

# 超深断控型油气藏差异富集程度分析方法及应用

——以塔里木盆地富满油田为例

常少英<sup>1\*</sup>, 李世银<sup>2</sup>, 王孟修<sup>1</sup>, 乔俊程<sup>3</sup>, 杜一凡<sup>1</sup>, 王彭<sup>2</sup>

1 中国石油杭州地质研究院, 杭州 100233

2 塔里木油田分公司勘探开发研究院, 库尔勒 841000

3 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102600

\* 通信作者, csy991@163.com

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-03-29

中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性重大科技专项《叠合盆地中下组合油气成藏与保持机制研究》(2023ZZ02) 和中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩专项项目“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(2023ZZ16-01) 联合资助

**摘要** 断控缝洞型油气藏在塔里木盆地碳酸盐岩领域勘探开发中占有重要地位。针对不同断裂、同一断裂不同段油气开发效果差异明显、油气富集特征不清晰, 影响了超深层高效开发效果的问题。以塔里木盆地富满油田一间房组—鹰山组为例, 采用钻井数据、高品质三维地震数据和生产动态数据, 开展超深走滑断裂对油气富集程度的控制作用研究。结果表明: ①断裂带控制油气富集主要受断裂与烃源岩接触关系、优势运移通道及储集体规模三方面因素控制; ②通过已钻井生产效果的对比分析, 构建了通源性、断裂疏导、储集体储量规模与油气富集的定量关系, 完善了一套超深断控油气藏差异化富集程度的评价计算方法; ③深大断裂通源性是断控油气藏富集程度的重要影响因素, 断裂与烃源岩接触关系好、运移通道上下连通性好、有效储集体规模大的油藏富集程度高。利用新方法对富满油田 19 号断裂油气富集程度进行评价, 其结果与钻探成果符合率达 92%。基于断控缝洞体油藏断裂“三性”分析新认识, 形成了一种断控缝洞型油气藏富集程度评价方法, 并对塔里木盆地其他类似油田高效开发实践具有较好的借鉴意义。

**关键词** 走滑断裂带; 构造样式; 油气垂向运移; 断裂疏导; 通源性; 油气富集

**中图分类号**: TE132.1; P62

## Analysis method and application of differential enrichment of ultra-deep fault-controlled reservoirs: A case study of the Fuman Oilfield in the Tarim Basin

CHANG Shaoying<sup>1</sup>, LI Shiyin<sup>2</sup>, WANG Mengxiu<sup>1</sup>, QIAO Juncheng<sup>3</sup>, DU Yifan<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>

1 PetroChina Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

引用格式: 常少英, 李世银, 王孟修, 乔俊程, 杜一凡, 王彭. 超深断控型油气藏差异富集程度分析方法及应用——以塔里木盆地富满油田为例. 石油科学通报, 2024, 09(06): 899-910

CHANG Shaoying, LI Shiyin, WANG Mengxiu, QIAO Juncheng, DU Yifan, WANG Peng. Analysis method and application of differential enrichment of ultra-deep fault-controlled reservoirs—A case study of the Fuman Oilfield in the Tarim Basin. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(06): 899-910. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.069

2 Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China

3 College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Received: 2023-11-17; Revised: 2024-03-29

**Abstract** The fault-controlled fracture-cavity type oil and gas reservoir plays an important role in the exploration and development of oil and gas in the carbonate rocks of the Tarim Basin. Research shows that there are significant differences in the oil and gas development effects in different fractures or different segments of the same fracture in the Fuman Oilfield, leading to unclear oil and gas accumulation characteristics and affecting the efficient development of ultra-deep layers. This paper takes the strata from the Yijianfang Group to the Yingshan Group in the Fuman Oilfield of the Tarim Basin as an example, using drilling data, high-quality 3D seismic data, and production dynamic data to study the control effect of ultra-deep strike-slip faults on the degree of oil and gas accumulation. The results show that:(1)The oil and gas accumulation in the fault zone is mainly controlled by three factors: the contact relationship between the fault and the source rock, the fault's role as a migration pathway, and the size of the reservoir.(2)By comparing and analyzing the drilling production results, the paper establishes a quantitative relationship between the connectivity of the source, the fault's guiding role, the scale of the reservoir, and oil and gas accumulation, improving a set of evaluation and calculation methods for the differentiated accumulation degree of ultra-deep fault-controlled oil and gas reservoirs.(3)The source connectivity of deep and large faults is an important factor affecting the accumulation degree of fault-controlled oil and gas reservoirs. The higher the oil and gas accumulation, the better the contact between the fault and the source rock, the better the vertical connectivity of the migration pathway, and the larger the effective reservoir scale.

This paper proposes a new understanding of the “source connectivity” analysis of fractures in fault-controlled fracture-cavity reservoirs and develops an evaluation technique for ultra-deep carbonate “fault-controlled oil and gas reservoir formation”. Using this method, the oil and gas accumulation degree of the FI 19 fault zone in the Fuman Oilfield was analyzed, with a match rate of 92% to the well data. This method has good reference value for the further development practice of other oilfields in the Tarim Basin.

**Keywords** strike-slip fault zone; structural style; vertical transport of oil and gas; fault-controlled fluid migration; source-connectivity; oil and gas enrichment

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.069

## 0 引言

塔里木盆地富满油田走滑断裂系统比较发育, 断裂与储层、油气的关系密切, 形成了典型的碳酸盐岩断控缝洞型油藏。塔里木油田已建成 300 万 t 原油生产基地, 其中超深断控缝洞型碳酸盐岩油气藏占主导地位, 区内勘探开发目标的部署受控于走滑断裂, 且油气成果相当丰富, 建产率达 90% 以上, 使得该区成为塔里木盆地重点勘探、开发的油气阵地<sup>[1]</sup>。从塔里木油田塔北地区北部到富满油田, 储层成因类型由“潜山岩溶型”到“层控岩溶型”向“断控缝洞型”逐步演化, 钻探井型由直井、水平井向多个靶点定向的井型转化, 储集体类型从“断溶体”转变为“断控缝洞体”、研究思路从断裂分块向走滑断裂条带状分段转变, 这些转变也成为了塔里木盆地富满油田勘探开发破题解困的有效途径<sup>[2]</sup>, 具体在生产中体现在: 以往在碳酸盐岩潜山岩溶区以及在缓坡层间岩溶区, 进行油藏勘探的模式是找地震“串珠”反射特征和构造高点<sup>[3]</sup>; 随着塔里木盆地勘探开发地质认识的深化, 向 8000~10000 m 超深层求产, 主要沿走滑断裂进行井位

部署。但在实践过程中发现不同的断裂带、甚至同一条断裂带的不同构造段、主次断裂不同的组合样式以及离主断裂带的距离远近都会对单井的产量有较大的影响。但深层—超深层的走滑断裂是如何控制油气富集的, 一直没有明确的认识, 现有的“断溶体”模式无法满足塔里木油田进一步开发挖潜的需要, 因此需要进一步的深化研究<sup>[4-5]</sup>。

要搞清楚断裂是如何影响、控制碳酸盐岩油藏富集的关键就是弄清楚走滑断裂的通源性问题。富满油田深层—超深层发育了多条不同几何构造样式和规模差异的走滑断裂, 但受构造期次和地层能干性的影响, 走滑断裂的通源性还需要进一步定量评价。走滑断裂能否直接沟通油源、输导油气, 与深大断裂与烃源岩接触关系和主要储集层的位置匹配关系非常密切<sup>[6]</sup>, 目前开展此项研究的学者并不多。

因此, 本文基于对富满油田走滑断裂带的内部结构、地震断裂识别属性变化等特征, 以及生产动态的综合分析, 从深大断裂能否有效沟通寒武系烃源岩、纵向优势运移通道评价等作为走滑断裂通源性评价的主要内容, 在此基础上研究断控缝洞型油藏的富集规

律。开展走滑断裂通源性方面的评价工作对塔里木盆地地下步高效产能井的部署决策产生积极作用。

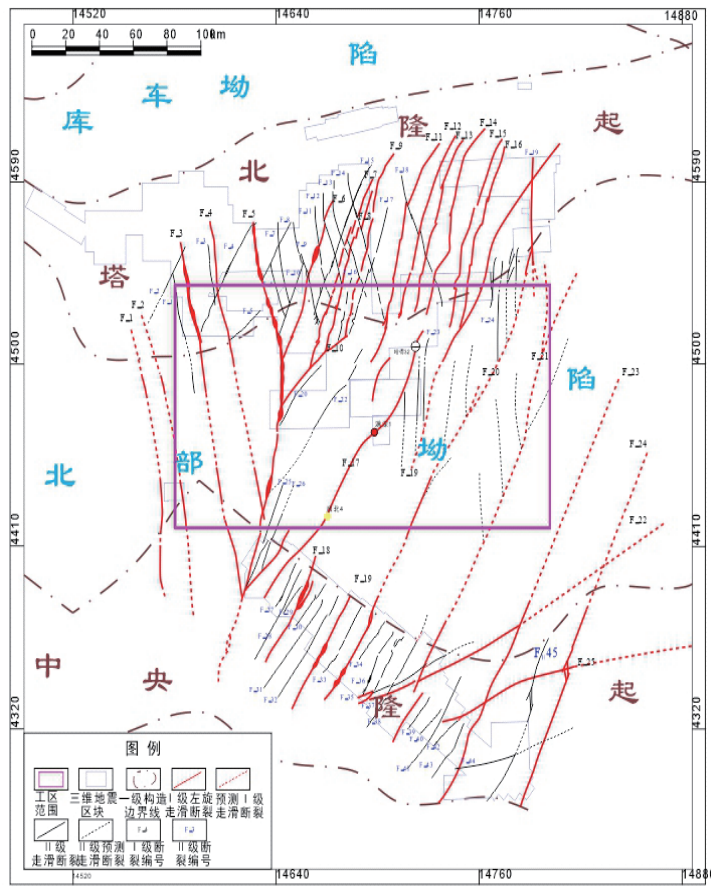
### 1 地质背景

富满油田构造位置位于塔里木盆地北部坳陷区的鞍部，北靠塔北隆起，南依塔中隆起，西邻阿瓦提凹陷，东接满加尔凹陷(图 1)。构造整体近马鞍状，目的层系为奥陶系一间房组—鹰山组<sup>[7-8]</sup>。富满油田油藏的主要成藏组合模式为“下生上储”，成藏条件有以下几方面的地质特点：①源灶供烃充分：富满油田下部发育下寒武统玉尔吐斯组烃源岩，具有分布范围广、沉积厚度大、烃源品质好的特征；②储、盖组合条件较为有利，在奥陶系一间房组—鹰山组沉积期间，砂屑滩相发育，同时受加里东中期隆升构造运动影响，叠加不同级别走滑断裂系统破碎改造，形成了优质的缝洞型储层<sup>[9]</sup>。其上覆地层桑塔木组为一套巨厚泥岩地层，是一套优质的区域盖层。因此，桑塔木组巨厚

泥岩与一间房组、鹰山组砂屑灰岩组成了一套有利的储、盖组合；③油气输导体系完备：研究区具有三类疏导方式，即深大断裂、不整合面、岩性疏导层，构成了完整的疏导体系。其中深大断裂起主要的疏导作用，是油气垂向运移的通道。主干断裂带活动强度大、油气充注强、富集程度高；次级断裂活动强度和规模则相对较小，储层规模也相对主干断裂带较小<sup>[10-11]</sup>。富满油田有效的输导体系，进一步形成“垂向通源、缝洞聚集”成藏模式。总体而言，富满油田成藏条件优越，但油气差异性富集规律是研究的重点。

### 2 断控缝洞体内部结构模式

走滑断裂平面上具有分段性，按力学性质和几何形态可以划分为压扭段、张扭段、平移段及走滑断裂端部的马尾段。通过对塔里木盆地柯坪地区“皮羌断裂”、“硫磺沟”、“大湾沟”、“一间房”、“肖尔布拉克”等地区 7 个露头区剖面进行解剖勘测，在野外露头走



(a)

地层系统		厚度/m	岩性	岩性特征		
系	统					
奥陶系	上奥陶统	铁阿瓦提组	O <sub>3</sub> tr	80-350	泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	
		桑塔木组	O <sub>3</sub> s	160-1300	巨厚深灰色泥岩与含泥岩互层	
		良里格组	O <sub>3</sub> l	4-20	薄层泥灰岩、含泥灰岩	
		吐休组	O <sub>3</sub> t	6-30	褐灰色、褐色泥晶灰岩、泥岩、含泥灰岩	
	中奥陶统	一间房组	O <sub>2</sub> y	100-170	浅褐色、灰褐色亮晶生屑砂屑灰岩、亮晶鲕粒灰岩、亮晶藻粘结灰岩、亮晶瓶椎石生物灰岩、夹少量泥晶灰岩	
		鹰山组	鹰一段	O <sub>1-2</sub> y	700-800	灰色厚层亮晶砂屑灰岩和泥晶灰岩
			鹰二段			
			鹰三段			
			鹰四段			
		蓬莱坝组	O <sub>1</sub> p	200-400	灰质云岩、含白云岩、白云岩、燧石、结核灰质云岩	

(b)

图 1 研究工区位置图(a)及地层柱状图(b)

Fig. 1 Location map of the study area (a) and stratigraphic column (b)



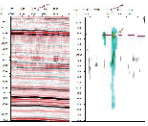

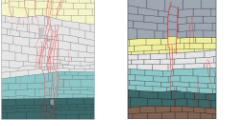
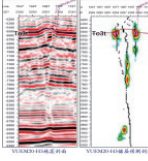

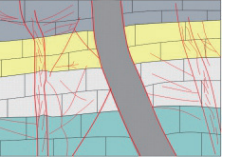
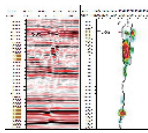

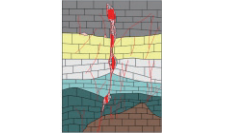
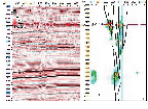

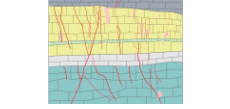
走滑断裂带内部结构类型	地质特征	地震刻画特征	露头特征	地质模式
平移段“单一结构”模式	发育在走滑断裂的平移带，主要成分为滑动面、断层上下盘滑动所产生的破碎带及少量断层角砾。			
压隆段“核带结构”模式	发育在走滑断层的压扭段，受控于剪切、挤压两种应力作用，发育断层核、断层破碎带及诱导裂缝带三种结构。断层核经历了粉碎、溶解、沉淀、矿物间的反应以及破坏原岩结构的力学—化学过程，形成低孔—低渗孔隙系统，不是最有效储集空间，断层破碎带及诱导裂缝带由于构造破碎增容作用，储层较发育，另外隆起的边坡部位接受大气淡水分流作用，发育岩溶储层。			
张扭段“空腔结构”模式	发育在拉张段，断层附近岩石会产生膨胀—剪切作用，断层两盘岩体在曲面化断层面上发生剪切—滑动，在特定的弯曲部位发生旋转—撕裂，诱发局部张引，产生破裂空腔，破裂空腔两侧发育的诱导裂缝带，发育断层空腔、断层破碎带及诱导裂缝带。			
端部“栅状缝网结构”模式	发育在走滑断裂的“马尾”段，即走滑断裂的端部，走滑断裂主位移带一端常常会分化成马尾状断裂，并沿走向逐渐消失，裂缝的发育不但增加了碳酸盐岩有效储集空间，连通了孤立孔洞，而且裂缝作为流体运移通道，还影响了储层的后期改造作用。			

图2 走滑断裂不同段内部结构特征

Fig. 2 Internal structural characteristics of different segments of a strike-slip fault

滑断裂不同部位观测到了不同的结构模式，分别为单一结构、压隆核带结构、张扭空腔结构、栅状缝网结构4类结构模型(图2)。

“单一结构”模式发育在走滑断裂的平移带，主要成分为：滑动面、断层上下盘滑动所产生的破碎带及少量断层角砾等地质要素。破碎带宽度约1.0~2.5 m，断裂上盘破碎、见风化剥蚀现象，断裂下盘发育有伴生的次级断裂及节理，断面上有摩擦面、断层擦痕及断层角砾岩。这种断裂带结构模式中大量错综复杂、相互交错的微裂隙的连通性较好，在未被后期充填胶结前可显著提高断裂带的渗透性。

“压隆核带结构”模式发育在走滑断层的压扭段，受控于剪切、挤压两种应力作用，发育断层核、断层破碎带及诱导裂缝带3种结构。断层核经历了粉碎、溶解、沉淀、矿物间的反应以及破坏原岩结构的力学—化学过程，形成低孔—低渗孔隙系统，不是最有效储集空间。断层破碎带缝网系统发育，破碎角砾在旋转、位移过程中形成“点—面”支撑结构洞穴和缝洞系统，是最有效的储集空间。断层破碎带两侧发育诱导裂缝带，裂缝系统以压剪缝为主，裂缝开度一般，储集性能较好。

“张扭空腔结构”模式发育在拉张段，断层附近岩石会产生膨胀—剪切作用，断层两盘岩体在曲面化断层面上发生剪切—滑动，在特定的弯曲部位发生

旋转—撕裂，诱发局部引张，产生破裂空腔，破裂空腔两侧发育的诱导裂缝带，发育断层核、断层破碎带及诱导裂缝带。断裂带发育特征：滑动破碎带宽约10~12 m，破碎强烈，发育有大量断层角砾岩，后期淋滤、充填有方解石脉。断层角砾岩成岩性好，为断层发育过程中摩擦形成的大量棱角状岩石碎块重新固结成岩，物性条件较差。滑动破碎带宽约30~45 cm，出露地表部分在长期风化、淋滤作用下，剥蚀严重，几乎无残留岩石，两盘诱导裂缝带破碎强烈，裂缝主要为方解石充填，宽度约50~90 cm。诱导裂缝带主要保留原岩性质，仅被大量错综复杂的裂隙所切割，出露地表部分也保留完整。脆性地层中发育的断裂，在发育演化过程中由于受到的力学性质变化、所受应力不均、岩性差异导致的压实程度不同、断面几何形态突变、裂缝的诱导扩张等因素的影响，往往会在不同部位出现大量大小不等的“断裂空腔”。

“栅状缝网结构”模式，发育在走滑断裂的“马尾”段，即走滑断裂的端部，走滑断裂主位移带一端常常会分化成马尾状断裂，并沿走向逐渐消失，裂缝的发育不但增加了碳酸盐岩有效储集空间，连通了孤立孔洞，而且裂缝作为流体运移通道，还影响了储层的后期改造作用。各类裂缝构成的网状裂缝系统有效地提高了哈拉哈塘—富满油田地区一间房组储层段储渗性能。

### 3 断控缝洞体差异控藏要素分析

断裂不仅是超深层形成储层的有利条件，也与油气富集息息相关。塔里木盆地富满油田断穿寒武系膏岩层的深大断裂，与生油岩连通，是石油运移的重要路径<sup>[12-13]</sup>。北东向走滑断裂形成于中加里东期，与形成于的近南北向走滑断裂相同，都断开中寒武统膏岩层，具有沟通寒武系烃源岩的能力<sup>[14-15]</sup>。根据油气向上运聚过程，按通源性的影响因素“源、运、聚”三步开展富满油田的通源性评价，即与烃源岩对接关系、优势运移通道评价、储集体规模大小。

#### 3.1 与烃源岩接触关系

走滑断裂与烃源岩接触关系，主要指走滑断裂是否断穿烃源岩地层，即断裂的同源性评价。富满油田碳酸盐岩成藏的主要油气来源是下寒武统玉尔吐斯组发育陆棚—盆地相的泥质烃源岩。因此，超深层走滑断裂是否与下寒武统玉尔吐斯组烃源岩接触，是富满地区评价走滑断裂通源性好坏的重要影响因素。笔者依据地震反射特征来表征走滑断裂与烃源岩地层接触

关系<sup>[16-18]</sup>，具体的可以用走滑断裂对烃源岩地层破裂作用的变形强度来描述，即变形强度等于地震反射波变形的高度除以变形的宽度(图3)。

将走滑断裂向下与烃源层的接触关系定性划分为4类(图4)：①“拉张错断”强沟通：地震剖面上特征为寒武系玉尔吐斯组烃源岩地层的地震同向轴受拉张

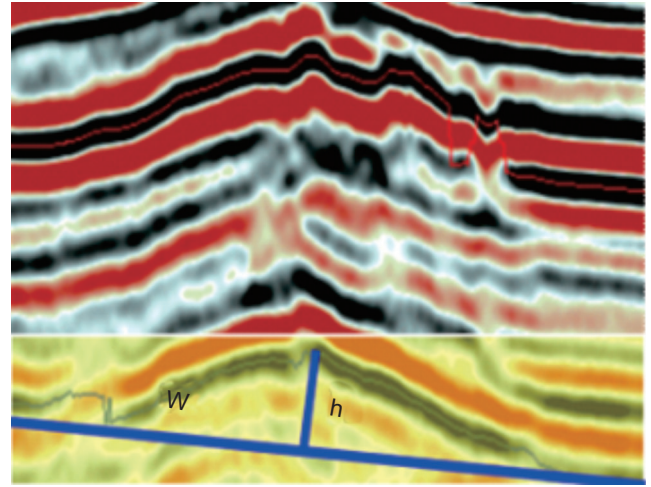


图3 地层变形强度计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram for calculating the intensity of stratal deformation

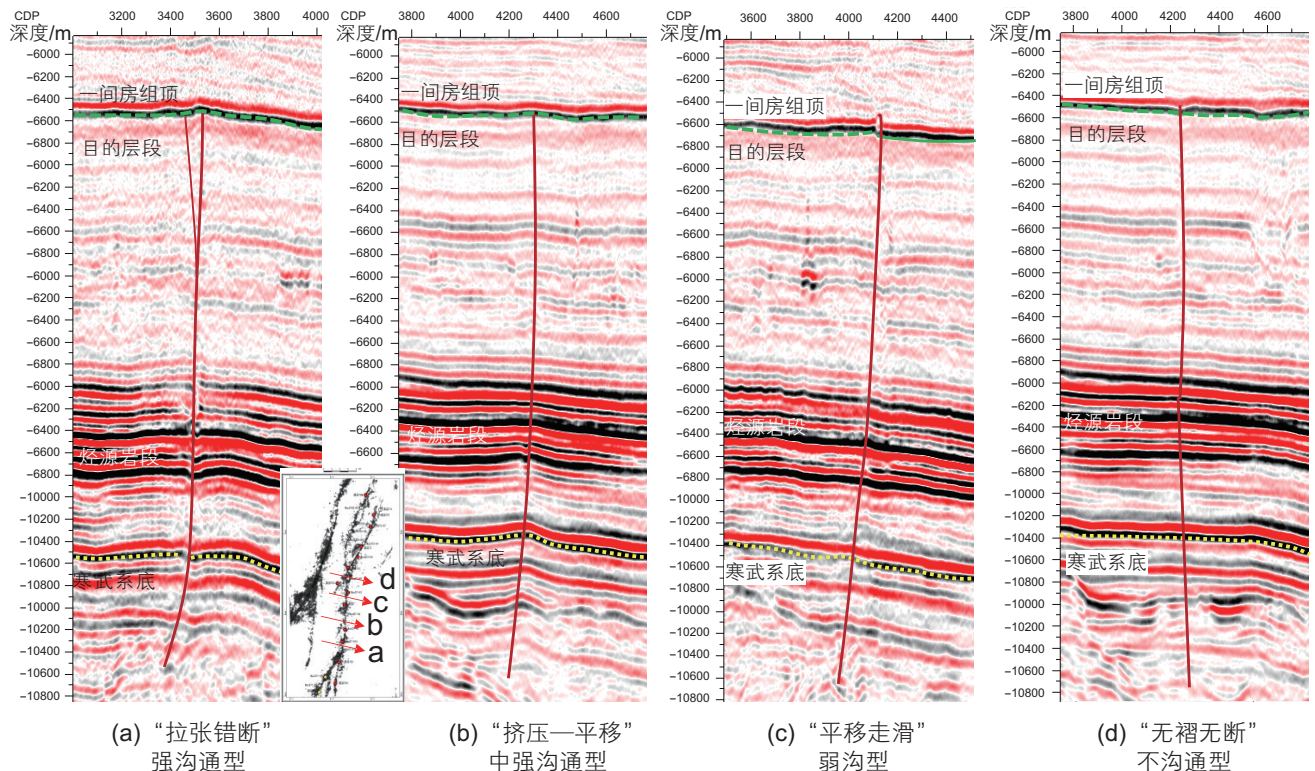


图4 通源断裂与烃源岩对接关系图

Fig. 4 Diagram showing the relationship between the Tongyuan fault and the hydrocarbon source rocks



应力作用完全错断(图 4a), 往往断距较大, 达到 1~2 个同相轴厚度; 在平面图上, 地震相干属性图上表现出明显的断裂特征, 这类断裂可指示与烃源岩具有较强的连通关系, 有利于油气向上运移; ②“挤压—平移”中强沟通: 地震剖面上特征为受挤压应力的影响, 玉尔吐斯组烃源岩地层的地震同相轴呈隆起错断(图 4b), 由于受挤压作用, 断裂纵向的渗透性较拉张断裂的差, 存在不够通畅的现象, 平面断裂预测图上断裂特征较明显; ③“平移走滑”弱沟通: 受水平应力影响, 寒武系玉尔吐斯组烃源岩地层的地震同相轴比较连续, 未见明显同相轴错断, 但有褶皱特征, 具有“层断波不断”的发育特征, 指示这类断裂与下伏烃源岩地层具有较差的沟通关系(图 4c); ④“无褶无断”不沟通: 断裂纵向上没有断到烃源岩地层(图 4d), 烃源岩地层振幅强弱没有变化, 也未发生明显的褶曲变形, 这类断裂可指示与下伏烃源岩无沟通关系。

### 3.2 优势运移通道评价

优势运移通道评价是对油气从生油层向储集层的主要运移路径的运移效率进行评估的过程。超深走滑断裂不同段的性质不一样且可能经过胶结充填, 作为油气疏导通道的性能有待进一步评价。基于野外露头模型建立“断裂特征认识”、“孔洞特征认识”专家标签数据集, 加入地震数据相位分解重构等数学原理, 利用多模态(露头、钻井、地震、生产动态)数据的多次叠加递进学习, 迭代 AI 训练, 得到契合实际生产的高精度断裂特征数据体, 实现了走滑断裂的内部结构地震表征, 进而分析断裂内部连通性。将塔里木盆地富满油田深大断裂与烃源地层的优势运移通道划分为 3 类(图 5, 图中颜色代表孔隙度大小): ①“上下一贯”式一类运移通道: 特征为在走滑断裂内部结构刻画剖面上, 缝洞储层较发育<sup>[19]</sup>, 储集体上下具有较好

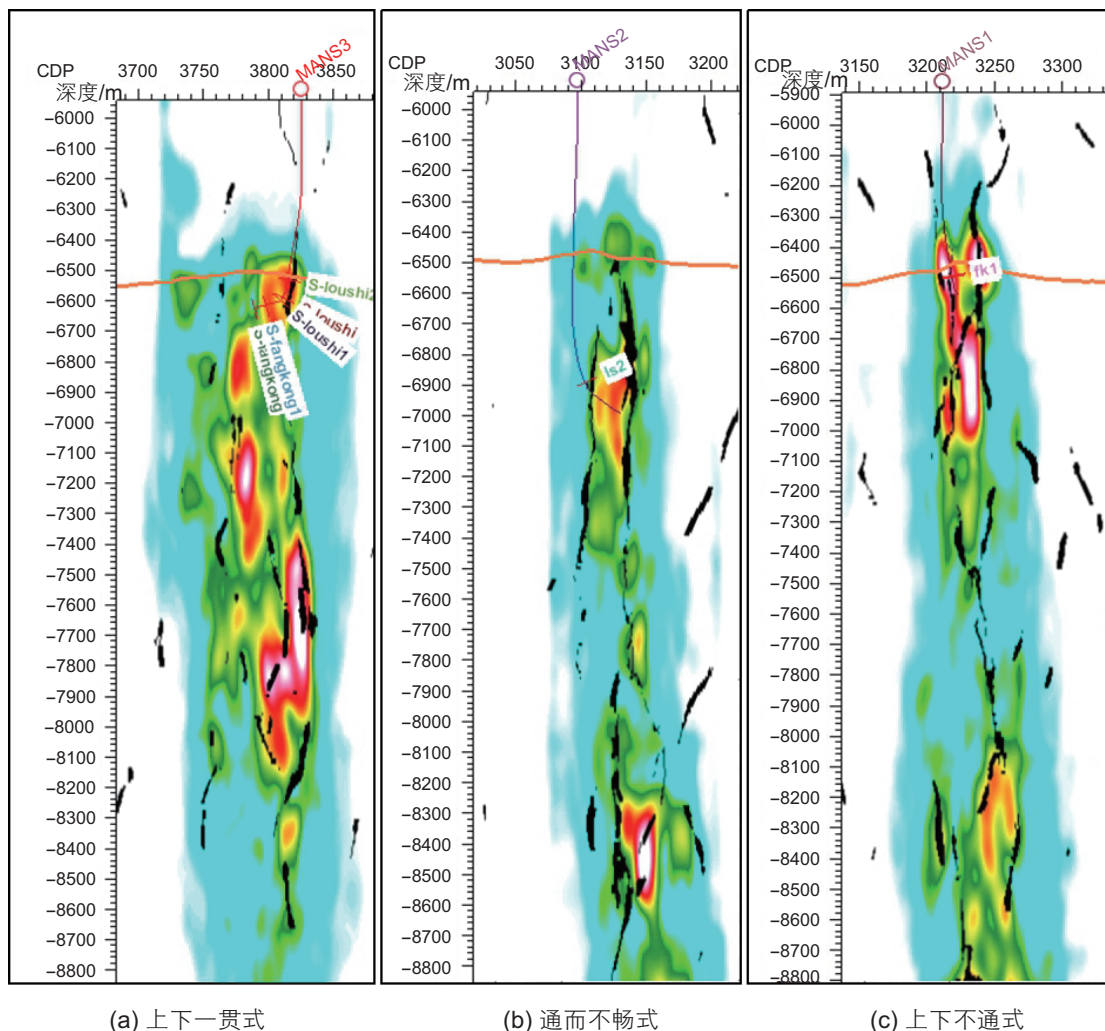


图 5 不同类型油气运移通道刻画图

Fig. 5 Diagram of different types of hydrocarbon migration pathways

的连通性(图 5a), 这类运移通道断裂特征指示其与寒武系玉尔吐斯组烃源岩地层有较强的沟通关系。钻井生产动态上表现为关井油压有轻微上升, 反映井筒供液好, 开井压力稳定; ②“通而不畅”式二类运移通道: 特征为在走滑断裂内部结构刻画纵向剖面上, 缝洞储层呈多段发育(图 5b), 且多段储集体之间有断裂相连, 流体在多段之间具有不通畅流通, 因此该类运移通道存在多段油藏生产动态上呈现“通而不畅”的特征; ③“上下不通”式三类运移通道: 特征为在走滑断裂内部结构刻画纵向剖面上, 缝洞储层也具有多段发育特征(图 5c), 但多段储集体之间无断裂相连, 为致密隔层, 流体在多段之间不能流通; 油藏生产动态上呈现油井钻遇浅层注水替油无效果, 加深钻探后, 油井生产仍保持原始地层压力的现象<sup>[20-21]</sup>。动静态资料均表明该类运移通道具有上下不连通的特征。

### 3.3 储集体规模评价

油气的“聚”, 则指油气聚集的场所, 即储集体。富满油田多年钻井实践及正演研究成果表明, 碳酸盐岩储层主要为洞穴型、孔洞型、裂缝—孔洞型和裂缝型, 地震常规剖面上储层主要表现为串珠状反射和杂乱状反射特征。碳酸盐岩断控缝洞储集体发育到一定规模时, 在地震剖面上往往表现为以低频率、较强振幅反射, 即“串珠”状反射, 钻井与地震标定表明当钻遇具有这种地震反射特征的储层时往往会遇到良好气测、溢流、井漏、钻具放空等现象, 对应的储层以洞穴为主。当碳酸盐岩断控缝洞储集体规模较小时, 地震剖面上往往表现为杂乱状反射特征, 钻井与地震标定表明当钻遇具有这种地震反射特征的储层时往往会见到气测或井漏现象, 该地震反射特征对应储层类型往往以孔洞及裂缝型储层为主。主要运用地震信息分析、地震属性分析和反演技术综合识别溶洞发育带和断层裂缝发育带, 预测碳酸盐岩有利储层分布范围, 并取得了较好的效果<sup>[22-23]</sup>。

根据测井声阻抗和孔隙度的关系, 将波阻抗反演体转化为孔隙度体, 并将孔隙度体网格化建立孔隙度模型, 计算每个网格内储层体积与相应孔隙度的乘积, 在三维空间求积分得到储层的有效总体积。

公式如下:

$$V = \iiint \Delta V(x,y,z) \times \Delta \Phi(x,y,z) dx dy dz \quad (1)$$

式中,  $\Delta V$ 是单位网格的有效体积,  $\Delta \Phi$ 是单位网格有效体积对应的孔隙度, 两者均随着空间变化而变化。

## 4 油气富集程度评价方法

针对富满油田同一断裂带不同段油气富集程度评价, 主要取决于每一段通源断裂的有效性以及该段储集体的规模。综合以上研究认识, 采用“断裂与烃源岩对接关系”、“优势运移通道评价”、“储集体规模大小”等条件来定量评价油气富集程度<sup>[24-26]</sup>, 建立富满油田一间房—鹰山组油气富集程度的模型, 其表达式为:

$$\begin{cases} BP_i = M_i \cdot F_i \cdot \frac{V_i}{V} \\ BP = \sum_{i=1}^m M_i \cdot F_i \cdot \frac{V_i}{V} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $BP$ 为整条断裂带的油气富集程度。 $BP_i$ 为第*i*段的油气富集程度, 其值为0~1;  $M_i$ 为第*i*段与烃源层的接触关系条件, 其取值为: 变形强度等于变形的高度除以变形的宽度;  $F_i$ 为第*i*段运移通道条件, 其取值为: “上下一贯”式取值为3; “通而不畅”式取值为2; “上下不通”式取值为1;  $V_i$ 为第*i*段油气储集体规模条件, 其取值为: 实际第*i*段容积法计算的有效储量;  $V$ 为整条断裂带的储集体储量规模;  $m$ 为断裂带总共划分的段数。油气富程度值 $BP_i$ 值越大, 说明所处的断裂段油藏越有利于油气聚集成藏, 油气钻探风险越小, 反之则不利于成藏, 有较大的钻探风险。

## 5 应用实效

利用提出的断控缝洞型油气藏富集程度评价方法, 对富满油田F19断裂带满深7井区17个油藏单元, 进行了地震相干属性进行断裂带宽度测量<sup>[27-29]</sup>以及地层变形幅度测量, 进而进行“断裂与烃源岩接触关系”的计算, 即断裂的通源性分析<sup>[30]</sup>(图6), “优势运移通道评价”即断裂的疏导性(图7)、“储集体规模大小(表1)”即储集性等三要素综合分析, 并将这3项油气富集程度控制因素采用权值叠加的耦合运算方法, 得出各个圈闭的油气富集程度值。根据圈闭油气钻探结果表明, 在油气富集程度值较大的圈闭中, 所有探井、评价井都钻遇了油层, 并出现千吨井的良好局面。

平移段多发育上下不通式, 赋值为1; 马尾段构造多见通而不畅型, 赋值为2; 叠接段发育上下一贯型, 赋值为3。

通过该类油气藏富集程度公式, 计算出每个油藏单元富集程度值(图8)。油气富集程度值在10~60之



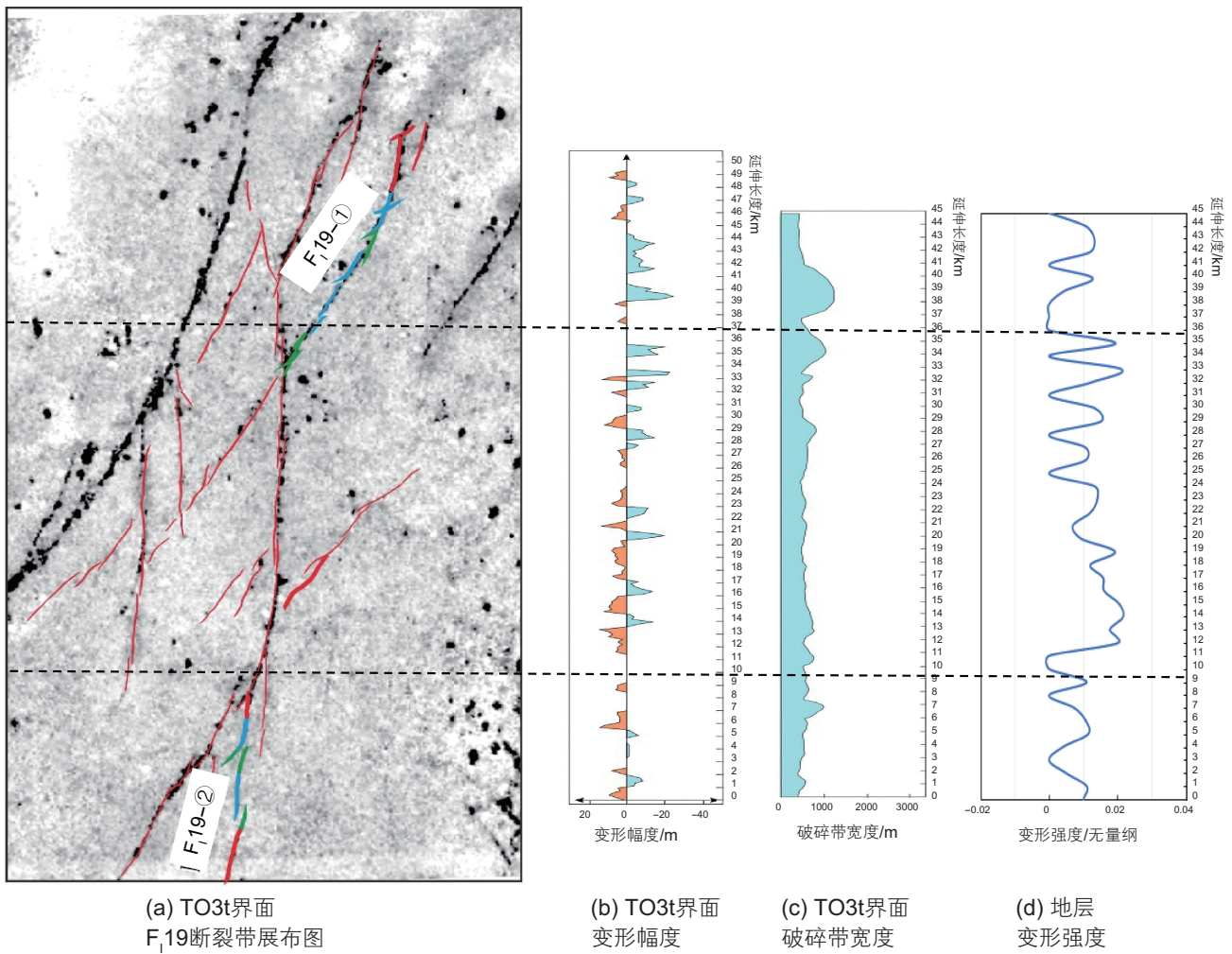


图 6 寒武系顶面地层变形强度图

Fig. 6 Map of stratal deformation intensity at the top of the Cambrian system

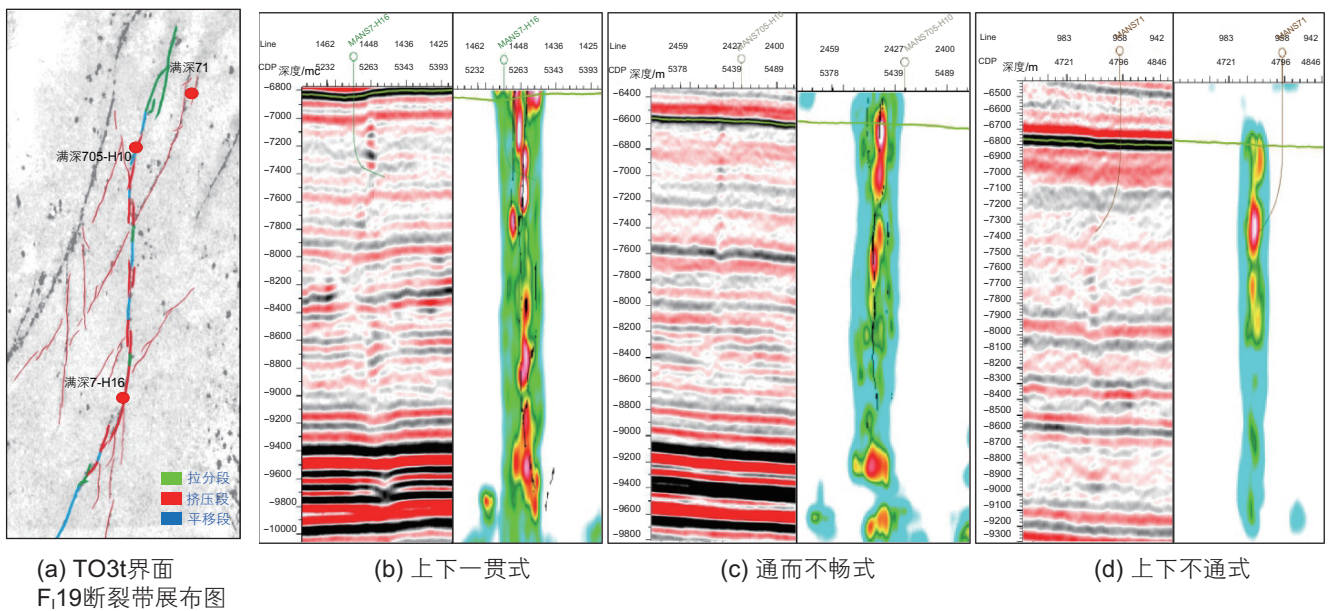


图 7 满深 3—满深 4 井区断裂带油藏单元疏导性评价图

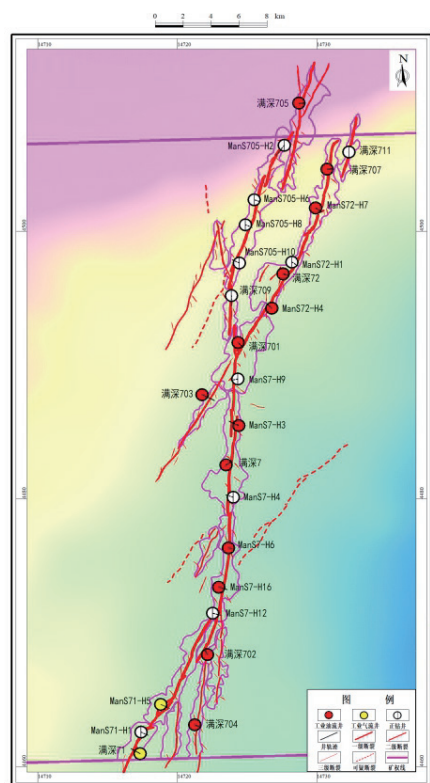
Fig. 7 Evaluation map of conductivity of oil reservoir units in the MS3-MS4 well area fault zone



表 1 F19 不同油藏单元储量计算数据表

Table 1 Reserves calculation data for different reservoir units of F19

油藏单元编号	包含井名	面积/km <sup>2</sup>	储量/万 t
满深 705	满深 705	9.56	869
满深 705-H2	ManS705-H2,ManS705-H6, ManS705-H8,ManS705-H10	13.24	1646
满深 711	满深 711	2.38	201
满深 72	满深 707, ManS72-H7,ManS72-H1,ManS72-H4,满深 72	16.46	1561
满深 705 西		2.92	189
满深 709	满深 709	2.31	192
满深 701	满深 701, ManS7-H9	12.91	956
满深 703	满深 703	3.17	186
满深 7	ManS7-H3,ManS7-H4, 满深 7	12.21	877
满深 7-H6-西		2.71	120
满深 702	ManS7-H6,ManS7-H16,ManS7-H12, 满深 702	11.41	287
满深 71-H5	ManS71-H5	8.76	605
满深 702-东		4.32	85
满深 71	ManS71-H1, 满深 71	4.41	347
满深 71-东		3.98	127
满深 704	满深 704	4.91	151
满深 7-H6	满深 7-H6	6.30	780



油藏单元编号	通源性	疏导性	储集性/万t	综合评价值	排名
满深705	0.15	1.0	869	13.04	7
满深705-H2	0.16	2.0	1646	52.67	3
满深711	0.04	1.0	201	0.80	14
满深72	0.14	2.0	1561	43.70	4
满深705西	0.03	1.0	189	0.56	16
满深709	0.13	3.0	192	7.48	9
满深701	0.07	3.0	956	20.07	6
满深703	0.14	2.0	186	5.21	10
满深7	0.15	3.0	877	39.46	5
满深7-H6-西	0.25	3.0	120	9.00	8
满深702	0.03	3.0	287	2.58	12
满深71-H5	0.45	2.0	605	54.45	2
满深702-东	0.02	2.0	85	0.34	17
满深71	0.11	1.0	347	3.82	11
满深71-东	0.06	1.0	127	0.76	15
满深704	0.03	2.0	151	0.91	13
满深7-H6	0.25	3.0	780	58.50	1

图 8 F19 不同油藏单元油气富集程度评价图

Fig. 8 Evaluation map of hydrocarbon enrichment degree for different reservoir units of F19

间的油藏单元中, 高效井的钻遇率约为 80%, 其余大多钻遇油水同层或含水层等; 而油气富集程度值小于 10 的圈闭中, 钻井显示大多为相对低产或水层。因此, 用“三要素”分析法来定量评价断控油藏的油气富集程度具有较好的实用性, 为下一步油气勘探的目标以及其他区块油气富集程度评价提供了有效技术借鉴。

## 5 结论

断控油藏差异富集程度评价是高效开发的必由之路, 断控油藏“三要素”分析法定量评价的油气富集程度具有较好的实用性, 为其他区块该类油气藏油气富集程度评价提供了有效技术借鉴。本次研究通过钻井、地震等动静态资料分析, 认为断控油藏成藏富集与“断裂与烃源岩对接关系”、“优势运移通道”、“储集体规模大小”等 3 个关键因素有关, 并提出了精

细化评价方法, 具体为:

(1) 富满地区走滑断裂将是否断到下寒武统的玉尔吐斯组烃源岩地层, 是本区走滑断裂通源性好坏的关键影响因素。划分为 4 类接触关系: “拉张错断”强沟通; “挤压—平移”中强沟通; “平移走滑”弱沟通; “无褶无断”未沟通, 提出“地层变形强度”的参数予以表征。

(2) 划分 3 类走滑断裂向下与烃源层的运移通道, “上下一贯式”为一类运移通道, 油气往往最富集; “通而不畅式”为二类运移通道, 油气富集程度减弱, 产能差—中等; 而“上下不通”三类运移通道, 油气产能通常很低甚至失利。

(3) 断控储集体规模评价主要运用地震信息分析识别溶洞发育带和断层裂缝发育带, 根据测井声阻抗和孔隙度的关系, 将波阻抗反演体转化为孔隙度体, 进而利用容积法计算储集体的规模。

## 参考文献

- [1] 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 X X. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 323–331.]
- [2] 金晓辉, 闫相宾, 李铁军, 等. 塔里木盆地油气勘探实践与发现规律探讨[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 45–52. [JIN X H, YAN X B, LI T J, et al. A discussion on gas and oil exploration activities and discovery patterns in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 45–52.]
- [3] 常少英, 李世银, 乔占峰, 等. 碳酸盐岩风化壳岩溶地震弱振幅储层识别技术的应用——以塔里木盆地 TZ62 井区为例[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 91–96. [CHANG S Y, LI S Y, QIAO Z F, et al. Application of weak amplitude reservoir identification technology in karst reservoir of carbonate weathered crust: An example study of TZ62 well area in Tarim Basin[J]. Marine Origin petroleum Geology, 2019, 24(3): 91–96.]
- [4] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771–779. [QI L X. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 771–779.]
- [5] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788–798. [YUN L, CAO Z C. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788–798.]
- [6] 马庆佑, 曹自成, 蒋华山, 等. 塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性及其与油气富集的关系[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 327–334. [MA Q Y, CAO Z C, JIANG H S, et al. The source connectivity of strike-slip fault zone in Tahe-Shunbei area and its relationship with oil and gas enrichment[J]. Marine Origin petroleum Geology, 2020, 25(4): 327–334.]
- [7] 常少英, 曾溅辉, 徐旭辉, 等. 碳酸盐岩断控缝洞体内部结构识别技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(2): 414–422. [CHANG S Y, ZENG J H, XU X H. Identification technology and application of internal structure of carbonate fault solution[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(2): 414–422.]
- [8] 常少英, 崔仕提, 曹鹏, 等. 碳酸盐岩断控缝洞体构型地震表征关键技术及应用[J]. 海相油气地质, 2022, 27(2): 192–200. [CHANG S Y, CUI S T, CAO P. Key technology and application of seismic characterization of carbonate fault solution configuration[J]. Marine Origin petroleum Geology, 2022, 27(2): 192–200.]
- [9] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38–51. [QI L X. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38–51.]
- [10] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831–839. [JIAO F Z.



- Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 831–839.]
- [11] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 1–11. [HUANG T Z. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 1–11.]
- [12] 孙东, 杨丽莎, 王宏斌, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(S1): 80–87. [SUN D, YANG L S, WANG H B, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(S1): 80–87.]
- [13] Young-SeogKim, David J. Sanderson. Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves. *Journal of Structural Geology*. 2009, 32(9): 1305–1316.
- [14] 常少英, 庄锡进, 邓兴梁, 等. 断控缝洞体油藏高效井预测方法与应用效果——以HLHT油田奥陶系潜山区为例. *石油地球物理勘探*, 2017, 51(S1): 199–206. [CHANG S Y, ZHUANG X J, DENG X L et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction: a case study in Ordovician buried hills, HLHT Oilfield. *Oil Geophysical Prospecting*. 2017, 51(S1): 199–206.]
- [15] 吕修祥, 张艳萍, 敬兵, 等. 走滑断层弯曲破碎带特征及对深部岩溶储集层发育的控制作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 839–850. [LV X X, ZHANG Y P, JING B, et al. Characteristics of bend damage zones of strike-slip faults and its control on development of deep karst reservoirs[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(5): 839–850.]
- [16] 马庆佑, 沙旭光, 李玉兰, 等. 塔中顺托果勒区块走滑断裂特征及控油作用[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(2): 120–124. [MA Q Y, SHA X G, LI Y L, et al. Characteristics of strike slip fault and its controlling on oil in Shuntuoguole region, middle Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(2): 120–124.]
- [17] 马庆佑, 曾联波, 徐旭辉, 等. 塔河油田奥陶系走滑断裂体系特征及成因机制[J/OL]. *地质学报*: 1–11[2023–03–08]. [MA Q Y, ZENG L B, XU X H et al. Characteristics and genetic mechanism of Ordovician strike-slip fault system in Tahe oilfield[J/OL]. *Acta Geologica Sinica*: 1–11[2023–03–08].]
- [18] 张艳萍, 吕修祥, 于枫, 等. 塔中隆起两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 663–673. [ZHANG Y P, LV Y X, YU H F, et al. Controlling mechanism of two strike-slip fault groups on the development of the Ordovician karst reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 663–673.]
- [19] 常少英, 李昌, 陈娅娜, 等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(1): 22–34. [CHANG S Y, LI C, CHEN Y N et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir[J]. *Marine Origin petroleum Geology*, 2020, 25(1): 22–34.]
- [20] 付广, 王浩然. 利用地震资料预测油源断裂有利输导油气部位[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(1): 161–168. [FU G, WANG H R. Prediction of favorable oil-gas transportation parts of oil-source faults on seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(1): 161–168.]
- [21] 刘峻桥, 张桐, 孙同文, 等. 油源断裂输导能力对油气分布的控制作用[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(5): 27–31. [LIU J Q, ZHANG T, SUN T W, et al. Control of oil source fault transport capacity on oil and gas distribution[J]. *Special Oil & Gas reservoirs*, 2017, 24(5): 27–31.]
- [22] 马庆佑, 吕海涛, 蒋华山, 等. 塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(1): 1–9. [MA Q Y, LV H T, JIANG H S, et al. Division program of structural units in the Paleozoic Platform-basin Region, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 1–9.]
- [23] 吕海涛, 张哨楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 444–452. [LV H T, ZHANG S N, MA Q Y. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(4): 444–452.]
- [24] 刘滨莹, 姜海燕, 付广, 等. 下生上储式油气富集程度的定量研究方法及其应用——以廊固凹陷大柳泉构造带沙三中亚段为例[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(5): 2035–2043. [LIU B Y, JIANG H Y, FU G, et al. Quantitative research method and its application of hydrocarbon enrichment degree of lower generation and upper storage type—Taking the middle sub-member of Sha3 in Daluquan structural belt of Langgu depression as an example. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(5): 2035–2043.]
- [25] 张奇, 文龙, 徐亮, 等. 四川盆地二、三叠系碳酸盐岩大气田类型及其成藏规律[J]. *天然气工业*, 2012, 32(1): 33–38+120. [ZHANG Q, WEN L, XU L, et al. Types of Permian and Triassic carbonate gas fields in Sichuan Basin and their reservoir-forming rules[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(1): 33–38+120.]
- [26] 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法——断面优势运移通道的提出及其应用[J]. *地质论评*, 2005, 51(2): 156–162. [LUO Q, PANG X Q, JIANG Z X. A new method for effectively tracing oil and gas migration trajectory – The proposal and application of cross-section dominant migration paths[J]. *Geological Review*, 2005, 51(2): 156–162.]
- [27] LIAO Z, LIU H, CARPENTER B M, et al. Analysis of fault damage zones using three-dimensional seismic coherence in the Anadarko Basin, Oklahoma[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(8): 1771–1785.

- [28] ZHAO Z, LIU J, DING W, et al. Analysis of seismic damage zones: a case study of the ordovician formation in the shunbei 5 fault zone, Tarim Basin, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(6): 630.
- [29] VOLATILI T, AGOSTA F, CARDOZO N, et al. Outcrop-scale fracture analysis and seismic modelling of a basin-bounding normal fault in platform carbonates, central Italy. *Journal of Structural Geology*, 2022, 155: 104515.
- [30] 李相文, 但光箭, 李景叶, 等. 面向断裂破碎带储层的“双等时”格架约束地震预测方法[J]. *石油物探*, 2023, 62(6): 1168–1181. [LI X W, DAN G J, LI J Y, et al. Seismic prediction method of ultra-deep strike-slip fault fractured reservoirs based on “dual-isochronous” framework constraint[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(6): 1168–1181.]

(编辑 杨雅露)

**第一作者及通信作者:** 常少英 (1983 年—), 博士、高级工程师, 从事地质与地球物理综合研究、复杂油气藏控储成藏特征研究, 油藏精细评价及开发研究, csy991@163.com。