

基于地质成因的走滑断裂带岩溶缝洞型储层连通性与 剩余油分布模式

——以塔里木盆地为例

李凤磊^{1,2,3,4}, 林承焰^{1,2,3}, 任丽华^{1,2,3}, 张国印^{1,2,3}, 朱永峰⁵, 张银涛⁵, 关宝珠⁵

[1. 深层油气全国重点实验室 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 山东省油藏地质重点实验室, 山东 青岛 266580;
3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 4. 山东石油化工学院, 山东 东营 257061; 5. 中国石油
塔里木油田 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000]

摘要:塔里木盆地走滑断裂带超深层碳酸盐岩岩溶缝洞型储层的立体结构,是影响其连通性和剩余油分布的主要因素。优选具有典型缝洞体特征的一间房地质露头,通过无人机露头扫描、探地雷达分析和实际测量等手段,完成断裂、裂缝和溶洞的参数提取,依据露头大型溶洞、小型溶洞、断层核和破碎带的分布特征,建立断裂带露头区缝洞体发育模式。基于里德尔剪切机理与应力椭圆理论,分析走滑断裂结构特征;采用传统解释与智能识别结合手段,完成富满油田跃满井区三维地震资料的走滑断裂、缝洞体主体和裂缝带精细解释,以及不同结构储层地震响应正演验证;借助缝洞型井组的干扰试井,分析储层连通要素,建立以生产井单井产能、见水周期、油压变化和静压梯度等生产动态为依据的油藏单元划分思路,探讨了不同结构特征储集体对剩余油分布的影响。研究结果表明:①断裂走向为控制缝洞体发育的主要因素,可将其划分为单断面无溶蚀断-缝组合、单断面弱溶蚀断-缝-洞组合和单断面强溶蚀断-缝-洞组合3个发育阶段,建立单断面、平行断面和复杂断面3个岩溶缝洞体发育模式,用来指导研究区缝洞型储层立体结构刻画;②确立断裂面走向为核心连通要素,基于储层解释结果,划分了不同断裂面组合的顺向强连通、复合中连通和侧向弱连通3种连通类型;③建立同向单断裂组合、斜列断缝面组合和不同向多断缝面组合3种储集体连通性组合模式,以及与之对应的剩余油分布模式。基于这种认识,可以建立起一种油藏连通单元的分析思路,从而指导走滑断裂带岩溶缝洞型油气藏勘探与剩余油挖潜工作。

关键词:剩余油;断裂破碎带;储层连通性;缝洞型储层;富满油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Connectivity and residual oil distribution patterns of fractured-vuggy karst reservoirs in strike-slip fault zone: A case study of the Tarim Basin

LI Fenglei^{1,2,3,4}, LIN Chengyan^{1,2,3}, REN Lihua^{1,2,3}, ZHANG Guoyin^{1,2,3}, ZHU Yongfeng⁵,
ZHANG Yintao⁵, GUAN Baozhu⁵

[1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Reservoir Geology, Qingdao, Shandong 266580, China; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 4. Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying Shandong 257061, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: For ultradeep, fractured-vuggy carbonate karst reservoirs located in the strike-slip fault zone within the Tarim Basin, their three-dimensional architecture is identified as a primary factor influencing their connectivity and residual oil distribution. This study focuses on the geologic outcrop in the Yijianfang area within the basin that exhibits the characteristics of typical fractured-vuggy reservoirs. Using unmanned aerial vehicle (UAV)-based scanning of the outcrop, analysis of ground-penetrating radar (GPR) data, and the field measurements, we determine the parameters of the faults, fractures, and karst caves. By examining the distribution characteristics of the large and small karst caves,

收稿日期:2024-06-08;修回日期:2024-12-05。

第一作者简介:李凤磊(1984—),男,博士研究生,油藏描述及地质信息智能化提取等。E-mail:llf_winter@163.com。

通信作者简介:林承焰(1963—),男,教授、博士研究生导师,储层地质学与油气藏描述、沉积学及油气地质与勘探。E-mail:lincy@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42002144);中国石油重大科技项目(ZD2019-183-006)。

fault cores, and fracture zones exposed, we establish the developmental model of fractured-vuggy reservoirs in the outcrop area in the fault zone. Based on the mechanisms of Riedel shear structures and the stress ellipse theory, we analyze the structural characteristics of the strike-slip faults. Afterward, we conduct fine interpretations of the strike-slip fault, main body of fractured-vuggy reservoirs, and fracture zones in the Yueman well block of the Fuman oilfield based on 3D seismic data, while combining conventional interpretations with intelligent identification. With the help of interference tests of a well group, we identify the major factors controlling the connectivity of the fractured-vuggy reservoirs. Accordingly, we divide the reservoir units based on production performance including single-well productivity, water breakthrough cycle, changes in tubing pressure, and static pressure gradients of the wellbore. Additionally, we explore the impacts of reservoir architecture on residual oil distribution. The results indicate that the strike of the fault plane represents a primary factor governing the development of fractured-vuggy reservoirs. These fractured-vuggy karst reservoirs have evolved through three stages: the single fault-plane fault-fracture combination without karstification, single fault-plane fracture-karst cave combination with weak karstification, and single fault-plane fracture-karst cave combination with strong karstification. These evolutionary stages correspond to three combination patterns of fractured-vuggy karst reservoirs, namely the single, parallel, and complex fault-plane patterns. Data on production performance can serve as a basis for determining reservoir connectivity since single-well production, tubing pressure, and stratigraphic static pressure reflect the degree of reservoir connectivity. Fault-fractured-vuggy karst reservoirs with varying fault-plane combinations manifest three reservoir connectivity types: strong connectivity along the fault zones of the same strike, moderate connectivity via intersecting fault zones with different strikes, and lateral weak connectivity via non-intersecting fault zones with different strikes. The fractured-vuggy reservoirs with the oblique fault-fracture plane combination, manifest slightly weak connectivity, with fractures and reservoirs particularly well-developed at fault intersections. In contrast, the fractured-vuggy reservoirs with the single fault of the same strike exhibit strong internal connectivity, indicating great potential for oil exploitation.

Key words: residual oil, fracture zone, reservoir connectivity, fractured-vuggy reservoir, Fuman oilfield, Tarim Basin

引用格式:李凤磊,林承焰,任丽华,等.基于地质成因的走滑断裂带岩溶缝洞型储层连通性与剩余油分布模式——以塔里木盆地为例[J].石油与天然气地质,2025,46(1):315–334. DOI:10.11743/ogg20250122.

LI Fenglei, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Connectivity and residual oil distribution patterns of fractured-vuggy karst reservoirs in strike-slip fault zone: A case study of the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 315–334. DOI: 10.11743/ogg20250122.

塔里木盆地是由古生界海相克拉通盆地和中-新生界陆相盆地组成的大型叠合盆地,盆地中部及北部在加里东中-晚期发育区域走滑断裂系统。该时期奥陶系碳酸盐岩地层易沿走滑断裂发生岩溶作用,从而形成由断裂、裂缝和溶洞等多因素共同控制的岩溶缝洞型储层^[1-4]。其中断裂和裂缝的产状和发育强度是控制储层结构、连通方向和剩余油分布的重要因素^[5-6]。由于研究区走滑断裂存在高陡、小断距和小滑移距的特点,使得缝洞型储层沿断裂带垂向发育,其封闭条件是由顶部奥陶系桑塔木组泥岩和侧向一间房组及鹰山组灰岩围岩组成,局部油柱高度可达1 km^[7]。随着塔里木盆地奥陶系缝洞型油藏的勘探与开发,研究人员发现同一级别的不同断裂带以及同一断裂在不同区段有明显不同的开发效果^[8-9],走滑断裂在不同构造层中的构造样式对断控缝洞型油气藏成藏要素具有重要控制作用^[10-12]。许多研究针对塔里木盆地的断裂和

溶蚀特征开展描述,认为研究区走滑断裂特征符合里德尔剪切模式和应力椭圆原理^[13-15],并且对不同几何形态储层的有效性做了系统分析^[16-18],但尚未建立起断裂带缝洞体储层空间立体结构,并以此为基础开展储层连通性分析。

塔北地区奥陶系碳酸盐岩地层广泛出露,发育不同级别的裂缝和溶洞,为研究缝洞体结构特征提供了第一手资料^[19]。特别是近年来无人机倾斜摄影扫描、探地雷达和高精度摄像等技术手段的应用^[20-21],有效补充了露头的现场资料,为研究人员提供了更加丰富的信息。在高质量的三维地震资料中,利用突出振幅差异来识别储层^[22-23],实钻后发现这些手段刻画储层边界的精度较低。随着计算机和人工智能的发展,通过建立断裂、裂缝和溶洞对应的三维地震样本,采用深度学习网络训练得到对应预测模型,可准确反映缝洞型储层结构的“断-缝-洞”预测结果,通过储层建模方

式可以实现储层结构的立体表征^[24-27]。地震资料模型正演是验证超深缝洞体结构解释结果准确性的重要手段,借助波动方程正演算法可以对实际资料的地震响应特征解释结果做正演验证,进一步减小静态资料解释结果的多解性^[28-30]。

实际勘探开发过程中,生产井动态数据可以最直接地反映储层的连通性,通过动态资料实现对静态刻画的缝洞体单元的标定,从而确立缝洞连通单元的刻画标准^[31-33]。随着对缝洞型碳酸盐岩储层剩余油研究的不断深入^[15,28-30],在储层连通单元刻画的基础上,对已开发油藏单元内部和未开发储集单元之间剩余油特征分布开展研究已成为可能。

通过分析走滑断裂地质成因和缝洞体储层结构,建立不同结构类型的储集体,并基于不同组合储层连通性分析,进一步开展缝洞体剩余油研究。前人虽然对缝洞型储层的发育特点做了大量研究,但是尚未通过露头建立起断裂带岩溶缝洞结构的发育模式。缝洞型储集体结构、连通性及其与剩余油之间的关系也有待深入研究。本文选取塔里木盆地西北缘相似露头和塔里木油田跃满井区作为研究对象,借助露头和地震资料,在分析断裂带岩溶缝洞型储层中断裂、裂缝和溶洞组合关系的基础上,开展储层结构分析;通过露头区的研究,对缝洞型储层阶段进行划分;根据里德尔剪切模式和应力椭圆原理,借助跃满井区三维地震资料相干属性分析成果和智能解释成果,建立起研究区储层的立体结构;最后利用动、静态结合的手段,划分油藏单元,提出符合研究区的剩余油分布模式,并提出井位部署和开发措施建议。

1 区域地质概况

塔里木盆地是中国的大型叠合盆地,塔北隆起位于塔里木盆地北部(图1),东西长约480 km,南北宽约90 km,由北向南倾没,隆起北邻库车坳陷,南部与顺托果勒低隆起相接,西部毗邻阿瓦提坳陷,东部与满加尔坳陷相邻,是盆地内最富有的油气单元之一^[1-4]。中-上奥陶统碳酸盐岩缝洞型储层是主要的储集类型之一,断控岩溶缝洞体储层是缝洞体储层中较为典型的一种,也是目前勘探的重要目标。富满油田跃满井区位于塔北隆起中部,奥陶系发育走滑断裂断缝带和缝洞型储集体,正处于开发阶段,其丰富的动态资料和对储层连通性分析的需求具有现实意义。

塔里木盆地在寒武纪总体为海相沉积环境,这一时期地层的隆升与沉降造成了西高东低的地形,形成

了以炭质泥岩、硅质泥岩、灰岩、白云岩和膏盐岩等多种岩性为主的地层,是奥陶系缝洞型储层的主力烃源岩地层^[3]。奥陶系主要发育碳酸盐岩和泥岩地层,其中蓬莱坝组(O_{1p})、鹰山组(O_{1-2y})和一间房组(O_{2j})以白云岩和灰岩为主,吐木休克组(O_{3t})、良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s})以灰岩、灰质泥岩和泥岩为主,储层不发育,主要作为区域盖层(图1d)。根据锆石U-Pb同位素定年与地震解释明确了盆内走滑断裂在中-晚加里东时期形成^[34-35],研究区断裂在后期未持续活动,从而形成了以断裂、裂缝和溶洞为主的储集空间,储层两侧被致密碳酸盐岩围岩和顶部灰质泥岩或泥岩盖层所封闭,形成了垂向发育的缝洞型储层。该类储层与地层构造高差关系较小,油藏厚度大^[36],局部油柱高度可超过1 km^[7],其油藏横向连通性受走滑断裂断裂面和断裂-裂缝-溶洞(断-缝-洞)组合关系控制,因此研究其储层结构特征对分析其连通性和剩余油分布有重要意义。

2 断缝带岩溶缝洞结构发育模式

塔里木盆地西北缘露头区发育大量的奥陶系碳酸盐岩地质露头。在对多个露头区断-缝-洞组合地质特征分析的基础上,认为这些露头区与跃满井区高陡岩溶缝洞型储层结构具有相似性,通过分析露头区岩溶缝洞发育模式和组合模式,指导超深层断缝带缝洞体储层结构分析。

2.1 露头多维信息分析

2.1.1 一间房缝洞体地质露头

一间房地质露头区沿裂缝发育多个不同尺度的溶洞^[20]。无人机扫描图像可以解释的断裂主要沿北西向发育,从出露的地层来看也发育较弱的北东向断裂(图2a)。沿北西向裂缝带发育一系列溶洞(图2b),对露出地表的较大溶洞进行实际测量,获取了该缝洞体可探测区域的长度、高度、宽度和方位信息(图2c),投影到露头扫描图像(图2a),发现该溶洞走向与断裂走向一致,属于断裂控制发育的溶洞。在溶洞发育方向上,设计了垂直于溶洞走向的测线布置方案,采用探地雷达进行勘探,可以在溶洞延伸方向上的雷达剖面上解释出断裂与溶洞^[15,28],其中北西向断裂和溶洞的解释结果与露头可见区域解释结果一致性较高(图2d)。

2.1.2 石片场缝洞体地质露头

石片场地质露头区可见明显的走滑断裂,卫星图

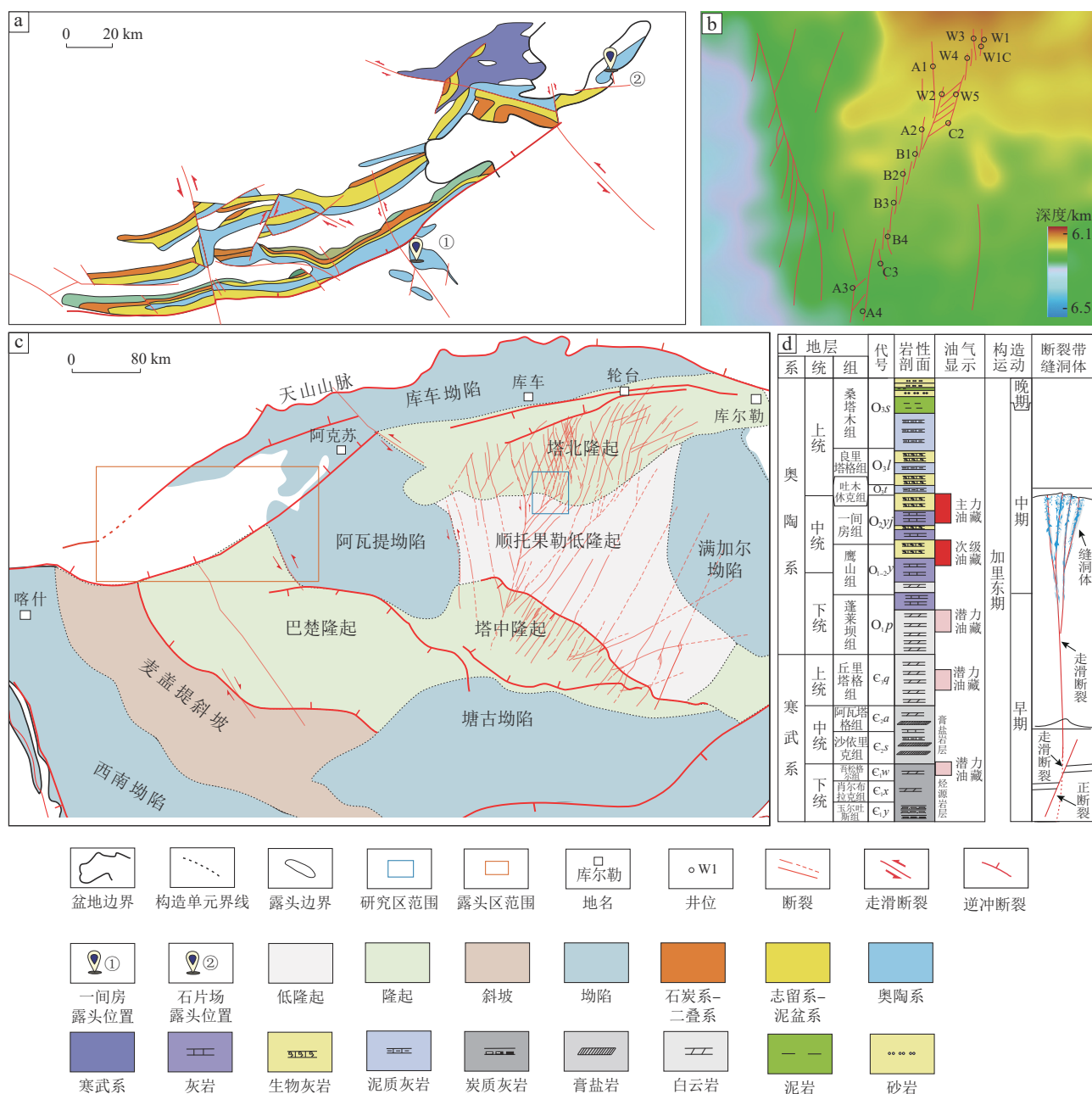


图1 塔里木盆地构造分布、露头区地质概况及研究区地层综合柱状图

Fig. 1 Structural distribution of the Tarim Basin, geological overview of the outcrop area in the basin, and composite stratigraphic column of the study area

a. 塔里木盆地露头区地质概况, 据文献[34]修改; b. 富满油田跃满井区奥陶系一间房组顶面断裂及构造分布, 据文献[27]修改; c. 塔里木盆地构造格架叠合区域走滑断裂分布, 据文献[27]修改; d. 成藏主力层系单井地层综合柱状图

片显示该露头位于断裂带附近, 地层存在明显错段, 且与断裂主干走滑方向交叉发育多条断裂, 其非主干方向断裂明显强于一间房露头区非主干方向的断裂(图2f)。通过无人机扫描图像可以看到断裂发育存在明显的分段特征, 不同段应力特征、裂缝发育和充填情况各不相同, 岩溶发育规模也不同。其中不同向断裂交叉处, 裂缝更为发育, 特别在断裂西端, 可见现存的未充填溶洞(图2i), 在孔洞上方山体部署探地雷达侧

线(图2j), 解释结果也显示溶洞主要在断裂附近发育, 特别是在主干断裂与非主干断裂相交的位置, 更容易形成溶洞, 从而形成更大规模的岩溶缝洞体。

2.2 缝洞体组合模式

2.2.1 单断面岩溶缝洞体发育模式

断裂是控制研究区碳酸盐岩岩溶储层发育的重要

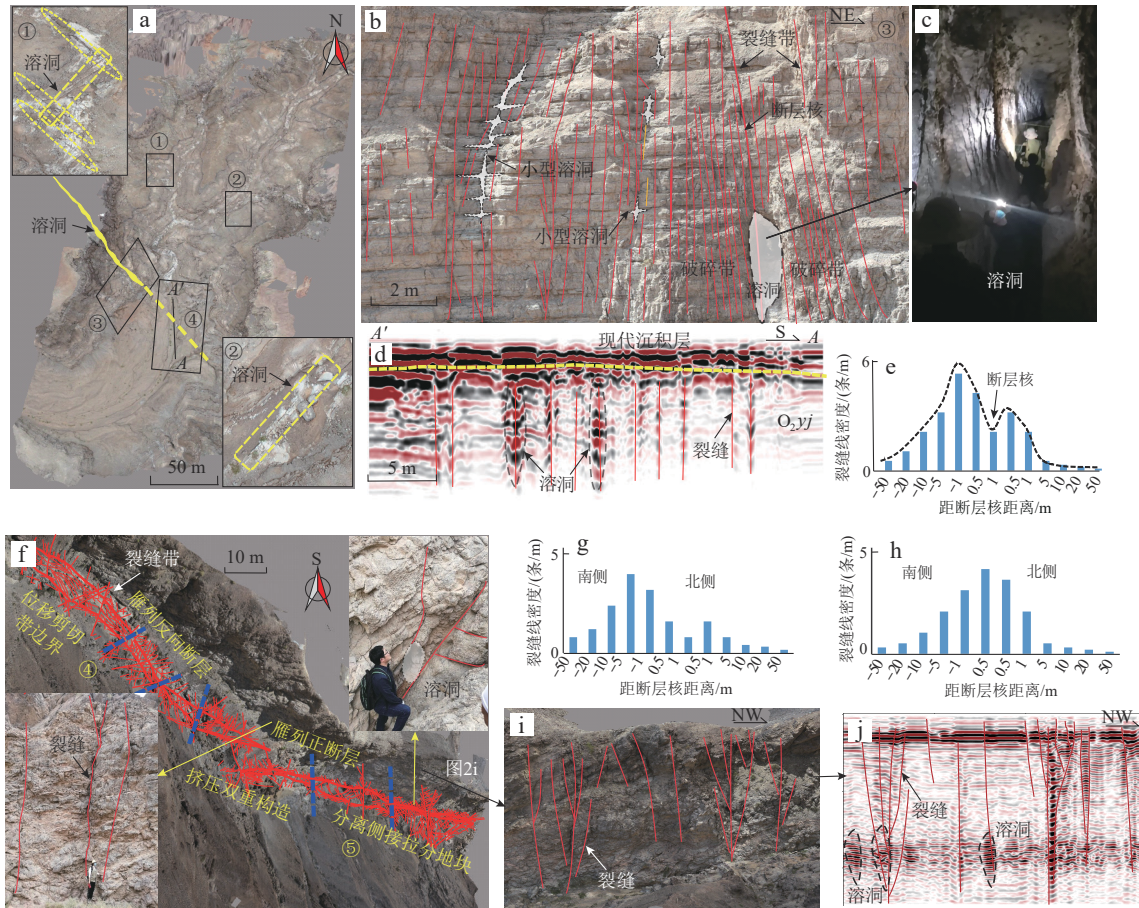


图2 塔里木盆地断裂带露头三维立体探测结果

Fig. 2 All-round exploration results of the outcrop in the fault-fracture zone within the Tarim Basin

a. 一间房缝洞体露头无人机俯视图;b. 一间房缝洞体露头西侧山体上的断裂和溶洞分布图像和解释结果;c. 一间房缝洞体露头溶洞内部踏勘野外照片;d. 一间房缝洞体露头探地雷达图像断裂解释剖面(剖面位置见a图);e. 一间房缝洞体露头沿断层核附近裂缝线密度分布柱状图;f. 石片场缝洞体断裂分布和溶洞野外照片及投影平面图;g. 石片场缝洞体东段(f图中④)裂缝线密度分布柱状图;h. 石片场缝洞体西段(f图中⑤)裂缝线密度分布柱状图;i. 石片场缝洞体露头野外照片;j. 石片场缝洞体露头探地雷达图像断裂解释剖面(剖面位置见f图)

因素^[16-17]。结合不同发育程度的溶洞分布情况,认为断裂带岩溶应该首先在断裂破碎带的裂缝区发育,随着溶蚀程度的加深,溶洞逐渐向断层核部发育,最终在断层核及断裂破碎带形成较大的岩溶缝洞体。基于这种认识,将一间房露头区岩溶缝洞体划分为3个发育阶段(图3a—c),即单断面无溶蚀断—缝组合、单断面弱溶蚀断—缝—洞组合和单断面强溶蚀断—缝—洞组合,并建立了3个阶段对应的地质模式(图3g—i):①单断面无溶蚀断—缝组合为断缝带储层的第一阶段,主要由断层面、断层核和破碎带组成,属于未发生岩溶作用的储层结构特征;②单断面弱溶蚀断—缝—洞组合为断缝带储层第二阶段,主要由断层面、断层核、破碎带和破碎带小型溶洞组成,属于断裂破碎带早期岩溶作用形成的储层结构特征;③单断面强溶蚀断—缝—洞组合为断缝带储层的第三阶段,主要由断层面岩溶、断层核及溶洞、破碎带及溶洞和断缝带大型溶洞组成,属于断

裂破碎带岩溶逐渐扩大,直至断层核被溶蚀,最终形成的储层结构特征。基于这种露头模式可见断裂、裂缝和溶洞总体沿断裂面走向发育,这一特征可以应用于研究区目的层的储层结构解释,为储层连通性分析提供基础。

2.2.2 平行断面岩溶缝洞体发育模式

断裂破碎带的裂缝线密度分布统计显示,断层周缘裂缝发育密集,距离断层越近裂缝发育越密集,距离断层越远裂缝发育越少。其中,一间房露头区裂缝最大发育密度在距离断层核两侧0.5~2.0 m处,在与断层核距离大于5.0 m左右开始下降(图2e);石片场露头区走滑断裂东部裂缝最大发育密度与断层核的距离为1.0~10.0 m,在与断层核距离大于10.0 m左右开始下降(图2g);石片场露头区走滑断裂西部裂缝最大发育密度与断层核距离为0.5~5.0 m,在与断层核距

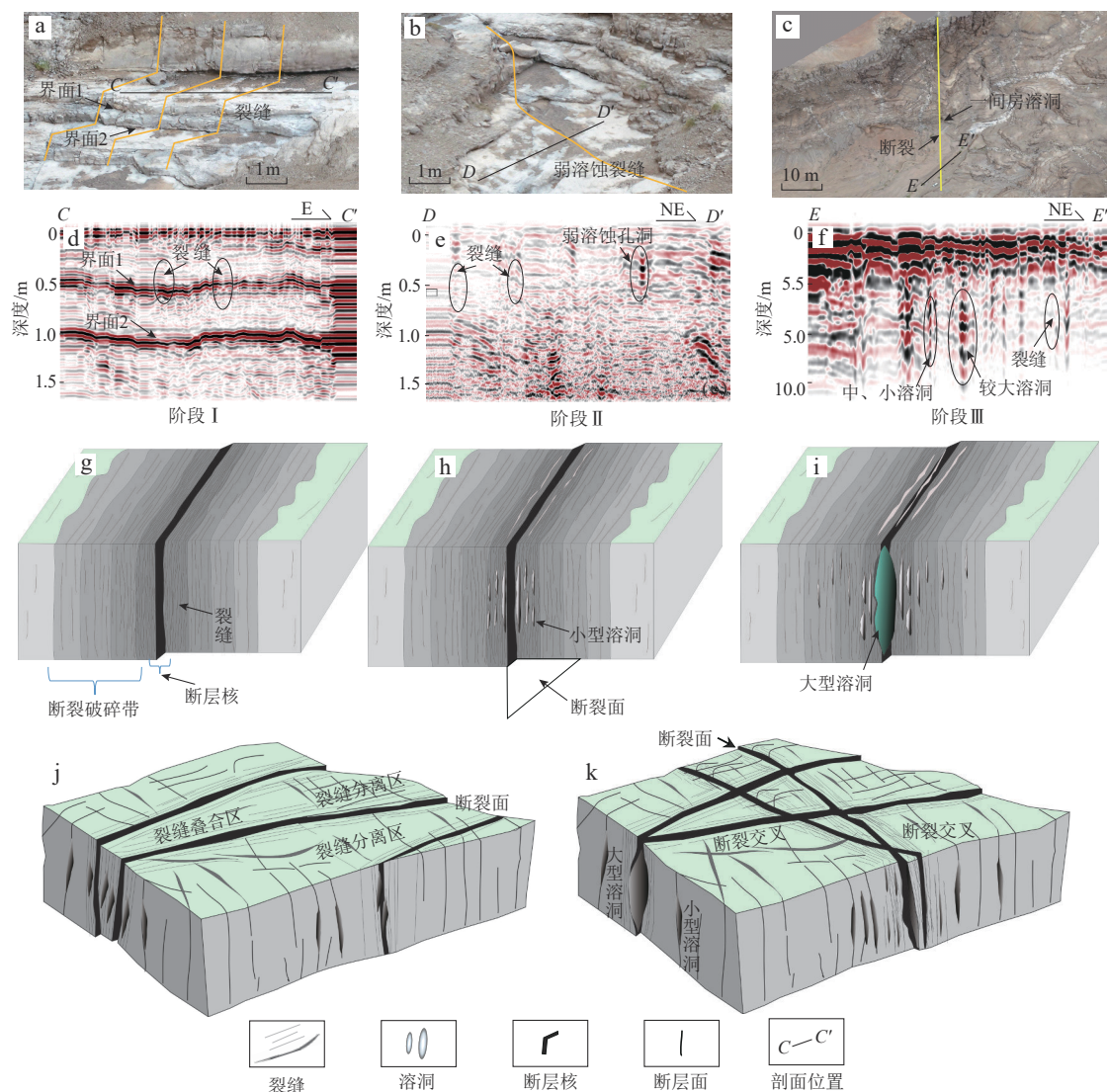


图3 基于塔里木盆地露头区建立的断裂带缝洞体发育地质模式

Fig. 3 Geological model showing the fractured-vuggy reservoir development in the fault zone of the outcrop area, Tarim Basin

a. 表层裂缝露头;b. 表层裂缝弱溶蚀露头;c. 较大溶洞露头;d. 表层裂缝露头 400 MHz 雷达探测剖面(剖面位置见 a 图);e. 表层裂缝弱溶蚀露头 400 MHz 雷达探测剖面(剖面位置见 b 图);f. 较大溶洞露头 100 MHz 雷达探测剖面(剖面位置见 c 图);g. 单断面无溶蚀断-缝组合模式示意图;h. 单断面弱溶蚀断-缝-洞组合模式示意图;i. 单断面强溶蚀断-缝-洞组合模式示意图;j. 平行断面岩溶缝洞体发育模式示意图;k. 复杂断裂带岩溶缝洞体发育模式示意图

离大于 5.0 m 左右开始下降(图 2h)。活动性越强的断裂带其裂缝发育越宽,但是不同强度的断裂带裂缝线密度与距断裂面的距离变化趋势相似。同时,通过统计两个地区露头的断裂,发现存在多个相对平行的裂缝带,当两个裂缝带的断层核距离较近时,两者之间裂缝线密度明显增加(图 2f 中④),随着两个断层核距离增大,两者之间裂缝叠合区域变小(图 2a),裂缝线密度分布规律更符合正态分布。在单断面形成的缝洞体分析的基础上,建立平行断面缝洞体发育模式(图 3j),用于指导分析相邻的同向断裂面发育的缝洞体储层侧向连通性。

2.2.3 复杂断面岩溶缝洞体发育模式

露头区断裂发育特征显示研究区发育不同方向的走滑断裂,特别是石片场露头走滑断裂西部最为明显(图 2f),两方向的断裂相交处裂缝发育,且在附近发育多个溶洞(图 2i),溶洞直径为 0.5~1.0 m,探地雷达结果也显示该区域溶洞发育(图 2j)。由此可见,不同向断裂面组合而成的区域,裂缝发育方向不确定,溶洞较为发育,但是方向性不强。基于这一认识,建立复杂断面岩溶缝洞体发育模式(图 3k),用于指导塔北地区不同向走滑断裂结合处的缝洞体连通性和单剪切走滑断

裂斜裂段缝洞体连通性分析。

3 储层立体结构精细刻画

露头分析认为,断裂带岩溶缝洞型储层是由走滑断裂、伴生裂缝和不同发育程度的岩溶洞穴组成,而不同组合关系形成的缝洞体结构差异决定了其储集性能,不同结构的储集体其地球物理响应特征也存在差异。同时,由于研究区目的层埋深大,地震信号能量弱,限制了地震资料储层识别的精度。对比分析缝洞体不同发育阶段的探地雷达响应特征与目的层地震反射特征,总结出单断面无溶蚀断-缝组合、单断面弱溶蚀断-缝-洞组合和单断面强溶蚀断-缝-洞组合3个阶段的地震响应特征。通过分析走滑断裂缝洞体结构成因,结合多属性分析和深度学习等手段,实现断裂、裂缝和溶洞主体的独立识别,最终形成断裂带缝洞体的精细结构解释,为储层连通要素分析提供依据。

3.1 断控岩溶储层立体结构主控因素

在奥陶系一间房组—良里塔格组沉积末期区域岩溶背景下,通过塔北—顺北—塔中地区走滑断裂带的输导,碳酸盐岩地层受到强岩溶作用影响,形成了大量的岩溶缝洞体。因此,储层结构与断裂结构具有高度一致性,要研究储层结构,首先需要分析储层发育位置的断裂立体结构。

中—晚加里东时期,目的层发育区域走滑断裂(图4a,d),断裂发育符合经典走滑断层模型——里德尔剪切模型,因此可以借助走滑断裂主断裂两侧地层水平位移切割早期地质体的特性来分析走滑断裂局部特征。中—晚加里东时期走滑断裂中—深部主位移带或主剪切带(principlec displacement zone, PDZ)^[37]与底部寒武系正断裂存在局部对接和交叉现象(图4a—c),其中底部正断裂受上部走滑断裂影响,在交叉点处发生位移,根据位移方向可以判断这一期北东向走滑断裂为左旋走滑(图4e)。根据以上现象分析认为,走滑断裂的滑移距小于50 m(图4c),延伸100 km^[9],符合弱走滑断裂特征。研究区在中—晚加里东时期为近南北向挤压应力场(现今方向),依据应变椭圆理论(图4f),认为沿走滑断裂主位移带形成R剪切和P剪切(图4g,h)。

基于以上地质认识,开展对研究区剪切走滑断裂立体结构的分析。根据一间房组顶部以下不同深度的沿层相干属性以及横切走滑断裂的三维地震资料立体解释分析(图5a,b),发现研究区断裂立体特征表现为底部收敛、顶部花状构造,收敛深度大多距一间房

组顶界面500~1 000 m。这种构造模式符合 Ken McClay 和 Massimo Bonora 等人^[38]建立的左旋斜列构造模式(图5c)。

3.2 不同发育阶段储层地震响应特征

3.2.1 探地雷达信号与地震信号

探地雷达获取到的信息为脉冲波的旅行时间、幅度和波形资料,这一点与油气勘探中地震资料是一致的。不同之处就是探地雷达是电磁波传播遇到介质介电常数变化时形成反射,地震资料则是在压缩波(声波)遇到介质波阻抗变化时形成反射,同时两者的探测尺度有所差异,但是都由频率和波速决定。露头区缝洞体探地雷达信号响应和地下缝洞体地震响应特征均为绕射形成的“串珠”,两者可以相互借鉴。

探地雷达是用于确定地下介质分布的广谱电磁法。利用高频电磁波(10~10 000 MHz)以宽频带、短脉冲形式,在地面通过发射天线送入地下,经地下地层或目标物反射后返回地面,被另一接收天线所接收。

电磁波在任意介质中的传播速度为:

$$v = c / \sqrt{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: v 为电磁波在任意介质中的传播速度,m/s; c 为电磁波在真空中的传播速度,取 3×10^8 m/s; ε 为介质的相对介电常数,无量纲。某一固定频率的电磁波在介质中的波长与其在真空中的波长的关系为:

$$\lambda_1 = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: λ_1 为电磁波在介质中的波长,m; λ_0 为电磁波在真空中的波长,m。

塔里木盆地一间房露头采集过程中,400 MHz 天线采集区为灰岩表面,100 MHz 天线采集区为表层沉积砂但是地下介质也为灰岩,选择介电常数为6^[39]。由此可以得到探地雷达信号针对目的层的探测速度(v_T ,m/s)为: $v_T = c / \sqrt{6}$,由此得到100 MHz 天线对应的波长($\lambda_{T_{100}}$,m)为: $\lambda_{T_{100}} = c / (2.45 \times 10^8) \approx 1.2$ m, 400 MHz 天线对应的波长($\lambda_{T_{400}}$,m)为: $\lambda_{T_{400}} = c / (8 \times 10^8) \approx 0.3$ m。探地雷达横向分辨率(ΔH ,m)在 $\lambda/4$ 到 $\lambda/8$ 之间,纵向分辨率为^[40]:

$$\Delta x = \sqrt{\lambda D / 2 + \lambda^2 / 16} / 2 \quad (3)$$

式中: Δx 为纵向分辨率,m; λ 为电磁波在介质中的波长,m; D 为目的层深度,m。

由此得到该露头100 MHz 天线对应的 Δx 为0.150~0.300 m,在横向分辨率计算中,从目的层深度挖掘至灰岩需要0.5~2.0 m,雷达探测结果也显示大

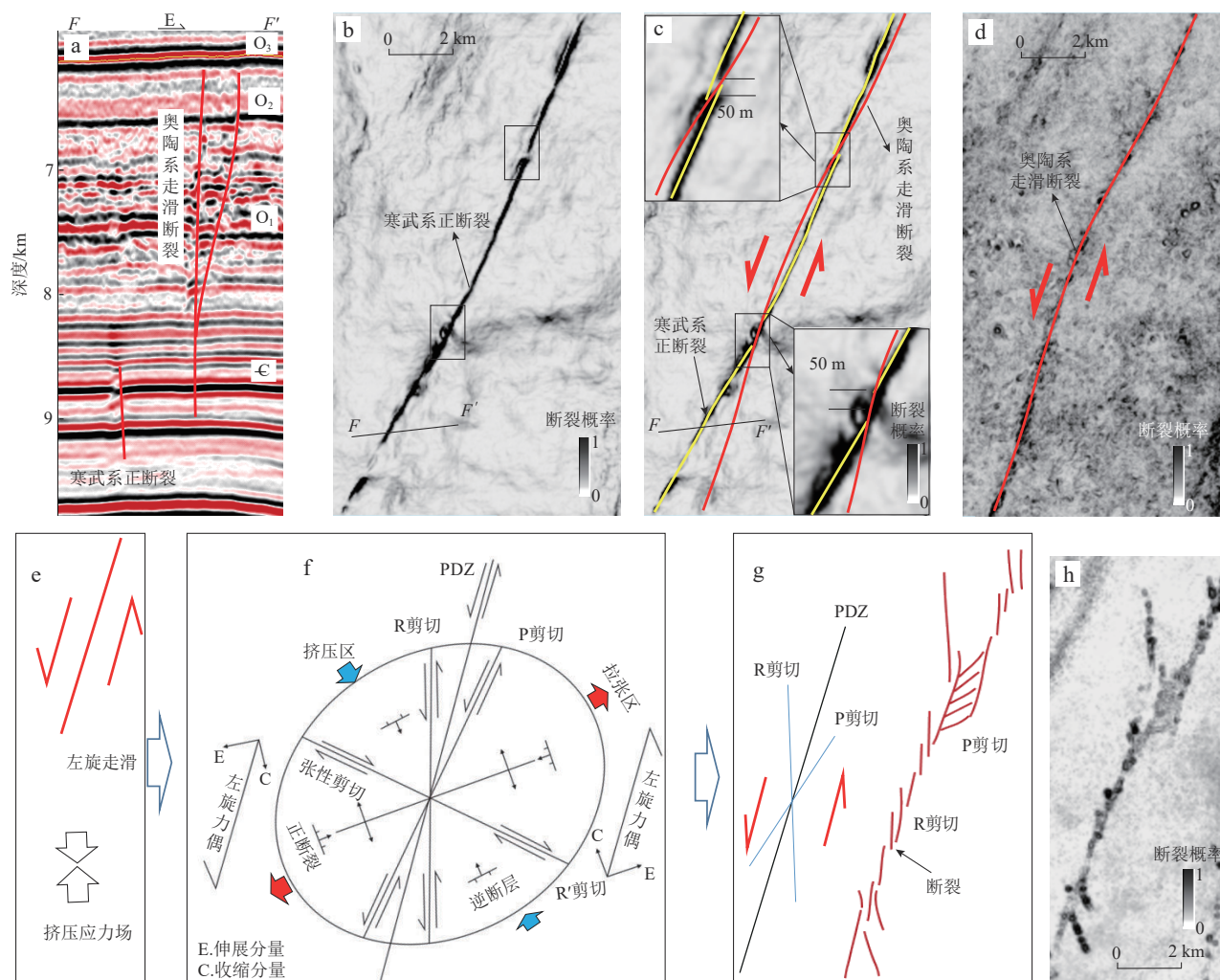


图4 塔里木盆地跃满井区目的层走滑断裂平面展布特征及其解释依据

Fig. 4 Planar distributions and corresponding basis for interpretation of the strike-slip fault in the target layer of the Yueman well block, Tarim Basin

a. 横切寒武系正断裂和奥陶系走滑断裂地震剖面(剖面位置见b图); b. 中寒武统沿层相干属性; c. 中寒武统沿层相干属性(b)叠合奥陶系走滑主干断裂解释成果分析对接点位移特点; d. 蓬莱坝组沿层相干属性叠合奥陶系走滑主干断裂解释成果; e. 左旋特征及应力特征示意图; f. 应变椭圆理论示意图; g. 一间房组断裂解释成果及分支断裂发育理论模式示意图; h. 一间房组沿层振幅梯度属性

(PDZ为主位移带。)

约在1.0 m出现绕射响应(这里取2.0 m),得到 ΔH 约为0.400 m,随着探测缝洞体埋深增加,横向分辨率会逐渐降低。同理400 MHz的 Δx 为0.075~0.150 m,由于该雷达直接贴近探测, ΔH 约为0.070 m。根据踏勘结果和无人机扫描结果分析,裂缝宽度介于0.01~0.10 m,溶蚀洞洞径介于0.10~2.00 m,原则上裂缝和弱溶蚀大部分不能分辨,但是,由于绕射现象的存在,导致裂缝发育区会产生强振幅响应^[27,41-44],由此可以分辨断裂、裂缝和孔洞发育程度。从露头踏勘结果(图2a)与无人机图像解释结果来看,裂缝带的主要响应特征为振幅扰动,局部见振幅略强于围岩(图2d),弱溶蚀缝洞组合响应特征为小型“串珠”相,能量明显强于裂缝(图3d,e),较大岩溶缝洞响应特征为大型

“串珠”相,能量最强,且纵向跨度大(图3f)。

3.2.2 储层地震响应特征

井位设计主要选择具有强振幅地震响应的井位目标(图6a),也就是露头缝洞体模式中对应的大型缝洞体(图3i)。在研究区选择成藏条件相似的断裂带,早期部署的W1井钻遇缝洞型储层,但是裂缝未沟通有利储层,导致该井生产情况较差(图6b),对比地震相,认为这类储层归类于露头区建立的阶段I模式(图3g)。随后侧钻的W1-C井钻遇缝洞体储层,获得高产(图6c),该井地震相“串珠”特征明显,归类于阶段III模式(图3i)。W2井钻遇并沟通大型缝洞型储层,获得高产(图6d),认为该井地震相显示介于阶段II和

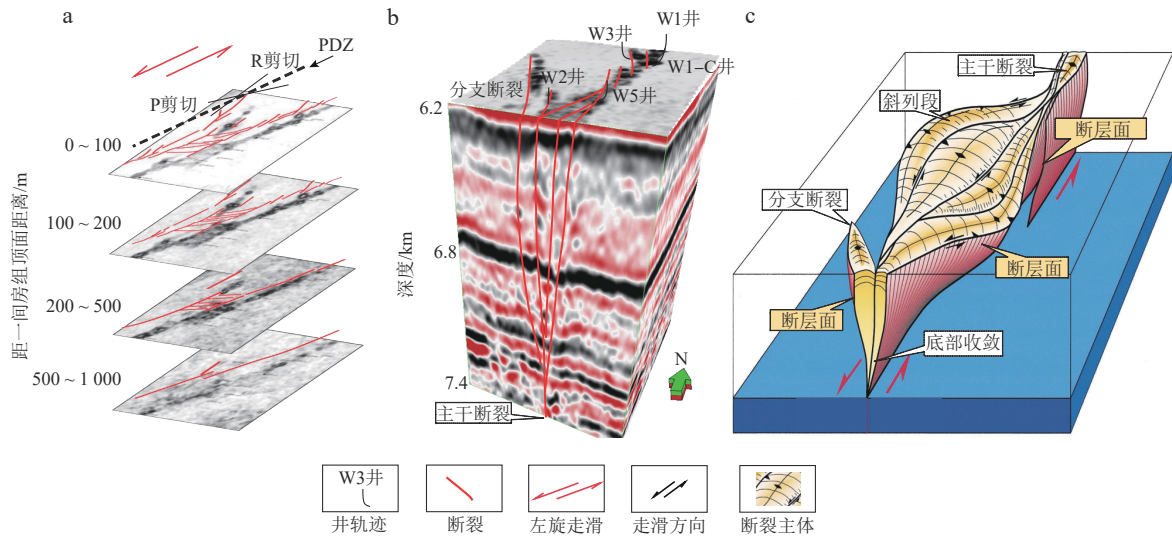


图5 塔里木盆地跃满井区单剪切走滑断裂三维立体发育特征

Fig. 5 Three-dimensional developmental characteristics of a single shear strike-slip fault in the Yueman well block, Tarim Basin

a. 一间房组顶部以下不同深度的沿层相干属性;b. 走滑断裂的三维地震资料立体解释;c. 花状构造立体模式示意图,据文献[37]修改 (PDZ为主位移带。)

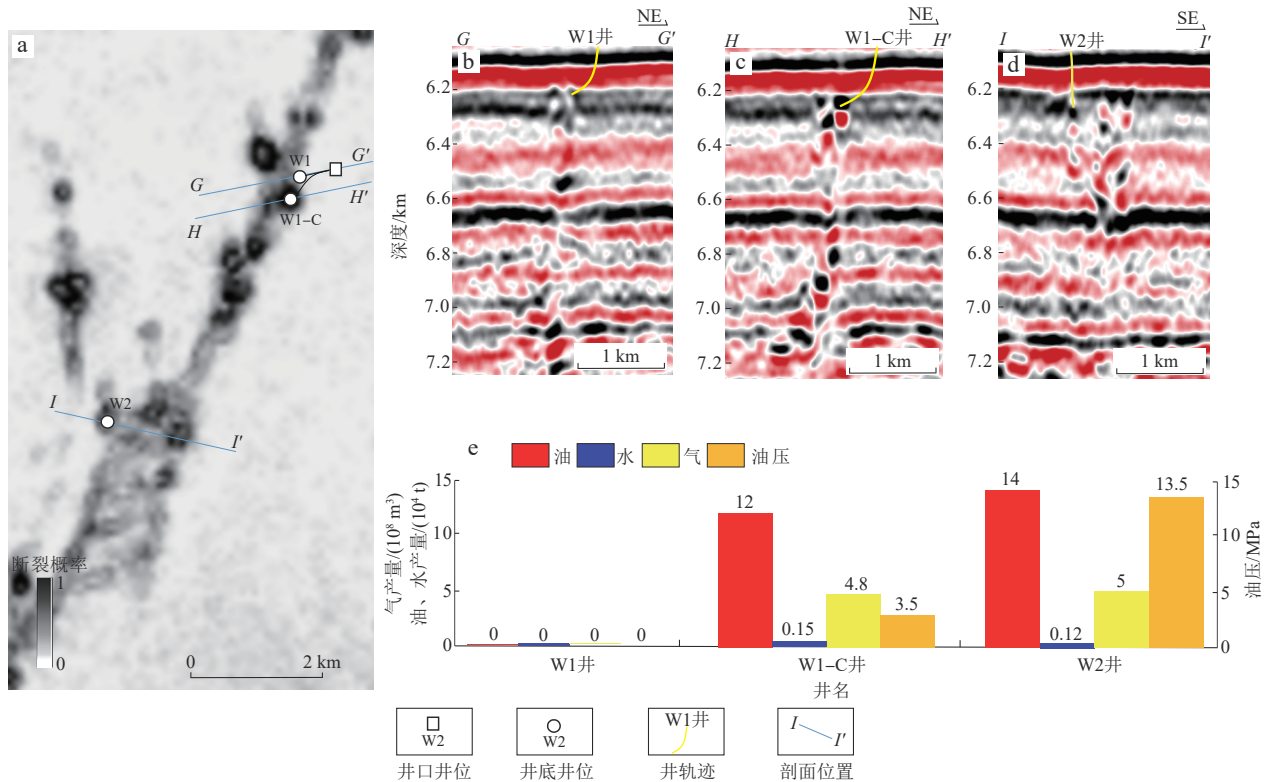


图6 塔里木盆地跃满井区典型井组缝洞体地震响应与单井生产情况

Fig. 6 Seismic responses and single-well production of fractured-vuggy reservoirs in a typical well group in the Yueman well block, Tarim Basin

a. 同一成藏条件断裂带振幅梯度属性特征及不同部位的井位图;b,c,d. 分别为过W1井、W1-c井和W2井横切断裂带的地震剖面 (剖面位置见a图);e. 不同部位的井对应的单井产能情况

Ⅲ模式之间,井位附近走滑断裂活动强,可有效沟通大型缝洞体储层。初步分析认为,同一断裂带相同的成藏条件下,可以通过地震相来解释断裂带岩溶缝洞体

的发育情况,且与断裂的匹配度较好。

为了进一步获取不同储层组合形态对应的地震特征,选择研究区典型剖面,设计对应的正演模型。模型

参数采用前人研究常用的参数^[27],通过正演预测,得到了与实际地震剖面吻合度较高的正演地震剖面(图7a₁—a₅,b₁—b₅)。同时,正演结果显示,花状构造形成的岩溶缝洞体地震响应特征为相对独立的“串珠”响应(图7b₁—b₅),且花状构造中两个片状储层分离度十分明显(图7c₁—c₅),这也符合露头分析得到的断缝带储集体特征,断裂带发育的缝洞体主要沿断层面方向延伸发育,垂直于断裂方向,主要在靠近断层核部位的破碎带附近,局部可以形成断层核与破碎带总体发育的储集体。

3.3 储层立体结构解释

通过露头 and 地震资料多尺度分析认为,研究区多是由断裂、裂缝和溶洞组合而成的片状储层,再进一步组成复杂的缝洞体结构。而针对这一结构的主

要预测手段是对高精度三维地震资料的解释。由于奥陶系碳酸盐岩地层围岩的岩石物理性质稳定,地层波阻抗较大,缝洞体与围岩形成较大的波阻抗差异,形成较强的绕射现象,经过偏移收敛之后,缝洞体的地震响应特征表现为强振幅的“串珠”状地震相,在深层信号较弱的情况下,这种强振幅是识别缝洞体的重要特征。

传统意义上的相干属性和振幅梯度属性等都是通过突出异常能量的方法解释储层轮廓,反演方法可以借助井参数进一步细化断控储集体内部细节,提升精度和横向非均质性的变化能力,能够发现更多储集体内部形态及物性变化特征。近年来,地震资料智能解释技术的进步,为解释缝洞体储层提供了新的技术手段,基于储层立体结构的分析(图8),依据地质成因及地球物理反射特征,分别构建符合跃满井区的断裂、裂缝和溶洞的

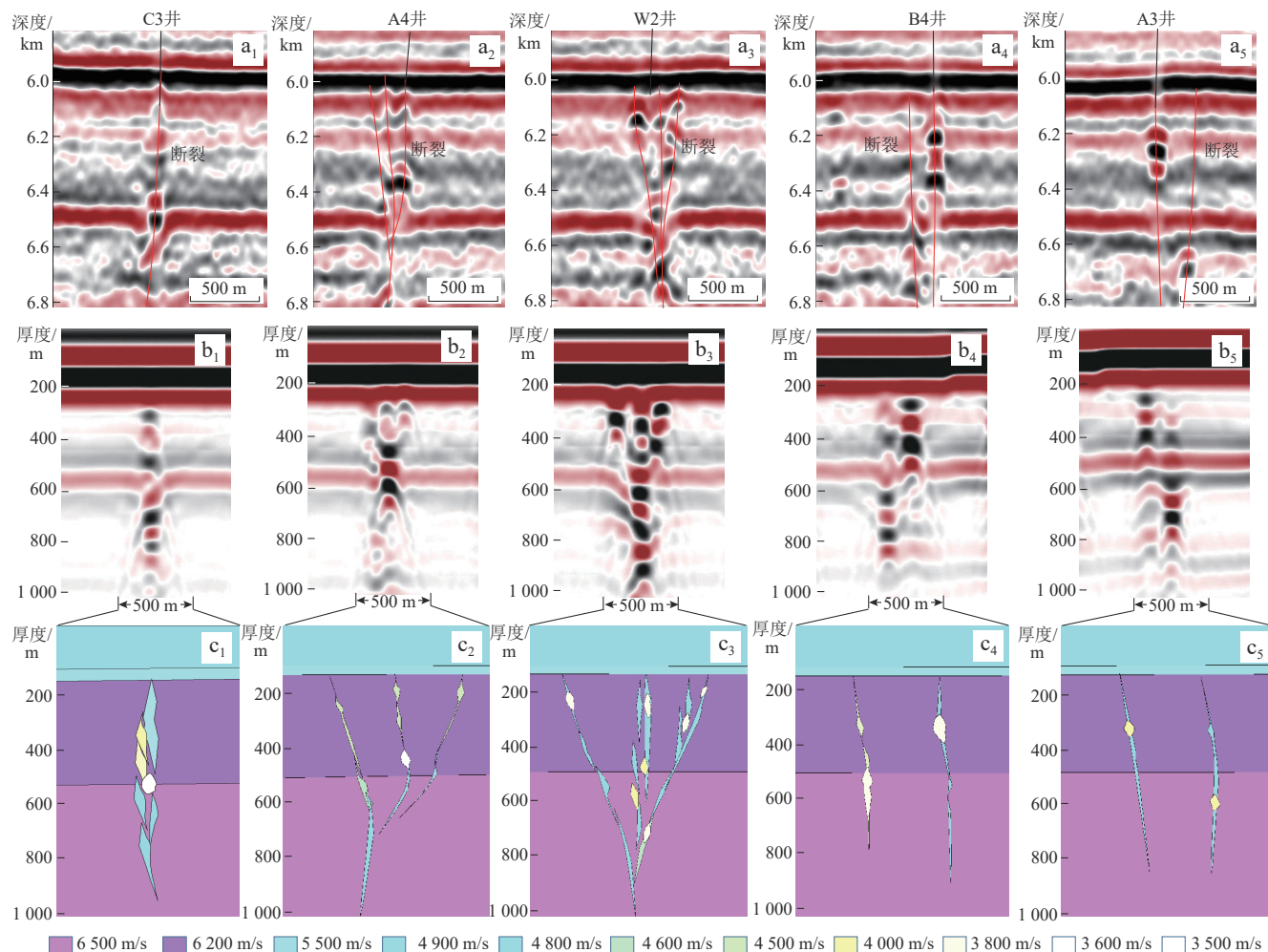


图7 塔里木盆地跃满井区基于典型剖面解释结果设计的正演模型及预测结果(据文献[27]修改)

Fig. 7 Forward models and prediction results designed based on the interpretation results of typical sections in Yueman well area, Tarim Basin (modified after references [27])

a₁—a₅. 跃满井区垂直于断裂带的地震剖面;b₁—b₅. 解释结果建立的缝洞体构造正演结果;c₁—c₅. 解释结果建立的缝洞体构造速度模型;

a₁—c₁. C3井;a₂—c₂. A4井;a₃—c₃. W2井;a₄—c₄. B4井;a₅—c₅. A3井

各自独立的训练样本,通过U-net深度学习网络训练并完成对储层结构的预测^[27],将缝洞体储层结构的地球物理响应处理成更准确的地质概率体(图8c)。对比分析预测结果与实钻测得的远探测成果发现其吻合度较高,可作为缝洞体结构分析的依据(图8d)。

4 储层连通要素分析及油藏单元划分

研究区缝洞型储层的结构受走滑断裂影响,断裂、裂缝和溶洞是构成储层结构的三大要素,实际生产和大量的研究表明研究区油藏分布受断裂控制,与区域的构造幅度关系不大。结合区域地质露头与前人认识,认为研究区在没有强岩溶作用的情况下^[9],缝洞体储层的发育与走滑断裂主断裂面的走向密切相关。

4.1 储层连通模式分析

4.1.1 干扰试井分析储层连通要素

分析断缝带岩溶缝洞型储层的立体结构发现,断裂带缝洞体主要沿断层面方向延伸发育,理论上断裂方向是最容易连通的方向。研究区附近通过干扰试井的方法对W6—W7—W8井组连通性做测试,实际生产中,W7井由于产量下降且见水,作为激动井采取注水方案,而W6井和W8井与W7井井位相邻,但是其所在的断缝带水平方向不同,该井持续稳产,作为观测井采取动态参数分析(图9)。从实验结果来看,W8井和W7井存在连通关系,但是流压变化曲线显示W7井停注一段时间后,W8井流压仍然持续上升,压力滞后效

应较弱,在结束注水10天后,流压才略有下降,下降幅度约为0.006 MPa(图9a)。而在W7井开始注水、暂停注水及完全停止注水后,W6井与W8井的流压变化曲线差异较大,W6井流压具有清晰的滞后效应。W7井注水采取断续短暂停注方式,在此期间W6井压力存在波动,说明W6与W7井间的连通性较好(图9b)。

通过智能解释的断-缝-洞组合成果来看,W6—W7—W8井组位于两个不同方向的断裂上,其中W6井与W7井位于同一条断裂上,而W8井位于另一方向的断裂上(图9c),两个方向的断裂并未明显交叉。前面露头地质模式分析认为,断裂控制着岩溶储层的发育,该井组解释结果显示W6井、W7井与W8井所在的储层均属于单断面岩溶缝洞体储层(图3i),两个储层所在的断裂没有交叉,而是末端存在局部裂缝沟通。总体分析该连通井组认为,位于同一成藏条件的同一断裂延伸方向上的缝洞型储集体连通性强,而不同断裂走向的断裂在局部小断裂/裂缝带同样可起到连通作用,但是连通性弱于同一断裂走向的缝洞储集体(图9d,e)。

由此,基于露头资料得到断裂控制储层和裂缝发育的特征,结合该连通井组不同方向断裂所在储层的连通程度,确定了断缝带岩溶缝洞型储层连通性主控因素为主干断裂(强连通),其次为分支断裂(中连通),最后为裂缝(弱连通),注采效果、示踪速度和干扰强度依次减弱。

4.1.2 储层连通模式

基于对研究区储层连通要素的分析,结合断缝带岩溶缝洞储层主要走滑断层面垂向上溶蚀为主的特

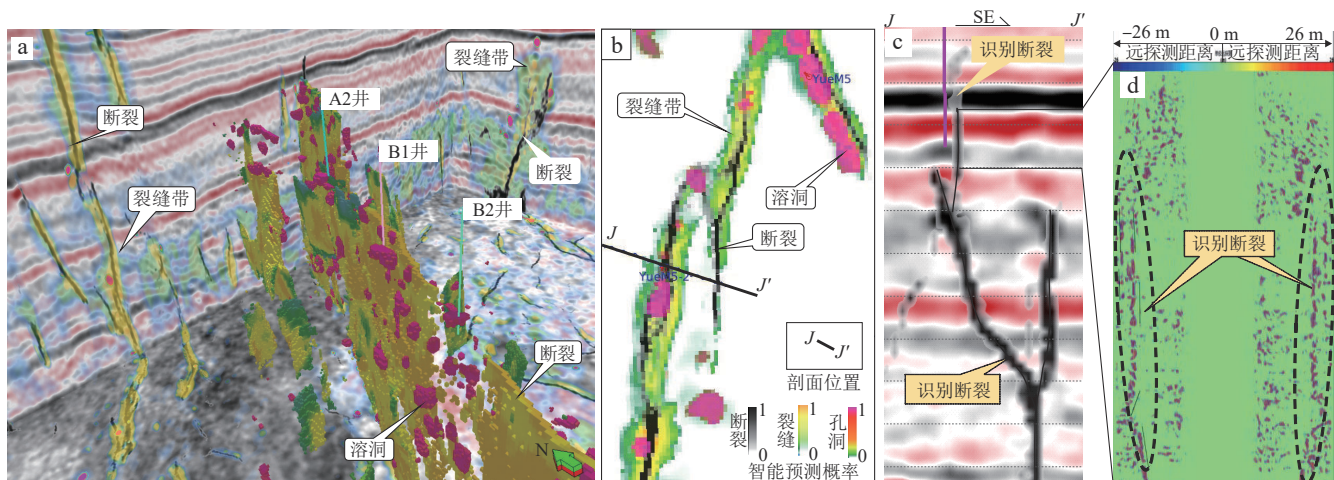


图8 塔里木盆地跃满井区储层结构智能预测结果及实钻井验证

Fig. 8 Intelligent predictions and drilling verification for reservoir architecture in the Yueman well block, Tarim Basin

a. 断裂、裂缝与溶洞智能预测结果立体显示;b. 断裂、裂缝与溶洞智能预测结果平面显示;c. 断裂智能预测结果剖面显示;d. 实钻井远探测剖面与解释结果

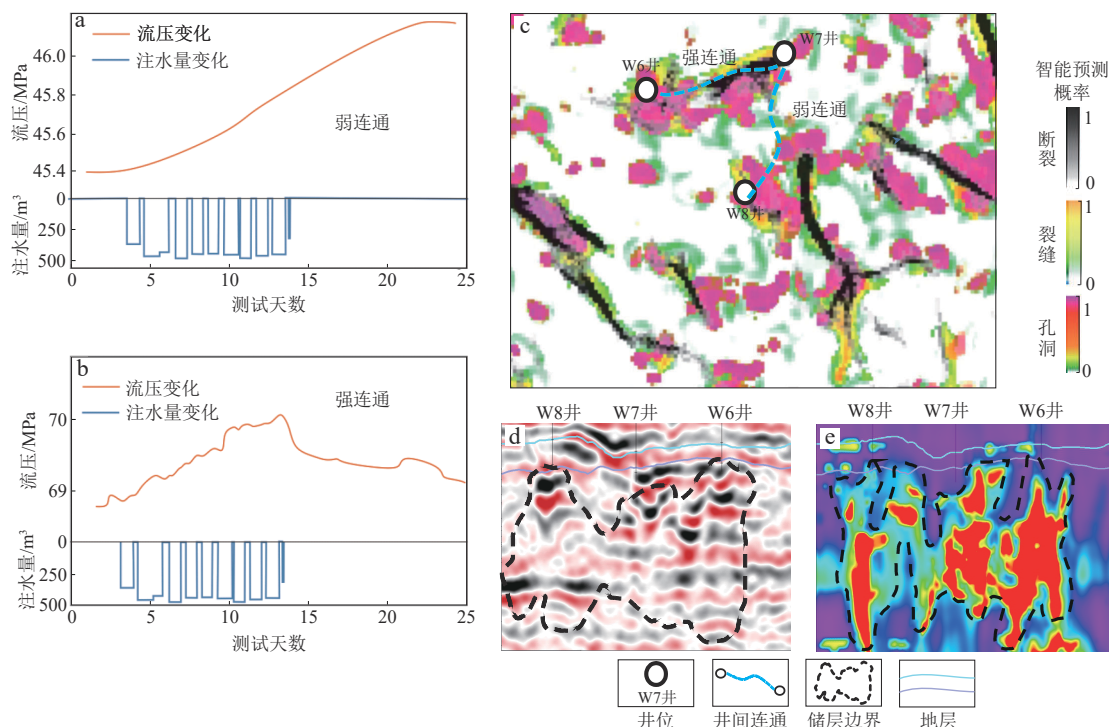


图9 塔里木盆地跃满井区通过断缝带典型缝洞体连通井组干扰试井分析连通关系

Fig. 9 Connectivity analysis of typical fractured-vuggy reservoirs in the fault-fracture zone through interference tests of a connected well group in the Yueman well block, Tarim Basin

a. W8井和W7干扰试井关系曲线; b. W6井和W7干扰试井关系曲线; c. 典型井组断裂、裂缝和溶洞智能解释平面结果; d. 典型井组地震剖面特征(剖面位置见c图); e. 典型井组连井剖面裂缝预测发育特征

点,认为跃满井区走滑断裂断裂面的走向和组合方式是研究储层连通性的关键。基于以上认识,结合露头区建立的单断面、平行断面和复杂断面的缝洞体发育模式,建立3种断缝带岩溶缝洞型储层的连通类型:①顺向强连通,为同一段走滑断裂断裂面发育的缝洞体,主要靠同向断裂带主干断裂及裂缝沟通(图10e₁—e₃);②复合中连通,为不同向走滑断裂断裂面发育的缝洞体,但是两个断裂面相交,主干断裂和搭界的裂缝沟通(图10d₁—d₃);③侧向弱连通,为未相交的两个相邻断裂带发育的缝洞体储层,由于走滑断裂破碎带及伴生断裂的发育,相邻但是未相交的断裂在一定距离内可以通过低序级伴生断裂或者裂缝沟通(图10c₁—c₃)。

不同的断裂组合方式可以形成不同的断缝带岩溶缝洞型储层发育模式。通过对跃满井区断缝带岩溶缝洞型储层解释结果的分析,建立了3种缝洞体储层结构:同向单断裂组合模式(图10c₃)、斜列断缝面组合模式(图10d₃)和不同向多断缝面组合模式(图10e₃)。认为同向单断裂组合模式的储层连通概率最高,中间断裂发育程度可能对连通性产生影响(图10c₁—c₃)。斜列断缝面组合模式主要发育在研

究区斜列段,由两条平行的主干断裂和内部斜列断裂组成的组合储集体,原则上,平行的断缝带岩溶缝洞型储层连通性差,但是这一段平行断裂间分支断裂发育,可以在平行断裂间形成不同方向的断裂连接,加之岩溶作用的影响,从而提高平行断裂间的连通性(图10d₁—d₃)。前文分析认为研究区单剪切走滑断裂发育,在区域应力的作用下,主干断裂在地表不会沿直线连续发育,而是发生R剪切作用,形成大量的分支断缝面,沿单个分支断缝面发育同向单断裂组合缝洞体,而相邻的不同分支断缝面可划分为一个缝洞体结构,将这一模式称之为不同向多断缝面组合模式(图10e₁—e₃)。

4.1.3 储层连通单元静态刻画

初步对储层连通单元的静态刻画开展大比例尺角度分析,结合以上连通主控因素的分析,将断裂面的发育方向作为连通单元刻画的最大控制因素,再考虑相邻断裂面的距离关系和组合模式,综合分析储层连通单元。前面介绍了储层立体结构解释,对构成岩溶缝洞体的断裂、裂缝和溶洞3个独立的构成要素,采取深度学习手段完成相对准确的预测。基

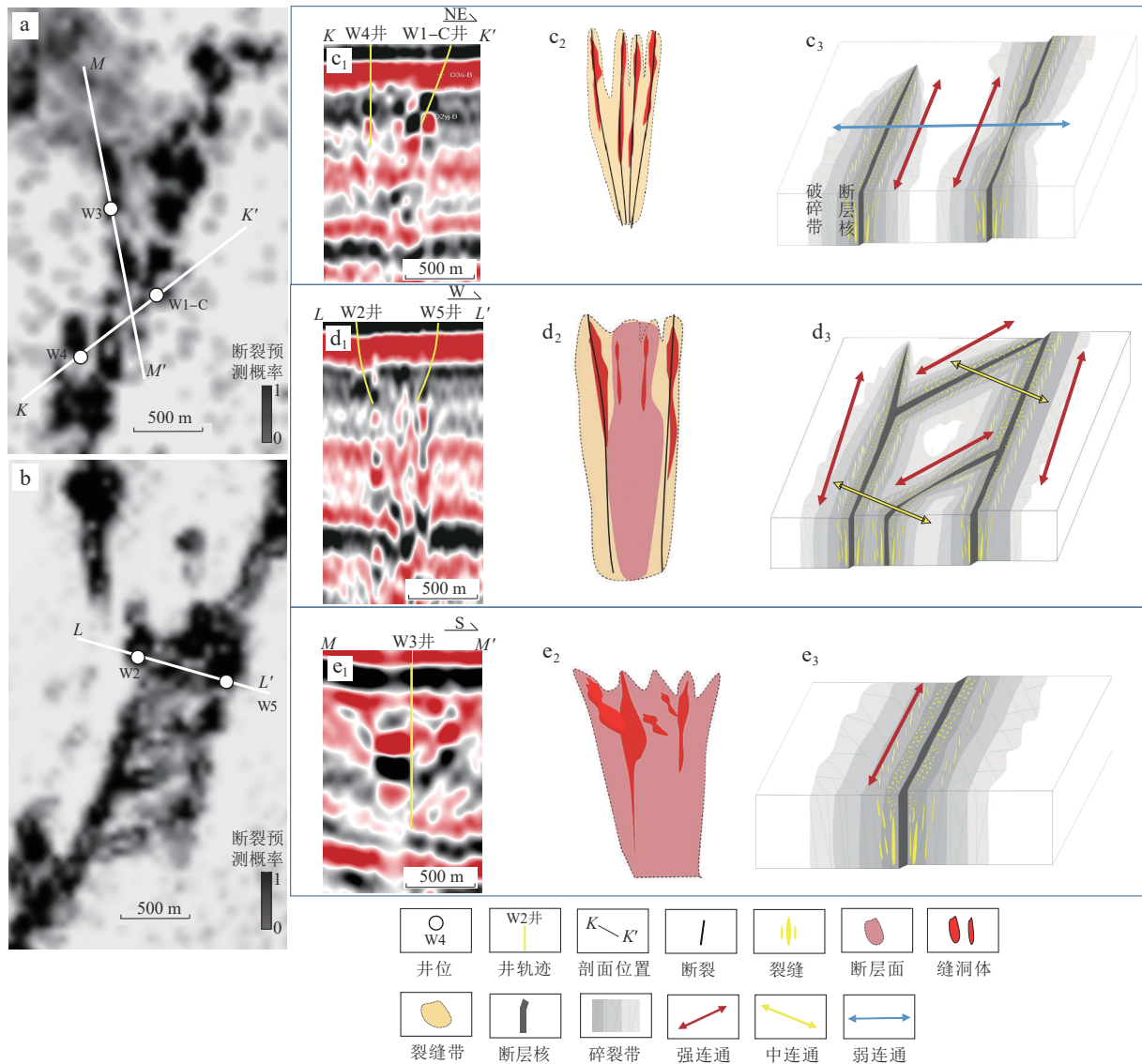


图10 塔里木盆地跃满井区基于断缝带岩溶缝洞型储层结构建立的连通模式

Fig. 10 Connection pattern of fractured-vuggy karst reservoirs in a fault-fracture zone of the Yueman well block, Tarim Basin

a, b. 沿层振幅梯度属性; c₁—c₃. 不同向多断缝面组合模式; d₁—d₃. 斜列断缝面组合模式; e₁—e₃. 同向单断裂组合模式;
c₁—e₁. 过井地震剖面(剖面位置见a图和b图); c₂—e₂. 缝洞体组合模式示意图; c₃—e₃. 连通模式示意图

于这些预测结果,先后将溶洞、断裂和裂缝加载到构造模型中,实现断裂和缝洞体结构的三维立体展示,这样更有利于实现储层连通单元的静态刻画。基于三维构造模型的立体分析,将W1井和W1-C井划分为一个连通单元,其效果差异原因在于W1井未钻遇有效裂缝沟通的有利储集体。而W3井、W4井和W1井分别位于相对独立的断裂面,这些断裂面间存在明显的分界,将其划分为独立的连通单元(图11a)。W2井和W5井虽然距离较远,但是两口井所在的断裂构造带活动强烈,形成典型的左旋斜列构造模式,该模式内部分支断裂较为发育,虽然局部可能连通性差,但是认为总体弱连通,将该块总体划分为一个连通单元(图11b)。

4.2 动、静态结合判断油藏连通单元

通过对研究区断裂和缝洞体的精细刻画,采用地质建模技术创建了断缝带岩溶缝洞型储层的立体结构,可以准确地分析不同断缝带的缝洞体发育情况。同时借助开发动态数据,通过对生产井井底压力的统计分析,结合储层预测结果,将地震资料解释为同一断缝带或者相近断缝带、生产动态结果近似的储层划分为一个油藏单元,同时采用井口生产动态数据和地层静压测试结果辅助分析油藏单元,动、静态预测结果一致性较强。

4.2.1 生产动态数据分析

结合缝洞识别结果及开采现状分析,以跃满井区

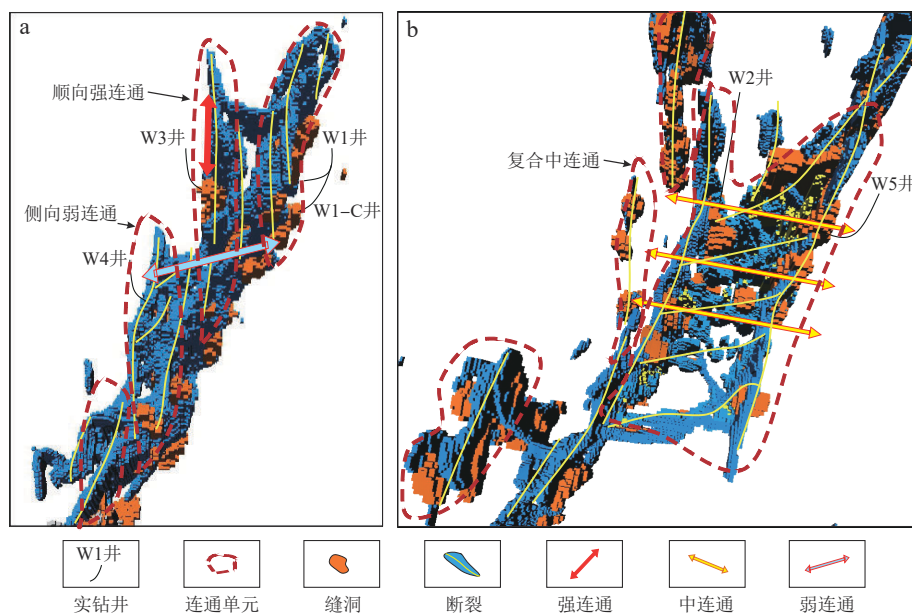


图11 塔里木盆地跃满井区基于断裂和溶洞地质建模结果静态刻画储层连通单元

Fig. 11 Static characterization of interconnected units in reservoirs based on the geological modeling results of faults and karst caves in the Yueman well block, Tarim Basin

a. 静态刻画储层顺向强连通和侧向弱连通单元; b. 静态刻画储层复合连通单元

为分析对象,提取累产、年产、年初日产和年末日产量数据,根据产量变化和含水率综合分析油藏的初始油-水界面,为刻画油藏单元奠定基础。

1) 低产井

通过对目前开发井的分析,缝洞单元低产井普遍存在,其产量低、见水周期短,目前所选的井都已见水。从生产到见水周期为1~20个月。整个开发周期油压持续波动,关井复压后可生产一段时间,见水后产量快速下降(图12a)。动、静态综合分析,推算油-水界面为距开采位置50~100 m(参与分析井:C1井、C2井、C3井、W1-C井、W2井、W3井、W4井和W5井)。

2) 中产井

通过对目前开发井的分析,缝洞单元的中产井油压相对稳定、产量中等,都已见水。从生产到见水周期为30~50个月,见水后油压波动(图12b)。动、静态综合分析,推算油-水界面为距开采位置100~200 m(参与分析井:B1井、B2井、B3井和B4井)。

3) 高产井

通过对目前开发井的分析,缝洞单元的高产井普遍存在油压稳定、产量高和见水周期长的特点(图12c)。特别是典型的C3井,在2014—2017年井底流温随生产升高大(井底流温升高7.2℃),井底流温推算油柱高度达325 m,稳产时间长,推测油-水界面为距开采位置300~500 m(参与分析井:A1井、A2井、A3井和A4井)。

基于断-缝-洞刻画和动、静态分析,静态识别结果与井点动态分析结果匹配关系较好。根据生产情况确定的油-水界面可以看到,B1井、B2井、B3井和B4井在开发效果和油-水界面分析结果上吻合度较高(图13a),同时根据深度学习预测的断裂面来看(图13b),几口井所在断裂面没有明显错动,分析其可能为连通的断缝带岩溶缝洞型油藏。A2井和C2井虽然距离较近,但是两者油-水界面差异明显,开发效果差异很大,两者为独立的油藏单元。而C2井和W2井,在上文中认为是同一个静态单元,这里动态数据也显示两者生产情况和油-水界面都一致,再次印证其属于同一个油藏单元。

4.2.2 动、静态综合分析油藏单元

除了生产动态数据,地层静压数据也能够反映油藏开采过程中压力的衰减程度,不同油藏单元的衰减速度是不一样的。而同一油藏单元地层静压理论上是一致的,通过测得不同时期的静压数据,建立起不同井时间与静压之间的关系曲线,可以作为分析油藏单元的依据。对W1—W2井区生产井测得的地层静压数据进行分析,可见该区的静压曲线存在明显的差异(图14),将曲线相关度高的划分为同一个单元,可划分4个油藏单元。结合储层静态刻画结果可以看到,动态分析的连通单元在静态结果上都符合前面提出的受断裂面控制的缝洞体发育模式。

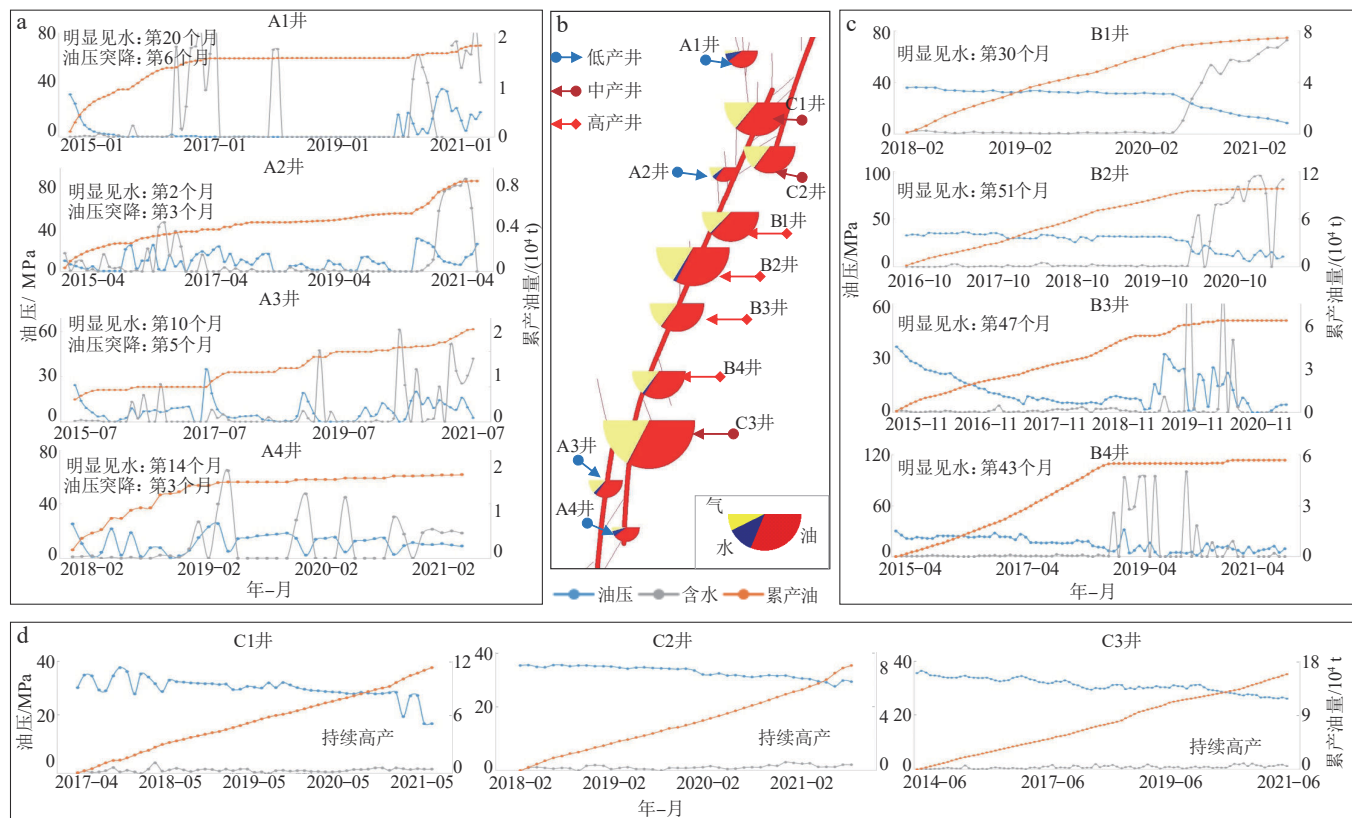


图12 塔里木盆地跃满井区同一断裂带不同井组的生产情况对比

Fig. 12 Comparison of production of different well groups in the same fault zone in the Yueman well block, Tarim Basin

a. 低产井产能及油压曲线; b. 单井累产分布图; c. 中产井产能及油压曲线; d. 高产井产能及油压曲线

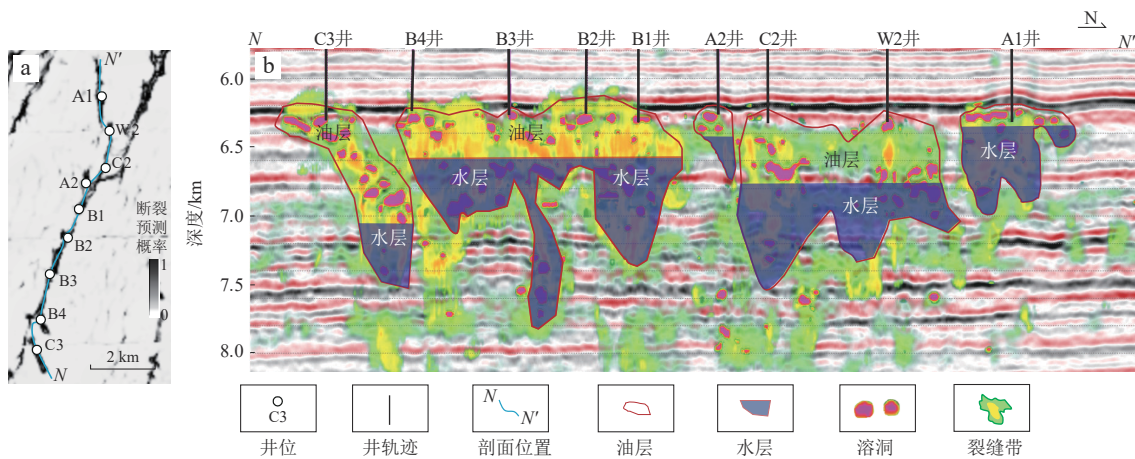


图13 塔里木盆地跃满井区部分井油-水界面与储层发育特征

Fig. 13 Section showing oil-water contacts and the developmental characteristics for reservoirs in some wells of the Yueman well block, Tarim Basin

a. 研究区走滑断裂智能预测结果平面分布特征; b. 连井地震剖面与储层预测剖面叠合估算的油藏油-水界面

5 断缝带缝洞型储层结构控制的规模剩余油分布特征

基于以上研究,认为断缝带缝洞型储层结构差异是导致同一成藏条件的一条断裂带油气藏分布

不均匀的重要因素。结合前人对研究区油藏的认识,在不考虑微观剩余油分布的情况下,探讨不同储层结构对规模剩余油分布的控制作用。基于上文提到的跃满井区连通单元刻画方案和油藏单元划分方案,将研究区规模剩余油分为已动用的油藏单元剩余油模式(图15a中I和II,图15b,c)和未动

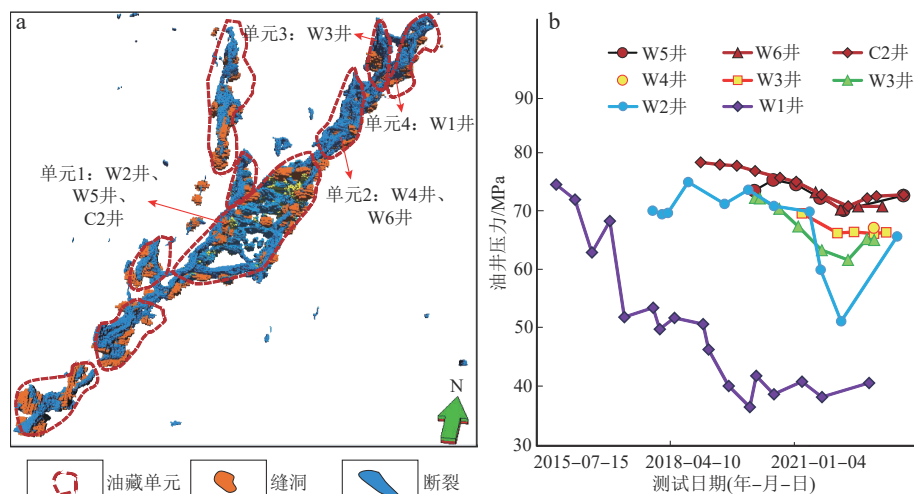


图14 塔里木盆地跃满井区动-静结合分析岩溶缝洞型油藏单元

Fig. 14 Fractured-vuggy karst reservoir units derived from combined dynamic and static analysis of the Yueman well block, Tarim Basin

a. 缝洞体立体结构与连通单元; b. 多井地层静压关系曲线

用的油藏单元剩余油模式(图15a中Ⅲ,图15d)两大类。

5.1 已动用油藏单元剩余油模式

已动用油藏单元剩余油模式主要是某井或者某一井组所在油藏的静态解释结果和动态分析结果都将其解释为同一油藏单元,但是油藏动用程度未达到预期,需要借助开发措施来提高剩余油动用程度。这类剩余油是由于其所在油藏单元开发过程中,底水上升造成的局部水窜,以及注水水体会沿着大断裂进入储集体驱替油气,主断裂带成为水体运移的优势通道,断裂带两侧相对低孔、低渗,孔-缝中的油气由于未受到注入水波及,只能依靠毛管压力吸入高渗通道(大断裂),速度极为缓慢,从而在断裂附近的孔-缝中富集了大量的剩余油。同时,由于开发区的井间距较大,井间构造幅度存在较大变化,局部存在构造高点可作为剩余油储层空间。结合上文对储层结构的认识,进一步将该类剩余油所在的储层结构划分为斜列断缝面组合模式剩余油和同向单断裂组合模式剩余油。

5.1.1 斜列断缝面组合模式剩余油

斜列断缝面组合缝洞体的不同断裂间储层连通性中等偏弱,依据上文提到露头的交叉断裂缝洞体发育模式(图3g),认为断裂交叉处裂缝和储层特别发育,也是多数井点部署位置,更易在此处形成优势通道,导致邻近的不同向的断裂带的储层是剩余油的有效富集区(图15a中Ⅰ,图15b)。跃满井区斜裂段这一类储层

宽度达1 km,长度大于2 km,多采用加密开发的方式,以提高整个区域的采出程度,采用这一方案对图14中的单元1部署2口加密井,单井产量目前都达工业油流,且持续稳产(表1)。

5.1.2 同向单断裂组合模式剩余油

同向单断裂组合形成的缝洞体内部连通性强、开发效果好,一般剩余油只存在于高部位。部分发育较长的同向单断裂缝洞型储层,也会在局部形成优势通道,附近孔缝型孤立缝洞体形成剩余油(图15a中Ⅱ,图15c)。针对这一类剩余油,多采用注水增压扩容方式提高剩余油开采程度,目前跃满井区开展了多轮措施,取得较好的效果。而针对局部高部位剩余油可采用注气方式开采高部位剩余油(表1)。

5.2 未动用油藏单元剩余油模式

未动用的油藏单元剩余油模式主要是静态解释出的独立连通单元但是尚未钻井的,也无法通过开发措施波及到的部位。由于走滑断裂多发育相对平行的雁列断裂面,这一特点决定了不同断面的岩溶缝洞型储层相对独立的特点。随着断裂的精细解释和对储层结构认识的加深,基于不同断裂面刻画出的储层独立连通单元将会是有利的未动用油藏单元。

结合研究区的开发现状及上文对储层结构的认识,将该类剩余油的储层结构定义为不同向多断缝面组合模式剩余油。不同的断裂之间的连通性差,受储层结构的影响,最多在储层底部局部连通,开发一个断裂带缝洞型储层,不会波及到另一个断裂带的储层。

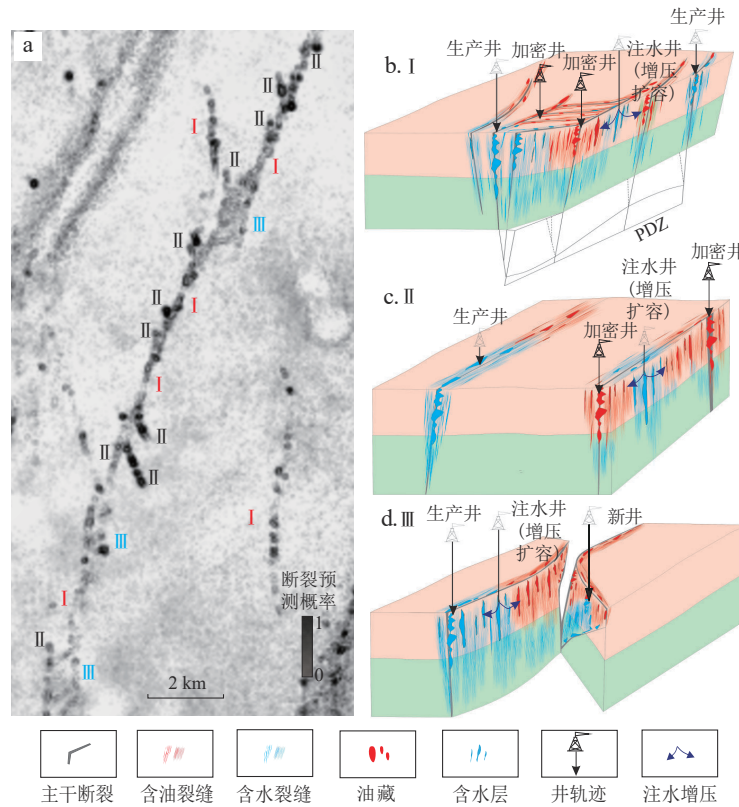


图 15 塔里木盆地跃满地区断缝带缝洞体油藏剩余油发育模式

Fig. 15 Residual oil development model of fractured-vuggy reservoirs in a fault-fracture zone within the Yueman area, Tarim Basin
a. 一间房组顶沿层相干属性叠合不同类型剩余油模式平面分布;b. 同向单断裂组合剩余油(Ⅰ)模式示意图;c. 不同向多断缝面组合剩余油(Ⅱ)模式示意图;d. 斜列断缝面组合剩余油(Ⅲ)模式示意图
(PDZ为主位移带。)

表 1 塔里木盆地跃满井区规模剩余油分布模式及开发方式

Table 1 Distribution patterns and production methods of residual oil in the Yueman well block, Tarim Basin

剩余油模式	储层结构	单元连通性	剩余油特点	开发方式
已动用油藏单元 剩余油	斜列断缝面 组合模式(Ⅲ)	不同断裂间储层连通性 中等偏弱	优势通道附近断缝带,不同向断裂有利部位难波及部位	加密井, 注水增压扩容
	同向单断裂 组合模式(Ⅰ)	连通性强,开发效果好	优势通道附近断缝带,单元高部位未动用	长断裂加密井, 短断裂注水增压扩容, 局部注气压驱
未动用油藏单元 剩余油	不同向多断缝面 组合模式(Ⅱ)	底部弱连通, 顶部不连通,油藏孤立	孤立油藏剩余油	加密井, 侧钻井

通过精细解释缝洞结构,可以划分出独立的连通单元,从而识别这一类剩余油(图 15a 中Ⅲ,图 15d)。针对这一类型剩余油,需要借助新井或者邻近单元的见水井或失利井侧钻开发。目前在跃满井区北部已经连续开发多个相对独立的油藏单元,如图 11 中的 W1-C 井、W3 井和 W4 井,都取得较好的效果(表 1)。

6 结论

1) 通过野外露头观察、无人机扫描和探地雷达等

手段,详细分析了露头区断裂、裂缝和溶洞的组合方式,建立不同岩溶阶段的地质模式。

2) 断裂带相同的成藏条件下,可以通过地震相来解释断缝带岩溶缝洞型储层的发育情况,且与断裂的匹配度较好。基于这一特点,通过正演分析建立起不同断-缝-洞组合的地震响应特征,认为目前地震资料所显示的情况下,“串珠”地震相可以作为划分不同断层面的依据。

3) 通过研究区断裂带平面几何形态和断-缝-洞立体结构分析,认为研究区走滑断裂符合里德尔剪切

模式,断裂纵向上表现为花状构造,这种构造在顶部形成雁行分支,底部收敛至走滑主干断裂,可以形成顶部弱连通、底部强连通的油藏单元。最终建立断-缝-洞3种不同的组合样式,通过对不同组合样式的分析,明确了各组合样式的连通性。

4) 生产动态数据可以作为判断油藏连通性的依据,其中单井产量、油压和地层静压等可以间接反映油藏的连通性,基于动态连通特点,证实了通过静态刻画连通单元,两者一致性较强。基于这种认识,可以建立起一种油藏连通单元的模式,从而指导油气勘探与剩余油挖潜工作。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 177-183.
JIA Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 177-183.
- [2] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1296-1310.
HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1296-1310.
- [3] 李凤磊, 林承焰, 任丽华, 等. 塔里木盆地塔北地区多期断裂差异匹配控制下超深岩溶缝洞储层成藏特征[J]. 地学前缘, 2024, 31(4): 219-236.
LI Fenglei, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Characteristics of deep karst fracture-cavity reservoir formation controlled by multi-phase faults matching in the northern Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(4): 219-236.
- [4] 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.
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.
- [5] 计秉玉, 郑松青, 顾浩. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术的认识与思考——以塔河油田和顺北油气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1459-1465.
JI Bingyu, ZHENG Songqing, GU Hao. On the development technology of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on Tahe Oilfield and Shunbei oil and gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1459-1465.
- [6] 江同文, 邓兴梁, 曹鹏, 等. 塔里木盆地富满断控破碎体油藏储集类型特征与注水替油效果[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 542-552.
- JIANG Tongwen, DENG Xingliang, CAO Peng, et al. Storage space types and water-flooding efficiency for fault-controlled fractured oil reservoirs in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 542-552.
- [7] 曹自成, 云露, 漆立新, 等. 塔里木盆地顺北地区顺北84X井超千米含油气重大发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 341-356.
CAO Zicheng, YUN Lu, QI Lixin, et al. A major discovery of hydrocarbon-bearing layers over 1 000-meter thick in well Shunbei 84X, Shunbei area, Tarim Basin and its implications[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 341-356.
- [8] 林波, 云露, 李海英, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1344-1353, 1400.
LIN Bo, YUN Lu, LI Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344-1353, 1400.
- [9] 李凤磊, 林承焰, 崔仕提, 等. 塔北地区奥陶系古地貌及走滑断裂差异性控储规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 48-58.
LI Fenglei, LIN Chengyan, CUI Shidi, et al. Analysis on difference of Ordovician fracture-cavity reservoirs controlled by ancient landform and slip fault in Tabei area, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 48-58.
- [10] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6): 1111-1126.
DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: A case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(6): 1111-1126.
- [11] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义——以顺北地区1号和5号断裂为例[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 906-923.
LIN Bo, ZHANG Xu, KUANG Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and their hydrocarbon significance: A case study of No. 1 fault and No. 5 fault in Shunbei area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 906-923.
- [12] 常少英, 曾溅辉, 徐旭辉, 等. 碳酸盐岩断溶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 Shaoying, ZENG Jianhui, XU Xuhui, et al. Identification technology for internal structures of carbonate fault-karst and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(2): 414-422.
- [13] 郭光辉, 张韬, 朱永峰, 等. 碳酸盐岩断裂破碎带结构、分布与发育机制[J]. 地质科学, 2020, 55(1): 68-80.

- WU Guanghui, ZHANG Tao, ZHU Yongfeng, et al. The architecture, distribution and growth of carbonate fault damage zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(1): 68–80.
- [14] 李映涛, 漆立新, 张哨楠, 等. 塔里木盆地顺北地区中——下奥陶统断溶体储层特征及发育模式[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1470–1484.
- LI Yingtao, QI Lixin, ZHANG Shaonan, et al. Characteristics and development mode of the Middle and Lower Ordovician fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1470–1484.
- [15] 姚超, 赵宽志, 孙海航, 等. 断溶体内部缝洞结构组合模式研究及应用[C]//西安石油大学, 陕西省石油学会. 2018油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2018)论文集. 北京: 中国石油塔里木油田勘探开发研究院, 2018: 1903–1910.
- YAO Chao, ZHAO Kuanzhi, SUN Haihang, et al. Research and application of the combination mode of internal fracture cavity structure in fractured solution bodies [C]//Xi'an Shiyou University, Shaanxi Petroleum Society. Proceedings of the 2018 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development (IFEDC 2018). Beijing: China Petroleum Tarim Oilfield Exploration and Development Research Institute, 2018: 1903–1910.
- [16] 王健, 庞宇晗, 操应长, 等. 塔里木盆地石灰窑露头区寒武系碳酸盐岩断控岩溶储层的形成机制及指示意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(5): 1–12.
- WANG Jian, PANG Yuhang, CAO Yingchang, et al. Formation mechanism and significance of Cambrian carbonate fault-controlled karst reservoir in Shihuiyao outcrop area, Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(5): 1–12.
- [17] 杜赫, 徐守余, 冯建伟, 等. 基于数字露头表征的岩溶缝洞组构特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(5): 1–9.
- DU He, XU Shouyu, FENG Jianwei, et al. Digital outcrop representation for karst fracture-cave reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(5): 1–9.
- [18] 尹兵祥, 刘展, 徐凯军. 探地雷达技术在岩石露头研究中的应用[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理·2009. 青岛: 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 2009: 360.
- YIN Bingxiang, LIU Zhan, XU Kaijun. Application of ground penetrating radar technology in rock outcrop research [C]//Chinese Geophysical Society. *Chinese Geophysics*, 2009. Qingdao: School of Earth Resources and Information Science, China University of Petroleum (East China), 2009: 360.
- [19] 徐红霞, 沈春光, 李斌, 等. 多属性分析技术在碳酸盐岩断溶体预测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(增刊2): 158–163.
- XU Hongxia, SHEN Chunguang, LI Bin, et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction with comprehensive multi-attribute analysis [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52 (S2): 158–163.
- [20] 韩长城, 林承焰, 马存飞. 地震多属性优选技术在碳酸盐岩缝洞型储层预测中的应用[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(6): 67–70, 78.
- HAN Changcheng, LIN Chengyan, MA Cunfei. Application of seismic multi-attribute optimization technology to the prediction of carbonate fractured-vuggy reservoir [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(6): 67–70, 78.
- [21] 李凤磊, 林承焰, 张国印, 等. 塔北地区多期走滑断裂地球物理响应特征及精细识别[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(3): 1–14.
- LI Fenglei, LIN Chengyan, ZHANG Guoyin, et al. Characteristics of geophysical response and fine identification of multi-stage strike-slip fault in Tabei area [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(3): 1–14.
- [22] WU Xinming, YAN Shangsheng, QI Jie, et al. Deep learning for characterizing paleokarst collapse features in 3-D seismic images [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(9): e2020JB019685.
- [23] ZHANG Guoyin, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Seismic characterization of deeply buried paleocaves based on Bayesian deep learning [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 97: 104340.
- [24] 李凤磊, 林承焰, 任丽华, 等. 超深层断缝带岩溶缝洞体储层结构分析与智能预测[J/OL]. *地学前缘*: 1–20[2024-07-13]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.5.31>.
- LI Fenglei, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Structural analysis and intelligent prediction of karst fracture cave reservoirs in ultra deep fault zones[J/OL]. *Earth Science Frontiers*: 1–20[2024-07-13]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.5.31>.
- [25] 邓辉, 李果营, 杨海风, 等. 走滑应变椭圆模型的改进及应用举例[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(8): 868–878.
- DENG Hui, LI Guoying, YANG Haifeng, et al. Improvement and application of Riedel shear system [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(8): 868–878.
- [26] 李艳友, 漆家福, 周赏. 走滑构造差异变形特征及其主控因素分析——基于砂箱模拟实验[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 711–715.
- LI Yanyou, QI Jiafu, ZHOU Shang. Differential deformation and its main controls on strike-slip structures: Evidence from sandbox experiments [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(5): 711–715.
- [27] 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等. 塔北哈拉哈塘地区走滑断裂分段特征及其与油气成藏的关系[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(2): 219–225.
- ZHENG Xiaoli, AN Haiting, WANG Zujun, et al. The segmentation features of strike-slip fault and its relation with the fault and reservoirs in Halahatang area, North Tarim Basin [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2018, 45(2): 219–225.
- [28] 杨敬雅, 李相文, 朱冬辉, 等. 基于正演模拟的碳酸盐岩缝洞体系连通性分析[J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(2): 22–27.

- YANG Jingya, LI Xiangwen, ZHU Donghui, et al. Connectivity analysis of carbonate fracture-cave system based on forward modeling [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(2): 22–27.
- [29] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 碳酸盐岩孔洞储层地震物理模型研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(2): 272–280.
- LI Fanyi, WEI Jianxin, DI Bangrang, et al. Seismic physical model of carbonate cavern reservoirs [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(2): 272–280.
- [30] 杨敏雅, 李相文, 朱冬辉, 等. 基于正演模拟的碳酸盐岩缝洞体系连通性分析[J]. *复杂油气藏*, 2019, 12(2): 22–27.
- YANG Jingya, LI Xiangwen, ZHU Donghui, et al. Connectivity analysis of carbonate fracture-cave system based on forward modeling [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2019, 12(2): 22–27.
- [31] 张洁, 袁晓满, 刘勇, 等. 富满油田富源210井区井间连通性研究及应用[C]//中国地质大学(武汉), 西安石油大学, 陕西省石油学会. 2023油气田勘探与开发国际会议论文集I. 库尔勒市: 中国石油塔里木油田分公司哈得油气开发部, 2023: 277–285.
- ZHANG Jie, YUAN Xiaoman, LIU Yong, et al. Research and application of inter well connectivity in Fuyuan 210 well area of Fuman Oilfield [C]//China University of Geosciences (Wuhan), Xi'an Shiyu University, the Shaanxi Petroleum Society. *Proceedings of the 2023 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development I*. Korla: Hade Oil and Gas Development Department of China Petroleum Tarim Oilfield Branch, 2023: 277–285.
- [32] 苏泽中. 利用动态资料研究碳酸盐岩缝洞型油藏井间连通性[D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- SU Zezhong. The study of interwell connectivity in fracture-vuggy carbonate reservoirs by dynamic data [D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2018.
- [33] 缪立南, 邸士莹. 类干扰试井井间连通程度的定量分析[J]. *油气田地面工程*, 2014, 33(7): 16–17.
- MIAO Linan, DI Shiyong. Quantitative analysis of inter well connectivity in interference testing [J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2014, 33(7): 16–17.
- [34] 顾浩, 王光付, 杨敏, 等. 超深断溶体油藏油井动用深度确定方法及其对开发的指导意义[J]. *石油学报*, 2021, 42(9): 1202–1211.
- GU Hao, WANG Guangfu, YANG Min, et al. A method for estimating the drainage depth of oil well in ultra-deep fault-karst reservoirs and its guiding significance to oilfield development [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(9): 1202–1211.
- [35] WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 595–607.
- [36] 叶天竺, 黄崇珂, 邓志奇. 1:250万中华人民共和国数字地质图空间数据库[J]. *中国地质*, 2017, 44(增刊1): 19–24, 139–146.
- YE Tianzhu, HUANG Chongke, DENG Zhiqi. Spatial database of 1:2 500 000 digital geologic map of People's Republic of China [J]. *Geology in China*, 2017, 44(S1): 19–24, 139–146.
- [37] 赵倩倩, 雷宛, 邓艳, 等. 探地雷达在工程勘察中天线频率的选择[J]. *勘察科学技术*, 2013(2): 61–64.
- ZHAO Qianqian, LEI Wan, DENG Yan, et al. Ground penetrating radar (GPR) in antenna frequency selection of engineering investigation [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2013(2): 61–64.
- [38] 栗宝鹏, 刘栋臣, 王志豪, 等. 基于电磁原理的浅地表地质病害探测方法及应用[J]. *工程地球物理学报*, 2022, 19(6): 753–761.
- LI Baojuan, LIU Dongchen, WANG Zhihao, et al. Electromagnetic method and application for geological defects detection in shallow surface [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2022, 19(6): 753–761.
- [39] RICHARD P D, NAYLOR M A, KOOPMAN A. Experimental models of strike-slip tectonics [J]. *Petroleum Geoscience*, 1995, 1(1): 71–80.
- [40] MCCLAY K, BONORA M. Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(2): 233–260.
- [41] 康志江, 张冬梅, 张振坤, 等. 深层缝洞型油藏井间连通路径智能预测技术[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1290–1299.
- KANG Zhijiang, ZHANG Dongmei, ZHANG Zhenkun, et al. Intelligent prediction of inter-well connectivity path in deep fractured-vuggy reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1290–1299.
- [42] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1195–1210.
- LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1195–1210.
- [43] 杨继东, 孙加星, 黄建平, 等. 面向断溶体缝洞储层的智能化散射波地震成像方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(2): 67–73.
- YANG Jidong, SUN Jiaxing, HUANG Jianping, et al. Intelligent diffractions imaging method for fault-karst reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(2): 67–73.
- [44] 毛鑫, 张云峰, 袁红旗, 等. 南堡凹陷及周边露头下古生界岩溶储集体特征及对比[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(4): 24–34.
- MAO Cui, ZHANG Yunfeng, YUAN Hongqi, et al. Characteristics and comparison of karst reservoirs of lower Paleozoic in Nanpu Sag and outcrops [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(4): 24–34.

(编辑 许诺)