

土壤导热率测定及其计算模型的对比分析

王 铄¹, 王全九^{1,2*}, 樊 军², 王卫华¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 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, 杨凌 712100)

摘 要: 土壤导热率是重要的热参数之一, 为了获得预测导热率的准确方法, 该文对比分析了确定土壤导热率的热脉冲直接测定法和模型间接推求法。根据热脉冲原理在相同体积质量下, 测定了不同质地和含水率土壤的导热率值。结果表明在相同含水率条件下, 砂粒含量越高, 土壤的导热率越大, 土壤导热能力越强。利用 Horton 经验公式对实测值进行了拟合, 结果显示 Horton 经验模型基本可以反映土壤导热率变化特征, 并得到了 Horton 公式经验系数。利用实测值与 Campbell 模型计算值进行了比较, 结果显示 Campbell 模型计算结果偏差较大, 并对其进行了修正。并且用实测值与 Johansen 模型及其 2 种改进模型 (Côté-Konrad 模型和 Lu-Ren 模型) 的计算值进行了对比分析, 结果表明 Johansen 模型计算结果与实测值偏差较大, 2 种改进型模型的计算结果与实测值更接近。该研究表明土壤导热率可以利用土壤质地、含水率、孔隙度和体积质量进行计算, 3 种理论模型的计算值与实测值的相关系数均值分别为: 0.643、0.937、0.943, 推荐使用 Côté-Konrad 模型和 Lu-Ren 模型计算土壤导热率, Lu-Ren 模型比 Côté-Konrad 模型的适用范围更广。

关键词: 土壤, 导热率, 模型, 热脉冲, 土壤质地

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.014

中图分类号: S152

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0078-07

王 铄, 王全九, 樊 军, 等. 土壤导热率测定及其计算模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 78-84.
Wang Shuo, Wang Quanjiu, Fan Jun, et al. Soil thermal properties determination and prediction model comparison[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 78-84. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土壤热特性不仅是描述土壤中温度变化、能量传输的前提, 也是研究其他土壤物理过程, 如水热耦合传输、气体扩散、物质运移的基础^[1]。随着研究的深入, 土壤的水热耦合、水热溶质耦合数值模拟也得到广泛的发展。导热率是土壤水热溶质耦合运动研究以及模拟计算时的必要参数。热脉冲方法与传统方法相比, 具有成本低, 对土壤扰动小, 测试时间短, 不易引起非饱和土壤中水分重分布的优势; 对于室内试验, 所需样品体积较小, 在田间试验时能够进行自动连续的定位测定, 并且现在有很多研究已经表明其精确度很高。因而在国内外的研究中得到了大量的应用^[2-3]。

土壤导热率受土壤水分、地表温度、土壤质地、体积质量、土壤孔隙度、有机质含量等因素的影响。各地方土壤类型差异较大, 土壤质地也各不相同, 对土壤导热率影响较大。目前土壤含水率, 体积质量对导热率的影响研究较多^[4-5]; 不同质地对土壤热特性影响也有过相关报道^[6]。本次试验用热脉冲方法测定土壤导热率, 旨

在分析不同质地对土壤导热率的影响, 对比经验模型和半理论模型的计算值与实测值, 明确各种模型的优缺点, 提出修正后的经验参数, 为土壤导热率的准确预测提供参考, 以期使公式的预测值更为精确, 应用范围更为广泛。

1 基本理论

根据热导定律, 一个无限长的均匀等温介质, 线性热源发射的热脉冲呈放射状向周围传导, 对于土壤中的某一点^[7-8]

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q}{4\pi\alpha} \left[Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)}\right) - Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \right] \quad t > t_0 \quad (1)$$

式中, ΔT 为温度变化值, $^{\circ}\text{C}$; t 为感应探针温度达到最高所需的时间, s ; t_0 为热脉冲持续时间, s ; Q 为线性热源的强度定义为 $Q=q/\rho_c$; ρ_c 为介质的体积热容量, $\text{MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$; q 为单位长度加热丝在单位时间内释放出的热量, W/m ; α 为介质的热扩散系数, m^2/s ; r 为热电偶距线性电源的垂直距离, mm ; $-Ei(-x)$ 为指数积分; x 为被积函数。这个指数积分可以用 Abramowitz and Stegun(1972)给出的公式计算: 当 $0 \leq x \leq 1$ 时用式 5.1.53; 当 $x > 1$ 时用式 5.1.56^[9]。

三探针热脉冲的原理是: 在测定时, 发出加热源的加热丝保持有限时长 (r_0) 的热脉冲, 在 t_m 时刻, 距离加热源的感应探针处达到最大温升值 ΔT_m , 由此求得关于 α , ρ_c 的表达式^[10-11]

收稿日期: 2011-05-14 修订日期: 2011-12-19

项目编号: 国家自然科学基金资助 (51179150)

作者简介: 王 铄 (1986—), 男, 陕西商南人, 从事流域水土资源管理技术以及土壤热特性方面的研究。西安 西安理工大学水资源所, 710048。

Email: wangshuo_1986@163.com

*通信作者: 王全九 (1964—), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与溶质运移研究。西安 西安理工大学水资源所, 710048。

Email: wquanjiu@163.com

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

$$\rho_c = \frac{q}{4\pi\alpha\Delta T_m} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_m - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m} \right) \right] \quad (3)$$

式中符号含义同前，通过感应探针温度变化与时间的关系曲线得到最大温度升高值 ΔT_m 和其出现相应时刻 t_m ，可计算得到土壤热扩散率和土壤热容量。土壤导热率 $\lambda(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$ 可通过下式得到

$$\lambda = \alpha \cdot \rho_c \quad (4)$$

2 材料与方法

2.1 试验土样

试验在中国科学院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进行。为研究不同质地土壤热特性，分别取自陕西杨凌、安塞、神木、新疆吐鲁番、库尔勒、以及东北吉林的土作为供试土样。土样经过风干、碾压、过筛后，采用 MS2000 激光粒度仪-马尔文法对土样进行颗粒分析。按照国际制标准进行分类，测定其基本物理特性，如表 1 所示。

表 1 供试土样的质地分类
Table 1 Texture classification of soil samples

土样名称	土壤颗粒质量分数/%			质地分类
	黏粒 <0.002 mm	粉粒 0.002~0.02 mm	砂粒 >0.02~2 mm	
杨凌土	30.566	42.759	26.675	壤黏土
吐鲁番土	17.884	42.463	39.653	粉黏壤土
安塞土	20.228	28.326	51.446	黏壤土
东北吉林土	8.650	33.811	57.539	壤土
库尔勒土	6.706	29.225	64.069	砂壤土
神木土	0.989	1.348	97.663	砂土

2.2 试验方法

2.2.1 试验设备

试验仪器采用 3 探针热脉冲探头，3 个探针都与数据采集器连接，中间的探针发出热脉冲，两边的感应探针监测在中间探针发出热脉冲以后温度随时间的变化过程。探头有 3 根探针组成，探针直径为 1.3 mm，探针长为 40 mm，探针标准间距为 6 mm（如图 1 所示）。实际使用时要用 5~6 g/L 琼脂溶液提前进行标定，标定时琼脂的作用是防加热时水的自然对流。CR1000 数据采集器（美国的 Campbell 公司生产）通过继电器控制加热的输入，而电流则是通过一个精确电阻（10 Ω）的分配电压来确定^[12-13]。数据采集器同时以 1 s 的间隔记录感应探针的温度变化。取琼脂溶液的容积热容量为 4.18 MJ/m³·°C，通过非线性拟合温度-时间曲线得到间距 r ，标定过程重复 10 次，取平均值。本次试验标定的结果为： $r_1=6.5$ mm， $r_2=6.3$ mm。

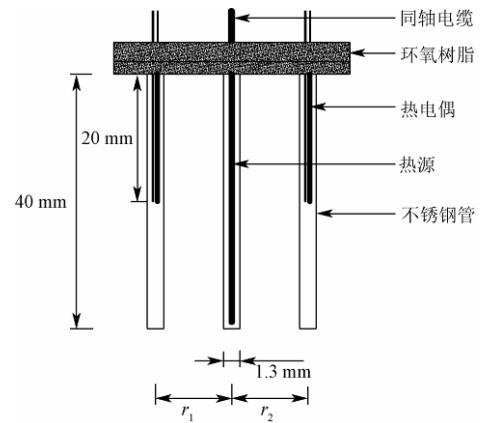


图 1 热脉冲探头示意图

Fig.1 Schematic view of heat pulse probe

2.2.2 试验方案

为研究质地对土壤导热率的影响，把每种土样的体积质量控制为 1.45 g/cm³。按照每种土样干土的初始含水率，分别计算出应装入 100 cm³ 的环刀中的土样质量，设置 5 个水平的含水率（初始含水率、5%、10%、15%、20%，以上均为质量含水率，在测量完毕后实测出环刀内土样的实际含水率作为最后采用的值）。

2.2.3 试验过程

在测定过程中，加热脉冲时长设为 15 s，每次测定总时间为 600 s，重复测量 3 次，取平均值，数据采集器每 1 s 记录一次温度值，测定过程是在恒温室下（20±1）°C 进行的。为了减小误差，加热电压通过一个 DC-DC 变压器，根据土壤含水率来调节大小，一般情况使两侧探针温度的最大升高值控制在 0.6~0.9°C 之间^[14-15]。测量结束后，将数据下载到电脑上，根据基本理论中的公式计算土壤热参数。

3 结果与分析

3.1 土壤质地对土壤导热率的影响

由基本原理可知，导热率反映了土壤导热能力的大小。通过上述室内试验测定不同质地土壤热参数，得到数据，根据式（3）计算得到导热率，将不同质地土壤导热率随含水率的变化趋势的结果绘制于图 2 上。由图 2 可知，①随着含水率的增加，在开始阶段导热率增加幅

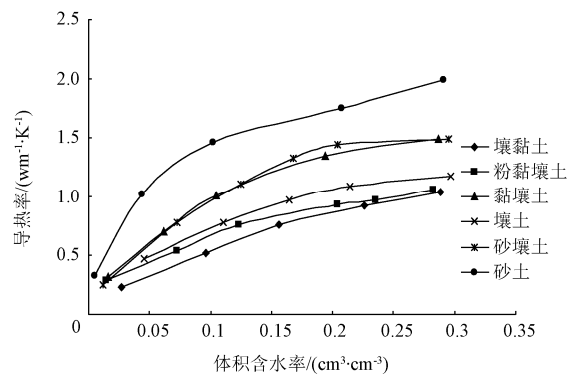


图 2 土壤导热率随含水率的变化趋势

Fig.2 Trend of soil thermal conductivity with water content

度较快, 随后增加趋势逐渐减小。导热率与含水率大体上呈幂函数变化趋势。②在相同含水率条件下, 砂土导热率明显比砂壤土高, 壤土次之, 黏壤土导热率最低。③与表 1 对照得出, 砂粒含量越高, 土壤的导热率越大, 土壤导热能力越强。但黏壤土除外, 原因可能是由于黏壤土中的黏粒含量很高, 3 种粒径的含量较为均匀, 在土样被装入环刀后, 其密实度较好, 虽然其砂粒含量没有东北土的高, 但是其导热率却比东北的壤土要高。

3.2 根据经验模型计算土壤导热率方法的准确性分析

3.2.1 Chung 和 Horton 模型

Chung 和 Horton(1987)^[16]提出了一个与含水率有关的导热率表达式 (5), 本文利用该经验公式对试验结果进行了拟合。

$$\lambda_0 = b_0 + b_1\theta + b_2\theta^{0.5} \quad (5)$$

式中, λ_0 为土壤导热率, $W/(m \cdot K)$; b_0, b_1, b_2 为经验常数, 对于不同质地的土壤, 经验常数是不同的。在土壤体积质量取 1.45 g/cm^3 条件下, 根据热脉冲实测值, 以模型计算值与实测值相差较小为原则, 选取有代表性质地的 4 种土壤, 提出了与质地相对应的经验参数, 参数值见表 2。

表 2 不同质地土壤对应的 Horton 公式经验参数值
Table 2 Parameters of Horton formula with different soil textures

土壤类型	b_0	b_1	b_2	土壤样品
砂土	-0.334	-5.31	7.11	神木
砂壤土	-0.552	-3.98	6.05	库尔勒
壤土	-0.743	-4.52	6.02	东北
粉黏壤土	-0.952	-4.21	6.00	吐鲁番

注: b_0, b_1, b_2 为式 5 中的经验常数

由图 3 可以看出, 在较高含水率条件下, 公式拟合值与热脉冲实测值拟合效果很好。在含水率较低的情况下, 得到的计算值偏小, 有的甚至为负值, 显然这是不符合实际情况的, 所以这个公式并不适用于土壤初始含水率很低的情况, 根据热脉冲方法得到的试验数据, 发现在 $\theta_v < 5\%$ 时, 不适宜用该公式计算土壤导热率。由于 Horton 经验公式只是以含水率为单一参数的公式, 在土壤体积质量或者是有机质含量发生变化的情况下, 模拟结果就会有较大差异。需要指出的是, 这个模型应用于 Hydrus-1D 软件对土壤温度剖面的模拟, 所以在调整经验参数时应根据不同土壤质地来选择不同的参数, 并且要注意在土壤含水率极低情况下模拟结果的准确性。

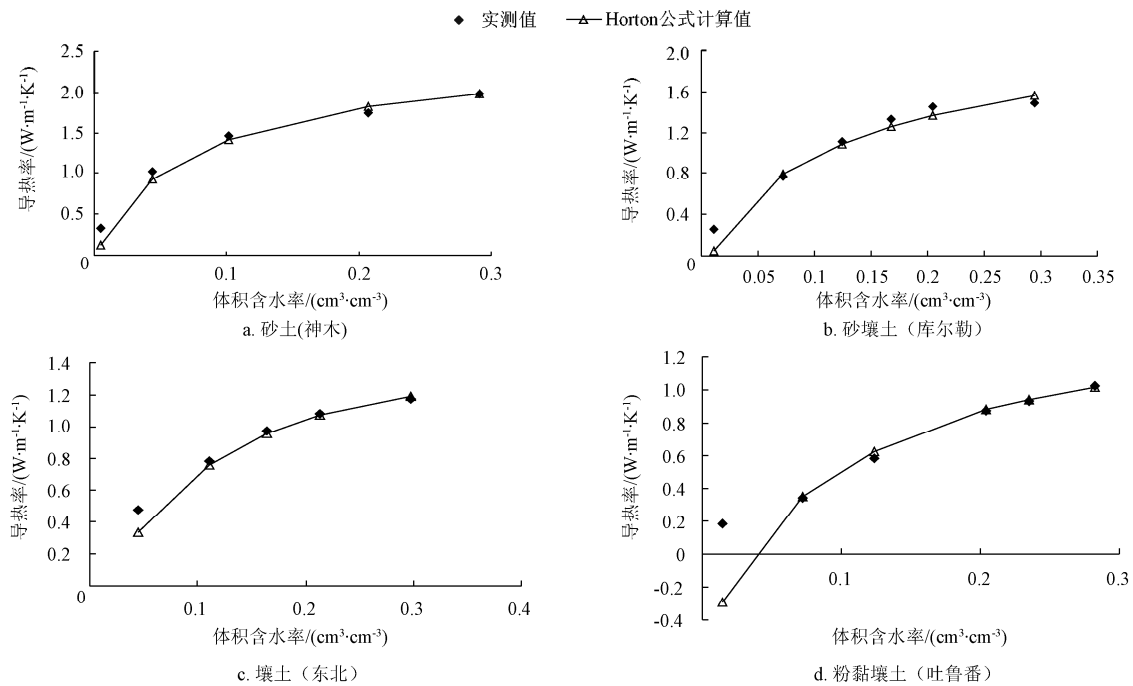


图 3 拟合与实测土壤导热率对比

Fig.3 Comparison of fitted and measured values of soil thermal conductivity

3.2.2 Campbell 模型的准确性分析以及修正

Campbell(1985)^[17]提出了根据土壤质地和体积质量计算土壤导热率的经验公式, 具体表示为

$$\lambda = A + B\theta - (A - D)\exp[-(C\theta)^E] \quad (6)$$

式中, 参数 A, B, C, D 和 E 可根据体积质量、黏粒含量、石英和其他矿物体积比计算。具体表示为

$$A = 0.65 - 0.78\rho_b + 0.60\rho_b^2$$

$$B = 1.06\rho_b$$

$$D = 0.03 + 0.1\rho_b^2 \quad E = 4$$

$$C = 1 + \frac{2.6}{m_c^{0.5}}$$

式中, m_c 为表示黏粒含量, %, ρ_b 为体积质量, g/m^3 。

在土壤体积质量取 1.45 g/cm^3 条件下, 用 Campbell 公式计算的土壤导热率, 结果点绘在图 4a 由图可以看出, 计

算的导热率总体显示随含水率增加而增加的变化趋势。为

了比较计算准确性，将计算值与实测值点绘在图 4b 上。

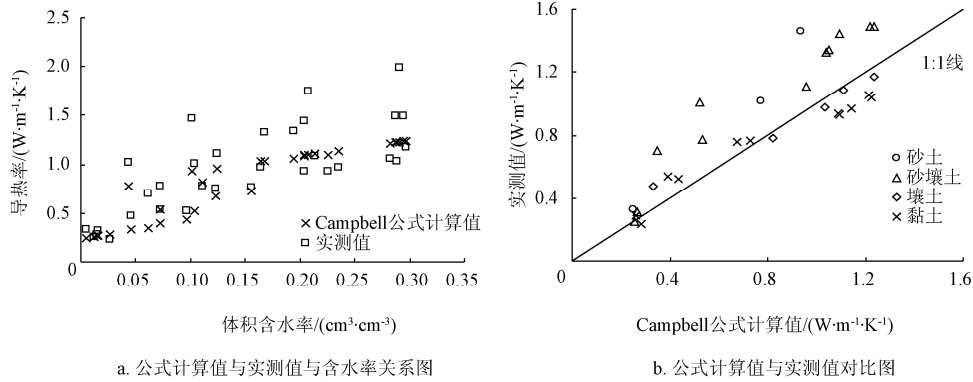


图 4 Campbell 公式计算值与实测值土壤导热率比较
Fig.4 Comparison of soil thermal conductivity from Campbell formula and measured values

由图 4 可以看出，公式计算值与实测值基本吻合，但热脉冲实测值大部分大于公式计算值。由于试验土壤质地不同，实测值的范围较宽，而计算值的范围较小，与实际情况存在较大的差异。2 种方法的对比结果，散点分布在 $y=x$ 附近，但分布较为分散， $RMSE=0.276 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ，相关性系数 $R^2=0.709$ ，所以本文针对不同质地土壤，对 Campbell 公式进行了修正。由于 Campbell 公式有 5 个参数，其中 $E=4$ 是决定图形性状的主要参数，故不改变 E 的值，对其余 4 个参数进行了调整，由于砂粒含量的高低对土壤导热率有很大影响^[6]，故对 a 、和 d 2 个影响导热率值大小的参数按照砂粒含量的高低进行调整，并以实测值与模拟值的相关系数最大为原则，而 e 、 f 、 g ，3 个影响曲线曲率的参数则根据与实测曲线最吻合为依据，其余参数未作修正。调整后，砂土、砂壤土、粉黏

壤土的 Campbell 公式计算值与实测值的相关系数 R^2 分别为：0.9803、0.9783、0.8638。各系数的修正结果见表 3，并将修正后公式计算结果显示在图 5 上。

表 3 不同质地土壤对应的 Campbell 公式参数值
Table 3 Parameters of Horton formula with different soil textures

土壤类型	$A = a - b\rho_b + c\rho_b^2$		$B = d\rho_b$	$C = 1 + e/m_c^{0.5}$	$D = f + g\rho_b^2$		土壤样品	
	a	b	c	d	e	f		g
砂土	1.152	0.78	0.6	1.52	2.35	0.1	0.15	神木
砂壤土	0.829	0.78	0.6	1.36	2.3	0.2	0.15	库尔勒
壤土	0.65	0.78	0.6	1.06	2.6	0.15	0.1	东北
粉黏壤土	0.515	0.78	0.6	1.06	2.35	0.03	0.1	吐鲁番

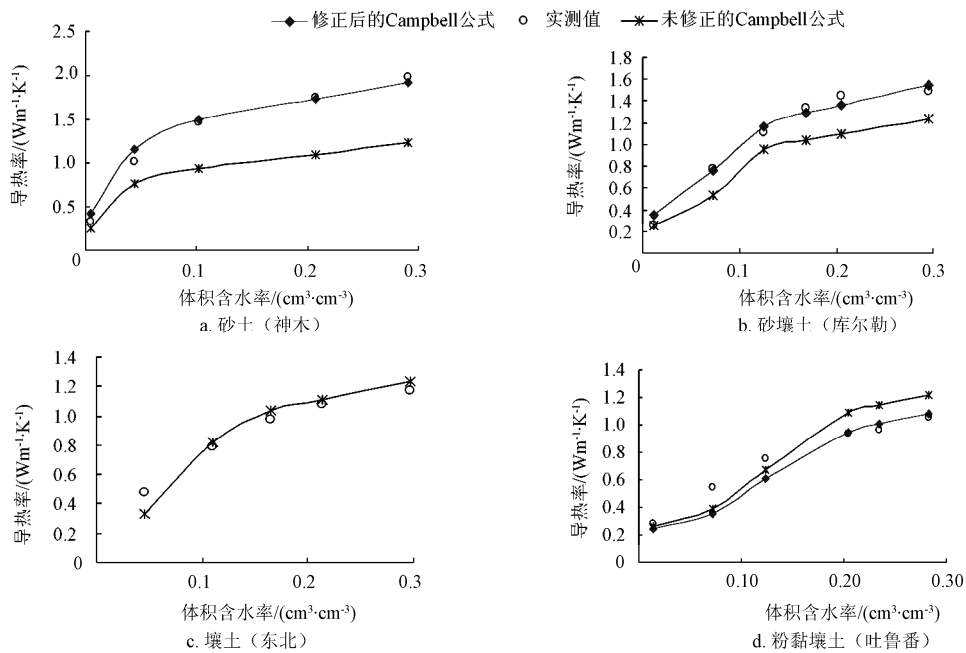


图 5 修正后的计算值与实测值比较
Fig.5 Comparison of soil thermal conductivity form revised calculation and measured values

由图 5 可知,修正后的结果与实测值较为吻合,修正后的 3 种质地土壤计算值与实测值的相关系数均值为 $R^2=0.9408$,说明相关性较好,预测较为准确。东北的壤土只改变了 f 的值,其余参数利用原始的 Campbell 公式参数,计算值与实测值拟合效果很好,因为原始的 Campbell 公式对土壤导热率的计算值都偏小,而壤土本身的导热率就很小,故 Campbell 公式较适用于壤土类型。

3.3 根据半理论模型计算土壤导热率方法的准确性分析

3.3.1 de Vries (1963) 理论模型

该模型以临界含水率为界,按照土壤含水率范围,给出不同导热率计算公式^[18]。临界含水率是指当土壤中液态水失去连续型时的含水率,也有研究者把压力势为 -55 kPa 时的含水率作为临界含水率计算值。

如果以 θ_k 表示临界含水率,当 $\theta \geq \theta_k$ 时,导热率由下式计算

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i x_i \lambda_i)}{\sum_{i=1}^n k_i x_i} \quad (8)$$

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,石英,湿润土壤空气,土壤有机质和其他土壤矿物。

当土壤完全干燥,即 $\theta=0$ 时,导热率的计算式为:

$$\lambda = 1.25 \left[\frac{x_a \lambda_a + \sum_{i=1}^3 k_i x_i \lambda_i}{x_a + \sum_{i=1}^3 k_i x_i} \right] \quad (9)$$

式中,下标 a 表示干燥空气,其他符号同前。当 $0 < \theta < \theta_k$ 时,导热率可以通过 $\theta=0$ 和 $\theta=\theta_k$ 的线性内插得出。由于本次试验未对各组分的体积分、各组分的导热率、临界含水率进行测定,故未对该模型的计算结果进行对比分析。

3.3.2 Johansen (1975)^[19] 导热率的半理论模型

对于非饱和土壤,以干土的导热率 λ_{dry} W/(m·K) 和饱

和土的导热率 λ_{sat} W/(m·K) 为基础建立了 λ 和 K_e (Kersten 数) 之间的关系

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) K_e + \lambda_{dry} \quad (7)$$

并且建立了 K_e 和常规土壤含水率或者是饱和度 S_r ($S_r = \theta/\theta_s$, θ_s 是指饱和含水率) 的关系式

$$K_e = 0.7 \log S_r + 1.0 \quad (0.05 < S_r < 0.01);$$

$$K_e = \log S_r + 1.0 \quad (S_r > 0.1) \quad (8)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n$$

式中,在 20°C 条件下 $\lambda_w = 0.594$ W/(m·K); n 为土壤孔隙度; λ_s 由下式表示,由整个固体的石英含量 (q) 及其导热率 ($\lambda_q = 7.7$ W/(m·K)) 和其他矿物质的导热率 (λ_0) 得到: $\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_0^{1-q}$, 其中: $\lambda_0 = 2.0$ W/(m·K) ($q > 0.2$), $\lambda_0 = 3.0$ W/(m·K) ($q \leq 0.2$)

$$\lambda_{dry} = \frac{0.135 \rho_b + 64.7}{2700 - 0.947 \rho_b} \quad (9)$$

3.3.3 Côté 和 Konrad (2005)^[20] 对 Johansen 模型的改进型

$$K_e = \frac{k S_r}{1 + (k-1) S_r} \quad (10)$$

k 是与土壤质地有关的独立的参数。粗砂粒、中小的砂粒、黏土、有机质含量高的 k 值分别对应的是: 4.60, 3.25, 1.40, 1.20。并且给出了一个新的公式

$$\lambda_{dry} = \chi 10^{-\eta n} \quad (11)$$

式中, χ (W·m⁻¹·K⁻¹) 和 η 是受颗粒性状影响的参数。压碎的岩石,矿物土壤,有机质含量高的土壤的 χ (W·m⁻¹·K⁻¹) 和 η 值分别是 1.70、1.80 和 0.75、1.2, 和 0.30、0.87。

3.3.4 Lu 和 Ren (2007)^[21] 对 Johansen 模型的改进型

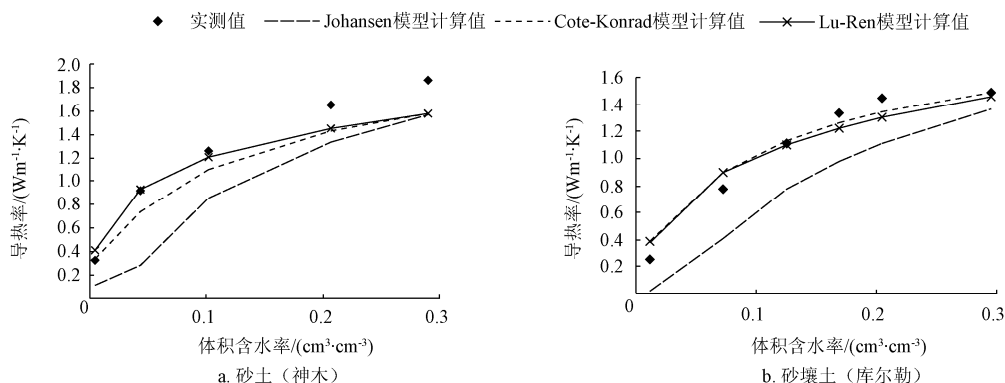
$$K_e = \exp\{\alpha[1 - S_r^{\alpha-1.33}]\} \quad (12)$$

式中, α 为由土壤质地决定的参数,对于砂土、壤土、黏土分别取值为: 1.05、0.9、0.58。1.33 为形状参数。对于矿物质的土壤给出了新的公式

$$\lambda_{dry} = -an + b \quad (13)$$

式中, a , b 是经验系数,在 $0.2 < n < 0.6$ 时, a , b 取值分别为: 0.56, 0.51。

用以上 3 种模型计算 4 种质地土壤的导热率,计算结果与实测值比较见图 6。



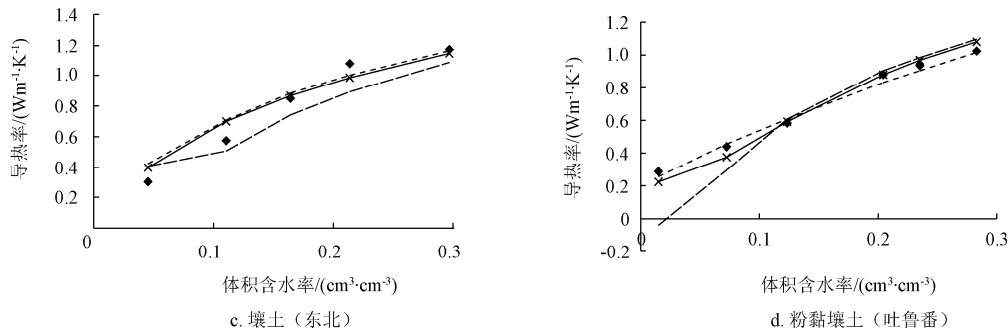


图 6 不同模型计算值与实测值比较

Fig.6 Comparison of soil thermal conductivity from different models and measured values

由图 6 可看出，用 Johansen (1975) 模型计算的结果与实测值差异较大，且明显都比实测值小。Côté 模型和 Lu 模型都比较适合对壤土和黏土类型的土壤进行预测，吻合程度较好，精度较高。而对于砂粒含量较高的土壤，模型预测效果一般，尤其是针对试验中所用神木地区的砂土（砂粒含量高达 97.663%），预测效果不好，精度较差，特别是在高含水率条件下，预测结果明显小于实测值。

表 4 对于 4 种质地土壤不同模型计算结果与实测值的相关系数 R^2 比较

Table 4 Correlation coefficient of three models in predicting thermal conductivity of four kinds of soils

土壤类型	Johansen 模型 R^2	Côté-Konrad 模型 R^2	Lu-Ren 模型 R^2
砂土	0.463	0.873	0.914
砂壤土	0.521	0.960	0.942
壤土	0.872	0.924	0.934
粉黏壤土	0.716	0.990	0.983
相关系数均值	0.643	0.937	0.943

为了更详细的比较 3 种模型的预测精度，计算了 3 种模型计算值与实测值的相关系数，由表 4 知，Johansen 模型的 R^2 变化范围在 0.463~0.872，相关系数均值为 0.643，相关系数偏小，预测效果较差；Côté-Konrad 模型的 R^2 变化范围在 0.873~0.990，相关系数均值为 0.937，相关性较好，预测效果比 Johansen 模型明显提高，但是对砂土的预测效果一般；Lu-Ren 模型的 R^2 变化范围在 0.914~0.983，相关系数均值为 0.943，比 Côté-Konrad 模型略有提高，其中对砂土的预测效果明显提高。据此结果，在模型预测导热率时，推荐使用 Côté-Konrad 模型和 Lu-Ren 模型，Lu-Ren 模型的预测精度略高于 Côté-Konrad 模型，模型的适用范围更广。

4 结 论

1) 导热率与含水率大体上呈幂函数变化趋势，在相同含水率条件下，砂土导热率明显比砂壤土高，壤土次之，黏壤土导热率最低。砂粒含量越高，土壤的导热率越大，土壤导热能力越强。

2) 对不同质地土壤，利用 Horton 公式分析了实测资料，获得了相应的经验参数，但是 Horton 公式不适用于 $\theta_v < 5\%$ 的情况。应注意在 Hydrus-1D 软件应用时调整相应

的参数。

3) 利用实测值与 Campbell 公式计算值进行比较，发现对于有些质地土壤两者差异较大，针对不同质地土壤，对其进行了修正。修正后公式可以比较准确计算不同质地的土壤导热率。

4) Johansen 模型及其 2 种改进模型（Côté-Konrad 模型和 Lu-Ren 模型）的计算值进行对比分析，结果表明 Johansen 模型计算结果与实测值偏差较大，2 种改进型模型的计算结果与实测值更接近。因此，在利用模型预测土壤导热率时，推荐使用 Côté-Konrad 模型和 Lu-Ren 模型。

[参 考 文 献]

- [1] 李毅, 邵明安. 热脉冲法测定土壤热性质的研究进展[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 134-139.
- [2] Ochsner T E, Ren T, Horton R. A New Perspective on Soil Thermal Properties[J]. Soil Sci. Soc. Am[J]. 2001, 65(6): 1641-1647.
- [3] Mori Y, Hopmans J W, Mortensen A P et al. Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration and heat transport parameters[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(5): 561-571.
- [4] Ghuman B S, Lal R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils[J]. Soil Sci., 1985, 139(1): 74-80.
- [5] 任图生, 邵明安. 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 [J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 225-229.
- [6] 李毅, 邵明安, 王文焰. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 62-65.
- [7] Liu X, Ren T, Determination of soil bulk density with thermo-time domain reflectometry sensors[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 2008, 72(4): 1000-1005.
- [8] Bristow K L, Thermal conductivity In methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods[M]. Madison, WI: SSSA[J]. 2002: 1209-1226.
- [9] Abramowitz M, Stegun I. Determination of Characteristic values. Handbook of mathematical functions[M]. Dover Publications, New York.1972:722-724.
- [10] Kluitenberg G J, Ham J M, Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity[J]. Soil Sci.Soc.Am.J, 1993, 57(6): 1444-1451.
- [11] Bristow K L, Kluitenberg G J, Horton R. Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique[J].

- Soil Sci Soc Am J, 1994, 58(5): 1288—1294.
- [12] Campbell G S, Calissendorff C, Williams J H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method[J]. Soil Sci.Soc.AmJ, 1991, 55(1): 291—293.
- [13] Ren T, Noborio K, Horton R. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1999, 63(3): 450—457.
- [14] Ochsner T E, Ren T, Horton R. Simultaneous water content, air-filled porosity, and bulk density measurements with thermo-time domain reflectometry[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 2001, 65(6): 1618—1622.
- [15] 陆森, 任图生, 杨泱. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 20—25.
Lu Sen, Ren Tusheng, Yang Yang, et al. Error analysis of multi-needle heat pulse probe for soil thermal conductivity measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 20—25. (in Chinese with English abstract)
- [16] Chung S-O, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. Water Resour. Res, 1987, 12(11): 2175—2186.
- [17] Campbell G S. Soil Physics with BASIC[M]. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 1985, 221—234.
- [18] De Vries D A. Thermal properties of soils. In: van Wijk W R.ed.Physics of Plant Environment. NewYork: John Wiley and Sons.Inc., 1963, 210—235.
- [19] Johansen, O. 1975. Thermal conductivity of soils. Ph.D. diss. Norwegian Univ.of Science and Technol., Trondheim CRREL draft transl. 1977, 10(5): 637—643.
- [20] Côté J. and Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. Can. Geotech. J. 2005, 42(3): 443—458.
- [21] Lu S, Ren T, Yuanshi Gong. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. Soil Sci. Soc. Am.J., 2006, 71(1): 8—14.

Soil thermal properties determination and prediction model comparison

Wang Shuo¹, Wang Quanjiu^{1,2*}, Fan Jun², Wang Weihua¹

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China)

Abstract: The thermal conductivity is one of the important thermal parameters. In order to get the method for accurately forecasting the thermal conductivity of soils, the heat-pulse direct measuring method and indirect calculation method were compared. According to the principle of heat-pulse, the thermal conductivity of soils with different textures and moisture in the same soil bulk density were measured. The results showed that, under the same moisture, the soil thermal conductivity increased with the sand content rise. Horton equation was used to fit the measured values. The results indicated that the Horton equation may be used to describe the relationship between thermal conductivity and water content, and the parameters in Horton equation were given. Campbell empirical formula of thermal conductivity was used to calculate the thermal conductivity. The results show that there was a large difference between the calculated and measured values. Johansen model and two improved models were used to calculate the thermal conductivity. The results showed that there was a deviation between Johansen model calculated values and measured values, and the results from two improved models were more consistent with measured values. The research indicated that soil thermal conductivity can be calculated by soil texture, water content, soil porosity and bulk density. The correlation coefficients of calculated values from Côté-Konrad model and Lu-Ren model with measured values were 0.643, 0.937 and 0.943, respectively. The two improved models are recommend for calculating soil thermal conductivity, and the application scope of Lu-Ren model is wider than that of Côté-Konrad model.

Key words: soils, thermal conductivity, models, heat pulse, soil texture