

张广智, 杜炳毅, 李海山等. 2014. 页岩气储层纵横波叠前联合反演方法. 地球物理学报, 57(12): 4141-4149, doi: 10. 6038/cjg20141225.

Zhang G Z, Du B Y, Li H S, et al. 2014. The method of joint pre-stack inversion of PP and P-SV waves in shale gas reservoirs. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(12): 4141-4149, doi: 10. 6038/cjg20141225.

页岩气储层纵横波叠前联合反演方法

张广智¹, 杜炳毅^{2*}, 李海山², 陈怀震¹, 李振振¹, 印兴耀¹

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020

摘要 杨氏模量与密度乘积($E\rho$)能够突显页岩气储层的异常特征,泊松比能够指示储层的含流体性.与常规叠前弹性参数反演相比,基于 $E\rho$ 、泊松比和密度的叠前纵横波联合反演可以获得更加精确的弹性参数,为页岩气储层识别和流体预测提供可靠的依据.首先,推导了基于 $E\rho$ 、泊松比和密度的纵波和转换波反射系数近似方程,利用典型模型对新推导的反射系数方程做精度分析,当入射角小于 30° 时,新推导的反射系数公式具有较高的精度;其次,充分利用纵波和转换波的信息,在贝叶斯的框架下,建立叠前纵横波联合反演流程,进行 $E\rho$ 、泊松比和密度的直接反演,避免了间接反演带来的累积误差;最后,利用实际工区井模型数据进行算法测试,结果表明,该反演方法所获得的 $E\rho$ 、泊松比和密度的估计值与真实值吻合较好,满足精细地震反演的精度要求.

关键词 叠前联合反演;页岩气储层;贝叶斯理论;杨氏模量;泊松比

doi: 10. 6038/cjg20141225

中图分类号 P631

收稿日期 2014-01-02, 2014-05-13 收修定稿

The method of joint pre-stack inversion of PP and P-SV waves in shale gas reservoirs

ZHANG Guang-Zhi¹, DU Bing-Yi^{2*}, LI Hai-Shan², CHEN Huai-Zhen¹, LI Zhen-Zhen¹, YIN Xing-Yao¹

1 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

2 Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Petrochina, Lanzhou 730020, China

Abstract The product of Young's modulus and density can highlight abnormal characteristic of shale gas reservoirs. Poisson ratio can indicate fluid property. Compared with conventional pre-stack elastic parameter inversion, pre-stack joint inversion based on the product of Young's modulus and density, Poisson ratio and density can achieve more accurate elastic parameters, and provide reliable geophysical basis for shale gas reservoir identification and fluid prediction. First, this paper deduces PP wave and P-SV wave approximate reflection coefficient (RC) based on the product of Young's modulus and density, Poisson ratio and density. And it uses the typical model to test accuracy of newly derived RC equation. It shows that the new RC equation has a high precision when the incident angle is less than 30 degree. Then, this work constructs pre-stack joint inversion workflow under the framework of Bayes theorem to invert the product of Young's modulus and density, Poisson ratio and density directly, considering PP and PS wave information. And it avoids error accumulation from indirect inversion. Finally, this study tests the method using a

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB228604, 2014CB239201);国家油气重大专项(2011ZX05014-001-010HZ, 2011ZX05014-001-006-XY570);中国石油大学(华东)自主创新科研计划项目(13CX06019A);中国石化地球物理重点实验室开放研究基金联合资助.

作者简介 张广智,男,1971年生,教授,主要从事地震岩石物理、储层预测和流体识别方面的研究. E-mail: zhanggz@upc.edu.cn

*** 通讯作者** 杜炳毅,男,硕士,助理工程师,主要从事叠前地震反演方面的研究工作. E-mail: dubingyi2011@petrochina.com.cn

well model of a real project. The results indicate that the inverted product of Young's modulus and density, Poisson ratio and density of joint pre-stack inversion can fit very well with the original curves and can meet the accuracy of subtle seismic inversion.

Keywords Pre-stack joint inversion; Shale gas reservoir; Bayes theorem; Young's modulus; Poisson ratio

1 引言

随着我国对能源的需求越来越大,人们将油气勘探的重点从常规油气逐渐向非常规油气勘探转变,页岩气作为重要的非常规能源之一,是常规天然气的潜在替代能源,也是清洁环保能源(孙赞东等, 2011),越来越受到广大地球物理勘探者重视.近年来,广大学者对页岩气的储层特征及岩石物理特性等方面做了大量的研究,Ritesh等(2013)对页岩气的岩性和脆性做了定量的研究,认为杨氏模量能够指示页岩气储层的脆性特征,但是针对无法准确获取密度的问题, $E\rho$ 可以作为较好的页岩指示剂;Chopra等(2012)考虑到页岩气的有机质类型及有机碳含量对纵、横波速度、密度以及各向异性参数的影响,分别从地震数据和测井数据出发建立了页岩气储层特征识别的工作流程.

叠前 AVO 反演的理论基础是 Zoeppritz 方程,但是由于该方程形式比较复杂,不方便利用,因此不同的学者对其做近似处理. Aki 和 Richards(1980)将反射系数表示为纵波速度、横波速度和密度的关系式,为后来的 AVO 反演提供了理论依据.宗兆云等(2011, 2012)将纵波反射系数分别表示为纵、横波模量和杨氏模量、泊松比的表示式,为直接反演有效的弹性参数提供了可能. Downton 等(2001)在地质信息、测井资料和岩石物理的约束下,利用贝叶斯理论实现非线性 AVO 三参数反演,进而获得稳定的弹性参数估计值. Arild 和 More (2003)提出了贝叶斯 AVO 的反演方法,通过建立目标函数来获取纵波速度、横波速度和密度的最大后验概率分布,实际资料的反演结果与测井资料匹配程度很好,但具有较高的不确定性. 还有一些学者也对此做了相关研究,如陈建江和印兴耀(2007)提出基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演. 张广智等(2011a, 2011b)利用 MCMC(Markov Chain Monte Carlo)算法实现了对地震储层参数的反演. 黄捍东等(2011)将贝叶斯理论应用到薄储层的反演与识别中.

很多学者开展了纵横波联合反演方法研究,充分考虑转换波(P-SV波)所携带的地下地质信息, Larsen(1999)利用纵横波叠前地震信息进行同步反演获得可靠的纵波阻抗和横波阻抗. Helene (2006)使用最小二乘的估计算法同时求解 PP 波和 PS 波线性近似,进行 PP 波和 PS 波联合反演,结合两个独立的分量(PP 和 PS 地震数据)可以获得比较稳健的参数估计结果. 陈天胜等(2006)提出一种基于方向加速度最优化方法扫描纵、横波平均速度比值,进一步提高纵横波联合反演的精度. Hu 等(2011)将贝叶斯理论运用到纵横波联合反演上,在稳定正态分布的假设和协方差矩阵求取的基础上,提高联合反演的精度. Chen 等(2013)利用分层的贝叶斯模型联立纵波和转换波地震数据反演储层参数.

本文推导了基于 $E\rho$ 、泊松比和密度的纵波和转换波反射系数近似方程,并进行精度分析. 在此基础上,引入贝叶斯理论,充分利用纵波和转换波的信息,建立适合页岩气储层预测和流体识别的纵横波叠前联合反演流程,从而精确地反演出能够表示页岩气储层的 $E\rho$ 、泊松比和密度. 最后,利用某工区的实际井资料模型,在纵波和转换波角度道集资料中加入信噪比为 3 的随机噪声,对该反演方法进行模型测试. 结果表明, $E\rho$ 、泊松比以及密度的反演精度较高,能够指示页岩气储层的位置以及储层的含流体性,为页岩气储层预测和流体识别提供有利证据.

2 方法原理

杨氏模量是表示岩石抗压缩能力的量,表征了岩石的岩性特征,密度也能显示储层的岩性特征,而 $E\rho$ 的乘积能够突显出储层的异常特征(Sharma and Chopra, 2013),泊松比是横向应变与纵向应变比值的绝对值,与储层中流体的性质有关,可以作为页岩气储层的脆性指示剂. 因此,利用纵横波叠前联合反演获取高精度的 $E\rho$ 和泊松比,可以解决页岩气储层特征和流体性质等问题.

2.1 基于 $E\rho$ 、泊松比和密度近似反射系数的推导

纵横波 AVO 联合反演的理论基础是 Zoeppritz 方

程. 纵波入射到弹性界面, 产生反射纵波、反射横波、透射纵波和透射横波, 根据应力连续和位移连续的边界条件来求解波动方程, 可以计算出纵波和转换波的反射系数和透射系数, 由于该方程非常复杂, 不便于应用. 在界面两侧弹性系数变化不大的假设条件下, 对 Zoeppritz 方程做一阶近似得到固-固分界面上的 PP 波和 PS 波反射系数方程(Aki and Richards, 1980):

$$R_{PP}(\theta) = \frac{1}{2}(1 - 4k^2 \sin^2 \theta) \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4k^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta V_S}{V_S}, \quad (1)$$

$$R_{PS}(\theta, \varphi) = \tan \varphi (2k \sin^2 \theta - 2 \cos \theta \cos \varphi) \frac{\Delta V_S}{V_S} - \frac{\tan \varphi}{2k} (1 - 2k^2 \sin^2 \theta + 2k \cos \theta \cos \varphi) \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}, \quad (2)$$

其中: θ 和 φ 分别是纵波的入射角和转换波的反射角, $k = \frac{V_S}{V_P}$ 为横纵波速度比值, $\frac{\Delta V_P}{V_P}$ 、 $\frac{\Delta V_S}{V_S}$ 和 $\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}$ 分别是纵波速度、横波速度及密度反射系数.

纵波模量 M 反射系数、横波模量 μ 反射系数与纵波速度反射系数、横波速度反射系数以及密度反射系数之间存在如下关系(宗兆云等, 2011):

$$\frac{\Delta M}{M} = 2 \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}},$$

$$\frac{\Delta \mu}{\bar{\mu}} = 2 \frac{\Delta V_S}{V_S} + \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}.$$

将纵横波模量代入(1)式推导了基于纵波模量和横波模量以及密度表示的纵波反射系数近似方程(宗兆云等, 2011):

$$R_{PP}(\theta) = \left(\frac{1}{4} \sec^2 \theta - 2k^2 \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta E}{E} - \left[\left(\frac{1}{4} \sec^2 \theta - 2k^2 \sin^2 \theta \right) \frac{\sigma}{1 + \sigma} - \frac{1}{4} \sec^2 \theta \frac{\sigma}{(2\sigma - 1)(\sigma - 1)} \right] \frac{\Delta \sigma}{\bar{\sigma}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}. \quad (7)$$

$$R_{PS}(\theta, \varphi) = \tan \varphi (k \sin^2 \theta - \cos \theta \cos \varphi) \frac{\Delta E}{E} - \tan \varphi (k \sin^2 \theta - \cos \theta \cos \varphi) \frac{\sigma}{1 + \sigma} \frac{\Delta \sigma}{\bar{\sigma}} - \frac{\tan \varphi}{2k} \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}. \quad (8)$$

为了消除公式中所包含的泊松比, 根据泊松比和横纵波速度比的关系式,

$$\sigma = \frac{1 - 2k^2}{2(1 - k^2)},$$

将其代入式(7)中, 得到纵波反射系数随杨氏模量反射系数、泊松比反射系数和密度反射系数的变化关系式(宗兆云等, 2012)

$$R_{PP}(\theta) = \left(\frac{1}{4} \sec^2 \theta - 2k^2 \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta E}{E} + \left[\frac{1}{4} \sec^2 \theta \frac{(2k^2 - 3)(2k^2 - 1)^2}{k^2(4k^2 - 3)} + 2k^2 \sin^2 \theta \frac{1 - 2k^2}{3 - 4k^2} \right] \frac{\Delta \sigma}{\bar{\sigma}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}. \quad (9)$$

$$R_{PP}(\theta) = \frac{1}{4} \sec^2 \theta \frac{\Delta M}{M} - 2k^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta \mu}{\bar{\mu}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}. \quad (3)$$

根据上述推导思想, 将纵横波模量代入(2)式中, 可以得到基于纵波模量和横波模量以及密度表示的转换波反射系数近似公式

$$R_{PS}(\theta, \varphi) = \tan \varphi (k \sin^2 \theta - \cos \theta \cos \varphi) \frac{\Delta \mu}{\bar{\mu}} - \frac{\tan \varphi}{2k} \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}}. \quad (4)$$

在完全弹性各向同性介质中, 杨氏模量以及泊松比与纵波模量、横波模量存在以下的关系:

$$M = E \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)},$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \sigma)}.$$

纵波模量反射系数、横波模量反射系数与纵波速度反射系数、横波速度反射系数以及密度反射系数之间存在如下关系(宗兆云等, 2011).

进一步推导出纵波模量反射系数与杨氏模量反射系数、泊松比反射系数的关系表达式

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta E}{E} + \left[\frac{\sigma}{(2\sigma - 1)(\sigma - 1)} - \frac{\sigma}{1 + \sigma} \right] \frac{\Delta \sigma}{\bar{\sigma}}. \quad (5)$$

同样可以推导出横波模量反射系数与杨氏模量反射系数和泊松比反射系数的关系

$$\frac{\Delta \mu}{\bar{\mu}} = \frac{\Delta E}{E} - \frac{\sigma}{1 + \sigma} \frac{\Delta \sigma}{\bar{\sigma}}. \quad (6)$$

把式(5)和式(6)代入方程(3),(4)中, 得到纵波反射系数和转换波反射系数随杨氏模量、泊松比和密度的变化关系式, 但是该近似公式中包含泊松比项.

代入式(8)中,得到转换波反射系数随杨氏模量反射系数、泊松比反射系数和密度反射系数的变化关系式

$$R_{PS}(\theta, \varphi) = \tan\varphi(k\sin^2\theta - \cos\theta\cos\varphi) \frac{\Delta E}{E} + \tan\varphi(k\sin^2\theta - \cos\theta\cos\varphi) \frac{2k^2 - 1}{3 - 4k^2} \frac{\Delta\sigma}{\bar{\sigma}} - \frac{\tan\varphi}{2k} \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}. \quad (10)$$

由于 $E\rho$ 能够更加明显地突出页岩气储层的异常,因此将 $\frac{\Delta(E\rho)}{(E\rho)} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta\rho}{\rho}$ 代入式(9)和式(10),得到

基于 $E\rho$ 、泊松比和密度的纵波近似系数和转换波近似系数

$$R_{PP}(\theta) = \left(\frac{1}{4}\sec^2\theta - 2k^2\sin^2\theta\right) \frac{\Delta(E\rho)}{(E\rho)} + \left[\frac{1}{4}\sec^2\theta \frac{(2k^2 - 3)(2k^2 - 1)^2}{k^2(4k^2 - 3)} + 2k^2\sin^2\theta \frac{1 - 2k^2}{3 - 4k^2}\right] \frac{\Delta\sigma}{\bar{\sigma}} + \left(\frac{1}{2} + 2k^2\sin^2\theta - \frac{1}{2}\sec^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}, \quad (11)$$

$$R_{PS}(\theta, \varphi) = \tan\varphi(k\sin^2\theta - \cos\theta\cos\varphi) \frac{\Delta(E\rho)}{(E\rho)} + \tan\varphi(k\sin^2\theta - \cos\theta\cos\varphi) \frac{2k^2 - 1}{3 - 4k^2} \frac{\Delta\sigma}{\bar{\sigma}} - \frac{\tan\varphi}{2k} (1 + 2k^2\sin^2\theta - 2k\cos\theta\cos\varphi) \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}. \quad (12)$$

2.2 纵波和转换波反射系数近似精度分析

本文利用某页岩气储层工区中的实测井数据,选取含气页岩层(平均值)和围岩(平均值)之间的反射界面作为验证模型,表1为该模型的相关参数.对新推导的纵波和转换波反射系数进行精度分析.由 Zoeppritz 方程得到精确的反射系数、由 Aki_Richards 近似得到的反射系数公式和基于 $E\rho$ 、泊松比和密度近似的反射系数公式进行对比.图1是不同纵波反射系数和转换波反射系数的近似曲线对比图.

从图1可以看出,当入射角不超过 30° 时,基于 $E\rho$ 、泊松比和密度的纵波和转换波反射系数公式比 Aki_Richards 近似方程更加接近于 Zoeppritz 方程的精确解.因此,当入射角小于 30° 时,利用新推导的纵波和转换波近似方程,进行叠前纵横波联合反演直接估测 $E\rho$ 和泊松比会提高反演的精度.

表1 含气页岩储层模型参数

Table 1 Model parameters of shale gas reservoirs

地层	纵波速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	横波速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	纵横波 速度比
围岩	5039	2868	2645	0.26	1.76
含气页岩	3913	2269	2633	0.22	1.72
围岩	5039	2868	2645	0.26	1.76

2.3 基于 $E\rho$ 、泊松比和密度纵横波叠前联合反演

Buland 和 More(2003)提出了贝叶斯 AVO 的反演方法,在贝叶斯框架下,建立目标函数来获取 $E\rho$ 、泊松比和密度的最大后验概率分布.假设似然函数服从正态分布,由 $E\rho$ 、泊松比和密度组成参数也服从正态分布,进而求取弹性参数的最大后验分布.页岩气储层纵横波叠前联合反演流程如图2所示.

不同入射角度时,将式(11)和式(12)联立起来表示成矩阵的形式:

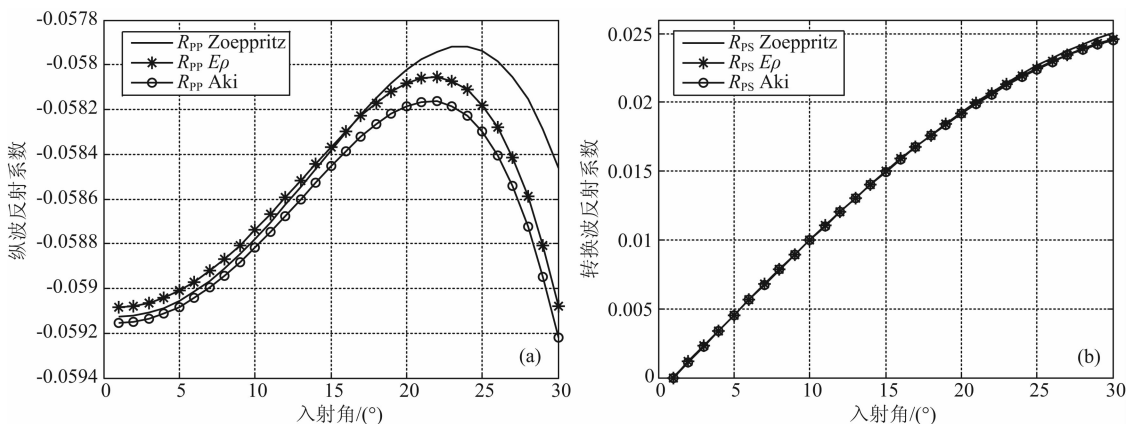


图1 不同近似反射系数曲线对比

(a)纵波反射系数; (b)转换波反射系数. 黑色实线是由 Zoeppritz 方程所得,黑色圈线是 Aki_Richards 近似公式所得,黑色星号线是基于 $E\rho$ 近似所得.

Fig. 1 Comparison of different approximate reflection coefficients

(a) PP wave; (b) PS wave. Black solid curves represent the exact Zoeppritz equation. Black circle curves represent Aki-Richards approximation. Black star curves represent approximation based on $E\rho$.

$$\begin{bmatrix} R_{PP}(\theta_1) \\ \vdots \\ R_{PP}(\theta_n) \\ R_{PS}(\theta_1, \varphi_1) \\ \vdots \\ R_{PS}(\theta_n, \varphi_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\theta_1) & B(\theta_1) & C(\theta_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A(\theta_n) & B(\theta_n) & C(\theta_n) \\ M(\theta_1, \varphi_1) & N(\theta_1, \varphi_1) & P(\theta_1, \varphi_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M(\theta_n, \varphi_n) & N(\theta_n, \varphi_n) & P(\theta_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta(E\rho)}{(E\rho)} \\ \frac{\Delta\sigma}{\bar{\sigma}} \\ \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} A(\theta_i) &= \frac{1}{4}\sec^2\theta_i - 2k^2\sin^2\theta_i, \\ B(\theta_i) &= \frac{1}{4}\sec^2\theta_i \frac{(2k^2-3)(2k^2-1)^2}{k^2(4k^2-3)} + 2k^2\sin^2\theta_i \frac{1-2k^2}{3-4k^2}, \\ C(\theta_i) &= \frac{1}{2} + 2k^2\sin^2\theta_i - \frac{1}{2}\sec^2\theta_i, \\ M(\theta_i, \varphi_i) &= \tan\varphi(k\sin^2\theta_i - \cos\theta_i\cos\varphi_i), \\ N(\theta_i, \varphi_i) &= \tan\varphi_i(k\sin^2\theta_i - \cos\theta_i\cos\varphi_i) \frac{2k^2-1}{3-4k^2}, \\ P(\theta_i, \varphi_i) &= -\frac{\tan\varphi_i}{2k}(1 + 2k^2\sin^2\theta_i - 2k\cos\theta_i\cos\varphi_i). \end{aligned}$$

令

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} R_{PP}(\theta_1) \\ \vdots \\ R_{PP}(\theta_n) \\ R_{PS}(\theta_1, \varphi_1) \\ \vdots \\ R_{PS}(\theta_n, \varphi_n) \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} A(\theta_1) & B(\theta_1) & C(\theta_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A(\theta_n) & B(\theta_n) & C(\theta_n) \\ M(\theta_1, \varphi_1) & N(\theta_1, \varphi_1) & P(\theta_1, \varphi_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M(\theta_n, \varphi_n) & N(\theta_n, \varphi_n) & P(\theta_n, \varphi_n) \end{bmatrix}, \mathbf{m} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta(E\rho)}{(E\rho)} \\ \frac{\Delta\sigma}{\bar{\sigma}} \\ \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} \end{bmatrix}.$$

可以简写为

$$\mathbf{d} = \mathbf{Gm}, \quad (14)$$

贝叶斯框架下,反演参数 \mathbf{m} 的后验概率分布与似然

函数以及先验概率分布存在如下关系:

$$p(\mathbf{m}|\mathbf{d}, \mathbf{I}) \propto p(\mathbf{d}|\mathbf{m}, \mathbf{I}) \cdot p(\mathbf{m}, \mathbf{I}), \quad (15)$$

其中: $p(\mathbf{m}|\mathbf{d}, \mathbf{I})$ 是反演参数的后验概率分布, $p(\mathbf{d}|\mathbf{m}, \mathbf{I})$ 是似然函数, $p(\mathbf{m}, \mathbf{I})$ 是先验密度函数. \mathbf{I} 为先验的地质信息.

叠前角度道集含有一定的噪声,即实际地震道和合成地震记录之间的残差,假设该残差是服从高斯分布的似然函数

$$p(\mathbf{d}|\mathbf{m}, \mathbf{I}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}\right)^{3N} \exp\left(-\frac{(\mathbf{Gm} - \mathbf{d})^T(\mathbf{Gm} - \mathbf{d})}{2\sigma_n^2}\right), \quad (16)$$

式中: σ_n 是噪声的方差.

假设模型参数也服从高斯分布,建立其先验概率密度函数:

$$p(\mathbf{m}, \mathbf{I}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m}\right)^{3N} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_m^2}\mathbf{m}^T\mathbf{m}\right], \quad (17)$$

式中: σ_m 是反演参数的方差.

根据式(15)可以得到待反演参数 \mathbf{m} 的后验概率分布为

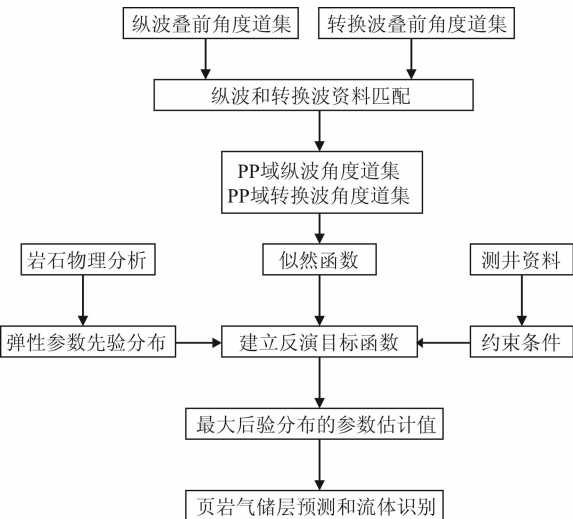


图2 页岩气纵横波叠前联合反演流程

Fig. 2 Workflow of joint pre-stack inversion for shale gas reservoirs

$$\begin{aligned}
 p(\mathbf{m} | \mathbf{d}, \mathbf{I}) &\propto p(\mathbf{d} | \mathbf{m}, \mathbf{I}) \cdot p(\mathbf{m}, \mathbf{I}) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left[-\frac{(\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})}{2\sigma_n^2}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m}\right] \\
 &\propto \exp\left[-\frac{(\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})}{2\sigma_n^2} - \frac{1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m}\right], \quad (18)
 \end{aligned}$$

其目标函数为

$$J(\mathbf{m}) = \frac{-(\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})}{2\sigma_n^2} - \frac{1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{C}_m^{-1} \mathbf{m}, \quad (19)$$

其中: \mathbf{C}_m 为反演参数的协方差矩阵. 求取目标函数 $J(\mathbf{m})$ 关于向量 \mathbf{m} 的偏导数, 并令其为零, 最终得其最优的目标参数估计值为

$$\mathbf{m} = \left(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \frac{\sigma_n^2}{Q} \mathbf{I}\right)^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d}, \quad (20)$$

式中:

$$Q_{ii} = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_1^2}, & 0 < i \leq N \\ \frac{1}{\sigma_2^2}, & N < i \leq 2N \\ \frac{1}{\sigma_3^2}, & 2N < i \leq 3N \end{cases}$$

其中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别是 E_ρ 、泊松比和密度的方差.

3 模型数据测试

为了验证该方法的有效性, 本研究采用某实际工

区的含页岩气储层的测井资料, 建立模型数据进行算法测试, 正演过程中, 采用 40Hz 的雷克子波合成叠前角度道集, 并且分别对纵波和转换波角度道集添加信噪比为 3 的随机噪声.

图 3 是该工区某口井的原始测井曲线, 图中阴影部分为主要的页岩气储集层. 图 4 是该井弹性参数交会分析图, 色标为 GR 曲线, 页岩气储层段测井解释为高 GR 异常值, 即图中暖色(红色或黄色)部分, 非储层段测井解释为低 GR 异常值, 即图中冷色(绿色或蓝色)部分. 图 4a 是杨氏模量与泊松比参数交会图, 图 4b 是 E_ρ 与泊松比交会图, 可以看出 E_ρ 与泊松比的交会能够清楚地区分页岩气储层和非储层, 而杨氏模量和泊松比的交会图区分效果较差. 图 5 是由该测井曲线正演得到的纵波叠前角度道集和转换波叠前角度道集(用 PP 波时间表示), 分别加入 SNR=3 的随机噪声. 初始模型为相应测井曲线的低频趋势, 如图 6 所示. 图 7 是叠前纵横波联合反演所估算的 E_ρ 、泊松比和密度与间接反演、真实值的对比结果.

从反演结果可以看出, 纵横波叠前联合反演的 E_ρ 、泊松比和密度的估测值与真实值吻合非常好,

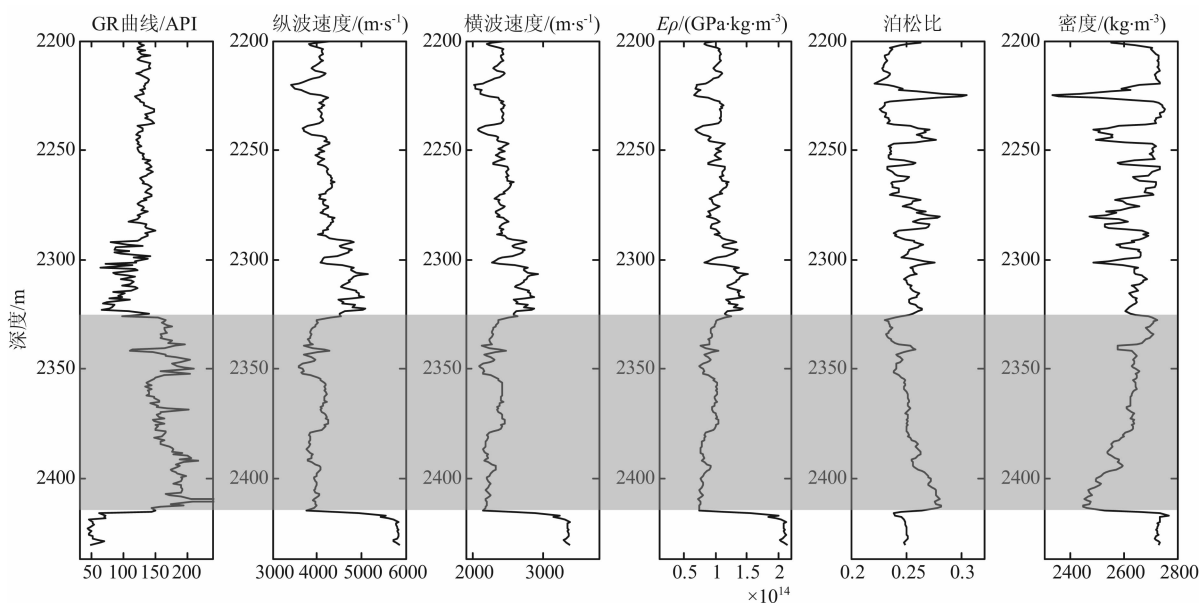


图 3 某工区原始测井曲线

阴影指示页岩储层所在的位置.

Fig. 3 Original curves of a well log in western China

Shade area is the shale gas reservoir.

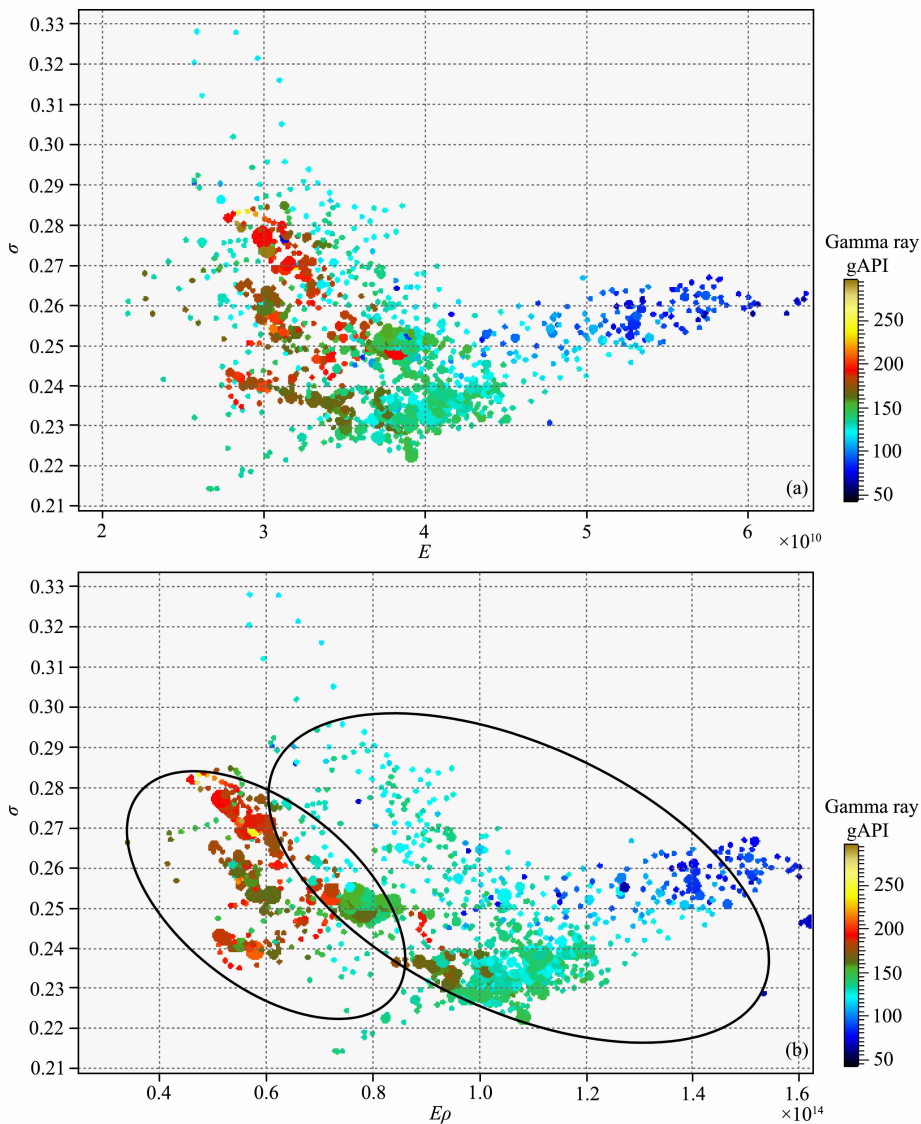


图4 实测井曲线交会分析

(a) 杨氏模量与泊松比交会图; (b) $E\rho$ 与泊松比交会图.

Fig. 4 Crossplot analysis of a real well log

(a) Crossplot of Young's modulus and Poisson ratio; (b) Crossplot of Young's modulus and density multiply and Poisson ratio.

直接反演的平均误差能量为 3.5%，而间接反演的平均误差能量为 6%，由相对误差计算可知，直接反演比间接反演获取的 $E\rho$ 、泊松比更加精确。因此，直接利用叠前纵横波联合反演得到的 $E\rho$ 能够更加精确指示页岩气储层的位置，估算的泊松比可以指示储层的含流体性，为页岩气储层的深入勘探和开发提供了可靠的证据，同时也验证了页岩气储层纵横波叠前联合反演方法的有效性。

4 结论

文中推导了基于 $E\rho$ 、泊松比和密度的纵波和

转换波反射系数近似公式，并对新推导的方程进行精度分析，在此基础上，将贝叶斯理论引入到纵波和转换波资料中，进行页岩气储层纵横波叠前联合反演。通过研究可以得出如下结论：

(1) 利用典型模型对推导的纵波和转换波反射系数近似公式做精度分析，可以发现，当入射角小于 30° 时，新推导的反射系数方程比传统的反射系数近似精度更高，为下一步页岩气储层的叠前纵横波联合反演提供坚实的理论基础。

(2) 模型测试结果显示，直接利用叠前纵横波联合反演估算 $E\rho$ 、泊松比和密度可以避免间接反演带来的误差；同时，加入转换波信息的约束，使得地

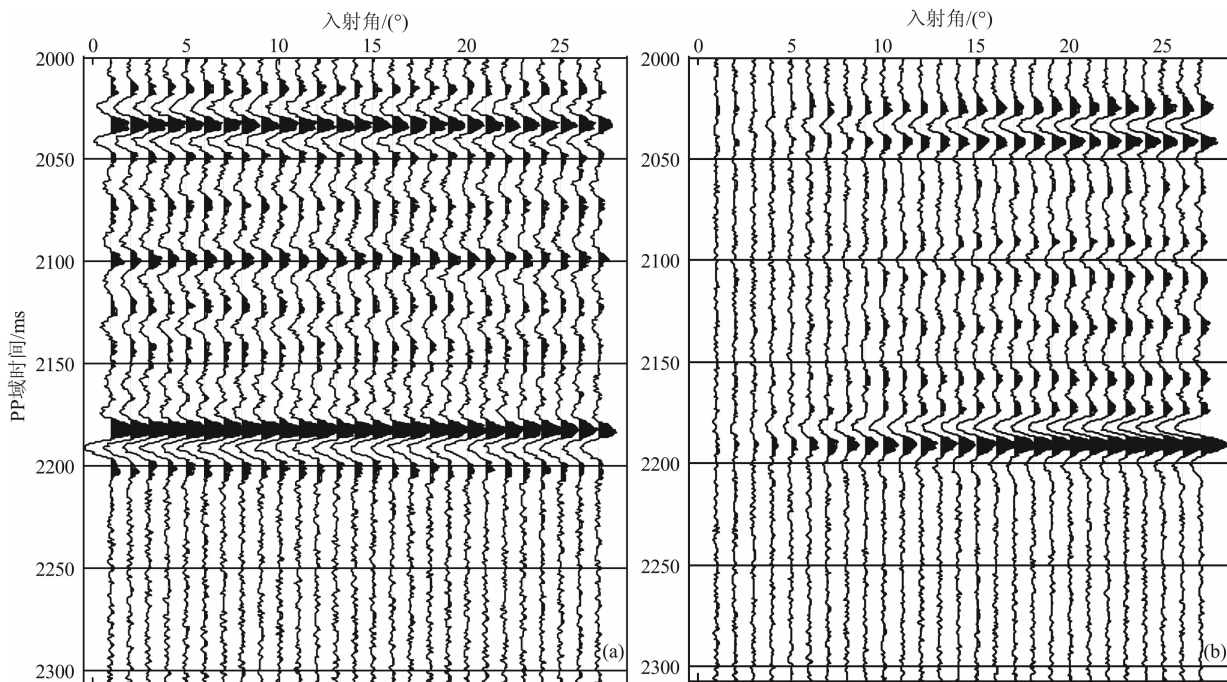


图 5 由测井曲线正演得到的角度道集

(a)纵波;(b)转换波.

Fig. 5 Pre-stack synthetic seismograms

(a) PP wave;(b) PS wave from original well.

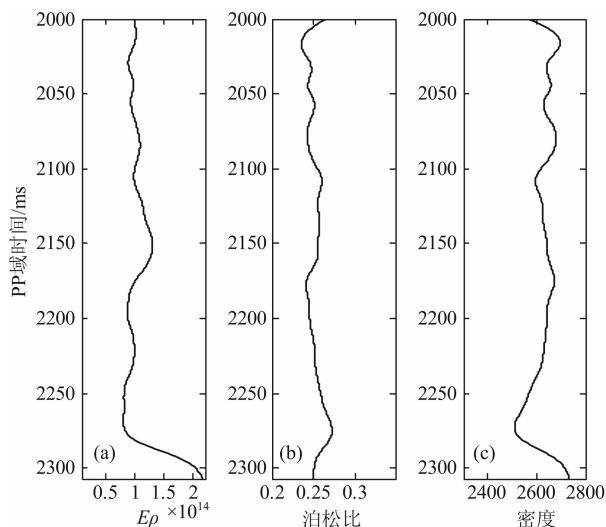


图 6 初始模型

Fig. 6 Initial model

震反演精度更高,反演更加稳定.验证了该反演方法的有效性.

(3)为了测试页岩气储层纵横波叠前联合反演算法的适用性,还需要对实际资料进行反演方法试算.实际资料中转换点的求取、转换波角度道集的提取、标志层的识别、纵波和转换波资料的匹配问题是进一步研究的主要内容.

References

- Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology Theory and Methods. San Francisco: W. H. Freeman and Company.
- Buland A, More H. 2003. Bayesian linearized AVO inversion. *Geophysics*, 68(1): 185-198.
- Chen J J, Yin X Y. 2007. Three-parameter AVO waveform inversion based on Bayesian theorem. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(4): 1251-1260.
- Chen J S, Glinesky M E. 2013. Stochastic inversion of seismic PP and PS data for reservoir parameter estimation. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 305-309.
- Chen T S, Liu Y, Wei X C. 2006. Joint amplitude versus offset inversion of P-P and P-SV seismic data. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 26(1): 33-37.
- Chopra S, Sharma R K, Keay J, et al. 2012. Shale gas reservoir characterization workflows. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1344-1348.
- Downtown J E, Pickford S, Lines L R. 2001. Constrained three parameter AVO inversion and uncertainty analysis. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 251-254.
- Helen V, Landrø M. Simultaneous inversion of PP and PS seismic data. *Geophysics*, 2006, 71(3): R1-R10.
- Hu G Q, Liu Y, Wei X C, et al. 2011. Joint PP and PS AVO inversion based on Bayes theorem. *Applied Geophysics*, 8(4): 293-302.

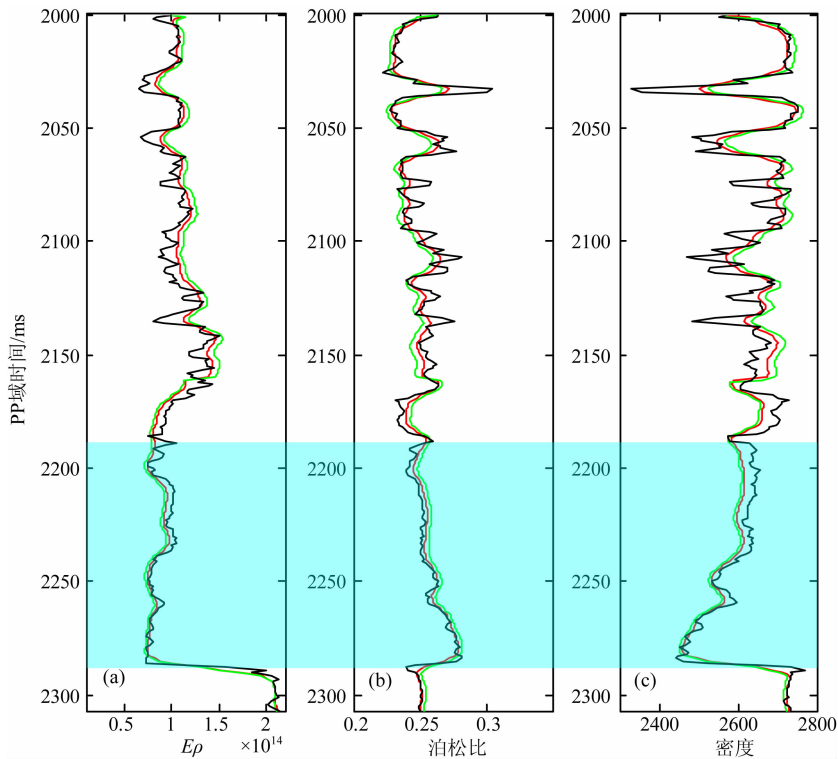


图 7 叠前纵横波联合反演所得的 $E\rho$ 、泊松比和密度的反演结果(红色曲线)与间接反演(绿色曲线)、原始值(黑色曲线)的对比
蓝色阴影指示页岩储层所在的位置。

Fig. 7 Comparison of $E\rho$, Poisson ratio and density from joint pre-stack inversion (red curves) with indirect inversion result (green curves) and original data (black curves)

Blue shade area is shale gas reservoir.

Huang H D, Zhao D, Ren D Z, et al. 2011. A thin bed inversion method based on Bayes theory. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 46(6): 919-924.

Larsen J A. 1999. AVO inversion by simultaneous P-P and P-S inversion [Master's thesis]. Calgary: University of Calgary, 9-37.

Sharma R K, Chopra S. 2013. New attribute for determination of lithology and brittleness. *CSEG Recorder*, 44-47.

Sun Z D, Jia C Z, Li X F, et al. 2011. Unconventional Oil and Gas Exploration and Development (in Chinese). Beijing: Publication of Petroleum Industry, 865-970.

Zhang G Z, Wang D Y, Yin X Y, et al. 2011a. Study on prestack seismic inversion using Markov Chain Monte Carlo. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(11): 2926-2932, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.022.

Zhang G Z, Wang D Y, Yin X Y. 2011b. Seismic Parameter estimation using Markov Chain Monte Carlo method. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 46(4): 605-609.

Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. 2011. Reflection coefficient equation and pre-stack seismic inversion with Young' modulus and Poisson ration. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(1): 284-292, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.025.

Zong Z Y, Yin X Y, Zhang F, et al. 2012. Fluid identification method based on compressional and shear wave modulus direct inversion. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55

(11): 3786-3794, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.028.

附中文参考文献

- 陈建江, 印兴耀. 2007. 基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演. *地球物理学报*, 50(4): 1251-1260.
- 陈天胜, 刘洋, 魏修成. 2006. 纵波和转换波联合 AVO 反演方法研究. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 26(1): 33-37.
- 黄捍东, 赵迪, 任敦占等. 2011. 基于贝叶斯理论的薄层反演方法. *石油地球物理勘探*, 46(6): 919-924.
- 孙赞东, 贾承造, 李相方等. 2011. 非常规油气勘探与开发. 北京: 石油工业出版社, 865-970.
- 张广智, 王丹阳, 印兴耀等. 2011a. 基于 MCMC 的叠前地震反演方法研究. *地球物理学报*, 54(11): 2926-2932, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.022.
- 张广智, 王丹阳, 印兴耀. 2011b. 利用 MCMC 方法估算地震参数. *石油地球物理勘探*, 46(4): 605-609.
- 宗兆云, 印兴耀, 张峰等. 2012. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演. *地球物理学报*, 55(11): 3786-3794, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.025.
- 宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 2011. 基于叠前地震纵横波模量直接反演的流体检测方法. *地球物理学报*, 55(1): 284-292, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.028.

(本文编辑 何燕)