

## 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

张 兵<sup>1</sup>, 郑荣才<sup>1</sup>, 文华国<sup>1</sup>, 胡忠贵<sup>1</sup>, 罗爱军<sup>2</sup>, 文其兵<sup>3</sup>, 朱宜新<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中国石油西南油气田分公司川东开发公司, 重庆 400021;

3. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400021)

**摘要:** 川东上二叠统长兴组生物礁滩储集体位于开江—梁平台内海槽东段。研究区发育有台内海槽(深水盆地)、台地前缘缓斜坡、台地边缘生物礁滩和开阔台地四个相带, 其中台地边缘生物礁滩相地层为最重要的油气勘探层段。长兴组储层岩性主要为礁滩相白云岩, 具有分布面积广和厚度较大的特点。综合利用地质、钻井、地震等资料, 并以岩芯观察描述、薄片鉴定和沉积相分析为依据, 建立了识别礁滩相储层的测井相和地震相模型。在地震相模型中, 确定地震剖面中波阻杂乱、中断和下拉的烟囱效应, 是寻找礁滩相储层和气藏的有效标志。在此基础上, 以建立礁滩体地质模型作为预测有利生物礁滩相带的地震反演约束条件, 结合地质资料预测的有利生物礁滩储集体及白云岩厚度分布图, 最终圈定出有利储层发育区和优选勘探目标区。

**关键词:** 开江—梁平台内海槽东段; 上二叠统长兴组; 生物礁滩; 测井相; 地震相; 下拉现象; 烟囱效应

中图分类号: P618.130.21

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2009)-02-0273-12

## Identification Criteria and Prediction of Reef and Shoal Facies Reservoirs of the Changxing Formation in the Eastern Kaijiang-Liangping Area Intraplatform Trough

ZHANG Bing<sup>1</sup>, ZHENG Rong-cai<sup>1</sup>, WEN Hua-guo<sup>1</sup>, HU Zhong-gui<sup>1</sup>,

LUO Ai-Jun<sup>2</sup>, WEN Qi-bing<sup>3</sup>, ZHU Yi-xin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Chuandong Exploitation Department, Southwest Oil and Gas Company, CNPC, Chongqing 400021, China;

3. Chongqing Gas Branch of Southwest Oil and Gas Company, CNPC, Chongqing 400021, China)

**Abstract:** The reef and shoal facies reservoir in Changxing Formation, Upper Permian, is located in Kaijiang - Liangping intraplatform trough. In the region of interest the intraplatform trough (deep water basin), platform slop, platform edge and open platform sedimentary facies are developed. The platform edge is the important layer for oil and gas exploration. The lithology of the reservoirs in Changxing Formation is mainly reef facies dolomites, shoal facies dolomites and crystal dolomites, and is characterized by huge distribution area and thick reservoirs. According to the analyses of core observation, thin sections and sedimentary facies and by using geology, bore wells and seismic data, the electrofacies and seismic facies models are established to recognize the reef and shoal facies reservoirs. The chimney effect which is used to confirm the mess of wave resistance, interception and pulldown in seismic cross section is an effective sign of looking for reef and shoal facies reservoirs enabled gas reservoirs. Based on it, reef and shoal geologic model acting to seismic inversion constraining condition of predicting favorable

收稿日期: 2008-10-27; 修回日期: 2008-12-16

基金项目: 西南油气田分公司科研项目(编号XNYQT-XNS02-2007-TS-5777)

作者简介: 张兵, 男, 1981年出生, 博士研究生, 石油地质学专业; E-mail: zb4819890@qq.com

reef and shoal facies zone, combined with the thickness distribution map of dolomites, the favorable area for reservoir evaluation is estimated.

**Key words:** Kaijiang-Liangping intraplate trough; Changxing Formation, Upper Permian; reef and shoal; logging facies pattern; seismic facies pattern; push down; chimney effect

四川盆地上二叠统长兴组礁、滩相、特别是海绵礁相地层的研究已有多年的历史(吴熙纯等, 1990; 王生海和强子同, 1992; 王一刚等, 1997, 1998; 范嘉松和吴亚生, 2002; 牟传龙等, 2004, 2005; 马永生等, 2005, 2006; 王瑞华等, 2006; 郑荣才等, 2007)。研究表明赋存在长兴组礁、滩相地层中的油气藏具有环“开江—梁平台内海槽”分布特点(王一刚等, 1998; 马永生等, 2006; 郑荣才等, 2007)。近年来, 对该区上二叠统长兴组沉积相特征和储层研究成果非常丰富, 但由于受研究手段和认识的限制, 少有对长兴组礁、滩相储层识别标志及其预测专项研究。文中以前人研究成果为基础, 结合地表地质、钻井、地震等资料, 详细描述了礁、滩储集体沉积相储层特征, 探讨和预测了礁、滩相储层的展布规律, 为进一步勘探开发开江—梁平台内海槽东段长兴组礁、滩相天然气藏提供有价值的基础地质资料。

## 1 地质概况

研究区包括重庆市的万州市、开江县和川东达州市与宣汉县, 包含五百梯、大猫坪、高峰场、黄龙场等构造带, 面积近万平方公里(图1)。勘探开发资料和研究成果(王一刚等, 1998)表明, 该区广泛发育长兴组礁、滩相油。气藏的“开江—梁平台内海槽”形成于晚二叠世长兴组早期, 充填和消亡于早三叠世飞仙关组晚期, 其成因可能与峨嵋“地裂运动”和南秦岭勉略—紫阳洋盆三叉裂谷系的南支向南东方向扬子板块延伸的裂陷作用有关, 具有“坳拉槽”性质, 它不仅控制了长兴组礁、滩相地层的分布, 对飞仙关组鲕滩及其相关的油气藏分布也有明显控制作用(李国军等, 2007)。该海槽东段的川东—渝北地区, 发育有黄龙场、五百梯、大猫坪和高峰场等含气构造带, 各构造带均呈北东—南西向带状展布(图1), 区域上属于川东弧形褶皱

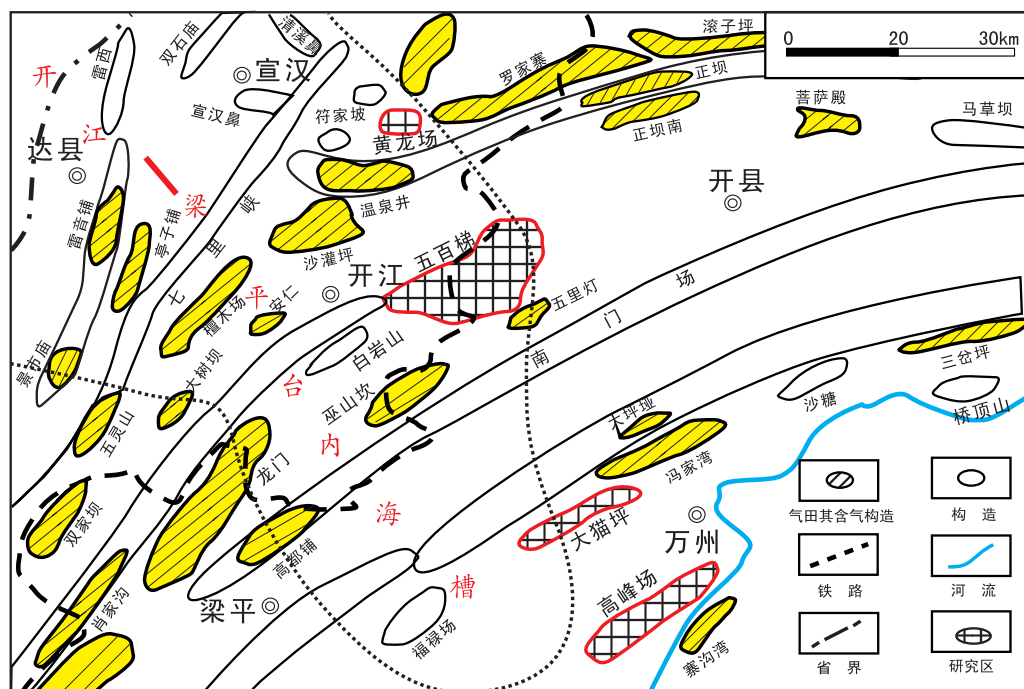


图1 研究区概况

Fig. 1 Sketch of the study area

构造带的东北段, 弧形褶皱带是后期叠加构造, 其空间展布与北西—南东向延伸的开江—梁平台内海槽的走向近于正交。构造叠加作用对环海槽东段分布的长兴组礁滩相油气藏具有极其重要的控制作用, 长兴组礁滩相带与弧形褶皱带相重叠的部位, 常是礁滩相油气藏的有利产出位置。

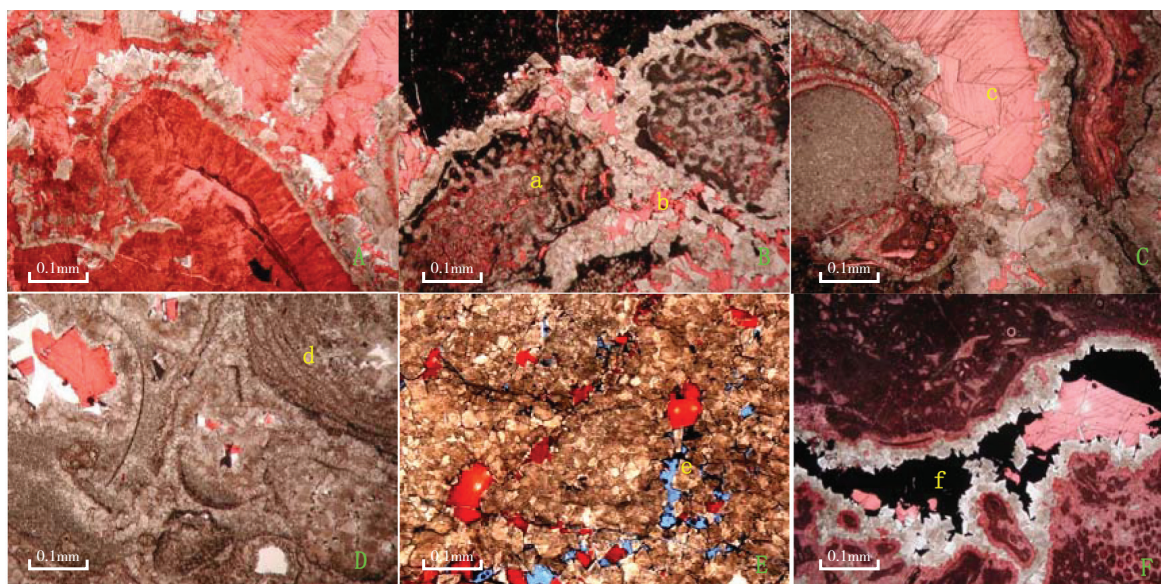
## 2 长兴组沉积相特征

开江—梁平台内海槽东段二叠统长兴组, 与下伏上二叠统龙潭组和上覆下三叠统飞仙关组都呈平行不整合接触。地表剖面测量、岩芯观察及薄片鉴定表明, 长兴组以灰岩为主, 其次为白云岩。其中灰岩可细分为泥—微晶灰岩、砂屑灰岩、生物屑灰岩及礁灰岩等; 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。

岩等, 储层主要为各类白云岩。根据众多剖面的沉积微相分析结果, 可确定长兴组碳酸盐岩的沉积相组合和演化特征符合里德的碳酸盐台地概念(转引姜在兴, 2003), 沉积相类型丰富, 可划分为台内海槽(盆地)、台地前缘缓斜坡、台地边缘生物礁和浅滩、开阔台地和局限台地等, 有利储层发育的相带主要为台地边缘生物礁、台地边缘浅滩相带, 由于篇幅有限, 以下仅讨论此二有利相带的主要特征。

### 2.1 台地边缘生物礁相

长兴组中上部台地边缘生物礁位于台地与盆地之间的过渡带上, 呈丘状和长垣状, 平面上沿开江—梁平台内海槽台地边缘成群成带分布, 与生物碎屑滩密切共生。造架生物主要为海绵(图2A, B, C), 含量>50%, 次为水螅类和藻类(图2D),



A. 亮晶海绵骨架礁白云质灰岩, 发育三个世代的等厚环边状栉壳状胶结物, 其中一代和三世代方解石被白云石交代, 对角线长0.8 mm (-), 天东021-3井, 4290.37 m; B. 微-粉晶海绵障积礁白云质灰岩, 骨架间栉壳状胶结物白云石化, 海绵骨架和骨架间被溶蚀, 形成众多骨架内(a)和骨架间溶孔(b), 铸体薄片, 对角线长度0.8 mm (-), 天东002-11井, 3886.03 m; C. 亮晶残余缠结骨架海绵礁云质灰岩, 栉壳结构白云石化, 中间充填方解石连晶(c), 对角线长度0.8 mm (-), 天东002-11井, 3875.05 m; D. 粉晶藻屑白云岩(d), 溶孔部分被沥青和方解石充填, 对角线长度0.8 mm (-), 天东002-11井, 3870.90 m; E. 亮晶生物屑白云岩, 溶蚀作用沿微裂缝发育, 形成网状连通的溶缝和溶孔(e), 部分溶孔被方解石充填, 对角线长0.8 mm (-), 天东10井, 3839.96 m; F. 泥-微晶海绵礁角砾灰岩, 粒间溶洞非常发育, 环边生长白云石晶簇、内被方解石和沥青(f)充填, 对角线长度0.8 mm (-), 天东53井, 4351.85 m

A. Calcsparite sponge framework reef dolomitic limestone, with three generations of isopachous cement and shell comb-like cement. The calcite of the first and the third generations was replaced by dolomite. Diagonal line 0.8 mm (-), well Tiandong 021-3, 4290.37 m; B. Microlite-crystal sponge bafflestone dolomitic limestone. The shell comb-like cement between skeletons was dolomitized. Sponge skeletons were corroded and many holes in skeletons (a) and inter-holes (b) were formed. Casting thin slice, diagonal line 0.8 mm (-), well Tiandong 002-11, 3886.03 m; C. Calcsparite entanglement sponge framework reef irreducible dolomitic limestone, pectinate structure and dolomitization, filled with calcite crystal (c), diagonal line 0.8 mm (-), well Tiandong 002-11, 3875.05 m; D. Crystal powder dolomitite (d). The dissolved pore partly filled with asphalt and calcite, diagonal line 0.8 mm (-), well Tiandong 002-11, 3870.90 m; E. Calcsparite bioclastic dolomitite. Corrosion occurred along the cracks, mesh-connected dissolution joints and pores were formed (e), dissolution porosity partly filled by calcite, diagonal line 0.8 mm (-), well Tiandong 10, 3839.96 m; F. Micrite-microlite sponge reef brecciola, with intergranular dissolution porosity developed, flanking built up dolomitite cluster, filled with asphalt and calcite (f), diagonal line 0.8 mm (-), well Tiandong 53, 4351.85 m

图2 长兴组台地边缘生物礁各种类型

Fig. 2 Various types of platform edge reef facies of Changxing Formation





内孔, 属于有利储层发育的微相。

### 2.1.3 礁前亚相

礁前亚相主要是指台地边缘生物礁面向海槽方向的沉积斜坡位置, 主要由礁灰岩被波浪破碎后形成的角砾在礁前快速堆积而成, 礁角砾径  $> 2\text{ mm}$  至数十厘米不等, 分选差, 磨圆较差, 次棱角—棱角状, 也见有少量次圆状角砾, 还往往含有大量的生物碎屑和灰泥。岩性为灰色块状礁角砾灰岩 (图2F) 夹生物屑灰岩和泥—微晶灰岩, 因灰泥含量高而不利储层发育。

### 2.1.4 礁后亚相

礁后指受到台地边缘生物障蔽保护的低能环境, 由潮坪和泻湖二微相组成, 岩性为泥晶灰岩、含生物屑藻屑灰岩, 残余生物屑粉—细晶白云岩, 有时含泥质。

## 2.2 台地边缘浅滩相

台地边缘浅滩位于浅水台地与台地前缘斜坡之间转折部位, 属于浅海水域, 海水循环良好, 氧气充足, 盐度正常, 但由于底质处于移动状态, 故不适于海洋生物栖息繁殖。该环境由于受到波浪和潮汐作用的共同控制, 水动力条件强, 颗粒组分以生物碎屑占绝对优势, 灰泥较少。研究区台地边缘浅滩由生物碎屑滩、滩间二微相组成 (图3)。

a. 生物碎屑滩微相: 台地边缘浅滩以此微相为主体, 岩性主要为灰色、灰褐色微—亮生物屑灰岩 (或白云岩), 局部重结晶为粉—细晶生物屑灰岩 (或白云岩)。该微相形成于较强水动力条件下, 生物屑分选较好, 灰泥含量较低, 保存有部分的粒间孔和生物体腔孔, 属于有利储层发育的微相。

b. 滩间微相: 为台地边缘浅滩之间相对较深水的潮下较低能沉积区, 沉积物粒度细, 岩性主要为深灰色生物屑微晶灰岩和泥—微晶灰岩, 局部为泥质灰岩。因泥质含量高而不利储层发育。

### 2.3 台地边缘礁、滩相沉积模式

近30年来, 碳酸盐台地研究不断深入。20世纪70年代主要是描述碳酸盐台地的沉积特征和识别, Ahr (1973) 据此首次区分出碳酸盐缓坡和陆架, Ginsburg and James (1974) 分别概括了碳酸盐镶边和开阔陆架的典型沉积特征, 威尔逊

(1975) 首次提出了台地边缘综合模式。到了80年代, 人们已关注到碳酸盐台地的演化过程, Kendall and Schlager (1981) 分析了礁体和台地对海平面变化的响应过程; Hine and Mullins (1983) 阐述了构造作用、沉积前古地形、海水能量和海平面变化对台地沉积剖面 and 沉积相带的控制作用; James and Mountjoy (1983) 强调了古代碳酸盐岩陆架坡折对造礁生物的依赖性; Read (1982, 1985) 根据各种碳酸盐台地沉积剖面、相带分布特征首次总结了它们之间的相互转化过程。90年代, 不同学者综合各种台地的沉积剖面、规模、与陆地是否连通及其演化特点, 提出了各自的划分方案。实际上, 通过进一步分析这些分类方案的依据可认识影响碳酸盐台地发育的因素, 从而为建立碳酸盐台地相模式及特征分析理论基础。

长兴初期, 开江—梁平台内海槽水体相对局限, 沉积环境不能满足生物礁的生长发育条件, 主要沉积一套缓斜坡泥晶灰岩和燧石结核灰岩, 而在五百梯以东为开阔台地沉积环境。长兴中、晚期, 随着海侵的进行, 沿海槽运动的洋流给缓坡边缘带来了大量的营养物质, 易形成生物礁。由于此时海平面的上升速度较早期低, 导致该带内生物礁的生长速度超过海平面上升与构造运动叠加而增加的可容空间, 当生物礁顶部生长于海平面附近时, 可形成向上变浅的海侵并进型生物礁; 在较大海平面上升过程中伴随有多个次一级的海平面升降旋回, 导致多个海侵并进型生物礁在垂向上叠加。根据上述长兴生物礁生长演化过程, 并结合研究区处于开江—梁平台内海槽内的特殊古地理格局, 建立了研究区沉积模式, 研究区主要发育开阔台地、台地边缘生物礁、台地边缘浅滩和前缘斜坡等沉积体系 (图4)。

## 3 台地边缘礁、滩相储层特征

根据区域地质资料和本区的钻井资料, 上二叠统长兴组的孔隙类型多而复杂。储层的发育受多种因素控制, 其中沉积相是制约储层岩性、储集性及其空间分布的主要控制因素之一。

### 3.1 储层空间特征

开江—梁平台内海槽东段长兴组储层主要发育于长兴组中上部的海绵礁白云岩、晶粒白

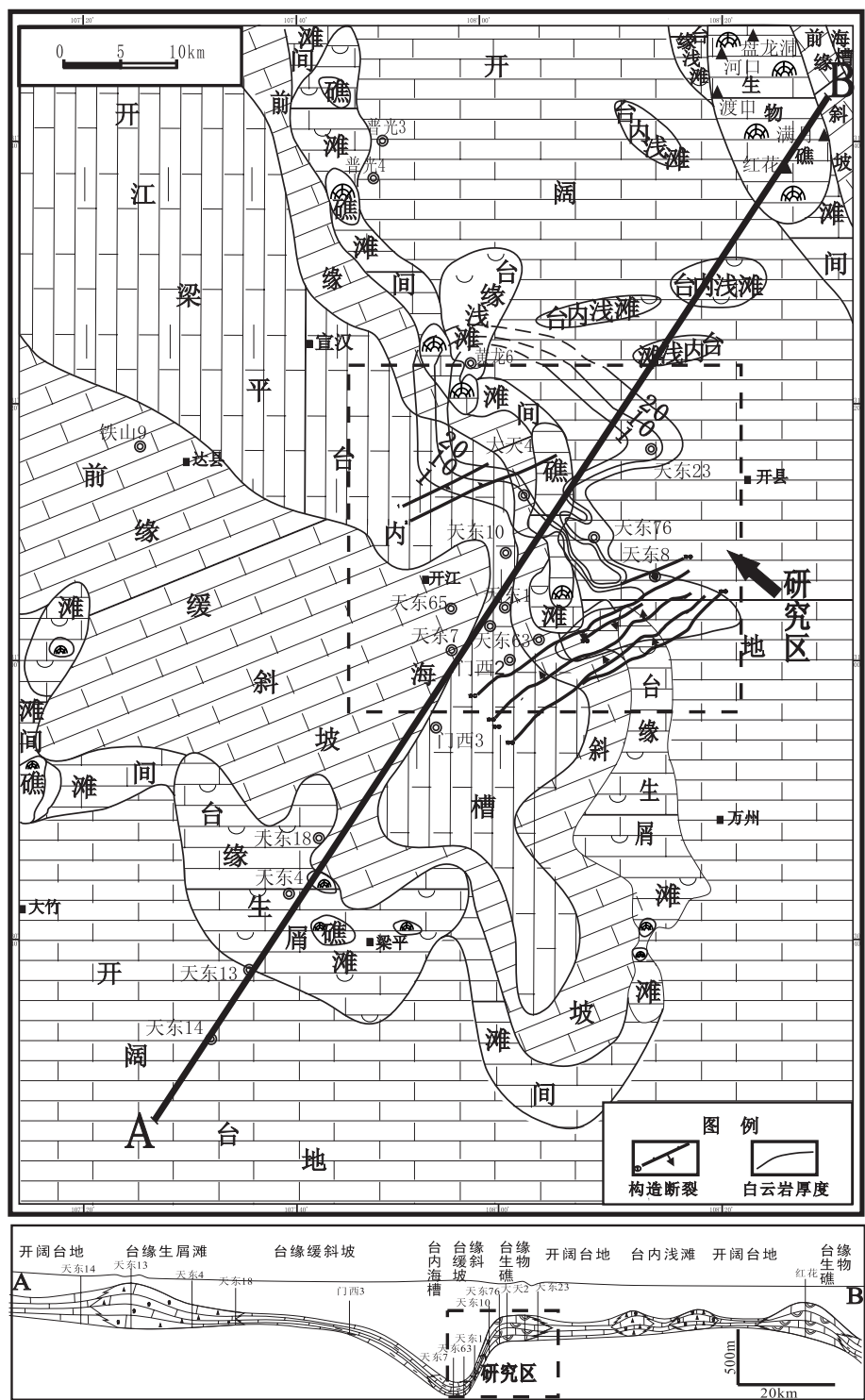


图4 开江—梁平台内海槽东段长兴组岩相古地理及沉积模式  
Fig. 4 Sedimentary model and lithofacies palaeogeography of Changxing Formation in the eastern Kaijiang-Liangping intraplate trough

云岩、含残余生物屑粉-细晶白云岩中。据各产气井碳酸盐岩储层的孔隙类型统计, 包括有粒间孔、晶间孔、晶间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和裂缝等, 部分白云岩的晶间孔叠加有强烈的溶蚀作

用, 晶间溶孔扩大形成溶斑孔和溶洞, 溶斑孔和溶洞部分被成岩矿物充填, 以方解石的充填作用最为强烈, 部分被天青石充填, 同时也见有残留孔和空斑孔。从各种孔隙类型统计中反映出有效



的储集空间主要是晶间孔和晶间溶孔, 其次为超大溶孔和粒内容孔, 而未充填的裂溶缝为有效的运移通道。根据孔—缝组合关系, 研究区长兴组大多数储层属于以次生孔隙为主的裂缝—孔隙型储层。

### 3.2 沉积环境与储集性

孔隙度是储层储集性评价的重要参数之一。根据川东地区长兴组亚相、微相与孔隙度关系统计结果, 沉积相与储层关系极为明显, 最好的储集层段位于生物礁滩相中。孔隙度以礁坪、骨架礁和缠结骨架礁为较高, 为有利储层发育的微相, 其余依次为生屑滩和浅水缓斜坡以及潮下静水泥, 属相对有利储层发育的微相类型, 而大部分潮坪、泻湖、障积礁以及塌积角砾等微相孔隙度普遍较低, 一般不利于储层发育。渗透率以塌积角砾、骨架礁和缠结骨架礁微相为相对较高, 其次为浅水缓坡、潮坪、障积礁和生屑滩微相, 而开阔台地潮下和泻湖微相的渗透率很低或特低, 为特低渗储层或无效储层(表1)。

表1 开江—梁平台内海槽东段地区长兴组不同沉积微相孔、渗物性特征统计

Table1 Statistics of sedimentary facies physical properties of the Changxing Formation reservoir in the study area

微相类型	样品数	孔隙度(%)		渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	
		范围	均值	范围	均值
骨架礁	538	0.38 ~ 6.75	3.24	0.01 ~ 1313	10.35
缠结骨架礁	227	0.20 ~ 10	3.1	0.01 ~ 679	9.38
障积礁	110	0.39 ~ 10.16	1.98	0.01 ~ 70.51	3.72
礁前塌积	33	0.1 ~ 12.19	2.12	0.01 ~ 156.2	2.35
生屑滩	671	0.1 ~ 12.19	2.12	0.01 ~ 156.2	2.35
缓斜坡	353	0.01 ~ 13.48	2.30	0.01 ~ 168.7	4.88
开阔台地	56	0.66 ~ 5.19	1.10	< 0.01	< 0.01
泻湖	54	0.64 ~ 4.61	1.95	0.01 ~ 32.6	3.75
潮坪	28	0.64 ~ 4.61	1.95	0.01 ~ 32.6	3.75

### 3.3 岩石类型与储集性

在同一沉积环境中不同岩石类型的孔隙度、渗透率具有不同的特征。如灰岩孔隙度分布在0.1%~11.27%之间, 平均值为1.41%, 以0.01%~2%样品居多, 占全部灰岩样品的87.5%, 样品中孔隙度大于5%的样品仅为0.33%; 白云岩在生物礁滩相中所占比例最高, 孔隙度分布在0.01%~20.26%, 平均值为3.71%, 以1%~5%样品居

多, 占全部白云岩样品的74.7%, 孔隙度大于5%的样品占20.7%, 孔隙度明显高于灰岩。不同结构类型的白云岩渗透率变化也很大, 为(0.01~679)  $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 其中以原始结构消失的台缘礁滩相的粉—细晶白云岩渗透率较高, 平均值为 $4.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 次为具残余结构的各类海绵礁白云岩, 平均值为 $1.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 生物屑白云岩相对较差, 平均值为 $0.905 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 而具泥—微晶结构的准同生白云岩渗透率 $< 0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。白云岩是储层发育的主要岩性。储集空间包括有礁白云岩中残留的海绵体腔孔, 生物骨架孔和广泛发育的粒间孔、晶间孔和各类相关的溶孔、铸模孔、溶洞和裂缝, 以各类白云岩中的晶间孔、晶间溶孔、铸模孔和溶洞等次生孔隙为主, 部分孔、洞被炭化沥青充填。

### 3.4 礁、滩相沉积与储层分布的关系

通过测井解释结果和试油气资料, 对每口单井的储层发育部位进行标定, 可确定储层主要发育于礁、滩相地层的中、上部, 以礁白云岩最有利储层发育。结合连井沉积相对比剖面, 做出储层—沉积相综合对比剖面(图5)。由图5可以看出, 天东002-11井和天东67井储层相对较发育, 储层主要位于长兴组中、上部台地边缘生物礁和浅滩相的白云岩中, 储层纵向连续性差, 层较薄; 天东71井由于台地边缘生物礁和浅滩相白云岩厚度较薄, 其储层厚度也相对较薄。储层大部分发育于台地边缘生物礁和浅滩组合的岩隆带核心部位, 也有少量储层发育于前缘斜坡和开阔台地相的灰岩中(天东52和天东002-11井), 但其厚度相对较薄, 物性一般都很差。

## 4 生物礁滩地球物理特征和预测

### 4.1 礁滩相储层测井响应模式

长兴组生物礁储层在测井曲线上反映为明显的质纯(低伽玛值), 高白云化(密度增大或解释白云石含量高)、高孔隙度、裂缝不发育, 在块状高阻背景下的中等电阻率异常等特征。在单井测井资料齐全(有岩性—孔隙度测井系列和电阻率系列)的情况下, 可划分出礁组合及其中的储渗层段。

#### 4.1.1 礁、滩相地层测井识别

对岩性与电性分析表明, 自然伽玛最能反映

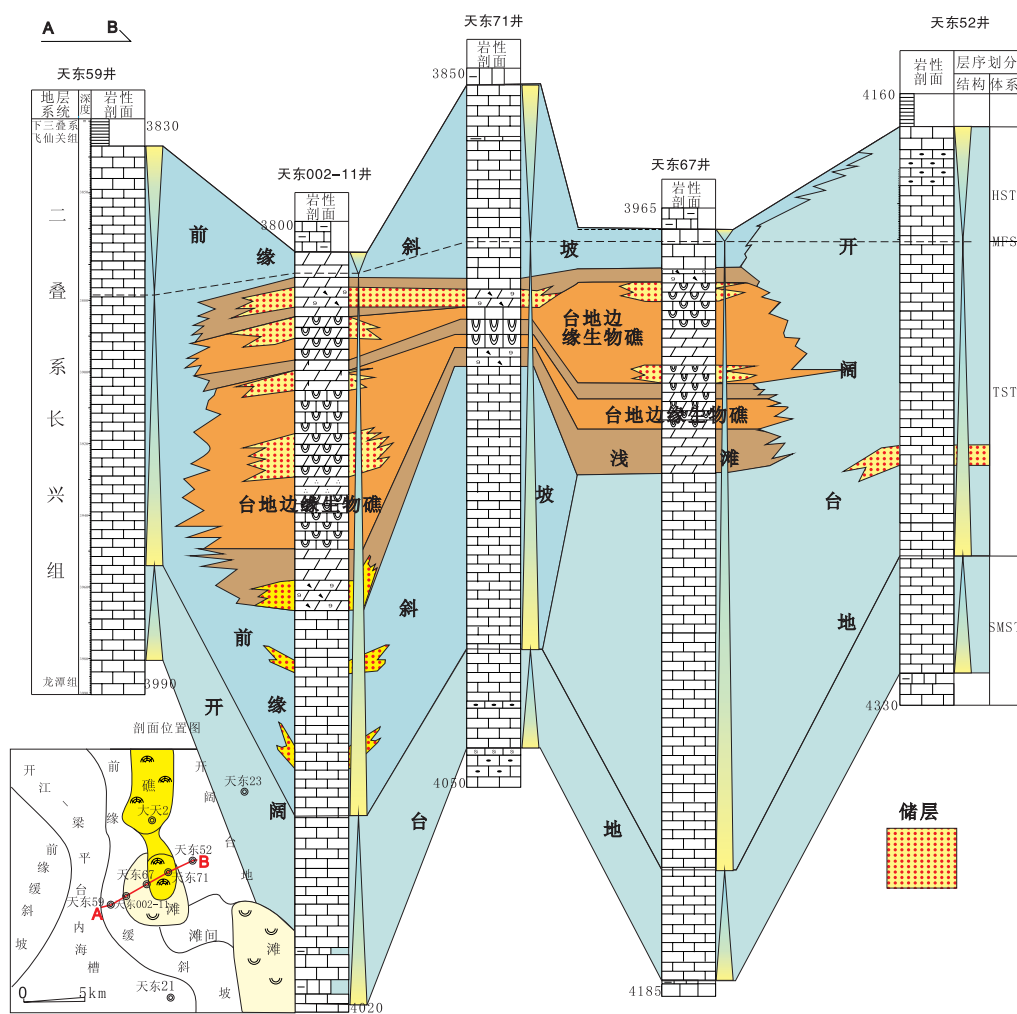


图5 开江梁平台内海槽东段长兴组储层分布与礁、滩相沉积关系  
Fig. 5 The relation of reservoir distribution with reef distribution with shoal facies of Changxing Formation in the eastern Kaijiang-Liangping intraplate trough

各微相特征，开江-梁平台内海槽东段长兴组礁相地层自然伽玛极低，与滨里海盆地东缘生物礁相似（蒋晓光等，2005），一般分布在5~17 API之间，平均为10.61 API；滩相介于5~30 API，平均22.51 API，此外，对非礁段灰岩也进行了统计（表2）。

表2 非礁段灰岩测井特征  
Table 2 The logging characteristics of non-reef limestone well

岩性	自然伽马 (脉冲)	声波时差 (微秒/英尺)	深侧向 (Ω·m)	浅侧向 (Ω·m)
晶粒灰岩	36.7	67.1	18655	9068
生物碎屑灰岩	32.3	70.7	6127	5454
燧石结核灰岩	35.3	67.4	18835	9586
泥质灰岩	46.2	66.5	17179	5671

4.1.2 礁、滩相储层的测井识别

在可能的礁滩组合层段中确定较高孔、渗

性的白云岩储层段，主要是依据孔隙度（声波时差、补偿密度、补偿中子）、电阻率测井系列。通过几十口井的测井响应特征和油气测试结果对比分析，总结出礁、滩相白云岩储层段的常规测井识别模式（表3），主要识别标志为电阻率值

表3 礁、滩相与非礁、滩相白云岩测井特征对比  
Table 3 The comparison of logging characteristics between non reef-bank facies dolomites and reef-bank facies dolomites

岩性	声波时差 (微秒/英尺)	补偿中子	体积密度 (g/cm <sup>3</sup> )
礁相白云岩	54.0	1.73	2.78
滩相白云岩	50.2	0.41	2.66
滩后潮坪白云岩	48.6	2.07	2.73
滩后泻湖白云岩	48.2	1.93	2.72
非礁、滩相白云岩	47.6	1.56	2.81



明显降低,深、浅侧向电阻率出现正幅度差,其正幅度差的程度取决于裂缝与溶洞的发育程度、分布状态、几何形状、充填物成分及地层中孔隙通道的弯曲程度和连通性有关。通常正幅度差越大,储层的缝洞越发育,裂缝发育段的中子孔隙度明显增大。当储层以溶蚀孔洞为主时,声波时差幅值增大明显,而当以裂缝为主时,增幅较小,而密度测井幅值有所降低。

#### 4.2 礁滩体的地震识别

由于来自生物礁的各种地球物理参数诸如振幅、频率、波形、速度、连续性等都有可能与围岩不同,从而导致生物礁地震反射的特殊性。通常,生物礁的地震反射特征可归纳为下述五个方面。

1) 反射外形 由于造礁生物生长速率快,生物礁厚度比四周同期沉积物明显增大。其在地震剖面上形态也各异,一般呈丘状或透镜状凸起。

2) 内部反射特征 由于生物礁具有丰富造礁生物及附礁生物形成的块状格架地质体,所以有时不表现沉积层理,使其内部表现为断续、杂乱或无反射(空白区)等特点。但是,当生物礁在其生物发育过程中伴随海水的进退而出现礁、滩互层,礁滩沉积显示出旋回性时,也可出现层状反射结构。

3) 底部反射特征 生物礁的底部可因地质条件的不同而出现不同的反射特征:当礁体速度高于围岩速度时,底界面上凸,形如弯月形;当礁体速度低于围岩速度时,底界面下凹,形如杏仁状;当礁体速度与围岩速度差异不大时底界面近于平直,如果礁体顶界面反射较强,可造成对底界面的屏

蔽,从而使底界面反射变弱或反射不清晰。

4) 礁体边界的反射特征 由于生物礁厚度大、生长速率快、岩性突变等原因,在生物礁的周缘可出现披覆、上超、绕射等地震反射特征。

5) 在一些大型的生物礁油气田,其礁体的上方有时还会伴有杂乱反射的烟囱现象,也称之为气烟囱效应。在该研究区从地震资料中也发觉了这一现象,以下举例详述。

地质模型和测井模型是建立地震模式的基础,而礁滩体测井模型识别和地震属性的提取是建立地震模式的关键(陈劲人和银玉光,1981;刘划一等,1999)。本区长兴组气藏是礁滩相岩性组合气藏,可作为礁滩体组合的独立岩性体,与周围地层岩性结构差异大,在构造应力场中形成力学尖点。在品质好的常规地震剖面上,某些部位反射波突然出现杂乱反射,振幅大幅度减弱形成地震模糊带,从而产生特殊的气烟囱效应(Aminzhadeh, 2001),是气烟囱形成的根本原因。

五百梯构造带气藏是较早发现的生物礁型气藏,在该构造带五百梯地震剖面上,钻达长兴组的井有3口(大天2,天东2和天东72井),获气井1口(天东2井)。钻井揭示五百梯气藏是礁岩性气藏,为微晶灰岩中的一个透镜体(图6下部正中),刘划一等(1999)采用多信息技术进行过描述,有比较深入的研究。五百梯构造位于大巴山前缘和川东高陡构造群的交汇处,由于地表为高山深谷地区,构造形变强烈,地震资料采集困难,地下构造成像困难,地震资料通常较差。五百梯生物礁为规模很小的点礁,普通的地震资料实际上很难准确

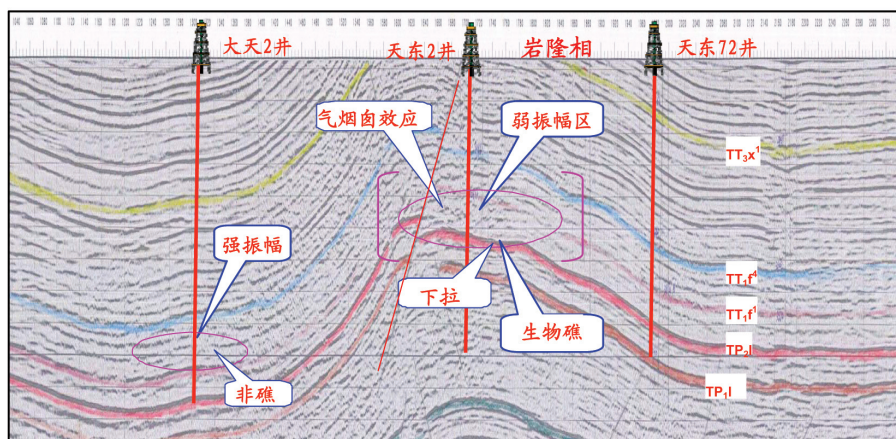


图6 生物礁滩地震相模式  
Fig. 6 Seismic facies pattern of reef

判断礁体分布。为分析五百梯生物礁地震响应特征,20世纪80年代采集过一条宽线。本次对这条宽线进行精细处理,发现五百梯特征性的地震响应实际上是气烟囱效应(图6上)。从密度测井数据分析,五百梯礁体密度比围岩密度更大,因此礁体更“硬”。这样的岩性体必然在构造应力场中形成应力集中,使得礁内部及其附近裂缝、断层发育,从而产生气烟囱效应。

在瞬时振幅剖面上(图6),礁滩相气藏的气烟囱地震响应特征为:①礁滩体内部反射波杂乱,如将天东2井生物礁发育部位与天东53井非生物礁发育部位进行对比(图6中的椭圆内),天东2井生物礁发育部位反射波明显中断和杂乱,而天东53井非生物礁发育部位为连续地震波组;②下二叠统底部通常是连续稳定的反射波组,但在生物礁下方具有很强的反射波组中断,并且形成一个杂乱反射条带,气烟囱效应在礁的下方特别突出(图6中的方框内);③礁下方有下拉现象,这是断层或

裂缝发育而得速度降低造成的特殊现象;④在品质良好的地震剖面上出现的地震模糊带称为气烟囱,发现和识别气烟囱是寻找大型礁滩相岩性组合气藏的有效技术方法(Aminzhadeh, 2001)。

#### 4.3 有利礁滩相带和有利储层发育区预测

以五百梯构造带为例,在长兴组成藏地质条件和气藏特征分析基础上,针对性地建立礁滩体地质模型,结合叠合地震资料(速度、伽玛、孔隙)和约束反演,在此基础上对有利储层发育的礁、滩相带和白云岩厚度分布特征分别进行综合预测,确定最有利的储层评价区。

##### 4.3.1 有利礁、滩相带预测

五百梯构造带最有利储层发育的沉积微相为台地边缘生物礁和生物屑浅滩,构造带内基于钻井和三维地震资料的地震相特征,可圈定出有利生物屑浅滩相带1个(图7),分布于大天002井—大天2井井区,滩体有沿开江—梁平台内海槽东段呈北西向连续展布特点。最有利生物礁微相带仅

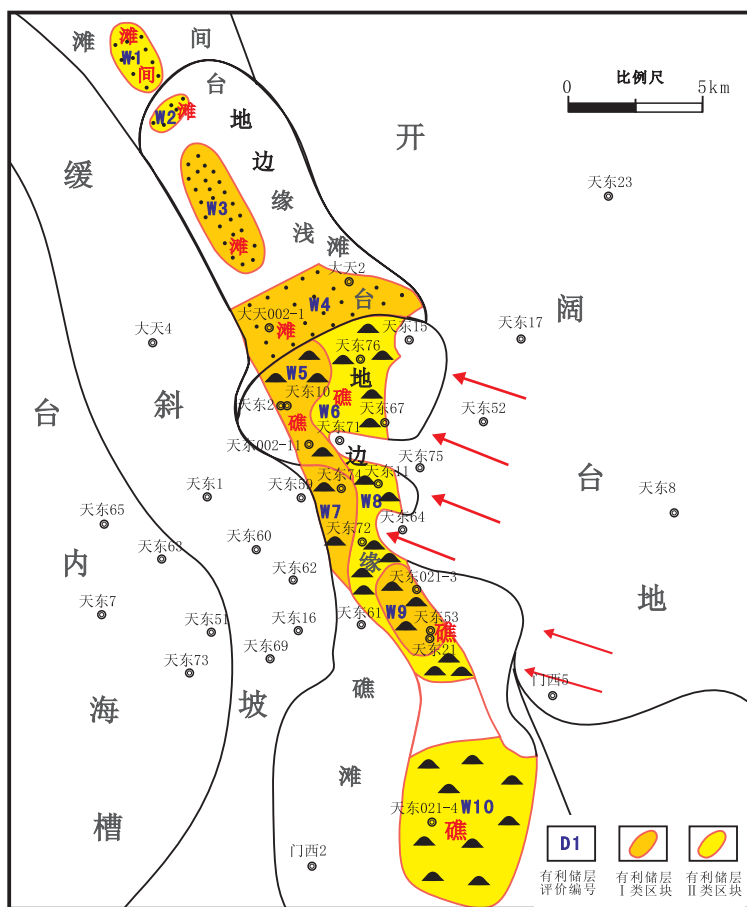


图7 五百梯构造带有利区块预测图

Fig. 7 Profitability prediction map of the Wubaiti structural zone

一个, 分布于天东15井—天东76井—天东74井—天东72井—天东53井—天东021-4井区, 沿开江—梁平台内海槽东段呈北北西—南南东向展布。

#### 4.3.2 有利储层发育区预测

##### 1) 礁、滩相储层地震响应特征

利用声波测井曲线制作多井声波合成记录, 在地震剖面上对储层进行准确标定, 确定储层发育位置是储层预测的基础。以天东021-3井声波合成记录的储层标定为例(图8), 长兴组第①套储层(储层厚22m)为长顶以下波谷段与地震的弱复波对应, 第②~第⑤套储层较薄, 与地震的弱振幅波峰至第二个波谷对应, 第⑥套储层在长兴组中部, 与地震剖面井旁道弱波峰对应较好。根据岩—电测井相解释成果, 可得到长兴组生物礁(滩)测井响应模式, 结合多井地震响应特征, 具体分析储层在地震反演剖面上的识别标志, 再通过多井的过井速度反演剖面进行储层追踪标定分析, 从而建立了长兴组生物礁(滩)储层识别模式为: 各井的储层段主要分布在长兴组中上部, 飞底向下50 ms范围内的弱波谷、弱波峰反射区, 速度 $\leq 6\ 100$  m/s的礁滩相岩性段。

##### 2) 礁、滩相储层的平面分布预测

针对有利储层发育区是基于地震资料进行有利相带的预测, 结合白云岩厚度分布特征等多种

指标的叠合作为最终确定有利储层发育区的研究思路, 在五百梯构造带有利相带分布图上, 叠合地震预测的白云岩厚度等值线, 以地震预测的并经钻井证实的较厚白云岩发育区作为优先考虑的预测评价对象(图7), 在五百梯筛选出有利储层评价区块10个, 依次编号为W1~W10。其中W9, W7, W4, W5和W3为最有利区块, 为首选勘探目标, 而W8, W2, W10, W1和W6为较有利区块。

## 5 结论

1) 通过地质、钻井和地震综合研究, 开江—梁平台内海槽东段长兴组广泛发育台地边缘生物礁和台地边缘浅滩相带为最有利储层发育相带。

2) 礁滩相带的储集岩主要为灰色块状海绵礁白云岩、生物屑白云岩和结晶白云岩等, 直接控制了储层的岩性和储集性及其储层的空间分布, 与埋藏白云岩化作用是成为控制该区优质储层的主要因素。

3) 对取芯段进行的岩性与电性分析表明, 礁段与非礁段的岩—电测井相解释模型的测井相响应特征有很大差别, 其中以自然伽玛最能反映礁、滩体的沉积微相特征, 而声波时差、补偿密度、补偿中子测井特征可用以进一步识别礁、滩相储层特征。

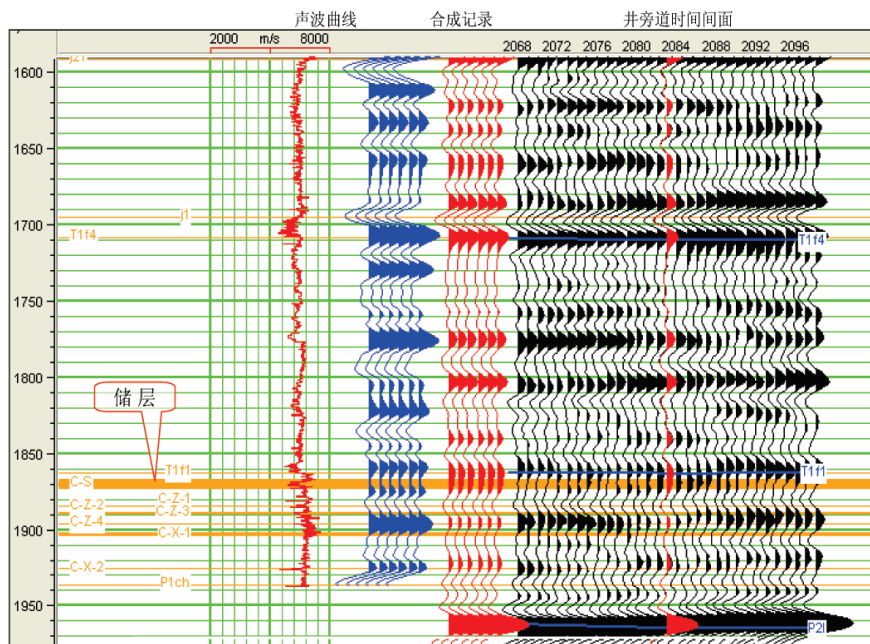


图8 天东021-3井合成记录及储层标定

Fig. 8 Synthetic seismogram and reservoir demarcation of Tiandong 021-3 well



4) 气烟囱效应是礁滩相储层的典型地震响应特征。生物礁滩气藏作为独立的岩性圈闭,易形成应力集中,是形成气烟囱的关键。

5) 以建立礁滩体地质模型作为预测有利生物礁滩岩隆带的地震反演约束条件,结合区域地质资料预测有利生物礁滩储层发育区及白云岩厚度分布图,圈定出有利储层发育区和优选勘探目标区。

## References:

- Aminahadeh F. 2001. Gas chimney as a tool for exploration [J] // Lu Guanghui. Intelligence Petroleum Exploration and Development, (6): 22–32. (in Chinese)
- Chen Jinren and Yin Yuguang. 1981. Exploration and practice of Changxin organic reef reservoirs, Jiannan Gas Field [J]. Natural Gas Exploration and Development, 10(2): 27–33. (in Chinese with English abstract)
- Fan Jiasong and Wu Yasheng. 2002. Restudies on Permian reefs in eastern Sichuan, China [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 12–18. (in Chinese with English abstract)
- Graham R D and Langhorne B S. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, (90): 1641–1690.
- Jiang Zaixing. 2003. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 404–420. (in Chinese)
- Jiang Xiaoguang, Peng Dajun, Chen Jigao, et al. 2005. Prediction of organic reefs on the east edge in the near Caspian Sea basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 32(5): 492–497. (in Chinese with English abstract)
- Li Guojun, Zheng Rongcai, Tang Yulin, et al. 20007. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Lower Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin [J]. Northwest Oil & Gas Exploration, 19(4): 64–70. (in Chinese with English abstract)
- Liu Huayi, Wang Yigang, Yang Yu, et al. 1999. A study of multivariate information comprehensive prediction method for the biohermal gas reservoir in Upper Permian Series in east Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 19(4): 13–18. (in Chinese with English abstract)
- Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Guo Tonglou, et al. 2005. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of the Changxing Formation in northeastern Sichuan basin [J]. Earth Science Frontiers, 12(3): 179–185. (in Chinese with English abstract)
- Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Guo Xusheng, et al. 2006. Characteristics and framework of the Changxing sedimentation in the northeastern Sichuan basin [J]. Geological Review, 52(1): 25–29. (in Chinese with English abstract)
- Mou Chuanlong, Ma Yongsheng, Yu Qian, et al. 2005. The oil-gas sources of the Late Permian organic reefal oil-gas pools in the Panlongdong, Xuanhuan, Sichuan [J]. Petroleum Geology and Experiments, 27 (6): 570–574. (in Chinese with English abstract)
- Mou Chuanlong, Tan Qinyin, Yu Qian, et al. 2004. The organic reefs and their reef-forming model for the Upper Permian Changxing Formation in northeastern Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 24(3): 65–71. (in Chinese with English abstract)
- Wang Ruihua, Mou Chuanlong, Tan Qingying, 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. (in Chinese with English abstract)
- Wang Shenghai and Qiang Zitong. 1992. The organic reefs of Upper Permian Changxing Formation in Mt. Huayin, Sichuan [J]. Oil & Gas Geology, 12(2): 147–154. (in Chinese with English abstract)
- Wang Yigang, Wen Yingchu and Zhang Fan. 1998. Distribution regularities of the organic reefs in Changxing Formation of Upper Permian in east Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 18(6): 10–15. (in Chinese with English abstract)
- Wang Yigang, Zhang Jing, Yang Yu, et al. 1997. Forming mechanism of the Upper Permian organic reefal gas pool in the northeastern part of the Sichuan basin [J]. Marine Petroleum Geology, 5(1/2): 145–152. (in Chinese with English abstract)
- Wu Xichun, Liu Xiaozeng, Yang Zhonglun, et al. 1990. Organic reefs control the form of reservoir in Changxing Formation of Upper Permian in east Sichuan [J]. Oil & Gas Geology, 11(3): 283–296. (in Chinese with English abstract)
- 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)

## 参考文献:

- 陈劲人, 银玉光. 1981. 建南气田长兴组生物礁气藏的勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 10(2): 27–33.
- 范嘉松, 吴亚生. 2002. 川东二叠纪生物礁再认识[J]. 石油与天然气地质, 23(1): 12–18.
- 姜在兴. 2003. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 404–420.
- 蒋晓光, 彭大钧, 陈季高, 等. 2005. 滨里海盆地东缘生物礁预测研究[J]. 成都理工大学学报, 32(5): 492–497.
- 李国军, 郑荣才, 唐玉林, 等. 2007. 川东北地区飞仙关组层序—岩相古地理特征[J]. 岩性油气藏, 19(4): 64–70.
- 刘划一, 王一刚, 杨雨, 等. 1999. 川东上二叠统生物礁气藏多元信息综合预测方法研究[J]. 天然气工业, 19(4): 13–18.
- 马永生, 牟传龙, 郭彤楼. 2005. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布[J]. 地学前缘, 12(3): 179–185.
- 马永生, 牟传龙, 郭旭升, 等. 2006. 川东北地区长兴组沉积特征与沉积格局[J]. 地质论评, 52(1): 25–29.
- 牟传龙, 马永生, 余谦, 等. 2005. 四川宣汉盘龙洞生物礁古油气藏油气源分析[J]. 石油实验地质, 27 (6): 570–574.
- 牟传龙, 谭钦银, 余谦, 等. 2004. 川东北地区上二叠统长兴组生物礁组成及成礁模式[J]. 沉积与特提斯地质, 24(3): 65–71.
- 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.
- 王生海, 强子同. 1992. 四川华蓥山涧水沟上二叠统生物礁[J]. 石油与天然气地质, 12(2): 147–154.
- 王一刚, 文应初, 张帆. 1998. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律[J]. 天然气工业, 18(6): 10–15.
- 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): 145–152.
- 吴熙纯, 刘效曾, 杨仲伦, 等. 1990. 川东上二叠统长兴组生物礁控储层的形成[J]. 石油与天然气地质, 11(3): 283–296.
- 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.