

碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法

——以塔河油田四区奥陶系油藏为例

胡向阳¹, 李 阳², 权莲顺¹, 孔庆莹¹, 王 英¹, 吕心瑞¹

(1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化 油田勘探开发事业部, 北京 100728)

摘要:碳酸盐岩缝洞型油藏储集空间类型主要为大型溶洞、溶蚀孔洞及裂缝, 尺度大小悬殊, 形态不规则, 分布不连续。定量刻画孔、洞、缝在三维空间的展布一直是该类油藏开发的技术难题, 目前尚缺乏有效的地质建模方法。以塔河碳酸盐岩缝洞型油藏为原型, 提出了多元约束碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法, 即在古岩溶发育模式控制下, 采用两步法建模。第一步, 建立4个单一类型储集体模型: 首先利用地震识别的大型溶洞和大尺度裂缝, 通过确定性建模方法, 建立离散大型溶洞模型和离散大尺度裂缝模型; 然后在岩溶相控约束下, 基于溶洞发育概率体和井间裂缝发育概率体, 采用随机建模多属性协同模拟方法, 建立溶蚀孔洞模型和小尺度离散裂缝模型。第二步, 采用同位条件赋值算法, 将4个单一类型模型融合成多尺度离散缝洞储集体三维地质模型。该模型定量刻画了缝洞储集体在三维空间的展布特征, 为油田开发奠定了坚实的地质基础。

关键词:离散裂缝建模; 溶蚀孔洞建模; 离散大型溶洞建模; 地质建模; 碳酸盐岩缝洞型油藏

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield

Hu Xiangyang¹, Li Yang², Quan Lianshun¹, Kong Qingying¹, Wang Ying¹, Lv Xinrui¹

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Exploration and Production Department, SINOPEC, Beijing 100728, China)

Abstract: Reservoir spaces of fractured-vuggy carbonates mainly include large caverns, dissolved pores and fractures, which are varied in scale, irregular in shapes and discontinuous in distribution. There still have no effective geological modeling method for quantitative descriptions of 3D reservoir space distributions in fractured-vuggy carbonate reservoirs. In this paper, taking Tahe fractured-vuggy carbonate reservoir as an example, we put forward a 3D geological modeling method of fractured-vuggy reservoir under the constraint of multiple geological factors, i. e. two-step modeling under the control of ancient karst development pattern. In the first step, 4 single-type reservoir models were established. After large caverns and large-scale fractures were identified by using seismic data, a discrete large cavern model and a discrete large-scale fracture model were established first with deterministic modeling method. Then, under the constraint of karst facies and based on development probability volumes of dissolved pores and interwell fractures, a dissolved pore model and a discrete small-scale fracture model were established by using the stochastic multi-attribute coordinated modeling method. In the second step, the 4 single-type reservoir models were merged into a 3D multiscale discrete geological model of fractured-vuggy carbonate reservoirs by using the diachronic assignment algorithm. The final model can quantitatively describe the 3D distribution of the fractured-vuggy carbonate reservoirs, and provide geological foundation for oilfield development.

Key words: discrete fracture modeling, dissolved pore modeling, discrete large cavern modeling, geological modeling, fractured-vuggy carbonate reservoir,

近年来我国碳酸盐岩缝洞型油藏储量不断增长, 先后发现了塔河、渤海湾盆地的广饶潜山等大型油田, 目前找到的碳酸盐岩油藏储量中, 缝洞型油藏占探明

石油储量的2/3。塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏属于典型的缝洞型油藏, 储集体主要为大型溶洞、溶蚀孔洞及多尺度裂缝, 其分布受沉积、构造、古地貌以及多期

收稿日期: 2012-10-27; 修订日期: 2013-04-25。

第一作者简介: 胡向阳(1964—), 男, 博士、高级工程师, 开发地质及地质建模。E-mail: huxy.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB201003); 国家科技重大专项(2011ZX05014-002)。

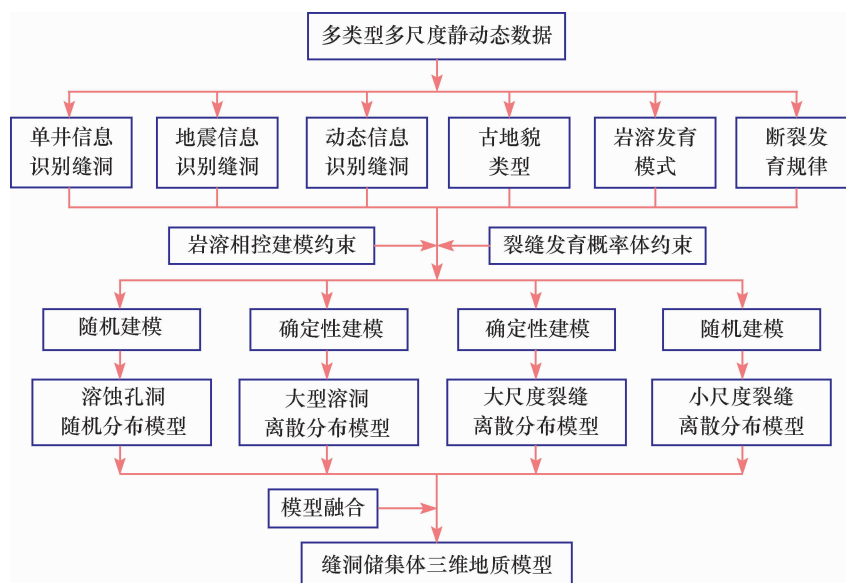


图1 缝洞型油藏地质建模方法

Fig. 1 Diagram showing the geological modeling method of fractured-vuggy reservoirs

岩溶作用控制^[1-10],储集体大小悬殊,形态不规则,空间分布不连续^[11-14]。建立定量表征裂缝、溶洞空间展布的三维地质模型是世界级难题,传统的碎屑岩及孔隙性碳酸盐岩等地质建模方法并不适用,针对该类油藏的建模理论和方法,国内外仍处于探索阶段^[15-20]。通过近几年的开发实践和国家“973”项目攻关研究,突破了碎屑岩连续性介质的地质建模技术思路,提出了多元约束碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法(图1)。

1 建模方法

1.1 大型溶洞建模方法

岩溶成因控制离散大型溶洞建模方法是通过三维地震资料识别和表征大型溶洞,在岩溶成因模式控制下,采用确定性建模方法建立大型溶洞三维分布模型。

通过井-震结合储层波阻抗反演及地震多属性融合技术,获得三维波阻抗及地震属性融合体,利用井点岩心、测井及测试等静、动态资料标定波阻抗及地震属性融合体确定储层截断值,采用确定性建模方法,刻画大型溶洞在三维空间的分布。

1.2 小尺度溶蚀孔洞建模方法

小尺度溶蚀孔洞建模是在单井缝洞储集体识别及井间缝洞储集体地震预测的基础上,采用地质统计学随机模拟技术,以溶洞发育概率体为条件概率约束,建立小尺度溶蚀孔洞的三维分布模型。

在具体模拟方法上,首先通过岩心、测井及生产动态等资料,在井点上识别溶蚀孔洞发育段,作为条件模拟数据;井间利用地震识别的溶洞发育概率体,作为建模约束参数;综合井点及井间数据,在岩溶相控下,采

用地质统计学多属性协同模拟技术,建立小尺度溶蚀孔洞的三维分布模型。

1.3 大尺度裂缝建模方法

对于大尺度断裂及裂缝,主要通过三维地震资料解释及地震属性进行识别和预测,采用确定性建模方法建立大尺度裂缝在三维空间的分布模型。

利用三维地震构造解释、地震相干体、地震“蚂蚁体”及与断裂相关的地震边缘检测等进行人机交互方式拾取断裂信息,分别按不同方位分组建立大尺度离散裂缝模型。

1.4 小尺度裂缝建模方法

对于小尺度裂缝,在单井裂缝模型的基础上,以裂缝发育概率体及距断裂距离信息为条件约束,采用随机模拟的示性点过程方法建立小尺度离散三维裂缝网络模型。

井点小尺度裂缝可通过成像测井、岩心及常规测井资料识别。利用成像测井资料可获得单井裂缝发育密度、裂缝的产状及开度等信息;利用岩心及常规测井资料可以获得裂缝发育密度;结合区域应力场资料及断裂展布信息,可从宏观上分析裂缝的发育规律,并以此约束小尺度裂缝的模拟。

1.5 孔、洞、缝三维缝洞体融合模型

在上述建立的4个单一缝洞储集体模型基础上,将4个单一储集体模型融合,建立多尺度三维缝洞储集体模型。

在模型融合方法上,以地质概念模式为指导,模型忠实于井点条件数据,遵循缝洞储集体发育模式和缝洞组合规律,采用同位条件赋值算法,将4个单一类型

储集体离散模型融合成缝洞型油藏三维地质模型。

$$P[x, y, z | (i)] = F\{I_{\text{溶洞}}, I_{\text{断裂}}, I_{\text{孔洞}}, I_{\text{裂缝}}(x, y, z) | (\text{缝洞模式})\} \quad (1)$$

式中: $P[x, y, z | (i)]$ ——位置 (x, y, z) 处 i 目标的发育概率;

$I_{\text{溶洞}}(x, y, z)$ ——大型溶洞存在指数;

$I_{\text{断裂}}(x, y, z)$ ——大尺度裂缝存在指数;

$I_{\text{孔洞}}(x, y, z)$ ——溶蚀孔洞存在指数;

$I_{\text{裂缝}}(x, y, z)$ ——小尺度裂缝存在指数。

2 应用实例

塔河油田四区奥陶系油藏为缝洞型碳酸盐岩油藏,储集空间以大型溶洞、多尺度裂缝和小的溶蚀孔洞为主,大小悬殊、分布不均,其中大型溶洞是最主要的储集空间类型。中-下奥陶统岩性主要为颗粒灰岩、微晶灰岩,亮晶、泥微晶的颗粒灰岩次之,矿物成分99%为方解石。储层基质岩块孔隙度低、渗透性较差,岩心统计储层孔隙度平均0.92%,其中小于1%的样品占67.6%。平均渗透率 $2.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占样品总数的63%,储层具有极强的非均质性^[2-5]。按着上述建模方法和步骤,对塔河油田四区进行了三维地质建模。

2.1 大型溶洞模型的建立

2.1.1 确定性数据获取

大型溶洞主要通过井-震结合的方法识别和表征。通过地震反射结构、储层波阻抗反演及地震多属性融合体,预测大型溶洞;利用井点资料对地震识别的溶洞体进行截断值的确定和综合标定。

2.1.2 古地貌平面分区、岩溶垂向分带

研究表明,大型溶洞储集体的发育主要受古地貌和岩溶分带的控制。塔河4区主要发育三种古地貌类型,即岩溶高地、岩溶斜坡及岩溶洼地,其中岩溶高地缝洞系统发育程度较高、规模相对较大;古岩溶在垂向上划分为4个带,即表层岩溶带、垂向渗滤带、径流溶蚀带和潜流溶蚀带。大型溶洞发育程度及规模在平面上受不同古地貌分区控制,在垂向上受不同岩溶分带的影响。

2.1.3 离散大型溶洞分布模型

根据地震综合识别的大型溶洞,在垂向岩溶分带和平面古地貌分区的岩溶相控下,采用确定性建模方法,建立塔河4区大型溶洞离散分布模型(图2)。

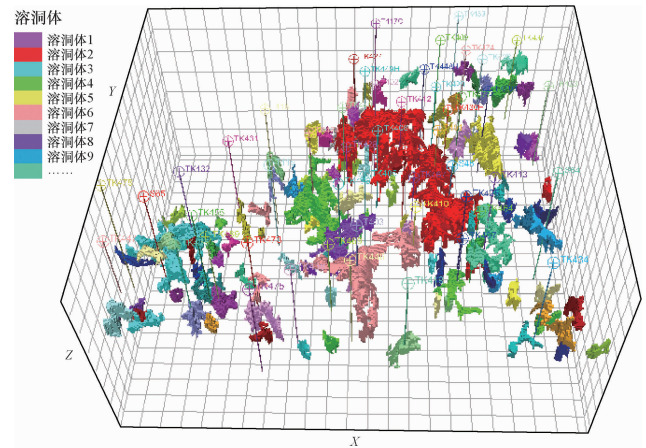


图2 塔河四区离散大型溶洞三维分布模型

Fig. 2 3D distribution model of discrete large caverns in Tahe-IV block

2.2 溶蚀孔洞模型的建立

2.2.1 溶蚀孔洞发育段的识别

根据岩心、成像测井、常规测井等资料在单井上识别溶蚀孔洞发育段,以此作为建模的条件数据。

2.2.2 溶洞发育概率密度分布函数

基于单井溶洞发育段及储层三维波阻抗反演溶洞识别成果,统计不同古地貌单元及垂向不同岩溶带溶洞发育概率,构建溶洞发育概率密度分布函数,作为井间溶蚀孔洞建模定量约束参数。

2.2.3 溶蚀孔洞模型的建立

以研究区56口井识别的81个溶蚀孔洞发育段作为条件数据,以溶洞发育概率体作为井间约束参数,在垂向岩溶分带和平面古地貌分区的岩溶相控下,采用协同序贯指示模拟方法,建立溶蚀孔洞分布模型(图3)。

2.3 大尺度裂缝模型的建立

地震构造解释结果表明,研究区主要发育北东方

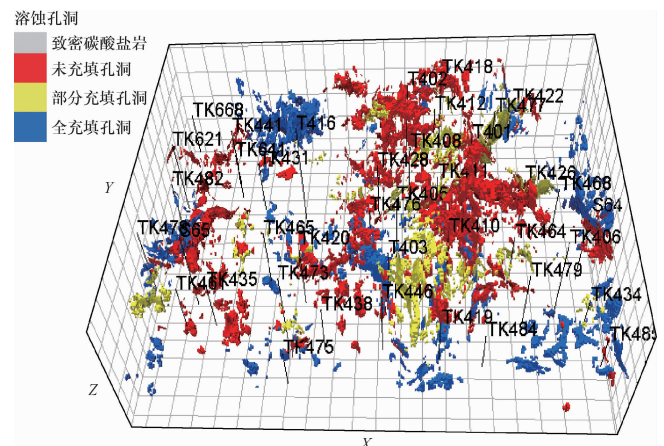


图3 塔河油田四区溶蚀孔洞三维分布模型

Fig. 3 3D distribution model of dissolved pores in Tahe-IV block

高精度三维地震信息,采用确定性建模方法建立三维地质模型,表征地震尺度下大型溶洞及大尺度裂缝的三维空间分布。

3) 针对小尺度溶蚀孔洞和裂缝,主要通过井-震信息识别孔洞、裂缝发育段,基于溶洞和裂缝发育概率体,在岩溶相控约束下,采用多属性协同随机模拟方法,建立溶蚀孔洞随机模型和小尺度离散裂缝模型,表征岩心及测井尺度下裂缝和溶蚀孔洞三维分布。

4) 该成果在塔河油田得到了规模应用,为剩余油挖潜、调整加密井、老井侧钻等挖潜措施的实施,奠定了可靠的地质基础,应用效果显著。

参 考 文 献

- [1] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115-121.
Li Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.
- [2] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [3] 江怀友, 宋新民, 王元基, 等. 世界海相碳酸盐岩油气勘探发现状与展望[J]. 海洋石油, 2008, 28(4): 6-13.
Jiang Huaiyou, Song Xinmin, Wang Yuanji, et al. Current situation and forecast of the world's carbonate oil and gas exploration and development[J]. Offshore Oil, 2008, 28(4): 6-13.
- [4] 康玉柱. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 1-12.
Kang Yuzhu. Characteristics and distribution laws of palaeokarst hydrocarbon reservoir in palaeozoic carbonate formation in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 1-12.
- [5] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101-106.
Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [6] 康志宏. 塔河碳酸盐岩油藏岩溶古地貌研究[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 522-525.
Kang Zhihong. The karst palaeogeomorphology of carbonate reservoir in Tahe oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 522-525.
- [7] 肖玉茹, 王敦则, 沈杉平. 新疆塔里木盆地塔河油田奥陶系古洞穴型碳酸盐岩储层特征及其受控因素[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 92-98.
Xiao Yuru, Wang Dunze, Shen Shanping. The characteristics of paleozoic carbonate reservoir and its control factors in ordovician of the Tahe Oilfield in the Tarim Basin, Xinjiang[J]. Geoscience, 2003, 17(1): 92-98.
- [8] 王萍, 袁向春. 塔河油田4区古地貌对储层分布的影响[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 381-387.
Wang Ping, Yuan Xiangchun. Control of paleogeomorphology on reservoir distribution in Block 4 of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 381-387.
- [9] 张文博, 金强, 徐守余, 等. 塔北奥陶系露头古溶洞充填特征及其油气储层意义[J]. 特种油气藏, 2012, 19(3): 50-54.
Zhang Wenbo, Jin Qiang, Xu Shouyu, et al. Paleocavern filling characteristics and hydrocarbon reservoir implication in the Ordovician outcrops in northern Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 50-54.
- [10] 张希明, 杨坚, 杨秋来, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 13-18.
Zhang Ximing, Yang Jian, Yang Qiulai, et al. Reservoir description and reserves estimation technique for fracture-cave type carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 13-18.
- [11] 阎相宾. 塔河油田下奥陶统古岩溶作用及储层特征[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(4): 23-25.
Yan Xiangbin. Paleokarst and reservoir characteristics of lower ordovician in Tahe oilfield[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(4): 23-25.
- [12] 李阳. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(1): 1-8.
Li Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1): 1-8.
- [13] 吴胜和, 欧阳健. 塔里木盆地轮南地区奥陶系岩溶体系的测井分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(2): 123-127.
Wu Shenghe, Ouyang Jian. Well logging analysis on karst system of ordovician at Lunnan region of Tarim Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994, 18(2): 123-127.
- [14] 季玉新. 用地震资料检测裂缝性油气藏的方法[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(5): 28-35.
Ji Yuxin. Detection of fractured reservoirs with seismic data[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2002, 25(5): 28-35.
- [15] 刘钰铭, 侯加根, 胡向阳, 等. 塔河油田古岩溶储集体三维建模[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 34-38.
Liu Yuming, Hou Jiagen, Hu Xiangyang, et al. 3D modeling of paleokarst reservoir in Tahe oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(2): 34-38.
- [16] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 标点过程随机模拟方法在沉积微相研究中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 19-22.
Hu Xiangyang, Xiong Gihua, Wu Senghe. Application of marked point process stochastic simulation to study sedimentary microfacies[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(2): 19-22.
- [17] 赵敏, 康志宏, 刘洁. 缝洞型碳酸盐岩储集层建模与应用[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(3): 318-320.
Zhao Min, Kang Zhihong, Liu Jie. Modeling and application of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(3): 318-320.
- [18] 吴胜和, 金振奎. 储层建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 99-104.
Wu Shenghe, Jin Zhenkui. Reservoir modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 99-104.
- [19] 王兆峰, 方甲中. 缝洞型碳酸盐岩油藏地质建模和油藏数值模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(9): 1-5.
Wang Zhao Feng, Fang Jiazhong. Geological modeling and numerical simulation study for fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9): 1-5.
- [20] 于金彪, 吴胜和. 基于动态资料约束的储层迭代建模研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 13-18.
Yu Jinbiao, Wu Shenghe. Reservoir iterative modeling constrained by dynamic data[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 13-18.