

弹性波阻抗反演在稠油热采地震监测中的应用

王新红^{1,2}

(1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 胜利石油管理局物探公司, 东营 257100)

摘要 在稠油热采地震监测中, 储层特性的变化主要是通过弹性波参数的变化才最终表现为地层速度和实际地震响应的变化. 因此, 在一定条件下, 弹性波参数应当是储层特定变化最直接和灵敏的标志. 本文详细叙述了弹性波阻抗反演的方法, 并将其应用于稠油热采地震资料的反演和解释中, 结果表明弹性波阻抗反演用于稠油热采地震监测是切实可行的.

关键词 反演, 相对波阻抗, 波阻抗差, 纵波阻抗, 横波阻抗, 泊松比, 稠油热采, 地震监测

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)01-0186-06

Application of elastic impedance inversion in seismic monitoring of the heavy-oil thermal recovery

WANG Xin-hong^{1,2}

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Geophysical Exploration and Development Corporation of Shengli Petroleum Administrative Bureau, SINOPEC, Dongying 257100, China)

Abstract The variation of reservoir characteristics mainly show the changes of reservoir velocity and actual seismic response caused by the change of elastic parameters. In the process of seismic monitoring of the heavy-oil thermal recovery, for this reason, elastic parameters should be the most direct and sensitive indication for the variation of reservoir characteristics under certain condition. In the paper, the method of elastic impedance inversion is introduced in detail and used in the inversion and explanation of seismic monitoring data. Results show it is feasible for elastic impedance inversion to be used in seismic monitoring of the heavy-oil thermal recovery.

Keywords inversion, relative impedance, difference of impedance, P-wave impedance, S-wave impedance, Poisson ratio, heavy-oil thermal recovery, seismic monitoring

0 引言

目前地震波反射振幅随偏移距变化(AVO)技术相当成熟, 尽管AVO处理和解释中仍然存在许多难题, 但越来越多的专家学者已经将AVO技术作为岩性和油气定量预测的关键技术之一^[1]. 传统AVO分析的理论基础是Bortfeld(1961)和Shuey(1985)提出的Zoeppritz方程近似表达式. 它主要通过线性拟和P-P波反射振幅随偏移距变化计算AVO切距和梯度, 在纵横波速度比为2的假设情况下, 通过AVO切距和梯度的组合可获得其它AVO属性, 如伪横波、相对泊松比等属性. Connolly

(1999)对传统AVO分析方法进行了分析, 提出了一种与入射角有关的弹性波阻抗(Elastic Impedance, EI)概念, 这使得平面P波在有入射角情况下, 其反射系数有着与垂直入射相似的表达方式^[2]. Whitcombe(2002)对弹性阻抗函数进行了修改, 得到了一个新的归一化弹性阻抗方程, 这一修改消除了维度随入射角的变化, 使得弹性阻抗的维度和声阻抗趋于一致, 从而使函数更加稳定. 该方法在孔隙流体和岩性预测中取得了成功^[3]. Santos等(2002)提出了一种求取非零偏移距阻抗估计的新方法, 可以用于非零偏移距地震资料的标定. 他们将这种方法称为反射阻抗(reflection impedance, RI). 模型试

验表明,RI 方法能恢复准确的反射系数曲线.当用于生成依赖于角度的阻抗时,与E1 方法相比,RI 方法的精度和判别准确度均较高^[4,5].

中国稠油资源比较丰富,陆上稠油、沥青资源约占石油资源总量的20%以上,预测资源量为198 亿t,其中最终可探明的地质资源量为79.5 亿t,可采资源量为19.1 亿t.目前在全国范围内已经发现了70 多个稠油油田,集中分布在辽河、胜利、克拉玛依以及河南等油区.中国稠油油藏具有陆相沉积的特点,油藏非均质严重,地质构造复杂,而且油藏类型多,埋藏深.油藏深度大于800 m 的稠油储量约占已探明储量的80%以上,其中约有一半的油藏埋深在1300 ~1700 m.吐哈油田的稠油油藏埋深在2400 ~3400 m,塔里木油田的轮古稠油油藏埋深达到5300 m 左右.因此,稠油开采十分困难.

胜利油田具有丰富的稠油资源,稠油开采主要采用火烧、注蒸汽等热采手段,为了准确了解热前缘的推进和变化,以便合理调整开发方案,进行稠油热采地震监测不失为一种最佳的选择.但如何对地震监测结果做出合理的解释是目前稠油热采地震监测的核心问题之一.

鉴于地震反演在孔隙流体和岩性预测中的成功应用,本文针对叠前稠油热采地震监测资料进行了弹性波阻抗反演的探索性研究,希望能够更好地揭示储层动态变化,进而为稠油热采地震监测资料解释技术的发展提供指导.

1 基本理论

定义反射界面上、下介质的弹性波阻抗 E_1 和 E_2 的数学表达方式如下:

$$E_1 = \frac{1 + \tan^2 \theta}{1} \frac{1 - 8K \sin^2 \theta}{1} \frac{(1 - 4K \sin^2 \theta)}{1}, \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{1 + \tan^2 \theta}{2} \frac{1 - 8K \sin^2 \theta}{2} \frac{(1 - 4K \sin^2 \theta)}{2}, \quad (2)$$

式中, v_1 和 v_2 分别表示纵波速度、横波速度和密度,下标1、2 分别表示界面上、下介质, θ 为入射角, K 的表达方式如下:

$$K = \frac{\frac{1}{v_1^2} + \frac{1}{v_2^2}}{2}. \quad (3)$$

根据公式(1)和(2)定义的弹性波阻抗,入射角为 θ 时的反射系数可近似为:

$$R(\theta) = \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1}. \quad (4)$$

由(4)式可见,非垂直入射时反射系数表达式与垂直入射时反射系数表达式一样,这样我们就可以

借用传统相对成熟的叠后波阻抗反演方法反演弹性波阻抗,这也是Connolly 按式(1)和(2)定义弹性波阻抗的原因.

对(1)式和(2)式两端取对数可得

$$\cos^2 \theta \ln(E) = \ln(\rho) - [4K\{\ln(\rho) + 2\ln(v_1)\} + \ln(v_2)] \sin^2 \theta + 4K[\ln(\rho) + 2\ln(v_1)] \sin^4 \theta. \quad (5)$$

当入射角 θ 小于30 度时, $\tan^2 \theta \approx \sin^2 \theta$, $\sin^4 \theta \approx 0$, (5) 式可简化为

$$\ln(E) = \ln(\rho) + [\ln(v_1) - 4K\{\ln(\rho) + 2\ln(v_1)\}] \sin^2 \theta. \quad (6)$$

假设纵横波速度比为2,那么 $K = 0.25$, (6) 式可进一步简化为

$$\ln(E) = \ln(\rho) + [\ln(v_1) - 2\ln(v_2)] \sin^2 \theta. \quad (7)$$

对地震角道集进行反演即可获得不同角度的弹性波阻抗,然后根据(7)式对不同角度的弹性波阻抗进行最小二乘拟合,即可计算出纵横波阻抗,进而获得泊松比等弹性参数.

2 弹性波阻抗反演方法

弹性波阻抗反演的流程如图1所示.根据井中纵波速度、横波速度和密度计算井中弹性波阻抗,在复杂构造框架和多种储层沉积模式的约束下,采用地震分形插值技术建立可保留复杂构造和地层沉积学特征的弹性波阻抗模型,使反演结果符合研究区的构造、沉积和异常体特征.采用广义线性反演技术反演各个角度的地震子波,得到与入射角有关的地震子波.在每一个角道集上,采用宽带约束反演方法反演弹性波阻抗,得到与入射角有关的弹性波阻抗.最后根据(7)式对不同角度的弹性波阻抗进行最小二乘拟合,即可计算出纵、横波阻抗,进而获得泊松比等弹性参数.

3 实例分析

3.1 实验区概况

实验区位于东部某蒸汽驱稠油油藏内^[6,7].其构造处于斜坡鼻状构造的根部,基本地质特征如下:油藏受构造及岩性双重控制,油层东南以地层超覆与凸起相接,含油区域在侧向受断层所控制;油藏埋藏浅,岩石胶结疏松,砾石含量高,油层平均埋深为880 ~950 m,成岩性差,砾石含量在40%以上,砾径最大为140 ×120 mm,一般为20 ~50 mm,胶结方式为泥质及部分稠油胶结;油层厚度小,主力油

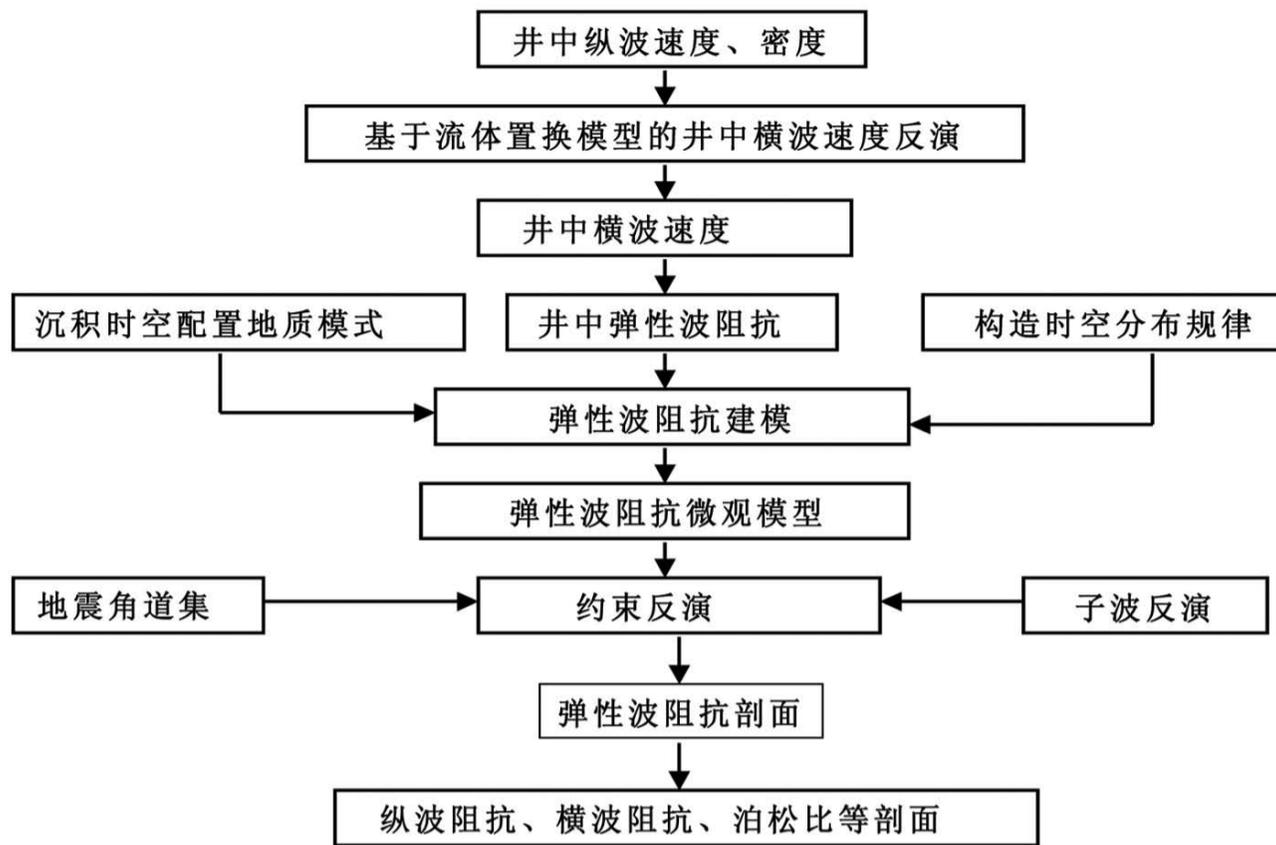


图1 弹性波阻抗反演流程图

Fig.1 How chart of elastic impedance inversion

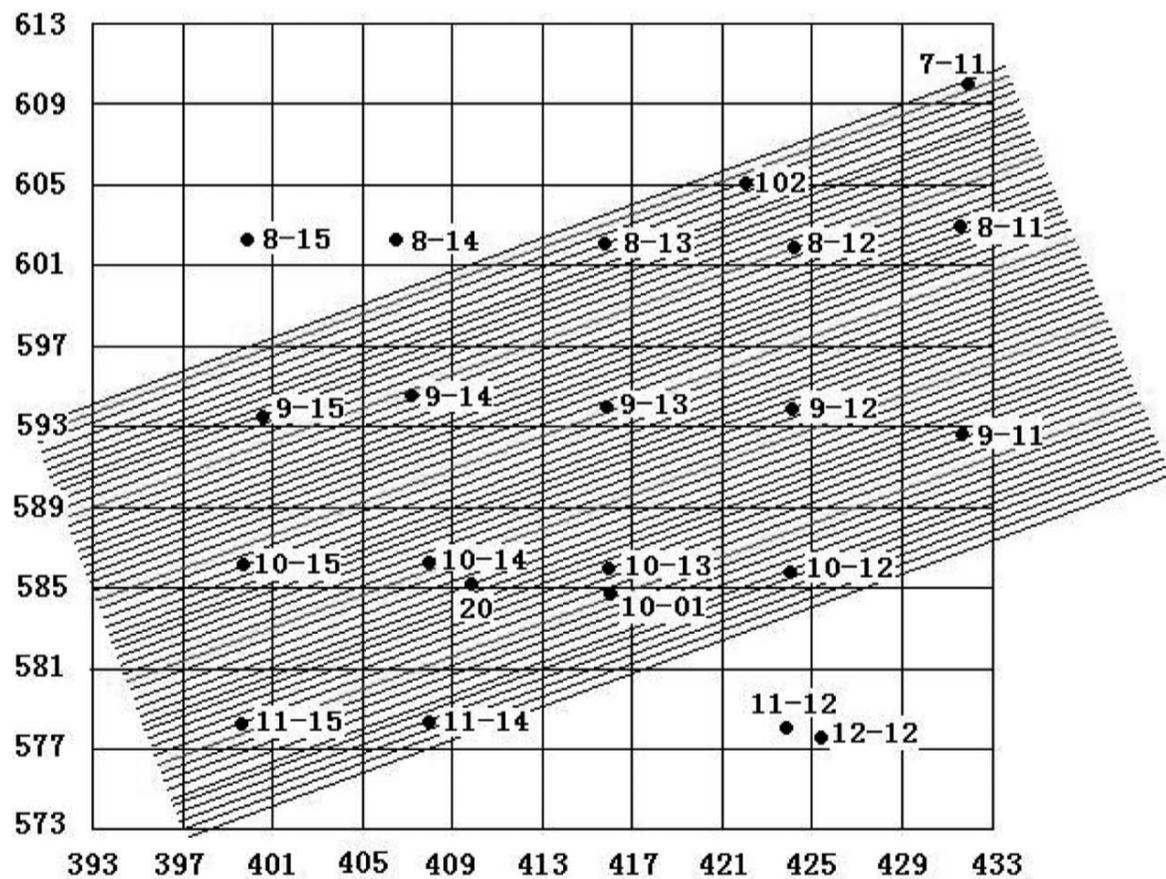


图2 某稠油油藏热采三维观测CDP 网格及注采井组示意图

Fig.2 Sketch map of 3D survey CDP net and position of injection and produce wells in a heavy-oil thermal recovery reservoir

分布稳定,油层厚度一般为15~25 m,纵向上分为三个砂体;地震监测的目的层埋深927~944 m(注汽层在两套强相位860~916 ms之间处的890~900 ms处,该处的反射波能量较弱,横向上追踪效果不明显),稠油层厚17 m,其上覆有50 m厚的玄武岩.蒸汽驱采用的是反九点井网试验井组,即中间一口井注汽,周围8口井采油,井网为200×283 m,

注采井距最小为200 m,最大为823 m.

野外共进行了3次观测,每次测量的时间间隔均为1年.第1次是注气前的基础观测,后2次为注汽后观测,采用的是三线七炮一束线的观测方法,每线40道,道距40 m,检波器实行点式组合,埋置于0.4 m的坑中,地下CDP网格为5×10 m,平面展布面积为80×1000 m,井深为9.3 m,药量为1 kg,采

样间隔2 ms,记录长度3 s.

3.2 应用效果图3、4、5 分别显示了偏移距为70 m、210 m、360 m 三种情况下不同时间测量结果的对比剖面.不难看出,1993 年、1994 年剖面中反射能

量都明显增强,1993 年的剖面中反射能量比1994 年的要强,而且在近偏移距和远偏移距剖面中变化最明显^[8-10]

3.3

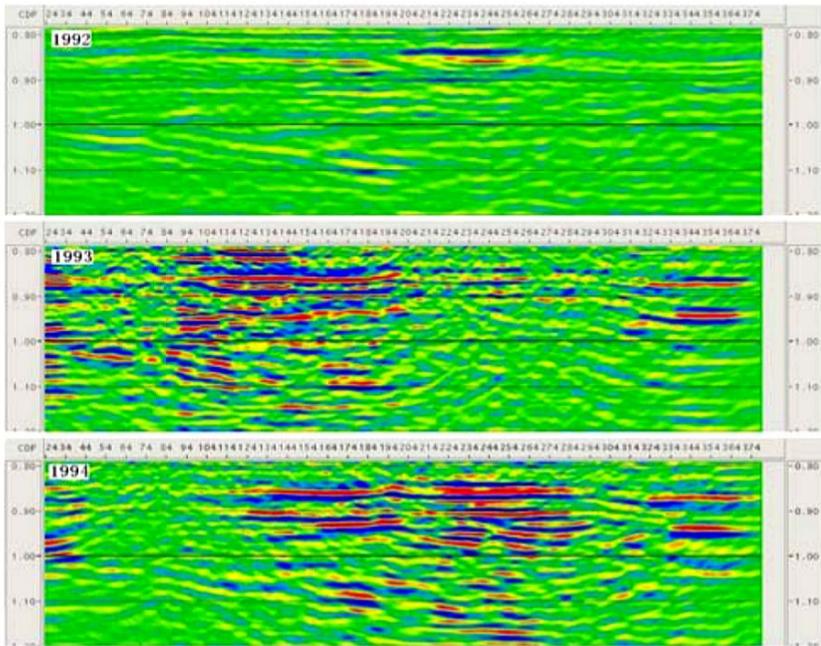


图3 偏移距为70 m 的地震剖面比较

Fig.3 Seismic profiles of 70 m offset for different times

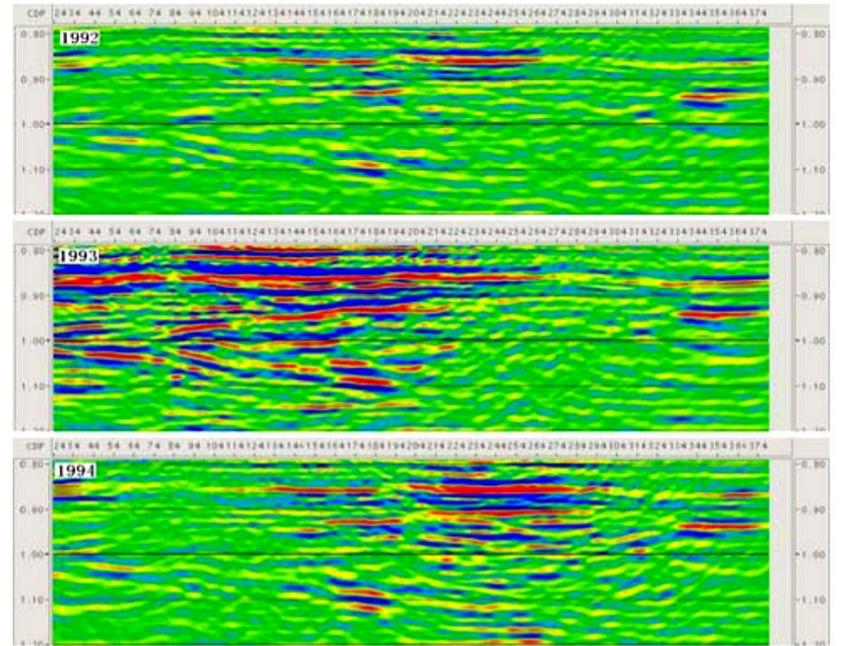


图4 偏移距为210 m 的地震剖面比较

Fig.4 Seismic profiles of 210 m offset for different times

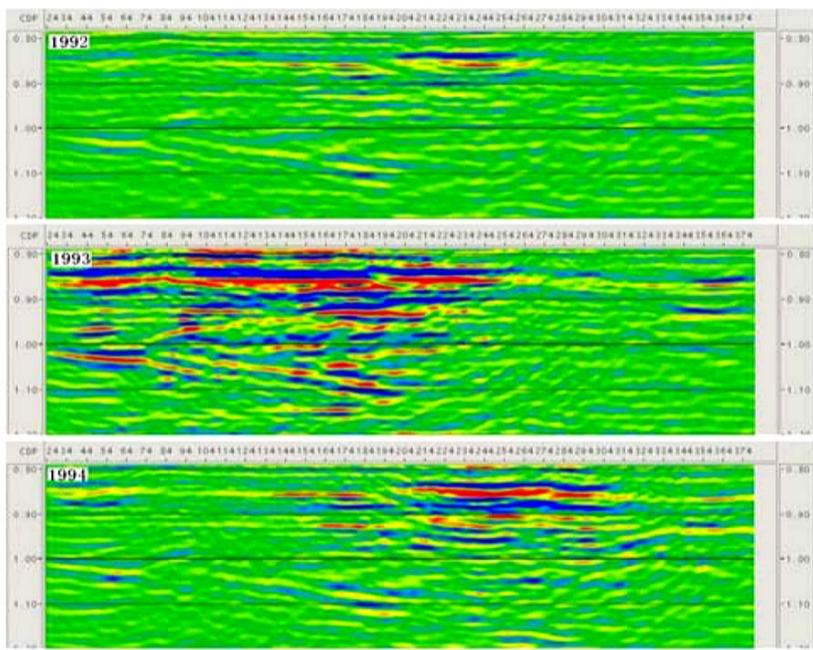


图5 偏移距为360 m 的地震剖面比较

Fig.5 Seismic profiles of 360 m offset for different times

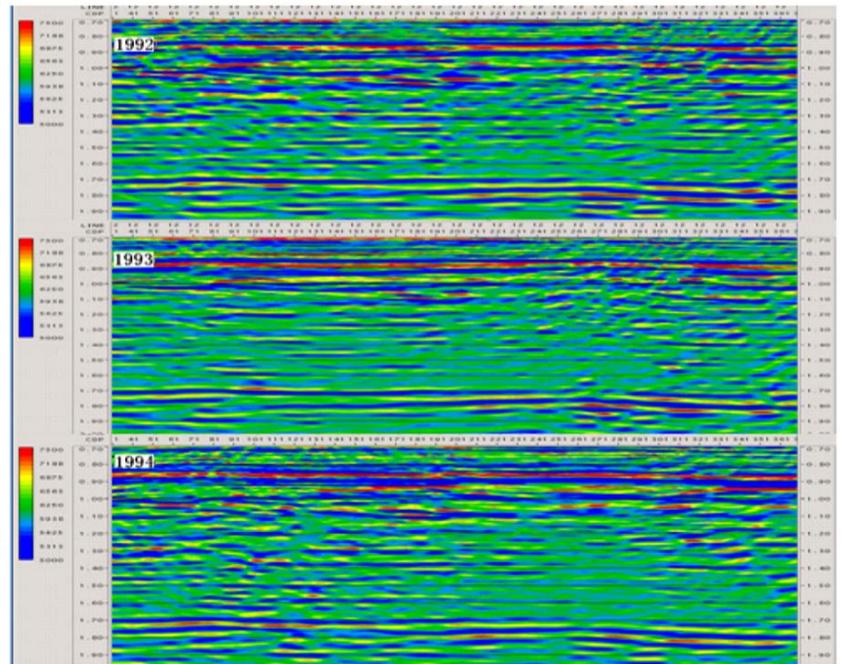


图6 三维地震资料相对波阻抗剖面比较

Fig.6 Relative impedance profiles for different times

图6、图7 分别是三维地震资料相对波阻抗剖面 and 相应的差剖面,从相对波阻抗剖面可以看出:1993 与1992 年相比南部有一降低区,1994 的变化情况接近1992 年的情况;从相对波阻抗差剖面可见:1994 ~1993 与1994 ~1992 相比差异更明显.

图8、9、10 分别显示了不同时间测量结果的纵波阻抗剖面、横波阻抗剖面 and 泊松比剖面的对比结果.

由图可见,在纵波阻抗剖面中,剖面中部波阻抗逐年明显增强,且强阻抗区域横向展布范围不断扩

大,表明油藏注前缘的不断向前推进.与此同时,反射层位出现下拉现象,表明注蒸汽式的原油年度降低,相应速度和密度降低,地震波旅行时间增大;在横波阻抗剖面中,阻抗值也表现出明显变化的趋势,表明储层温度的增加不仅引起孔隙流体特性的改变,同时使得岩石骨架的弹性模量发生变化;在泊松比剖面上也呈现出逐年变化的情况,但与纵波阻抗和横波阻抗相比变化幅度相对较弱.

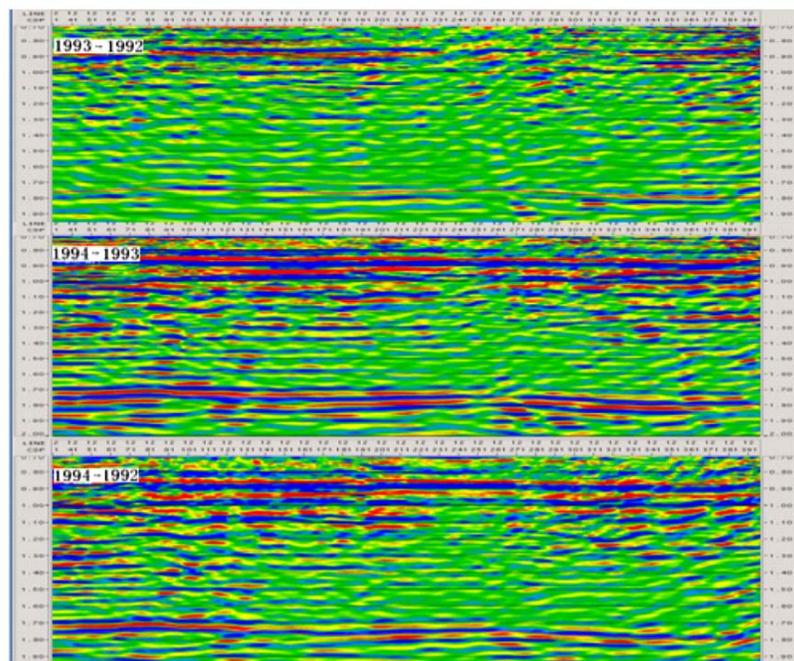


图7 三维地震资料相对波阻抗差剖面比较

Fig.7 Relative impedance difference profiles for different times

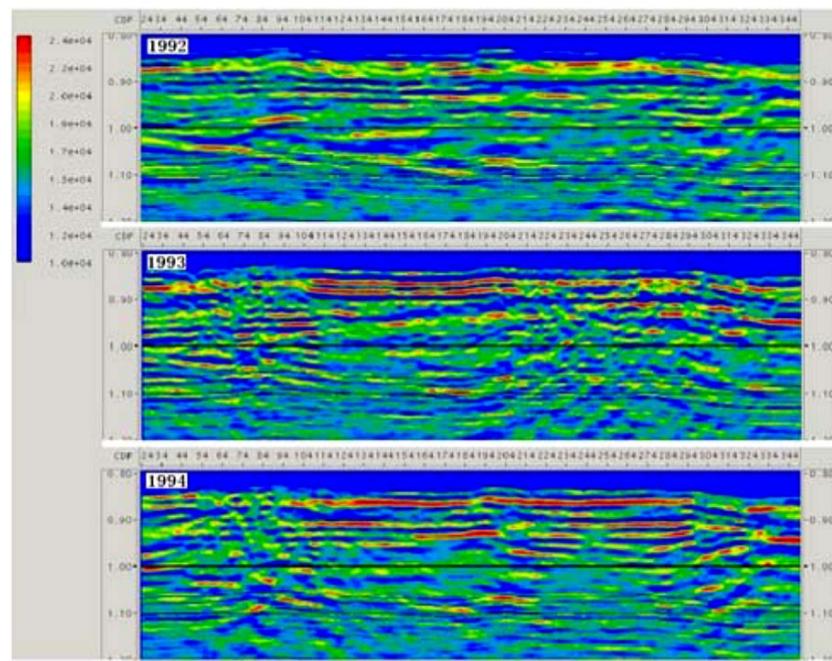


图8 纵波阻抗剖面比较

Fig.8 P-wave impedance profiles for different times

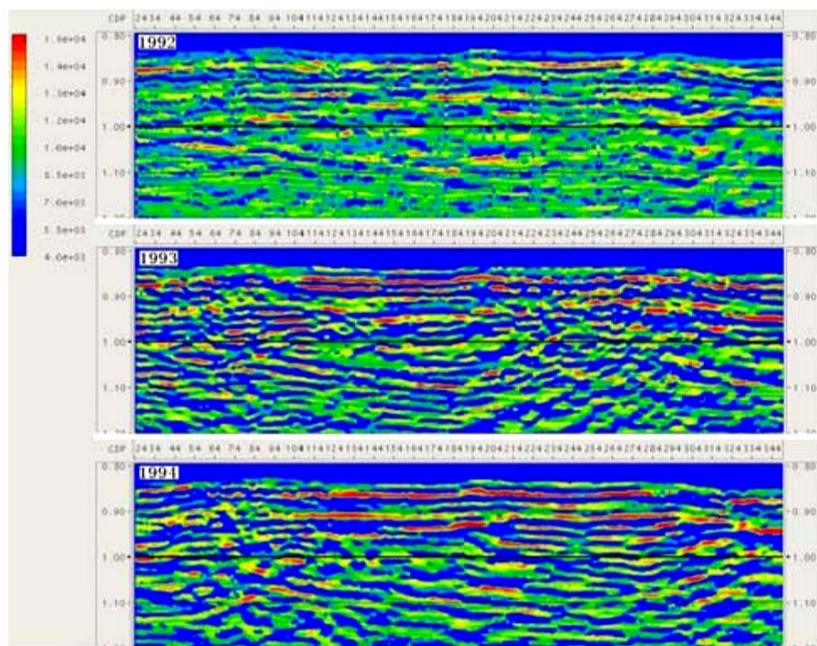


图9 横波阻抗剖面比较

Fig.9 S wave impedance profiles for different times

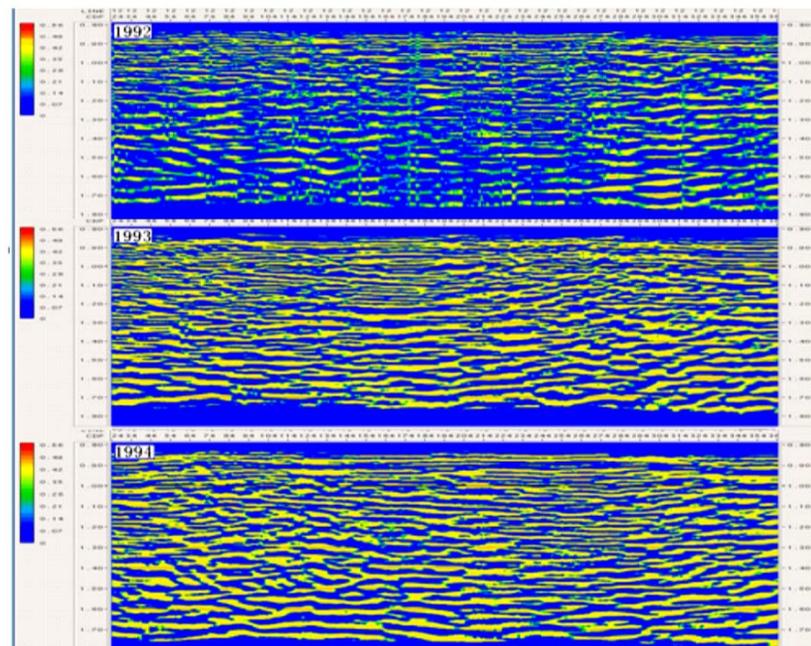


图10 泊松比剖面比较

Fig.10 Poisson ratio profiles for different times

4 结 语

在稠油热采地震监测中, 储层特性的变化最终是通过弹性参数的变化表现为地层速度和实际地震响应的变化的, 因此, 弹性参数应当是储层特性变化最直接和灵敏的监测标志. 从某种意义上讲, 弹性波阻抗反演比传统的 AVO 截距和梯度具有更高的抗噪音能力, 是一种更好的储层流体检测参数. 但应当指出的是本文研究所得的结论还主要停留在定性解释的基础上, 尚未完全定量化. 因此, 相关的研究工作还有必要进一步深入和继续, 相信随着弹性波阻抗反演的进一步发展完善, 该项技术的应用前景将会越来越广泛.

致 谢 本项目得到了美国 EPT 公司中国服务中心的鼎力相助, 得到了贺振华教授、杨绍国教授、云美厚博士的大力支持和帮助, 对以上单位和个人所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢!

参 考 文 献 (References) :

- [1] 李景叶, 陈小宏, 郝振江, 等. 多波时移地震 AVO 反演研究 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(4) :902 ~908.
- [2] Connolly P N. Elastic Impedance: The Leading Edge [J]. 1999, 18(4) :438 ~452.
- [3] Whitcombe D N. Elastic Impedance Normalization [J]. Geophysics, 2002, 67(1) :60 ~62.
- [4] Santos L T, Tygel M, Ramos A C B. Reflection Impedance, 67th Annual. Internat [J]. Mg SEG, Expanded Abstract,

- 2002, 225 ~ 228 .
- [5] 张宏兵, 尚作萍, 杨长春, 等. 波阻抗反演正则参数估计[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1) : 181 ~ 188 .
- [6] 于世煊, 等. C20 块蒸汽驱试验区的地震监测方法[J]. 石油物探, 2000, 39(1) : 1 ~ 9 .
- [7] 王新红, 等. 稠油热采的地震监测试验[J]. 石油地球物理勘探, 1992, 27(2) : 294 ~ 302 .
- [8] 云美厚, 易维启, 庄红艳. 砂岩中干岩石弹性模量与孔隙度、泥质含量、有效压力和温度的经验关系[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3) : 308 ~ 314 .
- [9] 云美厚, 易维启. 孔隙流体地震特性的计算[J]. 石油物探, 2001, 40(2) : 13 ~ 20 .
- [10] 金龙, 陈小宏, 李景叶. 基于误差准则和循环迭代的时移地震匹配滤波方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3) : 698 ~ 703 .

《地球物理学进展》2007 年征订启事

各期刊订户:

2007 年《地球物理学进展》由季刊改为双月刊, 每年 6 期, 每期定价不变, 仍为 35 元, 全年定价变为: 210 元。特此通知。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-62007709, 010-62007696

联系人 刘少华, 汪海英, 肖台琴

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, wanghy@mail.igcas.ac.cn

开户行 中国农业银行北京建德支行 账号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上: 购《地球物理学进展》款, 同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378, 022-23962479

网 址 [http:// www.LHZD.com](http://www.LHZD.com)

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn