

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.01.13

引用格式: 张乐,周阳,刘建强,等. 基于叠加法的陕西省典型地貌单元岩土导热系数分析[J]. 中国地质调查,2020,7(1): 91-96.

基于叠加法的陕西省典型地貌单元岩土导热系数分析

张乐^{1,2}, 周阳^{1,2}, 刘建强^{1,2}, 金光^{1,2}, 张亚鸽^{1,2}

(1. 陕西省水工环地质调查中心, 西安 710068; 2. 陕西省地质调查院, 西安 710054)

摘要: 近年来,浅层地热能受到广泛关注,但由于在开发利用过程中对地层导热性能分析不足,现有开发利用项目失败率较高。为解决这一问题,对陕西省不同地貌单元已开展的46组热响应试验结果进行整理,以线热源模型为基础,采用叠加法对陕西省典型地貌单元的导热系数进行了分析统计。结果表明:山间盆地、沙漠高原和断陷盆地3种地貌单元的导热能力依次减小;在同一地貌单元中,第四系黄土覆盖层越厚,钻孔的导热能力越差;黄土塬地区导热系数大小差距较大,可进一步深入研究该地貌单元内导热系数的影响因素。通过对不同地貌单元岩土导热系数分布特征的研究,提出了各地区浅层地热能开发利用的相关建议,从而为进一步高效、高质开发浅层地热能提供思路和技术支持。

关键词: 叠加法; 线热源模型; 导热系数; 浅层地热能资源

中图分类号: P314; P642.114

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2020)01-0091-06

0 引言

浅层地热能资源(Shallow Geothermal Resources)是指蕴藏在浅层岩土体、地下水、地表水中的地热资源^[1],一般低于25℃^[2]。最新数据表明,我国287个地级以上城市浅层地热资源量为每年 2.87×10^{20} J,相当于95亿t标准煤,至少可减少二氧化碳排放量6.52亿t^[3]。据调查,陕西省共有浅层地热能开发利用工程234处,运行效果良好的仅占39.7%。对岩土体导热性能分析的不足,是导致浅层地热能开发工程失败率高的主要原因。

为设计浅层地热能开发利用工程,要对岩土导热系数进行测试分析。对于岩土热物性参数的测量,一般采用热响应试验法,这种方法常用的数学模型有线热源模型和柱热源模型。通过热响应试验可较精确地得到岩土的热物性参数,但这种方法的时间成本较高。为解决时间成本与工程成功率

之间的矛盾,本文基于大量热响应实验数据,采用叠加法进行分析整理,发现岩土导热系数与其所在地貌单元存在一定的相关性,初步得到了适宜修建浅层地热能开发利用工程的地貌条件,为浅层地热能的开发、利用提供了适宜性区划。

1 典型地貌单元概述

陕西省地貌总体呈SN走向,北部为高原,中部为盆地,南部为山区,地貌结构复杂,由北向南大体可分为4种地貌类型,分别为陕北沙漠高原、陕北黄土高原、关中断陷盆地和陕南山间盆地(图1)。

陕西省北部地区属大陆性季风气候,年平均气温8~12℃^[4],年降水量300~500mm^[5];中部地区属温带湿润、半湿润气候,年平均气温为11~13℃^[6],年降水量500~700mm;南部地区属亚热带湿润、半湿润气候,年平均气温达13℃以上,年降水量大于700mm。

收稿日期: 2018-12-24; 修订日期: 2019-07-05。

基金项目: 陕西省公益性地质工作项目“关中平原城市群浅层地热能开发利用潜力评价及环境效应研究(编号: 201915)”和“陕西省浅层地热能赋存规律及开发利用关键技术研究(编号: 20170201)”、中国地质调查局“陕西省关中盆地地热资源调查评价(编号: 1212010535416)”和“陕西省主要城市浅层地温能开发区1:5万水文地质调查(编号: 12120114086501-15)”项目联合资助。

第一作者简介: 张乐(1992—),女,助理工程师,主要从事水工环地质工作与研究。Email: 765213301@qq.com。

通信作者简介: 周阳(1986—),男,工程师,主要从事水工环地质工作与研究。Email: 77196410@qq.com。

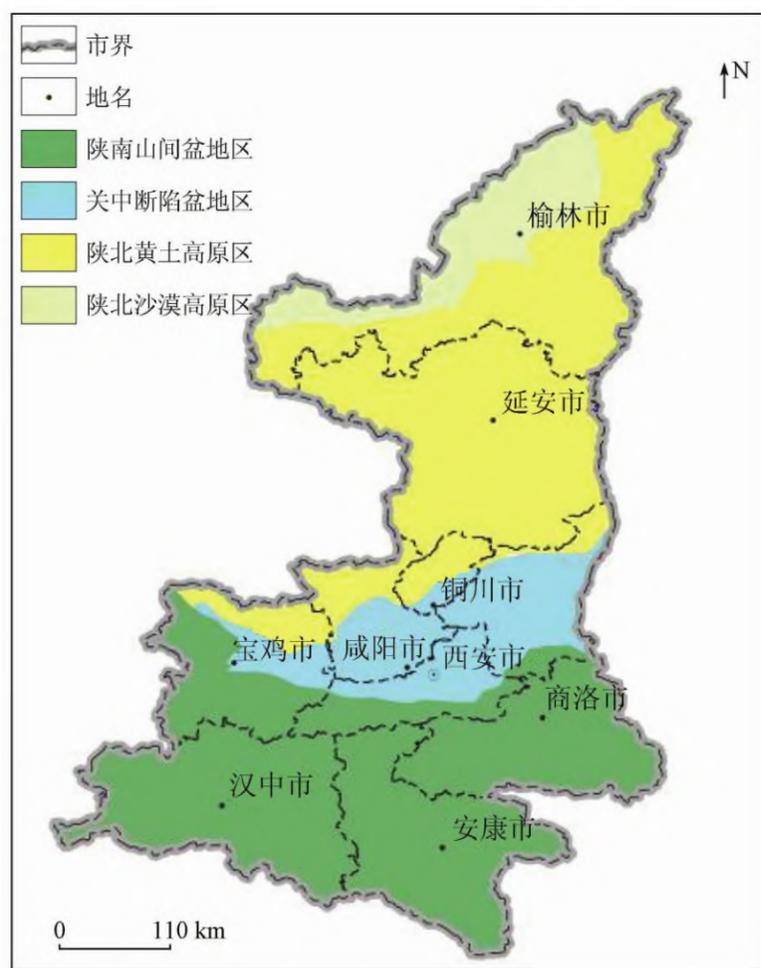


图1 陕西省地貌图

Fig. 1 Landform map of Shaanxi Province

1.1 陕北沙漠高原区

陕北沙漠高原区主要分布于长城以北,是毛乌素沙漠的南缘。构造单元属鄂尔多斯盆地东翼北部的陕北单斜^[7],地势平坦,以活动沙丘、沙垄及片沙为主。沙丘、沙地之间湖泊、海子众多,间有滩地。地势总体西高东低,海拔900~1400 m。沟壑不发育,风蚀、风积地貌发育。地下水埋深一般为10~30 m,个别地方埋深低于5 m,渗透系数多小于5 m/d。

1.2 陕北黄土高原区

陕北黄土高原是在新近纪末起伏和缓的准平原基础上历经第四纪以来多次黄土堆积和侵蚀作用形成的。地貌单元以延安为界:北部地形破碎,沟壑发育,水土流失严重,生态环境脆弱;南部中低山夹黄土塬。黄土梁峁地区地形破碎,不利于地下水的存储,导致水量贫乏;黄土塬地区的降水存储条件较好,洼地富水更为丰富。

1.3 关中断陷盆地区

关中断陷是新生代断陷盆地,盆地南依秦岭,北连黄土高原,西狭东阔,盆地两侧地形向渭河倾斜,呈阶梯状地貌景观。盆地中共发育13条张性或张扭性断裂,走向呈EW向或NW向,倾角介于50°~80°之间,控盆断裂6条,控单元断裂7条。水文地质方面,该地区具有第四系松散岩类典型盆

地的水文地质特征^[8]。

1.4 陕南山间盆地区

陕南山间盆地区是经断陷作用和堆积作用形成的、由宽阔阶地、坝子、丘陵、河谷等构成的地貌单元,区内主要有汉中盆地、安康盆地、商丹盆地、洛南盆地和石门盆地。山间盆地的含水岩性相互交接,并被各类地质构造穿插。由于地形、地貌、岩性和构造的不同,该地区富水性分布极不均匀。汉中盆地和安康盆地富水性极好,商丹盆地富水性中等。总体来说,地势越高,富水性越差。

2 分析方法

2.1 线热源模型

欧美许多国家在20世纪中叶就已经开始了对埋管地源热泵换热过程的研究^[9],Ingersoll和Plass于1948年利用Kelvin线热源理论首次提出了线热源模型,并将其应用到无限大土壤中^[10-12]。时至今日,线热源模型仍广泛应用于埋管地源热泵设计、浅层地热能分析、岩土导热系数计算等多个方面。

线热源模型应用于埋管换热器的换热过程中时,需做如下简化假定^[12-13]:

- (1)埋管周围土体无限大,且具有均匀性和各向同性,初始温度和热物性参数相同且不随温度的变化而变化;
- (2)只考虑径向导热,忽略轴向导热;
- (3)不考虑钻孔的几何尺寸,近似将其视为轴心上的线热源。

载热流体平均温度 $T_f(t)$ 的计算方法为

$$\begin{cases} T(r, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda_s} I\left(\frac{r^2}{4\alpha\tau}\right) + T_0 \\ I(x) = -E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $T(r, \tau)$ 为距线热源 r 处 τ 时刻的温度,℃; T_0 为无穷远处岩土温度,℃; q 为单位长度钻孔的加热量,W/m; r 为距离线热源的距离,m; λ_s 为岩土体导热系数,W/(m·℃); α 为岩土体扩散率,m²; τ 为热响应试验加热时间,s。

经整理可得

$$T(r, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha\tau}{r^2} - \gamma \right) + T_0, \quad (2)$$

式中: γ 为欧拉常数, $\gamma = 0.57726$ 。

热响应试验中,流体平均温度 T_f 遵守以下公式

$$T_f = T_b + q R_s, \quad (3)$$

式中: T_b 为 τ 时刻钻孔半径(即 $r = r_b$) 处的温度, $^{\circ}\text{C}$; R_s 为岩土热阻, $\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

经整理可得

$$T_f = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha\tau}{r_b^2} - \gamma \right) + q R_b = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \ln(\tau) + q \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) \right] + T_0. \quad (4)$$

由上式可知如何绘制 T_f 与 $\ln(\tau)$ 成一次函数关系,可通过 $T_f - \ln(\tau)$ 图像斜率与相关参数求得岩土导热系数 λ_s 。

2.2 叠加法

常规的热响应试验分析方法是 2 次热响应试验看作 2 次孤立的热负荷,这种计算方法认为第 2 次热响应试验开始时的地温条件与第 1 次热响应试验开始时的地温条件完全一致,但其实地温场已经受到干扰,很可能 2 次结果的初始条件并不完全相同,这就导致 2 次热响应试验计算出的导热系数结果相去甚远。因此,高宽等^[14]及周世玉^[15]提出了线热源的叠加法。叠加法认为岩土的导热系数、热阻、扩散率等都是岩土的固有属性(不随温度的变化而变化),在此基础上将 2 次热响应试验等效成 3 个持续热负荷叠加的结果,从而避免了地温恢复这一未知过程所带来的误差。

热响应试验过程为: 0 至 τ_1 时间段,小功率热响应试验阶段,施加 q_1 热功率; τ_1 至 τ_2 时间段,地温恢复阶段,施加 0 功率; τ_2 至 τ_3 时间段,大功率热响应试验阶段,施加 q_2 热功率。该试验可等效为如下 3 个持续的热(冷)负荷过程叠加的效果: 0 至 τ_1 时间段,施加 q_1 热负荷; τ_1 至 τ_2 时间段,施加 q_1 冷负荷; τ_2 至 τ_3 时间段,施加 q_2 热负荷。3 个持续的热(冷)负荷均遵循线热源理论,由此可得 2 次热响应试验。

第 1 次热响应试验稳定后流体平均温度为

$$t = t_0 + \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha\tau}{r_b^2} - \gamma \right) + q_1 R_b, \quad (5)$$

第 2 次热响应试验稳定后流体平均温度为

$$t = \left[t_0 + \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha\tau}{r_b^2} - \gamma \right) + q_1 R_b \right] - \left[t_1 + \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha\tau}{r_b^2} - \gamma \right) + q_1 R_b \right] + \left[t_2 + \frac{q_2}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha\tau}{r_b^2} - \gamma \right) + q_2 R_b \right], \quad (6)$$

式中: t_0 为无穷远处岩土温度, $^{\circ}\text{C}$; t_1 为第 1 次热响应试验稳定后流体平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t_2 为第 2 次热响应试验稳定后流体平均温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为变量,代表热响应时间进行的时长。其余符号同上。经整理可得:

第 1 次热响应试验稳定后流体平均温度为

$$t = \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} \ln(\tau) + q_1 \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) \right] + t_0, \quad (7)$$

第 2 次热响应试验稳定后流体平均温度为

$$\begin{cases} t = \frac{q_1}{4\pi\lambda_s} Y(\tau) + C \\ Y(\tau) = \ln(\tau) - \ln(\tau - \tau_1) + \frac{q_2}{q_1} \ln(\tau - \tau_2) \\ C = t_0 - t_1 + t_2 + q_2 R_b - \frac{q_1\gamma}{4\pi\lambda_s} + \frac{q_2}{4\pi\lambda_s} \ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

由上式可知,基于叠加法的原理,在连续 2 次热响应试验中,第 1 次热响应试验稳定后流体平均温度 t_1 与 $\ln(\tau)$ 成正比,第 2 次热响应试验稳定后流体平均温度 t 与 $Y(\tau)$ 成正比。

由此,通过叠加法可计算出岩土体的导热系数。

2.3 应用示例

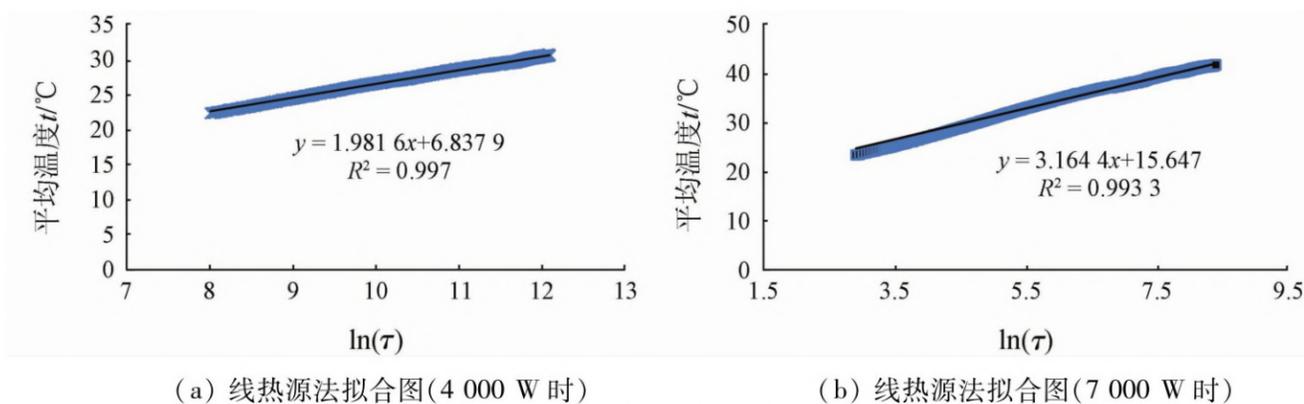
本文以西安市一处热响应试验点为例,分别进行了线热源法和叠加法计算,并将 2 者结果做了对比。该点位于黄土台塬,底层为第四系全新统冲积物,岩性为粉质黏土、砂层,钻孔深 120 m,地下水位埋深 21.6 m。

2.3.1 线热源法

分别将第 1 次和第 2 次热响应试验过程中流体平均温度 t 与试验历时的对数 $\ln(\tau)$ 绘制于图 2 中,通过斜率与比例系数之间的关系,计算得出不同功率下岩土体导热系数,4 000 W 时导热系数为 1.339 7 W/(m·K),7 000 W 时导热系数为 1.467 9 W/(m·K),两者相对误差为 9.6%。

2.3.2 叠加法

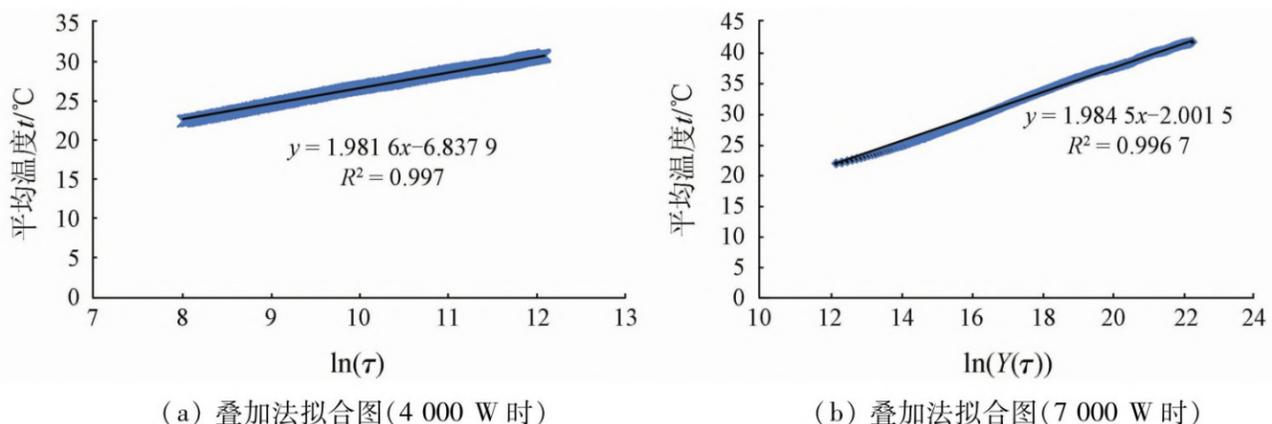
利用第 1 次热响应试验数据绘制 $t - \ln(\tau)$ 曲线,利用第 2 次热响应试验数据绘制 $t - \ln(Y(\tau))$ 曲线。利用 2 条曲线稳定段数据进行拟合,结果见图 3。通过斜率与比例系数之间的关系,计算得到不同功率下岩土体导热系数,4 000 W 时导热系数为 1.339 7 W/(m·K),7 000 W 时导热系数为 1.337 7 W/(m·K),两者相对误差为 0.15%。



(a) 线热源法拟合图(4 000 W 时) (b) 线热源法拟合图(7 000 W 时)

图 2 线热源法拟合图

Fig. 2 Fitting chart by linear heat source method



(a) 叠加法拟合图(4 000 W 时) (b) 叠加法拟合图(7 000 W 时)

图 3 叠加法拟合图

Fig. 3 Fitting chart by superposition method

可见,利用叠加法计算导热系数可有效减少因 2 次热响应试验之间的相互干扰而对导热系数计算结果产生的影响,能更准确地模拟热响应试验过程中的实际情况,因此通过叠加法计算出的导热系数也更加精确可信。

3 典型地貌单元分布特征

本文所采用数据来源于陕西省水工环地质调查中心 2013—2018 年多个浅层地热能相关项目,包括“陕西省大中型城市浅层地热能调查评价”“陕西省主要城市浅层地温能开发区 1:5 万水文地

质调查”“陕西省浅层地热能示范基地建设”和“陕西省浅层地热能赋存规路及开发利用关键技术”等。项目组在省内 4 大典型地貌单元中选取具有代表性的地段,开展了 46 组热响应试验,试验数据比较丰富。

本文利用叠加法对已有的 46 组热响应试验数据(其中断陷盆地 28 组,山间盆地 9 组,黄土高原 4 组,沙漠高原 5 组)进行分析计算,并对计算结果进行处理,筛选出 2 次热响应试验计算所得导热系数相对误差小于 10% 的试验点共计 39 组。后将这 39 组综合导热系数计算结果分类绘制于图中(图 4)。

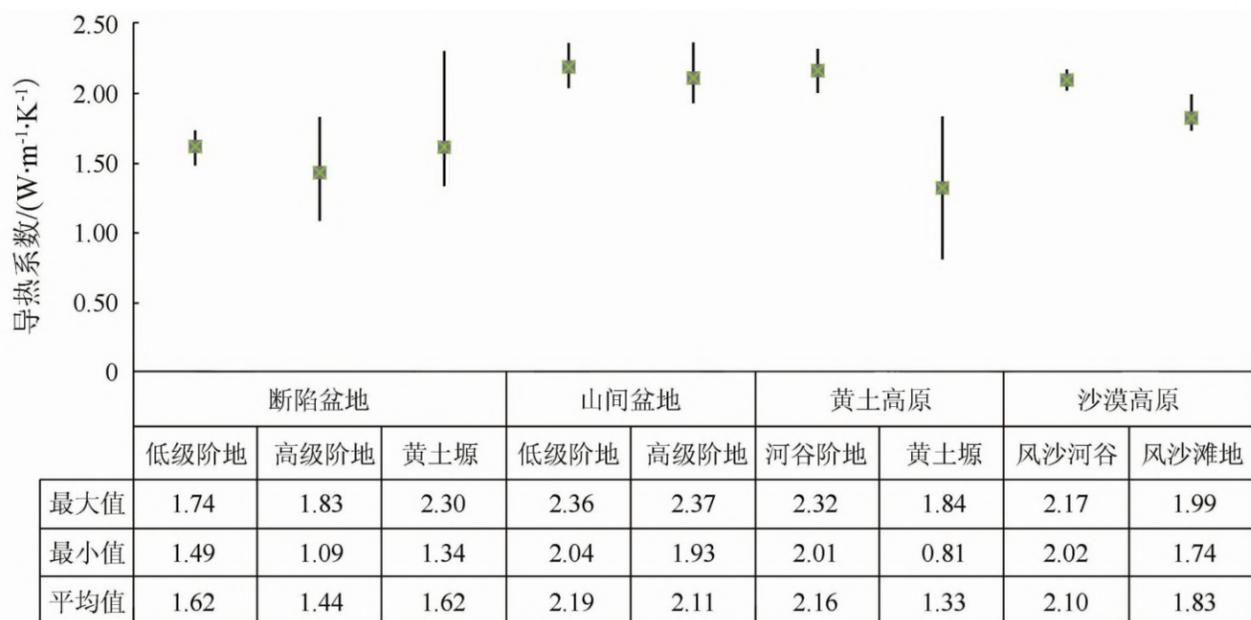


图 4 不同地貌单元下综合导热系数图

Fig. 4 Comprehensive thermal conductivity in different geomorphological units

由图4可知:总体来说,山间盆地、沙漠高原、断陷盆地3种地貌单元,岩土体综合导热系数依次减小;黄土高原地貌单元中,不同地貌类型导热系数差距较大。总之,各地貌单元导热系数具有不同特征。

3.1 断陷盆地

断陷盆地地貌单元包括低级阶地、高级阶地、黄土塬3种类型。其中:低级阶地地区导热系数值分布最为集中,集中分布于 $1.49 \sim 1.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $1.62 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;高级阶地地区导热系数值分布于 $1.09 \sim 1.83 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $1.44 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,各点导热系数值几乎均匀地分布于均值周围;黄土塬地区导热系数值分布于 $1.34 \sim 2.30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $1.62 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,偏向较小的边缘,存在某个点计算所得导热系数过大,从而拉高了平均水平的现象。就均值而言,高级阶地 < 低级阶地 = 黄土塬;就区间长度而言,黄土塬 > 高级阶地 > 低级阶地。这说明黄土塬地区热响应试验钻孔的导热能力分布并不均匀,可能受局部地貌或地质条件影响较大。

3.2 山间盆地

山间盆地地貌单元包括低级阶地、高级阶地2种类型。低级阶地地区和高级阶地地区导热系数值分布都较为集中:低级阶地地区导热系数值分布于 $2.04 \sim 2.36 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $2.19 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;高级阶地地区导热系数值分布于 $1.93 \sim 2.37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $2.11 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。就区间长度上和均值而言,两者均相差不大,高级阶地区间长度略长于低级阶地地区,高级阶地地区均值略低于低级阶地地区。

3.3 黄土高原

本次热响应试验涉及黄土高原地貌单元中的河谷阶地地区和黄土塬地区。河谷阶地地区导热系数值分布于 $2.01 \sim 2.32 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $2.16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;黄土塬地区导热系数值分布于 $0.81 \sim 1.84 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $1.33 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。两者对比,黄土塬地区导热系数值的不稳定性高于河谷阶地地区,黄土塬地区导热系数均值明显低于河谷阶地地区。

3.4 沙漠高原

沙漠高原地貌单元包括风沙河谷和风沙滩地2种类型。风沙河谷地区导热系数值分布于 $2.02 \sim 2.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $2.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

风沙滩地地区导热系数值分布于 $1.74 \sim 1.99 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间,均值为 $1.83 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。两者导热系数区间长度均较小,风沙滩地地区导热系数略高于风沙河谷地区。

总的来说,山间盆地、沙漠高原、断陷盆地3种地貌单元的导热能力依次减小;同一地貌单元中,第四系黄土覆盖层越厚,钻孔导热能力越差;黄土塬地区导热系数大小差距较大。

4 结论与建议

研究表明,陕西省岩土体导热系数与其所处地貌类型有一定关系。山间盆地、沙漠高原、断陷盆地3种地貌单元的导热能力依次减小。在同一地貌单元中,第四系黄土覆盖层越厚,钻孔的导热能力越差。对断陷盆地低级阶地地区、山间盆地、黄土高原河谷阶地地区和沙漠高原而言,地貌因素对岩土导热能力影响较大,在相同地貌条件下,岩土体导热系数相近。

本研究对陕西省浅层地热能开发、利用及选址具有指导意义。陕西省山间盆地、沙漠高原风沙河谷地区以及黄土高原河谷阶地地区岩土体导热性能良好,且受地域影响不大,可进行浅层地热能的推广利用;断陷盆地低级阶地地区和沙漠高原风沙滩地地区的岩土导热性能受地域影响不大,但导热能力一般,可适当开发、利用浅层地热能资源;在黄土高原黄土塬地区、断陷盆地高级阶地和黄土塬地区,不同地域岩土导热系数相差较大,应因地制宜,针对不同地区、不同地质条件测定岩土热物性参数,分析其是否适宜进行浅层地热能开发,同时进一步有针对性探讨影响该地区岩土导热系数的主要因素,从而指导在该地貌单元上进行浅层地热能的开发、利用。

致谢:参与本次野外调查工作的同事还有赵智强、宋巧莲、朱红玉、张卉、王克、桂忠强、王鸽、侯娟等,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 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. GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] 龙西亭,袁瑞强,皮建高,等. 长沙浅层地热能资源调查与评

- 价[J]. 自然资源学报, 2016, 31(1): 163 - 176.
- [3] 王秉忱. 我国浅层地热能开发现状与发展趋势[J]. 供热制冷, 2011(12): 50.
- [4] 王立祥. 黄土高原的治理与农业自然资源的合理利用——兼谈陕北发展农业生产的途径[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1981(2): 37 - 52.
- [5] 安彬, 孙虎, 刘宇峰, 等. 陕西省气候及其生产潜力时空变化特征[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 103 - 108.
- [6] 张宏芳, 潘留杰, 卢珊, 等. 1901—2012年陕西降水、气温变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1674 - 1682.
- [7] 周阳, 穆根胥, 刘建强, 等. 典型地貌单元浅层地热能资源量赋存规律[J]. 地质科技情报, 2018, 37(4): 232 - 238, 268.
- [8] 周阳, 王友林, 杜少少, 等. 关中盆地地下水系统的划分与特征[J]. 中国地质调查, 2018, 5(4): 67 - 75.
- [9] 张景欣, 彭冬根, 魏昊然, 等. 基于线热源模型的垂直U型埋管换热器的换热分析[J]. 流体机械, 2015, 43(4): 75 - 79.
- [10] Ingersoll L R, Zobel O J, Ingersoll A C. Heat conduction with engineering, geological, and other applications [J]. Physics Today, 1955, 8(3): 17.
- [11] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids [M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959.
- [12] Hart D P, Couvillion R. Earth - coupled heat transfer [R]. Dublin: National Water Well Association, 1986: 959.
- [13] 海那尔·别克吐尔逊, 施斌, 吴晓华, 等. 基于DTS技术的菏泽地层导热性研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 802 - 809.
- [14] 高宽, 崔文智, 周世玉. 地温未恢复时热响应试验的线热源叠加法[J]. 暖通空调, 2016, 46(4): 111 - 114.
- [15] 周世玉. 重庆典型地层热物性及地源热泵系统运行特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

Analysis on thermal conductivity of typical geomorphological units in Shaanxi Province based on superposition method

ZHANG Le^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}, LIU Jianqiang^{1,2}, JIN Guang^{1,2}, ZHANG Yage^{1,2}

(1. Shaanxi Geological Survey Center of Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology, Xi'an 710068, China; 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China)

Abstract: In recent years, shallow geothermal energy has received extensive attention, but the failure rate of existing projects is high due to insufficient analysis of the thermal conductivity of the strata during the development and utilization process. In order to solve this problem, the authors collated 46 sets of thermal response test results that have been carried out in different geomorphological units in Shaanxi Province. Based on the linear heat source model, the thermal conductivity of typical geomorphological units in Shaanxi Province was analyzed by superposition method. The results show that the thermal conductivity of three geomorphological units (mountain basin, desert plateau and fault basin) decreases gradually. In the same geomorphological unit, the thicker the loess cover of Quaternary, the worse the thermal conductivity of the borehole. The difference of thermal conductivity in loess tableland is quite large, and the influencing factors of thermal conductivity in the geomorphological unit can be further studied. Based on the study of the distribution characteristics of thermal conductivity in different geomorphological units, some suggestions for the development and utilization of shallow geothermal energy in different regions were put forward, thus providing some ideas and technical supports for further efficient and high-quality development of shallow geothermal energy.

Keywords: superposition method; linear heat source model; thermal conductivity; shallow geothermal resources
(责任编辑: 刘丹)