引用格式：刘风云，罗怀瑞，万旭升，等．土壤导热系数预测模型评估及参数分析[J]．工业建筑，2026，56(3)：223-234．LIU Fengyun，LUO Huairui，WAN Xusheng，et al. Evaluation of Thermal Conductivity Coefficient Prediction Models of Soil and Their Parameter Analysis[J]. Industrial Construction，2026，56(3)：223-234 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG23072412

土壤导热系数预测模型评估及参数分析*

刘凤云[1]　罗怀瑞[1]　万旭升[1]　谢　飞[1]　蒋　杰[1]　骆吉庆[2]

（1. 西南石油大学土木工程与测绘学院，成都　610500；2. 中国石油川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院，四川广汉　618300）

摘　要　土壤导热系数是土壤传热分析的重要热物理参数，广泛应用于涉及热效应的领域。由于试验测量土壤导热系数面临诸多困难，准确预测土壤导热系数至关重要。为此，使用土壤导热系数试验数据，评估了4种经典土壤导热系数预测模型的预测精度，分析了模型参数对导热系数预测值以及孔隙率对模型参数取值的影响。为提高预测的准确性，基于评估结果，使用表现最优的模型对不同土质的土壤导热系数进行了预测；为提高模型的适用性，建立了模型参数计算模型。结果表明：1)在不同的土壤中，Bi-Zhang-Chen模型的整体计算精度最高，其次为Côté-Konrad模型、Lu-Ren-Gong模型、Chen模型。其中，Bi-Zhang-Chen模型对砂土、黄土、粉土以及粉质黏土的计算误差较小，Côté-Konrad模型对石英砂土的计算结果更准确。2)针对同一地区的土壤，土壤孔隙率对模型参数的取值有较大的影响，尤其在黄土中表现出较强的规律性。3)根据土壤类型选择不同的预测模型能够更好地预测不同土质的土壤导热系数，且基于模型评估和参数分析建立的参数计算模型能够很好地预测砂土、黄土、粉土以及粉质黏土的导热系数。

关键词　土壤导热系数；模型评估；参数分析；孔隙率；参数取值

Evaluation of Thermal Conductivity Coefficient Prediction Models of Soil and Their Parameter Analysis

LIU Fengyun[1]　LUO Huairui[1]　WAN Xusheng[1]　XIE Fei[1]　JIANG Jie[1]　LUO Jiqing[2]

(1. *School of Civil Engineering and Geomatics*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu* 610500, *China*; 2. *Safety and Environmental Protection Quality Supervision and Testing Institute of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited*, *Guanghan* 618300, *China*)

Abstract: Soil thermal conductivity is an important thermophysical parameter for soil heat transfer analysis, widely used in fields involving thermal effects. Accurate prediction of soil thermal conductivity is crucial due to numerous challenges in measuring soil thermal conductivity. In terms of that, this study utilized experimental data on soil thermal conductivity to evaluate the prediction accuracy of four classical models, then examined the impact of model parameters on the predicted values of thermal conductivity, and porosity on the value selecting of model parameters. To enhance the prediction accuracy, this research used the best-performing model to predict the soil thermal conductivity with different soil textures based on the evaluation results. A parameter calculation model was also developed to improve the model's applicability. The results indicated that: 1) the Bi-Zhang-Chen model exhibited the highest overall calculation accuracy among different soils, followed by the Côté-Konrad model, the Lu-Ren-Gong model, and the Chen model. More specifically, the Bi-Zhang-Chen model showed small

* 国家自然科学基金项目(42271146，42071087)；西南石油大学起航计划(2021QHZ003)。

第一作者：刘风云，博士，讲师，硕士生导师，主要从事寒区岩土工程研究，liufengyun0634@163.com。

通信作者：万旭升，博士，教授，硕士生导师，主要从事盐胀机理及寒区工程研究，xinyanwanxxusheng@163.com。

收稿日期：2023-07-24

© 2026 工业建筑

calculation errors for sandy soil, loess, silty soil, and clay, while the Côté-Konrad model yielded more accurate results for quartz sand soil. 2) Soil porosity had a significant impact on model parameter values in the same region, particularly showing strong regularity in loess. 3) Selecting different prediction models based on soil types can better predict the thermal conductivity of soils with different textures. The parameter calculation model established through model evaluation and parameter analysis can effectively predict the thermal conductivity of sandy soil, loess, silty soil, and clay. This study provides theoretical references for the improvement and establishment of soil thermal conductivity models.

Keywords: thermal conductivity coefficient of soil; model evaluation; parameter analysis; porosity; parameter value

0 引 言

导热系数被定义为在单位时间内单位面积材料以单位温度梯度流过的热量，是描述材料传热能力的重要参数之一[1-3]。土壤导热系数广泛应用于地面热能储存[4]、路基热稳定性[5]、油气管道[6]和寒区工程[7]等领域。如土壤导热系数控制着土壤中的物理、化学、生物和机械特性，从而影响土壤的冻融过程和地表温度分布。此外，土壤导热系数也是处理核废料、利用地热能和模拟工程结构温度场等方面的重要热物理参数。

目前测定土壤导热系数的方法主要分为瞬态法和稳态法两种[7]。瞬态法在测试过程中受到相变和水分迁移的影响较小，测试结果更加准确[8]。然而影响土壤导热系数的因素众多（如含水率、孔隙率和温度等），须同时结合土壤类型、饱和度、孔隙率等因素对所有样品进行测试，耗时且成本高，从而导致大规模应用存在困难。

为解决试验获取土壤导热系数所面临的诸多问题，许多学者对土壤导热系数预测模型进行了研究[9-16]。目前，土壤导热系数预测模型可分为三类：理论模型、数学模型和经验模型[17]。其中，理论模型将土壤组分假设为立方体或微元体，通过串联、并联及其他特定组合连接块体，计算土壤导热系数。虽然理论模型对于研究土壤热传导机理具有重要作用，但理论模型精度较差且需要土壤组分的物理性质和体积分数的详细数据[9]。数学模型利用土壤的其他物理性质来预测土壤导热系数，例如介电常数、电导率和渗透系数等，这类模型也需要土壤组分的体积分数和物理性质的具体信息[10]。经验模型建立在试验数据和相对容易测量的土壤物理性质（如含水量、孔隙率等）的基础上，用于预测土壤导热系数与饱和度或含水量之间的关系。尽管这类经验模型没有明确的物理意义，但形式简单、精度高，已广泛应用于多个领域，如Johansen模型[11]和其改进模型[12-16]。

大部分土壤导热系数预测模型是基于少量的土壤样本建立与验证的，因此需进一步全面验证这些模型在其他土壤中的适用性。许多学者对土壤导热系数预测模型进行了评估、比较和分析。Dong等[17]总结并评估了三种类型的土壤导热系数预测模型，发现这些模型无法解释土壤孔隙结构和界面特征对导热系数的影响。Wang等[18]使用饱和土壤的导热系数评估了52个模型的预测能力，发现许多经验模型是在较少的土壤样品上建立的，因此预测能力较差，无法很好地应用于其他类型土壤。Zhang等[19]基于孔隙率和饱和度对理论模型和经验模型进行了评估和比较，发现经验模型的预测精度高，但经验参数没有明确的物理意义；理论模型有明确的物理意义，但精度较低。He等[20-23]使用收集的土壤导热系数数据库研究了土壤固体成分、干燥土、冻土的导热系数预测模型和归一化导热系数预测模型，并提供了土壤导热系数预测模型的建立和选择的参考及建议。

综上所述，经验模型因形式简单和精度高而被广泛应用。然而，大部分经验模型的经验参数取值是由土壤类型决定的固定参数，但土壤导热系数受到诸多因素影响，因此仅凭土壤类型确定模型经验参数的取值是不符合实际情况的。此外，大多数经验模型是以饱和度为控制变量，少有研究对模型在不同饱和度区间的预测精度进行评估和比较。因此，将利用试验数据对4种经典的土壤导热系数预测模型进行评估和比较，以给出各模型的适用范围，并分析模型参数对导热系数预测值的影响以及孔隙率对模型参数取值的影响，旨在为土壤导热系

数预测模型的建立和选择提供参考。

1　土壤导热系数预测模型

为更详细地探讨导热系数预测模型的适用性，本研究选择了能够良好预测不同土壤导热系数的模型，包括 Côté-Konrad 模型[12]和 Lu-Ren-Gong 模型[13]及在粗粒土、细粒土的导热系数预测中具有代表性的 Bi-Zhang-Chen 模型[14]和 Chen 模型[15]，并进行导热系数预测模型的评估和参数分析。

1.1　Côté-Konrad 模型[12]

Côté-Konrad 模型[12]是 Johansen 模型[11]的改进模型，其引入了土质相关因子(κ)，建立了不同土质的归一化导热系数与饱和度之间的关系，见式(1)。

$$\lambda = K_e\left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right) + \lambda_{dry} \tag{1}$$

其中　$K_e = \dfrac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r}$

式中：λ 为土壤导热系数；K_e 为归一化导热系数；λ_{sat} 为饱和土导热系数；λ_{dry} 为干土导热系数；S_r 为土壤饱和度；κ 为与土质相关的经验参数，对于砾石和粗砂、中细砂、粉质黏土以及有机土，κ 的取值分别为 4.60，3.55，1.90 和 0.60[12]。

采用几何平均法计算 λ_{sat}，详见式(2)。

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n}\lambda_w^n \tag{2}$$

式中：λ_s 为土壤固体成分导热系数；n 为孔隙率；λ_w 为水的导热系数。

Côté 和 Konrad 建立了一个 λ_{dry} 与孔隙率的经验算式[12]，详见式(3)。

$$\lambda_{dry} = \chi 10^{-\eta n} \tag{3}$$

式中：χ 和 η 分别为与土质和土颗粒形状相关的经验参数，对于碎石，$\chi = 1.7$ W/(m·K)，$\eta = 1.8$；对于矿物含量土壤，$\chi = 0.75$ W/(m·K)，$\eta = 1.2$；对于有机纤维土壤，$\chi = 0.30$ W/(m·K)，$\eta = 0.87$[12]。

Côté 和 Konrad 对 λ_s 的计算式进行改进[12]，根据土壤矿物的导热系数和体积比例，使用几何平均法[式(4)]计算 λ_s，因此需要土壤具体的矿物组成。

$$\lambda_s = \prod_j \lambda_{m_j}^{x_j} \tag{4a}$$

$$\sum_j x_j = 1 \tag{4b}$$

式中：λ_{mj} 为矿物成分 j 导热系数；x_j 为矿物成分 j 的体积百分比。

1.2　Lu-Ren-Gong 模型[13]

Lu 等对 Côté-Konrad 模型进行验证，发现该模型在低饱和度范围表现并不理想，因此提出一个新的 K_e 计算模型，详见式(5)[13]。

$$K_e = \exp\left[\gamma\left(1 - S_r^{\gamma - 1.33}\right)\right] \tag{5}$$

式中：γ 为与土质相关的参数，Lu 等建议粗粒土和细粒土的 γ 值分别取 0.96 和 0.27[13]。

Lu 等还提出一个新的计算 λ_{dry} 的算式[13]，详见式(6)。

$$\lambda_{dry} = -0.56n + 0.51 \tag{6}$$

λ_{sat} 也采用式(2)进行计算。

1.3　Bi-Zhang-Chen 模型[14]

Bi 等基于水土特征曲线改进了 Johansen 模型[11]，提出一个三参数模型[14]来计算细粒土全饱和度范围内的导热系数，详见式(8)。

$$K_e = \begin{cases} 0 & S_r = 0 \\ \dfrac{1}{\left\{\ln\left[e + \left(\dfrac{a}{S_r}\right)^c\right]\right\}^b} & S_r > 0 \end{cases} \tag{7}$$

其中　$b = 3.06a^{-0.40} - 2.59$

$c = 7.71a^{2.58} + 1.83$

式中：e 为欧拉数(取值 2.71828)；a、b 和 c 是经验参数，a 由一个导热系数测试点决定。

λ_{sat} 也采用式(2)进行计算。λ_s 的计算采用两种方法，对于已知矿物成分的土壤，使用式(4)计算，否则采用式(8)计算：

$$\lambda_s = \begin{cases} 2.0^{1-q} \times 7.7^q & q > 0.2 \\ 3.0^{1-q} \times 7.7^q & q \leqslant 0.2 \end{cases} \tag{8}$$

式中：q 为土壤石英含量。

λ_{dry} 的计算则使用 He 等[16]研究中提出的模型，详见式(9)。

$$\lambda_{dry} = -0.58n + 0.50 \tag{9}$$

1.4　Chen 模型[15]

Chen 测量了四种砂的导热系数，研究了孔隙度和饱和度对导热系数的影响，并定量分析了导热系数随孔隙度和饱和度的变化，提出了考虑孔隙度和饱和度影响的模型[15]来预测土壤导热系数，见式(10)。

$$\lambda = \lambda_s^{1-n}\lambda_w^n\left[(1 - \alpha)S_r + \alpha\right]^{\beta n} \tag{10}$$

式中：α 和 β 为经验系数，对于砂土，α 和 β 的值分别为 0.0022 和 0.78[15]。

2　数据来源和分析方法

2.1　数据来源

为进行科学评估，文献数据须满足以下要

求：1）所有数据均回避了四种模型的原始样本数据；2）每组数据须包含至少四种含水量或饱和度下的导热系数试验值；3）提供土壤类型、饱和度或含水量、孔隙率和λ_s的详细信息，其中缺少λ_s详细信息的土壤须有饱和土导热系数测量值。本研究所使用土壤详细信息见表1，共计457个数据点，其中306个数据点用于评估，151个数据点用于验证。

表1 土壤基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soils

编号	类型	饱和度	孔隙率	λ_s/(W·m^{-1}·K^{-1})	数据点数	文献来源	用途
S1-1~S1-5	砂土	0~1	0.415~0.491	1.56	30	[24]	评估
S2-1~S2-6	砂土	0~1	0.400~0.510	4.48~5.96	36	[25]	评估
S3-1~S3-6	石英砂土	0~1	0.320~0.400	7.70~6.88	48	[26]	评估
L1-1~L1-5	黄土	0.239~1	0.389~0.537	3.947	20	[27]	评估
L2-1~L2-5	黄土	0.205~0.779	0.386~0.443	2.71~3.60	24	[28]	评估
F1-1~F1-5	粉土	0~1	0.370~0.444	1.20	30	[24]	评估
F2-1~F2-6	粉土	0.310~1	0.385~0.431	4.37~4.53	48	[29]	评估
FN1-1~FN1-5	粉质黏土	0~1	0.375~0.449	1.68	30	[24]	评估
FN2-1~FN2-5	粉质黏土	0~1	0.510~0.530	1.358	40	[25]	评估
S4-1~S4-4	砂土	0~0.983	0.352~0.449	4.98	20	[30]	验证
S5-1~S5-3	石英砂土	0~1	0.390~0.430	7.7	35	[31]	验证
L3-1~L3-4	黄土	0.171~0.605	0.446~0.487	2.71	16	[28]	验证
F3-1~F3-5	粉土	0.074~0.713	0.442~0.591	5.66	40	[32]	验证
FN3-1~FN3-5	粉质黏土	0.08~1	0.489~0.635	1.36	40	[33]	验证

对表1数据的处理细节如下：

1）对于表1中未明确列出孔隙率和饱和度的数据，分别通过式（11）和（12）计算。

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w} \tag{11}$$

式中：ρ_d为土壤干密度，g/cm^3；G_s为土壤重度，g/cm^3；ρ_w为水的密度，g/cm^3，取1 g/cm^3。

$$S_r = \frac{w\rho_d}{100\% n \rho_w} \tag{12}$$

式中：w为土壤含水量，%。

2）土壤饱和度略大于1，认为该土壤为饱和状态（S_r=1）。

2.2 土壤的固体成分导热系数值

研究中，水和空气的导热系数分别取0.60，0.024 W/(m·K)[12]。Côté和Konrad在研究中提出一种根据几何平均法反演的λ_s计算方法[34]，见式（13）。

$$\lambda_s = \left(\lambda_{sat}/\lambda_w^n\right)^{\frac{1}{1-n}} \tag{13}$$

对于已知λ_s的土壤采用已知的数据，否则采用式（13）的计算结果。计算结果如表1所示。

2.3 评估指标

通过绘制试验值与模型预测值的比较图（图1），以及两个评估指标：平均绝对百分比误差（*MAPE*）和均差（*AD*），对导热系数模型进行性能评估，详见式（14）、（15）：

$$MAPE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left|(\lambda_{pred} - \lambda_{exp})/\lambda_{exp}\right| \tag{14}$$

式中：*MAPE*的值越接近于0，表明模型的精度越高；λ_{pred}为导热系数模型预测值；λ_{exp}为土壤导热系数试验值；m为土壤导热系数试验值的数量。

$$AD = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\lambda_{pred} - \lambda_{exp}) \tag{15}$$

式中：*AD*>0，表示模型预测值高估了土壤导热系数试验值；*AD*=0，表示模型预测值等于土壤导热系数试验值；*AD*<0，表示模型预测值低估了土壤导热系数试验值。

2.4 模型拟合值和计算值说明

本研究评估了模型的预测精度（拟合精度和计算精度）并使用拟合参数进行了参数分析，以下是模型拟合和计算的详细过程。

2.4.1 模型拟合值

首先，根据表1中土壤的基本物理性质分别计算出Côté-Konrad模型[12]、Lu-Ren-Gong模型[13]和Bi-Zhang-Chen模型[14]中的λ_{sat}和λ_{dry}及Chen模型[15]的$\lambda_s^{1-n}\lambda_w^n$；然后，通过MATLAB分别采用Côté-Konrad模型[12]、Lu-Ren-Gong模型[13]、Chen模型[15]和Bi-

Zhang-Chen 模型[14]对 43 组土壤导热系数（详见表 1）进行曲线拟合，得到 43 组模型的拟合参数；最后，使用各模型的拟合参数计算模型拟合值，并进行模型参数分析。

2.4.2　模型计算值

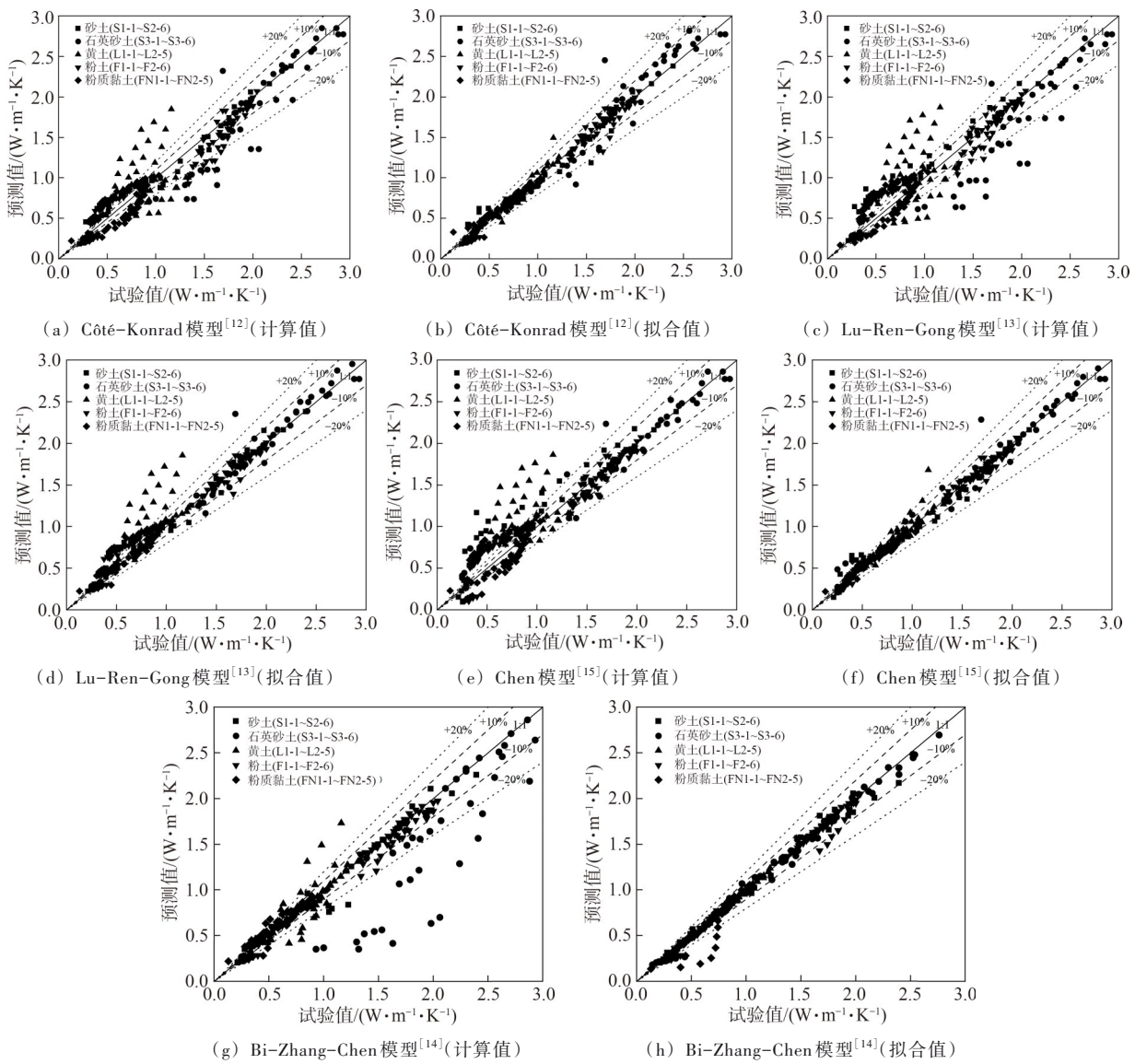
模型计算值均采用第 1 节中不同模型的计算式，将表 1 中土壤的基本物理性质和模型参数建议值代入式中，得到同饱和度下不同土壤的导热系数计算值。值得注意的是，Bi-Zhang-Chen 模型[14]的参数 a、b 和 c 通过代入一个试验值计算得到：将导热系数试验值（该试验值不参与模型评估）代入式（1）中，得到对应的 K_e，将导热系数试验值对应的 S_r 和 K_e 代入式（7），将式（7）中的参数 b 和 c 由参数 a 表达，随后通过求解方程计算得出参数 a 的具体取值，再通过参数 a 计算参数 b 和 c 的取值。

3　结果和分析

3.1　模型评估及适用范围

3.1.1　模型评估

为对比 4 种模型对不同类型土壤的拟合精度和计算精度，绘制了 5 种土壤类型的导热系数试验值和 4 种经验模型计算值与拟合值的比较图（图 1）。表 2 和表 3 分别列出了相应的 *MAPE* 和 *AD*。



（a）Côté-Konrad 模型[12]（计算值）　（b）Côté-Konrad 模型[12]（拟合值）　（c）Lu-Ren-Gong 模型[13]（计算值）

（d）Lu-Ren-Gong 模型[13]（拟合值）　（e）Chen 模型[15]（计算值）　（f）Chen 模型[15]（拟合值）

（g）Bi-Zhang-Chen 模型[14]（计算值）　（h）Bi-Zhang-Chen 模型[14]（拟合值）

图 1　模型导热系数预测值与试验值的比较

Fig. 1　Comparisons between predicted values of the models and experimental values of soil thermal conductivity

从图1、表2、表3可知：Côté-Konrad模型[12]对石英砂土的计算精度最高，其次是Chen模型[15]。虽然Côté-Konrad模型[12]的部分计算值相对于Chen模型[15]更偏离±20%的误差线，但Côté-Konrad模型[12]计算值的*MAPE*相对于Chen模型[15]更小（表2），因此其精度更高。Bi-Zhang-Chen模型[14]计算的砂土、黄土、粉土以及粉质黏土导热系数大部分都集中在±20%的误差线内，计算精度相较于其他模型更高（表2），但Bi-Zhang-Chen模型[14]对石英砂土导热系数的计算效果不理想，这与Bi等研究结果[14]一致。

从图1、表2和表3可知：四种模型的拟合值相较于计算值更集中于±20%的误差线内，使用拟合参数可显著提高模型性能，其中，Chen模型[15]的精度提高最为明显（计算值的*MAPE*=0.274、*AD*=0.083，最优拟合值的*MAPE*=0.073、*AD*=0.006），Côté-Konrad模型[12]、Lu-Ren-Gong模型[13]和Bi-Zhang-Chen模型[14]精度提高不及Chen模型[15]显著。Chen模型[15]使用拟合值后对粉土和粉质黏土的精度显著提高，在四种模型中表现最为理想；Bi-Zhang-Chen模型[14]使用拟合值后，对石英砂土的拟合精度显著提高，明显优于其他三种模型，并且对砂土和黄土的拟合精度也优于其他三种模型。

表2　四种模型导热系数的计算值和拟合值的平均绝对百分比误差*MAPE*

Table 2　*MAPE* values of fitting and calculated values of soil thermal conductivity of the four models

土壤类型	Côté-Konrad模型		Lu-Ren-Gong模型		Chen模型		Bi-Zhang-Chen模型	
	计算值	拟合值	计算值	拟合值	计算值	拟合值	计算值	拟合值
砂土	0.176	0.102	0.28	0.130	0.365	0.101	0.082	0.055
石英砂土	0.123	0.083	0.175	0.054	0.157	0.078	0.227	0.050
黄土	0.357	0.058	0.416	0.274	0.371	0.066	0.139	0.012
粉土	0.170	0.056	0.153	0.115	0.180	0.038	0.066	0.042
粉质黏土	0.237	0.103	0.224	0.152	0.296	0.076	0.110	0.087
平均值	0.213	0.080	0.250	0.145	0.274	0.072	0.125	0.049

表3　四种模型计算值和拟合值的均差*AD*

Table 3　*AD* values of fitting and calculated values for four models

土壤类型	Côté-Konrad模型		Lu-Ren-Gong模型		Chen模型		Bi-Zhang-Chen模型	
	计算值	拟合值	计算值	拟合值	计算值	拟合值	计算值	拟合值
砂土	0.029	−0.017	0.139	0.047	0.146	−0.011	−0.028	−0.013
石英砂土	−0.138	0.035	−0.25	0.026	0.012	0.018	−0.377	−0.015
黄土	0.074	−0.002	0.152	0.207	0.239	0.035	0.014	−0.006
粉土	−0.074	−0.012	0.008	0.036	0.016	−0.009	−0.027	−0.024
粉质黏土	−0.028	−0.013	0.012	0.043	0.001	−0.002	0.018	−0.042
平均值	−0.027	−0.002	0.012	0.072	0.083	0.006	−0.080	−0.020

3.1.2　模型适用范围

以往模型评估研究仅比较总精度，缺少对模型在不同饱和度范围内的应用效果评估。因此，本研究比较了模型在不同饱和度区间的计算精度。饱和度区间根据土壤导热系数随饱和度变化的3个区域划分。Lu等[13]指出细粒土的导热系数可根据每个区域的斜率分为3个区域。Bi等[14]也提出了将细粒土导热系数曲线划分为3个区域，其中导热系数在区域1、3随饱和度增加基本不变，而在区域2内随饱和度的增加发生明显变化（图2）。

然而，这些区域的分界点并非固定，其会随着土质的变化而变动[17]。为具体分析四种模型在不同饱和度范围内的精度，按照文献[13-14]的区域划分方法对所用数据进行划分（研究中的砂土、石英砂土、黄土、粉土以及粉质黏土的区域2的饱和度分别为0.3~0.5、0.05~0.2、0.35~0.7、0.4~0.7、0.4~0.8）。对四种模型在5类土的不同饱和度区域内的表现进行评估，并绘制了*MAPE*柱状图（图3），以讨论不同模型的适用范围。

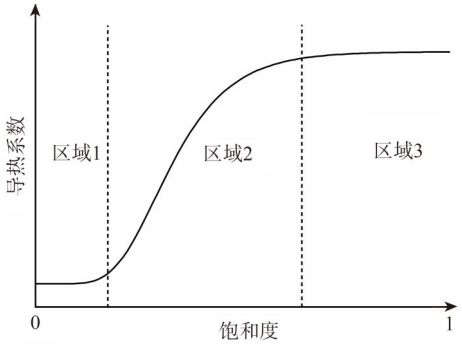


图2　土壤导热系数随饱和度变化的3个区域

Fig. 2　Three regions of thermal conductivity coefficients of soil varying with saturation

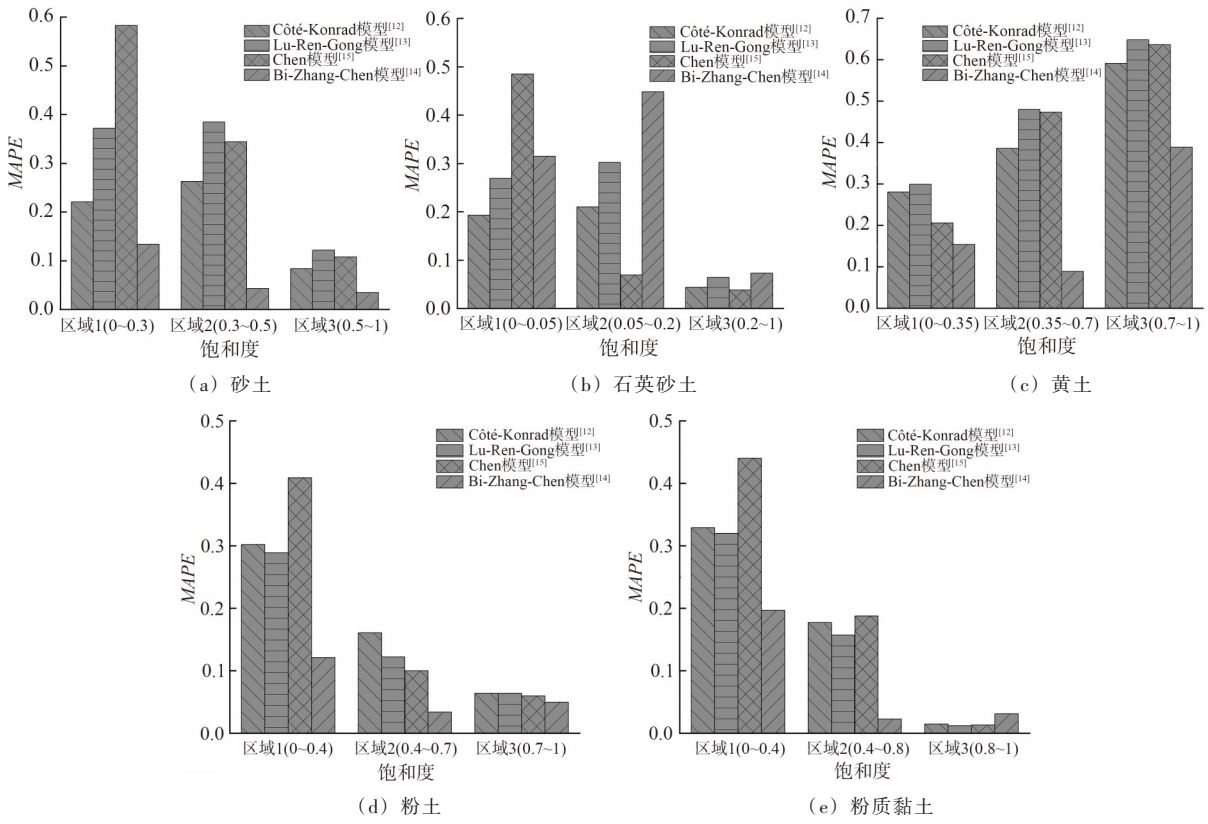


图 3　四种模型的 3 个区域精度对比

Fig. 3　Comparisons of region accuracy among four models

由图 3(a)、(c)和(d)可看出：对于砂土、黄土和粉土，Bi-Zhang-Chen 模型[14]的总计算精度最高，且在 3 个区域内表现均最佳。从图 3(b)可知：对于石英砂土，Chen 模型[15]在区域 2、3 的误差明显低于其他三种模型，但 Chen 模型[15]计算区域 1(饱和度为 0~0.05)内计算石英砂土导热系数的结果并不理想(MAPE=0.485)，Côté-Konrad 模型[12]在区域 1 内的计算误差最小。从图 3(e)可知：对于粉质黏土，Bi-Zhang-Chen 模型[14]在区域 1、2 内的计算精度较高，Lu-Ren-Gong 模型[13]在区域 1 内的计算精度较高。因此，建议选用 Côté-Konrad 模型[12]计算区域 1 范围内的石英砂土导热系数，选用 Chen 模型[15]计算区域 2、3 范围内的石英砂土导热系数。尽管 Bi-Zhang-Chen 模型计算区域 3 内的粉质黏土导热系数误差不是最小的，但计算误差仍较小(*MAPE*=0.031)，所以对于砂土、黄土、粉土和粉质黏土，建议每个饱和度区域内都选用 Bi-Zhang-Chen 模型[14]计算导热系数。

3.2　模型参数分析

3.2.1　模型参数对导热系数预测值的影响

针对不同类型的土壤，其导热系数预测模型的经验参数采用不同取值，并且粗粒土和细粒土的导热系数有一定差异，因此选取粗粒土(S3-1)和细粒土(F1-1)的拟合数据，研究模型参数对导热系数曲线的影响。以 S3-1 和 F1-1 的拟合数据为基础，改变模型参数的取值，分析模型参数对导热系数预测值的影响。

从图 4(a)、(b)可知：在 Côté-Konrad 模型[12]中，随着参数 κ 的减少，导热系数曲线由上凸变为下凹。在 Lu-Ren-Gong 模型[13]中，如图 4(c)所示，参数 γ 的值较大时，曲线的上凸部分随着参数 γ 的增大而上移；而在参数 γ 的值较小时，如图 4(d)所示，当 $\gamma<0.552$ 时，导热系数曲线的上凸部分随着参数 γ 的减小而上移，当 $\gamma>0.552$ 时，导热系数曲线的上凸部分随着参数 γ 的增大而上移。从图 4(e)、(f)中可看出：Chen 模型[15]的导热系数曲线通常呈上凸形状，整体上移与参数 α 的增大有关，而上凸部分下移与参数 β 的增大有关。从图 4(g)、(h)可看出：在 Bi-Zhang-Chen 模型[14]中，导热系数曲线上凸部分随参数 a 的增大而上移，整体上移与参数 b 的增大有关，而斜率随参数 c 的增大而增大。综上所述可知，参数 κ、γ、β 和 a 取决于土壤类型；而参数 α 和 b 取决于

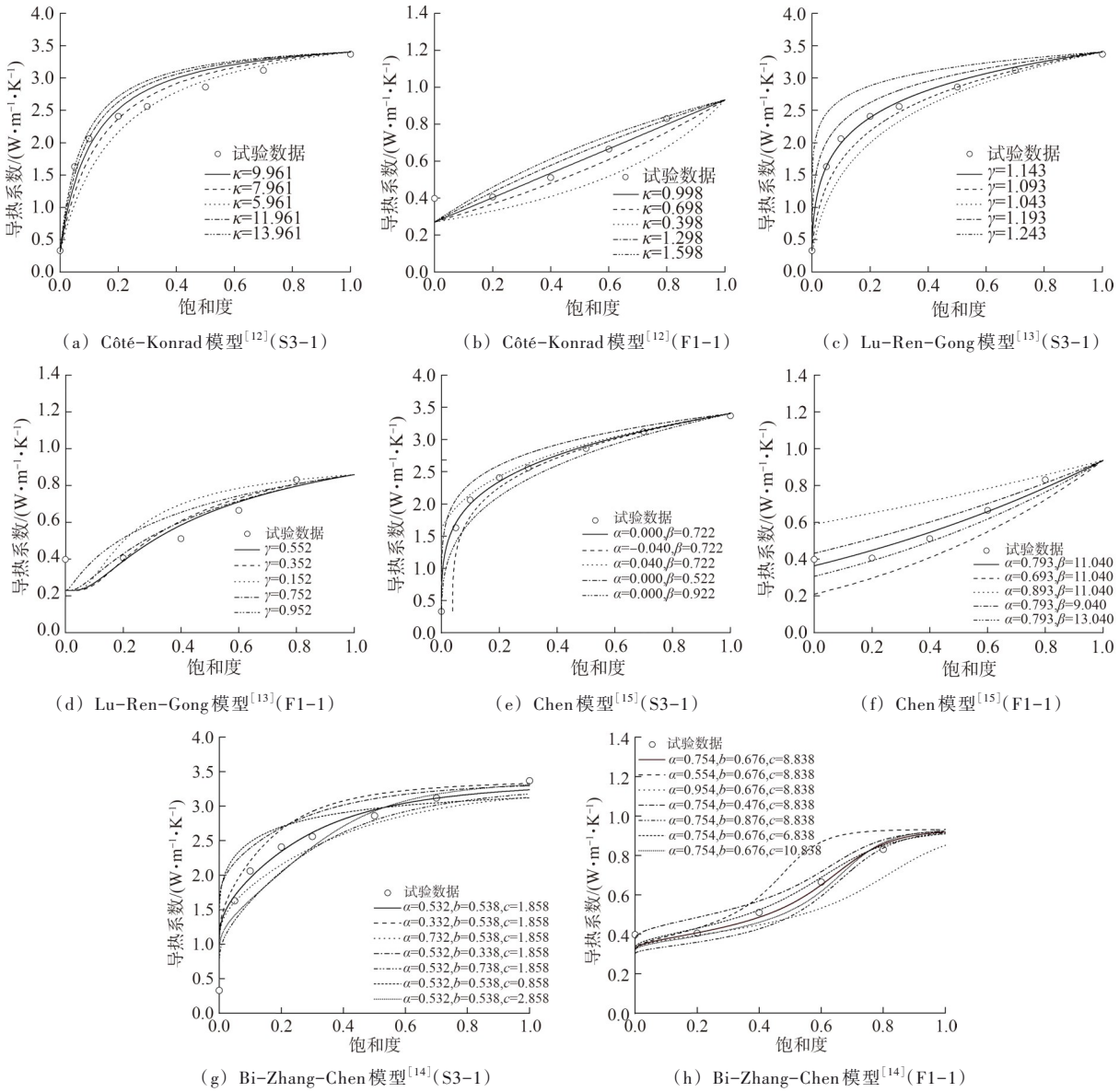


图4 参数变化对各模型曲线的影响

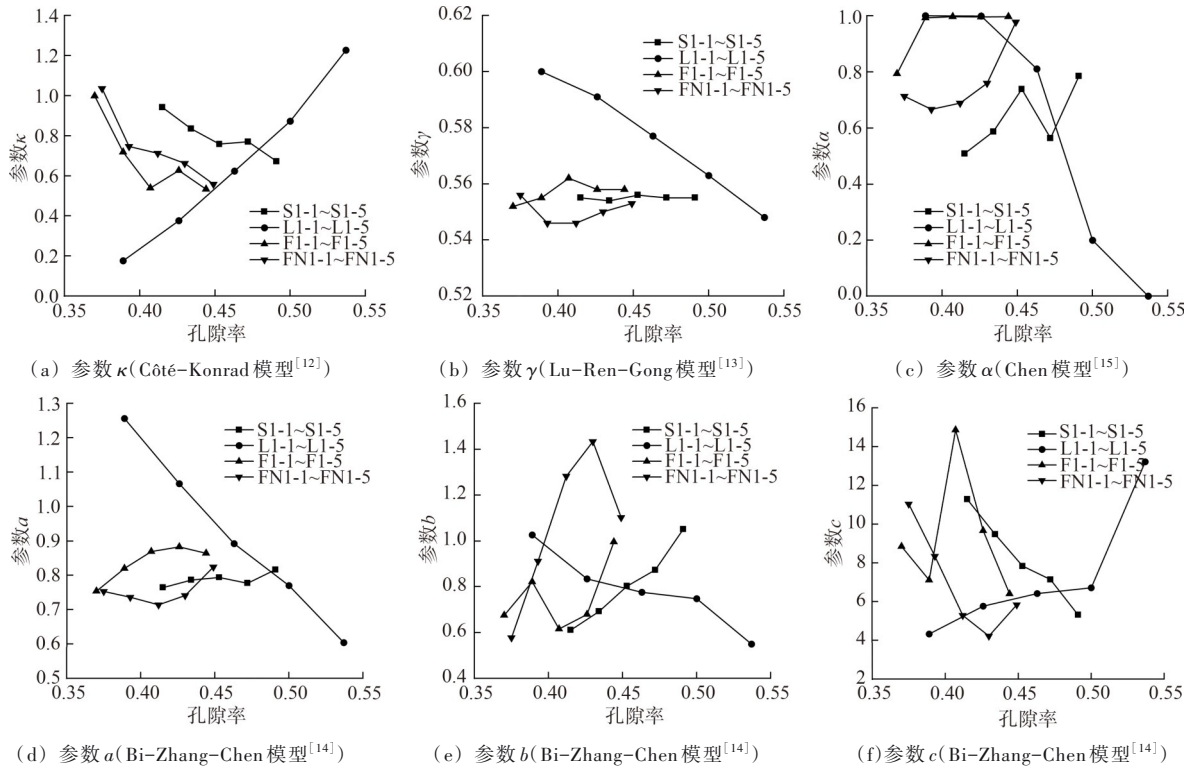
Fig. 4 Influence of parameter variation on model curves

全饱和度范围内导热系数的变化范围；参数c则反映了导热系数对饱和度的敏感程度。

3.2.2 孔隙率对模型参数的影响

目前大多数经验模型在计算饱和土时均考虑了孔隙率的影响，如第1节中式(2)所示，但忽略了孔隙率对模型（即归一化导热系数计算式）参数取值的影响。目前尚无研究分析土壤孔隙率对模型参数取值影响程度和规律。因此，选择了四种不同孔隙率的土壤，分别为砂土（S1-1~S1-5）、黄土（L1-1~L1-5）、粉土（F1-1~F1-5）和粉质黏土（FN1-1~FN1-5），以研究孔隙率对模型参数的影响。

分析图5(a)可知：在Côté-Konrad模型[12]中，砂土、粉土和粉质黏土的参数κ会随孔隙率的增大而减小，而黄土的参数κ则会随孔隙率的增大而增大。Lu-Ren-Gong模型[13]的参数γ随孔隙率的变化如图5(b)所示，对于黄土，γ会随孔隙率的增大而减小。随着孔隙率的变化，砂土、粉土和粉质黏土的参数γ并没有明显的变化规律，最终趋向于稳定值。在Chen模型[15]中，参数α、β随孔隙率的变化规律基本相同，因此只分析参数α随孔隙率的变化规律，如图5(c)所示，可知对于砂土、粉土和粉质黏土，参数α的取值与孔隙率的关系规律性较差，但整体上参数α的取值随孔隙率的增加而增加；对于黄土，参数α会随着孔隙率的增大而减小。图5(d)、(e)和(f)



（a）参数 κ（Côté-Konrad 模型[12]）　（b）参数 γ（Lu-Ren-Gong 模型[13]）　（c）参数 α（Chen 模型[15]）

（d）参数 a（Bi-Zhang-Chen 模型[14]）　（e）参数 b（Bi-Zhang-Chen 模型[14]）　（f）参数 c（Bi-Zhang-Chen 模型[14]）

图 5　参数取值与孔隙率关系

Fig. 5　Relations between porosity and parameter values

显示了 Bi-Zhang-Chen 模型中 3 个参数与孔隙率的关系，对于黄土，参数 a、b 会随孔隙率的增大而减小，而参数 c 的取值随着孔隙率的增大而增大；随着孔隙率的变化，在砂土、粉土和粉质黏土数据中，参数 a 没有明显的变化规律，最终趋向于稳定值；在粉土的数据内，参数 b 和参数 c 规律性较差；对于砂土和粉质黏土，参数 b 的取值随着孔隙率的增加而增加，参数 c 的取值随着孔隙率的增大而减小。因此，对于同一地区的土壤而言，孔隙率对模型参数取值的影响相当重要，其中，黄土表现出了较强的规律性，这可能是因为黄土特有的湿陷性。已有研究表明孔隙率对黄土湿陷影响显著，黄土湿陷会引起土壤结构破坏，影响土壤水分迁移，从而使土壤导热系数发生变化[35]。因此，当黄土的孔隙率不同时，其湿陷程度和水分迁移路径也不同，进而导致导热系数与饱和度之间的变化趋势有明显差异。

4　讨　论

对于不同土质的土壤，Bi-Zhang-Chen 模型[14]的整体计算精度最高，其次是 Côté-Konrad 模型[12]、Lu-Ren-Gong 模型[13]、Chen 模型[15]。四种模型的适用范围不同，Bi-Zhang-Chen 模型[14]对砂土、黄土、粉土和粉质黏土的计算精度最高，Côté-Konrad 模型[12]在区域 1 内的石英砂土的计算精度最高，Chen 模型[15]对区域 2、3 内的石英砂土的计算精度最高。因此，根据不同模型的适用范围，建立了组合模型（砂土、黄土、粉土和粉质黏土使用 Bi-Zhang-Chen 模型[14]，石英砂土的区域 1 使用 Côté-Konrad 模型[12]，石英砂土的区域 2、3 使用 Chen 模型[15]），并使用表 1 中验证数据进行了精度验证，结果如表 4 所示。可知，该组合模型能够有效提高模型预测效果。虽然组合模型可以结合不同模型的优势来提高计算精度，但组合模型也引入了更多的模型参数，使得土壤导热系数的计算更为复杂。在后续研究中，将进一步探索如何在确保组合模型精度的同时，简化计算步骤并减少模型参数的数量，以获得更精确且参数更少的模型。

此外，Chen 模型[15]一般适用于石英砂土，Bi-

表 4　不同模型的精度

Table 4　Accuracy of different models

指标	Côté-Konrad 模型[12]	Lu-Ren-Gong 模型[13]	Chen 模型[15]	Bi-Zhang-Chen 模型[14]	组合模型
MAPE	0.148	0.155	0.181	0.136	0.113
AD	−0.096	−0.055	0.050	−0.051	−0.033

Zhang-Chen模型[14]适用于细粒土，但基于拟合结果（表2和表3）发现，Chen模型[15]对粉土（*MAPE*=0.038）和粉质黏土（*MAPE*=0.076）的拟合精度较高，Bi-Zhang-Chen模型[14]也适用于砂土（*MAPE*=0.055）、石英砂土（*MAPE*=0.050）和黄土（*MAPE*=0.012）。由于石英砂土样本数量偏少，拟合算式易出现局部最优解，因此不对石英砂土进行参数计算模型研究。基于土壤孔隙率对模型参数的分析结果，对不同规律的参数提供不同的建议值。当模型参数与孔隙率的变化规律较为显著时，采用非线性回归拟合出模型参数与孔隙率的关系式；对于参数取值变化较小且与孔隙率的变化规律不显著的模型参数采用固定值，模型参数建议值如表5所示。使用表1中验证数据进行精度验证，结果如表6所示。

表5　模型参数建议值

Table 5　Suggested values for model parameters

土壤	模型	参数建议值
砂土	Bi-Zhang-Chen模型[14]	$a = 0.45n^{0.96} + 0.56$ $b = 7.98n^{6.39} + 0.39$ $c = 8.64n^{-1.42} - 15.6$
黄土	Bi-Zhang-Chen模型[14]	$a = -23.28n^{0.092} + 22.60$ $b = -5.53n^{0.293} + 5.19$ $c = 98.70n^{3.51} + 0.30$
粉土	Chen模型[15]	$\alpha = 0.27n^{0.13} + 0.24$ $\beta = 5.08n^{0.88} + 0.12$
粉质黏土	Chen模型[15]	$\alpha = 0.77$ $\beta = 5.37n^{0.94} + 0.15$

表6　模型参数建议值的预测精度

Table 6　Prediction accuracy of suggested values for model parameters

土壤	MAPE—AD			
	Bi-Zhang-Chen模型[14]	Bi-Zhang-Chen模型[14]	Chen模型[15]	Chen模型[15]
砂土	0.061~-0.031			
黄土		0.096~-0.048		
粉土			0.132~0.020	
粉质黏土				0.113~-0.03

由表6可看出：在使用本研究提出的参数建议值后，Bi-Zhang-Chen模型[14]预测砂土、黄土和粉土的*MAPE*分别为0.061，0.096，*AD*分别为-0.031，-0.048，Chen模型预测粉土和粉质黏土的*MAPE*分别为0.132和0.113，*MAPE*均小于0.14，这表明所提出的参数建议值能较好地预测砂土、黄土、粉土以及粉质黏土的导热系数。

当前大部分经验模型均建立在少量的土壤样本上，限制了模型的适用范围，并且对于不同类型的土壤，经验模型的参数是固定值或根据不同土质建议不同的参数值，例如，Côté-Konrad模型[12]建议砾石和粗砂、中细砂、粉土和黏土以及有机纤维土的参数分别为4.60，3.55，1.90和0.60。Lu-Ren-Gong模型[13]建议粗粒土和细粒土的参数分别为0.96和0.27。对于砂土，Chen模型[15]建议α和β的值分别为0.0022和0.78。虽然图4表明，模型部分参数为土质的控制参数，但是在实际情况中，即使是同一地区的土壤，模型参数取值也有很大差异，尤其是对于黄土（详见图5）。因此仅凭土壤类型来确定模型经验参数的取值是不符合实际情况的。虽然Bi-Zhang-Chen模型[14]的经验参数不是固定的（其经验参数由一个测试点所确定），但其所提供的参数计算方法仅适用于细粒土，在研究中发现其对砂土和黄土拟合效果也较好。使用基于孔隙率建立的模型参数计算模型后，Bi-Zhang-Chen模型[14]也能适用于黄土和砂土，因此，基于土壤基础物理特性建立模型参数的计算模型是可行的。然而，本研究中采用的模型参数计算方法还需进一步改进。由于土壤成分复杂，其导热系数受多种因素影响。大多数经验模型的归一化导热系数计算式只考虑了含水量或饱和度的影响，忽略了土壤的孔隙率、持水方式、粒径分布以及堆积方式等因素。为提高模型预测精度，土壤导热系数模型的建立和改进应当考虑多因素的影响。

5　结束语

基于试验数据，对四种经典的土壤导热系数预测模型进行了评估，给出了四种模型的适用范围，分析了模型参数对导热系数预测值的影响，以及同一土壤类型孔隙率的变化对模型参数取值的影响。此外，基于四种模型的适用范围建立了组合模型，并对每种土壤的推荐模型建立参数计算模型。主要结论如下：

1）对于不同土质的土壤，Bi-Zhang-Chen模型的整体预测精度最高，其次是Côté-Konrad模型、Lu-Ren-Gong模型、Chen模型。其中，Bi-Zhang-Chen模型对砂土、黄土、粉土以及粉质黏土的预测效果较好，Côté-Konrad模型对石英砂土的计算值与试验值的误差更小。

2）基于各模型的适用范围提出的组合模型能够更好地预测土壤导热系数，使用参数计算模型

后，预测砂土、黄土、粉土以及粉质黏土的 *MAPE* 均小于 0.14，能很好地预测不同土壤的导热系数。

3）模型参数对导热系数预测值的影响不同，其中，参数 κ、γ、β 和 a 由土壤类型决定，而参数 α 和参数 b 取决于全饱和度范围内导热系数的变化范围，参数 c 则表明了导热系数对饱和度的敏感程度。

4）对于同一地区的土壤，土壤孔隙率会对模型参数的取值产生较大的影响，其中黄土有较强的规律性。但土壤导热系数影响因素较多，为提高模型的预测精度，模型参数取值应考虑更多因素的影响。

参　考　文　献

[1] LU J G, WAN X S, YAN Z R, et al. Modeling thermal conductivity of soils during a freezing process[J]. Heat and Mass Transfer, 2022, 58(2): 283-293.

[2] 李顺群，吴琼，张翻，等. 含水量对土体导热系数的影响[J]. 工业建筑，2021，51(9)：177-180.

[3] WAN X S, ZHONG C M, MOHAMED H S, et al. Study on the thermal conductivity model of sodium sulfate soils [J]. Experimental Heat Transfer, 2020, 34(3): 217-239.

[4] 李顺群，陈之祥，夏锦红，等. 冻土导热系数的聚合模型研究及试验验证[J]. 中国公路学报，2018，31(8)：39-46.

[5] YAN Z R, ZHANG M Y, LAI Y M, et al. Countermeasures combined with thermosyphons against the thermal instability of high-grade highways in permafrost regions[J/OL]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 153[2023-07-24]. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119047.

[6] 杨露梅，苟富刚，许书刚，等. 南京市各工程地质层热物性及分布特征研究[J]. 地下空间与工程学报，2021，17(1)：143-147.

[7] 陈之祥，李顺群，夏锦红，等. 冻土导热系数测试和计算现状分析[J]. 建筑科学与工程学报，2019，36(2)：101-115.

[8] HE H L, DYCK M F, HORTON R, et al. Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements [J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(4): 567-620.

[9] ZHU M. Modeling and simulation of frost heave in frost-susceptible soils[D]. Michigan: University of Michigan, 2006.

[10] 刘洋，张丹，桑宏伟，等. 下蜀土导热系数与电阻率和剪切波速关系模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报，2020，40(3)：453-459.

[11] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1975.

[12] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 443-458.

[13] 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 Science Society of America Journal, 2007, 71(1): 8-14.

[14] BI J, ZHANG M Y, CHEN W W, et al. A new model to determine the thermal conductivity of fine-grained soils [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 123: 407-417.

[15] CHEN S X. Thermal conductivity of sands[J]. Heat and Mass Transfer, 2008, 44: 1241-1246.

[16] HE H L, ZHAO Y, DYCK M F, et al. A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(6): 1281-1300.

[17] 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.

[18] WANG J M, HE H L, LI M, et al. A review and evaluation of thermal conductivity models of saturated soils[J]. Archives of Agronomy and Soil Science Arch, 2021, 67(7): 974-986.

[19] ZHANG W D, BAI R Q, XU X T, et al. An evaluation of soil thermal conductivity models based on the porosity and degree of saturation and a proposal of a new improved model[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 129: 105682.

[20] HE L, LI M, DYCK M, et al. Modelling of soil solid thermal conductivity[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 116: 104745

[21] HE H L, LIU L M, DYCK M, et al. Modelling dry soil thermal conductivity [J]. Soil and Tillage Research, Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105188.

[22] HE H L, FLERCHINGER G N, KOJIMA Y, et al. A review and evaluation of 39 thermal conductivity models for frozen soils[J]. Geoderma, 2021, 382: 114713.

[23] HE H L, NOBORIO K, JOHANSEN O, et al. Normalized concept for modelling effective soil thermal conductivity from dryness to saturation [J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(1): 27-43.

[24] 于珊，李顺群，冯慧强. 土的导热系数与其干密度、饱和度和温度的关系[J]. 天津城建大学学报，2015，21(3)：172-176.

[25] TARNAWSKI V R, MOMOSE T, MCCOMBIE M L, et al. Canadian field soils III thermal-conductivity data and modeling [J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(1): 119-156.

[26] 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.

[27] 王铁行，刘自成，卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学，2007，28(4)：655-658.

[28] 叶万军，董西好，杨更社，等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学，2017，38(3)：656-662.

[29] 王海波，杨平，何忠意. 孔隙率与饱和度对粉土导热特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2012，36(2)：42-46.

[30] 甄作林，朱江鸿，张虎元，等. 砂土导热性能测试与预测研究[J]. 地下空间与工程学报，2018，14(6)：1577-1586.

[31] ZHANG N，YU X B，PRADHAN A，et al. Thermal conductivity of quartz sands by thermo-time domain reflectometry probe and model prediction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering，2015，27(12)：04015059.

[32] 曾召田，范理云，莫红艳，等. 土壤热导率的影响因素实验研究[J]. 太阳能学报，2018，39(2)：377-384.

[33] 刘晓燕，蔡国军，刘路路，等. 南京河漫滩淤泥质粉质黏土导热系数特性及预测模型[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2019，49(5)：989-995.

[34] CÔTÉ J，KONRAD J M. Indirect methods to assess the solid particle thermal conductivity of Quebec marine clays [J]. Canadian Geotechnical Journal，2007，44(9)：1117-1127.

[35] 马闫，王家鼎，彭淑君，等. 黄土湿陷性与土性指标的关系及其预测模型[J]. 水土保持通报，2016，36(1)：120-128.