

煤田地质与勘探
Coal Geology & Exploration
ISSN 1001-1986, CN 61-1155/P

《煤田地质与勘探》网络首发论文

题目：歧口凹陷区新近系馆陶组热储特征及成因机制
作者：夏国朝，楼达，赵艳婷，王辉，段忠丰，孙晓林，张飞鹏，雒蓉，葛家成
收稿日期：2023-10-06
网络首发日期：2024-01-11
引用格式：夏国朝，楼达，赵艳婷，王辉，段忠丰，孙晓林，张飞鹏，雒蓉，葛家成. 歧口凹陷区新近系馆陶组热储特征及成因机制[J/OL]. 煤田地质与勘探.
<https://link.cnki.net/urlid/61.1155.P.20240109.1607.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

歧口凹陷区新近系馆陶组热储特征及成因机制

夏国朝¹, 楼达^{1,*}, 赵艳婷², 王辉¹, 段忠丰³, 孙晓林², 张飞鹏¹, 雒蓉¹, 葛家成¹

(1. 中国石油大港油田公司, 天津 300280; 2. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要: 渤海湾盆地黄骅坳陷歧口凹陷内赋存极为丰富的地热资源, 其中新近系馆陶组热储最具开采价值, 开展馆陶组热储地温场、孔渗条件、地热水循环规律和成因模式研究对认识馆陶组地热资源属性, 合理开发地热资源具有重要意义。通过分析该区钻探、物探、测温、开发数据等资料, 确定歧口凹陷内馆陶组热储为沉积盆地传导型地热系统, 深部地幔热流和地壳内放射性生热以热传导方式传热, 地热异常分布受基岩起伏的控制, 在沧东断裂、北大港断裂带附近出现高温地热异常, 地温梯度可达 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 以上。馆陶组热储的孔渗条件南北两侧较高, 中部较低, 热储孔隙率整体在 26% 以上, 渗透率在 $400 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 以上, 单井涌水量平均 $60\text{ m}^3/\text{h}$, 是优质热储。地热水主要来源于古大气降水, 由北部燕山补给, 沿地层深循环, 吸取岩石骨架热量, 形成地热水。歧口凹陷区馆陶组热储地热资源量为 $41.81 \times 10^{18}\text{ J}$, 尤以天津滨海新区和河北黄骅市分布最广, 占总资源量的 95%, 资源与需求匹配度高, 具有良好的开发利用前景。

关 键 词: 歧口凹陷; 孔隙型热储; 馆陶组; 热储特征; 成因模式; 渤海湾盆地

中图分类号: P314 文献标志码: A

Characteristics and genetic mechanisms of geothermal reservoirs in the Neogene

Guantao Formation, Qikou Sag

XIA Guochao¹, LOU Da^{1,*}, ZHAO Yanting², WANG Hui¹, DUAN Zhongfeng³, SUN Xiaolin²,
ZHANG Feipeng¹, LUO Rong¹, GE Jiacheng¹

(1. Petro China Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China; 2. Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute, Tianjin 300250, China; 3. School of Geoscience, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The Qikou Sag in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin boasts extremely abundant geothermal resources. Among them, the geothermal reservoirs of the Neogene Guantao Formation have the greatest potential for exploitation. To ascertain the properties of geothermal resources in this formation and rationally exploit these resources, it is significant to investigate the geothermal field, porosity, permeability, geothermal water circulation patterns, and genetic mode of geothermal reservoirs in the formation. Based on data from drilling, geophysical exploration, thermometry, and production of the study area, this study determined that the geothermal reservoirs of the Guantao Formation in the Qikou Sag constitute a conductive geothermal system of a sedimentary basin, with the heat flow from the deep mantle and the radioactive heat from the crust being transferred through heat conduction. The distribution of geothermal anomalies is subjected to wavy bedrock. High-temperature geothermal anomalies with geothermal gradients up to above $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ are found near the Cangdong and Beidagang faults. The geothermal reservoirs of the Guantao Formation manifest high porosity and permeability in the north and south but low porosity and permeability in the central portion, with porosity greater than 26%, permeability above $400 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$, and average single-well water yield of $60\text{ m}^3/\text{h}$ overall. These suggest high-quality geothermal reservoirs. The geothermal water in the study area primarily originates from paleometeoric water. As the recharge source, the paleometeoric water from the Yanshan area in the north circulates deeply along strata while absorbing heat from the rock matrix, ultimately forming geothermal water. The geothermal reservoirs of the Guantao Formation in the Qikou Sag host geothermal resources of $41.81 \times 10^{18}\text{ J}$, 95% of which are distributed in the Tianjin Binhai New Area and Huanghua City, Hebei Province. Their high match with demands makes geothermal resources in the study area have great potential for production and utilization.

Keywords: Qikou Sag; porous geothermal reservoir; Guantao Formation; geothermal reservoir characteristic; genetic mode; Bohai Bay Basin

地热资源作为清洁的可再生能源, 在生态城市建设中具有显著优势, 是助力“碳达峰碳中和”目标实现的重要措施^[1-2]。歧口凹陷位于渤海湾盆地黄骅坳陷中北部, 是华北盆地内的中新生代断陷盆地, 地热资源丰富^[3]。凹陷区自 1982 年开始利用地热资源, 至今地热井已超 120 眼, 集中在凹陷区的北部和中部,

开发利用规模达到 $680 \times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。歧口凹陷行政区划上主要位于天津市滨海新区、津南区以及河北省黄骅市, 区内经济发展势头强劲, 能源需求旺盛^[4-5], 客观评价地热资源潜力具有重要的经济价值和现实意义。

凹陷区热储层包括新近系馆陶组、古近系东营组以及古生界奥陶系, 是典型的沉积盆地砂岩孔隙型热

储^[6-7]。其中,馆陶组热储埋藏浅、厚度大、分布广,是区内开发利用规模最大、最具经济价值的热储层,除西北部和中部有小范围缺失外,其余地区皆有分布。

前人研究主要围绕渤海湾盆地局部的地温场^[8]、水化学场^[9]、地热资源分布^[10]等开展研究工作,部分学者对歧口凹陷北部部分地区奥陶系以及元古界进行了地热资源评价^[11-12]。总体上歧口凹陷馆陶组热储研究程度低,对热储地温场、水化学场以及地热水富集规律缺乏认识,制约了歧口凹陷区馆陶组地热资源的高效开发和规模利用。

歧口凹陷作为重要的油气勘探地区,经过近60年的勘探开发,保存有大量的钻井、物探以及地质资料,为馆陶组地热资源的系统评价提供了重要契机。笔者以歧口凹陷新近系馆陶组热储为研究对象,通过分析区内大量钻井以及地质、物探资料,首次系统刻画馆陶组热储特征及分布,编制热储厚度、物性及地温场、水化学场等图件,研究地热资源成因机理、建

立热田成因模式,以期为凹陷区科学化、规模化以及可持续性开发地热资源提供重要支撑,为其他地区科学勘查开发砂岩型热储提供重要借鉴。

1 区域地质背景

歧口凹陷为黄骅坳陷的次级单元,位于黄骅坳陷中北部,是典型的箕状断陷,为古近纪以来长期继承性发育的凹陷(图1)。区内断裂走向以NNE、NE、NEE—近EW和NWW向为主,具有明显的地区差异,包括1条I级断层(沧东断层)和多条II级断层,对盆地形成和发育起着重要作用^[13-16]。地层具有双层结构特点,底部结晶基底之上覆盖沉积盖层,自下而上为蓟县系(Jx)、青白口系(Qb)、寒武系(Є)、奥陶系(O)、石炭—二叠系(C-P)、侏罗系(J)、白垩系(K)、古近系(E)、新近系(N)和第四系(Q)^[17-18]。凹陷内发育多层热储,其中新近系馆陶组(Ng)砂岩热储普遍分布,岩性以陆相碎屑岩为主,是区内主要的孔隙型热储层^[19]。

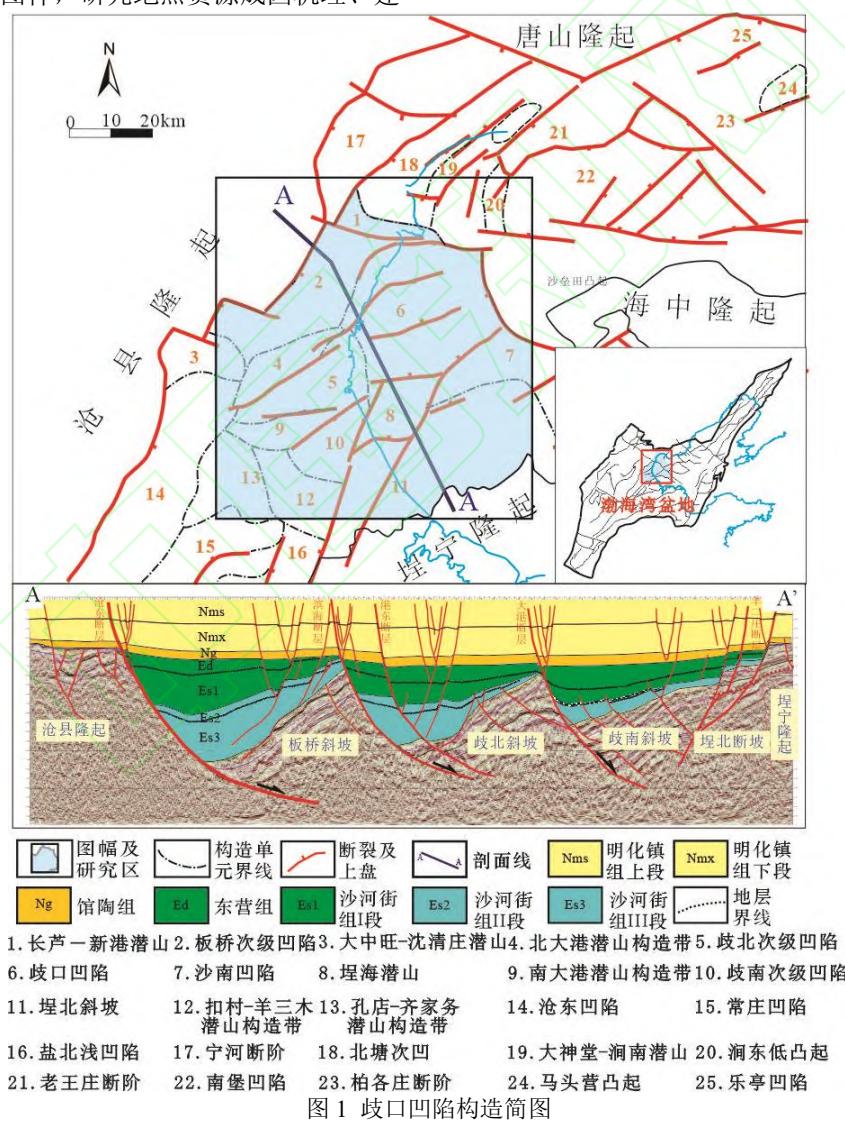


图1 歧口凹陷构造简图

Fig.1 Structural sketch of the Qikou Sag

2 地温场特征

依据区内地热井测温资料及石油勘探井试油温度资料计算地温梯度,总共采用了72个数据点,能够

反映区内地温梯度分布规律。歧口凹陷内大部分区域盖层地温梯度变化范围2.5~3.5°C/hm;靠近沧东断裂地区为明显异常区,地温梯度为3.5°C/hm以上,局部可达5.0°C/hm以上;在北大港断裂带附近,受断

裂和火成岩影响,出现局部地温异常,地温梯度为3.5°C/hm以上。基岩起伏与地温梯度呈正相关关系(图2)。



Fig.2 Isoline map showing the average geothermal gradient of cap rocks

分析区内多年稳态测温及地温梯度曲线,地层温度虽局部受岩性、孔隙率和渗透率变化等因素影响出现波动,但总体上地温随深度增加而增加,具有较好的线性关系。第四系地层结构疏松,热导率小,起隔热作用,地温梯度高;进入新近系明化镇组后,受地下水活动的影响,地温梯度降低;进入新近系馆陶组后,岩层孔隙率大、渗透性好,地下水活动强烈,地温梯度较明化镇组低,在1 670~1 700 m内,地温梯度陡然增加,因为岩性由细砂岩变为泥岩;进入馆陶组III段后,岩性由大段泥岩变为砂岩,地温梯度恢复到低值(图3)。

根据区域大地热流数据,包括油井、地热井等测试结果^[20-21],沧县隆起区热流值最高可达67.3 mW/m²,黄骅坳陷内部热流值普遍较低,平均48.0 mW/m²(表1)。同地温梯度分布规律类似,黄骅坳陷内部的凸起区大地热流高于凹陷区^[22]。

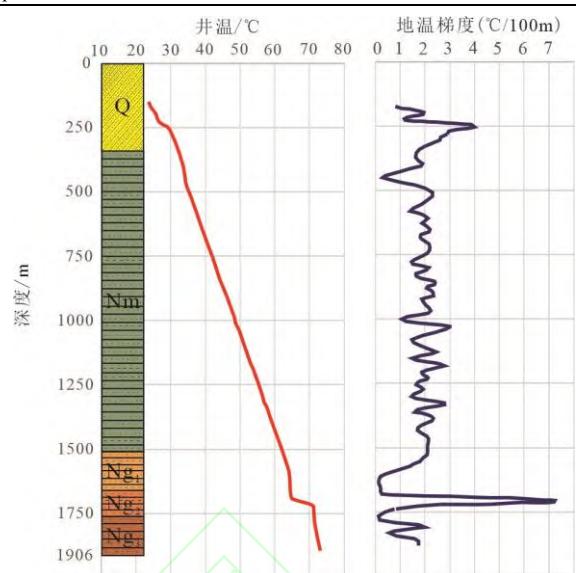


Fig.3 Curves of geotemperature and geothermal gradient

表1 区域大地热流数据

Table 1 Regional terrestrial heat flow

构造单元	X/m	Y/m	大地热流/(mW/m ²)
沧县隆起	20530391	4300132.3	51*
	20534692	4309408.8	63*
	20522392	4290684.0	56*
	20529033	4310899.6	63
	20508873	4299746.1	74
	20534953	4305975.0	76
	20534284	4325525.7	73
	20544454	4324448.0	65
	20538012	4318205.3	81
	20536725	4314403.3	71
黄骅坳陷	20558460	4319196.9	50
	20552201	4317807.8	46
	20545352	4311715.3	42
	20542515	4301416.3	45*
	20546748	4285605.0	55*
	20523562	4287159.0	49
	20530624	4281944.0	53
	20539942	4304249.7	45

注: *来自文献[20],其余来自文献[21]。

3 热储特征分析

3.1 分布特征

歧口凹陷内馆陶组热储是在准平原化的基础上形成的曲流河和辫状河砂体,岩性以陆相碎屑岩为主,是区内主要的孔隙型热储层,总体上受河流沉积相控制,靠近沧东断裂附近局部缺失,其他地区广泛分布,垂向上沉积旋回明显,自下而上呈现粗-细-粗的沉积特征,分为馆I段、馆II段和馆III段。砂体分布受沉积特征影响,砂层主要发育在馆I段与馆III段,是较理想的含水层。

根据油井、地热井钻探资料,歧口凹陷区内顶板埋深为1 050~2 650 m(图4),整体呈NE—SW向埋深增加的特征,邻近沙垒田凸起和沙南凹陷地区埋深最大,顶板埋深超过2 000 m,底板埋深超过2 600 m;孔店—齐家务潜山构造带和邻近沧县隆起和埕宁隆起

地区埋深最浅, 基本未超过 1 500 m。

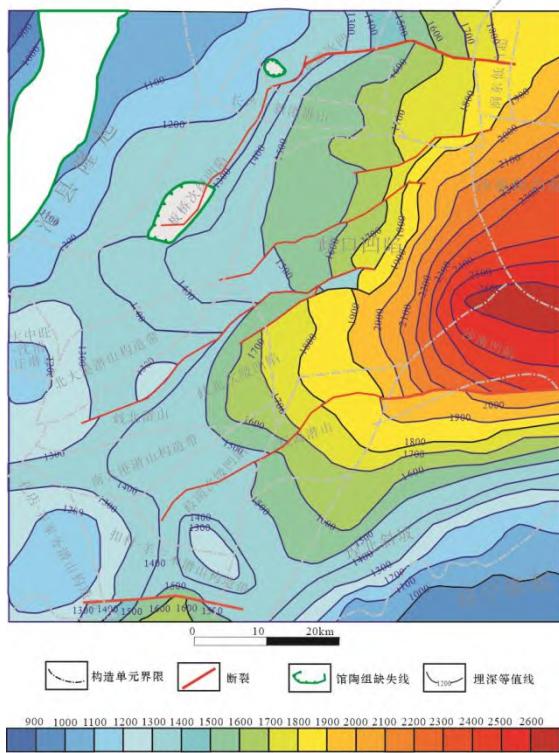


图 4 馆陶组热储顶板埋深等值线

Fig.4 Isoline map showing the hanging wall burial depth of geothermal reservoirs in the Guantao Formation

馆陶组在区内广泛分布, 厚度 250~550 m, 仅在邻近沧县隆起地区有部分缺失。馆陶组热储呈现如下特征:

(1) 垂向上呈现粗-细-粗的沉积特征, 分为馆I砂岩段、馆II泥岩段和馆III砂砾岩段。馆 I 段岩性为灰绿、灰白色厚层粉-细砂岩, 夹灰绿、棕红色泥岩, 以及泥岩与砂岩互层, 局部具波状微细交错层理。馆 III 段也称砂砾岩段, 岩性以厚层状砂砾岩夹泥岩为主, 底部为砂砾岩、砾岩, 偶尔夹薄层泥岩^[23-24], 局部地区砂层厚度较薄。

(2) 水平分布上, 砂体呈透镜状及带状。馆陶组沉积时期主要物源区是太行山及燕山, 次要物源区是沧县隆起及埕宁隆起, 以 NE 向为轴向两侧逐渐减少, 沉积中心地层分布厚度大, 砂岩层多而厚, 砂地比高, 向两侧地层厚度减薄。以歧口主凹、歧北次级凹陷和扣村-羊三木潜山构造带最厚, 达 250~398 m; 临近沧县隆起和埕宁隆起厚度最小, 仅 100~150 m(图 5)。

3.2 孔渗特征

良好的孔渗条件, 有利于地热水资源的富集, 同时孔渗条件较好的区域, 有利于深部热能以地下水为介质通过热传导的方式上传至上部砂岩热储。应用石油勘探井的补偿中子测井、补偿密度测井曲线进行解译, 并采用典型井的岩心实测孔渗数据进行了验证, 共得到了孔隙率数据点 72 个、渗透率数据点 72 个, 分散分布于研究区, 能够控制数据精度(图 6)。

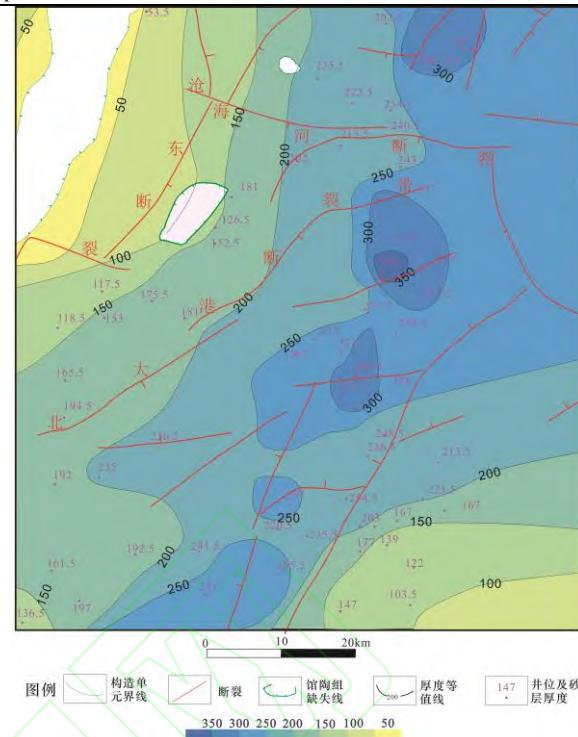


图 5 馆陶组热储砂体厚度等值线

Fig.5 Isoline map showing the sand body thickness of geothermal reservoirs in the Guantao Formation

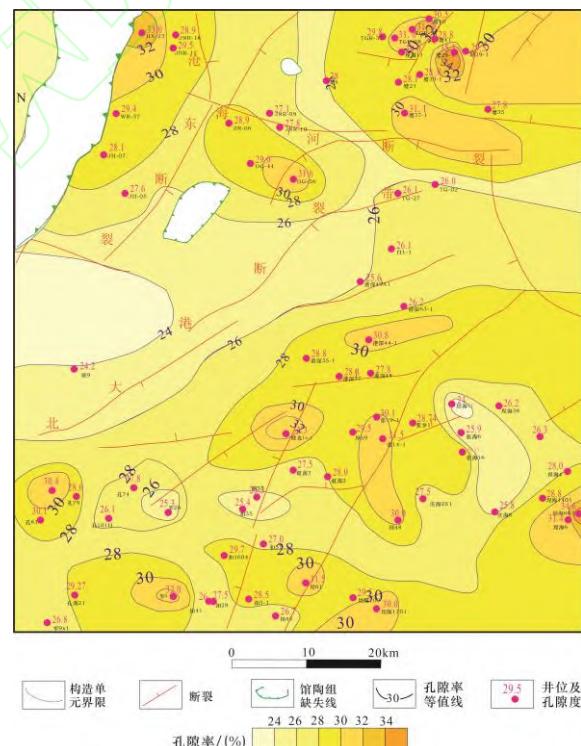


图 6 馆陶组热储孔隙率分布等值线

Fig.6 Isoline map showing the porosity distribution of geothermal reservoirs in the Guantao Formation

馆陶组热储孔隙率发育南北较好, 中部较差(图 6)。南北孔隙率可达 30 %以上, 凹陷中部孔隙率 26 %左右。垂向上主要受压实作用影响, 随埋深增大, 孔隙率逐渐减小。2 000 m 以浅孔隙率为

20%~40%, 2 000~2 550 m 孔隙率一般为 10%~30%(图 7)。

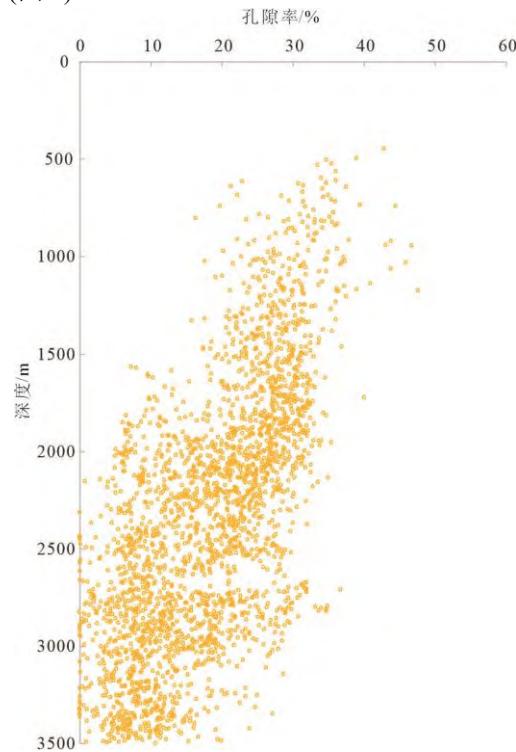


图 7 孔隙率随深度变化曲线
Fig.7 Depth-varying porosity

渗透率与孔隙率的分布规律基本一致, 南北较大, 中部较小(图 8)。凹陷北部储层渗透率发育较好, 2 000 m 以浅渗透率为 $(600\sim 1 050)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$; 凹陷中部渗透率稍差, 2 000 m 以浅渗透率为 $(350\sim 550)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$; 凹陷南部渗透率相对中部稍好, 2 000m 以浅渗透率为 $(550\sim 900)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图 9)。

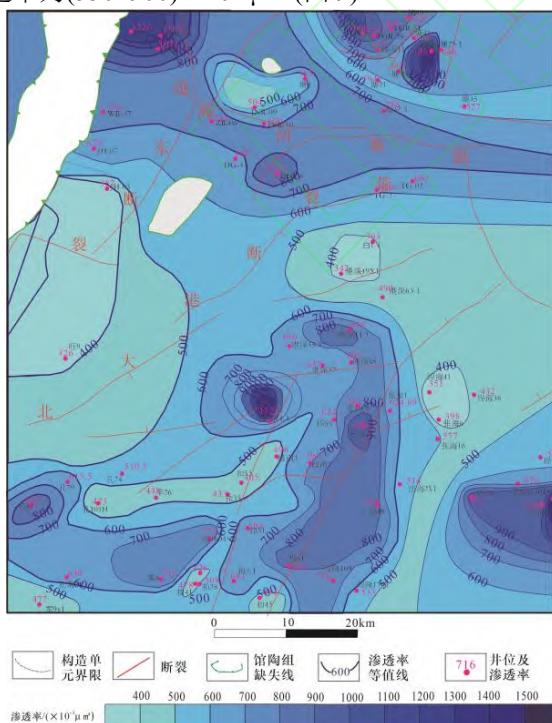


图 8 馆陶组热储渗透率等值线

Fig.8 Isoline map showing the permeability of geothermal reservoirs in the Guantao Formation

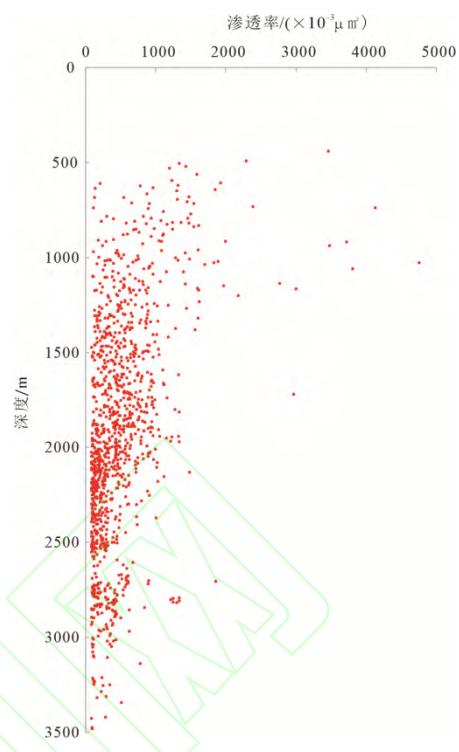


图 9 渗透率随深度变化曲线
Fig.9 Depth-varying permeability

3.3 热储储水特征

根据馆陶组地热井成井时降压试验资料, 歧口凹陷内馆陶组单井涌水量为 $40\sim 134\text{ m}^3/\text{h}$, 富水区主要分布在北部的歧口主凹内, 单井涌水量大于 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 。涌水量较小地区主要分布在凹陷南部, 单井涌水量普遍小于 $60\text{ m}^3/\text{h}$, 其他地区涌水量一般 $60\sim 100\text{ m}^3/\text{h}$ (图 10)^[25-26]。区内馆陶组地热水富水规律呈南北分带特征, 即越往北, 富水性越好, 这与地热流体的补给源来自北方山区的观点基本一致。

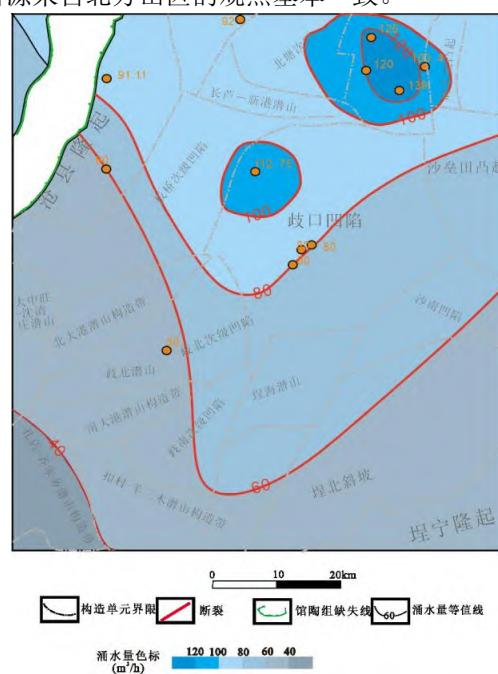


图 10 馆陶组热储涌水量等值线

Fig.10 Isoline map showing the water yield of geothermal reservoirs in the Guantao Formation

4 地热资源潜力

4.1 资源量

依据 GB/T 11615—2010《地热资源地质勘查规范》，采用热储法对研究区馆陶组热储地热资源量进行计算。

表 2 馆陶组资源量计算结果(基准温度 13.5°C)

Table 2 Calculation results of geothermal resources in the Guantao Formation (temperature baseline: 13.5°C)

行政区	热储分布面积/km ²	地热资源量/(×10 ¹⁸ J)	地热资源可开采量/(×10 ¹⁸ J)	地热流体储存量/(×10 ⁸ m ³)	地热流体储存热量/(×10 ¹⁸ J)	地热流体可开采量/(×10 ⁶ m ³ /a)	地热流体可开采热量/(×10 ¹⁴ J/a)	折合标准煤/(×10 ⁴ t/a)
东丽	14.00	0.23	0.06	5.05	0.09	0.16	0.28	0.10
津南	115.00	1.88	0.47	41.49	0.78	1.29	2.34	0.80
滨海新区	1358.00	22.15	5.54	489.94	9.20	15.20	27.59	9.41
黄骅	1076.00	17.55	4.39	388.20	7.29	12.04	21.86	7.46
合计	2563.00	41.81	10.45	924.67	17.36	28.68	52.07	17.76

4.2 地热资源开发目标区

考虑热储温度、单井涌水量和热储顶板埋深 3 个参数，对研究区馆陶组地热资源进行潜力分区，圈定地热资源开发目标区，分级标准见表 3。

单井涌水量大于 40 m³/h 且热储温度大于 60°C 的区域均为潜力区；在此基础上，选取单井涌水量大于 80 m³/h，热储温度大于 70°C，且顶板埋深小于 2 000 m 的区域作为 I 类潜力区；选取单井涌水量在 40~60 m³/h 的区域作为 III 类潜力区；其余为 II 类潜力区。具体分布如图 11 所示。I 类约 608.7 km²，II 类约 3 018.6 km²，III 类约 1 742.5 km²，合计 5 369.8 km²。

表 3 地热资源评价分级标准

Table 3 Grading criteria for geothermal resource assessment

评价指标 分级	单井涌水量/ (m ³ /h)	热储温度/°C	热储顶板埋 深/m
I	≥80	≥70	<2 000
II	≥60	≥60	
III	40~60		

5 热储成因机制

5.1 热源与传递方式

热源主要包括地幔传导热流和地壳中放射性元素衰变产生的热^[27]。

区内莫霍面埋深较周边山区浅，约 33 km，有利于深部热量向浅部传导。燕山期酸性花岗岩侵入体主要位于 8~16 km 深处，放射性生热率高，是附加热源。利用剥层法^[28]计算壳幔热流贡献，结果显示地幔热流占地表热流的 48.5%，放射性元素衰变热占 51.5%^[29-30]。

42 号钻孔揭露歧口凹陷内分布有少量的新生代火山岩，岩性包括安山岩、玄武岩、凝灰岩和辉绿岩，安山岩、玄武岩和凝灰岩属喷出岩，热影响时期较短，对地热形成意义不大。辉绿岩为侵入岩，深度在 3 000~3 150 m，仅在歧南 2 井附近发现，对地热影响

行计算。计算公式如下：

$$Q_r = A \cdot H \cdot C \cdot (t_r - t_0) \dots \dots \dots (1)$$

$$C = \rho_r \cdot C_r \cdot (1 - \varphi) + \rho_w \cdot C_w \cdot \varphi \dots \dots \dots (2)$$

地热可开采量采用回收率法^[12]计算，区内孔隙率大于 20%，取回收率为 25%。

计算结果见表 2。从表可知，馆陶组热储地热资源量总为 41.81×10^{18} J，其中天津市滨海新区和河北省黄骅市热储分布面积广，占地热资源总量的 95%。

表 2 馆陶组资源量计算结果(基准温度 13.5°C)

有限。华北平原地壳上部岩浆余热产生的热流很少，不作为热源考虑^[31-32]。



图 11 歧口凹陷馆陶组地热资源潜力分区
Fig.11 Geothermal resource potential zones of the Guantao Formation in the Qikou Sag

研究区属中低温沉积盆地型地热异常区，热流传递以热传导为主。地温梯度的垂向变化主要受岩石热导率及地下水活动的综合影响，一般来说，热导率低，地温梯度高；反之则低。地下水活动强烈，地温梯度低。

5.2 地热流体来源

从区内 86 组热储地热流体的氢氧同位素测试(图 12)可以看出，均落在大气降水线下方，新近系明化镇组及馆陶组热水点距降水线较近，基岩地热流体产生了氧漂移现象，表明区内新近系热水是现代降水与早期大气降水混合形成，且随着热储温度的升高，水

与岩石的¹⁸O交换作用强,产生了氧漂移。

根据区内16个钻孔中地热水的¹⁴C测年结果(表4),地热水年龄自西北向东南逐渐变老,说明地下热水自北向南东方向缓慢运移,补给来源可能是北部燕山山区和西部太行山区的古大气降水。明化镇地热水¹⁴C年龄总体大于馆陶组,说明馆陶组地下水交换较强烈,有年龄较新的现代水源补给^[28]。大气降水和地表水入渗后,沿断层、节理裂隙及地层孔隙等通道运移,在运移过程中,不断与热储介质进行水热交换,经深部循环成为地热流体。

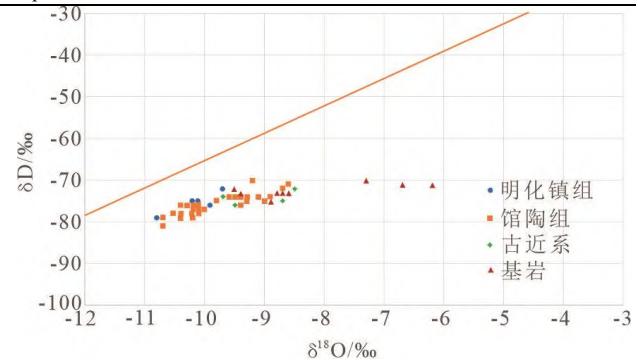


图12 热储地热水 δ D- $\delta^{18}\text{O}$ 同位素关系图
Fig.12 δ D versus $\delta^{18}\text{O}$ of geothermal water in geothermal reservoirs

表4 地热流体¹⁴C分析数据

Table 4 Data from ¹⁴C analysis of geothermal fluids

统一编号	地理位置	层位	表观年龄/ka	统一编号	地理位置	层位	表观年龄/ka
D51	大港西部	Nm	29.47±3.27	T18	塘沽北部	Ng	22.43±0.21
N01	南涧	Nm	27.40±0.46	T15	塘沽北部	Ng	20.28±0.3
T24	塘沽西北	Ng	16.00±0.26	T16	塘沽中部	Ng	24.01±0.53
T11	塘沽西北	Ng	19.05±0.28	T26	塘沽中部	Ng	23.50±0.35
D06	大港南部	Ng	23.05±0.28	T02	塘沽中部	Ng	21.84±0.51
D02	大港南部	Ng	24.458±0.732	C01	沧州市	Ng	25.07±0.57
D22	大港南部	Ng	25.56±0.40	H01	黄骅市	Ng	27.24±1.24
T25	塘沽西北	Ng	21.96±0.29	Z01	沧州中捷产业园	Ng	32.34±4.07

5.3 地热水循环过程

¹⁴C表观年龄分析能够体现天津地区馆陶组热储中地热水运移规律。可以看出,同一构造单元内上下热储层之间地热水年龄显著不同,热储层之间的黏土和泥岩层透水性差,阻止了垂向上的水力联系,热储内以水平方向径流为主。

研究区范围内发育的沧东断裂、海河断裂,是良好的导水导热断裂,北大港断裂带中的滨海断层作为导热断裂,导致北大港地区出现局部热量富集和地热异常区。

5.4 地热系统成因机制

根据已有地热井和石油井测温资料,馆陶组热储温度多低于90°C,属低温和地热资源。按水热系统成因机制分类,区内新近系馆陶组热储属沉积盆地深坳陷层控型水热系统^[33-34]。

深部地幔热流和地壳中放射性元素衰变生的热向浅部传导,是区内馆陶组热储的热源保障;而区内高热导的基岩隆起区有利于深部热量向浅部传导,形成地热异常区。上部的新近系明化镇组和第四系热导率较低,作为盖层,起到了很好的保温隔热效果。

来自北部燕山山区和西部太行山区的古大气降水自北向南东方向沿地层水平径流,吸收热量,温度升高,形成地热水。

研究区新近系馆陶组孔隙型热储具有高孔、高渗

的特点,为地热流体的赋存提供了空间。

此外,研究区内导水导热的深大断裂,沟通了浅部孔隙型热储和深部基岩热储,以热对流的方式实现热能局部富集。

综上,新近系馆陶组热储具备了地热资源形成和赋存所需的“热源、水源、储层、盖层和循环通道”等要素,资源条件好,是研究区内的主力热储层。

6 结论

a. 歇口凹陷中新近系馆陶组砂岩孔隙型热储普遍分布,是目前的主力开发热储层。

b. 区内地温场属传导型地温场,地温梯度分布总体上受基岩起伏控制,在基岩凸起部位形成地热异常区。受导水导热的沧东断裂影响,局部呈现地温异常,地温梯度局部达5.0°C/hm以上。

c. 歇口凹陷区馆陶组热储的孔隙率、渗透率变化规律基本一致,南北两侧较高,中部较低。热储孔隙率整体在26%以上,渗透率在 $390 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,孔渗性较好,单井涌水量平均 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,最高可达 $134 \text{ m}^3/\text{h}$,是优质热储。

d. 歇口凹陷区馆陶组热储为沉积盆地传导型地热系统。古大气降水自北部燕山山区补给,经缓慢的深循环交替、水热对流后,形成地热水,地下水系统相对封闭。

e. 歇口凹陷区馆陶组热储地热资源量为 $41.81 \times 10^{18} \text{ J}$,其中天津市滨海新区和河北省黄骅市热

储分布面积广, 占地热资源总量的 95%, 资源与需求匹配度较高, 具有良好的开发利用前景。

符号注释:

A 为研究区面积, m^2 ; C 为热储岩石和地热流体的平均体积热容, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$; C_r 为热储岩石比热容, $910 \text{ J/kg} \cdot ^\circ C$; C_w 为地热流体比热容, $4180 \text{ J/kg} \cdot ^\circ C$; H 为热储层厚度, m ; Q_r 为热储中储存的热量, J ; t_r 为热储层温度, $^\circ C$; t_0 为基准温度, 取 $13.5^\circ C$; ρ_r 为热储岩石密度, 2103 kg/m^3 ; ρ_w 为地热流体密度, 984.544 kg/m^3 ; φ 为热储岩石的孔隙率, 取 34.5%。

参考文献(References)

- [1] 国家能源局. 国家能源局综合司关于公开征求《关于促进地热能开发利用的若干意见(征求意见稿)》意见的公告[EB/OL]. (2021-04-14) [2022-05-01]. http://www.nea.gov.cn/2021-04/14/c_139880250.htm.
- [2] 汪集暘, 庞忠和, 程远志, 等. 全球地热能的开发利用现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 5–11.
- WANG Jiyang, PANG Zhonghe, CHENG Yuanzhi, et al. Current state, utilization and prospective of global geothermal energy[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(12): 5–11.
- [3] 杨吉龙, 汪大明, 牛文超, 等. 天津地热资源开发利用前景及存在问题[J]. 华北地质, 2022, 45(3): 1–6.
- YANG Jilong, WANG Daming, NIU Wenchao, et al. Prospects and problems of geothermal resources exploitation and utilization in Tianjin[J]. North China Geology, 2022, 45(3): 1–6.
- [4] ZHENG Tingting, KANG Fengxin, ZHOU Qundao, et al. Key technologies on geothermal water reinjection of sandstone porous aquifers: A case study of Dezhou geothermal reservoir in northern China[J]. GRC Transactions, 2007, 41: 2880–2895.
- [5] 李珊, 孙晓林, 杨宝美, 等. 天津市新近系馆陶组砂岩热储回灌能力评价分析[J]. 华北地质, 2023, 46(2): 38–44.
- LI Shan, SUN Xiaolin, YANG Baomei, et al. Evaluation and analysis of heat reservoir reinjection ability of Neogene Guantao Formation in Tianjin[J]. North China Geology, 2023, 46(2): 38–44.
- [6] 潘家明, 眭彪, 李耀义. 天津滨海新区中新生态城地热资源赋存条件探讨[J]. 地质调查与研究, 2010, 33(3): 185–189.
- PAN Jiaming, KUI Biao, LI Yaoyi. Discussion on the hosting conditions of geothermal resources in Sino-Singapore Tianjin Eco-city[J]. Geological Survey and Research, 2010, 33(3): 185–189.
- [7] 徐军祥, 康凤新. 山东省地热资源[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [8] 王连成. 天津市新近系馆陶组地热流体回灌研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- WANG Liancheng. A study of geothermal reinjection in the Guantao reservoir in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [9] 邓俊祖, 蔺文静, 邢琳琳, 等. 冀中坳陷北部碳酸盐岩热储水化学特征及成因分析[J]. 地下水, 2022, 44(3): 1–4.
- DENG Junzu, LIN Wenjing, XING Linxiao, et al. Chemical characteristics and genetic analysis of geothermal water in carbonate reservoir in the northern Jizhong Depression[J]. Groundwater, 2022, 44(3): 1–4.
- [10] 董月霞, 黄红祥, 任路, 等. 渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践: 以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 666–676.
- DONG Yuexia, HUANG Hongxiang, REN Lu, et al. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the Caofeidian geothermal heating project in Tangshan, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 666–676.
- [11] 孙晓林, 杨宝美, 王震凯. 天津地区奥陶系热储层上覆地层对其储层特征影响分析[J]. 华北地质, 2023, 46(2): 31–37.
- SUN Xiaolin, YANG Baomei, WANG Zhenkai. Analysis of the influence of the overlying strata on the reservoir characteristics of the Ordovician thermal reservoir in Tianjin area[J]. North China Geology, 2023, 46(2): 31–37.
- [12] 刘杰, 宋美钰, 秦莉红, 等. 天津地区雾迷山组地热资源潜力区划[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(2): 321–325.
- LIU Jie, SONG Meiyu, QIN Lihong, et al. Division of potential geothermal resources zones in the Wumishan Formation in Tianjin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(2): 321–325.
- [13] 魏真真, 王丙贤, 杨静. 歧口凹陷断裂构造特征及其控油气作用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4288–4295.
- WEI Zhenzhen, WANG Bingxian, YANG Jing. Structural characteristics of fault and its control on oil and gas distribution in Qikou Sag[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4288–4295.
- [14] 侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 200–214.
- HOU Zhongshuai, ZHOU Lihong, JIN Fengming, et al. Hydrothermal fluid activity and its reformation on reservoirs in Qikou Depression[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 200–214.
- [15] 张雨健, 王延斌. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海-港西断层垂向封堵性评价研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(1): 45–54.
- ZHANG Yujian, WANG Yanbin. Evaluation of vertical sealability of Binhai-Gangxi Fault in Qikou Sag Bohai Bay Basin[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1): 45–54.
- [16] 史双双. 歧口凹陷主断裂系统形成演化及油气地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- SHI Shuangshuang. Formation and evolution for the main fault systems and their implication to petroleum geology in Qikou Depression[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [17] 周立宏, 韩国猛, 董越崎, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海断鼻断-砂组合模式与油气成藏[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 869–882.
- ZHOU Lihong, HAN Guomeng, DONG Yueqi, et al. Fault-sand combination modes and hydrocarbon accumulation in Binhai Fault nose of Qikou Sag, Bohai Bay Basin, east China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 869–882.
- [18] 吴永平, 杨池银, 王华, 等. 歧口凹陷构造-层序-沉积一体化研究及其应用[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(4): 451–460.
- WU Yongping, YANG Chiyin, WANG Hua, et al. Integrated study of tectonics-sequence stratigraphy-sedimentology in the Qikou Sag and its applications[J]. Geotectonica et Metallogenica, 2010, 34(4): 451–460.
- [19] 饶松, 肖红平, 王朱亭, 等. 渤海湾盆地馆陶组热储特征与地热资源评价[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 141–152.
- RAO Song, XIAO Hongping, WANG Zhuting, et al. Geothermal reservoir characteristics and geothermal resource evaluation of Guantao Formation in the Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(5): 141–152.
- [20] 姜光政, 高珊, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2892–2910.
- JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892–2910.
- [21] 刘杰. 天津地区地热流体地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- LIU Jie. The geochemical character of geothermal liquid in Tianjin area[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [22] JIANG Guangzheng, HU Shengbiao, SHI Yizuo, et al. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2019, 753: 36–48.
- [23] 唐永香, 程万庆, 赵苏民, 等. 天津滨海新区深部地热资源评价及有利勘探区圈定[J]. 中国地质调查, 2020, 7(4): 37–42.
- TANG Yongxiang, CHENG Wanqing, ZHAO Sumin, et al. Evaluation of deep geothermal resources and delineation of favorable exploration areas in Binhai New Area, Tianjin[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(4): 37–42.

- [24] 刘祥柏, 柳广弟, 宋泽章, 等. 渤海湾盆地凹陷沙河街组烃源岩沉积环境及形成机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(12): 2008–2031.
LIU Xiangbai, LIU Guangdi, SONG Zezhang, et al. The paleo-sedimentary environment and formation mechanism of the source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(12): 2008–2031.
- [25] 高新智. 天津市孔隙型砂岩热储回灌能力评价模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
GAO Xinzh. The model of thermal storage recharge capacity for sandstone pore in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018.
- [26] 赵苏民. 沉积盆地型地热田勘查开发与利用[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
ZHAO Sumin.沉积盆地型地热田勘查开发与利用[M].北京: 地质出版社, 2013.
- [27] 王贵玲, 蔺文静, 刘峰, 等. 地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 639–660.
WANG Guiling, LIN Wenjing, LIU Feng, et al. Theory and survey practice of deep heat accumulation in geothermal system and exploration practice[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 639–660.
- [28] 高宝珠, 王心义, 曾梅香, 等. 天津市地下热水成因、年龄及补给条件研究报告[R]. 天津: 天津地热勘查开发设计院, 2013.
GONG Yuling. Thermal structure and thermal evolution in the Bohai Bay Basin in eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2003.
- [29] 龚育龄. 中国东部渤海湾盆地热结构和热演化[D]. 南京: 南京大学, 2003.
GONG Yuling. Thermal structure and thermal evolution in the Bohai Bay Basin in eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2003.
- [30] 左银辉, 邱楠生, 常健, 等. 渤海湾盆地中、新生代岩石圈热结构研究[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 145–153.
ZUO Yinhui, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Meso-Cenozoic lithospheric thermal structure in the Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 145–153.
- [31] 张百鸣, 林黎, 赵苏民. 天津地区地热形成机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(2): 104–107.
ZHANG Baiming, LIN Li, ZHAO Sumin. Analyses on mechanism of geothermal origin in Tianjin area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(2): 104–107.
- [32] 郭飒飒, 朱传庆, 邱楠生, 等. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2026–2035.
GUO Sasa, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2026–2035.
- [33] 王贵玲, 蔺文静. 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, 2020, 94(7): 1923–1937.
WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923–1937.
- [34] 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.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIN Wenjing, et al. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1074–1085.