

文章编号: 1000-0550(2009) 03-0390-14

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^①

赵雪凤^{1,2} 朱光有¹ 张水昌¹ 刘钦甫²

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083

2. 中国矿业大学 北京 100083)

摘 要 近年来在四川盆地川东北地区与塔里木盆地塔中地区发现了深部礁滩体优质储层,为我国深部海相碳酸盐岩油气勘探带来了希望。虽然这些礁滩体分布范围广,储层性质好,探明油气储量大,但是这两个盆地的礁滩体储层却存在较大的差异:川东北礁滩体储层比塔中礁滩体储层厚度大,孔渗性好,前者岩性为白云岩,而塔中则为灰岩。对比研究认为这些差异性受控于以下因素:高能沉积环境和海平面升降变化过程对储层的发育厚度和孔渗性能具有决定性的控制作用;膏岩一定程度上控制了白云岩化作用的发生,白云化过程改善了储层的孔渗性能;烃类的充注时间、储层的埋藏演化、以及烃类流体与岩石的相互作用等对次生孔、洞、缝的形成与保存具有明显的控制作用。由于川东北礁滩体发育时期海平面升降过程相对稳定,水体能量较高,有利于发育厚层礁滩体;白云岩化程度较高,重结晶现象比较普遍;油气充注较早且储层早期快速深埋,后期又处于抬升状态,利于次生孔隙的形成和保持,因此川东北深部礁滩体的储集性能明显优于塔中奥陶系深部礁滩体储层。

关键词 深部优质储层 礁滩体储层 白云岩 流体-岩石相互作用 普光 塔中

第一作者简介 赵雪凤 女 1982 年出生 硕士 油气储层地质 E-mail: xuefengzhao2005@163.com

中图分类号 P588.2 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

随着我国油气勘探进一步拓展,深层、超深层油气藏不断发现,其中碳酸盐岩储层占有较大比重,成为勘探的重点对象^[1~6]。但影响深层、超深层碳酸盐岩储层发育的控制因素比较复杂,特别是我国碳酸盐岩地层发育时代比较早,目前埋藏比较深,后期构造改造运动比较复杂^[5~14],控制深层碳酸盐岩储层发育的各种因素相互叠加,更不容易鉴别,因此国内对深层碳酸盐岩储层发育并没有统一的模式可寻,本文选取国内目前发现的两个比较典型且大型的深层碳酸盐岩储层(普光地区长兴组—飞仙关组的生物礁和鲕粒滩储层,塔中地区良里塔格组的生物礁滩复合储层)对其主控因素进行对比分析,探讨不同的控制因素所起作用的程度不同,对储层的特征有何影响。希望对国内深层、超深层碳酸盐岩储层发育模式的建立有一定的帮助。

1 川东北普光气田和塔中奥陶系凝析气田碳酸盐岩储层特征

1.1 储层的基本特征

川东北普光气田位于川东断褶带东北段双石庙—普光构造带上,储层主要为上二叠统长兴组的生物礁白云岩和下三叠统飞仙关组的鲕粒滩白云岩,是构造—岩性复合大型气藏。根据普光气田 2006 年初上报的储量公告,探明天然气地质储量 $3\ 560\ 72 \times 10^8\ \text{m}^3$,探明含气面积 $86\ 77\ \text{km}^2$ 。储层孔隙度 $2\% \sim 29\%$,平均孔隙度 7.52% ,渗透率 $0.012 \times 10^{-3} \sim 9\ 664.88 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均渗透率 $180 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ^[15],有效厚度在 66~518.8 m 范围内,是目前国内发现的储集物性最好的深层碳酸盐岩储层。

塔中奥陶系良里塔格组凝析气藏位于塔里木盆地塔中低凸起 1 号坡折带台缘区,储层主要为台缘区良里塔格组的礁滩复合体,为构造—岩性复合大型凝析气藏。有利勘探区带沿着塔中 1 号带延展长约 200 km,宽 3~10 km,面积在 1 000 km²以上。近期探明天

^①国家自然科学基金项目(批准号:40602016)和中国石油天然气股份有限公司科技风险创新研究项目《碳酸盐岩新型溶蚀模式的确立和优质储层的预测方法研究》资助。

收稿日期:2008-04-28 收修修改稿日期:2008-06-19

然气三级储量可达 $3\ 000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 储层孔隙度 1.5% ~ 10.09%, 平均孔隙度 3.3%, 渗透率 $0.008 \times 10^{-3} \sim 448 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均渗透率 $5.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[16], 有效厚度主要在 52.1~63.2 m 之间, 是国内目前发现的规模较大的深层碳酸盐岩储层。总体来讲川东北普光气田和塔中奥陶系凝析气田的储层特征与油气组合关系存在较大差异^[15-17] (表 1)。

1.2 普光气田和塔中 I 号带凝析气田储层特征的差异性

普光长兴组—飞仙关组与塔中 I 号坡折带良里塔格组发育相似的沉积相带, 都主要是生物礁和颗粒滩沉积相, 但因沉积环境差异和后期成岩改造过程不同, 导致这两个地区储层的岩性组合、岩石类型、孔隙类型特征、以及孔渗性能等多个方面都存在着较大的差别, 概括来说, 体现在以下几个方面:

(1) 从岩性特征来看, 普光地区无论是生物礁储层还是鲕粒滩储层都以白云岩为主, 而且白云岩大部分重结晶程度比较高, 晶形较好; 塔中 I 号带礁滩体储层主要以灰岩为主, 仅在一些溶蚀孔隙中见少量细小的藻砂屑白云石晶粒^[18]。因此, 二者岩性组合上有本质区别。

(2) 从储层岩石类型来看, 普光地区飞仙关组储

层主要包括鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、糖粒状残余鲕粒白云岩、含砾屑鲕粒白云岩、含砂屑鲕粒白云岩和结晶白云岩等。其中鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩和含砾屑鲕粒白云岩是最主要的储集岩类型。长兴组储层岩石类型包括含灰或灰质白云岩、生屑白云岩、砂屑白云岩、砾屑白云岩、结晶白云岩、海绵礁白云岩、海绵礁灰岩等, 其中以结晶白云岩、砾屑白云岩和海绵礁白云岩为重要的储集岩类型。

塔中 I 号坡折带边缘良里塔格组储层岩石类型主要包括: 泥—亮晶砂屑灰岩和砂砾屑灰岩、藻粘结生物砂砾屑灰岩、藻粘结结晶砂屑生屑灰岩、生物礁灰岩类、隐藻泥晶灰岩、生物泥晶灰岩和含泥泥晶灰岩。其中生物灰岩、生物粘结岩、生屑灰岩、砂砾屑灰岩是发育孔隙型储层的主要岩石类型。

(3) 从孔隙类型来看, 普光地区长兴组—飞仙关组储层储集空间非常发育, 孔隙类型可分为两大类型: 一种是与溶蚀有关的孔隙, 主要包括铸模孔、粒间溶孔和粒内溶孔 (图 1 a b)、晶间溶孔 (图 1 c)、溶洞、溶缝 (图 1 d) 等; 另一种是与溶蚀无关的孔隙, 主要包括晶间孔和原生粒间孔。其中溶蚀孔 (洞、缝) 占绝对优势, 所占比例 > 80%; 次为晶间孔, 所占比例在 1% ~ 15% 之间。

表 1 川东北普光气田和塔中凝析气田地质特征对比

Table 1 Comparison of geologic characteristics of Puguang gas field in the northeast of Sichuan Basin with Tazhong gas fields of Tarim Basin

地区	川东北普光	塔中 I 号带
区域构造位置	川东断褶带东北段双石庙—普光构造带	塔里木盆地塔中低凸起 I 号坡折带
储层层系	上二叠统长兴组—下三叠统飞仙关组	上奥陶统良里塔格组
沉积相带	长兴组生物礁滩、飞仙关组鲕粒滩	台地边缘生物礁、滩、灰泥丘
储层埋深	约 5 104.5 m	4 500~6 500 m
分布面积	86.77 km ²	232.4 km ²
储层有效厚度	66~518.8 m	52.1~63.2 m
主要岩性	鲕粒溶孔白云岩、砾屑海绵礁白云岩	礁滩相礁灰岩、颗粒灰岩
孔隙类型	粒内溶孔、粒间溶孔、铸模孔、晶间孔	粒间溶孔、粒内溶孔、晶间溶孔、溶洞、裂缝
孔隙度	2% ~ 29%, 平均 7.52%	1.5% ~ 10.09%, 平均 3.3%
渗透率	$0.012 \times 10^{-3} \sim 9664.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	$0.008 \times 10^{-3} \sim 448 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $5.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
圈闭类型	构造岩性圈闭	层状岩性圈闭
圈闭形成时间	燕山期	加里东期
圈闭高度	800 m	1 350 m
地层压力	55.61~56.29 MPa	58.03~64 MPa
盖层	中—下三叠统膏岩和泥岩	上奥陶统桑塔木组泥岩
油气来源	二叠系龙潭组和志留系混源	寒武—奥陶系烃源岩
天然气类型	以甲烷、硫化氢和二氧化碳组成为主的干气藏	以烃类组成为主的凝析气藏, 微含—低含硫化氢
储量丰度	$55.083 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$	$4.97 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{km}^2$
含气饱和度	90%	74.7% ~ 78.8%
压力系数	1.07~1.18	1.22~1.27

塔中 I 号坡折带奥陶系碳酸盐岩储集空间相对普光地区不太发育, 孔隙类型主要是和溶蚀有关的孔、洞、缝, 具体包括: 粒内溶孔(图 1e g)、铸模孔(图 1f)、粒间溶孔(图 1e g)、晶间溶孔、生物体腔孔、生物格架孔、溶洞和溶缝等。其中溶洞主要与表生溶蚀

作用相关, 其它的溶蚀孔隙多与埋藏溶蚀作用有关, 常沿裂缝周缘分布。

(4) 从普光地区和塔中地区深层碳酸盐岩储层的孔隙度和渗透率对比可以看出: 普光飞仙关组鲕粒滩储层的孔隙度好于塔中 I 号带砂屑滩储层的孔隙

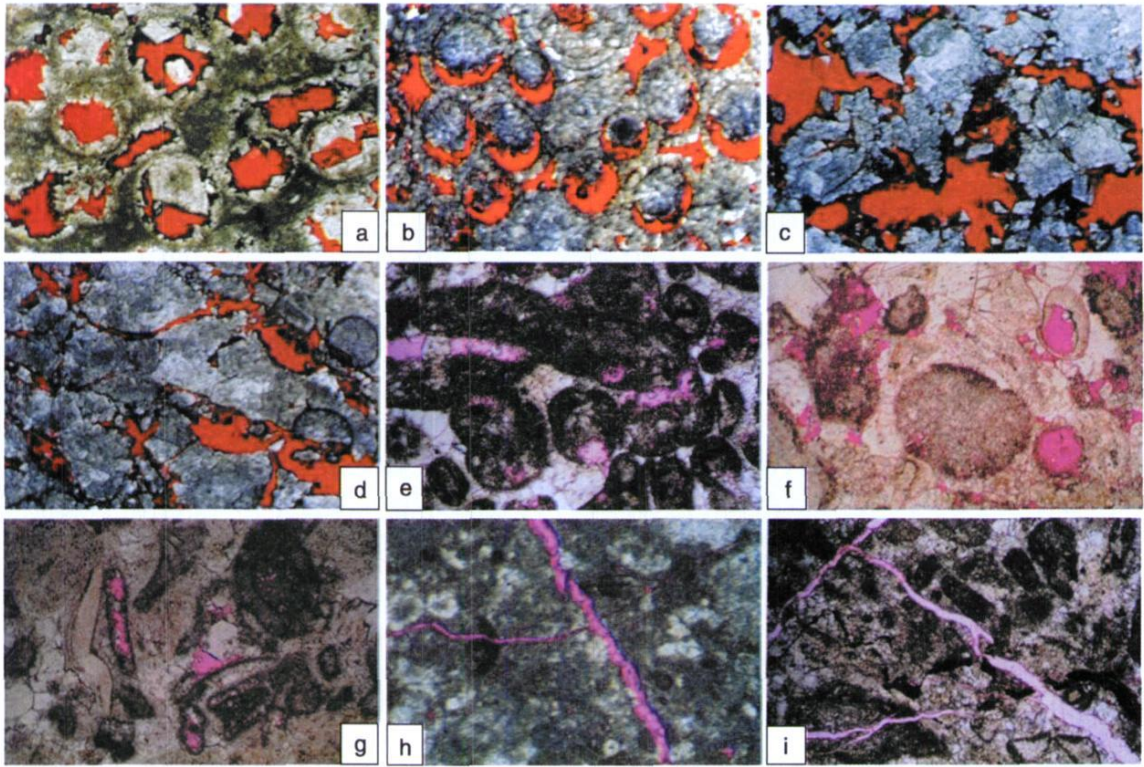


图 1 普光和塔中地区储层孔隙微观特征

(a. 普光 2 井, 残余鲕粒白云岩, 粒内溶孔, 粒间溶孔发育, 部分溶蚀孔隙边缘有沥青, 4 954.38 m, $\times 10$; b. 普光 2 井, 残余鲕粒细晶白云岩, 粒内溶孔, 粒间溶孔发育, 部分边缘有沥青, 4 979.07 m, $\times 10$; c. 普光 2 井, 含残余细晶白云岩, 岩石重结晶形成大量晶间孔, 晶间溶蚀孔也比较发育, 孔隙边缘有沥青充填, 5 074.19 m, $\times 10$; d. 普光 2 井, 残余鲕粒粗晶白云岩, 裂缝发育, 呈不规则网状, 溶孔沿裂缝发育, 5 055.92 m, $\times 10$; e. 塔中 30 井, 亮晶颗粒灰岩, 粒内及粒间溶孔, 5 020.65 m, $\times 50$; f. 塔中 62-3 井, 亮晶棘屑灰岩, 铸模孔, 粒内溶孔, 粒间溶孔, 5 127.03 m, $\times 80$; g. 塔中 822 井, 亮晶生屑灰岩, 粒内溶孔, 粒间溶孔, 5641.1 m, $\times 50$; h. 塔中 261 井, 泥晶颗粒灰岩, 粒内溶孔, 晶间溶孔, 构造缝和构造溶蚀缝(缝较宽, 缝壁不齐), 4352.1 m, $\times 80$; i. 塔中 30 井, 亮晶颗粒灰岩, 网状构造缝未充填, 5 019.9 m, $\times 80$ (红色铸体, 红色代表孔隙或裂缝)

Fig. 1 Microscopic features of porosity in Puguang and Tazhong area

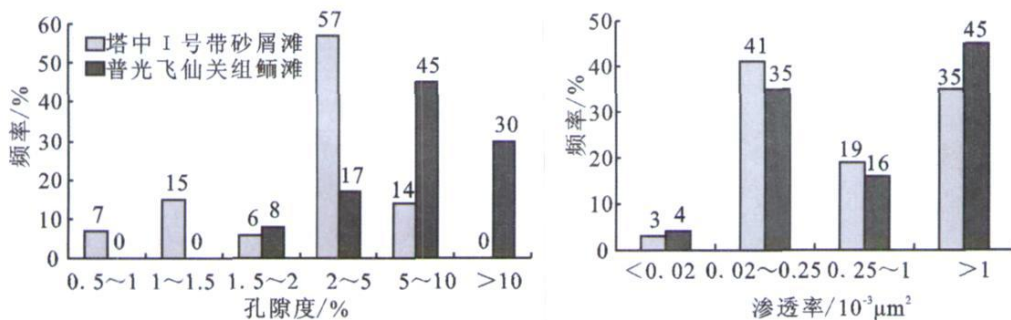


图 2 塔中砂屑滩和普光飞仙关组鲕粒滩储层孔隙度、渗透率对比图

Fig. 2 Comparison of porosity and permeability of oolitic beach in Puguang area with psammitic beach in Tazhong area

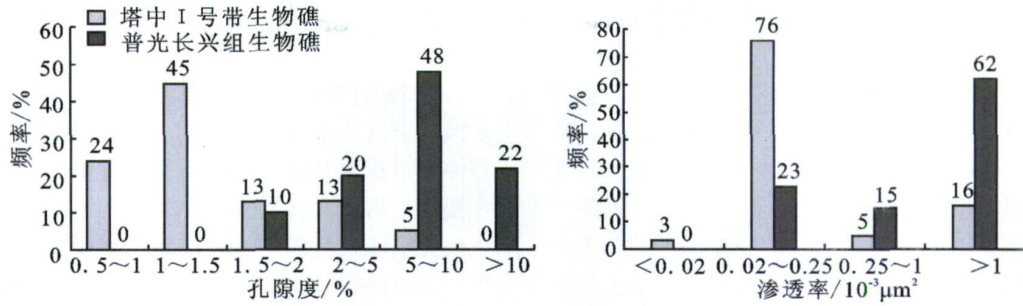


图 3 塔中和普光生物礁储层孔隙度、渗透率对比图

Fig 3 Comparison of porosity and permeability of reef in Puguang area with Tazhong area

度(图 2), 普光鲕粒滩储层孔隙度主要分布在 5% ~ 10% 的范围内, 孔隙度大于 10% 的占到 30%; 塔中砂屑滩的孔隙度主要分布在 2% ~ 5% 的范围内, 基本上没有孔隙度大于 10% 的储层。从渗透率的分布频率来看, 塔中砂屑滩的渗透率比普光的鲕粒滩要差(图 2), 但塔中砂屑滩储层中渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层也占有很大比重, 渗透性也比较好, 这说明虽然塔中 I 号带砂屑滩储层的孔隙度比普光的鲕粒滩储层要差的多, 但经裂缝改造后储层的渗透率仍然较好。

对生物礁相储层孔隙度和渗透率的对比可以看出, 普光的生物礁储层的孔隙度远好于塔中 I 号带的礁滩体(图 3)。普光的礁滩体储层孔隙度主要分布在 5% ~ 10% 范围内, 孔隙度 > 10% 的占到 22%; 塔中 I 号带礁滩体储层孔隙度主要分布在 1% ~ 1.5% 的范围内, 孔隙度 > 2% 占 18% 左右。从渗透率分布频率来看(图 3), 普光的礁滩体储层渗透率也远好于塔中 I 号带的礁滩体储层。

总体来讲, 塔中 I 号带礁滩复合储层无论是砂屑滩相沉积还是生物礁相沉积, 其储层孔隙度和渗透率都远小于普光地区。

2 沉积环境的差异

2.1 沉积相展布特征的差异

川东北地区长兴组古地理面貌呈现槽台相间格局(图 4a), 飞仙关组海平面逐渐变浅, 演化为开阔台地和局限台地沉积(图 4b)。整体呈北西西向延伸, 西部为深水盆地沉积环境, 沉积物以泥晶灰岩为主; 中部为通江—开县局限碳酸盐岩台地, 沉积砂屑灰岩、生屑灰岩等颗粒灰岩等, 局限台地两侧边缘部位发育长兴组的礁滩体(图 4a)和飞仙关组的鲕粒滩(图 4b)沉积相^[19 20]

塔中地区良里塔格组沉积体系为陆棚—斜坡—盆地沉积, 良里塔格组沉积早期(良五一良三段), I 号带比较低缓, 沉积物以含泥灰岩为主, 局部发育灰泥丘, 良三段中晚期—良一段塔中 I 号带台缘陡坡逐渐形成, 沉积物以镶嵌式礁滩复合体为主(图 4c d), 是储层发育的主要层段。I 号坡折带西侧边缘总体上以低能开阔海台地沉积为主, 沉积了较厚的泥晶灰岩和低能砂屑滩; I 号坡折带东侧主要为斜坡相和深水盆地沉积^[21-23]。

2.2 岩性组合特征的差异

普光地区礁滩体纵向上表现为典型的下礁上滩型组合规律, 长兴组长一段中上部到长二段主要为生物礁滩体沉积(图 4a), 生物礁组成以海绵障积岩为主, 其次为海绵骨架岩。造礁生物间和骨架孔中的填隙物主要为生物碎屑、砂屑和少量泥晶方解石, 生物礁上部(礁盖)主要是蒸发坪或浅滩沉积相的生屑白云岩、砂屑白云岩及少量砾屑白云岩和鲕粒白云岩。飞仙关组飞—一飞三段中下部主要发育巨厚层的鲕粒滩沉积, 其中夹杂有多套薄层膏岩(图 5左)。

塔中 I 号带台缘礁滩体主要发育在良三段中上部到良一段, 纵向上表现为多个旋回礁滩体的叠加(图 5右)。侧向上塔中 62—塔中 82 井区以发育礁滩体为主, 塔中 24—塔中 26 井区以发育砂屑滩为主(图 4c d)。生物礁沉积以生物丘为主, 少量骨架礁和障积礁。造礁生物和骨架孔中填隙物除生屑外, 泥晶灰岩和泥质含量比较高。和生物礁共生的砂屑滩的沉积物以砂屑灰岩、砂砾屑灰岩、生屑灰岩为主, 鲕粒灰岩较少发育。

2.3 高能沉积体系的差异

普光长兴—飞仙关组和塔中良里塔格组的沉积相都主要为碳酸盐岩台地—台缘礁滩体沉积相, 但礁滩体的发育规模、充填物粒度及造礁生物具有一定的

差异, 这是由沉积时期海平面的相对变化、水体能量和时代的差异造成的。

普光和塔中 I 号带地区的生物礁发育模式都属于碳酸盐岩台地边缘斜坡生物礁发育模式。生物礁的生长需要保持适宜的水深、水温 and 光照强度。普光生物礁旋回后, 因海水变得较浅, 不适宜生物礁的生长, 发育了厚层的鲕粒滩沉积。塔中在海平面的多个旋回中仍存在生物礁生长的环境, 发育了多个生物礁滩, 相互叠加, 形成了大规模的生物礁。前人关于川东北和塔中海平面演化的研究刚好印证了这一点, 川东北地区水深由浅变深再变浅, 长兴组末期到飞仙关初期海平面快速升高变深后, 长期处于缓慢变浅的过程, 直到飞三段末期^[24] (图 5 左)。塔中地区礁滩体发育时期海平面变化比较频繁^[23, 25] (图 5 右)。

从生物礁骨架孔中的填隙物来看, 普光生物礁骨架孔中的填隙物主要为生屑灰岩、砂屑灰岩和少量泥晶灰岩。而塔中地区骨架岩孔隙中的填隙物除生屑外, 泥晶灰岩或泥质含量比较高, 且粘结岩、障积岩比较发育, 这说明普光地区生物礁沉积时的水体能量较

高。塔中良里塔格组礁滩复合体沉积时, 水体能量相对比较弱。

从颗粒滩发育的粒度来看, 普光飞仙关组滩相沉积鲕粒灰岩非常发育, 其中还夹杂薄层膏岩。塔中 I 号带滩相沉积主要发育在塔中 24—塔中 26 井区, 沉积物主要为生屑灰岩、砂屑灰岩、砂砾屑灰岩。这说明普光飞仙关组滩相沉积时水体能量比塔中 I 号带塔中 24—塔中 26 井区滩相沉积时的水体能量要高, 高能的水体环境既增加了沉积物的颗粒粒度, 又减少了泥质等细粒物质的沉积, 提高了原生孔隙的发育程度。

从造礁生物来看, 普光生物礁的造礁生物主要是海绵类 (串管海绵、纤维海绵、硬海绵等), 少量苔藓虫和藻类。塔中生物礁的造礁生物除了有海绵类, 托盘类外还有大量隐藻、蓝绿藻、绿藻、红藻等藻类。这可能是时代的差异造成的, 塔中的生物礁是奥陶系生物礁, 处于生物礁刚开始繁盛阶段, 普光的生物礁是二叠系生物礁, 处于地质历史中生物礁最繁盛阶段, 造礁生物也比奥陶纪高等, 海绵礁原生孔隙的发育大于藻粘结岩, 这可能也是优质生物礁储层发育的影响因素。

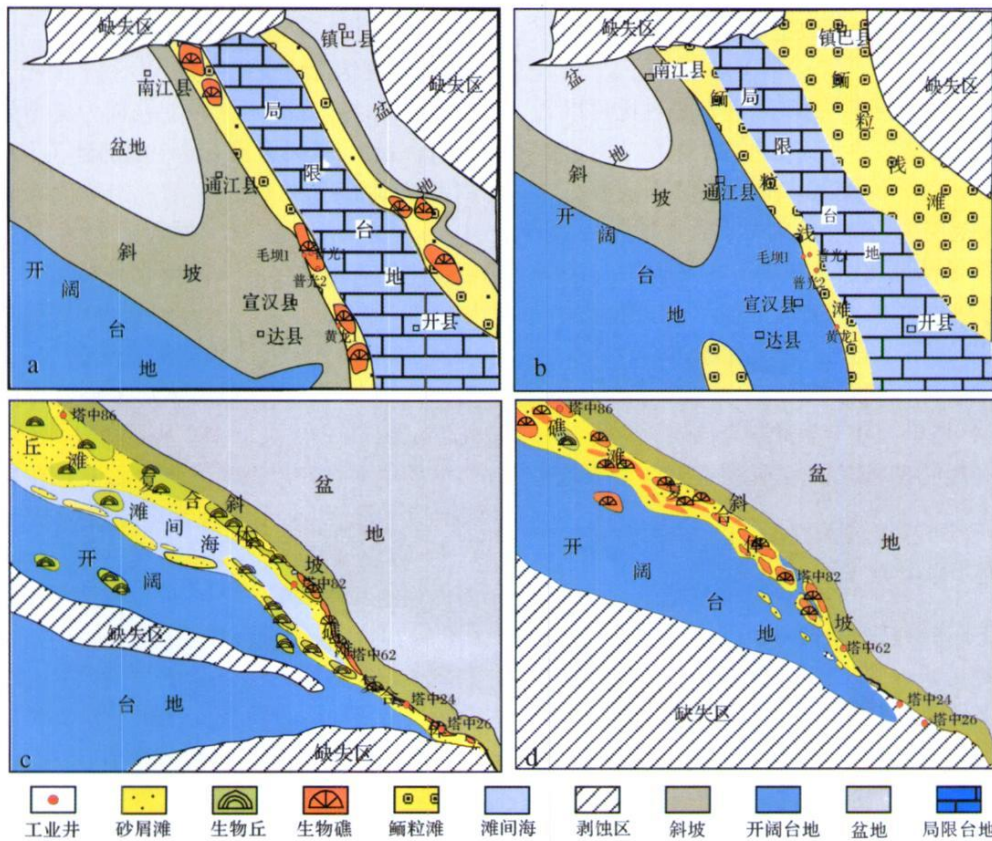


图 4 川东北和塔中地区沉积相展布对比图

a 川东北长兴组沉积相图; b 川东北飞仙关组沉积相图; c 塔中 I 号坡折带良二段沉积相图; d 塔中 I 号坡折带良一段沉积相图

Fig 4 Comparison of sedimentary facies in the northeast of Sichuan Basin with Tazhong area

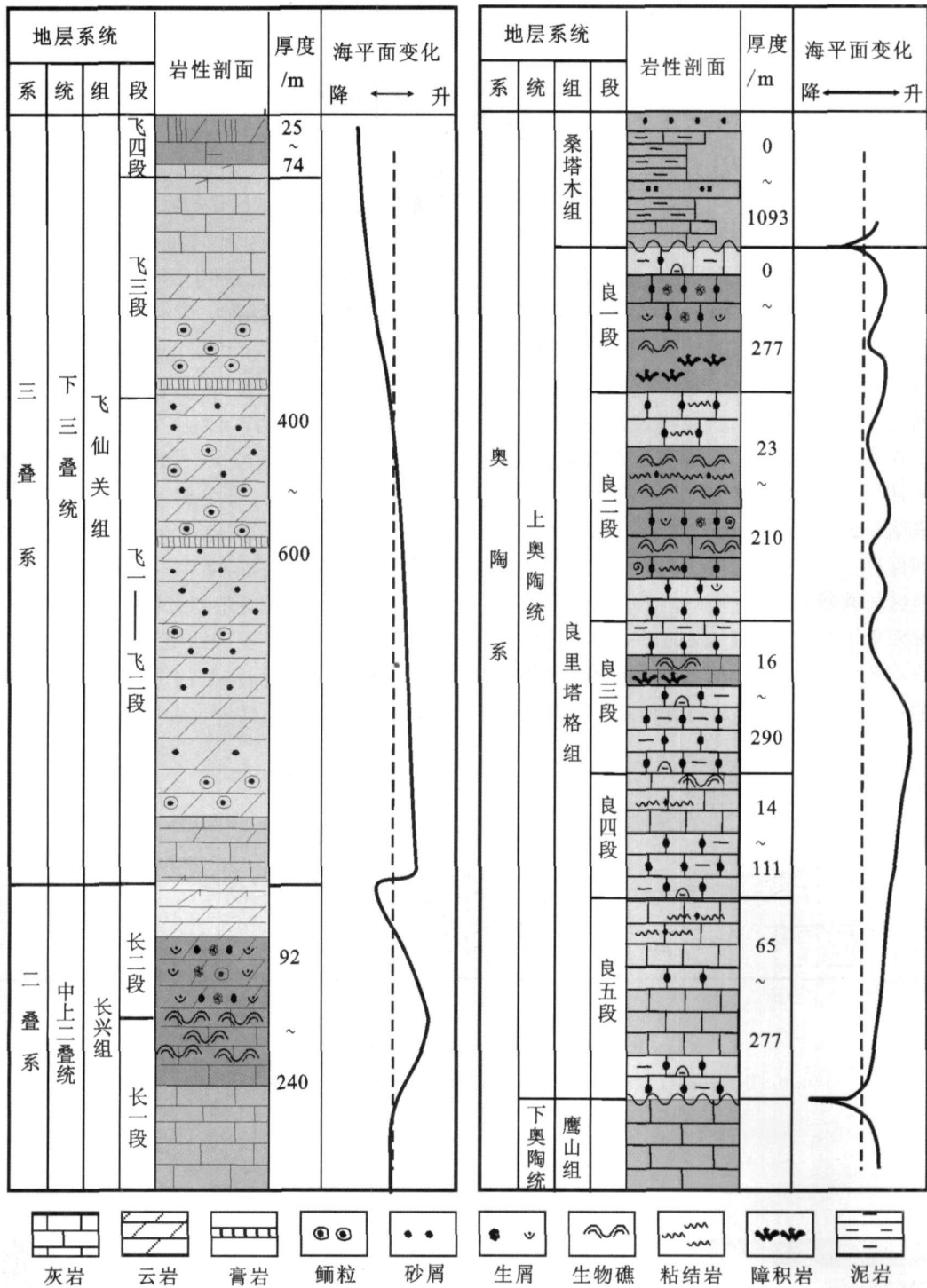


图 5 普光长兴—飞仙关组岩性组合剖面图(左)和塔中良里塔格组岩性组合剖面图(右)

Fig 5 Columnar section showing lithologic association of Changxing-Feixianguan Formation in Puguang (left) and Lianglitage Formation in Tazhong area (right)

普光地区和塔中 I 号带台缘区生物礁滩特征和沉积环境的对比说明高水体能量环境下发育的生物礁, 泥质成分经水体洗涤后很少残留, 有利于原生孔

隙的发育。

普光地区无论是礁相沉积环境还是滩相沉积环境, 其水体能量都比塔中 I 号带台缘区良里塔格组礁

滩体发育带要高,而且长兴组的主要造礁生物比上奥陶统要高等,这些因素是造成普光长兴组生物礁和飞仙关组鲕粒滩原生孔隙的发育程度比塔中 I 号带台缘区良里塔格组的礁和滩要好的重要原因,为普光优质储层的发育打下了坚实基础。

3 白云岩化作用对储层影响的差异

国内外大量数据统计显示无论是从数量还是从质量上来讲,白云岩储层在深部优质储层中都占有非常重要的地位^[3],因此白云岩化作用是深部优质碳酸盐岩储层发育的一种重要的成岩作用。与方解石相比,白云石比重大,硬度高,抗压溶性比较强,在硫酸根离子存在的流体中,溶蚀性比方解石要强,白云岩化作用的晚期可以有利于残余方解石的溶解^[26-34]。多种现象表明白云岩化有利于次生溶蚀孔隙、晶间孔隙的发育和保存。

普光地区长兴组的生物礁滩储层和飞仙关组鲕粒滩储层都发生了强烈白云岩化,而塔中 I 号带良里塔格组台缘礁滩体白云岩化非常弱,仅在藻砂屑灰岩的溶蚀孔隙中发现细粒的白云石,这种差异与沉积环

境条件密不可分。普光地区在飞仙关组沉积时期属于强蒸发水体环境,具备渗透回流白云岩化作用的发生(萨布哈模式),同时沉积过程中鲕粒滩不定期出露在大气淡水环境下,接受大气淡水淋滤,有具备混合水白云岩化作用(图 6)。对于普光地区优质白云岩储层的白云岩成因很多学者做了大量的研究,但究竟属于那种白云岩化模式目前仍没有统一的认识,多认为是回流渗透白云岩化、混合水白云岩化和埋藏白云岩化共同作用的结果。

从塔中地区的沉积演化来看,塔中台缘礁滩体区域海水循环比较通畅,基本不存在浓缩的高盐度海水(储层中也不发育膏质岩类等蒸发强度较大的岩类组合),礁滩体发育过程中存在不定期的暴露在大气淡水环境中(图 7),部分属于混合水作用带,但基本未发生白云岩化作用,这可能与混合水白云岩化发育范围比较局限有关。

从川东北飞仙关组的沉积模式图中还可以看出,深水海槽两侧同是鲕粒滩沉积,一侧白云岩化强烈,而另一侧白云岩化较弱,甚至没有,而这两侧的沉积环境差异仅是强白云岩化带一侧有厚层的膏岩发育,

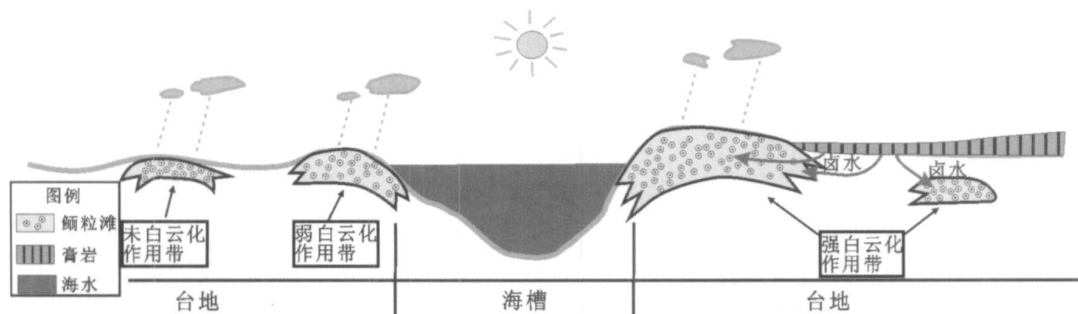


图 6 川东北飞仙关组沉积模式图

Fig. 6 Depositional model of Feixianguan Formation in the northeast of Sichuan Basin

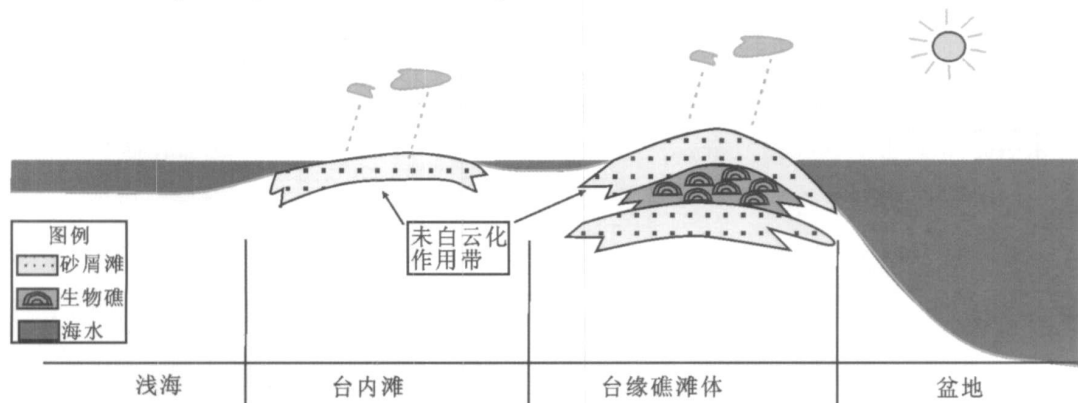


图 7 塔中良里塔格组沉积模式图

Fig. 7 Depositional model of Lianglitage Formation in Tazhong area

这种现象说明膏岩对白云岩化作用具有重要的控制作用(图 6)。无论是那种白云岩化模式, Mg^{2+} 的提供至关重要, 膏岩中丰富的 Mg^{2+} 含量可以作为白云化所需 Mg^{2+} 的重要来源。其它盆地的对比也发现白云岩分布地层多发育在膏岩层附近, 塔里木盆地奥陶统鹰山组和寒武系的白云岩都紧密分布在寒武系膏岩层周围或上下, 上奥陶统良里塔格组未白云岩化可能是因为远离膏岩层, 缺乏 Mg^{2+} 来源。

通过塔中 I 号带台缘礁滩体和普光礁滩体沉积

环境及其周缘沉积环境的对比, 认为受膏岩影响的富镁地层水是白云岩化的重要原因, 膏岩对白云岩化具有重要的控制作用。普光长兴—飞仙关组储层发生了强烈的白云岩化作用, 而塔中地区几乎没有发生白云岩化作用。这也是导致普光储层的渗透性比塔中良里塔格组好的重要原因。

4 同生期大气淡水溶蚀作用差异

对于礁滩体沉积体系来讲, 海平面的相对变化常

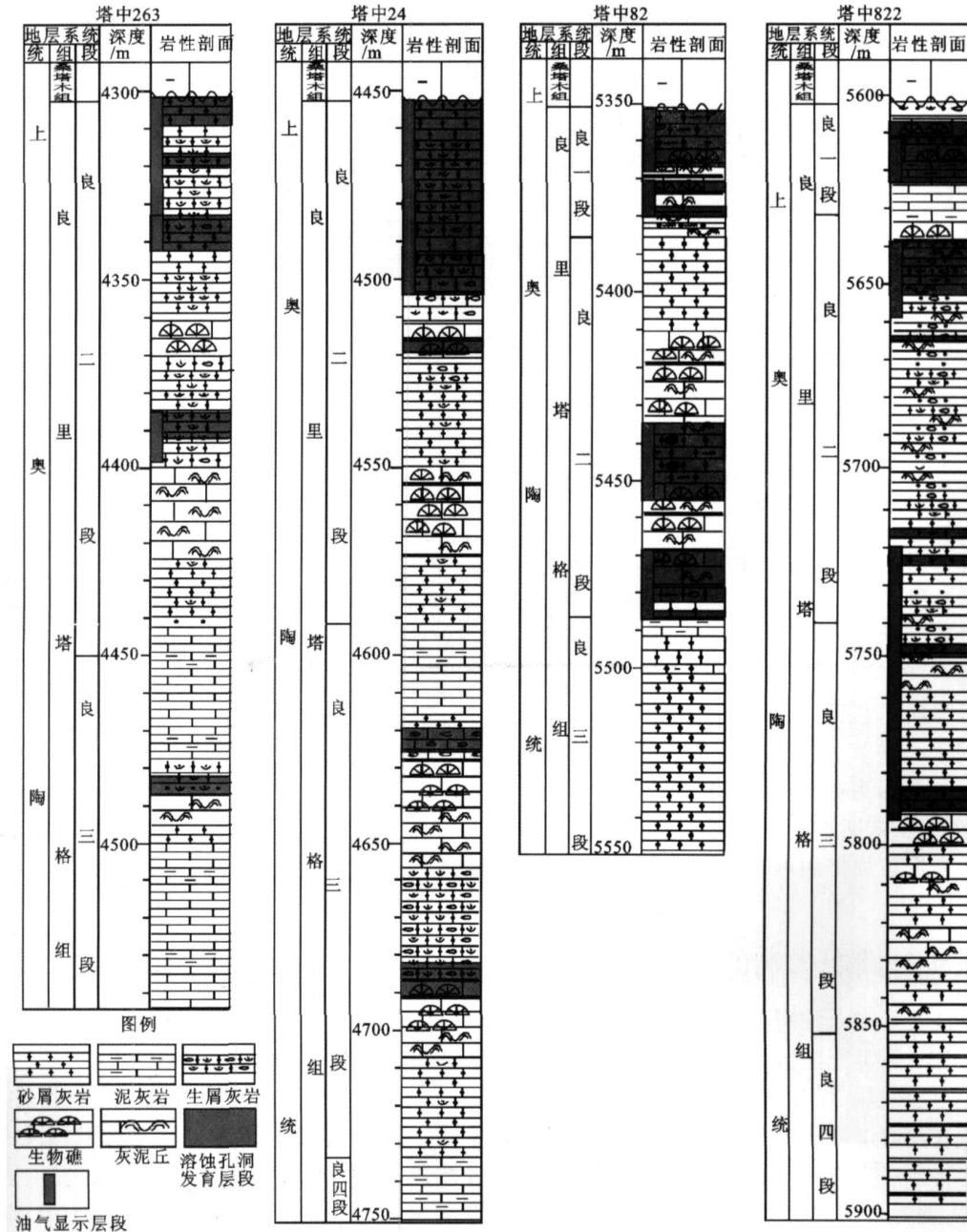


图 8 塔中良里塔格组多期同生溶蚀孔洞的分布

Fig 8 The distribution of multiphase syngenetic vugs of Liangritage Formation in Tazhong area

常会造成沉积物暴露在大气淡水环境中,发生大气淡水淋滤溶蚀作用,形成溶蚀孔洞。这些溶蚀孔洞虽然在后期的沉积埋藏过程中会遭到一定的破坏,但残余的溶蚀孔洞对储层的发育仍具有很大贡献^[20~22,35]。

从塔中 I 号带良里塔格组的地层特征与分布来看,良里塔格组沉积后曾经历了短期的部分暴露,地层剥蚀厚度从塔中 26 井区到塔中 82 井区逐渐减薄;但因暴露时间短,风化壳储层特征表现不明显,但是钻井过程中的井漏现象和取心上见到的溶蚀孔洞还是比较发育的,是能反映出良里塔格组沉积后的表生溶蚀对储层的发育具有重要的促进作用。

从取心段溶蚀孔洞的分布情况和测井解释结果来看,溶蚀孔洞成多层分布,甚至在良里塔格组顶面以下 150 多米处仍有分布(图 8),而且孔隙的发育程度和距良里塔格组顶面的距离没有关系,孔洞直径以 2~6 mm 为主,这些现象表明良里塔格组溶蚀孔洞的发育可能是多期同生大气淡水溶蚀作用形成的。塔中海平面变化规律的研究恰好印证了这点认识,塔中良里塔格组沉积时期海平面变化频繁(图 5 右),随着海平面的下降,生物礁丘逐渐被砂屑滩覆盖,再随后出露于大气淡水环境中,接受短期淡水淋滤溶蚀,发育多套溶蚀孔洞层,对良里塔格组储层的发育具有重要的贡献。取心段和测井显示油气层大多分布在这些早期溶蚀孔洞分布的层段(图 8)。可想如果塔中 I 号带台缘区良里塔格组没有多期同生期溶蚀孔洞的发育,其储层性能很可能更差,也有可能连储气的性能都没有。

普光地区多期同生期溶蚀现象并不明显,仅在鲕粒滩顶部出现了一些表生溶蚀现象(具示顶底构造的铸模孔等),这是因为普光地区海平面变化比较稳定,仅在鲕粒滩沉积末期才浅到足以使鲕粒滩出露在海平面之上。表生溶蚀作用对普光储层孔隙发育影响不大。

5 烃类充注对储层影响的差异

大量研究证实烃类充注有利于次生溶蚀孔隙的产生和保存^[36~43],烃类充注携带的有机酸等酸性流体对储层发生溶蚀作用,增加溶蚀孔隙的发育;烃类充注后的储层在深埋的过程中也不易被压实。普光地区和塔中 I 号带烃类充注对储层除了有以上烃类充注的影响外,普光地区的 TSR 溶蚀作用^[36,44~48]和塔中地区晚期的裂缝良好的保持更是这两个地区优质储层发育的关键控制因素^[17,23,49]。

普光气藏的烃类充注共包括三期(图 9),第一期烃类充注主要是来自志留系龙马溪组烃源岩的油,第二期烃类充注主要是来自下二叠统龙潭组烃源岩的气,同时第一期烃类充注形成的古油藏开始裂解成气,第三期烃类充注其实是普光气藏的调整定型期,原油裂解气和下二叠统龙潭组烃源岩生成的气不断充注到普光构造带储层中^[50,51]。该区烃类充注除了携带的有机酸等酸性流体对储层发生溶蚀外,原油裂解过程硫酸盐热化学还原反应(TSR)产生的 H₂S 等酸性气体产生了更强烈的溶蚀作用^[40,46~48],而且储层的孔隙度和 H₂S 含量成正比^[47]。这说明 H₂S 含量越高发生的溶蚀作用越强烈,普光是国内发现的 H₂S 含量最高的气藏,这也是普光发育国内最好碳酸盐岩储层的一个重要原因,这与 TSR 有密切关系,而且模拟实验也证实了这一点^[45]。

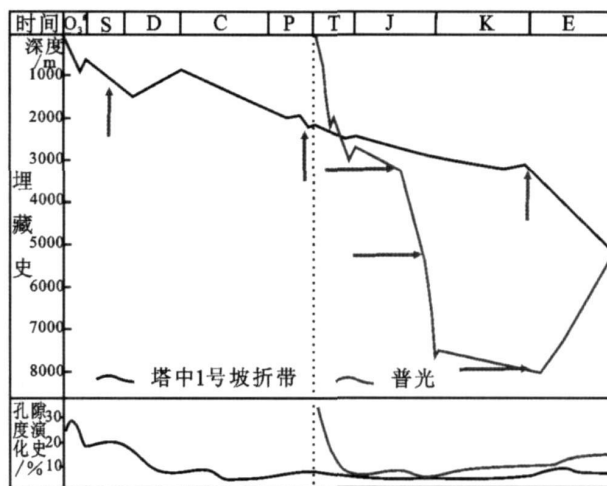


图 9 普光长兴—飞仙关组和塔中良里塔格组的埋藏史和孔隙度演化曲线

Fig 9 The burial history and porosity evolution of Changxing-Feixianguan Formation in Puguang area and Lianglitage Formation in Tazhong area

普光地区有利的岩性组合和超深埋藏使 TSR 的发生成为可能^[52~54],飞仙关组鲕粒滩储层中夹杂多套薄层膏岩,这些膏岩层为地层水提供了充足的 SO₄²⁻,深埋藏储层的温度在早侏罗世末期就超过 140°C,最深埋藏阶段储层温度达到 240°C 左右,保证了储层温度长期在 TSR 发生的温度范围之内。早期烃类大量充注形成的古油藏,为 TSR 提供了充足的烃源,这三者是 TSR 发生必不可少的因素。由于 TSR 的发生并且持续时间很长,使普光的古油藏发生充分裂解,演化成现今干燥系数比较高的天然气,同

时气藏中 H_2S 和 CO_2 的含量也非常高^[55, 56], 这一过程对储层影响巨大, 在储层中发生强烈的化学反应和岩石溶蚀作用, 其溶蚀程度远胜于有机酸类的溶蚀。而塔中地区 TSR 发生程度较弱, 硫化氢含量也较低, 溶蚀作用远不如普光地区, 因此其溶蚀孔隙不很发育。

塔中 I 号带凝析气藏的烃类充注也包括三期(图 9), 前两期烃类充注主要是来自寒武系和奥陶系烃源岩生成的油, 第三期充注主要是大量来自寒武系一下奥陶统烃源岩的气和少量来自中上奥陶统的油。对该区储层带来的影响主要是多期有机酸等酸性流体溶蚀产生溶蚀孔隙和晚期大量微裂缝的产生。从目前储集空间的分布来看, 前两期烃类充注对储层的影响不大, 喜山期构造运动和伴随的大规模气侵产生的大量微裂缝和相关溶蚀孔隙是储层发育的关键因素。塔中第三期烃类充注(主要是气), 对塔中储层具有重要的影响。镜下可以看到第三期裂缝大量存在, 但是都比较微小, 如果最后一期烃类充注的不是气而是油, 烃类则较难进入到储层(因储层较差)。正是因为气体进入了大量分布的微裂缝, 才使这些微裂缝在后期的埋深过程中不被压死, 保持了塔中良里塔格组储层的渗透性, 因此第三期气侵对微裂缝的保持起到了重要作用, 也对塔中储层的发育具有重要的影响。

综上所述, 烃类充注和烃类演化对这两个地区储层的发育都起到了关键性的建设作用, 虽然作用过程千差万别, 但最终结果都增加了储层的次生孔隙, 并使次生孔隙得到了有效保存, 是这两个地区储层发育的最重要的控制因素。普光地区的 TSR 产生了强烈的溶蚀作用, 形成了普光良好的溶蚀孔洞型储层, 这也是深部孔洞型储层发育的一种重要方式; 塔中 I 号带的气侵作用, 使晚期的微裂缝得到良好的保持, 形成了裂缝—孔隙型储层, 这也是深部裂缝—孔隙型储层发育的一种方式。

6 埋藏演化的差异及其对储层性能的影响

对于目前埋藏深度近似的储层, 其埋藏史的演化对储层的发育存在着一定的影响。不同的埋藏史对压实、压溶成岩作用的影响具有较大差异。快速埋藏过程使压实、压溶作用不充分, 成岩作用相对较弱, 有利于原生和早期溶蚀孔隙的保存; 长期的缓慢埋藏过程使压实、压溶和胶结等成岩作用得以充分发生,

对早期产生的孔隙特别是基质孔隙产生了毁灭性的破坏^[2, 12]。

普光地区长兴—飞仙关组的礁滩体储层和塔中 I 号带良里塔格组的礁滩体储层虽然目前埋藏深度近似, 但其埋藏史却存在较大差异(图 9)。普光地区长兴组—飞仙关组沉积后直到侏罗纪末大多处于快速埋藏过程, 白垩纪稳定埋藏阶段后, 开始进入快速抬升过程。塔中 I 号带地区良里塔格组沉积后一直到白垩纪末期一直处于缓慢埋藏阶段, 白垩纪以后开始进入快速深埋阶段。

从普光和塔中地区钻井取心和镜下照片来看, 这两个地区的压实成岩过程具有明显的区别, 普光岩心和镜下照片中缝合线都比较少见, 基质孔隙比较发育; 塔中的岩心和镜下都可看到广泛发育的缝合线, 其中不乏较宽的缝合线, 基质比较密。这说明塔中地区的压实、压溶成岩作用比较强烈, 而普光地区压实、压溶成岩作用较弱。因此快速埋藏有利于孔隙的保存, 对储层的发育具有促进作用。

从普光和塔中 I 号带的埋藏史对比图中还可以看出, 普光白垩纪后是快速抬升过程, 而塔中 I 号带刚好相反是快速深埋过程, 这也对这两个地区的储层产生了重要影响。对碳酸盐岩储层来说, 抬升运动使已有孔隙发生膨胀, 进一步改善了储层物性; 快速埋藏运动, 倾向于对储层产生压实和压裂作用, 对已有的孔隙有一定的破坏作用。

综上所述, 对深部碳酸盐岩储层来讲, 前期快速埋藏和晚期快速抬升对储层的发育具有促进作用, 前期缓慢埋藏和晚期快速深埋不利于储层孔隙的发育和保持。

7 结论

四川盆地普光长兴组—飞仙关组储层和塔中 I 号带奥陶系良里塔格组台缘礁滩体储层分布范围广, 储层性质好, 探明油气储量大, 是目前我国发现的最好的深部优质碳酸盐岩储层。但是二者存在较大差异, 川东北礁滩体储层比塔中礁滩体储层厚度大, 孔隙性好, 前者岩性为白云岩, 储集空间主要以埋藏溶蚀孔隙为主, 而塔中则为灰岩, 储集空间主要以裂缝沟通的溶蚀孔隙为主。

研究发现二者间的差异主要受以下因素的控制: 沉积水体能量与沉积环境、白云岩化作用、表生溶蚀作用、烃类和酸性流体—岩石相互作用等。

高能沉积环境水体能量的高低控制了生物礁填

隙物的粒度和砂屑滩沉积物的粒度,对储层孔、渗性能具有决定性的控制作用;沉积时的水体能量越高越有利于孔洞型储层的发育;

白云岩化作用对深部优质储层的形成具有重要的意义,白云化过程改善了储层的孔、渗性能;膏岩的发育对白云岩化具有重要的控制作用。

烃类的充注时间、储层的埋藏演化、以及烃类流体与岩石的相互作用等对次生孔、洞、缝的形成与保存具有明显的控制作用。快速深埋和烃类早期充注,在一定程度上抑制成岩作用的发生,有利于原生孔隙的保存。

由于川东北礁滩体发育时期海平面升降过程相对稳定,水体能量较高,有利于发育厚层礁滩体;白云岩化程度较高,重结晶现象比较普遍;油气充注较早且储层早期快速深埋,后期又处于抬升状态,利于次生孔隙的形成和保持,因此川东北深部礁滩体的储集性能明显优于塔中奥陶系深部礁滩体储层。

致谢 感谢中国石化南方油气勘探开发公司马永生教授、郭彤楼教授,中国石油塔里木油田勘探开发研究院杨海军院长、顾乔元所长、韩剑发主任等的帮助和支持,在此,向他们深表谢意!

参考文献 (References)

- 李晋超,马永生,张大江,等.中国海相油气勘探若干重大科学问题[J].石油勘探与开发,1998,25(5):1-2 [Li Jinchao, Ma Yongsheng, Zhang Dajiang, *et al*. Scientific problems of petroleum exploration on marine facies sedimentary basins in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(5): 1-2]
- 顾家裕,贾进华,方辉.塔里木盆地储层特征与高孔隙度、高渗透率储层成因[J].科学通报,2002,47(增刊):9-15 [Gu Jiayu, Jia Jinhua, Fang Hui. The genesis of high porosity high permeability reservoirs and its characteristics in Tarim Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(suppl): 9-15]
- 戴金星,秦胜飞,陶士振,等.中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J].天然气地球科学,2005,16(2):127-142 [Dai Jinxing, Qin Shengfei, Tao Shizhen, *et al*. Developing trends of natural gas industry and the significant progress on natural gas geological theories in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 127-142]
- 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]
- 金之钧.中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J].地学前缘,2005,12(3):15-22 [Jin Zhijun. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins [J]. *Earth Science Frontier*, 2005, 12(3): 15-22]
- 朱光有,赵文智,梁英波,等.中国海相沉积盆地富气机理与天然气的成因探讨[J].科学通报,2007,52(增刊1):46-57 [Zhu Guangyou, Zhao Wenzhi, Liang Yingbo, *et al*. Discussion of gas enrichment mechanism and natural gas origin in marine sedimentary basin, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(Suppl 1): 46-57]
- 赵雪凤,朱光有,刘钦甫,等.深部海相碳酸盐岩储层孔隙发育主控因素研究[J].天然气地球科学,2007,8(4):514-521 [Zhao Xuefeng, Zhu Guangyou, Liu Qinfu. Main control factors of pore development in deep marine carbonate reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 8(4): 514-521]
- 张水昌,梁狄刚,朱光有,等.中国海相油气形成的地质基础[J].科学通报,2007,52(增刊1):19-31 [Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhu Guangyou, *et al*. Fundamental geological elements for the occurrence of Chinese marine oil and gas accumulation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(Suppl 1): 19-31]
- 梁狄刚,陈建平.中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J].石油勘探与开发,2005,4(32):8-14 [Liang Digang, Chen Jianping. Oil source correlations for high and overmatured marine source rocks in South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 4(32): 8-14]
- 马永生.四川盆地普光超大型气田的形成机制[J].石油学报,2007,28(2):9-14 [Ma Yongsheng. Generation mechanism of Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2007, 28(2): 9-14]
- Barker C, Takach N E. Prediction of natural gas composition in ultra-deep sandstone reservoir [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(12): 1859-1873
- 赵文智,王红军,王兆云,等.天然气地质基础研究中的几项新进展及其勘探意义[J].自然科学进展,2006,4(16):393-399 [Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, Wang Zhaoyun, *et al*. New research development of natural gas geology and significance to exploration [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 4(16): 393-399]
- 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拾零[J].沉积学报,2007,12(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, 12(6): 831-839]
- 朱如凯,郭宏莉,高志勇,等.中国海相储层分布特征与形成主控因素[J].科学通报,2007,52(增刊1):40-45 [Zhu Rukai, Guo Hongli, Gao Zhiyong, *et al*. Main controlling on the formation of middle and large marine carbonate stratigraphic fields [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(Suppl 1): 40-45]
- 马永生.四川盆地普光大气田的发现与勘探[J].海相油气地质,2006,11(2):35-39 [Ma Yongsheng. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 6): Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2006, 11(2): 35-39]
- 周新源,王招明,杨海军,等.塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现[J].海相油气地质,2006,11(1):45-51 [Zhou Xinyuan, Wang Zhaoming, Yang Haijun, *et al*. Cases of discovery and exploration

- tion of marine fields in China (Part 5): Tazhong Ordovician Condensate Field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology 2006, 11(1): 45-51]
- 17 杨海军, 刘胜, 李宇平, 等. 塔中地区中—上奥陶统碳酸盐岩储集层特征分析 [J]. 海相油气地质, 2000, 5(1-2): 73-83 [Yang Haijun, Liu Sheng, Li Yuying *et al*. Reservoir characteristics of middle-upper Ordovician carbonate reservoir in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(1-2): 73-83]
 - 18 孙玉善, 韩杰, 张丽娟, 等. 塔里木盆地塔中地区上奥陶统礁滩体基质次生孔隙成因——以塔中 62 井区为例 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 541-547 [Sun Yushan, Han Jie, Zhang Lijuan *et al*. Genesis of reef flat body matrix secondary pores in Upper Ordovician in central area of Tarim Basin: A case from Well 62 field of Central Tarim [J]. Petroleum Exploration and Development 2007, 34(5): 541-547]
 - 19 马永生, 牟传龙, 郭旭升, 等. 四川盆地东北部部长期沉积特征与沉积格局 [J]. 地质论评, 2006, 52(1): 25-29 [Ma Yongsheng, Mu Chuanlong, Guo Xunsheng *et al*. Characteristic and framework of the Changxing sedimentation in the Northeastern Sichuan Basin [J]. Geology Review, 2006, 52(1): 25-29]
 - 20 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 [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Guowei. Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica 2005, 79(6): 858-865]
 - 21 王振宇, 李宇平, 陈景山, 等. 塔中地区中晚奥陶世碳酸盐岩陆棚边缘大气成岩透镜体的发育特征 [J]. 地质科学, 2002, 37(增刊): 152-160 [Wang Zhenyu, Li Yuying, Chen Jingshan *et al*. Characters of atmospheric diagenetic lens along Middle-Late Ordovician carbonate shelf/marine in central Tarim area [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(Suppl): 152-160]
 - 22 陈景山, 王振宇. 塔中地区中上奥陶统台地镶边体系分析 [J]. 古地理学报, 1999, 1(2): 8-17 [Chen Jingshan, Wang Zhenyu. Study of the Middle and Upper Ordovician carbonate platform system in the Tazhong area, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(2): 8-17]
 - 23 王振宇, 严威, 张云峰, 等. 塔中上奥陶统台缘礁滩体储层成岩作用及孔隙演化 [J]. 新疆地质, 2007, 25(3): 287-290 [Wang Zhenyu, Yan Wei, Zhang Yunfeng *et al*. Diagenesis and porosity evolution of upper Ordovician carbonate platform margin reefs and grain banks reservoir in Tazhong area [J]. Xinjiang Geology, 2007, 25(3): 287-290]
 - 24 王志兴, 张帆, 马青, 等. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化 [J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 249-254 [Wang Zhixing, Zhang Fan, Ma Qing *et al*. The characteristics of reef and bank and the fluctuation of sea-level in Feixianguan Period of Late Permian-Early Triassic East Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 249-254]
 - 25 高志勇, 张水昌, 朱如凯, 等. 塔中地区里里塔格组海平面变化与烃源岩的非均质性 [J]. 石油学报, 2007, 28(5): 45-50 [Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Zhu Rukai *et al*. Sea-level change and heterogeneity of source rocks of Langliage Formation in the central Tarim area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 28(5): 45-50]
 - 26 Sun S Q. Dolomite reservoirs porosity evolution and reservoir characteristics [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2) : 186-204
 - 27 Wendte J C. Evolution of porosity along a migrating dolomite front Devonian Swan Hills Formation west-central Alberta [C]. Canadian Society of Petroleum Geologists Annual Meeting, Calgary, 2002: 343
 - 28 Wierzbicki R, Dravis J J, A+Asm I *et al*. Burial dolomitization and dissolution of Upper Jurassic A+Benaki platform carbonates Deep Panuke reservoir Nova Scotia, Canada [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1843-1861
 - 29 Dravis J J. Burial dissolution in limestones and dolomites—Criteria for recognition and discussion of controls: A case study approach. American Association of Petroleum Geologists-Canadian Society of Petroleum Geologists Short Course on Subsurface Dissolution Porosity in Carbonates, Calgary, Canada, 1992: 171
 - 30 Dravis J J, Muir I D. Dolomite reservoirs created by burial dolomite dissolution—the Keg River case study—comet platform area, Rainbow Basin, NW Alberta [C] // Packard J, Davies G, eds. Dolomites: the Spectrum: Mechanisms, Models. Reservoir Development. Canadian Society of Petroleum Geology Core Conference, CD volume, Calgary, 2004: 58
 - 31 Chellie S T, Mazzullo S J, Bischoff W D. Dolomitization of Holocene shallow-marine deposits mediated by sulfate reduction and methane-genesis in normal salinity seawater, northern Belize [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(3): 649-663
 - 32 Wanen J. Dolomite occurrence, evolution and economically important association [J]. Earth Science Reviews, 2000, 52: 1-81
 - 33 邵龙义, 何红, 彭苏萍, 等. 塔里木盆地巴楚隆起寒武系及奥陶系白云岩类型及形成机理 [J]. 古地理学报, 2002, 4(2): 19-30 [Shao Longyi, He Hong, Peng Shuping *et al*. Types and origin of dolomites of the Cambrian and Ordovician of Bachu uplift area in Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(2): 19-30]
 - 34 黄思静, 海内 Q in, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量 & 锶同位素组成与白云岩化流体 [J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2123-2132 [Huang Sijing, Hainuo Q in, Pei Changrong *et al*. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic East Sichuan of China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2123-2132]
 - 35 刘忠宝, 孙华, 于柄松, 等. 裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28(3): 289-291 [Liu Zhongbao, Sun Hua, Yu Bingsong *et al*. The control of fractures on karst in Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong Area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 289-291]
 - 36 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]

- 37 Heydari E. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Snackover Formation [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(11): 1779-1797
- 38 Heydari E, Moore C H. Burial diagenesis and thermochemical sulfate reduction, Snackover Formation Southeastern Mississippi Salt Basin [J]. Geology, 1989, 17: 1080-1084
- 39 Moore C H, Heydari E. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H₂S accumulation, Upper Jurassic Snackover Formation, Black Creek Field, Mississippi [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 26-45
- 40 张水昌, 朱光有, 梁英波. 四川盆地普光大型气田 H₂S 及优质储层形成机理探讨 [J]. 地质评论, 2006, 52(2): 230-235 [Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Liang Yingbo, et al. Probe into formation mechanism of H₂S and high-quality reservoirs of Puguang Large Gas Field in Sichuan Basin: the new cognition after reading Professor Mas paper "Discovery of the Large-scale Gas Field in the Sichuan Basin and Its Enlightenment for Hydrocarbon Prospecting" [J]. Geology Review, 2006, 52(2): 46-50]
- 41 Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic setting—old and new insight [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140: 143-175
- 42 Worden R H, Smalley P C. H₂S-producing in deep carbonate gas reservoirs, Khuff Formation Abu Dhabi [J]. Chemical Geology, 1996, 133: 157-171.
- 43 黄思静, 海明, 胡作维, 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, Haiming, Hu Zuwei, et al. Influence of sulfate reduction on diagenesis of Feixianguan carbonate in Triassic, NE Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 815-824]
- 44 朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 中国含硫化氢天然气研究及勘探前景 [J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 1-4 [Zhu Guangyou, Dai Jinxing, Zhang Shuichang, et al. Research on sour gas in China and its exploration prospects [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 1-4]
- 45 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 1): 136-141 [Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhu Guangyou, et al. Simulated experiment evidences of the corrosion and reform actions of H₂S to carbonate reservoirs: An example of Feixianguan Formation, east Sichuan [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(suppl 1): 136-141]
- 46 朱光有, 张水昌, 李剑, 等. 中国高含硫化氢天然气田的特征及其分布 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 18-21 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Li Jian, et al. Formation and distribution of hydrogen sulfide bearing gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 18-21]
- 47 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR (H₂S) 对石油天然气工业的积极性研究——H₂S 的形成过程促进储层次生孔隙的发育 [J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 141-149 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Effectiveness of thermochemical sulfate reduction on oil and gas industry: A H₂S formation accelerating development of the secondary pores in reservoirs [J]. Earth Science Frontier, 2006, 13(3): 141-149]
- 48 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地威远大气田硫化氢的成因及其证据 [J]. 科学通报, 2006, 51(3): 2780-2788 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Formation and evidence of hydrogen sulfide bearing gas in Weiyuan gas field, Sichuan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(3): 2780-2788]
- 49 郭光辉, 李建军, 卢玉红. 塔中 1 号断裂带奥陶系灰岩裂缝特征探讨 [J]. 石油学报, 1999, 20(4): 19-23 [Wu Guanghui, Li Jianjun, Lu Yuhong. Classification of fractures in O₂₊₃ carbonate reservoirs in Tazhong # Faulted Zone [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 1999, 20(4): 19-23]
- 50 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及其气源 [J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 234-248 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan basin and its source [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-248]
- 51 张水昌, 朱光有, 陈建平, 等. 四川盆地川东北飞仙关组高含硫化氢大型气田群气源探讨 [J]. 科学通报, 2007, 52(增刊): 86-94 [Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, Chen Jianping, et al. A discussion on gas sources of the Feixianguan Formation H₂S-rich giant gas fields in the northeastern Sichuan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Suppl 1): 86-94]
- 52 朱光有, 张水昌, 梁英波. 川东北飞仙关组 H₂S 的分布与古环境的关系研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 34-39 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Relationship between paleoenvironment and the distribution of H₂S in Feixianguan Formation, NE Sichuan Province [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 34-39]
- 53 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北飞仙关组高含 H₂S 气藏特征与 TSR 对烃类的消耗作用 [J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 300-308 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Characteristics of gas reservoirs with high content of H₂S in the Northeastern Sichuan Basin and the consumption of hydrocarbons due to TSR [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 79-85]
- 54 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 硫酸盐热化学还原反应对烃类的蚀变作用 [J]. 石油学报, 2005, 26(5): 48-52 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Alteration of the thermochemical sulfate reduction to hydrocarbons [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 48-52]
- 55 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地 H₂S 的硫同位素组成及其成因探讨 [J]. 地球化学, 2006, 35(3): 432-442 [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Stable sulfur isotopic composition of hydrogen sulfide and its genesis in Sichuan Basin [J]. Geochimica, 2006, 35(3): 432-442]
- 56 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H₂S 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 Yingbo, et al. Isotopic evidence of TSR origin for natural gas bearing high H₂S contents within the Feixianguan Formation of the Northeastern Sichuan Basin [J]. Science in China Series D, 2005, 35(11): 1037-1046]

Comparison of Deeply Buried and High-Quality Reef-Bank Facies Reservoirs of Puguang Gas Field in the Northeast of Sichuan Basin with Tazhong Gas Fields of Tarim Basin

ZHAO Xue-feng^{1,2} ZHU Guang-you¹ ZHANG Shu-chang¹ LIU Qi-fu²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083;

2 China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract In recent years, deeply buried and high quality reefbank facies reservoirs have been discovered in the Changxing and Fexianguan Formation in the northeast of Sichuan Basin and the Linglitage Formation of Tazhong area in the Tarim Basin has brought the hope for the oil-gas exploration in deep marine facies carbonate strata. Although this reef beach body distribution range is broad, the reservoir quality is good, the proving oil gas reserves are big, but these two basins reef beach body reservoir actually has the big difference. The reservoir thickness of the reefbank facies reservoir in the northeast of Sichuan Basin is bigger, the porosity and permeability is better than the reservoir of Tazhong, and the lithologic character of the former is dolomite, the latter is limestone. The comparison research of the two areas discovered that the difference is controlled in the following factors. The high energy sedimentary environment and eustatic sea level change have the decisive control on the thickness and poroperm capability of reservoir; the gypsum can affect the dolomite occurrence to a certain extent, improve the poroperm capability of reservoir; the hydrocarbon charge time, the reservoir burial evolution, as well as hydrocarbon-fluid-rock interaction and so on have obvious control on the formation and preservation of the secondary pore, hole and fracture. Because in the northeast of Sichuan Basin when the reefbank body is growing, the eustatic sea level change is comparatively steady and the water energy is very high, are advantages to grow thick and clean reef-flat body; dolomite is more, recrystallization is common; hydrocarbon is early charge, the reservoir fast bury deeply at the front and in uplift at last, these are advantages to grow the second porosity, so the storage quality of reefbank reservoir in the northeast of Sichuan Basin is better than Tazhong area.

Key words deeply buried and high-quality reservoir; reefbank reservoir; dolomite; interaction of fluid with rock; Puguang; Tazhong