

引用格式:任小庆,高小荣,王红亮,等.多尺度离散裂缝三维精细地质建模及地热资源评价研究:以渤海湾盆地献县地热田为例[J].油气藏评价与开发,2025,15(6):1104-1111.

REN Xiaoping, GAO Xiaorong, WANG Hongliang, et al. Research on multi-scale discrete fracture 3D refined geological modeling and geothermal resource evaluation: A case study of Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(6): 1104-1111.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.06.017

多尺度离散裂缝三维精细地质建模及地热资源 评价研究

——以渤海湾盆地献县地热田为例

任小庆^{1,2}, 高小荣², 王红亮¹, 刘健^{2,3}, 孙彩霞², 卢星辰², 孙致学⁴

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中石化绿源地热能开发有限公司, 河北 雄安 071800; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

摘要:渤海湾盆地献县地热田开发程度较高,为精细构建地热田模型及评价地热资源提供了数据支撑。献县地热田在构造上属于渤海湾盆地沧县隆起献县凸起,凸起东侧为阜城凹陷,西侧为饶阳凹陷。研究区内主要发育孔隙型砂岩热储与岩溶性灰岩热储2类热储,以蓟县系雾迷山组灰岩热储为研究对象,采用多尺度离散裂缝三维精细地质建模方法,开展献县地热田地热资源评价。献县地热田地质构造模型采用确定性与随机建模相结合的方法构建,模型网格步长设定为25 m×25 m,纵向上模拟300个层段(单层厚度1 m),总网格数为2 333.06×10⁴个。在测井二次解释结果约束下,建立雾迷山组岩相、物性及温度场地质模型。模型分析表明,献县地热田热储资源分布走向与献县凸起构造形态呈一定正相关关系;埋藏深度越浅,地热资源条件越好,并与已有井成井参数对比验证,模型适配性较好。采用基于精细热储地质模型的体积法评价区域内地热资源量,结果显示:献县地热田蓟县系雾迷山组热储总量为2.881×10¹⁶ kJ,折合标准煤9.841×10⁸ t,总可回收热量为0.432×10¹⁶ kJ;热水体积为35.75×10⁸ m³,热水含热量0.105×10¹⁶ kJ,折合标准煤0.359×10⁸ t。上述结果证实献县地热田地热资源潜力巨大,该模型为后续开发工作提供了技术支撑与依据。

关键词:渤海湾盆地;献县地热田;多尺度离散裂缝;地质建模;地热资源评价

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Research on multi-scale discrete fracture 3D refined geological modeling and geothermal resource evaluation: A case study of Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

REN Xiaoping^{1,2}, GAO Xiaorong², WANG Hongliang¹, LIU Jian^{2,3}, SUN Caixia², LU Xingchen², SUN Zhixue⁴

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Xiong'an New Area, Hebei 071800, China; 3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 4. China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: The Xianxian County geothermal field in the Bohai Bay Basin is highly developed, providing data support for the refined construction of geothermal field models and the evaluation of geothermal resources. Structurally, the Xianxian geothermal field belongs to the Xianxian County Uplift of the Cangxian County Uplift in the Bohai Bay Basin, with the Fucheng Depression to the east and the Raoyang Depression to the west. The main thermal reservoirs developed in the study area are porous sandstone thermal reservoirs and karst limestone thermal reservoirs. Taking the Wumishan Formation limestone thermal reservoir of the Jixian System as the research object, a multi-scale discrete fracture three-dimensional refined geological modeling method was employed to evaluate the geothermal resources of the Xianxian County geothermal field. The geological structure model of the Xianxian County geothermal field was constructed using deterministic and stochastic modeling methods. The model mesh was set with a step size of 25 m × 25 m, and 300 layers were simulated vertically, with a single layer thickness of 1 m and a total mesh number of 2 333.06 × 10⁴. Under the constraints of the secondary interpretation results of well logging, a geological model of lithofacies, physical properties, and temperature fields of the Wumishan Formation was established. The model

收稿日期:2024-12-23。

第一作者简介:任小庆(1980—)男,在读博士研究生,高级工程师,主要从事地热勘探开发和地热尾水回灌工作。地址:河北省保定市雄县雄州路746号,邮政编码:071800。E-mail: renxiaoping.xxsy@sinopec.com

通信作者简介:高小荣(1976—)男,本科,正高级工程师,主要从事地热能开发利用研究工作。地址:河北省保定市雄县雄州路746号,邮政编码:071800。E-mail: ga Xiaorong.xxsy@sinopec.com

基金项目:中石化绿源地热能开发有限公司科技项目“河北献县地热田热储地质建模及资源潜力评价”(10500100-23-ZC0607-0006)。

analysis showed that the distribution trend of thermal reservoir resources in the Xianxian County geothermal field was positively correlated with the structural morphology of the Xianxian County Uplift. The shallower the burial depth, the better the geothermal resource conditions. Comparison with existing well completion parameter data further validated the model, indicating good adaptability. A volumetric method based on the refined thermal reservoir geological model was employed to evaluate the geothermal resources in the region. The results showed that the total thermal reservoir capacity of the Wumishan Formation in the Jixian System of Xianxian County geothermal field was 2.881×10^{16} kJ, equivalent to 9.841×10^8 t of standard coal, with a total recoverable heat of 0.432×10^{16} kJ. The hot water volume was 35.75×10^8 m³, and the heat content in the hot water was 0.105×10^{16} kJ, equivalent to 0.359×10^8 t of standard coal. These findings confirm the huge potential of geothermal resources in the Xianxian County geothermal field, and the proposed model provides technical support and basis for the subsequent development in the Xianxian County geothermal field.

Keywords: Bohai Bay Basin; Xianxian County geothermal field; multi-scale discrete fracture; geological modeling; geothermal resource evaluation

地热资源是可再生的绿色清洁能源。献县地热资源兼具温度高、水量大、水质好的特点,被誉为“华北地区最大的地热富集区”,是河北省地热条件最好的地区之一。献县地热资源热储埋深浅^[1],被广泛应用于城乡居民供热。科学规范地开发利用地热资源,可充分发挥其安全、稳定、高效等清洁能源特性^[2],而可靠的热储地质模型是地热资源量评价与开发方案优化的基础。

热储地质模型是指在特定地质条件下,通过综合分析区域地质、水文地质、构造地质等因素,对地下水热体系进行描述与模拟,进而建立的一套用于地热储存与开发利用的可靠地质模型。丛淑飞等^[3]认为,将规模比较小的油气藏建模拓宽到建立大规模热储层模型,不但保证建模精度,在规模上也满足地热地质的需要。SEYEDRAHIMI-NIARAQ M等^[4]利用 Tough2 模拟器代码构建概念模型,对伊朗西北部 Sabalan 地热田开展研究,通过获取 10 口深井数据,提出并验证了该模型的可靠性。FLORIDIA G 等^[5]对西西里岛(意大利南部)的三维热模型及地热资源勘探前景进行研究后认为,地下地热潜力的量化主要取决于地热与岩石圈的力学构型。ABOUD E 等^[6]利用重力与地震断层成像技术,推导得出沙特北部 Rahat 火山地区的地下三维地质结构,为该地区哈拉特拉哈特北部地热活跃区的后续勘探指明方向。TIAN X M 等^[7]提出一套高效灵活的框架,可用于地热资源大规模能开采的历史匹配与预测。盖长城等^[8]通过对比地热数值模拟和油藏数值模拟数学模型的基础架构、数值解法、案例分析,揭示了数值模拟方法在开发 2 种能源过程中的相似点和差异性。朱红光等^[9]基于立方定律,建立了可与岩体裂隙匹配的分析模型。许光祥等^[10]根据裂隙稳定流达西定律,指出采用超立方定律与次立方定律建立的模型可描述粗裂隙渗流。高瑜等^[11]、单丹丹等^[12]在连续介质建模前提下,针对裂隙不同参数对地热利用效率的影响展开研究,结果表明裂隙物性参数与地热利用效率呈正相关变化。张树光等^[13]依据潘西煤矿单裂隙系统建立热耦合模型,模型验证结果显示,岩体内

部断裂两盘温度分布差异是由岩体内部渗流场导致。柯婷婷等^[14]针对关中盆地建立地质模型,结合生产运行中不同采灌方式及地下水流动影响条件,分析得出不同回灌效率。杜广林等^[15]对多重裂隙渗流网格模型提出新观点,并据此建立新的渗流模型。林承焰等^[16]总结研究了油气藏储层裂缝综合表征与预测的研究进展及数字岩心建模方法。为进一步深化对献县城区地热资源热源、热结构及成因机制的认识,以蓟县系雾迷山组热储为研究对象,对测井资料开展二次解释,建立雾迷山组基础地质模型;同时采用确定性与随机建模相结合的方法,制定多尺度裂缝分级方案并建立多尺度离散裂缝模型。采用基于精细热储地质模型的体积法评价区域内地热资源量,为深入认识献县地热田特征,精细化开发献县地热田提供技术支撑与依据。

1 地质背景

献县在构造上属于渤海湾盆地沧县隆起献县凸起,凸起东侧为阜城凹陷,西侧为饶阳凹陷,二者以献县断层为界,献县中心城区位于献县断凸内部。

献县断裂为献县地热田的主要断裂,活动时限从太古宇—古元古界延续至今,具有走向长、断盘两侧位移大等特征,断层走向为北东—北北东向,倾向北西向。该断裂分隔冀中拗陷与沧县隆起两大Ⅱ级构造单元,是控制区域地层沉积的主要断层。受多期构造运动影响,献县凸起普遍缺失新近系馆陶组与古近系东营组,且区内灰岩热储埋藏较浅,其顶界埋深普遍介于 1 300~1 500 m,而断层西侧饶阳凹陷内的基岩埋深普遍大于 4 000 m^[17-19]。

献县凸起内热储层依据岩性与埋藏深度可分为 2 类:一类为埋藏较浅的孔隙型砂岩热储,属传导型热储;另一类为埋藏较深的岩溶型裂隙热储(基岩热储),传热方式以热传导与热对流为主。中元古界蓟县系热储在献县凸起内广泛分布,是区内最重要的热储层。

2 地质模型建立

2.1 构造模型及地层模型建立

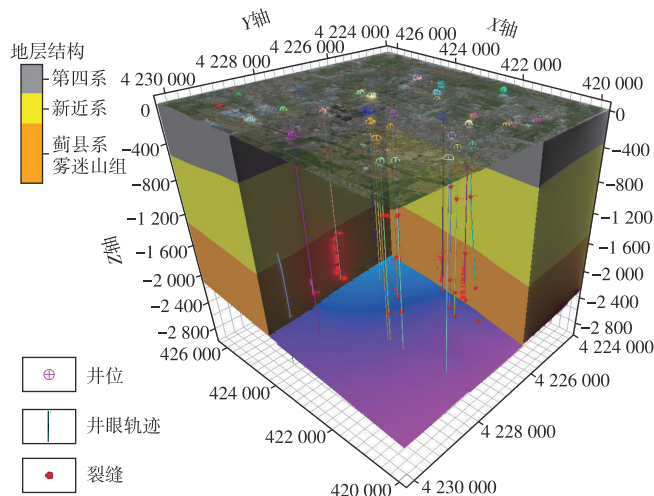
构造模型是热储岩相、岩石物理参数及热物性参数空间展布的基础,是对地下储层构造形态开展三维可视化描述与数字建模的过程。热储构造模型由断层模型与地层层面模型组成。依托地球物理勘探成果,结合研

究区内 50 余口地热井的井深(表 1)、地层界面、断层断点等深度数据,对献县凸起开展地质建模。模型尺度设定为: X 轴 420 000~426 000, Y 轴 4 224 000~4 230 000, Z 轴 0~-2 800 m, 其中,研究区地热井井深介于 1 800~2 800 m,井群呈“集采集灌”式分布,井间距均大于 500 m,可避免各井间发生热突破。最终结合献县凸起地质特征与测录井解释结果,建立研究区三维地层模型(图 1)。

表 1 献县地热田部分地热井建模参数

Table 1 Modeling parameters of selected geothermal wells in Xianxian County geothermal field

井名	井深/m	利用热储段深度/m	裂缝类型	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	井温/ $^{\circ}\text{C}$
ZFJ2	2 157.00	1 526.00~2 157.00	I 类裂缝	11.25	345.59	87
GY1	2 210.00	1 568.90~2 210.00	III 类裂缝	8.79	6.07	90
GY2	2 114.00	1 501.50~2 114.00	II 类裂缝	9.03	63.35	80
GY3	2 559.00	1 630.00~2 559.00	III 类裂缝	8.93	5.14	84
NGC1	2 060.00	1 459.00~2 060.00	II 类裂缝	8.16	26.44	92
NGC2	2 187.00	1 554.00~2 187.00	III 类裂缝	8.57	11.97	93
NGC3	2 200.00	1 591.00~2 200.00	III 类裂缝	7.94	0.89	96
ZFJ1	2 080.00	1 476.00~2 080.00	III 类裂缝	6.62	3.22	88
XFT2	2 200.00	1 449.62~2 200.00	I 类裂缝	10.73	164.10	86



注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹。

图 1 渤海湾盆地献县地热田三维地层模型

Fig. 1 3D stratigraphic model of Xianxian County geothermal field in Bohai Bay Basin

2.2 多尺度离散裂缝建模

以测井二次解释成果为基础,结合抽水试验等测试数据作为评价指标,综合考量构造位置、热储岩相、成因机制、应力条件及空间尺度等因素,建立献县地热田雾迷山组多尺度裂缝分级方案(表 2)。其中, I、II 级裂缝控制层间渗流, III 级裂缝控制层内渗流, IV 级裂缝连通基质孔喉。

由于储层裂缝发育特征对地热渗流传热起主导作用,因此,研究需同时建立雾迷山组热储基质地质模型与多尺度离散裂缝精细模型,为后期采灌参数优化及井网部署提供可靠地质依据。

裂缝建模常用双重介质模型与离散裂缝模型,双重介质模型对于存在多条大裂缝流动通道时,模拟计算误差较大,离散裂缝模型虽然常用于匹配型网格建模,但实际裂缝分布复杂,若采用非网格匹配划分,剖分过程繁

表 2 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组多尺度裂缝分级方案

Table 2 Multi-scale fracture classification scheme for Wumishan Formation in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

裂缝尺度	主要分布特征	平面延伸长度	缝高	开度	应力条件	主要储渗作用
I 级大尺度裂缝	断距不明显的小断层或高角度断层型裂缝,无断层核,切割泥岩夹层,可贯穿数套复合砂体	数百米级	数十米级	毫米级	局部应力场	导水换热主要通道
II 级中尺度裂缝	在热储体内发育,切割层理层界面,岩性差异及沉积微相控制	数十米级—百米级	米级—十米级	百微米级	派生应力场	导水换热主要通道
III 级小尺度裂缝	在单层热储内发育,受层理面、岩溶作用控制,表现为与层面垂直的溶蚀型裂缝	米级—十米级	分米级—米级	数十微米级—百微米级	派生应力场	增渗换热

琐,且易因网格剖分质量差导致计算误差增大。因此,采用多尺度离散裂缝建模方法:先通过大、中尺度进行网格粗分并求解控制方程,再利用小尺度来求解局部流动方程^[20],在保证模型剖分精细度的同时,兼顾模拟结果的准确性。考虑到研究区埋藏深、井控程度低且缺乏成像测井资料等客观条件,结合确定性与随机建模方法,以地热钻井识别的裂缝资料为基础数据,考虑区域构造格架、相似区地质露头等多重约束,采用“多重约束、动静验证”的建模策略^[21]。

1) 大尺度裂缝网络模型

大尺度裂缝平面延伸长、纵向高度大,其可探测性与预测精度均高于中、小尺度裂缝。受近南北向挤压应力作用,区域裂缝走向主要为北北东向,最初裂缝形成时未受岩溶作用侵蚀,裂缝开度较小且裂缝面较为光滑平直,后期经差异溶蚀作用改造,裂缝面凹凸不平、宽度不均,溶蚀改造后的裂缝宽度可达0.1~3.0 mm,而在溶蚀作用强烈区域,裂缝宽度可超5 mm^[22],且充填物较少。大尺度裂缝模型构建采用确定性与随机建模相结合的方法,通过测井响应识别较大尺度裂缝发育井段,确定其发育层位、规模、产状及形态,结合目的层裂缝长度、产状等信息,建立大尺度裂缝离散模型^[23],针对无井或缺测井响应资料缺失的井区,在区域古、今应力场约束下,分层、分期构建裂缝网络模型,二者融合形成大尺度裂缝网络模型。

2) 中尺度裂缝网络模型

中尺度裂缝规模小于大尺度裂缝,受研究区资料匮乏的客观条件限制,采用随机建模方法构建中尺度离散裂缝模型。具体步骤如下:首先,采用地质建模软件的离散裂缝网络(DFN)裂缝建模模块,设定中尺度裂缝的长度、方位等参数,以井点裂缝数据为条件,结合断层距离与断层走向的双重约束;其次,通过地质统计学方法获取三维裂缝发育概率体;最后,针对不同地层、不同裂缝期次,对天然裂缝的发育产状、密度进行精细表征,据此构建中尺度离散裂缝网络模型。该模型中,裂缝长度设定范围为10~50 m,裂缝走向以北西-南东向为主,白云岩脉裂缝多呈共轭型分布,主裂缝走向以北东-南西向为主,与大尺度裂缝模型特征基本吻合。

3) 小尺度裂缝网络模型

相较于大、中尺度裂缝,小尺度裂缝的预测与建模是世界性难题,主要因为小尺度裂缝特征参数在预测过程中存在较大的不确定性,因此,通常采用随机模拟方法处理。小尺度裂缝的三维密度建模是该领域的关键,其准确性直接影响小尺度裂缝离散网络模型的构建质量。开展小尺度裂缝密度建模时,需综合考量其形成控制因素及地震属性对该尺度裂缝平面分布的影响。小尺度裂缝

通常伴随大、中尺度裂缝形成,其发育密度与构造特征密切相关,因此,建立小尺度裂缝模型时必须考虑构造形态的空间约束,例如,构造曲率越大,小尺度裂缝发育密度相应越高^[24]。小尺度裂缝是储层天然裂缝的重要组成部分,但受物探资料分辨率限制,无法直接识别井间小尺度裂缝,因此,小尺度裂缝建模主要采用DFN建模方法,通过随机模拟构建小尺度裂缝DFN模型。其中,裂缝密度模型的构建是小尺度裂缝模型建立的关键。

3 网格参数设置与剖分

在地质建模中,网格划分是核心环节。设置合理的网格尺寸与数量,既能更贴近实际地质条件,又可显著降低数值模拟时的计算机运算负荷。但是理想状态并非网格越密、尺寸越小越好,主要因为当前计算机运算能力有限,大数据量网格计算必然导致运算效率降低^[25-29]。结合献县地热田构造特征及现有井位实际情况,为完整反映热储构造形态并提高热储精细地质模型精度,进而为地热田采灌精部署提供科学决策依据,确定献县地热田精细网格剖分方案如下:平面网格步长设为25 m×25 m;针对蓟县系雾迷山组主力热储层,纵向上划分为300个模拟层,单层厚度约1 m(表3),以精细刻画目的热储非均质性并控制网格节点规模。对上覆新生界明化镇组与平原组,则适当减少模拟层数,实现主力热储非均质性充分刻画与计算效率提升的平衡。献县地热田模拟网格总数为 $2\ 333.06 \times 10^4$ 个(265×248×355)。

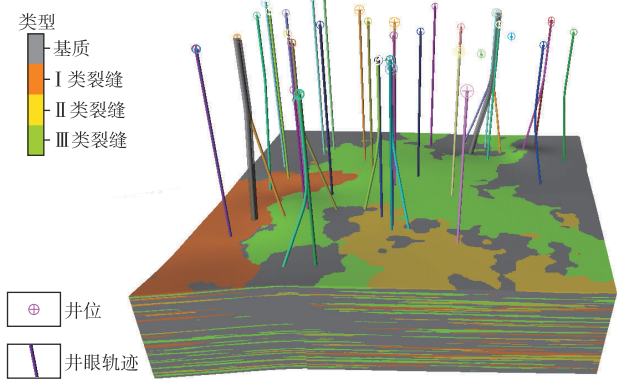
表3 渤海湾盆地献县地热田纵向网格系统参数
Table 3 Parameters of vertical mesh system for Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

地质分层	纵向模拟层/个	单层厚度/m
平原组	5	50~80
明化镇组	50	10~20
雾迷山组	300	1

4 热储模型建立

4.1 热储岩相模型

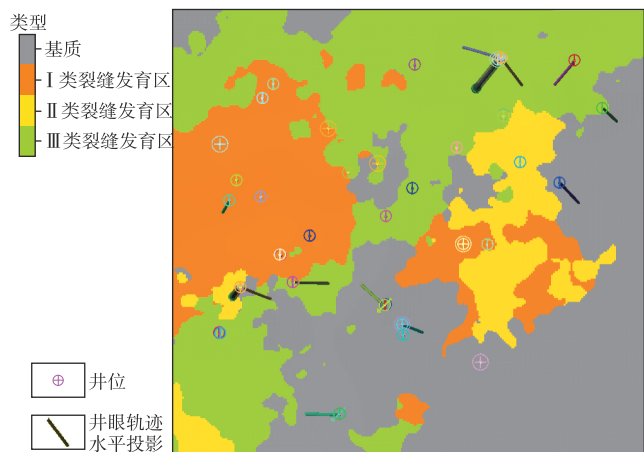
开展热储层岩相建模时,以测井综合解释的测井岩相类型为基础数据,结合测井曲线中的自然伽马曲线建立关联,据此确定最优岩相解释模型。最后,将所建模型与单井岩相解释结果进行对比分析,确保模型井上数据具有良好匹配度。图2与图3为献县地热田雾迷山组岩相模型,该模型包含基质相、裂缝相两大类,其中,裂缝相根据裂缝发育程度及抽水试验动态响应,进一步细分为



注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹。

图2 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组多层叠置三维立体模型

Fig. 2 3D stereoscopic model of multi-layer superimposition of Wumishan Formation in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin



注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹水平投影。

图3 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组主力热储层平面分布

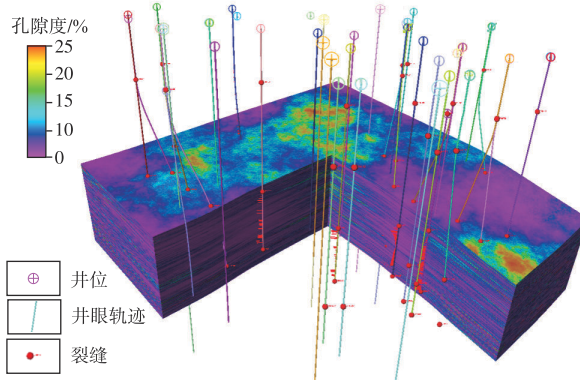
Fig. 3 Planar distribution of main geothermal reservoirs of Wumishan Formation in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

I、II、III类裂缝亚相。献县地热田裂缝岩相分布呈现明显规律,III类裂缝亚相分布于地热田中北部,I、II类裂缝亚相分布于西南部与东南部。因献县凸起雾迷山组热储顶界埋深由北西向南东逐渐变浅,这表明热储裂缝岩相与献县凸起构造发育呈一定正相关关系,即热储埋藏越浅,受岩溶剥蚀作用越强烈,裂缝岩相发育程度越优。

4.2 热储层物性模型

热储层孔隙度、渗透率等参数的非均质性较强,其空间分布具有一定随机性,因此,选择随机建模方法构建热储物性参数模型。热储物性建模以井点测井二次解释成果为条件数据,井间则以岩相、物探反演等数据作为协同约束,通过随机模拟方法建立热储孔隙度、渗透率等物性

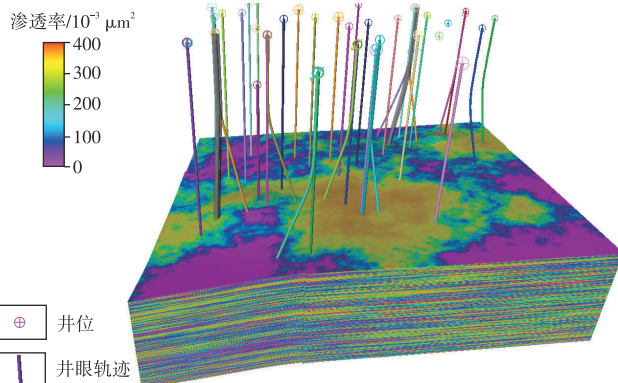
参数的三维空间展布模型。通过多次参数优选与质量控制,最终建立雾迷山组热储孔隙度、渗透率模型。由图4与图5可见,渗透率与孔隙度的平面分布与热储岩相具有较好相关性,且沿北西至南东方向,渗透率与孔隙度发育状况较好。



注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹。

图4 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组孔隙度三维地质模型

Fig. 4 3D porosity geological model of Wumishan Formation in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin



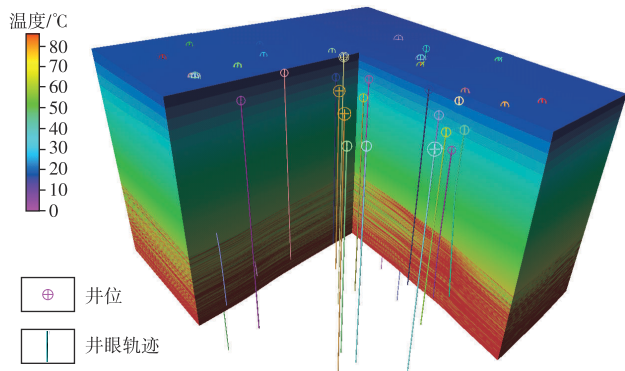
注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹。

图5 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组渗透率三维地质模型

Fig. 5 3D permeability geological model of Wumishan Formation in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

4.3 热储温度场模型

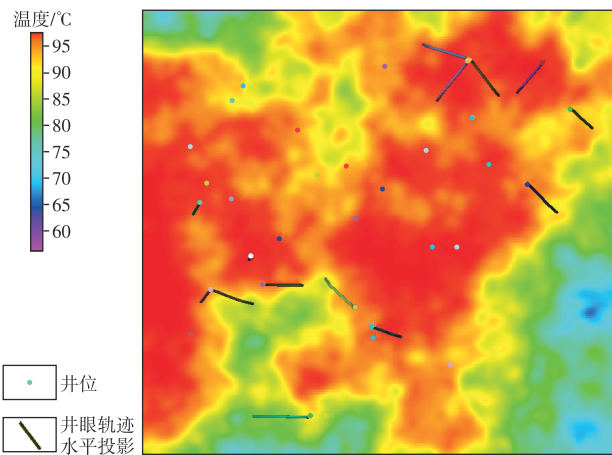
热储温度模型是热储资源量评价、地热井位优选及采灌布井方案优化的核心地质基础。实测数据显示,在岩性与构造形态大致一致的前提下,区域地温、压力分布主要受构造格局控制,其空间分布的非均质性弱于孔隙度、渗透率等地质参数;当井距较大时,该类参数在井间分布仍表现出一定随机性。因此,提出采用确定性与随机性相结合的方法构建雾迷山组热储温度模型(图6、图7)。表4为研究区雾迷山组模拟温度与地热井实测温度的对比结果,可见模拟值与实际值误差较小,吻合度较高。



注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹。

图6 渤海湾盆地献县地热田三维温度场地质模型

Fig. 6 3D temperature field geological model of Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin



注:图中不同颜色分别对应不同地热井的井位及井眼轨迹水平投影。

图7 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组热储温度平面分布

Fig. 7 Planar distribution of thermal reservoir temperature in Wumishan Formation of Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

表4 渤海湾盆地献县地热田雾迷山组热储模拟温度与地热井实测温度对比

Table 4 Comparison between simulated thermal reservoir temperatures and measured geothermal well temperatures in Wumishan Formation of Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

井名	模拟温度/°C	实测温度/°C	误差率/%
NGC3	95	96	1.04
GY1	88	90	2.22
XFT2	85	86	1.16
ZF1	84	88	4.54

5 地热资源量评价

1975年以前,地热资源评价尚未形成统一方法体系,直到1976年,意大利国家电力局地热研究中心

(ENEL)和美国能源研究与开发部(ERDA)通过研讨,共同建立了一套地热资源评价系统,该系统至今仍广泛应用于地热领域各方向。

该套评价系统不仅对地热资源进行分类,还阐明了资源储量与资源类型间的关联性。同时,不同类型地热资源储量的评估,在很大程度上取决于地下地热资源的勘察能力与可开发利用能力。

地热资源储量评估中,体积法应用最为普遍。采用该方法计算地下资源储量时,需获取岩石与水的比热、密度及孔隙度等参数,且该方法对孔隙型砂岩热储与裂隙型灰岩热储均适用。体积法地热资源储量计算公式为:

$$Q = v(t - t_0)[\rho_r c_r (1 - \varphi) + \rho_w c_w \varphi] \quad (1)$$

$$Q_{Re} = QR_E \quad (2)$$

$$Q_w = v\varphi \quad (3)$$

$$Q_{RE} = v(t - t_0)\rho_w c_w \varphi \quad (4)$$

式中: Q 为地热资源量,即热储中所含热量,单位kJ; v 为热储体积,单位 m^3 ; t 为指定体积内岩石和水的平均温度,单位 $^{\circ}C$; t_0 为基准温度,单位 $^{\circ}C$; ρ_r 为岩石的密度,单位 kg/m^3 ; c_r 为岩石的比热,单位 $kJ/(g \cdot ^{\circ}C)$; φ 为岩石孔隙度,%; ρ_w 为水的密度,单位 kg/m^3 ; c_w 为水的比热,单位 $kJ/(g \cdot ^{\circ}C)$; Q_{Re} 为可回收热量,即用热储法算得的资源量中所能开采出来的部分,单位kJ; R_E 为热回收率,即可回收热量与地热资源量之比,单位%; Q_w 为热储中储存的容积水量,单位 m^3 。

研究采用的热储资源量计算方法,是以体积法为基础,结合三维地质模型开展计算。由于三维地质建模过程中已获取储层物性与温度的空间分布特征,具体操作思路为:将体积法应用于三维地质模型的每个控制单元体,先计算单个单元体的资源量,再对整个三维研究区域内所有单元体的资源量进行积分,最终得到区域总资源量。基于三维地质模型的体积法计算热储资源量,可充分体现储层物性与温度的空间非均质分布特征,具体计算可参照如下公式:

$$Q = \sum_{i=1}^N v_i (t_i - t_0) [\rho_r c_r (1 - \varphi_i) + \rho_w c_w \varphi_i] \quad (5)$$

式中: N 为热储单元体数量; i 为从第1个到第 N 个热储单元体; v_i 为单个热储单元体体积,单位 m^3 ; t_i 为单个热储单元体岩石与水的平均温度,单位 $^{\circ}C$; φ_i 为单个热储单元体平均孔隙度,%。

1) 热储体积及温度

献县地热田3000m以浅雾迷山组热储体积通过三维地质模型获取,结果为 $3.259 \times 10^4 km^3$ 。

热储温度分布同样基于三维地质模型确定:热储最高温度为 $97.6^{\circ}C$,最低温度为 $56.1^{\circ}C$,平均温度

为78.6℃。

2) 岩石比热(c_r)、密度(ρ_r)及孔隙度(φ)特征值
岩石比热与密度是热储资源量计算的重要参数,本

次评价所需数据主要参考两方面:一是渤海湾盆地献县地热田岩石物性参数特征值测试结果(表5);二是相关参考文献查询数据。

表5 渤海湾盆地献县地热田岩石物性参数特征值

Table 5 Characteristic values of rock physical property parameters in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

热储	岩石密度特征值 $\rho_r/(kg/m^3)$			岩石比热特征值 $c_r/(kJ/(g\cdot^\circ C))$			岩石孔隙度特征值 $\varphi/\%$		
	最小值	最大值	最可能值	最小值	最大值	最可能值	最小值	最大值	最可能值
雾迷山组	2 702.0	3 060.0	2 881.0	0.86	1.02	0.94	1.00	32.91	13.5

热储孔隙度数据直接取自前文建立的三维地质模型。

3) 水的密度(ρ_w)及比热(c_w)

水的热物性参数参考中华人民共和国地质矿产部标准《地热资源评价方法》(DZ 40—85)推荐经验值。考虑到献县地热田雾迷山组热储温度相对较低,本次计算取水的密度 ρ_w 为1 000.0 kg/m³,比热 c_w 为4.18 J/(g·℃)。

4) 热回收率(R_E)

根据中华人民共和国地质矿产部标准《地热资源评价方法》(DZ 40—85),采用标准推荐的经验值,将研究区内雾迷山组碳酸盐岩基岩裂隙热储的热回收率取为15%(表6)。

表6 渤海湾盆地献县地热田地热资源储量评价结果

Table 6 Evaluation results of geothermal resource reserves in Xianxian County geothermal field, Bohai Bay Basin

热储量/ 10 ¹⁶ kJ	折合标煤/ 10 ⁸ t	可回收热 量/10 ¹⁶ kJ	热水体积/ 10 ⁸ m ³	热水热量/ 10 ¹⁶ kJ	折合标准 煤/10 ⁸ t
2.881	9.841	0.432	35.750	0.105	0.359

献县地热田蓟县系雾迷山组热储存总量为2.881×10¹⁶ kJ,折合标准煤9.841×10⁸ t,总可回收热量为0.432×10¹⁶ kJ。其中,热水体积(容积体积)为35.75×10⁸ m³,热水中所含热量为0.105×10¹⁶ kJ,折合标准煤0.359×10⁸ t。

6 结论

1) 针对研究区裂隙发育特征,建立热储构造、热储基质岩相、热储物性参数及温度场地质模型,验证了所构建热储温度模型的可靠性,为热储资源量评价、地热井位优选及采灌布井方案优化奠定基础。

2) 针对献县地热田,以抽水试验等测试数据为评价指标,综合考量构造位置、热储岩相、成因机制、应力条件及空间尺度等因素,建立雾迷山组多尺度裂缝分级方案,并采用确定性与随机建模相结合的方法,构建多尺度离散裂缝模型。

3) 采用基于精细热储地质模型的体积法开展热储资源量评价,结果表明:献县地热田蓟县系雾迷山组热储资源丰富,其总储存热量为2.881×10¹⁶ kJ,折合标准煤9.841×10⁸ t;按15%热回收率折算,总可回收热量为0.432×10¹⁶ kJ;热储中流体体积为35.75×10⁸ m³,流体所含热量为0.105×10¹⁶ kJ,折合标准煤0.359×10⁸ t。

参考文献

- 王君珂. 献县地热田地热控热因素及资源潜力分析[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2019.
WANG Junke. Analysis on thermal control factors and resource potential of geothermal fields in Xianxian county[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2019.
- 马峰, 王贵玲, 张薇, 等. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1981–1990.
MA Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1981–1990.
- 丛淑飞, 周宏, 赵艳, 等. 大民屯凹陷沈水501中深层地热田三维地质建模技术研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(6): 741–748.
CONG Shufei, ZHOU Hong, ZHAO Yan, et al. 3D geological modeling technology of medium-deep geothermal field in Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 741–748.
- SEYEDRAHIMI-NIARAQ M, DOULATI ARDEJANI F, NOOROLLAHI Y, et al. A three-dimensional numerical model to simulate Iranian NW Sabalan geothermal system[J]. Geothermics, 2019, 77: 42–61.
- FLORIDIA G, CACACE M, SCHECK-WENDEROTH M, et al. 3D thermal model of Sicily (Southern Italy) and perspectives for new exploration campaigns for geothermal resources[J]. Global and Planetary Change, 2022, 218: 103976.
- ABOUD E, ABRAHAM E, ALQAHTANI F, et al. High potential geothermal areas within the Rahat volcanic field, Saudi Arabia, from gravity data and 3D geological modeling[J]. Acta Geophysica, 2024, 72(3): 1713–1729.
- TIAN X M, VOLKOV O, VOSKOV D. An advanced inverse modeling framework for efficient and flexible adjoint-based history matching of geothermal fields[J]. Geothermics, 2024, 116: 102849.
- 盖长城, 李洪达, 任路, 等. 地热数值模拟与油藏数值模拟方法对比分析[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(6): 849–856.
GAI Changcheng, LI Hongda, REN Lu, et al. Comparative analysis of geothermal and reservoir numerical simulation methods[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(6): 849–856.
- 朱红光, 易成, 谢和平, 等. 基于立方定律的岩体裂隙非线性流动几何模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 822–828.

- ZHU Hongguang, YI Cheng, XIE Heping, et al. A new geometric model for non-linear flow in rough-walled fractures based on the cubic law[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(4): 822-828.
- [10] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. *水利学报*, 2003, 34(3): 74-79.
- XU Guangxiang, ZHANG Yongxing, HA Qiuling. Super-cubic and sub-cubic law of rough fracture seepage and its experiments study[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(3): 74-79.
- [11] 高瑜, 叶咸, 夏强. 基于等效连续介质模型的单裂隙渗流数值模拟研究[J]. *地下水*, 2016, 38(5): 40-43.
- GAO Yu, YE Xian, XIA Qiang. Study on numerical simulation of single fracture seepage based on equivalent continuum model[J]. *Ground Water*, 2016, 38(5): 40-43.
- [12] 单丹丹, 闫铁, 李玮, 等. 单裂隙热储热流耦合数值模拟分析[J]. *当代化工*, 2020, 49(4): 716-719.
- SHAN Dandan, YAN Tie, LI Wei, et al. Numerical simulation and analysis of thermal-hydraulic coupling in a single-fracture thermal reservoir[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(4): 716-719.
- [13] 张树光, 李志建, 徐义洪, 等. 裂隙岩体流-热耦合传热的三维数值模拟分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(8): 2507-2511.
- ZHANG Shuguang, LI Zhijian, XU Yihong, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of fluid-heat coupling heat-transfer in fractured rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(8): 2507-2511.
- [14] 柯婷婷, 黄少鹏, 许威, 等. 关中盆地沔西地区地热对井采灌开发模式的数值模拟[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(5): 1252-1263.
- KE Tingting, HUANG Shaopeng, XU Wei, et al. Numerical modeling of doublet well system for extracting heat from sandstone geothermal reservoir: A case study of Fengxi area, the Guanzhong Basin, NW China[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(5): 1252-1263.
- [15] 杜广林, 周维垣, 赵吉东. 裂隙介质中的多重裂隙网络渗流模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增刊1): 1014-1018.
- DU Guanglin, ZHOU Weiyuan, ZHAO Jidong. Multiple fracture network seepage model for fractured media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Suppl. 1): 1014-1018.
- [16] 林承焰, 王杨, 杨山, 等. 基于CT的数字岩心三维建模[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(1): 307-317.
- LIN Chengyan, WANG Yang, YANG Shan, et al. 3D modeling of digital core based on X-ray computed tomography[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2018, 48(1): 307-317.
- [17] 黄旭, 沈传波, 杜利, 等. 沧县隆起中段献县凸起和阜城凹陷岩溶型地热资源特征[J]. *现代地质*, 2021, 35(4): 997-1008.
- HUANG Xu, SHEN Chuanbo, DU Li, et al. Geothermal geological characteristics of the Xianxian high and Fucheng Sag in the middle Cangxian uplift, Bohai Bay Basin[J]. *Geoscience*, 2021, 35(4): 997-1008.
- [18] 王君珂, 朱喜, 刘彦广, 等. 献县地热田地温场特征及控热因素研究[J]. *能源与环境*, 2020, 42(1): 113-120.
- WANG Junke, ZHU Xi, LIU Yanguang, et al. Study on earth temperature field characteristics and heat controlling factors in geothermal field of Xianxian County[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2020, 42(1): 113-120.
- [19] 汪新伟, 高楠安, 王婷灏, 等. 河北献县地热田地热异常分布特征及成因机制[J]. *地质学报*, 2022, 96(7): 2611-2625.
- WANG Xinwei, GAO Nan'an, WANG Tinghao, et al. Distribution characteristics and genetic mechanism of the geothermal abnormality in the Xianxian geothermal field, Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(7): 2611-2625.
- [20] 张庆福, 黄朝琴, 姚军, 等. 多尺度嵌入式离散裂缝模型模拟方法[J]. *计算力学学报*, 2018, 35(4): 507-513.
- ZHANG Qingfu, HUANG Zhaoqin, YAO Jun, et al. Multiscale embedded discrete fracture modeling method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(4): 507-513.
- [21] 朱亚军, 李进步, 陈龙, 等. 苏里格气田大井组立体开发关键技术[J]. *石油学报*, 2018, 39(2): 208-215.
- ZHU Yajun, LI Jinbu, CHEN Long, et al. Key technology of large-well-group stereoscopic development in Sulige gasfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(2): 208-215.
- [22] 秦祥熙. 河北省献县隆起藁县系雾迷山组热储层增产技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- QIN Xiangxi. Study on stimulation technology of thermal reservoir of wumishan formation of Jixian system in Xianxian uplift, Hebei Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [23] 郎晓玲, 郭召杰. 基于DFN离散裂缝网络模型的裂缝性储层建模方法[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 964-972.
- LANG Xiaoling, GUO Zhaojie. Fractured reservoir modeling method based on discrete fracture network model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(6): 964-972.
- [24] 乔辉, 张永贵, 聂海宽, 等. 页岩储层多尺度天然裂缝表征与三维地质建模: 以四川盆地平桥构造带五峰组-龙马溪组页岩为例[J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 89-102.
- QIAO Hui, ZHANG Yonggui, NIE Haikuan, et al. Characterization and 3D modeling of multiscale natural fractures in shale gas reservoir: A case study in the Pingqiao structural belt, Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 89-102.
- [25] 李红波. 哈得逊东河砂岩储层构型模式对剩余油分布的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- LI Hongbo. The influence of reservoir architecture model in Hudson Donghe sandstone reservoir to the remaining oil distribution patterns[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [26] 张瑾, 张凤奇, 邹彦荣, 等. 地热水溶型和天然气伴生型氦气来源特征对比: 以渭河盆地和鄂尔多斯盆地北部为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(3): 463-470.
- ZHANG Jin, ZHANG Fengqi, ZOU Yanrong, et al. Comparison of helium source characteristics between geothermal water-dissolved type and natural gas-associated type: A case study of Weihe Basin and northern Ordos Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(3): 463-470.
- [27] 刘健, 曹强, 任小庆, 等. 基于水-热-化耦合数值模拟的地热田开发方案优化设计: 以河北雄安新区岩溶热储为例[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(2): 406-416.
- LIU Jian, CAO Qiang, REN Xiaoqing, et al. Optimization design of geothermal field development schemes based on hydraulic, thermal and chemical coupled numerical simulation: A case study of karst thermal reservoir in Xiong'an New Area, Hebei Province[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(2): 406-416.
- [28] 李红岩, 高小荣, 任小庆, 等. 雄安新区三维地热地质模型方法研究[J]. *地质与资源*, 2024, 33(2): 222-229.
- LI Hongyan, GAO Xiaorong, REN Xiaoqing, et al. 3d geothermal geological modeling method of Xiong'an new area[J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(2): 222-229.
- [29] 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 Zhixue, JIANG Chuanyin, ZHANG Kai, 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.