

文章编号: 0253-2697(2014)02-340-07 DOI:10.7623/syxb201402015

# 多尺度岩溶相控碳酸盐岩缝洞型油藏储集体建模方法

胡向阳<sup>1</sup> 袁向春<sup>1</sup> 侯加根<sup>2</sup> 权莲顺<sup>1</sup>

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

**摘要:**以塔河油田为代表的碳酸盐岩缝洞型油藏是中国近年来投入开发的大型油藏,其储集空间类型主要为大型溶洞、溶蚀孔洞及裂缝,且尺度大小悬殊,形态不规则,分布不连续。定量表征孔、洞、缝在三维空间的分布一直是该类油藏开发的技术难题,目前尚缺乏有效的储层建模方法。以塔河油田 4 区碳酸盐岩缝洞型油藏为原型,研究并提出了多尺度岩溶相控缝洞储集体建模方法,即在古岩溶发育模式控制下,根据缝洞尺度的差异,采用两步法建模:第 1 步建立 4 个单一类型储集体离散分布模型,即利用地震识别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,建立溶蚀孔洞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 个单一类型储集体模型融合成多尺度离散缝洞储集体三维分布模型。该模型的建立定量表征了缝洞储集体在三维空间的展布特征,可以为油田开发奠定坚实的地质基础。

**关键词:**碳酸盐岩缝洞型油藏;储集体建模方法;大型溶洞;溶蚀孔洞;离散裂缝

中图分类号:TE344

文献标识码:A

## Modeling method of carbonate fractured-cavity reservoirs using multiscale karst facies-controlling

Hu Xiangyang<sup>1</sup> Yuan Xiangchun<sup>1</sup> Hou Jiagen<sup>2</sup> Quan Lianshun<sup>1</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Exploration and Production, Beijing 100083, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Fractured-cavity carbonate reservoir represented by the Tahe oilfield in recent years in China is in the development of the large reservoir. The reservoir space types are mainly large caves, dissolved holes and multiscale fractures. Scale size disparity, irregular shape, and distribution are not continuous. Quantitative characterization of reservoir in 3D spatial distribution has been a technical problem, there is still lack of effective reservoir modeling method. In this paper, taking Tahe fractured-cavity carbonate reservoirs as the prototype, multiscale karst facies-controlling fractured-cavity carbonate reservoirs modeling method was studied and proposed. This method under control of the ancient karst development mode, according to the differences of measure, using two step modeling method: The first step is in the establishment of four discrete distribution models of a single type of reservoir, namely the use of seismic identification and description of the results, the establish certainty a large cave discrete distribution model and large-scale fracture discrete distribution model, in karst facies constraints, based on the probability of caves and fractures development body between the body and the wells, multi-attribute co-simulation, and the establishment of the dissolved holes stochastic model, and the small scale fractures discrete model; The second step is using parity conditions assignment algorithm, four single type of model integrae into multi-scale discrete fractured-cavity reservoir 3D distribution model. Quantitatively characterize the distribution characteristics of fractured-cavity reservoir in 3D space has laid a solid geological foundation for oilfield development.

**Key words:** carbonate fractured-cavity reservoirs; reservoir modeling method; large caves; dissolved holes; discrete fractures

塔河油田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,与孔隙型和裂缝型碳酸盐岩油藏不同,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,并遭受强烈的风化、剥蚀和淋滤作用<sup>[1-7]</sup>,其储集空间由大型溶洞、多尺度裂缝和小的溶蚀孔洞组成,储集体尺度差异大、空间分布不连续、非均质性强<sup>[8-13]</sup>。建立定量表征裂缝、溶洞三维空间展布的三维地质模型,是该类油藏高效开

发的基础。缝洞型油藏地质建模属于世界级难题,针对该类油藏在国内外尚没有成熟的地质建模理论和方法<sup>[14-20]</sup>,笔者以塔河油田 4 区(简称塔河 4 区)碳酸盐岩缝洞型油藏为原型,研究并提出了岩溶相控多尺度缝洞储集体建模方法,建立了塔河 4 区碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质模型,定量表征了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。

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

**第一作者及通信作者:**胡向阳,男,1964 年 11 月生,1987 年获兰州大学学士学位,2001 年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中石化石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事油气藏描述工作。Email: huxy. syky@sinopec.com

# 1 缝洞储集体建模思路和流程

碳酸盐岩缝洞型油藏储集空间类型以大型溶洞、多尺度裂缝及小尺度溶蚀孔洞为主,储集体类型多、形态不规则、尺度差异大、在空间上呈离散分布,传统的碎屑岩连续性介质的地质建模方法不能简单套用,目前没有成熟的地质建模方法和技术<sup>[13-19]</sup>。油田开发实践表明,在不同的古地貌单元及纵向上不同的岩溶带,缝洞储集体发育类型、发育程度及分布规律有显著差异<sup>[4-10]</sup>。因此,针对该类油藏的地质特征,提出了“平面分区、垂向分带”的岩溶相控缝洞储集体建模方法,建立缝洞储集体三维地质模型。

在具体建模过程中,以塔河 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,以缝洞型储集体纵向岩溶分带模型为基础,平面上按不同古地貌单元,根据缝洞尺度的差异和约束条件的不同,采用岩溶相控两步法建立离散缝洞储集体三维地质模型。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;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,建立小尺度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 个单一类型缝洞储集体模型融合成多尺度离散缝洞储集体三维分布模型(图 1)。

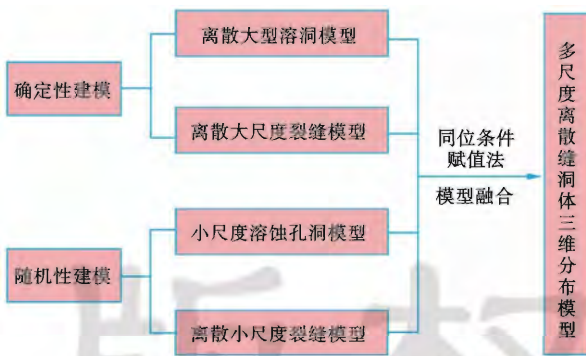


图 1 缝洞储集体建模流程

Fig. 1 Fractured-cavity reservoir modeling method process

## 2 多尺度岩溶相控缝洞储集体建模方法

### 2.1 离散大型溶洞建模方法

离散大型溶洞建模主要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。

利用三维地震资料,通过井-震结合储层波阻抗反演及地震多属性融合技术,对大型溶洞储集体进行识

别和预测。应用岩心、测井及测试等静、动态资料标定波阻抗体及地震属性融合体确定大型溶洞截断值,采用确定性建模方法,建立大型溶洞三维分布模型。

### 2.2 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。

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;在岩溶相控下,利用地震识别的溶洞发育概率体作为井间条件概率约束数据;综合单井及井间数据,采用地质统计学序贯指示多属性协同模拟方法,建立小尺度溶蚀孔洞的三维分布模型。

### 2.3 离散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,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。

通过三维地震构造解释、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,分别按不同方位分组建立大尺度离散裂缝模型。

### 2.4 离散小尺度裂缝建模方法

小尺度裂缝建模是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,采用示性点过程随机模拟方法<sup>[19]</sup>,建立小尺度离散裂缝三维网络模型。

通过成像测井、岩心及常规测井等资料在单井上识别小尺度裂缝,建立单井裂缝模型。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等信息,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。

### 2.5 孔、洞、缝三维缝洞储集体融合模型

在已建立的 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。采用模型融合方法,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储集体三维地质模型(图 2)。

$$P[x, y, z | (i)] = F\{I_c(x, y, z), I_{fr}(x, y, z), I_h(x, y, z), I_l(x, y, z) | \text{(缝洞模式)}\} \quad (1)$$

式中:  $P[x, y, z | (i)]$  为位置  $(x, y, z)$  处  $i$  目标的发育概率;  $I_c(x, y, z)$  为大型溶洞存在的指数;  $I_{fr}(x, y, z)$  为大尺度裂缝存在的指数;  $I_h(x, y, z)$  为溶蚀孔洞存在的指数;  $I_l(x, y, z)$  为小尺度裂缝存在的指数。

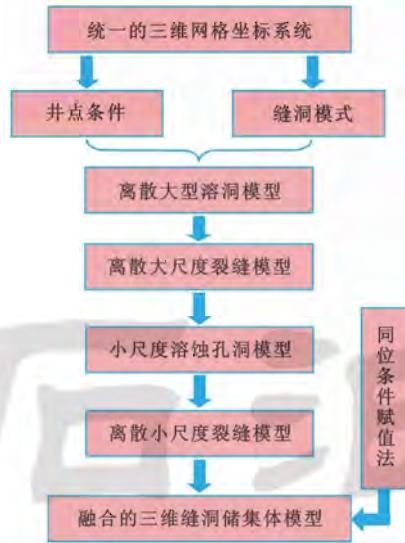


图2 缝洞储集体模型融合方法流程

Fig. 2 Fractured-cavity reservoir model fusion method process

### 3 应用实例

塔河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、分布不均,呈离散分布,其中大型溶洞是最主要的储集空间类型。中一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,99%的矿物成分为方解石。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为0.92%,其中小于1%的样品占67.6%。平均渗透率为2.26 mD,其中小于0.1 mD的占样品总数的63%,储层具有极强的非均质性。

### 3.1 三维构造建模

#### 3.1.1 岩溶古地貌特征

开发实践表明,缝洞储集体发育受岩溶古地貌和岩溶分带控制。垂向上,缝洞储集体在不同岩溶带中表现出明显的分带性;平面上,缝洞储集体在不同地貌单元呈现出明显的分区性。塔河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(图3),其中,岩溶高地古岩溶缝洞系统发育程度高、规模相对较大。垂向上依据岩溶发育程度和地下水运动方式,塔河4区岩溶缝洞系统可划分为表层岩溶带、垂向渗透带、径流溶蚀带和潜流溶蚀带(图4)。

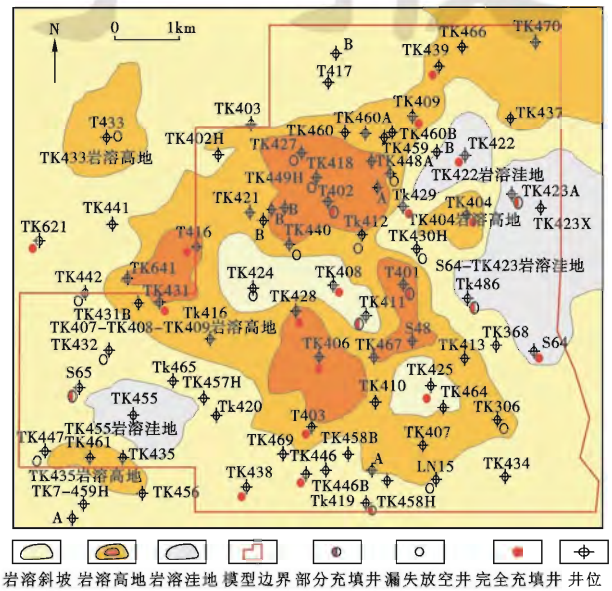


图3 塔河4区岩溶古地貌分布

Fig. 3 Karst palaeogeomorphology of Tahe district IV

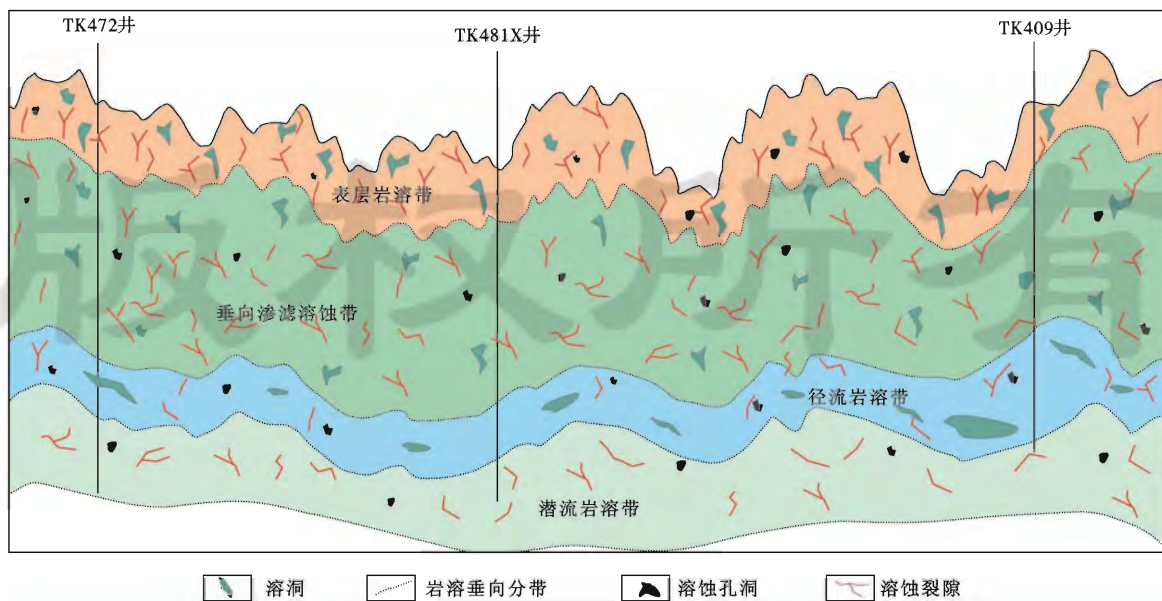


图4 塔河4区古地貌垂向分带

Fig. 4 Palaeogeomorphology vertical zoning of Tahe district IV

### 3.1.2 三维构造模型及网格设计

根据塔河 4 区奥陶系岩溶发育的特点,采用“平面分区、垂向分带”的岩溶相控方法,纵向自上而下将奥陶系划分为 4 个岩溶带,即表层岩溶带、垂向渗滤带、径流岩溶带及潜流岩溶带,以此建立地层格架模型。采用确定性建模方法,建立构造模型(图 5)。

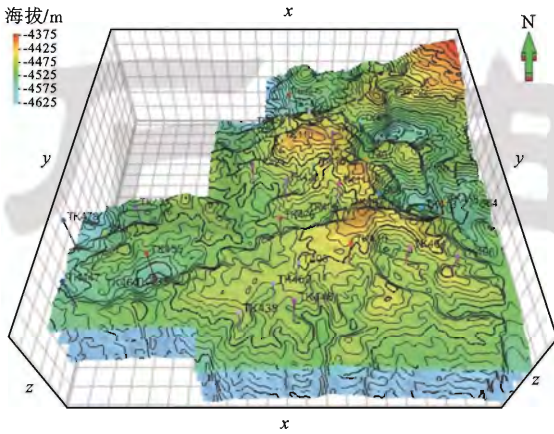


图 5 塔河 4 区奥陶系油藏三维构造模型

Fig. 5 3D structural model of Ordovician reservoirs of Tahe district IV

依据塔河 4 区的井网和井距,在充分考虑缝洞储集体非均质性、保证建模精度的前提下,建立的模型网格尺寸为:平面上为 25 m × 25 m;垂向上为 2 m;模型网格共有  $x \times y \times z = 330 \times 280 \times 120 = 11\,088\,000$  个。

### 3.2 大型溶洞建模

大型溶洞主要通过井-震结合的方法识别。依据塔河 4 区 56 口井的基础资料,通过钻井、岩心、成像测井、产液剖面、录井(钻具放空、泥浆漏失等)及动态信息在单井上共识别出 81 个大型溶洞发育段;井间则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,获得三维波阻抗体及地震属性融合体,利用波阻抗及地震属性截断值,识别大型溶洞。

在单井及井间大型溶洞识别的基础上,在纵向上按 4 个岩溶带,采用确定性建模方法,建立大型溶洞三维分布模型(图 6),表征大型溶洞在三维空间的分布。

通过分析塔河 4 区三维离散大型溶洞模型,可以发现在不同岩溶带大型溶洞发育规律及发育程度有显著差异。表层岩溶带大型溶洞发育程度高,显示出表层岩溶带内岩溶作用强烈、岩溶化程度较高;垂向渗滤溶蚀带内岩溶发育中至弱,溶洞体主要沿垂向断裂及裂缝发育;径流溶蚀带溶洞发育程度相对较高,形成了一系列近水平溶洞,主要为地下河沉积物,表明地下水径流对径流溶蚀带溶洞发育的控制作用明显;潜流溶蚀带为弱岩溶发育区,基本不发育大型溶洞。

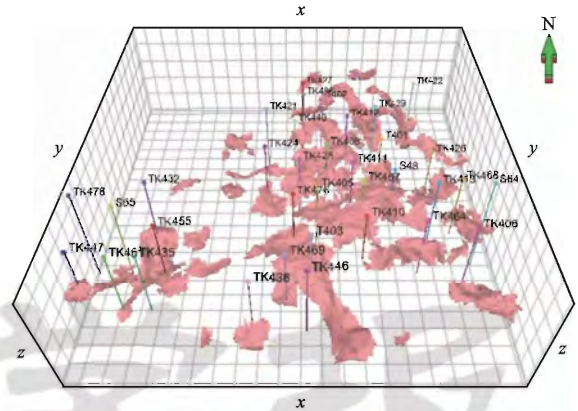


图 6 塔河 4 区离散大型溶洞三维分布模型

Fig. 6 3D discrete large cave model of Tahe district IV

### 3.3 溶蚀孔洞建模

溶蚀孔洞储集体在三维空间中的分布十分复杂,井孔中的溶蚀孔洞发育段可以通过取心井岩心观察、成像测井图像直接观测,也可以通过常规测井资料解释和生产动态资料获得,但井间溶蚀孔洞的发育规模、空间分布的确切位置则无法直接获取,因此在溶蚀孔洞储集体建模中,采用地质统计学随机模拟方法模拟三维空间中溶蚀孔洞储集体的分布。

基于单井溶洞发育段及储层波阻抗反演溶蚀识别成果,通过统计不同古地貌单元及垂向不同岩溶带溶洞发育概率,可以建立溶洞发育概率体模型。

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,采用地质统计学协同序贯指示模拟方法,建立了溶蚀孔洞三维空间分布模型(图 7)。

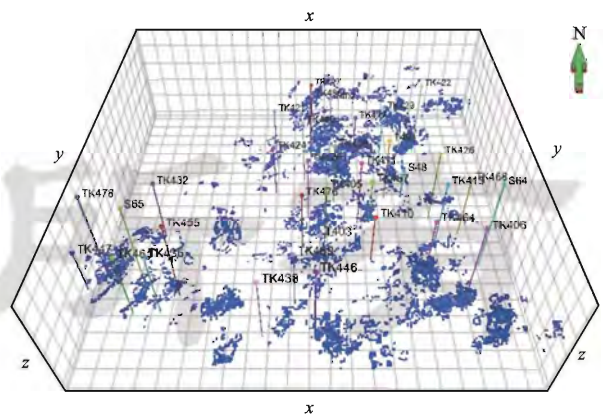


图 7 塔河 4 区溶蚀孔洞三维分布模型

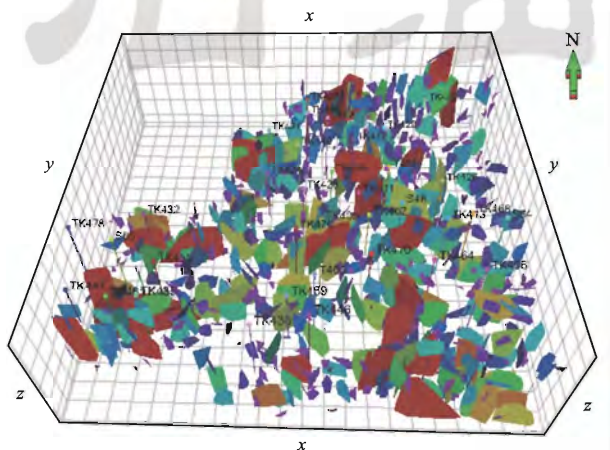
Fig. 7 3D dissolved hole model of Tahe district IV

### 3.4 大尺度离散裂缝建模

根据三维地震构造解释结果,塔河 4 区断裂主要分为 NE 向、NW 向、SN 向和 EW 向 4 个组系。同时利用地震相干体及地震“蚂蚁体”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,建立大尺度离散裂缝(断层)模型(图8)。

依据建立的塔河4区大尺度离散裂缝模型,NE向发育大尺度裂缝171条,NW向41条,SN向186条,EW向450条,裂缝发育特征与人工地震解释断层具有很好的一致性。从大尺度裂缝分布特征看,塔河4区大尺度裂缝密度较大,延伸短,EW向断裂发育密度最大,NE向断裂主要发育在4区西北部,NW向断裂东部发育密集,SN向断裂主要发育在东南部,4区中部断裂发育密度相对较小。



注:模型中不同颜色代表不同组系及方向的裂缝。

图8 塔河4区大尺度离散裂缝三维分布模型

Fig. 8 3D model of large scale discrete fracture in Tahe district IV

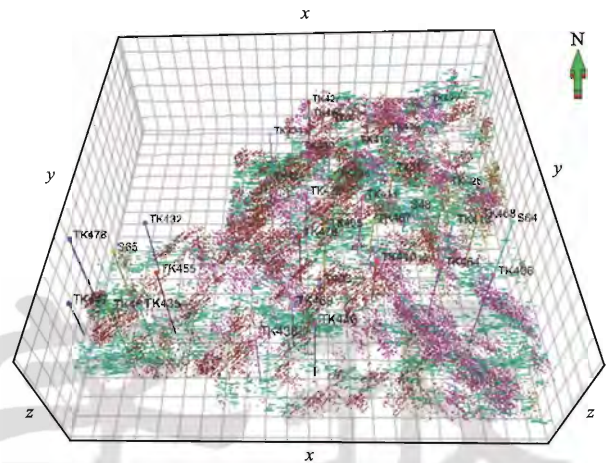
### 3.5 小尺度离散裂缝建模

依据成像测井、岩心及常规测井资料识别小尺度裂缝,统计裂缝组系、裂缝方位角、裂缝倾角、裂缝延伸长度等参数,并计算单井裂缝密度。基于大尺度裂缝离散分布模型,建立井间裂缝发育密度概率体。以单井裂缝密度作为条件数据,裂缝密度概率体作为井间约束数据,采用基于目标的示性点过程随机模拟方法,建立不同方向及组系的小尺度裂缝离散分布模型(图9)。

依据建立的小尺度离散裂缝分布模型,NE向发育小尺度裂缝7867条,NW向小尺度裂缝7242条,EW向小尺度裂缝9130条,SN向小尺度裂缝6578条。分析大尺度裂缝和小尺度裂缝分布特征,发现大尺度裂缝(断层)对小尺度裂缝发育程度控制作用明显,断层及大尺度裂缝发育区附近,小尺度裂缝较发育,裂缝数量较多,远离断裂带裂缝密度则迅速降低。

### 3.6 孔、洞、缝三维缝洞体融合模型

在已建立的4个单一缝洞储集体模型基础上,遵循缝洞发育模式和缝洞组合规律,忠实于井点条件数据,采用同位条件赋值算法,将4个单一类型储集体模型融合成缝洞储集体三维地质模型(图10)。



注:模型中不同颜色代表不同组系及方向的裂缝。

图9 塔河4区小尺度离散裂缝分布模型

Fig. 9 Small scale discrete fracture model of Tahe district IV

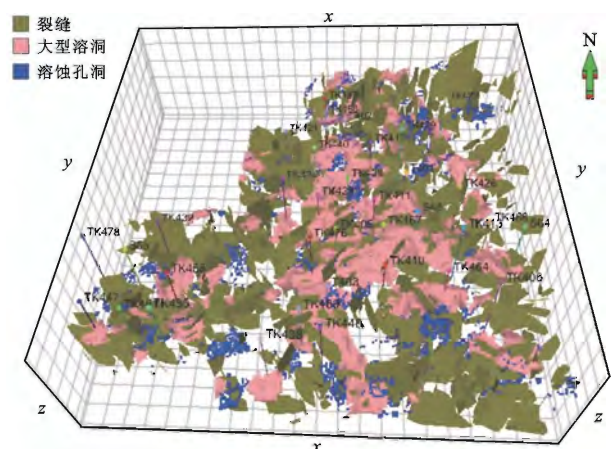


图10 塔河4区缝洞储集体三维分布模型

Fig. 10 3D model of fractured-cavity reservoir in Tahe district IV

依据建立的塔河4区缝洞储集体三维地质模型,大型溶洞主要发育在岩溶高地断裂发育部位,在表层岩溶带尤为发育;地下暗河型水平溶洞主要发育在径流溶蚀岩溶带,大型溶洞呈管状分布。在垂向渗透带主要发育沿纵向断裂溶蚀扩大的储集体,呈离散分布。在构造高部位断裂及缝洞储集体均很发育,沿岩溶斜坡至岩溶洼地缝洞储集体发育规模及程度依次减弱。

### 3.7 地质模型的验证及应用

#### 3.7.1 地质模型验证

依据所建立的塔河4区地质模型,采用网格积分法进行动用地质储量计算,计算得到开动用地质储量为 $5660 \times 10^4 \text{ t}$ ;将塔河4区生产井累积产油量数据标绘到地质储量丰度图上,可以发现开动用储量分布与目前单井累积产油量具有较好的一致性(图11)。储量丰度高的区域及高产井均位于构造高部位缝洞发育区,这与地质规律完全相符,也证实了所建地质模型的可靠性。