

燕山中部大地热流及岩石圈热结构特征

——以承德市七家-茅荆坝地热田为例

刘峰^{1,2,3)}, 王贵玲^{1,3)}, 张薇^{1,3)}, 岳晨¹⁾, 陆川^{1,3)}, 黄起伟⁴⁾, 欧小科⁵⁾

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061; 2) 中国地质大学(北京), 北京, 100083;
3) 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; 4) 东华理工大学, 南昌, 330000
5) 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东深圳, 518000

内容提要:燕山中部地区地热资源丰富, 地热地质条件较好, 但该地区大地热流测量工作较少, 岩石圈热结构研究尚未开展, 制约了该地区的地热地质研究与资源勘探开发。本文以该地区的七家-茅荆坝地热田为典型区, 结合地温测井、取样测试、数据收集与分析, 初步查明燕山中部大地热流特征及浅部-深部岩层热物性特征, 填补了大地热流值测量空白区, 在此基础上建立了研究区热结构概念模型, 估算其深部地温分布。研究得出燕山中部大地热流值变化较大, 平均约 57 mW/m^2 , 与周边温泉水温存在较好的相关关系。其中七家-茅荆坝地热田大地热流值较高, 为 74.9 mW/m^2 。通过深部地温分布计算得出七家-茅荆坝地区居里面埋深为 $21.5 \sim 22.8 \text{ km}$, 莫霍面温度约 815°C , 分析结果与前人研究成果较为一致, 验证了本文所建立岩石圈热结构模型的准确性。

关键词:燕山地区; 七家-茅荆坝地热田; 大地热流; 岩石圈热结构; 居里面

岩石圈热结构是岩石圈热演化过程的反映, 对地热资源的形成分布有重要影响。地表热流 q_0 由地壳及其以上岩层中放射性元素 U、Th、 ^{40}K 衰变产生的地壳热流 q_c 和来自上地幔的地幔热流 q_m 组成 (Roy et al., 1969; Birch et al., 1968)。岩石圈热结构即为一个地区地壳、地幔两部分热流的构成与配分 (Blackwell, 1971), 广义上, 还包括地壳内部不同层位间的热流构成、热物性参数及温度场分布。因此, 可以根据岩石圈各圈层的厚度与热物性参数分布特征, 利用“剥层法”计算地壳-地幔热流配分及深部地温分布, 从而进一步揭示壳、幔热流的构造意义, 为地热田的成因演化研究提供约束条件 (Lachenbruch, 1970)。其中, 大地热流值是表征区域地热场特征的综合性热参数 (Chen Aihua et al., 2017; Luo Lu et al., 2019), 是地球内部热动力过程的地表显示和岩石圈热结构研究的基础 (Furlong et al., 1987; Pollack et al., 1993; Mao Xiao-ping

et al., 2019)。

燕山地区主要位于京津冀北部, 北接坝上高原, 西南以关沟与太行山相隔, 南侧为华北平原, 在构造上主要包括内蒙地轴东部与燕山台褶带 (图 1)。燕山地区岩浆活动频繁且广泛, 与太行山及华北平原相比, 该区域发育有大量生热率较高的花岗岩类侵入岩 (Lin Yi, 2019)。该地区地壳也较厚 (Xiong Xiaosong et al., 2011), 莫霍面深度为 $42 \sim 32 \text{ km}$, 普遍大于华北平原 ($28 \sim 37 \text{ km}$)。因此, 推断该地区大地热流及岩石圈热结构特征与相邻地区存在一定差异。同时, 燕山地区地热资源较为丰富, 现存地热显示 35 处, 远远高于太行山周边温泉数量 (9 处)。对于该区域地热地质条件的研究具有重要的理论与实践意义。

燕山地区目前共有大地热流值测点 22 个, 其中绝大多数位于西部的张家口周边, 平均值约 54 mW/m^2 (Zu Jinhua et al., 1997)。而占地热显示数

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目 (编号 DD20190128、DD20160190) 资助的成果。

收稿日期: 2020-05-19; 改回日期: 2020-06-02; 网络发表日期: 2020-06-05; 责任编辑: 邱楠生; 责任编辑: 周健。

作者简介: 刘峰, 男, 1988 年生。硕士, 助理研究员, 主要从事地热地质研究。Email: xtliaofeng@foxmail.com。通讯作者: 王贵玲, 研究员, 从事地热地质、水文地质研究。Email: guilingw@163.com。

引用本文: 刘峰, 王贵玲, 张薇, 岳晨, 陆川, 黄起伟, 欧小科. 2020. 燕山中部大地热流及岩石圈热结构特征——以承德市七家-茅荆坝地热田为例. 地质学报, 94(7): 1950~1959, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020229.

Liu Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Yue Chen, Lu Chuan, Huang Qiwei, Ou Xiaoke. 2020. Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the middle Yanshan region—a case study from the Qijia-Maojingba geothermal field in Chengde. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1950~1959.

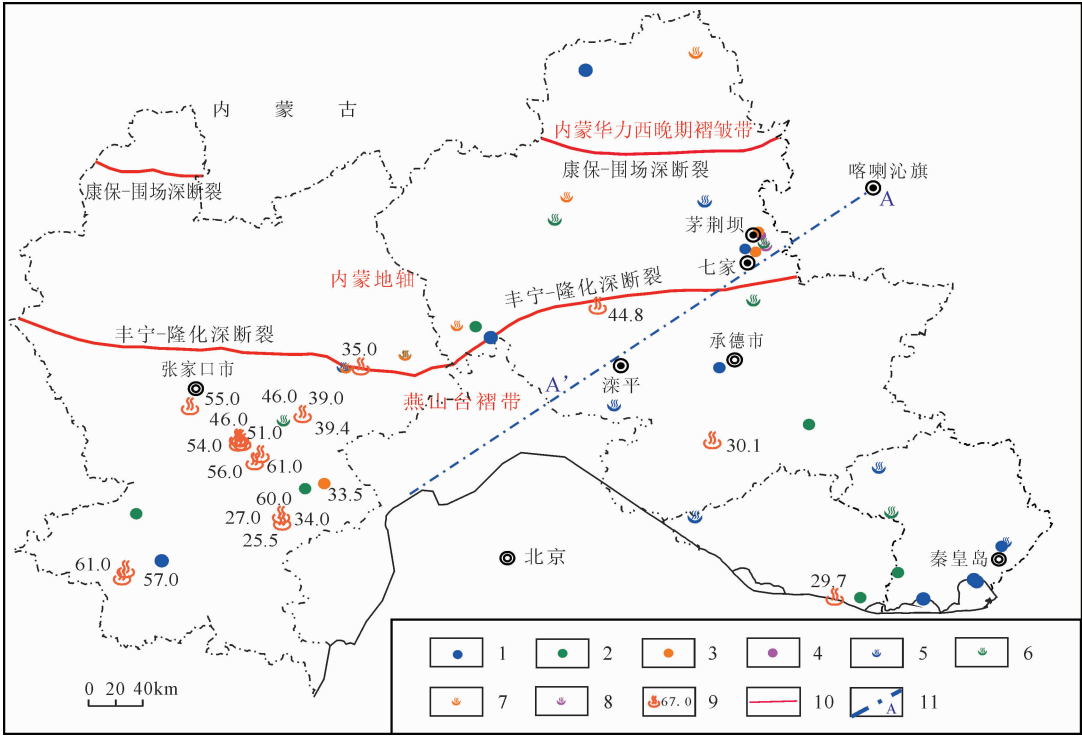


图 1 燕山地区大地热流及地热显示分布图

Fig. 1 Terrestrial heat flow data and geothermal fields in Yanshan region

1—地热井(25℃≤T<40℃); 2—地热井(40℃≤T<60℃); 3—地热井(60℃≤T<90℃); 4—地热井(90℃≤T<150℃); 5—温泉(25℃≤T<40℃); 6—温泉(40℃≤T<60℃); 7—温泉(60℃≤T<90℃); 8—温泉(90℃≤T<150℃); 9—大地热流值(mW/m²); 10—深大断裂; 11—剖面线

1—Geothermal wells (25℃≤T<40℃); 2—geothermal wells (40℃≤T<60℃); 3—geothermal wells (60℃≤T<90℃); 4—geothermal wells (90℃≤T<150℃); 5—hot springs (25℃≤T<40℃); 6—hot springs (40℃≤T<60℃); 7—hot springs (60℃≤T<90℃); 8—hot springs (90℃≤T<150℃); 9—terrestrial heat flow (mW/m²); 10—deep fault; 11—section line

量约一半(Zhang Xue, 2012)的燕山中部仅有 2 个数据(图 1),且均为早期的数据(Wang Jiyang et al, 1988; Wu Qianfan et al. , 1990),数据的代表性相对较差。因此,本文选定燕山中部地热地质条件较好,区域岩层、构造、岩石圈结构分布较为典型的七家-茅荆坝地热田为典型区,计算该地区大地热流值,分析区域地热背景,并结合现有深部地层断面资料,初步分析燕山中部地区岩石圈热结构,为该地区地热地质研究提供基础数据与理论支撑。

1 研究区现状

七家-茅荆坝地热田位于燕山中部(图 1),温泉出水温度 50~92℃,是该区域最主要的地热田之一,代表性较强。区内断裂发育,据其空间展布特征可分为近东西向、北东—北北东向、北西向及弧形四个断裂系统(图 2)。其中七家-龙头山断裂(两家-锦山断裂的一部分)位于研究区中部,总体走向北东,研究区内的温泉、地热井多分布于该断裂周边,故推

测其为该区域的主要控热构造(Guo Ruilin et al. , 2015)。

区域地层也较有代表性(Lin Yi, 2019; Guo Ruilin et al. , 2015),从老到新主要有侵入岩、中生代陆相火山-沉积地层、第四纪地层。其中第四纪地层较薄,多为几米至几十米厚,其下为流纹岩、凝灰岩等火山岩,厚度数百至上千米不等。本区侵入岩具有多期侵入特征,岩性多为花岗岩、二长花岗岩、闪长岩等。

如图 1 所示,内蒙古喀喇沁旗-湖北随州地学断面的北段在地热田东南部穿过(孙武诚等, 1992),为研究区的岩石圈热结构分析提供了地壳结构分层、地震波速等必要数据。该断面北起喀喇沁旗(118°38'E,41°51'N),沿 NE35°38'方向向西南延伸。七家镇莫霍面深度约 35.5 km(图 3),接近断面平均深度。

2 研究方法

2.1 大地热流值测量

陆域大地热流值具体可归结为地温梯度和岩石

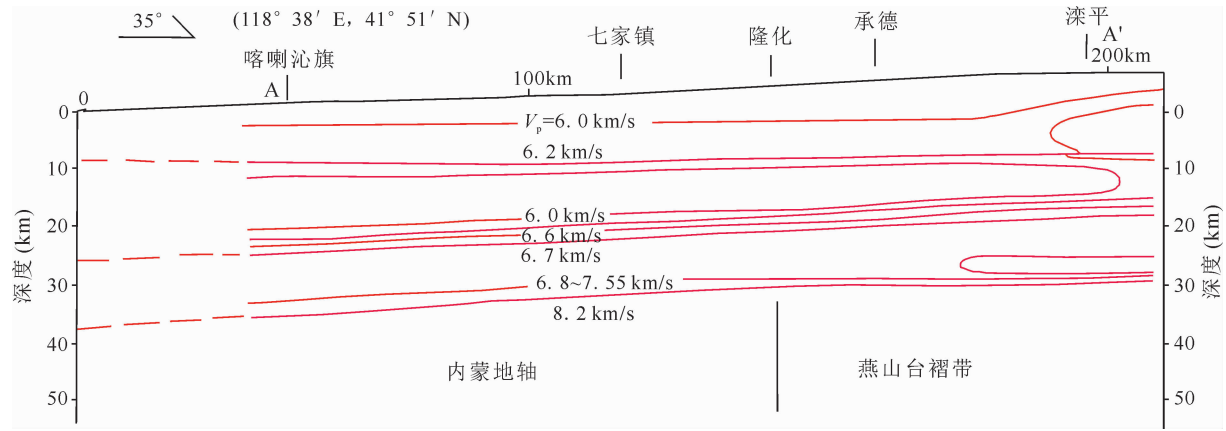


图 3 喀喇沁旗—滦平地质断面地震波速分布图(地质断面位置见图 1)
Fig. 3 Distribution of seismic velocity in geological transect from Harqin Banner to Luanping
(the location of profile A—A' refers to Fig. 1)

$\Delta T/\Delta h$ 。不同岩层地温梯度可能相差较大(Yan Baizhong et al. , 2018),结合相应测温段的热导率测试成果,加权平均得到该钻孔大地热流值。

(2)热导率:岩石热导率测试使用的仪器是德国生产的 TCS(Thermal Conductivity Scannng)热导率自动扫描仪,测量范围为 0.2~25 W/(m·K),测量精度±3%。Anand et al. (1973)通过实验发现岩石热导率会随着温度的升高而降低;热导率测试在 25℃环境下进行,与钻孔中实际地温可能相差较大,因此对于有实测原位温度的钻孔岩芯,可根据其原位温度进行热导率的校正,Sass et al. (1992)通过实验得出了热导率与温度关系的经验公式,前人研究表明,该公式中国大陆地区几千米内的地层较为适用(He Lijuan et al. , 2008; Gong Yuling et al. , 2011),因此对于岩芯实测热导率可采用如下两个公式进行钻孔岩芯热导率的校正:

$$K(0) = K(25)\{1.007 + 25[0.0037 - 0.0074/K(25)]\}$$

(1)

$$K(T) = K(0)/\{1.007 + T[0.0036 - 0.0072/K(0)]\}$$

(2)

式中: T 为钻孔岩芯原位温度(℃), $K(0)$ 和 $K(25)$ 分别为岩石在 0℃和 25℃时的热导率值(W/(m·K))。

2.2 岩石圈热结构

地壳热流 q_c 是地表以下所有地壳结构层由放射性元素衰变产生的热量累加的结果。因此,根据每一层的厚度与该岩层岩石放射性生热率数据,可采用“剥层法”计算各结构层由放射性元素衰变产生的热流。

$$q_i = D_i \cdot A_i$$

(3)

$$q_c = \sum q_i$$

(4)

式中: D_i 为结构层的厚度, A_i 为该层相应的生热率, q_i 为每一层岩石放射性衰变所产生的热流值, q_c 为地壳中所有岩层由放射性元素产生的热流值。进一步,可求出地幔热流值为 $q_m = q_0 - q_c$,同时,壳幔热流分配比 q_c/q_m 也可求出。

岩石放射性生热率通过测量岩石中 U、Th、K 这三种元素的含量计算得出。对于岩石生热率的计算,学者们提出了很多方法,目前应用较多的方法是 Rybach(1976)提出的计算公式,其计算公式如下:

$$A = 0.01\rho(9.52C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K)$$

(5)

式中: A 为岩石放射性生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$), ρ 为岩石密度(g/cm^3), C_U 、 C_{Th} 、 C_K 分别为岩石中铀($\mu\text{g}/\text{g}$)、钍($\mu\text{g}/\text{g}$)、钾的含量(%)。U、Th 使用 ICP-MS 测定,不确定度为±1%~±10%,K 元素由 XRF 仪器测定,分析不确定度为±1%~±2%。

对于地壳中的深部岩层,常用的生热率计算方法主要有两种,一种为根据资料确定地壳不同圈层岩性,并在地表或钻孔中采集相应岩性的样品进行测试。这种方法的优点是能够最大限度还原地壳深部生热率特征,缺点是深部岩体一般难以获取,需通过深钻或地表深源包体等方式取得样品(Liu et al. , 2001)。另一种为地球物理方法,Rybach(1984)研究了地壳岩层中地震纵波速度 V_p 与岩石放射性生热率 A 的关系,建立了 V_p - A 相关方程(公式 6),得到地壳各岩层的放射性生热率值,建立 V_p 与深度 H ,各结构层厚度 D 之间的关系。

$$\text{Ln}A = 16.5 - 2.74V_p$$

(6)

该方法的优点为可通过地质断面的资料获取较为精细的区域地壳生热率变化数据,缺点为 V_p - A

关系式为经验公式,在某一区域是否适用仍需验证(Zhao Ping, 1995)。因此,本文拟结合以上两种方法,分析研究区岩石圈热结构,验证该经验公式的适用性。

2.3 深部地温分布

地壳浅部的温度可借助于探井直接测量,而地壳深部地温只能根据间接方法加以推测。由于深部地温不随时间变化,Lachenbruch et al. (1970)认为地壳深部温度可以按照一维稳态热传导公式进行计算:

$$T_z = T_0 + \frac{qD}{k} - \frac{AD^2}{2k} \tag{7}$$

式中: T_z 为地下深度 z 处的温度($^{\circ}\text{C}$), T_0 、 q 为计算层段顶面的温度($^{\circ}\text{C}$)和热流(mW/m^2), D 为地壳各结构层的厚度(km), k 为该层岩石热导率($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), A 为该层的岩石生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$)。

浅部地层热导率一般由样品实测得出并按照公式(1)、(2)进行温度校正。上地壳及以下的地壳各结构层则一般采用 Cermak 所建立的公式进行校正(Cermak et al., 1982; Artemieva et al., 2001)。

$$k = k_0 / (1 + cT) \tag{8}$$

式中, c 为实验确定的温度系数, k_0 为各结构层顶面的热导率初始值,在实际工作中由实验或经验参数给定。前人研究中,一般上地壳 c 取 0.001,中地壳取 0,下地壳与地幔取 -0.00025 。 k_0 一般上地壳取 $3.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,中地壳取 $2.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,下地壳与地幔取 $2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Gong Yuling et al., 2011; Cermak et al., 1982)。

3 结果

3.1 区域大地热流值测量

受断裂导水导热引起的对流作用影响,七家-茅荆坝地热田不同地热井的温度-深度关系曲线各异(图 4)。其中,ZK3 井深度最浅,井温变化较小;ZK1、ZK4、ZK5、DK30 等井曲线上凸较为明显,表明均受深部热水上涌影响显著(Xiong Liangping et al., 1990)。ZK2 井地温出现负增长,推测为局部冷水混入所致。以上钻孔受对流影响较大,不适宜进行大地热流值计算。因此,选取井深最大、有多段线性增温段且增温段较长的 CD02 井计算地温梯度。该井岩芯热导率数据共 40 组,深度范围 10~810 m,涵盖了钻孔内所有岩性,可满足大地热流测量的需求。

CD02 井主要出水层位为井深 170~401.4 m

的凝灰岩破碎层,且揭穿该层时开始自流,自流量为 $14.30 \text{ m}^3/\text{h}$;678.10~693.30 m 为花岗岩破碎带,揭穿该层后自流量增加 $1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ (图 5)。因此,选取两段之间的线性增温段(约为 460~630 m)计算地温梯度。

如图 5 所示,根据岩性将线性增温段分为 2 段。其中 460~540 m(线性增温段 80 m)为花岗岩层,平均地温梯度为 $28.2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,平均热导率为 $2.78 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;550~630 m(线性增温段 80 m)为辉长岩层,平均地温梯度为 $33.46 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,平均热导率为 $2.33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。根据公式(1)、(2)进行热导率校正后加权平均得 CD02 井大地热流值为 $74.9 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。该数据远大于承德已有数据($30.1 \text{ mW}/\text{m}^2$ 、 $44.8 \text{ mW}/\text{m}^2$)(Jiang Guangzheng et al., 2016)。推测与该地区温泉出水温度($60\sim92 \text{ }^{\circ}\text{C}$,平均约 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$)(Zhang Dezhong et al., 2013)远大于以上两处大地热流值测点周边(平均约 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$)(Zhang Xue, 2012)有关。在燕山中部,大地热流值的高低与测点周边温泉水温呈明显的正相关关系,说明该区域温泉的形成与区域热背景关系较大。

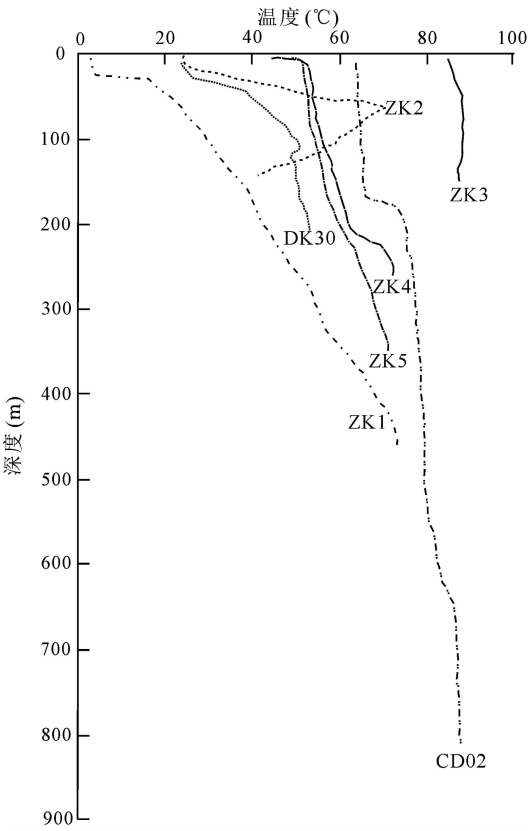


图 4 七家-茅荆坝地热田地热井测温曲线图
Fig. 4 Temperature curve of geothermal wells in Qijia-Maojingba geothermal field

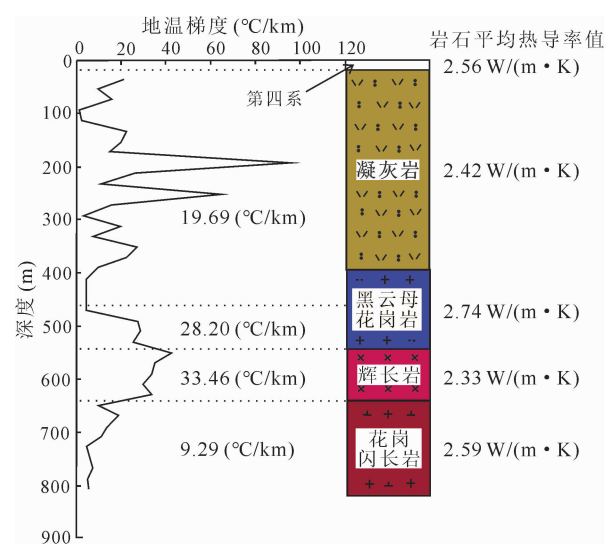


图 5 CD02 井地温梯度-深度剖面图

Fig. 5 Geothermal gradient-depth profile of the well CD02

根据以上三个数据,拟合得燕山中部地区大地热流-温泉水温关系曲线为 $Q=1.181T-8.35$,其中 Q 为大地热流值 (mW/m^2), T 为周边温泉水温 ($^{\circ}\text{C}$),拟合度为 0.86。按燕山中部承德市温泉水温平均 $50\sim60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zhang Dezhong et al., 2013) 计算,该区域大地热流值约 $51\sim63\text{ mW}/\text{m}^2$,平均约 $57\text{ mW}/\text{m}^2$ 。需注意,由于该方法目前数据较少,所得大地热流平均值仅具有参考意义。

3.2 岩石圈热结构

如图 6 所示,研究区 $0\sim0.8\text{ km}$ 地层分布及岩石生热率特征可由 CD02 钻孔测试结果近似代表, 0.8 km 至莫霍面的地壳结构及生热率特征则可根据图 3 与公式(6)计算得到,或利用研究区及周边相应岩性的数据近似代表。

其中, $0\sim0.4\text{ km}$ 深度地层为火山沉积层,第四纪地层岩样 1 组,凝灰岩样品 19 组,该层段放射性生热率平均值 $2.37\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$; $0.4\sim0.8\text{ km}$ 深度地层为多期次侵入岩层,黑云母花岗岩样品 7 组,辉长岩样品 5 组,花岗闪长岩样品 10 组,该层段放射性生热率平均值 $2.40\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。其中花岗闪长岩构成研究区基岩基底,该层段放射性生热率平均值 $1.80\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ ($0.8\sim6.65\text{ km}$)。

根据一些重要的 V_p 速度界面可对地壳结构进行分层(Fullea et al., 2014)。如图 3 所示,以 $V_p=6.0\text{ km}/\text{s}$ 速度界面为上地壳顶面,深度为 6.65 km ,以 $V_p=6.2\text{ km}/\text{s}$ 、 $6.7\text{ km}/\text{s}$ 、 $8.2\text{ km}/\text{s}$ 的界面分别为上地壳、中地壳的底面与莫霍面(国家地震局地学断面编委会, 1992),得研究区上地壳深度为

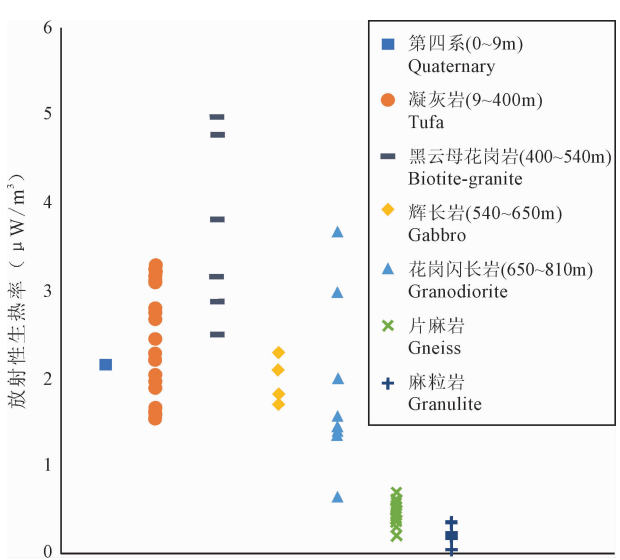


图 6 七家-茅荆坝地区及周边不同岩性放射性生热率测试结果(麻粒岩数据据 Liu et al., 2001)

Fig. 6 Test results of radioactive heat generation from different lithology in and around the Qijia-Maojingba area (granulite after Liu et al., 2001)

$6.65\sim14.74\text{ km}$,中地壳 $14.74\sim25.72\text{ km}$,下地壳为 $25.72\sim35.55\text{ km}$ 。上地壳以上为基底基岩,以花岗闪长岩为主, $A_{0.8\sim6.65}$ 约为 $1.80\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$,上地壳以下圈层生热率可利用 V_p - A 关系式计算得到(表 1),根据式(3)、(4)计算得研究区岩石圈热结构如表 1 所示。

计算结果显示七家-茅荆坝地热田地幔热流 $q_m=45.6\text{ mW}/\text{m}^2$, $q_c/q_m=0.65$ 。据河北省区域地质志(Zhang Dezhong et al., 2013),燕山地区基底岩层及上地壳以花岗闪长岩为主,根据 CD02 钻孔实测数据,放射性生热率 $A_{0.8\sim14.74}$ 约为 $1.80\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。中地壳多为片麻岩类岩体,根据本次遵化地区所取的片麻岩实测数据(图 6), $A_{14.74\sim25.72}$ 约为 $0.40\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。下地壳以中酸性、基性麻粒岩为主,根据张家口上麻坪(图 6;Liu et al., 2001)深源包体实测值, $A_{25.72\sim35.55}$ 约为 $0.24\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。根据以上实测数据,计算得研究区地幔热流 $q_m=41.1\text{ mW}/\text{m}^2$, $q_c/q_m=0.82$,为“热幔冷壳”型,符合汪集旻等对中国东部的热结构的分析描述(Wang Jiyang, 1996; Qiu Nansheng, 1998)。综上,两种方法计算所得壳幔热流比例相近,与前人成果相吻合,说明两种方法具有较好的适用性。

鉴于表 1 中地壳结构划分较细,以该表计算结果为基础,建立如图 7 所示研究区地壳生热率及岩石圈热结构概念模型,各层面的热流值可直接由图

表 1 七家-茅荆坝地区岩石圈热结构计算表

Table 1 Calculation table of lithospheric thermal structure in Qijia-Maojingba region								
结构层	深度 (km)	深度对应的 V_p (km/s)	层段平均 V_p (km/s)	计算层段 (km)	A_i ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	D_i (km)	q_i (mW/m^2)	热流值 (mW/m^2)
—	0	—	—	—	—	—	—	74.9 (q_0)
凝灰岩	0.4	—	—	0~0.4	2.37	0.4	0.95	74.9
花岗岩基底	0.8	—	—	0.4~0.8	2.40	0.4	0.96	73.9
	6.65	6	—	0.8~6.65	1.80	5.85	10.53	73.0
上地壳	13.01	6.2	6.1	6.65~13.01	0.81	6.36	5.13	62.4
	14.74	6	6.1	13.01~14.74	0.81	1.73	1.40	57.3
	21.96	6	6	14.74~21.96	1.06	7.23	7.67	55.9
中地壳	23.12	6	6.15	21.96~23.12	0.70	1.16	0.81	48.2
	24.28	6.3	6.45	23.12~24.28	0.31	1.16	0.36	47.4
	25.72	6.6	6.65	24.28~25.72	0.18	1.45	0.26	47.1
下地壳	34.39	6.7	6.75	25.72~34.39	0.14	8.67	1.18	46.8
	35.55	6.8	7.5	34.39~35.55	0.02	1.16	0.02	45.6
上地幔		8.2	—	—	—	—	—	—

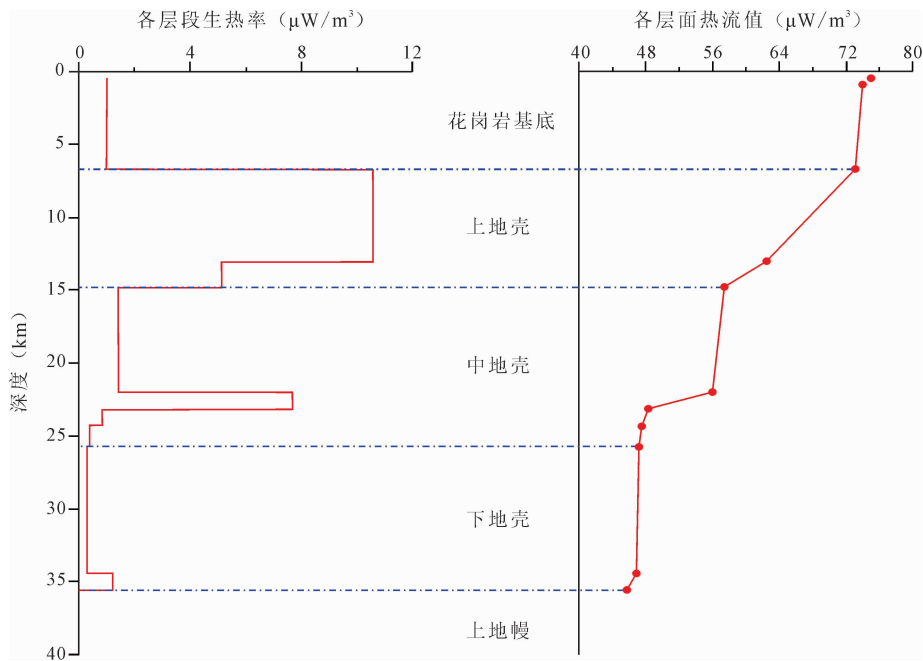


图 7 七家-茅荆坝地热田岩石圈热结构概念模型图

Fig. 7 Conceptual model of lithospheric thermal structure in Qijia-Maojingba geothermal field

上读出。其中,研究区莫霍面热流值为 45.6 mW/m²。莫霍面以上,6.65 km 以上岩石放射性生热 12.4 mW/m²,上地壳为 6.5 mW/m²,中地壳为 9.1 mW/m²,下地壳为 1.2 mW/m²,说明研究区较高的热流主要受区域花岗岩侵入基底与上地壳、中地壳岩石放射性产热的影响。

3.3 深部地温分布

以七家-茅荆坝地热田大地热流、岩石圈热结构为基础,计算得该地区的深部地温分布,可得出该地区居里面的深度,与物探方法所得结果对比可验证热结构模型的正确性。以研究区恒温带为计算起点,恒温带温度 9℃,埋深 20 m,根据热导率实测结

果,七家-茅荆坝地区 0~0.4 km 火山岩层热导率均为 2.43 W/(m·K),0.4~0.8 km 的多期次侵入岩层热导率为 2.77 W/(m·K),0.8~6.65 km 的花岗闪长岩层热导率为 2.83 W/(m·K),6.65 km 以下的地壳利用 Cermak 公式及上文所述相关参数进行热导率的校正。

如表 2 所示,根据已知地壳结构将莫霍面以上岩层分为 6 段计算地温分布。各层段内岩石放射性生热率由层内各段生热率值加权平均求得。根据不同层段的热物性参数,经公式(7)迭代试算得出七家-茅荆坝地区 0~35.6 km 深部地温分布与地温梯度,如表 2 所示。计算得莫霍面温度为 815℃,地温

表 2 七家-茅荆坝地区深部地温分布计算表

Table 2 Calculation of deep geothermal distribution in Qijia-Maojingba region

层面	深度 H (km)	各层厚度 D (km)	未校正热 导率 k_0	校正热导 率 k	平均生热率 A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	表面热流 q (mW/m^2)	地温 $T(^{\circ}\text{C})$	地温梯度 dT/dH ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)
			(W/(m·K))					
凝灰岩	0	—	—	—	—	74.9	9	—
	0.4	0.4	2.43	2.43	2.37	73.9	21.2	30.6
花岗岩基底	0.8	0.4	2.77	2.75	2.4	73.0	31.9	26.7
	6.65	5.85	2.83	2.52	1.8	62.4	181	25.5
上地壳	14.7	8.09	3	2.01	0.81	55.9	419	29.4
中地壳	25.7	10.98	2.3	2.3	0.80	46.8	664	22.3
下地壳	35.6	9.83	2.5	3	0.19	45.6	815	15.4

梯度大体随深度增加逐渐降低,由 30.6 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 逐渐降为 15.4 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

居里等温面,是岩石中铁磁性矿物因温度升高达到居里点而失去铁磁性,变为顺磁性的温度界面(Bodri et al., 1991)。一般,该温度为 570~600 $^{\circ}\text{C}$ (Bodri et al., 1991)。根据表 2 中计算结果插值可得研究区居里面深度为 21.5~22.8 km。熊盛青等人对燕山地区居里面埋深进行了定量计算,确定区域居里面深度为 20~22 km(Xiong Shengqing et al., 2016; Yang Hai, 2015)。本文计算结果与其基本一致,以上对比说明本文对于岩石圈结构层分层与各项参数选取较为合理,同时也验证了区域岩石圈热结构概念模型的准确性。

4 结论

本文以七家-茅荆坝地热田为典型区,结合地温测井、岩样测试分析等工作,分析了燕山中部大地热流特征与岩石圈热结构,并利用区域深部地温分布对所得结果进行了验证,结论如下:

(1)七家-茅荆坝地热田地层分布在燕山中部,较为典型。该地区侵入岩较为发育,区域基岩基底,推测也主要由花岗闪长岩构成,据地学断面数据显示基底底部埋深约 6.65 km。6.65~14.74 km 深为上地壳,以太古宙侵入岩为主,成分与花岗闪长岩基岩相近。14.74~25.72 km 深为中地壳,以片麻岩为主;25.72~35.55 km 深为下地壳,岩性多为麻粒岩。各层位岩体的热导率相差较小,为 2.0~3.0 W/(m·K);放射性生热率变化较大,为 0.24~2.40 $\mu\text{W}/\text{m}^3$,基本随深度增加而逐渐变小。0.4 km 以下的花岗岩层生热率均小于 5 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。因此,研究区不属于高产热花岗岩分布区(Wan Jianjun et al., 2015),浅部花岗岩类岩体的放射性生热不是该区域大地热流的主要来源,上地壳及以上岩层热流贡献率约 23%。

(2)七家 CD02 井实测大地热流数据为 74.9 mW/m^2 ,数据质量为 A。结合该数据与已有成果,初步分析显示燕山中部大地热流值的高低与测点周边温泉水温呈明显的正相关关系,说明该区域温泉的形成与区域热背景关系较大。结合现有大地热流与温泉温度数据,估算得燕山中部大地热流值约 51~63 mW/m^2 ,平均约 57 mW/m^2 ,小于我国陆区平均值 61.2 mW/m^2 。

(3)通过 V_p - A 关系式与实测地壳圈层放射性生热率数据,分别计算了七家-茅荆坝地区的岩石圈热结构,计算结果相近,说明利用 V_p 获取深部岩层生热率的方法在燕山地区仍有较大的实用价值。在此基础上根据一维稳态方程计算所得研究区居里面深度 21.5~22.8 km,地温梯度大体随深度增高而降低,变化范围为 30.6~15.4 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。推测莫霍面温度约 815 $^{\circ}\text{C}$ 。所得结果与前人研究成果基本一致,说明本文对于岩石圈结构层分层与各项参数选取较为合理,同时也验证了区域岩石圈热结构概念模型的准确性。

综上,本文以七家-茅荆坝地热田为典型区,开展了燕山中部大地热流与岩石圈热结构研究,取得一定的阶段成果。但由于研究区整体研究程度较低,尤其大地热流数据过少,目前对于该地区大地热流分布和岩石圈热结构特征的分析仅处于初始阶段,需在未来工作中继续开展工作,增加区域大地热流值测量点,综合分析整个地区地层结构分层与不同层位岩体的热物性特征,以获取更为有效的区域热结构模型成果,为燕山中部地区地热资源研究与开发提供理论支撑。

References

Anand J, Somerton W H, Gomaa E. 1973. Predicting thermal conductivities of formations from other known properties. Society of Petroleum Engineers Journal, 13(5):267~273.

Artemieva I M, Mooney W D. 2001. Thermal thickness and

- evolution of Precambrian lithosphere: a global study. *Journal of Geophysical Research*, 106 (B8): 16387 ~ 16414 (in Chinese with English abstract).
- Birch F, Roy R F, Decker E R. 1968. Heat flow and thermal history in New England and New York. *Studies of Appalachian Geology: Northern and Maritime*, 437~451.
- Blackwell D D. 1971. The thermal structure of the continent crust. In: Heacock J G, ed. *The Structure and Physical Properties of the Earth Crust*. AGU, Washington D C.
- Bodri B, Iizuka S, Hayakawa M. 1991. Relations between deep temperatures and other geophysical characteristics in central Honshu, Japan. *Tectonophysics*, 194(4): 325~336.
- Cermak V, Rybach L. 1982. Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: Angenheister, ed. *Physical Properties of Rocks*. Berlin: Springer, 305~343.
- Chen Aihua, Xu Xing, Luo Xianhu, Liao Kaixun, Peng Deng. 2017. Heat flow characteristics Baikang basin and controlling factors of the in South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 91 (8): 1720~1728 (in Chinese with English abstract).
- Fullea J, Muller M R, Jones A G, Afonso J C. 2014. The lithosphere-asthenosphere system beneath Ireland from integrated geophysical-petrological modeling ii: 3d thermal and compositional structure. *Lithos*, 189(3): 49~64.
- Furlong K P, Chapman D S. 1987. Thermal state of the lithosphere. *Reviews of Geophysics*, 25(6): 1255~1264.
- Guo Ruilin, Guo Shuai, Zhang Lijian. 2015. Characteristics and forming analysis of the Qijia hot spring in Longhua County of Hebei Province. *Journal of East China University of Technology*, 38 (2): 87 ~ 95 (in Chinese with English abstract).
- Gong Yuling, Wang Shuliang, Liu Shaowen. 2011. The thermal structure and thermal evolution of Bohai Bay basin in East China. Beijing: Atomic Energy Press (in Chinese with English abstract).
- He Lijuan, Hu Shengbiao, Huang Shaopeng, Yang Wencai, Wang Jiyang, Yuan Yusong, Yang Shuchun. 2008. Heat flow study at the Chinese Continental Scientific Drilling site: Borehole temperature, thermal conductivity, and radiogenic heat production. *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Hu Shengbiao, Huang Shaopeng. 2015. Heat flow of continental area of China. In: Wang Jiyang, ed. *Geothermics and Its Applications*. Beijing: Science Press, 64~122.
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892~2910 (in Chinese with English abstract).
- Lachenbruch A H. 1970. Crustal temperature and heat production: w33 implications of the linear heat-flow relation. *Journal of Geophysical Research*, 75(17): 3291~3300.
- Luo Lu, Zhu Xia, He Chunyan, Mao Xiang, Xu Zhenhua, Wang Xinwei, Zhu Xiantao. 2019. Study on the genesis of geothermal fluid in Xianyang geothermal field. *Geological Review*, 65(6): 1422~1430 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yi. 2019. Mesozoic tectonic deformation and paleostress field around the junction of Yanshan and Taihangshan tectonic belt. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Jin S Y, Hu S H, S M, Zhao Z B, Feng J L. 2001. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba basalt, North China craton: Implications for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15): 2589~2604.
- Mao Xiaoping, Li Kewen, Wang Xinwei. 2019. Causes of geothermal fields and characteristics of ground temperature fields in China. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 7(1): 15~28.
- Pollack H N, Hurter S J, Johnson J R. 1993. Heatflow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, 31(3): 267~280.
- Qiu Nansheng. 1998. Thermal status profile in terrestrial sedimentary basins in China. *Advances in Earth Sciences*, 13 (5): 447~448 (in Chinese with English abstract).
- Rybach L. 1976. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 114(2): 309~317.
- Rybach L, Buntebarth G. 1984. The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere. *Tectonophysics*, 103(1~4): 335~344.
- Roy R F, Blackwell D D, Birch F. 1969. Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. *Earth and Planetary Science Letters*, 5(1): 1~12.
- Sass J H, Lachenbruch A H, Moses T H, Morgan P. 1992. Heat flow from a scientific research well at cajon pass, California. *Journal of Geophysical Research*, 97(B4): 5017~5030.
- Wan Jianjun, Sun Zhanxue, Hu Baoqun, Wang Andong, Liu Jinhui, Liu Chengdong, Chen Gongxin, Li Xiaocong. 2015. Radiogenic geochemistry investigation on granitic rocks from Fogang complex, northern Guangdong Province and its implications for hot dry rock resource. *East China University of Technology*, 38: 406 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 1996. *Geothermics in China*. Beijing: Seismological Press.
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. 1988. Compilation of heat flow data for continental area of China. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 196~204.
- Xiong Liangping, Wang Jiyang. 1990. Convective and conductive heat flows in Zhangzhou geothermal field, Fujian Province, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 33(6): 702~711 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shengqing, Yang Hai, Ding Yan-yun, Li Zhankui. 2016. Characteristics of Chinese continent curie point isothermal. *Chinese Journal of Geophysics*, 59 (10): 3604 ~ 3617 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaosong, Gao Rui, Zhang Xingzhou, Li Qiusheng, Hou Hesheng. 2011. The Moho depth of North China and Northeast China revealed by seismic detection. *Geological Review*, 32(1): 46~56 (in Chinese with English abstract).
- Yan Baizhong, Xiao Changlai, Liang Xiujuan, Jiang Haiyang. 2018. Characteristics and genetic model of the basin type geothermal water recourses in basalt area of Changbai Mountain. *Geological Review*, 64 (5): 1201 ~ 1216 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hai. 2015. Characteristics of Chinese continental Curie point isotherm. PhD thesis of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xue. 2012. A study of the characteristics of hot springs of low to moderate temperature in Chengde district of northern Hebei. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1995. Studies of the relationship between seismic velocity and heat production in the rocks of crust. *Progress in Geophysics*, 1: 114~124 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈爱华, 徐行, 罗贤虎, 廖开训, 彭登. 2017. 南海北康盆地地热流分布特征及其构造控制因素探讨. *地质学报*, 91(8): 1720~1728.
- 郭瑞林, 郭帅, 张立剑. 2015. 河北省隆化县七家温泉特征及成因分析. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 38(2): 87~95.
- 龚育龄, 王良书, 刘绍文. 2011. *中国东部渤海湾盆地地热结构和热演化*. 北京: 原子能出版社.
- 河北省区域地质矿产调查研究所. 2017. *中国区域地质志. 河北志*. 北京: 地质出版社.
- 胡圣标, 黄少鹏. 2015. *中国陆地大地热流//汪集旻, 等. 地热学及其应用*. 北京: 科学出版社, 64~122.

姜光政, 高珊, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡胜标, 汪集旻. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第四版). 地球物理学报, 59(8): 2892~2910.

林逸. 2019. 燕山与太行山构造带结合部中生代构造变形与古构造应力场. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.

罗璐, 朱霞, 何春燕, 毛翔, 许振华, 汪新伟, 朱咸涛. 2019. 陕西咸阳地热田地热流体成因研究. 地质论评, 65(6): 1422~1430.

邱楠生. 1998. 中国大陆地区沉积盆地地热状况剖面. 地球科学进展, 13(5): 447~448.

孙武诚, 乌宝林, 宋松岩. 1992. 湖北随州至内蒙古喀喇沁旗地学断面 1:100 万说明书. 北京:地震出版社.

汪集旻, 黄少鹏. 1988. 中国大陆大地热流数据汇编. 地质科学, (2): 196~204.

吴乾蕃, 祖金华, 谢毅真, 康雨方. 1990. 我国第 5 号地学断面的大地热流研究. 科学通报, 2:126~129.

熊亮萍, 汪集旻. 1990. 漳州热田的对流热流和传导热流的研究. 地球物理学报, 33(6): 702~711.

熊盛青, 杨海, 丁燕云, 李占奎. 2016. 中国陆域居里等温面深度特征. 地球物理学报, 59(10): 3604~3617.

熊小松, 高锐, 张兴洲, 李秋生, 侯贺成. 2011. 深地震探测揭示的华北及东北地区莫霍面深度. 地质学报, 32(1):46~56.

闫佰忠, 肖长来, 梁秀娟, 江海洋. 2018. 长白山玄武岩区盆地型地热水特征及成因模式. 地质论评, 64(5): 1201~1216.

杨海. 2015. 中国陆域居里面特征研究. 成都理工大学博士学位论文.

张雪. 2012. 河北省北部承德地区中低温温泉特征研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.

张德忠, 刘志刚, 卢红柳, 等. 2013. 河北地热. 北京:地质出版社.

赵平. 1995. 地震波速与地壳岩石生热率关系的研究评述. 地球物理学进展, 1: 114~124.

Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the middle Yanshan region
——a case study from the Qijia-Maojingba geothermal field in Chengde

LIU Feng^{1,2,3)}, WANG Guiling^{*1,3)}, ZHANG Wei^{1,3)}, YUE Chen¹⁾,
LU Chuan^{1,3)}, HUANG Qiwei⁴⁾, OU Xiaoke⁵⁾

- 1) *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061;*
2) *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;*
3) *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, 050061;*
4) *East China University of Technology, Nanchang, 330000;*
5) *Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co., LTD, Shenzhen, Guangdong, 518000*
** Corresponding author: guilingw@163.com*

Abstract

The Middle Yanshan region in the north of the Hebei province is rich in geothermal resources. However, the absence of research on the terrestrial heat flow and lithosphere thermal structure seriously restricts the exploitation and utilization of thermal resources. This paper studies the physical parameters and heat flow in the shallow and deep rocks encompassing the Qijia-Maojingba geothermal field. Based on this data a conceptual lithospheric thermal structure model is established and information on heat flow is obtained. It is found that there is a good correlation between terrestrial heat flow (an average of about 57 mW/m²) and the temperature of the surrounding hot springs in the middle Yanshan Region. The terrestrial heat flow in the Qijia-Maojingba area is about 74.9 mW/m², which is the highest in the Yanshan Region. With the one-dimensional steady state thermal conduction formula, the temperature at different depths is calculated in the Qijia-Maojingba geothermal field. The depth of Curie surface is about 21.5~22.8 km with a temperature of 570~600 °C, and the Moho temperature of about 815 °C. Most of the analysis results presented above are consistent with previous research findings in the research area and its vicinity, confirming the reliability of the lithospheric thermal structure model established in this study.

Key words: Yanshan region; Qijia-Maojingba geothermal field; terrestrial heat flow; lithosphere thermal structure; Curie surface