

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220918

# 常温土壤导热系数的试验及预测研究

霍建星<sup>1</sup>, 晋 华<sup>2</sup>, 张炳钟<sup>2</sup>, 车志远<sup>2</sup>, 郭 磊<sup>2</sup>, 张雨露<sup>2</sup>

(1. 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014017; 2. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 探究土壤导热系数的变化规律, 对地源热泵系统和土壤储热等领域具有重要意义。利用 TEMPOS 热性能分析仪对不同干密度、不同饱和度下黄土和砂土导热系数变化规律进行研究。结果表明, 饱和度和干密度均对土壤导热系数影响显著, 黄土、砂土的导热系数随饱和度的增加总体呈增大趋势, 但黄土和砂土的导热系数变化规律差异明显; 黄土和砂土的导热系数随干密度的增大而增加, 但黄土较砂土变化幅度较小。根据试验数据对 16 种预测模型进行评价, 结果表明, CCM 模型表现最好。

**关键词:** 黄土; 砂土; 导热系数; 预测模型; 饱和度; 干密度

**中图分类号:** S29; TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0195-04

## 1 引言

随着人类社会快速发展和进步, 全世界面临着日益严峻的能源危机。发展绿色可再生能源成为全世界的共同目标。土壤储热技术由于其对可再生能源的高效利用, 成为世界范围内广泛应用的技术。导热系数决定着土壤传热能力的优劣性, 对土壤储热技术发展及其应用有重要意义。近年来, 通过试验对导热系数变化规律及预测模型进行了大量研究, 但大都集中于对砂土和红粘土的单一研究, 而对黄土及黄土与砂土导热系数之间的差异研究较少。因此, 本文以砂土(细砂和粗砂)及黄土为试验对象, 研究不同干密度、不同饱和度对导热系数的影响规律, 并对土壤导热系数预测模型进行了研究, 以期为工程实践提供指导。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验仪器及方法

采用 Meter 公司研制的 TEMPOS 热性能分析仪测试导热系数, 其传感器为 TR-3 型单针, 导热系数测量范围为 0.1~4.0 W/(m·K), 传感器工作温度范围为 -50~150 °C。其工作原理是基于瞬时线热源方法进行测量。对插入土壤的线

形探针施加某一恒定电压, 通过监测该探针的热耗散和温度, 计算土壤热特性。

### 2.2 试验材料

试验用土为砂土和黄土, 其中砂土取自山西省太原市, 黄土取自山西省忻州市。利用振筛机将砂土筛分后按《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012-2019)<sup>[1]</sup>中的标准制备出粗砂和细砂试验用土。黄土进行颗粒级配分析后, 直接用于试验。表 1 为试验用土颗粒级配。

表 1 试验用土颗粒级配

Tab. 1 Soil particle grade for experimental use

试验用土	大于某粒径土粒质量的百分数/%						
	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm	0
粗砂	1.71	18.27	27.99	58.20	75.72	96.16	100
细砂	0	0	0.12	1.69	46.72	88.89	100
黄土	0	0	0.10	0.17	0.84	50.28	100

### 2.3 试验步骤

在试验全过程中, 用空调控制实验室温度为 20 °C 恒温状态。具体试验步骤如下。

**步骤 1** 土壤烘干。取一定量土壤在烘箱中 105 °C 下烘干 12 h。烘干土壤是为了控制土壤含水率。

**步骤 2** 配制不同含水率土壤。取定量干土和不同质量含水率土壤所需水量, 混合并搅拌均匀。本次试验配制质量含水率分别为 0%、5%、10%、15%、20% 的粗砂、细砂和黄土。配制完成

收稿日期: 2022-05-05, 修回日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372247); 山西省回国留学人员科研项目(2017-045)

作者简介: 霍建星(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤热迁移, E-mail: 2579325003@qq.com

通讯作者: 晋华(1969-), 女, 博士、教授、博导, 研究方向为水文及水资源和环境地质, E-mail: jinhua@tyut.edu.cn

后,用保鲜膜密封后静置 24 h 并计算其饱和度。

**步骤 3** 配制不同干密度土壤。将配制完成的土壤,放入一定容积的 PVC 圆柱容器内,由于干土质量一定,故可通过调整体积配制不同干密度的土壤。

**步骤 4** 土壤导热系数测定。不同条件下的粗砂、细砂和黄土静置完成后,利用 TEMPOS 热性能分析仪测定导热系数。为减小试验误差,重复测定 3 次,而后取平均值作为试验工况下导热系数值。

**步骤 5** 土壤体积含水率测定。导热系数测定完成后,用 Stevens Hydras Probe II 温湿度传感器水平插入土壤,通过电脑与仪器连接后读取数据,得到试验土壤的体积含水率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 饱和度对导热系数的影响

整体而言,粗砂、细砂和黄土不同土壤质地的导热系数均与饱和度呈正相关关系。图 1 为干密度为  $1.610 \text{ kg/m}^3$  时土样导热系数随含水饱和度的变化规律。由图 1 可知,土样导热系数随含水饱和度的变化规律可大致分为 2 个阶段:①第 1 阶段快速增长期。当饱和度小于 62% 时,粗砂、细砂和黄土的导热系数均随饱和度的增加而快速增加,这是由于土壤颗粒之间的空隙远未被水填

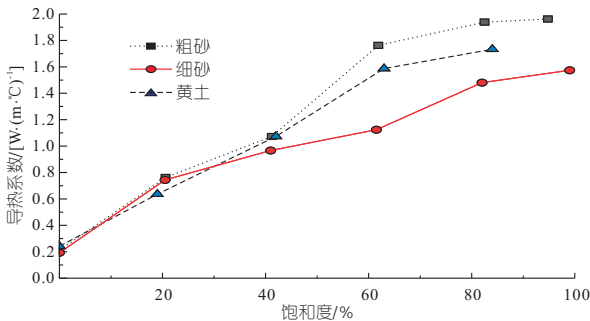


图 1 饱和度对不同土壤质地导热系数的影响  
Fig. 1 Effect of saturation on the thermal conductivity of different soil textures

满,随着饱和度增大,土壤中水分代替空气传热,加快了热量传递,同时随着水分增加在颗粒之间形成水化膜,颗粒之间形成点接触,促进颗粒间传热,由导热系数定义可知,热量传递越快,导热系数越大;②第 2 阶段缓慢增长期。当饱和度大于 62% 时,土中孔隙大部分被填满,随着饱和度的继续增大,水分含量进一步增加不会明显增加颗粒之间的热流,3 种土样的导热系数增长幅度开始逐渐变小。另外,在饱和度相同条件下,粗砂导热系数较细砂和黄土的大,粗砂粒径较细砂和黄土的大。这与现有研究结论一致,土壤颗粒粒径越大,导热系数越大。黄土颗粒粒径小于细砂粒径,但黄土导热系数大于细砂导热系数,造成此现象的机理可能与黄土的特殊性有关。

#### 3.2 干密度对导热系数的影响

图 2 为黄土和砂土在不同含水率下导热系数随干密度的变化规律。由图 2 可知,在相同干密度下,3 种不同土壤质地的导热系数受含水率影响较大,随着含水率的增加,其导热系数均显著增加;当质量含水率不为 0 时,3 种不同土壤导热系数与干密度明显正相关,而 3 种土壤为干土(质量含水率为 0)时,其导热系数随干密度增加而小幅度增加,显而易见,干密度对干土导热系数影响较小,对含水土壤导热系数影响较大。这一方面是因为随着干密度的增加,土越密实,颗粒接触点与接触面积越大,孔隙率越小,使土壤导热能力增强<sup>[2,3]</sup>;另一方面是在质量含水率不变情况下,干密度增加使孔隙率减小,故而使饱和度增加,使土壤导热系数增加。干密度对含水土壤影响较大是由于此两方面均导致土壤导热系数增加,而干密度对干土导热系数的影响仅受一方面影响,故导热系数随干密度变化增加不明显。同时可看出,黄土在 15%、20% 含水率下,不符合随含水率增加导热系数增加的规律,可能由于黄土含有粘性土颗粒,许多研究表明<sup>[4]</sup>,粘性土颗粒会使导热系数减小。出现反常可能是由于在高含水率时,孔

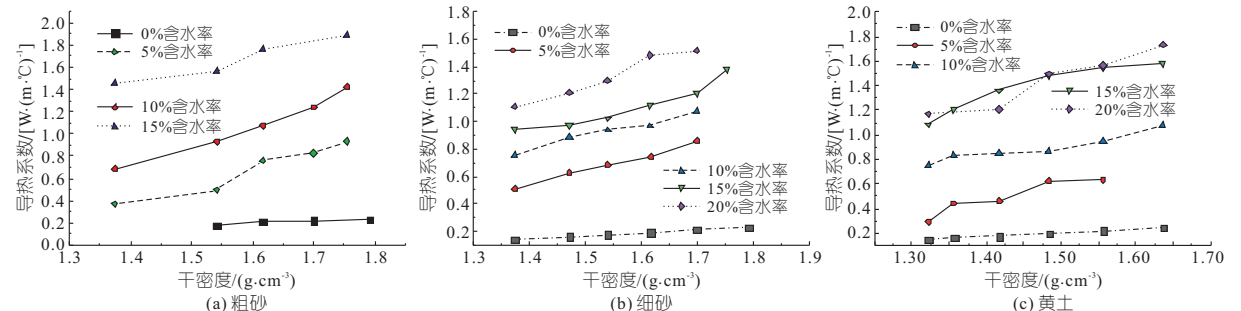


图 2 干密度对导热系数的影响

Fig. 2 The effect of dry density on thermal conductivity

隙水增多,使粘性土的导热性能充分体现,导致在含水率继续增加时,由于受到多种因素影响,黄土导热系数随含水率增加而变化不大。

## 4 导热系数预测模型分析

### 4.1 导热系数预测模型简介

Johansen 经验模型<sup>[5]</sup>为常温土壤导热系数的经验模型,当土样处于非饱和状态时,该模型认为土壤导热系数  $\lambda$  的计算公式为:

$$\lambda = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}})K_e + \lambda_{\text{dry}} \quad (1)$$

其中  $\lambda_{\text{dry}} = \frac{0.135\gamma_d + 64.7}{2700 - 0.947\gamma_d}$ ;  $\lambda_{\text{sat}} = \lambda_s^{(1-n)}\lambda_w^n$

式中,  $\lambda_{\text{sat}}$  为饱和土壤导热系数;  $\lambda_{\text{dry}}$  为干土导热系数;  $K_e$  为 Kersten 数;  $\gamma_d$  为土壤的干密度;  $\lambda_s$  为固体土颗粒导热系数;  $\lambda_w$  为水的导热系数;  $n$  为孔隙率。

对现有不同  $K_e$ 、 $\lambda_{\text{dry}}$  参数<sup>[6,7]</sup>进行矩阵组合,给出了 16 种预测模型。同时基于试验数据,选出一种最优常温土壤导热系数预测模型。

### 4.2 导热系数预测模型参数

#### 4.2.1 $\lambda_{\text{dry}}$ 参数

(1)  $\lambda_{\text{dry}}$  的 Johansen 模型。见式(1)。

(2)  $\lambda_{\text{dry}}$  的 Côté and Konrad 模型<sup>[8]</sup>。用以计算不同颗粒形状的干土导热系数,其表达式为:

$$\lambda_{\text{dry}} = 1 \times 10^{-\eta\chi} \quad (2)$$

式中,  $\chi$ 、 $\eta$  均为与颗粒形状有关的参数,碎石、天然矿物土壤、有机纤维土壤的  $\chi$ 、 $\eta$  值分别为 (1.70、1.80)、(0.75、1.20)、(0.30、0.87)。

(3)  $\lambda_{\text{dry}}$  的 Lu 模型<sup>[9]</sup>。用于预测大部分类型土壤的干土导热系数。

$$\lambda_{\text{dry}} = -an + b \quad (3)$$

式中,  $a$ 、 $b$  均为经验系数,当  $0.2 < n < 0.6$  时,  $a$ 、 $b$  分别取为 0.56、0.51。

(4)  $\lambda_{\text{dry}}$  的 Nikoosokhan 模型<sup>[10]</sup>。用以计算干土土壤导热系数,其表达式为:

$$\lambda_{\text{dry}} = 0.087C_{\text{sand}} + 0.019\gamma_d \quad (4)$$

式中,  $C_{\text{sand}}$  为砂土含量,当砂粒含量  $0 < C_{\text{sand}} < 1$  时,干土重度  $11 < \gamma_d < 20$ 。

$\gamma_d$ 、 $\rho_b$  之间转换关系为:

$$\gamma_d = \rho_b g \quad (5)$$

式中,  $\rho_b$  为土壤干密度,  $g/cm^3$ ;  $g$  为重力加速度,取为  $9.8 m/s^2$ 。

#### 4.2.2 $K_e$ 参数

(1)  $K_e$  的 Johansen 模型。同时反映含水率、土样种类、孔隙率和矿物成分对土壤导热系数的

影响。其表达式为:

$$K_e = \begin{cases} 0.7 \log_{10} S_r + 1.0 & 0.05 < S_r \leq 0.1 \\ \log_{10} S_r + 1.0 & S_r > 0.1 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $S_r$  为土壤饱和度。

(2)  $K_e$  的 Côté and Konrad 模型。其表达式为:

$$K_e = \kappa S_r / [1 + (\kappa - 1)S_r] \quad (7)$$

式中,  $\kappa$  为参数,  $\kappa = 4.60, 3.55, 1.90, 0.60$  分别用于砾石和粗砂、中细砂、粉质和粘性土、粉土和粘土及有机纤维土。

(3)  $K_e$  的 Lu 模型。其表达式为:

$$K_e = \exp\{\gamma [1 - S_r^{(\gamma-1.33)}]\} \quad (8)$$

式中,  $\gamma$  为系数,  $\gamma = 0.96, 0.27$  分别用于粗粒土和细粒土。

(4)  $K_e$  的 Nikoosokhan 模型。Nikoosokhan 对 Johansen 提出的归一化模型进行了简化,  $K_e$  和  $S_r$  的关系见式(7),并给出了该模型中参数  $\kappa$  的计算方式。将参数  $\kappa$  与  $C_{\text{sand}}$  砂土含量联系起来,计算公式为:

$$\kappa = 4.4C_{\text{sand}} + 0.4 \quad (9)$$

### 4.3 导热系数预测模型验证

对式(1)中参数  $K_e$ 、 $\lambda_{\text{dry}}$  已有大量研究,并进行了修正,本文使用 4 种  $\lambda_{\text{dry}}$  和 4 种  $K_e$  模型构成 16 种预测模型见表 2,基于试验数据,探索适用性较广的常温导热系数预测模型。新模型命名由 3 个大写字母构成,第一字母表示  $\lambda_{\text{dry}}$  模型,第二字母表示  $K_e$  模型,第三个字母 M 表示模型。例如 JJM 表示  $\lambda_{\text{dry}}$  的 Johansen 模型和  $K_e$  的 Johansen 模型的结合构成的新模型名称,而 CLM 表示  $\lambda_{\text{dry}}$  的 Côté and Konrad 模型和  $K_e$  的 Lu 模型结合构成的新模型。

表 2 常温导热系数预测模型

Tab. 2 Room temperature thermal conductivity prediction model

项目	类别	$K_e$ 模型			
		Johansen 模型	Côté 模型	Lu 模型	Nikoosokhan 模型
$\lambda_{\text{dry}}$ 模型	Johansen 模型	JJM	JCM	JLM	JNM
	Côté 模型	CJM	CCM	CLM	CLM
	Lu 模型	LJM	LCM	LLM	LNM
	Nikoosokhan 模型	NJM	NCM	NLM	NNM

结合试验数据,通过均方根误差评价 16 种预测模型,见表 3。由表 3 可知,大部分模型对砂土的预测效果优于对黄土的预测效果,而 JNM、CNM、LNM、NNM、NCM 模型对黄土的预测效果优于对砂土的预测效果,可见这些模型对粒径较小的黄土的预测效果较好。从这 5 种预测模型来看, Nikoosokhan 模型中的  $K_e$  参数适用于对黄土导热系数的预测,因此这 5 种模型可能适用

表 3 16 种预测模型基于砂土、砂土和黄土的均方根误差值  
**Tab.3 The 16 prediction models are based on the RMSE values for sandy soil, sandy soil and loess**

预测模型名称	均方根误差		预测模型名称	均方根误差	
	砂土	砂土和黄土		砂土	砂土和黄土
JJM	0.253 5	0.265 6	LJM	0.244 4	0.254 2
JCM	0.200 6	0.202 4	LCM	0.205 5	0.206 0
JLM	0.230 9	0.236 6	LLM	0.230 1	0.234 9
JNM	0.207 7	0.204 0	LNM	0.215 4	0.211 2
CJM	0.251 2	0.262 5	NJM	0.231 6	0.238 0
CCM	0.201 4	0.202 9	NCM	0.225 3	0.224 0
CLM	0.229 5	0.235 4	NLM	0.235 0	0.237 8
CNM	0.209 3	0.205 5	NNM	0.238 9	0.234 1

于对小粒径土壤导热系数的预测。JCM、JNM、CCM、CNM、LCM、LNM 模型在所有模型中对砂土和黄土的预测表现最好。

对比 16 种模型预测值与实测值,发现 CCM 模型对土壤导热系数预测较好,而其他模型在高含水率下,预测值显著小于实测值,且这些模型对细砂的预测效果显著优于对粗砂的预测效果。JCM、JNM、CCM、CNM、LCM 模型在 16 种模型中均方根误差值最小,模型表现较好。根据均方根误差预测趋势可知,基于本文试验数据 CCM 模型在 16 种预测模型表现最好,其原因为该模型中引入了与土壤质地有关的参数,因此 CCM 模型较其他预测模型适用范围广。

### 5 结论

- a. 饱和度和干密度与不同土壤质地的导热系数均呈正相关关系,黄土与砂土的导热系数随饱和度和干密度变化有所差异。
- b. 干密度对含水土壤导热系数贡献率大,对干土导热系数贡献率小。
- c. 基于对 16 种预测模型的试验验证表明,

## Experimental and Predictive Study of Thermal Conductivity of Room Temperature Soil

HUO Jian-xing<sup>1</sup>, JIN Hua<sup>2</sup>, ZHANG Bing-zhong<sup>2</sup>, CHE Zhi-yuan<sup>2</sup>, GUO Lei<sup>2</sup>, ZHANG Yu-lu<sup>2</sup>

(1. Baotou Steel Survey and Mapping Research Institute, Baotou 014017, China;

2. College of Hydro Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** It is of great significance to explore the variation law of soil thermal conductivity for fields of ground source heat pump systems and soil heat storage. The thermal conductivity variation law of loess and sandy soils with different dry densities and different saturations was investigated by TEMPOS thermal performance analyzer. The results show that saturation and dry density both have significant effects on the thermal conductivity of soil. The thermal conductivity of loess and sandy soil shows an overall increasing trend with the increase of saturation, but there is an obvious difference in the change pattern of thermal conductivity of loess and sandy soil. The thermal conductivity of loess and sandy soil increases with the increase of dry density, but the change range of loess soil is smaller than that of sandy soil. At the same time, 16 prediction models are evaluated based on the experimental data and the results show that the CCM model performs the best.

**Key words:** loess; sand; thermal conductivity; predictive model; saturation; dry density

CCM 模型预测效果较好,试验数据可均匀分布在 1 : 1 直线两侧。

### 参考文献:

- [1] 国家铁路局. 铁路工程地质勘察规范:TB10012-2019[S]. 北京:中国铁道出版社,2019.
- [2] 陈波,张芬,马慧龙,等. 土体热导率的研究现状及展望[J]. 土工基础,2019,33(5):575-578.
- [3] 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.
- [4] 皇甫红旺,晋华. 含水率对工程常用土导热系数影响的试验研究[J]. 水电能源科学,2015,33(12):122-124.
- [5] JOHANSEN O. Thermal conductivity of soils[D]. Trondheim, Norway: University of Trondheim, 1977.
- [6] EWEN J, THOMAS H R. The thermal probe-a new method and its use on an unsaturated sand[J]. Géotechnique, 1987, 37(1):91-105.
- [7] 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.
- [8] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. Canadian geotechnical journal, 2005, 42(2):443-458.
- [9] LU S, REN T, GONG Y, 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.
- [10] NIKOOSOKHAN S, NOWAMOOZ H, CHAZALLON C. Effect of dry density, soil texture and time-spatial variable water content on the soil thermal conductivity[J]. Geomechanics and geoen지니어ing, 2016,11(2):149-158.