

文章编号:1673-5005(2016)01-0010-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.01.002

四川盆地元坝地区飞仙关组二段滩相储层 孔隙演化特征

刘景东^{1,2}, 刘光祥², 韦庆亮², 袁国伟^{3,4}

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126; 3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西西安 710018; 4. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018)

摘要:通过岩石薄片、阴极发光、电子探针和流体包裹体分析等方法,对元坝地区飞仙关组二段滩相储层发育特征及影响储层孔隙形成、保存的主要成岩作用进行详细研究,并结合烃类充注期次,探讨滩相储层的孔隙演化模式。结果表明:研究区储层以鲕粒灰岩为主,粒间溶孔和粒内溶孔等次生孔隙构成主要的储集空间;储层孔隙的形成受泥晶化、溶蚀、胶结充填、压实压溶、构造破裂等多种成岩作用影响,其中大气淡水溶蚀作用是储层次生孔隙形成的关键,I期埋藏溶蚀作用为烃类充注提供了良好的通道和储集场所,而大气淡水方解石胶结作用则对次生孔隙保存起到明显的破坏作用;研究区储层孔隙演化经历了石油充注前形成溶孔且孔隙增减交替变化、油向气转化期溶孔孔隙减少、油向气转化后形成裂缝、溶孔且孔隙缓慢增加3个阶段。

关键词:四川盆地;元坝;飞仙关组;碳酸盐岩;台缘滩;储层;孔隙结构

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:刘景东,刘光祥,韦庆亮,等.四川盆地元坝地区飞仙关组二段滩相储层孔隙演化特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):10-17.

LIU Jingdong, LIU Guangxiang, WEI Qingliang, et al. Pore evolution characteristics of beach facies reservoir of Feixianguan II Member in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(1):10-17.

Pore evolution characteristics of beach facies reservoir of Feixianguan II Member in Yuanba area, Sichuan Basin

LIU Jingdong^{1,2}, LIU Guangxiang², WEI Qingliang², YUAN Guowei^{3,4}

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi 214126, China;

3. National Engineering Laboratory of Low Permeability Oil and Gas Exploration and Development, Xi'an 710018, China;

4. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Branch Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

Abstract: Using analyses of rock thin sections, cathodoluminescence, electron microprobe and fluid inclusion, the reservoir characteristics and the diagenesis that affected on reservoir pore formation and preservation of the Feixianguan II Member in Yuanba area were studied. The pore evolution model was discussed combined with hydrocarbon infill injection period times. The results show that the oolitic limestone with intergranular and intragranular dissolved pores is the main reservoir in the study area. Reservoir pores are mainly formed by micritization, dissolution, cement filling, compaction, pressure solution and tectonic rupture. Meteoric dissolution is the key for secondary porosity formation. The first buried dissolution provides a good channel and gathering place for hydrocarbon filling, but meteoric calcite cement plays a significant role in the destruction of the secondary porosity preservation. There are three stages of reservoir pore evolution in the study area, namely, dissolution pore forming and the alternative variation of pore fluctuating before oil charging; pore decreasing in the transformation

收稿日期:2015-07-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(14CX02116A);中国博士后科学基金项目(2013M530848)

作者简介:刘景东(1984-),男,讲师,博士,研究方向为油气地质。E-mail:ljd840911@126.com。

period from oil to gas; and fracture and dissolution pore forming and slow pore increasing after transformation from oil to gas.

Keywords: Sichuan Basin; Yuanba area; Feixianguan Formation; carbonate rock; marginal platform beach; reservoir; pore structure

碳酸盐岩储层孔隙结构复杂,成岩作用对储层有效孔隙的形成具有重要控制作用^[1-3]。滩相储层是四川盆地油气勘探的重要领域,在普光、毛坝场、双庙场、元坝、磨溪等地区相继取得重大突破^[3-5]。四川盆地飞仙关组气藏的分布明显受台地边缘沉积相带控制,优质储层多为台地边缘鲕滩沉积,与“台地边缘相带控制储层发育”的沉积控储理论密切相关^[6-7]。勘探证明,同属于台地边缘相带沉积,普光地区飞仙关组优质白云岩储层极为发育,而元坝地区优质储层发育规模却相对较低^[7-8],因此台地边缘鲕滩储层的最终发育程度还受到成岩作用的改造影响。多数学者认为普光地区飞仙关组储层演化主要受白云岩化作用和岩溶作用的双重控制^[4,9-10];元坝地区飞仙关组碳酸盐岩白云岩化程度低,与普光地区储层的形成机制有明显差异,目前对其储层演化过程的研究还相对较少。笔者通过岩石薄片、阴极发光、电子探针和流体包裹体等方法,结合烃类充注期次,对元坝地区飞仙关组二段滩相储层孔隙演化特征进行研究,以期为四川盆地台地边缘不同构造带碳酸盐岩储层发育差异的原因及碳酸盐岩油气勘探储层预测提供一定依据。

1 地质背景

元坝地区位于川北坳陷低缓构造带,处于米仓山隆起南侧、大巴山褶皱带西南侧和川中隆起东北侧(图1)。晚二叠世早期,受海西旋回东吴运动及

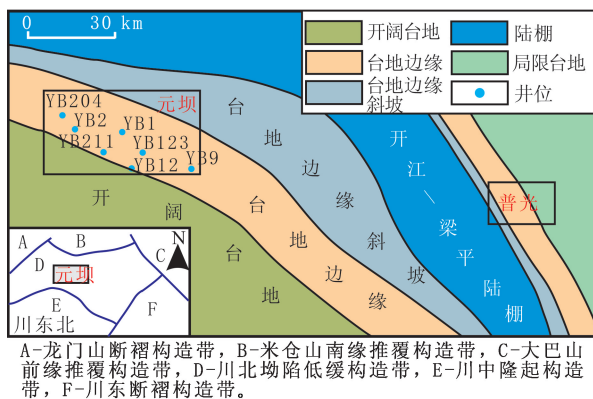


图1 元坝地区构造位置、沉积相及井位分布

Fig.1 Structural position, sedimentary facies and wells distribution of Yuanba area

其引起的峨眉玄武岩喷发等因素影响,沿开江—梁平一线形成了陆棚^[11-13]。元坝地区位于该陆棚西

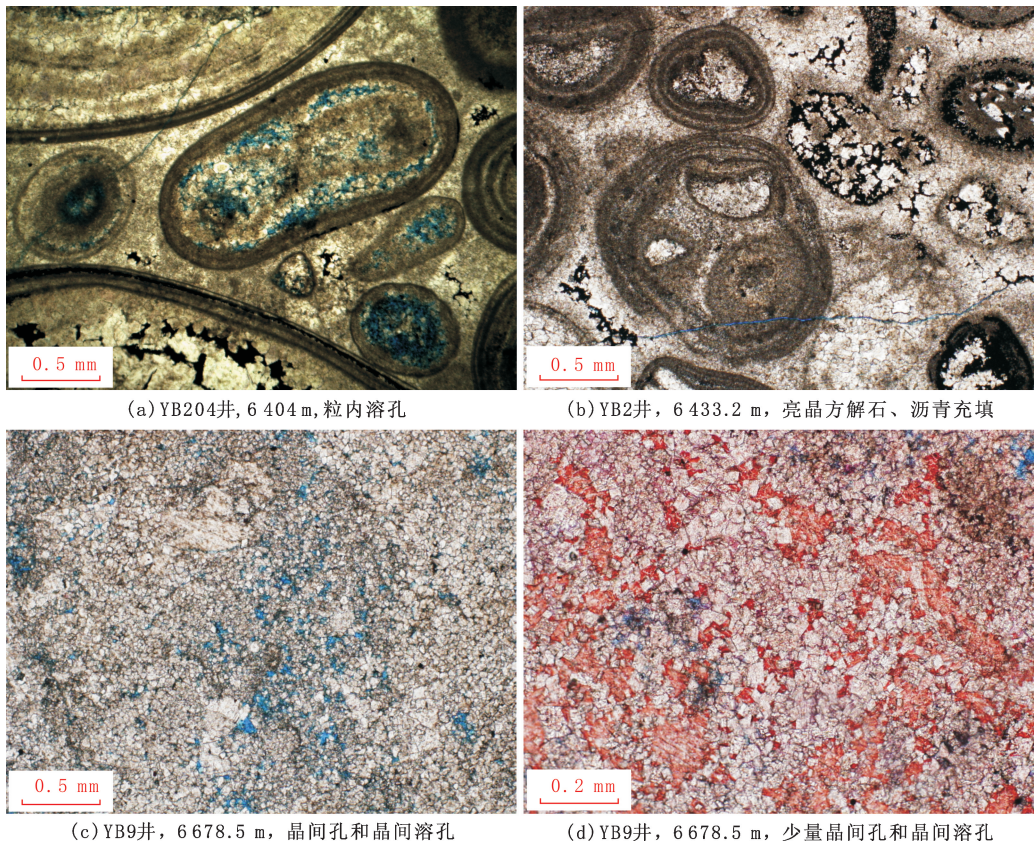
侧,飞仙关组一、二段沉积期表现为西高东低的古地理格局,自西向东依次发育开阔台地、台地边缘和台地边缘斜坡^[14],随着海平面下降,各沉积相带表现出向陆棚方向迁移的趋势,滩体沉积主要形成于飞一晚期和飞二期。飞仙关组三段沉积早期表现为开阔台地相,局部发育台内滩。飞仙关组三段沉积中期和飞仙关组四段沉积期,全区地势逐渐平坦,随海水进一步变浅而演化为局限台地相。

2 研究方法

本次研究共开展9口井的岩心观察及系统取样分析。首先,对岩石铸体薄片进行了镜下观察,然后以胶结现象最为典型的YB204井为例,通过阴极发光鉴别出胶结物世代关系,进而对各世代胶结物进行元素组成和流体包裹体均一温度分析,确定胶结物的形成环境及形成时间。岩石铸体薄片、阴极发光、电子探针和流体包裹体分析在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所国家重点实验室完成。铸体薄片分析仪器为MIAS2000型显微镜。阴极发光在CL8200 MK5型阴极发光仪上完成,束电压为10 kV、束电流300 μ A。电子探针在JXA-8230型电子探针仪上完成,束电压为15 kV,束电流为20 nA。流体包裹体使用Axioplan2/MDS600型全自动冷热台,均一温度测试精度为 ± 1 $^{\circ}$ C。

3 储层发育特征

研究表明,元坝地区飞二段储层岩石类型以鲕粒灰岩为主,其次为灰质粉晶白云岩。鲕粒灰岩中鲕粒以藻鲕、复鲕为主,部分被缝合线、裂缝所切割,发育粒间溶孔和粒内溶孔,部分被方解石、沥青充填(图2(a)、(b))。灰质粉晶白云岩大多表现为粉晶结构,部分白云石呈自形晶形,点-面接触为主,该类型岩石孔隙发育程度较低,仅局部集中发育晶间孔和晶间溶孔,呈三角形、多边形等形态(图2(c)、(d))。鲕粒灰岩和灰质粉晶白云岩局部均有裂缝发育,对于改善岩石渗透性、增加储层孔隙空间具有重要作用。物性统计表明,飞二段储层孔隙度一般为0.9%~14.15%,其中孔隙度为2%~5%的储层占49%,孔隙度小于2%的储层占30%,储层类型以孔隙型为主,部分为裂缝-孔隙复合型。



(a) YB204井, 6 404 m, 粒内溶孔

(b) YB2井, 6 433.2 m, 亮晶方解石、沥青充填

(c) YB9井, 6 678.5 m, 晶间孔和晶间溶孔

(d) YB9井, 6 678.5 m, 少量晶间孔和晶间溶孔

图2 元坝地区飞仙关组二段储层发育特征

Fig.2 Reservoir characteristics of Feixianguan II Member in Yuanba area

4 影响储层孔隙形成、保存的主要成岩作用

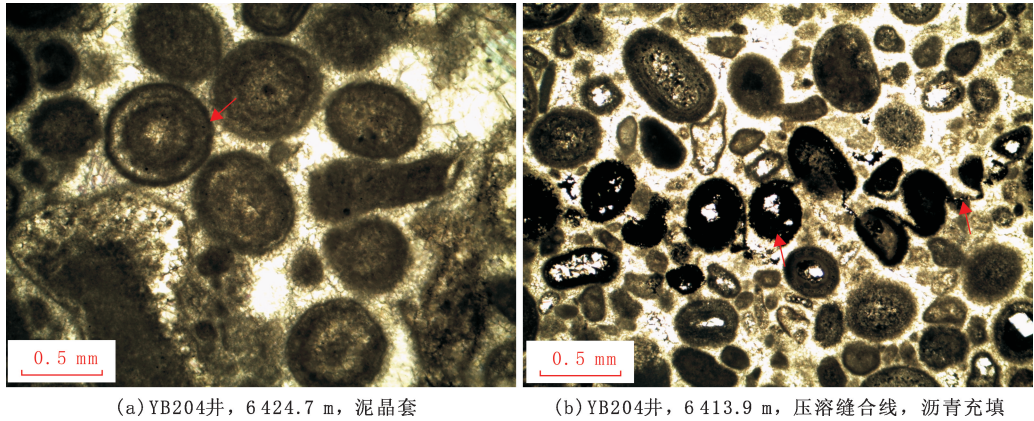
研究区飞二段滩相储层成岩作用类型较多,主要包括泥晶化、压实压溶、白云化、构造破裂、溶蚀和胶结充填等。通过对比这些成岩作用对储层孔隙形成、保存条件的影响,认为泥晶化(图3(a))、压实压溶作用(图3(b))在早一中成岩期对储层孔隙具有明显的破坏性,但形成的泥晶套又有利于后期粒内溶孔、铸模孔的形成和保存,压溶作用产生的缝合线也可以成为溶蚀流体和烃类运移的通道,沿压溶缝合线分布的沥青即是缝合线作为流体运移通道的直接证据(图3(b)),所以泥晶化、压溶作用在间接意义上又有利于储层孔隙的形成和保存。白云化作用在研究区发育程度相对较低,形成时间较晚,仅局部形成灰质粉晶白云岩和白云石胶结物,对于储层孔隙演化所起的作用不大。构造破裂作用主要发生于喜山期,形成时间晚,对现今储层孔隙起到一定的改善作用。多期溶蚀、多期胶结充填作用分别是研究区储层发育最重要的建设性和破坏性成岩作用,对于储层孔隙演化具有决定意义。

4.1 多期溶蚀作用是储层孔隙形成的有利条件

溶蚀作用特别是烃类充注前发生的溶蚀作用对于储层孔隙形成和烃类充注具有重要意义。综合分析表明,研究区主要经历了大气淡水溶蚀、I期埋藏溶蚀和II期埋藏溶蚀。大气淡水溶蚀是由于飞二期海平面下降使沉积物暴露,大气淡水渗入并使不稳定碳酸盐矿物发生溶解,形成大量的铸模孔、粒内溶孔(图2(a)),是研究区储层孔隙得以大量形成的最重要溶蚀作用。I期埋藏溶蚀与烃源岩在低成熟阶段生成的有机酸和 CO_2 对储层的溶蚀改造有关,镜下发现部分溶孔分布于构造挤压形成的破裂缝、破碎颗粒附近,溶孔无明显变形并有沥青充填,表明其形成于构造挤压之后、石油充注之前(图4(a)),该期溶蚀普遍发育,多形成晶间溶孔、粒内溶孔、粒间溶孔,由于该期溶蚀之后很快发生石油充注,所以这些溶孔可以为石油充注提供良好的运移通道和储集场所。II期埋藏溶蚀形成于油裂解成为气和干沥青之后,溶蚀多沿构造裂缝或构造破碎带发生,部分溶孔周围存在早期充填沥青且沥青形态曾明显遭受了构造挤压变形(图4(b)),该期溶蚀主要形成晶间溶孔、粒间溶孔和铸模孔,以非组构性为特征,整

体发育程度不如 I 期埋藏溶蚀,但常形成较大的溶

孔、溶洞或溶缝,有利于储层孔隙的增加。

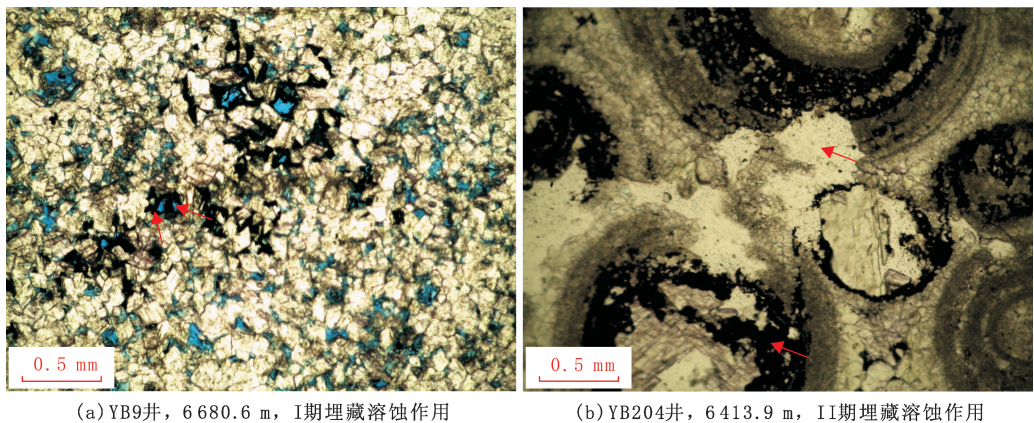


(a) YB204井, 6424.7 m, 泥晶套

(b) YB204井, 6413.9 m, 压溶缝合线, 沥青充填

图3 元坝地区飞仙关组二段储层泥晶化、压实压溶作用

Fig. 3 Micritization and compact and pressure solution of Feixianguan II Member in Yuanba area



(a) YB9井, 6680.6 m, I期埋藏溶蚀作用

(b) YB204井, 6413.9 m, II期埋藏溶蚀作用

图4 元坝地区飞仙关组二段储层溶蚀作用

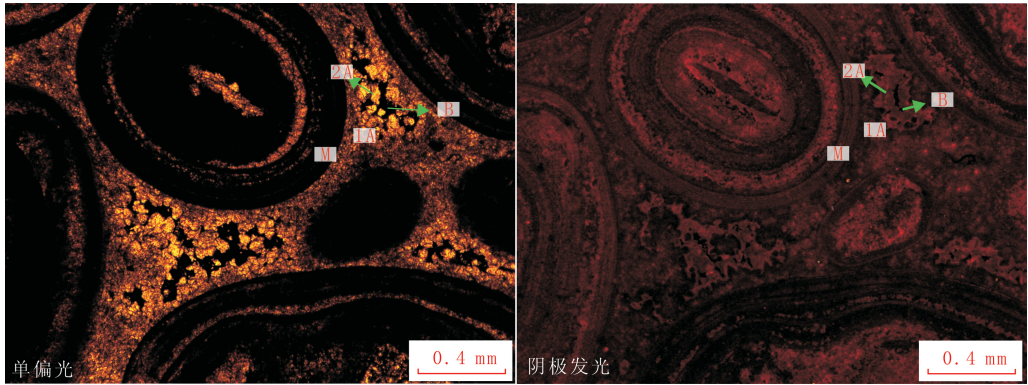
Fig. 4 Dissolution of Feixianguan II Member in Yuanba area

4.2 多期胶结充填作用不利于储层孔隙的保存

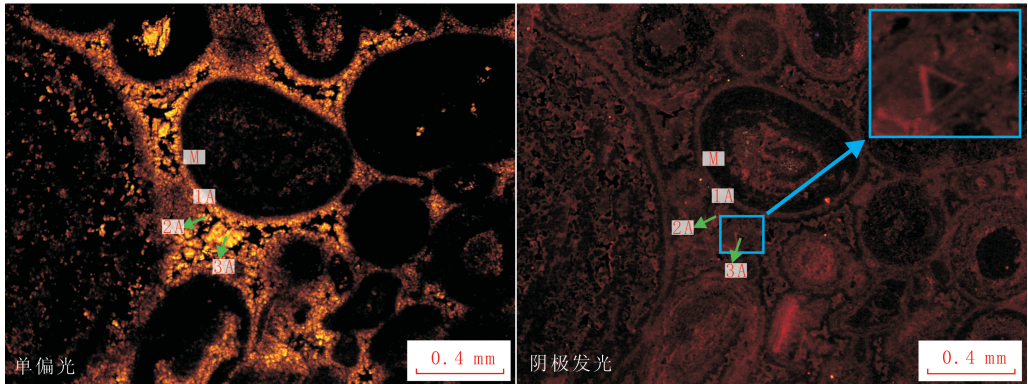
研究区飞二段储层胶结充填作用可以划分为四期(图5、6)。第一期发生于早期海水成岩环境,表现为世代纤维状或栉壳状方解石胶结物,胶结物围绕鲕粒颗粒呈等厚环边分布,阴极发光下不发光或弱发光(图5(a)、(b)), SrO、K₂O+Na₂O含量较高, FeO、MnO含量偏低,与原岩、泥晶套的地球化学特征类似,该期胶结充填与泥晶化作用使原生孔隙被严重破坏,由于其发生于大气淡水溶蚀作用之前,所以对储层的次生孔隙影响不大。第二期发生于大气淡水成岩环境,表现为二代粒状方解石胶结物,晶体呈等轴粒状,围绕颗粒或一代纤维状胶结物生长,晶粒向孔隙中心增长,阴极发光下多为中等强度或中等强度—强发光(图5(a)), K₂O+Na₂O、SrO含量较低, FeO、MnO含量较高,该期胶结物发育规模较大,使储层原生孔隙及先前在大气淡水环境下形成的次生孔隙遭受较严重的破坏。第三期为中—深埋藏条件下相对封闭环境,表现为三代斑状或

嵌晶状方解石胶结物,充填于中、晚成岩期形成的次生孔隙或残留原生孔隙中,阴极发光下为弱发光,多具有环带结构(图5(b)), SrO含量很高、K₂O+Na₂O、MnO含量较低,大多具有一定的FeO,该期胶结物封堵部分残余孔隙,胶结物数量分布不一。第四期同样为中—深埋藏条件下相对封闭环境,表现为鲕粒灰岩粒间和粒内孔隙中发育少量白云石胶结物,其中粒间白云石表现为斑状,与方解石呈不规则状接触,阴极发光下为中等强度发光,具有一定的FeO、MnO含量,同时 SrO含量较高, K₂O+Na₂O含量较低,表现为大气淡水和中—深埋藏环境的综合特征,这是由于早期大气淡水胶结形成的方解石在中—深埋藏阶段发生了局部白云岩化而形成,白云岩化过程中由于岩石体积收缩可以使储层孔隙发生小幅度的增加;粒内白云石数量更少,晶形为自形,阴极发光下为弱发光(图5(c)), K₂O+Na₂O、SrO、MnO含量均较低,但 FeO含量明显高于其他方解石或白云石胶结物,判断为铁白云石,该白云石胶结物

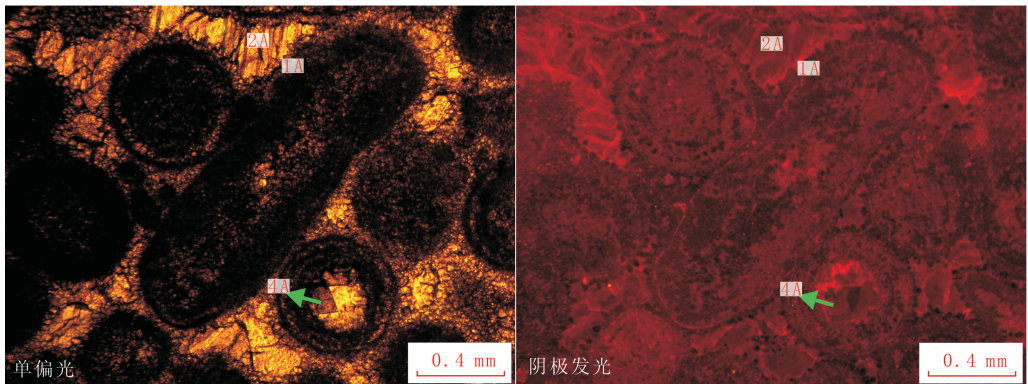
往往填充部分孔隙,但对孔隙造成的破坏有限。



(a) YB204井, 6404 m, 泥晶套(M)、一世代胶结物(1A)、二世代胶结物(2A)、沥青(B)



(b) YB204井, 6404 m, 泥晶套(M)、一世代胶结物(1A)、二世代胶结物(2A), 三世代胶结物(3A)



(c) YB 204井, 6424.7 m, 一世代胶结物(1A), 二世代胶结物(2A), 粒内自形白云石(4A)

图5 元坝地区飞仙关组二段储层胶结物分布

Fig.5 Cements distribution of Feixianguan II Member in Yuanba area

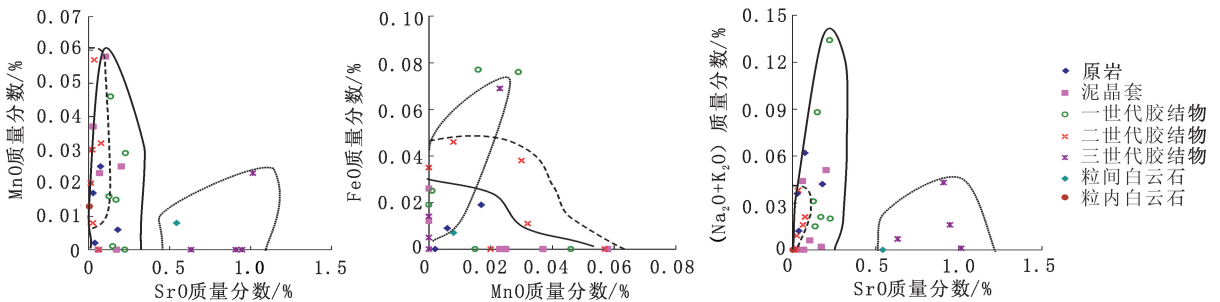


图6 元坝地区飞仙关组二段储层胶结物微区地球化学特征

Fig.6 Micro-area geochemistry of Feixianguan II Member in Yuanba area

通过流体包裹体分析,在 YB204 井鲕粒灰岩的 鲕粒间三世代方解石胶结物中找到可进行均一温度

分析的气液两相包裹体。获得的可供测温包裹体直径一般为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$,包裹体均一化温度为 $103 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$,结合埋藏史判断,这些包裹体主要形成于中侏罗世早期。

5 储层孔隙演化特征

5.1 储层成岩作用与烃类充注的先后次序

目前关于该区油气充注时间的研究较少,但油气来源的分析表明,该区飞仙关组二段与上二叠统长兴组油气来源一致且主要以上二叠统龙潭组烃源岩为主^[15],判断其石油充注期与长兴组一致,即中侏罗世。通过对各类成岩作用、成岩环境、成岩期次及其与烃类浸位关系等综合分析,认为研究区飞二段储层的成岩序列为:早成岩期的泥晶化、海水胶结

→大气淡水溶蚀、方解石胶结,中成岩期的压实压溶→I 期埋藏溶蚀→方解石胶结→白云岩化→进油→油演化为气和沥青,以及晚成岩期的构造破裂、II 期埋藏溶蚀。

5.2 储层孔隙演化模式

研究区储层孔隙主要分布于鲕粒灰岩,原生孔隙基本消失,现今孔隙主要为不同成岩期次形成的溶蚀孔。以 YB204 井飞二段鲕粒灰岩为例,以阴极发光所反映的胶结物面貌及其对胶结物的综合判断为主要依据,借助 photoshop 软件重点对不同时期溶蚀增加孔隙量和胶结充填减少孔隙量进行计算,反演不同时期储层孔隙的分布面貌,并建立孔隙演化模式(图 7)。

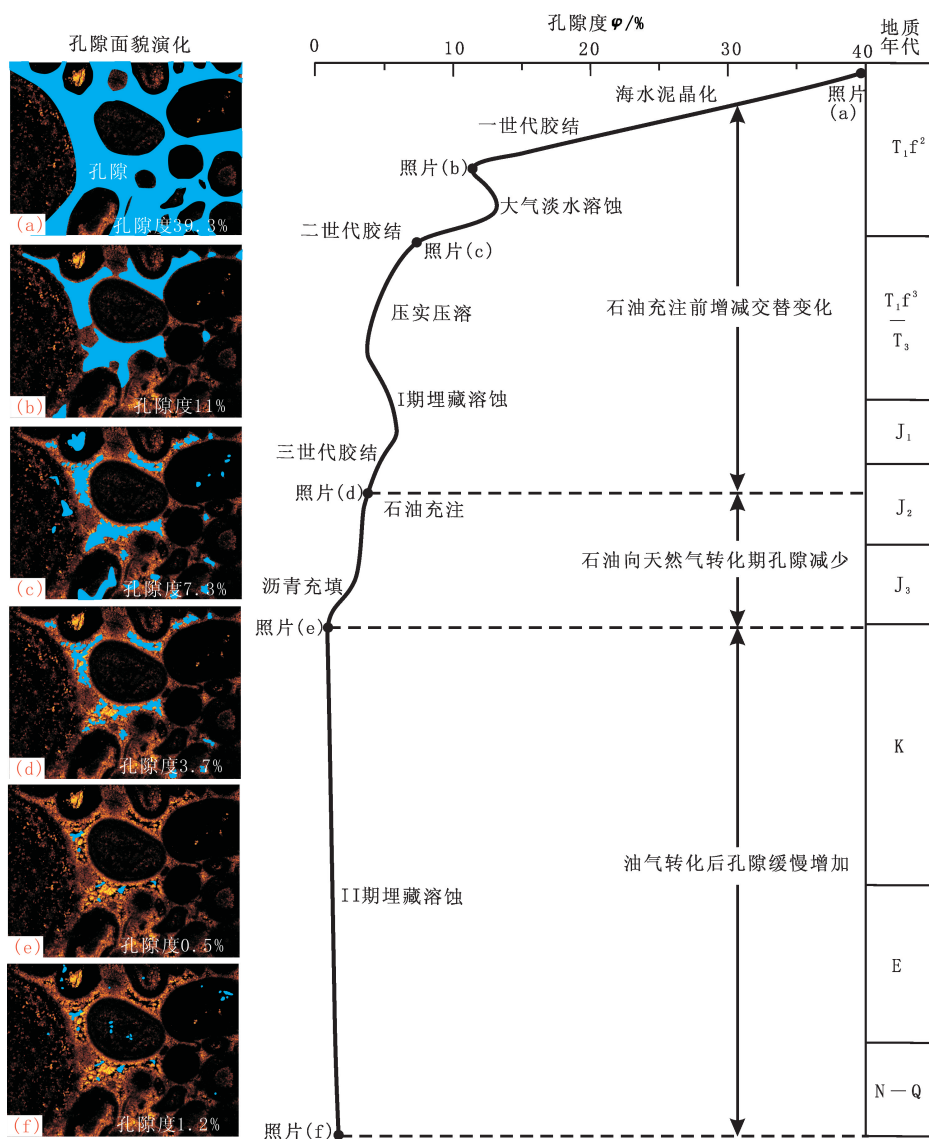


图 7 YB204 井飞仙关组二段鲕粒灰岩储层孔隙演化模式

Fig. 7 Pore evolution model of oolitic limestone reservoir in Feixianguan II Member of well YB204

(1) 石油充注前形成溶孔且孔隙增减交替变化

研究区飞二段主体为鲕滩相沉积,原生孔隙主要为粒间孔、生物体腔孔和少量遮蔽孔隙,计算初始孔隙度为39.3%。海水环境泥晶化、海水胶结作用对鲕粒灰岩孔隙的影响强烈,填塞的原生孔隙占28.3%。随着海平面下降,滩相沉积间歇暴露于大气淡水环境,造成大气淡水的选择性溶蚀,形成粒内溶孔、生物铸模孔及粒间溶孔等,增加了超过3%的次生孔隙。溶蚀作用发育的同时,过饱和流体渗入到下部沉积物中,形成粒状胶结物充填孔隙,导致孔隙度降至7.3%。

随着上覆地层沉积,飞二段储层开始处于浅埋藏环境,由于温度、压力增加,发生了压实压溶作用,但受前期胶结物影响,压实压溶作用使孔隙度仅降低约5%。

随着温度、压力的持续增加,研究区上二叠统烃源岩在晚三叠世和早侏罗世开始大量生成有机酸,部分纵向穿过长兴组地层运移至飞二段,造成I期埋藏溶蚀,但由于有机酸的数量有限,该期溶蚀使飞二段储层孔隙度增加约2%。之后发生了三世代方解石胶结作用,虽然该期胶结作用使较多孔隙被充填,但至中侏罗世储层孔隙度仍保持在约3.7%,为石油的充注创造了条件。

(2) 油向气转化期溶孔孔隙减少

随着上二叠统烃源岩在中侏罗世进入大规模生油阶段,飞二段储层开始发生石油充注,石油充注使储层中水岩反应明显降低,孔隙度变化较小。随着油藏温度、压力的逐渐增加,储层中的石油在晚侏罗世开始向天然气转化,生成沥青并充填于孔隙中,使储层孔隙度降至0.5%。

(3) 油向气转化后形成裂缝、溶孔且孔隙缓慢增加

石油向天然气转化后,受晚白垩世喜山运动影响,研究区发生构造抬升和岩石破裂,形成较多的未充填裂缝,这些裂缝是流体运移的有利通道,飞二段储层开始发生II期埋藏溶蚀作用,这些裂缝、溶蚀孔洞使储层孔隙再次缓慢增加,并使孔隙度约增加至1.2%,接近目前实际的孔隙大小。

6 结 论

(1) 多期溶蚀、多期胶结充填作用对研究区飞二段储层孔隙演化具有重要影响。前者包括大气淡水溶蚀作用、I期埋藏溶蚀作用和II期埋藏溶蚀作用,主要形成铸模孔、粒内溶孔,其中大气淡水溶蚀

作用、I期埋藏溶蚀作用是烃类充注前储层孔隙得以大量形成的关键;后者包括海水方解石胶结作用、大气淡水方解石胶结作用、中—深埋藏条件下方解石及白云石胶结作用,其中大气淡水方解石胶结作用对储层次生孔隙的破坏最为严重。

(2) 研究区储层孔隙演化模式可以概括为3个阶段:石油充注前形成溶孔且孔隙增减交替变化,油向气转化期溶孔孔隙减少,油向气转化后形成裂缝、溶孔且孔隙缓慢增加。

(3) 石油充注前发生的大气淡水溶蚀作用、I期埋藏溶蚀作用和大气淡水胶结作用控制了储层次生孔隙的形成与保存,对油气充注规模具有决定意义,因此寻找与此相关的残余次生孔隙储层是较有利的勘探方向。

参考文献:

- [1] 余敏,寿建峰,沈安江,等.埋藏有机酸性流体对白云岩储层溶蚀作用的模拟实验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(3):10-17.
SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution and alteration of buried organic acid fluid on dolomite reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(3): 10-17.
- [2] 丁熊,谭秀成,李凌,等.四川盆地雷口坡组三段颗粒滩储层特征及成因分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(4):30-37.
DING Xiong, TAN Xiucheng, LI Ling, et al. Characteristics and genetic analysis of grain shoal reservoirs in Lei 3 member of Middle Triassic Leikoupo formation, Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(4): 30-37.
- [3] 田艳红,刘树根,赵异华,等.四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(6):671-683.
TIAN Yanhong, LIU Shugen, ZHAO Yihua, et al. Diagenesis of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs in central area of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 671-683.
- [4] 马永生.四川盆地普光超大型气田的形成机制[J].石油学报,2007,28(2):9-21.
MA Yongsheng. Generation mechanism of Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 9-21.
- [5] 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 north-eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006,27(6):741-750.
- [6] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. *地学前缘*,2011,18(4):181-192.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011,18(4):181-192.
- [7] 张学丰,赫云兰,马永生,等. 川东北飞仙关组沉积控储机理研究[J]. *地学前缘*,2011,18(4):224-235.
- ZHANG Xuefeng, HE Yunlan, MA Yongsheng, et al. Controls of sedimentation on reservoir formation in Lower Triassic Feixian-guan Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011,18(4):224-235.
- [8] 王恕一,蒋小琼,管宏林,等. 川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J]. *石油实验地质*, 2010,32(4):366-372.
- WANG Shuyi, JIANG Xiaoqiong, GUAN Honglin, et al. Diagenesis effects of Lower Triassic Feixianguan Formation reservoir in Puguang Gas Field, Northeast Sichuan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010,32(4):366-372.
- [9] 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.
- WANG Xingzhi, ZHANG Fan, JIANG Zhibin, et al. A study of Feixianguan reservoir in northeast Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008,15(1):117-122.
- [10] 李小燕,王琪,韩元红,等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相沉积体系优质储层形成过程及储集空间演化主控因素分析[J]. *天然气地球科学*,2014,25(10):1594-1602.
- LI Xiaoyan, WANG Qi, HAN Yuanhong, et al. Main controlling factors on reservoir space evolution and high quality reservoir forming process of reef-beach facies in Changxing-Feixianguan Formation of northeastern Sichuan area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10):1594-1602.
- [11] 王兴志,张帆,马青,等. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化[J]. *沉积学报*,2002,20(2):249-254.
- WANG Xingzhi, ZHANG Fan, MA Qing, et al. The characteristics of reef and bank and the fluctuation of sea-level in Feixianguan period of late Permian-early Triassic, east Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002,20(2):249-254.
- [12] 魏国齐,陈更生,杨威,等. 川东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.
- WEI Guoqi, CHEN Gengsheng, YANG Wei, et al. Sedimentary system of platformal trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in northern Sichuan Basin and its evolution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004,22(2):254-260.
- [13] 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.
- [14] 赫云兰,付孝悦,刘波,等. 川东北飞仙关组鲕滩沉积与成岩对储集层的控制[J]. *石油勘探与开发*,2012,39(4):434-443.
- HE Yunlan, FU Xiaoyue, LIU Bo, et al. Control of oolitic beaches sedimentation and diagenesis on reservoirs in Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012,39(4):434-443.
- [15] 刘景东,刘光祥,王良书,等. 川东北元坝—通南巴地区二叠系—三叠系天然气地球化学特征及成因[J]. *石油学报*,2014,35(3):417-428.
- LIU Jingdong, LIU Guangxiang, WANG Liangshu, et al. Geochemical characteristics and origin of Permian and Triassic natural gases in Yuanba-Tongnanba area, Northeast Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014,35(3):417-428.

(编辑 徐会永)