

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.002

# 雄安新区牛东断裂带碳酸盐岩热储探测及其对地热勘探的启示

汪新伟<sup>1</sup>, 郭世炎<sup>2</sup>, 高楠安<sup>1</sup>, 刘慧盈<sup>1</sup>, 王婷灏<sup>1</sup>, 魏广仁<sup>1</sup>, 雷海飞<sup>2</sup>

WANG Xinwei<sup>1</sup>, GUO Shiyan<sup>2</sup>, GAO Nan'an<sup>1</sup>, LIU Huiying<sup>1</sup>, WANG Tinghao<sup>1</sup>, WEI Guangren<sup>1</sup>, LEI Haifei<sup>2</sup>

1. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083;

2. 中石化绿源地热能开发有限公司, 河北 雄安 071800

1. Sinopec Star Petroleum Co.Ltd., Beijing 100083, China;

2. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co.Ltd., Xiong'an 071800, Hebei, China

**摘要:**雄安新区在暂不考虑开采砂岩热储地热资源的前提下, 探明碳酸盐岩热储东部边界断裂牛东断裂带的分布位置与地热资源品质, 对新区地热资源开发利用规划的编制与整体能源利用布局均有着重要意义。以雄安新区高铁片区第一口碳酸盐岩热储勘探井 D09 孔的探测数据为依据, 结合地震剖面解释成果, 分析了牛东断裂带内碳酸盐岩热储的空间展布特征、储集层物理性质与单井产能参数, 并简述其对地热勘探的指导意义。探测结果表明, 牛东断裂带的碳酸盐岩热储主要为蓟县系雾迷山组含硅质的白云岩, 分布在断裂西侧基岩宽缓背斜顶部, 层状稳定, 厚约 2 000 m, 顶板埋深 1000~1200 m, 井口水温约 70°C, 单井水量约 102 m<sup>3</sup>/h。D09 孔揭示, 在距风化壳顶部 678 m 的地层内共发育 122 个裂隙带, 累计厚度达 251.20 m, 裂隙发育率 37%, 平均孔隙度 9.26%, 裂隙发育率与平均孔隙度明显比断裂带外地热井高出 50%。D09 孔与牛东断裂带周缘地热井的地层地温梯度、地热热水化学特征、储集层导水系数等对比分析表明, 垂直断距达 7000 m 的牛东断裂带是一条导水导热的盆内隐伏型深断裂, 其限定了雄安新区碳酸盐岩热储含水系统的东部边界, 构成了西侧牛驼镇凸起的导水通道与东侧霸县凹陷油气运移的阻隔屏障, 控制了牛驼镇凸起面积达 1000 km<sup>2</sup> 的整装地热田的形成。

**关键词:**碳酸盐岩热储; 储集层物性; 单井产能; 水文地质; 牛东断裂带; 雄安

**中图分类号:** P314; P588.24<sup>+</sup>6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)01-0014-13

**Wang X W, Guo S Y, Gao N A, Liu H Y, Wang T H, Wei G R, Lei H F. Detection of carbonate geothermal reservoir in Niudong fault zone of Xiong'an New Area and its geothermal exploration significance. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42 (1): 14-26**

**Abstract:** In Xiong'an New Area, because of prohibiting the exploitation of sandstone geothermal reservoir, it is of a great significance to find out the distribution position and the resources quality of the karst geothermal reservoir of the Niudong fault zone, as an eastern boundary of the karst geothermal resources, for the compilation of geothermal resources development and utilization planning and the layout of overall energy utilization. Based on the detection data of the D09 borehole, as the first exploration well for karst geothermal reservoir in the high-speed railway area of the Xiong'an New Area, and combined with the interpretation results of seismic sections, the spatial distribution characteristics, physical properties of reservoir and single well productivity parameters of the karst geothermal reservoir in the Niudong fault zone are analyzed, and its guiding significance for geothermal exploration is also summarized. The results show that the karst geothermal reservoir in the Niudong fault zone is mainly siliceous dolomite in the Wumishan Formation of the Jixian System,

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-03-07

资助项目: 中国石化集团重点科技项目《渤海湾盆地重点地区地热资源评价与开发技术政策》(编号: JP19002)

作者简介: 汪新伟(1968-), 男, 博士, 研究员, 从事盆地构造与地热资源勘查研究。E-mail: wangxinwei.xxsy@sinopec.com

which is distributed at the top of the broad, gentle anticline of the bedrock on the west side of the fault, and is high quality geothermal heating utilization resource with the stable layers thickness of about 2000 m, the roof buried depth of 1000~1200 m, the geothermal water temperature of about 70°C and the single well production of about 102 m<sup>3</sup>/h. There are 122 fractured karst zones in the strata of 678 m from the top of the weathering crust in the D09 borehole, with the total thickness of 251.20 m, the fracture ratio of 37%, and an average porosity of 9.26%. The fracture rate and average porosity are obviously 50% higher than those of the geothermal wells out of the fault zone. A comparative analysis of geothermal gradient of the strata, geochemical characteristics of geothermal water and water-conductivity of reservoir between the D09 hole and the geothermal wells around the Niudong fault zone shows that the Niudong fault zone with a vertical fault distance of 7000 m is a deep fault of water-conducting and thermal-conducting in the basin. The fault zone defines the eastern boundary of the karst water-bearing systems in the Xiong'an New Area, constitutes a water channel for the Niutuozen uplift and a oil-gas migration barrier for Baxian depression, and results in formatting a complete geothermal field of the Niutuozen uplift with an area of 1000 km<sup>2</sup>.

**Key words:** carbonate geothermal reservoir; reservoir property; single well productivity parameters; hydrogeology; Niudong fault zone; Xiong'an

在地热研究领域,位于造山带或板块边缘的断裂带是有着特殊地质意义的水文地质体。不仅体现在深大断裂沟通地壳深部热源、形成蒸汽型甚至熔岩型地热资源方面(多吉,2003;蒋喆等,2020),也表现在断裂破碎带可以在地壳浅部起导水-贮水作用,形成带状展布的中-高温水热型地热资源(廖志杰等,1991;张云辉等,2021)。但在沉积盆地内,深大断裂多为隐伏性断裂,稳定的层状热储组成的地热异常区(或地热田)与断裂带的对应关系不明显(尹政等,2022),导致断裂对沉积盆地内地热异常区的影响研究还处于导热、导水的定性认知阶段(马致远等,2018;柯柏林等,2019),而对热储改造、热传导差异、地热田形成等方面的研究还较欠缺(王贵玲等,2017;毛小平等,2018;汪新伟等,2019)。

牛东断裂是一条发育于渤海湾盆地冀中坳陷内,并构成次级构造单元牛驼镇凸起与霸县凹陷分界的隐伏断裂,亦是一条在雄安新区范围内与油气资源、地热资源的勘探开发密切相关的重要深大断裂(陈墨香等,1990;赵贤正等,2011)(图 1)。20 世纪后期,前人针对牛驼镇凸起进行了二维地震测线勘探与地热田普查工作,并取得了牛驼镇凸起的地热异常特征与油气成藏关键因素的初步认识(陈墨香,1988;周瑞良等,1989;阎敦实等,2000;查明等,2011)。近 10 年来,中石化集团新星公司在牛驼镇凸起南部的雄县进行了大规模的地热开发,并建成华北地区首个“地热供暖无烟城”。尤其是 2017 年以来,随着雄安新区的设立,以及由中国地质调查局组织实施的雄安新区地热清洁能源勘查工作全面展开,相继在起步区(D16 与 D18 孔)、安置区(容

2、容 3 与容 5 井)等多个区带取得勘探成功(吴爱民等,2018;戴明刚等,2019),并分别在地温场特征、地热水运移、深部碳酸盐岩热储特征与资源评价等方面均取得了有益的研究成果(苏永强等,2018;杨吉龙等,2018;鲁锴等,2019;王朱亭等,2019)。但对牛东断裂与碳酸盐岩热储关系的勘探与研究一直处于空白。本次研究是雄安新区网格化地热探井部署的一部分,主要目的是探明雄安新区高铁片区的地热资源特征。因高铁片区地处牛东断裂带的边缘附近,故本文在总结前人成果的基础上,应用地震测线解释成果确定该区地热探井的部署位置与实施方案,并根据探井所获得的钻井资料与测试数据,与近年来在研究区周缘的地热勘探成果相对比,分析断裂带的碳酸盐岩热储物性特征,揭示其地热勘探意义。这对分析深大断裂对碳酸盐岩热储形成机制的影响及确定雄安新区碳酸盐岩热储的勘探边界有着重要的理论与现实意义。

## 1 地热地质背景

### 1.1 断裂带构造分段特征

牛东断裂发育于雄县县城东 4 km,全长 60 km,隐伏于厚 1000~1200 m 的新近系—第四系之下。断裂南端与牛南断层断接,从南至北断裂走向由 NNE 向逐步过渡为 NEE 向,整体近弧形展布(杨明慧等,2002a;何登发等,2018)(图 1)。由系列地震剖面解释成果可知,牛东断裂是一条主要活动于古近纪的大型伸展断层。断层面倾向 SE、倾角 50°~70°,垂直断距 7000 m,水平断距在 1000 m 以上(图 2)。根据断层走向变化与断层两盘变形样式差异,

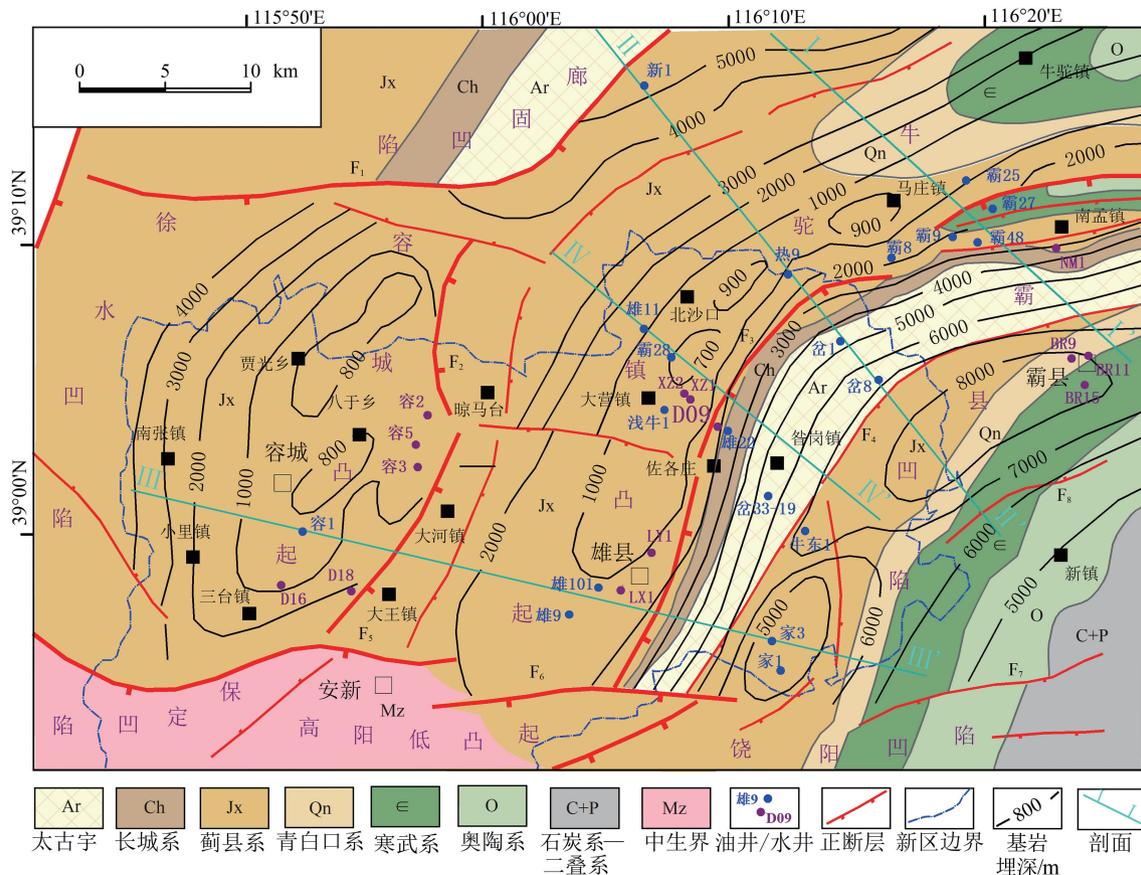


图1 雄安新区牛东断裂带前新生代地质图

Fig. 1 Pre-Cenozoic geological map of Niudong fault zone in Xiong'an New Area

F<sub>1</sub>—大兴断裂; F<sub>2</sub>—容城断裂; F<sub>3</sub>—牛东断裂前缘; F<sub>4</sub>—牛东断裂后缘; F<sub>5</sub>—安新断裂; F<sub>6</sub>—牛南断裂; F<sub>7</sub>—高家堡南断裂; F<sub>8</sub>—新镇北断裂

将牛东断裂带分为北、中、南3段(杨明慧等, 2002b)。北段主要分布在霸8井以东的霸州县南孟镇一带,走向NEE,断裂带由2~3条倾向相同的正断层组成断阶,断阶上出露的最新基岩地层为寒武系—奥陶系,东侧与断层上盘的古近系—新近系对接,并被古近系超覆(图2-a)。中段位于霸8井—佐各庄之间,走向NE,断面具有坡—坪—坡的三段式变化趋势,垂直断距与水平伸展量均达到最大值,是控制霸县凹陷发育的主要段落,上盘新生代沉积厚度达8000 m以上,下盘基岩地层翘倾幅度大,剥蚀作用强烈,断层两盘对接的地层为蓟县系/古近系(图2-b)。南段走向NNE,断裂带由数个断距较小的正断层组成,断面较陡,在下降盘发育形态较完整的基岩滚动背斜与古近纪的楔状沉积(图2-c)。

从收集的地热地质剖面对比分析可知,地温异

常与基岩凸起呈正相关(周瑞良等,1989)。牛东断裂带中段的基岩凸起最高,其1000 m深处的地层温度亦最高,达78℃,南、北两侧略低,约70℃。

## 1.2 热储类型

牛东断裂带附近主要发育砂岩孔隙型热储与碳酸盐岩溶型热储2类。

### 1.2.1 砂岩孔隙型热储

砂岩孔隙型热储包含新近系明化镇组与馆陶组。明化镇组热储广泛分布,埋藏浅、水质较好。底板埋深一般1300~2000 m,以一套河流相的陆源碎屑沉积为主,平均砂地比约30%,单层最大厚度达30 m。平均孔隙度18%~34%,渗透率 $118.17 \times 10^{-3} \sim 1252.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;富水性较好,单井涌水量一般60~80 m<sup>3</sup>/h,水温51~56℃。

馆陶组热储是目前砂岩孔隙型热储开发的主要层位,分布在牛东断裂带以东的霸州凹陷内,底板

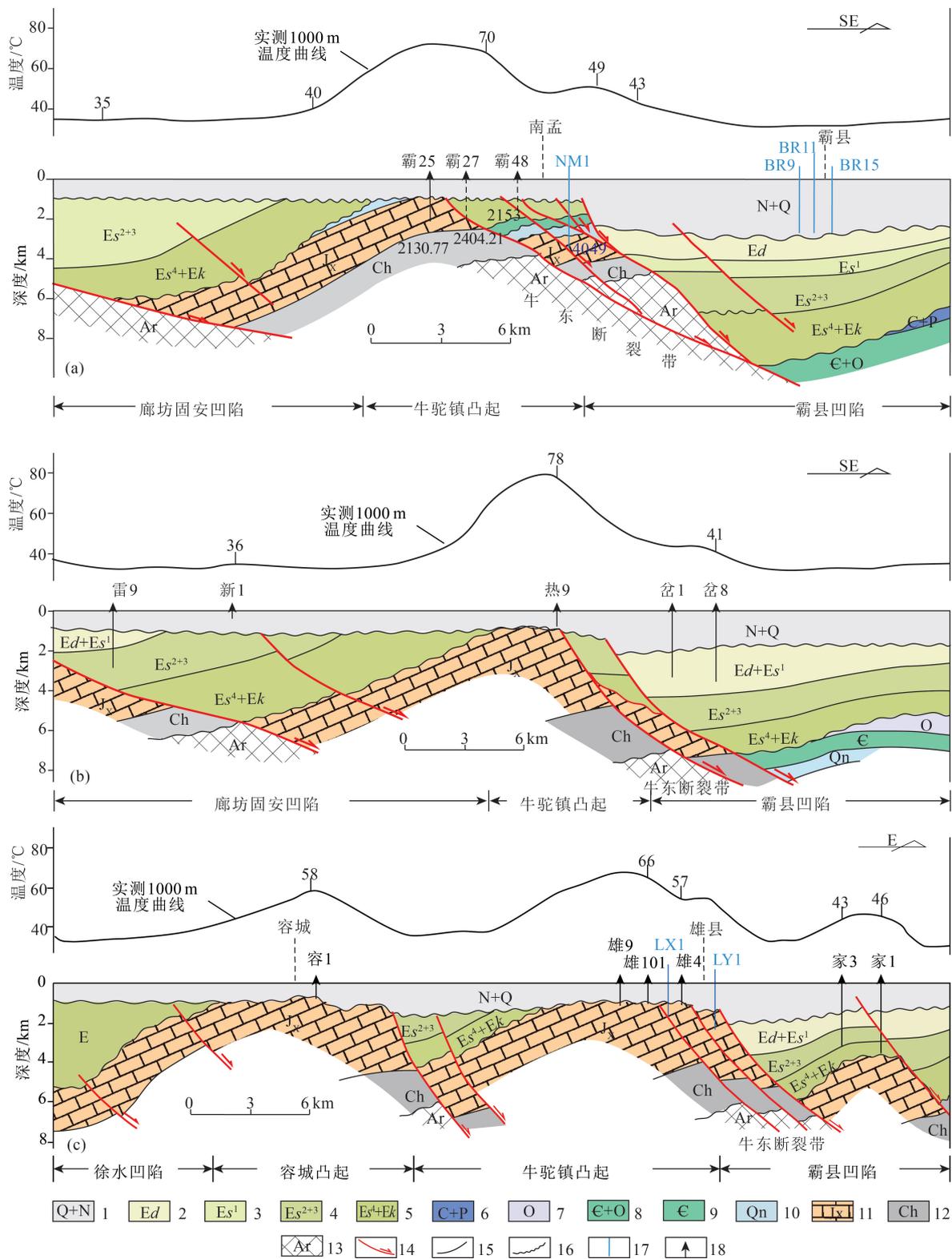


图 2 雄安新区牛东断裂带地热地质剖面(据周瑞良等,1989 修改;剖面位置见图 1)

Fig. 2 Geothermal and geological profile across Niudong fault zone in Xiong'an New Area

a—I—I'; b—II—II'; c—III—III'; 1—新近系-第四系; 2—古近系东营组; 3—古近系沙河街组一段; 4—古近系沙河街组二、三段; 5—古近系沙河街组四段+孔店组; 6—石炭系+二叠系; 7—奥陶系; 8—寒武系+奥陶系; 9—寒武系; 10—青白口系; 11—蓟县系; 12—长城系; 13—太古宇; 14—断层; 15—地层线; 16—不整合面; 17—地热井; 18—油气井

埋深一般 1600~2500 m,在断裂以西的牛驼镇凸起缺失。岩性可分为上、下 2 段,下段为粗砂岩、砂砾岩,上段主要为白色砂岩与紫红色泥岩互层。区内地层最厚达 400~500 m,平均砂地比 42%。热储层平均孔隙度为 14%~27%,渗透率  $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。单井涌水量 50~60  $\text{m}^3/\text{h}$ ,水温 60~70℃。

### 1.2.2 碳酸盐岩热储

碳酸盐岩热储分布在牛东断裂以西的牛驼镇凸起—容城凸起上,开发的主要层位是蓟县系雾迷山组。区域基岩地质图(图 1)揭示,牛驼镇凸起 80% 以上的面积出露蓟县系雾迷山组,只在向北方向的倾伏末端出现寒武系—奥陶系。雾迷山组岩性为一套约 2000 m 厚的含燧石结核、燧石条带白云岩。热储层产状受断裂与构造控制明显,顶板埋深在构造高点 800~1000 m,具有温度高、水量大、易回灌等特点(王钧等,1983;张德忠等,2018),单井涌水量 80~120  $\text{m}^3/\text{h}$ ,水温 65~85℃。本次雄安新区高铁片区的碳酸盐岩热储勘探就是确定牛东断裂内该套热储层的物性特征。

此外,位于雾迷山组之下的蓟县系高于庄组碳酸盐岩热储,已有勘探成果揭示具有良好的开发前景,可作为雄安新区未来地热探测开发的第二空间(吴爱民等,2018)(图 2)。

### 1.3 地热开发利用

碳酸盐岩热储开发主要集中在西侧牛驼镇凸起南部的雄县地区,不仅实现了雄县县城集中供暖的全覆盖,而且已成功推广至大营镇、胡家台等近 20 个自然村。截至 2019 年年底,在雄县实施地热井 102 口,建成换热站 45 座,实现供暖能力  $580 \times 10^4 \text{m}^2$ 。

砂岩孔隙型热储的开发集中在霸州凹陷中部的霸县城区。截至 2019 年年底,在霸县实施地热井 41 口,建成换热站 8 座,实现供暖能力  $158 \times 10^4 \text{m}^2$ 。

## 2 探测方法

### 2.1 地震剖面定位

预设的高铁片区地热勘探井在雄安新区地热清洁能源勘查网格化部署中编号为 D09。为查明该孔周边的地质构造特征,本文收集了研究区的 20 余条二维地震测线,并进行精细地质解释,明确了碳酸盐岩热储的空间展布规律,并以此为依据,确定了勘探井的实施方案(图 3)。主要内容包括:①该

孔的点位处于牛东断裂带分段构造的中段部位,断层走向 NE 向,断面东倾、陡立,倾角 60~70°。②断层西侧(下盘)的基岩地层为蓟县系雾迷山组—长城系,残留厚度约 2000 m,形态呈断失的宽缓背斜状,地层平缓,向西地层倾角逐步增大,达 45°左右,变化为单斜状;上覆地层为新近系明化镇组河流相碎屑岩,构成了碳酸盐岩热储的盖层;热盖层与热储层呈角度不整合接触,局部可见风化壳,凹凸不平,蓟县系顶板埋深 1000~1200 m。③断层东侧(上盘)地层为古近系湖河相泥、砂岩,厚度大于 7000 m,与断层西侧的基岩地层长城系—蓟县系对接。④从纵向投影分析,D09 孔点位于牛东断裂带的上盘,西距牛东断层上断点位置 395 m。因此,在钻井施工时,只有实施钻井轨迹向西的定向井,且靶心水平位移大于 395 m 时,才能从断层的上盘钻穿断层面,探测到断层下盘的蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储。该实施方案在实钻中取得了良好的效果。

### 2.2 地热井钻探

D09 孔由中石化集团新星公司负责完成,施工设备采用南阳二机石油装备(集团)有限公司生产的 ZJ40L 型号钻机。于 2019 年 9 月 11 日开钻,2019 年 10 月 16 日完钻,完钻层位于雾迷山组底部。该孔为方位角 295°的定向井,完钻垂深 1653.2 m,斜深 1871 m,水平位移 665.94 m。成井工艺为三开结构,按不同井径下入相应规格的国产石油无缝钢管。其中,产层滤水管采用  $\varphi 177.8 \times 9.19 \text{mm}$  N80 石油套管加工制作而成,孔隙度不小于 12%,取水段为 1122.5~1871 m。全孔岩屑录井,采取储层岩心一次。随后实施完井作业工作,包括测井、下钻具洗井、气举洗井、三落程抽水试验等。2019 年 11 月 5 日,获得了井口水温 70℃、流量 102.12  $\text{m}^3/\text{h}$  的稳定 48 h 大落程试水数据。

## 3 探测结果

### 3.1 碳酸盐岩热储物理性质

#### 3.1.1 储集层内幕

据 D09 孔录井资料,明化镇组底部灰色含砾砂岩的底界为 1119 m 深度,此后揭露的蓟县系雾迷山组岩性主要为灰色、灰褐色白云岩、硅质白云岩与泥质白云岩互层,层位对比推定为雾迷山组第三段。测井解释成果揭示,碳酸盐岩岩层的岩溶裂隙

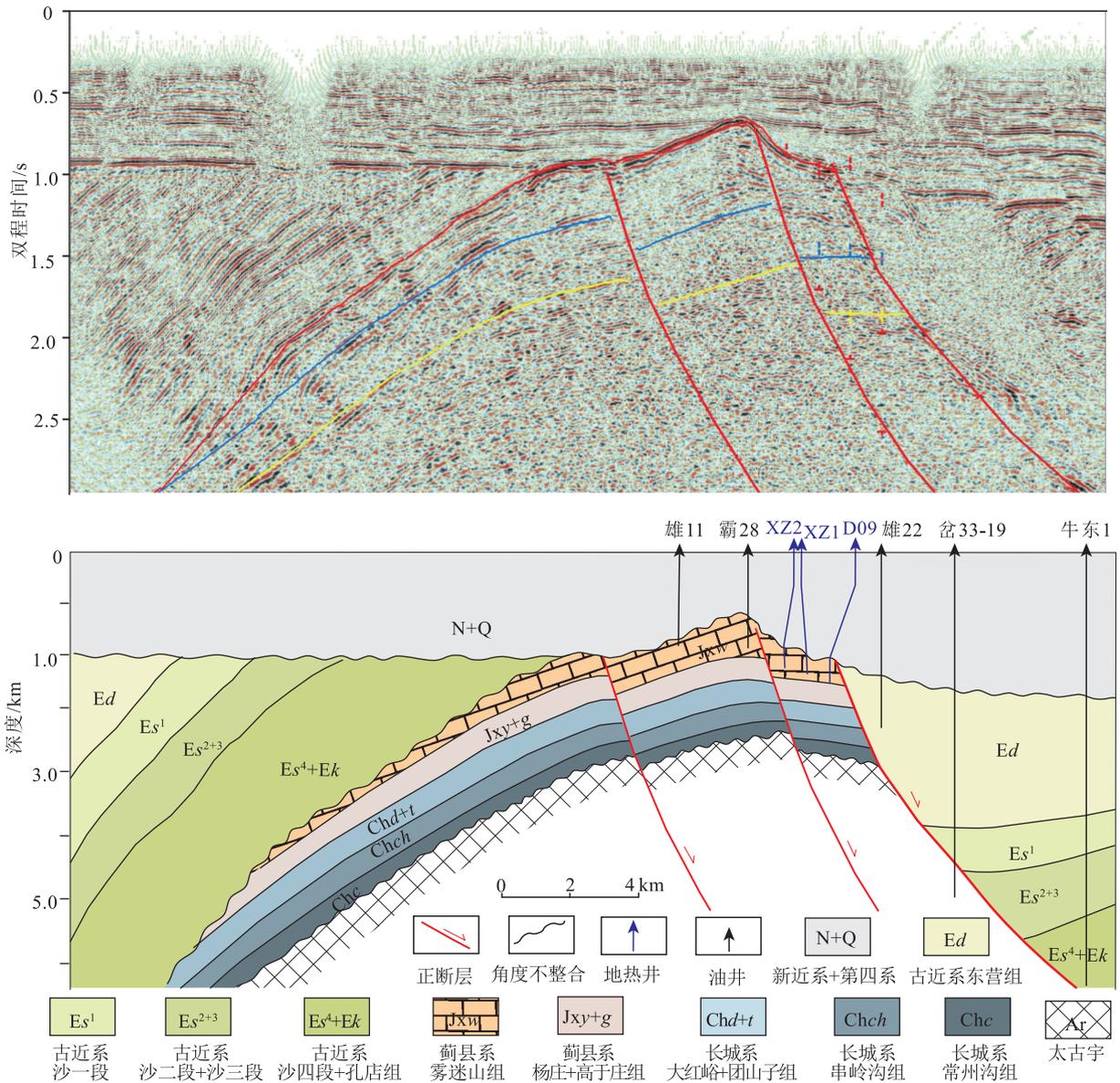


图 3 雄安新区 88838.5 地震测线地质解释(剖面位置见图 1 中 IV-IV')

Fig. 3 Geological interpretation of 88838.5 seismic survey in Xiong'an New Area

发育,在 1122.50~1871 m 斜长深度范围,共发育 122 个岩溶裂隙带,视厚度累计达 276.9 m (换算真厚度为 251.20 m),裂隙发育率高达 37%。裂隙带孔隙度 5.2%~12.6%,平均孔隙度 9.26%;渗透率 0.1~42.19 mD,平均渗透率 11.48 mD。根据孔渗条件,可划分为 41 层一类裂隙、46 层二类裂隙、35 层三类裂(图 3)。其中,一类裂隙累积厚度 115 m (换算垂直厚度为 102.81 m),平均孔隙度 11.06%,平均渗透率 24.19 mD,展示了作为优质碳酸盐岩热储的

孔渗条件(表 1)。

把 D09 孔的储层内幕特征与同一条剖面上相距约 1.6 km 的 XZ1 井、XZ2 井进行对比,可揭示牛东断裂带对碳酸盐岩热储的建设性改造作用(图 4)。XZ1 井的雾迷山组碳酸盐岩热储在 850.60~1407.90 m 深度范围发育 41 个岩溶裂隙带,视厚度累计达 129.8 m,裂隙发育率 23.29%,平均孔隙度 5.05%;XZ2 井在 781.50~1282.6 m 深度范围发育 27 个岩溶裂隙带,视厚度累计达 126 m,裂隙发育

表1 D09孔主要出水层测井解释成果  
Table 1 Well logging interpretation results of major aquifers in D09 borehole

| 层号 | 起始深度<br>/m | 终止深度<br>/m | 厚度<br>/m | 电阻率<br>$/(\Omega \cdot m^{-1})$ | 声波时差<br>$/(\mu s \cdot m^{-1})$ | 孔隙度<br>/% | 渗透率<br>/mD | 泥质含量<br>/% | 井温<br>/°C | 解释结论  |
|----|------------|------------|----------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|------------|------------|-----------|-------|
| 1  | 1132.6     | 1135.2     | 2.6      | 310.5                           | 218.7                           | 11.8      | 25.85      | 8          | 48.4      | 一类裂缝层 |
| 2  | 1136.2     | 1139.2     | 3        | 1307.4                          | 212.9                           | 9         | 22.48      | 6.6        | 47.8      | 一类裂缝层 |
| 3  | 1142       | 1143.7     | 1.7      | 4815.8                          | 220.9                           | 9.3       | 32.52      | 7          | 48.5      | 一类裂缝层 |
| 4  | 1150       | 1152.3     | 2.3      | 11682                           | 230.1                           | 9.3       | 39.79      | 2.7        | 48.3      | 一类裂缝层 |
| 5  | 1157.7     | 1161.2     | 3.5      | 5328.5                          | 215.5                           | 9.4       | 22.12      | 5          | 48.2      | 一类裂缝层 |
| 6  | 1171.2     | 1174       | 2.8      | 3760.2                          | 211.6                           | 9.5       | 34.9       | 2.5        | 49        | 一类裂缝层 |
| 7  | 1182       | 1183.6     | 1.6      | 13716                           | 207.6                           | 9.7       | 35.69      | 2          | 49.1      | 一类裂缝层 |
| 8  | 1232.5     | 1234.8     | 2.3      | 453.6                           | 209.7                           | 9.8       | 24.23      | 7.7        | 44.1      | 一类裂缝层 |
| 9  | 1235.7     | 1238       | 2.3      | 3206.8                          | 203.6                           | 10        | 27.17      | 2.2        | 43.6      | 一类裂缝层 |
| 10 | 1240.3     | 1243.8     | 3.5      | 3472.6                          | 206.3                           | 10.1      | 15.4       | 9.8        | 43.8      | 一类裂缝层 |
| 11 | 1250.8     | 1257.6     | 6.8      | 2666                            | 203.9                           | 10.1      | 18.9       | 5.3        | 45.7      | 一类裂缝层 |
| 12 | 1259.8     | 1264       | 4.2      | 4136.6                          | 199.3                           | 10.6      | 16.74      | 3.1        | 45.5      | 一类裂缝层 |
| 13 | 1266       | 1269.3     | 3.3      | 4934.2                          | 201.9                           | 10.7      | 16.66      | 5.2        | 46.4      | 一类裂缝层 |
| 14 | 1282       | 1286.3     | 4.3      | 3777.9                          | 203.3                           | 10.7      | 28.44      | 2.2        | 45.9      | 一类裂缝层 |
| 15 | 1323.2     | 1330.6     | 7.4      | 3804.6                          | 203.7                           | 10.7      | 19.13      | 3.4        | 42.4      | 一类裂缝层 |
| 16 | 1342.3     | 1345.7     | 3.4      | 1717.8                          | 219.4                           | 10.8      | 20.92      | 8.2        | 43.2      | 一类裂缝层 |
| 17 | 1348       | 1353.8     | 5.8      | 7770                            | 223.2                           | 10.8      | 36.53      | 2.3        | 44.1      | 一类裂缝层 |
| 18 | 1358.2     | 1362.2     | 4        | 7071.1                          | 233.5                           | 10.9      | 35.54      | 2.7        | 43.5      | 一类裂缝层 |
| 19 | 1364       | 1367       | 3        | 11798                           | 266.4                           | 11        | 42.19      | 4.3        | 43.5      | 一类裂缝层 |
| 20 | 1367.7     | 1369.6     | 1.9      | 7056.1                          | 231                             | 11.1      | 34.56      | 1.9        | 44.3      | 一类裂缝层 |
| 21 | 1384.1     | 1385.2     | 1.1      | 2396.6                          | 207.3                           | 11.1      | 34.22      | 2          | 43.8      | 一类裂缝层 |
| 22 | 1400.6     | 1404.2     | 3.6      | 1847.5                          | 210.3                           | 11.1      | 25.66      | 4.4        | 45        | 一类裂缝层 |
| 23 | 1412.2     | 1414.9     | 2.7      | 3884                            | 201.3                           | 11.2      | 22.07      | 2.5        | 46        | 一类裂缝层 |
| 24 | 1426       | 1429.9     | 3.9      | 4907.4                          | 218.6                           | 11.3      | 21.16      | 6          | 46.4      | 一类裂缝层 |
| 25 | 1437.8     | 1441.2     | 3.4      | 1537.9                          | 195.8                           | 11.4      | 10.16      | 4.5        | 46.2      | 一类裂缝层 |
| 26 | 1449.8     | 1451.8     | 2        | 1986.7                          | 204                             | 11.5      | 29.87      | 2.6        | 46.8      | 一类裂缝层 |
| 27 | 1455.8     | 1460       | 4.2      | 1261.5                          | 222.5                           | 11.6      | 38.81      | 5.4        | 47        | 一类裂缝层 |
| 28 | 1460.6     | 1463.6     | 3        | 1021.5                          | 202.2                           | 11.6      | 15.35      | 8.7        | 47.2      | 一类裂缝层 |
| 29 | 1467.6     | 1469.8     | 2.2      | 283.7                           | 223.7                           | 11.7      | 22.96      | 8          | 47.1      | 一类裂缝层 |
| 30 | 1474.8     | 1476.8     | 2        | 706.8                           | 228.7                           | 11.8      | 22.84      | 8.2        | 48.3      | 一类裂缝层 |
| 31 | 1477.5     | 1478.7     | 1.2      | 762.9                           | 236.7                           | 11.8      | 19.35      | 7.9        | 47.8      | 一类裂缝层 |
| 32 | 1480       | 1481.4     | 1.4      | 2165                            | 223.7                           | 11.8      | 26.97      | 4.7        | 48.9      | 一类裂缝层 |
| 33 | 1491.1     | 1493.1     | 2        | 2259.2                          | 201.8                           | 11.9      | 12.68      | 5.6        | 47.2      | 一类裂缝层 |
| 34 | 1493.8     | 1495.8     | 2        | 3499.5                          | 223.6                           | 12        | 29.05      | 4          | 48.5      | 一类裂缝层 |
| 35 | 1534.4     | 1537.1     | 2.7      | 1284                            | 202.7                           | 12        | 25.51      | 1.8        | 48.3      | 一类裂缝层 |
| 36 | 1541.8     | 1543.2     | 1.4      | 1323.7                          | 198.7                           | 12        | 13.96      | 3.9        | 48.9      | 一类裂缝层 |
| 37 | 1603.7     | 1606       | 2.3      | 1589.9                          | 194                             | 12.1      | 13.06      | 1.5        | 51.3      | 一类裂缝层 |
| 38 | 1759.9     | 1760.8     | 0.9      | 2564                            | 220.3                           | 12.3      | 13.3       | 3.6        | 56.4      | 一类裂缝层 |
| 39 | 1776.7     | 1777.9     | 1.2      | 2332.4                          | 202.7                           | 12.6      | 14.41      | 4.8        | 58.2      | 一类裂缝层 |
| 40 | 1806.4     | 1807.3     | 0.9      | 2041.5                          | 199.2                           | 12.6      | 13.24      | 2.9        | 60.9      | 一类裂缝层 |
| 41 | 1811.7     | 1812.9     | 1.2      | 2141.6                          | 203.1                           | 12.6      | 17.46      | 2.5        | 62        | 一类裂缝层 |

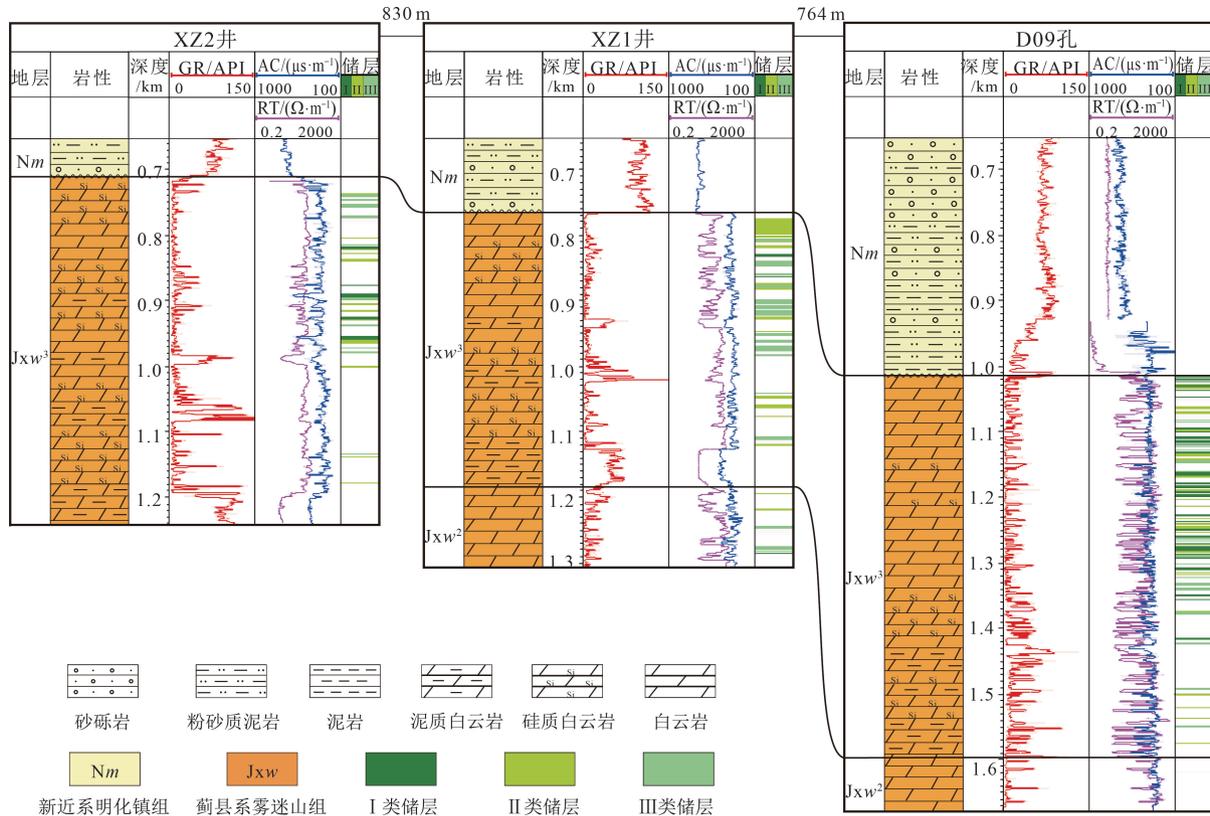


图 4 牛东断裂带 3 口地热井测井解释对比

Fig. 4 Comparison of logging interpretation of three geothermal wells in Niudong fault zone

率 25.14%，平均孔隙度 6.18%。相比较而言，D09 孔的裂隙发育率与平均孔隙度明显比 XZ1 井、XZ2 井的相应值高出 50%。

### 3.1.2 温度-深度曲线

热储温度-深度曲线反映了储集层段热流传递速度的大小，即地温梯度愈小，热流在储集层内的传递速度愈快，储集层内的温差变小；而上覆盖层的温度-深度曲线反映出盖层热封盖性能的优劣，即地温梯度越大，盖层内热流的聚热作用越强，地层增温率变大。D09 孔的温度-深度曲线呈现出差异明显的二段线性增温结构(图 5-a)：区域盖层新生界内的地温梯度为 4.93℃/100 m，大于华北平均地温梯度 3.0℃/100 m 近 64.3%，热封盖性能较好；热储层雾迷山组的地温梯度为 2.0℃/100 m，小于华北平均地温梯度 3.0℃/100 m 近 33.3%，反映了较快的热传导作用。

对比分析 D09 孔与 XZ1 井、XZ2 井温度-深度曲线的异同点(图 5)，可以得到以下 3 点认识：① XZ1 井、XZ2 井温度-深度曲线分布与 D09 孔类

似，呈典型的二段式线性增温结构，反映了牛东断裂带中段的热传递方式以热传导为主的特点；②位于构造更高部位的 XZ1 井热储层、热盖层的地温梯度为约 6.24℃/100 m、1.34℃/100 m(图 5-b)，XZ2 井为 7.28℃/100 m、1.23℃/100 m(图 5-c)，与 D09 孔的相应数据对比，反映 XZ1 井、XZ2 井在热储层段有更快的传热作用，而在热盖层段有更好的热封盖性能，体现为 XZ2 井的雾迷山组热储层埋藏较浅而井口水温略高；③D09 孔的温度曲线在进入雾迷山组热储时，呈明显的“左凹型”，并随着深度的增加，地层温度亦恢复到线性增温回归线，推测为低温钻井液的渗入引起漏失地层温度下降的结果，这也是断裂带碳酸盐岩储层裂隙率较发育的一个旁证(图 5-a)。

### 3.1.3 地热水水化学特征

D09 孔的地热水水化学类型按舒卡列夫分类(水中主要阴、阳离子含量大于 25% 的顺序排列命名)为 Cl-Na 型(图 6；表 2)，矿化度 2764 mg/L，pH

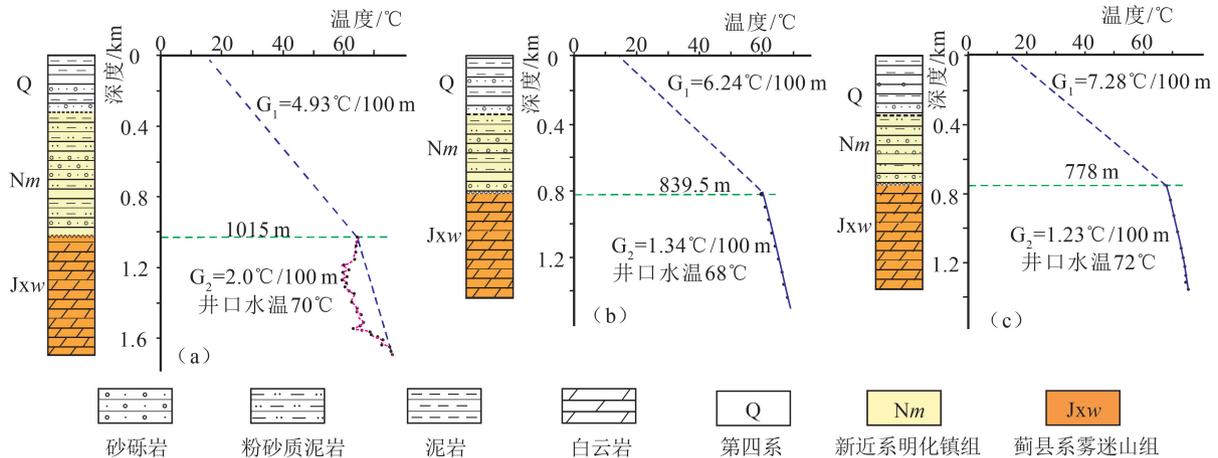


图5 牛东断裂带地热井温度-深度曲线(井位位置见图1)

Fig. 5 Temperature-depth curves of the geothermal wells in Niudong fault zone

a—D09孔;b—XZ1井;c—XZ2井

值 7.59, 属弱碱性、微咸水。其中, 主要离子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  含量分别为 876.1 mg/L、1208 mg/L。地热水因矿化度、氟化物、汞等超标不宜作生活饮用、渔业养殖与农业灌溉, 但富含锂、氟、钡等矿物质, 具有较好的医疗保健作用, 适宜洗浴和医疗用水。

D09孔地热水的水化学特征与同位于断裂中段的XZ1井、XZ2井基本一致, 其矿化度大小与水化学类型反映了起源于大气降水的地热水运移距离较长、水交替滞缓、整体较封闭的水文地质环境

(张保健等, 2015)。其井口水温为 68~72°C, 属低温地热资源热储。采用 Na/K 温标计算出热储温度为 148~155°C, 表明地热水的循环深度达到 4000 m 及以上。

### 3.2 地热井产能参数

#### 3.2.1 涌水量-降深曲线

本次 D09 孔的抽水试验结果见表 3 所示。其中, 初始静止水位 121.40 m, 小、中、大落程获得的井口流量(即总涌水量  $Q$ )分别为 63.65  $\text{m}^3/\text{h}$ 、79.3  $\text{m}^3/\text{h}$ 、102.12  $\text{m}^3/\text{h}$ , 相应的降深( $S$ )分别为 6.9 m、13.75 m、22.9 m, 由此折算出的单位涌水量( $q$ )分别为 9.22  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^{-1})$ 、5.76  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^{-1})$ 、4.46  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^{-1})$ 。从这 3 组数据拟合出的涌水量-降深曲线方程(图 7)可以看出: ①  $Q-S$  曲线基本上为直线, 表明该井口的地热水来自于富水性较好的承压含水层, 周缘热储层内地下水的运动状态保持层流, 总涌水量随着降深的增加呈线性增加(图 7-a), 外推降深 50 m 时最大出水量可超 160  $\text{m}^3/\text{h}$ 。②  $q-S$  曲线近似为指数为负 ( $a = -0.61$ ) 的幂函数, 即图像在区间  $(0, +\infty)$  上是减函数, 表现为单位涌水量随降深的增加而加速递减(图 7-b)。

#### 3.2.2 渗透系数与影响半径

地热井的渗透系数( $K$ )和影响半径( $R$ )是井口流量( $Q$ )、降深( $S$ )、含水层厚度( $M$ )与抽水井半径( $r$ )的函数, 通常采用裘布依公式( $K = (0.366 Q * \text{Lg}(R/r))/M * S$ )和吉哈尔特公式( $R = 10 S * K^{1/2}$ )选

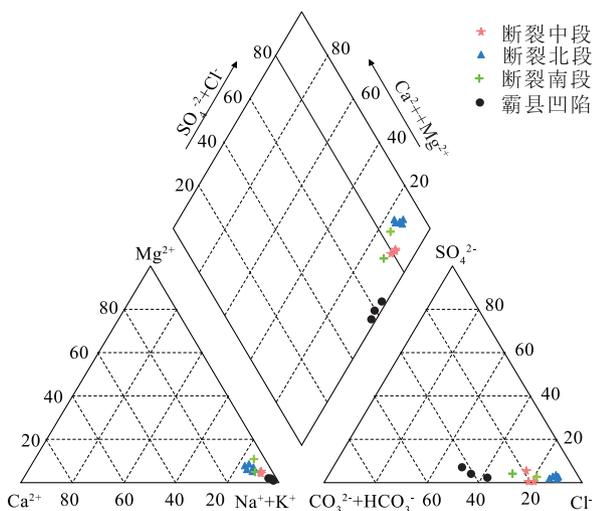


图6 牛东断裂带岩热储典型地下水类型 Piper 图

Fig. 6 Piper diagram of typical hydrochemical types of karst geothermal reservoirs in Niudong fault zone

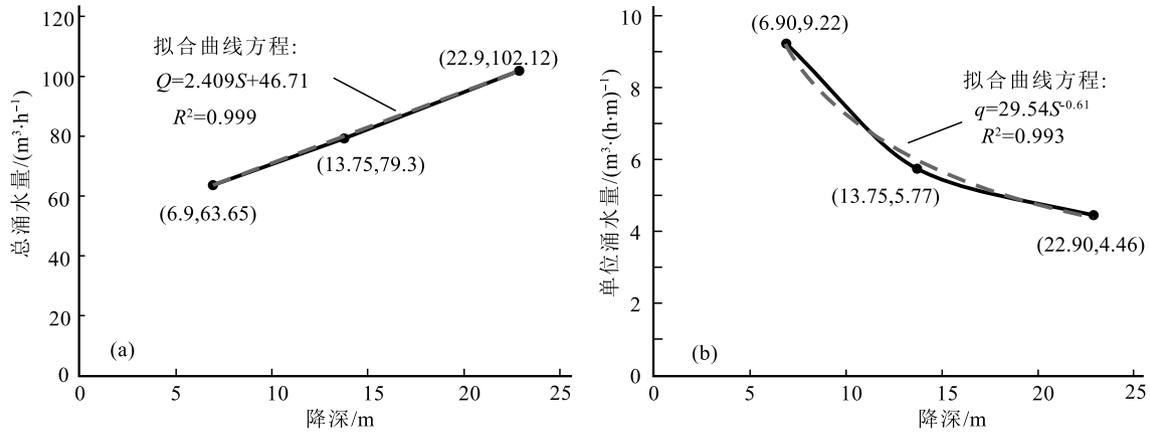


图 7 D09 孔涌水量-降深曲线

Fig. 7 Water output-level drop depth curve of D09 borehole

a—总涌水量-降深(Q-S)曲线;b—单位涌水量-降深(q-S)曲线

表 2 牛东断裂带及附近地热井岩溶水水化学分析数据

Table 2 Data of karst water chemical analysis of the geothermal wells in Niudong fault zone and nearby area

| 序号 | 井名    | 取水段深度/m         | 层位  | 静水埋深/m | 水温/°C | 流量/(m³·h⁻¹) | TDS/(mg·L⁻¹) | pH   | K⁺    | Na⁺     | Ca²⁺  | Mg²⁺  | Cl⁻     | SO₄²⁻ | HCO₃⁻  | 备注   |
|----|-------|-----------------|-----|--------|-------|-------------|--------------|------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|--------|------|
|    |       |                 |     |        |       |             |              |      |       |         |       |       |         |       |        |      |
| 1  | D09   | 1122.5~1871     | Jxw | 121.40 | 70    | 102.12      | 2764         | 7.59 | 46.22 | 876.1   | 41.1  | 20.38 | 1208    | 3.22  | 474    | 断裂中段 |
| 2  | XZ1   | 839.5~1420      | Jxw | 123.33 | 68    | 120.1       | 2627         | 7.64 | 45.57 | 804.4   | 33.73 | 25.17 | 1127    | 3.49  | 508    |      |
| 3  | XZ2   | 778~1350        | Jxw | 131.20 | 72    | 121         | 2810         | 7.42 | 46.69 | 878.8   | 39.64 | 24.46 | 1132    | 103.4 | 501.8  |      |
| 4  | NM1   | 3246~4049       | Jxw | 122    | 100   | 119.30      | 3412         | 7.86 | 60.03 | 992.08  | 81.56 | 51.83 | 1707    | 2.91  | 395.0  | 断裂北段 |
| 5  | 霸 9   | 2668~2718.8     | Jxw |        |       |             | 2949         |      | 76.89 | 1270.8  | 85.52 | 53.08 | 1215    | 14.75 | 235.92 |      |
| 6  | 霸 25  | 1043.29~1098.53 | Jxw |        |       |             | 2796         |      | 57.0  | 1244    | 86.67 | 61.51 | 1152    | 0     | 246.05 |      |
|    |       | 1725.5~1756.21  | Jxw |        |       |             | 2826         |      | 28.26 | 1271.14 | 87.6  | 56.52 | 1155.83 | 6.49  | 251.23 |      |
|    |       | 1756.21~1801.35 | Jxw |        |       |             | 2826         |      | 28.26 | 1271.14 | 87.6  | 56.52 | 1155.83 | 5.65  | 251.51 |      |
| 7  | 雄 101 | 1035~1183       | Jxw |        |       |             | 2938         |      | 75.98 | 1255.82 | 48.48 | 88.73 | 1065.32 | 40.54 | 363.14 | 断裂南段 |
| 8  | LY1   | 1046~1500       | Jxw | 79     | 69    | 127         | 2935         | 7.43 | 50.3  | 851.4   | 55.23 | 24.16 | 1113    | 79.08 | 676.5  |      |
| 9  | BR11  | 1943.4~2502.1   | Ng  | 100.3  | 67    | 74.66       | 1562         | 8.16 | 3.92  | 486.00  | 6.63  | 0.64  | 498.9   | 26.53 | 488.6  |      |
| 10 | BR9   | 1615.7~2490     | Ng  | 89.05  | 62    | 84          | 1348         | 8.39 | 3.01  | 410.50  | 5.46  | 0.67  | 336.1   | 62.54 | 486.01 | 霸州凹陷 |
| 11 | BR15  | 1973.6~2781.4   | Ng  | 132    | 68    | 64.11       | 1617         | 8.49 | 5.10  | 503.50  | 9.86  | 0.99  | 450.6   | 43.85 | 548.22 |      |

注:除样品 5、6、7 据曹新来(1989)外,其余样品全部为地热井封闭采灌循环系统下的地热水水样;样品的测试分析工作委托自然资源部济南矿产资源监督检测中心完成;Jxw—蓟县系雾迷山组;Ng—新近系馆陶组

表 3 D09 孔抽水试验结果参数

Table 3 Pumping test results of D09 borehole

| 落程  | 流量 Q/(m³·h⁻¹) | 静水位/m  | 降深 S/m | 含水层厚度 M/m | 单位涌水量 q/(m³·(h·m)⁻¹) | 井半径 r/m | 渗透系数 K/(m·d⁻¹) | 影响半径 R/m | 导水系数 T/(m²·d⁻¹) |
|-----|---------------|--------|--------|-----------|----------------------|---------|----------------|----------|-----------------|
| 小落程 | 63.65         | 121.40 | 6.9    | 251.2     | 9.22                 | 0.0889  | 0.9252         | 66.37    | 232.42          |
| 中落程 | 79.3          | 121.40 | 13.75  | 251.2     | 5.76                 | 0.0889  | 0.6693         | 112.49   | 168.13          |
| 大落程 | 102.12        | 121.40 | 22.9   | 251.2     | 4.46                 | 0.0889  | 0.4937         | 160.91   | 124.03          |

代求出。本文采用 Matlab 软件编程,运用多项式代数方程求解函数,求出小、中、大落程抽水试验下的渗透系数分别为 0.92 m/d、0.67 m/d、0.49 m/d,属中等偏弱的透水层结构。相应计算出的影响半径分别为 66.37 m、112.49 m、160.91 m,导水系数( $T=K \cdot M$ )分别为 232.42 m<sup>2</sup>/d、168.13 m<sup>2</sup>/d、124.03 m<sup>2</sup>/d(表 3),具中等偏好的导水能力。

#### 4 对地热勘探的启示

##### 4.1 限定了雄安新区碳酸盐岩热储含水系统的东部边界

雄安新区在暂不考虑开采砂岩热储地热资源的前提下,碳酸盐岩热储的开采边界在平面上的厘定,对地热资源开发利用规划的制定和新区整体能源利用的布局有重要意义。由该区的地震剖面解释成果可知(图 2),牛东断裂带新生代以来的伸展断距超过 7000 m,使原来统一的、呈“背形”状的碳酸盐岩热储含水系统被分割,断裂带东侧的碳酸盐岩热储因埋藏太深失去了经济开采价值。因此,地震剖面揭示出的牛东断裂带分段构造走向变化的平面位置(由 NNE 向至 NEE 向转化、总体呈弧形展布),限定了碳酸盐岩热储开发利用的地理边界。综合勘探成果表明,牛东断裂带的蓟县系雾迷山组热储顶板埋深较浅(1000~1200 m)、井口水温高(约 70℃)、单井水量大(约 120 m<sup>3</sup>/h),是优质的地热供暖利用资源。但断裂带沿走向的构造变形样式差异明显、断面陡立、上下两盘的落差大(图 2),且凸起带上的蓟县系顶面风化壳凹凸不平、地层产状变化较快(图 3),给靶区的选定和钻井的施工增添了难度,勘探风险较高。

同时,牛东断裂带亦阻挡了西侧碳酸盐岩热储含水系统与东侧砂岩热储含水系统的水力联系。这一点可从两侧地热水的水化学特征差异清晰地反映出来(表 2;图 6)。霸县凹陷内馆陶组砂岩热

储的地热水水化学类型为 HCO<sub>3</sub>·Cl-Na 型,矿化度 1300~1600 mg/L;而牛驼镇凸起内碳酸盐岩热储的地热水水化学类型为 Cl-Na 型,矿化度为 2800~3000 mg/L。二者对比表明,牛东断裂带对两侧不同热储类型含水系统的分隔作用十分明显,西侧碳酸盐岩热储的地热水比东侧砂岩热储的地热水具有更封闭的水文地质环境与更成熟的水化学类型。

##### 4.2 形成了西侧牛驼镇凸起碳酸盐岩热储由北向南的导水通道

对于断面西侧牛驼镇凸起的碳酸盐岩热储,牛东断裂对碳酸盐岩储层的改造作用及其构造演化控制的多期岩溶作用(由储盖组合蓟县系雾迷山组/新近系明化镇组之间的地层缺失揭示),使断面西侧牛东断裂带内的碳酸盐岩热储形成了一个纵横相连、水力畅通的连通体,为由北向南运移的地热水提供了良好的导水通道(Wang et al., 2013)。主要有两方面的证据。

(1)在储集层发育特征方面:从 D09 孔获取的储层岩心样品观测可以看出,在不同的储集层段,顺层发育密密麻麻的小溶蚀孔洞,成带成群出现。同时,在垂直层理方向上,发育众多次级构造裂缝,把这些大小不等的孔洞连在一起,形成一个“孔洞缝”三维交错的块状储集体,具有良好的导水能力。表现为断裂带上 D09 孔的小、中、大 3 个落程的导水系数分别为 232.42 m<sup>2</sup>/d、168.13 m<sup>2</sup>/d、124.03 m<sup>2</sup>/d(表 3),而断裂带外 1.6 km 处 XZ1 井的小、中、大 3 个落程的导水系数分别为 102.85 m<sup>2</sup>/d、98.43 m<sup>2</sup>/d、111.86 m<sup>2</sup>/d(表 4)。二者相比,D09 孔 3 个落程的导水系数分别比 XZ1 井多出 126%、70.8%、10.9%。

(2)在地热水水化学特征方面:平面上,位于牛东断裂带北、中、南 3 段不同构造部位,南北相距约 60 km 范围内的地热水,水化学类型相同(均为 Cl-Na

表 4 XZ1 井抽水试验结果参数  
Table 4 Pumping test results of XZ1 borehole

| 落程  | 流量<br>Q/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 静水位/m  | 降深 S/m | 含水层<br>厚度 M/m | 单位涌水量<br>q/(m <sup>3</sup> ·(h·m) <sup>-1</sup> ) | 井半径<br>r/m | 渗透系数<br>K/(m·d <sup>-1</sup> ) | 影响半径<br>R/m | 导水系数<br>T/(m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |
|-----|--|--------|--------|---------------|---|------------|--------------------------------|-------------|--|
| 小落程 | 60.05                                      | 123.33 | 11.99  | 152.6         | 1.39  | 0.0889     | 0.674                          | 98.42       | 102.85                                       |
| 中落程 | 90.16                                      | 123.33 | 20.19  | 152.6         | 1.24  | 0.0889     | 0.645                          | 162.13      | 98.43  |
| 大落程 | 120.1                                      | 123.33 | 24.49  | 152.6         | 1.36  | 0.0889     | 0.733                          | 209.69      | 111.86                                       |

型)、矿化度变化幅度小(2800~3000 mg/L,变化幅度小于10%)、酸碱度一致(pH值7.5~8.0,弱碱性),且6项离子百分比毫克当量相似(表2);纵向上,针对同一钻孔——霸25井内不同深度的地热水,测试分析数据也显示出相同的结论(曹新来,1989)(表2)。这些数据分析表明,牛东断裂带(乃至整个牛驼镇凸起)雾迷山组热储的地热水是连通的,属同一个水动力系统(吴爱民等,2018)。

#### 4.3 构建了东侧霸县凹陷油气运移的阻隔屏障

牛东断裂带对于东侧霸县凹陷这个生烃凹陷来说,阻隔了成熟液态烃向构造高地——牛驼镇凸起的运移。首先,从断裂两盘岩石的对接关系分析,牛东断裂带上盘(东侧霸县凹陷)与下盘(西侧牛驼镇凸起)碳酸盐岩热储段对接的地层为泥岩、砂泥岩等软弱塑性较强的岩层,断层面东侧的岩层破碎较少,裂隙小、延伸性差、被充填程度高,断层封闭程度高,既阻止了西侧碳酸盐岩热储含水系统向东侧的排泄,也屏蔽了东侧生烃凹陷的成熟液态烃向牛驼镇凸起的运移与集聚。其次,从勘探结果可以证实,断裂东侧霸县凹陷内发育的牛东1井潜山型油气藏(赵贤正等,2011),是以霸县凹陷巨厚的沙四段-孔店组泥岩为中等—好烃源岩、以蓟县系雾迷山组碳酸盐岩为储层的超深层油气藏,井深6027 m;而断裂西侧碳酸盐岩热储地热井D09孔、XZ1井与XZ2井中未见残存的液态烃与天然气。

#### 4.4 控制了西侧牛驼镇凸起整装优质地热田的形成

已有研究表明,牛驼镇地热田的区域热流值高达80~100 mW/m,远高于华北地区的平均背景值61.5 mW/m(常健等,2016)。许多学者把其成因机制归结为在新生代岩石圈减薄(至40~60 km)的构造背景下牛东断裂带的“导热作用”(周瑞良等,1989;庞忠和等,2015)。本次的探测成果也说明了碳酸盐岩储层内这种“热对流”对地热异常的贡献。断裂带中段D09孔与其紧临的XZ1井、XZ2井储层内的地温梯度(为1.2~2.0°C/100 m)远小于平均值(3.0°C/100 m),即是对流传热与传导传热相叠加所导致的热量快速传递的结果(图5)。D09孔的碳酸盐岩热储顶面岩溶裂隙发育(图5-a),给相对高温的承压水向上排泄创造了条件。更有利的证据是,据收集的牛东断裂带南段附近的LX1井资料(位置见图1),取水段980~1720 m之间地层温度

的变化范围为86.2~87.2°C,反映了局部有水热对流的存在。

尽管如此,本文强调的是,岩溶裂隙在横向上发育的非均质性、纵向上裂隙发育强度的差异性,使牛东断裂带在3个构造分段内的导水、导热作用均有较大不同,并未形成区域性的地热水横向流动与强烈的水热对流。因此,牛驼镇地热田的主控传热方式为热传导,其地热异常的主要成因在于牛东断裂带的同生正断作用使牛驼镇凸起的高热导率基岩隆起幅度达7000 m(Cermark et al., 1989;熊亮萍等,1988)。沉积盆地内高热导率基岩的巨大埋深高差造就了热导率在横向上与纵向上的不均匀性,凹陷区新生界的热阻远大于凸起区基岩的热阻,引起周缘凹陷区(如霸县凹陷、廊固凹陷等)的热流在向地壳浅部热传导过程中逐步分流,并在凸起带聚集,在盖层的热封盖作用下形成地热异常区,即所谓的“热折射效应”(熊亮萍等,1984)。主要证据在于,牛驼镇凸起顶部的地热异常比牛东断裂带更高,即基岩凸起幅度愈大,地热异常愈高。如凸起斜坡带XZ2井热储盖层的增温率比D09孔快(7.28°C/100 m, >4.93°C/100 m)、地热水的井口温度亦高(72°C, >70°C),而在凸起顶部的浅牛1井更高,盖层的地温梯度为12.61°C/100 m,井口水温达75°C(周瑞良等,1989)。

综上所述,隐伏的深大断裂牛东断裂是一条导水导热断裂,其对地热田的贡献不是形成了沿断裂带分布的带状异常区,而是控制了牛驼镇凸起这个面积达1000 km<sup>2</sup>的整装地热田的形成,最高的地热异常位于凸起带的顶部(Wang et al., 2020)。

## 5 结 论

(1)牛东断裂带的碳酸盐岩热储主要为蓟县系雾迷山组含硅质的白云岩,主要分布在断裂西侧的基岩凸起带上,顶板埋深较浅(1000~1200 m)、井口水温高(约70°C)、单井水量大(约120 m<sup>3</sup>/h),是优质的地热供暖利用资源。但断裂带断面陡立、地层产状变化较快,勘探风险较高。

(2)牛东断裂带上的D09孔在距顶部风化壳678 m的地层内共发育122个岩溶裂隙带,累计厚度达251.20 m,裂隙发育率高达37%,平均孔隙度9.26%;其裂隙发育率与平均孔隙度比断裂带外XZ1井、XZ2井的相应值高出50%。

(3)牛东断裂带的热传递方式具明显的分段式线性结构,反映了储集层热流快速的热传递作用与盖层内良好的热封盖性能。地热水水化学特征映射出地热水运移距离较长、水交替滞缓、整体较封闭的水文地质环境,地热井的总涌水量随着降深的增加呈线性增加,整体具中等偏好的导水能力。

(4)牛东断裂带呈弧形展布的断裂带分段构造特征限定了雄安新区碳酸盐岩热储含水系统的东部勘探边界,同时,断层面两侧的不同变形特征分别构成了西侧牛驼镇地热田的导水通道与东侧霸县凹陷成熟液态烃向上运移的阻隔屏障;其新生代同生正断层作用导致的高达7000 m的基岩隆升幅度,是控制牛驼镇凸起整装地热田形成的主要因素。

**致谢:**D09孔井位的确定得到了中石化绿源地热能开发有限公司卢星辰专家的帮助,组织相关科研人员多次现场讨论才最终成型;此外,审稿专家对本文的修改提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- Cernmark V, Rybach L. Vertical distribution of heat production in the continental Crust[J]. Tectonophysics, 1989, 159: 217-230.
- Wang S F, Pang Z H, Liu J R, et al. Origin and evolution characteristics of geothermal water in the Niutuozhen geothermal field, north China plain[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(6): 891-902.
- Wang X W, Mao X, Mao X P, et al. Characteristics and classification of the geothermal gradient in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain, China[J]. Math Geosci., 2020, 52(6): 783-800.
- 常健, 邱楠生, 赵贤正, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1003-1016.
- 曹新来. 容1雄101井地质和人文地质的研究[J]. 山西地震, 1989, 3: 39-42.
- 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- 陈墨香, 汪集暘, 汪缙安, 等. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制[J]. 地质学报, 1990, 64(1): 80-91.
- 戴明刚, 汪新伟, 刘金侠, 等. 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, 2019, 54(1): 176-191.
- 多吉. 典型高温地热系统-羊八井地热田基本特征[J]. 中国工程科学, 2003, 5(1): 42-47.
- 何登发, 崔永谦, 单帅强, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的三维地质结构特征[J]. 地质科学, 2018, 53(1): 1-24.
- 蒋喆, 聂凤军, 赵元艺, 等. 冰岛区域地质及矿产资源特征[J]. 地质通报, 2020, 39(5): 755-764.
- 柯柏林, 林天懿, 李文, 等. 北京西山谷积山背斜地热系统成因模式及远景区预测[J]. 地质通报, 2019, 38(8): 1378-1385.
- 廖志杰, 沈敏子, 过帼颖. 云南腾冲热海热田的热储特性[J]. 地质学报, 1991, 1: 73-85.
- 鲁锴, 鲍志东, 季汉成, 等. 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[J]. 古地理学报, 2019, 21(6): 886-898.
- 马致远, 吴敏, 郑会菊, 等. 对关中盆地腹部深层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 富集主控因素的再认识[J]. 地质通报, 2018, 37(2/3): 487-495.
- 毛小平, 汪新伟, 李克文, 等. 地热田热量来源及形成主控因素[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4256-4267.
- 庞忠和, 胡圣标, 王社教, 等. 地热系统与地热资源[C] // 汪集暘, 等. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社, 2015: 257-372.
- 张云辉, 李晓, 徐正宣, 等. 川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 46-53.
- 苏永强, 李郡. 雄安新区地热资源评价与开发应用潜力分析[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(4): 62-67.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1074-1085.
- 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 华北中、新生代沉积盆地的地温分布及地热资源[J]. 地质学报, 1983, 3: 304-316.
- 汪新伟, 王婷源, 张瑄, 等. 太原盆地西温庄地热田的成因机制[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1042-1056.
- 王朱亭, 张超, 姜光政, 等. 雄安新区现今地温场特征及成因机制[J]. 地球物理学报, 2019, 62(11): 4313-4322.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等. 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, 2018, 39(5): 523-532.
- 熊亮萍, 张菊明. 热流的折射和再分配的数学模拟[J]. 地质科学, 1984, 4: 455-454.
- 熊亮萍, 张菊明. 华北平原地温梯度与基底构造形态关系[J]. 地球物理学报, 1988, 31(2): 146-155.
- 阎敦实, 于英太. 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, 2000: 1-179.
- 杨吉龙, 柳富田, 贾志, 等. 河北牛驼镇与天津地热水化学和氢氧同位素特征及其环境指示意义[J]. 地球学报, 2018, 39(1): 71-78.
- 杨明慧, 刘池洋, 杨斌谊, 等. 冀中坳陷古近纪的伸展构造[J]. 地质论评, 2002a, 48(1): 58-67.
- 杨明慧, 刘池洋, 孙冬胜, 等. 冀中坳陷的伸展构造系统及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2002b, 26(2): 113-120.
- 尹政, 柳永刚, 张旭儒, 等. 张掖盆地地热资源赋存特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 50: 1-11.
- 查明, 尉亚民, 高长海, 等. 牛驼镇凸起南段潜山勘探潜力分析[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 10-14.
- 张保健, 高宗军, 张凤禹, 等. 华北盆地地下水热水的水动力条件及水化学响应[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 217-226.
- 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等. 中国东部超深超高温碳酸盐岩潜山油气藏的发现及关键技术——以渤海湾盆地冀中坳陷牛东1潜山油气藏为例[J]. 海相油气地质, 2011, 16(4): 1-10.
- 张德忠, 马云青, 苏永强. 河北平原地热流体可采量计算方法及岩溶热储分布规律研究[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 78-85.
- 周瑞良, 刘琦胜, 张晶, 等. 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, 1989, 第7、8号: 21-36.