

雄安新区顶面埋深在 3500m 以浅的中元古界热储可采地热资源量和开发参数评估

戴明刚^{1,2)}, 雷海飞³⁾, 胡甲国^{1,2)}, 郭新锋^{1,2)}, 马鹏鹏^{1,2)}, 张家云^{1,2)}

1) 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京, 100083; 2) 国家地热能源开发利用研究及应用技术推广中心, 北京, 100083; 3) 中石化绿源地热能开发有限公司, 河北雄安, 071800

内容提要:为了科学合理开发利用雄安新区顶面埋深在 3500m 以浅的中元古界热能, 从地热资源量回收率、布井规模、单井产量、国家水热下降许可指标、开采回注井距、回注量、开采时间等开发参数进行试算和分析, 评估了雄安新区地热流体可开采量, 试算结果表明雄安新区地热资源量回收率和布井规模有限制, 目前雾迷山组主流单井产量 110m³/h、回注量 165m³/h、井距 500m 合理, 可以满足 100 年的地热田开发寿命且符合国家水热下降许可指标。地热单元的理论热能最大回收率值与单层热储岩石孔隙度、密度、比热和地热水的密度、比热等物性有关, 与热储面积、厚度无关, 实际最大回收率约为理论最大回收率的一半, 它与生产井布井规模、单井生产量、生产开发时间、尾水温度等开发参数直接相关。推出的回注井距、回注量、开采时间简化计算公式方便实用; 在热突破距离、时间、回注量评估中, 不论哪种岩性, 有效热储层厚度是非常重要的因素, 其次是回注量和回注时间, 热储孔隙度及渗透性的影响远不及有效热储层厚度的影响。雄安新区的可采地热水资源乐观估算可采地热水量占总储存在水量的 50%, 为 163.79×10⁸ m³、可采地热水所含热量 37.76×10⁸ GJ、折合标煤 2.579×10⁸ t, 以每平方米每年耗能 0.32 GJ 计, 年均可满足 1.137 亿平方米建筑物供暖; 保守估算是乐观估算结果的 30%; 最佳估算是乐观估算结果的 50%, 年均可采地热水可满足 5685 万平方米建筑物供暖; 雄安新区成为是地热能源应用的典型示范区。

关键词: 地热; 雄安新区; 可采资源量; 热储; 开发参数评估; 容城凸起; 牛驼镇凸起

河北雄安新区, 作为国家大事、千年大计, 科学合理开发利用热能对于减轻雄安新区环境污染、改善能源结构、成为新能源应用示范区有着重大意义。

新区地理范围涉及河北省雄县、容城、安新 3 县及附近部分区域, 起步区约 200km², 新区总面积约 2000km²; 地质上位于渤海湾盆地冀中拗陷内, 区域上地热资源地质基础较好 (Chang Jian et al., 2016), 主要涉及的次级构造单元有容城凸起、牛驼镇凸起、高阳低凸起与蠡县斜坡、霸州凹陷、徐水凹陷、安新转换带、饶阳凹陷、保定凹陷等 (图 1), 主要涉及的断裂有容城断裂、徐水断裂、牛东断裂、容西断裂、牛南断裂、安新南断裂、高阳-博野断裂、保定-石家庄 (太行山东麓) 大断裂、任西断裂、任丘断裂等 (Chen Moxiang et al., 1982, 1985, 1990, 1992,

1996; Dai Minggang et al., 2019)。

地热单元的可采地热资源量和开发参数经过充分评估后, 才能制定科学合理的地热能开发方案。前人曾在雄安新区或其周边地区开展一些工作: Chen Moxiang et al. (1988, 1994) 采用最大允许降深法和系数法对整个华北地热流体可开采量进行了估算; Zhou Ruiliang et al. (1989) 利用热储体积法对牛驼镇地热田 3000m 以内可采地热资源进行了计算; Yan Dunshi et al. (2000) 采用热储法、试井分析法、最大允许降深法对京津冀地区地热资源进行了计算; Guo Shiyan et al. (2013) 利用热储体积法对容城凸起地热资源潜力作了测算; Li Jun et al. (2018) 采用地热流体热量潜力模数指标计算衡量冀中区域地热资源的开发利用潜力; Su Yongqiang et

注: 本文为国家重点研发计划专项 (编号 2018YFC0604300) 和中国石化集团公司科技攻关项目 (编号 JP17010) 资助成果。

收稿日期: 2019-05-24; 改回日期: 2019-08-30; 网络发表日期: 2019-09-28; 责任编辑: 邱楠生; 责任编辑: 周健。

作者简介: 戴明刚, 男, 1977 年生。博士, 高级工程师, 现主要从事地热综合勘查及井位设计部署工作。Email: 397211924@qq.com。

引用本文: 戴明刚, 雷海飞, 胡甲国, 郭新锋, 马鹏鹏, 张家云. 2019. 雄安新区顶面埋深在 3500m 以浅的中元古界热储可采地热资源量和开发参数评估. 地质学报, 93(11): 2874~2888, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019200.
Dai Minggang, Lei Haifei, Hu Jiaguo, Guo Xinfeng, Ma Pengpeng, Zhang Jiayun. 2019. Evaluation of recoverable geothermal resources and development parameters of Mesoproterozoic thermal reservoir with the top surface depth of 3500 m and shallow in Xiong'an New Area. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2874~2888.

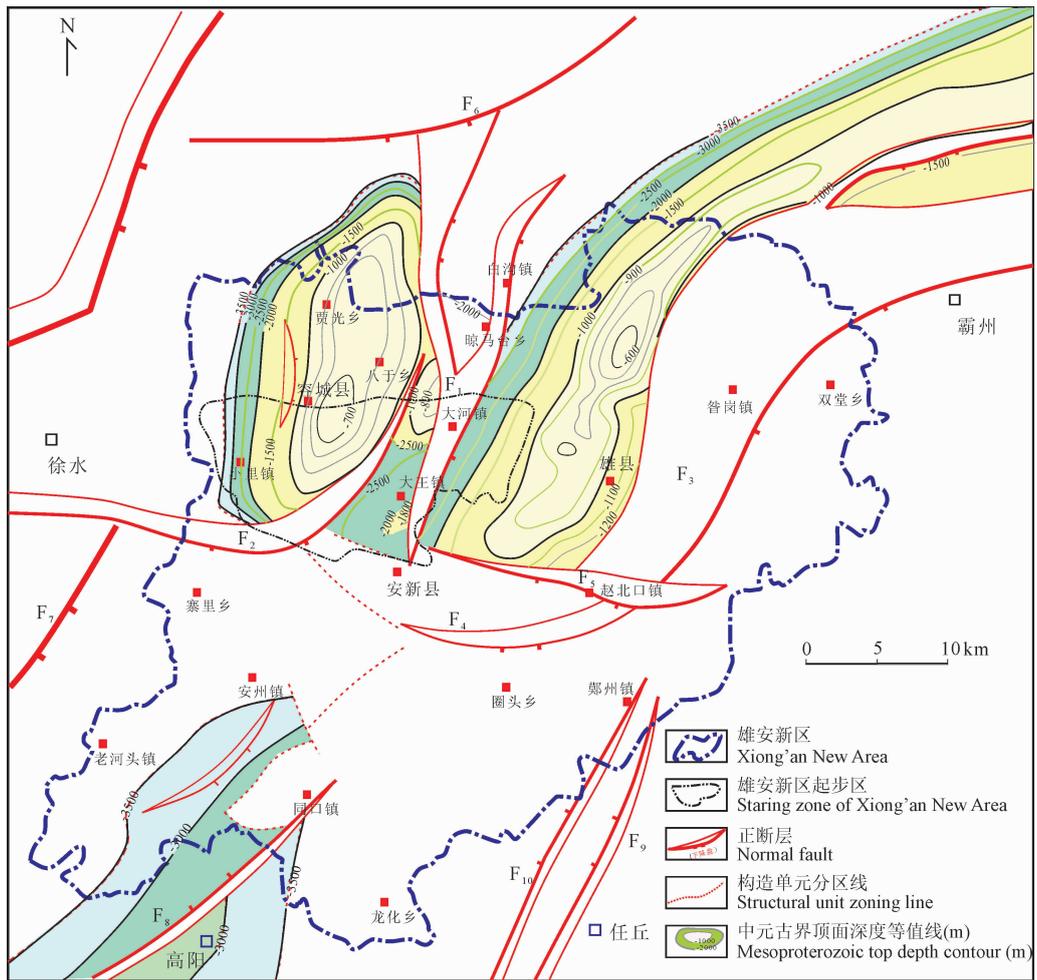


图 1 雄安新区及附近地区中元古界顶面埋深在 3500m 以浅的分布等值线

Fig. 1 The distribution contours of the Mesoproterozoic top with the depth of 3500 m and shallow in Xiong'an New Area and adjacent area

F₁—容城断裂; F₂—徐水断裂; F₃—牛东断裂; F₄—安新南断裂; F₅—牛南断裂; F₆—大兴断裂;

F₇—保定-石家庄断裂; F₈—高阳-博野断裂; F₉—任丘断裂; F₁₀—任西断裂

F₁—Rongcheng fault; F₂—Xushui fault; F₃—Niudong fault; F₄—Anxin south fault; F₅—Niunan fault; F₆—Daxing fault;

F₇—Baoding-Shijiazhuang fault; F₈—Gaoyang-Boye fault; F₉—Renqiu fault; F₁₀—Renxi fault

al. (2018)采用系数法对雄安新区可采地热流体进行了计算评价; Zhang Zhongxiang et al. (2005)用最大允许降深法和现代试井分析法对东营凹陷新生界热储热水可采资源量进行了计算探索; Zhang Dezhong et al. (2018)用热储法、解析法、统计分析法和数值模拟对整个河北平原地热流体可开采量进行了评价和对比。前人做的这些工作大多只公开结论没有公开相关过程,也没有对相关参数是否合理从生产实际进行评估。

本文拟依照主要构造单元把新区分为 3 个片区:容城凸起片区、牛驼镇凸起片区、高阳低凸起片区(图 2),针对雄安新区顶面埋深在 3500m 及以浅的中元古界地热资源,综合用多种方法从新区可能

的布井规模、开采量、回采率、尾水回注及环境保护要求等方面综合计算研究区可采地热资源量、评估开发参数,为合理制定雄安新区地热规模化科学利用规划提供参考。

1 热储特征

雄安新区所在基底主要为太古宇变质岩、元古宇及古生界海相碳酸盐岩,盖层主要由新生界碎屑岩组成,其详细地层见 Dai Minggang et al. (2019)文献,这里重点介绍本区中元古界,区内中元古界自老到新主要为长城系、蓟县系,各层岩性特征见表 1;热储主要为蓟县系雾迷山组和长城系高于庄组,长城系大红峪组、常州沟组砂岩是本区备用热储。

1.1 蓟县系雾迷山组热储

目前中元古界热储主力,主要岩性为大套灰色白云岩、硅质白云岩夹紫红、灰褐色泥质白云岩;其顶面在 3500m 以浅分布特征见图 1,厚度 760~1400m。据 Dai Minggang et al. (2019)研究,该区及周边雾迷山组整体孔隙度主要分布于 6%之内,所占比例为 85.9%,其中孔隙度分布于 1%~6%的占比 61.3%,最大孔隙度 22.4%,平均孔隙度为 3.39%;渗透率分布从 0.01×10^{-3} 至 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 及以上均有分布,主要分布于 $0.01 \times 10^{-3} \sim$

$100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,所占比例 87.8%;该组地温梯度 $0.2 \sim 1^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。

容城凸起片区:据大王 1 井测井资料,雾迷山组测井段厚约 1256m,解释热储厚度约 356m,平均有效孔隙度为 7.3%,平均渗透率为 $4.74 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。深度在 1100~2100m 之间的井口水温多在 $52 \sim 61^\circ\text{C}$ 、热水出水量多在 $80 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 、矿化度多在 1900~3100 mg/L 之间,水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。少数井钻至 2000m 至 3500m 深,井口水温 $81 \sim 93^\circ\text{C}$,出水量可达 $140 \text{ m}^3/\text{h}$,矿化度 2500 mg/L 左右。

表 1 雄安新区中元古界主要岩性特征

Table 1 The main strata lithology of the Mesoproterozoic in Xiong'an New Area

| 界 | 地层 | | | 厚度 (m) | 岩性特征 | 备注 |
|------|------|------|-------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| | 系 | 组 | 代号 | | | |
| 中元古界 | 蓟县系 | 雾迷山组 | Jxw | 760~1400 | 灰色白云岩、硅质白云岩夹紫红、灰褐色泥质白云岩 | 目前本区主力热储。西北局部地区其上可能有薄层铁岭组、洪水庄组 |
| | | 杨庄组 | Jxy | 38~86 | 紫红色灰白色泥页岩、灰色硅质白云岩,紫红色泥质云岩 | |
| | 长城系 | 高于庄组 | Chg | 860~1040 | 灰色灰黑色白云岩与泥质白云岩互层,夹厚度 100m 左右的杂色玄武岩 | 本区热储 |
| | | 大红峪组 | Chd | 75~106 | 石英砂岩夹硅质云岩 | 备用热储 |
| | | 团山子组 | Chr | 0~186 | 灰色硅质白云岩、泥质云岩,夹少量页岩 | 备用热储 |
| | | 串岭沟组 | Chcl | 0~340 | 深灰色页岩、泥岩,夹泥质白云岩 | |
| | 常州沟组 | Chcz | 0~200 | 上部灰白色石英砂岩,下部肉红色含砾长石砂岩、含海绿石砂岩 | 备用热储 | |
| 太古宇 | | Ar | | 灰色、肉红色花岗片麻岩、麻粒岩、变粒岩、片岩等 | | |

牛驼镇凸起片区:以雄县地热田雾迷山组热储为目标的地热井统计,平均孔隙度为 3.7%,深度在 1000~2000m 之间的井口水温多在 $60 \sim 92^\circ\text{C}$ 、热水出水量多在 $110 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 、矿化度多在 2000~3000 mg/L 之间,水化学类型为 Cl-Na 型。

高阳低凸起片区:在新区范围内尚未见雾迷山组顶面在 3500m 及以浅的地热井,但据距本区 9km 且在同一低凸起上的高阳县城 3 口井深在 3200~3432 m 的资料(Liu Xianchuan et al., 2018)显示,该区雾迷山组顶板埋深 3000 m 左右,地热水流量为 $20 \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$,井口温度为 $95 \sim 110^\circ\text{C}$,矿化度估计在 2800~3000 mg/L,水化学类型为 Cl-Na 型。

1.2 长城系高于庄组热储

本区中元古界重要热储,主要岩性为大套灰色灰黑色白云岩与泥质白云岩互层,夹几十到上百米杂色玄武岩、硅质白云岩,含燧石团块或条带;该组地温梯度为 $0.6^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。在研究区及周边,据国土资源部油气资源战略研究中心等(2014),高于庄组一般顶深 1425~3600 m,厚度在 1000m 左右,孔隙度为 2%~6%,渗透率从 0.1×10^{-3} 至 $160 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地层温度一般为 $75 \sim 95^\circ\text{C}$,水量为 $45 \sim$

$80 \text{ m}^3/\text{h}$,矿化度 3000 mg/L 左右。

容城凸起片区:据 Wang Guiling et al. (2018),中国地质调查局在容城凸起的 D16 井资料显示,高于庄组顶板埋深 2078m,未穿揭露厚度 925.24 m,裂隙岩溶总厚度 218 m,裂隙岩层孔隙率 $1.82\% \sim 3.76\%$,水温 71°C ,平均渗透率 $1.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,抽水试验降深为 22.37 m 时水量为 $86.2 \text{ m}^3/\text{h}$,水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,矿化度为 2472 mg/L。

牛驼镇凸起片区:据少量地热井和地震剖面推测高于庄组一般顶深 1800~2600 m,厚度在 1000m 左右,平均孔隙度 2.56%,储层平均温度估计在 85°C 以上。

高阳低凸起片区:截至目前本区尚未有钻到该层的地热井。从邻区资料估计本区最浅顶深在 4100m 以上,地热水流量在 $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 之间、井口温度 100°C 以上,矿化度估计不低于 3000 mg/L,水化学类型为 Cl-Na 型。

2 可采地热资源量与开发参数评估

本文评估的对象是雄安新区顶面埋深在 3500m 及以浅的中元古界,在 3500m 这个深度再钻进 300

~500m,就是目前勉强维持地热井经济性的界限深度。顶面均以蓟县系雾迷山组计,假定长城系高于庄组分布范围与之一致;该范围内所有断面区面积记为零,且超出雄安新区行政范围的不计(图 2)。

2.1 静态地热资源量估算

根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010),热储法计算公式及参数如下:

$$E = Ad\rho_r C_r (1 - \phi)(t_r - t_0) + (A\phi d + A\mu_e H)\rho_w C_w (t_r - t_0) = E_r + E_w \quad (1)$$

式中: E 为地热资源量(J); μ_e 为岩石贮水系数(无量纲数); H 为储层顶板深度和初始测压水位面深度之差(m); E_r 、 E_w 分别为岩石及水储存的热量(J)。

用热储法计算出的资源量,在目前技术条件下,实际上利用的只是其中的流体-地热水的的热量。故地热资源热量回收率:

$$R_E = \frac{E_{wh}}{E} =$$

$$\frac{n \cdot q_{wh} \rho_w C_w \cdot (t_r - t_{尾}) \cdot \Delta T}{A \cdot [d \cdot \rho_r C_r (1 - \phi) + (d\phi + \mu_e H) \rho_w C_w] \cdot (t_r - t_0)} \quad (2)$$

一般白云岩贮水系数数量级在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$,所以可以略去储层弹性释水储量,故本区总储存地热水储量、热量可近似表达为:

$$Q_w = A \cdot d \cdot \phi \quad (3)$$

$$E_w = A \cdot d \cdot \phi \cdot \rho_w C_w \cdot (t_r - t_0) \quad (4)$$

相应的可采地热资源热量回收率可近似表达为:

$$R_E = \frac{E_{wh}}{E} =$$

$$\frac{n \cdot q_{wh} \rho_w C_w \cdot (t_r - t_{尾}) \cdot \Delta T}{A \cdot d \cdot [\rho_r C_r \cdot (1 - \phi) + \rho_w C_w \cdot \phi] \cdot (t_r - t_0)} \quad (5)$$

理论最大地热资源热量回收率:

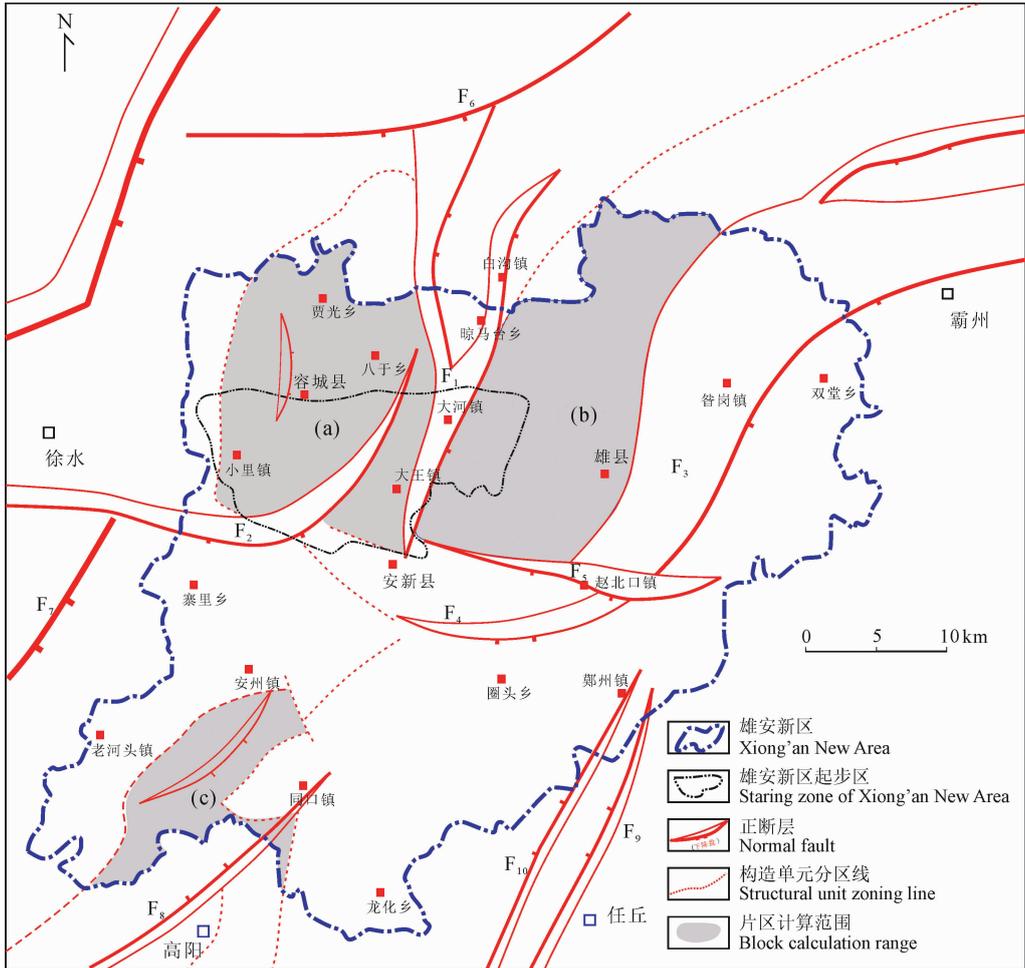


图 2 雄安新区顶面埋深在 3500m 以浅的中元古界计算范围

Fig. 2 The calculating range of the Mesoproterozoic top with the depth of 3500 m and shallow in Xiong'an New Area

(a)—容城凸起片区;(b)—牛驼镇凸起片区;(c)—高阳低凸起片区

(a)—Roncheng uplift block;(b)—Niutuozen uplift block;(c)—Gaoyang low uplift block

$$R_{E理} = \frac{E_w}{E} = \frac{\rho_w C_w \cdot \phi}{\rho_r C_r \cdot (1 - \phi) + \rho_w C_w \cdot \phi} \quad (6)$$

式中: $R_{E理}$ 为理论最大回收率; R_E 为实际回收率; Q_w 为热储中总储存水量(m^3); ΔT 为生产时间 100 年每年 120 天; q_{wh} 为单井流量(m^3/h); n 为最大生产井数。

显然对于封闭单层地热水系统 $R_E < R_{E理}$, 单层热储总储存地热水不可能被全部开采出来; 对于开放地热水系统, 理论上是可不断再生, R_E 可以趋于甚至超过 $R_{E理}$, 但至今尚未有足够的实例资料来证明。从 $R_{E理}$ 该式也可看出, 该理论值与单层热储岩石孔隙度、密度、比热和地热水的密度、比热等物性有关, 与热储面积、厚度无关。

雄安新区全区统一和分区分层参数意义及取值如表 2、表 3, 下文另有单独说明的除外。各片区、各层总地热资源量、总储存地热水量及所含热量试算结果见表 4。

表 2 雄安新区统一参数取值

Table 2 The unified parameters selection table in Xiong'an New Area

| 参数名 | 生产开发时间 ΔT | 基准温度 t_0 | 尾水温度 $t_{尾}$ | 地热水密度 ρ_w | 地热水比热 C_w | 白云岩密度 ρ_r | 白云岩比热 C_r | 白云岩热导率 k_r | 井孔半径 r_w | 井间距 D |
|------|-------------------|------------|--------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------|------------|---------|
| 参数单位 | 生产年 | °C | °C | kg/m ³ | J/(kg·°C) | kg/m ³ | J/(kg·°C) | W/(m·°C) | m | m |
| 取值 | 100(12000 天) | 15 | 25 | 980 | 4180 | 2700 | 810 | 2.28 | 0.1075 | 500 |

表 3 雄安新区分区参数取值

Table 3 The partition parameters selection table in Xiong'an New Area

| 估算单元 | 层位 | 单元范围 $A(km^2)$ | 热储平均厚度 $d(m)$ | 热储井口平均温度 $t_r(°C)$ | 热储平均孔隙度 $\varphi(\%)$ | 单井水量 $q_{wh}(m^3/h)$ | 渗透系数 $K_{渗}(m/d)$ |
|---------|-----|----------------|---------------|--------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 容城凸起片区 | Jxw | 233 | 1100 | 57 | 3.39 | 110 | 0.4 |
| | Chg | | 1000 | 72 | 2.17 | 80 | 0.4 |
| 牛驼镇凸起片区 | Jxw | 274 | 1100 | 70 | 3.7 | 110 | 0.4 |
| | Chg | | 1000 | 83 | 2.17 | 80 | 0.4 |
| 高阳低凸起片区 | Jxw | 89 | 1100 | 102 | 1.24 | 55 | 0.4 |
| | Chg | | 1000 | 110 | 0.79 | 20 | 0.15 |

表 4 雄安新区地热资源量试算结果

Table 4 The trial calculation results of geothermal resources in Xiong'an New Area

| 计算单元 | 热储层位 | 地热资源量 ($\times 10^8$ GJ) | 地热资源量折合标煤 ($\times 10^8$ t) | 储存地热水量 ($\times 10^8$ m ³) | 储存地热水热量 ($\times 10^8$ GJ) | 热水热量折合标煤 ($\times 10^8$ t) | 理论最大回收率 (%) |
|---------|------|---------------------------|------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-------------|
| 容城凸起片区 | Jxw | 242.39 | 8.28 | 86.89 | 14.95 | 0.511 | 6.2 |
| | Chg | 295.96 | 10.11 | 50.56 | 11.81 | 0.403 | 4 |
| | 层位合计 | 538.35 | 18.39 | 137.45 | 26.76 | 0.914 | 5 |
| 牛驼镇凸起片区 | Jxw | 374.25 | 12.79 | 111.5 | 25.13 | 0.858 | 6.7 |
| | Chg | 415.2 | 14.19 | 59.46 | 16.56 | 0.566 | 4 |
| | 层位合计 | 789.45 | 26.98 | 170.96 | 41.69 | 1.424 | 5.3 |
| 高阳低凸起片区 | Jxw | 188.29 | 6.43 | 12.14 | 4.33 | 0.148 | 2.3 |
| | Chg | 186.19 | 6.36 | 7.03 | 2.74 | 0.093 | 1.5 |
| | 层位合计 | 374.48 | 12.79 | 19.17 | 7.07 | 0.241 | 1.9 |
| 新区分层合计 | Jxw | 804.93 | 27.5 | 210.53 | 44.41 | 1.517 | 5.5 |
| | Chg | 897.35 | 30.66 | 117.05 | 31.11 | 1.062 | 3.5 |
| 新区总计 | | 1702.28 | 58.16 | 327.58 | 75.52 | 2.579 | 4.4 |

2.2 可采地热资源量试算

对于雄安新区, 可采地热资源量主要是可采地热水储量及所含热能。实际一个计算单元内的可采地热水储量、热量及实际回收率, 常用下述公式:

实际可采地热水量(m^3):

$$Q_{wh} = n \cdot q_{wh} \cdot \Delta T \quad (7)$$

实际可采地热水热量:

$$E_{wh} = Q_{wh} \cdot \rho_w C_w \cdot (t_r - t_{尾}) \quad (8)$$

100 年内地热水可采利用率:

$$\eta_{可用} = \frac{E_{wh}}{E_w} = \frac{nq_{wh} \Delta T \cdot (t_r - t_{尾})}{Ad\phi \cdot (\rho_r C_r \cdot (1 - \phi) + \rho_w C_w \cdot \phi)} \quad (9)$$

它与该处布井规模、单井开采量、开采时间、尾水温度等有直接关系:

$$\eta_{可用} = R_E \cdot \left(1 + \frac{1 - \phi}{\phi} \cdot \frac{\rho_r \cdot C_r}{\rho_w \cdot C_w}\right) \quad (10)$$

需要指出的是, 理论可采地热资源热量回收率与地热水可采利用率意义不同, 前者是热储总储存水量

所含热能与热储岩石固体所含热量加总储存水量所含热能二者之和之比,比值结果会比 1 小很多,永远不会趋于 1;后者是可采收的那部分水量利用的热能与总储存水量所含热能之比(一般情况下 $t_{E} \geq t_0$;是热量之比而非水量之比),比值随该区布井规模、单井开采强度、开采时间增加及尾水温度降低不断趋于 1,两者在本区数值大小关系见表 5。

表 5 雄安新区可采地热资源热量回收率与地热水可采利用率试算结果

Table 5 The trial calculation results of recovery rate of recoverable geothermal resources and water in Xiong'an New Area

| 可采地 热资源 量回收 率 R_E | 100 年地 水可采利 用率 $\eta_{可用}$ ($\phi=3.4\%$ 时) | 年均地 水可采利 用率 $\eta_{可用}$ ($\phi=3.4\%$ 时) | 100 年地 热水可采 用率 $\eta_{可用}$ ($\phi=7\%$ 时) | 年均地 热水可 采利用 率 $\eta_{可用}$ ($\phi=7\%$ 时) |
|------------------------------|---|--|---|---|
| 1% | 16.2% | 0.162% | 8.1% | 0.081% |
| 1.5% | 24.3% | 0.243% | 12.1% | 0.121% |
| 2% | 32.4% | 0.324% | 16.2% | 0.162% |
| 2.5% | 40.5% | 0.405% | 20.25% | 0.203% |
| 3.1% | 50.2% | 0.502% | 25.1% | 0.251% |
| 5% | 80.9% | 0.809% | 40.45% | 0.405% |
| 6.2% | 100.2% | 1.002% | 50.2% | 0.502% |
| 10% | 161.7% | 1.617% | 80.9% | 0.809% |
| 15% | 242.5% | 2.425% | 121.4% | 1.214% |

试算结果表明,当平均孔隙度为 3.4% 时,可采地热资源量回收率为 1% 时,100 年地热水可采利用率为 16.2%;可采地热资源量回收率为 3.1% 时,100 年地热水可采利用率约为 50%;可采地热资源量回收率为 15% 时,100 年地热水可采利用率为 242.5%。

当平均孔隙度为 7%、可采地热资源量回收率 15% 时,100 年地热水可采利用率为 121.4%,与平均孔隙度为 3.4% 相比,相同地热资源量回收率对应的 100 年地热水可采利用率降低,显然,这个 100 年地热水可采利用率降低不是绝对可利用的水热量少了,而是总储存的地热水热量变多了,而显得利用率降低了。

从表中也可看出,国家《地热资源评价方法》(DZ40—1985)规定热储是大型沉积盆地碳酸盐岩裂隙的地热田开发 100 年 R_E 值 15%,这个规定值明显偏高,这也与 Zhao Jing et al. (2008) 的结论一致。对比该结果和表 4,本区最大单层热储牛驼镇雾迷山组的理论最大回收率值 6.7%,对应 100 年地热水可采利用率 100%。借鉴石油采收率,特别是碳酸盐岩油藏采收率来看,这是很难达到的。

裂隙型碳酸盐岩油藏采收率一般在 24%,溶蚀

晶洞和混合型碳酸盐岩油藏采收率可达 40% (Zhang Dongyu, 2006)。Nathenson et al. (1975) 认为在回注条件下,一般可采热量可以达到总储存热水量的 50% 左右。

据此估计,在保守估计情况下,雄安新区 100 年地热水可采利用率为 15%,对应可采地热资源量回收率约 1%;乐观估计 100 年地热水可采利用率为 50%,对应可采地热资源量回收率约 3.1%;最佳估计 100 年地热水可采利用率为 25%,对应可采地热资源量回收率约 1.6%。

2.2.1 布井规模

100 年内可采地热水量按(7)式、可采地热水热量按(8)式、地热水实际可采利用率按(9)式计算,前未述及参数按下述计算:以目前生产井间距 D 一般为 500m 计,单井控制面积按正方形计 0.25 km²,在不回注条件下,最大可能布井数目由片区范围 A 与 0.25 的比值初步确定,扣除地上地下各种建筑、道路、管线、水面等因素影响后,在容城凸起片区、牛驼镇凸起片区、高阳低凸起片区,面积允许最大可能布井数分别为 825 口、997 口、258 口。在“三采两注”情形下,则面积允许最大可能生产井布井数目 n 分别为 495 口、598 口、155 口,各片区各层单井开采量按表 3 计,结果如表 6。

表 6 雄安新区按面积允许最大可能生产井布井数 100 年采收地热水试算结果

Table 6 The trial calculation results of recoverable geothermal water for 100 years according to the maximum possible number of wells allowed by area in Xiong'an New Area

| 计算单元 | 热储 层位 | 总储存地 热水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) | 采收地 热水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) | 总储存地 热水量的 50% ($\times 10^8 \text{ m}^3$) |
|---------|----------|--|---|---|
| 容城凸起片区 | Jxw | 86.89 | 156.82 | 43.45 |
| | Chg | 50.56 | 114.05 | 25.28 |
| 牛驼镇凸起片区 | Jxw | 111.5 | 189.45 | 55.75 |
| | Chg | 59.46 | 137.78 | 29.73 |
| 高阳低凸起片区 | Jxw | 12.14 | 24.55 | 6.07 |
| | Chg | 7.03 | 8.93 | 3.515 |

计算结果各片区各层可采地热水量是各片区各层储存的总地热水量的 1.3~2.3 倍,这说明在当前流量、开采 100 年每年 120 天、各片区边界完全封闭、所有水全部被开采的前提下,按这个最大可能生产井布井数目开采,各片区开采不了 100 年,最多只能分别开采约 55 年、59 年、49 年。而我们知道,所有水全部被开采是不可能的。

为了满足 100 年的开采寿命,单井流量仍按表 3 计,按乐观估计总储存热水量的 50% 左右都能被

开采出来,因为本区是半封闭地热系统,随着生产开发的进行,本区以外的热水会不断流入补充,只要补充量达到一定水平,百年累计开发量是有可能达到甚至超过总储水量的50%。基于该假定条件,可以算出各片区雾迷山组目的层最多分别只能布生产井137口、176口、38口,高于庄组目的层最多分别只能布生产井110口、129口、61口。

出于最大经济性目的,在同一片区的两层,一口井可同时钻穿两层,两层产量可叠加。故乐观估计下,容城凸起片区、牛驼镇凸起片区可布最大经济性生产井数目 n 为216口、270口,每口井钻穿两层产量共 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 、高阳低凸起片区高于庄组目前埋深过深开发不经济,只以雾迷山组计布生产井38口,每口井产量 $55\text{ m}^3/\text{h}$;按最佳估计,则各片区最多布生产井数目分别为108口、135口、19口。

2.2.2 单井产水量

国家目前初步规定,雄安新区地热开发100年内雾迷山组静水位不能低于150m,本区碳酸盐岩溶裂隙地热水动力条件属半开启半封闭承压区和开启承压区(Zhou Ruiliang et al., 1987, 1989; Yan Dunshi et al., 2000),因此可以根据 Handush (1960)提出的最大允许降深法,把热储概化为均质、各向同性、等厚、各处初始压力相等的无限(或存在直线边界)承压含水层,进行单井流量抽水,在规定时间内,以恒定的流量开采使热储水位降至最大允许深度,主要含水层中压力降深 Δz 与抽水时间及离抽水井中心距离的表达式可按非稳定流 Theis 公式表达。获得单井流量后,乘以按地热区所能部署最大数目的开采井数,即获得该区地热水最大可采量。为了方便计算,这里采用 Zhang Dezhong et al. (2018)等使用的近似公式:

$$q_{wh} = \frac{2\pi \cdot T_d \cdot \Delta z}{\ln \frac{0.473R}{r_w}} \quad (11)$$

如果按照承压含水层稳定流抽水试验公式(地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队,1978):

$$q_{wh} = \frac{T_d \cdot \Delta z}{0.3661g \frac{R}{r_w}} \quad (12)$$

按同一套参数计算,式(12)的结果约是式(11)的90%。式中: q_{wh} 为单井采水量(m^3/d); T_d 为导水系数(m^2/d),按 $T_d = K_{\text{滲}} \cdot h$ 计算, $K_{\text{滲}}$ 为渗透系数(m/d); h 为热储裂隙层厚度(m)(即热储有效厚度),各片区雾迷山组取360m,高于庄组取220m; Δz 为单井水位降深(m),为了统一计算,各片区两

层位100年降深都分别按70m、60m、50m、40m、35m、30m试算; r_w 为井孔半径,本区为0.1075m; R 为单井开采影响半径,是井间距 D 的1/2,为250m。

从单井试算结果(表7)可看出,渗透系数0.4时,如果裂隙层厚350m、百年降深30m,则单井最大水量为 $157\text{ m}^3/\text{h}$;如果裂隙层厚200m、百年降深30m,则单井最大水量为 $90\text{ m}^3/\text{h}$ 。如果渗透系数0.15、裂隙层厚220m、百年降深30m,则单井最大水量为 $37\text{ m}^3/\text{h}$ 。显然,如果降深增加,单井最大水量更大,目前各片区各层已开发单井水量都小于百年降深30m的水量。

表7 雄安新区不同裂隙层厚不同最大允许降深单井水量(m^3/h)试算结果

Table 7 The trial calculation results (m^3/h) of single well water flowrate with different maximum allowable drawdown and fracture layer thickness in Xiong'an New Area

| 不同裂隙层厚 | 降深 70m时 | 降深 60m时 | 降深 50m时 | 降深 40m时 | 降深 35m时 | 降深 30m时 |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $K_{\text{滲}}=0.4$ | | | | | | |
| 裂隙层厚 100m | 105 | 90 | 75 | 60 | 52 | 45 |
| 裂隙层厚 200m | 209 | 179 | 150 | 120 | 105 | 90 |
| 裂隙层厚 300m | 314 | 269 | 224 | 179 | 157 | 135 |
| 裂隙层厚 350m | 366 | 314 | 262 | 209 | 183 | 157 |
| 裂隙层厚 360m | 377 | 323 | 269 | 215 | 188 | 161 |
| 裂隙层厚 400m | 419 | 359 | 299 | 239 | 209 | 179 |
| 裂隙层厚 500m | 524 | 449 | 374 | 299 | 262 | 224 |
| 裂隙层厚 900m | 942 | 807 | 673 | 538 | 471 | 404 |
| $K_{\text{滲}}=0.15$ | | | | | | |
| 裂隙层厚 100m | 39 | 34 | 28 | 22 | 20 | 17 |
| 裂隙层厚 200m | 79 | 67 | 56 | 45 | 39 | 34 |
| 裂隙层厚 220m | 86 | 74 | 62 | 49 | 43 | 37 |
| 裂隙层厚 300m | 118 | 101 | 84 | 67 | 59 | 50 |
| 裂隙层厚 350m | 137 | 118 | 98 | 79 | 69 | 59 |
| 裂隙层厚 400m | 157 | 135 | 112 | 90 | 79 | 67 |
| 裂隙层厚 500m | 196 | 168 | 140 | 112 | 98 | 84 |
| 裂隙层厚 900m | 353 | 303 | 252 | 202 | 177 | 151 |

以百年降深30m单井最大水量 $157\text{ m}^3/\text{h}$ 计算可采水热量,若按最大经济性生产井可能布井数目 n 取值,显然计算的可采地热水必定超过计算范围内乐观估计可采地热水量,因为前文各片区各层单井产量在满足乐观估计时最大水量不过 $110\text{ m}^3/\text{h}$,据此反过来可知,片区按目前单井水量和乐观估计最大经济生产井布井数开采100年,可以确保百年静水位不低于150m的国家初步规定,若按最佳估计下的最大经济生产井布井数,就更没有问题。

该结果是以均质、各向同性为假设条件的模型计算结果。事实上,我们知道碳酸盐岩很难遇到均质、各向同性条件,大部分情况下是非均质、各向异

性的,在某个主方向孔渗最高、在与之垂直的方向上孔渗最低,但目前在本区不具备做三维水热模拟条件下,该结果还是很有参考意义的。

2.2.3 热平衡

上述单井产量主要是从水量的角度估算的,国家目前初步规定雄安新区地热开发 100 年内除了静水位不能低于 150m 外,还规定了 100 年内整个热储温度下降不能超过 2℃,所以还需从热量平衡角度估算单井产量和可采量。

100 年内允许开采的热量:

$$E_{允} = A[d\rho_r C_r(1-\phi) + (\phi d + \mu_e H)\rho_w C_w] \cdot \Delta t \approx A \cdot d[\rho_r C_r(1-\phi) + \rho_w C_w \phi] \cdot \Delta t \quad (13)$$

其中 Δt 为百年允许的热储温度下降量,为 2℃;按照热平衡原理,这些热储损失热量 $E_{允}$ 全部要以地热水量 Q_{wh} 所利用的热能 $E_{水用}$ 体现,即:

$$E_{水用} = E_{允} = Q_{wh} \cdot \rho_w C_w \cdot (t_r - t_{尾}) \quad (14)$$

$$Q_{wh} = \frac{E_{水用}}{\rho_w C_w \cdot (t_r - t_{尾})} =$$

表 8 雄安新区各片区热平衡法允许可采地热水估算结果

Table 8 The estimation of recoverable geothermal water allowed by thermal balance method in various zones in Xiong'an New Area

| 计算单元 | 热储层位 | 总储存热水水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) | 总储存热水热量 ($\times 10^8 \text{ GJ}$) | 允许最大开采热量 ($\times 10^8 \text{ GJ}$) | 允许最大开采热水水量 (尾水 25℃) ($\times 10^8 \text{ m}^3$) | 允许最大开采热水水量 (尾水 15℃) ($\times 10^8 \text{ m}^3$) |
|---------|------|--|---|--|---|---|
| 容城凸起片区 | Jxrw | 86.886 | 14.949 | 11.54 | 88.05 | 67.09 |
| | Chg | 55.62 | 12.531 | 10.38 | 56.33 | 44.47 |
| 牛驼镇凸起片区 | Jxrw | 101.38 | 22.841 | 13.61 | 73.83 | 60.4 |
| | Chg | 59.46 | 16.562 | 12.21 | 51.4 | 43.84 |
| 高阳低凸起片区 | Jxrw | 12.13 | 4.33 | 4.33 | 13.72 | 12.15 |
| | Chg | 7.73 | 3.01 | 3.92 | 11.26 | 10.07 |

2.3 开发参数——井距与热突破时间及单井最大回注量评估

对同样地热系统,回注与不回注条件,水热损失表现不一样。在回注条件下,热量和水量一起损失,尤其是相对较封闭的系统;在回注条件下,热量损失与不回注时一样大,水量若是百分之百回注则没有损失,但尾水回注会造成回注端温度明显下降。因此,在回注条件下,会导致可能影响地热田生产寿命的问题——热突破。从整体看,回注是以降低相同时间内开发量为条件,延长整个地热田开采寿命,做好热突破预防非常必要。

在回注条件下,为了防止产生“热突破”,生产井和回注井之间保持合理井距是个非常关键的问题。一年之中,在雄安四个月生产,八个月用来恢复,合理的井距可以不影响生产井正常生产,甚至有时间让回注端热储温度有所恢复。为了判断井距是否合

$$\frac{A \cdot d \cdot [\rho_r C_r(1-\phi) + \rho_w C_w \phi] \cdot \Delta t}{\rho_w C_w \cdot (t_r - t_{尾})} \quad (15)$$

各参数结果如前,计算结果见表 8。

从表 8 中看出,在目前各片区各层取现有平均孔隙度值及无论尾水取 25℃ 还是 15℃,热储 2℃ 的提取热量都比乐观估计总储存热水量的 50% 所含热量大,当尾水为 25℃ 时甚至比总储存水量全部还大,显然,要使热储温度降 2℃ 的热被全部提取,本区的热水资源量不够,甚至除牛驼镇凸起片区外总储存热水量即便 100% 被开采也不够。如果尾水温度取基准温度 15℃ 时,水量除了高阳低凸起片区外,总储存水量的 54% ~ 87% 将被开采,这么大的总储存水量能否被开采出来目前是值得怀疑的。反过来说,各片区各层在乐观估计下,即可开采水量不超过总储存水量的 50%,可确保开采 100 年热储温度下降最大不超过 1.7℃,也符合国家做出的雄安新区地热开发 100 年内整个热储温度下降不能超过 2℃ 的初步规定。

理,需要计算井距、回注冷水温度等参数随生产回注量、生产回注时间等参数的变化值。

这里假设岩层模型为上下隔水不隔热、水热水平方向对流的均厚热储对井系统模型。我们在 Gringartent et al. (1975) 提出的对井系统临界井间距公式(16)基础上,推出热突破临界时间公式(17)和热突破临界回注量公式(18):

$$D = \left\{ 2 \cdot q_{wh} \cdot \Delta T / \left[\left(\varphi + (1-\varphi) \frac{\rho_r C_r}{\rho_w C_w} \right) \cdot h + \left(\left(\varphi + (1-\varphi) \frac{\rho_r C_r}{\rho_w C_w} \right)^2 \cdot h^2 + 0.72 \frac{k_r \rho_r C_r}{(\rho_w C_w)^2} \cdot \Delta T \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \quad (16)$$

$$\text{令 } Y = \frac{k_r \rho_r C_r}{(\rho_w C_w)^2}, U = \left[\varphi + (1-\varphi) \frac{\rho_r C_r}{\rho_w C_w} \right] \cdot h, \text{ 有:}$$

$$\Delta T = 0.18 \frac{YD^4}{q_{wh}^2} + \frac{UD^2}{q_{wh}} \quad (17)$$

$$q_{wh} = \frac{UD^2}{2 \cdot \Delta T} + \frac{D^2 (U^2 + 0.72Y \cdot \Delta T)^{1/2}}{2 \cdot \Delta T} \quad (18)$$

式中, D 为生产井和回注井之间距离, 常量时取 500m; q_{wh} 为回注井水量, 对于“三采两注”方案因最大生产井产量为 110m³/h, 常量时取 165 m³/h; ΔT 为生产回注时间, 常量时 12000 天换算成小时。 h 为热储层有效厚度(即裂隙层厚度); 其他参数单位取国际单位制。

由于 Y 值量级在 10^{-7} , 即便与时间相乘仍然很小, 可对上式做简化:

热突破临界井间距简化公式:

$$D_{\text{简}} = \left(\frac{q_{wh} \cdot \Delta T}{U + \alpha} \right)^{1/2} \quad (19)$$

热突破临界时间简化公式:

$$\Delta T_{\text{简}} = \frac{D^2 \cdot (U + \alpha)}{q_{wh}} \quad (20)$$

热突破临界回注量简化公式:

$$q_{wh\text{简}} = \frac{D^2 \cdot (U + \alpha)}{\Delta T} \quad (21)$$

式中: $\alpha \in [2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-4}]$, 当 h 较大时选偏小值, h 较小时选偏大值, 一般取 8×10^{-5} 即可。

实际上还可以按岩石类型对一般式 $U = \left[\varphi + (1 - \varphi) \frac{\rho_r C_r}{\rho_w C_w} \right] \cdot h$ 做简化:

白云岩: 孔隙度 $\varphi \in [0.5\%, 15\%]$, $U = (0.534 + 0.466\varphi) \cdot h \approx 0.55h$;

灰岩: 孔隙度 $\varphi \in [0.5\%, 15\%]$, $U = (0.532 + 0.468\varphi) \cdot h \approx 0.55h$;

砂岩: 孔隙度 $\varphi \in [2\%, 25\%]$, $U = (0.506 + 0.494\varphi) \cdot h \approx 0.58h$ 。

在计算时既可以选 U 的一般式, 也可选 U 的分类等式。

从公式可看出, 在热突破距离、时间、与回注量计算中, 回注量、回注时间、有效孔隙度、有效热储层厚度、岩石密度、岩石比热、岩石热传导系数、水密度、水比热有直接关系。该公式模型隐含回注水温不低于应用地区的基准温度。

为了比较简化式与原式及推出式结果精度, 不特定说明参数取前文常量, 白云岩、灰岩、砂岩孔隙度分别取 4%、4%、15%, 热储层有效厚度 h 取 350m, α 取 8×10^{-5} , 比较结果如表 9。

表 9 对井系统热突破临界井间距、时间、回注量原式推出式及简化式结果

Table 9 The calculation results of original expressions deduction and simplified expressions for critical well spacing, time and recharging flowrate for thermal breakthrough of pair-well system

| 岩石类型 | D (m) | $D_{\text{简}}$ (m) | $\frac{ D - D_{\text{简}} }{D}$ | ΔT (年) | $\Delta T_{\text{简}}$ (年) | $\frac{ \Delta T - \Delta T_{\text{简}} }{\Delta T}$ | q_{wh} (m ³ /h) | $q_{wh\text{简}}$ (m ³ /h) | $\frac{ q_{wh} - q_{wh\text{简}} }{q_{wh}}$ |
|------|---------|--------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------|---|------------------------------|--------------------------------------|--|
| 白云岩 | 496 | 496 | 0~0.5% | 101.7 | 101.7 | 0~0.5% | 167.8 | 167.8 | 0~0.5% |
| 灰岩 | 497 | 497 | 0~0.5% | 101.4 | 101.4 | 0~0.5% | 167.3 | 167.3 | 0~0.5% |
| 砂岩 | 484 | 484 | 0~0.5% | 106.8 | 106.8 | 0~0.5% | 176.2 | 176.2 | 0~0.5% |

试算结果表明, 回注量 q_{wh} 为 165 m³/h、时间为 100 生产年时, 热突破距离在 496m 左右; 回注量 q_{wh} 为 165 m³/h、井间距 500m 时, 热突破距离在 102 个生产年左右; 井间距 500m、时间为 100 个生产年时, 单井回注量最大为 168 m³/h。

简化式结果与原式及推出式相比, 精度也很高, 用它们粗略评估开发井网是否科学合理计算非常方便。

针对雄安新区白云岩热储孔隙度取 3.39%, 设置了 3 类场景:

场景一: 回注水量 $q_{wh} = 165\text{m}^3/\text{h}$ 、 $150\text{m}^3/\text{h}$ 、 $110\text{m}^3/\text{h}$ 、有效厚度分别为 100m、200m、300m、400m、500m, 开采回注时间 ΔT 分别按 20 年、30 年、50 年、80 年、100 年, 计算了热突破临界井距 D , 结果见图 3。

试算结果表明, 有效热储厚度在 300m 以上、回

注量 110m³/h、开采回注 100 年, 热突破临界井距 437m; 热储有效厚度在 400m 以上、回注量即便在 165m³/h、开采回注 100 年, 热突破临界井距 465m, 仍小于我们目前的实际井间距 500m。

由于各片区估计雾迷山组有效厚度不低于 360m, 高于庄组有效厚度不低于 220m。如果同时向两层回注且单井回注量不超过 165m³/h, 那目前的井间距参数是合理, 按当下回注量 100 年内不会产生热突破。但如果单独向高于庄组回注、回注量超过 110m³/h, 那 90 年前后就会发生热突破。

场景二: 为了了解井距和单井回注量对热突破临界时间的影响, 在孔隙度取 3.39%、有效厚度 350m 时, 按井距 D 分别取 300m、400m、500m、600m 及回注量 q_{wh} 取 80m³/h、90m³/h、110m³/h、150m³/h、165m³/h 计算了热突破时间, 结果见图 4。

试算结果表明, 有效厚度 350m 时, 井距 300m

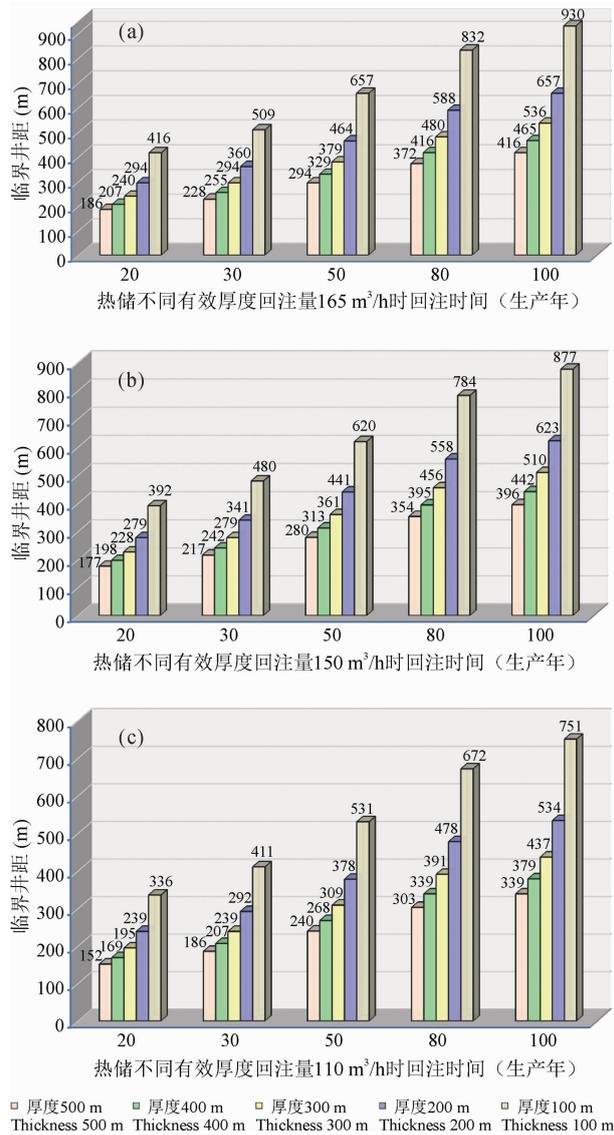


图 3 热储不同有效厚度不同回注量不同回注时间的临界井距

Fig. 3 Critical well spacing for different effective thickness, different recharging flowrate and time of thermal reservoir

(a)—回注量 165m³/h; (b)—回注量 150m³/h; (c)—回注量 110m³/h
(a)—Recharging flowrate 165 m³/h; (b)—recharging flowrate 150 m³/h; (c)—recharging flowrate 110 m³/h

回注量即便 80m³/h,也只能开采 75 年;井距 400m 回注量 110m³/h,只能开采 97 年;井距 500m、600m 时回注量在 165m³/h 都可以开采 101 年以上。

场景三:孔隙度取 3.39%、有效厚度 350m,井距 D 分别取 300m、500m、600m 及开采回注时间 ΔT 分别按 20 年、30 年、50 年、80 年、100 年时,计算了热突破临界回注量 q_{wh} ,结果见图 5 所示。

试算结果表明,有效厚度 350m 时,要保证能开采 100 年,井距在 500m 及以上时,回注量不能超过

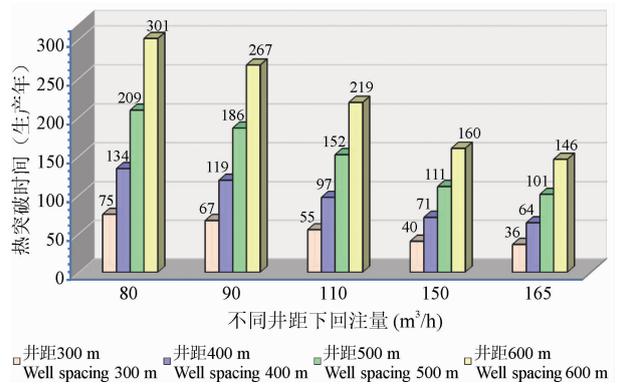


图 4 热储有效厚度 350m 时不同井距不同回注量时热突破临界时间

Fig. 4 Critical time of thermal breakthrough for 350m effective thickness of thermal reservoir with different well spacing and different recharging flowrate

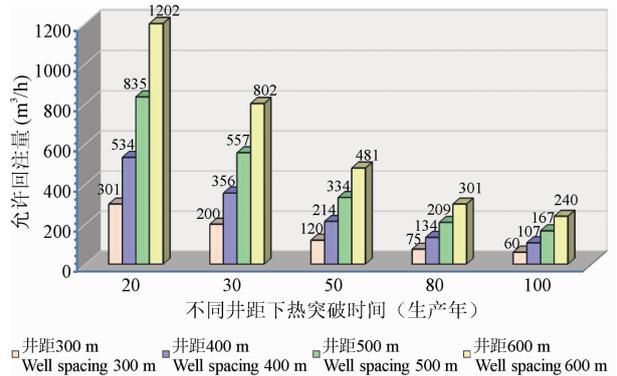


图 5 热储有效厚度 350m 时不同井距不同回注时间时的临界回注量

Fig. 5 Critical recharging flowrate at 350m effective thickness of thermal reservoir at different well spacing and recharging time

167m³/h;井距在 400m 时,回注量不能超过 107m³/h。目前 J_{xw} 有效厚度 360m,回注量 $Q=165m³/h$ 小于临界允许回注量 167m³/h,开采回注 100 年,不会产生热突破,理论上 152 年后会产生热突破。从这些结果可以估计出,按我们目前的生产回注参数,计算的可采地热水在 100 年内被开发利用是安全的。

上述场景是假设研究区储层物性均匀分布的情况下,如果遇到断裂或岩溶异常发育一连通性特好的情况,即其他条件不变,有效孔隙度增大时,根据公式(16)或(19),热突破临界距离会变小。

为了进一步定量说明问题,分别取回注水量 q_{wh} 为 165m³/h、150m³/h、110m³/h、80m³/h,有效厚度分别为 200m、350m,孔隙度分别取可能有实际意义的值 0.5%、7%、12%、15%、25%,开采回注时间 ΔT 按 100 年,计算了热突破临界井距 D ,结果见图 6。

从计算结果可知,不论有效厚度是 200m 还是

350m,随着孔隙度7%增大到25%,临界井距数值单调减小,减小幅度基本在25~50m;相同孔隙度、回注量越小时,临界井距越小。对于同样回注量,有效储层厚度越大,临界井距越小,如回注量为165m³/h、孔隙度为25%时,有效储层厚度200m时临界井距为604m,有效储层厚度350m则临界井距为456m。这说明,在回注量、回注时间、有效孔隙

度、有效热储厚度、岩石密度、岩石比热、岩石热传导系数等决定热突破临界距离的参数中,有效热储厚度是非常重要的因素,其次是回注量和回注时间,这从图3也可得出相同的认识。有效热储厚度的变化比孔隙度的变化引起的临界井距值影响大很多。具体在雄安新区,如果平均有效孔隙度从3.39%变为7%,相关结果见表10。

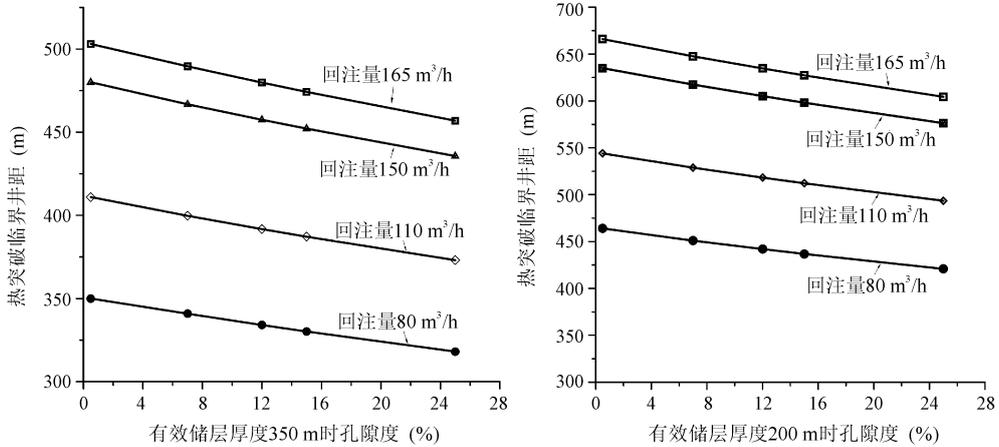


图6 热储有效厚度350m (a)和有效厚度200m (b)不同回注量不同回注时间的临界井距
Fig.6 Critical well spacing for effective thickness of reservoir is 350 m (a) and 200 m (b), different recharging flowrate and time of thermal reservoir

表10 雄安新区对井系统不同有效储层厚度不同回注量时热突破临界井间距

Table 10 Critical well spacing for different effective thickness, different recharging flowrate and time of pair-well system for thermal breakthrough in Xiong'an New Area

| 有效储层厚度(m) | 热突破临界井距(m) | | | | | | | |
|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| | 回注量 165 m ³ /h 时 | | 回注量 150 m ³ /h 时 | | 回注量 110 m ³ /h 时 | | 回注量 80 m ³ /h 时 | |
| | $\phi = 3.39\%$ | $\phi = 7\%$ | $\phi = 3.39\%$ | $\phi = 7\%$ | $\phi = 3.39\%$ | $\phi = 7\%$ | $\phi = 3.39\%$ | $\phi = 7\%$ |
| Jxw 360m | 490 | 483 | 467 | 460 | 400 | 394 | 341 | 336 |
| Chg 220m | 627 | 617 | 598 | 589 | 512 | 504 | 436 | 430 |
| Jxw+Chg 580m | 386 | 380 | 368 | 363 | 315 | 311 | 269 | 265 |

结果显示,对于雄安新区的白云岩热储,开采回注100年,有效储层厚度和回注量也是对热突破临界距离值最有影响的参数,孔隙度增大,也即热储渗透性变好,同条件下热突破临界井距变小。蓟县系雾迷山组热储,其有效厚度360m左右,回注量165m³/h时,临界井距490m减小为483m,各层都是类似规律,孔隙度越大,临界井距越小。

这表明,在本区,单独采注Jxw,要保持回注量165m³/h的话,井间距要大于490m,目前500m的井间距是合理的;单独采注Chg,保持回注量110m³/h的话,井间距要大于512m,如果保持500m井间距,则单井回注量不超过100m³/h为宜;若是两层合采合注,回注量165m³/h时,热突破临界井距386m,目前实际500m的井间距是合理的。

3 讨论

本文评估的雄安新区地热总资源量是针对区内顶界埋深在3500m以浅的中元古界,事实上主要是对蓟县系雾迷山组顶界估算的。对于顶界埋深在3500m以下的没有涉及,顶界埋深在4000m、4500m的中元古界,在今后二十年内开采经济性会越来越高的。

区内的总储存地热水水量及热水所含热量的计算是基于目前孔隙度统计结果,在这个前提下,乐观估算认为100年可采地热水水量及热水所含热量是总储存热水量的50%,如果供热能耗暂定以每平方米每年0.32GJ计,可供暖面积见表11。

计算结果表明,乐观估算100年可采地热水量163.79×10⁸m³、可采地热水热量37.76×10⁸GJ,

表 11 雄安新区 100 年可采地热水量及热量乐观估算结果

Table 11 The optimistic trial calculation results of 100-year recoverable geothermal water volume and heat in Xiong'an New Area

| 计算单元 | 热储层位 | 总储存地热水量 ($\times 10^8$ GJ) | 总储存热水热量 ($\times 10^8$ GJ) | 可采地热水量 ($\times 10^8$ m ³) | 可采地热水热量 ($\times 10^8$ GJ) | 可采热水热量折合 标煤($\times 10^8$ t) | 年供暖面积 ($\times 10^4$ m ²) |
|---------|------|--------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|---|
| 容城凸起片区 | Jxw | 86.89 | 14.95 | 43.445 | 7.475 | 0.511 | 2336 |
| | Chg | 50.56 | 11.81 | 25.28 | 5.905 | 0.403 | 1845 |
| | 层位合计 | 137.45 | 26.76 | 68.725 | 13.38 | 0.914 | 4181 |
| 牛驼镇凸起片区 | Jxw | 111.5 | 25.13 | 55.75 | 12.565 | 0.858 | 3926 |
| | Chg | 59.46 | 16.56 | 29.73 | 8.28 | 0.566 | 2588 |
| | 层位合计 | 170.96 | 41.69 | 85.48 | 20.845 | 1.424 | 6514 |
| 高阳低凸起片区 | Jxw | 12.14 | 4.33 | 6.07 | 2.165 | 0.148 | 676 |
| | Chg | 7.03 | 2.74 | 3.515 | 1.37 | 0.093 | 428 |
| | 层位合计 | 19.17 | 7.07 | 9.585 | 3.535 | 0.241 | 1104 |
| 新区分层合计 | Jxw | 210.53 | 44.41 | 105.265 | 22.205 | 1.517 | 6938 |
| | Chg | 117.05 | 31.11 | 58.525 | 15.555 | 1.062 | 4861 |
| 新区总计 | | 327.58 | 75.52 | 163.79 | 37.76 | 2.579 | 11799 |

排除高阳低凸起高于庄组热水储量后,新区现有年均可采地热水资源仍可满足 1.137 亿平方米建筑物供暖。保守估算是乐观估算结果的 30%,新区现有年均可采地热水资源可满足 3411 万平方米建筑物供暖。最佳估算是乐观估算结果的 50%,新区现有年均可采地热水资源可满足 5685 万平方米建筑物供暖。随着智慧能源与先进保温技术在雄安的应用,单位能耗可能会下降到每平方米每年 0.2 GJ,届时年均可采地热水资源可满足的建筑物供暖面积将比本计算结果还要多 0.6 倍。

基于乐观估计、钻井经济性,各片区允许最大生产井布井数目 n 分别为 216、270、38 口,合计 524 口,在当前单井产量下可以开采 100 年以上。据 Wu Aimin et al. (2018),雄安新区已有岩溶储层生产井 153 口,这意味着在现有岩溶储层单井产量和井间距 500m 条件下,乐观估计还能在顶面埋深 3500m 以浅的岩溶储层布生产井 371 口,最佳估计则只能再布生产井 109 口,当然,如果现有开发井产量没有 110m³/h,可布最大生产井数还可略增加。

在评估开发参数中推出的热突破临界井间距筒化公式中井间距的 1/2,即为单井开采权益保护半径。根据公式(19):

$$D_{\text{筒}} = \left(\frac{q_{\text{wh}} \cdot \Delta T}{U + \alpha} \right)^{1/2}, \text{其 } 1/2 \text{ 为 } R = D_{\text{筒}} / 2 = \sqrt{\frac{q_{\text{wh}} \cdot \Delta T}{4U + 4\alpha}}, \text{ } \alpha \text{ 相对于 } 4U \text{ 很小可略去,分子分母同乘以 } f \text{ 有:}$$

$$R = D_{\text{筒}} / 2 = \sqrt{\frac{q_{\text{wh}} \cdot \Delta T}{4U + 4\alpha}} \approx \sqrt{\frac{\Delta T \cdot q_{\text{wh}} \cdot f}{4[(f-1) \cdot \varphi + 1] \cdot h}} \quad (22)$$

式中: $f = \frac{\rho_w C_w}{\rho_r C_r}$,各参数意义和单位见前文。可以看出该式与《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)中不回注单井开采权益半径估算公式(23)有相同的形式:

$$R' = \sqrt{\frac{36500 \times 24q_{\text{wh}} \cdot f}{0.15\pi \cdot h}} \quad (23)$$

式中 36500 为开采或回注时间(天),为了统一其他参数都用本文单位,该公式未介绍其来源。值得指出的是,Liu Zhiming et al. (2014)在公式(23)基础上提出了回注条件下的单井开采权益半径公式(24):

$$R'' = \sqrt{1 - \alpha' \cdot \beta} \cdot \sqrt{\frac{36500 \times 24q_{\text{wh}} \cdot f}{0.15\pi \cdot h}} \quad (24)$$

式中: $\alpha' = \frac{t_{\text{尾}} - t_0}{t_r - t_0}$, $\beta = \frac{q_{\text{wh尾}}}{q_{\text{wh抽}}}$

公式(24)是错误的。既然是回注条件下,如果尾水温度 $t_{\text{尾}}$ 与基准温度 t_0 相等,这在现实开发中是可见的,则 α' 为 0,故 $R'' = R'$,这回注条件下与不回注条件单井开采权益半径一致,那回注与不回注没有区别,故该公式错误,由此错误公式计算的回注条件下的可采储量也是不可靠的。

开发参数中井间距、开采时间、单井产量在回注条件下的合理性评估结论是基于对井模型做出的计算,群井系统会有井间干扰等多种因素影响,实际结果一般比对井模型计算结果偏小,目前实际针对雾迷山组热储的井间距、单井产量等开发参数有很高的合理性。

新区内所有可采地热水量及热量结果,都是基于目前各片区各层取现有平均孔隙度值估算的。随着更多井的热储孔隙度资料被统计,如果各片区各层更可靠的平均孔隙度值如果是现有取值的 1.5~2 倍,那么新总储存水量、新可采地热水量也将是现

在估算的1.5~2倍;在井间距500m、单井产量保持现有值的情形下,各片区最大经济性生产井布井数可以增加0.5~1倍,年均建筑物供暖面积也可增加0.5~1倍,这些新参数仍可保证符合国家做出的雄安新区地热开发100年内静水位不低于150m、整个热储温度下降不超过2℃的初步规定。

4 结论

(1)地热单元的理论热能最大回收率与单层热储岩石孔隙度、密度、比热和热水的密度、比热等物性有关,与热储面积、厚度无关。乐观估算实际最大回收率是理论最大回收率的一半,且实际可采地热量及回收率与生产井布井规模、单井生产量、生产开发时间、尾水温度等直接相关。

(2)雄安新区顶界埋深在3500m以浅范围的中元古界,在容城凸起片区 J_{xw} 、 Ch_g 的平均有效孔隙度分别取值3.39%和2.17%、牛驼镇凸起片区 J_{xw} 、 Ch_g 的平均有效孔隙度分别取值3.7%和2.17%、高阳低凸起片区 J_{xw} 、 Ch_g 的平均有效孔隙度分别取值1.24%和0.79%的基础上,尾水取25℃,乐观估算100年地热水可采利用率为50%情况下(即可采地热量占总储存水量的50%),可采地热量为 $163.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,可采地热水所含热量 $37.76 \times 10^8 \text{ GJ}$,折合标煤 $2.579 \times 10^8 \text{ t}$;无论实际百年地热水可采利用率是何值,同等条件下平均有效孔隙度更大,则可采地热量及相应的可利用热量更多。

(3)乐观估算下,容城凸起片区、牛驼镇凸起片区可布最大经济性生产井数目分别为216口、270口,每口井钻穿两层最大产量共 $110 \text{ m}^3/\text{h}$,高阳低凸起片区高于庄组目前埋深过深开发不经济,雾迷山组可布最大经济性生产井数目38口,每口井最大产量 $55 \text{ m}^3/\text{h}$ 。三片区合计524口;按最佳估算结果,则各片区最多布生产井数目分别为108口、135口、19口,合计374口。若各片区单井平均产量没有达到相应最大产量,井规模略可增加。如果平均孔隙度更大,单井产量和井间距不变,则布井规模可增大到与平均孔隙度变大的相同倍数。不论孔隙度是否变化,本文在乐观、最佳、保守3种状况下估算的布井规模和单井产量,均可保证符合国家对雄安新区地热开发100年内静水位不低于150m、整个热储温度下降不超过2℃的初步规定。

(4)应用对井系统模型热突破井间距公式及推出的热突破临界时间公式、临界产量公式的简化公式,经对同一套数据试算比较,其精度与原式及推出

式相比仍然很高,计算非常简单,用它们初步评估开发井网是否科学合理,非常方便。在热突破距离、时间、回注量计算中,不论哪种岩性,有效热储厚度(裂隙层厚度)是非常重要的因素,其次是回注量和回注时间,热储孔隙度(及渗透性)的影响远不及有效热储厚度的影响。雄安新区雾迷山组热储单井最大开采量 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ 、最大回注量 $165 \text{ m}^3/\text{h}$ 及井距500m的“三采两注”开发方式合理,100年内不会导致热突破;高于庄组热储有效热储厚度较薄,因此要保证500m井间距100年不发生热突破,则单独针对该储层的单井回注量不宜超过 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(5)雄安新区乐观估算100年地热水可采利用率为50%,对应可采地热量回收率约3.1%,以每平方米每年耗能0.32 GJ计,年均可满足1.137亿平方米建筑物供暖;保守估算100年地热水可采利用率为15%,对应可采地热量回收率约1%,年均可满足3411万平方米建筑物供暖;最佳估算100年地热水可采利用率为25%,对应可采地热量回收率约1.6%,年均可采地热水资源可满足5685万平方米建筑物供暖。

建议:①在雄安起步区及安置区尽快布置三维地震,采集数据弄清地下构造和地层展布形态,为储层建模进行三维地热开发模拟做基础支撑;②尽快在新区已有地热井上安装地热监测系统,并要求以后钻探的地热井全部安装地热监测系统,为新区地热合理开发做好数据支撑;③加强雄安新区及其周边地热井监管,依法强制关停所有尾水不能百分之百回注的地热井,确保雄安新区的地热水资源可持续开发。

致谢:在本文研究过程中,中国科学院地质与地球物理研究所陈林研究员、中国地质调查局水文地质环境地质研究所王婉丽博士、中国石化新星公司雄安新区项目部,提供了帮助,各位评审专家及编辑提出了建设性意见,在此一并表示诚挚的感谢!

References

- Chang Jian, Qiu Nansheng, Zhao Xianzheng, Xu Wei, Xu Qiuchen, Jin Fengming, Han Chunyuan, Ma Xuefeng, Dong Xiongying, Liang Xiaojuan. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(3): 1003~1016 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang. 1988. *Geothermics of North China*. Beijing: Science Press, 1~218 (in Chinese).
- Chen Moxiang, Huang Geshan, Zhang Wenren, Zhang Rongyan, Liu Binyi. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozhen basement protrusion of central Hebei Province. *Scientia Geologica Sinica*, 17(3): 239~252 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Deng Xiao, Wang Jun, et al. 1985. On the

- formation and accumulation of thermal water in North China Plain. *Earth Science*, 10(1):83~90 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Ji'an, et al. 1990. The characteristics of the mechanism in the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-faulted basin. *Acta Geologica Sinica*, 64(1):80~91 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Juming, Xia Sigao. 1992. Simulation of relationship between water temperature at well head and geothermal reservoir temperature by finite element method and case studies. *Scientia Geologica Sinica*, 27(1):55~65 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1994. Geothermal Resources in China-Formation Characteristics and Potential Evaluation. Beijing: Science Press, 1~260 (in Chinese).
- Chen Moxiang, Deng Xiao. 1996. The distributive characteristics of geothermal water and its nature in China. *Quaternary Sciences*, 16(2):131~138 (in Chinese with English abstract).
- Dai Minggang, Wang Xinwei, Liu Jinxia, Lei Haifei, Bao Zhidong. 2019. Characteristics and influence factors of geothermal resources in the starting and adjacent zone of Xiong'an New Area. *Chinese Journal of Geology*, 54(1):176~191 (in Chinese with English abstract).
- Gringarten A, Sauty J. 1975. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. *J. Geophys. Res.*, 80(35):4956~4962.
- Guo Shiyang, Li Xiaojun. 2013. Reservoir stratum character and geothermal resources potential of Rongcheng uplift geothermal field in Baoding, Hebei. *Chinese Journal of Geology*, 48(3):922~931 (in Chinese with English abstract).
- Hantush M. 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. *J. Geophys. Res.*, 65(11):3713~3725.
- Li Jun, Zhang Zhigang. 2018. Characteristics of geothermal resources in Jizhong depression (Hebei Region). *Journal of Hebei University of Technology*, 47(2):113~120 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhiming, Wang Guiling, Lin Wenjing. 2014. Calculation of interest protection radius of single well under condition of reinjection. *Groundwater*, 36(6):72~75 (in Chinese).
- Liu Xianchuan, Liu Shijuan, Yang Fengliang. 2018. Evaluation of geothermal resources in Gaoyang County. *Coal Technology*, 37(4):44~46 (in Chinese with English abstract).
- Nathenson M, Muffei L. 1975. Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas. In: White D, Williams D, eds. *Assessment of the geothermal resources of the United States 1975*. U. S. Geol. Survey Cir., 726:104~121.
- Su Yongqiang, Li Jun. 2018. Evaluation of geothermal resources and their potential utilization in Xiong'an New Area. *Journal of Hebei University of Technology*, 47(4):62~67 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Li Jun, Wu Aimin. 2018. A study of the thermal storage characteristics of Gaoyuzhuang Formation-A new layer system of thermal reservoir in Rongcheng uplift area, Hebei Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(5):533~541 (in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Ma Feng, Wang Guiling. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(5):523~532 (in Chinese with English abstract).
- Yan Dunshi, Yu Yingtai. 2000. Geothermal resources assessment and utilization of Beijing, Tianjing and Hebei Province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~179 (in Chinese).
- Zhang Dezhong, Ma Yunqing, Su Yongqiang. 2018. Study on the calculation of geothermal fluids recoverable quantity and the distribution law of karst geothermal reservoirs in Hebei Plain. *Geological Survey of China*, 5(2):78~85 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dongyun. 2006. EOR technology for carbonate reservoir. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 25(1):16~17 (in Chinese).
- Zhang Zhongxiang, HanJianjiang, Xu Jian, Geng Dongqing, Li Changsuo, Liu Aiguo. 2005. The calculation of exploitable resources in the layered-geothermal reservoirs of sedimentary basin. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 32(1):73~77 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing, Wang Xukai, Wan Li. 2008. The recovery rate in assessment of deep geothermal resources. *Geological Science and Technology Information*, 27(6):89~92 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Ruiliang. 1987. The activity of deep underground water in the northern part of the North China Plain and its effect on the geothermal field. *Bulletin of the 562 Comprehensive Geological Brigade Chinese Academy of Geological Sciences*, No. 6:17~35 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Ruiliang, Liu Qisheng, Zhang Jin, Yang Liqiang. 1989. The geological characteristics of high uplift type geothermal field basin Niutuozhen bedrock and its development prospect in North China rift. *Bulletin of the 562 Comprehensive Brigade of Chinese Academy of Geological Sciences*, No. 7/8:21~36 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 常健,邱楠生,赵贤正,许威,徐秋晨,金凤鸣,韩春元,马学峰,董雄英,梁小娟. 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征. *地球物理学报*, 59(3):1003~1016.
- 陈墨香. 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社, 1~218.
- 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 张容燕, 刘炳义. 1982. 冀中牛驼镇凸起地热场的特点及地下热水的开发利用. *地质科学*, 17(3):239~252.
- 陈墨香, 邓孝, 王钧, 汪集旸. 1985. 华北平原地下热水形成条件及赋存特征. *地球科学*, 10(1):91~98.
- 陈墨香, 汪集旸, 汪缙安, 邓孝, 杨淑贞, 熊亮萍, 张菊明. 1990. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制. *地质学报*, 64(1):80~91.
- 陈墨香, 张菊明, 夏斯高. 1992. 井口水温与热储层温度关系的有限元模拟及实例剖析. *地球科学*, 27(1):55~65.
- 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 1994. 中国地热资源-形成特点和潜力评价. 北京: 科学出版社, 1~260.
- 陈墨香, 邓孝. 1996. 中国地下热水分布之特点及属性. *第四纪研究*, 16(2):131~138.
- 戴明刚, 汪新伟, 刘金侠, 雷海飞, 鲍志东. 2019. 雄安新区起步区及周边地热资源特征与影响因素. *地质科学*, 54(1):176~191.
- 地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队. 1978. *水文地质手册*. 北京: 地质出版社, 1~858.
- 郭世炎, 李小军. 2013. 河北保定容城凸起地热田储层属性与资源潜力. *地质科学*, 48(3):922~931.
- 国土资源部油气资源战略研究中心等. 2014. 华北前古近系油气资源战略调查与评价. 北京: 地质出版社, 1~511.
- 李郡, 张志刚. 2018. 冀中台陷(河北区域)地热资源特征研究. *河北工业大学学报*, 47(2):113~120.
- 刘现川, 刘仕娟, 杨凤良. 2018. 高阳县地热资源评价. *煤炭技术*, 37(4):44~46.
- 刘志明, 王贵玲, 蔺文静. 2014. 地热回灌条件下单井开采权益保护半径的计算. *地下水*, 36(6):72~75.
- 苏永强, 李郡. 2018. 雄安新区地热资源评价与开发应用潜力分析. *河北工业大学学报*, 47(4):62~67.
- 王贵玲, 李郡, 吴爱民. 2018. 河北容城凸起区热储层新层系——高于庄组热储特征研究. *地球学报*, 39(5):533~541.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究. *地球学报*, 39(5):523~532.
- 阎敦实, 于英太. 2000. 京津冀油田地热资源评价与利用. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~179.
- 张德忠, 马云青, 苏永强. 2018. 河北平原地热流体可采量计算方法

- 及岩溶热储分布规律研究. 中国地质调查, 5(2):78~85.
- 张冬玉. 2006. 提高碳酸盐岩油藏采收率技术. 油气田地面工程, 25(1):16~17.
- 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. 水文地质工程地质, 32(1):73~77.
- 赵静, 王旭开, 万力. 2008. 深层地热资源评价中的回收率问题. 地质科技情报, 27(6):89~92.
- 中国国家标准化管理委员会. 2011. GB/T11615—2010 地热资源地

- 质勘查规范. 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国地质矿产部. 1985. 地热资源评价方法(DZ40—85). 北京: 地质出版社.
- 周瑞良. 1987. 华北平原北部深层地下水活动及其对地温场的影响. 中国地质科学院 562 综合大队集刊, 1987 第 6 号:17~35.
- 周瑞良, 刘琦胜, 张晶, 杨力强. 1989. 华北断陷盆地牛驼镇基岩高凸起型热田地质特征及其开发前景. 中国地质科学院 562 综合大队集刊, 第 7、8 号:21~36.

Evaluation of recoverable geothermal resources and development parameters of Mesoproterozoic thermal reservoir with the top surface depth of 3500 m and shallow in Xiong'an New Area

DAI Minggang^{*1,2)}, LEI Haifei³⁾, HU Jianguo^{1,2)}, GUO Xinfeng^{1,2)}, MA Pengpeng^{1,2)}, ZHANG Jiayun^{1,2)}

1) *Sinopec Star Petroleum Co., Ltd., Beijing, 100083*; 2) *China National Center for Geothermal Energy Development Research and Applied Technology Promotion, Beijing, 100083*; 3) *Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Xiong'an, Hebei, 071800*

* *Corresponding author; 397211924@qq.com*

Abstract

In order to scientifically and rationally develop and utilize the Mesoproterozoic geothermal energy with the top surface depth of 3500m and shallow in Xiong'an New Area, the parameters recoverable amount of geothermal resources are evaluated using recovery rate of geothermal resources, well layout scale, single well production, national permissible index of hydrothermal decline, recharging-discharging well spacing, recharge quantity and production time. The results show that the recovery rate of geothermal resources and well distribution scale are limited. At present, the Wumishan Formation has the main single well production of 110 m³/h, recharge quantity of 165 m³/h and well spacing of 500 m, all of which can meet the 100-year development life of geothermal field and meet the national permissible index of water and heat decline. The theoretical maximum thermal energy recovery of geothermal unit is related to physical properties, such as porosity, density, specific heat of the rock and density, specific heat of geothermal water in single-layer thermal reservoir, but not to the area and thickness of thermal reservoirs. The actual maximum thermal energy recovery rate is only about half of the theoretical maximum recovery, and it is directly related to the development parameters such as production well layout scale, single well production, development time and tail water temperature. The simplified formulas for evaluating the development parameters of recharging-discharging well spacing, recharge quantity and production time are much practical and easily used. In the evaluation of thermal breakthrough distance, time and recharge quantity, the effective thickness of thermal reservoir, regardless of lithology, is a very important factor, followed by recharge quantity and recharge time. Porosity and permeability impose much less influence than effective thickness. The optimistic estimation of recoverable geothermal water resources in the Xiong'an New Area accounts for 50% of the total storage hot water, i. e. 163.79×10⁸ m³, 37.76×10⁸ GJ and 2.579×10⁸ t of standard coal, which can meet the annual heating requirement of 113.7 million square meters of buildings with energy consumption is 0.32 GJ per square meter and per year. The conservative estimation takes 30% of the optimistic result; the best estimation is 50% of the optimistic estimation result and the current annual geothermal water resources can meet the demand of 56.85 million square meters for building heating. Therefore, the Xiong'an New Area will be a typical demonstration area for geothermal energy application.

Key words: geothermal reservoir; recoverable resource quantity; development parameter evaluation; Xiong'an New Area; Rongcheng uplift; Niutuozen uplift