

川东北元坝地区飞仙关组二段 鲕滩储层预测

缪志伟*^① 别静^② 季春辉^①

(^①中国石化勘探南方分公司研究院,四川成都 610041; ^②中国石油东方地球物理公司油藏地球物理研究中心,河北涿州 072750)

缪志伟,别静,季春辉. 川东北元坝地区飞仙关组二段鲕滩储层预测. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 329-337.

摘要 川东北元坝地区飞仙关组二段具有广阔的勘探潜力。本文在分析元坝地区飞仙关组二段鲕滩储集层地质特征的基础上,利用三维地震资料,进行储集层精细标定、储集层地质建模与正演,确定储集层的地震响应特征;采用古地貌分析、地震相划分及地震属性分析等手段,确定储集层发育的有利相带和储层宏观展布,并以此为基础,应用稀疏脉冲约束波阻抗反演对储集层孔隙度及有效厚度进行精细预测,建立了一套鲕滩储集层的预测方法,预测了元坝地区飞仙关组二段鲕滩储集层的分布,通过与已完钻井储层厚度及孔隙度的对比,证实了预测结果的正确性。

关键词 飞仙关组二段 鲕滩储集层 地震相 约束反演 储层预测

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 概况

元坝地区构造上处于川东北通南巴背斜构造带西南、九龙山背斜和苍溪—川中低缓构造带交界处

(图1)。该区整体埋藏深,构造变形弱,地层产状平缓,处于川北拗陷与川中隆起的过渡带。区内下三叠统飞仙关组二段沉积格局全区变化较大,发育开阔台地相、局限台地相、台地边缘浅滩相、台地边缘斜坡相和陆棚相等沉积相类型,其中台地边缘浅滩

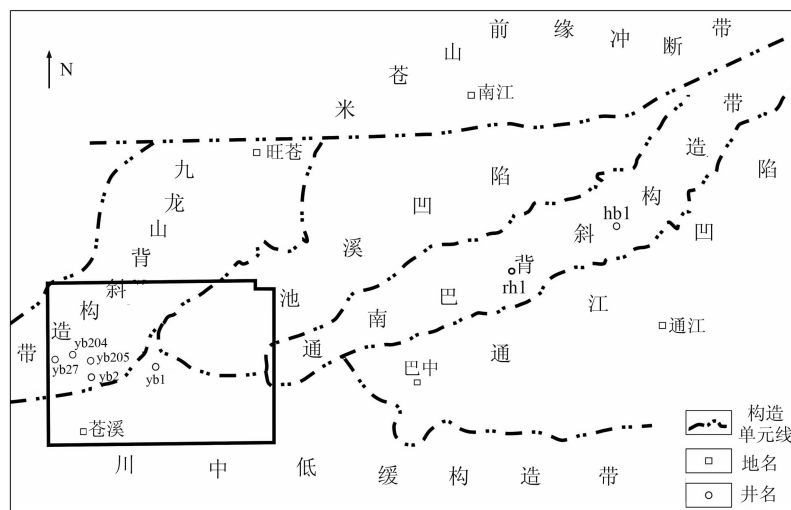


图1 川东北地区构造纲要图

* 四川省成都市高新区吉泰路688号西南科研办公基地勘探南方分公司研究院,610041。Email:mzw495342920@163.com
 本文于2012年10月18日收到,最终修改稿于2014年1月21日收到。
 本研究受国家油气重大专项课题(2011ZX05005-003)资助。

及开阔台地相为储层发育的主要相带,储层岩性以亮晶鲕粒灰岩为主^[1~3]。近年来,该区钻达飞仙关组的井孔均见到较好的油气显示,其中 yb27 井及 yb204 井在飞二段获得工业气流,充分表明元坝地区飞仙关组二段具有广阔的勘探潜力。但元坝地区飞仙关组二段鲕滩储层分布较为分散、连片性差,地震反射特征与泥灰岩反射类似,给储层的精细预测带来了困难。此前很少有人以飞二段储层存在的这两点特征为切入点进行储层的精细预测研究,大部分研究成果主要集中于储层的地震响应及分布的控制因素等方面。为了加快元坝气田的整体评价,尽快并准确确定飞二段储层分布已势在必行,这也是本文研究的初衷。

2 储集层预测技术路线

在确定储层发育特征及有利相带的基础上,本文首先通过合成记录的精细标定,明确鲕滩储层的地震响应特征;然后通过一维、二维地质正演模拟建立储层的地震识别模式,结合沉积时期古地貌,辅助以波形分类、最大振幅等属性,分析等时地层格架内地震相、沉积相的横向展布,明确储层的宏观分布;最后在沉积相带约束下,运用波阻抗反演对飞二段储层的分布进行了精细预测。在此基础上总结出一套鲕滩储层预测的技术方法(图2)。

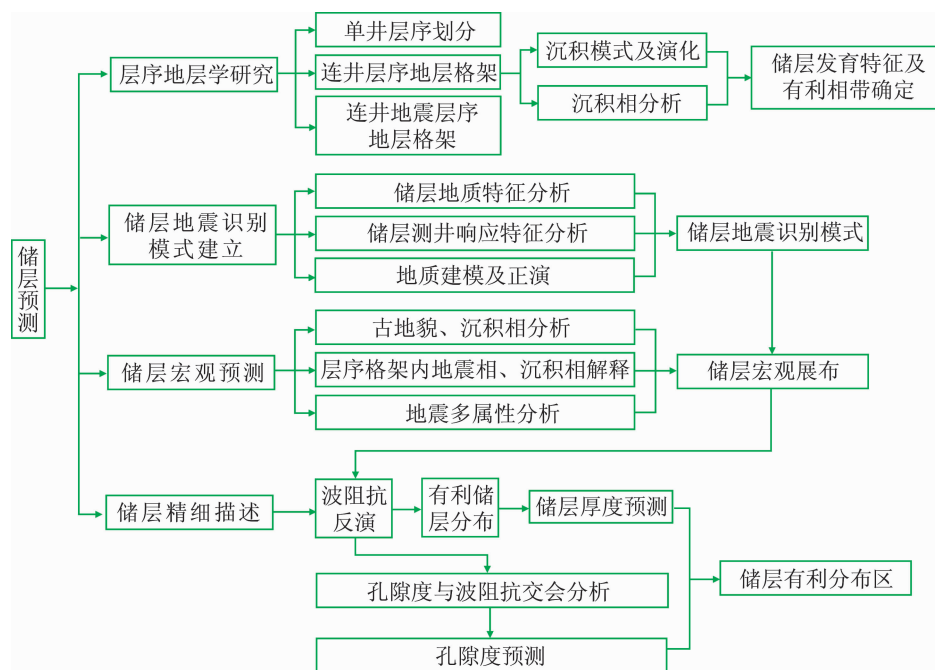


图2 技术路线图

3 储集层地球物理响应特征

3.1 岩石物理特征

元坝地区飞仙关组储集层岩石类型相对较少,以亮晶鲕粒灰岩及亮晶鲕粒白云质灰岩为主,少量亮晶鲕粒白云岩、粉细晶白云岩,垂向上主要分布于飞二段中上部。根据储层孔隙度及渗透率参数,参照四川碳酸盐岩储集岩分类方法,将飞仙关组储层划分为4类(表1),并以孔隙度2%作为储层评价的下限值,孔隙度大于2%的称为有效储层。

表1 元坝地区飞仙关组储层分类评价表

对比项目		储层分类			
		I	II	III	IV
储层	孔隙度(%)	>10	5~10	2~5	<2
	渗透率(mD)	>1.0	0.25~1	0.002~0.25	<0.002

据图3显示,飞二段I、II、III、IV类储层均有发育;以III类储层为主;IV、II类储层次之;I类储层很少,仅占3%。渗透率分类比例显示,渗透率要稍好于孔隙度,表明裂缝对渗透率的提高有所贡献。孔隙度与渗透率特征表明,飞二段储层物性较好,以III类为主,少量II类的孔隙型及裂缝—孔隙复合型储层。

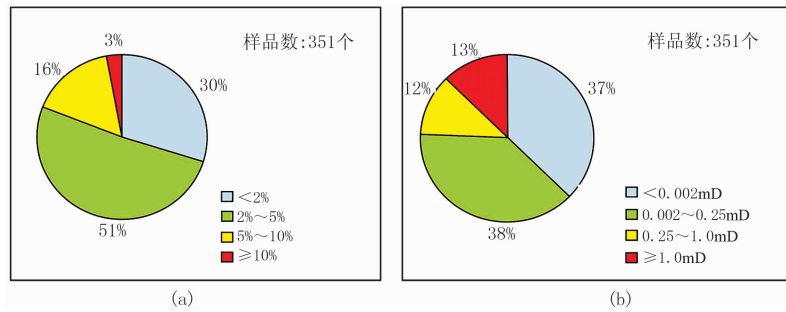


图 3 元坝地区飞二段储层孔隙度(a)及渗透率(b)分类比例

3.2 测井响应特征

通过对工区内围岩和储层的岩石物性进行分析,不同岩性的层速度值由大到小依次为致密灰岩、砂屑灰岩、鲹粒灰岩、含泥灰岩;自然伽马值由大到小依次为含泥灰岩、灰岩、砂屑灰岩、鲹粒灰岩;孔隙性较好的灰岩、鲹粒灰岩、砂屑灰岩等均可作为储层。当储层含流体时速度降低,当储层含气时速度最低。储层速度基本在 5400~6000m/s 之间,泥质含量较低,自然伽马值一般在 10~15API 之间,储层具有低速(储层含气速度最低)、低自然伽马的特征。

3.3 储层地震响应特征分析

3.3.1 储层精细标定

利用元坝地区已完钻井的声波、密度资料,制作

合成地震记录,对储层进行精细标定。以 yb204 井为例(图 4),储层的测井及地震响应特征为:飞二段储层以鲹粒灰岩为主,与围岩相比,具有低速、低密度的特点;在地震剖面上,储层顶界为由下部低速鲹粒灰岩与上部高速灰岩、致密生屑灰岩形成的波谷反射;储层底界为由储层与下部致密灰岩形成的波峰反射,储层包含在飞二段上部的波谷至下部的中强波峰之间。由于鲹滩与其围岩岩石物理的差别,地震剖面上鲹滩通常表现为“亮点”的反射特征^[4,5]。

3.3.2 正演模拟

为了确定储层底界波峰反射的强度与储层厚度的关系,选取合适单井,统计已完钻井围岩和储层的速度、密度等参数,分别进行一维、二维地质

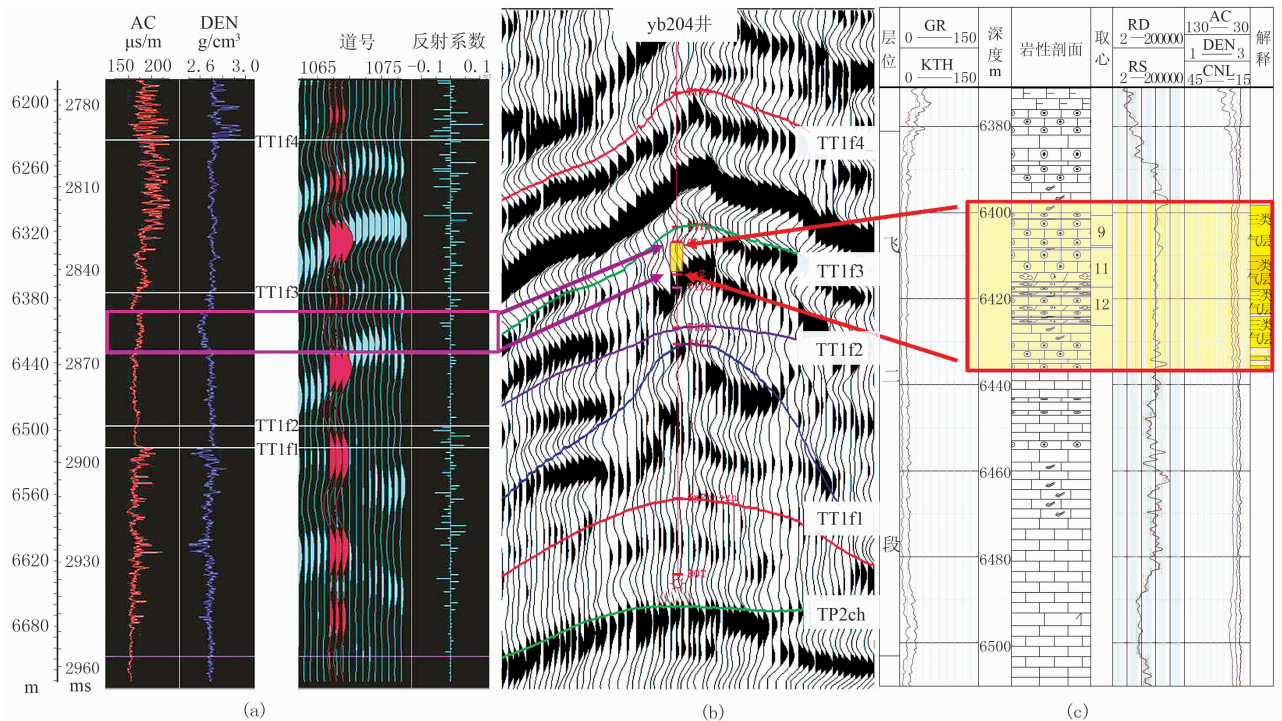


图 4 yb204 井储层标定图

(a)合成地震记录;(b)过井地震剖面;(c)测井曲线及岩性
AC:声波时差($\mu\text{s}/\text{ft}$);DEN:密度(g/cm^3);GR:自然伽马(API);KTH:无轴伽马(API);
RD:深双侧向($\Omega \cdot \text{m}$);RS:浅双侧向($\Omega \cdot \text{m}$);CNL:井壁中子(V/V)

模型正演。

3.3.2.1 一维模型正演

yb204 井在 6398.2~6436.5m 井段存在 4.4m 厚的Ⅲ类夹Ⅱ类鲕粒滩储集层,平均孔隙度约为 4.22%,其速度及密度与围岩相比偏低,与地震剖面 2870ms 处的强振幅反射相对应。通过储集层“置换”试验,将储集层下部的速度和密度用围岩的速度和密度替代,减小储层的厚度,发现与储集层对应的强振幅反射减弱(图 5),表明振幅的强弱变化反映

了储集层厚度的变化。

3.3.2.2 二维模型正演

为进一步确定鲕粒滩储集层地震反射特征,应用统计的储层及围岩的速度和密度,建立地质模型,对储层厚度的横向变化进行正演研究(图 6)。从图中可以看出,随着储层厚度的逐渐减薄,与储层对应的振幅也逐渐减弱,直至消失。正演模型表明,振幅的强弱是储层厚薄的响应;强反射尖灭点,为储层的边界或相变点。

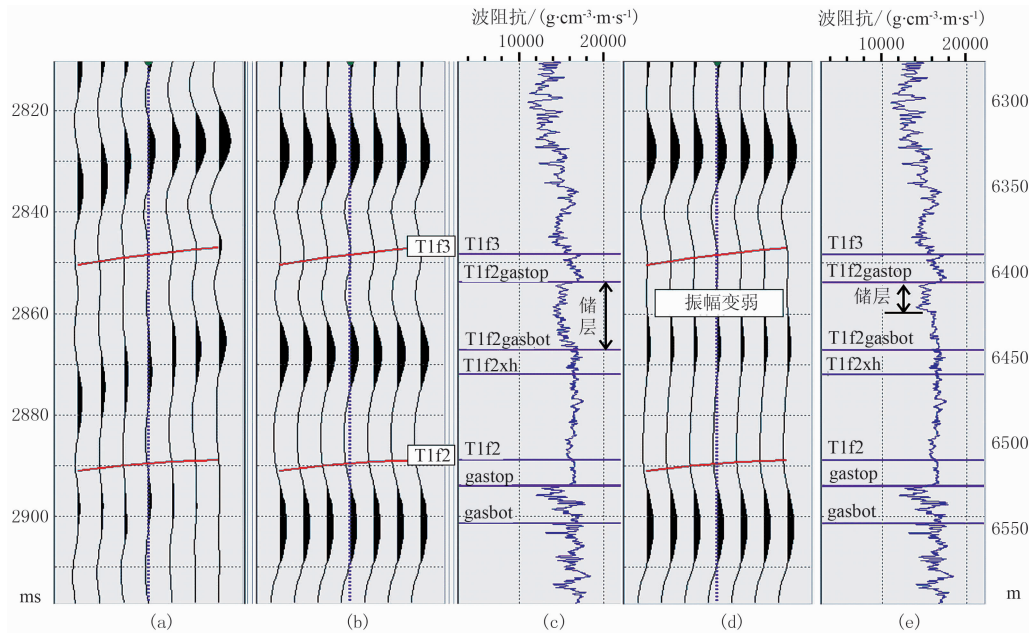


图 5 yb204 井储层“置换”实验

(a)地震记录;(b)合成记录;(c)波阻抗曲线;(d)储层减薄合成记录;(e)储层减薄波阻抗曲线

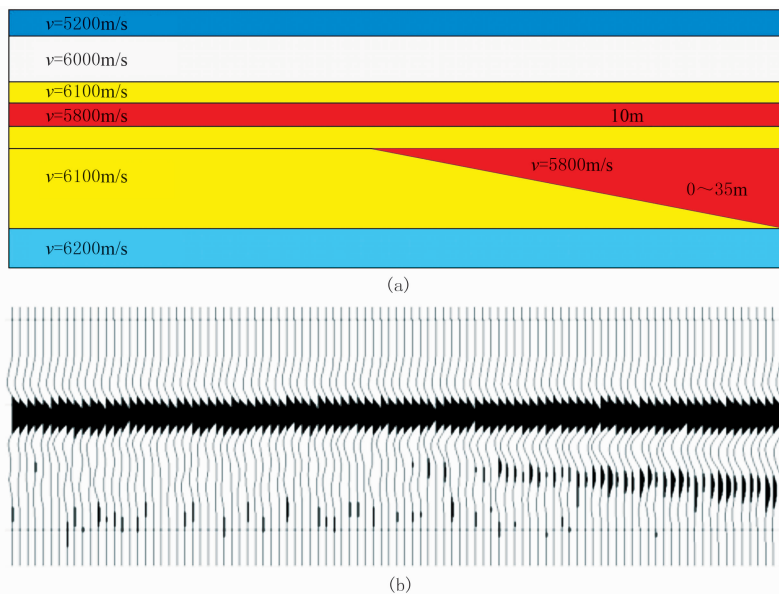


图 6 储层厚度减薄地质模型(a)和正演记录(b)

4 储集层预测

4.1 有利相带分析及储层宏观分布预测

4.1.1 古地貌分析

古地貌与沉积相的发育及分布密切相关,而沉积相控制了储层的发育与分布^[6]。因此在进行储层研究时如能较准确地恢复原始沉积时期的古地貌格局,就可以循着古地貌单元的线索寻找储层的分布相带。

古地貌可以采用层拉平技术近似地恢复。通过拉平 T1f1(飞一段底)、T1f3(飞三段底)反射层,编

制出长兴组末期、飞二段末期沉积时期古地貌图(图 7)。由古地貌图可以看出,长兴组沉积末期到飞仙关组沉积早期,元坝地区 yb204-yb101-yb9 井一带及其以南为一北西—南东向古地貌高地。飞一到飞二沉积时期,由于西北部摩天岭古陆隆起,使得元坝西北部迅速隆升,开江—梁平陆棚西北侧封闭,以及受长兴组沉积晚期古地貌的影响,在总体海退背景下,飞仙关组基本为填平补齐沉积,台缘由浅水区向深水区迁移^[7];台地相沉积进一步扩大,使研究区整个中西部处于构造的高部位,发育台地边缘浅滩、台地暴露浅滩相沉积,因此发育有大面积物性较好的碳酸盐岩储层。

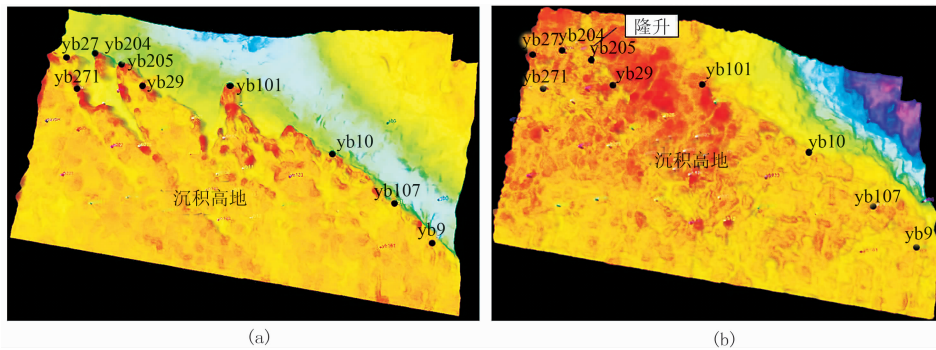


图 7 元坝地区长兴组末期(a)及飞二段末期(b)古地貌轮廓

4.1.2 利用地震属性预测储集层分布

地震属性分析主要是在储集层准确标定基础上,选取目的层段的时窗,提取地震波的振幅、波形、频率、相位、衰减因子、相关系数、能量和比率等参数的变化幅度及范围进行分析^[8]。同时,地震属性具有多样性,应针对不同的研究目标选取不同的地震属性^[9]。本文在属性分析方面主要按以下思路进行:运用波形分类属性对元坝地区飞二段地震相进行精细划分,在古地貌研究基础上,以单井沉积相为指导,以地震剖面为约束,将地震相转换为沉积相,明确储层发育的有利相带分布;根据飞仙关组二段储层地震响应特征,选取最大反射振幅属性,在有利相带内对储层分布进行宏观预测。

4.1.2.1 波形分类

地震信号的总体异常与地震波形有非常密切的关系^[10],地震波形是振幅、频率、相位等横向变化的综合反映,波形的横向变化可以反映地下地质体岩性、物性、结构、构造等的横向变化。在实际应用中,波形分类技术主要根据不同沉积特点在波形上显示的差异,将研究区目的层各地震道划分为不同类

型^[11],实现不同地下地质体的归类。

应用 Stratimagic 软件,选取 T1f3+5ms~T1f2 为时窗,根据层段内地震的振幅、频率、相位等属性对地震波进行分类,通过比较划分出 12 类波形,能较好地反映飞二段反射的变化特征。

飞二段波形分类平面图(图 8)显示,全区可分为四大类:Ⅰ类地震相为平面上红色含黄绿色的区域,主要分布于工区西南部,地震剖面上表现为中弱振幅、中低频率、连续性差或杂乱反射的特征,反映沉积水体较浅、动荡、水动力较强,表征台地相沉积;Ⅱ类地震相为平面上呈淡蓝色含蓝色区域,大致呈北西向条带状展布,地震剖面上表现为中低频弱反射或空白反射的特征,剖面上坡度较缓,为斜坡相的上缓坡;Ⅲ类地震相在平面上呈暗红色,地震剖面上显示为中弱振幅、中低频率、亚平行反射特征,剖面上坡度较陡,代表斜坡相的下斜坡;Ⅳ类地震相主要分布于工区东北部,地震剖面上表现为低频、中强振幅、较连续、斜交反射地震相,反映沉积水体比较深,水动力较弱,沉积环境较平静,为斜坡下段或陆棚相沉积。

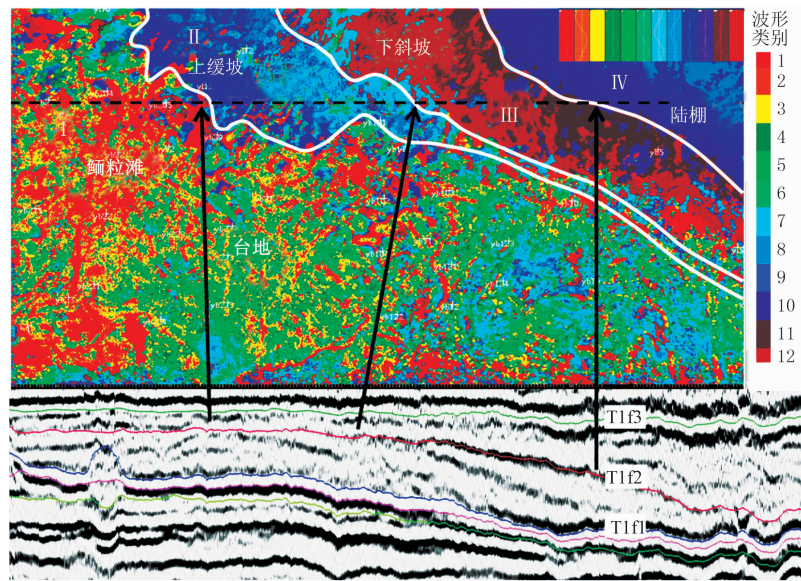


图8 飞二段地震相平面图

4.1.2.2 振幅属性

正演分析结果表明,飞仙关组二段鲕粒滩储层厚薄在振幅上都具有相应的反映。储层厚度越大,与其对应的振幅反射越强。根据储层的这一特点,选取合适的时窗,提取层段内的最大反射振幅平面图(图9)。由最大振幅平面图看出,振幅的分布具有明显的分带性,中、强反射振幅主要发育于工区的西南部以及东北部,通过与地震相平面图的对比以及单井的标定,西南部为台地相沉积,发育台地边缘浅滩、台地暴露浅滩相沉积,中、强振幅为储层的反射;西北部为斜坡—陆棚相,强振幅为泥灰岩的反射。在台地相带内(即台缘线左侧),西部 yb204-yb2-yb223 井一带储层发育连片性较好,东南部储

层发育分散、连片性差,初步认为工区西部是储层最主要的分布区。

4.2 波阻抗反演、孔隙度预测及效果分析

4.2.1 波阻抗反演

鲕滩储层的地震响应特征源于储集层孔隙度发育及含流体引起的速度及密度的变化,因此波阻抗反演是进行鲕滩储层预测的有效方法^[12]。根据鲕滩储集层低波阻抗的特征,以已完钻井为约束,针对飞二段进行波阻抗稀疏脉冲约束反演。反演结果表明,参与反演的 yb27、yb204、yb205 等井的鲕滩储集层“低波阻抗异常”都得到了较好的反映(见图10),反演结果与测井储层解释吻合程度高,分辨率亦得到一定程度的提高。

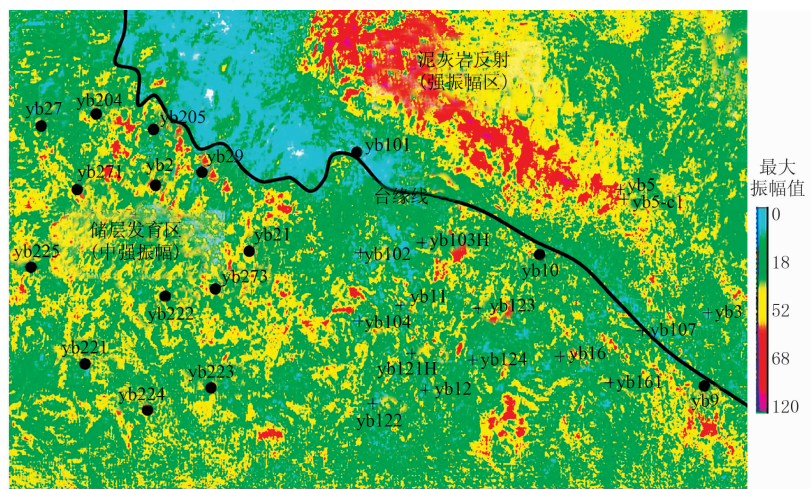


图9 飞二段最大振幅属性平面图

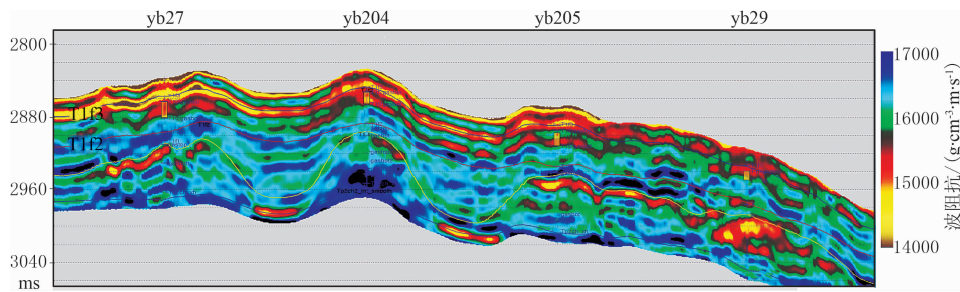


图 10 过 yb27-yb204-yb205-yb29 井波阻抗反演连井剖面

飞二段储层具有“高波阻抗背景下相对低波阻抗”的特点,为了更好地突显储层在平面上的展布规律,根据飞二段储层在垂向上的分布特征,选取合适时窗,避开飞三段底部低阻抗泥灰岩,提取层段内最小波阻抗值平面图。由波阻抗平面图(图 11)可以看出,工区西北部及南部局部区域红黄绿三色代表

波阻抗值接近飞二段钻遇的鲕粒灰岩储层的波阻抗值,为鲕滩储层的发育区,其中西北部 yb27-yb204 井区一带储层连片性较好,为鲕滩储层的主要发育区;yb101 井以北,也存在红黄绿相间的区域,为斜坡相内低阻抗的泥灰岩,储层不发育;浅蓝色和深蓝色代表的是非储层的高阻抗值区域,储层亦不发育。

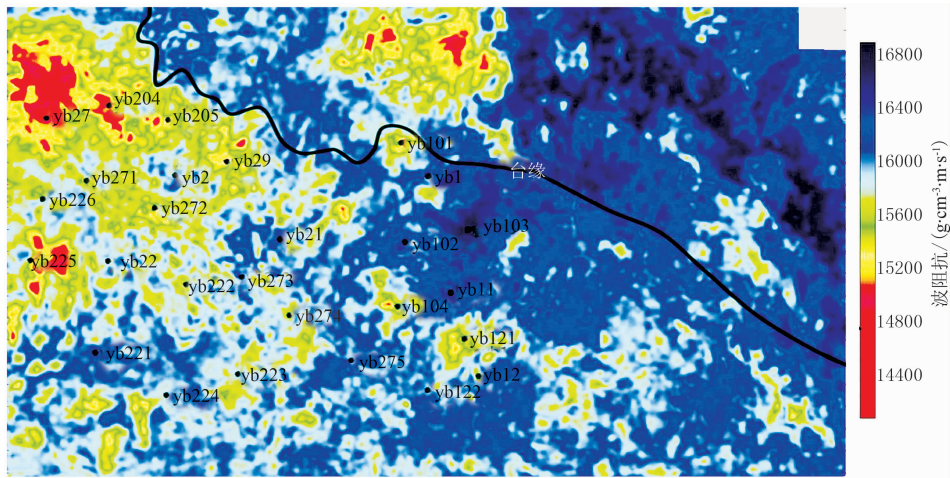


图 11 元坝地区飞仙关组二段波阻抗平面图

在波阻抗反演的基础上,利用沉积相带约束,通过对 yb27、yb204、yb29 井等 20 多口钻井的储层波阻抗概率统计(图 12),以波阻抗值 $13900 \sim 16200 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为门限值提取飞二段储层有效厚度。

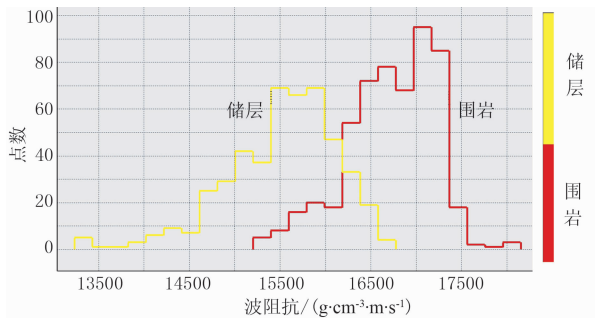


图 12 飞二段储层波阻抗概率统计图

4.2.2 孔隙度预测

在波阻抗反演的基础上,通过对已完钻井波阻抗与孔隙度进行交会分析,拟合波阻抗—孔隙度的关系公式,利用波阻抗数据体求取孔隙度数据体,对孔隙度进行预测。

根据飞二段储层孔隙度与波阻抗交会分析结果,飞二段储层孔隙度与波阻抗的相关关系式为 $\phi = -2.30264 \times 10^{-22} \text{imp}^6 + 6.06825 \times 10^{-18} \text{imp}^5 + 7.4954 \times 10^{-14} \text{imp}^4 - 1.45808 \times 10^{-9} \text{imp}^3 - 6.59737 \times 10^{-5} \text{imp}^2 + 1.46161 \text{imp} - 7934.86$ 相关系数为 0.8。式中: ϕ 为测井解释孔隙度(%); imp 为测井波阻抗($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

4.2.3 预测效果分析

通过综合分析,研究区飞二段储层主要分布于

工区的西部,连片性较好,预测孔隙度在 2.4%~5.3%之间,储层厚度在 0~47m 之间,平面分布规律与工区内已完钻井揭示的规律一致。平面上,孔隙度值变化较快,反映储层的非均质性较强,较高孔隙度的区域主要分布在台缘附近的 yb204、

yb205 井区及台内的 yb224、yb223 井区,孔隙度在 4.0%~5.3% 之间,其余区域的预测孔隙度在 2.4%~4.0% 之间。飞仙关组二段储层,其中 yb204、yb205、yb27 井区厚度在 20~36m 之间,其余区域基本在 0~22m 之间(图 13)。

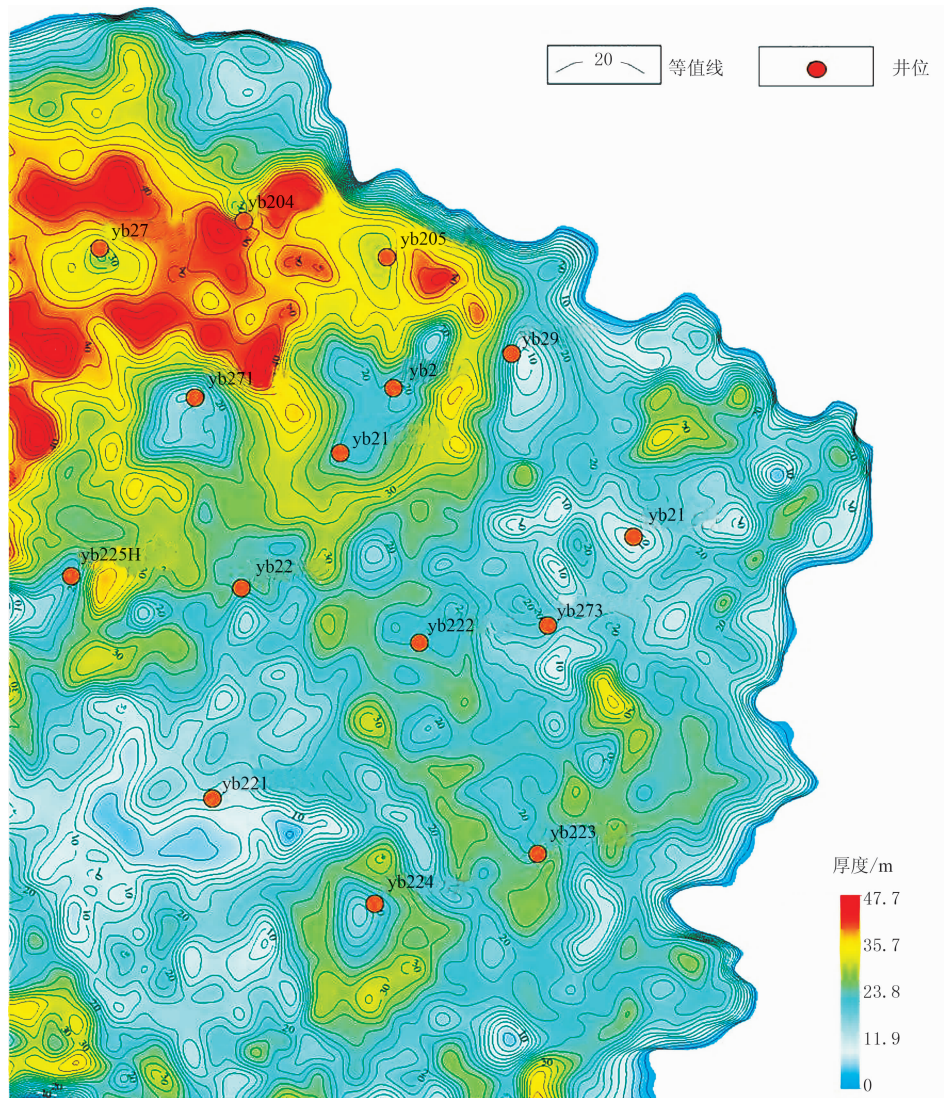


图 13 飞二段储集层预测厚度图

通过对工区内已完钻井储集层厚度及孔隙度的实钻值与预测值进行分析,两者误差在合理范围之内,吻合良好。

5 结束语

元坝气田飞仙关组二段鲕滩储集层发育较为分散、地震反射特征与泥灰岩类似,存在多解性。在建立鲕滩储层地震识别模式的基础上,以古地貌研究

为基础,结合波形分类、振幅等属性,进行地震相划分,确定储层发育的有利沉积相带展布及储层的宏观分布,以此指导最终的波阻抗反演,可以大大提高储层预测的精度。

参考文献

- [1] 王兴志,张帆,蒋志斌等. 四川盆地东北部飞仙关组储层研究. 地学前缘, 2008, 15(1): 117-122.
Wang Xingzhi, Zhang Fan, Jiang Zhibin et al. A study of Feixianguan reservoir in northeast Sichuan

- basin. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 117-122.
- [2] 郭旭升, 郭彤楼, 黄仁春等. 普光一元坝大型气田储层发育特征与预测技术. *中国工程科学*, 2010, 2(10): 82-90.
Guo Xusheng, Guo Tonglou, Huang Renchun et al. Reservoir development characteristics and predication technologies of large Puguang-Yuanba Gas Field. *Engineering Sciences*, 2010, 2(10): 82-90.
- [3] 赵文光, 蔡忠贤, 邹华耀等. 川东北元坝地区三叠系飞仙关组碳酸盐岩台地演化影响因素分析. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(3): 410-413.
Zhao Wenguang, Cai Zhongxian, Zou Huayao et al. Influence factor analysis for evolution of Feixianguan Formation carbonate platform in Yuanba Area, Northeast Sichuan Basin. *OGP*, 2010, 45(3): 410-413.
- [4] 李岩峰, 刘殊, 曾晓. 川东飞仙关组鲕滩储层地震响应特征及预测. *石油物探*, 2005, 44(3): 236-239.
Li Yanfeng, Liu shu, Zeng Xiao. Seismic response feature and prediction of oolitic beach reservoir of Feixianguan Formation in east Sichuan basin. *GPP*, 2005, 44(3): 236-239.
- [5] 武丽, 张永贵, 姜大建等. 基于等时地层格架的储层预测——以四川通南巴构造带飞仙关组为例. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(6): 944-951.
Wu Li, Zhang Yonggui, Jiang Dajian et al. Reservoir prediction based on isochronous stratigraphic framework: an example of Feixianguan formation in Tongnanba Structural Belt. *OGP*, 2011, 46(6): 944-951.
- [6] 马永生, 郭旭升, 凡睿. 川东北普光气田飞仙关组鲕滩储集层预测. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 60-64.
Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Fan Rui. Reservoir prediction of Feixianguan Formation in Puguang Gas Field, Northeast Sichuan Province. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 60-64.
- [7] 张玺华, 贺振华, 赵思为. 川东北地区飞仙关组鲕粒滩地震识别技术. *油气地球物理*, 2009, 7(1): 13-17.
Zhang Xihua, He Zhenhua, Zhao Siwei. Seismic recognition technology on oolitic beach in the northeast of Sichuan Feixianguan. *Petroleum Geophysics*, 2009, 7(1): 13-17.
- [8] 胡伟光. 地震相波形分类技术在川东北的应用. *勘探地球物理进展*, 2010, 33(1): 53-57.
Hu Weiguang. Application of seismic facies waveform classification in northeastern Sichuan basin. *Progress in Exploration Geophysics*, 2010, 33(1): 53-57.
- [9] 武丽, 于文芹, 杨立强等. 地震属性分析技术在波斯湾盆地中部 S 区块储层预测中的应用. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(5): 557-561.
Wu Li, Yu Wenqin, Yang Liqiang et al. Application of seismic attributes analytic technique to reservoir prediction in some block of central part of Persian Gulf basin. *OGP*, 2008, 43(5): 557-561.
- [10] 熊伟, 万忠宏, 刘兰锋等. 波形分类中半自动确定分类数的方法. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(2): 265-271.
Xiong Wei, Wan Zhonghong, Liu Lanfeng et al. A new method for semi-automatic definition of cluster number in waveform classification. *OGP*, 2010, 45(2): 265-271.
- [11] 张学娟, 卢双舫, 贾承造. 基于沉积特征分区域的多元地震属性储层定量预测方法. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(1): 115-120.
Zhang Xuejuan, Lu Shuangfang, Jia Chengzao. The regional multiple seismic attribute quantitative reservoir prediction method based on sedimentary characteristics. *OGP*, 2012, 47(1): 115-120.
- [12] 马劲风, 王学章, 贾春环等. 波阻抗约束反演中的约束方法研究. *石油物探*, 2000, 39(2): 52-63.
Ma Jingfeng, Wang Xuezhong, Jia Chunhuan et al. Study of constraint methodology in constrained impedance inversion. *GPP*, 2000, 39(2): 52-63.

(本文编辑: 刘英)

作者简介



缪志伟 助理工程师, 1987 年生; 2009 年本科毕业于长江大学地球物理学院勘查技术与工程专业, 获学士学位, 2011 年提前一年修完硕士研究生课程, 毕业于中国地质大学(武汉)资源学院能源地质工程专业, 获得硕士学位; 现在中国石化勘探南方分公司从事构造解释及储层预测等工作。