

塔里木盆地玉北地区鹰山组储层特征 及主控因素

李映涛^{1,2}, 袁晓宇³, 叶宇^{1,2}, 万有利^{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; 2 成都理工大学能源学院)
(3 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所; 4 成都理工大学沉积地质研究院)

摘要 塔里木盆地玉北地区中—下奥陶统鹰山组为断控型风化壳储层, 由于经历多期岩溶和断裂的综合叠加作用, 加之塔里木盆地本身复杂的古地貌演化史, 增加了识别岩溶改造期次的难度, 同时极大地影响了储层中裂缝有效性的判断。通过相关钻井的岩心观察、薄片鉴定、地化数据分析, 运用测井、地震等地球物理方法, 归纳出玉北地区鹰山组四种储集岩组合类型, 并研究了各类储集岩的孔渗相关性。认为研究区早—中奥陶世潜山构造带构造活动强烈, 储层的形成与断裂及构造裂缝密切相关。断裂期次与加里东中期 I 幕、III 幕岩溶作用在构造运动时期上的匹配, 有效地改善了鹰山组顶部石灰岩地层的储集性能; 埋藏白云石化作用则改善了区内鹰山组底部晶粒白云岩地层的孔隙性。

关键词 塔里木盆地; 玉北地区; 鹰山组; 风化壳储层; 储集层特征; 沉积相; 控制因素

中图分类号: TE122.2*3

文献标识码: A

塔里木盆地碳酸盐岩地层的发育和分布极其广泛, 且盆地具有形成复杂、沉积体系多旋回、构造体系多样化等特点, 是我国内陆最大的多旋回叠复合盆地^[1-6]。近年来, 塔里木盆地玉北地区的 YB1 井在奥陶系取得重大油气突破, 为重新以盆地级为尺度研究中央隆起区南部地区的构造沉积演化、储层展布预测和奥陶系碳酸盐岩储层发育条件等提供了新的思路^[7-10], 同时揭示了玉北地区有可能成为塔里木盆地的又一个具有勘探潜力的地区。

前人对玉北地区构造方面已经有较多的研究, 张旭光^[11]、云金表等^[12]、杜永明等^[13]、黄太柱^[14]等通过分析玉北地区的地震响应特征, 对该区断裂带的变形机制、断裂特征及控制作用做了比较细致的研究。谭广辉等^[15]则从烃源岩条件、储层条件、疏导体和保存条件等方面对玉北地区的成藏主控因素及成藏模式进行了阐述。但目前仍有诸多问题有待解决, 比如关于岩溶作用以及成岩作用方面的研究较

少, 对不同岩溶期次的影响范围和深度还有待精确划分, 热液溶蚀对储层改造方面的作用尚不够明确, 这些多方面的因素共同制约了工区勘探的进一步突破。因此, 正确评价玉北地区储层的储集性和分布规律, 探索该区储层的成因机理和主控因素, 对该区下一步的油气勘探开发具有重要意义。

本文依据玉北工区现有 12 口井的取心资料, 结合薄片鉴定、地化分析、测井以及地震数据, 对工区目的层——奥陶系鹰山组的储集岩组合类型进行了划分, 研究了构造破裂作用、表生岩溶作用和白云石化作用等因素在研究区储层改造方面的影响, 以期可以对该区油气勘探提供一定的参考价值。

1 区域地质背景

玉北工区位于新疆维吾尔自治区和田地区墨玉县境内, 构造位置位于塔里木盆地麦盖提斜坡区中东部, 北邻巴楚隆起南缘, 南邻叶城坳陷(图 1)。该

收稿日期: 2013-11-01; 改回日期: 2014-04-24

本文受中石化西北油田分公司勘探开发研究院横向委托课题“巴麦地区古生界碳酸盐岩储集体形成机理研究”(编号: KY-S-2010-013)资助

李映涛: 1986 年生。现为成都理工大学博士研究生。主要从事储层地质与储层地球化学研究。通讯地址: 610059 四川省成都市成华区二仙桥路东三段 1 号成都理工大学能源学院; E-mail: spark5521@qq.com

区早奥陶世整体属于台盆型沉积^[11]。奥陶纪地层自下而上划分为:下统蓬莱坝组(O_{1p}),中一下统鹰山组(O_{1-2y}),中统一间房组(O_{2yj}),上统恰尔巴克组(O_{3q})、良里塔格组(O_{3l})和桑塔木组(O_{3s})。其中除了蓬莱坝组发育白云岩地层、鹰山组三—四

段见部分白云岩和过渡性岩类、以及桑塔木组见泥岩地层外,其他均以石灰岩沉积为主(图 2)。工区部分区域鹰山组顶部直接为石炭系巴楚组泥岩所覆盖,同时由于多期岩溶作用的影响,整个工区内大部分区域均为岩溶叠加区^[16]。

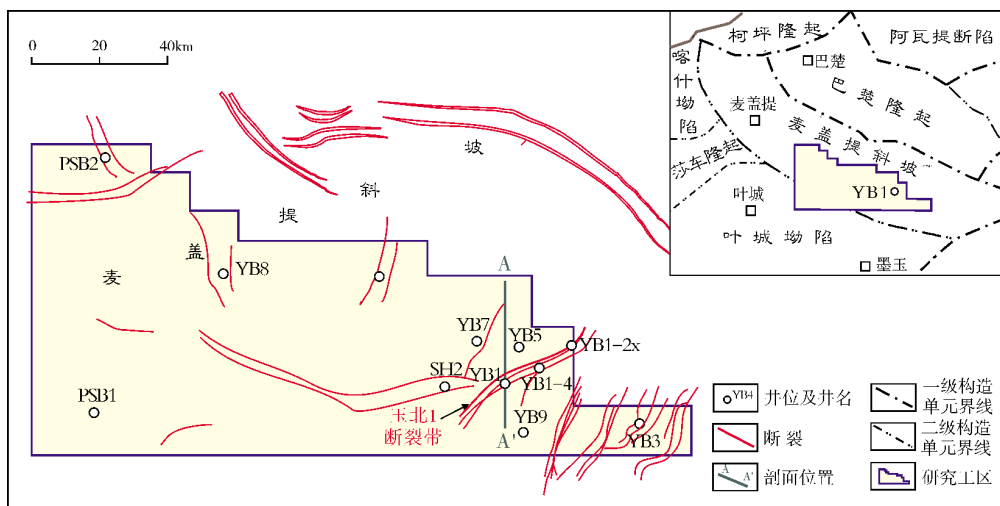


图 1 塔里木盆地麦盖提斜坡区玉北地区构造位置及井位分布图

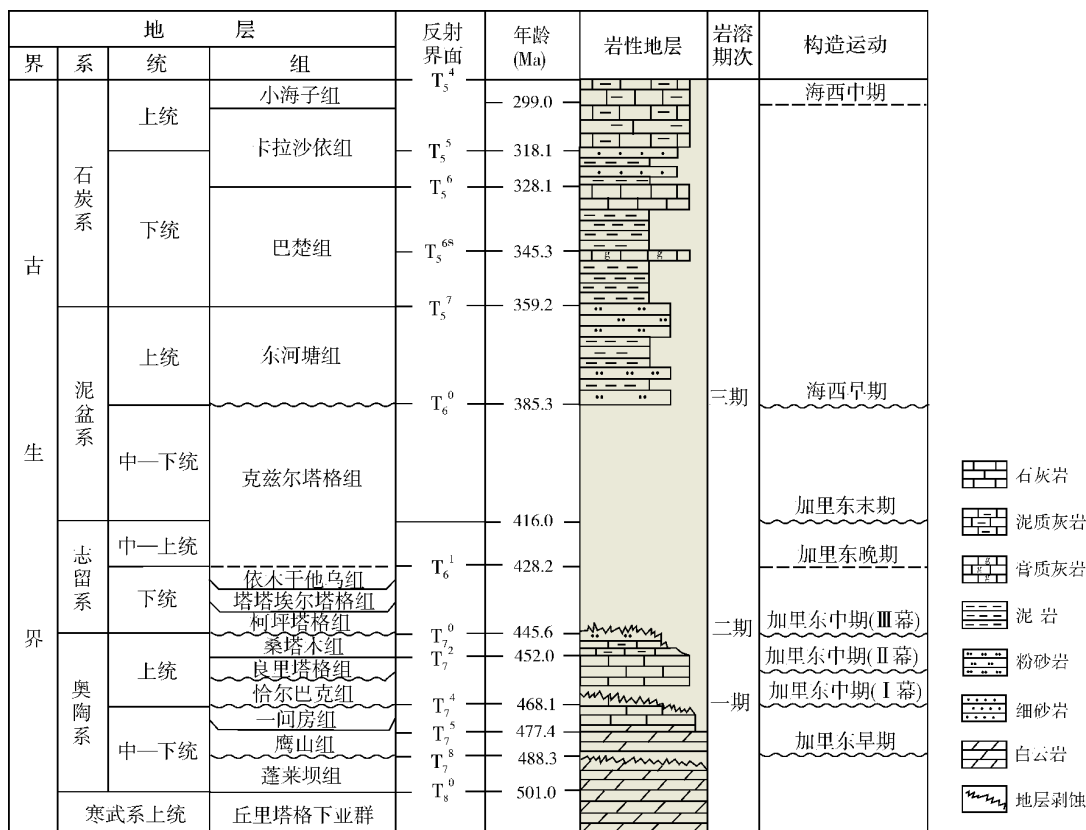


图 2 麦盖提斜坡区玉北地区地层发育图(据文献[14]修改)

2 沉积相特征

本文在前人研究基础上,利用工区范围内现有12口井的取心资料,以微观和宏观相结合的方法,通过薄片鉴定、测井和地震数据分析,参考古生物标志(生物化石种类、组合类型)、岩石学标志(岩石类型、沉积构造和沉积组合)和测井相标志(各类曲线特征对比)^[17],在鹰山组识别出局限台地和开阔台地两类沉积相,并对应划分出四种亚相以及多种微相(图3)。

2.1 局限台地相

局限台地相在整个麦盖提斜坡区中—下奥陶统

鹰山组的下部均有发育。工区YB3、YB1-2x和YB9井的鹰山组下部均具有典型的局限台地相剖面特征。局限台地的地势较平坦,但水体循环并不流畅,因而水体盐度也存在异常,生物种类比较单一。以上几口钻井鹰山组的薄片鉴定可见瓣鳃、有孔虫、介形虫和棘屑以及鸟眼构造等。早奥陶世的沉积相模式对晚寒武世而言有一定的继承性,岩性方面以白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩为主,同时发育包括泥晶、粉晶、细晶、中晶和粗晶等各类不同晶粒大小的白云岩以及藻纹层白云岩和砂屑白云岩等。

根据岩性组合特征、沉积构造特征和不同的水动力条件,局限台地相还可以进一步划分为台内滩、潟湖两种亚相(图3)。

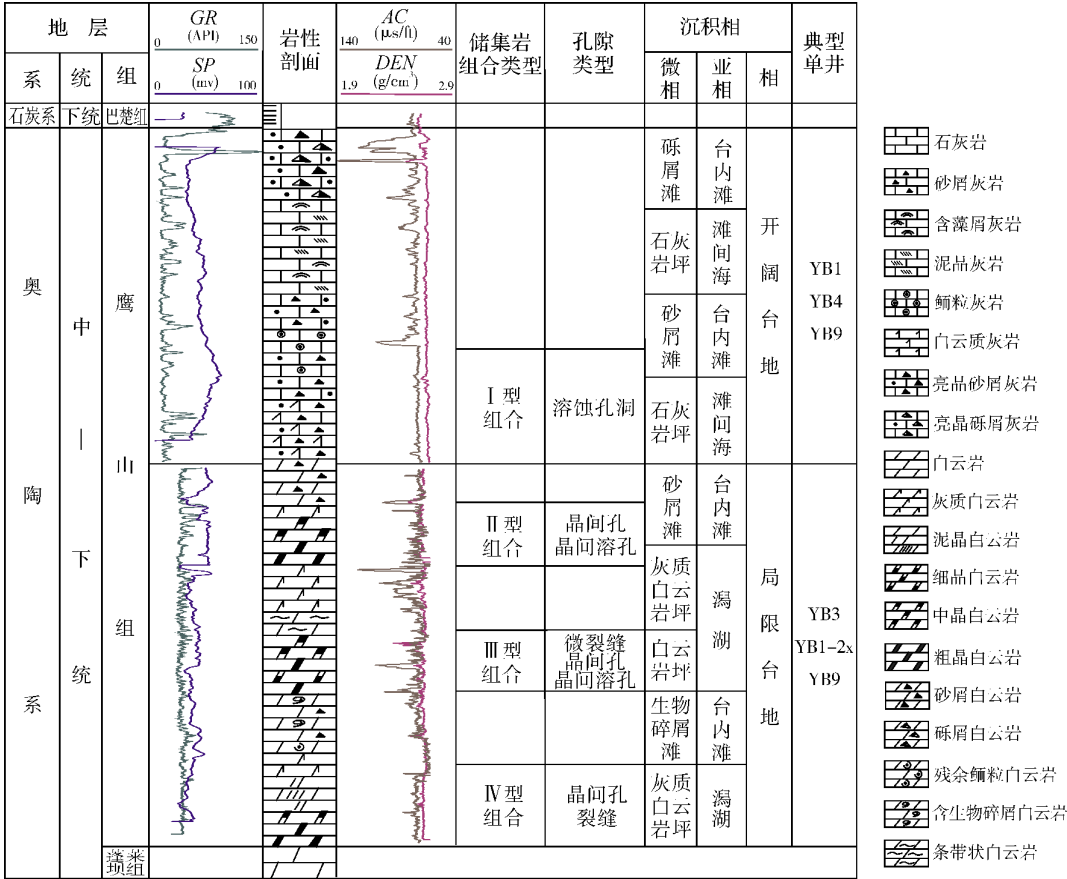


图3 玉北地区鹰山组岩性综合柱状图

台内滩亚相 主要岩石类型为白云岩,晶体类型不一,各类晶形均见及。残余颗粒主要为粒度分选较好和成熟度较高的砂屑、砾屑以及鲕粒等。

潟湖亚相 由于大部分呈层状产出的原岩(泥质灰岩)被白云石交代,形成了条带状结构的白云质灰岩。

2.2 开阔台地相

开阔台地是介于局限台地和台地边缘之间的广阔海域^[18]。海水深度一般不超过几十米,因靠海一侧无障壁的遮挡作用,保证了海水可以通畅地循环,盐

度也因此维持在正常的水平上,此海域生物种类的数量远远多于局限台地,并可见多种沉积物类型,且粒级大小不一。生物以蓝绿藻、珊瑚、介形虫、海绵和红藻等最为常见。工区在 YB1、YB4 和 YB9 等井均发现以各类石灰岩沉积为代表的开阔台地相特征。

根据沉积物的构造特征和类型,工区内的开阔台地相还可进一步分为台内滩和滩间海两种亚相(图3)。

台内滩亚相 岩性多以藻砂屑灰岩和亮晶颗粒灰岩为主,常见粒屑泥晶灰岩、鲕粒灰岩。该亚相在开阔台地和局限台地都会发育,且沉积特征大体相近,不易鉴别,是否存在正常盐度的生物是区分两者的重要标志之一。YB1 井鹰山组 5603~5620 m 处的取心表明,岩性以灰色亮晶砂屑灰岩、亮晶砾屑砂屑灰岩为主,砾屑粒级最大在 5 mm×3 mm(且具有一定的排列定向性),砂屑粒径在 0.01~1 mm,具有典型台内滩亚相沉积特征,为中高能砂屑砾屑滩微相沉积。

滩间海亚相 在工区鹰山组中广泛发育,与台内滩亚相多呈交互发育的沉积形式。YB5 井鹰山组

岩性主要以低能环境下沉积的泥晶灰岩、含藻屑泥晶灰岩以及含泥灰岩为主,说明沉积时海水的能量较低,水体循环较好,处于低洼区。

3 储层特征

3.1 岩石学特征

3.1.1 岩石类型

玉北地区中一下奥陶统的岩性从蓬莱坝组向上至鹰山组呈现出由白云岩向石灰岩过渡的趋势:蓬莱坝组和鹰山组下部主要沉积了比较纯的白云岩,具有局限台地相沉积特征;鹰山组中下部以过渡岩性为主(灰质白云岩或白云质灰岩);到了上部逐渐转变为以开阔台地相沉积特征为主的各类石灰岩(颗粒灰岩、泥晶灰岩等),整个岩性变化趋势上反映出了典型的海进式沉积序列特征^[19-20]。本文采用成都理工大学曾允孚等人^[21]的岩石分类方案,依据 110 块岩心样品及其薄片资料,将玉北地区鹰山组碳酸盐岩类型划分如下(表 1)。

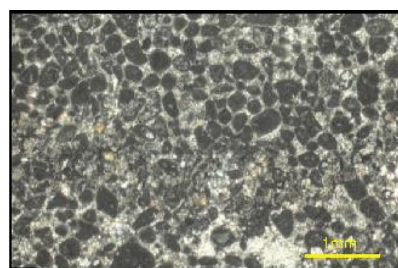
表 1 麦盖提斜坡区玉北地区鹰山组储层岩石类型划分表

岩 性 类 别			层 位	典 型 井
石灰岩	颗粒灰岩	亮晶颗粒灰岩	鹰山组	YB4 井,YB3 井,YB1-1 井
		微亮晶颗粒灰岩		
		微晶颗粒灰岩		
	颗粒微晶灰岩		鹰山组	YB4 井,YB9 井
	含颗粒微晶灰岩			
	(泥)微晶灰岩			
白云岩	(细、中、粗、巨)晶粒白云岩		鹰山组下部	YB1-4 井,YB1-2x 井,YB3 井
	(残余)颗粒白云岩			
	泥微晶白云岩			
	碎裂化白云岩			
过渡岩类及其他岩类	(含)白云质灰岩,灰质白云岩,硅质白云岩		鹰山组下部	YB3 井,YB5 井

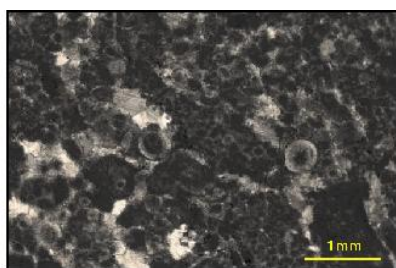
石灰岩 其划分依据主要是从沉积相角度出发,不同的沉积相通常会沉积不同类型的石灰岩。比如,代表高能环境的台地边缘或开阔台地的台内滩环境中可以沉积亮晶颗粒灰岩(图4a);而在开阔台地滩间海等中—低能的环境中,常以微亮晶颗粒灰岩(图4b)或微晶颗粒灰岩沉积为主;此外,(含)颗粒微晶灰岩(图4c)也常发育于滩间海亚相;(泥)微晶灰岩(图4d)则是低能环境下的产物。

白云岩 由于形成机制的不同,白云岩往往在

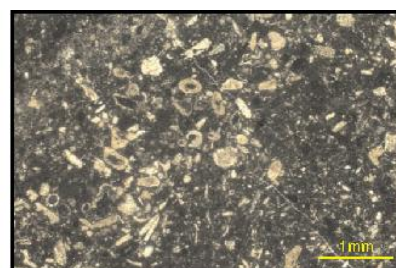
储集空间上有较大的差异,如细晶白云岩比较致密,储集空间发育很不理想(图4e);位于鹰山组下部的中—粗晶白云岩段则发育晶间孔和晶间溶孔,并常常伴随硅质充填(图4f)。具有残余结构的白云岩并不是同一时期交代形成的,而是经历了多期的交代、溶蚀和充填作用。研究认为,这类白云岩所经历的一系列成岩作用并没有对储集空间的发育起到建设性作用,它的原岩一般形成于台地边缘或局限台地(图4g);泥—粉晶白云岩在镜下的特征比较



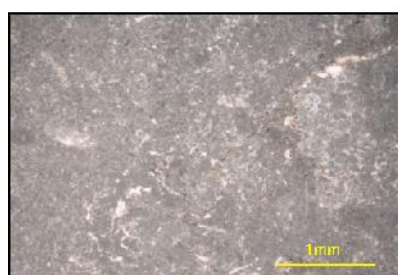
(a) 亮晶颗粒灰岩。颗粒以砂屑为主, 局部可见鲕粒和团块。YB4井5839.72m, 鹰山组, 开阔台地相。薄片(-)



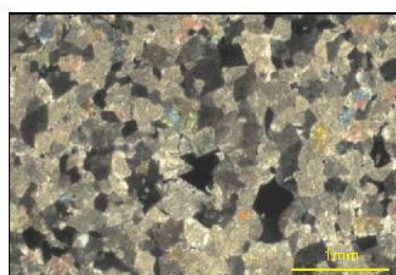
(b) 微亮晶颗粒灰岩。主要为砂屑, 偶见砾屑。生物碎屑主要为介形虫、棘屑等。YB1井5724.13m, 鹰山组, 开阔台地相。薄片(-)



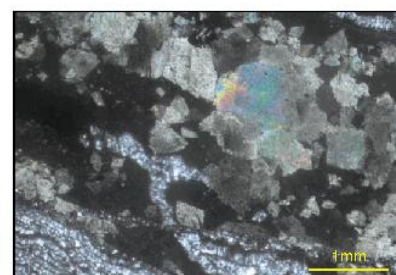
(c) 生物碎屑微晶灰岩。包括介形虫、三叶虫、棘屑、腕足、绿藻等。YB4井5942.15m, 鹰山组, 开阔台地相。薄片(-)



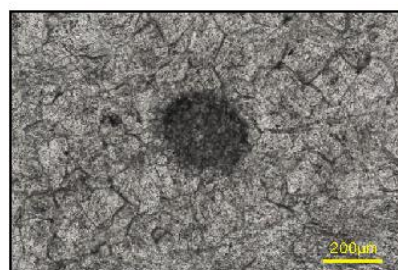
(d) 泥晶灰岩。可见少量生物碎屑, 以介形虫为主。YB1-1井5986.8m, 鹰山组, 开阔台地相。薄片(-)



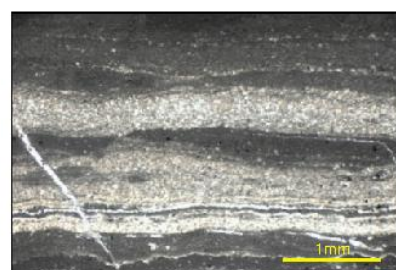
(e) 细晶白云岩。晶体多呈他形, 镶嵌状结构, 基本不发育孔隙。YB1-4井5046.70m, 鹰山组, 局限台地相。薄片(+)



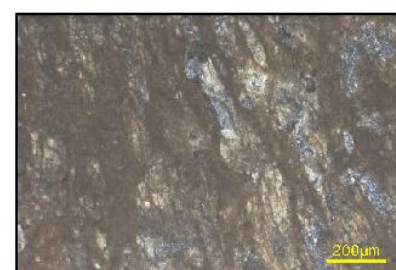
(f) 粗晶白云岩。晶体以他形为主, 溶洞被层状硅质充填。YB5井6739.55m, 蓬莱坝组, 局限台地相。薄片(+)



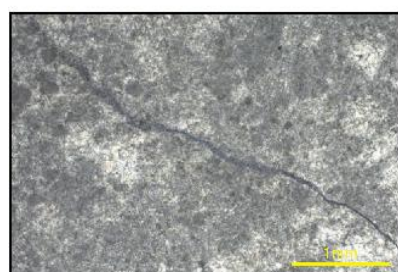
(g) 中晶白云岩。见残余颗粒幻影结构, 晶体自形程度较差, 孔隙发育。YB1-2x井5444.7m, 鹰山组, 局限台地相。薄片(-)



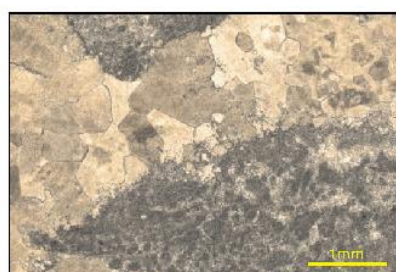
(h) 泥-粉晶白云岩。粉晶白云岩与泥晶白云岩呈层状分布。YB1-2x井5445.28m, 鹰山组, 局限台地相。薄片(-)



(i) 破碎结晶白云岩。晶粒白云岩部分碎裂呈泥状。YB3井5226m, 鹰山组, 局限台地相。薄片(+)



(j) 泥晶砂屑含白云质灰岩。见微裂缝, 沿缝合线可见白云石化。YB3井5368.93m, 鹰山组, 局限台地相。铸体薄片(-)



(k) 微(亮)晶砂屑白云质灰岩。白云石晶体大小不一, 以他形为主。YB3井5368.17m, 鹰山组, 局限台地相。薄片(-)



(l) 浅黄灰色粉细晶白云岩。见网状裂缝, 断面见硅质结核。见高角度缝被低角度缝切割现象。YB1-2x井5134.6~5134.66m, 鹰山组, 局限台地相。岩心

图4 玉北地区鹰山组岩石学特征

致密,晶粒呈他形镶嵌状结构,晶间孔隙不发育(图 4h);碎裂化白云岩在镜下的特征表现为强烈破碎呈泥状并伴有褐色沥青质,未破碎的原岩则为定向分布的扁长状晶粒,并与破裂泥状部分呈相间分布,裂缝发育并伴有硅质充填(图 4i),因此认为这可能与热液作用有关。

过渡岩类(含)白云质灰岩常常沿微裂缝或缝合线发育,因此推断这类岩性应是成岩流体顺延改造的结果。这类灰岩在镜下还观察到呈斑块状分散发育的白云石以交代微晶砂屑灰岩的方式出现(图 4j)。通过岩心观察,可以发现白云质微(亮)晶砂屑灰岩具有斑块状结构,颜色深浅不一的斑块可以代表不同的灰质来源;白云石未能将砂屑部分完全交代,白云石晶体排列紧密,多呈他形或半自形,且未发现理想的储集空间(图 4k)。斑块内部本身的细晶白云石通常自形程度较高,晶间孔比较发育;相比之下,斑块外缘的白云石晶粒表现出粒度更细且排列结构更为紧密的特征。斑块自身结构上的这种差异,可以解释为其在成岩过程中经历了多期流体的作用,并且延续了较长的时间。此外,紧密的晶体排列结构也决定了这类岩石很难发育理想的储集空间。

3.1.2 储集岩组合特征

不同的岩性组合类型构成了不同类型的储集空间,这也是划分沉积相的重要依据。本文依据三个方面:储集岩类的有效性(具连通且未被全填充的孔隙空间)、有效厚度的大小、区域上的分布范围,归纳总结出鹰山组主要的四种储层岩石组合类型^[2]。

I 型组合(亮晶砂屑灰岩与白云质灰岩组合)在鹰山组上部含泥晶砂屑灰岩段内广泛发育。岩心上通常呈泥晶砂屑灰岩夹白云质灰岩形式出现,可见溶蚀孔洞,发育程度中—弱。测井方面除了 GR 曲线由于泥质含量增高而呈现高值以外,整体曲线变化幅度不大(图 3)。镜下鉴定可见砂屑灰岩局部白云石化,且自形程度较好,并常伴有晶间孔发育。裂缝程度因区域不同而存在差异。工区主要在 YB9 井、YB4 井及 YB1 井的鹰山组顶部揭示了该组合类型,储集类型则以孔隙—溶洞型和孔隙—裂缝型为主。

II 型组合(粗—中晶白云岩组合) 鹰山组中部灰质白云岩等过渡性岩类地层中常见此类组合。岩性特征上表现为白云石晶粒向上逐渐变细的过程。

在测井方面,GR、AC 以及 DEN 等曲线均为小锯齿状起伏,SP 曲线呈高值(图 3),岩性和孔洞发育的不均一性可能是其主要原因。通过镜下薄片观察发现,在白云石交代比较彻底的部位,晶体的自形程度也比较高,多以半自形到自形晶为主,并发育晶间孔和晶间溶孔,同时可见晶间溶孔沿微裂缝的扩溶现象。从岩心描述方面看,这类组合的特别之处是溶蚀孔洞较为发育,裂缝的发育程度也较高,多呈网状发育,比如在 YB1-2x 井、YB1-4 井以及 YB9 井均有所见。储集体类型主要为裂缝—孔隙型、溶洞—孔隙型以及小规模溶洞型。

III 型组合(粗—细—粗—中晶白云岩组合) 在鹰山组中下部的灰质白云岩段内广泛发育。岩性特征同 II 型组合一样,表现为白云石晶粒向上逐渐变细。测井特征方面,AC 曲线变化比较大(图 3),原因可能是受控于孔洞分布的不均一性以及此类组合受自身的裂缝发育程度较高的影响。薄片观察可见微裂缝、晶间孔及晶间溶孔发育。孔隙更多发育在中—粗晶白云岩中;相比之下,细晶白云岩只有在晶形自形程度较高的情况下才会有晶间孔或晶间溶孔发育,否则结构均比较致密。从岩心观察方面看,该组合类型除了拥有较高的裂缝发育程度外,还发育大量的溶蚀孔洞。这类组合主要发育在位于断裂带之上的 YB1 井、YB1-2x 井、YB3 井等井的下部地层中,白云质的含量较高,储集空间主要为溶洞—裂缝型和裂缝—孔隙型,是研究区内比较重要的一类岩石组合类型。

IV 型组合(粗—中—泥晶白云岩组合) 同 III 型组合一样,这类组合也发育在接近蓬莱坝组的鹰山组下部的白云岩段中,岩性也为向上变细的特征。从测井曲线变化方面看,它是四类组合中曲线最为平缓的一类,GR、AC 以及 DEN 等曲线均为小锯齿状起伏(图 3)。镜下孔隙空间以晶间孔为主,微裂缝呈网状发育且多数未充填,晶形的自形程度高,以自形—半自形为主。岩心观察方面,属于裂缝发育的一种组合类型,中、高角度裂缝交叉呈网状,与其他三类组合相比,IV 型组合的溶蚀孔洞欠发育,储集空间以裂缝型、裂缝—孔隙型为主,有代表性的井为 YB1-2x 井和 YB9 井。

3.2 储层物性特征

为了有效区分不同类型岩心样品的物性差异,

本文对取自于工区范围内 12 口井共计 110 块样品进行岩性区分,将其分为白云岩、石灰岩和过渡岩类(灰质白云岩或白云质灰岩等)三类。分别对这三类岩石进行物性测试,结果分别为:石灰岩(75 块)平均孔隙度为 1.1%,平均渗透率为 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;白云岩(19 块)平均孔隙度为 2.26%,平均渗透率为 $0.49 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;过渡岩类(16 块)平均孔隙度 0.78%,渗透率为 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 5)。三类岩性的数据对比结果显示,白云岩物性好于石灰岩与过渡岩类。这一结果,部分与预计的相悖,因为从理论上而言,过渡岩类因受到白云石化作用影响,且需要确保 Mg^{2+} 的供给通道,在孔渗方面应优于纯石灰岩。

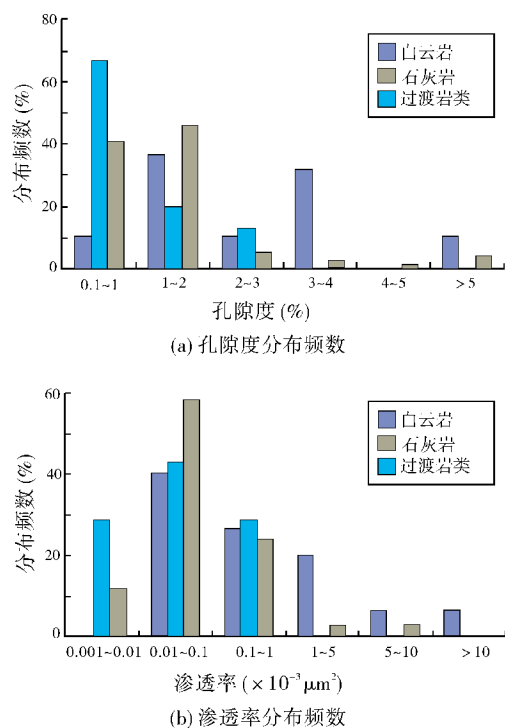


图 5 玉北地区奥陶系鹰山组储层不同岩性物性分布频数直方图

与此同时,通过岩性孔渗相关性对比图(图 6)也可以看出,白云岩的渗透率并没有随着孔隙度的增大而出现变大的趋势,而是表现为较差的孔渗相关性。相反,石灰岩和过渡岩类则表现了较好的孔渗相关性,石灰岩由于受控于取心位置、成岩作用和自身微裂隙等因素,它与白云岩相比,整体孔渗相关性较好。

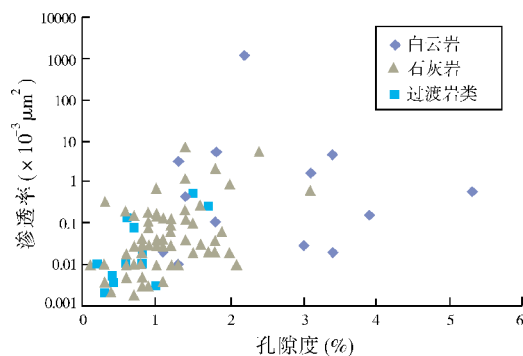


图 6 玉北地区鹰山组储层不同岩性孔渗相关性图

4 储层主控因素分析

4.1 构造破裂作用

虽然玉北地区鹰山组石灰岩层的基质孔隙发育并不理想,但因其潜山构造带构造活动强烈,导致玉北地区东部出现了一系列受北倾逆断层控制的断块或断鼻构造(以玉北1断裂带为代表)(图1),且其中部分构造高点的鹰山组直接被石炭系巴楚组所覆盖。这一特征,为寻找风化壳型岩溶储层提供了思路。铀测井资料^①显示,工区鹰山组顶部风化壳和底部的过渡性白云质灰岩段中所发育的裂缝多显示为高铀特征,说明前期多数裂缝都经历过流体流动。玉北1断裂带(图1)的三维地震剖面上显示出的串珠状反射(图7a中红色虚线圈),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7b中红色虚线圈)。

从构造的演化角度来看,工区以两类构造缝为主:一类是地表区域性分布的高角度张性缝,分析其成因,应是受地层隆升的影响,由应力释放所致;第二类则主要受断裂活动和褶皱控制,从高角度到低角度的裂缝均有发育。由于受到构造部位的控制,构造缝的发育常常有较大差异^[23-24]。通过YB1井的成像测井可发现,鹰山组裂缝的发育具有分段特征,且裂缝呈向下增多的趋势,走向与该区大的断裂带走向大致相同,表明发育受控于断裂带。底部主要发育水平缝和微裂缝,岩心上至少可识别出两期构造裂缝,常见高角度缝被低角度缝切割的现象(图4f),可能因下部层段更接近断层部位,断裂活动所派生的裂缝也更多。受构造应力导致的破裂缝,具有非组构

① 余腾孝. 玉北地区立体勘探项目 2012 年综合研究报告[R]. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 2012.

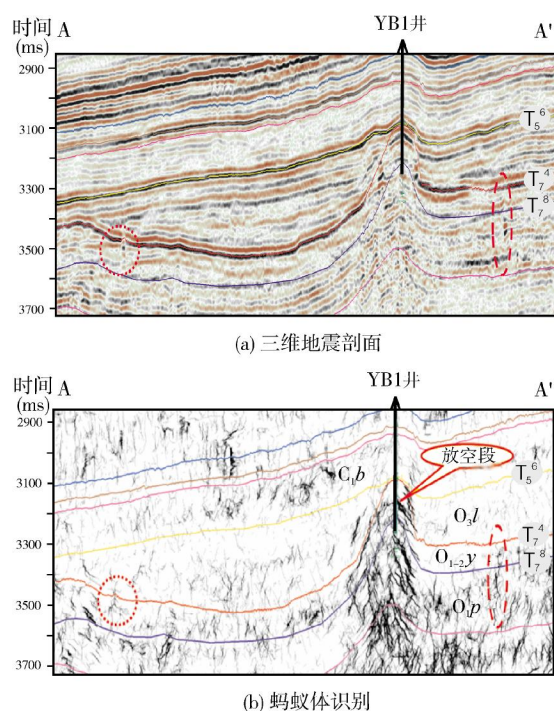


图 7 玉北地区玉北 1 断裂带三维地震剖面与蚂蚁体识别对比图

O_{1p} 蓬莱坝组; O_{1-2y} 鹰山组; O_{3l} 良里塔格组; C_{1b} 巴楚组
A—A' 剖面位置见图 1

控制、产状平直和延伸远的特点,它们不但增大了地层水岩比(促进水—岩相互作用,有利于次生孔隙演化),对推动碳酸盐岩的溶蚀改造(比如地表水的下渗和深部的热液上涌)起到积极的作用,同时还成了沟通储层孔洞和油气充注渗流的主要通道,对改善储层的储集性能方面具有重要意义^[25-27]。

4.2 表生岩溶作用

已有资料表明,位于现今麦盖提斜坡带及其南部的和田古隆起,自加里东中期形成后持续隆升直至海西早期,暴露时间长达 84 Ma^[28],这段时期玉北地区主体就位于和田古隆起之上,因此受到和田古隆起演化的控制,研究区奥陶系曾长期处于暴露环境,表生岩溶作用可能是鹰山组储层发育的一个重要控制因素。在前人研究基础上,通过岩心、薄片观察,结合工区的区域构造活动史以及古地貌和区域不整合接触关系认为,玉北地区主要经历了三期表生岩溶作用,分别为加里东中期 I 幕(第一期)、加里东中期 III 幕(第二期)和海西早期(第三期)^[13-14,28](图 2)。

第一期表生岩溶作用 造成中—下奥陶统鹰山组顶部与上奥陶统良里塔格组之间的不整合(T₇⁴)。这在 YB5 井和 YB9 井中有所揭示,该界面分布全区,但受后期岩溶改造强烈。YB1 井鹰山组顶部基岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值数据显示其十分接近同期海水的平均值 0.708 83^[29],这似乎与玉北地区同时经历了加里东中晚期表生岩溶和海西早期岩溶的事实不符^[30],由此数据可以推断,加里东中期 I 幕可能是三期表生岩溶作用中最为关键的一期,因为 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值并未受到后期放射性锶加入的影响而升高,从而推断后期的岩溶改造作用对地层的影响可能并不大。

第二期表生岩溶作用 主要发生在工区西北部,这一岩溶作用造成了鹰山组与下志留统柯坪塔格组之间(T₇⁰)的不整合,使得整个玉北地区西北部大范围缺失上奥陶统。这在地震剖面上显示为志留系与中—下奥陶统呈角度不整合接触,并在西北部的 PSB2 井中也有所揭示。此时玉北地区受区域挤压应力作用,断裂活动频繁,高角度裂缝发育。此外,受西南侧和田古隆起持续隆升的影响,上奥陶统遭受剥蚀,再次产生岩溶作用。

第三期表生岩溶作用 主要分布于工区的东部断褶区,下石炭统巴楚组泥岩呈角度不整合超覆于鹰山组之上(T₅⁷)。工区内有多条断裂带显示缺失上奥陶统,位于东部断褶带上的 YB1 井、YB4 井和 YB7 井等也均揭示有此现象。尽管第三期的岩溶范围在平面规模上小于前两期,但是通过地层剥蚀量的计算结果表明,该期岩溶作用影响的深度远远大于前两期。此时的和田古隆起规模向北扩大并覆盖整个现今的玉北地区,且仍处于隆升阶段,位于中部平台区的上奥陶统出露而遭受剥蚀,且大量的低角度裂缝和水平缝因断裂活动而产生(在岩心上可见沿裂缝的扩溶现象),因而有效地改造了目的层的储集性能。

至此之后,岩溶作用随着和田古隆起的逐渐淹没而停止,东部断裂带上的岩溶型储层由于巴楚组泥岩段的覆盖而得以保存。

4.3 白云石化作用

白云石化作用是玉北地区鹰山组底部储层发育的重要影响因素。在对 YB1-2x 井薄片样品进行镜下鉴定时发现,该井白云岩中白云石矿物的晶体整体上比较粗大,晶形多样,但主要以他形为主,呈镶

嵌结构,个别自形程度较高的晶体还可见环带结构。有资料显示,此类白云岩的有序度为0.83^[31],属于自形程度较高的类型,反映该类白云岩的形成过程可能比较漫长。在个别薄片,还发现有鞍形白云石发育,但由于重结晶作用和白云石化程度过高,原岩结构在薄片下已无法识别。

早先有研究认为,准同生白云岩由于结晶速度快,所以有序度普遍较低,且往往晶体较小,通常可见伴生发育的膏岩,或者与生物成因相关^[31]。但工区发育的白云岩特征与该研究中所描述的这些特征均不符,由此可以排除准同生成因的可能。从而可以推断,埋藏作用应该是本工区的主要成因机制,而后期经历了重结晶作用的调整^[32]。原因主要有三点,其一,埋藏环境下的晶体往往粗大^[33],这也是工区白云岩最为明显的特征之一;其二,鞍形白云石往往形成于高温环境之下(100~150℃),加之其镶嵌状的岩石排列结构,共同指示了高温高压的成岩环境;其三,工区目的层底部的17个白云石包裹体样品均一温度数据显示,其平均值大于115℃,也反映了较深的埋藏深度,镁离子可能由早期形成的白云岩供给。

5 结 论

(1)研究区内的鹰山组识别出局限台地和开阔台地两类沉积相,对应有四种亚相以及多种微相,中一下奥陶统的岩性从蓬莱坝组向上至鹰山组呈现由白云岩向石灰岩过渡的趋势。蓬莱坝组和鹰山组下部主要沉积了比较纯的白云岩,具有局限台地相沉积特征;鹰山组中部以过渡岩性为主(灰质白云岩或白云质灰岩);到了上部逐渐转变为以开阔台地相沉积特征为主的各类石灰岩(颗粒灰岩、泥晶灰岩等),整个岩性变化趋势反映出了典型的海进式沉积序列。

(2)鹰山组主要有四种储集岩组合类型,分别为亮晶砂屑灰岩与白云质灰岩组合、粗—中晶白云岩组合、粗—细—粗—中晶白云岩组合和粗—中—泥晶白云岩组合。储集物性方面,鹰山组顶部石灰岩段具有最好的孔渗相关性,其后依次为白云岩段和过渡性岩类段。

(3)研究区中一下奥陶统潜山构造带构造活动强烈,储层的形成与断裂及构造裂缝密切相关。裂缝与表生岩溶作用结合,共同改善了研究区内鹰山组顶部石灰岩层的储集性能,白云石化作用则改善了研究工区内鹰山组底部晶粒白云岩地层的孔隙性。

参 考 文 献

- [1] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩系油气勘探特殊性问题[J]. 地质前缘, 2005, 12(3): 15-22.
- [2] 丁道桂, 汤良杰, 钱一雄, 等. 塔里木盆地形成与演化[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- [3] 顾忆, 赵永强, 贾存善, 等. 塔里木盆地阿瓦提坳陷油气资源潜力分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 257-266.
- [4] 张仲培, 王毅, 云金表, 等. 塔里木盆地台盆区海西期地质事件及其油气成藏效应[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(4): 1-5.
- [5] 康玉柱. 塔里木盆地大油气田勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 581-583.
- [6] 康玉柱. 中国海相油气田勘探实例之四: 塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(4): 31-38.
- [7] 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 217-223.
- [8] 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.
- [9] 范筱聪, 孟祥豪, 徐梅桂, 等. 巴麦地区石炭系小海子组储层特征及控制因素分析[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(4): 18-23, 89.
- [10] 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): 937-948.
- [11] 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): 493-501.
- [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): 215-219.
- [13] 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): 170-174.
- [14] 黄太柱. 塔里木盆地玉北地区断裂系统解析[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 98-106.
- [15] 谭广辉, 邱华标, 余腾孝, 等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组油藏成藏特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 26-32.
- [16] 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.
- [17] 李映涛, 白晓亮, 袁晓宇, 等. 塔中地区中一下奥陶统鹰山组沉积相及沉积模式研究[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(1): 1-8.
- [18] 张儒佳, 柳春云, 郭峰. 塔里木盆地巴什托区石炭系沉积特征[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(1): 42-44.
- [19] VAIL P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 2: Seismic stratigraphy interpretation procedure [M]//BALLY A W. Seismic Stratigraphy: Tulsa: AAPG Studies in Geology, 1987: 1-10.
- [20] MITCHUM R M, VAIL P R, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis [M]. AAPG Memoir, 26, 1977.

- [22] 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]. 成都理工大学, 2013.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] GREEN D G, MOUNTJOY E W. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta Deep Basin[J]. Bull of Can Petrol Geol, 2005, 53(2): 101-129.
- [26] 黄思静, 王春梅, 黄培培, 等. 碳酸盐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): 1-10.
- [27] 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): 232-238.
- [28] 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(8): 2542-2556.
- [29] 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响应[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(1): 36-42.
- [30] JONES B, LUTH R W. Temporal evolution of Tertiary dolostones on Grand Cayman as determined by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(2): 187-205.
- [31] 吴仕强, 朱井泉, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩结构构造类型及其形成机理 [J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1390-1400.
- [32] 袁晓宇. 玉北地区鹰山组岩溶型储层地质—地震综合预测技术及应用[D]. 成都理工大学, 2013.
- [33] ZENGER D H. Burial dolomitization in the Lost Burro Formation (Devonian), east-central California, and the significance of late diagenetic dolomitization [J]. Geology, 1983, 11(9): 519-522.

编辑: 赵国宪

Reservoir Characterization and Controlling Factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan Reservoir in Yubei Area, Tarim Basin

Li Yingtao, Yuan Xiaoyu, Ye Ning, Wan Youli, Su Bingrui

Abstract: A Lower-Middle Ordovician Yingshan weathering-crust reservoir develops in Yubei area in Markit Slope, Tarim Basin. Affected on multi-stage faulting and paleo-karstification, it is difficult to identify karstification stages and fracture effectiveness. Based on observation and geochemical analysis of core samples and microscopic thin-slices, combined with logging and seismic interpretation, four assemblages of related reservoir rocks are recognized in Yingshan Formation and some correlations of porosity with permeability are diagramed for these rock assemblages. It is suggested that the reservoir property of Yingshan Formation is closely related to the early to middle Ordovician faulting and fracturing. The multi-stage faulting and the karstification experienced during I and III phases of Middle Caledonian movement effectively improved the reservoir property of limestone in the uppermost part of Yingshan Formation and the dolomitization improved the porosity of crystalline dolostone in the lowermost part of it.

Key words: Weathering crust reservoir; Reservoir characterization; Sedimentary facies; Carbonate reservoir; Yubei area; Tarim Basin

Li Yingtao; male, DSc. degree in progress at Chengdu University of Technology. Add: Energy College of Chengdu University of Technology, 1 Dong-3, Erxianqiao Rd., Chenghua, Chengdu, Sichuan, 610059, China