

文章编号:0253-9985(2012)01-0084-10

川东北盘龙洞长兴组-飞仙关组白云岩化特征及成因

陈琪¹, 胡文瑄¹, 李庆¹, 朱井泉²

(1. 南京大学 地球科学与工程学院 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:通过系统的野外调查和薄片鉴定,结合电子探针分析,认为四川盆地东北部盘龙洞长兴组-飞仙关组地层普遍发生白云岩化作用。不同类型的白云岩较发育,在纵向分布上具明显的分带性,由下至上依次为:生屑(含砂砾屑)白云岩、礁白云岩、结晶白云岩、鲕粒白云岩和泥-微晶白云岩。进一步研究表明,上述白云岩的成因模式主要有三种,即混合水白云岩化、渗透回流白云岩化和准同生白云岩化。混合水白云岩化为生屑(含砂砾屑)白云岩和礁白云岩的主要形成模式,这两类白云岩保持了岩石原始的沉积结构,白云岩化受原始结构的影响,具有离散的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和较负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,反映其形成于有大气淡水参与的相对开放的成岩环境。渗透回流白云岩化为结晶白云岩和鲕粒白云岩的主要形成机制,这两类白云岩具有一致的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和相对较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,较高的Fe、Mn含量。准同生白云岩化是泥-微晶白云岩的成岩模式,岩石以岩性致密,碳氧同位素值集中偏高为特征。

关键词:白云岩化;成因;长兴组;飞仙关组;盘龙洞;四川盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Characteristics and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin

Chen Qi¹, Hu Wenxuan¹, Li Qing¹ and Zhu Jingquan²

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 2. Institute of Geology and Geophysics & Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Systematic field investigation and thin section observation as well as electron microprobe determination reveal that dolomitization is common in the Changxing and Feixianguan formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin. Various types of dolomites are developed and distributed vertically in obvious zonation. From bottom to top, they are biological clastic dolomite, reef dolomite, crystalline dolomite, oolitic dolomite and micrite dolomite respectively. Our study showed that three genetic models could account for the formation process of the dolomites, including mixed-water dolomitization, infiltration and circumfluence dolomitization as well as penecontemporaneous dolomitization. The biological clastic and reef dolomites were mainly formed through the mixed-water dolomitization, which occurred in relatively open diagenesis environment with meteoric water input. These dolomites had different $\delta^{13}\text{C}$ values and more negative $\delta^{18}\text{O}$ values and remained original sedimentary structure of rocks which restricted dolomitization. The infiltration and circumfluence dolomitization resulted in the formation of the crystalline and oolitic dolomites which have same $\delta^{13}\text{C}$ values, less negative $\delta^{18}\text{O}$ values, Fe and Mn contents. The penecontemporaneous dolomitization created the micrite dolomite with tight lithology and less negative $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values.

Key words: dolomitization, genesis, Changxing Formation, Feixianguan Formation, Panlongdong, northeastern Sichuan Basin

收稿日期:2011-05-16;修订日期:2011-12-20。

第一作者简介:陈琪(1985—),男,硕士研究生,石油地质学。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05005002)。

四川盆地东北部是中国近年来油气重点勘探地区之一,相继发现了渡口河、铁山坡、罗家寨、普光等大型气田,累计探明储量已超过 $5\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1-3]。上二叠统长兴组-下三叠统飞仙关组发育的礁滩白云岩储层是该区油气的主力储层之一^[4-5]。因此,有关长兴组-飞仙关组海相碳酸盐岩储层,特别是优质礁滩相白云岩储层的成因、分布规律和控制因素受到石油工业界高度关注。

白云岩化作用是川东北地区碳酸盐岩形成过程中最为普遍和重要的作用,也是礁滩相优质储层形成的必备要素^[6-8]。根据前人研究,该区长兴组-飞仙关组发育的白云岩类型主要可分为泥-微晶白云岩、颗粒白云岩、礁白云岩、结晶白云岩^[9-14]。但关于这些白云岩的成因尚存在诸多分歧,不同学者提出了不同的成因机制和模式,如混合水模式^[15-16]、渗透回流模式^[17]、多期次埋藏模式^[12,18-19]、混合水和渗透回流模式^[20]、混合水和埋藏模式^[14,21-22]、混合水、渗透回流和埋藏模式^[9,13-14,23]。

针对上述问题,选择川东北宣汉盘龙洞剖面长兴组-飞仙关组碳酸盐岩剖面开展研究工作。前人对该剖面做过一些研究,主要集中在生物礁发育特征及形成机理方面^[15,24-27],认为白云岩化并不普遍,未作系统研究,因此没有引起重视。笔者的研究发现,该剖面上白云岩化非常普遍,是储层研究不可忽视的因素,因此开展了系统的岩相学鉴定和地球化学测试,试图揭示该剖面上白云岩化的基本特征、变化规律、以及成因机理,为进一步探讨川东北地区长兴组-飞仙关组白云岩储层的形成条件和预测提供理论依据。

1 剖面发育情况

盘龙洞剖面位于四川省宣汉县鸡唱乡,距羊鼓洞隧道约 8 km。在大地构造位置上,该区位于四川盆地东北边缘米仓山-大巴山前缘地带。盘龙洞地区长兴组为碳酸盐台地边缘相,属通江-梁平台地东北边缘,台地东边为鄂西-城口海槽盆地,西边为梁平-开江海槽(图 1)^[28-29];飞仙关组早期为局限台地相^[29-30]。

盘龙洞剖面出露连续,易于观测,主要发育吴家坪组、长兴组、飞仙关组(图 2)。吴家坪组主要岩性为含燧石结核的泥晶灰岩。长兴组为一套台地边缘相灰岩-白云岩层系,其中上部发育了完整

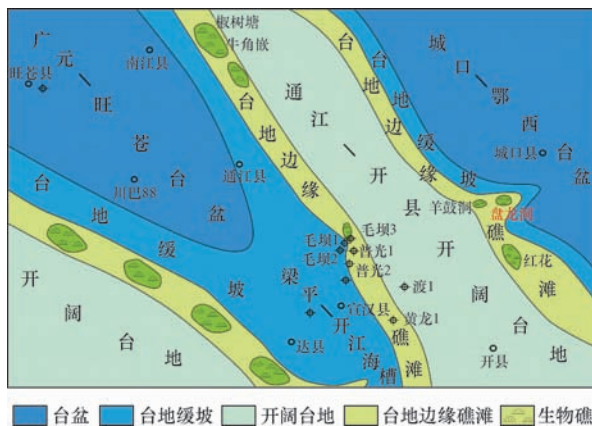


图 1 川东北地区长兴组沉积相示意图^[28](修改)

Fig. 1 Sketch map showing sedimentary facies of Changxing Formations, northeast Sichuan Basin

的台地边缘相生物礁沉积,由礁基、礁核及礁盖三部分组成:礁基厚约 50 m,由泥晶灰岩、生屑灰岩、生屑(砂砾屑)白云岩组成。礁核厚约 100 m,岩性由下往上为浅灰色海绵障积岩、海绵骨架岩和海绵障积岩;礁盖厚约 60 m,岩性主要为浅灰色结晶白云岩、泥-微晶白云岩。盘龙洞剖面飞仙关组出露不完全,与下覆长兴组呈不整合接触,岩性为鲕粒白云岩和泥-微晶白云岩。

详细野外观测和室内鉴定表明,盘龙洞剖面长兴组-飞仙关组地层普遍发生了白云岩化。生物礁以下的礁基地层白云化程度较弱,且不均匀;礁核往上至飞仙关组地层,发生了大规模较强度度的白云岩化,形成了较好的礁滩白云岩储层。进一步研究发现,从长兴组礁基地层上段至剖面上部的飞仙关组地层,发育不同类型的白云岩,其在纵向分布上具明显的分带性,由下往上依次可划分为生屑(含砂砾屑)白云岩、礁白云岩、结晶白云岩、鲕粒白云岩和泥-微晶白云岩(图 2)。

2 白云岩类型及特征

2.1 生屑(含砂砾屑)白云岩

生屑(含砂砾屑)白云岩主要分布于长兴组下段的礁基上部,厚约 27 m。这类白云岩保存了岩石的原始沉积结构,原岩为生屑灰岩或砂砾屑灰岩,其中生屑以腕足、海百合有孔虫为主。岩石白云岩化不彻底,白云石含量为 60%~80%,以生屑、砂砾屑优先白云化为特征(图 3a),生屑、砂砾



图 2 川东北盘龙洞长兴组-飞仙关组地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Changxing and Feixianguan formations in Panlongdong, northeast Sichuan Basin

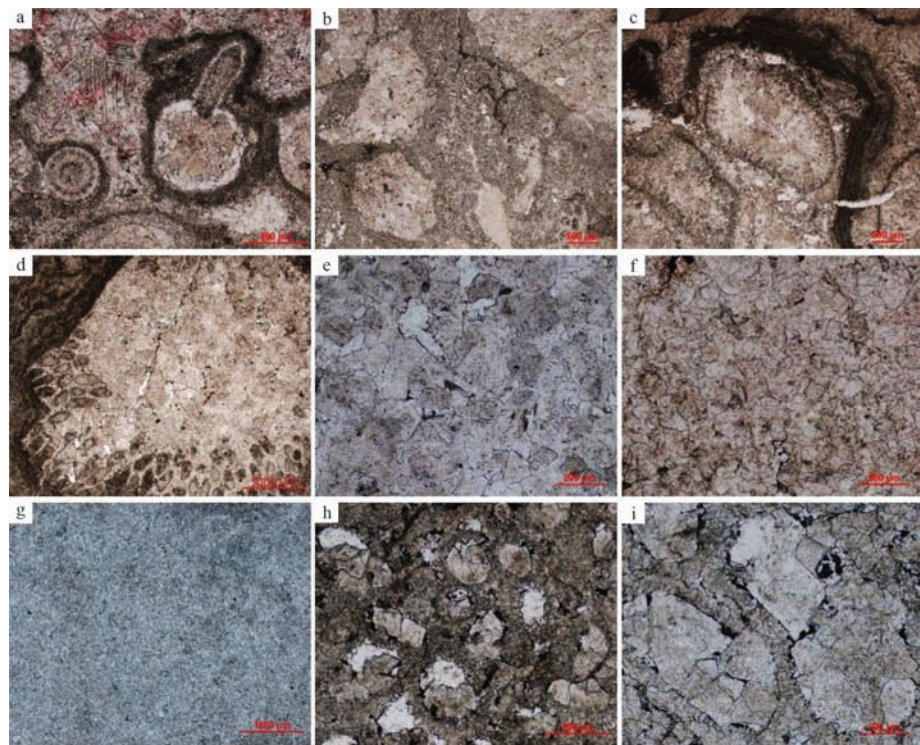


图 3 不同类型白云岩显微镜下照片

Fig. 3 Photomicrographs of different kinds of dolomites

a. 生屑白云岩,生屑优先白云岩化,方解石残余(红色部分);b. 砂砾屑白云岩,砂砾屑由粉细晶白云岩组成,胶结物为泥晶白云石;c. 礁白云岩,原始海绵骨架保存较好,发育骨架孔,溶蚀孔;d. 礁白云岩,原始海绵骨架保存完好,生物体腔内为细-中晶白云石,晶形较好,骨架间为泥-微晶白云石,e. 细晶白云岩,晶形半自形-自形,具雾心亮边结构,重结晶作用较强,晶间孔、晶间溶孔较发育;f. 粉-细晶白云岩,岩石发生去白云岩化,白云石边缘被溶蚀交代呈不规则状;g. 泥-微晶白云岩,白云石晶粒在微晶以下,岩性较致密,孔隙不太发育;h. 鲕粒白云岩,鲕粒铸模孔十分发育,铸模孔内不完全充填细-中白云石,呈示底构造;i. 鲕粒白云岩,鲕粒铸模孔被细-中晶白云石完全充填,孔内壁见沥青贴边

(图中所有薄片均为染色薄片,照片都为单偏光下拍摄。)

屑由半自形-它形粉-细晶白云石构成,少数由微-粉晶白云石组成;发育有亮晶白云石环边胶结,裂隙、生物模孔中发育晶形较好细晶白云石,为半自形-自形;胶结物或基质为泥晶白云石或方解石,与生屑、砂砾屑界线较明显(图 3b)。岩石中孔隙较发育,主要为生物模孔,溶蚀孔等。

2.2 礁白云岩

礁白云岩广泛分布于长兴组礁核中,厚约 80m。组成生物礁的骨架岩和障积岩由于受到大规模较强程度的白云岩化作用,已经演变成了礁白云岩,具体可分为海绵礁骨架白云岩和海绵礁障积白云岩。礁白云岩白云岩化程度较强,白云石含量达 90%以上。岩石保存了残余生物骨架结构,白云岩化受岩石的原始结构影响,生物骨架和生物体腔优先白云石化,由半自形粉-细白云石组

成,填隙物为泥-微晶方解石和白云石(图 3c,d)。岩石中孔洞非常发育,以骨架孔、溶蚀孔洞为主,孔洞内常见方解石和沥青充填。电子探针背散射图像显示局部骨架间和骨架内方解石被富钙的碳酸锶不完全交代,形成钙碳酸锶矿(图 4a,b 亮白色部分),骨架间残留的方解石后期被选择性溶蚀,形成较好的溶孔,有些溶孔沿骨架结构成排分布于骨架间。

2.3 结晶白云岩

结晶白云岩主要分布于长兴组上部,生物礁之上,厚约 59 m。岩石具结晶结构,白云石晶体大小大都在粉晶以上,通常为细晶。按晶体大小可分细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩等几个亚类。结晶白云岩白云化程度较高,白云石含量 80%以上,岩石的原始结构缺乏或保存较少(少部分结晶

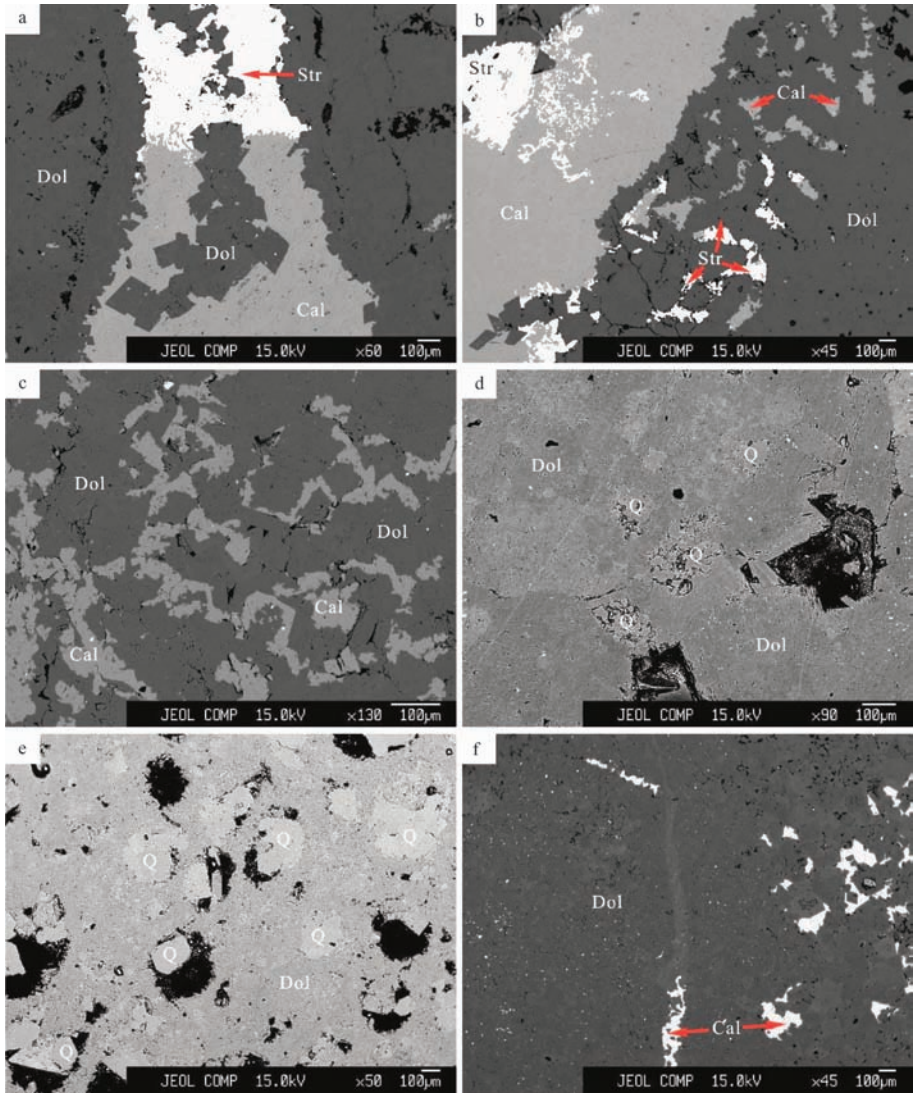


图 4 不同类型白云岩电子探针背散射照片

Fig. 4 Back scattered electron images of different kinds of dolomites

a. 礁白云岩,骨架间方解石部分被碳酸锶交代(亮白色);b. 礁白云岩,骨架内残留的方解石被选择性溶蚀,形成孔隙,骨架下方解石未被溶蚀,部分被钙碳酸锶交代;c. 结晶白云岩,发生去白云岩化,白云石边缘被交代溶蚀呈不规则状;d. 结晶白云岩,石英硅化,晶间溶孔;e. 鲕粒白云岩,鲕粒铸模孔十分发育,铸模孔内充填石英;f. 泥-微晶白云岩,残留的方解石后期被溶蚀,形成针状溶孔(图中 Cal 代表方解石,Dol 代表白云石,Str 代表碳酸锶矿,Q 代表石英。)

白云岩具残余粒屑结构,如鲕粒幻影)。岩石中白云石晶体大多为半自形-自形,多数具重结晶现象,部分晶体具雾心亮边结构(图 3e)。岩石孔隙较为发育,主要有晶间孔、晶间溶孔、残余粒内和粒间溶孔。部分白云岩有不同程度的去白云岩化现象(图 3f,图 4c),去白云岩化形成的方解石具有白云石的晶形,方解石从表面向内部交代白云石;在电子探针背散射图像中,发生去白云岩化白云石呈碎斑状分布,白云石边缘被溶蚀交代成港湾状、不规则状(图 4e)。此外,少部分白云岩具石英硅化现象,石英具白云石假晶,局部有微弱溶蚀(图 4d)。

2.4 鲕粒白云岩

鲕粒白云岩主要分布于飞仙关组下段,与下覆的长兴组泥-微晶白云岩呈不整合接触,厚约 38m。鲕粒白云岩的原岩为鲕粒灰岩,白云岩化程度较强,白云石含量达 95% 以上,岩石保存了原始的鲕粒结构,鲕粒含量 50%~75%,粒径一般为 0.2~0.5 mm,由粉-细晶白云石组成,保存有栉壳状等厚环边。岩石孔隙十分发育,具大量的鲕粒铸模孔,粒间溶孔,孔内多见沥青贴边。部分鲕粒铸模孔充填有中-粗晶白云石,有的孔

内被部分充填,呈示底构造(图 3h),有的孔内完全被充填(图 3i),充填的白云石晶形较好,多具雾心亮边结构。飞仙关组下段的白云岩具较大程度的石英硅化现象,多数铸模孔内充填了具白云石假晶的石英(图 4e),甚至整个鲕粒发生硅化。

2.5 泥-微晶白云岩

泥-微晶白云岩主要分布于剖面顶部,长兴组顶部亦有小段发育,累计厚约 30 m。岩石具泥晶-微晶结构,缺乏生物活动痕迹,晶粒大小大都在微晶以下,岩性比较致密,孔隙不太发育(图 3g),局部缝合线发育,缝合线内见沥青充填。部分泥-微晶白云岩中有方解石残余,呈星点状或不规则状分布,这些岩石时后期被溶蚀,形成针状孔(图 4f)。

3 白云岩成因

川东北长兴组-飞仙关组白云岩的成因一直是众多研究者关注的热点问题,本文在前人研究的基础上,通过详细的野外观测和系统的薄片鉴定,结合地球化学分析,认为盘龙洞剖面白云岩主要存在 3 种成因模式,即:混合水白云岩化,渗透

回流白云岩化及准同生白云岩化。

3.1 混合水白云岩化

在过去 30 多年里,混合水模式主要用来解释古代与蒸发盐岩无关的潮下礁滩白云岩的成因。Badiozamani^[31]用实验方法证明在海水以 5% ~ 30%与地下大气水组成的混合水,对方解石仍不饱和,对白云石已经饱和,从而出现白云石交代方解石。近年来,越来越多的学者对混合水模式提出了质疑,认为其应用范围可能很小,只有局部意义^[32-34]。但本文研究认为,用混合水白云岩化来解释盘龙洞生屑(砂砾屑)白云岩和礁白云岩的形成还是比较合理的。

生屑白云岩和礁白云岩碳氧同位素值分布规律具有一定的相似性(表 1;图 5 中 I 区),其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布较为离散,分布于-1.1‰~3.7‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值相对其他类型的白云岩明显偏负,其中生屑白云岩最负达-7.7‰,反映这两类白云岩的成岩环境具有一定得开放性,其成岩过程中有大气淡水参与。电子探针数据同样表明(表 2),礁白云岩和生屑白云岩的 Na, Fe, Mn 含量普遍较低,亦说明受淡水影响。Ca/Mg 趋向于 1,接近化学计量白云石,说明混合水白云岩化进行较为彻底。

表 1 各类白云岩碳、氧同位素分析值

Table 1 Carbon and Oxygen isotope values of different kinds of dolomites									
样品号	样品类型	层位	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, ‰	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$, ‰	样品号	样品类型	层位	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, ‰	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$, ‰
PL-2	结晶白云岩	P ₃ c	2.3	-3.6	PL-41	礁白云岩	P ₃ c	3.1	-3.8
PL-3	结晶白云岩	P ₃ c	1.7	-4.3	PL-43	礁白云岩	P ₃ c	1.0	-5.2
PL-6	结晶白云岩	P ₃ c	-0.6	-5.4	PL-46	泥微晶白云岩	P ₃ c	1.3	-3.8
PL-8	结晶白云岩	P ₃ c	0.2	-5.2	PL-47	泥微晶白云岩	P ₃ c	1.0	-3.9
PL-9	结晶白云岩	P ₃ c	1.1	-5.1	PL-51	泥微晶白云岩	T ₁ f	1.4	-3.5
PL-10	结晶白云岩	P ₃ c	2.0	-4.9	PL-54	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.7	-3.4
PL-12	结晶白云岩	P ₃ c	1.8	-4.7	PL-56	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.7	-3.9
PL-14	结晶白云岩	P ₃ c	1.3	-5.2	PL-59	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.8	-3.8
PL-16	结晶白云岩	P ₃ c	0.8	-3.2	PL-60a	鲕粒白云岩	T ₁ f	2.0	-3.4
PL-18	结晶白云岩	P ₃ c	1.1	-3.8	PL-60b	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.8	-3.9
PL-21	泥晶灰岩	P ₃ c	4.3	-4.4	PL-62	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.5	-3.8
PL-26	生屑白云岩	P ₃ c	3.4	-5.9	PL-63	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.9	-3.2
PL-27	生屑白云岩	P ₃ c	1.3	-7.7	PL-65	鲕粒白云岩	T ₁ f	1.3	-4.8
PL-30	生屑白云岩	P ₃ c	3.7	-5.6	PL-67	泥微晶白云岩	T ₁ f	2.1	-3.7
PL-32	生屑白云岩	P ₃ c	2.1	-5.2	PL-69	泥微晶白云岩	T ₁ f	1.4	-3.6
PL-34	礁白云岩	P ₃ c	-1.1	-6.6	PL-70	鲕粒白云岩	T ₁ f	2.2	-2.9
PL-40	礁白云岩	P ₃ c	2.2	-4.9	PL-72	泥微晶白云岩	T ₁ f	-0.1	-3.0

表 2 各类型白云岩电子探针成分

Table 1 EPMA data of different kinds of dolomites

样品类型	样品数/个	平均含量, %							
		K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Ca/Mg
结晶白云岩	3	0.001 2	0.001 0	31.069 5	23.594 5	0.005 5	0.003 3	0.006 8	0.941 2
泥微晶白云岩	2	0.006 1	0.003 4	32.188 7	22.427 9	0.015 4	0.010 0	0.044 7	1.026 1
礁白云岩	4	0.006 8	0.005 8	31.909 0	22.672 0	0.012 0	0.008 8	0.003 0	1.004 8
鲕粒白云岩	5	0.002 2	0.010 5	30.381 8	22.732 8	0.016 1	0.004 9	0.015 4	0.955 6

从沉积环境上分析,生物礁形成的水体环境较浅,当海平面下降时,生物礁暴露于海平面之上,大气淡水注入,沿生物骨架孔隙和生物体腔孔下渗,与岩石内存留的海水混合形成混合水,从而发生混合水白云岩化。生屑(含砂砾屑)白云岩与礁白云岩在空间产状上的伴生关系说明其成因均于混合水相关。位于剖面上部的礁核由于与地表联系密切,形成的混合水充足,故礁核发生较大程度白云岩化,礁核下部及礁基地层由于相对较封闭,形成的混合水不足,发生不均匀白云岩化。位于礁核下部的礁白云岩(图 6a)和组成礁基的生屑灰岩(图 6b)的显微照片都显示生物体腔和生物碎屑优先白云岩化,正是因为混合水首先在生物体腔和生物模孔中形成,优先使其发生白云岩化。

3.2 渗透回流白云岩化

渗透回流白云岩主要形成位于剖面上部结晶白云岩和鲕粒白云岩。这两类白云岩的碳氧同位素值具有很大程度的相似性(图 5 中 II 区),他们的 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本一致且较为稳定,表明其白云岩化流体性质类似。 $\delta^{13}\text{C}$ 值绝大部分分布在 1.5‰ ~ 2‰,略高于同期海水值^[35], $\delta^{18}\text{O}$ 值主要分布在 -3‰ ~ -5‰,明显高于混合水形成生屑白云岩和礁白云岩,碳、氧同位素都表明形成结晶白云岩和鲕粒白云岩的白云岩化流体具有高于同期海水的浓缩卤水特征。部分结晶白云岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都较同类型白云岩偏负(图 5 中 IV 区),可能是因为成岩后期发生了去白云岩化作用,产生较多的灰质成分具较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。电子探针成分分析发现,鲕粒白云岩 Na, Fe 含量相对礁白云岩和生屑白云岩较高,表明白云岩化流体盐度较高。同时鲕粒白云岩和结晶白云岩具有较低的 Ca/Mg 比值,也说明了富镁流体的来源。

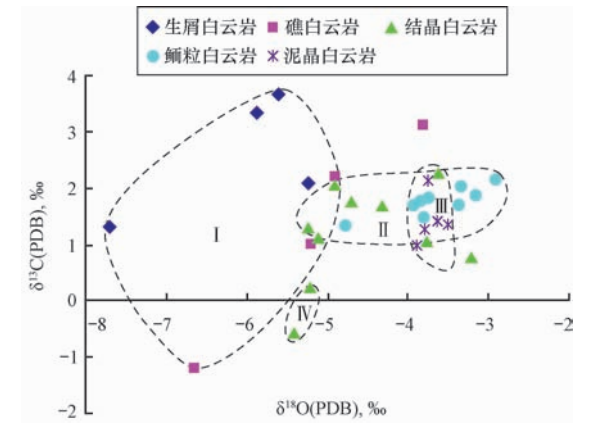


图 5 各类型白云岩碳、氧同位素交汇图

Fig. 5 Crossplots of Carbon and Oxygen isotope data for different kinds of dolomites

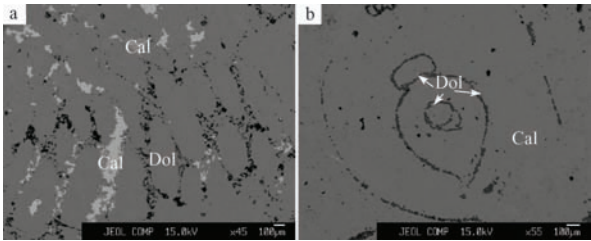


图 6 礁白云岩和生屑灰岩电子探针背散射照片

Fig. 6 Back scattered electron images of reef dolomites and biological clastic limestones

a. 礁白云岩中生物骨架优先白云岩化,骨架间残留方解石,后期被溶蚀,形成沿骨架排列的孔隙;b. 生屑灰岩中生物残壳被优先交代成白云石

Moore^[36]总结认为,渗透回流的白云岩总是与蒸发台地有着亲近的空间关系,白云岩化的渗透回流接收单元一定具有较高的孔隙度和渗透率。区域沉积相分析发现,盘龙洞西部的通江-开县地区在长期为开阔-局限台地,这个台地称为通江-开县台地,位于台地东部边缘的盘龙洞为台地边缘礁滩相沉积。研究表明,通江-开县台地在飞仙关中晚期变为蒸发台地^[25],这个台地

中形成富镁的高盐度卤水,在台地中央形成准同生白云岩的同时,高盐度的卤水还通过渗透的方式,回流至周边相邻的盘龙洞地区,使盘龙洞剖面飞仙关组地层和长兴组上部地层发生渗透回流白云岩化。位于剖面上部的飞仙关组鲕粒白云岩以及长兴组上部地层,由于受到早期淡水的淋滤作用,形成大量的铸模孔,溶蚀孔,具有较高的空隙率和渗透率,保证了卤水回流的通道,并容纳了浓缩的富镁卤水,在浅埋藏的条件下,发生白云岩化。

3.3 准同生白云岩化

盘龙洞准同生白云岩化为位于剖面顶部的泥-微晶白云岩的成因。这类白云岩具有最高的碳氧同位素值, $\delta^{13}\text{C}$ 分布与鲕粒白岩和结晶白云岩类似(图5中Ⅲ区),大多分布在1.5%~2%。 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,且分布较集中,位于-3.5%~-4%。泥-微晶白云岩Fe,Mn含量和Ca/Mg比值都较高,指示白云化流体同样具有高盐度卤水特征。同时,岩相学研究表明泥-微晶白云岩岩性致密,缺乏生物活动,孔隙不发育,说明其形成于环境较为局限的潟湖潮坪环境。在这种相对封闭局限的环境下,由于气候干旱,生物减少,持续的蒸发作用,产生高盐度的卤水,从而形成泥-微晶结构的准同生白云岩。野外考察发现泥-微晶白云岩与间断的灰岩层成互层产出(图7a),镜下泥-微晶白云石呈纹层条带状分布(图7b),这些都是准同生白云岩化的直观表现。

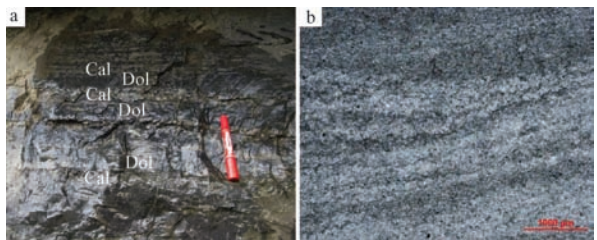


图7 泥-微晶白云岩野外照片及显微镜下照片
Fig.7 Field photo and photomicrograph of micrite dolomites

4 结论

1) 川东北盘龙洞剖面长兴组-飞仙组地层普遍发生白云岩化,形成了不同类型的白云岩,这些白云岩的分布在纵向上具有明显的分带性,由下

往上依次可划分为生屑(含砂砾屑)白云岩、礁白云岩、结晶白云岩、鲕粒白云岩和泥-微晶白云岩。

2) 在详细的野外观测基础上,通过系统的显微镜、电子探针观察和地球化学分析,结合区域沉积环境和沉积相分析,认为盘龙洞剖面白云岩主要存在三种成因模式,即:混合水白云岩化,渗透回流白云岩化及准同生白云岩化。

3) 混合水白云岩化是位于剖面中下部的长兴组生屑(含砂砾屑)白云岩和礁白云岩的主要形成机制,这两类白云岩保持了岩石原始的沉积结构,白云岩化受原始结构的影响,具有离散的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和较负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,反映其形成于有大气淡水参与的相对开放的成岩环境。渗透回流白云岩化主要形成剖面上部的长兴组结晶白云岩和飞仙关组鲕粒白云岩,这两类白云岩具有一致的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和相对较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,同时具有较高的Fe,Mn含量,反映了其形成环境具有一定得封闭性;准同生白云岩化是剖面顶部泥-微晶白云岩的成因模式,岩石以岩性致密,缺乏孔隙发育,碳、氧同位素值集中偏高为特征,说明其形成于环境较为局限的潟湖潮坪环境。

参 考 文 献

[1] 戴金星,黄土鹏,刘岩,等.中国天然气勘探开发60年的重大进展[J].石油与天然气地质,2010,31(6):689-698.
Dai Jinxing,Huang Shipeng,Liu Yan et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years[J]. Oil & Gas Geology,2010,31(6):689-698

[2] 王一刚,文应初,洪海涛,等.川东北三叠系飞仙关组深层鲕滩气藏勘探目标[J].天然气工业,2004,24(12):5-9.
Wang Yigang,Wen Yingchu,Hong Haitao,et al. Exploitation target of the deep oolitic beach gas reservoir of the triassic system Feixianguan formation in northeast part of Sichuan Basin [J] Natural Gas Industry,2004,24(12):5-9.

[3] 王一刚,洪海涛,夏茂龙,等.四川盆地二叠,三叠系环海槽礁,滩富气带勘探[J].天然气工业,2008,28(01):22-27.
Wang Yigang,Hong Haitao,Xia Maolong,et al. Exploitation of reef-bank gas reservoirs surrounding Permian and Triassic troughs in Sichuan Basin [J] Natural Gas Industry,2008,28(01):22-27.

[4] 陈洪德,钟怡江,侯明才,等.川东北地区长兴组-飞仙关组碳酸盐岩台地层序充填结构及成藏效应[J].石油与天然气地质,2009,30(5):539-547.
Chen Hongde,Zhong Yijiang,Hou Mingcai,et al. Sequence

- styles and hydrocarbon accumulation effects of carbonate rock platform in the Changxing-Feixianguan formations in the north-eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 539–547.
- [5] 朱忠发, 刘建清. 上扬子台地晚二叠世礁相油气藏的断块构造控制与勘探方法建议[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(2): 168–176.
- Zhu Zhongfa, Lu Jiangqing. Control of fault blocks upon the Late Permian reservoirs of reef facies in the Upper Yangtze Platform and exploration suggestions[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(2): 168–176.
- [6] 史建南, 郑荣才, 冯青平, 等. 川东北长兴组埋藏白云石化流体来源与油气倒灌式成藏[J]. *天然气工业*, 2009, 29(03): 5–8.
- Shi Jiannan, Zhen Rongcai, Feng Qingping, et al. Fluid origin of burial dolomitization and hydrocarbon accumulation model of backward charging in Changxing formation, NE Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(03): 5–8.
- [7] 郭彤楼. 川东北地区飞仙关组鲕滩储层成岩作用——以宣汉-达县及元坝区块为例[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(5): 620–631.
- Guo Tonglou. Diagenesis of the Feixianguan oolitic shoal reservoirs in the northeastern Sichuan Basin-examples from Xuanhan-Daxian and Yuanba areas[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 620–631.
- [8] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 810–818.
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 810–818.
- [9] 陈更生, 曾伟, 杨雨, 等. 川东北部飞仙关组白云石化成因探讨[J]. *天然气工业*, 2005, 25(04): 40–41.
- Chen Gengsheng, Zeng Wei, Yang Yu, et al. Discussion on dolomitization genesis of Feixianguan formation in Northeastern Sichuan[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 24(04): 40–41.
- [10] 黄思静, Hairuoqing, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩铈含量、铈同位素组成与白云石化流体[J]. *岩石学报*, 2006, 22(08): 2123–2132.
- Huang Sijing, Hairuoqing, Pei Changrong, et al. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan of China. [J]. *Acta Petrologica Sinica*. 2006, 22(08): 2123–2132.
- [11] 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. *矿物岩石*. 2007, 27(04): 78–84.
- Zheng Rongcai, Hu Zhonggui, Feng Qingping, et al. Genesis of dolomite of the Changxing formation Upper Permian, northeast Sichuan Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*. 2007, 27(04): 78–84.
- [12] 高梅生, 郑荣才, 文华国, 等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构的证据[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(03): 297–304.
- Gao Meisheng, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, et al. Lithological characteristics of dolomite in the Lower Triassic Feixianguan Formation of the NE Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*. 2007, 34(03): 297–304.
- [13] 张婷婷, 刘波, 秦善. 川东北二叠系-三叠系白云岩成因研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(05): 799–809.
- Zhang Tingting, Liu Bo, Qin Shan. The origin of Permian and Triassic dolostones in Northeastern Sichuan Province, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*. 2008, 44(05): 799–809.
- [14] 黄思静, 佟宏鹏, 刘丽红, 等. 川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2363–2372.
- Huang sijing, Tong Hongpeng, Liu Lihong, et al. Petrography, geochemistry and dolomitization mechanisms of Feixianguan dolomites in Triassic, NE Sichuan, China. [J]. *Acta Petrologica Sinica*. 2009, 25(10): 2363–2372.
- [15] 牟传龙, 马永生, 王瑞华, 等. 川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁成岩作用研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2005(21): 198–202.
- Mou Chuanlong, Ma Yongsheng, Wang Ruihua, et al. Diagenesis of the Upper Permian Panlongdong organic reefs in north-eastern Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*. 2005(21): 198–202.
- [16] 魏国齐, 杨威, 张林, 等. 川东北飞仙关组鲕滩储层白云石化成因模式[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(02): 162–166.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Zhang Lin, et al. Dolomitization genetic of Feixianguan group oolitic beach reservoir in northeast Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*. 2005, 16(02): 162–166.
- [17] 罗平, 苏立萍, 罗忠, 等. 激光显微取样技术在川东北飞仙关组鲕粒白云岩碳氧同位素特征研究中的应用[J]. *地球化学*, 2006, 35(03): 325–330.
- Luo Ping, Su Liping, Luo Zhong, et al. Application of laser micro-sampling technique to analysis of C and O isotopes of oolitic dolomites in Feixianguan Formation, Northeast Sichuan [J]. *Geochimica*. 2006, 35(03): 325–330.
- [18] 郑荣才, 耿威, 郑超, 等. 川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因[J]. *石油学报*, 2008, 29(06): 815–821.
- Zheng Rongcai, Gong Wei, Zheng Chao, et al. Genesis of dolostone reservoir of Feixianguan Formation in Lower Triassic of northeast Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*. 2008, 29(06): 815–821.
- [19] 郑荣才, 文华国, 郑超, 等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构与 Sr 同位素和 Sr 含量的证据[J]. *岩石学报*. 2009, 25(10): 2459–2468.
- Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Zheng Chao, et al. Genesis of dolostone of the Feixianguan Formation, Lower Triassic in the NE Sichuan basin: Evidences from rock structure and strontium content and isotopic composition [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2459–2468.

- [20] 曾伟,黄先平,杨雨,等.川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因及分布[J].西南石油大学学报,2007,29(01):19-22.
Zeng Wei,Huang Xianping,Yang Yu,et al. The origin and distribution of dolostone in Feixianguan Formation in Lower Triassic series,Northeast Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University. 2007,29(01):19-22.
- [21] 杨晓萍,赵文智,曹宏,等.川东北三叠系飞仙关组鲕滩气藏有利储集层的形成与分布[J].石油勘探与开发,2006,33(01):17-21.
Yang Xiaoping,Zhao Wenzhi,Cao Hong,et al. Formation and distribution of Triassic Feixianguan oolitic bank favorable reservoir in the NE Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2006,33(01):17-21.
- [22] 陈辉,田景春,张翔,等.川东北地区下三叠统飞仙关组鲕滩白云岩成因[J].天然气工业,2008,28(01):42-46.
Chen Hui,Tian Jingchun,Zhang Xiang,et al. Dolomitization genetic of the Lower Triassic Lower Triassic group oolitic beach in Northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2008,28(01):42-46.
- [23] 苏立萍,罗平,胡社荣,等.川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕粒滩成岩作用[J].古地理学报,2004,6(02):182-190.
Su Liping,Luo Ping,Hu Sherong,et al. Diagenesis of oolitic bank of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in Luoji-zhai Gas Field,northeastern Sichuan Province[J]. Journal of Palaeogeography,2004,6(02):182-190.
- [24] 牟传龙,谭钦银,王立全,等.四川宣汉盘龙洞晚二叠世生物礁古油藏的发现及其重要意义[J].地质论评,2003(03).
Mou Chuanlong,Tan Qinyin,Wang Liquan,et al. The discovery and their importance of the Late Permian organic reefal oil pool in Panlongdong, Xuanhan, Sichuan [J]. Geological Review,2003(03).
- [25] 牟传龙,谭钦银,余谦,等.四川宣汉盘龙洞晚二叠世生物礁古油藏剖面序列[J].沉积与特提斯地质,2003,23(03):60-64.
Mou Chuanlong,Tan Qinyin,Yu Qian,et al. The Late Permian organic reefal oil pool section in Panlongdong, Xuanhan, Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2003,23(03):60-64.
- [26] 牟传龙,谭钦银,余谦,等.川东北地区上二叠统长兴组生物礁组成及成礁模式[J].沉积与特提斯地质,2004,24(03):65-71.
Mou Chuanlong,Tan Qinyin,Yu Qian,et al. The organic reefs and their reef-forming model for the Upper Permian Changxing Formation in northeastern Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2004,24(03):65-71.
- [27] 李小燕,王琪,张瑞,等.川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁储层特征及其主控因素分析[J].天然气地球科学,2009,20(01):63-69.
Li Xiaoyan,Wang Qi,Zhang Rui,et al. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of Upper Permian Panlongdong Organic Reefs in Northeastern Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience,2009,20(1):63-69.
- [28] 马永生,牟传龙,谭钦银,等.达县-宣汉地区长兴组-飞仙关组礁滩相特征及其对储层的制约[J].地学前缘,2007,14(01):182-192.
Ma Yongsheng,Mou Chuanlong,Tan Qinyin,et al. Reef-bank features of Permian Changxing Formation and Triassic Feixianguan Formation in the Daxian-Xuanhan Area, Sichuan Province, South China and constraint for the reservoirs of natural gas [J]. Earth Science Frontiers,2007,14(01):182-192.
- [29] 倪新锋,陈洪德,田景春,等.川东北地区长兴组-飞仙关组沉积格局及成藏控制意义[J].石油与天然气地质,2007,28(04):458-465.
Ni Xinfeng,Chen Hongde,Tian Jingchun,et al. Sedimentary framework of Changxing-Feixianguan Formations and its control on reservoiring in northeastern Sichuan basin [J]. Oil & Gas Geology,2007,28(04):458-465.
- [30] 王一刚,张静,刘兴刚,等.四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相[J].古地理学报,2005,7(03):357-371.
Wang Yigang,Zhang Jing,Liu Xinggang,et al. Sedimentary facies of evaporative carbonate platform of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in northeastern Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography,2005,7(03):357-371.
- [31] Badiozamani K. The Dorag dolomitization model-application to the Middle Ordovician of Wisconsin[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1973,43(4):965-984.
- [32] Ward W C,Halley R B. Dolomitization in a mixing zone of near-seawater composition,late Pleistocene,northeastern Yucatan Peninsula[J]. Journal of Sedimentary Research,1985,55:407-420
- [33] Hard L A. Dolomitization;a critical view of some current views [J]. Journal of Sedimentary Research,1987,57:166-183
- [34] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Review. 2000, 52(3):1-81.
- [35] Veizer J,Hoefs J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1976,40(11):1387-1395.
- [36] Moore C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [M]. Elsevier Science,2001.

(编辑 董立)