

雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力

马峰^{1,2,3)}, 王贵玲^{1,2)}, 张薇^{1,2)}, 朱喜^{1,2)}, 张汉雄^{1,2)}, 岳高凡^{1,2)}

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061; 2) 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050061; 3) 中国地质大学(北京), 北京, 100083

内容提要:雄安新区地热条件优越,尤其是牛驼镇凸起和容城凸起具有多年的地热开发历史。容城地热田绝大部分地区适合地热的规模化开发,同时容城地区也是新区建设初期主要的规划开发区,地热资源在服务新区生态文明建设和清洁供暖方面具有重要的意义。容城地热田主要热储层包括新近系明化镇组孔隙型砂岩热储,寒武系、蓟县系以及长城系基岩热储。蓟县系为区域主要的热储层,埋深700~3000 m,厚度500~2000 m,热储温度50~98 ℃,具有水量大、水质好、储层易于回灌的特点;长城系热储在凸起中心部位仍具有较大的开采潜力,D14 钻孔显示长城系热储单位涌水量达到2.6 m³/h·m,井口水温63.7 ℃,可作为新区的后备资源。容城地热田按照主要热储层上部覆盖地层构造差异由西向东分别为西部斜坡区、中央隆起区、东部断陷区,由西向东热储开发潜力逐渐变大。本文通过热储法计算了容城地热田年地热可采资源量折合标准煤76.3万t;数值法模拟了水位下降不低于150 m,开采井温度下降小于2 ℃条件下,年地热可采资源量折合标准煤81.09万t,两者结果相近,评价结果可为容城地热资源规划开发提供参考。

关键词:容城地热田;热储结构;资源评价;雄安新区;采灌均衡;碳酸盐岩

太平洋板块的俯冲作用造成了华北克拉通的破坏,从而在局部下地壳侧向拆沉作用和自下而上的地幔热侵蚀作用下,形成了华北地区优质的地热甜点区(Zhu Rixiang et al., 2012)。雄安新区位于华北平原冀中坳陷中部,水热型地热资源丰富,也是我国中东部地区地热资源开发利用条件最好的地区(Ma Feng et al., 2019),包括了牛驼镇地热田、容城地热田大部分以及高阳地热田北部。经过多年的地热开发,区域内地热的利用已成规模化,形成了政企合作、统一管理、集中回灌的“雄县模式”(Ma Feng et al., 2015)。

雄安新区容城地热田相对于东部牛驼镇而言,勘查程度较低。中石油在20世纪70年代施工了两口石油勘探孔,2010年以后,中石化开始对容城地热田进行规模化开发,主要钻孔集中在容城县城,建立了采灌均衡的供暖模式。在县城周边,也有10余处零星分布的地热井,这些地热井相对而言没有形

成系统可靠的地质资料,且部分井现已废弃。2017年以来,中国地质调查局加大了对容城地热田的勘查力度,在不同的构造位置部署地热井10余口,最大探测深度达到4000 m。首次揭露了高于庄组热储层,并对其产能进行了评价(Wang Guiling et al., 2017, 2018);2018年,在核心区探获了容城地热田产能最大的地热井,单井供暖能力达到30万m²(Wu Aiming et al., 2018);在容西地区施工了2600 m地热钻孔,揭露了寒武纪地层;2019年,在启动区钻获了水量112.8 m³/h,井口温度71 ℃的高产能地热井,并揭露太古宙变质岩基底;在容城地热田南部徐水-牛南断裂带附近同样钻入了太古宙变质岩地层等,诸多工作形成了对容城地热田的构造以及热储特征的新认识,并大幅度提高了区域地热资源的调查评价精度。Dai Minggang et al. (2019a)对雄安新区启步区及整个新区3500m以浅的碳酸盐岩热储层可采资源量进行了评估,并对开发参数进行

注:本文为国家重点研发项目(编号2019YFB1504101)、国家自然科学基金项目(编号41602271、41741018)和中国地质调查项目(编号DD20189112)资助的成果。

收稿日期:2020-04-28;改回日期:2020-05-13;网络发表日期:2020-05-19;责任编辑:邱楠生;责任编辑:周健。

作者简介:马峰,男,1983年生。硕士,高级工程师,从事地热资源勘查评价及裂隙渗流传热方面的研究。Email:mf-1203@163.com。

引用本文:马峰,王贵玲,张薇,朱喜,张汉雄,岳高凡. 2020. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力. 地质学报, 94(7):1981~1990, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020217.

Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Yue Gaofan. 2020. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1981~1990.

了分析。本文重点介绍容城地热田热储空间分布特征及资源潜力。

1 研究区概况

1.1 地热背景

容城地热田位于雄安新区中北部,包括了容城县大部分地区,安新县北部大王镇和三台镇、定兴县东南部小朱庄乡、北田乡、杨村乡和北南蔡乡,高碑店市南部东马营镇和泗庄镇,总面积为 560 km²,其中位于雄安新区范围内面积为 313 km²。容城地区是雄安新区率先规划建设的地区,主城区基本位于容城地热田范围内,容东片区也是新区第一个开工建设的安置区。

容城地热田地热开发集中在容城县城,以供暖为主,地热资源开发全部来自碳酸盐岩热储。容城县城蓟县系雾迷山组碳酸盐岩储层地热井水量 80~100 m³/h,出水温度 50~60 °C,单井供暖面积约 4~8 万 m²。自然状态下水位埋深普遍在 90~120 m 之间,开采条件下,水位降深为 10~20m。目前,容城县城内共有地热井 34 眼,开采井 21 眼,回灌井 13 眼,地热勘探孔 8 眼。县城范围内已有地热开采井 16 个,回灌井 13 口,开采深度为 1200~1500 m 的蓟县系雾迷山组碳酸盐岩热储层上段,年开采量约 470 万 m³,回灌量 377 万 m³,供暖面积 105 万 m²。

1.2 区域构造

容城地热田以容城凸起为中心,为冀中拗陷中的一个次级正向构造,区域上位于冀中台陷东北部,受徐水断裂、容城断裂所控制,构造上形成容城低凸起区。北部为廊固凹陷,南部为保定凹陷与高阳低凸起,西部为徐水凹陷,东部为牛驼镇凸起(Dai Minggang et al., 2019b)(图 1)。

该区的区域地热背景为华北东部热盆地区,具有较高的热流背景(Chen Moxiang et al., 1982, 1988),容城凸起轴部走向北北东,与区内主要构造线断裂的方向一致,热田区基岩埋深小于 1000 m。由于克拉通破坏,来自深部的热量通过热传导的形式向地表传输,在高温导率的碳酸盐岩中形成热折射,到浅表层遇到低热导率的沉积盖层形成热反射,同时叠合了区域地下水的循环和水岩热交换,多元的聚热模式下形成了稳定优质的热储层。

1.3 地温场特征

在深部莫霍面上隆热传导、碳酸盐岩高热导率热折射和裂隙水循环增温三元聚热模式下,研究区

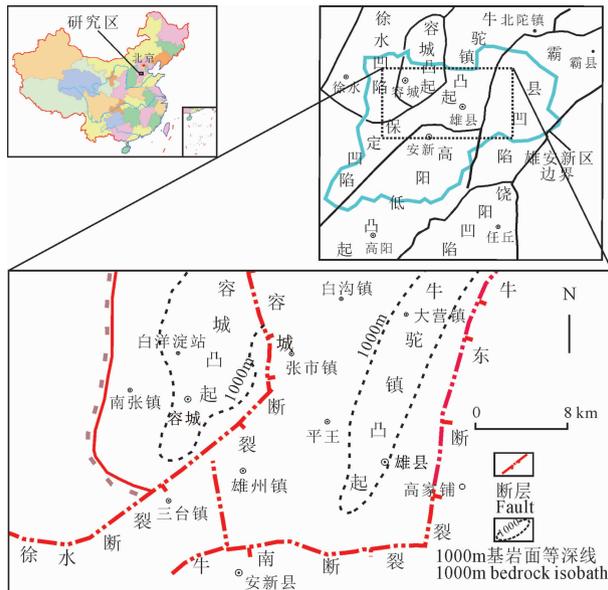


图 1 研究区地热构造图

Fig. 1 Tectonic map of the study area

为高热流区。大地热流介于 60.5~93.8 mW/m² 之间,平均值为 72.4 mW/m²。比中国大陆地区热流平均值 63.0±24.2 mW/m² 要高,在构造凸起区热流值高于拗陷区。

该地区是河北省地温梯度最高的地区,地温展布的主体方向为北东向,高温中心往往位于台拱或凸起的一侧,地温异常呈高低相间的带状分布,长轴方向基本和区域构造线一致,在潜山部位呈孤岛状(Wang Jun et al., 1983)。

容城地热田盖层地温梯度与覆盖层厚度密切相关,盖层地温梯度随着基岩埋深的变浅而增加。在区域上,由容城凸起中心向西部斜坡带以及东部断陷带,地温梯度明显减小;而垂向上,地温梯度与地层变化密切相关,覆盖层地温梯度稳定且相对较高,进入碳酸盐岩热储层后,地温梯度明显降低,部分钻孔甚至出现地温倒转现象(Xiong Liangping et al., 1988)。中央凸起区盖层地温梯度为 3~6 °C/100m,进入蓟县系热储层温度可达到 50~62 °C;西部斜坡区覆盖层地温梯度稳定,平均为 2.8~3.2 °C/100m;东部断陷带,覆盖层包括第四系、新近系、古近系,地温梯度为 3~3.5 °C/100m,热储层温度可达到 100 °C(Jiang Guangzheng et al., 2016, Li Weiwei et al., 2014)。根据稳态测温数据,1000m 地温等值线显示由凸起中心向东西两翼,地温逐渐下降,凸起处 1000 m 温度最高可达到 65 °C(图 2)。

1.4 地下水流场

区域基岩裂隙岩溶热储主要为碳酸盐岩海相沉

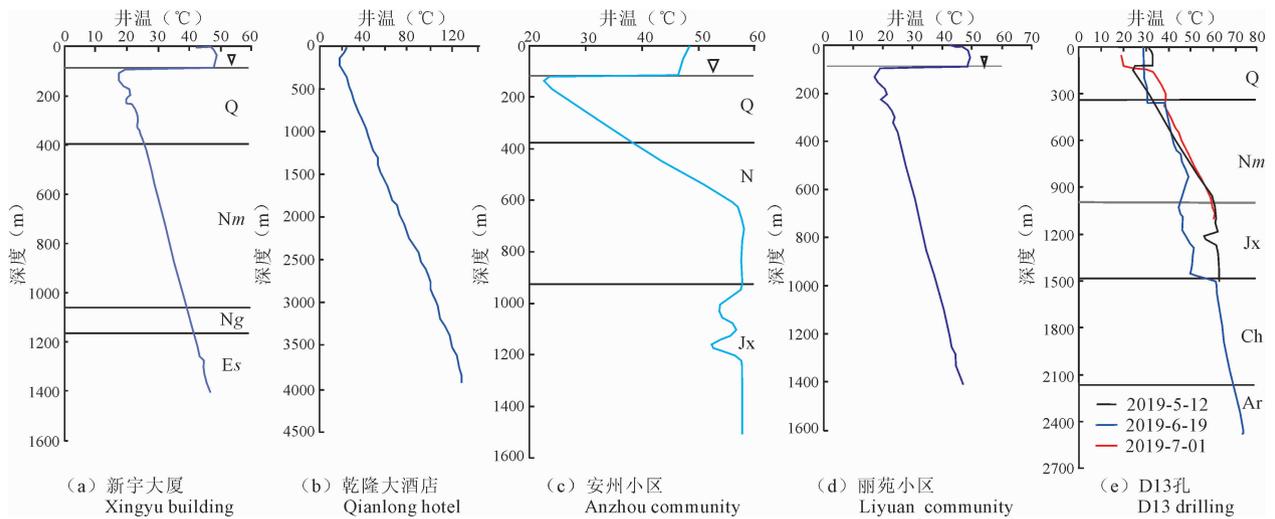


图 2 容城地热田钻孔稳态测温曲线

Fig. 2 Steady-state temperature measurement curve of boreholes in Rongcheng geothermal field

积层,广泛接受古降水淋滤。自新生代以来,基岩裂隙岩溶热储层被覆盖,但西北部山区基岩仍裸露地表,易接受大气降水补给,原始沉积水被长期淡化并逐渐被大气降水所代替,构成了本区内半封闭和封闭的地下水水文地质环境(Chen Moxiang, 1988),使基岩热水成为以大气降水渗入为起源的深部循环水,地下水经历长距离运移,溶解性总固体由西北向东南逐渐增高,水化学类型从西北至东南由 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型过渡到 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,以及 Cl-Na 型,这反映了基岩热水在西部和西北部基岩裸露山区接受补给,然后由西、西北部向东、东南部缓慢运移,在合适的部位富集(Yang Jilong et al., 2018; Zhang Dezhong et al., 2013)。

由于地热水埋深大,地表水的补给以及侧向径流补给缓慢,随着近年来地下热水的无序开采,热储压力逐渐下降,区域地下热水层水位整体下降,同时形成了以集中开采区为中心的深层地热水降落漏斗。容城县、雄县两县城周边地热井集中区地下水水位相对较低,埋深在 120 m 以下;中部容城凸起地区地下水水位埋深普遍在 100~110 m 之间,相对较浅。

2 热储空间结构

2.1 热储特征

容城地热田自上而下热储主要为新近系明化镇组孔隙型砂岩热储、寒武系、蓟县系以及长城系基岩热储(图 3)。馆陶组砂岩热储主要为古河道带砂岩、砾岩,在容城地热田大部分地区缺失,仅在南部

高阳县城一带出现(Yang Xunchang et al., 2019)。

(1)新近系热储:为浅部的明化镇组砂岩热储,呈水平的层状分布,空间厚度变化不大,是在大地热流控制作用下形成的孔隙型热储。明化镇组砂岩热储埋藏浅,深度一般在 400~650 m 之间,砂厚比 30%~45%,孔隙度 30%~33%,渗透率 $3.15\times 10^{-3}\sim 21.17\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,单井出水量 40~60 m^3/h ,水温 33~47 $^{\circ}\text{C}$,目前该组热储由于距离地表浅、回灌较难,目前全区禁止开采。在容城的大部分地区,其与下部蓟县系热储直接接触(Guo Shiyuan et al., 2013)。

(2)寒武系热储:位于容城凸起西翼以南北向条带状分布,包括炒米店组、崮山组、张夏组、馒头组等地层,岩性为灰白色、浅灰色白云岩、灰岩,夹紫色钙质泥岩,含有杂色燧石。D12 钻孔在 1290 m 深度揭露寒武系,厚度约 1200 m,地层倾角约 45°,泥质含量 0.83%~30.77%,储厚比 12.6%,裂隙率 0.8%~10.1%,渗透率 $0.09\times 10^{-3}\sim 11.75\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,水温 57 $^{\circ}\text{C}$,单位涌水量 0.27 $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$,溶解性总固体为 2.45 mg/L, pH 值 7.86。由于本组地层在区域上分布范围小,热储裂隙不发育,因此不属于区域主要的热储层。

(3)蓟县系热储:蓟县系碳酸盐岩为主要热储层,包括雾迷山组和高于庄组两个层段,是在热传导与热对流共同作用下形成的深循环构造裂隙型热储。地层岩性主要为灰、灰白色含碎石条带白云岩、白云岩,本段地层经历了漫长地质时期的剥蚀、风化、淋滤作用,岩石溶隙、裂隙较为发育,为地下水提

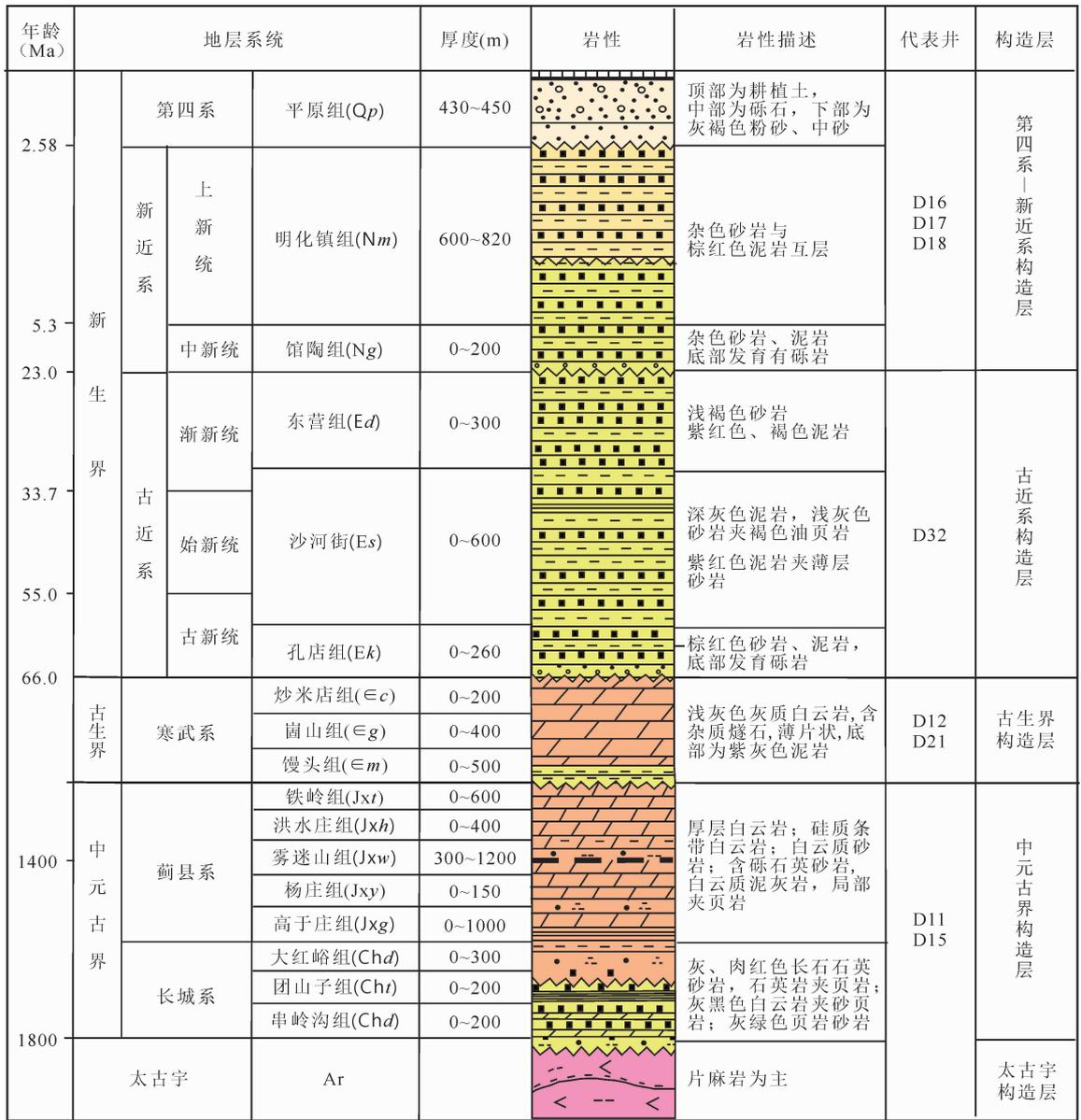


图3 容城地热田典型地层综合柱状图(据 He Dengfa et al., 2018)

Fig. 3 Comprehensive histogram in Rongcheng geothermal field (after He Dengfa et al., 2018)

供了良好的储存空间(Lu Kai et al., 2019)。受区域次级构造和地层风化剥蚀作用的影响,雾迷山组地层在凸起构造中心局部缺失,由凸起中心向两翼厚度明显增大,厚度最大处约为 1000 m;高于庄组在全区均有分布,凸起构造中心厚度约为 400 m(上部与雾迷山组一同被全部剥蚀),其余部位厚度为 800~1000 m(表 1)。钻孔地球物理测井及水质分析结果显示,容城地热田蓟县系埋藏深度一般在 600~2800 m 之间,地层厚度为 450~2000 m,有效热储主要分布在蓟县系顶部 300~400 m,储厚比 20%~40%,裂隙率 4%~12%,水温 50~63℃,单位涌水量 5.3~28.8 m³/h·m,溶解性总固体为

2.17~2.96 mg/L,pH 值 6.99~7.61,水化学类型多为 Cl·HCO₃-Na 型水。

(4)长城系热储:长城系包括大红峪组、团山子组、串岭沟组地层。在容城凸起中心的 D13、D14 勘探孔揭露了长城系大红峪组,岩性为灰黑、灰白色白云岩,中间夹肉红色粗面玄武岩,岩石致密坚硬,不规则裂隙发育。长城系热储顶面埋深大于 2000 m,厚度变化大,D14 勘探孔测井解译结果显示储厚比 13.4%,裂隙率 3.1%~13.2%,渗透率 0.3×10⁻³~7.9×10⁻³ μm²,抽水试验显示,单位涌水量 2.6 m³/h·m,井口水温 63.7℃,溶解性总固体为 3.04 mg/L,pH 值 7.52,偏硅酸含量 68.32 mg/L,总含

量 2.73 mg/L,是具备医疗养生价值的热矿泉水,可作为后备资源加以保护。

表 1 容城地热田钻孔揭露地层情况

Table 1 Strata of Rongcheng geothermal field by drilling

钻孔编号	钻孔深度 (m)	蓟县系 顶部 (m)	蓟县系 厚度 (m)	所处构造位置
D11	2520	800	>1720	中央隆起区
D12	2608.5	2594	>1000	西部斜坡区
D13	2506	998	485	中央隆起区
D14	2518	755	1380	中央隆起区
D15	3112	2632	>480	东部断陷区
D16	3003	980	>2023	中央隆起区
D17	4005.6	2552	130	东部断陷区
D18	3500	2119	>1381	东部断陷区
D19	4000	2160	—	东部断陷区
D20	1807.9	1098	294	中央隆起区
D21	3002	2580	>1000	西部斜坡区

注:>为在该深度未揭穿热储层;—为未完钻。

2.2 热储分区

容城地热田热储层隆起呈北北东向,隆起中心穿过容城县城(He Dengfa et al., 2018)。整个地热田中发育有两条北东向的次级构造,一条位于容城县城以西约 3 km,向南至小里镇,向北穿过北田乡到十里铺村;一条位于容城县东侧,北测穿过东马营乡与容城断裂相接,南侧在三台镇东白洋淀大道处与保定断

裂相交。整个地热田被东西两个次级断裂分为三段,按照主要热储层上部覆盖地层差异由西向东分别为西部斜坡区、中央隆起区、东部断陷区(图 4,图 5)。

西部斜坡区:由于由东向西逐渐覆盖了寒武系、石炭二叠系,因此,雾迷山组热储层顶板埋深由东向西从 2000 m 到超过 5000 m 急剧加深,热储层温度超过 90℃,单井出水量较小,为 20~60 m³/h;

中央隆起区:雾迷山组热储层位于新近纪地层之下,顶板埋藏深度为 800~1000 m,埋藏深度由隆起中心向东西两侧逐渐加深,热储层厚度为 700~1000 m;地热井出水温度介于 50~80℃之间,北高南低,单井出水量一般超过 100 m³/h;

东部断陷区:雾迷山组上部为古近纪地层覆盖,热储层顶板埋深为 2000~2300 m,厚度为 800~1000 m,热储温度高水量大。出水温度 80~90℃,水量一般超过 120 m³/h。

3 资源潜力评估

3.1 基本原则

针对雄安新区碳酸盐岩热储层,充分结合区域热储发育特征,按照区块化管理的要求制定采灌均衡条件下地热资源可持续开发评价方法,为地热资

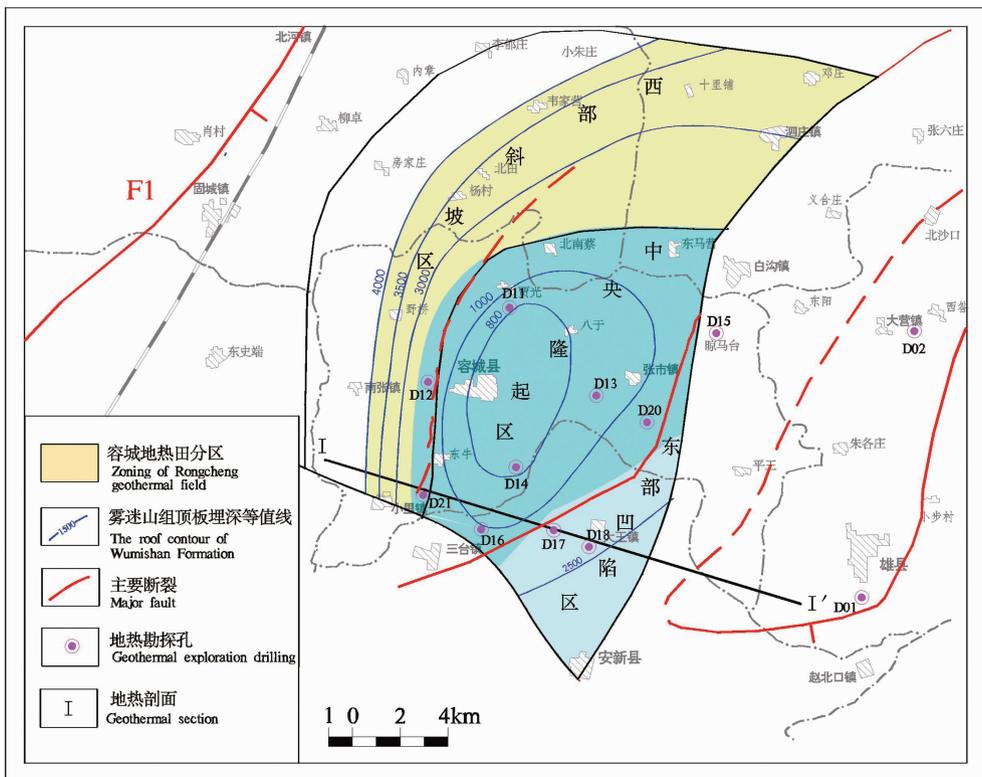


图 4 容城地热田雾迷山组热储分区图

Fig. 4 Thermal storage zoning map of Wumishan Formation in Rongcheng geothermal field

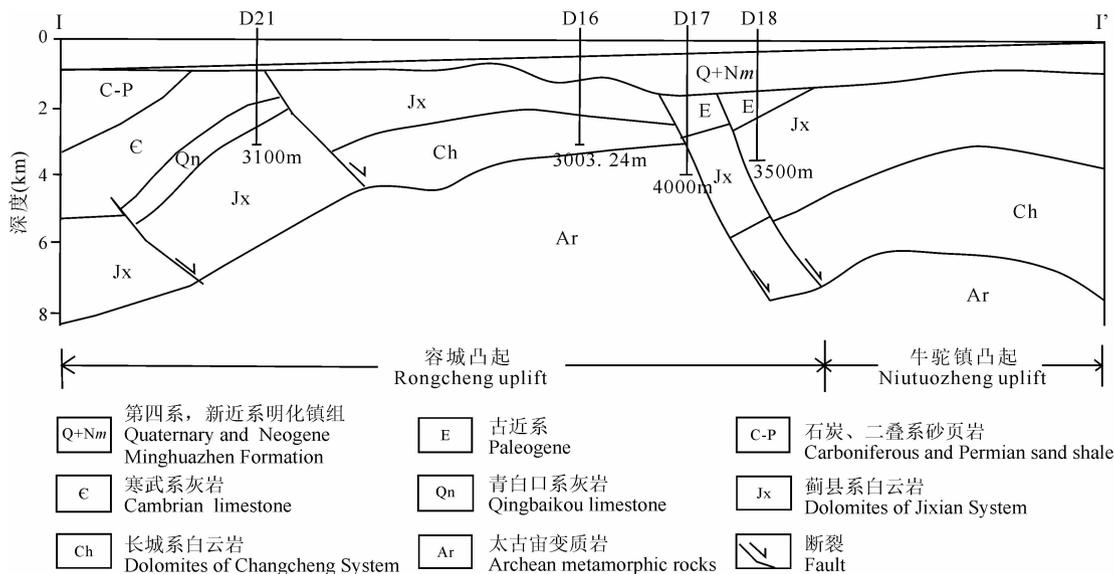


图5 容城地热田典型地质剖面 I-I' (剖面位置见图4)

Fig. 5 Typical geological section I-I' in Rongcheng geothermal field (location of section I-I' as in Fig. 4)

源开发利用规划提供支撑。

(1)在地热田分区的基础上分段(层)计算各区块静态地热资源量及地热流体储存量。

(2)运用长期动态监测数据(温度、水位)开展动态评价,评价区块地热资源可持续开采量和地热流体可持续开采量。

(3)评价深度4000 m,评价储层为蓟县系和寒武系热储。

(4)水量平衡:区内地热水回灌率达到90%;水位年降幅小于2 m;地下水水位埋深不低于150 m。

(5)热量平衡:预测评价100年不发生热突破;开采井水温10年降幅小于1℃;回灌井供暖恢复后,温度下降小于2℃。

3.2 热储法

研究区热储层包括砂岩孔隙热储和碳酸盐岩裂隙热储。砂岩热储为新近系馆陶组热储,由于在容城地热田大部分缺失,这里不做计算。碳酸盐岩裂隙热储为蓟县系、长城系两层热储,其中蓟县系雾迷山组热储为目前主要利用热储层,高于庄组以及长城系热储为未来潜力热储层。蓟县系热储层特征已基本探明,长城系热储区域分布不均,厚度尚不明,

目前为推测资源量。采用热储法计算地热资源量,包含了岩石中的热量和岩石空隙中流体所蕴含的热量,基本公式如下:

$$Q = C_r \rho_r (1 - \varphi) V (T_1 - T_0) + C_w \rho_w q_w (T_1 - T_0)$$

式中:Q为地热资源量(kJ); C_r 、 C_w 分别为热储岩石比热和水的比热(kJ/(kg·℃)); ρ_r 、 ρ_w 分别为热储岩石密度和水的密度(kg/m³); φ 为热储岩石孔隙率(或裂隙率); q_w 为流体储量,包括静储量和弹性储量(m³); T_1 为热储温度(℃); T_0 为恒温层温度(℃);V为热储体积(m³)。

评价参数的选取见表2,水的密度参照不同温度下水的密度表查表获取,岩石密度统一取2600kg/m³。

雄安新区范围内容城地热田面积为313 km²,经过分区分层计算,全区寒武系与蓟县系地热资源量 1230×10^{16} J,地热流体储存量30.25亿 m³。采灌均衡条件下全区地热流体可开采资源量为 99.6×10^6 m³/a,地热流体可开采热量为 223×10^{14} J/a,折合标准煤76.3万 t/a,其中寒武系占6.3%,雾迷山组资源量占62.2%,高于庄组地热资源量占31.5%。

表2 容城地热田地热资源评价分区参数选取表

Table 2 Table of zoning parameters for geothermal resource evaluation of Rongcheng geothermal field

热储层	储层厚度(m)	储厚比	顶板(m)	水位埋深(m)	孔隙度(%)	热储温度(℃)	基准温度(℃)	弹性释水系数(%)
寒武系	800	0.15	1800~2600	80	3.0	76	14.5	1.32
雾迷山组	400~1000	0.2~0.4	850~3000	110	3.5	60~75	14.5	1.67~3.52
高于庄组	400~800	0.15~0.2	1400~3600	112	2.0	65~95	14.5	0.61~1.38

3.3 数值法

对热储层构建数值模型是目前被认为最有效的地热资源评价方法,原因在于它不仅描述复杂的热储空间结构,同时借助强大的计算机功能可以将已有的开发监测数据进行不断的拟合,逐渐提高评价的精度(Ciriaco et al., 2020)。雄安新区具有多年的地热开发历史,本次采用 TOUGH2 软件,在收集大量物探解译、钻探、储层等值线、测井解译等资料基础上,综合考虑热储的空间分布特征和容城断裂的切割作用,建立了区域内第四系至太古宙的地层空间结构模型。TOUGH2 是一套功能强大、应用广泛的模拟孔隙或裂隙介质中多相流的系列程序,广泛应用于油气、地热的开发(Xu Tianfu et al., 2003)。

3.3.1 模型概化

容城地热田内分布的主要地层包括第四系、新近系、古近系、寒武系、蓟县系、长城系、太古宙 7 个地层。考虑地层的各向异性,每个地层具有不同的热物性特征。蓟县系是本次模拟评价的重点热储层,进行分区、分层刻画。蓟县系热储在水平向上分

为三个区域,分别是凸起区、斜坡区、凹陷区,每个区具有不同的热物性参数;在垂向上分为三层,分别是上段、中段、下段,每个层段赋有不同的热物性参数。

在长时间的采灌过程中,热水不断被抽出,造成开采井及其影响范围内的水位下降;冷水不断被回灌进入储层,造成回灌井附近水位上升。一方面容易形成回灌井冷水向开采井的运移,使得开采井水温降低,从而可能引起热突破,影响地热井供热能力。另一方面,采灌改变了三维模型的区域水动力条件和热平衡,对整体水热运移产生影响。模型的底边界定义为等温面边界,热量不断地通过地层和断裂传导对热储进行补给;顶边界为热量散失边界;侧边界为外延边界,由于模型内部水位的变化,确定水热的流入或流出(图 6)。

3.3.2 主要参数

根据前期的资料收集分析、抽水试验、热响应实验、岩样热物性测试等结果,获得研究区内地层基本参数见表 3。其中蓟县系分为 3 个区块,每个区块分 3 个层段。

表 3 模型计算分层参数赋值表

Table 3 Hierarchical parameter table in numerical model

地层	分区	层段	岩石密度 (kg/m^3)	岩石比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)	裂隙率 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	弹性释水系数 ($\times 10^{-5}$)
第四系	全区	全段	1918	1380	35	10	1.5	35.46
新近系	全区	全段	2500	1800	30	0.8	1.6	30.39
古近系	全区	全段	2500	1800	30	0.8	1.6	30.39
寒武系	斜坡区	全段	2650	1300	4.0	5.0	2.6	4.05
蓟县系	凸起区	上段	2870	1180	4.0	20	5.2	5.07
		中段	2870	1180	3.0	5	5.2	3.04
		下段	2870	1180	2.0	1	5.2	2.03
	斜坡区	上段	2870	1180	3.0	15	5.2	5.07
		中段	2870	1180	2.0	2.0	5.2	3.04
		下段	2870	1180	1.0	0.5	5.2	2.03
	凹陷区	上段	2870	1180	3.0	10	5.2	5.07
		中段	2870	1180	2.0	1	5.2	3.04
		下段	2870	1180	1.0	0.2	5.2	2.03
长城系	凸起区	上段	2870	1200	2.0	2.0	5.2	2.03
		下段	2870	1200	1.0	0.5	5.2	1.01
太古宙	全区	全段	2700	1100	1.0	0.1	3.1	1.01
容城断裂			2700	1100	1.0	15.0	5.4	1.01

3.3.3 评价结果

根据开采井静水位埋深和温度降低情况,设定标准,即开采 100 年时间内,开采井静水位埋深不超过 150 m、170 m,且开采井温度降低小于 2°C 、 4°C 。以此为标准,通过设计不同的采灌量方案,评价最大可采资源总量。评价结果如下:

在开采井水位下降不超过 150 m,热储温度下降不小于 2°C 条件下,模拟显示,水位下降在开采 40

年后达到稳定,100 年开采井水位降低小于 38 m,即埋深低于 150 m;而开采井水温在 30 年后开始逐渐下降,到 100 年时,开采井最大温度降低为 1.98°C ,满足标准的 2°C 。总的地热流体可开采热量为 $106.74 \times 10^6 \text{m}^3$,可开采热量 $236.7 \times 10^{14} \text{J/a}$,年可开采量折合标准煤 81.09 万 t。

在开采井水位下降不超过 150 m,热储温度下降不小于 4°C 条件下,模拟显示,水位下降在开采 40

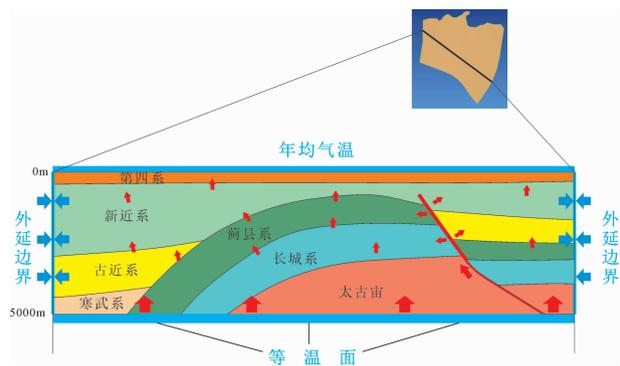


图6 容城地热田概念模型示意图

Fig. 6 Conceptual model of Rongcheng geothermal field

年后达到稳定,100年开采井水位降低约38m;而开采井水温在20年后开始逐渐下降,到100年时,开采井最大温度降低为3.96℃,满足标准的4℃。总的地热流体可开采热量为 $108.39 \times 10^6 \text{ m}^3$,可开采热量 $433.32 \times 10^{14} \text{ J/a}$,年可开采量折合标准煤148.40万t。

在开采井水位下降不超过170m,热储温度下降不小于2℃条件下,模拟显示,水位下降在开采50年后达到稳定,100年开采井水位降低约58m;而开采井水温在20年后开始逐渐下降,到100年时,开采井最大温度降低为2.05℃。该开采条件下,总的地热流体可开采热量为 $149.43 \times 10^6 \text{ m}^3$,可开采热量 $331.5 \times 10^{14} \text{ J/a}$,年可开采量折合标准煤113.53万t。

在开采井水位下降不超过170m,热储温度下降不小于4℃条件下,模拟显示,水位下降在开采30年后达到稳定,100年开采井水位降低约58m;而开采井水温在10年后开始逐渐下降,到100年时,开采井最大温度降低为4.06℃。该开采条件下,总的地热流体可开采热量为 $149.01 \times 10^6 \text{ m}^3$,可开采热量 $576.81 \times 10^{14} \text{ J/a}$,年可开采量折合标准煤197.54万t。

采灌均衡条件下第一种开采方案与热储法计算结果接近,表明数值计算结果可信。其余三种开采方案由于对水位降深和温度下降有更大的范围,可采资源量变大。但相比较而言,扩大热储温度的下降范围比提高水位下降对于可采资源量而言具有更明显的意义。提高最低水位埋深值可以提高单井开采量,但更容易发生热突破;提高开采井温度下降允许值则理论上可以在研究区布设更多地热井,缩小井间距,扩大了整个热田可采资源潜力。四种方案的平均水位埋深和温度变化历时曲线对比如图7。

统计得出容城地热田回灌情况下可采地热资源量表(表4)。

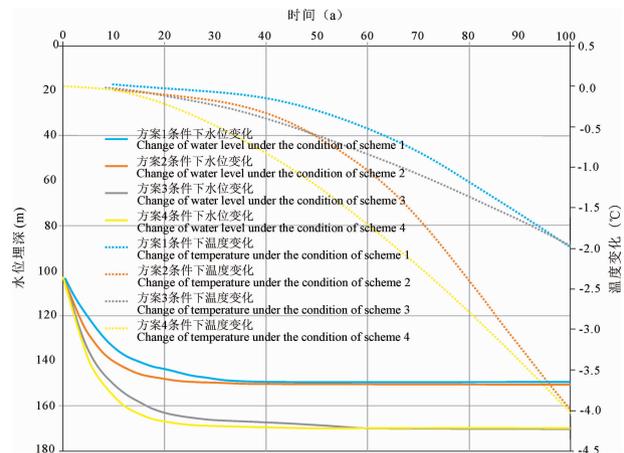


图7 四种开采方案水位埋深和温度变化历时曲线对比

Fig. 7 Water depth and temperature change diagram of four different conditions

表4 容城地热田采灌均衡条件下可采地热资源量

Table 4 Recoverable geothermal resources of balanced Mining and reinjection in Rongcheng geothermal field

设计方案	评价标准		容城地热田 地热流体 可开采量 ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)	容城地热田 地热流体 可开采热量 ($\times 10^{14} \text{ J/a}$)	折合标准煤 (万t)
	水位埋深最大界限(m)	温度降低最大值(℃)			
方案一	150	2	106.74	236.79	81.09
方案二	150	4	108.39	433.32	148.40
方案三	170	2	149.43	331.5	113.53
方案四	170	4	149.01	576.81	197.54

4 结论与建议

容城地热田地热资源赋存条件好,有利于地热资源的规模化开发利用。整个地热田地热储层包括新近系明化镇组孔隙型砂岩热储,寒武系、蓟县系以及长城系基岩热储,馆陶组砂岩热储在容城地热田大部分地区缺失,仅在南部高阳县城北部出现。蓟县系为区域主要的热储层,埋深700~3000m,厚度500~2000m,热储温度50~98℃,水量大水质好,储层易于回灌,适宜于规模化集中开采。

容城地热田全区地热流体可开采资源量为 $99.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,地热流体可开采热量为 $223 \times 10^{14} \text{ J/a}$,折合标准煤76.3万t/a,其中寒武系占6.3%,雾迷山组资源量占62.2%,高于庄组地热资源量占31.5%。

构建了数值模型对容城地热田四种开采限定条件下的可采资源量进行了评价,结果显示在开采井水位下降不超过150m,热储温度下降不小于2℃条

件下,地热流体可开采热量为 $106.74 \times 10^6 \text{ m}^3$,可开采热量 $236.7 \times 10^{14} \text{ J/a}$,年可开采量折合标准煤 81.09 万 t。

科学规范的开发利用地热资源,可发挥地热清洁能源的安全、稳定、高效等特点。制定科学合理的采灌方案,是保障地热资源可持续利用的有效途径,通过同层回灌,有效防止水位水温急剧下降,有效维持热储层压力,避免对地表环境的破坏。同时,地热开采井的允许下降温度是决定采灌井间距的关键因素,值得深入研究。

建议针对热储开发进行长期的监测,依托地热田三维热储模型,建立地热资源开发利用调度管理系统,提供地热资源空间分布状况服务和地热资源和热储管理的可视化服务。

References

- Chen Moxiang. 1988. Geothermal in North China. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Chen Moxiang, Huang Geshan, Zhang Wenren, Zhang Rongyan, Liu Bingyi. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozhen basement protrusion of central Hebei Province. Chinese Journal of Geology, 25(3): 239~252 (in Chinese with English abstract).
- Ciriaco A E, Zarrouk S J, Zakeri G. 2020. Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119.
- Dai Minggang, Lei Haifei, Hu Jianguo, Guo Xinfeng, Ma Pengpeng, Zhang Jiayun. 2019a. 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 (in Chinese with English abstract).
- Dai Minggan, Wang Xinwei, Liu Jinxia, Lei Haifei, Bao Zhidon. 2019b. Characteristics and influence factors of starting and adjacent zone of geothermal resources in the Xiong'an new area. Chinese Journal of Geology, 54(1):176~191 (in Chinese with English abstract).
- Guo Shiyun, Li Xiaojun. 2013. Reservoir stratum characteristics 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).
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuyin, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data. Science China Earth Sciences, 61: 1007~1022.
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition). Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2892~2910 (in Chinese with English abstract).
- Li Weiwei, Rao Song, Tang Xiaoyin, Jiang Guangzheng, Hu Shengbiao, Kong Yanlong, Pang Jumei, Wang Jiancun. 2014. Borehole temperature logging and temperature field in the Xiong'an geothermal field, Hebei Province. Chinese Journal of Geology, 49(3): 850~863 (in Chinese with English abstract).
- Lu Kai, Bao Zhidon, Ji Hancheng, Liu Jinxia, Wang Guiling, Ma Feng, Guo Ruijing, Cao Yingzhuo, Yang Fei, Fu Yong, Li Xiaobo, Hua Yingxin, Que Yijuan, Li Zongfeng, Xu Xiting, Hu Xiancai. 2019. Characteristics, main controlling factors and favorable area prediction of karstic geothermal reservoirs of the Jixianian Wumishan Formation in Xiong'an New Area. Journal of Palaeogeography, 21(6): 885~900 (in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Lin Wenjing, Lang Xujuan, Zhu Xi, Wang Guiling. 2015. Deep geothermal structures of potential hot dry rock resources area in China. Geological Science and Technology Information, (6):176~181 (in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Wang Guiling, Wei Shuaichao, Sun Zhanxue. 2019. Summary of hot research topics in geothermal exploitation in 2018. Science & Technology Review, 37(1): 134~143 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China. Acta Geoscientia Sinica, 38(4): 449~459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Li Jun, Wu Aimin, Zhang Wei, Hu Qiuyun. 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).
- Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan, Wang Jiyang. 1983. Geotemperature distribution and geothermal resources in the Meso-Cenozoic basins of North China. Acta Geologica Sinica, (3): 304~316 (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 Xiong'an New Area. Acta Geoscientia Sinica, 39(5):523~532 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Liangping, Zhang Juming. 1988. Relationship between geothermal gradient and the relief of the basement rock in North China Plain. Acta Geophysica Sinica, 31(2): 146~155 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Sonnenthal E, Spycher N, Pruess K. 2003. Toughreact: a new code of the TOUGH Family for non isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media. Office of Scientific & Technical information Technical Reports, 32(32):145~165.
- Yang Jilong, Liu Futian, Jia Zhi, Yuan Haifan, Xu Qinmian, Hu Yunzhuang. 2018. The hydrochemical and $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ characteristics of two geothermal fields in Niutuozhen of Hebei Province and Tianjin and their environmental significance. Acta Geoscientia Sinica, 39(1): 71~78 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xunchang, Kang Fengxin, Wang Xuepeng, Fu Qingjie, Liu Zhitao. 2019. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water: a case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei. Acta Geologica Sinica, 93(3):738~750 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dezhong, Liu Zhigang, Lu Hongliu. 2013. Geothermal in Hebei. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guan, Zhang Hongfu, Xia Qunke, Zheng Tianyu. 2012. Destruction of the North China Craton. Sci. China Earth Sci., 42(8):1135~1159.

参 考 文 献

- 陈墨香. 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社.
- 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 张容燕, 刘炳义. 1982. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用. 地质科学, (3): 239~252.
- 戴明刚, 雷海飞, 胡甲国, 郭新锋, 马鹏鹏, 张家云. 2019a. 雄安新区顶面埋深在 3500 m 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.
- 戴明刚, 汪新伟, 刘金侠, 雷海飞, 鲍志东. 2019b. 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

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.

何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束. 中国科学: 地球科学, 48(09): 87~102.

姜光政, 高棚, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). 地球物理学报, 59(8): 2892~2910.

李卫卫, 饶松, 唐晓音, 姜光政, 胡圣标, 孔彦龙, 庞菊梅, 王建存. 2014. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征. 地质科学, 49(3): 850~863.

鲁锴, 鲍志东, 季汉成, 刘金侠, 王贵玲, 马峰, 郭瑞娟, 曹瑛俦, 杨飞, 符勇, 李潇博, 华盈鑫, 阙宜娟, 李宗峰, 许西挺, 胡先才. 2019. 雄安新区蓟县系雾迷山组岩溶热储特征、主控因素及有利区预测. 古地理学报, 21(6): 885~900.

马峰, 蔺文静, 郎旭娟, 朱喜, 王贵玲. 2015. 我国干热岩资源潜力区深部热结构. 地质科技情报, (6): 176~181.

马峰, 王贵玲, 魏帅超, 孙占学. 2019. 2018 地热勘探开发热点回眸. 科技导报, 37(1): 134~143.

王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价. 地球学报, 38(4): 449~459.

王贵玲, 李郡, 吴爱民, 张薇, 胡秋韵. 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(05): 533~541.

王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 汪集旸. 1983. 华北中、新生代沉积盆地的地温分布及地热资源. 地质学报, (3): 304~316.

吴爱民, 马峰, 王贵玲, 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. 地球学报, 39(05): 523~532.

熊亮萍, 张菊明. 1988. 华北平原区地温梯度与基底构造形态的关系. 地球物理学报, 31(2): 146~155.

杨吉龙, 柳富田, 贾志, 袁海帆, 胥勤勉, 胡云壮. 2018. 河北牛驼镇与天津地热田水化学和氢氧同位素特征及其环境指示意义. 地球学报, 39(1): 71~78.

张德忠, 刘志刚, 卢红柳. 2013. 河北地热. 北京: 地质出版社.

朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑填愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42(08): 5~29.

Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area

MA Feng^{1,2,3)}, WANG Guiling^{*1,2)}, ZHANG Wei^{1,2)}, ZHU Xi^{1,2)}, ZHANG Hanxiong^{1,2)}, YUE Gaofan^{1,2)}

1) The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061;

2) Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development,

Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, 050061; 3) China University of Geosciences, Beijing, 100083

* Corresponding author: guilingw@163.com

Abstract

Xiong'an New Area provides superior geothermal conditions. Especially, the Niutuozen and the Rongcheng uplifts have witnessed many years of geothermal development. The majority of geothermal fields in the Rongcheng are suitable for large-scale geothermal development. Also, the Rongcheng is the main planning and development area in the early development stage of Xiong'an New Area. Geothermal resources are of great significance in developing the ecology and clean heating the Xiong'an New Area. The main thermal reservoirs in the Rongcheng geothermal field include porosity-type geothermal reservoir of the Neogene Minghuazhen Formation, and the bedrock thermal reservoir of the Cambrian, Jixian System and the Changcheng System. The bedrock thermal reservoir of the Jixian System is the main thermal reservoir in the region, with a buried depth of 700~3000 m, a thickness of 500~2000m, and a temperature of 50~98°C. It is characterized by large water volume, high water quality, and the inclination to reinjection. There is great potential for exploitation at the center of uplift in the Changcheng System. The D14 borehole shows that under the Changcheng System, the water yield for the stratigraphic unit reaches 2.6 m³/h·m and the wellhead temperature is 63.7 °C, which is suitable for the backup geothermal resources in Xiong'an New Area. Based on the stratigraphic structure of the upper thermal reservoirs, the Rongcheng geothermal field is divided into the slope zone in the west, uplift in the center and fault depression in the east. From the west to the east, the development potential for thermal reservoirs gradually increases. The annual recoverable geothermal resources in the Rongcheng geothermal field were 763000 tons of standard coal. According to numerical methods, under the condition that the water level dropped to no less than 150 m and the temperature of the exploitation well went down by less than 2 °C, the annual recoverable resources of geothermal energy was equivalent to 810900 tons of standard coal. The results from both methods are similar. The evaluation results can provide reference for the planning and development of geothermal resources in Rongcheng.

Key words: Rongcheng geothermal field; geothermal reservoirs structure; resource evaluation; Xiong'an New Area; balance in exploitation and reinjection; carbonate rock