

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.013

土体热传导系数测量与模型研究进展

任杰, 张文兵, 陈建琪, 于碧含

(西安理工大学 省部级西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 土壤流热耦合理论对于保障土石坝的长期稳定和安全运行等方面有着重要的意义。流热参数的确定是土壤流热耦合模型的关键,在一定程度上决定着模型模拟的结果。为优化流热耦合模型,提高渗流热监测技术理论的实用性与精度,建立完善可靠的土石坝渗流热监测体系,本文介绍了土壤热传导系数测量的稳态法和瞬态法,总结了目前应用较为广泛的经验模型与理论模型,并对模型进行了总结评价。在未来的研究中,应该进一步完善测量方法及预测模型的适用性和可靠性。

关键词: 热传导系数; 稳态法; 瞬态法; 理论模型; 经验模型

中图分类号: TV139

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0352-09

Advances in measurement and model research of soil thermal conductivity

REN Jie, ZHANG Wenbing, CHEN Jianqi, YU Bihan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The theory of soil hydro-thermal coupling is of great significance to the long-term stability and safe operation of earth-rock dams. The determination of hydro-thermal parameters is the key process of studying the soil hydro-thermal coupling model, which determines the results of model simulation to a certain extent. In order to optimize the hydro-thermal coupling model, improve the practicability and accuracy of seepage monitoring with temperature technology theory and establish a sound and reliable seepage monitoring with temperature system for earth-rock dams, this paper introduces the steady-state method and transient method for measuring soil thermal conductivity, and summarizes the current applications. Moreover, a wide range of empirical models and theoretical models are summarized and evaluated. In the future research, the applicability and reliability of measurement methods and prediction models should be further improved.

Key words: thermal conductivity; steady state method; transient method; theoretical model; empirical model

我国重视推广和发展高土石坝的建设,土石坝在高坝中所占比例不断提高,就地取材、适应不同的地形地质条件的特点,使得土石坝得以广泛发展和应用。渗流对于土石坝的稳定和安全运行有着显著影响,进行渗漏探测与监测渗流对水利工程显得尤为重要。目前对于工程中的渗流问题数学者多采用同位素示踪、地质雷达探测以及电法等手段研究。相比较之下,利用渗流热监测技术来研究渗流问题

具有无污染、成本低和易于观测等优势^[1]。

渗流热监测技术的原理就是基于渗流场与温度场相互作用,把测温设备埋设在监测对象的不同部位和深度处进行测温。当研究对象存在渗漏时,其渗漏通道附近的土体温度将发生骤变,使得研究对象内部温度分布不均。根据这种温度的突变,可以很好地帮助我们定性地掌握结构内部渗流的情况。渗流作用会影响到土体系统内部的热量迁移,直接

收稿日期: 2018-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679194);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金资助项目(YK319011);陕西省水利厅科技计划资助项目(2019slkj-12);省部级西北旱区生态水利国家重点实验室自主研究课题资助项目(2019KJXTD-10)

作者简介: 任杰,男,副教授,博士,研究方向为流热耦合模型及其应用研究。E-mail:renjie@xaut.edu.cn

关乎到土体内部温度的分布^[2];而温度的变化又会影响到与渗流有关的参数的性质(渗透系数、水动力黏度和密度等),进而影响着结构内部的水流运动^[3]。因此,研究土体流热耦合作用工作意义重大,直接关乎到土体结构的长期稳定以及工程生态系统的适应性。目前流热耦合模型已广泛应用于地表水-地下水相互作用^[4-5]、大坝安全监测^[6-7]及采矿与安全工程等领域^[8]。

土体热传导系数作为流热耦合模型中的关键参数^[9-10],直接影响着模型模拟的精度。目前对于土体热传导系数的测量主要以室内试验为主,且方法便捷有效。随着试验量测仪器精度不断提高以及测量体系传热理论的逐步完善,热传导系数测量方法可分为稳态法与瞬态法。虽然在热传导系数的测量技术方面已取得了长足的进步,但是直接测量耗时耗力,对于广泛应用到实际工程来说仍存在着诸多困难,因此不少学者^[11-20]提出经验模型用于预测热传导系数。本文结合国内外研究,总结了当前应用较为广泛的土体热传导系数模型及测量技术,以期优化流热耦合模型所需参数,提高渗流热监测技术理论的实用性与精度,建立完整有效的土石坝渗流热监测体系。

1 土体中热传导

1.1 土壤中热量运移

根据传热机理可将土体中的传热过程划分为热传导、热对流和热辐射三种模式^[12,21]。其中热传导是指热量从物体高温部分转移到低温部分,或者高温物体与其接触的低温物体的传热过程,在固、液和气体中均可发生,但严格来说,纯粹的热传导只发生在固体之间。热对流则是指由于流体的宏观位移将热量由一处传至另一处,温度梯度所形成的密度差会使静止流体发生自然对流。与以上两种传热模式不同,热辐射指的是物体由于具有热产生电磁波在空间传递的现象。热辐射不依靠介质传递热量,且只有存在大量放射性物质时,才在热传递过程占主导作用^[22]。因此,热对流-传导方程^[23]可以用来描述多孔介质传热过程,其中局部热平衡假定为:

$$C_{v,e}(t, \mathbf{x}) \frac{\partial T(t, \mathbf{x})}{\partial t} + C_{v,m}(t, \mathbf{x}) \mathbf{v} \cdot (t, \mathbf{x}) = \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}}(t, \mathbf{x}) \nabla T(t, \mathbf{x})] + Q_{\text{source}} \quad (1)$$

式中: $C_{v,e}$ 为有效体积热容; $C_{v,m}$ 为水的体积热容; T 为温度; \mathbf{x} 为空间矢量; \mathbf{v} 为Darcy通量; λ_{eff} 为有效热传导系数; Q_{source} 为温度场源汇项。

令 $\mathbf{v} = 0$ (无对流)和 $\nabla \lambda_{\text{eff}} = 0$ (导热均匀)得到简化的热平衡方程,该等式经常用于土壤的传热研究中^[24-25]:

$$\frac{\partial T(t, \mathbf{x})}{\partial t} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{C_{v,e}} \nabla^2 T(t, \mathbf{x}) = D_e \nabla^2 T(t, \mathbf{x}) \quad (2)$$

式中: D_e 为有效热扩散系数,是热传导系数与体积热容的比值,其大小取决于含水量 θ 或土体相对饱和度 S_r :

$$D_e(S_r) = \frac{\lambda_{\text{eff}}(S_r)}{C_{v,e}(S_r)} \quad (3)$$

1.2 土的热学性质

在传热应用中,土体的热学性质必须是已知或着重考虑的因素^[26]。土体中的热力学原理在很大程度上取决于与饱和度有关的热性质参数,如:热传导系数、热扩散系数和比热容,而比热容又可以分为质量热容和体积热容,土体体积热容是所存在组分的热容量(即水,沉积物和空气)的体积加权总和^[27]:

$$C_{v,e} = (1-n)C_{\text{dry}} + nS_r C_{v,m} + n(1-S_r)C_{v,a} \quad (4)$$

式中: C_{dry} 为干土的体积热容; $C_{v,a}$ 为空气的体积热容; n 为孔隙率。

类似地,对于密度和比热容,方程为:

$$C_{v,e} = (1-n)\rho_s c_s + nS_r \rho_w c_w + n(1-S_r)\rho_a c_a \quad (5)$$

式中: ρ_s 、 ρ_w 和 ρ_a 分别是土壤,水和空气的密度; c_s 、 c_w 和 c_a 分别为土壤,水和空气的比热容。

实际工程中,空气一般不会被考虑,因为与其他组分相比,空气体积热容非常小,这就有:

$$C_{v,e} = (1-n)C_{v,s} + nS_r C_{v,w} \quad (6)$$

比热容是影响土体温度达到稳态的时间,并决定物质单位温度变化所交换能量的参数,它与饱和度之间只成线性关系。与比热容不同,热传导系数是高度非线性且与材料相关。在低饱和度条件下,水体被吸附到土体的单个颗粒上,随着含水量的增加,单个颗粒之间的形成桥接,直到全部空隙达到饱和状态^[28],决定了土壤中温度场的分布。因而,分析热传导系数与饱和度或等效体积含水量之间的关系才是研究土壤流热耦合的理论的关键所在。

2 热传导系数测量方法

稳态法测定材料热传导系数是通过测量达到完全热平衡状态下材料内部的热流大小和温度梯度,计算得到材料的热传导系数。稳态法常用于测量中、低热传导系数的材料,常见的方法包括热流计法、热板法及圆管法等。瞬态法是测量土壤热学性

能的主要方法,其原理是对被测土体进行瞬时脉冲热量,再通过测定温度与时间的变化,确定热学性能参数。探针法是目前测量土体热传导系数最常见的一种瞬态方法,由于可以获得不同土体类型的热特性,使得它被越来越多的学者所采用^[29]。

2.1 热流计法

热流计法基于一维热传导原理,将被测样品置于两个平板之间,在平板之间垂向通入单向热流,当两平板温度稳定后,根据样品厚度、上下表面的温度和通过样品的热流量,由 Fourier 定律即可确定样品的热传导系数^[30]。热流计法是测定冻土热传导系数的常用经典方法。刘焕宝等^[31]采用热流计法进行了5种典型冻土区土料的在不同含水量及干密度条件下的模拟试验,揭示了冻融状态、含水量、干容重和土质条件等因素对热传导系数的影响和规律。

2.2 保护热板法

保护热板法(GHP法)无需进行预测试校准,测量精度良好,主要用于绝热材料热传导系数的测量,也可用于土体热性能测定。其原理是中间热板热流通过被测材料单向向两侧冷板传递,待冷板与热板达到温度趋于稳定的平衡状态时,样品的计量区域形成等温平面(见图1),依据 Fourier 热传导方程即可求得材料的热传导系数^[32]。Nikolaev 等^[33]采用 GHP 法研究了 Ottawa 粗砂土与 Richmond 细砂土在较大温度变化范围下,含水率变化对热传导系数的影响规律,并将测得的数据与相关热传导系数经验模型进行拟合,数据拟合结果良好。

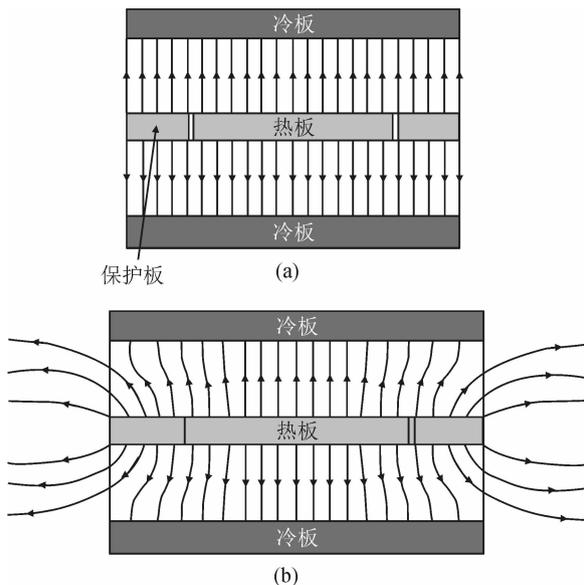


图1 保护热板实际热流线的分布^[28]

Fig. 1 Distributions of heat flux lines in a double-sided guarded hot plate in practical cases

2.3 探针法

探针法作为典型的瞬态法,以均匀各向同性介质中无限线热源的径向热传导方程为理论基础,假设热传播在无限大媒介发生,从而根据一定时间间隔内样品的温度随时间的变化而得到试样的热传导系数,广泛使用于土壤特性测试。探针法可分为单针法与双针法,单针法只有一个可以同时实现加热和测量的探针,而双针法包括加热探针与温度测量探针。

1952年 De Vries 将单针方法用于土壤热传导系数的测量。陆森等^[34]利用单针法热脉冲法实际测定了不同温度、不同含水率下的土壤热传导系数,对原有模型参数进行修正改进。Abuel-Naga 等^[35]使用探针法测定粘土固结过程的热传导系数的变化,并进行了数值模拟对照。双针法加热探针与温度探针有较小间距,在测量土体热性质时,加热探针内有加热丝释放热量,温度探针内的热敏电阻作为测温元件测量温度变化^[25]。Bristow 等^[36]采用双探针法探究了非饱和和砂土在不同水分含量条件下的热特性参数。

2.4 圆管法

圆管法基于圆筒壁一维稳态热传导原理,来测定单层或多层圆管绝热结构热传导系数。测定时应阻隔土壤与外界环境之间的热交换,保证传热过程达到稳态时进行,同时加热圆管的功率要保持恒定,试样内外表面的温度可由热电偶测出。李婷等^[37]对取自长武、杨凌、神木等地的4种土样进行热扩散率、导热率以及热容量等土壤热参数的测定,按照实测值对 Campbell 经验公式^[38]系数进行了修正。

2.5 热线法

瞬态热线法是利用测量热丝的电阻得到材料的热传导系数,初始状态下均向介质与内部温度均衡金属丝处于热平衡状态,金属丝施加恒定的电压加热后温度升高,通过温升速率来求解热传导系数。刘子文等^[39]采用 DRE 热传导系数测试仪测试了不同配比的下蜀土热传导系数,发现热传导系数随着土样含水率和砂含量的增加而增大,并将测试土样的电阻率与热传导系数进行拟合,发现两者符合指数关系。

稳态法测量具有稳定可靠、技术方法简单、可直接获得热传导系数绝对值、更好的可重复性和更高的准确度等优点。但稳态法测定热传导系数所用时间较长,导致土体中的水分由于温度作用发生迁移,进而影响土体水分含量,产生较大测量误差,因此,严格意义上的稳态法不适用于不饱和土壤。瞬态法是测量土体热学参数的主要方法,具有测量简便迅速、测量周期极短、对土壤扰动小等特点。相较于稳态法中土体水分含量由于温度作用迁移,瞬态法在

试验测量过程中只出现较小的温升,因此,土样中水分含量可视为保持不变。

3 土体热传导系数模型

3.1 模型归纳

目前,有关预测土体热传导系数的模型众多,这些模型可分为经验模型和理论模型,尤其是以经验模型居多。土体热传导系数与土体的质地类型、矿物质组成成分、饱和度和孔隙度等因素均有关,其中饱和度(S_r)被认为是影响土体热传导系数的最主要因素^[9],因而有不少学者建立了基于热传导系数与饱和度相关联的预测模型。Johansen 模型^[12]是最早考虑归一化热传导系数 K_e 与饱和度 S_r 关系的经验模型,其预测精度高,应用范围广,以至于后来很多新提出的经验模型都是基于 Johansen 模型^[12]改进而来。例如:Nikoosokhan 模型^[40]是在 Johansen 模型^[12]基础上提出了一组新的干土与饱和土热传导系数的关系;He 等^[20]建立了一个类似于 Johansen 模型^[12]的 K_e 与 S_r 新关系式。本节在众多的热传导系数模型中选取部分进行介绍,选取的模型如下。

1) Ewen & Tomas (1987) 模型

Johansen^[12]提出了一个简单的规范变量 K_e 和 S_r 对粗细土的经验关系。Ewen 和 Tomas^[41]研究了热探针在非饱和砂土热传导系数测定中的应用,并与其他经验模型进行对比验证,提出预测公式为:

$$t \frac{dT}{dt} = \frac{q}{4\pi\lambda_{\text{eff}}} \left(1 + \frac{b}{t} + \frac{c \ln t}{t} \right) \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{4\pi(a + b/t_{\text{final}})} \quad (8)$$

式中: t 为时间; T 为温度; q 为单位长度输入功率; a 与 b' 为方程拟合常数。

2) Campbell (1985) 模型

Campbell^[38]基于土壤容重、质地及黏粒含量的关系建立了一个常温热传导系数经验模型:

$$\lambda_{\text{eff}} = A + B\theta_v - (A - D)\exp[(C\theta_v)^E] \quad (9)$$

式中: θ_v 为土壤体积含水率;参数 A 、 B 、 C 、 D 和 E 可根据堆积密度 ρ_b 、黏粒含量 m_c 、石英和其他矿物体积比计算,具体表示为:

$$A = 0.65 - 0.78\rho_b + 0.60\rho_b^2 \quad (10)$$

$$B = 1.06\rho_b \quad (11)$$

$$C = 1 + 2.6/(m_c^{0.5}) \quad (12)$$

$$D = 0.03 + 0.1\rho_b^2 \quad (13)$$

$$E = 4 \quad (14)$$

3) Johansen (1975)模型

Johansen 模型^[12]是最先考虑归一化热传导系

数 K_e 概念的模型,它将 K_e 表示成为干土与饱和土热传导系数的线性组合:

$$\lambda_{\text{eff}} = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}})K_e + \lambda_{\text{dry}} \quad (15)$$

式中: λ_{dry} 为干土的热传导系数; λ_{sat} 为饱和土的热传导系数,采用如下表达式:

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_w \lambda_s^{1-n} \quad (16)$$

式中: λ_w 为水的热传导系数; λ_s 为固体颗粒的热传导系数; n 为孔隙度。

此外,Johansen^[12]还提出了一种用于预测干土热传导系数的经验公式:

$$\lambda_{\text{dry}} = \frac{(0.135\rho_b + 64.7)}{(2700 - 0.947\rho_b)} \pm 20\% \quad (17)$$

式中: ρ_b 为堆积密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

Johansen^[12]将 K_e 与 S_r 相关联,并得到了 K_e - S_r 关系表达式:

$$K_e = \begin{cases} 0.7 \lg S_r + 1 & S_r > 0.05 \\ \lg S_r + 1 & S_r > 0.1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: S_r 为饱和度。

结合上述表达式,Johansen 模型的最终表达式可归结为:

$$\lambda_{\text{eff}} = (\lambda_w \lambda_s^{1-n} - \frac{0.135\rho_b + 64.7}{2700 - 0.947\rho_b} \pm 20\%)K_e + \frac{0.135\rho_b + 64.7}{2700 - 0.947\rho_b} \pm 20\% \quad (19)$$

4) Balland & Arp (2005)模型

Balland 和 Arp^[14]于 2005 年在 Johansen^[12]模型的基础上,增加了有机物质含量对热传导系数的影响,提出了新的固体颗粒热传导系数表达式:

$$\lambda_s = \lambda_{\text{om}}^{\varphi_{\text{om}}} \lambda_q^{\varphi_q} \lambda_o^{(1-\varphi_q-\varphi_{\text{om}})} \quad (20)$$

式中: λ_{om} 、 λ_q 和 λ_o 分别表示有机物质、石英和其他矿物质的热传导系数; φ_{om} 、 φ_q 和 φ_o 分别表示有机物质、石英和其他矿物质占土壤总体积的百分比。

Balland 和 Arp^[14]同时提出了一种预测干土热传导系数的新表达式:

$$\lambda_{\text{dry}} = [(0.053\lambda_s - \lambda_g)\rho_b + \lambda_g\rho_s]/(\rho_s - 0.947\rho_b) \quad (21)$$

当 $\lambda_s = 3.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot (\text{C})^{-1}$, 空气热传导系数 $\lambda_g = 0.024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot (\text{C})^{-1}$, $\rho_s = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,此式与 Johansen^[17]式(17)相同。

他们提出的 K_e - S_r 关系为:

$$K_e = S_r^{0.5(1+\varphi_{\text{om}} - \alpha\varphi_{\text{sand}} - \varphi_{\text{cf}})} \times \left\{ \left[\frac{1}{1 + \exp(-\beta S_r)} \right]^3 - \left(\frac{1 - S_r}{2} \right)^3 \right\}^{1-\varphi_{\text{om}}} \quad (22)$$

式中: α 、 β 为协调参数,值为 $\alpha \approx 0.24 \pm 0.04$ 和

$\beta \approx 18.1 \pm 1.1$ 是基于 Kersten^[11] 和 Ochsner^[42] 的土壤数据确定的,可应用于多种土壤类型;下标 sand 和 cf 分别为砂和粗颗粒土,有机质含量假定为

$$\lambda_{\text{eff}} = \left[\lambda_w^n (\lambda_{\text{om}}^{\varphi_{\text{om}}} \lambda_q^{\varphi_q} \lambda_o^{(1-\varphi_q-\varphi_{\text{om}})})^{1-n} - \frac{[0.053 \lambda_{\text{om}}^{\varphi_{\text{om}}} \lambda_q^{\varphi_q} \lambda_o^{(1-\varphi_q-\varphi_{\text{om}})} - \lambda_g] \rho_b}{\rho_s - 0.947 \rho_b} \right] \times S_r^{0.5(1+\varphi_{\text{om}}-\alpha\varphi_{\text{sand}}-\varphi_{\text{cf}})} \left\{ \left[\frac{1}{1 + \exp(-\beta S_r)} \right]^3 - \left(\frac{1 - S_r}{2} \right)^3 \right\}^{1-\varphi_{\text{om}}} + \frac{[0.053 \lambda_{\text{om}}^{\varphi_{\text{om}}} \lambda_q^{\varphi_q} \lambda_o^{(1-\varphi_q-\varphi_{\text{om}})} - \lambda_g] \rho_b}{\rho_s - 0.947 \rho_b} \quad (23)$$

5) Abuel-Naga (2008)模型

Abuel-Naga^[35] 研究一维传热条件下饱和两相系统的黏土热传导系数,分析在不同的孔隙度和温度水平下粘土试样的热传导系数,并将模型预测值与实际测量值进行对比:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{a}{\frac{d}{\lambda_s} + \frac{1.0-d}{\lambda_f}} + b\lambda_s + c\lambda_f \quad (24)$$

式中: d 为固相对串联流的影响; a 、 b 、 c 分别表示饱和土的三种热传导途径与总热传导的比值($a+b+c=1$); λ_s 和 λ_f 分别为土壤固体颗粒和水的

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_s \theta_{\text{sb}} + \frac{(1-n-\theta_{\text{sb}}+n_{\text{wm}})}{\frac{1-n-\theta_{\text{sb}}}{\lambda_s} + \frac{n_{\text{wm}}}{\lambda_w \exp(1-S_r^X)}} + \lambda_a [1 - \exp(1-S_r^X)] + \frac{(n-n_{\text{wm}})^2}{\frac{nS_r - n_{\text{wm}} \exp(1-S_r^X)}{\lambda_w} + \frac{n(1-S_r) - n_{\text{wm}} [1 - \exp(1-S_r^X)]}{\lambda_a}} \quad (27)$$

式中: λ_s 为土体热传导系数; λ_a 为气体热传导系数; λ_f 为液体热传导系数; θ_{sb} 为固传热路径; n_{wm} 为水与土体混合传热路径; n 为孔隙率。

7) Lu (2014)模型

Lu 等^[18] 在先前的基础上,提出了用含水率 θ 、土壤种类和土壤堆积密度 ρ_b 的指数函数来表示与热传导系数 λ_{eff} 的非线性关系:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{dry}} + \exp(\beta - \theta^\alpha) \quad (28)$$

式中: α 和 β 是 λ_{eff} 曲线的形状因子,与土壤种类和土体堆积密度 ρ_b 有关。

建立黏土含量 f_{cl} 和 α 之间的线性关系如下:

$$\alpha = 0.67 f_{\text{cl}} + 0.24 \quad (29)$$

参数 β 由 ρ_b 和砂的含量 f_s 用下面的多元回归方程估算:

$$\beta = 1.97 f_s + 1.87 \rho_b - 1.36 f_s \rho_b - 0.95 \quad (30)$$

结合 Lu 等^[16] 在 2007 年开发的干土热传导系数模型, Lu (2014) 模型热传导系数经验公式为:

$$\lambda_{\text{eff}} = (b - an) + \exp[(1.97 f_s + 1.87 \rho_b - 1.36 f_s \rho_b - 0.95) - \theta^\alpha] \quad (31)$$

8) He (2017)模型

He^[20] 开发了一种类似于 Johansen 模型的新的

零。结合 Johansen 提出的 K_e - S_r 关系, Balland & Arp 模型的最终公式为:

系数。

土壤固体 v_s 与水 v_w 的体积如下:

$$v_s = 1 - n = ad + b \quad (25)$$

$$v_w = n = c + a(1 - d) \quad (26)$$

6) Tarnawski (2013)模型

针对之前模型对于粗土,特别是在低饱和度时,预测结果与实验数据不一致的缺陷。Tarnawski^[43] 模型假设一维导热热流通过非饱和土的初等立方单元,热流沿着三条独立绝热绝缘的路径传递。

当 $0 < S_r \leq 1$ 时,为:

经验公式以模拟不同土质和含水量与 λ_{eff} 的关系:

$$K_e = \begin{cases} 0 & \theta = 0 \\ [A \cdot \exp(\theta^{-B})] - 1 & \theta > 0 \end{cases} \quad (32)$$

式中: A 和 B 为拟合参数。

他提出的新的预测干土热传导系数的模型为:

$$\lambda_{\text{dry}} = \begin{cases} -0.58n + 0.50 & (a) \\ -1.92n + 1.18 & (b) \end{cases} \quad (33)$$

式中,(a) 是通过拟合文献[16,41]土壤数据所得,(b) 是通过拟合 Chen^[17] 石英砂数据所得。He 等^[20] 人研究发现,(a) 低估了低孔隙率($n < 0.45$) 下的 λ_{dry} 值。通常情况下土体孔隙率范围在 $0.3 \sim 0.65$ 之间,因此多采用(b) 来计算 λ_{dry} 值。

最终模型为:

$$\lambda_{\text{eff}} = \begin{cases} \lambda_{\text{dry}} & \theta = 0 \\ \lambda_{\text{dry}} + \frac{(\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}})}{A \cdot \exp(\theta^{-B})} & \theta > 0 \end{cases} \quad (34)$$

式中: λ_{sat} 采用式(16)进行计算, $\lambda_w = 0.598 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot (\text{C})^{-1}$, λ_s 根据 Tarnawski^[43] 和 Chen^[17] 实测的 47 种不同类型土壤饱和热传导系数数据取值。

3.2 模型评价

经验模型主要是通过室内或者野外试验来研究热传导系数随相关影响因素的变化,进而通过所得试验数据拟合得到的预测经验公式;理论模型则是

从孔隙介质的微观结构组成出发,分析其水热迁移过程,再通过理论推导的方式得到热传导系数预测模型^[45]。表1在前人研究^[9]的基础上进一步总结

了几种热传导系数模型的优缺点及适用的土质类型。

表1 几种土体热传导系数模型汇总

Tab. 1 Summary of several soil thermal conductivity models

模型类别	模型优点	模型缺点	适用土质类型
Johansen (1975) 模型	最早提出了 K_e 数概念的模型,并且具有相对较高的预测精度	未考虑不同土质类型对 K_e - S_r 关系的影响	各种土质
Campbell (1985) 模型	模型简单,仅通过堆积密度和黏粒含量即可估计热传导系数的值,便于应用	随着含水率的增加,模型偏差增大	各种土质
Ewen & Tomas (1987) 模型	在满足限制水分迁移效应的同时,还保持该方法的理论精确度	低饱和度情况下,模型精度受含水率的影响较大	砂性土
Balland & Arp (2005) 模型	考虑了土体中有机物质含量的影响	部分参数获取难度大,且公式复杂	各种土质
Abuel-Naga (2008) 模型	对于饱和细粒粘土的预测精度较高	模型仅对饱和粘土有效	饱和粘土
Tarnawski (2013) 模型	整个饱和度范围内的预测精度都较高	模型适用范围有限	石英砂
Lu (2014) 模型	模型简单,便于应用	实测数据样本容量较小,模型准确性有待进一步验证	各种土质
He (2017) 模型	模型验证样本容量大,土质类型丰富	部分未知参数的确定比较困难	各种土质

Johansen 模型^[12]是最早考虑了归一化热传导系数 K_e 概念的经验模型,它将 K_e 和 S_r 用对数公式的形式进行相关联,同时还能够反映含水量、土体种类、孔隙度和石英含量等对热传导系数的影响,因而具有较高的模拟精度,但是该模型没有考虑不同土质类型对 K_e - S_r 关系的影响,对于砂性土或粘性土的预测精度可能较低。Campbell 模型^[38]公式相对比较简单,仅通过堆积密度 ρ_b 和黏粒含量 m_c 即可估计热传导系数的值,并且这两个参数也较容易测得,使得该模型便于应用到实际工程中。李婷等^[37]利用陕西当地土壤对 Campbell 模型进行测试发现,该模型所计算的热传导系数均高于实测值,并且随着含水率的增加,偏差越大。众所周知,对于可允许的热探针运行时间存在着两方面限制,一方面,需要减少运行时间,以便限制水分迁移效应,另一方面,需要允许较长的运行时间,以便保持方法的理论精确度,然而室内或野外试验均不能同时满足这两个条件。Ewen & Tomas 模型^[41]则实现了在满足限制水分迁移效应的同时,还保持该方法的理论精确度,缺点在于该模型在低饱和度条件下,预测精度受含水率的影响较大。Balland & Arp^[14]模型的优势在于全面地考虑了土体中的物质组成成分,尤其是有机质含量的影响,这在一定程度上提高了模型的预测精度,但是该模型公式比较复杂,且对于土体中一

些物质成分的含量很难准确测得,因此限制了模型的应用。Abuel-Naga 模型^[35]主要是针对饱和和细粒粘土而提出的经验模型,对于饱和粘土的热传导系数数值预测精度较高,但是其适用的土质类型范围有限。Tarnawski 模型^[43]在整个含水量范围内都具有较高的预测精度,但是该模型主要是针对石英砂而言,因此对其他土质类型的土体热传导系数预测情况有待研究。Lu 模型^[18]是通过指数函数来表示 K_e 与土体体积含水量、质地和堆积密度的非线性关系,该模型虽然比较简单,但是在模型建立之初,对于模型验证的实测数据样本容量太少,因此模型的准确性仍有待进一步的验证。He 等^[20]建立了含水量和不同土质类型与热传导系数之间的新关系,并在大量前人的试验数据的基础上得到了预测精度更高,适用范围更广的模型。该模型的缺点在于参数 A 和 B 确定比较困难,使得模型很难被实际应用,建立估计未知参数 A 和 B 的方法将有助于更广泛地应用该模型。

热传导系数经验模型主要是通过对某种特定的类型的土体进行测试,再由实测数据来研究热传导系数与其相关影响因素之间的关系,进而拟合试验数据得到经验公式,一旦脱离了模型提出时的试验土质类型,其模型精度往往可能会出现不同程度的降低,因而经验模型的适用性和准确性都存在局限

性。理论模型多从孔隙介质的结构组成出发,以相关理论为基础,通过推理得到的热传导系数预测公式,以往的研究多是针对一维传热而言,对于二维传热的理论模型研究相对较少。

4 总结与展望

1) 流热耦合问题一直以来备受世界各国学者关注,但我国对于此方面的研究仍处于起步阶段,流热耦合模型方法的研究是拓展流热耦合理论研究的主体和关键。现如今的研究方法仍存在着一些不足,应开展影响因素的灵敏度分析,通过分析各因素影响程度,对高敏感度的影响因素进行重点研究。

2) 目前普遍采用瞬态法测量土体的热传导系数,但仍然存在可重复性和准确度等问题,应进一步完善热传导系数测量方法,改进测量仪器设备,借鉴稳态法的优点,提高瞬态法的测量准确度。

3) 虽然关于土壤热传导系数的经验模型与理论模型众多,但是目前还没有单一的模型可以准确预测不同土壤类型的热传导系数。尽管已有研究报告其预测值与实测值之间良好的一致性,但是从模型研究的验证结果来看,同样的模型在不同土壤质地、温度和水分条件下,预测的精度有所不同。因此,对于适用性更为广泛的土壤热传导系数经验模型仍有待研究,需扩大和评估传热对不同土壤类型的适用性,完善理论模型的传热机理。

4) 由于热传递引发土壤渗透性、力学性质和化学性质的改变,同时,渗透性质、力学性质和化学性质的改变也会反过来影响土的热性质。目前对于耦合问题研究而言,很多学者不仅仅局限于两场之间的耦合,多场耦合研究将逐渐成为新的热点区域。

参考文献:

- [1] 甘孝清,肖庆,宁晶. 土石坝渗流热监测理论研究进展[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(7): 119-124.
GAN Xiaqing, XIAO Qing, NING Jing. Advances in theory: monitoring seepage of embankment dam by measuring temperature[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(7): 119-124.
- [2] 王如宾,柴军瑞,徐维生,等. 裂隙网络非连续介质渗流场与温度场耦合分析研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 50-56.
WANG Rubing, CHAI Junrui, XU Weisheng, et al. A study of the coupled seepage field and temperature field in non-continuum media of a fractured network[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(4): 50-56.
- [3] 刘明,章青,刘仲秋,等. 考虑渗透系数变化的地下结构温度-渗流耦合分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(2): 183-188.
LIU Ming, ZHANG Qing, LIU Zhongqiu, et al. Study on thermo-hydro coupling model of underground structure with permeability coefficient changes[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(2): 183-188.
- [4] REN Jie, ZHANG Wenbing, YANG Jie, et al. Using water temperature series and hydraulic heads to quantify hyporheic exchange in the riparian zone[J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27(4): 1419-1437.
- [5] REN Jie, ZHANG Wenbing, YANG Jie, et al. A comparison of numerical and Lu modeling of water flow and heat transport with laboratory experiments[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: 267.
- [6] 张文兵,任杰,杨杰,等. 基于正交试验土石坝热-流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 147-154.
ZHANG Wenbing, REN Jie, YANG Jie, et al. Sensitivity analysis of thermal-hydro coupling model parameters in earth rock dam based on orthogonal test method[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2019, 47(1): 147-154.
- [7] REN Jie, ZHANG Wenbing, YANG Jie. Morris sensitivity analysis for hydrothermal coupling parameters of embankment dam: a case study[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 1-11.
- [8] 刘波,金爱兵,高永涛,等. 基于Morris法的单裂隙岩体温度场参数灵敏度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 152-157.
LIU Bo, JIN Aibing, GAO Yongtao, et al. Parameter sensitivity analysis of temperature field in single fracture rock mass based on Morris[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(1): 152-157.
- [9] 张楠,夏胜全,侯新宇,等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1550-1562.
ZHANG Nan, XIA Shengquan, HOU Xinyu, et al. Review on soil thermal conductivity and prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1550-1562
- [10] ZHANG Nan, WANG Zhaoyu. Review of soil thermal conductivity and predictive models[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 117: 172-183.
- [11] KERSTEN M S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soil[J]. Journal of Neurophysiology, 1949, 45(4): 667-697.
- [12] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim; University of Trondheim, 1975.

- [13] CHUNG S O, HORTON R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(12): 2175-2186.
- [14] BALLAND V, ARP P A. Modeling soil thermal conductivities over a wide range of conditions[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2005, 4(6): 549-558.
- [15] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 443-458.
- [16] LU Sen, REN Tusheng, GONG Yuanshi, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 8-14.
- [17] CHEN Shanxiang. Thermal conductivity of sands[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 44(10): 1241-1246.
- [18] LU Yili, LU Sen, HORTON R, et al. An empirical model for estimating soil thermal conductivity from texture, water content, and bulk density[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(6): 1859-1868.
- [19] LU Ning, DONG Yi. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(6): 04015016.
- [20] HE Hailong, ZHAO Ying, DYCK M F, et al. A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(6): 1281-1300.
- [21] FAROUKIO T. Thermal properties of soils [M]. Hanover, NH: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
- [22] PRUESS K, YABUSAKI S, STEEFEL C, et al. Fluid flow, heat transfer, and solute transport at nuclear waste storage tanks in the Hanford vadose zone[J]. *Vadose Zone Journal*, 2002, 1(1): 68-88.
- [23] NIELD D A, BEJAN A. Heat transfer through a porous medium[M]//*Convection in Porous Media*. New York: Springer New York, 2013: 23-31.
- [24] WANG X, BENSON C H. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, 27(2): 163-172.
- [25] NAHLAWI H, BOUAZZA A, KODIKARA J. Characterisation of geotextiles water retention using a modified capillary pressure cell [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25(3): 186-193.
- [26] DUQUE C, MÜLLER S, SEBOK E, et al. Estimating groundwater discharge to surface waters using heat as a tracer in low flux environments; the role of thermal conductivity [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(3): 383-395.
- [27] WOODSIDE W, MESSMER J H. Thermal conductivity of porous media. I. Unconsolidated sands [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(9): 1688-1699.
- [28] DONG Y, MCCARTNEY J S, LU N. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 33(2): 207-221
- [29] 温敏敏. 热探针方法测量土壤水热特性的改进研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- WEN Minmin. Temperature sensitivity. Improvement of thermal probe method for measuring soil water and heat characteristics [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [30] 闵凯, 刘斌, 温广. 导热系数测量方法与应用分析 [J]. *保鲜与加工*, 2005, 5(6): 40-43.
- MIN Kai, LIU Bin, WEN Guang. Measurement method and application analysis of thermal conductivity [J]. *Preservation and Processing*, 2005, 5(6): 40-43.
- [31] 刘焕宝, 张喜发, 赵意民, 等. 冻土导热系数热流计法模拟试验及成果分析 [J]. *冰川冻土*, 2011, (5): 1127-1131.
- LIU Huanbao, ZHANG Xifa, ZHAO Yimin, et al. Frozen soil thermal conductivity determined by using heat-flow meter: simulation experiment and result analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1127-1131.
- [32] SALMON D. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(12): R89-R98.
- [33] NIKOLAEV I V, LEONG W H, ROSEN M A. Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34(6): 1110-1129.
- [34] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 13-18.
- [35] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZA A. Thermal conductivity evolution of saturated clay under consolidation process. *International Journal of Geomechanics*, 2008, 8(2): 114-122.
- [36] BRISTOW K L. Measurement of thermal properties

- and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(2): 75-84.
- [37] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 59-64.
- [38] CAMPBELL G S. *Soil physics with basic-transport models for soil-plant systems*[M]. New York: Elsevier, 1985.
- [39] 刘子文, 张丹, 程健. 土体电阻率与导热系数的相关性实验研究[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(2): 251-256.
LIU Ziwen, ZHANG Dan, CHENG Jian. Experimental study on correlation between soil resistivity and thermal conductivity[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(2): 251-256.
- [40] NIKOOSOKHAN S, NOWAMOOZ H, CHAZAL-LON C. Effect of dry density, soil texture and time-spatial variable water content on the soil thermal conductivity [J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2015, 11(2): 149-158.
- [41] EWEN J, THOMAS H. The thermal probe-measurement of the thermal conductivity and drying rate of soil in the field[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1992, 15(3): 256-263.
- [42] OCHSNER T E, HORTON R, REN Tusheng. A new perspective on soil thermal properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1641-1647.
- [43] TARNAWSKI V R, MCCOMBIE M L, MOMOSE T, et al. Thermal conductivity of standard sands. part III. full range of saturation[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34(6): 1130-1147.
- [44] MCINNES K J. *Thermal conductivities of soils from dryland wheat regions of Eastern Washington*[D]. Pullman: Washington State University, 1981.
- [45] 张文兵. 大坝下游河岸带饱和-非饱和和流热耦合模型及应用研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
ZHANG Wenbing. Study on the hydro thermal coupling model of saturated-unsaturated in riparian zone downstream of dam and its application[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 319 页)

- [18] LIANG C J, HUANG S C. Kinetic model for sulfate / hydroxyl radical oxidation of methylene blue in a thermally-activated persulfate system at various pH and temperatures[J]. *Sustainable Environment Research*, 2012, 22(4): 199-208.
- [19] SCHWAAB M, PINTO J C. Optimum reference temperature for reparameterization of the Arrhenius equation. Part1: problems involving one kinetic constant [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(10): 2750-2764.
- [20] 刘桂芳, 孙亚全, 陆洪宇, 等. 活化过硫酸盐技术的研究进展[J]. *工业水处理*, 2012, 32(12): 6-10.
LIU Guifang, SUN Yaquan, LU Hongyu, et al. Research progress in activated persulfate technology [J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(12): 6-10.
- [21] ANIPSITAKIS G P, DIONYSIOU D D. Degradation of organic contaminants in water with sulfate radicals generated by the conjunction of peroxymonosulfate with cobalt [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20): 4790-4797.
- [22] 刘洪位, 郭洪光, 付焱, 等. 硫酸根自由基降解诺氟沙星动力学因子优化分析[J]. *水处理技术*, 2016, 42(3): 27-31.
LIU Hongwei, GUO Hongguang, FU Yao, et al. Optimal analysis for kinetics factors on the degradation of norfloxacin using sulfate radical[J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(3): 27-31.
- [23] ZHANG Jun, SHAO Xueting, SHI Chao, et al. Decolorization of acid orange 7 with peroxymono sulfate oxidation catalyzed by granular activated carbon [J]. *Chemical Engineering Journal*. 2013, 232: 259-265.

(责任编辑 王绪迪)