

碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征

——以塔河油田 S80 单元奥陶系油藏为例

吕心瑞,李红凯,魏荷花,司朝年,邬兴威,卜翠萍,康志江,孙建芳

(中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:碳酸盐岩缝洞型油藏受古地貌、构造及岩溶作用控制,储集体类型多样,主要以不同类型的大尺度溶洞、小尺度孔洞及多尺度裂缝为主,储集体成因机制不同,高度离散,传统连续性储层表征思路难以直接套用。以储集体识别和描述为基础,基于分类表征的思想对不同类型储集体分别进行刻画。以岩溶成因及野外露头为指导,综合地震定性预测与定量反演成果,对于风化壳成因、断控成因的大尺度溶洞分别采用序贯指示方法和基于目标的方法进行模拟。对于小尺度孔洞采用协同序贯指示模拟方法建模,对于多尺度裂缝则以地震信息为基础,采用人工解释、蚂蚁追踪与随机模拟相结合的方法进行表征。在分类表征基础上,根据岩溶成因规律构建分类储集体的融合原则,实现了分类模型的整合。结果表明:该方法能够有效表征 S80 单元缝洞型油藏的强非均质性特征,基于模型细化评价单元储量级别,设计新钻井位置,筛选有利目标区均取得较好效果,模型应用于油藏数值模拟,为指导剩余油挖潜与开发方案调整奠定地质基础。

关键词:离散建模;缝洞体;碳酸盐岩储层;奥陶系;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit

Lyu Xinrui, Li Hongkai, Wei Hehua, Si Chaonian, Wu Xingwei, Bu Cuiping, Kang Zhijiang, Sun Jianfang

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Formation of carbonate fractured-vuggy reservoirs is controlled by palaeogeomorphology, tectonic movement and karstification. The main storage spaces are large-scale caves, small-scale dissolved pores and multi-scale fractures with different geometry. Because of complicated genetic mechanisms and highly discrete, traditional continuum reservoir characterization methods are difficult to apply directly. Based on the recognition and description of fractured-vuggy reservoir, we use the classification characterization method to characterize various reservoirs. Guided by karst genetic mechanisms and outcrops studies, in combination with seismic qualitative forecast and quantitative inversion results, we simulate weathering karst caves and faults-controlled caves using sequential indicator and the object-based method respectively. We use the method of collaborative sequential indicator simulation to establish the distribution model of the small scale dissolution pore. Based on the seismic information, we establish the multi-scale discrete fracturing network using the artificial interpretation, ant tracking and random simulation methods. Based on karst genetic mechanisms, we construct fusion principle for different types of reservoirs, and thus effectively integrated different types of reservoirs. The results show that the idea of the classification and characterization method can effectively describe the strong heterogeneity of S80 unit. Based on the model, we can refine the reserve classification in different the reservoir pay sections, evaluate the new well design, identify the target area, and apply it to the numerical simulation of reservoirs. The method lays the geological foundation to guide discovery of remaining oil potential, and modification of development plan.

Key words: discrete modeling, fractured-vuggy reservoir body, carbonate reservoir, Ordovician, Tahe oilfield, Tarim Basin

收稿日期:2016-07-08;修订日期:2017-02-11。

第一作者简介:吕心瑞(1983—),男,高级工程师,油气田开发。E-mail:lvxr_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05014-002);中石化重大科技专项(ZDP17001)。

塔河油田位于阿克库勒凸起的西南部,是塔里木盆地油气勘探开发的重要领域,也是我国已投入开发储量和产量均最高的海相碳酸盐岩油藏,其主体区的主力产层集中于中-下奥陶统的碳酸盐岩储层^[1-2]。塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏经过多期构造运动和强烈的古岩溶作用,岩溶缝洞体的形态、尺度、规模和空间分布规律均存在很大差异,导致油藏储集体的空间展布、内部结构及储层非均质性表征难度大,常规油藏表征方法不能有效刻画不同类型储集体的特征^[3-9]。针对缝洞型油藏的特点,前期研究人员从储集体的测井识别、地震预测、岩溶成因、地质建模和动态反演等多角度开展了储集体表征研究,以期能够真实刻画储集体的分布特征与展布规律,取得了许多积极进展^[10-16]。但由于此类油藏不同储集体类型尺度差异大,采用统一方法很难有效表征其巨大的差异性,不能满足精细开发的需求。目前亟需研究不同类型储集体的宏观发育规律,明确其岩溶成因机制,采用多学科手段细化不同尺度储集体的表征方法,进一步明确不同类型缝洞体的空间分布规律与内部结构特征^[17-21]。

本文综合应用钻井、测井、地震和地质等多学科资料,以塔河油田 S80 单元奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏为研究对象,探索缝洞型油藏储集体分类表征方法。根据储集体尺度差异,分别采用不同的地球物理属性及模拟算法,力图有效表征不同类型储集体的形态展布、分布规律及属性特征,定量刻画此类油藏的强非均质特征,为油藏储量计算、新钻井效果评价、有利区筛选、剩余油研究及开发方案调整奠定地质基础。

1 单元地质特征

塔河油田 S80 单元位于六、七区西部,为该区的主体生产单元(图 1)。奥陶系储层属于风化壳与断控复合成因缝洞型碳酸盐岩油藏,不整合面之下 0~60 m 范围储集体主要为风化壳成因,分布较连续,中深部为断控洞穴及分支管道,分布较离散。单元构造整体呈北东高、南西低的特征,北东与南东为残丘高地,中北部为条带状洼地,西部为低幅残丘与洼地交替格局。主要发育两组断裂,一组为发育在单元东部的北东向的一级深大断裂,另一组为发育在单元西部北西向次级断裂。单元古地貌特征与现今构造格局基本一致,北部较南部区域剥蚀多,同时依据钻井、古地貌及地球物理识别特征确定单元中北部多条地表河由东北向西南汇集,为缝洞体的发育创造了水流条件。

综合钻井、测井、地震及生产动态等信息,采用“点-线-面-体”的流程进行储层识别、预测和描述,对缝洞储集体进行分类表征。单元内溶洞总体较发育,80%的井均钻遇溶洞,总发育段近 200 m。纵向上呈以下分布特征:不整合面以下 0~60 m 范围钻遇的溶洞占 55.3%,且南部较北部发育;60~130 m 范围溶洞占 39.5%,主要分布在单元东部;130 m 以下溶洞占 5.2%,主要分布在深大断裂附近。溶洞高度以小于 3 m 为主,中深部发育少数 10~15 m 高度的大尺度溶洞。根据钻井数据统计残丘斜坡上小型溶洞充填严重,深大断裂控制的溶洞充填程度较低。单元内小尺度孔洞的发育也具有明显的分段性,不整合面以下 0~60 m 范围内小型孔洞厚度较大,约占总体的 50% 以上,且整体南部较北部发育。

根据单元储集体发育特征,结合岩溶地质理论分析其主控因素为岩溶残丘和断裂作用,单元西部为低幅残丘和次级断裂控制区,中部为岩溶洼地和地表河控制区,东部为剥蚀残丘和深大断裂控制区。单元内储集体主要内部复合结构有 3 种:①局部暗河、浅层溶洞与小尺度孔洞复合体。主要发育在次级残丘和次级断裂控制区,充填程度中等,压裂改造后以溶蚀裂缝和孔隙相连,连通关系较好。初产以 50~100 t/d 为主,

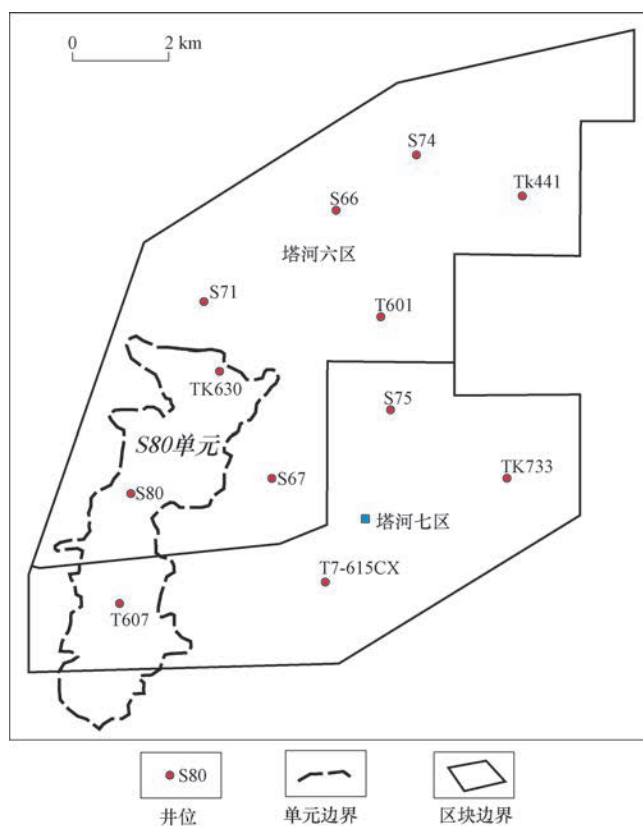


图1 塔河油田 S80 单元位置

Fig. 1 Location of S80 unit, Tahe oilfield

一般能获得较高的累产,后期注水、注气波及体积大,调整挖潜效果好。②断控洞穴与溶蚀孔洞复合结构。主要发育在残丘和深大断裂控制区,储集体以沿断裂发育的洞穴为主,主要以裂缝相连,连通关系一般。初产高,以100~200 t/d为主,累产中等。③溶蚀孔洞与裂缝复合体。主要发育在洼地+地表河控制区,溶蚀洞穴发育,发育少量裂缝和溶蚀孔,且充填严重,多数井为低产无效井。

2 构造精细表征

以精细井震标定为基础,优选本征值相干属性,充分考虑断裂的继承性,利用深部相干体约束断层精细解释,断层主要为北西和北东两组主干断层组成,连续性和伸展性清晰,解释结果保证了与深部断层的良好继承性。为了将地震时间域解释和预测成果转化为深度域数据,以地震处理渠道获取的速度做为背景,根据单井合成记录时深标定结果,S80单元采用6 100 m/s的速度建立储层平均速度模型,转换过程中利用井点地质分层对转换后的深度域层位进行验证和速度校正,提高速度模型精度,实现解释成果及地震数据体的时深转换,时深转换结果与抽稀井相比吻合度较高,能够满足油藏精细表征需求。综合现代岩溶纵向分带理论^[22]、致密段分布^[23]、储集体分布与生产动态特征,建立油藏纵向分层依据,将S80单元奥陶系储层划分为上、中、下3段,细化不同层段储集体发育特征的差别。

以 T_7^4 和 T_7^6 两个地震标识面为油藏顶、底,根据单元井点纵向分段结果,将储层整体划分为3段。利用地震构造解释断层切割、组合关系以及空间断面与构造层面表现的错断关系,精细调整各断层面,建立精细三维断层模型。考虑断裂北东向分布的特征,确定北东向为网格系统的主方向,调整层位与断层交切关系,建立精细构造模型。依据垂向不同层段储集体发育情况,设计平面网格为15 m×15 m,纵向网格在第一、第二层段为1 m,在第3层段为3 m,模型总网格数为 $2\ 680\times 10^4$ 个。

3 缝洞储集体分类表征与融合

由于井、震识别资料的尺度差异大,地震对缝洞体的识别能力在20 m左右,而井孔资料识别尺度在厘米甚至毫米级,难以直接匹配,井间储集体表征缺乏有效手段。针对不同级别、不同类型的缝洞储集体,分别采

用不同的地球物理属性及建模方法分类进行预测与建模,提高储集体的表征精度。

3.1 大尺度溶洞表征

S80单元大尺度溶洞主要为大尺度分支河道、与河道相关的厅堂、廊道及与断裂相关的断控洞穴等。分支河道在测井上解释类型为溶洞型,大部分有砂泥充填特征,顺河道地震反射特征为横向连续强反射,采用分频能量属性融合技术进行暗河预测。其他孤立状溶洞在地震剖面上呈强串珠反射特征,主要采用波阻抗反演和振幅变化率等属性进行预测。同时,溶洞主要受水流溶蚀作用形成,表层属于风化壳成因岩溶,缝洞体分布较为连续,中、下部溶洞主要受断裂和河道影响,主要发育断控溶洞和分支河道,分布相对离散。

对于地下分支河道,以井点钻遇的河道位置做为硬数据,结合河道描述成果,以地震分频能量预测属性作为井间暗河形状模拟约束条件,采用确定性建模方法建立分支河道储集体分布模型。河道建模结果与井点钻遇位置完全相符,形态与地震预测结果一致,同时符合地质人员对河道的描述特征;对于风化壳成因储集体,利用波阻抗反演和分频能量体建立井间溶洞发育融合体,采用地震融合体约束下的序贯指示方法进行表征(图2a)。对于断控成因溶洞储集体,其分布与大裂缝的分布密切相关,采用基于目标的方法进行模拟,以单井溶洞分布作为硬数据,以地震发育体和垂向发育概率作为断控溶洞建模软数据,以精细描述的形态规模作为建模约束参数(图2b)。

3.2 小尺度孔洞表征

小尺度孔洞受水流溶蚀作用形成,主要包括小尺度溶洞、溶蚀孔隙和溶蚀缝等。在塔河油田S80单元主要为测井解释小于50 mm的溶洞型储层、裂缝-孔洞型储层,地震响应呈弱反射或杂乱反射特征。通过岩心观察及测井解释,结合野外露头观测小尺度孔洞分布规律,确定该单元的小尺度孔洞主要呈“沿溶洞、顺断裂、沿层”的发育模式。

通过统计井点小尺度孔洞发育状况,建立孔洞发育概率体,基于常规波阻抗反演及分频能量属性构建孔洞发育地震约束体。考虑小尺度孔洞的地质发育模式,通过地质统计学随机模拟的方法实现小尺度孔洞模型的表征(图3)。小尺度孔洞分布规律与井点识别结果相符,井间分布规律与地震预测成果一致,同时符合相应的分布模式。

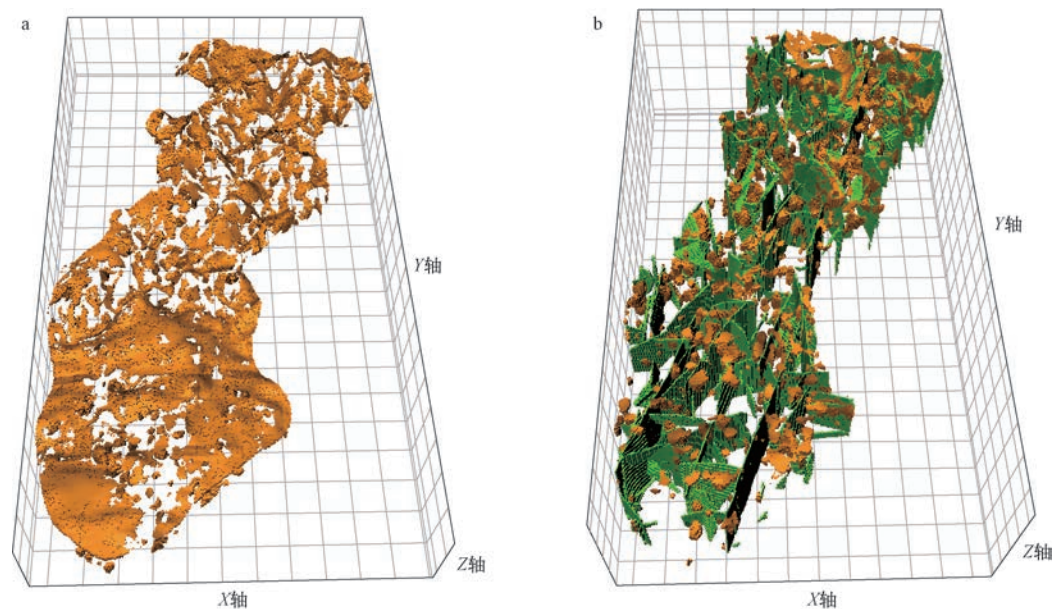


图 2 塔河油田 S80 单元大尺度溶洞分布
Fig. 2 Large scale cave distribution in S80 unit, Tahe oilfield
a. 风化壳成因溶洞; b. 断控成因溶洞

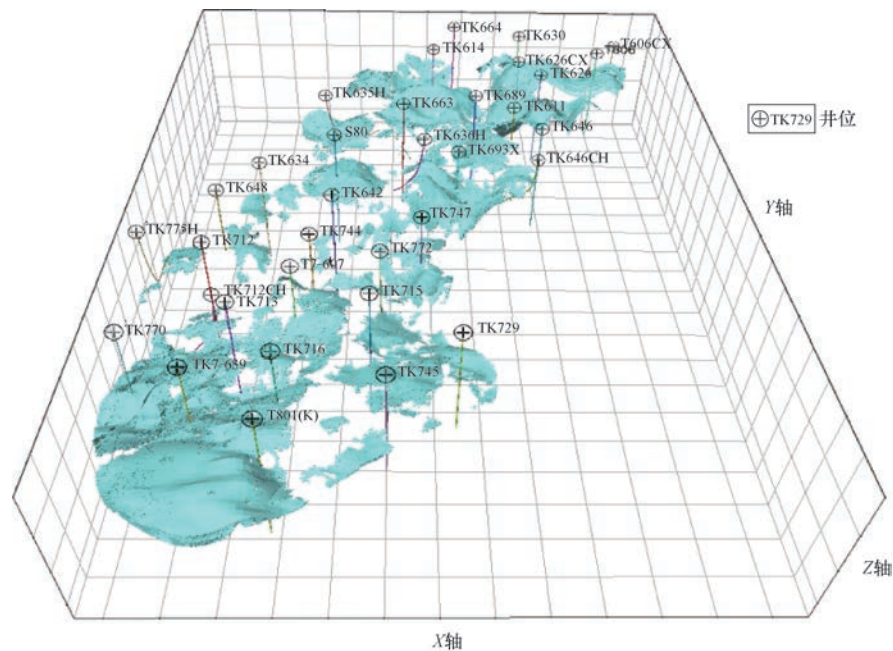


图 3 塔河油田 S80 单元小尺度孔洞分布
Fig. 3 Small scale solution pore distribution in S80 unit, Tahe oilfield

3.3 多尺度离散裂缝表征

根据裂缝的成因、充填特征及产状可以建立多种分类方案,不同的裂缝分类方法着眼点不同。在缝洞型油藏中,裂缝主要起导流作用,根据裂缝尺度及规模将其分为大尺度裂缝和小尺度裂缝,二者形成机

制和分布规律均不相同。大尺度裂缝是指横向延伸长度能达 20 m 以上,垂向也具有一定高度的裂缝,通常分布规律受应力分布和岩性等因素的控制,发育密度较低,但能提供较高的渗透作用,是流体流动的主要通道,主要通过地震手段识别;小尺度裂缝是指延伸距离短,高度小的裂缝,长度一般小于 20 m,

广泛存在于油藏中,发育密度较高,一般能形成有效的渗透作用,通常只能在成像测井或者岩心上观察识别。

大尺度裂缝的精确表征对油藏中水窜通道及连通特征的研究至关重要。在 S80 单元分析地震曲率属性,识别同向轴的形变,提高对挠曲和褶皱的识别效果,在曲率属性上提取蚂蚁体提升次级断裂识别效果。同时,将人工解释的断层作为确定性大尺度裂缝(图 4a),以断层产状的不确定性信息作为蚂蚁追踪的约束条件,自动拾取大尺度裂缝(图 4b),并将二者进行优化和筛选,最终采用确定性的方法建立大尺度离散裂缝分布模型。

对于小尺度裂缝则以单井成像测井解释的裂缝密度为样本,通过变尺度分析求取单井裂缝密度。同时,

小尺度裂缝发育密度与距断层的远近密切相关,距断层越近小尺度裂缝发育的密度越大,以其到断层的距离作为约束条件,建立小尺度裂缝密度属性模型。通过对比裂缝密度与储层之间的对应关系,建立小尺度裂缝相,在相控约束下采用示性点方法建立小尺度离散裂缝模型(图 4c),最终将不同尺度裂缝融合成为离散裂缝分布模型(图 4d)。裂缝模型反映出小尺度裂缝网络与大断裂有较好的匹配关系,与实际认识相符。

3.4 多尺度储集体融合

缝洞型油藏各类储集体之间存在各种共生或伴生关系,但从油藏表征的角度来说,每一个空间位置只能存在一种储集体类型。为了完整表征缝洞型油藏储集

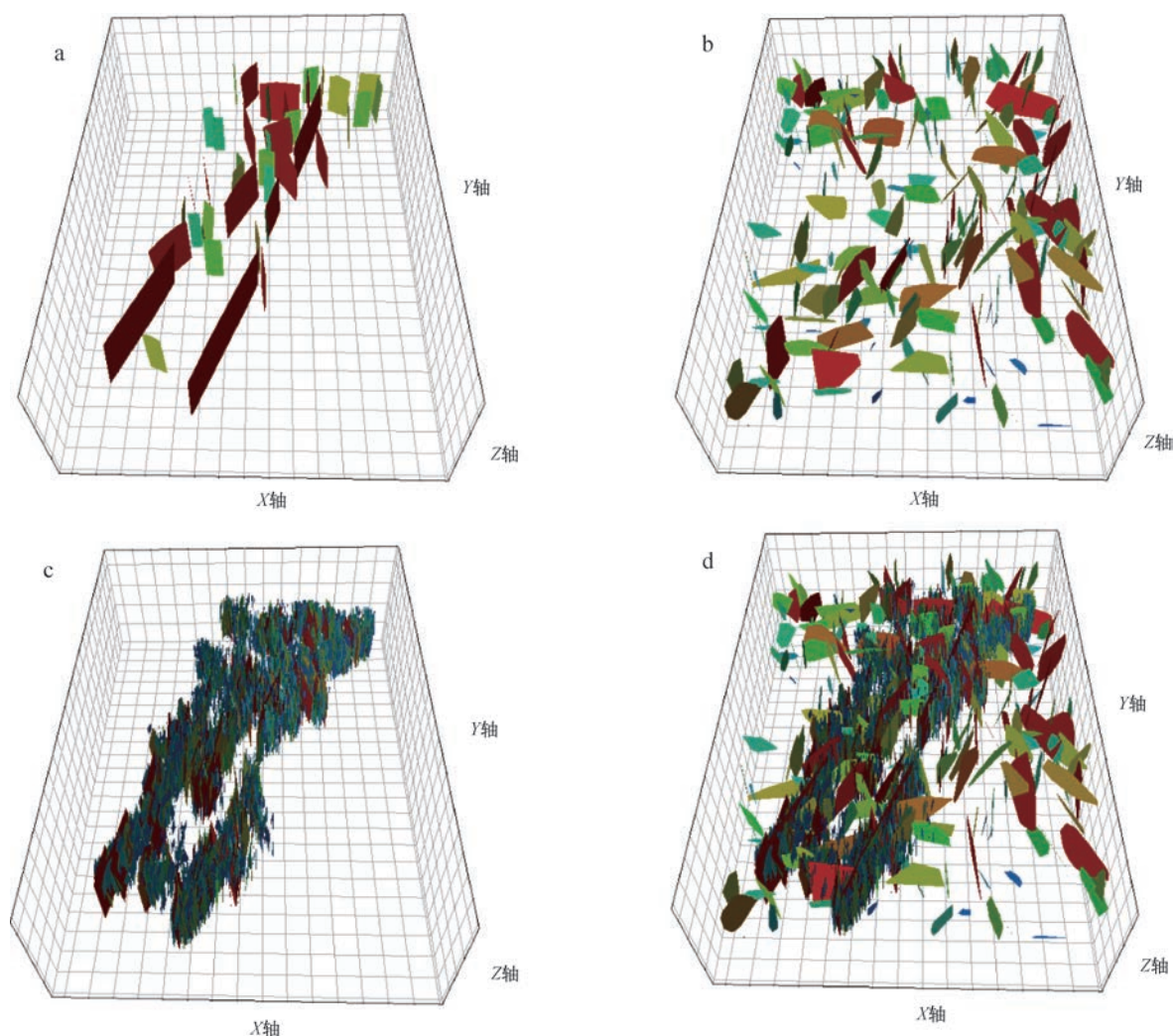


图4 塔河油田 S80 单元多尺度离散裂缝分布

Fig.4 Multi-scale discrete fractures distribution in S80 unit,Tahe oilfield

a. 断层;b. 蚂蚁追踪大裂缝;c. 小尺度裂缝;d. 多尺度裂缝融合

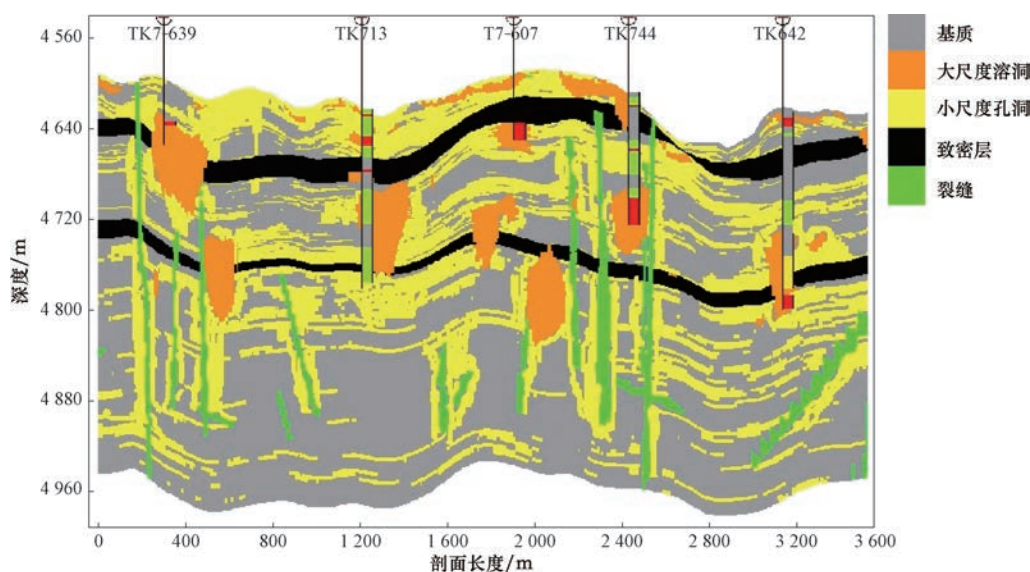


图5 塔河油田 S80 单元分类储集体融合剖面

Fig. 5 Profile of model combining different reservoirs in S80 unit, Tahe oilfield

体分布特征,需要对不同尺度储集体进行融合。在分析不同类型储集体岩溶成因的基础上,采用“大尺度溶洞—大尺度裂缝—小尺度孔洞—小尺度裂缝—基质”的融合原则,在遵循井点条件和缝洞模式的基础上,实现了储集体分布模型的融合(图5),融合模型剖面图显示融合结果与实际地质认识较为一致。

4 储集体属性参数表征

采用测井解释与标定赋值相结合的方法对井点属性参数进行表征。以孔隙度为例,对于曲线质量较好的溶洞、孔洞及裂缝发育段采用测井曲线解释获取单井孔隙度值。其中砂泥充填和角砾充填溶洞,利用研究区岩心分析数据回归,建立孔隙度计算模型,而未充填溶洞和小尺度孔洞则采用中子—密度交会或中子—声波交会进行解释。对于无曲线或曲线失真的溶洞发育段,采用与生产特征进行标定后进行赋值,标定的方法为建立单井累产数与溶洞孔隙度之间的关系,结合生产利用有曲线的井对无曲线的井进行标定。以此为基础,在储集体分布模型分类表征的基础上,分别采用随机模拟及等效的方法表征不同类型储集体的属性参数。

大尺度溶洞孔隙度模拟在溶洞分布模型的约束下,进行变差函数拟合后,采用序贯高斯随机模拟算法,表征其孔隙度分布,渗透率模型则采用孔渗关系进行计算获取。对于未充填溶洞的渗透率赋值方式采用

动态反演的方式获取其等效渗透率。对于小尺度孔洞孔隙度的表征,在小尺度孔洞离散分布模型的约束下,同样可使用序贯高斯模拟方法建立孔隙度模型,小尺度孔洞的渗透率参数也可以通过孔渗关系获取。此外,由于波阻抗数据是储层岩性、物性和含流体性质的综合响应,分析波阻抗数据与孔隙度的关系,发现二者之间具有一定的对应关系,波阻抗数据能够反映溶洞、孔洞发育段内的孔隙度空间分布趋势,可以利用其做为协同约束条件进行溶洞、孔洞孔隙度建模。建模结果既保证了井孔资料的垂相高分辨率,又保持了地震数据横向连续性好的特点,提高了孔隙度表征的可靠性。

基于离散裂缝网络分布模型,可通过成像、岩心资料统计,建立裂缝开度模型。基于立方定律计算裂缝等效渗透率模型,采用 Oda 等效参数计算的方法,建立裂缝的等效孔隙度模型。

油藏整体属性参数表征可以根据数值模拟概念模型的选择,将其等效为单重孔隙介质模型或双重孔隙介质模型。如图6所示为等效单重介质模型融合结果,可根据分布模型融合结果,将大尺度溶洞与小尺度孔洞的孔隙度直接分别赋值,将裂缝网络的孔隙度加在所过的网格上即可,渗透率采取同样的处理方法。如果等效为双重介质模型,则将溶洞与孔洞做为九重介质,将裂缝作为另一九重介质,则模型中存在双重孔隙度及双重渗透率,满足双重介质数值模拟的需求。

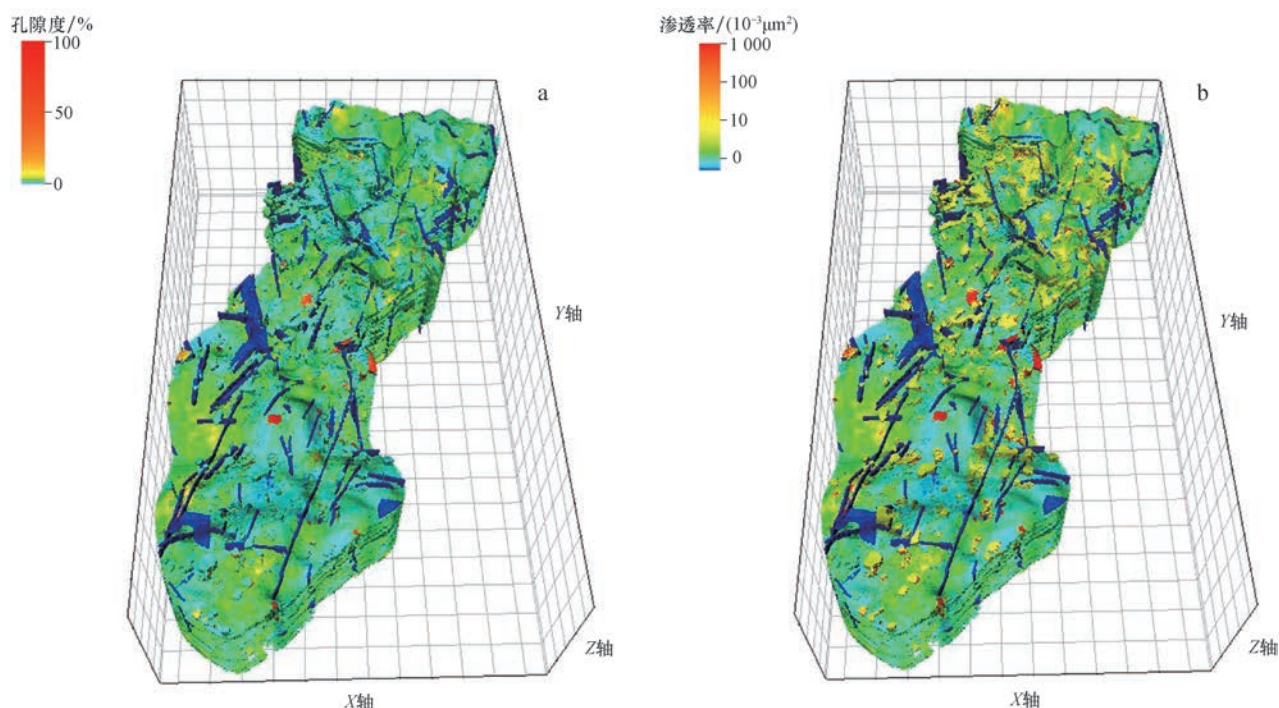


图6 塔河油田 S80 单元属性参数表征

Fig. 6 Reservoir property characterization in S80 unit, Tahe oilfield

a. 孔隙度模型; b. 渗透率模型

5 模型应用

5.1 储量评价

与常规容积法计算储量不同,基于地质模型可以对储量进行细化评价,采用网格积分法计算纵向上不同层段、平面上不同区域及不同储集体类型的储量大小。首先计算了 S80 单元不同孔隙度下限对应的地质储量,并绘制了储量值与孔隙度下限的关系曲线(图7)。按照储层孔隙度下限取 2% 的标准,对应的储量大小为 $2\,253.4 \times 10^4$ t。其中,纵向上第一储层段储量约占 39.4%,为 888.7×10^4 t;第二储层段储量

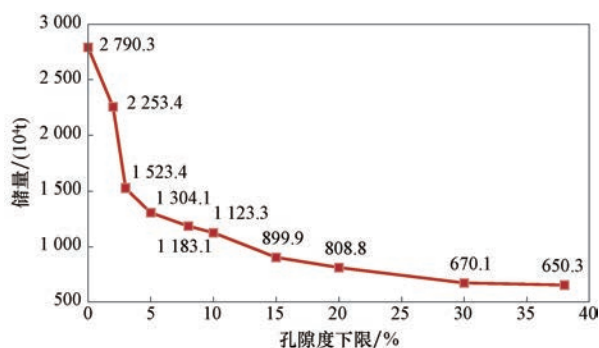


图7 储量计算值与孔隙度下限关系

Fig. 7 Relationship between reserves and porosity lower cut

约占 45.1%,为 $1\,016.1 \times 10^4$ t;第三储层段储量约占 9%,为 202.2×10^4 t。储量主要分布在大尺度溶洞储集体中,少部分存在于小尺度孔洞储集体中,裂缝主要起导流作用,占储量极少,与实际认识较为符合。平面上第一储层段储量分布较为连续,单元南部及东部储量丰度较高,第二储层段储量分布在 T607 井区及单元北部,第三储层段部分储集体处于油水界面以下,储量分布较为分散。

5.2 新钻井效果差异分析

在 S80 单元新钻井中,TK699 井初产油 49.6 t/d,当前平均日产 25.9 t,累产大于 2×10^4 t,综合含水 6.1%;TK6102X 井初产油 40.7 t/d,当前平均日产 11.9 t,累产近 1×10^4 t,综合含水 4.7%;TK781 井开井即高含水达 98.8%。3 口井均位于局部构造较高或相对较高位置,附近断裂均较发育,打井位置原始地震剖面上均呈“串珠状”反射特征, T_4^7 以下地震反射波下 0~40 ms 范围内平均振幅变化率均较大,邻井生产状况也较为近似,很难确定造成 3 口井开采效果差异的地质原因。

基于单元油藏表征结果定量分析新钻井的开采效果差异的原因主要为:①井控储量的差异造成了累产的不同。TK699 井整体控制储量为 25.5×10^4 t,其中连通部分为 17.8×10^4 t;TK6102X 井整体控制储量为

14.2 × 10⁴ t, 连通部分仅为 9.1 × 10⁴ t; TK781 井整体储量 11.6 × 10⁴ t, 连通部分为 8.9 × 10⁴ t。与 S80 单元典型高产井相比, 井周围储量明显要小。②井周围物性不同使得初产及平均日产量存在差异。TK699 井平均孔隙度为 3.76%, 标准差为 0.085, 孔隙度值离散程度较高; TK6102X 井平均孔隙度为 2.95%, 标准差 9.4, 离散程度高于 TK699 井; TK781 井平均孔隙度为 2.11%, 标准差为 0.034, 孔隙度值离散程度最低。③井周围断裂分布差异造成含水率的不同。TK699 井与 TK6102X 井周围断裂较发育, 但离最近的大尺度断裂均距近 200 m 距离; TK781 井周围断裂也较发育, 但离最近的大断裂仅 30 余 m。造成酸压后即高含水的主要原因, 是来自打在同一条断裂上 TK715 井的注入水。

5.3 有利区筛选

按照以上分析的差异原因, 结合构造特征及动态分析成果建立有利区筛选标准: ①构造地质条件。构造高或相对较高, 距开启大断裂 200 m 以上, 储集体预测规模较大; ②新钻井周围储层物性好、井控范围内储量大; ③连通的储集体规模较大, 尤其是经改造后单井范围内相互连通储集体储量大; ④未动用储量规模和连片性好。

按此条件分别在模型中进行储层级别划分、连通体分析以及单位面积含烃评价, 将图件进行叠合划分有利区。在第一储层段, 未控制有利区主要为南部及尖灭线附近的 TK744 井区, 单元北部未控制的有利区域较少; 在第二储层段, 未控制有利区为尖灭线附近的 S80 井区和 TK642 井区, 单元南部未控制有利区主要在 T607 井区。

6 结论

1) S80 单元油藏内储集体总体较发育, 浅层较深部储集体发育程度高。受残丘、断裂和地表河共同控制, 残丘斜坡和次级小断裂控制区溶洞和孔洞均较发育, 深大断裂控制部位大尺度溶洞发育, 洼地和地表河发育部位储集体不发育, 西部和中南部发育浅层溶洞和裂缝-孔洞储集体复合体。

2) 分别采用不同的地球物理属性及模拟算法对储集体进行分类表征, 能够较好地刻画不同尺度储集体的形态规模、发育特征及分布规律, 可以反映油藏不同储集体类型属性参数的巨大差异, 有效表征此类油藏极强的非均质特征。

3) 基于表征成果定量评价 S80 单元的储量构成,

明确了单元平面上和纵向上的储量分布规律, 并从地质的角度分析了 3 口新钻井效果差异原因, 主要为井控范围储量大小、连通储集体所占比例及断裂展布特征, 将控制因素进行定量表征, 筛选了纵向上不同层段未井控的有利区。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 曹建文, 金意志, 夏日元, 等. 塔河油田 4 区奥陶系风化壳古岩溶作用标志及控制因素分析[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2): 220-226.
Cao Jianwen, Jin Yizhi, Xia Riyuan, et al. Marks and controlling factors of the paleo-karstification in the Ordovician weathered crust at the 4th block of Tahe Oilfield[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(2): 220-226.
- [3] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 6-12.
Dou Zhilin. Development technology of carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 6-12.
- [4] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发——以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22-27.
Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development—taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [5] 刘群, 王世星, 顾汉明, 等. 碳酸盐岩缝洞体体积定量计算及其影响因素分析探索——以塔河油田主体区为例[J]. 石油物探, 2013, 52(2): 217-222.
Liu Qun, Wang Shixing, Gu Hanming, et al. Carbonate fracture-cave volume quantitative calculation and its influencing factors analysis: case study of the main area in Tahe Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(2): 217-222.
- [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): 101-105.
Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-105.
- [7] 金强, 田飞, 张宏方. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞单元综合评价[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 272-278.
Jin Qiang, Tian Fei, Zhang Hongfang. Comprehensive evaluation of fracture-cave units in karst carbonates in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 272-278.
- [8] 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.
- [9] 董瑞霞, 韩剑发, 张艳萍, 等. 塔中北坡鹰山组碳酸盐岩缝洞体量化描述技术及应用[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 314–317.
- Dong Ruixia, Han Jianfa, Zhang Yanping, et al. Application of fracture-cave quantitative technique for carbonate reservoir of Yingshan Formation of Lower Ordovician in north slope of Tazhong Area, Tarim Basin[J]. Xin Jiang Petroleum Geology, 2011, 32(3): 314–317.
- [10] 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): 1–7.
- Li Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(1): 1–7.
- [11] 张淑品, 陈福利, 金勇. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 175–180.
- Zhang Shupin, Chen Fuli, Jin Yong. 3D modeling of Ordovician fracture-vug carbonate reservoir, Tahe Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 175–180.
- [12] 刘学利, 汪彦. 塔河缝洞型油藏溶洞相多点统计学建模方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(6): 53–58.
- Liu Xueli, Wang Yan. Multi-point geostatistical approach to model karst facies of fracture-cavity reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(6): 53–58.
- [13] 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.
- [14] 鲁新便, 赵敏, 胡向阳, 等. 碳酸盐岩缝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.
- [15] 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. Modeling of carbonate fracture-vuggy reservoir: A case study of Ordovician reservoir of 4th block in Tahe Oilfield. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 59–66.
- [16] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 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.
- [17] 巫波, 刘遥, 荣元帅, 等. 蚂蚁追踪技术在缝洞型油藏裂缝预测中的应用[J]. 断块油田, 2014, 21(4): 453–457.
- Wu Bo, Liu Yao, Rong Yuanshuai, et al. Application of ant tracking technology in fracture prediction of fracture-vuggy reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(4): 453–457.
- [18] 李莹, 王怀洪, 巩固, 等. 塔河油田 S80 单元缝洞体分布规律及发育模式[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 30–32.
- Li Ying, Wang Huaihong, Gong Gu, et al. The fractured-vuggy structural model of S80 unit, Tahe oilfield. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 30–32.
- [19] 张军林, 田世澄, 郑多明. 塔北隆起西部缝洞型碳酸盐岩储层表征与评价[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 497–503.
- Zhang Junlin, Tian Shicheng, Zheng Duoming. Characterization and evaluation of fracture cavity type carbonate reservoir in the western part of Northern Tarim uplift[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 497–503.
- [20] 金强, 田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 15–21.
- Jin Qiang, Tianfei. Investigation of fracture—cave constructions of karsted carbonate reservoirs of Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 15–21.
- [21] 荣元帅, 胡文革, 蒲万芬, 等. 塔河油田碳酸盐岩油藏缝洞分割性研究[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 599–605.
- Rong Yuanshuai, Hu Wenge, Pu Wanfen, et al. Separation of fractures and cavities in carbonate reservoirs in the Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 599–605.
- [22] 夏日元, 邹胜章, 梁彬, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 119–138.
- Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Liang Bin, et al. Study on the patterns and forming mechanism of fracture-cavity systems in Ordovician carbonate, Tarim Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 119–138.
- [23] 李新华, 鲍典, 张娟. 塔河油田碳酸盐岩油藏致密段划分及意义[J]. 新疆地质, 2013, 31(1): 47–51.
- Li Xinhua, Bao Dian, Zhang Juan. Division and significance of dense limestone layers in Tahe Ordovician carbonate reservoir Oilfield[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(1): 47–51.

(编辑 张玉银)