

# 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\*

任图生 邵明安

(中国科学院地理资源研究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** 由于土壤特性的时空变异性, 对土壤含水量、温度、热特性以及其它物理参数的动态监测是土壤学研究的重要课题。本文以热脉冲技术和时域反射技术的理论为基础, 介绍了利用热脉冲技术—时域反射技术(Thermo-TDR)连续定位测定土壤含水量、电导率、温度和热特性的原理, 并利用土壤热特性与容重和含水量的关系, 导出了土壤容重、饱和度和通气孔度的计算公式。

**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

土壤水热动态以及土壤物理参数的测定是研究土壤状态和土壤中各种物理、化学和生物过程的基础。由于土壤物理性质具有显著的空间和时间变异性, 对土壤含水量、温度以及其它物理参数的连续定位测定一直是土壤学研究的难题。20 世纪 80 年代出现的时域反射技术(Time Domain Reflectometry, TDR)实现了土壤含水量和电导率的实时定位监测, 在土壤水分空间变异性 and 溶质运移研究中得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>。近年来, 随着数据采集技术和计算机技术的发展, 热脉冲技术越来越多地被应用于土壤导热率、容积热容量和热扩散系数的测定<sup>[6-8]</sup>。与其它技术相比, TDR 技术和热脉冲技术具有快速、对土壤结构影响轻微和自动化程度高等优点。

然而, 由于 TDR 技术和热脉冲技术具有相对独立的探头, 二者的观测位置和观测时间即使在同一土壤上也不尽相同, 所获得的土壤含水量、电导率和土壤热特性必然受到土壤时空变异性的影响。Ren 等将热脉冲技术和 TDR 技术结合起来, 提出了热脉冲—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、温度、容积热容量、

导热率和热扩散系数的连续定位测定<sup>[9]</sup>。本文首先介绍了 TDR 测定土壤含水量和电导率以及热脉冲技术测定土壤热特性的理论, 并根据土壤热特性与含水量和其它土壤物理特性的关系, 进一步给出了利用 Thermo-TDR 技术测定土壤容重、饱和度以及通气孔度的原理。

## 1 时域反射技术测定土壤含水量和电导率

### 1.1 土壤含水量

TDR 技术是一种测定物体空间位置和特性的电子遥感技术。土壤研究中常见的 TDR 探头由三根与同轴电缆相连接的探针(不锈钢棒或铜棒)组成。沿着同轴电缆传播的脉冲信号(电磁波)到达埋设在土壤中的探针时, 由于阻抗变化, 部分信号被反射回电缆检测仪, 而剩余信号继续沿探头前进。当信号到达探针末端时, 阻抗变化产生第二个反射信号并被送回检测仪。对于已知长度( $L$ )的探针, 脉冲信号的传播速度( $V_p$ )可以表示为<sup>[3]</sup>,

$$V_p = \frac{2L}{t} \quad (1)$$

\* 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, 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: 2003-11-05

其中,  $t$  为信号两次反射之间的时间,  $2L$  表示脉冲信号沿探针来回走了一次。

研究表明, 电磁波在非均匀介质中的传播速度决定于该介质的介电常数( $K_a$ )<sup>[3]</sup>:

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad (2)$$

其中,  $c$  为电磁波在真空中的速度( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )。

由公式(1)和(2)可以得到:

$$K_a = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (3)$$

在常温下, 空气、土壤矿物质和水的介电常数分别为 1、3~5 和 81。因此, 土壤介电常数的大小在很大程度上取决于土壤含水量的多少。Topp 等在一系列不同土壤上的研究表明, 土壤体积含水量( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )与  $K_a$  的关系可以用一个三次多项式方程表示<sup>[1]</sup>,

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

大量研究表明, 除特殊土壤(如有机土壤以及盐分、粘粒和铁氧化物含量过高的土壤)外, 应用 Topp 公式所得到的  $\theta$  误差不超过  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 而且受土壤质地、容重、环境温度以及含盐量的影响很小。然而, 对于探针较短( $< 10 \text{ cm}$ )的 TDR 探头, 公式(4)给出的  $\theta$  与实际测定值往往存在一定误差<sup>[10]</sup>。Ren 等建立的关于 Thermo-TDR 探头  $\theta$ - $K_a$  ( $\theta < 0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) 的函数关系为<sup>[9]</sup>,

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

## 1.2 土壤电导率

当电磁波沿着埋在土壤中的探针传播时, 其能量因土壤导电性而成比例损失。TDR 正是通过检测这种能量损失来测定土壤电导率。电缆检测仪不仅检测脉冲信号的传播时间, 而且把信号的反射率( $\rho$ ), 即反射电压( $V_R$ )与发射电压( $V_0$ )的比值, 随传播时间的变化在示波器上显示出来<sup>[3]</sup>:

$$\rho = \left( \frac{V_R}{V_0} \right) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

这里,  $Z_0$  和  $Z_L$  分别代表电缆和负载(探头+土壤)的阻抗值( $\Omega$ )。当电磁波频率相当低时,  $Z_L$  等于负载的电阻( $R_L$ , 电缆测试仪、连接器、同轴电缆电阻以及土壤中探头的电阻之和)。用  $R_L$  替代  $Z_L$ , 公式(6)可以转化为,

$$R_L = Z_0 \frac{1 + \rho_\infty}{1 - \rho_\infty} \quad (7)$$

其中,  $\rho_\infty$  是反射信号达到稳定状态时反射电压与发射电压的比值。由于  $R_L$  的倒数亦即对直流电的传导能力, 可以把它转化为土壤电导率  $EC_b$ ,

$$EC_b = \frac{K_c f_T}{R_L} \quad (8)$$

这里,  $K_c$  是 TDR 探头的几何参数, 通常利用已知电导率的溶液来标定;  $f_T$  是温度系数, 用来将实际温度时的测定值换算为参考温度(如 298 K)下的值, 以便于比较<sup>[3]</sup>。

当 TDR 系统带有多工箱、同轴电缆较长或土壤含盐量很高时, 负载总电阻  $R_L$  中电缆测试仪、连接器以及同轴电缆的电阻( $R_{\text{cable}}$ )会显著影响  $EC_b$  的测定结果<sup>[4]</sup>。为此, 需要将  $R_{\text{cable}}$  从总电阻  $R_L$  中分离出来, 利用测试样品的电阻( $R_s$ )通过公式(8)计算土壤电导率  $EC_b$ 。

$$R_s = R_L - R_{\text{cable}} \quad (9)$$

$R_{\text{cable}}$  不能够直接测定, 需要在已知  $EC_b$  的介质中进行标定<sup>[4]</sup>。

## 2 热脉冲技术测定土壤温度和热特性

在土壤研究中, 常用的热脉冲探头由两根平行的长 28 mm、直径约 1.0 mm、间距 6 mm 的空心不锈钢探针组成。其中, 一根探针中装有由特制绝缘电阻丝(直径 75  $\mu\text{m}$ )制成的线性热源, 另一根探针中有一个位于中部的 K 型热电偶。由于利用热电偶测定土壤温度的技术非常成熟, 而且贯穿于土壤热特性的测定之中, 本文重点介绍土壤热特性的测定原理。

根据热传导定律, 在一个无限大的均匀等温介质中, 线性热源发出的热脉冲呈放射状向周围传导。对于土壤中的某一点, 其温度随时间的变化可以表达为<sup>[11, 12]</sup>:

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\alpha} \left[ Ei \left[ \frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)} \right] - Ei \left[ \frac{-r^2}{4\alpha} \right] \right], \quad t > t_0 \quad (10)$$

其中,  $\Delta T$  是温度变化值(K),  $\alpha$  是土壤热扩散系数( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ),  $t$  是时间(s),  $t_0$  是热脉冲的时长(s),  $r$  是热电偶距线性热源的垂直距离(m),  $-Ei(-x)$  为指数积分。热源的强度  $Q$  定义为  $Q = q/\rho$ , 其中  $q$  是单位长度加热丝在单位时间内释放的热量( $\text{W m}^{-1}$ ),  $\rho$  为土壤容积热容量( $\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ )。

对方程(10)求  $t$  的偏微分并使结果等于零, 便得到最大温度升高所对应的时间  $t_m$ , 并由此求得关于  $\alpha$  的表达式<sup>[12, 6]</sup>:

$$\alpha = \frac{r^2}{4} \left[ \frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m} \right] \ln \left[ \frac{t_m}{(t_m - t_0)} \right] \quad (11)$$

显然,  $\alpha$  是  $r$ ,  $t_0$ , 和  $t_m$  的函数。将(11)代入(10)便得到关于  $\rho_c$  的表达式,

$$\rho_c = \frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m} \left[ Ei \left( \frac{-r^2}{4\alpha(t_m - t_0)} \right) - Ei \left( \frac{-r^2}{4\alpha t_m} \right) \right] \quad (12)$$

其中,  $\Delta T_m$  是与  $t_m$  对应的距热源  $r$  处的最大温度升高值(图1)。

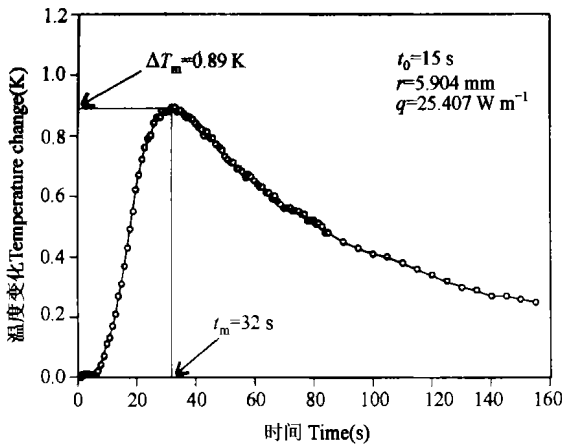


图1 热脉冲技术测得的温度变化与时间的关系

Fig. 1 A typical temperature by time data of the heat pulse method

土壤导热率  $\lambda$  ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) 为  $\alpha$  与  $\rho_c$  的乘积:

$$\lambda = \alpha \rho_c \quad (13)$$

公式(11)和(12)中,  $r$ ,  $q$  和  $t_0$  均为常数。因此, 只要得到  $\Delta T(r, t)$  曲线上的观测点  $(t_m, \Delta T_m)$ , 就可以求得  $\alpha$ ,  $\rho_c$  和  $\lambda$ 。也可以利用方程(10)通过非线性技术拟合时间- 温度变化数据而直接得到  $\alpha$ ,  $\rho_c$  和  $\lambda$ <sup>[13]</sup>。

需要指出的是, 方程(10)和(11)中的  $r$  是热电偶距线性热源的距离, 并不等同于两根探针之间的距离。在实际应用中,  $r$  往往用一定浓度(5~ 6  $\text{g L}^{-1}$ )的琼脂溶液来标定(假设此浓度琼脂溶液的容积热容量与水的容积热容量相同)。热脉冲探头插入土壤时两根金属探针之间的距离往往会发生一定变化, 从而导致实际  $r$  值偏离标定值。Kluitenberg等的分析指出, 由此产生的  $r$  误差是影响热脉冲技术测定结果的关键因子<sup>[14]</sup>。

### 3 Thermo-TDR 技术

Ren 等在系统分析 TDR 探头和热脉冲探头结构特征的基础上, 设计了 Thermo-TDR 探头<sup>[9]</sup>。该探头由三根平行的空心不锈钢探针(长 40 mm, 直径 1.3 mm, 间距 6 mm)组成(图2)。每根探针中装有由特制绝缘电阻丝制作的线性热源和一个位于中部的 K 型热电偶。中部探针与同轴电缆的正极相连, 而外侧的两根探针与同轴电缆的负极相连。测试过程中, 同轴电缆线连接于电缆测试仪(Tectronix 1502 系列), 热源和热电偶则与数据采集仪和直流电源连接。TDR 技术测定  $\theta$  和  $EC_b$  的数据及结果利用 WinTDR 等软件直接读取<sup>[15]</sup>。热脉冲由直流稳压电源向中间热源提供电流而产生。电流的开关由数据采集仪通过继电器控制。数据采集仪同时记录通过热源的电流大小和加热后两侧热电偶温度随时间的动态变化。

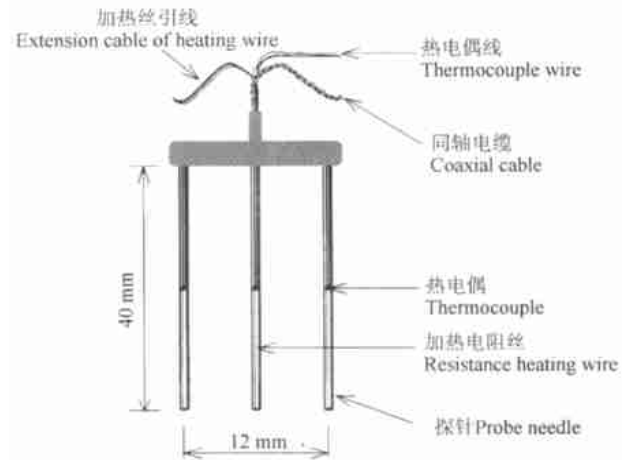


图2 Thermo-TDR 探头结构示意图

Fig. 2 Schematic view of the Thermo-TDR probe

与 TDR 技术和热脉冲技术相比, Thermo-TDR 的最大优点在于在同一时间、相同体积的土壤上完成 TDR 测定  $\theta$  和  $EC$  以及热脉冲技术测定  $\alpha$ ,  $\rho_c$  和  $\lambda$ , 从而极大地减小了土壤时空变异性对测定结果的影响。这对研究土壤中水、热、盐耦合运移规律以及其它动态过程具有重要的意义。

### 4 土壤容重、固相比例、饱和度和通气孔度的计算

Thermo-TDR 技术测定土壤容重( $\rho_b$ ) 基于土壤

容积热容量为土壤固相、液相和气相容积热容量之和的理论<sup>[16]</sup>。与固相和液相相比,土壤空气的容积热容量可以忽略不计。因此,土壤容积热容量  $\rho$  可以近似地表示为<sup>[17]</sup>,

$$\rho = \rho_b c_s + \rho_w c_w \theta \quad (14)$$

其中,  $\rho_w$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) 和  $c_w$  ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) 分别是水的比重和比热;  $c_s$  是土壤固体的比热( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), 可以从文献中得到<sup>[16,17]</sup>。由于  $c_s$  与土壤质地和有机质含量有关,应用实际测定的  $c_s$  值可以提高  $\rho$  值的准确性<sup>[18]</sup>。

由于 Thermo-TDR 技术可以同时得到公式(14)中的  $\rho$  和  $\theta$ ,  $\rho_b$  可以利用下式求出:

$$\rho_b = \frac{\rho - \rho_w c_w \theta}{c_s} \quad (15)$$

根据定义,得到  $\rho_b$  后,土壤中固体所占比例( $v_s$ )、通气孔度( $n_a$ )和饱和度( $S$ )可以通过下列公式计算出来:

$$v_s = \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (16)$$

$$n_a = 1 - v_s - \theta \quad (17)$$

$$S = \frac{\theta}{1 - v_s} \quad (18)$$

其中,  $\rho_s$  是土壤固体的比重( $\text{kg m}^{-3}$ )。对大多数矿物质土壤,  $\rho_s$  的近似值为  $2.65 \text{ Mg m}^{-3}$ 。如果对结果精度要求较高,  $\rho_s$  应当采用实际测定值。

## 5 结 论

本文介绍了利用 Thermo-TDR 技术测定土壤含水量( $\theta$ )、电导率( $EC$ )、容积热容量( $\rho$ )、热扩散系数( $\alpha$ )和导热率( $\lambda$ )的原理,并利用  $\rho$  与土壤容重( $\rho_b$ )和  $\theta$  的关系,给出了  $\rho_b$ 、通气孔度( $n_a$ )、固相比例( $v_s$ )以及饱和度( $S$ )的计算公式。由于实现了同一时间、相同体积土壤上各参数的连续定位测定, Thermo-TDR 技术最大程度地避免了土壤时空变异性对测定结果的影响。因此, Thermo-TDR 技术在土壤物理,尤其是土壤中水、热、盐耦合运移的研究中具有广泛的应用前景。

## 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] 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

[3] Dalton F N. Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. *SSSA Spec. Publ. Ser.*, 1992, 30: 143- 167

[4] 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

[5] 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

[6] Bristow K L, Kluitenberg G J, Horton R. Measurement of soil thermal properties with a dual probe heat-pulse technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 1 288- 1 294

[7] 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

[8] 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

[9] 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

[10] 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

[11] de Vries D A. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil *in situ*. *Soil Science*, 1952, 73: 83- 89

[12] Kluitenberg G J, Han J M, Bristow K L. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 1 444- 1 451

[13] 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

[14] Kluitenberg G J, Bristow K L, Das B S. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil heat capacity, diffusivity, and conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59: 719- 726

[15] WinTDR99. Time Domain Reflectometry Soil Sample Analysis Program. 1999. (Available on-line with updates at <http://psb.usu.edu/WinTdr99/index.html>)

[16] 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

[17] Campbell G S. *Soil Physics with BASIG-Transport models for Soil-Plant Systems*. New York: Elsevier, 1985

[18] Ren T, Ochsner T E, Horton R, *et al.* Heat-pulse method for soil water content measurement: Influence of the specific heat of the soil solids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67: 1 631- 1 634

## MEASUREMENT OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES WITH THERMO-TIME DOMAIN REFLECTOMETRY

### I . THEORY

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** The spatial and temporal variability of soil properties limits the determination of soil physical parameters in situ and in a dynamic way. In this paper the technique of Thermo-Time Domain Reflectometry (Thermo-TDR) is introduced to make measurements of a wide range of soil physical properties. We outline the theories of TDR technique for water content and electrical conductivity measurement, and heat-pulse technique for determination of volumetric heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity. Furthermore, the parameters of soil bulk density, air-filled porosity, and degree of saturation are derived from the theoretical relationship between heat capacity, bulk density, and water content.

**Key words** Thermo-TDR; Soil physical property; Measurement