

# 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系 层次建模方法

张文彪<sup>1</sup>, 张亚雄<sup>1</sup>, 段太忠<sup>1</sup>, 李 蒙<sup>1</sup>, 赵华伟<sup>1</sup>, 汪 彦<sup>2</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**断控岩溶储集体(断溶体)作为缝洞型碳酸盐岩储层的一种特殊类型,受大型走滑断裂带影响,其空间结构复杂、形态不规则且随机性强,给三维精细描述及地质建模带来新的挑战。基于多元、多尺度研究资料,对塔里木盆地塔河油田断溶体系结构层次进行了划分,并提出了断溶体系“层次约束、成因控制、逐级建模”的建模思路。结果表明:断溶体系按照形成过程及尺度规模划分为走滑断裂破碎带、断溶体、断溶体内部缝洞带、溶洞充填4个层次。以地震精细相干解释得到的主干断裂、次级断裂、包络范围及关键层位为确定性数据,建立走滑断裂破碎带格架模型。基于地震FL(fault likelihood)属性,通过属性自动分割及钻井标定,采用确定性方法建立断溶体轮廓模型。在断溶体轮廓的约束下,对内部缝洞带各要素采用分类建模方法,基于地震Texture属性及蚂蚁体属性截断,人机交互,采用确定性方法分别建立大型溶洞模型及中尺度裂缝离散分布模型;基于井点条件数据控制及地质-地震综合概率体约束,采用序贯指示模拟和示性点过程模拟方法,分别得到溶蚀孔洞分布模型及小尺度裂缝离散分布模型;基于波阻抗与大型洞穴约束,采用序贯指示模拟方法建立洞穴内部岩性充填模型。以塔里木盆地塔河油田托甫台区典型断溶体单元为例,建立的断溶体系三维模型体现了空间层次结构特征。

**关键词:**地质建模;断控岩溶;缝洞型储层;碳酸盐岩;塔河油田;塔里木盆地

**中图分类号:**TE19

**文献标识码:**A

## Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China

Zhang Wenbiao<sup>1</sup>, Zhang Yaxiong<sup>1</sup>, Duan Taizhong<sup>1</sup>, Li Meng<sup>1</sup>, Zhao Huawei<sup>1</sup>, Wang Yan<sup>2</sup>

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

2. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** Reservoirs of fault-karst type, special to the carbonate reservoir of the fractured-vuggy type, feature complicated storage structure, irregular geometry and stochastic spatial distribution under the impact of large strike-slip fault zones, which is bound to bring new challenges to their 3D quantitative characterization and geological modeling. Based on diversified research data of multiple scales, the hierarchical scheme of fault karst is established in Tahe oilfield, Tarim Basin, focusing on the principles of hierarchical constraint, genetic control and hierarchical modeling. The results show that the fault-karst hierarchy can be divided into four levels according to genesis and scale, namely the strike-slip faulted fracture zone, the fault karst, the fractured-vuggy zone inside the fault karst, and the karst cavern filling. In detail, the strike-slip faulted fracture zone framework model is established with deterministic data of the main and secondary faults, envelope range and key geological horizons obtained from fine interpretation of seismic coherence. Based on the seismic fault likelihood (FL) attribute, the external envelope model of the fault karst is established with deterministic method through automatic attribute segmentation and drilling calibration. With the constraint of the external envelope, the internal architecture elements are classified and modeled. Besides, a large-scale karst cavern model and a mesoscale discrete fracture distribution model are established with deterministic method based on seismic

收稿日期:2020-06-12;修订日期:2021-12-06。

第一作者简介:张文彪(1984—),男,高级工程师,油气田开发地质及三维地质建模。E-mail:zwb\_syky@sinopec.com。

基金项目:中国科学院战略先导A项目(XDA14010204);中国石化科技部项目(P18042)。

attributes such as texture and ant tracking truncation. As controlled by well data and constrained by seismic-geological probability, the sequential indication simulation and object-based marked point process simulation methods are applied to obtain the dissolved pore distribution model and the small-scale fracture discrete distribution model respectively. A filling model of the karst cavern is built by sequential indication simulation as constrained by wave impedance and large-scale cavern. Finally, a typical fault-karst reservoir in Tuoputai area, Tahe oilfield, is studied as an example to test the modeling method mentioned above, and the 3D integrated model thereby built can reflect the spatial hierarchy of the fault-karst carbonate reservoir.

**Key words:** geological modeling, fault karst, fractured-vuggy reservoir, carbonate rock, Tahe oilfield, Tarim Basin

引用格式: 张文彪, 张亚雄, 段太忠, 等. 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系统层次建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 207-218. DOI: 10. 11743/ogg20220117.

Zhang Wenbiao, Zhang Yaxiong, Duan Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 207-218. DOI: 10. 11743/ogg20220117.

三维地质建模是油气藏表征的关键环节, 准确的地质模型是油气藏精细管理的基础。当前地质建模技术对于常规碎屑岩储层以及孔隙型碳酸盐岩储层应用相对成熟, 支撑效果较好, 而对于缝洞型碳酸盐岩储层, 受后期强改造作用影响, 多重多尺度离散介质交错分布, 非均质性极强, 对于该类型的建模技术目前尚处于发展阶段。得益于中国塔河独特的油藏地质条件, 缝洞型碳酸盐岩储层建模在中国起步较早, 众多学者经过近十几年的攻关取得了许多宝贵的研究成果, 如地质-地震约束下分类、分尺度建模<sup>[1-3]</sup>, 多元约束随机建模<sup>[4-6]</sup>, 岩溶模式约束下确定性与随机结合建模<sup>[7-12]</sup>, 以及基于地震相或大尺度溶洞作为训练图形的多点地质统计学建模<sup>[13]</sup>。以上成果均从不同角度解决了多类、多尺度储集体分布和融合的问题, 尤其是引入了岩溶地貌和岩溶带约束, 给塔河主体区(剥蚀区)表生岩溶型缝洞储集体建模赋予了地质约束的含义, 均取得较好的效果。

断溶体属于缝洞型碳酸盐岩储层的一种特殊类型, 塔河油田近几年的勘探开发实践证明其存在且意义重大, 塔河覆盖区约75%的高产井沿大断裂分布, 均属于断溶体油藏<sup>[14-16]</sup>。与塔河主体区缝洞型油藏类似, 断溶体油藏同样受多期构造运动和多期岩溶作用影响, 且存在多种储集体类型, 而不同的是, 断溶体形成的主控因素为大型走滑断裂及次级断裂, 一定程度上不遵循岩溶“平面分区、纵向分带”的规律, 按照“成因建模”的原则<sup>[17]</sup>, 断溶体的成因控制条件与表生岩溶存在较大差异, 这也给断溶体油藏地质建模带来新的挑战。鉴于此, 本文以塔河油田托甫台区奥陶系油藏为例, 探讨针对断溶体型碳酸盐岩储层的三维地质建模思路与方法, 对于该类油藏的定量表征、储量分类及剩余油挖潜具有重要意义。

## 1 研究区概况

托甫台地区位于塔里木盆地塔河油田西南部, 受多期构造活动控制, 区内发育多组不同规模的NNW-NNE向“X”型断裂系, 以S99-TP12CX共轭走滑断裂带规模最大, 其中TP12CX断裂带沿NNE向纵穿整个托甫台区, 延伸距离超过50 km, 该断裂带内发育典型的断溶体油藏, 且根据断裂带的分段性及开发动态特征划分了多个断溶体开发单元。本次选取TP12CX断裂带北一段TP101-TH10421井区为建模实例研究区(图1), 区内共有各类钻井约40口, 产层主要为中-下奥陶统一间房组和鹰山组上段。TP12CX断裂向下断开前寒武系顶( $T_0^0$ ), 向上均断开中-下奥陶统顶部不整合面( $T_1^0$ )。为更好地体现断溶体纵深特征, 本次建模纵向范围选取从一间房组到上寒武统, 跨度超过1 000 m, 平面边界以走滑断裂包络带范围圈定。

## 2 断溶体系结构层次划分

关于缝洞型储层建模原则的适用性分析前人已做了相关论证<sup>[2]</sup>, 即等时性原则不适用这种强改造型的缝洞型储层, 而成因建模和层次建模原则可作为重要的方法指导。断溶体的形成与古地貌、古构造及岩溶水条件均有成因联系<sup>[18-23]</sup>, 尤其是按照断控岩溶的成因机制, 建立符合断溶体特点的成因模式是关键。

地质成因决定结构层次的划分, 断溶体属于断裂和溶蚀综合作用的结果, 两者相互匹配、互为影响。相关学者们也总结了关于断溶体的发育模式<sup>[24-25]</sup>, 主要考虑了断裂带不同位置所导致的断溶体几何外形差

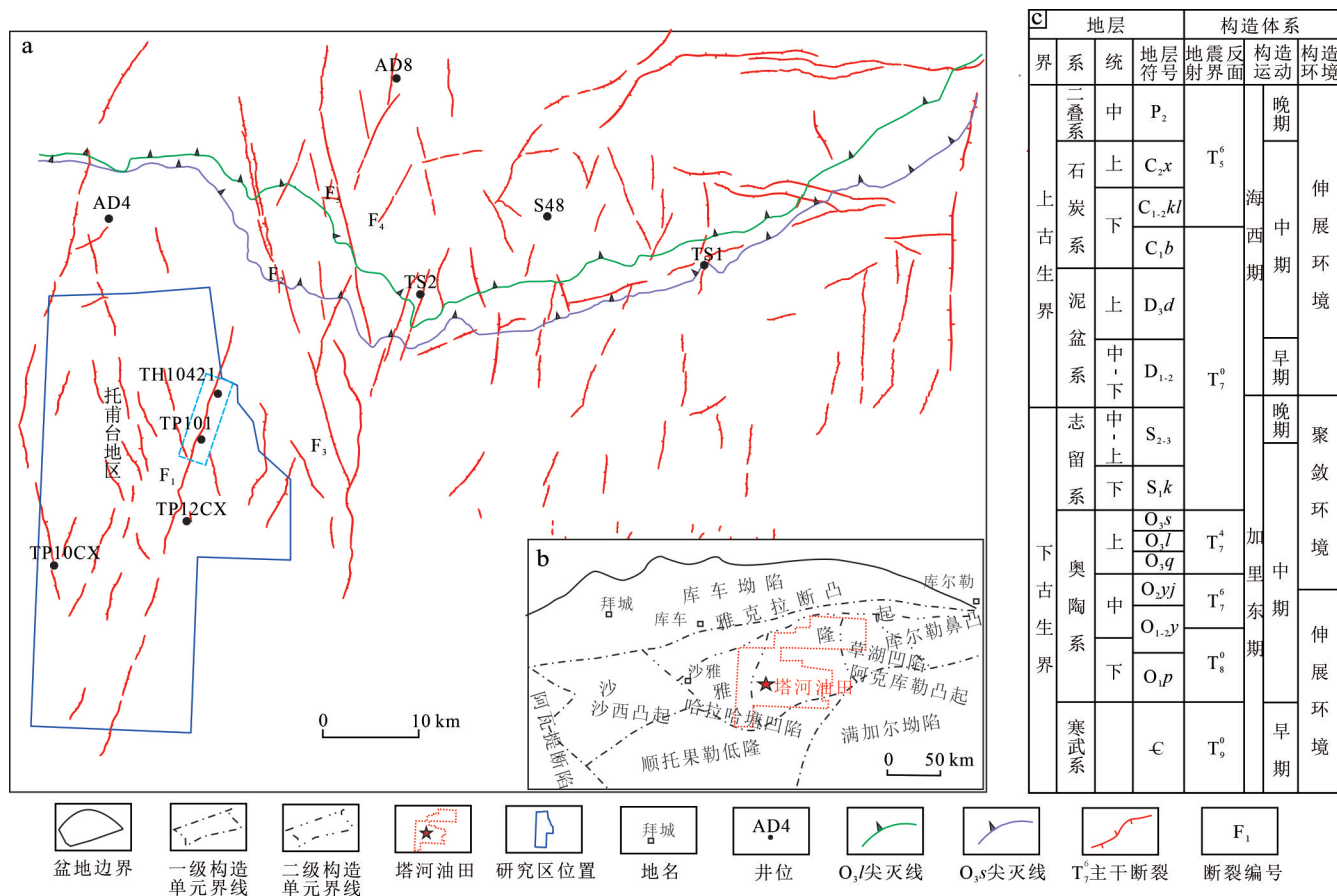


图1 塔河油田构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic location and generalized stratigraphic column of Tahe oilfield

a. 塔河油田构造位置; b. 塔里木盆地构造分布; c. 塔河油田地层综合柱状图

异,对于进一步的层次关系还需要系统阐述。本次研究从构造与溶蚀作用过程出发,将断裂与溶蚀体作为关键因素,通过相互匹配进行了断溶体系的结构层次划分。层次划分是层次约束建模的前提,考虑断溶体系要素的规模和结构的组合关系,划分为以下4个结构层次(图2)。

1) 第一层次为走滑断裂破碎带(图2a),主要从构造学的角度将走滑作用所产生的主干断裂、次级断裂、派生微裂缝以及过程中地应力所影响的主要范围进行统一归类,本质为走滑断裂综合影响范围,储集性能较致密灰岩好。平面具有一定宽度,规模约百米至千米级不等;垂向具有较大延伸高度,甚至断穿基底,规模几千米不等,剖面形状根据应力差异有所区分,通常包括花状(正、负花)或板状;平面走向延展规模也较大,几万米较为常见,且分段特征交替出现。

2) 第二层次为断溶体(图2b),显然受第一层次约束,走滑断裂带内部应力差异必然导致岩石破碎程度差异,将破碎集中程度高、裂缝发育密集,溶蚀作用也较为集中的部位统一定义为断溶体外部几何形态,其

往往受走滑断裂范围控制,规模尺度通常略小于断裂带范围。

3) 第三层次为断溶体内部缝洞带(图2c),顾名思义受第二层次外部几何形态控制,内部缝洞带由溶蚀强度差异形成的不同要素组成,包括大型溶洞、溶蚀孔洞(带)以及裂缝密集带,各要素之间具有一定组合规律,通常大型溶洞周围分布较多的溶蚀孔洞,裂缝密集区也主要围绕孔洞分布。内部结构要素的规模在十米至百米级,三维空间没有固定的形态,尺度差异和形态差异均较大。

4) 第四层次为大型洞穴充填(图2d),是本次结构划分的最小一级。洞穴内部的充填程度和充填岩性主要依靠野外露头、岩心及钻测井认识,在洞穴完全填充情况下通常可以通过露头或测井分析其填充岩性序列及纵向规模,依靠当前的地震手段很难确定其三维空间形态,且其内部接触关系和组合形式往往会存在多种形式,表征难度较大,也是当前地质建模的难点。内部充填要素的规模受大型洞穴规模约束,尺度范围在米至十米级别。



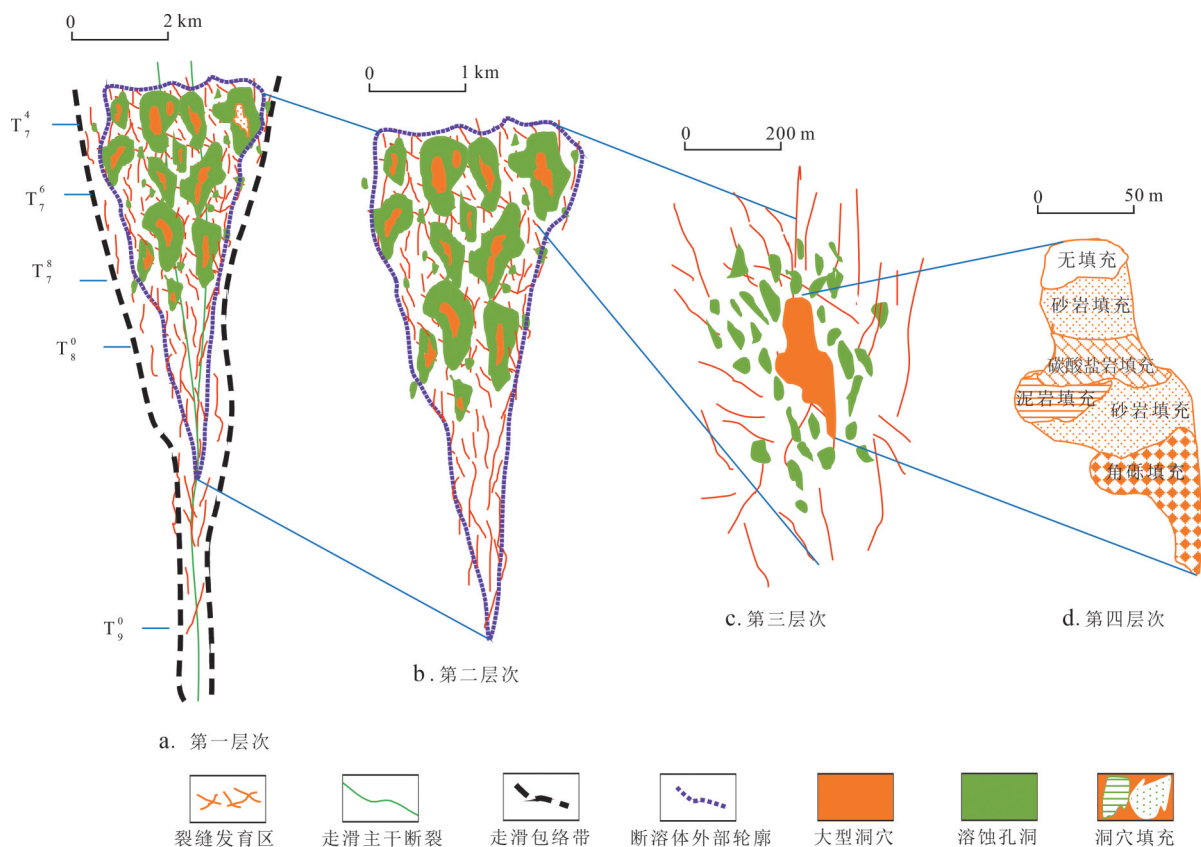


图2 断溶体系结构层次划分

Fig. 2 Schematic diagram showing the hierarchy scheme of the fault karst

a. 走滑断裂破碎带; b. 断溶体; c. 断溶体内部缝洞带; d. 洞穴充填

 $T_7^4$ . 一间房组顶;  $T_7^6$ . 鹰山组下段顶;  $T_7^8$ . 蓬莱坝组顶;  $T_8^0$ . 寒武系顶;  $T_9^0$ . 寒武系底

### 3 断溶体系层次建模方法

作为缝洞型碳酸盐岩储层的一种特殊类型,适用于表层岩溶型缝洞的一些技术思路,如多类多尺度、多元约束等,仍具有一定的适用性,较大不同在于岩溶模式的差异使得“层次建模”的思路有所调整。

#### 3.1 断溶体系层次建模思路的提出

层次建模的核心为高层级要素对低层级要素建模过程具有约束作用,即层次约束;约束的过程考虑地质成因,即成因控制;采用逐步建模的思路,即逐级建模。因此,本次断溶体系层次建模思路为“层次约束、成因控制、逐级建模”。

断溶体系层次约束建模需要明确层次之间的对应关系。断溶体作为强改造型储层,失去了原始沉积层状等时性的意义,但从断裂溶蚀改造过程来看仍具有一定的层次规律可循,尤其是作为最大控制因素的走滑断裂带,其经历了多期次的构造活动<sup>[26]</sup>,多期活动的叠加形成了现今不同尺度规模的断裂或裂缝,从规

模来看层次关系较为明显。岩溶过程与断裂活动配套发生,也形成了不同尺度、规模的洞穴及溶蚀孔洞,且相互之间也具有一定层次关系。

断溶体系成因控制建模需要将控制因素具体化。地质上成因的载体通常用地质模式来表示,因此,层次划分之后需要明确各个层次的地质模式。走滑断裂带需要从构造学的角度明确主要断裂的展布模式,断溶体外部轮廓及内部结构需要从断控岩溶的角度建立具体模式,大型洞穴充填则需要对洞内的充填规律进行总结,形成充填模式。各个层级之间均有对应的模式进行量化指导,即达到了成因控制建模的目的。

断溶体系逐级建模需要根据各层级特征优选适用的建模算法。先根据走滑断裂模式确立大型走滑断裂地层格架,格架内部进一步建立断溶体外部轮廓模型,再到轮廓内部大型洞穴、溶蚀孔洞及裂缝带的分类融合建模,依次类推,实现各个层级的嵌套建模。

#### 3.2 建模方法与实例分析

综合前述认识,进一步对断溶体系层次建模方法详细展开,具体为按照划分的走滑断裂破碎带、断溶

体、断溶体内部缝洞带及大型洞穴充填4个层次逐级展开建模(图3)。

### 3.2.1 走滑断裂破碎带建模

走滑断裂破碎带建模主要基于地震相干体精细处理,在走滑断裂发育模式的指导下,将主干断裂及走滑带包络线进行人工解释,采用确定性方法建立走滑断裂包络带模型。

#### 1) 基于地震信息的走滑断裂带三维解析

采用构造解析的思想和技术手段,基于高精度三维相干数据,开展走滑主干断裂、次级断裂及关键地质层位三维解释。本次解析重点关注奥陶系断溶体储集体,通过地震测线逐道解释,将主干断裂及分支断裂进行空间组合,剖面通常表现为单支状和花状样式。其中花状结构剖面具有明显的主断面、分支断裂面组合特点,主干断裂面断穿基底,而分支断裂则呈发散状,向底部收敛合并到某一地层,导致越是浅部地层其破碎程度越明显,表现为“上宽下窄”的特征。除断裂解析之外,因走滑断穿地质层位较多,地层层状信息也是重要的因素,因此,也对较为重要的地层界面进行了三维追踪解释( $T_7^1, T_7^6, T_7^8, T_8^0, T_8^1$ 等)。

#### 2) 走滑断裂破碎带三维模型实现

因走滑断裂的尺度规模较大,该层次建模的主要输入数据依托于前述三维地震解释及断裂模式认知。基于Petrel软件平台,设置走滑断裂带外部包络线作为模型边界,以解释的主干断裂、分支断裂以及关键地质层位作为格架数据,按照构造地层建模的方式建立走滑破碎带模型。建模网格划分精度X和Y方向为30 m, Z方向采用变网格精度方式,在油藏深度范围(一间房组+鹰山组上段)精度为2 m,深部层位为5 m。从模型

结果来看(图4),主干断裂连续性较好,沿走向横跨整个研究区,延伸长度约15 km,分支断裂连续性相对弱,与主干断裂近平行或小角度斜交;包络带边界在相干体中也体现为与围岩层状地层之间的显著差异,较容易识别和解释,在解释过程中以花状结构特征为指导,体现出剖面“下窄上宽”的特点(图4a)。根据区内主干断裂纵穿层位特点,对关键地质层位进行了追踪解释(图4b),以走滑包络带作为建模边界,确定了地层模型(图4c)。最后,将断裂模型与地层模型进行综合,即按照三维构造建模的方法得到最终的走滑断裂包络带模型(图4d),作为断溶体建模的基础格架。

### 3.2.2 断溶体建模

按照断溶体系层次建模思路,断溶体为走滑断裂带内的低一级层次,需要在走滑断裂破碎带模型内部开展断溶体建模。

#### 1) 断溶体轮廓地震预测

断溶体范围受断裂的控制作用明显<sup>[26]</sup>,即走滑断裂为“控洞断裂”,因此断溶体的地震预测需要寻找对断裂差异较为敏感的属性。已有研究通过结构张量或其他属性取得了相对较好的效果<sup>[27-29]</sup>,具有一定借鉴意义。本次提出采用对构造信息更为敏感的FL(fault likelihood)属性刻画断溶体外部轮廓,FL属性是一种基于样点处理的断裂成像算法<sup>[30]</sup>,通过一种相似性属性表达了断裂存在的可能性,通常用0~1的值域表示断裂可能性大小,在一定程度上反映了断溶体可能性的大小及范围。外部轮廓预测的另一个核心问题在于地震属性门槛值的确定,通过水平井或直井钻时曲线或其他测、录井特征可作为一个标定的途径,但对于无井标定时,本过程又引入了阈值自动分割技术<sup>[31]</sup>自动

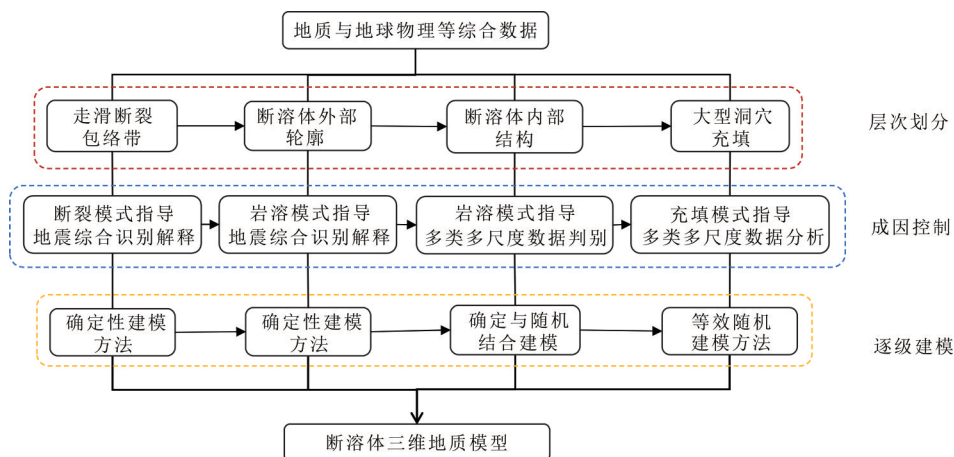


图3 断溶体系层次建模流程

Fig. 3 Flowchart showing the hierarchy modeling of fault-karst reservoirs



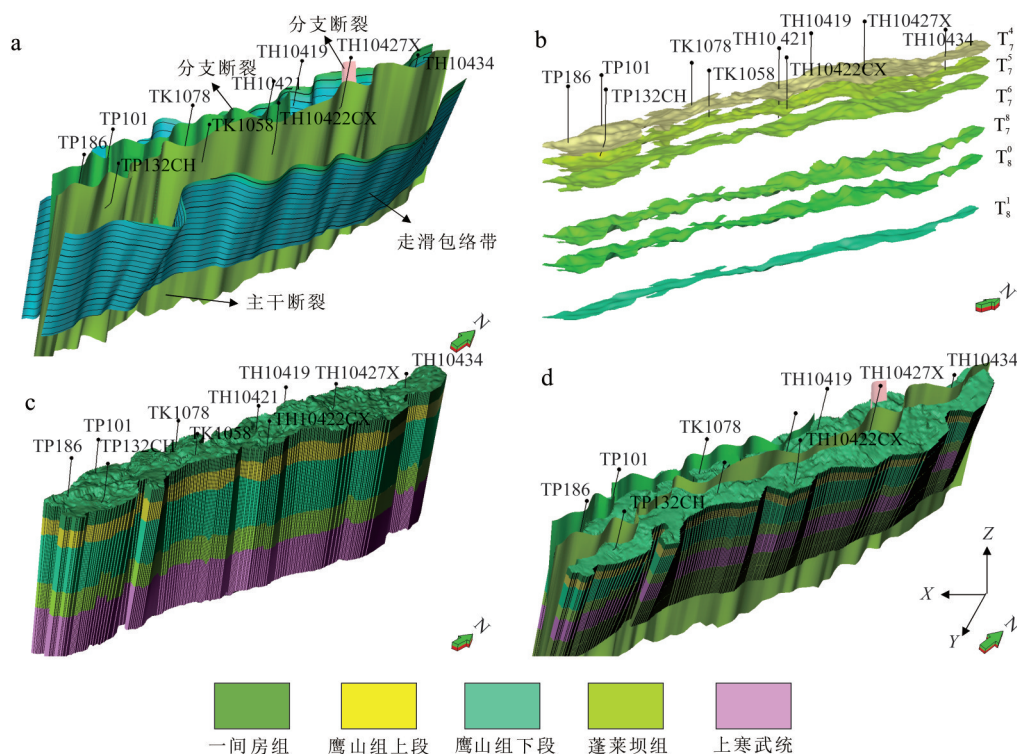


图4 塔河油田托甫台地区TP12CX断裂带典型单元走滑断裂破碎带模型

Fig. 4 Strike-slip fault zone model in a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

a. 主干分支断裂及包络带范围解释; b. 主要研究层位; c. 地层模型; d. 破碎带整体模型

$T_7^1$ : 一间房组顶;  $T_7^5$ : 鹰山组上段顶;  $T_7^6$ : 鹰山组下段顶;  $T_7^7$ : 蓬莱坝组顶;  $T_8^0$ : 寒武系顶;  $T_8^1$ : 上寒武统底

识别外部轮廓范围,技术原理类似于图像识别,阈值分割算法可自动统计某一数据集中不同数据类(即不同地震属性值)之间的分割阈值,且能够保证类间的统计方差最大,从而实现具有统计学意义的分类。基于该方法对研究区初步确定断溶体外部轮廓边界的属性截断值为0.25,即只有FL属性值高于0.25时为断溶体发育区,低于0.25时为围岩地层。

## 2) 断溶体模型实现

断溶体同样属于尺度较大的层次,采用的建模方法为确定性目标建模,主要实现过程为以地震识别的地质目标体为数据输入,按照临近最优采样原则从地震尺度采样到已建立的地质网格模型中,当存在与井点数据或已有地质模式认识相矛盾的情况再人工适度修正,模型整体需要体现出受走滑断裂带约束的特点,并具有沿断裂走向的分段性特征。基于上述地震预测结果,对断溶体外部轮廓进行地质目标体提取,按照确定性目标建模的方式采样到已建立的走滑断裂破碎带模型中,通过走滑破碎带格架控制,剔除走滑破碎带以外地区的异常体干扰,完成研究区断溶体模型建立。断溶体模型体现了空间结构的差异(图5),TP101井附近整体宽度较大,纵向发育深且连续性强,而到TK1058井附近则宽度变窄,纵向发育变浅且连续性变

弱,沿走向依次出现结构差异的变化,也进一步体现出走滑断裂分段性的特征。

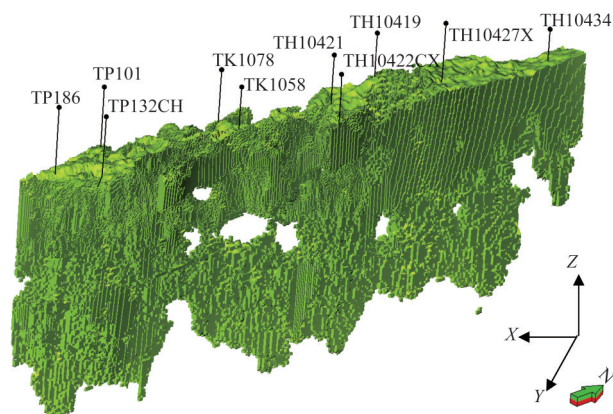


图5 塔河油田托甫台地区TP12CX断裂带典型单元断溶体模型

Fig. 5 Fault-karst model of a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

## 3.2.3 断溶体内部缝洞带建模

断溶体内部缝洞带包括大型溶洞(带)、溶蚀孔洞(带)及裂缝密集带等要素,具有尺度差异大、离散分布的特征,该步建模思路为“断溶体外部形态整体约束、内部缝洞带分类建模”。

### 1) 内部缝洞带要素单井识别

井数据通常被称为地质建模的条件数据或硬数据,主要用来约束模型或检验地质模型的合理性。大型洞穴、溶蚀孔洞及裂缝带在岩心、钻录井、成像测井及常规测井均有一定的响应特征。当遇到钻具放空、严重井漏和钻时突降的情况极有可能为洞穴且未充填,对于充填型洞穴,其内部不同岩性在常规测井上均有特征形态;溶蚀孔洞在岩心及成像测井上能够获得较为准确的信息,标定到常规曲线上具有类似孔隙型碳酸盐岩储层的响应特征,较容易识别;此处裂缝带主要指小尺度裂缝,通过岩心、成像测井对裂缝的产状(组系、规模、方位、倾角等)以及密度等参数进行统计分析,获取相应的先验认识,为后续裂缝建模建立基础。

### 2) 地质约束概率体建立

成因控制的核心在于建模过程中通过地质规律进行有效的约束,合理的约束条件对于提高模型准确度至关重要。按照“控洞断裂”分布的认识,断控缝洞体的发育与断裂的规模密切相关,主干断裂规模越大,延伸越长,岩溶作用的宽度和深度就越大,缝洞体越发育;断控缝洞体的发育还与距离断裂远近较为相关,从主干断裂向外,距离越远,缝洞发育程度越弱,规模也越小,对于分支次级断裂也有类似的规律。基于该地质认识,按照断控缝洞发育的原则,以主控断裂为核心,距离越近则缝洞越发育,得到横向上缝洞发育的地质概率模型(图6a);对于垂向发育概率体,按照沿不整合面地层水下渗溶蚀为主的初步认识,该区断溶体形成经历了多期次构造升降,地表岩溶水沿断裂下渗造成缝洞纵向发育程度的差异,尤其以一间房组顶部不整合面( $T_4^1$ )最为明显,通过统计该区多口井纵向缝洞发育情况,钻遇较厚的缝洞主要靠近中上部离 $T_4^1$ 界面较近的一间房组,越向下其钻遇厚度越薄,规模越小,因此,以该界面为基准面,按照距离关系得到纵向发育地质概率体(图6b)。

### 3) 地震约束概率体建立

缝洞型储层井网控制程度低,地震概率体可以作为软约束来提高井间预测的可信度。溶洞型储集体在地震反射上呈串珠状特征,多数地震属性均有一定响应,学者们统计了地震波阻抗与溶洞具有较好的对应关系<sup>[12]</sup>,并在塔河主体区得到一定应用,但波阻抗是岩性、物性和流体的综合响应,在孔隙型储层中多用来分析与孔隙度的关系,且缝洞型储层往往受到层状地层背景的影响,尤其越到奥陶系深层,波阻抗越不易祛除“层状”信息的干扰。鉴于此,本次引入地震结构属性(texture)<sup>[32-34]</sup>预测溶洞分布,地震结构属性主要通

过波形聚类的方式,将空间波形结构相似的信息进行组合强化,对于异常地质体反射较为敏感,比较适用于溶洞储集体的检测,并可以用检测概率(值域在0~1)的形式指示溶洞发育的可能性,可以作为大型溶洞及溶蚀孔洞预测的地震约束概率体。对研究区地震资料去噪后提取了结构属性数据体,属性值大小代表了缝洞发育的可能性大小,将其网格化到模型中,作为井间约束的地震概率体(图6c)。最后,为便于约束体的使用,按照合适的融合比例采用线性合并的方法将以上3种概率体整合为一套地质-地震综合概率体(图6d),作为支撑断溶体内部结构要素建模的趋势模型。

### 4) 大型洞穴离散分布模型

大型洞穴的平均尺度大于5 m,地震数据基本可以定位洞穴的存在,采用“目标属性截断”的确定性建模思路,通过多井洞穴识别结果对地震结构属性进行标定,确定洞穴边界的门槛值,先整体建立大型洞穴初步分布模型,再根据断控发育模式及连续性情况适度人机交互修正,达到全部已有数据拟合,得到大型洞穴离散分布模型。统计研究实例区40口井共钻遇识别大型溶洞62个,钻遇厚度在5~35 m,当前地震分辨率(主频约25 Hz)基本能够识别洞穴的位置。通过对地震原始资料增强处理,提取了反映波形特征的结构属性数据体,将其采样到断溶体外部轮廓地质网格中,再通过测井及动态资料对标定的结构属性值进行截断,通过人机交互修正,采用确定性方法建立大型溶洞地质模型(图7a),从其分布特征来看,受断裂控制分布的规律较为明显(图8),且相对于不整合面 $T_4^1$ ,浅部的溶洞较深部更发育。

### 5) 溶蚀孔洞分布模型

溶蚀孔洞具有常规孔隙型碳酸盐岩储层的一些属性特征,具有一定随机性,但根据其与大型洞穴以及断控之间的成因关系,主要采用多趋势约束的序贯指示模拟方法进行建模,其中多趋势具体包括前述沿主干断裂分布的地质概率体以及反映溶洞分布可能性的地震概率体,并以已建立的大型洞穴离散模型作为“相控”约束条件,以断裂发育走向为主变程调整变差函数,最后得到溶蚀孔洞离散分布模型。以实例区40口井识别的溶蚀孔洞发育段作为建模硬数据,同样在断溶体外部轮廓框架下,以前面得到的综合概率体(图6d)作为井间约束条件,采用协同序贯指示模拟方法,建立该区溶蚀孔洞三维分布模型(图7b)。溶蚀孔洞模型体现出与大型溶洞模型相匹配的特点(图8),分段性及纵向分布均与大型溶洞模型的规律较为一致,体现了成因控制的特点。



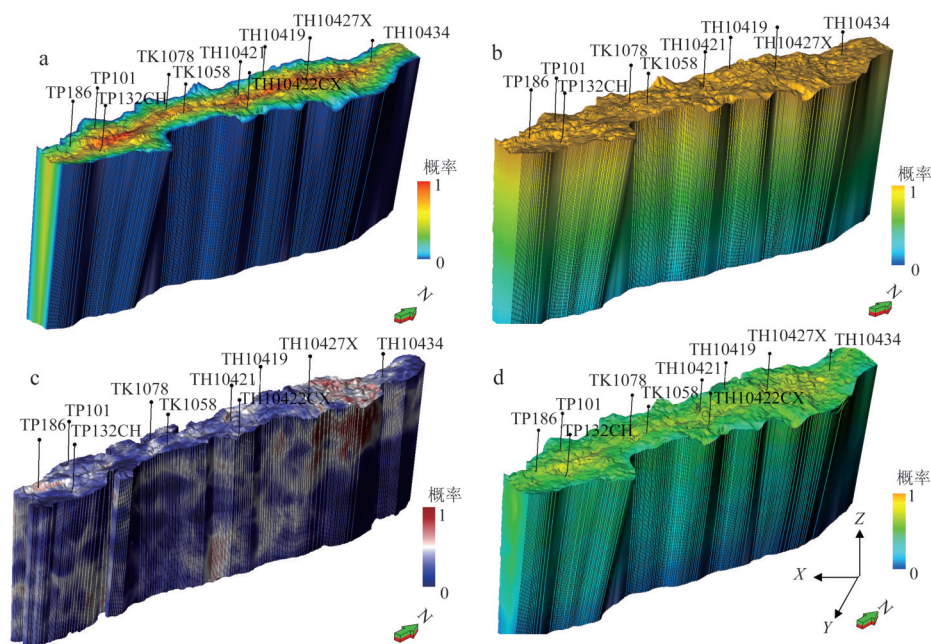


图6 塔河油田托甫台地区TP12CX断裂带典型单元缝洞带建模概率体模型

Fig. 6 Probabilistic models used for fault-karst internal elements modeling in a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

a. 断裂主控横向地质概率体模型; b. 断裂主控纵向地质概率体模型; c. 地震概率体模型; d. 基于线性加权的地质-地震综合概率体模型

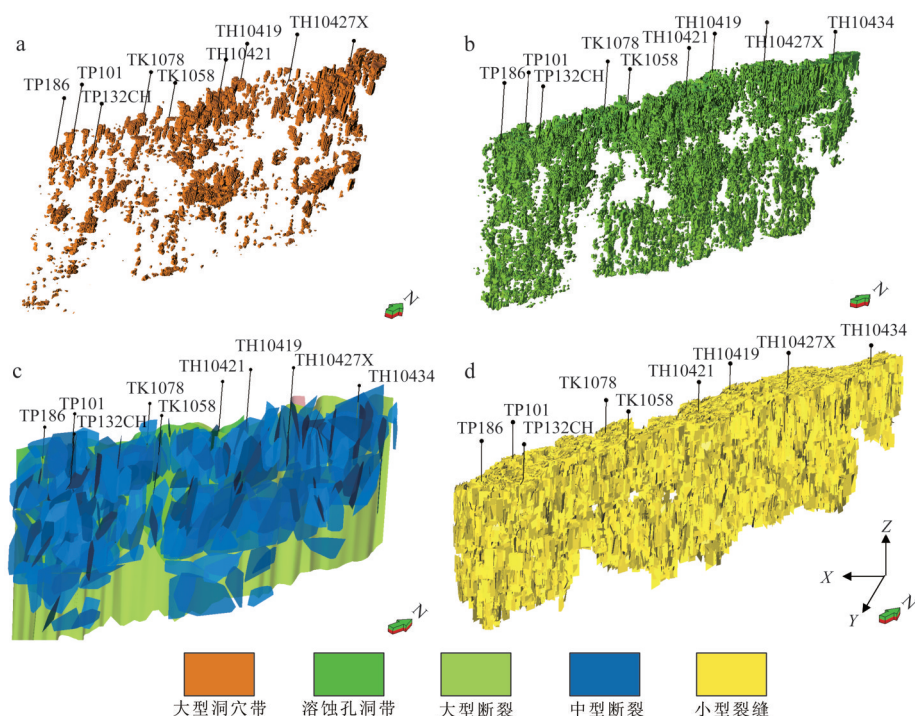


图7 塔河油田托甫台地区TP12CX断裂带典型单元多维、多尺度缝洞带建模结果

Fig. 7 Multi-dimensional and multi-scale fault-karst internal element models in a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

a. 大型洞穴带三维模型; b. 溶蚀孔洞带三维模型; c. 大、中型裂缝片模型; d. 小型裂缝片模型

#### 6) 多尺度裂缝离散分布模拟

不同尺度断裂之间的层次性较为明显,遵循“层次建模”思路,按照大、中、小规模逐级建立裂缝网络模型,其中大型裂缝相当于主干走滑断裂,在走滑断

裂包络模型中已经涉及,因此,在该部分重点针对中-小型裂缝的分布模拟。中型裂缝被认为是通过对地震数据的不连续性进行增强处理,能够进一步识别的断裂,以人工解释主干断裂的组系信息为指导,通过



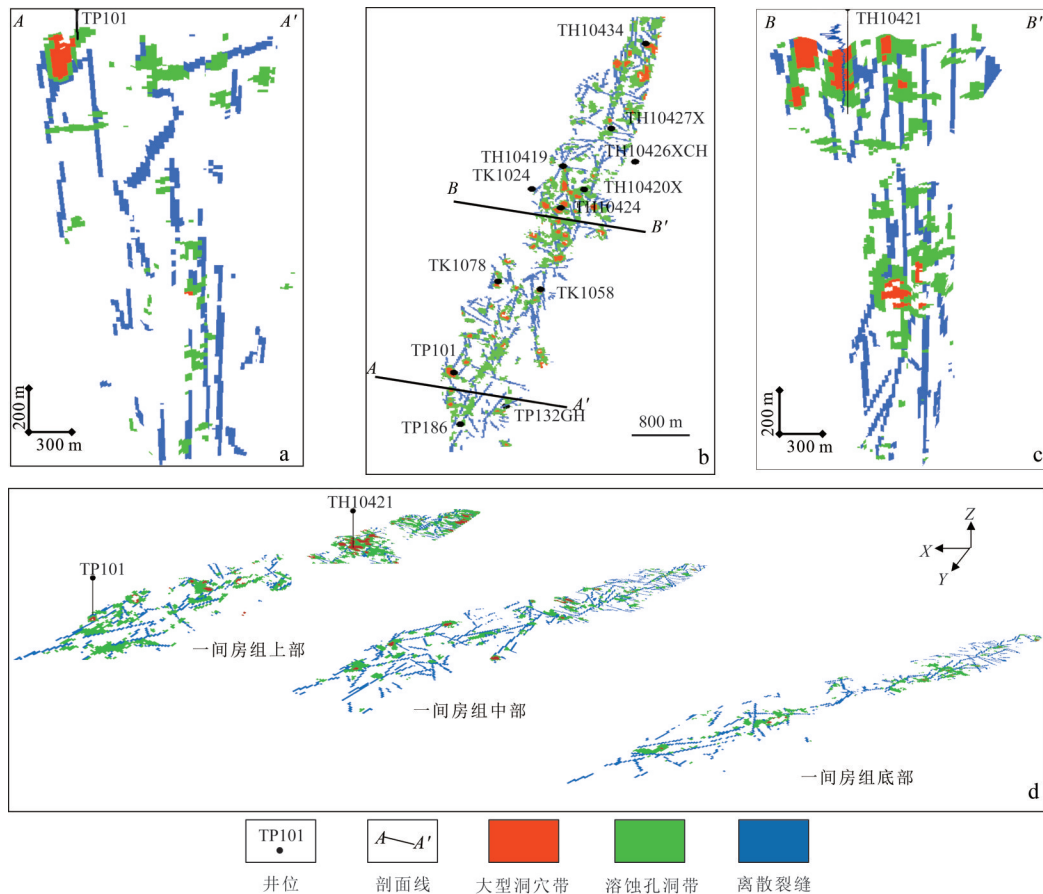


图8 塔河油田托甫台区TP12CX断裂带典型单元断溶体内部缝洞带建模结果

Fig. 8 Fault-karst internal element models in a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

a. 过TP101井模型剖面结果;b. 溶蚀孔洞带平面分布结果;c. 过TH10421井模型剖面结果;d. 缝洞带发育演化规律

蚂蚁追踪技术自动追踪,分组系拾取不同方向的裂缝片,采用确定性方法建立中型裂缝离散分布模型(图7c),可见其走向主要包括北东、北西及东西向3个组系,以高角度为主,延伸长度一般为130~1500 m。小型裂缝受地震精度限制难以直接识别,主要依靠单井信息,并结合野外露头统计其产状及密度特征。研究区内小型裂缝的走向与大、中型基本一致,倾角仍以高角度为主,裂缝延伸长度范围约5~130 m,根据单井裂缝密度和产状信息,结合已有大断裂生成的裂缝发育地质-地震概率体(图6),采用较为常用的基于目标的示性点过程模拟方法,完成小型裂缝离散分布模型(图7d)。

### 3.2.4 洞穴充填建模

洞穴充填直接决定了缝洞储层质量,受资料限制其表征难度大,认识的不确定性程度较高,该层次的地质建模也具有挑战。缝洞充填当前的研究主要基于单井认识(岩心、成像测井、常规测井)和野外露头,单井上基本可以识别充填岩性、物性及纵向序列特征<sup>[35-37]</sup>,

野外露头可以部分认识各充填要素的组合关系,但对其形态特征尤其是定量关系仍知之甚少,因此,针对地下洞穴储层直接建立各充填要素的结构模型具有较大难度。洞内充填不同岩性均可反映到物性的变化。波阻抗属性与储层孔隙度之间具有较好的相关性,通过洞穴内孔隙度的差异可以间接反映充填要素的差异,如高孔隙度可能为砂岩充填或未充填,低孔隙度可能为角砾充填或方解石胶结充填。本次尝试采用波阻抗反演体作为软约束,大型洞穴作为“相控”,单井解释岩性数据为条件数据,垂向变差以单井为准,平面变差函数参考大型洞穴的长、宽规模,采用序贯指示模拟方法得到大型洞穴内部可能的充填结构模型(图9)。从结果来看,其分布大致反映了洞穴内部的纵向充填序列,且其分布规律与波阻抗属性之间具有一定的层状约束关系。

最后,将在同一网格体系下不同尺度的溶洞及裂缝进行融合,按照同位条件赋值算法<sup>[5]</sup>,对几种不同的要素赋予不同的权重值,代表融合过程中的优先次序,得到实例区多重离散介质模型(图10)。

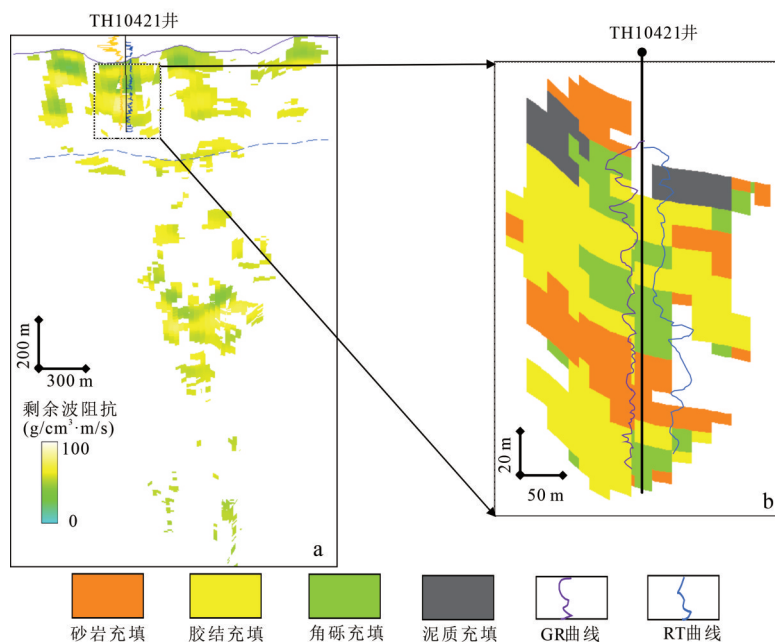


图9 塔河油田托甫台地区TP12CX断裂带典型单元断溶体洞穴充填结构模型

Fig. 9 Cavern filling model in a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

a. 剩余波阻抗模型; b. 洞穴内部可能充填结构

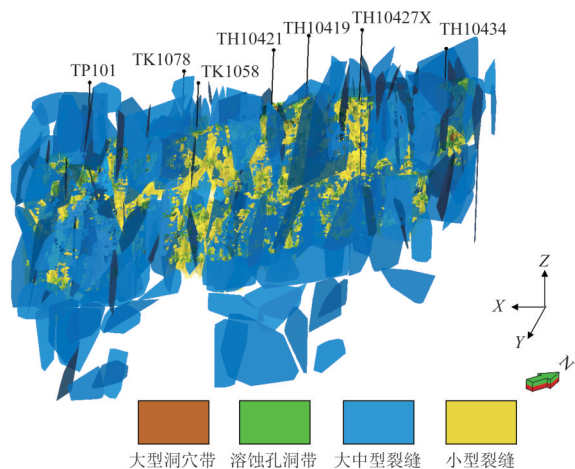


图10 塔河油田托甫台地区TP12CX断裂带典型单元断溶体系多重离散介质综合模型

Fig. 10 Integrated 3D fault-karst geological model of multiple discrete media in a typical unit in TP12CX fault zone in Tuoputai area, Tahe oilfield

## 4 结论

1) 提出了断溶体系层次建模方法。总体思路为“层次约束、成因控制、逐级建模”,即高级次要素对低级次要素具有层次约束作用,约束的原则通过地质成因模式来体现,按照不同的级次进行逐步建模。

2) 根据断溶体系不同级次规模及分布特点,优选了针对性的建模技术。大型溶洞及断裂主要采用确定

性建模方法,并通过人机互动进一步提高其准确度;溶蚀孔洞及中、小型裂缝分别采用带有趋势的序贯指示模拟及示性点过程模拟方法,随机模拟过程中加入了地质成因概率体作为约束,使得建模结果更为可靠;洞穴“相控”,波阻抗软约束下的充填岩性模型反映了洞穴内部的充填序列。

## 参 考 文 献

- [1] 侯加根, 马晓强, 刘钰铭, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层多类多尺度建模方法研究——以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 59–66.  
Hou Jiagen, Ma Xiaoqiang, Liu Yuming, et al. Modelling of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 59–66.
- [2] 侯加根, 马晓强, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩溶洞型储集体地质建模的几个关键问题[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 64–69.  
Hou Jiagen, Ma Xiaoqiang, Hu Xiangyang, et al. Key issues of 3D geological modeling of paleokarst-cave carbonate reservoir [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 64–69.
- [3] 马晓强, 侯加根, 胡向阳, 等. 论古岩溶洞穴型储层三维地质建模——以塔河油田四区奥陶系储层为例[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 315–324.  
Ma Xiaoqiang, Hou Jiagen, Hu Xiangyang, et al. Discussion on 3D geological modeling of palaeokarst cave reservoir: A case study on ordovician reservoir of the 4th block in the Tahe Oilfield [J]. Geological Review, 2013, 59(2): 315–324.
- [4] 康志江, 李阳, 计秉玉, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关

- 键技术[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 434-441.
- Kang Zhijiang, Li Yang, Ji Bingyu, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 434-441.
- [5] 胡向阳, 李阳, 权连顺, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383-387.
- Hu Xiangyang, Li Yang, Quan Lianshun, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 383-387.
- [6] 瞿长, 赵锐, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北5断裂带储集体地震反射与产能特征分析[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 68-74.
- Qu Chang, Zhao Rui, Li Huili, et al. Seismic reflection and productivity of reservoirs in the fault-zone 5 of Shunbei, Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 68-74.
- [7] 李阳, 侯加根, 李永强. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600-606.
- Li Yang, Hou Jiagen, Li Yongqiang. Features and classified hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 600-606.
- [8] 刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用——以四川盆地川西坳陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 973-980.
- Liu Zhenfeng, Liu Zhongquan, Guo Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: A case study on the Xu 2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, Western Sichuan Depression in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 973-980.
- [9] 丁芳. 开发前期少井条件下低渗储层“甜点”建模表征技术及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(6): 135-142.
- Ding Fang. Modeling and characterizing technique of the “sweet spot” and its application in low-permeability reservoirs with limited wells at the early stage of the development[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(6): 135-142.
- [10] 吕心瑞, 孙建芳, 郭兴威, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法——以塔里木盆地塔河S67单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 728-737.
- Lyu Xinrui, Sun Jianfang, Wu Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 728-737.
- [11] 鲁新便, 赵敏, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩溶洞型油藏三维建模方法技术研究——以塔河奥陶系缝洞型油藏为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 193-198.
- Lu Xinbian, Zhao Min, Hu Xiangyang, et al. Studies of 3D reservoir modeling: taking Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 193-198.
- [12] 李永强, 侯加根, 刘钰铭, 等. 基于岩溶模式的溶洞储集体三维地质建模[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 43-50.
- Li Yongqiang, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. 3D modeling of cave reservoirs based on karst patterns[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 43-50.
- [13] 陈克勇, 鲁洪江, 何怡坤, 等. 以古溶洞主导的白云岩岩溶储渗体分布模式[J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 13-16.
- Chen Keyong, Lu Hongjiang, He Yikun, et al. Distribution characteristics of dolomite reservoir-permeability systems determined by epikarstic paleocaves[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1): 13-16.
- [14] 赵彬, 侯加根, 刘钰铭, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储层三维地质建模与应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5): 12-16.
- Zhao Bin, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. Three dimensional modeling and application of Ordovician carbonate cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(5): 12-16.
- [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, 2012, 36(2): 34-38.
- [16] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [17] 吴胜和, 李宇鹏. 储层地质建模的现状与展望[J]. 海相油气地质, 2007, 12(3): 53-60.
- Wu Shenghe, Li Yupeng. Reservoir modeling: Current situation and developmental prospect[J]. Marine Oil and Gas Geology, 2007, 12(3): 53-60.
- [18] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 774-780.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 774-780.
- [19] 陈秀艳, 王剑, 张立平, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区石炭系东河砂岩段碳酸盐胶结物沉积特征及其成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 509-517.
- Chen Xiuyan, Wang Jian, Zhang Liping, et al. Sedimentary characteristics and genesis of carbonate cements in Carboniferous Donghe sandstone member, Hanilcatam area of Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 509-517.
- [20] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2339-2348.
- Zhou Wen, Li Xiuhua, Jin Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoirs in Tahe area



- [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2339-2348.
- [21] 韩长城, 林承焰, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶斜坡断控岩溶储层特征及形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 644-652.
- Han Changcheng, Lin Chengyan, Lu Xinbian, et al. Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbonate karst slope of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 644-652.
- [22] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(3): 1795-1834.
- [23] 林煜, 李相文, 陈康, 等. 深层海相碳酸盐岩储层地震预测关键技术与效果——以四川盆地震旦系-寒武系与塔里木盆地奥陶系油气藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 717-727.
- Lin Yu, Li Xiangwen, Chen Kang, et al. Key seismic techniques for predicting deep marine carbonate reservoirs and the effect analysis: A case study on the Sinian-Cambrian reservoirs in the Sichuan Basin and the Ordovician reservoirs in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 717-727.
- [24] 文欢, 邓光校, 王震. 塔河油田奥陶系油藏储集体发育控制因素分析-10区东高精三维区[J]. *非常规油气*, 2017, 4(1): 37-42, 74.
- Wen Huan, Deng Guangxiao, Wang Zhen. Analysis of controlling factors of reservoir development in Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield-3D high precision seismic Area in Eastern 10 Area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2017, (1): 37-42, 74.
- [25] 胡文革. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 1-10.
- Hu Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 1-10.
- [26] 吴涛, 戴少康, 曹飞, 等. 走滑断裂系对碳酸盐岩“断溶体”油藏形成的控制作用[J]. *地球科学前沿*, 2017, 7(5): 681-694.
- Wu Tao, Dai Shaokang, Cao fei, et al. Strike-slip fault system and it's controlling on the formation of “reservoir of fault controlling dissolution”: A case study of Toufuta area, Tahe oil fields[J]. *Advances in Geosciences*, 2017, 7(5): 681-694.
- [27] 王震, 文欢, 邓光校, 等. 塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用[J]. *石油物探*, 2019, 58(1): 149-154.
- Wang Zhen, Wen Huan, Deng Guangxiao, et al. Fault controlled-karst reservoir characterization technology in the Tahe Oilfield, China[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(1): 149-154.
- [28] 温志新, 王红漫, 漆立新, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层预测研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 94-100.
- Wen Zhixin, Wang Hongman, Qi Lixin, et al. Research on the prediction of Ordovician carbonate reservoir of fissure-cave type in the Tahe Oilfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 94-100.
- [29] 王威, 凡睿, 黎承银, 等. 川东北地区须家河组“断缝体”气藏有利勘探目标和预测技术[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 992-1001.
- Wang Wei, Fan Rui, Li Chengyin, et al. Exploration and prediction of promising fault-fracture reservoirs in the Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 992-1001.
- [30] 马德波, 赵一民, 张银涛, 等. 最大似然属性在断裂识别中的应用-以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6): 817-825.
- Ma Debo, Zhao Yimin, Zhang Yintao, et al. Application of maximum likelihood attribute to fault identification: A case study of Rewapu block in Halahatang area, Tarim Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 817-825.
- [31] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [32] Gao D. Application of three-dimensional seismic texture analysis with special reference to deep-marine facies discrimination and interpretation: Offshore Angola, west Africa[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(12): 1665-1683.
- [33] Gao D. Application of seismic texture model regression to seismic facies characterization and interpretation[J]. *Leading Edge*, 2008, 27(3): 394-397.
- [34] Gao D. Latest developments in seismic texture analysis for subsurface structure, facies, and reservoir characterization: A review[J]. *Geophysics*, 2011, 76(2): 1-13.
- [35] Li Yang, Zhou Dehua, Wang Weihong, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1-2): 55-68.
- [36] 田飞, 金强, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 36(6): 900-908.
- Tian Fei, Jin Qiang, Li Yang, et al. Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fractured-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe oilfield[J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 36(6): 900-908.
- [37] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 533-546.
- He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhu Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 533-546.

(编辑 张玉银)