

doi: 10.12029/gc20170513

周阳, 穆根胥, 张卉, 王克, 刘建强, 张亚鸽. 2017. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. 中国地质, 44(5): 1017-1026.

Zhou Yang, Mu Genxu, Zhang Hui, Wang Ke, Liu Jianqiang, Zhang Yage. 2017. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin[J]. Geology in China, 44(5): 1017-1026(in Chinese with English abstract).

关中盆地地温场划分及其地质影响因素

周阳 穆根胥 张卉 王克 刘建强 张亚鸽

(陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 具有无污染、可再生、分布广、储量大以及可就近利用等诸多优势的地热能是一种洁净能源, 应用前景广阔。地热能的开发利用与区域地温场划分紧密相关, 关于关中盆地整体地温场划分的研究鲜有报道。根据关中盆地的工程地质、水文地质、环境地质条件等因素, 总结了岩体类和砂土类的热物性特征。通过灰色关联分析方法, 分析了岩土体热物性参数的影响因素, 认为干燥重度对导热系数的影响程度最大, 含水率、天然重度、孔隙率三者影响程度相近; 干燥重度对比热容影响程度最大, 天然重度次之, 含水率和孔隙率影响最弱。利用盆地内多个地温常观孔, 绘制了地温变化曲线和地温梯度等值线, 认为关中盆地常温带位于 15~20 m 埋深处, 地温梯度总体呈中部高、东西低, 固市凹陷、西安凹陷、蒲城凸起、断裂及断裂汇合区域地温梯度较大, 宝鸡凸起、咸礼凸起以及临蓝凸起地温梯度较小, 产生差异的原因包括地质构造、地下水活动、岩土体热物性参数等三方面。利用热物性参数和地温梯度值, 计算了盆地内浅层和深层的大地热流值, 并分析了两者差异的成因, 经对比全国区域地热资料, 认为关中盆地是一个复杂的拗陷型中低温地热田, 地热资源潜力巨大, 居全国上游。该文旨在系统地分析关中盆地地温场特征, 为地热能的勘查评价提供基础数据支持, 促进关中盆地地热开发利用, 为构建环境友好型社会服务。

关键词: 关中盆地; 地温场; 地质; 热物性测试; 大地热流值

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)05-1017-10

Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin

ZHOU Yang, MU Genxu, ZHANG Hui, WANG Ke, LIU Jianqiang, ZHANG Yage

(Shaanxi Geological Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Shallow geothermal energy is a renewable and widely distributed clean energy, it has broad prospects for development and utilization. The exploitation and utilization of geothermal energy are closely related to the division of regional geothermal field; nevertheless, there are few reports about Guanzhong basin at present. Based on regional geological and hydrogeological conditions and the classification of lithology, the authors summarized the thermal properties of rocks and soil. The influence of soil thermal

收稿日期: 2017-03-07; 改回日期: 2017-06-13

基金项目: 陕西省公益性地质调查专项“陕西省大中型城市浅层地热能调查评价”(20130202)、陕西省公益性地质工作项目“陕西省浅层地热能赋存规律及开发利用关键技术研究”(20170201)及中国地质调查局项目(1212010535416, 12120114086501-15)联合资助。

作者简介: 周阳, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事水工环地质工作与研究; E-mail: 77196410@qq.com。

通讯作者: 穆根胥, 男, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作与研究; E-mail: 478615981@qq.com。

conductivity and the specific heat capacity based on gray relational analysis reveal the main factors controlling the thermal conductivity and specific heat. The drying severity has the greatest impact on the thermal conductivity, whereas water content, natural gravity and porosity exhibit similar influences. The dry severity has the greatest impact on the specific heat capacity, followed by the natural gravity, whereas the water content and porosity play the weakest role. Based on the long-term observation data of downhole temperatures in the Guanzhong basin, the authors presented downhole temperature logs and temperature gradient contours. Normal temperature zone lies in the depths of 15–20 m in Guanzhong basin. The geothermal gradient is high in the middle part and low in the east and west part. The areas with large geothermal gradient include Gushi depression, Xi'an depression, Pucheng bulge and faults. The geothermal gradient of Baoji bulge, Xianyang–Liquan bulge, and Lintong–Lantian bulge is relatively small. The reasons of the differences include geological structure, groundwater activity and thermal and physical parameters of rock and soil. The heat flow in the basin was calculated using thermal physical parameters and geothermal gradient values, and the reasons which produce the heat flow difference between the shallow and the deep were analyzed. Compared with the regional geothermal background, the Guanzhong basin is hotter and its geothermal resources are abundant. The purpose of this paper is to systematically analyze the characteristics of the geothermal field in the Guanzhong basin so as to provide a basis for exploration and evaluation as well as the development of geothermal energy and to serve the construction of a good environment and society.

Key words: Guanzhong basin; geothermal field; geology; thermal property determination; heat flow

About the first author: ZHOU Yang, male, born in 1986, master, engineer, majors in geological engineering; E-mail: 77196410@qq.com.

Fund support: Supported by Special program of public welfare geological survey in Shaanxi “Investigation and evaluation of shallow geothermal energy in large and medium cities of Shaanxi Province” (No. 20130202), “Study on the occurrence pattern of shallow geothermal energy and the key technologies of exploitation and utilization in Shaanxi Province” (No. 20170201), and China Geological Survey Program (No. 1212010535416, No. 12120114086501–15).

1 引 言

中国能耗结构以费用高、污染大、不可再生的化石燃料为主,对化石燃料的过度开采将严重制约我国经济和社会的可持续发展,并对我国的战略安全留下了隐患。为解决经济发展与能源短缺的矛盾,寻找新型的可再生绿色能源已成为当务之急(周阳等,2017;王贵玲等,2012)。

地温能是指蕴藏在地表以下一定深度范围内岩土体、地下水和地表水中具有开发利用价值的热能。具有无污染、可再生、分布广、能量大以及可就近利用等诸多优势,不同季节的反向使用亦可以恢复地层温度,保障地层热源的可持续利用。地热能是一种新型的可再生的绿色能源。

地热能的开发利用首先在于对区域地温场特征的准确研究,学者已经对全国的地温场分布有了宏观的认识(王均等,1990;蔺文静等,2013),也进行了区域地温场的研究(卫万顺等,2010;栾英波等,2013;陈晓冬等,2006;冯超臣等,2015;赵振等,2015;李攻科等,2014;徐明等,2010;)和岩土体导热系数影响因素的研究(刘鹏等,2016;李少华等,2015),已经取得了

一定的成果。但关于关中盆地整体地温场和岩土体热物性参数的研究却鲜有报道。目前关中盆地的地热能应用工程多是由企业自发、自觉组织,工程施工前期的水源方案论证或地热能利用可行性的研究工作不扎实,地热能平衡、水量均衡研究欠缺,导致系统效率降低、甚至报废等问题。综上,尽早查明关中盆地地温场特征已是迫在眉睫。

本文在前人研究基础上,通过野外调查、现场热响应试验、地温监测、灰色关联等方法,总结了岩土体热物性参数特征,指出了物理性质对热物性参数影响程度的差异,分析了关中盆地常温带和地温场划分特征及其地质影响因素,基于热物性参数和地温梯度,讨论了关中盆地浅层和深层的大地热流值。

2 关中盆地概述

2.1 气候

关中盆地位于中纬度地区,属大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖潮湿。区域气候特征要求本地冬季供暖、夏季制冷。

2.2 地形地貌

关中断陷盆地,南依秦岭,北连黄土高原,为西

狭东阔的新生代断陷盆地,渭河横贯其中。地势西高东低,向东微倾,由冲积平原、黄土台塬、洪积倾斜平原呈阶梯状组成。

2.3 地质构造

关中盆地被不同方向、不同规模的断裂分割成大小不等、结构不同的两种类型的断块构造:断隆(断阶、断坡),断陷。断块构造以活动断裂为界,可划分为6大构造单元:宝鸡凸起、咸礼凸起、蒲城凸起、临蓝凸起、固市凹陷和西安凹陷。发育13条张性或张扭性断裂,走向近东西或北西,倾角多在50~80°,控盆断裂6条,控单元断裂7条。

2.4 水文地质

关中盆地具有第四系松散岩类典型盆地的水文地质特征,堆积厚度巨大的砂砾卵石及粉质黏土层,构成稳定的含水空间,潜水与承压水丰富。潜水含水层包括冲积平原冲积砂砾石层、洪积平原洪积泥沙与砂砾卵石层及黄土台塬风成黄土含水层。承压水含水层主要为第四系下更新统冲洪积、冲湖积砂、砂砾石层,宝鸡与蓝田一带为上新近系较疏松的砂砾石层(周阳等,2016)。

2.5 热源

关中盆地是一个快速沉积的新生界盆地,并有隆起的莫霍面,相对较浅的深部地热能向上覆巨厚的新生界沉积层扩散,扩散速率与岩石的热阻率呈反相关关系,在断裂处可通过构造的贯通向浅部快速传递。

盆地内部喜马拉雅—燕山时期形成的大量酸性花岗岩中的同位素²³⁸U衰变可以产生大量热,探测到的放射性元素在衰变期内产生的氦可燃气体的富集可支持该结论。

蒙脱石向伊利石转化过程中也会产生热能,该过程在西安凹陷和固市凹陷普遍。

综上,关中盆地主要热源为上地幔热源,其次为地壳中放射性元素衰变以及矿物转化过程中产生的热能,同时生物降解的有机质热能也作为补充能源。

3 岩土体热物性

岩土体热物性参数主要有岩土体的导热系数和比热容,导热系数的大小可以反映岩土体的传热效率,比热容的大小可以反映岩土体单位体积每升降1℃可以吸收和放热的能力大小。拥有较大的导热系数和比

热容的岩土体在浅层地热能利用中可以提高埋管单位长度的换热效率和换热量,对工程有利。

3.1 岩土体热物性特征

本次采集样品443件(图1)。岩性主要为粉质黏土、砾岩、砂岩、泥岩、粉土、黏土以及各个粒级的砂(图2,图3)。

区内岩土体导热系数最大为3.84 W/m·K,最小为1.00 W/m·K,平均2.13 W/m·K;比热容最大为2.00 kJ/kg·K,最小为0.72 kJ/kg·K,平均0.94 kJ/kg·K。区内可取得样品的砂质类型以粗砂和中砂为主,少量细砂和粉砂,其最大导热系数为3.36 W/m·K,最小为0.95 W/m·K,平均1.58 W/m·K;比热容最大为1.65 kJ/kg·K,最小为0.70 kJ/kg·K,平均1.10 kJ/kg·K。

经对比知,岩体类的导热系数较砂土类高,岩体类导热系数在2.13 W/m·K左右,砂土类的导热系数在1.66 W/m·K左右;岩体类的比热容较低,一

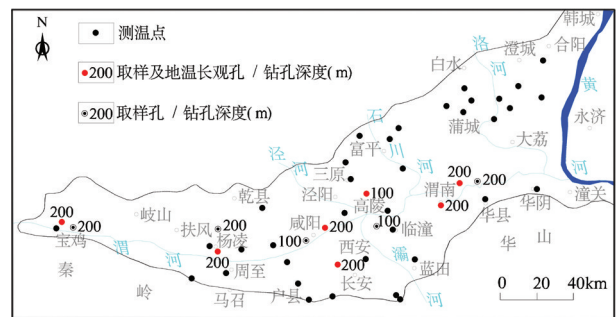


图1 取样点及测温点分布图

Fig.1 The distribution map of sampling points and temperature monitoring points

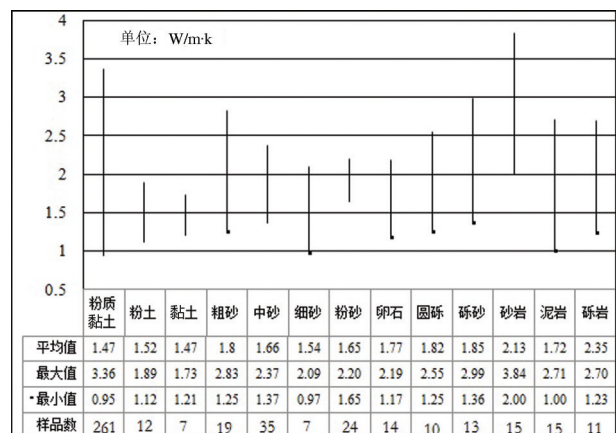


图2 岩土体导热系数统计特征值对比图

Fig.2 Comparison of the statistical characteristic values of thermal conductivity of rock and soil mass

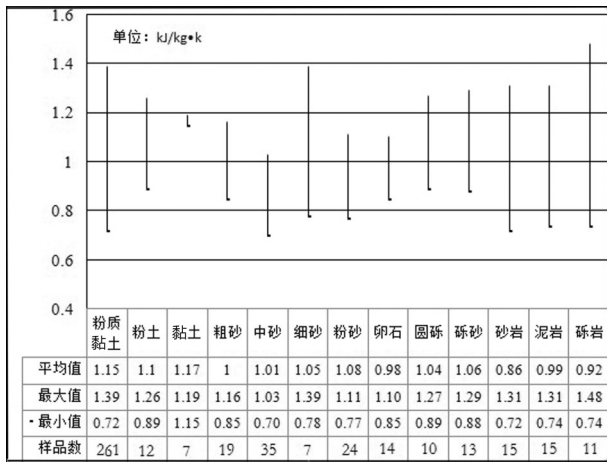


图3 岩土体比热容统计特征值对比图
Fig.3 Comparison of the statistical characteristic values of the specific heat capacity of the rock and soil

般小于0.92 kJ/kg·K,砂土类的比热容一般在1.06 kJ/kg·K。

3.2 岩土体热物性影响因素

为了探寻岩土体热物性质的影响因素,采用灰色关联分析法分析热物性质与含水率、天然重度、干燥重度和孔隙率的关联度。

3.2.1 消除异常值

为了尽量减少测量误差所引起的异常数据值,本研究以格罗布斯判据进行粗差剔除。按照格罗布斯判据,对一系列测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,可保留的范围如式(1)所示。

$$(x - Gn \cdot S) \leq x_i \leq (x + Gn \cdot S) \quad (1)$$

式中 x 为这列测量值的平均值, s 为测量列的标准偏差, Gn 是一个和数据 n 相联系的系数,可用下列式(2)和式(3)拟合式求得:

$$N < 30 \text{ 时取} \\ Gn = \ln(n - 2.65) / 2.31 + 1.305 \quad (2)$$

$$N > 30 \text{ 时取} \\ Gn = \ln(n - 3) / 2.30 + 1.36 - n / 550 \quad (3)$$

用该方法进行条件筛选(表1表2)。将数据中超出范围的超差数据列为异常值,予以剔除。

3.2.2 灰色关联分析法

(1)原始数据的极差变换

极差变换是为了消除原始数据的纲量,使其具有可比性,公式如下:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (4)$$

(2)确定字母序列

定导热系数 X_0 ,比热容 X_1 分别为母序列,含水率 X_2 、天然重度 X_3 、干燥重度 X_4 、孔隙率 X_5 为子序列。

(3)计算各母子序列差的绝对值 $\Delta_{0i}(t_j)$

$$\Delta_{0i}(t_j) = |X_0(t_j) - X_i(t_j)| \quad (5)$$

(4)在 $\Delta_{0i}(t_j)$ 中取最大值 Δ_{\max} 和最小值 Δ_{\min} 。

(5)求各母序列 X_0, X_1 与子序列 X_i 的关联系数。

$$\xi_{0i}(t_j) = (\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}) / (\Delta_{0i}(t_j) + \rho \Delta_{\max}) \quad (6)$$

其中 ρ 为分辨系数,一般取0.5。

(6)求取关联系数的均值即为关联度(表3,表4),从而确定各因素对热物参数的影响程度的差异。

通过灰色关联分析知,含水率、天然重度、孔隙率三个参数对导热系数的影响程度相同(关联度0.66),干燥重度对导热系数的影响较大(关联度0.77);干燥重度对比热容影响较大(关联度0.71),天然重度次之(关联度0.69),含水率和孔隙率影响最弱(关联度0.60)。

3.3 岩土体热物性参数与现场实测值对比

利用实验室测试原状土样得到的岩土体导热系数及砂层参考导热系数值,对各勘探孔内地层进行赋值,对以地层导热系数值加权平均得出各单孔的地层平均导热系数与现场热响应测试得出的单孔综合导

表1 岩土体导热系数的筛选依据

Table 1 Selection of thermal conductivities of rock and soil

岩性	$x - Gn \cdot S$	$x + Gn \cdot S$	岩性	$x - Gn \cdot S$	$x + Gn \cdot S$
粉砂	0.99	2.29	砂岩	0.14	4.54
细砂	0.80	2.28	砾岩	1.13	3.13
中砂	0.69	2.63	泥岩	0.58	2.86
粗砂	0.75	2.85	粉土	0.89	2.15
砾砂	0.62	3.08	黏土	1.15	1.79
圆砾	0.77	2.87	粉质	0.61	2.35
卵石	1.04	2.50	黏土		

表2 岩土体比热容的筛选依据

Table 2 Selection of specific heat capacities of rock and soil

岩性	$x - Gn \cdot S$	$x + Gn \cdot S$	岩性	$x - Gn \cdot S$	$x + Gn \cdot S$
粉砂	0.60	1.60	砂岩	0.35	1.53
细砂	0.62	1.48	砾岩	0.58	1.18
中砂	0.59	1.43	泥岩	0.60	1.38
粗砂	0.75	1.25	粉土	0.78	1.42
砾砂	0.72	1.40	黏土	1.15	1.19
圆砾	0.77	1.31	粉质	0.79	1.49
卵石	0.79	1.17	黏土		

表3 岩土体导热系数关联度计算结果

Table 3 Calculation results of correlation coefficients of thermal conductivity of rock and soil

	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂	圆砾	卵石	砂岩	砾岩	泥岩	粉土	黏土	粉质黏土	关联度
含水率	0.62	1	0.89	0.36	0.59	0.59	0.5	0.4	0.44	0.76	0.59	1	0.89	0.66
天然重度	0.45	0.77	0.87	0.37	0.38	0.63	0.67	0.74	0.83	1	0.57	0.77	0.59	0.66
干燥重度	0.8	1	0.67	0.42	0.67	0.69	0.67	0.69	0.89	0.96	0.96	1	0.57	0.77
孔隙率	0.46	0.65	0.34	0.55	0.33	1	1	1	0.65	0.69	0.55	0.69	0.65	0.66

表4 岩土体比热容关联度计算结果

Table 4 Calculation results of the specific heat capacities of rock and soil

	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂	圆砾	卵石	砂岩	砾岩	泥岩	粉土	黏土	粉质黏土	关联度
含水率	0.41	0.33	0.65	0.81	0.46	0.48	0.87	1	0.45	0.4	0.36	1	0.52	0.60
天然重度	0.7	0.61	1	0.83	0.79	0.69	0.92	0.46	0.52	0.74	0.57	0.57	0.57	0.69
干燥重度	0.69	0.68	1	0.88	0.78	0.74	1	0.49	0.56	0.86	0.58	0.5	0.51	0.71
孔隙率	0.65	0.37	0.5	0.36	0.72	0.4	0.33	0.98	0.5	0.5	0.48	1	0.96	0.60

表5 岩土体导热系数加权值与实测值对比

Table 5 Comparison of the weighted and measured values of thermal conductivity of rock and soil

1	BG3	BG4	BG5	BG6	BG8	BG11	WG1	WG5	WG6	XG1	XG2	XG4	XG7	XG9	XYG1
2	1.26	1.49	1.29	1.67	1.42	1.86	1.38	1.49	1.57	1.57	1.75	1.57	1.50	1.44	2.00
3	1.46	1.41	1.29	1.44	1.35	1.66	1.71	1.34	1.73	1.53	1.62	1.58	1.38	1.53	2.10
1	XYG3	XYG4	YLG2	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10	D11	D12
2	1.83	1.86	1.59	2.32	1.94	2.06	2.03	1.99	1.72	2.11	1.96	1.61	2.05	1.69	1.62
3	1.98	1.80	1.57	2.07	1.91	2.08	1.92	2.00	1.69	1.93	2.08	1.68	1.95	1.71	1.59

注:1—钻孔编号;2—地层加权单孔导热系数;3—现场测试单孔导热系数。

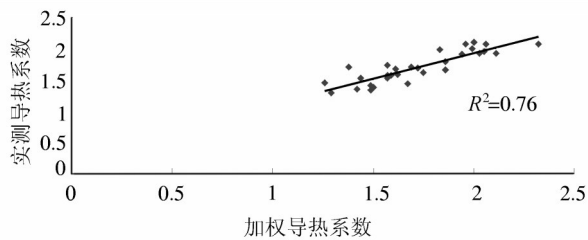


图4 岩土体导热系数加权值与实测值对比图
Fig.4 Comparison of the weighted and measured values of thermal conductivity of rock and soil

热系数(大小功率得出的导热系数的平均值)进行比较(表5、图4),可以看出两者有着较高的一致性。

4 常温层及地温特征

4.1 常温层

采用数字地温监测系统,选择关中盆地内西

安、咸阳、渭南、宝鸡以及杨凌区内新施工的埋管地源热泵勘探孔作长期观测,进行恒温层深度和温度分析。

据本次地温监测资料,关中盆地地温场在垂直方向上总体随深度增加地温升高,但不同深度地温变化不同(图5,图6)。在常温带(15~25 m)以浅,尤其是近地表0~3 m,受季节气候变化影响,地温高低波动敏感,3~15 m地温受气候变化影响逐渐减小,在地下15~20 m埋深处地温基本恒定不变,地温为15~17℃,在20~25 m以下,地温已不受当地气候变化影响,随深度增加温度升高。

4.2 地温场特征

4.2.1 地温特征

关中盆地近地表(20 m)地温场除秦岭山前个别断裂直接导通地表,致使该地段温度较高,一般情况下正常地温为15℃左右,但在秦岭山前的东大地区、骊山、宝鸡温水沟地区由于断裂直接导通地

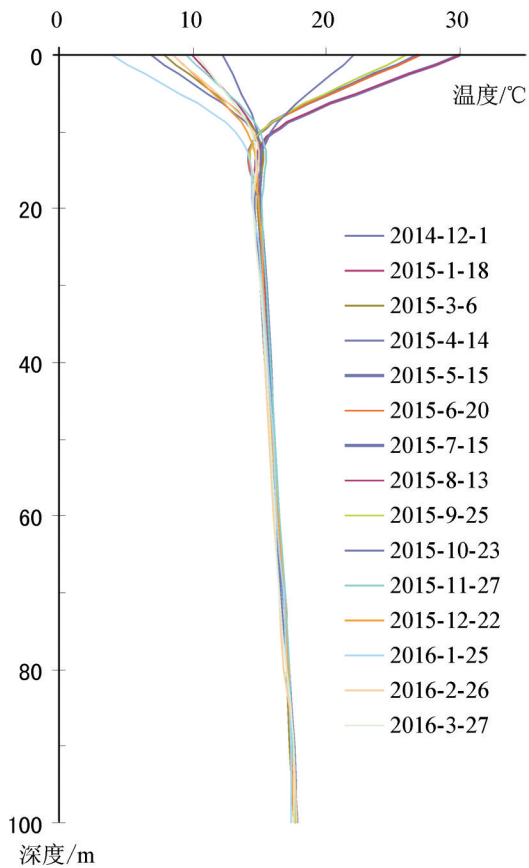


图5 关中盆地100 m以浅地温变化曲线图
Fig.5 Curves of temperature variation within 100 m in Guanzhong Basin

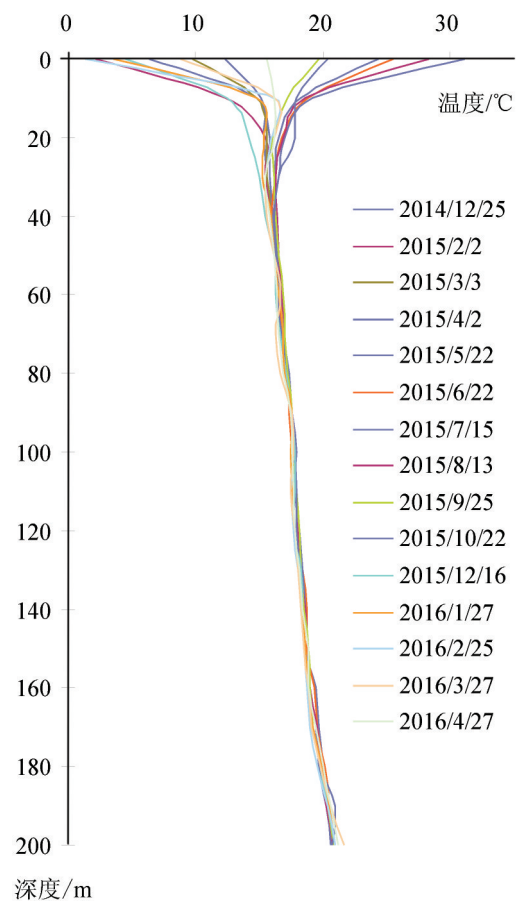


图6 关中盆地200 m以浅地温变化曲线图
Fig.6 Curves of temperature variation within 200 m in Guanzhong Basin

表,这些区域的地温值均大于17℃。

根据已有地温数据对关中盆地100 m的地温场进行分析,认为盆地内100 m处地温介于16.5~21.9℃,西安凹陷、蒲城凸起等地温较高,宝鸡凸起、咸礼凸起等地地温较低。

选取开采段1300~2000 m的地热井温度数据,结合地温梯度公式估算1500 m地温值,认为1500 m处地温大致在60~70℃,在渭河断裂武功—咸阳段、渭南—敷水镇段两侧以及西安凹陷部分区域1500 m处地温大于70℃;宝鸡凸起、临蓝凸起大部分区域以及渭北岩溶区1500 m处地温均小于60℃。

4.2.2 地温梯度变化规律

地温梯度是地温和深度的函数,反映了温度随深度的变化率,不同地区同一深度的地温梯度,反映了地区地温梯度的差异,同一地区不同深度地温梯度反映了垂向地温的变化。一般把在常温层以下,每向下加深100 m所升高的温度称为地热增温

率或地温梯度。

其计算公式为:地温梯度 $= (T - T_0) * 100 / (H - H_0)$

其中 T 代表该点温度; H 代表该点深度; T_0 代表恒温层温度; H_0 代表恒温层深度。

关中盆地地温梯度总体呈中部高、东西低。从构造单元来看固市凹陷、西安凹陷、蒲城凸起、岩溶区断裂附近以及断裂汇合区域、秦岭山前的东西汤峪以及东大地区地温梯度相对较大,一般大于3℃/100 m,汤峪、临潼、蒲城等地都在5℃/100 m以上,长安区东大附近地温梯度最大可达到13.7℃/100 m;宝鸡凸起、咸礼凸起、临蓝凸起以及渭北岩溶区地温梯度相对较小,一般小于等于3℃/100 m(图7)。

4.3 影响地温分布的因素

4.3.1 构造对地温场分布的影响

关中盆地是一个独立的新生代地堑型断陷盆地,新生界沉积巨厚,地表被第四系覆盖,根据地震

烈,地表热流密度较高,来自地幔的热流密度相对贡献较大;而在隆起区则相反,地壳较厚,地表热流密度较低,来自地幔的热流密度相对贡献较小。同时断裂对地温场的分布影响比较大,尤其是在某些深大断裂带一侧或两侧区域地温场较远离断裂带的地温场大,使地温场在这些地区产生正异常。

4.3.2 地下水活动对地温场分布的影响

地壳浅部的地下水易于流动且热容量较大,其对地温场影响的程度取决于沉积盆地的规模、地貌特征、含水层及其水动力条件等。通常在受冷水源补给的地下水强径流区,由于从补给区进入较低温度的地下水,在快速流动过程中和围岩进行热交换,不断把热量带走,冷却围岩,导致地温降低。如盆地北部山前岩溶区属于地下水补给区的区域,由于岩溶孔隙裂隙比较发育,地下水径流速度快,致使这些区域出现地温的负异常,地温梯度一般为 $1.25\sim 2.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 100 m 时的地层温度在 $16.5\sim 19.0^{\circ}\text{C}$ 。

地下水排泄区或某些断裂带出现地温正异常,是由于深部温度较高的地热流体通过断裂运移至浅部,从而对上部围岩起着加热的作用,导致地温的增高。如位于渭北岩溶水排泄区的合阳县洽川镇的处女泉、马粪泉,由于深部较高温度的地热流体在排泄区由深部上行,造成该处温泉出露,地温产生正异常。

4.3.3 岩土体热物性参数对地温场分布的影响

在完整的地质块断内(地质体内),深部热能通过上覆岩层以热传导的方式向地表扩散。关中盆地上覆新生界岩性导热系数数值的差异造成了在不同深度的岩层内形成了面状的地温梯度不同的地段。上覆岩层导热率相对较低,孔隙率较大的岩层起到了隔热作用,地温梯度较大,在相对较完整的断凹部形成了封闭的高温高压热储层。

例如宝鸡市北部陵塬乡地层以导热系数数值较高的砾岩(均值 $2.35\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$)为主,该处的地温梯度为 $2.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,渭河南岸阶地马营镇地层以粉质黏土(均值 $1.47\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$)为主,地温梯度升至 $3.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 左右。

西安凹陷内建成的地热井均有高温高压热流体,特别在凹陷封闭较好的西安—咸阳之间,热流体可喷出地表100余米,温度超过 100°C ,如咸阳国际商贸学院地热井井深 3500.32 m ,井口温度

120°C ,井口压力 1.0 MPa ,折算水头高度 $+100\text{ m}$ 。尽管固市凹陷地热井较少,但华县051基地地热井仍揭露出了高压高温热流。

5 大地热流值

地球表面单位时间内流经单位面积的热量流称为热流密度(q),也称大地热流。它是地球内热在地表一个重要的可测物理量,能更确切地反应某个地区地温场的特点。在数值上等于岩体导热系数与垂向地温梯度的乘积。

$$Q=K\left(\frac{dT}{dZ}\right)$$

式中: Q 为热流(单位为: mW/m^2), K 为岩石热导率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$, dT/dZ 为地温梯度。

计算大地热流值所采用的地温梯度选用长期地温监测孔的监测数据,岩土体热导率选用本次勘探孔岩心的测试数据并结合中国大陆地区地热流数据汇编中的经验值。

选取关中盆地内浅层(200 m 以浅)和深层(大于 1 km)的测温数据计算不同深度的大地热流值(表6),根据计算结果,关中盆地浅层大地热流平均值为 $46.22\text{ mW}/\text{m}^2$;深层大地热流平均值为 $68.33\text{ mW}/\text{m}^2$ 。差异产生的原因是浅部地层易受地下水对流换热的影响,使得浅部平均地温梯度($3.15^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)低于深部($3.47^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$),加之数据获取的偏差影响所引起的误差。

将本次深层大地热流值的计算结果同《中国大陆地区大地热流数据汇编》(胡圣标等,2011)关中盆地的大地热流值进行比较,可以发现本次根据实测资料计算的关中盆地大地热流平均值为 $68.33\text{ mW}/\text{m}^2$ 与《中国大陆地区大地热流数据汇编》关中盆地的大地热流平均值 $68.24\text{ mW}/\text{m}^2$ 大致相符。

根据本次计算结果关中盆地深层大地热流平均值为 $68.33\text{ mW}/\text{m}^2$,相比全国平均值(61 ± 15.5) $\text{ mW}/\text{m}^2$ 及西北地区大地热流平均值(60.9 ± 15.5) $\text{ mW}/\text{m}^2$,关中盆地的大地热流值较高。前已述及本区莫霍面埋深较周边浅,可以认为关中盆地是一个复杂的拗陷型中低温地热田。

6 结论与展望

概述了关中盆地的气候气象特征、工程地质、

表6 关中盆地浅层和深层大地热流值计算成果

Table 6 The calculation of the earth heat flow values in the shallow and deep layers of Guanzhong Basin

	位置	测试段/m	热导率/(W/m·K)	地温梯度/(°C/100m)	地温梯度/(K/km)	大地热流值/(mW/m ²)
松散层	宝鸡市金台区	50~150	1.73	2.3	27.55	47.66
	宝鸡市金台区	50~200	2.08	3.1	27.63	57.47
	渭南市临渭区	50~100	1.49	3.4	27.66	41.21
	西安市长安区	50~120	1.50	3.5	27.67	41.51
	西安市高陵区	50~100	1.57	3.5	27.67	43.44
	咸阳市渭城区	50~120	2.0	3.2	27.64	55.28
	咸阳市底张镇	50~200	1.57	2.8	27.60	43.33
	咸阳市三原县	50~100	1.44	3.4	27.66	39.83
	平均		1.67	3.15	27.64	46.22
基岩层	华阴市敷水镇	1800~2805	2.89	4.11	27.73	80.15
	渭南市华县	1000~1401	2.0	4.41	27.76	55.52
	西安市临潼区	1599~2017	2.01	3.09	27.62	55.52
	咸阳周陵镇	1158~2325	2.68	4.02	27.72	74.29
	西安电影厂	1100~1700	2.6*	3.36	27.65	71.89
	西京电气公司	2424~3981	2.6*	2.66	27.58	71.71
	骊山温泉别墅	900~1379	2.01	3.2	27.64	55.56
	户县灵山寺村	1400~1600	2.42*	3.84	27.70	67.03
	咸阳商贸学院	2325~3500	2.6*	2.97	27.61	71.79
	华阴市敷水镇	2055~2584	2.89	3.07	27.62	79.82
	平均		2.47	3.47	27.66	68.33

注:1.钻孔编号;2.地层加权单孔导热系数;3.现场测试单孔导热系数。

表7 关中盆地与部分地区大地热流值(mW/m²)对比

Table 7 Contrast of the earth heat flow values in Guanzhong Basin and other areas

地区	大地热流值	地区	大地热流值
关中盆地	68.33	鄂尔多斯盆地	63.4
松辽盆地	68.6	酒泉盆地群	50~57
吐哈盆地	44.5	沁水盆地	61.0
渤海湾	61.5	天津	64

水文地质、环境地质条件以及地温场的热源,总结了不同岩性的岩土体热物性特征,分析了热物性参数与岩土体物理性质的相关关系。使用格罗布斯判据,剔除了可能影响分析结果的差异值,再用灰色关联分析方法,指出了影响岩土体导热系数和比热容的主要因素。利用关中盆地内多个地温常观孔,绘制了地温变化曲线和地温梯度等值线图,总结了关中盆地常温带分布和地温梯度变化特

征。通过计算盆地内部大地热流值,认为浅部大地热流值偏低的主要因素是松散层的导热系数偏低,深部值符合全国规律,经对比全国区域资料,认为关中盆地的地热资源居全国上游。

地温场特征的准确分析直接关乎区域地热能的勘察评价,是地热能这一新型绿色能源开发利用的先决条件。地温场特征的研究是地热勘探开发中的重点、难点和急需解决的科学技术问题,也是具有产业化前景、覆盖面广、关联度高的核心技术。对其深入研究有利于带动关中城市群发展,为实施国家战略和陕西省“绿色”追赶超越做出贡献。

致谢: 本文在野外工作及后期写作过程中得到了陕西省地质调查中心闫文中教授级高工、李锋教授级高工、王友林所长的指导与帮助,在此表示衷心感谢!

References

Chen Xiaodong, Jin Xu, Guan Yanwu, Shi Zhuo, Gao Yi.2006. The

- influence of daily and annual variation of the surface temperature on near-surface temperature survey[J]. Progress in Geophysics, 21(3):1008-1011.
- Feng Chaochen, Huang Wenfeng. 2015. Evaluation of geothermal resources in fault zone of Heze City, the Western Liaocheng-Lankao Shandong Province[J]. Geological Survey of China, 2(8): 55-59(in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001. Completion of heat flow data in the China continental area(3rd edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5):611-623(in Chinese with English abstract).
- Li Shaohua, Qin Xiangxi, Niu Dinghui, Mao Hanchuan. 2015. Analysis of influence factors for field heat response test of ground heat conduction coefficient[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 45(12):49-52.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 40(1):312-321 (in Chinese with English abstract).
- Li Gongke, Wang Weixing, Li Hong, Yang Fengtian, Wang Linhai, Fang Wanling. 2014. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province[J]. Geology in China, 41(6):2099-2109 (in Chinese with English abstract).
- Liu Peng, Yan Changhong, Xu Yang, Zou Mingyang, Zhou Yinkang. 2016. Laboratory research on influence factors of thermal conductivity for Xiashu Loess in the area of Nanjing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 36(5): 847-852.
- Luan Yingbo, Zheng Guisen, Wei Wanshun. 2013. The experimental study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain[J]. Geology in China, 40(3):981-988 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lin Wenjing, Zhang Wei. 2012. Evaluation on utilization potential of shallow geothermal energy in major cities of China[J]. Building Science, 28(10):1-3, 8.
- Wei Wanshun, Zheng Guisen, Luan Yingbo. 2010. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in Beijing plain area[J]. Geology in China, 37(6):1733-1739 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan. 1990. Basic Characteristics of Geothermal Distribution in China[M]. Beijing: Seismological Press. 80-100(in Chinese).
- Xu Ming, Zhao Ping, Zhu Chuanqing. 2010. Borehole temperature logging and terrestrial heat flow distribution in Jiangnan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 45(1):317-323.
- Zhou Yang, Li Feng, Yan Wenzhong, Mu Genxu, Liu Jianqiang. 2016. Research on shallow geothermal energy resources occurrence rule of major cities in Guanzhong basin[J]. Geological Survey of China, 3(4):12-18(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yang, Deng Niandong, Wang Feng, Mu Genxu, Liu Jianqiang. 2017. Fractal theory of suitability zoning structure of shallow geothermal energy[J]. Geological Survey of China, 4(1):18-23(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈晓冬, 金旭, 管彦武, 石卓, 高艺. 2006. 长春地区地表温度日变、年变对地温测量的影响[J]. 地球物理学进展, 21(3):1008-1011.
- 冯超臣, 黄文峰. 2015. 山东省菏泽市聊城—兰考断裂带西部地区地热资源评价[J]. 中国地质调查, 2(8):55-59.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 2011. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 44(5):611-623.
- 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 2013. 北京平原区粉质黏土热导率影响因素实验研究[J]. 中国地质, 40(3):981-988.
- 李攻科, 王卫星, 李宏, 杨峰田, 王林海, 房万嶺. 2014. 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究[J]. 中国地质, 41(6):2099-2109.
- 李少华, 秦祥熙, 牛定辉, 毛汉川. 2015. 现场热响应试验测定导热系数的影响因素分析[J]. 暖通空调, 45(12):49-52.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1):312-321.
- 刘鹏, 阎长虹, 徐杨, 邹明阳, 周殷康. 2016. 南京地区下蜀土导热系数影响因素室内试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 36(5):847-852.
- 王贵玲, 蔺文静, 张薇. 2012. 我国主要城市浅层地温能利用潜力评价[J]. 建筑科学, 28(10):1-3, 8.
- 王均, 黄尚瑶, 黄歌山. 1990. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社:80-100.
- 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 2010. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 37(6):1733-1739.
- 徐明, 赵平, 朱传庆. 2010. 江汉盆地钻井地温测量和大地热流分布[J]. 地质科学, 45(1):317-323.
- 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 罗银飞, 赵东阳, 边疆. 2015. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. 中国地质, 42(3):803-810.
- 周阳, 李锋, 闫文中, 穆根胥, 刘建强. 2016. 关中盆地主要城市浅层地热能源量赋存规律研究[J]. 中国地质调查, 3(4):12-18.
- 周阳, 邓念东, 王凤, 穆根胥, 刘建强. 2017. 浅层地热能适宜性分区结构的分形原理[J]. 中国地质调查, 4(1):18-23.