

doi: 10.12029/gc20220210001

刘杰, 宋美钰, 胥博文, 阮传侠, 石峰. 2023. 天津市馆陶组地热流体可采量计算方法及适宜性分区研究[J]. 中国地质, 50(6): 1655–1666.

Liu Jie, Song Meiyu, Xu Bowen, Ruan Chuanxia, Shi Feng. 2023. Calculation method and suitability zoning of recoverable geothermal fluid in Guantao Formation of Tianjin City[J]. Geology in China, 50(6): 1655–1666(in Chinese with English abstract).

# 天津市馆陶组地热流体可采量计算方法及适宜性 分区研究

刘杰<sup>1</sup>, 宋美钰<sup>2</sup>, 胥博文<sup>1</sup>, 阮传侠<sup>1</sup>, 石峰<sup>1</sup>

(1. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 2. 天津市城市建设档案馆(天津市地质资料馆), 天津 300000)

**摘要:**【研究目的】“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期,要求着力合理推动能源清洁利用和低碳转型,天津市低碳清洁能源——地热资源丰富,对调整能源结构、节能减排、改善环境有着重要的意义。天津市开展了《天津市矿产资源规划(2021—2025年)》的编制工作。其中为了夯实规划编制基础、摸清地热资源禀赋,设置评价专题对天津市地热资源潜力进行深入研究。【研究方法】专题通过采用热储法、统计分析法和数值模拟法对天津市馆陶组地热资源潜力进行评价和对比。【研究结果】热储法在不考虑回灌及其他约束条件的情况下,馆陶组地热流体可开采量为 $0.94 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ;统计分析法在考虑回灌、水位降幅及水位降深的情况下,馆陶组地热流体可开采量为 $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ;数值模拟法在考虑回灌、温度降幅及水位降深的情况下,馆陶组地热流体可开采量为 $0.296 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。【结论】通过对比研究,认为采用统计分析法和数值模拟法计算结果可信度较高,并且利用了基于GIS的层次分析法,将GIS技术和层次分析法相结合,对馆陶组地热资源开发利用潜力进行综合性评价及适宜性分区。

**关键词:**地热资源;馆陶组;地热资源调查工程;统计分析法;数值模拟法;层次分析法;天津市

**创新点:**首次利用大量长序列地热资源动态数据,对天津市馆陶组储层进行了统计分析;考虑回灌条件并设置保护资源的约束条件下,计算馆陶组热储层可开采量。

中图分类号:P314 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)06-1655-12

## Calculation method and suitability zoning of recoverable geothermal fluid in Guantao Formation of Tianjin City

LIU Jie<sup>1</sup>, SONG Meiyu<sup>2</sup>, XU Bowen<sup>1</sup>, RUAN Chuanxia<sup>1</sup>, SHI Feng<sup>1</sup>

(1. Tianjin Geothermal Exploration and Development-Design Institute, Tianjin 300250, China; 2. Tianjin Urban Construction Archives (Tianjin Geological Archives), Tianjin, 300000, China)

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

收稿日期:2022-02-10;改回日期:2022-06-01

基金项目:天津市规划和自然资源局项目(HYGP-2020-C-037)资助。

作者简介:刘杰,男,1984年生,硕士,高级工程师,从事地热数值模型研究工作;E-mail: 287909443@qq.com。

**[Objective]** The "14th Five-Year Plan" is a critical period and a window period for carbon peaking. It requires efforts to promote clean energy utilization and low-carbon transformation rationally. Low-carbon and clean geothermal resources in Tianjin are abundant. It is significant to adjust the energy structure and conservation and improve the environment. Tianjin has carried out the compilation of the "Tianjin Mineral Resources Planning (2021–2025)". Among them, to consolidate the foundation of planning and finding geothermal reserves, an evaluation topic is set up to conduct in-depth research on the potential of geothermal resources in Tianjin. **[Methods]** The special topic evaluates and compares the geothermal resource potential of the Guantao Formation by using the thermal storage method, statistical analysis method, and numerical simulation method. **[Results]** It is concluded from the research that the recoverable amount of geothermal fluid in the Guantao Formation is  $0.94 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  without considering recharge and other constraints; with statistical analysis method in the case of considering recharge, water level depth, and water level drop, the recoverable amount of geothermal fluid in Guantao Formation is  $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ; numerical simulation method in the case of considering recharge, temperature drop and water level drop, the recoverable amount of geothermal fluid in Guantao Formation is  $0.296 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ . **[Conclusions]** Through comparative research, it is believed that the statistical analysis method and numerical simulation method are used to calculate the reliability of the results. The GIS-based AHP is used, and the GIS technology and the AHP are combined to carry out comprehensive evaluation and suitability zoning of geothermal resource development and utilization potential in the Guantao Formation.

**Key words:** geothermal resources; Guantao Formation; geothermal resources survey engineering; statistical analysis method; numerical simulation method; analytic hierarchy process; Tianjin City

**Highlights:** This paper makes a statistical analysis of the Guantao Formation reservoir in Tianjin for the first time by using a large number of long-term geothermal resource dynamic data; Considering the recharge conditions and setting the constraint conditions of protected resources, the recoverable amount of Guantao Formation thermal reservoir is calculated.

**About the first author:** LIU Jie, male, born in 1984, master, senior engineer, engaged in geothermal numerical model research; E-mail: 287909443@qq.com.

**Fund support:** Supported by Tianjin Municipal Bureau of Planning and Natural Resources (No.HYGP-2020-C-037).

## 1 引 言

20世纪70年代初,在著名地质学家李四光教授倡导下,天津开启了中国地热规模化开发利用的先河,积累了丰富数据资料,形成了可推广的“天津经验”(刘杰等,2016;李胜涛等,2022)。天津市地处华北平原东北部、海河流域下游,东临渤海,北依燕山,西靠首都北京,是京津冀协同发展中的重要引擎,是京津冀及三北地区的海上门户,是“一带一路”的海陆交汇点,对促进京津冀城市群和环渤海地区协同发展发挥着重要作用。

地热资源作为天津市优势清洁能源矿产,具有分布范围广,资源储量较大,易开发利用等优点(马冰等,2021)。经过50年的不懈努力,天津圈定了10个地热异常区,已完成勘查的8个地热田可采地热流体资源量为 $7606.6 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ (茹洪久等,2018;唐永香等,2020;Wang et al., 2020;王贵玲和蔺文静,2020)。为推进生态文明建设,提高清洁能源占比,助力实现“碳中和”目标,需进一步开展地热资源勘

查与评价工作,深挖资源潜力,提高地热资源的供给能力,支撑能源安全(汪新伟等,2023)。

馆陶组作为天津地区主要开发利用热储层,对其重新进行资源评价意义重大,对全国具有示范效应。因此本文将利用近些年新增数据资料(汪新伟等,2022;谢娜等,2020;陈庆龙等,2021;黄继超等,2022),更新已有数据和模型,应用热储法、统计分析法和数值模拟法三种方法对馆陶组热储层资源潜力进行研究评价,获取更合理的地热流体可开采量(张中祥等,2005;赵振等,2015;于彦等,2016;张芬娜等,2016;梅博等,2021),为天津市“十四五”矿产资源规划提供能源支撑,实现地热资源为地方经济发展发挥作用和做出贡献。

## 2 区域地热地质条件

### 2.1 地质构造特征

天津市属华北地层大区冀鲁豫地层区的华北平原分区。从太古宇至新生界第四系除缺失新元古界南华系、震旦系,古生界上奥陶统、志留系、泥

盆系、下石炭统,中生界中、上三叠统、上侏罗统、上白垩统及古近系古新统和始新统外,基本齐全(陈墨香,1988)。

天津在大地构造上属 I 级构造单元柴达木—华北板块的华北陆块(II),以宝坻—宁河断裂为界,天津分属于 III 级构造单元燕辽台褶带(北区)和华北盆地(南区)。北区位于燕辽台褶带的次一级(IV 级)构造单元蓟唐裂谷区;南区则横跨了华北断坳区的 3 个 IV 级构造单元,即西侧的冀中坳陷、中部的沧县隆起和东侧的黄骅坳陷,形成了两坳夹一隆、呈北北东(NNE)向展布的构造格局,也是本次资源潜力对比研究的基本构造单元(天津市地矿局,1992;张百鸣等,2006)(图 1)。

## 2.2 地温场特征

天津地区无论从平面上,还是垂向上,地温场

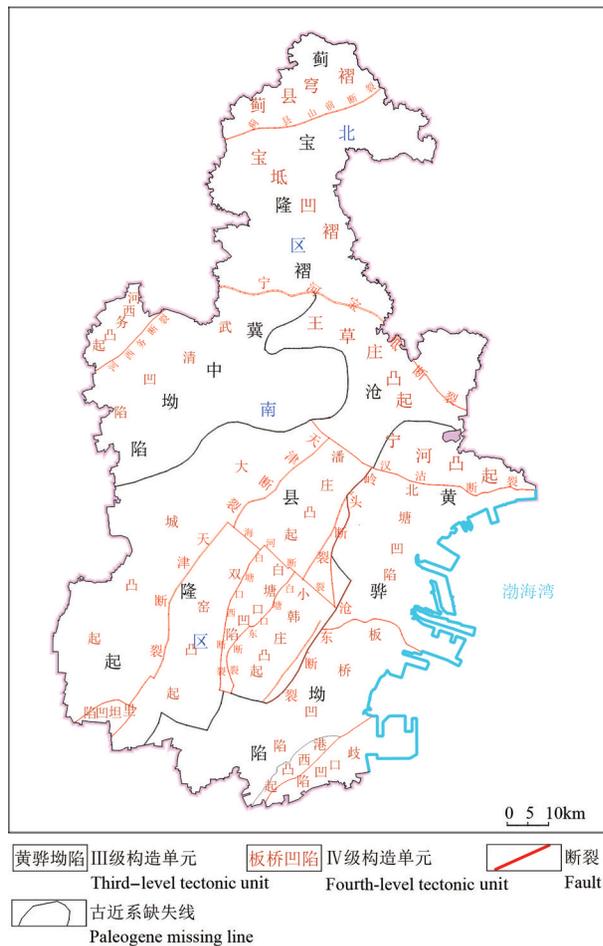


图 1 天津市地质构造单元分区图

Fig.1 Zoning map of geological structural units in Tianjin

的分布特征均与华北沉积盆地一致(蔺文静等,2013;刘凯等,2017;毛小平等,2018;吴爱民等,2018;洪增林等,2019;胡秋韵等,2020),盖层平均地温梯度表现为中间高、两侧低的分布特征,沧县隆起是地温梯度的高值区,其两侧的坳陷为地温梯度的低值区。若以  $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  为地热异常区的下限值,那么分布在沧县隆起区的地热异常面积占南区的 86%。地温带主体以 NNE 向展布最为明显,EW 和 NWW 方向次之,平面上可清楚地显示地温异常区呈低、高、低相间展布,并与地质构造的凹、凸、凹分布相一致。

## 2.3 热储层特征

天津地区的地热资源主要以沉积盆地型地热资源为主,根据其所赋存的热储岩性、孔裂隙性质和结构等条件,可划分为陆相碎屑沉积为主的新生界孔隙型热储(孔隙热储)和海相沉积为主的古生界、中元古界碳酸盐岩容裂隙型热储(基岩热储)。其中孔隙热储包括新近系明化镇组(Nm)和馆陶组(Ng)、古近系东营组(Ed)热储;基岩热储包括古生界奥陶系(O)、寒武系(C)和中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)热储(张百鸣等,2006;林黎等,2007;Wang,2008;王贵玲等,2017)。本文主要研究热储为新近系馆陶组热储。

新近系馆陶组热储在宁河—宝坻断裂以北及王草庄、潘庄农场至西南部静海地区部分缺失,咸水沽和大港局部缺失,总分布面积  $8435.2\text{ km}^2$ (图 2)。在坳陷区分布稳定,底板埋深  $988\sim 2660\text{ m}$ ,沧县隆起区分布厚度薄、埋深小;向两侧坳陷区逐渐加厚、加深。属河流相碎屑岩沉积,多呈粗—细—粗的沉积旋回,对应沉积岩相可分为上部馆 I 砂岩热储段和下部馆 III 砂砾岩热储段。馆 I 热储段:厚度  $100\sim 200\text{ m}$ ,井口稳定流温  $48\sim 65^{\circ}\text{C}$ ;馆 III 热储段:井口稳定流温  $60\sim 82^{\circ}\text{C}$ ,单位涌水量  $0.52\sim 5.13\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ ,流体化学类型为  $\text{HCO}_3-\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Na}$  型,矿化度  $0.8\sim 1.9\text{ g/L}$ 。渗透系数  $0.3\sim 2.2\text{ m/d}$ ,导水系数  $40\sim 212\text{ m}^2/\text{d}$ ,孔隙度  $18\%\sim 36.6\%$ (张薇等,2019)。

## 3 地热资源量及可开采量计算

### 3.1 地热资源量计算

本次研究利用热储法对天津市新近系馆陶组

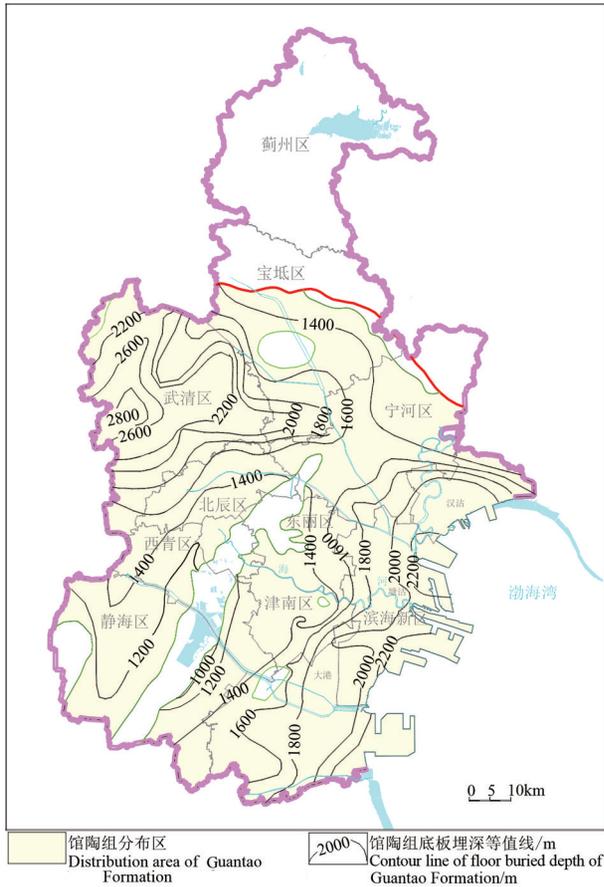


图2 天津市馆陶组热储分布及埋深等值线图  
Fig.2 Thermal reservoir distribution and buried depth isoline map of Guantao Formation in Tianjin

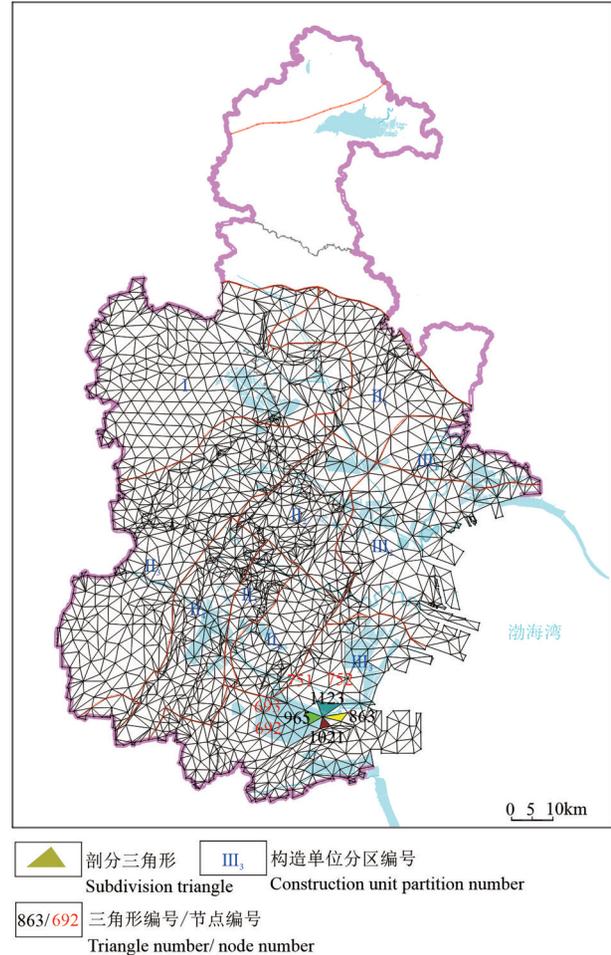


图3 天津市地热资源评价剖分图  
Fig.3 Dissection map of geothermal resource evaluation of Tianjin

热储地热资源量进行计算,对计算区进行三角剖分,各层总量由公式(1)计算。根据天津馆陶组热储的分布特征,此次计算分区以V级构造单元为准。剖分节点的确定同时考虑V级构造单元、行政区、断裂、钻孔位置、各热储分布区及缺失线等主要界线。剖分三角形文件利用MapGIS生成,共1873个节点,3361个三角形,分布区面积为8435.2 km<sup>2</sup>(图3),具体计算参数如表1。

$$Q_r = \sum_{i=1}^n A_i \cdot M_i \cdot \rho_{wi} c_{wi} \cdot (1 - \varphi_i) \cdot (T_i - T_0) + A_i \cdot (\varphi_i \cdot M_i + S_i \cdot H_i) \cdot \rho_{wi} \cdot c_{wi} \cdot (T_i - T_0) \quad (1)$$

式中: $Q_r$ —评价区范围内某个热储的地热资源量J; $i$ —三角形的编号; $n$ —三角形剖分总数; $A_i$ —第*i*个剖分三角形的面积,km<sup>2</sup>; $M_i$ —第*i*个剖分三角形所对应热储的厚度,m; $\rho_{wi}$ —第*i*个剖分三角形所对应热储岩石的密度,kg/m<sup>3</sup>; $c_{wi}$ —第*i*个剖

分三角形所对应热储岩石的比热,J/(kg·°C); $\rho_{wi}$ —第*i*个剖分三角形所对应地热流体的密度,kg/m<sup>3</sup>; $c_{wi}$ —第*i*个剖分三角形所对应地热流体的比热,J/(kg·°C); $H_i$ —第*i*个剖分三角形所对应计算热储起始点以上水头高度,m; $\varphi$ —热储岩石孔隙率(或裂隙率),无量纲; $S$ —热储的弹性释放系数,无量纲; $T_i$ —第*i*个剖分三角形所对应热储的平均温度,°C; $T_0$ —基准温度,13.5°C。

地热资源可开采量采用回收率法进行计算(《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331-2020)),热储地热能回收率应根据热储的岩性、有效孔隙率、热储温度以及开采回灌技术条件合理确定。对于大型沉积盆地的新生代砂岩孔隙型热储,孔隙率大于20%时,回收率可取25%。地热资源可开采量计算公式为:

表1 天津市馆陶组热储参数

Table 1 Thermal storage parameters of the Guantao Formation in the Tianjin

热储类型分区	计算分区	热储平均温度(°C)	$\rho_s$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$c_s$ /(J/kg·°C)	孔隙率/%	$\rho_w$ /(kg/m <sup>3</sup> )	$c_w$ /(J/kg·°C)
武清凹陷	I	57.9	2103	908	27.0	984.299	4180
王草庄凸起	II 1	48.6	2103	908	27.3	988.686	4180
潘庄凸起	II 2	63.8	2103	908	27.3	981.166	4180
大城凸起	II 3	53.9	2103	908	27.3	986.239	4180
双窑凸起	II 4	58.4	2103	908	27.3	984.018	4180
白塘口凹陷	II 5	57.9	2103	908	27.3	984.299	4180
小韩庄凸起	II 6	65.9	2103	908	27.3	979.968	4180
宁河凸起	III 1	66	2103	910	34.5	979.91	4180
北塘凹陷	III 2	65.1	2103	910	34.5	980.432	4180
板桥凹陷	III 3	57.4	2103	910	34.5	984.544	4180

$$Q_k = R_E \cdot Q \quad (2)$$

式中: $Q_k$ —地热资源可开采量,kJ; $R_E$ —回采率,%; $Q$ —地热资源储量,kJ。

根据资源计算公式和上述各计算参数,天津全市馆陶组地热资源量计算采用地热资源计算软件程序(软件项目组独立开发)辅助完成。程序计算出每个热储所有剖分单元的资源量,其结果见表2。

### 3.2 地热流体可开采量计算(热储法)

根据《地热资源地质勘查规范》(GB11615-2010)和《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331-2020),采用热储法对馆陶组地热资源可开采量进行计算,结合热流体静储量资源计算模型、公式和计算参数,与热资源计算一样应用地热资源计

算软件程序完成本次天津全市馆陶组热储各剖分单元地热资源静储量的计算。再分类汇总,即可求得各构造单元的地热资源储量(表3)。

### 3.3 地热流体可开采量计算(统计分析法)

运用的统计分析法基于开采消耗量与水位降深值之间的统计模型计算地热流体可开采量,用来预测构造单元在定量开采条件下的水位及消耗量变化趋势,统计方法利用相关分析法。统计模型为:

$$Q=f(s) \quad (3)$$

式中: $Q$ —年累计开采消耗量, $10^4 \text{ m}^3$ ; $s$ —区域单位面积加权累计水位降深,m。

根据天津市地热井水位监测和地热流体开采/回灌量动态资料,建立的统计模型主要利用年累计

表2 各构造单元地热资源量统计

Table 2 Statistics of geothermal resources of each structural unit

热储类型分区	计算分区	地热资源量		地热资源可开采量	
		地热资源量/( $10^{18} \text{ J}$ )	折合标准煤/( $10^8 \text{ t}$ )	地热资源可回收量/( $10^{18} \text{ J}$ )	折合标准煤/( $10^8 \text{ t}$ )
武清凹陷	I	36.823	12.564	9.206	3.141
王草庄凸起	II 1	3.994	1.363	0.998	0.341
潘庄凸起	II 2	3.336	1.138	0.834	0.285
大城凸起	II 3	22.191	7.572	5.548	1.893
双窑凸起	II 4	1.252	0.427	0.313	0.107
白塘口凹陷	II 5	0.894	0.305	0.224	0.076
小韩庄凸起	II 6	2.716	0.927	0.679	0.232
宁河凸起	III 1	9.125	3.114	2.281	0.778
北塘凹陷	III 2	35.619	12.154	8.905	3.038
板桥凹陷	III 3	23.321	7.957	5.83	1.989
总计		139.271	47.521	34.818	11.88

表3 各构造单元地热流体储存量及可开采量统计

Table 3 Statistics of geothermal fluid storage capacity and recoverable capacity of each structural unit

热储类型分区	计算分区	地热流体储存量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	地热流体储存热量/(10 <sup>18</sup> J)	折合标准煤/(10 <sup>4</sup> t/a)	地热流体可开采量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)	地热流体可开采热量/(10 <sup>18</sup> J/a)	折合标准煤/(10 <sup>4</sup> t/a)
武清凹陷	I	76.992	16.409	5.6	0.231	49.227	16.797
王草庄凸起	II 1	12.575	1.805	0.616	0.038	5.415	1.848
潘庄凸起	II 2	6.939	1.483	0.506	0.021	4.448	1.518
大城凸起	II 3	59.801	9.896	3.377	0.178	29.687	10.129
双窑凸起	II 4	3.011	0.563	0.192	0.009	1.688	0.576
白塘口凹陷	II 5	2.044	0.402	0.137	0.006	1.205	0.411
小韩庄凸起	II 6	5.903	1.216	0.415	0.018	3.649	1.245
宁河凸起	III 1	24.587	4.775	1.63	0.074	14.326	4.888
北塘凹陷	III 2	70.269	14.699	5.017	0.211	44.098	15.047
板桥凹陷	III 3	51.582	9.682	3.304	0.155	29.045	9.91
总计		313.703	60.93	20.794	0.941	182.788	62.369

消耗量和年区域水位累计降深两个参数量。本次统计分析数据取值范围为2007动态监测年至2019动态监测年(即2006年11至2019年10月),通过分析整理数据,截至2019年10月,将所有地热井开采量、回灌量和消耗量数据进行累加(图4),统计出所有参与计算的馆陶组热储地热井258眼。据计算公式算得年累计消耗量和年区域水位累计降深。根据馆陶组热储特征、分布情况及数据齐整情况,将馆陶组热储分为东区和西区计算,主要以馆陶缺失线为分区界线。

统计分析模型宜以累计消耗量和水位累计降幅数据绘制散点图,根据散点图曲线的形态选择相关方程的类型,因地热水为承压水,采用一元线性回归模型来拟合模型。即 $Q=a \times S+b$ ,式中 $Q$ 为累计开采量,10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;S为热储水位累计降幅,m。 $a$ 、 $b$ 为待定的参数,采用最小二乘法确定模型,具体各区模型见图5和图6。从 $Q-S$ 散点图可得出各区回归方程及相关系数,从中可以看出,各区相关系数均高于0.90,所以本次建立的各区回归方程均有较高的实用价值。

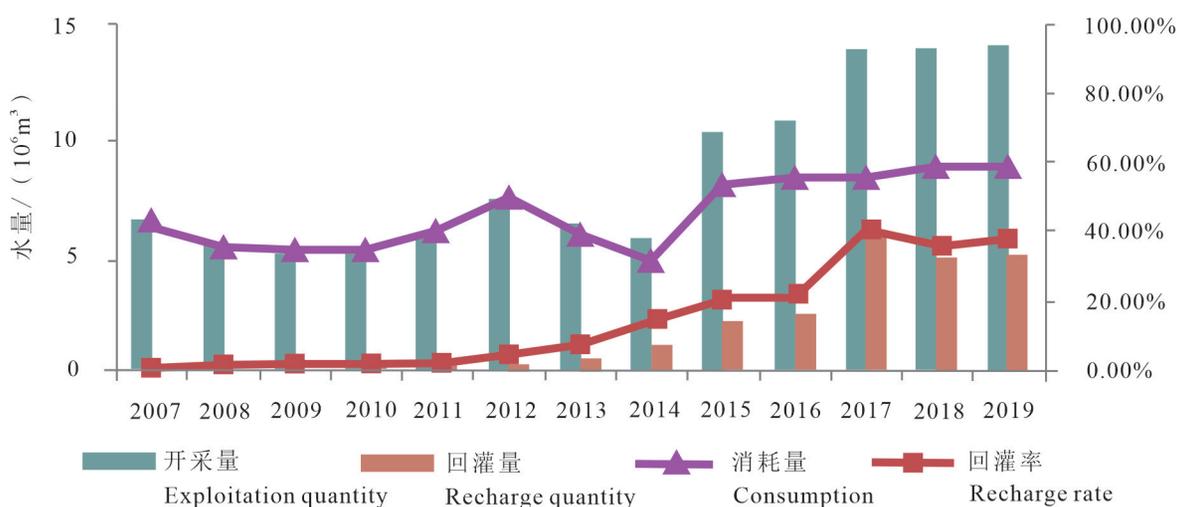


图4 馆陶组热储年开采量统计图

Fig.4 Statistical chart of annual production of thermal reservoirs in Guantao Formation

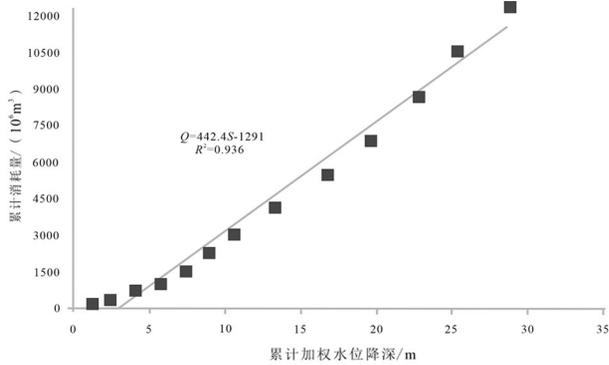


图5 馆陶组西区Q-S散点图

Fig.5 Q-S scatter plot of the west area of Guantao Formation

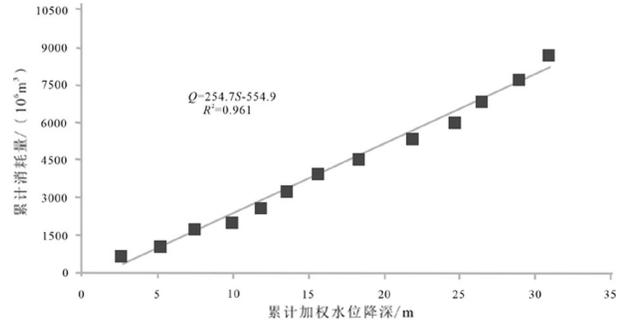


图6 馆陶组东区Q-S散点图

Fig.6 Q-S scatter plot of the east area of Guantao Formation

根据天津市地热资源具体情况考虑,制定计算原则:开采30年时间内,馆陶组开采井20℃静水位埋深不超过200 m、年降幅不超过3 m,各区计算结果如表4和表5所示。

### 3.4 地热流体可开采量计算(数值模型法)

本次参与建模的馆陶组地热井共计257眼,另外在空白区域和资料不足区域,通过分析整理物探相关资料,模拟满足条件的虚拟钻孔。利用Petrasim数值模拟软件实现三维可视化,使得馆陶组热储模型在平面上剖分为120行、100列,最大剖分单元为1.23 km<sup>2</sup>×1.23 km<sup>2</sup>矩形单元,最小剖分单元约0.52 km<sup>2</sup>×0.52 km<sup>2</sup>矩形单元。

初始压力场利用馆陶组热储动态水位资料,经过综合分析处理,利用GIS技术对各热储的初始地热流体压力参数进行栅格化处理,得到初始压力场和初始温度场。侧向边界以北部以宁河—宝坻断裂为界,缺失区域定为隔水边界,四周侧向边界均按天津市行政边界定为自然流量边界。沧东断裂、海河断裂在垂向上应是连接该区域上下热储地热流体的通道,中心城区、滨海新区的过量开采可导致其下部热储对上部储层有所补给,因此,将沧东断裂、海河断裂带作为含水层垂向补给导水导热内部边界处理。各单元格的水文地质参数赋值为热储降压试验、地热井测井资料所得。

由于受地热井长观资料完整性以及连续性限

制,本次工作选择2006年10至2019年10月作为所建数值模型的检验期。在检验期内,将各要素输入模型后,运行模型,确定各热储长观孔地热井压力历时曲线并与模型计算曲线相比较;利用模型计算出检验期内的水位等值线图与实际绘制水位等值线图进行对比。本次馆陶组数值模型选择7眼长观孔进行地热井压力曲线实测值与计算值的比较,经各种参数逐步调整后,使得两条曲线逐渐接近并达到较为理想的拟合结果。利用地热井2019年10月长观和统测资料绘制对应时刻的地热流体压力等值线图;将模型计算出对应时刻的压力场图换算水位等值线图与实际绘制水位等值线图反复进行模拟对比,得出各项计算值与实测值趋势一致。说明所建模型基本反映了实际地热系统特征。

根据天津市地热资源开发利用特征,按照每年11月15日至下一年的3月15日为供暖季,共计120天,开采和回灌同时进行;其余时间为水位恢复期,不进行采灌。模拟时间为30年,即2019年10月至2049年10月。本次评价标准为水位和温度综合标准,根据开采井静水位埋深(20℃)和温度降低情况,设定标准,即开采30年时间内,馆陶组热储开采井静水位埋深不超过200 m,且开采井温度降低小于2℃,评价最大可采资源总量。

根据采灌均衡,以灌定采原则,分别计算回灌

表4 各区可消耗量统计

Table 4 Consumption statistics of each district

热储层	构造	面积/m <sup>2</sup>	30年消耗量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	年可消耗量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	预测年降速/(m/a)	总消耗量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)
Ng	东区	3898.01	14727.1	490.90	2.0	0.139
Ng	西区	4537.19	27022.6	900.75	2.13	

表5 不同计算原则下的可开采量统计  
Table 5 Statistics of the mineable volume under different calculation principles

热储层	总消耗量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)	计算原则	可开采量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)
Ng	0.139	按回灌率 50%	0.278
		按回灌率 70%	0.463

率为50%和70%条件下的地热流体可开采量。在维持现有开采井布局的基础上,按照平均布井的方式在地热开发空白的区域增加虚拟地热井50对,各地热分区虚拟井的可开采潜力按照该热储层总开采量与回灌量的比例进行分配,将每眼井的开采量/回灌量代入模型进行计算,根据模型计算结果不断调整地热井开采量与回灌量。

地热流体可开采量数值模拟法计算结果见表6。

## 4 地热流体可开采量计算结果对比及适用条件

### 4.1 地热流体可开采量结果对比

本次地热流体可开采量计算主要采用热储法、统计分析法和数值模拟法,每种方法都有各自的适用条件,根据勘查阶段、开采时间、监测资料情况选用适宜的计算方法。本文研究工作开采期为30年,并按照不同的约束条件,采用热储法、统计分析法和数值模拟法对地热流体可开采量进行计算,对比结果如表7所示。

### 4.2 地热流体可开采量计算方法适用条件

热储法仅计算区域的地热资源储量和地热流体储量,不考虑侧向补给、越流补给以及回灌因素

的静态储存量。适合于勘查程度低,大致掌握热储分布范围、温度分布,无地热井抽水试验数据的地热田。其可采系数的大小取决于热储层的岩性、厚度、孔隙裂隙发育情况,根据经验确定,人为因素较大,而对于区域性地热资源评价时,却显示出简单准确的特点。

统计分析方法是一种以开采量与水位监测实测数据为基础的评价方法。该方法对资料的准确性及详实性要求较高,适用于勘查程度较高、已开发利用多年、具有多年动态监测资料的地热田。计算初期要考虑资料的合理性、水位监测数值的准确性、开采量调查与实际是否相符等问题,这些都会直接影响计算结果。另外,选择不同的回归方程,计算结果会有所不同,因此该方法更适用于开采时间较长、监测资料齐全的地热开采区,且预测时限应不超过监测时长。

数值模型方法借助计算机程序对研究区域进行剖分,采用有限单元法或有限差分法对剖分单元进行离散,可将动态的水位、水量、补给情况等输入模型中,不断调整参数值使其更符合实际的地热地质环境。因此该方法是一种高精度评价方法,适用于勘查程度较高、并且具有一定时期的开采历史,具有较齐全的监测资料的地热田。

因此,地热流体可开采量计算方法有多种,但在地热田前期勘查阶段可采用热储法进行地热资源量估算;在大规模开采阶段,地热田达到详查或勘探程度,可采用统计分析法和数值模拟法进行地热流体可开采量评价。

表6 不同计算原则下的可开采量统计  
Table 6 Statistics of the mineable volume under different calculation principles

热储层	计算原则	开采井水位	30年末静水位	30年末地热流体	可开采量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)
		最大降幅/m	最大埋深/m	最大温降/(°C)	
Ng	按回灌率 50%	60	186	1.21	0.296
	按回灌率 70%	55	173	1.51	0.469

表7 不同方法计算年可开采量对比(10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/a)  
Table 7 Comparison of different methods to calculate the annual mining capacity (10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/a)

方法	热储法	统计分析法		数值法	
	未考虑回灌	回灌条件定降幅定降速		回灌条件定降幅定温降	
考虑条件		馆陶组回灌率 50%	馆陶组回灌率 70%	馆陶组回灌率 50%	馆陶组回灌率 70%
馆陶组	0.940	0.278	0.463	0.296	0.469

表8 评价因子权重分配

Table 8 Weight distribution of evaluation factor

评价因子	开采潜力模数	回灌量	水位埋深	水位下降速率	单位降深涌水量	地热井布局	合计	
权重	开采潜力模数<1.2	20%	20%	20%	20%	15%	5%	100%
	开采潜力模数≥1.2	25%	-	25%	25%	20%	5%	100%

## 5 地热资源综合评价及适宜性分区

天津市地热资源开发利用已经开始步入规模化、集约化以及精细化管理阶段,对天津地热资源的开发利用进行潜力评价,是地热资源可持续开发利用的重要保障。

本次地热资源潜力评价模型利用基于GIS的层次分析法,将GIS技术和层次分析法相结合,对地热资源开发利用潜力进行综合性评价。层次分析法用于计算各影响因素的权重,GIS用于影响因素和评价结果的空间表达,从天津地热资源开发利用的实际出发,建立天津市地热资源潜力综合评价指标体系;将层次分析法运用于各指标权重的定量计算,采用GIS的叠加分析和缓冲区分析功能,得到天津市资源潜力综合评价结果。

### 5.1 综合评价的过程和步骤

(1)确定研究区、研究对象及研究目标,将研究区以 $1\text{ km}^2 \times 1\text{ km}^2$ 进行单元剖分并进行数据分析,确定本次评价分析所需要的数据,包括数据来源、数据质量指标等。

(2)将各种资料进行数据处理,包括数字化、格式转换、投影转换、分层及属性编码等,建立研究对象的数据库。

(3)结合综合研究所获取的多源资料,总结研究区、研究对象的构成,以及研究目标的相关特征;根据研究目标的特征,分析影响目标的因素,建立目标的层次指标模型,并运用GIS空间分析功能提取分析因子。

(4)由专家估计法、特尔菲法以及加权平均等方法对分析因子综合评分,对数量、等级赋权重。

(5)运用GIS技术和相应数学方法进行综合分析、运算,确定模型的各种参数。

(6)应用建立的模型对研究区未知对象进行分析。

### 5.2 评价因子的选择

本次评价根据天津地热开发利用的实际情况,

确定对天津地热资源合理开发利用影响较大的6个因素作为可持续开发潜力的评价因子:开采潜力模数、回灌量强度、水位埋深、水位下降速率(年降幅)、单位降深涌水量和地热井布局。其中单元开采潜力较大,不需考虑单元回灌量,只需考虑其他5个因子,开采潜力一项可赋满分,各因子权重分配见表8。

根据评分标准和各指标的实测资料,利用GIS叠加原理得到各个剖分单元的综合得分,从评价得分及评定等级中找出该得分对应的等级,从而可以直观定量地评价出每个剖分单元的可持续开发潜力值。评价准则如表9。

### 5.3 馆陶组热储适宜性分区

天津市馆陶组热储层水位降幅较大的地热井主要分布在宁河城区、滨海新区的塘沽和武清集中开采区。2019年度242眼地热井中仅有169眼处于在用状态,开采量为 $1412.93 \times 10^4\text{ m}^3$ ,其年度开采量占全市开采总量的26.25%。2019年度51眼回灌井中有15眼处于停用或未用状态,回灌总量为 $509.94 \times 10^4\text{ m}^3$ ,回灌率为36.09%。

通过GIS叠加到各个剖分单元的综合得分及对应等级,得到馆陶组热储层适宜性分区情况。馆陶组中心城区、武清区中心、塘沽区部分地区是集中开采区,开采量较大,因此对该区的可持续发展影响较

表9 评价得分及评定等级

Table 9 Evaluation score and grade

等级	得分范围	评价	对策
1	>85	可持续发展潜力极大	鼓励开采
2	65~85	可持续发展潜力较大	保护开采
3	55~65	可持续发展潜力一般	控制开采
4	<55	可持续发展潜力较小	限制新增开采

表10 馆陶组热储层分区情况

Table 10 Thermal reservoir zoning in Guantao Formation

分级	限制新增开采	控制开采	保护开采	鼓励开采
面积/ $\text{km}^2$	265	409.5	3281.9	4478.8

大。经综合评判各区具体的分区情况见表 10。

## 6 结 论

(1)应用热储法计算馆陶组热储,在不考虑回灌的情况下:馆陶组的地热流体可开采量为 $0.94 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

(2)应用统计分析法计算馆陶组热储,在考虑回灌的情况下,地热资源开采期末热流体水头压力最大允许埋深值馆陶组热储不大于 200 m,且地热流体下降速率不超过 3 m/a 的约束条件下,馆陶组热储层按总体回灌率 50%计算地热流体可开采量为 $0.28 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,馆陶组热储层按总体回灌率 70%计算地热流体可开采量为 $0.46 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

(3)应用数值模拟法计算馆陶组热储在考虑回灌的情况下,地热资源开采期末热流体水头压力最大允许埋深值馆陶组热储不大于 200 m,且开采井温度降低不超过 2℃的约束条件下,馆陶组热储层按总体回灌率 50%计算地热流体可开采量为 $0.30 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,馆陶组热储层按总体回灌率 70%计算地热流体可开采量为 $0.47 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

(4)地热流体可开采量计算方法有多种,在地热田前期勘查阶段可采用热储法进行地热资源量估算;在大规模开采阶段,地热田达到详查或勘探程度,可采用统计分析法和数值模拟法进行地热流体可开采量评价。

(5)通过 GIS 叠加到各个剖分单元的综合得分及对应等级,得到馆陶组热储层适宜性分区情况,中心城区、武清区中心、塘沽区部分地区是集中开采区,开采量较大,因此对该区的可持续发展影响较大,必须加强地热资源开发利用管理。

### 注释

①天津地热勘查开发设计院. 2000. 天津市深部地热资源普查报告[R].

### References

Chen Moxiang. 1988. Geothermal in North China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).  
Chen Qinglong, Huang Rui, Pu Renhai, Wang Bin, Sun Long, Wang Yanxin. 2021. Study on classification and correlation of thermal reservoir strata and geothermal favorable area in Renxian area, Hebei Province[J]. Journal of Geology, 45(3): 316–326(in Chinese

with English abstract).  
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).  
Hu Qiuyun, Gao Jun, Ma Feng, Zhao Zhihong, Liu Guihong, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Baojian, Xing Yifei. 2020. Dynamic prediction of geothermal recoverable resources in the Rongcheng uplift area of the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2013–2025(in Chinese with English abstract).  
Huang Jichao, Rong Fuqiang, Wang Tielin. 2022. Study on the distribution and development and utilization of geothermal resources in Jingkai District of Zhengzhou City[J]. Henan Water Resources and South-to-North, 51(1): 27–31 (in Chinese with English abstract).  
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 and its exploitable potential analysis[J]. Geology in China, 49(6): 1732–1746(in Chinese with English abstract).  
Lin Li, Zhao Sumin, Ruan Chuanxia. 2007. The inhomogeneity characteristics of geothermal storing karst caves of Wumishan reservoir of Jixian System in the deep part of Tianjin[J]. Geoscience, 21(4): 600–604 (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 Jie, Song Meiyu, Tian Guanghui. 2012. Development Situation of the geothermal resources and suggestion on sustainable development utilization in Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 35(1): 67–73(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, 40(1): 312–320(in Chinese with English abstract).  
Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan. 2021. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. Geology in China, 48(6): 1734–1747 (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).  
Mei Bo, Zhang Yanfeng, Yang Yunzhan, Xing Hualu, Chang Linzhen, Liu Pufeng. 2021. Geochemical characteristics and origin of geothermal water of Guantao formation in Huanghua depression

- (Cangzhou region)[J]. Mineral Exploration, 12(6): 1366–1377(in Chinese with English abstract).
- Ru Hongjiu, Liu Donglin, Hu Huichuan, Shen Jian. 2018. Evaluation and comprehensive study of geothermal resources in Tianjin[J]. Geological Survey of China, 5(2): 25–31(in Chinese with English abstract).
- Tang Yongxiang, Cheng Wanqing, Zhao Sumin, Tian Guanghui, Li Yuanyuan, Zeng Meixiang, Li Hao. 2020. Evaluation of deep geothermal resources and delineation of favorable exploration areas in Binhai New Area, Tianjin[J]. Geological Survey of China, 7(4): 37–42(in Chinese with English abstract).
- Tianjin Bureau of Geology. 1992. Tianjin Regional Geological Records[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- 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 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 K. 2008. Background, history and status of geothermal utilization in Tianjin[C]// Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia, 12–23.
- Wang Xinwei, Guo Shiyuan, Gao Nan'an, Liu Huiying, Wang Tinghao, Wei Guangren, Lei Haifei. 2023. Detection of carbonate geothermal reservoir in Niudong fault zone of Xiong'an New Area and its geothermal exploration significance[J]. Geological Bulletin of China, 42(1): 14–26731(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinwei, Wang Tinghao, Li Haiquan, Zhang Xuan, Luo Lu, Liu Huiying, Wang Simin, Xiang Caifu. 2022. Evolution of karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin[J]. Geology in China, 49(3): 716–731(in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Ma Feng, Wang, Guiling, Liu Jinxia, Hu Qiuyun, Miao Qingzhuang. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan new area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 523–532(in Chinese with English abstract).
- Xie Na, Yu Shengbo, Ding Hongwei, Zhang Mingquan. 2020. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment in Gansu Province[J]. Geology in China, 47(6): 1804–1812(in Chinese with English abstract).
- Yu Yan, Qin Lihong, Lin Wei, Kang Nan, Liu Jie, Meng Xiangbo. 2016. Practical and theoretical calculation comparative study on the geothermal resources development in Tianjin[J]. North China Geology, 39(3): 221–225(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 Fenna, Jia Zhi, Li Hu, Gao Liang, Zong Zhenhai. 2016. Evolution of geothermal fluids in Guantao layer of Tanggu district in Tianjin[J]. North China Geology, 39(2): 149–152(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Zhang Zhongxiang, Han Jianjiang, Xu Jian, Geng Dongqing, Li Changsuo, Liu Guoai. 2005. The calculation of exploitable resources in the layered-geothermal reservoirs of sedimentary basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 32(1): 73–77(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen, Yu Piaoluo, Chen Huijuan, Luo Yinfei, Zhao Dongyang, Bian Jiang. 2015. Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province[J]. Geology in China, 42(3): 803–810(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈庆龙, 黄锐, 蒲仁海, 王彬, 孙龙, 王妍心. 2021. 河北任县地区热储地层划分对比及地热有利区[J]. 地质学刊, 45(3): 316–326.
- 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.
- 胡秋韵, 高俊, 马峰, 赵志宏, 刘桂宏, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张保建, 邢一飞. 2020. 雄安新区容城凸起区地热可采资源量动态预测[J]. 地质学报, 94(7): 2013–2025.
- 黄继超, 荣富强, 王铁霖. 2022. 郑州市经开区地热资源分布及开发利用研究[J]. 河南水利与南水北调, 51(1): 27–31.
- 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及其开发利用潜力分析[J]. 中国地质, 49(6): 1732–1746.
- 林黎, 赵苏民, 阮传侠. 2007. 天津地区深部蓟县系雾迷山组热储岩溶非均一性特征研究[J]. 现代地质, 21(4): 600–604.
- 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.
- 刘杰, 宋美钰, 田光辉. 2012. 天津地热资源开发利用现状及可持续发展利用建议[J]. 地质调查与研究, 35(1): 67–73.
- 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.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢. 2021. 世界地热能开发利用现状与展

- 望[J]. 中国地质, 48(6): 1734-1747.
- 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.
- 梅博, 张岩峰, 杨云展, 邢化庐, 常林祯, 刘普峰. 2021. 黄骅台陷(沧州段)馆陶组地热水地球化学特征及成因分析[J]. 矿产勘查, 12(6): 1366-1377.
- 茹洪久, 刘东林, 胡慧川, 沈健. 2018. 天津地热资源评价与综合研究[J]. 中国地质调查, 5(2): 25-31.
- 唐永香, 程万庆, 赵苏民, 田光辉, 李嫻嫻, 曾梅香, 李昊. 2020. 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, 7(4): 37-42.
- 天津市地矿局. 1992. 天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 王贵玲, 张薇, 蒯文静, 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.
- 王贵玲, 蒯文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94(7): 1923-1937.
- 汪新伟, 郭世炎, 高楠安, 刘慧盈, 王婷灏, 魏广仁, 雷海飞. 2023. 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, 42(1): 14-26.
- 汪新伟, 王婷灏, 李海泉, 张瑄, 罗璐, 刘慧盈, 王嗣敏, 向才富. 2022. 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力[J]. 中国地质, 49(3): 716-731.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 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, 39(5): 523-532.
- 谢娜, 喻生波, 丁宏伟, 张明泉. 2020. 甘肃省地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 47(6): 1804-1812.
- 于彦, 秦莉红, 林激, 康楠, 刘杰, 孟祥博. 2016. 天津地热资源开采情况实际与理论计算对比研究[J]. 地质调查与研究, 39(3): 221-225.
- 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.
- 张芬娜, 贾志, 李虎, 高亮, 宗振海. 2016. 天津塘沽地区馆陶组地热水体演变特征研究[J]. 地质调查与研究, 39(2): 149-152.
- 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.
- 张中祥, 韩建江, 徐健, 耿冬青, 李常锁, 刘国爱. 2005. 沉积盆地型层状热储可采资源量计算方法探索[J]. 水文地质工程地质, 32(1): 73-77.
- 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 罗银飞, 赵东阳, 边疆. 2015. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. 中国地质, 42(3): 803-810.