

# 辽宁省主要城市浅层地温能赋存条件及特征

朱巍<sup>1,2</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 张梅桂<sup>1</sup>, 何海洋<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 为研究岩土体的热物理参数变化规律等浅层地温能赋存特征,运用现场热响应试验和实验室测试分析等研究手段对岩土体导热系数(热导率)、孔隙度、比热容等参数进行科学分析,利用 IGSHPA 线热源模型和 INGERSOIL 圆柱热源模型开展导热系数变化特征分析. 研究结果显示,区内地层平均导热系数为  $1.68\sim 3.44\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , 高值区位于基岩山区. 地层初始地温范围为  $10.80\sim 15.80^\circ\text{C}$ , 高值区位于东、西两侧基岩山区及山前地带. 在天然含水率条件下,岩土体的导热系数随含水率、颗粒密度、孔隙度的变化规律趋势明显,即随含水量的增大而逐渐减小,随颗粒密度的增加而增大,随孔隙度的增加而逐渐降低. 随钻孔直径的增加,钻孔导热系数减小,钻孔热阻明显增加. 以与初始地温差  $1.0^\circ$  作为地温恢复的标准,黏性土地层恢复期需要 5 d,中粗砂地层恢复期为 3 d;以与初始地温差  $0.5^\circ$  作为地温恢复的标准,黏性土地层恢复期需要 15 d,中粗砂地层恢复期为 7 d.

**关键词:** 浅层地温能; 初始地温; 导热系数; 比热容; 线热源模型

中图分类号: TK521

文献标志码: A

## Conditions and Features of the Occurrence of Shallow Geothermal Energy in Major Cities of Liaoning Province

ZHU Wei<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Meigui<sup>1</sup>, HE Haiyang<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Center of China Geological Survey Bureau, Shenyang 110034, China; 2. School of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China)

**Abstract:** Change rule for the study of the thermal physical parameters of rock and soil mass can occurrence characteristics of shallow ground temperature, such as using the thermal response test and the research methods such as laboratory test and analysis of geotechnical engineering (thermal conductivity), porosity, thermal conductivity, specific heat, scientific analysis, parameters, such as using IGSHPA line heat source model and INGERSOIL cylindrical heat source

model to carry out the analysis of characteristics of coefficient of thermal conductivity changes. The results show that the average thermal conductivity of strata in the area is  $1.68\sim 3.44\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , and the high value area is located in bedrock mountainous area. Formation of initial ground temperature range of  $10.80\sim 15.80^\circ\text{C}$ , the high value area in east and west on both sides of bedrock mountains and piedmont zone. Under the condition of natural moisture content, the thermal conductivity of the rock and soil body shows an obvious trend with the change of water content, particle density and porosity, that is, it gradually decreases with the increase of water content, increases with the increase of particle density and gradually decreases with the increase of porosity. As the diameter of borehole increases, the thermal conductivity of borehole decreases and the thermal resistance of borehole increases obviously. And the initial temperature of  $1.0^\circ$  as a standard for geothermal recovery, sticky soil layer recovery needs 5d, coarse sand formation in the recovery of 3d; And the initial temperature of  $0.5^\circ$  as a standard for geothermal recovery, sticky soil layer recovery need 15d, coarse sand formation in the recovery period for 7d.

**Key words:** shallow geothermal energy; initial ground temperature; heat conductivity coefficient; specific heat; line heat source model

浅层地温能是一种重要的新型能源,它是地表以下一定深度范围内(恒温带至 200m 埋深)岩土体、地下水和地表水中温度低于  $25^\circ\text{C}$  并在当前经济技术条件下具备开发利用价值的地热能<sup>[1]</sup>,它具有储量大、分布广、开发利用成本低等优点,其开发利用主要通过地源热泵换热技术实现,全面高效的开发浅层地温能对构建资源节约型和环境友好型社会、保障国家能源安全、改善我国现有能源结构、促进国家节能减排战略目标的实现具有重要的意义. 在我国近年来,汪集暘院士等人对地热资源开展了相关的

收稿日期: 2017-06-29

基金项目: 自然资源部中国地质调查局项目(DD 20189504, 12120114086501-25)

第一作者: 朱巍(1979—),男,高级工程师,博士生,主要研究方向为地热地质、水文地质、环境地质. E-mail: zhuwei\_1114@163.com

研究,并取得了丰富的成果,目前主要集中在指导深部地热勘探开发过程中的作用以及地下能源的利用<sup>[1-4]</sup>,地热能源作为一种重要的清洁能源通过合理的开发利用已经越来越多应用到国民生产生活中。

辽宁省位于我国东北地区南部,是东部沿海省份,省内主要城市包括大连、鞍山、抚顺、本溪、丹东、锦州、营口、阜新、辽阳、盘锦、铁岭、朝阳、葫芦岛市,本文即是对这 13 个城市浅层地温能进行研究。经济快速增长的同时节能减排、生态环境保护等任务也日益加重,尤其是雾霾污染挥之不去,已经在全国范围内造成严重影响。自然资源部中国地质调查局对浅层地温能开发利用工作十分重视,近年来在国内主要省份组织实施了相关工作,依托详实的现场热响应试验和岩土体样品热物性测试分析数据深入分析浅层地温能的赋存特征,为有效开发利用浅层地温能提供参考。

## 1 浅层地温能赋存条件

### 1.1 第四系地质结构特征

研究区第四系地层由冲洪积、冲积、冲海积及坡洪积物组成,主要分布于下辽河平原及丘陵山区的河谷平原。冲洪积层分布于东、西两侧的山前倾斜平原,含水岩组以上更新统、全新统冲洪积层为主,上部为厚 5~15 m 的亚砂土、亚黏土,下部为砂砾石、砾卵石层,厚度 10~60 m。冲积层分布于中部平原地区,表层覆盖厚度 2~8 m 的亚砂土、粉砂,中部以更新统冲积细砂、中粗砂为主,厚度为 50~80 m,下部为中下更新统中细砂、含砾中粗砂及混土砂砾石层,夹亚黏土含砾,厚度 50~110 m。冲海积层分布于滨海三角洲平原,厚度 20~60 m,下部为细砂、中细砂混砾,夹亚黏土层,厚 200~300 m。坡洪积层分布于下辽河平原山前倾斜平原冲洪积扇间地带及辽北丘陵边坡区,岩性以黏性土为主,夹砂、砾石、碎石薄层,厚度变化大,最厚可达 70 m。

### 1.2 地质条件

研究区地势总体由北向南,由东西两侧的山地和丘陵向中部倾斜,丹东市、大连市、抚顺市、本溪市和朝阳市、葫芦岛市、锦州市、阜新市分别位于东、西两侧的山地和丘陵,面积约占 2/3,铁岭市、辽阳市、鞍山市、营口市、盘锦市位于中部北东南西向展布的长方形平原,面积约占 1/3,河流自东、西、北 3 个方向汇集南部,注入辽东湾。中朝准地台断裂体系和滨太平洋断裂体系控制了区内的基本地貌形态,使

山川地势呈北东向展布的特征非常明显(图 1)。地下水分布呈明显的水平和垂直变化。第四系地层普遍下伏上第三系馆陶组、明化镇组地层,为砂砾岩、砂岩和泥岩的互层,地下水赋存运移在其中的孔隙-裂隙空间内,形成层间承压水。此外,南部的滨海三角洲平原广泛分布着咸水(矿化度大于  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

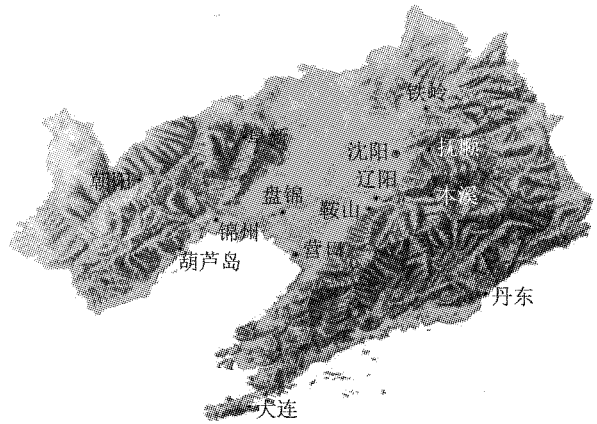


图 1 辽宁省地势分布

Fig.1 Schematic diagram of Liaoning province

### 1.3 水文地质条件

区内地下水类型依据赋存条件和含水岩组特征,分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类岩溶裂隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水、基岩裂隙水。表 1 为各类型地下水的富水性特征。大气降水是区内地下水的主要补给来源。辽东丹东市、大连市、抚顺市、本溪市山区地形陡峭,沟谷狭窄,堆积物薄,渗透、储水条件不利,补给强度较弱。辽西朝阳市、葫芦岛市、锦州市、阜新市山区地形坡度较缓,河谷宽阔,堆积物较厚,有利于降水渗入补给。辽北铁岭市丘陵区北缘为河谷平原,渗透条件、储水性能比东部山区好,渗入补给较强。下辽河平原辽阳市、鞍山市、营口市、盘锦市松散堆积物厚达 30~200 m,是地下水汇聚储存的主要场所,地形平坦,有利于降水入渗补给。地下水径流由西、北、东三面中低山丘陵区向中部下辽河平原汇聚,河谷平原是其主要通道,由平原周边汇入中部,由北东至南西流向渤海湾。

## 2 浅层地温能赋存特征

### 2.1 测试数据的数理统计分析

为了能够使得现场测试与实验测试数据真实可靠,客观反映研究区岩土体的热物理性质,尽量减少测试误差等因素引起的异常数值,首先需要对现场热响应试验和实验室测试的岩土体热物理性质数据

表 1 水文地质条件特征  
Tab.1 Hydrogeological conditions

地下水类型			含水层富水性	水文地质特征			
				含水层岩性	含水层厚度/m	水位埋深/m	单井涌水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
松 散 岩 类 孔 隙 水	下辽 河平 原松 散岩 类孔 隙水	浅 层地 下水	水量丰富	砂卵石、砂砾石	25~70	3~5	5 000~10 000
			水量丰富	砂砾石、中粗砂	20~60	1~4	1 000~5 000
			水量中等	砂砾石、中细砂	30~40	3~5	500~1 000
			水量贫乏	黏性土夹砂砾透镜体	5~10	3~10	100~500
			咸水	粉细砂、中细砂混砾	200~300	1~3	1 000~3 000
	深 层地 下水	水量丰富	砂砾石、含砾中粗砂、中粗砂	20~50	2~4	1 000~3 000	
		鸭绿江	水量丰富	砂砾石	10~20	1~5	1 000~3 000
		浑河流域	水量丰富	砾卵石	3~5	1~5	1 000~3 000
		辽东流域	水量丰富	砂砾石、中粗砂	10~60	2~5	1 000~3 000
		大凌河流域	水量丰富	砾卵石、粗砂	8~20	7~19	2 000~5 000
孔 隙 水	河 谷平 原松 散岩 类孔 隙水	水量中等	砂砾石	4~10	3~5	500~2 000	
		小凌河	水量中等	砂砾石	2~7	1~2	500~2 000
		水量丰富	灰岩		不稳定	1 000~5 000	
		水量中等	灰岩、白云质灰岩		不稳定	500~1 000	
		水量中等	板岩、石英岩互层		不稳定	泉流量 5~10	
	碎 屑岩 类 裂 隙 孔 隙 水	水量丰富	砂砾岩与砾岩互层	大于 200	5~10 10~15	500~1 000	
		水量中等	砂砾岩与页岩互层	大于 300	1~5 局部自流	60~600	
		水量贫乏	细粉砂岩、砾岩		1~5 或自流	4~130	
	基 岩 裂 隙 水	水量中等	火成岩、变质岩裂隙			泉流量>1.0	
		水量贫乏	三大岩类的风化裂隙			泉流量<1.0	

注:板岩、石英岩互层,火成岩、变质岩裂隙,三大岩类的风化裂隙以泉流量计。

进行异常值剔除,对筛选后的数据开展进一步研究,基于上述考量,利用最小二乘拟合算法来剔除天然含水量等的异常数值,以满足研究的实际需求,拟合方程如下:

$$y = a + bx$$

$$ma + \left(\sum_{i=1}^m x_i\right)b = \sum_{i=1}^m y_i$$

$$\left(\sum_{i=1}^m x_i\right)a + \left(\sum_{i=1}^m x_i^2\right)b = \sum_{i=1}^m x_i y_i$$

$$h = \max_{1 \leq i \leq m} |(a + bx_i) - y_i| \times 0.618$$

式中:  $x$  为时间;  $y$  为天然含水量等数值;  $a$ 、 $b$  为拟合系数;  $i$  为计算过程数据个数;  $m$  为测试数据总个数。

方程中  $|(a + bx_i) - y_i| > h$  的数据即为异常点。

## 2.2 岩土体热物性特征

研究区地层岩性主要包括粉质黏土、粉细砂、砾砂、卵石、泥岩、砾岩、花岗岩等,不同岩性的结构导致其热物理性质有很大差异.分析实验室测试数据的主要热物性参数(表 2、表 3、图 2),结果显示第四系松散岩类导热系数的总体变化趋势随岩性颗粒变粗而增加,依次增加的次序为:粉质黏土、粉细砂、砾砂.卵石颗粒不均匀导致热系数小于砾砂,导热系数偏小;孔隙度和比热容的总体变化趋势随岩土体颗粒增大而减小,由于水的比热容最大,因此比热容与含水率呈正相关.研究区基岩的热物性参数变化规律与松散岩类基本一致。

表 2 不同岩土体热物性参数范围

Tab.2 Different scope of rock and soil body heat physical parameters

岩性	含水率 $\omega/\%$	颗粒密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	比热容/(kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> )
粉质黏土	20.5~33.6	1.68~2.05	37.9~49.6	0.97~1.56	0.87~1.21
粉细砂	10.6~19.4	1.65~1.99	30.2~44.9	0.91~1.78	0.56~0.80
砾砂	7.10~13.8	1.51~2.13	24.9~49.8	0.74~1.76	0.66~0.92
卵石	5.00~9.80	1.82~2.32	18.8~36.5	1.05~1.64	0.71~1.02
泥岩	6.10~21.2	1.94~2.44	14.8~38.9	1.19~1.45	0.81~1.21
砾岩	2.70~16.5	2.39~2.61	7.40~20.6	1.25~1.72	0.72~1.02
花岗岩	0.20~2.33	2.62~2.78	1.25~4.75	1.55~2.82	0.62~0.84

## 2.3 不同测试方法热物性特征对比

对每个热响应试验钻孔采集热物理性样品室内

测试结果进行加权平均(地层厚度)计算,获取试验孔的地层综合导热系数,图 3 和表 4 显示了 ZK01~

表 3 不同岩土体热物性参数对比  
Tab.3 Different rock and soil body heat physical parameters

岩性	含水率/%	颗粒密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	比热容/(kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> )
粉质黏土	26.2	1.90	44.05	1.25	1.05
粉细砂	11.3	1.85	37.17	1.43	0.71
砾砂	9.80	1.91	34.26	1.27	0.78
卵石	6.81	2.04	28.05	1.40	0.81
泥岩	14.9	2.18	30.43	1.30	0.99
砾岩	8.65	2.50	14.85	1.45	0.82
花岗岩	0.63	2.70	3.020	1.95	0.70

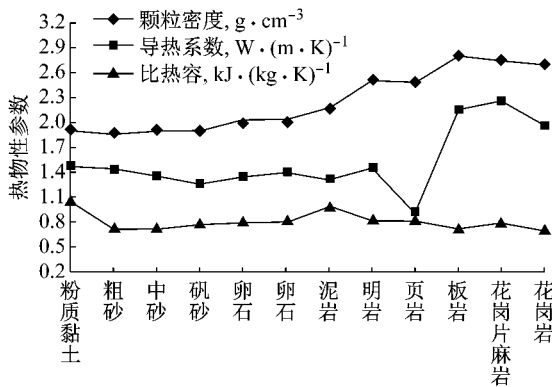


图 2 不同岩土体主要热物性参数对比

Fig.2 Different rock and soil body heat physical parameters

ZK14 钻孔样品室内测试与野外现场热响应试验测试的结果对比。通过对比可知,实验室测试的导热系数比原位热响应试验测试的结果低。分析其原因主要是由于岩土体的热物性参数不但与岩土体的岩性、结构、物理性质(含水率、孔隙度)等密切相关,还与岩土体自身所处的环境包括所处地层深度的压力、温度等有关,不同的外界环境导致了不同热物性参数的存在。

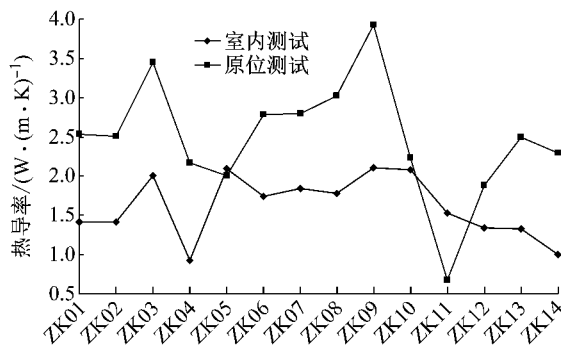


图 3 不同方法测试钻孔综合导热(热导率)系数对比

Fig. 3 Comparison of comprehensive thermal conductivity (thermal conductivity) of borehole tested by different methods

表 4 热物性参数室内测试加权平均计算结果与现场热响应试验 3kw,6kw 测试结果对比

Tab.4 Weighted average calculation results of thermal property parameters are compared with those of thermal response tests

城市	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )			
	室内测试	加热功率 3kw	加热功率 4kw	加热功率 6kw
大连	2.08	2.17		2.29
丹东	1.78	2.73		3.32
本溪	1.74		1.99	2.78
抚顺	2.00	3.40		3.49
铁岭	1.41	2.51		2.50
辽阳	1.33	2.35		2.63
鞍山	1.34	1.72		2.03
营口	1.53		1.63	1.72
盘锦	1.68		1.76	1.82
朝阳	0.93	2.08		2.26
葫芦岛	2.09	2.01		2.00
锦州	1.42	2.46		2.61
阜新	1.00	2.29		2.31

## 2.4 岩土体热物性参数分布特征

### 2.4.1 地层导热系数特征

研究区导热系数高值区位于东、西两侧的基岩山区及山前基岩埋藏较浅的地区,中部下辽河平原地区的导热系数总体低于两侧的基岩山区。基岩山区的地层岩性风化程度低,

地层中花岗岩较多,花岗岩导热系数为研究区所涉及岩土体中最大,因此形成导热系数高值区。山前地区由于基岩埋藏较浅,因而导热系数相对也较大。下辽河平原南部的导热系数高于平原北部地区。下辽河平原内分布有浑河、太子河冲洪积扇地,地层以细砂、粗砂为主,北部地区河流阶地上,地层以黏土、粉质黏土及泥岩为主。根据前面研究成果,细砂、粗砂的导热系数明显高于黏土、粉质黏土及泥岩,因而在南部形成高值区。

### 2.4.2 地层比热容特征

区内地层比热容呈现出与导热系数相反的规律。东、西部山区比热容明显小于平原区。在东、西部基岩山区,地层中多含花岗岩,花岗岩的比热容在所测试的岩土体中最小,因此形成比热容低值区。由东西两侧山区向平原区过渡,比热容逐渐增大。下辽河平原地区比热容均比较高,其北部地层以黏性土和泥岩为主,由于黏性土及泥岩的比热容较高,因而形成高值区;平原中部和南部地层以砂为主,虽然砂的比热容低于黏性土,但是由于南部地层富水性好,水的比热容较大,因而区内的比热容大。

## 2.5 地层热响应特征

地层热响应特征包括地层初始平均地温、岩土

体平均导热系数、地温恢复特征,其获取方法通过现场热响应试验,结合规范的要求和进行热响应试验的实际工作需要,研究采用的是恒定热流试验测试法计算岩土体热参数.恒定热流法是我国地源热泵系统工程技术标准(GB 50366—2009)推荐的方法.计算热物性参数的依据是线热源模型,试验过程采用电加热埋管换热器对地下岩土持续释放恒定热量,持续时间大于 48 h,通过记录各时刻盘管的进出口水温获得循环水平均温度的变化过程,再利用数学模型反演得岩体热物性参数.

试验可以获得初始地温、单位深度换热量、钻孔综合热导率、热扩散系数等,过程分为无功循环、加热试验、地温恢复 3 个阶段<sup>[3-6]</sup>,加热试验分为大功率 6KW 和小功率 3KW 两部分,钻孔深度为 100 m,试验采用双 U 管,回填材料为中粗砂<sup>[7-9]</sup>.

地层初始平均地温是自然条件下温度,研究采用无功循环的方式获取地层初始平均地温,如葫芦岛市 1 号钻孔 2014 年 9 月 22 和 23 日测试数据,如表 5、图 4、图 5.无功循环法(埋管水温平衡法)的原理是当埋管内的水与岩土体的温度达到平衡时通过水泵循环泵出埋管换热器内的水,同时监测水温的变化,从而分析岩土体的温度.在不向埋管换热器加载冷、热量的情况下,使水在埋管内形成循环,在循环水的温度达到稳定时,此时循环水与岩土体达到热平衡<sup>[10-18]</sup>,该温度即为岩土体初始平均温度.

表 5 研究区各城市地层初始地温一览

Tab.5 List of initial ground temperature of urban strata in the study area

城市	地貌特征	主要岩性	初始地温平均值/℃
大连市	辽东山地	板岩、泥岩、花岗岩	14.0
丹东市		砂岩、花岗岩	13.2
本溪市		砂岩、花岗岩	11.3
抚顺市		泥岩、板岩	11.5
铁岭市		砾砂	12.9
辽阳市	下辽河平原	黏性土	12.4
鞍山市		粗砂、亚黏土	12.7
营口市		粗砂、卵石	12.4
盘锦市		粗砂	12.1
朝阳市		砂岩、页岩	12.2
葫芦岛市	辽西低山丘陵	页岩、花岗岩	13.9
锦州市		砂岩、花岗岩	10.8
阜新市		页岩、角砾岩	11.8

分析测试数据呈现如下特征:① 初始地温范围为 10.80~15.80℃;② 高值区在研究区东、西部的基岩及山前地带,其第四系薄,地层岩性多含花岗岩或以其为主,因为花岗岩的导热系数比其他岩土体大;③ 在第四系松散岩类区中,由于岩体的导热系

数与地温呈正相关,因此地层岩性以中粗砂为主的地区地温值高于黏性土为主的地区.

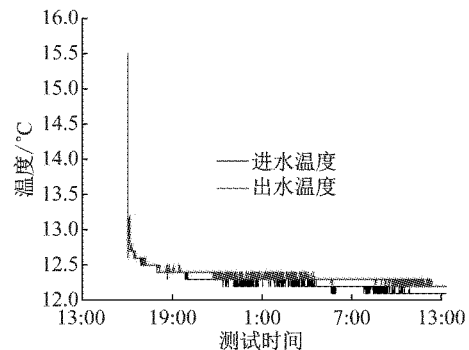


图 4 进出水温度变化曲线

Fig.4 Inlet and outlet water temperature change curve

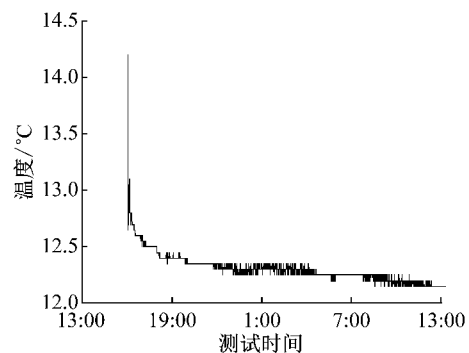


图 5 地层平均温度变化曲线

Fig.5 Formation mean temperature change curve

岩土体的平均导热系数通过现场热响应试验的稳定热流模拟(大、小 2 种功率)获取,模拟通过试验台向埋管换热器提供恒定热流,监测埋管换热器的进、出水温度变化和流量数据<sup>[15-19]</sup>.

欧美国家对埋管换热器的基础理论研究开始较早,1948 年,Ingersoll<sup>[15]</sup>首先提出了至今仍在广泛应用的线热源理论,随后 Carslaw 和 Jaeger 提出了一种改进了的线热源理论——圆柱热源理论,这 2 种模型都是利用解析法求解无限大介质中的无限长热源的热传导问题.V. C. Mei 等人提出了基于三维瞬态远边界的传热模型,将系统分为运行、停止 2 个状态分别建立能量方程.在工程应用中,开发了各种计算工具,Spitler 于 2000 年开发了已应用于商业建筑埋管换热器设计的 Glheprom 软件;Hellstrom 分别于 1995、2001 年开发了 Dst for Trnsysw 和 EED 软件,在不考虑渗流作用情况下进行埋管换热器的设计;同样,对于地下水流动很微弱的地区,国际地源热泵协会(IGSHPA)推荐采用 IGSHPA 法,该方法的设计、模拟基于无限长线热源模型展开.

### 2.5.1 基于 IGSHPA 线热源模型的岩土体热物性分析

研究引进 IGSHPA 线热源模型作为地埋管换热器计算的基础,该模型将钻孔内外土壤视为整体,忽略回填材料和土壤的差异,将埋管换热器看作具有一个当量直径的单根线热源,通过解一维瞬态热传导问题来确定在线源径向某一平面位置上的地层温度.利用分析试验数据计算得到导热系数,该模型为解决竖埋管间的热干扰提供了基础.模型方程为

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left\{ \frac{Q}{H} \left[ \frac{1}{4\pi\lambda_0} \cdot \left( \ln \frac{4a}{r_b^2} - \gamma \right) - R_b \right] + T_0 \right\} \quad (1)$$

式中: $T_f$  为随时间变化的地埋管换热器进出水平均温度,℃; $t$  为测试时间; $Q$  为单位延米地埋管换热量,  $W \cdot m^{-1}$ ;  $a$  为岩土体热扩散系数,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ,  $\alpha = \lambda/c$ , 其中  $c$  为土壤体积比热容;  $\lambda$  为岩土体导热系数,  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ;  $H$  为有效孔深,  $m$ ;  $r_b$  为钻孔半径,  $m$ ;  $\gamma$  为欧拉系数, 0.577 2;  $R_b$  为钻孔内热阻,  $m \cdot K \cdot W^{-1}$ ;  $T_0$  为地层初始温度,℃;

线热源模型可简化为

$$T_f = k \cdot \ln(t) + b \quad (2)$$

式中: $k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$ , 由此得到岩土体热导率计算方程

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H} \quad (3)$$

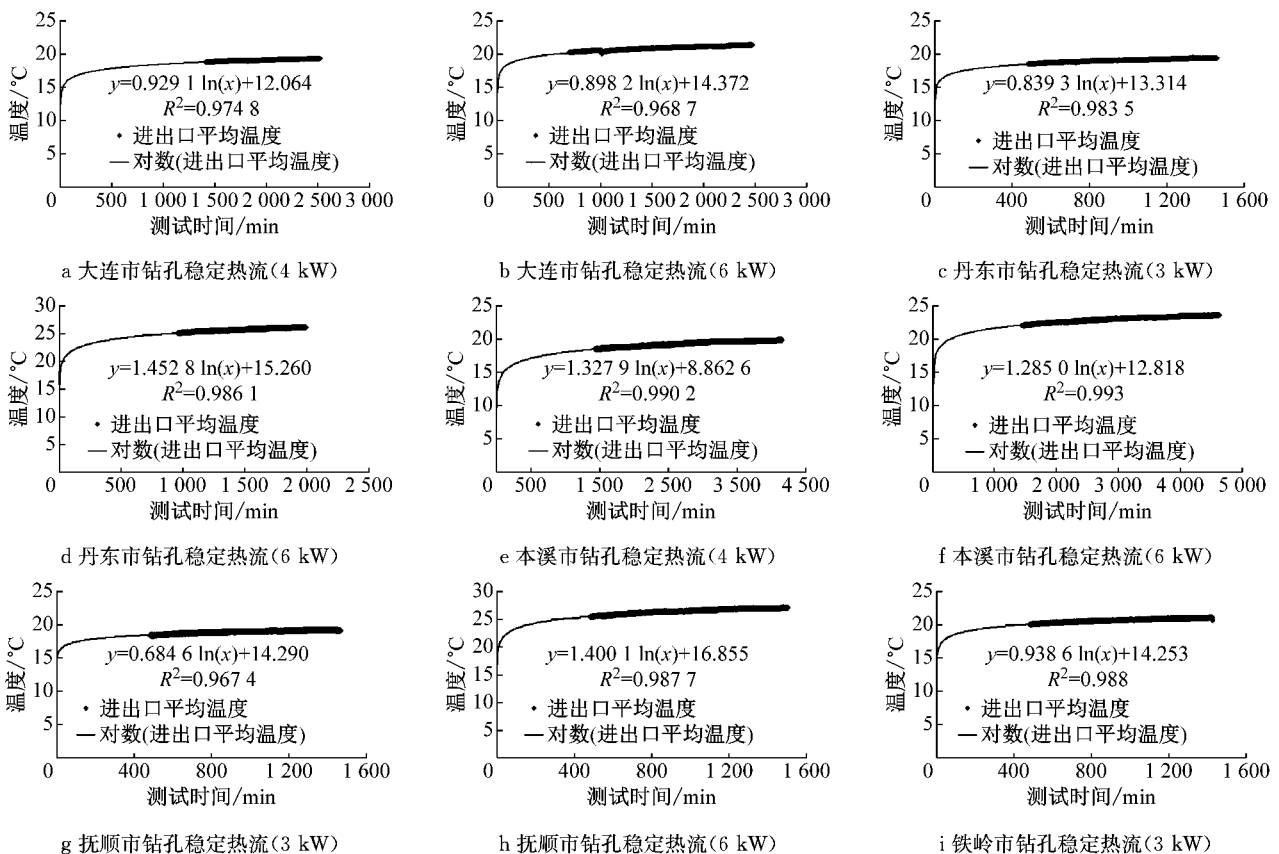
式中: $k$  为地埋管进、出口水温与时间对数拟合曲线的斜率.钻孔热阻为  $R_b$ , 见式(4):

$$R_b = \frac{(m - T_0)H}{Q_{\text{heat}}} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \frac{4a}{r_b^2} \right) - \gamma \quad (4)$$

式中: $m$  为  $T_f$  随  $\ln t$  变化曲线的截距; $r$  为钻孔半径.

通过对数拟合曲线拟合时的拟合优度( $R^2$ )验证,计算结果符合规范.各城市地埋管换热器进出水平均温度及对数拟合成果如图 6, 细线为对数曲线,即拟合曲线,曲线的数据基于野外实验数据,曲线越趋于平缓越说明拟合的效果好.IGSHPA 线热源模型计算结果见表 6、表 7.

通过分析研究结果,可以对区内地层的岩土热物理性质有如下认识:①研究区 100 m 内地层的导热系数为 1.68~3.44  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ .②区内东西两侧山前地区的导热系数值较高,说明该区地层的换热能力较强.③在钻孔孔径相同的情况下,导热系数变化情况由大到小为花岗岩、砂、黏性土,这个变化与室内试验测得的岩土体热导率特征的变化一致.钻孔孔径不同对测试结果也有影响.在同为黏性土和中粗砂地区,钻孔孔径大时测得的地层导热系数均比同种岩性的大.



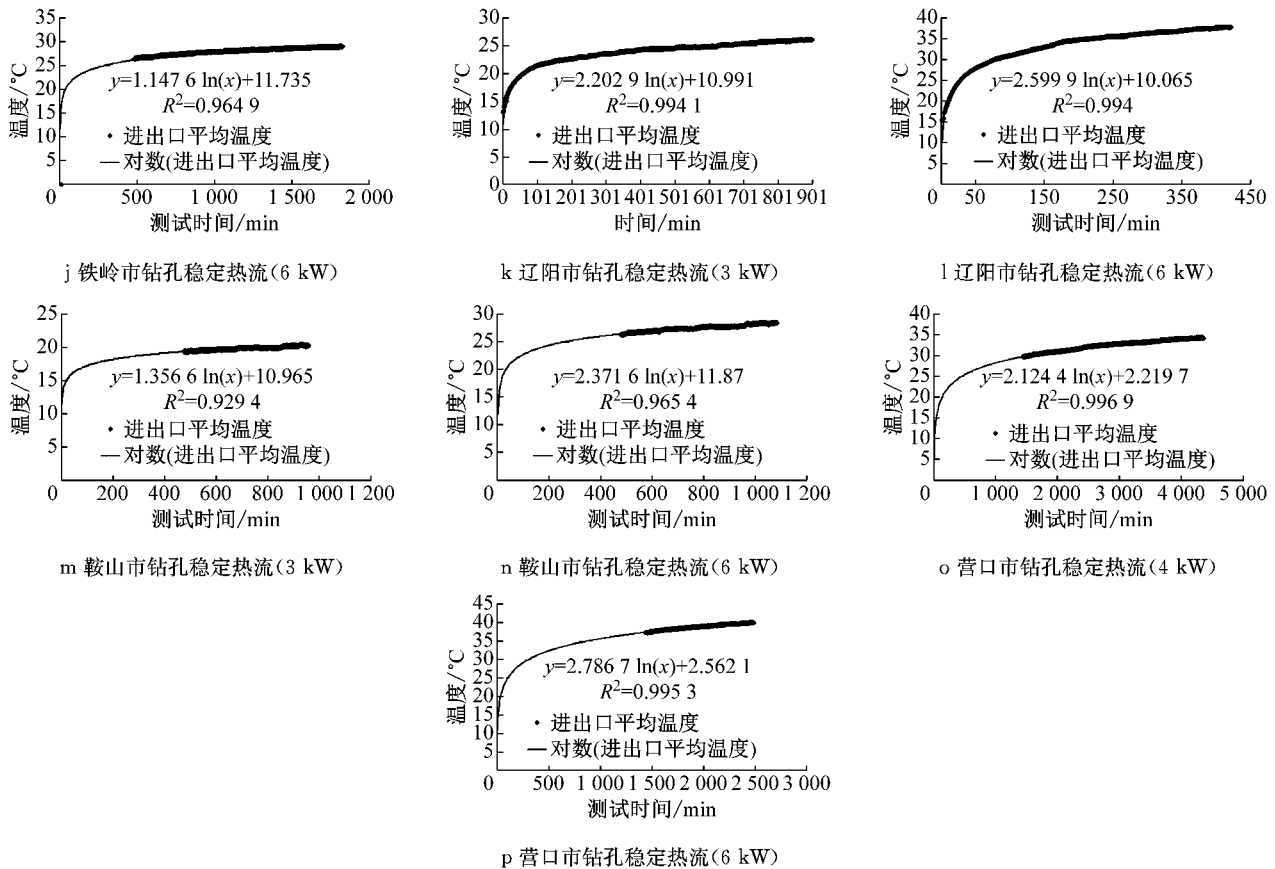


图 6 研究区主要城市地理管换热器进出水平均温度及对数拟合结果

Fig. 6 Average horizontal temperature and logarithmic fitting results of underground heat exchanger in main cities in the study area

表 6 现场热响应试验导热系数测试数据计算结果

Tab. 6 Test data of thermal response test of field test data

城市	初温/°C	测试数据计算结果/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )			
		3 kW	4 kW	6 kW	平均值
大连市	14.0	2.17		2.29	2.23
丹东市	13.2	2.73		3.32	3.03
本溪市	11.3		1.99	2.78	2.39
抚顺市	11.5	3.40		3.49	3.44
铁岭市	12.9	2.51		2.50	2.51
辽阳市	12.4	2.35		2.63	2.49
鞍山市	12.7	1.72		2.03	1.87
营口市	12.4		1.63	1.72	1.68
盘锦市	12.1		1.76	1.82	1.79
朝阳市	12.2	2.08		2.26	2.17
葫芦岛市	13.9	2.01		2.00	2.00
锦州市	10.8	2.46		2.61	2.54
阜新市	11.8	2.29		2.31	2.30

2.5.2 基于 Ingersoll 圆柱热源模型的岩土体热物性分析

为了研究不同钻孔直径对岩土体热物理性质的影响,在线源模型的基础上引入圆柱源模型. 圆柱热源模型就是将钻孔包括埋管和回填材料看作土壤中的均匀圆柱状热源,并假设钻孔孔壁处有一恒定热

流,在这一模型中,以钻孔壁为界,考虑了钻孔回填部分和大地土壤存在的差异.

圆柱源理论本质上基于线源模型,是线热源理论的一种延伸,该模型将 U 型埋管用当量直径等价为一根圆管. 圆柱热源理论分析的主要目的在于确定土壤温度与热交换井井壁温度之间的温差  $\Delta T_g$ , Ingersoll 等<sup>[20]</sup>在 Carslaw 和 Jaeger 工作基础上导出了无限大各向同性介质内嵌入的圆柱热源非稳定传热温差方程如式(5):

$$\Delta T_g = T_g - T_w = \frac{Q_e G(F_0, p)}{H k} \quad (5)$$

式中:  $T_g$  为土壤温度;  $T_w$  为热交换井井壁温度;  $Q_e$  为单位延米地理管换热孔换热量;  $p$  为地下岩土计算点半径与钻井半径的比值;  $F_0$  为傅立叶数,定义为

$$F_0 = \frac{at}{r^2} \quad (6)$$

$$a = \frac{k_s}{\rho_s c_s} \quad (7)$$

式中:  $k_s$  为岩土平均导热系统,  $W \cdot (m \cdot k)^{-1}$ ;  $\rho_s$  为岩土平均密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $c_s$  为岩土平均比热.

表 7 大、小功率下现场热响应试验热物性参数计算一览

Tab.7 Calculation of thermal physical parameters of field thermal response test under large and small power

城市	体积比热容/ kJ·(m <sup>3</sup> ·°C) <sup>-1</sup>	斜率	截距	相关系数	热导率/ (W·(m·°C) <sup>-1</sup> )	平均热导率/ (W·(m·°C) <sup>-1</sup> )	热扩散系数/ (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	钻孔热阻/ (m·°C·W <sup>-1</sup> )
大连小	3 087	0.929	12.06	0.975	2.17	2.23	7.63	0.076
大连大		0.898	14.37	0.969	2.29		7.74	0.185
丹东小	2 662	0.839	13.31	0.984	2.73	3.03	9.20	0.230
丹东大		1.453	15.26	0.986	3.32		12.10	0.250
本溪小	3 358	1.328	8.86	0.990	1.99	2.39	6.22	0.056
本溪大		1.285	12.82	0.993	2.78		7.61	0.158
抚顺小	2 796	0.685	14.29	0.967	3.40	3.44	9.76	0.201
抚顺大		1.400	16.86	0.988	3.49		11.80	0.171
铁岭小	3 224	0.939	14.25	0.988	2.51	2.51	8.00	0.193
铁岭大		1.148	11.74	0.965	2.50		8.46	0.106
辽阳小	2 511	2.203	10.99	0.994	2.35	2.49	9.30	0.207
辽阳大		2.600	10.07	0.995	2.63		9.53	0.215
鞍山小	3 081	1.357	10.97	0.929	1.72	1.87	6.38	0.281
鞍山大		2.372	11.87	0.965	2.03		6.78	0.258
营口小	3 050	2.124	2.220	0.997	1.63	1.68	6.53	0.240
营口大		2.787	2.562	0.995	1.72		6.87	0.238
盘锦小	3 456	1.263	3.288	0.971	1.76	1.79	6.53	0.186
盘锦大		2.523	3.100	0.980	1.82		6.94	0.250
朝阳小	2 832	1.524	0.960	0.969	2.08	2.17	7.38	0.069
朝阳大		2.964	6.728	0.974	2.26		7.84	0.240
葫芦岛小	3 098	1.274	3.841	0.952	2.01	2.00	8.62	0.120
葫芦岛大		2.771	5.870	0.976	2.00		8.99	0.216
锦州小	2 701	1.255	5.199	0.977	2.46	2.54	9.89	0.062
锦州大		2.629	2.773	0.977	2.61		10.20	0.112
阜新小	2 627	1.093	9.431	0.994	2.29	2.30	8.36	0.213
阜新大		2.032	9.450	0.996	2.31		8.98	0.221

通过函数迭代,可以得到埋管流体平均温度

$T_f(t)$ 的计算公式为

$$T_f(t) = q\lambda^{-1} \times 10^{[-0.89129+0.3608\lg F_0-0.05508\lg F_0+3.596 \times 10^{-1}\lg^3 F_0]} + qR_b + T_0 \quad (8)$$

式中: $T(r,t)$ 为  $t$ 时刻半径  $r$  处的岩土温度,°C; $q$  为单位长度圆柱热源的热流强度, $W \cdot m^{-1}$ ;  $T_0$  为岩土初始温度,°C; $\lambda$  为岩土平均导热系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ;  $R_b$  为钻孔总热阻, $K \cdot m$ .

分别以 80 mm、120 mm、160 mm、200 mm、240 mm 为钻孔直径进行圆柱热源非稳定传热温差方程计算,根据计算结果可以得到如图 7、8 所示钻孔直径对导热系数和热阻的影响曲线.从图中可以看出,随钻孔直径的增加,钻孔导热系数减少,钻孔热阻明显增加,因而在进行地源热泵系统设计时,应当尽量采用较小的钻孔直径,尤其在回填材料的导热系数较低的情况下,更要注意钻孔直径的影响.

### 2.6 地温恢复特征

在地埋管地源热泵系统运行时,由于不断地向地下注入或提取热量,会使地温场发生改变,当系统停止运行后,地温场存在一个恢复期,但在不同的地

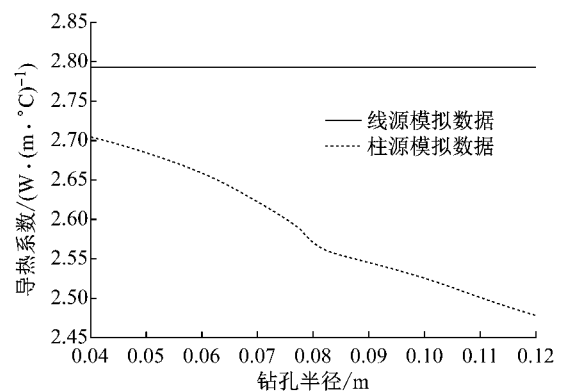


图 7 钻孔直径对导热系数的影响

Fig.7 Influence of borehole diameter on thermal conductivity

质条件下地温恢复的能力是不同的.地温恢复能力可以通过热响应大小功率试验结束后的空载数据来判定<sup>[18-22]</sup>.选择 4 个不同地层岩性下的热响应试验孔的地温恢复数据来反映其地温的恢复能力.恢复数据采用大小功率之间的恢复期的数据.地层地温恢复能力详见表 8 及图 9.通过数据统计、对比分析及对恢复数据曲线进行线性回归分析,综合得出以下结论:



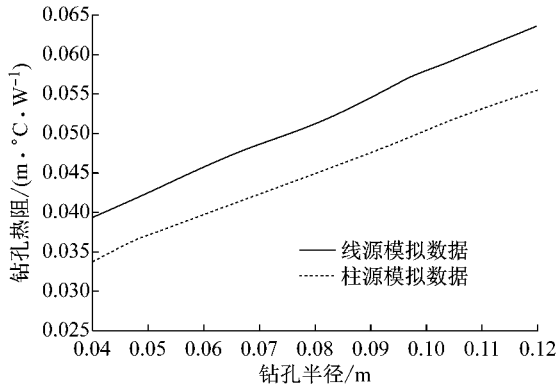


图 8 钻孔直径对热阻的影响

Fig. 8 Influence of borehole diameter on thermal resistance

(1) 地温场的恢复能力与地层的热导率、比热

容等热物性参数有直接的关系。

(2) 以恢复距初始地温差距最小作为地层恢复能力的标准,地温恢复能力大小次序为花岗岩、中粗砂、黏性土,这与地温恢复曲线斜率的绝对值呈现相反的规律,说明地温恢复快的地层,地温恢复曲线的斜率小。

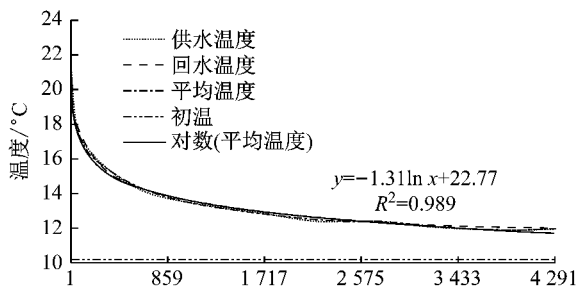
(3) 以与初始地温差 1.0°作为地温恢复的标准,在热响应试验大小功率之间的恢复期,以黏性土为主的地层恢复期需要 5 d(根据线性回归公式推算);而中粗砂为主的地层恢复期为 3 d。

(4) 以与初始地温差 0.5°作为地温恢复的标准,在热响应试验大小功率之间的恢复期,以黏性土为主的地层恢复期需要 15 d(根据线性回归公式推算),而中粗砂为主的地层恢复期为 7 d。

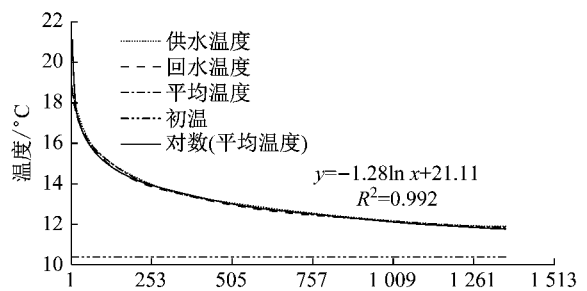
表 8 不同地质条件地温恢复参数对比

Tab. 8 Comparison of temperature recovery parameters in different geological conditions

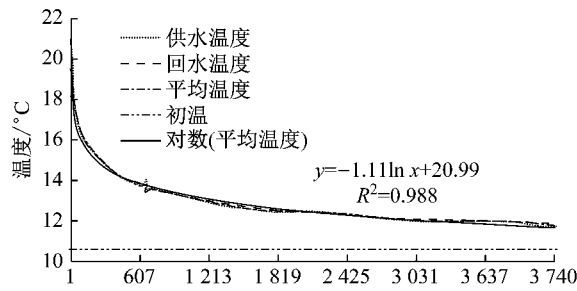
城市	第四系厚度/m <sup>-1</sup>	地层岩性	恢复时间/h <sup>-1</sup>	进出口平均温度/°C		地层初始温度/°C	恢复温差/°C	与初始地温温差/°C
				恢复初时	恢复末时			
Zk02	42.10	亚黏土、粗砂岩、砂砾岩	71.5	20.14	12.00	10.23	8.14	1.77
Zk05	50.80	亚黏土、泥岩、粉砂岩	72.5	19.85	11.85	10.40	8.00	1.45
Zk08	51.68	亚黏土、粉砂、泥岩、砂岩	72.5	19.45	11.77	10.58	7.68	1.19
Zk13	5.20	亚黏土、花岗岩	72.5	19.19	11.84	11.31	7.88	0.53



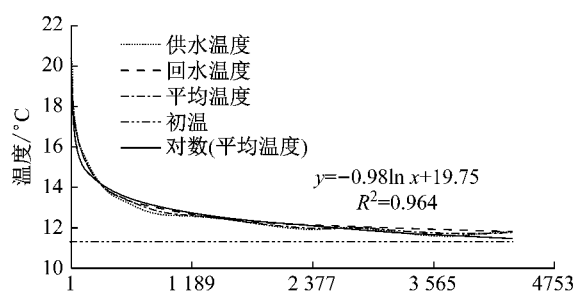
a zk02



b zk05



c zk08



d zk13

图 9 地温恢复曲线

Fig. 9 Temperature recovery curve

### 3 结论

为了得到天然含水条件下岩土体的热导率与含水量、孔隙度等的关系曲线,研究采用了最小二乘法

剔除了个别异常值.研究重视数据的选择、岩性和粒度级配对天然条件下热物性参数的影响,研究导热系数变化规律.通过数理分析、模型构造、正反演拟合等多种方法分析了热物性参数的变化规律,得出以下结论:

(1) 第四系松散岩类导热系数由小到大排序为:黏土、粉质黏土、粉细砂、中砂、粗砂、砾砂,位于  $0.91 \sim 1.85 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  范围内。卵石的导热系数平均值为  $1.40 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ , 低于砾砂, 主要是由于卵石颗粒很不均匀, 因此会对热导率有影响。导热系数随岩性颗粒变粗而增加, 但孔隙度和比热容呈相反规律。基岩的热物性参数变化与松散岩类一致, 导热系数由小到大排序为: 泥岩、砂岩、砂砾岩、花岗岩, 位于  $1.19 \sim 2.82 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  范围内。

研究区地层平均导热系数为  $1.68 \sim 3.44 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ , 高值区位于基岩山区。通过对比分析, 实验室测试的导热系数比原位热响应试验测试的结果低, 主要是由于岩土体的热物性参数与其所处地层深度的压力、温度等有关, 不同的外界环境导致了其热物性参数的差异。原位试验的地层初始地温显示, 其范围为  $10.80 \sim 15.80^\circ\text{C}$ , 高值区出现在东、西部的基岩及山前地带, 岩性直接影响地温分布, 主要影响因素为热导率。

(2) 在天然含水率条件下, 岩土体的导热系数随含水率、密度、孔隙比的变化规律趋势明显: 随含水量的增大热导率逐渐减小, 随密度的增加热导率增大, 随孔隙度的增加热导率逐渐降低。岩土体综合含水量在 25% 左右热导率最佳。

钻孔直径的变化对地层导热系数会产生影响, 随钻孔直径的增加, 钻孔导热系数减少, 钻孔热阻明显增加, 因而在进行地源热泵系统设计时, 应尽量采用较小的钻孔直径, 尤其当回填材料的导热系数较低时。

(3) 与初始地温相差  $1.0^\circ$  作为地温恢复的标准, 黏性土层恢复期为 5 d, 中粗砂地层恢复期为 3 d; 以与初始地温差  $0.5^\circ$  作为地温恢复的标准, 黏性土地层恢复期为 15 d, 中粗砂地层恢复期为 7 d。

**致谢:** 本论文得到自然资源部中国地质调查局的“大连海岸带陆海统筹综合地质调查(DD20189504)”和“辽宁省主要城市浅层地温能开发区 1:5 万水文地质调查(12120114086501-25)”的项目联合支持, 特致谢!

#### 参考文献:

[1] 翁丽芬, 张楠, 陈俊萍. 我国建筑能耗现状下的建筑节能标准解析及节能潜力[J]. 制冷与空调, 2011, 25(1): 10.  
WENG Lifen, ZHANG Nan, CHEN Junping. Building energy consumption in our country under the present situation of

building energy efficiency standard parsing and energy saving potential [J]. Journal of Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(1): 10.

- [2] 王秉忱. 科学利用地源热泵开发浅层地热能[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 3.  
WANG Bingchen. Scientific use of ground source heat pump development of shallow geothermal energy [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2008, 35(3): 3.
- [3] 清华建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度研究报告 2010 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Tsinghua Construction Energy Conservation and Research Center. China building energy efficiency annual report 2010 [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [4] 汪集囡, 龚宇烈, 陆振能, 等. 从欧洲地热发展看我国地热开发利用问题[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 1.  
WANG Jiyang, GONG Yulie, LU Zhenneng, et al. Geothermal development from Europe think of geothermal exploitation and utilization in China [J]. Progress in New Energy, 2013, 1(1): 1.
- [5] 卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 中国浅层地温能资源[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010.  
WEI Wanshun, LI Ningbo, RAN Weiyan, et al. Can shallow geothermal resources in China [M]. Beijing: China Publishing House, 2010.
- [6] 王均, 黄尚瑶, 黄歌山. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 1990.  
WANG Jun, HUANG Shangyao, HUANG Geshan. Basic characteristics of geothermal distribution in China [M]. Beijing: Seismological Press, 1990.
- [7] 国家质量技术监督局. 浅层地温能勘查开发技术规程[S]. 北京: [s. n.], 2006.  
STATE Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical standard for Shallow geothermal resource exploration and exploitation[S]. Beijing: [s. n.], 2006.
- [8] 骆祖江, 金芸芸, 张莱. 可再生浅层地热能资源开发利用关键技术问题[J]. 地质学刊, 2011, 35(4): 401.  
LUO Zujiang, JIN Yunyun, ZHANG Lai. Key technical problems on renewable shallow geothermal energy development and utilization[J]. Journal of Geology, 2011, 35(4): 401.
- [9] 韩再生, 冉伟彦, 佟红兵, 等. 浅层地热能勘查评价[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1115.  
HAN Zaisheng, RAN Weiyan, TONG Hongbing, et al. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy[J]. Geology in China, 2007, 34(6): 1115.
- [10] ADSETT J, Thottan J, AKHAND N. Groundwater treatment for high temperature heat recovery[J]. Journal Environmental Engineering and Science, 2008, 2(2): 233.
- [11] 中华人民共和国建设部. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
Development of the people's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Ground source heat pump systems engineering technical specifications: GB50366—2005 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [12] 刁乃仁, 方肇洪. 埋管式地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出

- 出版社,2006.
- DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Uround ouplcd heat pump technology[M]. Beijing: China HigherEducation Prcss,2006.
- [13] KAVANAUGH S P. Field tests for uround thermal pro-pertics methods and impact on uround-source heat pump[J]. Ashrac Transactions,1998,104(2):347.
- [14] ASHRAE. 2007 ASHRAE handbook on HVAC appli-cans[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2007.
- [15] INGCRSOLL I R, PLANS H J. Theory of the Uround Pipe heat source for the heat pump [J]. Heating, Piping&Air Conditioning, 1948,20(7):119.
- [16] 蔺文静,吴庆华,王贵玲. 我国浅层地温能潜力评价及其环境效应分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(3):57.  
LIN Wenjing, WU Qinghua, WANG Guiling. The shallow ground temperature can potential evaluation and its environmental effect analysis [J]. Journal of Arid Zone Resources and Environment, 2012, 26 (3) : 57.
- [17] 王贵玲,刘云,蔺文静,等. 地下水热源应用适宜性评价指标体系研究[J]. 城市地质,2011,6(3):6.  
WANG Guiling. LIU Yun. LIN Wenjing, *et al.* Application suitability evaluation index system of the underground water thermal fusion research[J]. The City Geology, 2011,6(3):6.
- [18] 陈善雄,陈守义. 砂土热导率的实验研究[J]. 岩土工程学报,1994,16(5):47.  
CHEN Shanxiong, CHEN Shouyi. Experimental study on thermal conductivity of sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering,1994,16(5):47.
- [19] 肖琳,李晓昭,赵晓豹,等. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内试验[J]. 解放军理工大学学报,2008,9(3):241.  
XIAO Lin, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, *et al.* Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils[J]. Journal of PLA University of Science and Technology,2008,9(3):241.
- [20] 王俊杰,徐玉党,毛佳妮. 土壤温度场对垂直 U 形埋管换热性能的影响[J]. 暖通空调,2009,39(3):89.  
WANG Junjie, XU Yudang, MAO Jiani. Influence of soil temperature field on heat transfer performance of vertical U-tube uround heat exchangers[J]. Heating Ventilation and Air Conditioning, 2009,39(3):89.
- [21] 吕朋,孙友宏,王庆华,等. 地源热泵设计参数原位热响应测试的方法及实验[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(增刊1):362.  
LU Peng,SUN Youhong, Wang Qinhu, *et al.* In-situ thermal response test methods and experiment for design uround source heat pump system[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2012,42(Sup.1):362.
- [22] 高平,张延军,方静涛,等. 浅层岩土室内、外热物性测试的相关性[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2014,44(1):259.  
GAO Ping,ZHANG Yanjun, FANG Jingtao, *et al.* Correlation of shallow layer rock and soil thermal physical tests in laboratory and field[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014,44(1):259.

## (上接第 1461 页)

- MA Yuxiao, LIU Jiaduo, WANG Hongfeng. Geology of the Panzhuhua Region [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2001.
- [42] GANINO C, ARNDT N T, ZHOU M F, *et al.* Interaction of magma with sedimentary wall rock and magnetite ore genesis in the Panzhuhua mafic intrusion, SW China [J]. Mineral Deposition, 2008, 43: 677.
- [43] 邢长明,王焰,张铭杰. 攀西地区超大型钒钛磁铁矿床挥发组成及其 C—H—O 稳定同位素研究:对挥发份来源和矿石成因的约束[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(11):1782.  
XING Changming, WANG Yan, ZHANG Mingjie. Volatile and C—H—O isotopic compositions of giant Fe-Ti-V oxide deposits in the Panxi region and their implications for the sources of volatiles and the origin of Fe-Ti oxide ores[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(11): 1782.
- [44] 张国伟,董云鹏,姚安平. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. 陕西地质,1997,15(2):1.  
ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, YAO Anping. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. Geology of Shaanxi, 1997, 15(2): 1.
- [45] WU Y B, ZHENG Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogeny: An overview on the Qinling—Tongbai—Honggan—Sulu orogenic belt in central China[J]. Gondwana Research, 2013, 23:1402.
- [46] 周敬臣. 汉江干流夹河以下河段工程地质特征分析[J]. 长江水利教育,1996,13(4):46.  
ZHOU Jingchen. The engineering geological characteristics analysis of the Jiahe part in Hanjiang[J]. Yantze River Water Conservancy Education, 1996, 13(4):46.
- [47] 张本仁,韩吟文,徐继锋,等. 北秦岭新元古代前属于扬子板块的地球化学证据[J]. 高等地质学报,1998,4(4):369.  
ZHANG Benren, HAN Yinwen, XU Jifeng, *et al.* Geochemical evidence for north Qinling being a part of Yangtze Plate prior to the Neoproterozoic [J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(4):369.
- [48] 万天丰. 中朝与扬子板块的鉴定特征[J]. 地质论评,2001,47(1):57.  
WAN Tianfeng. Distinctive characteristics of Sino—Korean and Yangtze Plates[J]. Geological Review, 2001, 47(1):57.
- [49] YANG S Y, JUNG H S, CHOI M S, *et al.* The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201:407.
- [50] 邵磊,李长安,张玉芬,等. 长江上游水系沉积物铷—钕同位素组成及物源示踪[J]. 沉积学报,2014,32(2):290.  
SHAO Lei, LI Chang'an, ZHANG Yufen, *et al.* Sr-Nd isotopic compositions of the upper Yangtze River sediments: implications for tracing sediment sources [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2):290.