

塔里木盆地北部奥陶系海相碳酸盐岩断溶体油藏成因类型及特征再认识

杨德彬¹, 鲁新便¹, 鲍典¹, 曹飞¹, 汪彦¹, 王明¹, 谢润成²

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 成都理工大学, 四川成都 610059)

摘要:前人提出的“断溶体”油藏概念, 现已成为海相碳酸盐岩油气藏勘探开发的新目标、新类型。但断溶体油藏与传统的风化壳型喀斯特油藏有显著差别, 断溶体储集体类型、结构特点也存在差异。研究断溶体溶蚀作用和构造破裂作用的差异性, 将断溶体划分为过溶蚀残留型、破碎+强溶蚀型和强破碎+弱溶蚀型3种类型。研究表明不同成因类型的断溶体油藏, 其溶蚀程度、缝洞规模、累产油量、地层能量和缝洞间连通性差异明显。过溶蚀残留型油藏的分布受风化壳不整合面及断裂带的纵向溶蚀作用控制。破碎+强溶蚀型及强破碎+弱溶蚀型油藏的形成和分布与不整合面的发育和构造位置关系不大, 主要受溶蚀断裂带“破碎+溶蚀程度”控制, 在溶蚀断裂带核部发育规模较大的洞穴, 向两侧逐步发育裂缝-孔洞型、裂缝型储层。

关键词:成因类型; 碳酸盐岩; 断溶体油藏; 奥陶系; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

New insights into the genetic types and characteristics of the Ordovician marine fault-karst carbonate reservoirs in the northern Tarim Basin

YANG Debin¹, LU Xinbian¹, BAO Dian¹, CAO Fei¹, WANG Yan¹, WANG Ming¹, XIE Runcheng²

(1. Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The previously coined fault-karst reservoirs have become new exploration and exploitation targets and types of marine carbonate hydrocarbon reservoirs. However, these reservoirs are significantly different from conventional weathering-crust karst reservoirs and also show diverse reservoir types and structural characteristics themselves. By delving into the differences in the dissolution and tectonic fracturing of fault-karst reservoirs, we categorize these reservoirs into three types: the over-dissolved residual type, the fractured and highly dissolved type, and the highly fractured and weakly dissolved type. Investigations into these types of fault-karst reservoirs reveal that these reservoirs significantly differ in dissolution intensity, fracture and vug sizes, cumulative oil production, formation energy, and fracture-vug connectivity. Furthermore, the distribution of over-dissolved residual fault-karst reservoirs is influenced by both weathering crust unconformities and the longitudinal dissolution of fault zones. In contrast, the formation and distribution of the remaining two types, manifesting a minimal association with unconformities and tectonic locations, are primarily governed by the fracturing and dissolution intensity of dissolved fault zones. Specifically, large-scale caves occur in the cores of dissolved fault zones, gradually transitioning to fractured-vuggy and fractured reservoirs towards their both sides.

Key words: genetic type, carbonate rock, fault-karst reservoir, Ordovician, Tarim Basin

引用格式: 杨德彬, 鲁新便, 鲍典, 等. 塔里木盆地北部奥陶系海相碳酸盐岩断溶体油藏成因类型及特征再认识[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 357-366. DOI: 10.11743/ogg20240204.

YANG Debin, LU Xinbian, BAO Dian, et al. New insights into the genetic types and characteristics of the Ordovician marine fault-karst carbonate reservoirs in the northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 357-366. DOI: 10.11743/ogg20240204.

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2024-03-25。

第一作者简介: 杨德彬(1984—), 男, 高级工程师, 碳酸盐岩油气藏开发地质。E-mail: yangdb.xbsj@sinopec.com。

基金项目: 中石化科研项目(P20017, P21063-2)。

全球多个大型碳酸盐岩油气田的统计数据显示,碳酸盐岩油气藏主要有生物礁类、颗粒滩类、白云岩类以及不整合与风化壳类等多种圈闭类型^[1-2]。断溶体油藏是一种新发现的油气藏类型^[3-5]。国内外针对断裂带的研究表明^[6-7],断裂带与油气的聚集成藏密切相关,如乌克兰地盾及其他地区活动性断层带内的结晶基底、变质岩和其他脆性岩层的破碎,形成的裂缝带和糜棱岩化带宽度达50~100 m,而且具有区域性分布特征。这种构造带对流体传导作用好,在具备可靠盖层和封闭水动力系统的条件下,就有可能形成大型油藏,如密执安含油气区的阿尔比诺、西皮奥和普拉斯基油田都是发育在奥陶系碳酸盐岩的柱状裂缝带内。部分学者认为密执安盆地南部的阿尔比诺油田是典型的溶蚀走滑断裂带控制的油藏,油田整体上沿断裂带呈雁列状分布,因溶蚀作用和断裂作用被分隔成不同类型的油气藏,表现出不同的分段具有不同的生产特征、驱动方式和压力系统。

在海相碳酸盐岩含油气研究领域,针对断裂带控储、控藏方面的研究成果较多,断裂带不仅改善了碳酸盐岩储层物性,而且也控制了油气田(藏)的分布,但大部分学者认为^[8-18],断裂带主要对油气的运移、输导起控制作用,作为烃类输导通道或遮挡面,同时断裂带也为碳酸盐岩的破碎、溶蚀提供了有利条件,大型溶洞一般发育在断裂的交汇处。前期对断裂带与圈闭的关系研究表明,塔里木盆地北部奥陶系以构造作用下的潜山型圈闭为主,60%以上油气圈闭的形成与断裂关系密切。断裂对油气圈闭的类型、分布、形成及聚油能力均有重要的控制作用^[1]。罗群等^[19]提出,在碎屑岩地层里,可能存在沥青封堵型、断层交汇型、断层尖灭消失型和层间滑动型等4种成因类型的断层体油气藏(圈闭)。

近年来在塔里木盆地北部地区(简称塔北地区)的海相碳酸盐岩勘探开发实践中,基于对深大断裂带的破碎作用、溶蚀作用及油气藏圈闭关系研究,提出了断溶体油藏的概念^[3],与传统的碳酸盐岩断块型和潜山型油气藏圈闭差别显著。此类油田多是由沿溶蚀断裂带或断裂破碎带分布的一系列不同规模的断溶体油藏群构成,塔河南部的油气田、顺北油气田就是此类油气藏的典型实例。这些关于溶蚀断裂带控制油气聚集的新认识,进一步丰富和发展了海相碳酸盐岩油气藏的类型,可为国内外具有相似地质背景的油藏研究提供理论借鉴。

前人虽提出了断溶体概念,对断溶体圈闭类型及特征、成藏认识、油藏特征及开发实践^[3]也进行了一定

的研究,认为碳酸盐岩地层经过破碎与溶蚀的耦合作用,沿断裂发育大量的溶蚀孔、岩溶洞穴、裂缝等储集空间,形成一种不规则的断控岩溶储层,被油气充注后就形成新的油藏类型,并且基于断溶体油藏的形成条件,根据断裂的级别、构造样式、破碎程度和岩溶强度等控制因素分析,对断溶体的油藏类型进行了划分^[20],但对塔北地区断溶体从北向南岩溶差异规律研究及油藏富集生产规律总结较少,本文主要从溶蚀作用和构造破裂作用差异性以及油藏生产特征等方面进一步讨论断溶体油藏发育规律。

1 断溶体油藏特征

塔北地区的勘探开发实践表明,海西早期的北北西向和北东向走滑断裂带对储集层的溶蚀改造(大气淡水或热液)起到了决定性的作用,其活动性较强的部位往往也是溶蚀作用和油气充注活动最为强烈的地方。这些大型走滑断裂带多数形成于加里东中晚期,对于海西期和喜马拉雅期的油气藏有明显的“控溶、控储、控藏”作用。受上覆地层剥蚀的影响,不同区域具有不同的储-盖组合。位于塔河油田中-上奥陶统尖灭线以北的剥蚀区(以下简称剥蚀区),储-盖组合主要由中-下奥陶统的一间房组、鹰山组与上覆的石炭系泥岩、志留系、泥盆系砂泥岩地层组成,油气藏形态呈“蘑菇状”,缝洞规模大,实钻溶洞平均高度达10 m,油柱高度达100 m。地层能量强,单位压降采油量达10 000 t/MPa。而位于塔河油田中-上奥陶统尖灭线以南的覆盖区(以下简称覆盖区),储-盖组合主要由中-下奥陶统的一间房组、鹰山组与上覆的上奥陶统泥灰岩地层组成。目前在塔河油田南部地区、跃进、富源及顺北等地区(图1)开展的大量勘探开发工作均取得了良好的效果,其油气藏形态呈“直立板状”或“花状”,缝洞规模中等,油柱高度普遍低于100 m。由塔河南至顺北地区,实钻溶洞高度为1.0~8.6 m,单位压降采油量为800~18 000 t/MPa。但不同地区、不同成因类型的断溶体油藏,其储集体发育规模、油井产能和油藏能量差异明显,是深层海相碳酸盐岩中极为特殊的一类油气藏。由此可见,溶蚀深断裂体系及其结构特征控制了储层发育程度、油气聚集规模和单井产能的大小。

2 断溶体油藏成因类型划分

塔北地区不同区域由于断裂和岩溶这两种地质作用的此消彼长,形成了具有区域性的储集空间类型组

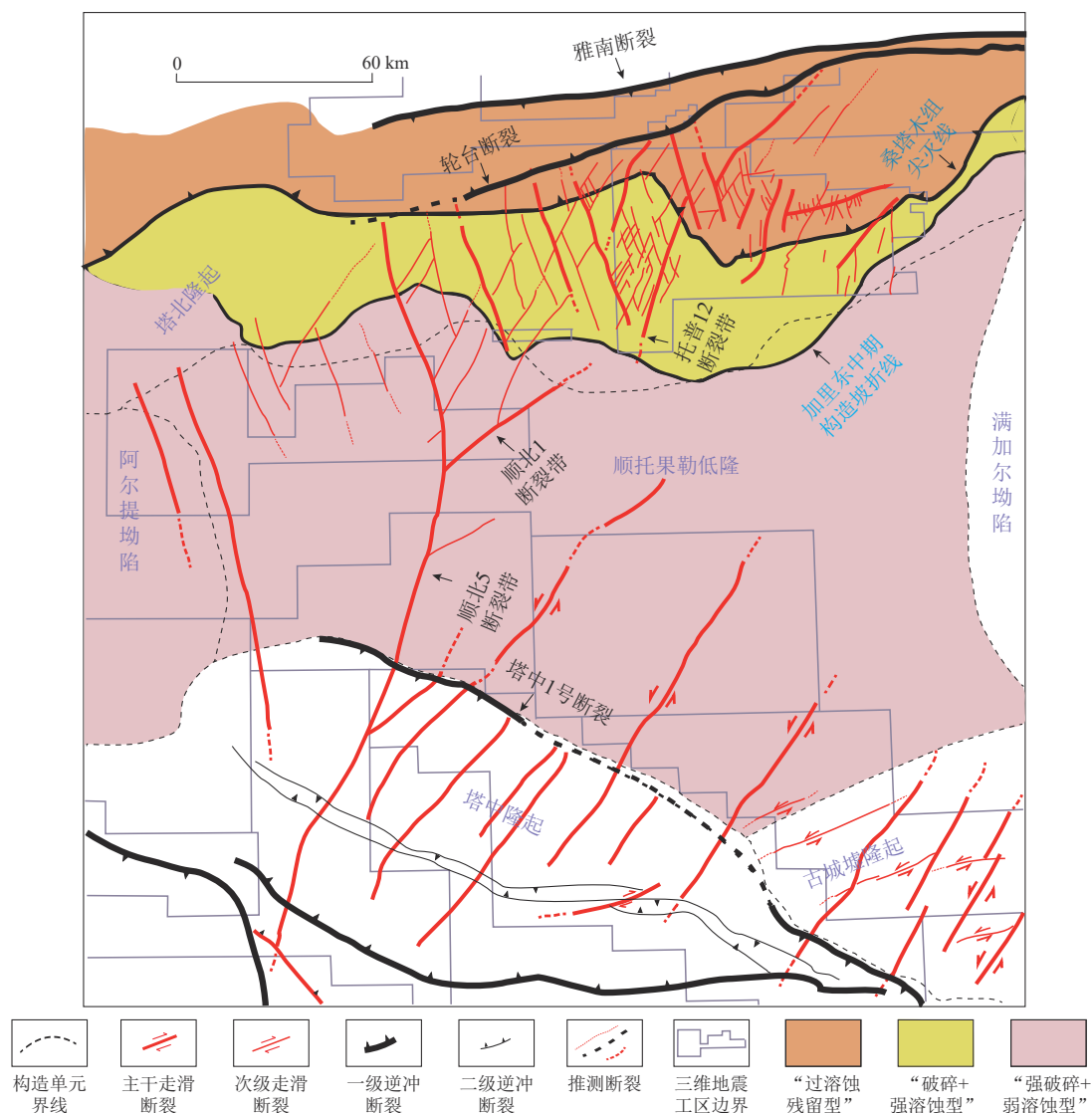


图1 塔北地区不同类型断溶体油藏平面分布

Fig. 1 Planar distributions of different types of fault-karst reservoirs in the Tabei area

合。在上奥陶统桑塔木组尖灭线以北的剥蚀区,由于经过长期暴露遭受大气淡水淋溶作用而形成的风化壳缝洞储集体,断控岩溶特征并不明显,如塔河油田的主体区。在尖灭线以南的覆盖区到塔北隆起的边缘地区,主要发育断裂带控制的岩溶缝洞储集体,如塔河油田的托甫台地区和跃进地区。而在塔北隆起南侧的顺托果勒低隆上主要以断裂的破碎作用为主,大气淡水的影响很小,因此形成由奥陶系灰岩破碎带与大量裂缝或者断裂面组成的储集空间类型,如顺北油气田。

依据断溶体油藏表现出的溶蚀作用及构造破裂作用的差异性,可进一步将断溶体油藏划分为过溶蚀残留型、破碎+强溶蚀型、强破碎+弱溶蚀型3类(表1)。

2.1 过溶蚀残留型

塔河油田剥蚀区主要是风化壳岩溶发育区,该区域的断溶体主要是大气淡水沿着断裂和缝网体系下渗溶蚀,对奥陶系灰岩地层的破碎区域或者早期的层间原生孔进行溶蚀扩大或再改造,并且随着区域性基准面的下降,岩溶作用纵向范围不断扩大,由此形成浅层不规则连片状发育的缝洞体+中-深层沿断裂溶蚀扩大的断控岩溶缝洞体。在实际剖面上,“过溶蚀残留型”断溶体的岩溶作用极强,在溶蚀断裂带附近发育以洞穴和溶蚀孔洞为主的缝洞储集体,其分布一方面受控于风化壳不整合面的溶蚀,另一方面受断裂带的纵向溶蚀作用影响,深度可达340 m。在断裂发育区,岩溶水可顺着断裂继续溶蚀扩大,形成顶部风化壳储集

表1 不同地质背景下断溶体油藏结构特征对比

Table 1 Comparison of structural characteristics of fault-karst reservoirs under different geological settings

成因类型	结构特征	断裂特征	岩溶作用	储集空间组合	开发特征	分布区及实例
过溶蚀 残留型	具层控状的洞穴+ 孔洞带+裂缝带	北东向主干断裂间 加持北西向的平行 次级断裂	暴露于地表的 大气淡水岩溶 作用为主	沿不整合面发育以洞穴、 溶蚀孔洞为主及沿断裂带 发育的溶蚀孔洞	油井普遍初期产能高、稳 产能力强、累产高,井间面 状连通	塔河油田剥蚀区, 如塔河4区、6区、 7区等
破碎+ 强溶蚀型	裂缝带+孔洞带+ 洞穴+孔洞带+裂 缝带	北北西、北北东向的 棋盘格式共轭剪切 走滑断裂	地层条件下大 气淡水的溶蚀 作用为主	沿主干断裂发育大型洞 穴、溶蚀孔洞以及溶蚀的 裂缝带	油井普遍初期产能高、稳 产能力较强、累产较高,井 间线状连通	塔河油田覆盖区, 如TP12CX等断裂 带
强破碎+ 弱溶蚀型	破碎带+孔洞(含 局部发育的洞 穴)+破碎带	北东向、近南北向的 平行走滑断裂	埋藏条件的多 种溶蚀作用	沿主干断裂发育大规模的 破碎作用,以断面空腔+角 砾间孔隙+裂缝为主	油井普遍初期产能高、稳 产能力偏弱、累产较高,井 间连通弱	顺北地区,如顺北 1号、5号走滑断 裂带

体+中-深部断溶体的垂向缝洞发育模式,圈闭形态剖面为“T”字形。总体来讲,风化壳岩溶区的储集体形成是以大气淡水岩溶作用为主,加之局部断裂带的影响,也可认为是一种广义的以岩溶为主的断溶体油藏类型,在地震剖面上多为“蘑菇状”的强反射特征(图2,图5a)。

“过溶蚀残留型”断溶体以洞穴和溶蚀孔洞为主,呈现横向连片发育、缝洞规模大、连通性好的特征。实钻平均溶洞高度达10.1 m(表2),岩心显示以砂泥质充填溶洞、蜂窝状溶蚀孔洞为主,部分井因溶蚀破碎强烈,取心收获率低(图6a)。生产井表现出高产能、地层能量充足的特征。试井曲线上多呈现2个下凹、具有2套及以上缝洞的特征,表明储集体间连通性好、规模大(图8a)。

2.2 破碎+强溶蚀型

塔河油田覆盖区由于上覆地层的影响,岩溶水主要沿北北西向和北北东向的棋盘格式走滑断裂下渗、溶蚀断裂面,溶蚀储集空间分布和规模受控于断裂及其伴生的缝网体系,常常在主干断裂发育大型洞穴、溶蚀孔洞以及溶蚀裂缝带的板状缝洞储集体,圈闭剖面形态为矿脉状或树枝状。典型代表是塔河油田覆盖区托甫台和跃进等地区,储集体的展布格局和规模大小既受断裂带的破碎作用控制,又受大气淡水下渗溶蚀的影响,其主要以溶蚀洞和孔为主要储集空间类型,局部以大型溶洞体为主要类型,地震属性剖面呈现杂乱反射或串珠状反射特征,具有较强的振幅变化率响应(图3,图5b)。

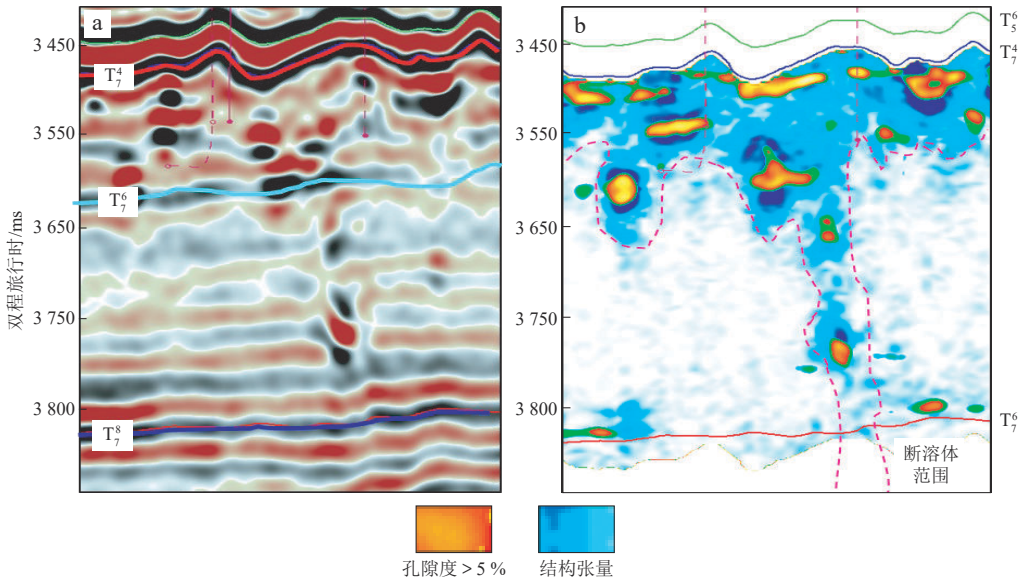


图2 塔河油田剥蚀区岩溶型断溶体的地震属性剖面

Fig. 2 Seismic attribute profiles of over-dissolved residual fault-karst reservoirs in the denudated area of the Tahe oilfield

a. 原始地震剖面; b. 波阻抗反演剖面

T₇⁴. 鹰山组上段顶面; T₇⁶. 鹰山组下段顶面; T₇⁸. 蓬莱坝组顶面

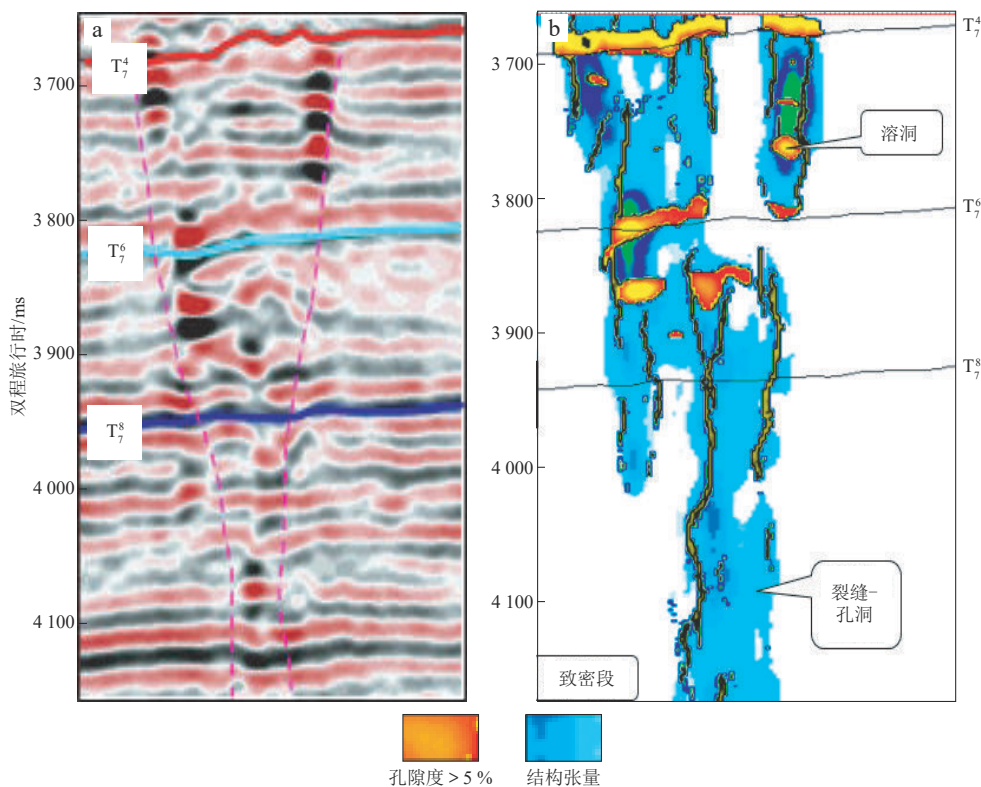


图3 塔河油田覆盖区过渡型断溶体的地震属性剖面

Fig. 3 Seismic attribute profiles of fractured and highly dissolved fault-karst reservoirs with overlying strata above, Tahe oilfield

a. 原始地震剖面; b. 波阻抗+蚂蚁体+孔隙度反演的属性剖面

T₇⁴. 鹰山组上段顶面; T₇⁶. 鹰山组下段顶面; T₇⁸. 蓬莱坝组顶面

2.3 强破碎+弱溶蚀型

顺北地区与塔河油田主体区、托甫台及跃进地区相比,虽然储集空间仍然是洞、孔、缝,但主要储集空间类型发生了显著变化,其洞穴规模明显小于塔河地区的断溶体。主干断裂发育大规模的破碎作用,形成以断裂破碎带为主体,差异溶蚀进一步改造后的断溶体油藏剖面形态为板状或矿脉状。实钻取心资料显示,主要为断裂破碎作用后形成的角砾岩间孔隙,孔隙空间被挤压变形的岩体、方解石胶结物、沥青等充填,且洞壁上的溶蚀改造现象不明显,成像测井显示以小型溶蚀孔洞和裂缝带为主。地震解释为“断裂面+强反射+断裂面”反射特征(图4,图5c)。

依据距上奥陶统尖灭线以北暴露岩溶区的距离,大致以加里东中期构造坡折线为界,近暴露岩溶区发育“破碎+强溶蚀型”断溶体油藏,远暴露岩溶区发育“强破碎+弱溶蚀型”断溶体油藏,上奥陶统尖灭线以北的风化壳岩溶区发育“过溶蚀残留型”断溶体油藏(图1,图5)。自北向南随着流体改造作用的减弱,三者表现出显著的差异(表1;图5),其宏观表现为:①作为油气优势储集空间的洞穴系统规模变小;

②油井的稳产能力降低;③试井表现为沟通边界变小。

3 断溶体油藏实钻及生产特征

通过对塔北地区(塔河地区南部,包括托甫台、富源、跃进、顺北等地区)不同成因的断溶体油藏储层、油气藏特征及开发动态的综合对比研究,发现不同成因类型的断溶体油藏具有不同的开发特征。

3.1 过溶蚀残留型

根据研究区不同岩溶区带实钻“洞穴”高度统计(表2),过溶蚀残留型实钻“洞穴”数量最多,规模最大,破碎+强溶蚀型次之,强破碎+弱溶蚀型实钻“洞穴”数量最少且规模相对最小。整体表明,溶蚀残留型为塔北地区奥陶系海相碳酸盐岩断溶体油藏最主要的类型。

3.2 破碎+强溶蚀型

以塔河油田覆盖区托甫台、跃进、跃满、富源等为代表的地区,缝洞储集体表现出沿断裂带走向展布的特征,但其缝洞规模、产能及能量特征受控于断裂带发

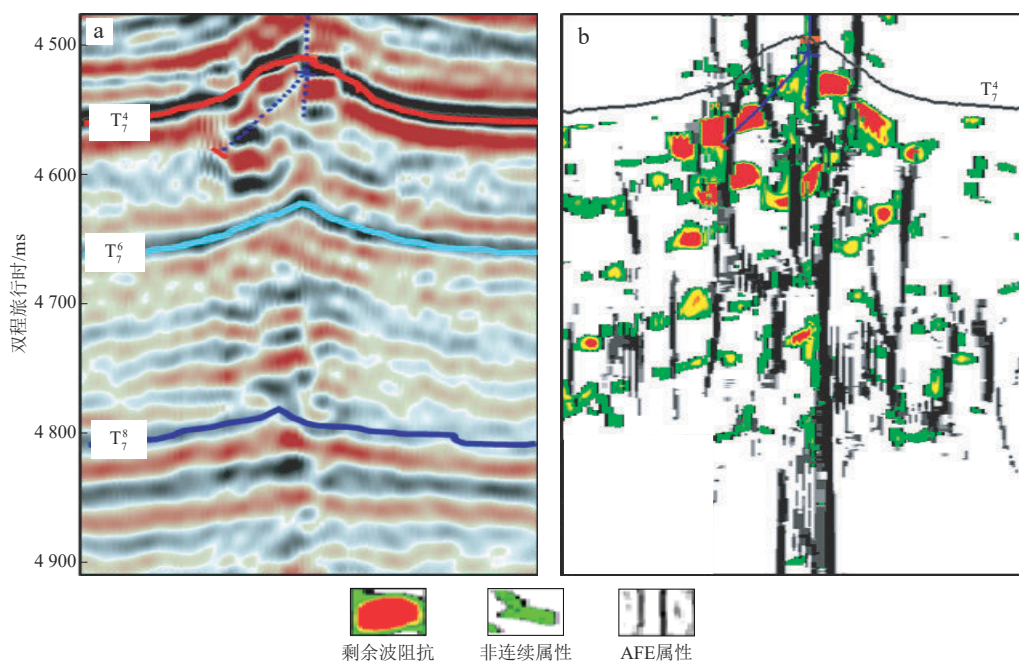


图4 顺北油气田破碎型断溶体的地震属性剖面

Fig. 4 Seismic attribute profiles of highly fractured and weakly dissolved fault-karst reservoirs in the Shunbei oil and gas field

a. 原始地震剖面; b. 剩余波阻抗剖面

T_7^4 : 鹰山组上段顶面; T_7^6 : 鹰山组下段顶面; T_7^8 : 蓬莱坝组顶面

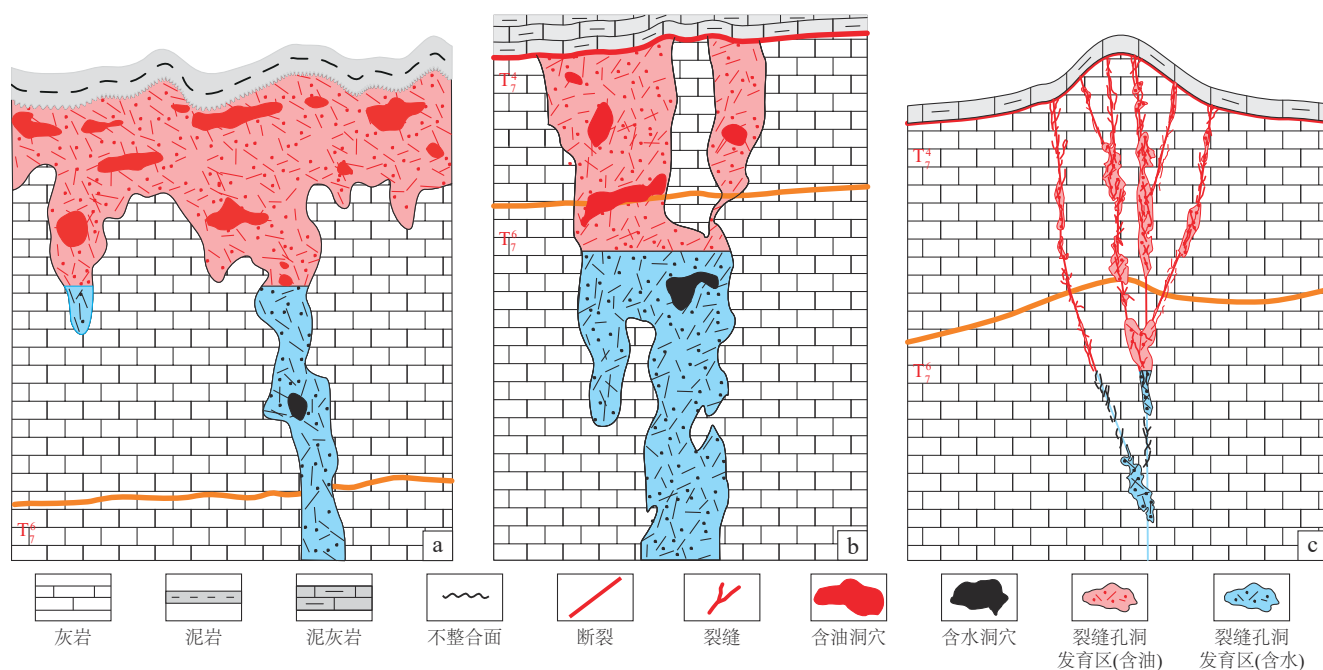


图5 塔北地区不同岩溶条件下3类断溶体油藏剖面示意图

Fig. 5 Schematic diagrams showing the cross-sections of the three types of fault-karst reservoirs under different karst conditions in the Tabei area

a. 塔北风化剥蚀区“过溶蚀残留型”; b. 塔河南覆盖区“破碎+强溶蚀型”; c. 顺北深埋地区“强破碎+弱溶蚀型”

育规模。对于主干断裂带,以溶洞型和裂缝孔洞型储层为主,放空漏失率达62%,实钻平均洞高达8.6 m (表2),岩心可见规模的溶孔发育(图6b)。生产井表

现为中-高累产、地层能量强、稳产能力强的特征,单位压降采油量达6 000~18 000 t/MPa(图7)。试井压力导数曲线比较光滑,这类断溶体油藏常未见边界响

表2 塔北地区不同岩溶区带实钻“洞穴”高度统计

Table 2 Statistics of drilled caves' heights in different karst zones of the Tabei area

油藏类型	分布区域	样本数/个	高度/m	平均高度/m
过溶蚀残留型	岩溶区构造高部位	56	0.62 ~ 51.00	10.40
	岩溶区斜坡带	158	0.24 ~ 47.50	9.82
破碎+强溶蚀型	托甫台断控区	22	0.18 ~ 19.00	4.71
	跃进断控区	5	0.25 ~ 7.57	3.91
强破碎+弱溶蚀型	顺北断控区	10	0.41 ~ 1.00	0.96

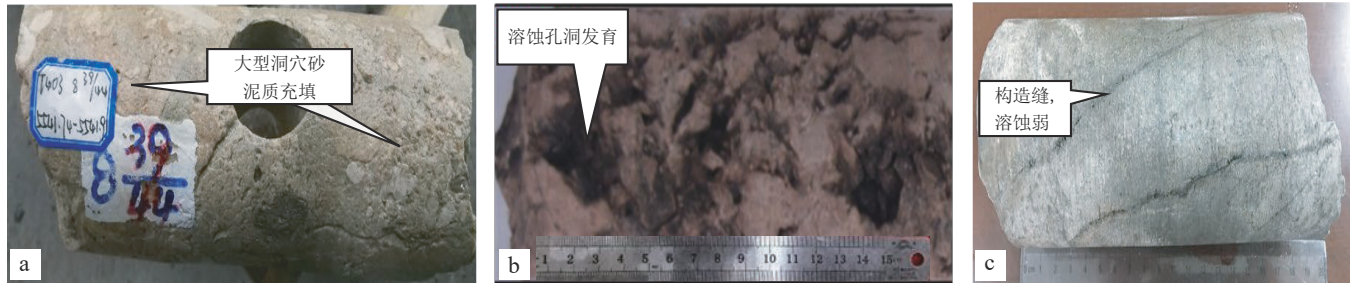


图6 塔北地区不同岩溶条件下3类断溶体油藏岩心特征

Fig. 6 Core characteristics of the three types of fault-karst reservoirs under different karst conditions in the Tabei area

a. “过溶蚀残留型”, T403井, 砂、泥质充填溶洞; b. “破碎+强溶蚀型”, TH12382井, 溶蚀孔洞发育; c. “强破碎+弱溶蚀型”, SHB5-1X井, 裂缝发育, 未见溶蚀现象

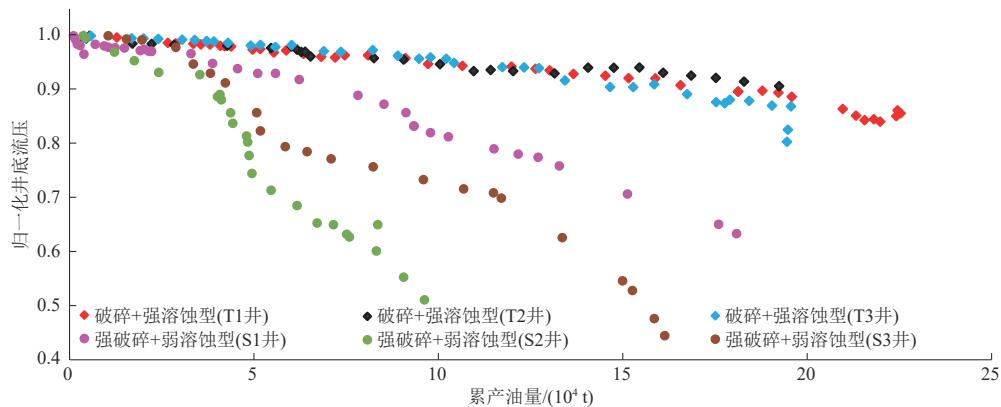


图7 塔北地区断溶体油藏典型生产井流压随累产变化散点图

Fig. 7 Scatter diagram showing the flow pressure varying with cumulative oil production in typical production wells of fault-karst reservoirs in the Tabei area

(菱形为塔河南覆盖区“破碎+强溶蚀型”生产井; 圆形为顺北深埋地区“强破碎+弱溶蚀型”生产井。)

应,属缝洞规模较大的双重介质油藏(图8b)。对于次级断裂带,则以裂缝-孔洞型和裂缝型储层为主,生产井常表现为定容特征,地层能量不足,产能快速下降,说明该类型缝洞规模较小,缝洞连通性差。

3.3 强破碎+弱溶蚀型

以顺托果勒低隆地区顺北1号和5号断裂带为代表,对比过溶蚀残留型和破碎+强溶蚀型两类断溶体油藏,流体对断裂的改造作用明显减弱,储集空间的生

成主要依赖于断裂的构造破碎作用。顺北深埋地区溶洞高度仅0.96 m(表2),岩心以发育直立缝为主,未见沿缝溶蚀扩大现象(图6c)。生产井产能较高、地层能量较强,但稳产能力偏弱,单位压降采油量在800~6500 t/MPa(图7)。试井压力导数曲线多表现为尖峰状抖动,分析认为强破碎储集体上下或者横向连通裂缝宽窄尺度较大,连通不畅,导致压力传导速度有较大起伏。结合生产状况,说明井周外围无远端有效储集体供给,物性变差(图8c)。

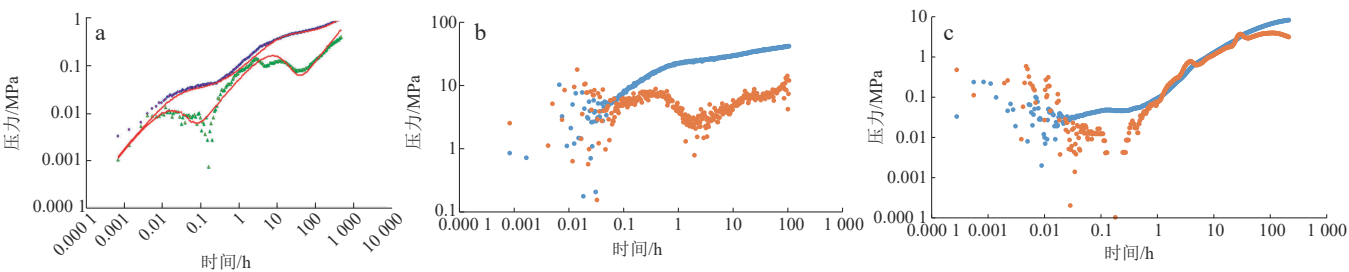


图8 塔北地区断溶体油藏典型生产井试井压力双对数曲线

Fig. 8 Log-log curves of typical production wells for fault-karst reservoirs in the Tabei area

a. 塔河剥蚀区“过溶蚀残留型”(T1井);b. 塔河南覆盖区“破碎+强溶蚀型”(T2井);c. 顺北深埋区“强破碎+弱溶蚀型”(T3井)

4 断溶体油藏认识及意义

前人曾对碳酸盐岩断溶体油藏的内涵、分类进行过探讨,并阐述了不同类型油藏的成因机制、发育特征以及相应的生产特征^[3-4,14]。通过近年来对断溶体油藏的勘探开发实践,对断溶体油藏的认识有了进一步的深化。

4.1 断溶体油藏认识

1) 断溶体油藏是自然界存在的较为特殊的油气藏类型,也是塔北奥陶系海相致密碳酸盐岩地层物性封堵的新类型。油气藏的形态多样、规模大小不等、油柱高度各异,油藏能量和开发动态差异明显(表3)。

2) 断溶体油藏的形成和分布受不整合面溶蚀与构造断裂溶蚀的共同作用。过溶蚀残留型油藏的分布一方面受控于风化壳不整合面的溶蚀,另一方面受断裂带的纵向溶蚀作用影响;破碎+强溶蚀型及强破碎+弱溶蚀型油藏的形成和分布与不整合面的发育和构造位置关系不大,主要受溶蚀断裂带“破碎+溶蚀程度”控制,在溶蚀断裂带核部发育规模较大的洞穴,向两侧逐步发育裂缝-孔洞型、裂缝型储层。

3) 由于不同溶蚀断裂带以及同一断裂带的不同

溶蚀段和缝洞结构丰富多样,导致断溶体圈闭形态各有不同。加之油气输导和成藏动力学的差异,致使不同断裂带及其同一断裂带不同段油藏的连通性、油气富集程度和单井产能差别明显。

对比分析不同缝洞带油井初期产能情况,TP12CX缝洞带受北东向深大断裂及其伴生断裂控制,岩溶作用强、储集体发育规模大、油气充注程度高,油井单井产能较高,初期产能达到86.7 t/d;中部TP7缝洞区位于北西向、近东西向和北东向断裂交汇区,断裂和局部构造有利区油井产能较高,西部外扩井含水快速上升以及东部外扩井供液不足导致产量快速下降,建产井初期产能为45.1 t/d;北部TP8缝洞区储集体发育及油气富集主要受TP20北东向、TP6北西向和TP24北西向断裂控制,局部井区良里塔格水系沿T₇—T₇断裂下渗对一间房组早期缝洞系统存在进一步的溶蚀和改造作用,建产井平均初期产能为40 t/d;南部TP10CH缝洞区受北西向深大断裂控制,该深大断裂与北东向深大断裂带相比,连续性相对较差,受喜马拉雅期北东向最大主应力影响,断裂带开启程度受到一定程度限制,油气充注程度较北东向断裂带差,建产井单井平均产能为36.4 t/d;TP14缝洞区油水关系复杂,该缝洞区内完钻井5口,3口钻遇水层,2口测试油水同出且后期地层供液不足,建产井平均初期产能

表3 塔北地区不同成因类型断溶体油藏断裂特征及油藏特征

Table 3 Fault and other characteristics of the three types of fault-karst reservoirs in the Tabei area

成因类型	断溶体油藏	断裂特征			油藏特征				
		长度/km	破碎带宽度/km	破碎带深度/km	溶洞钻遇率/%	溶洞高度/m	油柱高度/m	初期产能/(t/d)	累产/(10 ⁴ t)
过溶蚀残留型	TP101	11.6	0.24~2.3	1.5~1.8	38.1	3.3	96.0	108.0	31.9
破碎+强溶蚀型	TP249X	6.8	0.1~0.3	1.5~1.8	16.7	3.0	105.0	48.0	8.6
强破碎+弱溶蚀型	TP12CX	7.8	0.3~2.4	1.5~1.8	46.7	4.9	93.0	164.0	6.4
	TP315	8.3	0.2~1.6	0.9~1.2	21.4	2.7	81.0	71.8	12.9
	TP310	10.5	0.1~0.8	0.9~1.2	10.0	1.2	110.0	66.0	22.1

为18.5 t/d(图9)。

4.2 断溶体油藏意义

从油藏地质角度看,以溶蚀断裂带(走滑或逆冲断裂带)为核心、差异溶蚀改造为基础所形成的断溶体油藏及相关地质认识,开拓了油气勘探开发的思路和领域。对于油气开发而言,利用断溶体概念及相关地质认识,实现了塔里木盆地碳酸盐岩油藏性质的再认识、再深化,勘探开发目标从前期的潜山风化壳油藏逐渐转向断溶体油藏,从准层状的不整合面储集体向板状缝洞体开发转移,拓展了以塔河油田为代表的“串珠反射+残丘高点”开发思路,由前期的“以串珠为中心找洞、按缝洞布井、逐洞开发”转变为“断裂溶蚀带有利储层发育段,划分不同规模的断溶体,按断溶体分段评价、逐段开发”,有利支撑了塔河油田的持续稳产以及顺北油气田的高效开发评价和规模建产。

5 结论

1) 从断溶体油藏成因的角度,依据溶蚀作用和构造破裂作用的差异性,可将断溶体油藏的结构模式进一步划分过溶蚀残留型、破碎+强溶蚀型、强破碎+弱溶蚀型。

2) 不同成因类型的断溶体油藏特征差异明显。从塔河北部风化剥蚀区“过溶蚀残留型”断溶体—塔河南覆盖区“破碎+强溶蚀型”断溶体—顺北深埋区“强破碎+弱溶蚀型”断溶体,缝洞规模变小,溶蚀程度依次变弱,累产量及地层能量依次变低,缝洞间连通性变差。

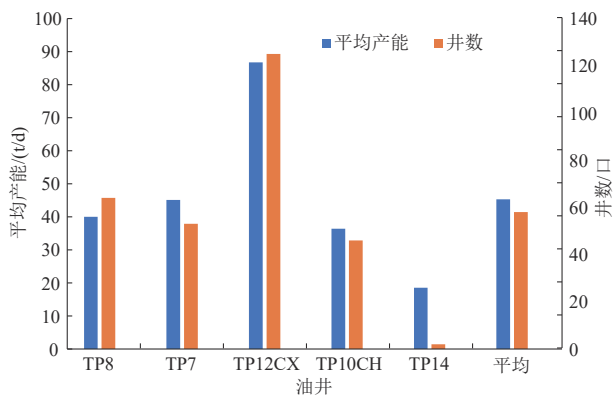


图9 托甫台区不同缝洞带油井投产初期产能分级

Fig. 9 Grading of the initial productivity of oil wells in different fractured-vuggy zones in the Tuofutai area

3) 基于研究区断溶体油藏勘探开发实践得到了如下启示,砂岩、石灰岩、白云岩以及硬石膏甚至盐岩地层内都可以发育不同级次的断裂、裂缝带,只要具备适当的成藏条件,即可成为油气运移和聚集的有利区域,值得持续深化研究。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.
ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [2] 罗平, 张静, 刘伟, 等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 36-50.
LUO Ping, ZHANG Jing, LIU Wei, et al. Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 36-50.
- [3] 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.
- [4] 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: 587-605.
- [5] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [6] 加弗里什. 深断裂在石油及天然气运移和聚集中的作用[M]. 金衍泰, 译. 北京: 石油工业出版社, 1988: 14-75.
ГАВРИШ В К. The role of deep faults in the migration and accumulation of oil and gas[M]. JIN Yantai, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 14-75.
- [7] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 156-165.
JIA Chengzao. Structural features and hydrocarbon in Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 156-165.
- [8] 焦方正, 翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田——塔河油田勘探研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-135.
JIAO Fangzheng, ZHAI Xiaoxian. A unconventional large oil and gas field of marine carbonate rock: Exploration research and practice of Tahe oil-field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,

- 2008: 1-135.
- [9] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323-331.
- ZHAI Xiaoxian. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(4): 323-331.
- [10] 吕修祥, 杨宁, 周新源, 等. 塔里木盆地断裂活动对奥陶系碳酸盐岩储层的影响[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(增刊1): 48-54.
- LYU Xiuxiang, YANG Ning, ZHOU Xinyuan, et al. Influence of fault activity on Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2008, 38(S1): 48-54.
- [11] 罗群, 姜振学, 庞雄奇. 断裂控藏机理与模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 145-196.
- LUO Qun, JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi. Mechanism and model of fault controlling petroleum accumulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 145-196.
- [12] 郭光辉, 陈志勇, 曲泰来, 等. 塔里木盆地走滑带碳酸盐岩断裂相特征及其与油气关系[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 219-227.
- WU Guanghui, CHEN Zhiyong, QU Tailai, et al. Characteristics of the strike-slip fault facies in Ordovician carbonate in the Tarim Basin, and its relations to hydrocarbon[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 219-227.
- [13] 金之钧. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展(之二)——以塔里木盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 281-288, 294.
- JIN Zhijun. New progresses in research of China's typical superimposed basins and reservoiring of hydrocarbons (Part II): Taking Tarim Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 281-288, 294.
- [14] 何治亮, 陈强路, 钱一雄, 等. 塔里木盆地中央隆起区油气勘探方向[J]. 石油天然气地质, 2006, 27(6): 769-778.
- HE Zhiliang, CHEN Qianglu, QIAN Yixiong, et al. Hydrocarbon exploration targets in central uplift area of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 769-778.
- [15] 何登发, 贾承造, 周新源, 等. 多旋回叠合盆地构造控油原理[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 1-9.
- HE Dengfa, JIA Chengzao, ZHOU Xinyuan, et al. Control principles of structures and tectonics over hydrocarbon accumulation and distribution in multi-stage superimposed basins [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 26(3): 1-9.
- [16] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 827-844.
- ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 827-844.
- [17] 吕海涛, 耿锋, 毛庆言, 等. 塔里木盆地阿瓦提北—顺托果勒北地区有利勘探方向分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 8-13.
- LYU Haitao, GENG Feng, MAO Qingyan, et al. Favorable exploration targets in northern Avat and northern Shuntuoguole areas, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(1): 8-13.
- [18] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 820-835.
- DU Jinhu, LI Xiangbo, BAO Hongping, et al. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 820-835.
- [19] 罗群, 黄捍东, 庞雄奇, 等. 自然界可能存在的断层体圈闭[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 148-150.
- LUO Qun, HUANG Handong, PANG Xiongqi, et al. A kind of possible natural fault petroleum trap [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 148-150.
- [20] 程洪, 汪彦, 鲁新便. 塔河地区深层碳酸盐岩断溶体圈闭类型及特征[J]. 石油学报, 2020, 41(3): 301-309.
- CHENG Hong, WANG Yan, LU Xinbian. Classifications and characteristics of deep carbonate fault-karst trap in Tahe area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 41(3): 301-309.

(编辑 董奕含)