

# 华北平原主要城市浅层岩土综合导热能力研究

## ——基于现场热响应试验分析

王婉丽<sup>1,2)</sup>, 王贵玲<sup>1,2)</sup>, 刘春雷<sup>1,2)</sup>, 李郡<sup>3)</sup>

- 1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061; 2) 中国地质调查局地热资源调查研究中心与自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050061;  
3) 河北省地矿局第三水文工程地质大队, 河北衡水, 053000

**内容提要:**现场热响应试验方法可以获得换热深度内岩土体热物性参数的平均值,能够较真实地模拟地源热泵的实际运行情况,在地源热泵工程勘查设计阶段得到了广泛的应用。本文基于华北平原 89 个钻孔的热响应试验数据,对地表以下 200 m 深度内岩土体的综合导热能力进行分析,并对影响综合热导率的因素进行了探讨。结果表明,华北地区综合热导率大部分处于 1.50~2.16 W/(m·K) 之间(25% < 累积概率 < 75%)。在富水性较好、岩石颗粒粗、地下水径流速度较快的区域,地埋管换热器的换热效果明显高于富水性差、岩石颗粒细、地下水径流速度慢的地区。地层岩性、含水率特征和地下水径流条件是影响岩土体综合热导率的主要因素。其中 200m 深度以内不同地区岩土体的岩性组成各不相同、地下水位埋深不同,是造成综合热导率差异的重要影响因素,地下水径流对岩土体的综合导热能力有促进作用。用无量纲 Pelet 值( $Pe$ )判断地下水流动对换热过程影响的大小,在  $0.28 < Pe < 0.84$  的情况下, $Pe$  值增加 47%,岩土体综合导热能力增加 7.56%。

**关键词:** 现场热响应试验;综合热导率;地层岩性;地下水径流;Pelet 值( $Pe$ )

地源热泵系统因其高效、绿色环保和低维护的优越性,在世界范围获得了广泛的应用(Pahud et al., 2001)。2015 年地源热泵的设备容量为 50258 MWt,在五年间增长了 1.52 倍,平均年累进增长率为 8.69%(Lund et al., 2016)。中国的装机容量仅次于美国,居于世界第二(11781 MWt)。科学应用地源热泵技术的关键之一是准确地确定岩土体的热物性参数,其中综合热导率( $\lambda_{eff}$ )是衡量换热能力的关键参数(Borinaga-Trevino et al., 2013)。

目前,热导率的主要测试方法包括实验室测试法和现场热响应试验法(Wang Shuzhong et al., 2007; Zhang Qing et al., 2013)。室内测试法包括稳态测试法和非稳态测试法,分别应用于中低热导率材料和高热导率材料(Xu Mo et al., 2011)。室内测试由于受样品采集和保存的影响,其结构、含水

量、密度都发生了变化,而且脱离了地下水流动的影响,所测试的结果不能完全反映岩土体的换热能力(Gao P et al., 2015)。现场热响应试验方法可以获得换热深度内岩土体热物性参数的平均值,能够较真实地模拟地源热泵的实际运行情况(Hu Pingfang et al., 2009),利用该方法测试地下岩土体的综合导热能力是进行换热器设计的最佳选择,并在地源热泵工程勘查设计阶段得到了广泛应用。

目前,处于华北地区的北京、天津、河北、山东等地,地源热泵应用面积增长迅速,截止 2016 年应用建筑面积已超过  $1.88 \times 10^8$  m<sup>2</sup>(Wang Wanli et al., 2016)。本文基于 89 个钻孔开展的热响应试验数据,对华北地区 200 m 深度以内岩土体的综合热导率进行分析总结,并对影响综合热导率的主要因素进行了探讨。

注:本文为国家自然科学基金(编号 41302189)、中国地质调查项目(编号 DD20189112)、中国地质调查局地热资源调查研究中心与自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心共同资助的成果。

收稿日期:2020-05-08;改回日期:2020-05-12;网络发表日期:2020-05-16;责任编辑:邱楠生;责任编辑:周健。

作者简介:王婉丽,女,1985 年生。博士,高级工程师,水文地质专业。Email:wanliwang2010@163.com。通讯作者:刘春雷,男,1984 年生。硕士,助理研究员,主要从事地下水资源与地热研究。Email:chunleiliu-dn@163.com。

**引用本文:** 王婉丽,王贵玲,刘春雷,李郡. 2020. 华北平原主要城市浅层岩土综合导热能力研究——基于现场热响应试验分析. 地质学报, 94(7): 2089~2095, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020212.

Wang Wanli, Wang Guiling, Liu Chunlei, Li Jun. 2020. A study of effective thermal conductivity in the North China Plain based on in situ thermal response tests. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2089~2095.

# 1 热响应试验方法

## 1.1 试验方法

目前常采用的热响应试验方法主要有恒热流法和恒温法,二者均为导热反问题,即利用测量得到的温度场或换热量来反解岩土体的热物性参数(Li Min et al., 2010)。

恒热流法通过对岩土体施加恒定热流量,测量其温度分布来反解岩土体的热物性,对应的原理为常热流的线热流理论和圆柱热源理论。恒温法是控制埋管的入口温度,即预设一温度场,测定该温度场下岩土体的换热量,再反演得到岩土体的热物性参数及埋管换热器的总换热热阻,对应的原理为变热流的线热源理论和圆柱热源理论。

实践表明,恒热流法是一种有效的土壤热响应实验手段,但也存在一些不足,例如只能间接得出土壤热导率和热阻,不能直接得出地源热泵系统设计所需单位孔深换热量。恒温法采用热泵建立稳定的埋管换热器运行工况,并直观获得埋管换热器每米换热量的方法,避免了复杂的计算(Deng Na et al., 2014),但与工况和初始温度相关。

## 1.2 试验数据处理方法

热响应试验数据求解方法,多采用线热源理论和圆柱热源理论。

### 1.2.1 线热源理论方法及求解

线热源模型的主要原理是将埋管换热器看成一个无限长恒热流热源,将土壤看作一个均质无限大的热阻,且保持原始温度不变(Ingersoll et al., 1948)。假设条件如下:将热交换孔看作线热源,忽略钻孔几何尺寸并且不考虑竖直方向上的热传导;热物性不随温度的变化而变化;不考虑地下水流动对埋管换热的影响;埋管之间没有热干扰;传热以单纯导热方式进行。

根据以上假设,采用无限长线源模型对数曲线拟合方式分析,其温度解析式为(Ingersoll et al., 1948):

$$T_f(t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

式中,  $T_f(t)$  为  $t$  时刻管内循环液的温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_0$  为岩土体远处未受扰动的温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $r$  为线热源半径( $\text{m}$ );  $H$  为钻孔深度( $\text{m}$ );  $t$  为传热时间( $\text{s}$ );  $Q$  为单位钻孔的总换热量( $\text{W}$ );  $\lambda$  为土壤的热导率( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ );  $a$  为土壤的热扩散率( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $u$  为积分变量。

当  $r^2/(4at)$  很小时,即经长时间运行后,式(1)可近似表达为:

$$T_f(t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda H} (\ln \frac{4at}{r^2} - \gamma) + \frac{Q}{H} R \quad (2)$$

式中,  $R$  为循环液与岩土体间的换热热阻( $\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$ );  $\gamma$  为欧拉常数,取 0.5772。当  $r^2/(4at) \leq 0.05$  时,其误差在 10% 以内;当  $r^2/(4at) \leq 0.0125$  时,误差小于 2.5%。因此维持单位钻孔换热功率不变且当系统运行一定时间(大于 10 h)后(Yu Mingzhi et al., 2006),  $T_f(t) - T_0$  接近一定值。钻孔的换热量为:

$$Q = Mc_p (T_j - T_c) \quad (3)$$

式中,  $M$  为循环液质量流量( $\text{kg}/\text{s}$ );  $c_p$  为循环液的定压比热容( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ );  $T_j$  为循环液的进口温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_c$  为循环液的出口温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

循环液与岩土体间的换热热阻可按式计算(忽略了接触热阻)(Cui Ping et al., 2003):

$$R = R_f + R_p + R_c \quad (4)$$

式中,  $R_f$  为管内循环液的换热热阻( $\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$ ),  $R_p$  为管壁的换热热阻( $\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$ );  $R_c$  为回填物的换热热阻( $\text{m}\cdot\text{K}/\text{W}$ )。

### 1.2.2 圆柱热源模型

圆柱热源模型与线热源模型有很多相似之处,主要区别在于,圆柱热源模型将埋管换热器看成是具有一定半径的圆柱体(Carslaw et al., 1959; Hikari et al., 2004)。其假设条件与线热源模型几乎一致,换热模型忽略圆柱体径向传热,忽略地下水扰动影响,假设圆柱体与土壤之间是单纯的导热,忽略埋管之间的热干扰。在柱热源模型下恒定热源在无限大土壤中非稳定传热的表达式如下所示(Ingersoll et al., 1948):

$$T_w - T_0 = \frac{Q}{H\lambda} G(F_0, p) \quad (5)$$

式中,  $T_w$  为远界未受扰动的初始温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_w$  为钻孔壁温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $p$  为计算点距热源中心距离与埋管半径之比;  $F_0$  为 Fourier 数,  $F_0 = at/r^2$ ,  $G(F_0, p)$  为理论解  $G$  函数。

对上式的求解要用到数值方法求解,计算量相当庞大,不仅包含有两类贝塞尔函数,而且还含有半无限大区间上的积分,工程上一般不予应用。只能采用近似计算方法,一种做法是借助典型半径下  $G(F_0, p)$  随  $F_0$  的拟合公式进行计算。如当  $p=1$  时(Zhao Jun et al., 2006),

$$G = 10^{(-0.89129+0.36081 \times \lg F_0 - 0.05508 \times \lg^2 F_0 + 3.596 \times 10^{-3} \times \lg^3 F_0)} \quad (6)$$

式(6)的适用范围为  $F_0 = 0.1 \sim 10^6$ ,  $p = 1$  即钻孔壁处,假设沿深度方向钻孔内的热阻为定值,管内循环液平均温度与岩土初始温度的关系为:

$$T_f - T_0 = \frac{Q}{H} \left[ \frac{G(F_0, 1)}{\lambda} + R \right] \quad (7)$$

式中,  $T_f$  为管内循环液温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

## 2 不同城市综合热物性参数特征

### 2.1 数据来源

目前,全国已完成包括北京、天津在内的 31 个省、自治区、直辖市城市勘查评价工作(Ran Weiyan et al., 2014)。本文收集到北京、济南、石家庄、天津、郑州在内的 5 个城市共 89 个钻孔的热响应试验数据(卫万顺等, 2010)。基于恒热流法开展的热响应试验,均开展了大、小功率试验,其中小功率一般 3~4 kW,大功率一般 6~8 kW。基于恒温法

开展的试验,均开展了不同进出口温度模拟冬季、夏季的试验工况。本文所利用的数据,均是取测试结果的平均值(表 1)。

其中收集到的北京市的热响应试验孔有 5 个,分别位于永定河、潮白河等冲洪积扇的不同位置,岩性以砂、砾石、黏土为主。天津市共有 40 个热响应试验孔,广泛分布在滨海平原区,砂、砂性土和黏性土不规则“互层”。石家庄的试验孔共有 13 个,主要位于太行山山前倾斜平原,以粗砂、卵砾石为主,部分地区以中粗砂为主。郑州市的试验孔共有 12 个,主要位于黄河冲积平原,第四系为厚层黏土、粉质黏土、粉土及粗、中、细砂层。济南市的试验孔共有 19 个,沉积岩地层岩性组合复杂,从古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系,中生界三叠系、白垩系及新生界新近系和第四系都有分布。

表 1 主要城市热响应试验综合热导率统计表

Table 1 Efficient thermal conductivity based on TRT tests of 89 boreholes

城市	代表地质单元	主要岩性	综合热导率( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )					热响应试验孔数
			极小值	中值	极大值	百分位 25	百分位 75	
北京	永定河、潮白河等冲洪积扇	砂、砾石、黏土为主	1.90	2.45	3.00	1.97	2.71	5
济南	内陆平原和岩溶地区	第四系松散层、奥陶系灰岩、白云岩、二叠系砂岩、泥岩等	1.38	2.61	4.71	2.17	3.62	19
石家庄	太行山山前倾斜平原	粗砂、卵砾石为主,部分地区以中粗砂为主	1.04	1.20	1.43	1.07	1.25	13
天津	滨海平原区	砂、砂性土和黏性土不规则“互层”	1.04	1.70	2.30	1.55	1.89	40
郑州	黄河冲积平原	厚层黏土、粉质黏土、粉土、粗、中、细砂层	1.61	1.80	2.35	1.68	2.07	12

### 2.2 不同城市综合热导率的测试值

华北地区综合热导率大部分处于  $1.50 \sim 2.16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  之间( $25\% < \text{累积概率} < 75\%$ )。除济南岩溶区外,华北平原沉积物来源主要包括河流冲洪积物、沉积物以及滨海地区海陆交替相沉积,第四纪沉积厚度大,综合热导率大部分位于  $1.44 \sim 1.97 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  之间(图 1)。位于冲洪积扇扇顶的地区,山前水动力条件比较强,颗粒粗大,岩性以砂卵砾石夹砂和黏土为主,综合热导率较大,最高达  $3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,换热效果好;位于冲洪积扇下部的地区,岩性颗粒变细,地下水径流速度慢,综合热导率较小,换热效果相对差,只有  $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  左右;位于滨海的地区,颗粒逐渐变为粉砂与黏土互层,综合热导率在  $1.04 \sim 2.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  之间,其中分布在古河道中的现场热响应试验点,通过现场热响应试验所得到的综合热导率偏大。

北方岩溶的代表济南市,发育有典型的岩溶水。其主要岩溶含水层为奥陶系、寒武系的灰岩地层,该

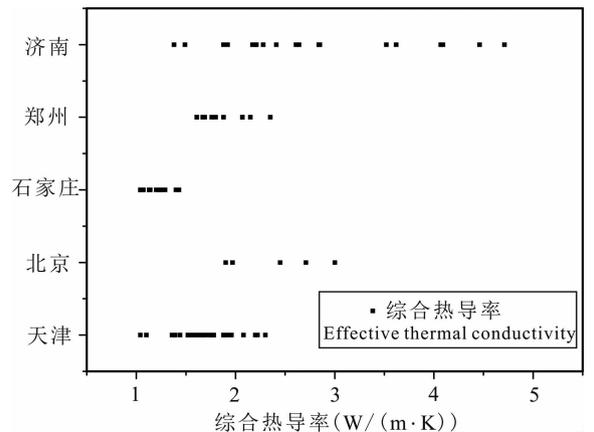


图 1 华北平原 89 个钻孔测定的岩土综合热导率  
Fig. 1 Thermal conductivity of 89 boreholes in the North China Plain

地层综合热导率一般  $1.38 \sim 2.85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,在强径流带,该值更超过了  $4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。石炭-二叠系平均热导率一般  $2.21 \sim 4.09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,辉长岩、辉石闪长岩平均热导率一般  $2.17 \sim 2.20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

### 3 综合热导率的影响因素

#### 3.1 岩性

不同岩石矿物组分和含量不同,其热物性参数各异。地表以下 200m 深度内不同地区岩土体的岩性组成各不相同,是造成综合热导率差异的一个影响因素(Liu Jianjun et al., 2009)。为研究不同岩性的热物性参数,收集到华北地区省会城市的热导率测试数据 1515 个,主要岩性为第四系松散地层及石灰岩、白云岩、泥岩、砂岩等岩石。其中石灰岩、白云岩、辉长岩、闪长岩是济南市出露的典型岩石。对不同岩性热导率的极大、极小值、中值进行统计分析,结果如图 2 所示。

从热导率分布的箱线图可以看出,从黏土、粉质黏土、粉土到粉砂、细砂、中砂,热导率中值从 0.95 W/(m·K) 逐渐增大到 1.95 W/(m·K),热导率随沉积物平均粒径的增大逐渐增加。岩石的热导率普遍高于第四系松散层,碳酸盐岩的热导率中值最大,包括石灰岩中值 2.70 W/(m·K),白云岩中值 2.63 W/(m·K),其次是砂岩 2.03 W/(m·K)、泥岩 1.99 W/(m·K),岩浆岩类相对较小,其中闪长岩中值 1.95 W/(m·K)、辉长岩中值 1.93 W/(m·K)。这与热响应试验测试获取的综合热导率特征具有一致性,说明岩性是影响综合热导率的一个重要因素。

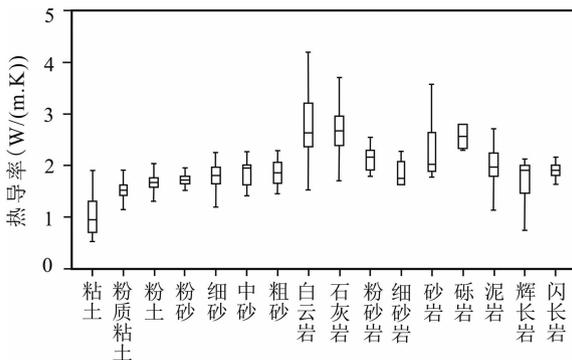


图 2 华北平原主要岩类热导率分布箱线图

Fig. 2 Thermal conductivity of different lithology in the North China Plain

#### 3.2 含水率的影响

不同地区地下水位埋深不同,引起相同岩性的岩土体含水率有较大差别。为对比分析含水率变化对岩土体导热能力的影响,测试了 10 组不同含水率的中砂样品热导率值,测试结果如表 2 所示。结果显示,随着含水率的增加,热导率逐渐增加。在含水

率 < 6.9% 时,增加的幅度较小,在 6.9% < 含水率 < 32% 时,含水率存在线性增加趋势,并达到饱和状态下的最大值。

前人也做过相关测试分析,并利用试验数据拟合了热导率随含水率变化的经验公式,Chen Shanxiong et al. (1994) 选用四种不同级配的石英砂进行试验,采用探针法测定了四种砂土的热导率,实验中考虑砂土孔隙率和饱和度两参数对砂土热导率的影响。Ewen et al. (1987) 总结出计算土的热导率的经验公式。利用两个经验公式,同样可以获得不同含水率对应的热导率值(表 2)。通过对比发现,实际测试值普遍高于经验公式的计算结果,但存在相同的趋势,随着含水率的增加,热导率逐渐增加(图 3)。因此在开展岩土体综合能力研究时,同时还要考虑地下水位埋深或其他因素引起的岩土体含水率的变化。

表 2 热导率测试值与经验公式对比

Table 2 Thermal conductivity results based on tests and empirical equations

深度 (m)	含水率 (%)	饱和度	热导率(W/(m·K))		
			测试值	Chen Shanxiong et al. (1994)	Ewen et al. (1987)
0.2	4.5	0.02	1.20	0.82	0.5
0.5	4.7	0.02	1.20	0.83	0.5
1.0	6.4	0.03	1.40	0.91	0.8
1.5	5.8	0.02	1.30	0.88	0.8
2.0	6.8	0.03	1.50	0.93	0.8
2.5	6.0	0.02	1.40	0.89	0.8
3.0	6.9	0.03	1.45	0.93	0.8
4.0	10.3	0.04	1.55	1.05	1.1
4.5	32.0	0.14	1.95	1.51	1.6
5.5	32.9	0.13	1.97	1.53	1.6

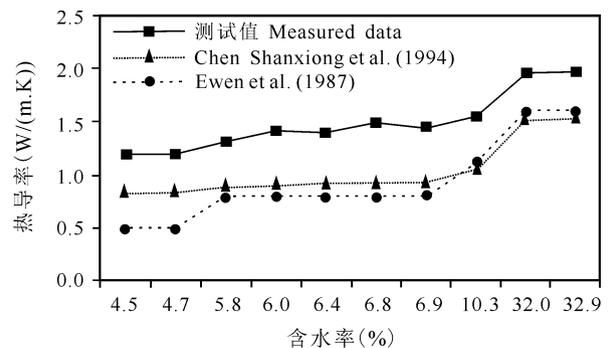


图 3 不同含水率对应的热导率值

Fig. 3 Thermal conductivity of underground material with different water content

#### 3.3 地下水径流条件的影响

从华北地区热响应试验的结果来看,在富水性较好、岩石颗粒粗、地下水径流速度较快的区域,地

埋管换热器的换热效果明显高于富水性差、岩石颗粒细、地下水径流速度慢的地区。根据前人研究,0~200m 深度内浅层岩土体中通常会存在含水层,并且局部的地下水流动也会对岩土体的传热产生影响,从而影响埋管的换热效率。无量纲 Pecllet 值一般用作判断地下水流动对换热过程影响的大小(Bear et al., 1972),表示为渗流换热与热传导的比值:

$$Pe = \frac{\rho_w c_w \nu L}{\lambda} \quad (8)$$

式中,  $\rho_w$  为地下水的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c_w$  为地下水的比热容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ),  $\nu$  为在地下水渗流流速大小( $\text{m}/\text{s}$ ),  $L$  为特征长度( $\text{m}$ ),  $\lambda$  为多孔介质的综合热导率( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。

按照 Pecllet 值的定义,值越大,渗流换热所占的比重也越大。这也意味着由热传导起主导作用的传热过程中 Pecllet 值较小,由热对流起主导作用的传热过程中 Pecllet 值较大。特征尺寸  $L$  的取值选

择对其结果也有影响。Bear et al. (1972)从一系列实验研究中归纳得出,当把平均粒度作为特征长度时,Pecllet 值小于 0.4 时,导热作用占主导过程;当其处于 0.4~5 时,热传导换热与热对流换热程度相当;大于 5 时,渗流换热占主导作用。因此,分析 Pecllet 值的相对大小,可初步得出由渗流所产生的对流换热对整个系统换热过程的影响。

为对比地下水流速影响,选择石家庄地区试验数据进行分析,试验孔位如图 4 所示。所选孔位地下水埋深介于 35~45m 之间,孔深均为 100m,统一采用 DN32 双 U 埋管形式,钻孔直径均为 0.2m,采用建筑用中粗砂作为回填材料。根据 1:5 万地下水水位等值线图,结合渗透系数分区图,计算得到每个钻孔位置的流速,孔位信息及径流条件见表 3。为了减小试验测量误差,埋管换热器的地面以上部分的长度保留约 1m 左右,并进行了保温处理,以尽量减少热损失。

表 3 石家庄热响应试验孔地下水流速

Table 3 Groundwater velocity of different boreholes

钻孔编号	经度(°)	纬度(°)	成井深度(m)	水力梯度	地下水流速(m/d)	地下水流速( $\times 10^{-6}$ m/s)	Pe 值
SJZ-02	114.58	38.08	100	0.00067	0.11	1.32	0.28
SJZ-05	114.65	37.98	100	0.00128	0.22	2.52	0.53
SJZ-06	114.58	38.15	100	0.00154	0.26	3.04	0.64
SJZ-07	114.55	38.17	100	0.00204	0.35	4.01	0.84

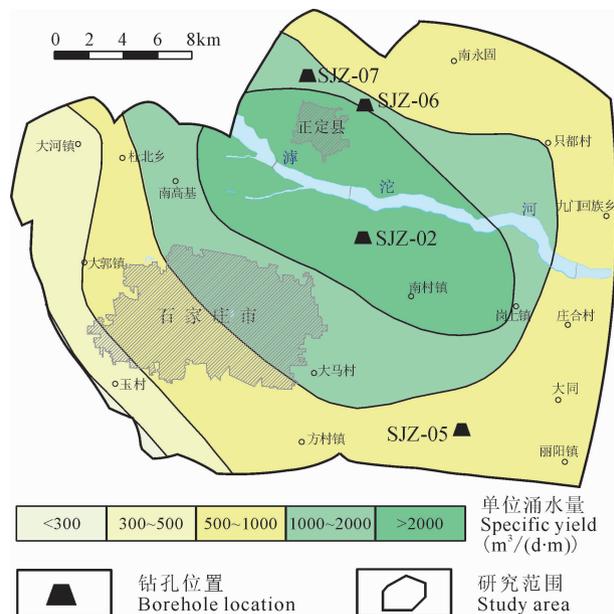


图 4 石家庄地区热响应试验钻孔位置示意图  
Fig. 4 Borehole locations of thermal response tests in Shijiazhuang City

对 4 个钻孔开展恒温法热响应试验,每一个孔位除进行 1 组无功循环测试岩土体初始地温外,还

开展了 3 组不同进口温度的试验,包括 1 组制冷试验和 2 组加热试验。4 个钻孔共进行了 16 组试验,得到每个钻孔的初始温度、综合热导率(表 4)。SJZ-02 钻孔 Pe 值为 0.28,由无功循环阶段测得初始温度为 16.06℃,综合热导率为 1.04  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。Pe 值最大的为 SJZ-07 孔,Pe 值为 0.84,由无功循环阶段测得初始温度为 14.74℃,综合热导率为 1.29  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

表 4 热响应试验对应综合热导率结果表

Table 4 Results of thermal response tests

野外编号	地下水流速(m/d)	Pe	初始平均地温(°C)	综合热导率( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )
SJZ-02	0.11	0.28	16.06	1.04
SJZ-05	0.22	0.53	14.66	1.06
SJZ-06	0.26	0.64	15.45	1.13
SJZ-07	0.35	0.84	14.74	1.29

将所有钻孔测试结果与 Pe 值进行对比(图 5),随着 Pe 值的增加,综合热导率出现逐渐增加的变化趋势。将两两钻孔的综合热导率进行对比,计算地下水流速增加的幅度和相对应的钻孔换热效率的提高率。由计算结果可知,随着地下水流速增加,换热效率总体上呈增加趋势,在  $0.28 < Pe < 0.84$  的

情况下,  $Pe$  值增加 47%, 换热效率可以增加 7.56%。

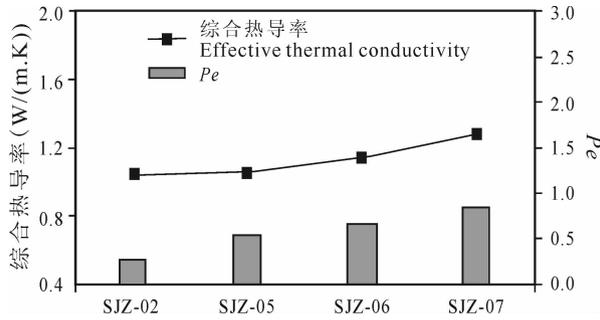


图5 钻孔综合热导率随  $Pe$  值变化图

Fig. 5 Effective thermal conductivity with different  $Pe$  number

## 4 结论

通过对华北地区 89 个钻孔开展的热响应试验数据进行分析, 华北地区综合热导率大部分处于 1.50~2.16 W/(m·K) 之间 (25% < 累积概率 < 75%)。从华北地区热响应试验的结果来看, 在富水性较好、岩石颗粒粗、地下水径流速度较快的区域, 埋管换热器的换热效果明显高于富水性差、岩石颗粒细、地下水径流速度慢的地区。济南市主要岩溶含水层为奥陶系、寒武系的灰岩地层, 综合热导率一般为 1.38~2.85 W/(m·K)。地层岩性、含水率特征和地下水径流条件是影响岩土体的综合热导率的主要因素。

(1) 地表以下 200m 深度内不同地区岩土体的岩性组成各不相同, 是造成综合热导率差异的一个影响因素。从黏土、粉质黏土、粉土到粉砂、细砂、中砂, 热导率中值从 0.95 W/(m·K) 逐渐增大到 1.95 W/(m·K), 热导率随沉积物平均粒径的增大逐渐增加。岩石的热导率普遍高于第四系松散层, 碳酸盐岩的热导率中值最大, 其次是砂岩、泥岩。这与热响应试验测试获取的综合热导率特征具有一致性。

(2) 不同地区地下水埋深不同, 引起相同岩性的岩土体含水率有较大差别。不同含水率中砂样品的测试数据反映, 随着含水率的增加, 热导率逐渐增加。因此在开展岩土体综合能力研究时, 同时还要考虑地下水埋深或其他因素引起的岩土体含水率的变化。

(3) 地下水流动对岩土体的传热产生影响, 从而影响埋管的换热效率。利用石家庄地区热响应试验测试结果进行分析可知, 随着地下水流速增加, 换热效率总体上呈增加趋势, 在  $0.28 < Pe < 0.84$  的情况下,  $Pe$  值增加 47%, 换热效率可以增加 7.56%。因此在开发利用过程中, 对水文地质条件的调查至关重要。

## 注释

- ① 天津地热勘查开发设计院. 2012. 天津市浅层地热能资源调查潜力报告.
- ② 河北省地矿局第三水文工程地质大队. 2013. 石家庄市浅层地热能调查评价报告.
- ③ 山东省地矿工程集团有限公司. 2013. 济南市浅层地热能调查评价报告.
- ④ 河南省地质调查院. 2013. 郑州市浅层地热能调查评价报告.

## References

- Bear J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier, 53~260.
- Borinaga-Trevino R, Pascual-Munoz P, Castro-Fresno D, Blanco-Fernandez E. 2013. Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT. Applied Thermal Engineering, 53:13~20.
- Carslaw H S, Jaeger J C. 1959. Conduction of Heat in Solids. Second Edition. Oxford: Oxford University Press, 1~517.
- Chen Shanxiong, Chen Shouyi. 1994. Experimental study on thermal conductivity of sands. Journal of Geotechnical Engineering. 16(5): 47~53 (in Chinese with English abstract).
- Cui Ping, Diao Nairen, Fang Zhaohong, Sun Changliang. 2003. Heat transfer model and thermal resistance calculation of U-shape buried pipe of geothermal heat exchangers. Heating Ventilating Air Conditioning, 33(6): 108~110 (in Chinese with English abstract).
- Deng Na, Wang Jilin, Wang Jianshuan, Yu Xiaohui, Zhang Yufeng. 2014. Quantitative analysis and comparison of ground thermal response test based on constant temperature method and constant heat-flux method. Acta Energetica Solaris Sinica, 35(2): 320~325 (in Chinese with English abstract).
- Ewen J, Thomas H R. 1987. The thermal probe- a new method and its use on an unsaturated sand. Geotechnique, 37: 91~105.
- Gao P, Zhang Y J, Yu Z W, Fang J T, Zhang Q. 2015. Correlation study of shallow layer rock and soil thermal physical tests in laboratory and filed. Geothermics, 53: 508~516.
- Hikari F, Ryuichi I, Takashi I. 2004. Improvements on analytical modeling for vertical U-tube ground heat exchange. Resources Council Trans, 28(15): 73~76.
- Hu Pingfang, Meng Qingfeng, Guan Changsheng, Deng Qiming, Lei Fei. 2009. Uncertainty analysis on the parameters of the rock-soil thermal properties. Journal of Hunan University: Natural Science, 36(12): 35~39 (in Chinese with English abstract).
- Ingersoll L R, Plass H J. 1948. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. ASHRAE Transactions, 47: 339~348.
- Li Min, Yu Yanshun. 2010. Research progress of thermal response test for GSHP system. Refrigeration and Air-conditioning, 10(1): 31~34 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianjun, Liu Hailei. 2009. Rock thermal physical properties test and analysis. West-China Exploration Engineering, 4: 144~148 (in Chinese with English abstract).
- Lund J W, Boyd T L. 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. Geothermics, 60: 66~93.
- Pahud D, Matthey B. 2001. Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ. Energy and Building, 33: 503~507.
- Ran Weiyuan, Li Ningbo, Yang Junwei, Yu Yuan. 2014. Some enlightenment gained from city shallow geothermal energy investigation and evaluation. Urban Geological, 9(sup): 1~3 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuzhong, You Shijun, Zhang Guangping. 2007. Application of geothermal response test in the design of ground heat exchanger. Acta Energetica Solaris Sinica, 28(4): 405~410 (in Chinese with English abstract).

- Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi. 2016. Method of forecasting the temperature in constant temperature zone under warm temperate climates. *Renewable Energy Resources*, 34(8): 1112~1116 (in Chinese with English abstract).
- Xu Mo, Wang Di, Jiang Wenliang, Qi Jihong. 2011. Review on thermal conductivity coefficient of rock and soil mass. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4): 422~425 (in Chinese with English abstract).
- Yu Mingzhi, Peng Xiaodong, Fang Zhaohong, Li Xiaodong. 2006. Line source method for measuring thermal properties of deep ground. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 27(3): 279~283 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qing, Zhang Yanjun, Zhou Bingqiang, Huang Xianlong, Yu Ziwang. 2013. Influence of nature cold source on groundwater heat source pump. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 43(2): 537~549 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jun, Duan Zhengqiang, Song Zhukun, Li Limei. 2006. A method for in situ determining underground thermal properties based on the cylindrical heat source model. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 27(9): 934~936 (in Chinese with English abstract).

### 参 考 文 献

- 陈善雄, 陈守义. 1994. 砂土热导率的实验研究. *岩土工程学报*, 16(5): 47~53.
- 崔萍, 刁乃仁, 方肇洪, 孙长亮. 2003. 地热换热器 U 型埋管的传热模型及热阻计算. *暖通空调*, 33(6): 108~110.

- 邓娜, 王继林, 王建栓, 于晓慧, 张于峰. 2014. 基于恒温法与恒热流法的土壤热响应测试分析与比较. *太阳能学报*, 35(2): 320~325.
- 胡平放, 孟庆丰, 管昌生, 孙启明, 雷飞. 2009. 岩土综合热物性参数的不确定性分析. *湖南大学学报: 自然科学版*, 36(12): 35~39.
- 李敏, 余延顺. 2010. 地源热泵系统的热响应测试的研究进展, 制冷与空调, 10(1): 31~34.
- 刘建军, 刘海蕾. 2009. 岩石热物理性质测试与分析. *西部探矿工程*, 4: 144~148.
- 冉伟彦, 李宁波, 杨俊伟, 于漫. 2014. 城市浅层地温能勘查评价工作的几点启示. *城市地质*, 9(增刊): 1~3.
- 王书中, 于世俊, 张光平. 2007. 热响应测试在土壤热交换器设计中的应用. *太阳能学报*, 28(4): 405~410.
- 王婉丽, 王贵玲, 朱喜. 2016. 暖温带地区恒温带温度的预测方法. *可再生能源*, 34(8): 1112~1116.
- 卫万顺, 郑佳森, 冉伟彦, 李文伟, 李宇. 2010. 浅层地温能资源评价. 北京: 中国大地出版社, 139~144.
- 许模, 王迪, 蒋良文, 漆继红. 2011. 岩土体导热系数研究进展. *地球科学与环境学报*, 33(4): 422~425.
- 于明志, 彭晓峰, 方肇洪, 李晓东. 2006. 基于线热源模型的地下岩土热物性测试方法. *太阳能学报*, 27(3): 279~283.
- 张庆, 张延军, 周炳强, 黄贤龙, 于子望, 孙永泉. 2013. 天然冷源对地下水热源的影响规律. *吉林大学学报: 地球科学版*, 43(2): 537~549.
- 赵军, 段征强, 宋著坤, 李丽梅. 2006. 基于圆柱热源模型的现场测量岩土热物性方法. *太阳能学报*, 27(9): 934~936.

## A study of effective thermal conductivity in the North China Plain based on in situ thermal response tests

WANG Wanli<sup>1,2)</sup>, WANG Guiling<sup>1,2)</sup>, LIU Chunlei<sup>\*1,2)</sup>, LI Jun<sup>3)</sup>

1) *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, 050061*; 2) *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, 050061*;

3) *Third Hydrological Engineering Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Hengshui, Hebei, 053000*

\* *Corresponding author; chunleiliu-dn@163.com*

### Abstract

Average thermal parameters of the whole heat exchanger can be measured by in situ thermal response test (TRT). TRT can simulate the actual operation of the ground source heat pump (GSHP) and has been widely used in designing the GSHP. Data of TRTs from 89 different boreholes in China were collected and analyzed. Effective thermal conductivity ( $\lambda_{\text{eff}}$ ) of the ground within 200 m was analyzed and its influencing factors were evaluated. Results show that thermal conductivity from TRT results are mostly between 1.50 and 2.16 W/(m·K) with cumulative probability between 25%~75%. Generally speaking, underground materials with coarse grain, high water yield and strong groundwater velocity show better heat transfer capacity. Lithology, water content and groundwater flow are important influencing factors for effective thermal conductivity. The regional variability of the underground material and groundwater level depth within 200m are important factors controlling effective thermal conductivity. Groundwater flow also plays an important role and the modified Peclet number ( $Pe$ ) is introduced to define the effect of groundwater flow. When  $Pe$  is between 0.28 and 0.84, a 47% increase in  $Pe$  number results in a 7.56% increase in the effective thermal conductivity of the ground.

**Key words:** thermal response test (TRT); effective thermal conductivity ( $\lambda_{\text{eff}}$ ); lithology; influencing factors; Peclet number ( $Pe$ )