

热脉冲法测定土壤热性质的研究进展*

李毅^{1,2} 邵明安^{1,2}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 土壤热性质包括土壤热容量、热扩散率和导热率等, 是决定土壤热状况的内在因素, 与土壤水分状况之间关系密切。热脉冲—时域反射仪方法所用成本低, 对土壤扰动小, 测试时间短, 具有很多优点, 因此在测定土壤热性质方面具有很大的潜力。该方法在国外已得到了大量应用, 在国内应用却很有限。本文综述了土壤热性质的计算模型及研究现状, 重点针对近年来国内外研究土壤热性质的新方法——热脉冲法的理论和技术发展, 及其在土壤水和其他物理性质应用方面的进展。该方法在国内相关研究领域里有进一步推广的意义。

关键词 土壤热性质; 热脉冲; 土壤水管理

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

土壤热性质是决定土壤热状况的内在因素, 研究土壤热和温度的变化规律以及调节土壤热状况时必须首先了解土壤的热性质。已有研究表明, 导热过程受土壤水和其他物理化学特性的影响^[1,2], 土壤热性质与土壤水分状况之间存在明确的定量关系。因此研究土壤热性质还有助于从土壤热运动规律方面获取土壤水分信息。目前已有不少研究者对土壤水和土壤热性质的关系进行了探讨, 并找出了一些规律, 这对于土壤热性质的深入研究及其在土壤水分管理的应用方面无疑具有重要作用。

本文就近年来国内外土壤热性质研究的新方法——热脉冲方法在理论和实验上的发展及应用进展进行介绍, 并与常规方法进行对比, 以期对其推广和进一步研究起到参考作用。

1 土壤热性质参数及其模型

1.1 反映土壤热性质的相关参数

不同土壤吸收一定热量后, 其温度增减的幅度不同, 即各种土壤贮热和导热能力不同, 这是因为土壤的热性质不同所致。土壤热性质指标主要有土壤热容量、土壤导热系数、土壤热扩散率等。

单位体积土壤的热容量 C_v 可用下式计算:

$$C_v = X_s C_s + X_w C_w + X_a C_a \quad (1)$$

式中, X_s 、 X_w 和 X_a 分别是土壤中固体物质、水和气体的体积; C_s 、 C_w 和 C_a 分别是它们的比热容。

土壤导热率 λ 是在标准条件下通过土壤传导热量的量度, 为各组分导热率的加权平均。导热率与体积热容量之比即为土壤热扩散率:

$$D_q = \lambda C_v \quad (2)$$

式中, C_v 为土壤体积热容, $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$; λ 为土壤导热率, $\text{J m}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$; D_q 为土壤热扩散率, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

1.2 土壤导热率的计算模型

土壤热性质与土壤中各相的组成及比例有关。在上述三个土壤热性质中, 土壤热容量的计算较简单, 可根据土壤总孔隙度及土壤中不同组成成分的热容量求得^[1]; 而土壤热扩散率的计算基于式(2)求出, 因此获取土壤热性质的方法便集中在了导热率的计算模式上。导热率计算模型可分为物理模型和经验模型两类。其中物理模型以 de Vries(1963)的最具代表性, 该模型以临界含水量为界, 不同的土壤含水量范围有不同的表达形式。在此, 临界含水量是当土壤中液态水失去连续性时的含水量, 也有研究者把压力势为 -55 kPa 时的含水量作为临界含水量计算值^[1]。若以 θ_k 表示临界含水量, 当 $\theta \geq \theta_k$

* 国家杰出青年科学基金项目(40025106)、中国博士后科学基金(2003034031)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501)资助

作者简介: 李毅(1974~), 女, 汉族, 副研究员, 从事土壤水、盐、热耦合迁移研究。E-mail: liyimm@tom.com

收稿日期: 2004-01-07; 收到修改稿日期: 2004-04-22

时, 导热率由下式计算^[1]:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n (k x_i \lambda_i) / \sum_{i=1}^n k x_i \quad (3)$$

式中, x_i 为组成成分 i 的体积比例; λ_i 为组分 i 的导热率; k_i 表示颗粒组分 i 的权重系数, 它与颗粒形状和接触角以及各成分导热率有关; 模型中考虑了 5 种组分 ($n = 5$), 包括: 液态土壤水, 湿润土壤空气, 石英, 其他土壤矿物和土壤有机质。

当土壤完全干燥, 即 $\theta = 0.0$ 时, 导热率计算式为:

$$\lambda = 1.25 \left[\frac{x_a \lambda_a + \sum_{i=1}^3 k x_i \lambda_i}{x_a + \sum_{i=1}^3 k_i x_i} \right] \quad (4)$$

式中下标 a 表示干燥空气; 其他符号同前。

$0.0 < \theta < \theta_k$ 时, 导热率可由 $\theta = 0.0$ 和 $\theta = \theta_k$ 的线性内插得出。

Campbell (1985) 提出了计算土壤导热率的经验模型^[2], 表示为:

$$\lambda = A + B\theta - (A - D) \exp[-(C\theta)^E] \quad (5)$$

式中, 参数 A, B, C, D 和 E 可根据容重、粘粒含量、石英和其他矿物体积比计算得出。

1.3 土壤热性质常规研究方法的研究进展

国内外对热性质的研究已表明, 土壤热性质受土壤水分状况的影响。Pariikh (1969) 用非稳定方法测定了 250 μm 的玻璃珠和粉壤土的导热率和扩散率随含水量变化特征^[3]。Wierenga 等 (1969) 分析了 Yolo 粉壤土的热性质, 发现表观导热率为土壤含水量的函数, 且用 de Vries 模型进行计算的结果与测定值较吻合^[4]。Ghuman 等 (1985) 研究发现, 土壤导热率和热扩散率都随质地和初始含水量的改变而变化, 含水量增大则导热率也增大, 而且在不同含水量范围内, 粘性土壤的导热率比沙土的低^[5]。Persaud 和 Chang (1985) 根据两个深度的温度值计算了表观导热率, 并采用四种不同方法进行了对比, 结果表明不同方法计算的导热率是有差异的^[6]。Kaune 等 (1993) 测定了扰动的结构性黄土的温度, 研究了团聚体对土壤热性质的影响^[7]。

除含水量之外, 土壤中含盐水平、容重及有机质含量也影响导热性质。早在 van Rooyen 和 Winterkorn (1959) 的研究中, 浓度为 0.18 mol kg^{-1} 的 CaCl_2 溶液, 或是浓度达到 0.34 mol kg^{-1} 的 NaCl 溶液对石英的导热率并无明显影响^[8]。但 Globus 和 Rozenshtok (1989) 对 0.25 mol kg^{-1} 的 KOH 湿润过的石英进行

导热率测定, 结果表明其导热率比水湿润过的石英砂的低^[9]。Noborio 和 McInnes (1993) 发现从 0.1 mol kg^{-1} 到溶解度范围内, 土壤表观导热率随 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaCl 、 Na_2SO_4 等盐分浓度的增加而降低^[10]。

在运用不同模型及其与实测值的对比方面, Bachmann 等 (2001) 将斥水土壤与吸水土壤做对比, 利用模型计算出的结果和实测值进行比较发现, 吸水土壤的导热率比斥水土壤的大得多, 实测法与计算模型等不同方法得出的导热率差异很大, 其中 de Vries 模型对吸水土壤导热率的计算值比实测值低 $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 以上; 对斥水土壤的计算值也比实测值小, 而 Campbell 模型计算的导热率在低饱和度时偏小。此外, 两模型计算干土或者饱和含水量下的导热率值均很精确^[11, 12]。

贺康宁等 (2000) 采用 KADEC-U2 型自记土壤温度计连续测定土温, 并根据温度观测值计算土壤热性质, 给出了光滑坡面、光滑+ 地衣坡面及自然坡面等不同坡面处理的土壤热性质平均值^[13]。李毅等 (2003) 在研制了热性质实验系统的基础上, 根据实测土壤温度资料, 用非稳态法测定土壤温度, 并采用有限差分法离散热传导方程来计算热扩散率^[14]:

$$D_{q} = \frac{(T_{k+1,j} - 2T_{k,j} + T_{k-1,j}) \Delta t}{(\Delta x)^2 (T_{k,j+1} - T_{k,j})} \quad (6)$$

式中, T 为温度; x 为距离坐标; t 为时间坐标; 下标 k 和 j 分别代表差分离散后的位置点和时间点。李毅等根据土壤孔隙分布确定土壤热容量, 得到了不同质地土壤的导热率。同时还将导热率与土壤水吸力和土壤盐分浓度建立联系, 研究了土壤水、盐、热性质的内在关系。

2 热脉冲法测定土壤热性质的理论基础及其应用

2.1 测定原理

土壤热性质的测量有不同的方法, 传统方法是在观测位置上设置输入热源, 根据温度的升降直接测定。近年来研究者提出了土壤热性质测定的新方法——热脉冲方法。该方法自 Byrne 等 (1967) 提出后, 最初多应用于矿业, 引入土壤研究中仅 10 多年, 但在国外已引起重视并进行了一系列相关研究^[15-24]。该方法成本低, 对土壤扰动小, 测试时间短, 不易引起非饱和土壤中水分的重新分布, 而且所需样品体积小, 能够在田间进行自动连续定位测量, 并且不断有研究证实其测量精度较高^[20-24], 因而

在国外得到了大量应用。自热脉冲方法提出以来,其技术方面在不断改进和更新,理论研究也逐渐深入,并且在土壤水分测定方面得到了较多应用。由于经济力量和技术等各方面原因,热脉冲技术在我国的应用还很有限。

根据热传导定律,在一个无限大的均匀等温介质中,线性热源发射的热脉冲呈放射状向周围传导。使用热脉冲方法测量时,最简单的是用单探头方法进行测量。对于初始温度场均匀的介质,基于热传导方程,可将温度表示为时间的函数。假设温度与时间的对数值呈线性关系,则对两个时刻温度可得出下式^[15]:

$$\lambda = (q'/4\pi) \ln[(t_2/t_1)(t_1 - t_h)/(t_2 - t_h)] / [T(t_2) - T(t_1)] \quad (7)$$

式中, T 为温度; q' 为热源的强度, 定义为 $q' = q/C_v$, 其中 q 是单位长度加热丝在单位时间内释放的热量; t_h 为传感器冷却时间; t_1 、 t_2 分别为测定的两个时刻。

实际测定和应用中采用更多的是双探头热脉冲法。其测量设施上装有两个距离为 r 的平行不锈钢探针, 其中一个探针含有线性加热源, 另一个装有温度测量元件(如传感器或热电偶)。将双探头设备插入土壤时, 通电后加热探头产生热脉冲, 而另一探头可记录温度的时间变化。这些观测资料可直接用于确定包括导热率在内的热性质参数。对于土壤中的某一点, 其温度随时间的变化表示为^[11, 16]:

$$\Delta T(t, r) = \frac{q'}{4\pi C_v D_q} \left\{ Ei \left[\frac{-r^2}{4D_q(t-t_0)} \right] - Ei \left[\frac{-r^2}{4D_q t} \right] \right\} \quad t > t_0 \quad (8)$$

式中, $\Delta T(t, r)$ 为温度变化量, t 为加热设备开启后的时间, t_0 为开始发射热脉冲的时刻, r 为线性热源的径向距; C_v 和 D_q 分别是介质的体积热容和热扩散率, $-Ei(-x)$ 为指数积分。用热脉冲装置实际测出的是时间增加量, 热容量和热扩散率可根据上式用非线性回归方法求解, 热容量和热扩散率的乘积即为导热率。

热时域反射仪(Thermo-TDR), 简称热-TDR, 是采用热脉冲方法进行土壤热和其他物理性质测量的一种新仪器, 该装置结合 TDR 和热脉冲方法为一体, 采用三个探针等间距平行排列, 通常中间的探针发射热脉冲, 而两边的探针(热源上、下游)监测温度随时间变化过程^[17~21]。对于三探头热 TDR, 土壤热性质根据下列各式求解:

$$D_q = \frac{r^2}{4} \left[\frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m} \right] \left| \ln \left[\frac{t_m}{(t_m - t_0)} \right] \right| \quad (9)$$

$$C_v = \frac{q}{4\pi D_q \Delta T_m} \left[Ei \left[\frac{-r^2}{4D_q(t_m - t_0)} \right] - Ei \left[\frac{-r^2}{4D_q t_m} \right] \right] \quad (10)$$

式中, ΔT_m 是 r 处的最大增温值; t_m 是与 ΔT_m 对应的时间; 其他符号意义同前。上两式通常与式(1)联解。

2.2 理论研究进展

由于热脉冲方法提供了测定温度、热性质、土壤含水量等参数的改进方法, 因此自该法提出以来, 在土壤物理研究中很快得到了认可和应用, 尤其在近几年其理论和技术上的发展非常迅速。Byrne 等(1967)首先提出用热作为示踪测定水分通量, 他们使用的装置中装有温度传感器和点(或线)热源, 水分通量根据仪器附近热场的变化确定。但该方法测定水分通量存在几个局限性, 因而限制了仪器的应用推广。局限性之一是它在达到热平衡之前需要较长时间的稳定热输入(在平均流速下需 30 min), 而非饱和土壤中存在热梯度将导致土壤水分再分布; 其二是仪器的校正需要把水分通量和仪器的响应方式关联起来; 此外, 仪器尺寸偏大改变了仪器周围土壤水流区域。而且其实验结果也表明, 点热源方法测定的结果与理论值相差较大^[22]。

为此, 不少学者致力于改进 Byrne 等(1967)研究中存在的问题。Ren 等(2000)采用热-TDR 技术提出了测定土壤水通量密度的新方法, 基于热迁移理论推导出了最大无量纲温度差(M_{DTD})的表达式:

$$M_{DTD} = \int_{t_m - t_0}^{t_m} S \left\{ \exp \left[- \frac{(x_d - V_s)^2}{4C_v s} \right] - \exp \left[- \frac{(x_u + V_s)^2}{4C_v s} \right] \right\} ds \quad (11)$$

式中, t_m 是无量纲温度差达最大值的时间, V 为热脉冲速度或热锋对流速度, x 为位置, 下标 u 代表热源探头的上游, 下标 d 指下游, s 为时间差。Ren 等采用热-TDR 方法测定 M_{DTD} , 利用上述关系确定 V , 根据(12)式确定土壤水分通量^[23]:

$$V = \theta V_w \frac{C_{vw}}{C_v} = J \frac{C_{vw}}{C_v} \quad (12)$$

式中, J 为土壤水分通量, C_{vw} 为土壤溶液的体积热容。若测定了 C_{vw} 和 C_v , 则可进一步计算水分通量, Ren 等的研究中探头距离 x_d 和 x_u 经人工调整, 可使 C_w 实测值为 $4.18 \text{ MJm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。Ren 等对沙土、砂壤和黏壤等不同质地土壤测定 M_{DTD} , 结果表明对上述土壤 M_{DTD} 与通量之间的关系均为近似线性关

系, 砂土实测值和计算值较接近, 而砂壤和粘壤则误差较大。此外, 由于热-TDR 可同时测定土壤含水量 θ , 因此在获得土壤水分通量 J 后, 可进一步得到孔隙水流速值 (J/θ)。Ren 等的研究方法克服了前人测定土壤水分通量时不能同时测定热性质的缺陷, 但关于该方法在不同土壤上的适用性方面, 今后还需更多的工作去检验; 此外, 式(11)的积分形式使得 M_{DTR} 的计算偏于复杂而不便于应用。

为了解决 Ren 等(2000)的方法中表达式过于复杂的问题, Kluitenberg(2001)引入渗漏含水层井函数的概念, 并将该函数中的指数部分进行麦克劳林级数展开, 得到了形式上较为简单的近似解, 从而仅用简单函数就表达了 Ren 等的解析解^[24]:

$$W(u, \beta) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!} \left(\frac{\beta^2}{4u} \right)^m E_{m+1}(u) \quad (13)$$

$$E_{m+1}(u) = \frac{1}{m!} [\exp(-u) - uE_m(u)] \quad m=1, 2, \dots \quad (14)$$

式中, $E_{m+1}(u)$ 为井函数。

但 Kluitenberg 的方法在实际计算中也是不易应用的。为寻求更简便的方法, Wang 等(2002)对热脉冲测定土壤水分通量进行了理论分析, 找出了线性热源上、下游温度增加比的自然对数与土壤水分通量之间的简单线性关系, 由于其表达式在形式上较简单, 因此在土壤水分通量的测定方面, 更适于应用热脉冲传感器方法。热流方程写为^[25]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_q \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - V \frac{\partial T}{\partial x} \quad (15)$$

式中 V 可根据式(12)确定。Wang 等基于热流方程得出的上、下游温度增加比与时间的关系为:

$$\text{上游: } V^2 = \frac{4D_q}{t_0} \ln \left\{ \frac{t_u - t_0}{t_u} \right\} + \frac{x_u^2}{(t_u - t_0)t_u} \quad (16)$$

$$\text{下游: } V^2 = \frac{4D_q}{t_0} \ln \left\{ \frac{t_d - t_0}{t_d} \right\} + \frac{x_d^2}{(t_d - t_0)t_d} \quad (17)$$

联立上两式, 消去 V , 则热扩散率 D_q 可根据下式计算:

$$D_q = \frac{t_0 \left[\frac{x_d^2}{(t_d - t_0)t_d} - \frac{x_u^2}{(t_u - t_0)t_u} \right]}{4 \ln \left[\frac{(t_u - t_0)t_u}{(t_d - t_0)t_d} \right]} \quad (18)$$

将计算所得的 D_q 值代入式(16)或(17)可得 V , 再与式(12)联解可得出土壤水分通量值。Wang 等理论分析适用的水分通量测定范围为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ 。

2.3 应用研究现状

热脉冲方法提出之初多用于测定土壤热性质,

由于土壤热性质与土壤水及其他物理性质(如孔隙度、密度、饱和度)之间密不可分的联系, 因而该方法也逐渐用于包括土壤水分在内的其他物理性质的测定, 这对于进一步探索土壤热与土壤物质属性的联系及更深入的理解热性质特征具有重要意义。

Ochsner 等(2001)采用热脉冲方法, 以砂壤、粘壤、粉壤和粉质粘壤四种典型土壤为例, 采用室内土柱装土, 以热-TDR 为观测工具, 针对目前还很少涉及的充气孔隙度对热性质的影响进行了研究。对不同土壤导热率及与土壤中水、固体颗粒和充气孔隙体积比例的研究结果表明, 充气孔隙体积百分比增加时, 几种土壤的热性质均呈线性递减趋势, 作者认为土壤热性质与充气孔隙的联系比它与含水量的关系更密切。为检验该方法的精确性, Ochsner 等还用 de Vries 的导热率模型, 运用不同的充气孔隙度进行计算, 并与实测值做了对比, 表明热脉冲方法测定的导热率基本在模型计算出的最大值和最小值范围内^[26]。

Ochsner 等(2001)采用热-TDR 测量热和电磁波, 完成了对砂壤土的土壤含水量、充气孔隙和容重的同时测定, 他们在式(1)的基础上, 结合土壤电介质常数的经验公式, 进一步计算了土壤饱和度和固相密度。其中电介质表示为土壤含水量 θ 和土壤固相体积百分比 v_s 的函数^[16]:

$$K^{0.5} = (K_w^{0.5} - 1)\theta + (K_s^{0.5} - 1)v_s + 1 \quad (19)$$

式中, K 为土壤介电常数, K_m 及 K_s 分别为测定温度和频率下的水和土壤固相的介电常数。

忽略土壤中空气的贡献, 且土壤的体积含水量表示为重量含水量和容重的乘积, 则式(1)写为:

$$C_v = X_s C_s + \theta \rho C_w \quad (20)$$

整理可得含水量 θ 的表达式: $\theta = (C_v - X_s C_s) / (\rho C_w)$ 。若对烘干土壤进行热脉冲法测定, 则因含水量为零, 土壤固体的比热可直接由式 $C_v = X_s C_s$ 计算。Ren 等(2003)基于上述原理, 采用热脉冲方法测定了沙土、粉壤土和粉质粘壤土的含水量值和土壤固相比热^[27]。采用热-TDR 测定含水量是间接方法, 其值取决于仪器测定不同参数的各种误差, 因而 Ren 等测定含水量值比重力法的偏小。此外, 他们测定的沙土、粉壤土和粉质粘壤土固体比热值分别为 881、913 和 973 Jkg⁻¹K⁻¹。其研究结果还表明, 用热脉冲方法测定固体比热容从而进一步测定含水量可减少测定误差。

此外, Ren 等(2003)将热-TDR 方法用于包气

带土壤水分、温度、电导、热容量、热扩散率及导热率的测定,用该方法检验前人的资料并进行了6种不同质地土壤的热-TDR测量,所得结果表明,热-TDR对于土壤含水量、电导率、导热率及充气孔隙度的测定结果较合理,但对容重的测量误差较大^[28]。

3 结 语

热脉冲方法目前在国外已得到了大量应用,但由于技术力量的欠缺和经济实力的差异,在国内的应用还非常有限。热脉冲方法自动化程度较高,读数间隔通常为1s,数据的连续性较好。近几年热-TDR技术实现了同一时间、相同体积土壤上各参数的连续定位测定,因此最大程度地避免了土壤时空变异性对测定结果的影响。目前研究者已逐渐开始考虑土壤含盐对热性质的影响,但还不够深入。到目前为止,用热脉冲方法获得土壤水分资料方面已有若干研究成果。由于土壤热性质与土壤水、孔隙分布、土壤盐分浓度及其他土壤物理化学性质之间^[29,30]具有直接或间接的联系,热-TDR将更多地应用于相关研究中,其技术亦将日臻成熟。热脉冲方法在今后土壤水分中的研究方面将发挥更大的作用,尤其对土壤中水、热、溶质耦合运移的研究有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] de Vries D A. Thermal properties of soils. In: van Wijk W R. ed. *Physics of Plant Environment*. New York: John Wiley and Sons. Inc., 1963. 210~ 235
- [2] Campbell G S. *Soil Physics with BASIC*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 1985
- [3] Panik R J, Havens J A, Scott H D. Thermal diffusivity and conductivity of moist porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, 43: 1 050~ 1 052
- [4] Wierenga P J, Nielsen D R, Jagan R M. Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1969, 33: 354~ 360
- [5] Ghuman B S, Lal R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils. *Soil Sci.*, 1985, 139(1): 74~ 80
- [6] Persaud N, Chang A C. Computing mean apparent soil thermal diffusivity from daily observations of soil temperature at two depths. *Soil Sci.*, 1985, 139(4): 297~ 304
- [7] Kaune A, Turk T, Horn R. Alteration of soil thermal properties by structure formation. *Soil Sci.*, 1993, 44: 231~ 248
- [8] van Rooyen M, Winterkom H F. Structural and textural influences on thermal conductivity of soils. *Highway Res. Board, Natl. Res. Council. Washington. DC: In Proc. Annu. Meeting 38th. Washington, DC. 5~ 9 Jan. 1959. 576~ 621*
- [9] Globus A M, Rozershtok S K. Nonisothermal internal moisture exchange in an incompletely saturated porous medium with alkaline interstitial solution. *Sov. Soil Sci.*, 1989, 21: 111~ 115
- [10] Noborio K, McInnes K J. Thermal conductivity of salt affected soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 329~ 334
- [11] Bachmann J, Horton R, Ren T, *et al.* Comparison of the thermal properties of four wettable and four water repellent soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 1 675~ 1 679
- [12] 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水土壤中水热运动规律与数值模拟. *土壤学报*, 1996, 33(4): 351~ 359. Yang B J, Blackwell P S, Nicholson D F. Regularities and mathematical models of water and heat movement in repellent soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(4): 351~ 359
- [13] 贺康宁, 王斌瑞, 张光灿. 黄土集水造林地土壤热特性的研究. *北京林业大学学报*, 2000, 22(3): 27~ 32. He K N, Wang B R, Zhang G C. Study of soil thermal properties in forest land of catchments in Loess (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(3): 27~ 32
- [14] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 质地对土壤热性质的影响研究. *农业工程学报*, 2003, (4): 62~ 65. Li Y, Shao M A, Wang W Y, *et al.* Studies on influence of soil texture to thermal properties (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, (4): 62~ 65
- [15] Abu Hamdeh N H, Reeder R C. Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1 285~ 1 290
- [16] Ochsner T E, Horton R, Ren T S. Simultaneous water content, air filled porosity, and bulk density measurements with the θ time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 1 618~ 1 622
- [17] Ren T, Noborio K, Horton R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a θ time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 450~ 457
- [18] 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): 225~ 229. Ren T S, Shao M A, Ju Z Q, *et al.* Measurement of soil physical properties with θ time domain reflectometry: Theory (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 225~ 229
- [19] 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
- [20] 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
- [21] Byrne G G, Drummond J E, Rose C W. A sensor for water flux in soil "Point source" instrument. *Water Resour. Res.*, 1967, 3: 1 073~ 1 078
- [22] 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
- [23] Kluitenberg G J, Warrick A W. Improved evaluation procedure for heat pulse soil water flux density method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 320~ 323
- [24] 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水土壤中水热运动模型的应用. *土壤学报*, 1997, 34(4): 427~ 433. Yang B J, Blackwell P S, Nicholson D F. Application of soil water and heat movement model for repellent soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 427~ 433
- [25] Wang Q J, Ochsner T E, Horton R. Mathematical analysis of heat pulse signals for soil water flux determination. *Water Resour. Res.*, 2002, 38(6): 1 029~ 1 035
- [26] Ochsner T E, Horton R, Ren T S. A new perspective on soil thermal properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 1 641~ 1 647
- [27] 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
- [28] Ren T S, Ochsner T E, Horton R. Development of thermotime domain reflectometry for vadose zone measurements. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 544~ 551
- [29] Han X F, Lu J, Liu Y L, Yu L Z. Coupled transfer of water and heat in red soil: Experiment and numerical modelling. *Pedosphere*, 2001, 11(2): 123~ 130
- [30] Zhuang S Y, Yin B, Zhu Z L. A simulation study on effect of surface film forming material on water evaporation. *Pedosphere*, 2001, 11(1): 67~ 72

LATEST ADVANCE OF THERMO-PULSE METHOD FOR MEASURING SOIL THERMAL PROPERTIES

Li Yi^{1,2} Shao Mingan^{1,2}

(1 *Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract Soil thermal properties include thermal capacity, thermal diffusivity and thermal conductivity. They are intrinsic factors for determining soil thermal conditions and closely associated with soil water conditions. Thermotime Domain Reflectometry has many advantages, such as low cost, less disturbance of the soil and time-saving, thus showing great potential in soil research. In this paper, we introduced calculation models for and status of the research on soil thermal properties, with emphasis on development of the theory and technology of a new method. Thermotime Domain Reflectometry, for determination of soil thermal properties, and advances in its application to the research on soil water and other soil physical properties. The new method has recently been extensively used abroad but quite limitedly at home. It is worth further popularizing in related research fields in the country.

Key words Soil thermal properties; Thermotime Domain Reflectometry; Soil water management