

doi: 10.12029/gc20201230002

高楠安,汪新伟,梁海军,杜利,毛翔,罗璐. 2023. 冀鲁豫三省交界处临清坳陷大名次凹陷地热系统成因模式及开发潜力[J]. 中国地质, 50(4): 1149-1162.

Gao Nan'an, Wang Xinwei, Liang Haijun, Du Li, Mao Xiang, Luo Lu. 2023. Genetic mechanism of geothermal system in Daming Sag, Linqing Depression in the junction of Hebei, Shandong and Henan Provinces and its exploration potential[J]. Geology in China, 50(4): 1149-1162(in Chinese with English abstract).

## 冀鲁豫三省交界处临清坳陷大名次凹陷 地热系统成因模式及开发潜力

高楠安<sup>1,2</sup>,汪新伟<sup>1,2</sup>,梁海军<sup>1,2</sup>,杜利<sup>1,2</sup>,毛翔<sup>1,2</sup>,罗璐<sup>1,2</sup>

(1. 中国石化集团新星石油有限责任公司,北京 100083;2. 中国石化地热资源开发利用重点实验室,北京 100083)

**摘要:**【研究目的】建立地热系统的成因模式对地热田地热资源量评价以及后期有利区带的优选有着重要指导作用。大名次凹陷为渤海湾盆地临清坳陷馆陶凸起南端的一个次一级构造单元,其馆陶组砂岩热储可以构成一套完整的地热系统。【研究方法】本文结合前人研究成果和区内地热钻井资料,通过对临清坳陷大名次凹陷地热系统“源、储、通、盖”主要地质因素分析研究,建立了研究区地热系统的概念模型,并在此基础上开展了地热资源量评价。【研究结果】馆陶组热储层在区内分布均一,底板埋深在 1550~2000 m,储层厚度在 268~324 m,孔隙度介于 14%~32%,储厚比最高可达 70%。区内钻遇至馆陶组的地热井,地热水井口水温多在 54~60℃,水化学类型以 Cl·SO<sub>4</sub>-Na 为主。上部沉积的第四系和明化镇组,地温梯度在 22~60℃/km,构成了良好的盖层。地热系统热源主要来自于新生代断陷盆地背景下的高大地热流值,约 52~57 mW/m<sup>2</sup>,南部临漳一大名断裂和东部冠县断裂为其深部热流向上运输的有利通道。热储整体接受来自西部太行山和东部鲁西南隆起的大气降水补给,经深部热传导和局部热对流增温后,富集于热储之中。【结论】馆陶组砂岩地热系统资源量超过 127.42×10<sup>8</sup> GJ,每年可开采地热资源量为 31.86×10<sup>6</sup> GJ,折合标煤 1.09×10<sup>6</sup> t。年开采地热资源量可满足超 3.14×10<sup>7</sup> m<sup>2</sup> 的供暖面积,开发潜能较大。

**关键词:**地热系统;成因模式;资源量评价;供热面积;大名次凹陷;地热调查工程

**创新点:**(1)在厘清临清坳陷大名次凹陷地热系统“源、储、通、盖”主要地质因素特征的基础上,首次建立了其地热系统成因模式;(2)馆陶组砂岩地热系统资源量超过 127.42×10<sup>8</sup> GJ,每年可开采地热资源量为 31.86×10<sup>6</sup> GJ,折合标煤 1.09×10<sup>6</sup> t,整体开发潜能较大。

中图分类号: P531 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1149-14

## Genetic mechanism of geothermal system in Daming Sag, Linqing Depression in the junction of Hebei, Shandong and Henan Provinces and its exploration potential

GAO Nan'an<sup>1,2</sup>, WANG Xinwei<sup>1,2</sup>, LIANG Haijun<sup>1,2</sup>, DU Li<sup>1,2</sup>, MAO Xiang<sup>1,2</sup>, LUO Lu<sup>1,2</sup>

(1. SINOPEC Star Petroleum Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Geothermal Exploitation and Utilization,

收稿日期: 2020-12-30; 改回日期: 2021-01-19

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目(JP19002)资助。

作者简介: 高楠安,女,1989年生,博士,工程师,主要从事含油气盆地分析与地热地质研究;E-mail: nanan.gao96@gmail.com。

通讯作者: 汪新伟,男,1968年生,博士,高级工程师,主要从事构造地质学与地热地质研究;E-mail: wangxinwei.xxxy@sinopec.com。

*Sinopec, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** This paper is the result of geothermal survey engineering.

**[Objective]** Building genetic model of the geothermal system plays an important guiding role in the evaluation of the geothermal resources of the geothermal field and the later selection of favorable zones. Daming Sag is a secondary structural unit at the southern of Guantao Uplift in Linqing Sag, Bohai Bay Basin. The sandstone thermal reservoir of Guantao Formation can form a complete geothermal system. **[Methods]** Combining previous research results and regional geothermal drilling data, through analysis and research on the main geological factors of the “source, reservoir, migration, and cover”, the conceptual model of the geothermal system was established in Daming Sag, Linqing Depression. On this basis, a evaluation of geothermal resources was carried out. **[Results]** The thermal reservoirs of the Guantao Formation are uniformly distributed in the area, the floor depth is between 1550–2000 m, the thickness of the reservoir is between 268–324m, the porosity is between 14%–32%, and the reservoir–thickness ratio can reach up to 70%. The geothermal wells drilled into the Guantao Formation in the area, its water temperature is about 54–60°C, and the water chemistry type is mainly  $Cl \times SO_4 - Na$ . The upper Quaternary and Minghuazhen Formation strata have a geothermal gradient between 22–60°C/km, forming a good cap layer. The heat source comes from the high geothermal value background of the Cenozoic rift basin, about 52–57 mW/m<sup>2</sup>. The Linzhang–Daming fault in the south and the Guanxian fault in the east are favorable channels for the upward transportation of deep heat. The geothermal system receives the atmospheric precipitation replenishment from the Taihang Mountains in the west and the southwestern Luxinan uplift in the east. After being warmed by deep heat conduction and local heat convection, it is enriched in the reservoir. **[Conclusions]** The evaluation results of the geothermal resources in the Damingci Depression show that the sandstone geothermal system resources of the Guantao Formation are more than  $127.42 \times 10^8$  GJ, the annual geothermal resources that can be exploited are  $31.86 \times 10^6$  GJ equivalent to  $1.09 \times 10^6$  t of standard coal. The annual exploitation of geothermal resources can meet the heating area over  $3.14 \times 10^7$  m<sup>2</sup>, and the development potential is great.

**Key words:** geothermal system; genetic model; resource evaluation; heating area; Daming Sag; geothermal survey engineering

**Highlights:** (1) Based on the characteristics of the main geological factors of “source, reservoir, migration and cover”, the genesis model of the geothermal system in Daming Sag of Linqing Depression was established for the first time. (2) The resources of the sandstone geothermal system of the Guantao Formation are more than  $127.42 \times 10^8$  GJ, the annual exploitable geothermal resources are  $31.86 \times 10^6$  GJ, equivalent to  $1.09 \times 10^6$  t of standard coal, and the overall development potential is large.

**About the first author:** GAO Nan'an, female, born in 1989, Ph.D., engineer, mainly engaged in basin analysis and geothermal geology research; E-mail: nanan.gao96@gmail.com.

**About the corresponding author:** WNG Xinwei, male, born in 1968, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in structural geology and geothermal geology research; E-mail: Wangxinwei.xxsy@sinopec.com.

**Fund support:** Supported by Science and Technology Project of Sinopec Corporation (No. JP19002).

## 1 引 言

地热系统是构成相对独立的热能储存、运移、转换的系统(汪集暘, 2015; 王贵玲和蔺文静, 2020)。对于沉积盆地水热型地热系统, 早期研究更偏重于地下热水的“补径排”, 在明确水化学特征和水运移的基础上, 结合“源、储、盖”建立地热系统的概念模型(孙红丽, 2015; 郎旭娟, 2016)。近些年含油气盆地分析的研究思路被广泛应用于地热田研究(朱焕来, 2011; 何治亮等, 2017; 张英等, 2017; 汪新伟等, 2019; 曹瑛倬等, 2021), 该研究方法相较之前更偏重于对地质要素和内部地质作用的分析, 在明确“源、

储、通、盖”等地质要素特征的基础上, 探讨其之间的配置关系, 从而建立地热系统概念模式。

大名次凹陷早期油气勘探程度低, 二维地震测线较少。其西南部的大名县冀鲁豫三省交界处, 自2000年才开始开发利用地热能, 整体勘探开发时间较短。截至2016年, 大名县内已钻探50余口地热井, 多为私人民企地热井, 井网杂乱, 地热水直排直供。由于缺乏合理的地质、钻井设计, 造成了地热水资源的超采浪费和环境污染。中石化新星公司于2016年进入大名县, 进行整合收购, 统一规划, 合理回灌, 现已开发50余口地热井, 水温52~57°C, 水量65~80 m<sup>3</sup>/h, 成井深度1800~2000 m, 采水层位为

新近系馆陶组,已建成供暖面积200万m<sup>2</sup>。前人对该地区地热资源的研究处于初级阶段,并未开展系统研究,本次研究在前人地质研究成果的基础上,结合最新地热钻井相关资料和地热水化学分析数据,通过对“源、储、通、盖”四大地质要素特征分析,查明其间的耦合关系,提出了研究区的地热系统成因模式,并在此基础上进行地热资源量评价,为后期进一步地热勘探开发提供有力的支撑。

## 2 研究区地热地质概况

大名次凹陷为渤海湾盆地临清拗陷馆陶凸起南端的一个次级构造单元(刘剑平等,2004),面积约为400 km<sup>2</sup>,呈NE向展布的近长方形。其南接内黄隆起,边界断裂为NWW向的磁县—大名断裂,该断裂为一铲式断层,长度在63 km以上,石炭系—二叠系落差约3000~7000 m,白垩纪—古近纪为断层强烈裂陷活动时期(许华明等,2010;冉志杰等,2016)。大名次凹陷东西两侧为大名西断裂和大名东断裂所限,北部边界断裂为一条倾向向南的小型传递断层(图1a)。

大名次凹陷与渤海湾盆地构造演化基本一致,为一新生代断陷凹陷(刘剑平等,2002)(图1b),地层发育较全,由下至上依次为下古生界寒武系、奥陶系,上古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系、白垩系和新生界古近系、新近系、第四系(袁同星和刘东生,2000)(图2)。本区热储主要有三套(华解明和王真奉,2006;刘向阳和龚汉宏,2007;崔阳等,2013),一套为新近系明化镇组底部的孔隙型砂岩热储,该储层底界面埋深介于1000~1300 m,水温整体较低(井口水温31~40℃),因作为战略储备用水,不适于开采;第二套为新近系馆陶组孔隙型砂岩热储,其底界面埋深介于1600~2000 m,井口水温51~56℃(井位分布如图1c),整体埋藏深度适中,地层分布发育稳定,为本区的主要储层;第三套为寒武系—奥陶系岩溶裂隙型热储,该地层在大名次凹陷内局部发育,且埋深较大,勘探风险较高。本次研究主要以经济有效的馆陶组砂岩热储为研究对象,开展其地热系统成因模式的研究,对其地热资源量进行计算评价。

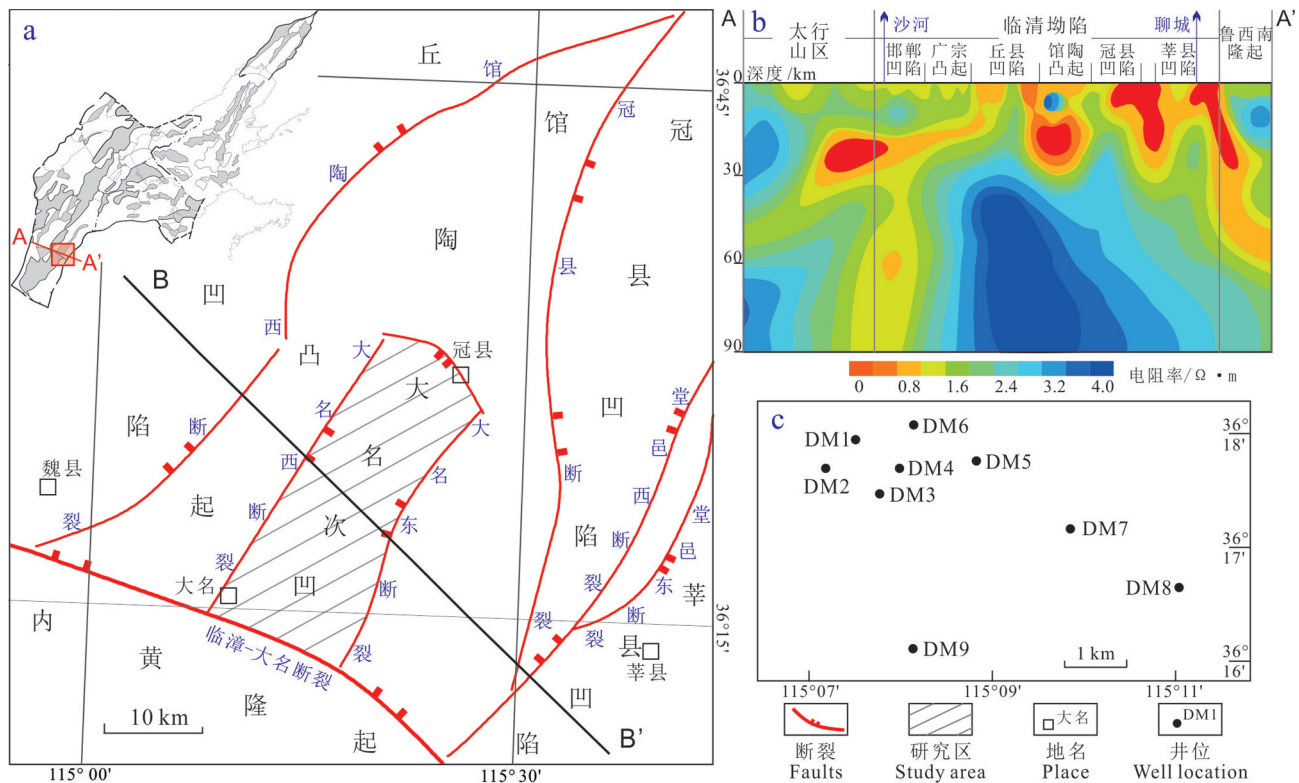


图1 大名次凹陷区域地质图(a)、大名次凹陷北部电测剖面图(b)及大名地区井位分布图(c)  
Fig.1 Basemap of Daming Sag and its adjacent area (a), 2D geo-electrical structure profile of north Daming Sag(b) and distribution of well log in Daming area (c)



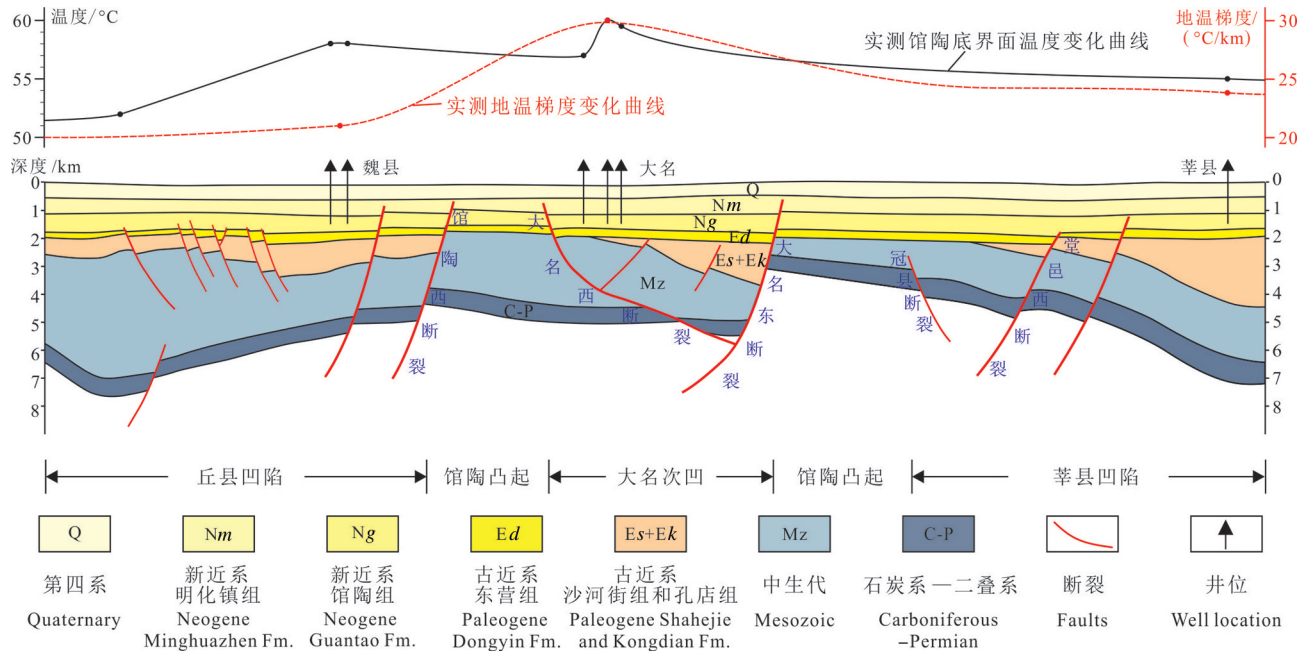


图2 大名次凹陷地热地质剖面  
Fig.2 Geothermal geological profiles of Daming Sag

### 3 地热系统地质要素

#### 3.1 热源机制

##### 3.1.1 深部地壳结构

地热能一般来自于地壳放射性元素产生的热量和来自上地幔的热量,不同热背景条件下,地热系统内部地热能的来源和聚敛模式决定了热异常的分布。渤海湾盆地通常被认为是“热幔冷壳”型岩石圈热结构(汪洋等,2001),即地幔供热所占百分比大于地壳供热。大名次凹陷的莫霍面埋深大约在36 km左右(景成虎,2007),根据魏文博等(2008)利用大地电磁对渤海湾盆地南部,过大名次凹陷北部的深部壳幔电性结构的分析结果(图1b)可以看出,其上部整体为中、低阻区块,浅表呈凹凸相间的构造格局,为伸展背景下的表现形式。研究区大地热流值在52~57 mW/m<sup>2</sup>(姜光政等,2016),其中馆陶凸起下方约10~28 km处存在的低阻高导体可能为石英熔融体,两侧电性差异带对应了馆陶断裂和冠县断裂,这些断裂可成为热流向上运移的良好通道。

##### 3.1.2 热传递方式

大名次凹陷中地热井实测温深曲线的关系表现为温度随深度的增加而升高,为线性增温,是典

型的热传导方式(图3)。第四纪沉积物有着高地温梯度,可达到59.5°C/km,地温梯度在下部明化镇组和馆陶组中明显降低,多介于6.4~16.9°C/km。通过地温梯度的变化趋势可以划分出储层和盖层,反映了储、盖之间的岩性变化导致了热导率变化,其热传导速度也呈现出了较大的差异。

研究区中温深曲线关系反映的地温梯度总体呈两段式,但是在各个单井上其显示的变化趋势有所不同,总体可以分为三类:(1)如DM3井,地温梯度整体变化不大,在盖层中表现为相对低值,仅略高于下部储层。说明上覆盖层和下伏储层的岩性较为一致,热导率变化不大,整体以热传导传递热能为主(图3a);(2)如DM6井,地温梯度在盖层中表现为高值,在下部储层中先减小后增大。说明在热能量向上传导的过程中,以热传导为主,岩性的变化是地温梯度变化的主要因素(图3b);(3)如DM9井,地温梯度在盖层中表现为高值,在下部储层中先增大后减小,整体呈现出“上凸”的样式。说明在热能量传递过程中,可能存在下部热水上涌,造成了上部地层中地热水温度较高,同时也说明了该地区存在局部热对流(图3c)。

##### 3.1.3 浅部地热场特征

基于研究区实测地热井温度和深度的相关数

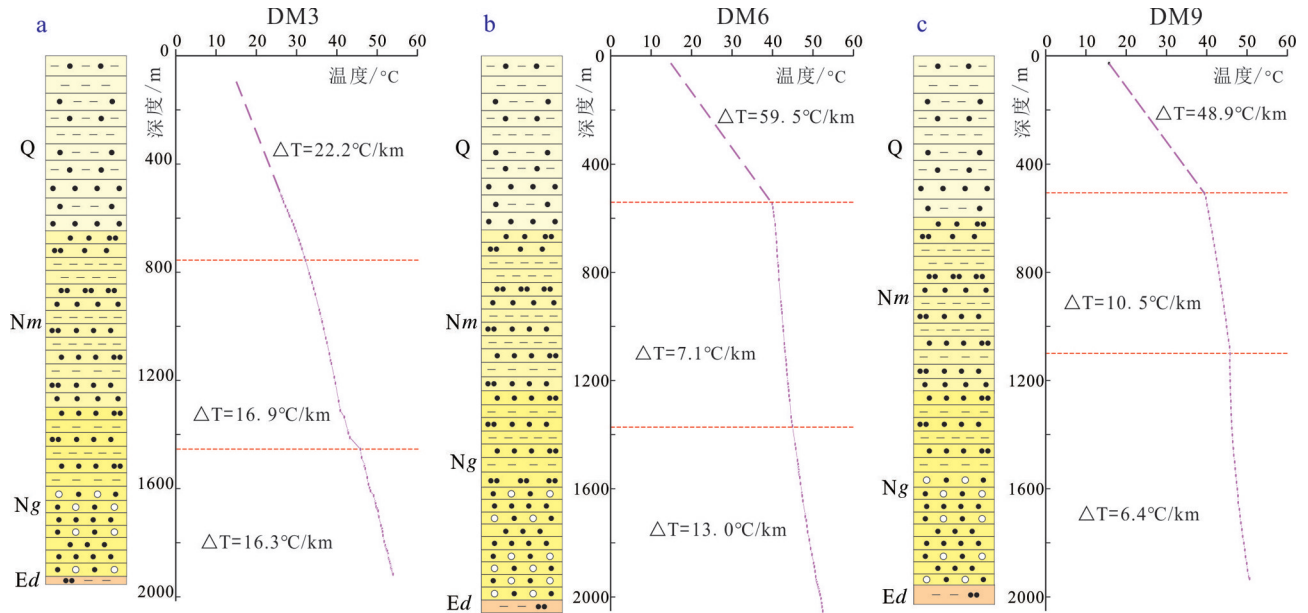


图3 大名次凹陷地热井温深变化曲线

Fig.3 Relationship between temperature and depth of geothermal wells in Daming Sag

据,同时收集了邻区地温梯度相关数据,绘制了大名次凹陷及邻区新近系平均地温梯度平面分布图(图4),其中邱县地温梯度为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,广平地温梯度为 $24^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,魏县地温梯度为 $21^{\circ}\text{C}/\text{km}$ <sup>①</sup>,馆陶地温梯度为 $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,冠县地温梯度为 $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,莘县地温梯度为 $24^{\circ}\text{C}/\text{km}$ <sup>②</sup>。整体上,地温梯度圈闭形态与凸起构造带的延伸方向一致,在平面上的特征表现为凸起区的相对高值和凹陷区的相对低值,其中馆陶凸起西侧地温梯度介于 $24\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,东部冠县凹陷和莘县凹陷,地温梯度介于 $23\sim 25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,西部的丘县凹陷、南部的魏县地区地温梯度较低介于 $21\sim 25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,其北部的邱县地区地温梯度较高,可以达到 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。这是由于凹陷内部新生代巨厚沉积物盖层热导率较低,而凹陷周围的凸起或者斜坡带热导率较高,从而产生热折射,造成热量向凹陷的凸起区聚集,最终在凹陷内部形成低温区,在凹陷周围凸起带和斜坡带形成高温区(汪集咏,2015)。在大名地区附近地温梯度最高,为 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。由于大名地区位于临漳—大名断裂和大名西断裂交汇处附近,推测断裂在该区域为良好的热传递通道。

### 3.2 热储特征

#### 3.2.1 热储平面分布特征

大名次凹陷及邻区新近系馆陶组为一套砂泥

岩沉积,在全区内均匀分布,整体厚度变化不大,其顶板埋深介于 $1000\sim 1300\text{ m}$ ,底板埋深介于 $1100\sim 2000\text{ m}$ (图5)。由于为盆地构造拗陷期沉积,其地层厚度和分布受断裂影响较小。馆陶组底界面在研究区南部展布特征表现为由西向东埋深先增大后减小,在大名地区埋深达到最大,在馆陶凸起和丘县凹陷表现为由北向南埋深增加,同样在大名地区埋深最大,可达到 $2000\text{ m}$ ,说明该地区地势较低,可为东西两侧地热水流动供给提供一定势能。馆陶组底板埋深在东部的冠县凹陷和莘县凹陷南端最小,仅为 $1100\sim 1400\text{ m}$ 。

#### 3.2.2 热储物性特征

馆陶组热储层为孔隙性层状砂岩热储,储层岩性在垂向上有明显的分段性,表现为上段以中细砂岩与泥岩的互层沉积为主,下段以含砾砂岩与泥岩的互层沉积为主。以研究区内DM6井为例(图6),通过对比自然伽马曲线的相对低值和电阻率曲线的相对高值,结合相对高值的声波时差曲线,定义含水层。在馆陶组层段内共解释出36个含水层,累计有效厚度为 $324.2\text{ m}$ ,折算储厚比为 $47.7\%$ 。其中,馆陶组上段解释出17个含水层,单层最大厚度为 $11.7\text{ m}$ ,最小为 $2.2\text{ m}$ ,孔隙度介于 $17.1\%\sim 29.3\%$ ,平均值为 $23.7\%$ ;馆陶组下段解释出19个含水层,单层最大厚度可达 $37\text{ m}$ ,最小为 $2.3\text{ m}$ ,孔隙度介于

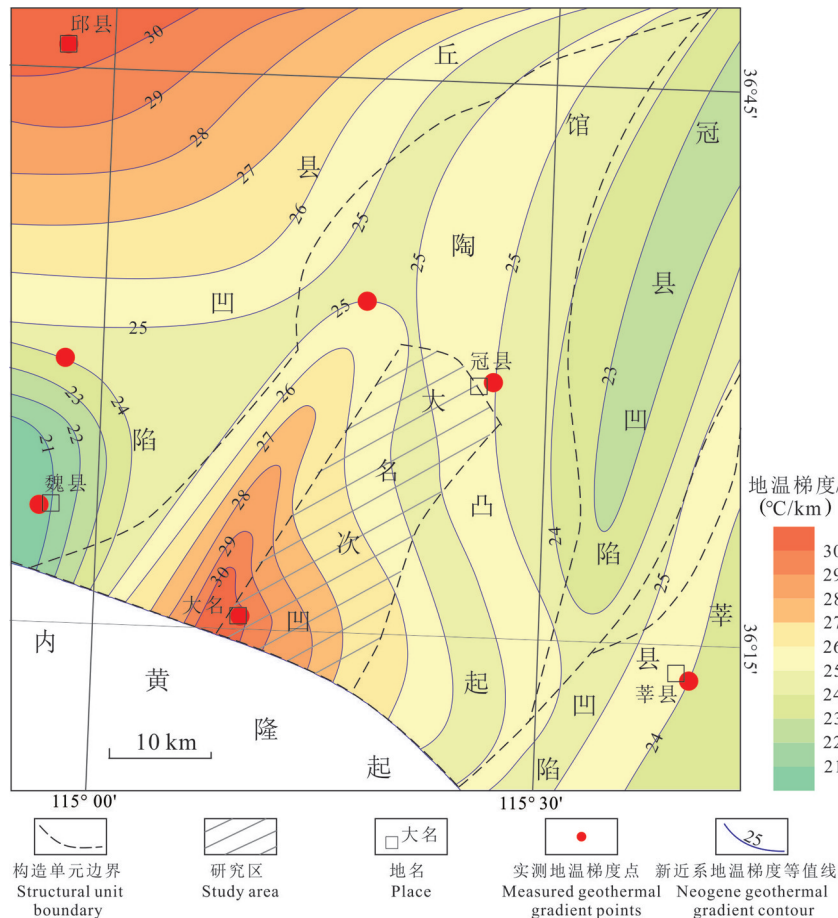


图4 大名次凹陷及邻区新近系平均地温梯度分布图

Fig.4 Distribution of Neogene geothermal gradients in Daming Sag and its adjacent area

19.1%~31.9%，平均值为25.7%。

渤海湾盆地馆陶组总体为河流相沉积背景，在大名地区地热井上，自然伽马(GR)测井曲线整体以正旋回形态为主，对应了河流沉积垂向的二元结构(图6,图7)。馆陶组上段以齿状钟形、指状或者钟形和指状叠加交替的曲线形态为主，局部可见漏斗状曲线形态，结合其岩性为中砂岩和泥岩的互层，将馆陶组上段沉积背景解释为相对远源中—细粒的曲流河沉积。其中，齿状钟形曲线对应于河床亚相中的河床和边滩沉积，漏斗形曲线对应于堤岸亚相中的决口扇沉积，曲线齿状幅度较小对应沉积粒度较细的河漫滩沉积。馆陶组下段自然伽马测井曲线以箱型、齿状箱型和钟形曲线形态为主，岩性为大套的含砾砂岩垂向上叠加，将其沉积背景解释为近源粗粒的辫状河沉积。辫状河沉积有多河道的沉积特点，叠加的箱状曲线对应于垂向上多套沉

积的辫状河道。

在砂体连井剖面上可以看出馆陶组上段砂体厚度较薄，在平面上的连续性较差，体现了中—远源的特征。馆陶组下段砂体厚度较大，在平面上发育稳定，连续性好，代表了近源沉积(图7)。

根据研究区内地热井统计分析，馆陶组热储厚度介于268~324 m，平均热储厚度为299 m，储厚比可达50%。在垂向上存在明显的岩性差异，上段热储以中细砂岩沉积为主，储厚比介于27%~32%，其孔隙度主要集中在14%~28%，整体呈单峰正态分布，说明压实作用对热储的后期改造较小(图8a)；下部热储以含砾砂岩沉积为主，储厚比可高达74%，其热储孔隙度主要介于16%~30%，孔隙度分布呈双峰正态分布，说明随着埋深增大，压实作用对储层的改造作用增大(图8b)。由储厚比和孔隙度的物性条件来看，馆陶组下段热储储集性能要好



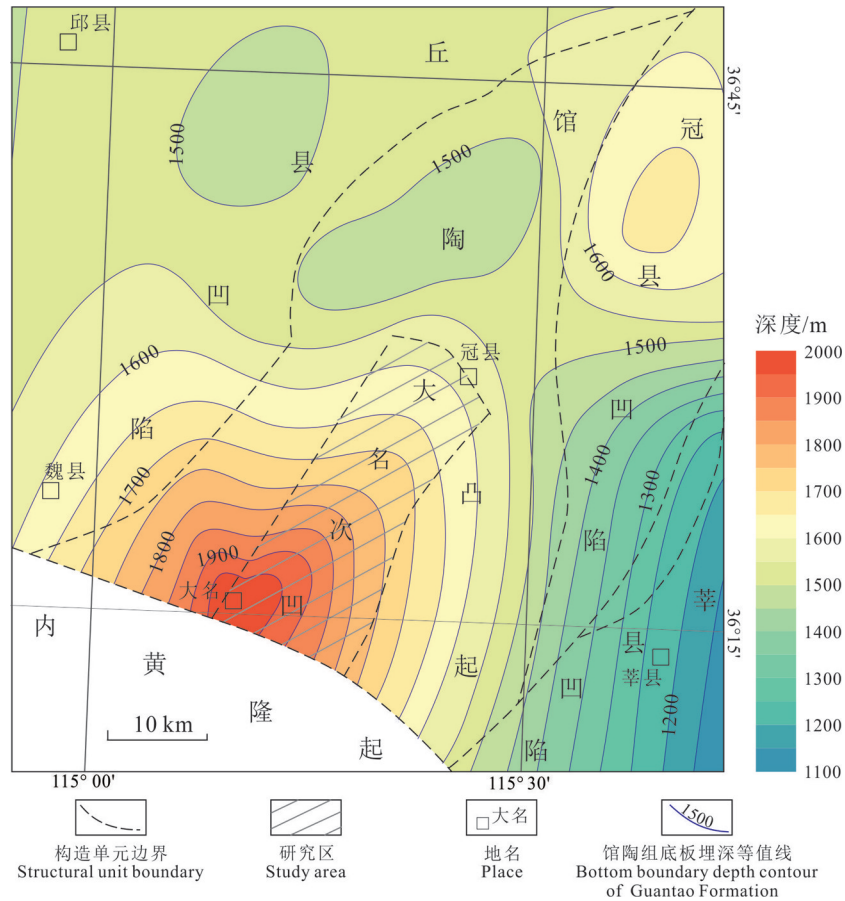


图5 大名次凹陷及邻区馆陶组底界面埋深分布图  
Fig.5 Distribution of depth of bottom Guantao Formation in Daming Sag and its adjacent area

于上段热储。

### 3.2.3 热储温度特征

馆陶组底界面温度受热传导差异影响,其平面分布特征与凹凸格局有一定对应关系。表现为在凹陷中温度较低,而周围凸起上相对较高。其中,大名次凹陷中馆陶组底界面实测温度多介于54~60℃,其西部丘县凹陷的魏县地区底界面实测温度为58℃;在东部莘县凹陷的莘县地区,底界面实测温度为54℃。温度在平面上整体变化不大。

## 3.3 地热水特征

### 3.3.1 水化学特征

将研究区采集分析得到的水样(表1)按主要组分的毫克当量百分比投影到Piper三线图中(图9a),可以发现研究区地热水水化学类型比较集中,按C.A舒卡列夫分类(即水中主要阴、阳离子含量大于25%即参与命名),水化学类型全部为Cl·SO<sub>4</sub>-Na型。

大名馆陶地下热水 TDS 为 1875~4000 mg/L,整

体变化较大,可能是由于局部深部热水垂向上涌导致浅层水的 TDS 增大。阳离子含量顺序为 Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>,阴离子含量顺序为 Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。其中阳离子中 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>与 TDS 具有较好的正相关性(图9b),相关系数可达 0.98,阴离子 Cl<sup>-</sup>与 TDS 同样存在明显的正相关性,相关系数为 0.94,说明矿化度变化主要受 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>四种离子控制,同时也说明水中这几种离子可能存在相同的来源。

在所采水样中,井 DM8 有着较低的矿化度和较高的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量。说明该井位所在的地区可能存在局部的断裂,混入了浅层的地表水,使得馆陶组热储中地热水的成熟度整体偏低。

### 3.3.2 氢氧同位素特征

Craig(1961)首先提出了大气降水 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值之间存在线性关系,即全球大气降水线 GMWL。不同地区大气降水线略有差异,华北平原大气降水线

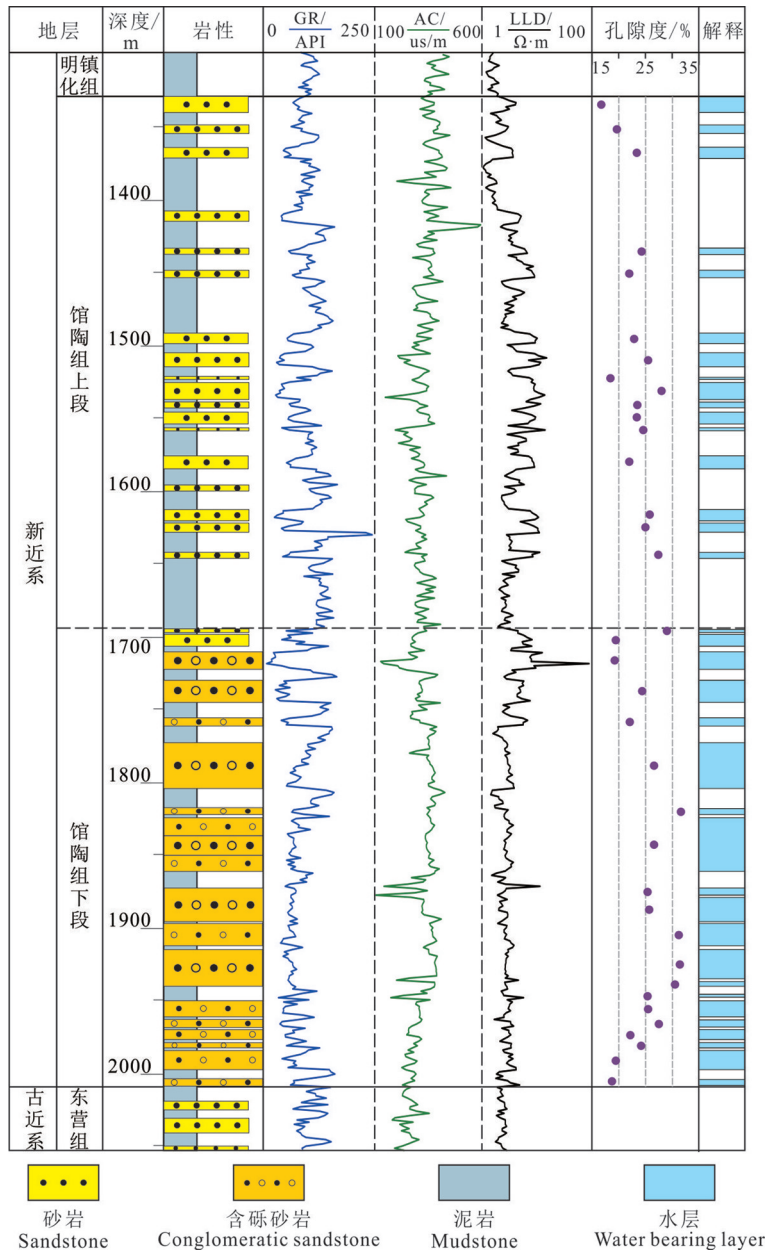


图6 DM6井馆陶组孔隙性砂岩热储特征

Fig.6 Characteristics of Guantao Formation porous sandstone geothermal reservoir in Well DM6

为  $\delta D = 7.46\delta^{18}O + 0.90$  (柳鉴容等, 2009)。研究区内测试了两口地热井(DM7和DM8)的氢氧同位素值,同时收集到大名地区两口地热井(MS和XSY)的氢氧同位素值<sup>①</sup>,可以发现研究区内地热水整体落于华北平原降水线附近的右下方(图10),计算得到的氧漂移幅度整体较小(表2),说明热储主要接受大气降水的补给,并且地下水运移时温度较低,水岩作用不是很强烈。

大气降水中的氢氧同位素具有高程效应。在

水文地球化学中,如果已经确定大气降水为地下水补给来源,可以利用氢氧同位素的高程效应确定补给区和补给高程(Sánchez Navarro et al., 2004)。通常情况下,沉积盆地型地热资源的地下水补给来源为大气降水,所以本次研究根据研究区内 $\delta^{18}O$ 的数值计算地下热水补给高程,计算公式如下:

$$H = \frac{\delta G - \delta P}{K} + h$$

式中, $H$ 为补给区海拔,m; $h$ 为取样点海拔,m; $\delta G$ 为地下热水中的 $\delta^{18}O$ 值,‰; $\delta P$ 为取样点降水中



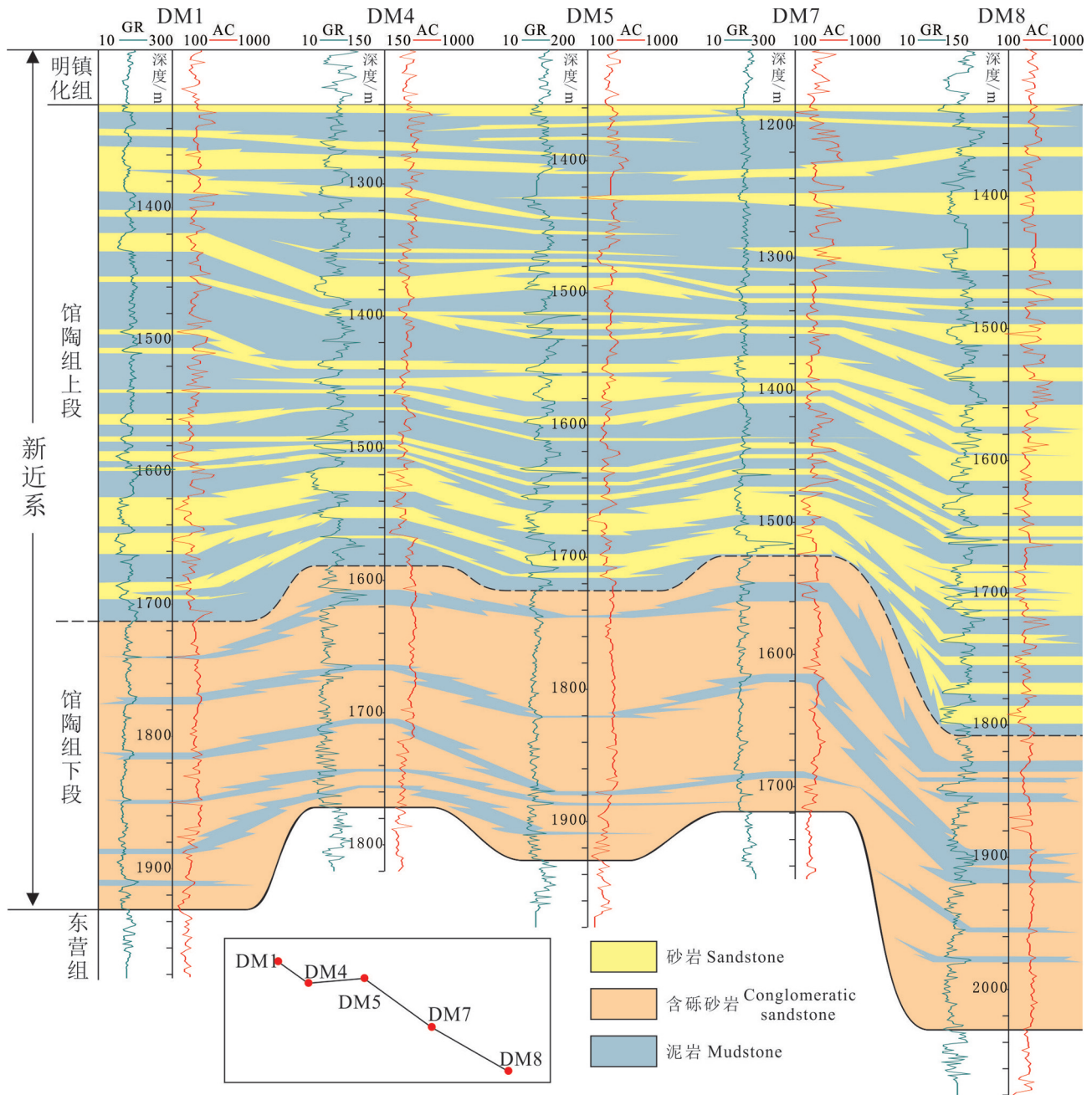


图7 大名地区砂岩热储连井分布

Fig.7 Distribution of sandstone geothermal reservoir of wells profile in Daming area

$\delta^{18}\text{O}$  值,取  $-7.6\text{‰}$ ; K 为  $\delta^{18}\text{O}$  同位素高度梯度,取  $-0.2\text{‰}/100\text{ m}$ 。计算得到的补给高程结果在 1250~1402 m(表 2,图 10),推测为来自西部太行山隆起和东部鲁西南隆起的大气降水补给。

### 3.4 盖层条件

研究区内第四系平原组和新近系明化镇组总厚度约 1150~1400 m,地层均匀覆盖于馆陶组砂岩

热储之上,厚度变化整体不大。其中,平原组主要为一套泥质粉砂及细砂岩,其松散而细粒的沉积可以成为一套良好的隔水层。同时当源自地下深处的热流途经该层段传导时,地温快速降低,地温梯度可达到  $22\sim 60\text{°C}/\text{km}$ (图 3),所以该层段也是一套条件良好的隔热保温盖层。明化镇组沉积表现为砂岩、粉砂岩和泥岩的互层,垂向上其一定的沉积

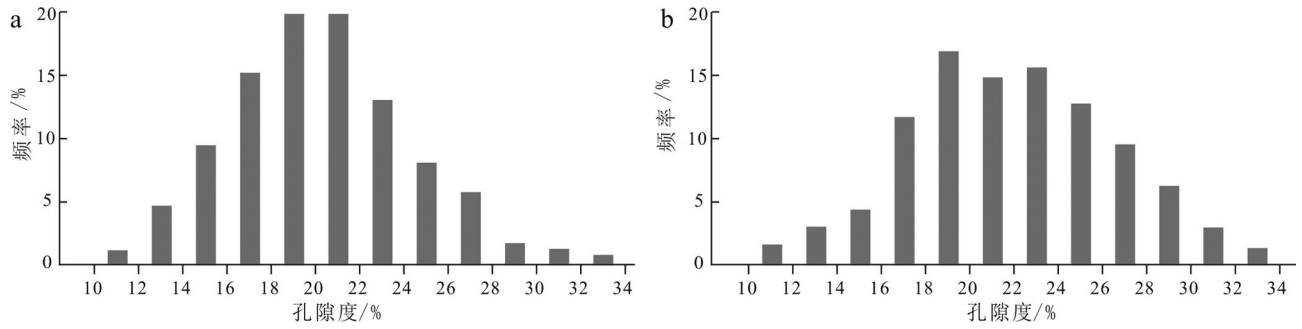


图8 馆陶组砂岩热储孔隙度统计直方图:(a)馆陶组上段;(b)馆陶组下段

Fig.8 Statistical histogram of sandstone thermal reservoir porosity in Guantao Formation: (a) The upper part of Guantao Formation; (b) The lower part of Guantao Formation

表1 大名次凹陷水化学分析数据

Table 1 Chemical composition and information of groundwater samples in Daming Sag

井名	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TDS	水化学类型
	mg/L								
DM2	258.35	37.52	1055.04	19.94	145.26	1233.90	1320.19	4000.47	Cl·SO <sub>4</sub> -Na
DM4	331.20	45.04	1282.60	31.42	188.35	1867.29	901.44	4559.19	Cl·SO <sub>4</sub> -Na
DM5	185.67	27.06	804.69	16.92	199.27	793.04	1064.85	2995.16	Cl·SO <sub>4</sub> -Na
DM6	230.86	30.85	1009.83	17.23	192.95	1268.18	1040.98	3697.24	Cl·SO <sub>4</sub> -Na
DM8	82.13	11.37	557.96	10.90	331.03	383.75	660.15	1874.59	Cl·SO <sub>4</sub> -Na

厚度也同样对下伏地层起到了隔水隔热的封盖作用。

#### 4 地热系统概念模型

大名次凹陷馆陶组砂岩孔隙性层状热储可构

成一套地热系统。结合其“源、储、通、盖”地质特征的分析,建立了地热系统的成因模式。该地热系统热源来自于新生代断陷盆地背景下的高大地热流值,约为52~57 mW/m<sup>2</sup>,其南部的临漳—大名断裂和东部的冠县断裂构成了深部热流向上运输的有利

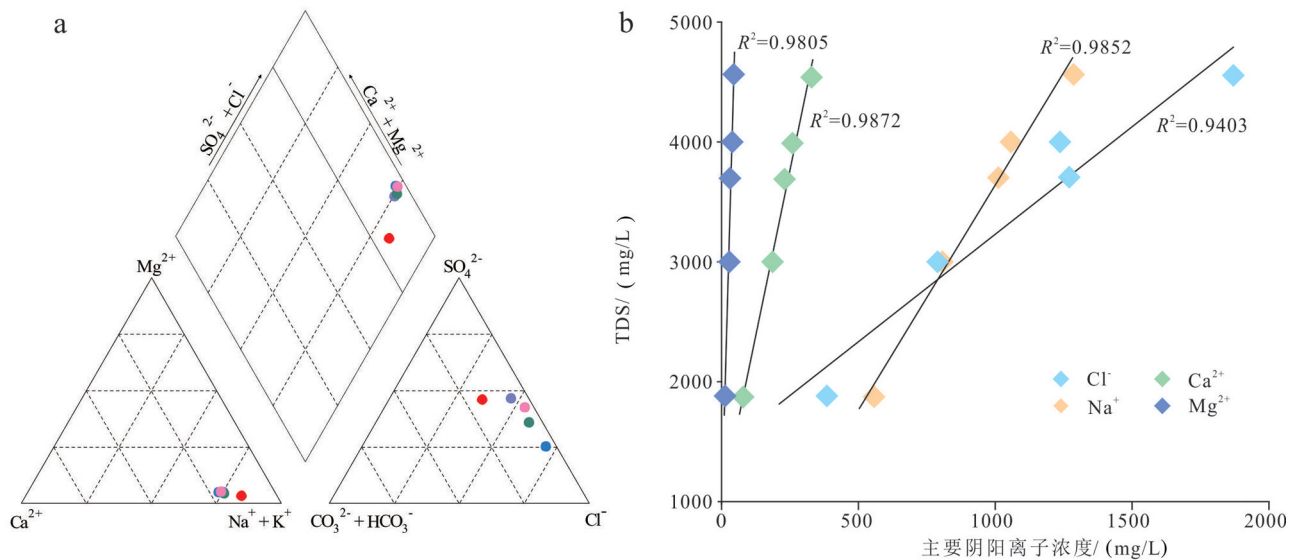


图9 大名次凹陷水化学分析图:地热流体Piper图(a);阴阳离子和TDS关系(b)

Fig.9 Piper triangular diagram of the major ions in underground water from Daming Sag (a); Relationship between TDS and ion concentration in Daming Sag (b)

表2 大名次凹陷地热井补给高程计算表

Table 2 Parameter and supply elevation calculation results of Daming Sag

井名	$\delta D/\text{‰}$	$\delta G/\text{‰}$	氧漂移量/ $\text{‰}$	h: 取样点海拔/m	H: 补给区海拔/m
DM7	-76.1	-10.3	0.03	52	1402
DM8	-77.9	-10.2	0.37	46	1346
MS	-76.1	-10	0.21	50	1250
XSY	-76.0	-10.1	0.31	47	1297

通道。砂岩热储接受来自西部太行山隆起和东部鲁西南隆起的大气降水补给,沿断裂进入目的地层,顺储集层段长距离运移,经深部循环、围岩加热后富集于热储中。上部第四系和明化镇组较细的沉积地层构成了良好的盖层,由此形成了一个双向补给,长距离运移,承压保存的富水地热系统(图11)。

馆陶组孔隙性砂岩地热系统的热储底面埋深约1550~2000 m,储层厚度约为268~324 m,实测热储底板温度介于54~60℃,地热水化学类型以Cl×SO<sub>4</sub>-Na型为主,以热传导作用为主传递热流,局部存在热对流作用。

## 5 地热田资源量评价

### 5.1 热储体积法

大名次凹陷地热系统为沉积盆地型层状热储,在上述地热田成因机制分析的基础上,结合研究区

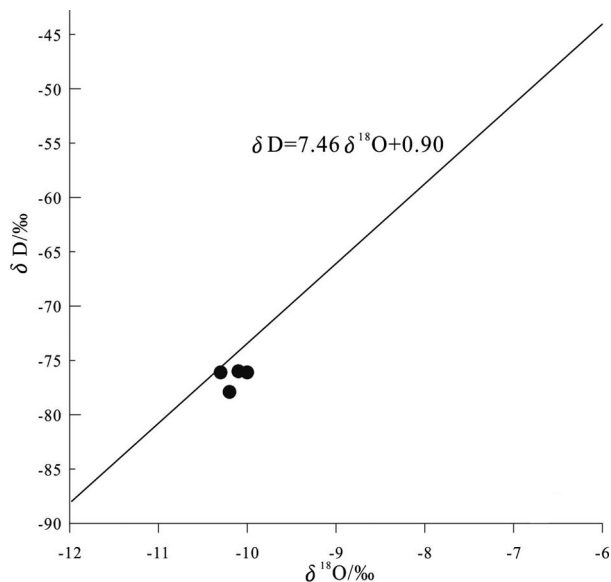


图10 大名次凹陷 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

Fig.10 Relationship of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in Daming area

目前已有的钻探资料使用热储体积法对馆陶组砂岩热储进行资源量评价。其基本原理为计算某一给定体积的岩石和水中所含有的全部热含量之和,其计算公式如下:

$$Q=A[d\rho_c C_c(1-\varphi)+d\varphi\rho_w C_w](t_r-t_0) \quad (1)$$

式中, $Q$ 为地热资源量, $J$ ;  $A$ 为评价区面积, $m^2$ ;  $d$ 为热储有效厚度, $m$ ;  $\varphi$ 为岩石的孔隙度, $\%$ ;  $t_r$ 为热储温度, $^\circ C$ ;  $t_0$ 为当地年平均气温,取 $16^\circ C$ ;  $\rho_c$ 为岩石密度,取 $2700 \text{ kg}/m^3$ ;  $C_c$ 为岩石比热容,取 $878 \text{ J}/(\text{kg}\times^\circ C)$ ;  $\rho_w$ 为水的密度,取 $1000 \text{ kg}/m^3$ ;  $C_w$ 为水的比热容,取 $4180 \text{ J}/(\text{kg}\times^\circ C)$ 。

公式中各个参数确定如下(表3):

(1)评价区面积( $A$ ):馆陶组热储分布于整个大名次凹陷,其面积通过geomap软件计算为 $418.48 \text{ km}^2$ 。

(2)热储有效厚度( $d$ ):统计分析已有钻井的储厚比(有效储层厚度/地层厚度),再结合平均地层厚度计算出储层厚度(平均地层厚度×储厚比)。计算得到馆陶组平均储层厚度为 $244.6 \text{ m}$ 。

(3)热储平均温度( $t_r$ ):为热储顶底板温度的平均值,馆陶组砂岩热储顶板平均温度为 $49^\circ C$ ,底板平均温度为 $57^\circ C$ ,计算得温度平均温度为 $53^\circ C$ 。

(4)热储孔隙度( $\varphi$ ):根据已有测井解释资料统计,馆陶组热储平均孔隙度为 $21\%$ 。

大名次凹陷馆陶组地热系统的地热资源量计算结果如表3所示。其中馆陶组砂岩热储资源量为 $127.42\times 10^8 \text{ GJ}$ ,折合标煤 $4.34\times 10^8 \text{ t}$ (1 t标煤可产出 $29.3 \text{ GJ}$ 热量)。根据《地热资源评价方法》(DZ40-85)规定,砂岩热储回收率为 $25\%$ ,所以大名次凹陷内可采资源量为 $31.86\times 10^8 \text{ GJ}$ ,折合标煤 $1.09\times 10^8 \text{ t}$ 。若按100年开采计,每年可开采地热资源量为 $31.86\times 10^6 \text{ GJ}$ ,折合标煤 $1.09\times 10^6 \text{ t}$ 。根据每平方米每年供暖所需热量为 $0.0283 \text{ t}$ 标煤,其地热资源量满足的供暖面积可达 $3.84\times 10^7 \text{ m}^2$ ,资源开发潜力巨大。

### 5.2 回灌法

通过采用热突破公式计算地热回灌条件下流体可开采量,引用了自然资源部2020年发布的《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331-2020),该规程认为在隔水隔热均一等厚的热储层中,热量只靠对流方式传递时,热突破时间取100年时,允许开采量公式如下:



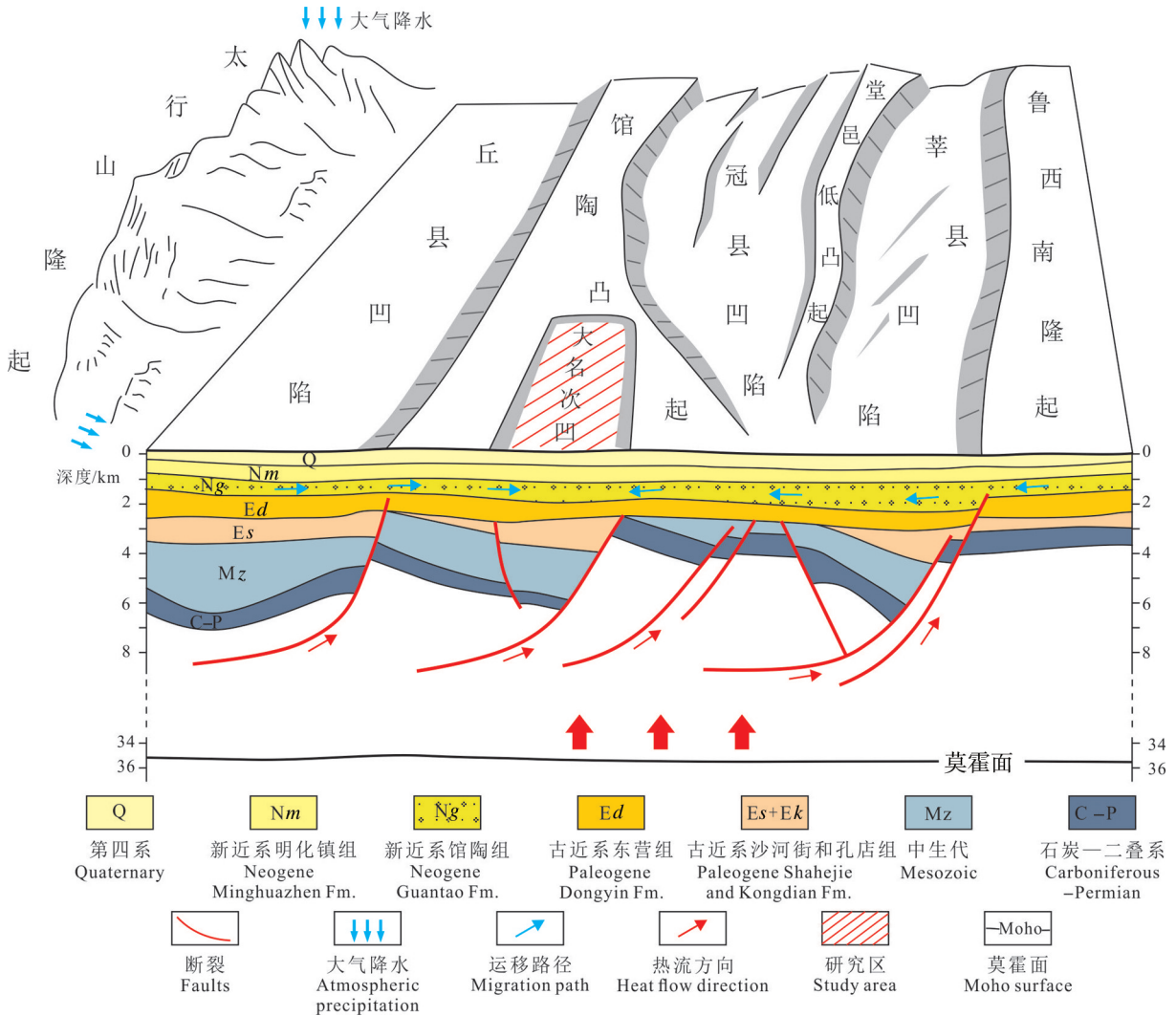


图 11 大名次凹陷地热系统成因模式图  
Fig.11 Conceptual model of geothermal system in Daming Sag

$$Q_a = \frac{AQ}{\pi R^2} = \frac{Ad}{36500f} \quad (2)$$

其中:

$$f = \frac{\rho_w C_w}{\rho_c C_c (1 - \varphi) + d\varphi \rho_w C_w} \quad (3)$$

$$Q = Q_a \rho_w C_w (t_r - t_0) \quad (4)$$

式中:  $Q_a$  为回灌条件下每天允许开采量,  $m^3/d$ ;  $Q$  为回灌条件下每天地热流体可采热量,  $J/d$ ; 其他参数见公式(1)。

计算结果如表4, 大名次凹陷馆陶组每天允许开采量为  $0.75 \times 10^6 m^3$ , 每天可采地热资源量为  $0.116 \times 10^6 GJ$ 。每年可采地热资源量为  $42.5 \times 10^6 GJ$ , 折合标煤  $1.45 \times 10^6 t$ , 地热资源量满足的供暖面积可达  $4.1 \times 10^7 m^2$ , 计算结果相比热储体积法计算的结果较大。

## 6 结论

(1)大名次凹陷热源来自于新生代断陷盆地背景下的高大地热流值, 约为  $55 mW/m^2$ , NE向的馆陶西断裂和冠县断裂, 以及其南部的NWW向临漳—大名隐伏断裂构成了深部热流向上运移的有利通道。大名次凹陷新生界地温梯度平均介于  $24 \sim 30^\circ C/km$ , 热传递方式以深部热传导为主, 存在局部热对流。

(2)大名次凹陷馆陶组砂岩热储在研究区均有分布, 厚度变化较为均一, 底板埋深介于  $1550 \sim 2000 m$ , 根据岩性的区别可以将热储分为上下两段, 其中上段储厚比约为  $27\% \sim 32\%$ , 孔隙度约在  $14\% \sim 28\%$ , 下段储厚比可高达  $74\%$ , 孔隙度约在  $16\% \sim 30\%$ 。

(3)大名次凹陷馆陶组地热水化学类型以  $Cl \times$

表3 大名次凹陷馆陶组地热资源评价参数取值与计算结果(热储体积法)

Fig.3 Evaluation parameters and calculation results of Guantao Fm. geothermal resources in Daming Sag by reservoir volumn method

层位	评价单元面积(A)/km <sup>2</sup>	平均有效厚度(d)/m	平均温度(t)/°C	平均孔隙度(φ)/%	地热资源量/10 <sup>8</sup> GJ	地热资源量/10 <sup>8</sup> 标煤	可采地热资源量/10 <sup>8</sup> GJ	可采地热资源量/10 <sup>8</sup> 标煤
馆陶组	418.48	299.18	53	21	127.42	4.34	31.86	1.09

表4 大名次凹陷馆陶组地热资源评价参数取值与计算结果(回灌法)

Fig.4 Evaluation parameters and calculation results of Guantao Fm. geothermal resources in Daming Sag by recirculation method

层位	评价单元面积(A)/km <sup>2</sup>	平均有效厚度(d)/m	平均温度/°C	平均孔隙度(φ)/%	地热水可采量/(m <sup>3</sup> /d)	(可采地热资源量/天)/(10 <sup>6</sup> GJ)	(可采地热资源量/年)/(10 <sup>6</sup> GJ)	可采地热资源量/(10 <sup>6</sup> 标煤)
馆陶组	418.48	299.18	53	21	0.75×10 <sup>6</sup>	0.116	42.5	1.45

SO<sub>4</sub>-Na型为主,地热水接受来自西部太行山隆起和东部鲁西南隆起的大气降水,经深部循环加热后聚集于热储中,其中热储温度约在54~60℃。

(4)大名次凹陷馆陶组孔隙性砂岩热储整体可以定义为一个双向补给,长距离运移,承压保存的富水地热系统。其馆陶组砂岩热储资源量为127.42×10<sup>8</sup> GJ,折合标煤为4.34×10<sup>8</sup> t。每年可开采地热资源量超过31.86×10<sup>6</sup> GJ,折合标煤1.09×10<sup>6</sup> t。年开采地热资源量可满足超3.14×10<sup>7</sup> m<sup>2</sup>的供暖面积,整体开发潜能较大。

### 注释

①张薇,刘峰,何雨江. 2013. 华北平原地热资源调查评价成果报告[R]. 石家庄:中国地质科学院水文地质环境地质研究所。

②赵季初,杨询昌,谭志容. 2006. 山东省临清—茌平拗断区地热资源调查报告[R]. 德州:山东省鲁北地质工程勘察院。

### References

Cao Yingzhuo, Bao Zhidong, Lu Kai, Xu Shiqi, Wang Guiling, Yuan Shuqin, Ji Hancheng. 2021 Genetic model and main controlling factors of the Xiongxi geothermal field[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(4): 863–872(in Chinese with English abstract).

Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 133(3465):1702–1703.

Cui Yang, Gao Shengping, Wei Yingying, Mu Haidong. 2013. Analysis of geothermal resources in Handan[J]. Science and Technology of West China, 12(12):18–19(in Chinese with English abstract).

He Zhiliang, Feng Jianyun, Zhang Ying, Li Pengwei. 2017. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China[J]. Earth Science Frontiers, 24(3): 168–179 (in Chinese with English abstract).

Hua Jieming, Wang Zhenfeng. 2006. Utilization and development of

geothermal resources in eastern Hanxing Plain (Southern Hebei Depression), Hebei Province[J]. Coal Geology of China, 18(1): 34–37(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).

Jing Chenghu. 2007. A Study on Geologic Features of Geothermal and its Exploitation and Utilization in the Eastern Plain of Handan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

Lang Xujuan. 2016. The Thermal Structure and Geothermal Genesis Mechanism in Guide Basin [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science.

Liu Jianping, Wang Xinwen, Lu Yanwen. 2002. The Cenozoic extended basin characterand models in the east of Linqing[J]. Journal of Chengdu University of Technology, (5): 551–554(in Chinese with English abstract).

Liu Jianping, Wang Xinwei, Wang Xinwen. 2004. Transition structures in Linqing depression [J]. Geological Science and Technology Information, 23(4): 51–54 (in Chinese with English abstract).

Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, Sun Xiaomin, Liu Xin, Wang Shiqin. 2009. Characteristics of δ<sup>18</sup>O in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 54(22): 3521–3531(in Chinese with English abstract).

Liu Xiangyang, Gong Hanhong. 2007. An evaluation of Handan city geothermal resources[J]. Coal Geology of China, (6): 45–48 (in Chinese with English abstract).

Ran Zhijie, Peng Yuanqian, Meng Lipeng, Sun Lina, Wen Chao and Wang Yan. 2016. Active characteristics of the Linzhang–Daming Fault[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 11(2): 230–238(in Chinese with English abstract).

Sánchez Navarro J Á, López P C, Perez–García A. 2004. Evaluation of geothermal flow at the springs in Aragón (Spain), and its relation to

- geologic structure[J]. *Hydrogeology Journal*, 12(5):601-609.
- Sun Hongli. 2015. The Bearing Features and Genetic Model for Geothermal Resources in Guanzhong Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2002. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923-1937(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 2015. Geothermics and its Application[M]. Beijing: Science Press, 1-6.
- Wang Xinwei, Wang Tinghao, Zhang Xuan, Mao Xiang, Luo Lu, Wang Di. 2019. Genetic mechanism of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin[J]. *Earth Science*, 44(3): 1042-1056(in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Wang Jiyang, Xiong Liangping, Deng Jinfu. 2001. Lithospheric geothermics of major geotectonic units in China mainland[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 17-22 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wenbo, Ye Gaofeng, Jin Sheng, Deng Ming, Jin Jianen, Peng Zhiqiang, Lin Xing, Song Shilei, Tang Baoshan, Qu Shuanzhu, Chen Kai, Yang Hongwei, Li Guoqiang. 2008. Geoelectric structure of lithosphere beneath eastern North China: Features of a thinned lithosphere from magnetotelluric soundings[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 204-216(in Chinese with English abstract).
- Xu Huaming, Zhou Bin, Geng Shijiang, Hou Pingshu, Li Guangyong. 2010. Segmentation characteristics and activity of Cixian-Daming fault[J]. *North China Earthquake Sciences*, 28(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Yuan Tongxing, Liu Dongsheng. 2000. A preliminary discussion analysis of geotherm-geological conditions in the eastern plain of Handan city[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2): 177-181(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ying, Feng Jianyun, He Zhiliang, Li Pengwei. 2017. Classification of geothermal system and their formation key factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 190-198(in Chinese with English abstract).
- Zhu Huanlai. 2011. Research on the Sedimentary Geothermal Resources in North Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University(in Chinese with English abstract).
- 中国西部科技, 12(12): 18-19.
- 何洽亮, 冯建赞, 张英, 李鹏威. 2017. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. *地质前缘*, 24(3): 168-179.
- 华解明, 王真奉. 2006. 河北省邯邢东部平原区(冀南凹陷)地热资源的利用与开发[J]. *中国煤田地质*, 18(1): 34-37.
- 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, 汪集昶. 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.
- 景成虎. 2007. 邯邢东部平原地区地热地质特征及开发利用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 郎旭娟. 2016. 贵德盆地热结构及地热成因机制[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘剑平, 汪新文, 鲁言文. 2002. 临清地区东部新生代伸展构造特征及盆地伸展模式[J]. *成都理工学院学报*, (5): 551-554.
- 刘剑平, 汪新伟, 汪新文. 2004. 临清拗陷变换构造研究[J]. *地质科技情报*, 23(4): 51-54.
- 刘向阳, 龚汉宏. 2007. 邯郸市地热资源评价[J]. *中国煤田地质*, (6): 45-48.
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 孙晓敏, 刘鑫, 王仕琴. 2009. 中国东部季风区大气降水  $\delta^{18}\text{O}$  的特征及水汽来源[J]. *科学通报*, 54(22):3521-3531.
- 冉志杰, 彭远黔, 孟立朋, 孙丽娜, 温超, 王燕. 2016. 临漳-大名断裂活动特征[J]. *震灾防御技术*, 11(2): 230-238.
- 孙红丽. 2015. 关中盆地地热资源赋存特征及成因模式研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王贵玲, 蒯文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. *地质学报*, 94(7): 1923-1937.
- 汪集昶. 2015. 地热水及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1-6.
- 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[J]. *地球科学*, 44(3):1042-1056.
- 汪洋, 汪集, 熊亮萍, 邓晋福. 2001. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. *地球学报*, (1): 17-22.
- 魏文博, 叶高峰, 金胜, 邓明, 景建恩, 彭志强, 林昕, 宋石磊, 唐宝山, 屈栓柱, 陈凯, 杨宏伟, 李国强. 2008. 华北地区东部岩石圈导电性结构研究—减薄的华北岩石圈特点[J]. *地质前缘*, (4): 204-216.
- 许华明, 周斌, 耿师江, 侯平舒, 李广勇. 2010. 磁县大名断层分段特征及活动性[J]. *华北地震科学*, 28(1): 1-7.
- 袁同星, 刘东生. 2000. 邯郸市东部平原区地热地质条件初析[J]. *地球学报*, 21(2):177-181.
- 张英, 冯建赞, 何洽亮, 李鹏威. 2017. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. *地质前缘*, 24(3): 190-198.
- 朱焕来. 2011. 松辽盆地北部沉积盆地型地热资源研究[D]. 大庆: 东北石油大学.

## 附中文参考文献

- 曹瑛倬, 鲍志东, 鲁锴, 徐世琦, 王贵玲, 袁淑琴, 季汉成. 2021. 冀中拗陷雄县地热田主控因素及成因模式[J]. *沉积学报*, 39(4): 863-872.
- 崔阳, 高生平, 魏莹莹, 母海东. 2013. 邯郸市地热资源概况分析[J].