

# 叠前反演方法在致密砂岩气储层预测中的应用

薛明喜<sup>1</sup>, 陈开远<sup>1</sup>, 田泽华<sup>2</sup>, 贾曙光<sup>3</sup>

- (1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083;
2. 中国石油西部钻探录井工程公司, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 北京金海能达科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 以鄂尔多斯东缘 A 区块为例, 通过岩石物理正演分析, 论证了储层岩石物理参数的敏感性, 确定利用纵波阻抗与纵横波速度比参数进行储层的识别。在此基础上进行正演模拟, 研究了地震的极限分辨率及不同厚度砂体的地震响应特征, 确定了运用叠前地质统计学反演为核心的储层预测技术对该研究区太原组进行储层预测研究, 以解决该区储层薄、横向变化快、单一岩石物理参数无法区分岩性等问题。地质统计学反演结果表明, 该方法能有效的预测厚度大于 3 m 的储层。对比研究区内 11 口测井解释厚度与储层反演厚度表明, 储层反演预测厚度平均误差为 7.5%, 其中 5 口盲井的平均误差为 10.2%, 一口新钻井的砂体厚度预测误差为 1.73%, 为该区的井位部署提供了可靠的资料参考。

**关键词:** 致密砂岩气; 正演模拟; 叠前地质统计学反演; 储层预测

**中图分类号:** P618.13; P628.2

**文献标识码:** A

## APPLICATION OF PRESTACK INVERSION METHOD IN THE PREDICTION OF TIGHT SANDSTONE GAS RESERVOIR

XUE Mingxi<sup>1</sup>, CHEN Kaiyuan<sup>1</sup>, TIAN Zehua<sup>2</sup>, JIA Shuguang<sup>3</sup>

- (1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. CNPC Xibu Drilling and Logging Engineering Company Limited, Karamay 834000, Xinjiang, China;
3. Beijing JHND Science and Technology Ltd. Beijing 100085, China)

**Abstract:** Taking A block of eastern Ordos Basin as an example, reservoir petrophysical sensitive parameters are demonstrated through the work of petrophysical analysis which shows that the single impedance parameter can't be applied to identify the reservoir and the parameter  $V_p/V_s$  must be used for the identification. Though the analysis of seismic simulation, the seismic resolution and the seismic-response characteristics of different sand thicknesses are studied. Based on the study of seismic simulation, in order to solve the problems of tiny thickness reservoir, rapid lateral variation and reservoir recognition difficulty, the pre-stack geostatistical inversion is chosen as the research method. Comparison of the thickness of well log interpretation and reservoir inversion in 11 wells shows that pre-stack geostatistical inversion can effectively identify reservoir with thickness more than 3m. The results of inversion are considered achieving a high accuracy prediction of reservoir with a thickness average error rate of 7.5%, the average error of five blind wells is 10.2% and the new well is 1.73% which provides a strong reference for well placement.

**Key words:** tight sand gas; forward simulation; pre-stack geostatistical inversion; reservoir prediction

## 0 引言

致密砂岩气是指覆压基质渗透率小于或等于 0.1 mD 的砂岩气层,单井一般无自然产能,或自然产能低于工业气流下限,但在一定经济条件和技术措施下,可以获得工业天然气产量<sup>[1]</sup>。近年来致密砂岩气已成为全球非常规天然气勘探的重点领域<sup>[2]</sup>,受到越来越广泛的重视。2007年,世界石油委员会的报告中预测致密砂岩气资源量约为  $114 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,约占全球非常规资源量的 70%<sup>[3]</sup>。我国致密砂岩气早在 20 世纪 70 年代初在四川盆地就有发现,但受技术和成本限制进展缓慢;直到近些年,随着压裂技术的进步和规模应用以及井工厂模式的应用,实现了单井产量的大幅提高和开发成本的降低<sup>[4]</sup>。截至 2011 年底,致密砂岩气累计探明可采储量  $1.76 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占全国天然气探明储量的约 40%,成为我国天然气勘探开发的重要领域<sup>[5-6]</sup>。

鄂尔多斯盆地是我国重要的含油气盆地,有满盆气半盆油之说,尤其是近二十年来,先后发现了苏里格、大牛地、榆林、子洲、乌审旗、神木、米脂等上古生界大型致密砂岩型气藏。A 地区位于鄂尔多斯盆地东缘晋西挠褶带中部,其构造及沉积特征与以往发现的大型致密砂岩型气藏相似,是鄂尔多斯盆地致密砂岩气重要的勘探区域。截止到 2013 年底,鄂东缘 A 区块共部署钻井 10 口,并对其中 3 口进行了试气,其中 A-1 井与 A-6 井的测试产量达到日产  $2 \times 10^4 \text{ m}^3$  以上,预示该区内蕴藏有丰富的致密砂岩气资源。

由于研究区储层厚度薄,采用传统的纵波阻抗反演无法预测研究区薄层砂体的展布特征。叠前地质统计学反演是采用马尔科夫链蒙特卡洛算法<sup>[7]</sup>,将叠前同时反演与随机反演结合形成的一种算法,该方法以统计学分析为基础,通过地震钻井的统计分析,获得概率分布函数和变差函数,以单井岩石物理参数为基础,通过随机模拟获得井间的阻抗,将阻抗转换成反射系数并与子波进行褶积获得合成地震道,反复迭代直至合成地震道与原始地震数据达到一定的相关性。为了克服多解性,反演过程中产生多个实现拟,基于多个

反演结果的实现求取目标属性最大似然体<sup>[8-10]</sup>。因此,该研究在岩石物理及模型正演分析的基础上,应用地质统计学反演对研究区有利储层展布进行预测<sup>[11-12]</sup>,以期指导致密砂岩气储层的储层预测。

## 1 地质特征

A 地区位于鄂尔多斯盆地东缘,主要构造特征为近东西向的单斜,构造较平缓,断层不发育,目的层太原组地层继承性发育特征明显,储层主要沉积类型为辫状河三角洲及湖泊相砂体,储层具有横向变化快、非均质性强、储层物性差、储层厚度薄等特点<sup>[13-14]</sup>,研究区主要目的层单砂体厚度在 0.5 ~ 11.4 m 之间(见图 1)。储层孔隙度平均值为 5.5%,渗透率平均值为 0.53 mD,属于特低孔—特低渗组合,为典型的致密砂岩储层。储层与围岩之间物性差异较小,预测难度大。

## 2 储层岩石物理参数分析

前期钻井证实,研究区的储层全部为砂岩储层,煤层及泥岩均未见含气显示。为了更好的开展储层预测工作,首先必须要明确不同储层类型的岩石物理特征,优选对有利储层敏感的弹性参数,为有利储层预测工作提供依据<sup>[15-19]</sup>。对研究区太原组进行分岩性的统计,从弹性参数的统计结果可以看出:煤层与砂、泥岩存在明显的纵波阻抗差异,利用纵波阻抗可以有效识别煤层,但砂岩、泥岩纵波阻抗区分度较差,无法有效的识别砂岩储层(见图 2a)。进一步分析不同岩性的纵横波速度比特征表明,砂岩和泥岩的纵横波速度比差异明显(见图 2b),利用纵横波速度比可以有效的识别砂岩储层。因此必须开展叠前纵横波联合反演工作才可能对砂体及含气砂体进行描述。

## 3 地震正演数值模拟

### 3.1 地震资料品质分析

研究区三维地震采集面元为  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,满

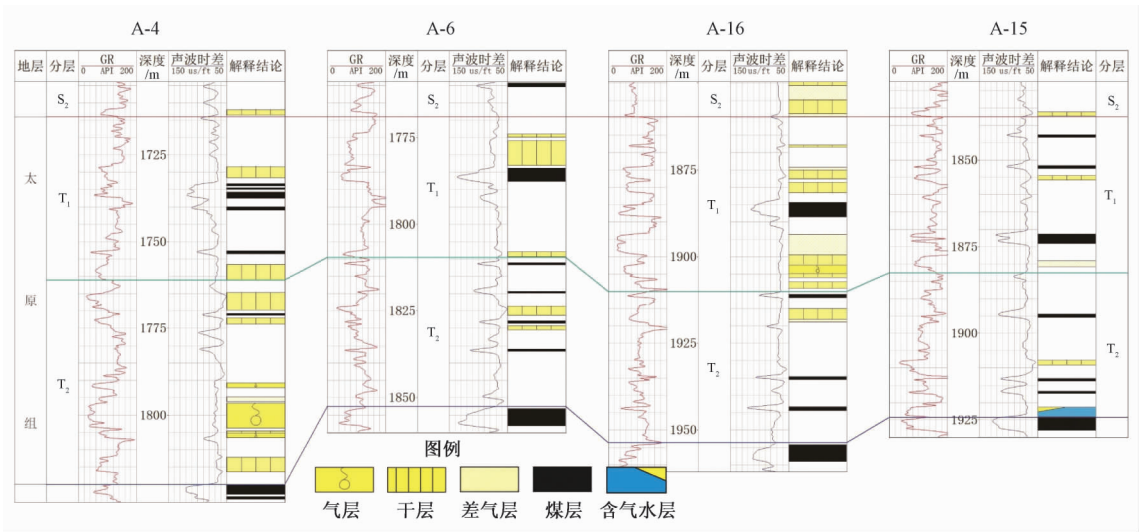


图1 鄂尔多斯东缘A区块太原组连井对比剖面

Fig. 1 Correlation section of Taiyuan formation in A block, eastern margin of the Ordos basin

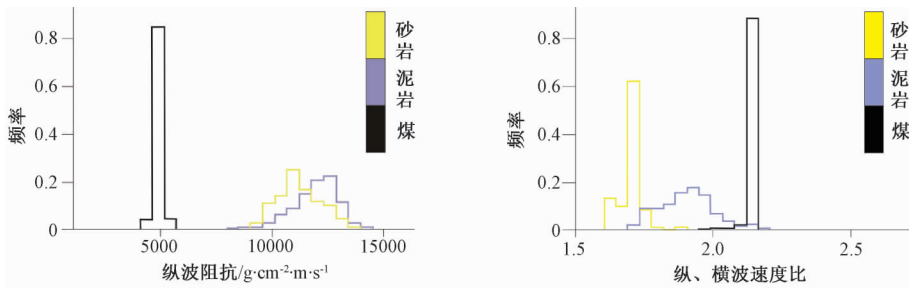


图2 太原组岩石弹性参数分岩性统计结果

Fig. 2 Lithology statistics of rock elastic parameters of Taiyuan formation

覆盖 96 次，目的层时间深度范围在 0.8 ~ 1.4 s (见图 3a)，目的层主频约为 20 Hz，有效频宽在 5 ~ 40 Hz 左右 (见图 3b)。该三维地震资料品质较好，从浅到深整体资料信噪比较高，地层接触关系清晰，成像效果较好，提供了较好的资料基础。根据 Rayleigh 准则<sup>[20]</sup>，研究区的地震极限分辨率为 1/4 波长，按照地层平均速度 4200 m/s 计算，地震极限分辨率为 52.5 m，但地震分辨率是根据地震波长大小定义的，而地震波长是随空间变化的，应用主频进行地震分辨率的计算误差较大<sup>[21]</sup>。因此文中利用楔状模型开展地震极限分辨率的研究。楔状模型厚变化范围为 0 ~ 50 m，主频为 20 Hz，围岩平均速度为 4500 m/s，密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>，目标层平均速度为 4000 m/s，密度为 2.51 g/cm<sup>3</sup>。楔状正演结果表明 (见图 3c)，地震调谐厚度为 24 m，常规反演的极限分辨率为地震分辨率一半<sup>[22]</sup>，其分辨厚度为 12 m。

### 3.2 结合工区实际情况正演模型

正确的认识储层地震响应特征，是利用地震资料开展储层预测的基础。为进一步研究含气砂体的地震响应特征与叠前常规反演的地震分辨率，以 A-6 井资料为约束，建立符合实际地层条件的过 A-6 井的致密砂岩地震地质模型。由于太原组与石盒子组储层特征类似，地质模型选取 A-6 井石盒子组测试段作为目的层段，该层共有三层气层，储层厚度分别为 3.2 m、12 m、4.1 m，该井测井数据包括纵波、横波、密度等曲线，因此目的层内泥岩和砂岩储层的地球物理参数采用 A-6 井的实际参数，模型顶、底层岩石物理参数均采用测井约束下的储层反演低频模型参数，模型目的层段砂、泥岩储层岩石物理参数从测井曲线读取 (见表 1)，具体的砂泥岩时间域模型如图 4a 所示，绿色为砂岩储层，橙色为泥岩背景。

实际剖面 (见图 4b) 与正演剖面 (见图 4c) 的对比，从图中可以看出，1 号、3 号砂体由于厚

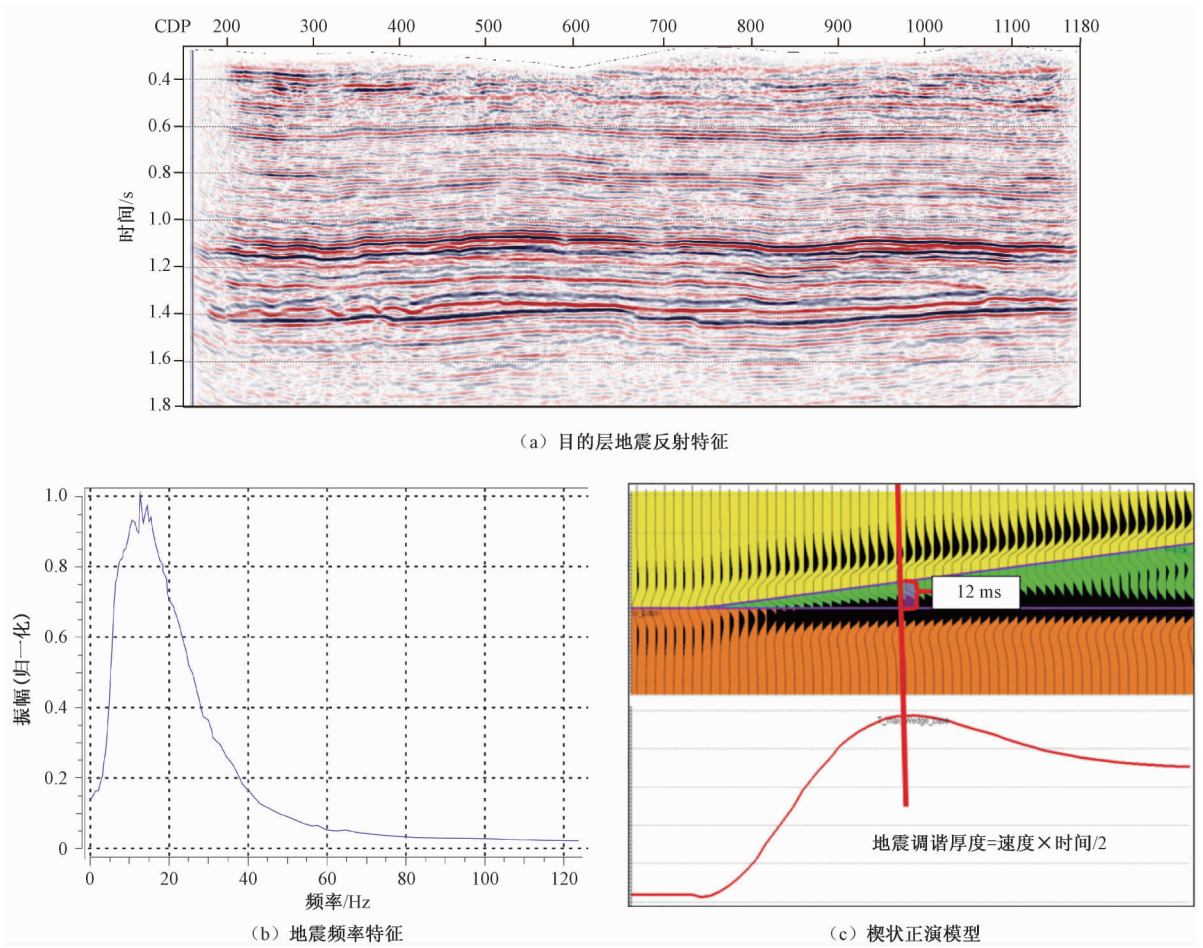


图 3 地震资料品质分析

Fig. 3 Seismic data quality analysis

度薄, 在实际地震剖面与正演合成记录上均无明显响应特征; 2 号厚砂层处正演地震记录与实际地震剖面相符合, 均表现为振幅增强, 为亮点反射特征。正演模拟结果与实际地震剖面的反射特征吻合很好, 表明基于实际地震地质资料建立的致密砂岩储层模型具有可靠性。在此基础上对此模型的正演模拟结果进行叠前同时反演, 结果表明 2 号气层可以清晰的刻画, 但 1 号、3 号气层通过同时反演无法进行预测 (见图 4d)。由于研究区储层以薄储层为主, 叠前同时反演精度无法满足研究区的储层刻画精度。

表 1 正演模型参数表

Table 1 Forward model parameters

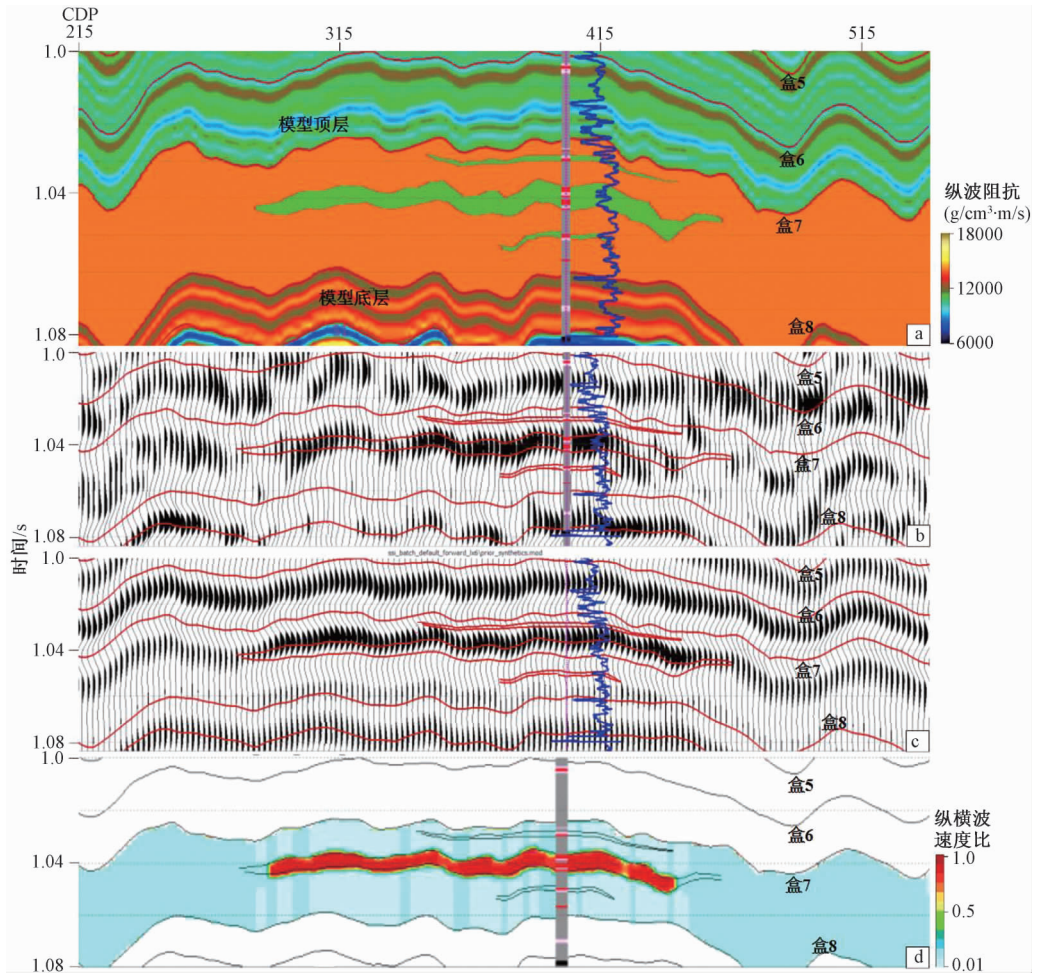
编号	厚度/ m	纵波阻抗/ $g \cdot cm^{-3} \cdot m \cdot s^{-1}$	纵横波速 度比	密度/ $g \cdot cm^{-3}$
1 号砂体	3.2	10220	1.71	2.52
2 号砂体	12	9855	1.69	2.50
3 号砂体	4.1	10060	1.70	2.51
泥岩		12600	1.90	2.69

## 4 实际应用效果分析

### 4.1 叠前地质统计学反演的关键参数

高质量的地震道集与合理的角度划分是叠前反演的基础。文中对研究区道集进行了剩余时窗校正, 去噪与超道等优化处理<sup>[23]</sup> (见图 5a), 在此基础上对有效偏移距分三部分叠加 (见图 5b), 叠加方案即保证了每个叠加范围的覆盖次数, 又充分保证了叠加资料的信噪比。

根据岩性测井解释结果, 针对目标层太原组岩性划分为砂岩、泥岩和煤层三种来进行叠前地质统计学反演<sup>[12]</sup>。反演的三个主要参数为概率密度分布函数、岩性比例及变差函数。概率分布函数描述的是特定岩性对应的岩石物理参数分布的可能性。针对目的层太原组, 结合岩石物理分析成果, 通过对各岩性的测井纵波阻抗和纵横波速度比的分析获得砂岩、泥岩和煤的概率密度分布



a—地质模型；b—实际地震剖面；c—正演地震剖面；d—正演同时反演剖面

图4 井地震正演模拟剖面

Fig. 4 Section of seismic forward modeling

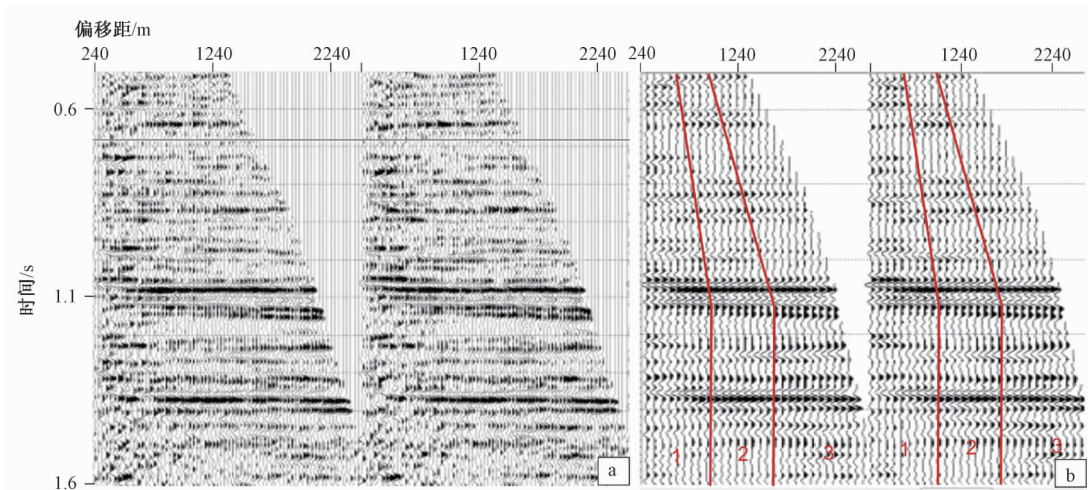


图5 道集优化处理

Fig. 5 Optimization progress of gathers

函数 (见图 6a)。岩性比例建立在对研究区的地质认识之上, 对地质统计学反演起到软约束的作用,

使储层反演结果融入更多的地质信息。通过对已钻井的统计分析, 太原组岩性划分的岩性比例如

图 6b 所示。变差函数描述的是横向和纵向地质特征的结构以及特征尺度, 垂向变程表征沉积体厚度, 影响反演垂向分辨率; 横向变程影响沉积体的展布特征, 其中  $X$  方向为沉积储层的延展长度,  $Y$  方向为储层宽度<sup>[24]</sup>; 也就是不同岩相及其属性在空间展布形态和变化尺度的大小, 很显然它是一个空间三维的函数, 描述不同岩相的空间展布。由于井少且分布不均, 变差函数统计是个难题,

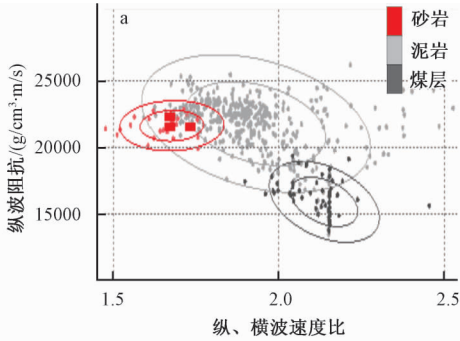


图 6 太原组岩相概率 (a) 及所占比例 (b)

Fig. 6 Lithofacies probability and ratio of Taiyuan formation

表 2 研究区太原组各岩性弹性参数  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向变程

Table 2  $X/Y/Z$  direction variable range of different lithologies of Taiyuan formation

岩性	$X/\text{m}$	$Y/\text{m}$	$Z/\text{ms}$
砂岩	1200	1200	1
泥岩	1600	1600	2
煤	1000	1000	4

#### 4.2 叠前地质统计学反演效果分析

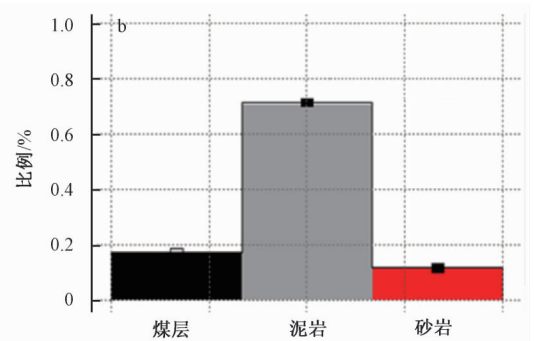
利用叠前同时反演与地质统计学反演分别得到纵波阻抗、纵横波速度比数据体, 对比纵横波速度比反演结果表明, 叠前地质统计学反演得到的纵、横波速度比横向分布和整体的趋势与叠前同时反演结果 (见图 7) 基本一致, 但是其保留了垂向上更多的地质细节, 对于薄层地区, 地质统计学反演具有更高的垂向分辨率和更好的储层预测能力。

#### 4.3 储层预测效果

经过以上地质统计学反演得到了纵波阻抗及纵横波速度比数据体, 利用单井的岩石物理统计结果, 定义各类岩性弹性参数属性的概率密度函数 (见图 6a), 然后应用贝叶斯模糊判别分析技术<sup>[25]</sup>, 计算各岩性类型的空间分布概率, 得到砂岩的空间概率体, 砂岩发育概率与其对应厚度的乘积即为砂体预测厚度。

根据砂岩概率体, 对主要目的层的砂体厚度

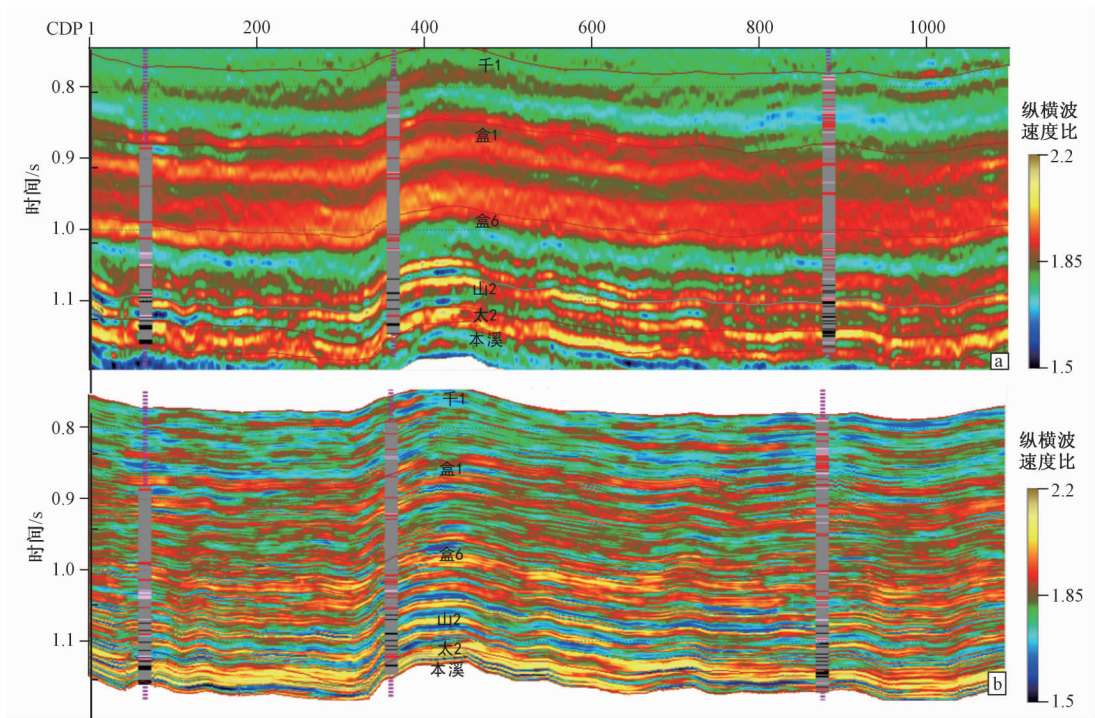
所以需要进行大量系统的测试。纵向上的变差函数统计来自于井资料, 横向上的变差函数统计通过多组变差函数反演测试分析, 选取与地质背景吻合度较高的一组参数, 作为最终参数, 从而得到纵向  $Z$  和横向  $X$ 、 $Y$  三个方向的变程以及拟合参数, 针对研究区太原组的各岩性的弹性参数  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的变程如表 2 所示。



进行解释, 并从单井、剖面及新钻盲井等方面进行校正分析。图 8 为过 A-6 井的地质统计学反演砂岩概率剖面。根据测井解释, 该井在目的层大于 1 m 砂体共 9 个, 其中 1 号、3 号及 7 号砂体厚度大于 3 m, 其它砂体均小于 3 m (见表 3)。通过对比表明, 地质统计学反演对于厚度大于 3 m 的砂体预测效果较好, 平均误差约为 17%; 但对于厚度小于 3 m 砂体, 地质统计学反演无法预测 (见表 3)。

图 9a 中 A-20 井反演预测砂体厚度为 20.4 m, 实际钻探砂体厚度为 20.7 m, 预测储层厚度误差为 1.5%; 同时根据地质统计学反演预测结果部署新井 A-101 井, 该井位置处太 2 段储层反演预测砂体厚度为 22.01 m, 实际钻探厚度为 22.4 m, 预测储层厚度误差为 1.73%。图 9b 为利用地质统计学反演预测的太 2 段砂岩厚度等值线图, 平面上太 2 段砂体呈近北北东向的条带和土豆状展布, 与地质沉积方向吻合。对比可见, 叠前地质统计学反演结果与实测结果总体吻合较好, 说明了叠前地质统计学反演应用研究整个实现过程的合理性。

为进一步验证 A 地区太 2 段三维空间预测结果的可靠性, 对全区 11 口井的实钻储层砂体厚度与反演储层砂体厚度进行了统计对比 (见表 4)。研究表明, 叠前地质统计学反演预测砂体厚度最大误差为 27.95%, 平均值为 7.5%。其中 5 口盲



a—叠前同时反演剖面；b—叠前地质统计学反演剖面

图7 A-5、A-4、A-6井纵、横波速度比对比剖面

Fig. 7 Correlation profiles of  $V_p/V_s$  in A-5, A-4, A-6 well

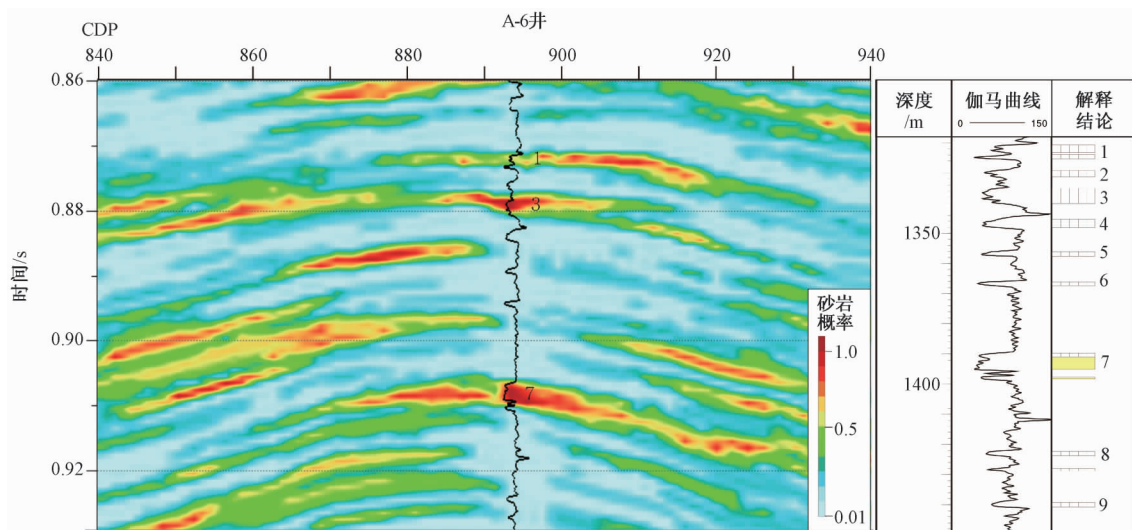


图8 过A-6井地质统计学反演剖面

Fig. 8 Pre-stack geostatistical inversion section of A-6 well

井砂体厚度预测的最大误差为27.95%，平均厚度误差为10.2%。由此可见利用叠前地质统计学反演能够很好的预测砂体的展部特征，预测成果为研究区下一步的井位部署提供了可靠的依据。

## 5 结论

致密砂岩气储层具有横向变化快、非均质性

强、储层物性差、储层厚度薄等特点，常规反演的精度无法有效预测薄层砂体。叠前地质统计学反演结合了常规叠前反演和地质统计学模拟，既解决了单一岩石物理参数无法准确预测储层的问题，又解决了常规反演垂向分辨率无法识别薄层的问题。研究区储层厚度薄、单砂体厚度小、相变快，通过地质统计学反演极大的提高了储层预

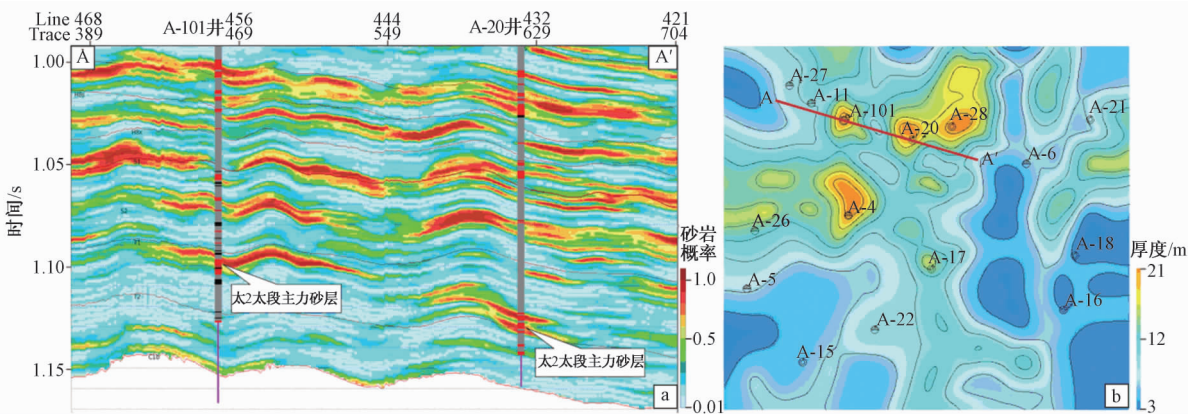


图 9 A 区块叠前地质统计学反演厚度验证

Fig. 9 Thickness verification of pre-stack geostatistical inversion in A block

表 3 A-6 井太原组砂体预测精度对比

Table 3 Sand body prediction accuracy comparison in

Taiyuan formation of A-6 well

砂体编号	测井厚度/m	反演厚度/m	误差/%	备注
1	4.26	3.2	24.8	含 0.4 m 泥岩夹层
2	2.2	0		
3	5.0	4.3	14	
4	2.8	0		
5	1.4	0		
6	1.3	0		
7	5.0	5.6	12	含 0.1 m 泥岩夹层
8	1.5	0		
9	1.5	0		

表 4 叠前地质统计学反演误差统计表

Table 4 Error statistics of pre-stack geostatistical inversion

井名	层位	钻井砂厚/m	预测砂厚/m	误差率/%
A-4	T <sub>2</sub>	23.20	21.66	6.64
A-5	T <sub>2</sub>	6.40	6.37	0.50
A-6	T <sub>2</sub>	15.00	14.85	1.02
A-8	T <sub>2</sub>	3.80	4.86	27.95
A-15	T <sub>2</sub>	4.10	4.31	5.18
A-16	T <sub>2</sub>	3.40	3.11	8.50
A-20	T <sub>2</sub>	20.70	20.40	1.46
A-26	T <sub>2</sub>	9.90	9.81	0.94
A-28	T <sub>2</sub>	24.00	22.46	6.40
A-101	T <sub>2</sub>	22.40	22.01	1.73
A-105	T <sub>2</sub>	13.40	15.45	15.29
误差均值:				7.5

注: A-8、A-15、A-26、A-101、A-105 井均未参与反演约束

测的垂向分辨率, 可以有效的识别 3 m 以上的薄层砂体, 反演结果与钻井吻合程度高, 能很好的刻画砂体的横向变化, 同时也证实了叠前地质统计学反演在该区有一定的适用性, 为储层精细描述提供了一种有效的方法。

参考文献/References

[ 1 ] 国家能源局. SY/T 6832 ~ 2011 致密砂岩气地质评价方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
National Energy Bureau. SY/T 6832 ~ 2011 Geological evaluating methods of tight sandstone gas [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011. (in Chinese)

[ 2 ] American Association of Petroleum Geologists, Energy Minerals Division. Unconventional energy resources: 2013 review [J]. Natural Resources Research, 2014, 23 (1): 19 ~ 98.

[ 3 ] Khlaifat A, Qutob H, Barakat N, et al. Tight gas sands development is critical to future world energy resources [R]. SPE 142049. Dubai, UAE; SPE, 2011.

[ 4 ] 马新华, 贾爱林, 谭健, 等. 中国致密砂岩气开发工程技术与实践 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39 (5): 572 ~ 579.  
MA Xinhua, JIA Ailin, TAN Jian, et al. Tight sand gas development technologies and practices in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39 (5): 572 ~ 579. (in Chinese with English abstract)

[ 5 ] 邱中建, 方辉. 中国天然气大发展——中国石油工业的二次创业 [J]. 天然气工业, 2009, 29 (10): 1 ~ 4.  
QIU Zhongjian, FANG Hui. Surging of natural gas in China: A new journey of China's petroleum industry [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (10): 1 ~ 4. (in Chinese with English abstract)

[ 6 ] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.  
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese)

[ 7 ] 赵林. 马尔可夫链蒙特卡罗模拟在储层反演中的应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2010, 32 (2): 249 ~ 252, 266.  
ZHAO Lin. Application of Monte Carlo simulation of Markov Chain in seismic inversion [J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 2010,



- 32 (2): 249 ~ 252, 266.
- [ 8 ] 高云, 朱应科, 赵华, 等. 叠前同时反演技术在砂砾岩体有效储层预测中的应用 [J]. 石油物探, 2013, 52 (2): 223 ~ 228.  
GAO Yun, ZHU Yingke, ZHAO Hua, et al. Application of prestack simultaneous inversion technique in effective reservoir prediction of sand-gravel body [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52 (2): 223 ~ 228. (in Chinese with English abstract)
- [ 9 ] Rothman D H. Geostatistical inversion of 3D seismic data for thinsand delineation [J]. Geophysics, 1998, 51 (2): 332 ~ 346.
- [10] Dubrule O, Thibaut M, Lamy P, et al. Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data [J]. Petroleum Geoscience, 1998, 4 (2): 121 ~ 128.
- [11] 王文香, 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 ~ 735.  
WANG Wenxiang, LIU Hong, TENG Binbin, et al. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33 (5): 730 ~ 735. (in Chinese with English abstract)
- [12] 薛怀艳, 李熙盛, 曾友良, 等. 精细刻画南海古近系油藏的叠前地质统计学反演 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2013, 35 (2): 92 ~ 95.  
XUE Huaiyan, LI Xisheng, ZENG Youliang, et al. Fine depiction of South China sea paleogene reservoir from prestack geostatistical inversion [J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 2013, 35 (2): 92 ~ 95. (in Chinese with English abstract)
- [13] 马东旭, 许勇, 吕剑文, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组物源特征及其与储层关系 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27 (7): 1215 ~ 1224.  
MA Dongxu, XU Yong, LÜ Jianwen, et al. Relationship between provenance and formation of Lower Shihezi Formation in Linxing area, Ordos Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (7): 1215 ~ 1224. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵达, 许浩, 汪雷, 等. 临兴地区山西组致密砂岩储层特征及成因探讨 [J]. 岩性油气藏, 2016, 28 (4): 51 ~ 58.  
ZHAO Da, XU Hao, WANG Lei, et al. Characteristics and genesis of tight sandstone reservoir of Shanxi Formation in Linxing area, Ordos [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28 (4): 51 ~ 58. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨宁, 王贵文, 赖锦, 等. 岩石物理相的控制因素及其定量表征方法研究 [J]. 地质评论, 2013, 59 (3): 563 ~ 574.  
YANG Ning, WANG Guiwen, LAI Jin, et al. Researches of the control factors and the quantitatively characterization method of reservoir petrophysical facies [J]. Geological Review, 2013, 59 (3): 563 ~ 574. (in Chinese with English abstract)
- [16] 成志刚, 宋子齐, 何羽飞, 等. 岩石物理相分类与致密储层含气层评价——以苏里格气田东区致密储层老井复查为例 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20 (5): 23 ~ 27, 32.  
CHENG Zhigang, SONG Ziqi, HE Yufei, et al. Classification of petrophysical facies and gas evaluation in tight reservoir-case of re-evaluation of old wells in eastern Sulige [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20 (5): 23 ~ 27, 32. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵铭海, 傅爱兵, 关丽, 等. 罗家地区页岩油气测井评价方法 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19 (6): 20 ~ 24.  
ZHAO Minghai, FU Aibing, GUAN Li, et al. Logging evaluation method of shale oil and gas reservoir in Luoia area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19 (6): 20 ~ 24. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王贤, 杨永生, 陈家琪, 等. 地震正演模型在预测薄储层中的应用 [J]. 新疆地质, 2007, 25 (4): 432 ~ 435.  
WANG Xian, YANG Yongsheng, CHEN Jiaqi, et al. Application of seismic forward modeling to prediction of thin reservoir [J]. Xinjiang Geology, 2007, 25 (4): 423 ~ 435. (in Chinese with English abstract)
- [19] Nowak E J, Swan H W, Lane D. Quantitative thickness estimates from the spectral response of AVO measurements [J]. Geophysics, 2007, 73 (1): C1 ~ C6.
- [20] Kallweit R S, Wood L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets [J]. Geophysics, 1982, 47 (7): 1035 ~ 1046.
- [21] 云美厚. 地震分辨率 [J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28 (1): 12 ~ 18.  
YUN Meihou. On seismic resolution [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28 (1): 12 ~ 18. (in Chinese with English abstract)
- [22] 沈财余, 阎向华. 测井约束地震反演的分辨率与地震分辨率的关系 [J]. 石油物探, 1999, 38 (4): 96 ~ 106.  
SHEN Caiyu, YAN Xianghua. Relation between the resolution of well log constrained seismic inversion and seismic resolution [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1999, 38 (4): 96 ~ 106. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张雅君, 侯斌, 陈岭. 叠前地震反演道集数据的预处理 [J]. 复杂油气藏, 2014, 7 (1): 34 ~ 37.  
ZHANG Yajun, HOU Bin, CHEN Ling. The gather data preprocessing of prestack seismic inversion [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7 (1): 34 ~ 37. (in Chinese with English abstract)
- [24] 马良涛, 范廷恩, 王宗俊, 等. 不确定性反演关键参数的地质含义及正演模型反演研究——以渤海海域 W 油田为例 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32 (1): 224 ~ 230.  
MA Liangtao, FAN Ting'en, WANG Zongjun, et al. Key parameter's geologic meanings and its forward model inversion study for geostatistics inversion—take W oilfield in the Bohai bay for example [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32 (1): 224 ~ 230. (in Chinese with English abstract)
- [25] 肖义越. 应用贝叶斯最佳二次型判别函数识别油气水层 [J]. 地质科学, 1982, 15 (1): 88 ~ 95.  
XIAO Yiyue. The use of Bayes best quadratic discriminant function to recognize oil-and water-bearing bed [J]. Scientia Geologica Sinica, 1982, 15 (1): 88 ~ 95. (in Chinese with English abstract)