

基于SKUA-GOCAD的天津市潘庄凸起区域 三维热储建模研究

刘杰,赵侃

(天津地热勘查开发设计院,天津 300250)

摘要:随着计算机技术的发展,三维建模技术逐步引入到地学领域。SKUA-GOCAD软件以先进的算法结合先进计算技术实现地质成果的三维可视化表达。本文通过收集天津市潘庄凸起区域的钻孔、物性参数及热储层资料,以SKUA-GOCAD软件为平台,构建了区域三维地质构造模型,并将模型赋予属性参数,建立热储属性模型,为区内地热资源评估提供了有价值的参考依据。同时,通过SKUA-GOCAD软件生成虚拟井和各地层等值线图,与原始数据及地层制图对比相似度高,验证了模型的可靠性。

关键词:SKUA-GOCAD;地质建模;属性模型;热储层

中图分类号:P314

文献标识码:A

文章编号:2097-0188(2023)02-0017-07

地热资源作为一种可再生清洁能源,可直接用于冬季供热,减少因传统燃料供热而产生的大气污染,改善生态环境^[1]。天津市地热资源丰富,属沉积盆地传导型中、低温地热资源,其在分布区域和资源特征上有着很大优势,目前已经广泛应用于供暖、温泉旅游和理疗、农业种植养殖等诸多方面^[2-3]。随着天津市地热资源开发利用的不断深入,热储描述已经不再局限于二维的平面及剖面研究,三维的热储模型已经成为地热地质研究的核心和关键^[4-5]。随着人们对地热资源开发利用的日益重视,地热系统的勘查程度要求也不断提高,因此三维热储模型的可视化评价、地质解释等方面的作用更为突出。

三维地质建模的核心内容之一是空间插值方法。在三维地质建模中,传统的插值方法有克里金插值、反距离权重插值、自然邻域插值等。而克里金插值方法又有普通克里金插值、外部漂移克里金插值、贝叶斯克里金插值、斜克里金插值和块克里金插值等^[6-10]。冯波研究证明三维地质建模过程中,插值算法对模型准确性具有显著影响。三维地质建模软件通过整合插值方法,为用于提供可视化的操作界面,大大提升了地统计学应用效率,降低使用难度。常用的三维地质建模软件有GMS、petral、SKUA-GOCAD等,各软件采用的插值算法和应用范围存在

一定差异。SKUA-GOCAD在系统开放性、与其他软件兼容性、可视化性能、复杂构造处理能力及建模速度等方面具有较好的优势^[11-15],因而本次建模工作采用了SKUA-GOCAD2019。

1 研究区热储层地质特征概况

1.1 构造单元

本次工作主要以潘庄凸起为工作对象^[16](图1),潘庄凸起在平面上为呈NE向展布的狭长断块,西北、东南分别以天津断裂、沧东断裂为界与大城凸起、北塘凹陷相邻;南端以海河断裂为界与双窑凸起和白塘口凹陷相接;北端以青龙湾河断裂为界^[17-20]。在区域上,潘庄凸起基岩顶板总体呈南西高、北东低的分布形态,局部突起或凹陷;基岩顶板地层主要为古生界、局部为中生界和中新元古界。在研究区内,基岩顶板埋深1 200~1 900 m^[21-23]。

1.2 地层特征

根据地质勘查成果和钻井资料分析,潘庄凸起区域已揭露地层从新至老依次有新生界(第四系Q和新近系N)、古生界(奥陶系O和寒武系C)、中新元古界(青白口系Qb和蓟县系Jx)。比较具有代表性的东丽湖地区的地层岩性特征描述如表1。所以本次三维热储模型以上述地层为建立基础。

收稿日期:2023-03-01

资助项目:天津市规划和自然资源局项目“天津市矿产资源规划(2021—2025年)”(HYGP-2020-C-037)

作者简介:刘杰(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事水工环、地热地质及数值模拟研究,E-mail:287909443@qq.com。

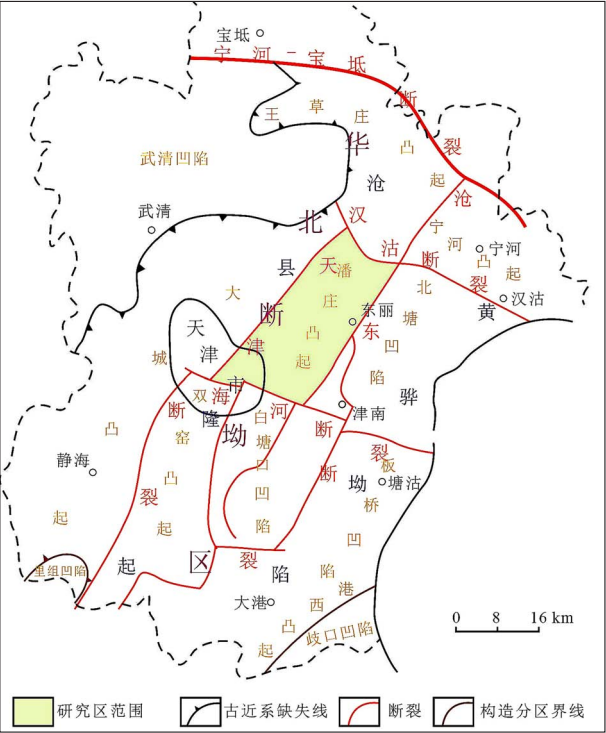


图1 区域地质构造图(据胡燕等,2011年)
Fig.1 Bedrock and tectonic map of the region
(modified after Hu et al.^[16])

2 热储层三维地质建模

通过对区域地层、热储特征以及构造发育特征进行分析,结合已有数据源,利用三维地质建模软件的功能特点,在提高建模效率的基础上,坚持高精度,高质量,提高创新的原则,综合利用地质分区图+剖面+钻孔等耦合的多源数据约束,以构造为整体构架,综合利用分区建模思想和人机互动的交互式建

模方法进行建模。

2.1 数据收集、整理与预处理

依据区域内的基本地质信息和资料现状,结合三维热储模型的功能,从数据来源来看,建模数据包括:钻孔基本数据、地层平面研究成果数据和钻孔测井数据等^[24-26]。

2.1.1 钻孔基本数据

在SKUA建模数据中,钻孔数据尤为重要,钻孔数据主要分为Path数据和Marker数据,其中Path数据包含钻孔的基本信息(如钻孔名称、钻孔坐标位置、井深以及井斜角等信息);Marker数据包含钻孔名称,钻孔分层信息等^[27]。本次研究的钻孔数据源于笔者收集整理的潘庄凸起区内80余眼地热井形成的Access数据库。选择SKUA需要的字段将ACCESS数据库中的地层数据导出转成文本格式,本次工作采用Column-based File格式。

2.1.2 地层平面研究成果和数据

地层平面研究成果主要是地层等高线图,等高线数据是确定三维地质结构空间定位的重要数据,地层高程等值线的稀疏,影响地层区域构建的精细程度。因此必须对等值线进行插密,为三维数字高程模型获取更多的采样点^[28]。等高线加密后对等高线挂接属性,属性结构的主要字段为“高程”,通过MapGIS平台的“高程自动赋值”来完成,在提高工作速度的同时也进行数据校验。

2.1.3 钻孔属性数据

在SKUA属性建模中,以钻孔测井属性数据为主,通过ACCESS数据库中的钻孔测井数据,选择

表1 潘庄凸起区域地层岩性特征表
Table1 Table of stratigraphic lithology characteristics in Panzhuang uplift area

地层				地层厚度/m	岩性特征
界	系	组	段		
新生界 (Cz)	第四系(Q)			350 ~ 500	黏土、粉细砂互层
	新近系(N)	明化镇组(Nm)	上段	400	砂岩为主,与泥岩互层
			下段	500	泥岩为主,与砂岩互层
古生界 (Pz)	奥陶系(O)	馆陶组(Ng)		0 ~ 100	砾砂岩
		马家沟组(Om)		514	灰岩
		亮甲山组(Ol)		99	灰岩
		冶里组(Oy)		101.5	灰岩
	寒武系(C)	张夏组(Cz)		0 ~ 100	鲕粒灰岩
		馒头组(Cm)		0 ~ 200	上段泥页岩,中下段白云岩、灰岩为主
		昌平组(Ch)		0 ~ 100	白云质灰岩
中、新元古界 (Pt)	青白口系(Qb)	景儿峪组(Qbj)		150 ~ 250	泥灰岩、灰岩
		龙山组(Qbl)		50 ~ 150	泥页岩
	蓟县系(Jx)	雾迷山组(Jxw)	四段	827	白云岩
			三段	963	白云岩夹泥岩
			二段	983	白云岩
			一段	643	白云岩

SKUA需要的字段导出转成文本格式。主要钻孔属性包括钻孔名称、层顶埋深、层底埋深、孔隙度、裂隙率、泥质含量、电阻率、声波时差、井温及解释结论。

2.1.4 数据质量控制

项目实施期间,一是尽量采用分布均匀、密集的钻孔数据;二是采用准确的剖面数据,对结果进行验证与修改;三是选择现势性高、数据完整性好、逻辑性一致、数据拓扑正确的各类数据参与建模。

2.2 导入数据

在新建项目,输入项目文件名,并选择所有模块,设置好计量单位后,将建模数据导入。导入钻孔数据后屏幕显示如图2所示。

2.3 定义地层层序

本次项目为了突出热储层的层序,地层层序按照由新至老操作(图3),解决的主要问题是各个地层的沉积顺序和各个地层之间的接触关系。图中左侧的地层代码,采用数字表示:1-新生界第四系;2-新生界新近系明化镇组;3-新生界新近系馆陶组;4-古生界奥陶系;5-古生界寒武系;6-新元古界青白口系;7-中元古界蓟县系雾迷山组。地层接触关系根据实际情况可以选择“Conformable”、“eroded”、“UnConformable”等。所建立的层序设置名称为New_Column。

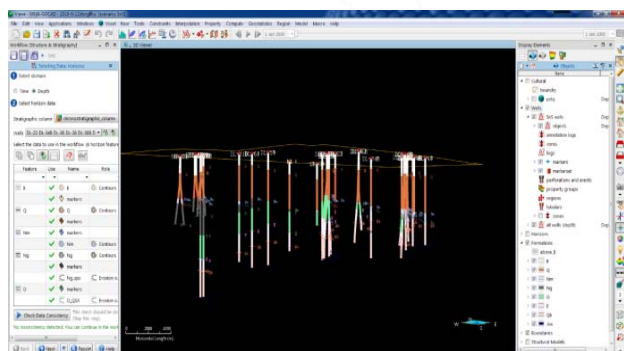


图2 导入钻孔Marker数据后显示效果

Fig.2 The effect after importing wells Marker data

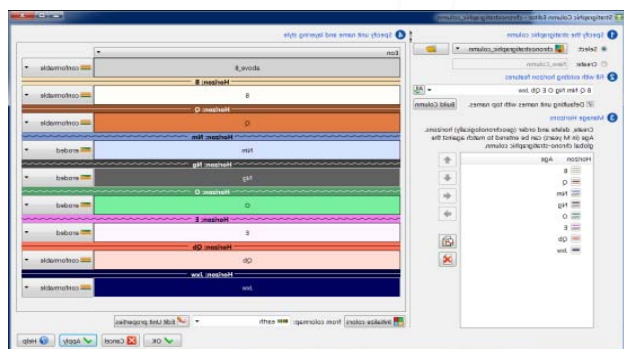


图3 定义地层层序

Fig.3 Specify the stratigraphy

2.4 建立地质结构模型

本次建模具体方法是:采用首先构建以构造为约束的框架,基于此填充地层内容,上下相邻两层间主要利用地层界面图的埋深信息控制深度,用平面分区图相关信息控制横向地层的展布的思路构建模型总体架构;其次采用剖面和钻孔资料对相关层位进行精细化建模、处理与验证,完成整个区域的三维建模工作。SKUA利用工作流程驱动模型构建,按照步骤执行任务,并对建模过程中地层与地层、钻孔与地层之间的关系以图表报告等多种形式进行评估,高效地完成三维热储模型的构建。

SKUA-GOCAD建模软件基于工作流构建三维模型,构建地层结构模型的过程与人的思维一致。总体流程如下:数据录入、地层整理、模型生成、模型调整。在模型生成阶段,可以调整模型的精细度和光滑度,通过软件的地层检查功能检查参与建模的各个钻孔的地层一致性,保证模型数据的准确性。在模型调整和改进阶段,可以引入控制钻孔与模型地层进行对比,利用控制钻孔对误差较大的位置进行校正。由于软件是基于工作流模式的,所以可以很容易地返回到地层固结步骤,直接在基于钻孔地层的错误地层上添加控制点,并且可以通过重新执行建模工作流来调整和改进模型。最终的地质结构模型平面分辨率为352 m,总单元数为 $100 \times 92 \times 221 = 2\,033\,200$ 。三维地质模型用两种形式表示,其一,地质块体模型(图4),其二,地质模型交叉剖面(图5)。SKUA系统具有动态显示交叉剖面的功能,当一条剖面固定不动,另一条剖面沿着与第一条剖面近乎正交的方向等间距移动,用户可以观察地层断层的变化情况。

2.5 属性模型建设

三维属性模型就是描述储层属性参数在三维空间上的变化和分布规律的模型,本次建立了孔隙度模型、渗透率模型、泥质含量模型、电阻率模型及储层温度模型等。属性模型建设分为两个部分,分别为数据分析和储层属性建模^[29]。SKUA-GOCAD建模软件可以在三维地层结构模型的基础上,用地层约束对目的层中的属性进行插值,建立三维地质属性模型。总体步骤可以概括为:设置构造模型网格大小、数据分析、获取变差函数、属性插值。

以渗透率为例,其一为属性块体模型(图6),其二为属性模型交叉剖面(图7)。图8为渗透率属性模型剖面图叠加地层面图。

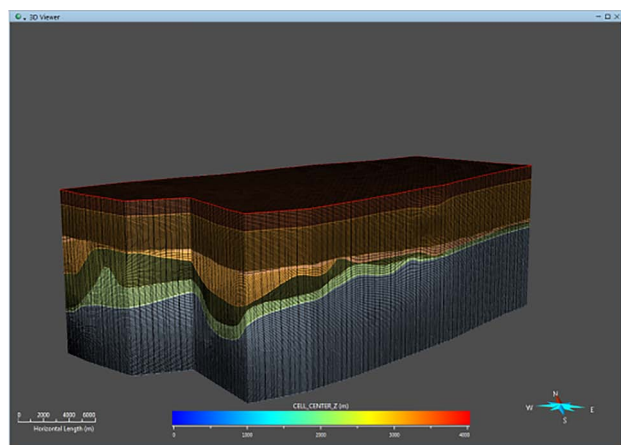


图4 三维地质模型的块体模型
Fig.4 3D geological solid model

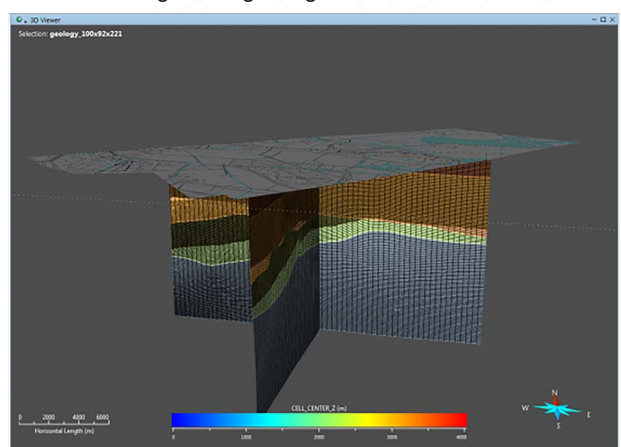


图5 三维地质模型的交叉剖面
Fig.5 3D geological cross profile model

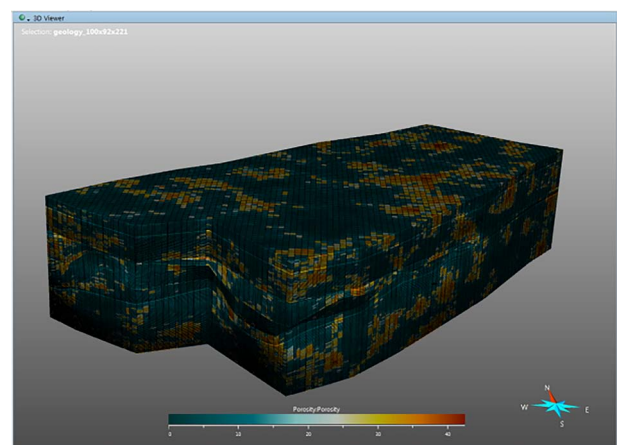


图6 渗透率属性块体模型图
Fig.6 Solid model of permeability attributes

3 三维热储模型分析与应用

3.1 三维热储模型分析

通过SKUA-GOCAD模拟软件添加未参加建模的钻孔数据,对三维模型进行验证。验证数据包括

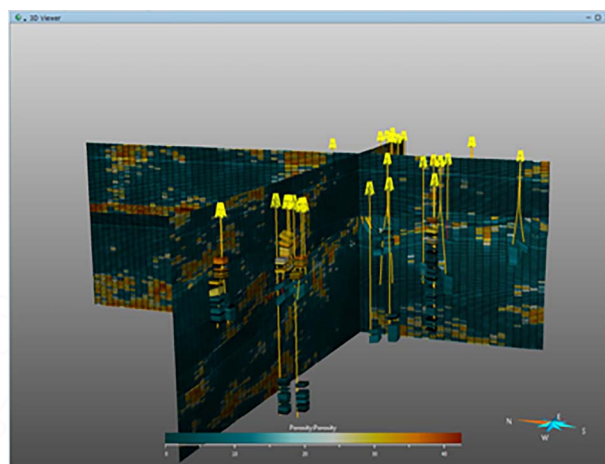


图7 渗透率属性模型剖面图
Fig.7 Profiles of permeability attributes model

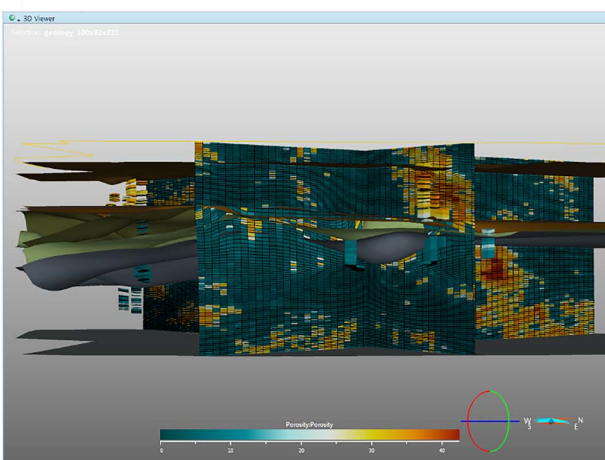


图8 渗透率属性模型剖面图叠加地层面图
Fig.8 Permeability attribute model
profile overlay interfaces

钻孔的地层数据和属性数据,其中属性数据包含孔隙度、渗透率、电阻率、泥质含量和温度^[30]。

图9是验证钻孔与模型对比图。将模型数据和原始数据进行对比,属性值之间的分布趋势上基本相同(每个属性值段的空之间的位置基本相同),但在属性空之间有不同的区域。造成这种结果的原因是分层属性插值建模方法逐层设置插值参数,更符合各地层的特点。而整体插值方法只对数据本身做插值算法,没有考虑各个地层的实际情况。但可以发现相似程度较高,说明模型基本反映了原始数据的特点,模型是可用的。

3.2 三维热储模型应用

3.2.1 在地质模型上任意切割

可在地质体上任意切割,制作需要的地质剖面图(图10)。

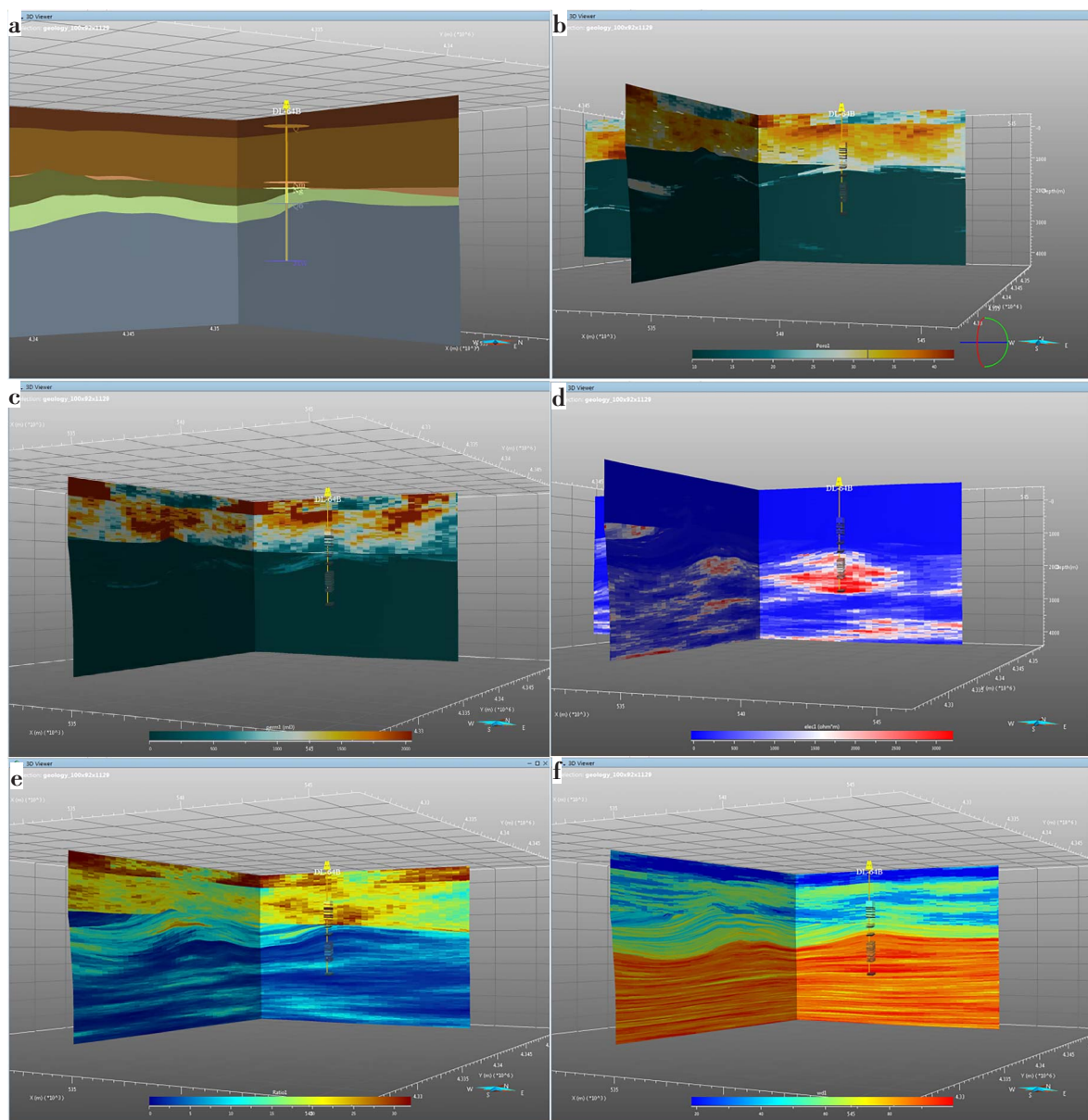


图9 验证钻孔与模型对比图

Fig.9 The comparison of borehole information and model data

- a. 钻孔与模型地层数据对比图; b. 钻孔与模型孔隙度数据对比图; c. 钻孔与模型渗透率数据对比图;
d. 钻孔与模型电阻率数据对比图; e. 钻孔与模型泥质含量数据对比图; f. 钻孔与模型温度数据对比图

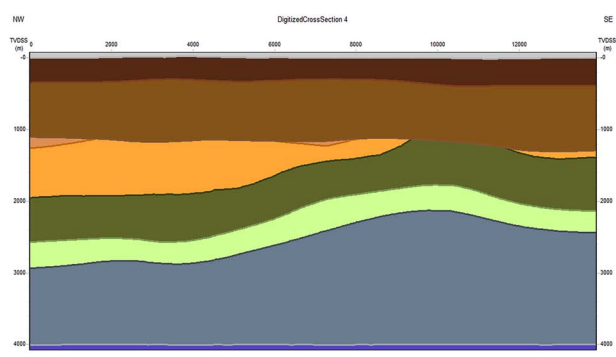


图10 任意划线剖切剖面图

Fig.10 The map of one longitudinal section profile

3.2.2 制作栅格图

可编制多条剖面然后同时显示三维立体效果(图11)。

3.2.3 制作各储层块状体

在 Object 对象框中找到已建立好的构造模型或属性模型,在其中找到 regions 项,针对某个地层或属性进行颜色及基础格式编辑后,即能在对象框中显示(以寒武系地层块状体为例,图12)。

3.2.4 制作各储层埋深等值线图

可在软件[MAP]界面下制作多种模型等值线图

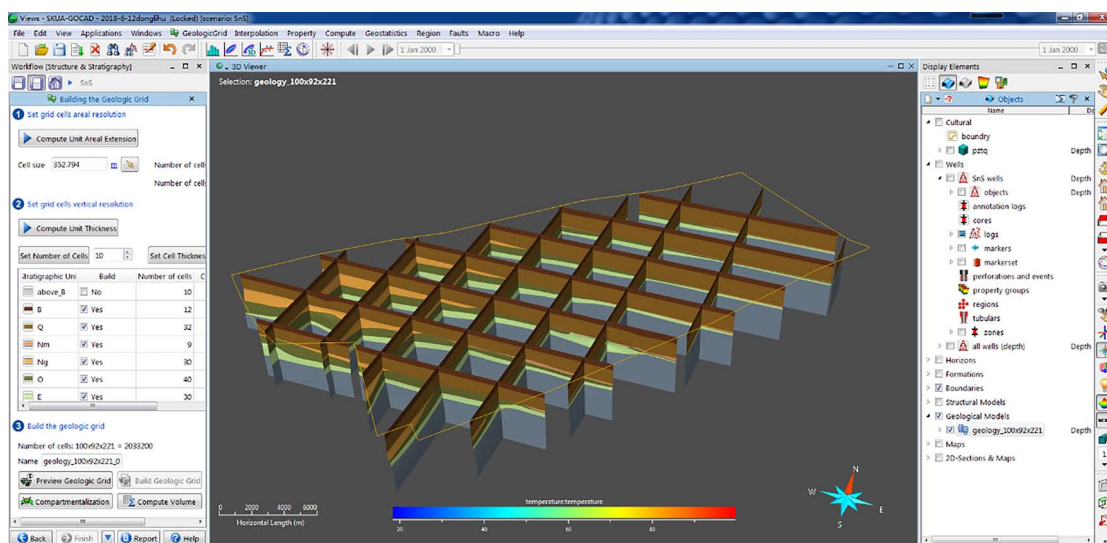


图 11 模型剖切栅格图

Fig.11 The map of longitudinal section grid model

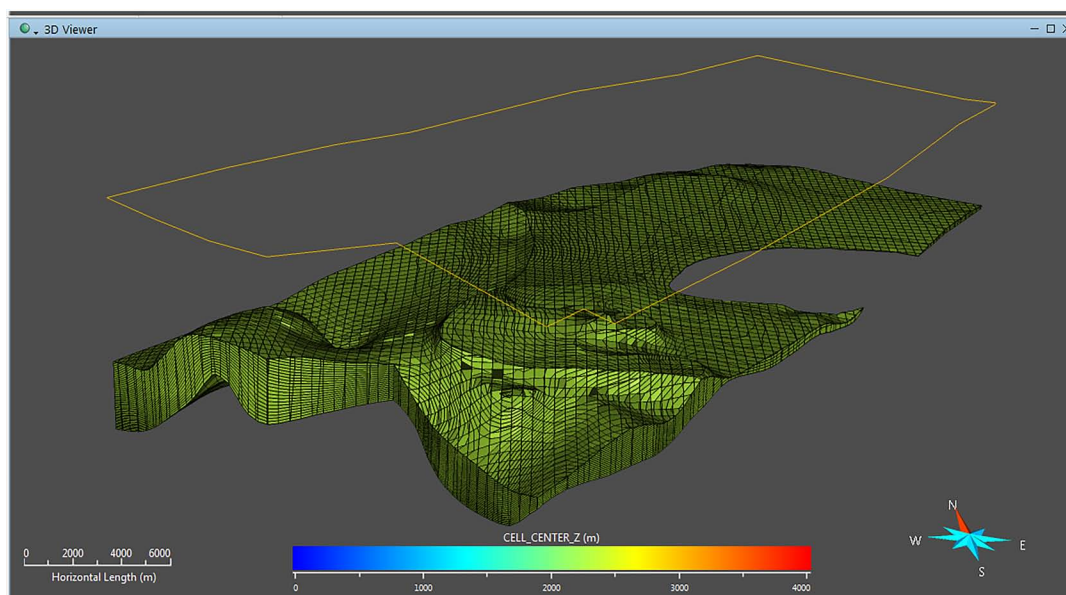


图 12 寒武系地层块状体图

Fig.12 Map of Cambrian stratum solid

(图 13), 选择好地层编号或者地层代码, 即可生成图件。

4 结论

(1) 本次模型建设共使用了 7 个地层的地质构造图和 80 余眼地热井资料构建了三维热储模型(结构模型与属性模型), 地层结构相对复杂。

(2) SKUA-GOCAD 在系统开发性、与其他软件兼容性、可视化性能、复杂构造处理能力及建模速度等方面具有优势。将三维地质信息可视化, 直观展示了地质体空间构造及热储分布特征。

(3) 利用工作流的建模方法及地质分区图+剖面+钻孔等耦合的多源数据, 实现了从多源二维平面数据到三维地质实体的转化。大大提高了建模效率。

(4) 天津市潘庄凸起区域热储三维地质模型在结构与属性模型上反映了热储层平面和垂向发育状况, 指导地热布井, 可以为因地制宜开发地热能提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 江国胜, 黄贤龙, 李晓晖. 天津地区奥陶系热储赋水规律研究[J]. 地下水, 2021, 43(1): 10-12.
- [2] 靳宝珍, 杨云霄, 邱京卫, 等. 天津市古潜山奥陶系岩

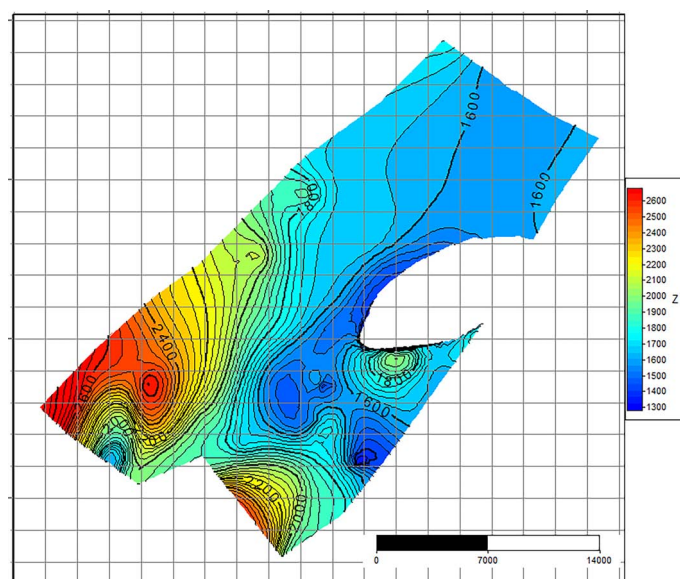


图13 寒武系底板埋深等值线图

Fig.13 Isoline map of buried depth of Cambrian floor

溶裂隙发育规律研究[J]. 中国地质调查, 2019, 6(2): 94-99.

- [3] 胡燕, 林黎, 林建旺. 天津市地热资源可持续开发潜力评价报告[R]. 天津地热勘查开发设计院, 2007.
- [4] 王亚军. 基于三维地质建模的银川平原地热资源储量评价[D]. 中国地质大学(北京), 2014.
- [5] 宿宇驰, 毛小平, 张飞, 等. 沧县隆起北部地温场特征及其主控因素分析[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 403-410.
- [6] 赵文菊, 王营, 滕寿仁, 等. GOCAD 三维可视化在深部地质调查中的应用[J]. 地质与资源, 2015, 24(4): 378-382.
- [7] 朱海龙. GOCAD 项目简介[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(02): 1-8.
- [8] 成兴东, 夏时斌. GOCAD 在龙门山某剖面的三维地质建模应用研究[J]. 科技创新与应用, 2015(32): 59-60.
- [9] 窦帆帆, 林子瑜. GOCAD 在三维地质建模中的应用进展综述[J]. 上海地质, 2017, 35(4): 147-149.
- [10] 何紫兰, 朱鹏飞, 白芸, 等. 复杂地质体三维实体建模方法[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 190-195.
- [11] 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): 207-213.
- [12] 刘先林, 唐正辉. 三维地质建模与数值模拟关键技术研究[J]. 道路工程, 2009, 2016(5): 1-5.

- [13] 王明. GOCAD在郑州地铁1号线三维地质建模中的应用研究[D]. 西南交通大学, 2013.
- [14] 李铎. 山东省曲家金矿床GOCAD 三维建模与成矿预测[D]. 中国地质大学(北京), 2020.
- [15] 李亦纲. 漳州及其邻区三维构造建模与强地面运动预测[D]. 中国地震局地质研究所, 2005.
- [16] 胡燕, 沈键, 刘杰, 等. 天津市滨海新区新近系馆陶组地热流体流场三维数值模拟方法[A]. 第十三届中国科协年会第14分会场-地热能开发利用与低碳经济研讨会论文集[C]. 2011: 103-112.
- [17] 刘赞, 陈海波, 冯树友, 等. 沧东断裂潘庄凸起的东缘地地热地质浅析[J]. 陕西水利, 2018(5): 101-103.
- [18] 宿宇驰, 毛小平, 张飞, 等. 沧县隆起北部地温场特征及其主控因素分析[J]. 地质与资源, 2021, 35(2): 403-411.
- [19] 杨吉龙, 柳富田, 贾志, 等. 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[J]. 地球学报, 2018, 39(1): 71-77.
- [20] 李继军, 翟子梅, 沈键. 天津城市地质调查成果报告[R]. 天津: 天津市地质调查研究院, 2009.
- [21] 刘杰, 宋美钰, 秦莉红, 等. 天津地区雾迷山组地热资源潜力区划[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(2): 321-325.
- [22] 李波. 天津地热资源可持续开发利用对策研究[D]. 天津大学, 2017.
- [23] 陈明涛. 天津潘庄凸起构造区砂岩型热储层水-热-力学耦合数值模拟研究[D]. 吉林大学, 2020.
- [24] 张燕飞, 朱杰勇, 张威. 基于 GOCAD 的三维地质模型构建[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28(4): 69-73.
- [25] 董梅, 慎乃齐, 胡辉, 等. 基于 GOCAD 的三维地质模型构建方法[J]. 桂林工学院学报(自然科学版), 2008, 28(2): 188-192.
- [26] 陈文杰. SKUA地质建模[J]. 技术应用, 2015, 10(2): 72-77.
- [27] 郑国磊, 徐新学, 袁航, 等. 基于 GOCAD 软件的天津市大寺新家园-海河教育园区三维可视化建模研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2261-2267.
- [28] 潘雅静. 基于 GOCAD 平台的复杂地质体空间信息一体化建模研究与实践[D]. 青岛理工大学, 2021.
- [29] 李兆亮, 潘懋, 韩大匡, 等. 三维构造建模技术[J]. 地球科学, 2016, 41(12): 2136-2146.
- [30] 冯波, 陈明涛, 岳冬冬. 基于两种插值算法的三维地质建模对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2019, 49(04): 1200-1208.