

四川盆地元坝地区长兴组生物礁储层形成控制因素与发育模式

李宏涛,肖开华,龙胜祥,游瑜春,刘国萍,李秀鹏

(中国石化石油勘探开发研究院 海相油气藏开发重点实验室,北京 100083)

摘要:通过岩心、薄片观察和地震资料,重点对四川盆地元坝地区长兴组生物礁碳酸盐岩层序、沉积相、储层类型和成岩作用进行了研究,分析了生物礁储层结构和发育控制因素,总结了储层发育模式。研究结果显示,长兴组生物礁主要发育在SQ2中的台地边缘相带,纵向上由两个明显的成礁旋回构成,横向上呈“东早西晚”不对称分布,是储层发育的有利相带。生物礁(滩)型优质储层以低孔、中低渗透孔云岩为主,主要发育于四级层序上部生物礁礁盖部位,具典型“双层储层结构”。成岩早期大气水溶蚀和白云岩化是储层发育最重要的建设性成岩作用。综合分析认为,受高频层序控制生物礁沉积相是储层发育的基础,也是控制长兴组生物礁准同生期的大气水溶蚀和白云岩化作用的关键因素。埋藏溶蚀、埋藏白云岩化以及破裂作用进一步改善储集岩物性。元坝气藏长兴组生物礁储层具有“岩相控储、早期形成、后期改造”的发育模式。

关键词:成岩作用;储层结构;生物礁;层序;长兴组;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Controlling factors and development models of biohermal reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin

Li Hongtao, Xiao Kaihua, Long Shengxiang, You Yuchun, Liu Guoping, Li Xiupeng

(Key laboratory for Marine oil and Gas Exploitation, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on detailed observation of cores, thin sections and analysis of seismic data, this paper studied the high frequency sequence, sedimentary facies, reservoir types and diagenesis of the biohermal reservoirs in the Changxing Formation in Yuanba area, the Sichuan Basin, analyzed the architecture of the biohermal reservoir and the factors controlling its development, and formulated its development models. The results show that the bioherms in the Changxing Formation were favorable facies and were developed mainly on platform margin of the SQ2. Vertically, the bioherms consist of two distinct reef cycles. Laterally they are in asymmetrical distribution featuring in “early in the east and later in the west”. The quality biohermal reservoirs are dominated by dissolved dolomite with low porosity and moderate-low permeability and mainly occur in reef caps of the upper fourth-order sequences, and feature in typical “double layer reservoirs architecture”. Meteoric dissolution and dolomitization in the early diagenetic stage were the most important constructive diagenesis in the Changxing Formation. A comprehensive analysis indicates that the biohermal facies controlled by high-frequency sequence is the foundation of reservoir development, and also is the key factor controlling penecontemporaneous meteoric dissolution and dolomitization of the bioherms in Changxing Fm. Burial dissolution, burial dolomitization and fracturing further improve the physical properties of reservoir rocks. The development model of the biohermal reservoirs in the Changxing Fm of Yuanba area is ‘lithofacies-controlling reservoir, early formation and late reformation’.

Key words: diagenesis, reservoir architecture, bioherm, sequence, Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

四川盆地东北部元坝地区长兴组气藏是中石化近年来发现的大型气田之一,提交探明储量上千亿立方米,显示了良好的开发潜力^[1-2]。关于该气藏的储层特征及形成机制,众多学者也做了一些非常具体和深

入的工作^[3-11]。郭彤楼(2011)提出了储层分布明显受三级层序体系域及沉积相控制^[6]。李国蓉等(2014)提出多期溶蚀,并认为埋藏期溶蚀是储层发育的关键^[11]。孟万斌等(2014)提出多期白云岩化等成

收稿日期:2015-06-04;修订日期:2016-05-07。

第一作者简介:李宏涛(1977—),男,博士,储层开发地质、气藏精细描述。E-mail:liht.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-002);中国石化科技部项目(P15050)。

岩作用^[10]。Long et al (2011) 从成藏的角度提出扩散成藏机制^[1]。这些研究为元坝气藏的勘探评价提供了重要指导。

目前,元坝地区长兴组气藏全面转向开发。其中长兴组二段的生物礁滩相储层是中石化西南油气田产能建设的主力目标。根据储层研究对象复杂化的现实和精细化的要求,相关研究有待深入。如取心井段相对有限,如何利用测井曲线在全井段实现(高频)层序界面识别与划分,描述储层结构,(高频)层序、沉积微相以及成岩作用之间的相互联系,以及如何控制储层发育。尽管众多学者分别提出了本区长兴组沉积模式^[7]、白云岩化模式^[8-10]以及溶蚀作用模式^[11],但白云岩化及溶蚀主要形成的期次仍存在一些异议^[8-10],且储层发育是一个综合过程,其最终形成模式有待进一步总结。为此,本文利用长兴组钻井岩心、薄片观察、物性数据,并结合测井和地震方法,对元坝地区长兴组生物礁储层与层序、沉积及成岩作用的关系进行研究,弄清储层发育的控制作用,分析生物礁储层结构,总结储层发育模式,为储层地震预测地质模型的准确建立,以及更精细的储层描述提供依据,也为该气藏实现有效开发提供基础。

1 地质背景

元坝气田处于四川盆地川北坳陷与川中低缓构造带结合部,西北与九龙山背斜构造带相接,东北与通南巴构造带相邻,南与川中低缓构造带相连(图1)。长兴组气藏顶面为一大型低缓负向构造,西北部为九龙山背斜构造带向西南延伸的构造倾末端,呈北东向展布。南部为川中隆起向北倾斜深入气藏区的宽缓斜坡,东北部是凹陷(或大型复向斜)西端(图1),均以低幅度构造(或称局部高点)为主,走向主要为北西向。

总体上,元坝气田长兴组产状平缓,构造简单,断裂相对不发育^[1]。

川东北地区上二叠统沉积始于东吴运动形成的茅口组侵蚀面上的海侵。至长兴期,川东北地区古地理面貌呈北西-南东展布,呈现陆棚-台地相间格局,控制了长兴期生物礁、滩的发育^[3-4]。元坝地区位于梁平-开江陆棚西侧,主要发育开阔台地、台地边缘礁滩、斜坡、浅水陆棚和深水陆棚等沉积相带^[3-6],古地形总体为西南高、东北低。

2 层序特征与沉积相

前人在层序研究上,三级层序划分相对较多^[3-6],而相对高频的四级层序划分研究相对较少。本文利用详细的录井岩屑、岩心观察,并根据测井曲线的岩性响应特征,在三级层序界面的约束下,进一步对四级层序进行划分,为沉积亚相和微相划分提供基本框架。

2.1 层序界面识别与层序划分

长兴组可划分为两个三级层序 SQ1 和 SQ2,分别以 SB0, SB1 和 SB2 作为这两个三级层序的层序界面(图2)。SB0 界面为一典型的(生屑)灰岩与炭质泥岩的岩性岩相转换面,界面上、下电测曲线响应特征明显不同。SB2 界面在台地边缘区为暴露不整合界面,界面上、下分别为飞仙关组含泥灰岩与长兴组(溶孔)白云岩,三孔隙度曲线由光滑变化为齿状。SB2 界面在台地内部则主要为岩性、岩相转换面。SB1 界面性质与特征与 SB2 界面相似,在台地边缘区同样为暴露不整合面,但规模较小,一般为致密泥晶灰岩与(溶孔)白云岩的分界面,界面上、下电阻也有明显的由高向低突变的特征。SB2 界面在台地内部也同样为岩性、岩相转换面。层序内部体系域界面主要是岩性、岩相转

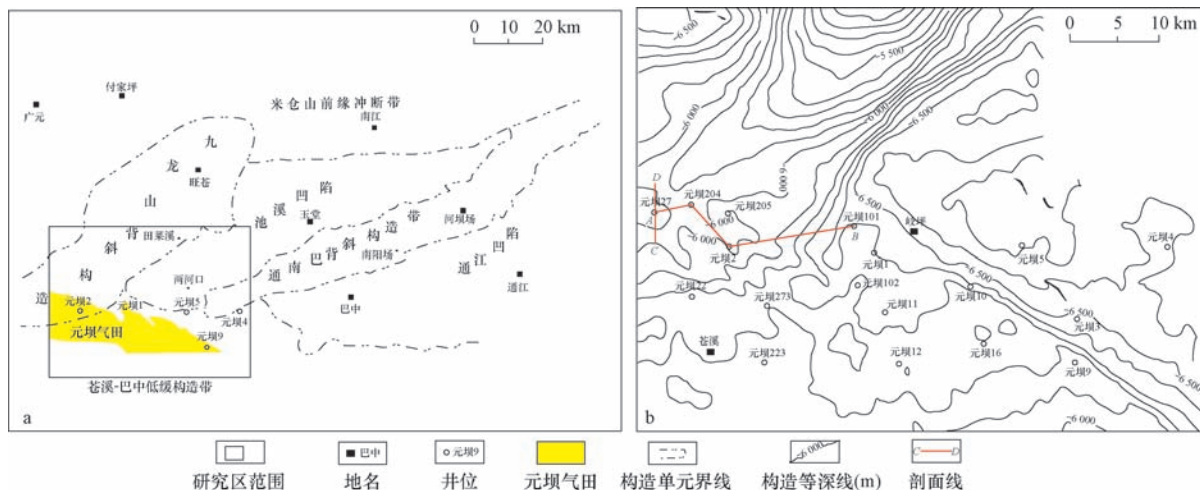


图1 川东北区域构造划分(a)及元坝区块构造特征(b)

Fig. 1 Tectonic unit division in the northeastern Sichuan Basin(a) and structural characteristics of Yuanba area(b)

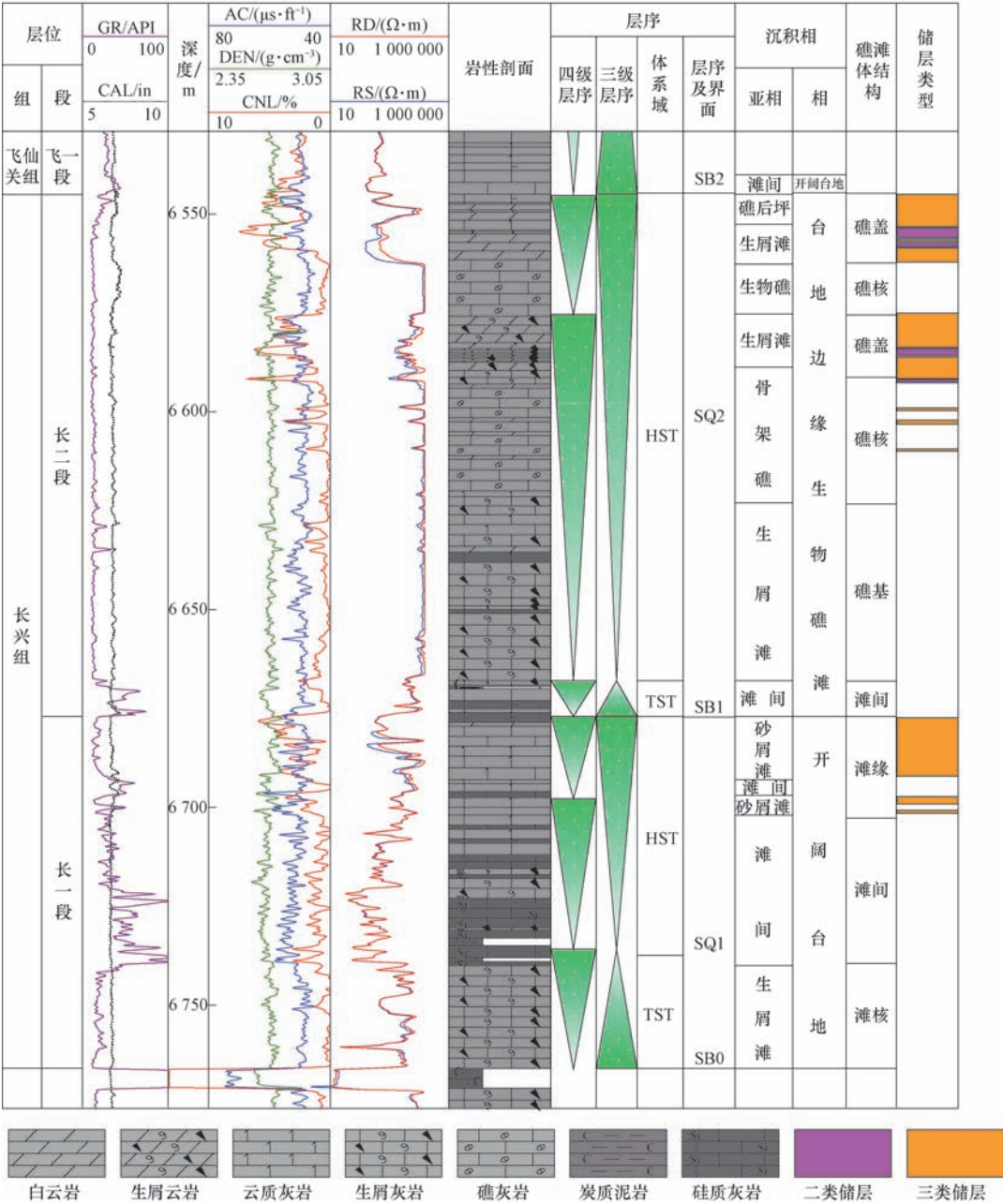


图 2 四川盆地元坝 2 井长兴组单井沉积相与储层单井评价

Fig. 2 Sedimentary facies and reservoir evaluation of the Changxing Formation in Well Yuanba 2, the Sichuan Basin

换面,研究区主要处于台地边缘和台地内部,发育海侵体系域和高位域,低位域不发育,因此体系域界面划分以 GR 显示相对高值的最大海泛面泥灰岩沉积为主要标志。

根据上述层序界面识别,把元坝地区长兴组台地边缘礁滩主体划分为两个完整的三级层序(SQ1 和 SQ2),并分别对应长兴组一段和二段(图 2)。SQ1 层序岩性自下而上为生屑灰岩和灰质白云岩(图 2),构成一个相对完整的三级层序,主要发育开阔台地或台缘浅滩沉积。SQ2 层序底部为深灰色含泥灰岩、灰色灰岩,构成了三级层序海侵体系域,为相对低能环境,中部为生屑灰岩、礁灰岩,顶部为生屑白云岩、微晶白

云岩,台地边缘生物礁、滩发育(图 2),构成了三级层序的高位体系域。长兴组每个三级层序进一步可分为 3 个四级层序,岩性上主要由微晶灰岩、生屑灰岩、礁灰岩向白云岩转化。电阻率曲线主要表现为相对高阻向相对低阻变化,从而明显构成了多个向上变浅的沉积组合,如长兴组二段 3 个四级层序中发育了台地边缘生屑滩、滩间及两期的生物礁沉积(图 2)。利用上述方法,在单井层序划分的基础上,实现全区所有井的层序对比。

在地震上,利用合成记录进行井震标定,SB0 界面一般位于中-强的波峰和波谷间的零相位处,表现相对清晰,可全区追踪(图 3)。SB2 界面在地震剖面上

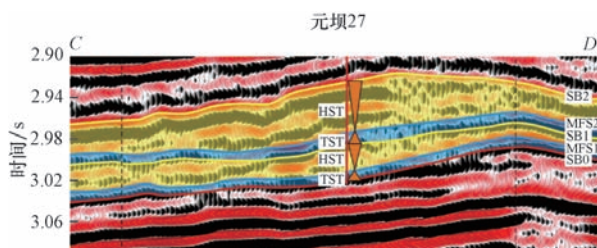


图3 四川盆地过元坝27井(台地边缘)地震剖面上三级层序及体系域划分(剖面位置见图1)

Fig.3 The third-order sequence and system tract division on (platform margin) seismic profile across Well Yuanba 27, in the Sichuan Basin (see Fig.1 for the profile location)

为一个波谷反射,尤其在台地边缘区呈强波谷反射,同相轴连续性好。SB1界面主要为连续性较差,低频中-弱振幅反射,全区追踪相对困难。四级层序(高频层序)边界在台地边缘生物礁相区,层序界面由相对高阻抗的灰岩进入相对低阻抗的溶孔白云岩。在地震剖面上主要呈波谷反射的特征,通过井-震结合,建立了元坝长兴组(高频)层序格架。

2.2 沉积相特征

在(高频)层序格架内,进行单井相划分,以元坝2井为例,长兴组早期长一段主要位于开阔台地相带,发育滩间、颗粒滩沉积。岩性主要为泥灰岩、微晶灰岩、生屑灰岩,自下而上的岩相组合与各个四级层序具有很好的对应性,即四级层序下部以泥灰岩、微晶灰岩低能沉积为主,上部为生屑灰岩或生屑云岩相对高能沉积(图2)。长二段主要位于台地边缘生物礁滩相带,发育滩间、生屑滩、骨架礁、生屑滩、礁后坪等亚相。岩性主要为微晶灰岩、生屑灰岩、生物灰岩、生屑云岩及微晶云岩等,岩相组合与四级层序同样具有良好的一致性,即自下而上很好地反映了生物礁礁体结构,发育礁基(生屑滩)、礁核(生物礁)和礁盖(生屑滩或潮坪)。

在单井相分析基础上,详细标定地震剖面,划分连井相(图4)。在剖面上,各井成礁旋回与四级层序对应良好,由此在三级层序上构成了包括由礁基-礁核-礁盖和礁核-礁盖组成的两大成礁旋回。长兴组总体具有早滩晚礁、前礁后滩的沉积特征^[6,12],即早期(长一段沉积时期)在缓坡台地边缘发育生物碎屑浅滩相沉积。晚期(长二段沉积时期)在台地边缘发育生物礁滩相沉积,生物礁分布于台缘外侧。

3 生物礁(滩)储层特征

长二段生物礁沉积是储层发育的有利层段^[6],为

储层研究的重点。需指出的是,本文的生物礁(滩)储层指由生物礁及其伴生的生屑滩或由内碎屑颗粒岩组成,包括生物礁的礁核(生物礁)和礁盖(生屑滩或潮坪)等构成的完整生物礁滩体结构的所有储层。

3.1 储集岩特征

长二段生物礁相储层岩石类型多。储集岩可以分为白云岩和灰岩两类,白云岩类储层物性明显好于灰岩类。

白云岩类储集岩孔隙度多大于5%,主要包括有:①(残余)生屑云岩(图5a,b)。岩石结构以生屑或砂屑颗粒支撑为主,生屑包括腕足、腹足、瓣鳃、有孔虫等,粒间云泥或亮晶胶结物充填,白云石晶粒大小不均,从泥粉晶到中-细晶均有发育。部分残余生屑或砂屑结构,通常发育于礁盖中部生屑滩亚相中。②细-中晶白云岩(图5d)。组成这类白云岩的白云石晶粒大小相对均匀,以中-细晶为主,白云石自形-半自形或半自形-它型,常具雾心亮边结构,晶间孔、晶间溶孔发育,常分布于礁盖的中下部。③(藻粘结)微晶云岩(图5c,e)。岩石结构以微-粉晶白云岩为主,部分呈藻粘结结构,主要分布于礁盖的上部礁后坪亚相中。

灰岩类主要包括(含云或云质)颗粒灰岩、(含云或云质)礁灰岩、残余颗粒结构粉细晶灰岩(图5f),孔隙度多低于5%,一般在本区为次要的储集岩。主要的储集空间类型包括:①生屑或砂屑粒内溶孔。出现于生屑内部或骨架内,孔隙直径变化范围较大,从0.01 mm到2 mm均有发育(图5a)。②颗粒粒间溶孔。这种溶蚀孔隙常分布于颗粒的粒间(图5b),或切割了生屑或砂屑颗粒,具有非选择性溶蚀的特征。③微晶云岩溶孔。溶孔主要发育于(藻粘结)微晶云岩中发育,具有相对孤立分布的特征。④白云石晶间(溶)孔。常在中-细晶白云岩中发育,晶间孔大小较均匀,部分晶间孔经后期溶蚀扩大,形成晶间溶孔(图5d),孔隙度较高。⑤溶洞。可能是由早期溶孔进一步溶蚀扩大而成(图5e),直径一般小于1 cm,部分具有顺层分布的特征,大部分溶洞未被充填,少量被黑色有机质、沥青质及方解石晶体不完全充填。⑥裂缝及微裂缝(图5f)。虽为次要的储集空间类型,但其明显提高了样品的渗透率,且由于裂缝或微裂缝的发育,有利于晚期成岩流体的流动,导致进一步的溶蚀,从而增加了孔隙空间。

3.2 物性特征

根据四川盆地碳酸盐岩储层评价标准(表1),结合前人对川东北地区碳酸盐岩储层分级评价标准^[13],

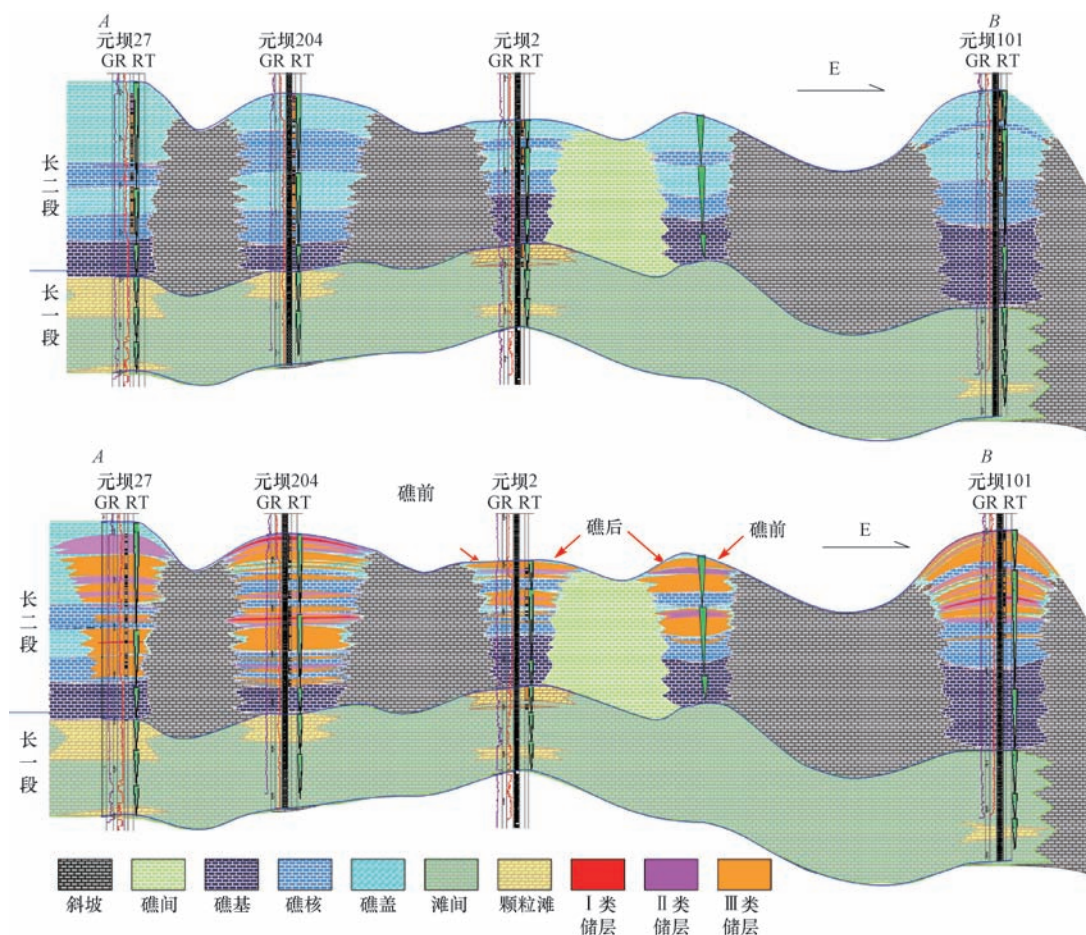


图4 四川盆地长兴组过元坝27—元坝204—元坝2—元坝101井剖面相(a)及相控储层结构模式评价(b)(剖面位置见图1)

Fig. 4 Sedimentary facies (a) and reservoir evaluation(b) of the Changing Formation on the profile across Well Yuanba27 - Yuanba204 - Yuanba2 - Yuanba101, in Sichuan Basin(see Fig. 1 for the profile location)

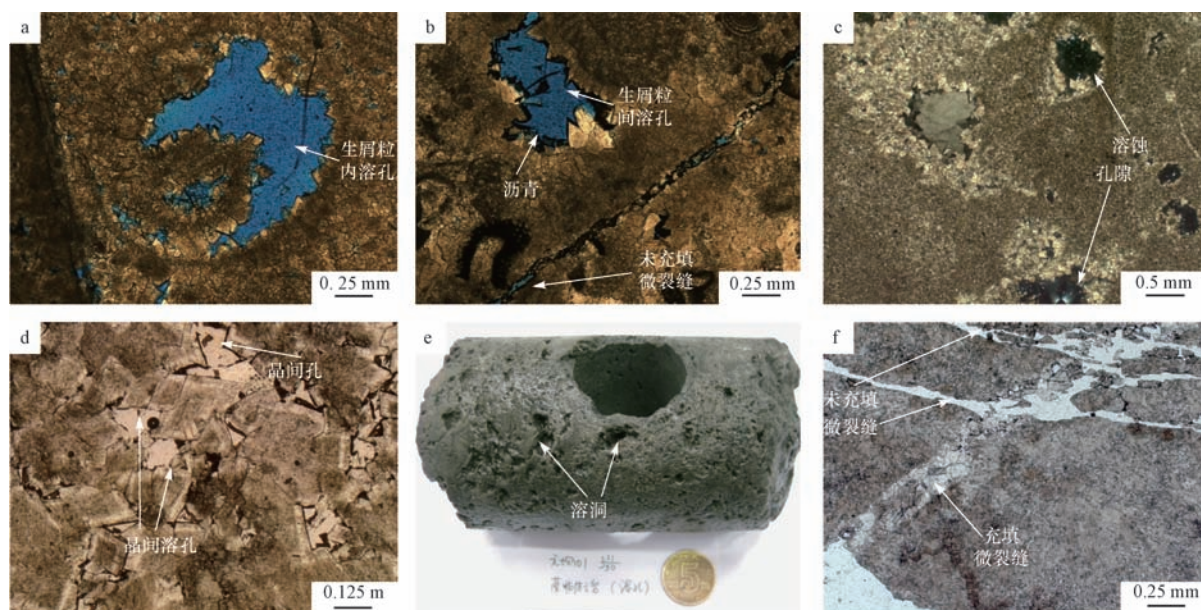


图5 四川盆地元坝地区长兴组二段储集岩孔隙及储集空间类型特征

Fig. 5 Pore structure and space types of reservoir rocks in the 2nd member of the Changxing Formation in Yuanba area, the Sichuan Basin
a. 残余生屑结构溶孔白云岩,粒内溶孔,元坝2井,埋深6 594.85 m,蓝色铸体,单偏光;b. 残余生屑结构溶孔白云岩,溶蚀孔隙边缘及微裂缝沥青薄膜覆盖,元坝2井,埋深6 584.40 m,蓝色铸体,单偏光;c. 微-粉晶云岩,溶蚀孔隙发育,元坝101井,埋深6 903.22 m,普通薄片,正交偏光;d. 细-中晶云岩,晶间(溶)孔发育,元坝27井,埋深6 302.55 m,普通薄片,单偏光;e. 藻粘结云岩,溶蚀孔隙发育,元坝101井,埋深6 904.00 m;f. 残余砂屑结构重结晶粉细晶灰岩,微裂缝切割方解石充填的裂缝,元坝2井,埋深6 552.70 m,普通薄片,单偏光

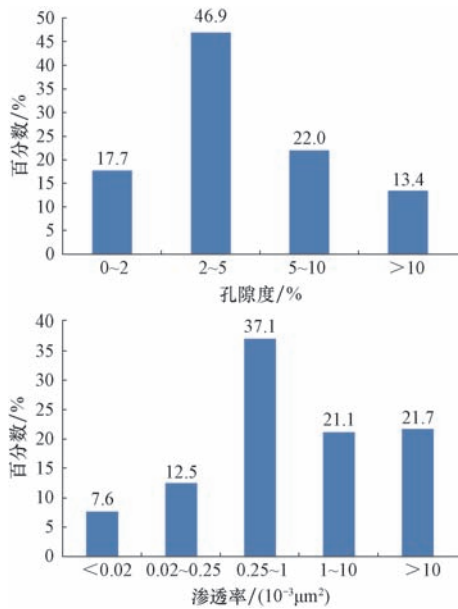


图 6 四川盆地长兴组二段储层样品孔隙度(a)和渗透率(b)分布直方图

Fig 6 Histogram of porosity(a) and permeability(b) of samples from the 2nd member of the Changing Formation in Yuanba area, the Sichuan Basin

对元坝地区已有 12 口钻井的长二段储层发育段岩心样品进行了详细的统计。结果显示,长兴组礁相储层孔隙度介于 0.79%~24.65%,平均为 5.27%。孔隙度主要分布在 2%~5%,约占 46.9%;孔隙度 5%~10%的约占 22%(图 6a)。渗透率变化范围较大,介于 $(0.0028 \sim 1720.7) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主峰值在 $(0.25 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 57.2%(图 6b)。总体上,显示出本区储层具有低孔-中低渗的储集特征,以Ⅱ类和Ⅲ类储层为主,Ⅰ类储层较少。

孔隙度和渗透率的相关性总体较差,特别是孔隙度低于 5%的样品占 64.6%,渗透率变化大,表明本区微裂缝可能较发育。当孔隙度大于 5%,孔隙度、渗透率具有一定相关性(图 7),因此优质储层整体属孔隙型、裂缝-孔隙型储层。

3.3 储层结构特征

根据岩性、物性、含气性与测井曲线电性的“四性关系”,选择合适的孔隙度测井解释模型进行计算,并按储层分类评价标准对钻井进行储层分类(表 1)。结果显示(图 2,图 4),本区至少发育由两期成礁旋回构成的储层,与沉积亚相和微相的相序垂向变化具有较好一致性,每个成礁旋回的礁盖中、上部生屑滩和礁后坪的溶孔白云岩储层,Ⅰ,Ⅱ类储层相对发育。Ⅲ类储层部分为(灰质)白云岩储层,部分为生屑灰岩及生物灰岩储层,分别位于生物礁礁盖下部和生物礁礁核。

表 1 四川盆地碳酸盐岩储层分类评价标准
Table 1 Carbonate reservoir evaluation criteria in the Sichuan Basin

储层类型	I	II	III	IV
孔隙度/%	>10	10~5	5~2	<2
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	>1.00	1.00~0.25	0.25~0.02	<0.02
中值喉道宽度(R ₅₀)/μm	>1	1~0.2	0.2~0.024	<0.024
储层评价	好-极好	中等-较好	较差	差

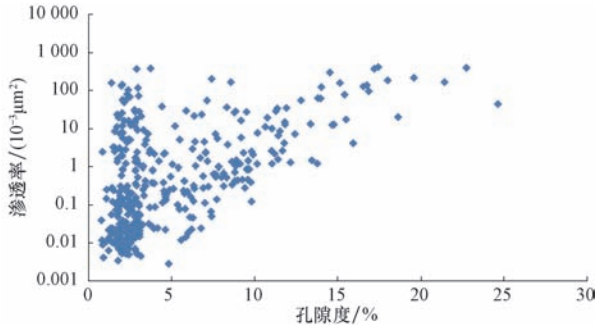


图 7 四川盆地长兴组二段储层样品孔隙度与渗透率关系
Fig 7 Relationship between porosity and permeability of samples from the 2nd member of the Changing Formation in Yuanba area,the Sichuan Basin

在每个成礁旋回的内部,生物礁储层表现为“层数多、单层薄、不同类型储层呈不等厚互层、非均质性强”的特征,但总体在纵向上具有自下而上,物性变好,由此构成了“东早西晚”不对称规模发育的“双层结构”,受生物礁沉积及暴露层序界面及其成岩作用影响,礁体中心好于礁体边部,礁后好于礁前(图 4)。

4 成岩作用类型及成岩序列

碳酸盐岩储集岩在孔隙演化过程中更易受成岩作用的改造,是储层发育不可忽视的重要因素^[14]。薄片岩石学观察是成岩作用研究的基础,结合地球化学方法,开展成岩类型成因解释和成岩序列判定^[15]。元坝地区长兴组二段储层成岩作用类型主要包括白云岩化、胶结充填、压实-压溶、溶蚀作用以及破裂作用。

4.1 白云石化作用

统计结果显示,本区长兴组二段白云岩段在高频层序内通常自上而发育(藻粘结)泥微晶云岩、生屑微晶云岩、(残余生屑)粉-细晶云岩、细-中晶云岩,而白云石晶型大小、自形程度大致能够反映白云岩的成因^[15-20],并经过众多学者证实。薄片观察显示,礁后坪亚相(藻粘结)泥微晶云岩,原始结构保存完好,可见窗格构造,藻粘连清楚(图 5c),基本反映了蒸发成岩环境。部分生屑白云岩样品生屑结构保存完好,

呈泥晶交代的泥微晶原始结构,常位于潮坪泥微晶云岩之下的生屑滩顶部地层中,反映了蒸发泵或回流渗透白云岩化快速白云岩化作用的结果^[16-17,19,21](图5a,b)。粉晶、细晶云岩多呈半自形-他形白云石残余结构生屑,反映了快速白云岩化导致的晶型较差,应主要形成于准同生期的回流渗透白云岩化^[17,19,21]。部分以半自形-自形细晶白云石形式存在(图5d),主要形成于浅埋成岩环境中较缓慢结晶生长环境^[16-17,21]。当然,在埋藏成岩环境中,随着温度压力的进一步提高,部分早期的粉晶白云岩在强烈重结晶作用下,也可能呈自形细晶结构^[17]。地层中局部也可见粗晶白云岩,略具波状消光的特征,应主要形成于深埋藏成岩时期^[16-17,20,22],但这部分白云岩含量相对较少。总体从上述白云石晶型大小、自形程度来看,自下而上反映了深埋白云岩化-浅埋白云岩化-回流渗透白云岩化-蒸发泵白云岩化的演化过程,与向上沉积环境逐渐变浅的高频层序旋回具有较好的一致性(图2)。显然,在生物礁后更容易形成闭塞、蒸发的潟湖环境,更易发生早期蒸发泵、回流渗透白云岩化成岩作用,是礁后的储层物性要好于礁前的重要原因。在地球化学上,白云岩与围岩灰岩碳、氧同位素分布相似,显示白云岩化环境与沉积环境具有一定继承性(图8a)。不同类型白云岩的形成盐度和温度均较为接近^[10],也显示白云岩化时间相对较早,这与白云岩化受层序沉积控制一致。

4.2 胶结作用

生屑灰岩胶结作用一般有3期。早期为等厚环边纤维状胶结(图9b),已低镁方解石化,应为准同生期海底成岩环境的产物^[18-19];第二期粒状方解石粒状或白云石胶结,可见明显的半自形-自形晶粒(图9b),而部分白云石略具波状消光,应该是在浅埋藏条件下形成的^[16-17],部分胶结物边缘可见沥青覆盖(图9d),显示形成于油气充注之前;晚期胶结通常为亮晶方解石胶结,主要呈连晶状(图9b,c),常发生在油气

充注之后(在白云石和连晶方解石胶结物之间可见沥青)(图9d),应为中深埋藏成岩环境的产物^[18-19,23]。然而,在白云岩中较难见到世代结构,可能是生屑灰岩及其早期胶结物经历了完全白云岩化及重结晶作用,难显世代胶结结构,仅保存晚期连晶方解石胶结(图9c)。而在不同类型岩石的溶孔、洞方解石胶结物的碳、氧同位素上,也可明显见到3期成因,第一期较早相当于准同生期或之后不久,第二期和第三期应主要为埋藏不同阶段的产物。

4.3 化学压实作用

本区的化学压实作用主要表现在缝合线上,缝合线的发育可能有2期。第一期缝合线通常在生屑内部发育,而在颗粒间胶结物中痕迹不明显,被第二期晶粒胶结物所切割,显示该期缝合线形成时间较早,应该在浅埋藏成岩时期;第二期缝合线则切割了颗粒以及方解石、白云石的胶结物(图9a),但很少有切割第三期方解石连晶胶结物,应为埋藏成岩环境的标志。

4.4 溶蚀作用

溶蚀作用本区主要应有3期。早期可进一步分为两种,前者具有选择性溶蚀的特征,后者与之相反,但切割颗(晶)粒特征不明显,孔洞边缘往往能够发现一些比较完整的碳酸盐岩胶结物(如白云石)以及沥青膜覆盖(图9d),也可见早期溶蚀的示顶底构造(图9b)。这两种均为同生-准同生期成岩环境中大气水溶蚀作用的结果,显然沉积古地貌高地是控制大气水溶蚀的重要因素,也是储层结构中礁体中心物性好于礁体边部的重要原因。晚期溶蚀作用形成的粒间溶孔、白云石晶间溶孔、溶蚀沟等具有明显切割晶粒或颗粒的特征(图9e,f),部分孔隙可能是对早期溶蚀孔隙的进一步溶蚀、改造^[15,22]。根据溶蚀孔隙中沥青的有无,长兴组至少存在两期以上的埋藏溶蚀。边缘含有沥青的溶蚀孔洞,可能形成于油气充注之前的浅-中

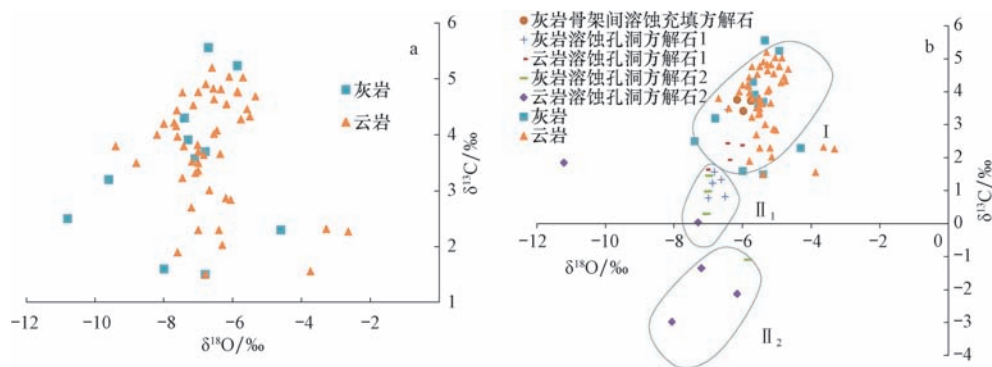


图8 四川盆地元坝地区灰岩与白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系(a)及其与溶蚀孔洞方解石胶结充填物 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系(b)

Fig 8 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of limestone and dolomite(a) and their calcite cements filling the vugs(b) in Yuanba area, the Sichuan Basin

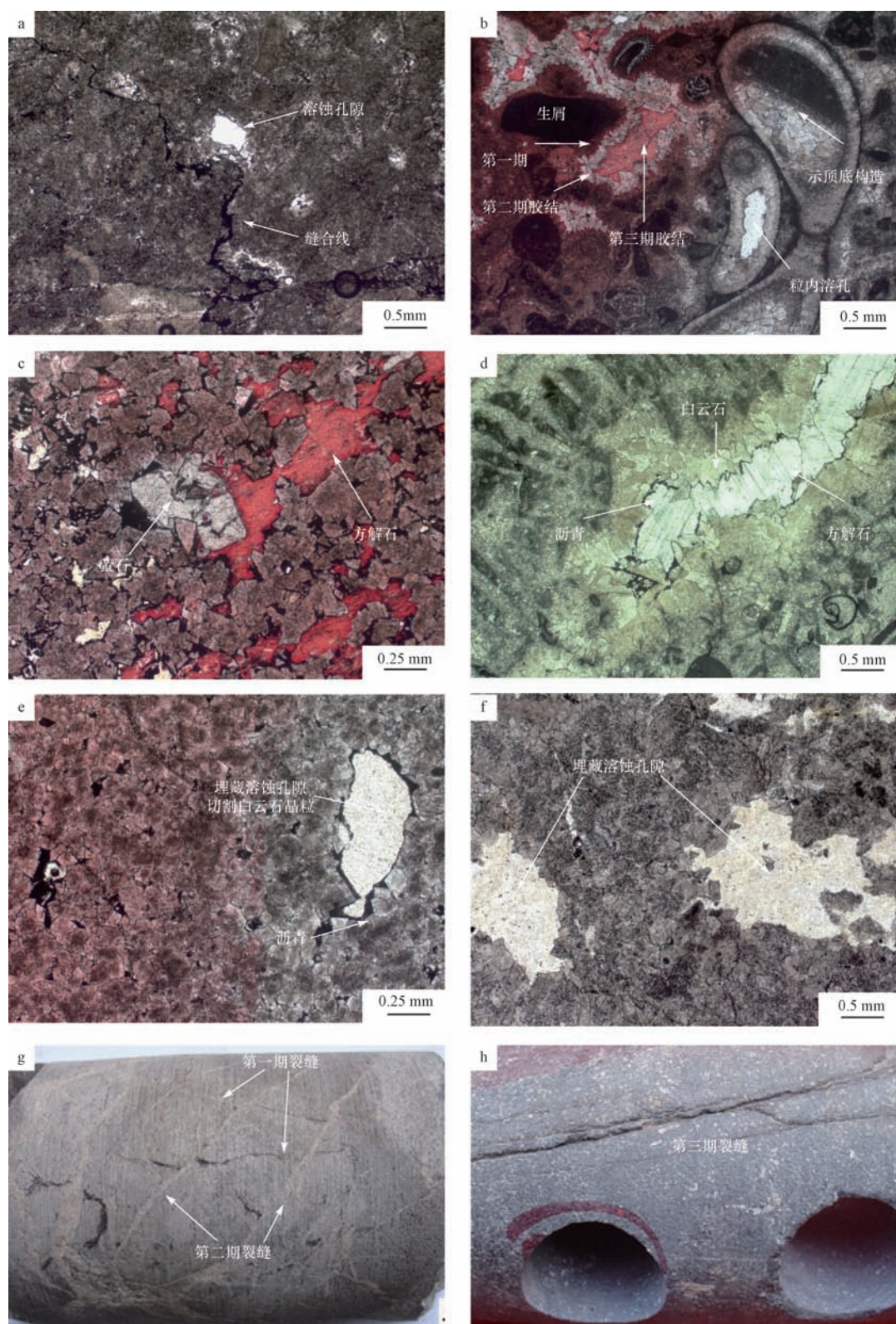


图9 四川盆地元坝地区长兴组二段储集岩成岩作用类型及特征

Fig 9 Diagenetic types and characteristics of reservoir rocks from the 2nd member of the Changxing Formation in Yuanba area, the Sichuan Basin

- a. 溶孔白云岩,缝合线中沥青分布,元坝102井,埋深6 724.70 m,普通薄片,单偏光;b. 多期胶结、白云岩化及早期溶蚀作用,见少量的生屑内部溶孔,元坝2井,埋深6 582.20 m,染色普通薄片,单偏光;c. 中细晶溶孔白云岩,见晚期连晶方解石、萤石胶结充填,元坝102井,埋深6 773.14 m,染色普通薄片,单偏光;d. 白云岩化生物灰岩,溶孔中白云石、方解石胶结,见沥青分布于白云石边缘,元坝2井,埋深6 587.16 m,普通薄片,单偏光;e. 残余结构粉细晶白云岩,晚期非选择溶蚀孔隙,沥青充填于孔隙边缘,元坝2井,埋深6 590.50 m,染色普通薄片,单偏光;f. 残余生屑溶孔白云岩,大的晚期溶蚀孔隙,孔隙边缘洁净,无沥青膜覆盖,元坝102井,埋深6 725.00 m,普通薄片,单偏光;g. 多组系裂缝发育,方解石充填,元坝9井,埋深7 069.50 m;h. 裂缝发育,未充填,元坝27井,埋深6 306.40 m

埋藏环境(图9e),而不含有沥青的孔隙则是在烃类充注之后(图9f),经过硫酸盐热化学还原作用(TSR)及其他埋藏溶蚀作用所形成的非选择性溶蚀孔隙^[15,23-27]。如元坝长兴组气藏中含有大量的 H_2S 气体(平均含量达5%左右),以及可见天青石、萤石、自生硅质等低温热液成因矿物组合图(9c)。

胶结充填的期次往往与溶蚀期次密切相关^[11]。因此,胶结充填物的地球化学特征,在一定程度上能够反映溶蚀成岩环境。上述胶结充填物的碳、氧同位素特征显示(图8b),埋藏期溶蚀造成的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 值明显降低,反映了埋藏溶蚀过程中烃类等有机质的参与以及埋藏成岩环境温度逐渐升高的特征。

4.5 破裂作用

本区破裂作用除少部分成岩缝,主要发育以下3期构造裂缝。第一期构造裂缝往往以高角度斜交层面发育,雁列式排列展布,方解石完全充填,可被缝合线切割改造(图9g)。第二期构造裂缝以高角度斜交层面或不规则展布,裂缝面较平直、延伸较远(图9g),可为方解石等(部分)充填。裂缝明显切割第一期裂缝、改造有机质侵染斑块,应形成于压溶缝合线及液态烃类进入之后。第三期构造裂缝以高角度斜交或垂直层面,裂缝平行排列展布,延伸远,未充填(图9h),切割改造第二期构造裂缝。

综合以上各自成岩作用类型期次先后顺序以及不同成岩作用类型矿物间的相互切割关系,结合物性分析结果、孔隙类型识别及变化特征,总结了元坝地区的长兴组二段生物礁滩储层的成岩序列及孔隙的演化规律(图10)。显然,本区储集岩经历了多期增加与减小孔隙度成岩作用的改造,也是导致本区储层孔隙类型多样、物性多变的重要因素。根据成岩演化序列与孔

隙演化的关系,多期溶蚀作用和白云岩化作用是成岩时期储层发育关键,尤其早期的大气水溶蚀和白云岩化作用产生并保留的孔隙空间,为本区储层的发育基础和后期的流体运移提供重要通道。

5 储层发育控制因素

5.1 沉积环境

台地边缘生物礁及台地边缘浅滩相是储层发育最有利相带,而低能相带的台地内部、礁间及斜坡沉积的岩性孔隙度明显较低,储层相对不发育^[12]。显然,三级层序和四级层序及其控制的沉积(微)相从宏观上控制了储层发育。三级层序中、上部发育生物礁礁核和礁盖沉积,四级层序中上部则控制着礁盖生物碎屑云岩、微晶云岩等云岩Ⅰ类和Ⅱ类储层的发育,储层物性均明显好于下部的灰岩Ⅲ类储层(图2,图4)。显然,随着高频层序可容纳空间变小,生物礁礁盖部分随海平面周期性下降而暴露于海平面之上,形成暴露不整合层序,为大气淡水淋滤溶蚀,以及台缘生物礁中相对蒸发浓缩的海水所形成蒸发白云岩化和回流渗透白云岩化提供了有利条件,这是储层发育最重要的基本前提。同时,这在一定程度上也控制了早期成岩作用发生^[12]。

5.2 成岩作用

成岩作用对储层发育具有重要建设性。成岩作用主要为溶蚀(大气水、埋藏溶蚀作用)、白云岩化、液态烃充注和破裂作用。早期白云岩化作用及(准)同生期大气水溶蚀形成的孔隙空间为中、晚期溶蚀作用和白云岩化(及重结晶)提供物质交换的重要空间。液态烃的充注一方面可以减少早期溶蚀孔隙被盆地卤水胶结或充填^[24-25],另一方面也为TSR提供了重要烃类来源^[26-29],使得原来孔隙进一步溶蚀扩大或改造。裂缝既可以作为油气或有机酸等流体的运移通道,也是储层重要的储集空间类型之一,沟通形成统一的孔、洞、缝系统,使其渗透性得到明显改善,特别对于Ⅲ类低孔低渗储层,具有更重要意义。

6 储层发育模式

综合以上分析,重点根据生物礁储层发育结构、储层沉积与成岩演化,并结合前人研究成果,总结了元坝生物礁储层的“岩相控储、早期形成、后期改造”发育模式,主要包括以下3个阶段。

1) 岩相控储、早期形成阶段

在元坝长兴组生物礁生长阶段,生物礁礁盖发育

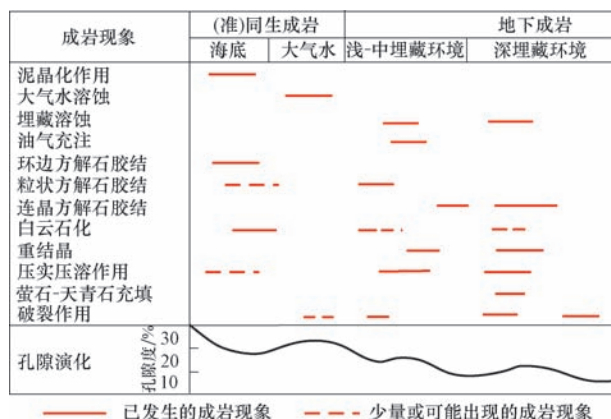


图10 四川盆地元坝地区长兴组二段成岩序列与孔隙演化
Fig 10 Diagenetic sequences and pore evolution of the reservoir rocks in the 2nd member of the Changxing Formation in Yuanba area, the Sichuan Basin

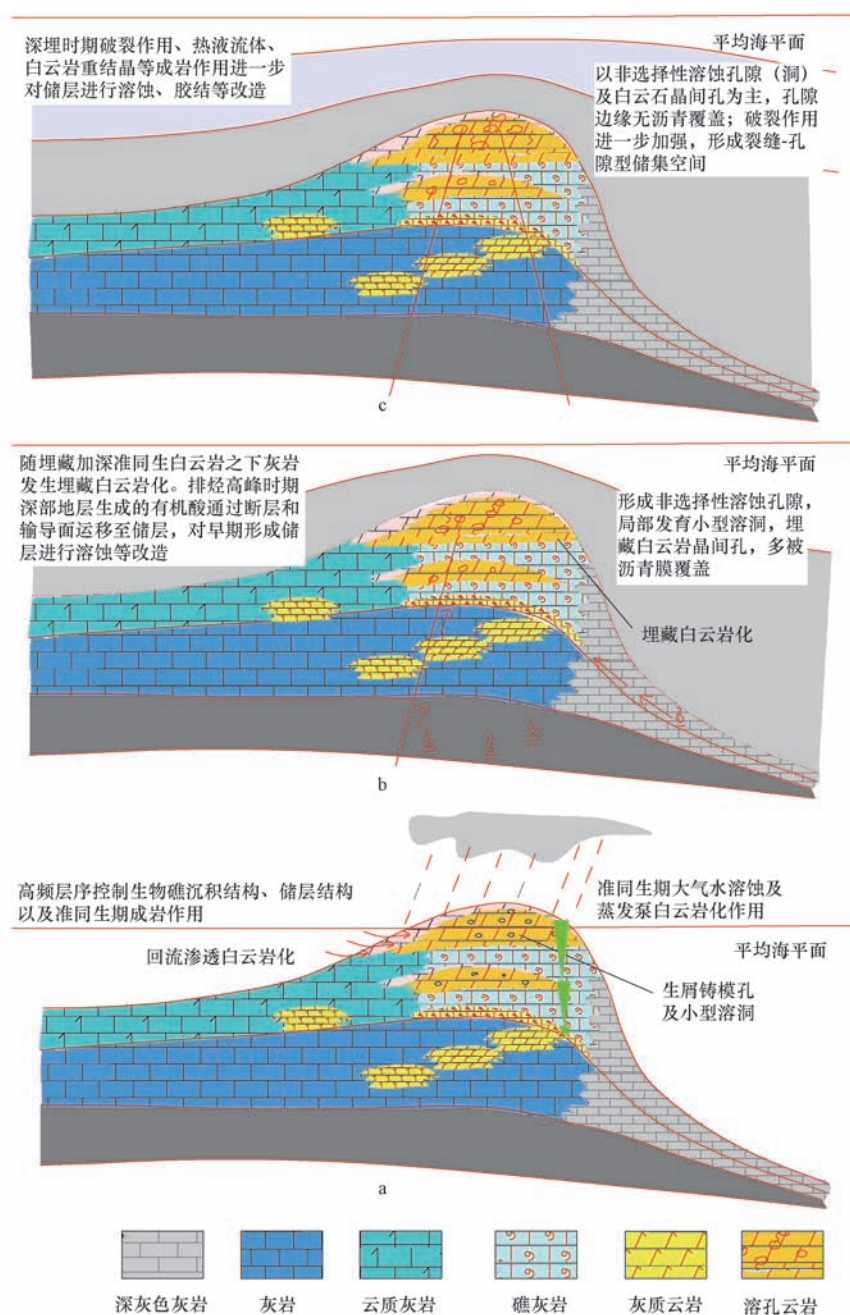


图 11 四川盆地元坝地区长兴组生物礁储层发育模式

Fig 11 Development models of biohermal reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area, the Sichuan Basin

生屑滩、砂屑滩及礁后坪亚相,沉积生屑灰岩、晶粒云岩、生屑云岩和藻粘结泥微晶云岩等储集岩,而优质储层主要分布于云岩类,反映了岩相对储层的控制作用(图 11a)。此阶段受低级别(准)同生期暴露不整合的控制,礁盖部分的潮坪及生屑滩亚相暴露于海平面之上,遭受大气降水的淋滤和溶蚀,潮坪相中易形成鸟眼孔等孔隙,生屑滩相中易形成生屑粒内溶孔、铸模孔等选择性溶蚀孔隙。随着准同生期暴露岩溶强度的增大,部分可能形成非选择性的小型溶蚀孔洞^[18-19,21]。同时,生物礁礁盖上的潮坪和生屑滩沉积,在蒸发泵白云岩化作用下形成(藻粘结)微晶云岩和生屑云岩,基本上保留了原始灰岩的微晶结构^[9-10,19]。而位于生

屑滩中下部沉积,部分在回流渗透白云岩化,白云石晶型通常为粉-细半自形-他形。

2) 储层早-中期改造阶段

上覆地层沉积后,长兴组进入埋藏成岩阶段。在浅埋藏成岩环境中,封存于地层中的高浓度海水,对部分生屑灰岩白云岩化。由于白云岩化是个相对缓慢的过程,部分灰岩的原始结构在白云岩化作用下有些模糊,但整体仍可以辨认,呈粉细晶半自形-自形,发育晶间孔。随着下伏吴家坪组(或龙潭组)烃源岩,在早-中侏罗统进入生排烃高峰期^[1,29],有机酸等酸性流体通过断层、裂缝等输导通道进入储层,对早期形成、保存的孔隙溶蚀,形成非选择溶蚀孔隙,随着液态

烃逐渐进入储集空间,成岩作用逐渐受到抑制^[25,30](图11b)。

3) 储层晚期改造、保存阶段

储层埋藏深度增加,温度上升,地层水中 SO_4^{2-} 离子与液态烃发生TSR作用^[26-27,29],生成 H_2S 和 CO_2 等酸性流体,连同其他热液等流体,对储层保存的孔隙进一步溶蚀改造,形成新的溶蚀孔隙^[22,26-29]。部分早期形成的白云岩,随着重结晶作用的进行,晶粒相应变大,形成晶间(溶)孔(图11c)。破裂作用继续对早期裂缝进行切割、改造。随着储层中液态烃进一步热裂解,全部转化为气态烃,气体占据孔隙空间的大部分区域。地层水主要以束缚水的状态存在,成岩作用进一步减弱,气藏得到了良好保存(图11c)。

7 结论

1) 元坝地区长兴组可划分为2个三级层序(SQ1, SQ2)和6个四级层序。电测曲线组合变化特征能够反映高频层序所控制的沉积旋回。长兴组生物礁主要发育在上部三级层序(SQ2)中的台地边缘外侧,纵向上构成2个明显的成礁旋回,储层主要发育于四级层序中上部生物礁礁盖位置,具有“双层储层结构”的特征。

2) 长二段生物礁相储集岩岩石类型多样,优质储层以溶孔云岩为主,白云岩类储层物性明显好于灰岩类,反映了岩相对储层的控制作用。受成岩作用多期改造,孔隙类型多样,物性变化大。早期大气水溶蚀和白云岩化是控制孔隙发育的关键建设性成岩作用,也是储层结构中物性在礁体中心好于边部、礁后好于礁前的重要原因。

3) 受(高频)层序控制生物礁沉积微相是储层发育的基础,明显控制着生物礁礁盖生屑颗粒滩、藻粘结白云岩岩相分布,也是控制早期大气水溶蚀和白云岩化作用的关键。埋藏溶蚀、埋藏白云岩化、破裂作用等成岩作用进一步改善储集岩物性。元坝气藏长兴组生物礁储层,具有“岩相控储、早期形成、后期改造”的发育模式。

参 考 文 献

- [1] Long Shengxiang, Huang Renchun, Li Hongtao, et al. Formation Mechanism of the Changxing Formation Gas Reservoir in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2011, 85(1): 233-242.
- [2] 马永生,蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 741-750.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu. Exploration achievements and prospects of the Permian-Triassic natural gas in northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 741-750.
- [3] 马永生,牟传龙,郭旭升,等. 四川盆地东北部长兴期沉积特征与沉积格局[J]. 地质论评, 2006, 52(1): 25-29.
- Ma Yongsheng, Mu Chuanlong, Guo Xusheng, et al. Characteristic and Framework of the Changxingian Sedimentation in the Northeastern Sichuan Basin [J]. Geological Review, 2006, 52(1): 25-29.
- [4] 马永生,牟传龙,谭钦银,等. 关于开江—梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 326-331.
- Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 326-331.
- [5] 郭彤楼. 川东北元坝地区长兴组—飞仙关组台地边缘层序地层及其对储层的控制[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 387-394.
- Guo Tonglou. Sequence strata of the platform edge in the Changxing and Feixianguan formations in the Yuanba area, northeastern Sichuan Basin and their control on reservoirs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 32(3): 387-394.
- [6] 郭彤楼. 元坝气田长兴组储层特征与形成主控因素研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2381-2391.
- Guo Tonglou. Reservoir characteristics and its controlling factors of the Changxing Formation reservoir in the Yuanba gas field, Sichuan basin, China. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2381-2391.
- [7] 程锦翔,谭钦银,郭彤楼,等. 川东北元坝地区长兴组—飞仙关组碳酸盐台地边缘沉积特征及演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(4): 29-37.
- Cheng Jinxiang, Tan Qinyin, Guo Tonglou, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the carbonate platform - margins in the Changxing Formation-Feixianguan Formation in Yuanba, northeastern Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(4): 29-37.
- [8] 韩定坤,傅恒,刘雁婷. 白云石化作用对元坝地区长兴组储层发育的影响[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 22-26.
- Han Dingkun, Fu Heng, Liu Yanting. Effect of dolomitization on the development of reservoirs in the Changxing fm in the Yuanba area [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 22-26.
- [9] 田永净,马永生,刘波,等. 川东北元坝气田长兴组白云岩成因研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2766-2776.
- Tian Yongjing, Ma Yongsheng, Liu Bo, et al. Dolomitization of the Upper Permian Changxing Formation in Yuanba gas field, NE Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2766-2776.
- [10] 孟万斌,武恒志,李国蓉,等. 川北元坝地区长兴组白云石化作用机制及其对储层形成的影响[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 699-708.
- Meng Wanbin, Wu Hengzhi, Li Guorong, et al. Dolomitization mechanisms and influence on reservoir development in the Upper Permian Changxing Formation in Yuanba area, northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 699-708.
- [11] 李国蓉,武恒志,叶斌,等. 元坝地区长兴组储层溶蚀作用期次与机制研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 709-717.
- Li Guorong, Wu Hengzhi, Ye Bin, et al. Stages and mechanism of dissolution in Changxing reservoir, Yuanba area [J]. 2014, Acta Petrologica Sinica, 30(3): 709-717.
- [12] 李宏涛,龙胜祥,游瑜春,等. 元坝气田长兴组生物礁层序地层及其对储层发育的控制[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 39-48.

- Li Hongtao, Long Shengxiang, You Yuchun, et al. Sequence and sedimentary characteristics of Changxing Formation organic reefs in the Yuanba Gasfield and their controlling effects on reservoirs development in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, *Natural Gas Industry*, 35(10): 39–48.
- [13] 冯明刚, 严丽, 王雪玲, 等. 元坝气田长兴组气藏有效储层物性下限标准研究 [J]. *石油实验地质*, 2012, 34(5): 535–538.
- Feng Minggang, Yan Li, Wang Xueling, et al. Lower limit for physical property of effective reservoir in Changxing Formation, Yuanba Gas Field [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(5): 535–538.
- [14] 王英华. 碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化 [J]. *沉积学报*, 1992, 10(3): 85–95.
- Wang Yinghua. Carbonate Diagenesis and Porosity Evolution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 85–95.
- [15] 李宏涛, 龙胜祥, 吴世祥, 等. 川西坳陷中段下三叠统碳酸盐岩储层成岩作用与机理 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4): 552–559.
- Li Hongtao, Long Shengxiang, Wu Shixiang, et al. Diagenesis and forming mechanism of the Lower Triassic carbonate reservoirs in the middle Part of the western Sichuan Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4): 552–559.
- [16] Uzdowski E. Synthesis of dolomite and geochemical implications [M]. Purser B, Dolomites a volume in honour of Dolomieu. Oxford UK: Blackwell Science. Publishing House, 1994: 345–360.
- [17] Muhsin Eren, Meryem Yesilot Kaplan, Selahattin Kadir. Petrography, geochemistry and origin of Lower Jurassic dolomites in the aydincik area, Mersin, Southern Turkey [J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2007, 16: 339–362.
- [18] Moore C H. Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001: 1–444.
- [19] Scholle P A, Ulmer-Scholle D S. A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis [M]. AAPG Memoir 77, 2003.
- [20] Machel, H G and Lonnee J. Hydrothermal dolomite-A product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 163–171.
- [21] 李宏涛, 吴文波, 游瑜春, 等. 四川盆地河坝地区下三叠统嘉陵江组气藏储集层沉积特征与成岩作用 [J]. *古地纪学报*, 2014, 16(1): 103–114.
- Li Hongtao, Wu Wenbo, You Yuchun, et al. Sedimentary characteristics and diagenesis of the gas reservoir in the Lower Triassic Jialingjiang Formation in Heba area, Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(1): 103–114.
- [22] 李宏涛. 川东北河坝气藏飞仙关组三段储集岩特征及成岩作用 [J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 263–271.
- Li Hongtao. Diagenesis and characteristics of reservoirs in the Member 3 of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Heba gas field [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2013, 34(2): 263–271.
- [23] Heydari E. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H₂S accumulation, Upper Jurassic Smackover Formation, Black Creek Field, Mississippi [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(1): 26–45.
- [24] Cai, C. F., Xie, Z. Y., Worden, R. H., et al. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation East Sichuan Basin, China: towards prediction of fatal H₂S concentrations [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21: 1265–1279.
- [25] Mazzullo, S. J., Harris, P. M., Mesogenetic dissolution: its role in porosity development in carbonate reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 607–620.
- [26] 朱光有, 张水昌, 梁英波. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2182–2194.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2182–2194.
- [27] 朱扬明, 李颖, 郝芳, 等. 四川盆地东北部海、陆相储层沥青质组成特征及来源 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 870–878.
- Zhu Yangming, Li Ying, Hao Fang, et al. 2012. Compositional characteristics and origin of marine and terrestrial solid reservoir bitumen in the northeast Sichuan basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 870–878.
- [28] Nedkvitne T, Karlsen D A, Bjørlykke K. Relationship between reservoir diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula Field, North Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10: 255–270.
- [29] 葛云锦, 陈勇, 周瑶琪. 不同成岩条件下油气充注对碳酸盐岩成岩作用的影响 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(1): 18–27.
- Ge Yunjin, Chen Yong, Zhou Yaoqi. Effects of hydrocarbon emplacement on diagenesis of carbonatite in different conditions [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(1): 18–27.
- [30] Howseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 633–642.

(编辑 张玉银)