

引用格式: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.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.004

大民屯凹陷沈水501中深层地热田三维地质建模 技术研究

丛淑飞,周宏,赵艳,靳海龙,刘鹏,吴荣碧,陈元春
(中国石油辽河油田环境工程公司,辽宁盘锦124010)

摘要:随着地热开发的不断深入,持续高效开发地热资源,实现地热资源的采灌均衡,是亟待解决的问题。在Petrel(勘探开发一体化软件平台)这一石油行业地质建模软件基础上开发出适合地热地质建模的应用。应用多种地热地质资料在Petrel软件建立地学平台,开展地热地质要素研究,最大限度地集成多种资料信息,提高了地热地质要素的研究水平。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。能够根据地热地质概念,利用多种信息,采用确定性建模和随机建模相结合方式,建立热储层温度场模型、压力场模型和有效热储层模型,形成了用Petrel软件建立热储层地质模型的方法。利用三维地质模型计算有效热储层资源量,受储层非均质的影响较小,更符合地下真实情况。准确的热储层三维地质模型及资源量评价,为辽河大民屯凹陷区热藏数值模拟及热藏开发方案的制定提供了扎实的地质基础,为科学开发利用该地区地热资源提供了数据支撑。

关键词:有效热储层;热储层地质模型;随机模拟;序贯高斯模拟;有效热储资源量

中图分类号:P641.1

文献标识码:A

3D geological modeling technology of medium-deep geothermal field in Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag

CONG Shufei, ZHOU Hong, ZHAO Yan, JIN Hailong, LIU Peng, WU Rongbi, CHEN Yuanchun

(Petrochina Liaohe Oilfield Environmental Engineering Company, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: As geothermal resource development continues to advance, addressing the challenge of sustainably and efficiently harnessing these resources becomes increasingly critical. This involves achieving a balance between the exploration and sustainable use (or "irrigation") of geothermal resources. To this end, the application of Petrel, a geological modeling software originally designed for the petroleum industry, has been adapted for geothermal geological modeling, offering a promising solution. The adaptation of Petrel for geothermal purposes involves establishing a geospatial platform within the software to manage and analyze a wide range of geothermal geological data. This platform enables comprehensive research into geothermal geological elements by integrating diverse data sets to the fullest extent, thereby enhancing the quality and scope of geothermal geological studies. This approach involves scaling up from traditional small-scale oil and gas reservoir modeling to large-scale thermal reservoir modeling. Such a transition not only maintains the accuracy of the models but also aligns with the scale requirements unique to geothermal geology. Utilizing Petrel, models of the thermal reservoir temperature field, pressure field, and effective thermal reservoir can be constructed. This is achieved by combining various types of data and employing both deterministic and stochastic modeling techniques, thereby establishing a robust method for thermal reservoir geological modeling using Petrel. A key advantage of employing a 3D geological model for calculating effective thermal reservoir resources is its reduced sensitivity to reservoir heterogeneity. This approach more accurately reflects real subterranean conditions, providing a more reliable basis for resource evaluation. The resulting accurate 3D geological models and resource assessments lay a solid foundation for the numerical simulation of thermal reservoirs and the development of comprehensive thermal reservoir management plans. This, in turn, supports the scientific and sustainable exploitation and utilization of geothermal resources in the area, ensuring their efficient and responsible development.

Keywords: effective geothermal reservoir; geology model of thermal reservoir; stochastic simulation; sequential Gaussian simulation; effective thermal reservoir resources

收稿日期:2023-07-25。

第一作者简介:丛淑飞(1973—),男,高级工程师,主要从事地热开发技术方面的研究。地址:辽宁省盘锦市兴隆台区兴隆台街140号,邮政编码:124010。E-mail:congshf@petrochina.com.cn

通信作者简介:周宏(1967—),男,高级工程师,主要从事地热开发技术方面的研究。地址:辽宁省盘锦市兴隆台区兴隆台街140号,邮政编码:124010。E-mail:allison632121@163.com

三维地质建模技术近年来在区域地质调查、矿产资源勘探、石油地质、水文地质等多个领域有广泛的应用,不同领域应用的深度和广度不同,中国三维地质建模技术在油气勘探领域的应用程度最高^[1]。目前,地热地质建模软件较多,常用建模软件有GMS、ROCK Model、GIS与GOCAD等,地热地质建模技术不断发展,从描述地质体构造,实现多源二维平面数据到三维地质实体的转化^[2],到描述储热盖层、热储层、导水通道以及热量来源等地质要素的概念模型^[3-4],进一步到基于三维地质模型的资源量评价^[5-6],地热地质建模主要是实现三维可视化展示地热地质体,实现准确的热储资源量评价。这些地热地质模型,能够满足地热勘探阶段地质建模需要。随着地热开发的不断深入,如何实现地热资源采灌均衡^[7-9],是地热资源可持续开发利用的关键,需要提供满足热储层数值模拟需要的三维热储层模型。

地热资源开采过程是一个涉及热传递、流体流动、岩石应变和化学反应的相互作用的耦合过程,实现地热资源采灌均衡则需要应用数值模拟技术综合分析各种影响因素,预测目标区地热田未来在不同的采灌条件下温度场、压力场变化情况,获得合理的采灌量与采灌井距^[10-11]。目前地热地质建模技术离满足地热数值模拟的要求还有一些距离,如何提高地热地质建模技术,实现三维地热地质模型数据与地热数值模拟软件数据无缝对接,为地热田深入开发及数值模拟技术的应用提供地质基础,是地热地质建模技术发展方向。

石油行业地质建模技术经过三十年发展,地质建模技术日趋完善,能够建立非常复杂的地质模型^[12]。目前,油气勘探领域的三维地质建模技术水平处于领先地位,Petrel软件是石油行业非常成熟的地质建模软件,在石油行业地质建模中有广泛的应用^[13-14],在Petrel软件基础上开发出适合地热地质建模的应用,将会大大提高地热地质建模水平。

将Petrel软件应用于热储层三维地质建模,形成了用Petrel软件建立热储层地质模型的方法。

1 研究区地热地质条件

辽河大民屯凹陷有丰富的地热资源^[15-16],大民屯凹陷位于辽宁省新民市,距沈阳市35 km,是辽河冲积平原的一部分,境内交通便利,公路、乡路四通八

达。区内气候温和,年平均温度9.7℃。全年平均降水量介于600~700 mm。

大民屯凹陷位于辽河断陷北部,是辽河断陷的二级构造带,大致呈北东向展布,面积约为800 km²,平面上呈不规则三角形,南宽北窄,四周为边界断层所限^[17]。基底地层主要由太古宇和元古宇的变质岩系组成^[18]。大民屯凹陷属于地幔隆起区,上地幔局部上拱,所形成的幔源热是该区主要热源^[19]。大民屯凹陷早期构造活动形成多个潜山,地处类似“火盆”结构,深大断裂促进深部热流供给。地热田为深循环热水,大民屯凹陷东南和西北部的低山丘陵区大气降水为地热地表水补给,地表水沿凹陷边界大断裂和第四系、新近系砂岩下渗,与深部大地热流传导、对流形成地热水,向凹陷中部运移,在古近系砂岩热储富集,形成沉积盆地型层状地热资源。沙河街组沉积时期凹陷稳定沉降,在基岩之上沉积了大套互层热储,沙河街及东营组热储厚度合计千米。

研究区位于大民屯凹陷沈水501地热田,沙河街组砂岩是此区主要热储层。沙河街组热储厚度介于450~650 m,热储温度介于45~90℃,考虑到热储层温度,地质建模和资源量评价目标层是沙河街组沙三段二亚段、沙三段三亚段、沙三段四亚段3套热储层。

2 目标区三维地质建模

建立三维地质模型需要使用井位坐标、井斜、测井资料、地震资料、钻井资料等大量的基础数据,数据加载过程就是基础数据库的建立过程。Petrel是一个集地热地质、地震、测井、钻井等资料一体化的综合研究地质平台。在这个平台上能够开展地热地质要素研究,可以进行地层对比、数据分析,建立井模型、层面模型,最后建立三维地质模型。

研究所建地质模型,是通过井分层数据和构造图,建立构造模型;利用泥质含量曲线,通过砂岩分布图、砂地比控制建立岩相模型;在岩相模型控制下,通过测井解释成果曲线、孔隙度、渗透率分布图等资料建立属性模型;最终通过各种模型进行热储资源量计算,三维地质建模流程见图1。

2.1 构造模型建立

构造建模是地质建模的基础和关键,构造模型由断层模型和层面模型组成。建立构造模型的关键

是构造模型需要准确反映地质研究中对构造的地质认识,构造建模是在精细构造图基础上采用克里金方法确定性建模。

1) 建立断层模型

为真实反映断层展布状况,最基本的要求是断层层面要与钻井断点位置完全吻合,与构造图反映的断层完全吻合。研究区发育北东向断层2条、近东西向断层1条(表1),断层模型是在精细构造图的断裂控制下,利用断层多边形建立初步断层模型,然后根据钻井断点数据,在三维空间对断面形态进行校正,使断裂空间展布与构造研究成果一致(图2)。

2) 建立层面模型

沈水501构造是由F1、F3断层夹持的向北西倾斜的单斜构造,地层倾角 $5^{\circ} \sim 7.3^{\circ}$,内部断层使断块复杂化,构造形态南东高北西低。使用精细构造等值线及已钻井地质分层计算构造层面,使构造形态空间分布与构造图描述完全一致(图3)。

3) 建立网格模型

该区平均井距600 m,考虑到网格节点数量既要满足数值模拟需要,也可以控制有效热储层和泥岩隔层的分布,模型平面网格间距设置为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,纵向上网格高度大致为5 m。在建模过程中,充分利

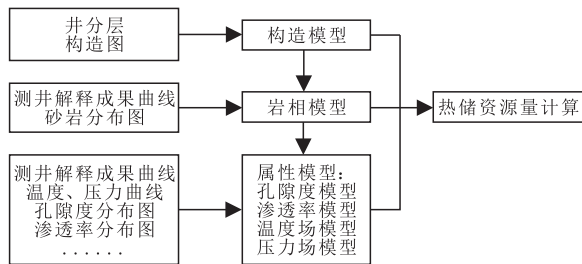
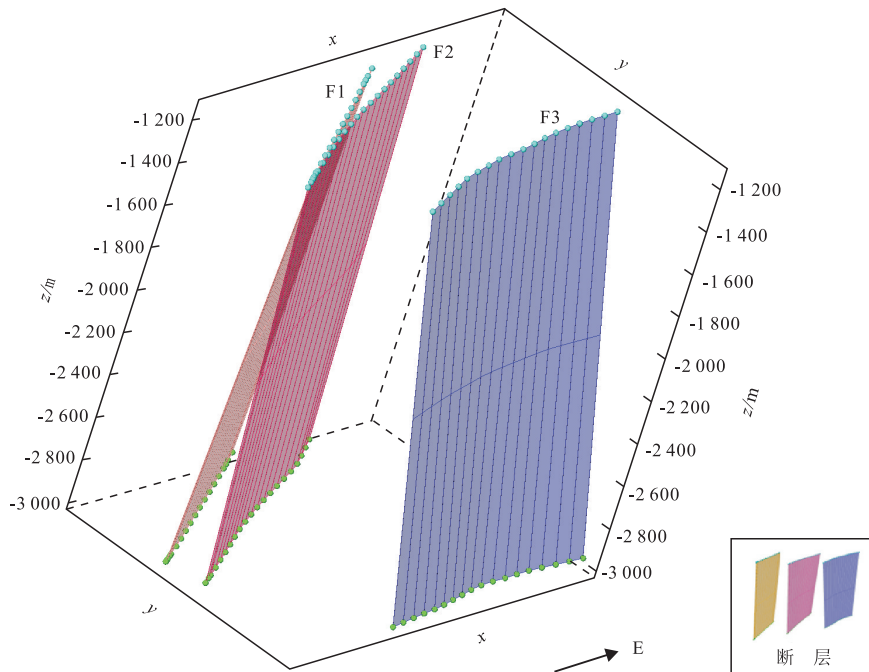


图1 三维地质建模流程

Fig. 1 Workflow of 3D geological modeling

表1 大民屯凹陷沈水501地热田断层要素
Table 1 Fault elements in Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag

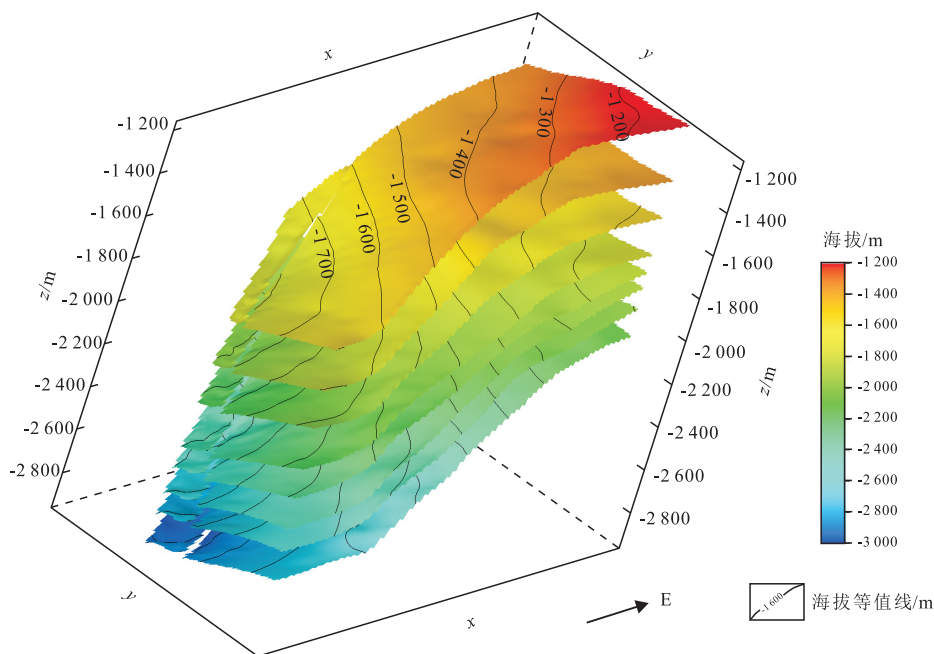
断层编号	断层性质	断层走向	断层倾向	断距/m	延伸/km	钻遇层段
F1	正断层	NE	NW	50 ~ 100	> 13.6	东营组一 沙三段四亚段
F2	正断层	NE	SW	10 ~ 50	8.3	沙三段二亚段— 沙三段四亚段
F3	正断层	EW	S	20 ~ 60	5.4	东营组一 沙三段四亚段



注: F1、F2、F3为断层; x为东西方向; y为南北方向; z为海拔, 单位m。

图2 大民屯凹陷沈水501地热田断层模型

Fig. 2 Fault model of Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag



注: x 为东西方向; y 为南北方向; z 为海拔, 单位m。

图3 大民屯凹陷沈水501地热田层面模型

Fig. 3 Surface model of Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag

用构造模型的三维可视化交互编辑与地层对比的结合,在三维空间深化构造认识。在网格模型中,将层面模型与断层模型相结合,形成构造模型。

2.2 建立热储层温度场压力场模型

确定性地质建模对构造和非均质程度很弱的参数如地层压力、温度等是非常有效的,构造模型、温度场模型和压力场模型采用的是确定性建模方法。

在岩性大致相同的条件下,区域地温分布主要受构造格局影响,基岩隆起区地温梯度较洼陷区高。根据区域地质研究,大民屯地区古近系地温梯度为 $2.35 \sim 4.12 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hm}^{[20]}$ 。恒温带地层温度 $9.7 \text{ } ^\circ\text{C}$,根据水井实测温度数据统计分析,地温梯度为 $3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hm}$ 。沈水501井投产初期静水位地面以上5 m,考虑到地面一个大气压,根据静水位计算初期井口压力 0.15 MPa 。根据工区内6口井测压资料回归分析,地层压力梯度 $0.98 \text{ MPa}/\text{hm}$ 。

根据上述地质认识,有温度、压力数据的井点采用校正后的温度压力数据,没有温度、压力数据的井,根据温度梯度和压力梯度计算温度、压力曲线。在构造框架控制下,粗化井点温度数据和压力数据,

采用克里金插值方法建立温度场模型(图4)和压力场模型。温度场模型和压力场模型能够充分反映原始状态下温度场和压力场在三维空间变化。

2.3 建立热储层岩相及孔渗模型

由于岩相、孔隙度、渗透率等参数非均质性较强,这些热储层属性在空间分布有一定的随机性,随机性建模方式更适合这类参数^[21-22]。储层随机建模是近年来在地质研究领域发展的最新技术,是对储层非均质性进行模拟和对所有不确定性进行评估的最佳方法。

建模采用“二步建模”方法,即第一步采用离散型方法建立岩相模型,因为离散模型主要用于描述一个离散性质的地质特征,比较适合描述岩相大范围的非均质特征;第二步是在岩相离散模型的基础上,用连续型建模方法建立孔隙度、渗透率模型,连续性模型主要描述连续变化的地质参数的空间分布,适用于孔隙度、渗透率等连续性变化参数的空间分布。储层建模质量控制的关键点包括相模型和物性模型^[23],在储层建模的一些重要环节开展了质量控制。

热储层建模,是在上述地热地质认识基础上建立的。首先,输入测井解释成果曲线,通过泥质含量曲线计算岩相数据,具体标准为,砂岩含量小于等于38%,泥岩含量大于62%。用砂地比数据进行质量监控。在构造框架控制下,粗化井点岩相数据、孔隙度数据和渗透率数据。相模型的建立使用序贯高斯指示模拟计算方法,采用变差函数参数,物源为北东向,主变程、次变程和垂向变程参数是通过数据分析优选的。通过砂体分布图进行趋势约束,通过调整模型的平均净毛比,以控制整体的砂岩体积。

根据测井资料统计分析,热储层孔隙度偏低,平均孔隙度介于14.8%~19.2%,平均渗透率介于 $(87.0\sim 303.5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,随着深度的增加热储层物性由浅到深变差。孔隙度模型和渗透率模型是在岩相模型约束下,使用序贯高斯模拟计算方法,同样采用变差函数参数,设置物源方向为北东向,根据数据分析优选主变程、次变程和垂向变程参数。孔隙度和渗透率模型直接反映储层内部的非均质性,将影响数值模拟的结果,尤其是渗透率模型,对渗流场温度和压力变化影响很大。因此,在建属性模型时候,对孔隙度模型和渗透率模型进行质量控制。首先,保证模型与井点数据保持一致,能够准确反映原始地层物性特

征。其次,在建模型时候,通过岩相模型进行趋势约束。经过多次优选参数和质量控制,建立了孔隙度模型和渗透率模型。模型中孔隙度、渗透率与岩相有很大的相关性,与地质认识基本一致(图5、图6)。

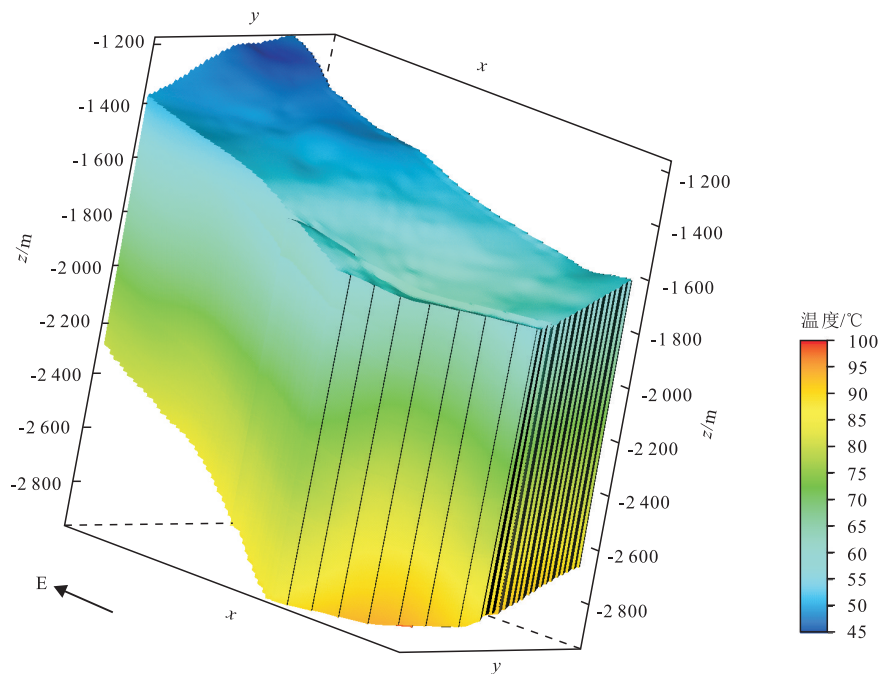
2.4 建立有效热储层模型

根据多个地热田研究经验,不是所有测井解释的水层都产水,据多个产液剖面分析,井筒中实际产水段为水层厚度较大、地层砂地比较高、物性条件好、热储层连通性好的水层。识别有效热储层是进行地热田研究基础和核心的一步。利用测井资料进行有效热储层研究是地热田研究关键环节之一。

由于没有岩心物性分析资料,根据关键井的测井解释做出不同目的层的有效热储层孔隙度及渗透率的交会图分析,有效热储层物性下限标准为孔隙度大于等于10%,渗透率大于等于 $30\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。基于以上认识,在后续的地质建模中,用以上标准约束精细刻画有效热储层。

NTG模型定义为有效热储层模型。在沈水501区块采用不确定方法计算这个有效热储层模型。

工区内有测井解释的泥质含量百分比曲线,据此可以计算得到砂质含量百分比曲线,然后将这个



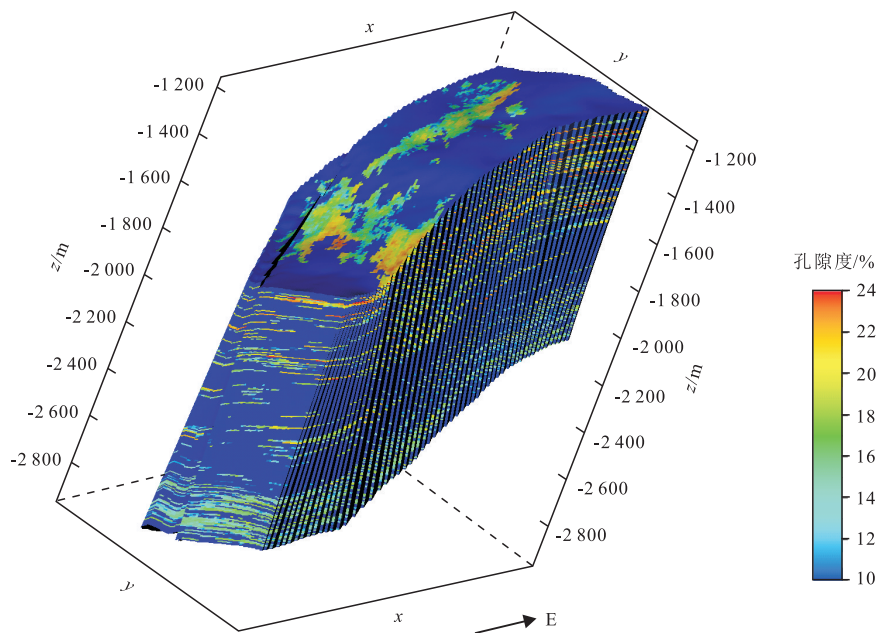
注: x为东西方向; y为南北方向; z为海拔, 单位m。

图4 大民屯凹陷沈水501地热田温度场模型

Fig. 4 Temperature field model of Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag

曲线粗化到模型中。沈水501区块在砂岩模型约束下,采用序贯高斯模拟方法计算NTG模型。根据前文分析,有效热储层孔隙度大于等于10%,渗透率大

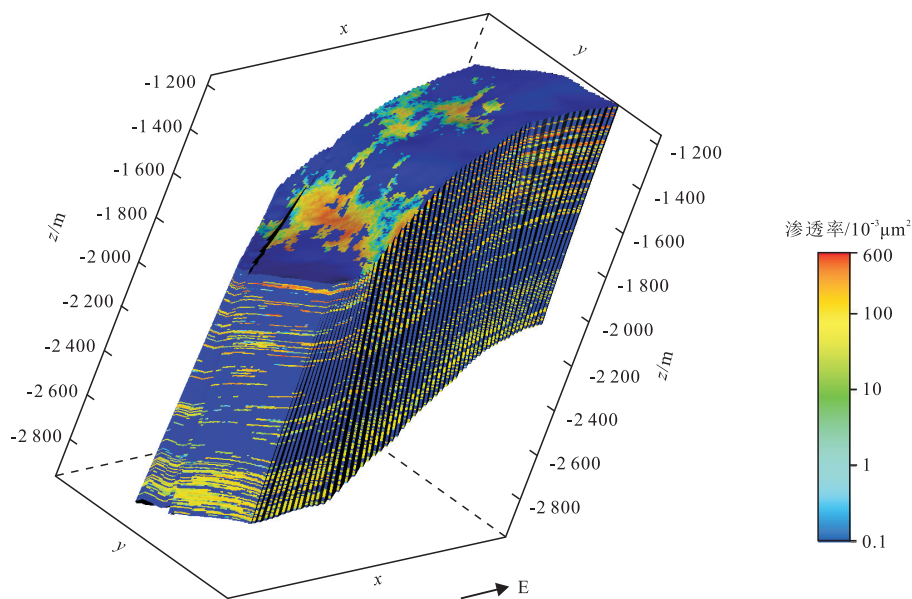
于等于 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此,再用孔隙度模型和渗透率模型对NTG模型进一步约束,最终得到适合工区的有效热储层模型。



注: x为东西方向; y为南北方向; z为海拔, 单位m。

图5 大民屯凹陷沈水501地热田孔隙度模型

Fig. 5 Porosity model of Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag



注: x为东西方向; y为南北方向; z为海拔, 单位m。

图6 大民屯凹陷沈水501地热田渗透率模型

Fig. 6 Permeability model of Shenshui 501 geothermal field in Damintun Sag

3 有效热储资源量计算

大民屯凹陷有丰富的地热资源,准确评估热储资源量是地热可持续开发利用的基础。为准确评估该工区热储资源量,热储资源量计算采用基于三维地质模型的有效热储资源量计算。

基于三维地质模型的资源量计算,充分考虑了热储层砂体、孔隙度、温度场的空间分布,将有效热储资源量计算的多种参数,通过模型代入计算,对热储层的描述能反映空间的非均质性,利用地质模型所计算的热储资源量更接近地下真实地质情况。

通过三维地质模型进行的资源量计算,计算原理同热储体积法:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$Q_1 = N\rho_w C_w \varphi (T_r - T_0) \quad (2)$$

$$Q_2 = N\rho_r C_r (1 - \varphi) (T_r - T_0) \quad (3)$$

式(1)一式(3)中: Q 为总热量,单位J; Q_1 为水中储存热量,单位J; Q_2 为岩石中储存热量,单位J; N 为有效热储体积,单位 m^3 ; ρ_w 为地热水密度,单位 kg/m^3 ; C_w 为地热水比热,单位 $J/(kg \cdot ^\circ C)$; φ 为热储岩石孔隙度; T_r 为热储温度,单位 $^\circ C$; T_0 为地表年平均温度,单位 $^\circ C$; ρ_r 为热储岩石密度,单位 kg/m^3 ; C_r 为热储岩石比热,单位 $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

在岩相模型约束下,根据上面原理,通过各种属性模型间的计算,能够计算出有效流体资源量模型和骨架资源量模型,不仅能得到资源量的准确数据,还能够空间立体展示资源量的分布。

孔隙度模型是随机模型,如果种子点不同,模型结果不同,基于这种思想可以对储量进行不确定性分析。

将孔隙度模型种子点设定一个变化范围,在其中平均采样50次,分别进行50次孔隙度模型计算,根据这些不同的属性孔隙度模型计算50次资源量。分析模型变化对计算资源量的影响。对所计算的资源量进行直方图分析,找到 P_{50} 概率率下的资源量数据,根据这个数据,找到对应的种子点数的孔隙度模型。根据这个种子点数量重新计算孔隙度模型及NTG模型。最后用这模型再次计算流体资源量和岩石骨架资源量。这种资源量计算方法,极大程度地考虑各种地质信息对资源量的影响,能够最大程度科学计算热储资源量。

根据三维地质模型计算该区总资源量 0.744×10^{15} kJ,其中地热流体资源量 0.216×10^{15} kJ,岩石骨架资源量 0.528×10^{15} kJ,地热流体体积 $0.84 \times 10^9 m^3$ 。

4 结论

1) 热储层三维地质模型是地热田数值模拟的地质基础,是地热田开发中不可或缺的一部分。三维地质模型准确与否,直接影响到数值模拟的结果。应用地质、钻井、测井等多种资料综合分析了目标区地热地质条件。在构造研究中,应用三维可视化技术与地层对比、构造层面计算相结合同步进行,深化了对该地热田的构造认识。利用克里金计算方法,首次建立了该区块的三维构造模型,在三维空间真实展示断裂及构造形态特征。

2) 根据热储层参数特点,应用确定性建模方式建立了此区温度场和压力场模型,应用随机建模方式建立了此区孔隙度模型和渗透率模型,极大地减少储层预测的不确定性。能够在三维空间精细刻画热储层各种属性参数的空间分布状况。

3) 在三维地质模型基础上用不确定方法计算热储资源量,多方面考虑各种地质信息对资源量的影响,计算热储资源量更加科学合理。基于三维地质模型评估的地热总资源量为 0.744×10^{15} kJ,相当于 2539×10^{15} t标准煤。这对于该地区能源结构调整,减少碳排放具有重大意义。

4) 可为沈阳采油厂地区地热资源开发利用提供数据支撑,为该地区地热开发方案提供地质基础。

参考文献

- [1] 李青元,张洛宜,曹代勇,等.三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J].地质与勘探,2016,52(4):759-767.
LI Qingyuan, ZHANG Luoyi, CAO Daiyong, et al. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 759-767.
- [2] 王君照,李胜涛,岳冬冬,等.基于GIS与GOCAD的天津双窑凸起构造区热储三维地质建模[J].科学技术与工程,2023,23(14):5887-5902.
WANG Junzhao, LI Shengtao, YUE Dongdong, et al. Tree dimensional geological modeling of thermal reservoir of Shuangyao uplift structural area in Tianjin based on GIS and GOCAD[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5887-5902.
- [3] 王凯,张杰,白大为,等.雄安新区地热地质模型探究:来自地球物理的证据[J].中国地质,2021,48(5):1453-1468.
WANG Kai, ZHANG Jie, BAI Dawei, et al. Geothermal-geological model of Xiong'an New Area: Evidence from

- geophysics[J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1453–1468.
- [4] 刘春华, 杨丽芝. 山东临清市地热地质条件分析及地热概念模型[J]. *分析研究*, 2008, 3(1): 27–30.
LIU Chunhua, YANG Lizhi. Analysis of the geothermal conditions and a geothermal conceptual model of Linqing County, Shandong Province[J]. *Analytical Investigation*, 2008, 3(1): 27–30.
- [5] 朱振洲, 雷晓东, 武雄, 等. 基于三维地质建模的北京市昌平新城地热资源量评价[J]. *现代地质*, 2020, 34(1): 207–214.
ZHU Zhenzhou, LEI Xiaodong, WU Xiong, et al. Geothermal resource evaluation in Changping new town, Beijing: Perspective from 3D geological modeling[J]. *Geoscience*, 2020, 34(1): 207–214.
- [6] 赵杰, 郭清海. 基于三维地质建模的地热资源潜力评价: 以施甸地热区为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(3): 1107–1117.
ZHAO Jie, GUO Qinghai. Geothermal resources evaluation based on 3D geological modeling: The case of Shidian geothermal area[J]. *Earth Science*, 2023, 48(3): 1107–1117.
- [7] 马峰, 王贵玲, 魏帅超, 等. 2018年地热勘探开发热点回眸[J]. *科技导报*, 2019, 37(1): 134–143.
MA Feng, WANG Guiling, WEI Shuaichao, et al. Summary of hot research topics in geothermal exploitation in 2018[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(1): 134–143.
- [8] 康凤新, 马哲民, 史启朋, 等. 岩溶热储地热水可更新能力及采灌均衡可持续开采量: 以菏泽潜凸起地热田为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(3): 1118–1137.
KANG Fengxin, MA Zhemin, SHI Qipeng, et al. Renewable capacity of Karst geothermal water and production–re injection balanced resources evaluation: A case study of Heze buried uplift geothermal fields[J]. *Earth Science*, 2023, 48(3): 1118–1137.
- [9] 秦耀军, 张平平. 山东省砂岩热储地热资源开发利用模式探讨[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(10): 93–98.
QIN Yaojun, ZHANG Pingping. Development and utilization of geothermal resources in the middle and deep layers of Shandong province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(10): 93–98.
- [10] 孙彭光. 大名地热田地质概念模型及井网模拟[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2018, 15(13): 11–16.
SUN Pengguang. Geological conceptual model and well pattern simulation of Daming geothermal field[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Sciences Edition)*, 2018, 15(13): 11–16.
- [11] 王宽, 周明泽, 张一博, 等. 郑州市主城区与东部新城地区地热资源数值模拟研究[J]. *能源与环保*, 2023, 45(7): 188–197.
WANG Kuan, ZHOU Ming, ZHANG Yibo, et al. Numerical simulation study of geothermal resources in main urban area and eastern new urban area of Zhengzhou City[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(7): 188–197.
- [12] 贾爱林, 郭智, 郭建林, 等. 中国储层地质模型30年[J]. *石油学报*, 2021, 42(11): 1506–1515.
JIA Ailin, GUO Zhi, GUO Jianlin, et al. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past three decades[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(11): 1506–1515.
- [13] 刘波. 柴达木盆地跃西油田三维地质建模[J]. *勘探开发*, 2023, 30(1): 144–146.
LIU Bo. Three dimensional geological modeling of Yuexi Oilfield in Qaidam Basin[J]. *Exploration and Development*, 2023, 30(1): 144–146.
- [14] 张瑞, 赵永刚, 杜进忠, 等. 鄂尔多斯盆地西南部Y33区块储层地质建模研究[J]. *石油化工应用*, 2022, 41(3): 76–86.
ZHANG Rui, ZHAO Yonggang, Du Jinzhong, et al. Research on reservoir geological modeling of Y33 block in the southwest of Ordos Basin[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2022, 41(3): 76–86.
- [15] 丁志刚. 辽宁省新民市大民屯地区地热资源前景分析[J]. *中国矿业*, 2012, 21(2): 119–121.
DING Zhigang. The foreground analysis of geothermal resources of Damintun area of Xinmin city in Liaoning[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(2): 119–121.
- [16] 邓春来. 辽河油田地热资源评价及其配套技术研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
DENG Chunlai. Geothermal resource evaluation of Liaohe Oilfield and research for related technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [17] 李建华, 余杰, 王锐, 等. 大民屯凹陷源控油气作用及资源潜力预测[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(12): 2964–2970.
LI Jianhua, YU Jie, WANG Rui, et al. Hydrocarbon–controlling function of source rock and resource potential in the Damintun Depression[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(12): 2964–2970.
- [18] 陈振岩, 陈永成, 郭彦民, 等. 大民屯凹陷精细勘探实践与认识[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 3–23.
CHEN Zhenyan, CHEN Yongcheng, GUO Yanmin, et al. Practice and understanding of detailed exploration of Damintun Depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 3–23.
- [19] 张洪梅. 辽宁大民屯凹陷地热资源形成条件分析[J]. *地质与资源*, 2013, 22(1): 25–29.
ZHANG Hongmei. Analysis on the formation conditions of geothermal resources in Damintun Sag, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(1): 25–29.
- [20] 倪金, 冯丽杰, 闫宝强, 等. 辽宁省中新生代盆地地下水富集规律研究[J]. *地质与资源*, 2006, 15(1): 57–61.
NI Jin, FENG Lijie, YAN Baoqiang, et al. Study on enrichment law of underground hot water in Meso–Cenozoic basins in Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2006, 15(1): 57–61.
- [21] 张晓坤. 随机模拟在三维地质建模中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
ZHANG Xiaokun. Application of stochastic simulation in 3D geological modeling[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [22] 罗婷婷, 周立发, 焦尊生, 等. 相控随机建模技术在鄂尔多斯盆地低渗透油藏的应用[J]. *现代地质*, 2016, 30(3): 655–662.
LUO Tingting, ZHOU Lifa, JIAO Zunsheng, et al. Application of facies–controlled property modeling technologies to characterization of low permeability oilfield in the Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2016, 30(3): 655–662.
- [23] 胡晓庆, 宋子怡, 李晨, 等. 储层地质建模的质量控制[J]. *石化技术*, 2021, 44(7): 121–122.
HU Xiaoqing, SONG Ziyi, LI Chen, et al. Quality control of reservoir geological modeling[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2021, 44(7): 121–122.

(编辑 常燕)