

塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统 储层发育特征及控制因素

刘红光^{1,2,3}, 刘波³, 曹鉴华⁴, 黄臣军^{2,3}, 刘格云⁵

[1. 中国石油化工集团公司 经济技术研究院, 北京 100029; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 北京大学 石油与天然气研究中心, 北京 100871; 4. 天津科技大学, 天津 300222; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083]

摘要:塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩具有良好油气勘探潜力,但储层发育的控制因素及分布规律不明制约了勘探进程。通过岩石学、物性测试与地化分析等手段,总结出玉北地区中-下奥陶统主要发育溶洞型、溶孔型、裂缝-溶蚀孔洞型、溶蚀孔洞-裂缝型与裂缝型等5种储层类型。溶蚀作用、白云岩化作用以及裂缝活动为储层发育的主要控制因素。早-中奥陶世相对较海平面,导致微古地貌高部位在准同生期反复暴露地表遭受溶蚀,形成不受单一暴露界面控制的小尺度溶蚀孔洞、顺层溶蚀与示顶底充填等现象。总体来看蓬莱坝组溶蚀作用强度大于鹰山组。主要发育于准同生阶段和浅埋藏阶段的白云岩化作用增强了岩石的抗压实压溶能力,有利于早期溶蚀孔洞的保存,对储层具有间接贡献。裂缝具有多期活动特征,海西晚期之前的裂缝多被方解石、白云石和硅质等流体充填,对储层贡献较少,海西晚期及喜马拉雅期裂缝经历的成岩改造较弱而成为有效裂缝。

关键词:白云岩化作用;储层;碳酸盐岩;中-下奥陶统;玉北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician Reservoirs in Yubei area, Tarim Basin

Liu Hongguang^{1,2,3}, Liu Bo³, Cao Jianhua⁴, Huang Chenjun^{2,3}, Liu Geyun⁵

[1. SINOPEC Economics & Development Research Institute, Beijing 100029, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 5. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The Lower-Middle Ordovician carbonates in the Yubei Area, Tarim Basin, are considered promising exploration targets. However, the complexity of the controlling factors and distribution patterns of the reservoirs hindered the exploration process in the area. By using petrologic, physical and geochemical methods, we classified the reservoirs into five types: cavern type, dissolution pore type, fracture-vug type, vug-fracture type and fracture type. The main controlling factors of the reservoirs were determined to be dissolution, dolomitization and fracturing. It is suggested that the relative low stand sea level during the Early-Middle Ordovician caused the relative paleogeomorphic highs being repeatedly exposed to penecontemporaneous dissolution, which resulted in the formation of centimeter-scale caves, millimeter-scale mold pores, along-bedding dissolution and geopetal cements that are not controlled by single uniform exposure surface. The dissolution degree in the Penglaiba Formation was overly stronger than that in the Yingshan Formation. The dolomitization processes that mainly occurred in penecontemporaneous and shallow burial stages strengthened the resistance of carbonates to compaction and pressure dissolution, thus provided favorable condition for the preservation of early dissolution pores and caves and contributed indirectly to the forming of reservoirs in the area. The fractures formed through multiple tectonic stages. The fractures formed before the Late Hercynian epoch were filled up by calcite, dolomite and silica and made less contribution to the formation of reservoirs. However, the fractures formed during the Late Hercynian and Himalayan epoch

收稿日期:2016-10-08;修订日期:2017-10-10。

第一作者简介:刘红光(1989—),男,博士、工程师,碳酸盐岩沉积学。E-mail:hgliu@puk.edu.cn。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技开发部项目(P14128, P16112);国家自然科学基金项目(41572117, 41672123);国家科技重大专项(2017ZX05005-003-005)。

were effective in contributing to the formation of reservoirs due to weak diagenetic processes.

Key words: dolomitization, reservoir, carbonate, Lower-Middle Ordovician, Yubei area, Tarim Basin

塔里木盆地碳酸盐岩勘探在近些年取得了诸多进展及成果,在奥陶系中发现了塔河岩溶缝洞型储层与塔中溶蚀孔洞型储层等,表明奥陶系碳酸盐岩地层具有很大的勘探潜力。位于麦盖提斜坡的玉北地区是中国石化西北油田分公司的重点探区之一,2010年在玉北1井获得油气突破,随后在同一构造带的玉北1-2X井等多口评价井中获得了高产油气流^[1-2],显示该地区具有良好的油气勘探潜力。但在后续勘探过程中,完钻的26口钻井含油气性不一,井间储层发育特征差异较大,储层分布规律不明,严重制约了进一步勘探。针对玉北地区中-下奥陶统不同储层类型进行了研究,探讨储层发育的主控因素,提出了玉北地区中-下奥陶统储层发育模式,以期为进一步勘探提供参考。

1 地质背景

玉北地区位于塔里木盆地西南缘麦盖提斜坡东部,北侧以海米-罗斯断裂带、罗南断裂带和玛扎塔格断裂带为界与巴楚隆起相邻,西南侧与叶城坳陷相邻,东南侧延伸至塘古巴斯坳陷(图1)。玉北地区中-下奥陶统自下而上发育蓬莱坝组(O_{1p})和鹰山组(O_{1-2y})。蓬莱坝组主要岩性为白云岩,见少量亮晶砂屑灰岩。鹰山组下段仍以白云岩为主,但灰岩较蓬莱坝组有所

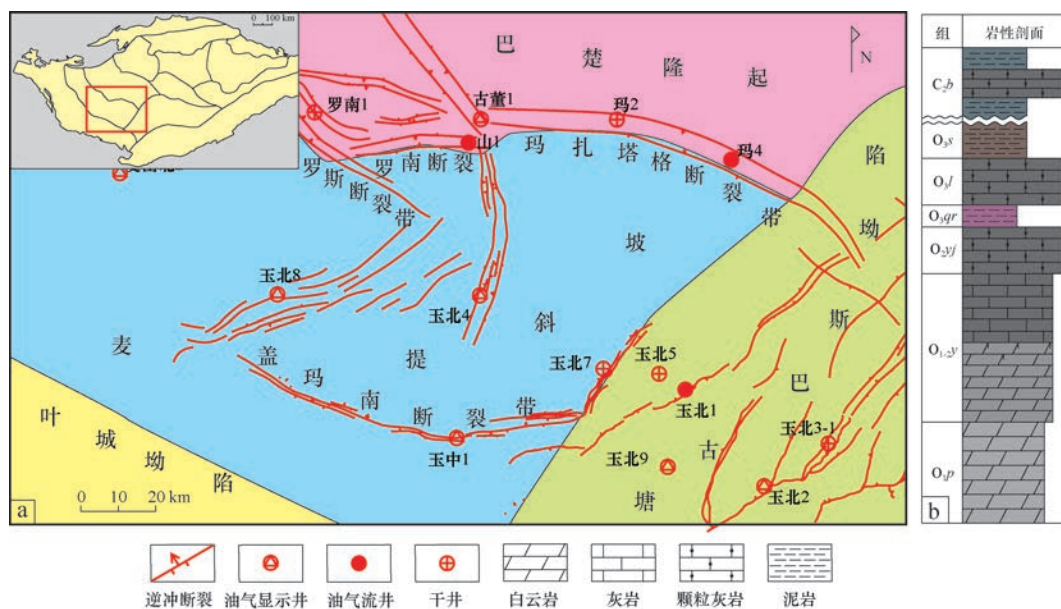
增加,鹰山组上段以砂屑灰岩为主^[3]。总体来看从蓬莱坝组到鹰山组白云岩含量具有逐渐减少的特征。玉北地区早-中奥陶世的沉积环境经历了从局限台地向开阔台地的转变,早奥陶世的蓬莱坝组时期沉积环境较为局限,不同学者依据岩石类型及发育特征、测井曲线特征等划分出潟湖、潮上-潮间带与潮下带等不同亚相;早-中奥陶世鹰山组沉积时期划分出砂屑滩、藻滩与滩间海等亚相^[4-5]。尽管划分方案存在差异,但总体均认为从蓬莱坝组到鹰山组,相对海平面具有逐渐升高的趋势。

玉北地区发育以东北向为主的复杂断裂系统,断裂具有多期发育特征,已有学者将该地区的断裂活动划分为加里东早期、加里东中期早幕、加里东中期I幕、加里东中期III幕、加里东晚期-海西早期、海西晚期以及喜马拉雅期等7个期次,且后期断裂活动往往是在早期断裂活动基础上继续发育,具有一定继承性^[6]。整体来看早期断裂活动较强,后期逐渐减弱,从平面上来看具有东强西弱的特征^[7-9]。

2 储层发育特征

2.1 储层类型及分布特征

从岩心和薄片观察特征来看,玉北地区主要储集



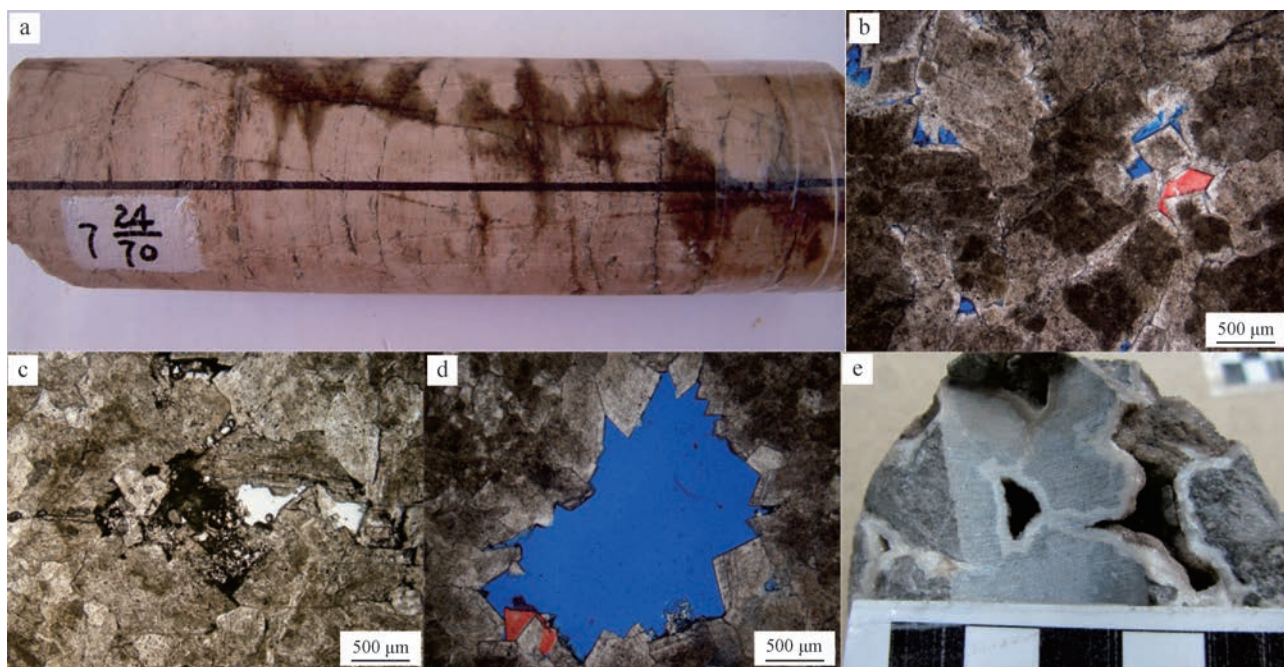


图2 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统主要储集空间类型

Fig. 2 Main reservoir space types of the Lower-Middle Ordovician in Yubei area, Tarim Basin

a. 玉北1井, 鹰山组, 埋深5 615 m, 亮晶砂屑灰岩, 裂缝发育, 见原油外渗; b. YB1-2X井, 鹰山组, 埋深5 136.43 m, 粗晶白云岩, 发育晶间孔; c. 玉北6A井, 鹰山组, 埋深6 710.58 m, 中-粗晶白云岩, 发育晶间溶孔; d. 玉北6A井, 鹰山组, 埋深6 712.14 m, 中-粗晶白云岩, 见残余铸模孔; e. 玉北5井, 蓬莱坝组, 埋深6 842.14 m, 粗晶白云岩, 发育溶洞, 硅质半充填

空间有裂缝、晶间孔、晶间溶孔、残余铸模孔/粒内孔和溶洞等5种类型(图2), 其中以裂缝和溶洞为主。裂缝多被白云石、方解石以及硅质等充填, 未被充填的有效裂缝主要发育于鹰山组, 在灰岩和白云岩中均可见, 通常开度较小, 部分见原油外渗。晶间孔、晶间溶孔及残余铸模孔/粒内孔主要发育于中-粗晶白云岩中, 但方解石胶结较为普遍, 因而作为有效储集空间得以保存的相对较少。溶洞在蓬莱坝组和鹰山组均有发育, 多呈顺层状, 部分为不规则状, 洞内充填-半充填硅质。

依据玉北地区储集空间主要发育特征, 可将玉北地区储层划分为五种类型: 裂缝型、溶蚀孔洞-裂缝型、裂缝-溶蚀孔洞型、溶孔型和溶洞型。岩心分层及薄片观察表明, 纵向上溶蚀作用发育程度具有蓬莱坝组强于鹰山组、鹰山组下段强于鹰山组上段的特征。溶蚀作用主要发育于蓬莱坝组中下部及鹰山组中下部, 裂缝发育程度具有鹰山组上段强于蓬莱坝组和鹰山组下段的特征。通过岩心观察、成像测井识别等手段, 在玉北地区9口钻井的蓬莱坝组及鹰山组共识别出储层发育段300个, 其中蓬莱坝组101个, 鹰山组东区断褶带82个, 鹰山组东区断洼带65个, 鹰山组中-西部地区52个。将其按不同储层类型进行分类统计分析, 统计结果显示, 玉北地区蓬莱坝组储层以溶洞型、溶孔型和裂缝-溶蚀孔洞

型为主, 即溶蚀作用较发育。鹰山组储层发育类型表现出明显的分区分带差异性, 东区断褶带裂缝型储层占有明显优势, 东区断洼带溶孔型和溶洞型占有明显优势, 中-西部地区裂缝型储层和溶孔型储层均较发育(图3), 但由于研究区范围较广而钻井较少, 因而中-西部地区的储层类型特征统计意义较差。

2.2 储层物性特征

对玉北地区共计14口钻井199个不同层位的灰岩、白云岩和硅质白云岩样品的物性数据进行了统计分析。从不同层位的孔渗数据来看, 蓬莱坝组平均孔隙度为2.51%, 平均渗透率为 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 鹰山组下段平均孔隙度为4.77%, 平均渗透率为 $10.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 鹰山组上段平均孔隙度为1.1%, 平均渗透率为 $0.72 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从孔渗分布直方图中也可见蓬莱坝组和鹰山组下段高孔隙度样品的比例较大, 鹰山组上段孔隙度总体较低, 但渗透率并未表现出与孔隙度相同的规律, 蓬莱坝组的渗透率为中等或较低值, 鹰山组下段和鹰山组上段的渗透率则为中等或较高值(图4a, c)。

从不同岩性的孔渗分布直方图来看, 灰岩的孔隙度值总体较低, 平均为1.1%, 硅质白云岩中低孔隙度的比例较高, 平均为1.9%, 白云岩的孔隙度值总体较

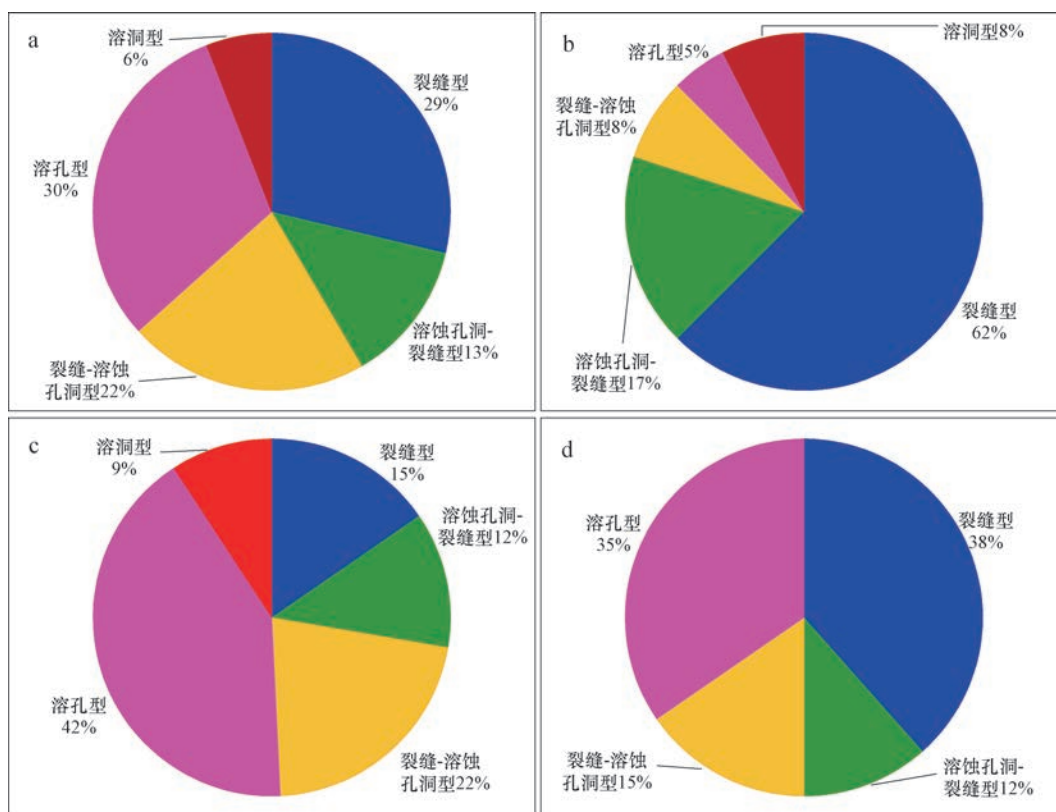


图 3 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统主要储层类型

Fig. 3 Main reservoir types of the Lower-Middle Ordovician in Yubei area, Tarim Basin

a. 蓬莱坝组; b. 东区断褶带鹰山组; c. 东区断洼带鹰山组; d. 中-西部地区鹰山组

高,平均为 4%。但从渗透率来看,灰岩及白云岩的渗透率为中等或较高值,平均分别为 $0.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $6.68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而硅质白云岩基本为中等,平均为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,高渗透率的样品少见(图 4b,d)。通过灰岩与白云岩的对比可知,白云岩的物性特征相对较好;通过白云岩与硅质白云岩的对比可知硅质白云岩的物性特征相对较差,上述特征表明白云岩化对于储层物性起到建设性作用,而硅质的产出对于储层物性具有一定的破坏作用^[10]。

从不同层段和不同岩性的孔渗关系图中也可见,在鹰山组上段和灰岩中裂缝型储层相对较为发育,这也与前述岩性分布的时代特征相吻合,鹰山组上段以灰岩为主,因而裂缝型储层在鹰山组上段和灰岩中的高比例出现了很好的耦合。蓬莱坝组和鹰山组下段的白云岩则以孔洞型储层为主(图 4e,f)。

3 储层发育控制因素

通过对于上述储集空间类型和储层类型特征的总结可知,控制玉北地区中-下奥陶统储层发育的主要因素有三个,分别为溶蚀作用、白云岩化作用和裂缝活

动,从而形成了以裂缝和溶蚀孔洞为主要端元的不同储层类型。

3.1 溶蚀作用

玉北地区多口探井在钻遇奥陶系时出现放空与漏失现象^[11-12],岩心观察可见溶蚀孔洞发育。通过储层发育特征及物性特征的总结可知,玉北地区溶蚀作用发育程度具有从蓬莱坝组到鹰山组逐渐减弱的特征。且从岩心和成像测井特征来看,孔洞发育并未受单一统一暴露界面的控制,表明并非是区域上加里东晚期—海西早期的构造运动导致的表生暴露控制着玉北地区储层的发育,而可能是海平面升降作用导致的短期暴露产生准同生溶蚀作用的结果。表生岩溶作用与准同生岩溶作用在溶蚀孔洞发育位置、规模和分布规律等多方面存在差异,除上述不受单一统一暴露面控制外,玉北地区的溶蚀孔洞发育尺度较小,部分具结构选择性,且其纵横向分布规律也符合准同生溶蚀的特征。

从纵向上来看,溶蚀孔洞发育特征在蓬莱坝组和鹰山组有所不同,蓬莱坝组以发育岩心尺度厘米级的溶洞为主,溶洞具顺层发育特征(图 5a),洞内充填一半充填硅质,溶洞边缘白云石晶形完好,不存在溶蚀现

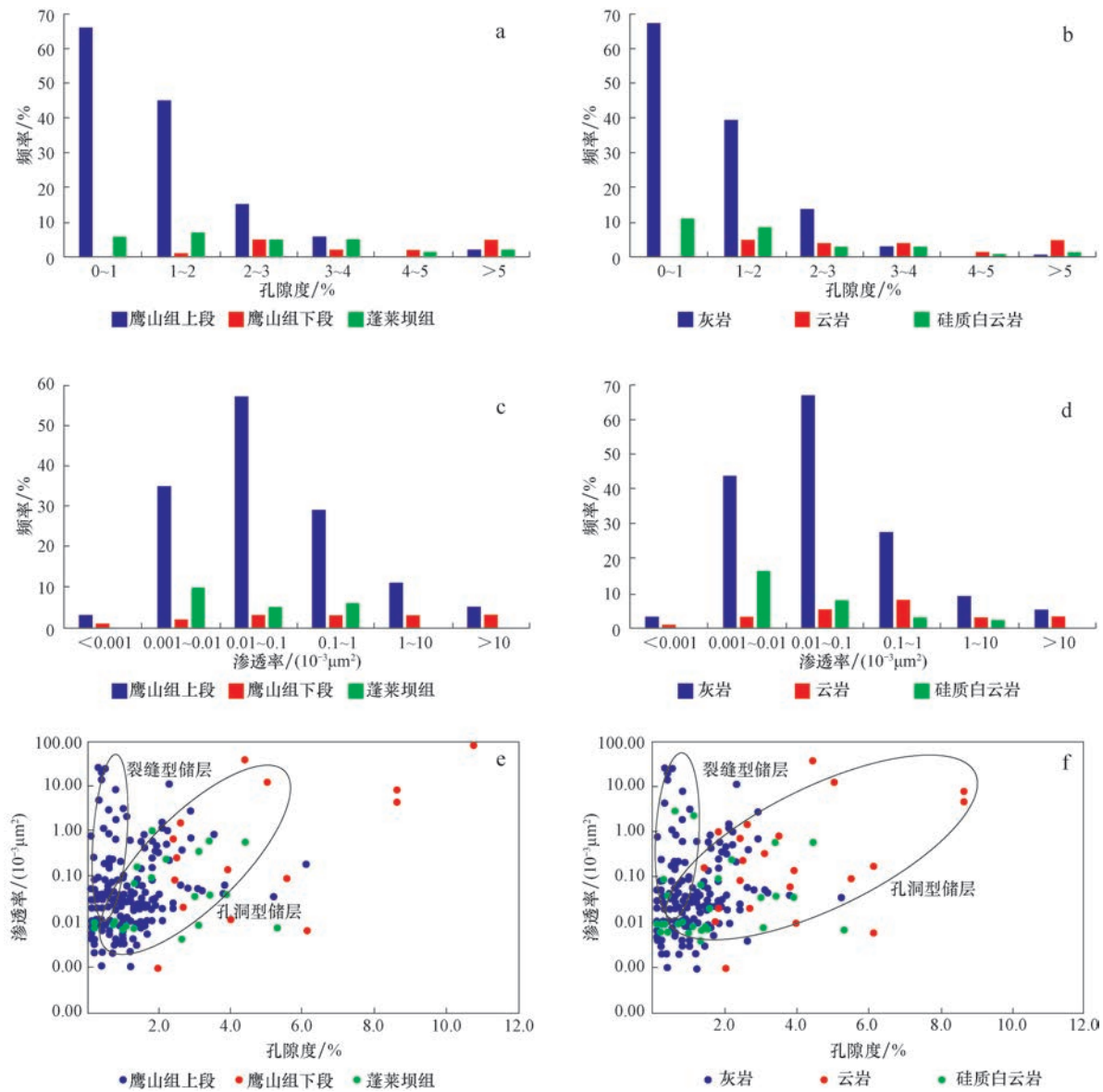


图 4 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统储层物性特征

Fig. 4 Porosity and permeability characteristics of the Lower-Middle Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin

a. 不同层位孔隙度分布直方图; b. 不同岩性孔隙度分布直方图; c. 不同层位渗透率分布直方图; d. 不同岩性渗透率分布直方图; e. 不同层位孔渗关系; f. 不同岩性孔渗关系

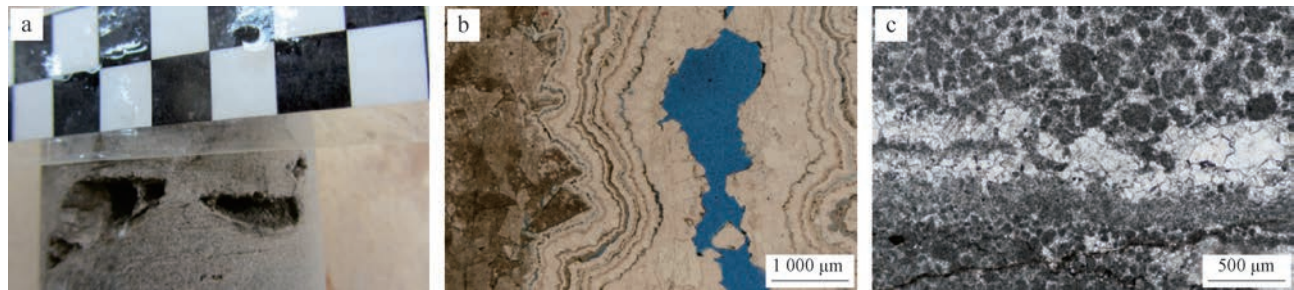


图 5 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩溶蚀作用发育特征

Fig. 5 Dissolution in the Lower-Middle Ordovician carbonates, Yubei area, Tarim Basin

a. 玉北 5 井, 蓬莱坝组, 埋深 6 741.61 m, 粗晶白云岩, 溶洞顺层发育, 溶洞内半充填硅质; b. 玉北 5 井, 蓬莱坝组, 埋深 6 742.2 m, 粗晶白云岩, 溶洞发育, 溶洞边缘的白云石自形且无溶蚀现象, 表明溶蚀作用早于白云石化, 铸体薄片; c. 玉北 9 井, 鹰山组, 埋深 6 848.27 m, 亮晶砂屑灰岩, 见顺层发育的溶洞内具示顶底充填特征, 普通薄片

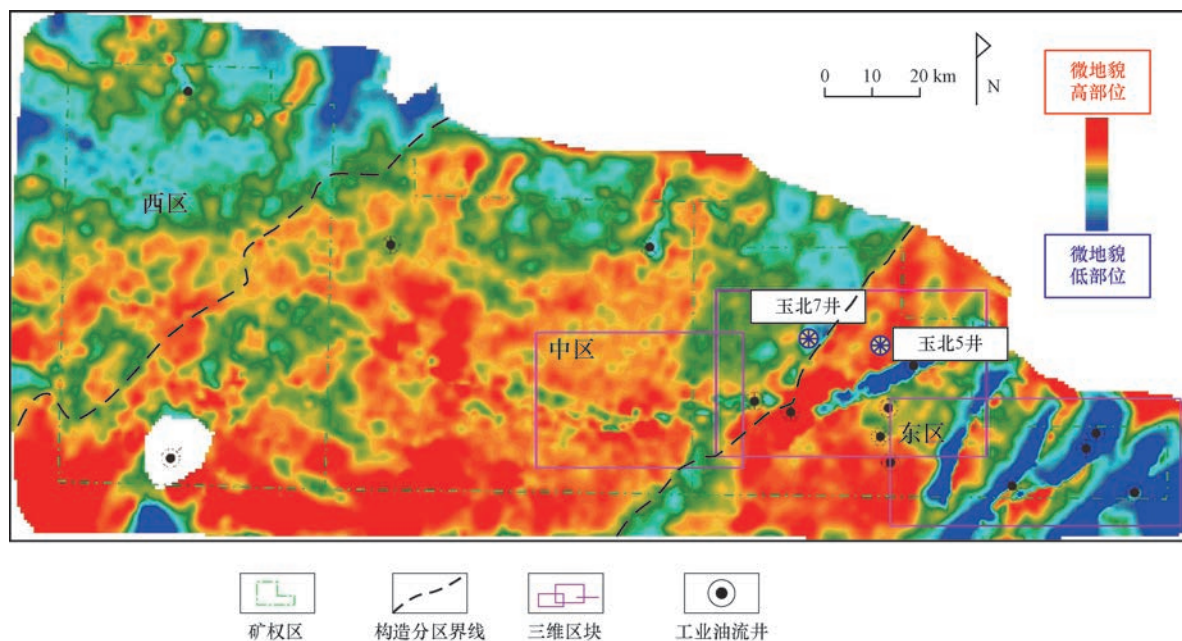


图 6 塔里木盆地玉北地区蓬莱坝组微古地貌

Fig. 6 Micro-paleogeomorphic map of the Penglaiba Formation in Yubei area, Tarim Basin

图中东区蓝色部分为断褶带,红色及黄色部分为断洼带。断褶带地区由于受多期断裂的影响较大,难以进行准确的古地貌恢复,因而东区深蓝色断褶带部分不代表实际原始古地貌特征。

象(图 5b),表明溶洞形成早于白云岩化。鹰山组以发育薄片尺度毫米级的溶蚀孔洞为主,见残余铸模孔、顺层溶蚀、示顶底充填等现象(图 2d,图 5c)。

这种溶蚀作用发育程度在纵向上的差异可能与相对海平面的变化相关。从蓬莱坝组到鹰山组,塔里木盆地西部台地沉积环境从局限-半局限台地转化为开阔台地^[13],相对海平面的升高导致鹰山组的暴露溶蚀程度相对蓬莱坝组减弱,从而蓬莱坝组形成厘米级尺度的溶洞,而鹰山组主要为毫米级的溶孔和溶洞。

溶蚀作用发育程度在平面上的差异也符合准同生溶蚀作用特征,准同生溶蚀作用发育程度受控于微古地貌,在微古地貌高部位,暴露时间较长,溶蚀作用较强,微古地貌低部位暴露时间较短或者始终处于海平面之下,溶蚀作用发育较弱或不发育。通过旋回分析法恢复的剥蚀量和原始地层厚度^[14]所揭示的原始微古地貌表明,玉北 5 井蓬莱坝组时期古地貌高于玉北 7 井(图 6),这与岩心观察到的玉北 5 井孔洞发育程度明显好于玉北 7 井的特征相符。

3.2 白云岩化作用

通过物性特征对比发现,玉北地区白云岩物性特征好于灰岩。白云岩对于储层的贡献可能存在两种情况,一种是白云岩化过程中由于晶体结构的调整形成

的晶间孔对储层物性产生直接贡献,另一种是白云岩化作用增强了岩石的抗压实压溶能力有利于早期孔洞的保存对储层物性产生间接贡献。通过岩心及薄片观察发现,白云岩化作用对于玉北地区中-下奥陶统储层的直接贡献较为有限,晶间孔发育程度总体较低,岩石整体较为致密,白云岩化作用对储层可能主要具有间接贡献作用。

通过岩心及薄片观察,可将玉北地区的白云石按产状划分为 3 种类型,分别为大规模块状产出的白云石、沿缝合线分布的白云石及充填缝洞的白云石(图 7)。其中沿缝合线分布的白云石和充填缝洞的白云石发育相对较少。前人的相关针对性研究表明,沿缝合线分布的白云石,是在浅-中埋藏环境下残留海水和高镁方解石转化为方解石过程中释放的 Mg^{2+} 导致的小规模的白云石化作用下产生的^[15];而充填缝洞的白云石往往具鞍形结构或波状消光等特征(图 7f),焦健等(2016)的研究表明它是二叠纪岩浆活动影响产生的少量热液白云石化作用的产物^[16]。

大规模块状产出的白云石是玉北地区最主要的白云石类型,按照晶粒大小及结构特征可将玉北地区主要的白云岩进一步划分为 3 种类型,分别为粉-细晶自形白云岩、中晶自形-半自形白云岩和粗晶自形-它形白云岩(图 7a-c)。各类白云岩的 $\delta^{18}O$ 值均与同期海水成因的白云岩 $\delta^{18}O$ 值相近,总稀土含量均小

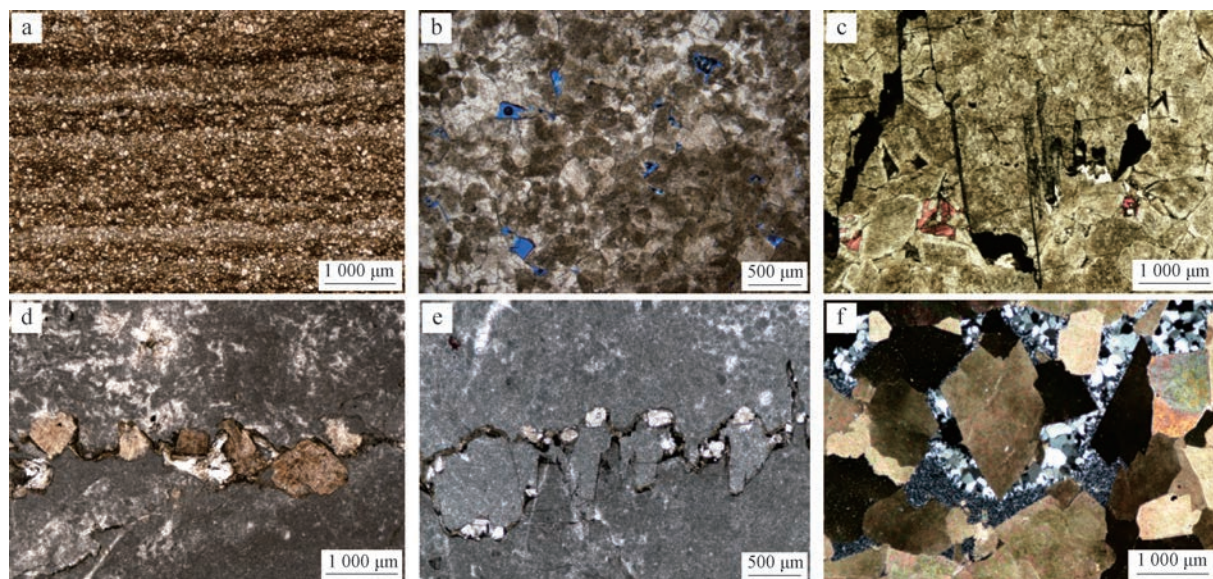


图7 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统白云岩类型及特征

Fig. 7 Dolomite types and characteristics of the Lower-Middle Ordovician in Yubei area, Tarim Basin

a. 玉北5井, 蓬莱坝组, 埋深6 841.2 m, 粉晶白云石, 具纹层状特征, 普通薄片; b. 玉北6A井, 鹰山组, 埋深6 712.14 m, 中-粗晶白云石, 具残余颗粒结构, 铸体薄片; c. 玉北8井, 鹰山组, 埋深7 176.75 m, 粗晶白云石, 缝合线晚于白云石化过程, 普通薄片; d. 玉北3井, 鹰山组, 埋深5 359.95 m, 泥晶灰岩中缝合线发育, 沿缝合线分布有少量白云石, 普通薄片; e. 玉北8井, 鹰山组, 埋深6 967.65 m, 泥晶砂屑灰岩中缝合线发育, 沿缝合线分布少量白云石, 普通薄片; f. 玉北3井, 鹰山组, 埋深5 260.4 m, 鞍形白云石, 白云石边缘平直且阻碍了硅质生长, 表明硅质产出时间晚于白云石, 普通薄片

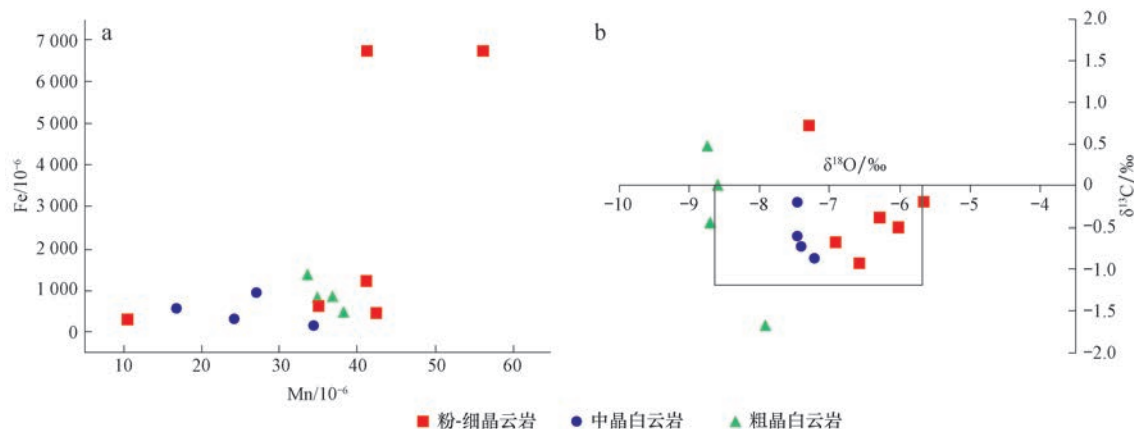


图8 塔里木盆地玉北地区蓬莱坝组白云岩地球化学特征

Fig. 8 Geochemical characteristics of the dolomites in the Penglaiba Formation, Yubei area, Tarim Basin

a. 玉北地区蓬莱坝组白云岩 Fe 和 Mn 交会图; b. 玉北地区蓬莱坝组白云岩 C-O 同位素交会图(框内为 Shields 等, 2003 的海水成因白云岩 C-O 同位素数据范围^[22])

于 10×10^{-6} , 与陈永权等(2009)所测得早奥陶世泥晶灰岩的数值相近^[17], 表明玉北地区各类白云岩的白云岩化流体来源为早-中奥陶世的海水(图8)。粉-细晶白云岩中 Fe 含量较高, 对应样品的 Mn 含量则无明显增高, 由于成岩作用过程中 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 会进入晶格中导致含量增加, 所以测试结果未显示出 Fe 和 Mn 含量的协同性增高, 表明并非是成岩作用过程中 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 离子进入了白云石晶格中。扫描电镜和能谱分析表明在粉-细晶白云石的晶间孔中充填有富 Fe 和富 Si 的泥质(图9), 同时部分粉-细晶白云岩的

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高达 0.710 5 ~ 0.710 6, 表明受到陆源物质影响, 结合其盐度指数高达 123.4, 有序度值较低($XRD \approx 0.30 \sim 0.52$) 及具有纹层状构造等特征^[18-19], 表明粉-细晶白云岩为准同生成因的白云岩, 白云岩化流体为同期海水且因为相对较低的海平面而受到陆源输入的影响。中晶白云岩和粗晶白云岩中可见残余颗粒结构, $\delta^{18}\text{O}$ 与同期海水成因的白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近而略有偏低, 盐度指数较低为 122, 成岩温度^[18,20] 和晶体有序度值较高, 表明中晶白云岩和粗晶白云岩为浅埋藏环境中受海水影响白云岩化的特征^[21]。

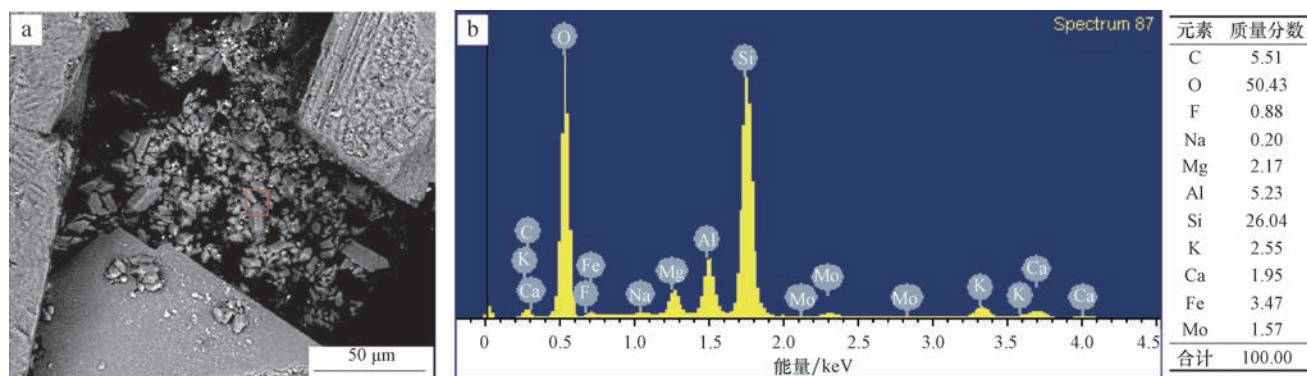


图 9 塔里木盆地玉北地区粉-细晶白云岩晶间充填物扫描电镜特征及能谱分析

Fig. 9 SEM images showing the silica-dominated matrix filling the inter-crystalline pores of micritic-fine dolomites, Yubei area, Tarim Basin

从发育程度来看,玉北地区准同生阶段粉-细晶白云岩产出相对较少,以发育浅埋藏阶段的中晶白云岩和粗晶白云岩为主。镜下可见在中晶白云岩和粗晶白云岩中存在较多残余铸模孔及粒内孔(图 2d, 图 7b),表明早期准同生阶段形成的溶蚀孔洞在浅埋藏阶段的白云岩化过程中,由于白云岩化作用增强了岩石的抗压实压溶能力而得到了有效保存,验证了玉北地区的白云岩化作用对储层具有间接贡献作用。

3.3 裂缝活动

玉北地区断裂活动具有多期继承性发育特征,且早期断裂活动较强,晚期逐渐减弱。加里东早期基底断裂复活;加里东中期为断裂主要活动阶段,受盆地南缘阿尔金洋俯冲碰撞的影响,断裂具强烈冲断特征;加里东晚期—海西早期断裂活动减弱,以老断裂低幅度

复活及部分新生叠瓦状断裂发育为主;海西晚期和喜马拉雅期断裂活动较弱,以低幅褶皱为主^[9,23]。

基于岩心和薄片观察到的裂缝交切关系,可将玉北地区中-下奥陶统裂缝从早至晚划分为 5 种类型:白云石充填缝、硅质充填缝、沥青充填缝、方解石充填缝和无充填裂缝。裂缝的形成时期应早于缝内充填物的充填时期或者二者同期,因而白云石充填缝应为热液白云石胶结发生之前或同时形成的,时代对应为海西期构造活动阶段;硅质产出具有围绕白云石放射状生长、被鞍形白云石阻碍生长等特征,表明硅质充填缝晚于白云石化作用及二叠系热液活动(图 5b, 图 7f),时代对应为海西晚期及之前的构造运动;沥青充填缝、方解石充填缝和无充填裂缝均切割硅质充填缝,时代对应为海西晚期—喜马拉雅期构造运动,其中无充填裂缝发育最晚(图 10)。

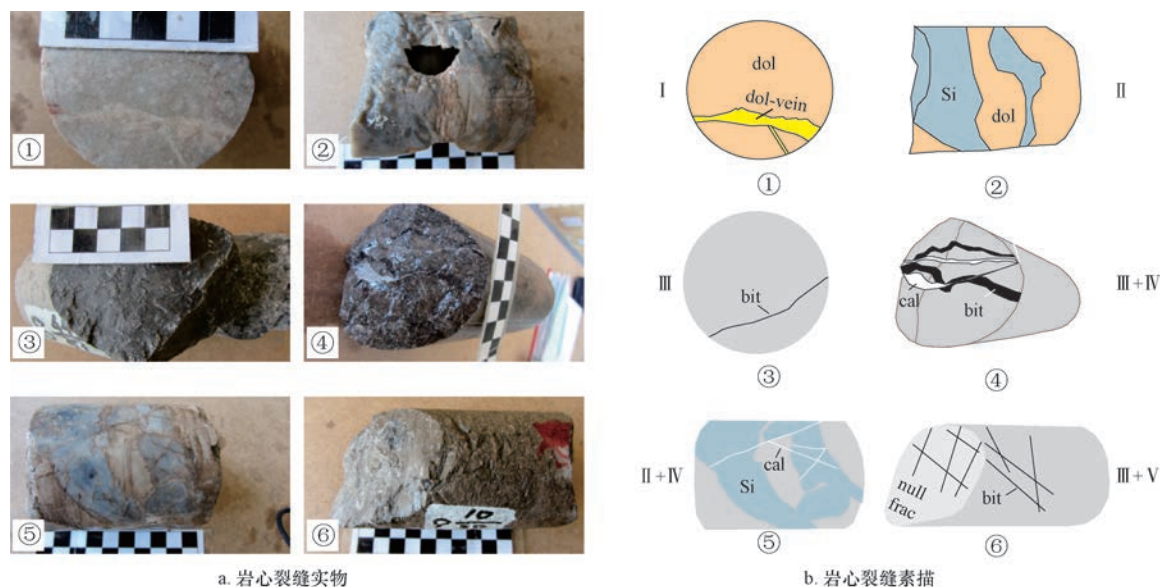


图 10 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统裂缝发育特征(修改自刘格云,2016)^[24]

Fig. 10 Fracture characteristics of the Lower-Middle Ordovician in Yubei area, Tarim Basin (Modified from Liu Geyun, 2016)^[24]

I. 白云石充填缝; II. 硅质充填缝; III. 沥青充填缝; IV. 方解石充填缝; V. 无充填裂缝

从实际勘探效果来看,尽管在玉北7、玉北1和玉北3等不同断裂带上均有钻井,但实际可见裂缝型储层及较好油气显示的钻井仅位于玉北1断裂带(图1)。玉北1断裂带现今水平最大主应力方向为NNE向,与其他断裂带以NW向为主的特征存在明显差异(图11),表明玉北1断裂带在较晚的地质时期中水平最大主应力方向存在偏转,可能是海西晚期及喜马拉雅期裂缝作为有效储集空间发育并在玉北1断裂带成藏的控制因素。

4 储层发育模式

玉北地区蓬莱坝组沉积时期,整体为局限台地向开阔台地过渡的环境,相对海平面较低,微古地貌高部位在相对海平面下降时反复暴露地表遭受溶蚀,

形成不受单一统一暴露界面控制的小规模的溶洞及铸模孔等,并见顺层溶蚀、示顶底充填等现象,溶洞规模以岩心尺度厘米级溶洞为主,而古地貌低部位则溶蚀较弱或不发生溶蚀作用(图12)。鹰山组时期,相对海平面整体升高,沉积环境演变为开阔台地^[25],准同生溶蚀作用持续发育,但相对于蓬莱坝组发育程度有所减弱,多以薄片尺度毫米级的溶蚀孔洞为主;该时期断裂活动较强,且加里东中期具有冲断性质的断裂导致局部地层隆起,有利于溶蚀作用的发生。主要发育于蓬莱坝组和鹰山组下段的白云岩以准同生阶段及浅埋藏阶段的白云岩化为主,白云岩化一方面对早期形成的裂缝产生了少量胶结充填,对储层具有破坏作用,另一方面增强了岩石的抗压实压溶能力,有利于准同生溶蚀孔洞的保存,从而对储层具有贡献作用。

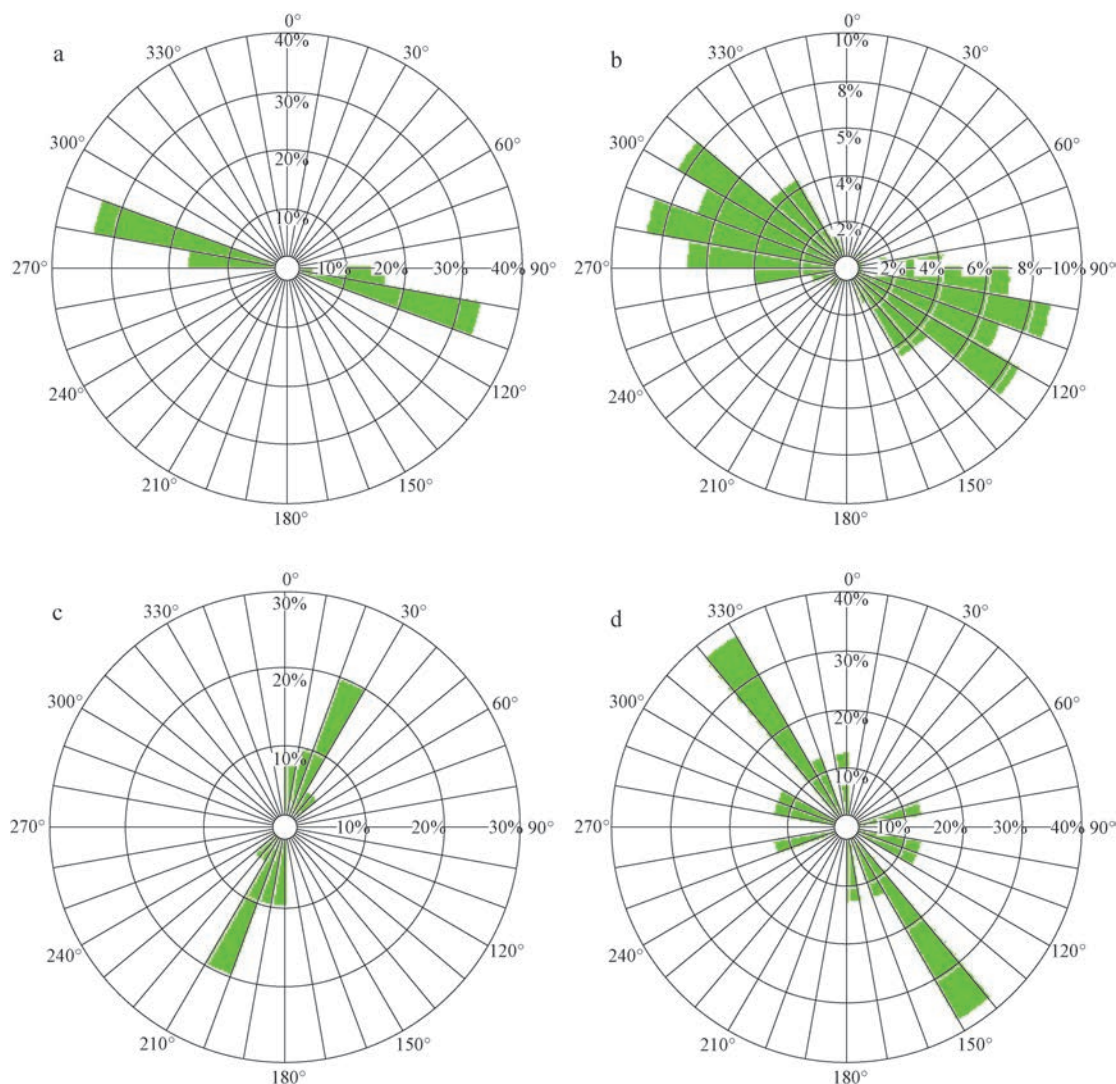


图11 塔里木盆地玉北地区诱导缝走向玫瑰花图

Fig. 11 Rose diagrams of induced fractures in Yubei area, Tarim Basin

a. 玉北4井; b. 玉北7井; c. 玉北1井; d. 玉北3井

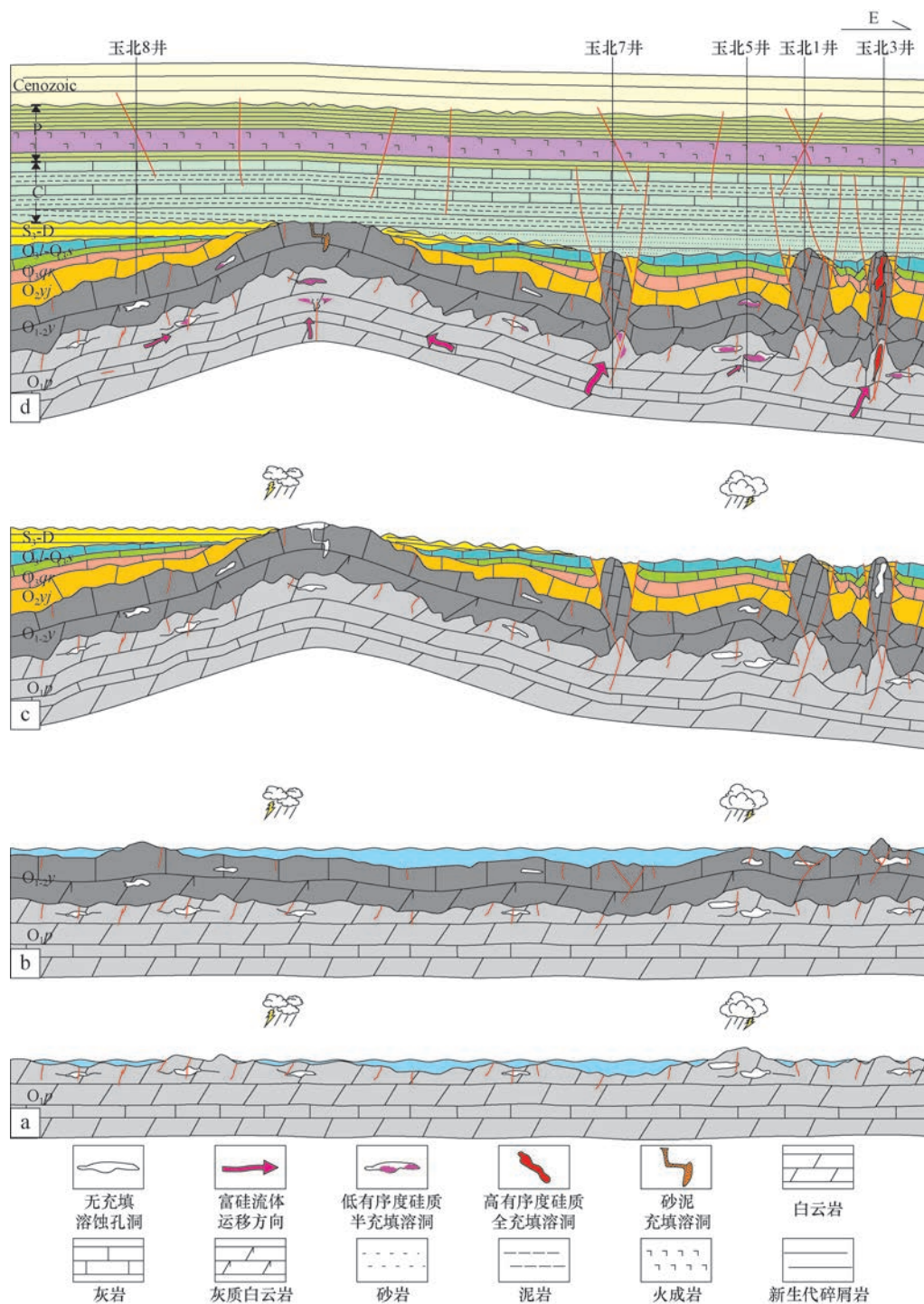


图 12 塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层发育模式

Fig. 12 Development patterns of the Lower-Middle Ordovician carbonate reservoirs, Yubei area, Tarim Basin

a. 蓬莱坝组:微古地貌控制的准同生溶蚀为主,玉北 5 井古地貌高部位准同生溶蚀孔洞发育;b. 鹰山组:准同生溶蚀继续发育,升高的相对海平面导致鹰山组溶蚀孔洞发育程度降低,玉北 3 井等受断裂夹持导致隆升的部位溶蚀程度较强,准同生及渗透回流的白云石化有利于早期孔洞的保存;c. 加里东晚期—海西早期:发育大规模的暴露不整合,表生岩溶型储层发育较差或后期保存较差,断裂、裂缝等发育;d. 海西晚期—喜马拉雅期:富硅流体活动充填-半充填早期孔洞和裂缝,后期断裂活动形成有效储集空间

中-晚奥陶世至泥盆纪时期为加里东晚期—海西早期构造运动,区域上形成大规模暴露不整合,具有形成风化壳岩溶的背景条件^[26-28],但从实际勘探中并未见到典型风化壳岩溶型储层,可能是后期保存较差;该

时期断裂活动较加里东中期有所减弱。

石炭纪至新生代为海西晚期—喜马拉雅期构造运动,二叠纪热液活动及之后的硅质流体活动对早期形成的储集空间具有一定破坏作用,硅质充填-半充填

早期溶洞;海西晚期及喜马拉雅期断裂活动较弱,但由于经历的成岩改造较少,因而更易作为有效储集空间保存下来,玉北1断裂带在晚期构造运动中存在最大主应力方向的偏转,可能是导致油气在玉北1断裂带中富集成藏的因素之一^[29]。

5 结论

玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩中主要发育溶洞型、溶孔型、裂缝-溶蚀孔洞型、溶蚀孔洞-裂缝型和裂缝型等五种储层类型,以裂缝和溶洞为主。控制储层发育和改造过程的因素较多。蓬莱坝组沉积期的准同生溶蚀作用导致溶蚀孔洞较为发育,到鹰山组沉积期随相对海平面的升高,溶蚀作用有所减弱,总体而言中-下奥陶统的准同生溶蚀作用对储层具有重要的基础性贡献。准同生及浅埋藏阶段的白云岩化作用一方面对储层具有轻微的充填破坏作用,另一方面由于增强了岩石的抗压实压溶能力有利于准同生溶蚀孔洞的保存,从而对储层产生了间接贡献。二叠纪之后的硅质流体活动部分充填了早期的溶蚀孔洞和裂缝,对储层具有一定的破坏作用。海西晚期及喜马拉雅期断裂活动由于经历了较少的成岩改造,可能对裂缝型储层具有主要的贡献作用。

参 考 文 献

- [1] 刘忠宝,高山林,岳勇,等.塔里木盆地麦盖提斜坡奥陶系储层成因与分布[J].石油学报,2014,35(4):654-663.
Liu Zhongbao, Gao Shanlin, Yue Yong, et al. Formation and distribution of the Ordovician reservoir in Maigaiti slope, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 654-663.
- [2] 郝建龙,余腾孝,曹自成,等.塔里木盆地玉北地区成藏主控因素与油气富集规律[J].新疆地质,2014,32(3):344-350.
Hao Jianlong, Yu Tengxiao, Cao Zicheng, et al. Study of the main factors controlling hydrocarbon accumulation and the regularity of hydrocarbon enrichment in Yubei area of Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(3): 344-350.
- [3] 刘忠宝,吴仕强,刘士林,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系储层类型及主控因素[J].石油学报,2013,34(4):638-646.
Liu Zhongbao, Wu Shiqiang, Liu Shilin, et al. Types and main controlling factors of Ordovician reservoirs in Yubei area, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 638-646.
- [4] 李映涛,袁晓宇,叶宁,等.塔里木盆地玉北地区鹰山组储层特征及主控因素[J].海相油气地质,2014,19(4):9-18.
Li Yingtao, Yuan Xiaoyu, Ye Ning, et al. Reservoir characterization and controlling factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan reservoir in Yubei area, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(4): 9-18.
- [5] 钱一雄,余腾孝,周凌方,等.麦盖提斜坡东部构造带奥陶系岩

- 相、成岩作用带与储层成因[J].石油与天然气地质,2014,35(6):870-882.
Qian Yixiong, Yu Tengxiao, Zhou Lingfang, et al. Lithofacies, diagenesis zone and reservoir origin of the Ordovician in eastern tectonic belt of the Maigaiti slope [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 870-882.
- [6] 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(2):170-174.
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 & Gas Field, 2013(2): 170-174.
- [7] 崔军文.南阿尔金断裂的韧性剪切作用时代及其构造意义[J].岩石学报,2011,27(11):3422-3434.
Cui Junwen. Ductile shearing age of the south Altun fault and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3422-3434.
- [8] 游声刚.塔里木盆地玉北地区古构造演化对奥陶系岩溶储层的控制作用[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
You Shenggang. Controlling effect of Paleotectonic evolution on Ordovician karst reservoir in Yubei area of Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [9] 陈刚,汤良杰,余腾孝,等.塔里木盆地玉北冲断带分期活动特征及其控油作用[J].中国矿业大学学报,2014,43(5):870-879.
Chen Gang, Tang Liangjie, Yu Tengxiao, et al. Poly-phase fault activities and the control on hydrocarbon accumulation of Yubei thrust belt, Tarim basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 870-879.
- [10] 刘红光.塔里木盆地玉北地区奥陶系碳酸盐岩成岩期流体活动及控储机理[D].北京:北京大学,2017.
Liu Hongguang. Fluid activities in diagenetic process and the control mechanisms on Ordovician carbonate reservoirs in the Yubei Area, Tarim Basin [D]. Beijing: Peking University, 2017.
- [11] 乔桂林,钱一雄,曹自成,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系鹰山组储层特征及岩溶模式[J].石油实验地质,2014,36(4):416-421.
Qiao Guilin, Qian Yixiong, Cao Zicheng, et al. Reservoir characteristics and karst model of Ordovician Yingshan Formation in Yubei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 416-421.
- [12] 吴礼明,蒋海军,林新,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系岩溶作用[J].新疆地质,2015,33(4):504-509.
Wu Liming, Jiang Haijun, Lin Xin, et al. Karstification of the ordovician in YuBei area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(4): 504-509.
- [13] 赵宗举,潘文庆,张丽娟,等.塔里木盆地奥陶系层序地层格架[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):175-188.
Zhao Zongju, Pan Wenqing, Zhang Lijuan, et al. Sequence stratigraphy in the Ordovician in the Tarim Basin [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(1): 175-188.
- [14] 郭颖,汤良杰,岳勇,等.旋回分析法在地层剥蚀量估算中的应用—以塔里木盆地玉北地区东部中下奥陶统鹰山组为例[J].中

- 国矿业大学学报, 2015, 44(004): 664 – 672.
- Guo Ying, Tang Liangjie, Yue Yong, et al. Application of cycle analysis method to estimate the denuded strata thickness: a case study of Middle-Lower Ordovician Yingshan formation of the eastern Yubei area, Tarim basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 664 – 672.
- [15] 韩银学, 李忠, 刘嘉庆, 等. 塔里木盆地鹰山组灰岩白云石化成因及其对储层的影响[J]. 地质科学, 2013, 48(2): 721 – 731.
- Han Yinxue, Li Zhong, Liu Jiaqing, et al. Genesis of dolomites in limestone of Yingshan Formation and their effects on poroperm characteristics of carbonate reservoir in Tahe area [J]. Scientia Geologica Sinica, 2013, 48(3): 721 – 731.
- [16] 焦健, 李映涛, 张哨楠, 等. 塔里木盆地玉北地区蓬莱坝组鞍形白云石地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 99 – 107.
- Jiao Jian, Li Yingtao, Zhang Shaonan, et al. Geochemical features of saddle dolomites in the Penglaiba Formation, Yubei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 99 – 107.
- [17] 陈永权, 周新源. 塔里木盆地中寒武统一奥陶统泥晶灰岩地球化学与古海洋学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 47 – 52.
- Chen Yongquan, Zhou Xinyuan. Geochemical characteristics of middle Cambrian-early Ordovician limestone and paleo-ocean reconstruction based on $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and rare earth elements, Tarim Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(1): 47 – 52.
- [18] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10): 1787 – 1816.
- [19] Allen P, Keith M L. Carbon isotope ratios and palaeosalinities of Purbeck-Wealden carbonates [J]. Nature, 1965, 208(5017): 1278 – 1280.
- [20] 王兵杰, 蔡明俊, 林春明, 等. 渤海湾盆地塘沽地区古近系沙河街组湖相白云岩特征及成因[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 65 – 76.
- Wang Bingjie, Cai Mingjun, Lin Chunming, et al. Characteristics and origin of lacustrine dolostone of the Paleogene Shahejie Formation in Tangu area, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 65 – 76.
- [21] 刘红光, 刘波, 吴双林, 等. 塔里木盆地玉北地区蓬莱坝组白云岩类型及成因[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1233 – 1242.
- Liu Hongguang, Liu Bo, Wu Shuanglin, et al. The types and origin of the Penglaiba Formation dolomite in the Yubei area, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1233 – 1242.
- [22] Shields G A, Carden G A, Veizer J, et al. Sr, C and O isotope geochemistry of Ordovician brachiopods: a major isotopic event around the Middle-Late Ordovician transition [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(11): 2005 – 2025.
- [23] 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.
- Huang Taizhu. Analysis on the fault system of Yubei region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 98 – 106.
- [24] 刘格云. 塔里木盆地玉北地区奥陶系沉积 – 构造 – 流体耦合与控储机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- Liu Geyun. Coupling relationships of sediments-structures-fluids and their control on reservoir development in the Ordovician of Yubei Area, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [25] 赵宗举. 全球海平面变化指标及海相构造层序研究方法——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 262 – 273.
- Zhao Zongju. Indicators of global sea-level change and research methods of marine tectonic sequences: take Ordovician of Tarim Basin as an example [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(3): 262 – 273.
- [26] 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等. 塔里木盆地巴楚 – 麦盖提地区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.
- Ly 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.
- [27] 郭光辉, 李洪辉, 张立平, 等. 塔里木盆地麦盖提斜坡奥陶系风化壳成藏条件[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 144 – 153.
- Wu Guanghui, Li Honghui, Zhang Liping, et al. Reservoir-forming conditions of Ordovician weathering crust in the Maigaiti slope, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 144 – 153.
- [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.
- 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(8): 2542 – 2556.
- [29] 刘红光, 刘波, 张学丰, 等. 塔里木盆地玉北地区中 – 下奥陶统碳酸盐岩成岩作用类型及演化[J/OL]. 北京大学学报(自然科学版): 1 – 11 (2017 – 08 – 01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2442.n.20170801.0945.001.html>. DOI: 10.13209/j.0479 – 8023.2017.135.
- Liu Hongguang, Liu Bo, Zhang Xuefeng, et al. The diagenesis types and evolution of the Lower-Middle Ordovician carbonates in Yubei area, Tarim Basin [J/OL]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis: 1 – 11 (2017 – 08 – 01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2442.n.20170801.0945.001.html>. DOI: 10.13209/j.0479 – 8023.2017.135.

(编辑 董立)