

王卫华, 蔡礼良, 龚一丹. 土壤热导率影响因素及模型评估研究 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 124-132.

WANG Weihua, CAI Liliang, GONG Yidan. Research on influencing factors and model assessment of soil thermal conductivity [J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 124-132.

土壤热导率影响因素及模型评估研究

王卫华[†], 蔡礼良[†], 龚一丹

(昆明理工大学 农业与食品学院, 云南 昆明 650500)

摘要:【目的】通过对预测模型的评估, 综合考虑各方面因素, 使各模型在适用条件范围内扬长避短、发挥优势, 简洁、快速、精确地获取土壤热导率的预测值, 以实现复杂程度上的量化研究。【方法】对前人提出的 16 种土壤热导率模型的优势和劣势及应用条件、影响因素进行分析总结, 将其中 14 种模型的预测数据与从文献中收集的实测数据进行比较, 通过线性回归分析与均方根误差分析, 实现模型评估。【结果】含水率和石英含量对土壤热导率有很大影响, 石英的热导率约为 $7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 是所有土壤矿物中最高的, 在湿润状态下的土壤热导率远高于干燥状态下的; 常温下, Wiener 的模型回归系数为 0.133 和 2.208, 模型决定系数为 0.393 和 0.820, 与其他模型相比偏差明显; 而 Geo-Mean 模型显示出最低回归系数 0.668, 最高均方根误差 0.598, 模型的预测值与实测值偏差显著; Zhang 等的模型、Chen 的模型和 Haigh 的模型回归系数分别为 0.994、0.919 和 0.891, 均方根误差为 0.280、0.315 和 0.394, 表现出相对较高的预测精度; Lu 等模型的回归系数为 0.850, 决定系数为 0.976, 土壤热导率的预测精度一般, 而基于 Lu 等模型改进的苏李君等模型显示最高回归系数(0.997)和决定系数(0.980), 表现出最优的性能。【结论】在需要考虑土壤类型的情况下, 推荐使用苏李君等的模型, 该模型能够更加详细描述土壤物理基本参数对土壤热导率的影响。

关键词: 土壤热导率; 影响因素; 预测模型; 模型评估

中图分类号: S152

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2020)05-0124-09

Research on influencing factors and model assessment of soil thermal conductivity

WANG Weihua[†], CAI Liliang[†], GONG Yidan

(Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: 【Objective】To comprehensively consider various factors through evaluating prediction models, make full use of each model's advantages and disadvantages within the scope of applicable conditions, play its advantages, acquire concise, fast and accurate prediction of soil thermal conductivity and realize quantitative research on its complexity degree. 【Method】The advantages, disadvantages, application conditions and influencing factors of the previous 16 soil thermal conductivity models are analyzed and summarized. The predicted data of 14 models are compared with their measured data collected from the literature. The model evaluation is realized through linear regression analysis and root mean square error analysis. 【Result】Soil thermal conductivity is greatly affected by moisture content and quartz content. The thermal conductivity of quartz is about $7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, which is the highest in all soil minerals. The thermal conductivity of soil in humid

收稿日期: 2019-12-05 网络首发时间: 2020-07-11 10:32:37

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200710.1537.002.html>

作者简介: 王卫华 (1982—), 女, 副教授, 博士, E-mail: wangweihua1220@163.com; 蔡礼良 (1997—), 男, 硕士研究生, E-mail: 18702515762@163.com; †对本文贡献相同

基金项目: 国家自然科学基金 (51409136); 云南省科技厅面上项目 (2019FB075)

state is much higher than that in dry state. Under normal temperature condition, the regression coefficients of Wiener model are 0.133 and 2.208, and the decision coefficients are 0.393 and 0.820, which deviates significantly from other models; Geo-Mean model shows the lowest regression coefficient of 0.668 and the highest root mean square error of 0.598, the prediction values deviated significantly from the measured values; The regression coefficients of the models of Zhang et al, Chen and Haigh are 0.994, 0.919, 0.891 respectively, and the root mean square errors are 0.280, 0.315, 0.394 respectively, showing relatively high prediction accuracy. The regression coefficient of the model of Lu et al is 0.850, the determination coefficient is 0.976, the prediction accuracy of soil thermal conductivity is general, while the improved model of Su et al based on model of Lu et al shows the highest regression coefficient of 0.997, the highest determination coefficient of 0.980, showing the best performance. 【Conclusion】 In the case of soil texture, improved model of Lu et al is recommended. This model can describe the effects of basic parameters of soil physics on soil thermal conductivity in more detail.

Key words: soil thermal conductivity; influencing factor; prediction model; model assessment

土壤热导率(λ)控制着稳定状态下土壤内的热传导过程,是土壤物理学水、热、溶质耦合数值模型的重要参数之一,也是研究土壤水分蒸发模拟、气象和地球物理过程的基础^[1]。热脉冲技术是测定土壤热导率最有效的方法,但它的过程相对复杂,难以在田间大面积应用,采用预测模型推求土壤热导率只需获取易得的土壤性状参数。如果研究者对影响土壤热导率的因素有更清晰、更有深度的把握,那么在建立新的预测模型时将更有针对性,模型的精度将更高。土壤热导率不仅由每种土壤成分的固有物理性质决定,还受其体积分数的影响,具体而言,它的主要影响因素包括饱和度、容重、土壤矿物质、土壤粒度、颗粒级配、孔隙几何形状等。此外,石英的热导率约为 $7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,是所有土壤矿物中最高的,土壤在湿润状态下的热导率远高于干燥状态下的,因此,含水率和石英含量对土壤热导率的影响比其他因素更为突出。土壤热传导与土壤水分传导、气体传输机理大不相同,土壤热既能借助土壤孔隙中的气体或者水分进行传导,也能直接通过固体颗粒间的接触进行传导,因此,土壤热传导相对于水、气传输显得更为复杂^[2]。土壤热传导引起水分迁移、温度升高,进而引起土壤水的状态改变,反过来又影响热传导,这种情况就是土壤中的热-水耦合过程。另一方面,在非饱和条件下,热梯度引起的水分迁移会影响土壤吸力,进而改变土壤的力学性能,这种情况属于热-水力-机械耦合过程。

土壤热传导受到了世界各国学者的广泛关注,目前,关于测定热导率的方法已有大量的研究,如何快速、准确估算土壤热导率是研究土壤热性质的主要内容之一,国内外学者提出了很多间接估算模型,用于描述土壤热导率与土壤质地、容重、含水率

之间的关系^[3-21],常用的间接估算模型有两类:理论模型^[3-7]和经验模型^[5,8-18]。正如文献所述,许多土壤热导率的预测模型是基于土壤热导率实测数据拟合而建立的^[5,8-9,13,16]。Johansen^[5]提出了归一化导热系数(κ_r)的概念,通过 κ_r-S_r 关系研究土壤类型、孔隙度(n)、饱和度(S_r)和矿物组分对土壤热导率的影响。Kersten^[8]测量了19种天然土壤的热导率,并提出了热导率与含水率、容重之间的经验模型。Cote等^[9]进一步研究了土壤的热导率,并建立了考虑土壤类型、颗粒形状影响的 κ_r-S_r 关系。Zhang等^[13]提出了砂土-黏土混合物的广义土壤热导率模型,该模型采用基于 κ_r 的热反射探针试验,得到石英含量极高土壤的试验数据。Lu等^[16]利用时域反射仪(TDR)测定了12种天然土壤的热导率,范围从砂土、粉土到壤土、黏壤土,并提出考虑土壤水分条件的 κ_r-S_r 关系的导热模型。综上所述,各模型的适用范围和参数取值不同,导致不同模型各具优缺点,模型应用存在一定的局限性。

本文综述了土壤热导率研究现状,比较分析了土壤热导率的各类影响因素,确定出石英含量和含水率对土壤热导率的影响最为显著。从国内外众多学者对土壤热导率预测模型的研究中,选择出16种模型(包括理论模型、经验模型和其他模型)总结其优、劣及适用性。分析了其中14种预测模型在石英砂中的应用差异,比较了不同饱和度下各模型的预测热导率。此外,为进一步评估和验证模型性能,本文对查阅文献收集的实测数据与预测数据进行比较,进行线性回归分析与均方根误差分析,将有助于准确预测土壤热导率,并在不同土壤、不同环境条件下选择最合理的模型。

1 土壤热导率的影响因素

1.1 组成因素

影响土壤热导率的组成因素包括土壤颗粒的矿物成分、粒度、形状和级配^[4-5, 8, 11, 22-25]。土壤主要由固、液、气三相组成, 在一些寒冷地区土壤中可能含有冰。固相含有不同的土壤矿物质, 如石英、高岭石、伊利石、蒙脱石等, 其中石英含量对固相热导率有巨大影响, 因为它在所有土壤矿物中热导率最高(约 $7.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), 而其他土壤矿物的热导率变化不大 ($2.0 \sim 3.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。土壤颗粒的大小和形状会影响固体颗粒之间的排列, 影响土壤结构和紧实程度, 从而引起土壤热导率的变化。例如, 天然土壤中较小的颗粒通常聚集成不同形状和次级单元, 这些次级单元分布在原始颗粒的大孔隙之间填充土壤孔隙、增加密实程度, 如果土壤颗粒排列与热传递方向一致, 热导率将显著增加。因此, 土壤固相决定土壤中热传导的状况。

影响土壤热导率的另一个组成因素是土壤颗粒之间的物理接触。应该注意的是, 热传递主要发生在这些接触点上, 特别是当土壤处于干燥状态时, 因为与土壤固体颗粒相比, 空气的热导率非常低。接触点的数量是这种情况下热导率的主要影响因素^[24]。此外, 如果土壤固体颗粒通过黏土或其他黏合剂黏结在一起, 导致密实程度提高, 土壤热导率会显著提高^[26]。

土壤结构的各种变化可能会自然发生, 诸如干燥和湿润循环会导致土壤收缩和膨胀, 冻融过程还会导致土壤的组成和结构变化。例如, 冻融循环会破坏土壤结构, 降低土壤团粒密度和渗透阻力, 也降低了土壤团聚体的稳定性, 从而影响土壤的热导率^[27-28]。

1.2 环境因素

影响土壤热导率的环境因素包括土壤含水率、容重和温度。据文献反映, 土壤在潮湿或完全饱和条件下的热导率远高于干燥或接近干燥情况下的热导率^[5, 12, 17, 25]。因此, 含水率对土壤热导率的影响是突出的。然而, 容重对土壤热导率的影响相对较小, 容重的提高将增加土壤颗粒间物理接触点的数量, 但土壤热导率没有显著增加^[12]。就温度对土壤热导率的影响而言, Campbell 等^[29]对 9 种天然土壤在 $30 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内进行热导率测定, 并提出了考虑温度影响的热导率模型。Liu 等^[30]使用 KD2 Pro (Decagon 设备公司, 2014 年) 测量温度为 $5 \sim 88 \text{ }^\circ\text{C}$ 的粉质黏土和细砂的热导率, 然后改进 Campbell 等^[29]的模型。Smits 等^[31]和 Xu 等^[32]指出, 由于土壤温度

升高, 砂土的热导率将显著增加。其他关于温度方面的研究在文献^[33-37]中有所表述, 在此不再赘述。

此外, 在温度变化或排水的情况下会引起土壤中的水分运动, 水的运动还会由于水量或水的状态的变化而导致土壤热导率的变化, 例如土壤水分相变(蒸发与凝结, 冻结与融化)产生热源或热汇, 从而导致土壤热导率变化。在温度低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时水会结冰, 导致土壤基质结构变化, 进而引起热导率相应的变化。在相对较高的温度下, 水可能在土壤中变成蒸气, 由于液态水或水蒸气分子的活性增加, 将导致土壤热导率增加。

1.3 其他因素

影响土壤热导率的其他因素包括土壤成分、有机质、离子、盐、添加剂及滞后效应^[38-40]。土壤有机质含量影响土壤颗粒间团聚体的结构, 固体颗粒表面是发生物理化学反应的场所, 例如水和其他分子的吸附、胶结物质的结合、离子交换和催化作用^[38]。土壤颗粒的比表面积主要取决于其细粒部分, 黏土的表面积比砂土大, 土壤颗粒的表面积越大, 它吸收的水分就越多, 导致液态水的减少, 进而降低土壤的热导率^[39]。铁和盐对细粒土壤的影响更大, 因为它们具有相对较高的比表面积。Farouki^[25]指出, 交换性阳离子提供的化学键有助于黏土的黏结强度, 这些化学键会影响土壤颗粒之间的热传导过程。这种热传导的显著变化归因于 2 个单颗粒相互接触的颗粒表面或颗粒相互靠近时表面之间区域发生的物理化学变化。滞后效应不仅发生在土壤热导率上, 也发生在其他土壤特性上^[40]。例如滞后效应影响土壤冻融循环中未冻结含水率与温度的关系, 以及干湿循环中土壤吸力与含水率的关系, 进而影响土壤热导率。试验表明, 土壤的导热性取决于特定的含水率是通过湿润还是干燥来实现的, 当通过干燥产生时, 特别是在接近干燥的状态下, 土壤热导率要高得多, 因为干燥过程最大程度地建立了定向水膜, 从而使热传导更有效^[41]。

同时, 土壤热导率作为土壤物理学中土壤热状况的 3 个物理参数之一, 显然会受到土壤热容量和土壤热扩散率的影响。土壤是由固体颗粒、水和空气三相组成的多孔介质, 是一个不均质体, 其组分受时间和空间变化的影响, 而其热导率表现为固相>水>空气, 决定土壤热状况的各个参数只是相对稳定, 所以热导率并不是绝对常数。此外, 土壤热性质是相互联系、相互影响的, 例如, 由于水在土壤各组分中的热容量最大, 因此含水率成为影响土壤热导率和热容量的主要因素, 同时土壤含水率对土壤热扩散率也有显著影响。因此, 在建立土壤热导率预

测模型时, 不可避免地需要考虑到这一系列影响因素; 在对土壤热导率研究逐渐深入的过程中, 评估各模型优势、劣势及适用条件时, 土壤热导率的影响因素往往也是决定性的。

2 热导率预测模型

研究者们为土壤热导率预测模型的发展做出

了大量贡献, 如在概念化土壤单元或多相土壤介质进行数学分析的基础上, 提出了理论模型; 而经验模型是从实测数据入手进行拟合, 建立土壤热导率和土壤性质 (例如含水率、饱和度、干密度等) 之间关系的数学表达式。本节将评估不同湿度条件下各土壤导热模型的优缺点及适用性。土壤热导率预测模型总结见表 1。

表 1 土壤热导率 (λ) 预测模型比较

Table 1 A comparison of the predictive models for soil thermal conductivity

模型类型 Model type	模型来源或名称 Model source or name	模型表达式 Model expression	参数含义 Parameter meaning	模型建立基础 Model building foundation	优势 Advantage	劣势 Disadvantage	适用性 Applicability
理论模型 Theoretical model	Wiener ^[3]	$\lambda = \lambda_W^L = \left[\sum \frac{V_\alpha}{\lambda_\alpha} \right]^{-1}$, $\lambda = \lambda_W^U = \sum V_\alpha \lambda_\alpha$	V_α 和 λ_α 分别为 α 相的体积分数和热导率, λ_W^L 和 λ_W^U 分别表示 Wiener 模型热导率的下限和上限	基于串联模型和并联模型经典混合定律	2 个极限热导率的量化	不适用于土壤	多孔介质
	De Vries ^[4]	$\lambda = \sum_{i=0}^N K_i \varphi_i \lambda_i / \sum_{i=0}^N K_i \varphi_i$	λ_i 为第 i 种土壤成分的热导率, φ_i 为第 i 种成分的体积分, K_i 为土壤中各成分平均热梯度与连续介质的平均热梯度之比, N 为土壤成分种类	假设土壤固体颗粒在连续孔隙流体内均匀分布	预测精度高	公式复杂, 参数难以确定	全部土壤
	Geo-Mean 模型 ^[5]	$\lambda = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^{n S_r} \lambda_a^{n(1-S_r)}$	λ_s 、 λ_w 和 λ_a 分别为固相、水和空气的热导率, S_r 为土壤饱和度, n 为土壤孔隙度	一种预测土壤热导率的几何平均方法	公式简单	预测精度低	全部土壤
	Tong 等 ^[6]	$\lambda = \eta_1 (1-n) \lambda_s + (1-\eta_2) \left[1 - \eta_1 (1-n) \right]^2 \times \left[\frac{(1-n)(1-\eta_1)}{\lambda_s} + \frac{n S_r}{\lambda_w} + \frac{n(1-S_r)}{\lambda_a} \right]^{-1} + \eta_2 \left[(1-n)(1-\eta_1) \lambda_s + n S_r \lambda_w + n(1-S_r) \lambda_a \right]$	η_1 为描述固体和气体混合物孔隙结构特征的参数, η_2 为孔隙结构、饱和度和温度的函数	考虑到含水率、孔隙率、饱和度、温度和压力对多相多孔介质热导率的影响	综合考虑多种影响因素	公式复杂, 参数难以确定	多孔介质
	Haigh ^[7]	$\frac{\lambda}{\lambda_s} = 2(1+\xi)^2 \left\{ \frac{\alpha_w}{(1-\alpha_w)^2} \ln \left[\frac{1+\xi+(\alpha_w-1)S_r}{\xi+\alpha_w} \right] + \frac{\alpha_a}{(1-\alpha_a)^2} \ln \left[\frac{1+\xi}{1+\xi+(\alpha_a-1)S_r} \right] \right\} + \frac{2(1+\xi)}{(1-\alpha_w)(1-\alpha_a)} \times \left[\beta(\alpha_w-\alpha_a)S_r - (1-\alpha_a)\alpha_w \right]$	$\alpha_w = \lambda_w/\lambda_s$, $\alpha_a = \lambda_a/\lambda_s$, ξ 和 β 分别为水膜厚度和宽度	从三相土壤接触单元推导出砂子理论导热率模型	公式简单, 预测精度高	适用范围有限	砂土
经验模型 Experience model	Kersten ^[8]	$\lambda = 0.144 2[\log_w 0.9-0.2] \times 10^{0.624 3\gamma_d}$, $\lambda = 0.144 2[\log_w 0.7+0.4] \times 10^{0.624 3\gamma_d}$	w 为土壤含水率, γ_d 是土壤的干容重	通过曲线拟合建立模型	公式简单	忽略石英含量影响	全部土壤
	Johansen ^[5]	$\lambda = \left(\lambda_w^n \lambda_s^{1-n} - \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2\ 650 - 0.947\rho_d} \right) \kappa_r + \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2\ 650 - 0.947\rho_d}$	κ_r 为归一化导热系数, ρ_d 为土壤的干密度	提出“归一化导热系数”建立新经验导热模型	归一化导热率概念和相对较高的预测精度	土壤类型对 κ_r-S_r 关系未知	全部土壤

续表 1 Continued table 1

模型类型 Model type	模型来源或名称 Model source or name	模型表达式 Model expression	参数含义 Parameter meaning	模型建立基础 Model building foundation	优势 Advantage	劣势 Disadvantage	适用性 Applicability
	Cote 等 ^[9]	$\lambda = (\lambda_w^n \lambda_s^{1-n} - \chi 10^{-m}) \left[\frac{k S_r}{1 + (k-1) S_r} \right] + \chi 10^{-m}$	k 为与土壤类型对 κ_r - S_r 关系影响有关的参数, χ 和 η 为土壤类型和颗粒形状对干燥土壤热导率影响的系数	结合参数 k 说明土壤类型效应, 干燥土壤孔隙度和热导率之间的关系	考虑土壤类型对 κ_r - S_r 关系的影响	未知 k 对土壤类型的敏感性	全部土壤
	Zhang等 ^[13]	$\lambda = (\lambda_w^n \lambda_s^{1-n} - \chi 10^{-m}) \left[\frac{k S_r}{1 + (k-1) S_r} \right] + \chi 10^{-m}$		拟合热-时域反射, 探测石英含量极高的土壤	对石英砂预测精度非常高	不适用于其他土壤类型	石英砂
	Balland 等 ^[15]	$\lambda = \left[\lambda_w^n \lambda_s^{1-n} - \frac{(A \lambda_s - \lambda_a) \times \rho_d + \lambda_a G_s}{G_s - (1-A) \times \rho_d} \right] \times S_r^{0.5 \times (1 + V_{om,s} - \mu V_{sand,s} - V_{cf,s})} \times \left[\left(\frac{1}{1 + \exp(-\nu S_r)} \right)^3 - \left(\frac{1 - S_r}{2} \right)^3 \right]^{1 - V_{om,s}} + \left[\frac{(A \lambda_s - \lambda_a) \times \rho_d + \lambda_a G_s}{G_s - (1-A) \times \rho_d} \right]$	μ 、 ν 为协调系数; $V_{sand,s}$, $V_{cf,s}$, $V_{om,s}$ 分别为固相砂、粗颗粒、有机质的体积分数; G_s 为有机质对干燥土壤热导率影响的系数; A 为固体对土壤热导率影响的拟合参数	研究有机质对固体颗粒导热性能影响, 提出干土导热性能改进模型	考虑了有机质含量的影响	忽略固相中的石英含量	全部土壤
	Lu等 ^[16]	$\lambda = \left[\lambda_w^n \lambda_s^{1-n} - (b - an) \right] \times \exp \left[\alpha (1 - S_r^{\alpha - 1.33}) \right] + (b - an)$	a 和 b 为与干燥土壤导热系数相关的参数, α 考虑了土壤类型对归一化导热系数的影响, 建议粗、细土分别取0.96和0.27	通过经验数据拟合得到干燥土壤导热系数与孔隙度的线性关系	公式简单	土壤类型对干燥土壤导热系数的影响未知	全部土壤
	Chen ^[17]	$\lambda = \lambda_w^n \lambda_s^{1-n} [(1-c) S_r + c]^{dn}$	c 和 d 为经验系数	根据经验拟合4种石英砂的试验数据而发展起来	石英含量相对较高的砂预测精度高	不适用于其他土壤类型	砂土
	苏李君等 ^[18]	$\lambda = \left[\lambda_w^n \lambda_s^{1-n} - (b - an) \right] \times \exp(H + 1 - S_r H) + b - an$, $H = b_1 w_{clay} + b_2 w_{silt} + b_3 w_{sand} + b_4 w_{om}$	w_{clay} 、 w_{silt} 和 w_{sand} 分别为黏粒、粉粒和砂粒的含量, w_{om} 为有机质含量; b_i 为拟合系数	土壤热导率与土壤物理基本参数间表达式	分别建立模型参数与颗粒组成和有机质含量间的关系	拟合系数难以确定, 公式复杂	全部土壤
其他模型 Other model	Donazzi等 ^[19]	$\lambda = \lambda_w^n \lambda_s^{1-n} \exp \left[-3.08n(1 - S_r)^2 \right]$		基于实验室试验土壤的热阻率推算热导率	公式简单	低饱和度时预测精度低	全部土壤
	Gangadhara 等 ^[20]	$\lambda = 10^{0.01 \gamma a - 1} (\log_w 1.07 + B)$	B 与土壤类型有关(粉砂取0.12, 细砂取0.7, 粗砂取0.73)	提出土壤热导率与含水率和容重的关系	公式简单	高饱和度时预测精度低	全部土壤
	Midttømme 等 ^[21]	$\lambda_s = \log_{dm} 0.215 + 1.930$	d_m 是石英砂的中值粒径	研究粒度对石英砂和粉砂热导率的影响	公式简单	仅考虑石英砂的粒度效应	石英砂

国内外对土壤热导率的研究, 所建立的热导率预测模型大致可划分为理论模型、经验模型和其他模型 3 种类型。理论模型方面, Wiener^[3] 的模型是

基于串联模型和并联模型的经典混合定律(即算术和谐波)开发的, 在理想情况下, 很好地定义了多相土壤系统热导率的上下边界。该模型已被修改或改

进,开发出一系列其他混合模型,例如,基于串联模型和并联模型的组合 Geo-Mean 模型^[5]。对于 De Vries^[4]的模型,由于土壤颗粒形状的随机特性, K_t (土壤中每种成分的平均热梯度与连续介质的平均热梯度之比)的确定有些困难,影响了预测结果的准确性。此外,在模型预测中,确定水或空气是否被假定为连续孔隙流体的极限含水率不容易获得,因为它取决于土壤田间持水量,而土壤田间持水量受到土壤颗粒大小、级配、颗粒形状和矿物组成等几个因素的影响。更重要的是,因为该模型总是低估了干燥条件下的土壤热导率,因此建议对干燥土壤进行修正(修正系数为 1.00~1.25)。Tong 等^[6]的模型的优势在于同时考虑了许多影响因素(例如饱和度和干密度、温度、孔隙结构和水蒸气压力),但是参数 η_1 和 η_2 的标定可能会受到土壤类型的影响,仍需要进一步研究。Haigh^[7]的模型是基于 2D 土壤接触单元,通过引入 2 个参数 ξ 和 β 来考虑水膜的厚度和宽度而开发的,与其他模型相比,该模型已被证明具有较高的预测精度,尤其是对于粗砂土。考虑到邻近土壤颗粒对单元内热传导的影响,通过与 Chen^[17]研究中的试验数据进行比较,得到了修正系数为 1.58 的预测结果。该模型的局限性是由于模型几何形状的缺陷,不适用于孔隙度小于 0.33 的土壤。

在经验模型中, Kersten^[8]没有测量完全饱和条件下的土壤热导率,因此在将试验数据外推至饱和状态后,通过曲线拟合来建立模型。Johansen^[5]使用几何平均法从 Kersten^[8]的研究中估算了土壤样品的热导率,他发现在 Kersten^[8]的研究中,固体颗粒的热导率在砂质土壤中约为 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,在粉质土壤和黏性土壤中约为 $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。因此,该模型可能低估了石英含量相对较高土壤的热导率,或者高估了黏性土壤的热导率,此外,该模型在预测中也没有考虑石英含量的影响。通过分析 De Vries^[4]的模型和 Kersten^[8]研究的试验数据, Johansen^[5]首先提出了一种计算干燥土壤热导率的方法,并提出了“归一化导热系数(κ_r)”的概念。在此基础上,建立了新的经验热导率模型。值得注意的是, κ_r 已被广泛用于开发一系列新的热导率模型,因为可以通过 κ_r-S_r 关系以任意给定的土壤类型研究土壤岩土性质对热导率的影响。例如, Cote 等^[9]分析了土壤热导率测量的大数据集,提出了一种新的 κ_r-S_r 关系,其中参数 k 考虑了几种典型土壤类型(砾石、砂子、黏土和有机土壤)对预测热导率的影响。Zhang 等^[13]基于一系列在 3 种石英砂上进行的实验室热 TDR 探针测试,修改了 Cote 等^[9]的模型,与

Chen^[17]的模型相比,该模型对石英砂的预测精度更高,但 Zhang 等^[13]的模型和 Chen^[17]的模型对其他土壤类型的适用性存在疑问。Balland 等^[15]基于 Johansen^[5]模型研究了有机物对固体颗粒导热性的影响,并提出了一种改进的干燥土壤热导率模型,此外,他还提出了另一种 κ_r-S_r 关系,这种关系导致预测热导率在整个饱和度和土壤粒度范围内的连续变化。与先前的试验研究相比,该模型的优异性能也得到了证实。Lu 等^[16]模型的缺点是在模型开发中砂含量被认为与石英含量相同,这可能导致对固相热导率的高估,另一个缺点是该干燥土壤预测模型是通过简单的线性拟合方法建立的,没有考虑土壤类型的影响。Chen^[17]模型在用于石英含量较高的砂土时,具有较高的预测精度,因为该模型是根据经验拟合 4 种石英砂的试验数据而开发的,另一个特点是模型表达式非常简单。利用土壤物理基本参数拟合土壤热特性参数的简单公式^[42],苏李君等^[18]基于模型参数与颗粒组成、有机质含量关系而提出改进 Cote 等^[9]和 Lu 等^[16]的模型,拟合土壤物理基本参数推求土壤热导率。

在其他模型中, Donazzi 等^[19]的模型与 Chen^[17]的模型具有相同的优点,它只需很少的参数即可应用。当饱和度 $S_r < 0.3$ 时, Gangadhara 等^[20]的模型表现出令人满意的性能,但当 $S_r > 0.3$ 时,由于两者之间的差异随着饱和度的增加而增加,因此预测值低于试验结果。这可能是因为用于模型开发的试验土样的饱和度大多小于 0.3,导致高饱和度土壤的预测精度相对较低。Midttømme 等^[21]研究了粒径对石英砂和粉质砂热导率的影响,但是该模型在大多数情况下不能被广泛使用,因为它只包含 1 个变量,即石英砂中值粒径(d_m),并忽略了许多其他重要的影响因素(例如含水率、饱和度和干密度等)。

3 模型评估与验证

3.1 模型评估

由于砂中石英的热导率极高,所以砂含量对土壤热导率影响很大,本文对砂的热导率模型的性能进行了比较分析。选择 14 个模型预测砂土热导率,并与从文献中收集的实测结果进行比较。此外,还进行了线性回归分析与均方根误差(Root mean square error, RMSE)分析,以便进一步评估模型性能。

需注意, Midttømme 等^[21]的模型未包含在本节中,因为试验砂的 d_m 值在文献中不可用。Balland 等^[15]的模型是在归一化导热系数 κ_r 和 Johansen^[5]的模型基础上发展起来的,它主要考虑有机质含量的影响。然而,文献中的试验砂被合理地假定为不含有

机质,因此该模型预测值与 Johansen^[5]的模型相比没有太大差异。此外,由于文献中缺乏 Balland 等^[15]的模型中 $V_{\text{quartz,s}}$ 、 $V_{\text{sand,s}}$ 和 $V_{\text{cf,s}}$ 的相关信息,无法确定测试砂的热导率,因此 Balland 等^[15]的模型不包括在本节中。

孔隙度为 0.38 各饱和度砂的各模型预测热导率见图 1。在预测模型中,假设固体和水的导热率分别为 7.900 和 $0.590 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[17],空气的导热率假定为 $0.026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[43],砂的模型参数的确定已经在前面介绍过了。应该指出, Kersten^[8]、Johansen^[5]、Gangadhara 等^[20]和 Lu 等^[16]的模型在饱和度为 0 时无法准确预测土壤热导率,不能应用于干燥土壤。

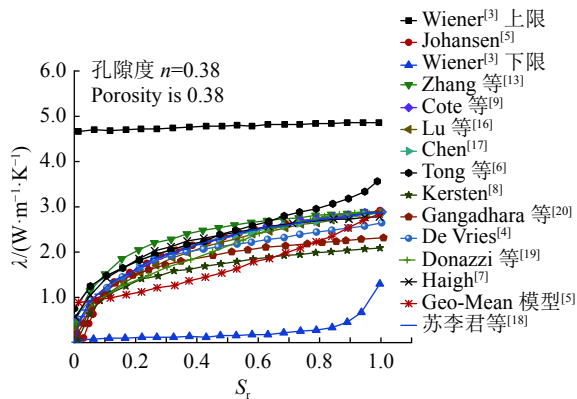


图 1 不同饱和度 (S_f) 下各模型的热导率 (λ) 预测值

Fig. 1 Thermal conductivity (λ) prediction values of different models under different saturation degrees (S_f)

从图 1 可知,与其他模型相比, Wiener^[3]的模型表现出很大的偏差,分别定义了土壤预测热导率的上限和下限。还发现在低饱和度时, Zhang 等^[13]的模型提供了最高的预测值,而 Kersten^[8]的模型给出了最低的预测值。此外,在高饱和度水平下 Tong 等^[6]的模型显示的预测热导率急剧增加。另一个特点是在低饱和度时 Geo-Mean 模型^[5]预测的热导率缓慢增加,而其他模型的预测值则显著增加。

3.2 模型验证

图 2 为热导率预测值和实测值之间的对比图。从文献中收集测量砂的实测热导率,再根据各热导率模型的预测值,总计 1 047 个数据点,对砂的热导率模型进行性能评估验证。

很明显, Wiener^[3]的模型的热导率预测值与实测值明显偏离。此外,其他模型的大多数数据点的预测值小于实测值。为了进一步评估砂土的模型性能,进行了线性回归分析和均方根误差 (RMSE) 分析 (表 2)。RMSE 的表达式为:

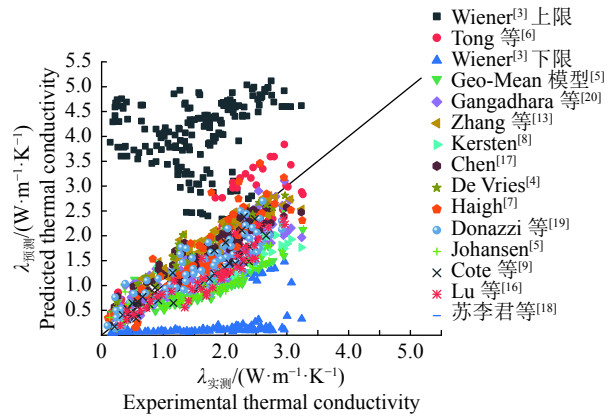


图 2 土壤热导率 (λ) 预测值与实测值比较

Fig. 2 Comparisons between predicted values and measured values of thermal conductivity (λ)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\lambda_{\text{exp}} - \lambda_{\text{model}}}{\lambda_{\text{exp}}} \right)^2}, \quad (1)$$

式中, λ_{exp} 为试验测量的热导率, λ_{model} 为预测热导率, m 为砂土样本的数量。

如表 2 所示,除 Wiener^[3]的模型外,在其余模型中,苏李君等^[18]的模型显示具有最高回归系数 (0.997)、最高决定系数 ($R^2=0.980$)、最低梯度标准误差 (0.009),表现出最优的性能。而 Geo-Mean 模型^[5]显示出最低回归系数 (0.668)、最高 RMSE (0.598),这说明该模型对砂土的热导率预测精度最低。此外,与其他模型相比,苏李君等^[18]的模型显示相对较低的 RMSE (0.208)、在此没有对 Midttømme 等^[21]和 Balland 等^[15]的模型的性能进行线性回归和均方根误差分析。

在所有土壤矿物成分中,石英具有最高的热导率 ($7.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),所以石英含量对砂土热导率具有显著影响,而大多数模型都忽略了石英含量的影响,导致砂的热导率预测值偏低。如图 2 和表 2 所示,在所选模型中,苏李君等^[18]进一步改进了 Cote 等^[9]的模型,在预测石英砂热导率时显示出最高精度。Tong 等^[6]的模型的梯度非常接近最高值,但 RMSE 值比其他大多数模型都大,这是因为其模型参数 η_1 和 η_2 是在 MX80 膨润土上进行实验室试验确定的,可能不适合预测砂土的热导率。Chen^[17]的模型最初是根据对石英砂的热导率测量而设计,并表现出令人满意的预测结果。此外, De Vries^[4]和 Haigh^[7]这 2 个理论模型预测结果在中等范围内, Geo-Mean 模型^[5]是由 Wiener^[3]改进的混合模型,采用几何平均法建立,对于饱和土预测精度较好,而对于石英砂预测精度较低。而 Gangadhara 等^[20]、Donazzi 等^[19]以及 Kersten^[8]的模型由于忽略了石英含量影响,无法准确预测出砂的热导率。

表 2 各模型的线性回归和均方根误差分析

Table 2 Linear regression and root mean square error analyses of each model

序号 No.	模型来源 Model source	回归系数 Regression coefficient	决定系数(R^2) Determination coefficient	梯度标准误差 Standard error of gradient	均方根误差 Root mean square error	数据点数量 Number of data point
1	苏李君等 ^[18]	0.997	0.980	0.009	0.208	28
2	Zhang等 ^[13]	0.994	0.979	0.009	0.280	80
3	Tong等 ^[6]	0.985	0.950	0.015	0.544	54
4	Chen ^[17]	0.919	0.979	0.009	0.315	98
5	Haigh ^[7]	0.891	0.964	0.012	0.394	50
6	Johansen ^[5]	0.877	0.976	0.010	0.212	20
7	Cote等 ^[9]	0.873	0.978	0.009	0.207	31
8	De Vries ^[4]	0.861	0.970	0.010	0.393	28
9	Lu等 ^[16]	0.850	0.976	0.009	0.206	43
10	Gangadhara等 ^[20]	0.813	0.970	0.010	0.245	138
11	Donazzi等 ^[19]	0.807	0.958	0.011	0.547	94
12	Kersten ^[8]	0.720	0.972	0.009	0.273	39
13	Geo-Mean模型 ^[5]	0.668	0.909	0.014	0.598	76
14	Wiener ^[3] 上限	0.133	0.393	0.011	0.891	184
15	Wiener ^[3] 下限	2.208	0.820	0.069	5.579	84

土壤热导率是 TEMPOS 热特性分析仪、监测容重的 Thermo-TDR 技术、土壤-水-溶质耦合数值模型设计的关键参数,可用于监测土壤含水率、热扩散速率和热损失。因此,研究热导率模型的预测精度对土壤物理参数研究具有重要意义。虽然 Zhang 等^[13]和苏李君等^[18]的模型对砂的热导率都具有较好的预测精度,模型的线性回归分析、均方根误差分析结果也相差无几,但 Zhang 等^[13]的模型只适用于石英砂,无法准确预测其他土壤类型的热导率。苏李君等^[18]的模型考虑了土壤各颗粒成分对模型参数的影响,可根据不同地区、不同土壤质地改进拟合参数以提高预测模型精度。基于以上分析,推荐使用苏李君等^[18]的模型来预测土壤热导率。

4 结论

土壤热导率是土壤热状况的重要参数之一,且研究土壤热导率有助于补充和完善土壤物理学性质。本文对国内外学者提出的土壤热导率预测模型进行总结评估,比较分析一系列土壤热导率的影响因素,为准确预测土壤热导率提出了新的方向。结论如下:

1) 比较分析了土壤组成因素、环境因素、其他因素对土壤热导率的影响差异,得出含水率和石英含量对土壤热导率影响最为显著。

2) 从优势、劣势、适用性 3 个方面对 16 种土

壤预测热导率模型进行评价。为实现砂土热导率预测模型的性能对比,选择 1 047 个数据点的热导率预测值与实测值进行线性回归分析和均方根误差分析,发现 Wiener^[3]的模型和 Geo-Mean 模型^[5]有显著偏差,Zhang 等^[13]、Chen^[17]和 Haigh^[7]的模型在所选模型中表现出相对较高的预测精度。

3) 考虑到土壤物理基本参数对热导率的影响,经过性能比较,采用苏李君等^[18]对 Lu 等^[16]的改进模型预测土壤热导率具有较高精度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 160-192.
- [3] WIENER O. Abhandl math-phys Kl KoniglSachsischen-Ges[M]. Leipzig: Klasse. Sachs Akad. Wiss, 1912: 509.
- [4] DE VRIES D A. Physics of the plant environment[M]. New York: John Wiley & Sons, 1963: 210-235.
- [5] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim, Norway: University of Trondheim, 1975.
- [6] TONG F G, JING L R, ZIMMERMAN R W. An effective thermal conductivity model of geological porous medium for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase flow[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46(8): 1358-1369.
- [7] HAIGH S K. Thermal conductivity of sands[J]. *Geotech-*

- nique, 2012, 62(7): 617-625.
- [8] KERSTEN M S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils[D]. Minneapolis: Minnesota University, 1949.
- [9] COTE J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Can Geotech J*, 2005, 42(2): 443-458.
- [10] ZHANG N. Development and validation of TDR based sensors for thermal conductivity and soil suction measurements[D]. Arlington: University of Texas at Arlington, 2015.
- [11] ZHANG N, YU X B, PRADHAN A, et al. Effects of particle size and fines content on thermal conductivity of quartz sands[J]. *Transp Res Rec*, 2015, 2510(1): 36-43.
- [12] ZHANG N, YU X B, PRADHAN A, et al. Thermal conductivity of quartz sands by thermo-TDR probe and model prediction[J]. *ASCE J Mater Civ Eng*, 2015, 27(12): 50-59.
- [13] ZHANG N, YU X B, PRADHAN A, et al. A new generalized soil thermal conductivity model for sand-kaolin clay mixtures using thermo-time domain reflectometry probe test[J]. *Acta Geotech*, 2017(12): 739-752.
- [14] ZHANG N, YU X B, WANG X L. Use of a thermo-TDR probe to measure sand thermal conductivity dryout curves(TCDCs) and model prediction[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 115: 1054-1064.
- [15] BALLAND V, ARP P A. Modeling soil thermal conductivities over a wide range of conditions[J]. *J Environ Eng Sci*, 2005, 4(6): 549-558.
- [16] LU S, REN T S, GONG Y S, 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.
- [17] CHEN S X. Thermal conductivity of sands[J]. *Heat Mass Transfer*, 2008, 44(10): 1241-1246.
- [18] 苏李君, 王全九, 王铄, 等. 基于土壤物理基本参数的土壤导热率模型[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 127-133.
- [19] DONAZZI F, OCCHINI E, SEPPI A. Soil thermal and hydrological characteristics in designing underground cables[J]. *Proc Inst Electr Eng*, 1979, 126(6): 506-516.
- [20] GANGADHARA RAO M V B B, SINGH D N. A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils[J]. *Can Geotech J*, 1999, 36(4): 767-773.
- [21] MIDTTØMME K, ROALDSET E. The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts[J]. *Petroleum Geosci*, 1998, 4(2): 165-172.
- [22] 卢奕丽, 张猛, 刘晓娜, 等. 含水量和容重对旱地耕层土壤导热率的影响及预测[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 146-151.
- [23] 曾召田, 范理云, 莫红艳, 等. 土壤导热率的影响因素实验研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(2): 377-384.
- [24] NASIRIAN A, CORTES D D, DAI S. The physical nature of thermal conduction in dry granular media[J]. *Geotech Lett*, 2015, 5(1): 1-5.
- [25] FAROUKI O T. Thermal properties of soils[M]. Hanover(N. H.): US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981: 81.
- [26] YU X B, ZHANG N, PRADHAN A, et al. Thermal conductivity of sand-Kaolin clay mixtures[J]. *Environ Geotech*, 2016, 3(4): 190-202.
- [27] OVERDUIN P P, KANE D L, VAN LOON W K P. Measuring thermal conductivity infreezing and thawing soil using the soil temperature response to heating[J]. *Cold Reg Sci Technol*, 2006, 45(1): 8-22.
- [28] SMITS K M, SAKAKI T, HOWINGTON S E, et al. Temperature dependence of thermal properties of sands across a wide range of temperatures (30-70 °C)[J]. *Vadose Zone J*, 2013, 12(1): 1-8.
- [29] 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.
- [30] LIU C H, ZHOU D, WU H. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. *Chin J Geotech Eng*, 2011, 33(12): 1877-1886.
- [31] SMITS K M, SAKAKI T, LIMSUWAT A, et al. Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles[J]. *Vadose Zone J*, 2010, 9(1): 172-180.
- [32] XU Y S, SUN D A, ZENG Z T, et al. Effect of temperature on thermal conductivity of lateritic clays over a wide temperature range[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2019, 138: 562-570.
- [33] ZHAO X D, ZHOU G Q, JIANG X. Measurement of thermal conductivity for frozen soil at temperatures close to 0 °C[J]. *Measurement*, 2019, 69(3): 504-510.
- [34] 陆森, 任图生. 不同温度下的土壤导热率模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 13-18.
- [35] 王志华, 王甜, 王泮浩. 非饱和土壤导热率模型的优化与应用[J]. *制冷学报*, 2017, 38(3): 89-95.
- [36] ZHANG Y J, YU Z W, HUANG R, et al. Measurement of thermal conductivity and temperature effect of geotechnical materials[J]. *Chin J Geotech Eng*, 2009, 31(2): 213-217.
- [37] 徐云山, 曾召田, 吕海波, 等. 高温下红黏土导热率的变化规律试验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1465-1473.
- [38] 张恩继, 王霖. 土壤水分运移模拟研究进展[J]. *南方农业学报*, 2019, 13(20): 188-190.
- [39] LI R, ZHAO L, WU T H, et al. Soil thermal conductivity and its influencing factors at the Tanggula permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Agric For Meteorol*, 2019, 264: 235-246.
- [40] RUBIO C M, JOSA R, FERRER F. Influence of the hysteretic behaviour on silt loam soil thermal properties[J]. *Open J Soil Sci*, 2011, 1(3): 77-85.
- [41] 于明志, 曹西忠, 王善明, 等. 水分含量对土壤导热系数的影响及机理[J]. *山东建筑大学学报*, 2012, 27(2): 152-154.
- [42] 王卫华, 李建波, 王铄, 等. 土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 120-125.
- [43] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 2005: 83-108.