

辽宁西部北票地区高于庄组白云岩沉积特征研究

丁伟铭 甯濛 秦树健 董琳[†]

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: lin.dong@pku.edu.cn

摘要 通过在野外及光学显微镜下观察辽宁西部北票地区高于庄组上部白云岩的岩石学特征, 识别出若干由薄层白云岩和中厚层白云岩组成的沉积旋回, 为潮上带至潮间带沉积特征, 具有微亮晶白云岩、泥晶白云岩和内碎屑白云岩 3 种沉积微相, 部分伴有白云岩的重结晶现象以及硅质成分的孔洞充填和交代现象。剖面中硅质条带和结核均顺层出露, 可能形成于准同生阶段。硅质成分的交代或充填对白云石的重结晶可能具有促进作用, 溶蚀作用对泥晶白云石的晶间孔隙度有明显的改善, 形成优质的白云岩储层。因此, 准同生阶段的硅质充填或交代作用对白云岩储层的形成与演化可能有重要的贡献。

关键词 北票地区; 高于庄组; 白云岩; 硅质充填; 硅质交代; 孔隙度; 储层

Sedimentary Characteristics of Dolomite from Gaoyuzhuang Formation in Beipiao Area, North China

DING Weiming, NING Meng, QIN Shujian, DONG Lin[†]

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: lin.dong@pku.edu.cn

Abstract The Neoproterozoic Gaoyuzhuang dolomite from Beipiao area, western Liaoning Province was systematically studied based on outcrop and microscope observations. The whole section is composed of several cyclic shallowing upward units (subsequences), which include subtidal massive dolomite and intertidal thin-bedded dolomite. Three types of microfacies, microspar dolomite, dolomicrite and intraclast dolomite, were identified. Partial recrystallization and silica filling/replacement are associated with each microfacies. The chert bands and nodules, which are commonly distributed along the stratigraphic layers, was probably formed during the syn-depositional stage. Silica filling/replacement may have great contributions to dolomite dissolution and recrystallization and therefore improve the porosity of the dolomite, potentially leading to the formation of the excellent dolomite reservoir. Therefore, silica filling/replacement during the syn-depositional stage is significant for the development and evolution of dolomite reservoirs.

Key words Beipiao area; Gaoyuzhuang Formation; dolomite; silica filling; silica replacement; porosity; reservoir

碳酸盐岩储层对全球油气资源有着极为重要的贡献, 超过 60% 的油藏和超过 40% 的气藏保存在碳酸盐岩中, 产量约占油气总量的 50%^[1-3]。白云岩具有良好的孔隙度和渗透率, 被认为是优质储层, 因此被广泛地研究^[4-7]。针对白云岩化对储集孔隙的破坏、保持或增强作用, 已有详细的研究^[8], 尚未达成一致的认识。近期的研究表明, 白云石化过

程对储集空间的贡献不大, 但形成的微孔隙可以成为流体的运移通道, 可能形成溶蚀孔洞等次生孔洞^[9], 这为白云岩孔隙的形成与演化过程提供了另外一种可能性。

我国海相碳酸盐岩分布范围很广, 开采潜力巨大, 但油气资源的探明储量较少^[10-11], 这与对碳酸盐岩储层性质的研究程度有关。碳酸盐岩储层的主

要问题在于非均质性强,孔隙系统多样化且形成原因各异,容易受各种准同生及后期成岩作用的干扰^[10]。研究白云岩储层的物理性质,重点在于描述岩石物理参数(如孔隙度、渗透率和饱和度等^[12-13])的空间分布,因此将岩石组构、沉积过程与孔隙大小和分布相联系,探究岩石的物理性质,是确定储层性质的重要手段。

在华北地区中元古代沉积的高于庄组中,发育较稳定的分布广泛的白云岩,并频繁出现顺层发育的硅质条带及结核^[14-15],为研究白云岩的沉积旋回、沉积微相以及孔隙发育提供了良好条件。前人认为高于庄组沉积时期属于“沉寂的十亿年”(boring billion)^[16-17],这一时期全球大气中氧气含量较低,生物演化较缓慢^[18]。但是,近年来高于庄组下部的页岩中发现大量微体化石和宏体化石^[19-22],地球化学证据也表明全球大气中氧含量出现较明显的波动^[23],使得高于庄组上部的白云岩具备有利的生烃环境与保存条件,对于古老岩系的油气勘探具有重要的研究意义。

本研究从高于庄组白云岩的沉积特征和沉积微相着手,探究硅质成分对白云岩孔隙的改造作用,以期对白云岩孔隙的形成及变化过程有更加全面的认识。

1 区域地质背景

燕辽盆地发育于 18 亿年前,是位于华北东部板块边缘的陆内裂陷盆地,其形成可能与哥伦比亚超大陆的裂解有关^[24-25]。约 9 km 厚的元古代沉积地层上覆在太古代-古元古代结晶基底上^[26]。辽宁西部地层中-晚元古代地层与蓟县标准剖面地层相邻,层序发育完全,厚度较大^[27]。按照地层序列,可将辽宁西部地区划分为 4 个群。

1) 长城群(1650~1600 Ma): 由常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组组成。长城群下部地层中出现冲积砾岩或河流相砾岩,并有火成岩出露,说明燕辽盆地当时处于初始的区域性伸展发育阶段^[24]。

2) 蓟县群(1600~1400 Ma): 由高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组组成,以碎屑岩、碳酸盐岩地层为主,发育纹层状、叠层石灰岩或白云岩,含较多的硅质结核和条带,沉积环境趋于稳定,为陆表海沉积。

3) 未命名群(1400~1000 Ma): 包含独立的下马

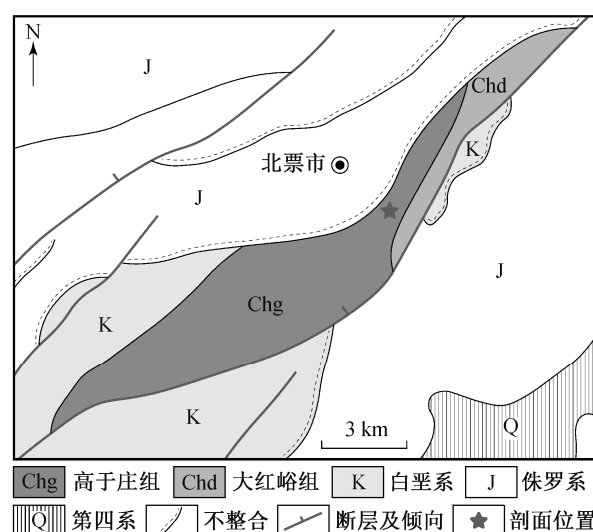
岭组这一地层单元,以富有机质页岩为主,可能沉积于陆棚内盆地的静水环境。

4) 青白口群(1000~800 Ma): 由长龙山组和景儿峪组组成。蓟县运动的抬升作用使得青白口群与寒武系下部地层之间存在地层缺失^[28],可能与罗迪尼亚大陆的聚合有关^[29]。

根据岩性特征,可将蓟县群高于庄组分为官地段、桑树鞍段、张家峪段和环秀寺段共 4 个岩性段,每个岩性段均由向上变浅的旋回组成,沉积环境从深水斜坡至潮上带或潮间带。叠层石、微体化石和宏体化石在高于庄组均有发现^[19-22,30],水体也出现局部氧化事件^[23],说明高于庄组沉积时期生物与环境的协同演化关系较密切。北票剖面(41.79°N, 120.75°E)位于辽宁省北票市某采石场(图 1),出露的岩石较新鲜,受风化影响较小,地层连续,沉积特征清楚(图 2 和图 3(a))。主要为中层白云岩与薄层白云岩互层(图 3(b)和(c)),偶见纹层状白云岩(图 3(d)),并出现较多顺层的连续性较好的硅质条带(图 3(d)和(g)),顶部出现粒屑白云岩(图 3(h)),发育极少量叠层石(图 3(e))。本文主要研究高于庄组第四段含硅质条带的白云岩,测量并采样的层段整体厚度约为 25 m。

2 岩石学特征及沉积环境

根据岩性及层厚等沉积特征,本文将研究区出露的高于庄组白云岩分为薄层白云岩、中-厚层白



根据《中华人民共和国辽宁省地质图》修改

图 1 北票地区研究剖面地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the outcrop in Beipiao area

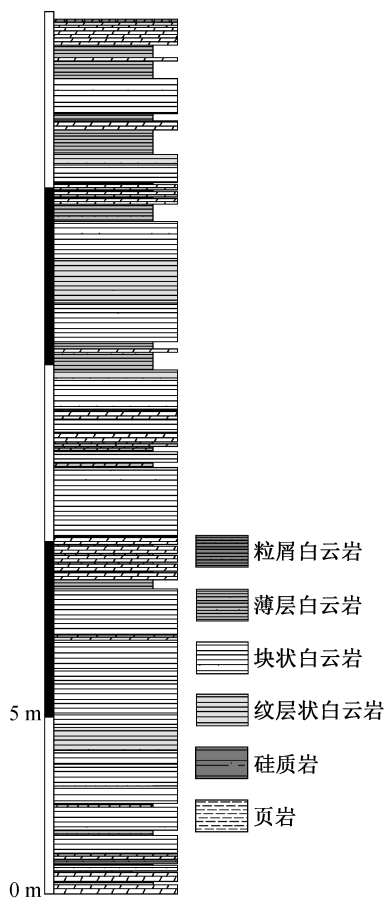


图2 北票地区高于庄组部分地层柱状图

Fig. 2 Partial stratigraphic column of Gaoyuzhuang Formation in Beipiao area

云岩和粒屑白云岩(图2; 图3(b), (c)和(h))。剖面总体由薄层白云岩和中-厚层白云岩互层组成, 夹少量由粉砂岩-页岩组成的碎屑岩, 剖面顶部出现粒屑白云岩。硅质条带和硅质结核频繁出露于剖面中, 以顺层发育为主, 但不完全连续(图3(d)和(g))。

1) 薄层白云岩: 以平直薄板状为特征, 单层厚约1 cm, 整体上厚度变化较大(5~70 cm)。以泥晶白云石沉积为主(图3(b)和(c)), 通常呈均质构造, 偶具纹层状构造, 未见硅质充填及交代现象。部分薄层白云岩含较多的石英碎屑颗粒, 可能代表陆源输入增强。与上下层平行整合接触, 没有明显的侵蚀面及暴露剥蚀痕迹。沉积环境可能为潮间带。

2) 中-厚层白云岩: 以平直中厚层状为特征, 沉积环境主要为潮下带。根据是否具有纹层, 可分为中-厚层块状白云岩和中-厚层纹层状白云岩。

① 中-厚层块状白云岩: 以泥晶白云石沉积为主, 厚度范围为10~110 cm。通常有硅质成分的交代和充填(图4(a)和(b)), 普遍具有白云石重结晶现

象。少数地层中含内碎屑和石英碎屑(图5(a)和(b)), 可能代表不规则的风暴事件以及陆源物质输入的增强。与上下层为平行整合接触, 没有明显的侵蚀面及暴露剥蚀痕迹。

② 中-厚层纹层状白云岩: 以具有平行纹层为特征(图3(d)), 厚度范围为15~120 cm。在剖面上出露较不规律, 没有明显的周期旋回特征。通常以泥晶白云岩与硅质交代白云岩互层为主(图4(c)和(d)), 有泥晶白云岩的重结晶作用(图5(c)), 部分孔洞被硅质成分充填(图4(e))。纹层的形成可能与硅质成分的交代与充填作用有关。

3) 粒屑白云岩: 以含碎屑颗粒为特征(图3(h)), 仅在剖面顶部出现厚度为8 cm的沉积地层, 在整个剖面中不常见。碎屑成分较复杂, 包含内碎屑、外来石英颗粒以及球粒等, 孔隙被亮晶白云石胶结物充填。与中-厚层纹层状白云岩接触的下表面有明显的下凹侵蚀痕迹, 很可能代表一次水动力较强的风暴事件, 其沉积环境可能为潮间-潮下带。

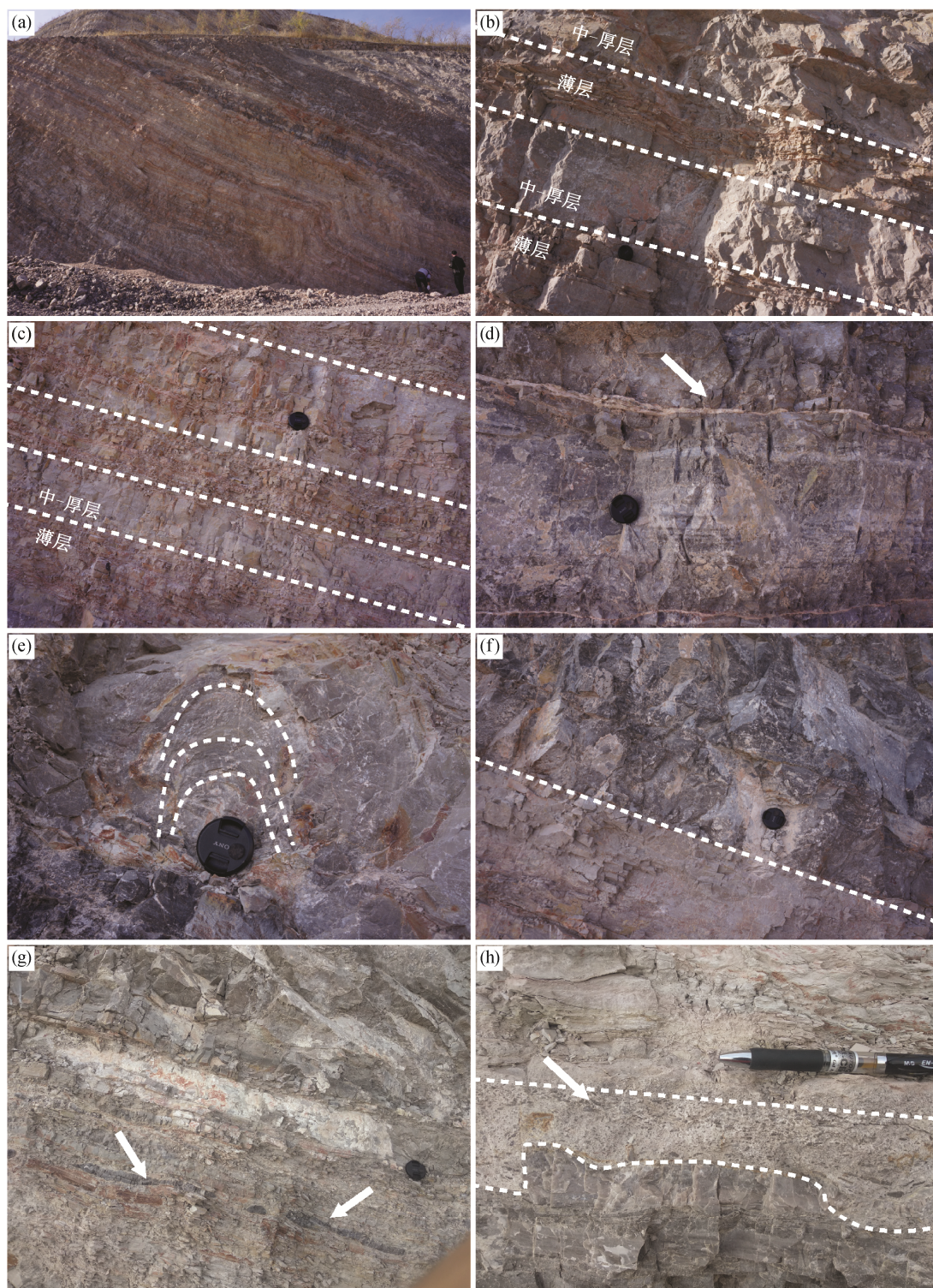
综合野外观察, 北票剖面高于庄组出露地层的主体旋回从中-厚层块状或纹层状白云岩向薄层白云岩过渡, 向上变浅的序列不断叠置, 其中硅质条带与硅质结核出现的层位及频率与白云岩沉积相无相关性, 因此硅质成分的沉积不受白云岩沉积环境的影响。

3 沉积微相观察

基于野外岩性观察及旋回划分, 通过光学显微镜及扫描电子显微镜观察, 将研究剖面的白云岩分为微亮晶白云岩、泥晶白云岩和内碎屑白云岩3种碳酸盐岩沉积微相(图5)。

1) 微亮晶白云岩: 主要出现在中-厚层白云岩中(图5(d))。在光学显微镜下, 微亮晶白云岩的不均一性较强, 暗色区域由泥晶白云石组成, 亮色区域由晶体较大的微亮晶白云石组成, 微亮晶白云石呈斑块状分布在泥晶白云石中。微亮晶白云岩的形成可能与泥晶白云岩的重结晶作用有关, 但重结晶程度不高。

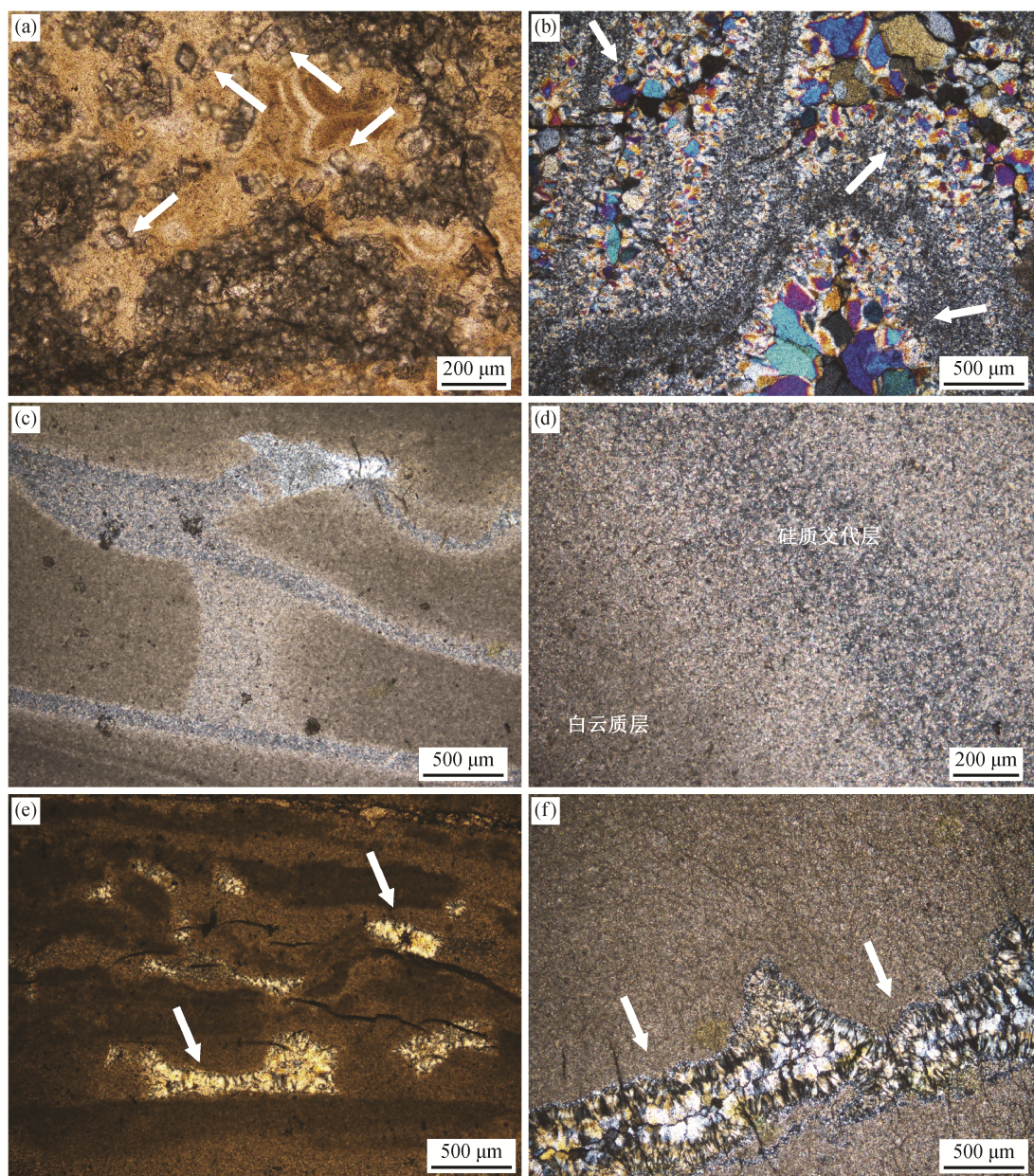
2) 泥晶白云岩: 在薄层白云岩及中-厚层白云岩中均出现(图5(e))。在光学显微镜下, 泥晶白云石的显微特征不明显, 没有特殊的结构特征, 颗粒大小及成分相对均一。颗粒粒径在1~10 μm 之间, 以镶嵌关系相接触, 结构较为致密, 孔隙度较低。部分泥晶白云岩发生区域性重结晶作用(图5(c)),



(a) 高于庄组部分出露地层的野外照片; (b) 薄层白云岩与中-厚层白云岩互层; (c) 薄层白云岩与中-厚层白云岩高频率互层; (d) 中-厚层纹层状白云岩, 硅质条带顺层出露(箭头); (e) 偶有疑似叠层石沉积构造, 呈纹层状向上突起; (f) 中-厚层块状白云岩, 暗色部分为重结晶程度较强的白云岩, 部分有硅质充填; (g) 黑色硅质结核和条带(箭头), 与地层平行; (h) 剖面顶部出露的粒屑白云岩(箭头), 其下表面有较明显的侵蚀现象

图 3 北票地区高于庄组野外剖面照片

Fig. 3 Field photographs of the Gaoyuzhuang Formation in Beipiao area



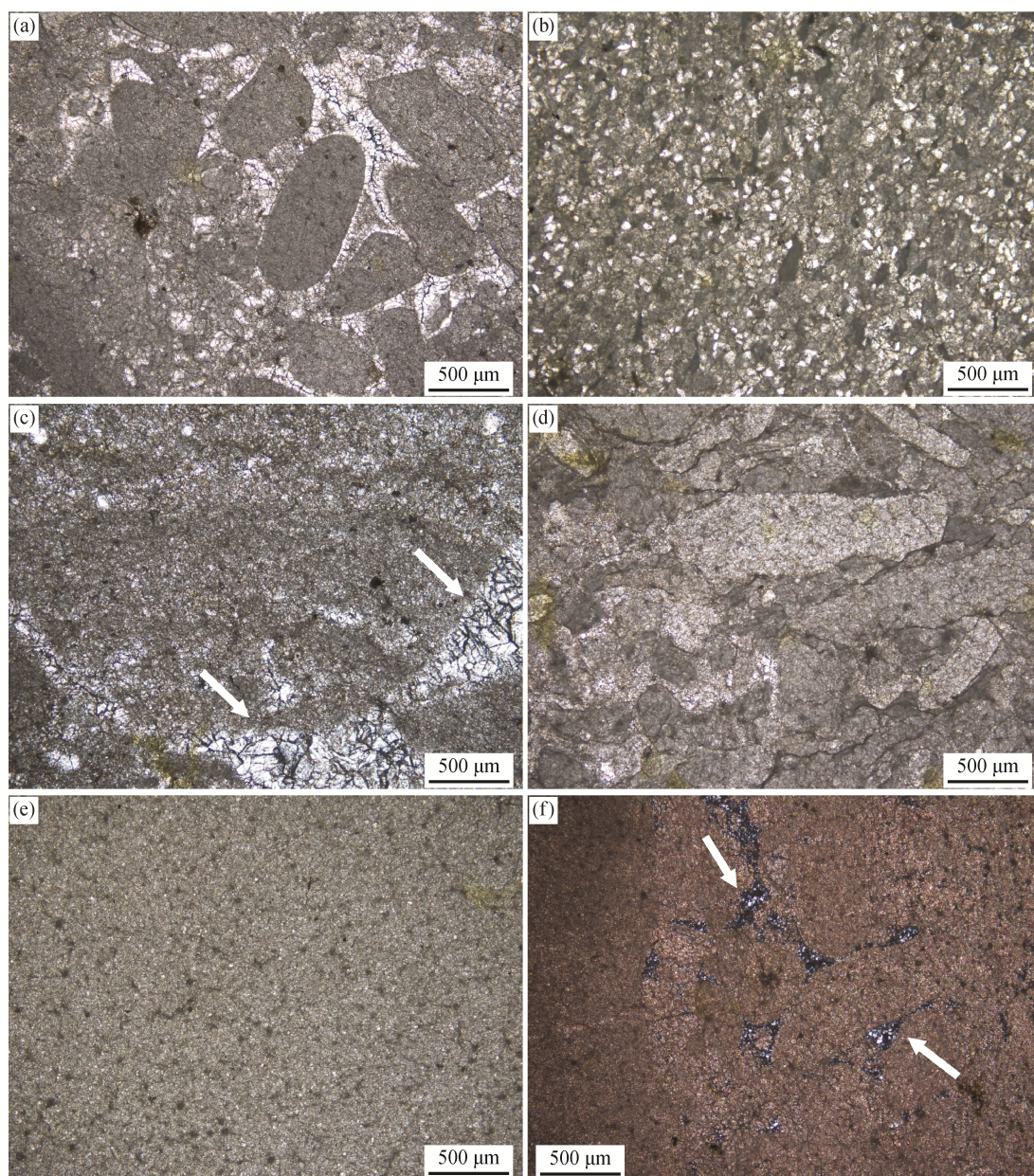
(a) 硅质成分中具有自形较好的白云石残留(箭头), 单偏光; (b) 中-粗晶硅质石英颗粒(箭头), 向结晶中心颗粒逐渐增大, 基质为泥晶白云岩与微晶-隐晶质硅质成分, 正交偏光; (c) 硅质成分(一级灰白干涉色区域)对泥晶白云岩(高级白干涉色区域)的交代作用, 正交偏光; (d) 纯泥晶白云岩与含硅质成分白云岩渐变过渡, 正交偏光; (e) 硅质以不规则形状充填(箭头), 基质为泥晶白云岩, 正交偏光; (f) 纤维状硅质充填(箭头), 基质为泥晶白云岩, 正交偏光

图 4 北票地区高于庄组白云岩中硅质成分的沉积形式

Fig. 4 Silica content in dolomite of Gaoyuzhuang Formation in Beipiao area

呈脉状或不连续、不规则区域出现, 粒径从微米级至毫米级。重结晶的白云石颗粒呈半自形或它型, 未重结晶的区域保留泥晶白云石的成分及形态特征, 部分重结晶的白云石靠近硅质充填区域。重结晶白云石在剖面上的出现也无明显的规律性。部分泥晶白云岩中混有较多的石英碎屑颗粒(图 5(b)), 可能为陆源输入增强导致。

3) 内碎屑白云岩。研究剖面中仅观察到 3 处内碎屑白云岩, 出现在中-厚层白云岩及顶部的粒屑白云岩中。3 处内碎屑白云岩的胶结物成分有所不同, 其中两处为钙质胶结, 孔隙中均充填亮晶白云石(图 5(a)), 亮晶胶结物没有明显的晶型, 其形状受孔隙形状控制, 晶体表面较明亮。另一处为钙质胶结与硅质胶结混杂(图 5(f)), 硅质成分在单偏光下



(a) 内碎屑白云岩, 钙质胶结, 单偏光; (b) 泥晶白云岩中夹杂石英碎屑颗粒, 可能为陆源输入, 单偏光; (c) 泥晶白云岩中的重结晶作用(箭头), 单偏光; (d) 微亮晶白云岩, 不均一性较强, 单偏光; (e) 泥晶白云岩, 均质构造, 单偏光; (f) 内碎屑白云岩, 钙质胶结, 孔隙中有硅质充填(箭头), 正交偏光

图 5 北票地区高于庄组白云岩的沉积微相

Fig. 5 Microfacies of Gaoyuzhuang dolomite in Beipiao area

较为干净明亮, 正交偏光下呈明显的一级灰白干涉色, 显示硅质沉积的特点。硅质胶结物可能是富硅流体对孔隙充填的产物或初始钙质胶结物进行交代的产物。

4 硅质成分的形成模式及硅质来源

野外观察到, 硅质条带虽横向不完全连续, 但

均顺层发育(图 3(g)), 未与白云岩构成穿插关系。部分硅质充填白云岩的上下地层均以泥晶白云岩为特征, 不含硅质成分。纹层状白云岩中的硅质纹层与白云岩纹层也均平行接触, 部分具有逐渐过渡的现象。剖面地层倾向整体上稳定, 断层及微小断裂均不发育。硅质条带及结核出露的层位和频率较不均匀, 与白云岩的整体旋回无关, 因此可以认为硅

质条带或结核的形成成为同生-准同生过程。

根据光学显微镜下的岩石学特征,可将高于庄组含硅质成分白云岩分为两种成因模式。

1) 交代成因。由微晶或隐晶质的石英($<10\ \mu\text{m}$)交代泥晶白云石形成的含硅质白云岩(图4(c)和(d)),主要出现在中-厚层块状白云岩以及中-厚层纹层状白云岩中。含硅质白云岩与纯白云岩为过渡接触关系,大多相互平行。硅质成分以极细小颗粒的形式存在于泥晶白云岩中,少数纹层中硅质将泥晶白云岩完全交代,硅质纹层中不含泥晶白云石颗粒;大多数硅质纹层中为部分交代,即硅质纹层中仍然含泥晶白云石成分,代表硅质成分对泥晶白云岩的交代过程。在交代成因的硅质成分中,可见少数自形程度较好的白云石残留(图4(a)),既表示交代的不完全性,也说明硅质交代过程对白云岩的重结晶作用有贡献。

2) 充填成因。由镶嵌状中-粗晶石英颗粒或纤维状玉髓填充孔洞形成的含硅质白云岩(图4(b)、(e)和(f)),主要出现在中-厚层块状白云岩以及中-厚层纹层状白云岩中,呈连续平行层状或不规则形状分布,大小在微米级至毫米级之间。充填的硅质成分结晶较好,表面较明亮,可分为镶嵌状中-粗晶石英颗粒(图4(b))和纤维状玉髓(图4(f))两种。镶嵌状中-粗晶石英向结晶中心颗粒逐渐增大,纤维状玉髓以在边缘以针簇状晶体生长为特征。两者均无白云石残留,与基质的接触界线分明。部分充填成因的硅质成分与重结晶的白云岩联系较紧密,并出现疑似连续过渡的现象,因此硅质的填充过程也可能对泥晶白云岩的重结晶过程起着重要的作用。

硅质成分结晶方式的不同反映其形成过程不同(图6)。在富硅流体未对白云岩进行改造时,白云岩可能局部发生不均一重结晶作用(图6(a))。在初始阶段,富硅流体(可能为热液成因)与泥晶白云岩接触,开始缓慢的交代过程(图6(b))。由于富硅流体的温度较高,硅质交代过程可能对泥晶白云岩的不均匀重结晶作用有贡献,富硅流体对重结晶亮晶白云岩的溶解程度更高。在白云岩重结晶期间或之后,富硅流体优先对重结晶白云岩进行溶解并重新充填,形成充填成因的硅质成分(图6(c))。内碎屑白云岩中的硅质胶结物(图5(f))同样印证了亮晶白云岩优先被溶解并填充的推论。部分交代现象的存在说明富硅流体并没有在泥晶白云岩孔隙中完全达到饱和。因此,富硅流体对白云岩的溶解充填作用

具有选择性,并对白云岩的重结晶作用有促进和推动作用。

硅质成分的来源一直是对硅质条带或结核的研究中重点关注的问题。前人对主量元素、微量元素及硅同位素的研究表明,富硅流体主要有陆源输入占主导的正常海水^[31-32]以及间歇性喷发洋中脊热液流体^[33-35]两类。由河流及风尘输入海洋的硅通量分别为 5.6×10^{12} 和 $0.5\times 10^{12}\ \text{mol/a}$,洋壳热液反应以及洋底风化作用共同产生的硅通量约为 $0.6\times 10^{12}\ \text{mol/a}$ ^[36]。现代海洋中,生物硅质的形成可以将海水表层的溶解硅浓度降低^[36-37],因此直接从海水中沉积的无机硅质岩几乎不可能存在。在高于庄组沉积的中元古代时期,硅藻、放射虫和硅质海绵等含硅生物还没有出现或繁盛^[38-39],无机沉积的硅质岩可能是海水中硅质成分主要的汇,因此中元古代海洋中可能有更高的硅浓度^[40-41]。同时,由于硅的饱和浓度与温度正相关,热液流体通常具有较高的硅浓度,因此热液流体也可以成为硅质来源的重要部分^[42]。

本文利用硅质岩的锗硅比值(Ge/Si)对硅质成分来源进行区分。硅与锗位于元素周期表中的同一主族,具有相似的地球化学性质。在硅酸盐矿物形成过程中,锗可以替代晶格中的硅,在沉积物中保存下来。Ge/Si值在低温风化作用与热液作用中有较明显的分异。河流中Ge/Si为 $0.4\sim 1\ \mu\text{mol/mol}$,显著低于地壳的平均值(约为 $1.8\ \mu\text{mol/mol}$)^[43-44];热液流体中Ge/Si约为 $11\ \mu\text{mol/mol}$,显著高于洋底玄武岩的平均值(约为 $2.5\ \mu\text{mol/mol}$)^[45]。因此,我们可以利用Ge/Si值判断硅质成分来源,并得到高于庄组沉积时期海水状态的信息。本研究中用于测定Ge/Si值的高于庄组硅质岩样品采自天津蓟县剖面,其层位可与辽宁北票剖面进行横向对比。样品的处理过程简述如下(详情可参阅文献[42]):将样品粉碎至200目,取约2 g样品粉末,用3 N的盐酸在50 mL的离心管中进行溶解,去除其中的碳酸盐成分;准确称量约200 mg烘干的样品粉末,放入5 mL的溶样罐中,加入4 mL浓硝酸与浓氢氟酸的混合溶液(体积比为1:3)进行溶解;使用ICP-MS仪器测定溶液中的常量元素及微量元素。

高于庄组硅质岩的Ge/Si值高达 $11.37\ \mu\text{mol/mol}$,显著高于现代正常海水($0.72\ \mu\text{mol/mol}$),与现代热液流体较为接近(平均值为 $11\ \mu\text{mol/mol}$)^[45-46],表明高于庄组的硅质成分可能主要来自热液流体。

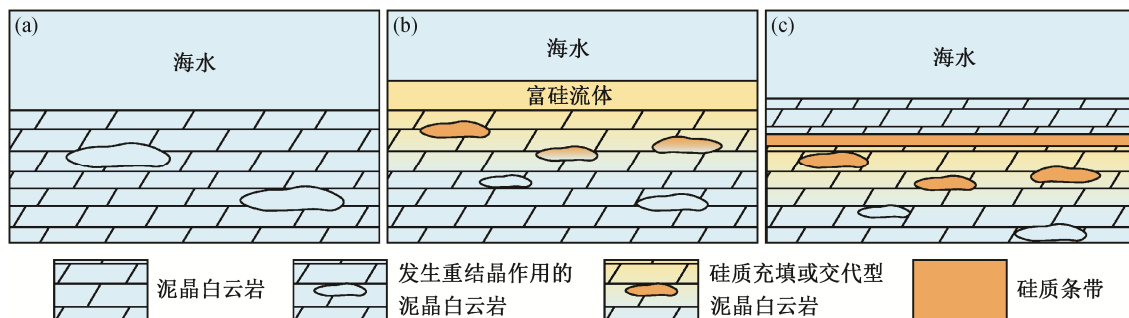


图 6 高于庄组沉积时期硅质成分进入白云岩进行充填或交代的模式

Fig. 6 Schematic diagram illustrating the silica filling/replacement in dolomite during the deposition of Gaoyuzhuang Formation

此外, 高于庄组硅质岩的沉积方式和沉积特征与中元古代雾迷山组(图 7)相似, 前人测试了雾迷山组中硅质成分的 Ge/Si 值, 结果表明高的 Ge/Si 值指示硅质的热液来源^[42]。高于庄组与雾迷山组沉积时期频繁的热液流体活动表明两者均沉积于具有活跃断层体系的盆地中^[47]。研究表明, 华北板块至少在 17.8 亿年至 14 亿年之间仍属于 Nuna 超大陆的一部分, 且 Nuna 超大陆的解体不早于 14 亿年^[48]。因此, 大量的硅质沉积可能反映 Nuna 超大陆解体之前频繁的裂谷活动。

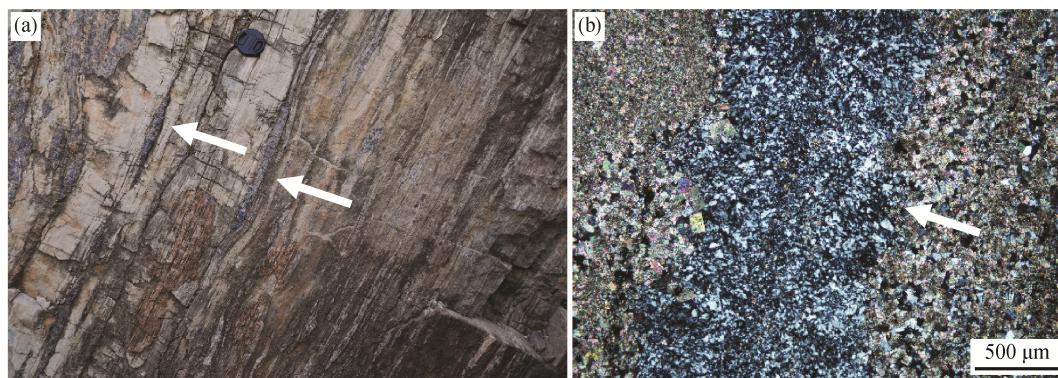
5 硅化作用对孔隙度的影响

由于灰岩与白云岩的晶体大小和形状存在差异, 文石和方解石的摩尔体积分别比白云石高 8% 和 13%, 因此多数白云岩的孔隙度和渗透率比灰岩高^[49]。但是, 白云岩化对孔隙的形成和改造也受原岩特征以及成岩环境影响^[50-51]。在深埋藏阶段形成的热液白云岩(以鞍状白云石为代表)可能使原有白云岩的晶间孔丧失^[52]。因此, 白云岩中孔隙受多

方面因素共同影响, 目前尚无统一的结论。

本文提出一种与准同生硅化作用有关的提高白云岩孔隙度的新模式。在扫描电子显微镜下观察高于庄组泥晶白云岩, 孔隙类型以次生孔隙为主(图 8(a)~(c))。泥晶白云岩中主要发育晶间孔, 密度较小, 可能为早期成岩阶段和交代过程中白云岩化形成, 未见溶蚀孔及溶洞。少量泥晶白云石颗粒表面有微小孔洞(图 8(c)), 但分布不广泛, 可能由成岩压实过程中晶体溶解导致。硅质成分的充填均顺层发育, 未见鞍状白云岩以及裂缝, 因此排除深埋藏成岩过程中形成次生孔洞的可能性。

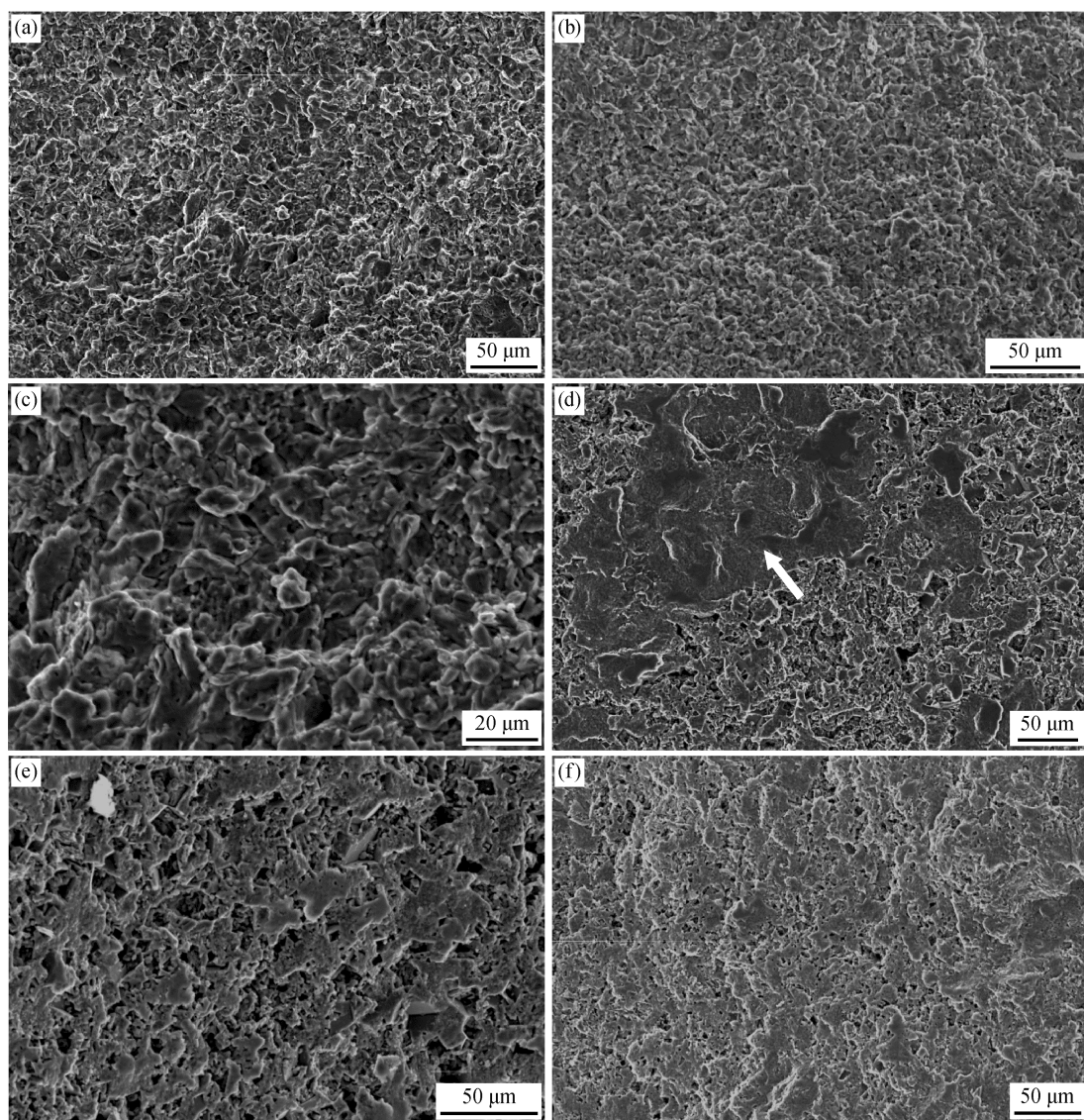
在具有硅质充填及硅质交代现象的泥晶白云岩中, 孔隙度明显增高, 广泛发育溶蚀孔洞, 部分孔洞保留较好的菱形晶型(图 8(d)~(f))。在硅质交代的区域内, 孔隙度比纯泥晶白云岩有较大幅度的提高(图 8(f))。在靠近硅质充填的区域, 泥晶白云岩中孔隙或孔洞密度明显增大(图 8(d)和(e))。这一特征代表在硅质填充或交代过程中, 富硅流体对泥晶白云岩有强烈的溶蚀作用。富硅流体沿原有的泥晶白



(b)中白色箭头指示硅质成分, 正交偏光

图 7 天津蓟县雾迷山组硅质成分野外照片(a)及显微镜照片(b)

Fig. 7 Silica content in the field (a) and under the microscope (b) of Wumishan Formation in Jixian, Tianjin



(a)和(b) 泥晶白云岩的主要晶型为它型, 孔隙以晶间孔为主, 孔隙度较低; (c) 部分泥晶白云石颗粒表面有凹坑或孔洞, 但分布不广泛; (d) 硅质充填(箭头)附近的泥晶白云岩孔隙度明显增高, 孔隙直径增大; (e) 部分孔隙保留较自形的白云石晶型, 可能为溶蚀孔洞; (f) 硅质交代纹层中形成的孔洞, 比硅质充填白云岩中的孔洞小且稀疏, 比纯泥晶白云岩的孔隙度高

图 8 扫描电子显微镜下纯泥晶白云岩以及受硅质成分影响白云岩中孔隙的变化

Fig. 8 SEM photographs showing the porosity change in dolomite due to silica filling/replacement

云岩晶间孔迁移, 在促进泥晶白云岩重结晶的同时, 由于富硅流体为碳酸盐不饱和状态, 因此泥晶白云岩有较强的溶解倾向。重结晶后的白云岩也有部分溶解, 使得富硅流体对泥晶白云岩进行充填和交代作用。保留下来的溶蚀孔洞也说明, 富硅流体在泥晶白云石的孔隙中没有达到饱和。在整个剖面中, 暗色白云岩均具有重结晶程度较高并有硅质充填的特征(图3(f)), 说明在同生沉积过程中, 有可能周期性的热液活动不断对刚形成的白云岩进行溶蚀和交代作用, 对白云岩储层的孔隙度等物性进行改良;

也有可能是通量较大的热液流体不仅改造着准同生的表层白云岩, 也沿孔隙或通过溶蚀作用向下渗透, 对水岩界面下部的白云岩储层进行改造。因此, 热液活动对高于庄组白云岩储层物性的改良具有重要作用。这一作用发生于同生-准同生阶段, 因此不同于热液白云岩中孔隙的发育过程。

综上所述, 硅化作用(硅质成分的交代和充填作用)对高于庄组白云岩的孔隙有明显的改善作用, 有利于形成较优良的白云岩储层。晶间孔与溶蚀孔洞的后期充填作用不强烈, 仍保留着较多开放的孔

隙空间,为油气的储藏及运移提供了良好的条件。由于当时华北板块处于 Nuna 超大陆之中^[48],顺层的硅质岩很可能代表周期性的热液活动。高于庄组中的硅质岩以及雾迷山组的硅质条带及结核^[42]均可能说明,Nuna 超大陆在裂解之前不断有热液活动,对白云岩的孔隙改造不断提供物质来源。近年来,在高于庄组不断发现的微体和宏体古生物化石也很有可能证实,高于庄组下部页岩沉积时期的生物活动或初级生产力较高^[22],对油气的产生有潜在的贡献。剖面上部白云岩中孔隙度高,富有机质页岩和高孔隙度白云岩构成良好的生-储系统,具有研究和勘探的良好前景。

6 结论

1) 通过对辽宁西部北票地区高于庄组沉积旋回的划分,可知其出露层段的白云岩以中厚层至薄层的旋回层序不断叠置,顶部出现粒屑白云岩。白云岩中夹杂多期顺层发育的薄层硅质岩,与沉积相和沉积旋回没有明显的相关性。

2) 高于庄组白云岩可以分为微亮晶白云岩、泥晶白云岩和内碎屑白云岩 3 种沉积微相,伴随多次区域性重结晶以及硅质的充填或交代现象。根据硅质成分的存在形式以及结晶方式,本文将硅质成分的沉积方式分为充填成因和交代成因两种。

3) 较高的 Ge/Si 值说明高于庄组硅质成分来源于热液。硅质成分的充填及交代过程对白云岩的孔隙度等物性有较大幅度的改善,促进了潜在优良储层的形成,可与高于庄组下部富含化石页岩层构成良好的生-储体系。

参考文献

- [1] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征. 古地理学报, 2006, 8(2): 241-250
- [2] 谢锦龙, 黄冲, 王晓星. 中国碳酸盐岩油气藏探明储量分布特征. 海相油气地质, 2009, 14(2): 24-30
- [3] 张宁宁, 何登发, 孙衍鹏, 等. 全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素, 中国石油勘探, 2014, 19(6): 54-65
- [4] 钱一雄, 陈代钊, 尤东华, 等. 塔东北库鲁克塔格地区中上寒武统白云岩类型与孔隙演化. 古地理学报, 2012, 14(4): 461-476
- [5] 张学丰, 刘波, 蔡忠贤, 等. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性. 地质科技情报, 2010, 29(3): 79-85
- [6] Azomani E, Azmy K, Blamey N, et al. Origin of

- Lower Ordovician dolomites in eastern Laurentia: controls on porosity and implications from geochemistry. *Marine & Petroleum Geology*, 2013, 40(1): 99-114
- [7] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(2): 186-204
- [8] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth Science Reviews*, 2000, 52(1): 1-81
- [9] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 5-17
- [10] 罗平, 张静, 刘伟, 等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征. 地学前缘, 2008, 15(1): 36-50
- [11] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12
- [12] Bjørlykke K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties: some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 2014, 301(3): 1-14
- [13] Lucia F J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(9): 1275-1300
- [14] Guo Hua, Du Yuansheng, Kah L C, et al. Sulfur isotope composition of carbonate-associated sulfate from the Mesoproterozoic Jixian Group, North China: implications for the marine sulfur cycle. *Precambrian Research*, 2015, 266: 319-336
- [15] Mei Mingxiang. Preliminary study on sequence-stratigraphic position and origin for Molar-tooth structure of the Gaoyuzhuang Formation of Mesoproterozoic at Jixian section in Tianjin. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(4): 437-447
- [16] Brasier M D, Lindsay J F. A billion years of environmental stability and the emergence of eukaryotes: new data from northern Australia. *Geology*, 1998, 26(6): 555-558
- [17] Buick R, Des Marais D J, Knoll A H. Stable isotopic compositions of carbonates from the Mesoproterozoic Bangemall Group, northwestern Australia. *Chemical Geology*, 1995, 123: 153-171
- [18] Planavsky N J, Reinhard C T, Wang X L, et al. Low mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals. *Science*, 2014, 346: 635-638

- [19] Guo Z X, Peng X T, Czaja A D, et al. Cellular taphonomy of well-preserved Gaoyuzhuang microfossils: a window into the preservation of ancient cyanobacteria. *Precambrian Research*, 2018, 304: 88–98
- [20] Seong-Joo L, Golubic S. Microfossil populations in the context of synsedimentary micrite deposition and acicular carbonate precipitation: Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation, China. *Precambrian Research*, 1999, 96(3): 183–208
- [21] Shi M, Feng Q L, Khan M Z, et al. An eukaryote-bearing microbiota from the early mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation, Tianjin, China and its significance. *Precambrian Research*, 2017, 303: 709–726
- [22] Zhu S X, Zhu M Y, Knoll A H, et al. Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China. *Nature Communications*, 2016, 7: 11500
- [23] Zhang K, Zhu X K, Wood R A, et al. Oxygenation of the Mesoproterozoic ocean and the evolution of complex eukaryotes. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5): 345–350
- [24] Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, et al. A group of rifting events in the Terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Research*, 2002, 5(1): 123–131
- [25] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth Science Reviews*, 2004, 67(1): 91–123
- [26] Zhang Yun. Proterozoic stromatolite microfloras of the Gaoyuzhuang Formation (Early Sinian: Riphean), Hebei, China. *Journal of Paleontology*, 1981, 55(3): 485–506
- [27] 杨欣德, 李星云. 辽宁省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997
- [28] Zhou Hongrui, Mei Mingxiang, Luo Zhiqing, et al. Sedimentary sequence and stratigraphic framework of the Neoproterozoic Qingbaikou system in the Yanshan region, North China. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 280–290
- [29] Lu Songnian, Li Huaikun, Zhang Chuanlin, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 2008, 160(1): 94–107
- [30] Schopf J W, Zhu Weiqing, Xu Zhaoliang, et al. Proterozoic stromatolitic microbiotas of the 1400–1500 Ma-old Gaoyuzhuang formation near Jixian, northern China. *Precambrian Research*, 1984, 24(3): 335–349
- [31] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 桂北泗里口老堡组硅质岩的常量、稀土元素特征及成因指示. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1098–1107
- [32] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 湖南安化留茶坡硅质岩的REE地球化学特征及其意义. *中国地质*, 2008, 35(5): 879–887
- [33] 杨恩林, 陈恨水, 陈焕, 等. 黔东南留茶坡组硅质岩元素地球化学特征与形成环境. *矿物学报*, 2011, 31(3): 406–411
- [34] Fan Haifeng, Wen Hanjie, Zhu Xiangkun, et al. Hydrothermal activity during Ediacaran–Cambrian transition: silicon isotopic evidence. *Precambrian Research*, 2013, 224: 23–35
- [35] Wang Jianguo, Chen Daizhao, Wang Dan, et al. Petrology and geochemistry of chert on the marginal zone of Yangtze Platform, western Hunan, South China, during the Ediacaran–Cambrian transition. *Sedimentology*, 2012, 59(3): 809–829
- [36] Tréguer P J, De La Rocha C L. The world ocean silica cycle. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 477–501
- [37] Tréguer P, Nelson D M, Aleido J V B, et al. The silica balance in the world ocean: a reestimate. *Science*, 1995, 268: 375–379
- [38] Sims P A, Mann D G, Medlin L K. Evolution of the diatoms: insights from fossil, biological and molecular data. *Phycologia*, 2006, 45(4): 361–402
- [39] Yin Z J, Zhu M Y, Davidson E H, et al. Sponge grade body fossil with cellular resolution dating 60 Myr before the Cambrian. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112(12): E1453–E1460
- [40] Maliva R G, Knoll A H, Simonson B M. Secular change in the Precambrian silica cycle: insights from chert petrology. *GSA Bulletin*, 2005, 117(7/8): 835–845
- [41] Siever R, Helgeson H C. The silica cycle in the Precambrian. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(8): 3265–3272
- [42] Shen Bing, Ma Haoran, Ye Heqing, et al. Hydrothermal origin of syndepositional chert bands and nodules in the Mesoproterozoic Wumishan Formation: implications for the evolution of Mesoproterozoic cratonic basin, North China. *Precambrian Research*,

- 2018, 310: 213–228
- [43] Froelich P N, Hambrick G A, Andreae M O, et al. The geochemistry of inorganic germanium in natural waters. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1985, 90(C1): 1133–1141
- [44] Mortlock R A, Frohlich P N. Continental weathering of germanium: GeSi in the global river discharge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(8): 2075–2082
- [45] Mortlock R A, Froelich P N, Feely R A, et al. Silica and germanium in Pacific Ocean hydrothermal vents and plumes. *Earth & Planetary Science Letters*, 1993, 119(3): 365–378
- [46] Froelich P N, Mortlock R A, Shemesh A. Inorganic germanium and silica in the Indian Ocean: biological fractionation during (Ge/Si) Opal formation. *Global Biogeochemical Cycles*, 1989, 3(1): 79–88
- [47] Zhang Chuanheng, Wu Zhengjie, Gao Linzhi, et al. Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in the Mesoproterozoic Wumishan Formation, North China, and their geologic implications. *Science in China: Series D*, 2007, 50(3): 350–358
- [48] Zhang S H, Li Z X, Evans D A D, et al. Pre-Rodinia supercontinent Nuna shaping up: a global synthesis with new paleomagnetic results from North China. *Earth & Planetary Science Letters*, 2012, 353: 145–155
- [49] Flügel E. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag, 2010
- [50] Purser B H, Brown A, Aissaoui D M. Nature, origins and evolution of porosity in dolomites // Purser B, Tucker M, Zenger D. *Dolomites (International Association of Sedimentologists Special Publication)*. Oxford: Blackwell Science, 1994, 21: 283–308
- [51] Lucia F J, Major R P. Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization // Purser B, Tucker M, Zenger D. *Dolomites (International Association of Sedimentologists Special Publication)*. Oxford: Blackwell Science, 1994, 21: 325–341
- [52] Moore C H, Heydari E. Burial diagenesis and hydrocarbon migration in platform limestones: a conceptual model based on the Upper Jurassic of the Gulf Coast of the USA. *AAPG Bulletin*, 1993, 73(2): 166–181