

# 开江—梁平地区上二叠统长兴组储层岩石学特征

董霞<sup>1</sup>, 郑荣才<sup>1</sup>, 王炯<sup>2</sup>, 罗清林<sup>3</sup>, 胡忠贵<sup>4</sup>

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学 四川 成都 610059; 2. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院 重庆 401331; 3. 川庆钻探公司 地质勘探开发研究院 重庆 401120; 4. 长江大学 地球科学学院 湖北 荆州 434023)

**摘要:**以露头剖面测量、单井岩芯观察和室内薄片鉴定为依据,结合不同结构和成因类型白云岩(或白云石)的 $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$ 比值、有序度和C、O、Sr同位素特征,对开江—梁平地区长兴组碳酸盐岩储层成岩作用与孔隙发育和演化规律进行了综合研究,确定研究区对储层破坏最大的成岩作用是胶结、压实—压溶、新生变形和次生矿物的充填等作用,而对储层贡献最大的建设性成岩作用主要为埋藏白云岩化、重结晶、溶蚀和破裂等作用,有效地改善了储层的孔渗性,形成以粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、晶间溶孔、超大溶孔、溶洞和溶裂缝等多种次生孔隙类型组合的礁、滩相储层基本特征。在再造成岩序列和恢复孔隙演化历史的基础上,对储层发育与孔隙演化的关系可得出如下几点结论:①有利的礁、滩相带决定了储层发育的位置和空间展布规律;②礁、滩复合体的多期次埋藏白云岩化是形成储层的基础;③破裂作用和溶蚀作用是改造储层和提高储层质量的关键。

**关键词:**开江—梁平地区;上二叠统;长兴组;成岩作用;孔隙类型及演化;成岩序列

中图分类号:P588.24<sup>+</sup>5;P618.13

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2010)01-0067-12

## Reservoir sedimentological characteristics of the Upper Permian Changxing Formation in Kaijiang-Liangping area

DONG Xia<sup>1</sup>, ZHENG Rong-cai<sup>1</sup>, WANG Jiong<sup>2</sup>, LUO Qing-lin<sup>3</sup> and HU Zhong-gui<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3. Geological Exploration and Development Research Institute of Sichuan Petroleum Administration, Chongqing 401120, China; 4. College of Geoscience, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

**Abstract:** Based on field section measurement, well core observation and thin section identification in combination with  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  ratio, the degree of order and C, O, Sr isotope characteristics of dolomites with different textures and genetic types, the authors made a synthetic study of the diagenesis, porosity development and evolution regularity of carbonate reservoirs of Changxing Formation in Kaijiang-Liangping area. The destructive diagenetic processes in the reservoirs of the study area are mainly cementation, compaction-pressure solution, neomorphism and secondary mineral filling, whereas the constructive diagenetic processes are mainly burial dolomitization, recrystallization, dissolution and fracturing, which effectively improve the reservoir porosity and permeability and constitute the basic characteristics of the reef and beach reservoir that has the combination of a variety of secondary porosity types such as intergranular pores, intragranular pores, moldic pores, intercrystal pores, superlarge dissolved pores, dissolved caverns and fractures. Dolomitization, as the most important and common diagenetic action, went through penecontemporaneous dolomitization in early diagenetic stage, burial dolomitization

收稿日期:2009-05-19;修订日期:2009-09-14

作者简介:董霞(1984-),女,硕士,主要从事沉积学、层序地层学研究,E-mail:xenia1982216@126.com。

in early diagenetic stage, burial dolomitization in middle diagenetic stage, burial dolomitization and the formation of tectonoclastic dolostone in late diagenetic stage. Further studies suggest that carbonate reservoirs of Changxing Formation experienced a very complex diagenetic and evolutionary history, which can be divided into five phases: penecontemporaneous diagenesis, early diagenesis, middle diagenesis, late diagenesis and tectonic period. On the basis of the reconstruction of diagenetic sequence and the restoration of porosity evolution history, the authors have reached some conclusions: ① favorable reef and beach facies determine the locations and spatial distribution of the reservoirs; ② the multistage burial dolomitization of reef and beach complexes constitutes the basis of reservoir formation; ③ fracturing and dissolution constitute the key to the formation of high quality reservoirs.

**Key words:** Kaijiang-Liangping area; Upper Permian; Changxing Formation; diagenesis; pore types and evolution; diagenetic sequence

自川东北和川东地区发现长兴组生物礁气藏以来,在该地区形成了以上石炭统黄龙组古岩溶型储层、上二叠统长兴组礁、滩相储层和下三叠统飞仙关组鲕滩相储层为代表的三大套碳酸盐岩储层(刘划一等,2001;马永生等,2006)。就开江-梁平地区的长兴组礁、滩相储层而言,前人对该地层单元沉积相的特征研究(倪新锋等,2007;耿威等,2008;董霞等,2009;周刚等,2009;张兵等,2009)对成岩作用与储层发育关系及控制因素的研究(雷卞军等,1994;牟传龙等,2005;王瑞华等,2006;郑荣才等,2007,2008a;任利剑等,2008)以及对成藏机理的研究(王一刚等,1997;刘划一等,2001;马永生等,2006;史建南,2009)都已积累了丰富的资料,但大多数成果偏重于长兴组沉积相、白云岩的地球化学特征和天然气藏特征分析,而以薄片鉴定为基础的岩石学特征研究相对较薄弱。本文拟在野外露头剖面测量、单井岩芯观察的基础上,以室内薄片鉴定为依据,对该地区长兴组礁、滩相储层的成岩作用方式、成岩环境、成岩序列进行综合研究,探讨成岩作用与孔隙发育、演化和分布规律的关系,为储层预测提供岩石学方面的依据。

## 1 地质概况

开江-梁平地区在地理位置上自东向西跨越了重庆市境内的万州区、开江县、梁平县和四川省境内的宣汉县和达州市,面积近万平方公里(图1)。该地区古地理位置属于开江-梁平台内海槽东段,属于台地相沉积(耿威等,2008),区域构造属于川东弧形褶皱带的东北缘,其中包括五百梯、大猫坪、高峰场、黄龙场等含气构造带,各构造带均呈北东-南西向弧形

展布,与开江-梁平台内海槽走向近于正交(图1)。上二叠统长兴组在该地区连续分布,厚80~120 m,与下伏上二叠统龙潭组(局部地区为吴家坪组)连续沉积,上覆下三叠统飞仙关组呈区域性不整合接触关系,以长兴组顶部的古暴露面和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值骤变面(黄思静等,2006)为与全球可对比的T/P界线。通过系统的地表剖面测量、钻井岩芯观察及薄片鉴定,确定研究区长兴组以灰岩为主,次为白云岩,偶夹薄层状泥页岩。其中灰岩可细分为泥-微晶灰岩、砂屑灰岩、生物屑灰岩以及生物礁灰岩等;白云岩可细分为泥-微晶白云岩、颗粒白云岩、礁白云岩和晶粒白云岩等。垂向上,经历了开阔台地→台地边缘浅滩→台地边缘生物礁→古暴露面等沉积演化序列(图2)。

## 2 成岩作用类型及特征

开江-梁平台内海槽东段长兴组碳酸盐岩成岩作用类型众多(耿威等,2008;周刚等,2009;张兵等,2009),主要有胶结作用、压实-压溶作用、新生变形-重结晶作用、白云岩化和去白云岩化作用、破裂作用和溶解、充填作用,以及硅化、硬石膏化、天青石化等作用。其他如准同生膏化(萨勃哈)作用就不详细描述了。按成岩作用与储层发育关系,可划分为破坏性和建设性两种成岩作用类型。

### 2.1 破坏性成岩作用

#### 2.1.1 胶结作用

##### (1) 早期多世代环边栉壳状胶结作用

在岩石中呈多世代等厚环边的栉壳状方解石,环边厚0.2~0.5 mm,原始成分为纤维状文石(或为高镁方解石),多形成于海水渗流带,包绕颗粒生长

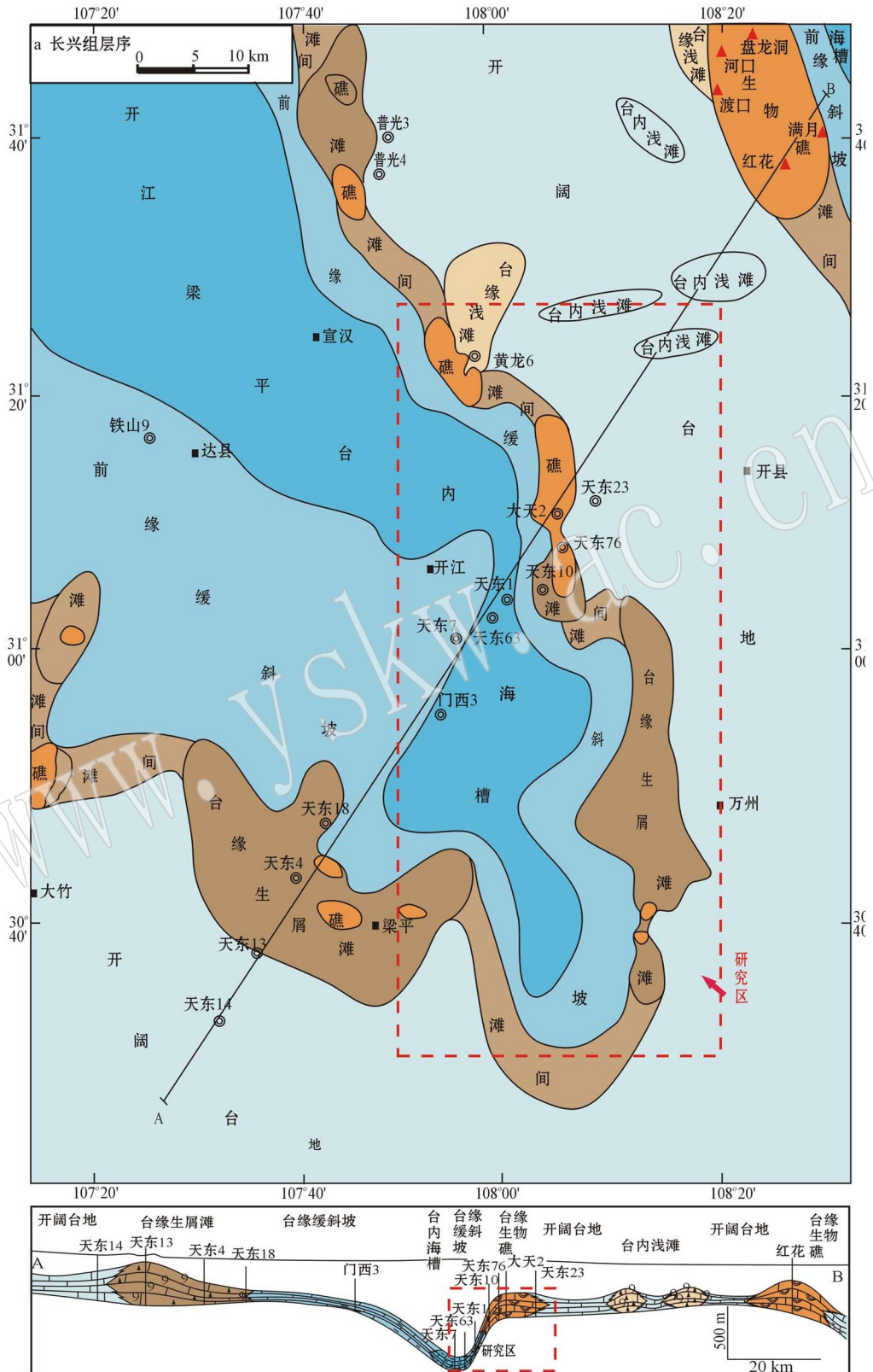


图 1 开江-梁平地区长兴组岩相古地理概况(据耿威等, 2008)

Fig.1 Overview of the study area and lithofacies palaeogeography of Changxing Formation (after Geng Wei *et al.*, 2008)

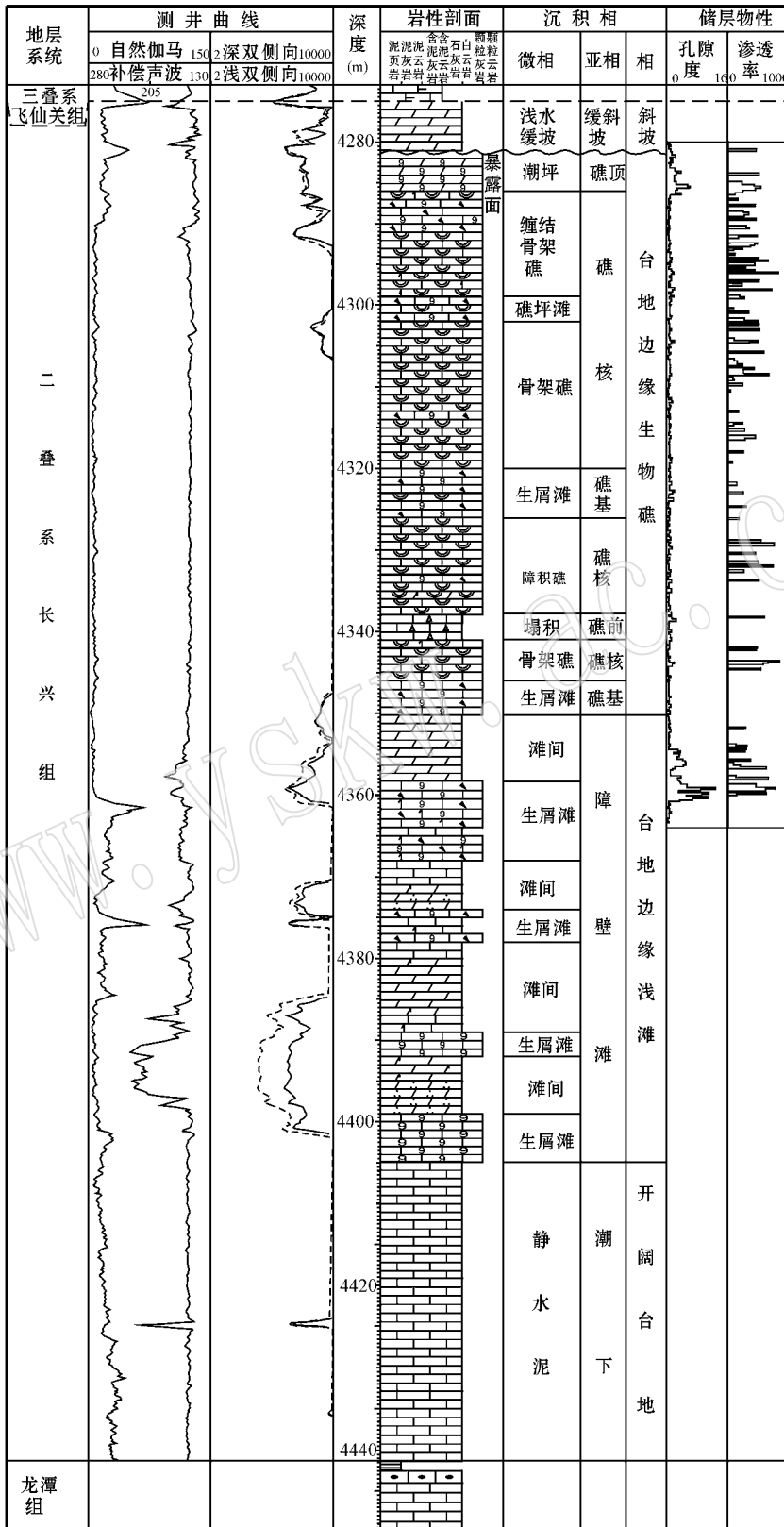


图 2 台地边缘生物礁相剖面结构(天东 53 井)

Fig.2 Structural map of sedimentary sections of platform edge reef(Well Tiandong-53)

(图 3a)或分布在礁灰岩的骨架间孔隙中。这种方解石胶结作用的第 1 世代形成时期较早,重结晶后多呈栉壳状结构,形成稍晚的第 2 和第 3 世代分布于第 1 世代环边之上,向孔隙中心生长,晶片逐级略粗于前一代。

### (2) 等粒状粉-细晶方解石胶结

方解石呈干净透明的等粒状,大小为 0.05~0.1 mm 之间,分布在碎屑间或生物骨架内被等厚环边胶结物充填后的剩余空间中,与等厚环边胶结物组成二世代或多世代胶结结构(图 3a、3b)。

### (3) 中-粗晶和连晶方解石胶结作用

这类方解石胶结物也呈干净明亮的等粒状,大小一般为 0.2~1 mm 的粗晶(图 3b、3c),局部为 >2 mm 的连晶,主要以充填各类剩余孔隙空间为特征(图 3f),依据其形成于等厚环边的栉壳状胶结物白云岩化作用之后,可确定这类方解石的胶结作用发生在早成岩阶段晚期—中成岩阶段早期。

### (4) 粗-巨晶方解石充填作用

这类胶结物多为 0.5~2 mm 的铁方解石粗晶,个别为 2~5 mm 的巨晶,干净透明,以充填各类溶蚀孔、洞、缝为主(图 3c),依据其形成于异形白云石沉淀之后,并与碳质沥青共生等特征,确定为中成岩阶段晚期至晚成岩阶段早期深埋藏环境中的热液沉淀物。

## 2.1.2 压实和压溶作用

### (1) 压实作用

碳酸盐沉积物在埋藏过程中,受压实后会出现各种各样的现象,表现为失水、流动及塑性变形,镜下可见灰泥及细小生物碎屑塑性变形,如片状介壳包绕大的生物屑塑性定向分布。受压实后,岩石中孔隙流体从高压低渗区流向多孔礁复合系统,伴随流体运动,可发生矿物的稳定化作用,如生物中的不稳定矿物文石和高镁方解石向稳定的低镁方解石转化,同时形成颗粒变形和形成颗粒间的微缝合线接触关系,通常发生在埋藏深度不大的缺乏近地表胶结作用的早成岩阶段早期至晚期。

### (2) 压溶作用

岩石进入埋藏期后,由于上覆地层压力或地应力作用,可造成岩石中矿物发生溶解产生压溶现象,形成缝合线(图 3d)。缝合线两侧的物质组分出现程度不同的溶解而内有粘土夹层或有机炭质,多出现在混有大量粘土矿物和粉砂、碳质的不纯泥粒灰岩中,通常发生在具有较大埋藏深度的中成岩阶段早

期至晚成岩阶段。

## 2.1.3 新生变形作用

新生变形作用是福克提出的一种特殊的重结晶作用(曾允孚,2007),一般只发生在同生成岩阶段后期和早成岩阶段的湿相转变的成岩期。长兴组主要表现为文石向方解石的转变,主要是因为文石矿物的稳定性比起方解石要差的多,当沉积碳酸盐矿物向成岩碳酸盐矿物转变的时候,文石中的锶元素将从晶体中排出,并进入到孔隙流体中,此时的文石就转化为稳定的低镁方解石。由于文石的摩尔体积( $34.15 \text{ cm}^3/\text{mol}$ )小于方解石( $36.93 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ),当文石就地转化为方解石时,晶体的体积将增加 8.14%,加大的体积主要占据孔隙而使岩石变得致密,因此,新生变形是造成石灰岩孔隙缩小的最基本原因。

## 2.1.4 硅化

硅化作用在长兴组地层中较为常见,主要发生在早成岩阶段晚期至中、晚成岩阶段,以自生石英的形式出现(图 3a),含量较低。在峰 003-2 井中所见早期硅化为微晶石英集合体交代生物碎屑灰岩,岩石中可见残余生物碎屑,硅质交代生物或粒间微晶方解石,甚至可形成硅化岩类。但这一现象仅在峰 003-2 井中偶尔见到,而其他各井以常见自生石英充填粒间孔或生物体腔孔的现象为主。

## 2.1.5 硬石膏、天青石和萤石的充填作用

虽然溶蚀作用增加了储层物性孔渗性,有利于油气的运移,但受中-晚成岩阶段自生矿物沉淀和充填作用的影响,大多数溶蚀孔洞和裂缝常被铁方解石、硬石膏、天青石和萤石等次生矿物完全或不完全充填(图 3c、3l)和封堵部分溶蚀孔洞和裂缝的现象,因此,次生矿物的充填作用是对储层发育不利的因素,但也正因为有次生矿物的不完全充填作用阻碍了裂缝的闭合而保留其渗流能力。

## 2.1.6 去白云石化作用

去白云石化作用发生于晚成岩期,是由中-晚成岩阶段铁方解石交代先前成岩期形成的白云石所致,在粉晶白云岩、细晶白云岩、含生物屑白云岩及残余海绵白云岩中均有发生,但由去白云石化形成的次生方解石多呈交代白云石的不均匀斑块状分布(图 3h)。由于白云石摩尔体积为  $64.1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ,2 个摩尔方解石的体积为  $73.86 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ,当 1 摩尔体积的白云石就地转化为 2 个摩尔体积的方解石时,晶体体积将增加 15.22%,加大的体积主要占据孔隙

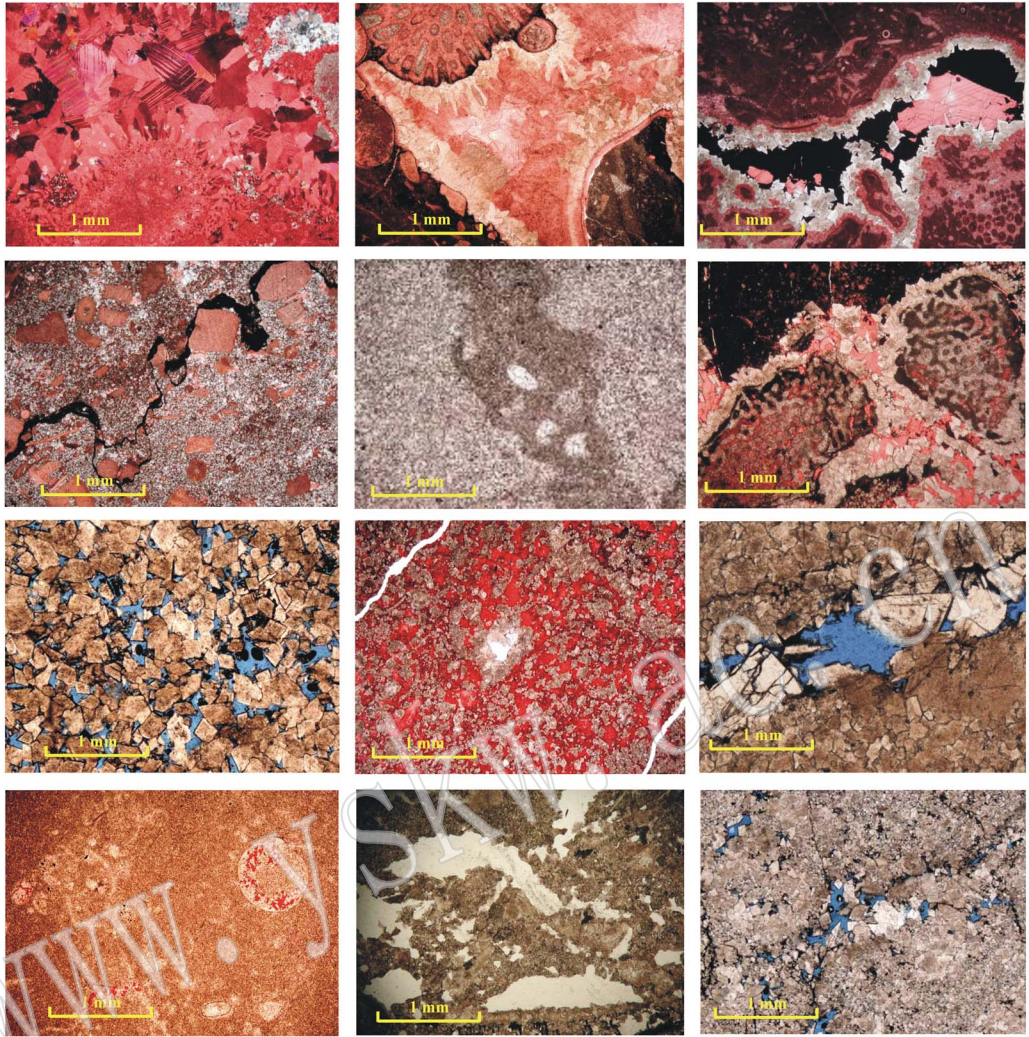


图 3 开江-梁平地区长兴组碳酸盐岩常见的成岩作用类型

Fig. 3 Sketch map of different diagenetic and pore types of carbonate rocks of Changxing Formation in Kaijiang-Liangping area  
 a—亮晶海绵生屑灰岩, 多世代胶结结构和局部的硅化作用, 天东 53 井, 4 320.75 m, 染色普通薄片, 正交偏光; b—亮晶海绵骨架礁含云灰岩, 多世代胶结结构, 等厚环边胶结物具有选择性白云石化作用, 天东 021-3 井, 4 286.73 m, 染色普通薄片, 单偏光; c—亮晶溶孔礁角砾灰岩, 溶蚀作用, 天东 53 井, 4 351.85 m, 染色普通薄片, 单偏光; d—微-粉晶棘屑灰质白云岩, 压溶缝合线非常发育, 峰 003-2 井, 4 490.08 m, 染色普通薄片, 单偏光; e—准同生期的泥-微晶白云岩发生不均匀的重结晶作用, 天东 74 井, 4 119.78 m, 染色普通薄片, 单偏光; f—海绵障积礁云质灰岩, 栉壳状胶结物在早成岩阶段埋藏白云岩化, 骨架间的剩余孔被连晶方解石充填, 天东 002-11 井, 3 886.03 m, 染色普通薄片, 单偏光; g—中成岩阶段埋藏白云岩化形成的细-中晶白云岩, 晶间孔非常发育, 天东 10 井, 3 782.55 m, 染色铸体薄片, 单偏光; h—去云化作用形成的粉-细晶灰质云岩, 硅化斑块, 天东 2 井, 3 787.84 m, 染色普通薄片, 单偏光; i—中成岩阶段埋藏白云岩化形成的细-中晶白云岩, 先后发育碎裂化和溶蚀作用, 黄龙 1 井, 块号 2(45), 铸体薄片, 单偏光; j—残余生物屑粉晶云岩, 发育粒内溶孔, 峰 003-2 井, 4 470.66 m, 染色铸体薄片, 单偏光; k—粉-细晶残余海绵礁白云岩, 粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔非常发育, 天东 021-3 井, 4 266.60 m, 普通薄片, 单偏光; l—碎裂化的粉-细晶白云岩, 成岩压裂缝, 局部发育有硅化, 天东 002-11 井, 3 859.92 m, 铸体薄片, 单偏光  
 a—sparry sponge bioclastic limestone, Well Tiandong-53, 4 320.75 m, staining thin sections, crossed nicols; b—sparry sponge reef dolomitic limestone, Well Tiandong 021-3, 4 286.73 m, staining thin sections, plainlight; c—sparry reef breccia, Well Tiandong-53, 4 351.85 m, staining thin sections, plainlight; d—micro-powder crystal echinate limy dolomite, Well Feng 003-2, 4 490.08 m, staining thin sections, plainlight; e—penecontemporaneous microlite dolomite, heterogeneous recrystallization, Well Tiandong-74, 4 119.78 m, staining thin sections, plainlight; f—sponge barrier reef dolomitic limestone, Well Tiandong 002-11, 3 886.03 m, staining thin sections, plainlight; g—fine-medium crystalline dolomite formed by burial dolomitization in mesodiagenesis, Well Tiandong-10, 3 782.55 m, staining casting thin sections, plainlight; h—powder-fine crystalline limy dolomite formed by dedolomitization, Well Tiandong-2, 3 787.84 m, staining thin sections, plainlight; i—fine-medium crystalline dolomite formed by burial dolomitization in mesodiagenesis, Well Huanglong-1, block 2(45), casting thin sections, plainlight; j—residual bioclastic crystal powder dolomite, Well Feng 003-2, 4 470.66 m, staining casting thin sections, plainlight; k—powder-fine crystalline residual sponge reef dolomite, Well Tiandong 021-3, 4 266.60 m, common thin sections, plainlight; l—cataclastic powder-fine crystalline dolomite, Well Tiandong 002-11, 3 859.92 m, casting thin sections, plainlight

而使岩石变得非常致密,因此,去白云石化作用也是造成储层局部孔隙缩小的原因之一。

## 2.2 建设性成岩作用

### 2.2.1 白云岩化作用

长兴组礁、滩相储层发育的岩石类型较丰富,有泥-微晶白云岩、微-粉晶(亮晶)生屑海绵白云岩、微-粉晶叠层藻白云岩、生屑微-粉晶白云岩、残余生屑海绵粉-细晶白云岩、海绵粉-细晶白云岩、细晶白云岩、中-粗晶白云岩等。按结构特征可划分为准同生期和成岩期交代两种类型。

#### 2.2.1.1 准同生期白云岩

准同生期交代成因的泥-微晶白云岩(图 3e)是长兴组常见的白云岩类型之一,泥-微晶白云石呈他形-半自形晶,常具泥质条带、鸟眼、石膏假晶、钙结壳和藻纹层-藻团粒结构等潮汐和暴露成因标志,白云石  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  比值和有序度最低,与海相泥-微晶灰岩比较碳同位素略低而氧同位素偏高,锶同位素基本一致(表 1),其成因没有争议,所有研究者都用蒸发泵白云岩化模式加以解释,主要发育于间歇暴露蒸发的礁、滩顶部或受障壁的泻湖-潮坪等萨勃哈环境,由于此类白云岩仍非常致密,一般不具备储集意义。

表 1 长兴组各成岩阶段白云石  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  比值、有序度和 C、O、Sr 同位素特征一览表  
Table 1  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  ratio, order degree and C、O、Sr isotopes of dolomite at different diagenetic stages of Changxing Formation

成因类型	样数	$n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$	有序度	样数	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
泥-微晶灰岩				5	3.156 5	-5.019 5	0.709 445
准同生白云岩	2	0.906	0.615	2	2.186 2	-2.979	0.709 300
早成岩埋藏白云岩	3	0.942	0.673	3	2.465	-3.474	0.707 909
中成岩埋藏白云岩	5	0.92	0.802	5	2.466	-3.891	0.706 910
晚成岩埋藏白云岩	2	0.9	0.845	2	2.965	-4.017	0.707 248
构造碎裂化白云岩	2	0.957	0.945	4	2.680	-4.039	0.707 746
飞仙关组准同生白云岩	2	0.93	0.57	3	4.929	-5.317	0.708 028

注  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  及 C、O 同位素由中石油西南油气田分公司勘探开发研究院地质研究室分析; Sr 同位素由成都理工大学同位素实验室分析。

#### 2.2.1.2 成岩期交代白云岩

根据薄片鉴定,区内长兴组成岩期交代成因和具备储集意义的白云岩在生物碎屑灰岩和海绵礁灰岩中最发育,而在泥-微晶灰岩、生屑泥晶灰岩中发育较差,反映孔渗性好的原始岩石组构更有利于白云岩化作用的发育,可以确定成岩期埋藏白云岩化是形成长兴组碳酸盐岩储层最为普遍和最为重要的成岩作用(郑荣才等,2007)。最新研究成果进一步证明长兴组成岩期埋藏白云岩化流体来源于飞仙关组囚禁的海源孔隙卤水,而且具有多期次白云岩化的特点(郑荣才等,2008a),可划分为 4 个具有不同结构和地球化学特征的白云岩化期次(表 1)。

##### (1) 早成岩阶段埋藏白云岩化

该阶段埋藏白云岩化以原始沉积结构保存较完整和颗粒与造礁生物具有优先白云岩化的选择性为主要特点,可分为 A、B 二期。①A 期白云岩化产物主要为灰质粉-细晶颗粒或礁白云岩,由很脏的他形-半自形晶白云石组成,颗粒或礁结构保存完好(图 3f),生物骨架、体腔和粒间孔隙中环边生长的晶簇

状白云石(图 3c)也为该期次产物;②B 期白云岩化产物主要为粉-细晶颗粒或礁白云岩,残余颗粒或生物礁结构仍保存较完好,几乎不含残余灰质组分,晶体较明亮,晶间孔隙较发育。白云石  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  比值和有序度略微高于准同生白云石,碳、氧同位素两者较接近,而锶同位素明显低于长兴组海相灰岩和准同生白云岩(表 1),并介于飞仙关组准同生白云岩与成岩埋藏白云岩平均值(0.707 435)之间,反映该阶段埋藏白云岩化流体与飞仙关组准同生白云岩和埋藏白云岩存在亲缘关系,而飞仙关组埋藏白云岩化流体已被证明来源于飞四段囚禁的海源高盐度孔隙水。

##### (2) 中成岩阶段埋藏白云岩化

该阶段以继续埋藏白云岩化和溶蚀作用为主,岩石主要由具雾心亮边结构的自形粉-细晶、部分为中-粗晶白云石组成(图 3g),具不很明显的残余颗粒或礁结构。残余颗粒的粒间溶孔、晶间孔和晶间溶孔与超大溶孔、生物体腔内大溶孔都非常发育,部分超大溶孔充填有连晶方解石。白云石  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  比

值相对早成岩阶段埋藏白云石偏低而有序度明显增高,碳、氧同位素两者基本一致,锶同位素与飞仙关组成岩埋藏白云岩平均值近一致,依然反映了白云岩化流体来源于飞四段。

### (3) 晚成岩阶段埋藏白云岩化

该阶段以强烈重结晶作用为主,伴有局部的强烈溶蚀作用,岩性主要为原始结构消失的中-粗晶白云岩,白云石晶形好,部分具雾心亮边结构,强烈重结晶、碎裂化和溶蚀作用形成的晶间孔、晶间溶孔、超大溶孔和溶裂缝非常都发育,溶孔中常充填有自生石英、炭化沥青和具有环带结构与马鞍状晶面的异形白云石(图 3i)。白云石  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  比值与中成岩埋藏白云石接近而有序度明显加大,碳、氧、锶同位素两者基本一致,反映白云岩化流体的来源、性质仍与前期一致。

### (4) 构造隆升期的白云岩碎裂化作用

该阶段以白云岩发生构造碎裂化、重结晶和强烈溶蚀作用为主,岩石或被密集的网状裂缝分割成大小不均匀的碎块,或沿裂缝被强烈溶蚀,导致原始岩石结构完全消失,溶蚀孔、洞、缝连通性非常好,往往充填有异形白云石、自生石英和炭渣状沥青,局部硅化。白云石  $n(\text{Mg})/n(\text{Ca})$  比值和有序度也达最高值(表 1),说明构造碎裂化过程中成岩作用进一步加强。碳、氧、锶同位素仍然与前几期成岩埋藏白云岩基本一致,反映了长兴组礁、滩相地层多期次埋藏白云岩化过程中白云岩化流体仍主要来源于飞四段囚禁的海源高盐度孔隙水,具有继承性发展演化的显著特点。据充填该期次溶蚀孔、缝的自生石英 ESR 测年结果为 13.8 ~ 23.21 Ma(郑荣才等, 2008b),可确定白云岩的碎裂化、重结晶和异形白云石与自生石英的充填作用发生在喜山早期晚时的构造隆升过程中。

#### 2.2.2 重结晶作用

这是长兴组碳酸盐岩中常见的成岩现象,但在不同的岩性重结晶程度和分布不同,一般以白云岩的重结晶作用相对灰岩更强烈一些,白云石晶体从微-粉晶、细晶到中-粗晶都有发育,造成原始岩石结构被破坏,常见重结晶残余斑块结构(图 3e),残余生物骨架和粒屑结构,并在重结晶的白云石晶体之间形成一定数量的晶间孔隙,但仅由重结晶形成的晶间孔隙对储渗的贡献仍然是有限的。

#### 2.2.3 深部热液溶蚀作用

深部热液的溶蚀作用主要发生于中-晚成岩阶

段的中-深埋藏成岩环境,不同的岩石类型和组构具有不同的溶蚀特征:①溶蚀作用主要发育于各类白云岩中,而灰岩的溶蚀作用极其有限;②各种骨屑的溶蚀程度极不相同,以螺和瓣鳃的溶解最为常见,多形成粒内溶孔和铸模孔,而棘屑、腕足和有孔虫等生物保存完好,说明生物的溶蚀作用与壳质原始组分密切相关,具有明显的选择性;③具有较粗晶粒结构的白云岩或颗粒白云岩、礁白云岩,以及发育有裂缝的白云岩溶蚀作用更普遍(图 3i),与其晶间孔和裂缝较发育,具有较好的原始孔渗性有关。

#### 2.2.4 破裂作用

破裂作用也主要发生于中-晚成岩阶段的中-深埋藏成岩环境,由成岩压裂和构造破裂作用引起,前者一般呈不规则的小型裂缝和微裂缝,显微镜下表现为骨屑破裂、错位的微裂缝,其形态各异,呈弯曲的或分叉的网状分布(图 3h)。此类裂缝往往被溶蚀作用叠加改造,形成渗流性更好的裂溶缝。较大的规则裂缝是构造破裂作用的产物,多为高角度的平缝,以岩芯中可以直接观察描述的小缝和中缝为主,个别为大缝,缝内一般无充填物,对改善储层的孔渗性具有重要的意义。

## 3 孔隙类型

根据 8 口产气井的储层特征和孔隙类型统计,以台地边缘生物礁和浅滩相的礁白云岩、颗粒白云岩和结晶白云岩为有利储层发育的岩性,储层孔隙类型非常丰富,包括有原生孔隙、次生孔隙和裂缝型 3 种主要类型,根据孔-缝组合关系,大多数储层属于以次生孔隙为主的裂缝-孔隙型储层。

### 3.1 原生孔隙

以原生粒间孔、礁骨架孔和生物体腔孔为主。由于研究区长兴组地层大多属于礁滩相沉积环境,岩石主要由海绿(含少量苔藓虫)与附礁生物及充填物组成,因而原生孔隙主要发育在礁灰岩与颗粒灰岩中,特别是发育在高压环境下形成的海绵、骨屑、藻屑灰岩中最初的原生粒间孔、礁骨架孔和生物体腔孔是非常发育的,但由于成岩胶结作用和充填作用,原生孔隙极大部分被充填堵塞,致使这类孔隙遭受严重破坏而消失。

### 3.2 次生孔隙

#### 3.2.1 粒间溶孔

大多数粒间溶孔是颗粒之间的胶结物和基质被



溶蚀后所形成的。由于长兴组强烈白云岩化导致大多数岩石中的颗粒和填隙物白云岩化,因此,这类孔隙在白云岩化的礁灰岩或生物碎屑白云岩、白云质礁角砾岩中相对较发育,由溶蚀作用可形成大量粒间溶孔(图3k),是最重要的储集空间。

### 3.2.2 粒内溶孔

粒内溶孔主要分布于部分生物碎屑、海绵、藻屑中,形态不规则,大小不等,孔径大小一般为0.2~1.5 mm,是长兴组较为常见孔隙类型。这类孔隙可在早期大气淡水对海绵、及螺类、藻屑和有孔虫进行不完全的溶蚀形成,更多的是在中成岩期颗粒白云岩化后,由有机质成熟排出的酸性热液进行溶蚀而形成粒内溶孔,晚期部分粒内溶孔被铁方解石充填,导致粒内溶孔减少(图3j、3k)。

### 3.2.3 铸模孔

由各种生物被选择性溶蚀形成,礁复合体中各种骨屑遭受溶蚀,其溶蚀程度极不相同,这与骨屑壳质原始组分有关,在螺壳和瓣鳃形成粒内溶孔的基础上,如溶蚀作用继续进行,粒内溶孔被进一步溶蚀扩大,直到颗粒全部被溶蚀掉而形成铸模孔(图3k),而棘屑、腕足等溶蚀较弱,相关的铸模孔也不发育。在长兴组礁储集岩中铸模孔占重要地位,它是除白云石晶间孔和晶间溶孔以外的主要孔隙类型,不同的岩石中铸模孔的数量不同,通常在0%~8%之间,对储层贡献较大。

### 3.2.4 晶间孔、晶间溶孔和超大溶孔

这类孔隙主要发育白云岩中,但一般具泥-微晶结构的准同生白云岩中不发育或发育很差,呈小孔或致密微孔,而在成岩期埋藏交代成因的晶粒状白云岩中很发育,是最重要的储集空间。晶间孔呈规则的多面体状(图3g),以中、小孔为主,但往往伴有溶蚀作用形成扩大的晶间溶孔或超大溶孔,多为中孔和大孔,部分为溶洞,最大孔径可达2~10 mm,面孔率5%~18%。部分晶间孔和晶间溶孔、超大溶孔被较晚期的铁方解石、异形白云石、沥青、天青石、萤石等次生热液矿物充填。

### 3.3 裂缝型孔隙

裂缝型孔隙按照成因可分为成岩压裂缝(图3l)、溶裂缝和构造破裂缝:早期形成的成岩破裂缝细小,以不规则弯曲状的微缝和小缝为主,受压溶影响大,常呈缝合线状或粒缘缝状分布,缝宽<0.01 mm,长一般为数毫米至数厘米,内充填有少量有机质或泥质,最为常见,但对改善储层物性的贡献较有

限,溶裂缝通常为成岩破裂缝被溶蚀叠加改造而成,沿溶裂缝往往发育有串珠状溶孔,孔、缝内虽然常被方解石、石英、石膏、天青石、萤石和黄铁矿等次生矿物半充填,但对改善储层的孔渗性仍具有重要意义;构造裂缝一般以缝宽0.05~0.2 mm的小缝和中缝为主,个别为缝宽>0.5 mm的大缝,长一般为十数厘米至切穿岩芯,缝内很少有充填物,对改善储层物性的贡献为最大。

## 4 成岩序列与孔隙演化

综上所述,参照国家碳酸盐岩成岩阶段划分标准(SY/T 5478-2003)结合研究区特定的成岩-孔隙演化特征,将开江-梁平地区上二叠统长兴组礁、滩相储层的成岩序列划分为准同生、早成岩、中成岩、晚成岩和构造期5个阶段(图4),对应此5个成岩阶段,长兴组礁、滩复合体的成岩-孔隙演化史是一个原生孔隙减少至消失,次生孔隙形成、增多、减少、再略增多的演化过程:①准同生阶段的萨勃哈白云岩化和海水渗流带的等厚环边胶结作用与大气水的等粒状亮晶方解石胶结作用,是该成岩阶段部分粒间孔、生物骨架和体腔孔等原生孔隙明显缩减的主要原因;②早成岩阶段的新生变形作用、压实-压溶作用、地层水胶结作用是造成大部分原生孔隙丧失的主要原因,而早期埋藏白云岩化形成的晶间孔开始出现,是次生孔隙形成和孔隙型储层的初始发育阶段;③中成岩阶段以继续发育压溶、埋藏白云岩化和重结晶作用,溶蚀-充填和成岩压裂作用也开始出现,压实和充填作用虽然造成部分孔隙缩减,但由更为强烈的埋藏白云岩化作用和溶蚀作用对原有孔隙和成岩压裂进行溶扩而形成粒间溶孔、晶间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和超大溶孔、溶洞及溶裂缝等各种次生孔隙,可有效地改善了储层的孔渗性,因此是次生孔隙型储层的主要发育期;④晚成岩阶段以发育深部压溶、重结晶、溶蚀和充填作用为主,局部出现较强烈的硅化、硬石膏化、天青石化、萤石化和次生矿物的充填作用,虽然由继续发生的溶蚀作用对各种次生孔隙进行溶扩,可进一步改善储层的孔渗性,但由深部压溶和次生矿物的充填作用,再次缩减了储层的孔隙度;⑤构造抬升阶段以构造破裂作用为主,由于所发育的构造裂缝很少被次生矿物充填,而且很快被油气占据,多为有效裂缝,因此,该阶段是裂缝型和裂缝-孔隙型储层的主要发育期,也是油气

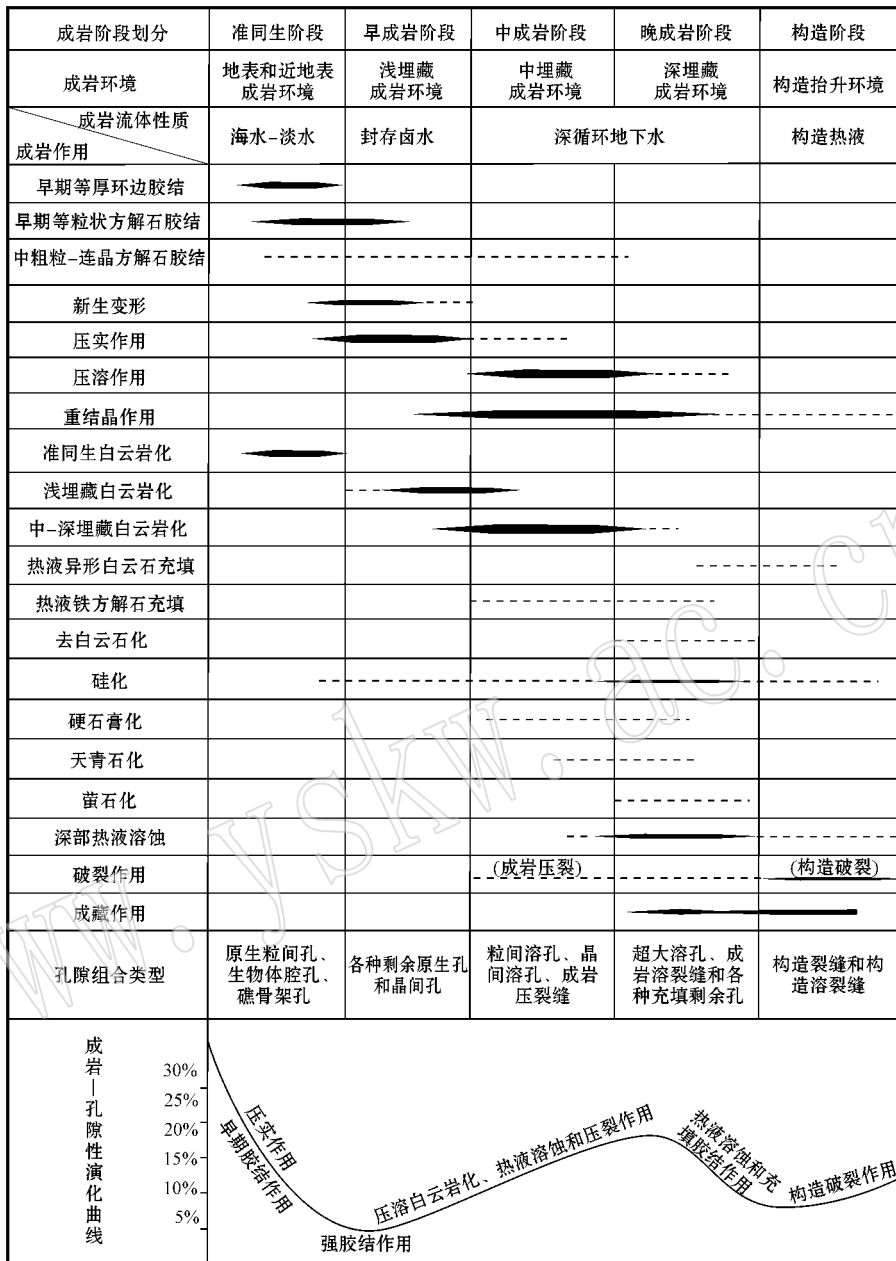


图 4 开江-梁平地区长兴组成岩阶段划分和演化模式

Fig. 4 Diagenetic stage division and evolution pattern of Changxing Formation in Kaijiang-Liangping area

运移、聚集和成藏的重要时期。

综上所述,开江-梁平地区上二叠统长兴组储层的沉积-成岩序列与储层发育和孔隙演化的关系可拟定为如下 3 点:①有利的礁、滩相带决定了储层发育的位置和空间展布规律;②多期次的埋藏白云岩化,特别是礁、滩复合体的埋藏白云岩化是形成储层的基础;③破裂作用和溶蚀作用是改造储层品质和提高储层质量的关键,各类原生孔隙、晶间孔隙和破裂在溶蚀作用改造下被扩大,有效地改善了储层的

孔渗性,形成以粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、晶间溶孔、超大溶孔、溶洞和溶裂缝等多种次生孔隙类型组合的礁、滩相储层基本特征。

## 5 结论

(1)碳酸盐岩的成岩作用,特别是埋藏白云岩化、溶蚀和破裂作用是影响岩石孔隙发育程度的重要因素,也是研究和再造成岩序列和恢复孔隙演化

历史的主要内容。

(2) 开江-梁平地区上二叠统长兴组储层经历了非常复杂的成岩作用和演化历史,包括:①准同生阶段的萨勃哈白云岩化和胶结作用,部分原生孔隙在该阶段开始缩减;②早成岩阶段的压实-压溶作用、埋藏白云岩化、重结晶和局部的膏化作用,该阶段是大部分原生孔隙丧失和晶间孔隙开始大量出现的孔隙型储层初始发育阶段;③中成岩阶段继续发育压实-压溶作用、埋藏白云岩化作用与重结晶作用,同时开始出现强烈的溶蚀和充填作用,各类次生孔隙大量发育,是发育孔隙型储层的关键阶段;④晚成岩阶段在伴随持续增强的重结晶和溶蚀作用过程中,硅化、硬石膏化和天青石化和次生矿物的充填作用变得较普遍;⑤构造抬升阶段以构造破裂作用为主,是裂缝型和裂缝-孔隙型储层发育的重要阶段,也是油气运移、聚集和成藏的关键时刻。

(3) 对应长兴组礁复合体的成岩序列,孔隙演化史是一个原生孔隙减少至消失,次生孔隙形成、增多、减少、再略增多的过程,所经历的破坏性成岩作用主要为胶结作用、压实-压溶作用、新生变形作用和次生矿物的充填作用,建设性成岩作用主要为埋藏白云岩化作用、重结晶作用、溶蚀作用和构造破裂作用,特别是早-中成岩阶段的埋藏白云岩化越彻底,所发育的白云岩孔渗性越好,对储层发育越有利。

(4) 储层发育和孔隙演化的关系可拟定为如下 3 点:①有利的礁、滩相带决定了储层发育的位置和空间展布规律;②礁、滩复合体的多期次的埋藏白云岩化是形成储层的基础;③破裂作用和溶蚀作用是改造储层品质和提高储层质量的关键。

## References

Dong Xia, Zheng Rongcai, Luo Aijun, *et al.* 2009. Characteristics of sequence-based lithofacies and paleogeography of the Changxing Formation in the eastern Kaijiang-Liangping intraplateau trough [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(6): 1124 ~ 1130 (in Chinese with English abstract).

Gen Wei, Zheng Rongcai, Li Shuang, *et al.* 2008. 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)*, 35(6): 639 ~ 647 (in Chinese with English abstract).

Huang Sijing, Zhang Meng, Sun Zhilei, *et al.* 2006. Age calibration of carbonate samples from the Triassic Feixianguan Formation, Well

Luojia 2, Eastern Sichuan by strontium isotope stratigraphy [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33(2): 111 ~ 116 (in Chinese with English abstract).

Lei Bianjun, Qiang Zitong and Wen Yingchu. 1994. Dolomitization of the Upper Permian organic reefs in Eastern Sichuan and its adjacent areas [J]. *Geological Review*, 40(6): 534 ~ 543 (in Chinese with English abstract).

Liu Huayi, Zhang Jing and Hong Haitao. 2001. Feixianguan and Changxing Group of the Northeast Sichuan Basin gas reservoir formation Conditions [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 24(2): 30 ~ 38 (in Chinese with English abstract).

Ma Yongsheng, Cai Xunyu and Li Guoxiong. 2006. Basic Characteristics and Concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 861 ~ 865 (in Chinese with English abstract).

Mou Chuanlong, Ma Yongsheng, Wang Ruihua, *et al.* 2005. Diagenesis of the Upper Permian Panlongdong organic reefs in northeastern Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(1 ~ 2): 198 ~ 202 (in Chinese with English abstract).

Ni Xinfeng, Chen Hongde, Tian Jingchun, *et al.* 2007. Sedimentary framework of Changxing-Feixianguan Formations and its control on reservoiring in northeastern Sichuan basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 28(4): 458 ~ 465 (in Chinese with English abstract).

Ren Lijian, Zhang Chunsheng, Liu Dezhi, *et al.* 2008. Reservoir diagenesis and pore evolution in Puguang gas field [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 31(3): 10 ~ 13 (in Chinese with English abstract).

Shi Jiannan, Zheng Rongcai, Feng Qingping, *et al.* 2009. Fluid origin of burial dolomitization and hydrocarbon accumulation model of backward charging in Changxing formation, NE Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 29(3): 5 ~ 8 (in Chinese with English abstract).

SY/T 5478-2003, The Division of Diagenetic Stages in Carbonate Rocks [S] (in Chinese).

Wang Ruihua, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, *et al.* 2006. Diagenetic processes and environments of the reef shoal dolostones from the Changxing Formation in the Daxian-Xuanhan region, northeastern Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 30 ~ 36.

Wang Yigang, Zhang Jing, Yang Yu, *et al.* 1997. Forming mechanism on the Upper Permian organic reefal gas pool in the northeastern part of the Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 5(1 ~ 2): 145 ~ 152 (in Chinese with English abstract).

Zhang Bing, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, *et al.* 2009. Identification sign and prediction of reef and shoal facies reservoir of the Changxing Formation in the Eastern Kaijiang-Liangping Intraplateau Trough [J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(2): 273 ~ 284 (in Chinese with English abstract).

Zheng Rongcai, Geng Wei, Zheng Chao, *et al.* 2008b. Genesis of dolostone reservoir of Feixianguan Formation in Lower Triassic of northeast Sichuan Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 29(6): 815 ~

821(in Chinese).

- Zheng Rongcai, Hu Zhonggui, Feng Qingping, *et al.* 2007. Genesis of dolomite reservoir of the Changxing formation of Upper Permian, Northeast Sichuan basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(4):78~84(in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Shi Jiannan, Luo Aijun, *et al.* 2008a. Comparative study on geochemical behaviors of dolomite reservoir in northeast Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 28(11):16~21(in Chinese).
- Zhou Gang, Zheng Rongcai, Wang Jiong, *et al.* 2009. Reef and shoal facies, reservoir prediction of Changxing Formation in eastern Sichuan and northern Chongqing[J]. *Lithologic Reservoirs*, 21(1):15~20.

## 附中文参考文献

- 董霞, 郑荣才, 罗爱军, 等. 2009. 开江-梁平台内海槽东段长兴组层序-岩相古地理特征[J]. *沉积学报*, 17(6):1124~1130.
- 耿威, 郑荣才, 李爽, 等. 2008. 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)*, 35(6):639~647.
- 黄思静, 张萌, 孙治雷, 等. 2006. 川东L2井三叠系飞仙关组碳酸盐样品的锶同位素年龄标定[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 33(2):111~116.
- 雷卞军, 强子同, 文应初. 1994. 川东及邻区上二叠统生物礁的白云岩化[J]. *地质论评*, 40(6):534~543.
- 刘划一, 张静, 洪海涛. 2001. 四川盆地东北部长兴组飞仙关组气藏形成条件研究[J]. *天然气勘探与开发*, 24(2):30~38.
- 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 2006. 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*, 79(6):861~865.
- 牟传龙, 马永生, 王瑞华, 等. 2005. 川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁成岩作用研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 25(1~2):198~202.
- 倪新锋, 陈洪德, 田景春, 等. 2007. 川东北地区长兴组-飞仙关组沉积格局及成藏控制意义[J]. *石油与天然气地质*, 28(4):458~465.
- 任利剑, 张春生, 刘德智, 等. 2008. 普光气田储集层成岩作用及孔隙演化[J]. *天然气勘探与开发*, 31(3):10~13.
- 史建南, 郑荣才, 冯青平, 等. 2009. 川东北长兴组埋藏白云石化流体来源与油气倒灌式成藏[J]. *天然气工业*, 29(3):5~8.
- SY/T 5478-2003, 碳酸盐岩成岩阶段划分标准[S].
- 王瑞华, 牟传龙, 谭钦银, 等. 2006. 达县-宣汉地区长兴组礁滩白云岩成岩作用与成岩环境研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(1):30~36.
- 王一刚, 张静, 杨雨, 等. 1997. 四川盆地东部上二叠统长兴组生物礁气藏形成机理[J]. *海相油气地质*, 5(1~2):145~152.
- 曾允孚. 2007. *沉积岩石学*[M]. 北京:地质出版社.
- 张兵, 郑荣才, 文华国, 等. 2009. 开江-梁平台内海槽东段长兴组礁滩相储层识别标志及其预测[J]. *高校地质学报*, 15(2):273~284.
- 郑荣才, 耿威, 郑超, 等. 2008b. 川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因[J]. *石油学报*, 29(6):815~821.
- 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 2007. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. *矿物岩石*, 27(4):78~84.
- 郑荣才, 史建南, 罗爱君, 等. 2008a. 川东北地区白云岩储层地球化学特征对比研究[J]. *天然气工业*, 28(11):16~21.
- 周刚, 郑荣才, 王炯, 等. 2009. 川东-渝北地区长兴组礁滩相储层预测[J]. *岩性油气藏*, 21(1):15~20.

## 致 谢

2009年度,许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间,配合编辑部为本刊评审了稿件,为提高刊物质量做出了贡献。没有这些专家的辛勤劳动,本刊是不可能多方面取得进步的。为此,本刊编辑部向他们表示衷心的感谢!

这些专家有(以姓氏笔画排序):

毕献武 蔡庆华 陈天虎 陈英丽 丁林 董发勤 樊祺诚 范宏瑞 冯敏 高善顺 韩宝福  
何明跃 蒋少涌 赖绍聪 李惠民 李锦轶 李胜荣 李伍平 李晓峰 李永军 连宾 廖忠礼  
刘建波 刘鹏举 刘焰 刘燕学 芦令超 鲁安怀 陆现彩 马昌前 闵隆瑞 牛贺才 石玉若  
史仁灯 孙德有 孙振亚 汤艳杰 田伟 万晓樵 汪哲弘 王长秋 王翠芝 王京刚 王君  
王立本 王汝成 王涛 王瑜 吴才来 吴大清 吴宏海 徐九华 徐文艺 徐学义 许光眉  
严德天 杨富全 杨进辉 杨天南 叶瑛 于炳松 袁选俊 张成立 张宏福 张建新 张进铎  
张敬阳 张招崇 钟宏 周维芝 朱弟成 朱祥坤 褚振西