

# 考虑有机质含量及分解度的草炭土导热系数模型改进

贺元源<sup>1,2</sup>, 何 玟<sup>1,2</sup>, 王 力<sup>1,2\*</sup>, 王世梅<sup>1,2</sup>, 吕 岩<sup>3</sup>,  
徐 燕<sup>3</sup>, 陈 勇<sup>1,2</sup>, 张先伟<sup>4</sup>

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 宜昌 443002;  
3. 吉林大学建设工程学院, 长春 130026; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与  
工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 土壤导热系数是决定土层传热性能的主要参数, 影响到地温分布、土壤环境及作物生长。高有机质土的导热系数受到有机质组分直接影响, 而目前土壤导热系数模型缺乏对有机质含量及分解度的考虑。该研究采用稳态比较法测定了未冻结及冻结状态下的草炭土导热系数, 分析了不同层位原状草炭土性质对导热系数的影响, 对比了 10 余种土体导热系数计算模型对草炭土的适用性, 并以此提出了改进模型。结果表明: 1) 各层位草炭土在未冻结状态下导热系数相近 ( $0.51 \sim 0.66 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ), 而冻结后导热系数层间差异明显 ( $1.00 \sim 1.62 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ), 表明冻结极大地改变了土体物质组成, 而有机质含量及分解度显著影响着土体的传热性质; 2) 考虑了干密度及组分权重的土体导热系数模型对草炭土的预测适用性更佳, 但准确度仍然难以达到理想效果 (未冻结土  $\text{RMSE} > 0.07 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ; 冻土  $\text{RMSE} > 0.28 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ); 3) 基于土体性质的影响程度及计算模型的原理, 引入草炭土有机质含量  $O_c$  及分解度  $D_d$  计算草炭土导热系数, 建立了改进模型, 提高了参数模型准确率 ( $R^2 > 0.75$ )。研究成果可为季冻草炭土分布区的农业耕作及工程建设提供参数依据, 同时可作为高有机质土体热物理性质研究的理论参考。

**关键词:** 土壤; 模型; 导热系数; 有机质含量; 分解度; 草炭土

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406007

中图分类号: S15

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0120-09

贺元源, 何玟, 王力, 等. 考虑有机质含量及分解度的草炭土导热系数模型改进[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 120-128. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406007 <http://www.tcsae.org>

HE Yuanyuan, HE Wen, WANG Li, et al. Improvement of the thermal conductivity model for turfy soil in view of organic matter content and decomposition degree[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 120-128. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406007 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

导热系数 ( $\lambda$ ) 是反映土体传热能力的指标, 在指导农业耕作、地表构筑物及地下管道工程建设尤其是多年冻土区、季节性冻土区时十分关键, 是土壤学、农学及工程地质研究领域的重点关注内容<sup>[1]</sup>。不同土类的传热性质表现出巨大的差异, 土体导热系数与颗粒粒径分布、土体成分、含水率、温度和其他物理因素高度相关<sup>[2-3]</sup>, 主要受到土体物质组成及组分物性差异的影响。尤其在含冰相的冻土中, 其导热系数受到土壤温度、含水率及质地的极大影响。季冻土导热系数直接决定了季冻区农耕地土壤的水热分布、土壤结构等, 进而影响农业工程设

施及作物生长, 对高寒地区的耕作影响深远<sup>[4-5]</sup>。因此, 准确测定土体导热系数, 进而通过水-热-力多场解析掌握地层温度及变形分布<sup>[6-7]</sup>, 是科学指导农业工程及场地建设的重要前提。草炭土是一种广泛分布于中国大小兴安岭、长白山区、新疆北部山区、川西若尔盖高原及长江中下游的一种高有机质特殊土, 处于高寒地区, 常常作为一种优质沃土用于盆栽培养及土壤改良。大量研究表明其物理性质受土体有机质含量及分解程度影响, 显著区别于粉质黏土、泥炭土等其他土类<sup>[8]</sup>, 因此其传热性能势必也会受到其内有机质组分的影响。

目前, 对土体导热系数的研究主要关注测定方法、影响因素及计算模型 3 个方面, 往往以高精度、易获取及适用性强为目的, 建立有效的土体导热系数参数模型。自 1950 年以来各种经验、半经验及理论模型不断发展进步, 同时机器学习等也不断应用于土壤导热系数预测<sup>[9-11]</sup>。HU 等<sup>[12]</sup> 和 DU 等<sup>[13]</sup> 根据青藏高原地区冻土的物理性质的长年现场岩土参数监测, 对比了 10 余种计算模型对冻土导热系数的预测效果, 表明 Johansen 模型的准确度较高, 并分析了不同土体性质参数的敏感性, 表明冻土含冰量是导热系数的决定性因素。同时, 邸佳颖等<sup>[14]</sup> 对比

收稿日期: 2024-06-03 修订日期: 2024-08-07

基金项目: 三峡库区地质灾害教育部重点实验室 (三峡大学) 开放研究基金项目 (2023KDZ10); 湖北省自然科学基金青年项目 (2024AFB082); 国家自然科学基金重点项目 (U21A2031); 防灾减灾湖北省重点实验室 (三峡大学) 开放基金课题 (2023KJZ23)

作者简介: 贺元源, 博士, 讲师, 研究方向复杂环境特殊土物理力学性质。

Email: [heyuanyuan@ctgu.edu.cn](mailto:heyuanyuan@ctgu.edu.cn)

※通信作者: 王力, 博士, 副教授, 研究方向岩土体多相多场耦合理论等。

Email: [wangli\\_ctgu@126.com](mailto:wangli_ctgu@126.com)

了田间原状土及装填土热特性，发现由于土壤重新装填使得孔隙率增大，导致装填土导热率低于原状土。然而，对于高有机质土，尤其是有机质含量高于 30% 的土类，在热物理性质方面的研究还较少。土壤有机质一方面作为农耕土壤重要的养分来源，另一方面又对土壤导热系数产生重要影响，因此考虑有机质含量及分解度的高有机质土热物理性质研究具有十分重要的意义。

本研究以典型的季冻区草炭土为研究对象，以土体性质随埋深而呈现的差异为切入点，采取稳态比较法测定原状土样在未冻结及冻结状态下的导热系数，分析各层位草炭土导热系数变化特征及其与土体性质之间的相关性，对比现有土体导热系数计算模型对草炭土的适用性。进而，基于导热系数参数模型计算原理，改进建立适用于高有机质草炭土的导热系数参数模型，以期为高有机质土的导热系数研究提供理论基础。

1 材料及方法

1.1 研究区及取样方法

在吉林省长白山区选取了一处典型的湿地草炭土分布区，位于以敦化为中心的山间盆地，属于长白山高寒山区地带。研究区年平均降雨量为 691 mm，年平均气温为 4.07 ℃，夏季平均气温为 19.60 ℃，冬季平均气温为 -13.15 ℃，每年约有 140 d 的日平均气温低于 0 ℃，是典型的季节性冻土区。

取样点位于鹤大公路草炭土工程试验段西侧约 200 m 处（128.035 017°E，43.153 983°N）。取样前 15 d 内无降雨，地表无积水。在清理完地表植被后，开辟出一块 1 m 宽方形取样窗口，采用 Φ10 cm 长 20 cm 的薄壁提取器持续静压到土体中，提取土样后蜡封以黑色塑料袋作避光处理，每次取样的深度为 20 cm，每 20 cm 取 5 个平行土样，完成后平整表面继续向下取样直至达到下伏地层。取样点草炭土层厚为 162 cm，共计采取 8 层土样，下伏地层为灰绿色泥炭土层，地下水埋深约为 175 cm。完成取样后，回填浮土恢复取样窗口，完成样品封装。

1.2 土体性质及导热系数测定方法

1) 基本物理性质

首先，对取样的各层位原状草炭土开展基本物理性质测定试验，主要包括含水率（ $\omega$ ）、天然密度（ $\rho_b$ ）、颗粒密度（ $\rho_s$ ）、颗粒粒径分析（particle size distribution, PSD）、有机质含量（ $O_c$ ）、分解度（ $D_d$ ）等性质。试验方法参考《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）<sup>[15]</sup>、《公路土工试验规程》（JTG E40-2007）<sup>[16]</sup> 及草炭土相关研究<sup>[17-18]</sup>，根据的高有机质特性调整试验方法汇总见表 1。

同时，采用浸水饱和法（24 h）制备了一组饱和草炭土样（7-s）。试验过程中，由于草炭土有机质含量较高，调整烘干法中的烘箱温度至 60 ℃；采取烧失法测定土壤有机质含量；将比重瓶法的比重介质由水替换为无水煤油。每个试验取 8 层草炭土的 3 个原状样进行试验

测定，最大偏差不超过最大测定值的 10% 即满足平行样试验结果，否则增加试验，取平均值作为试验结果（表 2）。此外，研究者采用核磁共振试验测定了草炭土未冻水含量，提出了未冻水含量-温度（ $\omega_u$ - $T$ ）幂指数关系<sup>[17]</sup>，作为本研究冻土导热系数预测中组分占比的计算依据。

表 1 草炭土基本物理性质试验方法

Table 1 Test method for physical properties of turfy soil

性质 Property	测定方法 Determination method
含水率 Water content ( $\omega$ )	烘干法 (60 ℃)
天然密度 Natural density ( $\rho_b$ )	环刀法
颗粒密度 Particle density ( $\rho_s$ )	比重瓶法
颗粒分析 Particle distribution analysis	激光粒度分析仪 (BT-9 300 LD)
有机质含量 Organic matter content ( $O_c$ )	烧失法 (450 ℃)
分解度 Decomposed degree ( $D_d$ )	氢氧化钠溶液煮沸法 <sup>[17-18]</sup>
未冻水含量 Unfrozen water content ( $\omega_u$ )	连续可控温核磁共振试验 <sup>[19]</sup>

表 2 不同土样埋深下草炭土的物理性质

Table 2 Physical properties of turfy soil under different soil depths

埋深 Depth/cm	密度 Density/(g·cm <sup>-3</sup> ) $\rho_b$ $\rho_s$	含水率 Moisture content $\omega$ /%	有机质含量 Organic matter content $O_c$ /%	分解度 Disintegration $D_d$ /%
0~20	1.090 1.901	154.058	39.158	62.635
>20~40	1.030 1.879	165.141	49.563	58.804
>40~60	1.131 1.617	161.026	41.496	85.478
>60~80	1.100 1.457	253.311	72.036	91.264
>80~100	1.029 1.532	290.727	80.244	92.599
>100~120	1.035 1.495	297.614	76.766	88.715
>120~140	1.072 1.490	259.249	75.334	94.955
>140~160	0.954 1.487	225.338	79.793	93.080

注： $\rho_b$  和  $\rho_s$  分别为天然密度和颗粒密度。  
Note:  $\rho_b$  and  $\rho_s$  are natural density and particle density, respectively.

2) 土体导热系数

参考规范《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）<sup>[15]</sup>，采用石蜡（导热系数为 0.279 W/(m·K)）作为对比介质在热稳态可获取土体的导热系数。在本研究中，冻土导热系数的测定对象为原状草炭土，取样点的平均冬季气温为 -13.15 ℃。因此，本文对具体方法进行了相应调整，为了与本文研究区气象条件相符，对冻土导热系数的冷\热端温度调整至 -20 ~ 10 ℃，对未冻结草炭土的导热系数测定冷\热端温度为 20 ~ 10 ℃。2 个外接冷源（冷浴机，温度调节范围：-40 ~ 40 ℃，精度：0.1 ℃，制冷液为无水乙醇）分别向控温铜板（25 cm×25 cm×5 cm）内的循环管道输送设定温度的制冷液；2 个硬塑材质试样盒（22 cm×22 cm×2 cm）中心有 Φ10 cm 的置样孔，将 Φ10 cm 厚度 2 cm 的石蜡块放置于下盒；测量系统由 3 个 mV 级电压表及铜丝热电偶组成；保温瓶及冰水混合物组成零温瓶，作为恒温参照物，试验步骤如下：

- ①电压表调至最小量程，对 3 个电压表进行测量校准，否则更换热电偶；
- ②保证外界冷源与控温铜板连接，并用保温材料（泡沫）包裹抑制热交换，与热端相连的铜上放置石蜡盒；
- ③用 Φ10 cm 高 2 cm 的环刀，在每个原状土样中取 3 个样，削切平整土样（避免扰动）；将环刀样压入至

试样盒, 放置土样盒于石蜡盒之上, 保证完全接触;

④将 3 个电压表的 1 个热电偶分别放置在土样顶部、土样底部 (石蜡顶部) 和石蜡底部, 3 个电压表另一端的热电偶均置于零温瓶中心水位, 保证接触良好;

⑤装好顶部的控温铜板, 设定外接冷源温度并开启循环, 待循环液温度达到设定温度后, 保持运行 8 h;

⑥8 h 后可视整个系统达到热稳态, 每 10 min 记录各电压表示数。当 2 次电位差变化不超过 0.001 mV 时停止测量, 认为测定精度达标, 通过土样与石蜡的热量是相等的, 土样的导热系数可根据以下公式计算:

$$\lambda = \frac{\lambda_{pa} \Delta U_{pa}}{\Delta U} \quad (1)$$

式中  $\lambda_{pa}$  为石蜡的导热系数, 0.279 W/(m·K);  $\Delta U_{pa}$  为石蜡两端的电位差, mV;  $\Delta U$  为土样两端的电位差, mV。

试验过程总耗时漫长, 需维持零温瓶中冰水混合物的比例; 同时, 需保证铜板-热电偶-石蜡-土样-热电偶完全接触, 减少缝隙提高测量精度; 每层取 3 个原状样, 每个土样取 3 个平行环刀样, 平行样差异应不超过最大值的 5%, 否则重新取样, 取平均值作为导热系数测定值。

### 1.3 土体导热系数计算模型

#### 1) Campbell 模型

基于土体含水率、密度及土壤颗粒级配, Campbell 于 1985 年提出了一个土壤导热系数经验模型<sup>[20]</sup>:

$$\lambda = A + B\theta - (A - D)e^{-(C\theta)^E} \quad (2)$$

式中  $\theta$  为土壤的体积含水率, %;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  为该模型中与土体天然密度 ( $\rho_b$ , g/cm<sup>3</sup>)、黏粒含量 ( $C_{clay}$ , %)

相关的经验参数, 具体计算方式如下:

$$\begin{cases} A = 0.65 - 0.78\rho_b + 0.6\rho_b^2 & B = 1.06\rho_b \\ C = 1 + \frac{2.6}{C_{clay}^{0.5}} & D = 0.03 + 0.1\rho_b^2 \quad E = 4 \end{cases} \quad (3)$$

#### 2) Johansen 模型及其衍生模型

随着对非饱和土的研究不断深入, 学者们关注到土体的传热能力与其饱和程度 ( $S_r$ ) 十分相关, JOHANSEN 于 1975 年提出了 Kersten 系数 ( $K_e$ ) 描述干土导热系数 ( $\lambda_{dry}$ ) 与饱和土导热系数 ( $\lambda_{sat}$ ) 之间的关系, 进而构建了描述不同含水率下的土体导热系数计算模型:

$$\lambda = \begin{cases} (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})K_e + \lambda_{dry} & S_r > 1 \times 10^{-5} \\ \lambda_{dry} & S_r \leq 1 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (4)$$

Johansen 模型中冻土的 Kersten 系数 ( $K_e$ ) 与其饱和度相等, 即  $K_e = S_r$ 。

目前, Johansen 模型是土壤导热系数参数模型中应用最为广泛的经验模型, 自 1975 年以来被不断应用验证及改进, 针对不同土质及土类发展了诸多衍生改良模型<sup>[21]</sup>, 具体计算参数及改进模式如表 3 所示。土壤导热系数计算过程中主要涉及到土壤的一些基本物理性质参数, 和土体组分的物理性质参数, 具体见表 3 注。各组分导热系数对于含水率极高 ( $\omega > 300\%$ )、天然状态近似饱和的草炭土, 可以认为冻结后草炭土内的体积含冰量  $\theta_{ice}$  等于孔隙率  $n$  与  $\theta_{liq}$  的差值。根据草炭土连续冻融的核磁共振测定试验, 本研究草炭土冻结温度  $T_f$  确定为 -3 °C, 草炭土中为石英含量约为 55%<sup>[22]</sup>。

表 3 Johansen 模型及其衍生模型  
Table 3 Johansen model and its derivative models

模型 Models	Kersten 系数 Kersten coefficient $K_e$	干土导热系数 Thermal conductivity of dry soil $\lambda_{dry}$	饱和土导热系数 Thermal conductivity of saturated soil $\lambda_{sat}$	土粒导热系数 Thermal conductivity of soil particles $\lambda_s$
Johansen	$K_e = \begin{cases} 0.71 \lg S_r + 1 & 0.05 < S_r \leq 0.1 \\ \lg S_r + 1 & S_r > 0.1 \end{cases}$	$\lambda_{dry} = \frac{0.135\rho_b + 64.7}{2700 - 0.947\rho_b}$	$\lambda_{sat} = \begin{cases} \lambda_{liq}^{1-n} \lambda_{ice}^n + 1 & T \geq T_f \\ \lambda_{liq}^{1-n} \lambda_{ice}^{n-\theta_{liq}} & T < T_f \end{cases}$	$\lambda_s = \lambda_q^{1-q} \lambda_{oth}^{1-q}$
Farouki	$K_e = \begin{cases} \lg S_r + 1 & T \geq T_f \\ S_r & T < T_f \end{cases}$	同 Johansen 模型	同 Johansen 模型	$\lambda_s = \frac{8.8C_{sand} + 2.92C_{clay}}{C_{sand} + C_{clay}}$
C & K	$K_e = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r}$	$\lambda_{dry} = \chi \times 10^{-\eta m}$	同 Johansen 模型	同 Johansen 模型
Luo	$K_e = 1 - \exp(-9.8S_r)$	$\lambda_{dry} = \chi \times 10^{-\eta m}$	同 Johansen 模型	$\lambda_s = \frac{8.8C_{sand} + 2.92C_{clay}}{C_{sand} + C_{clay}}$
Nikoosokhan	$\begin{cases} K_e = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r} \\ \kappa = 4.4C_{sand} + 0.4 \end{cases}$	$\lambda_{dry} = 0.087C_{sand} + 0.186\rho_d$	$\lambda_{sat} = 0.53C_{sand} + 0.98\rho_d$	同 Johansen 模型
E & T	$K_e = 1 - \exp(-9.8S_r)$	同 Johansen 模型	同 Johansen 模型	同 Johansen 模型
Lu2007	$K_e = e^{m(1-S_r-1.33)}$	$\lambda_{dry} = -0.56n + 0.51$	同 Johansen 模型	同 Johansen 模型
Su	$\begin{cases} K_e = e^{m(1-S_r-1.33)} \\ m = -0.5863C_{clay} + 0.9451C_{silt} + 0.108C_{sand} + 0.0567C_{om} \end{cases}$ , 其余参数同 Lu2007 模型			
Men	$\begin{cases} K_e = e^{(\alpha-\theta^{-\beta})} \\ \alpha = 0.493C_{sand} + 0.86C_{silt} + 0.014C_{om} + 0.778 \\ \beta = 0.736C_{clay} + 0.006C_{om} + 0.222 \end{cases}$ , 其余参数同 Nikoosokhan 模型			

注: Su 及 Men 模型考虑了土壤有机质组分的影响。n 为土体孔隙率, %;  $\theta_{liq}$  为土体中水的体积分数, %;  $\theta_{ice}$  为冻土中冰的体积分数, %; T 为土体温度, °C;  $T_f$  为土体的冻结温度, °C; q 为石英含量, %;  $\lambda_{ice}$ 、 $\lambda_{liq}$ 、 $\lambda_{sand}$ 、 $\lambda_{silt}$ 、 $\lambda_{om}$  分别为 0.57、2.28、7.7、2.0 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。

Note: The model considered soil organic matter (Su and Men models). n is soil porosity, %;  $\theta_{liq}$  is the volume fraction of liquid water in soil, %;  $\theta_{ice}$  is the volume fraction of ice in soil, %; T is soil temperature, °C;  $T_f$  is the freezing temperature of soil, °C; q is the quartz content, %; The thermal conductivity of water  $\lambda_{liq}$ , ice  $\lambda_{ice}$ , quartz and other mineral components are 0.57, 2.28, 7.7, 2.0 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, respectively

为了强调土颗粒粒径分布差异对导热系数计算的影响, FAROUKI<sup>[23]</sup> 于 1981 年提出了考虑土壤质地的改进

模型, 对 Kersten 系数 ( $K_e$ ) 及土颗粒导热系数 ( $\lambda_s$ ) 的计算方式作出了调整。此外, 在模型优化历史中意义深



远是 2005 年加拿大学者 COTE 等<sup>[24]</sup>提出了一种描述干土导热系数 ( $\lambda_{dry}$ ) 与孔隙率 ( $n$ )、土壤质地的新关系 (C & K 模型), 进一步考虑了更多的土壤物性参数对导热系数的影响, 拓宽了土体导热系数计算模型的适用土壤类型, 提高了土体导热系数预测在冻土、季节性冻土应用领域的准确度。2009 年, 中国学者罗斯琼等<sup>[25]</sup>通过对青藏高原中部土壤热导率的长期监测, 提出了土壤类别相关的经验参数  $\chi$ 、 $\eta$  和  $\kappa$  优化了模型中的参数取值 (Luo 模型)。

NIKOOSOKHAN 等<sup>[26]</sup>于 2015 年提出了一种改进的经验模型计算饱和和土体导热系数  $\lambda_{sat}$ 、干土导热系数  $\lambda_{dry}$  和经验系数  $\kappa$ , 充分考虑了土壤干密度  $\rho_d$  的影响。草炭土的干密度极低, 显著区别于其他常见土壤, 因此本研究纳入 Nikoosokhan 模型用于计算草炭土的导热系数。此外, 本研究还采取了基于 Johansen 模型改进的 Ewen & Thomas (E & T 模型)、Zhao、Yang、Lu2007、Lu2014 模型对比用于草炭土的适用性<sup>[27-31]</sup>。

**考虑有机质组分影响的 Su、Men 模型:** 随着农业及工程建设的发展, 一些学者逐渐意识到了含有机质的土体导热系数与其他土类有着显著差异, 开始将有机质含量指标纳入到土体导热系数预测模型中来。2016 年, 苏李君等<sup>[32]</sup>以 Lu2007 模型为基础, 加入有机质含量及质地参数改进了 Kestern 系数的计算方式, 将土体有机质质量比  $C_{om}$  (g/kg), 纳入了土壤导热系数计算模型中。

2020 年, 基于 Johansen 模型, 门利利<sup>[33]</sup>以土壤质地参数及有机质质量比, 针对含有机质土导热系数计算过程中的 Kestern 系数进行了修正。该模型被用于预测来自中国陕西及新疆、美国爱荷华州及俄勒冈州的 19 组有机质含量在 0.07%~21.65% 的砂土及黏土导热系数, 取得了较好的预测效果, 本研究采用 Su、Men 模型对比考虑有机质组分的导热系数测定结果。

### 3) 半经验半理论模型—Tian 模型

在理论模型方面, DE VRIES 将土颗粒和水视为连续混合介质, 基于各组分占比及各组分传热性质, 采取权重系数、形状因子等参数描述土体内各组分对土体导热系数的贡献率, 建立了一个土体导热系数计算理论模型<sup>[34]</sup>。由于计算步骤较为繁琐, 过程参数较多, 土体导热系数的预测难以快速实现, TIAN 等<sup>[34]</sup>提出了一个忽略了土体内水汽迁移的简化预测模型。由于本研究中的草炭土为原状土, 天然体积含水率 (65%~80%) 接近孔隙率 (70%~80%), 在天然状态下近似饱和。草炭土内部空气组分占比极低, 且空气组分的导热系数极低 (0.025 W/(m·K)), 因此可以作出合理假设在计算土体导热系数时忽略草炭土内的空气组分。基于假设及 Tian 模型的计算方式, 草炭土导热系数可按式 (5) 计算得出:

$$\lambda = \frac{\theta_{liq}\lambda_w + k_{ice}\theta_{ice}\lambda_{ice} + k_m\theta_m\lambda_m}{\lambda_w + k_{ice}\theta_{ice} + k_m\theta_m} \quad (5)$$

式中  $\lambda_m$  是土壤固体颗粒的导热系数,  $\theta_m$  是土壤固体颗粒的体积分数,  $\lambda_m$  以及权重  $k_n$  由以下方式计算得出:

$$\lambda_m = \lambda_{sand}^{C_{sand}} \lambda_{silt}^{C_{silt}} \lambda_{clay}^{C_{clay}} \quad (6)$$

$$k_n = \frac{2}{3} \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_n}{\lambda_w} - 1 \right) g_a \right]^{-1} + \frac{1}{3} \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_n}{\lambda_w} - 1 \right) (1 - 2g_a) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中  $\lambda_{sand}$ 、 $\lambda_{silt}$  和  $\lambda_{clay}$  是土体中砂粒、粉粒和黏粒的导热系数, 分别为 7.7、2.0 及 1.93 W/(m·K), 参考文献 [35] 取值,  $g_a$  是形状因子, 计算如下:

$$g_{a(m)} = g_{a(sand)} C_{sand} + g_{a(silt)} C_{silt} + g_{a(clay)} C_{clay} \quad (8)$$

式中  $g_{a(sand)}$ 、 $g_{a(silt)}$ 、 $g_{a(clay)}$  分别为土体中砂粒 (0.182)、粉粒 (0.053 4) 及黏粒 (0.007 75) 颗粒的形状因子, 从文献 [36-37] 参考取值。

综上所述, 本研究广泛对比了多种土体导热系数计算模型对于草炭土的适用性, 其中 Johansen、Farouki、Côté & Konrad 及 Tian 模型适用于冻土, 其余模型则用于常温土体导热系数的预测对比。

## 2 结果及分析

### 2.1 季冻区草炭土导热系数测定及预测结果

未冻结草炭土稳态导热系数测定及模型预测结果如图 1a 所示, 各层土样间无显著差异, 导热系数范围为 0.51~0.66 W/(m·K), 饱和样 (7-s) (0.57 W/(m·K)) 及水平样 (3-h) (0.61 W/(m·K)) 的测定结果与天然垂直土样的导热系数接近。

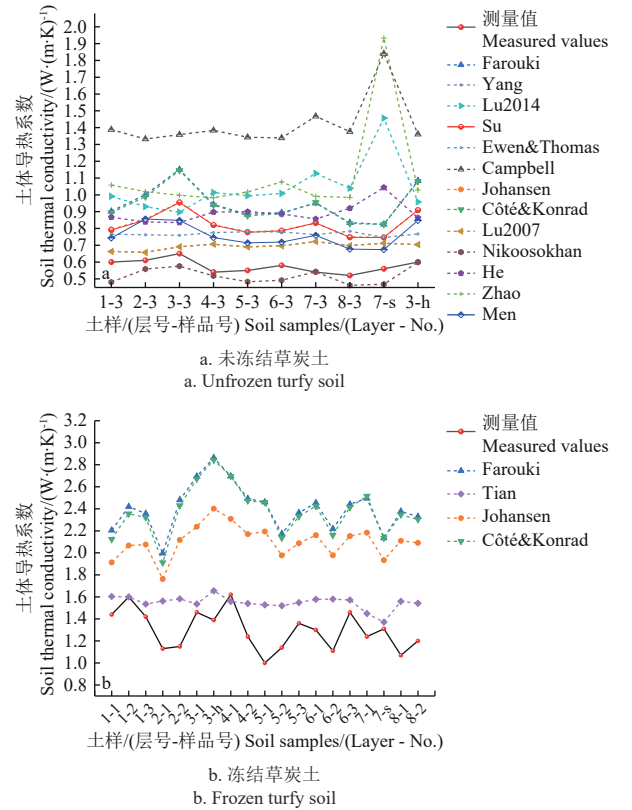


图 1 导热系数测定及预测结果对比

Fig.1 Comparison of thermal conductivity measurement and prediction results

对比其他高有机质土及含有机质土, 未冻结状态下 (5~30 °C), 草炭土的导热系数是低于含水率在 50% 左右的泥炭土 (0.65~1.14 W/(m·K))<sup>[38]</sup> 及含有机质黏

性土 (0.65~1.15 W/(m·K)) [39] 的。这是由于草炭土的干密度 (0.20~0.43 g/cm<sup>3</sup>) 远低于文献中所述的泥炭土 (0.879~1.098 g/cm<sup>3</sup>) 及含有机质黏土 (1.1~1.5 g/cm<sup>3</sup>)，草炭土中含有更多的低传热性能组分。

表 4 展示了采用 RMSE、MAE 及 MBE 描述预测效果较好的 9 种模型对于草炭土导热系数预测准确性，其中取得最好预测效果的是 Nikoosokhan 模型。Campbell 模型局限在于未考虑到干密度及有机质的影响，完全忽略了草炭土特性。Johansen 模型及其衍生模型的 Kestern 系数 ( $K_e$ ) 及土颗粒导热系数  $\lambda_s$  的计算决定了预测效果。而土固体组分中，土颗粒导热系数 (黏粒 1.93 W/(m·K)、粉粒 2.0 W/(m·K) 及砂粒 7.7 W/(m·K)) 是远高于有机质组分导热系数的 (木质组分 0~0.3 W/(m·K)) [40]，草本组分更低)。然而，模型对有机质组分考虑不足，使得  $K_e$  及  $\lambda_s$  未能量化有机质含量及其低传热性能的影响。因此，各模型对草炭土中有机质组分的导热系数表现出明显的“高估”效应。相对而言，干密度  $\rho_d$  (Nikoosokhan 模型)、孔隙度  $n$  (Lu2007 模型) 及有机质质量比  $C_{om}$  (Men 模型) 等能够表征草炭土特性的参数被引入进模型，在导热系数计算中量化了低传热组分的影响，大幅提高了草炭土大热系数预测精度。

表 4 草炭土导热系数预测误差分析

Table 4 Error analysis for prediction of thermal conductivity of turf soil

类型 Type	模型 Models	RMSE (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	MAE (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	MBE (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
未冻结草炭土 Unfrozen turf soil	Johansen	0.251	0.247	0.247
	Farouki	0.379	0.371	0.371
	Côté&Konrad	0.374	0.366	0.366
	Campbell	0.858	0.843	0.843
	Nikoosokhan	0.073	0.064	-0.058
	Lu2007	0.130	0.118	0.118
冻结草炭土 Frozen turf soil	Ewen & Thomas	0.198	0.192	0.192
	Johansen	0.947	0.911	0.911
	Farouki	1.252	1.568	1.219
	Côté&Konrad	1.224	1.187	1.187
	Tian	0.289	0.214	0.147

注：RMSE、MAE 及 MBE 分别为均方根差、平均绝对误差及平均偏差误差。

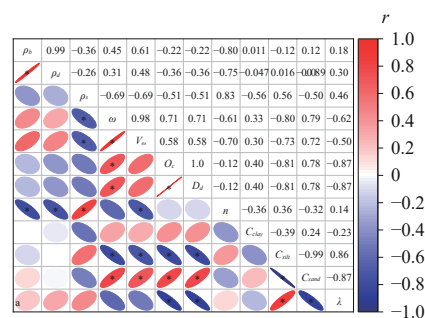
Note: RMSE, MAE and MBE are root mean square error, mean absolute error and mean bias error, respectively.

对冻结草炭土的导热系数测定及预测结果如图 1b 所示，随着土体冻结、水冰相变，冻结草炭土的导热系数显著升高，达 1.00~1.62 W/(m·K)。上层草炭土 (埋深 0~0.8 m) 在冻结后导热系数平均值为 1.38 W/(m·K)，略高于下层草炭土 (埋深 0.8~1.6 m) 平均值 1.22 W/(m·K)。相对其他含有机质土类而言，冻结草炭土的导热系数略高于东北地区的 (有机质含量约为 10%，含水率 20%~60%) 泥炭质土 (0.8~1.3 W/(m·K)) [41]，略高于大兴安岭地区的 (有机质含量 12%~18.78%) 含有机质黏土 (0.55~1.04 W/(m·K))，略低于 (有机质含量 1~10%) 含有机质黏土 (1.33~2.1 W/(m·K)) [42]。究其原因，草炭土的含水率极高 (>200%)，冻结后草炭土内含冰量大幅提高，使得其冻结后导热系数有所提升。

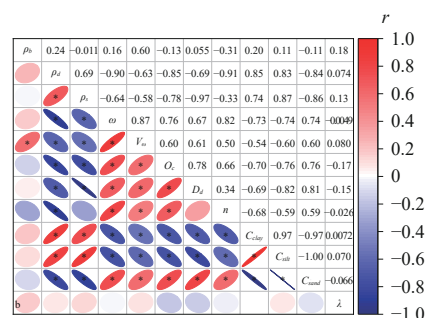
冻土导热系数预测误差显示，Johansen 模型及其衍生模型的预测结果均远高于实测值，基于组分占比及权重分配的 Tian 模型取得了相对较好的预测效果。在冻土

导热系数预测过程中，水、冰相占比的计算是根据考虑了高有机质特性的冻融草炭土未冻水含量参数模型 ( $\omega_u$ - $T$ ) 所得到的，因此  $\theta_{ice}$  及  $\theta_{liq}$  的描述是准确的。Johansen 模型通过石英含量计算了  $\lambda_s$ ，Farouki 模型是根据土颗粒中砂粒及黏粒的占比 ( $C_{sand}$  及  $C_{clay}$ ) 计算的  $\lambda_s$ ，而 Côté&Konrad (及 Luo) 模型引入了土质参数  $\kappa$ 、 $\chi$  及  $\eta$  优化  $K_e$  的计算方式。究其本质，这 3 种模型的计算方式中未将有机质含量及有机质组分的传热性能纳入进计算参数之中，因此对冻结草炭土的导热系数也表现出明显的“高估效应”。相比之下，Tian 模型的土颗粒体积分数  $\theta_m$  的计算中应用了草炭土干密度  $\rho_d$  及颗粒密度  $\rho_s$  比值，这种计算方式通过矿物质、有机质的密度差异间接量化了土体内低传热性能组分的影响。但间接考虑的  $O_c$  并未直接参与导热系数的计算，因此较 Tian 模型对其他各类土较好的预测效果 ( $R^2>0.9$ ) 相比还存在显著的差距 [34]。

目前各类模型对草炭土导热系数的适用性较差，原因在于计算参数对草炭土内的有机质组分占比及有机质组分的低传热性质考虑不足。因此，针对草炭土高有机质、低干密度、高孔隙率、高含水率等特性，进一步改进土体导热系数参数模型十分必要。对各层位草炭土的土体性质-导热系数开展了相关性分析，如图 2 所示：未冻结草炭土的孔隙率及土质参数与导热系数呈显著相关关系 ( $P<0.05$ )；冻结草炭土的有机质含量与孔隙率与导热系数呈显著相关关系 ( $P<0.05$ )，因此草炭土的导热系数同其他物理性质一样，极大地受到有机质组分影响，在土壤导热系数计算时也应重点考虑有机质含量及分解度。



a. 未冻结草炭土  
a. Unfrozen turf soil



b. 冻结草炭土  
b. Frozen turf soil

注：\*：显著相关 ( $P<0.05$ )。r 为相关系数。

Note: \*: significant correlation ( $P<0.05$ ). r is significant correlation.

图 2 草炭土性质-导热系数相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of turf soil properties and thermal conductivity

## 2.2 高有机质土导热系数计算模型改进

基于统计分析、各模型计算方式及结果的对比, 可见现有的土体导热系数计算模型对高有机质草炭土导热系数的适用性不足, 传统的导热系数计算模型 (Johansen 及其衍生模型) 对土体组分中的有机质传热性质有所高估。尽管 Su、Men 模型考虑了有机质含量的影响, 但其推导来源的样本土有机质含量 (Su: 0.5%~2.2%, Men: 0.1%~2.7%) 远低于本研究草炭土的有机质含量 (38.6%~85.7%)。因此, 现有考虑了有机质含量的土体导热系数计算模型对草炭土的准确度表现仍然欠佳。未冻结及冻结草炭土的导热系数-土体性质统计分析结果中, 有机质含量  $O_c$  及分解度  $D_d$  对土体导热系数  $\lambda$  均表现出了较为显著的负相关关系, 这也表明了对草炭土导热系数的计算势必需要考虑  $O_c$  及  $D_d$  等能够表征草炭土特殊物理性质的指标参数。同时, 大量关于草炭土基本物性的研究也指出,  $O_c$  及  $D_d$  十分显著地影响着草炭土的渗透性、压缩性及力学强度等性质<sup>[17-19]</sup>, 因此需考虑将  $O_c$  及  $D_d$  纳入草炭土导热系数参数化模型构建过程中。

本研究通过各层位草炭土的导热系数及土体性质测定结果, 着重考虑草炭土的高有机质含量、高含水率、低干密度及颗粒级配性质, 设计未冻结及冻结草炭土的导热系数改进参数化模型, 旨在提高现有土壤导热系数模型对高有机质草炭土的适用性。基于形式简单的 Campbell 模型形式, 改进得出适用于未冻结草炭土的导热系数计算模型; 基于对冻结草炭土预测效果最好的 Tian 模型, 给出冻结草炭土的导热系数改进模型。具体而言, 简化 Campbell 模型的形式只保留一次系数项, 引入更具草炭土特性的干密度  $\rho_d$  代替体积密度  $\rho_b$ , 土壤质地的影响用参数  $C_r$  表征, 采用  $O_c$  及  $D_d$  表征有机质组分的影响 ( $O_r$ ), 代入原状草炭土的数据获取系数如式 (9) 及 (10) 所示, 并验证对比预测效果如图 3a 所示。

$$\lambda_{uf} = A_r + B_r V_\omega + C_r + O_r \quad (9)$$

$$\begin{cases} A_r = 0.53 & C_r = 0.41C_{sand} + 20.26C_{clay} - 4.82\rho_d^2 \\ B_r = 0.16\rho_d & O_r = 1.67O_c - 1.28O_c D_d - 1.21n \end{cases} \quad (10)$$

式中  $C_r$  为土质参数修正项,  $O_r$  为土体有机质组分修正项,  $O_c D_d$  表征了土体有机质已分解的组分, 即腐殖质组分。

对冻结草炭土的导热系数, 基于物质组成, 首先对 Tian 模型中冰及固体组分的权重系数  $k_{ice}$  及  $k_m$  修正为  $k_{ice-r}$  及  $k_{m-r}$ , 对固体组分的导热系数  $\lambda_m$  引入考虑  $O_c$  及  $D_d$  的  $M_{Oc}$  项修正, 减小对有机质组分的“高估效应”, 代入测定数据获取各系数如式 (11)~(12) 所示。

$$\lambda_f = \frac{\theta_{liq}\lambda_w + k_{ice-r}\theta_{ice}\lambda_{ice} + k_{m-r}\theta_m(\lambda_m - M_{Oc})}{\theta_{liq} + k_{ice-r}\theta_{ice} + k_{m-r}\theta_m} \quad (11)$$

$$\begin{cases} k_{ice-r} = 0.5 + \frac{\omega_u}{n} + 1.01\omega_u - 0.05n \\ k_{m-r} = (0.51C_{sand} - 3.98C_{clay} - 0.1)(3.2O_c - 8.39O_c D_d + 2.19) \\ M_{Oc} = 10.81\rho_d + 9.57\rho_d^2 + 16.86O_c - 19.85O_c D_d \end{cases} \quad (12)$$

改进模型的效果如图 3b 所示, 可见通过引入草炭土特征性质  $O_c$  及  $D_d$ , 考虑草炭土的低干密度、高有机质含量性质, 并通过现有最优模型的改进, 能够有效提高土体导热系数计算模型对于草炭土的预测效果。对于组分构成相对简单的未冻结草炭土, 改进模型的预测效果显著优于 Nikoosokhan 模型,  $R^2$  达到了 0.9 以上; 对于冻结草炭土, 改进模型抑制了固体组分导热系数  $\lambda_m$  的“高估效应”, 所获取的土体导热系数的变化趋势更加符合实测值, 其中 9 个土样的导热系数预测值基本与实测值一致。

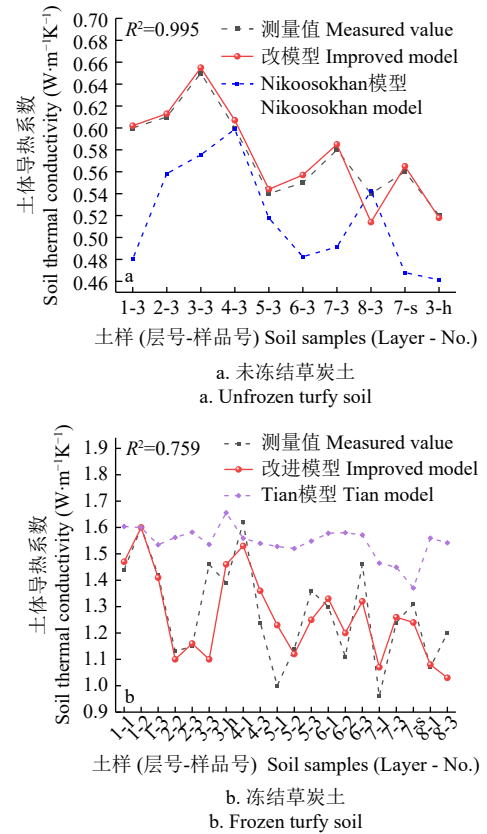


图 3 草炭土导热系数改进模型效果

Fig.3 Effects of improved model of soil thermal conductivity

误差分析如表 5 所示, 改进模型显著提高了预测精度。本研究中的草炭土性质, 在相同埋深下, 与吕岩等<sup>[17-19,43]</sup>在不同地点取样的测试结果相似。因此本文样本基本涵盖了草炭土的天然性质范围, 这明了改进模型对于季冻区草炭土导热系数预测具有代表性和适用性。

表 5 草炭土导热系数改进模型结果误差分析

Table 5 Error analysis of the improved model of turf soil thermal conductivity ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

类型 Type	模型 Models	RMSE	MAE	MBE
未冻结草炭土 Unfrozen turf soil	改进模型 Nikoosokhan 模型	0.001 0.066	0.001 0.055	0.000 -0.049
冻结草炭土 Frozen turf soil	改进模型 Tian 模型	0.091 0.278	0.066 0.206	0.001 0.201

## 3 结 论

本研究以季冻区高有机质草炭土为研究对象, 采用



试验测定及参数模型计算获取了不同埋深的原状未冻结及冻结草炭土的导热系数,探究了土体性质与土体导热系数之间的关系,并以模型计算原理及土体物性影响为依据改进了土体导热系数计算模型对高有机质草炭土的适用性,结果可概述为:

1) 草炭土具有十分显著的高有机质含量、低干密度、高孔隙率及高含水率性质,因此在未冻结状态其内低传热组分(有机质、空气及水)占比高,导热系数( $0.51\sim 0.66\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ )低于粉质黏土等其他土类;在冻结状态其内水冻结为冰,导热系数( $1.00\sim 1.62\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ )显著提高,与其他土类相近。

2) 现有的计算模型对草炭土导热系数的适用性均有所不足,主要是由于固体组分导热系数计算过程中对有机质组分传热性的“高估”,而 Nikoosokhan 模型及 Tian 模型考虑了干密度及组分权重,分别对未冻结草炭土及冻结草炭土的导热系数取得了较好的预测效果。

3) 基于土体导热系数参数模型的计算原理及草炭土性质-导热系数相关性分析,引入草炭土导热系数的主控参数,改进了高有机质草炭土导热系数模型,对未冻结草炭土  $R^2$  达 0.95,对冻结草炭土预测精度  $R^2$  达 0.75,可作为季冻区草炭土热物理性质的参数基础。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张媛媛, 刘湘君, 赵天悦, 等. 双针热脉冲测定冻土热特性的数值模拟方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 92-99.  
ZHANG Yuanyuan, LIU Xiangjun, ZHAO Tianyue, et al. Numerical simulation method for measuring the thermal properties of permafrost by dual-probe heat-pulse sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(11): 92-99. (in Chinese with English abstract)
- [2] XU Y, ZHOU X, SUN D A, et al. Thermal properties of GMZ bentonite pellet mixtures subjected to different temperatures for high-level radioactive waste repository[J]. Acta Geotechnica, 2021, 17: 981-992.
- [3] 王志国, 秦芮, 张佳. 含冰非饱和土壤导热模型构建及应用分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1094-1102.  
WANG Zhiguo, QIN Rui, ZHANG Jia. Construction and application analysis of thermal conductivity model of unsaturated ice-containing soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1094-1102. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张小磊, 周志民, 刘继亮. 季节性积雪消融对浅层土壤热状况的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 91-95.  
ZHANG Xiaolei, ZHOU Zhimin, LIU Jiliang. Melting of seasonal snow cover and its influence on soil temperature conditions of shallow layer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 91-95. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张栋, 郭璇. 灌淤冻土复合衬砌渠道保温防冻胀效果分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 122-129.
- ZHANG Dong, GUO Xuan. Effects of thermal insulation and anti-frost heaving in composite lining structures for a canal in colmatage frozen soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 122-129. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李瀚翔, 王正中, 陆立国, 等. 考虑冻胀影响的寒区渠道衬砌冻胀破坏力学模型分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 103-112.  
LI Hanxiang, WANG Zhengzhong, LU Liguang, et al. Mechanical model analysis of lining frost-heave failure in cold region considering frost-jacking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 103-112. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郑策, 高万德, 陈云飞, 等. 季节性冻土区包气带水汽热耦合运移研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 110-117.  
ZHENG Ce, GAO Wande, CHEN Yunfei, et al. Review of coupled water, vapor, and heat transport of the vadose zone in the seasonal frozen soil region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(24): 110-117. (in Chinese with English abstract)
- [8] 仝磊, 苏占东, 徐丽娜, 等. 中国主要沼泽草炭土的形成环境及分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1477-1484.  
NIE Lei, SU Zhandong, XU Lina, et al. Formation environment and distribution characteristics of main swamp turfy soil in China[J]. Journal of Jilin University( Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1477-1484. (in Chinese with English abstract)
- [9] LIU L M, HE H L, DYCK M, et al. Modeling thermal conductivity of clays: A review and evaluation of 28 predictive models[J]. Engineering Geology, 2021, 288: 17.
- [10] LI K Q, LL D Q, CHEN D H, et al. A generalized model for effective thermal conductivity of soils considering porosity and mineral composition[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 3455-3466.
- [11] LI K Q, KANG Q, NIE J Y, et al. Artificial neural network for predicting the thermal conductivity of soils based on a systematic database[J]. Geothermics, 2022, 103: 102416.
- [12] HU G, ZHAO L, WU X, et al. Comparison of the thermal conductivity parameterizations for a freeze-thaw algorithm with a multi-layered soil in permafrost regions[J]. Catena, 2017, 156: 244-251.
- [13] DU Y, LI R, ZHAO L, et al. Evaluation of 11 soil thermal conductivity schemes for the permafrost region of the central Qinghai-Tibet Plateau[J]. Catena, 2020, 193: 104608.
- [14] 邸佳颖, 刘晓娜, 任图生. 原状土与装填土热特性的比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 74-79.  
DI Jiaying, LIU Xiaona, REN Tusheng. Comparative study on thermal properties of intact and repacked soil samples[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 74-79.

- (in Chinese with English abstract)
- [15] GB/T 50123-2019. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
  - [16] JTG E40-2007. 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
  - [17] 吕岩, 仵磊, 徐燕, 等. 有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 655-660.  
LV Yan, NIE Lei, XU Yan, et al. The mechanism of organic matter effect on physical and mechanical properties of turf soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 655-660. (in Chinese with English abstract)
  - [18] 蒋森峰. 季冻区草炭土冻胀特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 9-20.  
JIANG Senfeng. Study on Frost Heave Characteristics of Turfy Soil in Seasonal Frozen Area[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 9-20. (in Chinese with English abstract)
  - [19] HE Y, XU Y, LV Y, et al. Characterization of unfrozen water in highly organic turf soil during freeze-thaw by nuclear magnetic resonance[J]. Engineering Geology, 2023, 312.
  - [20] CAMPBELL G S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems[J]. Elsevier, 1985, 14(11): 149.
  - [21] XU Y S, ZENG Z T, SUN D A, et al. Comparative study on thermal properties of undisturbed and compacted lateritic soils subjected to drying and wetting[J]. Engineering Geology, 2020, 277: 105800.
  - [22] 吕岩. 吉林省东部地区沼泽草炭土的结构特性及模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 15-49.  
LV Yan. Study on the Structural Characteristics and Model of Marsh Turfy Soil in the East of Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 15-49. (in Chinese with English abstract)
  - [23] FAROUKI O T. The thermal properties of soils in cold regions[J]. Cold Regions Science & Technology, 1981, 5: 67-75. (in Chinese with English abstract)
  - [24] COTE J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 443-458.
  - [25] 罗斯琼, 吕世华, 张宇, 等. 青藏高原中部土壤热传导率参数化方案的确立及在数值模式中的应用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 919-928.  
LUO Siqiong, LV Shihua, ZHANG Yu, et al. Soil thermal conductivity parameterization establishment and application in numerical model of central Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(4): 919-928. (in Chinese with English abstract)
  - [26] NIKOSOKHAN S, NOWAMOOZ H, CHAZALLON C. Effect of dry density, soil texture and time-spatial variable water content on the soil thermal conductivity[J]. Geomechanics & Geoengineering, 2015, 11(2): 149-158.
  - [27] 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.
  - [28] LU Y, LU S, 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.
  - [29] 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.
  - [30] ZHAO Y, SI B C, ZHANG Z H, et al. A new thermal conductivity model for sandy and peat soils[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 274: 95-105.
  - [31] THOMAS H R, EWEN J. The thermal probe: A new method and its use on an unsaturated sand[J]. *Géotechnique*, 1987, 37(1): 91-105.
  - [32] 苏李君, 王全九, 王铎, 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.  
SU Lijun, WANG Quanjie, WANG Shuo, et al. Soil thermal conductivity model based on soil physical basic parameters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(2): 127-133. (in Chinese with English abstract)
  - [33] 门利利. 土体导热系数经验模型研究及其应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 21-35.  
MEN Lili. Research and Application of Empirical Model of Soil Thermal Conductivity[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 21-35. (in Chinese with English abstract)
  - [34] TIAN Z, LU Y, HORTON R, et al. A simplified de Vries-based model to estimate thermal conductivity of unfrozen and frozen soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(5): 564-572.
  - [35] TARNAWSKI V R, MOMOSE T, MCCOMBIE M L, et al. Canadian field soils III. Thermal-conductivity data and modeling[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 36(1): 119-156.
  - [36] TARNAWSKI V R, WAGNER B. Modeling the thermal conductivity of frozen soils[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 1993, 22(1): 19-31.
  - [37] TARNAWSKI V R, WAGNER B. A new computerized approach to estimating the thermal properties of unfrozen soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 29(4): 714-720.
  - [38] 石修松, 刘素素, 陆钊, 等. 颗粒级配和含水率对含团粒泥炭土导热特性的影响[J]. 地球科学, 2024, 4(10): 1-16.  
SHI Xiusong, LIU Susu, LU Zhao, et al, ZHANG Fuhai. Effect of grading and water content on the thermal conductivity of natural peat aggregated soils[J]. *Earth Science*, 2024, 4(10): 1-16. (in Chinese with English abstract)
  - [39] 谢正鹏. 含有机质粘性土的热导性及其地基热固结处理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022: 17-46.  
XIE Zhengpeng. Study on Thermal Conductivity of Peat Soil and Its Foundation Thermal Consolidation Treatment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022: 17-46. (in Chinese with English abstract)
  - [40] 冯彦皓, 俞自涛, 陆江, 等. 基于模型迁移学习的木材导



- 热系数预测[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(3): 865-872.
- FENG Yanhao, YU Zitao, LU Jiang, et al. Model-based Transfer Learning for Prediction of Multi-factor Wood Thermal Conductivity[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(3): 865-872. (in Chinese with English abstract)
- [41] 冷毅飞. 中俄石油管道多年冻土物理力学性质试验研究及温度场数值分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 46-55.
- LENG Yifei. Experimental Research on Physical Mechanical Properties and Numerical Analysis on Temperature Field of Permafrost of China-Russia Oil Pipeline[D]. Changchun: Jilin University, 2011: 46-55. (in Chinese with English abstract)
- [42] 贾宁. 有机质土水-热物理性质冻融温度效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 31-50.
- JIA Ning. Study on Hydro-Thermophysical Properties of Organic-Rich Soil Under Freezing-Thawing Temperature Effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 31-50. (in Chinese with English abstract)
- [43] 王宏. 线路工程对季冻区草炭土湿地环境影响与评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 31-36.
- WANG Hong. Environmental Impact and Evaluation of Line Project on Turfy Wetland in Seasonal Frozen Area [D]. Changchun: Jilin University, 2020: 31-36. (in Chinese with English abstract)

## Improvement of the thermal conductivity model for turfy soil in view of organic matter content and decomposition degree

HE Yuanyuan<sup>1,2</sup>, HE Wen<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2\*</sup>, WANG Shimei<sup>1,2</sup>, LYU Yan<sup>3</sup>, XU Yan<sup>3</sup>,  
CHEN Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xianwei<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 4. State Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Engineering, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Soil thermal conductivity is one of the most important parameters to determine the heat transfer performance of the soil layer, leading to the ground temperature distribution, soil environment, and crop growth. The composition of organic matter is directly related to the thermal conductivity of high organic soil. However, the current model of soil thermal conductivity cannot consider the organic matter content and decomposition degree. This study aims to analyze the influence of the undisturbed turfy soil on the thermal conductivity in the different layers. Additionally, more than 10 improved models of soil thermal conductivity were proposed and then compared on the turfy soil. The results indicate that: 1) The thermal conductivity in each layer of unfrozen turfy soil was similar (0.51~0.66 W/(m·K)). There was a significant difference in the thermal conductivity among the layers (1.00~1.62 W/(m·K)) after freezing, indicating that the freezing altered the composition of the soil. The higher proportion of components was found with the low heat transfer performance, due to more organic matter components and pores in turfy soil. The thermal conductivity of unfrozen turfy soil was lower than that of other organic soil with higher dry density. Most water in the soil was turned into ice after freezing, indicating the greatly improved thermal conductivity. The high content of water greatly contributed to the thermal conductivity of frozen turfy soil. Furthermore, a correlation analysis was carried out between the fundamental physical properties of turfy soil and the thermal conductivity. The soil particle size distribution, organic matter content, and decomposition degree depended mainly on the thermal conductivity of unfrozen turfy soil. 2) Most prediction models of soil thermal conductivity (Campbell, Johansen, and their derived models) failed to directly consider the proportion of organic matter components in the turfy soil, leading to overestimation of the thermal conductivity of organic matter in the solid phase. Alternatively, the soil thermal conductivity model was used to consider the dry density (Nikoosokhan model) and component weight (Tian model), indicating the excellent applicability to predict turfy soil. It indirectly quantified the low performance of heat transfer in the organic matter components and pores, according to the density differences after the calculation of soil thermal conductivity. The high level of accuracy was still difficult to achieve (RMSE>0.07 W/(m·K) for unfrozen soil; RMSE>0.28 W/(m·K) for frozen soil). 3) According to the soil properties, the parameters were introduced to characterize the turfy soil, including organic matter content ( $O_c$ ) and decomposition degree ( $D_d$ ), in order to improve the model of thermal conductivity. The improved model was obtained to comprehensively consider the low dry density, high water content, and high organic matter of turfy soil. The parameters were modified to reduce the overestimation of the thermal conductivity of organic matter components. Furthermore, a better prediction ( $R^2 > 0.75$ ) of the soil thermal conductivity model was achieved for both unfrozen and frozen turfy soil with high organic matter, in terms of applicability and accuracy. The research findings can provide a strong theoretical reference for the thermophysical properties of seasonal frozen turfy soil with high organic matter in agricultural cultivation and engineering construction.

**Keywords:** soils; models; thermal conductivity; organic matter content; decomposition degree; turfy soil