

# 普光—元坝大型气田储层发育特征与预测技术

郭旭升, 郭彤楼, 黄仁春, 陈祖庆

(中国石化勘探南方分公司, 成都 610041)

[摘要] 根据普光、元坝地区礁滩相储层的发育特征及主控因素,建立了以沉积相研究为指导、以模型正演与地震相分析为基础、以相控多参数储层反演为核心的“相控三步法”超深层碳酸盐岩储层综合预测技术。

[关键词] 普光气田;元坝气田;台地边缘;生物礁;浅滩;属性分析;相控三步法

[中图分类号] TE32 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)10-0082-09

## 1 前言

近年来,在四川盆地台缘礁滩相带油气勘探取得了一系列突破,尤其是普光、元坝等特大型气田的发现,展示了碳酸盐岩台缘礁滩相带巨大的油气勘探潜力。普光、元坝气田储层发育特征的研究及预测技术的探讨,对四川盆地乃至我国南方碳酸盐岩油气勘探具有较好的借鉴意义。

## 2 普光—元坝大型气田储层发育特征

### 2.1 储层沉积背景

川东北地区上二叠统的沉积始于下二叠统剥蚀面上的海侵,总体表现为拉张背景下,由于差异沉降导致了沉积环境的分异,形成“台—棚”相间的沉积格局。广元—旺苍—梁平—开江一带为陆棚沉积环境,东西两侧为台地沉积环境,从陆棚向台地沉积相的展布依次为陆棚相—斜坡相—台地边缘相—碳酸盐岩台地相<sup>[1-3]</sup>。由于梁平—开江陆棚东西两侧所处构造背景的差异性,也导致了东西两侧台地边缘沉积模式及储层发育特征存在一定的差异。

陆棚西侧的元坝地区长兴期台地边缘具有从早期缓坡台地到晚期由于生物礁发育而逐渐演变为镶边台地演化的特点,具有早滩晚礁、前礁后滩的沉积特征,即早期在缓坡台地边缘广泛分布的浅滩相沉

积,发育浅滩相储层。长兴中晚期为生物礁生长的繁盛期,沉积表现为前礁后滩的沉积特征,发育台缘礁及礁后浅滩相储层。陆棚东侧的普光地区长兴期台地边缘坡度较陡,生物礁发育厚度大,礁盖白云岩储层发育,但礁后浅滩相带相对较窄。川东北地区飞仙关期总体继承了长兴期格局,仍为台棚相间格局,但陆棚两侧的台地边缘沉积模式差异更加明显。元坝地区飞仙关早期,由于摩天岭古陆的隆升和掀斜的影响,斜坡坡度相对较缓,分布范围宽,斜坡沉积物中形成了丰富的前积构造,飞仙关组鲕滩发育明显具有由台地向陆棚迁移的特征,储层厚度相对较小。而普光地区基本继承了长兴期的沉积样式,鲕滩的发育总体表现为纵向的加积为主,储层发育厚度大。

### 2.2 储层岩石学特征

普光与元坝气田,长兴组储层岩石类型以残余生物礁结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩、粉细晶白云岩及生物礁灰岩为主。飞仙关组储层岩石类型以残余鲕粒结晶白云岩为主,糖粒状白云岩及粉细晶白云岩次之,亮晶鲕粒灰岩最少。

1)残余生物礁结晶白云岩:发育于长兴组上部,为台地边缘礁滩相障积岩及骨架岩等亚相沉积。造礁生物以海绵为主,少量苔藓虫及层孔虫,含量35%~50%不等,因重结晶作用,生物结构多被破

[收稿日期] 2010-07-28

[基金项目] 国家油气重大专项资助项目(2008CX05005-003)

[作者简介] 郭旭升(1965-),男,山东菏泽市人,教授级高级工程师,主要研究方向为石油地质综合研究勘探管理;E-mail: tlguo@163.com

坏。生物礁白云岩发生的主要成岩作用有胶结作用、重结晶作用及溶蚀作用,具有良好的储集条件。

2) 残余鲕粒结晶白云岩:发育于飞一、二段,主要分布于普光地区,为台地边缘暴露浅滩相鲕粒滩亚相沉积。矿物成分以白云石为主,含量 90% ~ 95%。原岩岩石组成以鲕粒为主,含量 70% ~ 80%,因重结晶作用强烈,多数鲕粒只保留其残余结构。岩石中晶间孔丰富,后期溶蚀作用强烈,溶孔部分充填沥青,部分未被充填,是普光地区飞仙关组储集岩的主要岩石类型。

3) 残余生屑结晶白云岩:发育于长兴组生物礁的上部,为台地边缘暴露浅滩相生屑滩亚相沉积。矿物成分以白云石为主,含量为 83% ~ 95%。岩石组成以生物碎屑为主,因重结晶作用,大量生物结构被破坏,只保留了残余结构。岩石重结晶及溶蚀作用强烈,晶间孔、溶蚀孔发育,储集条件好。

4) 糖粒状白云岩:主要发育于普光 2 井飞一、二段。矿物成分以白云石为主,含量为 92% ~ 95%。具中粗晶结构,晶体中发育丰富的鲕粒残余。晶间孔丰富,部分充填沥青,部分未被充填,是储集条件最好的储层岩石类型。

5) 粉细晶白云岩:主要分布在长兴组上部及飞一、二段,为台地边缘礁滩相及台地边缘暴露浅滩相沉积。矿物成分以白云石为主,含量大于 90%。重结晶作用一般,具粉晶—细晶结构,溶蚀作用较弱,以形成 III 类储层为主。

6) 生物礁灰岩:发育于长兴组中上部,为台地边缘礁滩相障积岩及骨架岩等亚相沉积。造礁生物以海绵为主,少量苔藓虫及层孔虫,含量 35% ~ 50% 不等。生物礁灰岩发生的成岩作用主要为胶结作用,经过胶结作用后原生孔隙几乎全部被方解石充填。重结晶作用比较微弱,具微粉晶结构。岩石比较致密,储集条件较差,当在深部发生溶蚀作用后也可以形成储层,一般以 III 类储层为主。

7) 亮晶鲕粒灰岩:在区内广泛分布,主要分布于飞一、三段。亮晶鲕粒灰岩形成于开阔台地相鲕粒滩亚相及台地边缘浅滩相鲕粒滩亚相。矿物成分以方解石为主,含量大于 91%。岩石组成以鲕粒为主,含量为 68% ~ 76%。主要成岩作用为胶结作用,经过胶结作用后,粒间孔几乎消失殆尽。重结晶作用微弱,一般具微—粉晶结构,即使重结晶作用较强,晶体之间也是紧密镶嵌接触,晶间孔不发育。因此,多数鲕粒灰岩都较致密,难以形成优质储层,一般以 III 类储层为主。

虽然普光与元坝地区长兴组—飞仙关组储层主要为以上 7 种岩石类型,但普光地区与元坝地区还是有所差异(见表 1)。普光地区,长兴组—飞仙关组储层岩石类型主要为残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩以及残余生物礁结晶白云岩,亮晶鲕粒灰岩很少。而元坝地区,长兴组—飞仙关组储层则主要为残余生屑结晶白云岩及亮晶鲕粒灰岩,残余鲕粒结晶白云岩很少,仅见于 YB9 井飞二段。

表 1 普光地区和元坝地区长兴组—飞仙关组储层岩石类型统计

Table 1 The statistical results of rock types of Changxing - Feixianguan reservoir in the Puguang and Yuanba area

地区	I 类储层 (孔隙度 > 10%)	II 类储层 (孔隙度: 5% ~ 10%)	III 类储层 (孔隙度: 2% ~ 5%)
普光地区	残余生物礁结晶白云岩、残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩	残余生物礁结晶白云岩、残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩	残余生物礁结晶白云岩、残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩、粉细晶白云岩、生物礁灰岩
元坝地区	残余生物礁结晶白云岩、残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩、亮晶鲕粒灰岩	残余生物礁结晶白云岩、残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩、生物礁灰岩、亮晶鲕粒灰岩	残余生物礁结晶白云岩、残余鲕粒结晶白云岩、残余生屑结晶白云岩、生屑灰岩、泥晶灰岩、生物礁灰岩、亮晶鲕粒灰岩

### 2.3 储集空间类型

普光与元坝气田长兴组—飞仙关组储层类型以孔隙型为主,裂缝—孔隙型次之。储集空间以溶孔为主,晶间孔及裂缝次之。孔隙类型以晶间溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔及晶间孔为主,溶洞、鲕模孔及裂

缝次之。

1) 晶间溶孔:普遍发育于各类结晶白云岩中,由晶间孔因溶蚀扩大而形成。溶蚀作用发育在晶体之间,孔隙形态复杂,直径小于 2 mm。

2) 粒间溶孔:发育于各类颗粒白云岩及颗粒灰

岩中,由颗粒间胶结物或部分颗粒被溶蚀而形成。孔隙形态多样,直径小于2 mm,以1 mm 为主。

3)粒内溶孔:发育于各类颗粒白云岩及颗粒灰岩中,由各种颗粒(生屑、砂屑、鲕粒)内部被溶蚀而形成。溶孔形态复杂多样,直径小于2 mm。

4)晶间孔:发育于各类结晶白云岩中,由重结晶后白云石晶体杂乱排列而形成。该类孔隙为不规则的多边形,直径1~2 mm 居多,多数未被充填。

## 2.4 储层物性特征

分别对普光和元坝两地区26口、10口井岩物性分析样品进行统计,总结了两地区的储层物性特征,开展了储层物性对比研究。

### 2.4.1 普光地区

1)长兴组储层物性特征。a. 孔隙度与渗透率:普光地区长兴组储层孔隙度为2%~5%,5%~10%及大于10%的比例分别为33%,9%及27%,分布较为平均;渗透率为 $(0.02 \sim 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 及 $(0.25 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例分别为38%,35%及24%,与孔隙度分布特征相似(见图1)。b. 孔渗相关性:长兴组储层孔隙度和渗透率之间具有较好的正相关关系(见图2),即随着孔隙度的增加,渗透率也增大。局部渗透率高于正常值,裂缝是导致局部渗透率增高的主要原因。局部比正常值低,这是由于有些溶孔之间的连通性较差,加之部分孔缝被沥青充填,造成局部渗透率低于正常值。以上孔渗关系表明,长兴组以孔隙(溶孔)型储层为主,含少量裂缝—孔隙复合型储层。

2)飞一、二段储层物性特征。a. 孔隙度与渗透率:普光地区飞一、二段储层孔隙度以5%~10%为主,比例为48%,孔隙度大于10%和2%~5%的比例分别为27%和22%;渗透率以大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主,比例为53%,渗透率为 $(0.2 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(0.02 \sim 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例分别为27%及18%(见图3)。b. 孔渗相关性:飞一、二段储层孔隙度与渗透率之间具有很好的正相关关系,即随着孔隙度的增加,渗透率也随之增大。综合分析,飞一、二段以孔隙(溶孔)型储层为主(见图4)。

3)飞三段储层物性特征。a. 孔隙度与渗透率:普光地区飞三段储层孔隙度以2%~5%为主,比例为51%,非储层较多,比例为27%;渗透率以0.02%~0.25%为主,比例为47%(见图5)。

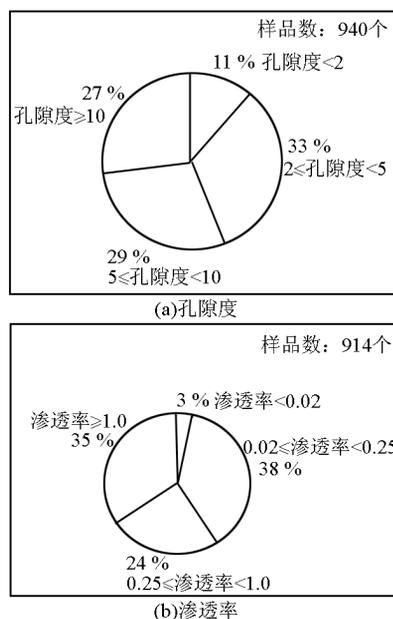


图1 川东北普光地区长兴组孔隙度及渗透率百分比  
Fig.1 The percentage of porosity and permeability of Changxing reservoir in Puguang area in North - East Sichuan

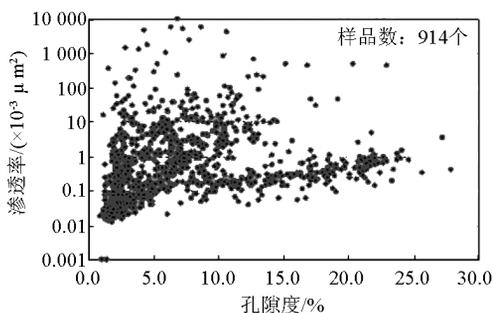
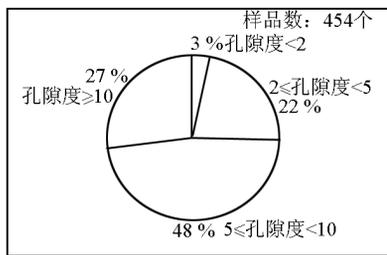


图2 川东北普光地区长兴组孔隙度—渗透率关系  
Fig.2 The relationship between porosity and permeability of Changxing reservoir in Puguang area in North - East Sichuan

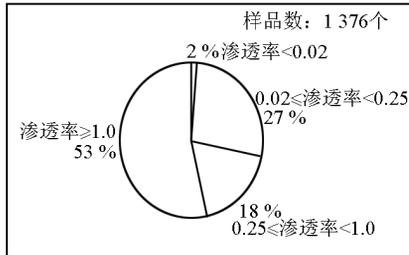
b. 孔渗相关性:飞三段储层孔隙度与渗透率之间具有很好的正相关关系,即随着孔隙度的增加,渗透率也随之增大(见图6),以孔隙(溶孔)型储层为主。

### 2.4.2 元坝地区

1)长兴组储层物性特征。a. 孔隙度与渗透率:长兴组孔隙度小于2%的比例为25%,2%~5%的比例为50%,5%~10%的比例为18%,大于10%的比例为7%;渗透率小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为16%, $(0.02 \sim 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为35%, $(0.25 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为12%,大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为37%(见图7)。b. 孔渗



(a)孔隙度



(b)渗透率

图3 川东北普光地区飞一、二段孔隙度及渗透率百分比

Fig. 3 The percentage of porosity and permeability of the member 1 and member 2 of Feixianguan reservoir in Puguang area in North - East Sichuan

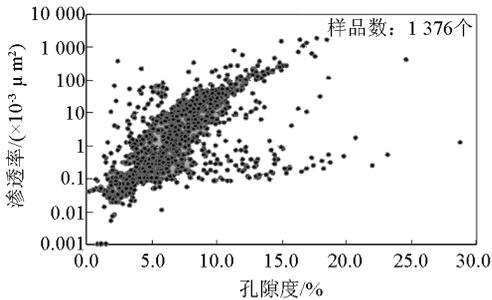
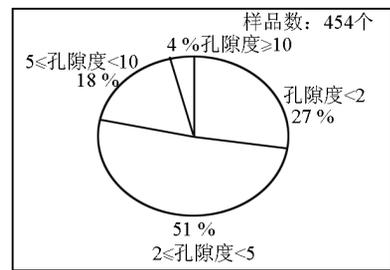


图4 川东北普光地区飞一、二段孔隙度—渗透率关系

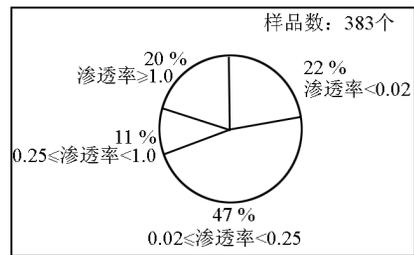
Fig. 4 The relationship between porosity and permeability of the member 1 - member 2 of Feixianguan reservoir in Puguang area in North - East Sichuan

相关性:元坝地区长兴组储层孔渗相关性较好,近似于正相关,即随着孔隙度的增加,渗透率也随之增大,局部渗透率高于正常值,表明长兴组以孔隙型储层为主,发育部分裂缝—孔隙型储层(见图8)。

2)飞二段储层物性特征。a. 孔隙度与渗透率:飞二段储层孔隙度小于2%的比例为42%,2%~5%的比例为47%,5%~10%的比例为7%,大



(a)孔隙度



(b)渗透率

图5 川东北普光地区飞三段孔隙度及渗透率百分比

Fig. 5 The percentage of porosity and permeability of the member 3 of Feixianguan reservoir in Puguang area in North - East Sichuan

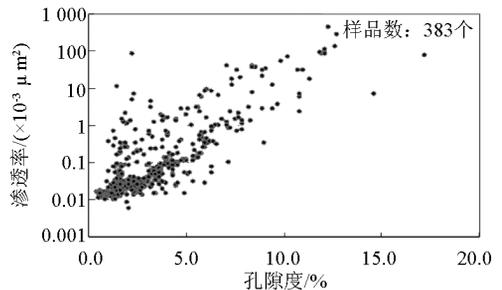
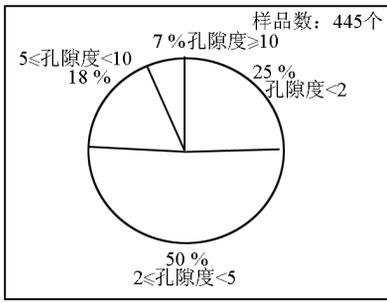


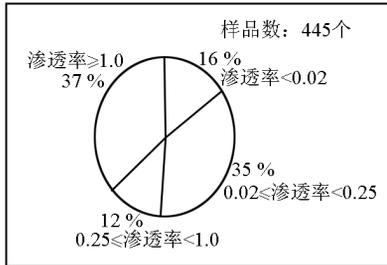
图6 川东北普光地区飞三段孔隙度—渗透率关系

Fig. 6 The relationship between porosity and permeability of the member 3 of Feixianguan reservoir in Puguang area in North - East Sichuan

于10%的比例为4%;渗透率小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为35%, $(0.02 \sim 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为39%, $(0.25 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为13%,大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比例为13%。总之,孔隙度以2%~5%为主,渗透率以 $(0.02 \sim 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主(见图9)。b. 孔渗相关性:元坝地区飞二段储层孔渗相关性一般,部分随着孔隙度的增加,渗透率也随之增大,部分位于低孔高渗区域,表明元坝地区飞二段为裂缝—孔隙复合型储层(见图10)。对比分析,普光、元坝地区长兴组礁滩储层特征基本一致,但普光地区飞一、二段比元坝地区飞一、二段储层明显。



(a)孔隙度



(b)渗透率

图7 川东北元坝地区长兴组孔隙度及渗透率百分比

Fig. 7 The percentage of porosity and permeability of Changxing reservoir in Yuanba area in North - East Sichuan

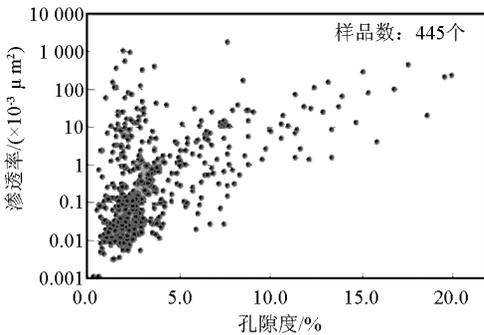
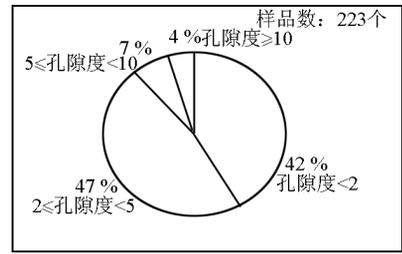
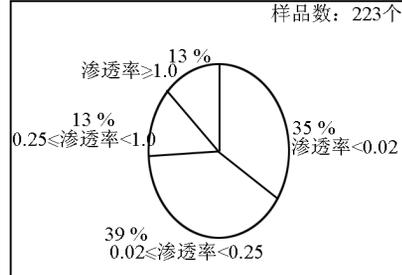


图8 川东北元坝地区长兴组孔隙度—渗透率关系  
Fig. 8 The relationship between porosity and permeability of Changxing reservoir in Yuanba area in North - East Sichuan



(a)孔隙度



(b)渗透率

图9 川东北元坝地区飞二段孔隙度及渗透率百分比

Fig. 9 The percentage of porosity and permeability of the member 2 of Feixianguan reservoir in Yuanba area in North - East Sichuan

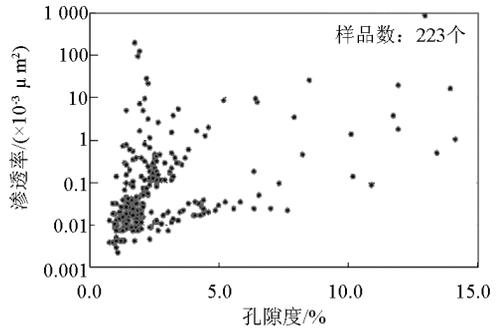


图10 川东北元坝地区飞二段孔隙度—渗透率关系  
Fig. 10 The relationship between porosity and permeability of the member 2 of Feixianguan reservoir in Yuanba area in North - East Sichuan

## 2.5 储层发育主控因素

有利的沉积相是控制储层的基本要素,在平面上控制了储层的发育范围,但储层发育的好坏,则受成岩作用的强烈制约。具体来说就是主要受控于高能沉积相带、早期暴露经受较强的大气淡水或混合水溶蚀改造和较强的白云岩化作用以及烃类较早期充注,区域性盖层的发育有效保护保存了孔隙。

1) 沉积相控制优质储层发育的位置;该区飞仙关组鲕滩白云岩和长兴组礁滩白云岩优质储层发育高能台地边缘相带,基本环“开江—梁平陆棚”分布,且随着“陆棚”的发育、填平作用而迁移展布。但勘探实践表明,并非整个高能鲕滩相带和礁滩相均具有良好的储渗性能。溶蚀和白云岩化等有利的成岩作用决定了储层最终发育的优劣。

2) 储层主要发育于Ⅲ级层序高位体系域中或

高频旋回的中上部:飞仙关组和长兴组一般可划分为两个Ⅲ级层序,储层一般在Ⅱ级或Ⅲ级层序高位体系域中发育。同时,这些干能鲕滩和鲕滩沉积一般可划分为多个高频旋回,在每个高频旋回的中上部,孔隙均较好。这与海平面的升降、水动力条件变化有关。

3)早成岩作用阶段的大气淡水溶蚀作用和白云岩化作用是优质储层发育的关键:由于海平面的升降,礁、滩相易于出露水体,并受大气淡水淋滤,或大气淡水与海水混合水的溶蚀作用。各种地质和地球化学证据表明,该区大量粒内孔和这些粒内孔的示顶底构造的发育是大气淡水溶蚀作用的结果。

在成岩阶段划分的基础上,建立了该区飞仙关组储层和长兴组储层中的矿物生长顺序,并以此建立了典型储层的成岩演化序列。利用 Photoshop 定量法统计出现今各个样品的孔隙度,再根据各期成岩作用对储层孔隙的影响,量化恢复出了典型鲕滩储层和礁滩储层的孔隙演化曲线<sup>[4]</sup>。研究表明,无论是鲕滩白云岩还是礁滩白云岩孔隙均形成较早,在古油藏形成之前就已发育,而沥青之后局部可能有部分非选择性溶孔产生,但总孔隙微弱减少。因此,早成岩阶段的大气淡水溶蚀和白云岩化可能是控制该区储层发育的最为关键的两个因素。

### 3 普光—元坝大型气田储层预测技术

普光、元坝地区礁滩相储层发育主要受沉积相控制。通过对普光、元坝气田的勘探实践,形成了以沉积相研究为指导、以模型正演与地震相分析为基础、以相控多参数储层反演为核心的“相控三步法”超深层碳酸盐岩储层综合预测技术<sup>[5]</sup>。

#### 3.1 礁滩储层精细标定及地震响应特征

储层标定是储层地震预测的基础。通常采用“常规合成地震记录初步标定、离散合成地震记录二次精细标定”的综合标定技术开展礁滩储层的精细标定。

与致密围岩相比,长兴—飞仙关组储层的速度、密度有明显的降低,储层含气后会导致穿越储层的地震波发生较强的吸收和衰减作用。孔隙度越高,含气性越好,吸收衰减作用越强,反映到地震剖面上会相应地出现振幅、频率相位和反射结构等的变化。储层精细标定及模型正演分析表明长兴—飞仙关组礁滩储层具有以下地震响应特征。

1)长兴组生物礁滩复合型储层表现为“低频、

低速、中强振幅、丘状杂乱反射结构、两翼同相轴上超、中断”的特征;

2)长兴组浅滩储层表现为“低频、中弱变振幅、断续、微幅蚯蚓状复波、亚平行反射结构”的特征;

3)飞仙关组台地边缘鲕滩储层表现为:“低频、中强变振幅、差连续性、杂乱”反射特征;

4)台地内部飞仙关组二段储层具有“中—低频、中强振幅”的地震响应特征。台地边缘斜坡相区前积体顶部飞仙关组二段储层具“中频、弱振幅、复波”的地震响应特征。

#### 3.2 礁滩储层的宏观展布预测

礁滩储层的发育与分布严格受沉积相控制,其宏观展布预测可以通过以下3个步骤来精细地刻画:首先通过古地貌分析了解沉积背景;其次,通过地震相分析和地震属性分析,研究沉积相横向展布特征,圈定有利沉积相带及其分布范围;最后在有利相带内部利用礁滩储层的“低频、低速、低阻抗”异常特征寻找有利储层发育区,明确储层的宏观展布规律。

##### 3.2.1 古地貌分析

古地貌恢复常用的方法有残余厚度法、标准层法和层拉平法。残余厚度法是运用不整合面上覆层地层厚度与侵蚀面起伏的镜像关系反映古地貌的大致形态。标准层法是运用两个标准层之间的厚度差反映古地貌的形态。层拉平技术通过选取能够反映沉积时期海平面变化的标志层,拉平标志层后可以直观地反映其下覆古地貌的起伏情况。川东北地区长兴组—飞仙关组与上下地层之间为整合接触关系,因此主要采用层拉平和标准层法开展了普光地区古地貌分析<sup>[6]</sup>。

区域沉积研究表明,飞四时期四川盆地由于填平补齐作用,早期高低不平的地貌已变得非常平坦,全区沉积环境相似,为局限—蒸发台地沉积。因此采用飞仙关组四段底界层拉平剖面可以很好地展示沉积古地势高低,识别出陆棚、斜坡、台地边缘、开阔台地、局限台地等不同的相带的横向展布。从图11对普光地区飞四段底界层拉平剖面分析,长兴—飞仙关组沉积相带展布类似于威尔逊碳酸盐岩理想标准相带模式。

根据台地与陆棚碳酸盐岩沉积厚度的差异性,采用标准层法,沉积古地貌的平面展布。在长兴时期宣汉—达县地区具西南低、东北高的古地貌特征,普光构造位于古地貌高的位置,往南西方向古地势

明显变低,坡折带清晰。在飞仙关时期古地貌特征与长兴时期相似,只是台地边缘往北东方向迁移(见图12)。元坝地区长兴组沉积时期具有南西高

北东低的古地貌特征,与普光地区相比台地边缘古地貌高带相对宽广,斜坡也相对宽缓(见图13)。

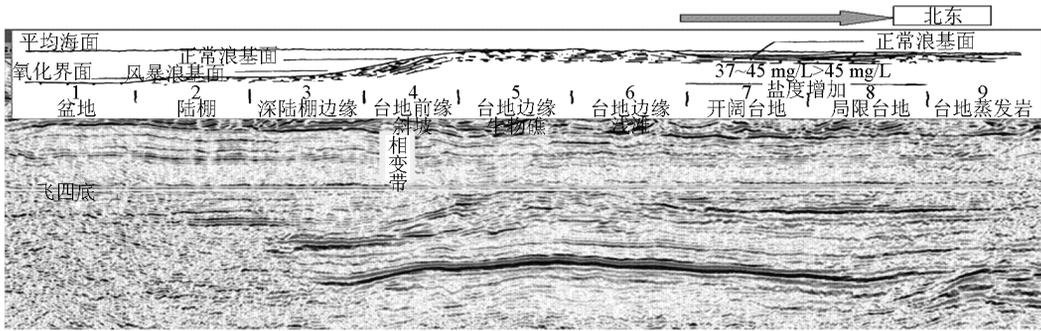


图 11 普光地区沿飞仙关四段底层拉平剖面

Fig. 11 Flattening section of Puguang area along the member 4 bottom layer of Feixianguan formation

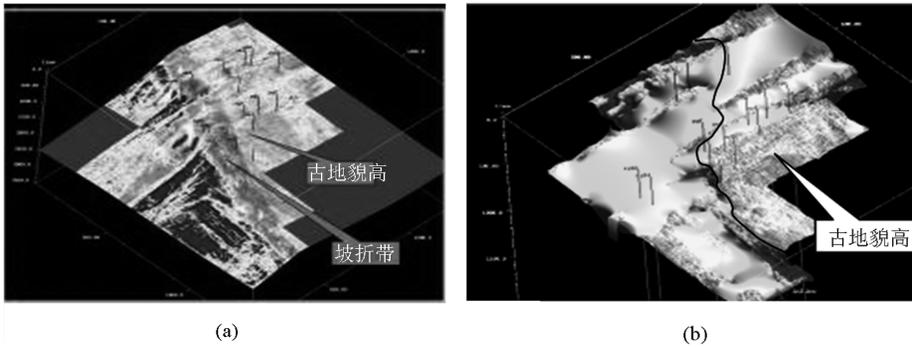


图 12 宣汉—达县地区长兴组沉积前(a)和飞仙关组沉积前古地貌图(b)

Fig. 12 The palaeogeomorphology maps during previous sedimentary period of Changxing formation(a) and during previous sedimentary period of Feixianguan formation(b) in Xuahan - Daxian area

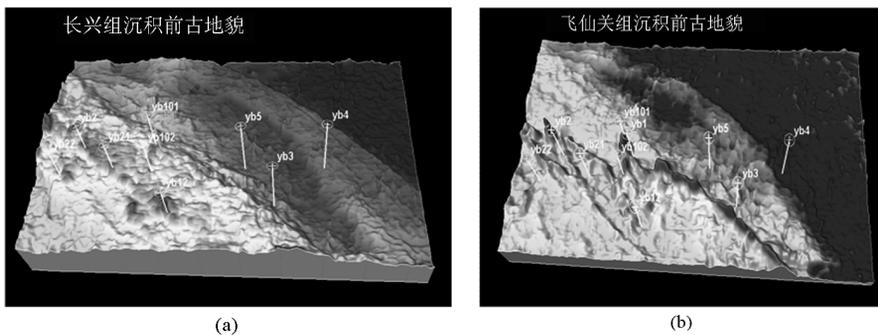


图 13 元坝地区长兴组沉积前(a)和飞仙关组沉积前(b)古地貌图

Fig. 13 The palaeogeomorphology maps during previous sedimentary period of Changxing formation (a) and during previous sedimentary period of Feixianguan formation (b) in Yuanba area

### 3.2.2 地震相—沉积相分析

地震相是沉积相在地震剖面上的影射,它是指有一定分布范围的、与相邻单元不同的三维地震反射单元。不同的地震反射单元反映出不同的沉积环境,利用地震相分析将地震特征的横向变化定量化,从而可以推断出沉积环境的变化,确定出有利储层沉积相带。地震相分析,就是由剖面到平面分析地震特征的变化,把同一地震层序中具有相似特征的地层单元连接起来,形成地震相的平面分布图,然后对它进行解释,与测井相结合把它转化成沉积相。

通常用于地震相分析的地震参数主要有反射波的振幅、频率、相位的连续性、外形和接触关系、内部反射结构等。根据普光—元坝地区地震特征,在礁滩储层的地震相识别和分析中以振幅、频率、外形和内部反射结构为主,连续性和接触关系为辅。在元坝地区可以识别出如下9种典型地震相模式。

- 1) 生物礁:底平顶凸、丘状外形、顶部强振幅、内部空白或杂乱反射结构、两翼同相轴中断、上超;
- 2) 礁后浅滩:低频、中强变振幅、复波、亚平行反射结构、差连续性;
- 3) 礁间滩:低频、中强振幅、复波、杂乱反射结构、差连续性的地震相特征;
- 4) 礁间潮道:中低频、弱振幅、中等连续性、亚平行反射结构;
- 5) 礁后泻湖:底部短轴强振幅、中上部空白弱反射;
- 6) 礁间水道:低频、单轴强振幅、连续性好、平行反射结构;
- 7) 开阔台地:中高频、中强振幅、平行反射结构、好连续性;
- 8) 斜坡:低频、单轴强振幅、连续性好,平行或斜交反射结构、向台地上超;
- 9) 陆棚:中高频、中弱振幅、好连续性、平行反射结构。

### 3.2.3 地震相平面分布特征

根据碳酸盐岩典型的地震相模式优选敏感属性开展地震相平面分析,刻画地震相带的平面展布特征,确定相变线。元坝地区长兴组平面上可以划分为五大类地震相(见图14)。第I类为中高频、中强振幅、亚平行地震相,主要分布于工区西南角,反映开阔台地沉积环境。第II类为低频、中弱变振幅复波、微幅蠕虫状、亚平行地震相,主要分布在元坝22井—元坝12井区的西部和南部区域,大致呈北

西—南东走向分布,反映的是相对高能的礁后浅滩相沉积环境。第III类为低频、中弱变振幅、丘状外形、内部空白杂乱反射地震相,主要分布在元坝204—元坝2—元坝102—元坝9井一带,代表高能的台地边缘礁滩相沉积。第IV类为低频、中强振幅、连续、斜交地震相,反映的是低能的斜坡相沉积环境。第V类为弱振幅空白的波谷反射地震相,代表较低能的斜坡沉积环境。

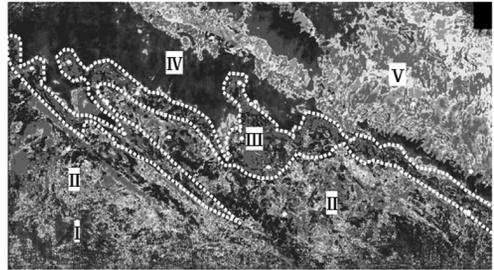


图14 川东北元坝地区长兴组地震相平面图  
Fig. 14 The seismic facies map of Yuanba area in the North - East Sichuan

### 3.3 礁滩储层的精细预测与描述

针对该区礁滩储层的“低速、低波阻抗、低伽马、相对低密度”异常特征,采用相控地震反演方法来进行储层精细描述及有效储层评价:a. 根据地震相分析结果,建立地震相和沉积相约束的初始地震地质模型,在此基础上利用声波和密度资料进行地质建模和约束稀疏脉冲反演,获得绝对波阻抗数据和层速度数据体,进而以波阻抗数据体作为软约束,通过随机反演求取伽马反演和密度反演数据体。b. 设定合理的伽马和密度阈值,利用伽马数据体和密度数据体对波阻抗和层速度数据体进行滤波,将泥岩和膏岩去除,得到可以反映纯孔隙储层的波阻抗和层速度数据体,进行储层精细解释。c. 利用纯储层的波阻抗数据体与岩心孔隙度作交会分析,获得孔隙度与波阻抗的关系式进行储层参数反演,求取储层的孔隙度。以2%孔隙度作为储层下限计算储层的有效厚度<sup>[7]</sup>。

#### 3.3.1 相控法储层预测

常规井约束反演方法建立的初始地质模型为层状模型,难以真实反映礁滩储层的变化特征。针对礁滩储层的地质特点,以真实反映礁滩储层特点的块状模型为基础建立初始地质模型,以相变线为边界约束控制井的内插和外推,采用地震属性切片建立主控制层的插值权重层,最终进行空间插值和平滑建立起三维相控初始波阻抗模型,利用该模型开

展测井约束反演,得到波阻抗数据体。

### 3.3.2 拟声波反演

元坝地区相带变化大,长兴组横跨了局限台地、开阔台地、台地边缘、台缘斜坡及浅水陆棚等相带,如果只是简单用声阻抗及伽马作为门槛值来区分储层、非储层,只能局限在某一个相带,而如果全区采用相同门槛值则可能去掉了好的储层或不能完全去除泥灰岩,同时从反演剖面上很难直观地分辨出储层。为了突出储层特征,采用对储层反映最为敏感的孔隙度曲线重构声波曲线进行拟声波曲线波阻抗反演,并在此基础上进行了储层空间展布特征描述。该方法能突出高速非储层背景下的储层低速特征,从而能有效反演储层纵横向展布特征。

元坝地区储层波阻抗值表现为高波阻抗背景下的“低波阻抗”特征,反演结果与实钻井资料比较吻合,较好地反映了长兴组礁滩储层的纵横向分布特征和接触关系。从拟声波反演结果看,由于利用了储层孔隙度的信息将储层从非储层中凸现出来,可以直接在拟声波反演剖面上观察到储层的纵横向变化情况,储层的厚度与物性与井基本吻合。从去除了低频和高频成分的反演剖面看,与地震资料吻合性较好,表明反演结果忠实于地震剖面,只是对低频成分进行了夸大处理。

### 3.3.3 伽马约束去泥质反演

普光地区长兴组—飞仙关组礁滩储层岩石物理分析结果表明:a. I, II类储层与非储层之间速度相差较大, III类储层与非储层之间差别较小,不易区分;b. I, II, III类储层与非储层之间伽马值差异大(非储层  $Gr > 20 \text{ Api}$ )。因此利用储层与非储层之间伽马值差异明显的特点,以波阻抗数据体作为软约束开展伽马随机反演,根据统计结果设置伽马门槛值对波阻抗数据体进行滤波,剔除泥质低速非储层,得到反映纯储层的波阻抗数据体和速度数据体,在此基础上开展储层的精细预测,能有效反演台地边缘相带内因沉积微相差异所造成的储层非均质性。这一储层预测在普光地区应用效果好,实钻结果与预测结果基本吻合。

### 3.3.4 储层参数预测

储层物性参数的估算主要包括孔隙度和厚度。

具体储层厚度计算方法为:根据不同层段中储层参数的门槛值将非储层从层速度以及伽马数据体中剔除,并求取满足门槛值要求的样点数,结合采样率及储层平均速度求出储层厚度。该方法人为因素少,结果可信度较高。

储层孔隙度的计算方法为:利用储层孔隙度与速度交汇建立的拟合公式将剔除了泥岩与非储层的阻抗体,转化为孔隙度体,然后计算储层段内储层的平均孔隙度。以上的定量计算方法较常用,尽管建立拟合公式时需要有足够多的样点数以减小误差,但是拟合得到的趋势是正确的。另外储层孔隙度的预测还可以在去除泥质的波阻抗反演数据的约束下利用孔隙度曲线开展非线性反演,这样可直观地预测出储层的物性参数。

## 4 结语

经过多年的探索发展和不断完善,以“相控三步法反演技术”为核心的礁滩储层预测技术在普光和元坝地区取得了良好的应用效果。目前在元坝地区利用预测成果针对长兴组礁滩储层部署实施的钻井均钻遇白云岩储层,取得了礁滩储层钻遇成功率100%的良好效果。2005年以来,在普光地区,针对预测的礁滩相储层一共部署了21口井,均钻遇了优质储层,其中15口井获高产天然气流。

## 参考文献

- [1] 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布[J]. 矿物岩石, 2005, 25 (4): 73 - 79
- [2] 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江—梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (3): 326 - 331
- [3] 王兴志, 张帆, 蒋志斌, 等. 四川盆地东北部飞仙关组储层研究[J]. 地学前缘, 2008, 15 (1): 117 - 122
- [4] 张学丰, 蔡忠贤, 胡文瑄, 等. 应用 Adobe Photoshop 定量分析岩石结构[J]. 沉积学报, 2009, 27 (4): 667 - 673
- [5] 马永生, 郭旭升, 凡睿, 等. 川东北普光气田飞仙关组礁滩储集层预测[J]. 石油物探与开发, 2005, 32 (4): 60 - 64
- [6] 叶庆全, 袁敏. 油气田开发常用名词解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004
- [7] 赵帮六, 杜小弟. 生物礁地质特征与地球物理识别[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009

(下转 96 页)