

文章编号:0253 - 4339(2017) 03 - 0089 - 07

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2017. 03. 089

非饱和土壤热导率模型的优化与应用

王志华^{1,2} 王甜^{1,3} 王泮浩^{1,2}

(1 西安交通大学人居环境与建筑工程学院 西安 710049; 2 西安交通大学建筑节能研究中心 西安 710049;

3 中核新能核工业工程有限责任公司 太原 030012)

摘要 本文在 Campbell 模型和 de V-1 模型的基础上,以 Campbell 模型为主,对该模型中的两个参数形状因子(g_a)和土壤固相热导率(λ_m)采用 de V-1 模型中的计算方法,提出了一种新的预测土壤热导率温度关系的模型。该模型土壤固相热导率和形状因子均考虑了土壤颗粒组成成分,也包含了温度对土壤固相热导率的影响。此外,与前两种模型进行比较,该模型与实验值吻合较好,能够更好地预测土壤热导率。基于该模型,分析了土壤温度和体积含水率两个变量对不同类型土壤热导率的影响。研究表明:在同一温度及体积含水率工况下,土壤热导率是砂土 > 壤土 > 黏土。该研究为埋管换热器周围非饱和土壤热湿耦合迁移模型的建立提供新的思路。

关键词 非饱和土壤;热导率;模型研究;优化

中图分类号:TQ051.5; TK529; TK124

文献标识码: A

Optimization and Application of Unsaturated Soil Thermal Conductivity Model

Wang Zhihua^{1,2} Wang Tian^{1,3} Wang Fenghao^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, China; 2. Center for Building Energy Conservation, Xi'an Jiaotong University, 710049, China; 3. CNNC Xinneng Nuclear Engineering Co., Ltd., Taiyuan, 030012, China)

Abstract Based on the models of Campbell and de V-1, a new mathematic model for predicting soil thermal conductivity is developed in this paper. Using the parameters shape factors (g_a) and soil solid thermal conductivity (λ_m), the Campbell model is calculated by the method of the de V-1 model. According to this method, the soil solid thermal conductivity and shape factors are considered to be soil solid components, and include the effect of temperature on the soil solid thermal conductivity. By comparing the Campbell and de V-1 models, the measured results are in good accordance with the numerical ones, and the model shows better performance when predicting soil thermal conductivity. In addition, the effects of soil temperature and moisture on different soil thermal conductivities are studied. The results indicate that under the same soil temperature and moisture, the thermal conductivity of sand is greater than that of loam, and the thermal conductivity of loam is greater than that of clay. This will provide new ideas for establishing a coupled heat and moisture transfer model in unsaturated soil for heat exchangers.

Keywords unsaturated soil; thermal conductivity; model study; optimization

地源热泵以高效、节能、环保无污染等特点,被认为是当今世界最具发展前景的空调技术之一^[1-3]。而土壤热导率是影响地源热泵性能的关键因素之一。另外,非饱和土壤中的水分在土壤温度梯度的作用下发生迁移,而土壤中水分含量的变化对土壤的热物性参数产生影响,影响土壤温度场的重新分布,土壤中的含水量和温度的变化相互耦合^[4-5]。为了更真实、

准确地模拟埋管换热器的传热过程,国内外学者展开了土壤热物性参数的温度效应研究^[6]。

D. A. De Vries^[7]研究了温度对土壤热导率的影响,并建立了土壤热导率温度效应关系理论模型,对不同温度下土壤热导率进行了实验测试和验证。G. S. Campbell 等^[8]通过对不同温度下土壤热导率模型进行测试,对 D. A. De Vries^[7]理论模型进行一定的

基金项目:国家自然科学基金(51606139)和中国博士后科学基金(2016M590950)资助项目。(The project were supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51606139) and China Postdoctoral Science Foundation(No. 2016M590950).)

收稿日期:2016年4月21日

修正,使计算模型可以更好地预测土壤实际热导率。王沅浩等^[9]通过数值模拟,分析了测试时间、舍弃初始小时数、钻孔半径、岩土体初始温度、加热器输入功率等因素对岩土导热系数测试结果的影响。袁玉倩等^[10]通过大量实测样本,分析了土壤孔隙度和饱和度对其热导率的影响,提出了基于改进学习算法的 BP 神经网络的土壤热导率预测模型,并基于该模型,分别对黏土、粉黏、粉土、粉砂 4 种土壤的热导率进行了预测分析。陆森等^[11]在气体扩散定律的基础上,结合常温土壤热导率模型,提出了一种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。苏李君等^[12]在 Côté-Konrad 模型和 Lu-*Ren* 模型的基础上,建立了基于土壤物理基本参数的改进模型。F. Gori 等^[13]考虑了温度的影响,扩展了原先建立的冻土模型,研究表明高温下土壤热导率在含水率较高的情况下会出现较大的偏差。V. R. Tarnawski 等^[14]在 D. A. De Vries^[7]理论模型基础上进行改进,得到两种扩展模型 de V-1 模型和 de V-2 模型。de V-1 模型假设土壤含水率小于临界含水率时气相为连续介质,大于时水为连续介质,才考虑 LHT 效应。de V-2 模型假设在整个含水率范围内水为连续介质,并且均考虑了 LHT 效应。同时对 de V-1, de V-2 和 Gori 三种模型进行比较,结果表明 de V-1 能够更好地预测高温下的热导率。

国内外学者对土壤热导率的温度效应关系研究主要有 D. A. De Vries^[7]模型以及在此基础上发展起来的 Campbell 模型和 de V-1 模型。王铄等^[15]利用热脉冲原理,测定了不同质地和含水率土壤的导热率值,并与 Campbell 模型计算值进行了比较,研究表明 Campbell 模型计算结果偏差较大,并对其进行了修正。刘晨晖等^[16]在实验的基础上对这两种模型进行了比较,结果表明两种模型的计算结果虽然与实验测定结果吻合度较好,但是在不同温度下均出现一定程度的高估或者低估。该学者认为两种模型提供的一些参数、获取方法和适用性均存在一定的偏差。

针对此问题,本文将 Campbell 模型和 de V-1 模型结合,对非饱和土壤热导率的模型进一步优化,提高其计算精度,为后期非饱和土壤热湿耦合迁移模型的深入研究提供新的思路。

1 建立模型

刘晨晖等^[16]对 Campbell 模型和 de V-1 模型的对比分析发现, Campbell 模型中一共有四个参数

(θ_{wo} 、 q_0 、 g_a 和 λ_m) 需要通过实验数据进行拟合,而拟合结果和实际情况有较大偏差,并且土壤固相热导率没有考虑温度对其的影响,另外各组成部分的形状因子假定是一个值,这也与实际不符。不同的是, Campbell 模型中土壤固体颗粒被作为一个整体考虑,固相热导率直接通过数据拟合得到,而 de V-1 模型中考虑了固体颗粒中各个组成成分(即将固体颗粒拆分成石英、云母、长石、黏土矿物等),其固相热导率是每一种颗粒组成热导率通过权重因子、形状因子计算得到,并且考虑了温度对其的影响。但由于 de V-1 模型将整个含水率区间分段计算,计算比 Campbell 模型更复杂,同时该模型的准确程度依赖于获得准确的土壤永久凋谢点和田间持水量,而这两个土壤含水率值的获得较为困难。

由于 Campbell 模型中需要四个参数进行拟合且拟合结果并不理想,本文在 Campbell 模型和 de V-1 模型的基础上,以 Campbell 模型为主,对该模型中的两个参数 g_a 和 λ_m 采用 de V-1 模型中的计算方法,提出了一种新的预测土壤热导率温度关系的模型。该模型土壤固相热导率和形状因子均考虑了土壤颗粒组成成分,也包含了温度对土壤固相热导率的影响,较之前的数据拟合更加方便,适用性也更广。

假设土壤热导率是土壤各个组分热导率的加权平均。如果假设土壤中组成成分是矿物质、水和空气,土壤整体的热导率表达式如下^[8]:

$$\lambda = \frac{k_m x_m \lambda_m + k_w x_w \lambda_w + k_a x_a \lambda_a}{k_m x_m + k_w x_w + k_a x_a} \quad (1)$$

式中: x_m 、 x_w 和 x_a 分别为土壤中固相、液相、气相占土壤总体积的体积分数,%; λ_m 、 λ_w 和 λ_a 分别为土壤中固相、液相、气相的热导率, W/(m·K); k_m 、 k_w 和 k_a 分别为土壤中固相、液相、气相的权重因子。

式中气相热导率 λ_a 指的是气相表观热导率,是土壤中气体和水蒸气潜热传输效应共同作用下的土壤气相实际热导率,一般用 λ_{ap} 表示。权重因子在很大程度上取决于连续介质,该模型为了简化,定义在整个土壤含水率范围内土壤连续介质的热导率为:

$$\lambda_f = \lambda_a + f_w (\lambda_w - \lambda_a) \quad (2)$$

式中: f_w 为经验加权函数,对于干饱和土壤,值为 0,对于饱和土壤,值为 1,其定义为:

$$f_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta_w}{\theta_{wo}}\right)^{-q}} \quad (3)$$

式中: θ_{wo} 为土壤中水转化为连续介质时的含水率; q 为连续介质从空气转化为水时的速度,它的大小与土壤温度有关,如式(4):

$$q = q_0 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \quad (4)$$

式中: q_0 为常数经验值; T 为土壤温度, K。

根据公式(2), 土壤中各个组分的权重因子可以定义为如下形式:

$$k_a = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_f} - 1 \right) g_i} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_f} - 1 \right) (1 - 2g_i)} \right] \quad (5)$$

$$k_w = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_f} - 1 \right) g_i} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_f} - 1 \right) (1 - 2g_i)} \right] \quad (6)$$

$$k_m = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f} - 1 \right) g_i} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f} - 1 \right) (1 - 2g_i)} \right] \quad (7)$$

式中: g_i 为土壤各组成成分(包括水, 空气, 固体颗粒的组成部分石英、云母、黏土矿物等)的形状因子, 其具体表达式如下:

$$g_i = \frac{n^2}{2(n^2 - 1)^{1.5}} \left[\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{1}{(n^2 - 1)^{0.5}} - \frac{(n^2 - 1)^{0.5}}{n^2} \right], \quad n > 1 \quad (8)$$

$$g_i = 0.333, n = 1 \quad (9)$$

$$g_i = 0.5 \left[\frac{1}{1 - n^2} - \frac{n^2}{2(1 - n^2)^{1.5}} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - n^2}}{1 - \sqrt{1 - n^2}} \right], \quad n < 1 \quad (10)$$

式中: n 为与土壤颗粒种类有关的常数, 其中石英 $n=3$, 长石 $n=9$, 黏土矿物 $n=100$, 方解石 $n=2$, 云母 $n=10$, 有机质 $n=0$ 。

土壤中固体颗粒石英的导热系数 λ_q , W/(m·K):

$$\lambda_q = 6.574 - 0.01633t, m_{\text{clay}} + m_{\text{silt}} < 0.5$$

$$\lambda_q = \frac{713.33}{T^{0.85172}}, m_{\text{clay}} + m_{\text{silt}} > 0.5 \quad (11)$$

式中: m_{clay} 为黏土的质量分数; m_{silt} 为粉土质量分数; t 为土壤的温度, °C, $T = t + 273.15$, K。

云母的导热系数 λ_{mi} 、黏土矿物的导热系数 λ_{cm} 和长石的导热系数 λ_{lc} 分别为 2.0、2.6 和 2.31 W/(m·K)。

土壤空隙中干空气的导热系数 λ_{da} , W/(m·K):

$$\lambda_{da} = 2.4 \times 10^{-2} + 7.73 \times 10^{-5}t - 2.6 \times 10^{-8}t^2 \quad (12)$$

土壤空隙中水的导热系数 λ_w , W/(m·K):

$$\lambda_w = 0.554 + 2.24 \times 10^{-3}t - 9.87 \times 10^{-6}t^2 \quad (13)$$

土壤空隙中饱和蒸气的导热系数 λ_v^s , W/(m·K):

$$\lambda_v^s = \frac{H_v \hat{\rho} D_v s}{p - p^*} \quad (14)$$

式中: H_v 为水蒸气汽化潜热, J/mol; $\hat{\rho}$ 为空气的摩尔密度, mol/m³; D_v 水蒸气扩散率, m²/s; s 为饱和蒸气压力随温度变化的斜率; p 为大气压力, kPa; p^* 为土壤空隙中饱和蒸气压力, kPa。其表达式分别为:

$$\hat{\rho} = \hat{\rho}_0 \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (15)$$

式中: $\hat{\rho}_0$ 为标准大气压下空气的摩尔密度, mol/m³; p_0 为标准大气压, kPa; $T_0 = 273.15$, K。

$$p^* = 101.325 \exp(13.3016\theta - 2.042\theta^2 + 0.26\theta^3 + 2.69\theta^4) \quad (16)$$

其中, θ 为无量纲温度,

$$\theta = 1 - \frac{273.15}{T} \quad (17)$$

$$s = 373.15p^* (13.3015 - 4.082\theta + 0.78\theta^2 + 10.76\theta^3) / T^2 \quad (18)$$

$$D_v = D_{vo} \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1.75} \quad (19)$$

式中: D_{vo} 为标准大气压下水蒸气扩散率, m²/s。

$$H_v = 45144 - 48t \quad (20)$$

2 模型预测及评价

为判断该新模型的正确性, 以及在预测不同温度下土壤热导率的准确性和适用性, 本文利用文献[16]中土壤热导率温度效应实验, 对该模型进行验证, 同时与 Campbell 模型和 de V-1 模型进行比较。本文模型通过 Matlab 编程模拟, Campbell 模型和 de V-1 模型直接采用文献中的数据, 三种模型的计算值和实测值的比较分别如图 1, 图 2 和图 3 所示, 图中 E 为实验值, S 为实验值。

从图中可以看出, 对于粉砂质黏壤土和砂土, 随着体积含湿量的增大, 土壤热导率的变化趋势都一致, 均在常温下(40 °C 以内)单调递增, 且温度对其影响较小。从 40 °C 左右开始, 呈现先增大后减小的趋势, 并且随着温度的升高, 土壤热导率变化较大, 由此可见, 温度对土壤热导率的影响在温度较高的情况下表现比较显著。这是因为在土壤温度较高的情况下, 水蒸气的潜热传输效应会对土壤热导率产生较大的影响, 且温度越高, 潜热传输效应越大, 从实验数据和模拟结果来看, 在温度为 88 °C 下土壤热导率比常温下的热导率大 3~4 倍。

潜热传输效应除与温度有关之外, 土壤的体积含水率也会对其产生影响, 在中等含水率区间, 潜热传

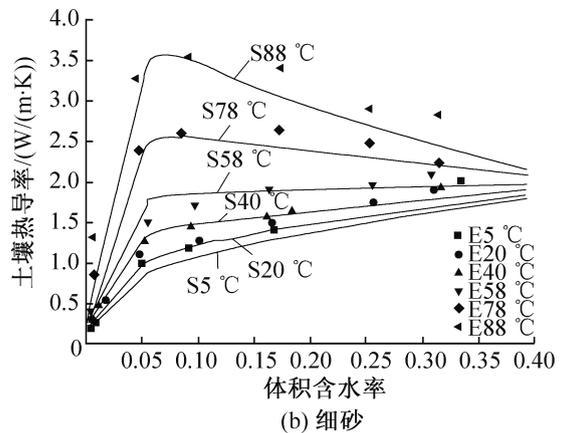
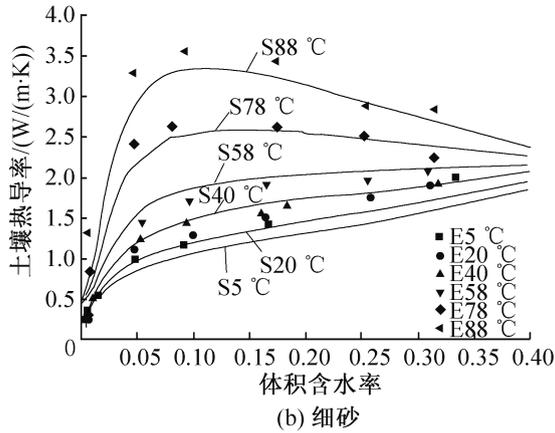
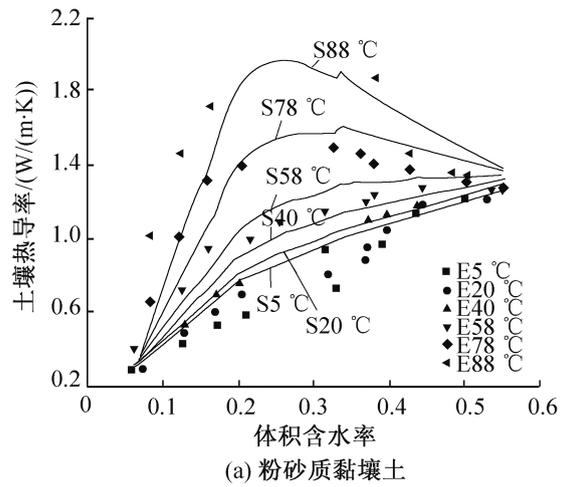
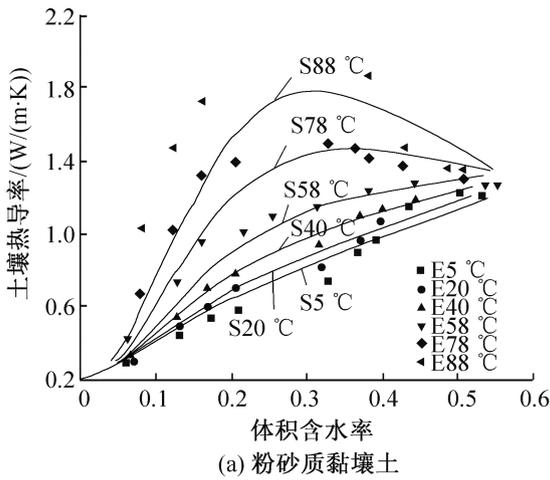


图 1 Campbell 模型计算值和实测值

Fig. 1 Comparison between simulated and experimental data for Campbell model

输效应最大。对于粉砂质黏壤土,土壤热导率在体积含水率为 0.3 左右时达到最大,细砂的热导率是在 0.10 左右达到最大值,这主要与两者的饱和含水率有关系。当土壤热导率达到极值含水率时,增大或降低土壤含水率,土壤热导率都会降低,这是因为土壤含水率较低时,土壤中的水蒸气含量较少,潜热传输效应较小,而在含水率较高时,水蒸气含量增大,但是由于孔隙容积有限,水蒸气活动空间变小,传输过程受阻,因此潜热传输效应也变小。

从以上分析可知,土壤质地、体积含水率和温度均影响土壤热导率。因此,建立不同土壤类型的土壤热导率与含水率、温度之间的函数关系至关重要。

上述介绍的三种模型都考虑了土壤质地、含水率和温度对土壤热导率的影响,以下对这三种模型的计算结果进行比较。

从图 1 可以看出,Campbell 模型对粉砂质黏壤土和细砂热导率高温下预测值较实验测定值偏低,因此在高温情况下需要考虑传质增强因子的作用;

图 2 de V-1 模型计算值和实测值比较

Fig. 2 Comparison between simulated and experimental data for de V-1 model

由图 2 可知,de V-1 模型预测粉砂质黏壤土时在常温工况高于实验测定值,而在高温情况时比实验测定值低,另外该模型对于细砂的预测结果较好,以上结果表明土壤的固相热导率需要乘以一定的修正系数。图 3 表明本文所建立的模型无论在高温还是低温工况,模型计算值和实测值的吻合度均较好,且比 Campbell 模型和 de V-1 模型计算值更接近实验测定值,这是因为该模型既考虑了高温下的传质增强因子,同时在土壤固相热导率的基础上乘以了与颗粒组成有关的修正系数。可见,结合 de V-1 模型中参数表达式对 Campbell 模型进行修正,即本文所建立的新的预测模型,能更好的预测温度影响下的土壤热导率。

为了更好地评价本文建立的模型,引入了相对均方差的概念,其定义式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \left(\frac{\lambda_{test} - \lambda_{sim}}{\lambda_{test}} \right)^2} \quad (21)$$

式中: λ_{test} 为实验测定值; λ_{sim} 为模型计算值。

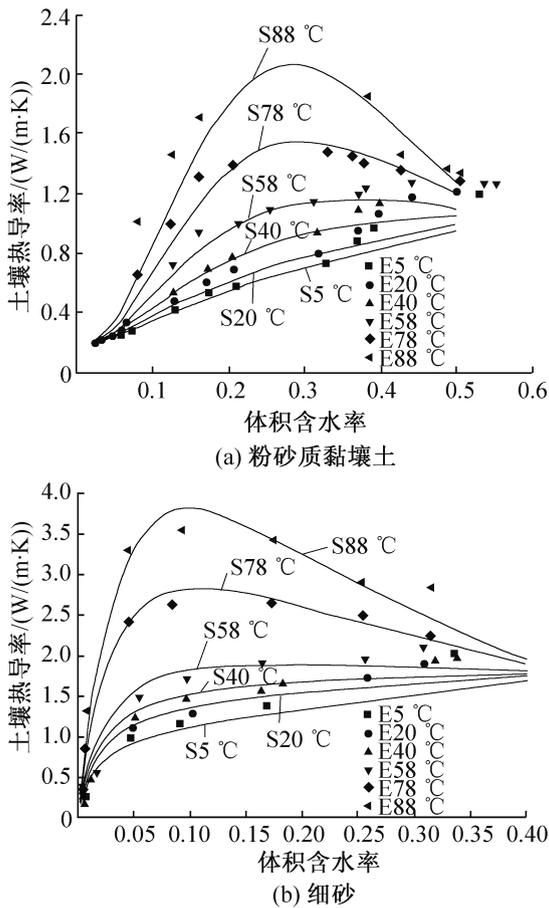


图 3 本文模型计算值和实测值比较

Fig.3 Comparison between simulated and experimental data for the new model

利用公式(21)对建立的热导率预测模型进行评价,计算得到该模型计算值和实验实际值之间的相对均方差,并与文献[16]计算得到的 Campbell 模型和 de V-1 模型的 RSME 进行比较,结果见表 1。

从表 1 可以看出,本文建立的土壤热导率温度效应预测模型对于粉砂质黏壤土和细砂的预测结果均较好,计算得到的每个温度下的 RSME 均比较小,模型计算值均与实验值相近。其平均 RSME 分别为 11% 和 14%,比 Campbell 模型和 de V-1 模型的平均 RSME 都小。综上所述,此模型能更好的预测土壤的热导率。

3 土壤温度和体积含水率对土壤热导率的影响

本文建立的模型模拟了三种土壤类型(砂土,壤土和黏土)的热导率,得到土壤温度和体积含水率两个变量对不同土壤热导率的影响,结果如图 4,图 5 和图 6 所示。

由图 4~图 6 可知,三种土壤热导率随温度和含水率的变化趋势一致。当温度一定时,均在低温情况下随含水率单调递增,当温度超过 40 °C 后,热导率先增加后逐渐减小;当含水率一定时,热导率随温度单调递增。对于不同土壤类型而言,土壤热导率值有区别,在相同条件下,土壤热导率为砂土 > 壤土 > 黏土,而最大热导率所对应的含水率为砂土 < 壤土 < 黏土。

表 1 三种模型的 RSME

Tab.1 RMSE among calculated values of the three model

温度/°C	Campbell 模型		de V-1 模型		本文模型	
	粉砂质黏壤土	细砂	粉砂质黏壤土	细砂	粉砂质黏壤土	细砂
5	9	40	20	14	12	17
20	7	24	14	10	12	10
40	2	3	9	10	6	8
58	10	18	9	13	10	14
78	16	17	15	18	10	15
88	25	25	26	27	17	21
平均 RSME	12	23	16	16	11	14

4 结论

本文重点介绍了土壤的热导率和导水率的温度效应关系的模型,在前人研究的基础上提出了一种新的预测土壤热导率温度效应的模型,并利用文献中的

实验对其进行了验证,结果表明该模型预测结果相对较好。并基于该模型,分析了土壤温度和体积含水率两个变量对不同土壤热导率的影响,研究表明:在同一温度及体积含水率工况下,土壤热导率是砂土 > 壤土 > 黏土,而最大热导率所对应的含水率是砂土

<壤土<黏土。

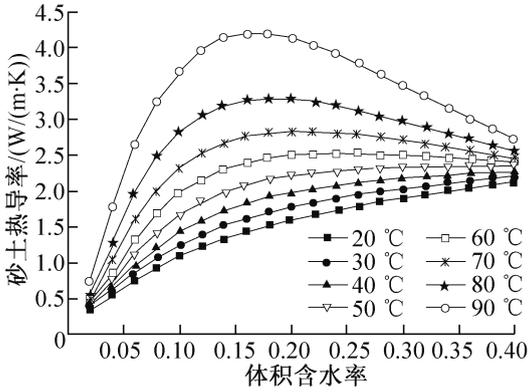


图4 不同温度下砂土热导率随含水率的变化
Fig. 4 Variation of sand thermal conductivity with water content at different temperature

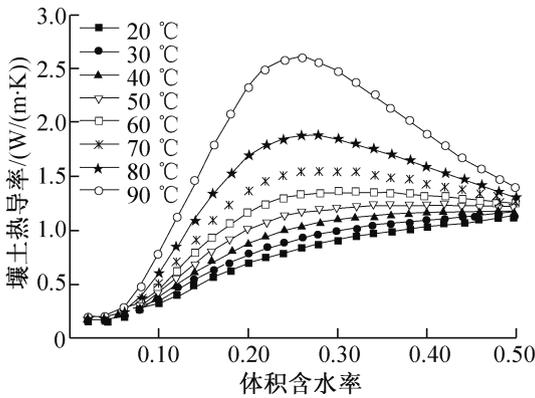


图5 不同温度下壤土热导率随含水率的变化
Fig. 5 Variation of loam thermal conductivity with water content at different temperature

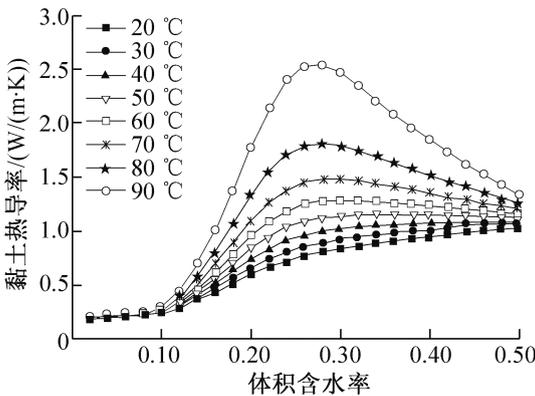


图6 不同温度下黏土热导率随含水率的变化
Fig. 6 Variation of clay thermal conductivity with water content at different temperature

参考文献

[1] 吕超, 郑茂余. 土壤源热泵系统土壤热平衡的评价方

法研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 42-47. (LYU Chao, ZHENG Maoyu. Research on evaluation method of soil heat balance of ground-coupled heat pump system[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 42-47.)

[2] 姬枫, 苏华, 刘赛楠, 等. U形埋管地源热泵系统动态性能数值模拟[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 78-82. (JI Feng, SU Hua, LIU Sainan, et al. Numerical simulations of dynamic performances of the U-tube ground source heat pumps system[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(3): 78-82.)

[3] 武佳琛, 张旭, 周翔, 等. 基于运行策略的某复合式地源热泵系统运行优化分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 6-12. (WU Jiachen, ZHANG Xu, ZHOU Xiang, et al. An optimization of operation strategy on hybrid ground source heat pump system [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2): 6-12.)

[4] 王华军, 齐承英, 王恩宇, 等. 土壤高温储热条件下热湿迁移过程的实验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 824-828. (WANG Huajun, QI Chengying, WANG Enyu, et al. Experimental study of heat and moisture transfer process for high-temperature heat storage of soils[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(7): 824-828.)

[5] 茅靳丰, 李永, 张华, 等. 地下水流动对埋管热作用距离影响的研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(3): 26-32. (MAO Jinfeng, LI Yong, ZHANG Hua, et al. Effects of groundwater flow on temperature plume distance of borehole heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(3): 26-32.)

[6] 郝小充, 余跃进, 毛炳文, 等. 岩土热响应试验在土壤源热泵系统设计中的应用[J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 44-48. (HAO Xiaochong, YU Yuejin, MAO Bingwen, et al. Application of geo-thermal response test in the design of ground-source heat pump system[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6): 44-48.)

[7] De Vries D A. Thermal properties of soils[J]. Physics of plant environment, 1963, 1: 210-235.

[8] Campbell G S, Jungbauer J D, Bidlake W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal-conductivity[J]. Soil Science, 1994, 158(5): 307-313.

[9] 王泮浩, 颜亮, 冯琛琛, 等. 地源热泵岩土导热系数测试影响因素分析[J]. 制冷学报, 2012, 33(4): 16-22. (WANG Fenghao, YAN Liang, FENG Chenchen, et al. Analysis of influencing factors on soil thermal conductivity test in ground source heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(4): 16-22.)

[10] 袁玉倩, 薛桂香, 孙春华, 等. 基于BP神经网络的土壤热导率预测算法研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(6): 39-44. (YUAN Yuqian, XUE Guixiang, SUN Chunhua, et al. A study of soil thermal conductivity prediction

algorithm based on BP neural network[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2015, 44(6): 39-44.)

[11] 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(9): 13-18. (LU Sen, REN Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 13-18.)

[12] 苏李君,王全九,王铎,等. 基于土壤物理基本参数的土壤热导率模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 127-133. (SU Lijun, WANG Quanjiu, WANG Shuo, et al. Soil thermal conductivity model based on soil physical basic parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 127-133.)

[13] Gori F, Corasaniti S. Theoretical prediction of the soil thermal conductivity at moderately high temperatures[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, 124(6): 1001-1008.

[14] Tarnawski V R, Gori F, Wagner B, et al. Modelling approaches to predicting thermal conductivity of soils at high temperatures [J]. International Journal of Energy Research, 2000, 24(5): 403-423.

[15] 王铎,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 CSAE, 2012, 28(5): 78-84.)

[16] 刘晨晖,周东,吴恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1877-1886. (LIU Chenhui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1877-1886.)

通信作者简介

王洋浩,男,教授,博士生导师,西安交通大学建筑节能研究中心主任,13227006940,E-mail: fhwang@mail. xjtu. edu. cn. 研究方向:建筑节能与可再生能源利用技术。

About the corresponding author

Wang Fenghao, male, professor, Ph. D. supervisor, Head of Building Energy Research Center, Xi'an Jiaotong University, + 86 13227006940, E-mail: fhwang@mail. xjtu. edu. cn. Research fields: building energy efficiency and renewable energy technology.

(上接第 75 页)

[15] 曹云勤,刘瑞贞. 电冰箱制冷系数的提高[J]. 潍坊学院学报, 2006, 6(4): 72-73. (CAO Yunqin, LIU Ruizhen. Raising of the refrigeration coefficient [J]. Journal of Weifang University, 2006, 6(4): 72-73.)

[16] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.)

[17] “超龄”家电隐患多——家电安全使用年限[J]. 家用电器, 2013(4): 35-37. (More hidden troubles to overage household appliances—household appliances safe service life[J]. Electrical Appliances, 2013(4): 35-37.)

通信作者简介

陶文铨,男,教授,西安交通大学,能源与动力工程学院,热流科学与工程教育部重点实验室,(029)82669106,E-mail: wqtao@mail. xjtu. edu. cn. 研究方向:先进的传热与流动数值模拟方法及其工程应用;强化传热与节能技术及其工程应用;能源与环境工程问题的多尺度模拟;微细尺度结构中的流动与传

热问题;航天航空工程中的热流科学问题;新能源与可再生能源的应用基础研究;湍流模型及工程应用;能效评估与能源经济。

About the corresponding author

Tao Wenquan, male, professor, Key Laboratory of Thermo-fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, + 86 29-82669106, E-mail: wqtao@mail. xjtu. edu. cn. Research fields: advanced computational methods in fluid flow and heat transfer and their engineering applications; heat transfer enhancement & energy-saving techniques and their applications; multiscale simulations of problems in energy and environmental engineering; fluid flow and heat transfer in mini-micro-nano structures; thermal and fluid science problems in aerospace engineering; fundamental studies of sustainable and renewable energy; turbulence modeling and its engineering applications; energy-efficiency evaluation and energy economics.