

PP-PS 联合反演含气性预测方法及应用

王文争^{1,2}, 刘俊杰³, 乌锐⁴

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 胜利油田 地球物理勘探公司, 山东东营 257086; 3. 赛索尔技术服务公司, 北京 100004; 4. 思威瑞达技术服务公司, 北京 100004)

摘 要: 讨论了利用 PP 波和 PS 转换横波进行叠前联合反演的理论和实现方法, 结合某油田实际多波地震资料, 在叠前联合反演的基础上, 对深层火成岩气藏进行了含气性预测。经钻井资料验证, 根据联合反演资料预测的气藏结果与井资料吻合较好。实践证明, 纵横波叠前联合反演可以避免单纯使用纵波信息进行弹性反演而造成的岩石弹性参数的多解性, 提高气藏预测的准确性。

关键词: PP 纵波; PS 转换波; 联合反演; 油气预测; 纵横波速比

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2011)04-0516-05

纵波和转换横波在含气地层中有着各自不同的传播规律: 纵波在含气地层中传播时速度变小, 而转换横波具有与纵波不同的传播特征, 其传播速度基本不受地层含气的影响, 综合应用纵波和转换横波地震资料提高天然气藏描述的精度, 克服常规纵波阻抗反演的多解性问题。

基于稳定的 Zoeppritz 方程的 PP-PS 联合反演的方法是利用 PP 波和 PS 波叠前时间偏移道集, 通过 PP 波与 PS 波在时间和振幅两个方向上的标定, 使反演出的 v_p/v_s 保持一致性和唯一性。PP-PS 联合反演不以测井资料为输入, 仅仅利用 PP 波和 PS 波地震数据, 反演运算过程不需要测井资料约束, 在一定程度上可以避免常规测井约束波阻抗反演方法人为经验的影响。

反演的最终结果得到反映岩石和流体特征的六个弹性参数: v_p/v_s 、密度、纵波速度、横波速度、泊松比和流体因子。

PP-PS 联合反演含气性预测方法应用在 XS 火山岩天然气藏地区采集的二维三分量资料上。在 PP 波和 PS 波叠前时间偏移成像道集数据的基础上, 进行 PP-PS 联合反演。

1 PP-PS 联合反演原理

对于有限入射角为 θ 的纵波 (PP 波), 根据 Shuey 等的研究结果, 纵波反射系数可以由

$$R_p(\theta) = R_{pp} + G_{pp} \sin^2(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta v_p}{v_p} + \frac{\delta \rho}{\rho} \right] + \left(\frac{\delta v_p}{2v_p} - \frac{4}{\gamma^2} \frac{\delta v_s}{v_s} - \frac{2}{\gamma^2} \frac{\delta \rho}{\rho} \right) \sin^2 \theta, \quad (1)$$

确定, 式中, θ 为 PP 波入射角, γ 为 v_p/v_s 之比, ρ 为密度, R_{pp} 、 G_{pp} 分别代表 P 波的截距和梯度; 而式中未知变量包括 v_p 、 v_s 和 ρ , 为不定方程, 为了增强式 (1) 可解性, 一般 AVO 反演假设 v_p 和 v_s 满足线性关系

$$v_p = a \cdot v_s + b,$$

其中, a 和 b 为常数, 而 v_p 与密度 ρ 的关系满足

$$\lg(\rho) = c \cdot \lg(v_p) + d,$$

其中 c 和 d 亦为常数。由此可以看出, 常规 AVO 反演仅仅利用纵波资料通过计算纵波截距 R_{pp} 和纵波梯度 G_{pp} 来求取岩石弹性参数 v_p 、 v_s 和 ρ 的方法, 其结果会有多解性。

对于有限入射角为 θ 的转换横波 (PS 波), 转换横波反射系数可以由

$$R_{ps}(\theta) = G_{ps} \sin(\theta) = \left(-\frac{2}{\gamma} \frac{\delta v_s}{v_s} - \frac{2+\gamma}{2\gamma} \frac{\delta \rho}{\rho} \right) \sin \theta, \quad (2)$$

确定, 式中, G_{ps} 为转换波梯度, 通过联合式 (1) 和式 (2), 就建立了由 PP 波截距 R_{pp} 、PP 波梯度 G_{pp} 和 PS 转换波梯度 G_{ps} 表达的 v_p 、 v_s 的式 (3):

$$R_{pp} + G_{pp} \sin^2 \theta + \frac{\gamma}{2+\gamma} \left(1 - \frac{4 \sin^2 \theta}{\gamma^2} \right) G_{ps} = (1 + \sin^2 \theta) \frac{\delta v_p}{v_p} - \frac{2}{2+\gamma} \left(1 + \sin^2 \theta \frac{2\gamma+8}{\gamma^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\delta v_s}{v_s}. \quad (3)$$

其中, R_{pp} 、 G_{pp} 和 G_{ps} 可以由地震数据获得。

设 $\gamma = v_p/v_s$, 那么 γ 可以用 PP 波和 PS 波旅行时表达为

$$\gamma_t = \frac{2t_{ps}}{t_{pp}} - 1. \quad (4)$$

假设地层是由等时间差 Δt_p 组成的一系列离散层, 若第 n 层已知 γ , 欲求第 $n+1$ 层的 γ , 那么已知 PP 波的旅行时为 t_p , 而 PS 波的旅行时为 t_{ps} , 则反射时间的 γ 可表示为

$$\gamma_t^{n+1} = 2 \frac{t_{ps}^{n+1} - t_{ps}^n}{\Delta t_p} - 1. \quad (5)$$

已知 Δt_p 是 PP 波的走时差, t_{ps}^n, γ^{n+1} 是 $t_{ps}^n + 1$ 的函数。 γ 的下角标 t 指通过波至时间。根据地下稳定的反射系数界面, 引入由 PP 波和 PS 波振幅定义的 γ 关系式

$$\frac{\delta\gamma}{\gamma} = \frac{\delta v_p}{v_p} - \frac{\delta v_s}{v_s}. \quad (6)$$

对于各向同性的弹性介质只能有唯一的一个 γ 值, 因此给出两种条件下 γ 值的约束条件

$$\left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right) = \omega * \left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right), \quad (7)$$

式中, ω 为调谐地震子波在数据有限带宽之内, 反射系数是地震反射时间 t 得到的 γ 值与地震子波 (ω) 褶积。由于 PP 波和 PS 波的旅行时信息可以由地震数据得到, PP 波和 PS 波的振幅信息也可以从沿层的地震层位提取出来, 因此 γ 的求解的实现过程是: 根据 PP 和 PS 解释结果, 预设一个初始 γ 模型, 根据 PP 和 PS 模型的 PS 时间由式(5)求解反射时间 t ; 同时在给定模型的时窗内, 根据式(5)逐点计算反射振幅 a , 通过式(6)检查 a 是否与 t 吻合, 并迭代修正直到收敛。得到了 γ 值, 于是很容易求解出 v_p 和 v_s , 并进一步导出密度、流体因子和泊松比等弹性参数。

2 PP-PS 联合反演流程

转换波叠前联合反演处理的基本流程如图 1 所示, 其中比较重要的两个环节为初始 γ 模型的建立和参数试验。为了保证算法的稳健和运算效率, 引入了由 PP 和 PS 旅行时差定义的 v_p/v_s 关系式(3), 这个关系即为初始的模型。由式(3)可知, 初始 γ 模型的建立需要基于对 PP 和 PS 目的层位的高度认知, 模型的精度也依赖于 PP-PS 标定的精度, 利用偶极声波测井和三分量 VSP 资料建立比较准确的 PP-PS 标定关系。

为了保证反演运算的效率, 限定目的层的纵波

(PP) 的速度 v_p 和转换横波 (PS) 的速度 v_s 以及密度的变化范围, 能有效加快反演的运算速度。通常情况下, 密度参数的变化范围可以从密度测井资料中获得, 而根据纵、横波测井资料或三分量 VSP 资料, 可以计算出目的层的 γ 变化范围。如果没有上述资料, 通过 γ 标定对比工具, 可以给出目的层段的 γ 变化关系。

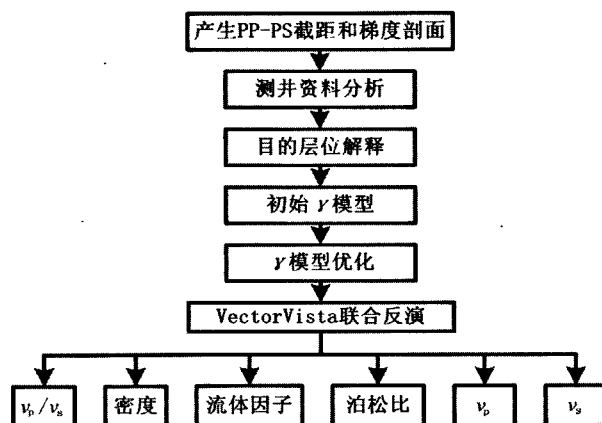


图1 PP-PS 联合反演流程

3 应用实例

研究区块位于 XX 气田, 勘探的主要目的层为白垩系下统营城组地层, 地层埋深约为 3 500 m, 营城组地层沉积时期, 基地断裂活动频繁, 火山活动强烈, 在断陷内形成了大范围分布的火成岩。研究表明, 火山岩地层非均质性强, 储集空间类型主要是气孔、溶蚀孔、粒间收缩缝、裂缝和微裂缝。火山岩地层与上覆地层之间具有强波阻抗界面, 在纵波剖面上为中强反射。火山岩储层内部, 不同喷发期次地层间波阻抗差不大, 在纵波剖面上表现为低频、断续弱反射或空白反射。由于火山多次喷发, 造成火山岩储层横向变化大, 非均质性强, 单一纵波资料难以描述气层空间上的变化规律, 因此, 在本区应用转换波勘探的目的之一就是利用纵、横波信息进行叠前联合反演, 探索直接识别含气储层及描述储层变化的可能性。采用的主要技术步骤如下。

(1) PP-PS 层位标定。转换波地震资料解释首先要进行波形识别和多分量层位标定。波形识别利用多分量的极化特性、速度传播规律、频谱、振幅差异、炮间距关系和各向异性特征。可靠的层位识别和标定需要结合地质、地震、岩石物理等各个方面的基础资料。利用传统的合成地震记录方法, 结合 VSP 资料对 XX1 井进行了纵波的层位标定, 针对转换波层位的标定方法, 则通过 PS 波合成地震记录, 在考虑多分量地震资料特点的基础上, 利用常用的地层对比原则, 如利用地质特征不变性, 地层层序不

变性等完成对 PS 波的层位标定和解释。

(2) 初始 γ 模型建立。通过测井资料分析, 根据 PP 波、PS 波合成地震记录, 确定目的层位 T4—T4I 段, 然后对比 PP 波和 PS 波合成记录, 明确 PP 和 PS 波的对极极性; 由测井资料分析来确定本区目的层段 γ 参数的变化范围 (1.6 ~ 1.8)。

根据横波测井资料, 依据转换波合成记录, 参考 PP 波的解译原则, 在 PS 梯度剖面上初步解释目的层位, 根据 PP 和 PS 的解释结果, 由式 (4) PP-PS 的旅行时差求取平均 γ , 并把 PS 剖面压缩到 PP 时间, 进行逐层对比标定。一般经过反复解释和压缩对比, 可以使得 PP 和 PS 在目的层段标定基本一致, 这样就获得了由 PP 和 PS 旅行时差所确定的初始 γ 模型 (图 2)。

(3) 联合反演及含气性预测。营城组地层, 总

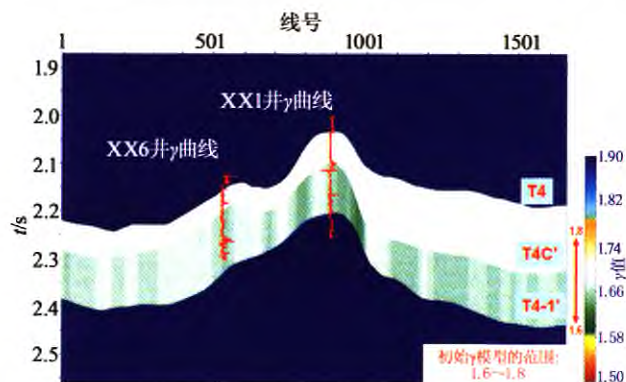


图 2 初始纵横波速度比 γ 模型

体上分为上下两个部分: 上部营城组四段沙砾岩和下部营城组一段火山岩, 两套目标储层之间发育一套或两套泥岩隔层。对 PP 波叠前时间偏移和 PS 波叠前时间偏移剖面对比显示, 工区内转换横波和纵波对于火山隆起构造的成像基本一致 (图 3)。

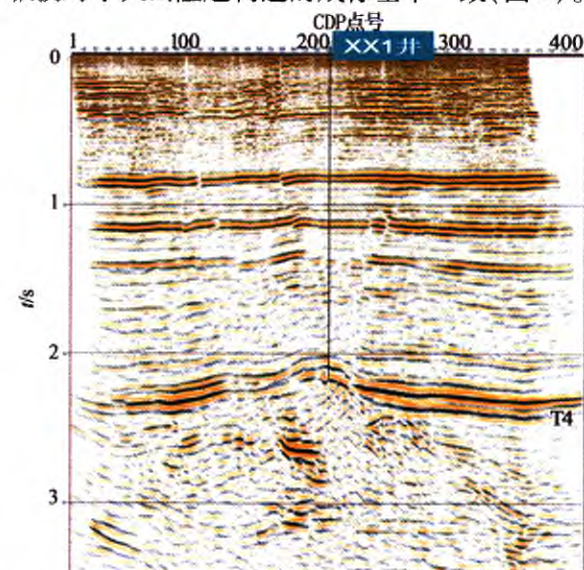
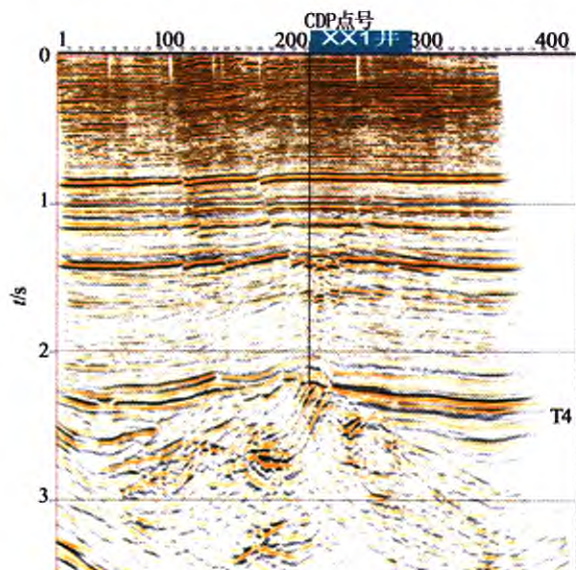


图 3 L1 线 PP (左) 和 PS (右) 叠前时间偏移剖面对比

纵波在目的层段的分辨率更高, 因此构造成像更清晰。但当火山岩储集层含有气时, 纵波速度变小, 反射系数变小, 反射波振幅会变弱; 而横波速度不变, 在转换横波剖面上反射波振幅无明显变化, 这显示出转换波资料对于流体的不敏感性, T4 层含气后, 振幅变化特征在 PP 波和 PS 波叠前时间偏移剖面上对应 XX1 井位置处更为明显 (图 4)。

通过对本区以往测井资料分析表明: 本区储层整体显示为低密度、低纵横波速度比的特征, 通过对联合反演得到的 γ 剖面 (图 5) 分析, 可以看出: 最上部蓝色的高值区的 γ 的值为 1.9 左右, 识别为干层或区域盖层, 中部红色条带区的 γ 的比值在 1.6 ~ 1.7, 识别为储集物性较差的储层, 下部棕红色区横向连续性较好, 厚度较大, 其 γ 的比值小于 1.6, 识

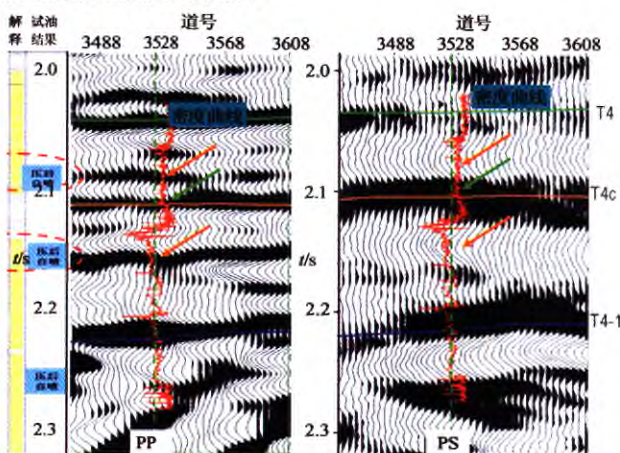


图 4 XX1 目的层处 PP 和 PS 地震剖面对比
别为储层物性较好的高产气层, 而中间发育的一套高 γ 比值的蓝色条带识别为泥岩隔层。

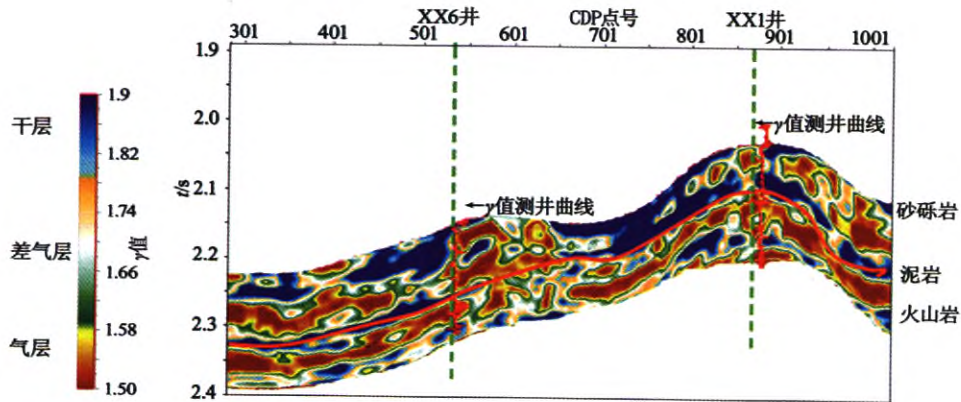


图5 目的层段纵横波速度比(γ 值)剖面与岩性的对应关系

对过 XX1 井的流体因子剖面与试油结果的对比分析(图6)表明:流体因子属性对于含气响应非常敏感,在 XX1 井处能有效地识别出目的层段内的 3 套气层和 2 套泥岩隔层,上、中、下 3 套气层与试油结果完全吻合。同样,对过 XX6 井的流体因子剖面与试油结果对比分析也能有效地识别出目的层段

内的第 1、3、4 气层以及两套泥岩隔层(图7),而第 2 层由于是气水同层且含水较多,联合反演结果与试气结果存在误差,但在横向上仍然可以追踪。

对过 XX1 和 XX6 井的流体因子属性剖面的对比分析显示,纵横波联合反演所揭示的储层属性变化与钻井结果吻合度比较高,其中与 XX1 井吻合度

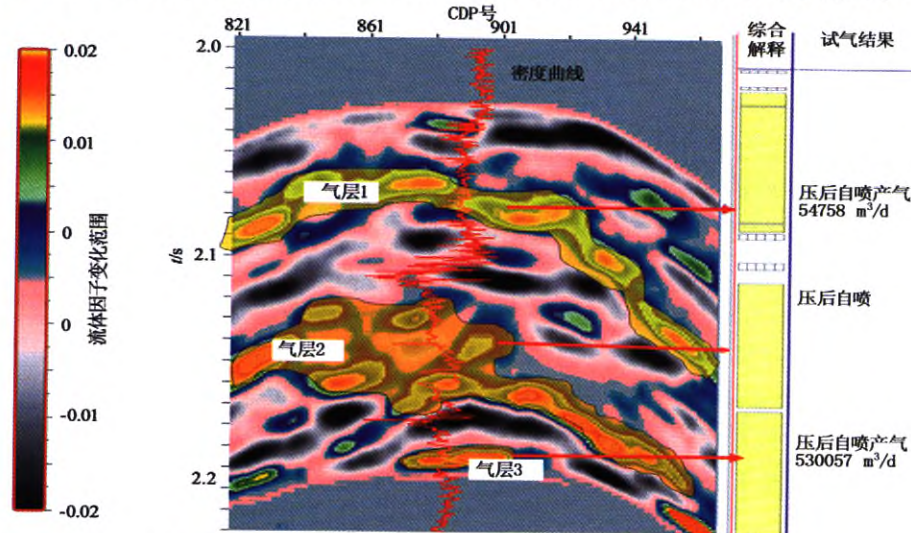


图6 过 XX1 井的流体因子剖面与试油结果的对应关系

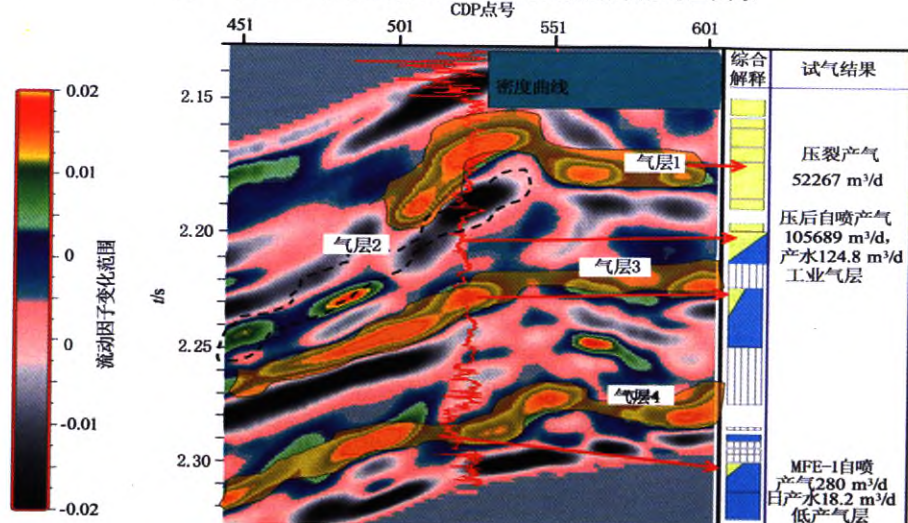


图7 XX6 井的流体因子剖面与试油结果的对应关系

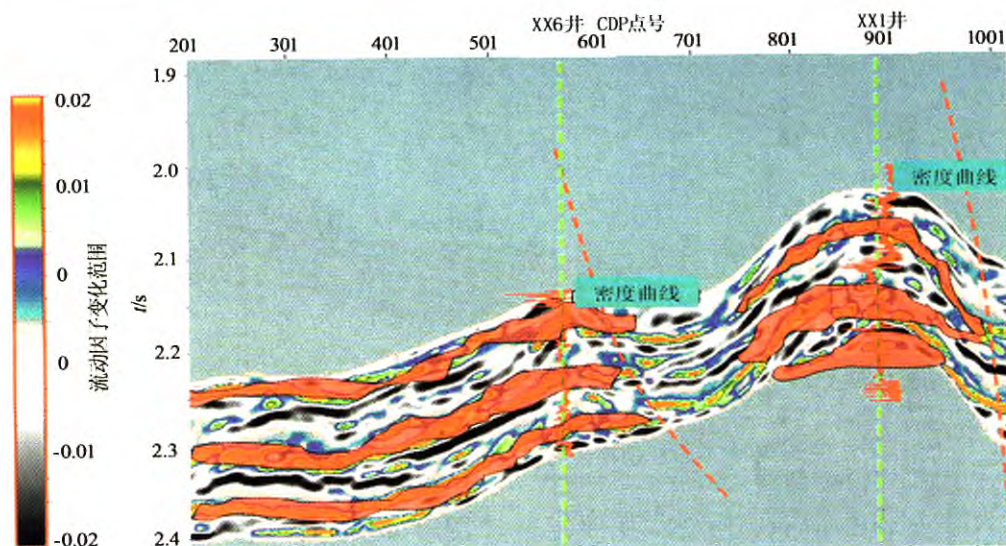


图8 过XX1井和XX6井流体因子剖面横向预测效果

达到100%，与XX6井的吻合度也达到75%。在此基础上对储层进行横向追踪，横向预测的结果基本上反映了气层在空间分布的变化规律(图8)。

4 结束语

纵横波叠前联合反演技术从PP波和PS波叠前CCP道集入手，通过构建稳定的Zoeppritz方程，反演结果稳定可靠；反演不依赖测井资料，避免了常规测井约束反演方法的人为因素影响。纵横波叠前联合反演采用模拟退火算法，并引入 γ 模型约束，提高了运行效率及反演结果的准确性。

叠前联合反演结果与井资料对比表明：联合反演结果与井资料的吻合度比较高。对联合反演输出的弹性参数分析显示，联合反演结果与XX1井目的层段的符合率达到100%，而与XX6井目的层段的

符合率也高于75%，证明了PP-PS联合反演在含气预测中的有效性。基于纵横波联合反演的油藏描述技术在气藏预测方面具有比纵波反演更高的精度。该技术是今后油气预测的一个发展方向。

参考文献：

- [1] 赵邦六. 多分量地震勘探理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 125-151.
- [2] 黄中玉, 赵金州. 纵波和转换波AVO联合反演技术[J]. 石油物探, 2004, 43(4): 319-322.
- [3] 石玉梅, 姚逢昌, 曹宏, 等. 多波多分量天然气勘探技术的进展[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(3): 172-177.
- [4] 伍志明, 李亚林, 巫芙蓉, 等. 多分量资料在碳酸盐岩裂缝性气藏气水识别中的应用研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 75-77.
- [5] 穆吉诺, 刘俊杰. 加速度数字检波器加速中国多波地震勘探的进程[J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊A): 10-12.
- [6] 王维佳, 徐亦鸣, 何晓冬. 纵波与转换波联合勘探[J]. 石油物探, 1983, 22(1): 84-94.

PP-PS JOINT INVERSION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION TO GAS RESERVOIR PREDICTION

WANG Wen-zheng^{1,2}, LIU Jun-jie³, WU Rui⁴

(1. School of Geophysics and Information Systems, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Geophysical Exploration Company of Shengli Oil Field, Dongying 257086, China; 3. Sercel (Beijing) Technological Service Co., Ltd., Beijing 100004, China; 4. CGGVeritas (Beijing) Technological Service Co., Ltd., Beijing 100004, China)

Abstract: This paper investigated the theories and methods of prestack joint inversion by utilizing PP and PS converted wave data sets. Actual multi-component seismic data from the oilfield were also used to delineate the deep buried volcanic gas reservoir based on the studied methods. Well log data show that the gas reservoir prediction results are consistent well with the well data, suggesting that prestack PP-PS joint inversion can avoid the multiple solutions of lithologic parameters caused by only using PP compression wave, and can improve the accuracy of gas reservoir prediction.

Key words: PP compression wave; PP converted wave; joint inversion; gas prediction

作者简介: 王文争(1969-),男,高级工程师,现为中国地质大学(北京)在读博士研究生,研究方向:多波多分量地震资料采集与处理技术应用,公开发表学术论文数篇。