

川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应

李开开^{1,2}, 张学丰³, 贺训云⁴, 范俊佳⁵

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 北京大学 石油与天然气研究中心, 北京 100871; 4. 中国石油 杭州地质研究院 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023; 5. 中国石油 勘探开发研究院 中国石油集团盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083]

摘要:当白云石含量超过一定范围后,白云岩孔隙度随着白云石含量增高而增大,这是否意味着白云岩化作用导致新生孔隙产生,这是值得深究的问题。选取川东北地区下三叠统飞仙关组鲕粒滩储层为对象,进行细致的岩石矿物学观察,并开展白云岩段和灰岩段对比分析工作。结果表明:当白云石含量大于40%,随着白云石含量增加,白云石的抗压实压溶作用使得鲕粒岩中压溶再沉淀成因的第三期粒间方解石胶结物含量不断减少,理应被其占据的粒间孔隙不断空出,并成为现今孔隙的主体,由此导致了岩石孔隙度与白云石含量之间的协同增长关系。由此提出,白云岩化并非为鲕粒滩储层贡献了新生孔隙,而是有效地保存了早期孔隙。研究还揭示了现今鲕粒滩体不同部位白云岩物性迥异根源于白云岩结构差异演化。沉积旋回内灰岩岩性及其分布特征的不同引发了这种白云岩结构差异演化;早期大气水淋滤对鲕粒岩结构、矿物组成以及稳定性等方面的效应是鲕粒原始结构保存与否的根本原因;重结晶和深埋藏溶蚀作用加剧原始鲕粒离散和结构破坏,趋向于形成最终的结晶云岩。

关键词:鲕粒滩;白云岩结构;白云岩化;孔隙保存;飞仙关组;四川盆地

中图分类号:122.2 **文献标识码:**A

Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin

Li Kaikai^{1,2}, Zhang Xuefeng³, He Xunyun⁴, Fan Junjia⁵

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism(Ministry of Education), China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 5. Key Laboratory of Basin Structure & Hydrocarbon Accumulation, CNPC, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: A progressive increase in dolomite content over a certain range is usually accompanied by an increase in porosity of dolostone. It is challenging to clarify whether dolomitization is capable of creating new pores or not, and this deserves special attention. We assessed this process in the oolitic shoal reservoirs in the Lower Triassic Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin, China, through petrographic observations and comparisons of petrologic and mineralogical features of the limestones and dolostones. The results show that the content of intergranular calcite cement of phase 3, the product of pressure solution and re-precipitation in oolite, continuously decreases with the increase of dolomite content after the content of dolomite exceeds 40%. Then the intergranular pore space, which was supposedly occupied by the calcite cements in the precursor lithologies, would have increased and developed into the present porosity. This observation explains well the trend of porosity increasing with dolomite content. That is, rather than creating new pores, dolomitization in the oolitic grainstone layers was more likely to have helped to preserve the early pores. We also found that the variation of petrophysical properties of the dolostones in different parts of the present oolitic shoal bodies o-

收稿日期:2017-08-23;修订日期:2017-11-29。

第一作者简介:李开开(1983—),男,博士,副教授,碳酸盐岩储层流体-岩石相互作用。E-mail:likaikai@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572129);中央高校基本科研业务专项资金项目(2652017299)。

originated from the differential evolution of dolostone fabric, which was initiated by the difference in lithologies and their distribution patterns in one depositional cycle. The effects of eogenetic freshwater infiltration on oolitic fabric, mineral composition and stability have exerted substantial influence on preservation of the original textures of the oolites. Recrystallization and deep buried dolomite dissolution further obliterated the oolites and the original fabrics of the precursor lithologies, resulting in the final crystallized dolomites.

Key words: oolitic shoal, dolostone fabric, dolomitization, porosity preservation, Feixianguan Formation, Sichuan Basin

深埋白云岩储层普遍具有比灰岩更高的孔隙度而成为了目前油气勘探的重要目标^[1]。近年来,涉及白云岩化作用如何影响碳酸盐岩储层孔隙形成与演化方面的问题,国内外众多学者已开展了卓有成效的研究,但争议依然很大。这是由于不同的成岩环境、白云岩化模式、白云岩化程度以及灰岩母岩结构差异^[2-6]将可能产生截然不同的估算结果。尽管如此,不同的研究人员均发现:当白云石含量超过一定范围后,白云岩孔隙度和渗透率将随着白云石含量增高而增大^[7-9](图1),这预示着一定条件下白云岩化对优质储层的形成有着积极的作用。前人提出的几种白云岩化作用改造储层模式在一定程度上能够对这种协同增长关系进行解释:①相关的溶解过程^[6];②白云岩化作用产生白云石晶间孔^[8];③具有较小体积的白云石对具有较大体积方解石的等摩尔交代^[10]。然而,需要认识到,

这种关系的得出并非基于同一样品的实验模拟或计算机模拟,而是针对不同样品的统计结果,因此根据这种正相关关系判断白云岩化作用导致孔隙度增加是值得商榷的,需要进一步挖掘深层次原因。

在川东北地区,统计数据显示^[11-13],长兴组-飞仙关组白云岩化程度超过40%~50%后,储层孔隙度与白云石含量之间存在与上述相似的正相关关系。不仅如此,对于白云岩储层而言,不同残余结构类型的白云岩具有明显不同的孔隙度和渗透率值^[14]。由于原始岩石结构的不断破坏过程必将伴随着岩石孔隙结构的变化,追溯研究区鲕粒滩白云岩结构演化历程将有利于探讨白云岩化作用对储层孔隙的改造效应,这需要扎实细致的岩石矿物学研究工作。有意义的是,川东北开江-梁平海槽东侧白云岩区和西侧灰岩区飞仙关组鲕粒滩层序地层格架及沉积旋回特征具有相似

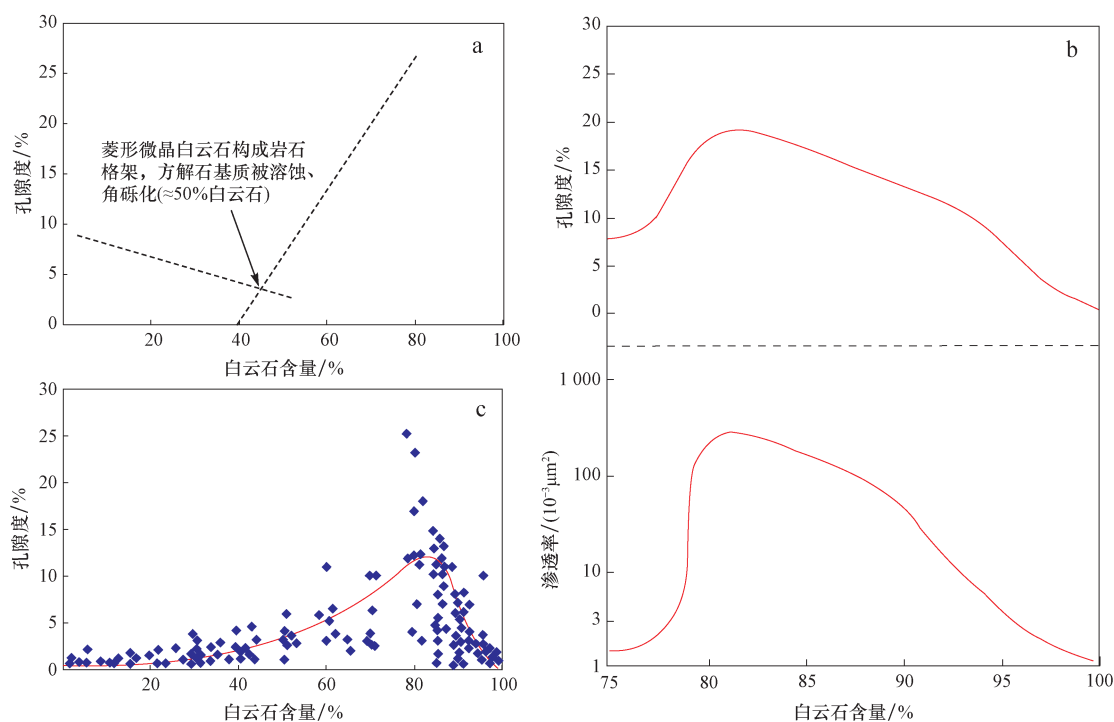


图1 已报道的岩石孔隙度和渗透率与白云石含量关系

Fig. 1 The reported relationship of porosity and permeability with dolomite content

a. 修改自 Murray(1960)^[7]; b. 修改自 Powers(1962)^[8]; c. 修改自 Lucia 和 Major(1994)^[9]

性,且海槽西侧鲕粒灰岩基本保存了原始岩石结构^[15-16]。为此,本研究拟对比海槽两侧灰岩和白云岩滩体旋回内岩石类型、胶结物和孔隙特征异同,探索白云岩结构和孔隙结构演化规律;同时针对不同白云石含量的岩石样品进行成岩矿物含量以及面孔率进行统计,量化估算白云岩化作用对储层孔隙的贡献。

1 研究区地质概况

四川盆地川东北地区是我国重要的油气勘探区域之一,近年来所发现的气藏主要环开江-梁平海槽两侧分布(图2)。受开江-梁平海槽构造发育特征控制,其东西两侧长兴组-飞仙关组沉积特征具较大差别。以飞仙关组为例,海槽的东侧为地垒、地堑组成的断块边界,坡度陡,因而斜坡相带窄,且东侧台地地貌整体较高,沉积水体相对西侧浅,在地垒顶部高能环境形成的台缘鲕粒滩坝容易对后部的台地沉积起到障壁、阻隔作用,使水体流动不畅,形成局限台地潟湖环境的白云岩、白云质灰岩沉积或蒸发台地相白云岩、纹层状石膏白云岩、石膏以及红层沉积。此外,台地坡度的平缓也使台地边缘鲕滩垂向生长的厚度大,从而进一步增强了它的障壁作用。对于海槽西侧,坡度平缓,斜坡相沉积较宽,与台地沉积呈渐变过渡。在地貌上西侧台地相对东侧低,沉积水体深,坡度平缓使水体深度侧向变化大,因而使得台缘鲕滩的发育具有厚度小、层数多、迁移变化快的特点。这样的鲕粒滩对后部向陆方向台地沉积不能起到较好的障壁作用,因此在台缘鲕粒滩后开阔台地相带

展布较宽,台内鲕粒滩发育,厚度、面积虽然小,但分布广泛。

关于川东北开江-梁平海槽两侧台地边缘礁滩体层序地层学相关研究前人已做了大量扎实工作^[17-18]。以飞仙关组为例,海槽东、西两侧均可识别出两个三级层序,每个层序均由一个海侵体系域和一个高位体系域构成。第一个海侵体系域由开阔台地潮坪沉积物充填,高位体系域主要为鲕粒滩沉积。海槽西侧第二个海侵体系域与第一个相近,同为开阔台地潮坪沉积物构成;而海槽东侧则为碎屑滩及滩间沉积。第二个高位体系域在两侧均表现为蒸发台地相沉积。钻井资料显示,鲕粒滩相主要发育于飞一段和飞二段,对应于第一个三级层序的高位体系域沉积。层序格架内发育一系列向上变浅的米级沉积旋回^[16,19]。

2 岩石矿物学观察

通过详细的井下岩心观察和室内显微镜下薄片观察,识别出开江-梁平海槽两侧鲕粒滩内各自具有的岩相。其中,如灰质云岩和云质灰岩等过渡类岩相所占比例较小,在此不作详细描述。岩石分类方法及术语参照前人成果^[20-22]。需要指出的是,并非所有岩石类型均能在地质实际中的每一个灰岩滩体或白云岩滩体中找到,理想剖面的绘制(图3)主要基于厚层滩体岩性分布特征。

海槽西侧灰岩相区共识别出3种岩石类型:

1) 亮晶鲕粒灰岩。该类岩石主要分布于鲕粒滩体中上部,且多位于向上变浅的米级旋回上部(图3)。鲕粒具有同心圈层,且多有灰黑色泥晶套环绕鲕粒外缘(图3a,b),鲕粒粒内溶孔、铸模孔较为发育;粒间通常可见3期方解石胶结物,占据大部分粒间孔隙(图3b)。由滩体顶部至中部,粒内溶蚀程度逐渐减弱,未溶蚀部分多见不同程度的重结晶(图3c,d);粒间第二期方解石胶结物逐渐减少直至消失,第一期和第三期胶结物直接接触(图3c)。

2) 泥晶鲕粒灰岩。该类岩石多以薄层或透镜体分布于滩体下部,位于向上变浅的米级旋回下部(图3),并与亮晶鲕粒灰岩呈渐变关系。泥晶基质见于粒间孔隙,极大减小岩石孔渗性(图3e,f);局部也可见粒内溶孔、铸模孔发育(图3f)。未溶蚀鲕粒内部多为晶面较脏的重结晶方解石填充(图3e,f)。

3) 粒泥岩或泥晶灰岩。该类岩石主要位于滩体和米级旋回底部(图3)。鲕粒含量急剧减少,一般小于20%;细粒沉积物居多(图3g,h)。

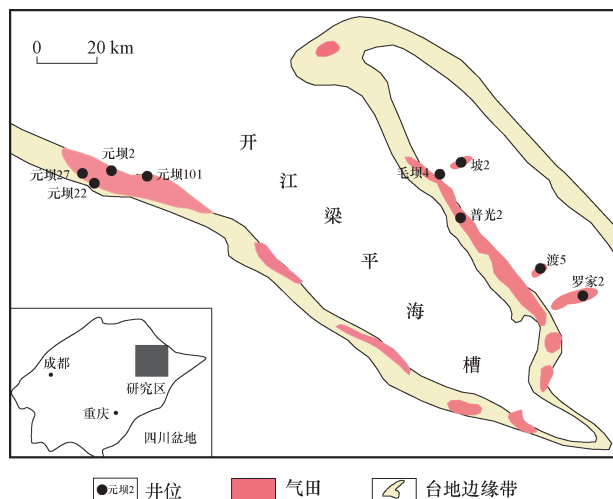


图2 川东北地区开江-梁平海槽两侧气田及井位分布
Fig. 2 Distribution of gas fields and wells along both sides of the Kaijiang-Liangping Trough in the northeastern Sichuan Basin

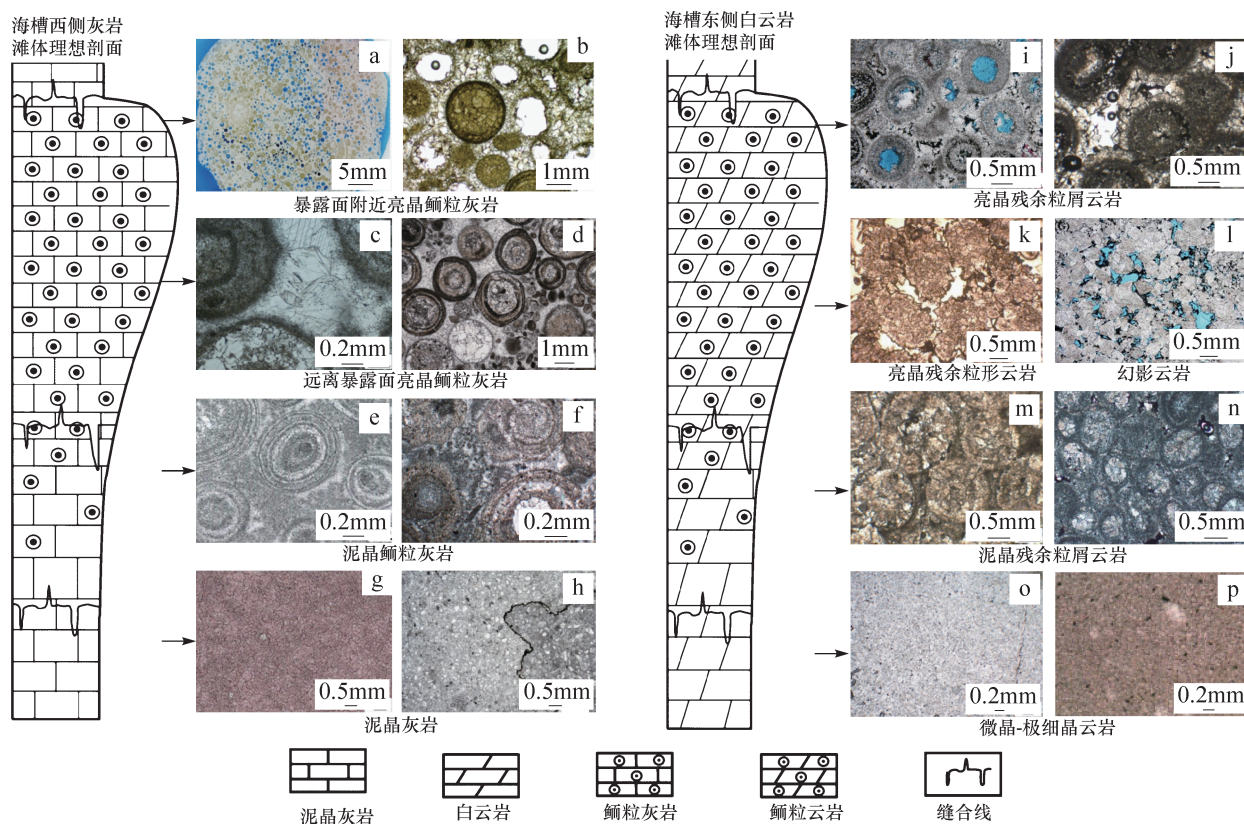


图3 开江-梁平海槽两侧飞仙关组二段米级旋回单元内岩石类型及镜下特征

Fig. 3 Lithologic types and their photomicrographic features in the meter-scale cycle of the T_1f^2 member on both sides of the Kaijia-Liangping Trough

a. 元坝22井,埋深6 407.7 m; b. 元坝22井,埋深6 407.7 m; c. 元坝101井,埋深6 796.7 m; d. 元坝27井,埋深6 125 m; e. 元坝2井,埋深6 433.2 m; f. 元坝22井,埋深6 432 m; g. 元坝27井,埋深6 124.5 m; h. 元坝27井,埋深6 124.75 m; i. 渡5井,埋深4 790.8 m; j. 普光2井,埋深4 950.1 m; k. 毛坝4井; l. 罗家2井,埋深3 232.2 m; m. 普光2井,埋深4 971.72 m; n. 普光2井,埋深5 186.6 m; o. 罗家2井,埋深6 440 m; p. 罗家2井,埋深3 210 m

海槽东侧白云岩相区共识别出4类岩相。

1) 残余粒屑白云岩。该类岩石粒间常见白云石胶结,也可见泥晶基质填充,据此可将该类岩石进一步分为两类。亮晶残余粒屑白云岩多发育于鲕粒滩体上部以及高频旋回顶部,与前人观察结果吻合^[23-24]。鲕粒内多由微晶-细晶白云石晶体构成(图3i,j),阴极发光下呈红-暗橘红色(图4a,b);核心或圈层易被溶蚀形成粒内溶孔甚至是铸模孔,未溶蚀部分依然保留原始岩石结构;鲕粒外缘常可见灰黑色泥晶套(图3i,j)。粒间多发育两期无色透明白云石胶结物,其晶体发育位置、大小及形状均与亮晶鲕粒灰岩一期和二期方解石胶结物相似;有所区别的是,亮晶残余粒屑白云岩很少在粒间孔隙中央发育3期方解石或白云石胶结物;其空间或被沥青、沥青后方解石占据,或保留至今(图3i,j)。

泥晶残余粒屑白云岩多分布于高频旋回下部,与泥晶鲕粒灰岩相对应。粒间多为泥晶-极细晶基质白

云石,阴极射线下发暗红-紫色光(图4c,d)。

2) 残余粒形白云岩。该类岩石主要分布于鲕粒滩中部以及高频旋回中部。相较于亮晶残余粒屑白云岩,残余粒形白云岩具有如下特征(图3k,图4e,图4f):①尽管鲕粒外形保存较为完整,但鲕粒内部结构以及粒间胶结物仅隐约可见,阴极发光总体不如亮晶残余粒屑白云岩明亮;②构成鲕粒的白云石晶体明显较为粗大(细-中晶),鲕粒圈层结构消失;③鲕粒间仅可见第一期白云石胶结物;④粒间孔和扩大溶蚀孔明显发育;⑤大多数鲕粒并没有发生溶蚀而保留完整。

3) 幻影白云岩。该类岩石通常呈透镜体或薄层发育于残余粒形白云岩中或局部发育于亮晶残余粒屑白云岩带内,相似的分布特征也为前人报道^[23-25]。无论上岩心还是镜下观察均不能分辨颗粒、胶结物和基质等组构,多呈现分布较为均一的细-中晶白云石,仅局部有迹可循,似为“幻影”(图3l,图4g);阴极射线或反射光下鲕粒轮廓依稀可见(图4h)。白云石晶体

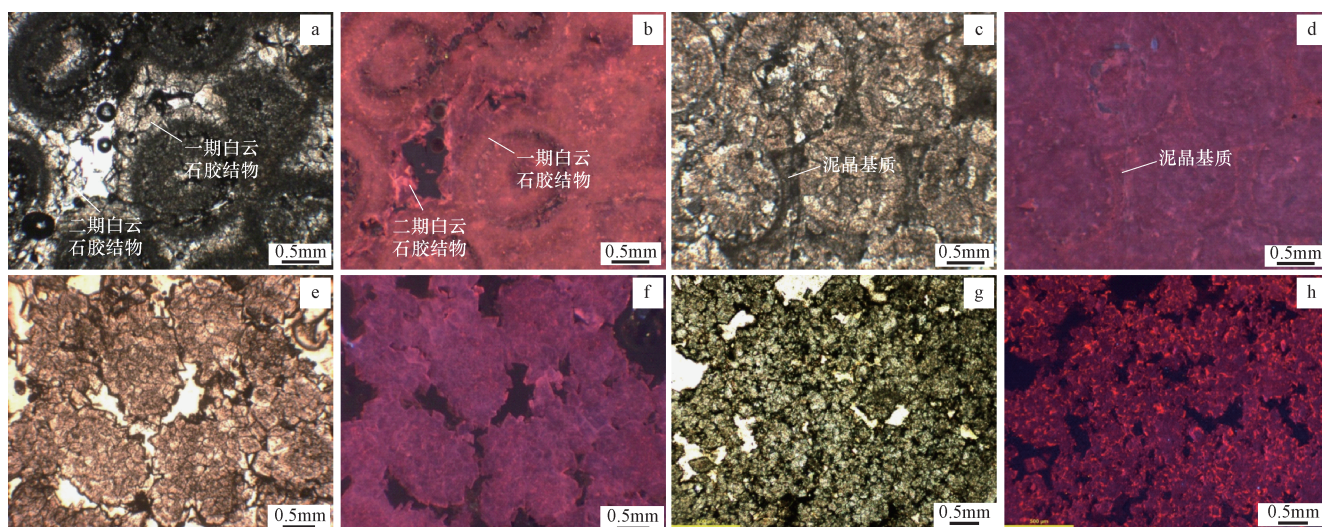


图4 开江-梁平海槽东侧飞仙关组二段不同类型白云岩及其显微特征

Fig. 4 Varying dolomites and their photomicrographic features in the Feixianguan Formation to the eastern side of the Kaijiang-Liangping Trough

a. 亮晶残余粒屑云岩,单偏光,普光2井,埋深4 950.1 m; b. 对应于照片a的阴极发光特征; c. 泥晶残余粒屑云岩,单偏光,普光2井,埋深4 971.72 m; d. 对应于照片c的阴极发光特征; e. 残余粒形云岩,单偏光,Mb4井; f. 对应于照片e的阴极发光特征; g. 幻影云岩,单偏光,坡2井,埋深4 058 m; h. 对应于照片g的阴极发光特征

4) 泥晶白云岩。与灰岩鲕粒滩体中粒泥岩或泥晶灰岩相似,泥晶白云岩多以薄层发育于滩体最下部及高频旋回底部。岩石由均一的极细-细晶他形-半自形白云石晶体构成(图3o,p),呈现暗色阴极发光。

3 海槽两侧成岩作用对比

有关于研究区飞仙关组成岩作用类型和演化过程在笔者先期研究中已有报道^[26],本文在此基础上结合前人研究成果^[27-30]认为,开江-梁平海槽两侧鲕粒滩沉积后经历了相似的海底成岩和大气水成岩作用(尽管东、西两侧大气水作用规模与强度有异),具有类似特征的第一期(海底)和第二期(大气水)方解石胶结物,并经历了相似的油气充注历史。然而,基于上述海槽两侧鲕粒滩体岩石分类,进一步的成岩观察发现,不同岩相内具有不同的胶结物类型,指示了明显不同的成岩历史。

1) 海槽西侧灰岩鲕粒滩体自上而下粒间胶结物由3期方解石胶结物(图3a,b)变为两期(第一期和第二期)胶结物(图3c,d)。海槽东侧白云岩滩体则由两期(海底和大气水)白云石胶结物逐渐转变为一期(图3i,j,k)。第三期方解石胶结物在白云岩滩体中并未发育。

2) 海槽东侧鲕粒岩显然经历了强烈的白云岩化

作用,而海槽西侧仅局部发生。白云岩化作用前的灰岩鲕粒及其胶结物结构控制了白云岩的轮廓、晶体大小、形状以及组构差异;残余粒屑白云岩粒间的两期白云石晶体发育位置及晶体特征与亮晶鲕粒灰岩前两期方解石胶结物极为相似(图3a,b,i,j)。

3) 海槽东侧白云岩储层经历了强烈的热化学硫酸盐还原作用(TSR),可观察到硬石膏和/或天青石的交代现象,孔洞缝中发育与TSR关系密切的方解石、白云石、黄铁矿和硫磺等成岩矿物;海槽西侧灰岩储层中并未发生TSR作用,孔洞中可见到一定量的嵌晶-连晶状方解石及石英矿物,晶体内可见到烃类包裹体^[26,29-30]。

4) 海槽东侧白云岩及部分晚期碳酸盐胶结物发生了强烈溶解,导致晶面上呈现明显的溶蚀边界以及丰富的扩大溶蚀孔^[30-31]。相反,海槽西侧灰岩储层内仅见到少量粒间溶孔和扩大溶孔。

4 白云岩结构演化与控制因素

已有研究表明^[6,21,32-36],白云岩结构的多样性可能归因于不同的白云岩化模式或性质不同的白云岩化流体。对于川东北地区飞仙关组,国内学者往往应用多种白云岩化模式分别阐述不同沉积相格局下的白云岩类型成因,如潟湖潮坪相的泥微晶白云岩和颗粒滩相的颗粒云岩及夹杂的粉-细晶云岩^[37-38],这具有合理性。

值得注意的是,仅对于颗粒滩发育的白云岩成因而言,尽管观点有别,研究人员多倾向于应用单一白云岩化模式或不同模式的早晚叠加进行解释^[24-25,38-41],即在同一时间域内颗粒滩内岩石经历着相同的白云岩化流体改造,这为后文的讨论奠定了基础。

颗粒滩内残余粒形白云岩和幻影白云岩原始结构破坏的现象,目前被认为是这些类型白云岩遭受了更为强烈的重结晶作用和埋藏溶蚀作用^[27-28,42]。然而,值得思考的是,在近于相同深度和温压条件下,同一滩体内灰岩原岩仅仅依靠这些晚期成岩作用的改造能否形成上述特征迥异的白云岩结构类型?因此,需要对白云岩作用前后的沉积、成岩作用过程效应进行重新审视。

4.1 沉积作用对白云岩结构演化的影响

在沉积期,海槽东、西两侧鲕粒滩体均表现出相似的米级旋回的沉积特征,且垂向上沉积物的叠置关系大致相同,高部位发育相对高能的鲕粒岩类(如亮晶鲕粒灰岩和亮晶残余粒屑白云岩),而低部位则发育低能的细粒岩类(如泥晶灰岩和泥晶云岩)。据此可以推断,海槽东侧发育的保存原始结构的亮晶残余粒屑白云岩、泥晶残余粒屑白云岩以及泥晶云岩的灰岩前身可能分别对应于海槽西侧发育的亮晶鲕粒灰岩、泥晶鲕粒灰岩以及泥晶灰岩(图3)。这些相对应的岩类往往具有相似的颗粒大小、形状、圈层结构以及孔隙类型,为上述推论提供了关键证据。白云岩原始结构的保存可能与灰岩前身内部细小粒度以及数目众多的成核位点有关^[32,43-44]。然而,沉积作用控制无法解释残余粒形白云岩和幻影白云岩的分布以及原始结构的破坏。

4.2 淡水淋滤作用对白云岩结构演化的影响

大气淡水淋滤与否将对鲕粒外缘胶结物性质有较大影响,并可能对白云岩结构的发育有深刻的影响。由于淡水作用,海底胶结物也将在淡水影响下发生由文石向低镁方解石转化,其外缘势必形成较为稳定的淡水方解石胶结物(图3a,b),这使得鲕粒内外矿物成分和稳定性存在差异,并将对随后的成岩路径、流体演化以及孔隙发育过程有强烈的影响^[45-49]。在白云岩化过程中,鲕粒内部不稳定文石颗粒将发生快速白云岩化^[21,50-51],数目众多的白云岩化质点以及较高的比表面积将导致形成的白云石具有晶面较脏、晶体细小、他形的特征(图3i,j)。而鲕粒外缘较为自形、明亮的方解石胶结物将转变为与鲕粒内部截然

不同的白云石晶体(更为干净、晶体较大、半自形-自形特征,图3i,j),这有利于原始鲕粒外形及内部结构的保存。

与之形成鲜明对比的是,在远离暴露面的鲕粒灰岩层,粒间孔隙持续保留了原始海水,这使得粒内文石颗粒和粒间文石质海水胶结物的新生变形同时进行,于是鲕粒内外具有较为均一的矿物成分。当白云岩化作用发生时,鲕粒外缘难以形成具有精美栉壳状结构的胶结物^[52],不利于后续成岩作用过程中泥晶套及内部原始结构的保存。

暴露面附近的亮晶鲕粒灰岩层遭受强烈的淡水选择性溶蚀作用,形成粒内溶孔或铸模孔(图3a,b),并在亮晶残余粒屑白云岩中得到很好的继承,包括相似的发育位置、大小及形态特征(图3i,j),其呈现的较为明亮的阴极发光特征暗示着淡水的影响(图4b)。对于远离暴露面的鲕粒灰岩层而言,未遭受淋滤的鲕粒内部泥晶质点在原生海水或近饱和的混合流体(高比例的海水和淡水)作用下发生重结晶,形成晶面较脏的镶嵌状微亮晶方解石(图3c,d),多具有无阴极发光和高Sr含量特征,这在世界其他地区多有报道^[53-57]。有意思的是,在泥晶残余粒屑云岩以及残余粒形云岩层段,鲕粒内部白云石晶体呈现极为类似的较脏的晶面、不规则形状(镶嵌状)以及较粗的晶体大小(细-中晶,图3k,m)。较粗的白云石晶体可能与微亮方解石晶体的发育以及较少的成核位置密切相关^[43]。显然,该类型云岩与远离暴露面的鲕粒灰岩具有良好的对应关系。随着粒内这些晶体较大的白云石后期不断增长,鲕粒圈层结构以及鲕粒外缘泥晶套逐渐被“擦除”痕迹,并区别于亮晶残余粒屑白云岩。这与前人研究成果吻合:白云岩结构取决于灰岩前身的矿物大小及形状等方面特征^[6,32,58]。由此可以认识到,鲕粒灰岩是否遭受淡水淋滤将对白云岩结构演化起到关键作用。

4.3 重结晶及晚期溶蚀作用对白云岩结构演化的影响

如前所述,灰岩母岩所具有的结构差异导致初始白云岩晶体大小及结构呈现多样性,这种多样性可能会对随后的白云岩重结晶程度有重大影响。前人曾报道了不同白云石晶体微观结构与重结晶作用之间的密切联系^[59];同时也证实了不同的白云岩结构和白云岩化流体地球化学控制着白云岩的重结晶程度^[60]。对于研究区初始形成的微-细晶的残余粒屑白云岩和泥晶白云岩而言,细小且致密的晶体决定了储层空间相

对匮乏的重结晶流体以及较弱的水-岩作用,从而导致原始晶体及结构在后续成岩过程中变化微弱。前人针对其他地区白云岩的研究成果中也有相应表述^[61]。对于初始形成的具有较粗晶体(细-中晶)的残余粒形白云岩而言,丰富的孔隙水将极大的提高水-岩比率,促进强烈的重结晶作用,形成更为鲜明的白云石晶体结构差异。

不仅如此,初始白云岩的孔隙度和渗透率差异将引发不同程度的白云岩重结晶作用,这是由于该类参数决定了成岩流体是否能在孔隙介质中流动并与白云石质点发生充分接触^[35,60-61]。目前并不能恢复出研究区白云岩重结晶前的初始孔渗值,但不同类型白云岩现今孔渗差异将提供一些线索(图5a,b)。幻影白云岩具有最高的孔隙度和渗透率值,其晶体最为粗大且原始结构破坏最为严重(图3l,图4g,图4h),反映其经历了程度最高的重结晶作用;残余粒形云岩的物性以及结构特征表明其经历了中等程度重结晶(图4e,f),为过渡类型产物;亮晶残余粒屑云岩具有较高的孔隙度,然而其晶体细小以及原始结构保存较好的特征表明后续的重结晶作用较弱(图3i,j),偏低的渗透率可能影响了重结晶流体的流动。显然,不同类型白云岩重结晶前初始孔渗特征与现今孔渗特征有着良好的对应关系,后文将进一步阐述白云岩初始物性的差异原因。重结晶作用期间,先期存在的原生和次生孔隙为鲕粒内部白云石重结晶以及鲕粒边缘白云石胶结物的生长提供了空间,这些白云石持续生长并指向孔隙中央。随着重结晶程度增大,新生白云石数目不断增多,晶体不断增大,将使得鲕粒粒形逐渐消失,最终形成结构完全破坏的幻影白云岩。类似的白云岩结构特征以及演化过程

同样见于其他地区古生界糖粒状白云岩^[34],区别是这些地区糖粒状白云石主要为孔洞充填矿物而非重结晶的产物。

深埋藏阶段,伴随着石油的充注以及随后烃类的氧化裂解,区内白云岩储层发生由有机酸或 TSR 作用引发的埋藏溶蚀作用^[30-31,62]。这一过程将产生粒间扩大溶蚀孔以及其他新生孔隙(图3l,图4g),导致鲕粒外形进一步残缺不全,加速原始鲕粒结构的破坏。目前并不确定究竟是重结晶作用还是深埋藏溶蚀作用对鲕粒的离散起到主要控制作用。前人提供了溶解-再沉淀的循环模式以解释 British West Indies 地区 Brac 组菱形白云石生长以及白云岩原始结构逐渐消失的过程^[35]。然而,岩石薄片及阴极发光观察发现(图3l,图4g,图4h),在川东北地区飞仙关组,构成幻影云岩的大部分糖粒状白云石晶体呈现较脏的晶面、不规则形状以及斑驳状阴极发光特征,明显区别于溶解-再沉淀形成的菱形白云石。同时,糖粒状白云石外缘多包裹固体沥青(图3l,图4g)也指示了其生长所需空间并非来源于深埋藏溶蚀过程中白云岩自身溶解,而是来自于早期孔隙的保存。这些都预示着白云岩重结晶作用可能主要控制了鲕粒的离散过程。

5 白云岩化作用在孔隙演化过程中的影响

为评估白云岩化作用对储层孔隙的贡献,本次研究在开江-梁平海槽西侧灰岩区和东侧白云岩区分别选取元坝27井和普光2井井段进行孔隙度和矿物组构对比分析。研究中重点统计的第三期方解石胶结物主要分布于粒间孔中心,呈嵌晶-连晶状,明显区别于

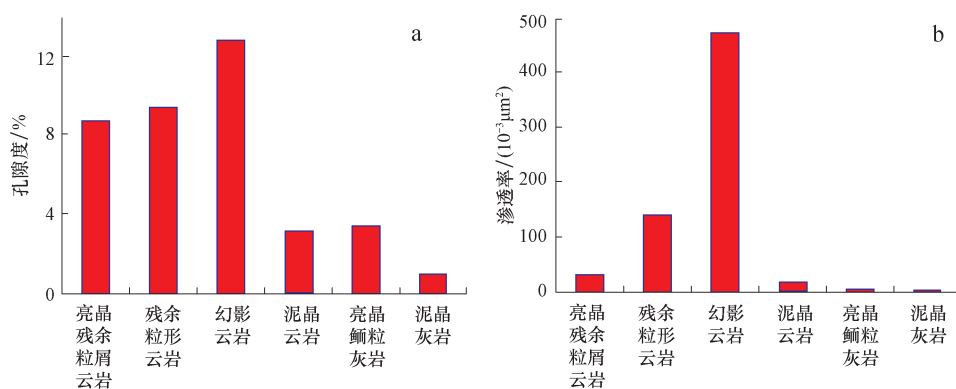


图5 川东北飞仙关组不同类型白云岩和灰岩物性特征对比

Fig. 5 Histograms showing petrophysical properties of various dolostones and limestones in the Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin

a. 孔隙度; b. 渗透率

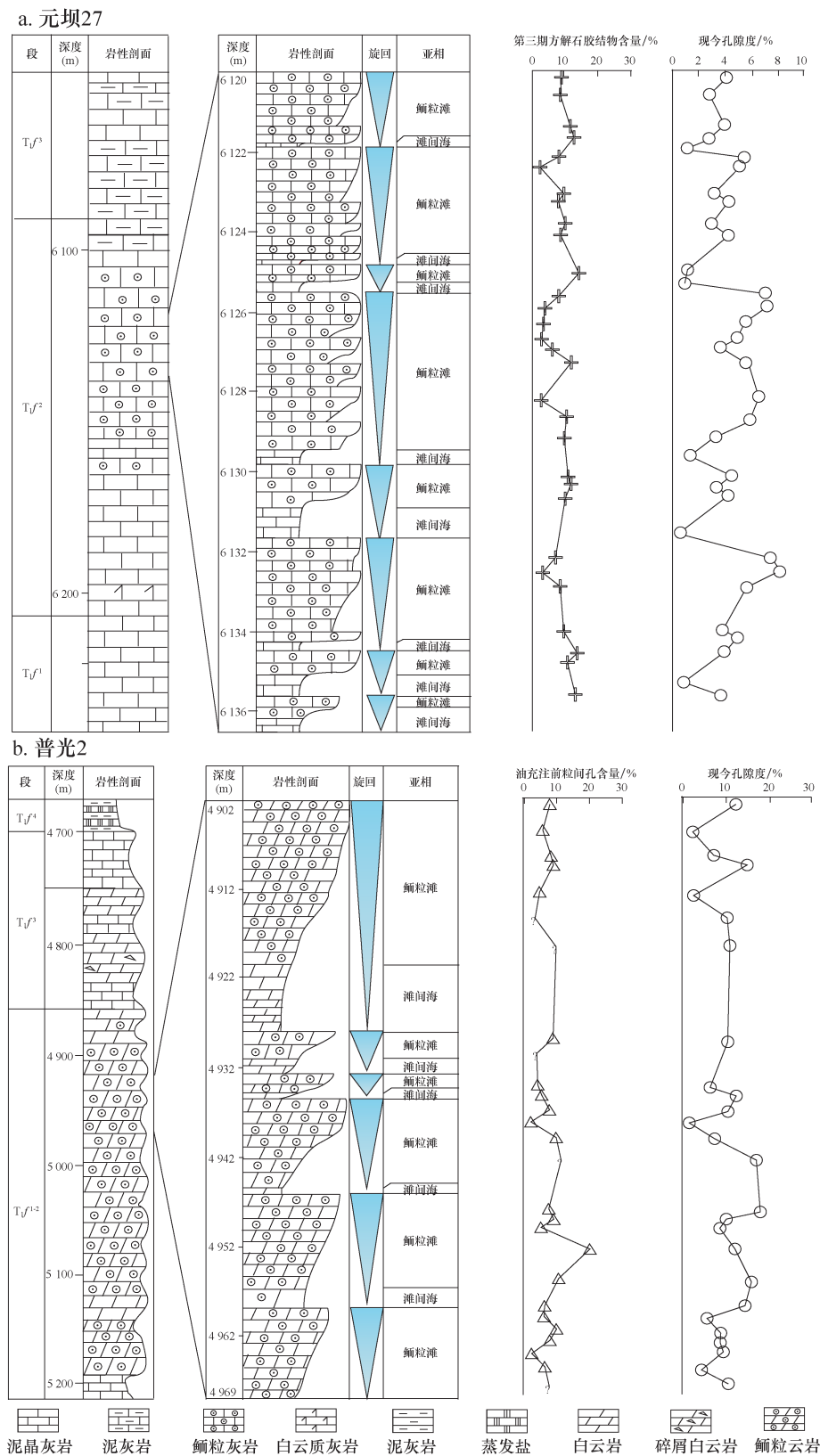


图 6 开江-梁平海槽两侧典型井位飞仙关组二段部分结构组构含量以及孔隙度纵向分布

Fig. 6 Vertical profiles of the percentage of some rock fabrics and porosity for the T_{1f}^2 member from typical wells on both sides of the Kaijiang-Liangping Trough

a. 元坝 27 井, 埋深 6 120 ~ 6 136 m, 鲕粒灰岩段第三期方解石胶结物含量和孔隙度剖面; b. 普光 2 井, 埋深 4 902 ~ 4 969 m, 鲕粒云岩段油充注前粒间孔含量和孔隙度剖面 (两口井相应井段柱状图改自前人图件^[16])

一期胶结物(针状或纤维状)和二期胶结物(叶片状或粒状);阴极发光下呈暗红-不发光,区别于二期胶结物(红-橘红色);晶体略混浊,含有大量两相流体包裹体和极少量烃类包裹体,晶体外缘如有剩余孔隙多可见沥青填充,有别于晚期的孔洞方解石充填物(内含两相包体及大量有机包体,且多沿孔洞贴边沥青向孔隙中央生长)。其他矿物识别特征在笔者先期研究中已有报道^[26],在此不做详述。

研究发现,在西侧鲕粒灰岩滩体,孔隙度最高值发育于向上变浅的高频旋回顶部(图6a),这意味着早期大气淡水作用在鲕粒灰岩储层的改造方面具有极为重要的影响。这种影响理论上在东侧鲕粒云岩滩体应同样得以体现,孔隙面貌(孔隙度及分布特征)应具有相似特征。然而,孔隙度数据显示(图6b),白云岩孔隙度峰值通常并非发育于米级旋回顶部,而是距顶部有一定距离;且最好的储层岩石类型是滩体中上部的残余粒形白云岩和幻影白云岩,而非位于滩体顶部的亮晶残余粒屑白云岩。类似的物性纵向分布特征在前人研究工作中也有报道^[19]。显然,在东侧鲕粒白云岩滩体中,淡水成岩对储层的改造效应在某种程度上被“削弱”,后续的成岩作用对储层孔隙应该有着更为强烈的改造效应。

对于海槽西侧鲕粒灰岩段,大部分粒间空间被埋藏压溶作用产生的第三期方解石胶结物封堵(图3c,d),这种孔隙破坏效应进一步体现于现今孔隙度与该期方解石体积比率之间的负相关关系(图7a)。然而,在海槽东侧鲕粒白云岩段通常不发育类似的方解石胶结物,从而“节省”出大量的粒间储集空间(图3k,l)。这种改造效应导致白云岩现今孔隙度与油充注前粒间孔隙度之间存在正相关关系(图7b),很好地解释了白云岩相对灰岩具有更优储集物性的现象^[15-16,30]。这些方解石胶结物在白云岩段的缺失很可能反映了白云岩

相对灰岩具有更强的抗压实、压溶能力^[63-65],由此决定了灰岩段第三期(压溶成因)方解石胶结物的潜在发育量与白云岩段沥青前粒间孔隙度之间应该有良好的对应关系。与此同时,针对密西西比地区 Black Creek 气田 Smackover 组颗粒灰岩储层的研究表明^[66],丰富的早期胶结物将抑制压溶作用以及相应压溶成因方解石的产出。研究区远离暴露面的亮晶鲕粒灰岩层相对暴露面附近的灰岩层赋存较少的淡水胶结物,导致前者倾向发育更为丰富的第三期方解石胶结物。于是,与前者位置对应的残余粒形白云岩和幻影白云岩将拥有更为丰富的粒间孔隙(多数晶间孔隙实际由粒间孔隙演化而来),展现出更为明显的孔隙保存效应。此种效应下,这两类白云岩不仅具有高孔隙度,还具有高渗透率特征(图5a,b)。这很好地解释了同一滩体内不同类型白云岩在重结晶作用前的初始物性具有的明显差异:残余粒形白云岩和幻影白云岩孔隙主要分布于粒间(晶间),明显区别于亮晶残余粒屑白云岩(粒内孔隙为主,粒间孔隙为次),并与各自渗透率有着良好的对应关系。

基于上述论述可以推断,研究区储层孔隙度随白云石程度增高而增大^[13](图8a)主要是由于粒间第三期方解石胶结物发育程度减弱以及对应的原生粒间孔隙的保存。为证实此推论,研究选取颗粒大小相近、不同白云石含量的白云岩样品进行薄片点数统计。结果显示(图8b),当白云石含量从0增至40%时,第三期方解石胶结物含量没有显著变化或仅略微减小;而当白云石含量高于40%并继续增长时,方解石胶结物含量急剧减少。有意思的是,该方解石胶结物含量随白云石含量的变化趋势与研究区孔隙度随白云石含量变化趋势呈镜像关系;而且,由于白云岩化作用减少的第三期方解石胶结物的量(3.5%~15.5%,平均7.6%)近似等于孔隙度的变化值,这无疑为上述论断提供了

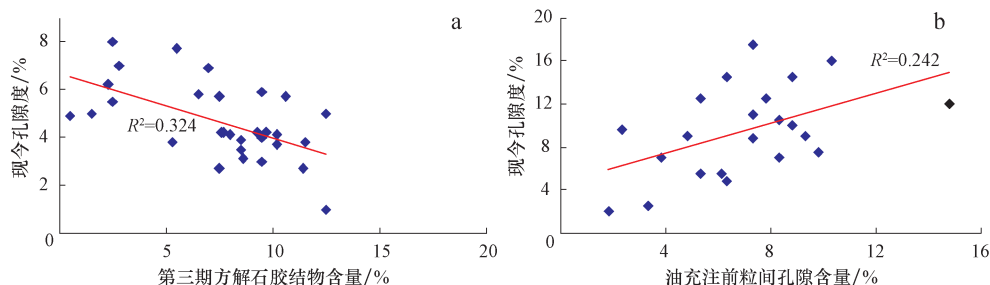


图7 开江-梁平海槽两侧典型井位飞仙关组部分结构组构含量与现今孔隙度散点关系

Fig. 7 Scatter diagram showing the relationship of the percentage of some rock fabrics and the present porosity for the T_1^2 member from typical wells on both sides of the Kaijiang-Liangping Trough

a. 元坝27井,埋深6120~6136 m,鲕粒灰岩段第三期方解石胶结物含量与现今孔隙度关系;b. 普光2井,埋深4902~4969 m,鲕粒云岩段油充注前粒间孔隙含量与现今孔隙度关系

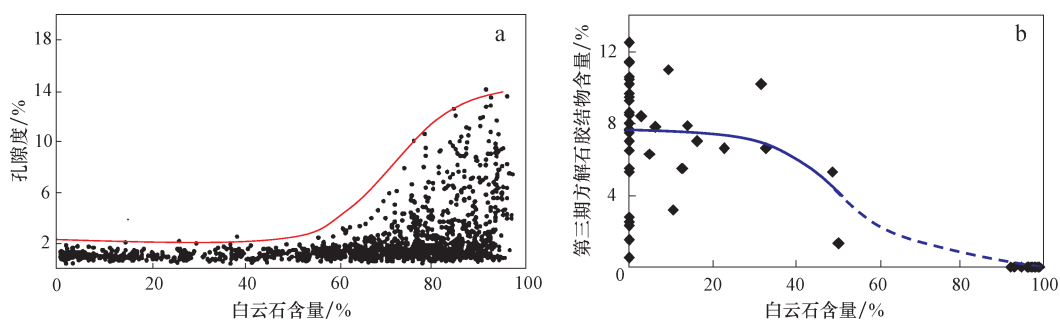


图8 川东北飞仙关组鲕粒岩白云石含量与孔隙度和方解石胶结物含量之间的关系

Fig. 8 The relationship of dolomite content with porosity and calcite cement content in the Feixianguan Formation oolites, northeastern Sichuan Basin

a. 白云石含量和孔隙度关系^[13]; b. 本研究统计的第三期方解石胶结物含量与白云石含量关系

有力证据。因此,我们可以得出结论,对于鲕粒岩而言,白云岩化过程并没有导致新孔隙的生成,却很好地保存了原始粒间孔隙(也应保存了其他早期孔隙);而孔隙保存效应是否显著则取决于对应的鲕粒灰岩母岩中第三期方解石胶结物发育的潜力。

值得注意的是,上述结论可能并不适用于其他岩相。研究区泥晶云岩孔隙度和渗透率分别为3.2%和 $10.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,分别远高于泥晶灰岩相应值(1.0%和 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,图5a,b),但后者却并不发育第三期方解石胶结物。前人研究也表明,白云岩化对于鲕粒灰岩储层和细粒基质主导的灰岩储层的改造有截然不同的效应^[67]。

对于研究区白云岩依靠骨架支撑获得的早期孔隙而言,快速的油充注不仅能够有效阻止胶结作用的发生,还能够分担上覆岩石的压力,减弱了压实压溶作用对其的破坏作用^[68-69]。然而,仅从孔隙度绝对值角度考虑,我们目前还无法明确油的充注究竟是孔隙建设者还是破坏者,这是由于一方面油裂解形成的沥青的确占据了白云岩前期积攒的部分早期孔隙,且沥青含量较高(1.11%~5.73%)^[70];另一方面油的充注将引发后续的烃-水-岩相互作用(如TSR),矿物的溶解-沉淀在很长时间内持续发生。限于篇幅,有关于深埋藏溶蚀作用对储层孔隙改造的效应将在后续论文成果中报道。

6 结论

1) 与以往认识不同,研究认为,对于鲕粒滩而言,原始结构保存程度不同的白云岩形成并不仅仅受控于重结晶和深埋藏溶蚀作用程度。沉积旋回实质上搭建了鲕粒滩不同结构类型白云岩分布的早期框架;早期大气水淋滤对鲕粒岩结构、矿物组成以及稳定性等方

面的效应是白云岩结构分异的重要原因;重结晶和深埋藏溶蚀作用加剧了原始鲕粒结构破坏。

2) 白云石含量与岩石孔隙度之间的协同增长关系并不能指示白云岩化作用新增了孔隙。对于鲕粒滩储层而言,白云岩化作用并没有导致新孔隙产生,而是有效地保存了原生粒间孔隙和淡水淋滤成因孔隙(~7.6%),构成了现今储层的主要孔隙。岩石孔隙度随白云石含量增加而增大的值与压溶成因方解石胶结物的减少量高度吻合,这是由于白云石相对方解石具有的更有效的抗压实压溶作用,总体反映了白云岩孔隙保存效应。

3) 尽管早期淡水淋滤对鲕粒滩白云岩储层的形成有着积极的作用,但白云岩孔隙保存效应对现今储层孔隙度和渗透率的贡献更为巨大,从而导致鲕粒滩最优质储层往往发育于暴露面之下的一定距离,且最好的储层岩石类型是滩体中上部的残余粒形白云岩和幻影白云岩,而非位于滩体顶部的亮晶残余粒屑白云岩。

4) 白云岩结构差异演化是鲕粒滩体不同部位白云岩物性(特别是渗透率)具有明显差异的重要原因。

参 考 文 献

- [1] Zhu D Y, Meng Q Q, Jin Z J, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim basin, northwestern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59(59): 232-244.
- [2] Mazzullo S J. Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: A review [J]. Carbonates and Evaporites, 1992, 7(1): 21-37.
- [3] Purser B H, Brown A, Aissaoui D M. Nature, origins and porosity in dolomites [C] // Purser B, Tucker M, Zenger D. Dolomites: a volume in honour of Dolomieu. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 1994, 21: 283-308.
- [4] Saller A H, Henderson N. Distribution of porosity and permeability in

- platform dolomites: Insight from the Permian of west Texas [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(8): 1528–1550.
- [5] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1): 1–81.
- [6] Machel H G. Concepts and models of dolomitization—A critical reappraisal [C] // Braithwaite C, Rizzi G, Darke G. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. London: Geological Society Special Publication, 2004, 235: 7–63.
- [7] Murray R C. Origin of porosity in carbonate rocks [J]. Journal of Sedimentary Research, 1960, 30(1): 59–84.
- [8] Powers R W. Arabian Upper Jurassic carbonate reservoirs [C] // Ham W E. Classification of carbonate rocks. Tulsa: AAPG Memoir. 1962, 1: 122–192.
- [9] Lucia F J, Major R P. Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization [C] // Purser B, Tucker M, Zenger D. Dolomites—A volume in honor of dolomieu. Cambridge: Blackwell Scientific Publications, 1994, 21: 325–341.
- [10] Weyl P K. Porosity through dolomitization: conservation of mass requirements [J]. Journal of Sedimentary Research, 1960, 30(1): 85–90.
- [11] 耿威, 郑荣才, 李爽, 等. 开江—梁平台内海槽东段长兴组礁、滩相储层特征 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2008, 35(6): 639–647.
- Geng Wei, Zheng Rongcai, Li Shuang, et al. Characteristics of reservoirs of Upper Permian Changxing Formation in the eastern Kaijiang Liangping intraplateau trough in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(6): 639–647.
- [12] 何莹, 胡东风, 张箭, 等. 四川盆地大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组储层特征及其主控因素 [J]. 中国地质, 2008, 35(5): 922–939.
- He Ying, Hu Dongfeng, Zhang Jian, et al. Reservoir rock characteristics and main controlling factors of the Feixianguan Formation in the Maoba-Dawan-Tieshanpo area, Sichuan basin [J]. Geology in China, 2008, 35(5): 922–939.
- [13] 吴婷婷, 王兴志, 冯仁蔚. 普光气田飞仙关组成岩作用对滩相储层的影响 [J]. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 94–100.
- Wu Tingting, Wang Xingzhi, Feng Renwei. Influence of diagenesis on beach reservoirs of Feixianguan Formation in Puguang gas field [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 6: 94–100.
- [14] 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), 2007, 37(增刊2): 43–52.
- Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. Formation mechanism of high-quality deep burial dolomite in Puguang Field [J]. Science China Earth Sciences, 2007, 37(Suppl. 2): 43–52.
- [15] 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 Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 387–394.
- [16] 郝云兰, 付孝悦, 刘波, 等. 川东北飞仙关组滩沉积与成岩对储集层的控制 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 29(4): 434–443.
- Hao 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, 29(4): 434–443.
- [17] 杨莹莹, 李国蓉, 邓勇. 川东北开江—梁平陆棚两侧飞仙关组储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 736–742.
- Yang Yingying, Li Guorong, Deng Yong. Reservoir characteristics of the Feixianguan Formation in Kaijiang-Liangping continental shelf flanks, northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 736–742.
- [18] 武恒志, 吴亚军, 柯光明. 川东北元坝地区长兴组生物礁发育模式与储层预测 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 645–657.
- Wu Hengzhi, Wu Yajun, Ke Guangming. Bioherm development model and reservoir prediction of Changxing Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 645–657.
- [19] 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, Hao Yunlan, Ma Yongsheng, et al. Controls of sedimentation on reservoir formation in Lower Triassic Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 224–235.
- [20] Dunham R J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture [C] // Ham W E. Classification of carbonate rocks. Tulsa: AAPG Memoir, 1962, 1: 108–121.
- [21] Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock texture [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57(6): 967–975.
- [22] 张学丰, 蔡忠贤, 李林, 等. 白云岩的残余结构及由此引发的孔隙分类问题 [J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 475–485.
- Zhang Xuefeng, Cai Zhongxian, Li Lin, et al. Relict textures of dolomite and the related porosity classification [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 475–485.
- [23] 胡作维. 川东北地区三叠系飞仙关组白云岩的形成机制研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- Hu Zuowei. Dolomitization of the Triassic Feixianguan Formation, Northeastern Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [24] 张建勇, 周进高, 潘立银, 等. 川东北地区孤立台地飞仙关组优质储层形成主控因素—大气淡水淋滤及渗透回流白云石化 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 9–18.
- Zhang Jianyong, Zhou Jingao, Pan Liyin, et al. The main origins of high quality reservoir in Feixianguan Formation in Northeast Sichuan Basin: Atmospheric Water Eluviation and Seepage-reflux Dolomitiza-

- tion[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 24(1): 9–18.
- [25] 潘立银, 刘占国, 李昌, 等. 四川盆地东部下三叠统飞仙关组白云岩化作用及其与储集层发育的关系[J]. *古地理学报*, 2012, 14(2): 176–186.
- Pan Liyin, Liu Zhanguo, Li Chang, et al. Dolomitization and its relationship with reservoir development of the Lower Triassic Feixianguan Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(2): 176–186.
- [26] Li K K, Cai C F, Jiang L, et al. Sr evolution in the Upper Permian and Lower Triassic carbonates, Northeast Sichuan Basin, China: constraints from chemistry, isotope and fluid inclusions[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(12): 2409–2424.
- [27] 高林. 碳酸盐岩成岩史及其对储层的控制作用—以普光气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(6): 733–739.
- Gao Lin. Diagenesis of carbonate rocks and their control over reservoirs—an example from the Puguang gas field[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 733–739.
- [28] 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.
- [29] 赫云兰, 付孝悦, 刘波, 等. 川东北飞仙关组鲕粒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.
- Hao 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.
- [30] Cai C F, He W X, Jiang L, et al. Petrological and geochemical constraints on porosity difference between Lower Triassic sour-and sweet-gas carbonate reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 56(56): 34–50.
- [31] 张俊, 蔡缪璐, 向雷, 等. 川东北地区飞仙关组成岩晚期白云石溶解作用[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(4): 599–606.
- Zhang Jun, Cai Liulu, Xiang Lei, et al. Late diagenetic dissolution of dolomites in the Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(4): 599–606.
- [32] Sibley D F. The origin of common dolomite fabrics: clues from the Pliocene[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(4): 1087–1100.
- [33] Gregg J M, Howard S A, Mazzullo S. Early diagenetic recrystallization of Holocene (<3 000 years old) peritidal dolomites, Ambergris Cay, Belize[J]. *Sedimentology*, 1992, 39(1): 143–160.
- [34] Choquette P W, Hiatt E E. Shallow-burial dolomite cement: a major component of many ancient sucrosic dolomites[J]. *Sedimentology*, 2008, 55(2): 423–460.
- [35] Zhao H W, Jones B. Genesis of fabric-destructive dolostones: A case study of the Brac Formation (Oligocene), Cayman Brac, British West Indies[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 267–268(4): 36–54.
- [36] Haas J, Budai T, Gyori O, et al. Multiphase partial and selective dolomitization of Carnian reef limestone (Transdanubian Range, Hungary)[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 836–859.
- [37] 黄思静, 咚宏鹏, 刘丽红, 等. 川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2363–2372.
- Huang Sijing, Tong Hongpeng, Liu Lihong, et al. Petrography, geochemistry and dolomitization mechanisms of Feixianguan dolomites in Triassic, NE Sichuan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2363–2372.
- [38] 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 Wenzuan, Li Qing. Characteristics and genesis of dolomitization in Changxing and Feixianguan Formations in Panlongdong, northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 84–93.
- [39] 魏国齐, 杨威, 张林, 等. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层白云石化成因模式[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 162–166.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Zhang Lin, et al. Dolomitization genetic model of Feixianguan Group oolitic beach reservoir in Northeast Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 162–166.
- [40] 强子同, 曾德明, 王兴志, 等. 川东北下三叠统飞仙关组鲕粒滩白云岩同位素地球化学特征[J]. *古地理学报*, 2012, 14(1): 13–20.
- Qiang Zitong, Zeng Deming, Wang Xingzhi, et al. Isotopic geochemical characteristics of oolitic bank dolostones in the Lower Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(1): 13–20.
- [41] 郑荣才, 刘萍, 文华国. 川东北地区飞仙关组和长兴组白云岩成因与成岩—成藏系统[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1): 1–13.
- Zheng Rongcai, Liu Ping, Wen Huaguo. Dolomite genesis and diagenetic-reservoir system of Feixianguan and Changxing Formation in northeast Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2017, 44(1): 1–13.
- [42] 蒋小琼, 管宏林, 郑和荣, 等. 四川盆地普光气田飞仙关组白云岩储层成因探讨[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 332–336.
- Jiang Xiaoqiong, Guan Honglin, Zheng Herong, et al. Discussion on origin of dolomite reservoirs in Feixianguan Formation, Puguang Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 332–336.
- [43] Mresah M H. The massive dolomitization of platform and basinal sequences: proposed models from the Paleocene, Northeast Sirte Basin, Libya[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 116(3–4): 199–226.
- [44] Eren M, Kaplan M Y, Kadür S. Petrography, geochemistry and origin of Lower Liassic dolomites in the Aydnck area, Mersin, southern Turkey[Turkish][J]. *Journal of Earth Sciences*, 2007, 16(3): 339–

- 362.
- [45] Wilkinson B H, Buczynski C, Owen R M. Chemical control on carbonate phases; implications from Upper Pennsylvanian calcite-aragonite ooids of southeastern Kansas [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1983, 54(3): 932 - 947.
- [46] Sandberg P. Aragonite cements and their occurrence in ancient limestones [C] // Schneidermann N, Harris P M. *Carbonate Cement*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1985, Special Publication; 33 - 57.
- [47] Ehrenberg S N. Porosity destruction in carbonate platforms [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2006, 29(1): 41 - 52.
- [48] Macquaker J H S, Taylor K G, Keller M, et al. Compositional controls on early diagenetic pathways in fine-grained sedimentary rocks: Implications for predicting unconventional reservoir attributes of mudstones [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(3): 587 - 603.
- [49] Jamal M, Adabi M H. Geochemistry, microfacies and diagenetic evidences for original aragonite mineralogy and open diagenetic system of Lower Cretaceous carbonates Fahliyan Formation (Kuh-e Siah area, Zagros Basin, South Iran) [J]. *Carbonates Evaporites*, 2015, 30(1): 77 - 98.
- [50] Buchbinder B. Facies and environments of Miocene reef limestones in Israel [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1979, 49(1): 1323 - 1344.
- [51] Gaines A. Dolomitization kinetics; recent experimental studies [C] // Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. *Concepts and models of dolomitization*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1980, 28: 139 - 161.
- [52] 黄思静, 李小叶, 兰叶芳, 等. 海水胶结作用对碳酸盐岩石结构的影响: 以四川盆地东北部三叠系飞仙关组为例 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(12): 5007 - 5018.
- Huang Sijing, Li Xiaoning, Lan Yefang, et al. Influences of marine cementation on carbonate textures: A case of feixianguan carbonates of Triassic, NE Sichuan Basin [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(12): 5007 - 5018.
- [53] Steinen R P. SEM observations on the replacement of Bahaman aragonitic mud by calcite [J]. *Geology*, 1982, 10(9): 471 - 475.
- [54] Moshier S O. Microporosity in micritic limestones; a review [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63(3): 191 - 213.
- [55] Munnecke A, Westphal H, Reijmer J J G, et al. Microspar development during early marine burial diagenesis; a comparison of Pliocene carbonates from the Bahamas with Silurian limestones from Gotland (Sweden) [J]. *Sedimentology*, 1997, 44(6): 977 - 990.
- [56] Reid R P, Macintyre I G. Carbonate recrystallization in shallow marine environments: A widespread diagenetic process forming micritized grains [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68(5): 928 - 946.
- [57] Melim L A, Westphal H, Swart PK, et al. Questioning carbonate diagenetic paradigms; evidence from the Neogene of the Bahamas [J]. *Marine Geology*, 2002, 185(1): 27 - 53.
- [58] Zempolich W G, Baker P A. Experimental and natural mimetic dolomitization of aragonite ooids [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(4): 596 - 606.
- [59] Reeder R J. Electron optical investigation of sedimentary dolomites [J]. *Contributions To Mineralogy and Petrology*, 1981, 76(2): 148 - 157.
- [60] Nielsen P, Swennen R, Keppens E. Multiple-step recrystallization within massive ancient dolomite units; an example from the Dinantian of Belgium [J]. *Sedimentology*, 1994, 41(3): 567 - 584.
- [61] Coniglio M, Zheng Q, Carter T R. Dolomitization and recrystallization of middle Silurian reefs and platform carbonates of the Guelph Formation, Michigan Basin, southwestern Ontario [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2003, 51(2): 177 - 199.
- [62] Tan X C, Zhao L Z, Luo B, et al. Comparison of basic features and origins of oolitic shoal reservoirs between carbonate platform interior and platform margin locations in the Lower Triassic Feixianguan Formation of the Sichuan Basin, southwest China [J]. *Petroleum Science*, 2012, 9(4): 417 - 428.
- [63] Sun S Q. Dolomite reservoirs; porosity evolution and reservoir characteristics [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(2): 186 - 204.
- [64] Ehrenberg S N. Factors controlling porosity in Upper Carboniferous - Lower Permian carbonate strata of the Barents Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(12): 1653 - 1676.
- [65] Ehrenberg S N, Nadeau P H, Aqrabi A A M. A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(3): 275 - 286.
- [66] Heydari E. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Smackover Formation [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(11): 1779 - 1797.
- [67] Lucia F J. *Carbonate Reservoir Characterization* [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1999: 226.
- [68] 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理 [J]. *地质论评*, 2006, 52(5): 708 - 718.
- Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Wang Yigang. Formation mechanism of highly effective gas pools in the Feixianguan Formation in the NE Sichuan Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 708 - 718.
- [69] Neveux L D, Grgic C, Carpentier J, et al. Influence of hydrocarbon injection on the compaction by pressure-solution of a carbonate rock: An experimental study under triaxial stresses [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 55(3): 282 - 294.
- [70] 秦建中, 付小东, 刘效曾. 四川盆地东北部气田海相碳酸盐岩储层固体沥青研究 [J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1065 - 1071.
- Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, Liu Xiaozeng. Solid bitumens in the marine carbonate reservoir of gas field in the Northeast Area of the Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1065 - 1071.