

雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测

郭飒飒^{1,2)}, 朱传庆^{1,2)}, 邱楠生^{1,2)}, 唐博宁^{1,2)}, 崔悦^{1,2)}

1) 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京, 102249;
2) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

内容提要:热源、通道、储层、盖层、流体等是中低温对流型地热资源聚集的要素。本文从雄安新区深部地热资源的形成条件出发,分析了热源、储盖、通道的特征。在此基础上结合地温场的分布特点,确定了影响研究区地热资源的重要因素并进行了有利区的预测。结果表明,雄安新区新生界盖层与元古宇碳酸盐岩构成的储盖组合,凹凸相间的构造格局,流体活动等因素共同影响了深部地热资源的赋存。研究区地热资源易富集在断裂控制的凸起构造或者构造低凸起的元古宇热储中。大地热流高值区、具有高渗透储层和区域连续性盖层的凸起构造是地热开发的有利区。

关键词:地热资源; 岩溶热储; 成藏要素; 勘探有利区; 雄安新区

地热资源是指能够经济地被人类所利用的地球内部的地热能、地热流体及其有用组分(GB/T 11615—2010《地热资源地质勘查规范》)。地热资源形成的要素包括热源、热储、盖层、通道和流体等。认识地热资源形成要素对地热资源的勘探开发具有重要意义,也是地热学研究的重要内容。早在20世纪六七十年代,White (1967)首次提出了地热系统一词,并且在此基础上提出了中低温对流型地热系统的概念,建立了中低温地热系统的经典模式。此后,Read (1982)把中低温地热系统划分为三种不同类型,根据其划分标准确定了美国的地热系统类型。我国对于地热资源的研究起步较晚,1990年以后对我国地热资源赋存的热背景以及资源分布特征才有了系统性的分析(Chen Moxiang et al., 1990, 1994)。我国地热资源分布不均,高温地热资源主要集中在台湾、藏南—川西—滇西地区(Zhang Chaofeng et al., 2018),中低温地热资源分布广泛,主要集中在东南沿海、胶辽地区和大中型沉积盆地。

20世纪以来不同学者对我国的中低温地热田进行了分析,发现地热田形成要素对地热资源的聚集起到了重要作用。大多数学者认为,明确热源机

理对了解地热田的现今热状态具有重要意义(Liu Shaowen et al., 2017; Rao Song et al., 2016),剖面上具有理想的储热储水环境的热储层,和具有良好的保温隔热效果的储盖组合对地热资源的赋存和保温起到重要作用(Wang Guiling et al., 2017; Wang Xinwei et al., 2019)。热导性较好的深大断裂能够作为热源传递的通道,影响现今地热资源的分布,并且研究发现地热田的形成多与深大断裂关系紧密(Luan Guangzhong et al., 2002; Wang Guiling et al., 2004)。另外对于地下水水化学方面的分析有助于探讨地下水的形成机理,补给机制以及运移规律等(Liu Zhao et al., 2014; Yang Jilong et al., 2018)。因此,了解热源、储盖、通道、流体形成要素的特点不仅有利于建立地热资源成因模型,对于探究地热资源的赋存规律和预测有利区也具有重要意义。

雄安新区具有裂谷盆地型较高的热流背景,属于中低温地热系统,雾迷山组热储层是目前开发利用的潜力层位,分析雾迷山组地热资源的形成条件,完善成因模式,可以对该地区的勘探开发提供理论支撑。本文以深部蓟县系雾迷山组热储层为研究对

注:本文为国家重点研发计划重点专项(编号 2018YFC0604302)资助的成果。
收稿日期:2020-05-06;改回日期:2020-05-29;网络发表日期:2020-06-01;责任编辑:周健。
作者简介:郭飒飒,女,1995年生。硕士研究生,主要从事地热资源勘探与评价方面的研究工作。Email: gss61333@163.com。通讯作者:朱传庆,男,1981年生。副教授,主要从事地热资源成因机制和沉积盆地热演化方面的研究。Email: zhucq@cup.edu.cn。

引用本文: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. 地质学报, 94(7): 2026~2035, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020227.
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. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2026~2035.

象,通过测温资料、地震资料、测井曲线等对研究区的地质构造特征、地热背景条件、地热资源的赋存进行了研究,建立了典型地热田的成藏模式,总结了地热资源赋存规律和勘探有利区。

1 地质概况

雄安新区位于渤海湾盆地西部的冀中拗陷内(图 1a),构造单元上包括牛驼镇凸起、容城凸起、高阳低凸起北部以及部分霸县凹陷和饶阳拗陷。整体位于冀中拗陷北部与中部的构造过渡与转换部位(Yang Minghui et al., 2002)。在太古宇变质岩的基底之上,沉积了中新元古界长城系、蓟县系和青白口系,古生界寒武系、奥陶系,新生界古近系,新近系和第四系。新元古代以来,经历了蓟县、加里东、海西、印支、燕山等多期构造运动,使得内部构造变形复杂,形成了凹凸相间的构造格局,并发育不同走向,不同性质的区域断裂,走向主要为 NE 向,其次为 NNE 和 EW 向。太行山山前断裂是控制冀中拗陷的边界断裂,牛东断裂是控制牛驼镇凸起的边界断裂。

雄安新区地热资源丰富,主要集中在容城凸起、牛驼镇凸起和高阳低凸起。蓟县系雾迷山组热储岩性为灰白色、灰褐色白云岩,岩溶裂隙发育,富水性好,是研究区内开发利用条件最好的热储,也是本次研究的目标储层。新生界地层主要为黏土、砂岩、含砾砂岩等,在研究区广泛分布,为研究区区域盖层。据前人研究,冀中拗陷现今地温梯度介于 20.8~41.0℃/km,平均 31.6℃/km,现今大地热流介于

48.7~79.7mW/m²,在中部容城、牛驼镇、高阳低凸起区偏高,为 60~69mW/m²,现今地温梯度和大地热流具有从西向东先增大后降低的趋势,其平面展布与构造地形起伏具有一致性(Chang Jian et al., 2016)。因此,在对研究区地温场的认识基础上研究地热资源形成条件,有助于分析地热资源的赋存特征,预测有利区。

2 地热资源形成条件分析

2.1 热源

新近纪以来,渤海湾盆地进入拗陷发育阶段并且岩浆活动逐渐减弱,根据前人研究,华北平原地壳上部岩浆余热产生的热流很少,不能作为热流来源。雄安新区内分布有少量的新生代火山岩(图 1b),燕山期的侵入体岩石类型复杂,均有不同程度产出,因为燕山期酸性花岗岩侵入体放射性生热率高,是研究区的附加热源(Qi Xiaofei et al., 2018)。因此雄安新区的热流主要来源于地壳上部花岗岩中放射性元素产热和上地幔产热(Chen Moxiang et al., 1990)。通过河北省莫霍面深度发现,北部和西部埋深较大,在 40km 以上,雄安新区所在的冀中拗陷莫霍面埋深较浅,在 35~37km 之间,说明深部热量传导距离短,有利于深部热源向浅部传热(Zhu Shuyuan et al., 2018)。

岩石圈热结构是指一个地区地壳、地幔两部分热流的构成以及比例,前人在分析华北平原现今的大地热流过程中,利用“回剥法”计算了地幔贡献的热流值(Chang Jian et al., 2016; Qiu Nansheng et

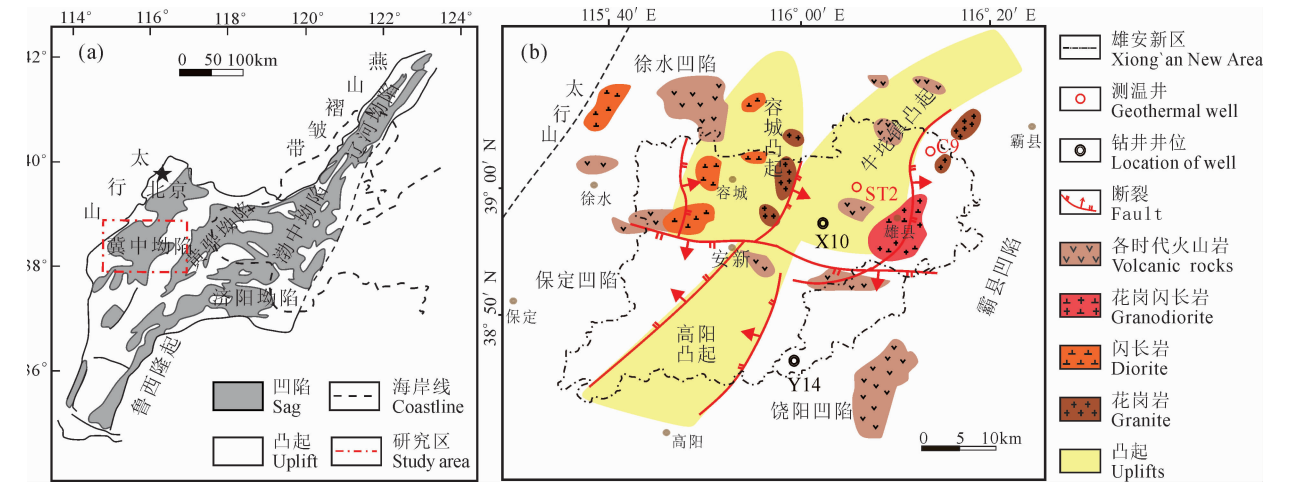


图 1 渤海湾盆地构造单元图(a)和雄安新区断裂及岩浆平面分布图(b)(据 Yu Changchun et al., 2017 修改)
Fig. 1 Tectonic units of Bohai Bay basin (a) and plane distribution of fault and igneous in Xiong'an New Area (b) (after Yu Changchun et al., 2017)

al. , 1998; Gong Yuling et al. ,2005)。结果表明渤海湾盆地地幔热流占地表热流的 55%~63%,并且冀中坳陷现今的地幔热流占地表热流的 55%,热流比值为 0.83,地幔对地表的热流贡献较大,研究区是典型的“冷壳热幔”结构。

2.2 储盖特征

本次研究对象为雾迷山组热储,是区域性热储层,主要分布在研究区内三个凸起区以及保定凹陷内,岩性为灰白色、灰褐色泥质白云岩。热储在凸起区埋藏浅,在 764~2000m 之间(最浅处小于 500m),在凹陷区埋深较大,在 2500~5987m 范围内(图 2),热储岩溶裂隙发育,富水性好。

通过对野外露头、岩芯、薄片等资料分析发现,雾迷山组地层受到多期成岩作用及构造运动的影响,热储储集空间类型丰富,孔、洞、缝均发育。其中孔隙和溶洞是主要的储集空间,对储集空间贡献大。孔隙主要由晶间孔、晶间溶孔、粒间孔、粒间溶孔组成,直径在 0.01~0.08mm 之间。溶洞在岩芯中多呈串珠状、蜂窝状,直径可达 0.1~5cm。储层内可识别出多组裂缝形成的网状缝、构造缝等,裂缝宽度在 0.1~3mm 之间(Lu Kai et al. , 2019; Dai Minggang et al. , 2020)。

通过元古宇雾迷山组的 48 个孔隙度和 32 个渗透率数据分析发现(图 3),雾迷山组地层孔隙度一般小于 9.0%,所占比例为 88%。孔隙度主要分布

在 1%~6%之间,占样品总数的 71%,最小孔隙度为 0.9%,最大孔隙度可达 18.8%,平均孔隙度为 5.2%。渗透率变化较大,最小渗透率 $0.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大渗透率 $88.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布于 $0.5 \times 10^{-3} \sim 9.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,占样品总数的 69%,平均渗透率为 $5.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。这与前人的统计结果基本一致(Lu Kai et al. , 2019),该地层属于低孔低渗碳酸盐岩储层。

根据前人对碳酸盐岩储层测井曲线的分析,认为碳酸盐岩地层测井响应具有自然伽马值低、声波时差低、电阻率高的特点(Shi Yujiang et al. , 2011; Zhang Juntao et al. , 2008)。研究区热储层经历的成岩作用复杂,非均质性强,孔、洞、缝均有发育,通过观察研究区热储的测井曲线,应用常规测井资料对碳酸盐岩储层进行了划分,因为溶洞型在常规测井曲线上不易识别,本次主要对孔洞型、裂缝-孔洞型和裂缝型储层在测井曲线上进行了识别,特征如下:

(1)孔洞型储层:孔洞型储集层是指孔洞较发育的储集层段,孔隙度大于 5%,孔渗性良好,常规测井中自然伽马值一般低于 30API,电阻率值明显降低,声波时差曲线表现为高值,介于 $200 \sim 300 \mu\text{s/m}$ 之间;双侧向电阻率值降低($100 \sim 3000 \Omega \cdot \text{m}$),并且深浅侧向电阻率差异较小或不明显(图 4a)(Shi Yujiang et al. , 2011; Zhang Juntao et al. , 2008)。

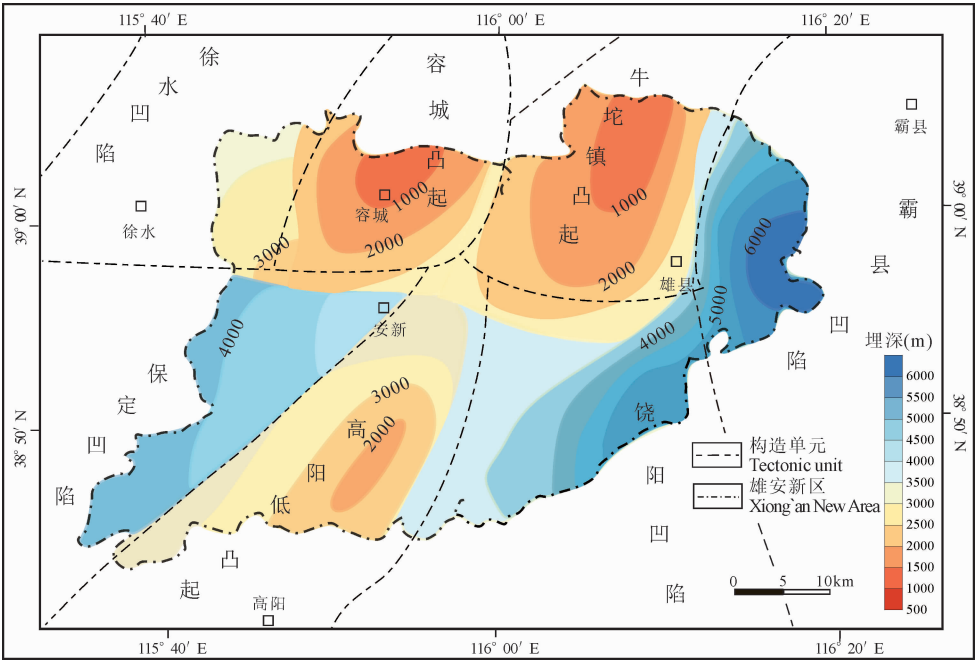


图 2 雄安新区雾迷山组顶面埋深图

Fig. 2 Supersurface depth of Jixw Formation in Xiong'an New Area

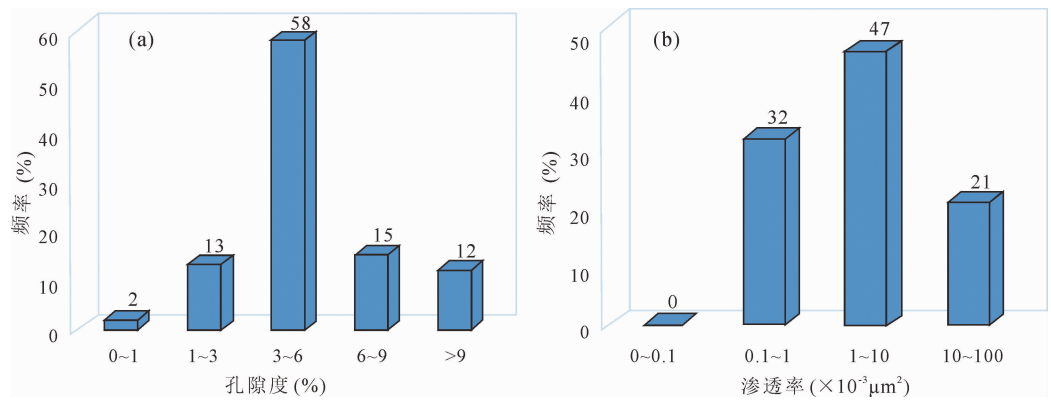


图 3 岩石样品孔隙度(a)和渗透率(b)频率分布直方图

Fig. 3 Porosity (a) and permeability (b) frequency distribution of rock samples

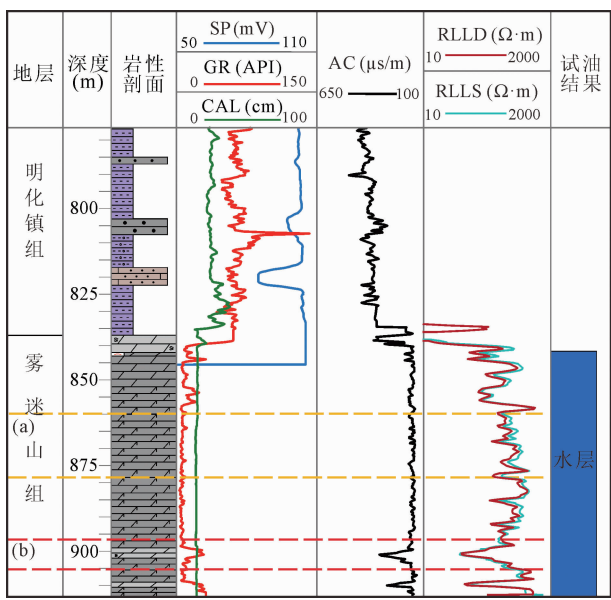


图 4 雄安新区 X10 井裂缝(a)和孔洞型(b)储层测井响应特征(井位见图 1)

Fig. 4 Logging response characteristics of fracture(a) and pore-vug reservoir of X10 well in Xiong'an New Area (well Location is shown in Fig. 1)

(2)裂缝-孔洞型储层:裂缝-孔洞型储集层是指裂缝和溶蚀孔洞均发育的储集层段,这类储层在测井曲线上综合了裂缝型和孔洞型的响应特征,自然伽马为低值,一般低于 30API;双侧向电阻率为中低值($100\sim3000\Omega\cdot\text{m}$)、声波时差值大于 $150\mu\text{s}/\text{m}$,但数值小于孔洞型储层,深浅侧向电阻率不仅降低同时还会出现裂缝型储层中出现的幅度差响应(图 5)。由于裂缝发育,测井曲线的形态表现为锯齿状或出现局部跳跃。

(3)裂缝型储层:裂缝型储集层是指裂缝较发育的储集层段。常规测井响应特征表现为自然伽马值一般低于 25API;声波时差曲线有不明显的增大,值

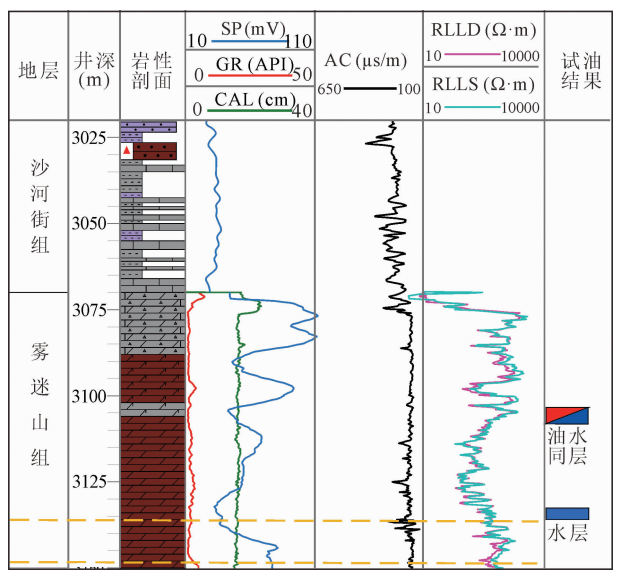


图 5 雄安新区 Y14 井裂缝-孔洞型测井响应特征(井位见图 1)

Fig. 5 Logging response characteristics of fractured-vuggy reservoir of Y14 well in Xiong'an New Area (well location is shown in Fig. 1)

略大于 $150\mu\text{s}/\text{m}$ 。深浅双侧向电阻率降低,电阻率随着裂缝发育程度的增高而降低,一般大于 $1000\Omega\cdot\text{m}$ (图 4b)。测井曲线锯齿状特征明显,裂缝发育位置声波时差值增大。

新生代地层作为盖层,在研究区广泛分布但差异较大,厚度范围在 $700\sim5000\text{m}$ 之间,在容城、牛驼镇凸起区厚度较小在 1500m 以下,在东部凹陷区厚度较大,普遍在 3500m 以上。自下而上包括古近系孔店组、沙河街组和东营组,新近系的馆陶组、明化镇组和第四系。岩性上部主要为黏土、砂岩、含砾砂岩等,下部主要由砂泥岩互层组成。根据前人研究,新近纪地层孔渗性良好,渗透率在 $93\times10^{-3}\sim570\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均有效孔隙度在 $20\%\sim$

33%之间(Zheng Liying, 2015)。在测井曲线上可以发现(图4、图5),盖层的声波时差和自然伽马表现为高值,孔渗性良好,但是底部多为砂泥互层,泥质含量高,导热率低、导热性差,并且泥岩具有较强封闭性,因此构成了良好的盖层和隔水层。

2.3 通道

运移通道是指连接水源和储层的通道。运移通道主要有渗透性岩层和断裂两种,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。沉积盆地中深大断裂是深部地下热水上涌的主要通道,尤其是张性或张扭性断裂,通过将深部高温地下热水带到地表,形成高温异常区,是传递热量的良好通道,而压性断裂其导水能力差,则作为良好的保温隔热阻水带(Liu Guoming et al., 2006)。

雄安新区内部构造变形复杂,发育的区域断裂走向、性质均有差别,主要为NE走向,其次为NNE和EW向,其中NE向断层是坳陷内的主要伸展断层,也是控坳、凹或洼的边界断层,主要形成于燕山运动晚期。雄安新区内的地热田都处于多条断裂交汇部位,这些断裂与地热田的形成有不同程度的联系。太行山断裂沟通地壳深部,是良好的导热导水通道。牛东断裂处于牛驼镇凸起与霸县凹陷两个构造单元之间,是一条延伸长、落差大、活动强的高角度张性正断层。在牛东断层下盘发育了底辟构造,可能是由深部地幔物质上涌引起浅层抬升所致,另外在断裂附近有第三系的玄武岩呈串珠状展布(Li Hong et al., 2017),说明牛东断裂既是研究区的导热断裂,也是导水断裂。容城凸起东侧是容城断裂,走向近NNE,倾角在 45° 左右小于牛东断裂,剖面上表现为典型的犁式正断裂的特征,该断裂控制了容城凸起内新近纪地层的发育。通过对重力异常特征分析,容城断裂断面发育了大量的裂缝带、溶蚀带,说明该断裂是牛驼镇凸起基岩热水的上涌出口。通过以上分析发现,研究区内的张性正断裂是地热资源运移重要的通道条件(Li Hong et al., 2017)。

3 地温场特征

通过测温数据分析发现,雄安新区现今盖层地温梯度范围在 $25.2\sim 58.9^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间,主要集中在 $45^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右(Wang Zhuting et al., 2019; Guo Sasa et al., 2019),比我国东部华北中新代断陷盆地地温梯度略高。牛驼镇和容城凸起地温梯度介于 $32\sim 58.9^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 之间,凹陷地区地温梯度偏低,

因此沉积盖层的地温梯度平面分布具有区域性,而热储内部的地温梯度比较均一,主要分布在 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。

通过收集研究区内的热流值,对不同构造单元的热流分布进行了分析,认为雄安新区大地热流介于 $53.3\sim 106.5\text{mW}/\text{m}^2$ 之间,平均值为 $73\text{mW}/\text{m}^2$,高于中国大陆地区热流平均值 $63.0\pm 24.2\text{mW}/\text{m}^2$ 和渤海湾盆地的热流值 $69\text{mW}/\text{m}^2$ 。牛驼镇和容城凸起热流值分布在 $70\sim 106.5\text{mW}/\text{m}^2$ 之间,为高异常区(图6)。另外前人通过模拟深部的温度场特征发现,深部的地温场也表现出了凸起区温度高于凹陷区的分布特征(Wang Zhuting et al., 2019)。总的来说,雄安新区地温场分布与基底起伏具有一致性,且从西至东,地温梯度变化趋势为低—高一低—高一低,这种趋势与研究区凹凸相间的构造格局呈对应关系(Chang Jian et al., 2016; Guo Sasa et al., 2019)。

4 典型地热田成藏模式与有利区预测

基于以上对研究区热源、通道和储盖地热要素的分析,选取了研究区的典型剖面及测温曲线进行重点分析,进而确定研究区地热资源的成藏模式。

以霸县凹陷和牛驼镇凸起两个不同构造单元典型井的测温曲线为例(图7),发现牛驼镇凸起区ST2井的测温曲线在盖层中以热传导为主,地温梯度为 $53.1^{\circ}\text{C}/\text{km}$,在雾迷山组热储中以热对流方式进行热传递,地温梯度只有 $4.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$,说明热储中地温明显降低。上部沉积盖层和下部热储层的地温梯度具有较大差异,是因为上部沉积盖层主要为砂岩、砂泥岩等,传热性差岩石导热率低,而下部热储层岩性主要为白云岩,传热性好岩石导热率高,热储内部的热对流作用使得内部温度较快地分布均一。测温曲线也反映出储层内存在较复杂的对流现象,这种对流既造成了热储内温度的均一化和地温梯度的减小,同时还存在由于高温水流沿裂隙或顶部不整合界面进入相对较低温度的周围环境,在某些地方还会形成地温曲线倒转的现象(图7中ST2井)。凸起区和凹陷区的测温曲线均表现出这样的特点。但是凹陷区储层较深,C9井在2000m也未到达储层,仅在盖层中进行传热,地温梯度为 $29.4^{\circ}\text{C}/\text{km}$,这个地温梯度明显小于凸起区的地温梯度。总的来说,凸起区和凹陷区典型井测温曲线可以看出,在1500m以浅,凸起区ST2井地温大于霸县凹陷的C9井,在1500m以深,ST2井进入热储层地温梯度

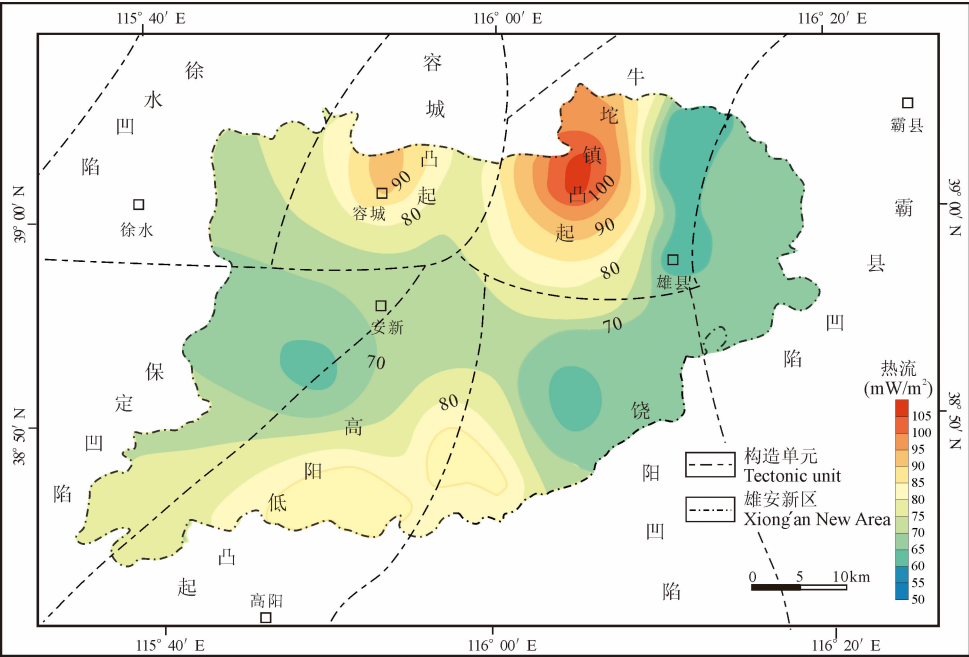


图 6 雄安新区大地热流平面分布图

Fig. 6 Geothermal flow distribution map of Xiong'an New Area

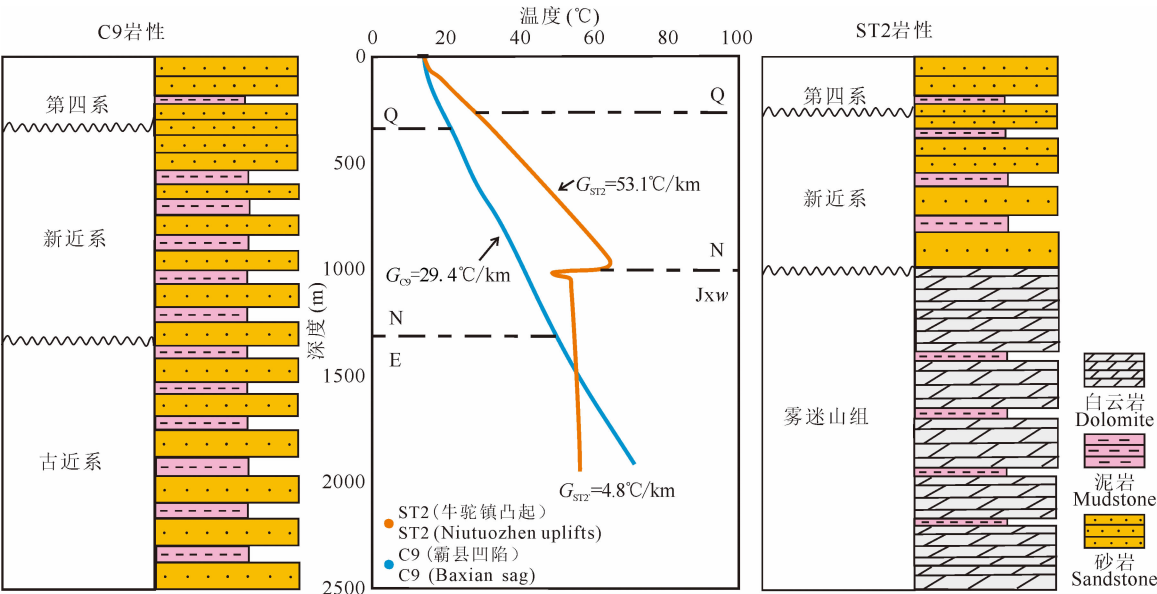


图 7 雄安新区不同构造区代表性地热井测温曲线对比图(井位见图 1)

Fig. 7 Temperature logs of two representative wells in different tectonic areas of Xiong'an New Area (location is shown in Fig. 1)

变小,地温略有降低,温度逐渐与凹陷区的 C9 井拉开差距。说明在凸起区较浅部就可以获得较高温的地下水,而凹陷区热储埋深大且地热地质条件较差,因此凸起区是地热开采的有利区。

前人对雄安新区地热资源的研究较多,一些学者通过实测的测温数据对雄安新区的现今地温场特征进行了分析(Wang Zhuting et al. , 2019),或是从

概念模型入手建立了以牛驼镇地热田为代表的雄安新区地热资源的“二元聚热”成因模式,并对地热资源储量进行了估算(Pang Zhonghe et al. , 2017)。有些学者重点对雾迷山组岩溶热储的发育特征进行了研究(Lu Kai et al. , 2019),或是对地下水来源以及活动机制进行了分析(Yang Jilong et al. , 2018)。但是多数学者仅是对地热资源形成要素中的某一方

面进行分析,对研究区地热资源形成的综合评价工作不够深入。本文将地温场分布与地质结构及流体活动等相结合,综合解剖了研究区的地热成藏要素,对研究区地热资源聚集的控制因素进行了总结。

牛驼镇和容城凸起是冀中拗陷内的次级构造,位于雄安新区北部,通过剖面成藏模式图分析发现,凸起区储层顶面温度为 40~90℃,地表热流量为 70~106.5mW/m²(图 8),是在正常偏高的地热背景下形成的。新生界盖层直接覆盖于蓟县系雾迷山组白云岩之上,雾迷山组储层埋深浅、厚度大,顶深多分布在 760~2000m 范围内,由于经历长期的淋滤作用,具有高孔高渗的特点。霸县凹陷热储埋深大,在 3000~6000m 之间,地表热流分布在 48.9~66.6mW/m² 范围内。根据 40℃ 和 60℃ 等温线发现,凸起区在 1000m 以浅地温就已达 60℃,而凹陷区达到 60℃ 则需要较大深度,并且东部凹陷区需要的深度具有增大的趋势,因此凸起区具有良好的地热地质条件,更易聚集高温的地下水。

雄安新区地热田属于中低温传导型地热资源,热源为幔源传导热和地壳放射性元素生热,是典型的“冷壳热幔”型热结构。太行山断裂是控制冀中拗陷的边界断裂,该断裂垂直断距大,可沟通地壳深部,是良好的导热导水通道。富含 CO₂ 的大气降水自北部、西部的燕山、太行山山区补给后,沿太行山

断裂下渗,向南、东南方向进行径流补给。从西部补给区到排泄区的运移过程中,径流时间长、速度慢,地下水不断吸收深部花岗岩的热量,温度逐渐升高(图 8)。到达牛驼镇和容城地区深部后,因为地下水具有较高的势能,在水头差驱动下,分别沿牛东、容城断裂张性正断层向浅部运移,到达热储后与浅部地下水混合,在热储内通过热对流方式增温,形成高温异常区。由于蓟县系白云岩热导率高,砂泥岩盖层热导率较低,因此下部的热流上传导时,容易向高热导率的凸起区聚集,且上覆盖层具有很好的保温隔热作用。

从深部地热资源成藏模式可见(图 8),良好的储盖组合对地热资源的赋存和保温起着重要作用,地热资源容易通过断裂在地热地质条件良好的凸起区聚集。另外,大地热流平面分布与构造格局具有较高的一致性(图 6),说明凸起区热背景条件优于凹陷区。因此,认为雄安新区的地热资源是在凹凸相间的构造格局和良好的储盖组合以及流体活动的多重影响下形成的。雄安新区地热资源容易富集在断裂控制的凸起构造或者构造低凸起的元古宇热储中。大地热流高值区、具有高渗透的元古宇储层且上覆区域连续性盖层的凸起构造是地热开发的有利区。

结合前人对热储物性平面分布的研究(Lu Kai

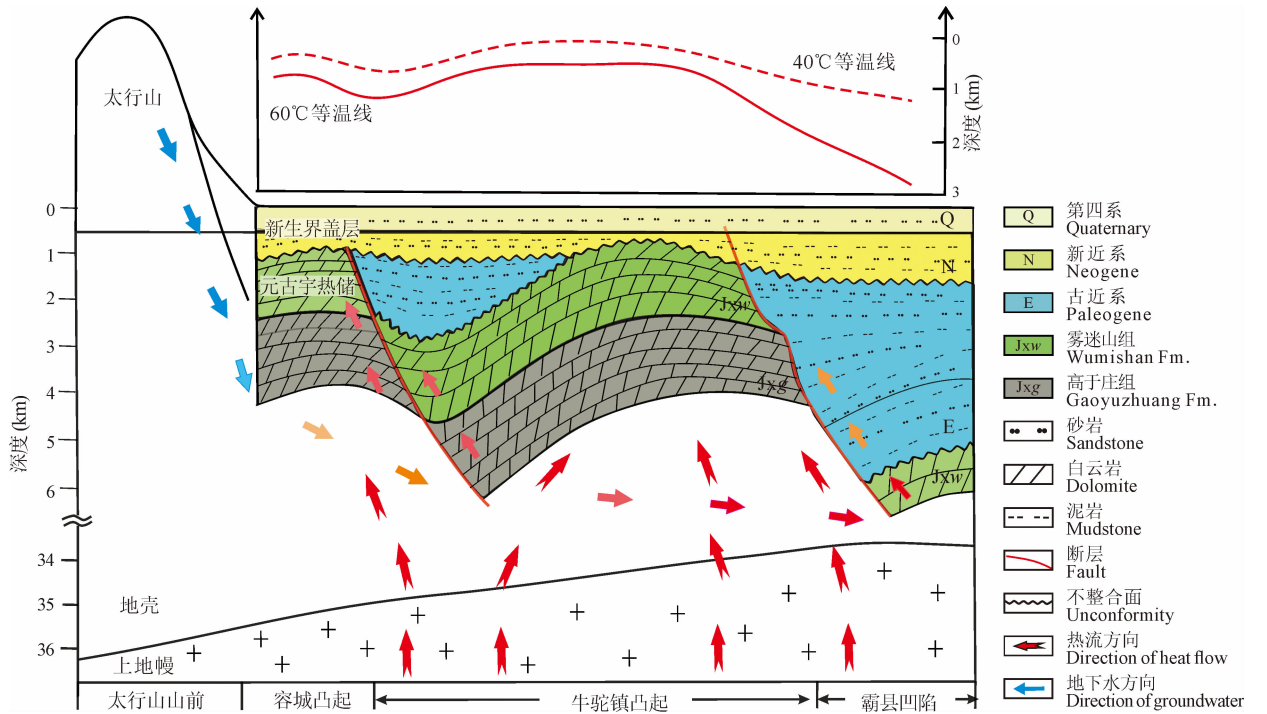


图 8 牛驼镇-容城凸起区地热资源成因模式图

Fig. 8 Genetic model of geothermal resources in Niutuozen and Rongcheng uplifts

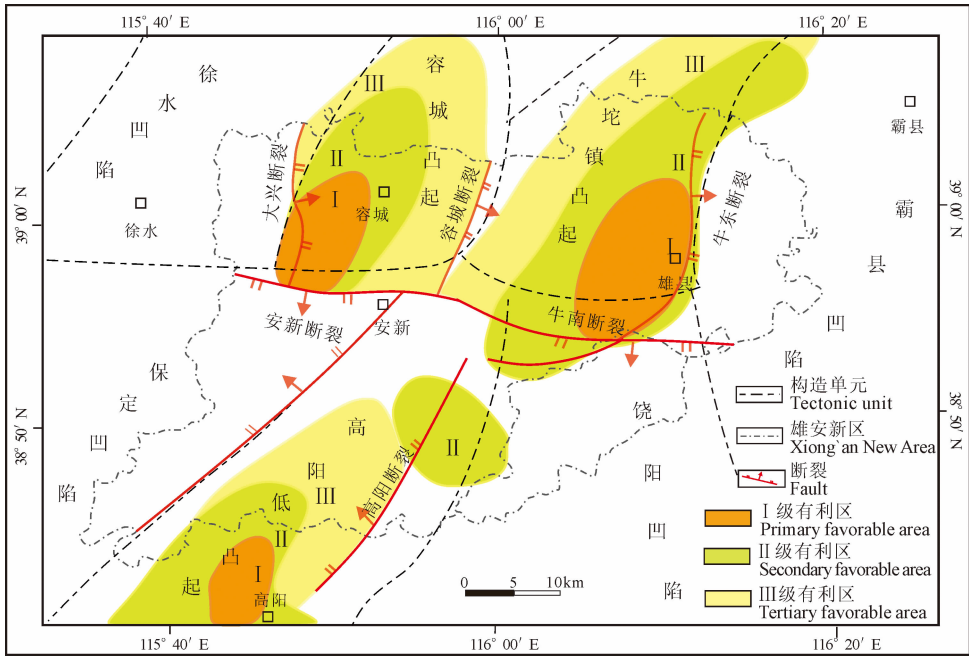


图 9 雄安新区雾迷山组热储有利区预测

Fig. 9 Prediction of favorable thermal reservoirs of Jxw formation in Xiong'an New Area

et al. , 2019; Dai Minggang et al. , 2020),对雾迷山组热储有利区进行了评价(图 9)。Ⅰ级有利区是研究区最有利的地热资源聚集区,储层孔隙度大于 4%,渗透率大于 $20\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,物性良好,位于盖层薄储层埋深浅地热地质条件良好的凸起区,并且附近发育张性正断裂,是有利的地下水运移通道。Ⅱ级有利区是研究区次有利的地热资源区,物性条件中等,位于凸起区距张性正断裂较近。Ⅲ级有利区物性较差,分布在断裂控制的凸起构造内。

5 结论

(1)雄安新区是典型的“冷壳热幔”结构,地下水主要来自于西部的太行山补给,在凸起区通过张性正断裂运移至储层内,剖面上孔洞型、孔洞-裂缝型储层与热导率较低的新生界地层的储盖组合构成了良好的水、热的储层和盖层。

(2)良好的储盖组合、凹凸相间的构造格局、地下流体活动是雄安新区地热资源赋存的主要影响因素。

(3)雄安新区地热资源容易富集在断裂控制的凸起构造或者构造低凸起的元古宇热储中。大地热流高值区、具有高渗透的元古宇储层且上覆区域连续性盖层的凸起构造是地热开发的有利区。

致谢:感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所对本文依托的课题给予了大力支持,在此致

以诚挚感谢!

References

Chang Jian, Qiu Nansheng, Zhao Xianzheng, Xu Wei, Xu Qiuchen, Jin Fengming, Han Chunyuan, Ma Xuefeng, Dong Xiongying. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai basin, East China. Chinese Journal of Geophysics, 59 (3): 1003~1016 (in Chinese with English abstract).

Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Jian, Deng Xiao , Yang Shuzhen, Xiong Liangping, Zhang Juming. 1990. The characteristic of the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-faulted basin. Acta Geologica Sinica, 64 (1): 80 ~ 91 (in Chinese with English abstract).

Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, Li Cheng, Han Yongbing, Li Hua, Cai Jingong. 2005. Mantle heat flow and deep temperature of Jiyang Depression, Shandong, North China. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 30 (1): 121 ~ 128 (in Chinese with English abstract).

Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nangsheng, Tang Boning, Zhang Jiatang, Zhao Yuhang. 2019. Present geothermal characteristics and influencing factors in the Xiong'an New Area, North China. Energies, 12(3884): 1~24.

Li Hong, Yu Jianbao, Lv Hui, Xiao Pengfei. 2017. Vertical Zone Characteristics and identification standard of Ordovician karst reservoirs in the Tahe Oilfield. Geophysical & Geochemical Exploration, 41 (2): 242 ~ 248 (in Chinese with English abstract).

Liu Guoming, Zhang Hengrong, Kong Qingjun. 2006. Analysis of the seismic activity at the Changbaishantianchi volcano. Seismology and Geology, 28(3): 503 ~ 508 (in Chinese with English abstract).

Liu Juan. 2018. Reservoir characteristics and comprehensive evaluation of Wumishan formation in Jizhong Depression. Master's thesis of China University of Petroleum (Beijing) (in Chinese with English abstract).

Liu Shaowen, Li Xianglan, Hao Chunyan, Li Xudong. 2017.

- Vertical Zone Characteristics and identification standard of Ordovician karst reservoirs in the Tahe Oilfield. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 41~55 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhao. 2014. The forming mechanism of typical geothermal systems in Nimu-Naqu geothermal belt, Tibet. PhD thesis of Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Lu Kai, Bao Zhidong, Ji Hancheng, Liu Jinxia, Wang Guiling, Ma Feng, Guo Ruijing, Cao Yingzhao, Yang Fei, Fu Yong, Li Xiaobo, Hua Yingxin, Que Yijuan, Li Zongfeng, Xu Xiting, Hu Xiancai. 2019. Characteristics, main controlling factors and favorable area prediction of karstic geothermal reservoirs of the Jixianian Wumishan formation in Xiong'an New Area. *Journal of Palaeogeography*, 21(6): 885~900 (in Chinese with English abstract).
- Luan Guangzhong, Liu Hongjun, Liu Dongyan, Wang Wenzheng. 2002. Geothermal attributes and characteristics of warm springs in Shandong Peninsula. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 79~84 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xiaofei, Zhang Guobin, Shangguan Shuantong, Su Ye, Tian Lanlan, Li Xiang, Qiao Yongchao, Liu Xu. 2018. A brief analysis of hot and dry rock geothermal resources hosting and distribution in Hebei Province. *Coal Geology of China*, 30(11): 47~54 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng. 1998. Thermal status profile in terrestrial sedimentary basins in China. *Advance in earth sciences*, 13(5): 34~38 (in Chinese with English abstract).
- Rao Song, Jiang Guangzheng, Gao Yajie, Hu Shengbiao. 2016. The thermal structure of the lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(06): 2176~2190 (in Chinese with English abstract).
- Reed M J. 1982. Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States. 145(24): 10.
- Shi Yujiang, Xiao Liang, Mao Zhiqiang, Guo Haopeng. 2011. An identification for diagenetic facies with well logs and its geological significance in low-permeability sandstones: A case study on Chang 8 reservoirs in the Jiyuan region, Ordos basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(5): 820~828 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Liu Zhiming, Lin Wenjing. 2004. Tectonic control of geothermal resources in the Peripheral of Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 44~51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liufeng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Geology in China*, 44(6): 1074~1085 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinwei, Wang Tinghao, Zhang Xuan, Mao Xiang, Luo Lu, Wang Di, Wu Minghui. 2019. Genetic mechanism of Xiwenzhuang Geothermal field in Taiyuan basin. *Earth Science*, 44(3): 1042~1056 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhuting, Zhang Chao, Jiang Guangzheng, Hu Jie, Tang Xianchun, Hu Shengbiao. 2019. Present-day geothermal field of Xiongan New Area and its heat source mechanism. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(11): 4313~4322 (in Chinese with English abstract).
- White D E. 1967. Some principles of geyser activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada. *American Journal of Science*, 265(8): 641~684.
- Yang Jilong, Liu Futian, Jia Zhi, Yua Haifan, Xu Qinmian, Hu Yunzhuang. 2018. The hydrochemical and $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ characteristics of two geothermal fields in Niutuozhen of Hebei Province and Tianjin and their environmental significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(01): 71~78 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minghui, Liu Chiyang, Yang Binyi. 2002. Negative structure inversion of the west-dipping faults in the eastern Jizhong depression. *Petroleum Exploration and Development*, 29(6): 35~37 (in Chinese with English abstract).
- Yu Changchun, Qiao Rixin, Zhang Dishuo. 2017. The basement tectonic characteristics from interpretation of aeromagnetic data in Xiong'an region. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 41(3): 385~391 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Juntao, Hu Wenxuan, Qian Yixiong, Wang Xiaolin, Xie Xiaomin. 2008. Classification and logging modes of dolomite reservoirs in the Tarim basin, Northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 82(3): 380~386 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chaofeng, Guo Wen, Wang Xiaopeng. 2018. Discussion on types and characteristics of geothermal resources in China. *Ground Water*, 40(4): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Liying. 2015. The characteristics and evaluation of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region. Master's thesis of Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhu Huanlai. 2011. Research on the sedimentary geothermal resources in North Songliao basin. PhD thesis of Northeast Petroleum University (in Chinese with English abstract).
- Zhu Shuyuan, Zhang Guobin, Li Shaohu. 2018. A study on geothermal resources comprehensive utilization in Xiongan New Area. *Coal Geology of China*, 30(5): 20~23 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 常健, 邱柄生, 赵贤正, 许威, 徐秋晨, 金凤鸣, 韩春元, 马学峰, 董雄梁, 梁小娟. 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征. *地球物理学报*, 59(03): 1003~1016.
- 陈墨香, 汪集旻, 汪维安, 邓孝, 杨淑贞, 熊亮萍, 张菊明. 1990. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制. *地质学报*, 64(01): 80~91.
- 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 李成, 韩用兵, 李华, 蔡进功. 2005. 济阳坳陷地幔热流和深部温度. *地球科学*, 30(01): 121~128.
- 李弘, 俞建宝, 吕慧, 肖鹏飞. 2017. 雄县地热田重磁响应及控热构造特征研究. *物探与化探*, 41(02): 242~248.
- 刘国明, 张恒荣, 孔庆军. 2006. 长白山天池火山区的地震活动特征分析. *地震地质*, 28(03): 503~508.
- 柳娟. 2018. 冀中坳陷雾迷山组储层特征及综合评价. 中国石油大学(北京)硕士学位论文.
- 刘绍文, 李香兰, 郝春艳, 李旭东. 2017. 塔里木盆地的热流、深部温度和热结构. *地学前缘*, 24(03): 41~55.
- 刘昭. 2014. 西藏尼木—那曲地热带典型高温地热系统形成机理研究. 中国地质科学院博士学位论文.
- 鲁锴, 鲍志东, 季汉成, 刘金侠, 王贵玲, 马峰, 郭瑞婧, 曹瑛倬, 杨飞, 符勇, 李潇博, 华盈鑫, 阙宜娟, 李宗峰, 许西挺, 胡先才. 2019. 雄安新区蓟县系雾迷山组岩溶热储特征、主控因素及有利区预测. *古地理学报*, 21(06): 885~900.
- 栾光忠, 刘红军, 刘冬雁, 王文正. 2002. 山东半岛温泉的地热属性及其特征. *地球学报*, 23(01): 79~84.
- 齐晓飞, 张国斌, 上官拴通, 苏野, 田兰兰, 李翔, 乔永超, 刘旭. 2018. 河北省干热岩地热资源赋存分布研究. *中国煤炭地质*, 30(11): 47~54.
- 邱柄生. 1998. 中国大陆地区沉积盆地热状况剖面. *地球科学进展*, 13(05): 34~38.
- 饶松, 姜光政, 高雅洁, 胡圣标, 汪集旻. 2016. 渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理. *地球物理学报*, 59(06): 2176~2190.
- 石玉江, 肖亮, 毛志强, 郭浩鹏. 2011. 低渗透砂岩储层成岩相测井识别方法及其地质意义——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8段储层为例. *石油学报*, 32(05): 820~828.
- 王贵玲, 刘志明, 蒯文静. 2004. 鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形成的控制作用. *地质学报*, 78(01): 44~51.
- 王贵玲, 张薇, 蒯文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀

地区地热资源成藏模式与潜力研究. 中国地质, 44(06): 1074~1085.

汪新伟, 王婷灏, 张瑄, 毛翔, 罗璐, 王迪, 武明辉. 2019. 太原盆地西温庄地热田的成因机制. 地球科学, 44(03): 1042~1056.

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. 地球物理学报, 62(11): 4313~4322.

杨吉龙, 柳富田, 贾志, 袁海帆, 胥勤勉, 胡云壮. 2018. 河北牛驼镇与天津地热田水化学和氢氧同位素特征及其环境指示意义. 地球学报, 39(01): 71~78.

杨明慧, 刘池阳, 杨斌谊. 2002. 冀中坳陷东部西倾断裂的构造负反转过程. 石油勘探与开发, 29(06): 35~37.

于长春, 乔日新, 张迪硕. 2017. 雄安新区航磁推断的三维基底构造特征. 物探与化探, 41(03): 385~391.

张朝锋, 郭文, 王晓鹏. 2018. 中国地热资源类型和特征探讨. 地下水, 40(04): 1~5.

张军涛, 胡文瑄, 钱一雄, 王小林, 谢小敏. 2008. 塔里木盆地白云岩储层类型划分、测井模型及其应用. 地质学报, 82(03): 380~386.

郑丽英. 2015. 京津冀地区新生代地热热储分布特征与资源评价. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.

朱焕来. 2011. 松辽盆地北部沉积盆地型地热资源研究. 东北石油大学博士学位论文.

朱树源, 张国斌, 李少虎. 2018. 雄安新区地热资源综合利用研究. 中国煤炭地质, 30(05): 20~23.

Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an New Area

GUO Sasa^{1,2)}, ZHU Chuanqing^{* 1,2)}, QIU Nansheng^{1,2)}, TANG Boning^{1,2)}, CUI Yue^{1,2)}

1) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249;

2) College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, 102249

* Corresponding author: zhucq@cup.edu.cn

Abstract

Heat resource, channel, reservoir, caprocks and fluids are the fundamental elements for the low medium temperature geothermal systems. Based on the formation conditions of the deep geothermal resources, this paper analyzed the characteristics of heat source, channel, reservoir, and caprocks of the geothermal fields in Xiong'an New Area. On this basis, the comprehensive influencing factors of the geothermal resources in the study area were determined and favorable prospecting areas were predicted. The results showed that a combination of the Cenozoic caprocks and the Proterozoic carbonate reservoirs, the interlacing distribution of uplifts and sags and the fluid flow were the main factors controlling the accumulation of the deep geothermal resources. The fault controlled uplifts or the low uplifts with high heat flow, Proterozoic karstic reservoir and continuous caprocks are the preferential places for heat accumulation and favorable prospecting areas of geothermal resources.

Key words: geothermal resources; karstic geothermal reservoir; accumulation elements; favorable prospecting area; Xiong'an New Area