B 表示根据 Topp 公式^[1]和公式(1)的结果。尽管土壤质地差异明显, 容重变化较大, 图中数据的变化趋势基本一致, 表明土壤质地和容重对 Thermo-TDR 测定含水量没有显著影响。比较图 2A 和图 2B 可以看出, 公式(1)得到的 Thermo-TDR 含水量与烘干法所得结果基本一致, Topp 公式所得数据则在含水量低于 $0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 时稍低于实际含水量, 而在含水量高于 $0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 时比实际值

偏高。相关系数和回归分析的结果也表明公式(1)得到的含水量准确性比 Topp 公式高。因此, 为了保证 Thermo-TDR 测定含水量的准确性, 应当建立独立的 $\theta-K_s$ 关系式。其他研究者在较短 TDR 探头上也得到类似结果^[15,16]。对于本研究使用的 Thermo-TDR 探头, 公式(1)可以普遍地应用于土壤含水量与介电常数的转化。

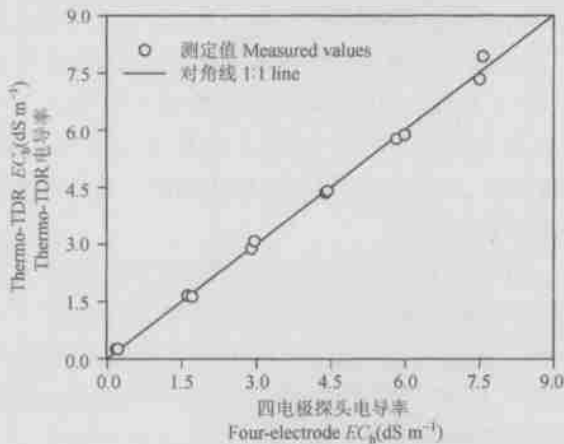
需要指出的是, 测定和计算过程产生的误差对 Thermo-TDR 得到的土壤含水量的准确性也有一定影响。首先, 由于 Thermo-TDR 探头比常规 TDR 探头要小, 轻微拉动同轴电缆、加热丝引线或热点偶线都可能影响探针和土壤的接触, 从而增加探针和土壤之间的孔隙, 导致介电常数的读数偏小。其次, 脉冲信号传播时间一般通过分析确定 TDR 波形上切线的交叉点完成^[12]。这种方法的准确性与 TDR 波形的噪音、曲线斜率以及反射率的高低有关, 受电缆

图2 Thermo-TDR 土壤含水量(θ)与烘干法含水量的比较Fig.2 Comparison of Thermo-TDR θ versus gravimetric θ

长度和连接器等的影响很大。Heimovaara 指出,对于探针长度小于 0.05 m 的探头,同轴电缆的长度不应超过 3.2 m^[17]。本研究将所用探头同轴电缆的长度都控制在 2 m 以内。另外,由于介电常数 K_a 与探针长度 L 的平方成反比,较小的 L 误差可能导致较大的 K_a 误差。这对探针较短的 Thermo-TDR 探头尤为重要。采用探针的表观长度(L')能够减小这种误差。 L' 可以在已知介电常数的介质(如空气或蒸馏水)中标定^[17]。最后,公式(1)是在含水量 0.03 ~ 0.40 m³ m⁻³内得到的^[10],其应用不应超过此含水量范围。

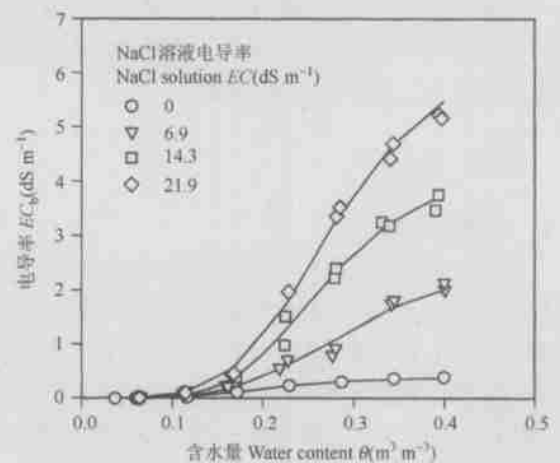
2.2 土壤电导率

Thermo-TDR 技术和四电极探头法在饱和粘壤土上获得的土壤电导率结果见图3。两种方法在

图3 Thermo-TDR 技术与四电极法测定饱和土壤电导率(EC_b)的比较Fig.3 Comparison between Thermo-TDR and the four-electrode technique in bulk soil electrical conductivity (EC_b) of a saturated soil

0.2 ~ 7.9 dS m⁻¹的电导率范围内所得结果高度一致,相关系数为 0.997,表明 Thermo-TDR 技术能够准确测定土壤电导率,可以应用于饱和土壤盐分运移的监测。

不饱和土壤电导率的测定是土壤物理学中的一个难题。在 TDR 技术出现前,常用四电极探头法测定田间土壤电导率^[18]。由于四电极探头读数的稳定性受探头与土壤接触的影响,该技术在不饱和土壤上的应用受到了一定限制^[19]。对粘壤土的研究证明,Thermo-TDR 具有较高的稳定性,能够准确反映土壤电导率随含盐量和含水量的变化(图4)。因此,Thermo-TDR 技术克服了四电极探头法稳定性差的缺点,是描述非饱和土壤盐分动态的有效工具。

图4 Thermo-TDR 电导率(EC_b)随溶液电导率和土壤含水量(θ)的变化Fig.4 Thermo-TDR measured bulk electrical conductivity (EC_b) as a function of solution electrical conductivity and soil water content (θ)

2.3 土壤热特性

首先,对 Thermo-TDR 技术得到的土壤热特性与理论值进行了比较。土壤容积热容量的理论值利用 Campbell 的公式计算^[20]。其中,土壤容重为烘干法实测值,干土比热来自表 2(Thermo-TDR 实测值),土壤含水量为 Thermo-TDR 测定值。土壤导热率理论值的计算采用了文献中大量使用的 de Vries 模型^[21]。

图 5 是 Thermo-TDR 土壤热特性与理论值的比

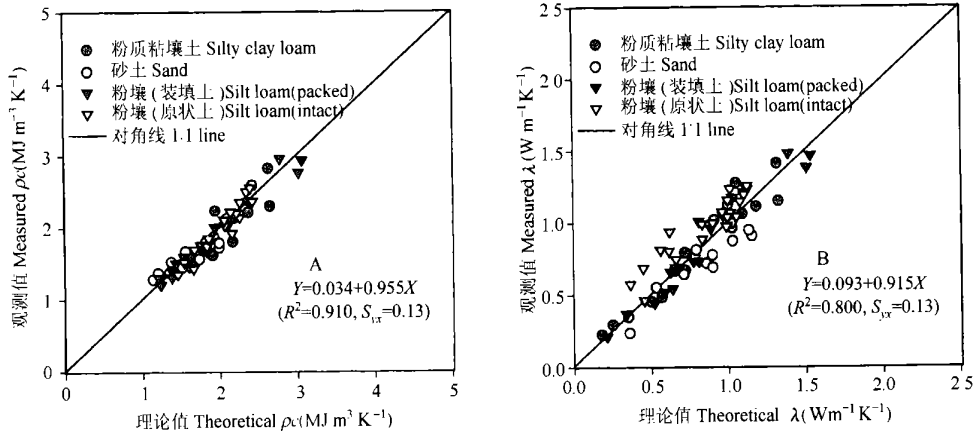


图 5 Thermo-TDR 土壤容积热容量(ρc)和导热率(λ)与理论值的比较

Fig.5 Comparison of Thermo-TDR measured soil heat capacity (ρc) and thermal conductivity (λ) against theoretical values

对于田间土壤,影响土壤热特性的主要因子是土壤含水量。图 6 是原状粉壤土热扩散率、容积热容量和导热率随土壤含水量的变化情况。可以看出,土壤容积热容量与含水量呈线性相关。含水量较低($<0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)时,增加土壤含水量有效地提高了土壤颗粒之间的连接,使土壤导热率随含水量呈非线性增长。当含水量进一步增加时,土壤热传导率则随含水量呈线性增加。由于土壤热扩散率为导热率与容积热容量之比,其随含水量的变化决定于土壤容积热容量和导热率随含水量增加率的相对大小。当含水量较低时,容积热容量的增加率小于导热率的增加率,热扩散率随含水量快速增长,而当含水量继续增加时,由于容积热容量的增加率大于导热率的增加率,热扩散率随含水量呈下降趋势。值得指出的是,该土壤容重在测定期间的变化范围较小($1.29 \sim 1.35 \text{ Mg m}^{-3}$)。如果田间土壤的容重变化较大,土壤热特性与含水量的关系会更加复杂。

2.4 土壤容重、通气孔度和饱和度

由于原状粉壤土容重在测定期间变化较小,图 7 只给出了其他三种质地土壤 Thermo-TDR 容重与

较结果。显然,Thermo-TDR 测定的土壤容积热容量和导热率与理论值存在很好的吻合,相关系数分别达到 0.910 和 0.800,回归预测的剩余标准差分别为 $0.13 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ 和 $0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。图 5B 中,原状粉壤土导热率的测定值大于模型预测值,可能与原状土中土壤结构利于热量传导有关,而 de Vries 模型未考虑土壤结构对导热率的影响。另外,含水量较高时砂土导热率的测定值低于模型预测值,其原因有待进一步探索。

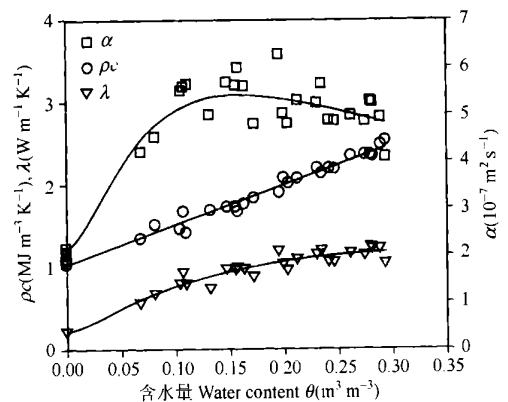


图 6 Thermo-TDR 测定的原状粉壤土容积热容量(ρc)、导热率(λ)和热扩散系数(α)与含水量(θ)的关系
Fig.6 Thermo-TDR measured soil heat capacity (ρc), thermal conductivity (λ), and thermal diffusivity (α) as a function of soil water content (θ) on the undisturbed soil

烘干法实测值的比较。结果表明,Thermo-TDR 土壤容重值与实测值之间也呈显著的线性关系,但结果的准确性比土壤含水量和热特性要低(决定系数为 0.638)。这是土壤容重的准确性受 TDR 含水量准

确性和干土比热以及容积热容量准确性共同影响的结果(公式(6))。尽管如此,图7中回归预测的剩余标准差仅 0.084 Mg m^{-3} ,对大多数土壤研究是完全能够接受的。应当继续探讨提高 Thermo-TDR 测定土壤含水量和容积热容量准确性的技术,例如适当增加探针的直径和长度,降低探针入土时的摆动,并保证探针和土壤的有效接触等。

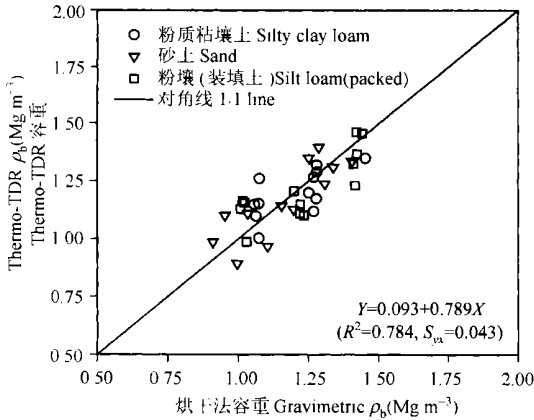


图7 Thermo-TDR 土壤容重(ρ_b)与烘干法容重的比较

Fig.7 Comparison of bulk density (ρ_b) results from Thermo-TDR against gravimetric values

图8和图9分别显示土壤通气孔度和饱和度的计算值与烘干法测定结果的比较。图中数据基本上随机分布于对角线两侧,而且三种不同质地土壤呈现相同的趋势。线性相关分析指出,通气孔度计算值与实际值的相关系数为0.784,饱和度计算值与实际值的相关系数为0.944,均高于土壤容重计算值与实际值的相关系数。这些结果表明,利用 Thermo-TDR 提供的含水量和容积热容量信息能够得到合理可靠的通气孔度和饱和度。

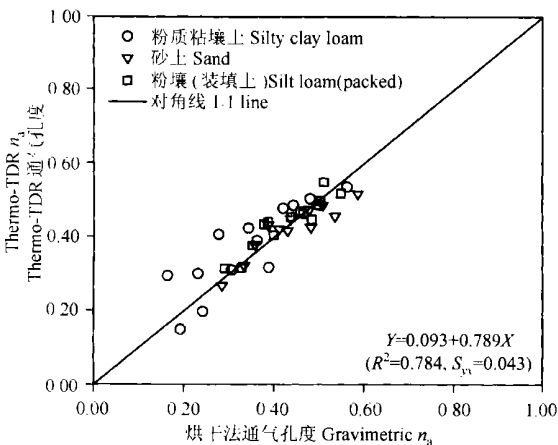


图8 Thermo-TDR 土壤通气孔度(n_a)与烘干法测定值的比较

Fig.8 Comparison of air-filled porosity (n_a) from Thermo-TDR with gravimetric values

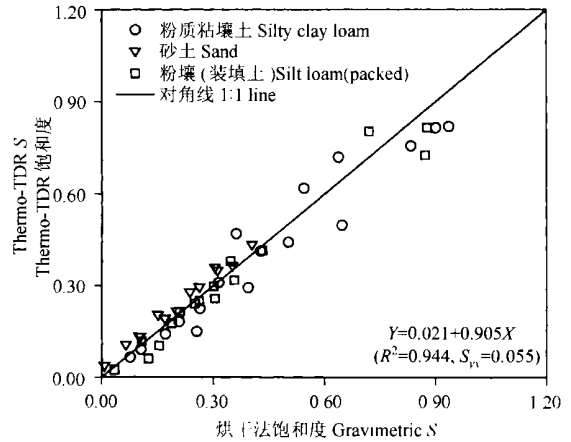


图9 Thermo-TDR 土壤饱和度 S 与烘干法测定值的比较

Fig.9 Comparison of degree of saturation S from Thermo-TDR with gravimetric values

3 结论

在不同质地土壤上的实验表明, Thermo-TDR 技术能够提供比较可靠的土壤含水量、电导率、容积热容量、热扩散系数和导热率信息,根据 Thermo-TDR 含水量和容积热容量计算的土壤容重、通气孔度和饱和度与实测值存在较好吻合。通过优化探头设计、提高波形分析技术并精确确定探针长度,将进一步提高 Thermo-TDR 技术测定的准确性,也是值得深入探讨的课题。

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] Dalton F N, Herkelrath W N, Rawlins D S, *et al.* Time domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 1984, 224:989 ~ 990
- [3] 龚元石, 廖超子. 测定土壤含水量的新技术-时域反射仪. 石元春等主编. 节水农业应用基础研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1995. 48 ~ 55. Gong Y S, Liao C Z. Time domain reflectometry - A new technique for measuring soil water content. In: Shi Y C, *et al.* eds. *Advances in Water-saving Agricultural Researches* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 1995. 48 ~ 55
- [4] 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 ~ 153. Gong Y S, Cao Q H, Huang M X. A laboratory experiment of time domain reflectometry for soil water content measurement including effects of bulk density and temperature (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 145 ~ 153
- [5] Bristow K L, Kluitenberg G J, Horton R. Measurement of soil ther-

- mal properties with a dual-probe heat-pulse technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58; 1 288 ~ 1 294
- [6] Bilskie J R, Horton R, Bristow K L. Test of a dual-probe heat-pulse method for determining thermal properties of porous materials. *Soil Science*, 1998, 163; 346 ~ 355
- [7] Topp G C, Reynolds W D. Time domain reflectometry: A seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47; 125 ~ 132
- [8] Heimovaara T J, Focke A G, Bouten W, *et al.* Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59; 689 ~ 698
- [9] Ren T, Kluitenberg G J, Horton R. Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64; 552 ~ 560
- [10] Ren T, Noborio K, Horton R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63; 450 ~ 457
- [11] 任图生, 邵明安, 巨兆强, 等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 I. 原理. *土壤学报*, 2004, 41(2): 266 ~ 230. Ren T S, Shao M A, Ju Z Q, *et al.* Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry I. Theory (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 266 ~ 230
- [12] WinTDR99. Time Domain Reflectometry soil sample analysis program. 1999. (Available on-line with updates at <http://psb.usu.edu/Wintdr99/index.html>)
- [13] Campbell G S, Calissendorff C, Williams J H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55; 291 ~ 293
- [14] Welch S M, Kluitenberg G J, Bristow K L. Rapid numerical estimation of soil thermal properties for a broad class of heat-pulse emitter geometries. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, 7; 932 ~ 938
- [15] Shaun F K, Selker J S, Green J L. Using short moisture probes with high-bandwidth time domain reflectometry instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59; 97 ~ 102
- [16] Hudson D B, Wierenga P J, Hills R G. Unsaturated hydraulic properties from upward flow into soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60; 388 ~ 396
- [17] Heimovaara T J. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57; 1 410 ~ 1 417
- [18] Rhoades J D, van Schilfgaard J. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1976, 40; 647 ~ 651
- [19] 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
- [20] Campbell G S. *Soil Physics with BASIC - Transport Models for Soil-Plant Systems*. New York: Elsevier, 1985
- [21] de Vries D A. Thermal properties of soils. *In*: van Wijk W R, ed. *Physics of Plant Environment*. Amsterdam, Netherlands: North-Holland Publ. Co., 1963. 210 ~ 235

MEASUREMENT OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES WITH THERMO- TIME DOMAIN REFLECTOMETRY II. APPLICATION

Ren Tusheng Shao Mingan

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Ju Zhaoqiang

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

Horton Robert

(Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, IA 50010 USA)

Abstract Abstract Dynamic information of soil water, temperature, thermal properties and other physical parameters is vital for describing the physical, chemical, and biological processes in the vadose zone. Recent development of the thermo-Time Domain Reflectometry (Thermo-TDR) opens up an opportunity for such purposes. In this study, the Thermo-TDR technique is applied to simultaneously determine water content, electrical conductivity, heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity in soils of various textures. Soil bulk density, air-filled porosity, and degree of saturation are then obtained from the dependence of soil heat capacity on water content and bulk density. The results indicate that the Thermo-TDR measured soil water, electrical, and thermal properties, as well as other physical parameters, agree well with the results from theoretical models or gravimetric measurements. Further improvement in probe design, waveform interpretation, and determination of the effective probe length will increase the measurement accuracy of the Thermo-TDR technique.

Key words Thermo-TDR; Soil physical property; Measurement