



呼和浩特白庙子凹陷热储特征与高产能地热井参数研究

马占雄, 闫福贵, 李明, 张青, 韩婧, 赵俊宾

Geothermal characteristics and high-yield geothermal well parameters in the Baimiaozi sag of Huhe depression

MA Zhanxiong, YAN Fugui, LI Ming, ZHANG Qing, HAN Jing, and ZHAO Junbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202408024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式](#)

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36–46

[基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究](#)

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 同伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190–199

[基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价](#)

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196–200

[胶东典型花岗岩热储地下热水水化学特征及热储研究](#)

A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area

王晓翠, 孙海龙, 袁星芳 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 186–194

[沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究](#)

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9–18

[四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因](#)

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81–89



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202408024](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202408024)

马占雄, 闫福贵, 李明, 等. 呼和坳陷白庙子凹陷热储特征与高产能地热井参数研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 217-228.

MA Zhanxiong, YAN Fugui, LI Ming, et al. Geothermal characteristics and high-yield geothermal well parameters in the Baimiaozi sag of Huhe depression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 217-228.

呼和浩特白庙子凹陷热储特征与高产能地热井 参数研究

马占雄^{1,2}, 闫福贵^{1,2}, 李 明^{1,2}, 张 青^{1,2}, 韩 婧^{1,2}, 赵俊宾^{1,2}

(1. 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010020; 2. 内蒙古自治区地质
调查研究院, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要: 呼和坳陷白庙子凹陷地热地质条件优越, 以往地热勘查主要围绕凹陷中心北部浅埋区热储层布置钻孔, 但探获的热储埋藏浅、热储厚度相对薄, 探测西南部新近系深部砂岩热储, 寻找高产能地热资源是呼和浩特市地热勘查开发的重要方向。文章以白庙子凹陷西南部的 TD1 孔为依托, 通过二维地震剖面解译、钻探、物探测井、放喷试验、水样测试分析, 研究新近系热储的特征、深部热对流机制、主要参数等。研究结果表明: (1) 白庙子凹陷西南部新近系地热储层厚度大, 是地热资源勘查开发的有利目标区, TD1 孔新近系深部热储由大厚度砂砾岩组成, 热储总厚度 299.5 m, 占地层总厚度的 40.69%; (2) TD1 孔在新近系中新统 2 030.9 ~ 2 282.5 m 深度共发育 14 层热储层, 热储总厚度 160.4 m, 占地层总厚度的 63.75%, 孔隙度平均值 26.27%, 为 TD1 孔主要出水段; (3) TD1 孔口水温 75.0°C, 孔底最高温度 80.7 °C, 2 030.9 ~ 2 282.5 m 深度热储层孔隙度最高, 井温梯度明显偏低, 推测深部存在热对流; (4) TD1 孔放喷试验曲线反映了深部热储层呈强富水性特征, 完井稳定涌水量 233.12 m³/h, 单井供暖潜力达 33×10⁴ m², 为目前发现的呼和浩特最高产能地热井。研究成果揭示了呼和浩特白庙子凹陷西南部新近系高产能热储特征和单井供暖潜力, 可为未来呼和浩特高产能地热资源勘查开发提供参考借鉴。

关键词: 地热资源; 新近系热储; 高产能地热井; 热储参数; 白庙子凹陷

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0217-12

Geothermal characteristics and high-yield geothermal well parameters in the Baimiaozi sag of Huhe depression

MA Zhanxiong^{1,2}, YAN Fugui^{1,2}, LI Ming^{1,2}, ZHANG Qing^{1,2}, HAN Jing^{1,2}, ZHAO Junbin^{1,2}

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Hohhot, Inner Mongolia
010020, China; 2. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: The geothermal geological conditions of Baimiaozi sag in Huhe depression are favorable for geothermal exploration. Previous geothermal investigations primarily focused on boreholes around the northern shallow-buried zone of the sag center, where the thermal reservoirs are shallow and relatively thin. However, exploring deep Neogene sandstone geothermal reservoirs in the southwest of the sag represents a key direction for geothermal exploration and development in Hohhot. Based on the borehole TD1 in the southwest of Baimiaozi

收稿日期: 2024-08-19; 修订日期: 2024-10-09

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 内蒙古自治区本级地质调查预算项目(201999); 内蒙古自治区城市地热专项勘查及示范项目(2200113505005)

第一作者: 马占雄(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地热地质、水工环地质研究。E-mail: 765167960@qq.com

通讯作者: 闫福贵(1964—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地热地质、水工环地质研究。E-mail: 13847128967@qq.com

sag, this study analyzed the seismic data by interpretation of two dimension seismic profile, drilling, geophysical logging, blowout test, and water sample test, to study the characteristics, deep thermal convection mechanism, and main parameters of the Neogene geothermal reservoir. The results show that the Neogene geothermal reservoir in the southwest of the sag is thick, which is a favorable target for exploration and development of geothermal resources. The deep Neogene geothermal reservoir in borehole TD1 is composed of a considerable thickness of conglomeratic sandstone, with a total thickness of 299.5 m, accounting for 40.69% of the total thickness of the formation. 14 geothermal reservoir layers have been developed in the Neogene Miocene from 2 030.9 m to 2 282.5 m deep in TD1 borehole, with a total thickness of 160.4 m, accounting for 63.75% of the formation's total thickness and an average porosity value of 26.27%, which is the dominant water-yielding section of the borehole TD1. The wellhead temperature in the borehole TD1 is 75.0 °C, and the max bottom temperature is 80.7 °C. The geothermal gradient from 2 030.9 m to 2 282.5 m with high porosity development is significantly lower, suggesting the existence of deep heat convection. The pumping test in borehole TD1 demonstrates the reservoir's high water yield, with a stable well flow rate of 233.12 m³/h. The heating potential with the single well is estimated at 33×10^4 m², making it the highest-yielding geothermal well currently discovered in the Huhe depression. These findings highlight the characteristics of high-yield thermal storage and the single-well heating potential of the Neogene geothermal reservoir in the southwest of Baimiaozi sag, providing valuable insights for the future exploration and development of high-yield geothermal resources in the Huhe depression.

Keywords: geothermal resources; neogene geothermal reservoir; high-yield geothermal well; thermal storage parameters; Baimiaozi sag

地热资源是一种分布广泛、稳定、可再生、易于利用及经济的低碳清洁能源,合理开发利用地热资源在优化能源结构,促进节能减排方面具有广阔前景^[1-5]。根据传热方式、热储赋存特征及开发利用方式等因素,可将中国地热资源分为浅层地热能、水热型地热资源和干热岩3大类型^[6-7]。其中,中国水热型地热资源主要分布在松辽、汾渭、鄂尔多斯、河套、华北等平原(盆地)。中国地热研究起步较晚,20世纪70—80年代,中国取得一批主要盆地大地热流数据^[8]。20世纪90年代,国内研究了主要盆地水热型地热资源的赋存特征,并评估了其开发潜力^[9],开展了主要沉积盆地热体制和热演化研究^[10-11]。到了“十二五”期间,国内评价了主要盆地地热资源开发潜力^[12]。这些均为宏观层面的地热研究。

内蒙古地热勘查研究始于2000年,先后对河套盆地、鄂尔多斯盆地、乌海盆地等开展了地热勘查研究,初步查明了自治区主要盆地地热资源分布状况^[13]。其中,呼和浩特位于河套盆地的东部,由北部凹陷区、南部斜坡区和西部断块区3个亚一级构造单元组成,北部凹陷区具体又划分为大城西凹陷、哈素凹陷和白庙子凹陷3个次一级构造单元^[14]。自2000年以来,在呼和浩特相继施工了24眼地热井,单井涌水量641.76~3 954.00 m³/d,井口出水温度53~66 °C,勘查研究结果

表明呼和浩特地热资源丰富。

白庙子凹陷位于呼和浩特的东部,是一个以前震旦系深变质岩为基底的中新生代沉积盆地。石油部门曾开展过盆地构造、油气有利圈闭等勘测工作^[15],前人^[16-19]也对地热成因、地热分布特征开展过部分研究,研究表明白庙子凹陷主要赋存新近系地热储层,以传导型地热为主。自治区地质勘查基金实施了多项地热勘查项目^[20-22],以往的地热勘查研究主要围绕白庙子凹陷中心北部浅埋区热储开展工作,揭露的新近系热储埋藏浅、热储厚度相对薄,尚未发现温度更高、出水量更大的高产能热储层。为了研究新近系深部粗碎屑砂岩热储特征,文章以白庙子凹陷西南部的TD1孔为依托,通过二维地震剖面解译、钻探、物探测井、放喷试验及水样测试分析,研究了新近系高产能热储特征、深部热对流机制等,评价了热储参数及单井供暖潜力,研究成果对未来呼和浩特高产能地热资源勘查开发具有重要意义。

1 研究区概况

1.1 研究区地质背景

白庙子凹陷构造属于华北地台—鄂尔多斯台坳—河套盆地—呼和浩特的四级构造单元,具体位于呼和浩特亚一级构造单元北部凹陷区的东部,北临大青

山, 东南与南部斜坡相邻, 西接哈素凹陷, 受近东西向及北东向盆地边界构造断裂所控制^[23], 呈北深南缓、西深东浅的箕状形态, 凹陷内部断裂构造不甚发育。白庙子凹陷受燕山期的强烈构造运动形成了中新生代盆地的沉积基底, 凹陷沉积中心偏北, 凹陷东部较陡, 西南部较缓, 中心处沉积基底最大埋深约 5 200 m, 相继沉积了巨厚的中新生代河湖相堆积物, 地层由凹陷中心至边缘逐渐变薄, 中心周围厚度达 4 400~5 200 m, 至凹陷边缘地带厚度逐渐变为 2 000~2 600 m(图 1)。

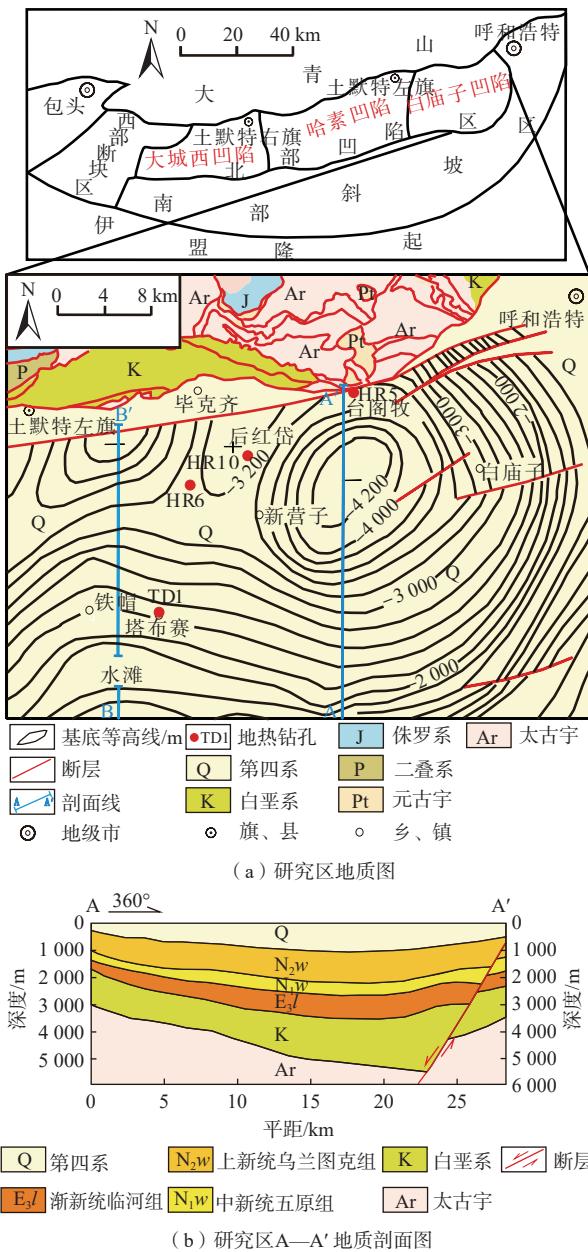


图 1 研究区地质概况及地质剖面图

Fig. 1 Geological diagram and geological profile of the study area

1.2 热储层特征

白庙子凹陷的地层岩性特征及其地热属性如图 2 所示。在白庙子凹陷研究区范围内, 由深到浅相继沉积了中生界白垩系, 新生界古近系、新近系及第四系地层^[24~25], 地热储层主要有新近系砂岩热储层和古近系砂岩热储层。

1.2.1 新近系砂岩热储层

热储层是新近系砂岩热储, 新近系上新统下部和中新统储层较发育。据凹陷北部 HR5、HR6 钻孔揭露, 热储底板埋深介于 1 200~1 500 m 之间, 热储埋藏浅, 热储岩性较细, 以细砂岩为主, 静止水位 +13.8~+40.0 m, 单井涌水量 73.66~116.70 m³/h, 地热井出水温度介于 56~64 °C, 可作为地热供暖及温泉康养等梯级开发利用的主要热储层, 上部第四系地层及新近系中新统上部泥岩地层为区域盖层。

1.2.2 古近系砂岩热储层

热储层是古近系砂岩热储, 据凹陷北部 HR10 钻孔揭露, 热储底板埋深 1 600 m, 热储岩性较粗, 以粗砂岩为主, 静止水位 +45.5 m, 单井涌水量 164.75 m³/h, 地热井出水温度 66 °C。古近系热储在凹陷北部埋藏浅, 易于揭露, 热储岩性较粗, 可作为地热供暖热储层, 上部第四系及新近系为区域盖层。

以往地热勘查主要围绕白庙子凹陷中心北部热储层浅埋区布置钻孔, 取得了较好的勘查成果, 但探获的新近系热储埋藏浅、热储厚度相对薄, 尚不能构成高产能热储层, 而白庙子凹陷新近纪中新世为洪积物沉积扩张期^[26], 岩性以砂砾岩为主, 白庙子凹陷西南部新近系中新统埋藏深、热储温度高, 热储岩性粗、渗透性好, 有可能成为高产能热储层。本次深部热储探测以新近系中新统粗碎屑砂岩热储为主要目标。

2 深部热储探测方法

2.1 地球物理系统解译

二维地震可用来探测深部地层沉积构造, 有利于寻找地热资源^[27], 本次研究充分利用石油部门在 20 世纪 80 年代开展的二维地震勘探成果资料, 对白庙子凹陷新近系中新统地热储层沉积特征分布进行解释, 凹陷中部 A—A' 地震剖面(图 3)呈中-强振幅、高频、连续性好的反射结构, 具平行的反射构造, 反映凹陷中心及附近为浅湖-半深湖沉积、厚层状泥岩发育特征, 不具备发育高产能热储的条件。西南部 B—B' 地震剖面(图 4)新近系中新统呈弱振幅、低频、连续性差的反射结构, 反映出岩性变化大, 具粗粒碎屑夹

地层					厚度/m	地层柱状	岩性描述	地热属性
界	系	统	组	代码				
新生界	第四系	全新统		Qh	50~200		浅黄色粉细砂，灰黄色黏砂土	盖层
		更新统		Qp	400~1000		土黄色粉细砂、黏砂土，兰灰色及青灰色淤泥质黏土、黏砂土夹薄层粉细砂，灰黄色中细砂、细粉砂	盖层
	新近系	上新统	乌兰图克组	N _{2W}	400~800		上段：上部为灰褐色泥岩，中部为灰色粉砂岩，平行层理；下部为灰褐色泥岩夹灰白色粉砂岩。下段：上部为浅褐色泥质粉砂岩；中部为灰色泥质粉砂岩，发育细纹层理；下部为灰色细砂岩夹薄层粉砂质泥岩	地热储层
		中新统	五原组	N _{1W}	200~600		岩性以含砾砂岩为主，中间夹薄层泥岩、泥质粉砂岩，底部可见泥质砾岩	地热储层
古近系	渐新统	临河组	E _{3L}	800~600		灰色粗砂岩夹粉砂岩、泥岩	地热储层	
中生界	白垩系	下统	固阳组	K _{1g}	200~1600		棕褐色砂质泥岩、砂岩、含砾泥岩	隔层
太古界				Ar	>10 000		花岗片麻岩，变粒岩	隔层

图2 白庙子凹陷地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive histogram of strata in the Baimiaozi sag

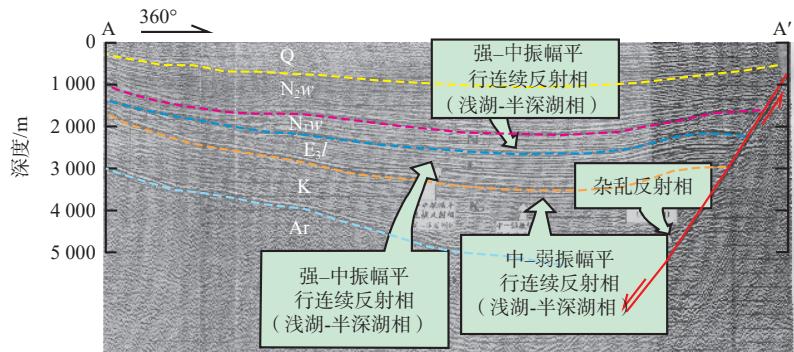


图3 A—A'地震反射解译剖面图

Fig. 3 A—A' seismic reflection interpretation profile

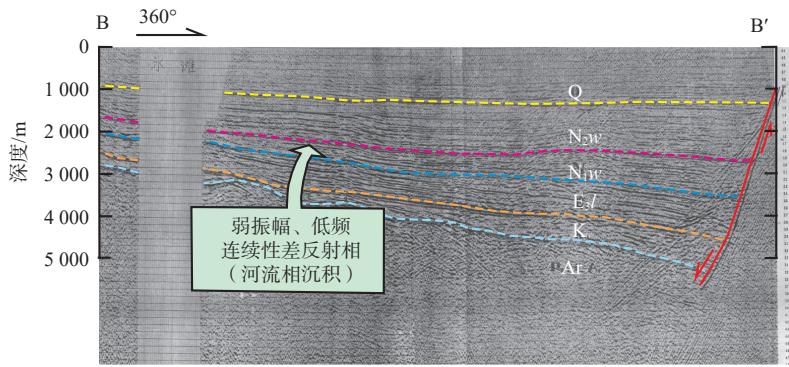


图4 B—B'地震反射解译剖面图

Fig. 4 B—B' seismic reflection interpretation profile

薄层细粒多层叠置河流相沉积的特征,凹陷西南部具备形成高产能热储的条件。根据二维地震解释成果,在西南部B—B'地震剖面东侧附近3.2 km处布设了一

个地热勘探孔TD1,设计孔深2 550 m,是内蒙古自治区地质调查研究院于2020年在白庙子凹陷布置的新近系深部热储勘查钻孔,推测热储具有埋藏深、厚度

地层				厚度/m	地层柱状	钻孔结构	岩性描述	地热属性
系	统	组	代码					
第四系	全新统		Qh	65.0			浅黄色亚砂土、粉质黏土、中细砂 上部为灰黄色中细砂及黑色淤泥质黏土；中部以粉土、粉质黏土为主，夹薄层粉细砂；下部为黄色砾砂、中粗砂及粉质黏土	盖层
	更新统		Qp	913.0				
新近系	上新统	乌兰图克组	N ₂ w	1 052.9			上部为灰绿色、灰白色泥岩及粉砂质泥岩；下部为灰色中粗砂岩、砂砾岩与泥岩互层	上部为盖层 下部为储层
	中新统	五原组	N ₁ w	251.6				
古近系	渐新统	临河组	E ₃ /I	269.5 未揭穿			粗砂岩、砂砾岩	热储主力产层
							紫红色泥岩	隔层

图 5 TD1 钻孔柱状图

Fig. 5 Column diagram of borehole TD1

大、涌水量大、温度较高的特点,可以探获高产能地热井。

2.2 地热地质钻探

地热地质勘探钻孔 TD1 位于呼和浩特市土默特左旗塔布赛村,具体由河北省煤田地质局第二地质队负责钻探施工,钻机型号 TSJ3000 型。该钻孔于 2021 年 3 月 11 日开钻,一开采用 $\Phi 444.5\text{ mm}$ 牙轮钻头,采用低固相不分散泥浆体系,钻至井深 501.01 m 完钻,全井段封闭止水,水泥浆返高至地面;二开采用 $\Phi 311.3\text{ mm}$ 聚晶金刚石复合片钻头 (polycrystalline diamond compact bit, PDC) 与 $\Phi 311.3\text{ mm}$ 三牙轮钻头,采用低固相不分散泥浆体系钻进,至井深 2 551.98 m 终孔,对 445.53 ~ 1 546.40 m 井段外环状部位采用水泥“穿鞋戴帽”固井止水,2021 年 6 月 27 日完钻,完钻井深 2 551.98 m。钻遇地层依次为第四系,新近系上新统乌兰图克组、新近系中新统五原组及古近系渐新统临河组(图 5)。

2.3 地球物理测井

地球物理测井工作采用 SKD-3000B 型数控测井系统。测井项目包括:自然电位、自然伽玛、补偿声波、视电阻率、双侧电阻率、微电极、泥浆电阻率、固井质量检测(水位压差法、声幅固井检测)、井温、井斜、井径等。测井解释成果见表 1。

2.4 放喷试验

地热地质钻孔 TD1 完井后,按照《地热资源地质

勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[28]并结合地热井自流实际,对新近系热储层(1 546.4 ~ 2 282.5 m)进行了四个落程的放喷试验,自 2021 年 6 月 12 日 00:00 开始至 2021 年 6 月 22 日 12:00 结束。(表 2、图 6—7)。

3 结果

3.1 TD1 孔热储特征

据 TD1 孔揭露及测井解释成果(表 1),新近系在 1 546.4 ~ 2 282.5 m 深度热储总厚度 299.5 m,占地层总厚度的 40.69%,其中,上新统发育的孔隙型砂岩热储在 1 546.4 ~ 2 030.9 m 深度共发育 30 层热储层,单层热储最大厚度 9.7 m,热储总厚度 139.1 m,占地层总厚度的 28.71%,孔隙度平均值 21.33%,渗透率平均值为 $279.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而新近系中新统在 2 030.9 ~ 2 282.5 m 深度共发育 14 层热储层,单层热储最大厚度 44.4 m,热储总厚度 160.4 m,占地层总厚度的 63.75%,孔隙度平均值 26.27%,渗透率平均值为 $470.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,显然新近系中新统为 TD1 孔主要出水段。

3.2 水文地质参数

TD1 孔完井后,进行了四个落程降压放喷试验,通过迭代法求得新近系热储层渗透系数与影响半径^[29],计算公式为:

$$K = \frac{0.366Q}{MS} \lg \frac{R}{r} \quad (1)$$

$$R = 10S \sqrt{K} \quad (2)$$

表 1 TD1 新近系热储出水层测井解释成果

Table 1 Main Water-yielding stratum logging results of Neogene thermal storage in borehole TD1

层号	层位	井段/m	层厚/m	电阻率/(Ω·m)	声波时差/(μs·m⁻¹)	孔隙度%	渗透率/(10⁻³ μm²)	泥质含量/%	解释结论
1		1 546.4 ~ 1 556.1	9.7	7.8	354.6	27.6	489.54	16.5	水层
2		1 559.4 ~ 1 566.0	6.6	7.2	337.7	24.8	309.66	15.9	水层
3		1 570.7 ~ 1 576.5	5.8	8.5	351.1	27.1	446.36	20.6	水层
4		1 580.1 ~ 1 583.1	3.0	7.0	336.3	24.7	310.27	37.1	水层
5		1 594.5 ~ 1 598.9	4.4	5.7	345.1	26.2	404.64	22.2	水层
6		1 612.7 ~ 1 616.1	3.4	5.5	331.3	23.9	269.11	33.4	水层
7		1 633.9 ~ 1 635.3	1.4	3.2	339.5	25.4	357.49	39.4	水层
8		1 638.7 ~ 1 642.5	3.8	3.7	341.3	19.0	303.46	40.3	水层
9		1 672.3 ~ 1 679.7	7.4	4.3	327.7	23.5	448.40	24.6	水层
10		1 689.5 ~ 1 691.3	1.8	3.6	348.0	23.9	612.68	9.8	水层
11		1 710.9 ~ 1 716.0	5.1	4.0	326.1	23.0	339.80	20.5	水层
12		1 731.6 ~ 1 734.5	2.9	5.7	298.5	18.7	114.55	23.8	水层
13		1 738.5 ~ 1 740.7	2.2	4.4	347.1	25.4	436.33	30.6	水层
14		1 759.0 ~ 1 762.3	3.3	4.4	338.8	21.4	366.21	23.1	水层
15	N _{2W}	1 781.1 ~ 1 785.8	4.7	3.9	306.4	20.2	132.44	39.7	水层
16		1 797.0 ~ 1 803.1	6.1	4.6	298.9	20.1	139.29	25.0	水层
17		1 822.1 ~ 1 825.8	3.7	3.9	307.5	22.3	243.88	35.9	水层
18		1 834.7 ~ 1 843.6	8.9	3.9	304.5	21.8	457.45	25.1	水层
19		1 861.2 ~ 1 866.6	5.4	3.6	309.1	20.5	316.54	33.3	水层
20		1 868.7 ~ 1 872.5	3.8	4.4	306.9	16.0	138.35	43.5	水层
21		1 905.8 ~ 1 914.4	8.6	4.7	280.1	16.9	80.36	22.8	水层
22		1 917.1 ~ 1 920.2	3.1	4.0	289.2	19.4	250.97	31.9	水层
23		1 922.7 ~ 1 926.6	3.9	4.5	293.2	20.1	148.30	25.8	水层
24		1 929.8 ~ 1 931.7	1.9	4.9	282.7	14.8	66.80	41.2	水层
25		1 935.4 ~ 1 938.8	3.4	3.1	303.3	17.4	209.27	40.2	水层
26		1 958.4 ~ 1 962.2	3.8	2.7	371.6	20.4	317.99	29.4	水层
27		1 966.7 ~ 1 968.9	2.2	4.5	294.9	17.3	161.86	36.0	水层
28		1 981.3 ~ 1 984.1	2.8	2.9	329.8	20.9	406.37	45.1	水层
29		1 997.3 ~ 2 004.1	6.8	4.6	257.5	15.7	67.37	23.2	水层
30		2 021.7 ~ 2 030.9	9.2	4.9	271.0	18.2	84.56	23.8	水层
31		2 042.4 ~ 2 063.4	21.0	2.8	340.0	25.4	340.28	21.7	水层
32		2 064.9 ~ 2 109.3	44.4	3.0	353.2	27.0	515.12	27.2	水层
33		2 110.9 ~ 2 113.0	2.1	2.4	353.4	28.1	526.18	23.6	水层
34		2 129.3 ~ 2 137.3	8.0	1.9	351.8	27.5	506.15	29.1	水层
35		2 138.7 ~ 2 143.0	4.3	1.8	367.3	24.1	756.49	39.3	水层
36		2 149.0 ~ 2 171.3	22.3	1.9	350.3	26.5	480.12	23.4	水层
37	N _{1W}	2 177.9 ~ 2 186.9	9.0	2.0	354.0	25.3	454.73	28.6	水层
38		2 197.5 ~ 2 214.8	17.3	1.6	352.0	28.3	574.54	13.5	水层
39		2 216.4 ~ 2 224.4	8.0	1.7	345.0	27.0	526.70	13.9	水层
40		2 232.7 ~ 2 238.8	6.1	2.0	336.3	25.5	351.78	11.9	水层
41		2 242.6 ~ 2 245.7	3.1	2.2	307.0	20.0	231.15	23.8	水层
42		2 260.9 ~ 2 263.6	2.7	3.9	310.2	18.1	151.35	32.3	水层
43		2 267.2 ~ 2 277.2	10.0	1.7	344.7	27.2	463.48	17.0	水层
44		2 280.4 ~ 2 282.5	2.1	1.8	353.6	17.6	77.36	10.7	水层

式中: K —渗透系数/(m·d⁻¹); r —抽水管半径/m; Q —涌水量/(m³·d⁻¹); M —含水层厚度/m; R —影响半径/m; S —降深/m。

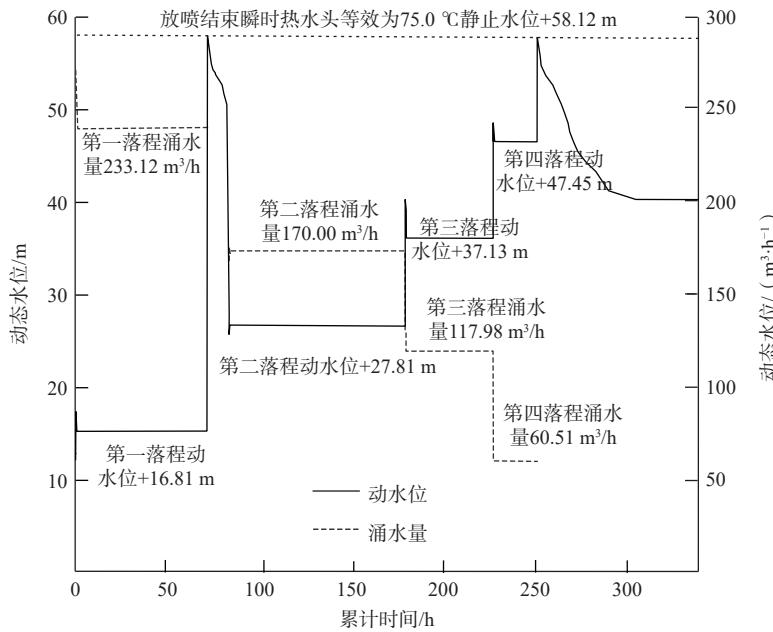


图 6 TD1 孔放喷试验历时曲线

Fig. 6 Water level dynamic curve of Blowout test in borehole TD1

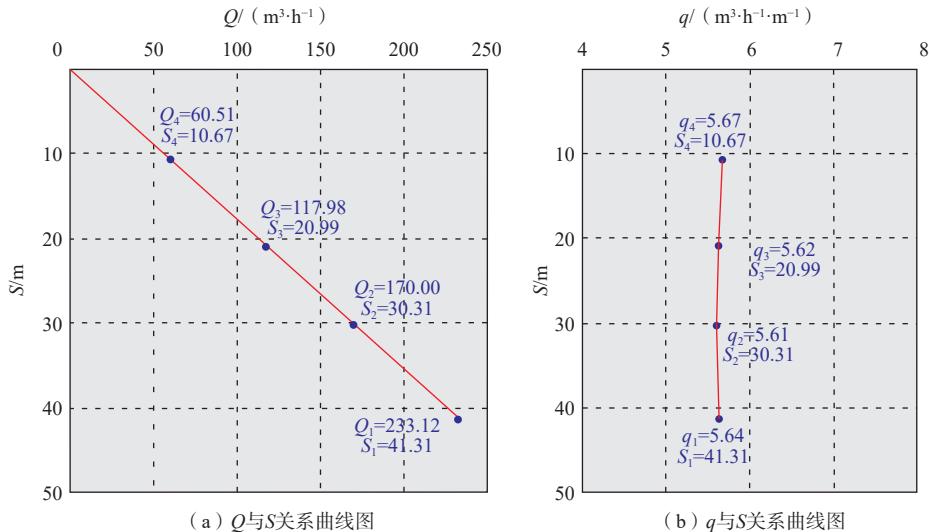


图 7 TD1 孔新近系放喷降压试验曲线

Fig. 7 Curve of full section blowout test of Neogene in borehole TD1

式(1)(2)联立,计算结果见表2。

$$T = K \cdot m \quad (3)$$

导水系数(T)计算公式为:

式中: m ——热储层厚度/m。

表 2 TD1 孔放喷试验水文地质参数

Table 2 Blowout test results of hydrogeological parameters for TD1 borehole

落程	放喷时间/h	稳定延续时间/h	热水头/m	稳定动水位/m	涌水量/(m³·h⁻¹)	降深/m	单位涌水量/(m³·h⁻¹·m⁻¹)	出水温度/°C	抽水管半径/m	含水层厚度/m	渗透系数/(m·d⁻¹)	影响半径/m
第一落程	72.00	71.50		+16.81	233.12	41.31	5.64	75.0	0.118 3	299.5	0.57	312
第二落程	96.00	95.54		+58.12	170.00	30.31	5.61	75.0	0.118 3	299.5	0.54	223
第三落程	48.00	47.54		+37.13	117.98	20.99	5.62	74.5	0.118 3	299.5	0.52	151
第四落程	24.00	23.52		+47.45	60.51	10.67	5.67	74.5	0.118 3	299.5	0.47	73

注:四个落程的渗透系数平均值为0.51 m/d。

计算结果 $T=152.75 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

3.3 TD1 孔井温特征

根据研究需要,进行了2次井温测井。在钻井完钻刚结束时进行了第1次全井段测温,井底温度78.3 °C,24 h后进行了第2次全井段测温,井底温度80.7 °C。2条测温曲线的中性点(2条及以上的钻孔测温曲线有一共同的交点^[30])位于820.0 m(图8),温度41.7 °C,中性点以上钻井循环液受周边岩层热传导,逐渐接近原始地温,第1次测温曲线中性点以上增温明显。中性点以下2条测温曲线偏离程度较小,钻孔底部受钻井循环液影响小,第2次测温曲线井底处更接近真实地层温度,中性点以下温度与深度总体上呈线性关系,反映了传导性地温特征。

3.4 TD1 孔地热流体水化学特征

TD1孔测试结果表明,地热水水化学类型为Cl—Na型,阳离子Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺的质量浓度分别为2 722.0, 37.6, 29.3, 528.0 mg/L, 主要阴离子Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻的质量浓度分别为4 865.0, 325.0, 115.0 mg/L。TD1孔地热水总溶解性固体质量浓度为8.56 g/L。TD1孔地热水偏硅酸质量浓度为53.70 mg/L, 达到理疗热矿水浓度和命名矿水浓度。地热水碘质量浓度为7.01 mg/L, 达到命名矿水浓度,是优质的理疗热矿水。

4 讨论

4.1 高产能热储特征

表3反映了TD1孔与凹陷北部3个地热孔的热储参数对比,从揭露的热储层厚度分析,TD1孔热储总厚度和新近系中新统热储厚度均最厚,分别为299.5, 160.4 m, 新近系中新统砂厚比高达63.75%; HR10孔热储厚度次之,为226.1 m; HR5最薄,为180.5 m。从平均孔隙度分析,各孔新近系中新统热储层孔隙度均比上新统大,其中TD1孔最高,为26.27%。从单位涌水量(q)分析,TD1最高,为5.64 m³/(h·m); HR10孔次

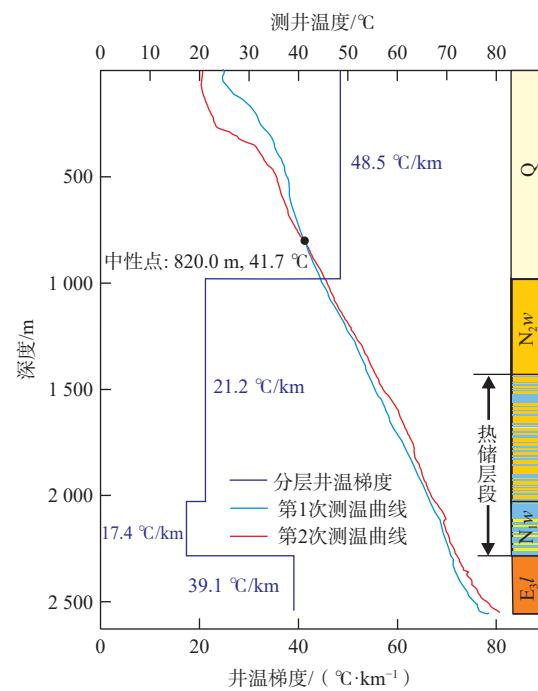


图8 TD1孔测井温度及井温梯度垂向分布

Fig. 8 Vertical distribution of well logging temperature and well logging temperature gradient in borehole TD1

之,为4.12 m³/(h·m); HR5最小,仅为0.85 m³/(h·m)。从孔口出水温度分析,TD1孔最高,为75.0 °C;其次为HR10孔,为66.0 °C;最低的是HR5孔,为56.0 °C。综合分析认为,热储总厚度和孔隙度是决定白庙子凹陷新近系砂岩热储涌水量的关键因素,反映出在凹陷西南部新近系深部热储可以探获更大单位涌水量和更高温度的地热资源。这也说明了将西南部新近系深部热储作为高产能地热勘查目标层位是正确的,将TD1孔作为高产能地热探测孔是合理的。

4.2 热对流机制

根据TD1地热井测井井温与地层埋深垂向上的对应关系(图8),上部第四系砂质黏土层、淤泥层厚,孔隙度大,热导率低,地温梯度大,井温梯度高达

表3 地热钻孔热储参数对比

Table 3 Comparison of geothermal borehole and thermal storage parameters

孔号	井深/m	热储厚度/m	砂厚比/%	平均孔隙度/%	单位涌水量/(m ³ ·h ⁻¹ ·m ⁻¹)	孔口出水温度/°C	构造位置
HR5	2 404	N ₂ w: 49.0	42.72	20.06	0.85	56.0	凹陷东北部
		N ₁ w: 114.1	22.02	21.24			
		E ₁ l: 17.4	5.96	22.33			
HR6	2 400	N ₂ w: 81.3	11.24	16.15	1.46	64.0	凹陷北中部
		N ₁ w: 137.5	33.54	20.71			
HR10	2 206	226.1	E ₃ l: 226.1	38.45	4.12	66.0	凹陷北部
TD1	2 552	299.5	N ₂ w: 139.1	28.71	5.64	75.0	凹陷西南部
		N ₁ w: 160.4	63.75	26.27			

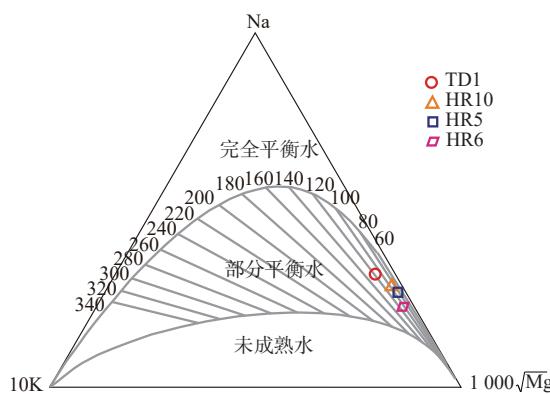


图9 研究区地热水Guggenbach三角图

Fig. 9 Guggenbach triangle diagram of geothermal water in the study area

48.5 °C/km, 是良好的盖层。进入新近系后, 成岩程度变高, 岩石热导率变大, 井温增幅降低, 新近系上新统井温梯度 21.2 °C/km, 而中新统井温梯度仅为 17.4 °C/km, 与厚层状粗碎屑砂砾岩地热储层连续分布有密切关系, 热储层孔隙度大、渗透性好, 富水性强, 上、下层位地下热水存在对流作用, 井温增加幅度降低最为明显。下部为古近系渐新统, 孔底最先达到地温, 而上面一段地温尚未完全恢复, 井温梯度变为 39.1 °C/km, 计算的井温梯度偏大, 但钻遇的渐新统以泥岩为主, 砂岩不发育, 受地下热水活动影响明显减弱。

4.3 地热水成因

TD1 孔总溶解性固体质量浓度为 8.56 g/L, 明显高于凹陷北部 HR5(6.08 g/L)、HR6(2.04 g/L)及 HR10(3.67 g/L), 反映了水-岩溶解作用程度在凹陷西南部较凹陷北部明显增强。根据水-岩作用程度, 可将地热水区分为未成熟水、部分平衡水和完全平衡水 3 种类型^[31], 研究区地热水的平衡状态如图 9 所示, 研究区地热水均处于部分平衡区, 说明了反应的平衡温度偏低, 热水在上涌的过程中受到上部低温水的混合作用。TD1 孔热储温度高于凹陷北部地热孔热储温度, 并大于出水温度, 同样反映了凹陷西南部热储较凹陷北部隔热保温更好, 封闭性更强, 水-岩作用程度较高, 以致凹陷西南部总溶解性固体浓度较凹陷北部明显变大。

4.4 TD1 孔参数评价

如图 7 所示, TD1 孔新近系热储放喷试验 Q - S 曲线呈直线型, 直线过原点, 判定系数平方和 (R^2) 为 1, 表明热储层呈强富水特征并且有稳定的补给来源, TD1 孔放喷试验曲线最大的特点是放喷降压开始时动水位很快趋于稳定, 降压结束瞬间井内水位骤升,

随后水位逐渐下降, 这是因为地热井水温高, 且热储层埋藏深度大, 降压结束时水柱上下温度一致, 之后地热水受上部地层冷却影响, 密度增大, 水位下降, 放喷试验过程中温度效应引发的水位变化是不可忽略的^[32~33]。根据放喷试验降深为 41.31 m 时, 涌水量为 233.12 m³/h, 计算的渗透系数为 0.57 m/d, 影响半径为 312 m。

4.5 单井供暖潜力

依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[28], 地热流体可开采热能计算公式为:

$$W_t = 4.1868 \cdot Q_k \cdot (t - t_0) \quad (4)$$

式中: W_t ——热功率/kW;

Q_k ——地热流体可开采量/(L·s⁻¹), 取值 64.75;

t ——地热流体温度/°C, 取值 75.0;

t_0 ——当地年平均气温/°C, 取值 9.4。

地热流体有效利用热资源量计算公式:

$$Q_y = Q_k \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot (t_r - t_q) \quad (5)$$

式中: Q_y ——地热水有效利用热资源量/kJ;

Q_k ——地热流体可开采量/(m³·h⁻¹), 按年供暖 180 d, 取值 233.12;

ρ_w ——热水密度/(kg·m⁻³), 取值 1 000;

C_w ——热水比热容/(kJ·kg⁻¹·°C⁻¹), 取值 4.1868;

t_r ——井口水温/°C, 取值 75.0;

t_q ——板换后尾水温度/°C, 取值 25.0。

经计算, TD1 孔可开采热能 17 783.85 kW, 年有效利用热资源量 2.11×10^{11} kJ, 有效利用热能 13 567.38 kW, 年折合标准煤约 7 193 t。供暖潜力计算公式:

$$F = \frac{Q_y}{180 \times 24 \times 3600 \cdot q_n} \quad (6)$$

式中: F ——供暖面积/m²;

q_n ——建筑物设计采暖热负荷/(W·m⁻²), 取值 40。

经计算 TD1 孔热水直供取暖面积可达 338 898.2 m², 与呼和浩特主要地热井对比可知(表 4), TD1 孔比呼和浩特最深孔 HBDR2(孔深 3 016 m)的涌水量和地热产能都大。TD1 孔是白庙子凹陷乃至呼和浩特, 迄今为止发现的涌水量最大、单位涌水量最大、地热产能最高的地热井。

5 结论及建议

(1) 白庙子凹陷西南部新近系地热储层厚度大, 是地热资源勘查的有利目标区, 热储具有埋藏深、涌

表4 TD1孔与呼和浩特主要地热井基本情况对比表

Table 4 Basic parameters comparison between main geothermal wells in the Huhe depression and borehole TD1

序号	位置/编号	井深/m	利用段深度/m	热储时代	热储岩性	涌水量/(m³·h⁻¹)	单位涌水量/(m³·h⁻¹·m⁻¹)	井口水温/°C	地热井产能/kW	资料来源
1	土默特左旗塔布赛村/TD1	2 552	1 546.4 ~ 2 282.5	N ₂ w-N ₁ w	砂砾岩	233.12	5.64	75.0	17 783.85	本研究, 2021年
2	土默特右旗巧儿气村/HBDR2	3 016	2 288.3 ~ 2 997.0	N ₂ w-N ₁ w	粗砂岩	201.60	1.58	82.0	17 068.74	
3	土默特左旗独立坝村/HBDR3	2 221	1 378.10 ~ 2 210.1	N ₁ w-E ₁ l	细砂岩	132.99	2.84	62.0	8 135.50	
4	土默特左旗后红岱村/R10	2 206	1 600.3 ~ 2 106.3	E ₁ l	粗砂岩	164.75	4.51	66.0	10 844.80	
5	土默特左旗台阁牧地区/HR5	2 404	2 120.0 ~ 2 284.3	N ₂ w-N ₁ w-E ₁ l	细砂岩	73.66	0.85	56.0	3 992.06	文献[20]
6	土默特左旗毕克齐/HR6	2 400	1 267.0 ~ 2 393.5	N ₂ w-N ₁ w	细砂岩	116.70	1.46	64.0	7 410.43	
7	达拉特旗树林召/HR7	2 602	1 884.40 ~ 2 601.0	N ₂ w-N ₁ w	粗砂岩	122.58	1.21	66.0	8 068.93	
8	土默特右旗萨拉齐/HR8	2 404	1 440.0 ~ 2 356.0	N ₂ w-N ₁ w	粗砂岩	89.51	1.04	53.0	4 538.77	
9	包头市滨河新区/HR9	2 604	1 577.7 ~ 2 581.8	N ₂ w-N ₁ w	粗砂岩	119.30	1.58	64.0	7 575.53	

水量大、温度高的特点, TD1孔新近系热储由大厚度砂岩、砂砾岩组成, 热储总厚度 299.5 m, 占地层总厚度的 40.69%, 新近系中新统上部和第四系是良好盖层。

(2) TD1孔在新近系中新统 2 030.9 ~ 2 282.5 m 深度共发育 14 层热储层, 单层热储最大厚度 44.4 m, 热储总厚度 160.4 m, 占地层总厚度的 63.75%, 孔隙度平均值 26.27%, 渗透率平均值为 $470.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为 TD1 孔主要出水段。

(3) TD1孔口水温 75.0 °C, 孔底最高温度 80.7 °C, 2 030.9 ~ 2 282.5m 深度热储层孔隙度最高, 井温梯度明显偏低, 与厚层状粗碎屑砂砾岩地热储层连续分布有密切关系, 推测深部存在热对流。

(4) TD1孔放喷试验曲线反映了深部热储层呈强富水性特征, 完井稳定涌水量 233.12 m³/h, 单井供暖潜力达 33 万 m², 为目前探获的呼和浩特涌水量最大、产能最高的地热井。

白庙子凹陷西南部是高产能地热资源分布有利区, 将为呼和浩特市地热资源开发利用提供有力支撑, 但新近系深部热储埋藏深, 粗碎屑砂岩热储空间分布规律尚不能精细刻画, 需进一步深入研究。

参考文献 (References) :

- [1] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势 [J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1 ~ 9. [WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1 ~ 9. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 汪洋, 张旭虎, 蒲丛林, 等. 河北廊坊南部地区地热水化学特征及成因机制 [J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1698 ~ 1706. [WANG Yang, ZHANG Xuhu, PU Conglin, et al. The hydrochemical characteristics of
- [3] 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, 2023, 50(1): 168 ~ 178. [YIN Zheng, LIU Yonggang, ZHANG Xuru, et al. An analysis of the endowment characteristics and geneses of geothermal resources in the Zhangye Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 168 ~ 178. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杜先利, 王泓博, 赵容生, 等. 松辽盆地南部大清字井区青山口组地热水化学特征及成因模式 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 22 ~ 35. [DU Xianli, WANG Hongbo, ZHAO Rongsheng, et al. Geothermal chemical characteristics and genetic model of the Qingshankou Formation in the Daqingzijing area, southern Songliao Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 22 ~ 35. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张莹, 任战利, 兰华平, 等. 关中盆地新近系蓝田—灞河组热储层物性及渗流特征研究 [J]. 地质通报, 2024, 43(5): 712~725. [ZHANG Ying, REN Zhanli, LAN Huaping, et al. Physical properties and percolation characteristics of Neogene Lantian–Bahe Formation thermal reservoir in Guanzhong Basin. Geological Bulletin of China, 2024, 43(5): 712~725. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 薛文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估 [J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312 ~ 321. [LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China [J]. Geology in China, 2013, 40(1): 312 ~ 321. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 许天福, 陈敬宜, 冯波, 等. 地热资源开发过程中潜在

- [8] 地下水环境问题 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1149 – 1162. [XU Tianfu, CHEN Jingyi, FENG Bo, et al. Possible problems of groundwater environment in the exploitation of geothermal energy[J]. Journal of Jinlin University(Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1149 – 1162. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编 [J]. 地质科学, 1988(2): 196 – 204. [WANG Jiyang, HUANG Shaopeng. Compilation of heat flowdata for continental area of China[J]. Scientia Geology Sinica, 1988(2): 196 – 204. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 中国地热资源形成特点和潜力评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. [CHEN Moxiang, WANG Jiyang, DENG Xiao. Geothermal resources in China-Formation characteristics and potential evaluation[M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)]
- [10] 邱楠生. 中国大陆地区沉积盆地热状况剖面 [J]. 地球科学进展, 1998, 13(5): 447 – 451. [QIU Nansheng. Thermal status profile in terrestrial sedimentary basins in china[J]. Advances in Earth Sciences, 1998, 13(5): 447 – 451. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邱楠生. 不同类型沉积盆地热演化成因模式探讨 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 15 – 17. [QIU Nansheng. Thermal evolution models for different types of basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 15 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价 [J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449 – 459. [Wang Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449 – 459 (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李虎平, 霍改兰, 冯宝爱, 等. 内蒙古自治区地热资源现状调查评价与区划 [R]. 内蒙古自治区地质调查研究院, 2016. [LI Huping, Huo Gailan, Feng Baoai, et al. Investigation, evaluation and zoning of geothermal resources in Inner Mongolia[R]. Geological survey and Research Institute of Inner Mongolia, 2016.]
- [14] 何康宁. 河套盆地呼和浩特油气成藏地质条件分析 [D]. 西安: 西安石油大学, 2015. [HE Kangning. The analysis of petroleum accumulation geological conditions in HuHe depression of HeTao Bain[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 胡显穆, 常传炜, 张文力, 等. 内蒙古河套盆地石油普查现阶段评价报告 [R]. 地质矿产部第三石油普查勘探大队, 1984. [Hu Xianmu, Chang Chuanwei, Zhang Wenli, et al. Evaluation report on the current stage of petroleum census in Hetao Basin, Inner Mongolia[R]. The Third Petroleum Survey and Exploration Brigade of the Ministry of Geology and Mineral Resources, 1984. (in Chinese)]
- [16] 高仰才, 葛玉玮. 内蒙古地热资源成因类型及开发前景初探 [J]. 西部资源, 2004(3): 91 – 95. [GAO Yangcai, GE Yuwei. A preliminary study on genetic types and prospect for geothermal development in inner mongolian autonomous region[J]. Western Resources, 2004(3): 91 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 闫岩, 张迪, 赵国春, 等. 内蒙古自治区地热资源分布特征与潜力评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 51 – 57. [YAN Yan, ZHANG Di, ZHAO Guochun, et al. Distribution characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 51 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵红利. 内蒙古自治区地热资源研究 [J]. 西部资源, 2012(2): 185. [ZHAO Hongli. Research on geothermal resources in Inner Mongolia autonomous region[J]. Western Resources, 2012(2): 185. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王贵玲, 刘志明, 蔺文静. 鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形成的控制作用 [J]. 地质学报, 2004, 78(1): 44 – 51. [WANG Guiling, LIU Zhiming, LIN Wenjing. Tectonic control of geothermal resources in the peripheral of ordos basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 44 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 杨少勇, 杨子龙. 内蒙古自治区呼和浩特市毕克齐地区地热资源预可行性勘查 [R]. 内蒙古自治区第七地质矿产勘查开发院, 2018. [Yang Shaoyong, Yang Zilong. Preliminary feasibility exploration of geothermal resources in Bikeqi, Huhhot, Inner Mongolia Autonomous Region[R]. Inner Mongolia Autonomous Region Seventh Geological and Mineral Exploration and Development Institute, 2018. (in Chinese)]
- [21] 杨红玉, 葛晓东, 王巍伟, 等. 内蒙古自治区呼包平原地热资源综合勘查评价 [R]. 内蒙古第三地质矿产勘查开发有限责任公司, 2022. [Yang Hongyu, Ge Xiaodong, Wang Weiwei, et al. Comprehensive exploration and evaluation of geothermal resources in the

- [22] Hubao Plain of Inner Mongolia Autonomous Region[R]. Inner Mongolia Third Geological and Mineral Exploration and Development Co. Ltd., 2022. (in Chinese)]
- [22] 任兆刚,任继成,贾松豪,等.内蒙古自治区土默特左旗台阁牧地热资源预可行性勘查(地热井施工)[R].内蒙古地质工程有限责任公司,2018. [Ren Zhaogang, Ren Jicheng, Jia Songhao, et al. Preliminary feasibility exploration of geothermal resources in Taige, Tumed Left Banner, Inner Mongolia Autonomous Region(geothermal well construction)[R]. Inner Mongolia Geological Engineering Co. Ltd., 2018. (in Chinese)]
- [23] 石宇昕.河套盆地构造特征研究进展[J].云南化工,2019, 46(10): 50 – 51. [SHI Yuxin. Advances in research on structural characteristics of Hetao Basin[J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(10): 50 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杨华,李民才,崔永平,等.河套盆地生物气成藏条件及勘探前景[J].石油地质,2005, 10(3): 16 – 21. [YANG Hua, LI Mincai, CUI Yongping, et al. Accumulation condition and exploration prospects of biogenic gas in Hetao Basin[J]. Petroleum Geology, 2005, 10(3): 16 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 淡伟宁,陈树光,李志军,等.河套盆地油气勘探新领域及有利方向[J].石油学报,2023, 44(12): 2217 – 2230. [DAN Weining, CHEN Shuguang, LI Zhijun, et al. New fields and favorable directions for oil-gas exploration in Hetao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2217 – 2230. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 姚建国.河套盆地呼和地区毕探1井完井地质总结报告[R].长庆石油勘探局内蒙河套钻探前线指挥部,1988. [Yao Jianguo. Geological summary report on completion of well Bitan 1 in Huhe area, Hetao Basin[R]. Changqing Petroleum Exploration Bureau Inner Mongolia Hetao Drilling Front Headquarters, 1988. (in Chinese)]
- [27] 张艳,亢俊健,雷雨.反射波二维地震在托克托地区地热勘察中的应用[J].人民珠江,2015, 36(6): 35 – 38. [ZHANG Yan, KANG Junjian, LEI Yu. Application of reflection wave of 2D seismic survey to geothermal exploration in Tuo Ke-tuo area[J]. *Pearl River*, 2015, 36(6): 35 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.地热资源地质勘查规范: GB/T 11615—2010[S].北京:中国标准出版社,2011. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological exploration specification for geothermal resources: GB/T 11615—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)].]
- [29] 地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队.水文地质手册[M].2版.北京:地质出版社,2012. [Hydrogeological Engineering Geological Technology Method Research Team of the Ministry of Geology and Mineral Resources. Hydrogeological handbook[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)]
- [30] 陈常兴,刘佳,叶树刚.地温测量方法研究与应用——以淮南矿区为例[J].煤炭科学技术,2020, 48(5): 157 – 163. [CHEN Changxing, LIU Jia, YE Shugang. Study and application on ground temperature measurement methods: Taking Huainan Mining Area as an example[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [31] GIGGENBACH W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749 – 2765.
- [32] 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. [WU Aimin, MA Feng, WANG Guiling, et al. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan new area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 523 – 532. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 王贵玲,高俊,张保建,等.雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J].地学学报,2020, 94(7): 1970 – 1980. [WANG Guiling, GAO Jun, ZHANG Baojian, et al. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1970 – 1980. (in Chinese with English abstract)]