

油藏三维地质模型质量控制研究

——以 D 油田 E 块为例

张洋洋¹ 郭 敏² 刘志慧¹ 郭 祥³

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院实验教学中心, 山东 青岛 266580;
2. 中国石化胜利油田分公司技术检测中心, 山东 东营 257000;
3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000

摘 要: 储层三维地质建模对于量化油藏描述和预测剩余油饱和度具有重要意义, 多种因素对其预测精度有影响。通过对影响建模质量的构造模型和属性模型的研究和分析, 得出提高精度的控制因素, 结合地质模型与实际储层的储量复检、概率一致性检验、抽稀检验等, 确定地质模型建立的合理性。以 D 油田 E 块为例, 利用分层数据、断层模型、地层接触关系控制, 提高沙二段构造模型精度; 利用数据平均对比、变差函数物性拟合、序贯高斯物性确定性模拟, 改善属性模型的质量与统一性。对比检验结果表明, 模型储量拟合较好, 相对误差为 -1.60%, 参数趋势一致性较高, 为进一步提高后续模拟的可靠性奠定了基础。

关键词: 模型检验; 不确定性; 质量控制; 地质建模

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2020.01.011

Study on Quality Control of Reservoir Three Dimensional Geological Modeling —Taking Block E of Oilfield D as an Example

Zhang Yangyang¹, Guo Min², Liu Zhihui¹, Guo Xiang³

1. Experimental Teaching Center of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580, China;
2. Technology Testing Center, Sinopec Shengli Oil Field, Dongying, Shandong, 257000, China;
3. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Shengli Oil Field, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract: As the basis of quantitative reservoir description and prediction of remaining oil saturation, reservoir three dimensional geological modeling is affected by many factors. Through the research and analysis of the structural model and attribute model which affect the modeling quality, the controlling factors of improving the accuracy are obtained, the rationality of establishing geological model is determined by combining the

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 河北省博士后择优资助项目“声场采油激励低渗透储层油水渗流动力学研究”(B 2018003011); 河北省教育厅基金项目“斜井爆燃压裂变燃烧冲载过程多裂缝生成机制研究”(QN 2019163); 山东省自然科学基金项目“LNG 加注船液舱晃动时域非线性方法研究”(ZR 2016 EEP 08)

作者简介: 张洋洋(1987-), 男, 山东肥城人, 实验师, 硕士, 主要从事海洋油气工程、流体力学方面研究。E-mail: zhangyangy@upc.edu.cn

geological model with the actual reservoir reserve re-examination, probability consistency test and dilution test. Taking Block E of Oilfield D as an example, the accuracy of the structural model of the second section of the sand basin is improved by using stratified data, fault model and stratum contact relationship control; the quality and unity of the attribute model are improved by means of data average comparison, variation function physical property fitting and sequential Gauss physical property deterministic simulation. The comparative test results show that the model reserves fit well with a relative error of -1.60% and the parameter trend is consistent, which lays a foundation for further improving the reliability of subsequent simulation.

Keywords: Model test; Uncertainty; Quality control; Geological modeling

0 前言

油藏数值模拟与地质建模技术是油气田勘探开发各阶段地质油藏研究工作的重要组成部分,广泛应用于工程生产和油气田开发^[1-4]。由于油田地下地质特征的复杂性和基础资料的差异性,目前尚无关于油藏地质模型质量控制的正式标准。在油藏三维地质模型建模过程中的每一个环节应用质量控制的方法,可以提高模型结果的合理性。首先,在井点上模型数据应该与井点的输入数据一致;其次,在三维空间中断层特征、断层组合形式、构造特征、地层之间的接触关系以及属性数据的统计直方图应该符合油田的地质特征^[5-9]。

D油田E块主要含油层系为沙河街组沙二段,地层厚度448~507 m。区块整体为北、西、南三面由断层封闭,东面开口的断块构造。构造整体地势西北部及东南抬高,中间为低洼的鞍部,西北部地势陡,倾角可达 15° ,东南部地势较缓,内部发育断层走向大多数呈北西或北东走向,少数断层呈近东西走向。

1 地质模型的质量控制

1.1 构造模型

1.1.1 分层数据的控制

合理的构造模型是三维地质建模工作的重要依据^[10-14],可以根据测井结果或地震勘探解释结论绘制断层模型,对测井分层方法进行改进,以降低数据误差。

1.1.2 断层模型的控制

断层模型不仅决定了油田区块的划分,而且影响了地下流体流动边界的分布。断层模型质量控制的基本原则是:断层的空间分布和组合是合理的,必须符合区域结构和局部结构特征,并尽量减少模型中异常网格的数量。正常情况下,考虑到解释人员不同的观点、不同的数据来源和精度等因素的影响,会造成此类数据在三维空间交叉的地方并没有显著差别,此时需要人工矫正处理。

E块断层模型图见图1,区块断裂体系整体呈现三面封闭、低级序断层伴生发育的特点,断层组合较为简单,无截断断层发育,5口井钻遇断点。首先需要对断层

生成的控制点数量进行控制,区块断层面整体倾角倾向较小,采用2个控制点生成。然后对3条边界断层进行组合连接处理,对过断点的断层进行断点锁定控制,确保断层模型质量。

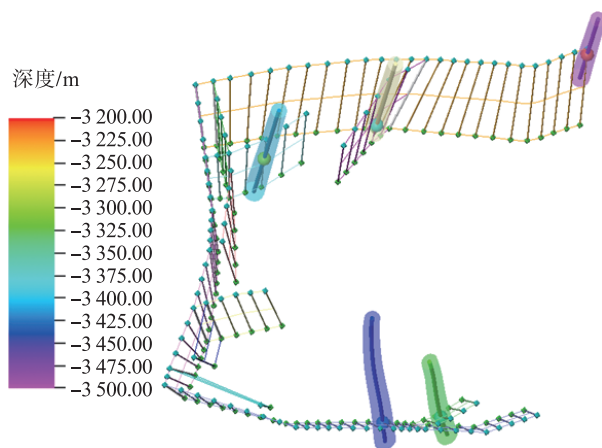


图1 E块断层模型图

Fig. 1 Fault model of Block E

在建模过程中需要特别注意负体积网格和异常形态网格,它们通常产生在断面处或断层相交处,这是由地质构造的复杂性和断面断层的多态性造成的。为减少或消除异常形状网格,根据断层走向添加网格方向趋势线,并减少异常模型网格数量,同时保持油气田总体地质特征。

原始模型网格图见图2,由图2可以看出,原始的设计网格方向为正南正北方向,由于模型边界和断层走向的影响,在交界处产生了网格切割变形现象。根据模型特征,依托边界断层重设网格方向,设计模型网格图见图3。由图3可以看出,模型网格走向存在一个近 40° 的旋转,边界处的网格切割现象消除,异常网格数量减少。最后,通过提取模型网格体积分布,确定网格“负体积”现象消除。

1.1.3 地层接触关系

地层接触关系图见图4,根据图4所示,砂层组内部的小层需要进行厚度约束处理,层与层之间的接触关系采用厚度图叠合的方式生成,对部分存在尖灭现

象的小层,可以选择合适的快速收敛的层面生成算法与厚度加权进行控制。最终,通过检验任意方向下的

油藏地质剖面 and 层面与断层之间的交线,达到合理的空间配置关系。

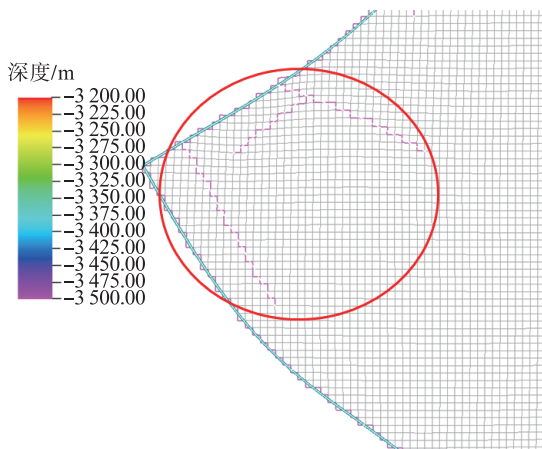


图 2 原始模型网格图

Fig. 2 Original model grid

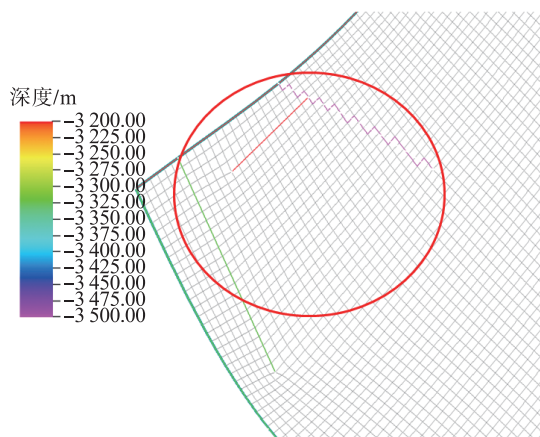
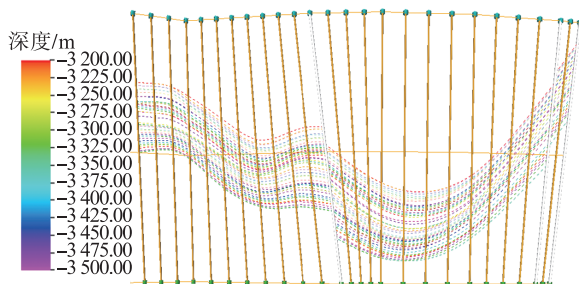


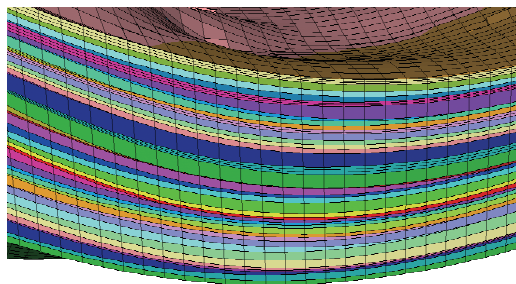
图 3 设计模型网格图

Fig. 3 Designed model grid



a) 层面与断面的交线

a) Intersection of planes and sections



b) 小层网格接触关系

b) Contact relationship of small layer mesh

图 4 地层接触关系图

Fig. 4 Stratum contact relationship

1.2 属性模型

1.2.1 数据采样

由于井数据是地质建模的基础数据,所以模型在井点上一一定要与井数据一致^[15-20]。井的原始属性数据呈连续样本的曲线形式,且三维模型的网格厚度大于样本间距。在属性建模之前,应选择适当的平均方法,并对相应网格的连续样本进行平均,得到一系列平均值作为属性建模的控制点。选择合适的平均方法,并且在计算变差函数之前将平均后的属性与原始属性值进行比较,以确保建模的控制数据能合理表征原始属性。

算术平均: $M = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) / n$; 调和平均: $M = n / (1/X_1 + 1/X_2 + 1/X_3 + \dots + 1/X_n)$; 几何平均: $M = (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \dots \cdot X_n)^{(1/n)}$ 。其中, M 为平均值; X_i 为各取样点样值 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); n 为样本区域内的个数。

测井曲线重采样图见图 5,任意一口井的孔隙度与渗透率进行采样对比分析,未涉及到多参数协同约束。可以看出对于孔隙度参数,三种平均方法对高孔隙的采样差异较小,但是算术平均方法对于低孔隙下的细节保

留有更大的优势。对于渗透率参数,调和平均方法对数据细节保留较差,算术平均方法对流动模拟下的层间差异体现较差,优选几何平均方法。

1.2.2 数据分析

变差函数的好坏直接影响到基于克里金插值技术的序贯高斯模拟的效果的好坏,综合考虑水平和垂直两个方向上的变差函数,一般主变程是平均井距的 6~8 倍,次变程是平均井距的 3~4 倍,以期在两个方向都能达到最佳拟合效果,6 砂组各小层孔隙度变差函数见表 1。

1.2.3 算法参数优选

序贯高斯模拟方法的原理是先找出变量的累积条件分布函数,之后进行正态变换使其标准正态化,再根据简单克里金利用正态变换后的变差函数沿随机路径序贯地模拟每一个值。通过设定统一的变差函数,改变数据分布的标准差,见图 6,标准差分别为 8、4、2、0.5,优选多次实现中与滩坝砂沉积模式相一致的一次实现。

采用序贯高斯模拟方法,仅改变单一数据变量分布

的标准差,分别取值 8、4、2、0.5 时的沙二段 7 砂组 9 小层的孔隙度模拟结果进行对比。根据对小层砂体厚度图的整体地质认识进行比较,可以看出当标准差 = 2 时,

既保留了滩坝砂三个沉积中心部位的孔隙度分布特征,又能体现沉积边缘物性逐渐变差的特点,因此,本次模拟优选标准差 = 2 的特征值。

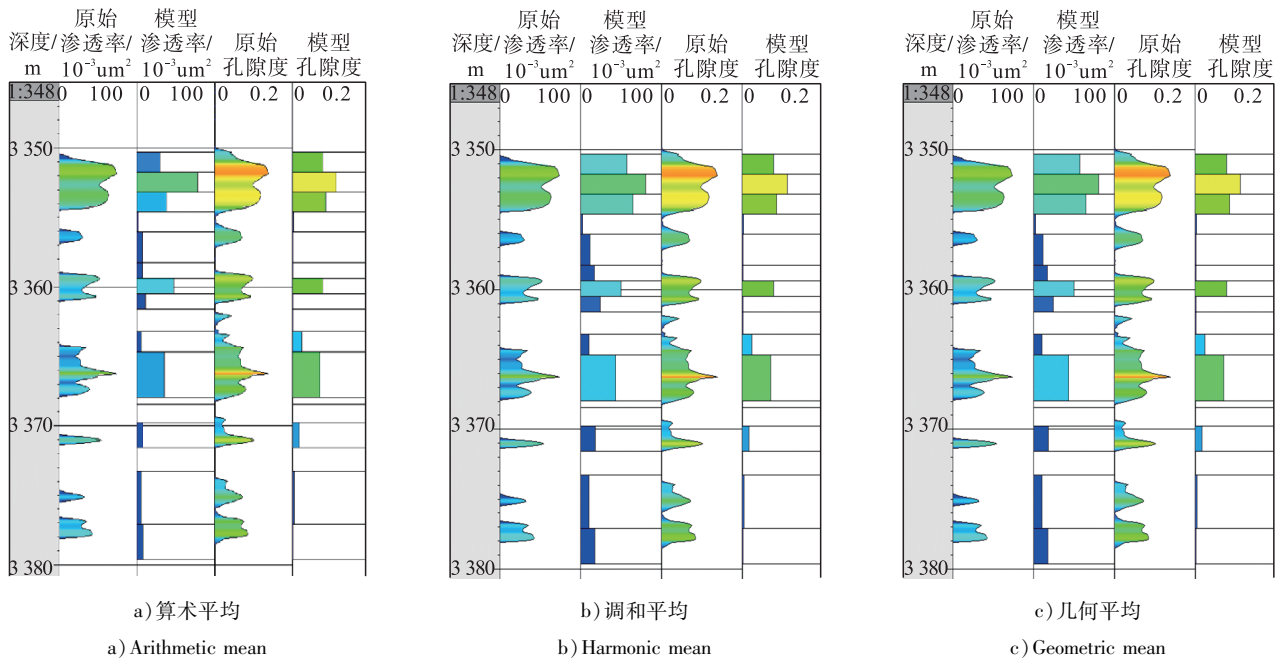


图 5 测井曲线重采样图

Fig. 5 Log resampling

表 1 6 砂组各小层孔隙度变差函数表

Tab. 1 Variation function of porosity in each small layer of sand formation 6

层位	主变程 方向 / (°)	主变程			次变程			垂向变程		
		变程 /m	块金值	基台值	变程 /m	块金值	基台值	变程 /m	块金值	基台值
Es ₂ 6 ¹	335	556.2	0.14	1.24	442.8	0.12	0.98	5.3	0.26	1.22
Es ₂ 6 ²	343	799.7	0.23	0.84	411.2	0.11	1.04	6.8	0.04	1.13
Es ₂ 6 ³	315	856.5	0.11	0.85	649.8	0.15	0.85	6.4	0.31	1.01
Es ₂ 6 ⁴	238	573.4	0.29	0.81	487.2	0.19	1.21	4.4	0.11	1.17
Es ₂ 6 ⁵	325	608.3	0.46	1.13	672.8	0.01	1.27	7.6	0.19	1.15
Es ₂ 6 ⁶	346	973.2	0.47	1.37	766.5	0.12	0.97	4.9	0.12	0.97
Es ₂ 6 ⁷	299	632.8	0.11	0.82	381.4	0.02	0.91	2.7	0.01	0.81
Es ₂ 6 ⁸	325	838.4	0.02	0.91	623.5	0.12	1.02	5.3	0.12	1.22
Es ₂ 6 ⁹	296	776.3	0.18	1.03	549.7	0.07	0.83	6.9	0.23	1.38
Es ₂ 6 ¹⁰	275	844.3	0.14	1.27	663.8	0.26	1.37	5.2	0.27	1.26

2 地质模型的检验

如果地质模型与实际地质情况偏离较明显,则需要重新建模,综合考虑参数设置、思路方法等,持续修正直到两者相符合。

2.1 储量复算检验

D 油田 E 块沙二段有效孔隙度 14.7%, 含油饱和度 59.6%, 体积系数 1.248, 原油密度 0.878 g/cm³, 单储系数 6.16 × 10⁴ t/(km² · m)。根据储量计算参数对模拟区域内的储量进行拟合, 分别对每个储层单元的模式采用容积法计算储量。

容积法计算公式:

$$N = 100AH\phi(1 - S_{wi})\rho_o / B_{oi}$$

式中: N 为石油地质储量, 10⁴ t; A 为含油面积, km²; H 为平均有效厚度, m; ϕ 为平均有效孔隙度, %; S_{wi} 为平均束缚水饱和度, %; ρ_o 为平均地面脱气原油密度, 10³ kg/m³; B_{oi} 为平均地层原油体积系数。

计算石油与模拟石油地质储量相对误差是 -1.60%, 可见模型储量拟合较好, 区块各小层地质储量对比统计情况见表 2。

2.2 概率一致性检验

如果原始数据分布形态和地质模型的数据分布形

态具有高度的相似性,主要分布区间、峰值等主要参数一致,则表明所建立的模型比较可靠,反之,模型精度较差,则需要重新分析数据并重新模拟。

进行孔隙度概率一致性测试,测试后发现原始数据与模拟结果在数据分布趋势上的一致性较高,见图 7,模拟结果可信。

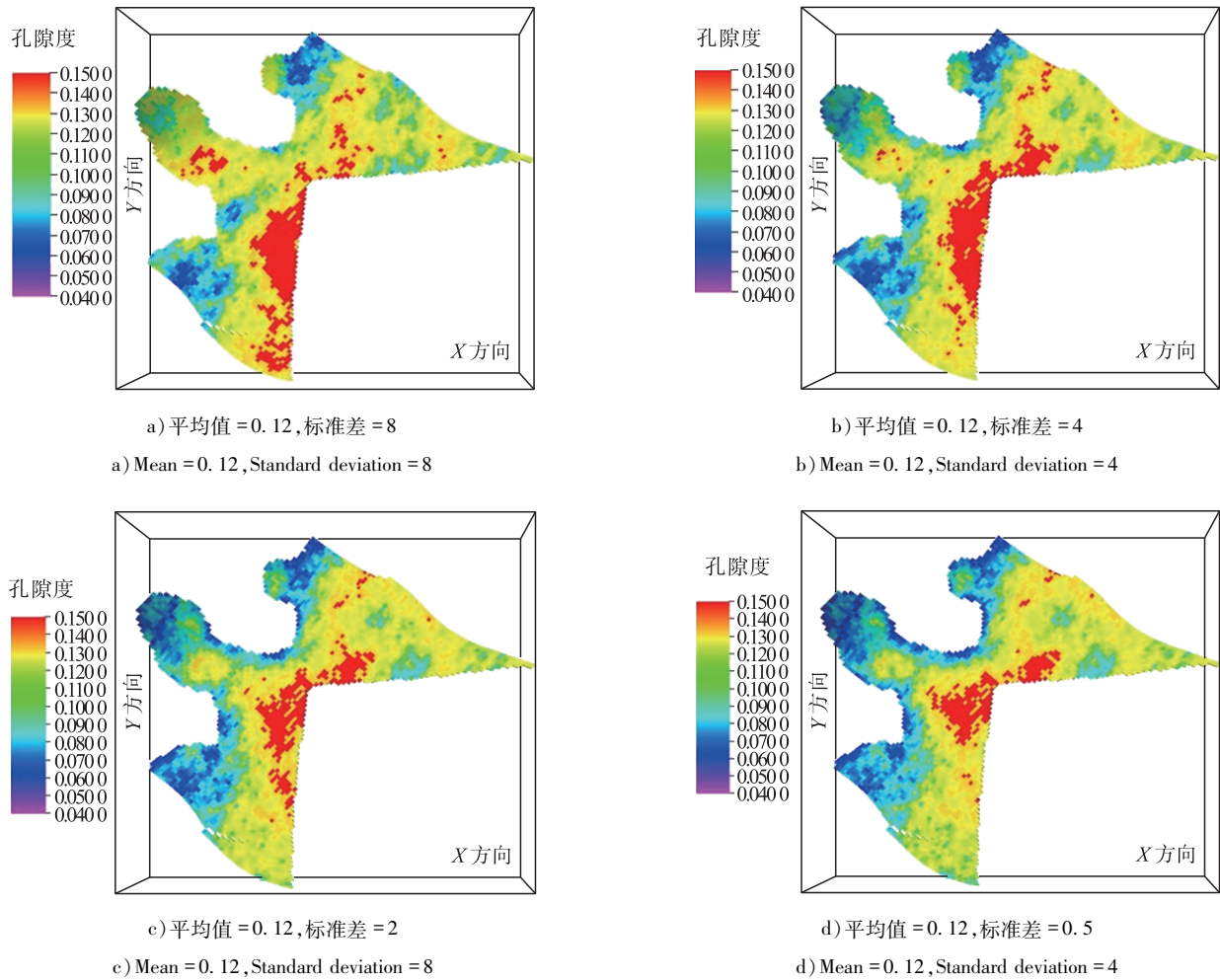


图 6 ES₂7⁹ 小层在不同标准差下的孔隙度分布图

Fig.6 Porosity distribution of ES₂7⁹ small layers with different standard deviations

表 2 计算储量与模拟储量对比表

Tab.2 Comparison of calculated and simulated reserves

砂组	小层	计算石油地质 储量 /10 ⁴ t	模拟石油地质 储量 /10 ⁴ t	误差	砂组	小层	计算石油地质 储量 /10 ⁴ t	模拟石油地质 储量 /10 ⁴ t	误差
Es ₂ 6	1	1.37	1.42	0.04	Es ₂ 7	1	8.07	7.88	-0.02
	2	5.35	5.35	0.00		2	14.58	14.07	-0.04
	3	2.95	2.88	-0.02		3	4.39	4.21	-0.04
	4	0.42	0.40	-0.04		4	1.80	1.74	-0.03
	5	0.44	0.42	-0.04		5	2.36	2.25	-0.05
	6	2.42	2.36	-0.02		6	3.82	3.68	-0.04
	7	13.15	12.96	-0.01		7	6.04	5.92	-0.02
	8	3.47	3.39	-0.02		8	8.24	8.01	-0.03
	9	6.41	6.18	0.03		9	15.97	15.61	-0.02
	10	0.71	0.68	-0.04		10	5.91	5.72	-0.03
	11	26.13	26.92	0.03		11	43.08	42.21	-0.02
					合计		177.08	174.26	-0.02

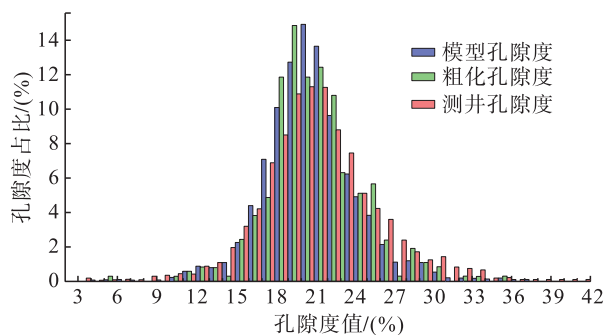
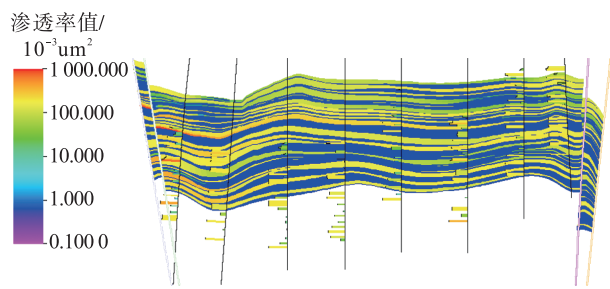


图7 孔隙度概率分布柱状图

Fig. 7 Histogram of porosity probability distribution

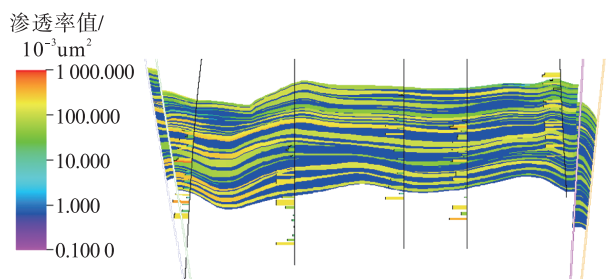
2.3 抽稀检验

选取 E1-X14、E1-12、E1-1 三口井作为检验井不参与模拟,对其它井建立储层参数模型,通过与原始数据进行比较,认为两者基本一致,对比见图 8。



a) 抽稀前模型渗透率剖面图

a) Model permeability profile before drainage



b) 抽稀后模型渗透率剖面图

b) Model permeability profile after drainage

图8 油藏渗透率剖面对比图

Fig. 8 Reservoir permeability profile comparison

3 结论

1)通过对影响建模质量的构造模型和属性模型的研究和分析,得出提高精度的控制因素,结合地质模型与实际储层的储量复算检验、概率一致性检验、抽稀检验等,确定了地质模型建立的合理性。

2)对地质建模过程进行质量控制能显著提高模型质量,改善属性模型的质量与统一性,以 D 油田 E 块为例,通过构造模型、属性模型、模型验证等多个环节的严格控制,利用分层数据、断层模型、地层接触关系控制,

提高了沙二段构造模型精度。

参考文献:

- [1] 王 牧,李 茂,高 洁,等. 姬塬油田 X 区地质建模及数值模拟研究[J]. 石油化工应用,2016,35(10):117-121.
Wang Mu, Li Mao, Gao Jie, et al. Study on Geological Modeling and Numerical Simulation in Jiyuan Oilfield X Area [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35 (10): 117-121.
- [2] 刘 江,石少波,汪光丽,等. 常规测井三向应力计算方法研究[J]. 测井技术,2006,30(4):298-302.
Liu Jiang, Shi Shaobo, Wang Guangli, et al. On Calculating Method of Three-Component Stress with Conventional Logging Data [J]. Well Logging Technology, 2006, 30 (4): 298-302.
- [3] 宋 毅,伊向艺,卢 渊. 地应力对垂直裂缝高度的影响及缝高控制技术控制研究[J]. 石油地质与工程,2008,22(1):75-77.
Song Yi, Yi Xiangyi, Lu Yuan. Impact of Earth Stress on Vertical Fracture Height and Technique of Fracture Height Control [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22 (1): 75-77.
- [4] 孟 文,陈群策,杜建军,等. 新加坡地应力测量[J]. 地球物理学报,2012,55(8):2611-2619.
Meng Wen, Chen Qunce, Du Jianjun, et al. In-Situ Stress Measurement in Singapore [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (8): 2611-2619.
- [5] 江艳平,芦凤明,李 涛,等. 复杂断块油藏地质建模难点及对策[J]. 断块油气田,2013,20(5):585-588.
Jiang Yanping, Lu Fengming, Li Tao, et al. Geological Modeling Difficulties and Countermeasures of Complex Fault-Block Reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20 (5): 585-588.
- [6] 吴泽鑫. 有限元构造应力场研究在苏里格气田水平井开发中的应用[J]. 石油地质与工程,2013,27(1):79-81.
Wu Zexin. Application of Finite Element Study on Tectonic Stress Field to Horizontal Well Development for Sulige Gas Field [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2013, 27 (1): 79-81.
- [7] Deutsch C V, Wang Libing. Hierarchical Object-Based Stochastic Modeling of Fluvial Reservoir [J]. Mathematical Geology, 1996, 28: 857-880.
- [8] Karve P M, Kucukcuban S, Kallivokas L F. On an Inverse Source Problem for Enhanced Oil Recovery by Wave Motion Maximization in Reservoirs [J]. Computational Geosciences, 2015, 19 (1): 233-256.

- [9] Zoback M D, Barton C A, Brady M, et al. Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40 (7-8): 1049-1076.
- [10] 郑黎明,刘 静,蒲春生.波动采油对饱和单相一维储层模型渗流的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35 (10): 2098-2105.
Zheng Liming, Liu Jing, Pu Chunsheng. Seepage Analysis Under Low-Frequency Vibration in One-Dimensional Porous Media Model Saturated with Single-Phase Percolating Fluid [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (10): 2098-2105.
- [11] Hall J, Alvarez E. Petrophysics for Rock Physics: What Really Matters at Seismic Scale [C] //Proceedings of SPWLA 55th Annual Logging Symposium, 18-22 May, 2014, Abu Dhabi, United Arab Emirates. Houston: SPWLA, 2014.
- [12] 李 刚,张金利,杨 庆,等.非达西渗流与变渗透系数下的大变形固结分析[J].中南大学学报(自然科学版), 2016,47(3): 977-983.
Li Gang, Zhang Jinli, Yang Qing, et al. Analysis of Large-Strain Consolidation with Non-Darcy Flow and Variable Permeability Coefficient [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47 (3): 977-983.
- [13] 王从乐,周鹏高,杨 虎,等.由井壁崩落宽度反演地层水平主应力的数学模型[J].新疆石油地质,2012,33(2): 233-235.
Wang Congle, Zhou Penggao, Yang Hu, et al. Mathematical Model for Deriving Formation Horizontal Stress from Sidewall Breakout Width [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33 (2): 233-235.
- [14] Sinha B K, Vissapragada B, Renlie L, et al. Horizontal Stress Magnitude Estimation Using the Three Shear Moduli-A Norwegian Sea Case Study [C] //Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 24-27 September, 2006, San Antonio, Texas, USA. New York: SPE, 2006.
- [15] 李玉丹,董平川,张 荷,等.低渗透油藏渗透率及启动压力梯度应力敏感性分析[J].油气地质与采收率,2016,23 (6):57-63.
Li Yudan, Dong Pingchuan, Zhang He, et al. Stress Sensitivity Analysis of Permeability and Threshold Pressure Gradient in Low-Permeability Reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23 (6): 57-63.
- [16] 张志红,师玉敏,朱 敏.黏土垫层水力-力学-化学耦合模型研究[J].岩土工程学报,2016,38(7):1283-1290.
Zhang Zhihong, Shi Yumin, Zhu Min. Coupled Hydro-Mechanical-Chemical Model for Clay Liner [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (7): 1283-1290.
- [17] 宋元新.大功率低频谐振波采油波场分布与近井渗流特征研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.
Song Yuanxin. Study on Wave Field Distribution and Near-Wellbore Filtration Features Under Low-Frequency High-Power Resonance Wave Recovery [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [18] Sinha B. Estimation of Formation Non Linear Constants by Sonic Measurements While Changing Borehole Pressures [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 15 (1): 118-121.
- [19] Sinha B K, Papanastasiou P, Plona T J. Influence of Triaxial Stresses on Borehole Stoneley and Flexural Dispersions [C] // Proceedings of the SEG Annual Meeting, 2-7 November, 1997, Dallas, Texas, USA. New York: 1997.
- [20] 郑黎明,蒲春生,黄小梅,等.宏观渗流对孔隙介质中弹性波传播的影响分析[C] //孙 楠.2015 油气田勘探与开发国际会议论文集.西安:陕西省石油学会,2015:1-9.
Zheng Liming, Pu Chunsheng, Huang Xiaomei, et al. Influence of Initial Seepage Fluid In Porous Media on Elastic Wave Propagation [C] //Sun Nan. 2015 International Field Exploration and Development Conference. Xi'an: Shaanxi Petroleum Society, 2015: 1-9.