

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

吕心瑞,孙建芳,邬兴威,魏荷花,肖凤英,马翠玉,宋传真

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:为表征缝洞型碳酸盐岩油藏古岩溶储集体成因类型多样、储层结构复杂的特点,综合考虑主控因素和成因关系将古岩溶划分为表层岩溶、断控岩溶和地下河系统3类。表层岩溶主要受风化淋滤作用形成,分布范围广,结构类型以小型溶洞、溶蚀孔、裂缝等小缝洞体为主;断控岩溶主要沿断裂带溶蚀扩大形成,结构类型以复杂断裂、大型断控溶洞、溶蚀孔缝为主;地下河系统主要受控于潜水面,经长期水流冲刷溶蚀形成,规模大,结构类型以岩溶管道、厅堂洞及沿河的溶蚀孔缝为主。针对不同成因岩溶分布规律特征,采用地震振幅谱梯度属性结合序贯指示模拟表征表层岩溶分布,基于波阻抗反演结合梯度结构张量刻画断控岩溶特征,利用分频能量属性结合基于目标的方法构建地下河系统模型,综合测井、地质、动态等多学科资料表征古岩溶连通、充填及物性特征,并通过融合建立三维地质模型。结果表明:该方法能够有效表征此类油藏储层缝洞结构复杂、非均质性强的特点。塔河油田 S67 单元结构类型及连通样式多样,表层岩溶缝洞体尺度较小,局部连片近似层状分布,厚度在 0~50 m,物性及连通性较好;断控岩溶缝洞体尺度较大,沿断裂带呈多种分布样式,物性差异大,顺断裂方向连通性好;地下河系统较为发育,存在上、下2层河道,充填严重,物性及连通性较差。基于融合模型落实并细化了单元储量构成,模型应用于油藏数值模拟及开发方案调整效果显著。

关键词:强非均质性;储层结构;表层岩溶;断控岩溶;地下河系统;缝洞型油藏

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin

Lyu Xinrui, Sun Jianfang, Wu Xingwei, Wei Hehua, Xiao Fengying, Ma Cuiyu, Song Chuanzhen

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

Abstract: For the purposes of precisely delineating the characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoirs marked by diverse genetic types and complicated internal structure, the paleo-karst is subdivided into three types in terms of their major control factors and origins, namely the epi-karst, fault-controlled karst and underground river system. Formed by weathering and leaching, the epi-karst has a wide range of distribution with a reservoir architecture composed of small seam-cavern bodies, predominantly small karst caves as well as dissolved pores and fractures. Fault-controlled karst dominated by complex faults and fractures, large fault controlled karst caves, dissolved pores and dissolved fractures, are formed by dissolution enlargement mainly along the fault zone. The large pipe system of the underground paleo-rivers mainly dominated by the fluctuation of water table, came into being by long-term current corrosion, and its reservoir architecture mainly makes up of karst pipes, chambers, and dissolved fractures and vugs along the pipe. In the light of distinct characteristics of karst in origin, amplitude spectrum gradient seismic attributes combined with sequential indication simulation were applied to characterize the epi-karst distribution. Features of fault-controlled karst were depicted based on impedance inversion and gradient structure tensor attributes. The model of ancient underground river was constructed by means of frequency-division attributes and object-based simulation method. Consequently, logging, geologic and dynamic data were integrated to delineate the connectivity, filling and physical properties of the paleo-karst;

收稿日期:2019-06-25;修订日期:2021-04-20。

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)。

in addition, a 3D model was constructed by a fusion of the above-mentioned karst types. The results show that this method can effectively characterize the complex internal structure and strong heterogeneity of such reservoirs. Unit S67 comes in quite complicated reservoir architectures and various connectivity styles. The epi-karst reservoir bodies are quite small in scale and locally connected almost in laminar distribution, with a thickness ranging from 0 to 50 m, better in physical property and connectivity. The fault-controlled karst reservoirs are large in scale in various distribution patterns along fault zones, with great discrepancy in physical property and good connectivity following the fault direction. The pipe system mainly developed in paleo-subterranean river, is marked by two layers of river course, with heavy filling, poor physical property and connectivity. Based on the fusion model, the unit reserve constitution was refined and ascertained. The model was applied to reservoir numerical simulation and development plan adjustment with remarkable effect.

Key words: strong heterogeneity, reservoir architecture, epi-karst, fault-controlled karst, underground paleo-river system, fractured-vuggy reservoir

塔河油田位于塔里木盆地沙雅隆起阿克库勒凸起中南部,奥陶系碳酸盐岩地层为古岩溶发育和海相缝洞型油气藏分布的主要层位,是世界范围内罕见的复杂油藏,缝洞发育不均一,非均质性极强,主要有效储集空间为古岩溶缝洞系统^[1-2]。由于经历多期构造、岩溶和充填改造作用,古岩溶缝洞体成因类型多样,尺度差异大,分布规律复杂,缝洞体形态、结构及物性的表征异常困难。随着此类油藏的开发,对缝洞系统刻画和表征技术的需求越来越大,逐渐成为开发地质领域研究的热点和难点^[3-4]。目前,众多学者在储层成因与分布^[5-11]、缝洞体识别与预测^[12-17]、缝洞结构与发育模式^[18-22]、分类建模与融合等方面^[23-25],开展了诸多研究工作,在储层宏观分布规律与缝洞体形态的刻画方面,取得很多积极进展。随着塔河油田老区开发程度的不断提高,区块面临整体含水上升快,稳产期短,老井产量递减大,措施调整困难等问题,亟需开展精细油藏描述研究,明确高含水期油藏剩余油分布特征,调整井网注采结构,进一步提高油田开发效果和油藏采收率^[26-33]。因此,在缝洞油藏储集体外部轮廓刻画的基础上,进一步研究储层缝洞结构特征,明确不同成因类型的岩溶缝洞分布规律与结构关系,定量表征油藏的强非均质性,为油藏数值模拟和剩余油分布研究奠定可靠地质基础,对此类油藏的高效开发具有重要意义。

根据岩溶形成主控因素的不同,从成因关系角度将古岩溶划分为表层岩溶、断控岩溶和地下河系统3类。基于不同成因类型岩溶特点,利用露头、钻、录、测井、地震、生产动态等多学科信息,采用地震振幅谱梯度属性结合序贯指示模拟表征表层岩溶分布;基于波阻抗反演结合梯度结构张量刻画断控岩溶特征;利用分频能量属性结合基于目标的方法构建地下河系统模型。在储集体外部形态刻画基础上,综合多学科资料描述古岩溶连通、充填及物性特征,定量表征缝洞结构

特点,并通过“先分类、再融合”的方法建立精细三维地质模型,取得了较好应用效果。

1 单元地质特征

如图1a所示,S67单元位于塔里木盆地塔河六、七区中南部,面积约12 km²,利用容积法初步评价地质储量 $2\ 170 \times 10^4$ t,完钻井39口,开井14口,单元日产油180 t,综合含水率41.6%,采出程度不足15%。该单元自1999年投入开发以来经历了试采、天然能量开采、注水、注气补充能量开采等时期,目前处于中高含水、低产开发阶段,面临进一步落实可开发储量和提高开发效果的难题。

单元整体位于二级古地貌岩溶缓坡带,岩溶发育层位为中奥陶统一间房组和中-下奥陶统的鹰山组,厚度260~420 m,岩性主要为灰色泥晶灰岩和含砂屑泥晶灰岩,是典型的缝洞型碳酸盐岩油藏。一间房组尖灭线横穿单元中部(图1b),奥陶系顶面构造呈北东高、南西低特点,中北部为剥蚀区,位于岩溶残丘高部位,南部处于岩溶缓坡低洼带。根据岩溶发育程度、致密段分布、测井曲线差异结合生产特征,纵向上储层分为上、中、下3段。单元内NE向高角度走滑断裂较发育,纵向切割深度大,平面延展长,剖面上具有花状断裂特征;其次为NW向断裂,多为次级小断裂;中部发育少量EW向断裂。受古地貌、断裂和潜水面等多重因素控制,缝洞体整体较为发育,储集空间表现为地下暗河、溶洞、溶蚀孔洞、不同尺度裂缝等多种类型,形态各异,缝洞结构复杂。通过综合识别和预测,按照成因将单元内古岩溶主要划分为3类,分别为受风化淋滤作用形成的表层岩溶缝洞体、沿断裂带溶蚀扩大形成的断控岩溶缝洞体及受潜水面波动溶蚀形成的地下河系统。

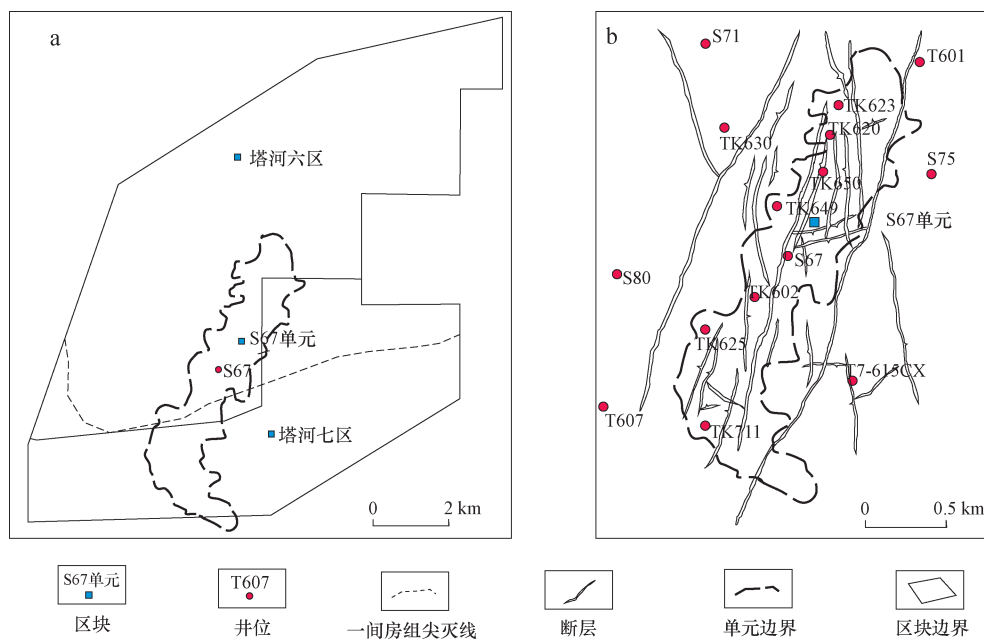


图1 塔里木盆地塔河 S67 单元边界区划(a)及 T_7^4 构造图(b)

Fig.1 Unit S67 boundary delineation (a) and T_7^4 structure map (b) in Tahe area, Tarim Basin

2 岩溶成因及结构类型

受构造、岩性和潜水面等多重控制因素影响,使得 S67 单元缝洞型油藏表层岩溶、断控岩溶和古地下河系统形成的主控因素、成因关系及结构类型各不相同。

表层岩溶主要受风化淋滤作用形成,地表水流多顺坡度流动,形成下切河道、溶蚀缝槽和落水洞等,水流遇可溶岩溶蚀形成顺层溶蚀孔、缝等,在断裂、构造缝和风化缝处会发育高角度的溶蚀裂缝^[18]。通过将岩心与测井曲线进行对比识别, S67 单元表层岩溶储集层涵盖洞穴型、裂缝-孔洞型和裂缝型等,缝洞体机械砂泥充填和垮塌角砾充填率达 79%,结构类型以小型溶洞、溶蚀孔和裂缝等小缝洞体为主,钻遇储集体厚度 85% 以上小于 3 m,多沿不整合面局部连片分布,储层整体厚度位于不整合面以下 0 ~ 50 m,钻遇油井初产 60 ~ 200 t/d,累产在 $(6 \sim 18) \times 10^4$ t,是良好的含油岩溶储层。

断控岩溶为地表水流沿长度几十米以上的大断裂形成垂向流动,遇到强可溶岩或断裂交叉处溶蚀扩大形成的驻水洞及在断裂和驻水洞周围形成的大量溶蚀孔洞和溶蚀裂缝^[20]。综合识别该单元断控岩溶主要结构类型以断控复杂断裂、大型溶洞和溶蚀孔缝为主,平面上溶洞主要呈离散状分布在断裂附近,以垮塌角砾充填为主,充填程度较低,断控岩溶规模整体较大,纵向沿断裂的储集体较发育。结合生产动态分析, S67

单元西南部位沿断裂的 TK711 - TK625 - TK602 井区,油井单井初产 130 ~ 180 t/d,单井累产油大于 15×10^4 t,单井生产特征类似,井间连通性较好;西北部 TK650 - TK620 井区发育北东向断控溶洞,单井初产 70 ~ 90 t/d,单井累产 $(5 \sim 7) \times 10^4$ t,为较小的断控岩溶缝洞体,井间连通性较好;TK649 - TK623 井区表现为孤立溶洞特征,洞穴较小,单井初期产量 40 ~ 70 t/d,且初产含水,单井累产油 $(1 \sim 2) \times 10^4$ t,为定容生产,含封存水,属于连通程度较低溶洞;此外,单元中、南部发育受断层控制的少量孤立溶洞。

地下河系统由水流汇聚长期冲刷溶蚀形成,受控于潜水面波动,可发育多层岩溶河道,整体规模大,类型多样,结构复杂,存在大量的机械沉积物和垮塌角砾充填,为塔河油田重要的储集空间^[11,18]。综合识别 S67 单元地下河系统主要结构类型以岩溶河道、厅堂洞及沿河道的溶蚀孔、缝为主,在不整合面 300 m 以内,主要发育 2 层地下河道,浅层河道位于不整合面以下 0 ~ 90 m,深层河道位置在不整合面以下 160 ~ 240 m,起伏均与石炭系巴楚组顶部构造具有较好一致性,河道高度 5 ~ 30 m,发育方向均自东北向西南延展,结合古地貌与水系特征分析,河道系统入水口位于 TK610 井以南位置,出水口位于 TK743 附近。岩心观察结合测井解释分析东部浅层分支河道充填程度高,部分充填角砾和方解石,大多充填砂泥,且具有一定韵律性(图 2)。浅层河道充填程度高于深层河道,以全充填和部分充填为主,且南部构造低部位充填程度更

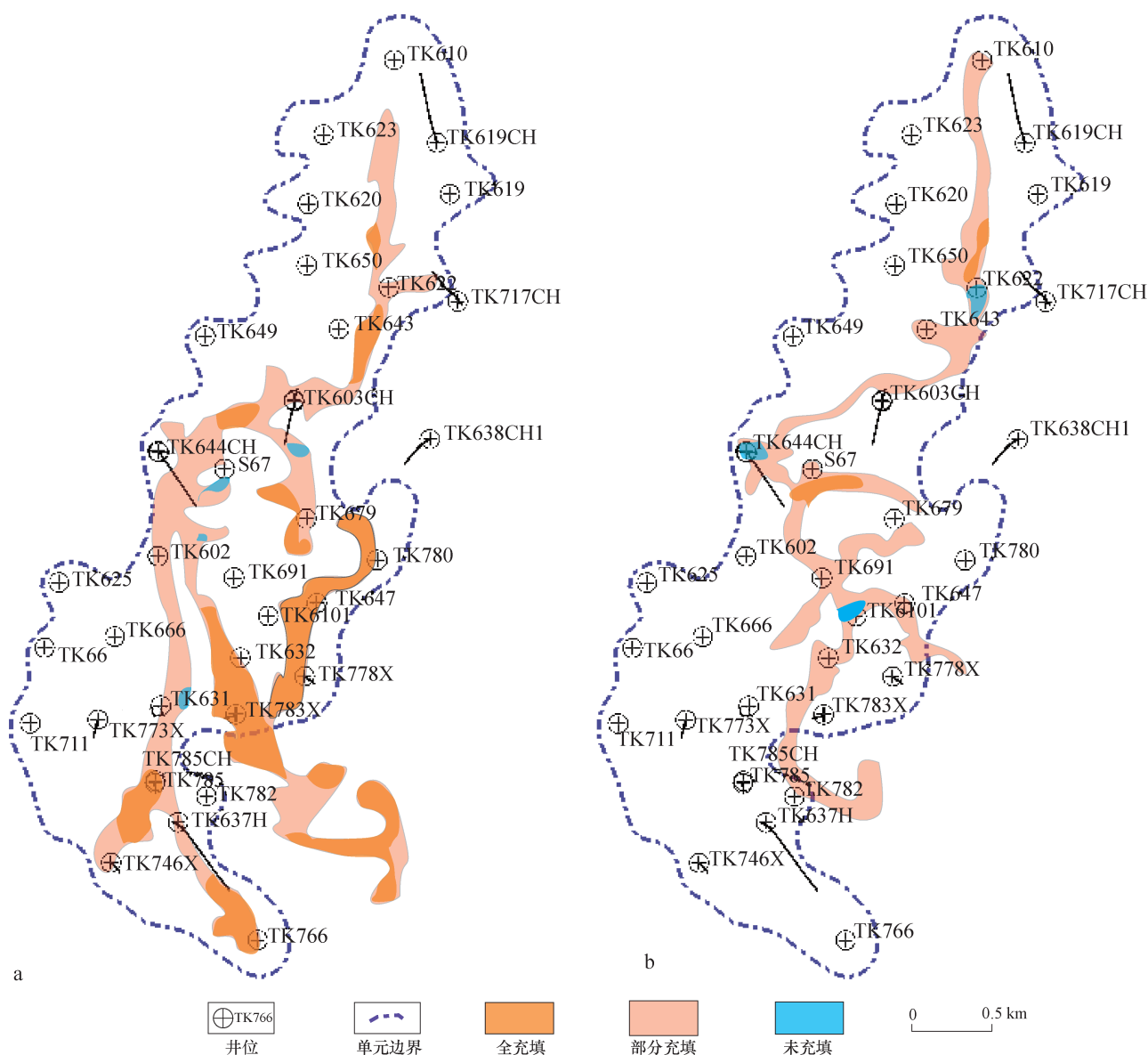


图2 塔里木盆地塔河 S67 单元河道系统充填程度平面图

Fig. 2 Plane map of underground river filling degree in Unit S67 of Tahe area, Tarim Basin

a. 浅层河道; b. 深层河道

高;深层河道以部分充填和未充填为主,仅在局部地区存在全充填特征。

3 不同成因岩溶缝洞体表征

3.1 表层岩溶缝洞体

S67 单元表层岩溶缝洞体测井曲线呈现深、浅电阻率小于 $400 \Omega \cdot \text{m}$, 多为正差异, 自然伽马比基岩段略高, 声波时差和中子增大, 密度降低等特征, 储层以裂缝-孔洞型和裂缝型为主。储集体类型、大小、分布规律的不同, 导致其在地震剖面响应特征的差异, 通过模型正演结合实钻统计确定表层小尺度缝洞体的主要

地震响应呈“弱反射”特征, 缝洞发育程度低于“强串珠”型储层^[13]。

根据表层岩溶缝洞体的发育特征, 优选地震振幅谱梯度属性预测表层小尺度缝洞体, 该属性是指在地震资料有效频带内地震反射波振幅随频率的变化率, 结合了地震资料不同频率和振幅的变化特征, 消除了岩石骨架对地震响应的影响, 能更加直观揭示储层储集性能的平面分布和横向变化特征^[14,17]。利用振幅谱梯度预测的表层小尺度缝洞体与实钻井识别结果符合率达到 80% 以上。

单元表层岩溶缝洞体分布主要受古残丘高点和斜坡控制, 存在 4 个小缝洞体集中发育区, 也是高产井集

中区。在井、震识别和预测的基础上,结合表层岩溶分布规律,采用确定性方法建立少量高度3 m以上的大尺度溶洞模型;人工解释结合蚂蚁追踪建立大尺度裂缝模型;3 m以下的小型溶洞、溶蚀孔、小裂缝等均等效为小缝洞体,统计不同类型的小缝洞体在垂向上的发育深度,分类建立小缝洞体在垂向上的发育概率体,以井点硬数据为基础,在振幅谱梯度属性和垂向发育概率体的协同约束下,利用序贯指示模拟建立表层小缝洞体分布模型;并以分布模型为基础,采用序贯高斯模拟方法建立表层岩溶物性模型。图3为融合后的表层岩溶地质模型,定量表征了表层岩溶缝洞体和物性参数分布特征。图3a所示表层岩溶厚度最大48.6 m,储集体类型主要为小缝洞体,横向连续性较好,仅存少量零散的大尺度溶洞及裂缝;图3b所示孔隙度的分布特征,局部存在孔隙度高的区域,整体物性较好,差异较大,最大30%,平均3.7%,溶洞及岩溶残丘处的孔隙度相对较高,表层岩溶连通性较好,模拟结果与实际认识相符。

3.2 断控岩溶缝洞体

断裂的存在增加了水与岩石的接触面积,使溶蚀作用增强,早期形成的溶蚀孔洞可进一步扩大形成溶洞,同时可以形成新的溶蚀孔洞,裂缝本身溶蚀扩大也可成为有利储集空间,断裂相交处、相互平行破裂的叠接处是裂缝、溶洞的有利发育区^[8-9]。S67单元受多期构造作用形成沿断裂发育的脆性灰岩破碎带,由于水流沿断裂的下渗或上涌溶蚀形成不同空间结构的缝洞系统,测井解释结合地震剖面识别,缝洞体主要包括

在地震剖面上呈“强串珠”反射特征的大尺度断控溶洞和呈“杂乱”反射的小尺度溶蚀孔、溶蚀缝。

根据断控岩溶发育特点,优选地震梯度结构张量属性刻画S67单元的断控岩溶外部轮廓,该属性与相干体相比,运算前增加了平滑处理,消除了弱差异背景,凸显主要差异,能够较好反映断控岩溶杂乱异常,有效刻画其纵向厚度和横向宽度。以断控岩溶结构和发育模式为指导,地震结构张量属性截断与人工修正相结合确定外部轮廓模型,反映了受断裂控制形成的岩溶发育范围。对于在地震剖面上呈“强串珠”反射特征的大尺度断控溶洞,采用融合波阻抗反演和分频能量属性,优选二者均反映大尺度缝洞体区域作为地震协同约束属性,采用基于目标的方法建立断控溶洞分布模型;对于在地震剖面上呈弱反射特征的小尺度断控溶蚀孔洞、缝,以梯度结构张量属性结合断裂、溶洞分布模型作为约束条件,随机模拟建立小尺度溶蚀孔、缝模型;在缝洞体分布模型基础上,采用序贯高斯模拟方法建立断控岩溶物性模型^[23]。图4为断控岩溶储集体三维地质模型,定量表征了断控岩溶形状轮廓、缝洞体及物性参数分布特征。图4a为断控岩溶形状轮廓,岩溶发育位置在不整合面以下0~240 m,也反映了沿断裂分布的缝洞体发育范围各异,宽度多位于90 m以内;图4b所示断控溶洞发育程度不同,多沿断裂分布,尺度较大且相对离散,直接或通过溶蚀孔、缝与断裂连通;图4c所示断控溶洞孔隙度相对较好,位于0~40%,平均值5.2%,呈现出断裂尺度越大,溶洞规模越大、物性越好的特征。

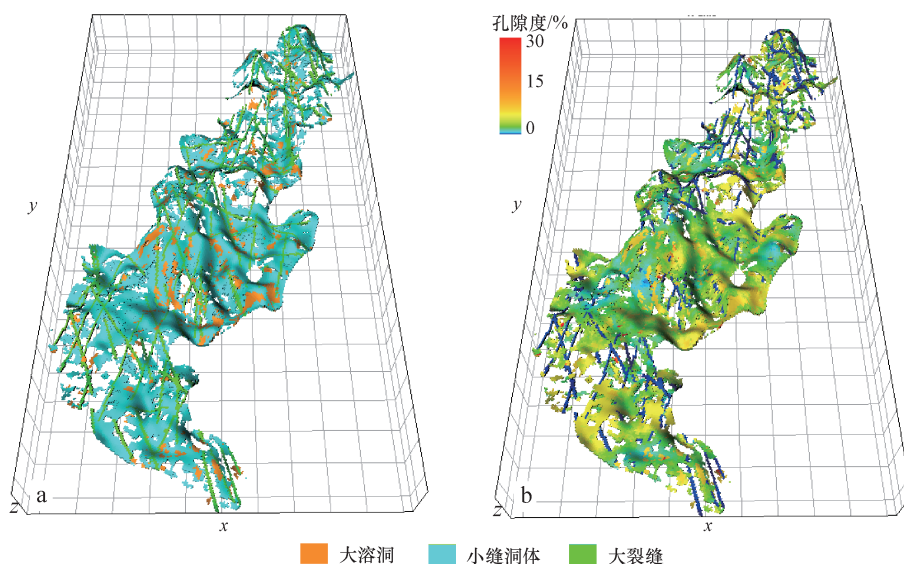


图3 塔里木盆地塔河S67单元表层岩溶储集体三维地质模型

Fig. 3 3D geological model of epi-karst reservoir in Unit S67 of Tahe area, Tarim Basin

a. 缝洞体分布模型; b. 孔隙度模型

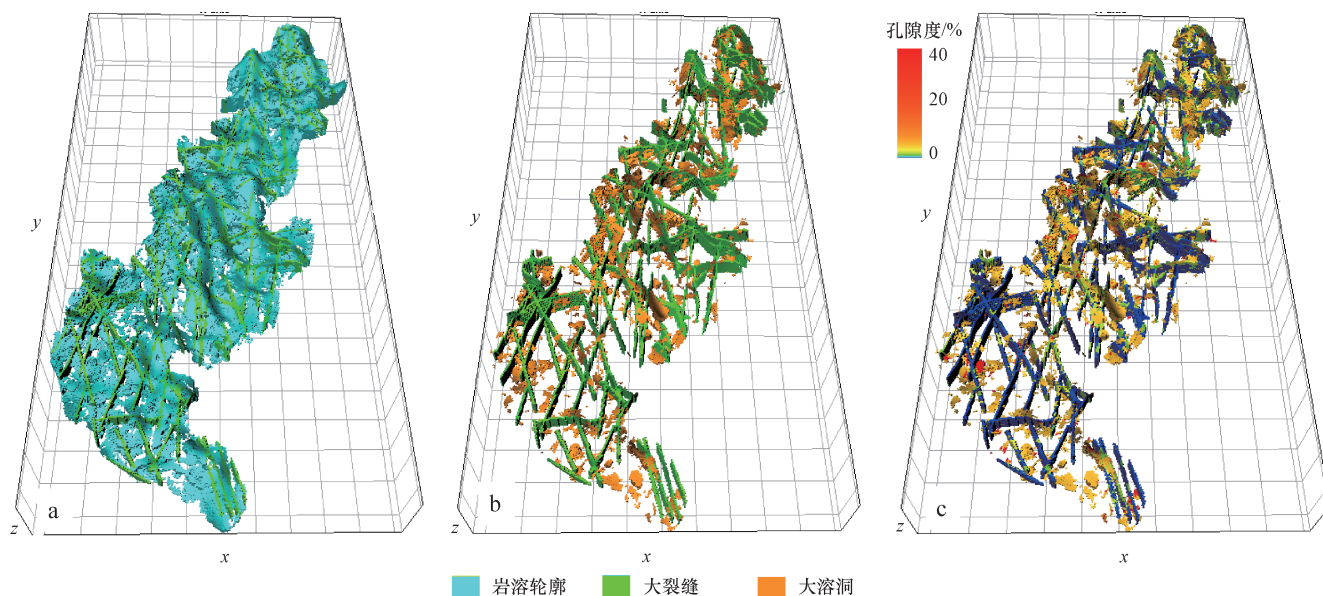


图4 塔里木盆地塔河 S67 单元断控岩溶储集体三维地质模型

Fig. 4 3D geological model of fault-controlled karst in Unit S67 of Tahe area, Tarim Basin

a. 断控岩溶轮廓; b. 断控溶洞储集体; c. 断控岩溶孔隙度模型

3.3 地下河系统

地下河系统是 S67 单元重要的岩溶类型,河道在测井上表现为高 GR 跳跃,测井解释储层类型为溶洞型,部分有砂泥充填特征,顺河道的地震反射特征为横向连续强反射。结合暗河分布特征,利用分频能量属性刻画地下河系统,分频处理是提高深层地震资料的有效手段,其本质是不同尺度的地质目标对地震信号的不同频率成分敏感程度不同。该技术是利用短时窗离散傅里叶变换或基于 Z 变换的最大熵谱方法,将地震数据变换到频率域^[16]。

通过正演模拟研究发现,河道宽窄、位置的不同会造成分频能量不同,宽河道低频能量强,窄河道高频能量强,河道中部低频能量强,边部高频能量强。因此,分别提取 S67 单元不同频带能量沿层属性平面图,其反映了该单元不同位置、厚度河道的形态,20 ~ 40 Hz 分频能量属性反映河道较宽和较厚部位,整体上河道展布较连续,50 ~ 70 Hz 分频能量属性反映河道较窄和较薄部位,通过属性平面统计,结合井点信息分别赋予不同分频能量属性权重系数,实现多频带能量属性融合,能够较完整的展现河道的空间展布,如图 5a 所示为该单元浅层河道预测结果,整体古河道系统展布较为清晰,但与实钻井相比河道预测规模偏大,同时地震异常体较难反映出古暗河系统的结构特征。

综合岩心、测井、地震、生产动态等多学科资料,在暗河描述成果与地震预测属性双重约束下,采用基于

目标的方法,井震结合建立地下河系统三维分布模型,实现了河道几何形态和属性特征的空间定量表征。建模过程中利用水平井钻遇河道宽度和直井钻遇河道的厚度对地震预测结果进行校正,结合岩溶成因及结构类型的研究,对地下河系统进行结构识别、划分与表征,实际地下河系统建模结果与井点钻遇河道系统相符,地下河形态与地震预测结果一致,同时符合岩溶地质对地下河特征的认识,河道宽度、厚度均为真实河道描述特征,消除了地震雕刻视体积偏大的影响,有效表征了地下河系统的结构特征。如图 5b 所示为 S67 单元浅层河道系统建模结果,较好反映了地下河系统几何形态和复杂结构特征,模型共有 1 条主河道和 3 条分支河道,地下河系统入水口、出水口分别位于单元北部和南部,河道分叉或转弯处发育 2 个规模较大的厅堂洞,受断裂影响主河道局部区域会形成廊道。两层暗河整体孔隙度值范围为 0 ~ 36.7%,平均值 4.5%,呈现较强非均质性。

4 模型融合与应用

4.1 不同成因缝洞体模型融合

在分别对不同成因的岩溶缝洞体进行建模的基础上,将分类缝洞体模型进行融合,融合内容复杂多样,具体包括:不同成因岩溶缝洞体间的融合;表层岩溶中大溶洞、小缝洞体和大裂缝的融合;断控岩溶中岩溶轮廓、大溶洞和大裂缝的融合;地下河系统中河道不同结

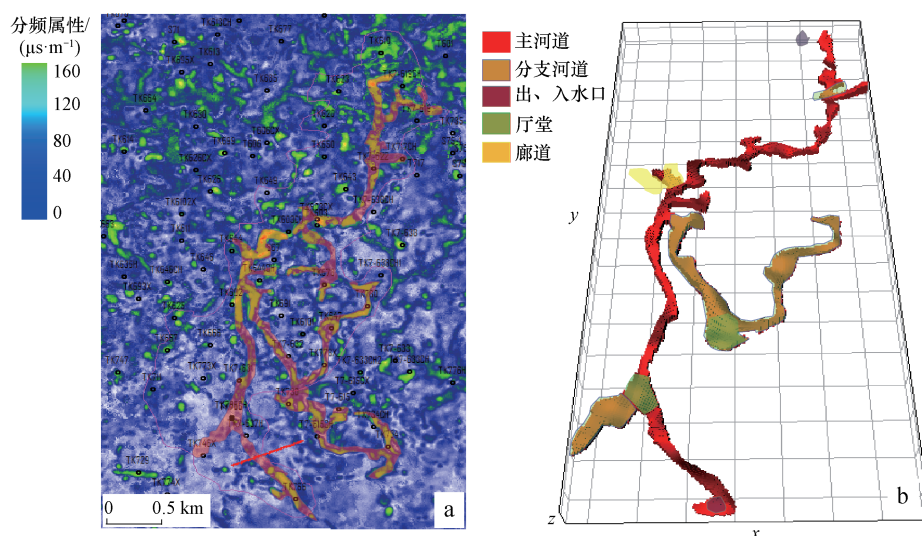


图5 塔里木盆地塔河 S67 单元浅层河道系统表征结果

Fig. 5 Characterization of shallow river system in Unit S67 of Tahe area, Tarim Basin

a. 分频能量预测结果; b. 地质模型

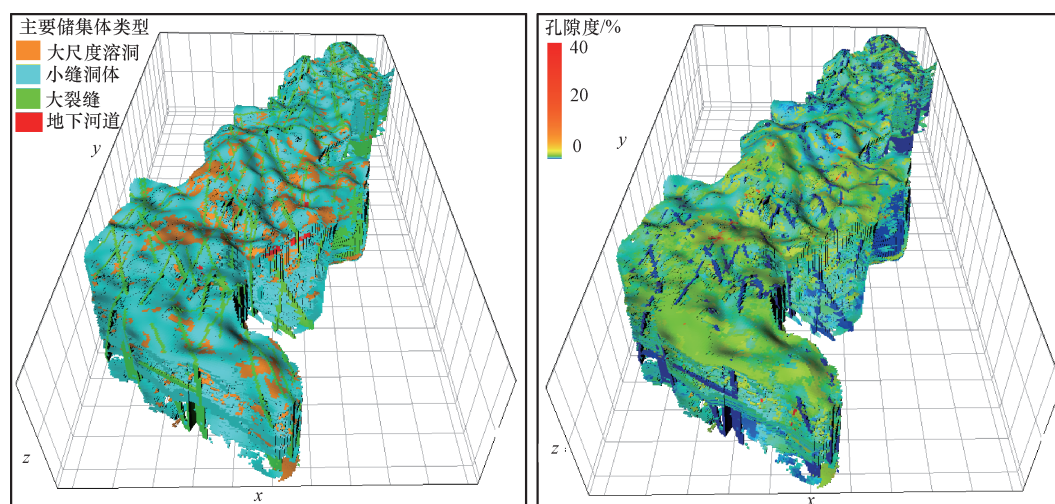


图6 塔里木盆地塔河 S67 单元油藏融合模型

Fig. 6 Fusion model of reservoirs in Unit S67 of Tahe area, Tarim Basin

a. 不同类型缝洞体模型融合; b. 孔隙度融合模型

构的融合;属性参数模型的融合等。因此,融合过程综合考虑岩溶成因和缝洞体发育规律,确定分类储集体模型的融合原则,该单元表层岩溶、断控岩溶和地下河系统有成因上的相关性,在空间上也存在一定的重叠,考虑三者分布规律、主控因素及成因次序上的差异,确定宏观岩溶背景的融合原则为“古地下河系统—断控岩溶—表层岩溶”;根据缝洞体形成规律的不同确定表层岩溶缝洞体的融合顺序为“大型溶洞—大裂缝—小缝洞体”;断控岩溶缝洞体中岩溶轮廓反映了各种缝洞体的综合边界范围,轮廓内含有大溶洞、大裂缝、小尺度缝洞体等,因此融合规律确定为“大溶洞—大裂缝—岩溶轮廓”;古地下河系统则根据浅层河和深层河的空

间位置及发育期次确定融合规律,该单元2层地下河发育在不同期次,空间位置上并无重叠之处;属性参数模型的融合采用参考文献[23]的方法。

图6为S67单元油藏模型融合结果,图6a为缝洞体模型融合结果,图6b为孔隙度模型融合结果。融合模型较好反映了油藏储集体分布及复杂结构特征,整体发育表层岩溶、断控岩溶和地下河系统3种不同成因的岩溶类型。表层岩溶主要结构类型为大尺度溶洞、裂缝和小缝洞体,连续性较好,断控岩溶结构类型主要为大尺度断控溶洞、断裂和溶蚀孔、洞、缝,纵向连通较好,地下河系统包含上、下2期河道,结构复杂,由多个主河道、分支河道、出—入水口、厅堂、廊道等结构

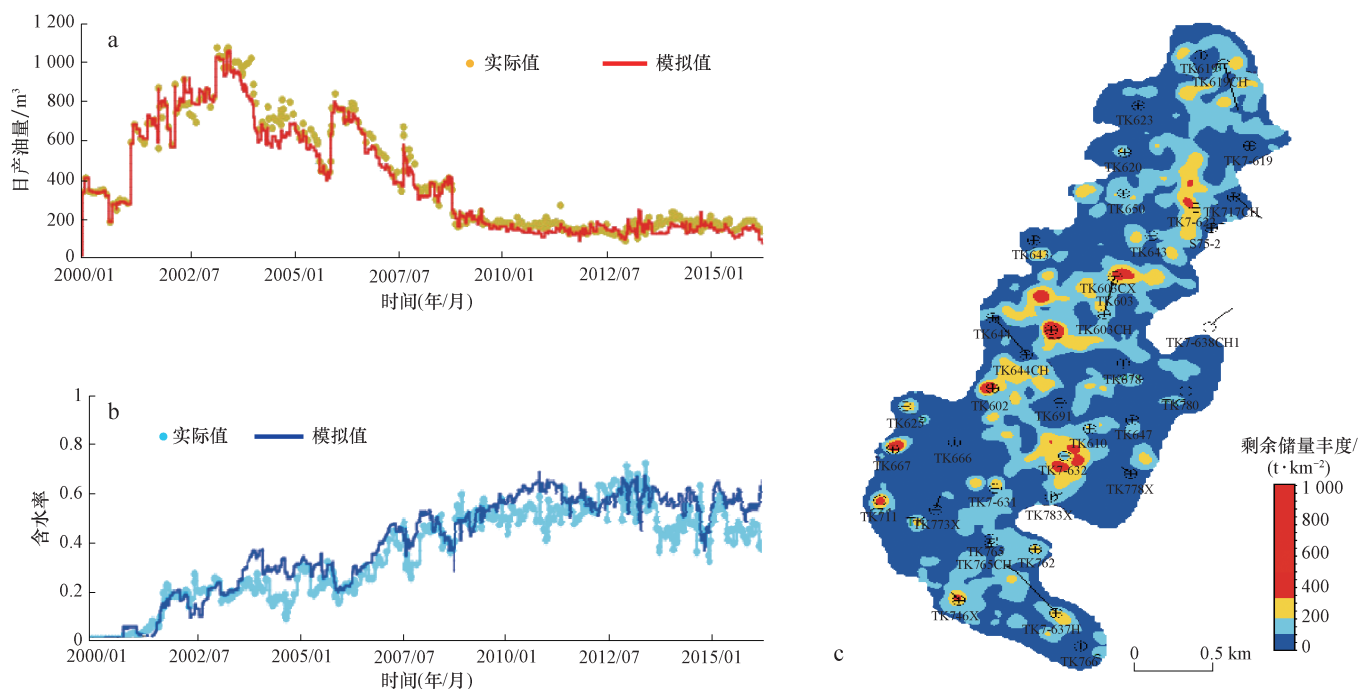


图7 塔里木盆地塔河 S67 单元数值模拟结果

Fig. 7 Results of reservoir numerical simulation in Unit S67 of Tahe area, Tarim Basin

a. 日产油量拟合曲线; b. 含水拟合曲线; c. 剩余储量丰度分布

类型组成。油藏整体孔隙度分布范围在 0 ~ 40%, 不同类型缝洞体物性差异较大, 大尺度溶洞孔隙度分布范围在 2.1% ~ 40.0%, 小尺度缝洞体孔隙度在 1.5% ~ 33%, 大尺度裂缝渗透率高达 $350 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。

4.2 模型应用

基于模型计算该单元缝洞型油藏储量为 $1494 \times 10^4 \text{ t}$ 。表层岩溶缝洞体储量为 $589.6 \times 10^4 \text{ t}$, 其中大尺度溶洞占 34.6%, 大尺度裂缝占 2.8%, 小缝洞体占 62.6%; 断控岩溶缝洞体储量为 $744.4 \times 10^4 \text{ t}$, 其中大尺度溶洞占 63.8%, 大尺度裂缝占 3.5%, 其它缝洞体占 32.7%; 古地下河系统储量为 $160 \times 10^4 \text{ t}$ 。储量分类评价结果为开发技术政策调整奠定了可靠物质基础。

以建立的精细地质模型为基础, 采用“平面分区, 纵向分段, 缝洞体分类”的策略进行网格粗化。平面上, 井周围 100 m 范围内采用 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的网格, 100 m 范围之外采用 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的网格进行划分; 纵向上, 表层采用 1.2 m 的网格, 中部采用 3 m 的网格, 深部采用 5 m 的网格进行划分; 缝洞体方面, 在 8 个大尺度溶洞和 13 条裂缝周围进行了局部的加密。粗化模型较好地保留了地质模型非均质性特征, 同时能够满足油藏数值模拟计算能力的要求。图 7 为 S67 单元数值模拟结果, 其中, 图 7a, b 分别为数值模拟日产油量和含水率的拟合曲线, 基于模型计算结果与实际生产拟合

较好, 模拟较好地体现了不同缝洞体的原始储量分布状况及在开发过程中的储量动用状况, 图 7c 为油藏剩余油丰度分布平面图。

模拟结果表明: 剩余储量主要分布在溶洞中, 其中大尺度缝洞体和地下河道系统占 67.7%, 小尺度缝洞体占 32.3%, 剩余油类型主要以洞顶油、高导流通道屏蔽剩余油和井间未井控剩余油为主, 裂缝是油水流动的主要通道, 底水沿大裂缝窜进明显, 油井见水时间与裂缝分布密切相关, 也是产生屏蔽剩余油的主要原因。剩余油分布结果指导了开发方案的调整, 制定了侧钻、上返酸压、恢复注气、改善注水等措施, 单元开发效果显著改善, 单元日产油增加约 80 t, 含水率明显下降, 有效减缓了单元产量的递减。

5 结论

1) 综合考虑主控因素、成因关系和结构类型将缝洞型碳酸盐岩油藏古岩溶储层划分为表层岩溶、断控岩溶和地下河系统 3 类。表层岩溶结构类型以小型溶洞、溶蚀孔、裂缝等小缝洞体为主, 断控岩溶结构类型以大型溶洞、复杂断裂、溶蚀孔缝为主; 地下河系统结构类型以岩溶河道、大型厅堂洞及沿河道的溶蚀孔、缝为主。

2) 针对不同成因岩溶发育特点, 采用地震振幅谱

梯度属性结合序贯指示模拟方法表征表层岩溶分布,基于波阻抗反演结合梯度结构张量刻画断控岩溶特征,利用频能量属性结合基于目标的方法构建古地下河系统模型,综合测井、地质、生产动态等多学科资料表征了古岩溶连通、充填及物性特征,并通过融合建立了三维地质模型,较好地表征了此类油藏缝洞系统结构及强非均质特征。

3) 模型较好地应用于油藏数值模拟和开发方案调整,基于模型细化了 S67 单元缝洞油藏储量构成,模拟较好体现了不同类型缝洞体的原始储量分布及在开发过程中的储量动用状况。剩余油分布结果为开发方案调整提供了依据,实施后单元开发效果显著改善,单元日产油增加约 80 t,含水率明显下降,有效减缓了单元产量的递减。

参 考 文 献

- [1] 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,2012:1-15.
Dou Zhilin. Development technology of carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012:6-15.
- [2] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [3] 李阳, 吴胜和, 侯加根, 等. 油气藏开发地质研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 569-579.
Li Yang, Wu Shenghe, Hou Jiagen, et al. Progress and prospects of reservoir development geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 569-579.
- [4] Johnson K S. Evaporite-karst problems and studies in the USA[J]. Environmental Geology, 2008, 53(5): 937-943.
- [5] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [6] 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. Reservoir description and reserves estimation technique for fracture-cave type carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 14-18.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Wu Guanghui, Gao Lianhua, Zhang Yintao, et al. Fracture attributes in reservoir-scale carbonate fault damage zones and implications for damage zone width and growth in the deep subsurface[J]. Journal of Structural Geology, 2019, 118: 181-193.
- [10] 李会军, 丁勇, 周新桂, 等. 塔河油田奥陶系海西早期、加里东中期岩溶对比研究[J]. 地质论评, 2010, 56(3): 413-425.
Li Huijun, Ding Yong, Zhou Xingui, et al. Study Oil Hercynian and Middle Caledonian Karstification of Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2010, 56(3): 413-425.
- [11] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268-274.
Lu Xinbian, He Chengjiang, Deng Guangxiao, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 268-274.
- [12] 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.
- [13] 马丽娟, 孔庆莹, 刘坤岩, 等. 塔河油田奥陶系油藏弱振幅反射特征及形成机理[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 338-343.
Ma Lijuan, Kong Qingying, Liu Kunyan, et al. Weak reflection characteristics and its formation mechanism of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 49(2): 338-343.
- [14] Silin D B, Korneev V A, Goloshubin G M, et al. A hydrologic view on Biot's theory of poroelasticity[R]. LBNL Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2004.
- [15] 刘静静, 刘震, 齐宇, 等. 地震频处理技术预测深水储集体[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 80-87.
Liu Jingjing, Liu Zhen, Qi Yu, et al. Prediction of deep-water reservoir by seismic frequency division technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 80-87.
- [16] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震频技术的地质内涵及其效果分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 64-71.
Zhang Yanzhang, Yin Shoupeng, Zhang Qiaoling, et al. Geologic significance of the seismic spectral decomposition technology and its application analysis[J]. Petroleum exploration and Development, 2006, 33(1): 64-71.
- [17] 魏小东, 张延庆, 曹丽丽, 等. 地震资料振幅谱梯度属性在 WC 地区储层评价中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 281-284.
Wei Xiaodong, Zhang Yanqing, Cao lili, et al. Applications of amplitude spectrum gradient for reservoir evaluation in WC project[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(2): 281-284.

- [18] Tian Fei, Luo Xiaorong, Zhang Wang. Integrated geological-geophysical characterizations of deeply buried fractured-vuggy carbonate reservoirs in Ordovician strata, Tarim Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 292–309.
- [19] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289–298.
- Li Yang, Jin Qiang, Zhong Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289–298.
- [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): 16–21.
- Jin Qiang, Tian Fei. 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): 16–21.
- [21] 程洪, 张杰, 张文彪. 断溶体储层类型识别、预测及发育模式探讨——以塔里木盆地塔河十区 TH10421 单元为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 996–1003.
- Cheng Hong, Zhang Jie, Zhang Wenbiao. Discussion on identification, prediction and development pattern of faulted—karst carbonate reservoirs: A case study of TH10421 fracture–cavity unit in block 10 of Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 996–1003.
- [22] 宁超众, 孙龙德, 胡素云, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层岩溶类型及特征[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 15–32.
- Ning Chaozhong, Sun Longde, Hu Suyun, et al. Karst types and characteristics of the Ordovician fracture-cavity type carbonate reservoirs in Halahatang oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 15–32.
- [23] 吕心瑞, 韩东, 李红凯. 缝洞型油藏储集体分类建模方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 68–77.
- Lü Xinrui, Han Dong, Li Hongkai. Study on the classification and modeling of fracture-vug oil deposits [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(1): 68–77.
- [24] 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 [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 59–66.
- [25] 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.
- [26] 刘中春. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏提高采收率技术途径[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 66–68.
- Liu Zhongchun. Enhanced oil recovery in Tahe karstic/fractured carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 66–68.
- [27] 罗娟, 鲁新便, 巫波, 等. 塔河油田缝洞型油藏高产油井见水预警评价技术[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 468–473.
- Luo Juan, Lu Xinbian, Wu Bo, et al. A water breakthrough warning system of high-yield wells in fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 40(4): 468–473.
- [28] 鲁新便, 荣元帅, 李小波, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏注采井网构建及开发意义——以塔河油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 658–664.
- Lu Xinbian, Rong Yuanshuai, Li Xiaobo, et al. Construction of injection-production well pattern in fractured-vuggy carbonate reservoir and its development significance: A case study from Tahe oilfield in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 658–664.
- [29] 杨敏, 李小波, 谭涛, 李青, 等. 古潜河油藏剩余油分布规律及挖潜对策研究——以塔河油田 TK440 井区为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 43–48.
- Yang Ming, Li Xiaobo, Tan Tao, et al. Remaining oil distribution and potential tapping measures for palaeo-subterranean river reservoirs: A case study of TK440 well area in Tahe Oilfield [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 43–48.
- [30] 昌琪, 耿甜. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏不同开发阶段井网构建[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(4): 64–68.
- Chang Qi, Geng Tian. Well pattern construction in different development stages of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(4): 64–68.
- [31] 金燕林, 王金柱. 塔河油田 T738 井区奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征及储层控制因素分析[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(4): 7–11.
- Jin Yanlin, Wang Jinzhu. Karst development characteristics and reservoir controlling factors of Ordovician carbonate rocks in T738 well area of Tahe oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(4): 7–11.
- [32] 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.
- [33] 操银香, 李柏颀, 郭媛. 高压注水扩容在缝洞型碳酸盐岩油藏中的应用——以塔河 S1 井为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 49–53.
- Cao Yinxiang, Li Bojie, Guo Yuan. Application of high pressure water injection expansion in fractured-vuggy carbonate oil reservoir: A case study of well-S1 in Tahe Oilfield [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 49–53.