

引用格式:商晓飞,王鸣川,李蒙,等.基于VBM方法的油气藏高精度地层格架建模——以川西坳陷新场构造带须二段为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):302-312.

SHANG Xiaofei, WANG Mingchuan, LI Meng, et al. High precision stratigraphic framework modeling for oil and gas reservoirs based on VBM algorithm: A case study of Xu2 Formation in Xinchang tectonic zone, western Sichuan Depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 302-312.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.005

基于VBM方法的油气藏高精度地层格架建模

——以川西坳陷新场构造带须二段为例

商晓飞,王鸣川,李蒙,赵磊

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:川西坳陷新场地区须家河组受多期构造运动叠加,地层起伏较大,总体呈“马鞍”形特征,同时发育多组逆断层,断穿层位各异,断层交切关系多样。常规的建模方法不能精确表征该区复杂的构造-地层特征,模型难以满足实际生产需要。因此,采用VBM建模方法对新场须二气藏进行了构造地层模型建立。依据地震解释数据和钻井分层信息,获取须二段层面和断层控制数据。建立断层框架模型,精细调整断面形态和断层交切关系。以层面数据为输入数据,计算每一砂组的地层厚度,恢复并构建原状地层模型。利用断层与层面的相关参数控制,精准调控断层与层面之间的关系,实现现今构造-地层格架模型的建立。结果表明:VBM方法通过体积守恒原理和非结构化网格表征技术,对复杂构造模型能够做到精准刻画,较处理好复杂的地层接触和断层展布问题。新建立的地层格架模型相比传统角点网格建立的模型具有更高的网格质量,且保持了复杂断层处的断层组合关系以及层序地层特征,为后续的储层地质建模提供了更可靠的模型框架基础。

关键词:地层格架;地质建模;构造-地层模型;VBM建模;新场构造带;川西坳陷

中图分类号:TE319

文献标识码:A

High precision stratigraphic framework modeling for oil and gas reservoirs based on VBM algorithm: A case study of Xu2 Formation in Xinchang tectonic zone, western Sichuan Depression

SHANG Xiaofei, WANG Mingchuan, LI Meng, ZHAO Lei

(Sinopec Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The Xujiahe Formation in Xinchang area of western Sichuan Depression has experienced multiple periods of tectonic movement superposition. The stratigraphic deformation is significant, and the whole stratum is characterized by “saddle” shape. In addition, several groups of reverse faults are developed, with different fault broken horizons and diverse fault crosscutting relationships. However, the conventional modeling methods can not accurately describe the complex structure-stratigraphic characteristics of the area, and the model is difficult to meet the actual production needs. Therefore, the VBM modeling method is used to establish the structural-stratigraphic framework model of Xu2 gas reservoir in Xinchang area. Based on the analysis of sedimentary and filling characteristics in the study area, the sequence stratigraphic framework is clarified. Then, the horizon and fault data are obtained based on seismic interpretation data and drilling stratification information to establish the model of fault frame and finely adjust the relation between sectional shape and cross section. The horizon model is used as the input data to calculate the stratigraphic thickness of each sand group, and to restore and construct the original formation model. The present structural-stratigraphic framework model can be established by accurately regulating the relation between faults and horizons by controlling the relevant parameters of them. The results show that VBM method can accurately describe complex structural model

收稿日期:2021-04-22。

第一作者简介:商晓飞(1986—),男,博士,副研究员,主要从事沉积地质学和油气藏描述研究。地址:北京市海淀区学院路31号,邮政编码:100083。E-mail: shangxf.syky@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部项目“须家河组气藏描述与地质建模”(P18089-3)。

through volume conservation principle and tetrahedron grid characterization technology, and better deal with complex formation contact and fault distribution problems. The new stratigraphic framework model has higher grid quality than the traditional corner grid model, and the combination relation and sequence stratigraphic characteristics are maintained in the complex faults. This structural-stratigraphic model provides a more reliable model framework for the subsequent reservoir geological modeling.

Keywords: stratigraphic framework; geological modeling; structural-stratigraphic model; volume-based modeling; Xinchang tectonic belt; western Sichuan Depression

为了经济、有效地开发油气资源,了解油气藏地质参数在地下分布情况显得尤为重要和关键。地质建模是从空间的角度对油气藏构成要素进行三维可视化定量分析,可靠的地质模型能够帮助人们预测储层参数的分布规律,优化井位部署,有效提高储量动用程度和油气采出程度^[1-2]。构造-地层模型反映了油气藏的基本空间格架,是后续三维储层地质建模的基础,高质量的地层模型需要能够准确描述研究区域内地层发育特征,包括地层构造起伏、地层厚度变化等^[3-4]。所以,在进行储层及流体空间分布的建模之前,应首先进行地层格架建模。在精细、可靠的构造-地层模型基础上,模拟的油气藏储层属性的空间分布特征才能够更加接近客观实际情况。

传统的构造-地层模型的建立通常包括三大步骤^[5-6]:首先,通过地震解释成果,结合钻井揭示的分层,建立层面模型和断层模型(图1a);其次,依据层面模型建立地层模型;最后,建立纵向上具有一定网格分辨率的三维地层网格体。传统构造-地层建模方法中,网格的生成严重依赖断层模型质量,因此,往往会将断层进行简化化处理,如断层均切割全地层或断层不交切,即便如此,断层产状的空间变动都会极易造成周边网格的扭曲变形(图1b)。因此,客

观存在的复杂断层,采用传统建模方法难以同时保证断层模型的准确性与网格质量的精确性。

随着油气的不断勘探开发,对地下油气藏地质建模精度的要求日益提升。近些年,许多商业软件平台在处理复杂构造建模方面进行了很多探索和应用,如Skua-Gocad软件通过三维空间点坐标转换,实现断层切割前后的地层构造样式恢复,依此处理复杂断块建模^[7];JewelSuite软件通过限制网格大小与形变,达到网格不随断层产状扭曲的目的。斯伦贝谢Petrel软件平台涵盖了更为成熟的且完整的地质建模流程模块,其中Structural Framework构造建模流程中VBM(Volume-Based Modeling)算法通过四面体网格来保证断层形态及其接触关系,经过网格转换后,可以解决各种地层接触关系或者复杂地质体的建模问题(图1c)。

在川西坳陷新场地区,其晚三叠世须家河组形成于挤压环境,并受多期构造运动叠加,造成地层褶皱起伏且岩层破碎发育大量尺度不一的逆断层和裂缝^[8-11]。由于新场地区须家河组特殊的地质构造背景,断层和构造形态较为复杂,在进行构造-地层建模过程中带来很大的难度,主要表现在:①新场地区须二段地层的断层数量多;②新场地区断层全部都

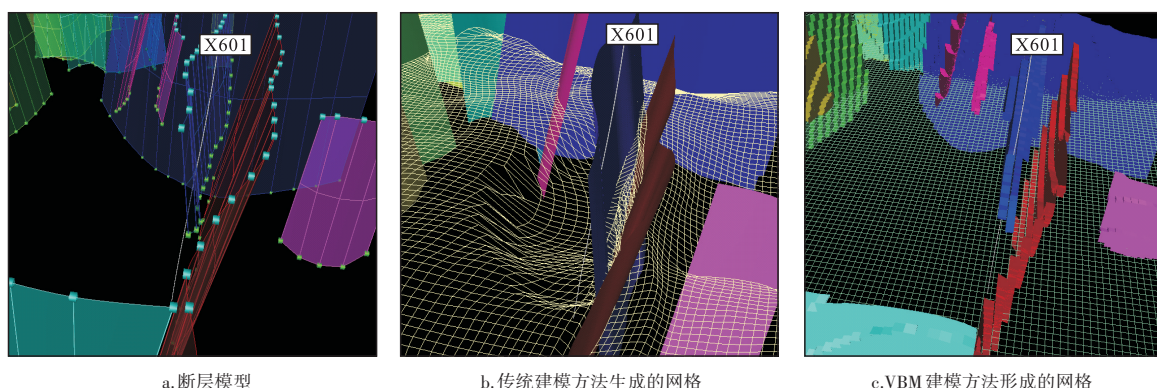


图1 传统方法与VBM方法构建的构造-地层模型网格

Fig. 1 Structural-stratigraphic models constructed by traditional method and VBM method

是逆断层;③不同断层断穿层位各异;④断层之间的交切关系复杂。采用传统的构造-地层建模方法,模型网格会极易扭曲变形,并且调整构造层面与断层之间关系的工作量巨大,因此,建立符合已有气藏钻井的实际穿行情形的构造-地层模型一直是该区地质建模亟需解决的难点和基础。采用基于VBM算法的建模方法创建构造-地层模型,能够很好地保持断层与层面的地质特征,为后续基于Petrel建模平台的储层属性建模提供保障。

1 区域构造背景

川西坳陷位于扬子地块西北缘,毗邻特提斯洋和华北地块,是几个板块的结合部位,是构造活动最活跃的地带。川西坳陷西邻龙门山造山带,北东与昆仑-秦岭构造带相接,大致呈北东向延伸,面积超过 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是一个典型的中新生代盆地^[12-13]。新场构造带位于四川盆地西部坳陷中段鸭子河-孝泉-新场-合兴场-丰谷北东东向构造带的中间部位,形成于印支运动早期,其南为彭州-德阳向斜,北为梓潼-金山铺向斜^[14-15]。新场构造整体上表现为NEE向的大型构造隆起带,构造南北两翼表现为南陡北缓(图2)。在该构造带内发育有近斜列展布的孝泉-新场构造带和高庙子-丰谷构造带,在这两个斜列的构造带的结合部位与合兴场-石泉场南北向构造带交错、复合,形成较为复杂的构造形态。纵向上深层须家河组(埋深4 000~5 000 m)由多个构

造高点组成完整的NEE向复式背斜,断裂较为发育,向上至侏罗系渐变为向东倾没的NEE向鼻状构造,断裂发育程度明显减弱。

须家河组沉积初期,米仓山、大巴山古陆出现,龙门山逆冲隆升,龙门山北段逐渐凸起,前陆盆地开始形成^[16]。须二段沉积时期,新场构造带EW向构造运动进一步加剧,川西地区大幅度沉降,沿龙门山前形成坳陷,坳陷中心位于彭州安县一带^[17-18]。前人对川西坳陷构造发育史分析表明,在该构造带上分布的、与构造带呈斜交的一系列北东向局部构造(孝泉、新场、罗江、丰谷构造)为燕山、印支期形成,其形成时间早于油气运移的高峰期,非常有利于油气的聚集,加之该构造带紧临彭县-德阳大向斜厚大的烃源岩,油气资源丰富,加之保存条件较好,成藏条件优越,使之成为油气有利构造^[19-20]。新场气田须二气藏2000年第一口勘探井即获得高产,至2010年已探明储量上千亿立方米,叠合面积150 km²。川西新场构造带须二段致密砂岩气藏虽然储层的致密化影响了油气的运聚程度,但构造起伏特征及构造调整从根本上控制着该区油气的富集条件。为了更好地开发气田,迫切需要深化精细构造-地层格架建模,为气田有效开发提供更可靠的地质模型保障。

2 地层与断层特征

新场地区须二段沉积时期湖平面变化频繁,三角洲砂体进积作用明显,物源多,充填范围广^[21]。须

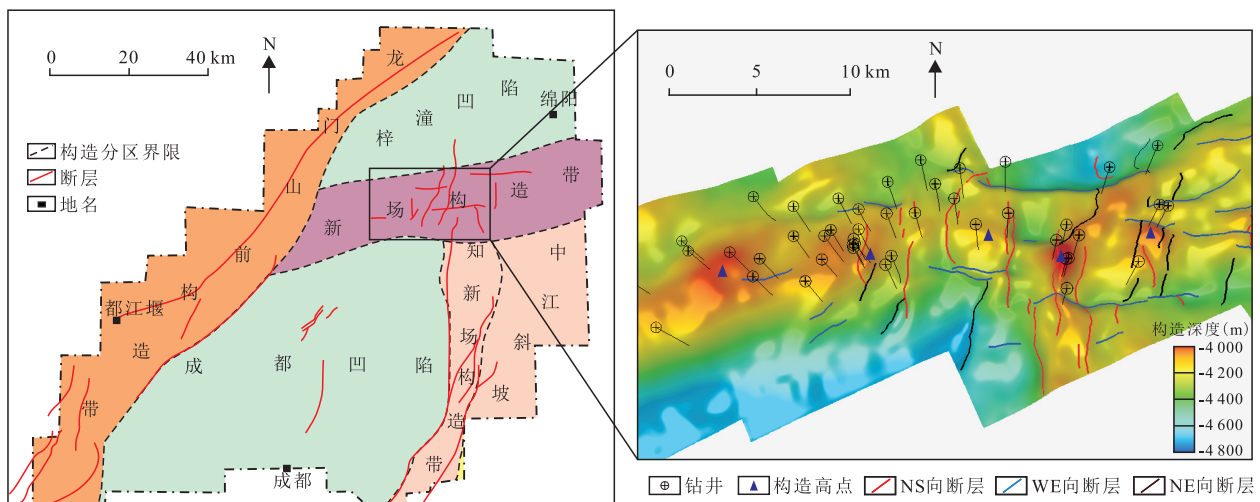


图2 新场构造带区域构造位置与构造特征

Fig. 2 Regional tectonic position and structural characteristics of Xinchang structural belt

二段底界面为岩性、岩相转换面,界面之下以须一段顶部的灰黑色页岩为主要特征,界面之上则是须二段砂岩,该沉积不整合面的广泛发育标志四川盆地由晚三叠世早期的海陆过度沉积转换为陆相沉积,为T6地震反射界面(图1)。须二段顶界面是一个岩性由粗转细的相转换面,标记为T5地震反射界面,界面之上以须三段滨浅湖相沉积为主,界面之下则是须二段河流—三角洲相沉积。

须二段地层内部,通过测井曲线样式所反映出的岩性突变特征,又可识别出2个界面,记为SQB1和SQB2。岩心观察发现,SQB1之下泥岩呈灰色、灰绿色甚至略带紫色,之上为深灰色泥岩,认为是代表湖平面快速上升的初始湖泛面。SQB2处自然电位及电阻率曲线平直,泥岩厚度一般在5~25 m,全区分布较为稳定。该泥岩之上多见一套厚层砂岩沉积,认为是湖平面快速上升后到开始下降的转换面。通过层序界面的分析,可厘清须二段沉积时期湖平面变化(即上升—下降)的完整基准面旋回,并由此将须二段分为3个亚段。下亚段为湖泊水位上升时形成的沉积,岩性以厚层、深灰色泥岩为主,地层厚度自西向东逐渐减薄,平均厚度约为150 m,其内部可细分4个砂组(TX₂¹⁰—TX₂⁷)。中亚段沉积初期以泥质沉积为主,中后期开始水退,此时砂体进积,物源供应充足,砂体易连续堆积,地层厚度自西向东变化不大,平均厚度约为220 m,其内部分为3个砂组(TX₂⁶—TX₂⁴)。上亚段地层主要表现为加积样式,从砂泥薄互层向上过渡到厚层砂充填为特征,地层厚度自西向东逐渐加厚,平均厚度约为180 m,其内部分3个砂组(TX₂³—TX₂¹)。

新场构造带内部的次级构造及断层与龙门山构造带的活动密切相关^[5]。新场地区主要发育NS、WE和NE走向三组断裂,均为逆断层,主要集中分布在新场地区的中部,断裂横向延伸距离一般小于5 km,断距一般低于50 m,倾角较陡,从深至浅断层活动逐步减弱。规模较大的断层主要为NS向,纵向上呈现“y”字形(如X851井区的F1和F12断层、X601井区的断层)、叠瓦状和平行展布(X5井区的F4和F17断层)3种类型。断层附近主要发育5个由NE、SN、NEE向高点形成的背斜圈闭,并且纵向具有较好的继承性(图3)。结合水平时间切片、相干切片和地震属性等信息,发现小断层、微断层在局部地区较发育,主要集中在X3井区和XC8—L150井区,这些断层断距更小,断深差异及切穿层位差异大。

3 VBM方法与流程

基于VBM算法的构造框架模型其核心是利用地下地层体积守恒原理^[22]。地下地质体在体积不变的前提下(如果涉及地层剥蚀则先进行剥蚀量恢复),依据断层性质、断层产状和断距信息,恢复断层两盘的构造层面位置,实现原状—现今构造地层样式的转换。VBM方法构建的模型,其网格是通过非结构化网格(如四面体网格等)转换而来,四面体网格既能保持断层的产状变化与组合关系,又能保证空间网格的质量,而且在断层交接处可以根据需求实现更精细地刻画,因此,该方法所建立的模型网格不会受复杂构造的影响(图1c)。VBM构造建模方法承载了地质专家的构造解析过程和结果,通过体积守恒

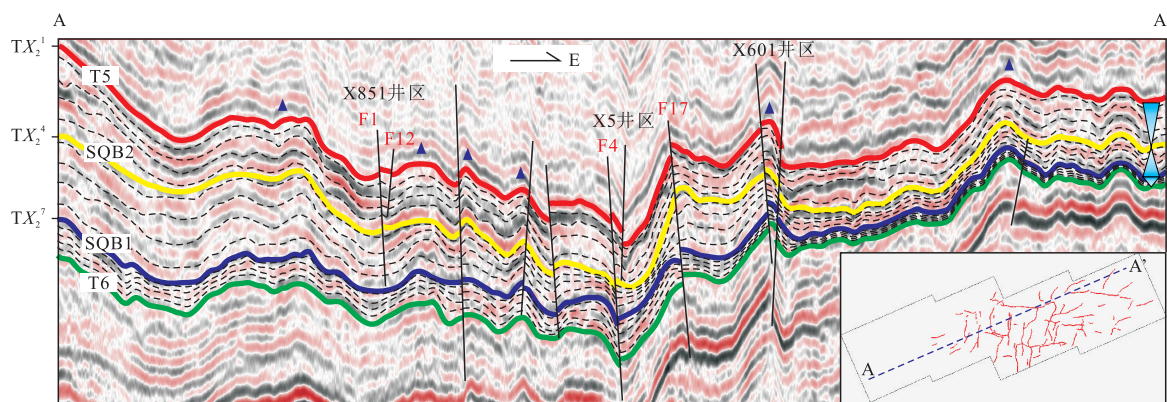


图3 新场构造带须二段地震剖面解释及层序地层特征

Fig. 3 Seismic section interpretation and sequence stratigraphic characteristics of Xu2 Formation in Xinchang structural belt

原理和非结构化网格技术,对更加复杂的构造模型能够做到更精准的刻画,较处理好复杂的地层接触(如角度不整合、超覆、退覆等)和断层展布(如复杂叠瓦状构造、复杂断块等)问题。

VBM构造建模的主要步骤流程包括:①基于地震解释和钻井地层对比,获取层位和断层信息,建立断层与层面模型;②基于体积守恒原理,形成断层未切割地层时的原状构造-地层模型,并以非结构化网格进行表征;③依据层序地层学原理,解析地层构造变动规律;④根据断层性质、断层产状、断距信息以及断层与层面参数控制,恢复断层切割地层后的现今构造-地层模型;⑤网格转换,设置角点网格平面步长和纵向网格分辨率,将非结构化网格转换成角点网格,完成构造-地层模型建立,为后续储层建模提供格架(图4)。

4 层面和断层数据获取

构造-地层建模数据主要是单井分层数据、断层解释数据以及构造图,其最关键的2个组成部分分别是层面数据和断层数据。

4.1 层面数据获取

研究区三维地震资料采集于2012年,覆盖面积超530 km²。目前,已经对地震信息进行了处理和解释,解释出3套地震层面,分别是须二段顶面和中间2个层面(亚段之间的界面),可以为构造-地层分析提供等时地层框架。结合地震解释出的须二段顶、TX₂⁴以及TX₂⁷砂组顶面层位,基于PaleoScan平台的全局优化思想建立网格点,并对其进行初步连接,对

新场地区须二段地层格架模型进行更新。采用全局振幅特征自动匹配追踪层位,建立自动追踪模型,保障层位闭合与相对等时性。通过地震地震解释分析,须二段现今构造整体呈现出东西高、中间低的近“马鞍”形特点。须二段底部呈现明显的由西向东逐渐升高的特点,且须二段顶底构造幅度的差异反映出西厚东薄的沉积特征(图5)。目前,这一沉积地层格架展布与盆地西侧更靠近前陆盆地中心的认识^[17-18]较为相符。

为保证须二段顶、底界面速度的合理性,利用整个须家河组地层多个地震解释层面的时深转换关系,采用线性速度数学模型,建立三维速度场模型,继而通过时深转换得到须二段深度域的层位解释数据,保证其与时间域数据相吻合。应用钻井搭建的精细地层格架,以钻井实际的分层信息对地震解释出的砂组顶面层位数据进一步校正,获取各砂组的层面数据和构造图,纵向层位包括TX₂¹—TX₂¹⁰共10个砂组、11个层面。

4.2 断层数据获取

断层地震解释结果表明,研究区断层发育较多、尺度不一,既有贯穿须二段的较大断裂,也有层间小断层,且断层组合关系多样,如“x”字形断层、“y”字形断层以及阶梯状断层。由于断层在新场须二段较为发育,且因构造作用使得断层产状和断裂情况复杂,在建模时首先对规模尺度较大、全区发育稳定的断层进行精细刻画,充分考虑每条大断层的切穿层位(断深)、断层的产状以及断层之间的交切关系。

基于地震解释的断层数据,在Petrel软件平台中通过拉取全区共计十几条过断层剖面,精细分析并

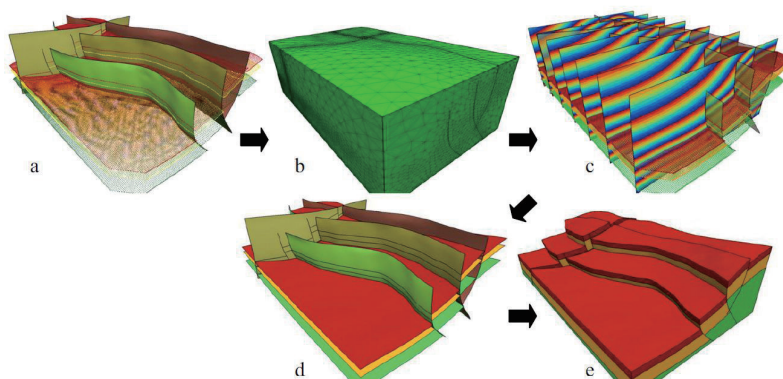


图4 基于VBM算法的构造-地层格架建模流程(据文献[22]修改)

Fig. 4 Structure-stratigraphic framework modeling process based on VBM algorithm(According to reference [22])

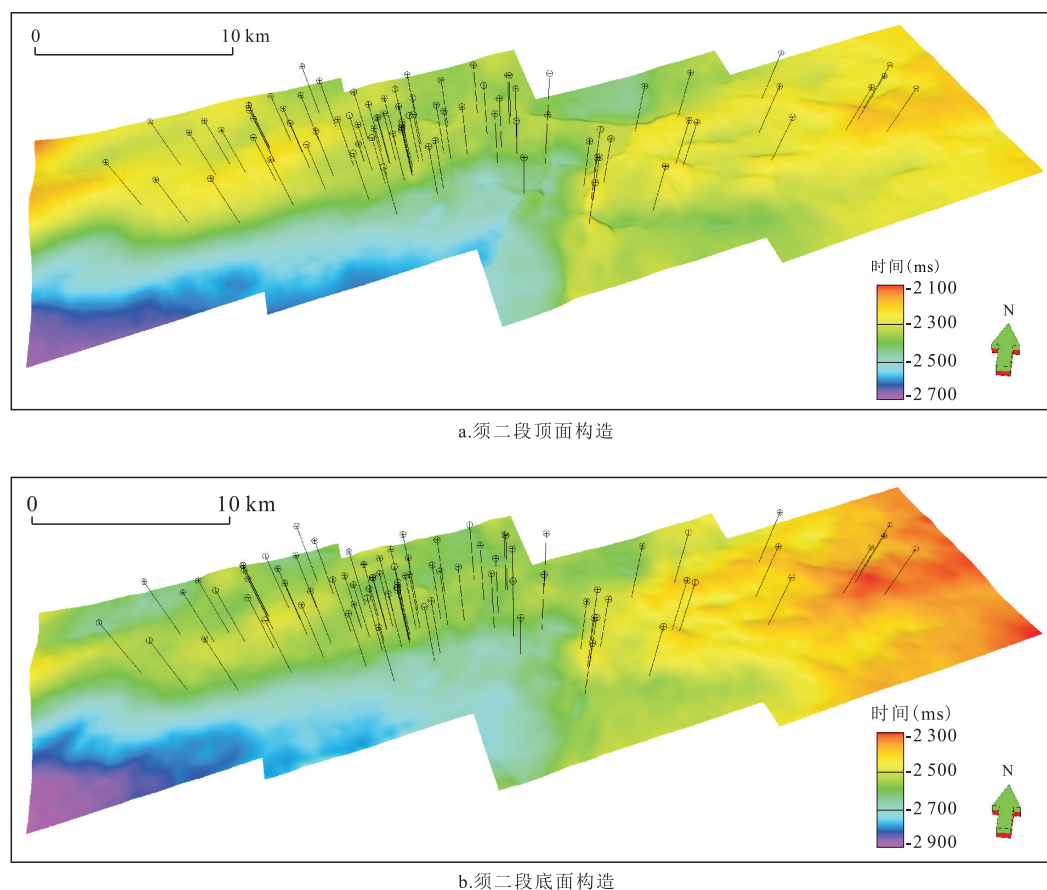


图5 新场构造带须二段地层顶、底面构造层面

Fig. 5 Structural horizons of top and bottom of Xu2 Formation in Xinchang structural belt

刻画出每条断层在不同位置的断深、细化断层产状以及断层之间的组合关系(图3)。对于断层组合关系复杂的区域,需要精细调整断层截切关系,通过反复质控与调整使之逼近真实情况,以确保断层数据合理准确。对于微小断层(如三、四级断层)因其断距不明显,且多发育在层内,可以在获取控制全区构造格局的较大断裂数据后,依据断层走向、倾向和规模,采用离散裂缝网络(DFN)方法建立微小断层模型。

5 基于VBM的构造-地层模型建立

在全油田地层构造格架基础上,依据层面和断层数据,采用基于岩石体积建模(VBM)算法建立研究区须二段砂组级别的构造-地层模型。

5.1 断层框架模型建立

基于Petrel平台Structural Modeling模块的Fault

Framework,调取基于精细地震解释的断层数据作为主要输入数据,确定性方法初步形成各断层三维断面形态。建立精细的断层模型需要对断层层面进一步校正,提高断层模型的精度和准确性。

对断层模型的调整(表1)主要包含以下内容:1)断面分辨率,通过表征断面的三角网格周长的设置,设置断层层面的分辨率;2)断面平整程度,根据断层规模适当调整断层层面的光滑性,降低后期构造模型的粗糙网格数;3)断面基本形态,根据地震剖面上的断层数据,明确各个断层在断层外边界的断面形态,如凸形或凹形;4)断层外推距离,受地震解释的限制,实际断层断面面积可能更大,可根据断层规模对原有的断层层面进行一定距离的外推;5)通过钻井实际对比出的断点数据,调整断层位置,保证了井震数据一致性;6)检查断层组合样式,对相互切割和交叉的断层,基于断层形成期次明确其交切关系,保证断层组合样式与地质认识的一致性。

5.2 原状地层模型建立

原状地层是由相应地层沉积时期的地质年代环境所控制的一种模拟的、物理沉积空间一致的构造。原状地层模型中的网格点位置是虚拟的,在实际地下地层三维空间中并不代表任何几何意义。原状地层模型的作用是为了保证原始整合地层(即未发生断裂切割)的层面结构特征和地层体积,并适当考虑了褶皱或断裂构造等后期构造运动对地层造成的形变距离,在进行构造恢复创建实际的构造-地层模型具有重要意义^[22]。

利用上述获取的 TX_2^1 — TX_2^{10} 共10个砂组顶面的层面数据为输入数据,基于“填凹补平”沉积理念,以计算每一砂组的地层厚度,建立原状地层模型。新场地区须二段没有遭受剥蚀,每一个砂组均保持整合接触关系,并可以恢复得到构造从老到新的沉积变形演化过程,很好地反映了研究区原始地层结构并保证了实际地层空间体积,为后期构造恢复提供基础(图6)。

5.3 现今构造-地层模型建立

5.3.1 基本参数设置

VBM构造-地层建模的结果实际是由地层模型

表1 新场地区须二段部分断层模型调整参数
Table 1 Adjustment parameters of partial fault models in Xu2 Formation of Xinchang area

| 断层 | 断面分辨率 (m) | 断层 平整度 | 断面 形态 | 断层外推 距离(m) | 断层交切 关系 |
|-----|--------------|-----------|----------|---------------|------------|
| F1 | 100 | 2 | 凸形 | 50 | 被F12截切 |
| F2 | 100 | 2 | 凸形 | 50 | |
| F3 | 100 | 2 | 凸形 | 50 | |
| F4 | 100 | 2 | 凸形 | 50 | |
| F5 | 100 | 2 | 凸形 | 50 | |
| F12 | 60 | 1 | 凸形 | 30 | |
| F17 | 60 | 1 | 凸形 | 20 | 截切F1 |

和切割地层的断层模型组成,在建模过程中,其控制参数也主要是针对所建立的地层模型本身和断层对地层的影响2个方面(表2)。对新场地区须二段构造地层建模的具体过程和参数调试原则如下包括:

1) 非结构化网格尺寸,该参数控制区域构造框架模型的网格增量,用以在地层厚度出现变化较大较准确拟合并控制地层倾角,考虑到新场地区建模范围较大(约260 km²),同时各砂组平均地层厚度不同,设置四面体网格尺寸为100 m,可保证研究区模型精度,也能满足后期数值模拟的要求;

2) 层面接触类型,该参数控制层序地层结构,明确地层之间的接触关系(如削截、上超、整合或不整合等),配置正确的层序类型并得到层面接触关系,是VBM建模的基础,研究区须二段各砂组层面不相交,地层继承性发育呈整合接触关系;

3) 模型复杂度,根据要建立模型的复杂程度,调整表征地质体网格的四面体元素的数量,数量越大说明构造越复杂,整个须二段地层虽没有涉及剥蚀,但不同亚段的地层厚度变化较大,且经历多期构造运动发育多组逆断层,模型复杂度偏大;

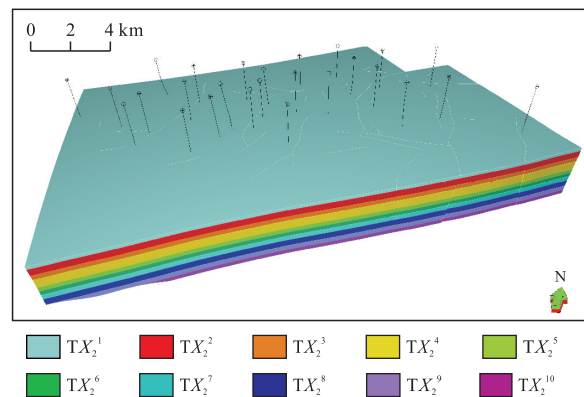


图6 新场地区须二段原状地层三维模型

Fig. 6 3D model of original formation of Xu2 Formation in Xinchang area

表2 新场地区须二段重点砂组VBM构造-地层建模主要参数
Table 2 Main parameters of VBM structural-stratigraphic modeling for key sand groups of Xu2 Formation in Xinchang area

| 砂组 | 平均层厚(m) | 断层数 | 层序接触关系 | 断层影响距离(m) | 垂向断距(m) | 网格尺寸(m) |
|----------|---------|-----|--------|------------|---------|---------|
| TX_2^2 | 80 | 59 | 整合接触 | 上盘400、下盘80 | 40~50 | 100 |
| TX_2^4 | 110 | 46 | 整合接触 | 上盘300、下盘50 | 35~45 | 100 |
| TX_2^7 | 50 | 31 | 整合接触 | 上盘200、下盘30 | 30~40 | 100 |

4) 地层纵向分辨率,根据地层的薄厚程度,调整四面体网格的垂直分辨率和水平分辨率之间的比率,新场须二主要产气层段为TX₂²和TX₂⁴砂组,在后期储层建模过程中,需要重点刻画这2个砂组层,因此构造建模过程中可以对这2个砂组进行更精细网格剖分,提升网格精度和地层纵向分辨率;

5) 层面平整程度,根据建模范围适当调整地层面面的光滑性,降低后期构造模型的粗糙网格数,但过度的平滑会偏离实际构造起伏,降低构造层面的准确性;

6) 断层影响层面距离,该参数需要针对每个砂组的每个断层依次设置并调试,因全区为逆冲断层,断层上盘更易发生断背斜构造,因而对层面的影响距离更大,较大尺度的断裂其上盘影响层面距离设置为200~400 m,下盘影响距离平均为50 m,较小断层其上下盘参数均减小,在诸如“y”字形断层、叠瓦状断层等断层间隔距离较近的地方,断层间层面可能会同时受到这2条断层参数的影响而出现不合理的弯曲,此时需要多次调控该参数,直至断层间的层面最接近输入的层面控制点;

7) 断层活动性,主要控制断层的垂向断距,不同砂组该参数设置有所差异,结合地震断层解释和钻井断点分析,断距从下往上依次增大,较大尺度断层的断距更大,设为30~50 m,较小断层设为5~30 m。

5.3.2 模型建立结果

综合地震、井资料实际数据和地质认识,以现今构造和岩石力学参数为基础,明确研究区构造演化历史。新场地区须二段地层沉积后,在晚三叠世经历龙门山断裂带俯冲,开始形成北东—南西走向为主的断层和褶皱。在断层框架模型和原状地层层序结构的基础上,基于地层构造形变演化过程,依据非结构化网格尺寸、断层距离等参数设置,利用Petrel建模软件的Structural Framework模块的Model Construction创建新场地区须二段现今构造-地层模型(图7)。

基于VBM的构造-地层建模重在通过精准调控断层与层面之间的关系,还原地下地层经过构造变动后的展布特征。不同断层的断裂规模由断层断距参数控制,不同砂组的褶皱变形程度由原状地层模型含有的层面位移参数控制。建立的现今构造-地层模型不仅保证了原状地层模型反映的地层体积量

和层序地层结构,在复杂断层处能够更好地保持断层与层面的关系,具有更高的网格质量。

5.4 质量控制及模型效果

由于建模的一些关键参数选取具有一定不确定性,在构造-地层模型建立后,还需要对模型的质量进行控制。构造-地层模型质量控制主要包括断层模型质量控制、层面模型质量控制和垂向网格质量控制3个方面。断层模型质控需要检查各断层延伸长度、切穿层位以及交叉断层之间的截切关系是否符合基础数据。层面模型质控需要检查各砂组层面构造深度与钻井分层数据的一致性,以及层面与断层的交线能否反映相应断层性质。垂向网格化目的是将纵向上的地层单元进行细分,垂向分辨率太细,在储层建模时虽然可以捕捉更多地质细节,但会导致模型网格数量太多,运行速度低;垂向分辨率太粗,会脱离储层参数的实际反映。考虑到研究区TX₂²和TX₂⁴砂组为主力产层,给予更高的纵向网格精度,其他砂组依据产气贡献程度给出合适的网格厚度,确保纵向上的储层非均质性能最大程度反映到三维网格中。

和传统构造建模方法(如角点网格)对比,基于VBM的构造-地层模型具有更高的网格质量(图1c)。通过切取模型多个过井地层剖面,在全区发育逆断层的情况下,断层两侧的网格并未发生明显的扭曲变形,断层与层面的空间展布均保持了原始基础数据,复杂断层处的断层组合关系均有较好的刻画,如“y”字形断层、阶梯状断层(图8、图9a)。而利用传统建模

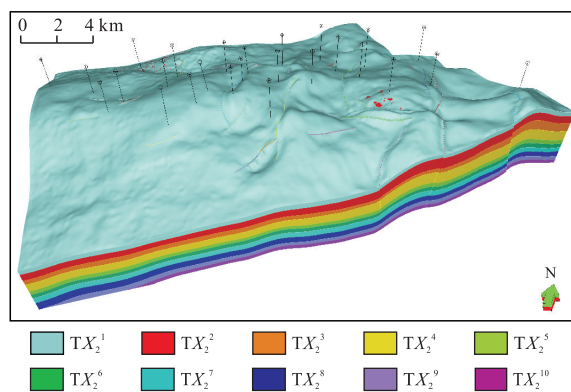


图7 新场地区须二段现今构造-地层格架三维模型
Fig. 7 3D model of present structural-stratigraphic framework of Xu2 Formation in Xinchang area

方法难以保证复杂的断层与层面关系,如相互截切的“y”形断层会在网格生成时极易变形成为相互交切的“x”字形断层,导致构造-地层模型失真(图9b)。

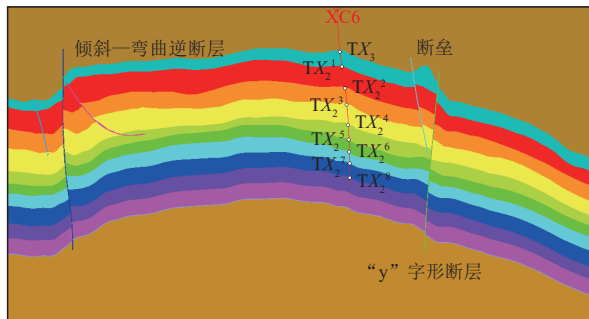


图8 新场地区须二段地层格架模型剖面
Fig. 8 Model section of structural-stratigraphic framework of Xu2 Formation in Xinchang area

本次建立的构造-地层模型实现了川西前陆盆地复杂逆冲断裂发育背景下构建高精度、高准确度、高可靠度的地层格架三维展布,为后续致密砂岩气藏的相模型、属性模型、流体模型建立打下坚实的基础。

6 结论

- 1) VBM 构造框架建模方法能够较好处理复杂的构造格架,通过非结构化网格转换,保证空间网格质量,可建立具有复杂断层结构和不整合层序地层关系的高精度构造-地层模型。
- 2) 川西坳陷新场地区须家河组经历多期次构造运动叠加,全区逆断层发育,断层断穿层位各异,

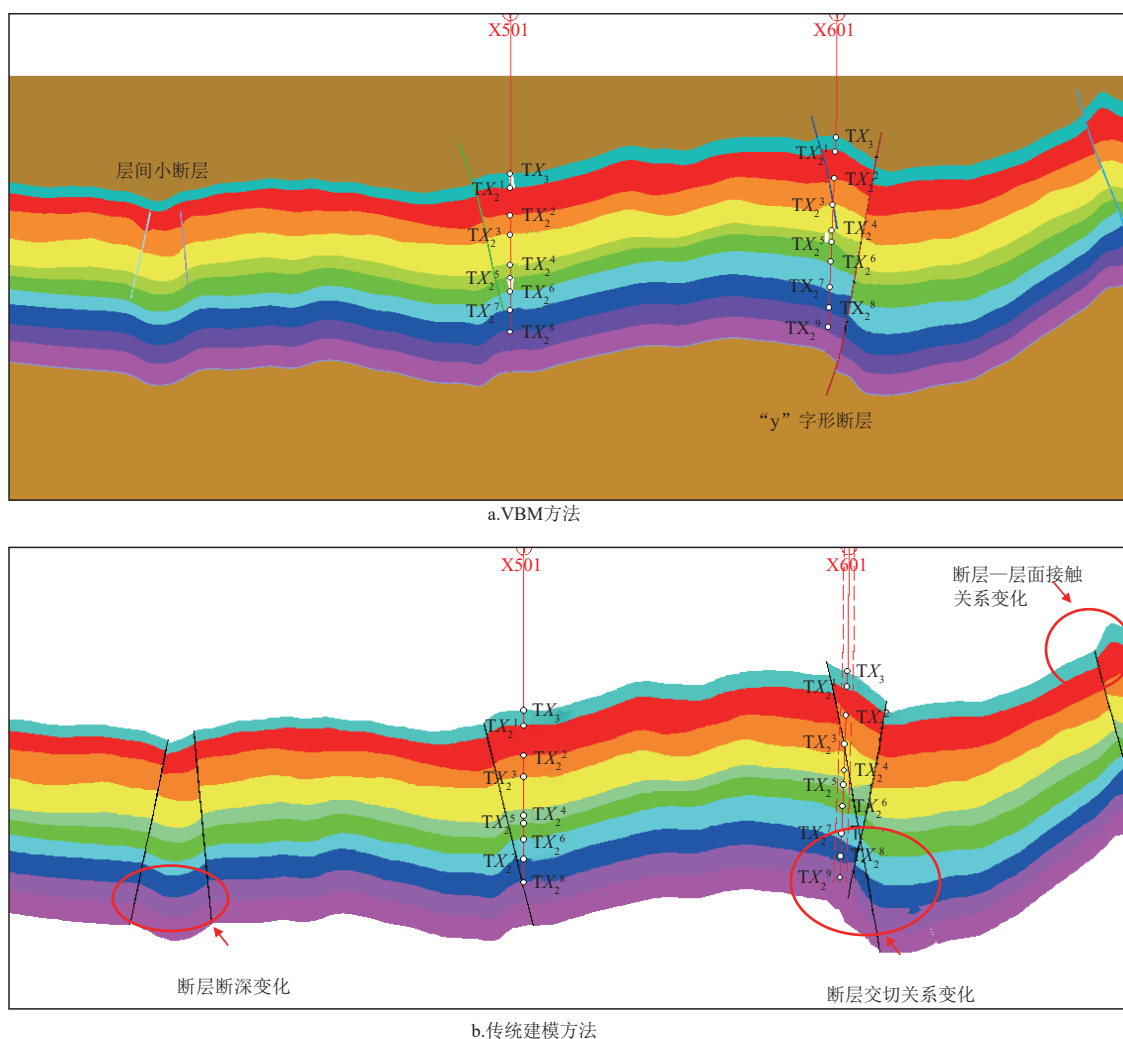


图9 VBM方法与传统方法构建的地层格架模型剖面对比
Fig. 9 Comparison between VBM and traditional method of stratigraphic framework model

断层关系复杂,难以采用传统的建模方法构建出理想的构造-地层模型。

3) 基于VBM算法通过恢复新场地区须二段原状地层模型,利用断层与层面关系的相关参数控制,实现现今构造-地层模型的建立。建立的构造-地层模型相比传统角点网格建立的模型具有更高的网格质量,且保持了复杂断层处的断层组合关系以及层序地层特征。

参考文献

- [1] 张文彪,段太忠,刘彦锋,等.定量地质建模技术应用现状与发展趋势[J].地质科技情报,2019,38(3):270-281.
ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, LIU Yanfeng, et al. Application status and development trend of quantitative geological modeling[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 270-281.
- [2] 段太忠,王光付,廉培庆,等.油气藏定量地质建模方法与应用[M].北京:石油工业出版社,2019,1-17.
DUAN Taizhong, WANG Guangfu, LIAN Peiqing, et al. Quantitative geological modeling method and application of oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 1-17.
- [3] 王玉岩.石油勘探三维地质构造建模技术探讨[J].西部探矿工程,2020,32(5):79-83.
WANG Yuyan. Discussion on 3D geological structure modeling technology for petroleum exploration[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(5): 79-83.
- [4] 毛凤军,姜虹,欧亚菲,等.尼日尔Termit盆地三维地质构造建模研究与应用[J].地学前缘,2018,25(2):62-71.
MAO Fengjun, JIANG Hong, OU Yafei, et al. 3D structural modeling and its application in the Termit Basin, Niger[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 62-71.
- [5] 管树巍,何登发.复杂构造建模的理论与技术架构[J].石油学报,2011,32(6):991-999.
GUAN Shuwei, HE Dengfa. Theories and technical frameworks of complex structural modeling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 991-999.
- [6] 邹起阳,闫振华,徐阳东.应用Petrel进行构造建模的研究[J].长江大学学报(自然科学版),8(2):62-64.
ZOU Qiyang, YAN Zhenhua, XU Yangdong. Structure modeling using PETREL software[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 8(2): 62-64.
- [7] 何紫兰,朱鹏飞,白云,等.复杂地质体三维实体建模方法[J].地质与勘探,2020,56(1):190-197.
HE Zilan, ZHU Pengfei, BAI Yun, et al. 3D solid modeling method for complex geological bodies[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 190-197.
- [8] 刘殊,任兴国,姚声贤,等.四川盆地上三叠统须家河组气藏分布与构造体系的关系[J].天然气工业,2018,38(1):1-14.
LIU Shu, REN Xingguo, YAO Shengxian, et al. Relationship between gas reservoir distribution and structural system of Upper Triassic Xujiahe Fm in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 1-14.
- [9] 雍自权,刘庆松,李倩.川西前陆盆地的发展演化、地层充填及其对油气成藏的意义[J].天然气工业,2008,28(2):26-29.
YONG Ziquan, LIU Qingsong, LI Qian. Evolution and sediment filling of Western Sichuan Foreland Basin and their significance of hydrocarbon accumulation[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 26-29.
- [10] 陈洪德,徐胜林,林良彪,等.龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及层序充填响应[J].沉积学报,2011,29(4):622-630.
CHEN Hongde, XU Shenglin, LIN Liangbiao, et al. Segmental uplift of Longmenshan orogen and sequence filling characteristics of Western Sichuan Foreland-like Basin, later Triassic[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 622-630.
- [11] 刘君龙,纪友亮,杨克明,等.川西须家河组前陆盆地构造层序及沉积充填响应特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(6):11-23.
LIU Junlong, JI Youliang, YANG Keming, et al. Tectono-stratigraphy and sedimentary infill characteristics of Xujiahe Formation in western Sichuan foreland basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(6): 11-23.
- [12] 陈竹新,贾东,魏国齐,等.川西前陆盆地中-新生代沉积迁移与构造转换[J].中国地质,2008,35(3):472-481.
CHEN Zhuxin, JIA Dong, WEI Guoqi, et al. Meso-Cenozoic sediment transport and tectonic transition in the western Sichuan foreland basin[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 472-481.
- [13] 罗启后.安县运动对四川盆地中西部上三叠统地层划分对比与油气勘探的意义[J].天然气工业,2011,31(6):21-27.
LUO Qihou. Significance of the Anxian Movement to the stratigraphic division and correlation of the Upper Triassic formations and their hydrocarbon exploration in the western-central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 21-27.
- [14] 于福生,王彦华,李晓剑,等.川西坳陷孝泉-丰谷构造带变形特征及成因机制模拟[J].地球科学与环境学报,2011,33(1):45-53.
YU Fusheng, WANG Yanhua, LI Xiaojian, et al. Deformation characteristics and genetic simulation of Xiaoquan-Fenggu structural belt in West Sichuan Depression[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2011, 33(1): 45-53.
- [15] 刘忠群,徐士林,刘君龙,等.四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J].天然气工业,2020,40(2):31-40.
LIU Zhongqun, XU Shilin, LIU Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 31-40.
- [16] 魏国齐,杨威,刘满仓,等.四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J].天然气工业,2019,39(6):1-12.
WEI Guoqi, YANG Wei, LIU Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of

- giant gas fields in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 1-12.
- [17] 张世华,田军,叶素娟,等.断层输导型天然气成藏模式的动态成藏过程——以川西坳陷新场构造带上三叠统须二段气藏为例[J].天然气工业,2019,39(7):49-56.
ZHANG Shihua, TIAN Jun, YE Sujuan, et al. Dynamic accumulation process of fault-translocation natural gas accumulation model: A case study on the gas reservoir of the second member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang structural zone of the Western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 49-56.
- [18] 马旭杰,周文,唐瑜,等.川西新场地区须家河组二段气藏天然裂缝形成期次的确定[J].天然气工业,2013,33(8):15-19.
MA Xujie, ZHOU Wen, TANG Yu, et al. Timing of natural fractures formed in the gas reservoirs of the 2nd member of Xujiahe Formation in the Xinchang area, western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 15-19.
- [19] 杨克明.四川盆地“新场运动”特征及其地质意义[J].石油实验地质,2014,36(4):391-397.
YANG Keming. Characteristics of Xinchang movement in Sichuan Basin and its geological significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 391-397.
- [20] 田军,张世华,叶素娟,等.川西坳陷新场构造带须二段气藏类型划分及成藏主控因素[J].成都理工大学学报(自然科学版),2017,44(6):659-667.
TIAN Jun, ZHANG Shihua, YE Sujuan, et al. Classification of gas accumulation types and main controlling factors of gas accumulation of the Xu-2 Member in Xinchang structural zone, western Sichuan Depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(6): 659-667.
- [21] 刘君龙,刘忠群,肖开华,等.四川盆地新场地区三叠系须家河组二段致密砂岩有利岩石相表征及油气地质意义[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1111-1121.
LIU Junlong, LIU Zhongqun, XIAO Kaihua, et al. Characterization of favorable lithofacies in tight sandstone reservoirs and its significance for gas exploration and exploitation: A case study of the 2nd Member of Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1111-1121.
- [22] SOUCHE L, LEPAGE F, ISKENOVA G. Volume based modeling—Automated construction of complex structural models[C]// Paper presented at the 75th EAGE conference and exhibition incorporating, SPE EUROPEC, London, UK, 2013.
- (编辑 顾丽媛)

(上接第291页)

- [14] 曾联波.低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M].北京:科学出版社,2008:5-32.
ZENG Lianbo. Formation and distribution of fractures in low permeability sandstone reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2008: 5-32.
- [15] 师调调,何生平.鄂尔多斯盆地低渗透储层微裂缝分布规律研究[J].科技创新与应用,2015(29):41-42.
SHI Diaodiao, HE Shengping. Study on microfracture distribution law of low permeability reservoir in Ordos Basin[J]. Technology Innovation and Application, 2015(29): 41-42.
- [16] 南珺祥,王素荣,姚卫华.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长6-8特低渗透储层微裂缝研究[J].岩性油气藏,2007,19(4):40-44.
NAN Junxiang, WANG Surong, YAO Weihua. Micro-fractures in extra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 40-44.
- [17] 徐波,孙卫,韩宗元.姬塬油田长4+5砂岩储层微裂缝与水驱油特征[J].西北大学学报,2008,38(6):971-976.
XU Bo, SUN Wei, HAN Zongyuan. Characteristics of micro-fracture and water-flooding in Chang 4+5 sandstones reservoir of Jiyuan Oilfield[J]. Journal of Northwest University, 2008, 38(6): 971-976.
- [18] 臧士宾,崔俊,郑永仙,等.柴达木盆地南翼山油田新近系油砂山组低渗微裂缝储集层特征及成因分析[J].古地理学报,2012,14(1):133-141.
ZANG Shibin, CUI Jun, ZHENG Yongxian, et al. Analysis of characteristics of low-permeable reservoir with micro-fracture and their origins of the Neogene Youshanshan Formation in Nanyishan Oilfield, Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 133-141.
- [19] 王瑞飞,陈明强,孙卫.特低渗透砂岩储层微裂缝特征及微裂缝参数的定量研究——以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J].矿物学报,2008,28(2):215-220.
WANG Ruifei, CHEN Mingqiang, SUN Wei. Quantitative research on the characteristics of and parameters for micro cracks in ultra-low permeability sandstone reservoirs——Taking Yan 25 and Zhuang 40 areas in the Ordos Basin for example[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 215-220.
- [20] 郝明强,刘先贵,胡永乐,等.微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J].石油学报,2007,28(5):93-98.
HAO Mingqiang, LIU Xiangui, HU Yongle, et al. Reservoir characteristics of micro-fractured ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 93-98.
- [21] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透油田储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
YANG Zhengming, ZHANG Yingzhi, HAO Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 64-67.
- (编辑 徐佩)