

三角洲外前缘薄砂体地震综合预测方法

肖佃师^{1,2}, 卢双舫¹, 王海生³, 陆正元², 郭思祺¹, 张鲁川¹

(1. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580; 2. 成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059; 3. 中国石油辽河油田公司, 辽宁盘锦 124010)

摘要:针对三角洲外前缘储层单砂体薄、砂泥岩波阻抗值差异小的特点,结合曲线重构、地震正演等技术,分别对适用于薄储层的地震反演及属性分析方法进行研究。结果表明:声波与自然伽马曲线重构、稀疏脉冲波阻抗与地质统计学反演的联合是实现薄储层精细预测的有效手段,前者提高了波阻抗反演的岩性分辨能力,后者降低了储层预测的不确定性;三角洲外前缘薄砂体的厚度与地震属性间关系较分散,依据地震属性对不同规模砂体的分辨能力指导属性优选及阈值选取,可以定性刻画砂层组内薄砂体的空间展布;将地震反演及属性分析的成果进行交互验证,指导油田井位部署方案的调整,区块内钻探成功率由65%提高至82%。

关键词:曲线重构;地质统计学反演;属性分析;薄砂体;三角洲外前缘

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:肖佃师,卢双舫,王海生,等. 三角洲外前缘薄砂体地震综合预测方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):62-69.

XIAO Dianshi, LU Shuangfang, WANG Haisheng, et al. Comprehensive prediction method of seismic to thin sandstone reservoir in the delta-frontal [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 62-69.

Comprehensive prediction method of seismic to thin sandstone reservoir in delta-frontal

XIAO Dianshi^{1,2}, LU Shuangfang¹, WANG Haisheng³, LU Zhengyuan², GUO Siqu¹, ZHANG Luchuan¹

(1. Institute of Unconventional Oil & Gas and New Energy in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation in Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, China)

Abstract: The reservoirs of delta-frontal subfacies are characterized by single thin sandstone and there are no obvious impedance difference between sandstone and shale. Based on curve reconstruction and seismic forward modeling, the seismic inversion and attribute analysis technology suitable to such thin reservoirs were studied respectively. The results indicate that fine prediction of thin reservoirs can be accomplished by two effective methods: pseudo-sonic curve reconstruction with origin sonic and gamma ray curve which can improve the reservoir identification ability of impedance inversion; and the combination of sparse spike impedance and geostatistics stochastic inversion which contributes to decrease uncertainty in reservoir prediction. Due to the scattered relationship between thickness of thin reservoirs and seismic attributes in the delta-frontal subfacies, the spatial distribution of thin sand bodies in sand groups can be qualitatively characterized by optimizing attributes and selecting threshold based on the identification ability of seismic attributes in different scale of sand bodies. Results obtained by the proposed seismic inversion and attributes analysis are cross-validated, and are applied to guide adjustment of well deployment scheme in oilfield, resulting in a significant improvement of drilling success rate from 65% to 82%.

Keywords: curve reconstruction; geostatistics inversion; attributes analysis; thin reservoir; delta-frontal subfacies

随着构造类油气资源的日益枯竭,岩性类隐蔽油气藏逐渐成为目前勘探的主体,其中蕴含在三角洲外前缘储层中的油气在隐蔽油气藏中占有很大比例^[1],如大庆油田南部葡萄花油层、吉林油田高台子油层等。三角洲外前缘储层砂体规模小、非均质性强,该类油藏储量动用效果差,钻井成功率低^[2],精细刻画薄储层的空间展布是提高其钻井成功率的关键。三角洲外前缘的单砂体厚度远小于地震可分辨范围,其地震刻画一直是地球物理学家研究的热点及难点,其中地震属性、井震结合高分辨率反演是常用的两项技术。基于薄层调谐规律的属性分析可实现砂层组级别薄互层砂岩厚度的预测^[3-4],结果忠实于地震解释,但垂向分辨率低;井震结合高分辨率反演方法利用测井、地质等信息补偿了地震资料频带宽度的不足^[5-8],结果垂向可达单砂体级别,但多解性强;二者结合能够提高薄储层识别的精度^[9]。三角洲外前缘储层中普遍存在砂岩与泥岩波阻抗差异小的特点,这将削弱砂岩储层的地震响应,增加地震反演及属性分析结果的多解性,甚至无法区分岩性^[10-11]。需要针对三角洲

外前缘薄砂体建立起一套有效的井震联合刻画方法。笔者以松辽盆地敖9研究区葡萄花油层为例,对制约薄砂层地震刻画精度的因素进行分析,改进、完善薄储层的井震反演及地震属性分析方法,有效指导油田的井位部署调整。

1 三角洲外前缘储层及岩石物理特征

三角洲外前缘为三角洲前缘亚相中邻近前三角洲泥质沉积的部分。由于远离物源区,分流河道能量减弱殆尽,湖浪改造力逐渐增强,三角洲外前缘以厚层泥岩与薄层粉砂岩、泥质粉砂岩互层的沉积体为主^[12]。松辽盆地敖9研究区葡萄花油层为北部物源影响下的三角洲外前缘沉积环境,断续分流河道、席状砂及远砂坝为其主要的砂体类型。研究区储层呈现“规模小、粒度细、泥质含量高”的特点(图1):单砂体厚度多为0.5~2 m,剖面上呈透镜状,平面及侧向连续性均差;砂岩粒度细,粒度中值集中在125~31.2 μm ,岩性为极细砂—粗粉砂类型;泥质含量普遍高于10%。

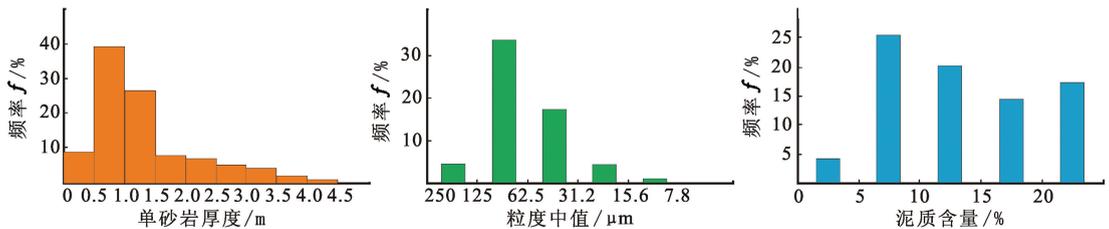


图1 敖9地区葡萄花油层单砂体厚度、粒度中值及泥质含量

Fig.1 Sandstone thickness, median grain diameter and shale content of Putaohua reservoir in Ao9 region

三角洲外前缘储层“粒度细、泥质含量高”,导致储层四性关系差,声波不能很好区分砂岩和泥岩。统计敖9研究区葡萄花油层砂岩(包括粉细砂岩和泥质粉砂岩)和泥岩(包括泥岩及粉砂质泥岩)两类岩性的速度分布(图2)发现,砂岩速度集中在3050~4000 m/s,泥岩速度集中在2800~3600 m/s,整

体上砂岩速度大于泥岩,但二者重叠部分较多;由于声波速度随砂岩储层物性的增加而降低,因此渗透性砂岩较正常砂岩的速度值要低,利用声波更难以区分出渗透性砂岩和泥岩。

2 井震结合地震反演方法

叠后地震反演主要可分为基于褶积、基于地震属性和基于模型的反演3类。基于褶积模型的波阻抗反演方法,如递推反演、稀疏脉冲反演等,受地震频带宽度的限制^[13],精度和分辨率都不能满足薄储层精细描述的需求;地震属性反演是通过数学变化将多种地震属性转化为储层参数,精度依赖先验信息的全面性,适用于开发中后期高密度井网^[14];基于模型的地质统计学随机反演垂向可识别单砂体,分辨率与测井基本一致,结果不受井网密度的限制。针对三角洲外前缘单砂体薄、钻井密度小的特点,本文中主要采用地质统计学随机反演方法进行薄砂体

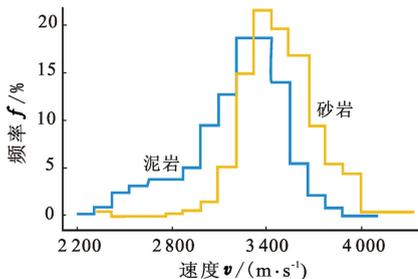


图2 敖9地区葡萄花油层砂岩和泥岩速度分布直方图

Fig.2 Velocity distribution contrast between sandstone and shale of Putaohua reservoir in Ao9 region

的预测。地质统计学反演的基本原理^[15]为根据井点测井、地质等信息建立储层参数的地质统计学规律,通过随机模拟产生井间波阻抗,将波阻抗转换成反射系数并与地震子波褶积生成合成地震道,比较合成道与实际地震道的差异,经过反复迭代修正波阻抗模型直至残差达到最小。根据三角洲外前缘储层岩石物理特征,对地质统计学反演进行以下改进:利用曲线重构改善波阻抗对岩性的分辨能力,提高反演结果的精度;利用稀疏脉冲波阻抗反演结果约束随机反演,降低反演的多解性。

2.1 声波曲线重构

测井曲线连续地记录了地下岩层的声、电、放射性等物理特性,曲线中的不同频率信息可以反映相应周期地层的物理特性^[16]。对声波而言,低频部分代表大套沉积地层(周期较长)的速度信息,而高频

部分反映局部速度变化,可能由岩性、物性变化等因素引起。声波曲线重构的基本思想为:将声波的低频信息与某条对岩性敏感的测井曲线的高频信息进行合并,得到一条拟声波曲线,该曲线能有效保留地下岩层的速度信息,同时反映目的层段岩性细微变化。通过曲线对岩性的敏感性分析,确定自然伽马对砂泥岩区分最好,利用自然伽马和声波进行拟声波曲线的重构。

曲线重构的基本过程(图3)为,将声波和自然伽马曲线分别进行高频滤波和低频滤波,滤波器截止频率优选为0.375/m,得到自然伽马高频成分和声波低频成分,将二者进行刻度匹配,然后叠加得到拟声波曲线。从图3可知,拟声波曲线与原始声波有很好的相关性,同时对岩性的分辨能力有明显提高。

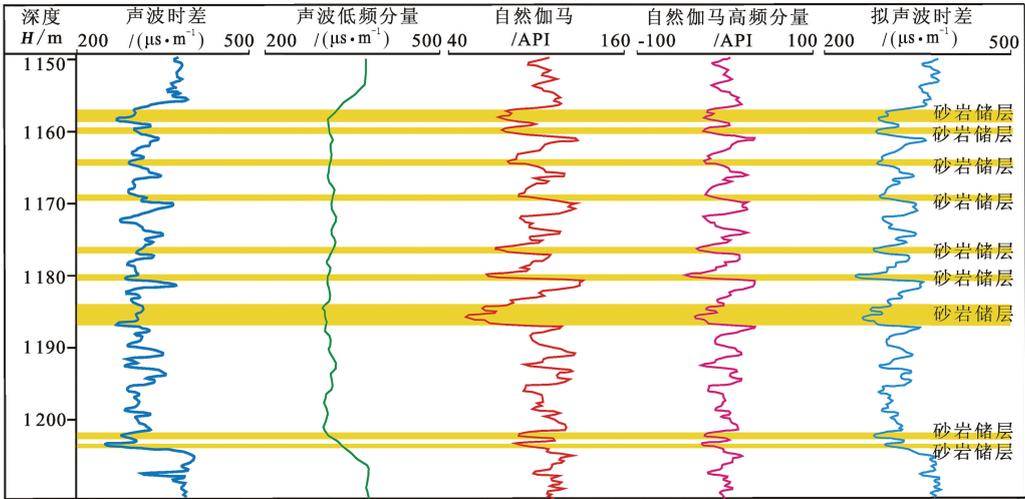


图3 拟声波曲线重构过程(南128-380井)

Fig. 3 Workflow of pseudo-sonic curve reconstruction (Well Nan128-380)

图4为利用原始声波、拟声波曲线制作合成地震记录对比,其中波阻抗计算中的密度通过Garden公式得到,子波从井旁实际地震道提取。拟波阻抗合成地震记录(图4(c))与实际地震道相关系数高达87%,与原始波阻抗合成地震记录(图4(b))基本一致,这说明拟声波曲线保留了原始声波中的主要速度信息,可代替原始声波进行层位标定、子波提取以及波阻抗反演。由于拟波阻抗具有较高的岩性分辨能力,波阻抗反演对砂岩储层的识别精度将明显提高。

2.2 反演过程及效果

联合稀疏脉冲和地质统计学随机反演进行薄储层精细刻画的基本过程为:在层位标定、低频模型建

立的基础上进行稀疏脉冲波阻抗反演;优选随机反演的参数,包括利用相对波阻抗水平切片分析主要沉积砂体的空间展布,确定水平变差函数,根据测井、地质等信息确定垂向变差函数;然后开展地质统计学随机反演,包括随机模拟和随机反演两过程,其中随机模拟采用序贯高斯协配置方法,随机反演采用模拟退火算法;对随机反演得到的多个等概率拟波阻抗体进行优选,根据拟波阻抗与岩性对应关系设定合理阈值,将拟波阻抗体转化为岩性体,实现薄砂层分布定量刻画。随机反演结果优选遵循以下原则:剖面上砂体过渡自然、横向变化与地震一致;平面上砂体变化趋势符合地质规律,与地震属性反映的砂体趋势基本一致;盲井、新钻井砂体符合率高。

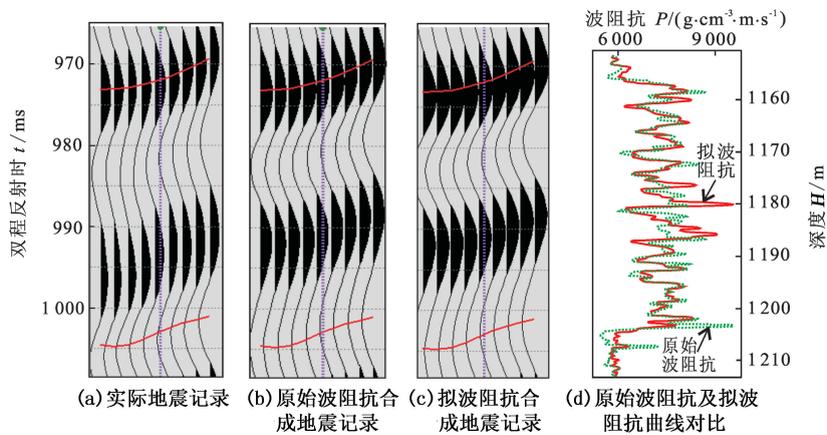


图 4 原始波阻抗、拟波阻抗曲线及合成地震记录对比

Fig. 4 Curve and synthetic seismogram comparison of original impedance and pseudo-impedance

图 5 为拟波阻抗反演和原始波阻抗反演剖面对比,图中红、黄色为高阻抗值,指示砂岩储层。两种反演剖面反映的砂体变化趋势基本一致,但拟波阻抗对砂岩和泥岩的分辨能力明显高于原始波阻抗,与单井砂岩解释基本吻合;拟波阻抗反演尊重原始地震资料,结果可靠性高,一方面表现为正演得到的模拟地震记录与实际地震间残差较小(图 5(d)),另一方面是井间砂体的变化与地震响应一致,如图 5(a)中虚线框处,地震能量向两侧变弱,反演剖面显示该处发育一套透镜状薄层砂体。反演结果可以清晰刻画小级别薄砂体的空间展布(图

6),反映沉积垂向演化规律。葡萄花油层经历了“快速水退—缓慢水进”的沉积过程,PI9—PI6 处于葡萄花油层沉积早期,水体较深,单砂体规模小,砂体主要呈零星状分布于北部和东侧,自下而上厚层砂体分布范围逐渐扩大,整体表现为快速水退;PI5—PI1 砂体较发育,整体表现为缓慢水进过程,但湖盆水体震荡频繁,PI5—PI4 和 PI3—PI1 表现为两套小规模“水进—水退”过程,PI5、PI3 和 PI1 小层水体相对较浅,厚层砂体呈南北向、北北西向条状展布。

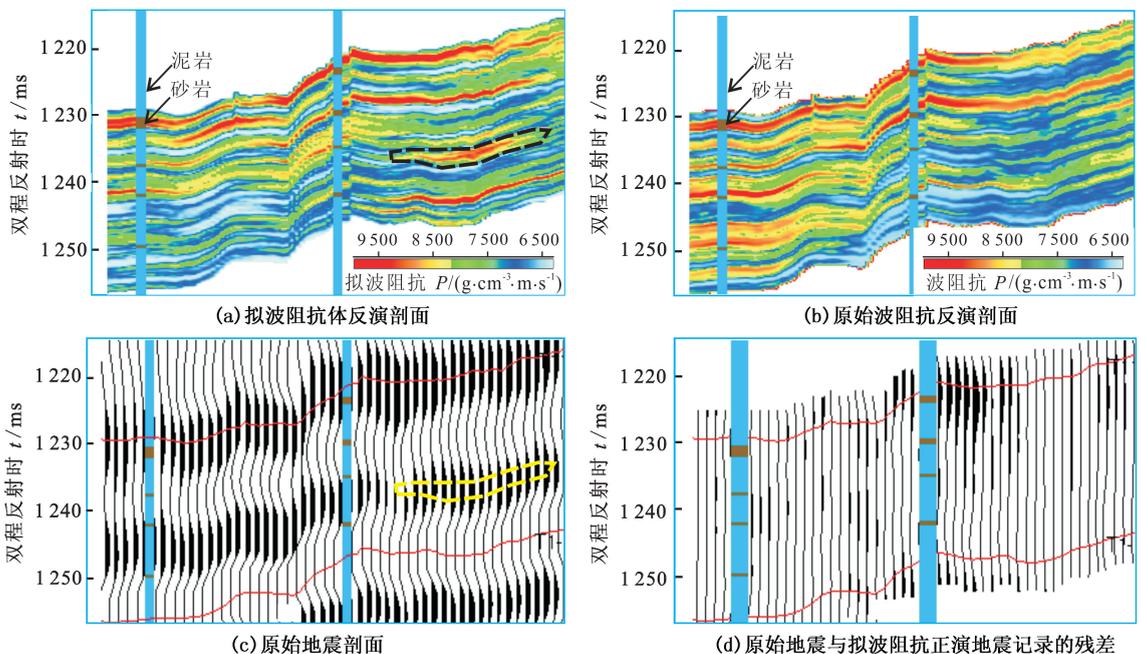


图 5 拟波阻抗体识别砂岩效果及精度分析

Fig. 5 Effect of sand bodies identification and precision analysis of pseudo-impedance

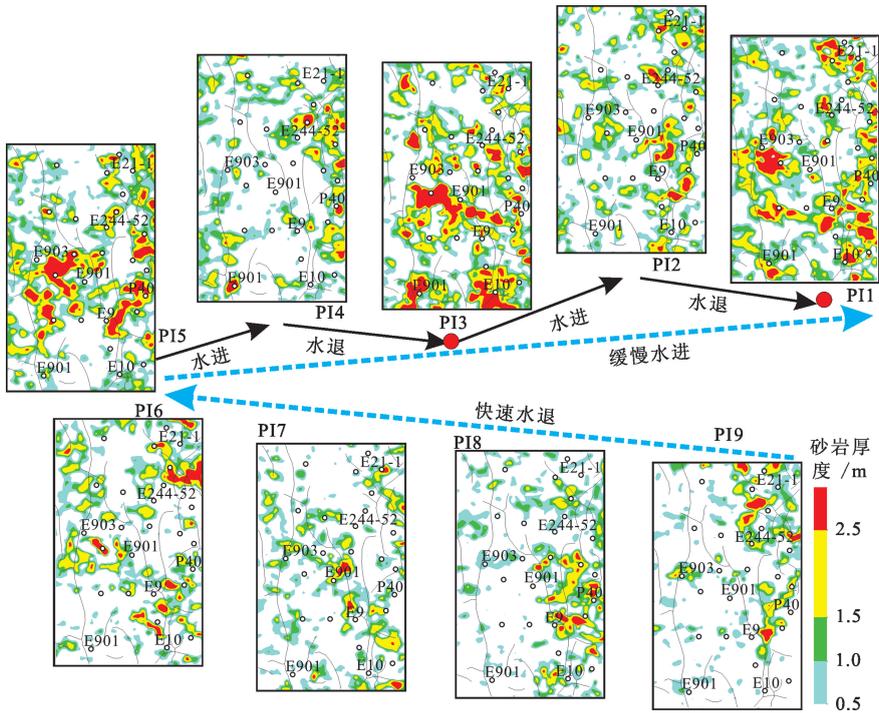


图6 葡萄花油层各小层砂岩厚度预测

Fig. 6 Sandstone thickness of each single layer in Putaohua reservoir

3 薄储层地震属性分析

前人利用单砂体楔状模型和砂泥岩薄互层模型研究了地震属性(主要是振幅和频率属性)与砂体厚度间关系^[17-18]:当砂岩厚度小于1/4波长时,累计砂

岩厚度与振幅属性呈正相关,与瞬时频率属性呈负相关。前人的研究建立在砂岩和泥岩的速度稳定且具有明显差异的假设下,当地层中砂岩速度不稳定时,砂岩厚度与地震属性间关系将变得异常复杂。

设计4组两套薄砂体叠置地质模型(图7(a)),

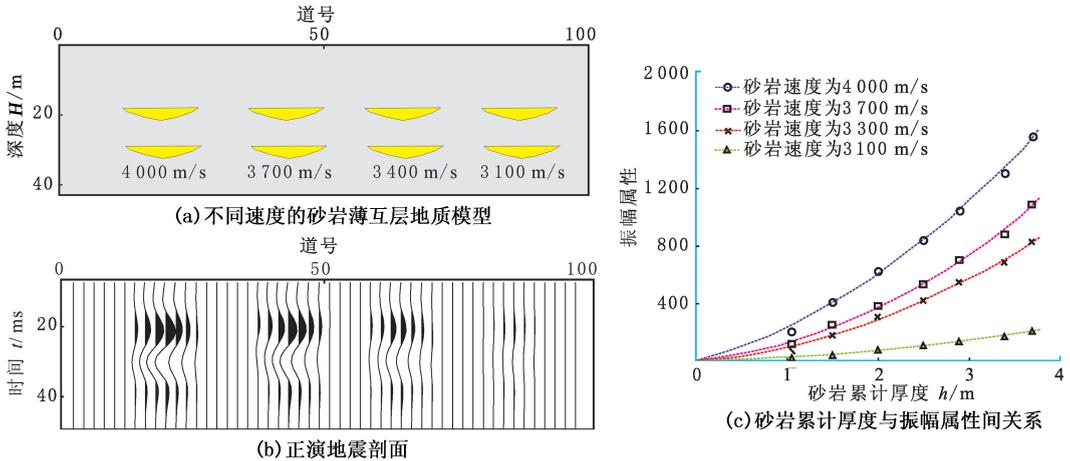


图7 不同速度的砂岩薄互层地质模型及地震响应

Fig. 7 Geologic model and seismic response of thin interbedded layers with different velocity

单砂体厚度为1.5 m,围岩(泥岩)速度为3 000 m/s,由左到右砂岩速度依次为4 000、3 700、3 400、3 100 m/s。利用主频为40 Hz的雷克子波合成地震记录(图7(b)),各套砂体的地震反射在纵向上相互干涉形成复合波,从左向右4组地层对应的复合波能量逐渐减弱,这说明地震反射能量受砂岩和泥岩速

度差异的影响,二者速度差异越大,地震反射能量越强。图7(c)为4组地层的砂岩累计厚度与振幅属性间关系,每组地层中砂岩累计厚度与振幅属性均呈现明显的正相关性,但将4组地层放到一起比较,砂岩累计厚度与振幅属性间相关性变差。三角洲前缘中砂岩储层速度变化大,与泥岩重叠部分多,砂

岩和泥岩的速度差异不稳定,导致砂岩累计厚度与振幅属性间关系复杂。以 P11-3 砂层组(图 8)为例,砂岩厚度与振幅属性交会图中散点呈现“左细右粗的喇叭状”形态,砂岩厚度小时,振幅属性值低且分布集中,砂岩厚度增加时,振幅属性值也呈增大趋势,但较为分散;按砂岩累计厚度将散点划分为大于 2 m 和小于等于 2 m 两种级别,厚度小于等于 2 m 点主要落在振幅属性小于 7 800 范围(吻合 19 个,共 28 个),厚度大于 2 m 点主要落在振幅属性大于 7 800 范围(吻合 24 个,总 31 个)。由此可知,利用地震属性难以实现薄储层砂岩厚度的定量预测,但可以定性分析厚层砂岩的分布。

地震属性对不同规模砂体的分辨能力不同,以此进行属性优选、阈值选取,定性刻画各砂层组砂体的空间展布。图 9 为葡萄花油层各砂层组地震属性平面图,其中 P14-5 和葡萄花油层优选平均瞬时相位, P11-3 和 P16-9 砂层组优选均方根振幅,图中色标均根据阈值进行调整,黄、红色区域指示厚层砂体的分布。砂体整体呈现“北厚南薄、东厚西薄”趋势;北部

及东部砂体发育,平面上呈南北条带状;南部砂体主要发育在 P11-3 油层组,平面上呈片状分布,横向连续性差。地震属性与储层反演得出的砂体分布规律基本一致,从而验证了反演结果的可靠性。

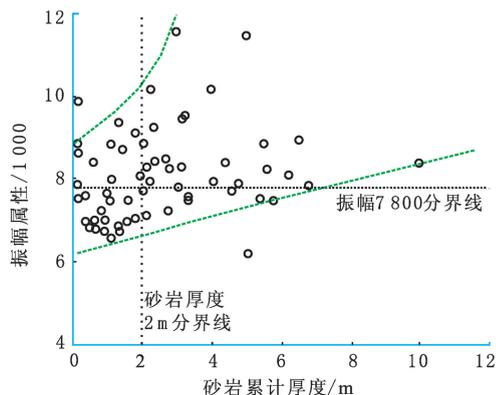


图 8 砂岩累计厚度与均方根振幅交会图 (P11-3 砂层组)

Fig. 8 Crossplot of sandstone thickness and RMS amplitude (P11-3 oil layer group)

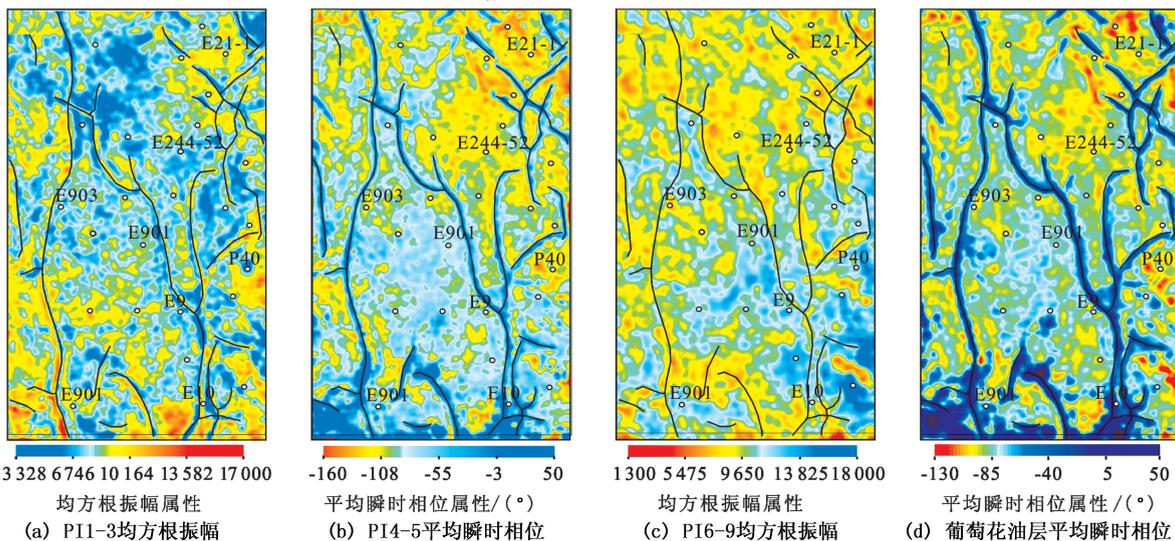


图 9 葡萄花油层及各砂层组地震属性优选图

Fig. 9 Amplitude maps optimized of Putaohua reservoir and each oil layer group

4 应用效果分析

将地震属性与井震结合储层预测成果进行有机结合,可以指导油田井位部署方案调整。对已部署设计井位进行分类优选:将两种预测方法均指示砂岩发育的定为 I 类,仅一种方法指示砂岩发育的定为 II 类,两种方法均显示砂岩不发育的定为 III 类。建议优先钻探 I 类井位,其次为 II 类井位,不建议钻探 III 类井位。2012 年之前,敖 9 区块共钻井 23 口,

其中获工业油流井 15 口,成功率为 65%,成功率低的主要原因为储层相变快,相邻仅几百米的两口井,一口获高产工业油流,而另一口因砂体不发育而失利;2012 年在该区新部署井位 85 口,利用本次研究成果进行井位优选,落实 I 类井位 44 口,II 类井位 29 口,III 类井位 12 口。目前 I 类井位中已钻 38 口,获工业油流井 34 口,成功率为 82%,钻井成功率提高了 17%。如葡 402-3 井(图 10),钻前根据储层预测成果将其定为 I 类,地震属性指示该井砂

体发育,所处砂体向北逐渐尖灭,反演结果显示该井葡萄
花油层发育两套厚层砂体;钻探后该井在 P11

和 P19 小层试油获 22.1 t/d 高产工业油流。

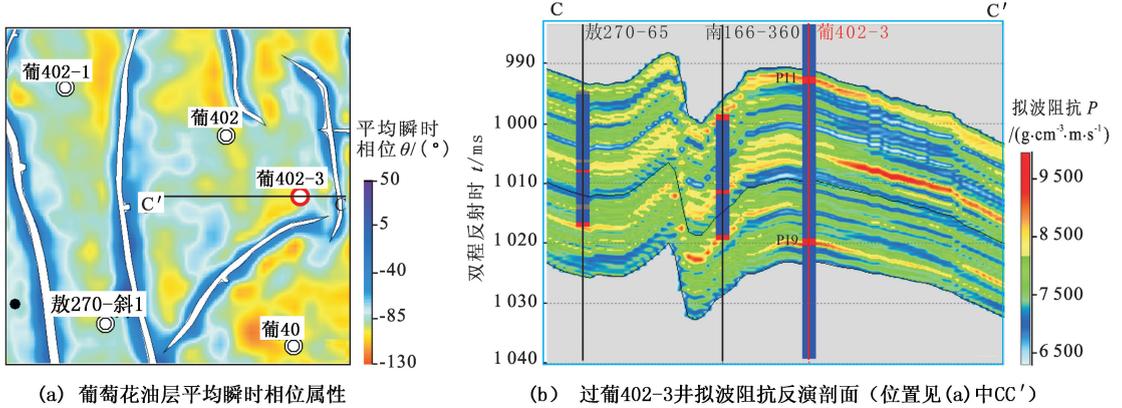


图 10 验证井(葡 402-3)储层预测效果分析

Fig. 10 Result analysis of reservoir prediction for verified well (Well Pu402-3)

5 结 论

(1) 曲线重构得到的拟波阻抗曲线既包含反映大套地层速度背景的声波低频信息,又包括反映地层岩性变化的自然伽马高频信息;与原始波阻抗相比,拟波阻抗体对砂岩储层的分辨能力明显提高。

(2) 三角洲外前缘薄层砂岩和泥岩速度分布重叠部分多,砂岩速度分布不稳定,地震振幅属性与砂岩累计厚度间相关性差,但地震属性能较好地区不同规模的砂体,可以定性分析砂层组内厚层砂体的空间展布。

(3) 联合应用随机反演和地震属性分析成果指导井位部署方案的调整,可有效提高油田钻井的成功率。该方法对薄储层岩性类隐蔽油气藏的井位部署方案调整具有重要意义。

致谢 在本文成文过程中,大庆油田有限责任公司第七采油厂刘洪涛总地质师提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] 迟元林,蒙启安,杨玉峰. 松辽盆地岩性油藏形成背景与成藏条件分析[J]. 大庆石油地质与开发,2004,23(5):10-15.

CHI Yuanlin, MENG Qi'an, YANG Yufeng. Origin background and reservoir forming condition of lithologic oil pools in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2004,23(5):10-15.

[2] 肖佃师,卢双舫,黄振凯,等. 大庆长垣南部两翼葡萄
花油层油气运移及聚集规律[J]. 现代地质,2013,27(1):172-179.

XIAO Dianshi, LU Shuangfang, HUANG Zhenkai, et al. Oil migration and accumulation pattern of Putaohua reservoir in two wings of the south of Daqing placanticline[J]. Geoscience,2013,27(1):172-179.

[3] 王开燕,徐清彦,张桂芳,等. 地震属性分析技术综述[J]. 地球物理学进展,2013,28(2):815-823.

WANG Kaiyan, XU Qingyan, ZHANG Guifang, et al. Summary of seismic attribute analysis[J]. Progress in Geophysics,2013,28(2):815-823.

[4] 崔凤林,孙成治,唐建人. 松辽盆地茂 8 井三维地震区薄互层储层预测方法及效果[J]. 石油物探,1993,32(4):1-10.

CUI Fenglin, SUN Chengzhi, TANG Jianren. Prediction method and its effect for thin interbed reservoir in a 3-D seismic survey area of Songliao Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,1993,32(4):1-10.

[5] 黄文锋,姚逢昌,李宏兵. 薄互层调谐规律研究与净厚度估算[J]. 石油地球物理勘探,2012,47(4):584-592.

HUANG Wenfeng, YAO Fengchang, LI Hongbing. Regularities of tuning effects of thin interbedded layers and their net thickness determination [J]. Oil Geophysical Prospecting,2012,47(4):584-592.

[6] 何火华,李少华,杜家元,等. 利用地质统计学反演进行薄砂体储层预测[J]. 物探与化探,2011,35(6):804-808.

HE Huohua, LI Shaohua, DU Jiayuan, et al. The application of geostatistic inversion method to predicting the thin sandstone reservoir[J]. Geophysical & Geochemical Exploration,2011,35(6):804-808.

[7] ARTUN E, TORO J, WILSON T. Reservoir characterization using geostatistical inversion[R]. SPE 98012,2005.

[8] 王香文,刘红,滕彬彬,等. 地质统计学反演技术在薄

- 储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 730-736.
- WANG Xiangwen, LIU Hong, TENG Binbin, et al. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 730-736.
- [9] 郭建卿, 林承焰. 频谱分解及地质模型反演新方法在滩坝砂沉积特征及发育模式研究中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(3): 37-44.
- GUO Jianqing, LIN Chengyan. Application of new method of spectrum decomposition and seismic inversion in research of beach-bar sand sedimentary characteristics and development model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(3): 37-44.
- [10] 赵晓明, 吴胜和, 岳大力, 等. 老油田浅层声波曲线的预处理与重构技术[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4): 559-564.
- ZHAO Xiaoming, WU Shenghe, YUE Dali, et al. The pre-processing and reconstruction technique for shallow layer acoustic curve in old oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(4): 559-564.
- [11] 崔永谦, 邵龙义, 谢建荣, 等. 河流砂岩地震储层预测中的几个问题[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 54-59.
- CUI Yongqian, SHAO Longyi, XIE Jianrong, et al. Several problems concerning reservoir prediction of fluvial sandstone[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 54-59.
- [12] 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层河控浅水三角洲沉积模式[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1502-1509.
- SUN Yu, MA Shizhong, JIANG Hongfu, et al. Sedimentary mode of shallow lacustrine fluvial-dominated delta of Putaohua reservoirs in the Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1502-1509.
- [13] 郭朝斌, 杨小波, 陈红岳, 等. 约束稀疏脉冲反演在储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2006, 45(4): 397-401.
- GUO Chaobin, YANG Xiaobo, CHEN Hongyue, et al. Constrained sparse pulse inversion research in Haitongji depression[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(4): 397-401.
- [14] 徐赢, 覃新平, 吴迪, 等. 基于模型地震反演储层预测技术的应用: 以牛圈湖油田西山窑组为例[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 85-90.
- XU Ying, QIN Xinping, WU Di, et al. Application of seismic inversion technique based on model to reservoir prediction: a case study from Xishanyao Formation in Ni-uquanhu Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 85-90.
- [15] 孙思敏, 彭仕宓. 基于模拟退火算法的地质统计学反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 38-43.
- SUN Simin, PENG Shimi. Inversion of geostatistics based on simulated annealing algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 38-43.
- [16] 肖佃师, 卢双舫, 陈海峰, 等. 基于频谱分解的测井曲线标准化方法[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 129-137.
- XIAO Dianshi, LU Shuangfang, CHEN Haifeng, et al. Logging data normalization based on frequency spectral decomposition[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 129-137.
- [17] KALLWEIT R S, WOOD L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. Geophysics, 1982, 47(7): 1035-1046.
- [18] 李国发, 岳英, 国春香, 等. 基于模型的薄互层地震属性分析及其应用[J]. 石油物探, 2011, 50(2): 144-150.
- LI Guofa, YUE Ying, GUO Chunxiang, et al. Seismic attributes analysis based on model in thin interbedded layers and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(2): 144-150.

(编辑 徐会永)