



雄安新区三维地热地质模型方法研究

李红岩^{1,2,3,4}, 高小荣^{1,2,4}, 任小庆^{1,4}, 孙彩霞^{1,4}, 卢星辰^{1,2,4}, 许 勇^{1,4}

1. 中石化绿源地热能开发有限公司, 河北 保定 071800;

2. 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083;

3. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

4. 陕西省“四主体一联合”地热能校企联合研究中心, 陕西 咸阳 712000

摘 要: 根据区域地质资料、钻井地层数据、测井资料, 分别对雄安新区构造进行网格化并建立构造模型, 应用层序地层学原理厘定等时界面及地层框架, 选取建模参数, 建立沉积相三维模型。采用相控条件下的序贯高斯模拟算法, 建立孔隙度、渗透率模型。根据实测, 得出区域内盖层、储层、基岩的岩石热导率, 并建立雾迷山组温度场模型。最后采用物性参数展布对比、概率模型一致性、拟合三方面对地质模型进行验证, 结果表明, 此地质模型的孔隙度、渗透率概率分布特征与测井解释曲线数据和初始化数据基本一致, 说明该模型与地质认识吻合度超过 90%, 所建地质模型合理。

关键词: 地热模型; 雾迷山组; 地热能; 雄安新区

3D GEOTHERMAL GEOLOGICAL MODELING METHOD OF XIONG'AN NEW AREA

LI Hong-yan^{1,2,3,4}, GAO Xiao-rong^{1,2,4}, REN Xiao-qing^{1,4}, SUN Cai-xia^{1,4}, LU Xing-chen^{1,2,4}, XU Yong^{1,4}

1. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Baoding 071800, Hebei Province, China; 2. Sinopec Star Petroleum Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4. Shaanxi University-Enterprise Joint Research Center for Geothermal Energy, Xianyang 712000, Shaanxi Province, China

Abstract: The structure model of Xiong'an New Area is established by structural gridding on the basis of regional geology, drilling formation and well logging data. The principle of sequence stratigraphy is applied to determine isochronous interface and stratigraphic framework, and modeling parameters are selected to establish the 3D sedimentary facies model. The porosity and permeability models are established by facies-controlled sequential Gaussian simulation algorithm. The rock thermal conductivity of caprock, reservoir and bedrock in the region is obtained and the temperature field model of Wumishan Formation is established according to the actual measurement. The physical parameter distribution comparison, probability model consistency and fitting are finally used to verify the geological model. The results show that the probability distribution characteristics of porosity and permeability of this geological model are basically consistent with the log interpretation curve data and initialization data, indicating that consistency between the model and geological recognition is more than 90% thus the geological model is reasonable.

Key words: geothermal model; Wumishan Formation; geothermal energy; Xiong'an New Area

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-05-05. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国石化集团新星石油有限责任公司“雄安新区热储工程动态数学模型研究”(10500000-19-ZC0607-0012).

作者简介: 李红岩(1969—)男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事地热田安全高效勘探开发工程技术研究, 通信地址 河北省保定市雄县雄州路 746 号, E-mail/lihongyan.xsxy@sinopec.com

通信作者: 任小庆(1980—)男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地热勘探开发和地热尾水回灌研究工作, 通讯地址 河北省保定市雄县雄州路 746 号, E-mail/937122575@qq.com

0 引言

地热资源按赋存形式可分热水型、地压地热能、干热岩地热能和岩浆热能4种类型;根据地下热水的温度,又可分为高温型($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$)、中温型($90\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)和低温型($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$)三大类^[1-2]。地热能的开发利用包括发电和非发电两个方面,其中,高温地热资源主要用于地热发电,中、低温地热资源主要为直接利用,广泛应用于工业、农业和人类日常生活当中。例如,工业上,可利用其进行工业干燥和工业烘干;农业上,用于温室的种植与灌溉、农业养殖等。在日常生活方面,地热资源主要被用于室内取暖,还可以进行医疗保健、矿泉水生产、温泉和旅游度假等。此外,对于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的浅层地热水,可利用地源热泵进行供暖、制冷。随着地热资源开发和利用的发展与深入,逐渐形成了地热+其他新能源、可再生能源的思想,在充分利用清洁地热能的基础上,因地制宜,进行多能互补,极大地提高了能源利用的效率。

热储工程数值模拟已被认为是地热研究中的一项方便有效的方法,在实际工程中也得到了广泛的应用。Mercer等基于Gerlerkin有限元方法建立了模拟地热热储层中流体运移和热传导的数学模型^[3]。美国斯坦福大学于1980年开展地热数值模型代码对比验证的项目正式将数值模拟方法引进到地热工业化开采和管理的研究中。自20世纪90年代起,应用计算机模拟技术于地热资源开采的规划和管理开始成为工业化标准流程之一,许多数值模型和相应的模拟软件相继提出。

在地热田勘探开发以及后期运营过程中,受环境变量的影响,温度较低的尾水回灌会引起储层温度和应力发生变化,导致渗流也产生改变。储层骨架的变形以及回灌过程中的堵塞,又会进一步造成几种场的重新变化与分布。面对复杂的地下问题,数值模拟已经成为研究评价多场耦合的主要技术方法,而目前应用较为广泛的有Petrel、TOUGH、OGS等软件^[4-15]。尽管THC耦合模拟在热储工程领域已实现并在实际工程中得到验证,但到目前为止,国际上针对大型岩溶热储在大规模采灌条件下的THC的响应仍不清楚,应用THC耦合技术针对大型岩溶热储的构建方面仍然有待发展,这正是本文研究的主要内容。

1 区域地质背景

雄安新区位于渤海湾盆地冀中拗陷中部、京津冀腹地,其行政范围涵盖雄县、容城、安新三县及周边地区,总面积约为 $1\,795\text{ km}^2$ 。区内分布从属于冀中拗陷的9个四级构造单元,主要包括3个凸起(牛驼镇凸起、容城凸起和高阳低凸起)、2个斜坡(牛北斜坡和蠡县斜坡)以及4个凹陷(霸县凹陷、徐水凹陷、饶阳凹陷和保定凹陷)。区内分布7条主要断裂,包括北东向的容城断裂、牛东断裂、保定断裂、高阳断裂和任西断裂,北西西向的容南断裂和牛南断裂^[5,16-20]。

雄安新区地层系统自下至上依次包括太古宇、古元古界、中元古界(长城系和蓟县系)、古近系(孔店组、沙河街组、东营组)、新近系(馆陶组和明化镇组)和第四系(平原组),其中太古宇—古元古界为深变质岩。

雄安新区所在的华北平原,是中—新生代沉积盆地。基底为太古宇和古元古界复杂变质岩系,盖层为中元古界、下古生界海相碳酸盐岩和新生界陆相碎屑岩2套沉积层组成。雄安新区主要开发的热储层为中元古界雾迷山组,下伏杨庄组,上覆洪水庄组^[21-31]。研究区构造见图1。

2 雄安新区三维地热地质建模

2.1 地质建模方法

本次建模采用斯伦贝谢技术服务公司开发的Petrel软件,该软件主要应用于地学领域的三维模拟,开发程度较为成熟。

该软件拥有独特的插值算法,即离散光滑插值算法(DSI),为主要针对地质建模的计算方法。在模型生成的全过程中,DSI用一系列空间坐标点来模拟地质体。这些坐标点代表了空间实体物理特性,相连节点的空间信息和属性信息被转化为线形约束,因而DSI更加适于自然物体的模拟。

技术方面,针对相建模,开发了随机约束建模的多步复合相建模方案。该技术方案主要强调模式指导、分级约束的思想。首先利用卫星照片等对研究区主要沉积微相建立地质知识库,已提取基于目标的示性点算法中各沉积相类型对应的模拟参数。第二步,以模拟沉积相为约束,建立沉积相发育概率模型,明确热采区碳酸盐岩发育概率平面,最后建立储层岩相

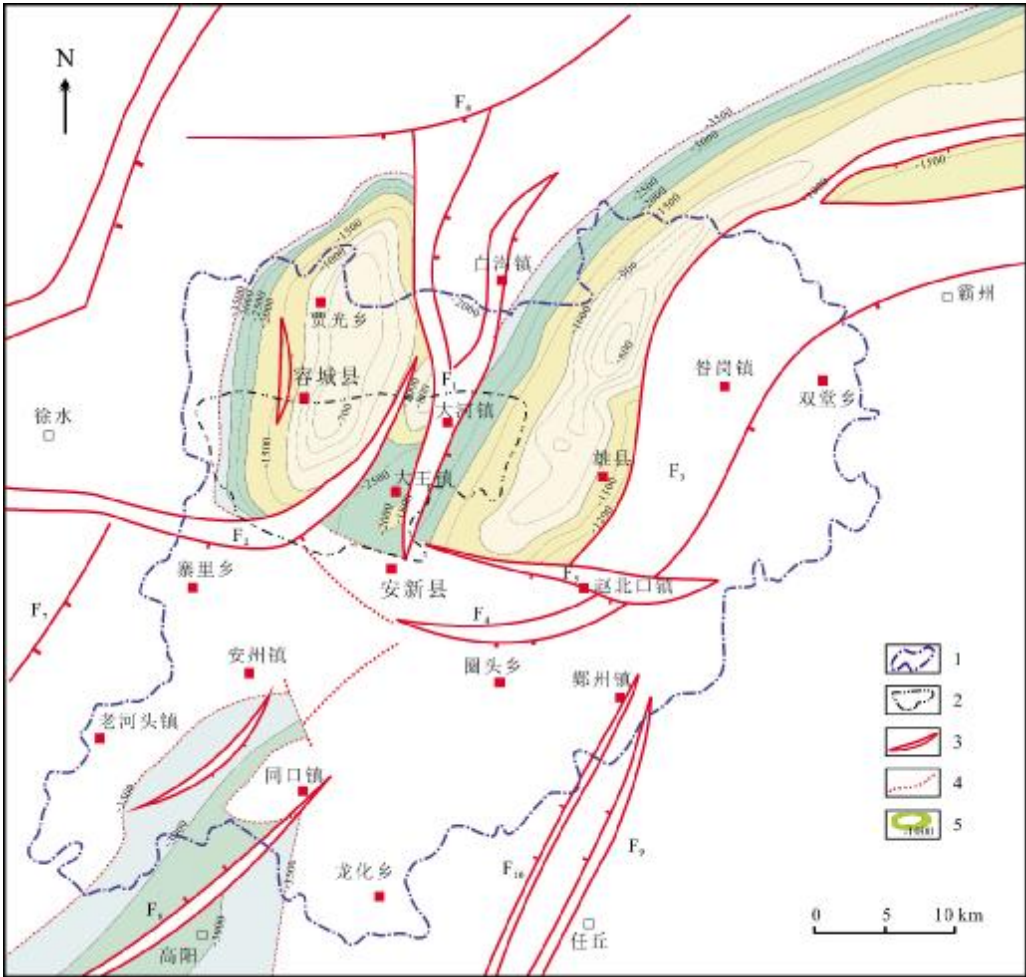


图 1 研究区地质图
(据文献[26]修改)

Fig. 1 Geological map of the study area
(Modified from Reference [26])

1—雄安新区(Xiong'an New Area); 2—雄安新区起步区(starting zone of Xiong'an New Area); 3—正断层(normal fault); 4—构造单元分区线(boundary of tectonic unit); 5—中元古界顶面深度等值线(depth contour of Mesoproterozoic top)

模型.

2.2 数据准备及预处理

储层地质建模要达到精细描述的精度，必须要有完备的地质数据库. 研究区内钻井数量多，各井曲线类型多样且存在因测量仪器、刻度标准等不同造成的差异，加之构造平面图断层多边形无法准确表征断裂的组合关系，沉积相图需进行数字化等，因此各类数据均需要在建模开始前做好准备.

建立地质模型主要是要在三维空间上对地下有效储层的平面展布、厚度、孔隙度以及渗透率等参数进行准确的描述和表征. 因此，岩性、孔隙度、渗透率等物

性测井数据是必须的. 但如前文所述，本次研究的主要目的层位为蓟县系雾迷山组，研究区内有新钻探的用于开发地热水的井具备孔隙度、渗透率等数据. 上述数据均需要在开展地质建模前做好处理.

(1) 利用聚类分析划分相

对研究区内已知地热井中明化镇组下部—馆陶组各小层的主成分进行聚类，聚类为 8 种测井相. 它们和相应的地质相之间建立起对应关系，再利用这种对应关系去评判研究区雄安新区其他井的测井资料，并与地质相对比，并不断调整聚类的中心和范围，直到地质相与测井相之间建立起良好的对应关系为止，进而

完成岩相数据的准备。

(2)利用神经网络预测测井孔隙度、渗透率

BP 神经网络是一种多层前馈型神经网络,是由 Rumelhart 等于 1985 年提出的一种人工神经网络技术,构成神经网络的基本三要素是神经元、网络结构和学习算法。神经网络可以把 N 个分量的输入矢量转换成一个具有 P 个分量的输出矢量。在学习算法上,其权值的调整采用反向传播(Backpropagation)训练算法,很好地解决了输入和输出之间的关系和复杂的非线性问题,为储层参数的预测提供了一种有效的途径。

孔隙度、渗透率测井数据是建立模型的关键参数,但在热采区仅部分井中具有这类物性数据,因此本次研究利用深度学习方法预测孔隙度、渗透率。

3 雄安新区三维地质模型建立

3.1 构造建模

构造建模是生成一个三维地质模型框架。在进行网格化的过程中,首先需要建立一个网格边界,使其成为一个闭合的区间形成闭合的工区。其次需要设计合理的网格,主要有 2 方面的内容:1)选用合理的网格类型,在这里选用角点网格,可以克服正交网格处理断层的局限性;2)网格大小,划分网格的基本原则是平面上两井之间内插 4~8 个网格为宜,本次建模网格大小 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,3 个方向选取。

为了建立高质量的断层模型,在使用一体化建模软件 Petrel 建立断层模型时,对断层进行了综合处理。经过处理的断层模型可以较为准确地表征断层的三维几何形态。图 2 给出了雄安新区的三维断层建模。

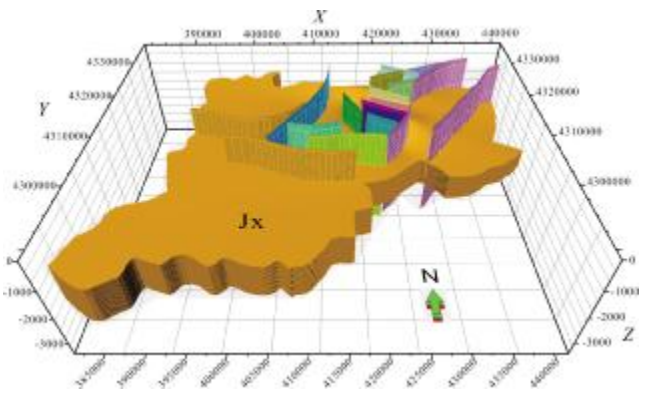


图 2 雄安新区三维断层建模

Fig. 2 3D fault modeling of Xiong'an New Area

构造解释完成了雄安新区大范围明化镇组顶界面、雾迷山组顶界面反射层的三维追踪,如图 3 所示。由顶面到底面依次为第四系、明化镇组和雾迷山组。图 4 与图 5 为雄安新区三维构造模型近东西向与近南北向剖面图。

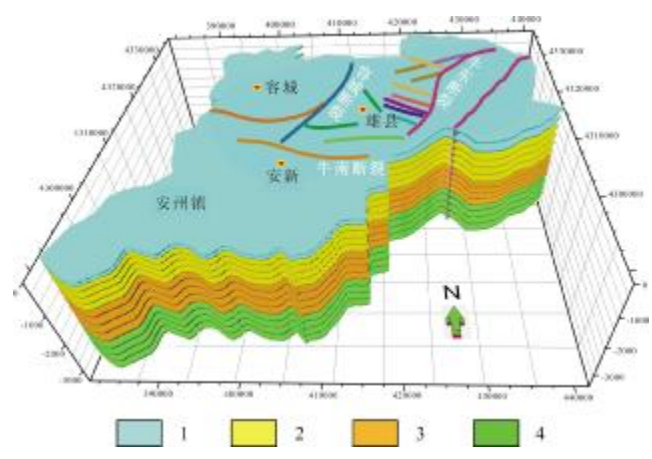


图 3 雄安新区三维构造模型

Fig. 3 3D structure model of Xiong'an New Area

1—第四系(Quaternary); 2—新近系(Neogene); 3—蓟县系(Jixian System); 4—太古宇(Archean)

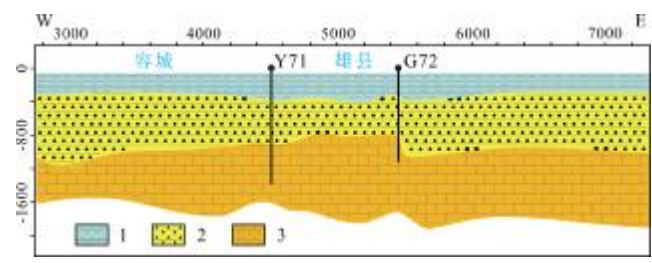


图 4 雄安新区三维构造模型近东西向剖面图

Fig. 4 West-east profile of 3D structure model of Xiong'an New Area

1—泥岩(mudstone); 2—砂岩(sandstone); 3—白云岩(dolomite)

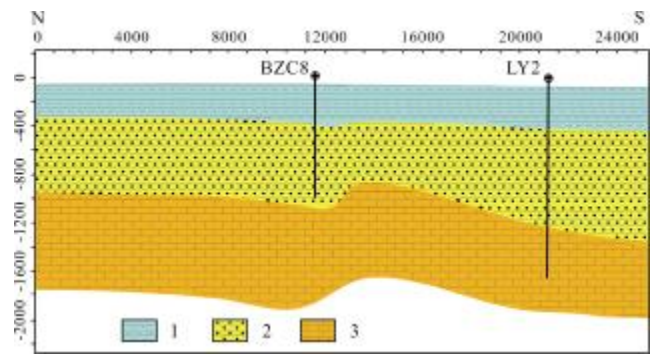


图 5 雄安新区三维构造模型近南北向剖面图

Fig. 5 North-south profile of 3D structure model of Xiong'an New Area

1—泥岩(mudstone); 2—砂岩(sandstone); 3—白云岩(dolomite)

3.2 相模型建立

沉积相的分布是有其内在规律的, 相的空间分布与层序之间、相与相之间、相内部的沉积层之间均有一定的成因关系. 因此, 在相建模时, 为了建立符合地质实际的储层相模型, 需要充分利用这些成因关系. 图 6 与图 7 分别为雄县雾迷山组相模型和容城雾迷山组相模型.

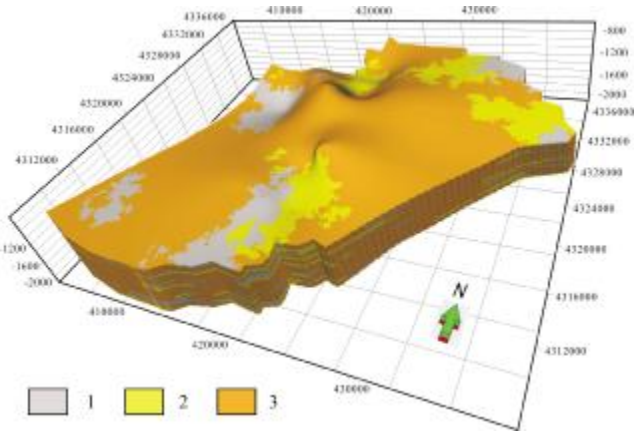


图 6 雄县雾迷山组相模型

Fig. 6 Facies model of Wumishan Formation in Xiongxin County
1—泥岩(mudstone); 2—砂岩(sandstone); 3—白云岩(dolomite)

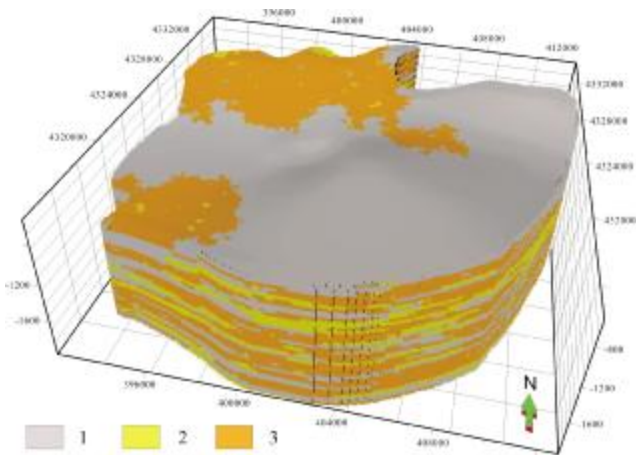


图 7 容城雾迷山组相模型

Fig. 7 Facies model of Wumishan Formation in Rongcheng County
1—泥岩(mudstone); 2—砂岩(sandstone); 3—白云岩(dolomite)

运用层序地层学原理厘定等时界面, 建立等时地层框架, 并在等时界面限制的模拟单元层(Zone)内, 依据一定的相模式(相序规律、砂体叠置规律、微相组合方式及各相几何学、概率学特征)选取建模参数, 建立沉积相的三维模型.

3.3 储层物性模型

三维物性建模采用相控条件下的序贯高斯(SGS)模拟算法, 建立孔隙度、渗透率模型. 序贯高斯模拟是建立在序贯模拟上的一个特殊的情况. 它是建立在顺序模拟、克里金正态得分转换原理基础上的, 只要知道一个随机变量的均值和方差就可以确定其分布. 因此它适用于一些分布区域较窄、取值稳定均一、少有奇异值出现的近似服从高斯分布的变量.

储层物性参数的相控随机模拟采用序贯高斯模拟, 应用数据分析得到的参数统计特征及变差函数, 分别模拟了雄县热采区雾迷山组渗透率(图 8)、容城热采区雾迷山组孔隙度(图 9)在空间上的变化特征.

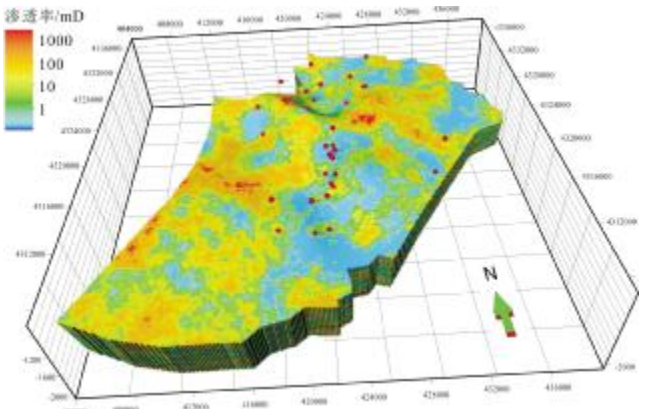


图 8 雄县雾迷山组渗透率三维物性模型

Fig. 8 3D permeability model of Wumishan Formation in Xiongxin County

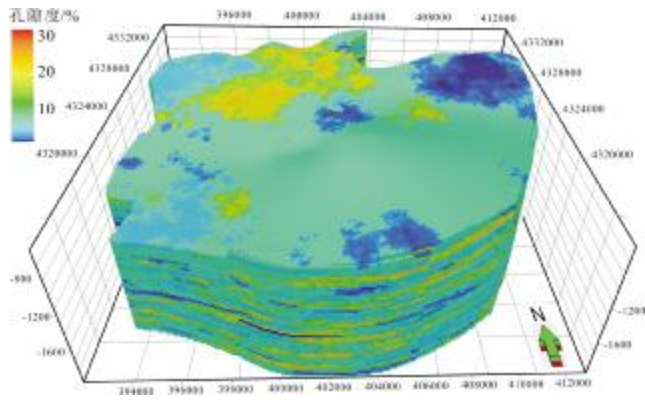


图 9 容城雾迷山组孔隙度三维物性模型

Fig. 9 3D porosity model of Wumishan Formation in Rongcheng County

3.4 温度场模型

(1) 岩石的热物性参数

在本研究过程中,实际测量 129 块钻井岩心样品的热导率值,其中包含 35 块沉积砂岩、68 块白云岩及 26 块变质基岩。通过分析可以看出,沉积砂岩的热导率值分布范围在 $0.4 \sim 3.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 之间,平均值为 $1.88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;变质基岩的岩性主要为花岗片麻岩和片麻岩,测试结果显示热导率值的范围为 $1.6 \sim 4.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,主要的分布区间为 $2.5 \sim 3.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,热导率的平均值为 $2.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;白云岩的热导率值分布范围为 $2.0 \sim 10.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,主要的分布区间段为 $4.0 \sim 7.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,热导率的平均值为 $5.87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

针对不同岩性采集岩石样品进行热物性参数测定,将结果以散点形式绘制图中,并对测试结果进行温度校正,获得砂岩热导率大致为 $1.69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,白云岩热导率大致为 $5.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,变质岩热导率大致为 $2.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

(2) 雾迷山组温度场模型

首先根据雄安新区及周边实际钻井测井曲线的温度数据,包括最新钻探实施的地热井、小区供暖废弃井及勘探井等,并结合区域地层剖面及相关的地球物理资料等,获取地热井沿深度的温度数据。结合建立的三维地质模型,将所有地热井的温度数据导入三维地质模型中,利用序贯高斯插值方法,获得基于三维地质模型的温度场模型,如图 10 所示。

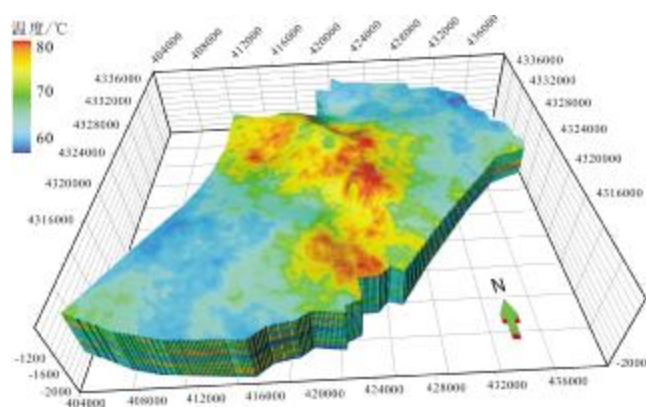


图 10 雄县雾迷山组三维温度场模型

Fig. 10 3D temperature field model of Wumishan Formation in Xiongxin County

利用钻孔实际测温曲线对所建立的温度场模型进

行进一步校正,通过反复测试序贯高斯插值参数,最终获得与测温曲线较为一致的温度场模型。图 11 为反演调整参数后模型稳态地层温度与实测钻孔温度的对比,从温度曲线可以看出模拟的地层温度与实际测温曲线基本一致,说明假设合理。由图中可以看出所建立的三维温度场模型可以较好地拟合实际测温曲线的数据。

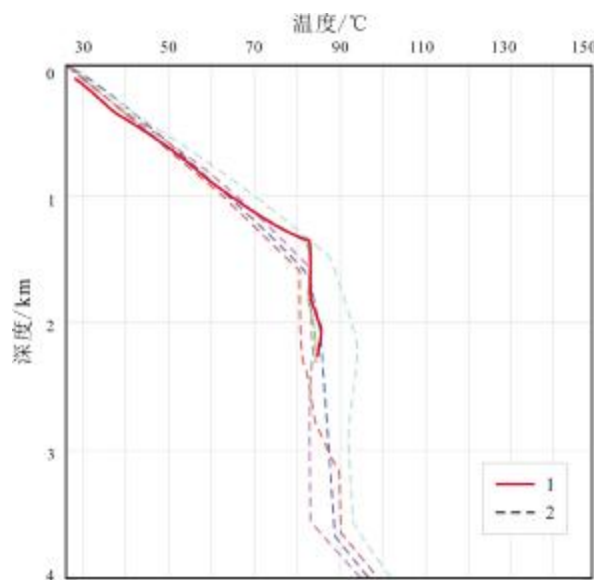


图 11 实测地温曲线与模拟计算所得稳态地温曲线

Fig. 11 Comparison of observed and simulated steady-state subsurface temperature curves

1—地温实测值(measured value of ground temperature); 2—不同位置的模拟值(simulation value of ground temperature in different locations)

4 模型合理性验证

本文地质建模采用随机建模与确定性建模相结合的方法,模拟插值过程中考虑了实际地层的细微变化,建立的模型与实际地质情况吻合,但在控制范围以外储集层参数具有一定的随机性,即不确定性。为了将这种不确定性控制在一定范围内,需对模型进行合理性检验。本文采用物性参数展布对比、概率模型一致性、储量拟合三方面验证地质模型合理性。

概率模型验证是指通过分析模型孔隙度、渗透率的概率分布特征验证地质模型的合理性,对比测井解释曲线数据和模型属性数据的概率分布特征,三者越趋于一致,地质模型就越合理。

测井解释曲线数据作为单井岩石地球物理研究成

果,反映的是单井原始的、最真实的属性分布特征;初始化数据是对测井解释曲线数据进行数据转换后的数据,对单井垂向网格进行了赋值,反映的是单井井眼属性数据分布特征;属性模型数据是初始化数据在岩相模型控制下,通过变差函数分析,采用序贯高斯模拟对空间网格赋值后的数据,反映的是油热储属性三维空间分布特征。本研究地质模型的孔隙度、渗透率概率分布特征与测井解释曲线数据和初始化数据基本一致(图12),说明该模型与地质认识吻合度高(超过90%),所建地质模型合理。

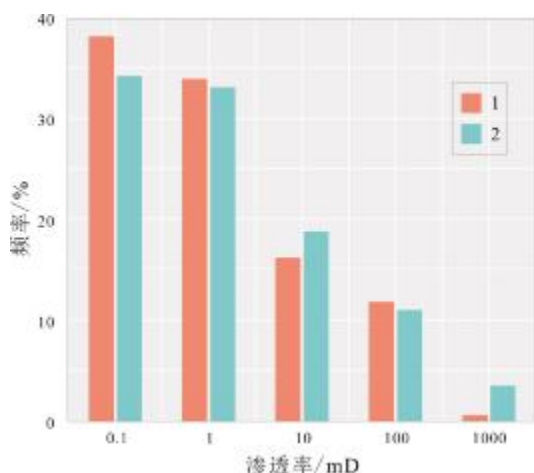


图12 地质模型渗透率概率分布与测井曲线对比直方图

Fig. 12 Histogram comparison of permeability probability distribution between geological model and logging data

1—模型属性数据(attribute data of model); 2—测井数据(logging data)

5 结论

本文根据区域地质资料、钻井地层数据、测井资料等建立了雄安新区雾迷山组地热地质模型,并采用物性参数展布对比、概率模型一致性、拟合三方面验证地质模型合理性。同时,建立了构造模型、相模型、储层物性模型、温度场模型,并对模型合理性进行验证。模拟结果表明,模型与实际拟合性较强,可为雄安新区地热田的进一步开发,优化井网布局,为实现地热能的循环可持续开发利用提供技术支撑。同时,也为雄安新区“碳达峰碳中和”发展目标助力。

参考文献(References):

[1]汪集暘. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 10-121.

Wang J Y. Geothermics and its application [M]. Beijing: Science

Press, 2015: 10-121.

[2]陈墨香. 中国地热资源的分布及其开发利用[J]. 自然资源, 1991, 15(5): 40-46, 58.

Chen M X. The distribution of geothermal resources and its development and utilization[J]. Natural Resources, 1991, 15(5): 40-46, 58. (in Chinese)

[3]Mercer Jr J W, Pinder G F. Galerkin finite-element simulation of a geothermal reservoir[J]. Geothermics, 1973, 2(3/4): 81-89.

[4]陈继良, 黄文博, 曹文昊, 等. 增强型地热系统中液-岩化学作用数值模拟研究[J]. 新能源进展, 2016, 4(1): 48-55.

Chen J L, Huang W B, Cao W J, et al. A numerical study on the effect of fluid-rock reaction during enhanced geothermal system heat extraction processes[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016, 4(1): 48-55.

[5]王宽. 基于TOUGH2数值模拟软件的延津地区热储采灌研究[J]. 地下水, 2019, 41(1): 14-16.

Wang K. Research on thermal storage and irrigation in Yanjin area based on TOUGH2 numerical simulation software[J]. Ground Water, 2019, 41(1): 14-16.

[6]周训, 陈明佑, 方斌, 等. 埋藏型岩溶地下水水源地的三维数值模拟——以天津市宁河北岩溶地下水源地为例[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 6-11.

Zhou X, Chen M Y, Fang B, et al. 3-D numerical modeling to groundwater wellhead in buried karst area: A case study to the Ninghebei karst wellhead in Tianjin[J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(1): 6-11.

[7]宋美钰, 刘杰, 于彦, 等. 天津地区雾迷山组热储数值模拟研究[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(4): 306-311.

Song M Y, Liu J, Yu Y, et al. Numerical simulation of Wumishan Formation thermal reservoir in Tianjin area[J]. Geological Survey and Research, 2018, 41(4): 306-311.

[8]李俊峰, 贾志, 张芬娜, 等. 天津市蓟县系雾迷山组热储层水位动态变化及趋势预测研究[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(3): 221-225.

Li J F, Jia Z, Zhang F N, et al. Research on the change and trend prediction of the water level of Wumishan geothermal reservoir in Jixian system, Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 2013, 36(3): 221-225.

[9]孔彦龙, 黄永辉, 郑天元, 等. 地热能可持续开发利用的数值模拟软件OpenGeoSys: 原理与应用[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 170-177.

Kong Y L, Huang Y H, Zheng T Y, et al. Principle and application of OpenGeoSys for geothermal energy sustainable utilization[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 170-177.

[10]孙致学, 姜传胤, 张凯, 等. 基于离散裂缝模型的CO₂增强型地热系统THM耦合数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 79-87.

- Sun Z X, Jiang C Y, Zhang K, et al. Numerical simulation for heat extraction of CO₂-EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fracture models[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(6): 79–87.
- [11] Bujakowski W, Tomaszewska B, Miecznik M. The Podhale geothermal reservoir simulation for long-term sustainable production[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 420–430.
- [12] Crooijmans R A, Willems C J L, Nick H M, et al. The influence of facies heterogeneity on the doublet performance in low-enthalpy geothermal sedimentary reservoirs[J]. Geothermics, 2016, 64: 209–219.
- [13] Hamm V, Bouzit M, Lopez S. Assessment of complex well architecture performance for geothermal exploitation of the Paris Basin: A modeling and economic analysis[J]. Geothermics, 2016, 64: 300–313.
- [14] Ostermann I. Three-dimensional modeling of heat transport in deep hydrothermal reservoirs [J]. GEM — International Journal on Geomathematics, 2011, 2(1): 37–68.
- [15] Seyedrahimi-Niaq M, Ardejani F D, Noorollahi Y, et al. A three-dimensional numerical model to simulate Iranian NW Sabalan geothermal system[J]. Geothermics, 2019, 77: 42–61.
- [16] 孙杉, 谢家声, 李桂茹, 等. 冀中坳陷地下水的氢和氧同位素组成与成因[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(3): 240–249.
- Sun S, Xie J S, Li G R, et al. Hydrogen and oxygen isotopic composition and genesis of the ground water in Jizhong depression[J]. Oil & Gas Geology, 1982, 3(3): 240–249.
- [17] 张业成, 胡景江, 周瑞良. 中国地热资源概况及开发利用前景[J]. 中国地质, 1985(1): 19–22.
- Zhang Y C, Hu J J, Zhou R L. Overview of China's geothermal resources and their development and utilization prospects[J]. Geology in China, 1985(1): 19–22. (in Chinese)
- [18] 郭瑞婧, 纪友亮, 马锦涛, 等. 雄安新区雾迷山组岩溶热储成储机制及发育模式[J]. 古地理学报, 2023, 25(1): 180–197.
- Guo R J, Ji Y L, Ma Z T, et al. Mechanism and development model of karst reservoir in the Wumishan Formation in Xiong'an New Area [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(1): 180–197.
- [19] 马峰, 高俊, 王贵玲, 等. 雄安新区容城地热田碳酸盐岩热储采灌数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1534–1548.
- Ma F, Gao J, Wang G L, et al. Numerical simulation of exploitation and reinjection of carbonate geothermal reservoir in Rongcheng geothermal field, Xiongannew area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1534–1548.
- [20] 汪新伟, 郭世炎, 高楠安, 等. 雄安新区牛东断裂带碳酸盐岩热储探测及其对地热勘探的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 14–26.
- Wang X W, Guo S Y, Gao N A, et al. Detection of carbonate geothermal reservoir in Niudong fault zone of Xiong'an New Area and its geothermal exploration significance[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 14–26.
- [21] 李卫卫, 饶松, 唐晓音, 等. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征[J]. 地质科学, 2014, 49(3): 850–863.
- Li W W, Rao S, Tang X Y, et al. Borehole temperature logging and temperature field in the Xiong'an geothermal field, Hebei Province [J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(3): 850–863.
- [22] 郭世炎, 李小军. 河北保定容城凸起地热田储层属性与资源潜力[J]. 地质科学, 2013, 48(3): 922–931.
- Guo S Y, Li X J. Reservoir stratum characteristics and geothermal resources potential of Rongcheng uplift geothermal field in Baoding, Hebei[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(3): 922–931.
- [23] 何登发, 单帅强, 张煜颖, 等. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1207–1222.
- He D F, Shan S Q, Zhang Y Y, et al. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(8): 1007–1022.
- [24] 毛翔, 汪新伟, 郭世炎, 等. 高阳地热田及邻区地热资源形成机制[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 273–280.
- Mao X, Wang X W, Guo S Y, et al. Genetic mechanism of geothermal resources in the Gaoyang geothermal field and adjacent areas [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 273–280.
- [25] 魏广仁. 雄安新区蓟县系岩溶热储缝洞储层发育规律研究[J]. 石化技术, 2020, 27(8): 248–249.
- Wei G R. Study on the development law of karst thermal reservoir in Jixian System of Xiong'an New Area [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(8): 248–249. (in Chinese)
- [26] 戴明刚, 马鹏鹏, 雷海飞, 等. 雄安新区雾迷山组岩溶热储特征与有利区[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 487–505.
- Dai M G, Ma P P, Lei H F, et al. Distribution characteristics and favorable targets of karst geothermal reservoir of Wumishan Formation in Xiong'an New Area [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(2): 487–505.
- [27] 朱喜, 王贵玲, 马峰, 等. 雄安新区地热资源潜力评价[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 1093–1106.
- Zhu X, Wang G L, Ma F, et al. Evaluation of geothermal resources of the Xiong'annew area[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 1093–1106.
- [28] 余鸣潇, 马峰, 王贵玲, 等. 雄安新区容东片区地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 180–190.
- Yu M X, Ma F, Wang G L, et al. Characteristics and evaluation of geothermal resources in the Rongdong area of Xiongan New Area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 180–190.

- [12] 吴明堂, 薛正海, 崔振华, 等. 基于斜坡单元和证据权-logistic 回归的滑坡易发性评价[J]. 人民长江, 2022, 53(10): 87-94.
Wu M T, Xue Z H, Cui Z H, et al. Landslide susceptibility evaluation of reservoir banks by evidence weight-logistic regression coupling model based on GIS slope unit[J]. Yangtze River, 2022, 53(10): 87-94.
- [13] 王毅, 方志策, 牛瑞卿, 等. 基于深度学习的滑坡灾害易发性分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(12): 2244-2260.
Wang Y, Fang Z C, Niu R Q, et al. Landslide susceptibility analysis based on deep learning[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(12): 2244-2260.
- [14] 罗祎沅, 蒋亚楠, 许强, 等. 基于深度学习的滑坡位移时空预测[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2160-2170.
Luo H Y, Jiang Y N, Xu Q, et al. A spatio-temporal network for landslide displacement prediction based on deep learning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2160-2170.
- [15] 宋雨洋, 郝利娜, 严丽华, 等. 支持向量机在滑坡识别中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 727-734.
Song Y Y, Hao L N, Yan L H, et al. Application of the support vector machine in landslide identification[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(6): 727-734.
- [16] 赵彬如, 陈恩泽, 戴强, 等. 基于水文-气象阈值的区域降雨型滑坡预测研究[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2216-2225.
Zhao B R, Chen E Z, Dai Q, et al. Study on prediction of regional rainfall-induced landslides based on hydro-meteorological threshold[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2216-2225.
- [17] 姚闯闯, 姚鑫, 顾珍连, 等. 基于 InSAR 识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析[J]. 地质力学学报, 2022, 28(2): 257-267.
Yao C C, Yao X, Gu Z K, et al. Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(2): 257-267.
- [18] 黄龙, 孙倩, 胡俊. 基于 InSAR 与随机森林的滑坡敏感性评价与误差改正[J]. 测绘通报, 2022(10): 13-20.
Huang L, Sun Q, Hu J. Landslide sensitivity assessment and error correction based on InSAR and random forest method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(10): 13-20.
- [19] 吴绿川, 王剑辉, 符彦. 基于 InSAR 技术和光学遥感的贵州省滑坡早期识别与监测[J]. 测绘通报, 2021(7): 98-102.
Wu L C, Wang J H, Fu Y. Early identifying and monitoring landslides in Guizhou province with InSAR and optical remote sensing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(7): 98-102.
- [20] 李小米, 李海涛, 杨世强, 等. 基于高光谱数据和雷达融合的滑坡信息提取[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 184-190.
Li X L, Li H T, Yang S Q, et al. Landslide information extraction by fusion of hyper spectral and radar data[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 184-190.
- [21] 喜文飞, 赵子龙, 李国柱, 等. SBAS-InSAR 技术与无人机影像融合的滑坡变形监测[J]. 测绘通报, 2022(10): 1-6.
Xi W F, Zhao Z L, Li G Z, et al. Landslide deformation monitoring based on the SBAS-InSAR technology and UAV image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(10): 1-6.
- [22] 南晓聪, 刘俊峰, 张永选, 等. 基于多源时间序列的滑坡位移动态预测[J]. 人民珠江, 2023, 44(4): 54-62.
Nan X C, Liu J F, Zhang Y X, et al. Dynamic prediction of landslide displacement based on multi-source time series[J]. Pearl River, 2023, 44(4): 54-62.
- [23] 李信, 阮明, 杨峰, 等. 基于 GIS 技术和信息量法的地质灾害易发性研究——以海南省昌江县为例[J]. 地质与资源, 2022, 31(1): 98-105.
Li X, Ruan M, Yang F, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility based on GIS and information method: A case study of Changjiang County, Hainan Province[J]. Geology and Resources, 2022, 31(1): 98-105.

(上接第 229 页/Continued from Page 229)

- [29] 邢一飞, 王慧群, 李捷, 等. 雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1711-1722.
Xing Y F, Wang H Q, Li J, et al. Chemical field of geothermal water in Xiong'an New Area and analysis of influencing factors[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1711-1722.
- [30] 姚亚辉, 贾小丰, 李胜涛, 等. 雄安新区 D01 井岩溶热储下伏太古界中热流测定研究[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1723-1731.
Yao Y H, Jia X F, Li S T, et al. Heat flow determination of Archean strata under the karst thermal reservoir of D01 well in Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1723-1731.
- [31] 李燕燕, 张保健, 邢一飞, 等. 雄安新区高阳地热田热储高于庄组碳酸盐岩不同围压下破碎规律研究[J]. 中国地质, 2023, 50(4): 1138-1148.
Li Y Y, Zhang B J, Xing Y F, et al. Fragmentation law of carbonate rocks under different confining pressure in Gaoyuzhuang Formation, Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 2023, 50(4): 1138-1148.