

## 四川盆地九龙山地区三叠系飞仙关组薄层鲕粒滩储层定量描述及预测

裴森奇<sup>1,2</sup>, 胡欣<sup>2</sup>, 王兴志<sup>1</sup>, 张本健<sup>1,2</sup>, 王宇峰<sup>2</sup>, 李荣容<sup>2</sup>, 龙虹宇<sup>2</sup>

1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 中国石油西南油气田公司川西北气矿

**摘要** 三叠系飞仙关组鲕粒滩储层是四川盆地重要的油气储层之一。九龙山地区飞仙关组储层埋深在 5 000 m 左右,具有多期生物碎屑滩沉积的地质背景,但储层厚度薄,现有地震资料分辨率相对较低,难以准确预测鲕粒滩储层的空间展布,制约了该区飞仙关组的天然气勘探。通过采用拓频处理系列技术,获得高分辨率的三维地震资料,在此基础上采用伽马反演和波阻抗分频反演等技术,有效预测并刻画了九龙山地区飞仙关组鲕粒滩薄储层的空间分布。储层预测结果与实钻吻合较好,证实了所采用的技术方法在鲕粒滩薄储层预测中是实用和有效的。

**关键词** 鲕粒滩; 地震反演; 储层预测; 飞仙关组; 九龙山地区; 四川盆地

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

### 0 前言

九龙山构造位于四川盆地西北部,大地构造位置处于米仓山台缘隆起与川北低平褶皱带过渡区域的川北古中坳陷低缓构造带,属地台北部边缘凹陷带中印支期形成的稳定的局部背斜构造<sup>[1-2]</sup>。该区现有L4井、L16井、L17井、L104井和L004-X1井等共5口井钻穿下三叠统飞仙关组鲕粒滩储层,其中L16井测试获得工业气流,初步显示了该区的勘探潜力。九龙山地区飞仙关组埋深5 000 m左右,常规地震资料主频约为30 Hz,已钻井揭示研究区飞仙关组二段(简称飞二段)层速度为5 200 m/s,因此该区地震资料的理论极限分辨率为22 m,而各井钻遇的储层单层厚度均小于22 m,小于调谐厚度,造成常规地震数据识别薄储层的难度大。前人虽然进行了多种方法的尝试,如利用稀疏脉冲反演方法<sup>[3]</sup>、伽马反演结合速度反演<sup>[4-5]</sup>、地震属性分析<sup>[6-8]</sup>、三维可视化技术刻画<sup>[9]</sup>等,但是这些方法都是以常规资料为基础实现的。由于薄储层在常规地震剖面上难以识别,因此薄储层厚度预测已成为制约气藏评价与开发的核心问题。

本次研究采用以动态子波反褶积为核心的拓频处理技术,提高了地震资料的分辨率,并结合伽马反演和波阻抗分频反演等技术,对鲕粒滩储层进行精细描述及定量预测,结果与实钻吻合较好,证实了本文采用的技术方法对鲕粒滩薄储层预测具有实用性和有效性,对解决其他地区勘探开发面临的类似问题具有一定的借鉴价值。

### 1 飞仙关组储层特征

飞仙关组整合于二叠系长兴组之上,长兴组生物礁古地貌高地和龙门山岛链为九龙山地区飞仙关组的沉积奠定了古地理基础,飞仙关组相对海平面下降促进了高能鲕粒滩的形成与迁移<sup>[10-12]</sup>。海侵期鲕粒滩主要发育在台地边缘,海退期向斜坡—盆地方向迁移,从而导致飞二段早期鲕粒滩近南北向分布,晚期演化为北东向展布。高能鲕粒滩相叠加准同生期溶蚀作用而形成规模优质储层,发育高能鲕粒滩储层。九龙山地区飞二段沉积期处于台地边缘有利相带,鲕粒滩体广泛分布,主滩体位于L16井区,发育上下2套鲕粒滩储层,但单层滩体厚度较薄。

收稿日期: 2019-02-03; 改回日期: 2019-06-16; 网络出版日期: 2020-01-15

本文受中国石油西南油气田公司科技项目“川西北部地区飞仙关组储层特征研究及勘探目标优选”(编号: 20150302-09)和“川西北部地区飞仙关组含油气地质综合研究”(编号: 20190301-16)共同资助

**第一作者**: 裴森奇,博士在读,高级工程师,从事油气勘探科研工作。通信地址: 621700 四川省绵阳市江油市川西北石油大厦; E-mail: psq2007@petrochina.com.cn

## 1.1 岩性特征

九龙山地区飞二段岩石类型多样,主要为大套泥质灰岩、泥灰岩夹中—薄层鲕粒灰岩。储集岩类主要为亮晶鲕粒灰岩、含灰残余鲕粒白云岩和豆粒灰岩,其中亮晶鲕粒灰岩和含灰残余鲕粒白云岩中发育优质储层。

**亮晶鲕粒灰岩** 以浅灰色、灰色、灰白色和褐灰色为主,中—厚层状,鲕粒含量在60%~75%之间,多呈颗粒支撑,多数分选及磨圆好;颗粒之间的充填物以亮晶方解石胶结物为主,其胶结期次一般有2~3期;发育粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔,孔隙多被沥青半充填。

**含灰残余鲕粒白云岩** 以浅灰色、灰褐色为主,常以层状或透镜状夹于厚层鲕粒灰岩之中;鲕粒一般由细粉晶他形白云石构成;发育晶间溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔,局部形成蜂窝状或针状溶孔,孔隙被少量沥青充填,面孔率一般为5%~15%。

**豆粒灰岩** 一般位于大套鲕粒灰岩的下部,呈灰色、灰褐色;豆粒含量为40%~60%,粒径为0.2~0.5 cm,其他颗粒为鲕粒和生物碎屑;粒间以2期亮晶方解石胶结物为主;见少量被沥青充填的粒间溶孔和粒内溶孔。

## 1.2 物性及孔隙特征

飞二段鲕粒滩储层实测32块样品的孔隙度分布范围在0.92%~16.92%之间,平均孔隙度为3.54%(其中孔隙度小于2%的样品占40.6%),孔隙度大于2%的样品的平均孔隙度为5.04%。30块样品的岩心渗透率大多数介于 $(0.0001\sim3.39)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.184\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,在 $(0.001\sim0.1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间的样品较多,占43%;渗透率变化范围大、非均质性强。总体来看,研究区飞二段主要发育低孔中—低渗储层。岩心及薄片显示飞二段储层主要发育粒内溶孔、粒间溶孔,其次发育微裂缝等。

## 1.3 岩石物理参数及正演模拟

首先,通过多参数交会图分析来明确研究区识别岩性与储层的敏感参数,为后续储层反演提供理论与解释的依据。图1a为飞二段自然伽马(GR)与密度的交会图,其中红色圆点代表滩体,灰色圆点代表非滩体,滩体的GR值<26 API,利用GR能较好地识别岩性。在识别出滩体后,通过分析飞二段波阻抗与密度交会图(图1b)发现:孔隙度>2%的鲕粒滩储层波阻抗值基本小于 $15500\times10^2\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 、且大于 $14000\times10^2\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 。因此,可通过波阻抗来判别鲕粒滩储层。

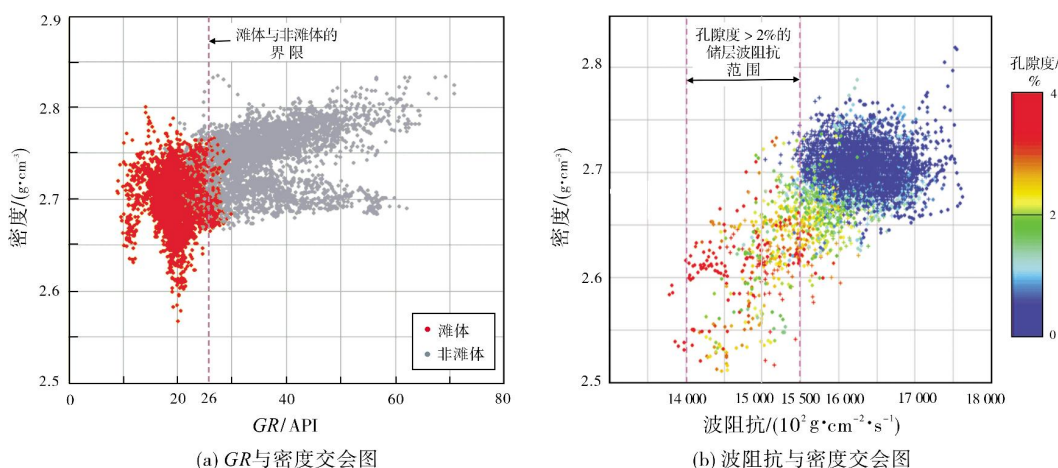


图1 四川盆地九龙山地区飞二段岩石物理参数交会图

Fig. 1 Crossplot of physical parameters of Member 2 of Feixianguan Formation in Jiulongshan area, Sichuan Basin

同时,还结合储层楔状正演模型来说明不同厚度储层条件下的地震响应特征。图2a为建立的地质模型,在飞二段中发育一段楔状的储层,各地层的岩石物理参数见表1,参数值来源于对实际工

区测井资料的统计。采用45 Hz的雷克子波与模型地层剖面褶积后得到图2b所示的地震响应剖面;整体上,储层顶界对应波谷反射,储层底界对应波峰反射;当鲕粒滩储层小于6 m时无独立反射,当其

大于6 m时,随着储层厚度增加,储层底界反射振幅变强。而研究区储层厚度在11.3~39.6 m之间,因此当

地震主频为45 Hz时,利用地震资料预测薄储层是可行的。

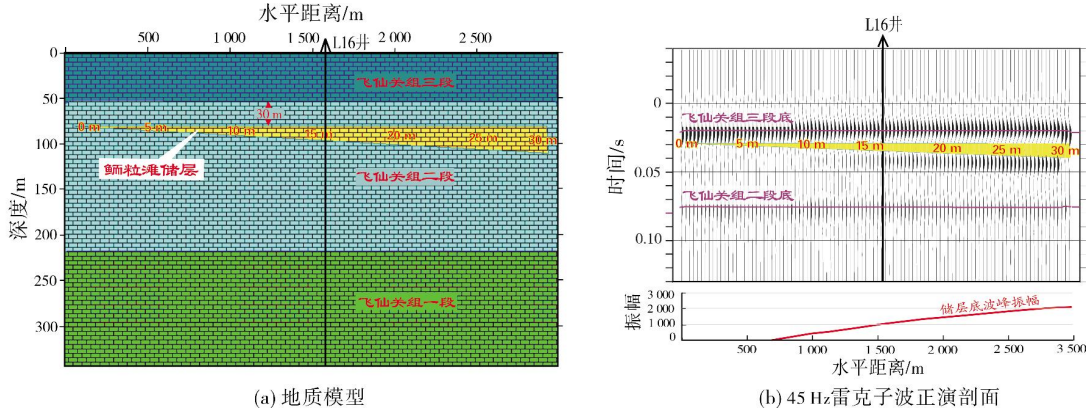


图2 四川盆地九龙山地区飞仙关组地质模型(a)与地震理论响应剖面(b)  
Fig. 2 Geological model (a) and theoretical seismic response profile (b) of Feixianguan Formation in Jiulongshan area, Sichuan Basin

表1 四川盆地九龙山地区飞二段正演模型岩石物理参数表  
Table 1 Petrophysical parameters of forward model of Member 2 of Feixianguan Formation in Jiulongshan area, Sichuan Basin

地层	厚度/m	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
飞三段	50	5 200	2.71
飞二段	170	5 950	2.71
飞一段	130	6 180	2.70
鲕粒滩储层	0~30	5 555	2.65

2 鲕粒滩储层精细描述

测井岩石物理分析表明:飞二段鲕粒滩体 GR 值基本上小于 26 API,与上、下地层区分明显,可采用 GR 反演预测出滩体的分布。滩体中鲕粒滩储层与围岩相比,速度略低,波阻抗基本上介于(14 000~15 500)×10<sup>2</sup> g/(cm<sup>2</sup>·s)之间,而滩体中非储层的波阻抗一般大于 15 500×10<sup>2</sup> g/(cm<sup>2</sup>·s)。因此,可在GR 反演刻画滩体的基础上,再进行波阻抗反演,在GR 小于 26 API 的地震体中寻找相对低的阻抗体,从而精细刻画飞二段鲕粒滩薄储层。

2.1 保幅宽频高分辨率处理

由于常规时间偏移数据体难以满足研究区的薄储层预测,为此需要进一步拓展地震资料频带以提高分辨率,才能对薄储层做出精细预测。为保证拓频处理后的地震数据保持原有的信噪比、相对振幅关

系和时频特性,在采用反褶积技术、谱整形及谱白化技术、Q补偿技术等常规处理技术的基础上,再采用动态子波反褶积技术进一步提高资料分辨率<sup>[13]</sup>。

信噪比与分辨率往往是一对矛盾,在提高分辨率的同时,会降低资料的信噪比。因此,本次研究的思路是在正演指导下优选处理参数(图3):在可分辨地质体的前提下,适当提高地震资料主频。从图3可以看到,当主频大于45 Hz时,地震数据就能区分储层顶底,因此为了保证后续地震资料的信噪比,地震拓频数据体的主频控制在45 Hz。

目前常用的反褶积方法大多基于常子波的褶积模型,然而实际地震子波在地下传播过程中总是时变和空变的。为此将地震剖面分为很多小的时窗段,在每一小段内都计算一个地震子波,进而得到时变与空变的动态子波,最后将这个动态子波用于反褶积,这样可明显提高地震资料的分辨率<sup>[14]</sup>。

在整个处理过程中,为了保证高分辨率处理后的同相轴是保真的,采用如下4条质控法则:①频带得到有效拓宽;②波组特征清晰,能有效追踪储层反射轴;③地震数据相位特征保持不变;④与合成记录的匹配程度好。以过L4井的地震剖面为例(图4),拓频后地震主频由常规的30 Hz(图4a)提高到45 Hz(图4b),频带宽度由常规的10~57 Hz拓宽到10~85 Hz。从合成记录的对比情况来看,合成道与井旁道的对应关系较好,这说明拓频后增加的反射轴是可靠的。



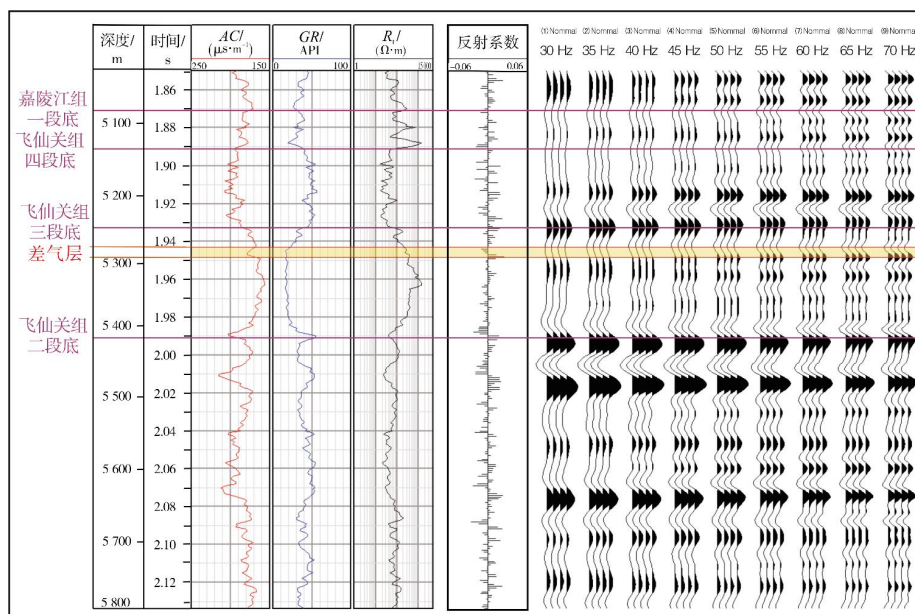
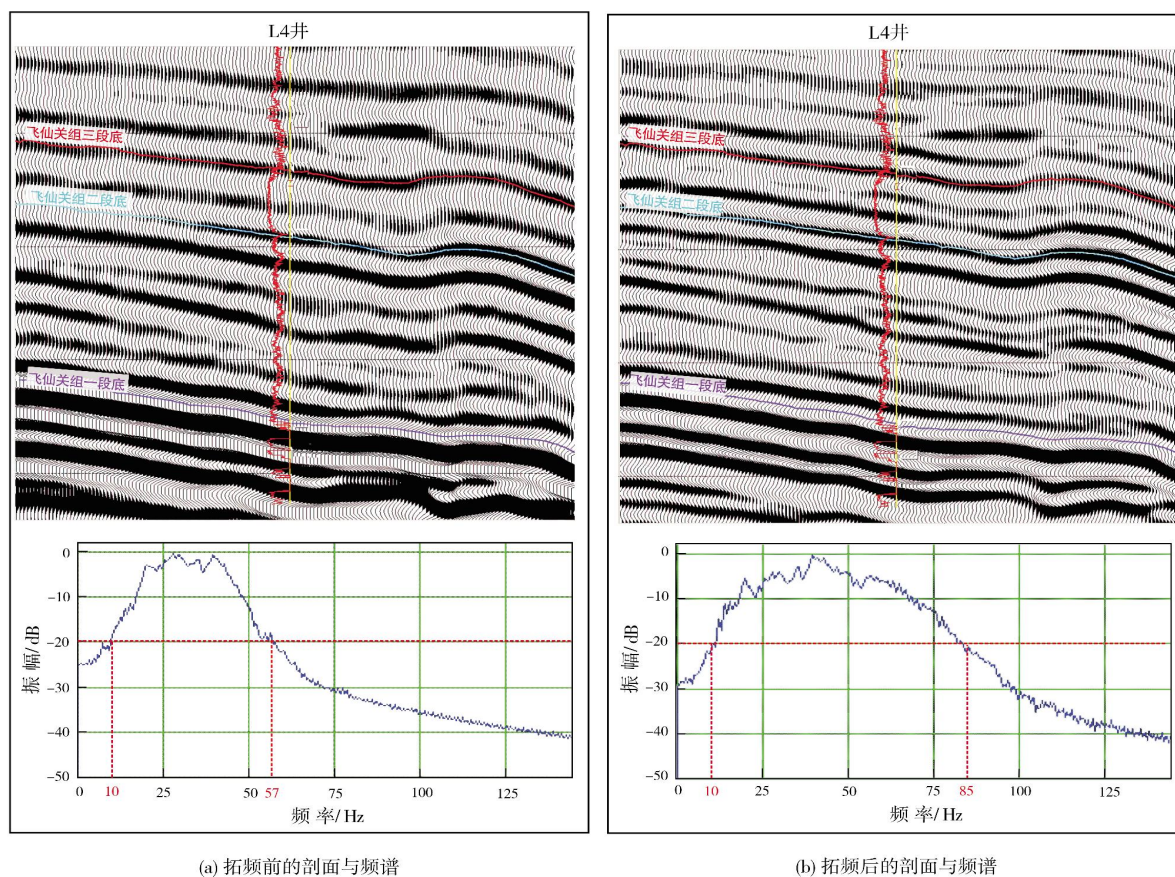


图3 四川盆地九龙山地区L4井不同频率地震正演模拟

Fig. 3 Forward seismic modeling with different frequencies of Well L4 in Jiulongshan area, Sichuan Basin



(a) 拓频前的剖面与频谱

(b) 拓频后的剖面与频谱

图4 四川盆地九龙山地区过L4井地震剖面 and 频谱拓频前后对比

Fig. 4 Comparison of seismic profile and frequency spectrum before and after frequency expansion of Well L4 in Jiulongshan area, Sichuan Basin

## 2.2 自然伽马反演

在提高地震资料分辨率的基础上,采用多属性、多权值 GR 预测方法来进行 GR 反演预测滩体。该方法假设 GR 曲线上某采样点的值是地震属性道上对应位置附近多个采样点的贡献,通过建立 GR 与多属性、多样点的非线性方程来达到预测目的。

在过 L16 井的 GR 反演剖面中(图 5),GR 值小于 26 API 预测为滩体,GR 值大于 26 API 预测为非滩体。剖面上反映出滩体向工区西部逐渐减薄、消失,飞二段下亚段由 L16 井区的滩体向东逐渐相变为 GR 值较高的灰岩。预测结果与实际地质情况吻合,因此利用 GR 反演能有效预测九龙山地区飞二段滩体的分布。

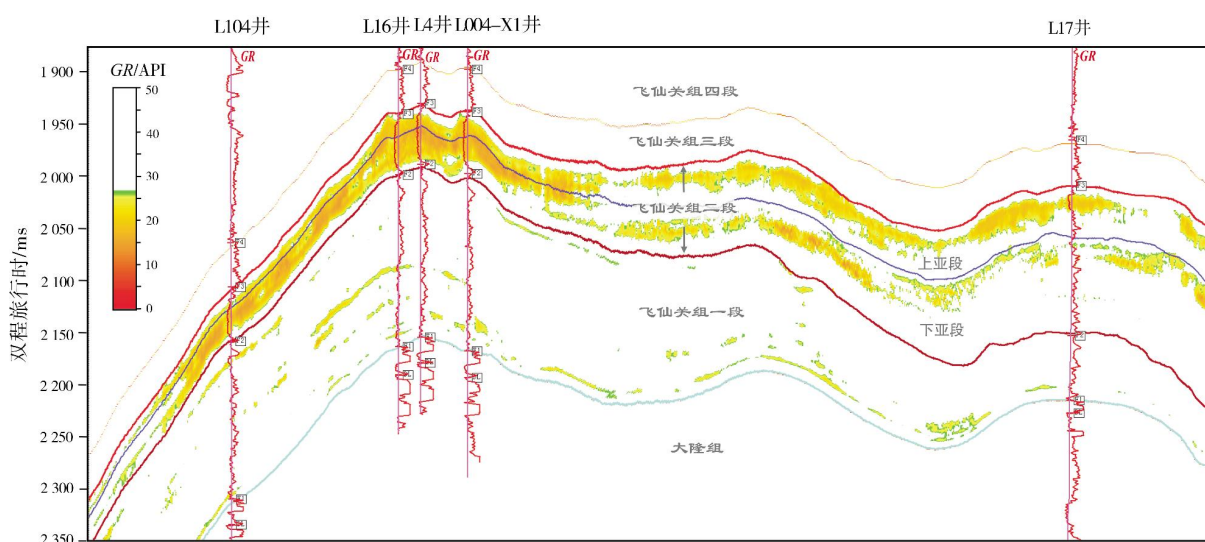


图 5 四川盆地九龙山地区 L104 井—L16 井—L4 井—L004 井—X1 井—L17 井 GR 反演剖面(剖面位置见图 6)

Fig. 5 GR inversion profile of Well L104-L16-L4-L004-X1 L17 in Jiulongshan area, Sichuan Basin (the section position is shown in Fig. 6)

利用 GR 反演数据体,以 GR 值 26 API 为门槛值,分别计算出飞二段上、下 2 段滩体的厚度(图 6,图 7)。飞二段上亚段滩体呈北东向分布,飞二段下亚段滩体呈近南北向分布,其展布特征主要受沉积时期台地边缘的分布所控制。

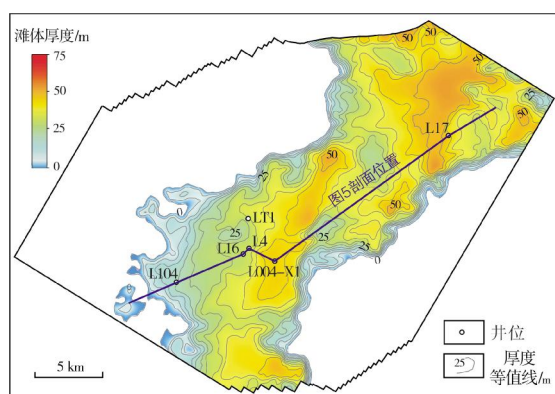


图 6 四川盆地九龙山地区飞二段上亚段滩体厚度分布预测

Fig. 6 Prediction map of shoal thickness of the upper submember of Feixianguan Member 2 in Jiulongshan area, Sichuan Basin

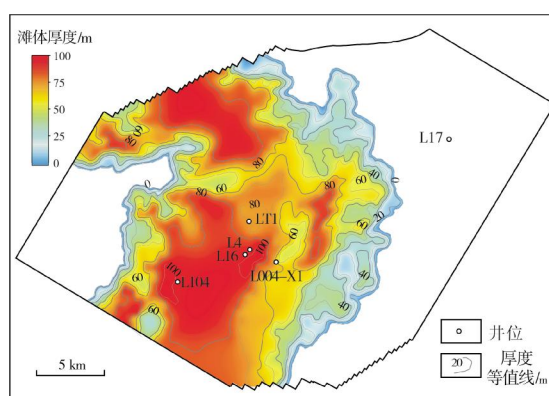


图 7 四川盆地九龙山地区飞二段下亚段滩体厚度分布预测

Fig. 7 Prediction map of shoal thickness of the lower submember of Feixianguan Member 2 in Jiulongshan area, Sichuan Basin

## 2.3 AVF 法波阻抗反演

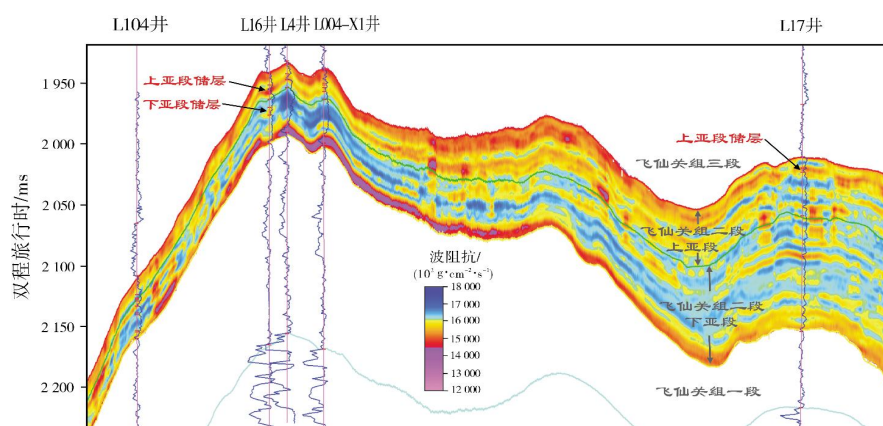
波阻抗反演作为联系地震、测井及地质信息的纽带,是储层地震预测的核心技术。由于工区井数较少且分布在局部区域,难以建立一个反映全区的



可靠低频模型;并且工区构造变化较大,通过单一子波难以得到准确的反演结果。而分频反演无需子波提取,也不需要初始低频模型,因此选用波阻抗分频反演技术定量预测鲕粒滩储层的空间分布。分频反演首先对地震数据进行频谱分析,确定数据的有效频带范围,利用小波分频技术将地震数据分成低、中、高频分频数据体;然后通过支持向量机(SVM)的方法计算出不同厚度下振幅与频率(AVF)之间的关系,将AVF关系引入反演,从而建立起测井目标曲线与地震波形之间的非线性映射

关系,得到反演结果。在分频反演过程中,由于加入了AVF关系,有效地降低了反演的自由度。

图8为连井的波阻抗反演剖面,井上投影曲线为波阻抗曲线。反演剖面整体上与井匹配较好。利用GR和波阻抗反演数据体,以GR值小于26 API、波阻抗值介于 $(14\ 000\sim 15\ 500)\times 10^2\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 为条件,分别计算出飞二段上、下段的储层厚度(图9,图10);飞二段上亚段储层与滩体展布形态一致,呈北东向分布, L16井区储层厚度最大;飞二段下亚段储层分布呈南北向,在L104井附近发育一套南北走向的储层。



注:井旁蓝色曲线为波阻抗曲线。

图8 四川盆地九龙山地区L104-L16-L4-L004-X1-L17井连井波阻抗反演剖面(剖面位置见图6)

Fig. 8 Impedance inversion profile of Well L104-L16-L4-L004-X1 L17 in Jiulongshan area, Sichuan Basin  
(the section position is shown in Fig. 5)

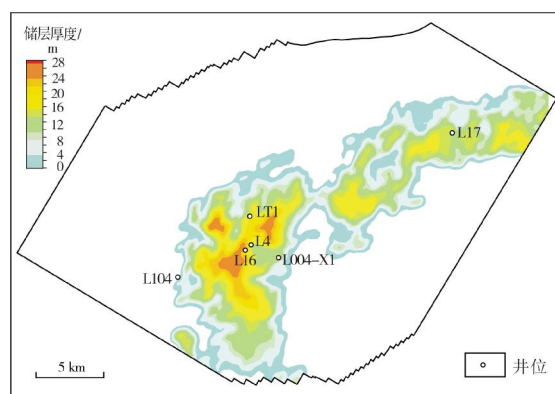


图9 四川盆地九龙山地区飞二段上亚段储层厚度分布预测图  
Fig. 9 Prediction map of reservoir thickness of the upper submember of Feixianguan Member 2 in Jiulongshan area, Sichuan Basin

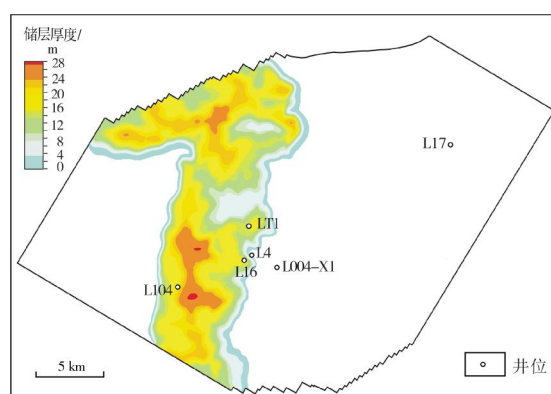


图10 四川盆地九龙山地区飞二段下亚段储层厚度分布预测图  
Fig. 10 Prediction map of reservoir thickness of the lower submember of Feixianguan Member 2 in Jiulongshan area, Sichuan Basin

## 2.4 应用效果分析

根据上述滩体与储层的预测结果,并结合关于沉积相的认识,在研究区部署了LT1井,钻探过程中在飞

仙关组获得了良好油气显示。LT1井揭示的飞二段上亚段储层厚度为18.5m,地震预测厚度为18m;揭示的下亚段储层厚度为17.8m,预测厚度为16m。实钻厚度与预测结果基本吻合,说明采用本文方法预测、描述

薄层鲕粒滩储层是可行的。

### 3 结 论

(1)岩石物理分析表明,九龙山地区飞二段鲕粒滩体GR值小于26 API,鲕粒滩储层的波阻抗值介于 $(14\ 000\sim 15\ 500)\times 10^2\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 。

(2)单井正演模拟及叠后数据拓频处理表明,地震主频达到45 Hz,频宽为10~85 Hz时,能够分辨出飞二段上、下亚段储层,且在地震剖面上有可追踪的独立反射轴。

(3)GR反演能有效预测飞二段滩体分布,在此基础上通过波阻抗分频反演可进一步预测鲕粒滩储层的空间展布。刻画结果表明:受台缘带分布的控制,飞二段上、下亚段储层的分布方向不同,上亚段储层大体呈北东方向展布,下亚段储层呈南北方向展布。

#### 参 考 文 献

- [1] 马永生. 中国海相油气田勘探实例之六: 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): 35-40.
- [2] 李向峰, 张春生, 刘富艳, 等. 普光气田飞仙关组储层沉积体系及沉积相特征[J]. 海相油气地质, 2010, 15(3): 19-22.
- [3] 缪志伟, 别静, 季春辉. 川东北元坝地区飞仙关组二段鲕粒滩储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 329-337.
- [4] 徐明华, 王绪本, 李学华. 自然伽马反演在双家坝构造飞仙关组鲕粒滩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2003, 42(3): 346-349.
- [5] 何谦, 熊高君. 自然伽马反演在鲕粒滩储层预测中应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014, 11(31): 101-102.
- [6] 刘殊, 唐建明, 马永生, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 332-338.
- [7] 刘微, 曾云贤, 杨雨. 飞仙关组鲕粒滩储层常规地震相识别技术探索[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(1): 30-33.
- [8] 谢芳, 李志荣, 肖富森, 等. 四川盆地东北部飞仙关组鲕粒滩储层地震预测技术[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 34-36.
- [9] 张向涛, 汪旭东, 张素芳, 等. 台内薄层礁滩型碳酸盐岩储层定量描述及控制因素: 以珠江口盆地A地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 417-424.
- [10] 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地北部晚二叠世—早三叠世碳酸盐岩斜坡相带沉积特征[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 143-156.
- [11] 王一刚, 刘划一, 文应初, 等. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层分布规律、勘探方法及远景预测[J]. 天然气工业, 2002, 22(增刊 1): 14-19.
- [12] 程锦翔, 郭彤楼, 谭钦银, 等. 川东北宣汉—达县地区长兴组—飞仙关组礁滩储层特征及其控制因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(3): 64-70.
- [13] 孙夕平, 张研, 张永清, 等. 地震拓频技术在薄层油藏开发动态分析中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 695-701.
- [14] 曹健. 动态子波反褶积研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.

编辑:张润合

## Quantitative description and predication of thin oolitic shoal reservoir of Triassic Feixianguan Formation in Jiulongshan area, Sichuan Basin

PEI Senqi, HU Xin, WANG Xingzhi, ZHANG Benjian, WANG Yufeng,  
LI Rongrong, LONG Hongyu

**Abstract:** Oolitic shoal reservoirs of the Triassic Feixianguan Formation is one of the important oil and gas reservoirs in Sichuan Basin. The reservoir of Feixianguan Formation in Jiulongshan area is about 5 000 m deep, which has the geological background of multi-stage bioclastic shoal deposition. However, the thickness of the reservoir is thin, and the resolution of existing seismic data is relatively low, so it is difficult to accurately predict the spatial distribution of oolitic shoal reservoir, which restricts the gas exploration of Feixianguan Formation in this area. In this paper, the high-resolution three-dimensional seismic data are obtained by using the frequency expansion processing technology. On this basis, the spatial distribution of thin oolitic shoal reservoir of Feixianguan Formation in Jiulongshan area is effectively predicted and depicted by using the technologies of gamma inversion and frequency decomposition impedance inversion. The reservoir prediction results are in good agreement with the actual drilling, which proves that the technologies are practical and effective in the prediction of thin oolitic shoal reservoir.

**Key words:** oolitic shoal; seismic inversion; reservoir prediction; Feixianguan Formation; Jiulongshan area; Sichuan Basin

PEI Senqi, First author: Senior Engineer, engaged in research of oil and gas exploration. Add: School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 637001, China