

文章编号: 1001-1986(2016)02-0096-10

第 84 届 SEG 年会多分量地震技术评述

孙丽霞¹, 杨春², 王赞^{2,3}, 张智¹

(1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541000; 2. 中国地质大学(北京)地球物理与
息技术学院, 北京 100083; 3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 综合分析 2014 年度美国 SEG 年会上多分量地震技术方面的学术论文, 不难发现: 在多波地震偏移成像研究中, 叠前时间偏移仍是实际应用的主要方法; 相比于 PS 折射波初至拾取, 径向-道域变换的射线路径一致性静校正方法效果更好; 全波形反演在四维地震应用中具有诱人的前景, 基于纵波反射系数的流体因子反演方法在稳定性、准确性方面显示出很大的优势, 有望产生实际的应用效果。多分量地震技术的发展特点可归纳为“一批亮点, 一个重点”, 即: 页岩的岩石物理实验与数值模拟分析、地震波的低频衰减气溶机理、六分量矢量波场特征的研究、多组多尺度裂缝系统的响应特征是该领域研究的亮点; 综合利用海洋四分量压制鬼波及径向波、去除海底多次波、提高纵波的信噪比是海洋多分量地震技术发展的重点。

关键词: 多分量; 地震技术; 亮点; 重点; SEG

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.02.018

A commentary on multi-component seismic technology in the 84th SEG annual meeting

SUN Lixia¹, YANG Chun², WANG Yun^{2,3}, ZHANG Zhi¹

(1. School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541000, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Through analysis of papers about multi-component seismic technology presented in the 84th SEG annual meeting, it is easy to find out that prestack time migration is still the major method used in multi-component migration imaging. Compared with the method based on S-wave refraction, static correction method using the radial-trace domain transform for ray path consistency can get the real reflection interface, the application of the full waveform inversion in 4D seismics has attractive perspective. Based on the advantages of stability and accuracy of the fluid factor of longitudinal wave, it is hopeful to produce practical effect. The development characteristics of the multi-component seismics can be summarized as “a lot of highlight spots and one emphasis”, the highlight spots include rock physical experiment and numerical simulation of shale, aerosol mechanism of low frequency attenuation of seismic wave, research on the characteristics six-component vector wave field, research on response characteristics of multi-group and multi-scale fracture system. The emphasis for ocean multi-component seismic technology is to suppress ghost wave and radial wave, to remove multiple wave, and to increase the signal-to-noise ratio of P wave.

Key words: multi-component; seismic technology; highlight spot; emphasis; society of exploration geophysicists

2014 年第 84 届国际勘探地球物理学家学会
(Society of Exploration Geophysicists, 简称 SEG)在

美国丹佛召开, 其中涉及地震各向异性理论和多分量地震技术共有四个专题:

收稿日期: 2015-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41425017, 41574126, 41504107); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA064201); 中国科学院仪器专项(YZ201207); 中央高校基本科研业务费项目(2-9-2013-093)

Foundation item: National Natural Science Foundation Project of China(41425017, 41574126, 41504107); National Hi-tech Research and Development Program of China(863 Program)(2013AA064201); the Special Apparatus Project of the Chinese Academy of Sciences(YZ201207); the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(2-9-2013-093)

作者简介: 孙丽霞(1993—), 女, 河北新乐人, 硕士研究生。研究方向为地质资源与地质工程。E-mail: 2561110746@qq.com

引用格式: 孙丽霞, 杨春, 王赞, 等. 第 84 届 SEG 年会多分量地震技术评述[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(2): 96-105.

SUN Lixia, YANG Chun, WANG Yun, et al. A commentary on multi-component seismic technology in the 84th SEG annual meeting[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2): 96-105.

- a. 多分量地震方法与应用实例；
- b. 多分量地震数据处理；
- c. 多分量转换波分析解释；
- d. 岩石物理、物理模拟与 AVO 特征。

上述每个专题 8 篇文章，共计 32 篇，主要内容围绕着多分量转换波的静校正、偏移成像和应用效果等^[1-2]。与上几届 SEG 年会^[3-7]相比，在海洋四分量地震中，如何综合利用水听器压力分量与陆地检波器的三分量实现波场分离与压噪，尤其是通过 P、Z 分量的叠压制鬼波、多次波、提高信噪比是本届年会文章的一个非常明显的特点。通过综合分析本届年会的多波文章，本文将从以下几个方面加以介绍。

1 实验

在地震学研究中，物理模拟与数值模拟是各向异性介质理论研究的主要手段。

在本届年会上，页岩的岩石物理实验与数值模拟分析、波动受流体影响所产生的地震波低频衰减作用、空间矢量波场的记录与分析、多组多尺度裂缝系统的响应特征是四个值得关注的研究方向。

1.1 页岩的多波 AVO 响应

近年来美国在页岩气勘探开发方面获得巨大成功，引起了国际上对于页岩的研究热潮。本届年会上，关于页岩各向异性或多波数值模拟分析的文章有 2 篇，均来自 Austin Texas 大学 Jackson 地学院，其中 Gustie 等^[8]在 VTI 介质 Thomsen 弱各向异性假设的前提下，在 Rüger^[9]和 Ramos 等^[10]给出的转换横波反射系数(R_{PS})近似公式基础上，重点讨论了当各向异性参数 δ, ε 变化时 PS 波 AVO 曲线特征，以说明各向异性参数对 PS 波 AVO 曲线或转换横波反射系数与入射角正弦值($R_{PS} \cdot \sin(i)$)交汇图具有明显的影响，预示着 PS 波 AVO 特征分析用于页岩气“甜点”预测的可能性。由于页岩的各向异性差异很大，而 Thomsen 各向异性参数表示是建立在弱各向异性的假设基础上，且各近似公式对不同各向异性强度的近似误差没有经过严谨的论证，因此，该文给出的 AVO 分析结论需要慎重使用。

Morshed^[11]则重点讨论了干酪根含量及其骨架纵横比、各向异性参数变化所引起的多波反射异常。Marcellus 页岩在美国东部分布范围广，在部分州已开发形成产能。长期的勘探开发发现，Marcellus 页岩的黏土成分及其含量、干酪根含量、干酪根骨架纵横比三方面变化很大，所产生的地震速度各向异性也存在差异。Morshed 等通过设定 3 种页岩气储

层模型，采用二维 VTI 介质频率-波数域模拟算法，分别讨论了干酪根含量、干酪根骨架纵横比、各向异性参数对 PP、PS、SS 反射 AVA 特征的影响。数值模拟发现：干酪根含量的变化可在 PP、PS、SS 反射 AVA 曲线上看到明显的变化，其中 PP 波的变化主要体现在近偏移距，其异常幅度最大可达 150%；PS 的异常变化最大可达 100%，主要出现在中远偏移距；SS 波异常变化最大可达 150%，主要表现在中等偏移距。另外，干酪根骨架的纵横比对 PP、PS、SS 反射 AVA 特征影响不明显，异常幅度最大都不超过 10%。

1.2 地震波低频衰减的气溶机理

地震波衰减是一个重要的物理现象，不仅影响地震波的成像，还直接影响地震解释与反演结果。针对部分水饱和的 Berea 砂岩，University of Toronto(加拿大多伦多大学)的 Nicola Tisato 等^[12]发现：10 Hz 以上的地震波波动会引起流体流动(wave-induced fluid flow, 简称 WIFF^[13])，从而引发地震波的衰减。此外，由宽频带衰减测试仪和 Berea 砂岩样品进行的一系列共振实验显示：在约 0.3 Hz 的低频处也存在一个衰减峰值，该峰值出现的流体压力小于 0.5 MPa；当有效应力不变，增加流体压力时，衰减峰值消失；数值模拟也显示了同样的低频峰值衰减特征。由此，Nicola 等^[14]推测流体饱和岩石中地震波衰减可能存在一个新的衰减机制—气溶机制，即波诱导导致饱和流体中气相和液相化学平衡的破坏产生这种低压低频的衰减(图 1)。尽管这种机制已经在充填气体的岩浆模型中提出，但这是第一次在实验室观测的结果，而且这一新的衰减机制的发现将有助于对人工地震和天然地震频带范围内饱和流体影响的解译。

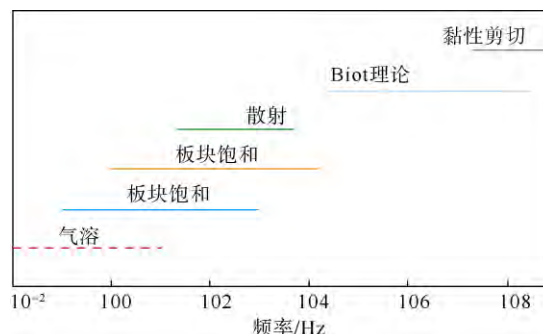


图 1 不同频率范围内的衰减机制(据文献[15])

Fig.1 Attenuation mechanisms at different frequency ranges

1.3 六分量矢量波场

物体在笛卡尔空间坐标系中具有六个自由度，即沿 x 、 y 、 z 三个正交坐标轴方向的移动自由度和

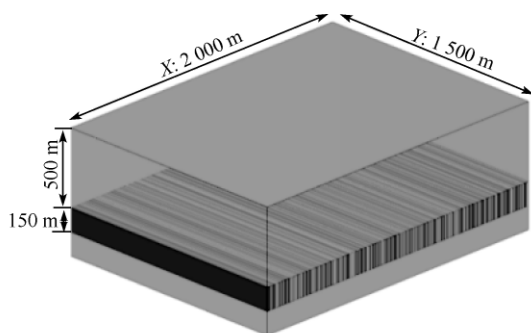
围绕这三个坐标轴的转动自由度。目前的多分量检波器,只记录了垂直和水平分量地震数据,即只记录了三个正交坐标轴方向的线性运动自由度,而没有采集转动自由度分量,使得记录的地震波场信息不够全面,完整的矢量波场信息缺失,影响后续的数据处理。在第 83 届 SEG 年会上,Stanford 大学 SEP(Stanford Exploration Project)研究组通过海底散射体模型的数值模拟,介绍了增加 3 个旋转分量对于记录矢量波场的意义^[16];本届年会上,他们进一步展现了六分量检波器用于波场分离与去噪的潜力。Ohad Barak 等^[17]通过陆上 6 分量数据采集实验和后续数据分析,论述了折射波与面波在 6 分量地震数据(X, Y, Z , Yaw(沿 Y 轴旋转), Roll(沿 Z 轴旋转)和 Pitch(沿 X 轴旋转))上的不同极化特征,展现了 6 分量地震数据在去除面波和折射波方面的潜在优势。

1.4 三维正交裂缝模型的地震响应

对于空间均匀等间隔分布的单组裂缝,研究表明通过等效各向异性介质理论可以实现裂缝密度、排列方向和柔度的反演,包括基于 P 波方位各向异性的方法和横波分裂分析。但对于两组或多组裂缝,或裂缝非等间距排列时,尚没有研究表明现有的等效介质理论是否能够描述这种裂缝介质。

休斯顿大学(University of Houston)与曼彻斯特技术研究所(Massachusetts Institute of Technology)的 Zheng 等^[18]通过两组正交裂缝模型,介绍了利用双聚焦高斯束方法^[19-20]可以实现两组裂缝密度、排列方向和柔度的准确反演。

图 2 给出了不等距的裂缝层模型,数值模拟发现:不等距的裂缝产生了强烈的散射,即使提高频率也会出现类似的现象,而等间距裂缝就不会出现这种现象;且不等距裂缝层的散射效应具有频率依赖性(图 3),说明双聚焦高斯束方法有可能对于这种变尺度的裂缝串具有一定的应用潜力。



($V_p=3\ 000\ \text{m/s}$; $V_s=1\ 700\ \text{m/s}$; $\rho=2.2\ \text{g/cm}^3$; 柔度= $10^{-10}\ \text{m/Pa}$;
裂缝间距 a 随机变化,服从幂律分布: $D(a)\sim a^{-1}$, 其中 $a\in[5, 30]\ \text{m}$)

图 2 均匀弹性介质中的不等距裂缝

Fig.2 Fractures in a homogenous elastic medium

2 海洋四分量的综合利用

自从海洋四分量地震技术发展以来,如何综合利用水听器分量与海底 Z 分量压制干扰波、提高纵波的信噪比成为海洋多分量地震技术领域研究的热点之一。

2.1 鬼波的压制

CGG 公司的 Gordon Poole^[21]在其 2013 年成果^[22]的基础上,针对炮点与检波点的鬼波压制,通过频率域三维最小平方线性 Randon 方程给出一个模型驱动的鬼波压制方法,并在北海拖缆数据的测试中获得了较好的应用效果(图 4)。该方法假设模型道的基准面模型与实际数据相同,且均是平的,利用不同深度的拖缆压力检波器通过最小二乘迭代求出模型道以达到去鬼波的目的。

CGG 公司的 Wang Ping^[23]则提出首先将数据转换到频率慢度域,通过 τ - ρ 和傅里叶反变换获得无鬼波的检波点数据,再结合 CGG 公司的 Peng Can^[24]提出的 Z 分量去除噪音方法,联合 P 、 Z 和 Y 分量去除鬼波。该算法克服了拖缆间距较大造成空间采样不足的问题,也不同于其它方法对上下行波分离的要求,能最大化地去除鬼波干扰;北海拖缆数据测试检测了算法的效果。

由于传统的垂直分量信号信噪比较低,噪声将严重降低 PZ 分量叠加方法的应用效果。此外,不同于 OBC/OBN 地震采集方法,拖缆多分量数据记录的上行波和下行波会出现相互干扰。因此,直接利用压力分量数据消除垂直分量鬼波的方式在拖缆数据上会出现错误。CGG 公司的 Peng Can 等^[25]提出了一种系统的利用压力分量和垂直分量数据去除噪音的方法,很好地解决了这一问题。

现有的双检叠加技术是在均匀介质假设下通过将常规检波器接收信号给定一个近似比例的调整,再与压力检波器进行叠加完成,当检波器埋置的介质横向速度变化较大、海底环境复杂、各向异性发育时,难以获得稳定、准确的调整因子,因而难以获得好的叠加结果。Saint Petersburg State 大学的 Dmitry Alexandrov 等^[26]给出一种互相关的优化算法来求取这个调整因子以适应介质的非均匀性,理论和实际陆地数据测试证明了该方法的有效性。通过较为理想化的数据来验证其算法的可行性,值得注意的是:由于海底并不是水平理想层,噪音对数据的干扰将严重限制这种方法的有效利用。

2.2 去除海底多次波

Statoil 的 Amundrov 等^[27]采用 Robertsson^[28]提出的波场注入技术,将多分量波场记录注入到有限

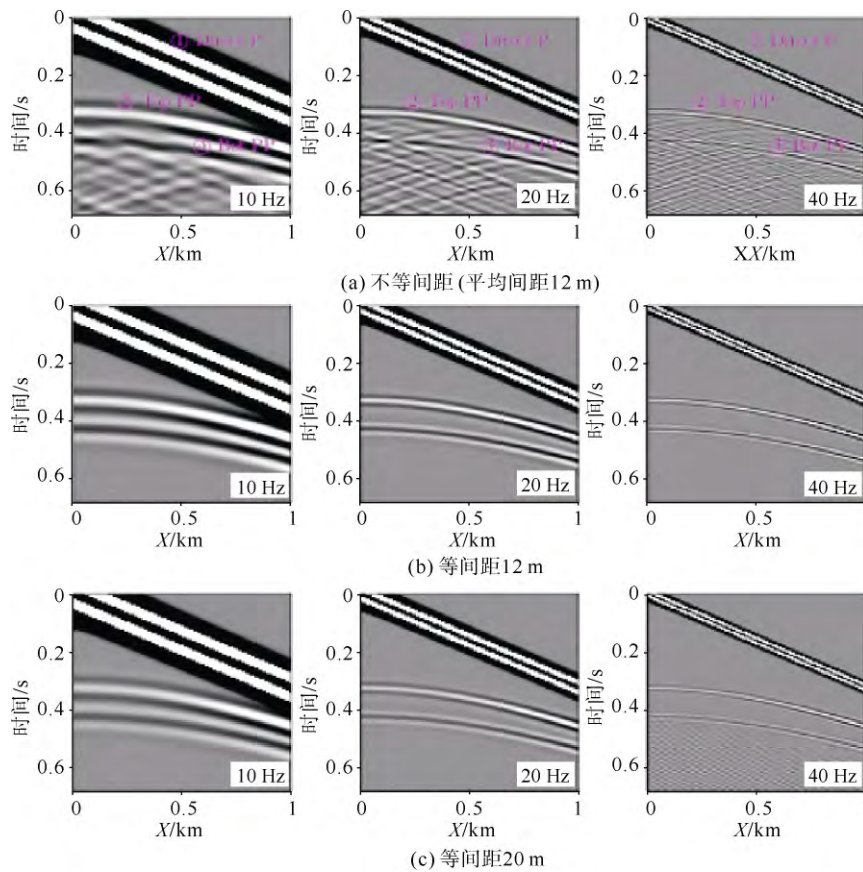


图 3 三种间距模型的模拟 P 波炮集
Fig.3 Numerically simulated pressure shot gathers

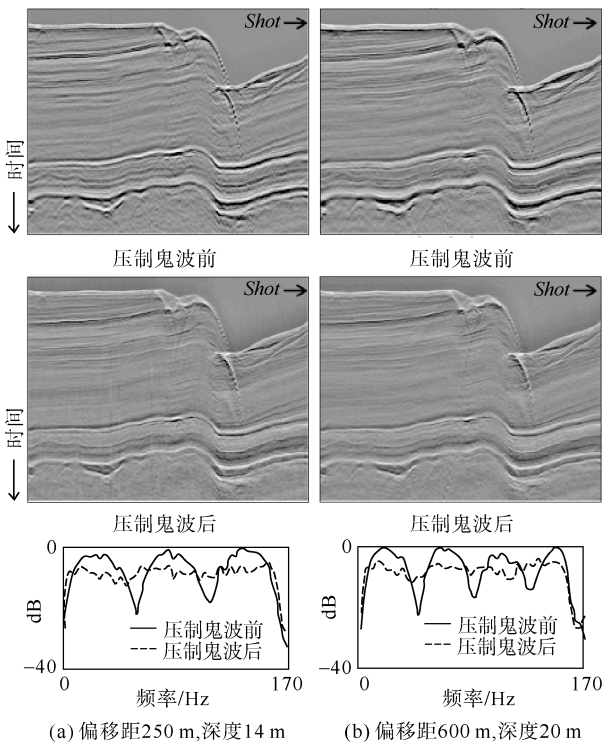


图 4 压制检波点鬼波前后频谱对比, 实线频谱线为压制鬼波前, 虚线为压制鬼波后

Fig.4 Comparison of frequency spectra before solid line and after dotted line receiver deghosting

差分(finite differences, FD)网格上, 实现对上/下行波的分离、直达波的剥离和多次波的去噪及数据的重构。此方法可以进一步改进, 通过模拟预测海底多次波、再减去多次波达到去噪的目的, 即运用 van Mnene 的 EBCs(确切边界条件, Exact Boundary Conditions)理论^[29], 通过多分量数据向模拟节点的注入, 实现多次波的模拟与压制^[30], 从而将多次波压制的反问题转换为正问题。该方法的理论模型数据测试效果很好。

2.3 压制径向波

4C 海底地震采集技术已经发展了几十年。通过分析 4 个分量的地震数据, 可以更加准确地进行储层预测。阿拉伯湾海域整体水深较浅, 海底主要为高速基岩, 因此海底反射波强。早期在这一地区的地震勘探研究, 主要集中在如何有效地利用 P 波数据(水检和陆检接收到的信号), 而转换波(PS, PS-S)信息很少得到研究和有效利用。由于纵横波场信息可以有效地识别孔隙流体的分布, 所以对 4C 地震数据中的 PS 和 PS-S 波的研究成为近年来阿拉伯海湾 OBC 地震数据分析的另一个重要领域。Abu Dhabi 石油研究中心的学者^[31-32]通过弹性波的数值

模拟分析了在海底具有强反射层时(图 5),将会产生 PS-S 型的上行波(国内一般称之为径向波)^[33],这种波能量强,将会在地震剖面上产生很强的干扰。Karl Berteussen 等^[31]通过研究基于测井数据约束的建模与波场模拟,证实了这种 Scholte 波确实存在;在抽取 CDP 道集、固定振幅补偿和切除的基础上,该文介绍了通过四个处理步骤可以将其提取出来,从而提高 4C 记录的信噪比。实际上这部分工作早在 1999 年就有介绍,不仅强反射的储层会产生这种转换横波,在基岩出露而又下伏一个低速层的海底环境中,也会产生这种复杂的强 Scholte 波,将有效反射掩盖。通过数值模拟和实际数据的分析,发现多次波、Scholte 波在不同分量上特征不同,值得以后进一步探索如何更好地利用这种差异。

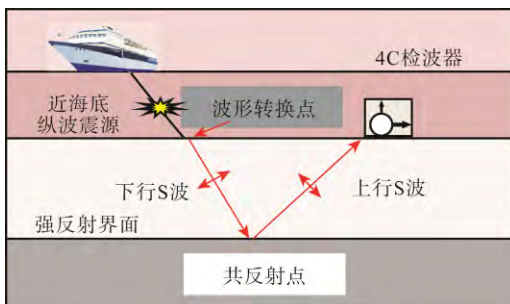


图 5 PS-S 型波产生的路径示意
Fig.5 Illustration of a PS-S wave-path

3 多波地震偏移成像

3.1 层位匹配

在多分量地震数据的偏移处理过程中,为方便 PP 与 PS 波的联合解释与反演,经常需要用到层位匹配技术对 PP 与 PS 波进行层位标定。美国科罗拉多矿院(Colorado School of Mines, CSM)的 CWP 研究组(Center for Wave Phenomena)提出了基于图像的动态变形技术 TIW 和 DIW 技术以来,获得了广泛的业界关注,取得了一些较好的应用。但在层位匹配的过程中,由于 PP 波与 PS 波子波和频谱特征的差异使得振幅与相位在匹配中将产生畸变,而这却是多波属性解释与反演主要依赖于地震反射动力学信息的应用所难以容忍的。Bansal and Matheny^[34]曾尝试使用层位匹配后的平稳子波滤波来消除 PS 波子波畸变;Gaiser 等^[35-36]在此基础上给出了时变子波滤波方法来消除子波的畸变。这些方法可以统称为整形滤波方法。

不同于上述滤波的思路,科罗拉多矿院的 Chris Graziano 等^[37]提出采用层位匹配前的 PS 波子波反褶积的方法来消除层位匹配过程中的子波畸变,该算法还可用于 PS 子波的估算。该文给出了子波反褶

积层位匹配算法的 PP 波与 PS 波对比效果图,同时对比了没有进行子波畸变校正的 DIW 方法和上文提到的子波整形滤波算法。虽然子波畸变校正后的 PP 波与 PS 波对比效果要好些,但该文提出的方法较之子波整形滤波法的效果改进并不明显。

上述方法对于非水平、地下构造复杂的介质存在较大的横向误差。为此,CGG 与 Petrobras 公司的 Luis D'Afonseca 等^[38]以巴西 Albacora 地区 OBC 数据处理为例,针对复杂构造的多波成像,使用了多项速度建模与更新的新技术,提高了 PS 成像精度。其主要特点是在层位匹配时使用了 S 波的射线路径近似,获得了相对可靠的横波速度,从而提高了 PS 波的成像效果。

在这一技术路线的基础上,针对巴西 Campos 盆地 Albacora 地区海洋多分量数据 OBC 或海底节点(OBN)PP 波和 PS 波的处理,CGG 和 Petrobras 公司的 Ole J Birkeland 等^[39]提出了一种利用层析成像层位匹配实现 PP 波和 PS 波偏移的 PSDM 流程。数据测试显示 S 波射线方法得到的 PP 和 PS 反射层不仅深度匹配很好,还提高了 PS 图像的质量。该方法缺点是在 PP 和 PS 反射层匹配中需要大量的人工判断和层位拾取,且要有准确的初始 P 波和 S 波速度模型。

3.2 叠前时间偏移

尽管在多波速度建模与层位匹配方面获得了诸多进展,但速度建模及其迭代更新,包括各向异性偏移时涉及各向异性参数建模还远未达到偏移算法所要求的精度。因此,在多波多分量的地震数据偏移方法研究中,较多的还是采用基于 Kirchhoff 积分的偏移,包括各向异性与各向同性。

例如:BGP 的 Yang Jun 等^[40]结合塔里木盆地碳酸盐岩储层 3D3C 地震勘探,采用了包括基于共检波点道集的互相关和地表一致性剩余静校正、非地表一致性剩余静校正、转换波多参数速度分析、各向异性 Kirchhoff 叠前时间偏移以及方位各向异性校正等关键技术,实现了串珠状储层的 PP 波与 PS 波成像;但偏移测试显示 PS 波对于串珠的成像效果不如 PP 波好。

TGS 公司的 Chuck Ursenbach 等^[41]介绍的新的、近似偏移权重 PS 波 Kirchhoff 叠前时间偏移法尚停留在各向同性介质假设的基础上,尽管该方法兼顾了偏移的精度和计算效率,PS 波偏移获得了与 PP 波偏移近似相同的精度。

多分量地震叠前时间偏移的研究与应用,如上所述,基本还是以各向同性和 VTI 为主,对于更复杂的各向异性介质(例如 VTI 与 HTI 叠加的介质),

ION 的 Jenner^[42]给出了纵波偏移的方法。为了提高 PS 波偏移成像质量, 中石化的 Huang ZhongYu 等^[43]则进一步给出了正交各向异性介质转换波 Kirchhoff 叠前时间偏移处理方法, 并通过同时考虑 VTI 和 HTI 各向异性参数对转换波走时方程的影响和各向异性速度分析, 验证了该方法的适用性; 中国西部某陆上三维转换波实际数据处理验证了方法的有效性(图 6)。

图 6a 中黑色矩形框里的成像效果很差, 说明该地区受到了比较强的 HTI 各向异性介质的影响; 图 6b 中黑色矩形框里箭头所指的同相轴仍然很不连续, 这是因为没能选取一个合适的慢波速度, 但是成像效果相对提高; 图 6c 成像效果最好, 是因为慢波速度场信息是通过全方位信息获得的。

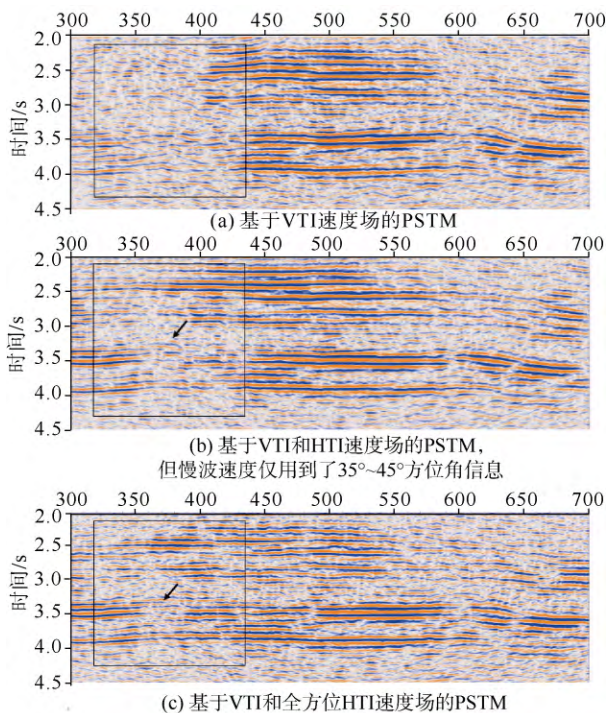


图 6 538 线转换波各向异性叠前时间偏移成像剖面对比
Fig.6 Portion of all azimuth 3D PS-wave PSTM sections in line-538

3.3 叠前深度偏移

由于 PP 波与 PS 波旅行时的差异, 叠前时间偏移不仅在成像条件上存在层位匹配的困难, 也给多波的对比解释造成了障碍。鉴于 P 波 Kirchhoff 积分叠前深度偏移在产业界所获得的巨大成功, 一个很自然的想法就是如何实现深度域的、适用于各向异性介质假设的 K 氏积分深度偏移。British Geological Survey(英国地调局)的 Hengchang Dai 等^[44]就提出一种简单可行的、基于模型的深度域 PP 和 PS 偏移方法, 即将时间域均方根速度模型转换为深度域速

度模型, 然后进行叠前深度偏移。目前已实现二维数据的深度域模型的建立和基于射线追踪与 Kirchhoff 积分叠前深度偏移算法, 并实现了 GUI 加速计算。

前几年逆时偏移在各向同性声波与弹性波领域获得越来越多的关注, 将逆时延拓的思路引进到各向异性介质的弹性波偏移中也是一种十分明显的研究趋势。弹性波逆时偏移成像条件可以分为两大类: 一类是炮点波场和重建检波点波场的位移分量直接做相关, 另一类是炮点波场和检波点波场的纯波型做相关, 后一种成像条件由于蕴含了地层界面的反射/转换系数信息而在地质解释中更具意义。

Los Alamos National Laboratory(Los Alamos 国家实验室)的 Ting Chen 等^[45]提出了一种新的弹性波逆时偏移成像条件, 其思路为: 首先在炮点波场正向延拓过程中, 利用振幅最大准则求出地下各成像点的炮点波场成像时间; 其次, 采用相似的算法求出各成像点的接收点波场成像时间; 然后, 只利用各成像点的炮、检波场成像时刻的波场值进行纵横波的互相关成像。理论上, 这种方法可以压制层间反射干扰, 但这种方法也存在明显缺陷, 主要表现在: a. 它假设地表接收到的反射或转换波均来源于最大入射能量的反射或转换, 且只有一个射线路径, 当模型复杂时这一假设显然不成立; b. 这种方法会严重降低偏移结果的保真性, 这与地震波偏移技术的发展方向相悖; c. 它对速度模型的依赖性较强, 速度误差会导致走时计算的误差, 进而引起成像结果产生更大误差。

Qizhen Du 等^[46]将声波逆时偏移中的角度域共成像点道集(Angle Domain Common Imaging-point Gather, 简称 ADCIG)提取思路推广至弹性波领域, 实现了弹性波逆时偏移中纵横波 ADCIG 的提取。具体方法为: 首先利用弹性波方程进行炮点波场的正向延拓和接收点波场的逆时延拓, 然后在波数域进行纵横波的分离, 最后利用角分解方法提取纵横波的 ADCIG, 模型数据的测试结果显示出较高的振幅保真性。但该方法仅能用于二维各向同性介质, 三维情况下横波是一个矢量, 此时需要将矢量合成为一个标量, 其波场分离算子无法应用。

针对转换波(PS 和 SP)成像的极性反转问题, 科罗拉多矿院 CWP 研究组的 Yuting Duan 等^[47]提出一种新的 3D 弹性波逆时偏移成像条件, 可以方便地得到极性校正后的转换波偏移结果, 计算成本低且鲁棒性强。

4 转换波静校正

鉴于折射波在 P 波静校正中的成熟应用，一个很自然的想法就是将之延续到 PS 波的静校正处理中。中国石油大学的 Xiao Wu 等^[48]将黏弹性波动方程正演用于模拟折射波在近地表的传播，通过 PP 波与 PS 波的折射初至拾取，在获得 P 波折射静校正量的基础上，迭代算出 PS 波的折射校正量。文中波场模拟虽然使用的是有限差分的粘弹性模拟，但并未讨论粘弹性对折射波的影响；而且文中理论模型的设置只讨论了地形起伏，而未考虑浅层介质的横向非均匀性。由于 PS 波的折射初至淹没在 PP 波折射等之后，通过折射波初至拾取的方法试图解决复杂地区的转换波静校正问题仍面临很大挑战。

当近地表速度与下伏浅层介质速度接近时，射线将不会近似垂直出射地表，造成基于地表一致性假设的静校正方法存在很大的误差。为求取地表横向速度变化地区的转换波静校正问题，卡尔加里大学 CREWES 研究组的 Raul Cova 等^[49]提出利用径向-道域(Radial Trace, R-T)变换^[50-51]将地表一致性假设改为射线-路径一致性假设，即假设射线路径近似固定不变，应用走时干涉来获取近地表速度不均匀引起的走时延迟。在检波点道集中，利用无静校正量的模型道与径向-道域不同接收点地震道的互相关重建近地表速度结构，然后再进行反 R-T 变换获得无校正量的地震数据。作者展示了 R-T 域干涉法处理非地表一致性 S 波静校正问题的稳健性，也给出了互相关函数引起的延迟时间是如何与近地表结构相联系的。例如对于浅层横波速度变化的模型，当采用地表一致性静校正方法时将产生下伏反射界面的成像假象，而该文所给出的方法则会获得真实的界面反射，如图 7 所示。

显然，从图 7 上的 PS 叠加图中可以看出：地表一致性方法没能完全消除同相轴的静校量，尤其是低速层存在大倾角的地方，浅层地堑构造的右侧没有很好地叠加出来，而且造成深部同相轴畸变；而 R-T 域射线路径一致性静校正方法则获得了较好的叠加效果。

5 多波反演

5.1 全波形反演

挪威科技大学 Espen Birger Raknes 等^[52]介绍了两种各向同性弹性假设条件下的三维时移多分量地震数据的全波形反演方法，并探讨了以时移地震数据差异为基础来估计开发动态对纵横波参数模型的影响，对两种参数模型反演的计算效率进行了探讨，

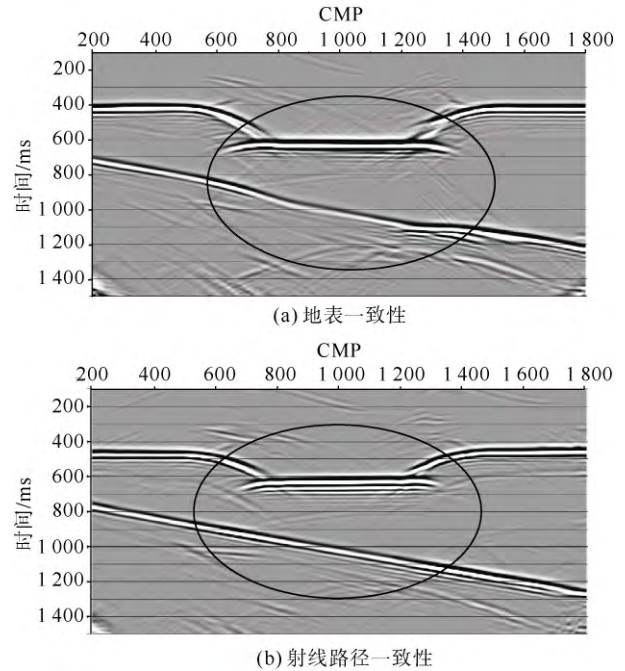


图 7 利用地表一致性(a)和射线路径一致性(b)静校正得到的 PS 叠加剖面

Fig.7 Stacked PS sections using surface-consistent (a) and raypath-consistent(b) static corrections

模型试算证明了方法的正确性。

5.2 流体因子反演

中国石油大学(华东)的 Chao Li 等^[53]在 Zhang 等^[54]推导的纵波反射系数近似式的基础上，引入 Russell 基于 Biot-Gassman 理论得到的流体因子表达式^[55]，给出了随入射角变化、与流体有关的弹性阻抗反演公式，如下所示：

$$EI(\theta_1) = EI_0 \left(\frac{F}{F_0}\right)^{a(\theta_1)} \left(\frac{\mu\rho}{\mu\rho_0}\right)^{b(\theta_1)} \quad (1)$$

其中：

$$a(\theta_1) = \frac{\gamma_{sat}^2 - \gamma_{dry}^2}{2\gamma_{sat}^2} \left[\left(\frac{1}{1-C}\right) - \frac{1}{b+1} \left(\frac{C}{1-C} - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} C\right) \right] \quad (2)$$

$$b(\theta_1) = \frac{\gamma_{dry}^2}{2\gamma_{sat}^2} \left[\left(\frac{1}{1-C}\right) - \frac{1}{b+1} \left(\frac{C}{1-C} - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} C\right) \right] - \frac{4}{\gamma_{sat}^2} C \quad (3)$$

且有 $\gamma_{sat}^2 = (V_s^2/V_p^2)$ ，

$$EI_0 = F_0^{((\gamma_{sat}^2 - \gamma_{dry}^2)/2\gamma_{sat}^2)} \mu\rho_0^{(\gamma_{dry}^2/2\gamma_{sat}^2)}$$

$$C = (1 + \Delta V_p/V_p) \sin^2 \theta_1$$

V_p 、 V_s 分别表示 P 波与 S 波速度，m/s； θ_1 表示入射角； F_0 和 $\mu\rho_0$ 分别是流体因子 F 与 $\mu\rho$ 测井值的均值； μ 为剪切模量， ρ 为密度，g/cm³； b 为待定常数。

通过在贝叶斯反演理论框架下求解最大后验概

率密度函数来构建弹性阻抗的反演目标函数,即在目标函数中加入高斯分布项、柯西分布项、平滑项以及控制点项,最后由迭代最小二乘法求解。

该方法不仅可以直接反演 Russell 流体因子,而且克服深层储层缺少远偏移距数据的困难,反演精度和稳定性得到提高。该方法应用在模拟数据时得到的剖面几乎与模型一致,与常规的弹性阻抗反演方法相比在准确度、稳定性等方面也显示出很大的优势,模型数据和实际数据应用表明了该方法的实用性和可靠性。

此外,还有些零散的文章,分别就三分量地震数据的应用、旋转分析横波裂缝预测、地表一致性振幅补偿、海洋四分量一致性校正、分布式光纤采集系统等展开,将不予介绍。

6 结 论

a. 对于岩石物理、介质各向异性及其理论波场特征的认识始终是该领域研究的热点问题,本届年会上的气溶低频衰减实验、页岩各向异性特征、多尺度裂缝的散射响应、6 分量波场所呈现的完整矢量场特征都是对于地震各向异性理论研究与多分量地震技术应用有可能产生重要影响的、有价值的论文。

b. 如何综合利用海洋四分量地震数据实现 PZ 分量的信噪比提高、鬼波与海底鸣震压制是本届年会上讨论最多的热点问题之一。尽管已有相当多的尝试与成功的实例,但对于海洋四分量地震数据中信息的发掘还远远不够,海洋多波勘探问题的解决还停留在相对简单的层次上。可以预见,随着越来越多信息的采集,尤其是 4 分量、6 分量矢量场信息的利用,将从根本上改变现有的关于波场特征认识与信号处理的方法技术。

c. 尽管多波的叠前深度偏研究已进行了很长时间,但逆时偏移的加入将更加丰富深度偏移的研究领域;预计以 K 氏积分为基础的叠前时间偏移将是未来的发展方向。

对于基于分布式光纤的地震采集技术具有动态、密集、海量、随机布点等优势,将引导地震数据的处理与解释走向大数据时代。

需要说明的是:对于多分量地震技术理解和认知的差异,造成了各论文介绍技术的水平参差不齐。长期从事此领域研究的单位或团队沿着地震各向异性的脉络在逐步深入研究,对于技术瓶颈问题的解决确实提出了很多有意义的方法和见解;而一些刚进入此领域的论文所展示的内容则处于低水平重复或感性认识的程度。

参考文献

- [1] 张永刚,王赞,王妙月. 目前多分量地震勘探中的几个关键问题[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 151-155.
ZHANG Yonggang, WANG Yun, WANG Miaoyue. Some key problems in the multi-component seismic exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(1): 151-155.
- [2] 赵波,王赞,芦俊. 多分量地震勘探技术新进展及关键问题探讨[J].石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 506-516.
ZHAO Bo, WANG Yun, LU Jun. Improvement and some key problems of the multi-component seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 506-516.
- [3] 黄中玉. 储层描述中的多分量地震技术[C]//石油地球物理技术新进展-第 75 届 SEG 年会论文概要, 2005: 87-96.
HUANG Zhongyu. The multi-component seismic technique in reservoir description[C]//Improvement of oil geophysical techniques: Expanded Abstract of the 75th SEG Annual Meeting, 2005: 87-96.
- [4] 黄中玉. 多分量地震资料解释应用[C]//油气地球物理技术新进展-第 76 届 SEG 年会论文概要, 2006: 162-171.
HUANG Zhongyu. Interpretation and application of the multi-component seismic data[C]//Improvement of oil geophysical techniques: Expanded Abstract of the 76th SEG Annual Meeting, 2006: 162-171.
- [5] 黄中玉. 多分量地震技术进展[C]//油气地球物理技术新进展-第 77 届 SEG 年会论文概要, 2007: 100-110.
HUANG Zhongyu. Development of the multi-component technique: [C]//Improvement of oil geophysical techniques: Expanded Abstract of the 77th SEG Annual Meeting, 2007: 100-110.
- [6] 余波,徐亦鸣. 多分量勘探技术[C]//油气地球物理技术新进展-第 78 届 SEG 年会论文概要, 2008: 294-310.
YU Bo, XU Yiming. The multi-component seismic technique Improvement of oil geophysical techniques[C]//Expanded Abstract of the 78th SEG Annual Meeting, 2008: 294-310.
- [7] 胡晓亚,王赞. 多分量地震技术新进展—SEG2013 年会多分量地震技术论文分析与评述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 391-400.
HU Xiaoya, WANG Yun. The new multi-component seismic technology progress-Analysis and commentary of thesis about multi-component seismic technology on 2013 SEG Annual Meeting[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 391-400.
- [8] PATRICK J G, ROBERT H T, KYLE T S. Characterization of VTI media with P-SV AVO attributes[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014: 1975-1979.
- [9] RUGER A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media[J]. Geophysical Monograph Series, 2001(10): 163-167.
- [10] RAMOS A, CASTAGNA J. Useful approximations for converted-wave AVO[J]. Geophysics, 2001, 66(6): 1721-1734.
- [11] SHARIF M M, REBERT H T. Seismic sensitivity to variations of rock properties in the productive zone of the Marcellus, WV[C]//

- Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1950–1954.
- [12] TISATO N , QUINTAL B , GRASSELLI G , et al. Seismic wave attenuation in fluid-saturated rock as result of gas dissolution[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1985–1990.
- [13] MADONNA C , TISATO N , BOUTAREAUD S , et al. A new laboratory system for the measurement of low frequency seismic attenuation[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010 , 2010 , 29(1) : 4453.
- [14] TISATO N , QUINTAL B. Measurements of seismic attenuation and transient fluid pressure in partially saturated Berea sandstone : Evidence of fluid flow on the mesoscopic scale[J]. Geophysical Journal International , 2013 , 195(1) : 342–351.
- [15] MAVKO G , JIZBA D. Estimating grain-scale fluid effects on velocity dispersion in rocks[J]. Geophysics , 2012 , 56(12) : 1940–1949.
- [16] OHAD B , ROBERT B , HERKENHOFF F , et al. Seven-component seismic data[C]//Expanded Abstract of the 83th SEG Annual Meeting , 2013 : 5151–5155.
- [17] OHAD B , JAISWAL P , DE RIDDER S , et al. Six-component seismic data acquired with geophones and rotation sensors wave-mode separation using 6C SVD[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1863–1867.
- [18] ZHENG Yingcai , FANG Xinding , MICHAEL C F , et al. Characterizing fracture networks for unconventional reservoirs using focusing seismic waves[C]//spatial resolution and interpretation : Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 5179–5183.
- [19] ZHENG Y , FANG X , FEHLER M. Seismic characterization of reservoirs with variable fracture spacing by double focusing Gaussian beams[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013 , 2013 : 2432–2438.
- [20] ZHENG Y , FANG X D , FEHLER M C , et al. Seismic characterization of fractured reservoirs by focusing gaussian beams[J]. Geophysics , 2013 , 78(4) : 23–28.
- [21] POOLE G. Wavefield separation using hydrophone and partial velocity components with arbitrary orientation[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1858–1862.
- [22] POOLE G. Pre-migration receiver de-ghosting and re-datuming for variable depth streamer data[C]//Expanded Abstract of the 83th SEG Annual Meeting , 2013 : 4216–4220.
- [23] WANG Ping , JIN Hongzheng , PENG C , et al. Joint hydrophone and accelerometer receiver deghosting using sparse Tau-P inversion[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1894–1898.
- [24] PENG C , HUANG R. Cooperative noise attenuation in a complex wavelet transform domain[C]//Expanded Abstract of the 76th EAGE Annual Meeting , 2014 : 512–516.
- [25] PENG Can , JIN Hongzheng , WANG Ping. Noise attenuation for multi-sensor streamer data via cooperative de-ghosting[C]// Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1878–1882.
- [26] ALEXANDROV D , BAKULIN A , LEGER P , et al. Dual-sensor summation with buried land sensors[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1929–1933.
- [27] AMUNDSEN L , ROBERTSSON J O A , VASMEL M , et al. Prediction of wavefields by injecting multicomponent seismic measurements into modeling[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1842–1847.
- [28] ROBERTSSON J O A , CHAPMAN C H. An efficient method for calculating finite-difference seismograms after model alterations[J]. Geophysics , 2002 , 65(3) : 907–918.
- [29] VAN MANEN D J , ROBERTSSON J O A , et al. Exact wave field simulation for finite-volume scattering problems[J]. the Journal of the Acoustical Society of America , 2007 , 122(4) : 115–175.
- [30] VASMEL M , ROBERTSSON J O A , AMUNDSEN L. A new solution to eliminate free surface related multiples in multicomponent streamer recordings[C]//Expanded Abstract of the 76th EAGE Annual Meeting , 2014.
- [31] BERTEUSSEN K , SUN Yuefeng , ZHANG Zhao , et al. Hunting S-waves using 4C seismic data in the Carbonate offshore UAE[C]// Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1883–1887.
- [32] Sun Yuefeng , BERTEUSSEN K. New opportunities of 4C ocean bottom seismic in shallow-water environment of the Arabian Gulf : Results from comparison of field data and full-waveform elastic modeling[C]//Expanded Abstract of the 79th SEG Annual Meeting , 2009 : 46–50.
- [33] YAO Chen , CHEN Xianguo , LEI Jun. Seismic synthetics study of 4 components for sea floor reflection[C]//Expanded Abstract of the 70th SEG Annual Meeting , 2000 : 804–807.
- [34] BANSAL R , MATHENEY M. Wavelet distortion correction due to domain conversion[J]. Geophysics , 2010 , 75(6) : 77–78.
- [35] GAISER J , VERM R , CHAVESTE A. Extending the high end of C-wave bandwidth to match P-wavelengths[C]//Expanded Abstract of the 81th SEG Annual Meeting , 2011 : 4334–4338.
- [36] GAISER J , VERM R , CHAVESTE A. Pseudo S-wave broadband response of C-waves after domain change[J]. the Leading Edge , 2013(32) : 50–62.
- [37] GRAZIANO C , HALE D. Wavelets and warping PS seismic images[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1848–1852.
- [38] D'AFONSECA L , KRISHNASAMY T , BIRKELAND O J , et al. Innovative PSDM processing of OBC data on albacora field[C]// Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1832–1836.
- [39] BIRKELAND O J , GUILLAUME P , KRISHNASAMY T , et al. Tomographic co-depthing of PP and PS horizons by S-ray approximation[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1837–1841.
- [40] YANG Jun , NING Bin , CHEN Yijin , et al. Converted-wave imaging technology and application to carbonate fractured-cavern bodies[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting , 2014 : 1924–1928.
- [41] URSENBACH C , CRAY P. Converted-wave prestack time mi-

- gration with a new approximate migration weight[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1919-1923.
- [42] JENNER E. Combining VTI and NTI anisotropy in prestack time migration workflow and data examples[J]. the Leading Edge, 2011(30) : 732-739.
- [43] HUANG Zhongyu, WANG Yujing. Pre-stack time migration for PS-wave data in orthorhombic symmetry media[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1909-1913.
- [44] DAI Hengchang, LI Xiangyang, XU Tianji, et al. A model-based approach for registration of PP and PS waves in the depth domain[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1960-1964.
- [45] CHEN Ting, HUANG Lianji. Elastic reverse-time migration with an excitation amplitude imaging condition[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1868-1872.
- [46] DU Qizhen, ZHANG Mingqiang, FANG Gang, et al. Relatively amplitude-preserved ADCIGs based on elastic RTM by modifying the initial condition as the boundary condition[C]// Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1888-1893.
- [47] DUAN Yuting, SAVA Paul. Converted-waves imaging condition for elastic reverse-time migration[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1904-1908.
- [48] WU Xiao, LIU Yang. Visco-elastic modeling of refractions and its application in converted wave static correction[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1945-1949.
- [49] COVA R, HENLEY D, INNANEN K A. Using ray-path domain interferometry to address non-stationary S-wave statics[C]// Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1970-1974.
- [50] CLAERBOUT J F, ROLL G. Radial Traces, Stanford Exploration Project Report[R], SEP-35, 1983.
- [51] HENLEY D C. More radial trace domain applications, CREWES Research Report[R], 2000.
- [52] RAKNES E B, AMTSEN B. 3D elastic time-lapse full waveform inversion using multi-component seismic data[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1939-1944.
- [53] LI Chao, YIN Xingyao, ZHANG Guangzhi, et al. Fluid elastic impedance inversion based on the incident-angle approximation[C]//Expanded Abstract of the 84th SEG Annual Meeting, 2014 : 1980-1984.
- [54] ZHANG G, ZHANE J, WANG Y, et al. AVO approximation and attribute extraction based on the incident angle[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(4) : 578-583.
- [55] RUSSELL B H, HEDLIN K, HILTERMAN F J, et al. Fluid-property discrimination with AVO : A Biot-Gassman perspective[J]. Geophysics, 2003, 68(1) : 29-39.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 95 页)

- [9] SORIANO A, SANCHEZ F J. Subsidence of railroad high embankments [C]//Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Amsterdam : Balkema, 1999 : 1885-1890.
- [10] CHARLES J A, SKINNER H D. Compressibility of foundation fills[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers : Geotechnical Engineering, 2001, 149(3) : 145-157.
- [11] CHARLES J A. Laboratory compression tests and the deformation of rockfill structures[C]//Advances in Rockfill Structures, Proceeding of NATO Advanced Science. London :Kluwer, 1990 : 53-72.
- [12] CHARLES J A, WATTS K S. The assessment of the collapse-potential of fills and its significance for building on fill[C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers : Geotechnical Engineering, 1996 : 15-28.
- [13] BURFORD D, CHARLES J A. Long term performance of houses built on opencast ironstone mining backfill at Corby[C]// Proceeding of 4th International Conference on Ground Movements and Structure. London : Pentech, 1991 : 54-67.
- [14] 黄润秋, 许强. 工程地质广义系统科学分析原理及应用[M]. 北京 : 地质出版社, 1997 : 96-97.
- [15] 赵望生, 龚文慈. 变形监测的现状方法综述与展望[J]. 大坝观测与土工测试, 1996, 12(3) : 15-18.
- ZHAO Wangsheng, GONG Wenci. Summarizing and forecasting for the situation and method of the deformation observation[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1996, 12(3) : 15-18.

(责任编辑 张宏)