地震岩石物理和正演模拟技术在致密砂岩储层预测中的应用研究

李勇根 （中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院，北京 100083
中国石油勘探开发科学研究院，北京 100083）
徐胜峰 （中国石油勘探开发科学研究院，北京 100083）

[摘要] 致密砂岩储层因低孔隙性和含油气饱和度变化所产生的地球物理特征相对变化微弱，有利储层预测一直是地震预测中的难点，用传统的技术手段识别可能难以取得好的效果。地震岩石物理偏重于微观的实验研究，地震正演则反映了空间组合变化，二者结合相得益彰。开展了四川某工区致密砂岩的地震岩石物理基础研究和地震正演模拟研究，将地质模型和地震模型有机地结合起来，探索地层厚度、孔隙度、流体饱和变化引起地震响应的一般性规律，使地震反射特征具有地球物理意义和地质意义，进行有效的岩性区分和烃类检测，对于指导地震勘探实践具有重要意义。

[关键词] 储层预测；致密砂岩储层；地震岩石物理；正演模拟
[中图分类号] P631.44 [文献标识码] A [文章编号] 1000-9752(2008)06-0061-05

利用地震资料进行储层预测和流体识别一直是地球物理勘探研究热点之一。地震技术识别有效储层的关键是因孔隙度变化引起地层相对波阻抗变化。一般而言，有效储层的孔隙度越大就越易识别。地层中流体的地震可检测性取决于两个关键因素：一是流体引起的弹性参数相对变化，二是流体的可动性。在具备一定孔隙度基础上，流体密度越低、纵波速度越低，通过地震手段被探测到的可能性越大。流体的可动性越大，流体与骨架相互作用所造成的地震响应越显著，被地震方法有效探测的可能性也越大。由于致密砂岩本身具有的低孔低渗的特点，其所引起的地球物理特征的差异相对较小，导致致密砂岩有利储层预测一直是地震预测中的难点。实际地震资料受地层本身条件及采集、处理等多种因素影响，储层变化和流体的响应很容易被破坏。在实际地震记录中分析储层和流体的地震响应，要比使用简单的数学模型要复杂得多，油气藏的隐蔽性大大增强，用传统的技术手段识别可能难以取得好的效果。

地震岩石物理偏重于微观的实验研究，地震正演模拟则反映了空间组合变化，二者相得益彰[1~6]。因此，开展系统的地震岩石物理基础研究和地震正演模拟研究，将地质模型和地震模型有机地结合起来，探索出地层厚度、孔隙度、流体饱和变化引起地震响应的一般性规律，使地震反射特征既具有地球物理意义，又具有明确的地质意义，不仅能够有效区分岩性，也能够进行有效的烃类检测，以减少预测结果的多解性，对于指导地震勘探实践具有重要意义。

1 地震岩石物理分析

地震岩石物理学基础研究及相关分析方法研究的目的是识别岩性和流体，贯穿于有效储层预测和流体检测的各个环节，是应用地震及测井资料研究储层和进行油气预测的理论基础，进行参数有效性优选的重要手段。本研究综合利用已钻井的测井、岩心资料、钻井和试油资料，对四川川中某研究区内低孔低渗的致密砂岩有效储层测井曲线进行统计分析，寻找储层的岩石物理特征，用有效的地球物理技术预测储层参数。

[收稿日期] 2008-09-12
[作者简介] 李勇根（1970-），男，1992 年大学毕业，高级工程师，博士生，现主要从事地震资料解释和储层预测方面的研究工作。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 1 是该研究区内典型 x 井的岩心孔隙度与纵波阻抗和测井密度交会图。图中揭示随着孔隙度增大，密度和纵波阻抗呈稳定的下降趋势，并且相关性较好。值得注意的是，当孔隙度低于 8.5% 时，数据点更集中于拟合线附近；而当孔隙度大于 8.5% 时，相对高孔隙有利储层段数据点比较发散。分析研究认为，该现象与地层含气性有关。孔隙度越高、含气性越好，所测得的声波速度和体积密度越向低值方向偏移。该现象同时也揭示，在储层孔隙度预测时，使用纵波信息可能会具有更高的误差，并且通常会出现好储层过度估计的情况。

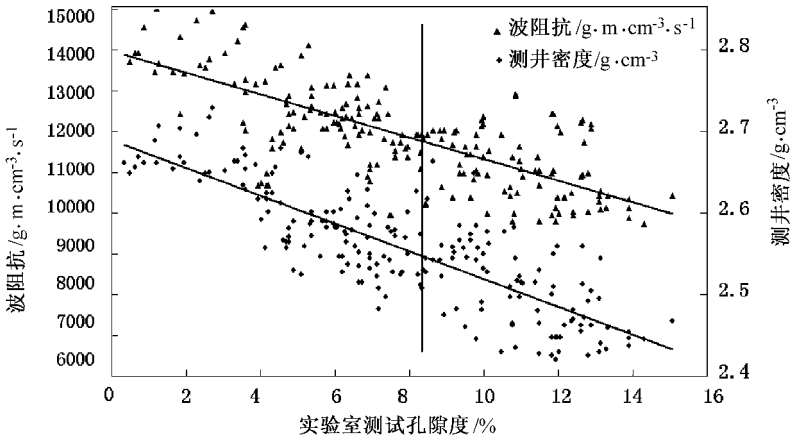


图 1 岩心孔隙度与纵波阻抗和密度测井交会图

图 2 为岩心孔隙度和纵、横波阻抗测井交会图。通过比较可以看出，由于横波受流体的影响非常小，气层与一般砂体的拟合趋势一致，预测的砂体孔隙度应该最能反映真实的储层质量。因此，要获得更准确的有效储层预测结果，应该使用横波反演信息，建立横波信息对应于孔隙度的经验公式，这也是叠前储层描述的优势。通常叠后储层反演只能得到纵波信息，预测的储层孔隙度会明显偏高。

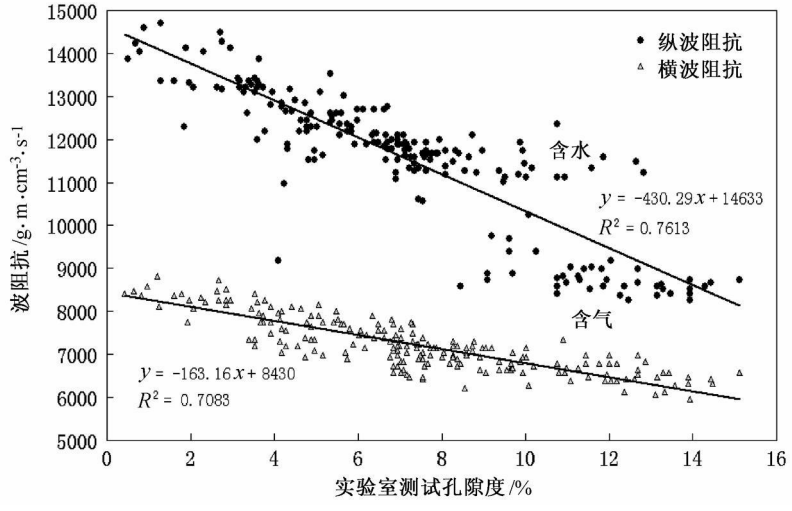


图 2 岩心孔隙度与纵横波阻抗交会图

图 3 是纵波速度 V_p 随含气饱和度 S_g 变化测试结果，纵波速度随含气饱和度增大而降低的规律非常稳定；孔隙度越高，纵波速度越低；孔隙度越高，纵波速度随含气饱和度变化的非线性特征越显著，当孔隙度小于 5.0% 时，可以认为纵波速度与含气饱和度基本呈线性关系。根据纵波速度随含气饱和度的相对变化关系，拟合得到研究区内砂岩储层纵波速度与含气饱和度、孔隙度关系的经验公式，可预测有效储层的含气饱和度。

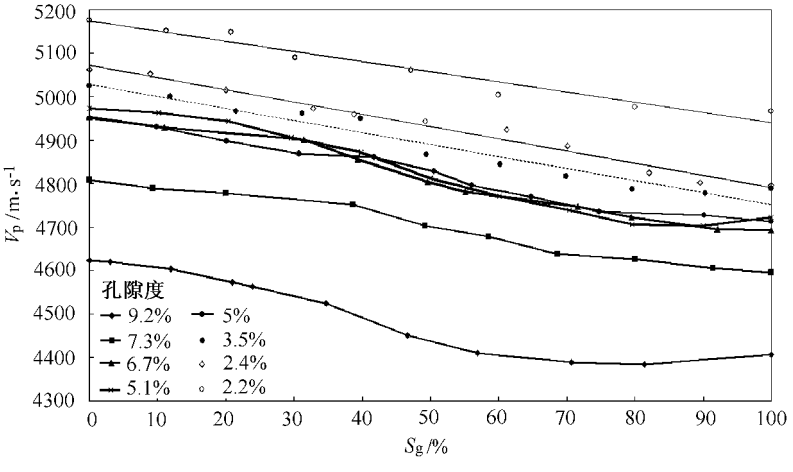


图 3 纵波速度随含气饱和度变化测试结果

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　地震正演模拟

通过地震正演模拟研究，将地质模型和地震模型有机地结合起来，探索出地层厚度、孔隙度、流体饱和度变化引起地震响应的一般性规律。当然，国内许多学者也进行大量的正演模拟研究。邬长武[1]（2004）针对古岩溶储集空间类型复杂多样的特点，开展碳酸盐岩储层地震物理正演模拟研究。姜岩[2]（2006）分析了基于正演模拟的地震反射特征的主要影响因素。王贤[3]（2007）将地质模型和地震模型有机结合起来，研究了地震正演模型在薄储层预测中的应用。杨新菊[4]（2006）利用 AVO 正演模型，研究了单界面、双界面和多界面的 AVO 异常类型特征及变化规律，并利用该特征检测含油气砂岩的分布范围，预测工区内可能的含油气性。孔选林[5]（2008）基于 Biot 理论的基础上，实现了不同储层的理论模型，计算了其 AVA 响应特征，分析不同储层理论模型的 AVA 异常特征。尚新民[6]（2008）以岩石物理理论为基础，进行了地震反射正演模拟，研究含气储层的地震反射特征，认为 AVO 技术是一种能够反映孔隙流体对地震反射特征影响的有效办法。

笔者主要针对研究区内的致密砂岩储层的特点，采用地震岩石物理分析技术中得到的孔隙度和饱和度的经验公式，采用传统的褶积模型进行正演模拟研究。

2.1　子波的形态与频谱

地震正演的结果与子波形态有紧密的联系，改变子波的频率成分，将可能得到完全不同的地震记录。通常条件下，子波的频率越高，反射波垂向分辨率愈高。为了和实际的地震资料对比，研究中模型所用的子波为从实际井旁地震道提取，主频大约为 32 Hz 左右。地震子波的形态见图 4。

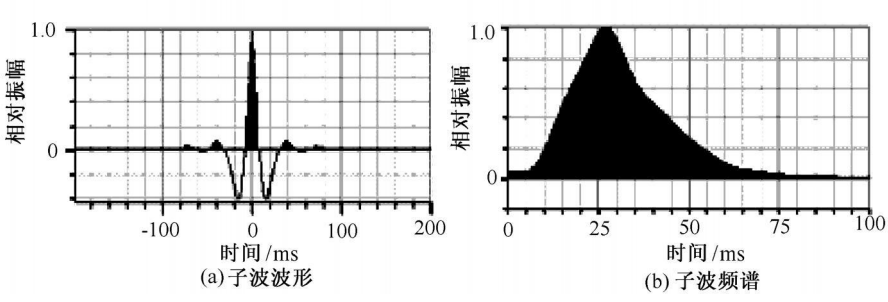


图 4　地震子波形态

2.2　变储层厚度模型

图 5 是对研究区内实际的 x 井，通过改变储层厚度，其范围从 0~ 50 m，用传统的褶积模型方法得到的合成地震记录。其中储层的孔隙度为 10%，含气饱和度为 50%。为了进一步探讨储层厚度变化对地震资料的影响，对合成记录做了层位解释。

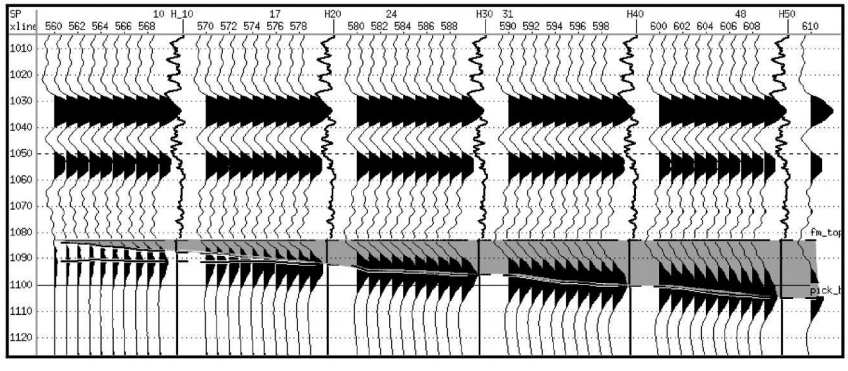


图 5　变厚度模型正演剖面

从图 5 中可能看出，砂岩顶部层位对应波谷位置，很容易解释，对应地震层位为 fm _ top。受子波长度和主频的影响，砂岩厚度为 0~ 32m 的砂岩底部对应复波，精确解释稍有点困难。砂岩的底部边界层位理论上对应 fm _ bot 位置，但实际解释波峰，对应层位为 pick _ bot。

图 6 为均方根振幅与储层厚度之间的关系图。从图 6 中看出，在砂体厚度范围 0~ 32m 内，随着厚度的增大，地震均方根振幅也增大，约 32 m（1/4 λ）位置均方根振幅最大；而在 32~ 50 m 之间，随着厚度增大，均方根振幅却随之减少。可见，利用常规的均方根振幅属性识别储层厚度存在多解性，模

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

型正演表明不能简单根据振幅的强弱判断储层的厚薄。比较理论层位和实际解释层位之间地震均方根振幅相对变化，如图 6 中所示预测误差曲线。结果表明，砂岩厚度 25 m 以上振幅相对变化接近零，表明储层厚度可以准确解释。砂岩厚度在 5~ 25m 之间，振幅相对差异呈一定规律逐渐减少，通过关系拟合，可以把实际解释的振幅均方值校正到理论值，从而可以有效的预测砂岩厚度。当储层的砂岩厚度小于 5m 时，振幅差异变化太大且没有规律，预测难度很大。因此，理论上通过正演模型，建立均方根振幅和砂体厚度变化关系的量版可以在一定范围内有效预测砂体厚度。

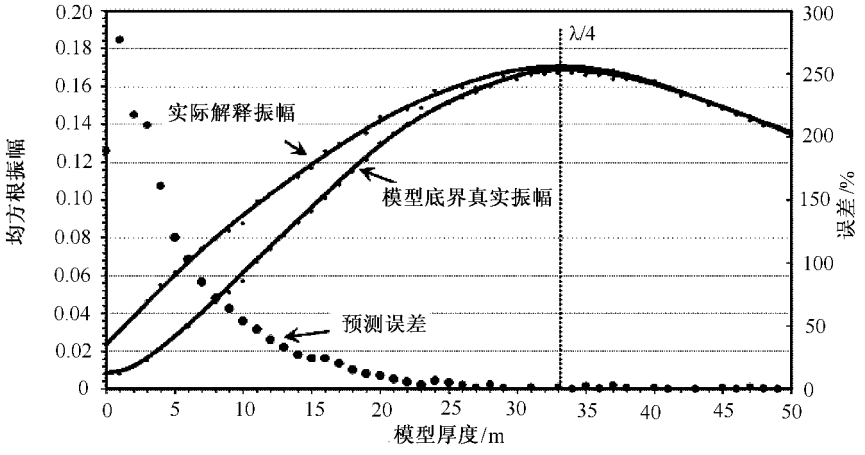


图 6 均方根振幅与储层厚度变化关系

2 3 变孔隙度模型

由于研究中要预测孔隙度大于 6% 的有效储层厚度分布范围。利用研究区内实际 **x** 井，在不变储层厚度（10m）和含气饱和度（50%）的条件下，建立变孔隙度正演模型，孔隙度（Pro）变化范围从 1% ~ 15%。图 7 为变孔隙度模型的正演剖面，在正演剖面中拾取了储层顶面 act _ top 和底面 act _ bot 的地震解释层位。但是从图 7 中可以看出解释层位基本上是水平的，因此地震层位时差随储层孔隙度变化关系不明显。图 8 为顶面和底面之间均方根振幅随孔隙度变化的关系图，从图中看出孔隙度小于 6%时，振幅变化不大；当孔隙度大于 6% 时，均方根振幅随孔隙度增大快速增大。可见，通过这种变化梯度，可以定性检测有效储层（孔隙度大于 6%）和致密储层（孔隙度小于 6%）。但是建立定量的孔隙度和振幅变化关系比较困难。

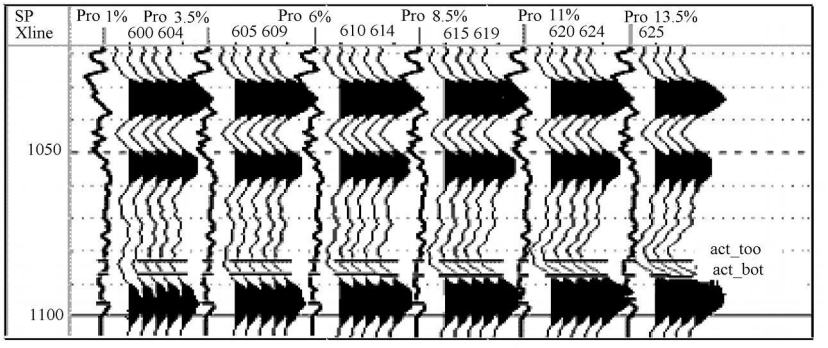


图 7 变孔隙度模型正演剖面

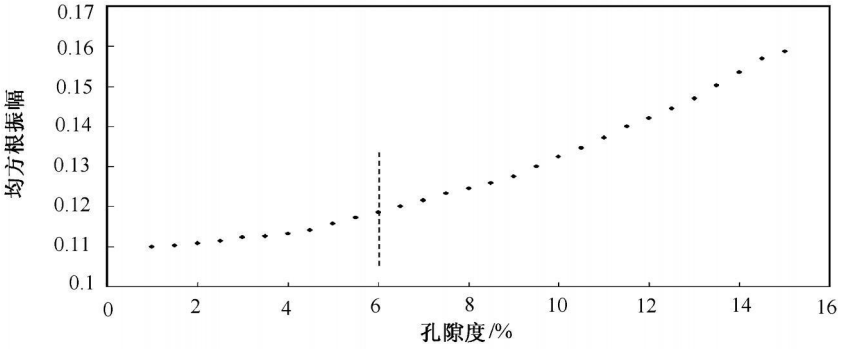


图 8 均方根振幅与孔隙度关系图

2 4 变饱和度模型

为了进一步验证均方根振幅、孔隙度和含气饱和度变化的关系。正演模拟了在储层厚度为 10m 的条件下，不同饱和度和孔隙度条件下均方根振幅的变化关系。图 9 是同时改变孔隙度从 0~ 30%，含气

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

饱和度从 0~ 100% 的结果。图 9 中揭示了在特低孔隙度（小于 6%）情况下，含气饱含度和孔隙度的变化引起的均方根振幅变化不明显。在孔隙度大于 6% 时，均方根振幅随含气饱和度增大而增大，并且孔隙度越大，其增加的幅度（梯度）越大。

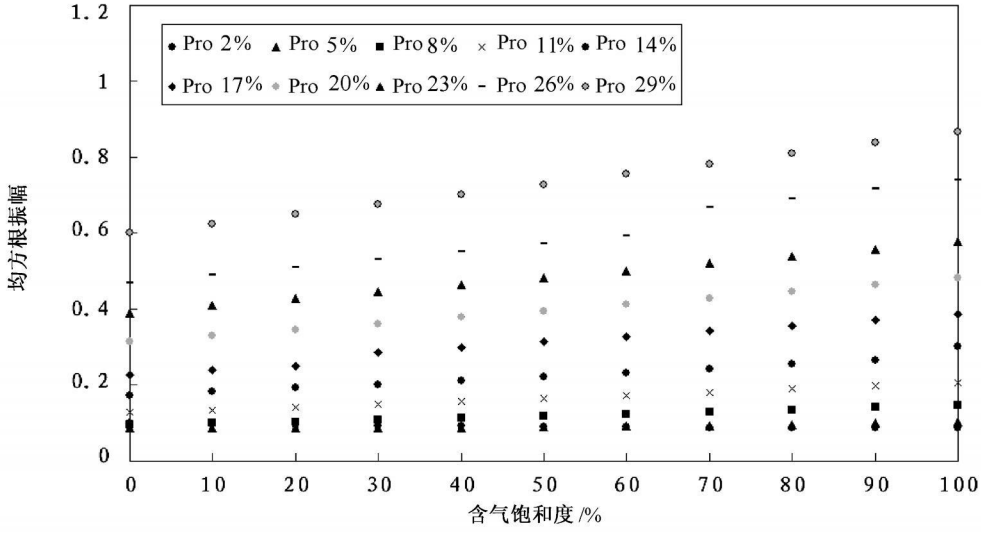


图 **9**　均方根振幅与孔隙度和饱和度交会图

3　结　　语

储层厚度、孔隙度和饱和度一直是储层描述的 3 个重要的物理参数。致密砂岩因为低孔低渗的原因，由参数变化引起的地层相对地球物理特征变化比较小，从而使得储层预测更为困难。通过开展系统的地震岩石物理基础研究和地震正演模拟研究，将地质模型和地震模型有机地结合起来，探索出地层厚度、孔隙度、流体饱和变化引起地震响应的一般性规律。理论上通过正演模型，建立均方根振幅和砂体厚度变化关系的量版可以在一定范围内有效预测砂体厚度。实际地震资料受噪声的影响，难以准确建立储层参数和地震振幅的关系，因此定量预测储层参数比较困难。研究表明，基于岩石物理分析的叠前反演定量预测方面有较大潜力。

[参考文献]

[1] 邬长武，龚福华，魏建新 等. 地震物理正演模拟在古岩溶储层研究中的引用 [J]. 江汉石油学院学报，2004，26（3）：143~ 147.
[2] 姜岩，李文艳，叶萍. 基于正演模拟的地震反射特征主要影响因素分析 [J]. 大庆石油地质与开发，2006，25（5）：100~ 103.
[3] 王贤，杨永生，陈家琪 等. 地震正演模拟在与其薄储层中的引用 [J]. 新疆地质，2007，25（4）：432~ 435.
[4] 杨新菊，马建德. AVO 正演模型研究及引用 [J]. 海洋石油，2006，26（3）：14~ 19.
[5] 孔选林，仇燕. 饱和流体多孔介质中 AVA 特征分析与正演 [J]. 内蒙古石油化工，2008，（4）：74~ 76.
[6] 尚新民，李红梅，韩文功 等. 基于岩石物理与地震正演的 AVO 分析方法 [J]. 天然气工业，2008，28（2）：64~ 66.

[编辑]　弘　文

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

process of migration. The physical and chemical characters of the petroleum and the reservoir were induced to change disciplinarily. So the rules were used to research the direction and the route of petroleum migration. In this paper, the saturated and aromatic hydrocarbons parameters – Ts/Tm, ααα20S/20(S+R)-C_{29}-sterane, ββ/(αα+ββ)-C_{29}-sterane, MPI, 1-/4-methyl-carbazole were used to research synthetically the migration of the Chang3 crude oil coming from the region of Zhen28 well in Zhenbei Oilfield. The result indicated that the precursor type of the oil was main terrestrial organic matter. The oil was mature and came from low-reducing lacustrine depositional environment. The research of the oil group indicates that the Chang3 oil belonges to the same oil group and the direction of the migration was from northeast to southwest via the research of migration parameters on saturated and aromatic hydrocarbon.

Key words: Zhenbei Oilfield; Chang3 oil; crude oil; geochemistry; biomarkers; direction of migration

51 **The Structural Characteristics and Petroleum Distribution of Nanyang Sag in Nanxiang Basin**

TIAN Na-xin *(China University of Petroleum, Beijing 102220, China; SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)*

WU Guan-sheng, Li Feng *(Petroleum Exploration and Production Research Institute of Henan Oilfield Company, SINOPEC, Nanyang 473132, Henan, China)*

LIN Xue-qing *(Research Institute of Petroleum Exploration and Production of Northwest Company, SINOPEC, Urumqi 830011, Xinjiang, China)*

Abstract: Nanyang Sag in Nanxiang Basin, controlled by the southern boundary fault, was a sag like dustpan which was deep in south and shallow in north. Its tectonic evolution could be divided into two periods: rift and depression. The tectonic activities were in the period of rift affected structural conformation, the sag encompassed the southern fault overlap, the central depression and northern slope zone. According to the morphological characteristics and origin, the trap could be fallen into four types and twelve categories. The northern bend zone governed formation and distribution of lithologic oil pool. Differential subsidence and uplift in later period are the main factors for a large set of updip pinchout sandbody trap (reservoir). This paper points out that the subtle traps in southern fault overlap and the northern slope zone, as well as tectonic-lithologic composite trap in central depression should be the key targets in future oil and gas exploration.

Key words: tectonic evolution; tectonic character; oil and gas distribution; Nanyang Depression; Nanxiang Basin

61 **Application of Seismic Rock Physics and Forward Simulation in Predicting Tight Sandstone Reservoirs**

LI Yong-gen *(School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)*

XU Sheng-feng *(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)*

Abstract: Because in tight sandstone, the characteristics of geophysics induced by the changes of low porosity and oil saturation were relatively weak, the prediction of favorable reservoirs was the problem in seismic prediction, better result could not be obtained by using traditional techniques. Seismic rock micro-physics were emphasized in experimental study, forward seismic simulation could be used to reflect the changes of spatial combination, good result could be obtained by combining both. The basic study on seismic rock physics and the study of forward seismic simulation are carried out in the tight sandstone in a work area of Sichuan, in which geological model is combined with a seismic model to study the general laws of seismic response induced by the changes of reservoir thickness, porosity and fluid saturation, thus the characteristics of seismic reflection has the meanings of geology and geophysics, the lithology property is effectively classified and hydrocarbon is effectively inspected, it has an important significance for guiding the seismic exploitation.

Key words: reservoir prediction; tight sandstone reservoir; seismic rock physics; forward simulation

66 **Analysis on Stack Velocity Error of Lateral Variable Medium Based on Forward Simulation**

WANG Yong *(College of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; College of Computer Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)*

Abstract: Velocity was one of the important parameters in seismic exploration, it was directly related to the quality of super position and offset, by which high errors were caused in complicated seismic areas. The reason of stack velocity errors in lateral variable medium is denoted, a forward simulation of wave equation is conducted on actual well profile from the south margine of Tianshan, the reason and size of the stack velocity errors are analyzed and the methods for avoiding them are discussed, and more reliable velocity field is provided for variable diagram.

Key words: lateral variable medium; stack velocity; error; forward simulation

70 **Methods for Reservoir Predicting in Xishanyao Formation in Yongjing Oilfield**

SHI Hao-guo, LIU Guo-hong, SONG Chuan-chun, XIU Jin-lei, REN Xin-cheng *(Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Co. Ltd., SINOPEC, Dongying 257022, Shandong, China)*

Abstract: It was proven that in Yongjing Oilfield of Junggar Basin there were a hundred million tons petroleum geological reserves, Jurassic Xishanyao Formation was one of major strata, but the reservoir was buried deeply with strong heterogeneity and poor reservoir physical property, it had the characters of sandstone mixed with mudstone and the corresponding relation between axis of seismic reflection and sandstone and mudstone was unclear. Analysis shows that the corresponding relation between GR curve and lithology was good, by which the geophysical characters could be reflected in the reservoir. The technique of wave impedance reverse simulation is used to recognize the distributions of sandstone and mudstone in the target zones, the technique of variational time-window for seismic attribute is used for effectively predicting and evaluating the reservoirs.

Key words: wave impedance reverse; variational time-window; seismic attribute; reservoir prediction; Yongjing Oilfield

74 **Analysis on Es_4 Seismic Facies of Fault Block Tuo 123 in Dongying Depression**

PAN Shao-wei, YANG Shao-chun, YAN Ke *(College of Resources and Information, China University of Pe-*

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net