

雄安新区深部储热构造探测研究与地热井优选技术

马岩¹⁾, 张保建^{1, 2)*}, 闫金凯¹⁾, 李燕燕^{1, 2)}, 张永伟³⁾,
朱喜^{2, 4)}, 高俊^{1, 2)}, 邢一飞^{1, 2)}

1) 中国地质科学院, 北京 100037;

2) 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北石家庄 050061;

3) 山东省国土空间生态修复中心, 山东济南 250014;

4) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061

摘要: 为了给雄安新区下步高温、高产地热井的探测提供借鉴, 需要归纳总结雄安新区高阳地热田雁翎潜山高温、高产地热井的成熟地质规律。本文系统分析了雁翎潜山地热田地地质条件与地温场背景, 通过对莫霍面上隆、深大断裂、凹凸相间构造格局、深浅断裂系统的控热、导热作用的综合研究, 总结归纳了地球物理场、区域水动力场、水化学场与温度场的多场耦合指示等探测评价技术对地温场的指示作用。在此基础上, 确定了研究区高温、高产地热井的主要优选布设依据: ①雁翎潜山是距饶阳、霸县深凹陷较近的低凸起, 深凹陷的莫霍面相对上隆使其底部形成相对较高的温度, 热流自深凹陷底部向与凹陷相邻的低凸起汇聚, 有利于形成深部高温异常; ②雁翎潜山距区域深大走滑断裂——马西断层较近, 马西断层河间段气藏为 $R/R_a > 1$ 的幔源氦异常区, 指示马西断层有可能导通深部幔源热; 潜山东侧的出岸断裂等断裂岩溶发育, 利于碳酸盐岩地下水的深循环对流加热后上涌; ③雁翎潜山距太行山相对较远, 且未处于与太行山补给区水力联系较密切的安新一文安构造变换带, 受补给区冷水影响较小; 距区域深部岩溶地下水汇流区较近, 有利于热流的集聚。雁翎潜山井口水温 123.4℃、109.2℃ 地热井的成功实施, 说明了深部碳酸盐岩地热井位优选探测技术的科学有效性, 对雄安新区乃至华北盆地深部高温、高产地热井位的优选具有很好的示范意义。

关键词: 深部储热构造; 地热井优选; 综合探测; 雄安新区; 华北盆地

中图分类号: P314 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.061601

Deep Geothermal Reservoir Structure Detection and Geothermal Well Optimization Technology in Xiongan New Area

MA Yan¹⁾, ZHANG Bao-jian^{1, 2)*}, YAN Jin-kai¹⁾, LI Yan-yan^{1, 2)}, ZHANG Yong-wei³⁾,
ZHU Xi^{2, 4)}, GAO Jun^{1, 2)}, XING Yi-fei^{1, 2)}

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Technology Innovation Center of Geothermal and Hot Dry Rock Exploration and Development,
Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061;

3) Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Jinan, Shandong 250014;

4) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061

Abstract: This study aimed to summarize the geothermal formation law of high-temperature and high-yield geothermal wells in Yanling buried hill in Gaoyang geothermal field of Xiongan New Area, and provide reference for the detection of high-temperature and high-yield geothermal wells in the lower part of Xiongan New Area.

本文由国家重点研发项目(编号: 2019YFB1504102)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20189114; DD20221677)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JKY 202122)、湖南省地质院科研项目基金项目(编号: HNGSTP202102)、青海省科学技术厅应用基础研究计划项目(编号: 2019-ZJ-7062)联合资助。

收稿日期: 2022-04-26; 改回日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 马岩, 男, 1964年生。高级工程师。主要从事地球深部探测研究管理工作。E-mail: yma64@163.com。

*通讯作者: 张保建, 男, 1972年生。博士, 正高级工程师。主要从事地热、水文及环境地质相关研究。E-mail: zbjssdk@126.com。

In this study, the geothermal geological conditions and geothermal field background of Yanling buried hill geothermal field were systematically analyzed. Through the thermal control and thermal conductivity of Moho uplift, deep-large faults, inter-concave-convex structural pattern, and deep-shallow fault system, the indicative effects of geophysical field, regional hydrodynamic field, hydrochemical field and temperature field on geothermal field were summarized. On this basis, the main optimal layout basis of high temperature and high yield geothermal wells in the study area were determined: (1)Yanling buried hill is a low uplift near the deep depressions of Raoyang and Baxian. The Moho surface of the deep depression is relatively uplifted to form a relatively high temperature at the bottom. The heat flow converges from the bottom of the deep depression to the low uplift adjacent to the depression, which is beneficial to the formation of deep high temperature anomalies. (2)Yanling buried hill is close to the regional deep strike-slip fault-Maxi fault, and the gas reservoir in the inter-river section of Maxi fault is the mantle-derived helium anomaly area with $R/R_a > 1$, indicating that Maxi fault may lead to deep mantle-derived heat; faults and karst development on the east side of the buried hill, such as the outgoing faults, are conducive to the uprising of carbonate groundwater after deep circulation convection heating; (3)Yanling buried hill is relatively far from Taihang Mountain, and is not in the Anxin-Wen'an structural transformation zone which is closely related to Taihang Mountains recharge area, and is less affected by the cold water in the recharge area. It is close to the deep karst groundwater confluence area, which is conducive to the accumulation of heat flow. The successful implementation of geothermal wells with water temperatures of 123.4°C and 109.2°C at the wellhead of Yanling buried hill shows the scientific validity of deep carbonate geothermal well location optimization detection technology, demonstrating the optimization of deep high temperature and high yield geothermal wells in Xiongan New Area and North China Basin.

Key words: deep thermal storage structure; geothermal well optimization; comprehensive exploration; Xiongan New Area; North China Basin

雄安新区地热资源非常丰富,分布有三个碳酸盐岩热储地热田,分别为牛驼镇、容城地热田和高阳地热田北部。牛驼镇、容城地热田热储埋深较浅,具有多年开发历史和较大利用规模(陈墨香等,1982;周瑞良等,1989),高阳地热田由于基岩热储埋深较大(埋深一般大于 3000 m),开发时间较晚,开发规模较小。自从 2017 年党中央、国务院决定设立雄安新区以来,为支撑服务雄安新区地热清洁能源开发利用,中国地质调查局部署了一系列地热资源勘查研究工作,在深部基岩热储探测、新层系探测等方面取得了新的进展(吴爱民等,2018;王贵玲等,2018)。特别是中国地质科学院在高阳地热田东北部深部碳酸盐岩地热资源探测取得重要进展,探获了华北盆地温度最高的地热井(王思琪等,2021)。

地热井的勘查定位是地热资源勘查评价一项十分重要的工作,但目前多是在地热地质条件分析基础上配合以浅层物探工作进行地热井井位优选(曾昭发等,2012;陆晨明等,2021),研究的地热井深度多在 3000 m 以浅,3000 m 以深的地热井主要集中于干热岩的探测(马峰等,2015)。以往地热勘查开发资料表明,雄安新区浅埋潜山地热资源丰富,而埋深 3000 m 以下的深部热储勘查研究程度较低。因深部热储埋深大,构造较复杂,基岩顶界面起伏情况不明,在确定地热井位时,应充分考虑物探、化探综合勘查依据,结合地热地质赋存条件进行深入分析、审慎确定,以减小地热勘查的风险。本文

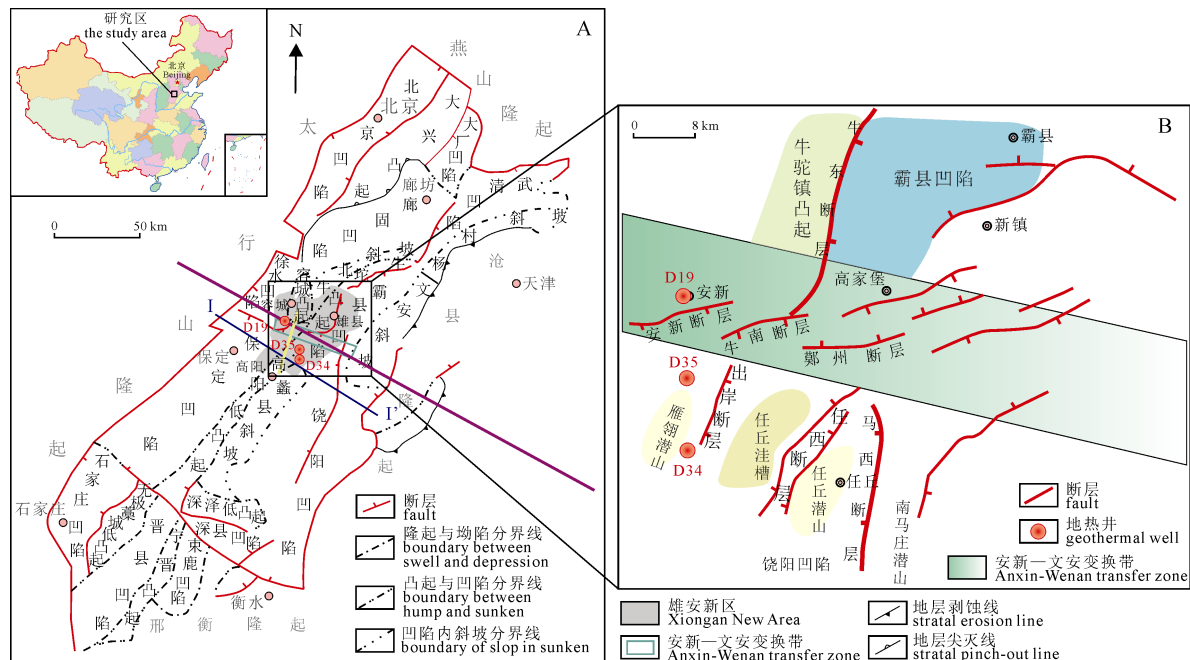
基于中国地质调查局在雄安新区开展的深部地热资源勘查项目研究成果,通过综合分析研究雄安新区高温、高产地热井勘查的成功经验,说明综合研究与深部探测技术在深部地热井井位确定中的重要性、有效性,为雄安新区勘查与开发利用地热清洁能源起到示范指导意义。

1 地质背景与深部储热构造特征

1.1 地质构造背景

雄安新区位于华北盆地冀中坳陷的中西部,涉及容城凸起、牛驼镇凸起、高阳低凸起与蠡县斜坡(即位于冀中坳陷的中央凸起带),徐水凹陷、保定凹陷位于冀中坳陷的西部凹陷带,霸州凹陷、饶阳凹陷位于东部凹陷带(图 1A)。另外在雄安新区的中部有一条 NWW-SEE 向的安新一文安构造变换带(图 1B),西起太行山断裂,往东延伸到文安一带,是冀中坳陷中的一级构造变换带,将冀中坳陷划分为南区、北区,使南北两侧在构造样式、变形强度、储热构造等方面呈现明显不同。研究区及周边主要分布有容城凸起、牛驼镇凸起及高阳低凸起地热田。

研究区东部的马西断层为一条大型走滑断裂,走向近南北向,马西断层北段受到安新一文安构造变换带的影响,在本段伸展活动较弱,接近于走滑断层特征,对于沉积的控制作用很弱。霸县—束鹿—邯郸断裂是一条和基底走滑断裂相关的区域走滑断裂(漆家福,2004),马西断层是该大型走滑构造带



A—雄安新区在冀中拗陷中的构造位置; B—安新一文安构造变换带平面图;

图 1A 中: 紫色长线为图 6 中深部速度结构剖面线; 黄色短线为图 8 中大地电磁反演视电阻率剖面线;

蓝色直线为图 9 中二维地震解释地质剖面线。

A—structural location of Xiongan New Area in Jizhong Depression; B—plan of Anxin-Wenan structural transformation zone.
In Fig. 1A: the long purple line is the deep velocity structure profile in Fig. 6; the yellow short line is the apparent resistivity profile of magnetotelluric inversion in Fig. 8; the blue line is the 2D seismic interpretation geological profile in Fig. 9.

图 1 雄安新区大地构造图

Fig. 1 Tectonic map of Xiongan New Area

的组成部分, 该断层与牛东断层组成的牛东—马西走滑构造系统, 是切穿基底的深层断裂在新生代右旋走滑活动的结果, 是深部构造应力通过下地壳传递到浅层的直接证据(肖尚斌等, 2000)。马西断层河间段气藏的氦同位素特征值存在沿马西断层呈带状分布的 $R/R_a > 1$ 异常区(戴金星等, 1995), 说明沿马西断层有幔源物质上涌到浅部的可能性, 在马西断层附近或与之相交的断层处有可能形成高温地热异常。

1.2 深部基岩热储

研究区 3000 m 以深可开发利用的热储主要为中元古界蓟县系雾迷山组、高于庄组, 局部地段还有少量古生界寒武系热储。

(1) 蓟县系雾迷山组热储

雾迷山组热储主要为白云岩, 在雄安新区内均有分布。容城凸起与牛驼镇凸起雾迷山组埋深多在 2500 m 以浅。在高阳低凸起与安新一文安构造变换带, 雾迷山组热储埋深多在 3000 m 以深, 其中高阳低凸起的顶部、安新一文安构造变换带局部与蠡县斜坡北部的雁翎潜山一带, 顶界埋深为 2500~3500 m, D19 孔揭露蓟县系雾迷山组顶界埋深 2920 m; 其他地段顶界埋深为 3500~4000 m 或更深, D35 孔揭露蓟县系雾迷山组顶界埋深 3 634.50 m。雾迷山组在大部地段均有分布, 在雁翎潜山的南部

剥蚀严重, 仅剩余几十米厚的风化层。热储层厚度一般为 1000~1400 m, 整体分布相对较均匀, 储厚比均值为 19.0% 左右。热储孔隙度主要分布于 6.0% 之内, 最大孔隙度可达 22.4%, 平均孔隙度为 3.39%。白云岩渗透率分布范围较大, 从 0.01~1000 mD 均有分布, 且主要分布于 0.01~100 mD 之间, 占比达 87.8%(戴明刚等, 2019)。

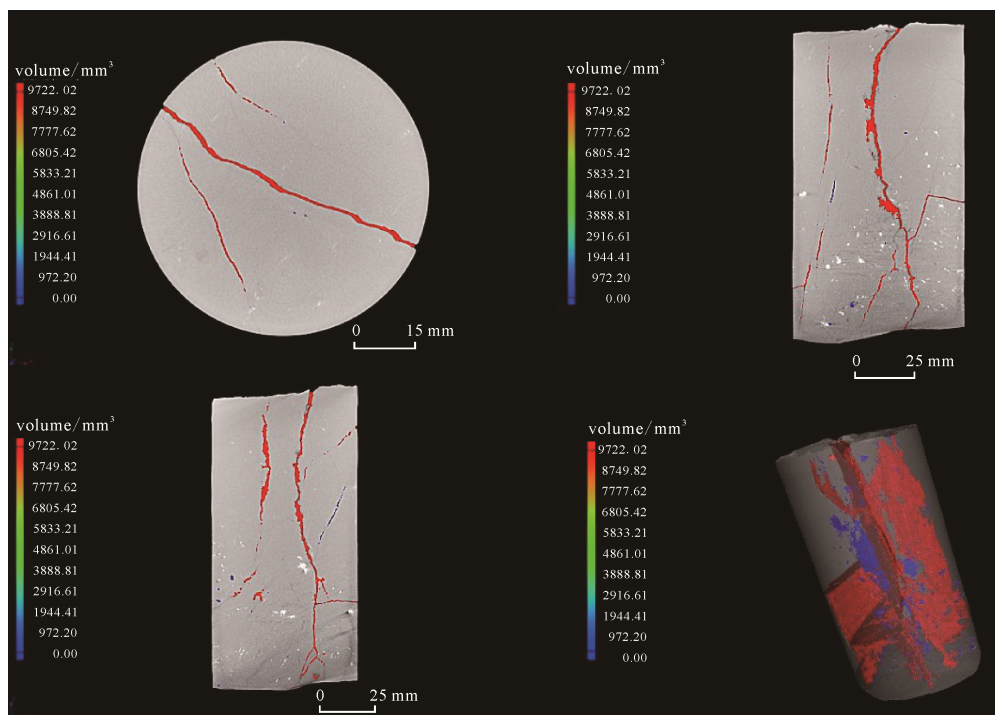
在构造发育部位, 岩溶裂隙比较发育, 如位于安新一文安构造变换带的 D19 孔, CT 扫描岩心裂缝长度最大为 69.61 mm, 裂缝张开度最大为 4.00 mm; 裂缝与溶孔相互连通, 形成良好的缝(孔)洞型储集空间(图 2)。D35 孔雾迷山组白云岩在 3666 m、3667.5 m、3668 m 处出现 1~3 mm 溶蚀洞, 局部岩心破碎(图 3); 钻至 3760 m 处时放空 0.5 m, 孔内钻井液突然不上返, 最大漏失量达 100 m³/h, 自 3760—3853 m 岩屑不上返, 说明该孔段岩溶非常发育。

(2) 蓟县系高于庄组热储

在研究区周边, 为数不多的几口井钻至高于庄组, 探明高于庄组热储顶界埋深 1425~3600 m, 钻孔揭露厚度一般不低于 1000 m, 岩性主要为灰色白云岩夹泥质白云岩、硅质白云岩, 含燧石团块或条带。白云岩孔隙度为 2%~6%, 渗透率 0.1~160 mD, 热储温度一般为 75~95 °C, 地热井出水量 45~80 m³/h

左右,矿化度 3000 mg/L 左右。D34 孔钻探深度 4507.43 m,揭露基岩热储为蓟县系高于庄组,揭露厚度 814.43 m(未穿),主要岩性为灰色、灰白色白云岩,含大量燧石及少量方解石;D34 孔高于庄组白云岩热储中裂隙含水层总厚度为 173 m,占地层总厚度的 21.24%。D34 孔 CT 扫描岩心裂缝长度最大为 55.44 mm,裂缝张开度最大为 1.49 mm,裂缝与溶孔相互连通,形成较好的缝(孔)洞型储集空间(图 4)。

D34 孔岩心镜下显微结构显示,储层岩性主要为白云岩(图 5A),岩石经历了后期热液活动的改造,形成热液脉,主要由方解石和赤铁矿组成(图 5B)。脉体角砾岩较为发育,角砾棱角分明(图 5C),说明未经过长距离搬运,角砾被方解石和赤铁矿(红色)胶结(图 5D)。整体上,储层天然裂缝较为发育,且裂缝连通性较好(图 5E, F),且白云岩储层溶蚀孔(图 5G 中红圈处)和粒间孔等均较为发育(图 5G, H)。



左上一岩心截面,裂隙最宽 2 mm; 左下一岩心侧面,裂隙最宽 2 mm;

右上一岩心侧面,裂隙最宽 4 mm; 右下一岩心三维裂隙形态。

Upper left—core section, the widest crack is 2 mm; lower left—core side, the widest crack is 2 mm;
upper right—core side, the widest crack is 4 mm; lower right—three-dimensional fracture morphology of core.

图 2 D19 孔雾迷山组白云岩岩心(深度 2944—2946 m)CT 扫描图

Fig. 2 CT scanning image of the dolomite core (depth 2944–2946 m) of Wumishan Formation in hole D19



局部岩心破碎, 3666 m、3667.5 m、3668 m 处出现 1~3 mm 溶蚀洞。

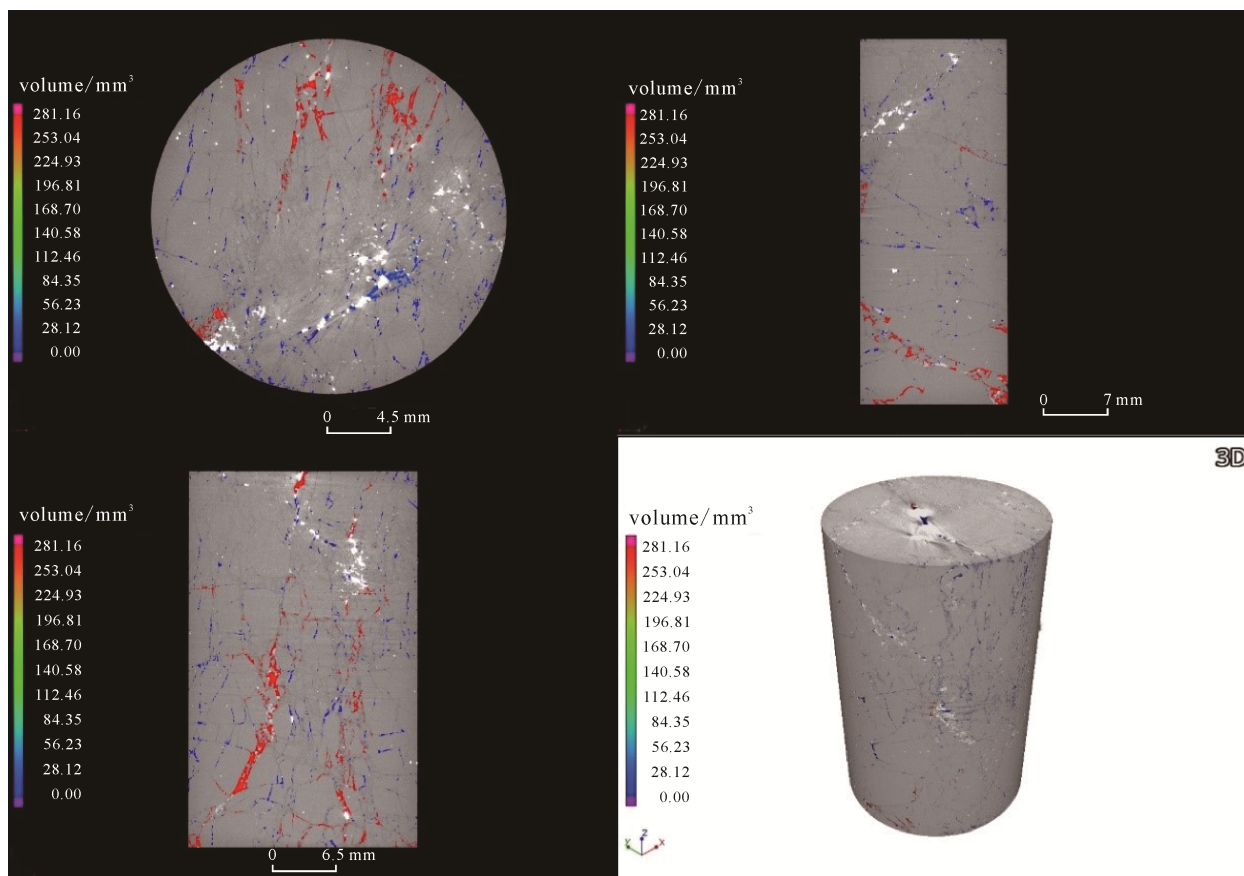
Local core was broken, and 1~3 mm dissolution hole appeared at 3666 m, 3667.5 m and 3668 m.

图 3 D35 孔雾迷山组白云岩类(3665.51—3669.40 m)段岩心

Fig. 3 Core of dolomite group (3665.51–3669.40 m) of Wumishan Formation in Well D35

研究区内安新一文安构造变换带潜山蓟县系顶界埋深 2500~3500 m, 洼槽基岩埋深多在 4000 m 以上, 研究区外可达 5000 m 左右。饶阳凹陷基岩最大埋深在 6000 m 左右(宋永东, 2010)、霸县凹陷基

岩最大埋深在 9000 m 左右(马兵山等, 2017)。安新一文安构造变换带是两侧饶阳、霸县凹陷中流体(油气)运移的指向(李飞, 2018), 是流体(油气)包括地热水聚集的有利场所。



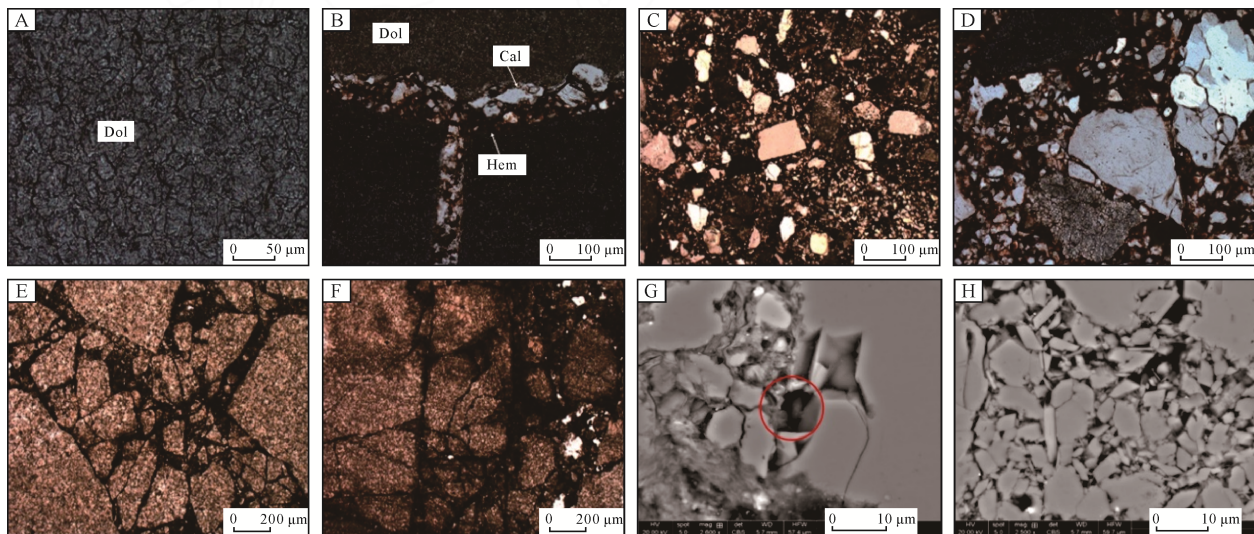
左上一岩心截面, 裂隙最宽 2 mm; 左下一岩心侧面, 裂隙最宽 2 mm;

右上一岩心侧面, 裂隙最宽 4 mm; 右下一岩心三维裂隙形态。

Upper left—core section, the widest crack is 2 mm; lower left—core side, the widest crack is 2 mm;
upper right—core side, the widest crack is 4 mm; lower right—three-dimensional fracture morphology of core.

图 4 D34 孔高于庄组白云岩岩心(深度 4497—4500 m)CT 扫描图

Fig. 4 CT scanning image of dolomite core (depth 4497–4500 m) of Gaoyuzhuang Formation in well D34



Dol—白云石; Cal—方解石; Hem—赤铁矿; 红圈—溶蚀孔。

Dol—dolomite; Cal—calcite; Hem—hematite; red circle—dissolution pores.

图 5 D34 孔高于庄组白云岩热储显微结构

Fig. 5 Microstructure of thermal storage of the dolomite in Gaozhuang Formation Well D34

2 地热井优选探测技术

华北盆地地热资源类型以沉积盆地传导型为主,沿断裂系统与凹凸构造的接触带存在局部水热对流。目前对雄安新区地热水的水源、热源及热储、盖层等地热地质条件已有较明确认识(吴爱民等, 2018; 王贵玲等, 2018), 本文主要从地热流体及热流聚集的有利因素方面阐述地热井优选的依据。

2.1 地温场背景分析

研究区处于华北盆地的西北部。中—新生代以来西太平洋板块俯冲驱动下,软流圈熔融物质向两侧运动,华北克拉通东部破坏岩石圈拉张作用形成了华北裂谷盆地,岩石圈、地壳厚度显著减薄。华北克拉通破坏所造成的岩石圈巨量减薄,有利于幔源热向浅部的传导,为深部热能进入地层浅部提供了良好的条件(王贵玲等, 2017)。现今华北盆地仍保留着前期残存下来的较高热背景,热流仍相对较高($60\sim 68\text{ mW/m}^2$),位于雄安新区高阳地热田东北部雁翎潜山的 D34 孔、D35 孔蓟县系热储的热导率均值为 $5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,地温梯度均值为 $1.23^\circ\text{C/(100 m)}$,据此计算的大地热流值为 62 mW/m^2 左右,大地热流值明显高于研究区中西部地区。

2.2 地质构造

(1) 莫霍面上隆的控热作用

大型拗陷基底与莫霍面上隆呈现镜像关系(戴金星等, 1995; 徐常芳, 2003),从图 6 看出深部莫霍面埋深 $30\sim 40\text{ km}$,在拗陷区地壳厚度明显薄于周边隆起区域。在岩石圈薄的拗陷区,软流圈、莫霍面上隆,壳内高导低速层发育,基底断裂比较发育,新生代岩浆活动频繁,深部活动性强,因而在拗陷区的基岩顶界深度温度一般都高于隆起区同一深度的热流值和温度。研究区处于冀中拗陷的中部马西断层主走滑带的西侧,地幔隆起明显,壳内高导低速层发育,有利于深部幔源热的向上传导。

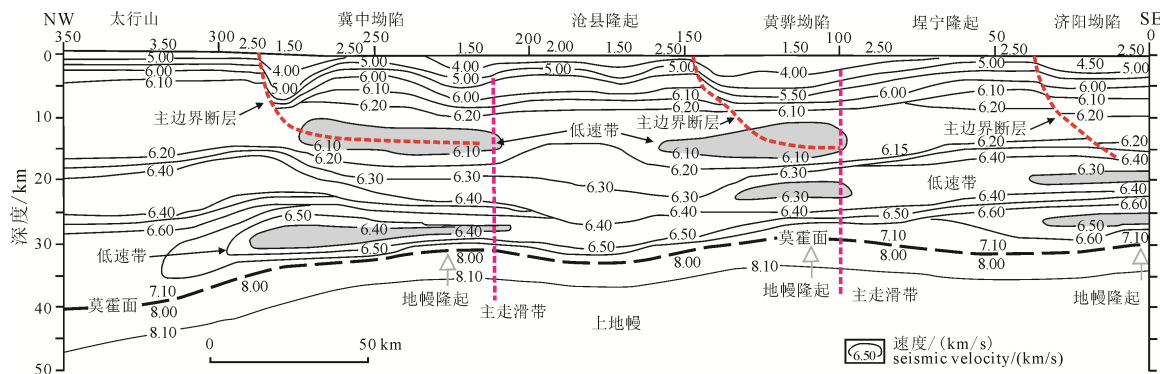
(2) 深大断裂的控热作用

华北盆地 NNE–NE 向的深大走滑断裂带,如郯庐断裂带、霸县—束鹿—邯郸断裂带等都是切穿莫霍面乃至岩石圈的深大断裂,成为地幔热物质上涌或基性岩浆上涌的通道(Qi and Yang, 2010)。软流圈高导低速层上隆部位多位于区域深大断裂下部,这说明软流圈熔/流体多“选择”壳内软弱带,如断裂破碎带作为其上涌的通道。深大断裂既是深部幔源热物质上涌的主要通道,同时幔源热物质的上涌也可以促使深大断裂的活化或催生新的断裂,研究区东部的马西断层为一条大型走滑断裂(图 1B),为霸县—束鹿—邯郸大型走滑构造带的组成部分,在马西断层河间段气藏的氦同位素特征值存在沿马西断层呈带状分布的 $R/R_a > 1$ 异常区(戴金星等, 1995),说明沿马西断层有幔源物质上涌到浅部的可能性,在马西断层附近或与之相交的断层处有可能形成高温地热异常。

根据研究区以北的牛驼镇地热田气体同位素地温测量,蓟县系雾迷山组储层的深层温度在 $141\sim 165^\circ\text{C}$ (Pang et al., 2018)之间。地幔来源的 He 在总 He 含量中的贡献在 $5\%\sim 8\%$ 之间,表明牛东断裂等深断裂是区域性的控热构造,是深部流体对流进入浅层储层的通道(Pang et al., 2018)。

(3) 凹凸相间构造格局的控热作用

前人早就研究了华北盆地凹凸相间的构造格局有利于热流的分配与再分配作用(熊亮萍和张菊明, 1984; 陈墨香, 1988),其实质是由于凸起部位的基岩的热导率明显高于凹陷区新生界松散沉积物的热导率,因而深部的热流更易于向热导率高的凸起部位汇聚,著名的牛驼镇凸起地热田就是因为高地温梯度而形成浅部地热异常。但是,这一规律是相对于浅部而言,深部某处存在一条水平的“热流平衡线”,在热流平衡线以下,热流由凹陷区向凸起区聚集;在该线以上,热流由凸起区向凹陷区



剖面线位置见图 1A。

The location of the profile line is shown in Fig. 1A.

图 6 华北盆地深部速度结构剖面图(据刘国栋等, 1984)

Fig. 6 Section of deep velocity structure in North China Basin (modified from LIU et al., 1984)

聚集(熊亮萍和高维安, 1982)。因此, 相对于浅埋的高凸起来说, 深埋的低凸起更容易聚热。

(4) 浅成侵入岩的保温作用

研究区的凸起区和凹陷区都有浅成侵入岩分布。本区主要以古近纪侵入岩为主, 据位于安新县城西北角的 D19 孔揭露, 在 3000 m 以浅揭露了厚约 120 m 的变粒玄武岩; D35 井下部的雾迷山组脉体内也见有少量青灰色、褐色侵入型闪长玢岩。虽然早期岩浆活动所保留的余热很少, 但玄武岩、闪长玢岩等侵入岩热导率为 $1.60 \sim 1.65 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 减弱了热流向上传导, 规模较大的层状侵入岩可形成“棉被”效应, 在其下部形成局部地热异常, 如 D19 孔在厚度 221 m 的玄武岩段上下温度突变明显, 玄武岩下的白云岩热储温度为 89°C , 比玄武岩顶部的盖层温度增高 17°C (据中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 未发表资料)。

(5) 碳酸盐岩地下水沿断裂构造的深循环加热

研究区和区域断裂构造控制了本区岩溶的发育和岩溶古地貌的总体格局。地质构造运动作用产生的裂缝及断裂, 形成了热储的储集空间和渗流通道。裂缝系统有利于地下水活动及溶蚀孔洞的发育; 断裂构造促进了岩溶作用, 形成统一的孔洞缝系统。断裂构造及岩溶的发育, 利于碳酸盐岩地下水的深循环对流加热后上升, 使深部热源更易到达浅层, 形成局部浅部热异常, 因此这些断裂发育带往往是热储最发育的地区(戴明刚等, 2019)。研究区新生界地温梯度($2.5 \sim 3.0^\circ\text{C}/(100 \text{ m})$ 左右)明显高于蓟县系碳酸盐岩的地温梯度($1.0^\circ\text{C}/(100 \text{ m})$ 左右)(图 7), 说明在 3500 m 深度以下碳酸盐岩地下水的深循环热对流仍然比较强烈。但断裂构造的发育也是一把双刃剑, 热储断裂密集且与补给区冷水联系密切的情况下, 会因受冷水影响而降低热储温度, 如 D19 孔白云岩热储由 3250 m 深度的 92°C 降到了 4000 m 深度的 88°C (据中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 未发表资料), 出现了负地温梯度。这是因为 D19 孔位于断裂构造发育且构造带向西延伸到太行山区的安新一文安构造变换带, 虽地热井出水量较大, 但由于是区域岩溶地下水的优势流动通道(Zhang et al., 2022)、受冷水影响较大而热储温度偏低。

2.3 深部地球物理探测

根据本次工作在雄安新区高阳地热田北部施工的人工地震、大地电磁测深资料, 冀中拗陷基底地壳具有多层结构和层间活动面, 一般可分为高速低导的上地壳、低速高导的中地壳和高速低导与低速高导交错的下地壳(图 6)。其中壳内低速高导层埋深约 15~22 km, 位于中、下地壳之间, 同时又是深部层间滑动面所在位置, 浅部的正断层多终止

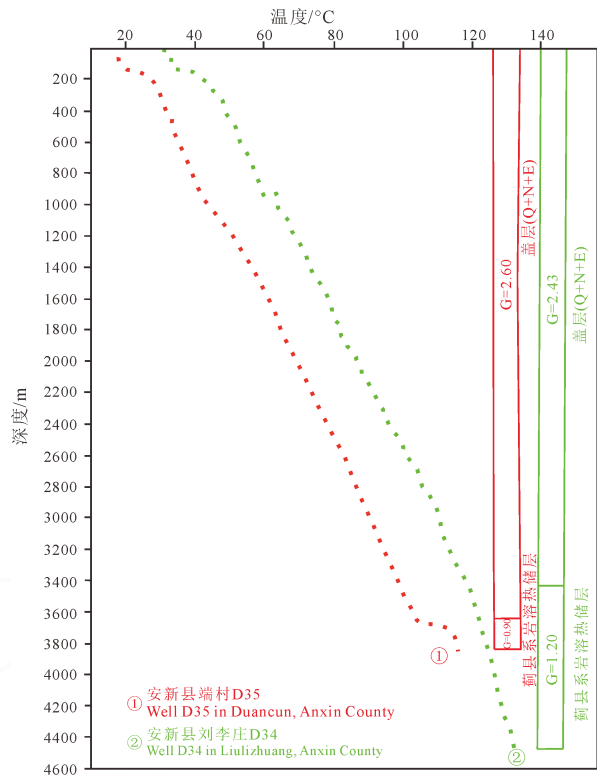


图 7 D34、D35 井测温曲线图

Fig. 7 Temperature measurement curve of D34 and D35

于该低速带内(刘国栋等, 1984; 徐常芳, 2003)。壳内中强地震多发生在中地壳低速层的顶部附近。这表明中地壳低速高导层是一个构造活跃层, 其与切穿地壳甚至岩石圈的深大断裂相配合, 有利于沟通来自地幔的热源, 成为深部幔源热物质上涌的通道。根据大地电磁与二维地震揭示的深部基岩面起伏成果(图 8, 图 9), 选取深凹陷附近的低凸起区且附近深大断裂与浅部断裂构造发育的地段作为深部地热钻孔(D34 孔)部署靶区, 有利于揭露到相对高温地热资源。

2.4 多场耦合指示依据

(1) 水动力场

几十年的地热水开采历史与油田采注水活动的影响, 使得现今雄安新区及周边的基岩地热水水动力场已发生了显著变化, 现今的基岩地热水流场已不能反映天然状态下的基岩地热水补给、径流、排泄条件。因此, 本文以早前的基岩地热水水动力场特征(阎敦实和于英太, 2000)来说明研究区基岩地热水补给、径流、排泄条件。

由图 10 看出, 冀中拗陷基岩地热水主要由西部的太行山区和北部的燕山补给, 虽然东南部的沧县隆起位于基岩地下热水流场的下游部位, 但沧县隆起向东北一直与燕山相连, 埋藏较浅的碳酸盐岩岩溶裂隙较发育, 因而使沧县隆起基岩地下水水位明显高于其西侧的冀中拗陷基岩地下水水位。其中雄安新区安新一文安构造变换带基岩地下水水位

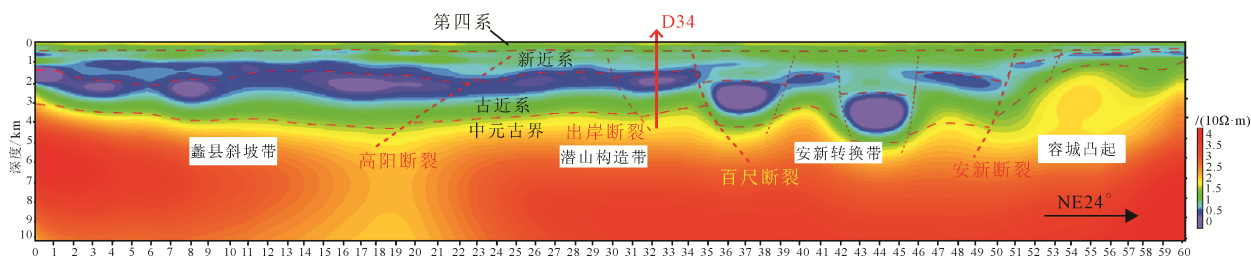


图8 高阳地热田北部大地电磁反演视电阻率剖面

Fig. 8 Magnetotelluric inversion apparent resistivity profile in the north of Gaoyang geothermal field

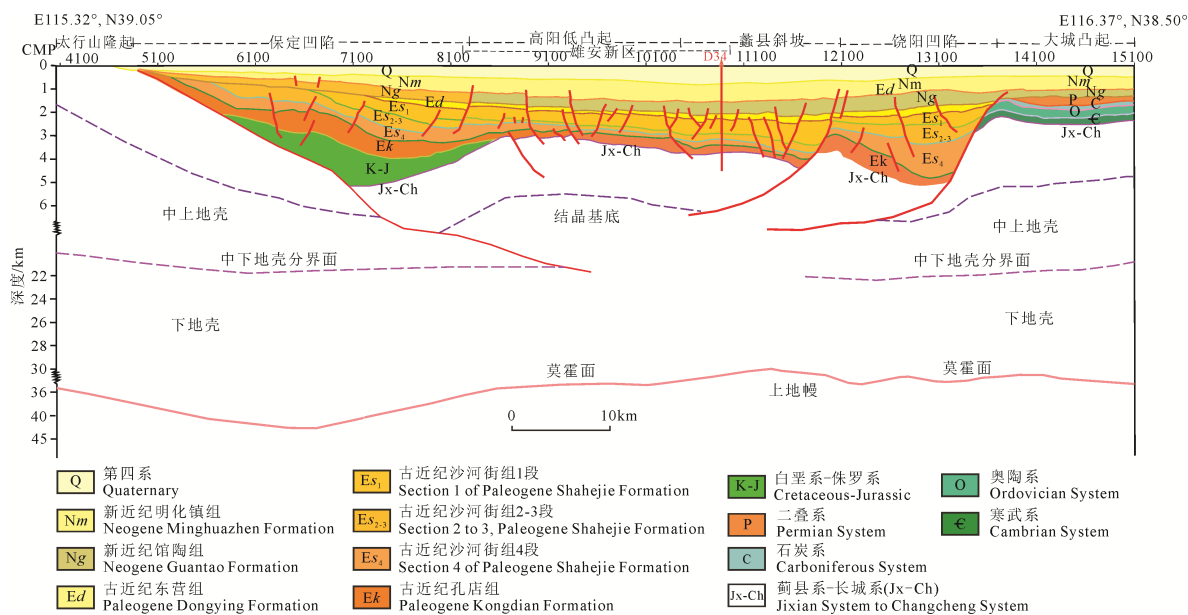


图9 高阳地热田北部二维地震解释地质剖面

Fig. 9 2D seismic interpretation geological section in the north of Gaoyang geothermal field

比其南北两侧的凸起区略高,这可能是由于安新一文安构造变换带一系列 NWW-SEE 向的断裂沟通了太行山东麓山前断裂,使沿安新一文安构造变换带容易得到来自太行山山前地下水的补给。同时由于安新一文安构造变换带基岩埋深相对较浅(最大埋深约 5000 m),来自沧县隆起的基岩地下水,也可以沿安新一文安构造变换带向西径流(Zhang et al., 2022),来自东、西两个方向的基岩地下水在任丘西侧形成水动力平衡区(张保建等, 2015),转而向南、北两侧的饶阳、霸县凹陷缓慢径流。在饶阳凹陷的东南部和霸县凹陷的西部形成两个区域基岩地下水的汇流中心(低势区),有利于地下热水的汇聚。高阳地热田东北部距这两个岩溶地下水的汇流区较近,也有利于地下热水聚集。

(2)水化学场

从冀中坳陷基岩地下水的矿化度等值线图(图 11)看出,西部靠近太行山区一带,基岩地下水矿化度较低,一般低于 2 g/L, $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl}) > 1.5$,反映了地下水循环交替作用较强。饶阳凹陷东南部河间、深县、武邑所围限的范围内基岩地下水矿化度高达 10 g/L 甚至几十 g/L, $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl}) < 1.0$,反映了该区域

处于区域基岩地下水汇集中心,为地下水循环交替滞缓区。安新一文安变换带基岩地下水矿化度较两侧的饶阳、霸县凹陷低, $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$ 值较饶阳、霸县凹陷高,反映了变换带基岩地下水的循环交替优于两侧的凹陷区。研究区处于饶阳、霸县凹陷的西侧,基岩地下水矿化度 2~4 g/L, $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$ 值 1.1~1.5,愈向东部受深部凹陷区影响越明显。

(3)地温场

根据前人及近几年中国地质调查局在研究区开展的地热调查工作,绘制了雄安新区新生界地温梯度等值线图(图 12),其中安新县以北地温梯度参照以往研究成果,安新县以南据本次实测地温梯度绘制。浅埋的牛驼镇凸起和容城凸起是研究区新生界地温梯度高值区,这是因为在热导率差异作用下,热流由凹陷区向凸起区汇聚。除去凹凸构造因素,新生界地温梯度由太行山前的低于 2 °C/(100 m),向东逐步增长到霸县、饶阳凹陷的 3 °C/(100 m)左右,这是因为靠近太行山,地温场受补给区冷水的影响较大,愈远离补给区冷水的影响愈弱。雁翎潜山地温梯度值虽然低于牛驼镇凸起和容城凸起,但由于新生界厚度较大,其 3000 m 以下同深度的温

度明显高于牛驼镇凸起和容城凸起, 这是因为牛驼镇凸起和容城凸起新生界之下的基岩地温梯度多在 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 之间。

通过校正后的大地热流值分布图可看出(图 13), 雄安新区热流值主要集中于 $56.0 \sim 66.0\text{ mW}/\text{m}^2$ 之间,

热流波动较小。高阳低凸起热流值略高于牛驼镇凸起区与容城凸起, 这可能与高阳低凸起碳酸盐岩热储保温盖层明显厚于牛驼镇凸起区与容城凸起所致。

综上所述, 雄安新区深部碳酸盐岩地热井位优选评价技术可归纳为表 1。

3 地热井位优选与验证情况

3.1 基于地热井位优选技术的高温井位预选

在施工 D34、D35 之前, 依据上述地热井位优选技术, 高阳地热田深部碳酸盐岩地热井(D34、D35)部署在了雁翎深潜山及其周边, 依据如下:

(1) 雁翎潜山是雄安新区距饶阳、霸县深凹陷较近的低凸起。深凹陷的莫霍面相对上隆使其底部形成较高的温度, 热流自深凹陷底部向凹陷相邻的

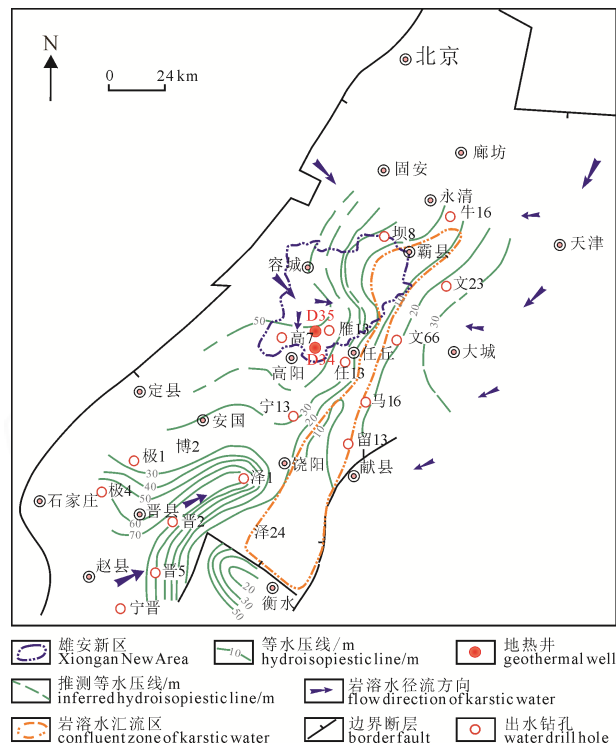


图 10 冀中拗陷潜山测压水位标高等值线图
(据阎敦实和于英太, 2000)

Fig. 10 Contour map of the phreatic pressure level elevation in Jizhong Depression
(after YAN and YU, 2000)

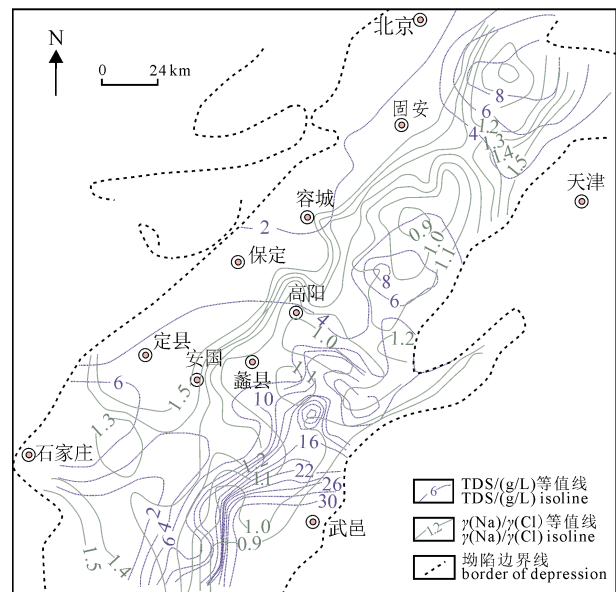


图 11 冀中拗陷碳酸盐岩地热水 TDS、 $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$ 等值线图
(据阎敦实和于英太, 2000)

Fig. 11 Contour map of TDS and $\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$ of carbonate geothermal water in Jizhong Depression
(after YAN and YU, 2000)

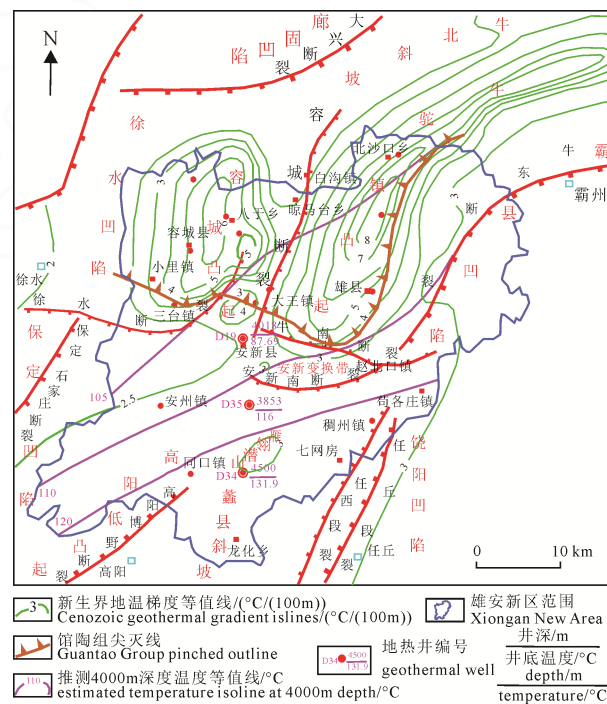


图 12 雄安新区新生界地温梯度等值线图

Fig. 12 Contour map of Cenozoic geothermal gradient in Xiongan New Area

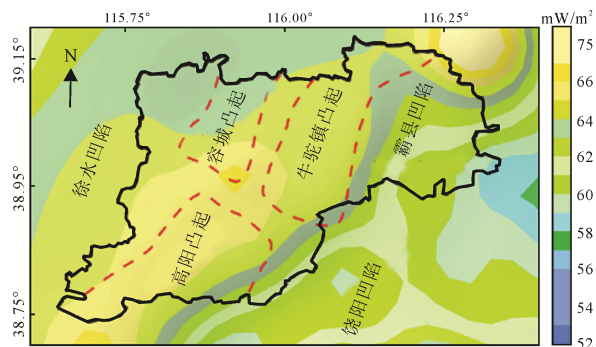


图 13 雄安新区校正后大地热流分布图
(据 Wang et al., 2021)

Fig. 13 Earth heat flow distribution map after correction in Xiongan New Area (after Wang et al., 2021)

表 1 雄安新区深部碳酸盐岩热储地热井位优选评价技术
Table 1 Optimization and evaluation technology of geothermal well location
in deep carbonate reservoir in Xiongan New Area

序号	有利地质要素	地质要素分解	井位优选原则
1	地质构造	壳幔结构	软流圈、莫霍面上隆部位有利于深部热源的向上传导,是布井有利部位,因此布井宜选择深凹陷的边缘
2		深部构造	高阳地热田东部的马西断层为切穿岩石圈的深大走滑断裂,既可导通深部热源,幔源热物质的上涌也可促使深大断裂的活化或催生新的断裂,在马西断层附近或与之相交的断层处有利于形成高温地热异常
3		浅部构造	地壳浅部断裂构造及岩溶的发育,利于碳酸盐岩地下水的深循环对流加热,使深部热源更易到达浅部;但是与补给区密切沟通的断裂密集带由于受补给区冷水影响,一般水量相对较大,水温相对较低,如安新一文安构造变换带
4		构造格局	凹凸相间的构造格局有利于热流的再分配,深部的热流易于向热导率高的凸起部位汇集
5		岩浆活动	热导率低的浅成侵入岩可形成“棉被”聚热效应,在其下部形成局部地热异常
6	热储与盖层	热储	热储应选择碳酸盐岩古潜山的顶部风化壳或构造密集的溶蚀缝(孔)洞发育层段
7		盖层	新生界是研究区的良好盖层,要获得 90 °C 以上的中温地热资源,新生界盖层厚度需达到 2500 m 以上
8	地球物理场	低速高导体	软流圈高导低速层上隆部位多位于深大断裂下部;中地壳低速高导层是构造活跃层,与切穿地壳甚至岩石圈的深大断裂配合,有利于沟通来自地幔的热源
9		地温场	研究区东部受西部补给区冷水影响较小,地温梯度相对较高
10		大地热流	研究区西部低凸起热流值相对较高
11	地热水动力场		在饶阳凹陷的东南部和霸县凹陷的西部形成两个区域基岩地下水的汇流中心,地下水运动滞缓,有利于热量集聚。高阳地热田东北部距这两个岩溶地下水汇流区较近,因而易被加热
12	地热水化学场		区域碳酸盐岩地热水的汇流中心溶解性总固体(TDS)较高、变质系数($\gamma(\text{Na})/\gamma(\text{Cl})$)较低,指示其为地下水与热量的集聚区,其周边亦温度较高

低凸起汇聚,有利于形成深部高温异常。(2)雁翎潜山距区域深大走滑断裂——马西断层较近,马西断层有可能导通深部热源;研究区出岸等断裂构造及岩溶的发育,利于碳酸盐岩地下水的深循环对流加热后上涌。(3)雁翎潜山距太行山相对较远,受补给区冷水影响较小;雁翎潜山距区域深部岩溶地下水的汇流区较近,有利于热量的集聚。(4)雁翎潜山盖层厚度适中,既不因为盖层薄使热储热量易于散失,又不因为盖层厚度太大,导致钻探施工成本过高。

3.2 地热井优选技术的验证

综合以上热源主控因素,分别在雁翎潜山的北部和南部部署了 D35、D34 两口地热井,其中 D35 井设计深度 4000 m(终孔深度为 3853 m),D34 井设计深度 4500 m(终孔深度为 4507.43 m),目的热储层位均为蓟县系碳酸盐岩。经钻探验证,均获得了很好的地质效果。

3.2.1 热储特征

D34 井钻探深度 4507.43 m,揭露热储主要为蓟县系高于庄组,揭露厚度 814.43 m(未穿)。主要岩性为灰色、灰白色白云岩,含大量燧石及少量方解石。其上为厚度 209.19 m 的杨庄组紫红色、灰白色含砾石白云岩和厚度 29 m 的雾迷山组灰白色白云岩。高于庄组热储中裂隙(水层)总厚度为 173 m,占地层总厚度的 21.24%。

D35 井钻探深度 3853.00 m,揭露雾迷山组热储

218.50 m(未穿)。主要岩性为灰白色、浅灰色白云岩,含泥质。下部含青灰色、褐色侵入型闪长玢岩、构造角砾岩。上部风化程度较高,裂隙岩溶较发育。裂隙发育段总厚度为 43.00 m,占热储总厚度的 19.68%。

3.2.2 地热井产能

D34 地热井抽水试验井口最高水温 123.4 °C,井底温度 131 °C。热水头+11.29 m,抽水后可自流。降深 145.24 m,汽水混合物的流量为 142 m³/h,地热水的流量为 94.528 m³/h,单位涌水量 0.651 m³/(h·m)。有效利用热资源量 3.65×10⁷ kJ/a,折合标准煤约 3867 t/a,用于地板供暖,供暖面积约 33.8 万 m²/a。是迄今华北盆地温度最高的地热井。

D35 地热井抽水试验井口最高水温 109.2 °C,井底温度 116 °C。热水头+17.00 m,降深 51.20 m,汽水混合物的流量为 250.009 m³/h,地热水的流量为 170.003 m³/h,单位涌水量 3.320 m³/h·m。有效利用热资源量 5.70×10⁷ kJ/a,折合标准煤约 5606 t/a,用于地板供暖,供暖面积约 52.8 万 m²/a。是迄今华北盆地产能最大的地热井。

与位于安新一文安构造变换带的 D19 井(井口水温 80 °C)相比,D35、D34 地热井的水温明显偏高,这一是由于 D19 井新生界盖层厚度相对较薄(2920 m),二是由于安新一文安构造变换带断层发育,且与西部太行山区补给区水力联系密切,受补给区冷水影响较大。

4 结论

综上所述, 本文形成了雄安新区深部高温地热井位优选技术, 其经验可推广到整个华北盆地, 主要经验如下:

(1) 地热井宜部署在与深凹陷相邻的低凸起部位。这是由于新生界热导率普遍低于基岩, 热流从深凹陷新生界底部的高温区向低凸起富水性较好的碳酸盐岩地层汇聚, 形成温度相对较高的碳酸盐岩热储。

(2) 地热井宜部署在与深大走滑断裂附近且与深大走滑断裂相沟通的构造发育部位。华北盆地的深大走滑断裂往往切穿地壳或岩石圈, 而成为幔源热物质上涌的有利通道; 碳酸盐岩含水层沿浅部构造循环对流加热, 容易在浅部形成高温异常区(带), 但若获得较高温度, 井位应避免与补给区水力联系密切的断裂构造密集带。

(3) 在经济技术条件允许的情况下, 适当的基岩埋深有利于形成高温热储。以华北盆地为例, 在距离周边山区较远的低凸起构造部位, 埋深在3000~5000 m且碳酸盐岩等裂隙发育的基岩含水层, 有可能赋存100~150 °C甚至更高温度的地热资源。

致谢: 感谢审稿专家对本文的审阅及提出的宝贵修改建议。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2019YFB1504102), China Geological Survey (Nos. DD20189114 and DD20221677), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JKY 202122), Geological Bureau of Hunan Province (No. HNGSTP202102), and Science and Technology Department of Qinghai Province (No. 2019-ZJ-7062).

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.
- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 戴金星, 宋岩, 戴春森, 陈安福, 孙明良, 廖永胜. 1995. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社.
- 戴明刚, 雷海飞, 胡甲国, 郭新锋, 马鹏鹏, 张家云. 2019. 雄安新区顶面埋深在3500m以浅的中元古界热储可采地热资源量和开发参数评估[J]. 地质学报, 93(11): 2874-2888.
- 李飞. 2018. 陆相断陷盆地典型凹陷流体活动差异性及其对油气成藏影响研究[D]. 北京: 中国石油大学.
- 刘国栋, 史书林, 王宝钧. 1984. 华北地区壳内高导层及其与地壳构造活动性的关系[J]. 中国科学 B 辑, 14(9): 839-848.
- 陆晨明, 刘春雷, 李亚松, 郝奇琛, 曹胜伟, 董岩. 2021. 泉州官桥地区地热勘探靶区及成因模式探讨[J]. 地质论评, 67(5):

1345-1356.

- 马兵山, 漆家福, 高强, 王利爽, 杨克基. 2017. 霸县凹陷构造特征及新生代构造演化[J]. 地质科学, 52(2): 343-358.
- 马峰, 孙红丽, 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲. 2015. 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. 科技导报, 33(8): 41-47.
- 漆家福. 2004. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质, 31(1): 15-22.
- 宋永东. 2010. 饶阳凹陷中北部构造特征及有利勘探方向研究[D]. 青岛: 中国石油大学.
- 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——高于庄组热储特征研究[J]. 地球学报, 39(5): 533-541.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 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[J]. 中国地质, 44(6): 1074-1085.
- 王思琪, 张保建, 李燕燕, 邢一飞, 袁文真, 李郡, 高俊, 赵甜. 2021. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制[J]. 地质科技通报, 40(3): 12-21.
- 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.
- 肖尚斌, 高喜龙, 姜在兴, 譙汉生. 2000. 渤海湾盆地新生代的走滑活动及其石油地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 24(4): 321-328.
- 熊亮萍, 高维安. 1982. 隆起与拗陷地区地温场的特点[J]. 地球物理学报, 25(5): 448-456.
- 熊亮萍, 张菊明. 1984. 热流的折射和再分配的数学模拟[J]. 地质科学, (4): 445-454.
- 徐常芳. 2003. 中国大陆岩石圈结构、盆地构造和油气运移探讨[J]. 地学前缘, 10(3): 115-127.
- 阎敦实, 于英太. 2000. 京津冀油区地热资源评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 曾昭发, 陈雄, 李静, 李桐林, 张良怀. 2012. 地热地球物理勘探新进展[J]. 地球物理学进展, 27(1): 168-178.
- 张保建, 高宗军, 张凤禹, 郝桂虎, 刘福义, 臧建军. 2015. 华北盆地地下热水的水动力条件及水化学响应[J]. 地学前缘, 22(6): 217-226.
- 周瑞良, 刘琦胜, 张晶, 杨力强. 1989. 华北断陷盆地牛驼镇基岩高凸起型热田地质特征及其开发前景[J]. 中国地质科学院 562 综合大队集刊, (7-8): 21-36.

References:

- CHEN Mo-xiang, HUANG Ge-shan, ZHANG Wen-ren, ZHANG Rong-yan, LIU Bing-yi. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozen basement protrusion of central Hebei Province[J]. Scientia Geologica Sinica, (3): 239-252(in Chinese with English abstract).
- CHEN Mo-xiang. 1988. Geothermics of North China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- DAI Jin-xing, SONG Yan, DAI Chun-sen, CHEN An-fu, SUN Ming-liang, LIAO Yong-sheng. 1995. Inorganic gas and its reservoir forming conditions in eastern China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- DAI Ming-gang, LEI Hai-fei, HU Jia-guo, GUO Xin-feng, MA Peng-peng, ZHANG Jia-yun. 2019. Evaluation of recoverable geothermal resources and development parameters of Mesoproterozoic thermal reservoir with the top surface depth of

- 3500 m and shallow in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2874-2888(in Chinese with English abstract).
- LI Fei. 2018. Differences of fluid activities and their influences on the hydrocarbon migration and accumulation between typical sags in continental rift basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(in Chinese with English abstract).
- LIU Guo-dong, SHI Shu-lin, WANG Bao-jun. 1984. The high conductive layer in the crust of North China and its relationship with crustal tectonic activity[J]. *Science in China Series B*, 14(9): 839-848(in Chinese).
- LU Chen-ming, LIU Chun-lei, LI Ya-song, HAO Qi-cheng, CAO Sheng-wei, DONG Yan. 2021. Exploration target area of geothermal resources in Guanzhou area, Quanzhou, and its genetic model[J]. *Geological Review*, 67(5): 1345-1356(in Chinese with English abstract).
- MA Bing-shan, QI Jia-fu, GAO Qiang, WANG Li-shuang, YANG Ke-ji. 2017. Structural characteristic and Cenozoic tectonic evolution in Baxian sag[J]. *Chinese Journal of Geology*, 52(2): 343-358(in Chinese with English abstract).
- MA Feng, SUN Hong-li, LIN Wen-jing, GAN Hao-nan, WANG Gui-ling. 2015. Target site selection and index matrix evaluation of EGS trial project in China[J]. *Science & Technology Review*, 33(8): 41-47(in Chinese with English abstract).
- PANG Ju-mei, PANG Zhong-he, LÜ Min, TIAN Jiao, KONG Yan-long. 2018. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozen geothermal field, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 77: 12.
- QI Jia-fu, YANG Qiao. 2010. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 757-771.
- QI Jia-fu. 2004. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. *Geology in China*, 31(1): 15-22(in Chinese with English abstract).
- SONG Yong-dong. 2010. Study on structural characteristics and the favorable exploration zones of the middle-northern area in Raoyang sag[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China)(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, LI Jun, WU Ai-min, ZHANG Wei, HU Qiu-yun. 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 Gui-ling, ZHANG Wei, LIN Wen-jing, LIU Feng, ZHU Xi, LIU Yan-guang, LI Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6): 1074-1085(in Chinese with English abstract).
- WANG Si-qi, ZHANG Bao-jian, LI Yan-yan, XING Yi-fei, YUAN Wen-zhen, LI Jun, GAO Jun, ZHAO Tian. 2021. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the north-east of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3): 12-21(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhu-ting, GAO Peng, JIANG Guang-zheng, WANG Yi-bo, HU Sheng-biao. 2021. Heat flow correction for the high-permeability formation: A case study for Xiong'an New Area[J]. *Lithosphere*, (Special 5): 9171191.
- WU Ai-min, MA Feng, WANG Gui-ling, LIU Jin-xia, HU Qiu-yun, MIAO Qing-zhuang. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(5): 523-532(in Chinese with English abstract).
- XIAO Shang-bin, GAO Xi-long, JIANG Zai-xing, QIAO Han-sheng. 2000. Cenozoic dextral strike-slip motion in Bohai Bay Basin and its meaning to petroleum geology[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(4): 321-328(in Chinese with English abstract).
- XIONG Liang-ping, GAO Wei-an. 1982. Characteristics of geotherm in uplift and depression[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 25(5): 448-456(in Chinese with English abstract).
- XIONG Liang-ping, ZHANG Ju-ming. 1984. Mathematical simulation of refract and redistribution of heat flow[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 445-454(in Chinese with English abstract).
- XU Chang-fang. 2003. The study of lithospheric tectonics and basin formation of Chinese mainland and migration of oil and gas[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 115-127(in Chinese with English abstract).
- YAN Dun-shi, YU Ying-tai. 2000. Evaluation and utilization of geothermal resources in Beijing Tianjin Hebei Oil Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- ZENG Zhao-fa, CHEN Xiong, LI Jing, LI Tong-lin, ZHANG Liang-huai. 2012. Advancement of geothermal geophysics exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 27(1): 168-178(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-jian, GAO Zong-jun, ZHANG Feng-yu, HAO Shuan-hu, LIU Fu-yi, ZANG Jian-jun. 2015. Hydrodynamic condition and response of formation water chemical fields of geothermal water in North China Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 217-226(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-jian, WANG Si-qi, KANG Feng-xin, LI Yan-yan, ZHUO Lin-yang, GAO Jun, YUAN Wen-zhen, XING Yi-fei. 2022. Flow path of the carbonate geothermal water in Xiong'an New Area, North China: Constraints from ^{14}C dating and H-O isotopes[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 782273.
- ZHOU Rui-liang, LIU Qi-sheng, ZHANG Jing, YANG Li-qiang. 1989. The Geological geological features and exploitive prospects of the geothermal field of salient type of bed rock of Niutuozen in the fault basin of North China[J]. *Bulletin of The 562 Comprehensive Geological Brigade Chinese Academy of Geological Sciences*, (7-8): 21-36(in Chinese with English abstract).