

doi: 10.12029/gc20220604

王婷灏,汪新伟,毛翔,罗璐,高楠安,刘慧盈,吴陈冰洁. 2022. 沧县隆起北部地区地热资源特征及开发潜力[J]. 中国地质, 49(6): 1747-1764.  
Wang Tinghao, Wang Xinwei, Mao Xiang, Luo Lu, Gao Nan'an, Liu Huiying, Wu Chenbingjie. 2022. Characteristics and development potential of geothermal resources in northern Cangxian uplift[J]. Geology in China, 49(6): 1747-1764(in Chinese with English abstract).

## 沧县隆起北部地区地热资源特征及开发潜力

王婷灏<sup>1,2,3</sup>,汪新伟<sup>1,2</sup>,毛翔<sup>1,2</sup>,罗璐<sup>1,2</sup>,高楠安<sup>1,2</sup>,刘慧盈<sup>1,2</sup>,吴陈冰洁<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;3. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083)

**摘要:**【研究目的】地热资源特征研究及开发潜力分析是开发区域地热资源的重要依据。【研究方法】本文将前人研究成果与最新钻井资料相结合,通过对沧县隆起北部地区地热地质背景、热储分布、地温场特征、水化学资源类型等主要因素进行剖析,建立了该区的地热成藏模式。【研究结果】沧县隆起北部地区是在渤海湾伸展型沉积盆地高大地热流值背景下,由北部燕山裸露区基岩接受的大气降水作为近源补给水源,进入基岩的冷水在深层循环过程中受到深部热源加热增温,沿断裂破碎带和不整合面向上运移富集,形成的以传导型传热机制为主的地热系统。【结论】本区地热资源特点为热储类型多、盖层地温梯度高、补给速度快、资源量巨大。主要表现为:区内分布馆陶组砂岩热储,奥陶系、蓟县系雾迷山组岩溶热储三套主力热水储集层;地温场分布主要受基底构造形态控制,基岩凸起区的平均地温梯度为 45℃/km;地下水类型随着埋深的增加由 HCO<sub>3</sub>-Na、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na 型水向成熟的 Cl-Na 型水过渡;本区内三套热储的可采地热资源量为 1.67×10<sup>10</sup>GJ,折合标煤 5.72×10<sup>8</sup>t,年可开采地热资源量可满足供暖面积 2 亿 m<sup>2</sup>,若在采灌平衡的条件下,沧县隆起北部地区年可采地热资源量为 7.06×10<sup>7</sup>GJ,折合标煤 2.41×10<sup>6</sup>t,可满足供暖面积 0.85 亿 m<sup>2</sup>,具有良好的地热市场开发前景。

**关键词:**热储评价;地温场特征;地热资源潜力;沧县隆起北部;天津市;地热地质调查工程

**创新点:**通过地质构造背景、热储分层段特征、地温场平面与垂向分布、水化学运移路径多角度刻画沧县隆起北部地区地热资源特征并建立地热概念模型,在此基础上计算本区年可采地热资源量,对分析采灌平衡的条件下的地热开发潜力具有创新意义。

中图分类号:P314;TK529 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)06-1747-18

## Characteristics and development potential of geothermal resources in northern Cangxian uplift

WANG Tinghao<sup>1,2,3</sup>, WANG Xinwei<sup>1,2</sup>, MAO Xiang<sup>1,2</sup>, LUO Lu<sup>1,2</sup>, GAO Nan'an<sup>1,2</sup>,  
LIU Huiying<sup>1,2</sup>, WU Chenbingjie<sup>1,2</sup>

(1. Sinopec Star Petroleum Corporation Limited, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Geothermal Exploitation and Utilization, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), School of Energy, Beijing 100083, China)

收稿日期:2021-01-13;改回日期:2021-02-21

基金项目: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”(JP19002)资助。

作者简介:王婷灏,女,1990年生,工程师,矿产普查与勘探专业,主要从事地热资源评价研究;E-mail: wangtinghao.xxxy@sinopec.com。

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

**[Objective]** The characteristics and development potential of geothermal resources is an important basis for the development of regional geothermal resources. **[Methods]** Combined the previous research results with the latest drilling data, the geothermal reservoir model is established based on the analysis of the main factors such as geothermal geological background, thermal reservoir distribution, geothermal field characteristics and hydrochemical resource types in the northern Cangxian uplift. **[Results]** Under the background of high heat flow value in the extensional sedimentary basin of Bohai Bay, the atmospheric precipitation received by the bedrock in the exposed area of Yanshan Mountain in the north is used as the near source water supply. The cold water enters the bedrock, is heated by the deep heat source in the deep circulation process, and migrates and enriches along the fracture zone and unconformity surface, and forms the geothermal heat transfer mechanism dominated by conduction system. **[Conclusions]** The geothermal resources in this area are characterized by many types thermal reservoirs, high geothermal gradient of caprock, rapid recharge rate and huge resources. It is mainly shown as follows: Three sets of main hot water reservoir, sandstone thermal reservoir of Guantao Formation, karst thermal reservoir of Ordovician and Jixian Wumishan Formation are distributed in the area; the distribution of geothermal field is mainly controlled by basement structure, and the average geothermal gradient in bedrock uplift area is 45 °C/km; with the increase of groundwater depth, the groundwater type changes from  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$  to mature  $\text{Cl-Na}$ ; the recoverable geothermal resources in this area is  $1.67\times 10^{10}$  GJ, equivalent to  $5.72\times 10^8$  t of standard coal. The annual exploitable geothermal resources can meet the heating area of  $2\times 10^8$  m<sup>2</sup>, considering the balance of exploiting and irrigation, the annual exploitable resource of geothermal fluid in the northern part of Cangxian uplift is  $7.06\times 10^7$  GJ, equivalent to  $2.41\times 10^6$  t of standard coal, which can meet the heating area of  $8.5\times 10^7$  m<sup>2</sup>, which has a good prospect of geothermal market development.

**Key words:** reservoir evaluation; characteristics of geothermal field; geothermal resource potential; northern Cangxian uplift; Tianjin; geothermal geological survey engineering

**Highlights:** Characterizing the characteristics of geothermal resources in the northern part of Cangxian Uplift from multiple angles, including geological structure background, characteristics of thermal reservoir stratification, horizontal and vertical distribution of geothermal field, and hydrochemical migration path, and establishing a geothermal conceptual model, on this basis, calculating the annual recoverable geothermal resources in this area have innovative significance for analyzing the geothermal development potential under the condition of balanced exploitation and irrigation.

**About the first author:** WANG Tinghao, female, born in 1990, engineer, majors in minerals exploration, engaged in evaluation of geothermal resources; E-mail: wangtinghao.xsy@sinopec.com.

**Fund support:** Supported by the project of Sinopec Key Scientific and Technological "Geothermal resources evaluation and development technology policy in key areas of Bohai Bay Basin" (No.JP19002).

## 1 引 言

地热资源作为一种储量大、分布广、可再生的清洁能源在国际能源领域取得了广泛关注,按温度分级可分为高温地热资源( $\geq 150^\circ\text{C}$ ),中温地热资源( $< 150^\circ\text{C}$ 且 $\geq 90^\circ\text{C}$ )和低温地热资源( $< 90^\circ\text{C}$ )三级(蔺文静等,2013;张薇等,2019)。渤海湾盆地沧县隆起内部地热资源主要为中低温地热资源,整体地热资源表现为水温高、水量大、易开采、勘探潜力巨大。该区域内的中低温地热资源的合理利用可以有效缓解京津冀地区冬季供暖引起的能源紧张及大气污染问题,对加快能源结构改革和经济增长起到了正向促进作用(Giggenbach,1988; Armienta et

al., 2014)。

本文的研究区域行政区划主要包含天津市宁河汉沽地区、宝坻区、芦台地区及滨海新区北部,面积2780.8 km<sup>2</sup>,构造区划上涉及王草庄凸起、宁河凸起、潘庄凸起和北塘凹陷4个三级构造单元(图1,表1)。沧县隆起区中低温地热资源的勘探开发已有60余年的历史,第一眼地热井钻于1936年天津老西,井深800 m,主要开发的为浅部孔隙型热水。20世纪70年代开始该地区的地热资源开始规模化勘探,先后圈定了山岭子地热田、滨海地热田、宁河—汉沽地热田、潘庄—芦台地热田等10个地热异常区(高知云,1995)。如今,沧县隆起地区的开采深度已由浅入深,由南至北,由小范围勘探至规模性开

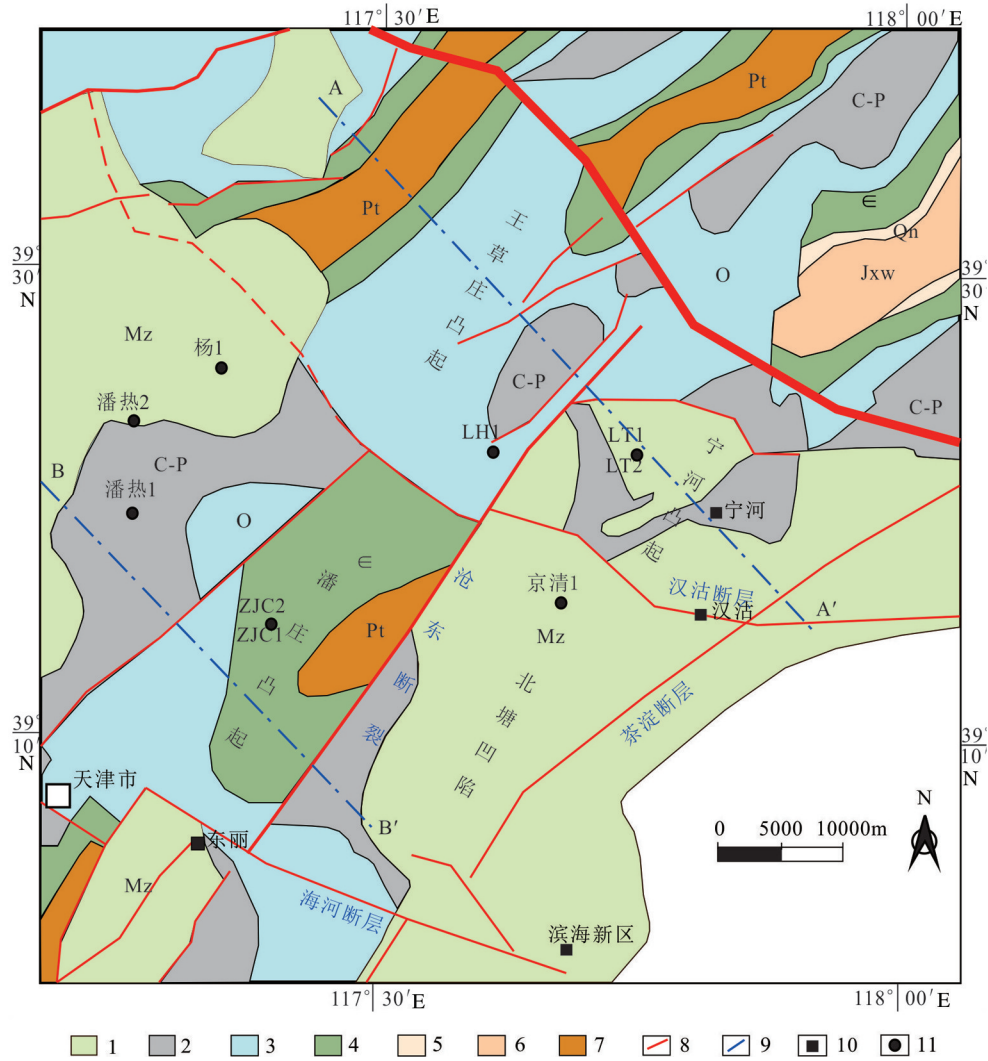


图1 沧县隆起北部剥新生代地质图

1—中生界;2—石炭系—二叠系;3—奥陶系;4—寒武系;5—青白口系;6—蓟县系;7—元古界;8—断层;9—剖面;10—县市;11—地热井

Fig.1 Stripping Cenozoic geological map in northern Cangxian uplift

1—Mesozoic; 2—Carboniferous-Permian; 3—Ordovician; 4—Cambrian; 5—Qingbaikou System; 6—Jixian System; 7—Proterozoic; 8—Fault; 9—Profile; 10—City; 11—Geothermal well

发阶段,2017年北部区域包括王草庄凸起、宁河凸起、潘庄凸起共完钻地热井6口,井口温度70~90℃,水量90~140 m<sup>3</sup>/h。

针对沧县隆起北区的地热资源分布特征,前人已经有了一定的研究成果,段忠丰(2007)认为区内地层岩性及富水程度的差异较大,明确了蓟县系雾迷山组是本区的主要热储层位;天津地热勘探开发设计院(2002)对天津地区的地下热水成因进行了研究,认为宁河—宝坻断裂以北的基岩裸露区为大气降水入渗提供了开放的水文地质环境;赵苏民等(2007)总结沧东断裂(天津段)的导水导热特征,认为沧东断裂在上地壳浅部能将下部热储层高位热能以热对流的形

式传递到浅部。通过总结前人的研究成果,可以发现本区内受断裂影响下的砂岩热储与岩溶热储的特征差异较大,不同岩性的聚热与传热机制尚不明确,不同类型地热系统的“源、储、通、盖”存在明显差别。故本文拟在总结前人研究成果的基础上,结合最新钻井数据剖析沧县隆起北部地区地热资源的主控构造、热源条件、热储特征及开发潜力,为津唐地区的地热资源开发提供理论依据。

## 2 地热地质条件

### 2.1 构造条件

渤海湾盆地是华北克拉通内陆中心的中、新生

表 1 研究区构造单元一览表

Table 1 List of tectonic units in the study area

I 级	II 级	III 级	边界断裂	基底顶面岩性/埋深/m	热储类型
渤海湾盆地	沧县隆起	王草庄凸起	北:宝坻—宁河断裂 南:汉沽断裂 东:沧东断裂 西:古近系缺失线	Pt、C、O、C-P 均有分布/800~1500	奥陶系岩溶热储
			北:汉沽断裂 南:海河断裂 东:沧东断裂 西:天津断裂		
	黄骅坳陷	宁河凸起	北:宝坻—宁河断裂 南:汉沽断裂 西:沧东断裂	Mz、C-P/1000~1800	馆陶组砂岩热储
			北:汉沽断裂 南:海河断裂 西:沧东断裂 东:涧南断裂		

代盆地,经历印支—燕山构造运动伴生一系列北北东、北东向断裂,形成多凹多凸、凹凸相间的构造格局(李三忠等,2010)。华北克拉通破坏所造成的岩石圈减薄、地壳变形、地震及岩浆活动为本地区深部热能进入地层浅部,形成地热资源创造了良好的条件(王贵玲等,2017)。本区大地热流值(62.5±5) mW/m<sup>2</sup>,高于中国大陆地区平均大地热流值 60 mW/m<sup>2</sup>(刘琼颖和何丽娟,2019)。

现今沧县隆起构造位置位于冀中坳陷东侧,北抵宝坻—宁河断裂与燕山褶皱带相接,东以沧东断裂为界与黄骅坳陷相邻(江国胜,2014)。古沧津复向斜的构造—沉积演化为现今沧县隆起北部地区地热系统的形成创造了地质条件,主要表现为:(1)中元古代—早古生代浅水地台相沉积,发育蓟县系雾迷山组和寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩(图 2a);(2)晚古生代石炭系—二叠系接受海陆交互相煤系地层沉积,发育热储直接盖层(图 2b);(3)白垩纪晚期沧津复向斜隆升,基本没有接受沉积并有一定程度的剥蚀,潜山岩溶逐渐发育(图 2c);(4)古近纪伸展断块差异升降,向斜中北部沿沧东断裂解体,上盘沉降形成黄骅坳陷,西侧逐渐上升形成现今的正向构造沧县隆起,遭受强烈剥蚀并发育与断层相关的岩溶热储(图 2d,刘池洋,1986);(5)新近系华北断坳整体下沉,沧县隆起沉积了新生界地层作为本区的热储区域盖层,沉积厚度 800~1600 m(图 2e,段忠丰,2007;鲁庆伟等,2018)。

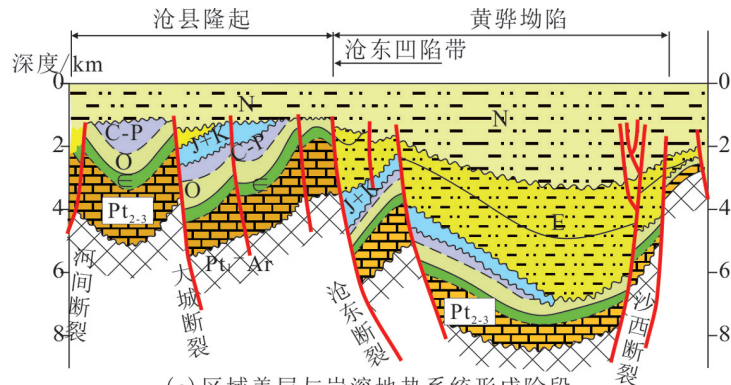
沧县隆起北部地区构造主体为基岩凸起区,深大断裂控制全区的构造演化及地层分布(Chu et al., 2014),如沧东断裂切穿整个区域上地壳,影响了本区地热田及热储分布,对区内深部地热的向上传导与地热资源形成起到重要的控制作用。

## 2.2 地层条件

沧县隆起北部地区地层以太古宇—古元古界变质岩系为结晶基底,其上不整合地沉积了元古界至新生界的一系列地层。全区除缺失古生界上奥陶统一石炭统和新生界古近系古新统外,其余地层均有发育,从老至新分别为太古界(Ar),中—新元古界(Pt<sub>2+3</sub>)的长城系、蓟县系和青白口系,岩性以滨海、浅海相泥质碳酸岩、页岩为主;下古生界(Pz)的寒武系、奥陶系发育滨海相灰色白云岩、灰岩夹泥质条带,上古生界石炭系—二叠系以海陆交互含煤碎屑岩沉积为主,下部岩性主要为深灰色泥岩、粉细砂岩夹煤层,上部发育紫红色泥岩与灰色细砂岩互层,偶见中酸性火山岩;中生界(Mz)部分缺失,剩余三叠系、侏罗系、白垩系以内陆杂色碎屑岩为主,含暗紫红、棕红、黄绿色砂岩、粉砂岩、泥岩呈不等厚互层。新生界古近系、新近系和第四系以陆相砂岩沉积为主,以砂泥岩互层覆盖全区。这些地层作为地热资源的热储层与沉积盖层,共同构成了本区地热资源的赋存环境。

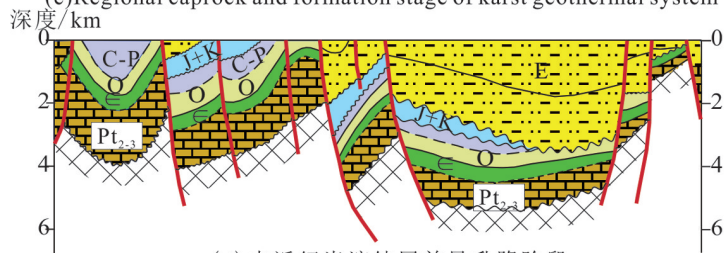
## 2.3 储—盖组合

本区受基岩剥蚀程度与盖层沉积厚度差异的

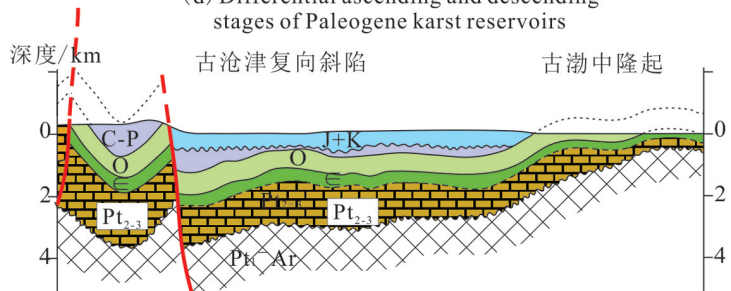


(e) 区域盖层与岩溶地热系统形成阶段

(e) Regional caprock and formation stage of karst geothermal system

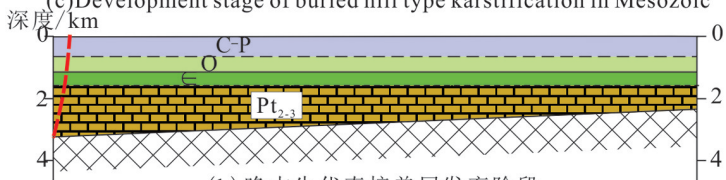


(d) 古近纪岩溶储层差异升降阶段  
(d) Differential ascending and descending stages of Paleogene karst reservoirs



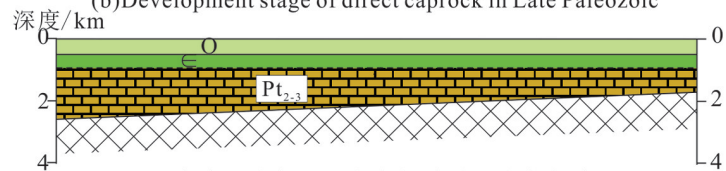
(c) 中生代潜山型岩溶作用发育阶段

(c) Development stage of buried hill type karstification in Mesozoic



(b) 晚古生代直接盖层发育阶段

(b) Development stage of direct caprock in Late Paleozoic



(a) 中晚元古代—早古生代碳酸盐岩发育阶段

(a) Middle-Late Proterozoic-Early Paleozoic carbonate development stage

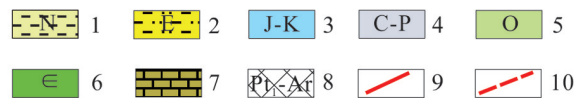


图2 研究区构造及地层演化图(修编自汪新伟,2018)

1—新近系;2—古近系;3—侏罗系—白垩系;4—石炭系—二叠系;5—奥陶系;6—寒武系;7—中—晚元古界;8—基底;9—断裂;10—推测断裂

Fig.2 Structural and stratigraphic evolution map of the study area (modified from Wang Xinwei et al., 2018)

1—Neogene; 2—Paleogene; 3—Jurassic—Cretaceous; 4—Carboniferous—Permian; 5—Ordovician;

6—Cambrian; 7—Middle—Late Proterozoic; 8—Basement; 9—Fault; 10—Inferred fault

双重影响,主要发育两类热储,包括:(1)砂岩孔隙型热储:主要为馆陶组砂岩热储,在沧东断裂上盘成层状分布,岩性稳定,具有埋藏浅、水温较低、出水量大的特点;(2)碳酸盐岩岩溶型热储:包含奥陶系和蓟县系雾迷山组两个层位,成带状分布于剥蚀较强烈的构造高部位,具有水温高、水量大、回灌易、经济性好的特点。

因次级构造单元内的基岩埋深情况不同,在4个Ⅲ级构造单元内存在不同的储/盖组合:黄骅拗陷自新近系全面进入受热沉降控制的裂后沉降期,构造活动弱,馆陶组和明化镇组下段地层在全区稳定发育(祁鹏等,2010;岳保静等,2020),是一套以陆相河流沉积为主的地层。进入新近系后期至第四系时期沉降速率又一次增大,沉积了较厚的砂泥岩互层,起到了很好的阻止热量散失的盖层作用(刘凯等,2017)。故位于沧东断裂以东的黄骅拗陷上的宁河凸起和北塘凹陷储/盖组合接触关系均为Q+Nm/Ng。

沧东断裂以西的王草庄凸起和潘庄凸起位于沧县隆起上,由北向南新生界碎屑岩作为直接盖层覆盖在奥陶系和蓟县系雾迷山组热储上,储/盖组合接触关系依次为(Q+N)/O、(Q+N)+C+Pt/Pt。就盖层条件相比较而言,在北塘凹陷因新生界地层较厚、岩溶热储埋藏深(>3000 m),故地热开发利用经济风险较高;而在其他三个构造单元新生界厚度适中,岩溶热储顶面埋深800~2000 m,地热开采条件较好,目前主要已开发的热储层位为奥陶系和蓟县系雾迷山组。

### 3 热储特征

热储特征主要由地层沉积厚度、岩性组合、平

面空间展布及裂隙发育程度来决定。为对比不同热储类型的空间展布与物性差异,本文根据前人成果与最新的地热井数据(表2)、结合区域地质剖面,编制了沧县隆起北部地区砂岩热储底板埋深图和岩溶热储顶板埋深图(图3a,图4a,图5a)。在此基础上,结合钻井所揭示的井口温度和地温梯度,编制了研究区的储层水温度分布图(图3b,图4b,图5b),本文所表述的热储平均温度分布是指热储层内不同深度储集段中地热水的混合温度(忽略抽水过程中的热量损失)。

#### 3.1 砂岩热储

砂岩热储的开发条件主要受岩性垂向和平面展布的影响,相较于明化镇组曲流河沉积特征,馆陶组主要发育的辫状河沉积具有良好的孔渗条件,为更优质的砂岩热储层(岳保静等,2020;杨会峰等,2021)。根据区域地质剖面和已完钻地热井数据,编制了沧县隆起北部地区馆陶组砂岩底板埋深与孔隙水温度图(图3)。

##### 3.1.1 馆陶组底板埋深

由沧县隆起北部地区馆陶组底板埋深等值线图(图3a)可以看出,本区馆陶组由北向南埋深逐渐增加,地层受断裂控制明显,沧东断裂附近底板埋深较浅,在1200~1700 m,向东靠近渤海海域馆陶组底板埋深在1900~2200 m,在潘庄凸起大部分地区馆陶组缺失,全区馆陶组厚度范围300~600 m。

##### 3.1.2 馆陶组底板温度

由沧县隆起北部地区馆陶组底板温度等值线图(图3b)可以看出,全区大部分地区馆陶组底板温度范围40~65℃,凹陷深处温度超过65℃,沧东断裂附近的凸起区虽底板埋深浅,但温度较处于55~60℃范围内,靠近北部燕山裸露区温度较低,在35~45℃范围内。

表2 沧县隆起北部地区地热井数据统计表

Table 2 Statistical table of geothermal well data in northern Cangxian uplift

编号	井位	构造单元	井深/m	出口水 温/℃	涌水量/ (m <sup>3</sup> /h)	储厚 比/%	孔隙 度/%	渗透 率/mD	储层有效 厚度/m	取水层段/m	热储层位	G <sub>地</sub>
1	LT1	宁河凸起	1608	57	106	34.6	24.2	245	145.5	1264~1685	Ng	2.72
2	LT2	宁河凸起	1680	59	112	51.8	26	287	149.7	1285~1677	Ng	2.62
3	LH1	王草庄凸起	1650	47	122	26.9	11.7	259	122.2	1281~2010.88	O	2.72
4	LH2	王草庄凸起	1880	49	102	28	2.4	155	201.6	1290~2010.7	O	/
5	ZJC1	潘庄凸起	2983	85	112.8	39.1	5.6	0.78	271.8	2403~3078	Jxw	2.76
6	ZJC2	潘庄凸起	3010	85	112	21.6	4.6	1.19	127.1	2407~2998	Jxw	2.53
7	京清1	北塘凹陷	1869	61	80	/	/	/	/	1467.6~1826	Ng	3.2
8	BD-05B	王草庄凸起西缘	3300	74	84	14.3	3.7	206	109.6	2537.2~3150.7	O	/

注:编号1~6所有数据来源于中石化新星石油公司成井报告,7~8号来自天津市潘庄—芦台地热资源普查报告。

### 3.1.3 储集层物性

LT1井测井解释成果显示已开发的馆陶组(未钻穿)共发育37层储集层段,砂岩地层累计厚度308.7 m,孔隙度24%~30%,平均渗透率为200~300 mD,单井出水量80~100 m<sup>3</sup>/h(图6,表2)。从测井曲线判断主力产水层段位于馆陶组下段,自然伽马曲线呈中低值,自然电位存在曲线异常幅度,声波速度与附近岩性对比可能发生突变。

录井资料显示馆陶组地层整体呈粗—细—粗的沉积旋回,砂包泥岩性特征明显,上部岩性以灰绿、灰白色砂岩、砂砾岩为主,夹灰绿、棕红色泥岩;中部以浅灰色、棕红色泥岩为主;下部以砂砾岩为主,夹泥岩呈不等厚互层(图6a),砂岩颗粒较粗,砂厚比一般大于35%。

## 3.2 岩溶热储

较于全区稳定沉积的孔隙型砂岩热储,碳酸盐岩岩溶热储的形成主要是海相地层沉积后抬升遭受淋滤剥蚀形成的裂缝结构为地层储水创造了条件(李胜涛等,2022)。所以,此类型热储发育主要受断裂控制,呈带状分布、非均质性强,具有水温高、埋藏浅、易回灌等特点(王迪等,2020)。

### 3.2.1 奥陶系岩溶热储

研究区内的奥陶系基本连续发育,仅在汉沽断裂、沧东断裂及天津断裂之间的部分地区缺失,顶面埋深在1000~5000 m,结合地热开发的经济性,一般奥陶系顶部埋深大于3000 m的地区不为此类型热储的主力开发区。

#### (1) 奥陶系岩溶热储顶板埋深

从沧县隆起北部地区奥陶系顶面埋深等值线图(图4a)可以看出,区域内王草庄凸起的奥陶系地层顶面埋深1000~2000 m,一般厚度为500~700 m,具备奥陶系热储开发利用条件。潘庄凸起的西南部存在尚未剥蚀的奥陶系,顶板埋深在1200~1600 m。沧东断裂上盘的坳陷区奥陶系顶板埋深大于3000 m,仅在宁河凸起北部靠近山前断裂带地区存在埋深在1200~2400 m范围内的奥陶系。

#### (2) 奥陶系岩溶水温度

从沧县隆起北部地区奥陶系岩溶水温度等值线图(图4b)可以看出,全区奥陶系热储温度范围为40~80℃。在可开发区域王草庄凸起和宁河凸起北部地区的奥陶系热储温度在45~75℃,整体奥陶系

温度与埋深变化一致。

### (3) 储集层物性

LH1井测井曲线显示本区地层取水层段自然伽马曲线明显低值,电阻较高,局部出现孔渗突变特征,推测可能钻遇裂缝、溶洞或溶孔,成为本套主力产水层。结合区域地层剥蚀情况,分析凸起内峰峰组地层可能已经被剥蚀,储层以上、下马家沟组为主,孔隙度变化范围较大,在2.36%~42.6%,渗透率的高值区分布在断层附近,单井出水量80~130 m<sup>3</sup>/h(图6b,表2)。测井曲线上识别出岩溶裂缝层42层,累计厚度122.2 m,其中一类裂缝层在上、下马家沟组发育共发育14层,厚度分别为35.1 m和9.5 m;二类裂缝层主要发育在上马家沟组共发育6层,厚度19.2 m;三类裂缝层奥陶系整段均有分布,发育厚度58.4 m。

录井成果显示奥陶系岩性以灰岩为主,大套灰岩夹少量泥质条带,反映了浅海相碳酸盐岩沉积序列(Wang et al.,2020)。

### 3.2.2 蓟县系雾迷山组岩溶热储

本区蓟县系地层在全区均有分布,经历了铁岭运动和蓟县运动使地壳上升,区域表现为两次海侵海退,碳酸盐岩受风化剥蚀裂隙发育形成岩溶剥蚀面,目前区内尚未有钻孔揭穿该组,视厚均大于600 m。因此,蓟县系雾迷山组具有分布广、厚度大、储水能力强的特点。

#### (1) 雾迷山组岩溶热储顶面埋深

从沧县隆起北部地区蓟县系雾迷山组顶面埋深等值线图(图5a)可以看出,王草庄凸起由北向南埋深从2000 m到4000 m变化,沧东断裂的上盘的坳陷区蓟县系雾迷山组总体埋深大于3000 m。受热储的顶面埋深及上覆盖层不同岩性热导率的影响,研究区内蓟县系雾迷山组的开发位置主要集中在潘庄凸起,顶面埋深范围在2000~3000 m。

#### (2) 雾迷山组岩溶水温度

从沧县隆起北部地区蓟县系雾迷山组岩溶水温度等值线图(图5b)可以看出,全区温度变化范围在75~100℃,王草庄凸起和宁河凸起北部地区的雾迷山组热储温度偏低,范围在45~75℃,靠近沧东断裂埋深较深的部位温度可能超过140℃,但受埋深条件影响,不考虑进行地热开采。

### (3) 储集层物性

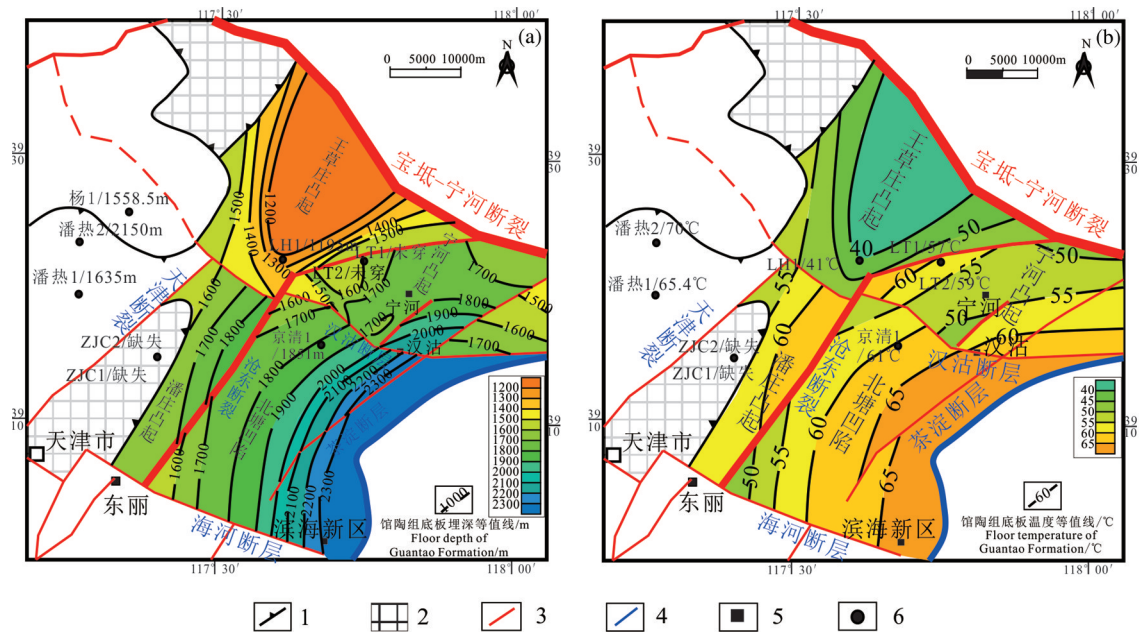


图3 沧县隆起北部地区馆陶组底板埋深(a)及温度等值线图(b)  
 1—古近系尖灭线;2—剥蚀区;3—断层;4—海岸线;5—县市;6—地热井

Fig.3 Floor depth (a) and temperature contour map (b) of Guantao Formation in northern Cangxian uplift  
 1—Paleogene pinch out line; 2—Denudation area; 3—Fault; 4—Coastline; 5—City; 6—Geothermal well

ZJC1井测井曲线显示裂缝在雾迷山组全段均有分布,储水条件优质。取水层段自然伽马曲线明显低值,声波速度增大,测井曲线上识别出岩溶裂缝层51层,累计厚度352 m,一类裂缝层52.3 m/7层、二类裂

缝层110.1 m/20层、三类裂缝层191.7 m/24层。一类裂缝层多发育在雾迷山组上段的风化壳顶部,相对产能超过50%,孔隙度范围在2.29%~8%,厚度52.3 m;二类裂缝层电阻略高于一类;三类裂缝层孔隙度范围

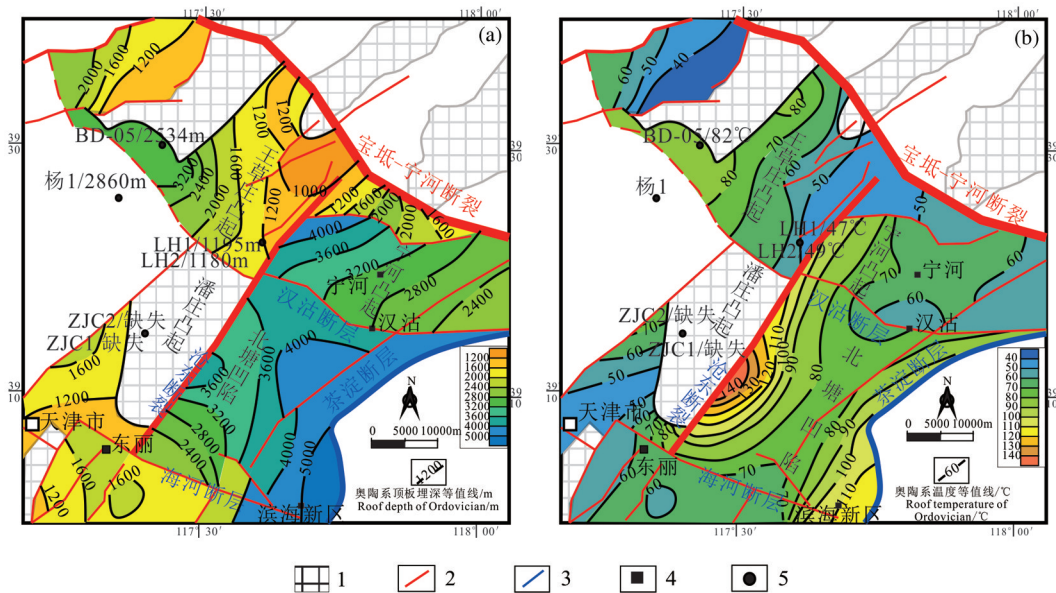


图4 沧县隆起北部地区奥陶系顶面埋深(a)及温度等值线图(b)  
 1—剥蚀区;2—断层;3—海岸线;4—县市;5—地热井

Fig.4 Roof depth (a) and temperature contour map (b) of Ordovician in northern Cangxian uplift  
 1—Denudation area; 2—Fault; 3—Coastline; 4—City; 5—Geothermal well



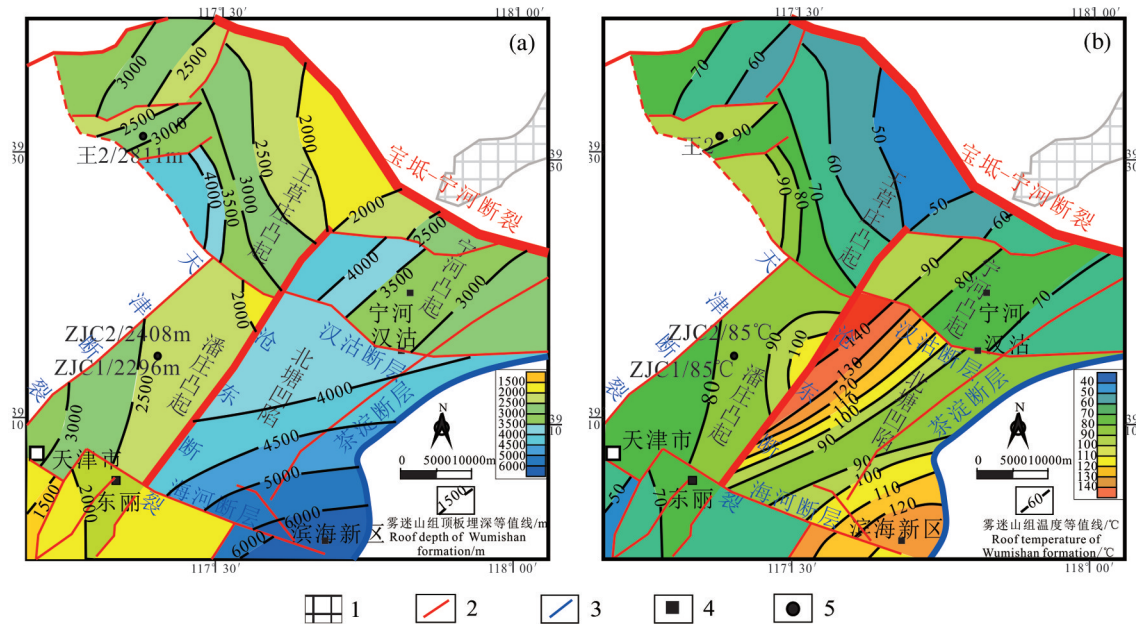


图5 沧县隆起北部地区蓟县系雾迷山组顶面埋深(a)及温度等值线图(b)

1—剥蚀区;2—断层;3—海岸线;4—县市;5—地热井

Fig.5 Roof depth (a) and temperature contour map (b) of Wumishan Formation of Jixian system in northern Cangxian uplift

1—Denudation area; 2—Fault; 3—Coastline; 4—City; 5—Geothermal well

在0.71%~7.10%。井段内储厚比范围为20%~40%，出单井出水量100~200 m<sup>3</sup>/h(图6c,表2)。

录井资料显示地层岩性以灰白色细晶白云岩为主,含少量燧石条带白云岩、肉红色泥质白云岩,与上覆青白口系呈不整合接触。

#### 4 地温场特征

地温场特征是深部热源在地壳浅层的直接表示,盆地深部地温场的非对称性分布决定了盆地浅部的地温场展布特征,而决定这种非对称性的主要因素是基岩面的起伏形态、岩石热物理性质及新生界盖层厚度(汪新伟等,2019)。同时,沉积盆地内的断裂规模、岩浆活动和地下水活动对地温场分布也有一定的影响(Pirlo,2004)。本区区域构造背景华北平原属于上地幔隆起区,热源均为上地幔热量和基岩花岗岩壳中的放射性产热,这些热量通过上覆介质向地表传递(毛小平等,2018),形成可利用的地热资源。前人研究成果表明,沧县隆起北部的大地热流值相较于渤海湾盆地并无明显增幅,分析原因是区内无附加热源,岩浆活动对本地区的地热无明显影响(张百鸣等,2006)。

##### 4.1 平面分布

大地热流值和地温梯度是揭示区域现今热状态

的重要参数。由前人资料及地热井钻井数据绘制出沧县隆起北部地区大地热流等值线图(图7a)、地温梯度等值线图(图7b)、地热地质剖面图(图8),从图中可以看出,地热异常主要受两种构造作用控制。

##### 4.1.1 基岩凸起

本区地温梯度等值线、大地热流值的圈闭形态与凸起构造带的延伸方向一致,间接说明沧县隆起北部地区地温场的分布受基底构造形态控制的特点。沧县隆起高部位地温梯度值较高为40~50°C/km,大地热流值57.5~70 mW/m<sup>2</sup>,隆起区的平均地温梯度在45°C/km,明显高于两侧的坳陷区地温梯度平均值33°C/km,说明基底凹凸相间的构造格局下产生的热流侧向再分配是造成该地区地热资源差异存在的主要原因。

##### 4.1.2 深断裂

除受基岩凸起的影响,区域内主控断裂对于地温场的分布也有较大影响(Zhang et al.,2020),沧东断裂带中段附近的地温梯度为全区最高,普遍大于50°C/km。LT1井和LH1井钻遇新生界厚度均在1270 m左右,但靠近断裂的LT1井地温梯度在28°C/km,LH1井相对断裂较远,盖层的地温梯度仅为22°C/km。说明沧东断裂的性质影响了浅部地温场的分布,分析导致这一现象的原因可能是断裂交汇

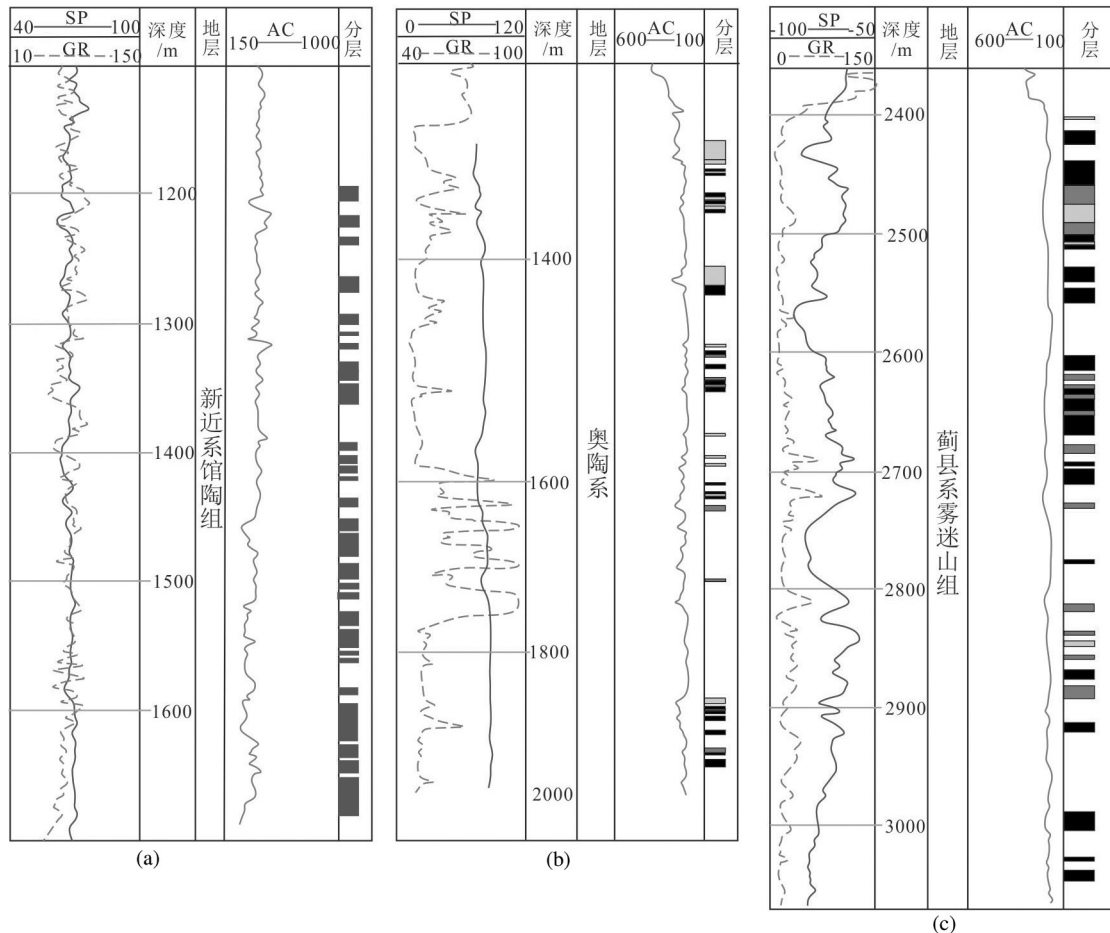


图6 沧县隆起北部地热井单井测井解释图

a—LT1—宁河凸起馆陶组砂岩热储；b—LH1—王草庄凸起奥陶系岩溶热储；c—ZJC1—潘庄凸起蓟县系雾迷山组岩溶热储

Fig.6 Logging interpretation of geothermal well in northern Cangxian uplift

a—LT1—Sandstone thermal reservoir of Guantao Formation in Ninghe uplift; b—LH1—Karst thermal reservoir of Ordovician in Wangcaozhuang uplift; c—ZJC1—Karst thermal reservoir of Wumishan Formation of Jixian System in Panzhuang uplift

地带热流活动强烈,向浅部地层传热的过程中热流选择断裂破碎带作为快速通道(赵苏民等,2007),故这一区域的大地热流值和地温梯度相对较高。

#### 4.2 垂向分层

从沧县隆起北部地区的大地热流值与地温梯度等值线图(图7)可以看出,二者基本成正相关关系,但并不完全一致,说明岩层热导率的不同以及不同类型盖层厚度的差异,也是造成区域地温分布差异的主要因素之一。不同性质的岩石热导率差别较大,地层由老到新,岩石热导率基本呈逐渐减小的趋势。其中,以泥岩、砂岩为主的新生界沉积层平均热导率仅为 $1.72 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,古生代与元古宙地层以碳酸盐岩为主,热导率一般大于 $2.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。从整体而言,结构松散的新生界热导率小于结构致密的

基岩地层,故地温梯度高于基岩地层以阻碍热能自由散失,是地热田的保温盖层。

从单孔连续测温的稳态温度表明(图9),沧县隆起北部地区的地下水温度基本上是线性增温,表明整体是传导型地热系统,在古近系—新近系以上的盖层部分地温梯度变化不大,均大于 $25^\circ\text{C}/\text{km}$ 。进入基岩后梯度明显减小,一般在 $10\sim 20^\circ\text{C}/\text{km}$ ,甚至部分井小于 $10^\circ\text{C}/\text{km}$ ,结合测井曲线,发现含水段比非含水段具有更低的地温梯度,这说明在热储的裂隙发育,连通性较好,侧向低温水通过裂缝补给,局部出现水热对流的特征,而水是热的良导体,水的对流与径流加速了热的传递。

综上所述,沧县隆起北部地区处于中低温热流背景区,热流在地壳浅部再分配,于地壳浅部基岩

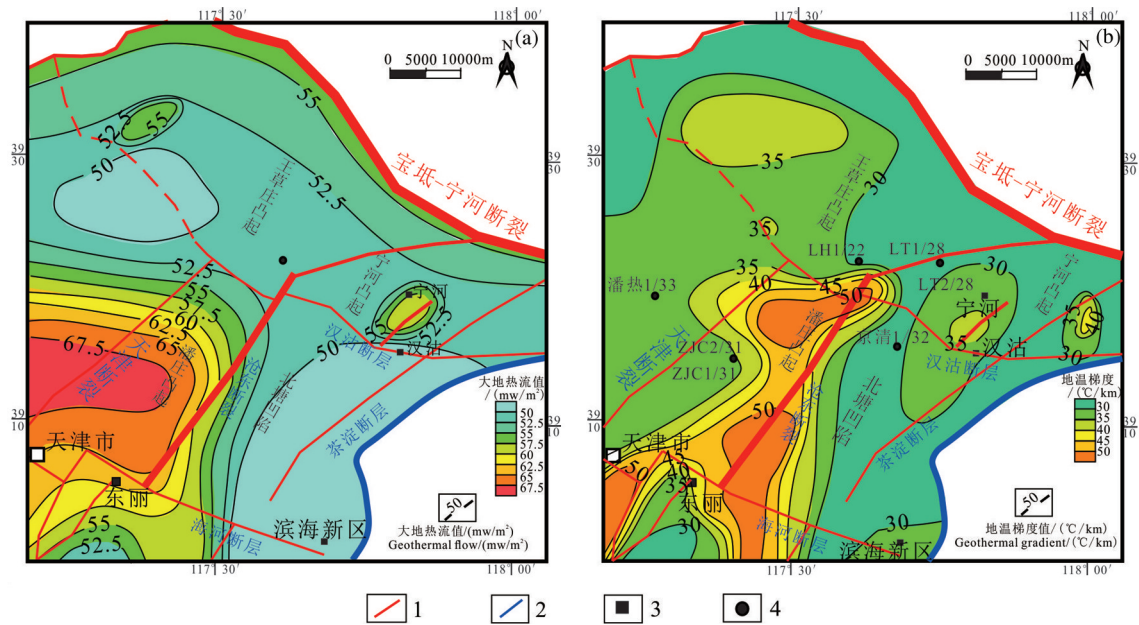


图7 沧县隆起北部盖层大地热流等值线图(a)和地温梯度等值线图(b)(修编自阮传侠等,2018)

1—断层;2—海岸线;3—县市;4—地热井

Fig.7 Geothermal flow (a) and geothermal gradient contour map (b) of the northern cap rock of Cangxian uplift (modified from Ruan Chuanxia et al., 2018)

1-Fault; 2-Coastline; 3-City; 4-Geothermal well

凸起区的高热导率碳酸盐岩地层中相对集中,在本区北部由于新生界高热阻盖层发育较差,且地下水径流条件好,影响了地温场的发育,而沧东断裂中段附近,在断裂导热且高热阻盖层的保护下,则形成了热流、温度、地温梯度均较高的地温场。

### 5 水化学类型及运移路径

按照本区的热储分类总结本区的两套地下水运移系统,孔隙型砂岩热储和裂隙型岩溶热储在平面和垂向上分带明显:平面上,同层地下水的矿化度由北向南逐渐升高;垂向上,由浅至深逐渐增加(图10),且地下水类型随着埋深的增加由HCO<sub>3</sub>-Na、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na型水向成熟的Cl-Na型水过渡(表3)。

研究区内孔隙型砂岩热储地下水组成以Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>为主,且Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>;阴离子以Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,且HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>,水化学类型以HCO<sub>3</sub>-Na型为主,矿度化一般在0.4~2 g/L,pH值>8,属弱碱性水。据已有钻孔资料统计,本区矿化度由北向南逐渐增加,北部因靠近燕山山前积极交替带,受大气降水影响较大,间接证明本区的馆陶组地下水来自燕山补给区沿南西向径流

的事实(赵苏民等,2007),由于馆陶组在本区域内分布不连续,所以矿化度在水平方向上受到地层分布的影响(图10b),在地层连续分布的区域,地下水径流条件好,靠近断裂的钻孔(LT1井、LT2井)地下水矿化度明显偏低,研究区内的裂隙型岩溶热储水质类型多为HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Na和Cl-Na,pH值在7~8,属弱碱性水。由燕山附近的基岩裸露区到沧县隆起的轴部基岩埋深较浅且直接被古近系覆盖,缺失新近系和石炭系一二叠系,矿度化一般在2~4 g/L,而沧东断裂附近基岩地下水矿化度较低仅有1~2 g/L,也说明深大断裂为本区地下水交换运移提供了通道。通过对比得知,本区的奥陶系热储矿化度存在较大差异,层内可能含有石膏和其他盐类,如王草庄凸起西缘的BD-05B井、潘庄凸起西部的潘热1井的矿化度明显高于本区同层其他钻孔的地下水矿化度,分析原因可能是由于本区远离燕山山区补给,且石炭系一二叠系直接覆盖其上,地下水径流受阻,导致其矿化度明显高于靠近燕山山前断裂带地下水。

从静水位等值线可以看出,水流从燕山基岩裸露区由北向南进入盆地补给,沧东断裂北段两盘具

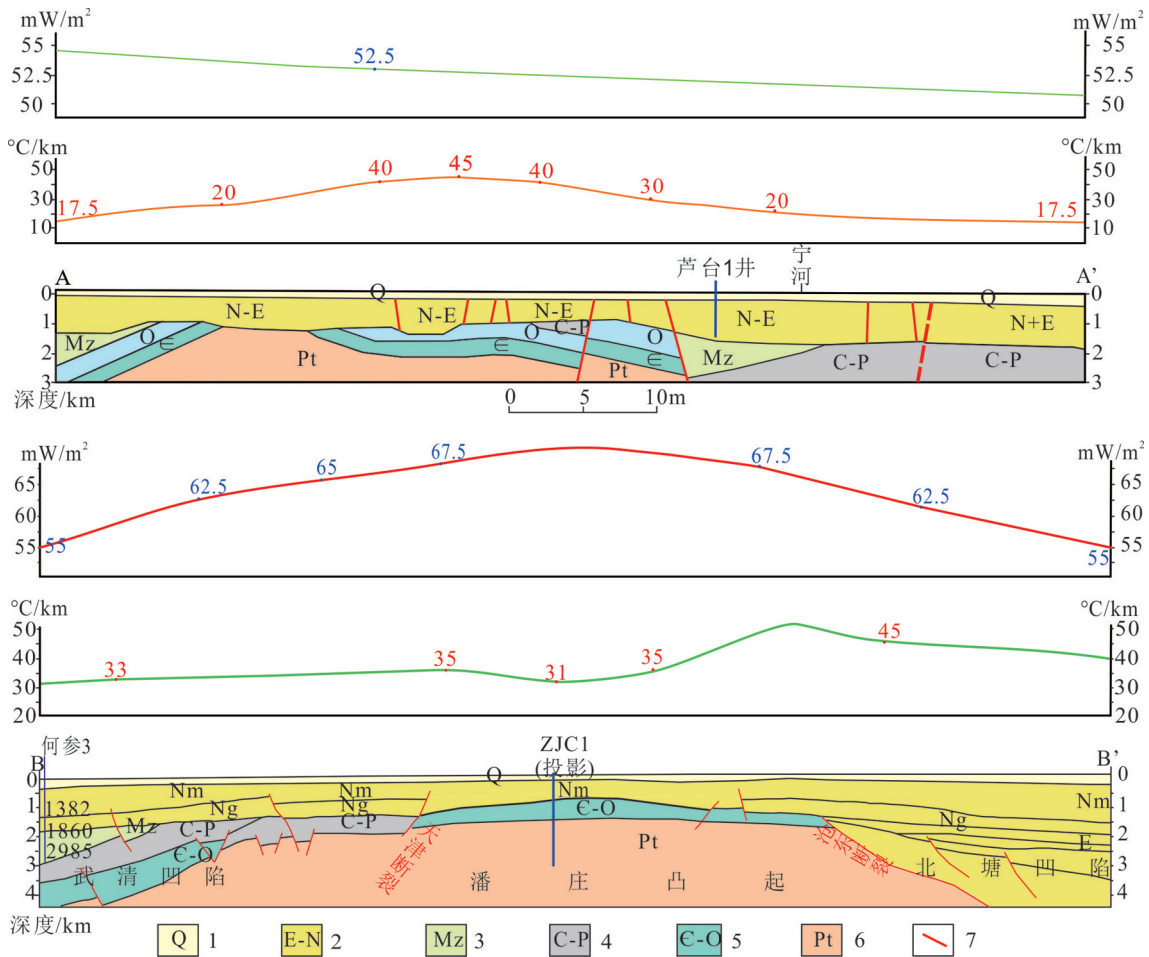


图8 沧县隆起北部地区地热地质剖面图(A—A'、B—B'剖面位置见图1)

1—第四系;2—古近系—新近系;3—中生界;4—石炭系—二叠系;5—寒武系—奥陶系;6—元古界;7—断层

Fig.8 Geothermal geological profile of northern Cangxian uplift (location sections in Fig. 1)

1—Quaternary; 2—Neogene—Paleogene; 3—Mesozoic; 4—Carboniferous—Permian; 5—Cambrian—Ordovician;

6—Proterozoic; 7—Fault

有从NE向SW较强的导水能力,远离断裂带的区域水动力较弱。从整体地层的矿化度差异也可以看出,沧东断裂两侧的砂岩孔隙水与岩溶裂隙水矿化度差别不大,水流混合作用使上下热储层矿化度相近,说明沧东断裂其对上下砂岩热储与碳酸盐岩热储具有沟通作用。

## 6 概念模型与地热资源量

### 6.1 地热概念模型

沧县隆起北部地区是在渤海湾伸展型沉积盆地高大地热流值背景下,以传导型传热机制为主的地热系统。北部燕山裸露区基岩接受的大气降水作为近源补给水源,进入基岩的冷水在深层循环过

程中受到深部热源加热增温,沿断裂破碎带和不整合面向上运移富集,形成了3套主力热水储集层:馆陶组砂岩热储,顶板埋深1200~2200 m,热储温度40~65°C;奥陶系岩溶热储,开发区域主要为沧县隆起北部地区的低凸起区,顶面埋深1200~2400 m,热储温度45~65°C;蓟县系雾迷山组岩溶热储在全区均有分布,凸起区顶面埋深2000~3000 m,热储温度75~100°C(图11)。

### 6.2 地热资源量

沧县隆起北部地区为传导型地热资源,对于这类地热田一般采用“热储体积法”估算其内部的地热资源量。由于沧县隆起北部地区采用的是采灌结合的地热开发方式,根据自然资源部最新颁发的

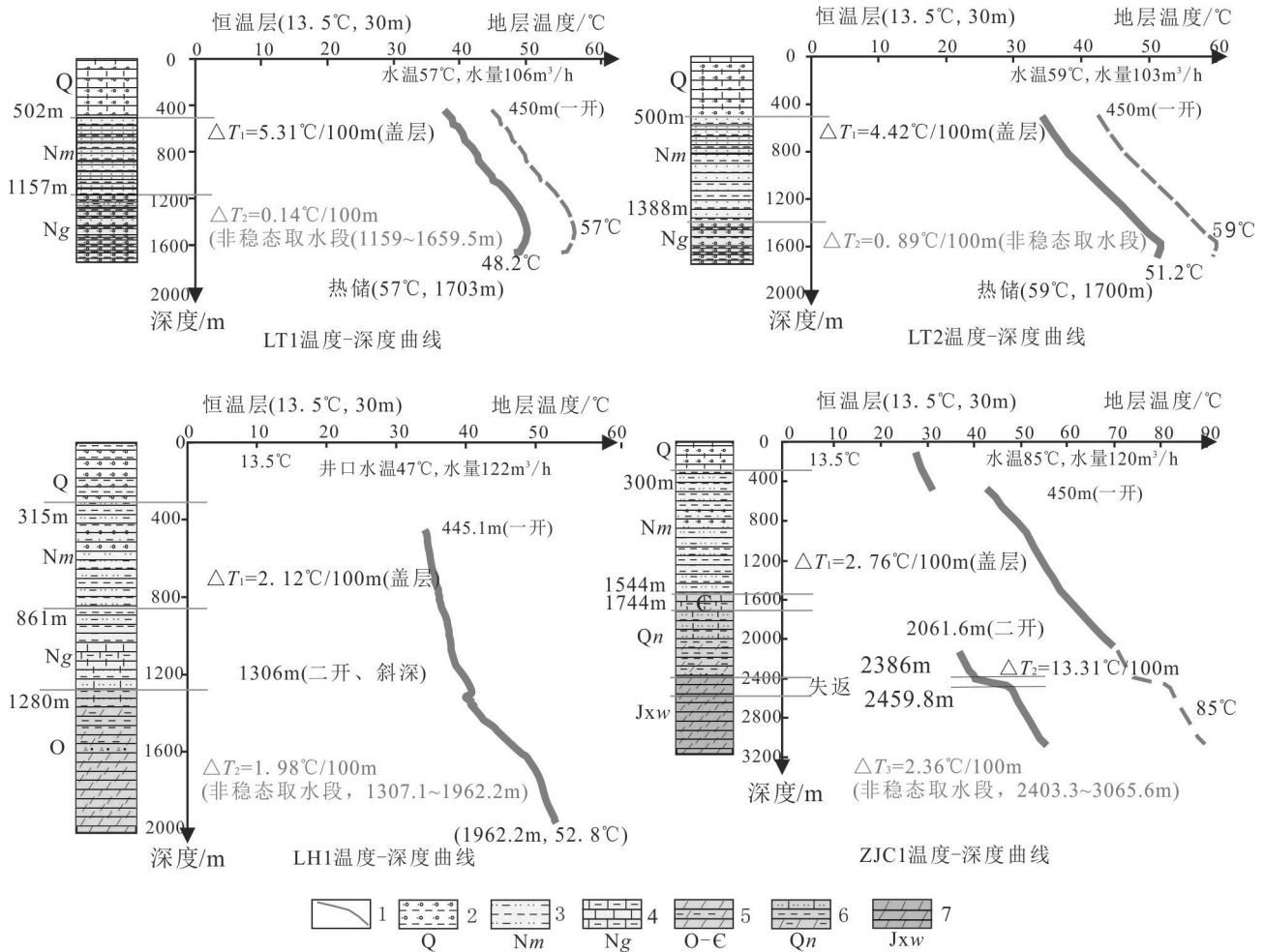


图9 地热井地层温度-深度关系图(虚线为稳态后温度)

1—深度-温度曲线; 2—第四系; 3—明化镇组; 4—馆陶组; 5—奥陶系—寒武系; 6—青白口系; 7—蓟县系雾迷山组

Fig.9 Geothermal well formation temperature-depth diagram (dotted line shows post steady state temperature)

1—Depth-temperature curve; 2—Quaternary; 3—Minghuazhen Formation; 4—Guantao Formation; 5—Ordovician-Cambrian; 6—Qingbaikou System; 7—Wumishan Formation of Jixian System

《地热资源评价方法及估算规程(DZ/T 0331-2020)》,在利用“热储体积法”计算了静态地热资源量的基础上,考虑地热回灌对地热流体年开采量的影响,本文也计算了采灌均衡条件下的地热流体年可开采量。据前期研究成果,将沧县隆起北部地区按照砂岩热储和岩溶热储两类分别进行计算后相加作为该地区的地热资源量。根据区内热储分布情况、地热井测井解释结果、可开发利用的经济价值,参考已开发地热田的相关热储层物理参数(王迪等,2020),本区内馆陶组砂岩热储底板埋深范围在1200~2000 m为经济性可开发利用热储区域;奥陶系岩溶热储顶板埋深1000~2500 m为经济性可开发利用热储区域;蓟县系雾迷山组岩溶热储顶板埋

深1200~3500 m为经济性可开发利用热储区域。综合盖层厚度和热储埋深,确定了本区地热资源量计算的参数(表4)。

根据热储体积法计算公式(1)计算沧县隆起北部地区不同热储地热资源量如表6所示。

$$Q=Ad[P_r C_r(1-\varphi)+P_w C_w \varphi](t_r-t_j) \quad (1)$$

式中:Q—地热资源量,J;A—评价区面积,m<sup>2</sup>;d—热储有效厚度,m;t<sub>r</sub>—热储温度,°C;φ—岩石的孔隙度,%;t<sub>j</sub>—基准温度,°C;P<sub>r</sub>、P<sub>w</sub>—分别为岩石和水的密度,kg/m<sup>3</sup>;C<sub>r</sub>、C<sub>w</sub>—分别为岩石及水的比热容,J/(kg·°C)。

当地年平均气温13.5°C;地热水密度取1000 kg/m<sup>3</sup>;砂岩密度取2300 kg/m<sup>3</sup>;灰岩岩石密度取

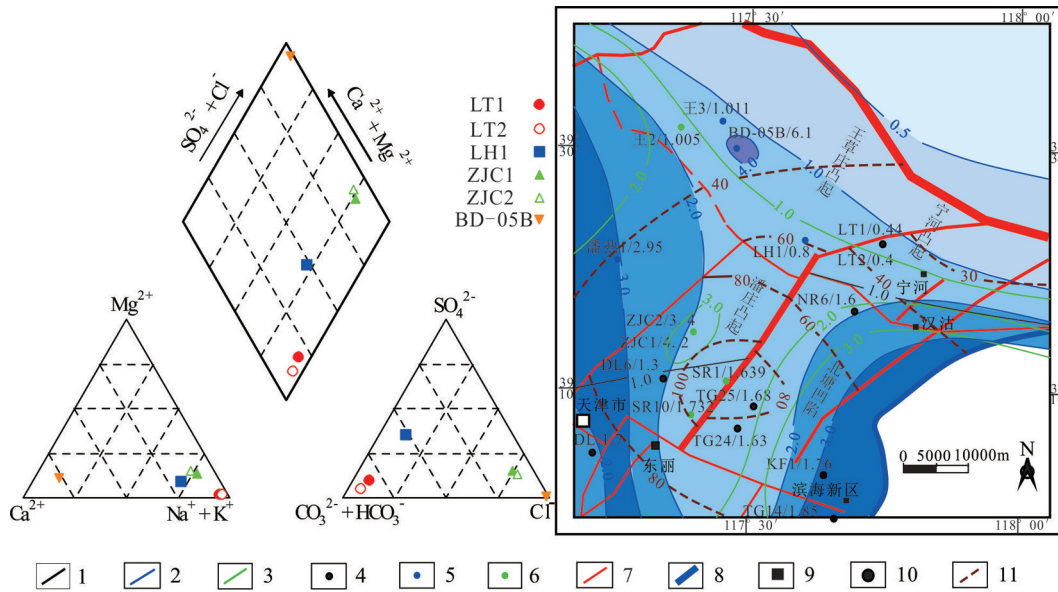


图 10 沧县隆起北部地区地下水 Piper 图(a)与地层矿化度(g/L)等值线图(b)  
 1—馆陶组矿化度;2—奥陶系矿化度;3—雾迷山组矿化度;4—馆陶组井位;5—奥陶系井位;6—雾迷山组井位;7—断层;8—海岸线;9—县市;  
 10—静水位等值线/m

Fig.10 Piper (a) and formation salinity (g/L) contour map (b) of groundwater in northern Cangxian uplift

1—Mineralization degree of Guantao Formation; 2—Mineralization degree of Ordovician; 3—Mineralization degree of Wumishan Formation;  
 4—Guantao Formation well; 5—Ordovician well; 6—Wumishan Formation well; 7—Fault; 8—Coastline; 9—City; 10—Isoline of static water level/m

2881 kg/m<sup>3</sup>;水比热取 4180 J/(kg·°C);砂岩岩石比热取 880 J/(kg·°C),灰岩岩石比热取 940J/(kg·°C)。

可采资源量计算公式(2):

$$Q_R = QR_E \quad (2)$$

式中:  $Q_R$ —地热可采资源量, J;  $Q$ —地热资源量, J;  $R_E$ —回收率, %。

采用地热回灌条件下单井开采权益保护半径计算地热流体可开采量,根据公式(3)、计算采灌均衡条件下的地热流体年可开采量。

$$Q_a = \delta AM / (1 - \alpha\beta)tf \quad (3)$$

$$Q_{WR} = Q_a C_w P_w (t_r - t_j) \quad (4)$$

式中:  $Q_a$ —回灌条件下允许开采量, m<sup>3</sup>;  $Q_{WR}$ —回灌条件下地热可采资源量, J;  $\alpha$ —回灌率, 据本区

实际回灌值,砂岩热储回灌率取 90%,岩溶热储回灌率取 100%; $\beta$ —回灌量与产水量之比; $\delta$ —热储温度下降 2°C 所减少的地热储存量的百分比;其他参数同公式(1)。

根据《地热资源评价方法》(DZ40-85)规定,对大型沉积盆地的新生代砂岩,当孔隙度大于 20% 时,砂岩热储回收率定为 0.25;碳酸盐岩裂隙热储回收率定为 0.15。通过可采资源量公式(2)计算,沧县隆起北部地区地热总资源量  $9.42 \times 10^{10}$  GJ,折合标煤 32.2 亿 t,可采资源量  $1.67 \times 10^{10}$  GJ,折合标煤 5.72 亿 t。按照开发利用年限 100 年计算,年可采资源量折合标煤为  $5.72 \times 10^6$  t。根据地热供暖项目运行数据,按照每平方米采暖季消耗热量相当于 0.0283 t 标煤

表 3 研究区地下水水化学测试结果(mg/L)

Table 3 Chemical compositions of groundwater from the study area(mg/L)

井号	pH	TDS	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>	水化学类型
LT1	8.35	437.57	6.01	1.22	159.58	1.86	329.51	21.27	33.62	HCO <sub>3</sub> -Na
LT2	8.32	396.12	4.01	1.22	149.88	1.57	311.2	14.18	14.41	HCO <sub>3</sub> -Na
LH1	7.3	810.1	39.22	11.17	169.1	13.5	320.7	50.77	170	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Na
ZJC1	7.88	3405	101	81.22	902.8	84.44	343.2	1425	360	Cl-Na
ZJC2	7.06	4186	140.9	123	1088	86.08	361.3	1856	418.2	Cl-Na
BD-05B	7.16	6088.3	1650	131.4	242.8	40.8	61	3828.6	78.2	Cl-Ca

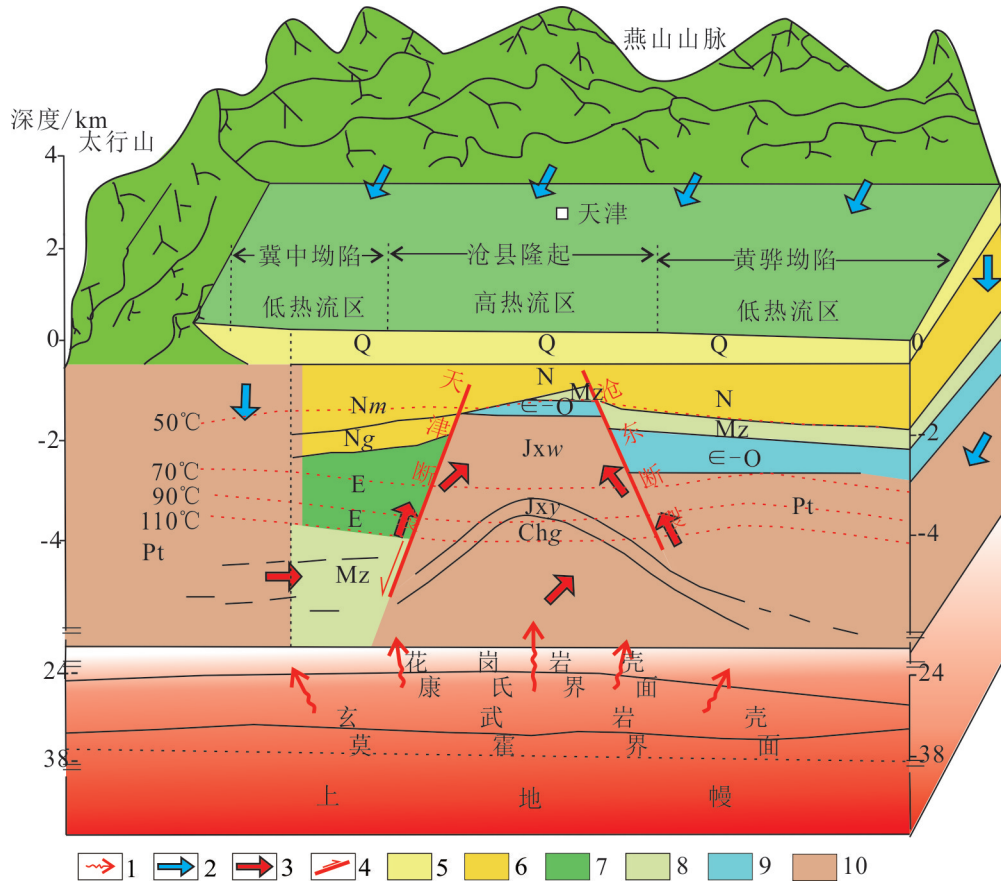


图 11 沧县隆起北部地区传导型地热资源概念模式图

1—热流;2—冷水流;3—热水流;4—断层;5—第四系;6—新近系;7—古近系;8—中生界;9—古生界;10—元古界

Fig.11 Reservoir forming model of conductive geothermal resources in northern Cangxian uplift

1—Heat flow; 2—Cold water flow; 3—Hot water flow; 4—Fault; 5—Quaternary; 6—Neogene; 7—Paleogene; 8—Mesozoic; 9—Paleozoic; 10—Proterozoic

表 4 沧县隆起北部地区地热资源评价参数与计算结果汇总表

Table 4 Summary of evaluation parameters and calculation results of geothermal resources in Cangxian uplift

层位	构造单元	有效面积 /km <sup>2</sup>	平均有效 厚度/m	平均 温度/°C	平均 孔隙度/%	地热资源 总量/GJ	折合标煤 /t	可采地热资 源量/GJ	可采资源量 折合标煤/t
新近系	宁河凸起	367	150	58	25	6.28×10 <sup>9</sup>	2.15×10 <sup>8</sup>	1.57×10 <sup>8</sup>	5.36×10 <sup>7</sup>
	北塘凹陷	874	150	60	25	1.20×10 <sup>10</sup>	4.10×10 <sup>8</sup>	3.3×10 <sup>9</sup>	1.03×10 <sup>8</sup>
馆陶组	王草庄凸起	629	110	40	26	4.74×10 <sup>9</sup>	1.62×10 <sup>8</sup>	1.84×10 <sup>9</sup>	4.05×10 <sup>7</sup>
	潘庄凸起	263	100	57	26	2.96×10 <sup>9</sup>	1.01×10 <sup>8</sup>	7.39×10 <sup>8</sup>	2.52×10 <sup>7</sup>
奥陶系	宁河凸起	238	120	45	6	2.52×10 <sup>9</sup>	8.60×10 <sup>7</sup>	3.77×10 <sup>8</sup>	1.29×10 <sup>7</sup>
	北塘凹陷	38	100	62	6	5.15×10 <sup>8</sup>	7.73×10 <sup>7</sup>	1.76×10 <sup>7</sup>	2.64×10 <sup>6</sup>
	王草庄凸起	464	161	48	7.1	7.24×10 <sup>9</sup>	2.48×10 <sup>8</sup>	1.087×10 <sup>9</sup>	3.71×10 <sup>7</sup>
蓟县系 雾迷山 组	潘庄凸起	207	190	60	5	5.09×10 <sup>9</sup>	1.73×10 <sup>8</sup>	7.63×10 <sup>8</sup>	2.61×10 <sup>7</sup>
	宁河凸起	460	150	65	5	9.88×10 <sup>9</sup>	3.38×10 <sup>8</sup>	1.48×10 <sup>9</sup>	5.07×10 <sup>7</sup>
	北塘凹陷					(顶面埋深超过3500 m, 不计入可开发利用资源量)			
	王草庄凸起	733	180	70	5.2	2.08×10 <sup>10</sup>	7.1×10 <sup>8</sup>	3.11×10 <sup>9</sup>	1.06×10 <sup>8</sup>
	潘庄凸起	531	210	85	5.2	2.22×10 <sup>10</sup>	7.58×10 <sup>8</sup>	2.33×10 <sup>9</sup>	1.14×10 <sup>8</sup>
合计						9.42×10 <sup>10</sup>	3.22×10 <sup>9</sup>	1.67×10 <sup>10</sup>	5.72×10 <sup>8</sup>

计算,沧县隆起北部地区地热资源量可满足供暖面积2亿 $m^2$ 。根据《地热资源评价方法及估算规程(DZ/T 0331-2020)》,通过公式(3)、公式(4)计算,在采灌均衡的条件下,沧县隆起北部地区地热流体年可开采资源量为 $7.06 \times 10^7$  GJ,折合标煤 $2.41 \times 10^6$  t,可满足供暖面积0.85亿 $m^2$ 。

## 7 结 论

(1)沧县隆起北部地区共发育3套可供开发的热储:馆陶组砂岩热储有效厚度110~150 m,储厚比33%~52%,水温40~65 $^{\circ}$ C,单井出水量80~100  $m^3/h$ ,主力产水层段位于馆陶组下段;奥陶系岩溶热储在本区主要开发区域为王草庄凸起,有效厚度110~210 m,储厚比24%~30%,水温40~80 $^{\circ}$ C,单井出水量80~130  $m^3/h$ ;蓟县系雾迷山组岩溶热储主要开发区域为潘庄凸起,有效厚度110~290 m,储厚比14%~40%,温度75~100 $^{\circ}$ C,主力产水层位于雾迷山组中上部,单井出水量100~200  $m^3/h$ 。

(2)沧县隆起北部地区的地温场分布主要受基底构造形态控制,隆起区的平均地温梯度为45 $^{\circ}$ C/km,两侧的拗陷区地温梯度平均值约为33 $^{\circ}$ C/km。沧东断裂作为区内主控断裂具有一定的导热性,热量沿断裂破碎带向上快速运移,断裂附近的地温梯度可以达到50 $^{\circ}$ C/km。

(3)沧县隆起北部地区地下水类型随着埋深的增加由 $HCO_3-Na$ 、 $HCO_3 \cdot SO_4-Na$ 型水向成熟的 $Cl-Na$ 型水过渡。地热水来源为燕山山脉裸露基岩接受大气降水补给,进入基岩的冷水在深层循环过程中受到深部热源加热增温,沿断裂破碎带和不整合面向上运移富集,形成了传导型地热系统。

(4)沧县隆起北部地区馆陶组砂岩热储、奥陶系、蓟县系雾迷山组岩溶热储地热资源量合计 $9.42 \times 10^{10}$  GJ,折合标煤32.2亿t,可采资源量 $1.67 \times 10^{10}$  GJ,折合标煤5.72亿t,年可开采地热资源量可满足供暖面积2亿 $m^2$ 。若在采灌平衡的条件下,本区的年可采地热资源量为 $7.06 \times 10^7$  GJ,折合标煤 $2.41 \times 10^6$  t,可满足供暖面积0.85亿 $m^2$ ,具有良好的地热市场开发前景。

## References

Armienta M A, Rodríguez R, Cenicerós N, Cruza A O, Aguayo A P, Moralesb Cienfuegosb E. 2014. Groundwater quality and

geothermal energy. The case of Cerro Prieto Geothermal Field, México[J]. *Renewable Energy*, 63: 236-254.

Chu Hongxian, Mei Sai, Gao Xiaohui, Fang Zhonghua, Feng Jing. 2019. Analysis of formation and slope stability in Caofeidian Channel in Bohai Bay[J]. *China Geology*, 2(2): 189-197.

Duan Zhongfeng. 2007. The Numerical Modeling and Recharge Technique Analysis of The Wumishan Formation at Cangxian Uplift[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 19-38(in Chinese with English abstract).

Gao Zhiyun. 1995. The Preliminary research on sedimentary phases and reservoir of Wumishan Formation in Cangxian Uplift[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 25(4): 348-352(in Chinese with English abstract).

Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* [J]. 52(12): 2749-2765.

Hong Zenglin, Zhang Yinlong, Zhou Yang. 2019. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. *Geology in China*, 46(5): 1224-1235(in Chinese with English abstract).

Jiang Guosheng. 2014. The Research on the Main Factors of Controlling the Development of Ordovician Geothermal Reservoirs in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract).

Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, Liu Liping, Jin Chong, Liu Xin, Hao Tianyao, Zhou Lihong, Liu Baohua, Zhou Juntao, Jiao Qian. 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64-89.

Li Shengtao, Yue Dongdong, Feng Zhaolong, Song Jian, Liu Donglin, Song Zhibin, He Guolei, Long Hui, Hao Wenjie, Zhang Qiuxia. 2022. Sinoprobe and parameters study on deep karst geothermal reservoir in the Donglihu Area, Tianjin[J]. *Geology in China*, 49(6): 1732-1746(in Chinese with English abstract).

Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1): 312-320(in Chinese with English abstract).

Liu Chiyang. 1986. The determination of the Cangxian-Tianjin Palaeo-Synclinalorium and its geological evidence[J]. *Oil & Gas Geology*, 7(4): 333-343(in Chinese with English abstract).

Liu Kai, Wang Shanshan, Sun Ying, Cui Wenjun, Zhu Deli. 2017. Characteristics and regionalization of geothermal resources in Beijing[J]. *Geology in China*, 44(6): 1128-1139(in Chinese with English abstract).

Liu Qiongying, He Lijuan. 2019. Tectono-thermal modeling of the Bohai Bay Basin since the Cenozoic[J]. *Chinese Journal of*



- Geophysics, 62(1): 219–235(in Chinese with English abstract).
- Lu Qingwei, Wang Qiang, Zhan Jian, Guo Wei, Li Wen, Wang Xiyu. 2018. Middle Pleistocene stratigraphic hiatus on the Cangxian Uplift, the west coast of Bohai Bay[J]. Journal of Palaeogeography, 20(4): 665–679(in Chinese with English abstract).
- Mao Xiaoping, Wang Xinwei, Li Kewen, Guo Shaobin. 2018. Sources of heat and control factors in geothermal field[J]. Earth Science, 43(11): 4256–4266(in Chinese with English abstract).
- Pirlo M C. 2004. Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal groundwaters from the Birdsville Track Ridge, Great Artesian Basin, South Australia[J]. Geothermics, 33: 743–774.
- Qi Peng, Ren Jianye, Lu Gangchen, Lu Shuangshuang, Tong Dianjun, Zhang Junxia. 2010. Cenozoic Episodic subsidence in the middle and north part of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 35(6): 1041–1052(in Chinese with English abstract).
- Ruan Chuanxia, Shen Jian, Li Liliang, Liu Rongguang, Mou Shuangxi. 2017. Researches on the reinjection of Dongli Lake bedrock reservoir in Binhai New Area, Tianjin[J]. Geological Bulletin of China, 36(8):1439–1449(in Chinese with English abstract).
- Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute. 2003. General Survey Report of Geothermal Resources in Panzhuang–Lutai, Tianjin[R]. Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute(in Chinese).
- Wang Di, Wang Xinwei, Mao Xiang, Wu Minghui, Liu Huiying, Zhang Xuan, Wang Tinghao. 2020. Characteristics of geothermal geology of the Wucheng uplift geothermal field[J]. Earth Science Frontiers, 27(3): 269–280(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Wang Wanli, Zhang Wei, Ma Feng, Liu Feng. 2020. The status quo and prospect of geothermal resources exploration and development in Beijing–Tianjin–Hebei region in China[J]. China Geology, 3(1): 173–181.
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, 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 Xinwei, Wang Tinghao, Zhang Xuan, Mao Xiang, Luo Lu, Wang Di, Wu Minghui. 2019. Genetic mechanism of Xiwenzhuang geothermal field in Taiyuan Basin[J]. Earth Science, 44(3): 1042–1056(in Chinese with English abstract).
- Yang Huifeng, Cao Wengeng, Zhi Chuanshun, Li Zeyan, Bao Xilin, Ren Yu, Liu Futian, Fan Cunliang, Wang Shufang, Wang Yabin. 2021. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. Geology in China, 48(4): 1142–1155(in Chinese with English abstract).
- Yue Baojing, Liu Jinqing, Liu Jian, Liao Jing, Zhang Junqiang. 2020. Grain size distribution of sediment of core YRD–1101 in the western margin of the modern Bohai Sea since the latest Pleistocene and its environmental change[J]. Geology in China, 47(3): 853–867(in Chinese with English abstract).
- Zhang Baiming, Lin Li, Zhao Sumin. 2006. Analyses on mechanism or geothermal origin in Tianjin area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 33(2): 104–107(in Chinese with English abstract).
- Zhang Baojian, Zhao Tian, Li Yanyan. 2019. The hydrochemical characteristics and its significance of geothermal water in both sides of large fault: Taking northern section of the Liaokao fault in north China as an example[J]. China Geology, 4: 512–521.
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255–268(in Chinese with English abstract).
- Zhao Sumin, Gao Baozhu, Li Xuemei, Li Huijuan, Hu Yan. 2007. Haracter and water–temperature conductivity of the Cangdong Fault( Tianjin Segment)[J]. Geological Survey and Research, 30(2): 121–127(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 段忠丰. 2007. 沧县隆起雾迷山组热储层数值模拟及回灌分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 19–38.
- 高知云. 1995. 沧县隆起雾迷山组沉积相与储层初探[J]. 西北大学学报(自然科学版), 25(4): 348–352.
- 洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 46(5): 1224–1235.
- 江国胜. 2014. 天津市奥陶系热储层发育主控因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珧, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 17(4): 64–89.
- 李胜涛, 岳冬冬, 冯昭龙, 宋健, 刘东林, 宋志彬, 和国磊, 龙慧, 郝文杰, 张秋霞. 2022. 天津东丽湖深部岩溶热储探测与储层参数研究[J]. 中国地质, 49(6): 1732–1746.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312–320.
- 刘池洋. 1986. 古沧县—天津复向斜和其确定的依据[J]. 石油与天然气地质, 7(4):333–343.
- 刘凯, 王珊珊, 孙颖, 崔文君, 朱德莉. 2017. 北京地区地热资源特征与区划研究[J]. 中国地质, 44(6): 1128–1139.
- 刘琼颖, 何丽娟. 2019. 渤海湾盆地新生代以来构造—热演化模拟研

- 究[J]. 地球物理学报, 62(1):219-235.
- 鲁庆伟, 王强, 詹健, 郭维, 李稳, 王西玉. 2018. 渤海湾西岸沧县隆起中更新世地层间断[J]. 古地理学报, 20(4): 665-679.
- 毛小平, 汪新伟, 李克文, 郭少斌. 2018. 地热田热量来源及形成主控因素[J]. 地球科学, 43(11):4256-4266.
- 祁鹏, 任建业, 卢刚臣, 史双双, 佟殿君, 张俊霞. 2010. 渤海湾盆地黄骅坳陷中北区新生代幕式沉降过程[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(6): 1041-1052.
- 阮传侠, 沈健, 李立亮, 刘荣光, 牟双喜. 2017. 天津市滨海新区东丽湖地区基岩热储回灌研究[J]. 地质通报, 36(8): 1439-1449.
- 天津地热勘查开发设计院. 2003. 天津市潘庄—芦台地热资源普查报告[R]. 天津地热勘查开发设计院.
- 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.
- 王迪, 汪新伟, 毛翔, 武明辉, 刘慧盈, 张瑄, 王婷灏. 2020. 河北武城凸起地热田地热地质特征[J]. 地学前缘, 27(3): 269-280.
- 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.
- 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 李泽岩, 包锡麟, 任宇, 柳富田, 范存良, 王树芳, 王亚斌. 2021. 近40年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 48(4): 1142-1155.
- 岳保静, 刘金庆, 刘健, 廖晶, 张军强. 2020. 渤海西缘YRD-1101孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其环境变迁[J]. 中国地质, 47(3): 853-867.
- 张百鸣, 林黎, 赵苏民. 2006. 天津地区地热形成机理分析[J]. 水文地质工程地质, 33(2):104-107.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255-268.
- 赵苏民, 高宝珠, 黎雪梅, 李慧娟, 胡燕. 2007. 沧东断裂(天津段)特征及导水导热性质分析[J]. 地质调查与研究, 30(2):121-127.