

# 应用随机反演技术精细刻画河道砂体

——以大庆油田萨北开发区萨二组为例

闫百泉<sup>1)</sup>, 韩文伯<sup>1)</sup>, 孙雨<sup>1)</sup>, 陈司铎<sup>1)</sup>, 陈奋<sup>2)</sup>, 杨洋<sup>1)</sup>

1) 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆, 163318;

2) 大庆油田责任有限公司第三采油厂, 黑龙江大庆, 163113

**内容提要:** 以大庆油田萨北开发区萨二组为例, 研究了随机地震反演技术及其对河道砂体的精细刻画。研究表明: 纵向上, 不同厚度砂体的随机反演结果符合率差异较大: 厚度大于 3 m 的砂体符合率为 89.6%, 厚度为 2 ~ 3 m 的砂体符合率为 79.1%, 厚度小于 2 m 的砂体符合率为 71.5%; 平面上, 各沉积单元平均的砂体符合率能达到 75% 以上, 且分流平原亚相的符合率要高于内前缘亚相。地震、测井及地质资料的充分结合, 能够对河道的走向、复合河道砂体的单一河道边界及井间砂体叠置关系精细刻画, 显示了井震结合预测河道砂体的适用性。

**关键词:** 随机反演; 井震结合; 河道砂体; 萨二油层组

大庆油田经过 50 余年的开发, 现已进入特高含水期, 剩余油储量十分可观但多零散分布在较薄的储层中, 横纵向矛盾显著(王玉普等, 2014; 韩大匡, 2010; 王凤兰等, 2011)。尽管多年来井网密度不断加大, 但单纯基于测井资料或地震数据仍难以刻画平面上河道砂体的分布。地震反演技术已广泛地应用于储层预测中, 高精度的地震反演能够有效识别薄层砂体在空间的分布规律(朱伟林等, 2008; 姜岩等, 2013)。在地震反演中, 波阻抗是重要的岩石物理参数, 可直接对储层进行岩性解释, 狭义的地震反演指的就是波阻抗反演。其中基于褶积模型的宽带约束稀疏脉冲反演, 是目前生产上广泛采用的方法, 主要根据稀疏的原则在地震道中提取反射系数并递推出相对波阻抗, 再加上测井与地质信息的低频分量, 最终得到全频带的绝对波阻抗数据体。此法完整的保留了地震反射的基本特征, 能够显著反应岩性的空间大致分布, 但约束条件有限, 根据以往经验, 只能作为定性的预测手段。当前的地震反演技术是将地质统计学、神经网络等技术融入波阻抗反演中, 使得反演结果对储层的描述和预测更加精准。随机反演是将随机模拟思想引入地震反演, 以地质框架模型为基础, 应用地质统计原理分析井点数据,

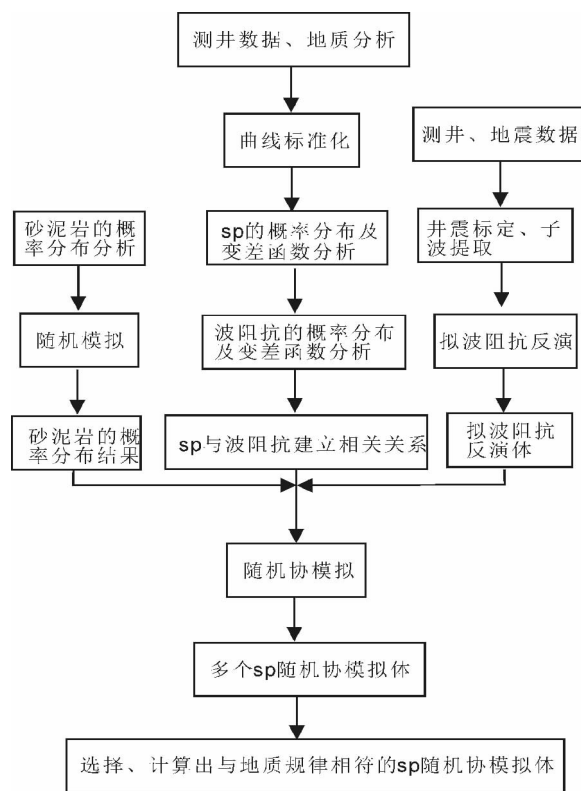


图1 随机反演流程图

Fig. 1 The diagram of stochastic inversion process

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号 41172135)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(编号 12541073)和黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目(编号 1254G003)的成果。

收稿日期: 2015-03-11; 改回日期: 2015-09-12。责任编辑: 黄敏。Doi: 10.16509/j.georeview.2015.06.022

作者简介: 闫百泉, 男, 1971 年生。博士。教授。主要从事储集层沉积及构型、油气田开发地质学研究工作。Email: ybqhht@163.com; 1071901500@qq.com。

井间以原始地震资料约束,根据储层参数的空间分布规律和相关性随机反演得出三维模型,实现储层预测(张秀丽等,2014)。反演结果受地质、测井和地震资料多级次的约束,忠于地震资料的同时与井点也达到最大吻合,分辨率高,能在空间上反映薄储层的精细变化,适合在油田开发程度较高的地区应用。

大庆长垣萨北开发区萨尔图油层萨二组(即 S-II,下同),发育三角洲分流平原亚相和三角洲内前缘亚相,主要为二类油层,砂体发育规模小,厚度多集中在 1~3m,且为砂泥岩薄互层(文慧俭等,2012;冯志强等,2012)。本文以此为例,综合发挥地震数

据与测井资料的优势,应用随机反演技术尝试对薄储层进行预测,刻画河道砂体的横向展布特征,为老油田开发提供更精细的地质模型,指导剩余油的挖潜。

## 1 随机反演基本思路 and 关键步骤

### 1.1 基本思路

随机反演技术以约束稀疏脉冲反演的结果为基础,对测井资料和地质信息分析获得概率分布函数和变差函数,根据概率分布函数获得正确的随机样点集分布,通过多次等概率模拟,最终获得一组与储层属性相关性好的三维数据体(黄捍东等,2007;徐

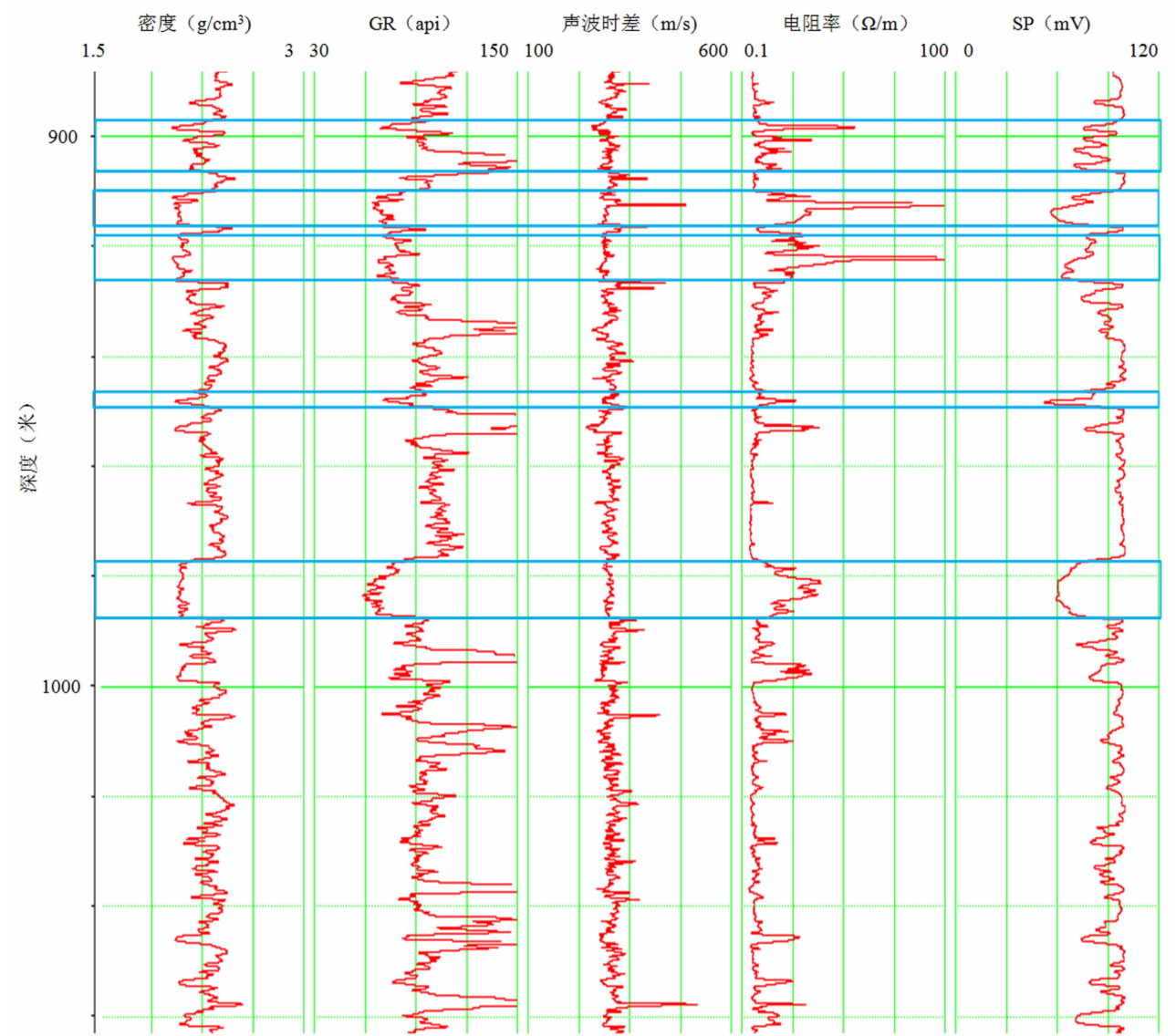


图 2 大庆油田萨北开发区萨二组单井测井响应分析图  
Fig. 2 The analysis diagram of rock and logging response of single well for the S-II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield

立恒等,2012;张繁昌等,2014)。本文以 SP 拟波阻抗稀疏脉冲反演的结果作为随机协模拟的波阻抗体,再根据 SP 与波阻抗的相关关系,得到最后的 SP 随机模拟体(图 1)。反演结果依据井资料、地质统计学信息和地震资料的有机结合,弥补了地震数据缺少的低频成分,在垂向和横向上较好地反映了储层的非均质性,克服了反演的多解性(刘百红等,

2009;何火华等,2011)。  
**1.2 关键步骤**  
**1.2.1 拟声波测井重构**  
储层的测井响应特征,特别是声波时差曲线特征的分析是进行精细储层反演前的重要工作之一(姜晓宇等,2014;潘昱洁等,2011)。从单井岩电响应分析图可看出,S-II 层段砂岩在测井曲线上表现

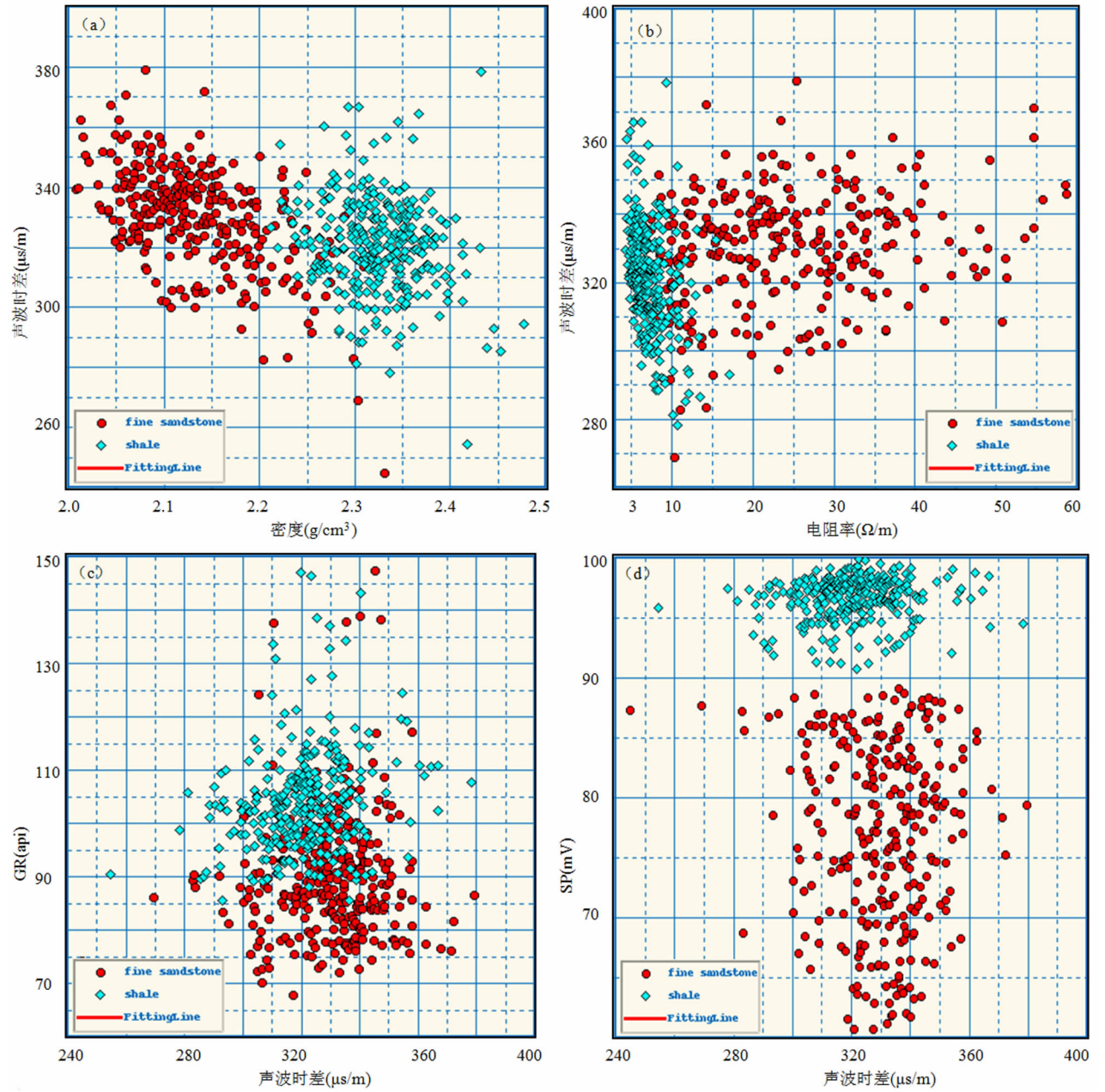


图 3 大庆油田萨北开发区萨二组测井曲线交汇分析图

Fig. 3 The analysis diagram of curve intersection for the S-II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield

(a) 声波与密度交汇图;(b) 声波与电阻率交汇图;(c) 声波与伽玛交汇图;(d) 声波与自然电位交汇图  
(a) the intersection of acoustic and density;(b) the intersection of acoustic and resistivity;(c) the intersection of acoustic and gamma;(d) the intersection of acoustic and spontaneous potential

为低密度、高电阻率、低伽玛、SP 负异常,而声波时差曲线对于砂泥岩没有明显的分界线(图 2)。

同时,从声波测井曲线与密度、电阻率、自然伽玛、自然电位测井曲线交汇图看(图 3),电阻率曲线受储层含油性影响,变化较大,GR 曲线在泥岩段存在一定的高值畸变,而 SP 曲线泥岩基线清楚,储层负异常明显。整体来说,本区 S-Ⅱ 层段 SP 测井属岩性敏感性最好,是区分砂泥岩的主要测井属性。

当波阻抗不能有效分辨砂泥岩时,可以利用与岩性相关的测井曲线构造出一条更能够突出储层分辨率的反演约束曲线(崔健等,2008)。单纯的波阻抗曲线不能有效地区分砂泥岩,砂泥岩波阻抗值完全混叠(图 4a),而 SP 曲线对砂泥岩具有良好的分辨能力,利用 SP 拟声波重构后的波阻抗能够区分砂泥岩(图 4b)。

1.2.2 子波的提取

拟波阻抗反演是随机反演的基础,而地震子波提取的好坏直接影响拟波阻抗反演的质量。首先利用地震资料和测井资料提取子波的振幅谱和相位谱,然后利用振幅谱和相位谱的信息合成一个理论子波。利用该子波做合成记录,根据此合成记录与地震资料的相关对比,修改时深关系,利用修改后的井的时深关系结合地震资料提取新的子波,再利用新的子波重新去修正井的时深关系。如此反复,直到得到相位振幅谱变化稳定的子波,和与地震资料

相关性最好的合成记录。当子波的振幅谱确定下来后,还要对子波的相移量进行调整,真正影响子波质量好坏的是相位谱。图 5a、b、c 为制作合成地震记录所提取的子波及其频谱。可以看出所有参与反演井子波形态、能量、振幅及频宽基本一致,相位稳定,从而说明统计子波可靠合理。

1.2.3 随机协模拟反演

随机协模拟是随机反演中的关键技术。随机协模拟的实现思路是寻求比较符合地质规律的地质统计学模型和方法,表征各种沉积类型的储层参数的变化规律,用这种已知的规律对井间未知地区的储层参数的空间分布作出预测估计。

随机协模拟运用岩性指示随机反演(马尔科夫链蒙特卡罗算法),即在统计井点岩性比例的基础上,首先对井点的离散数据——岩性(分为砂岩和泥岩)和连续数据——波阻抗,进行概率分布函数拟合以及变差函数分析(图 6a、b、c),然后将拟合得到的概率分布函数和变差函数,推广应用到整个三维空间。完成所有井点的分析工作后,以地震资料约束井间,在高斯模拟和克里金算法的控制下,获得多个等概率模型,最终完成岩性的随机反演数据体。该方法的最大优点是直接由定性转化为定量,所得结果能够达到精细预测的目的。从岩性随机反演剖面图可以看出(图 7),岩性随机反演结果与实际钻井结果吻合的较好,大部分井间预测砂体能与单井

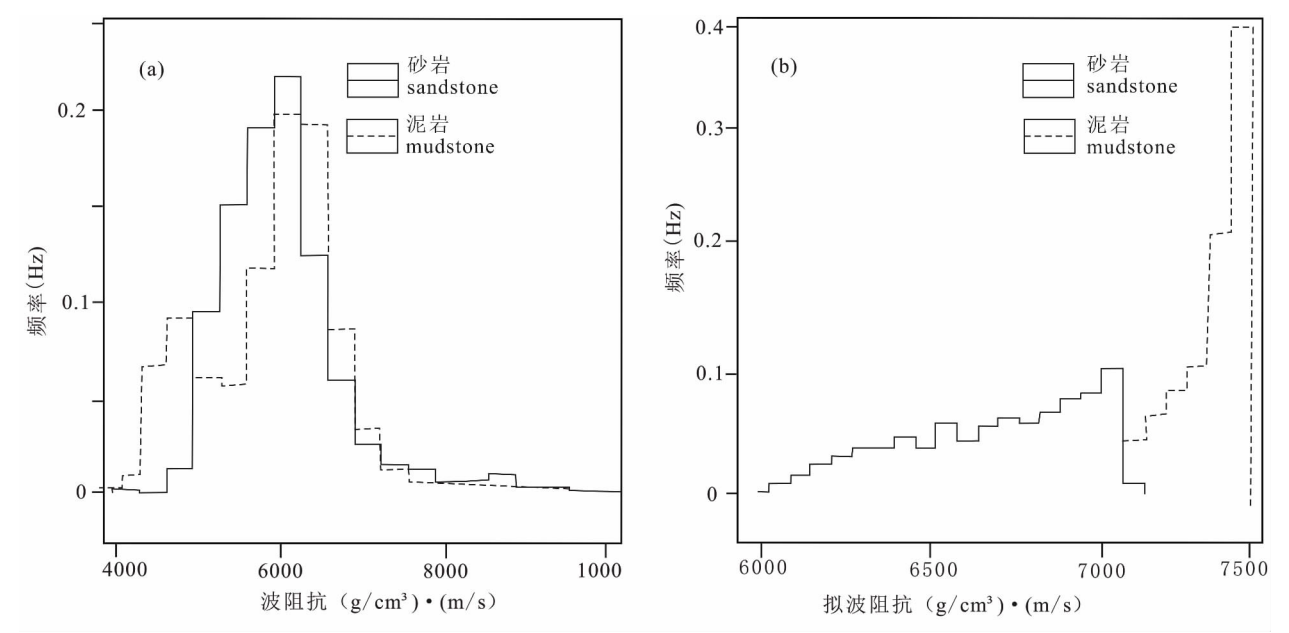


图 4 大庆油田萨北开发区萨二组波阻抗与拟声波阻抗区分砂泥岩对比直方图

Fig. 4 The contrast histogram of wave impedance and simulated wave impedance on distinguish between sand and mud for the S-Ⅱ Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield



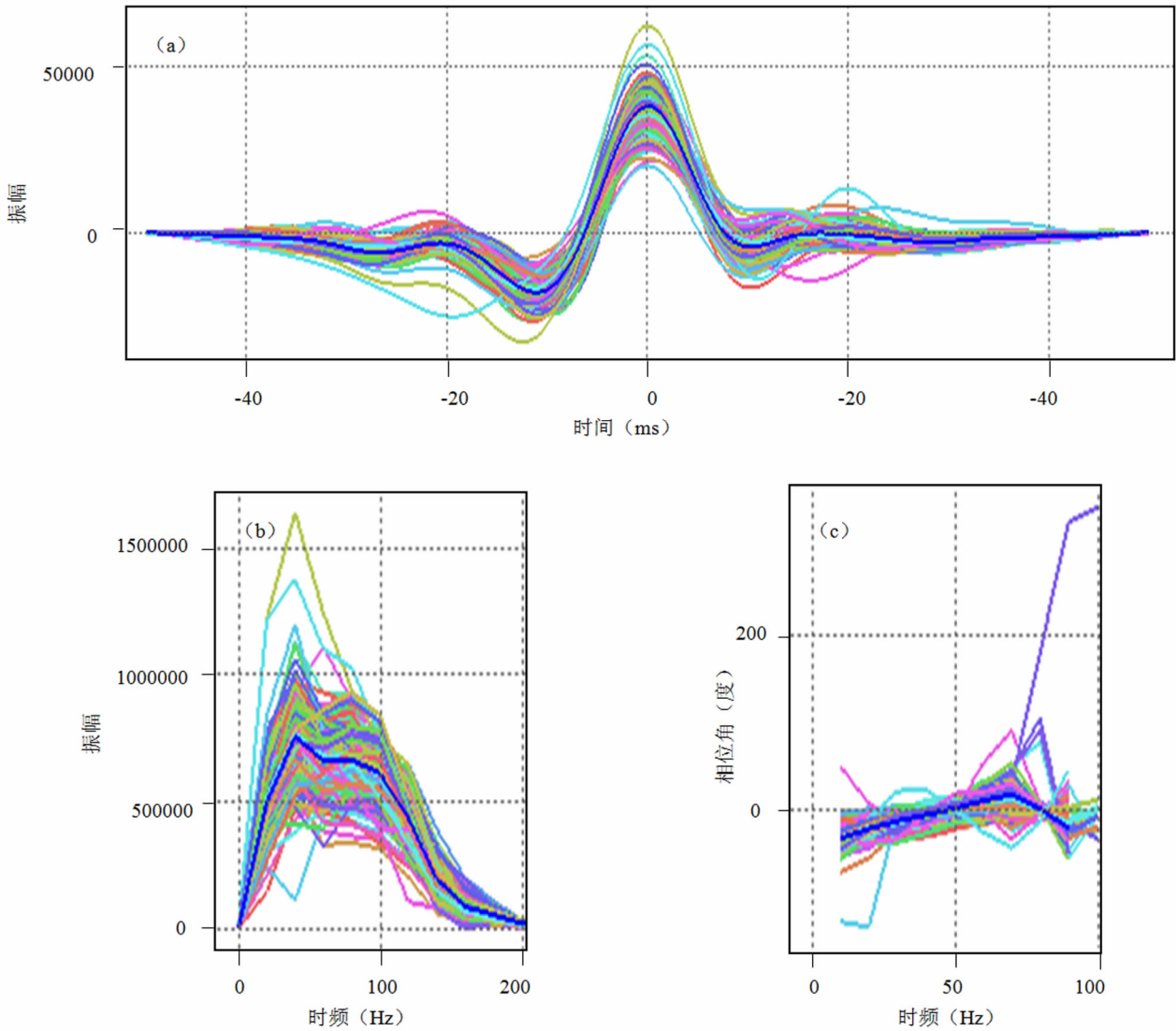


图 5 大庆油田萨北开发区萨二组子波频谱分析  
Fig. 5 The analysis diagram of wavelet frequency spectrum for the S- II Layer of the Saertu Reservoir  
in North Development Area, Daqing Oilfield  
(a) 所有井的子波;(b)振幅频谱;(c)相位频谱  
(a) the wavelets of all wells; (b) amplitude spectrum; (c) phase spectrum

砂体有较好的吻合。

## 2 反演效果分析

### 2.1 纵向分辨率精度

纵向分辨率的高低直接影响着反演精度,决定着是否能够精细刻画各个沉积单元的砂体展布情况。通过井震对比,随机反演有效提高了储层预测的纵向分辨率,河道砂体清楚,同时为了验证反演精度,应用后验井进行了剖面对比分析(图 8),通过各井统计,大于 3m 的砂层符合率达到 89.6% 以上,2

~3m 砂岩符合率达 79.1%,小于 2 m 的砂岩符合率 71.5%,达到了反演预测河道砂体的要求。

### 2.2 平面效果对比

随机反演的主要目的是提高储层的纵向预测精度,实现薄差层河道砂体的精细刻画,因此需立足于沉积单元级别对测井资料和反演结果进行一致性对比分析。通过对萨 II 的井点符合率分析得出,各沉积单元的反演预测图与源于测井资料的砂岩厚度等值线图的平均符合率能达到 75% 以上,其中,三角洲分流平原亚相的沉积单元,符合率要明显高于内

前缘亚相的沉积单元。

如图 9a 与 9b, 萨 II12 单元属于三角洲分流平原亚相, 砂体发育较好, 厚度大于 1m 的砂体约占总

面积的 80%。从反演预测图看, 与砂岩厚度等值线图在平面分布趋势特征上具有良好的一致性, 砂岩展布特征、厚度变化反映清楚, 砂岩厚度大于 2m 的

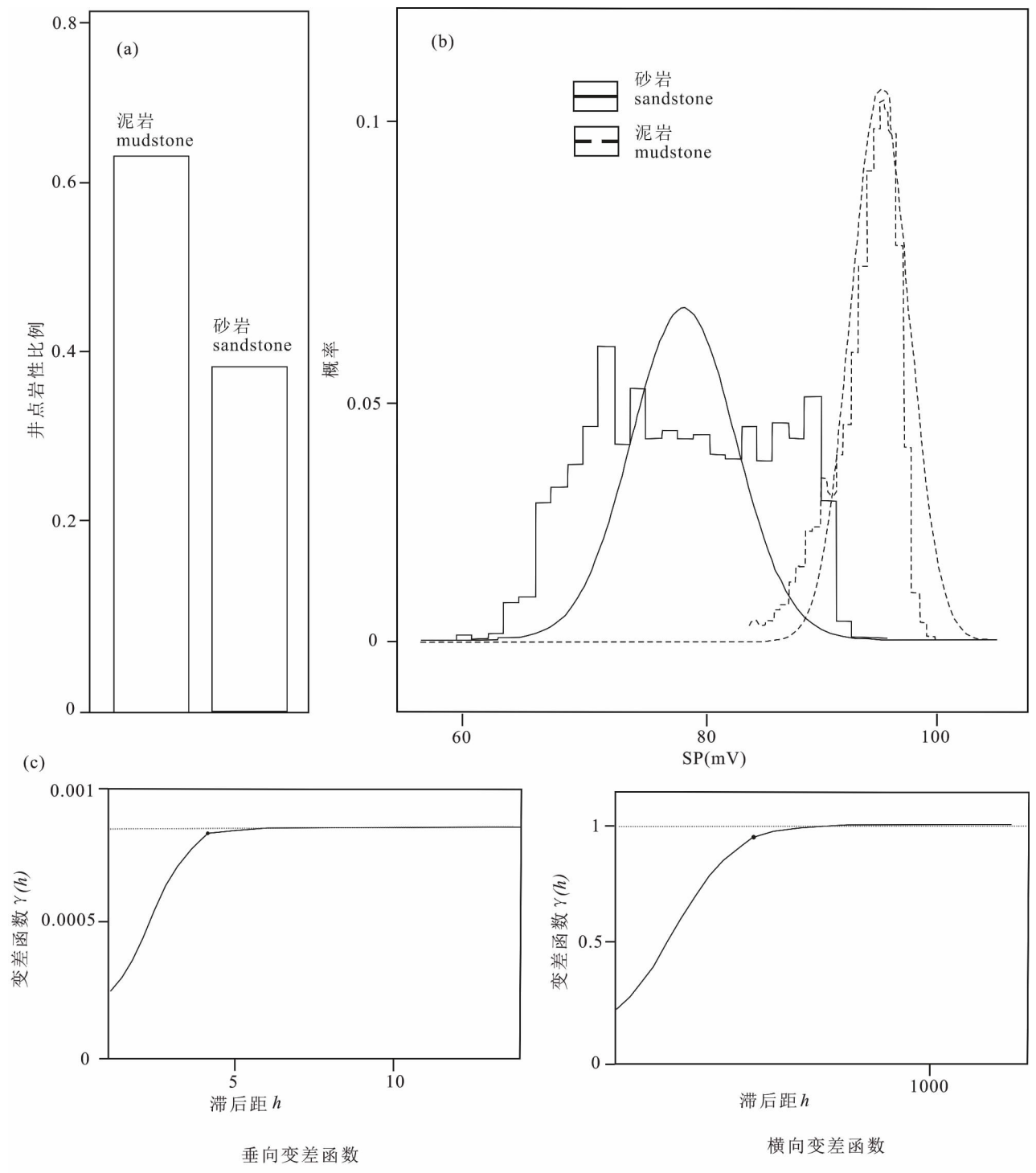


图 6 大庆油田萨北开发区萨二组随机协模拟图  
Fig. 6 The diagram of stochastic association simulation for the S-II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield

(a) S-II 岩性比例; (b) S-II 砂岩和泥岩 SP 的概率分布函数; (c) 依据井统计的 S-II 砂岩的变差函数分析  
(a) the lithologic proportion of S-II layer group; (b) the SP distribution of sand and mud; (c) the variogram analysis of S-II layer group from well statistics

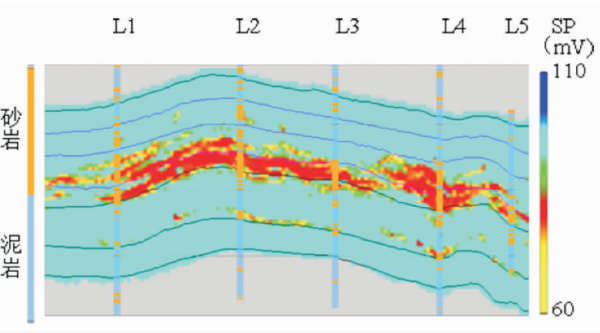


图 7 大庆油田萨北开发区萨二组岩性模拟与过井沉积相剖面对比图

Fig. 7 the contrast profile of lithology simulation and through-well facies for the S- II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield

储层符合率为 81.6%，表明本次高精度反演结果真实可靠，达到了反演预测的要求，在沉积单元沉积微相识别及相图编制中具有较好的指示作用。如图 9c 与 9d，萨 II2 + 3b 单元属于三角洲内前缘亚相，厚度大于 1m 的砂体约占总面积的 40%，且平面上

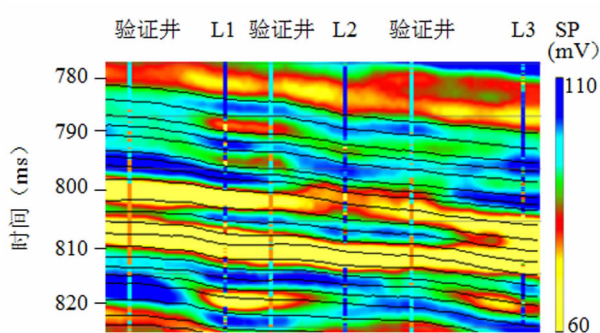


图 8 大庆油田萨北开发区萨二组反演验证剖面

Fig. 8 The verification profile of inversion for the S- II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield

分布不稳定，砂体变化快，非均质性强。反演预测图的颜色变化趋势与砂体变化趋势较相似，但不如平原相沉积单元的一致性，砂岩厚度大于 2m 的储层符合率为 69.8%。因此针对砂体发育较差的内前缘相沉积单元，应基于测井资料进行微相的组合和河道边界的识别。

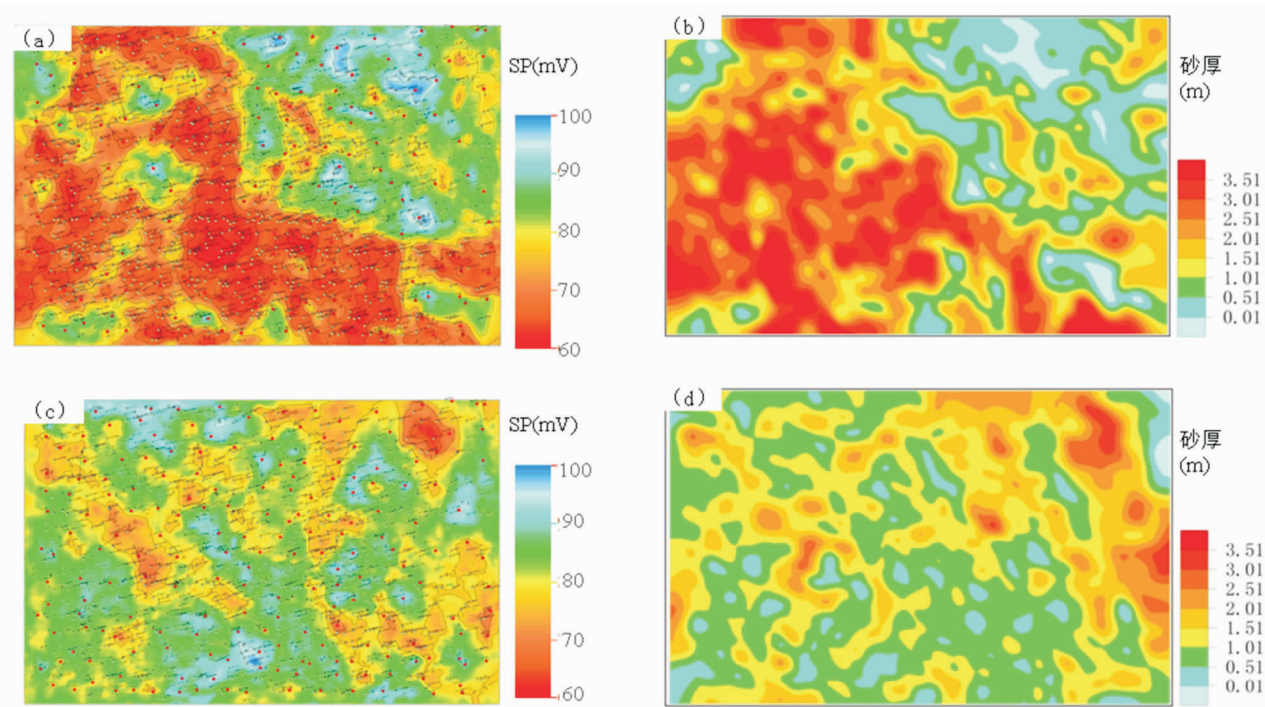


图 9 大庆油田萨北开发区萨二组三角洲分流平原亚相与内前缘亚相反演效果对比

Fig. 9 The inversion effect contrast of delta distributary plain subfacies and inner front subfacies for the S- II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield

(a) 萨 II12 单元反演预测图; (b) 萨 II12 单元砂岩厚度等值线图; (c) 萨 II2 + 3b 单元反演预测图; (d) 萨 II2 + 3b 单元砂岩厚度等值线图

(a) the inversion prognostic map of S- II 12; (b) the sand thickness isoline map of S- II 12; (c) the inversion prognostic map of S- II 2 + 3b; (d) the sand thickness isoline map of S- II 2 + 3b



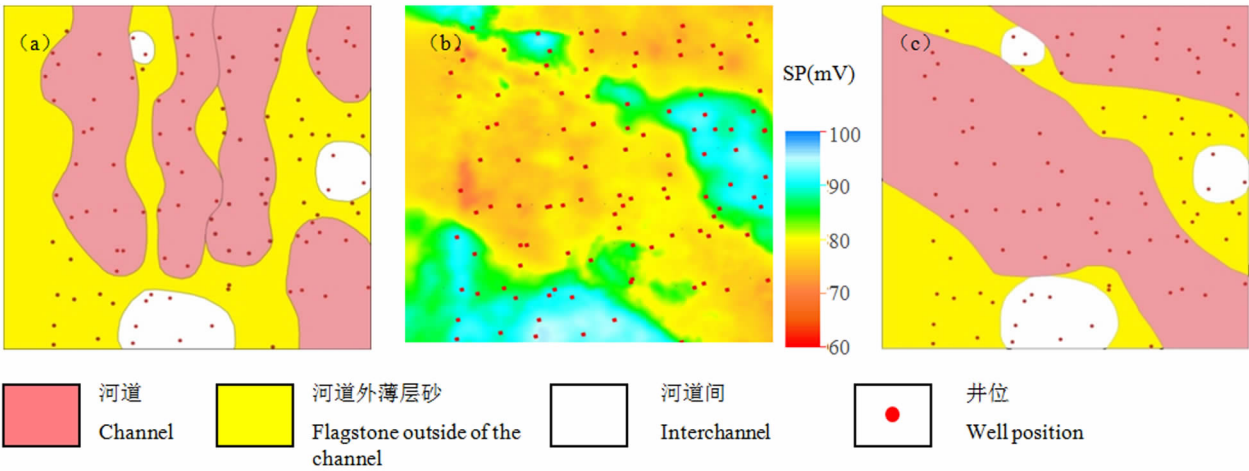


图 10 大庆油田萨北开发区萨二组基于随机反演结果的井震结合河道走向修正图

Fig. 10 The map of channel trend revision through the combination of well and seismic based on inversion result for the S- II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield  
(a) 井震结合前的河道砂体展布图; (b) 随机反演平面预测图; (c) 井震结合后河道砂体展布图  
(a) the channel sandbody distributive map before combination; (b) the forecast profile of inversion ;  
(c) the channel sandbody distributive map after combination

3 反演结果在河道砂体刻画中的应用

3.1 河道砂体走向的确定

利用“地震反演引导,井点微相控制”方法,以沉积模式为指导,依次分析各个井点的测井曲线识别河道砂体,在井间参考反演结果追踪砂体的发育状况,从而确定河道砂体的走向(王琦等,2012;苏燕等,2008)。萨二油层组 1 + 2b 沉积时间单元,属于三角洲分流平原亚相,砂体发育规模较大。基于测井资料绘制的沉积相图表明(图 10a),河道总体呈南北展布,砂体有间断,连续性较差。而从反演结果预测的砂岩分布图上揭示出砂体的发育方向为南东向(图 10b),在平面上砂体能量变化显著,能清晰地反映出砂体的宏观组合面貌。井震结合后,河道的展布方向和摆动位置变化较大,连续性更好,形态稳定,更符合三角洲分流平原环境的砂体沉积特征,为河道砂体的精细刻画提供了导向(图 10c)。

3.2 复合河道砂体中单一河道砂体边界的刻画

在大庆油田,河道砂体是最主要的储层砂体类型,多条分流河道频繁改道、切割和叠置在沉积单元内形成横向分布稳定的复合河道砂体。不同单河道砂体之间由于复杂的连通方式和显著的物性差异造成了复合河道砂体的严重非均质性(何宇航等,2005;金振奎等,2010)。因此,正确认识单一河道边界、划分复合河道砂体,对建立储层的精细地质模型

和调整井网注采关系具有重要的现实意义。

图 11a 为仅利用井资料勾绘的 S- II 1 + 2b 沉积单元 B 井区的河道砂体展布图,沉积类型为三角洲分流平原,河道砂体连片分布,仅用测井资料无法在该井区识别出单期河道的边界,未受地震反演约束下,沉积相图绘制为三期河道相切。由过井反演剖面图可见(图 11b),井间存在清晰的砂体连通性变差至尖灭的现象,表明在大面积分布的复合河道砂体内部存在砂体尖灭(或发育程度变差)的情况,即单一河道砂体边界,只不过目前井网密度尚不能揭示该现象,所以从利用测井资料绘制的沉积微相图上看表现为大面积分布的复合河道砂体。利用“地震反演引导,井点微相控制”方法,通过逐井、逐剖面的追踪,根据测井曲线形态差异、反演剖面砂体发育状况的全面分析,从井点到剖面、再到平面进行单一河道砂体边界的识别,由基于随机地震反演结果的井控平面沉积微相图可见(图 11c),原来表现为大面积分布、互相切叠的复合河道砂体,实质为三条单一、独立分布的河道砂体。

4 结论

(1)纵向上,不同厚度砂体的随机反演结果符合率为:厚度大于 3 m 的砂体符合率为 89.6%,厚度为 2 ~ 3 m 的砂体符合率为 79.1%,厚度小于 2 m 的砂体符合率为 71.5%;平面上,各沉积单元平均



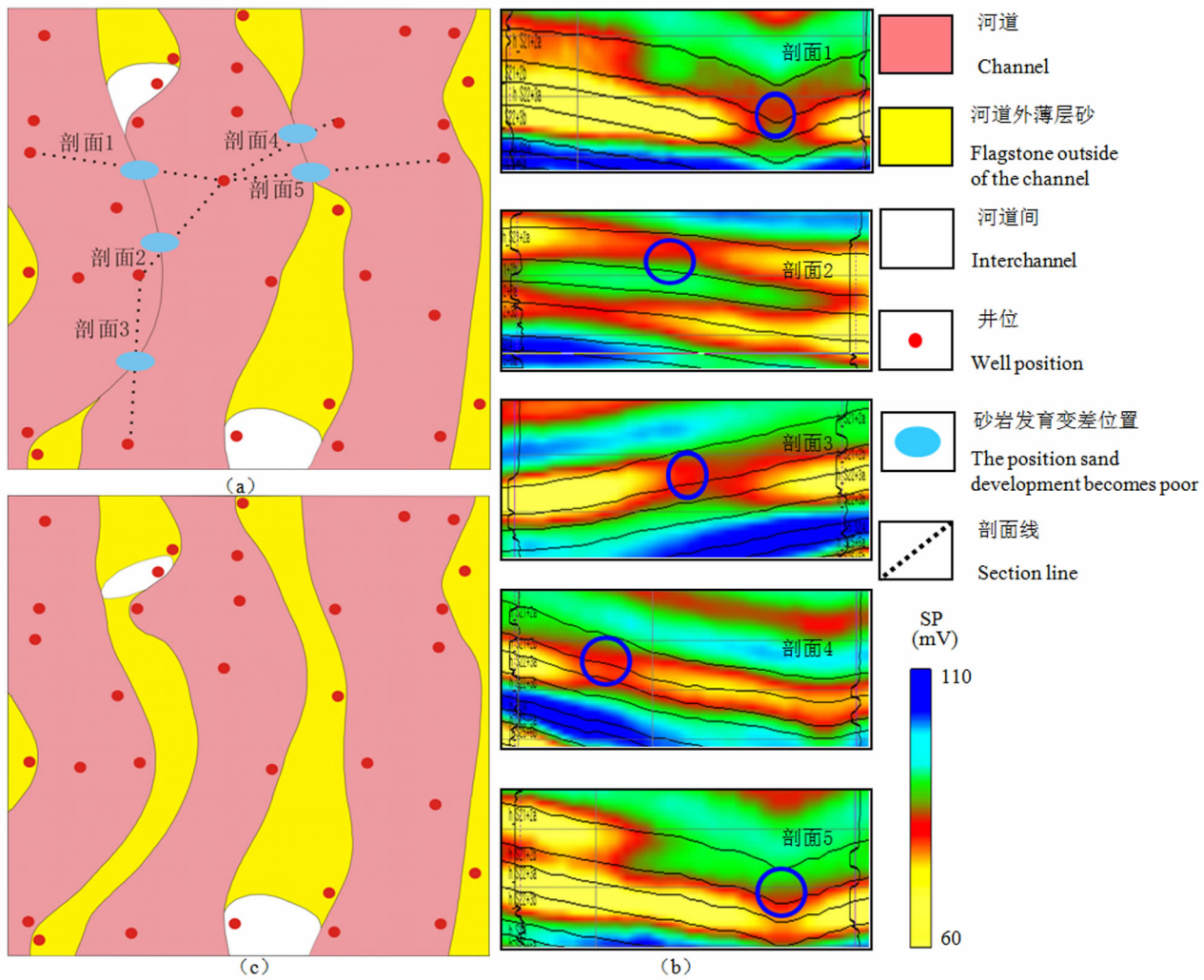


图 11 大庆油田萨北开发区萨二组复合河道砂体单一河道边界的识别  
Fig. 11 The identification of single channel sandbody boundary in compound channel sandbody for the S-II Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield  
(a) 井震结合前河道砂体展布图; (b) 反演预测剖面图; (c) 井震结合后河道砂体展布图  
(a) the channel sandbody distributive map before combination; (b) the plane inversion prognostic;  
(c) the channel sandbody distributive map after combination

的砂体符合率能达到 75% 以上,且三角洲分流平原亚相的砂体符合率要明显高于内前缘亚相。

(2) 利用“地震反演引导,井点微相控制”方法,根据测井曲线形态差异与反演剖面砂体发育状况的分析,能对河道砂体的单一河道边界、走向、井间砂体叠置关系描述起到一定的指示作用。

(3) 密井网条件下井震结合精细刻画井间河道砂体的方法在三角洲分流平原和内前缘亚相是适用的,通过充分利用钻测井数据的纵向优势与地震属性信息的横向优势对井间河道砂体定位,减少了以往单纯基于井数据刻画河道砂体的主观因素的影响。

响。

参 考 文 献 / References

崔健,张星. 2008. 曲线重构反演在储层预测研究中的应用. 大庆石油地质与开发, 27(3): 133 ~ 135.  
冯志强,张顺,付秀丽. 2012. 松辽盆地姚家组—嫩江组沉积演化与成藏响应. 地学前缘, 19(1): 78 ~ 87.  
韩大匡. 2010. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨. 石油勘探与开发, 37(5): 583 ~ 591.  
何火华,李少华,杜家元,李密,王全. 2011. 利用地质统计学反演进行薄砂体储层预测. 物探与化探, 35(6): 804 ~ 808.  
何宇航,于开春. 2005. 分流平原相复合砂体单一河道识别及效果分析. 大庆石油地质与开发, 24(2): 17 ~ 19.  
黄捍东,罗群,付艳,王保华. 2007. 地震相控非线性随机反演研究与

应用. 石油地球物理勘探,42(6):694~698.

刘百红,李建华,魏小东,郑四连. 2009. 随机反演在储层预测中的应用. 地球物理学进展,24(2):581~589.

姜晓宇,计智锋,毛凤军,宋涛,甘利灯. 2014. 薄互储层地震反演方法在尼日尔 Fana 地区的应用. 地球物理学进展,29(3):1157~1162.

姜岩,徐立恒,张秀丽,朱权,齐金成,李红星,黄勇. 2013. 叠前地质统计学反演方法在长垣油田储层预测中的应用. 地球物理学进展,28(5):2579~2586.

金振奎,时晓章,何苗. 2010. 单河道砂体的识别方法. 新疆石油地质,31(6):572~575.

潘昱洁,李大卫,杨锴. 2011. 确定性反演与随机反演对井约束条件的需求分析. 石油物探,50(4):345~349.

苏燕,杨愈,白振华,王彦辉. 2008. 密井网区井震结合进行沉积微相研究及储层预测方法探讨——以大庆杏树岗油田杏 56 区为例. 地学前缘,15(1):110~116.

王凤兰,白振强,朱伟. 2011. 曲流河砂体内部构型及不同开发阶段剩

余油分布研究. 沉积学报,29(3):512~519.

王琦,李红梅. 2012. 开发地震在大庆长垣喇嘛甸油田储层预测中的应用. 石油与天然气地质,33(3):490~495.

王玉普,刘义坤,邓庆军. 2014. 中国陆相砂岩油田特高含水期开发现状及对策. 东北石油大学学报,38(1):1~9.

文慧俭,范广平,马世忠,杨成,耿冬云. 2012. 大庆萨尔图油田北部萨一油层组沉积微相再认识. 科技导报,30(7):39~43.

徐立恒,陈显森,姜岩,张秀丽,朱权,朴昌永. 2012. 不同变差函数变程下随机反演与随机模拟对比分析. 物探与化探,36(2):224~233.

张繁昌,肖张波,印兴耀. 2014. 地震数据约束下的贝叶斯随机反演. 石油地球物理勘探,49(1):176~182.

张秀丽,姜岩,郝兰英,王彦辉,郭亚杰,孙雨. 2014. 密井网条件下随机地震反演及其在河道砂体预测中的应用. 石油地球物理勘探,49(5):954~963.

朱伟林,李建平,周心怀,郭永华. 2008. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探. 沉积学报,26(4):575~582.

An Application of Stochastic Inversion Technique to Describe Channel Sandbody Subtly

——Taking S-Ⅱ Layer of the Saertu Reservoir in North Development Area, Daqing Oilfield for Example

YAN Baiquan<sup>1)</sup>, HAN Wenbo<sup>1)</sup>, SUN Yu<sup>1)</sup>, CHEN Siduo<sup>1)</sup>, CHEN Fen<sup>2)</sup>, YANG Yang<sup>1)</sup>

1) College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318;

2) Oil Recovery Plant No. 3, Daqing Oilfield Corporation, Daqing, Heilongjiang, 163113

**Abstract:** Take S-Ⅱ layer group in north development area of Daqing oil field as an example, it's studied that what is Stochastic inversion technique and its application to describe channel sandbody subtly. The study has shown that: In the vertical, there are large differences between the stochastic inversion results coincidence rate of sandbody of different thickness: The sandbody of over 3 metres, its coincidence rate is 98.6% ; The sandbody of 2~3 m, its coincidence rate is 79.1% ; less than 2 metres, its coincidence rate is 71.5% ; in the plane, the average coincidence rate of all sedimentary units can reach more than 75% , and the coincidence rate of delta distributary plain subfacies is higher than that of inner front subfacies. With the logging curve and inversion results, combining well and seismic the channel trend, the single channel sandbody boundary in compound channel sandbody and the superimposed relationship between interwell sandbody , can be described subtly.

**Keywords:** stochastic inversion; combining well and seismic; channel sandbody ; S-Ⅱ Layer of the Saertu Reservoir; Daqing Oilfield