

塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统储集体断裂与裂缝特征

李映涛^{1,2},袁晓宇³,叶宁^{1,2},黄擎宇^{1,2},苏炳睿⁴

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 能源学院,四川 成都 610059; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214151; 4. 成都理工大学 沉积地质研究院,四川 成都 610059)

摘要:通过薄片、岩心观察结合成像测井以及三维地震等资料对玉北地区鹰山组海相碳酸盐岩储层进行了研究,认为此区域虽然剥蚀严重,大范围缺失上奥陶统,但并非典型的风化壳型储层,具有明显的断控型岩溶储层特征。储集空间主要为小型溶蚀孔洞-裂缝,且区域上明显受到断裂系统控制。文章从宏观角度分析了玉北地区断裂发育的期次和构造样式以及有效缝的走向,之后转入微观裂缝特征的研究,最后探讨裂缝与储层改造的关系。研究认为地表水沿断裂下渗溶蚀是储层改善的关键,埋藏环境下的成岩作用(深部热液溶蚀、有机酸作用)对储层存在影响,但并非储集空间形成的主要因素。玉北地区奥陶系全井段裂缝型储层都发育,尤其在顶部风化壳和底部云灰岩性过渡段裂缝发育,其东部断褶区中构造层发育的北东向盖层滑脱型逆冲推覆断裂系统,与下构造层中发育的北东向直立走滑断裂带位置相近,在东部断垒带共同构成了油气运移通道,使之成为玉北地区裂缝-孔洞型储层发育的优势地区。

关键词:断裂体系;裂缝特征;碳酸盐岩储层;玉北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Fault and fracture characteristics of the Middle-Lower Ordovician in Yubei area, Tarim Basin

Li Yingtao^{1,2}, Yuan Xiaoyu³, Ye Ning^{1,2}, Huang Qingyu^{1,2}, Su Bingrui⁴

(1. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. School of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 4. School of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Yingshan Formation marine carbonate reservoirs in Yubei Area were examined by applying various data such as cores, FMI, 3D seismic attributes and thin sections. Although extensive erosion has led to the absence of the Upper Ordovician in the study area, the carbonate reservoirs are not typical weathering-crust reservoirs, but fault-controlled karst reservoirs. The reservoir spaces are mainly small-scale solution vugs and fractures, the distribution of which is strongly controlled by fault systems. This paper first studied the timing of fault, structural styles and the azimuth of fractures in a macroscopic view, then analyzed the features of fracture in a microscopic view, and finally discussed the relationship between the fractures and reservoir reconstruction. The results show that meteoric corrosion downward along faults is critical to reservoir reconstruction. Whereas the burial diagenesis (deep hydrothermal erosion or organic acid) also has influences on reservoir pores but is not the main factor. Faulted reservoirs occur in the whole Ordovician in Yubei Area, especially in the top weathering crust and the bottom transition from dolomite to limestone. The overthrust system of NE-trending cap rock detachment type in the middle structural layer of east fault-fold structural belt is adjacent to the NE-trending vertical strike slip fault in the lower structural layer. They together consist of the hydrocarbon migration pathway in the eastern faulted horst belt, which is the most favorable zone for fractured or fractured-vuggy reservoirs.

Key words: fault system, fracture characteristics, carbonate reservoir, Yubei area, Tarim Basin

收稿日期:2014-8-21;修订日期:2014-10-20。

第一作者简介:李映涛(1986—),男,博士研究生,储层地质与储层地球化学。E-mail:spark5521@qq.com。

基金项目:中国石化西北油田分公司科技项目(KY-S-2010-03)。

玉北地区位于塔里木盆地西南坳陷麦盖提斜坡区中东部,北邻巴楚隆起南缘的海米-罗斯构造带、玛扎塔格构造带,南邻叶城坳陷^[1-2]。其奥陶系自下而上划分为:下统蓬莱坝组(O_{1p});中-下统鹰山组(O_{1-2y});中统一间房组(O_{2yj});上统良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s})。其中除了 O_{1p} 发育白云岩、 O_{1-2y} ^[3-4]可见部分白云岩和过渡性岩类以及 O_{3s} 见泥岩外,其它均以灰岩沉积为主。2010年7月,中国石化西北油气田分公司在部署于工区内玛南Ⅵ号构造带上的YB1井取得重大油气突破,为研究中央隆起区南部的构造沉积演化、碳酸盐岩储层研究和油气分布规律预测提供了新的思路^[3-4]。由于早期勘探结果显示玉北地区广泛缺失上奥陶统,因此该区一度被认为是典型的风化壳型储层。但是后期对YB1井鹰山组风化壳界面附近岩溶岩(颗粒灰岩)样品进行 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值测试,结果显示其平均值为0.708 9^①,接近同期海水的平均值0.708 83^[5],说明 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值并未受到放射性铀的影响^[6]。与此同时,该区域储层横向连通性差,呈局部集中发育,非均质性强烈,纵向上岩溶分带性特征不明显,岩溶洞穴层欠发育,多以小孔为主,似乎也与风化壳型储层的特征不符。

相比之下,裂缝对储层的改造表现得非常明显,目前玉北地区北东向构造带多口钻井的三维地震与成像测井资料揭示,奥陶系的裂缝走向与本区的断裂带走向大致平行,表明裂缝受断裂带的控制。录井资料所显示的含油、油斑、油迹、荧光等层段,在成像测井中也

均为主要含裂缝层段。先前个别钻井在钻进过程中出现的放空现象,通过进一步的精确解释也排除了钻遇大型洞穴的可能,认为是钻遇断裂层导致。可见,断裂系统在研究区岩溶缝洞型储层的形成过程中具有重要作用,详细研究目的层的断裂和裂缝发育机制、展布特征以及其对储层形成的控制作用,对该区下一步的油气勘探开发具有重要意义。

1 主要断裂期次和分布特征

研究区断裂系统具有多期形成和叠加改造的特征,且纵向上断裂类型多样,平面上疏密性差异大,呈现出分区展布的格局。杜永明等^[7]将玉北地区的断裂归结为五期,并且总结出了多种不同性质的断裂样式。本文在前人研究基础上,通过分析断层与地层的接触关系,结合地震剖面区域不整合,将研究区断裂期次划分为加里东早期(Ⅰ期),加里东中、晚期—海西早期(Ⅱ期)和海西晚期(Ⅲ期)(图1),不同期次发育的断裂在分布范围和断裂性质上均有差异。

1.1 断裂期次及构造样式

1) 第一期断裂:加里东早期基底断裂

震旦纪—早寒武世,玉北地区紧邻西昆仑洋,受加里东早期构造运动控制,南部边缘出现低隆,属于典型拉张环境^[8],同时与巴楚地区整体相连发育碳酸盐岩台地相,除了个别地区的中、下寒武统见小型基底张性断裂外,无大规模断裂发育。地震剖面上显示同

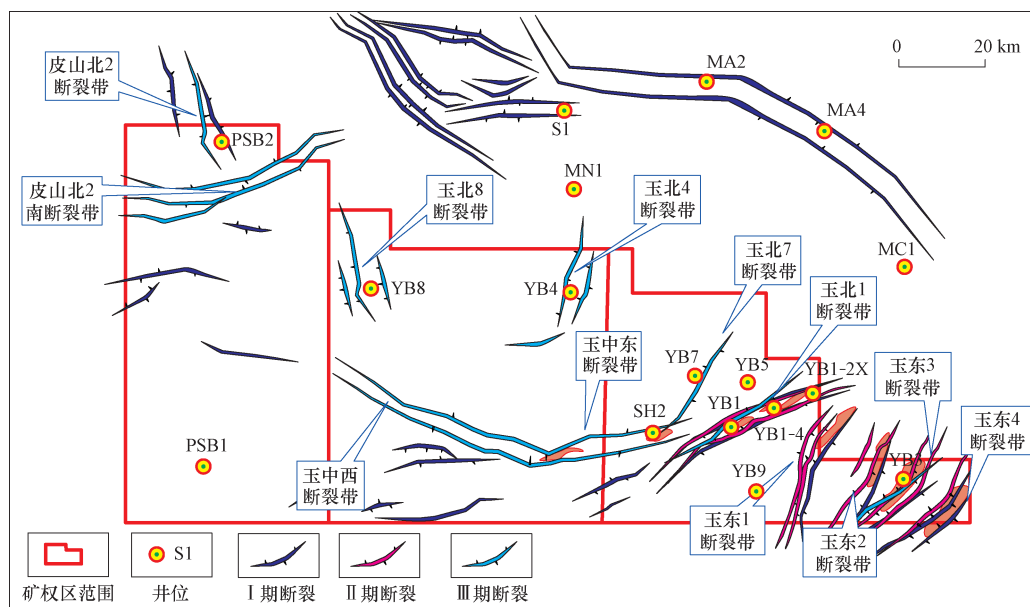


图1 塔里木盆地玉北地区断裂系统

Fig. 1 Fault systems in Yubei area, Tarim Basin

① 吴仕强. 巴麦地区鹰山组成岩作用研究. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 2011.

相轴呈楔状形态,具有明显的同沉积特征^[7]。晚寒武世开始,塔里木板块开始向南俯冲,昆仑洋向南消减,发育了呈北西西向展布的塔西南古隆起^[9-11]。到了早奥陶世晚期,受到西南端挤压应力作用,研究区开始进入碰撞聚敛阶段,构造应力也开始向挤压环境转变,发育基底卷入型走滑断裂,向下断穿基底,向上呈发散状,延伸至下奥陶统。

2) 第二期断裂:加里东中、晚期—海西早期滑脱断层

在晚奥陶世到早泥盆世,玉北地区正位于已演化发展到鼎盛期的和田古隆起主体之上,在东昆仑造山运动挤压作用下,其东部形成了一系列北东向展布的叠瓦状盖层滑脱型逆冲推覆带,玉北1断裂带和玉东多条断裂带均形成于此时期。从断裂特征来看,该逆冲推覆带的滑脱面为寒武系阿瓦塔格组,其上的奥陶系形成了南翼陡、北翼缓的南东向逆冲褶皱变形,尤其是南翼鹰山组断裂控制了左、右两盘后期地层的沉积,最高断开层位至石炭系下统。地震资料显示,志留系与奥陶系背斜之间为角度不整合接触关系,据此推测变形应发生于晚奥陶世。

3) 第三期断裂:海西晚期逆冲断裂

晚二叠世时期,由于南天山碰撞挤压作用,玉北地区受南北向挤压应力而整体沉降,表现为巴楚隆起的斜坡带,构造活动强烈,东部的个别区域在早期断裂变形的基础上,产生了继承性盖层滑脱断裂活动,同时派

生反向调节断裂,断开层位至中二叠统。中西部则形成了多套东西向和北西向展布的盖层滑脱型逆冲断裂,以及基底卷入型断裂。

在进入喜马拉雅期后,巴楚地区的强烈隆升,玉北地区随着和田古隆起沉降反转,下陷沉积,形成南倾斜坡,整体断裂活动减弱,只在西北部地区发育微弱褶皱变形。

1.2 断裂分布特征

玉北地区断裂系统从平面分布上看区域性差异明显,东部构造活动强烈,相比中部平台区和西部斜坡区而言,构造带密集;纵向上则呈现分层特征。

1) 横向密集性差异

自东向西,研究区在断裂活动的强度和期次上区别显著(图1,图2),随着近年来对玛南构造带认识的不断提高^[12],认为东部断褶区主要受控于加里东中、晚期构造运动,局部区域,如玉北7、玉北1以及玉东3断裂带上还叠加有海西晚期构造活动的影响,属于两期构造运动叠加区。相对于中、西部而言,东部具有断裂幅度较大,断裂带密集的特点,属于工区内构造形态相对复杂的区域。而从构造活动方式和地层沉积序列角度分析,东部断褶区的断裂带应属于塘古巴斯拗陷断裂体系,具有与玛扎塔格构造带相似的成藏条件。位于此区的玉北1断裂带、玉东3断裂带均呈现明显的分段特征^[7,12],主要在逆冲方向和断裂样式两个方面

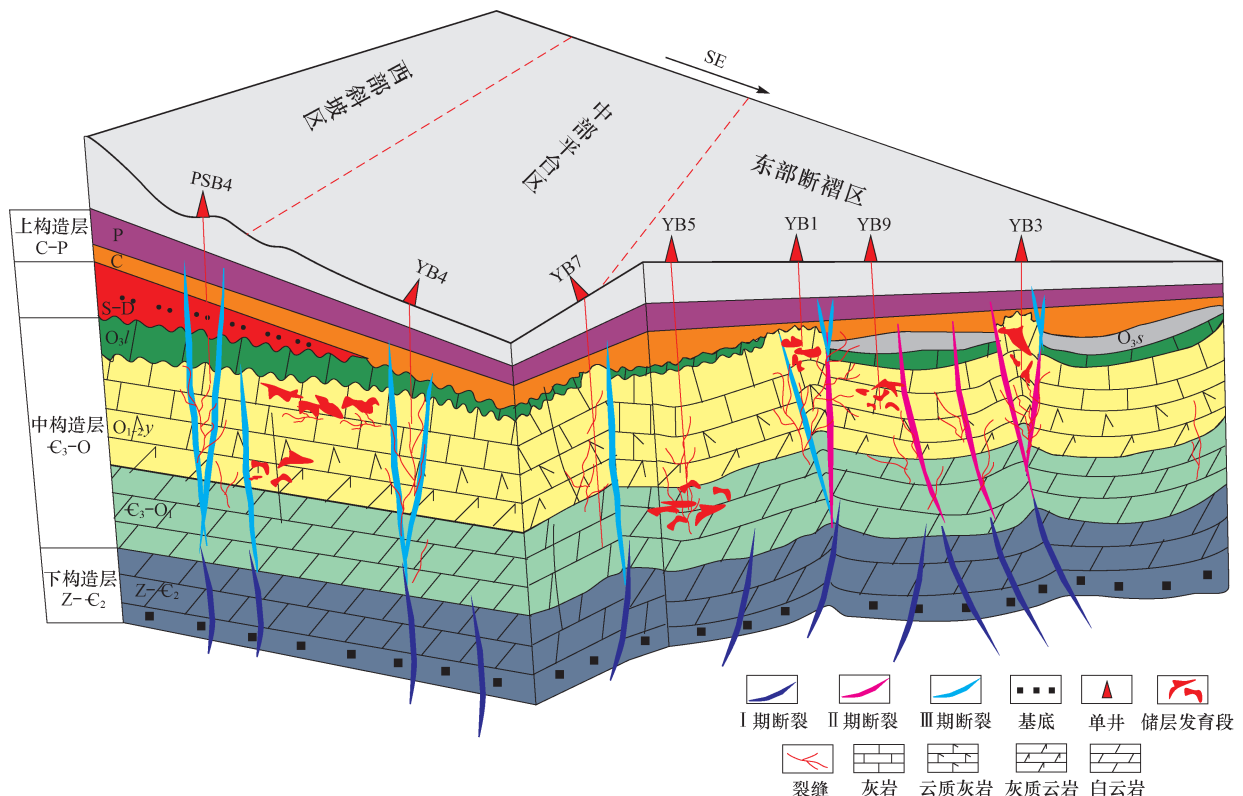


图2 塔里木盆地玉北地区断裂发育期次与模式

Fig. 2 Timing and development patterns of faults in Yubei area, Tarim Basin

存在差异。中部平台区和西部斜坡区则是受海西晚期构造活动影响明显,但断裂发育密集程度和强度不如东部断褶区。

2) 纵向分层特征

纵向上,根据断裂系统在地层深度、性质和疏密性特征上的差异分为基底-中寒武统(下构造层)、上寒武统-奥陶系(中构造层)、石炭系-二叠系(上构造层),共3套构造层(图2)。下构造层对整个工区均有影响,以直立走滑和高角度逆冲断裂为主。中构造层断裂最为密集,对研究区油气勘探意义也最为重大,尤其是在东部断褶区发育的北东向盖层滑脱型逆冲推覆断裂系统,其向下与下构造层中发育的北东向直立走滑断裂带位置相近,在东部断垒带共同构成了油气运移通道。上构造带横向上主要影响了近东西向玉中构造带,另外有少量继承性逆冲断裂发育在东部断褶区。

2 裂缝成因类型及特征

利用研究区范围内现有12口单井的取心资料,结合薄片、成像测井、三维地震分析,裂缝作为玉北地区渗滤通道和储集空间,可按其成因、在研究区内发育的程度和对储层改造作用的大小,分为构造裂缝、溶蚀裂缝和成岩裂缝3种。

2.1 构造缝

玉北地区的构造缝与区域构造运动关系紧密,是整个工区中、下奥陶统潜山构造带储层改造的一个重要控制因素。通过地震界面(T_4^1 界面)曲率属性预测,在断裂带范围内,裂缝走向主要呈北东走向,与本区的断裂带走向大致平行,沿最小应力方向发育,目前玉北地区北东向构造带上的YB1、YB1-2X、YB3和YB7四口钻井的FMI资料揭示,奥陶系的裂缝走向虽然呈多方向性,但仍以北东向为主。如YB1井通过成像测井拾取的裂缝走向主要分布在 $30^\circ \sim 60^\circ$;YB1-2X井拾取开口裂缝平均走向为 24° ;YB3井所在构造带裂缝走向呈现杂乱性,表明可能与其构造带形成对冲样式相关;YB7井拾取的中高角度裂缝,倾向相对散乱,为高角度斜交裂缝,裂缝走向北西向,表明可能存在不同的区域构造应力场,YB7井构造带可能存在晚期断裂活动,表现为以裂缝的形式释放构造应力。

此外,研究区构造缝延伸远,产状平直且属于非组构控制,从构造的演化角度来看,以两类构造缝为主:第一类是地表区域性分布的高角度张性缝,分析成因为受地层隆升影响,应力释放所致;第二类则主要受断裂活动和褶皱控制,从高角度到低角度裂缝均有发育。由于受到构造部位的控制,构造缝的发育程度常常有较大差

异^[13-14]。鹰山组整体主要表现为斜交缝,顶部和底部则分别发育垂直缝和网状缝。镜下鉴定多呈方解石与泥质充填特征,部分可见硅质(图3a—d)。裂缝发育程度向下呈增多的趋势,应与向下层段越来越接近断层部位,与断裂活动派生的裂缝越来越多有关。成像测井方面显示,高角度裂缝发育,层段不集中;与水平缝、不规则裂缝、微细缝叠置发育;开口性好,有效地高角度开口缝对油气渗流起到主要作用(图3e—f)。

2.2 溶蚀缝

构造缝的存在为溶蚀缝的发育提供了前提,前者为机械力学成因,后者则为化学溶蚀成因,成岩流体(地表水或深部热液)在早期构造缝的基础上,沿缝面发生溶蚀,可形成形态曲折的溶蚀缝,其缝壁多不规则。玉北地区溶蚀缝主要发育在鹰山组风化壳界面附近的颗粒灰岩以及地层较薄的泥晶灰岩中,分析认为有两方面原因。首先,隆升导致的应力释放,加上颗粒灰岩自身较脆的岩石力学性质,使得鹰山组顶面极易形成构造缝,这为溶蚀缝的形成提供了先决条件。其次,风化壳界面附近的灰岩受到早先表生岩溶的影响,形成了大量的溶蚀微孔隙,有利于溶蚀缝的发育。溶蚀缝充填物则由于成因不同而有所差异,研究区鹰山组发育受风化壳控制的表生岩溶缝,充填物多为绿色泥质和方解石(图4a),偶见少量白云石颗粒。除此以外,在YB5井和YB7井等钻遇蓬莱坝组的白云岩层段,也可见及溶蚀缝的发育。说明除了风化壳界面附近,在深部碳酸盐岩地层中(6 229.59~6 229.65 m附近)也可发育溶蚀缝(图4b—e),即埋藏溶蚀缝^[15-16]。区别在于前者由于溶蚀缝洞的坍塌而形成角砾或渗滤砂充填,可伴有去云化现象,而后者则多见有机质或白云石。可能是白云岩地层附近个别层位的缝合线在地壳抬升或岩溶期从闭合转为开启,后期成岩流体顺延改造的结果,阴极发光下流体期次分异明显,说明其并非一个连续的过程(图4c,d)。溶蚀缝虽然会受到构造缝发育的规模或部位所控制,但二者的成像测井特征仍存在明显差别,溶蚀缝在形态上往往不具备明显的规律性,缝宽变化较大,并时常与斑点(或斑块)状溶蚀孔洞伴生(图4f,g)。

2.3 成岩缝

与溶蚀缝一样,成岩缝也属于非构造缝之一^[17],是成岩过程中的产物。玉北地区成岩缝可细分为层间缝、收缩缝和缝合线。

2.3.1 层间缝

作为流体运移聚集的通道,层间缝属于广义裂缝的范畴,在野外岩心观察中常将层间缝描述为水平裂

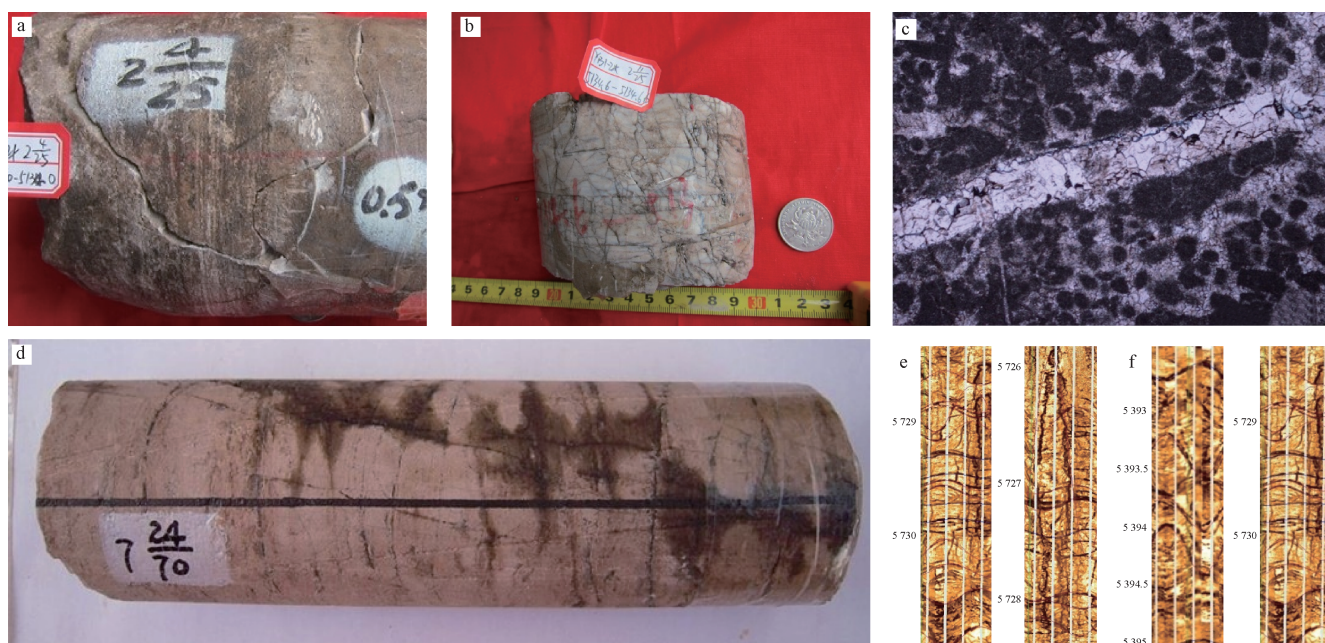


图3 塔里木盆地玉北地区鹰山组构造缝特征

Fig. 3 Characteristics of structural fractures of the Yingshan Formation in Yubei area, Tarim Basin

- a. YB1-2X井, 2-4/25, $O_{1-2}y$, 埋深 5 133.78 ~ 5 134.00 m, 浅灰色油斑灰质泥晶白云岩, 中高角度构造缝发育; b. YB1-2X井, 2-11/25, $O_{1-2}y$, 埋深 5 134.6 ~ 5 134.66 m, 浅黄灰色粉-细晶白云岩, 见网状裂缝, 断面见硅质结核; c. YB1井, $O_{1-2}y$, 埋深 5 610.77 m, 亮晶砂屑灰岩, 构造缝, 方解石脉切割围岩; d. YB1井, 7-24/70, $O_{1-2}y$, 埋深 5 615.27 ~ 5 615.52 m, 灰黄色泥晶灰岩, 立缝与水平缝交织呈网状, 见黄褐色原油外渗 (照片来自西北局完井报告); e. YB1井, $O_{1-2}y$, 埋深 5 726 ~ 5 731 m, 高角度裂缝与中、低角度裂缝、平行缝、不规则裂缝及微细缝叠置发育; f. YB3井, $O_{1-2}y$, 埋深 5 393 ~ 5 395 m, 平行裂缝特征, 局部见弱溶蚀

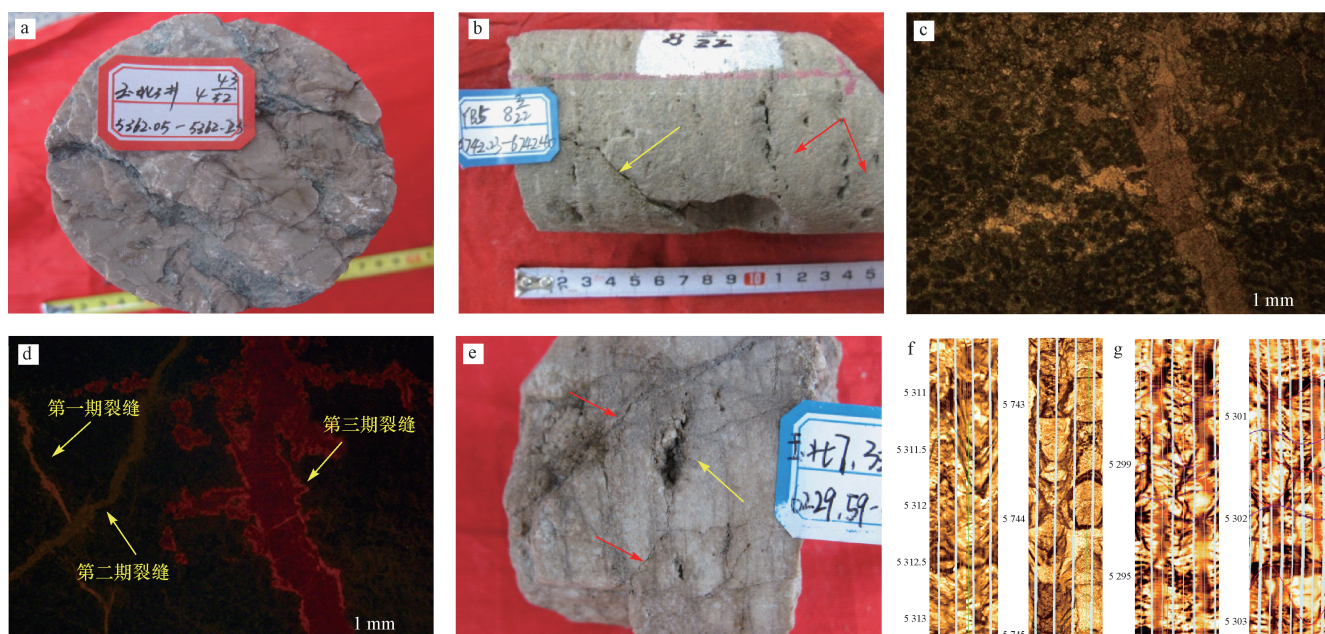


图4 塔里木盆地玉北地区中、下奥陶统溶蚀缝特征

Fig. 4 Characteristics of dissolved fractures of the Yingshan formation in Yubei area, Tarim Basin

- a. YB3井, 4-43/52, $O_{1-2}y$, 埋深 5 362.05 ~ 5 362.23 m, 浅灰色泥晶灰岩, 具有表生岩溶特征的溶蚀缝; b. YB5井, 8-3/22, O_{1p} , 埋深 6 742.23 ~ 6 742.45 m, 低角度/斜交溶蚀缝 (黄色箭头) 及水平溶蚀缝 (红色箭头), 半充填或未充填; c. YB7井, O_{1p} , 埋深 6 371.40 m, 泥晶砂屑灰岩, 多期裂缝叠加 (构造缝 + 溶蚀缝); d. c图的阴极发光, 期次分异明显, 可识别出3期裂缝 (黄色箭头); e. YB7井, 3-5/21, O_{1p} , 埋深 6 229.59 ~ 6 229.65 m, 浅灰色泥晶云岩, 中、高角度构造缝 (红色箭头) 以及沿构造缝扩溶的近水平状溶蚀缝 (黄色箭头), 缝宽 3 ~ 12 mm, 伴有溶孔, 多数未充填, 可见干沥青; f. YB3井, $O_{1-2}y$, 5 310 ~ 5 312 m, 沿溶蚀缝发育的溶蚀孔特征; g. YB1-2X井, $O_{1-2}y$, 埋深 5 110 ~ 5 190 m, 中、高角度裂缝并见受裂缝影响的局部溶蚀特征

缝,以岩层的层面或层理形式出现^[18]。玉北地区中下奥陶统层间缝纵向上广泛发育,多口钻井均有见及,多数张开度较小,间距在 10 mm 以内不等。张开度较大的层间缝偶见方解石半充填,多数可见沿缝面的溶蚀现象(图 5a),主要发育在砂屑泥晶灰岩、藻纹层灰岩和灰质泥晶云岩等岩性中。

2.3.2 成岩收缩缝

玉北地区的成岩收缩裂缝主要包括脱水收缩缝、热收缩缝两种。其中脱水收缩缝主要发育在砂屑泥晶灰岩、藻纹层灰岩中。规模小,缝宽一般在微米级,镜下鉴定多呈网状分布,方解石充填;在 YB3 井中可见灰岩通过热液重结晶变为中、粗晶灰岩,在包含多个颗粒的同时呈镶嵌状分布,发育网状热收缩成岩缝,由于热液重结晶作用,早期孔隙中的原油变为干沥青,并充填重晶石,微裂缝充填褐黑色沥青质(图 5b)。

2.3.3 缝合线

作为压实和压溶作用的共同产物,缝合线是一种特殊的裂缝构造。对于碳酸盐岩自生自储油气的运移聚集意义重大,因此,在模拟碳酸盐岩储层裂缝过程中,必须定量、半定量地把缝合线对储层连通性的贡献

考虑在内。岩心描述过程中一般就其延伸方向和与岩层的相关性,可将其分为水平、垂直及倾斜缝合线 3 种类型^[11,19]。缝合线在研究区全区钻井的多个层位都有不同程度的揭示,区域上也有一定变化,根据构造位置的不同,前两种缝合线多出现在中部平台区和西部斜坡区的钻井中,表面以泥质、炭质等不溶杂质为主,常见黑色有机质,比如 YB5、YB9 以及 PSB2 井等单井,从成因上分析,这两区的构造活动较弱,上覆沉积物负荷作用下压实压溶可能是水平缝合线形成的主要原因;而水平挤压应力作用则造成了垂直缝合线的形成;倾斜缝合线则在位于东部断隆带上的单井中十分发育,YB1、YB4、YB3 和 YB1-2X 井等都可见及,缝宽一般不超过 0.2 mm,相互间距疏密不一,形态相对平缓,最大幅度不超过 5 mm,缝面紧闭,以泥质、有机质以及方解石充填为主(图 5c,d),倾斜缝合线与剪切缝的方向一致,可能为剪切应力的产物。

3 断裂对储层的改造

3.1 断裂对表生岩溶深度的影响

构造作用是玉北地区储层改造的重要因素之一,

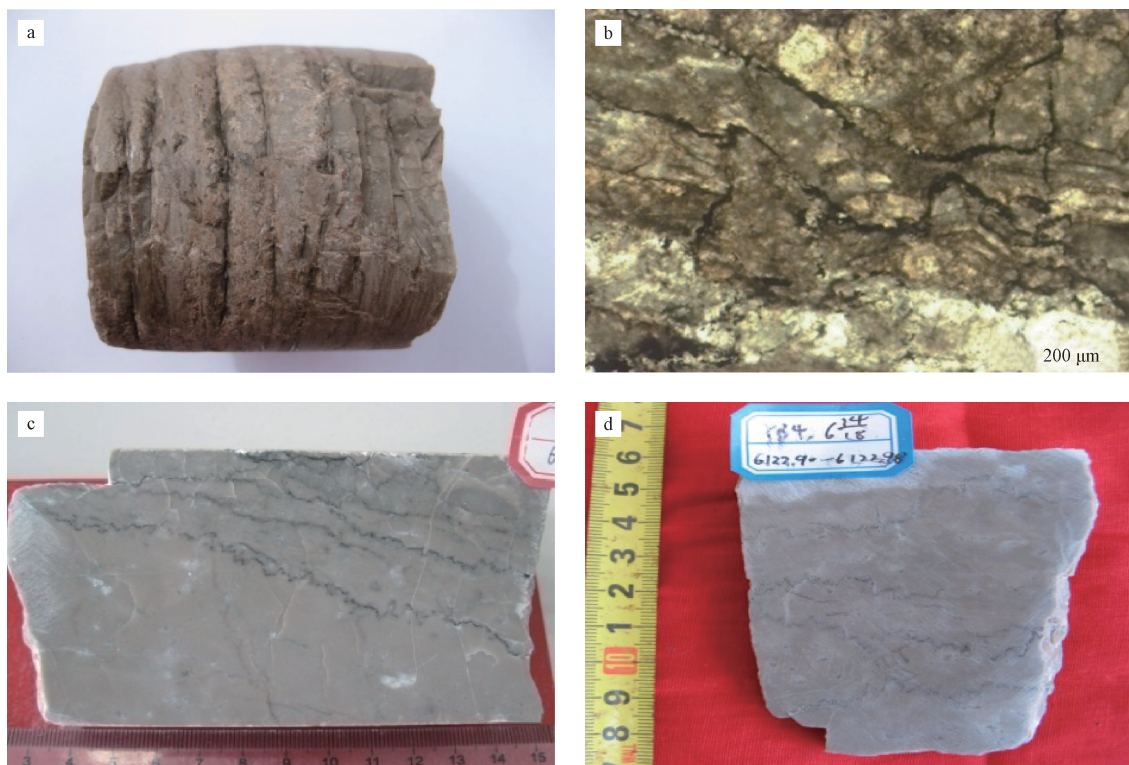


图5 塔里木盆地玉北地区中、下奥陶统成岩缝特征

Fig. 5 Characteristics of diagenetic fractures of the Yingshan formation in Yubei area, Tarim Basin

a. YB3 井, 53-6/21, O_1-2y , 埋深 5 264.09 ~ 5 264.22 m, 浅黄灰色泥晶灰岩, 沿层间缝可见溶蚀迹象(照片来自西北局完井报告); b. YB3 井, O_1-2y , 埋深 5 444.25 m, 泥晶灰岩, 局部重结晶为粗大晶, 裂缝内充填褐色、黑色沥青质, 见重晶石; c. YB1 井, 6-56/57, O_1-2y , 埋深 5 612.39 ~ 5 612.60 m, 浅灰色油迹泥晶灰岩, 高角度缝合线密集发育; d. YB4 井, 6-14/18, O_1-2y , 埋深 6 122.90 ~ 6 122.98 m, 水平缝合线密集发育, 充填方解石

导致玉北地区东部出现了一系列由于北倾逆断层所形成的断块或断鼻构造(其中部分构造高点鹰山组直接为石炭系巴楚组所覆盖),为寻找风化壳型岩溶储层提供了思路。自然伽马能谱测井资料显示,研究区鹰山组顶部风化壳和底部云灰岩性过度段所发育的裂缝多为高铀特征,说明前期多数裂缝都经历了流体流动,增大了地层水岩比,对促进溶蚀作用(比如地表水的下渗和深部的热液上涌)改造碳酸盐岩储层起到积极作用的同时,还成为了沟通储层孔、洞和油气充注渗流的主要通道^[20-22]。

第二期断裂形成时期(加里东中晚期至海西早期),玉北地区断裂带活动比较频繁,在此期间研究区东部奥陶系碳酸盐岩地层经历了加里东中期I幕、III幕岩溶作用^[23-24],两者在时期上的匹配有效地促使了地表水沿受构造带控制的伴生裂缝下渗,产生溶蚀,这点已经从玉北1断裂带的勘探成果中得以证实,该断裂带上的多口单井在 T_7^4 不整合界面之下100~200 m发育有孔洞-裂缝型、孔隙-孔洞-裂缝型储层,甚至在位于风化壳界面之下300 m处,仍可见到伴随裂缝发育的孔隙,如YB1-2X井距 T_7^4 界面下175 m仍有溶洞发育;此外,位于玉东3号断裂带(断裂主体形成于加里东晚期)上的YB3井,

在风化壳面之下200 m处取心仍见绿色泥质充填裂缝并伴有微孔发育。

综上所述,玉北地区断穿奥陶系的第二期断裂必然控制了其周缘地区表生岩溶的深度,玉北1断裂带的三维地震剖面上显示出的串珠状反射,在通过蚂蚁体识别后可清晰地反映出与裂缝相对应的特征(图6)。因此,东部断裂带常常具有更好的溶蚀孔隙,也是研究区储层最发育的部位。而第一期和第三期的断裂活动,在时期上虽然不能与岩溶期相匹配,但由其控制的伴生裂缝发育,这无疑对储层的改造起到至关重要的建设性作用。

3.2 后期热液沿断裂充填作用的识别

构造热液活动是内幕型储层发育的重要方式^[25-26],与基底断层活动关系密切,对油气晚期运聚成藏意义重大。海西构造运动时期,大量的热液流体因塔里木全盆发育的强烈火山活动而从岩浆中释放出来,流体活动异常活跃。在巴麦地区古生界海相碳酸盐岩广泛发育的背景下,东部断垒带多发育具走滑性质的基底断层,为地下热液沿断裂带上涌提供了有利条件,其外沿的白云岩和矿化作用则是构造热液白云石化和交代结晶作用的结果。另外,碳酸盐岩受到了

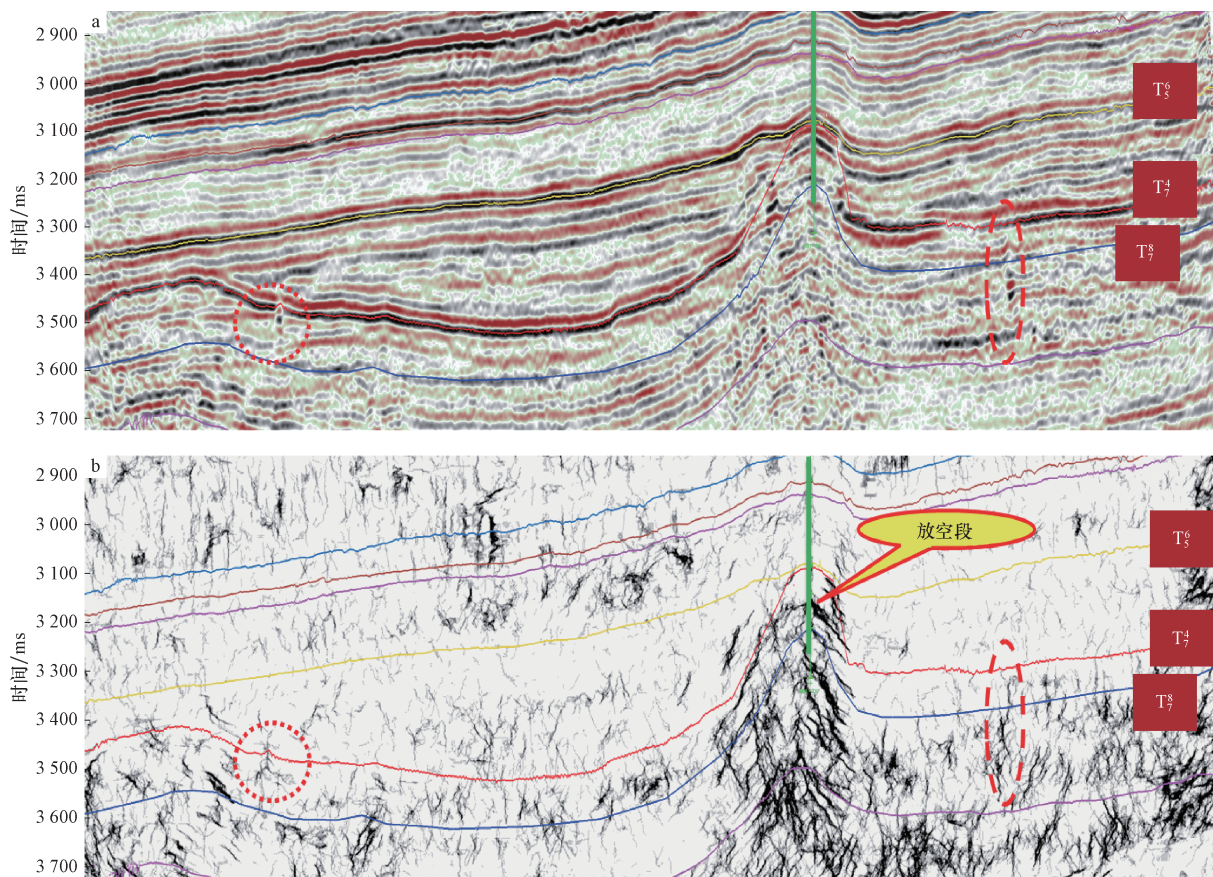


图6 YB1井断裂带三维地震剖面与蚂蚁体识别对比

Fig. 6 Comparison of 3D seismic profile and ant colony algorithm in YB1 fault zone

热液流体的改造,可形成萤石矿,进而改善储集性能^[27],这样的情况国外已有较多实例^[28-29]。通过对YB1-2X井采集的样品进行扫描电镜分析(图7a, b),在埋深5 134.9 m处可见溶洞内鞍形白云石与重晶石伴生发育,同时可见萤石充填于裂缝内。YB3井

埋深5 227 m处的碎裂化云岩进一步证明了热液沿裂缝上涌现象的存在(图7c)。沿断裂自下而上侵入地层的热液从理论上为热液溶蚀作用创造了可能性,使原本已致密的碳酸盐岩地层重新获得储集能力,这种溶蚀机理近些年来成为了碳酸盐岩储层研究领域的一

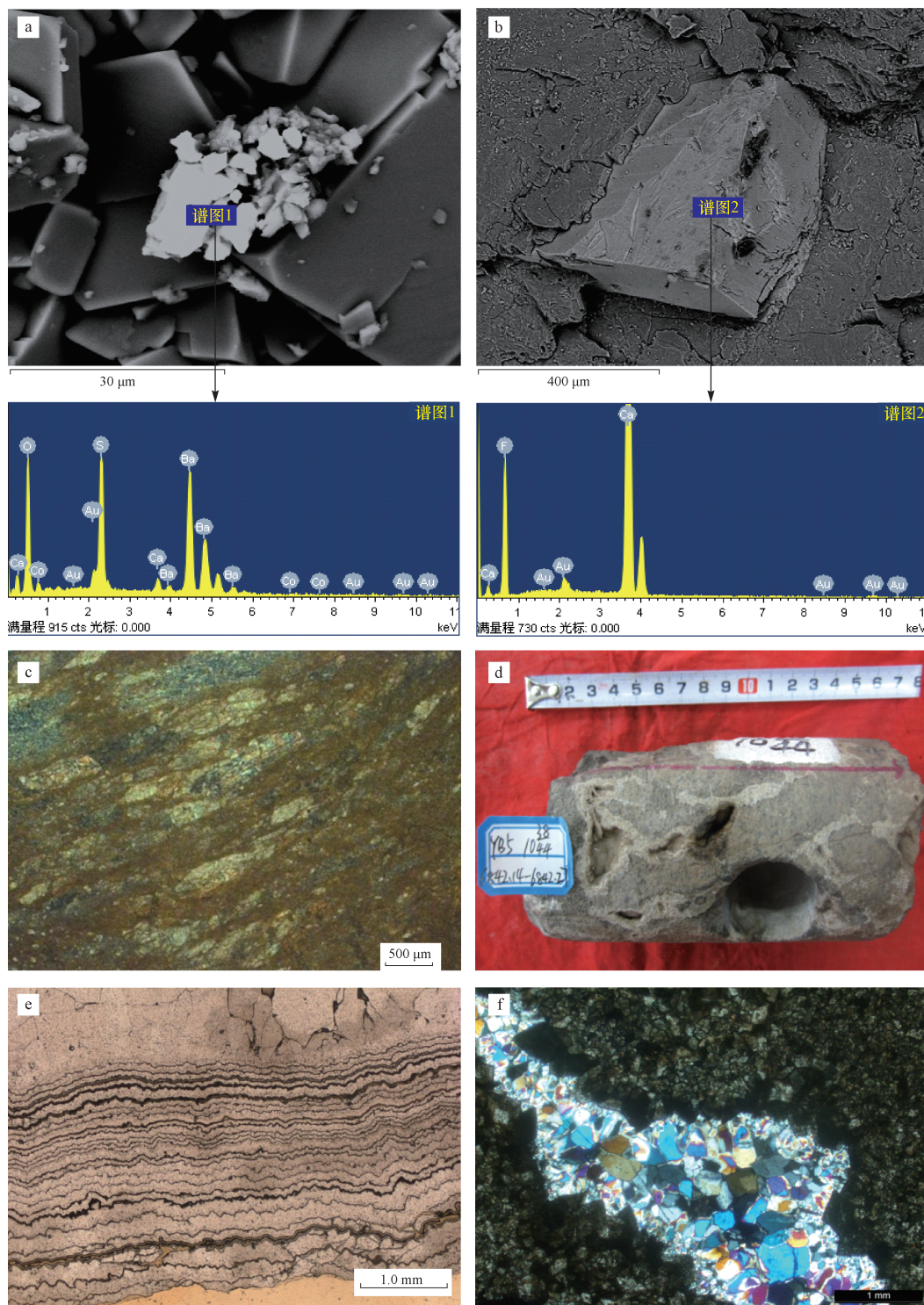


图7 热液改造的相关特征

Fig. 7 Characters of hydrothermal reformation

- a. YB1-2X井, O_1-2y , 埋深5 134.9 m, 溶蚀孔洞内充填重晶石; b. YB1-2X井, O_1-2y , 埋深5 134.66 m, 裂缝断面内充填的萤石; c. YB3井, O_1-2y , 埋深5 227 m, 碎裂化云岩; d. YB5井, O_1p , 埋深6 842.14~6 842.27 m, 沿溶蚀缝内充填硅质; e. YB5井, O_1p , 埋深6 740.51 m, 粗晶白云岩, 石英呈层状发育; f. YB1-2X井, O_1-2y , 埋深5 544.8 m, 溶蚀缝内见两期充填物, 首期为鞍形白云石, 第二期为晶簇状自生石英充填

个热点理论^[30-32]。但在工区内已识别到的热液改造层段,不但没有发现理想的热液溶蚀孔隙,反而表现为大量与热液相关的硅质对缝洞空间的充填,充填形式主要分为两种,一种是呈层状沿溶蚀缝面生长,逐渐阻塞溶蚀缝;另一种则是以晶簇状自生石英的形式,生长于洞壁的鞍形白云石之上,充填孔洞,储集空间因而遭到了一定程度的破坏,对储层发育不利(图7d—f)。

4 结论与讨论

1) 研究区断裂系统具有多期形成和叠加改造的特征,可按时间先后将研究区断裂期次划分为加里东早期、加里东中、晚期至海西早期和海西晚期;纵向上根据断裂系统在地层深度和性质特征上的差异分为基底-中寒武统(下构造层)、上寒武统-奥陶系(中构造层)、石炭系-二叠系(上构造层),共3套构造层。

2) 根据成因、发育程度和对储层改造作用的大小,可将研究区裂缝的主要类型分为构造裂缝、溶蚀裂缝和成岩裂缝3种。裂缝走向主要呈北东走向,与本区的断裂带走向大致平行,沿最小应力方向发育,表明裂缝受到断裂带的控制。断穿奥陶系的第二期断裂控制了其周缘地区表生岩溶的深度,是储层改善的关键。现有资料并未发现因热液上涌作用形成的溶蚀孔隙,岩心上反而表现为大量与热液相关的硅质对缝洞空间的充填,对储层具有一定的破坏作用。

3) YB1井钻探证实了玉北区块存在好的裂缝型岩溶储层,但是裂缝发育层位多,形式多样,空间内变化快,在某些云灰岩过渡段区分白云岩化灰岩条带和溶蚀裂缝困难,从而给裂缝的识别和有效性评价带来了一定的难度。同时,断裂发育期次和样式,对地层、储层、成藏的控制作用以及裂缝型储层平面展布特征尚需要深入研究。

参 考 文 献

- [1] 张旭光. 玉北地区碳酸盐岩储层地震响应特征研究[J]. 石油物探, 2012, 51(5): 493-502.
Zhang Xuguang. The research on seismic response characteristics of carbonate reservoir in Yubei area[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2012, 51(5): 493-502.
- [2] 李映涛. 麦盖提斜坡玉北地区中下奥陶统碳酸盐岩储集体特征及主控因素研究[D]. 四川: 成都理工大学, 2013.
Li Yingtao. Research on reservoir characterization and key controlling factors of Middle- Lower Ordovician carbonate reservoir in Yubei of Maigaiti slope [D]. Si Chuan Cheng Du university of technology, 2013.
- [3] 赵宗举, 罗家洪, 张运波, 等. 塔里木盆地寒武纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 937-942.
Zhao Zongju, Luo Jiahong, Zhang Yunbo, et al. Lithofacies paleogeography of Cambrian sequences in the Tarim Basin[J]. Acta Petroleica Sinica, 2011, 32(6): 937-942.
- [4] 吕修祥, 周新源, 李建交, 等. 塔里木盆地塔北隆起碳酸盐岩油气成藏特点[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1057-1064.
Lv Xiuxiang, Zhou Xinyuan, Li Jianjiao, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and reservoir geological model of Mid-Lower Ordovician carbonate rock in Tazhong northern slope[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1057-1064.
- [5] 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的相应[J]. 中国科学, 2002, 32(1): 37-40.
Jiang Maosheng, Zhu Jingquan, Chen Daizhao, et al. The corresponding between Ordovician carbonate rock /Sr isotope with sea level[J]. Science of China, 2002, 32(1): 37-40.
- [6] Jones B, Luth R W. Temporal evolution of Tertiary dolostones on Grand Cayman as determined by 87Sr/86Sr[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(2): 187-205.
- [7] 杜永明, 余腾孝, 郝建龙, 等. 塔里木盆地玉北地区断裂特征及控制作用[J]. 断块油气田, 2013, 20(2): 171-174.
Du Yongming, Yu Tengxiao, Hao Jianlong, et al. Fracture characteristics and control action on hydrocarbon accumulation in Yubei Area of Tarim Basin [J]. Fault-Block Oil Field, 2013, 20(2): 171-174.
- [8] 丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-74.
Ding Daogui, Wang Daoxuan, Liu Weixin, et al. Western Kunlun orogenic belt and basin[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1996: 1-74.
- [9] 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等. 塔里木盆地巴楚-麦盖提早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 76-83.
Lü Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibing, et al. Structural evolution and exploration significance of the Early Paleozoic palaeo uplifts in Bachu Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 76-83.
- [10] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. 地质学前沿, 2008, 15(2): 207-221.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 207-221.
- [11] 胡德胜, 佟殿君, 阳怀忠. 走滑构造研究进展[J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 27-30.
Hu Dengsheng, Dong Dianjun, Yang Huaizhong. Progress in research of strike-slip tectonics [J]. Fault-Block Oil Field, 2009, 16(5): 27-30.
- [12] 云金表, 周波, 王书荣. 塔里木盆地玉北1井背斜带变形特征与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 215-220.
Yun Jinbiao, Zhou Bo, Wang Shurong. Deformation characteristics and forming mechanism of the Well Yubei 1 anticline belt in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 215-220.
- [13] 艾合买提江·阿不都热和曼, 钟建华, 李阳, 等. 碳酸盐岩裂缝与岩溶作用研究[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 485-493.

- Ahmatjan Abdurahman, Zhong Jianhua, Li Yang, et al. Study on effect between karstification and fracture in carbonate rocks[J]. Geological Review, 2008, 54(4): 485–493.
- [14] 秦启荣, 苏培东, 邓辉. 塔中 I 号断裂带中上奥陶统灰岩裂缝类型划分[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(2): 1–4.
- Qing Qirong, Su Peidong, Deng hui, et al. Type division of Ordovician limestone in Tazhong No. 1 Fault Belt[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(2): 1–4.
- [15] 肖玉茹, 王敦则, 沈杉平. 新疆塔里木盆地塔河油田奥陶系古洞穴型碳酸盐岩储层特征及其受控因素[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 92–98.
- Xiao Yuru, Wang Dunze, Shen Shanping. The characteristics of paleo-cave carbonate reservoir and its control factors in Ordovician of the Tahe Oil Field in the Tarim Basin, Xinjiang[J]. Geoscience, 2003, 17(1): 92–98.
- [16] 刘忠宝, 孙华, 于炳松, 等. 裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(3): 289–291.
- Liu Zhongbao, Sun Hua, Yu Bingsong, et al. The control of fractures on karst in Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 289–291.
- [17] 郭光辉, 李建军, 卢玉红. 塔中 I 号断裂带奥陶系灰岩裂缝特征探讨[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 19–23.
- Wu Guanghui, Li Jianjun, Lu Yuhong. The fracture characteristics of Ordovician limestone in Tazhong No. 1 Fault Belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 19–23.
- [18] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933–941.
- Ni Xinfeng, Yang Haijun, Shen Jiangnan, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on karst reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 0933–0940.
- [19] 丁贵明. 油气勘探工程新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 163–187.
- Ding Guiming. Beijing. petroleum exploration[M]: Geology Publishing House, 1995: 163–187
- [20] Rezaee M R, Sun X. Fracture-filling cements in the palaeozoic Warburton basin, South Australia[J]. Petroleum Geology, 2007, 30(1): 79–90.
- [21] 黄思静, 王春梅, 黄培培, 等. 碳酸盐岩成岩作用的研究前沿和值得思考的问题[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(1): 1–7.
- Huang Sijing, Wang Chunmei, et al. scientific research frontiers and considerable question of carbonate diagenesis[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(1): 1–7.
- [22] 姜华, 张艳秋, 潘文庆, 等. 塔北隆起英买 2 井区碳酸盐岩储层特征及岩溶模式[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 232–237.
- Jiang Hua, Zhang Yanqiu, Pan Wenqing, et al. Carbonate reservoir features and karst mode in the Yingmai-2 well field of Tabei uplift [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 232–237
- [23] 魏国齐, 贾承造, 宋惠珍, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系构造–沉积模式与碳酸盐岩裂缝储层预测[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 408–413.
- Wei Guoqi, Jia Chengzao, Song Huilin, et al. Ordovician tectonic-deposition mode and carbonate fracture reservoir prediction in the middle area of Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 408–413.
- [24] 丁文龙, 漆立新, 云露, 等. 塔里木盆地巴楚–麦盖提地区古构造演化及其对奥陶系储层发育的控制作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(08): 2542–2556.
- Ding Wenlong, Qi Lixin, Yun Lu, et al. The tectonic evolution and its controlling effects on the development of Ordovician reservoir in Bachu-Markit Tarim basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(08): 2542–2556.
- [25] 乔占峰, 沈安江, 邹伟宏, 等. 断裂控制的非暴露性大气水岩溶作用模式[J]. 地质学报, 2011, 85(12): 2071–2082.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zou Weihong, et al. A fault-controlled non-exposed Meteoric karstification [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(12): 2071–2082.
- [26] Graham R, Davies, Langhorne B, et al. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [27] Lu X X, Jin Z J, Liu L F, et al. Oil and gas accumulations in the Ordovician carbonates in the Tazhong Uplift of Tarim Basin, west China [J]. Petrol Science & Engineering, 2004, 41(1–3): 109–121.
- [28] Lonnee J, Machel H G. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas field, Middle Devonian Slave Point Formation, British Columbia, Canada [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1739–1761.
- [29] Smith L B. Origin and reservoir characteristics of upper Ordovician Trenton-black river hydrothermal dolomite reservoirs in New York [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1691–1718.
- [30] John A, Luczaj, William B, et al. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the central Michigan Basin [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1787–1801.
- [31] Langhorne B, Smith Jr. Origin and reservoir characteristics of Upper Ordovician Trenton-Black River hydrothermal dolomite reservoirs in New York [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1691–1718.
- [32] Lavoie D, Morin C. Hydrothermal dolomitization in the Lower Silurian Sayabec Formation in north Gaspé-Matapédia (Quebec): Constraint on timing of porosity and regional significance for hydrocarbon reservoirs [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2004, 52(3): 256–269.

(编辑 董立)