

# 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

刘红光<sup>1,2</sup> 刘波<sup>2,†</sup> 张学丰<sup>2</sup> 曹鉴华<sup>3</sup> 黄臣军<sup>1,2</sup> 刘格云<sup>4</sup> 吴双林<sup>1,2</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; 3. 天津科技大学  
计算机科学与信息工程学院, 天津 300222; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

† 通信作者, E-mail: bobliu@pku.edu.cn

**摘要** 为恢复塔里木盆地玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩的成岩演化历史, 通过岩芯观察、薄片观察、地球化学分析等工作, 针对溶蚀作用、白云石化作用、硅化作用和破裂作用等开展研究, 并将成岩历史划分为4个阶段。由于海平面的波动, 地貌高部位在相对海平面较低时短暂地暴露在地表, 以颗粒结构为主的灰岩在沉积后不久发生准同生溶蚀作用, 形成顺层发育的溶洞及结构选择性溶孔等。主要发育于早成岩阶段的白云石化作用增强了岩石的抗压实压溶能力, 有利于孔洞的保存; 此外, 早成岩阶段的加里东中-晚期及海西早期构造运动导致裂缝较为发育, 但由于经历了复杂的压实及胶结作用过程, 裂缝多呈封闭或充填状态, 未形成有效的储集空间。中成岩阶段的热液活动以产出具波状消光和鞍形结构的白云石和黄铁矿为特征, 热液活动总体上较弱, 对先期形成的孔洞和裂缝具有轻微的充填破坏作用。晚成岩阶段的硅质流体及钙质流体活动部分地充填早期的孔洞, 在区域内对储层具有破坏作用; 晚成岩阶段的海西晚期及喜山期裂缝活动弱于早成岩阶段的裂缝活动, 但由于经历的成岩改造作用较弱, 这些晚期裂缝多为开启状态, 在喜山期油气调整阶段具有一定的输导和储集作用。

**关键词** 玉北地区; 中-下奥陶统; 碳酸盐岩; 成岩序列; 孔隙

**中图分类号** P581

## Diagenesis Types and Evolution of the Lower-Middle Ordovician Carbonates in Yubei Area, Tarim Basin

LIU Hongguang<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>2,†</sup>, ZHANG Xuefeng<sup>2</sup>, CAO Jianhua<sup>3</sup>, HUANG Chenjun<sup>1,2</sup>,  
LIU Geyun<sup>4</sup>, WU Shuanglin<sup>1,2</sup>

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871;  
3. College of Computer Science and Information Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222;  
4. School of the Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

† Corresponding author, E-mail: bobliu@pku.edu.cn

**Abstract** The Lower-Middle Ordovician carbonate rocks are studied by core observation, thin section observation, geochemical analysis to restore the diagenetic evolution history of the Yubei area, Tarim Basin. Dissolution, dolomitization, silicification and cataclasis are studied and the diagenetic evolution history is divided into four stages. The grained texture dominated limestone in the relative geomorphic high location exposes to the ground and undergoes penecontemporaneous dissolution due to the fluctuation of the sea level. Caves and pores with structural selectivity parallel to the sedimentary bed are generated by the penecontemporaneous dissolution. The dolomitization developed mainly in early diagenetic stage enhances the resistance of carbonates to compaction and pressure

国家自然科学基金(41572117)、中国石油化工股份有限公司科技开发部项目(P14128, P16112)和中国地质调查局项目(DD20160175-1-1)资助

收稿日期: 2017-01-04; 修回日期: 2017-06-20; 网络出版日期: 2017-08-01

solution, which benefits the preservation of early pores and caves. The fractures formed during the Middle-Late Caledonian and Early Hercynian in this stage are mostly closed and filled due to complicated compaction and cementation. Hydrothermal activity in middle diagenetic stage damages the reservoir slightly by the presence of pyrite and dolomite with wavy extinction and saddle structure in the reservoir space. The late diagenetic stage is characterized by the silica and calcareous fluid activity, which fill the early space partially. The development degree of fractures formed during Late Hercynian and Himalayan epoch is weaker than early diagenetic stage. However, the fractures formed during late diagenetic stage keep open due to weak diagenetic transformation and become efficient migration channel and reservoir spaces in Yubei area.

**Key words** Yubei area; Lower-Middle Ordovician; carbonate; diagenetic sequence; pore

奥陶系是塔里木盆地碳酸盐岩油气勘探的重要目的层,近年来在塔北、塔中等地区取得不同程度的突破。对塔北地区岩溶缝洞型储层及塔中地区礁滩体岩溶型储层为主的储层类型已有较多研究<sup>[1-3]</sup>,也充分显示塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩具有良好的储集能力及勘探前景。

玉北地区位于塔里木盆地西南部麦盖提斜坡,受塔西南古隆起及多幕构造运动影响,具有岩溶储层和裂缝储层发育的潜在背景条件<sup>[4-7]</sup>。2010年,麦盖提1区块的玉北1井获得奥陶系油气突破,随后在玉北1井构造带之上的玉北1-2X井等多口评价井中获得高产油气流<sup>[8-9]</sup>。但是,在随后的勘探过程中,完钻的26口钻井储层发育情况及含油气性存在很大差异,表明储层存在较大的非均质性。复杂的成岩作用和构造活动对于储层非均质性的形成具有重要控制作用。现有的针对玉北地区的研究

主要集中于沉积层序、断裂活动、岩溶作用、白云岩化等特定问题<sup>[4,10-13]</sup>,有关成岩作用的系统梳理以及成岩作用对储层演化的动态影响研究尚未深入开展。本文旨在通过玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩成岩演化的系统研究,探讨其对孔隙变化和储层发育的影响,为下一步勘探提供参考。

## 1 地质背景

### 1.1 构造背景

玉北地区位于塔里木盆地麦盖提斜坡东南部,北邻巴楚隆起南缘的海米-罗斯断裂带、罗南断裂带和玛扎塔格断裂带,西南与叶城坳陷相邻,东南延伸至塘古巴斯坳陷(图1)。麦盖提斜坡中东部在古生代和中生代发育和田古隆起,其构造演化经历了早加里东期形成雏形、加里东中期至海西早期持续隆升、海西中晚期埋藏沉降、印支-喜山期掀斜

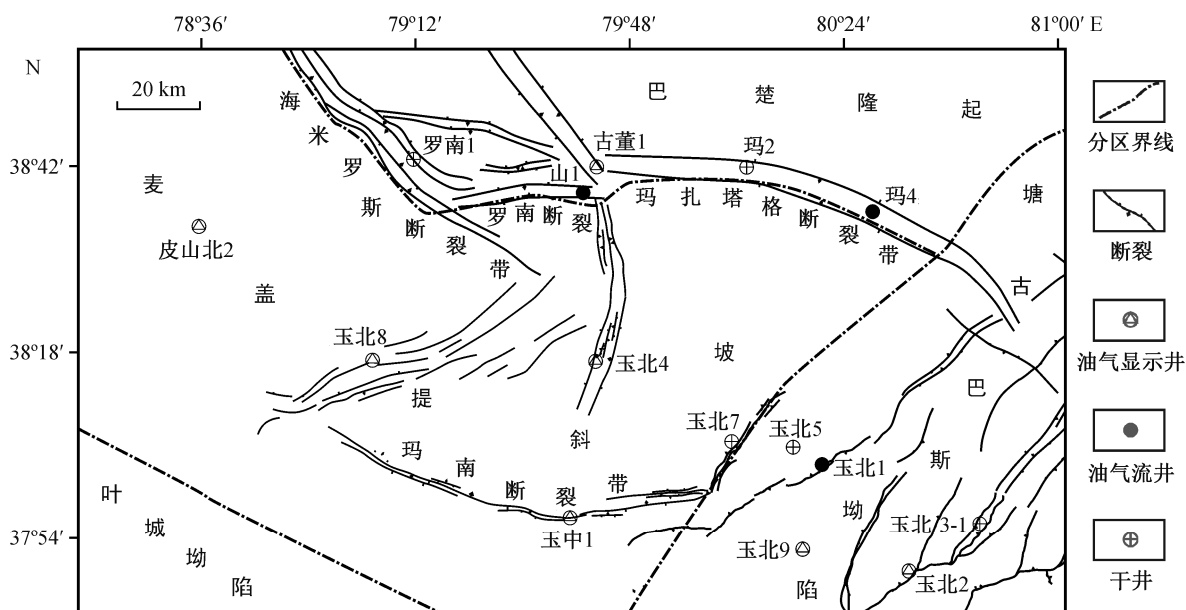


图1 塔里木盆地玉北地区构造简图  
Fig. 1 Structure outline map in Yubei area



消失4个阶段。加里东期至海西早期和田古隆起的持续活动对于玉北地区中-下奥陶统的沉积、剥蚀及断裂发育影响显著,导致在区域内形成加里东中期、加里东晚期和海西早期等3期风化壳<sup>[6,14]</sup>。

在塔里木盆地南缘板块俯冲产生的区域应力场以及和田古隆起的持续影响下,玉北地区发育加里东早期、加里东中期早幕、加里东中期 I 幕、加里东中期 III 幕、加里东晚期至海西早期、海西晚期以及喜山期等7期断裂作用,各期断裂活动间具有继承性,且具有分区段差异性发育特征,早期断裂活动强于晚期,东部断裂活动强于西部,海西晚期和喜山期断裂活动有利于成藏或油气调整<sup>[7,15-16]</sup>。

## 1.2 沉积地层及岩相特征

塔里木盆地西部台地的中-下奥陶统自下而上分为蓬莱坝组和鹰山组,中-上奥陶统地层发育情况在不同地区存在较大差异,东部断裂带内钻井缺失中-上奥陶统,东部断褶带内钻井中-上奥陶统发育较为完全,中西部地区钻井部分或完全缺失中-上奥陶统。玉北地区蓬莱坝组主要为白云岩和灰质白云岩,含少量砂屑灰岩;鹰山组下段仍以白云岩为主,向上逐渐向灰岩过渡;鹰山组上段以颗粒灰岩或泥晶灰岩为主,仍有白云岩发育(图2)。

不同学者依据主要岩石类型及测井曲线特征,结合区域沉积演化特征,将玉北地区中-下奥陶统划分出潟湖、潮上-潮间带、潮下低能带、砂屑滩、藻滩、滩间海等不同亚相<sup>[17-18]</sup>,尽管不同的划分方案对不同层段的沉积相划分存在差异,但整体规律均为从蓬莱坝组到鹰山组,沉积环境从局限台地逐渐变为开阔台地,相对海平面逐渐升高。

## 2 成岩作用类型及特征

通过岩芯观察、薄片分析和成像测井资料分析,在玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩中识别出多种成岩作用类型,主要包括准同生溶蚀作用、白云石化作用、硅化作用和破裂作用。

### 2.1 准同生溶蚀作用

玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩中溶蚀孔洞发育,在钻井过程中出现放空、漏失等现象。孔洞发育特征在蓬莱坝组和鹰山组有所不同,蓬莱坝组以岩芯尺度的溶洞为主。从成像测井和岩芯来看,孔洞具有顺层发育的特征,且孔洞与裂缝的位置在空间上没有相关性(图3(a)和(b)),表明其成因不是裂

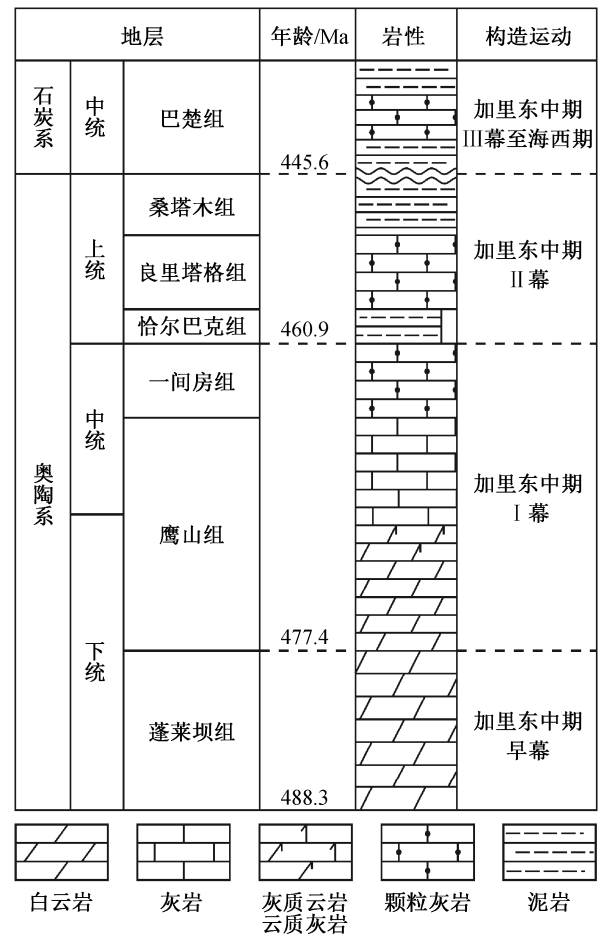
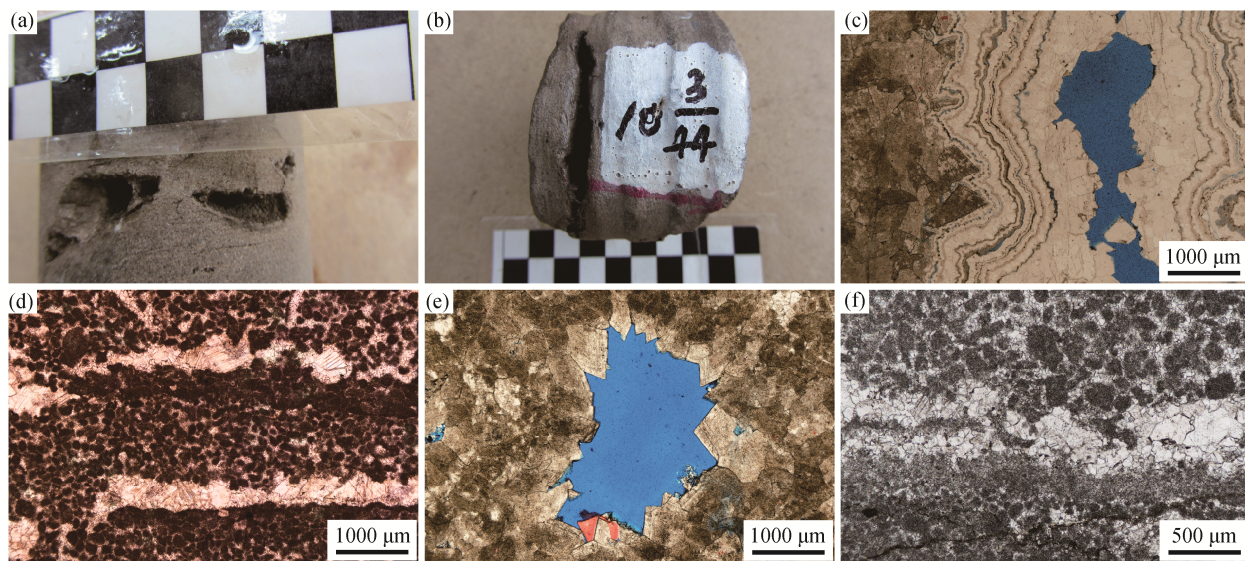


图2 玉北地区沉积综合柱状图

Fig. 2 Sedimentary comprehensive histogram in Yubei area

缝沟通流体导致的溶蚀作用。从薄片特征来看,孔洞边缘的白云石边界完整平直,不存在溶蚀现象(图3(c)),表明溶蚀孔洞的形成早于白云石化。鹰山组溶蚀孔洞尺度较小,以薄片尺度的顺层溶蚀孔洞、残余铸模孔等为主(图3(d)和(e)),部分顺层溶蚀孔洞内具有示顶底充填特征,溶洞下部充填泥晶方解石,向上顺序过渡为细粒亮晶方解石和粗粒亮晶方解石胶结物(图3(f)),原始颗粒灰岩形成的铸模孔在后期白云石化过程中得以保存,在铸模孔边缘的白云石自形程度高,边界平直。上述小规模孔洞顺层发育、示顶底充填、选择性溶蚀等现象均是准同生期溶蚀作用的典型特征。

准同生溶蚀作用是由于小幅度的相对海平面下降所致(图4),古地貌中的高部位短暂露出地表,发生小规模溶蚀作用,而古地貌中的低部位始终处于海平面之下,不发生溶蚀作用或者溶蚀作用较弱。由于中寒武统阿瓦塔格组发育一套稳定分布的膏盐



(a) 玉北 5 井, 蓬莱坝组, 6741.61 m, 白云岩中顺层发育溶洞, 溶洞内半充填硅质; (b) 玉北 5 井, 蓬莱坝组, 6839.53 m, 白云岩中顺层发育溶洞; (c) 玉北 5 井, 蓬莱坝组, 粗晶白云岩, 溶洞发育, 溶洞边缘的白云石自形晶无溶蚀现象, 表明溶蚀作用早于白云石化; (d) 玉北 1 井, 鹰山组, 亮晶砾屑砂屑灰岩, 发育具顺层特征的溶蚀孔洞, 被方解石胶结; (e) 玉北 6A 井, 鹰山组, 中-粗晶白云岩, 见原始颗粒灰岩中发育的铸模孔, 在白云石化过程中得以保存, 孔洞边缘白云石自形程度高; (f) 玉北 9 井, 鹰山组, 亮晶砂屑灰岩, 顺层发育的溶洞内具示顶底充填特征

图 3 玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩溶蚀孔洞发育特征

Fig. 3 Characters of caves and pores developed in Lower-Middle Ordovician carbonates in Yubei area

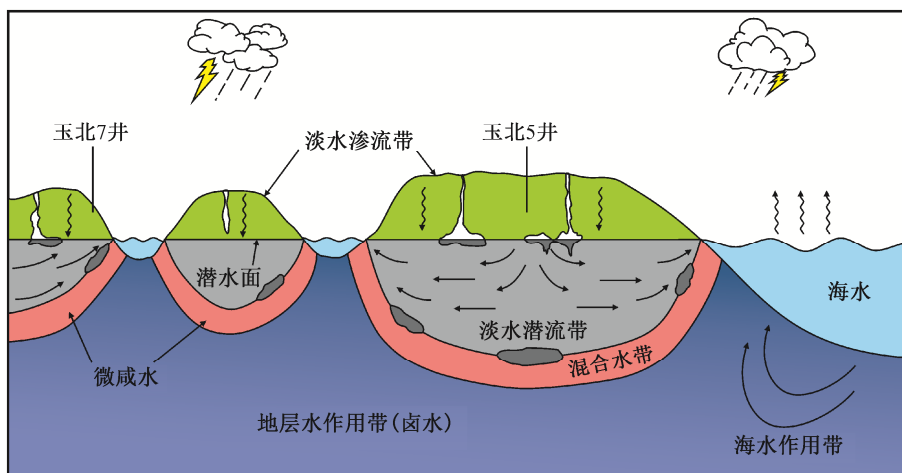


图 4 玉北地区准同生溶蚀作用模式

Fig. 4 Penecontemporaneous dissolution model in Yubei area

岩, 容易识别和对比, 且研究区蓬莱坝组与下伏寒武系之间为整合接触, 故采用残余厚度法恢复古地貌, 用上寒武统下丘里塔格组和下奥陶统蓬莱坝组地层的总厚度近似地表示下奥陶统沉积期的古地貌特征(图5)。由于东区断裂发育较强的部分难以进行准确的古地貌恢复, 因此东区深蓝色断褶带部分不代表实际古地貌特征。古地貌恢复结果表明, 玉北5井当时的位置比玉北7井高出大约 210 m, 这与岩芯和成像测井观察到的玉北5井蓬莱坝组溶蚀孔

洞发育程度明显好于玉北7井的特征相符。同时, 其他学者均认为从蓬莱坝组到鹰山组, 沉积环境从局限变为开阔, 相对海平面逐渐升高, 也与蓬莱坝组的溶蚀孔洞发育尺度大于鹰山组的特征相吻合。

## 2.2 白云石化作用

玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩中白云石可分为 3 种类型: 大规模块状产出的白云石、沿缝合线分布的白云石和充填缝洞的白云石(图6)。

大规模块状产出的白云石是玉北地区中-下奥



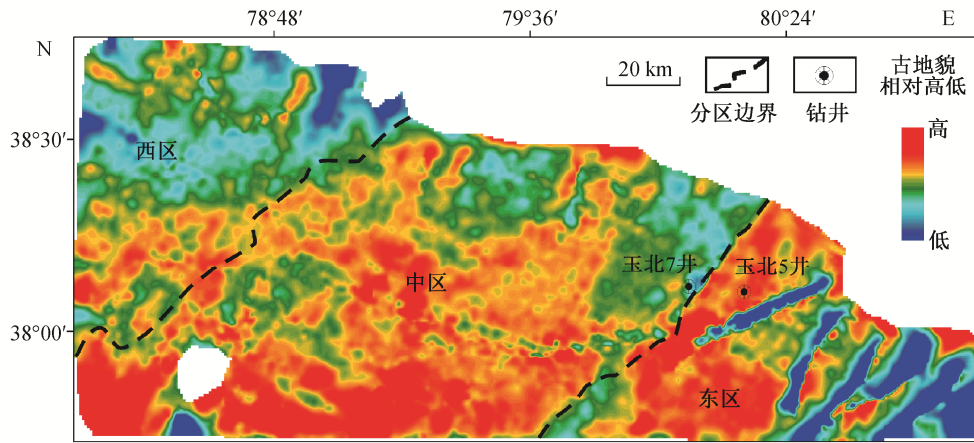
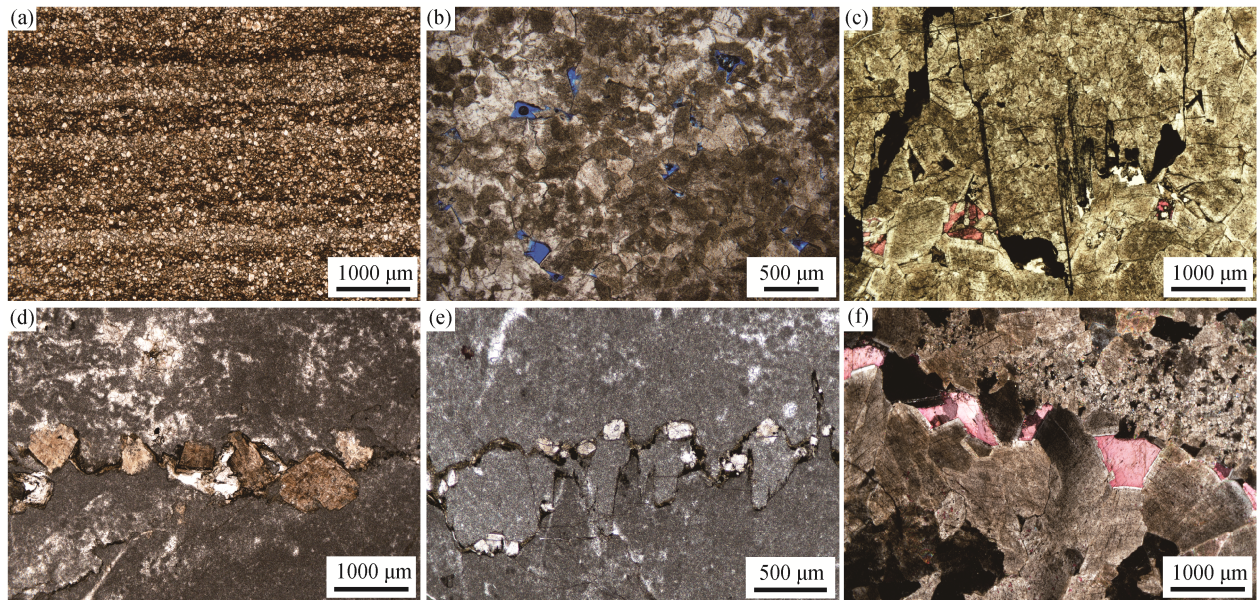


图5 玉北地区蓬莱坝组古地貌

Fig. 5 Ancient geomorphology of Penglaiba Formation in Yubei area



(a) 玉北5井, 蓬莱坝组, 粉晶白云石, 具纹层; (b) 玉北6A井, 鹰山组, 中-粗晶白云石, 具残余颗粒结构; (c) 玉北5井, 蓬莱坝组, 粗晶白云石; (d) 玉北3井, 鹰山组, 泥晶灰岩中缝线发育, 沿缝线分布少量白云石; (e) 玉北6A井, 鹰山组, 云质亮晶砂屑灰岩, 沿缝线有白云石产出; (f) 玉北3井, 鹰山组, 粗晶白云石, 孔洞边缘的白云石为鞍形, 具波状消光

图6 玉北地区中-下奥陶统白云石类型及特征

Fig. 6 Dolomite types and characters of Lower-Middle Ordovician in Yubei area

陶统白云石的主要类型, 按照晶粒大小、晶体结构类型可进一步细分为纹层状粉-细晶白云石、中晶自形-半自形白云石、粗晶自形-它形白云石。这3类白云石的氧同位素组成均表现出海水流体导致的白云石化特征, 但是, 对于相同成因的白云石, 随着结晶程度增加, 由于  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  的离子半径小于  $\text{Ca}^{2+}$ , 更易占据  $\text{Ca}^{2+}$  的位置, 因此富集在碳酸盐矿物中;  $\text{Sr}^{2+}$  的离子半径大于  $\text{Ca}^{2+}$ , 在成岩过程中,  $\text{Sr}^{2+}$  会趋向于进入流体相而在碳酸盐中逐渐减少<sup>[19]</sup>。

对不同类型的白云岩样品进行主量元素测试, 并以各元素含量最大值为标准值, 分别进行归一化处理, 以便观察不同类型样品元素含量的变化趋势, 进行 Fe, Mn, Sr 含量变化幅度的对比(图7)。从测试结果看, 粉-细晶白云石中 Fe 和 Mn 含量高于中晶白云石和粗晶白云石, 表明前者具有与后两者不同的成因机制。粉-细晶白云石在手标本和薄片尺度均具纹层(图6(a))、 $\delta^{18}\text{O}$  偏正值、成岩温度( $T$ )和有序度偏低等特征(图7), 显示其为准同生白云石化产

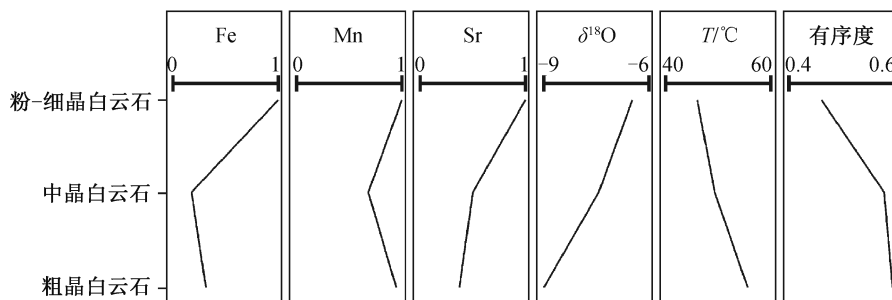


图 7 玉北地区中-下奥陶统不同白云石类型地球化学变化特征

Fig. 7 Geochemistry trends of different dolomite types of Lower-Middle Ordovician in Yubei area

物;中晶白云石和粗晶白云石的残余颗粒结构及较高的成岩温度和有序度等特征则指示其为浅埋藏环境下海水渗透回流导致的白云石化产物。

对于沿缝合线分布的白云石,白云石与缝合线在产状上的相关性表明缝合线应是白云石化流体运移的通道。玉北地区中-下奥陶统地层经历了比较复杂的成岩作用,缝合线作为流体运移通道的有效性最可能在缝合线形成后、未被后续压实作用和胶结作用堵塞前成立,因而此类白云石的形成时间应该相对较早,与缝合线的形成时期和深度大致相同。文献[20-21]报道塔里木盆地奥陶系此种类型的白云石均出现在鹰山组。阴极发光测试及岩石学和地球化学分析表明,白云石化发生于浅-中埋藏环境,富  $Mg^{2+}$  流体来源于孔隙中的残留海水和高镁方解石转化为方解石过程中释放的  $Mg^{2+}$ ,但这两种来源均难以提供足够的  $Mg^{2+}$ ,导致此类白云石化规模较小<sup>[22]</sup>。

充填缝洞的白云石相对较少,多具鞍状结构及波状消光特征。焦健等<sup>[23]</sup>对玉北地区鞍形白云石的元素分析表明,缝洞充填白云石的 Sr 和 Ba 含量均远远高于基质白云石,且其稀土配分模式表现为 Eu 正异常。这些特点指示鞍形白云石的热液成因。

从玉北地区不同岩石类型的物性分析结果可以发现,白云石的孔隙度和渗透率明显高于灰岩(图8)。通过薄片观察,可以将白云石化过程对储层的贡献分为两种,一种是白云石化过程中产生的晶间孔对储层产生的直接贡献,另一种是白云石化过程使得岩石的抗压实压溶能力增强,从而有利于早期准同生溶蚀形成的溶洞、铸模孔的保存而对储层产生的间接贡献(图3(e))。

### 2.3 硅化作用

硅化作用是玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩中

较普遍的成岩作用类型。通过岩芯观察和薄片研究,可将玉北地区的硅质划分为沉积型、充填型和交代型3种产状类型。对于沉积型硅质,在薄片可见硅质层与云质层交互产出的现象(图9(a)),在扫描电子显微镜下可以见到粉-细晶白云岩的晶间孔中均匀充填的硅质(图10),在塔西北野外剖面中也见燧石结核的产出导致围岩碳酸盐岩中发育弯曲层理的现象(图9(b)),这些特征均表明在碳酸盐沉积阶段有沉积型硅质同时产出。对于充填型硅质和交代型硅质,其产出状态包括充填-半充填溶洞及裂缝、充填白云石晶间孔和交代颗粒灰岩等(图9),硅质的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,且散布在硅质中的白云石晶形完好(图3(c)和图9(e)-(f)),表明充填型硅质和交代型硅质的产出晚于白云石化及热液流体活动。

从相态类型来看,沉积型硅质以低有序度相态为主,薄片下多呈隐晶或微晶产出,而充填型硅质和交代型硅质以高有序度相态为主,薄片下多见亮晶石英(图9和图3(c))。不同产状类型硅质的微区地球化学特征十分相近,属同源硅质。硅质的 Th/U 比值为 2.043~3.737 (表1),明显大于1,表明非热液来源<sup>[24-25]</sup>。硅质的 Al 含量较高,在 Al-Fe-Mn 三端元图上位于正常沉积区(图11)。

不同产状类型硅质的地球化学性质指示其具有同源性,均为正常沉积的硅质流体,因此可以推断充填型硅质和交代型硅质是早期沉积型硅质在后期成岩演化过程中活化再沉淀的结果,晚期充填型和交代型硅质的有序度高于早期沉积型硅质的特征也符合漫长的成岩转化过程中结晶速度缓慢导致结晶有序度较高的规律。

### 2.4 破裂作用

在成岩演化过程中,碳酸盐岩常因构造变形发



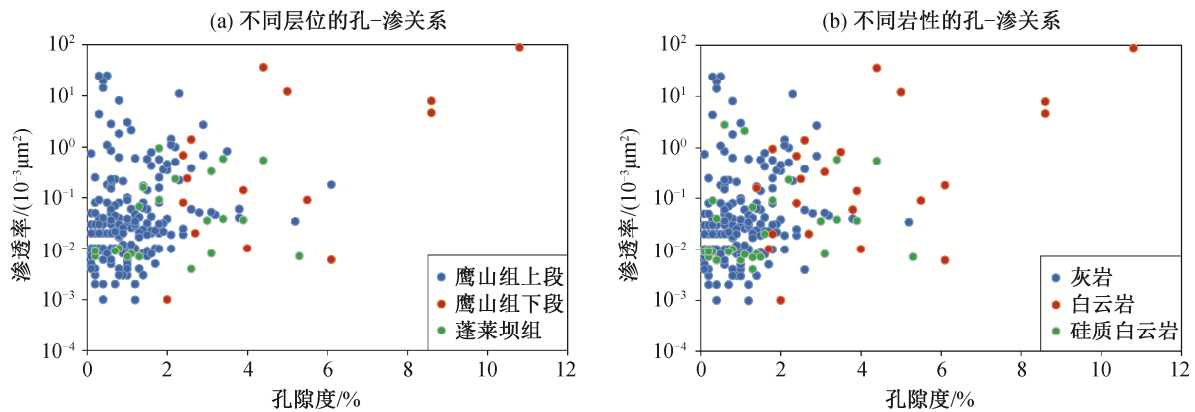
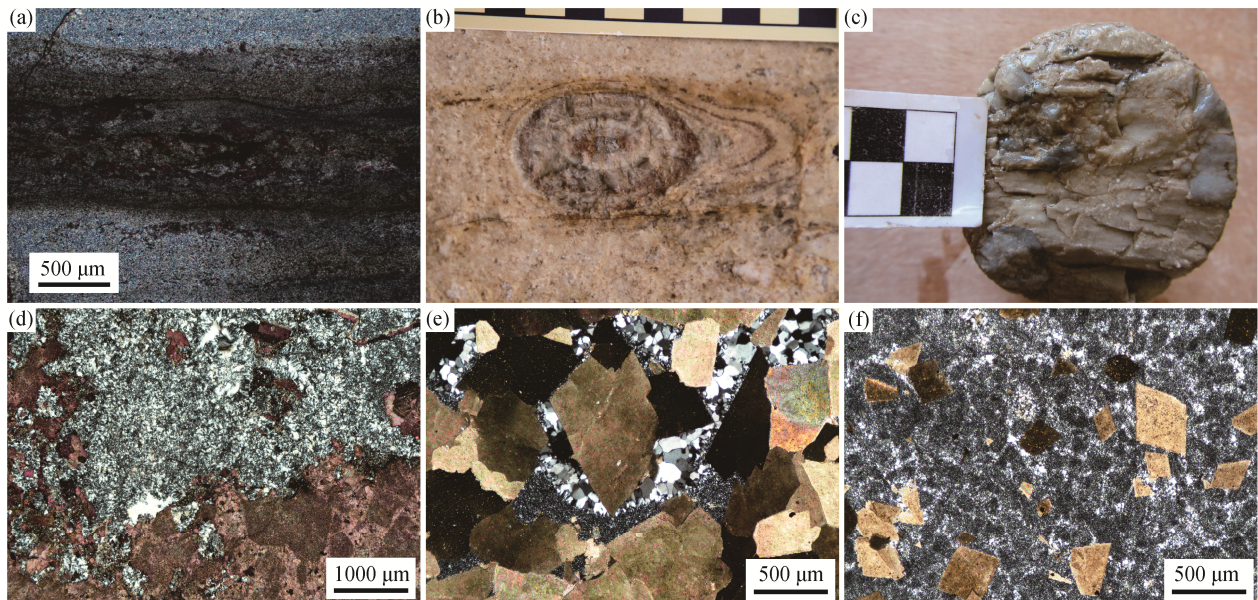


图 8 玉北地区中-下奥陶统的物性特征

Fig. 8 Porosity and permeability characters of Lower-Middle Ordovician in Yubei area



(a) 玉北 3 井, 鹰山组, 硅质层与灰质/云质层互层; (b) 塔西北野外剖面蓬莱坝组, 顺层产出的硅质结核, 结核外部碳酸盐岩地层表现出围绕结核发生弯曲的现象; (c) 玉北 2 井, 鹰山组, 灰岩中产出的团块状硅质; (d) 玉北 2 井, 鹰山组, 灰岩中产出的团块状硅质的薄片特征; (e) 玉北 3 井, 鹰山组, 粗晶白云岩, 白云石具鞍状结构, 白云石晶间孔中充填硅质, 硅质具有从隐晶到亮晶的规律性变化; (f) 玉北 3-1 井, 鹰山组, 交代灰岩颗粒的硅质, 残余原始颗粒结构

图 9 玉北地区中-下奥陶统硅质类型及特征

Fig. 9 Silica types and characters of Lower-Middle Ordovician in Yubei area

生破裂而形成裂缝。玉北地区的断裂具有多期发育的特征, 且断裂活动具有继承性<sup>[27]</sup>。加里东早期基底断裂复活; 加里东中期为主要活动阶段, 受塔里木盆地南缘阿尔金洋俯冲碰撞的影响, 断裂具有强烈冲断的特征; 加里东晚期至海西早期断裂活动减弱, 主要是老断裂低幅度复活及部分新生叠瓦状断裂的发育; 海西晚期和喜山期断裂活动较弱, 以低幅度褶皱为主<sup>[7,11]</sup>。

通过岩芯观察和薄片分析, 可将玉北地区中-

下奥陶统裂缝划分为 5 种类型, 分别为白云石充填缝、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胶结物, 或者二者同期形成, 因此白云石充填缝应在早成岩阶段白云石化作用发生的同时或之前形成, 对应加里东中期构造活动; 硅质充填缝应在中-晚成岩阶段硅质流体活动的同时或之前形成, 由于其晚于以鞍形白云石等为特征的二叠系热液活动(图 9(e)), 因此时代上对应海西晚期构造运动; 沥青充填缝、方

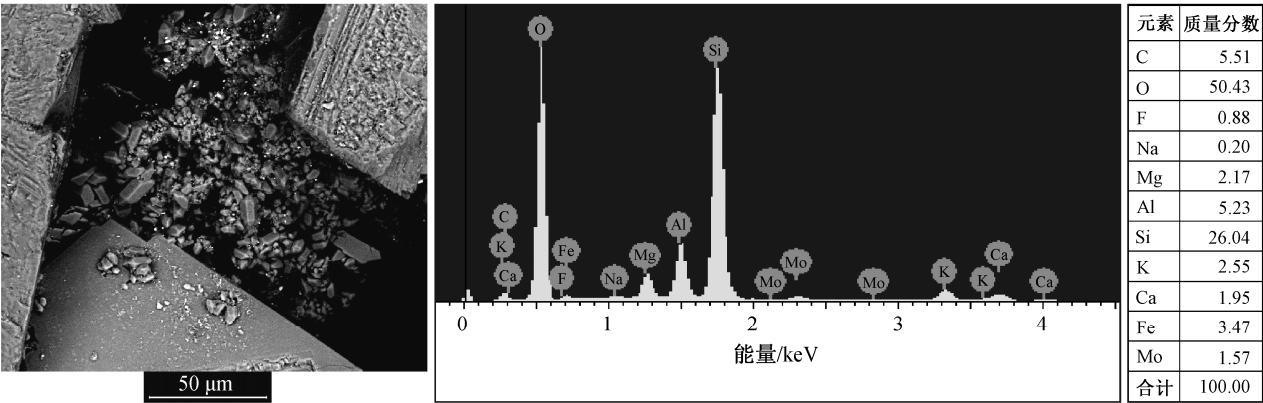


图 10 粉-细晶白云石晶间充填物扫描电子显微镜分析结果

Fig. 10 SEM characteristics of the silica-dominated matrix filled in the inter-crystalline pores of micritic-fine dolomites

表 1 玉北地区硅质的元素含量

Table 1 Element contents of silica in Yubei area

样品号	元素含量/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )					Th/U
	Al	Fe	Mn	Th	U	
S-1	8923.9	2506.1	44.6	1.64	0.48	3.38
S-2	8895.3	2546.5	45.4	1.65	0.49	3.40
S-3	8963.5	2539.4	45.3	1.69	0.48	3.49
S-4	9002.0	2558.6	45.4	1.68	0.50	3.32
S-5	6088.2	1666.5	29.2	1.15	0.56	2.04
S-6	9527.3	2571.6	45.7	1.79	0.50	3.55
S-7	9569.2	2538.6	45.4	1.74	0.51	3.41
S-8	9260.4	2511.0	44.3	1.77	0.47	3.72
S-9	6796.4	1856.0	32.5	1.32	0.51	2.58
S-10	6600.0	1781.4	31.1	1.24	0.48	2.59
S-11	6996.0	1914.9	33.1	1.27	0.52	2.42
S-12	9373.3	2589.6	46.3	1.66	0.49	3.38
S-13	9275.3	2588.3	44.7	1.75	0.47	3.69
S-14	9446.1	2595.0	45.8	1.74	0.49	3.56
S-15	9429.3	2617.7	45.7	1.75	0.47	3.74

解石充填缝及无充填裂缝在晚成岩阶段形成, 时代上对应海西晚期及喜山期构造运动(图12)。上述特征表明, 海西早期及之前的裂缝多被胶结充填而未能形成有效裂缝, 海西晚期及喜山期裂缝由于经历了较弱的胶结作用, 在喜山期油气调整阶段可以起到一定的输导和储集作用。

从实际勘探效果来看, 尽管在玉北 7、玉北 1、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)。通过分析可反映现今水平最大主应力方向

的诱导缝走向玫瑰花图(图13), 可见玉北 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, 表明在较晚的地质时期, 玉北 1 断裂带的水平最大主应力方向存在偏转现象, 这可能是控制玉北 1 断裂带海西晚期及喜山期具储集作用的有效裂缝的发育以及油气聚集成藏的主要因素。

### 2.5 其他成岩作用

除上述主要成岩作用类型外, 玉北地区还广泛发育多期胶结作用及微弱的热液作用等。其中, 胶

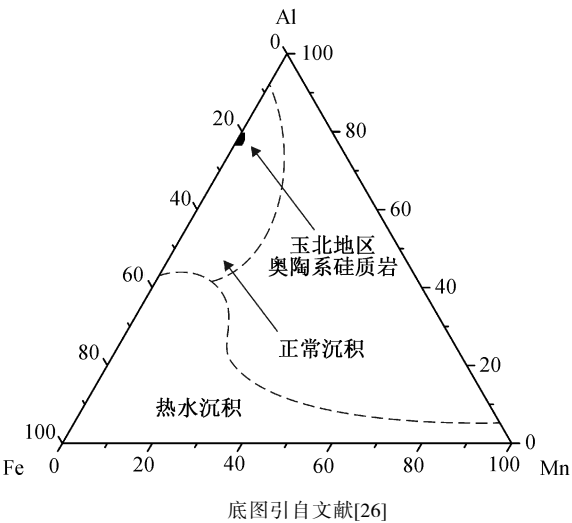


图 11 玉北地区硅质的主量元素 Al-Fe-Mn 三端元特征分布  
Fig. 11 Al-Fe-Mn distribution characters of silica in Yubei area

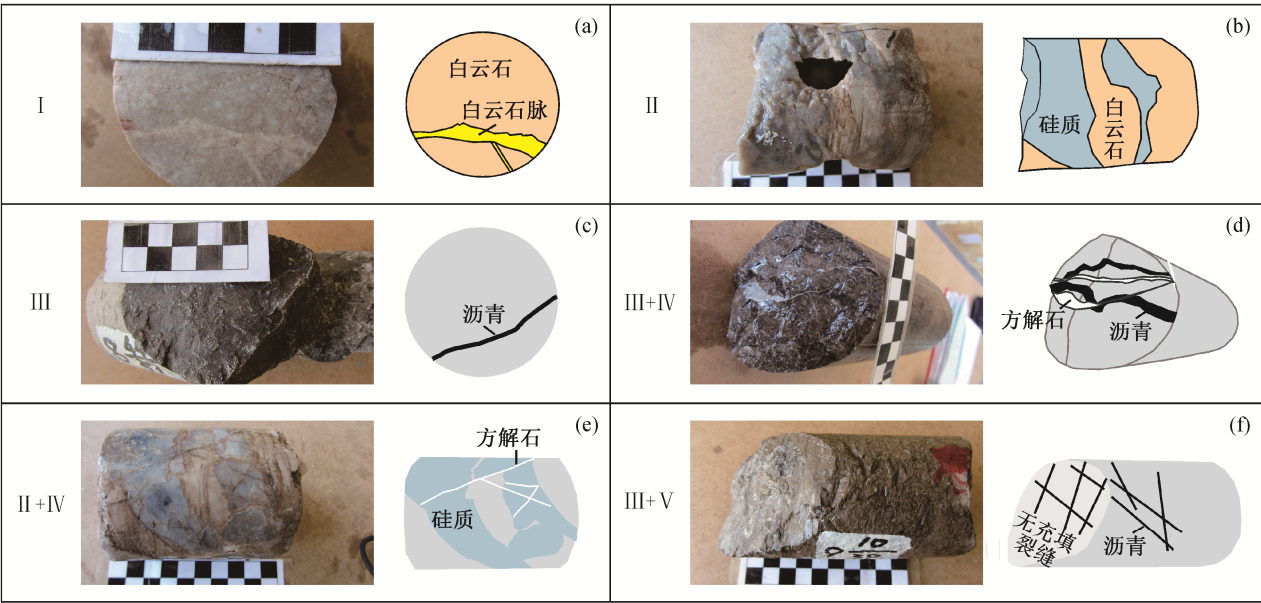
结作用既包括(准)同生期海水或淡水胶结(图3(d)和(f)), 还存在埋藏期方解石流体胶结(图6(f))。热液活动主要表现为黄铁矿、重晶石、鞍形白云石等的产出<sup>[23,29]</sup>, 黄擎宇等<sup>[13]</sup>及焦健等<sup>[23]</sup>通过包裹体测温、碳氧同位素分析等结果与埋藏史曲线结合对比的方式研究得出, 玉北地区热液活动与二叠纪岩浆活动时期相近。

3 成岩序列及孔隙演化

本文在岩芯观察和薄片研究基础上, 综合采用中国石油天然气行业标准《碳酸盐岩成岩阶段划分》(SY/T 5748—2003)及郭峰<sup>[30]</sup>的成岩阶段划分方案, 以埋藏深度、成岩环境及成岩作用特征等为主要依据, 将玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩的成岩历史划分成(准)同生成岩、早成岩、中成岩、晚成岩4个阶段(图14)。

1) (准)同生成岩阶段。成岩作用发生在沉积物尚未完全脱离海水的海底环境中, 形成泥晶套、环边胶结、粒状胶结等(图3(f))。玉北地区中-下奥陶统相对海平面较低, 由于海平面的波动, 地貌高部位短暂暴露, 接受大气淡水的溶蚀, 形成顺层溶蚀、铸模孔等溶蚀孔洞(图3(a), (b), (d)和(e)), 可见典型渗流充填形成的示顶底充填现象(图3(f))。该阶段胶结作用对储层具有破坏作用, 准同生溶蚀孔洞对玉北地区的储层具有重要的基础性贡献。

2) 早成岩阶段。成岩作用发生于加里东中-晚期及海西早期浅-中埋藏环境中, 主要表现为白云石化作用和压溶作用。大规模的白云石化作用发生于蓬莱坝组及鹰山组下段, 压溶作用产生的缝合线切过早期颗粒、胶结物及裂缝等, 沿缝合线发育少量白云石(图6(d)~(e))。此外, 还发育加里东中-晚



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

图 12 玉北地区中-下奥陶统裂缝发育特征(修改自文献[29])

Fig. 12 Fracture types and characters of Lower-Middle Ordovician in Yubei area (modified from Ref. [29])



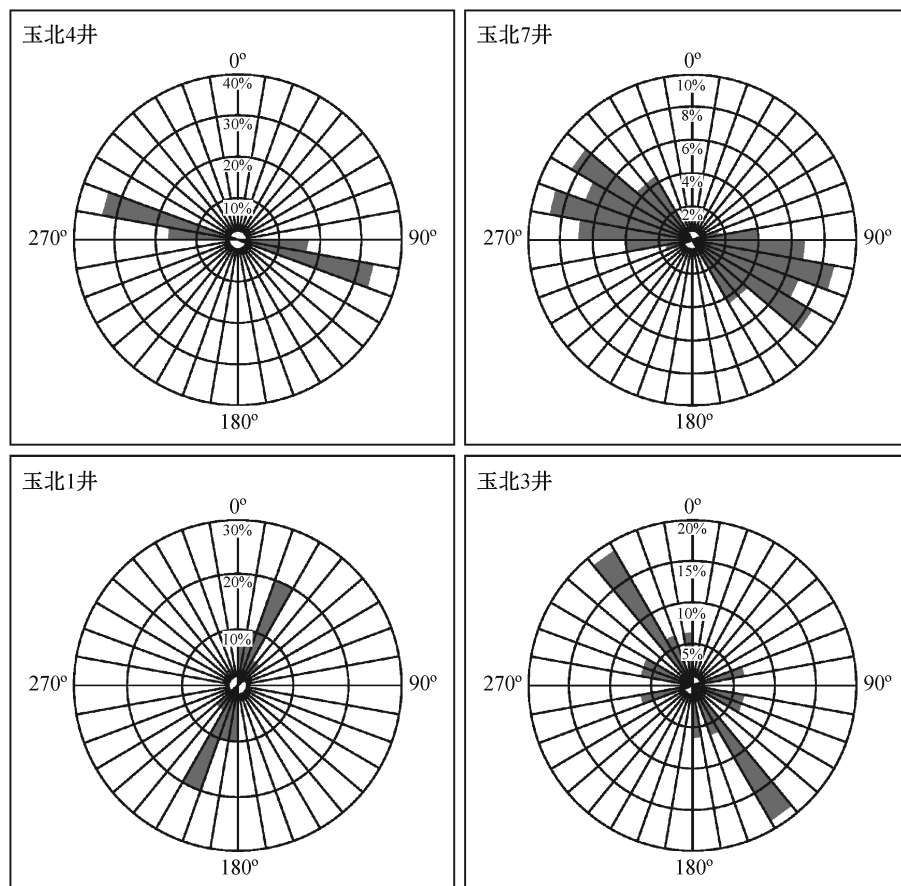


图13 玉北地区诱导缝走向玫瑰花图

Fig. 13 Rose diagrams of induced fractures in Yubei area

期及海西早期构造裂缝。该阶段白云石化作用对于储层具有直接和间接的贡献：直接贡献来自白云石化过程中形成的晶间孔；间接贡献则是由于碳酸盐岩在白云石化之后具有更强的抗压实压溶能力，有利于早期准同生溶蚀形成的溶蚀孔洞保存。压溶作用对储层的影响有限，表现为微弱的破坏性成岩作用。加里东中-晚期及海西早期发育的裂缝遭受压实作用及胶结作用影响，多呈封闭或充填状态，对储层的贡献有限。

3) 中成岩阶段。成岩作用发生在海西中-晚期的中-深埋藏环境中。该阶段压溶作用继续进行，存在部分热液活动，主要表现为孔洞边缘部分具鞍状结构及波状消光的热液白云石(图6(f)和图9(e))，也有少量黄铁矿产出。加里东中-晚期及海西早期形成的裂缝及早成岩和中成岩阶段形成的孔洞为热液流体提供了运移的通道。该阶段在热液活动之后，硅质充填作用开始发育(图9(e))，并持续到晚成岩阶段。在海西晚期，断裂活动在加里东期及海西

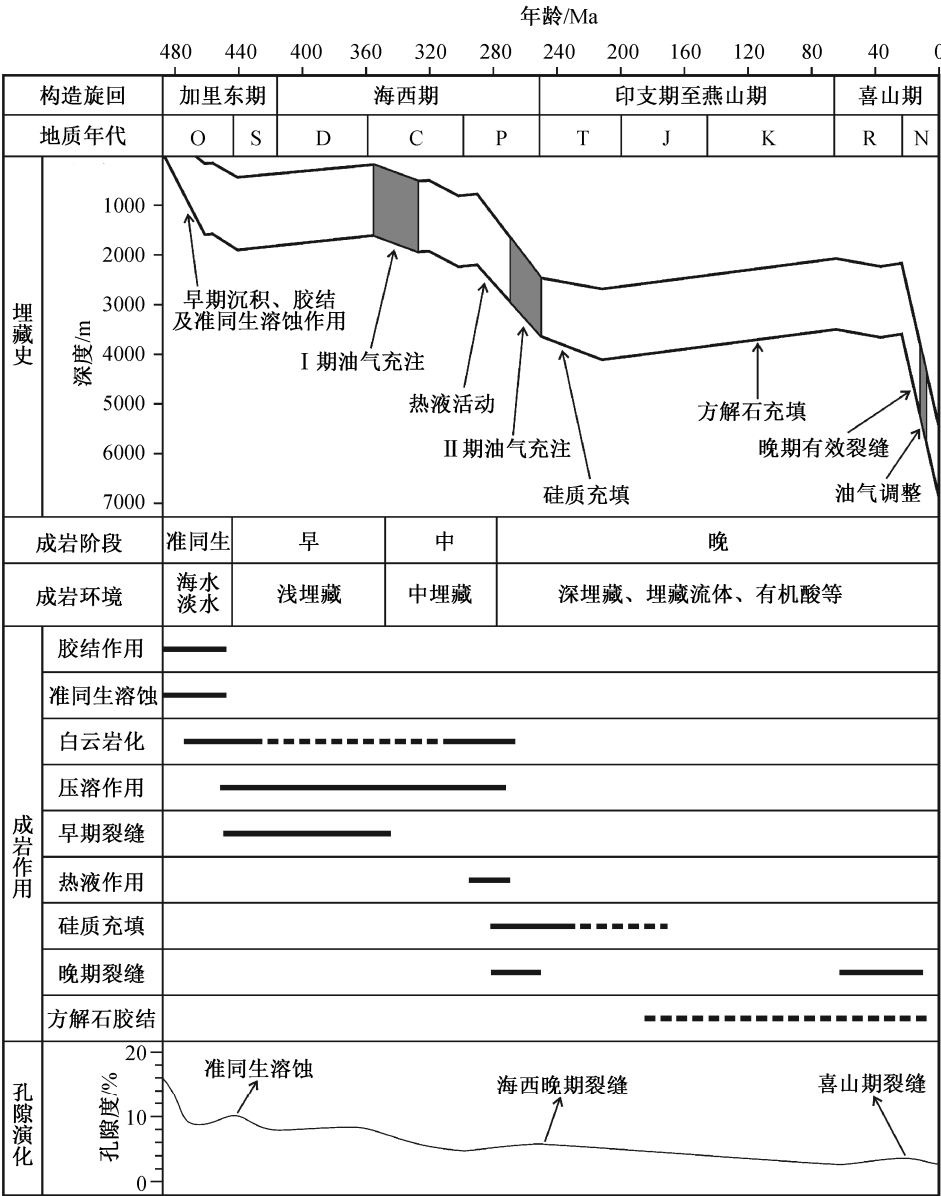
早期断裂的基础上继承性发育。该阶段充填孔洞的白云石对储层有轻微的破坏作用，但由于热液白云石产出有限，因而破坏作用不明显；海西晚期形成的裂缝对储层有贡献。

4) 晚成岩阶段。成岩作用发生于海西晚期至喜山期的深埋藏环境中。沉积期硅质发生活化，并以充填-半充填孔、洞、缝或交代灰岩等多种形式产出。在硅质流体活动之后，出现大量方解石胶结物，可以见到方解石脉切穿硅质、充填白云石晶间孔等现象(图6(f)和图12(c))。该阶段的硅质充填和方解石胶结对早期的储集空间具有一定的破坏作用，海西晚期及喜山期裂缝活动则对储层有贡献，在喜山期油气调整阶段可起到一定的输导和储集作用(图12(d))。

## 4 结论

综上所述，玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩经历了较为复杂的成岩改造过程。由于相对海平面较





O: 奥陶纪; S: 志留纪; D: 泥盆纪; C: 石炭纪; P: 二叠纪; T: 三叠纪; J: 侏罗纪; K: 白垩纪; E: 古近纪; N: 新近纪

图 14 玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩成岩演化序列  
Fig. 14 Evolution sequence of Lower-Middle Ordovician carbonates in Yubei area

低，准同生期海平面的波动导致古地貌高部位短暂暴露，遭受准同生溶蚀，形成顺层溶蚀孔洞、铸模孔等，对玉北地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层产生基础性的贡献。准同生及早成岩阶段的白云石化作用在形成晶间孔而对储层产生直接贡献的同时，还增强了碳酸盐岩的抗压实压溶能力，有利于早期溶蚀孔洞的保存，对储层产生间接贡献。中成岩阶段的热液作用形成少量充填孔洞的鞍形白云石以及具波状消光特征的白云石，对储层有轻微的破坏作

用。晚成岩阶段的硅质充填及方解石胶结进一步破坏了储集空间，但海西晚期和喜山期的裂缝由于经历的成岩改造较少，在后期油气调整阶段能够起到一定的输导和储集作用。

参考文献

[1] 李忠, 黄思静, 刘嘉庆, 等. 塔里木盆地塔河奥陶系碳酸盐岩储层埋藏成岩和构造-热流体作用及其有效性. 沉积学报, 2010, 28(5): 969-979

- [2] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752
- [3] 徐国强, 刘树根, 李国蓉, 等. 塔中、塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 114-119
- [4] 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. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 76-83
- [5] 邹光辉, 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. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 144-153
- [6] 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. 岩石学报, 2012, 28(8): 2542-2556
- [7] 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气作用. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 870-879
- [8] 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. 石油学报, 2014, 35(4): 654-663
- [9] 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. 新疆地质, 2014, 32(3): 344-350
- [10] 林水城, 傅恒, 曾毅. 塔里木盆地玉北地区奥陶系层序界面识别及特征. 新疆地质, 2014(2): 219-224
- [11] 黄太柱. 塔里木盆地玉北地区断裂系统解析. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 98-106
- [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. 新疆地质, 2015, 33(4): 504-509
- [13] 黄擎宇, 张哨楠, 叶宁, 等. 玉北地区下奥陶统白云岩岩石学、地球化学特征及成因. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 391-400
- [14] 李慧莉, 刘士林, 杨圣彬, 等. 塔中-巴麦地区构造沉积演化及其对奥陶系储层的控制. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 883-892
- [15] 崔军文. 南阿尔金断裂的韧性剪切作用时代及其构造意义. 岩石学报, 2011, 27(11): 3422-3434
- [16] 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
- [17] 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. 海相油气地质, 2014, 19(4): 9-18
- [18] 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. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 870-882
- [19] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs — geochemical techniques for evaluating origin and distribution [D]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993
- [20] 陈强路. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2004
- [21] 朱井泉, 吴仕强, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征. 地质前缘, 2008, 15(2): 67-79
- [22] 韩银学, 李忠, 刘嘉庆, 等. 塔河地区鹰山组灰岩白云石化成因及其对储层的影响. 地质科学, 2013, 48(2): 721-731
- [23] 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. 石油实验地质, 2016, 38(1): 99-107
- [24] Marchig V, Gundlach H, Möller P, et al. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. Marine Geology, 1982, 50(3): 241-256
- [25] 周新平, 何幼斌, 罗进雄, 等. 川东地区二叠系结核状, 条带状及团块状硅岩成因. 古地理学报, 2012, 14(2): 143-154
- [26] Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. Sedimentary Geology, 1987, 52(1/2): 65-108
- [27] 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. 断块油气田, 2013, 20(2): 170-174
- [28] 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
- [29] 朱松柏, 王洪峰, 王胜军, 等. 玉北地区深部热液活动的发现及其储层改造意义. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 42-47
- [30] 郭峰. 碳酸盐岩沉积学. 北京: 石油工业出版社, 2011: 62-74