

doi: 10.12029/gc20220602

姚亚辉, 贾小丰, 李胜涛, 张建伟, 宋健, 杨涛, 岳冬冬. 2022. 雄安新区 D01 井岩溶热储下伏太古界中热流测定研究[J]. 中国地质, 49(6): 1723–1731.

Yao Yahui, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Zhang Jianwei, Song Jian, Yang Tao, Yue Dongdong. 2022. Heat flow determination of Archean strata under the karst thermal reservoir of D01 well in Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 49(6): 1723–1731(in Chinese with English abstract).

雄安新区 D01 井岩溶热储下伏太古界中热流测定研究

姚亚辉^{1,2,3}, 贾小丰^{1,2}, 李胜涛^{1,2,4}, 张建伟^{1,4}, 宋健^{1,2}, 杨涛^{1,2}, 岳冬冬^{1,2}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300304; 2. 天津市地热资源勘查开发工程研究中心, 天津 300304; 3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 天津 300304)

摘要:【研究目的】目前雄安新区范围内的热流数据多测自于新近系沉积盖层及白云岩地层,对岩溶热储下伏太古界的热流测定研究还鲜见报道,主要受限于以往的地热勘查开发层位主要在 1800 m 以浅的蓟县系岩溶热储,揭露岩溶热储下伏太古界的钻孔稀少。2018 年以来,在雄安新区牛驼镇地热田实施了 D01 深部地热参数井,揭穿了高于庄组岩溶热储,并揭露太古界厚度达 1723.67 m,给该地区岩溶热储下伏太古界的热流测定研究提供了条件。【研究方法】本文基于近稳态钻孔测温及岩心热导率测试,对 D01 井太古界进行了热流测定及分析。【研究结果】结果表明: D01 井太古界呈显著的传导型地温特征,地温梯度为 18.3°C/km,相比于新近系地温梯度 48.6°C/km 偏低。测得 25 块 D01 井太古界片麻岩岩心样品的热导率平均值为(2.41±0.40)W/(K·m)。根据钻孔测温数据及热导率测试,计算出 D01 井太古界 2300~2700 m 深度的热流值为(44.1±7.0)mW/m²。同时,估算了 D01 井新近系 400~800 m 深度段的热流值为 84.6 mW/m²,较太古界高出 40.5 mW/m²。【结论】分析认为 D01 井新近系较太古界高出热流主要为高孔渗岩溶白云岩层中地下水侧向热对流作用以及牛东断裂地下水垂向热对流作用共同所致。研究结果对前人提出的地下水运移聚热模式及导热断裂聚热模式提供了数据支撑,对雄安新区深部地热资源成因机制和太古界地温场研究具有重要意义。

关键词:热流;钻孔测温;太古界;热导率;D01 井;地热地质调查工程;雄安新区

创新点:基于钻孔测温 and 岩心热导率测试,获取雄安新区岩溶热储下伏太古界结晶基底的高质量热流数据,并揭示其现今地温场特征。

中图分类号:P314 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)06-1723-09

Heat flow determination of Archean strata under the karst thermal reservoir of D01 well in Xiong'an New Area

YAO Yahui^{1,2,3}, JIA Xiaofeng^{1,2}, LI Shengtao^{1,2,4}, ZHANG Jianwei^{1,4},
SONG Jian^{1,2}, YANG Tao^{1,2}, YUE Dongdong^{1,2}

收稿日期:2020-10-09;改回日期:2020-11-21

基金项目:国家重点研发计划(2020YEE0201300,2018YFC0604305,2019YFB150410301)及中国地质调查项目(DD20189113,DD20190127,DD20221680)联合资助。

作者简介:姚亚辉,男,1990年生,博士生,工程师,主要从事地热地质与水文地质工作;E-mail: yaoyahui@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者:贾小丰,男,1982年生,硕士,高级工程师,主要从事地热(干热岩)资源调查评价、二氧化碳地质储存潜力评价等方面的研究;E-mail: jiaxiaofeng@mail.cgs.gov.cn。

(1. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Tianjin 300304, China; 2. Tianjin Engineering Center of Geothermal Resources Exploration and Development, Tianjin 300304, China; 3. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 4. Technology Innovation Center for Geological Environment Monitoring Engineering, MNR, Tianjin 300304, China)

Abstract: The paper is the result of geothermal geology survey engineering.

[Objective] The heat flow values in Xiong'an New Area are mostly measured from the Neogene sedimentary cap and dolomite strata. The previous geothermal exploration and utilization horizons are mainly karst thermal reservoirs shallower than 1800 m in the Jixian System and the boreholes exposing the Archean are scarce in Xiong'an New Area. Heat flow determinations and analyses from Archean under the karst thermal reservoir are rarely reported by previous researchers. Since 2018, D01 deep geothermal parameter well with a depth of 3403.67 m has been implemented in Niutuozen geothermal field in Xiong'an New Area. The karst thermal reservoir of the whole Gaoyuzhaung Formation was exposed and the Archean of 1723.67 m was drilled by D01 well. The D01 well provides the conditions for the heat flow study from Archean under the karst thermal reservoir in this area. **[Methods]** Based on borehole temperature measurement and thermal conductivity tests, the study on the heat flow from the Archean of D01 well was carried out. **[Results]** The results showed that the Archean of D01 well has significant geothermal characteristics of conduction type, and the geothermal gradient is 18.3°C/km, which is lower than the Neogene geothermal gradient of 48.6°C/km. The thermal conductivity values of 25 Archean gneiss core samples of D01 well were measured with an average value of $(2.41 \pm 0.40) \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$. Based on the temperature measurement curve and thermal conductivity data of 2300–2700 m section of D01 well, the Archean heat flow of D01 well was calculated to be $(44.1 \pm 7.0) \text{ mW}/\text{m}^2$. The heat flow of the Neogene sedimentary cap of D01 well was estimated to be $84.6 \text{ mW}/\text{m}^2$. **[Conclusions]** The higher part $40.5 \text{ mW}/\text{m}^2$ than Archean of D01 well was considered to be mainly contributed by the lateral convection heat transfer of groundwater in high pore-permeable karst dolomite and the vertical convection heat transfer of groundwater in the Niudong fault. The research results can provide the basic data for the previous heat accumulation mechanism of the groundwater transport and the heat conduction fault. And the results are of great significance to the genetic mechanism of deep geothermal resources and the geothermal field of Archean in Xiong'an New Area.

Key words: heat flow; borehole geothermal measurement; Archean; thermal conductivity; D01 well; geothermal geology survey engineering; Xiong'an New Area

Highlights: Based on borehole temperature measurement and core thermal conductivity test, high-quality heat flow data of Archean crystalline basement under the karst thermal reservoir in Xiong'an New Area were obtained, and its present-day geothermal field characteristics were revealed.

About the first author: YAO Yahui, male, born in 1990, doctor candidate, engineer, mainly engaged in the research of geothermal geology, hydrogeology, engineering geology and environmental geology work; E-mail: yaoyahui@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: JIA Xiaofeng, male, born in 1982, master, senior engineer, mainly engaged in the geothermal and hot dry rock resource survey and the potential evaluation of CO₂ geological storage; E-mail: jiaxiaofeng@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the National Key Research and Development Program (No.2020YEE0201300, No.2018YFC0604305, No.2019YFB150410301) and the project of China Geological Survey (No.DD20189113, No.DD20190127, No.DD20221680).

1 引 言

热流(大地热流)是地球内部热作用过程在地表最直接的显示,蕴含着丰富的地质信息,热流的测量、积累及分析是地热研究中重要的基础性工作。目前已经分四版公开发表中国大陆地区热流数据 1230 个(姜光政等,2016),为中国大陆地区岩石圈动力学研究和地热资源潜力评价积累了丰富

的基础资料。以往认为热流描述的是稳态热传导所传输的热量,在非稳态或有对流参与的情况下,地球的散热量用热流量来表征,包含了传导和对流热流分量的总和(Furlong and Chapman, 2013)。第二版《地球物理名词》将大地热流定义由传导热流修改为同时包含传导热流和对流热流(何丽娟和汪集咏,2021)。目前雄安新区范围内,中国大陆地区热流数据汇编第一版收录的 3 个热流值(汪集咏

和黄少鹏,1988;陈墨香等,1982)以及第四版收录的10个热流值(李卫卫等,2014;姜光政等,2016),分别测自蓟县系雾迷山组白云岩地层及新近系。关于雄安新区岩溶热储下伏太古界的热流测定研究还鲜见报道,主要受限于以往的地热勘查开发层位在1800 m以浅的蓟县系岩溶热储(吴爱民等,2018),揭露岩溶热储下伏太古界的钻孔稀少。

为支撑雄安新区地热资源规划,拓展新的热储空间,自然资源部中国地质调查局水文地质环境地质调查中心2018—2019年在雄安新区牛驼镇地热田部署实施了D01深部地热参数井。该井完钻深度3403.67 m,揭穿蓟县系高于庄组岩溶热储,并揭露太古界厚度达1723.67 m,为该地区太古界的热流测定和地温场研究提供了条件。本文基于钻孔测温 and 岩心热导率测试,对D01井岩溶热储下伏太古界进行了热流测定及分析,研究结果对雄安新区深部地热资源成因机制和太古界地温场研究具有重要意义。

2 地质背景

雄安新区位于渤海湾盆地的次级构造单元冀中拗陷内(图1a),可划分为西北部的容城凸起、东北部的牛驼镇凸起及南部的高阳低凸起等构造单元。牛驼镇凸起的边界为牛东断裂、牛南断裂、容城断裂和大兴断裂,主要地层从下至上分别为太古界、长城系、蓟县系、古近系,新近系和第四系(图

1b)。已有研究(陈墨香等,1982;李卫卫等,2014;戴明刚等,2019)表明牛驼镇凸起地热异常是在正常地热背景下形成的,凹凸相间的构造格局下,由于基岩热导率高于沉积盖层,热流重新分配并向高热导率的凸起区集中,使凸起区呈现为高一中热流,热源主要来自于地幔热流和地壳放射性元素生热。断裂构造的破裂及变形作用促进了碳酸盐岩岩溶作用的进行,形成了岩溶热储的储集空间和渗滤通道(马峰等,2021;岳高凡等,2021)。

D01井位于雄安新区雄县县城东南方向,地处牛驼镇凸起东南部,东临牛东断裂后缘线约800 m(图1b)。D01井钻遇地层岩性分别为第四系黏土、砂质黏土,新近系明化镇组粉砂岩、泥岩,新近系馆陶组砂砾岩,蓟县系高于庄组白云岩,及太古界片麻岩(图2)。

3 热流测定

热流通常通过地温测量和岩石热导率测试间接测量的。在实测热流的计算中,假设地壳中热量的传递符合一维稳态热传导的傅里叶定律,则热流 $q(\text{mW}/\text{m}^2)$ 为:

$$q = -K \frac{dT}{dZ} \quad (1)$$

式(1)中, dT/dZ 为地温梯度($^{\circ}\text{C}/\text{km}$), K 为岩石热导率($\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$),负号表示热流传导的方向与地温梯度的方向相反。为对比研究雄安新区岩溶热储下伏太古界与上覆沉积盖层的热流特征,本文对

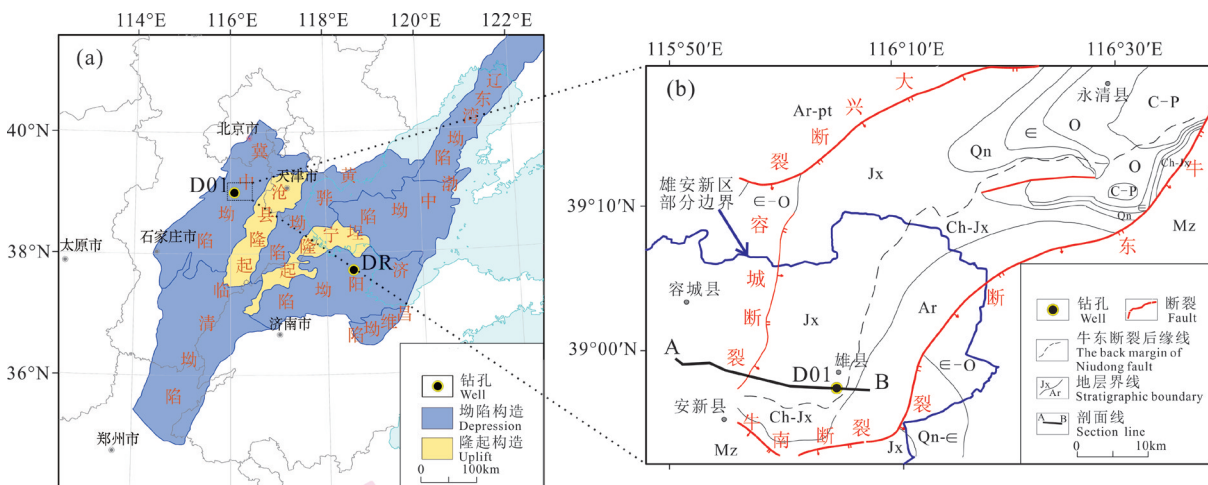


图1 渤海湾盆地构造单元图(a)和牛驼镇凸起基岩地质简图(b)(改自马敬业等,1990)

Fig.1 Tectonic units of Bohai Bay basin (a) and geological sketch of bedrock in Niutuozen uplift (b)(modified from Ma Jingye et al., 1990)

D01井新近系和太古界均进行热流测定。

3.1 钻孔地温测量

钻孔地温测量是获取热流值和研究地温场的基本方式(汪集旻等,2001;何丽娟等,2006;徐明等,2010,2011),也是满足深部地热资源评价的重要手段。钻孔地温测量是以井液为介质间接测量井壁地层温度,但钻进过程中,钻具升降旋转、钻井液的循环及渗漏等过程都会对井液和地层的温度产生影响,使得测量的井温与地层原始温度有一定差距。完钻后,不同的静井时间测量的温度也有一定差异(He et al., 2008)。根据静井时间的长短,可以将钻孔测温数据分为4类:系统稳态测温数据、静井温度数据、准稳态测温数据及瞬态测温数据(饶松等,2013)。

本次研究于2019年12月18日对D01井进行钻孔测温,静井时间为完钻后233 d,测温深度5.1~2949.0 m。测温设备采用PPS71高温存储测井仪,精度:±3%,量程0~350℃,分辨率0.01℃。由于静井时间较长,井液温度基本接近地层真实温度,可以判断基本达到稳态。从D01井测温曲线(图3)可

以看出,测温曲线呈现明显的分段性,新近系和太古界段内呈现良好的传导型地温特征。高于庄组热储段的温度较均一,即地温梯度较小,仅为1.48℃/km,呈对流型地温特征。

鉴于沉积盖层的地温一定程度受地表温度的影响,也受到下部高于庄组岩溶热储对流段温度影响,此次沉积盖层的热流测定选取新近系400~800 m深度段;考虑太古界地温一定程度受到上部高于庄组岩溶热储对流段的影响,此次太古界的热流测定选取2300~2700 m深度段。对沉积盖层和太古界选取的两个深度段的测温数据进行线性拟合,拟合结果如图4所示,得出新近系400~800 m深度段的温度 $T(℃)$ 和深度 $H(m)$ 的拟合公式为:

$$T=0.0486H+18.228 \quad R^2=0.99978 \quad (2)$$

太古界2300~2700 m深度段的温度 $T(℃)$ 和深度 $H(m)$ 的拟合公式为:

$$T=0.0183H+44.091 \quad R^2=0.99986 \quad (3)$$

由式(2)、(3)可以得出,新近系400~800 m深度段的地温梯度为48.6℃/km,太古界2300~2700 m深度段的地温梯度为18.3℃/km。新近系和太古

地层	层深	柱状	岩性描述
第四系Q	270		土黄色黏土、粉细砂层及砂质黏土,不成岩
新近系明化镇组Nm			上段岩性以半胶结的粉细砂、细砂为主,夹杂色泥岩;下段岩性以棕红色、灰绿色泥岩为主,夹粉细砂岩
新近系馆陶组Ng	1138 1186.5		杂色砂砾岩,砂砾粒度不均匀,主要粒径在3~5mm,磨圆较好
蓟县系高于庄组Jxg	1680		灰黑色、灰白色白云岩为主,含沥青质白云岩
太古界Ar	3403.67		钾长石、斜长石、石英、黑云母、角闪石等矿物组成的片麻岩

图2 D01井钻遇地层柱状图
Fig.2 Stratigraphic histogram of D01 well

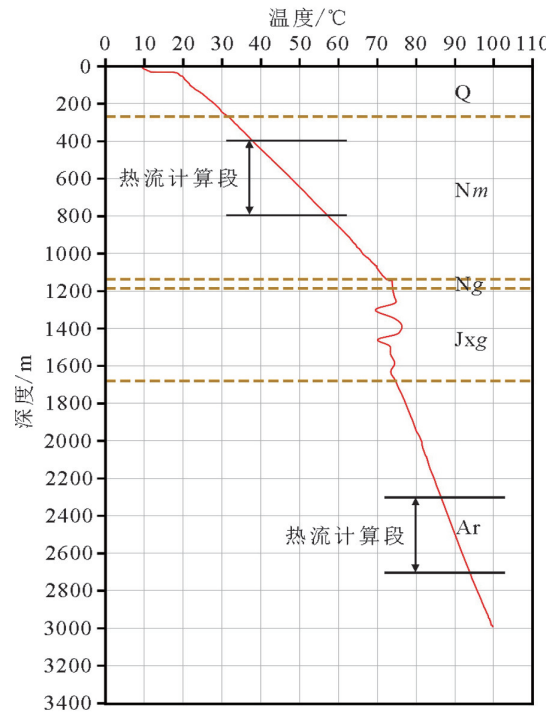


图3 D01井近稳态测温曲线
Fig.3 Temperature curve of D01 well near steady state

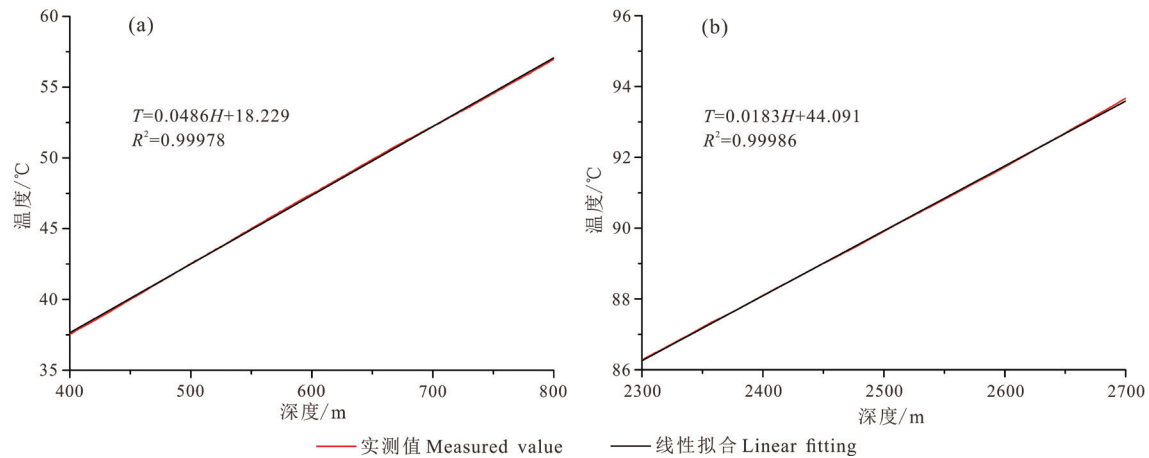


图4 新近系(a)和太古界(b)热流计算段测温数据线性拟合

Fig.4 Linear fitting of temperature measurement data of Neogene (a) and Archean (b) heat flow calculation section

界选取的两个深度段温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 和深度 $H(\text{m})$ 线性拟合结果 R^2 均大于 0.999, 呈现较好的线性热传导特征。通过公式(3)可以预测太古界 4000 m 的温度仅为 117.3°C , 5000 m 深度为 135.6°C , 6000 m 深度为 153.9°C 。可以看出进入太古界后地温梯度与新近系相比较低。

3.2 热导率测试

岩石的热导率受矿物成分、孔隙度、水饱和度、压力、温度等因素的影响 (Pribnow et al., 1996; Norden et al., 2020), 由于太古界片麻岩岩心样品结构致密, 孔隙度较低, 而且根据热导率压力校正公式 (Seipold and Huenges, 1998), 压力对热导率的影响不超过 1%, 因此忽略饱和水校正和压力校正, 仅对热导率进行温度校正。采用如下热导率温度校正公式 (Sass et al., 1992) 对太古界片麻岩热导率实测值校正。

$$\lambda(0) = \lambda(25)\{1.007 + 25[0.0037 - 0.0074/\lambda(25)]\} \quad (4)$$

$$\lambda(T) = \lambda(0)\{1.007 + T[0.0036 - 0.0072/\lambda(0)]\} \quad (5)$$

上式(4)、(5)中 $\lambda(0)$ 和 $\lambda(25)$ 为 0°C 和 25°C 时的岩石热导率, 单位为 $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, $\lambda(25)$ 为热导率测试值; T 为岩石的原位温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; $\lambda(T)$ 为温度为 T 时岩石的原位热导率。

D01 井此次共采集太古界 2300 ~ 2700 m 深度段 25 块片麻岩岩心样品进行热导率测试。将岩心样品切割制成直径 70 mm, 厚度 20 mm 的圆柱, 并两端磨平, 每块样品可对两个端面分别测试热导

率, 共测得 50 个热导率数据。本次岩石热导率是在中国地质调查局二氧化碳地质储存重点实验室完成测试分析的, 此次测试分别采用两种设备进行对比测试, 一是采用瑞典生产的 Hot Disk (型号: TPS 1500) 热常数分析仪, 测量原理为瞬态平面热源法, 测试精度为 $\pm 2\%$, 测量范围为 $0.03 \sim 500 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$; 二是采用国产的 TC 3200 导热系数仪, 测量原理为瞬态热线法, 测试精度 $\pm 5\%$, 测量范围 $0.001 \sim 20 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 。测试结果如表 1 所示, 可以看出对同一块样品两种方法测试得到的热导率值较为接近, 说明测试数据可靠性较高。热流计算采用两种方法测试值的平均值, 并进行原位温度校正, 得出温度校正后的太古界片麻岩岩心热导率值大小介于 $2.07 \sim 3.20 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, 平均值为 $(2.41 \pm 0.40) \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 。

3.3 热流计算

3.3.1 新近系

由于 D01 井未获得新近系钻孔原位岩心, 通过搜集冀中拗陷内部以及渤海湾盆地沉积盖层的热导率的测试结果 (龚育龄, 2003; 王朱亭等, 2019), 取热导率参考值 $1.74 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 进行计算, 根据钻孔测温得到 D01 井新近系 400 ~ 800 m 深度段的地温梯度为 $48.6^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 由公式(1)计算得出, D01 井 400 ~ 800 m 新近系热流估算值为 $84.6 \text{ mW}/\text{m}^2$, 与牛驼镇凸起南部雄县 7 口地热井的新近系热流值估算范围 $80.61 \sim 113.86 \text{ mW}/\text{m}^2$ (李卫卫等, 2014) 相一致。

3.3.2 太古界

根据钻孔测温得到 D01 井太古界 2300 ~ 2700

表1 D01井太古界片麻岩岩心热导率测试统计

Table 1 Thermal conductivity of Archean gneiss core samples in D01 well

取样深度/m	常温热导率测试值(W/(K·m))				两种方法 平均值	对应深度温 度/°C	热导率校正值/ (W/(K·m))
	瞬态平面热源法		瞬态热线法				
	平均值±标准差(数量)	范围	平均值±标准差(数量)	范围			
2355.47~2356.47	3.15±0.14(4)	3.02~3.35	3.26±0.20(4)	3.07~3.53	3.20	87.4	2.94
2445.65~2447.85	2.07±0.18(8)	1.86~2.31	2.06±0.13(8)	1.83~2.23	2.07	89.1	2.05
2533.56~2536.26	2.94±0.08(12)	2.83~3.13	2.91±0.15(12)	2.64~3.11	2.92	90.7	2.71
2581.76~2584.46	2.24±0.14(14)	2.04~2.49	2.20±0.14(14)	2.03~2.40	2.22	91.5	2.16
2603.58~2605.58	2.29±0.04(12)	2.22~2.34	2.25±0.06(12)	2.16~2.37	2.27	91.9	2.20

m深度段的地温梯度为18.3°C/km,并结合温度校正后的25块太古界片麻岩岩心热导率实测平均值(2.41±0.40)W/(K·m),由式(1)计算得出太古界2300~2700 m深度段的热流平均值为(44.1±7.1) mW/m²。

4 分析及讨论

上文估算出D01井新近系400~800 m深度段的热流值为84.6 mW/m²,较太古界2300~2700 m深度段的热流平均值44.1 mW/m²高出40.5 mW/m²。由于D01井白云岩地层放射性生热率平均值为0.3 μW/m³(6块白云岩岩心实测),太古界片麻岩的放射性生热率为1.32 μW/m³(13块片麻岩岩心实测),沉积盖层未取心测试,参考龚育龄(2003)在济阳拗陷的统计值为1.4 μW/m³,可以估算出在D01井400~2700 m的放射性生热贡献热流约为2.6 mW/m²,可以看出放射性生热的热流贡献较低。

为进一步分析原因,与位于渤海湾盆地济阳拗陷北部的DR井(图1)进行对比研究。DR井钻遇地层为第四系、新近系与太古界,与D01井相比,缺少沉积盖层与太古界之间的岩溶热储。D01井静井223天后的测温曲线(图3)和DR井静井261天的测温曲线(图5)对比可以看出,D01井和DR井沉积盖层与太古界均呈现线性传导型地温特征。Jiang et al.(2016)对DR井进行了钻孔测温及热流分段计算,D01井和DR井分段热流对比如表2所示。DR井分段热流计算结果可以看出,新近系和太古界各段的热流平均值均在90 mW/m²左右,较为接近,即垂向上各个地层内热流值接近,而D01井新近系与太古界的热流值差距较大。通过D01井和DR井的

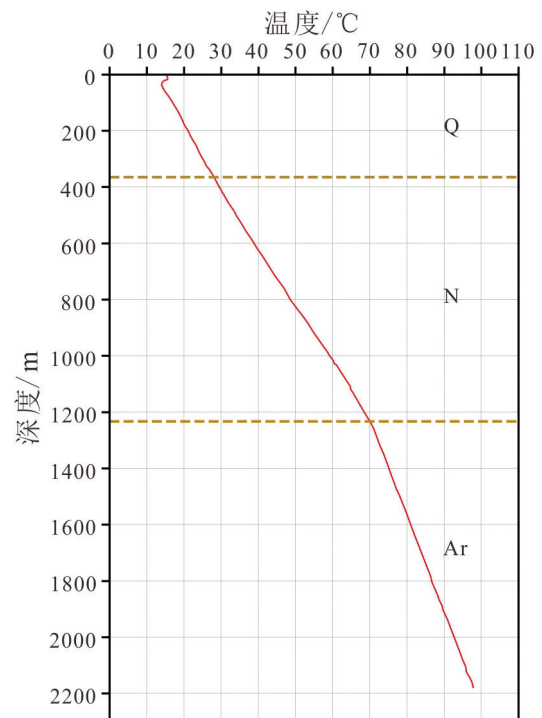


图5 DR井静井261 d后测温曲线(Jiang et al., 2016)
Fig.5 Temperature curve of DR well for 261 days after the cessation of drilling(Jiang et al., 2016)

表2 D01井和DR井分段热流对比

Table 2 Comparison of heat flow between D01 well and DR well

地层分界	D01井 深度/m	分段热流平均值 /(mW/m ²)	DR井 深度/m	分段热流平均值 /(mW/m ²)
N	400~800	84.6	983.2~1233.5	91.6
			1233.5~1450.0	93.7
Ar	2300~2700	44.1	1599.0~1860.0	91.2
			1960.0~2080.0	88.3

注:DR井的分段热流数据引自Jiang et al., 2016。

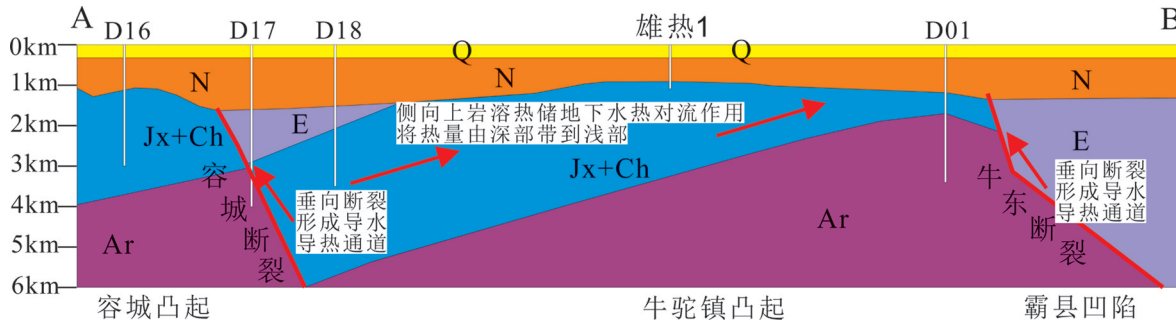


图6 牛驼镇凸起地热地质概念模式图(地层剖面改自王贵玲等,2018)

Fig.6 The geothermal geological conceptual model of Niutuozen uplift (stratigraphic section modified from Wang Guiling et al., 2018)

钻孔测温曲线和热流剖面的对比分析,认为DR井为“沉积盖层+太古界”地层结构,呈“传导+传导”型地温特征,垂向上热流值较接近;D01井为“沉积盖层+岩溶热储+太古界”地层结构,呈“传导+对流+传导”型地温特征,岩溶热储的热对流作用可能是D01井新近系热流较太古界偏高的主要原因之一。

已有研究表明牛驼镇地热田是在中国东部晚中生代岩石圈减薄(赵利和李理,2016)引起的正常偏高的区域热背景下,岩石热导率因素与盆地尺度地下水循环因素双重机制耦合作用下,导致地热再分配而聚集形成地热资源的“二元聚热”成因模式(李卫卫等,2014;Pang et al., 2015;庞忠和等,2017)。此外,处于牛驼镇凸起东部的牛东断裂和牛驼镇凸起西部的容城断裂,为导热导水断裂(郭飒飒等,2020;王凯等,2021)。从穿过D01井的东西向地热地质剖面(图6)来看,蓟县系和长城系发育高渗透性白云岩热储层以及牛东断裂、容城断裂共同组成了地下水运移通道,热储内部的渗透性岩层控制了地下水的侧向运移,断裂控制了地下水的垂向运移。

综合前人的研究成果以及本文对D01井新近系和太古界热流的实测数据对比,分析认为D01井高于庄组白云岩岩溶裂隙发育、水量大,高于庄组岩溶热储及牛东断裂中地下水热对流作用将地层更深处的热流带到浅部,对新近系沉积盖层的底部进行加热,是沉积盖层的热流值偏高的原因。D01井岩溶热储下伏太古界热流值的测定对前人提出的地下水运移聚热模式及导热断裂聚热模式提供了数据支撑。

5 结论

(1)通过近稳态钻孔测温得出,D01井太古界呈

显著的传导型地温特征,地温梯度为 $18.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$,可以看出进入太古界后地温梯度与新近系 $48.6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 相比较低。D01井揭露太古界3000 m深度的钻孔测温为 99.0°C ,按照太古界地温梯度 $18.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 计算,可以预测D01井4000 m的温度仅为 117.3°C ,5000 m深度为 135.6°C ,6000 m深度为 153.9°C 。

(2)对D01井太古界2300~2700 m深度内25块片麻岩岩心热导率测试平均值为 $(2.41\pm 0.40)\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 。基于太古界2300~2700 m段测温曲线和热导率实测数据,计算出D01井太古界热流值为 $(44.1\pm 7.1)\text{mW}/\text{m}^2$ 。同时,估算了D01井新近系盖层的热流为 $84.6\text{mW}/\text{m}^2$,高出太古界 $40.5\text{mW}/\text{m}^2$ 。

(3)通过D01井和DR井的测温曲线和热流剖面的对比分析,认为DR井“传导+传导”型地层结构的垂向热流接近;而D01井存在岩溶热储,即“传导+对流+传导”型地层结构,高孔渗岩溶白云岩层中地下水侧向热对流以及牛东断裂地下水垂向热对流的共同作用将地层更深处的热流带到浅部,对新近系沉积盖层的底部进行加热,是沉积盖层的热流值偏高的原因。研究结果对前人提出的地下水运移聚热模式及导热断裂聚热模式提供了数据支撑。

致谢:本次研究得到中国科学院地质与地球物理研究所姜光政博士、王朱亭博士的帮助和建议,在此表示诚挚的感谢!

References

- Chen Moxiang, Huang Geshan, Zhang Wenren, Zhang Rongyan, Liu Bingyi. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozen basement protrusion of central Hebei Province[J]. Chinese Journal of Geology, (3): 239-252(in Chinese with English abstract).

- Dai Minggang, Wang Xinwei, Liu Jinxia, Lei Haifei, Bao Zhidong. 2019. Characteristics and influence factors of geothermal resources in the starting and adjacent zone of Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Geology, 51(1): 176–191(in Chinese with English abstract).
- Furlong K P, Chapman D S. 2013. Heat flow, heat generation, and the thermal state of the lithosphere[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41(1): 385–410.
- Gong Yuling. 2003. The Thermal Structure and Thermal Evolution of Bohai Bay in East China [D]. Nanjing: Nangjing University(in Chinese with English abstract).
- Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Cui Yue. 2020. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2026–2035(in Chinese with English abstract).
- He Lijuan, Hu Shengbiao, Yang Wencai, Wang Jiyang, Yang Shuchun, Yuan Yusong, Cheng Zhenyan. 2006. Temperature measurement in the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(3): 745–752(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[J]. Journal of Geophysical Research–Solid Earth, 113: B02404.
- He Lijuan, Wang Jiyang. 2021. Concept and application of some important terms in Geothermics and Geophysics such as terrestrial heat flow[J]. China Terminology, 23(3): 3–9(in Chinese with English abstract).
- 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)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2892–2910(in Chinese with English abstract).
- Jiang Guangzheng, Tang Xiaoyin, Rao Song, Gao Peng, Zhang Linyou, Zhao Ping, Hu Shengbiao. 2016. High-quality heat flow determination from the crystalline basement of the south-east margin of north china craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 118, 1–10.
- Li Weiwei, Rao Song, Tang Xiaoyin, Jiang Guangzheng, Hu Shengbiao, Kong Yanlong, Pang Jumei, Wang Jiancun. 2014. Borehole temperature logging and temperature field in the Xiong'an geothermal field, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 49(3): 850–863(in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Sun Zhanxue. 2021. Influence mechanism of ancient buried hill geothermal development on land subsidence[J]. Geology in China, 48(1): 40–51(in Chinese with English abstract).
- Ma Jingye, Cai Hongtao, Dong Jinsheng. 1990. Investigation Report on Niutuozen Geothermal Field, Hebei Province[R]. Hengshui: The 3rd Hydrogeology and Engineering Group of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, 1–299(in Chinese).
- Norden B, Förster A, Förster H, Fuchs S. 2020. Temperature and pressure corrections applied to rock thermal conductivity: Impact on subsurface temperature prognosis and heat-flow determination in geothermal exploration[J]. Geothermal Energy, 8(1): 1–19.
- Pang Zhonghe, Pang Jumei, Kong Yanlong, Luo Lu, Duan Zhongfeng, Yang Fengtian, Wang Shufang. 2015. Large karstic geothermal reservoirs in sedimentary basins in China: Genesis, energy potential and optimal exploitation[C]//World Geothermal Congress 2015.
- Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Pang Jumei, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2017. Geothermal resources and development in Xiong'an New Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32(11): 1224–1230(in Chinese with English abstract).
- Pribnow D, Williams C F, Sass J H, Keating R. 1996. Thermal conductivity of water-saturated rocks from the KTB Pilot Hole at temperatures of 25 to 300°C[J]. Geophysical Research Letters, 23(4): 391–394.
- Rao Song, Hu Shengbiao, Zhu Chuanqing, Tang Xiaoyin, Li weiwei, Wang Jiyang. 2013. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(8): 2760–2770(in Chinese with English abstract).
- Sass J H, Lachenbruch A H, Moses T H, Morgan Paul. 1992. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California[J]. Journal of Geophysical Research, 97(B4): 5017–5030.
- Seipold U, Huenges E. 1998. Thermal properties of gneisses and amphibolites—high pressure and high temperature investigations of KTB—rock samples[J]. Tectonophysics, 291(1/4): 173–178.
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Cheng Benhe, Li Tiejun, Yang Wencai, Cheng Zhenyan. 2001. Predication of the deep temperature in the target area of the china continental scientific drilling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(6): 774–782(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. 1988. Compilation of heat flow data in the China Continental area[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), (2): 196–204(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Li Jun, Wu Aimin, Zhangwei, Huqiuyun. 2018. A study of the thermal storage characteristics of Gaoyuzhuang formation, A new layer system of thermal reservoir in Rongcheng uplift area, Hebei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 533–541(in Chinese with English abstract).
- Wang Kai, Zhang Jie, Bai Dawei, Wu Xingang, Yue Hangyu, Zhang Baowei, Wang Xiaojiang, Zhang Kai. 2021. Geothermal-geological model of Xiong'an New Area: Evidence from geophysics [J].

- Geology in China, 48(5): 1453–1468(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhuting, Zhang Chao, Jiang Guangzheng, Hu Jie, Tang Xianchun, Hu Shengbiao. 2019. Present-day geothermal field of Xiong'an New Area and its heat source mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(11): 4313–4322(in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Ma Feng, Wang Guiling, Liu Jinxia, Hu Qiuyun, Miao Qingzhuang. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 523–532(in Chinese with English abstract).
- Xu Ming, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Shan Jingnan, Hu Shengbiao. 2010. Borehole temperature logging and terrestrial heat flow distribution in Jiangnan Basin[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 45(1): 317–323(in Chinese with English abstract).
- Xu Ming, Zhu Chuanqing, Tian Yuntao, Rao Song, Hu Shengbiao. 2011. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(4): 1052–1060(in Chinese with English abstract).
- Yue Gaofan, Wang Guiling, Ma Feng, Zhu Xi, Zhang Hanxiong. 2021. Evaluation of fault slip probability of geothermal large-scale development: A case study of deep karst geothermal reservoir in Xiong'an New Area [J]. Geology in China, 48(5): 1382–1391(in Chinese with English abstract).
- Zhao Li, Li Li. 2016. The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay basin in Late Mesozoic–Cenozoic[J]. Geology in China, 43(2): 470–485(in Chinese with English abstract).
- 何丽娟, 汪集旻. 2021. “大地热流”等地球学重要术语的概念与应用[J]. 中国科技术语, 23(3): 3–9.
- 姜光政, 高翔, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旻. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 59(8): 2892–2910.
- 李卫卫, 饶松, 唐晓音, 姜光政, 胡圣标, 孔彦龙, 庞菊梅, 王建存. 2014. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征[J]. 地质科学, 49(3): 850–863.
- 马峰, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张汉雄, 孙占学. 2021. 古潜山热储开发对地面沉降的影响机制研究[J]. 中国地质, 48(1): 40–51.
- 马敬业, 蔡洪涛, 董金生. 1990. 河北省牛驼镇地热田勘查报告[R]. 衡水: 河北省地矿局第三水文工程地质大队, 1–299.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 胡圣标, 汪集旻. 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 32(11): 1224–1230.
- 饶松, 胡圣标, 朱传庆, 唐晓音, 李卫卫, 汪集旻. 2013. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构[J]. 地球物理学报, 56(8): 2760–2770.
- 汪集旻, 胡圣标, 程本合, 李铁军, 杨文采, 程振炎. 2001. 中国大陆科学钻探区深部温度预测[J]. 地球物理学报, 44(6): 774–782.
- 汪集旻, 黄少鹏. 1988. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, (2): 196–204.
- 王贵玲, 李郡, 吴爱民, 张薇, 胡秋韵. 2018. 河北容城凸起区热储层新层系一高于庄组热储特征研究[J]. 地球学报, 39(5): 533–541.
- 王凯, 张杰, 白大为, 吴新刚, 岳航羽, 张保卫, 王小江, 张凯. 2021. 雄安新区地热地质模型探究: 来自地球物理的证据[J]. 中国地质, 48(5): 1453–1468.
- 王朱亭, 张超, 姜光政, 胡杰, 唐显春, 胡圣标. 2019. 雄安新区现今地温场特征及成因机制[J]. 地球物理学报, 62(11): 4313–4322.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报, 39(5): 523–532.
- 徐明, 赵平, 朱传庆, 单竞男, 胡圣标. 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.
- 徐明, 朱传庆, 田云涛, 饶松, 胡圣标. 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. 地球物理学报, 54(4): 1052–1060.
- 岳高凡, 王贵玲, 马峰, 朱喜, 张汉雄. 2021. 地热规模化开发断层滑动概率评估——以雄安新区深部岩溶热储为例[J]. 中国地质, 48(5): 1382–1391.
- 赵利, 李理. 2016. 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制[J]. 中国地质, 43(2): 470–485.

附中文参考文献

- 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 张容燕, 刘炳义. 1982. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用[J]. 地质科学, (3): 239–252.
- 戴明刚, 汪新伟, 刘金侠, 雷海飞, 鲍志东. 2019. 雄安新区起步区及周边地热资源特征与影响因素[J]. 地质科学, 51(1): 176–191.
- 龚育龄. 2003. 中国东部渤海湾盆地地热结构和热演化[D]. 南京: 南京大学.
- 郭飒飒, 朱传庆, 邱楠生, 唐博宁, 崔悦. 2020. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J]. 地质学报, 94(7): 2026–2035.
- 何丽娟, 胡圣标, 杨文采, 汪集旻, 杨树春, 袁玉松, 程振炎. 2006. 中国大陆科学钻探主孔动态地温测量[J]. 地球物理学报, 49(3):