

引用格式:何东博,任路,郝杰,等.基于层次分析法的地热资源评价体系研究——以河北省曹妃甸地区中深层水热型砂岩储层为例[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):713-725.

HE Dongbo, REN Lu, HAO Jie, et al. Quantitative evaluation system of geothermal resources based on analytic hierarchy process: A case study of middle-deep hydrothermal sandstone reservoir in Caofeidian of Hebei Province[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 713-725.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.002

## 基于层次分析法的地热资源评价体系研究

——以河北省曹妃甸地区中深层水热型砂岩储层为例

何东博<sup>1</sup>,任路<sup>1,2</sup>,郝杰<sup>1</sup>,刘小平<sup>2</sup>,曹倩<sup>3</sup>

(1. 中国石油冀东油田公司,河北唐山063000; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京102249;

3. 中国石油勘探开发研究院,北京100083)

**摘要:**为定量评价目标区域中深层水热型地热资源品质,以沉积盆地内中深层水热型地热资源为研究对象,以地热资源品质评价为主要内容,深入分析地热地质条件、地热资源量和地热流体质量3个部分。选择对地热资源影响较大的16项指标,使用层次分析法对每项指标进行权重赋值,将中深层水热型地热资源划分为三级7类。Ⅰ级区域为资源优势区,可进行高效开发;Ⅱ级区域为资源富集区,满足工业开发要求;Ⅲ级区域为资源不富集区,最终形成一套可量化评价的资源评价体系,为地热资源是否可进行利用提供数据分析结论。通过河北省唐山市曹妃甸区地热供暖项目的实际应用效果作为案例,验证了评价体系的针对性、实用性。

**关键词:**地热资源评价;中深层水热型;层次分析法;砂岩热储;曹妃甸地区

中图分类号:TE122

文献标识码:A

### Quantitative evaluation system of geothermal resources based on analytic hierarchy process: A case study of middle-deep hydrothermal sandstone reservoir in Caofeidian of Hebei Province

HE Dongbo<sup>1</sup>, REN Lu<sup>1,2</sup>, HAO Jie<sup>1</sup>, LIU Xiaoping<sup>2</sup>, CAO Qian<sup>3</sup>

(1. Petroleum Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063000, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To quantitatively assess the quality of deep hydrothermal geothermal resources in the target area, with a focus on middle-deep hydrothermal resources in sedimentary basins, a comprehensive analysis is conducted. This analysis delves into the effects of geothermal geological conditions, the nature of the geothermal resources themselves, and the quality of geothermal fluids on the overall resource quality. For this assessment, sixteen indicators that significantly impact the quality of geothermal resources are identified. These indicators are then incorporated into an Analytic Hierarchy Process (AHP) framework, which assigns weights to each indicator, facilitating a quantitative evaluation. The middle-deep hydrothermal geothermal resources are divided into three levels and seven categories. Level I areas are resource advantage areas that can be efficiently developed; Level II areas are resource rich areas that meet the requirements of industrial development; Level III areas are resource non enriched areas. Ultimately, a quantifiable resource evaluation system is formed to provide data analysis conclusions on whether geothermal resources can be utilized. The relevance and practicality of this evaluation system are demonstrated through its application in a case study. The example of geothermal development and usage in the Caofeidian District of Tangshan City, Hebei Province, serves as a testament to the system's effectiveness in guiding decision-making processes for geothermal resource utilization.

**Keywords:** evaluation of geothermal resources; middle-deep hydrothermal type; analytic hierarchy process; thermal energy storage for sandstone; Caofeidian District

收稿日期:2023-04-13。

第一作者简介:何东博(1972—),男,博士,正高级工程师,从事储集层评价、天然气开发、新能源开发综合研究与管理工。地址:河北省唐山市路北区新华西道101号,邮政编码:063000。E-mail: 311@petrochina.com.cn

通信作者简介:郝杰(1983—),女,硕士,高级工程师,从事地热资源评价工作。地址:河北省唐山市路北区新华西道101号,邮政编码:063000。E-mail: haojie2008@petrochina.com.cn

基金项目:中国石油前瞻性基础性技术攻关项目“东部油区地热成因机制与开发潜力研究”(2021DJ5501);中国石油油气与新能源分公司科技项目“地热开发利用技术研究及试验”(2022KT2601)。

地热能是一种绿色可再生能源,大力开发利用地热能,有利于实现化石能源低碳化<sup>[1-3]</sup>,对深入贯彻习近平生态文明思想,落实碳达峰、碳中和目标具有重要意义。2021年国家能源局印发的《关于促进地热能开发利用的若干意见》中指出,要根据资源情况和市场需求,在京津冀、山西、青海等区域稳妥推进中深层地热能供暖,鼓励各地开展地热资源评估工作。

对于水热型地热系统而言,热源、渗透性和流体是3个必备因素<sup>[4]</sup>。目前的一系列水热型地热资源的勘查及评价规范<sup>[5-8]</sup>和国内外评价案例<sup>[9]</sup>,主要针对热储资源量、流体质量等方面的评价,缺乏地热资源生成地质条件、地质背景等内容。影响地热资源评价的因素较多,影响程度也不尽相同,但目前的评价方式未能体现出各因素影响程度的差异性。针对该问题,结合国内地热资源发展利用需要,选择中深层水热型地热资源作为评价对象,纳入地热地质条件,与地热资源量和地热流体质量共同构成评价体系,并选取其中的关键影响因素。通过层次分析法计算各因素在评价体系内所占权重,在地热资源的预可行性、可行性勘查阶段和开发阶段为地热资源利用的选区提供定量的分析结论。

## 1 分级系数

地热资源评价的影响因素具有多样性,为量化区分这种多样性,在开始评价之前要先建立相应分级系数(表1)。分级的级差取决于分级数量,根据每个影响因素,具体评价内容设置评分级差,最小级差为0.1,最大级差为0.5。

## 2 评价体系内容

除了以往主要对地热资源量和地热流体质量的评价外,将地热地质条件纳入评价体系。地热地质条件评价包括热源、热传输通道、盖层和热储层4个“地质要素”<sup>[10]</sup>,对应生热系统(源)、运移系统(通)、保温系统(盖)、渗流系统(储)<sup>[11]</sup>。

### 2.1 热源

热源是地热田聚热成藏的基础条件,具体评价对象为地热地质背景条件、基岩埋深、热源类型3个指标。

#### 2.1.1 地质背景条件

地热地质背景条件是判断热源优劣的先决因素,地热系统因地质构造成因不同分为沉积盆地型地热系统与隆起山地型地热系统<sup>[12]</sup>。中国西南地区喜马拉雅地热带和东部台湾高温地热带均属于板块边缘的高温对流型地热系统<sup>[13-14]</sup>,而板块内的其他地区则以中低温地热系统为主,包括沉积盆地中低温传导型地热系统<sup>[15]</sup>,隆起山区中低温对流型地热系统<sup>[16]</sup>。

沉积盆地中,因地下构造的不同,凸起区的地温梯度一般要高于凹陷区,例如渤海湾盆地内的高阳低凸起<sup>[17]</sup>、牛驼镇凸起<sup>[18]</sup>等。中国东部挤压背景下的隆起山区,多以温泉出露为主,因盖层缺乏等原因,地热资源相对较差。

因此,地热地质背景条件以板块之间的接触关系和运动方向为评价目标,分为挤压背景板块交界处、伸展背景盆内凸起、伸展背景盆内凹陷和挤压背景板块内部隆起。其中,挤压背景板块交界处的热源最优,挤压背景下板块内部隆起最差。依次设置分级系数1.0、0.8、0.6、0.4,见表2中评价指标分级标准。

表1 中深层水热型地热资源评价体系分级标准  
Table 1 Grading standards for evaluation system of geothermal resources of middle-deep hydrothermal types

级差	分级系数	指标品质
0.1	1.0	最好
	0.9	次好
	0.8	较好
	0.7	普通
	0.6	较差
	0.5	很差
	0.4	最差
0.2	1.0	最好
	0.8	较好
	0.6	较差
	0.4	最差
0.3	1.0	最好
	0.7	普通
	0.4	最差
0.5	1.0	最好
	0.5	最差

表2 评价指标分级标准  
Table 2 Classification standard of evaluating indicator

指标	分级系数	指标品质	分级内容
地质背景	1.0	最好	挤压背景下板块交界处
	0.8	较好	伸展背景下盆内凸起
	0.6	较差	伸展背景下盆内凹陷
	0.4	最差	挤压背景下板块内部隆起
基岩埋深	1.0	最好	$800 < D_b \leq 2\ 000$
	0.8	较好	$2\ 000 < D_b \leq 3\ 000$
	0.6	较差	$3\ 000 < D_b \leq 4\ 000$
	0.4	最差	$D_b > 4\ 000$
热源组成	1.0	最好	上地幔热源+元素衰变生热+岩浆侵入体
	0.5	最差	上地幔热源+元素衰变生热
断裂级别	1.0	最好	盆地断裂或地质二级构造单元边界断裂
	0.8	较好	控凹断裂或地质三级构造单元边界断裂
	0.6	较差	控带断裂或地质四级构造单元边界断裂
	0.4	最差	小型断裂
热传输方式	1.0	最好	传导和对流(沉积盆地)或对流(板块边缘)
	0.7	普通	以传导为主(沉积盆地)
	0.4	最差	以对流为主(隆起山区)
盖层岩性	1.0	最好	上部松散堆积;下部砂泥岩
	0.7	普通	上部松散堆积;下部碳酸盐岩
	0.4	最差	上部松散堆积(或缺失);下部页岩、板岩
盖层厚度	1.0	最好	$800 < h_c \leq 1\ 500$
	0.8	较好	$600 < h_c \leq 800$ 或 $1\ 500 < h_c \leq 2\ 500$
	0.6	较差	$400 < h_c \leq 600$ 或 $2\ 500 < h_c \leq 3\ 500$
	0.4	最差	$h_c < 600$ 或 $h_c > 3\ 500$
孔隙度	1.0	最好	$\varphi \geq 25$ (砂岩); $\varphi \geq 7$ (碳酸盐岩)
	0.7	普通	$15 \leq \varphi < 25$ (砂岩); $2 \leq \varphi < 7$ (碳酸盐岩)
	0.4	最差	$\varphi < 15$ (砂岩); $\varphi < 2$ (碳酸盐岩)
渗透率	1.0	最好	$k \geq 500$ (砂岩); $k \geq 100$ (碳酸盐岩)
	0.7	普通	$100 \leq k < 500$ (砂岩); $10 \leq k < 100$ (碳酸盐岩)
	0.4	最差	$k < 100$ (砂岩); $k < 10$ (碳酸盐岩)
单井地热流体	1.0	最好	$q_w \geq 2\ 400$
	0.7	普通	$1\ 200 \leq q_w < 2\ 400$
	0.4	最差	$q_w < 1\ 200$
热储中部温度	1.0	最好	$T_f \geq 150$
	0.7	普通	$90 \leq T_f < 150$
	0.4	最差	$25 \leq T_f < 90$
热储有效厚度比	1.0	最好	$R \geq 70$
	0.9	次好	$60 \leq R < 70$
	0.8	较好	$50 \leq R < 60$
	0.7	普通	$40 \leq R < 50$
	0.6	较差	$30 \leq R < 40$
	0.4	最差	$R < 20$
地热资源量	1.0	最好	大型地热田
	0.7	普通	中型地热田
	0.4	最差	小型地热田
地热资源丰度	1.0	最好	$\Omega \geq 300$
	0.8	较好	$200 \leq \Omega < 300$
	0.6	较差	$100 \leq \Omega < 200$
	0.4	最差	$\Omega < 100$
腐蚀性	1.0	最好	非腐蚀性水
	0.7	普通	半腐蚀性水
	0.4	最差	腐蚀性水

注:  $D_b$  为基岩顶板埋深, 单位 m;  $h_c$  为盖层厚度, 单位 m;  $\varphi$  为热储孔隙度, 单位 %;  $k$  为热储渗透率, 单位  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。  $q_w$  为单井地热流体产量, 单位  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $T_f$  为热储中部温度, 单位  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R$  为热储有效厚度比, 单位 %;  $\Omega$  为资源丰度, 折算成单位面积的标准煤量, 单位  $10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ 。

2.1.2 基岩

通常基岩热导率越高,基岩埋深越浅,对上部热储层加热作用越明显,地幔热量传导至热储层的过程中损耗就越小,热储层温度相对较高<sup>[9]</sup>。例如高阳低凸起、牛驼镇凸起以及黄骅拗陷内的马头营凸起,凸起区基岩埋深浅,且下部有太古界变质岩,温度传导能力强,从该地区已有地热地质资料分析可知,地温异常与基岩凸起呈正相关<sup>[19]</sup>。因此,该指标项采用0.2的级差,将4类深度由浅到深设置级差,如表2中基岩埋深分级标准。

2.1.3 热源类型

地球形成过程中,重力位能转化储藏在核幔的热和壳幔放射性同位素衰变产生的热是地球内热的起因<sup>[20]</sup>,除此之外,岩浆活动也是热源的一种。研究表明,用于地热应用的热量约40%来自地核早期形成时的余热,剩余60%的热量来自长寿命放射性同位素。在中国存在典型的地热异常高值区,如青海共和盆地、河北马头营地区。目前研究认为地壳花岗岩(地壳物质的部分熔融)放射性元素异常富集<sup>[21]</sup>、地幔热<sup>[22]</sup>、深大断裂导热<sup>[23]</sup>是盆地地热异常形成的三大主因(图1)。因此,该指标项以是否有岩浆岩侵入分为2类,采用0.5的级差,见表2中热源组成分级标准。

2.2 热传输通道

热传输通道主要是起到沟通深部热源和地层上部热储的作用,是热和水的双向通道,具体评价对象为断裂级别和热传输方式。

2.2.1 断裂级别

断裂级别包括深大断裂或地质二级构造单元边界断裂、控凹断裂或地质三级构造单元边界断裂、控带断裂或地质四级构造单元边界断裂和小型断裂。断层级别对地热资源的控制作用主要表现为:断裂级别越高,切割地层越深,导热导水能力越强,直接影响地热地质背景条件。作为热和水的双向通道,断裂起到疏导和传递的作用。

区域深大走滑断裂构成了地幔热物质上涌的主要通道。以黄骅拗陷内发现高温地热资源的马头营凸起为例,凸起东南为渤中拗陷,北部为燕山褶皱带。该区域深大断裂非常发育,郯庐断裂带、沧东断裂带等,北东—北北东走向的郯庐断裂带是中国东部规模最大的岩石圈断裂带<sup>[24]</sup>。同时,根据多地的地热钻井数据分析,凹陷内的三级构造单元边界断裂具有很好的导热性,如北京通州的西集1井与通热18井、京通2井相比,同样深度下处于夏垫断裂带的西集1井温度明显高于其他两井<sup>[25]</sup>。

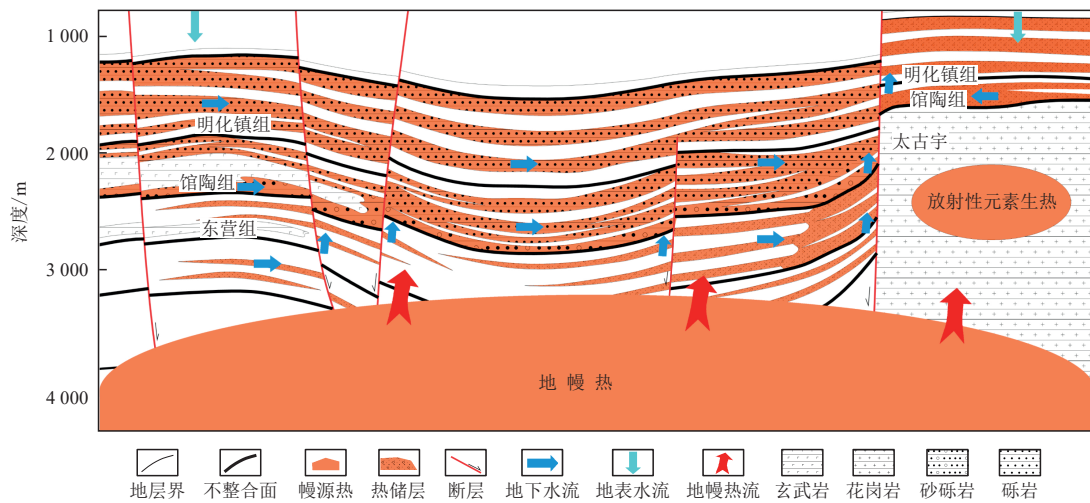


图1 渤海湾盆地南堡凹陷高尚堡—柳赞地热田成因模式(据参考文献[19]修改)

Fig. 1 Original cause of formation of Gaoshangbao-Liuzan Geothermal Field in Nanpu Depression of Bohai Bay Basin (According to reference [19])

此外,断裂带附近有利于形成较好的热储,雄安新区内的牛东断裂是构成牛驼镇凸起与霸县凹陷的重要深大断裂,与油气资源、地热资源的勘探开发均密切相关<sup>[26]</sup>。在该断裂带附近发育了优质的砂岩孔隙型热储与碳酸盐岩岩溶型热储。

因此,该指标项将上文中断裂的4个级别,最高级别的二级构造单元断裂设为“最好”,盆地内的小型断裂为“最差”,采用0.2的级差设置分级系数,见表2中断裂级别分级标准。

### 2.2.2 热传输方式

热传输方式同时存在传导和对流、以传导为主、以对流为主3种。地热资源的传输方式中,因构造背景不同,传输方式的优劣也有较大差异。在板块边缘地热带,以高温热对流传输效果为主,如西藏羊八井;而在大型沉积盆地中,传导和对流同时存在,既能有效传递深部热能又不会因冷热水交替过快而使地层水温下降,热传输效果相对较好。隆起山区,单一的以对流为主的传输方式,冷热水在地层浅部会发生混合,降低水温,定为“最差”,以传导为主的热传输方式居中。因此,该指标项对3类传输方式采用级差为0.3的指标评分标准(表2)。

### 2.3 盖层

对于水热型地热资源,热水相对稳定地储存在热储层中,盖层的主要作用是对热和水形成有效封盖。不同岩性岩石热导率的差异较大,对热量的封盖能力也不相同。例如,渤海湾盆地第四系厚度大,结构较松散,孔隙度大,导热性差,下部普遍有厚层黏土层,具有良好的隔水隔热效果,是渤海湾盆地理想的热储盖层;松辽盆地第四系、新近系、古近系和白垩系的砂泥岩,厚约1 000 m,形成松辽盆地深部水热系统的主要盖层<sup>[15]</sup>。盖层如果过薄,不利于下部热储中热量的封盖,而盖层过厚,在开发中经济效益就会降低。因此,盖层评价主要是岩石岩性和盖层厚度两方面。

#### 1) 盖层岩性

当盖层岩性以松散堆积物、泥岩、砂泥岩页岩构成,这类岩石导热率较低,有利于防止热量散失,设为“最好”。以松散堆积物和板岩、页岩为主,岩石导热率比砂泥岩高,设为“最差”。因此该项对这3类岩性的盖层采用级差为0.3的指标评分标准(表2)。

#### 2) 盖层厚度

盖层厚度对于热储内地热资源热量的保存有重要作用,厚度过薄热储热量易散失,而过厚的盖层又提高了地热资源开采的成本。因此,该项将盖层厚度在(800,1 500] m设为“最好”,盖层厚度小于600 m或者大于3 500 m设为“最差”,共分为4类采用0.2的级差(表2)。

### 2.4 热储层

热储层是影响经济开发的主要条件,水热型地热资源热储岩性主要为砂岩和碳酸盐岩<sup>[26]</sup>。根据地热储层评价规范中热储地质评价关键参数,选择孔隙度、渗透率、单井地热流体产量、有效厚度比和热储层中部温度<sup>[8]</sup>为主要评价参数。

#### 1) 孔隙度

热储层孔隙度高,有利于地热流体的存储,该项根据砂岩和碳酸盐岩两大热储层岩性,采用级差为0.3的指标评分标准(表2),将孔隙度从高到低分为最好、普通和最差3类。

#### 2) 渗透率

热储岩性为高渗透率,则地热流体的流动性较强。同上文孔隙度的分级标准,采用级差为0.3的指标评分标准(表2),将渗透率从高到低分为最好、普通和最差3类。

#### 3) 单井地热流体产量

单井地热流体产量的高低对地热能的开发利用有直接影响,将单井地热流体产量不小于2 400 m<sup>3</sup>/d设为“最好”,低于1 200 m<sup>3</sup>/d设为“最差”,该项采用级差为0.3的指标评分标准(表2)。

#### 4) 热储中部温度

热储中部温度的高低影响地热利用项目的经济效益,根据国家能源行业标准《地热储层评价方法:NB/T 10263—2019》中热储中部温度的划分,该项分为3类,采用级差为0.3的指标评分标准(表2)。

#### 5) 热储有效厚度比

热储层有效厚度比高则含水层累计厚度大,直接影响单井地热流体产量。该项以10 m间隔,将指标项不小于70%的设为“最好”,小于20%设为“最差”,总共7类,采用级差为0.1的指标评分标准(表2)。

### 2.5 地热资源量

#### 1) 地热资源储量

地热田所蕴藏的地热资源量对于研究区后期的

资源开采利用有重要的指导作用。在地热资源可行性勘查和预可行性勘查阶段,可结合已有地热钻井测试数据,宜通过获取的地热资源量参数计算地热资源量,如雄安新区D03井等<sup>[27]</sup>,计算方法宜采用热储体积法<sup>[5]</sup>。

地热资源量的大小影响地热利用项目的确立,该项分最好、普通和最差3类,采用级差为0.3的指标评分标准(表2)。

### 2) 地热资源丰度

地热资源丰度有利于确定地热能开发项目的重点地区,标准煤不小于 $300 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 设为“最好”,小于 $100 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 设为“最差”,将该项分为4类采用级差为0.2的指标评分标准(表2)。

## 2.6 地热流体质量

腐蚀与结垢是地热开发利用中普遍存在的现象之一,因此,地热流体质量评价主要为地热流体的腐蚀性和结垢性,分析已开采的地热流体对地面管线的影响程度。地热流体的腐蚀性和结垢性评价方法为腐蚀系数、锅垢总量、碳酸钙结垢趋势<sup>[6,28]</sup>。

### 1) 腐蚀性

地热流体的腐蚀性主要影响地热流体开采,强腐蚀性的地热流体开采需要采取相应的抗腐蚀措施。该项根据国家标准《地热资源地质勘查规范:GB/T 11615—2010》将地热流体腐蚀性分为3类,采用级差为0.3的指标评分标准(表3)。

### 2) 结垢性

地热流体的结垢性同腐蚀性一样,主要影响地热流体开采。结垢性严重的地热流体,在开采过程中易发现堵塞管线等问题。该项根据国家标准《地热资源地质勘查规范:GB/T 11615—2010》,使用锅垢总量计算法时,采用级差为0.2的指标评分标准;使

用 $LI$ (拉申指数)时,采用级差为0.3的指标评分标准;使用 $RI$ (雷兹诺指数)时,采用级差为0.2的指标评分标准(表4)。

## 3 评价方法

### 3.1 层次分析法

地热资源评价具有过程变量多、不确定因素作用显著等特点,涵盖了从最初的大范围区域性评价到后期精细开发的整个过程,需要对各影响因素进行估测(即赋予权重数),从而对地热资源进行定量评价,指导工程项目的开展。

层次分析法(Alytic Hierarchy Process,简称AHP)是一种较好的权重确定方法。将所要进行权重计算的指标项置于一个大系统,这个系统中存在互相影响的多种因素,要将这些问题层次化,形成一个多层的分析结构模型。之后运用数学方法与定性分析相结合,通过层层排序,最终根据各方案计算出的所占权重来辅助决策<sup>[29]</sup>。

#### 3.1.1 建立分析模型

采用层次分析方法模型,将影响和制约中深层水热型地热资源评价的要素进行遴选,从地热地质条件、地热资源量、地热流体质量等3个方面建立层次分析(图2)。

表4 地热流体结垢性(锅垢总量)分级标准  
Table 4 Classification standard for geothermal fluid scaling ability

指标	分级系数	分级内容
地热流体 结垢性	1.0	$H_0 < 125$ , 锅垢很少
	0.8	$125 \leq H_0 < 250$ , 锅垢少
	0.6	$250 \leq H_0 < 500$ , 锅垢多
	0.4	$H_0 \geq 500$ , 锅垢很多
地热流体 结垢性	1.0	$LI < 0.5$ , 可能结垢,没有腐蚀性
	0.7	$0.5 \leq LI < 3.0$ , 不结垢,有轻微腐蚀性
	0.4	$3.0 \leq LI < 10.0$ , 不结垢,强腐蚀性
地热流体 结垢性	1.0	$RI \geq 7.0$ , 不结垢
	0.8	$6.0 \leq RI < 7.0$ , 结垢轻微
	0.6	$5.0 \leq RI < 6.0$ , 结垢中等
	0.4	$4.0 \leq RI < 5.0$ , 结垢严重
	0.2	$RI < 4.0$ , 结垢非常严重

注: $H_0$ 为锅垢总量,单位mg/L。

表3 腐蚀性分级标准

Table 3 Classification standard for corrosiveness

分级系数	指标品质	分级内容	计算公式
1.0	最好	非腐蚀性水	$K_k < 0$ , 并且 $K_k + 0.050 \ 3r(\text{Ca}^{2+}) < 0$
0.7	普通	半腐蚀性水	$K_k < 0$ , 并且 $K_k + 0.050 \ 3r(\text{Ca}^{2+}) > 0$
0.4	最差	腐蚀性水	$K_k > 0$

注: $K_k$ 为腐蚀系数; $r$ 为离子含量的每升毫克当量(毫摩尔)数,单位mg/L。

### 3.1.2 构建判断矩阵

判断矩阵中各元素  $a_{ij}$  为  $i$  行指标相对  $j$  列指标进行重要性两两比较的值。

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

同一层次内  $n(n>2)$  个指标相对重要性的判断由前期研究成果及生产实际数据确定。AHP法使用九分位的比例标度(表5)对指标的相对重要性进行评判。

将判断矩阵的各行向量进行几何平均,然后归一化,得到的行向量就是权重向量。从而得到矩阵的最大特征值  $\lambda_{max}$ 。

### 3.1.3 一致性检验

判断矩阵的一致性检验是重要的一环,一致性

指标  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ ,引入判断矩阵的平均随机一致性指标  $RI$  值。1、2阶的  $RI$  值为0,3阶的  $RI$  值为0.52,4阶的  $RI$  值为0.89,5阶的  $RI$  值为1.12,6阶的  $RI$  值为1.26,7阶的  $RI$  值为1.36,8阶的  $RI$  值为1.41,9阶的  $RI$  值为1.46,10阶的  $RI$  值为1.49,高阶的平均随机一致性指标  $RI$  值见文献[30]。当阶数大于2,判断矩阵的

表5 相对重要性的比例标度  
Table 5 Proportional scale of relative importance

Saaty标度 (见 Saaty1—9 标度法)	含义
1	表示待比较的两个因素有相同的重要性
3	一个因素比另一个因素稍微重要
5	一个因素比另一个因素明显重要
7	一个因素比另一个因素强烈重要
9	一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	因素之间重要性比较在上述描述之间 相应上述数的倒数 一个因素比另一个因素不重要的上述描述

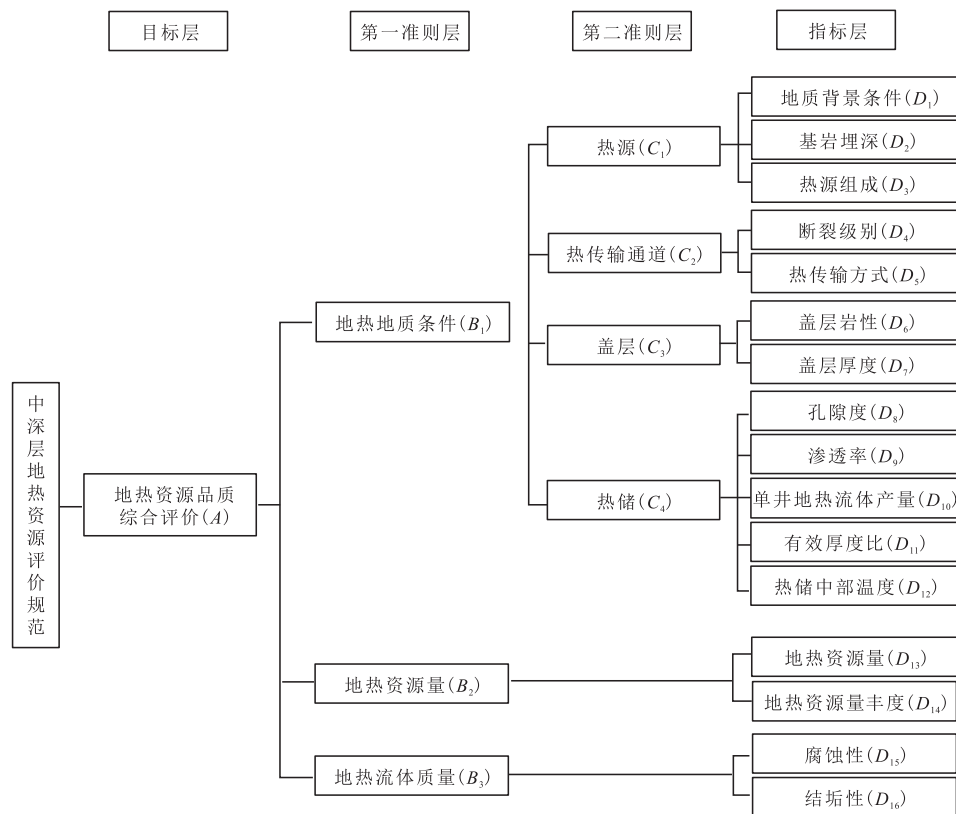


图2 地热资源品质层次分析模型  
Fig. 2 AHP model for geothermal resource quality

一致性比率  $CR = \frac{CI}{RI} < 0.10$  时,即认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵。

### 3.1.4 计算结果

经过已有的100多口地热钻井和60多个城市、地区的资源评价结果显示,两两比较判断矩阵及单一准则下的权重值  $W$ 。

#### 1) 第一准则层:

$$A=(B_{ij}) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 & B_3 & W_A \\ B_1 & 1 & 7 & 7 & 0.78 \\ B_2 & 0.143 & 1 & 1 & 0.12 \\ B_3 & 0.143 & 1 & 1 & 0.10 \end{bmatrix} \quad (2)$$

求得第一准则层各项的权重  $W_{A_i}$ ,其中  $W_A$  表示权重, $i$  表示行指标,  $W_{A_i}$  表示第  $i$  行指标的权重值,  $\lambda_{\max} = 3.0, CR = 0.0006$ 。例如  $W_{A_1}$  表示指标项  $B_1$  在整个评价体系中占的权重值为 0.78。

#### 2) 第二准则层:

第一准则层的项目中又包含了一些指标项,即第二准则层。由第二准则层各项指标的判断矩阵可以求得该矩阵内各项的权重  $\omega_1$ 。

$$B_i=(C_{ij}) = \begin{bmatrix} B_i & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & \omega_1 \\ C_1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0.276 \\ C_2 & 0.5 & 1 & 1 & 0.33 & 0.148 \\ C_3 & 1 & 1 & 1 & 0.33 & 0.176 \\ C_4 & 1 & 3 & 3 & 1 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

求得  $\lambda_{\max} = 3.5, CR = 0.19$ 。

第二准则层各项的最终权重  $W_{B_i} = W_{A_i} \omega_{1_i}$ ,其中  $W_{B_i}$  表示该指标在整个评价体系中的权重值, $i$  表示行指标,  $\omega_{1_i}$  表示第  $i$  行指标在  $B_i$  对比矩阵中的权重值。例如  $\omega_{1_1}$  表示指标项  $C_1$  在当前对比矩阵里的权重值为 0.276,  $W_{B_1} = W_{A_1} \times 0.276 \approx 0.78 \times 0.276 \approx 0.22$ ,表示指标项热源在整个评价体系中占的权重值为 22%。

#### 3) 指标层:

对于准则层2下大于2项的指标层  $C_1$  和  $C_4$ ,建立2个判断矩阵进行权重计算。准则层1的地热资源量和地热流体质量,准则层2的热传输通道与盖层,仅包含2个指标项,不需要建立判断矩阵,其指标层的权重综合考虑了各指标项在资源品质中的重要性、开发中对经济效益的影响性等因素。

$$C_1=(D_{ij}) = \begin{bmatrix} C_1 & D_1 & D_2 & D_3 & \omega_2 \\ D_1 & 1 & 2 & 1 & 0.403 \\ D_2 & 0.5 & 1 & 1 & 0.27 \\ D_3 & 1 & 1 & 1 & 0.327 \end{bmatrix} \quad (4)$$

求得  $\lambda_{\max} = 3.0536, CR = 0.0301$ 。

$$C_4=(D_{ij}) = \begin{bmatrix} C_4 & D_8 & D_9 & D_{10} & D_{11} & D_{12} & \omega_4 \\ D_8 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0.5 & 0.205 \\ D_9 & 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.178 \\ D_{10} & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.178 \\ D_{11} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.205 \\ D_{12} & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.235 \end{bmatrix} \quad (5)$$

求得  $\lambda_{\max} = 5.058, CR = 0.0129$ 。

指标层最终权重  $W_{C_1} = W_{B_i} \omega_{2_i}, W_{C_4} = W_{B_i} \omega_{4_i}$ 。其中  $W_{C_i}$  表示该指标在整个评价体系中的权重值, $i$  表示行指标,  $\omega_{2_i}, \omega_{4_i}$  表示第  $i$  行指标在对比矩阵中的权重值。例如  $\omega_{2_1}$  表示指标项  $D_1$  在  $C_1$  对比矩阵里的权重值为 0.403,  $W_{C_1} = W_{B_1} \times 0.403 = W_{A_1} \times 0.276 \times 0.403 \approx 0.78 \times 0.276 \times 0.403 \approx 0.09$ ,表示指标项地质背景条件在整个评价体系中占的权重值为 9%。

根据以上计算结果,  $CR$  均小于 0.1,以上矩阵具备满意的一致性。完成指标层各项的权重赋值(表6),权重值取整数。

## 3.2 指标分级系数设定

每项指标的评分计算公式为:

$$Y_i = W_i X_i \quad (6)$$

式中:  $Y_i$  为指标评分值,  $W_i$  为指标权重,  $X_i$  为分级系数。

$$F = \sum_{i=1}^N Y_i \quad (7)$$

式中:  $F$  为目标层最终评分值,  $Y_i$  为指标评分值,  $W_i$  为指标权重,  $N$  为指标层包含的指标个数。通过对目标层、准则层和指标层各元素指标评价值的比较,可以把不同地区中深层水热型地热资源品质量化描述出来。

## 3.3 综合评价

在完成指标层、准则层2和准则层1的逐级定量评价后,将地热资源品质综合评价作为目标层,进行计算后完成量化评价,见式(7)。最终定量评价结果进行分级(表7)。

I级区域资源评价评分大于0.80,为地热资源非常富集区:

1) I级1类评分大于0.85,区域内热源条件好,盖层稳定沉积、隔热效果好,热储条件好、孔隙或裂缝发育,区内一级断裂使热量和流体与地层深部沟通好。

表6 中深层水热型地热资源评价体系指标权重赋值  
Table 6 Index weight assignment for evaluation system of middle-deep water thermal geothermal resources

目标层	准则层1	权重( $W_A$ )/%	准则层2	权重( $W_B$ )/%	指标层	权重( $W_C$ )/%
地热资源品质 (A)	地热地质条件 ( $B_1$ )	78	热源( $C_1$ )	22	地质背景条件( $D_1$ )	9
					基岩埋深( $D_2$ )	6
					热源组成( $D_3$ )	7
			热传输通道( $C_2$ )	11	断裂级别( $D_4$ )	6
					热传输方式( $D_5$ )	5
					盖层( $C_3$ )	13
			盖层厚度( $D_7$ )	7		
			热储( $C_4$ )	32	孔隙度( $D_8$ )	7
					渗透率( $D_9$ )	6
					单井地热流体产量( $D_{10}$ )	6
					有效厚度比( $D_{11}$ )	7
					热储中部温度( $D_{12}$ )	8
	地热资源量 ( $B_2$ )	12			地热资源量( $D_{13}$ )	6
	地热流体质量 ( $B_3$ )	10	地热资源丰度( $D_{14}$ )	6		
			腐蚀性( $D_{15}$ )	5		
			结垢性( $D_{16}$ )	5		

表7 中深层水热型地热资源分级评价  
Table 7 Grading and evaluation of middle-deep hydrothermal geothermal resources

分类	评分	地热资源分级	资源条件
I级	大于0.85 (0.80,0.85]	I级1类	非常富集
		I级2类	非常富集
		II级1类	富集
II级	(0.75,0.80] (0.70,0.75]	II级1类	富集
		II级2类	富集
		II级3类	较富集
III级	(0.65,0.70] (0.60,0.65] 不大于0.60	III级1类	不富集
		III级2类	不富集

2) I级2类评分(0.80,0.85],区域内热源条件与I级1类区域相同,地层温度略低,孔渗条件低于I级1类地区,热储厚度薄于I级1类地区。

II级区资源评分(0.65,0.80],为地热资源丰富区:

1) II级1类评分(0.75,0.80],属挤压或伸展地质背景,区域内盖层主要为第四系松散堆积和新近系砂泥岩,盖层厚度较大,热储为砂岩或碳酸盐岩,属高孔高渗热储,热储有效厚度比50%以上,热储埋深大,热储温度普遍在60℃以上,受控凹断裂影响,地热流体补迳排畅通。

2) II级2类评分(0.70,0.75],区域内基岩埋深加大,管线出现腐蚀和结垢风险。

3) II级3类评分(0.65,0.70],区域内孔渗下降,为高孔—中孔、中渗热储,单井地热流体产量和温度明显下降。

III级区域资源评分不大于0.65,为地热资源不富集区:

1) III级1类评分(0.60,0.65],区域内缺乏稳定沉积盖层,热储有效厚度比低于30%,水流交替速度过快,缺乏大型断裂沟通深部热源。

2) III级2类评分不大于0.60,区域内基岩埋深超过4 000 m,热储埋深大、孔渗条件差、温度低、出水量小。

## 4 应用案例

曹妃甸新城地区(以下简称研究区)地理位置属华北平原北部,构造位置属渤海湾盆地黄骅拗陷南堡凹陷高尚堡—柳赞地热田<sup>[31-33]</sup>(图3)。冀东油田在南堡凹陷经过多年石油勘探开发,积累了大量地质、地球物理等基础数据。在曹妃甸地热供暖项目开发前期,结合已钻油井的基础数据,对高尚堡—柳

赞地热田进行了初步资源分析,认为该地区地热资源丰富。2018年11月冀东油田在河北省曹妃甸地区投产大型集中式地热供暖项目,满足曹妃甸新城 $230 \times 10^4 \text{ m}^2$ 供热需求。

根据上文的评价方法,对该地区先进行地热地质条件评价、地热资源量和地热流体质量评价,最终得到地热资源品质的量化评价结果。

#### 4.1 地热地质条件评价

##### 4.1.1 热源评价

地质背景条件评价:研究区属伸展背景下盆地内凹陷构造,地质背景条件权重9%,分级系数0.6,量化评分:

$$Y_1 = W_1 X_1 = 9\% \times 0.6 = 0.054 \quad (8)$$

基岩埋深评价:研究区基岩埋深在3 500~4 000 m,权重6%,分级系数0.5,量化评分:

$$Y_2 = W_2 X_2 = 6\% \times 0.5 = 0.03 \quad (9)$$

热源组成评价:研究区热源来自上地幔和沉积层放射性元素衰变生热,权重7%,分级系数0.5,量

化评分:

$$Y_3 = W_3 X_3 = 7\% \times 0.5 = 0.035 \quad (10)$$

##### 4.1.2 热传输通道评价

断裂级别评价:研究区主要疏导断层是高尚堡—柳赞断层,是区域构造的控带断层,属地质四级构造单元边界断层,权重6%,分级系数0.6,量化评分:

$$Y_4 = W_4 X_4 = 6\% \times 0.6 = 0.036 \quad (11)$$

热传输方式评价:研究区热能传输通道以传导为主,对流为辅,权重5%,分级系数0.7,量化评分:

$$Y_5 = W_5 X_5 = 5\% \times 0.7 = 0.035 \quad (12)$$

##### 4.1.3 盖层评价

盖层岩性评价:研究区盖层以第四系松散堆积物和新近系明化镇组砂泥岩沉积为主,权重6%,分级系数1.0,量化评分:

$$Y_6 = W_6 X_6 = 6\% \times 1.0 = 0.06 \quad (13)$$

盖层厚度评价:研究区盖层厚度在2 000~2 200 m,权重0.7%,分级系数0.8,量化评分:

$$Y_7 = W_7 X_7 = 7\% \times 0.8 = 0.056 \quad (14)$$

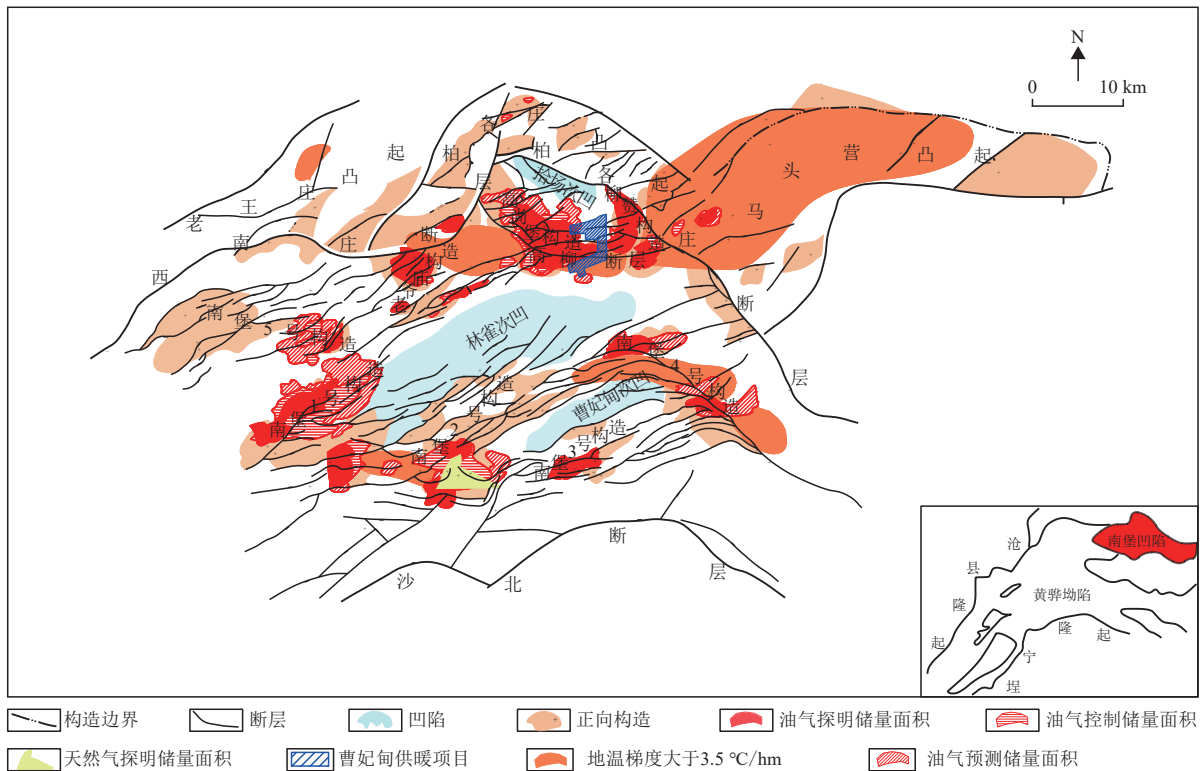


图3 唐山市曹妃甸地热供暖工程地热异常带与地面工程位置<sup>[34]</sup>

Fig. 3 Geothermal anomaly zone and surface engineering location of Geothermal heating engineering in Caofeidian, Tangshan City<sup>[34]</sup>

#### 4.1.4 热储层评价

孔隙度评价:研究区开发热储层为新近系馆陶组,属砂岩热储层,根据研究区120多口油气及地热钻井696个数据统计结果,孔隙度介于18.8%~53.6%,平均值27.5%,权重7%,孔隙度分级系数1.0,量化评分:

$$Y_8 = W_8 X_8 = 7\% \times 1.0 = 0.07 \quad (15)$$

渗透率评价:研究区开发热储层为新近系馆陶组,属砂岩热储层,根据研究区120多口油气及地热钻井696个数据统计结果,孔隙度介于(121.2~3174.4)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均值596.3×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,权重6%,渗透率分级系数1.0,量化评分:

$$Y_9 = W_9 X_9 = 6\% \times 1.0 = 0.06 \quad (16)$$

单井地热流体产量评价:研究区地热开采井产水量介于(83~132)m<sup>3</sup>/h,平均约107 m<sup>3</sup>/h,折日产水量2568 m<sup>3</sup>,权重6%,分级系数1.0,量化评分:

$$Y_{10} = W_{10} X_{10} = 6\% \times 1.0 = 0.06 \quad (17)$$

有效厚度比评价:研究区地层钻遇厚度254.1~517.2 m,平均地层厚度318.5 m,平均有效厚度比58.6%,权重7%,分级系数0.8,量化评分:

$$Y_{11} = W_{11} X_{11} = 7\% \times 0.8 = 0.056 \quad (18)$$

储层中部温度评价:研究区地热开采井井底温度介于78~90℃,权重8%,分级系数0.4,量化评分:

$$Y_{12} = W_{12} X_{12} = 8\% \times 0.4 = 0.032 \quad (19)$$

## 4.2 地热资源量评价

### 4.2.1 地热资源量

研究区地热资源量主要热储法:

$$Q = Ad(T_r - T_0) [\rho_r C_r (1 - \varphi) + \rho_w C_w \varphi] \quad (20)$$

式中:Q为地热资源总量,单位J;A为热储计算面积,单位m<sup>2</sup>;d为热储有效厚度,单位m;T<sub>r</sub>为热储层温度,单位℃;T<sub>0</sub>为基础温度,单位℃;ρ<sub>r</sub>为岩石密度,单位kg/m<sup>3</sup>;C<sub>r</sub>为岩石的比热容,单位J/(kg·℃);φ为热储岩石孔隙度,单位%;ρ<sub>w</sub>为水的密度,单位kg/m<sup>3</sup>;C<sub>w</sub>为水的比热容,单位J/(kg·℃)。

最终计算结果表明,仅主力开采层位新近系馆陶组砂岩储层中地热资源量为2.26×10<sup>18</sup>J,折合标煤7.71×10<sup>7</sup>t,按回收率25%计算,可回收热量5.65×

10<sup>17</sup>J,折合标煤1.93×10<sup>7</sup>t。热水储量为7.15×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,取热水资源量的20%,可采水量为1.43×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。按照曹妃甸新城供暖工程热负荷需求计算,每年总供热量为5.96×10<sup>14</sup>J,理论上该区域馆陶组砂岩资源总量可以供曹妃甸新城当前规模供暖需求长达3800a。曹妃甸新城供暖工程采取“取热不耗水”采出水100%回灌,对该地区热水资源量影响极小,折算成电能约为3.86×10<sup>10</sup>kW·h,按开采年限30a计算,约146MW,属大型地热田,权重6%,分级系数1.0,量化评分:

$$Y_{13} = W_{13} X_{13} = 6\% \times 1.0 = 0.06 \quad (21)$$

### 4.2.2 地热资源丰度

研究区地热资源量折合标准煤量7.71×10<sup>7</sup>t,采水面积37.1km<sup>2</sup>,资源丰度折算成单位面积的标准煤量为207.8×10<sup>4</sup>t/km<sup>2</sup>,权重6%,分级系数0.8,量化评分:

$$Y_{14} = W_{14} X_{14} = 6\% \times 0.8 = 0.048 \quad (22)$$

## 4.3 地热流体评价

### 4.3.1 腐蚀性评

研究区地热流体pH介于7.2~8.5,属弱碱性水,腐蚀系数计算:

$$K_k = 1.008[r(\text{Mg}^{2+}) - r(\text{HCO}_3^-)] = 1.008 \times [2.6 - 535.9] = -537.6 \quad (23)$$

K<sub>k</sub>为非腐蚀性水,权重5%,分级系数1.0,量化评分:

$$Y_{15} = W_{15} X_{15} = 5\% \times 1.0 = 0.05 \quad (24)$$

### 4.3.2 结垢性评价

根据RI定性估计地热流体中碳酸钙的结垢趋势,计算公式为:

$$RI = 2\text{pH}_s - \text{pH}_a, \quad \text{pH}_s = -\log[\text{Ca}^{2+}] - \log[\text{ALK}] + Ke \quad (25)$$

式中:pH<sub>s</sub>为计算出的pH值;pH<sub>a</sub>为实测pH值;ALK为总碱度,即重碳酸根HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子物质的量浓度,单位mol/L;Ke为一个常数,当总固形物介于200~6000mg/L时,取值介于1.8~2.6,温度大于100℃取低值,低于50℃取高值。计算结果RI介于5.28~7.08,平均值6.17,属轻微结垢,权重5%,分级系数0.9,量化评分:

$$Y_{16} = W_{16} X_{16} = 5\% \times 0.9 = 0.045 \quad (26)$$

#### 4.4 地热资源品质评价

对研究区地热资源品质的评价公式:

$$F = \sum_{i=1}^N W_i X_i = W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_{16} X_{16} \quad (27)$$

式中:  $F$  为目标层最终评分值,  $W_i$  为指标权重,  $X_i$  为指标分级系数。将各指标项定量评价结果代入式(27)。

$$F = \sum_{i=1}^{16} W_i X_i = 0.8 \quad (28)$$

按照中深层水热型地热资源评价标准,研究区地热资源为Ⅱ级1类,属地热资源非常富集区。

#### 4.5 应用效果

目前曹妃甸地热供暖项目已经平稳运行了5 a,项目采用了7个丛式钻井平台共40口钻井满足供暖需求。最初的设计方案中,地热供暖平均热负荷值为31.0 W/m<sup>2</sup>,井口温度80℃,采水量100 m<sup>3</sup>/h,无压回灌量80 m<sup>3</sup>/h;而实际运行,地热供暖平均热负荷值为31.5 W/m<sup>2</sup>,井口温度介于78~82℃,采水量介于95~120 m<sup>3</sup>/h,无压回灌量介于55~88 m<sup>3</sup>/h。实际运行与设计参数基本相当,采水量等指标优于设计方案,运行后室内温度高出2~3℃,供暖效果良好。

## 5 结论

1) 随着勘探开发技术的不断提升,从以往的浅层地热开发为主到因地制宜开展浅层、中深层开发,从单一的“对井”式开发到集群式开发,地热能的利用逐渐向规模化、规范化方向发展。

2) 地热能利用项目的发展对中深层水热型地热资源评价的要求逐渐增高,工程建设不再满足于以往的定性评价和单一的温度、流量预测,而是需要一套更加有效、准确、高精度的资源评价方法,能够对生产建设起到良好技术支撑作用。

3) 提出的中深层水热型地热资源定量评价方法是在充分分析了地热地质条件、地热资源量和地热流体质量对地热资源品质的影响因素后,使用层次分析法建立的评价方法,完成对地热资源品质的定量评价。

4) 该评价方法是将孔隙度、渗透率、热储温度、单井流量等16个影响地热资源品质的因素作为指标

层,逐一进行权重赋值并分级评价,同时建立了地热资源综合评价体系,其评价结果能够直接应用于地热开发利用和生产建设,有较强的指导和借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.  
ZOU Caineng, HE Dongbo, JIA Chengye, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.
- [2] 黄璜, 刘然, 李茜, 等. 地热能多级利用技术综述[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 1-10.  
HUANG Huang, LIU Ran, LI Qian, et al. Overview on multi-level utilization techniques of geothermal energy[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 1-10.
- [3] 郭鸿, 夏岩, 陈雷, 等. 废弃油气井改造的地热井换热性能影响因素模拟研究[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(6): 850-858.  
GUO Hong, XIA Yan, CHEN Lei, et al. Numerical simulation on influence factors of heat transfer performance of geothermal wells which transformed from abandoned oil and gas wells[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 850-858.
- [4] 庞忠和, 罗弄, 程远志, 等. 中国深层地热能开采的地质条件评价[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 134-151.  
PANG Zhonghe, LUO Ji, CHENG Yuanzhi, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 134-151.
- [5] 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: 1.  
Natural Resources and Territory Spatial Planning. Geologic exploration standard of geothermal resources: GB/T 11615—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 1.
- [6] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 地热资源评价方法及估算规程: DZ/T 0331—2020[S]. 北京: 地质出版社, 2020: 1.  
Natural Resources and Territory Spatial Planning. Specification for estimation and evaluation of geothermal resources: DZ/T 0331—2020[S]. Beijing: Geology Press, 2020: 1.
- [7] 地热能专业标准化技术委员会. 地热资源储量分级评价方法: NB/T 10700—2021[S]. 北京: 中国石化出版社, 2021: 1.  
Energy Industry Geothermal Energy Standardization Technical Committee. Classification and assessment methods for geothermal resources/reserves: NB/T 10700—2021[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021: 1.
- [8] 地热能专业标准化技术委员会. 地热储层评价方法: NB/T 10263—2019[S]. 北京: 中国石化出版社, 2020: 1.  
Energy Industry Geothermal Energy Standardization Technical Committee. Evaluating methods of geothermal reservoirs: NB/T 10263—2019[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020: 1.
- [9] 邱楠生, 胡胜标, 何丽娟. 沉积盆地地热学[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2019: 263-271.  
QIU Nansheng, HU Shengbiao, HE Lijuan. Geothermics in sedimentary basins[M]. Qingdao: China University of Petroleum

- press, 2019: 263-271.
- [10] 张英, 冯建赟, 何治亮, 等. 地热系统类型划分与主控因素分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 190-198.  
ZHANG Ying, FENG Jianyun, HE Zhiliang, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 190-198.
- [11] 王贵玲, 蒯文静. 中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, LIU Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923-1937.
- [12] 陈墨香, 汪集暘, 邓孝. 中国地热系统类型图及其简要说明[J]. 地质科学, 1996, 39(2): 114-121.  
CHEN Moxiang, WANG Jiyang, DENG Xiao. The map of geothermal system types in China and its brief explanation[J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 39(2): 114-121.
- [13] 汪集暘, 孔彦龙, 程远志. 中国地热资源分布与开发利用[C]. 北京: 中国言实出版社, 2019.  
WANG Jiyang, KONG Yanlong, CHENG Yuanzhi. Geothermal resources, utilization and its development trend in China[C]. Beijing: China Yan Shi Press, 2019.
- [14] 胡浩, 周鸿, 隆辉, 等. 四川盆地老气田开发后期综合潜力分析及开发建议——以W气田震旦系气藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(6): 877-885.  
HU Hao, ZHOU Hong, LONG Hui, et al. Comprehensive potential analysis and development suggestions of old gas fields in Sichuan Basin in the later stage of development: A case from Sinian gas reservoir in W gas-field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 877-885.
- [15] 王贵玲, 张薇, 蒯文静, 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, LIU 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.
- [16] 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.
- [17] 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]. 地质学报, 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.
- [18] 朱喜, 王贵玲, 马峰, 等. 雄安新区地热资源潜力评价[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 1093-1106.  
ZHU Xi, WANG Guiling, MA Feng, et al. Evaluation of geothermal resources of the Xiong'an New Area[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 1093-1106.
- [19] 汪新伟, 郭世炎, 高楠安, 等. 雄安新区牛东断裂带碳酸盐岩热储探测及其对地热勘探的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 14-26.  
WANG Xinwei, GUO Shiyan, GAO Nan'an, et al. Detection of carbonate geothermal reservoir in Niudong fault zone of Xiong'an New Area and its geothermal exploration significance [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 14-26.
- [20] 汪集暘. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-6.  
WANG Jiyang. Geothermics and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-6.
- [21] 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 等. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1087-1102.  
ZHANG Senqi, YAN Weide, LI Dudpeng, et al. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe basin, Qinghai Province[J]. Geology in China, 2018, 45(6): 1087-1102.
- [22] FENG Y F, ZHANG X X, ZHANG B, et al. The geothermal formation mechanism in the Gonghe basin: Discussion and analysis from the geological background[J]. China Geology, 2018, 1(3): 331-345.
- [23] 张盛生, 张磊, 田成成, 等. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 501-508.  
ZHANG Shengsheng, ZHANG Lei, TIAN Chengcheng, et al. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe basin[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 501-508.
- [24] 张保建, 李燕燕, 高俊, 等. 河北省马头营干热岩的成因机制及其示范意义[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2036-2051.  
ZHANG Baojian, LI Yanyan, GAO Jun, et al. Genesis and indicative significance of hot dry rock in Matouying, Hebei Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2036-2051.
- [25] 张进平, 袁利娟. 夏垫断裂带对地热资源分布的影响——以通州西集地区为例[J]. 城市地质, 2018, 13(3): 15-20.  
ZHANG Jinping, YUAN Lijuan. Influence of Xiadian Fault on geothermal resource distribution: A case study in Xiji area, Tongzhou district, Beijing[J]. Urban Geology, 2018, 13(3): 15-20.
- [26] 汪新伟, 郭世炎, 高楠安, 等. 雄安新区牛东断裂带碳酸盐岩热储探测及其对地热勘探的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 14-26.  
WANG Xinwei, GUO Shiyan, GAO Nan'an, et al. Detection of carbonate geothermal reservoir in Niudong fault zone of Xiong'an New Area and its geothermal exploration significance [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 14-26.
- [27] 樊腊生, 贾小丰, 王贵玲, 等. 雄安新区D03地热勘探井钻探施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 13-22.  
FAN Lasheng, JIA Xiaofeng, WANG Guiling, et al. Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 13-22.
- [28] 刘明言. 地热流体的腐蚀与结垢控制现状[J]. 新能源进展, 2015, 3(1): 38-46.  
LIU Mingyan. A review on controls of corrosion and scaling in geothermal fluids[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, 3(1): 38-46.

- [69] 王勇. 动态负荷下地源热泵性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
WANG Yong. Research on the performance of ground source heat pump under dynamic load[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [70] YU M K, ZHANG K, CAO X Z, et al. Zoning operation of multiple borehole ground heat exchangers to alleviate the ground thermal accumulation caused by unbalanced seasonal loads[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 110: 345–352.
- [71] COEN T, FRANÇOIS B, GERARD P. Analytical solution for multi-borehole heat exchangers field including discontinuous and heterogeneous heat loads[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 253: 111520.
- [72] YOU T, ZENG W T. Zoning operation of energy piles to alleviate the soil thermal imbalance of ground source heat pump systems[J]. *Energy and Built Environment*, 2023, 4(1): 57–63.
- [73] 吴暄, 周雅慧, 路子业, 等. 地理管群全年蓄热取热同步模式下岩土传热特性[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(1): 274–287.  
WU Xuan, ZHOU Yahui, LU Ziyue, et al. Heat transfer characteristics of rock and soil under the synchronous mode of annual heat storage and extraction of buried pipe groups[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(1): 274–287.
- [74] NOYE S, MULERO MARTINEZ R, CARNIELETTO L, et al. A review of advanced ground source heat pump control: Artificial intelligence for autonomous and adaptive control[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111685.
- [75] CORBERAN J M, FINN D P, MONTAGUD C M, et al. A quasi-steady state mathematical model of an integrated ground source heat pump for building space control[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(1): 82–92.
- [76] MOKHTAR M, STABLES M, LIU X, et al. Intelligent multi-agent system for building heat distribution control with combined gas boilers and ground source heat pump[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 62: 615–626.
- [77] MADANI H, CLAESSEON J, LUNDQVIST P. A descriptive and comparative analysis of three common control techniques for an on/off controlled ground source heat pump (GSHP) system[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 65: 1–9.
- [78] CHIASSON A D, JOHNSON D W, YAVUZTURK C C, et al. Optimization of the ground thermal response in hybrid geothermal heat pump systems[J]. *ASHRAE Transactions*, 2010, 116: 212–524.
- [79] GANG W J, WANG J B, WANG S W. Performance analysis of hybrid ground source heat pump systems based on ANN predictive control[J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 1138–1144.

(编辑 黄颖)

(上接第725页)

- [29] 张承斌. 基于层次分析法-模糊综合评价模型的浅层地热能适宜性评价——以山东省昌乐县为例[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(2): 91–99.  
ZHANG Chengbin. Suitability evaluation of shallow geothermal energy based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation: A case study of Changle County in Shandong Province[J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(2): 91–99.
- [30] 莫健文, 纪传伟, 李阳苹, 等. 基于层次分析法的地区节能潜力评价模型研究[J]. *东莞理工学院学报*, 2021, 28(5): 69–74.  
MO Jianwen, JI Chuanwei, LI Yangping, et al. Research on evaluation model of regional energy saving potential based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2021, 28(5): 69–74.
- [31] 刘国勇, 赵忠新, 任路, 等. 沉积盆地中深层水热型地热资源评价体系研究与应用[J]. *油气与新能源*, 2022, 34(2): 38–47.  
LIU Guoyong, ZHAO Zhongxin, REN Lu, et al. Study and application of the evaluation system concerning the hydrothermal type geothermal resource at the middle and deep layers of sedimentary basin[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(2): 38–47.
- [32] 李国永. 复杂断块油藏精细描述关键技术与应用[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(2): 152–162.  
LI Guoyong. Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(2): 152–162.
- [33] 程晓军. 缝洞型油藏注气提高采收率参数优化数值模拟研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(6): 902–909.  
CHENG Xiaojun. Enhanced oil recovery and parameter optimization of hydrocarbon injection in fractured-cavity reservoirs[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(6): 902–909.
- [34] 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.

(编辑 黄颖)