

文章编号: 1009-3850(2013)01-0068-07

川西北中二叠统栖霞组白云岩储层特征及控制因素

郝毅, 周进高, 张建勇, 倪超, 谷明峰, 辛勇光

(中国石化杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 本文以四川盆地西北部钻井岩心及露头剖面样品的镜下岩石学特征为基础, 以微区多参数实验分析数据为依据, 对四川盆地西北部中二叠统栖霞组白云岩储层进行了研究。认为栖霞组白云岩储层类型主要为结晶型白云岩及残余颗粒型白云岩。储集空间主要为晶间孔、晶间溶孔、粒间孔、溶蚀孔洞以及裂缝。白云岩储层的发育主要受到沉积微相、早期白云石化作用、晚期白云石化作用、溶蚀作用以及构造作用等因素控制。其中浅滩沉积微相是储层形成的环境基础; 早期白云石化作用是储层保存的重要条件; 溶蚀作用及构造裂缝是储层改善的关键因素; 而晚期白云石的生成则对储集空间有一定的破坏作用。

关键词: 四川盆地西北部; 中二叠统; 栖霞组; 白云岩储层; 控制因素

中图分类号: TE122.2⁺³

文献标识码: A

1 地质背景

川西北地区构造位置处于上扬子准地台北部边缘的3个次级构造带的交汇部位^[1]。栖霞组下部主要为深灰-黑灰色生屑灰岩, 含泥质较重; 上部主要为灰色生屑灰岩, 局部夹白云岩或硅质结核, 生物繁茂, 总厚度一般100~200m^[2]。沉积环境属于碳酸盐台地^[3]或缓坡^[4]。中二叠统栖霞组白云岩储层一直以来都是四川盆地重要的勘探领域, 而栖霞组白云岩也是众学者们研究的重点^[3-44]。栖霞组白云岩纵向上主要发育在栖霞组二段中上部(图1), 属于生屑滩的高部位, 顶部还可见一套云化不彻底的豹斑云灰岩。白云岩厚度一般不超过栖霞组地层厚度的10%^[5]; 而横向上这套白云岩厚度变化较快, 平面分布较局限。据目前研究主要分布在川西北地区及川中局部地区的生屑浅滩中^[6], 浅滩核部尤为发育, 但总体上分布规律较复杂, 研究程度较低。

2 储层类型

构成栖霞组白云岩储层的主要类型有: 结晶白

云岩、残余颗粒白云岩以及豹斑云灰岩。

(1) 结晶白云岩(图2A): 在镜下观察可见细晶结构(晶体大小0.03~0.1mm)及中-粗晶结构(晶体大小0.1~0.5mm), 晶形主要为半自形-自形晶体。白云石晶体表面较污浊, 晶形较好的白云石可见明显的雾心亮边结构, 有的具波状消光和机械双晶, 还有的见少量铁白云石。由于白云石重结晶后颗粒粗大, 在野外风化后呈似白糖的颗粒状, 也正是因为如此, 也常称栖霞组这套结晶白云岩为“砂糖状”白云岩。在阴极发光下, 白云石晶体呈较均匀的橘红色, 反映了其形成环境可能为Eh值较低、锰含量相对较高的还原环境, 有的白云石见有较窄的深红色环带, 反映为埋藏后多阶段和不同时期不断生长的产物。

(2) 残余颗粒白云岩(图2B、C): 其最明显的特征是可以看到残留的颗粒结构, 有的还可见明显的生屑结构。颗粒原岩本身未完全溶解即被白云石交代, 保留了原岩原有的性质, 普遍为泥晶结构、颜色较暗。颗粒间可见颜色明亮白云石, 晶形较好, 应为后期在有孔隙空间的环境下自由生长形成的。

收稿日期: 2012-04-01; 改回日期: 2012-06-09

作者简介: 郝毅(1981-), 男, 工程师, 沉积储层专业。E-mail: haoy_hz@petrochina.com.cn

资助项目: 国家科技重大专项课题(编号: 2011ZX05004-002)

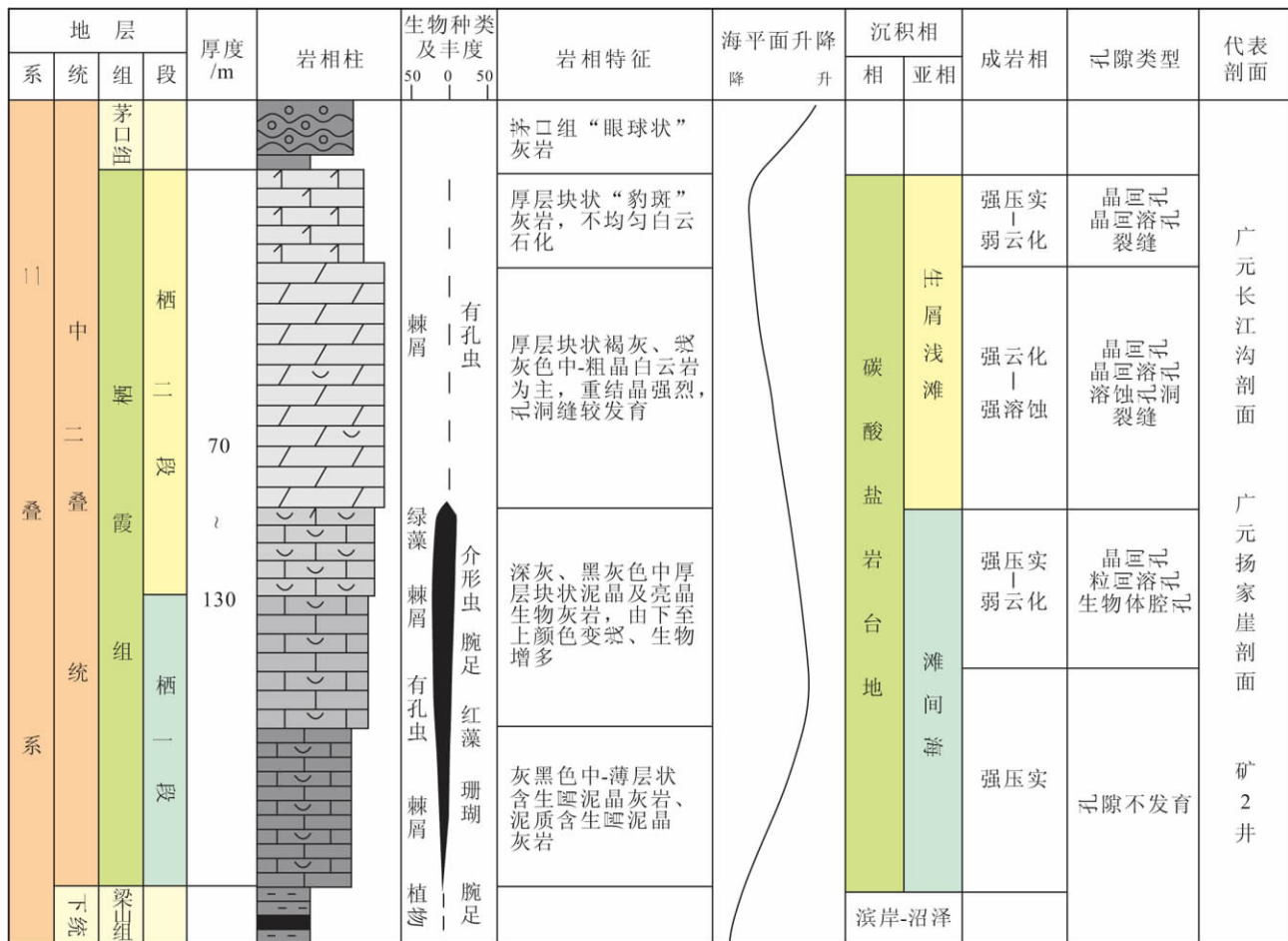


图1 川西北中二叠统栖霞组有利成岩作用与孔隙演化综合柱状图(据蒋志斌等^[7] 2009 修编)

Fig.1 Column showing the diagenesis and porosity evolution in the Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin (modified from Jiang Zhibin et al. ,2009)

(3) 豹斑云灰岩: 在野外露头此类岩性特征明显(图 2D), 整个岩石被不均匀的白云石化。灰白色的为泥晶生屑灰岩(流水冲刷后颜色较浅), 暗色的为含泥质白云岩。白云岩主要沿着宿主灰岩的裂缝或孔隙发育, 两者明暗相间, 如同豹纹一般。镜下观察(图 2E、F) 可见豹斑云灰岩中的白云岩为泥质白云岩。白云石晶体主要为细-中晶, 晶形较好, 以自形晶为主, 白云岩中可见残留的生屑结构(图 2E 箭头所示)。在豹斑云灰岩中, 白云岩与宿主生屑灰岩可呈缝合线过渡或渐变过渡(图 2E、F)。

不同岩石类型的物性具有明显差异。从前人的研究资料^[8] 可看出(图 3) 物性最好的是中-粗晶白云岩, 平均孔隙度为 5.38%, 最大孔隙度可达 15.64%, 平均渗透率为 $1.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 最大渗透率为 $0.63 \mu\text{m}^2$; 其次是细晶白云岩和颗粒白云岩, 平均孔隙度分别为 3.43% 和 2.84%, 平均渗透率为 $1.40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $1.565 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 孔隙度最低的是豹斑云灰岩, 只见有少量晶间孔和晶间溶孔, 其平均

孔隙度一般小于 1%, 但渗透率较高, 平均为 $3.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由此可见, 栖霞组中储集性能最好的是结晶白云岩, 其次是残余颗粒白云岩, 较差的是豹斑云灰岩, 对储层贡献意义不大。较高的渗透率可能从侧面反映了该类岩石的形成是与裂缝型孔隙相关的, 孔隙度较低的主要原因是储集空间被后期形成的自形白云石晶体所充填。

3 储集空间特征

栖霞组白云岩的储集空间主要包括: 晶间孔、晶间溶孔、溶蚀孔洞、粒间孔及裂缝等。

(1) 晶间孔: 位于自形-半自形白云石晶粒之间, 常呈多面体型(图 4A、B), 直径一般 0.01 ~ 0.5mm。一般情况下孔隙周围的晶粒越大。晶间孔则越大, 局部被灰泥或沥青充填-半充填, 面孔率一般 1% ~ 2%, 局部可达 5% 以上。泥-粉晶白云岩中的晶间孔很小, 通常借助于高倍显微镜和扫描电镜才能加以识别。此外, 在裂缝和溶洞内充填胶结物

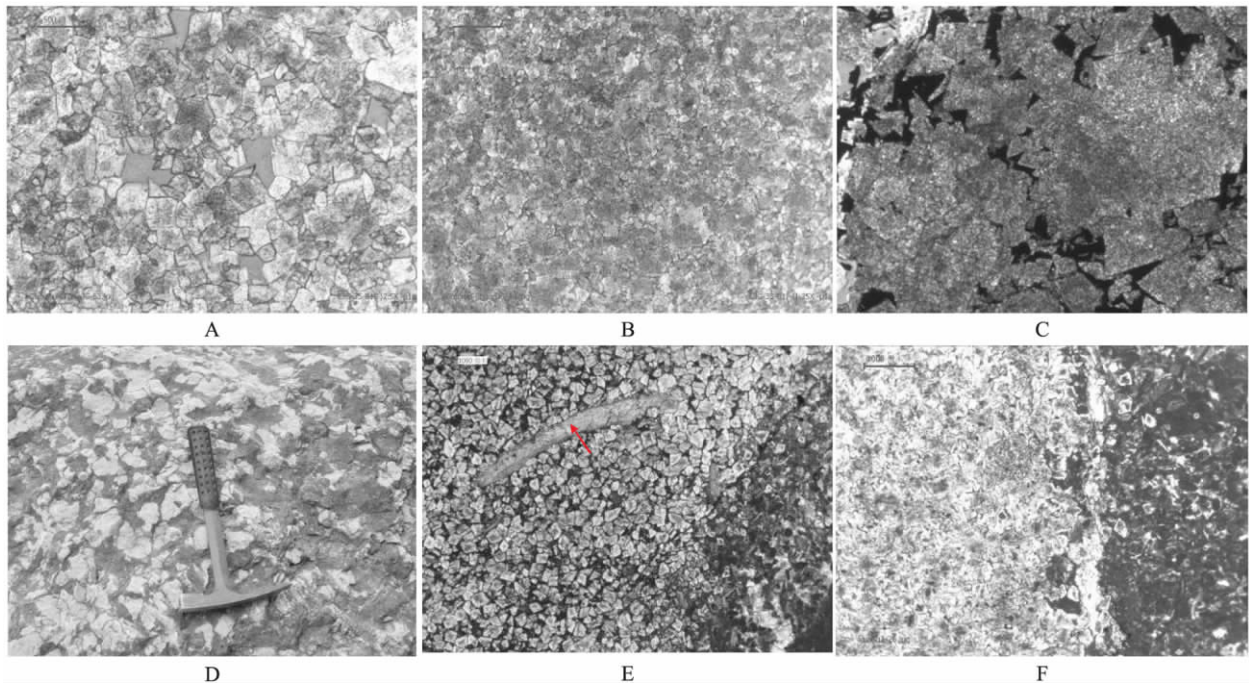


图2 四川盆地栖霞组白云岩储层岩石类型

A. 结晶白云岩,长江沟剖面,铸体薄片 $2.5\times(-)$; B. 残余颗粒白云岩,长江沟剖面,铸体薄片 $1.25\times(-)$; C. 残余颗粒白云岩,K2井 $2.5\times(-)$; D. 豹斑状云灰岩(长江沟剖面野外照片); E. 豹斑状云灰岩,长江沟剖面,铸体薄片,右下为宿主灰岩,白云石中可见残留生屑, $1.25\times(-)$; F. 豹斑状云灰岩,K2井,左为白云岩,右为灰岩, $1.25\times(-)$

Fig. 2 Types of the dolostone reservoirs from the Qixia Formation in the Sichuan Basin

A. Crystalline dolostone from the Changjianggou section, cast section, plane-polarized light, $2.5\times$; B. Residual grainy dolostone from the Changjianggou section, cast section, plane-polarized light, $1.25\times$; C. Residual grainy dolostone from the K-2 well, plane-polarized light, $2.5\times$; D. Field picture of leopard dolomitic limestone from the Changjianggou section; E. Leopard dolomitic limestone from the Changjianggou section, cast section, plane-polarized light, $1.25\times$; F. Leopard dolomitic limestone from the K-2 well, plane-polarized light, $1.25\times$

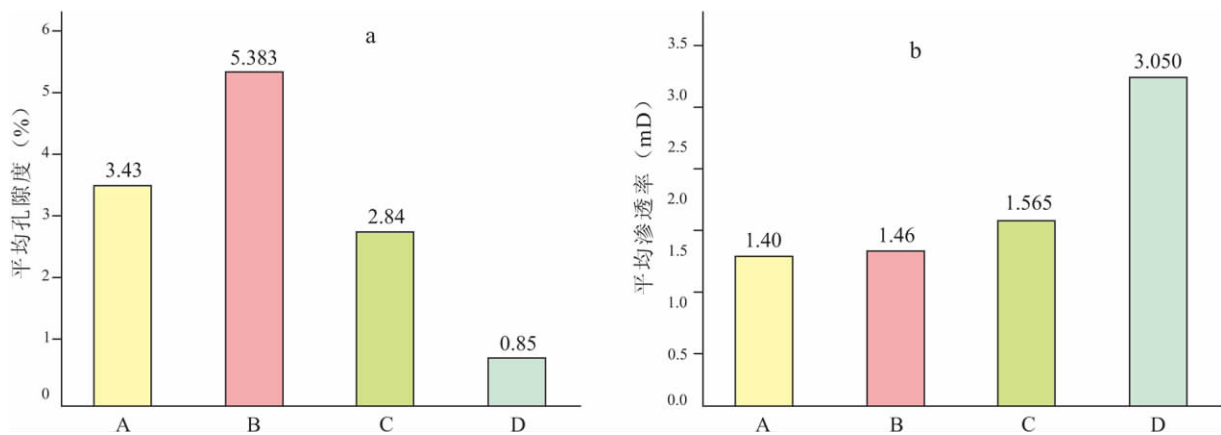


图3 栖霞组岩石类型与孔隙度及渗透率关系直方图(据石新等^[8] 2005,修编)

a. 岩石类型与孔隙度关系直方图; b. 岩石类型与渗透率关系直方图

A. 细晶白云岩; B. 中粗晶白云岩; C. 残余颗粒白云岩; D. 豹斑状灰岩(云质灰岩)

Fig. 3 Bar charts showing the relationship between the dolostone types and porosity (a) and permeability (b) in the Qixia Formation (modified from Shi Xin et al., 2005)

A. Finely crystalline dolostone; B. moderately to coarsely crystalline dolostone; C. Residual grainy dolostone; D. Leopard limestone (dolomitic limestone)

之间也发育少量的晶间孔。这类孔隙是栖霞组结晶白云岩中最常见的孔隙类型。

(2) 晶间溶孔: 是在晶间孔发育的基础上, 经过后期溶蚀作用扩大的结果, 孔隙直径一般 0.5 ~ 2mm, 其显著特征就是孔隙周围可见明显的溶蚀痕迹(图 4C、D)。这类孔隙在溶洞周围的白云岩中尤为发育, 面孔率一般为 2% ~ 5%, 部分生屑内部的粉晶白云石晶体间、裂缝和溶洞内的亮晶充填物之间也可见少量此类孔隙。晶间溶孔也是栖霞组白云岩储层中较为常见的孔隙类型。

(3) 溶蚀孔洞: 是在早期晶间孔或晶间溶孔的基础上继续溶蚀扩大的结果(图 4E、F、G), 孔隙直

径往往大于晶间孔及晶间溶孔, 一般 >2mm, 孔隙周边溶蚀很严重, 很难看到原来的孔隙特征, 细晶白云岩、中-粗晶白云岩和颗粒白云岩中均可见此类溶蚀孔洞发育。由于有些溶洞由于较大, 薄片下是无法观察到的, 部分呈蜂窝状, 可能是有机酸或 TSR 作用溶蚀所致(图 4E、F)。局部孔洞被粗-巨晶方解石、粉晶自形石英和沥青半充填, 宏观面孔率一般 3% ~ 6%, 局部可达 10% 以上。这类孔隙是栖霞组白云岩储层中最主要的储集空间之一, 但由于全直径物性分析样品较少, 因此实际平均物性应该高于参与统计的数据。

(4) 粒间孔: 主要发育在残余颗粒白云岩之中

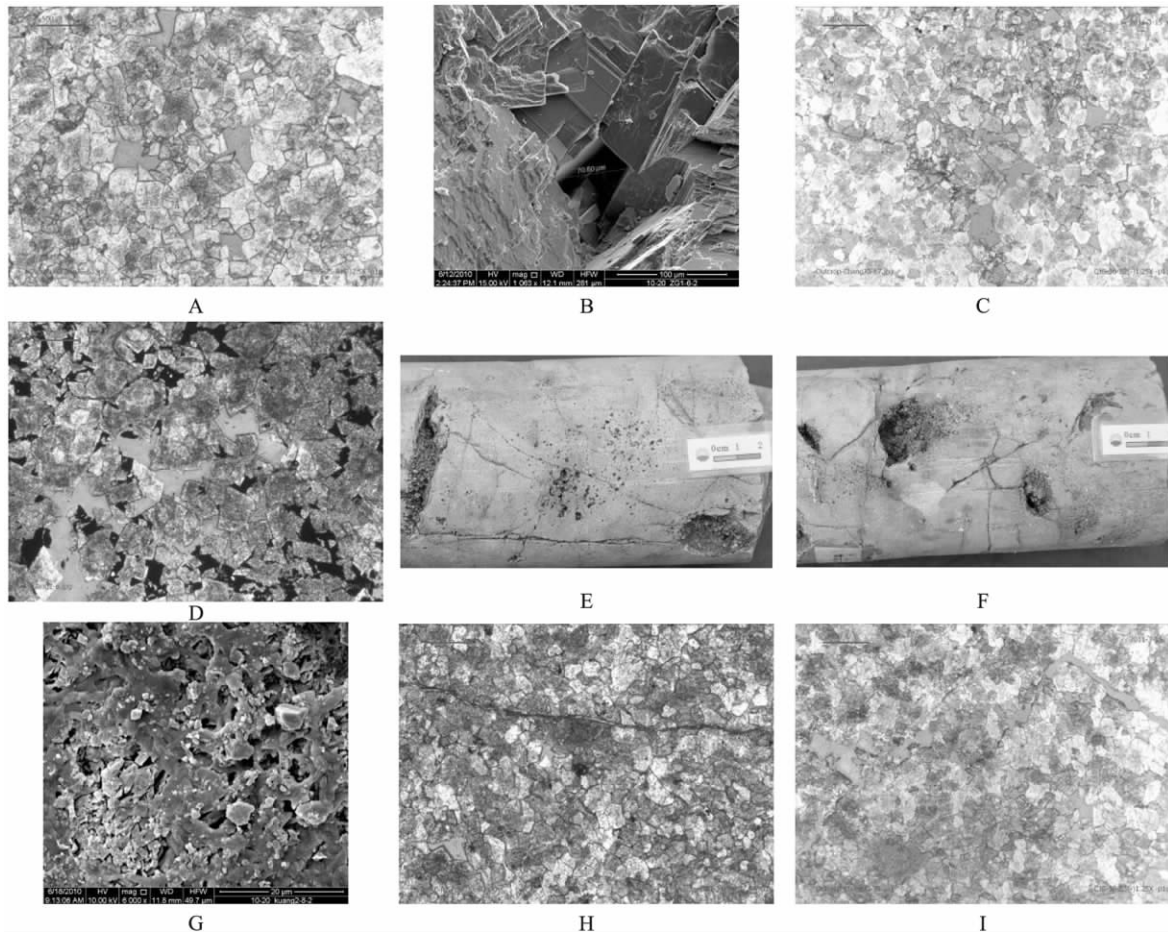


图 4 四川盆地栖霞组白云岩储集空间类型

A. 晶间孔(长江沟剖面 铸体薄片); B. 晶间孔 SEM 照片(ZG-1 井); C. 晶间溶孔(长江沟剖面 铸体薄片); D. 晶间溶孔(K-2 井); E. 溶蚀孔洞及裂缝(K-2 井 2448.95-2449.17m); F. 溶蚀孔洞及裂缝(K-2 井 2426.71-2426.97m); G. 溶蚀孔洞 SEM 照片(K-2 井); H. 裂缝(长江沟剖面 铸体薄片); I. 溶蚀扩大缝(长江沟剖面 铸体薄片)

Fig. 4 Types of the reservoir spaces of the dolostone reservoirs from the Qixia Formation in the Sichuan Basin

A. Intercrystal pores, Changjianggou section, cast section; B. Intercrystal pores, ZG-1 well, SEM microphotograph; C. Intercrystal solution openings, Changjianggou section, cast section; D. Intercrystal solution openings, K-2 well; E. Solution pores and solution fissures, 2448.95-2449.17 m of the K-2 well; F. Solution pores and solution fissures, 2426.71-2426.97 m of the K-2 well; G. Solution pores, K-2 well, SEM microphotograph; H. Solution fissures, Changjianggou section, cast section; I. Expanded solution fissures, Changjianggou section, cast section

(图 2B、C) 孔隙直径一般 0.05 ~ 0.2mm, 局部见溶蚀扩大痕迹。由于残余颗粒之间常常被自生白云石充填, 形成晶间孔, 因此原生的粒间孔较为少见, 但也是栖霞组白云岩较为重要的储集空间。

(5) 裂缝: 栖霞组白云岩中裂缝普遍发育, 其中主要以构造缝为主(图 4E、F、H)。另外还有一些早期的压溶缝, 但大多已被后期充填, 成为无效缝。钻井岩心及薄片中可以见到裂缝相当发育, 有些裂缝被明显的溶蚀扩大(图 4I)。据前人研究印支期-燕山期产生的构造缝基本已被充填, 现今看到的有效裂缝主要是喜山期的产物, 多为高角度裂缝(图 4E)。由于时代较近, 因此裂缝未被充填或半充填。除本身是有效的储集空间外, 还可以对整个储集层起到连通疏导的作用, 在整个中二叠统储层中起到了相当关键的作用。

此外, 栖霞组白云岩储层中还可见少量的残余粒间孔、鸟眼孔、生物体腔孔和粒内溶孔等, 总体来说比例较小, 对储集性能影响不大。

4 白云岩储层的控制因素

栖霞组白云岩储层的形成主要受到沉积微相、白云石化作用、溶蚀作用以及构造作用等因素的控制。

(1) 沉积微相: 栖霞组中上部的生屑滩相沉积是形成白云岩储层的物质基础。准同生期生屑滩或其高部位暴露遭受溶蚀形成高孔渗带, 为后来白云石化及有机酸溶解提供流体通道。另外由于生屑滩处于相对高部位, 水动力条件较强。因此泥质等杂质含量较少, 导致岩性质地较脆。在后期的构造作用中容易产生裂缝, 提供储集空间及连通通道。

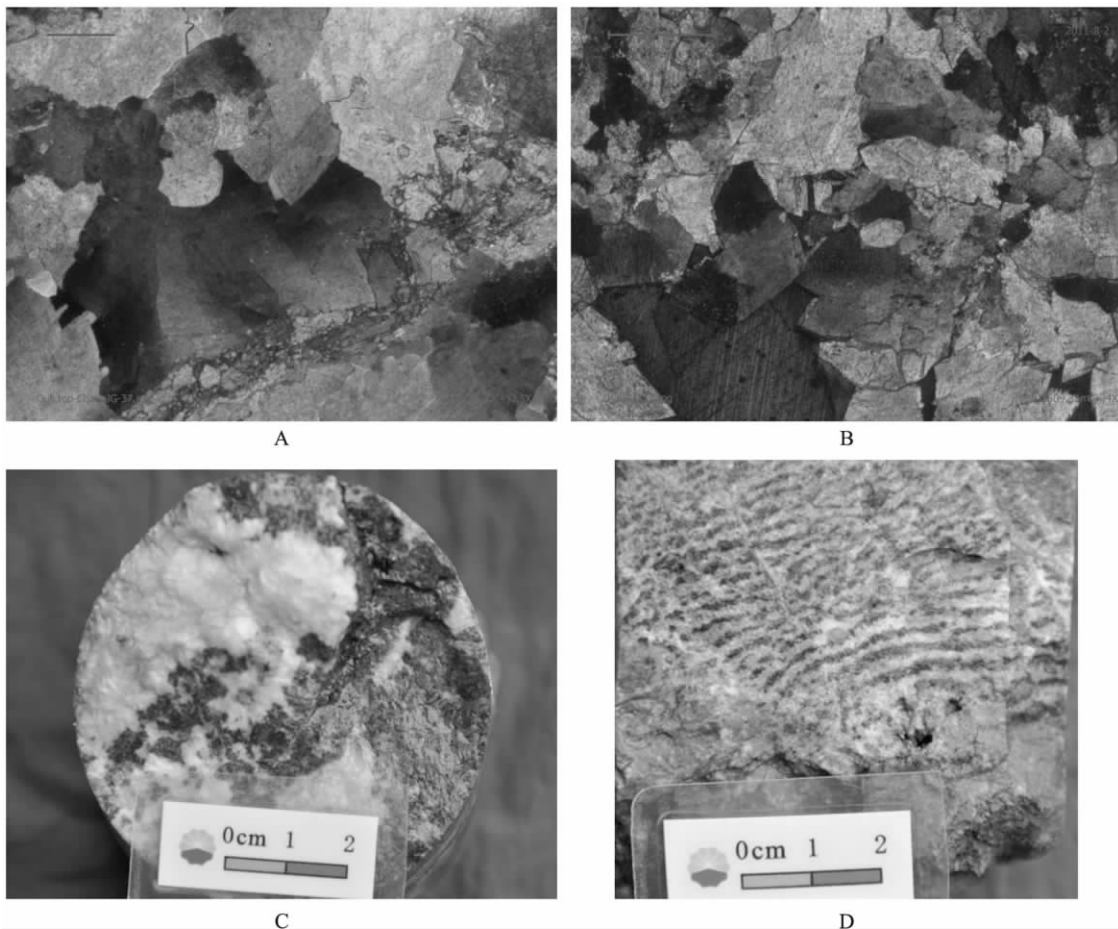


图 5 四川盆地栖霞组热液成因白云石证据

A. 鞍状白云石具波状消光(长江沟剖面); B. 鞍状白云石具波状消光(ZG1井); C. 白云石沿裂缝分布(Z1井 3496.5-3497.23m); D. 斑马纹状白云石(Z1井 3478.04-3478.14m)

Fig. 5 Evidences for the hydrothermal origin of the dolomite from the Qixia Formation in the Sichuan Basin

A. Saddle dolomite with undulatory extinction, Changjianggou section; B. Saddle dolomite with undulatory extinction, ZG-1 well; C. Dolomite along the fissures, 3496.5 - 3497.23 m of the Z-1 well; D. Zebra dolomite, 3478.04 - 3478.14 m of the Z-1 well

在图 2B、C 中可以明显的看到颗粒原岩的幻影,即使在结晶白云岩中(如图 2A),这种现象也是可见的。因此不论是结晶白云岩还是残余颗粒白云岩,其都与浅滩环境形成的颗粒原岩有着一定的关系。颗粒原岩以及伴随早期浅滩环境的淡水淋滤作用是储层形成的基础。

(2) 早期白云石化作用: 早期白云石化是储层保存的关键因素。这里的早期就是指随着埋藏深度逐渐增加,压实压溶作用大规模发生之前的时间段(本文不对白云石化模式进行讨论)。在地层的持续埋藏过程中,灰岩相对白云岩而言更容易发生压实及压溶作用,这不但对储层空间起到了破坏作用,而且压溶产生的富钙流体还容易填充到周围已经形成的孔隙中,可以说对储层起到了双重破坏作用。而较早云化的颗粒白云岩在埋藏过程中最大限度地保存了原始孔隙,为今后的酸性流体继续溶蚀或油气运移提供空间及通道。据镜下观察,早期白云岩化主要以交代原岩为主。因此原岩的结构形态被保留了下来,主要表现为晶粒小,晶形差,杂质含量高。

(3) 溶蚀作用: 溶蚀作用是改善储层的重要作用。栖霞组溶蚀作用主要分为两个阶段。第一阶段发生在准同生期。由于生屑滩位置较浅,在高位体系域时期时常有机会暴露出水面,导致大气淡水对其淋滤溶蚀,形成了早期的一些基质孔储集空间。第二阶段发生在埋藏期,主要是有机酸、TSR 作用等流体对储层已形成的孔洞进行继续溶蚀扩大(图 4 E、F)。由于致密岩层后期流体难以进入,因此埋藏时期的溶蚀作用主要发生在已存在的储层内,并对其基质孔进行进一步的改善,主要形成一些较大的溶孔溶洞。

(4) 构造作用: 构造作用产生的裂缝系统是连通非均质储层的关键。在四川盆地栖霞组储层中,无论是白云石化作用还是溶蚀作用,都表现出较强的非均质性,储层分布规律较差,储层之间连通性较差。而喜山期的构造运动则产生了较为复杂的断裂-裂缝系统,除本身作为储集空间以外,还对储层起到连通-疏导作用。另外,早期的构造运动(如东吴运动)使当时已沉积的栖霞组-茅口组地层受到抬升、侵蚀作用,可能会形成较大的溶洞系统,这也是栖霞组的主要储集空间。

(5) 晚期形成的白云石: 在岩心及薄片的观察中可以看到很多晚期热液白云石的特征,如波状消光的鞍状白云石(图 5A、B),白云石沿裂缝充填分

布(图 5C)及斑马纹状白云石(图 5D)。另外还可以看到伴随有地开石、石英等热液矿物(北京勘探院 2010)。这类白云岩总的特征是晶体粗大,以粗晶为主。表面洁净,内部杂质含量低,自行程度较高,充填孔隙现象严重,与残余颗粒白云岩或据颗粒幻影结构的结晶白云岩相比,这类白云岩的物性较差,孔隙度较低。

5 结论

四川盆地中二叠统栖霞组白云岩储层一直以来都是重要的勘探领域。栖霞组白云岩纵向上主要发育在栖霞组二段中上部,属于生屑滩的高部位;横向上厚度变化较快,主要分布在川西北地区及川中局部地区的生屑浅滩中,浅滩核部尤为发育。储层类型以残余颗粒型白云岩以及据颗粒环境的结晶白云岩为佳,一些后期形成的热液成因的白云岩储集物性较差(如豹斑状云灰岩)。储集空间主要为晶间孔、晶间溶孔、粒间孔、溶蚀孔洞以及裂缝。浅滩沉积微相是储层形成的环境基础;早期白云石化作用是储层保存的重要条件;溶蚀作用及构造裂缝是储层改善的关键因素;而晚期白云石的生成则对储集空间有一定的破坏作用。

参考文献:

- [1] 郭正吾. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志, 卷十, 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [3] 胡明毅, 魏国等. 四川盆地中二叠统栖霞组层序-岩相古地理[J]. 古地理学报, 2010, 12(5): 515-526.
- [4] 陈宗清. 四川盆地中二叠统栖霞组天然气勘探[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 325-334.
- [5] 何幼斌, 冯增昭. 四川盆地及其周缘下二叠统细-粗晶白云岩成因探讨[J]. 江汉石油学院学报, 1996, 18(4): 15-20.
- [6] 宋文海. 四川盆地二叠系白云岩的分布及天然气勘探[J]. 天然气工业, 1985, 5(4): 22-23.
- [7] 蒋志斌, 王兴志等. 川西北下二叠统栖霞组有利成岩作用与孔隙演化[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 101-109.
- [8] 石新, 王兴志等. 川西北地区栖霞组白云岩储集层研究[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(2): 13-16.
- [9] 张荫本. 四川盆地二叠系中的白云岩化[J]. 石油学报, 1982, (1): 29-33.
- [10] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地地下二叠统沉积相及其勘探潜力区研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 10-12.
- [11] 徐世琦, 周建文等. 龙门山北段二叠系栖霞组二段白云岩储层特征[J]. 天然气工业, 2005, 25(增刊A): 59-61.
- [12] 魏国齐, 刘德来等. 四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 437-442.

- [13] 魏国齐, 杨威等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 442 - 448.
- [14] 袁浩, 尹富平等. 川西北地区下二叠统栖霞组白云岩分布与成因探讨 [J]. 四川地质学报, 2010, 30(4): 386 - 389.

The dolostone reservoirs from the Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin: Characteristics and controlling factors

HAO Yi, ZHOU Jin-gao, ZHANG Jian-yong, NI Chao, GU Ming-feng, XIN Yong-guang
(Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: The dolostone reservoirs in the Middle Permian Qixia Formation are dealt with in the light of petrographic and laboratory analysis of the core samples and outcrop samples collected from northwestern Sichuan Basin. The dolostone reservoirs in the Formation are composed of crystalline dolostones and residual grainy dolostones. The reservoir spaces include intercrystal pores, intercrystal solution openings, intergranular solution openings, solution pores and solution fissures. The development of the dolostone reservoirs are dominantly constrained by sedimentary microfacies, early dolomitization, late dolomitization, dissolution and tectonism. The shoal microfacies is believed to facilitate the formation of the dolostone reservoirs. The early dolomitization may be favourable for the preservation of the dolostone reservoirs. The dissolution and structural fissures may have exerted key influence on the improvement of the reservoir quality. However, the generation of late dolomites may be destructive to the reservoir spaces.

Key words: northwestern Sichuan Basin; Middle Permian; Qixia Formation; dolostone reservoirs; controlling factor