

Forward Modeling Analysis of Gas Bearing Seismic Anomalies in Sanhu Area

Liwen Liu^{1,2,3} Wanhui Liu³ Huijuan Shen³ Quan Zhang³ Qiang Xian³

1.School of Geoscience and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

2.Shaanxi Key Laboratory of petroleum accumulation geology, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

3.BGP Inc., CNPC, Zhuozhou, Hebei, 072750, China

Abstract

Abnormal phenomena such as gas cloud and gas chimney exist on the local P-wave seismic profile in Sanhu area, Qaidam Basin, which are closely related to biogas reservoir and gas leakage, and are favorable seismic indicators for biogas exploration and evaluation. The surface conditions in Sanhu area are complex, and the shallow biogas is accumulated in the uncompacted Quaternary strata, resulting in a variety of seismic anomaly types in this area. Therefore, the identification of seismic gas bearing anomalies has always been the focus and difficulty of Sanhu exploration. In this paper, the full wave field forward modeling method is used to carry out model forward analysis combined with well and earthquake, so as to deepen the identification and scope of seismic anomalies, so as to provide a reliable basis for identifying reservoir gas.

Keywords

Sanhu area; full wave field forward modeling; identification of gas bearing seismic anomalies

三湖地区含气地震异常正演模拟分析

刘利文^{1,2,3} 刘万辉³ 申会娟³ 张泉³ 鲜强³

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 中国·陕西 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室(西安石油大学), 中国·陕西 西安 710065

3. 中国石油集团东方地球物理公司, 中国·河北 涿州 072750

摘要

柴达木盆地三湖地区局部纵波地震剖面上存在气云、气烟囱等异常现象, 与生物气藏及气泄漏等密切相关, 是勘探和评价生物气的有利地震指示。三湖地区地表条件复杂, 浅层生物气在第四系欠压实地层成藏, 造成本区地震异常类型多种多样。因此, 对地震含气异常真假的甄别一直以来是三湖勘探的重点和难点。论文采用全波场正演的方法, 井震结合开展模型正演分析, 深化地震异常识别与范围落实, 为识别储层含气提供可靠依据。

关键词

三湖地区; 全波场正演; 含气地震异常甄别

1 引言

柴达木盆地第四系生物气分布在盆地中东部的合吉乃尔湖、达布逊湖、霍布逊湖(简称三湖)的湖相沉积中。三湖地区已发现气田局部纵波地震剖面上存在气云、气烟囱等异常现象(见图1), 与生物气藏及气泄漏等密切相关, 是勘探和评价生物气的有利地震指示。围绕地震异常分析研究从20世纪60年代开始近年来, 却缺乏深入分析及评价。针对众多地震异常, 如何甄别真假含气异常、确定气藏分布范围及垂向位置, 亟需开展模型正演分析等针对性研究, 以支持探井井位部署和提高钻探成功率。

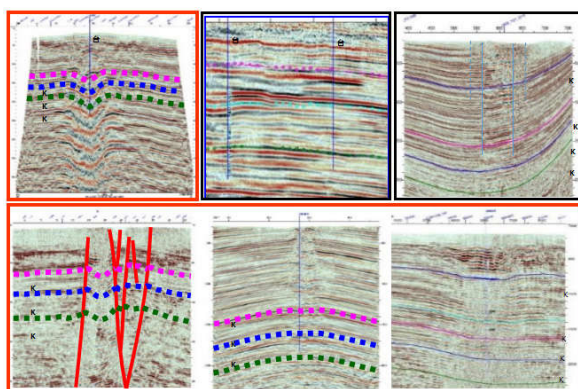


图1 三湖地区地震异常剖面图

【作者简介】刘利文(1990-), 男, 中国河北涿州人, 本科, 工程师, 从事地震资料处理工作的研究。

2 模型正演原理

正演即地震波场模拟, 是指已知模型结构, 通过物

理或数值计算的方法模拟该地质结构下的地震波的传播,最终合成对应于所建立地质模型的地震记录,其是野外数据采集过程的室内再现。其主要目的是通过模拟记录与实际地震记录的对比分析,校正初始模型,使之更接近地下真实的地质情况。通过正演模拟明确地质体的地震剖面特征,并对正确指导解释观测数据并搞清地质构造具有重要意义^[1]。

当地层含气之后,地震波在含气地层中传播具有波动能量衰减剧烈、波形变化大、横向连续性差等特点,反映在地震波频谱中为高频分量衰减迅速、主频向低频方向移动、频带宽度变窄,速度降低等现象。与完全含水情形相比,储层部分含气时由于气泡的存在,岩石孔隙内的流体相对岩石骨架运动增强,波的传播速度随着地震波频率的降低而减小,砂岩储层与上、下围岩阻抗之差变大,从而引起地震低频反射能量相对增强,表现为明显的低频速度频散和低频反射异常。实际地震资料的低频能量分析结果表明,当未固结砂岩储层阻抗低于上下围岩阻抗时,低频地震能量异常现象可以作为识别储层含气的重要标志。

本次研究正演的研究基于软件 Tesserall-2D,采用的是高精度有限差分算法进行二维波动方程正演模拟。这种方法能估算实际地质情况中地震能量传播的二维波场效应,它忽略固体介质中的刚度,在该介质中横波的速度为零。这种近似对于固体的计算仍然有用,当大部分地震能量传播到不连续介质时,转换波的振幅是很小的,可以忽略不计。声波方程模型和垂直入射模型仅考虑纵波速度和密度特性。

下面以二维非均匀介质中波动方程为例来论述这一算法。二维声波波动方程的传播方程如下:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) + f(x, z, t) \quad (1)$$

式中 v 为地震波的传播速度, p 为波场位移函数, $f(x, z, t)$ 为震源函数。方程式从地震波动力学角度来描述地震波的传播规律。在模拟计算时需要将计算区域进行网格分割,用差商代替偏导数得到相应的差分方程,在此基础上推导高阶的交错网格有限差分法。

先将 $p(x+\zeta\Delta x)$ 与 $p(x-\zeta\Delta x)$ 在 x 点按照 Taylor 公式进行展开,并将两项展开结果相减后化简得如下表达式:

$$p(x+\zeta\Delta x) - 2p(x) + p(x-\zeta\Delta x) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\zeta\Delta x)^{2n}}{(2n)!} p^{(2n)}(x) \quad (2)$$

式中: $p^{(n)}(x)$ 是 $p(x)$ 的 n 阶导数,取 $\zeta=1, 2, 3, \dots$ 。消除高于二阶的导数项,可得到函数的空间二阶导数,其中空间上的 $2n$ 阶差分逼近式为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{i=1}^n c_i d_i + o(\Delta x^{2n}) \quad (3)$$

式中: $d_i = (x+i\Delta x) - 2p(x) + p(x-i\Delta x)$, c_i (其中 $i=1, 2, \dots, n$) 为 $2n$ 阶精度有限差分二阶中心导数的差分系数,可以通过求解方程组得到。

3 含气地震异常的正演流程

3.1 地质模型建立

从三大气田钻井成熟区的测井资料分析大致可以推测出,三湖地区第四系的目的层地层速度变化范围为 1400~2400m/s; 地层密度变化范围为 1.8~2.8g/cm³。正演时不同地层的速度、密度参数结合实际地层位置选取,并在合理的范围内变化。

统计所有气区井的资料,收集气层水层及围岩速度、密度及饱和度资料,大致确定本区第四系地层的速度变化范围在 1000~2400m/s, 地层含气之后一般会比不含气或者含水的地层速度更低为 1000~1400m/s。密度为 1.6~2.9g/cm³, 含气地层的密度大约为 1.9g/cm³, 密度变化幅度很小。同时结合埋深与测井数据的分析可知,不同深度气层(主要因压实造成)与围岩速度差异不同,埋深为 300m 时地层的速度约为 1000m/s, 800m 左右的地层速度约为 1400m/s, 1100m 的地层速度约为 1450m/s, 1500m 地层的速度约为 1500m/s。

3.2 地震主频和子波

地震子波是正演模拟的另一个重要参数,为了便于研究,这里选用 Ricker 子波作为正演模拟子波,而 Ricker 子波主频决定了地震垂向分辨率,直接影响模型正演的结果。

为了更好地将正演模拟结果与实际地震剖面进行对比,通过分析台南气田区的地震频谱(见图 2),从频谱图上可以看出,该地区第四系地层及气层地震的子波主频在 20Hz 左右,并且多次试验 10、15、25、30、35、40 等多种主频的模型正演,发现 20Hz 以下的主频的子波正演对气层反应较好。因此此次正演模拟子波都选用主频为 20Hz 附近的 Ricker 子波。

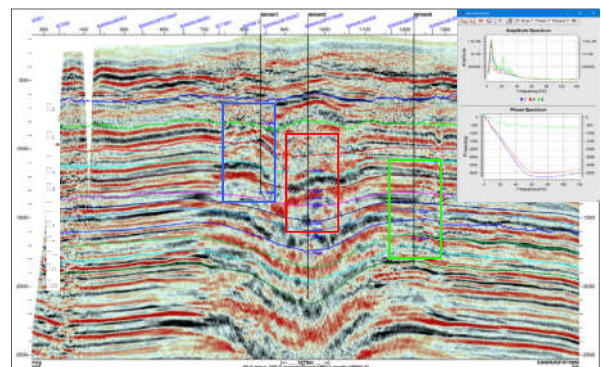


图 2 台南气田地震资料频谱图

3.3 正演方法确定

目前,常规的地震叠前正演方法主要有射线追踪法和全程波动方程法。射线追踪法是基于惠更斯原理和斯奈尔定律,反映波的运动学特性^[2],可以灵活地处理起伏的地表条件,所得的地震波的传播时间比较准确,但计算结果很难保持地震波的动力学特征,而且对复杂的地质构造会出现盲区。而波动方程法是基于弹性或粘弹性理论和牛顿力学,反映波的动力学特征^[3],包含了地震波场的全部信息,可以处

理复杂的地质构造。因此，本次正演选用全程波动方程法。

3.4 边界条件

在地震波场正演模拟中，必须引入人工边界来界定计算区域。人工边界若不做特殊处理，就会随着波场的递推计算在边界上产生虚假反射波从而扰乱波场，人工边界的使用是地震波场正演数值模拟的一个重要课题。本次研究不涉及边界条件的使用时，通过增大模型来避免边界反射干扰，具体做法就是将工区测线排列长度加大排列长度大大超过目的层段的延伸长度，避免扰乱波场发生。

3.5 含气模型正演模拟

通过 Tesser1 模型地震正演理论的研究，并整理多口井的速度密度厚度埋深等数据，结合三湖地区实际地震数据的采集的炮检距等间距规则地移动炮点、排列等参数，利用模型设计与实验，分析影响含气丰度的地球物理参数，进一步优化模型正演参数的选取（见图3）。

测试简单模型单炮正演，进行实际排列炮距、炮检距模型设计，取炮距为 20m 炮检距为 10m，取排列长度 10km 以上。以及不同主频从 5Hz 到 15Hz 以及 20Hz、30Hz、40Hz，不同围岩层厚，不同气层厚度和不同气层速度等各种类型，综合测录井资料，进行正演模拟。

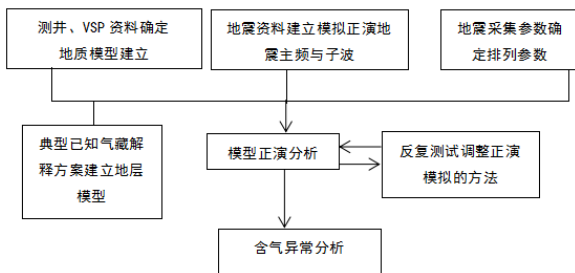


图3 三湖地区生物气地震异常正演流程图

4 成果及结论

经过模型正演模拟，现将研究成果归纳如下：

①由简单气层水平层状模型正演可知，一般说来单层或累计厚度单层或累计厚度 3m 及 6m 气层无明显影响，9m 及以上会对下伏地层造成明显下拉，同一深度厚度越大的气层对下伏地层造成地震纵波时间域下拉越明显（见图4~图7）。

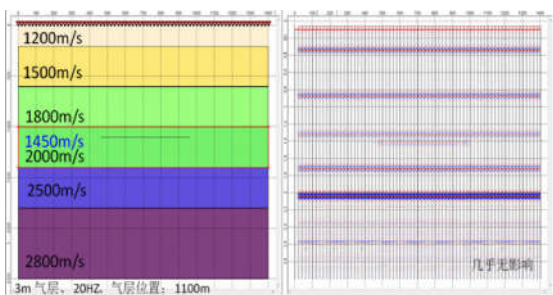


图4 3m 气层模型正演剖面（时间域）

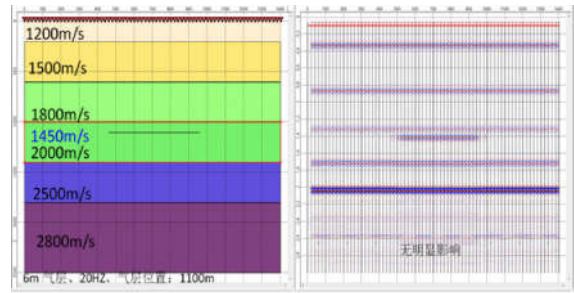


图5 6m 气层模型正演剖面（时间域）

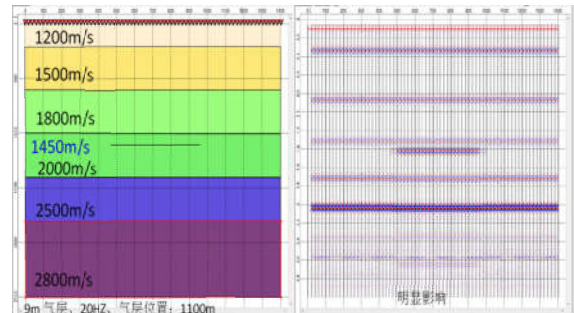


图6 9m 气层模型正演剖面（时间域）

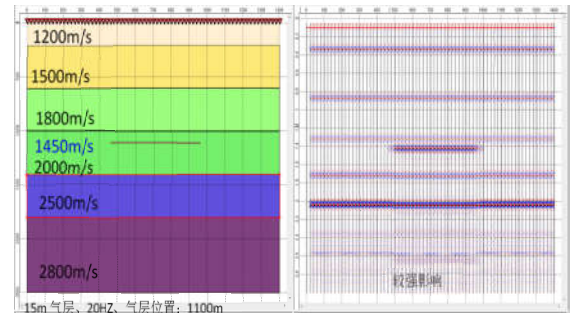


图7 15m 气层模型正演剖面（时间域）

②相同厚度埋藏深度更大的气层主要因压实造成与围岩速度差异，与围岩差异相对较大且对下伏地层影响大（见图8）。

③气层累计厚度越大对下伏地层影响越大单层厚度 3m 累计三层达到 9m 的复合气层，埋深在 800m 左右，在正演剖面上，其下伏地层，地震同相轴只是有略微幅度的下拉；单层厚度 9m 累计达到 27m 的复合气层，埋深在 800m 左右，在正演剖面上，其下伏地层，地震同相轴已经有较大幅度的下拉（见图9）。

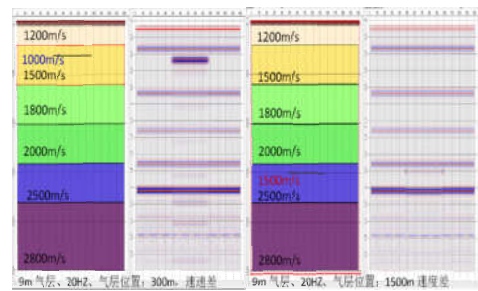


图8 等厚气层（9m）在不同深度下（300m 与 500m）模型正演剖面

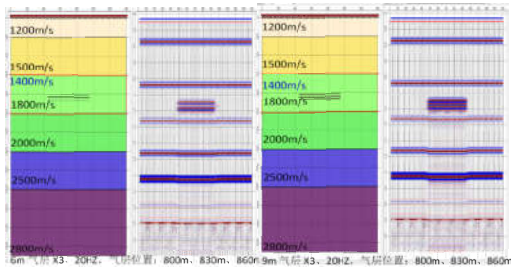


图 9 18m 及 27m 气层模型正演剖面 (时间域)

④地层含气后可形成强振幅反射,随着丰度的增高地震反射反而变弱。以台南气田为例,台南气田台中3井含气,台中1井和台11井则含气量更高,但是在含气量更高的区域,振幅反而变弱,同时从测井数据可知台中1井含气段速度也降低(见图10)。

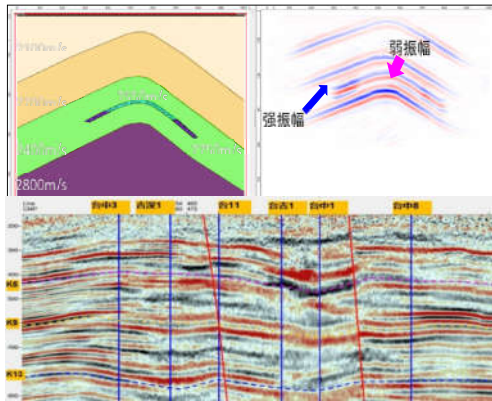


图 10 台南气田正演模拟剖面图 (时间域)

⑤气层下伏地层地震纵波发生畸变,造成断层假象,厚度越大下拉越明显,多层含气形成“松塔”型异常(见图11~图13)。

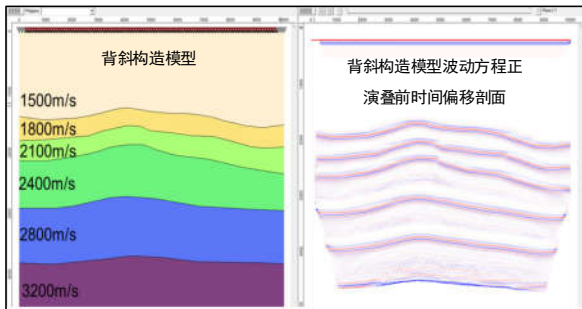


图 11 背斜构造模型波动方程正演叠前时间偏移剖面(深度域)

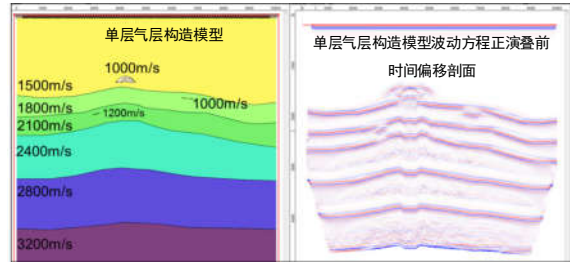


图 12 单层气层(超过 30m)构造模型波动方程正演叠前时间偏移剖面(深度域)

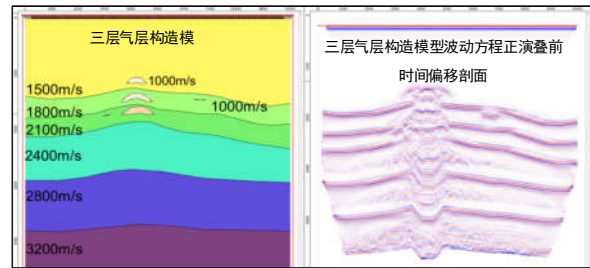


图 13 三层气层(超过 90m)构造模型波动方程正演叠前时间偏移剖面(深度域)

5 结语

综上所述,三湖含气区单层或累计厚度 9m 及以上会对下伏地层造成明显地震下拉异常,厚度越大下拉越明显,多层含气形成“松塔”型异常,下伏地层地震纵波发生畸变,造成断层假象。该结论可作为甄别三湖地区真假含气异常的一个重要评价标准,进而对三湖地区生物气勘探有利区带划分带来新的认识,为下一步井位目标优选和勘探部署提供可靠依据。

参考文献

- [1] 许辉群,桂志先,余晓宇.模型正演技术在SZ地区砂体识别中的应用[J].工程地球物理学报,2010,7(4):1-4.
- [2] 裴正林,牟永光.地震波传播数值模拟[J].地球物理学进展,2004,19(4):1-9.
- [3] 朱多林,白超英.基于波动方程理论的地震波场数值模拟方法综述[J].地球物理学进展,2011,26(5):2-6.