

文章编号:0253-9985(2011)04-0560-08

鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏储层建模

张永贵,刘振峰

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏普遍具有岩性致密、低孔、低渗的地质特征,其地球物理异常往往较为微弱,先验地质模型特征模糊、地球物理数据体约束性差,从而导致最终构建的储层地质模型不能充分体现致密砂岩气藏储层较强的非均质性特征。为了解决该区致密砂岩气藏储层建模中遇到的实际问题,提出了将地质研究和地震数据信息充分结合起来的储层模型构建方案。在该方案中,在储层地质研究的基础上构建储层地质知识库,量化先验地质认识;通过地震属性优化和储层地震反演,构建对储层参数较为敏感的地震约束信息库;通过精细速度模型构建,将时间域和深度域的数据信息很好地进行匹配;通过构造建模、沉积相/岩相建模、相控下的连续型储层参数建模,建立起完备的致密砂岩储层地质模型。通过该方案在大牛地气田致密砂岩气藏储层建模中的实施和应用,证实了该方案的有效性。

关键词:地震属性;地震反演;储层建模;上古生界;致密砂岩气藏;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Reservoir modeling of tight gas sands in the Upper Palaeozoic of the northern Ordos Basin

Zhang Yonggui, Liu Zhenfeng

(SINOPEC Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The tight gas sands in the Upper Palaeozoic in northern Ordos Basin feature in tightness, low porosity and low permeability. Their geophysical anomalies are often insignificant, characteristics of priori geological models are ambiguous, and constraints on corresponding geophysical data volume are poor. For these reasons, the final reservoir model can not reflect exactly the heterogeneity of the tight gas sands. In order to solve these problems in modeling of the tight gas sands in the study area, geologic research results and seismic information are fully integrated in reservoir modeling. A reservoir geology database is first created based on geologic research results and is used to quantify the priori geologic knowledge. Then, a database of seismic constraints which are sensitive to reservoir parameters is created through seismic attribute optimization and seismic inversion. Next, information of time and depth domains is matched by building a fine velocity model. Finally, an integrated geologic model of the tight gas sands is established based on structure modeling, sedimentary facies/ lithofacies modeling and continuous reservoir parameter modeling under the control sedimentary facies. Application to reservoir modeling of the tight gas sands in the Daniudi gas field verifies its effectiveness.

Key words: seismic attribute, seismic inversion, reservoir modeling, Upper Palaeozoic, tight gas sands, Ordos Basin

致密砂岩气藏分布在致密砂岩背景下的“相对高孔渗砂体”之中^[1-2]。随着鄂北地区上古生界致密砂岩气藏勘探开发工作的不断深入,如何构建精细而准确的“相对高孔渗砂体”储层地质模型,以满足该地区对致密砂岩气藏高效开发的需要,成为储层预测与描述研究工作者关注的重要问题之一^[3-9]。由于该区致密砂岩储层普遍具有

岩性致密、低孔、低渗、含气丰度低的地质特征,泥岩、致密砂岩以及含气砂岩之间的阻抗差异小,地球物理响应特征微弱^[8-9],储层模型构建存在较大困难。为解决这一问题,在充分突出地质研究的核心地位并全面而合理地应用地震储层预测技术的基础上,本文提出了针对鄂北地区上古生界致密砂岩气藏的储层建模技术方案,这一方案及相

收稿日期:2011-04-04。

第一作者简介:张永贵(1964—),男,高级工程师,石油地质。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05002-005-003)。

关配套技术流程在大牛地气田的勘探开发实践中获得了良好的应用效果。

1 技术方案

致密砂岩储层建模需要着重考虑的问题有如下几个方面:①在地震反射界面不能和钻井分层很好地匹配的情况下,如何建立准确的构造-地层模型,为储层参数建模提供一个可靠的空间框架?②在层序内部体系域难以界定、砂体的空间变化频繁情况下,如何确定地质单元的成因类型及储层目标体的几何形状?③在不同沉积微相/岩相地震响应特征微弱的情况下,如何建立较为客观的沉积相模型或岩相模型?④如何在储层参数模型中较好地反映储层非均质性特征?

为解决好以上四个问题需要注意两个关键点,其一是突出地质研究的核心作用。地质研究对储层建模的核心作用,主要体现为地质概念模型的应用和相控建模原则^[10-14]。建模过程中运用地质概念模型越正确、越全面,建立的储层模型也越接近于实际。地质概念模型的具体体现是储层地质知识库。相控建模原则就是在沉积相/岩相空间分布控制下进行物性参数空间分布建模。其二是全面、合理地应用地震数据,地震数据参与是储层建模技术在实践中生命力不断增强的前提条件^[15-19]。

把握上述两个关键点的具体做法包括以下几个方面,①开展叠后地震资料提高分辨率处理、结合“三瞬”剖面来提高地震层位解释精度,解决地震反射层位和钻井分层的匹配问题。②开展储层沉积学分析和地震储层预测,查明不同砂体类型的几何形态,建立储层地质知识库、地震约束信息库。③建立可靠的速度场模型,进行时-深转换,建立构造-层位模型,进行地震约束信息重采样,使井、震信息在构造-地层模型中准确归位。④依托储层地质知识库,建立不同沉积相/岩相的变差函数模型,借助地震约束信息库干预,建立沉积相/岩相模型。⑤依托储层地质知识库,开展孔隙度/渗透率/含气饱和度等参数的空间变异性分析,在沉积相/岩相模型的控制和地震信息约束下,建立孔隙度/渗透率/含气饱和度等参数模型。总体技术方案流程如图1所示。

以下结合鄂北地区上古生界储层地质与地球物理综合研究的实际情况,就致密砂岩气藏储层

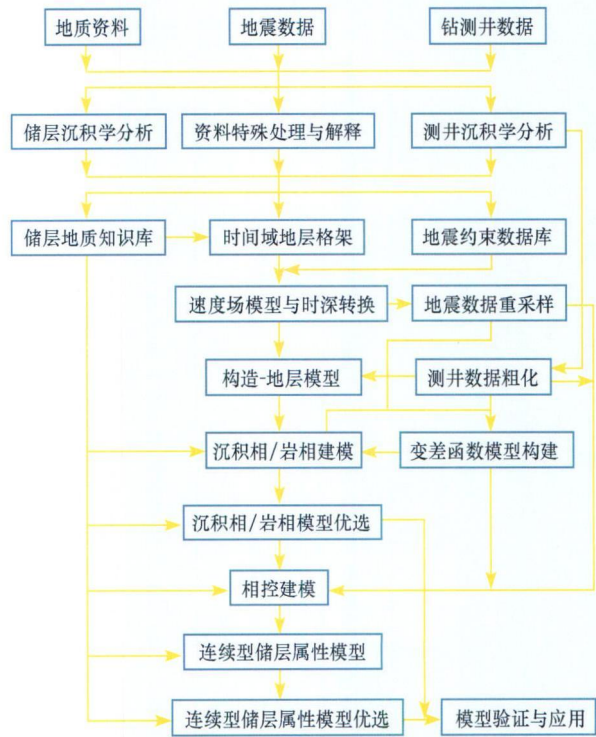


图1 致密砂岩气藏储层模型构建技术方案

Fig.1 Technique solution of reservoir modeling for tight gas sands

模型构建中几个重要的方面作以介绍。

2 储层地质知识库和地震约束信息库

2.1 储层地质知识库

储层地质知识库是定性或定量表征储层地质特征、具有区域指导意义的参数集,是储层建模的基础。如果将储层建模视为一个由先验认识经由数据的不断融入进而得到后验结果的过程,那么储层地质知识库就是这一认识提升过程所必需的先验认识。

在油气勘探开发工作中,前期沉积学研究总结出的储层特点和分布特征多是一些定性的认识,如果用于储层建模这一定量化研究过程,进一步的量化工作是必不可少的。在露头分析、现代沉积环境考察、密井网解剖、地震综合研究基础上,通过归纳总结,可以得到其量化或半量化的表达形式——储层地质知识库。该地质知识库由沉积环境/沉积微相、岩性/岩相、砂体几何形状、物性参数、旋回信息等多种参数共同组成。表1给出了大牛地气田不同沉积环境中砂体的几何形态、物性分布特征等量化信息。这些先验认识的量化过程不仅使地质认识进一步深化,而且量化的形式也

表 1 大牛地气田致密砂岩气藏储层沉积环境-岩性/岩相-几何形态-物性参数知识库
Table 1 Geology knowledge base of sedimentary environment, lithology/lithofacies, geometry and physical parameters of the tight gas sands in the Daniudi gas field

沉积环境	砂体类型	岩性/岩相	几何形态			物性		气饱和度, %	变异系数	GR 形态	成因解释	分布层位
			形状	宽度/m	厚度/m	孔隙度, %	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)					
辫状河	心滩	含砾粗砂岩相、砂砾岩相	透镜状、板状	800 ~ 1 100	>10	>8	>0.6	>60	1.827	微齿箱形	强水动力	下石盒子组
	河道充填	含砾粗砂岩、粗、中砂岩	剖面透镜状, 平面条带状	3 000 ~ 5 000	<10	6 ~ 10	0.3 ~ 1	50 ~ 70		微齿箱形	水动力强但变化频繁	
泛滥平原	决口扇	细、粉砂岩为主	舌状, 剖面透镜状	>5 000	<2	<6	<0.3	<50	—	钟形、指形	洪水决堤形成扇状堆积	
三角洲平原	分流河道	含砾粗砂、粗砂、中砂岩为主	平面带状分布	500 ~ 1 000	5 ~ 20	>6	>0.3	>50	1.402	钟形、箱形及组合	分流河道沉积正韵律	山西组
	决口扇	细砂岩为主	舌状, 剖面透镜状		<2	6 ~ 8	0.3 ~ 0.6	50 ~ 60	—	钟形、指形	洪水决堤形成扇状堆积	
	天然堤	粉砂岩为主	平面带状分布	500 ~ 2 000	<2	<6	<0.3	<50	—	指形	粉砂与粉砂互层堤岸沉积	
障壁砂坝	障壁砂坝	灰白色厚层状石英砂岩相	成排平行分布少弯曲	1 000 ~ 5 000	10 ~ 20	>5	>0.2	>50	0.775	光滑漏斗或箱形	海滩演化形成	太原组
潮坪	潮坪	中、细粒石英砂岩、泥岩、灰岩	平行砂坝带状分布	>2 000	<10	<5	<0.2	<50	—	指形	障壁砂坝两侧潮汐作用形成	

为后续的定量化的研究过程(模型构建)提供了研究基础和具体的指导方向,同时保证了模型构建这一数学过程不至于偏离地学研究的初衷。

2.2 地震约束信息库

储层建模过程中所利用的数据包括两类,一是钻、测井数据信息,即通常所说的“硬数据”;二是地震、生产动态测试等数据信息,即所谓的“软数据”或“约束数据”。第二类信息中的地震数据对储层建模具有至关重要的作用,为此建立地震约束信息库是非常必要的。该工作通过地震多属性优化和储层地震反演来完成。

开展地震多属性优化的原因在于,该区上古生界致密砂岩储层与围岩的岩石物理特征差异微弱,单一地震属性分析难以取得良好效果。在储层岩石物理分析、单一属性分析基础上,开展多属性优化分析,将多种地震属性中微弱的储层响应集成起来,形成具有明确地质意义的优化属性,可

以为储层建模提供可靠的地震约束数据体。在大牛地气田致密砂岩气藏储层研究中,用纵波阻抗、二阶导数、绝对振幅积分、道积分、55 ~ 70 Hz 信息、视极性、优势频率、瞬时相位余弦、瞬时相位 9 种地震属性得到的优化属性与岩性指示曲线的相关系数达到 84.54%。从图 2 可以看出,单一属性与岩性指示曲线的相关性很差(仅有 45.76%),而以井曲线为学习目标经过训练的优化属性具有明确的地质意义,低值(小于 270)代表了砂岩的存在,较好地反映了砂岩侧向的展布趋势,可以作为岩性参数模拟的约束数据体。

优化属性只是多种地震属性的一种组合,其垂向分辨能力较低。在薄互层情况下,需要为储层建模提供垂向精度较高的地震约束数据体。这个工作通过储层地震反演来完成。在该过程中,测井信息是作为条件数据(硬数据)出现的,直接参与到模拟结果之中,因而具有较高的垂向分辨能力。

这里需要讨论这两种方法的适用性问题。在

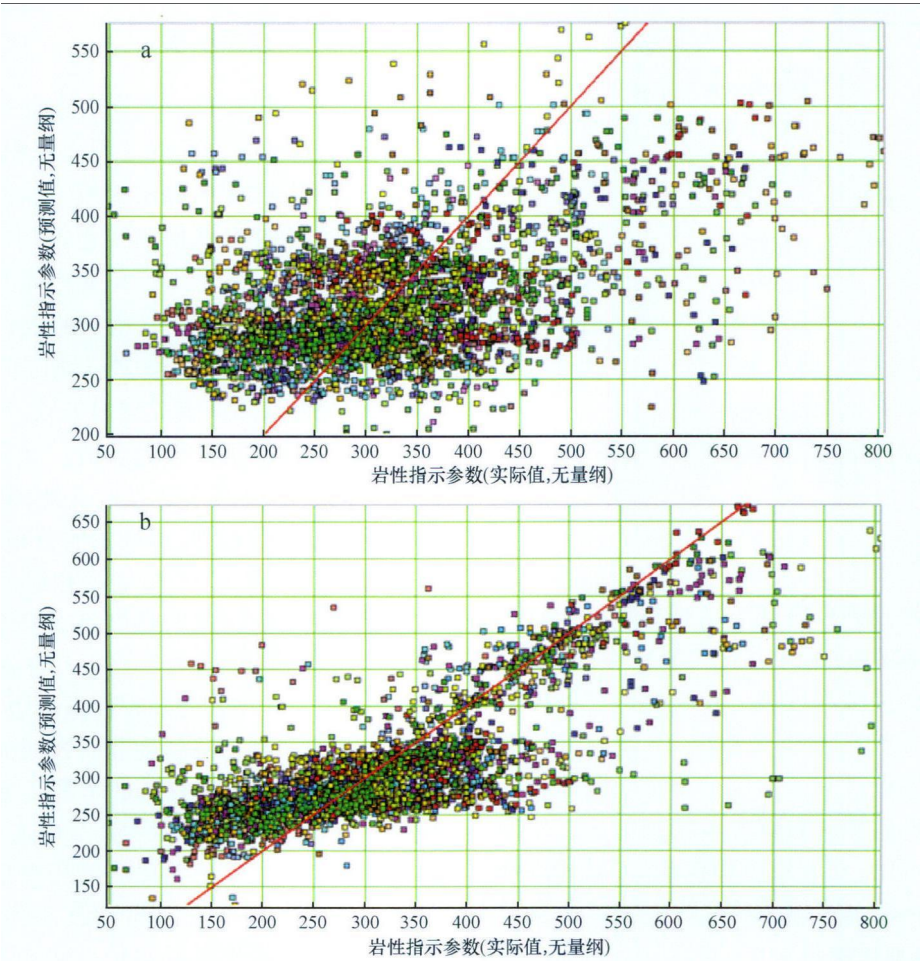


图 2 阻抗预测结果(a)、优化属性预测结果(b)与岩性指示曲线的相关性比较
Fig. 2 Correlations of impedance(a)and optimized attributes (b) with lithologic indicative curve

钻井较少的情况下,如果钻井分布均匀,多属性优化方法虽然垂向分辨率低一些,但能较客观地预测储层横向分布。而储层地震反演方法在钻井较为稀疏的情况下,很难对储层参数的变异结构做出较为合理的分析,往往会平面图上出现“围井打圈”,剖面图上出现“圣诞树”或“平行轨道”等明显有悖于地质规律的现象。不恰当地使用此类“软数据”约束建模,会加剧以上不合理现象的出现。因此在实际工作中,应该根据研究区块所处的勘探开发阶段、资料占有程度、所要达到的目标来综合考虑,来确定最终的地震约束信息库构建方案。表 2 给出了大牛地气田致密砂岩气藏储层建模地震约束信息库的主要数据体类型。

表 2 大牛地气田致密砂岩气藏储层建模地震约束数据信息库构成

Table 2 Components of seismic constraint database for reservoir modeling of the tight gas sands in the Daniudi gas field

数据体	使用目的
地震层位	速度场建模、构造建模
波阻抗	岩性、孔隙度、含气饱和度模拟
地震岩性优化属性	岩性模拟
地震孔隙度优化属性	孔隙度模拟
地震含气性优化属性	含气性模拟
岩性反演数据体	岩性模拟
密度反演数据体	孔隙度模拟、含气饱和度模拟
含气性反演数据体	含气饱和度模拟

3 储层模型构建

3.1 速度建模

储层建模涉及到深度域的钻测井数据和时间域地震数据的匹配问题。为此需要建立速度场,将时间域数据转换到深度域。单纯由地震处理人员提供的速度模型往往较为粗糙,不能满足储层模型用于水平井设计对于精度的要求。因此结合地震解释成果和钻测井数据开展精细的速度模型构建是非常必要的,其大致过程包括:①以井点处的地质分层时—深点作为控制,以地震解释层位为约束,建立与地质层位对应的时间域面;②以等时面作为约束条件进行钻井间的速度插值,建立速度模型;③利用所建速度模型,对地震数据进行

时—深转换,运用转换后的地震解释成果,与测井地质分层成果相对比,验证速度模型的可靠性。该工作是一个反复完善、不断改进的过程,相关结果要结合构造—层位分布特征,逐井、逐层进行检验,来保证结果的可靠性。

3.2 构造建模

构造模型反映储层的空间格架。这个过程的具体步骤如下:①定义模型名称(时间域模型);②定义横向网格间隔,横向网格数目决定了模型的侧向精度;③层位建模,将与地质界面对应的时间域的地震解释层位插入到定义的模型之中;④时深转换,将由主要地层界面构成的时间域框架模型转换到深度域;⑤层段建模,将其他层位插入到深度域模型中,建立起完整的地层框架模型;⑥建立垂向网格框架,在层段模型建立之后,根据每个层段的厚度等情况确定每个层段的网格数目,此网格数目决定了模型的垂向精度。

3.3 沉积相/岩相建模

鄂北地区致密砂岩气藏有效储层发育受制于沉积相、岩相的分布情况。因而沉积相/岩相模型客观与否直接决定着储层建模工作的成败。沉积相/岩相模型构建过程主要包括以下几个方面。①单井岩相划分。根据岩相建模需要将目的层段的岩相类型进行简化,避免相的数目过多。否则每种相所占比例较少,兼之以地震信息对划分太细的相不敏感,从而造成建模失效。一般而言,相的数目以三种至五种较为合适。②岩相特征参数统计。除地质知识库已有信息外,需要对相变量的指示变差函数模型、相变量的分布直方图、单层厚度分布频率直方图、相变量和地震信息间的概率关系、相变量的旋回性特征进行统计并保存。③模拟方法选取与模拟。目前用于离散变量模拟的方法很多,参与者交互程度差异也比较大,研究者应根据自己的熟稔程度和研究区的资料基础进行遴选,相关的方法测试是非常必要的。④模型优选。在相模拟得到的一簇实现之中,按照一定的方法来优选模型作为最终的相模型。优选方法主要有模拟前后的直方图近似、模拟前后变差函数模型近似,以及预留验证井进行检验等办法。在实际工作中,直方图近似和预留验证井进行检验使用的比较多,而模拟前后变差函数模型近似

性分析因为计算时间过长,在实际中应用较少。

3.4 连续型储层属性建模

连续型储层属性建模需要重视 4 个环节的工作。其一是按照相控建模的要求,在储层地质知识库的基础上,按小层分别统计各种相的连续型储层属性分布特征;其二是按照地震约束的要求,统计地震约束信息库里已有数据体与待模拟参数(孔隙度、渗透率、含气饱和度)的相关性;其三是在相模型基础上,按照相控原则,并遴选与模拟变量相关性好的地震数据体作为约束,选择序贯高斯模拟等连续型变量模拟算法,建立孔隙度、渗透率、含气饱和度等连续型变量的三维数值模型;其四是模型优选问题。最终的模拟结果是一簇实现。按照模拟前后不同数据区间所占比例直方图近似的原则,优选相应的模型作为最终成果模型。

4 实际应用效果

在鄂北地区大牛地气田上古生界致密砂岩气藏储层建模工作中,按照图 1 所示的工作流程,根

据前述研究方案,针对储层非均质性强,储层空间变异结构复杂等问题,在储层建模地层框架、储层地质知识库、地震储层预测、震控-相控建模等方面开展了技术攻关,构建了该气田大 23 井区等多个井区的上古生界致密砂岩气藏岩相、孔隙度、含气饱和度等一系列储层模型(图 3,图 4,图 5)。在这些模型基础上,按照气层评价标准,计算了相应层段的气层分布地质模型(图 6),刻画了气层在三维空间的分布状况。

在获取模型之后,结合钻井情况分析,对储层参数模拟结果进行了钻井验证。参加验证分析的未参与模拟的钻井共计 20 口,气砂岩厚度平均相对误差值为 13.72%。可见,预测结果准确率在 85% 以上,针对鄂北地区致密砂岩气藏的储层模型构建方案取得了较为可靠的储层地质模型。

以上研究成果被及时地应用到气田的储量计算、有利区优选、井位设计等工作,成为气田勘探开发部署的主要参考依据之一。图 7 显示了水平井 DP16 井井位建议剖面上气层的分布状况。从剖面可以看到,薄层砂体的含气状况得到了较为精细的刻画,满足了水平井钻井轨迹设计的需要。

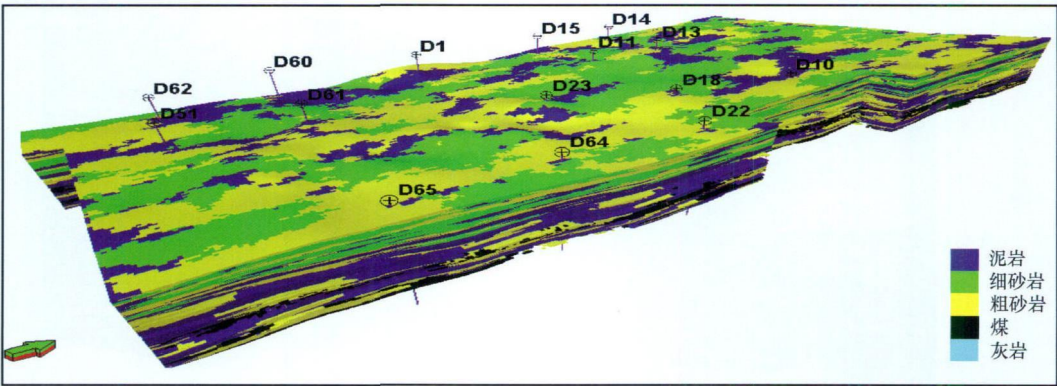


图 3 大牛地气田大 23 井区上古生界岩相模型
Fig. 3 Lithofacies model of the Upper Palaeozoic in the D23 wellblock, Daniudi gas field

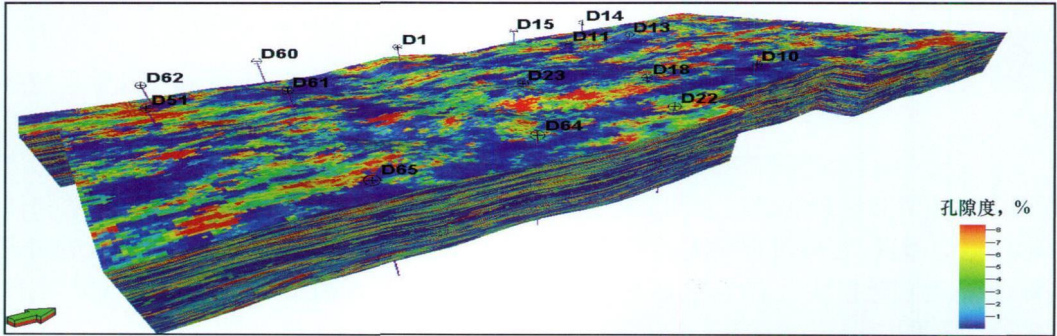


图 4 大牛地气田大 23 井区上古生界孔隙度模型
Fig. 4 Porosity model of the Upper Palaeozoic in the D23 wellblock, Daniudi gasfield

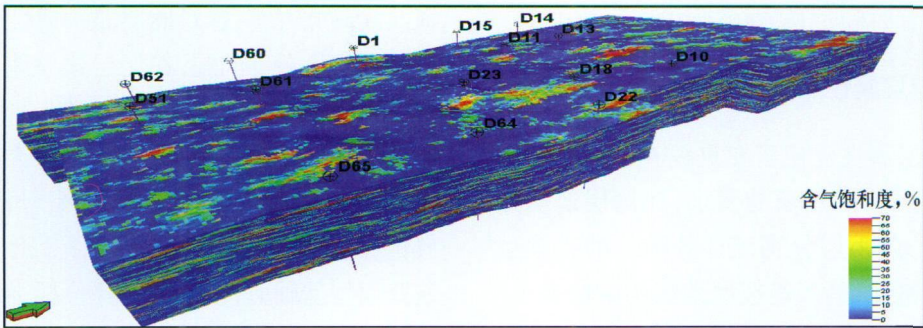


图 5 大牛地气田大 23 井区上古生界含气饱和度模型

Fig. 5 Gas saturation model of the Upper Palaeozoic in the D23 wellblock, Daniudi gas field

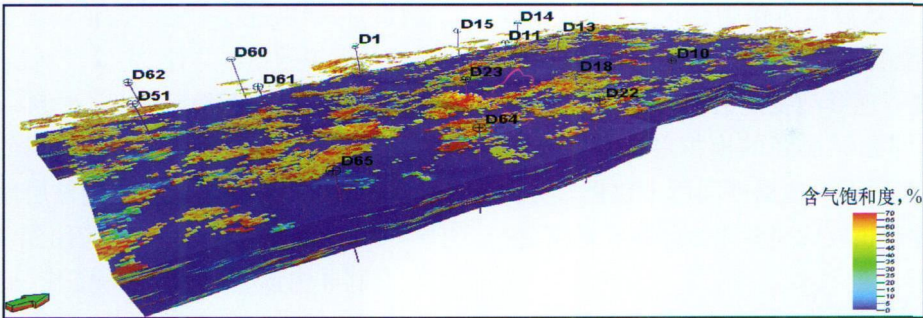


图 6 大牛地气田大 23 井区上古生界气层模型

Fig. 6 Gas layer model of the Upper Palaeozoic in the D23 wellblock, Daniudi gas field

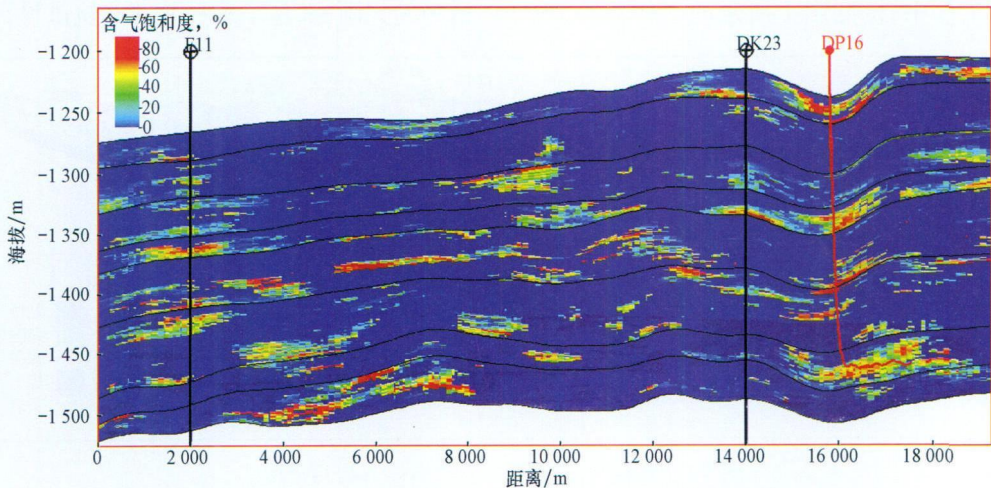


图 7 致密砂岩气藏气层预测成果剖面

Fig. 7 Profile showing the predicted gas layers in the tight gas sands

5 结论

- 1) 鄂北上古生界致密砂岩储层非均质性强, 储层地球物理响应微弱, 建模过程中先验地质模型特征模糊、地球物理数据体约束性差, 制约了储层建模技术的有效推广。
- 2) 根据该区目的层段地质地球物理特征, 提

出了突出地质研究的核心作用和地震数据全面参与的致密砂岩气藏储层建模技术方案, 方案实施取得了良好的应用效果。

3) 地质概念模型是储层地质学和储层建模之间的纽带, 其具体体现是储层地质知识库。储层地质知识库为储层建模提供了详尽的研究基础和具体的指导方向。

4) 地震数据的全面参与对储层建模具有至关重

要的作用。地震属性优化和储层地震反演是构建对储层参数较为敏感的地震约束信息库的主要手段。

参 考 文 献

- [1] 王金琪. 中国大型致密砂岩含气区展望[J]. 天然气工业, 2000, 20(1):10-16.
Wang Jinqi. Prospects for the large sized tight sandstone gas bearing regions in China [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(1):10-16.
- [2] 唐海发, 彭仕宓, 赵彦超, 等. 致密砂岩储层物性的主控因素分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(1):59-63.
Tang Haifa, Peng Shimi, Zhao Yanchao, et al. Analysis of main control factors of the physical property of tight sandstone reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2007, 22(1):59-63.
- [3] 丁晓琪, 张哨楠, 周文, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4):491-496.
Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Zhou Wen, et al. Characteristics and genesis of the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the northern Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4):491-496.
- [4] 于兴河, 李胜利, 赵舒, 等. 河流相油气储层的井震结合相控随机建模约束方法[J]. 地学前缘, 2008, 15(4):33-41.
Yu Xinghe, Li Shengli, Zhao Shu, et al. The constraining method on stochastic modeling for fluvial petroleum reservoir controlled by depositional facies integrating wells with seismic data[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4):33-41.
- [5] 陈昭佑, 王光强. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山西组砂体组合类型及成因模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5):632-639.
Chen Zhaoyou, Wang Guangqiang. Assemblage types and genetic models of the Shanxi sandbodies in Daniudi gasfield, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5):632-639.
- [6] 董昭雄, 沈昭国, 何国贤, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山1段储层与沉积微相的关系[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2):162-167.
Dong Zhaoxiong, Shen Zhaoguo, He Guoxian, et al. Relationship of sedimentary microfacies with reservoirs in the Shan-1 Member of the Daniudi gas field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2):162-167.
- [7] 郝蜀民, 惠宽洋, 李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6):762-768.
Hao Shumin, Hui Kuanyang, Li Liang. Reservoiring features of Daniudi low-permeability gas field in Ordos basin and its exploration and development technologies [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6):762-768.
- [8] 董宁, 刘振峰, 周小鹰, 等. 鄂尔多斯盆地致密碎屑岩储层地震识别及预测[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5):668-675.
Dong Ning, Liu Zhenfeng, Zhou Xiaoying, et al. Seismic detection and prediction of tight gas reservoirs in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5):668-675.
- [9] 李东安, 宁俊瑞, 刘振峰. 用神经网络和地质统计学综合多元信息进行储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4):493-498.
Li Dongan, Ning Junrui, Liu Zhenfeng. Reservoir prediction with integrated information based on artificial neural network technology and geostatistics [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4):493-498.
- [10] 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望[J]. 地学前缘, 2008, 15(1):1-15.
Yu Xinghe. A review of development course and prospect of petroleum reservoir characterization and stochastic modeling [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1):1-15.
- [11] 王家华. 迎接油气储层建模理论、应用的大发展——从2007年国际石油地质统计学大会谈起[J]. 地学前缘, 2008, 15(1):16-25.
Wang Jiahua. Greeting the great development of theories and applications of reservoir modeling. [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1):16-25.
- [12] Lucia, Jerry F, Kerans, et al. Technology today series article [J]. SPE 82071, 2003.
- [13] Tang Hong, Ji Hancheng. Incorporation of spatial characteristics into volcanic facies and favorable reservoir prediction [J], SPE 90847, 2004.
- [14] Tamhane D, Wang L, Wong P M. The role of geology in stochastic reservoir modelling; the future trends [J]. SPE 54307, 1999, 4: 20-22.
- [15] Martinez R D, Corinish B E, Seymour. An integrated approach for reservoir description using seismic, borehole, and geologic data [C] // SPE annual technical conference and exhibition, Texas, San Antonio, 1989: 81-11.
- [16] Moore J. Reservoir mapping problems in the United Kingdom Sector of the North Sea [C] // SPE european meeting, United Kingdom: London, 1973.
- [17] Harris D G, Sarg J F, Branisa F, et al. Trace inversion for interpreting reservoir continuity and lithology [C] // International petroleum exhibition and technical symposium, China: Beijing, 1982: 17-24.
- [18] McDonald J A, Gardner H F, Morris R I. Reservoir characterization by areal seismic methods [C] // International petroleum exhibition and technical symposium, China: Beijing, 1982: 17-24.
- [19] Zhang T, Bombarde S, Strebelle S, et al. 3D porosity modeling of a carbonate reservoir using continuous multiple-point statistics simulation [J]. SPE 96308, 2006, 11(3): 113-130.

(编辑 董立)