

# 隐蔽油气藏地震预测技术研究新进展

马丽娟, 郑和荣, 陈霞

(中石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要** 本文分析了隐蔽油气藏预测的现状和存在问题,在详细介绍了地震技术预测隐蔽油气藏的研究进展的基础上,阐述叠前保幅地震资料处理、正演模拟、岩石物理参数分析、地震反演、AVO 分析和叠前弹性反演等技术的特点,指出了隐蔽油气藏定量描述需在叠前真振幅处理地震资料的基础上,岩石物理参数研究和正演结合探究含油气性地震属性特征,正演与反演相结合和验证,岩石物理分析技术贯穿地震正、反演的整个过程,是今后隐蔽油气藏勘探发展的必然趋势。

**关键词** 叠前偏移,岩石物理参数,正演模拟,地震反演

**中图分类号** P631

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-2903(2007)01-0294-07

## The New progress of seismic forecast technology of Subtle Traps

MA Li-juan, ZHENG He-rong, CHEN Xia

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

**Abstract** This paper analyzed the actuality and existing problems for subtle traps forecasting, on the basis of introducing the progress of seismic technique in subtle traps forecasting. The discussed issues include prestack holding-amplitude processing, forward modeling, rock physics analysis, seismic inversion, AVO analysis, and prestack elastic inversion. It is concluded that quantitative description should be based on holding-amplitude stacked of prestack time migrated section, hydrocarbon potential prediction should be adopted in the subtle traps by using the seismic attributes that deduced from rock physics analysis and forward modeling. Aiming at a combination of forward modeling and seismic inversion, rock physics parameter analysis run through the whole process, it is the development tendency of exploration in subtle traps forecasting.

**Keywords** prestack migration, rock physics parameter, forward modeling, seismic inversion

### 0 引言

近年来,随着油气勘探程度的不断提高,许多油田的勘探重点已从易于发现的大型背斜断块构造和潜山披覆背斜构造油气藏的勘探转向地层、岩性等隐蔽的非构造油气藏的勘探。由于隐蔽油气藏主要受地层、岩相、砂体几何形态,以及与油气运移相关的断层等多种因素控制,因此对其油水边界、含油高度、地质储量预测难度大,并且,隐蔽油气藏在形态上变化大,生储盖配置关系多样化,这些情况加大勘探开发难度。如何预测地下油气储层的岩石物性(压力、孔隙度、渗透率、饱和度等)由此再进一步预测油气分布位置和规模、确定储集体形态、标定产层深度

及厚度是地球物理学家一直探究的课题。地球物理油藏描述中涉及最多的是地震资料,涉及的技术是地震资料的处理和地震资料的综合解释研究<sup>[1~3]</sup>,面对油气勘探目标越来越复杂这一事实,为了适应油气勘探工作的新变化,地球物理学家已认识到充分利用地震资料和其它地球物理资料提供的信息的必要性;要求在最大限度地保留地震资料有效信息的同时,用新的方法新的手段有效提取显示这些信息。特别是 71 届和 72 届 SEG 年会上发表的地震综合研究方面的新技术和新方法,这些技术涉及地震的各个方面,在采集方面超多道地震仪、检波器、海洋勘探设备等逐步完善,成像技术由叠后提到叠前来完成,研究介质由各向同性向各向异性转变;反演

**收稿日期** 2005-12-10; **修回日期** 2006-05-20.

**作者简介** 马丽娟,女,1966 年 10 月,汉族,浙江省义乌市人,高级工程师,博士后。研究方向:盆地分析,从事物探地质的综合解释研究工作。(E-mail:malj@pepris.com)

则以多偏移距、多分量和各向异性为主,基础地震资料也由叠后向叠前转变,针对数据处理中大数据量的管理及算法也提出一些新的方法和新技术,由于这些新技术的应用使得一些复杂的目标检测成为可能.在地震资料解释中应用的技术有岩石物理统计分析方法、正演模型的建立、地震反演技术和 AVO 技术等方法,这些技术方法本身并不是近两年出现的新方法、新技术,但因其技术的发展,内涵变得更加丰富,促进了应用方面的发展.

## 1 地震资料处理

地震数据处理,一直是地球物理技术的一个重要组成部分.由于地震储层预测方法在油气勘探中的重要作用,使得大量的石油勘探工作者对此产生浓厚的兴趣,并投入了相当的人力和物力进行研究,但过去许多储层预测方法的研究是建立在叠后地震资料的基础上的,而叠后地震处理技术是基于介质均匀或水平层状假设,叠后时间偏移虽然能解决反射层归位和绕射波收敛,而不能解决倾斜界面的非共反射点叠加问题,保幅性和成像效果都差;加之全角度多次叠加,损失、模糊了很多构造和储层及油气信息,削弱了地震资料反映构造、储层变化特征的敏感性,导致叠后地震反演处理与地震属性处理应用成果存在多解性;随着勘探难度越来越大,包含更多信息的叠前地震信息处理方法研究日趋活跃,表现在三维 AVO 处理前必须要做的叠前真振幅处理;其次叠前反演因其较叠后反演减少了许多勘探与开发情况的不确定性而得到越来越多的应用.

叠前偏移技术是地震技术中的前沿技术.随着

计算机能力的提高和研究工作的深入,叠前处理方法正成为保幅处理和复杂构造成像的有效方法<sup>[4]</sup>.从近年 SEG 年会有关论文了解到地震偏移成像的发展概况及发展趋势,主要表现在以下方面:常规 Kirchhoff 偏移趋于成熟,对其研究主要是考虑射线传播的多路径问题和实现保幅偏移问题.波动方程偏移主要在提高成像精度和提高计算效率等方面开展研究工作,已在角度域偏移、线束偏移和偏移振幅等方面开展了较多研究.叠前处理包括叠前深度偏移和叠前时间偏移.叠前深度偏移对速度模型精度的要求比较高,使得该方法在实际资料的处理中并不尽人如愿.与叠前深度偏移相比,叠前时间偏移不仅可以解决上述问题,而且由于其使用的是均方根速度,对速度场的要求比叠前深度偏移对速度模型的要求低得多,叠前时间偏移(PSTM)是一种较好的归位处理方法,在一定程度上可以解决复杂地区的地震保幅与聚焦和成像处理问题,成像效果大大优于叠后时间偏移,图 1 是 CC 地区常规处理与叠前地震资料对比,图中叠前时间偏移地震剖面较常规地震剖面对潜山的特征反映更为清晰.

图 2 是 YAZ 地区一个亮点气藏的处理实例.图 2a 是保持振幅叠加剖面,气藏反射两端绕射波的存在,使气藏的准确范围难以确定,在对应的偏移叠加剖面上(图 2b),绕射波完全收敛,气藏边界是比较清楚的.因此,叠前时间偏移的应用,不论是在三维 CRP 道集上,还是在三维数据体上(包括保持振幅剖面、属性叠加、角叠加等),都可以较为准确地确定出气藏范围与边界.

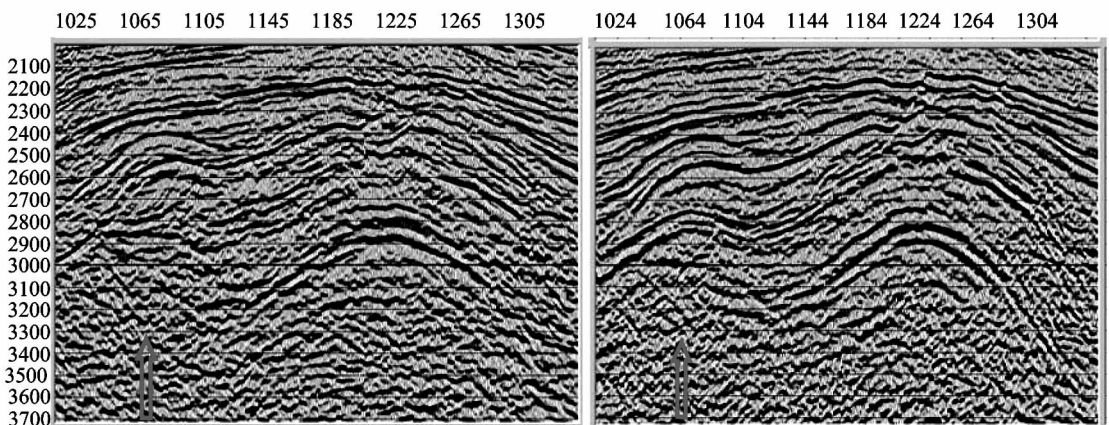


图 1 CC 地区常规处理与叠前时间偏移处理地震剖面对比

Fig. 1 Comparison between routine processing section and prestack time migrated section of CC area

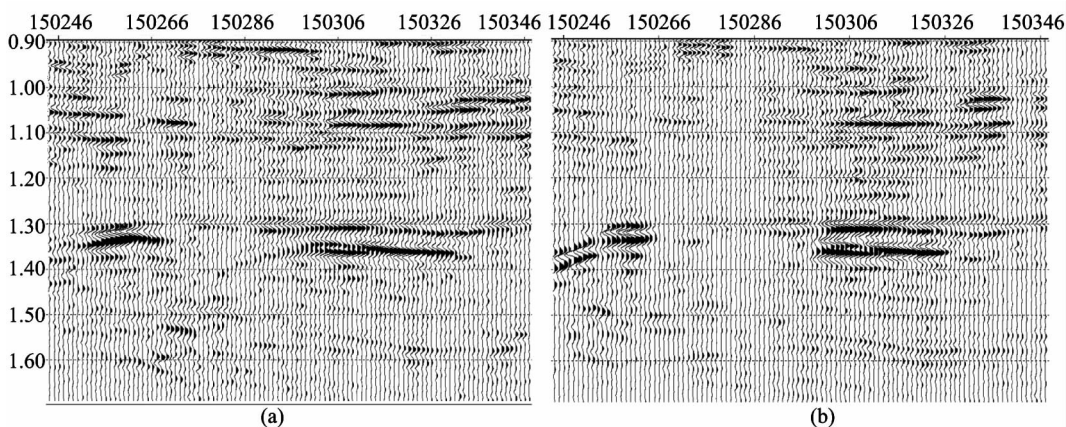


图2 叠前时间偏移的保持振幅叠加剖面前后对比

(a)保持振幅叠加剖面;(b)偏移叠加剖面

Fig.2 Comparison between holding—amplitude stacked section and prestack time migrated section

叠前处理技术与叠后处理技术相比,具有很多优点.在改善保幅性和成像效果的同时,还能够提供保真度好、聚焦好的道集,以进一步做好 AVO、AVA 等叠前属性反演研究.

## 2 岩石物理学研究

目前地震资料解释正朝着定量解释的方向发展,人们试图建立起地震参数与介质物性参数、状态之间的关系.岩石物理学研究正是这种工具,越来越受到业界重视.地震岩石物理学是油气勘探的基础工作,它是用地震及测井资料研究储层和油气富存的理论基础,岩石物理学在从地震数据中导出储层和流体特性及油藏参数的技术中,它起到一种基本准则的作用.在勘探中,它是用地震属性预测岩性及迭前反演预测油气的物理基础<sup>[5]</sup>.可以使人们快速理解储层流体变化所引起的地震响应变化,是连接地震和油藏工程的纽带.

岩石物理分析主要研究地球物理勘探所获得的物理量与地下储层参数的对应关系<sup>[6]</sup>,这二者的对应关系的确定程度必然影响到地球物理探测结果、储层解释能力及其效果,对于地震勘探来说确定地震波特点的因素除激发、接收条件外主要受岩石的弹性模量、密度和吸收等特性的影响.而这些特性又与岩石成分、孔隙度、埋深、孔隙内流体性质、压力、岩层的不均匀性以及其它的地质特性密切相关<sup>[7]</sup>,了解岩石物性与地震波特性的关系可以更好地研究储层性质(孔隙度、渗透率)及其状态(饱和度、孔隙压力等).利用岩石物理技术研究成果,可以提供

各种对储层识别及含油气性分析的敏感岩石物理参数,有效指导储层反演技术.

岩石物理研究结果可以有两方面的应用:

(1)根据取自不同地区的岩石样品,进行不同条件下的测定,总结出具有普遍性的规律.图3是ZGE地区的砂岩纵、横波速度随压力的变化规律,有助于更好理解孔隙压力影响储层变化的过程.

(2)建立适用于研究地区的预测标志.根据岩石的孔隙度、渗透率与波速的关系,饱和水、饱和油和饱和气时岩石类型的波速特征,横波波速反映的岩石各向异性特征等,建立适合与本地区、本储层的具体预测标志,图4是CB地区饱和水、饱和油的纵、横波速交汇图,体积模量与剪切模量与密度乘积交汇,能够较好的区分油、水,根据所得的规律预测其它未探明地区的含油气性,为勘探提供依据.

岩石物理在储层预测及油气特征分析方面具有广阔的应用前景,尤其是建立在 Gassman 模型基础上的岩石物理技术研究,它是计算岩石性质变化后(包括孔隙内流体变化)的弹性参数,特别是速度的重要工具.国外在这方面的技术研究非常活跃,从 SEG 年会发表的论文看,岩石物理的研究已在岩石物理模型研究、岩石物性测定和储层参数分析、各向异性、粘滞与衰减和渗透率六部分展开了研究,这些研究对地球物理正、反演、评价 AVO、识别流体和岩性的可行性提供了依据.目前,国内已有研究利用 Gassman 方程进行流体替换模型实验,探讨不同含流体状态下地震响应和属性特征,但未深入开展其他方面的研究.

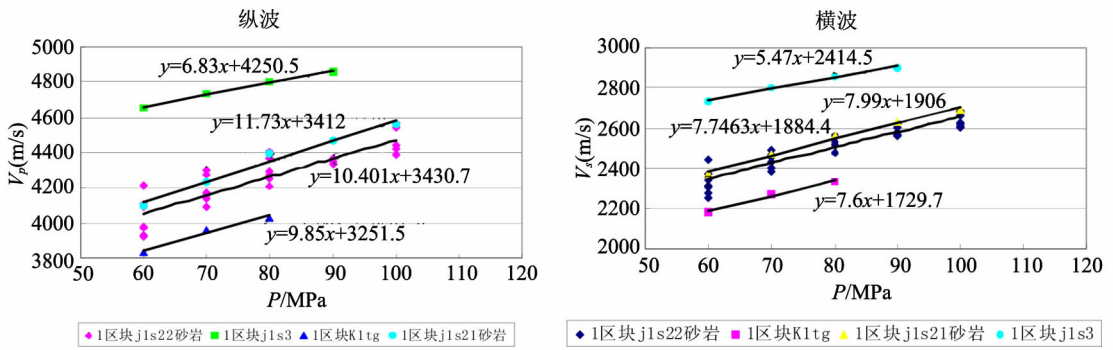


图 3 ZGE 地区砂岩纵、横波速度随压力的变化规律

Fig. 3 P-wave and S-wave velocities for sandstone varied with pressure in ZGE area

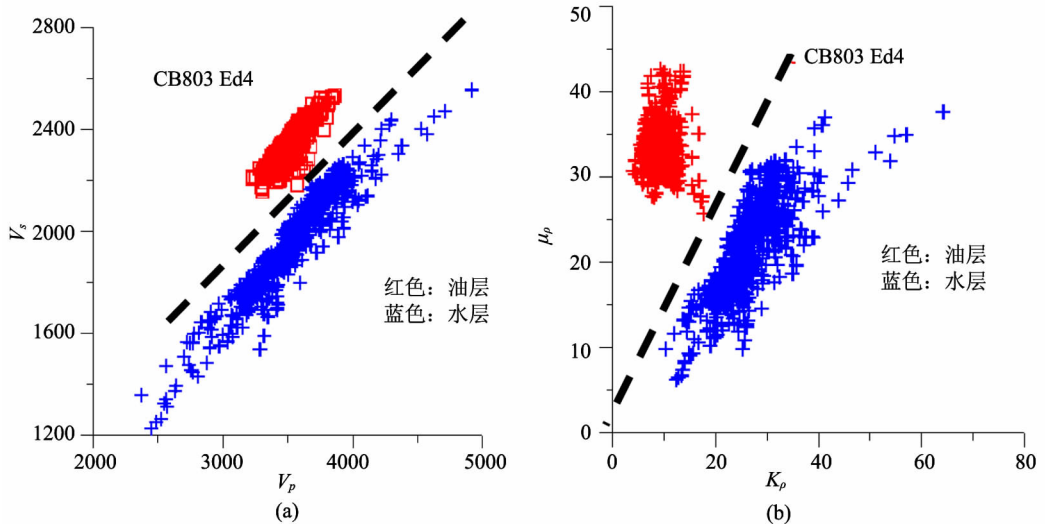


图 4 饱和油、饱和水纵、横波速及弹性模量特征

(a)CB 地区纵、横波交汇; (b)体积模量与密度乘积与剪切模量与密度乘积交汇

Fig. 4 Character of P-wave and S-wave velocities and elastic modulus for saturated oil and water

### 3 正演模拟技术

不同地质体由于其岩石组合、内部结构、岩性、物性、含油气性等的差异,在地震剖面上表现出不同的反射特征,包括反射外形、内部结构、反射频率、振幅等地震参数.然而,由于地下地层、构造千变万化,地震波传播过程十分复杂,加之各种波的干扰,造成了地震剖面中的各种反射现象存在多解性,大大地增加了地震资料解释的难度.地震正演模拟是通过已知的地层参数、模拟地震波及地层的反射信号,实现由地质模型到地震反射记录的正演过程,开展正演模拟技术研究不仅可以将其作为一种认知手段研究地震波在各种复杂介质中的传播规律,建立不同

地质体的地震识别模式,以达到利用地震特征直接预测有利目标的目的,避免地震现象的多解性,提高解释精度<sup>[8,9]</sup>;同时可以作为一种检验手段,检验各种方法技术的适用条件,并在此基础上开发新的处理解释技术.

在地球物理勘探领域中,模拟方法可分为两大类<sup>[10,11]</sup>.一类是物理模拟,它是通过物理实验过程对某个过程或现象进行模拟的.另一类是属性模拟或数值模拟,它是通过数值计算方法对某一过程或现象进行模拟的.地震物理模拟与属性模拟方法相比,其最大的优点就是地震物理模拟结果的真实性和不受计算方法、假设条件的限制,特别是在三维复杂介质地震模拟中,它比地震数值模拟具有快速和经济的特点,因而地震物理模型手段受到国外工业发

达国家石油公司和大学的普遍重视。

数值模拟技术是地球物理学的一个重要研究领域,由于数学计算方法所解方程的不同,数值模拟主要分为解程函方程的射线追踪法和解波动方程的波动方程数值模拟法。射线追踪技术在地震波场数值模拟方法技术系列中出现最早、使用最广、发展最为成熟的技术。该技术因其能够提供直观的射线路径图,且运算速度快,对计算机等硬件要求较低等特点而长期受到地震学家的喜爱。根据追踪方法的不同,射线追踪方法主要分为弯曲射线法、时间场法等。虽然射线模拟是现在应用最广泛的模拟方法,但这种应用大都只是研究地震波场的运动学特征,而研究地震波场的动力学特征,特别是复杂介质中波场的动力学特征时基本上都采用波动方程数值模拟,说明波动方程数值模拟代表了波场数值模拟的发展方向。当前制约波动方程数值模拟方法广泛应用的根本原因是计算机的性能问题,特别是三维模拟对内存要求很高,但随着计算机群组技术发展迅速,大大促进来波动方程数值模拟的技术发展,波动方程数值模拟包括有限差分法、混合平面波法模拟和虚谱法。近年来的研究可以看出数值模拟具有以下特点:

(1)复杂介质高精度模拟是数值模拟技术发展的主要方向,非均匀各向异性、裂隙和孔隙弹性、双多向介质的弹性波模拟是其研究重点;

(2)射线追踪法因其简单、快速直观等优势,在现阶段仍拥有广阔的应市场;

(3)提高对复杂介质中地震波传播规律的认识程度是数值模拟技术的又一目标;

(4)应用波场数值模拟技术不仅可以在勘探阶段确定处理、解释流程及相应的方法技术,而且可以利用其振幅对储层参数的敏感性监测油气开采情况。

物理模拟中的井间物模技术也是近年发展起来的新技术,井间地震勘探由于避开了地表低速带对地震信号高频成分的吸收,利用它可以获得具有较高空间分辨率的地震信号,由此可以得到井间地层、构造、储层等地质目标的精细的成像。但是由于人们对井间地震的波场特征的认识还不十分地了解,从而增加了处理的难度,更难以反映其精确地质结构,因此需要采用数值模拟和物理模拟试验相结合的办法,来解释井间地震波场特征问题。物理模型超声波实验观测方法,具有直接性和唯一性;波动理论的正反演方法,具有间接性和多解性,基于这种特点,采用物理模拟实验可研究井间地震勘探的波场特征。

针对储层地质结构特征,物理模型实验思路:单一体—多组结构体组合—野外实际模型模拟来展示井间地震波场特征,从而加强井间地震层析成像研究,并提高成像技术。为提高油气采收率、优化油气开发提供依据。

#### 4 地震波阻抗反演

地震反演的历史可追溯到几十年之前,但真正能解决实际储层描述问题的反演方法和技术研究还要归功于近十几年以来的成果<sup>[12~17]</sup>。地震勘探的对象越来越多的是寻找和发现薄的储集层,用常规地震记录已显得力不从心。由于地震数据是带限的,要想恢复全频带信息通常是不可能的,同时常规地震资料所反映的是两个岩层的波阻抗分界面,将这种界面资料转换为岩层资料是波阻抗反演的目的,大多数地球物理工作者都通过地震反演的方法来解决这个问题。利用岩层资料所包含的地质信息为研究储层提供可以与测井资料直接对比的形式。

地震反演方法和技术可以分为叠前和叠后两大类。从波阻抗反演技术的发展历程看<sup>[18~21]</sup>,地震反演方法经历了从不基于模型反演到基于模型反演、从基于褶积理论到基于波动方程理论、从线性反演到非线性反演、从有限带宽频率到宽带频率、从声波阻抗反演到弹性波阻抗反演,从一维到二维再到三维的发展历程。不基于模型的地震反演由于有限带宽的限制已被基于模型的地震反演所取代,线性反演由于其有限的局部而逐渐向全局寻优的非线性反演发展。为了增加反演的稳定性,提高反演结果的分辨率和精度,降低多解性,在外推反演过程中加入测井、地质模型等多项约束条件,对断层、超覆等特殊地质问题作适当合理的处理,拓宽反演结果的频带,永远是地震反演所追求的目标。三维波阻抗储层参数数据体能在任意方向上进行地层对比及岩性识别,实现精细的储层预测与描述,为落实构造、划分油水边界、圈定有利区带等提供较好的依据。

地震波阻抗反演包括声阻抗反演、弹性阻抗反演和全波形反演。声阻抗反演在岩性反演中发挥重要的作用,其发展中出现的随机地震反演方法,因其模型建立是基于岩相的孔隙度和渗透率模型,反演的声阻抗变化可以指示储层内孔隙度和流体类型的变化,很好的描述和预测岩性。用于油藏描述的许多技术中,AVO分析应用较为广泛。随着AVO技术的发展,涌现出一些新技术,如AVO交汇图、弹性波阻抗反演、拉梅常数反演及TI介质中AVO简化

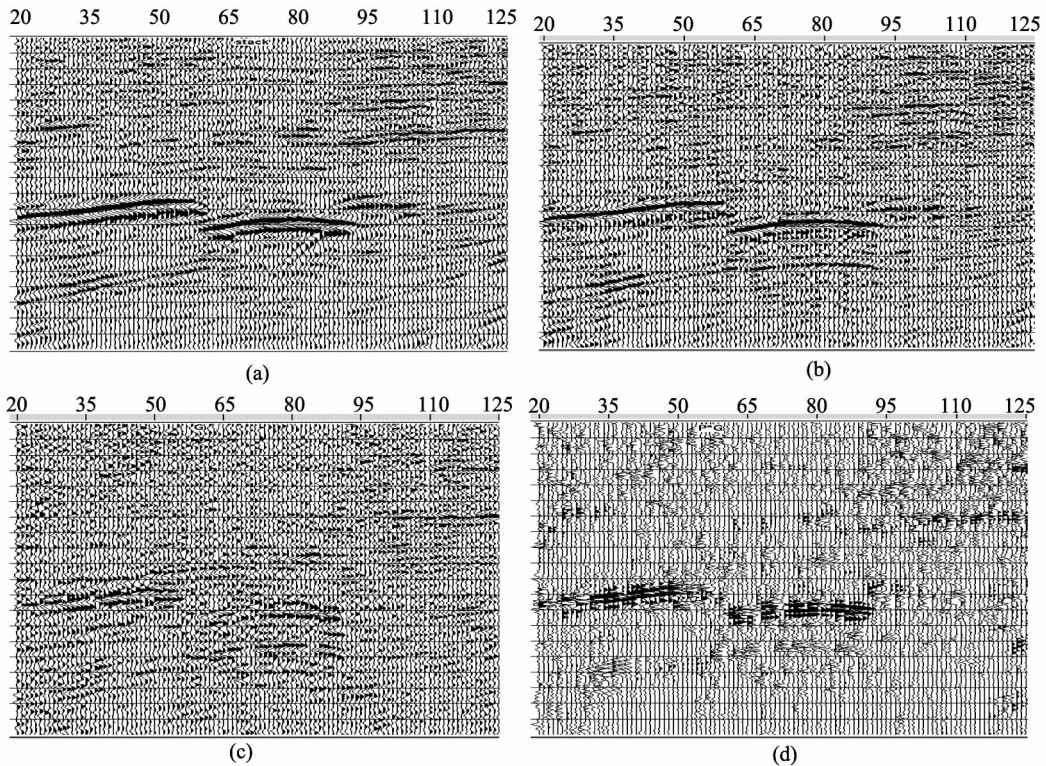


图5 FQ1井主要 AVO 属性剖面

(a) 叠加剖面;(b)P 剖面;(c)G 剖面;(d) 碳氢检测剖面

Fig. 5 The section of AVO attributes

(a) stack section;(b)P section;(c)G section;(d) hydrocarbon detection section

方程.越来越多的专家认为 AVO 处理是唯一可以用来定量预测岩性与油气的地球物理技术,但必建立在细致的分析工作基础之上,它包括岩石物理分析、精细地震资料保幅处理、井资料标定和约束、合适的反演和解释方法.图 5 是 FQ1 井气藏的 AVO 属性特征.在 P 波上表现为弱反射,较叠加剖面明显变弱,叠加剖面上的双轨反射同相轴在叠加平面上变为单轨同相轴,说明第二个反射同相轴为气层反射,在 G 剖面上特征气藏不突出,仅为轻微的正异常,碳氢检测剖面表现为明显的正异常.

AVO 属性能迅速地从大量的三维数据中找到 AVO 异常,但 AVO 属性往往受噪音等客观因素以及处理中的人为因素等方面的影响,不能全面地反映地震波振幅的变化规律,因此不能只从 AVO 属性单方面确定 AVO 异常,确定 AVO 异常是否为油气藏还需其它的 AVO 成果来进一步描述,尽管声阻抗是强有力的岩性识别方法,但由于其忽略了 AVO 特征,而不能用于检测含流体特征;其次 AVO 方法由于子波变化,有时往往也不能准确预测流体.弹性波阻抗反演是声阻抗反演的推广,它是纵波速

度、横波速度、密度以及入射角的函数.弹性波阻抗反演由于能有效地解决 AVO 子波反演中的子波随偏移距变化问题而引起地球物理学家的重视. Garcia 等人提出了改进岩性和流体的预测能力的弹性波阻抗反演方法——神经网络和弹性反演,其具体做法是从声阻抗(AI)、弹性阻抗(EI)和判别数据(R)中评价描述岩性和流体特性的潜力,R 是 AI 和 EI 的线性组合,通过神经网络对 AI、EI 和 R 之间建立对应关系,Garcia 等人用此方法识别了委内瑞拉 Sam Joaquin 油田的岩性和流体含量,实践证明 AI 可以很好识别岩性而 EI 不行,在砂体的流体检测中,EI 好于 AI,但 R 检测气时效果最好,因此 AI 和 EI 联合能有助于识别如孔隙度、岩性和流体含量等储层性质间的相互关系.

在油藏表征的描述中,尽管 AVO 分析能确定 P 波阻抗和泊松比的微小变化,但 AVO 分析仅针对反射波,不包括转换波和层间多次波,因此出现了叠前地震数据的全波形反演,它是地下弹性变化界面精细成像的关键,是地震工业极具挑战性的任务,地震全波形反演由于能充分体现地震波的动力学和

运动学特征而更加引人注目。但在实践中存在以下困难:反演问题是严重非线性的;误差测量多解;正演问题极其复杂;精确的地震资料处理需要振幅保持。

目前,叠前地震反演技术本身的研究深度还不够,岩石物理研究深度及与反演的结合以及地震正演与地震反演的结合不够紧密,在应用叠前、叠后地震反演解决精细储层描述问题方面,还缺乏岩石物理和地震正演作为基础支撑技术的系统性和完整性研究,还有不少待探讨的理论方法研究和实际应用研究问题。

今后的发展趋势将向叠前地震反演,叠后、叠前联合地震反演,多参数联合反演方向发展<sup>[22~25]</sup>。其应用也将向着多学科相互渗透,多种方法软件相互集成方向发展。随着进一步研究,必将使人们更科学地应用这项技术为勘探开发服务,发挥最大的效益。

随着勘探技术的发展和寻找隐蔽性储层及油气藏勘探的需要,为了有效提高储层描述与预测的精确度,储层预测描述技术必须加强与岩石物理分析技术和地震正演模型技术的结合,开展岩石物理和地震正演作为基础支撑的系统性和完整性研究,这是储层反演技术发展的必然趋势。深入研究叠前反演方法和技术流程,加强与岩石物理分析和地震正演模型技术的结合,形成一个完整的以岩石物理分析和地震正演模型分析为基础的储层反演技术系列。正演与反演相互结合、相互促进、相互验证,岩石物理分析技术贯穿地震正、反演的整个过程,将是今后的一个重要研究发展方向。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] 张进铎. 地震解释技术现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 578~587.
- [2] 张向林, 陶果, 刘新茹. 油气地球物理勘探技术进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 143~151.
- [3] 张延玲, 杨长春, 贾曙光. 地震属性技术的研究和应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1129~1133.
- [4] 孟凡冰 计平 王建军 游洪文 张玉斌. 叠前时间偏移在三维地震资料连片处理中的应用实例[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(3): 211~215.
- [5] Pokob AH, 扬恬欣. 岩石物理参数统计关系在研究火山地球中的应用[J]. 国外铀金地质, 1990(2): 60~63.
- [6] 沈建国, 陈宇, 等. 用两个不同源距的声波测井全波波形计算纵波和横波波速[J]. 石油物探, 2002, 41(2): 115~120.
- [7] 史譔, 杨东全. 岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 379~384.
- [8] Yarus J M, Chambers R L. Stochastic Modeling and Geostatistics; Principles, Methods, and case Studies[J]. 1994, No. 3, AAPG Computer Application in Geology.
- [9] 牟永光著. 储层地球物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [10] 牟永光著. 三维复杂介质地震物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [11] 魏建新, 牟永光, 获帮让. 三维地震物理模型的研究[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(6): 556~561.
- [12] Russell B, Ross C, Lines L. Neural Networks and AVO[J]. The leading Edge, 2002, 21(3): 268~276.
- [13] Lines L R, Treitel S. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems[J]. Geophysical Prospecting, 1984, 32: 159~186.
- [14] Brian R, Dan H. Comparison of poststack seismic inversion methods[A]. In: the 61th meeting of the SEG[C], 1991.
- [15] Mukerji T, Jorstand A, Avseth P, et al. Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North Sea reservoir seismic inversions and statistical rock physics[J]. Geophysics, 2001, 66(4): 988~1001.
- [16] Shanor G et al. A Geostatistical Inversion to Flow Simulation Workflow Example: Makarem field[A]. In: Oman, EAGE Meeting, 2001.
- [17] Whitcombe D N, Connolly P A, Reagan R L, et al. Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction[R]. 70th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 2000.
- [18] 张永刚. 地震波阻抗反演技术的现状和发展[J]. 石油物探, 2002, 41(4): 385~390.
- [19] David Gray, Eric Andersen 著, 吴官生译. AVO 和反演在地层特性中的应用[J]. 石油勘探开发情报, 2001(1): 24~30.
- [20] David M Dolberg, 等著, 刘社平等译. 在挪威 Lavrans 油田用地震反演预测孔隙度[J]. 石油物探译丛, 2000(6): 23~30.
- [21] 曹柏如, 张霖斌. 波阻抗反演中的不确定性分析[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 62~67.
- [22] 杨文采. 非线性地球物理反演方法: 回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 255~261.
- [23] 杨文采. 评地球物理反演的发展趋向[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 389~396.
- [24] 陈丽虹, 孙建国, 等. 地球物理反演的拟线性近似方法综述[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 464~472.
- [25] 马劲风. 地震勘探中广义弹性阻抗的正反演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 118~124.