

文章编号:0253-9985(2008)06-0733-07

碳酸盐岩成岩史及其对储层的控制作用 ——以普光气田为例

高林^{1,2}

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国石油化工股份有限公司 勘探南方分公司, 四川 成都 610041)

摘要:碳酸盐岩成岩作用贯穿沉积物从堆积到埋藏直至抬升的整个历史,碳酸盐矿物对成岩环境的高度敏感性使得岩石原始结构及其物性在长期的成岩作用过程中不断被改造,川东北普光大气田长兴组礁滩云岩和飞仙关组鲕滩云岩储层复杂的成岩史即是例证。综合运用高精度三维地震和岩心资料对储层的准同生成岩环境进行分析,利用普光气田重点探井薄片资料对埋藏成岩进行研究。上二叠统长兴组至下三叠统飞仙关组沉积时期,普光气田主体位于(镶边)台地,长兴组台地镶边礁、飞仙关组台缘滩和台内滩构成该气田的储层相,礁滩后和鲕滩间的局限环境提供了渗透-回流准同生白云石化条件。薄片研究表明普光气田长兴组和飞仙关组经历了大范围白云石化、多期胶结作用、压实、多期溶解、裂缝等成岩作用。白云石化作用产生了晶间孔并提高储层渗透率,早期方解石胶结物可使岩石原始孔隙度免遭压实作用破坏,鲕粒的选择性溶解形成溶模孔,埋藏期非组构选择性溶解产生溶蚀扩大孔或溶洞,构造裂缝不仅大大提高了储层渗透率而且作为埋藏溶蚀性流体运移通道形成溶蚀扩大缝。尽管多种成岩事件的叠加以及沉积组构的复杂性决定了礁滩储层物性的非均质性,但鲕滩和礁滩岩相的原始沉积组构控制着潜在储层分布。

关键词:成岩作用;准同生成岩;白云石化;碳酸盐岩;普光气田;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Diagenesis of carbonate rocks and their control over reservoirs —an example from the Puguang gas field

Gao Lin^{1,2}

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. South Exploration Company of Sinopec, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The diagenesis of carbonate rocks underwent through the entire period from the accumulation, burial to the uplifting of sediments. Because carbonate rocks were sensitive to the rock-forming environment, primary petrofabric and physical properties of rocks were constantly modified during the long time of diagenesis. Examples are the complex diagenesis processes of the Changxing reef shoal dolomite and the Feixianguan oolitic beach dolomite in the Puguang gas field in northwest Sichuan. This paper focuses on the burial diagenesis through thin-sections of key wells in the Puguang gas field, and high precision 3D seism and cores data have been used to analyse the penecontemporaneous diagenesis environment. From the sedimentation of the Changxing Formation of the Upper Permian to the Feixianguan Formation of the Lower Triassic, most part of the Puguang gas field was located on the platform margin. Reef on the Changxing Formation platform margin, marginal beach and intraplatform beach on the Feixianguan Formation platform composed the reservoir facies of the Puguang gas field. Limited environment after and between reef beach has provided penetration-reflux conditions for penecontemporaneous dolomitization. The study on thin-sections shows that the Permian Changxing Formation and the Triassic Feixianguan Formation underwent large-scale diagenesis processes like dolomitization, multistage cementation,

收稿日期:2008-07-15。

作者简介:高林(1966—),男,高级工程师、博士研究生,石油地质勘探。

compaction, multistage dissolution and fissure. The dolomitization generated intracrystalline pores and improved reservoir permeability. Early calcite cementing materials protected the original porosity from compaction. The selective dissolution of oolite formed moldic pores. The selective dissolution of non-fabric materials created enlarged pores or caverns. Tectonic fracture not only improved reservoir permeability but also served as the liquid migration channels to enlarge the dissolved fissure. Despite the heterogeneity of reef beach facies reservoirs, which was determined by various diagenesis processes and the complexity of depositional fabric, the original depositional fabric of oolitic beach and reef beach facies controlled the distribution of potential reservoirs.

Key words: diagenesis; penecontemporaneous; dolomitization; carbonate rock; Puguang gas field; Sichuan Basin

碳酸盐岩极易受成岩作用影响,这种作用自沉积物堆积之后即可发生并一直持续到沉积物抬升剥蚀或变质为止。碳酸盐岩储层现今孔渗性集中反映了各种成岩事件的综合影响。晚二叠世长兴组礁滩和早三叠世飞仙关组鲕滩是普光气田也是四川盆地的重要储层相,它们经历了自近地表至深埋环境复杂的物理化学成岩史,这些滩体在成岩过程中原始孔隙不断被破坏,新的储集空间不断形成并被保存下来。本文旨在阐明控制普光气田礁滩和鲕滩储层孔隙发育和保存的沉积、成

岩作用及储层物性对成岩作用的影响。

普光气田位于四川盆地川东北宣汉-达县探区,面积约1116 km²,其现今构造位置位于大巴山前缘推覆构造带、川东断褶带和川中平缓构造带的交汇部位(图1A)。地质新认识尤其是对碳酸盐岩储层沉积相的新认识是在海相深层领域部署普光构造-岩性复合气藏的发现井——普光1井的关键。该气田发现之前,这一探区由于埋深大且被认为是不利于长兴组和飞仙关组储层发育的海槽背景^[1~4],因此被长期视作勘探禁区。随着

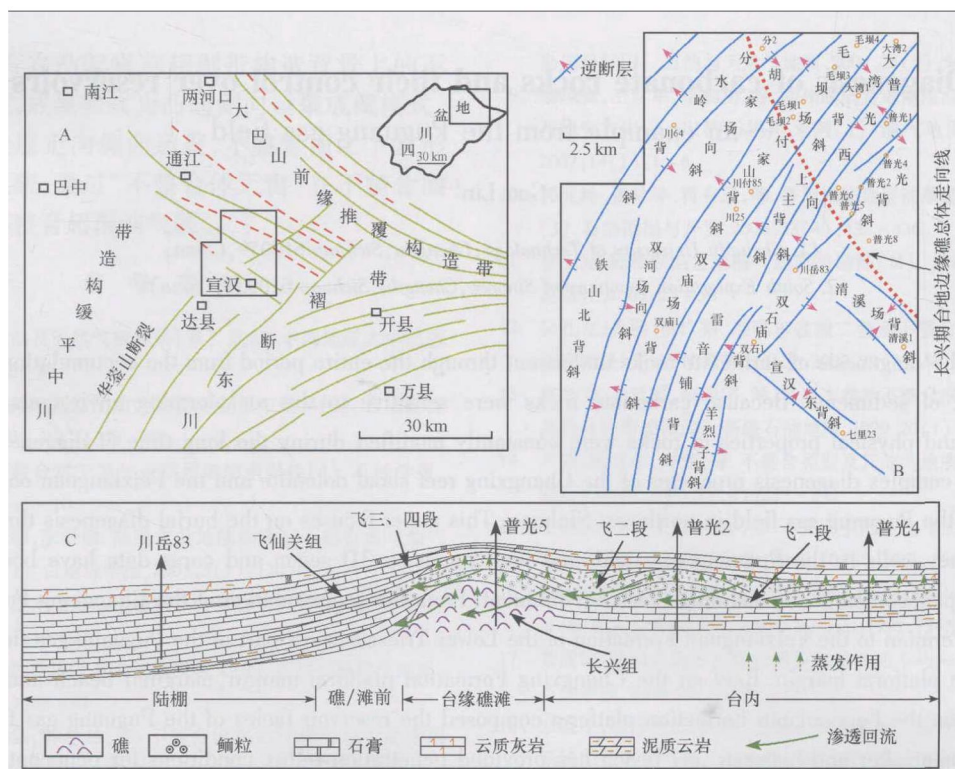


图1 宣汉-达县探区现今构造位置、构造单元和普光气田长兴-飞仙关组相模式

Fig. 1 Current tectonic location and unit in the Xuanhan-Daxian exploration area and the facies pattern of the Changxing-Feixianguan Formation in the Puguang gas field

A. 宣汉-达县探区现今构造位置; B. 宣汉-达县探区现今构造单元; C. 普光气田长兴-飞仙关组相模式

地质认识的深化尤其是对本区普光构造碳酸盐岩沉积和成岩的再认识,发现本区具备发育镶边台地长兴组礁和滩、飞仙关组鲕滩的沉积条件和形成白云岩储层的成岩条件以及成藏条件^[5~14]。普光气藏圈闭类型属于构造-岩性复合圈闭,礁滩前与陆棚间的相变构成该气田的侧向封堵,直接盖层为飞仙关组顶部膏云岩(图1C)。

1 长兴组—飞仙关组沉积相及准同生白云石化作用

综合运用地震、钻井和薄片资料,可建立普光气田储层规模、沿台地倾向的长兴组—飞仙关组相模式(图1C)。长兴组礁形成于晚二叠世构造沉降期产生的陆棚背景,礁建造了台地边缘并将台内和陆棚分隔开,导致陆棚、礁前斜坡、台缘礁、礁后开阔台地等沉积环境的分异;继二叠纪末的一次海退之后,飞一段初期三级沉积旋回的海平面上升时期,在前期的礁顶和礁后的台地背景上,分别发育了台缘和台内鲕滩,横向上形成陆棚、台缘滩、台内滩、滩间和潮坪滩等沉积相带,其中台缘滩的厚度要小于临近的台内滩而大于潮坪滩,这是由于台缘滩不断被海流侵蚀然后堆积其后侧的台内滩上使之不断抬高,而潮坪环境较低的能量不足以形成厚层鲕滩;至飞二段沉积时期,由于滩间不断被鲕粒填平,台地地形和海水能量的差异逐渐减小,这一时期由于台缘环境能量最大,相应的鲕滩也最厚,从台缘到台内潮坪方向鲕滩厚度逐渐减薄;至飞三段沉积时期,经过前期沉积物的填平过程,台地海水能量分带的差异更为减小,台地沉积环境总体上接近局限台地,因此除了在台地和台前缓坡的过渡部位有薄层鲕滩外,其他地方不发育粗粒沉积;相应地,这一时期的斜坡坡度更小,整个台地地貌更为平坦;至飞四段沉积时期,沉积环境以蒸发环境为主,飞三期的缓坡和局限台地环境这一时期已分别演化成沉积灰泥的陆表海和发育膏云岩互层的蒸发坪,成为普光气田的优质盖层,覆盖在长兴、飞一和飞二段巨厚储层之上。

准同生白云石化作用产生的条件和上述沉积体系的演化密切相关(图1C),他们主要为渗透回流和萨布哈蒸发泵汲-回流模式^[15,16]。台缘镶边礁和台内滩间局限环境在蒸发作用下形成较高密

度的高Mg/Ca比和富 Mg^{2+} 卤水,这些白云石化流体向下渗透进入礁和鲕滩的原始孔隙内并和颗粒发生岩石-水反应形成白云石晶体以及晶间孔,在卤水回流过程中,随着 Mg^{2+} 的不断被消耗,白云石化程度逐渐减弱,晶间孔孔隙度逐渐减小。萨布哈蒸发泵汲-回流模式主要发生在潮坪鲕滩和飞四段蒸发坪,强烈的蒸发作用以及潮流不断补给的海水导致高Mg/Ca比(一是因为盐度高,另是因为 Ca^{2+} 被消耗到石膏沉淀物中)的白云石流体不断产生,这些流体受蒸发作用向上泵汲及其在重力作用的回流都会导致岩石的白云石化产生晶间孔,继续的白云石化过程会产生白云石胶结物堵塞已有孔隙导致“过白云石化”^[17,18]。

2 礁滩储层成岩作用

2.1 碳酸盐岩成岩阶段划分

碳酸盐岩成岩阶段可划分为近地表、中浅埋藏^[19]和深埋藏成岩阶段^[20]。近地表成岩作用流体来自海水、卤水或大气水,这一阶段经历时间短但成岩作用活跃,岩石矿物不稳定或朝着稳定矿物转化,改造原始孔隙的溶解、胶结和准同生白云石化作用等在相对短的时间快速完成^[21];中浅埋藏成岩作用不受近地表环境影响,持续时间长,岩石-流体反应速率慢,成岩驱动机制包括埋藏过程中不断增高的温度、压力和有关流体-岩石反应;深埋成岩作用流体不仅限于层间水,有机质成熟产生的烃类和有机酸以及二氧化碳、沿构造裂缝输导的外源流体等是主要的岩石-水反应流体,深埋成岩作用矿物学标志多样如继交代白云石化、充填溶蚀孔洞内或较晚期裂缝内富流体包裹体的半自形晶、粗晶或自形晶白云石、焦沥青、继马鞍状白云石之后、充填溶蚀孔洞内的黄铁矿、硫化物、刃状或纤维状硬石膏、粗粒方解石或石英等。

2.2 普光气田礁滩成岩事件

普光气田薄片资料表明成岩史漫长而复杂,且严重破坏了岩石原始沉积结构,多种成岩事件的叠加尤其是深埋白云石化作用导致单一成岩事件识别困难。这些成岩事件主要包括近地表环境泥晶化、海底胶结和上述准同生白云石化作用,中浅埋藏胶结作用、压实压溶作用、裂缝、胶结作用

等,深埋藏主要有硫酸盐热化学还原反应(TSR)等。

泥晶化作用是最早期成岩事件之一,它发生在沉积物和海水间的接触面^[22],由微生物如藻、菌类在颗粒表面频繁钻孔而后被泥晶充填形成颗粒环边^[23],普光气田长兴组和飞仙关组滩相颗粒常见泥晶套(图2A,图3A)。海底胶结作用常形成等厚方解石环边(图3B),它们主要出现于海水活动强烈的礁滩相颗粒间隙,这类早期胶结物有利于原始孔隙的保存。

白云石化作用不仅可以形成晶间孔,而且可以大大提高孔隙网络的连通性。普光气田云化作用包括准同生和埋藏白云石化,准同生白云石化机理前已述及。准同生白云石化发生之前,可发生同生阶段海底成岩环境的泥晶化(图2A),尽管

早期白云石化发生时间很难精确确定,但图2B基质中自形-半自形晶粒白云石形成时间应较早,因为图B中生屑颗粒成分仍未白云石化;图2C中粘结藻团粒胶结物已白云石化,但藻团粒仍未白云石化;图2D中亮晶胶结物已完全白云石化,而藻屑只有局部白云石化;图2E中颗粒和胶结物都已白云石化;图2F中颗粒和胶结物白云石化之后已形成晶间溶孔。

埋藏白云石化过程形成大量晶间孔^[24],如图3给出了鲕粒白云岩的砂糖化过程,图3A鲕粒白云岩在云化前经历了泥晶化、纤状和粒状方解石胶结、鲕粒机械压实破碎等过程,然后胶结物(图3B)或鲕粒(图3C)或两者(图3D)发生溶解,胶结物和鲕粒的相对溶解程度取决于他们的渗透性,

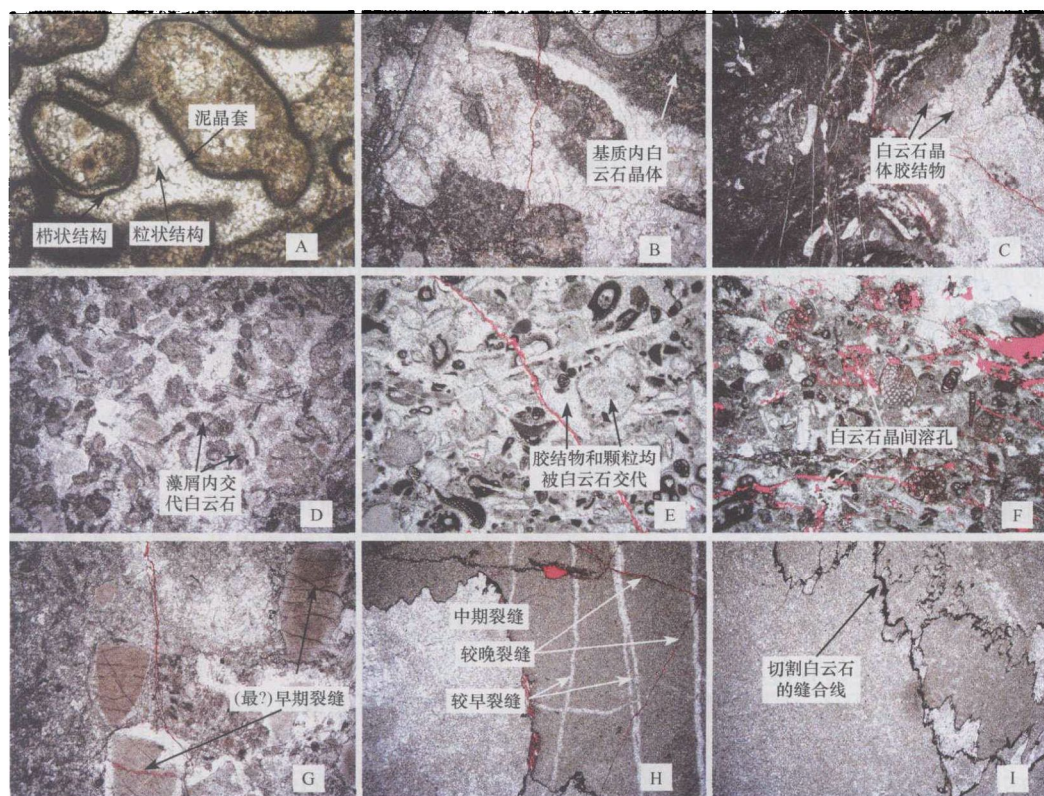


图2 胶结、白云石化、裂缝和缝合线

Fig. 2 Cementation, dolomitization, fracture and stylolite

A. 内碎屑鲕粒灰岩,颗粒表层泥晶化,亮晶方解石胶结物分为两期,第一期为带状结构,第二期为粒状结构;B. 粉晶生屑含云质灰岩,粒间基质白云石化后形成自形-半自形晶粒;C. 亮晶团粒灰岩,粒屑间至少具有二期胶结,一期为刀刃状白云石栉壳环边,二期为粉、细晶白云石晶粒镶嵌充填;D. 亮晶藻屑灰岩,白云石化选择性交代部分藻屑;E. 亮晶粒屑云岩,粒屑和胶结物均白云石化,胶结期次至少有2期,第一期为刀刃状或栉壳环边,二期为粉晶白云石镶嵌;F. 溶孔细晶残余生屑白云岩,粒屑和胶结物均白云石化,孔隙以晶间溶孔为主;G. 粉晶粒屑灰岩,粒屑被白云石化以前的裂缝切割;H. 粉晶白云岩,白云石化后发育三期裂缝,较早期裂缝被白云石晶体充填,中期裂缝充填有机物,较晚裂缝内充填物少量或无;I. 粉晶白云岩,切割白云石晶体的缝合线

(A图薄片来自四川盆地普光2井飞仙关组,而图中其他薄片来自四川盆地普光6井长兴组。)

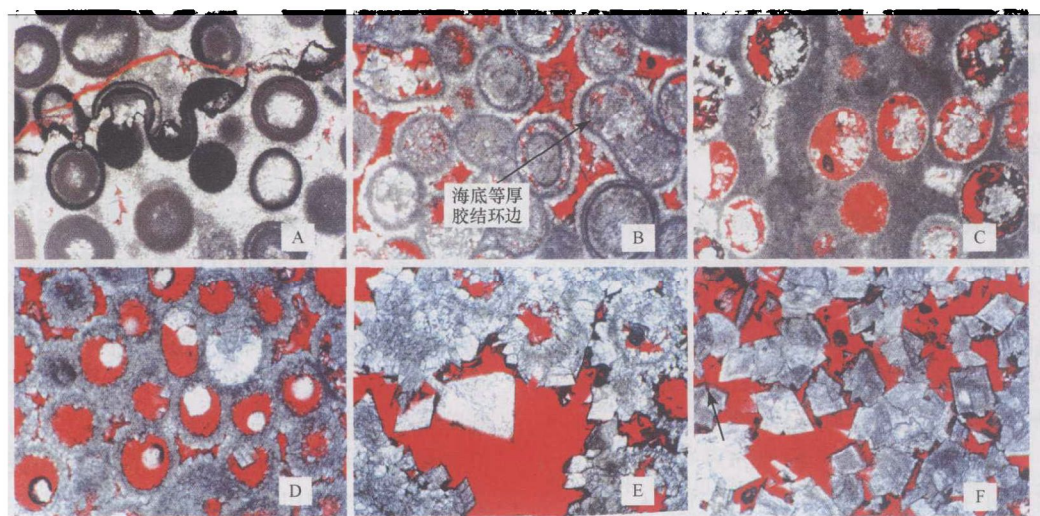


图3 鲕粒白云岩的“砂糖化”过程

Fig. 3 The “saccharite” process of oolitic dolomite

A. 溶蚀微弱; B. 主要溶蚀胶结物; C. 主要溶蚀鲕粒; D. 胶结物和颗粒均受溶蚀; E. 溶孔内白云石增生加大; F. 砂糖状白云岩
(图中薄片来自四川盆地普光2井飞仙关组。)

如图3B中鲕粒表面的泥晶套导致流体更易穿过胶结物,而图3C中基质渗透率较白云石化的鲕粒小,因此鲕粒优先溶解,图3D中鲕粒和胶结物渗透性较为接近,但鲕粒的溶解程度要大,这与鲕粒和胶结物白云石化前的原始矿物成分密切相关,随着胶结物、鲕粒或两者进一步溶解和后继白云石的次生加大(图3E),最终可形成砂糖状白云岩(图3F)。根据图3薄片的岩相,可推知鲕粒云岩的溶解和岩石结构和岩石原始矿物成分有关,同时溶解后的溶蚀扩大孔又可构成流体“高速运移通道”从而有利于白云石的加速溶解。

除了埋藏白云石化外,埋藏胶结作用在沉积物粒间或粒内孔或遮蔽孔内形成等厚的犬牙状、短柱状或等粒状方解石胶结物(图2A),另外,普光气田的裂缝和压溶(图3A)等埋藏成岩作用也常见,图2H中可以见到3期裂缝,较早期裂缝被半自形-他形晶充填,中期裂缝被有机质充填,而较晚期裂缝很少或未充填;图2I中压溶缝合线切割粉晶白云石,表明其发生在白云石化之后;压溶缝和裂缝构成流体运移和充注通道。构造裂缝作用对普光气田储层物性改造作用十分明显,他们能大幅度提高储层段的渗透率,如图4中普光6井孔渗关系,当孔隙度一定时如5%,渗透率的范围从 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 变化到 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,反映

了裂缝对物性的贡献,随着孔隙度的增加,渗透率变化范围逐渐减小,说明裂缝的影响程度相应减小;不仅如此,裂缝作为白云石化流体和溶蚀性流

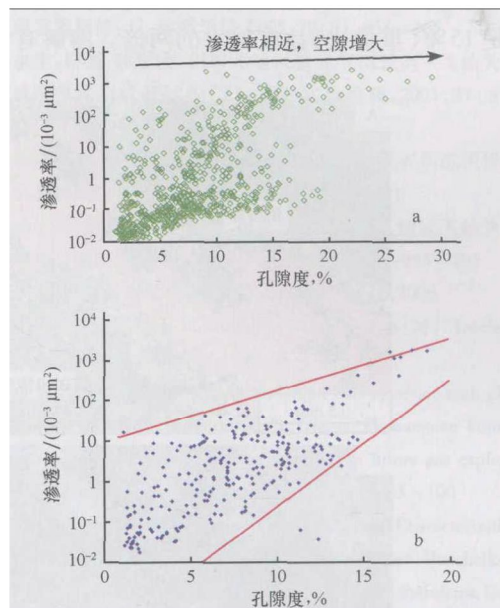


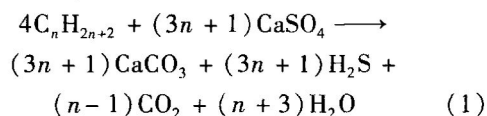
图4 构造裂缝作用对普光气田飞仙关组鲕滩云岩和长兴组礁滩云岩储层物性的改善作用

Fig. 4 Tectonic fracture improved physical property of the oolite beach dolomite reservoirs in the Feixianguan Formation and the reef beach dolomite reservoirs in the Changxing Formation

a. 普光2井飞仙关组鲕滩云岩; b. 普光6井长兴组礁滩云岩

体(有机酸、无机酸、TSR反应物)的运移通道,产生扩溶缝、溶洞并能大大提高溶蚀范围,如图4中普光2井渗透率相近时,孔隙度从5%变化到30%左右,这正是裂缝沟通溶蚀性流体、产生溶蚀孔洞的结果。

硫酸盐热化学还原反应(TSR)是普光气田深埋藏典型成岩事件^[25],图1C相模式表明普光气田具备TSR反应物硬石膏来源,而普光气田成藏过程提供了TSR的烃源^[29~32]。TSR产物对礁滩储层产生重要溶蚀作用。TSR反应的温度条件一般大于110℃,其反应式如下^[26~28]:



上述反应式(1)中右箭头表明该反应是一个非平衡的反应。硬石膏或地层水中的 SO_4^{2-} 和气藏中的烃^[33]提供了TSR的反应物,硬石膏溶解产生的钙离子和烃裂解或TSR反应本身产生的 CO_2 结合成碳酸钙沉淀。

TSR反应产生的 H_2O 和 H_2S 能够增加 CH_4 的溶解度^[26,34]的实验表明 CH_4 在淡水中的溶解度是15%(重量比)盐度的水的两倍。溶解有 H_2S

的水将大幅度提高甲烷的溶解性^[36]以及Huang^[37]的实验表明 CH_4 (9%)、 H_2S (71%)、水蒸汽(11%)和 CO_2 (9%)的混合气体对 CH_4 溶解度能提高70%,表明TSR生成物 H_2O 、 H_2S 和 CO_2 对 CH_4 溶解度的影响不可忽略。Yang^[26]得出由于随着TSR反应的持续进行,盐度不断降低, CH_4 的溶解量随着 H_2O 、 H_2S 和 CO_2 的生成不断增大,从而加速了TSR反应速度,因此它是一个“自催化”反应,随着盐度的不断降低,TSR反应生成的 CO_2 溶解度也相应增大,构造抬升过程中温压条件的不断降低又进一步提高了 CO_2 溶解度(因为温度降低所提高的 CO_2 溶解度大于压降),从而促进了白云岩储层的溶解以至形成溶蚀扩大孔甚至溶洞。

TSR对普光气田白云石化储层形成起重要作用,图5是TSR溶蚀作用的薄片和取心证据,如图5A中不规则溶蚀扩大孔中心残存焦沥青,而扩大孔孔壁干净,与溶蚀扩大孔伴生的TSR方解石(图5B),而图5D中大于1 cm的椭圆形溶洞壁干净,这些明显有别于图5C中被有机酸溶蚀生成后被沥青充填作用的溶洞。普光气田大型礁滩储层埋深普遍大于5 200 m,此埋深条件下礁储层最大孔隙度可达到20%(如普光6井),鲕滩储层可达

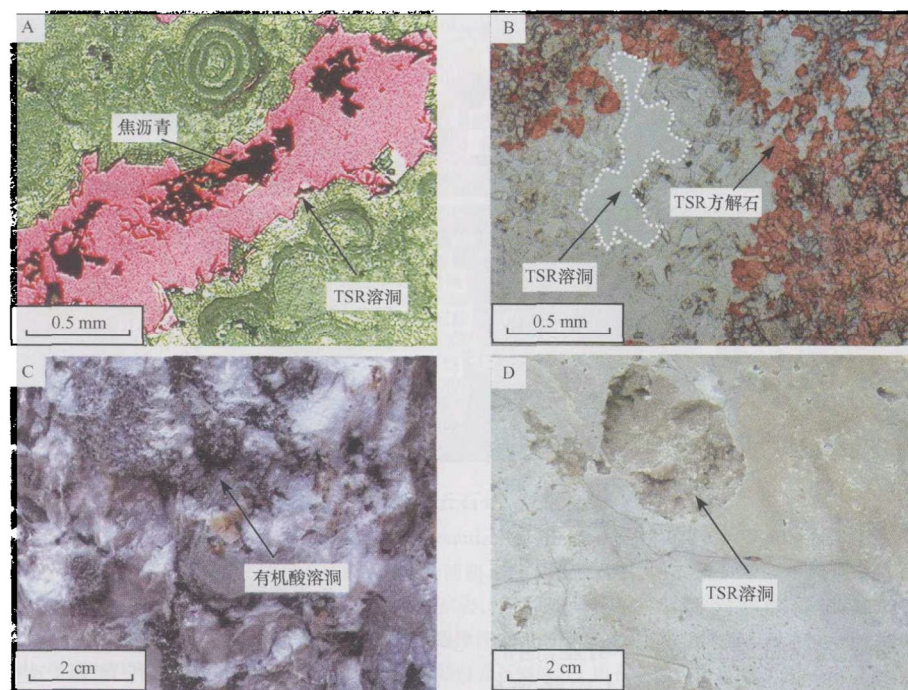


图5 普光气田TSR溶蚀作用的薄片和取心证据

Fig. 5 The thin-section and core evidences of TSR dissolution in the Puguang gas field

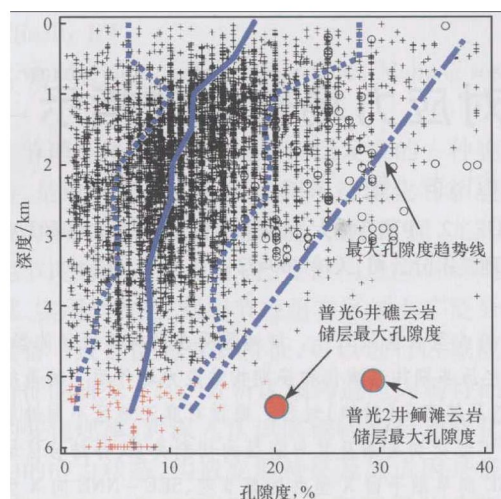


图6 普光气田礁滩和鲕滩云岩储层和世界范围内相同深度储层最大孔隙度比较

Fig. 6 The comparison between the maximum porosity of reef beach and oolite beach reservoirs in the Puguang gas field and the maximum porosity of reservoirs with the same depth in other places around the world

28% (如普光2井), 均大于世界相同深度范围的最大孔隙度^[38] (图6), 这是白云石晶间孔、溶蚀孔和裂缝共同叠加的结果, 更深层次地, 也是沉积、成岩和构造共同控制的结果。

3 结论

1) 碳酸盐岩储层物性受沉积相和成岩作用共同控制, 普光气田长兴组台缘礁将台内和陆棚分隔开, 导致陆棚、礁前斜坡、台缘礁、礁后开阔台地等沉积环境的分异; 长兴组礁滩为飞仙关组台缘和台内滩提供了高能沉积背景。普光气田长兴组礁滩后、飞仙关组滩间局限环境提供了白云石化流体镁离子源。

2) 普光气田礁滩成岩作用主要包括近地表环境泥晶化、海底胶结和准同生白云石化作用, 中浅埋藏胶结作用、压实压溶作用、裂缝、胶结作用等, 埋藏白云石化作用, 深埋藏主要有硫酸盐热化学还原反应(TSR)等, 其中白云石化作用、与TSR有关的溶蚀作用产生礁滩储层的晶间孔和溶洞。裂缝作用不仅能提高储层渗透率, 还可作为溶蚀性流体运移通道, 形成溶蚀扩大缝。

3) 普光气田礁滩白云石晶间孔、溶蚀孔和裂缝共同叠加, 形成了海相深层优质储层, 其孔隙度

要远大于世界相同深度的碳酸盐岩储层, 更深层次地, 普光气田优质储层是沉积、成岩和构造(裂缝)共同控制的结果。

参 考 文 献

- 1 杨雨, 王一刚, 文应初, 等. 川东飞仙关组沉积相与鲕滩气藏的分布[J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(3): 18~21
- 2 杨雨, 文应初. 川东北开江-梁平海槽发育对T₁f 鲕粒岩分布的控制[J]. 天然气工业, 2002, 22(S1): 30~32
- 3 魏国齐, 陈更生, 杨威, 等. 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
- 4 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地开江-梁平海槽内发现大隆组[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 32~36
- 5 马永生, 梅冥相, 陈小兵. 碳酸盐岩储层沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1999
- 6 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质论评, 2005, 25(4): 476~480
- 7 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布[J]. 地质学报, 2005, 12(3): 179~185
- 8 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 73~79
- 9 马永生, 郭旭升, 凡睿. 川东北普光气田飞仙关组礁滩储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 60~64
- 10 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 858~865
- 11 马永生, 傅强, 郭彤楼. 川东北地区普光气田长兴-飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 455~461
- 12 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部长兴期沉积特征和沉积格局[J]. 地质评论, 2006, 52(1): 25~29
- 13 马永生, 牟传龙, 郭旭升, 等. 川东北达县-宣汉地区飞仙关组沉积相与储层分布[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 293~293
- 14 马永生. 碳酸盐岩微相[M]. 北京: 地质出版社, 2006
- 15 Tucker M E, Wright V P. Carbonate sedimentology[M]. London: Oxford, Blackwell Scientific, 1990. 51~72
- 16 Zhao W Z, Luo P, Chen G S, et al. Origin and reservoir rock characteristics of dolostones in the Early Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China: significance for future gas exploration[J]. Journal of Petroleum Geology, 2005, 28: 83~100
- 17 Borkhataria R, Aigner T, Pöppelreiter M C, et al. Characterisation of epeiric “layer-cake” carbonate reservoirs: Upper Muschelkalk (Middle Triassic), the Netherlands[J]. Journal of Petroleum Geology, 2005, 28: 119~146
- 18 Borkhataria R, Aigner T, Koos J C, et al. An unusual, muddy, epeiric carbonate reservoir: the Lower Muschelkalk (Middle Triassic) of the Netherlands[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90: 61~89
- 19 Choquette P W, Pray L C. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1970, 54: 207~250

(下转第747页)

参考文献

- 1 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京:地质出版社,1988. 15~23
 - 2 万天丰. 构造应力场研究的新进展[J]. 地学前缘,1995,2(1~2):22~6234
 - 3 Whitaker A E, Engelder T. Characterizing stress fields in the upper crust using joint orientation distributions[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 1 778 - 1 787
 - 4 Eyal Y, Gross M R. Joint development during fluctuation of the regional stress in southern Israel[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23: 279 - 296
 - 5 Silliphant L J, Engelder T, Gross M R. The state of stress in the limb of the Split Mountain anticline, Utah: constraints placed by transected joints[J]. Journal of Geology, 2002, 24: 155 - 172
 - 6 刘树晖, 胡维元, 邱运鑫. 麻江古油藏翁项群成岩序列时代划分及油源讨论[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(2): 127~139
 - 7 武蔚文. 贵州东部若干古油藏的形成和破坏[J]. 贵州地质, 1989, 6(1): 9~23
 - 8 田海岸, 胡东风, 郭彤楼, 等. 黔中隆起及其周缘地区海相下组合油气勘探前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 509~518
 - 9 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相系油气成藏组合类型与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 11~16
 - 10 肖开华, 沃玉进, 周雁, 等. 中国南方海相系油气成藏特点与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 316~325
 - 11 李仲东, 罗志立, 刘树根, 等. 雪峰推覆体掩覆的下组合(Z-S)油气资源预测[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 392~398
 - 12 吴冲龙, 杜远生, 梅廉夫, 等. 中国南方印支—燕山期复合盆地体系与盆地原型改造[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 305~315
 - 13 吕宝凤, 夏斌. 中国海相碳酸盐岩地区油气成藏基本特征及勘探系统初探[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(5): 21~23
 - 14 张仲培, 王清晨. 库车坳陷节理和剪切破裂发育特征及其对区域应力场转换的指示[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(增刊 I): 63~73
 - 15 朱志澄. 构造地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 128~142
 - 16 童亨茂. 储层裂缝描述与预测研究进展[J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16(2): 9~13
 - 17 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛. 全球应力场与构造分析[J]. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 22~30
 - (编辑 高岩)
-
- (上接第 739 页)
- 20 Darryl G, Eric W M. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta Deep Basin[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53: 101~129
 - 21 Moore C H. Carbonate diagenesis and porosity[J]. Developments in Sedimentology 46, Elsevier, Amsterdam, 1989, 338
 - 22 Adams A E, Mackenzie W S. A colour atlas of carbonate sediments and rocks under the microscope[M]. London: Manson Publishing, 1998. 180
 - 23 Bathurst R G C. Carbonate sediments and diagenesis. Developments in Sedimentology 12 (Second Edition) [J]. Amsterdam: Elsevier, 1975. 658
 - 24 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): 742~750
 - 25 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 1): 136~141
 - 26 Yang C, Hutcheon I, Krouse H R. Fluid inclusion and stable isotopic studies of thermochemical sulphate reduction from Burnt Timber and Crossfield East gas fields in Alberta, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49: 149~164
 - 27 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): 1 037~1 046
 - 28 刘德汉, 肖贤明, 熊永强, 等. 四川东部飞仙关组鲕滩气藏储层含自然硫不混溶包裹体及硫化氢成因研究[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006, 36(6): 520~532
 - 29 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 858~865
 - 30 马永生, 傅强, 郭彤楼. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 455~461
 - 31 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江—梁海海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 326~331
 - 32 刘殊, 唐建明, 马永生, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 332~339, 347
 - 33 Krouse H R, Vial C A, Eliuk L S, et al. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs[J]. Nature, 1988, 333: 415~419
 - 34 Hanor J S. Dissolved methane in sedimentary brines: Potential effect on the PVT properties of fluid inclusions[J]. Economic Geology, 1980, 75: 603~609
 - 35 Namot A Y, Gubkina G F. Effects of dissolved H_2S on the solubility of methane in water[J]. Geochemistry International, 1989, 26: 117~119
 - 36 Huang S S, Leu A D, Ng H J, et al. The phase behaviour of two mixtures of methane, carbon dioxide, hydrogen sulphide, and water[J]. Fluid Phase Equilibria, 1985, 19: 21~32
 - 37 Ehrenberg S N, Nadeau P H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 435~445
 - (编辑 陈喜禄)