

文章编号:0253-9985(2012)04-0599-08

川东北地区飞仙关组成岩晚期白云石溶解作用

张俊¹, 蔡镏璐², 向雷², 蔡春芳²

(1. 中国石化科技开发部, 北京 100728;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 油气资源研究重点实验室, 北京 100029)

摘要:对川东北地区飞仙关组储层进行了岩石薄片观察及碳、氧、锶同位素和流体包裹体综合分析。结果发现, 开江-梁平陆棚东北侧优质储层并不发育方解石白云石化后所应该产生的晶间孔, 相反主要发育白云石粒间溶孔或粒间扩大溶孔。这些溶孔可与轻碳同位素的方解石紧密共生, 并且分布在储层沥青与白云石晶体之间, 应该是在沥青形成后白云石的溶解所致。而西南侧缺乏白云岩, 这一成因的孔隙也不发育。在酸性条件下, 东北侧的白云石与硬石膏或天青石发生溶解作用, 产生 MgSO_4 中间产物。而 MgSO_4 易于被烃类所还原产生 H_2S , 进一步促使白云石、硬石膏和天青石的溶解, 沉淀了孔洞的充填巨晶嵌晶方解石, 并在局部位置净增大了孔隙。这一成因机理很好地解释了东北侧与西南侧储层物性的差异, MgSO_4 很可能是自然界中硫酸盐热化学还原反应(TSR)的主要中间反应物。

关键词:硫酸盐热化学还原反应; 白云石溶解; 孔隙演化; 成岩作用; 飞仙关组; 川东北地区

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Late diagenetic dissolution of dolomites in the Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin

Zhang Jun¹, Cai Liulu², Xiang Lei² and Cai Chunfang²

(1. SINOPEC Science and Technology Development, Beijing 100728, China; 2. Key Lab of Petroleum Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Comprehensive analyses were performed on thin-section, carbon, oxygen and strontium isotopes and fluid inclusions of reservoirs in the Feixianguan Formation of northeastern Sichuan Basin. In the northeastern part of Kaijiang-Liangping shelf, intercrystalline pores resulting from dolomitization of calcite are absent in the high-quality reservoirs. In contrast, dolomite intergranular dissolution pores or intergranular enlarged dissolution pores are well developed in these reservoirs. Both two kinds of dissolution pores may coexist closely with calcites of light carbon isotope and occur in space between solid bitumen and dolomite crystals, thus they should have been produced by dolomite dissolution after solid bitumen precipitation. In the southern part of Kaijiang-Liangping shelf, dolostones are absent, thus pores of similar origin are also not developed. Under acidic conditions, dolomite may react with anhydrite or celestite, to produce MgSO_4 in the northeastern part of Kaijiang-Liangping shelf. As the MgSO_4 can be easily reduced by hydrocarbons to produce H_2S , further promoting the dissolution of dolomite, anhydrite and celestite, the precipitation of giant crystal/poikilitic calcite, and the enlarging of secondary pores in local areas. This genetic mechanism can clearly explain the differences of reservoir physical properties between the northeastern and northwestern areas. The MgSO_4 is likely to be the primary intermediate reactants of TSR.

Key words: dolomite dissolution, porosity evolution, diagenesis, TSR, Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin

收稿日期: 2012-05-14; 修订日期: 2012-07-11。

第一作者简介: 张俊(1968—), 男, 博士、高级工程师, 油气地质勘探与科技管理。

基金项目: 国家自然科学基金委石化联合基金项目(40839906)。

川东北地区飞仙关组沉积早期发育开江-梁平陆棚和城口-鄂西陆棚,在开江-梁平陆棚东北侧发育孤立台地、点滩沉积、台缘鲕滩相沉积(图1)。在孤立台地内部形成了厚层的云质膏盐,膏质泥晶云岩等含膏盐沉积。沿着台地边界发育的鲕粒滩沉积则形成了中晶鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩等一系列储层物性好的云岩,发现了一系列中大型气田如罗家寨、普光气田。而西南侧则发育开阔台地相、台内点滩和台地边缘相,沿着台地边缘主要发育颗粒灰岩沉积,虽然也发现了铁山、福城寨等气藏,但气藏规模较小^[1]。同样是台缘鲕滩沉积,并且经历了相似的构造演化,孔隙度和渗透率却存在较大的差异^[2-4],成岩作用是影响碳酸盐岩储层物性的重要因素之一。下文从成岩作用与化学反应机理方面探讨孔隙的演化。

川东北开江-梁平陆棚东北侧飞仙关组白云岩储层,富含硫酸盐热化学还原作用(TSR)成因 H_2S ^[5-7],而陆棚西南侧同一地层相变为鲕粒灰岩, H_2S 含量和孔隙度均比东北侧低,其差异原因可能是 TSR 产生的 H_2S 溶蚀碳酸盐矿物造成的^[8,9]。TSR 作用对两侧孔隙度有多大的影响成了本文探讨的一个重点。一般认为,TSR 常伴随

着方解石,甚至硬石膏、重晶石的沉淀^[10-12,7]而不能有效地增加孔隙度^[11]。仅有少量例子显示 TSR 能改善储层空间,如美国 Arkansas 州 Walker Creek 油气田上侏罗统 Smackover 组富含金属硫化物,次生孔隙发育,因金属硫化物沉淀而生成的 H^+ ^[14]和 TSR 成因的 H_2S 被氧化而产生 H_2SO_4 ^[15],这些酸性条件促进了碳酸盐矿物的溶解。最近理论计算与实验模拟研究显示,TSR 很可能是酸性的 HSO_4^- 或 $MgSO_4$ 与烃类之间所发生的氧化—还原反应^[16-17]。 HSO_4^- 或 $MgSO_4$ 的来源与分布是检验上述 TSR 机理在自然界中是否有效的关键。由于白云石、硬石膏能够提供 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 来源,本文通过对比开江-梁平陆棚东北侧白云岩与西南侧灰岩储层 TSR 程度、孔隙度的差异,目的是检验 TSR 的机理、探讨深埋条件下是否存在白云石溶解作用,并导致孔隙度增大。

1 成岩作用和成岩序列

川东飞仙关组成岩作用包括胶结作用、白云石化、压实压溶、溶蚀作用和有机质参与下的热化学硫酸盐还原作用。

1.1 胶结作用

三期胶结作用在陆棚两侧的颗粒灰岩或鲕粒云岩中基本一致。第一期方解石胶结物一般呈栉壳状环边,阴极发光下不发光(图2),与围岩颗粒具有相同的阴极发光特征,为早期的海底胶结作用形成。第二期方解石胶结物呈细晶半自形粒状,与第一期方解石胶结物呈整合接触或者部分有溶蚀不整合接触,直接和围岩接触,说明两期胶结之间经历了一期溶蚀作用,而第二期胶结物呈现出橙黄色的阴极发光色,与第一期胶结物明显不同,可能形成于同生期大气淡水环境下。第三期胶结物方解石以嵌晶或单晶形式充填于较大原生孔隙中心,或者方解石交代白云石胶结物。在川东北飞仙关组的这一期方解石较发育,使孔隙度减少 0~20%,残余沥青发育,说明在两期胶结作用之间有油气的充注。

1.2 溶蚀作用

通过岩心和薄片(普通染色片和铸体片)的观

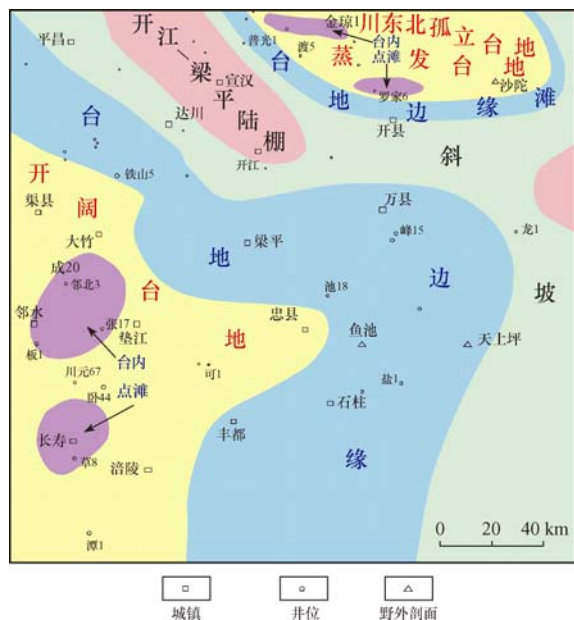


图1 川东北地区下三叠统飞仙关组沉积相分布

(改自王思议,2006)^[13]

Fig. 1 Map showing Lower Triassic Feixianguan Formation sedimentary facies in northeastern Sichuan Basin

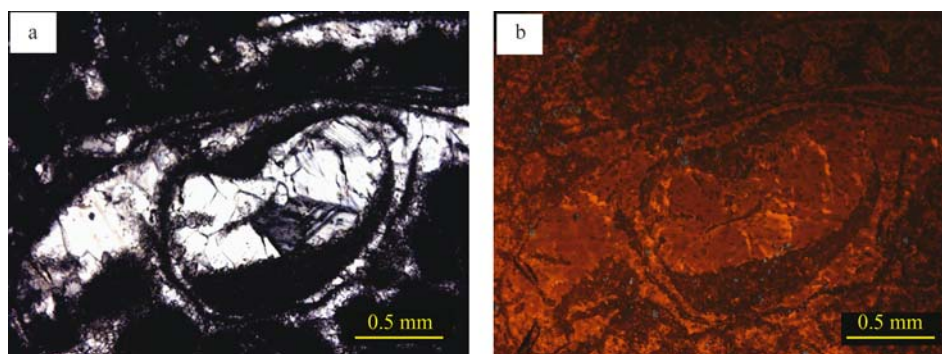


图2 川东北地区飞仙关组方解石胶结物显微照片和阴极发光照片

Fig. 2 Photomicrographs and cathodoluminescence photos of calcite cement in the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin

a. 飞仙关组生屑颗粒灰岩中示顶、底构造, D2-17井, T_1f ;

b. 图a的阴极发光特征图, 第一期栉壳状胶结物不发光, 第二期粒状胶结物发橘黄色光, 示底构造中充填方解石呈橘黄色光

察以及统计, 可以见到各类溶蚀孔隙: 粒内孔、粒间溶孔、晶间溶孔和晶内溶孔等。在这里至少识别出两期的溶蚀作用: 同生期选择性溶蚀作用和埋藏期非选择性溶蚀作用。

1.2.1 同生期溶蚀作用

川东北飞仙关组沉积时处于正地貌的台缘礁滩相沉积环境, 次级海平面的升降会使台地边缘暴露, 受到大气淡水的影响, 形成同生期溶蚀作用。该期溶蚀作用主要是选择性溶蚀早期不稳定的文石和高镁方解石等矿物, 形成粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔。钻井岩心中部分鲕粒滩顶部可见干裂构造和薄的岩溶角砾岩, 薄片可见铸模孔, 其底部常见渗流粉砂, 上部则被方解石充填, 形成明显的示底构造。上部的孔隙在后期的成岩过程中充填了亮晶方解石, 亮晶方解石在阴极发光下呈亮橙黄色, 与围岩的泥晶不同。这些都证明是同生期大气淡水环境中发生的溶蚀作用。第一期海底成岩环境生成的纤柱状方解石胶结物发生溶解, 并与第二期浅埋藏环境生成的粉-细晶方解石呈明显的溶蚀不整合接触, 说明在沉积物沉积后不久的海水胶结作用之后就发生了该期溶蚀作用, 并且发生在第二期胶结作用之前。该期溶蚀作用较弱, 可增大孔隙度的值不超过1%, 且仅在台地边缘鲕粒滩相中发育, 溶蚀孔隙多被后期的方解石、白云石等填充, 不具备渗储能力。

1.2.2 埋藏溶蚀作用

埋藏溶蚀作用在飞仙关组形成了大量的溶蚀

孔洞(图3a), 与同生期大气淡水溶蚀作用不同, 该期溶蚀作用具有非选择性, 形成各种粒间溶孔、粒内溶孔等, 并且后期被半充填或未充填(图3b), 为该区域储集空间形成的主要原因。王一刚等^[18](2007)根据溶蚀孔隙和沥青之间的关系, 将埋藏溶蚀作用区分为早、晚两期埋藏溶蚀。被沥青全部充填的孔隙为早期埋藏溶蚀作用形成, 而沥青呈环状或孤立团块状分布于孔隙中(图3c), 或充填有沥青的孔隙被溶缝-溶沟切割, 这些晚于沥青充填的溶蚀孔隙(缝、洞)为识别晚期溶蚀作用的标志。

鲕状白云岩和残余鲕状白云岩中存在超大粒间溶孔, 以及未被沥青充填的膏模孔、粒内溶孔等, 这些孔隙的体积约为7%。粒间溶孔和粒内溶孔部分充填亮晶巨晶方解石、石英, (图3b和3d)。尽管没有示顶底结构的膏模孔很难排除为大气水溶蚀作用成因, 但是由于没有被沥青充填, 很可能说明是在石油侵位后、甚至沥青沉淀后才形成的。通过薄片观察可见沥青呈环状或呈孤立团块分布于孔隙中央, 在沥青和周围颗粒之间形成的孔隙应该形成于固体沥青沉淀之后, 晚期硬石膏和白云石的溶解作用, 从时间上分析与TSR发生时期相匹配, 据此, 有理由认为与TSR作用紧密相关。

1.3 白云石化作用

川东北飞仙关组中白云岩发育^[19], 陆棚东北侧以中晶鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩和糖粒状

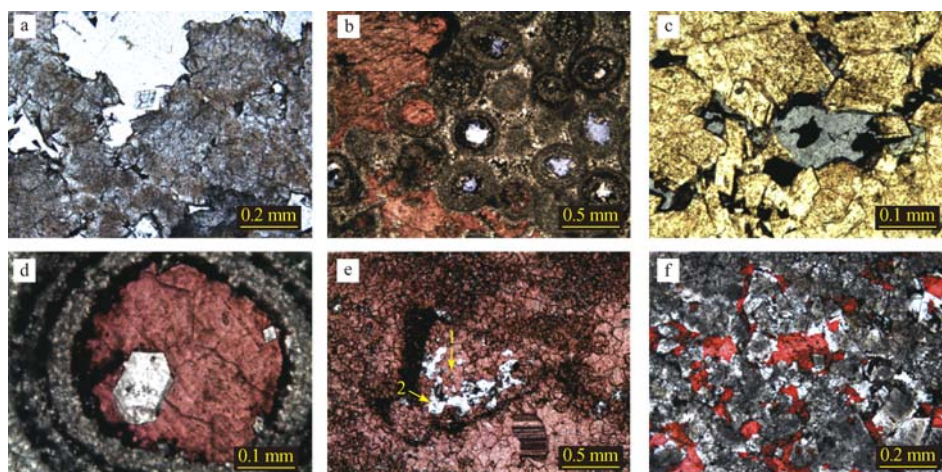


图3 川东北地区飞仙关组成岩作用现象照片

Fig. 3 Photomicrographs showing diagenesis of the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin

- a. 白云石超大溶孔, D3-26井, 4306.4 m, T₁f; b. 鲕状微晶白云岩粒内和粒间孔部分被方解石、石英充填, D5井, 4790.8 m, T₁f;
c. 白云石晶间孔内充填沥青, LJ2井, T₁f; d. 鲕状微晶晶粒内孔中石英和方解石, D5井, 4790.8 m, T₁f;
e. 第二期方解石交代天青石(1. 方解石, 2. 天青石) D2-17井, T₁f; f. 方解石交代白云石, LJ6-7井, 3936 m, T₁f

残余鲕粒白云岩为主,还含有泥微晶白云岩、粉-细晶白云岩。而陆棚西南侧白云岩则较少,以泥微晶白云岩为主。除了交代鲕粒的白云石外,还存在一期溶孔中充填的自形白云石。

1.4 硫酸盐热化学还原作用(TSR)

川东北飞仙关组的 TSR 作用研究表明,该区具备了发生 TSR 的条件:飞仙关组 PG2, PG6, LJ1, LJ2 和 D5 等井飞仙关组充填的方解石中流体包裹体均一温度散点图(图4)显示,以大于 130℃ 为主。有趣的是,流体包裹体的盐度较低。

通过薄片观察和扫描电镜分析,方解石还交代了天青石和硬石膏,被方解石交代的天青石边界成不规则接触关系(图3e,图5)。于是,认为天青石和硬石膏都是 TSR 反应硫酸盐的来源。

嵌晶方解石充填和方解石交代白云石现象也是 TSR 的结果(图3f)。碳同位素结果(图6)看出,该期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值可低至 $-18.87\text{‰} \sim -10.30\text{‰}$, 比地层中灰岩全岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值($0.9\text{‰} \sim 3.7\text{‰}$)^[2] 轻得多,指示了具有有机碳($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-34.57\text{‰} \sim -23.50\text{‰}$, PDB) 的贡献。溶洞充填的方解石碳同位素值显示主要为有机来源,应该是 TSR 作用产生的。相反,天然气中 CO_2 碳同位素值 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值($-4.46\text{‰} \sim -2.41\text{‰}$)^[20] 则重得多,很可能指示后期混入了碳酸盐矿物溶解而产生的无机碳。

飞仙关组硬石膏样品和后期充填的巨晶方解

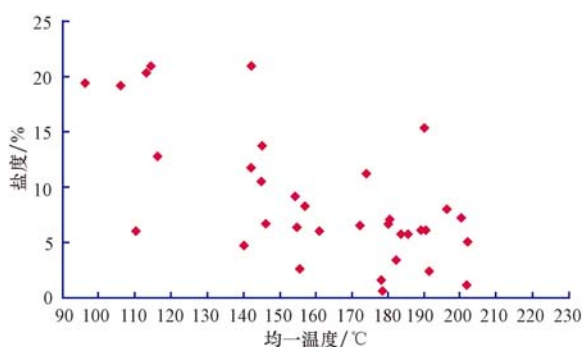


图4 川东北地区飞仙关组孔洞和脉中充填方解石包裹体均一温度和盐度分布

Fig. 4 Salinities and homogenization temperatures of fluid inclusions in calcites filled in vugs and fractures in Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin

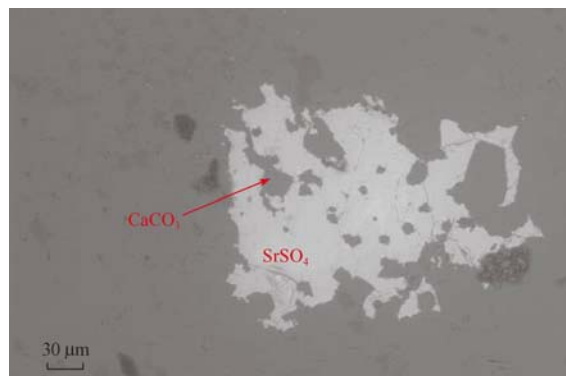


图5 川东北地区飞仙关组岩石扫描电镜背散射图像

Fig. 5 Backscatter electron image of the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin
(方解石交代天青石,边界成不规则接触, D2-17井, T₁f.)

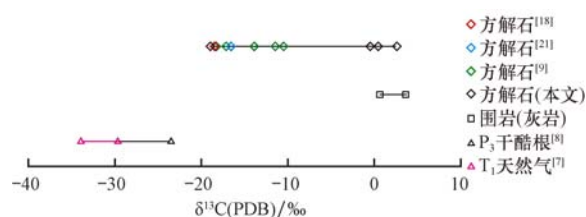


图6 川东北地区飞仙关组孔洞充填方解石碳同位素分布

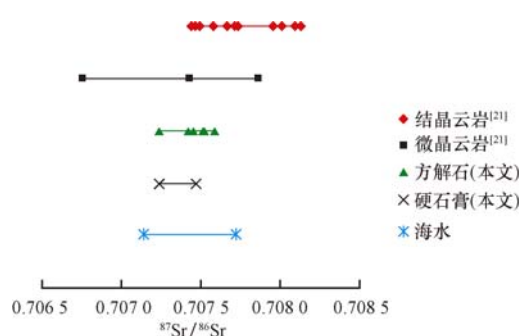
Fig. 6 $\delta^{13}\text{C}$ of vug-filling calcites in Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin

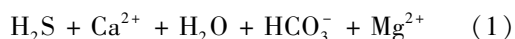
图7 川东北地区飞仙关组锶比值分布

Fig. 7 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin

石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值测试结果,与结晶白云岩和微晶白云岩^[22]具有很好的可比性(图7),并与早三叠世海水接近。锶主要是以 Sr^{2+} 离子方式与碳酸钙共同沉淀方式从海水中析出,或者只以 Sr^{2+} 离子取代 Ca^{2+} 离子的方式出现在碳酸盐岩的矿物中。碳酸盐的锶同位素组成具有独特的长期变化趋势^[23],是研究流体来源的极好参数。结合硬石膏的溶解和方解石交代硬石膏现象,可以认为硬石膏与方解石具有同一来源,并没有受到外来不同 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值流体的影响。

综合上述观察与地球化学测试结果,这里提出如下可能的 TSR 反应机理:

烃类 + 硬石膏 + 白云石 = 方解石 +



上述反应实际上是在酸性条件下,白云石与硬石膏或天青石反应,产生 MgSO_4 ,而后 MgSO_4 与烃类反应,形成了 H_2S 和 HCO_3^- ,并为后期的白云石沉淀提供了 Mg^{2+} 来源。上文方解石具有有机来源的碳同位素特征,支持了其碳主要来源于参与 TSR 反应的烃类。

2 TSR 对次生孔隙发育的影响

深部碳酸盐岩高 H_2S 含量与有意义增高的孔隙度被认为与 TSR 作用有关^[2,24-26],研究发现,较强的 TSR 区,多发生在白云岩储层中,TSR 是否能导致白云石矿物的溶解作用及其产生的机理,迄今还没有人进行深入研究。下文将开江-梁平陆棚两侧白云岩与灰岩加以对比来讨论。

开江-梁平陆棚两侧飞仙关组台地相沉积厚度一般为 350 ~ 400 m,主要发育厚层的鲕粒滩沉积^[5],而陆棚西南侧的储层物性次于东北侧的储层,孔隙度、渗透率均存在较大的差异(表1)。

朱光有等^[27]发现 TSR 成因的 H_2S ,其浓度与储层物性具有正相关关系,孔隙度等值线图 and H_2S 含量等值线图具有相似分布规律:普光、罗家寨、铁山坡、渡口河等飞仙关组以孔隙型为主的储层高含 H_2S 。相反铁山等不含或微含 H_2S 的气藏为裂缝型储层,孔隙度很低。这种规律也显示了 TSR 对储层物性的改善作用。

开江-梁平陆棚东北侧为蒸发台地,富含膏盐^[28-29],并发生了早期白云岩化作用;而西南侧为开阔台地,膏盐不发育,早期白云岩化弱。研究发现:①鲕粒云岩中发育大量的超大溶孔,溶孔约 1 mm 左右,显然不是方解石白云石化后产生的白云石晶间孔,这些超大孔隙并没有被沥青充填,可部分充填自形白云石;②可见部分沥青呈环状,分布于孔隙中间。这些观察表明,在沥青充填后有一期白云石的溶蚀作用。综合考虑研究区的实际,提出更可能的机理,即 TSR 作用过程中硬石膏与早期白云石都发生溶解而仅方解石发生沉淀。这一解释与这一地区岩矿观察(鲕粒白云岩或残余鲕状中晶白云岩中超大溶孔)、地球化学测试结果都吻合,同时,也很好地解释了在深埋比较封闭体系下白云石化(孔隙中自形白云石)所需要的

表1 开江-梁平陆棚两侧孔隙度和渗透率对比

Table 1 Comparison of porosity and permeability between the northeast and southwest sides of Kaijiang-Liangping shelf

储层	东北侧鲕粒白云岩 ^[30]	西南侧颗粒灰岩 ^[2]
孔隙度/%	平均 7.52	< 1.25
渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	平均 180	< 9.87×10^{-3}

Mg^{2+} 的来源问题。因此,在川东北飞仙关组中 TSR 很可能导致了有意义量的次生孔隙。

3 孔隙演化

通过对 TSR 作用等成岩现象的分析,对川东北开江-梁平陆棚两侧飞仙关组成岩作用和孔隙演化进行总结,从其成岩作用对孔隙的贡献来看,飞仙关组中对孔隙度和渗透率增加起建设性作用的主要成岩作用包括:多期多类型的溶蚀作用(一期同生期溶蚀,两期埋藏溶蚀)、白云石化作用(该区的鲕粒白云岩和残余鲕粒白云岩作为主要的储集体,其白云石化的作用对储层物性的影响起到了很重要的作用)、TSR 作用、重结晶作用等。破坏性的成岩作用主要包括:多期胶结作用、充填作用、压实作用等。在这些成岩作用的影响下,形成了埋藏深度高达 6 000 m 以上的优质储层,对深部的油气田勘探开发具有很好的指导意义。

开江-梁平陆棚东北侧飞仙关组在同生期-准同生期,海底方解石泥晶套、渗流带与潜流带大气淡水胶结与溶蚀作用,以及早期白云石化作用,使孔隙度减少至约 20%~30%。在浅-中埋藏期,由于压实作用的加强,以及第二期胶结作用和充填作用使孔隙度降低至 5%~7%左右。在这期间或稍后富含有机酸的流体和烃类发生了充注,可使孔隙度增加至 7%~9%左右。深埋期发生了 TSR 作用,导致第三期轻碳同位素方解石充填(均一温度 140~180 ℃,部分高达 210 ℃),伴随着白云石和硬石膏的溶解,产生无机 CO_2 ,这一作用可净增孔隙度约 2%~6%,形成孔隙度约 9%~13%的白云岩优质储层,而在后期的构造抬升中孔隙度变化较小(图 8)。

由于陆棚西南侧的礁滩体水体较深,未经历同生期-准同生期的溶蚀作用改造,以及早期白云石化作用,因而孔隙度随着胶结、充填和压实作用逐渐减小。至浅埋藏期,孔隙度已降至 3%左右,其后构造破裂作用和与烃类充注有关的埋藏溶蚀作用使孔隙度略微增加 1%~2%左右。随后的压实和压溶作用使孔隙降至 2%左右。该区深埋藏期由于 TSR 作用弱,与之相关的埋藏溶蚀作用对孔隙度影响较小,而破裂作用能有效地增加渗透率,对孔隙度影响小。现今储层孔隙度主要约为 2%~3%(图 9)。

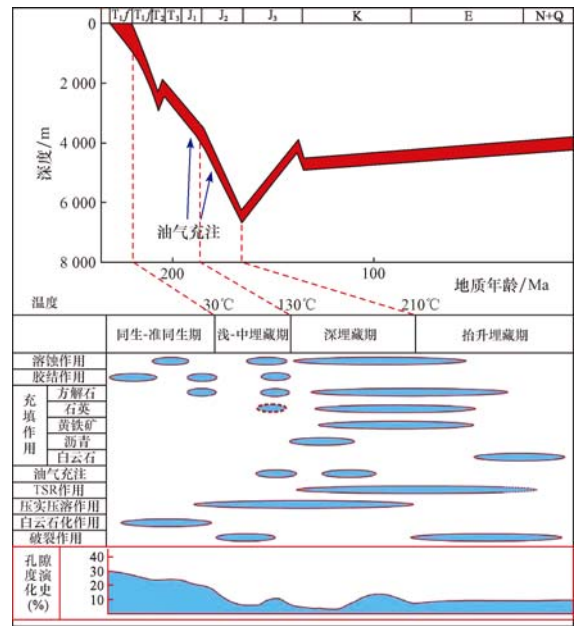


图 8 开江-梁平陆棚东北侧鲕粒云岩储层成岩作用和孔隙演化

Fig. 8 Diagenesis and porosity evolution of dolostones in the northeast side of Kaijiang-Liangping shelf

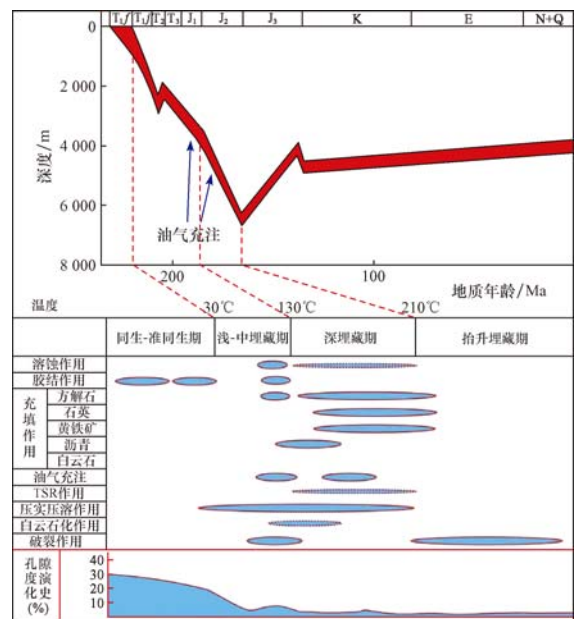


图 9 开江-梁平陆棚西南侧颗粒灰岩储层成岩作用和孔隙演化

Fig. 9 Diagenesis and porosity evolution of grainstones in the southwest side of Kaijiang-Liangping shelf

4 结论

1) 川东北飞仙关组储层经历了胶结作用、压

实压溶和3期溶蚀作用,以及TSR的改造作用。

2) 在开江—梁平陆棚东北侧储层物性明显好于西南侧,除与两侧储层岩性明显不同有关外,成岩特征观察还发现,东北侧优质储层还发育沥青形成后白云石、硬石膏的溶解孔隙。而西南侧缺乏白云岩,这一成因的孔隙也不发育。

3) 东北侧白云石之所以发生溶解作用,应与酸性条件下硬石膏或天青石存在有关。这些硫酸盐矿物与白云石反应,产生 MgSO_4 中间产物。而 MgSO_4 易于被烃类所还原产生 H_2S ,进一步促使白云石溶解作用, MgSO_4 很可能是自然界中TSR的主要中间反应物。

参 考 文 献

- [1] 王强,徐立恒,陈践发.川东北地区大中型气藏天然气特征及气源[J].石油与天然气地质,2011,32(6):867-872.
Wang Qiang, Xu Liheng, Chen Jianfa. Characteristics, origin of natural gas in large-and medium-sized gas reservoirs in north-east Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 867-872.
- [2] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 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, et al. 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.
- [3] 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.
- [4] 王正和,郭彤楼,谭钦银,等. 四川盆地东北部长兴组—飞仙关组各沉积相带储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 56-63.
Wang Zhenghe, Guo Tonglou, Tan Qinyin, et al. Reservoir characteristics of different sedimentary facies in the Changxing and Feixianguan Formations, northeast of the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 47-55.
- [5] 王一刚,窦立荣,文应初成,等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H_2S 成因研究[J]. 地球化学, 2002, 31(6): 517-524.
Wang Yigang, Dou Lirong, Wen Yingchu, et al. Origin of H_2S in Triassic Feixianguan Formation gas pools, Northeastern Sichuan Basin, China [J]. Geochimica, 2002, 31(6): 517-524.
- [6] Cai Chunfang, Xie Zengye, Worden R H, et al. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation East Sichuan Basin, China: Towards prediction of fatal H_2S concentrations [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(10): 1265-1279.
- [7] Cai Chunfang, Li Kaikai, Zhu Yangming, et al. TSR origin of sulfur in the Permian and Triassic reservoir bitumen in East Sichuan Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2010, 41: 871-878.
- [8] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 川东北地区飞仙关组高含 H_2S 天然气 TSR 成因的同位素证据[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(11): 1037-1046.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yinbo, et al. Evidence from isotopic on origin of TSR in Feixianguan Formation gas pools in East Sichuan Basin [J]. Science in China Series D, 2005, 35(11): 1037-1046.
- [9] 马永生,郭彤楼,赵雪凤,等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(增刊): 43-52.
Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. The formation mechanism of high-quality dolomite reservoir in the deep of Puguang Gas Field [J]. Science in China Series D, 2007, 37(S0): 43-52.
- [10] Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings old and new insights [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140: 143-175.
- [11] Cai Chunfang, Li Kaikai, Li Hongtao, et al. Evidence for cross for mational hotbrine flow from integrated $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, REE and fluid inclusions of the Ordovician veins in Central Tarim [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23: 2226-2235.
- [12] Cai Chunfang, Zhang Chunming, Cai Liulu, et al. Origins of Palaeozoic oils in the Tarim Basin: evidence from sulfur isotopes and biomarkers [J]. Chemical Geology, 2009, 268: 197-210.
- [13] 王思仪. 川东地区下三叠统飞仙关组成岩作用及对储层的影响[D]. 南充: 西南石油大学, 2006.
Wang Siyi. Diagenesis and its influence to the reservoir of Feixianguan Formation in Lower Triassic, East Sichuan [D]. Southwest Petroleum University, 2006.
- [14] Moore C H, Druckman Y. Burial diagenesis and porosity evolution, Upper Jurassic Smackover, Arkansas and Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65: 597-628.
- [15] Hill C A. H_2S related porosity and sulfuric acid oil-field karst [J]. AAPG Memoir, 1995, 63: 301-305.
- [16] Zhang Tongwei, Amrani A, Ellis G S, et al. Experimental investigation on thermochemical sulfate reduction by H_2S initiation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72: 3518-3530.
- [17] Ma Qisheng, Ellis G S, Amrani A, et al. Theoretical study on the reactivity of sulfate species with hydrocarbons [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72: 4565-4576.
- [18] 王一刚,文应初,洪海涛,等. 四川盆地三叠系飞仙关组气

- 藏储层成岩作用研究拾零[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 831-839.
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Diagenesis of Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin, Southwest China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 831-839.
- [19] 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 川东北地区酸性气体中 CO_2 成因与 TSR 作用的影响[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1195-1202.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. CO_2 origin in sour gas in Northeast Sichuan basin and fate action of thermochemical sulfate reduction (TSR) to natural gas[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1195-1202.
- [20] 陈琪, 胡文瑄, 李庆, 等. 川东北盘龙洞长兴组-飞仙关组白云岩化特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 84-93.
- Chen Qi, Hu Wenxuan, Li Qing, et al. Characteristics and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 84-93.
- [21] 黄思静, 胡作维, 邹明亮, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组硫酸盐还原作用对碳酸盐成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 815-824.
- Huang Sijing, Hu Zuowei, Zhou Mingliang, et al. Action of thermochemical sulfate reduction (TSR) to the diagenesis of carbonate in the Feixianguan of Triassic, NE Sichuan Basin of China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 815-824.
- [22] 黄思静, Hairuo Qing, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩镭含量、镭同位素组成与白云石化流体[J]. 岩石学报, 2006, 20(8): 2123-2132.
- Huang Sijing, Qing Hairuo, 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, 20(8): 2123-2132.
- [23] Machel H G. Concepts and models of dolomitization; a critical reappraisal. [C] // C.J.R. Braithwaite, Rizzi G, Darke G, eds. The Geometry and Petrogenesis of Dolomite Hydrocarbon Reservoirs. Geological Society (London) Special Publication, 2004, 235: 7-63.
- [24] 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐储层溶蚀改造作用的模拟实验证据——以川东飞仙关组为例[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊): 136-141.
- Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhu Guangyou, et al. Simulated experiment evidences of the corrosion and reform actions of H_2S to carbonate reservoirs; an example of Feixianguan Formation, East Sichuan[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 136-141.
- [25] Cai Chunfang, Warden R H, Bottrell S H, et al. Thermochemical sulfate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China[J]. Chemical Geology, 2003, 202: 39-57.
- [26] 张水昌, 朱光有, 梁英波. 四川盆地普光大型气田 H_2S 及优质储层形成机理探讨——读马永生教授的“四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示”有感[J]. 地质论评, 2006, 52(2): 230-235.
- Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo. Probe into formation mechanism of H_2S and high-quality reservoirs of Puguang large gas field in Sichuan Basin—the new cognition after reading professor Ma's paper “Discovery of the large-scale gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting”[J]. Geological Review, 2006, 52(2): 230-235.
- [27] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 161-166.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Formation mechanism and distribution prediction of high-quality marine reservoir in deeper Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration And Development, 2006, 33(2): 161-166.
- [28] 郑冰, 腾格尔, 张建勇, 等. 川东北地区飞仙关组油气藏 H_2S 由 TSR 和 TDR 两种方式形成[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 847-856.
- Zheng Bin, Teng Ge'er, Zhang Jianyong, et al. Origin of H_2S from TSR and TDR reactions in oil/gas reservoirs in the Feixianguan Formation, the northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 847-856.
- [29] 彭才, 张延充, 梅燕, 等. 川中地区飞仙关组高能鲕滩储层地震预测[J]. 石油物探, 2010, 49(5): 504-508.
- Peng Cai, Zhang Yanchong, Mei Yan, et al. Seismic prediction on high-energy oolitic-beach reservoir of Feixianguan Formation in central Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, (1): 504-508.
- [30] 赵雪凤, 朱光有, 张水昌, 等. 川东北普光地区与塔中地区深部礁滩体优质储层的对比研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 390-402.
- Zhao Xuefeng, Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, et al. Comparison of deeply buried and high-quality reef-bank facies reservoirs of Puguang gas field in the Northeast of Sichuan Basin with Tazhong gas field of Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 390-402.

(编辑 高岩)