

毛乌素沙地典型岩性导热系数试验和模型研究

赵贵章,王文科,李云良,吴亚娜,杨 峰

(长安大学 环境科学与工程学院,陕西 西安 710054)

【摘 要】 【目的】研究毛乌素沙地 4 种典型岩性的导热系数与含水率之间的关系。【方法】根据毛乌素沙地岩性特征和沉积环境不同,制定了相应的试验方案,利用 JW-III 型热流计测定不同含水率条件下的导热系数,利用 Campbell 模型和赵贵章模型分析了毛乌素沙地典型岩性的导热系数与含水率之间的变化规律及其拟合误差。【结果】毛乌素沙地 4 种典型岩性中砂质壤土和风化砂岩的导热系数-含水率变化曲线呈线性,而风积沙和萨拉乌苏组的导热系数-含水率变化曲线基本呈非线性。Campbell 模型对各种岩性导热系数曲线的拟合均呈线性,而用赵贵章模型可很好地反映参数的变化特征。赵贵章模型拟合的不同岩性导热系数-含水率变化曲线的相关系数均大于 0.97,而均方根差均小于 0.005。【结论】利用赵贵章等提出的导热系数和含水率模型能很好地反映参数的变化特征,可见该模型的拟合精度可以满足要求。

【关键词】 毛乌素沙地;岩性分析;导热系数;含水率

【中图分类号】 TU452

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)05-0224-05

Researching test and model on thermal conductivities of typical lithologies in Mu Us Sandy Land

ZHAO Gui-zhang, WANG Wen-ke, LI Yun-liang, WU Ya-na, YANG Feng

(College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: 【Objective】 The research studied the relationship between thermal conductivity and water content of four kinds of typical lithologies in Mu Us Sandy Land. 【Method】 According to different lithologic characteristics and sediment environment, we suggested a new test method. Meanwhile we measured thermal conductivity under different water contents using the JW-III heat-flow meter. 【Result】 By analyzing the differences between thermal conductivity and water content in Mu Us Sandy Land, and making use of the new model provided by Campbell and the author, the measured thermal conductivities of all kinds of lithologies and fitting error were analyzed. 【Conclusion】 According to the analysis, the new model suggested by the author was used to fit the measured thermal conductivity-water content curves. The model can greatly reflect the characteristics of parameters, the related coefficients of measured values and fitted values are bigger than 0.97.

Key words: Mu Us Sandy Land; lithologic analysis; thermal conductivity; water content

在包气带水分运移研究中,温度的影响常被忽视,达西定律也未考虑由于温度梯度所产生的水分通量^[1-2]。而在干旱半干旱地区,由于包气带中昼夜温差大,相应剖面中的温度梯度变化也较大,对水分

的运移也会产生较大的影响。因此,在研究这些地区包气带水分运移机理时,温度问题是不能忽略的。关于水热运动的耦合模型,很多学者在理论上进行了研究^[3-6],且多是在水热耦合模型中采用经验模型

* [收稿日期] 2009-10-23

[基金项目] 教育部科学技术研究重大项目(308021);教育部科学技术研究重点项目(02078)

[作者简介] 赵贵章(1975—),男,河南获嘉人,在读博士,主要从事包气带水转化动力学机制及数值仿真模拟研究。

E-mail: zhaono02@yahoo.com.cn

进行计算,如 Campbell^[7]、Tarnawski 等^[8]、Ochsner 等^[9]、Côté 等^[10]提出计算土壤导热系数的经验模型,然而对包气带热特性参数的研究很少。为此,本研究针对干旱半干旱地区的特点,利用赵贵章等^[11]建立的一种导热系数-含水率模型,对毛乌素沙地典型岩性热参数进行试验研究,探索不同岩性参数的变化规律,以期为毛乌素沙地水汽热耦合模型的建立和求解提供科学依据。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于我国中部高原陕宁蒙交界地带,属东南季风区与西部大陆性气候的过渡带,年平均温度 6.0~8.5℃,年均降雨量自东南部的 400 mm,向西北逐渐减少到 250 mm,年均水面蒸发量

2 000~3 000 mm^[12];该区基本覆盖了陕北能源化工基地与内蒙古能源基地,生态环境脆弱。

毛乌素沙地昼夜温差在 30℃以上,地表与地表以上 50 cm 处的大气温度相差达 15℃以上。地面温度升高导致自地面向下传热,使包气带的地温逐渐升高,但升高的幅度随着埋深的增大而减小。温度的变化造成包气带中水分及气体温度的变化,影响包气带中含水率 θ 与水力参数 $K(\theta)$ 、 $C(\theta)$ 以及气体扩散率等参数,从而影响包气带中水分的运移。本研究根据毛乌素沙地的岩性分布情况,确定 4 种典型岩性,即风积沙、砂质壤土、萨拉乌苏组、风化砂岩。

2 材料与方法

试验介质基本的颗粒组成如表 1 所示。

表 1 毛乌素沙地 4 种典型岩性的颗粒组成

试验介质 Test medium	颗粒组成/% Particle composition							定名 Naming
	2.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
风化砂岩 Weathered sandstone	2	28	50	20				粉砂 Silt
萨拉乌苏组 Salawusu		11.3	73.2	5.4	4.5	0.9	4.7	粉砂 Silt
砂质壤土 Sandy loam	1.0	4.4	23.5	2.2	17.7	12.9	38.3	粉质粘土 Silty clay
风积沙 Aeolian sand		4.8	88.1	3.0	5.1			粉砂 Silt

采用 JW-Ⅲ型热流计测定土壤导热系数和含水率。一般情况下利用 JW-Ⅲ型热流计测试的都是建材的导热系数,建材可根据需要切割成任意形状,而文中试验介质为松散砂样和易破损的原状样,不能直接放入冷热板间进行测试,因此设计了工装(如图

1),其用隔热耐高温且防水的特殊材料制成。由于风积沙无结构性,且沉积时间较短,因此采用扰动样测定其导热系数;而萨拉乌苏组和砂质壤土为第三纪湖相沉积物,风化砂岩为白垩系沉积物,均具有结构性,试验采用原状样测定其导热系数。

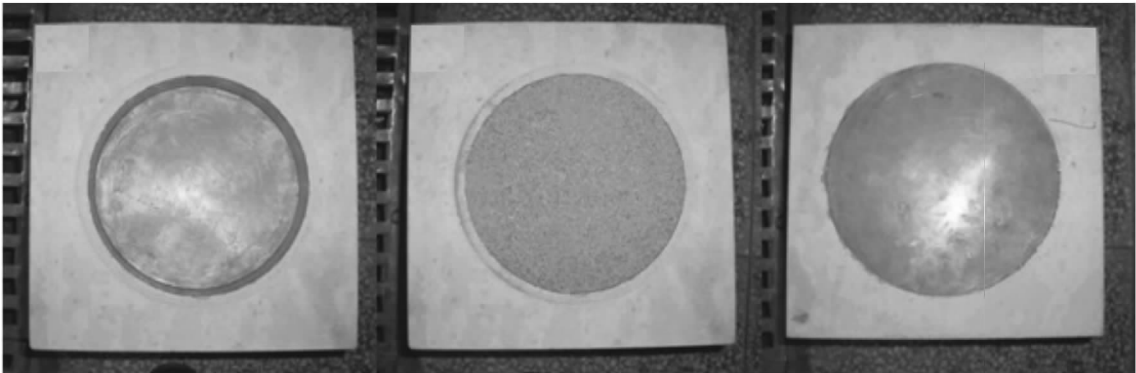


图 1 工装实物图

Fig. 1 Real profile of process tooling

2.1 风积沙导热系数的测定

步骤 1:将试验介质置于烘箱内连续烘烤至恒

质量,计算其干容重。

步骤 2:根据干容重计算试样在工装中应填充

的沙量,称量沙子后装入工装。将已准备好的试样工装放入热流计中冷热板之间安装试样的部位,启动电源及各控制开关,待液晶屏中代表导热系数的值达到稳定(至少持续 20 min,变化范围在 0.000 5 内),即可认为含水率为 0%条件下的导热系数测定试验结束。

步骤 3: 根据工装凹槽的体积,计算 0.5% (0.005 cm³/cm³) 体积含水率条件下工装中沙样所需水量。用天平称得相应水量加入沙中,快速搅拌均匀后,将工装密封,放入热流计中进行试验。

步骤 4: 计算 1%, 2%, 3%, 5%, …… , 25% (0.01, 0.02, 0.03, 0.05, …… , 0.25 cm³/cm³) 体积含水率条件下,工装中沙样所需水量,重复步骤 3, 完成不同含水率条件下介质导热系数的测定试验。

2.2 萨拉乌苏组和砂质壤土及风化砂岩导热系数的测定

步骤 1: 就地选取大块原状样,打磨成与试样工装内孔大小一致的岩块,置入试样工装密封。

步骤 2: 在试验前打开密封的试样,于 105 ℃ 烘箱内烘烤至恒质量。设定初始体积含水率为 25% (0.25 cm³/cm³), 计算加入工装中试验水的体积,然后用密封胶密封,不断地翻转使水分在试样中分布均匀。

步骤 3: 在试样存放过程中,由于水分不可避免地散发损失,为此,在试验前首先称量试样质量 (m_1), 测定该条件下的导热系数后放置烘箱烘烤 30 min, 取出,用密封胶密封,称取试样质量 (m_2); 依此类推,直至烘烤前后质量不变 (m_n), 此时即为含水率为 0 时的导热系数。

3 描述多孔介质导热系数的数学模型

本研究采用 Campbell^[7] 提出的土壤导热系数经验模型和赵贵章等^[11] 提出的导热系数-含水率模型进行分析和比较。

Campbell^[7] 的模型表达式为:

$$K_T(\theta) = a + b\theta - \frac{c}{d \cdot \exp(e\theta)} \tag{1}$$

式中: $K_T(\theta)$ 为导热系数 (W/(m · K)), θ 为含水率 (cm³/cm³), a, b, c, d, e 为与介质容重、特性有关的参数。

赵贵章等^[11] 的模型表达式为:

$$K_T(\theta) = K_{Ts} - \frac{K_{Ts} - K_{Tr}}{\alpha + (1 - \alpha)\exp(\beta\theta)} \tag{2}$$

式中: $K_T(\theta)$ 为导热系数 (W/(m · K)), θ 为含水率

(cm³/cm³), K_{Ts} 为饱和导热系数 (对应饱和含水率) (W/(m · K)), K_{Tr} 为残余导热系数 (对应零含水率) (W/(m · K)), α, β 为与介质特性有关的参数。

4 结果与分析

4.1 毛乌素沙地典型岩性导热系数-含水率的变化规律

根据试验测得的各种岩性的导热系数及其对应的含水率绘制实测曲线,如图 2 所示。由图 2 可以看出,毛乌素沙地 4 种典型岩性中风积沙的导热系数在含水率为 0.05~0.10 cm³/cm³ 时呈非线性变化,之后随着含水率增大其增加趋势减缓,当达到饱和状态时导热系数为定值。对砂质壤土和风化砂岩,当含水率大于 0.05 cm³/cm³ 时,该介质的导热系数基本呈线性增加。萨拉乌苏组导热系数的变化趋势基本与风积沙一致,但其导热系数存在差别。上述结果提示,当介质达到饱和状态时,该介质的导热系数理论上应为定值,然而试验未能实现这一假定,其原因有待进一步研究。

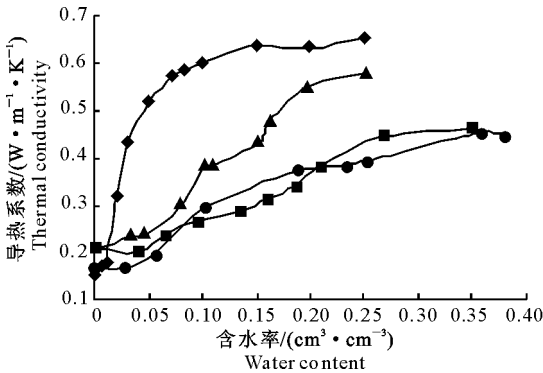


图 2 毛乌素沙地 4 种典型岩性导热系数与含水率的关系
—◆—, 风积沙; —■—, 砂质壤土; —●—, 萨拉乌苏组; —▲—, 风化砂岩
Fig. 2 Thermal conductivity-water content curves of 4 kinds of typical lithologies in Mu Us Sandy Land
—◆—, Aeolian sand; —■—, Sandy loam; —●—, Salawusu; —▲—, Weathered sandstone

分别利用模型(1)和模型(2),采用非线性最小二乘法,对所测得的不同岩性条件下导热系数和含水率之间的关系进行拟合,结果见表 2。将表 2 中的参数代入模型中进行计算,由此拟合的导热系数和含水率的关系曲线如图 3、图 4 所示。根据图 3、图 4,结合毛乌素沙地 4 种典型岩性的颗粒组成,从不同岩性的实测曲线可以看出,不同岩性的导热系数-含水率变化曲线存在很大差别,引起这种差别的主要原因为岩性结构、有机质含量、矿物质成分、沉积环境以及介质的级配等因素。根据表 2 以及上述

4 种典型岩性的沉积特点认为,以粘粒和粉粒占主要成分时,如砂质壤土和风化砂岩,导热系数-含水率变化曲线呈线性;当中细颗粒为主要成分时,如风

积沙和萨拉乌苏组,导热系数-含水率变化曲线基本呈非线性。

表 2 Campbell 模型和赵贵章模型中参数的拟合

Table 2 Parameters fitting of Campbell and Zhao G Z models

模型 Model	参数 Index	风积沙 Aeolian sand	砂质壤土 Sandy loam	萨拉乌苏组 Salawusu	风化砂岩 Weathered sandstone
Campbell 模型 Campbell model	a	0.148	0.581	0.686	0.829
	b	0.020	0.913	-0.131	1.710
	c	-0.026	0.085	0.103	0.079
	d	0.196	0.210	0.191	0.121
	e	0.000 3	0.041	2.982	0.143
赵贵章模型 Zhao G Z model	K_{Ts}	0.637	1.058	1.001	1.015
	K_{Tr}	0.130	0.179	0.171	0.178
	α	0.482	0.100	0.099	0.113
	β	0.384	0.100	0.100 1	0.208

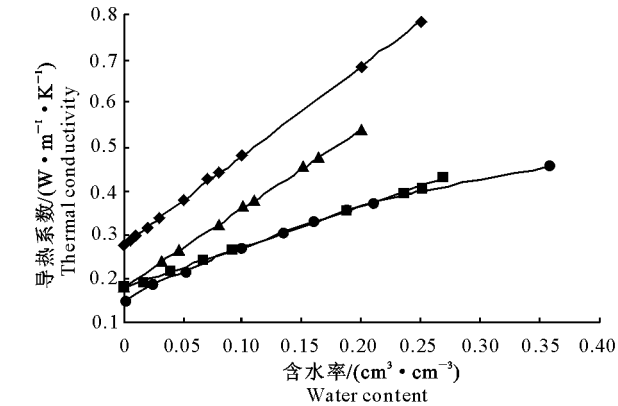


图 3 Campbell 模型拟合的不同岩性导热系数-含水率变化曲线

—◆—, 风积沙; —■—, 砂质壤土; —●—, 萨拉乌苏组; —▲—, 风化砂岩

Fig. 3 Different lithologies thermal conductivity-water content curves of Campbell model

—◆—, Aeolian sand; —■—, Sandy loam; —●—, Salawusu;
—▲—, Weathered sandstone

通过分析不同岩性的实测试验数据,利用 Campbell 模型和赵贵章模型拟合经验模型中的参数,比较两种模型拟合的不同岩性导热系数-含水率变化曲线发现,Campbell 模型对各种岩性导热系数曲线的拟合均呈线性。理论上认为导热系数-含水率关系曲线应为非线性关系,即随着含水率的逐渐增大,导热系数会迅速增加,但是当含水率达到饱和含水率时,导热系数基本保持不变,所以 Campbell 模型的拟合效果不佳,特别是针对砂质介质。采用赵贵章模型对实测曲线进行拟合,能很好地反映参数的变化特征,特别是对砂质介质的拟合效果更好。

4.2 毛乌素沙地典型岩性导热系数-含水率的误差分析

根据赵贵章模型拟合的公式,对实测值和拟合

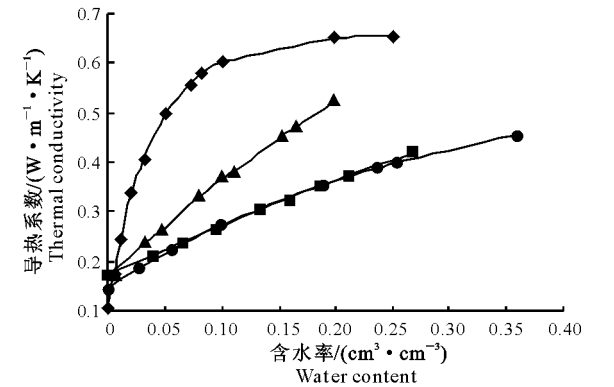


图 4 赵贵章模型拟合的不同岩性导热系数-含水率变化曲线

—◆—, 风积沙; —■—, 砂质壤土; —●—, 萨拉乌苏组; —▲—, 风化砂岩

Fig. 4 Different lithologies thermal conductivity-water content curves of Zhao G Z model

—◆—, Aeolian sand; —■—, Sandy loam; —●—, Salawusu;
—▲—, Weathered sandstone

值进行相关系数、协方差和均方根差分析,结果见表 3。

表 3 利用赵贵章模型拟合各种岩性导热系数-含水率变化曲线的误差分析

Table 3 Error analysis of different lithologies thermal conductivity-water content curves of Zhao G Z model

岩性 Lithologies	相关系数 Correlation coefficient	协方差 Covariance	均方根差 REMS
风积沙 Aeolian sand	0.992	0.023	0.004
砂质壤土 Sandy loam	0.980	0.006	0.002
萨拉乌苏组 Salawusu	0.974	0.011	0.004
风化砂岩 Weathered sandstone	0.986	0.013	0.003

由表 3 可见,毛乌素沙地 4 种典型岩性的导热

系数-含水率变化曲线的实测值与拟合值之间的相关系数均大于 0.97,且均方根差小于 0.005,可见该模型拟合精度满足要求。综上所述,赵贵章模型不仅能反映参数的变化特征,而且拟合程度较好。

5 结 论

根据毛乌素沙地 4 种典型岩性的岩性结构和沉积特点制定不同的试验方案,测定各种岩性的导热系数,利用 Campbell 模型和赵贵章模型对导热系数与含水率的变化规律进行分析,结果表明:(1)毛乌素沙地 4 种典型岩性中砂质壤土和风化砂岩的导热系数-含水率变化曲线呈线性;而风积沙和萨拉乌苏组的导热系数-含水率变化曲线基本呈非线性。(2)Campbell 模型对各种岩性导热系数曲线的拟合均呈线性,拟合效果不佳,而用赵贵章模型对实测曲线进行拟合,可很好地反映参数的变化特征,特别是对砂质介质的拟合效果更好。(3)根据赵贵章模型拟合的公式,不同岩性导热系数-含水率变化曲线拟合的相关系数均大于 0.97,而均方根差均小于 0.005,说明该模型的拟合精度可以满足要求。

[参考文献]

[1] Giakoumakrs S G,Taakiris G P. Eliminating the effect of temperature from unsaturated soil hydrating founction [J]. Journal of Hydrology,1991,129:109-125.

[2] Hopmerne J W,Dane J H. Effect of temperature-dependent hydraulic properties on soil water movement [J]. Soil Sci Soc Am J,1985,49:51-58.

[3] Philip J R,Vties D A. Moisire movement in porous meterual under temperature gradients [J]. Trans Amer Geophys Union,

1957,38(2):222-228.

[4] De Vties D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media [J]. Trans Amer Geophys Union,1958,39(5):909-916.

[5] Milly P C D. Moisture and heat transnor in hysteretic inhomo-geneous porous media;a matric head-based formation and numerical model [J]. Water Resour Res,1982,18(3):489-498.

[6] Milly P C D. A simulation anaiysis of thermal effect on evapo-ration from soil [J]. Water Resour Res,1984,20(8):1087-1098.

[7] Campbell G S. Soil physics with BASIC;Transport models for soil-plant systems [M]. New York;Elsevier Sci Publ Co,1985.

[8] Tarnawski V R,Wagner B A. New computerized approach toesti-mate the thermal properties of unfrozen soils [J]. Can Geotech J,1992,29:714-720.

[9] Ochsner T E,Horton R,Ren T. A new perspective on soil ther-mal properties [J]. Soil Sci Soc Am J,2001,65:1641-1647.

[10] Côté J,Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials [J]. Can Geotech J,2005,42:443-458.

[11] 赵贵章,王文科,侯莉莉,等. 干旱半干旱地区包气带热参数模型研究 [J]. 水文地质工程地质,2009(5):107-110.

Zhao G Z,Wang W K,Hou L L,et al. Determination of ther-mal parameter of aerated zone in the arid and semi-arid region [J]. Hydrogeology&Engineering Geology,2009(5):107-110. (in Chinese)

[12] 李智佩,岳乐平,薛祥煦,等. 毛乌素沙地沉积物粒度特征与土地沙漠化 [J]. 吉林大学学报:地球科学版,2007,37(3):578-586.

Li Z P,Yue L P,Xue X X,et al. Grain-size distribution charac-teristics of different geo-genetic type sediments and land de-sertification in Mo Us desert [J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2007,37(3):578-586. (in Chinese)