文章编号:1009-9603(2019)06-0053-09

DOI: 10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.06.007

# 塔河油田缝洞型油藏不同成因岩溶储集体表征

余智超1,王志章1,魏荷花2,肖凤英2,李永强2

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

摘要:塔河油田奧陶系缝洞型油藏探明石油地质储量近14×10<sup>8</sup> t,目前该油田已进入开发中后期,油藏整体存在含 水率较高、注采关系矛盾、储层非均质性严重、采收率明显偏低的问题,急需建立精细的油藏地质模型。按岩溶成 因将缝洞储集体分为风化壳型、断控型和地下河型3类,通过分析沙74、沙65和塔7-615这3种典型缝洞单元不同 成因储集体发育特征,最终以3种岩溶储集体均发育的沙65缝洞单元为例,分别建立其离散分布模型,并与孔洞、 裂缝融合成完整的油藏模型。对于属性参数模型的建立,以大量成像测井上观察到的储集体类型为依据,结合单 井储集体波阻抗与测井解释孔隙度,总结出不同类型缝洞储集体波阻抗与孔隙度定量关系,并直接由波阻抗体反 演得到孔隙度体,储量计算最终结果与油藏动态预测结果一致。

关键词:缝洞型油藏;岩溶储集体;成因;离散分布模型;塔河油田 中图分类号:TE122.2 文献标识码:A

# Characterization of fracture-cave karst reservoirs with different genesis in Tahe Oilfield

YU Zhichao<sup>1</sup>, WANG Zhizhang<sup>1</sup>, WEI Hehua<sup>2</sup>, XIAO Fengying<sup>2</sup>, LI Yongqiang<sup>2</sup>

(1.College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China;
2.Petroleum Exploration & Development Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China)

**Abstract**: The proven reserves of the Ordovician fracture-cave reservoir in Tahe Oilfield are nearly 1.4 billion tons. At present, the oilfield has entered the middle-late stage of development. Problems such as high water cut, contradictory injectionproduction relationship, strong heterogeneity and low recovery factor appear. Therefore, the establishment of a fine reservoir geological model is urgent. According to the genesis, the karst reservoirs can be divided into three types, including weathering crust type, fault-controlled type, and underground river type. The development characteristics of karst reservoirs with three different genesis are analyzed in typical fracture-cave Units S74, S65, T7-615, respectively. Taking Unit S65 in which all three types are developed as an example, a discrete reservoir geological model is established for each type, and then a complete reservoir model is formed by combining pores, caves and fractures together. For the establishment of property parameter model, based on the numerous reservoir types identified from imaging well logging, and combining with the wave impedance of reservoir and porosity interpreted from well logging of single well, the relationship between the wave impedance and porosity of different types of fracture-cave reservoirs is quantitatively summarized, and the porosity data volume is obtained directly from the inversion of wave impedance data volume. The final reserves calculation result is consistent with the dynamic prediction results.

Key words: fracture-cave reservoir; karst; genesis; discrete model; Tahe Oilfield

在世界已经发现的油气藏中,碳酸盐岩油气藏 占有举足轻重的地位,尽管碳酸盐岩油气藏数量较 少,但其储量约占全部储量的50%,产量更是占世 界油气总产量的60%<sup>[1]</sup>。中国碳酸盐岩油藏分布面积比较广阔,主要位于四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地及塔里木盆地等,油气总资源量高达百亿

收稿日期:2019-07-11。

作者简介:余智超(1993—),男,湖北荆州人,在读硕士研究生,从事开发地质研究。联系电话:18627223527, E-mail: 2499250263@qq. com。

基金项目:国家科技重大专项"缝洞型油藏精细描述与地质建模技术"(2016ZX05014-002)。

吨级别,显示出优越的勘探开发前景。

塔里木盆地塔河油田是中国已探明石油地质 储量最大的深层、超深层海相碳酸盐岩油田。其烃 源岩为寒武系一奥陶系,主要勘探目的层为奥陶系 鹰山组,储层类型为岩溶型储层,平均井深大于 6000 m。截至2018年底,探明石油地质储量近14× 10<sup>8</sup> t<sup>[2]</sup>。塔北奥陶系海相碳酸盐岩经多期构造破裂 与古风化岩溶共同作用,主要经历了加里东中期表 生岩溶、海西早期裸露风化岩溶和埋藏岩溶等多期 岩溶作用过程。与常规的沉积型碎屑岩储层相比, 该类储集体表现为极不规则形态和不均匀分布,具 有非均质性强、储集空间多样、缝洞充填程度及油 气水关系复杂、岩溶储集体识别难度大等特点,加 大了对岩溶储集体内幕结构表征的难度<sup>[3-4]</sup>。

刘钰铭等提出"整合多类多尺度数据的岩溶型 储集体建模"的思路,采用以"平面分区,垂向划带" 岩溶模式为指导的建模方法,分别建立溶洞、孔洞、 大小尺度裂缝储集体几何形态模型<sup>[5-7]</sup>。杨辉廷等 提出以地震相作为训练图像;采用多点地质统计学 进行储集体建模的思路<sup>[8]</sup>。以往的建模方法虽然对 储集体类型进行细分,但并未从岩溶成因上划分储 集体类型。生产实践证明,不同成因岩溶储集体的 开发方式、特征及产量等影响因素都不尽相同。因 此如何从成因上表征岩溶储集体内部非均质性强 的特点,建立相应的三维地质模型,对于油田增储 上产及数值模拟均具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。

为表征岩溶型碳酸盐岩油藏成因类型多样、内 幕结构复杂的特征,按照成因关系将岩溶储集体进 行划分,分析不同成因储集体发育特征,并以典型 缝洞单元为解剖对象,根据单元内不同岩溶储集体 发育特征,进行不同成因岩溶储集体融合。采用波 阻抗反演孔隙度体建立储集体属性参数表征,定量 刻画此类油藏的强非均质性特征,为油藏储量计 算、剩余油挖潜及开发方案调整奠定地质基础。

# 1 区域地质背景

塔河油田地理位置处于新疆维吾尔自治区轮 台县与库车县交界处,塔克拉玛干沙漠北部,其构 造位置处于塔北隆起(沙雅隆起)南部的阿克库勒 凸起斜坡上,北靠雅克拉一轮台断凸,南接满加尔 坳陷,东邻草湖凹陷,西边为哈拉哈塘凹陷。

塔河油田主要含油层位为奥陶系,从下到上依次为蓬莱坝组、鹰山组(O<sub>1-2</sub>y)、一间房组(O<sub>2</sub>yj)、恰尔巴克组(O<sub>3</sub>q)、良里塔格组(O<sub>3</sub>l)、桑塔木组(O<sub>3</sub>s)。

其中鹰山组大面积发育,而上奥陶统在主体区大面积剥蚀。

塔河油田奧陶系缝洞型储层主要经历加里东 中期Ⅰ幕、Ⅲ幕、Ⅲ幕和海西早期4个岩溶发育阶段 (图1)。加里东中期Ⅰ幕岩溶作用发生于一间房组 沉积末期一良里塔格组沉积前,古地貌较为平缓, 起伏不大,一间房组纯灰岩地层处于整体暴露状 态,有利于岩溶发育,且以具有明显层控性的溶蚀 孔洞为该幕岩溶作用的标志物。加里东中期Ⅱ幕 岩溶作用发生于良里塔格组沉积末期—桑塔木组 沉积前,因良里塔格组泥质含量较高,不利于大气 水的流动和下渗,因此该幕岩溶作用对良里塔格组 的影响较弱,但通过断裂沟通下伏纯灰岩地层,从 而产生溶蚀作用,具有明显的断控性。加里东中期 Ⅲ幕岩溶作用发生在晚奥陶世桑塔木组沉积时期 与早志留世之间,与加里东中期Ⅱ幕一样,由于桑 塔木组抗溶蚀能力较强,仅形成小规模的岩溶储集



Fig.1 Evolution model of karst reservoirs in Tahe Oilfield

体。整体上来讲,该幕岩溶作用较弱,形成的储集 空间有限且规模较小。海西早期上奥陶统缺失,志 留系-泥盆系被剥蚀殆尽,地层抬升,中-下奥陶统 鹰山组沉积时期再次裸露地表,岩溶作用强烈,塔 河油田北部抬升段发育大规模风化壳型岩溶储集 体,同时由于构造作用形成的大规模断裂为岩溶水 下渗提供通道,各种断控型及地下河型岩溶储集体 也相当发育。

同时,塔河油田具备良好的油气成藏组合模 式<sup>[11]</sup>,南部的满加尔坳陷为主要的生油区,由于阿 克库勒凸起经历多期构造运动,区内断裂极度发 育,生成的油气经断裂运移到阿克库勒凸起奥陶系 以溶洞为主要储集空间的储层中,石炭系巴楚组泥 岩为盖层,阻止了油气进一步扩散。

# 2 不同岩溶储集体发育特征

研究表明,塔河油田岩溶发育主要受古构造 (断裂及其伴生裂缝)、岩溶古地貌和古水系等因素 的控制。海西早期整体处于一个岩溶斜坡相带<sup>[12]</sup>, 即岩溶高地与岩溶盆地的过渡带,地下水动力为垂 向渗入和水平运动,风化壳型岩溶储集体、断控型 岩溶洞穴及地下河均发育,其中风化壳型岩溶储集 体位于表层岩溶带,断控岩溶洞穴一般位于渗流 带,地下河一般位于径流带。

塔河油田风化壳型岩溶油藏包括134个多井单 元,占多井单元总数的46.7%,产量占塔河油田总产 量的40%。沙74缝洞单元为风化壳型岩溶油藏的 典型代表,位于塔河油田六区北部岩溶斜坡部位, 风化剥蚀严重。表生岩溶储集体主要发育在局部 构造高部位,受岩溶残丘控制。古地形、地貌对古 岩溶系统的发育程度和分布起重要的控制作用。 以单元内高产井沙74井为例,产层与奥陶系顶面距 离仅为20m,无水产油期为355d,累积产油量高达 7×10<sup>4</sup>t。从该井成像测井上可以看出,表生岩溶储 集体主要为小尺度缝洞体(图2),在成像测井上表 现为黑色斑点状,其发育位置与测井资料解释的中 小尺度储集体吻合。

断裂与油气的关系一直是中外学者关注的热 点。尤其是碳酸盐岩中的断裂,不仅影响油气运移 和成藏,而且对岩溶储层的形成和分布具有重要的 控制作用<sup>[13-17]</sup>。塔河油田南部断溶体受多期构造挤 压,沿深大断裂带发育一定规模的破碎带,经多期 岩溶水沿断裂下渗或局部热液上涌使破碎带内断 裂、裂缝被溶蚀改造,形成柱状溶蚀孔、洞储集体。



Fig.2 Weathering crust type karst reservoir of Well S74

与南部"控储成藏"的深大走滑断裂带不同,北部发 育大量高角度北东及北西向逆断层,主要形成一些 位于渗流带的断控型孤立洞,分布较分散,其产量 与洞穴发育规模和充填程度息息相关<sup>[18]</sup>。沙65缝 洞单元内断控型岩溶储集体发育(图3),钻井过程 中泥浆漏失严重,生产特征表现为高产稳产,表明 其具有规模大、纵向深度高、充填程度低、连通性好 等特点。

通常将发育在奥陶系顶面以下的岩溶水道称 之为地下河。在岩溶区常发育于地下水面附近,是 近水平的溶洞系统,若多期岩溶叠加,可能发育多 层岩溶洞穴<sup>[19-20]</sup>。溶洞在岩心上识别标志主要为洞 穴崩塌角砾岩和洞穴沉积岩,若沉积物具有沉积层 理或流水痕迹,则多为岩溶管道系统。其油气产量 通常与溶洞发育特征息息相关,高产井往往钻遇未 充填的溶洞而发生放空漏失现象,一般来说,充填 程度较低的井一般较易破碎,取心收获率往往较 低。以地下河型溶洞发育较典型的塔7-615井为 例,第7,8,9次取心段为大型溶洞发育段,洞顶主要 发育垮塌角砾岩,而下部为具有明显水流作用平行 层理发育的细砂岩(图4),韵律性较好,具有良好油 气显示,含油级别为油斑,并且岩心孔隙度及渗透 率测定可以看出,溶洞发育段物性明显好于围岩。

# 3 不同成因岩溶储集体分类表征

沙65缝洞单元位于塔河油田四区西南部,勘探



图 3 沙 65 缝洞单元断控型岩溶储集体发育特征





面积为5.6 km<sup>2</sup>, 完钻井12口, 3种岩溶储集体均发 育。首先从断层解释和岩溶分带入手, 进行三维构 造表征; 然后利用地震、测井、岩心、成像等资料, 进 行不同成因岩溶储集体和溶蚀孔洞表征。

#### 3.1 精细构造表征

沙65缝洞单元解释断层多达31条。本次构造 建模先建立构造框架模型,这不仅保留了原始解释 数据基本不变,而且节省了断层柱编辑的大量工 作。在断层柱调整好后,根据地震构造解释断层切 割、组合关系以及三维空间中断面与构造层面表现 的错断关系,精细调整各断层面,建立精细的三维 断层模型<sup>[21-22]</sup>。结合现代岩溶分带理论及岩溶储集 体分布特征,以地震解释的鹰山组顶面为顶,恰尔 巴克组顶面为底,以钻井上岩溶带分层数据为约束 建立地层格架模型,将地层纵向上分为表层岩溶 带、渗流岩溶带和径流岩溶带,再结合断层模型,构 建沙65缝洞单元三维构造模型(图5)。为精细表达 储层内部非均质性特征,网格平面上划分为10 m× 10 m,在第1和第2岩溶段纵向上采用1 m 网格,在 第3岩溶段采用2 m 网格,总网格数达3 146×10<sup>4</sup>个。

### 3.2 不同成因岩溶储集体表征

#### 3.2.1 风化壳型

塔河油田奧陶系岩溶储层主要发育在一间房 组和鹰山组顶部的岩溶古风化壳。分析塔河油田 四区沙65缝洞单元有测井曲线的10口井的单井资 料,结合另外2口放空漏失井,单元内共识别出12 个大型溶洞,总厚度为66.6 m。69.2%的溶洞与奥



Fig.5 3D structural model of Unit S65

陶系顶不整合面的距离小于60m,溶洞型储集体主要分布在浅层。

整个沙65缝洞单元处于岩溶台地与斜坡的古 地貌较高部位,整个单元风化壳型洞穴较发育,利 用峰值振幅梯度属性体作为井间约束,以钻遇的风 化壳测井数据体作为硬数据,采用序贯指示的方法 来表征风化壳型岩溶储集体(图 6a)。结果表明该 类储集体主要分布在表层岩溶带,主要发育在岩溶 残丘等局部高点。

3.2.2 断控型

典型的风化壳储层模式难以支撑塔北地区深 层奥陶系碳酸盐岩油藏的开发,断裂与油气的关系 一直是中外学者关注的热点。尤其是碳酸盐岩中 的断裂,不仅影响油气运移和成藏,而且对岩溶储 层的形成和分布具有重要的控制作用。随着地表 水的下渗,不同岩溶带中的岩溶储集体结构特征也 明显不同,断控型岩溶洞穴储集体主要位于渗流 带。沙65缝洞单元内断控型岩溶洞穴的分布与大 型裂缝密切相关,顺着北西向大型断裂走向分布。 以单井溶洞分布数据体作为硬数据,以波阻抗体作 为建模软数据,来表征断控型岩溶洞穴储集体(图 6b)。结果表明该类储集体主要分布在渗流带,洞 穴大多顺着大型断裂走向发育,具有明显"断控"特 点。

#### 3.2.3 地下河型

地下河主要发育于水平径流带,为具有河流主 要特性的岩溶水道,地震反射连续且呈层状分布, 由于潜水面变化或者构造抬升,垂向上可发育多期 次河道。地下河型溶洞的主要特征是机械沉积充 填物发育,在岩心和测井曲线上均能够体现。分频 能量地震属性体通过多种频带组合,对刻画地下河 展布具有较好效果,主频为30 Hz的分频能量融合 体可较为清晰地刻画单元内地下河展布,结合钻井 及测井资料,认为在沙65缝洞单元发育2期地下河 系统,共识别出3条地下河,其中2条发育在浅层,1 条发育在深层。研究发现,塔勘7-451、塔勘447和 沙65这3口高产井均与南北向发育规模最大的地 下河有关。采用Petrel软件提取Geobody体的方法, Geobody 体基于三维地震体,提取不同透明度阈值 范围内的3D目标体,调整分频能量融合体的不透明 度阈值,将其采样到模型中,得到单元内地下河岩 溶洞穴的分布模型(图6c)。模型结果与实际钻井 的位置完全相符,形态与地震预测结果一致,模型 较好地表征了深浅地下河的空间结构。

#### 3.3 溶蚀孔洞表征

井点上溶蚀孔洞可通过岩心、测井及动态资料 识别,井间溶蚀孔洞的发育规模、空间分布等信息 无法通过现有资料直接获取,需通过软数据进行井 间约束。在大型断裂附近,挤压破碎作用较强,岩 溶较为发育,溶蚀孔洞分布相对密集。采用序贯指 示方法,主要以单井解释溶蚀孔洞数据体作为硬数 据,以断层距离属性体与振幅谱梯度属性体融合建 立溶蚀孔洞发育概率体作为井间约束,协同模拟建 模,得到溶蚀孔洞分布模型(图6d)。溶蚀孔洞约占 整个模型的10%,与钻井结果相近,且距离断层和 奥陶系顶越近,溶蚀孔洞越发育,与通过观察野外 露头取得的地质认识一致,证明溶蚀孔洞表征结果 是可靠的。

# 4 不同成因岩溶储集体融合

缝洞型油藏储集体类型多样,但在模型网格系统中1个位置只有1种储集体存在。由于不同类型储集体分布特征不同,为更好地表征各类储集体的空间分布,采用分类建模方法,需要将不同类型的储集体融合,形成一个完整的地质模型。

首先将大尺度裂缝模型粗化到网格中,再分别 将大断裂、溶洞及溶蚀孔洞模型融合,得到沙65缝 洞单元储集体融合模型。针对其发育规律,制定储 集体融合原则<sup>[23]</sup>:每个网格储集体类型唯一,忠实 于钻井储集体类型,大型溶洞与断裂优先,其次为 溶蚀孔洞和小尺度裂缝。

按照上述融合技术,将建立的沙65缝洞单元大





型溶洞、溶蚀孔洞、大尺度裂缝、基质融合为完整的 沙65缝洞单元缝洞型油藏模型。将融合模型剖面 (图7)与钻井储集体进行对比,与钻井数据完全一 致,融合的结果与地质认识也较为符合。

# 5 不同成因岩溶储集体属性参数表 征

利用建立的岩溶储集体模型,采取相控建模的 方法,对储集体的属性参数分布进行研究,建立岩 溶储集体属性参数模型。由于渗透率为矢量,具有 多方向性,且在这种非均质性极强的缝洞型碳酸盐 岩油藏中孔渗关系复杂,不像碎屑岩孔渗规律那么 明显,故不考虑渗透率模型的建立。

以往对于岩溶储集体属性参数模型的建立往 往采用测井解释与生产标定赋值来实现,但此方法 存在2个弊端:①测井解释储集体存在多解性,解释 的储集体类型不一定准确,但仍用作硬数据,导致 储集体孔隙度无法使用。②对于井间岩溶储集体 的属性参数采用随机模拟的方法,属于井间插值的 范畴,可信度较低。为此,针对现存的岩溶型储层 属性参数建模难点,提出建模新方法。其思路为: 以大量成像测井观察到的储集体类型为储集体识 别依据,结合单井不同类型储集体波阻抗与测井解





释孔隙度之间的关系,总结出不同类型岩溶储集体 波阻抗与孔隙度的定量关系,直接由波阻抗体反演 得到孔隙度体。

成像测井以数据量大、分辨率高、成像直观精 细等特点在裂缝评价、岩性识别、构造分析、沉积相 研究等方面具有独特优势。很多地质信息可以直接 根据FMI图像解释得出。选取主体区20口井的成 像照片,对裂缝、溶洞和溶蚀孔洞这3种不同类型岩 溶储集空间进行识别(图8),裂缝在FMI上呈黑色 的正弦曲线,溶洞一般被砂泥质充填,溶蚀孔洞则呈 黑色的斑点状。结合单井波阻抗与孔隙度信息建立 了不同储集空间波阻抗分布及与孔隙度之间的关 系。对于大型溶洞,波阻抗分布范围较广,这是溶洞 中充填物类型及充填程度的复杂多样造成的,总体 上,溶蚀孔洞与裂缝的波阻抗分布则较为集中,孔 洞波阻抗值一般为1.6×107~1.65×107 kg/m3·(m/s), 裂缝波阻抗值主要大于1.66×107 kg/m3·(m/s),二者 波阻抗与孔隙度大致呈线性关系(图9a)。溶洞波 阻抗值一般小于1.6×107 kg/m3·(m/s),其波阻抗与 孔隙度呈指数关系(图9b)。在相控约束条件下,利



a—裂缝 (砂67井, 5 484.5~5 485 m)



## 6 结论

将岩溶储集体按成因分为风化壳型、断控型和 地下河型,以沙74、沙65和塔7-615典型缝洞单元 为例,分析了3种不同成因储集体发育特征。首次 提出基于不同岩溶成因类型的岩溶储集体的建模 方法,分别建立离散分布模型,并最终与孔洞和裂 缝一起融合成完整的油藏模型,表征结果与地质认



c—溶蚀孔洞 (砂75井, 5 647~5 648 m)



b—溶洞

(砂74井,5653.5~5654.5m)









识较为相符。对属性参数模型的建立,以大量成像 测井观察到的储集体类型为基础,结合单井不同类 型储集体波阻抗与测井解释孔隙度之间的关系,总 结出不同类型岩溶储集体波阻抗与孔隙度的定量 关系,直接由波阻抗体反演得到孔隙度体。最终储 量计算结果与油藏动态预测的结果一致。

#### 参考文献

- [1] ROEHL P O, CHOQUETTE P W.Carbonate petroleum reservoirs: Introduction[M].New York:Springer Verlag, 1985:1-15.
- [2] 焦方正,窦之林.塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发研究与实践
   [M].北京:石油工业出版社,2008:12-25.
   JIAO Fangzheng, DOU Zhilin. Development and practice of frac-

tured-cavity carbonate reservoirs in Tahe [M]. Beijing: Petroleum

Industry Press, 2008:12-25.

 [3] 李永强.塔河油田碳酸盐岩缝洞单元内部非均质性定量表征
 [D].北京:中国石油大学(北京),2017:8-10.
 LI Yongqiang.Quantitative characterization of internal heterogeneity of concentration construction in Taba cilicitation.

ity of carbonate fracture-cavity units in Tahe oilfield[D].Beijing: China University of Petroleum(Beijing),2017:8-10.

- [4] TIAN F, JIN Q, LU X, et al. Multi-layered Ordovician paleokarst reservoir detection and spatial delineation: A case study in the Tahe Oilfield, Tarim Basin, Western China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 69(2):53-73.
- [5] 刘钰铭,侯加根.缝洞型碳酸盐岩油藏三维地质建模——以塔 河油田奧陶系油藏为例[M].北京:石油工业出版社,2016:56-60.

LIU Yuming, HOU Jiagen. 3D geological modeling of fracturedcavity carbonate reservoirs: a case study of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield[M].Beijing: Petroleum Industry Press, 2016:56– 60.

- [6] 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):34-38,44. LIU Yuming, HOU Jiagen, HU Xiangyang, et al. 3D modeling of paleokarst reservoir in Tahe Oilfield[J].Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(2):34-38,44.
- [7] LI Y, HOU J, MA X.Data integration in characterizing a fracturecavity reservoir, Tahe oilfield, Tarim basin, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(8): 532–545.
- [8] 陈培元,杨辉廷,刘学利,等.塔河油田6~7区孔洞型碳酸盐岩 储层建模[J].地质论评,2014,60(4):884-892.
   CHEN Peiyuan, YANG Huiting, LIU Xueli, et al.3D modeling of vug carbonate reservoir in the sixth-seventh blocks of Tahe oilfield, Tarim basin[J].Geological Review,2014,60(4):884-892.
- [9] 裘怿楠,贾爱林.储层地质模型10年[J].石油学报,2000,21 (4):101-104.

QIU Yinan, JIA Ailin.Development of geological reservoir modeling in past decade [J].Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 101– 104.

[10] 吴胜和,金振奎,黄沧细,等.储层建模[M].北京:石油工业出版社,1999:1-20.

WU Shenghe, JIN Zhenkui, HUANG Cangxi, et al.Reservoir modeling[M].Beijing:Petroleum Industry Press, 1999:1-20.

- [11] 陈正辅,顾忆,罗宏.塔里木盆地东北地区古生界海相油气特点及油气源研究[C]//张文正.第四届全国有机地球化学会议论文集.武汉:中国地质大学出版社,1990:79-88.
  CHEN Zhengfu, GU Yi, LUO Hong. Characteristics and sources of Paleozoic Marine oil and gas in northeast Tarim basin [C]// ZHANG Wenzheng. Proceedings of the Fourth National Conference on Organic Geochemistry. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990:79-88.
- [12] 漆立新,云露.塔河油田奧陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J].石油与天然气地质,2010,31(1):1-12.
  QI Lixin, YUN Lu.Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J].
  Oil & Gas Geology,2010,31(1):1-12.
- [13] 兰晓东, 吕修祥, 朱炎铭, 等. 走滑断裂与盖层复合成藏模 式——以塔中东部中古51井区鹰山组为例[J]. 石油与天然气 地质, 2014, 35(1):107-115.

LAN Xiaodong, LÜ Xiuxiang, ZHU Yanming, et al. Hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by strike-slip faults and cap rocks: a case from Yingshan Formation in ZG-51 wellblock of eastern Tazhong area, Tarim Basin[J].Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):107-115.

- [14] 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.
- [15] LU Xinbian, WANG Yan, TIAN Fei, et al. New insights into the carbonate karstic fault system and reservoir formation in the Southern Tahe area of the Tarim Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86(2):587-605.
- [16] 鲁新便,杨敏,汪彦,等.塔里木盆地北部"层控"与"断控"型油 藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J].石油实验地质, 2018,40(4):461-469.

LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al.Geological characteristics of "strata-bound" and "fault-controlled" reservoirs in the northern Tarim Basin: taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example[J].Petroleum Geology & Experiment, 2018,40(4):461-469.

[17] 罗枭,刘俊锋,张磊,等.塔里木盆地轮古西地区奥陶系断裂特 征及其对油气富集的控制作用[J].特种油气藏,2018,25(2): 19-24.

LUO Xiao, LIU Junfeng, ZHANG Lei, et al.Ordovician fault properties and its effect on hydrocarbon enrichment in western Lungu of Tarim Basin [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(2): 19–24.

[18] 唐海,何娟,荣元帅,等.塔河断溶体油藏典型断溶体注水驱替 规律及剩余油分布特征[J].油气地质与采收率,2018,25(3): 95-100.

TANG Hai, HE Juan, RONG Yuanshuai, et al. Study on water drive law and characteristics of remaining oil distribution of typical fault-karst in fault-karst reservoirs, Tahe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(3):95-100.

- [19] LI Yongqiang, HOU Jiagen, SUN Jianfang, et al. Paleokarst reservoir features and their influence on production in the Tahe Oilfield, Tarim basin, China[J].Carbonates and Evaporites, 2018, 33 (4):705-716.
- [20] 张娟,鲍典,杨敏,等.塔河油田西部古暗河缝洞结构特征及控制因素[J].油气地质与采收率,2018,25(4):33-39. ZHANG Juan, BAO Dian, YANG Min, et al. Analysis on fracturecave structure characteristics and its controlling factor of palaeosubterranean rivers in the western Tahe Oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(4):33-39.
- [21] 孙月成,张楠,李成立,等.三维数据体时深转换速度模型的精 细构建方法[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):145-152.
  SUN Yuecheng,ZHANG Nan,LI Chengli, et al.Fine velocity modeling method of the time-depth conversion for 3D data volume[J].
  Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37 (3):145-152.
- [22] 刘江丽,徐美茹,吕学菊,等.地震约束鲕粒滩型碳酸盐岩储层
  三维地质建模[J].中国石油勘探,2017,22(3):63-70.
  LIU Jiangli, XU Meiru, LÜ Xueju, et al. 3D geologic modeling of oolitic-beach carbonate reservoirs based on seismic constraint[J].
  China Petroleum Exploration, 2017, 22(3):63-70.
- [23] 吕心瑞,李红凯,魏荷花,等.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[J].石油与天 然气地质,2017,38(4):813-821.

LÜ Xinrui, LI Hongkai, WEI Hehua, et al.Classification and characterization method for multi – scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit [J].Oil & Gas Geology, 2017, 38 (4):813-821.

编辑 单体珍