

岩溶相控多尺度碳酸盐岩缝洞储集体 二步法建模新技术

胡向阳¹, 权莲顺¹, 侯加根²

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 以塔河碳酸盐岩缝洞型油藏为原型, 研究并形成了岩溶相控多尺度缝洞储集体二步法建模新技术, 即在古岩溶发育模式控制下, 采用二步法建模: 第 1 步建立 4 个单一类型储集体离散分布模型, 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; 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, 采用随机模拟多属性协同模拟方法, 建立溶蚀孔隙模型和小尺度离散裂缝模型; 第 2 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分布模型。该模型在三维空间定量表征了缝洞储集体的展布特征, 为油田开发奠定了坚实的地质基础。

关键词 碳酸盐岩缝洞型油藏; 二步法建模; 大型溶洞; 溶蚀孔隙; 离散裂缝

中图分类号 TE344

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.006

New Technology of Two Step Modeling Controlled by Karst Facies of Multiscale Fractured-cavity Carbonate Reservoir

HU Xiangyang¹, QUAN Lianshun¹, HOU Jiagen²

1. Sinopec Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China
2. College of Geoscience, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

Abstract Taking Tahe fractured-cavity carbonate reservoirs as the prototype, a new technology of the two step modeling controlled by karst facies of multi-scale fractured-cavity reservoir is developed. It is a two step modeling method under the control of the ancient karst development mode: the first step is the establishment of four discrete distribution models of a single type of reservoir, namely, using the seismic identification and description of the results, to establish a large cave discrete distribution model and a large-scale fracture discrete distribution model. With the karst facies constraints, based on the probability of caves and fractures to be developed between the body and the wells, and the multi-attribute co-simulation, the dissolved pores stochastic model and the small scale fractures discrete model are built. In the second step the parity condition assignment algorithm is used, to integrate the four single types of models into a multi-scale discrete fractured-cavity reservoir 3D distribution model. The quantitative model in 3D space to characterize the distribution feature of the fractured-cavity reservoir may serve as a solid geological foundation for the oilfield development.

Keywords fractured-cavity carbonate reservoir; two step modeling; large scale; dissolved pores; discrete fractures

0 引言

碳酸盐岩油藏是世界上最重要的油气勘探开发领域之一, 占已探明石油储量的 52%, 全球油气总产量的 60%^[1,2]。近年来中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, 目前已探明碳酸盐岩储量中缝洞型油藏约占 2/3, 是中国石油增储上产的主

要领域之一^[3-5]。塔河油田位于塔里木盆地北部, 奥陶系碳酸盐岩油藏是中国已经发现的储量规模最大的典型碳酸盐岩缝洞型油藏, 埋深超过 5600m, 原始地层压力 60MPa 左右, 地层温度在 125℃ 以上, 属于超深、超高温、高压复杂油藏^[6,7]。

缝洞型油藏储层特征与孔隙型和裂缝-孔隙型油藏有本质上的差异, 储集体由大型溶洞、多尺度裂缝和小的溶蚀孔

收稿日期: 2013-01-08; 修回日期: 2013-05-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201003); 国家重大科技专项(2011ZX05014-002)

作者简介: 胡向阳, 博士, 高级工程师, 研究方向为油气藏描述及三维地质建模, 电子信箱: huxyky@sinopecc.com

洞组成,不同储集空间类型尺度差异大、空间分布不连续^[8-11]。碳酸盐岩缝洞储集体发育受沉积、构造、古地貌以及多期岩溶作用控制,定量表征孔、洞、缝在三维空间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。本文中以塔河油田4区碳酸盐岩缝洞型油藏为原型,研究并形成了岩溶相控多尺度缝洞储集体二步法建模新技术,建立了碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质模型,定量表征了碳酸盐岩缝洞储集体在三维空间的展布特征,为油田的开发奠定了地质基础,有效地指导了生产。

1 缝洞储集体建模思路和流程

开发实践表明,缝洞体发育受岩溶作用控制,平面上在不同的古地貌单元、纵向上在不同的岩溶带,储集体发育程度及分布规律有显著差异。因此,作者提出了采用“平面按古地貌分区、纵向按岩溶分带”的岩溶相控缝洞储集体三维地质建模方法,遵循成因控制的建模原则,建立缝洞储集体三维地质模型。

在具体建模过程中,以塔河油田4区碳酸盐岩缝洞型油藏为原型,利用多类型、多尺度的静、动态资料,采用岩溶相控两步法建立三维离散缝洞储集体模型。第1步建立4个单一类型储集体离散分布模型:首先利用地震识别的大型溶洞及大尺度裂缝,通过确定性建模方法,建立离散大型溶洞分布模型和离散大尺度裂缝分布模型;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,采用随机模拟多属性协同模拟方法,建立溶蚀孔洞模型和离散小尺度裂缝模型;第2步采用同位条件赋值算法,将4个单一类型缝洞体模型融合成多尺度离散缝洞储集体三维分布模型(图1)。

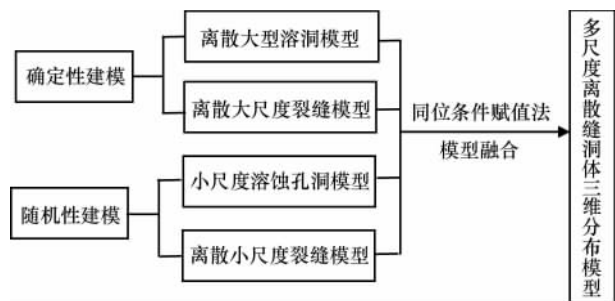


图1 缝洞储集体建模技术框图

Fig. 1 Fractured-cavity reservoir modeling technology diagram

2 岩溶相控多尺度缝洞储集体二步法建模技术

2.1 大型溶洞建模方法

通过地震属性定性预测和储层波阻抗定量反演对大型溶洞进行识别,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,表征大型溶洞在三维空间的分布。

2.2 溶蚀孔洞建模方法

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,在单井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。

2.3 大尺度裂缝建模方法

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。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属性进行人机交互方式拾取断裂信息,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。

2.4 小尺度裂缝建模方法

小尺度裂缝可通过成像测井、岩心及常规测井资料识别。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约束,采用随机模拟的方法建立小尺度三维离散裂缝网络模型。

小尺度裂缝的模拟采用示性点过程模拟算法,其基本思想是按照点过程的概率定律,按照空间几何物理的分布规律,产生小尺度缝中心点的空间分布,然后模拟裂缝的其他属性(长度、方位角、倾角、开度和传导率等参数)标注到该点上得到裂缝的三维几何模型。即先模拟裂缝中心点的位置再模拟裂缝的相关属性,最后得到裂缝几何模型。物体中心点的分布可以是独立的,如泊松过程(Poisson),也可以是相互关联或排斥的,如吉布斯(Gibbs)分布。对于裂缝其点过程属于Poisson点过程^[14,15]。

示性点过程模拟是建立在对目标体地质认识的基础上,在模拟过程中,将一些关于目标体的先验地质认识(如裂缝的形状、大小、空间分布规律)作为条件约束信息加入模型中,可以使随机模拟结果最大限度地接近地质实际。由于三维空间内裂缝的分布以及裂缝的属性极为复杂,在随机模拟过程中需要应用优化算法^[14]对目标体分布进行“逐步逼近”,直至最终得到一个满意的随机模拟结果。

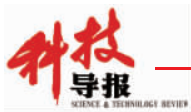
2.5 孔、洞、缝三维缝洞体融合模型

在建立的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,其表达式为

$$P[x, y, z | (i)] = F\{I_1, I_2, I_3, I_4(x, y, z) | \text{缝洞模式}\}$$

式中, $P[x, y, z | (i)]$ 为位置 (x, y, z) 处 i 目标的发育概率, $I_1(x, y, z)$ 为大型溶洞存在指数, $I_2(x, y, z)$ 为大尺度裂缝存在的指数, $I_3(x, y, z)$ 为溶蚀孔洞存在的指数, $I_4(x, y, z)$ 为小尺度裂缝存在的指数。



3 应用实例

塔河油田4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,储集体大小悬殊、呈离散分布,其中大型溶洞是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,岩芯统计储层孔隙度平均为0.92%,其中小于1%的样品占67.6%。平均渗透率为 $2.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,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。

3.1 三维构造模型的建立

研究表明,缝洞储集体发育受岩溶地貌和岩溶地带的控制,在纵向上,缝洞体在不同岩溶带中表现出明显的分带性,在平面上,缝洞体在不同地貌单元上体现出明显的分区性。

塔河油田4区主要发育3种古地貌类型,即岩溶高地、岩溶斜坡及岩溶洼地,其中岩溶高地古岩溶缝洞系统发育程度高、规模相对较大;纵向上根据岩溶发育程度和地下水运动方式,塔河油田4区岩溶缝洞系统划分为表层岩溶带、纵向渗滤带、径流溶蚀带和潜流溶蚀带4个岩溶带。

三维构造建模采用确定性建模方法,依据油藏描述成果,纵向上按个岩溶带建立三维构造模型(图2)。

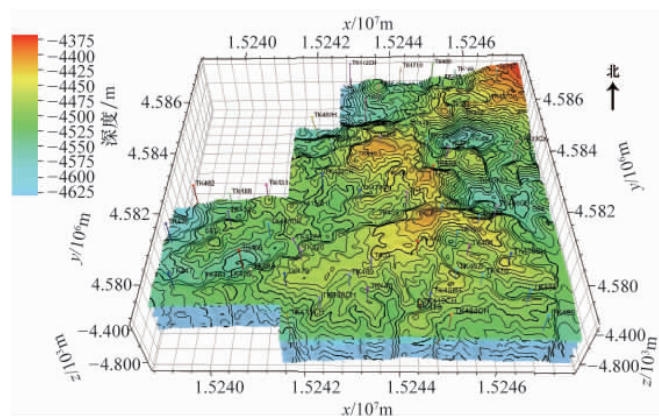


图2 塔河油田4区三维构造模型
Fig. 2 3D structural model of Tahe District IV

3.2 大型溶洞模型的建立

大型溶洞主要利用高精度三维地震资料,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,利用波阻抗及地震属性截断值,识别大型溶洞。

采用确定性建模方法,纵向上按4个岩溶带,建立大型溶洞三维分布模型(图3),刻画大型溶洞在三维空间的分布。

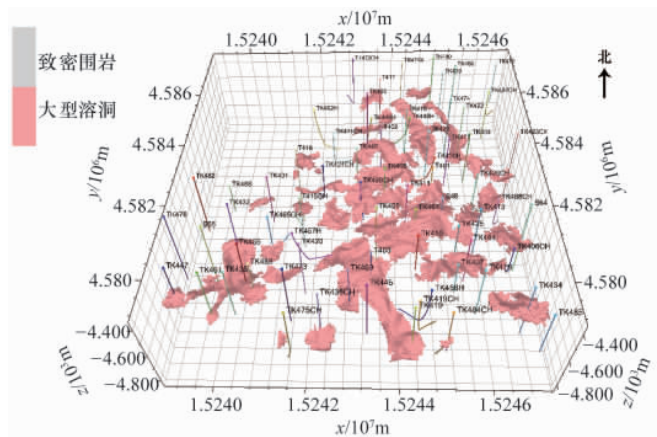


图3 塔河油田4区离散大型溶洞三维分布模型
Fig. 3 3D discrete large scale cave model of Tahe District IV

3.3 溶蚀孔洞模型的建立

3.3.1 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。

3.3.2 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纵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。

3.3.3 溶蚀孔洞模型的建立

以单井溶蚀孔洞分布为条件数据,以溶洞发育概率体为井间约束数据,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4)。

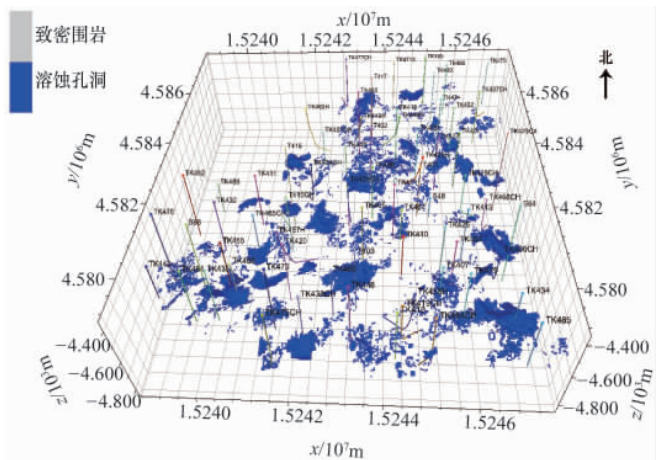


图4 塔河油田4区溶蚀孔洞三维分布模型
Fig. 4 3D dissolved pores model of Tahe District IV

3.4 大尺度离散裂缝模型的建立

根据三维地震构造解释结果,塔河4区断裂主要分为北东方向(NE)、北西方向(NW)、南北向(SN)和东西向(EW)4

个组系。依据上述信息,利用地震相干体、地震“蚂蚁体”及地震边缘检测等属性通过人机交互方式拾取断裂及大尺度裂缝,采用确定性建模方法,分别按不同方位、组系,建立大尺度离散裂缝(断层)分布模型(图5)。

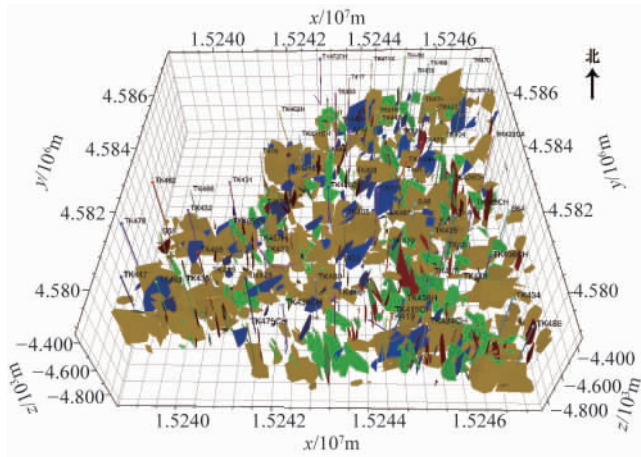


图5 塔河油田4区大尺度离散裂缝三维分布模型
Fig. 5 3D discrete large scale fracture model of Tahe District IV

3.5 小尺度离散裂缝模型的建立

通过成像测井、岩心及常规测井资料识别小尺度裂缝,并计算单井裂缝密度。以单井裂缝密度作为条件数据,在裂缝产状统计数据及裂缝密度分布模型的约束下,采用基于目标的示性点过程模拟算法,建立不同不同方向及组系的小尺度裂缝离散分布模型(图6)。

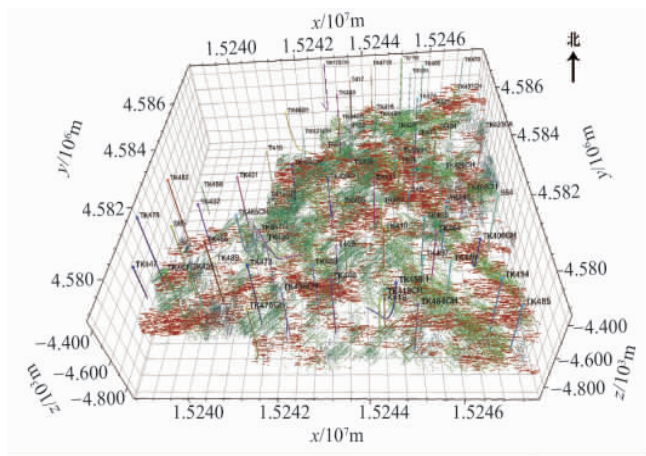


图6 塔河油田4区小尺度离散裂缝三维分布模型
Fig. 6 3D small scale discrete fracture model of Tahe District IV

3.6 孔、洞、缝三维缝洞体融合模型

忠实于井点条件数据,遵循缝洞发育模式和缝洞组合规律,采用同位条件赋值算法,将4个单一类型储集体模型合成缝洞缝洞储集体三维地质模型(图7)。

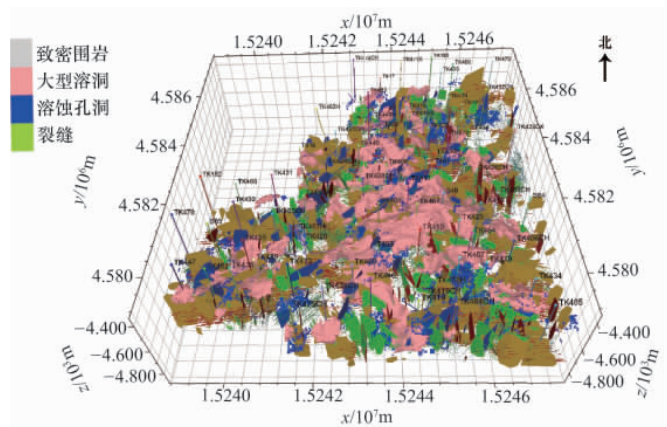


图7 塔河油田4区缝洞储集体三维分布模型
Fig. 7 3D fractured-cavity reservoir model of Tahe District IV

3.7 地质模型应用

3.7.1 动用地质储量计算

利用上述三维地质模型分大型溶洞、溶蚀孔洞及裂缝等储集体类型,采用网格积分法计算了开发动用地质储量,塔河油田4区开发动用地质储量为 5.660×10^7 t,其中大型溶洞地质储量为 2.463×10^7 t,占总储量44%;溶蚀孔洞地质储量为 3.117×10^7 t,占总储量的55%;裂缝为 80×10^4 t,占储量的1%。因此,基于三维地质模型的缝洞型油藏动用储量计算方法,细化了储量的构成,明确了储量有利富集区。

3.7.2 剩余油挖潜

三维地质模型用于油藏数值模拟,明确了剩余油分布的有利部位,为调整加密井、老井侧钻等挖潜措施的实施奠定了可靠的地质基础。依据三维地质模型,经过井位部署,分批实施了15口调整加密井、侧钻井,累产油 9.59×10^4 t。

4 结论

(1) 以塔河油田4区碳酸盐岩缝洞型油藏为原型,形成了岩溶相控多尺度缝洞储集体二步法建模新技术,首次建立了离散大型溶洞模型、大尺度离散裂缝模型、溶蚀孔洞模型、小尺度离散裂缝网络模型及孔、洞、缝融合的三维缝洞储集体模型,从不同尺度上刻画了缝洞储集体在三维空间的分布。

(2) 针对缝洞储集体大型溶洞及大尺度裂缝,提出了主要依据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) 针对小尺度的溶蚀孔洞和裂缝,在岩溶相控约束下,基于溶洞发育概率体和裂缝发育概率体,采用多属性协同随机模拟方法,建立溶蚀孔洞模型和小尺度离散裂缝模型,表征了岩心及测井尺度的缝洞体分布。

(4) 按地质概念模式及缝洞发育规律,采用同位条件赋值算法,将4个单一储集体模型融合成离散缝洞储集体三维



地质模型,定量刻画了缝洞储集体在三维空间的展布特征。

(5) 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 (References)

[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. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.

[2] 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. Offshore Oil, 2008, 28(4): 6-13.

[3] 康玉柱. 中国中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. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 1-12.

[4] 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. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.

[5] 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. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(4): 23-25.

[6] 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. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-106.

[7] 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. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 522-525.

[8] 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. Geoscience, 2003, 17 (1): 92-98.

[9] 王萍, 袁向春, 李江龙, 等. 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, Li Jianglong, et al. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 381-387.

[10] 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. Special Oil. & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 50-54.

[11] 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. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 13-18.

[12] 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 Qihua, Wu Shenghe. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2002, 26(2): 19-22.

[13] 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. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(3): 318-320.

[14] 吴胜和, 金振奎, 黄沧钿, 等. 储层建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 99-104.
Wu Shenghe, Jin Zhenkui, Huang Cangdian, et al. Reservoir Modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 99-104.

[15] 赵彬, 侯加根, 刘钰铭, 等. 基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法[J]. 科技导报, 2011, 29(3): 39-43.
Zhao Bin, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. Science & Technology Review, 2011, 29(3): 39-43.

(责任编辑 赵业玲)

· 学术动态 ·



中国科协 2012 年度事业发展统计公报: 科技开放与交流

2012 年, 各级科协及两级学会加入国际民间科技组织 609 个。其中, 两级学会加入的组织 592 个, 占 97%; 在国际民间科技组织中任职专家 781 人。其中, 两级学会任职专家 766 人, 占 98%。

参加国际科学计划 215 项。其中, 两级学会参加的国际科学计划 194 项, 占 90%。

促成科技合作项目 453 项。其中, 引进优质科技资源 204 项, 占合作项目的 45%。

参加国外科技活动 1.21 万人次; 接待国外专家学者 1.93 万人次; 参加港澳台地区科技活动 1.2 万人次; 接待港澳台地区专家学者 0.83 万人次。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/14908615.html>。