

川北地区下三叠统飞仙关组优质鲕滩储层成岩演化序列

侯振学¹, 王兴志², 宋光建³, 李军龙⁴, 胡占群³

(1 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部资料解释中心; 2 西南石油大学资源与环境学院)

(3 中国石油新疆油田公司; 4 中国石油川庆钻探工程有限公司井下作业公司)

摘要 早三叠世飞仙关期, 川北地区为台地与海槽相间的沉积格局, 在两者的转换地带, 发育了大套台地边缘碳酸盐鲕粒滩。该套储层经历的破坏性成岩作用类型主要有压实、压溶作用和胶结作用, 建设性成岩作用主要有泥晶化作用、新生变形及重结晶作用、白云石化作用和溶蚀作用。讨论了各种成岩作用的主要特征及对储层的影响。结合成岩阶段划分, 建立了该储层的成岩序列。胶结作用可分为三期, 对储层的破坏作用非常强, 尤其是第二期胶结作用以后, 残存下来的孔隙降至 5% 左右。白云石化作用主要有混合水白云石化和埋藏白云石化, 它不仅将岩石孔隙度提高了 5% 左右, 更重要的是在白云岩中形成了较多的晶间孔, 为后期埋藏溶蚀作用创造了施展空间。埋藏溶蚀作用使白云岩中的晶间孔溶蚀扩大, 形成晶间溶孔, 这是优质白云岩储层形成的必要条件, 它可将孔隙度再提高 5%~20% 左右。

关键词 鲕粒滩相; 碳酸盐岩储层; 成岩作用; 飞仙关组; 四川盆地北部

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

近年来, 四川盆地北部下三叠统飞仙关组油气勘探获得重大突破, 这里先后发现过罗家寨、渡口河、铁山坡、普光、龙岗、元坝等多个大中型气田, 表明该套地层含有极为丰富的天然气资源, 它目前已成为我国西南乃至全国的重点勘探对象之一。

勘探已经证实, 大部分飞仙关组气藏富集在开江—梁平海槽两侧台地边缘鲕粒滩所形成的优质储层中^[1], 但并不是所有的台地边缘鲕粒滩都能形成优质储层, 这是因为成岩作用才是储层形成的关键。本文分析了该区飞仙关组所经历的成岩环境, 划分出不同的成岩阶段, 在此基础上着重研究了成岩作用对储层的影响并建立了成岩序列, 这对该套储层的油气勘探将具有非常重要的意义。

1 成岩环境和成岩阶段

研究表明, 早三叠世飞仙关期, 四川盆地北部为一开阔台地—海槽—孤立台地—海槽沉积环境格局, 在海槽与台地的转换地带, 发育了大套台缘

滩^[2-3](图 1)。

这套以鲕滩沉积为主的地层自沉积至今已有 2 亿多年的时间, 在这漫长的地质历史中, 经历了从地表到地下五六千米深度变化的埋藏过程, 经受了多期次、多类型成岩作用的长期叠加, 将由原生孔隙为主的滩相沉积体改造成了以次生孔隙占优势的储层。根据岩石学特征及地球化学特征(镜质体反射率和包裹体均一温度), 并结合前人研究^[4], 可以发现飞仙关组先后经历了同生期、准同生期、早成岩期以及晚成岩期等成岩阶段, 期间先后经历了海底成岩环境、大气淡水、海水及混合水成岩环境、浅埋藏、中埋藏及深埋藏成岩环境, 受到了海水、大气淡水、混合水和地层流体等影响, 该套地层发生了复杂的成岩作用演化(图 2)。

2 成岩作用类型及特征

根据野外剖面和钻井岩心的宏观、微观研究, 结合地球化学分析, 将研究区飞仙关组优质鲕滩储层

收稿日期: 2011-10-30; 改回日期: 2012-03-11

侯振学: 1986 年生, 硕士, 2011 年毕业于西南石油大学矿产普查与勘探专业。主要从事沉积学、储层地质学、测井解释及储层评价等方面的研究。通讯地址: 065201 河北省廊坊市燕郊经济开发区行宫大街中海油基地中海油服油田技术事业部资料解释中心; 电话: (0316)3366262

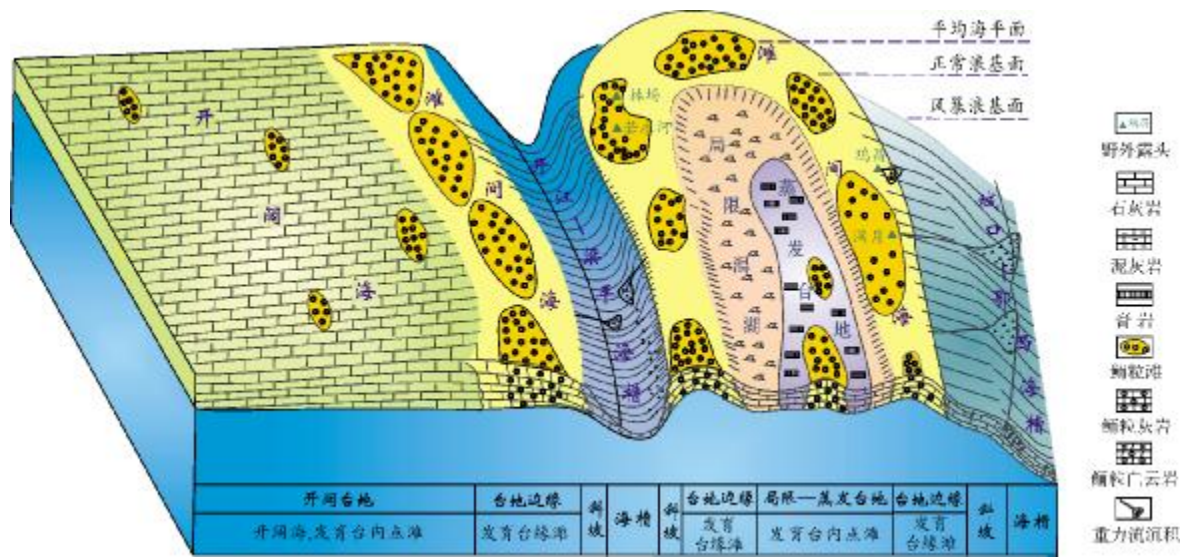


图1 川北地区下三叠统飞仙关组沉积相分布

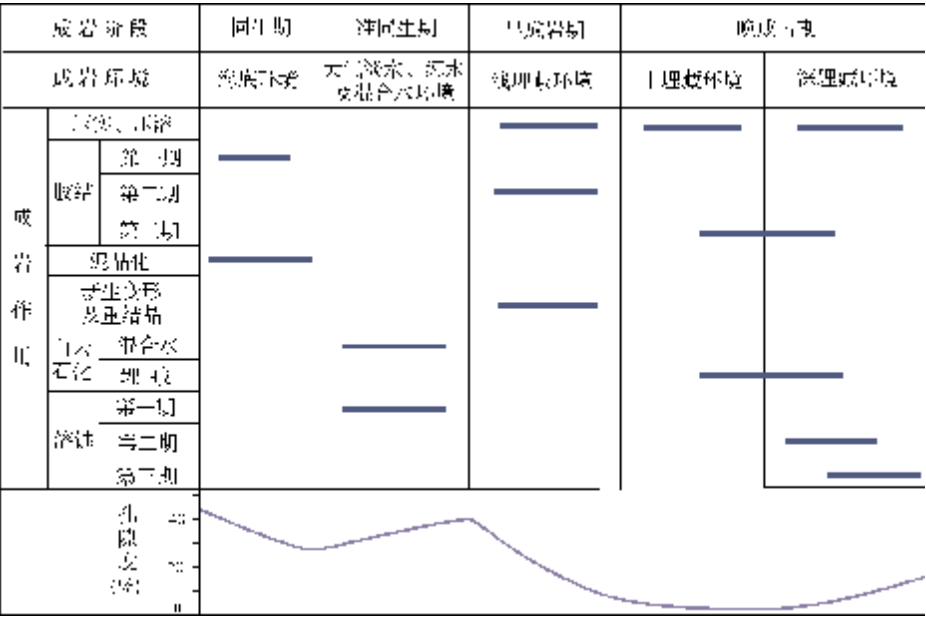


图2 川北地区飞仙关组优质鲕滩储层成岩阶段、成岩环境及成岩作用类型

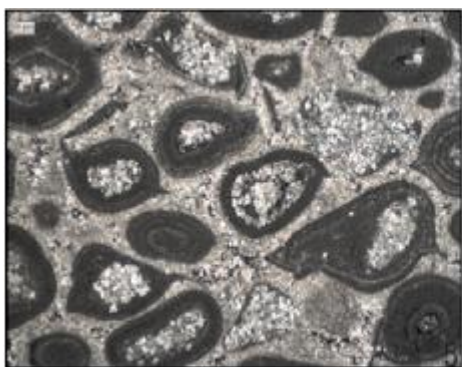
所经历的成岩作用分为破坏性和建设性两类成岩作用。其中破坏性成岩作用主要有压实、压溶作用、胶结作用,建设性成岩作用主要有泥晶化作用、新生变形及重结晶作用、白云石化作用及溶蚀作用。

2.1 破坏性成岩作用

2.1.1 压实作用和压溶作用

压实、压溶作用是该区飞仙关组常见的成岩作

用,主要发生在浅埋藏—深埋藏成岩环境中,表现为鲕粒的变形(图 3a)及压溶缝合线(图 3b)。压实作用是使沉积物孔隙缩小的主要破坏性成岩作用之一,在泥晶灰岩、泥质灰岩中最为明显,但对于鲕粒灰岩等颗粒岩来说,由于它们含有大量的早期胶结物,因而可以明显地抵抗压实作用的进行,导致压实作用对其储层性能的影响并不太强。压溶作用是压实作用的继续和发展,强烈的压溶作用所析出的组分为后期胶结



(a) 灰质鲕粒白云岩。埋藏期压实作用导致鲕粒变形。
X井6529.75m, 飞仙关组三段。薄片, $\times 25$, (-)



(b) 亮晶鲕粒灰岩, 其中压溶缝合线发育。X井6504.21m, 飞仙关组二段。岩心

图3 川北飞仙关组储层压实作用和压溶作用特征

作用提供了丰富的物源,因而压溶作用属破坏性成岩作用。压溶作用形成的缝合线,在一定程度上可起到提高储层渗透性的作用,但从总体来看,压溶作用对储层的影响以破坏性为主。

2.1.2 胶结作用

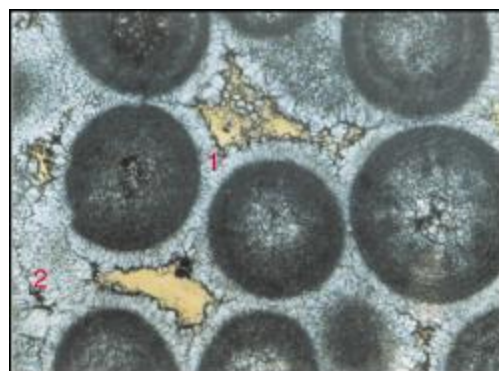
胶结作用是研究区飞仙关组鲕滩储层原生孔隙和部分次生孔隙消失的主要原因。该鲕滩主要为方解石胶结,可以分为三期。第一期为纤状或马牙状亮晶方解石胶结,沿颗粒边缘呈单环带(图4)或多环带分布,属于鲕滩沉积后不久的海底胶结。第二期为粉—细晶方解石胶结,从孔隙边缘向孔隙内部,具有晶体逐渐变粗的充填结构。这类胶结物是鲕滩沉积后不久在浅埋藏阶段形成的。第三期为粗晶方解石,是在中—深埋藏环境下形成的,仅位于较大粒间孔、裂缝及溶洞内部。上述三期胶结作用对储层的破坏非常强烈,尤其是第二期胶结作用以后,原生孔隙和大部分次生孔隙几乎全被堵塞,残存下来的孔隙降至5%左右。

2.2 建设性成岩作用

2.2.1 泥晶化作用

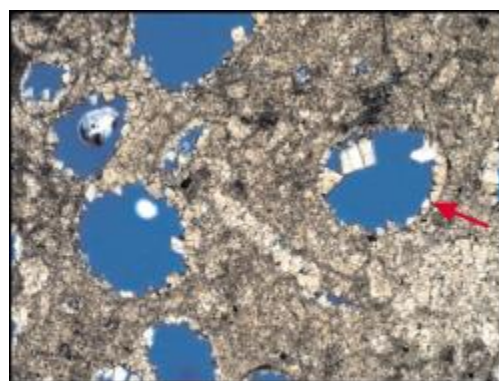
川北地区飞仙关组碳酸盐岩沉积中,常见有些鲕粒被一层暗色物质包围,称之为泥晶套(图5),它是由泥晶化作用形成的。蓝绿藻或真菌将分泌物排泄在鲕粒表面,导致鲕粒边缘由暗色泥晶灰质组分构成。泥晶化作用对孔隙的增加可能影响不大,但增加了颗粒的抗压能力,为后来的粒内溶孔、铸模孔的形成和保存创造了良好的条件。浅水高能环境下淘洗干净的颗粒沉积物有利于藻类

和真菌的活动,因此泥晶套是同生期海底成岩环境的标志。



亮晶鲕粒灰岩。1 第一期马牙状方解石胶结; 2 第二期粉细晶粒状方解石胶结, 具充填结构。X井4805.3m, 飞仙关组三段。薄片, $\times 25$, (-)

图4 川北飞仙关组储层胶结作用特征



鲕粒灰岩。鲕粒内被溶蚀形成铸模孔(被染色成蓝色), 鲕粒边缘可见清晰的泥晶套(图中箭头所指)。X井5109.28m, 飞仙关组三段。薄片, $\times 100$, (-)

图5 川北飞仙关组储层泥晶化作用特征

2.2.2 新生变形及重结晶作用

早期成岩阶段由于淡水作用,不稳定的文石、高镁方解石逐渐转化成为低镁方解石,局部泥晶基质及组成鲕粒圈层的泥晶方解石重新结晶形成微晶,即发生新生变形作用。白云石交代方解石之后,随着埋藏深度的增加,温度增高、压力增大,同时在构造应力作用下,岩石普遍发生重结晶作用。重结晶过程中白云石晶粒变粗,由泥晶、微晶变为粉晶、细—中晶。根据对研究区200块样品的分析对比后发现,细—中晶白云岩物性(平均孔隙度8.9%,平均渗透率 $21.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)明显好于泥粉晶白云岩(平均孔隙度3.9%,平均渗透率 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),因此说重结晶作用对储层具有明显的建设性意义。

2.2.3 白云石化作用

白云石化作用是川北地区飞仙关组优质鲕滩储层形成的关键因素^[5],根据岩石学和地球化学特征分为混合水白云石化和埋藏白云石化两种类型。

2.2.3.1 混合水白云石化作用

对于混合水白云石化模式目前尚存在较大争议^[5-6]。近年来, Luczaj^[7]对混合水白云石化的典型地点美国威斯康星弧(Wisconsin Arch)碳酸盐岩的成岩作用进行了重新研究,认为该弧的白云石化作用是由与温度升高有关的浓卤水导致的,是热液成岩作用的结果^[7-8]。与此相应的,国内也有人对四川盆地飞仙关组鲕滩储层混合水白云石化模式提出

了否定^[9]。但本文认为,混合水白云石化并不能被完全否定,它对储层的改造作用不可忽视。

不论从钻井岩心还是野外剖面来看,四川盆地飞仙关组的白云石化作用受沉积相控制明显。从单一滩体来看,大气淡水渗流带中的白云石化作用较强,大气淡水与海水混合水带中的为最强,而海水潜流带中基本未发生(图6),这是其它白云石化模式所不能解释的。而且从鲕粒灰岩与鲕粒白云岩的过渡岩类可以看出,鲕粒由半自形—它形的粉、细晶白云石构成,第一期胶结物为半自形、自形细晶马牙状白云石,第二期胶结物多未白云石化(图7a),在深埋藏期多被溶蚀,这表明该类白云岩的主要白云石化作用是在第一期胶结物形成后不久发生的,推测是在同生—准同生期,由大气淡水和混合水成因所致。在薄片上还可以观察到这样的现象,鲕粒的白云石化呈选择性,且呈环带状(图7b),这有可能是由于飞仙关期频繁的海平面(四级)升降^[10-11],鲕粒在形成过程中不断露出水面,接受大气淡水的影响,在大气淡水与海水混合带发生混合水白云石化所形成的。

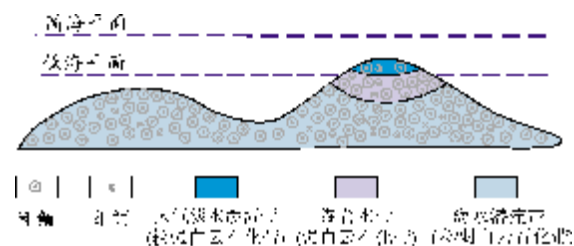
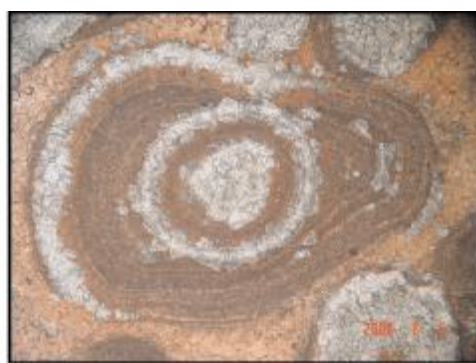


图6 川北地区飞仙关组滩相储层白云石化分带模式



(a) 含灰鲕粒白云岩, 鲕粒及第一期胶结物被白云石化, 第二期胶结物(被染成红色)未白云石化。X井5989.7m, 飞仙关组三段。薄片, $\times 25$, (-)



(b) 含白云石鲕粒灰岩, 鲕粒被选择性白云石化, 且呈环带状。X井6015.6m, 飞仙关组三段。薄片, $\times 50$, (-)

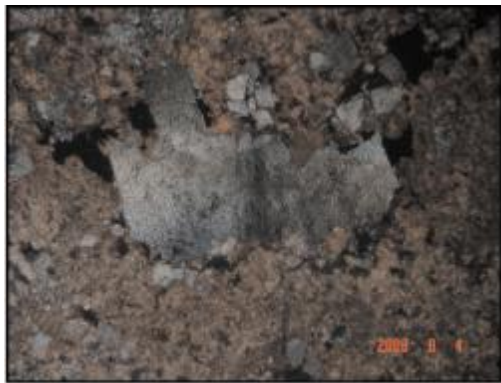
图7 川北飞仙关组储层白云石化作用特征

2.2.3.2 埋藏白云石化作用

埋藏白云石化主要沿着早期形成的孔缝周围分

布,形成的白云石呈半自形—自形,中晶为主,砂糖状,可见鞍状白云石(图8)。含沥青包裹体和气烃包

裹体,均一温度大于 90℃,表明为高温成因,为中—深埋藏环境下形成的白云石。



含白云石颗粒灰岩,鞍状白云石。X井6017.9m,飞仙关组三段。薄片,×50, (+)

图 8 川北飞仙关组储层埋藏白云石化作用特征

上述两类白云石化作用的结果,不仅将岩石孔隙度提高了 5%左右,更重要的是在白云岩中形成了较多的晶间孔,它们不易被充填,为后期埋藏溶蚀作用创造了施展空间,能进一步提高孔隙度。

2.2.4 溶蚀作用

飞仙关组鲕滩主要经历了三期溶蚀作用^[12-13],其中第二、三期溶蚀作用是优质白云岩储层形成的必要条件,可将孔隙度再提高 5%~20%。

2.2.4.1 第一期溶蚀作用

由于海平面频繁升降,滩相沉积物常暴露于大气水环境,大气淡水对鲕粒中的不稳定矿物——文石、高镁方解石等进行选择性溶蚀,形成鲕模孔(负鲕)。该期溶蚀作用虽较强,但因发生时间较早,形成的孔隙大多被方解石、白云石和渗流物充填而失去储渗能力。

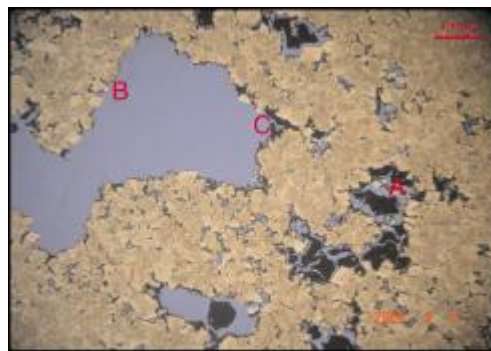
2.2.4.2 第二期溶蚀作用

第二期溶蚀作用发生于构造挤压之后、大量烃类充注之前。开江—梁平海槽的海槽相飞仙关组之下的烃源岩(主要为二叠系烃源岩)在成油过程中会产生丰富的有机酸或与之有关的酸性地层水,在侧向上或者垂向上运移至海槽与台地之间由于构造作用形成的裂隙或者断层中,并进入鲕滩储层,从而产生强烈的溶蚀作用,形成大量的溶孔、溶洞和溶蚀缝,尤其是对白云石化形成的晶间孔强烈溶蚀,形成大量晶间溶孔。该期溶蚀孔、洞、缝未见明显变形,表明它们形成于挤压构造运动之后,随后被大量烃类

充注。由于后期热演化,现今这些溶孔、溶洞、裂缝(溶缝)中,普遍赋存沥青(图 9),表明它们形成于沥青侵位之前,是液态烃的主要储渗空间。溶蚀孔洞中也充填有少量粗晶方解石,包裹体均一温度为 86~122℃,表明是中—深埋藏环境下的产物。

2.2.4.3 第三期溶蚀作用

该期溶蚀作用发生于烃聚集并演化为沥青之后。随着早期滩相储层中的液态烃向气态烃转变,释放出较多的腐蚀性组分,并对滩相储层进一步溶解,形成一定数量的次生孔隙。该期溶孔主要为晶间溶孔和粒内溶孔,粒内溶孔常具有定向和新月形的特征,有时发育成超大孔隙或宽大的溶缝(图 9)。溶孔、裂隙异常干净,一般没有沥青充填,常见孔隙周围白云石晶体被强烈溶蚀。少数晶间溶孔中有少量沥青充填,可能是早期充填沥青的残留。



残余颗粒白云岩。A 第二期溶蚀作用阶段形成的孔隙,孔隙壁多被沥青充填; B 第三期溶蚀作用阶段形成的孔隙,孔隙壁干净,无沥青; C 第三期溶蚀作用所形成的残留沥青。X井6000.0m,飞仙关组三段。薄片,×25, (-)

图 9 川北飞仙关组储层溶蚀作用特征

3 成岩序列

根据以上研究,笔者建立了四川盆地北部飞仙关组优质鲕滩储层成岩序列,共分为六个阶段(图 10),各阶段所对应的孔隙度演化见图 2。

(a) 同生期海底成岩环境(图 10a) 早三叠世,主要堆积了一套分选和磨圆度均较好的颗粒,原生粒间孔达 40%以上。在同生阶段的海底环境主要经历了第一期纤状、柱状方解石胶结作用,其次为泥晶化作用,使疏松颗粒弱—半固结,孔隙度降低至 30%以下。

(b) 准同生期海水、大气淡水及混合水成岩环境(图 10b) 早三叠世,随海平面升降变化,滩体频繁暴露于海平面之上,接受大气淡水、海水或混合水的成

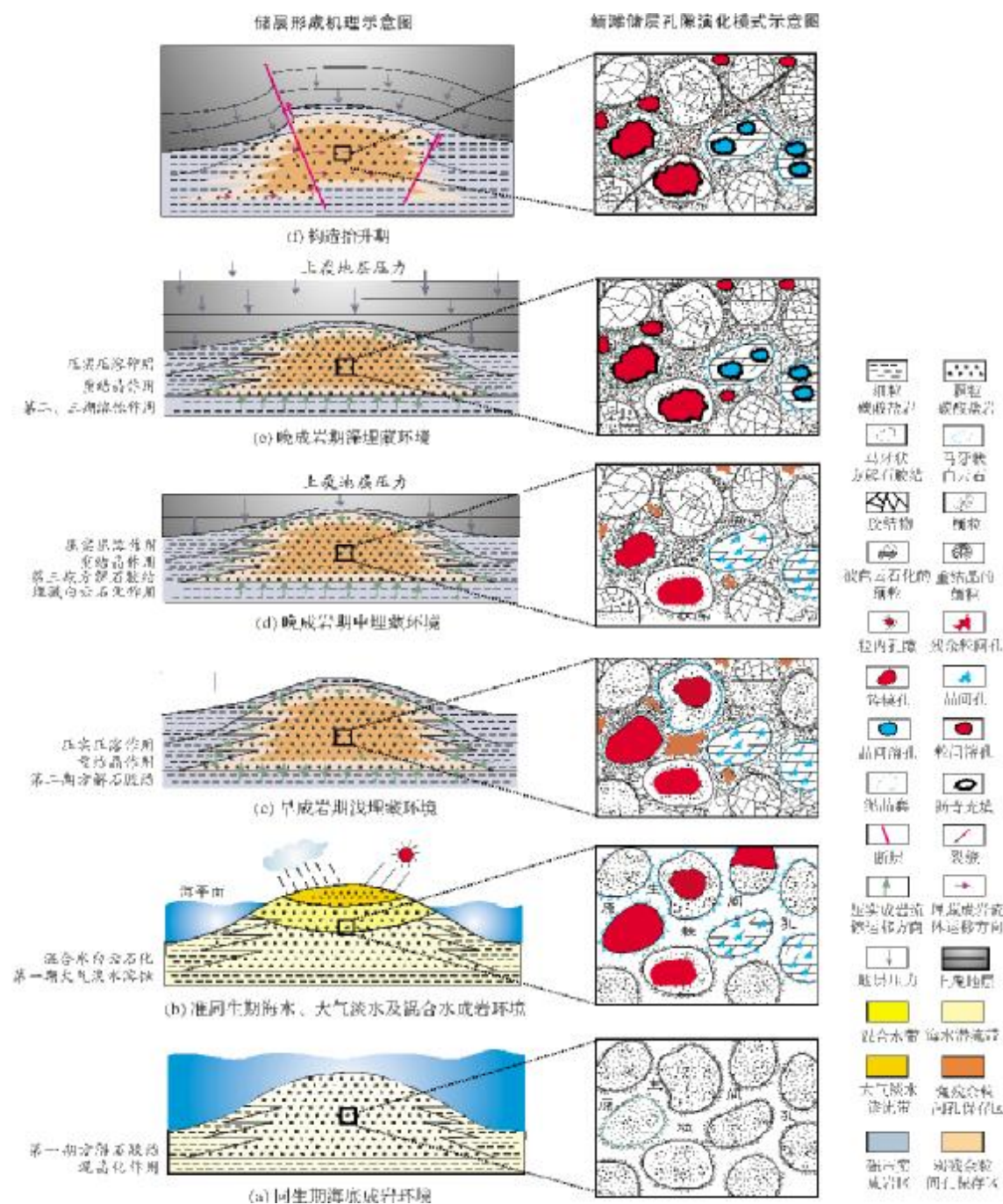


图 10 川北地区飞仙关组优质鲕滩储层成岩演化序列

岩改造,主要发生混合水白云石化和第一期大气淡水溶蚀。滩体颗粒和第一期方解石胶结物转变为白云石,形成以颗粒白云岩为主的岩体,其中的晶间孔较为发育。随后发生的溶蚀作用,形成一定数量的粒内溶孔及铸模孔。滩体孔隙度又升高至接近40%。

(c)早成岩期浅埋藏环境(图10c) 中三叠世—

晚三叠世,滩体进入了浅埋藏阶段,主要发生压实、压溶作用,第二期方解石胶结及重结晶作用,前两种为主。由于前期泥晶化作用的影响,铸模孔及粒内溶孔基本未受破坏。粒间孔基本消失,只剩下少量未被胶结物充填的成为残余粒间孔。沉积物完全固结,滩体孔隙度受到严重破坏,孔隙度又降至5%左右。

(d)晚成岩期中埋藏阶段(图10d) 侏罗纪,滩体埋藏深度继续增加,当达到中埋藏阶段时,压实、压溶作用继续进行,同时发生第三期中—粗晶方解石的胶结,早期滩体中部分较大的次生孔洞消失,孔隙度进一步减低到5%以下。同时,在裂缝或者缝合线发育的地方,埋藏白云石化作用开始,形成砂糖状白云岩,但是由于其仅局部发育,因此图中未明确标示。

(e)晚成岩期深埋藏阶段(图10e) 白垩纪,当滩体进入深埋藏阶段后,随着下伏或相邻地层中的有机质演化成熟,液态烃开始大量形成,并产生较多的伴生有机酸等腐蚀性组分进入地层水。这些地层水沿断层和裂缝进入滩体中发生较强的溶蚀作用,形成大量的粒间溶孔、粒内溶孔及晶间溶孔,使滩体孔隙度上升至5%~8%。同时液态烃进入滩体储层,因此该阶段形成的孔隙中现今多被沥青充填或者半充填。随着埋藏深度的进一步增加,早期滩相储层中的液态烃开始向气态烃转变,并释放出较多的腐蚀性组分,对滩相储层进一步溶蚀,形成一定数量的次生孔隙,使滩相储层孔隙度局部又可达到15%左右。此过程中,烃类的进入可避免储集空间被后期胶结物再次充填。

(f)构造抬升期(图10f) 侏罗纪—白垩纪发生的印支—燕山构造运动对储层影响不明显,仅局部产生的裂缝可以提高储层的渗透率。

本文的主要内容是第一作者在西南石油大学资源与环境学院学习期间完成的,特此说明。

参考文献

- [1] 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(1):25-27.
- [2] 魏国齐,陈更生. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. 沉积学报,2004,22(2):254-260.
- [3] 冯仁蔚,王兴志,张帆,等. 四川盆地东北部下三叠统飞——飞三段孤立碳酸盐岩台地沉积相及相关研究[J]. 中国地质,2008,35(1):54-65.
- [4] 罗川又,张帆,王兴志,等. 川东北地区飞仙关组成岩作用对储层的影响[J]. 石油与天然气学报(江汉石油学院学报),2009,31(5):182-189.
- [5] 王兴志,张帆,蒋志斌,等. 四川盆地东北部飞仙关组储层研究[J]. 地学前缘,2008,15(1):117-122.
- [6] 曾伟,黄先平,杨雨,等. 川东北地区飞仙关组白云岩成因及分布[J]. 西南石油大学学报,2007,12(1):19-22.
- [7] Luczaj J A. Evidence against the Dorag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin Arch—A case for hydrothermal diagenesis[J]. AAPG Bulletin,2006,90(11):1719-1738.
- [8] 黄思静,张雪花,刘丽红,等. 碳酸盐成岩作用研究现状与前瞻[J]. 地学前缘,2009,16(5):219-230.
- [9] 王一,王兴志,王一刚,等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩的地球化学特征[J]. 沉积学报,2009,27(6):1043-1049.
- [10] 王兴志,张帆,马青,等. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关组礁、滩特征与海平面变化[J]. 沉积学报,2002,20(2):249-254.
- [11] 魏国齐,杨威,张林,等. 川东北飞仙关组滩相白云岩白云岩成因模式[J]. 天然气地球科学,2005,16(2):162-166.
- [12] 曾德铭,王兴志,王思仪. 溶蚀在川东北飞仙关组储层演化中的意义[J]. 西南石油大学学报,2007,29(1):15-18.
- [13] 朱光有,马永生,戴金星,等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造[J]. 岩石学报,2006,22(8):2182-2194.

编辑:吴厚松

Diagenetic Evolution Sequence of Lower Triassic Feixianguan Excellent Oolitic Beach Reservoir in Northern Sichuan Basin

Hou Zhenxue, Wang Xingzhi, Song Guangjian, Li Junlong, Hu Zhanqun

Abstract: A platform/trough in-between sedimentary pattern developed in northern Sichuan Basin during Early Triassic Feixianguan age. Thick carbonate oolitic beach reservoirs of platform-marginal facies are developed in the transition zones between platforms and troughs. The reservoirs underwent both destructive and constructive diagenesis. The destructive diagenesis includes compaction, pressolution and cementation and the constructive diagenesis are micritization, neomorphism and recrystallization, dolomitization, dissolution. The main characteristics of these diagenesis and the influence to reservoirs are discoursed. Combined with every diagenetic stage, a diagenetic evolution sequence of reservoirs is set up. Cementation can be divided into three phases, all of which acted as heavy destruction, especially after the second phase of cementation, the porosity in reservoirs decreased to about 5%. Dolomitization includes mixed-water dolomitization and burial dolomitization, which not only increased porosity by about 5 percent but also made a great number of intercrystalline pores form to create favorable rooms for the post-burial dissolution. Burial dolomitization can enlarge intercrystalline pores in dolostone to form intercrystalline dissolution porosity that can increase about 5% to 20% of additional porosity, which is a necessary condition to be high quality dolostone reservoirs.

Key words: Oolitic beach facies; Carbonate reservoir; Diagenesis; Feixianguan Formation; Northern part of Sichuan Basin
Hou Zhenxue; male, Master. Add: Data Interpretation Center, CNOOC Oilfield Services Limited, Yanjiao, Lanfang, Hebei, 065201, China