

# 不同温度下的土壤热导率模拟

陆 森, 任图生<sup>\*</sup>

(中国农业大学土壤与水科学系, 北京 100193)

**摘 要:** 土壤热导率是研究陆地表层水热盐耦合运动的基本物理参数。由于水汽潜热传热在高温下的显著作用, 高温下的土壤热导率显著高于常温值。该研究的目的是建立能够有效预测高温下土壤热导率的模型。在气体扩散定律的基础上, 该文结合常温土壤热导率模型, 提出了一个计算高温土壤热导率的新方法。并利用热脉冲技术实际测定了不同温度、不同含水率下的土壤热导率, 对新模型进行了测试验证。结果表明, Cass 等的水汽运移促进因子参数依赖于土壤质地, 且存在较大的不确定性。经过对该参数修正后, 建立的热导率模型均能够较好地模拟出高温下的土壤热导率。

**关键词:** 土壤, 热导率, 温度, 水汽运移促进因子

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.003

中图分类号: S152.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0013-06

陆 森, 任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 13-18.

Lu Sen, Ren Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(7): 13-18.(in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

土壤热状况影响着农业生产的各个方面, 如种子萌发, 水分蒸发, 热量传递等<sup>[1]</sup>。如何定量模拟土壤中的热量传输一直是土壤学和农业工程领域研究的热点问题。土壤的热特性包括热导率、热扩散系数和热容量 3 个参数, 其中热导率是土壤水热盐耦合运动研究以及水分蒸发模拟计算必须的参数, 得到了广泛的关注<sup>[2-8]</sup>。

在土壤热导率的测定方面, 传统的稳态法通过维持样品两端恒定的温度梯度, 利用测定的土壤热通量来计算热导率。由于平衡时间长, 土壤水分会在土柱内运移并引起水分再分布, 影响了测定结果的可靠性。基于瞬态热传输原理的热脉冲技术由于水分对流很小, 在测定土壤热特性方面得到了很大发展, 近些年来在土壤科学以及水土工程方面得到了广泛的应用<sup>[9-13]</sup>。

在土壤热导率的预测模拟方面, 国内外已发展了大量的常温热导率模型, 一般均充分考虑了土壤质地、含水率和容重等对热导率的影响<sup>[14-17]</sup>。在田间条件下, 土壤表层温度存在显著的日变化和季节变化。由于高温下土壤的热导率一般是常温下的数倍, 忽略热导率的温度效应会给模拟结果带来很大的偏差<sup>[18-20]</sup>。长期以来, 关于高温下土壤热导率的测定和模拟研究很少, 仅 Campbell 等<sup>[18]</sup>、Hiraiwa 和 Kasubuchi<sup>[20]</sup>利用单针热脉冲技术进行了定量测定和模拟。Campbell 等<sup>[18]</sup>以 de Vries<sup>[19]</sup>

的热导率模型为基础, 第 1 次建立了高温(直至 90℃)下土壤热导率与含水率的关系。但该模型所需参数很多, 而且至少需要一组观测数据来校正模型以获取参数。另外, 模型中许多参数依赖于土壤质地, 在实际应用中存在着很大的不确定性。

当土壤温度在 30℃ 以上时, 水汽的蒸发和凝结传热作用对土壤热传输过程影响显著, 此时不能再传统的常温热传导方法模拟, 而必须考虑水汽在其中的运移传热。在温度梯度下, 土壤水汽从热端扩散至冷端会产生凝结并放热, 随着温度的升高, 潜热传输作用越来越显著。考虑到非饱和土壤中液相水的存在以及液相水与水汽的相互作用, 水汽在土壤中的扩散问题很难准确模拟, 从而增加了高温下土壤热导率模拟的难度。

本文以土壤水汽潜热运移理论为依据, 结合 Lu 等<sup>[17]</sup>建立的常温土壤热导率模型, 发展了一个新的预测高温下(30~90℃)土壤热导率的模型, 以期土壤水热盐耦合运动研究中确定土壤热导率提供科学依据。

## 1 模型建立

基于 Fick 扩散定律, 水汽在土壤中的运移方程为<sup>[21]</sup>

$$J_v = a\alpha D_a \frac{d\rho}{dT} \nabla T \quad (1)$$

式中:  $J_v$ ——水汽通量密度,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $a$ ——土壤充气孔隙度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $\alpha$ ——土壤弯曲因子, 一般取 0.66;  $D_a$ ——水汽在空气中的扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\rho$ ——土壤气相中的水汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$ ——温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\nabla T$ ——温度梯度,  $^\circ\text{C}/\text{m}$ 。

早期的研究发现, 基于经典扩散理论描述的土壤水汽扩散方程偏差较大, 实测结果总是模拟结果的数倍<sup>[21-22]</sup>。Philp 和 de Vries<sup>[21]</sup>提出液岛理论与土壤水汽运移促进因子(vapor enhancement factor)来解释这个现象。该理论的机理包括 2 个方面。首先, 土壤颗粒之间的液

收稿日期: 2009-02-01 修订日期: 2009-05-15

基金项目: 国家 863 项目“农田土壤信息新型传感器与信息解析”(2006AA10Z205)与“车载农田土壤信息快速采集关键技术与产品研发”(2006AA10A301-1)

作者简介: 陆 森(1982-), 男, 江苏人, 研究方向: 土壤物理。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: lusen82@163.com

\*通信作者: 任图生(1963-), 男, 教授, 研究方向: 土壤与环境物理。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: tsren@cau.edu.cn

岛可以传输水汽,即水汽在液岛的一端凝结并放热,从而引起另一端水汽的蒸发。其次,考虑到土壤中固液气三相热导率的差异,土壤气相中的温度梯度应大于平均温度梯度。因而,在传统理论推导出的土壤水汽运移方程中,需要乘以一个水汽运移促进因子,用来定量描述这2种机理。这样,式(1)式修正为

$$J_v = \eta \alpha D_a \frac{d\rho}{dT} \nabla T \quad (2)$$

Cass 等用下式来描述促进因子 $\eta$ <sup>[23]</sup>

$$\eta = A + B \frac{\theta}{n} - (A - D) \exp \left[ - \left( C \frac{\theta}{n} \right)^E \right] \quad (3)$$

式中: $\theta$ ——土壤体积含水率,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $n$ ——土壤孔隙度( $n = a + \theta$ ),  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $A, B, C, D, E$ ——依赖于土壤质地的参数。Cass 等<sup>[23]</sup>提供了包含一种砂土和一种壤土的参数表,已被广泛应用于水热耦合运动模拟<sup>[23-24]</sup>。

将式(2)代入土壤热流方程可得

$$\begin{aligned} J_h &= -\lambda_c \nabla T + L J_v = -(\lambda_c + \lambda_v) \nabla T \\ &= -(\lambda_c + L \eta \alpha D_a \frac{d\rho}{dT}) \nabla T \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $J_h$ ——热流量密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $L$ ——潜热系数,  $\text{J}/\text{kg}$ ;  $\lambda_c$  和  $\lambda_v$ ——分别为传导和水汽潜热贡献的热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。 $\lambda_c$  和  $\lambda_v$  两者之和为土壤热导率 ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), 即

$$\lambda = \lambda_c + \lambda_v = \lambda_c + L \eta \alpha D_a \frac{d\rho}{dT} \quad (5)$$

在一般的土壤热导率模型中,并不考虑温度变化的影响<sup>[14-17]</sup>。这是因为在  $0 \sim 30^\circ\text{C}$  范围内,土壤中水汽潜热传输的作用并不大,可以将低温下实测的热导率近似于传导贡献的热导率 $\lambda_c$ <sup>[20]</sup>。为此,本文利用常温下的热导率模型,将其预测结果近似为 $\lambda_c$ ,再结合已知温度,通过公式(5)来计算高温下的土壤热导率。

公式(5)中,参数  $L$  ( $\text{J}/\text{kg}$ ) 和  $D_a$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) 都是温度  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) 的函数

$$L = 2490317 - 2259.4T \quad (6)$$

$$D_a = 0.0000229[(T + 273)/273]^{1.75} \quad (7)$$

水汽密度 $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 可以利用饱和水汽密度和水汽相对湿度计算出

$$\begin{aligned} \rho &= 0.001 \exp[19.819 - 4975.9/(T + 273)] \\ &\exp \left[ \frac{\psi g}{R(T + 273)} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $g$ ——重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $\psi$ ——土壤水势,  $\text{kPa}$ , 可以利用土壤水分特征曲线计算得到。

这里,我们利用 Lu 等<sup>[17]</sup>模型计算的常温土壤热导率来近似式子(5)中的 $\lambda_c$ 。只需要输入土壤的砂粒含量以及容重信息,该模型就可以较好地模拟出室温下的土壤热导率<sup>[17]</sup>:

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) K_e + \lambda_{dry} \quad (9)$$

式中: $\lambda_{dry}$ ——干土热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda_{sat}$ ——饱和土壤

热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $K_e$ ——Kersten 函数,分别用下列公式计算

$$\lambda_{dry} = -0.56n + 0.51 \quad (10)$$

$$\lambda_{sat} = (\lambda_q^q \lambda_o^{1-q})^{(1-n)} \lambda_w^n \quad (11)$$

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

式中: $\lambda_w$ ——水的热导率,  $20^\circ\text{C}$  时为  $0.594 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $q$ ——石英含量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;  $\lambda_q$ ——石英的热导率,  $7.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda_o$ ——非石英矿物的热导率,  $q \leq 20\%$  时取  $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $q > 20\%$  时取  $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $S_r$ ——土壤饱和度 ( $S_r = \theta/n$ );  $N$ ——形状因子,一般取  $1.33$ ;  $M$ ——与土壤质地有关的常数,土壤砂粒含量大于  $40\%$  时取  $0.96$ , 小于  $40\%$  时取  $0.27$ <sup>[17]</sup>。

## 2 试验设计

为了验证本文发展的模型,我们利用瞬态法测定了一种壤土在不同温度的热导率。同时也收集了 Campbell 等<sup>[18]</sup>的数据,进行了比较分析。

### 2.1 瞬态法测定土壤热导率原理

瞬态法基于瞬态热传输理论<sup>[12]</sup>,通过对土壤施以较短时长的脉冲热量,测定一定位置处土温随时间的变化来获取热特性参数。由于加热量低、加热时间短,瞬态法引起的水分对流可降至最低,测定的土壤热特性相对可靠。

对于均一初始温度下各向同性的均质土壤,如果加热源为无限长的线形热源,柱坐标下的热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = w \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (13)$$

式中: $t$ ——时间,  $\text{s}$ ;  $w$ ——热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $r$ ——径向距离,  $\text{m}$ 。

当线性热源为维持一定加热时长  $t_0$  ( $\text{s}$ ) 的热脉冲,公式(13)的解为

$$\Delta T(r, t) = -(Q' / 4\pi w) Ei(-r^2 / 4wt) \quad 0 < t < t_0 \quad (14)$$

式中: $\Delta T$ ——温度变化值,  $^\circ\text{C}$ ;  $Q'$ ——单位时间内的线形热源强度,  $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{s}$ ,  $Q' = q' / \rho_c$ , 其中  $q'$ ——单位时间内单位长度线形热源所释放的热量,  $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ;  $\rho_c$ ——土壤容积热容量,  $\text{J}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$ ;  $Ei(x)$ ——指数积分,其中  $x$  为被积函数。

对于单针法,加热电阻丝和温度传感器(本文为热电偶)被固定在同个不锈钢管中。测定时,将探针插入土中,记录加热或者冷却过程中的探针温度变化(如图1)。

在探针加热时期,当  $r^2/(4wt)$  值较小时,公式(14)可近似为

$$\Delta T \cong q' / (4\pi\lambda) \ln(t) + b \quad (15)$$

式中: $b$ ——不依赖于时间  $t$  的系数。在计算中,只要将温度变化值  $\Delta T$  对时间对数  $\ln(t)$  做直线回归,通过直线的斜率即可获得  $\lambda$ 。考虑到在开始加热时,所记录的温度

值受探针自身材料热特性影响较大，加上探针和土壤的接触阻力，计算时通常不包括早期（5~10 s）的几组数据<sup>[12,25]</sup>。图 2 是将图 1 例子在加热时期数值的直线回归结果。

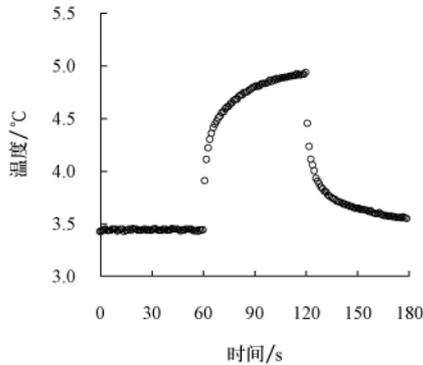


图 1 热脉冲技术测定热导率过程中探针温度随时间的变化  
Fig.1 Example data of probe temperature changes versus time during the process of thermal conductivity measurement using heat pulse technique

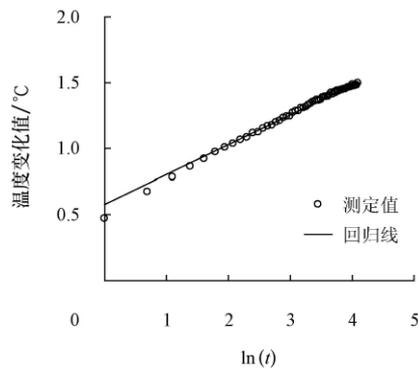


图 2 加热期间探针温度变化值与时间对数的关系  
Fig.2 Changes of probe temperature as a function of  $\ln(t)$  during the heating period

### 2.2 测定过程

本研究采用热交换器（图 3）来控制土壤样品的温度<sup>[24,26]</sup>。热交换器包括上下两层热交换铜板，每个板子上都有循环水通道，通过循环一定温度的水来控制铜板温度。土柱管被紧紧夹在两个交换器板子之间（图 3）。土柱管包括内管和外管，内管为测定管，规格为 10 cm 长、10.2 cm 内径的 PVC 管。外管为保护管，目的为减小径向温度梯度，也为 PVC 管（长 10 cm，内径 20 cm）。在试验中，内管和外管均填入相同含水率的土壤，但测定只在内管中进行。在测定过程中，外管外面还包裹几层隔热材料，进一步消除了外界温度的影响。因此，该设备能够最大程度地消除径向热传递<sup>[24,26]</sup>。当热交换器两端维持相同温度时，该设备就可以很好地调节和控制管内土壤样品的温度。

试验材料为壤土，采自河北省廊坊市。表 1 给出了该土样和 Campbell 等<sup>[18]</sup>所用的 Palouse 粉壤土的基本物理特性。采集的土壤样品经风干、研磨后过 2 mm 筛，然后向土中加入不同量的蒸馏水，搅拌均匀后，按照容重

1.30 g/cm<sup>3</sup> 填入内管和外管中。将单针热脉冲探头水平地插入内管中部，整个系统平衡至少 6 h 以上，以保证温度和水分均匀分布。

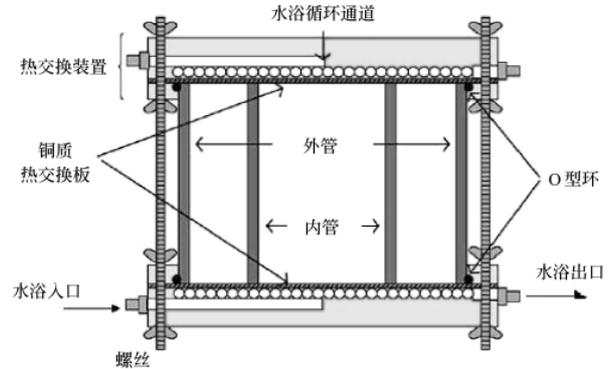


图 3 热交换器试验装置示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the heat exchanger

表 1 土壤取样地点和质地  
Table 1 Sampling sites and textures of soil samples

土壤质地 (美国制)	采样地点	颗粒组成/%		
		2~ 0.05 mm	0.05~ 0.002 mm	<0.002 mm
壤土	河北省廊坊市	40	49	11
Palouse 粉壤土*	美国华盛顿州	11	68	21

注：\* Palouse 粉壤土为 Campbell 等<sup>[18]</sup>的测定值。

本研究使用的单针直径 0.9 mm，长度为 60 mm。温度记录和加热控制由数据采集器完成（CR21X, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, 美国）。在测定过程中，每一秒记录一次温度变化，共记录 180 s 的温度—时间数据（加热前 60 s，加热中 60 s，冷却时 60 s）。加热电流随含水率不同而调整变化，控制探针最大温升在 0.7~2°C 之间<sup>[25]</sup>。在回归计算过程中，未考虑加热阶段前 10 s 的数据。

热导率测定的顺序均是从低温到高温。每个土柱测定了 4 个温度（3、22、60、81°C）下的土壤热导率。测定完成后打开热交换器，收集内管土样并用烘干法准确测定土壤含水率。

## 3 结果与分析

### 3.1 温度对土壤热导率的影响

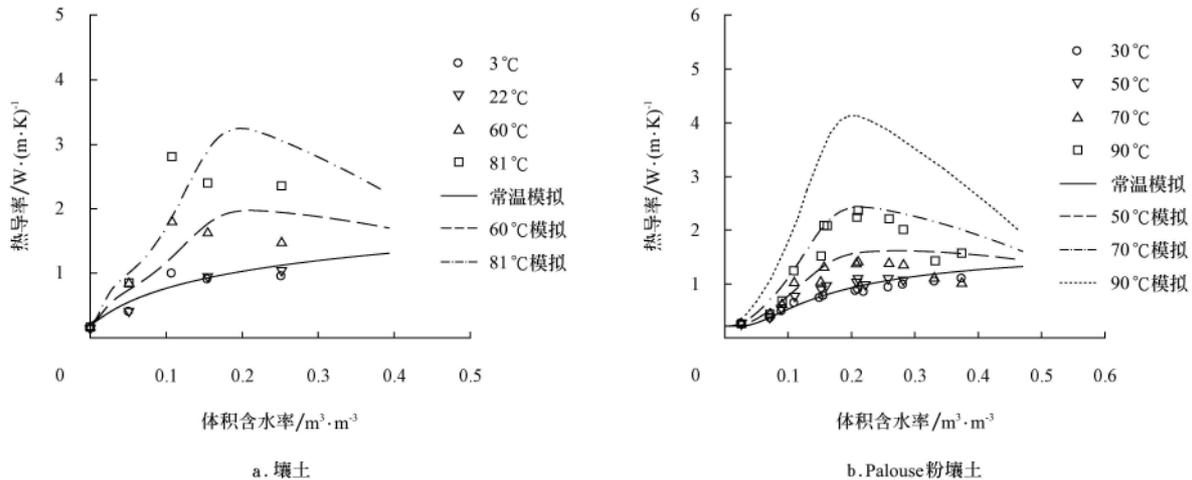
在 3~22°C 范围内，土壤热导率随含水率的增加而逐渐增大。从图 4a 中可以看出，常温下温度对土壤热导率的影响很小，可以忽略，Lu 等的模型能够较好地模拟出常温下的土壤热导率。

温度进一步升高时，土壤热导率的变化趋势趋于复杂。高温下热导率的测定结果表明，在中等含水率区域（0.15~0.35 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>），高温下两种土壤的热导率是相同含水率下常温热导率的 2~4 倍（图 4）。其原因有两个方面：第一，此时土壤气相中的水汽相对湿度足够大；第二，一定量的气相体积分数使水汽的扩散能力达到极值，从而导致水汽潜热传输在中等含水率区域达到最大。以

80°C为例,此温度下饱和水汽的潜热贡献热导率远大于液态水的热导率。当土壤热导率达到极值后,进一步增加水分含量会降低水汽扩散的空间,从而引起热导率的不断下降。这些结果和 Campbell 等<sup>[18]</sup>、Hiraiwa 和 Kasubuchi<sup>[20]</sup>的报道相似,说明水汽潜热传热在高温下土壤热传输中具有显著作用。在低含水率区域,由于土壤气相中水汽相对湿度值偏低,温度对热导率的作用比中

等含水率区域降低了很多(图4)。

图4的结果充分说明,高温下的水汽潜热传输在很大程度上增加了土壤热导率。然而,常规的土壤水热耦合模拟往往不考虑热导率的温度效应,显然会带来较大误差。因此,在模拟温度梯度驱动的水分运动过程时,应将液态水流和水汽流综合考虑,把土壤热导率作为温度的函数计算。这对研究地表水热耦合过程尤为重要。



注:模型中水汽运移促进因子的参数来自 Cass 等。常温模拟为 3~30°C 下的模拟结果

图4 不同温度下土壤热导率测定值与模拟值的比较

Fig.4 Comparisons of measurement values with prediction of soil thermal conductivity under different temperatures

### 3.2 高温下土壤热导率模拟

利用本文发展的模型,我们预测了不同温度下两种土壤的热导率,结果见图4。可以看出,常温下两种土壤的热导率模拟值和实测值均相符很好,但是在高温下误差很大。模拟值和实测值在壤土和粉壤土上的最大差异分别达到 0.9 W/(m·K)和 1.8 W/(m·K)。由于除水汽运移促进因子外,模型的其他输入参数都是测定值或经典公式的计算结果,因而需要分析水汽运移促进因子的误差。事实上,Andraski 和 Jacobson<sup>[27]</sup>已经指出,在土壤水热运动模拟中,模拟值偏离实测值的主要原因可能就是土壤水汽运动模拟和水汽运移促进因子选取的不确定性<sup>[27]</sup>。

水汽运移促进因子的不确定性主要来源于两个方面。首先,Cass 等提出的促进因子模型<sup>[23]</sup>从 Campbell 建立的常温热导率模型<sup>[14]</sup>发展而来,二者在形式上基本相同。但 Campbell 模型中的 5 个参数值是基于个别土壤上的测定结果,其适应范围目前仍不太清楚。李婷等<sup>[28]</sup>最近发现,即使在常温下,Campbell 热导率模型的参数也需要修正。在计算中,他们将 Campbell 模型 5 个参数中的 3 个进行了修正,保持其他 2 个参数不变,显著地提高了该模型预测土壤热导率的准确性<sup>[28]</sup>。第二,公式(3)是一个经验模型,5 个参数值一般均依据 Cass 等的两种质地土壤结果而选择,其可靠性尚未在其他质地土壤上获得试验验证。事实上,Cass 等的试验结果表明,不同质地土壤的水汽增强传输强弱不同,水汽运移促进因子的大小相差很大。文献中关于水汽运移促进因子的实际测定极少,多数水热迁移模型都是根据土壤质地选用

Cass 等两组参数的一组<sup>[24]</sup>。对于本研究,公式(3)中 A、B、C、D 和 E 的值选自 Cass 等在壤土上的结果,分别取 9.5、3、3.5、1.0 和 4.0。但本文两种土壤的质地和 Cass 等相差较大(表1),上述参数可能存在不适应性。因此,有必要对促进因子模型中的参数进行修正。

### 3.3 不同质地土壤水汽运移促进因子的修正

对于中国的壤土,我们利用 60°C 下实测的土壤热导率数据,参照李婷等<sup>[28]</sup>的做法进行了参数修正。将 Cass 等<sup>[23]</sup>粉壤土的参数 A、B、C 由 9.5、3、3.5 分别修正为 6.9、1.0、7.0,参数 D 和 E 保持 1.0 和 4.0 不变。图 5a 为参数修正后的模拟结果。可以看出,参数修正后测定值随机分布在模型预测线的两侧,能够很好地预测高温(81°C)下的土壤热导率。与实测数据比较后的误差分析表明,以 60°C 结果为例,参数修正后的均方根误差(RMSE)为 0.127,远小于修正前的误差值(0.335);81°C 下的误差分析结果与此相似,参数修正前后的 RMSE 值分别为 0.579 和 0.241。

对于美国的 Palouse 粉壤土,参数修正后 A、B、C 分别为 3.5、1、3.4,参数 D 和 E 保持 1.0 和 4.0 不变。从模拟结果看,参数修正后模型的预测精度得到很大提高。如 90°C 下的模拟值与实测值比较分析结果表明,参数修正后的 RMSE 误差为 0.267,与参数修正前的误差值(1.455)比较,参数修正显著提高了模拟预测精度。从图 5b 中还可以看出,在中等含水率区域(0.15~0.25 m³/m³),90°C 下的预测值比实测值稍低,而在 50°C 和 70°C 下预测值比实测值稍高(图 5b)。这可能是高温

下温度梯度驱动的液态水流传热增大造成的。Campbell等<sup>[18]</sup>发现, 90℃测定时探针周围的土壤含水率有降低现象。一般地, 高温下土壤热导率的测定误差比常温要大<sup>[18]</sup>, 不仅因为高温下水汽扩散的不确定性, 高温下液态

水传输和探针周围土壤的含水率下降都可能引起较大的测定误差。因此, 在高温下的非饱和土壤中, 水汽流和液水流对热传输过程的影响机理还需要进一步研究。

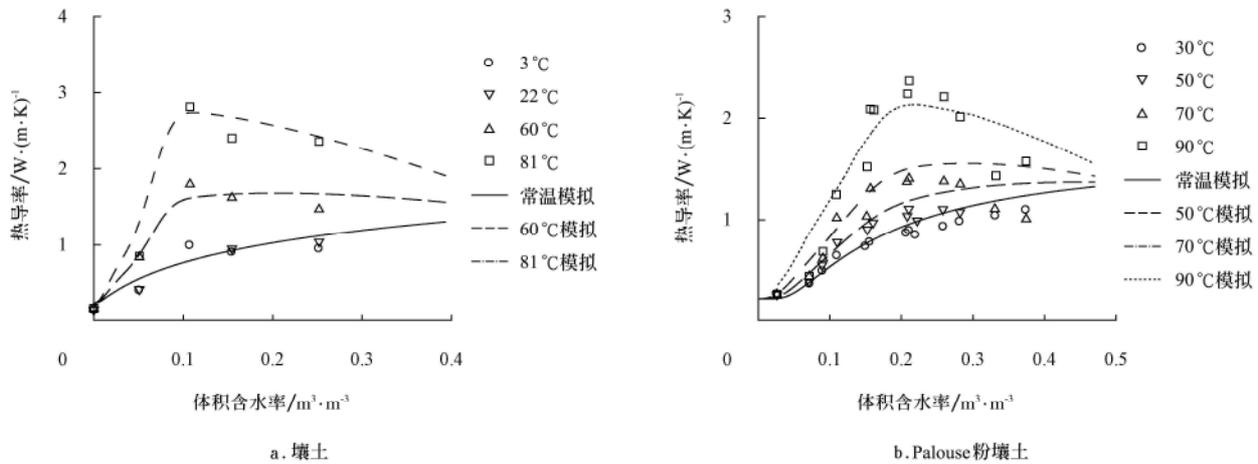


图5 水汽运移促进因子修正后土壤热导率测定值与模拟值的比较

Fig.5 Comparisons of measurement values with prediction values of soil thermal conductivity under different temperatures with modified vapor enhancement factor

## 4 结论

本文将常温土壤热导率模型与水汽潜热运移传热理论相结合, 建立了一个预测高温下土壤热导率的模型, 并利用热脉冲技术测定不同温度下的土壤热导率, 对模型进行了验证。结果表明:

1) 温度对土壤热导率的影响很大, 特别在中等含水率区域 ( $0.15 \sim 0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), 相同含水率下高温土壤的热导率是常温热导率的数倍。

2) 在常温下 ( $3 \sim 30^\circ\text{C}$ ) 模拟土壤热导率时, 一般可以忽略温度效应, Lu 等模型能够较好地模拟出常温热导率。当土壤温度较高时 ( $>30^\circ\text{C}$ ), 使用常温热导率模型模拟农田水热过程会引起较大误差, 应当考虑水汽潜热传热的作用。

3) 常用的 Cass 等水汽运移促进因子参数表中的参数是显著依赖于质地的, 未修正参数直接代入模型中计算可能是热导率模拟以及水热耦合运动模拟中误差的重要来源。修正水汽运移促进因子参数后, 模型计算的热导率和实测热导率符合较好。

4) 在常温土壤热导率模型中引入水汽运移潜热传热, 提高了高温下土壤热导率的预测精度。新建模型对进一步探讨土壤中水热盐耦合迁移机理具有重要的应用价值。

### [参 考 文 献]

[1] 王建东, 龚时宏, 隋娟, 等. 华北地区滴灌灌水频率对春玉米生长和农田土壤水热分布的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 39-45.  
Wang Jiandong, Gong Shihong, Sui Juan, et al. Effects of drip irrigation frequency on the farmland soil water-heat distribution and spring maize growth in North China[J].

Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 39-45. (in Chinese with English abstract)

- [2] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 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.  
Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Influence of soil textures on the thermal properties[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [3] 任理, 张瑜芳, 沈荣开. 条带覆盖下土壤水热动态的田间试验与模型建立[J]. 水利学报, 1998, (1): 76-84.  
Ren Li, Zhang Yufang, Shen Rongkai. Field experiments and numerical simulation of soil water and heat regimes under the condition of summer corn partially covered by mulch strips[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (1): 76-84. (in Chinese with English abstract)
- [4] 脱云飞, 费良军, 杨路华, 等. 秸秆覆盖对夏玉米农田土壤水分与热量影响的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 27-32.  
Tuo Yunfei, Fei Liangjun, Yang Luhua, et al. Simulation study on influence of straw mulch on soil moisture and heat of summer corn farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 27-32. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水土壤中的水热运动规律与数值模型[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 351-359.  
Yang Bangjie, Blackwell P S, Nicholson D F. Modeling heat and water movement in a water-repellent sandy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(4): 351-359. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水土壤中的水热运动模型的应用[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 427-433.  
Yang Bangjie, Blackwell P S, Nicholson D F. Application of the model of heat and water movement in water-repellent soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(4): 427-433. (in Chinese with English abstract)

- [7] Milly P C D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media[J]. *Water Resour Res*, 1982, 18(3): 489–498.
- [8] Nassar I N, Horton R. Simultaneous transfer of heat, water, and solute in porous media: I. Theoretical development[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 1350–1356.
- [9] 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[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 225–229.  
Ren Tusheng, Shao Ming'an, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry I. Theory[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 225–229. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 II. 应用[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 523–529.  
Ren Tusheng, Shao Ming'an, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry II. Application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 523–529. (in Chinese with English abstract)
- [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: 1288–1294.
- [12] Bristow K L. Thermal conductivity[A]. *Methods of Soil Analysis: Part. 4. Physical Methods*[M]. Madison, WI: SSSA, 2002: 1209–1226.
- [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: 450–457.
- [14] Campbell G S. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-plant Systems*[M]. New York: Elsevier Science Publishing Company, 1985.
- [15] Côté J, Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Can Geotech J*, 2005, 42(2): 443–458.
- [16] Johansen O. *Thermal Conductivity of Soils*[D]. Trondheim, Norway: University of Trondheim, 1975.
- [17] Lu Sen, Ren Tusheng, Gong Yuanshi, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, 71(1): 8–14.
- [18] Campbell G S, Jungbauer J D, Bidlake W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity[J]. *Soil Sci*, 1994, 158(5): 307–313.
- [19] de Vries D A. *Thermal properties of soils*[A]. van Wijk W R. *Physics of Plant Environment*[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963.
- [20] Hiraiwa Y, Kasubuchi T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5–75°C)[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 211–218.
- [21] Philip J R, de Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Trans Am Geophys Union*, 1957, 38: 222–232.
- [22] Gurr G G, Marshall T J, Hutton J T. Movement of water in soil due to a temperature gradient[J]. *Soil Sci*, 1952, 74(5): 335–345.
- [23] Cass A, Campbell G S, Jones T L. Enhancement of thermal water vapor diffusion in soil[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48: 25–32.
- [24] Heitman J L, Horton R, Ren T, et al. A test of coupled soil heat and water transfer prediction under transient boundary temperatures[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2008, 72: 1197–1207.
- [25] Shiozawa S, Campbell G S. Soil thermal conductivity[J]. *Remote Sensing Rev*, 1990, 5: 301–310.
- [26] Heitman J L, Horton R, Ren T, et al. An improved approach for measurement of coupled heat and water transfer in soil cells[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, 71(3): 872–880.
- [27] Andraski B J, Jacobson E A. Testing a full-range soil-water retention function in modelling water potential and temperature[J]. *Water Resour Res*, 2000, 36(10): 3081–3089.
- [28] 李婷, 王全九, 樊军. 土壤热参数确定方法比较与修正[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 59–64.  
Li Ting, Wang Quanjiu, Fan Jun. Modification and comparison of methods for determining soil thermal parameters[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 59–64. (in Chinese with English abstract)

## Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures

Lu Sen, Ren Tusheng\*

(Department of Soil and Water Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Soil thermal conductivity is an essential parameter for studying the coupled transport of heat, water, and solute at land surface. It is generally recognized that soil thermal conductivity is increased at elevated temperatures due to the enhanced latent heat transfer. The objective of this study was to develop a model that was capable of predicting soil thermal conductivity at high temperatures. The gas diffusion law was applied and the latent heat transfer of vapor was introduced to a soil thermal conductivity model for moderate temperature. The performance of the model was examined by heat-pulse measurements of soil thermal conductivity at various temperatures and water contents. The results indicated that the vapor enhancement factor varied with soil texture and existed a great uncertainty. Thus the parameters of Cass et al that were used to estimate the vapor enhancement factor were modified. When the adjusted parameters were applied, the new model was able to predict soil thermal conductivity accurately at high temperatures.

**Key words:** soils, thermal conductivity, temperature, vapor enhancement factor