中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 7 期: 1166 ~ 1180
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

基于弹性阻抗的孔隙结构与物性参数非线性同步反演

李红兵[1*], 张佳佳[2†], 潘豪杰[3], 高强[1]

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;
3. 长江大学地球物理与石油资源学院, 武汉 430100
* 通讯作者, E-mail: hbingli@petrochina.com.cn
† 通讯作者, E-mail: zhangjj@upc.edu.cn

收稿日期: 2020-09-04; 收修改稿日期: 2021-02-26; 接受日期: 2021-04-13; 网络版发表日期: 2021-05-17
国家重点研发计划项目(编号: 2019YFC0605504)和中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(编号: 2017D-3504)资助

摘要 碳酸盐岩储层具有复杂的孔隙结构, 其显著影响了岩石的弹性和地震响应特征, 也影响物性参数预测精度. 现有的岩石物理反演方法主要是针对碎屑岩储层, 反演的对象主要是孔隙度和饱和度, 采用的数据主要是弹性参数, 使用的算法主要是线性近似法, 缺少针对碳酸盐岩储层的孔隙结构与物性参数反演方法. 针对这些问题, 文章首次提出了一种基于弹性阻抗的适用于碳酸盐岩复杂孔隙储层的孔隙结构和物性参数贝叶斯非线性同步反演新方法, 该方法把多孔介质岩石物理模型、Gassmann方程、AVO理论、贝叶斯理论和非线性反演算法结合起来, 实现复杂孔隙储层的孔隙结构和物性参数的定量同步预测. 模型正演揭示, 孔隙结构参数即孔隙扁度对AVO反射系数和弹性阻抗的贡献度仅次于孔隙度, 远远大于含水饱和度的影响. 实际资料应用表明, 文章提出的从叠前道集中直接反演物性参数和等效孔隙扁度新方法可以准确预测储层孔隙度和饱和度及其空间展布, 并可评价有效储层的孔隙结构.

关键词 碳酸盐岩, 孔隙结构, 物性参数, 弹性阻抗, 非线性, 岩石物理反演

1 引言

从地震数据中估计储层物性参数(例如孔隙度、饱和度等)是地震定量储层预测的核心内容(Avseth等, 2005; 印兴耀等, 2015), 也是地球物理工作者孜孜以求的目标. 起初人们把更多的注意力放在从弹性参数中估计物性参数的反演算法上, 经常利用贝叶斯理论来克服由于弹性参数的测量误差和理想岩石物理模型的近似误差引起的反演不确定性问题. 目前物性参数反演的研究对象主要是碎屑岩储层, 反演的储层参数主要是孔隙度和饱和度. 这种方法常称之为岩石物理反演(Mukerji等, 2001), 经过近十几年来的发展, 岩石物理反演方法已日趋成熟, 在碎屑岩储层物性参数定量估计中发挥了重要作用(Bachrach, 2006; Spikes等,

中文引用格式: 李红兵, 张佳佳, 潘豪杰, 高强. 2021. 基于弹性阻抗的孔隙结构与物性参数非线性同步反演. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1166–1180, doi: 10.1360/SSTe-2020-0233
英文引用格式: Li H, Zhang J, Pan H, Gao Q. 2021. Nonlinear simultaneous inversion of pore structure and physical parameters based on elastic impedance. Science China Earth Sciences, 64(6): 977–991, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9773-8

© 2021 《中国科学》杂志社

2007; Bosch等, 2009; Grana和Rossa, 2010; Fang和Yang, 2015; Grana, 2016; 张佳佳等, 2020). Bachrach (2006)利用Gassmann方程(Gassmann, 1951)建立了弹性参数与物性参数之间的概率分布函数, 采用贝叶斯方法联合反演孔隙度和含水饱和度. Grana(2016)利用接触胶结模型和Gassmann方程进行岩石物理建模, 利用蒙特卡罗-马尔科夫链(MCMC)方法实现储层参数反演. Fang和Yang(2015)基于BISQ模型(Dvorkin和Nur, 1993)利用杂交遗传算法反演孔隙度、饱和度和渗透率. 基于弹性参数的岩石物理反演方法一般采用"两步"法实现: 第一步, 利用常规地震反演方法从叠前地震数据获取储层弹性参数即纵波速度、横波速度和密度等(Russell, 1988); 第二步, 利用岩石物理模型由弹性参数预测储层物性参数即孔隙度、饱和度和泥质含量等. 因此, 岩石物理反演的效果一是依赖于从叠前地震数据中反演的弹性参数精度, 二是取决于所采用的岩石物理模型与实际岩石的匹配程度.

这种基于弹性参数的物性参数"两步法"反演方法不可避免带来误差累积, 为了解决这个误差传递问题, 不少学者提出直接从叠前道集中反演物性参数(印兴耀等, 2014; Lang和Grana, 2018; Yuan等, 2019; 李坤等, 2020). 印兴耀等(2014)建立了表征弹性阻抗与储层物性参数之间关系的统计岩石物理模型, 通过贝叶斯方法实现储层物性参数反演. Lang和Grana(2018)基于Gassmann方程的一阶近似模型, 发展了基于贝叶斯线性反演的地震AVO物性参数预测方法. 李坤等(2020)建立了适用于碎屑岩储层预测的用岩石弹性模量高阶近似表征的叠前地震概率化反演方法, 实现从叠前道集到储层弹性、物性及干岩石骨架等参数的同步预测. 目前这些利用叠前数据直接反演物性参数的方法大多数是针对碎屑岩储层, 鲜有针对碳酸盐岩储层.

碎屑岩储层的储集空间主要以粒间孔为主. 与碎屑岩相比, 碳酸盐岩储层非均质性强, 受次生改造作用大, 储集空间多样, 不仅发育原生孔隙如粒间孔, 同时还发育大量的次生孔隙如铸模孔、溶蚀孔、粒内孔和裂缝等(Anselmetti和Eberli, 1993; Xu和Payne, 2009). 复杂的孔隙结构导致碳酸盐岩储层的速度与孔隙度之间的关系非常离散(Sayers, 2008), 在矿物和孔隙流体组分完全相同的情况下, 孔隙类型对碳酸盐岩速度的影响有时甚至超过孔隙度对其的影响(Dou等, 2011); 且其纵波速度与横波速度之间的关系具有很强的非线性, 而碎屑岩的纵波速度与横波速度则呈线性关系(Xu和Payne, 2009). 如果采用不合适的岩石物理模型, 会给碳酸盐岩岩石物理建模和反演结果带来严重影响. 孔隙结构是影响碳酸盐岩储层弹性参数变化的主要因素(Baechle等, 2008; Sayers, 2008), 李宏兵等(2019)研究发现岩石的孔隙结构对碳酸盐岩物性参数反演至关重要. 复杂孔隙结构岩石的弹性模量可利用岩石物理理论中的包裹体等效介质模型和孔隙弹性理论模型计算. 常见的包裹体模型如Mori-Tanaka平均场模型、Kuster-Toksöz理论和微分等效介质(Differential Effective Medium, DEM)理论认为岩石的弹性模量不仅与孔隙度有关, 而且与包裹体(即孔隙)的几何形态有关(Mori和Tanaka, 1973; Kuster和Toksöz, 1974; Norris, 1985). Sayers(2008)和Baechle等(2008)分别证实了碳酸盐岩弹性性质可以用Mori-Tanaka平均场模型和DEM理论来模拟. 与Mori-Tanaka模型和Kuster-Toksöz理论仅适合于包裹体稀疏的假设条件相比(Mavko等, 2009), DEM理论更准确有效地模拟了复合材料的等效弹性特性, 甚至在包裹体的体积百分比很大时亦如此(Norris, 1985; 李宏兵和张佳佳, 2014). 目前, DEM理论已从单孔介质扩展到多孔介质, 而且不再受包裹体添加顺序影响(李宏兵和张佳佳, 2014). 孔隙弹性理论模型是另一类常见的且广泛应用的岩石物理模型如Biot模型(Biot, 1956a, 1956b)、BISQ模型(Dvorkin和Nur, 1993; Yang和Zhang, 2002)、双孔模型(Pride和Berryman, 2003; Ba等, 2017)和非均质多尺度模型(Zhang等, 2019)等. Biot (1956a, 1956b)首次建立流体饱和岩石中地震波速度频散和振幅衰减模型. Yang和Zhang(2002)将BISQ理论推广到更一般的三维各向异性情况. Zhang等(2019)将Zener模型引入Biot孔隙弹性理论中建立了一种广义多孔黏弹性模型.

有些学者已经尝试利用岩石物理模型从地震数据中预测碳酸盐岩储层孔隙结构(Xu和Payne, 2009; 李宏兵等, 2013; Zhao等, 2013; Zhang等, 2018; 李宏兵等, 2019; Li等, 2020). 目前的孔隙类型评价方法主要有两类: 一类是假设岩石具有单一的孔隙类型, 通过估计其等效孔隙扁度来定性描述储层是偏孔隙型的, 还是偏裂缝型的, 抑或是偏溶洞型的; 一类是使用Xu-Payne模型预先假设岩石中包含孔、缝、洞三种孔隙类型, 通过估计这三种类型的孔隙度来定量评价储层中孔、缝、洞的发育程度. 李宏兵等(2013)应用微分等效介

质(DEM)模型和Gassmann方程由纵波速度反演等效孔隙扁度, 并用其预测横波速度. Xu和Payne(2009)利用他们建立的Xu-Payne模型, 从测井数据估算碳酸盐岩储层中的三种孔隙类型的孔隙度. Zhang等(2018)利用Sun氏模型(Sun, 2004)从叠前地震数据中反演表征孔隙类型的孔隙结构因子. 李宏兵等(2019)利用等效介质理论构建三维岩石物理模版, 基于最小二乘原理寻找最佳网格点来预测物性参数和孔隙扁度.

本文提出一种基于弹性阻抗的适用于碳酸盐岩复杂孔隙储层的孔隙结构和物性参数同步反演方法. 首先利用表征孔隙扁度的干岩石骨架微分等效介质解析模型(Li和Zhang, 2011; 李宏兵等, 2013)和Gassmann方程模拟地震弹性参数(纵、横波速度和密度)随储层参数(孔隙度、饱和度和孔隙扁度)的变化规律, 建立弹性参数与储层参数间的定量关系; 其次基于AVO理论和正演模拟分析, 揭示反射振幅和弹性阻抗随孔隙结构、物性参数和入射角的变化特征, 利用理论模型分析孔隙结构、物性参数对AVO和弹性阻抗的贡献度; 然后构建由弹性阻抗反演储层的等效孔隙扁度、孔隙度以及流体饱和度的算法流程; 最后分别用白云岩储层的测井数据合成的和叠前地震道集反演的弹性阻抗进行孔隙结构和物性参数定量预测.

2 方法原理

对复杂孔隙结构储层(如碳酸盐岩)的地震岩石物理建模, 这里采用业内广泛使用的Xu-Payne模型(Xu和Payne, 2009), 但对孔隙结构的处理方式作了一些改进, 其详细的岩石物理建模流程如图1所示. 首先使用等效介质理论模型把组成岩石的不同类型矿物进行混合, 计算固体岩石基质的弹性模量, 常见的碳酸盐岩矿物组分有方解石、白云石和泥岩. 然后, 把岩石的总孔隙空间划分为四个部分: (1) 黏土束缚水孔隙; (2) 硬孔; (3) 参考孔; (4) 微裂隙. 采用等效介质理论中的流体替换方法先把与黏土束缚水相关的那部分孔隙加入到生成的固体岩石基质中, 构成“新”的岩石基质; 接着, 利用多重孔隙微分等效理论模型把孔隙系统中的溶洞、孔和微裂隙等三种孔隙类型进行等效(李宏兵和张佳佳, 2014; 李宏兵等, 2019), 这是与Xu-Payne模型不同之处, 然后再加入到“新”生成的岩石基质中得到干岩石骨架等效弹性模量; 最后, 使用Gassmann方程流体替换方法计算饱和岩石的弹性模量.

2.1 固体岩石基质等效弹性模量模拟

固体岩石基质等效弹性模量估计是地震岩石物理建模的第一步, 它由岩石中固体矿物的弹性模量及其体积含量共同确定, 矿物体积含量可以通过岩芯和测井数据获得. 矿物基质等效模量通常使用各向同性介质等效模型Voigt-Reuss-Hill(VRH)平均(Mavko等, 2009)来计算, 即

$$M_{\mathrm{VRH}}=\left[\sum_{i=1}^{N}f_iM_i+\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{f_i}{M_i}\right)^{-1}\right]/2, \tag{1}$$

式中, M_{VRH}为固体岩石基质的等效弹性模量, 即体积模量或剪切模量, M_i为第i种固体矿物的弹性模量, f_i为第i种固体矿物的体积含量, N为固体矿物的个数.

2.2 多孔岩石干骨架等效弹性模量模拟

一旦确定好固体岩石基质的弹性模量, 就可以利用等效介质理论模型(Mavko等, 2009)计算多孔岩石的干岩石骨架模量. 李宏兵等(2019)基于微分等效介质理论推导并通过数值模拟证实多重孔隙岩石的弹性性质可以用一个等效孔隙扁度的单重孔隙介质来模拟, 也就是说图1中的孔、缝、洞三种孔隙类型的孔隙系统可以等效为一种虚拟孔隙类型的单重孔隙系统. 干岩石骨架的弹性模量可用他们给出的解析公式计算, 即

$$K_{\mathrm{dry}}=K_{\mathrm{m}}\frac{(1-\phi)^{S_0\left[S_1+S_2-S_3+\frac{(S_1-S_3)(S_2-S_3)}{S_3+K_{\mathrm{m}}/G_{\mathrm{m}}}\right]}}{\left[1+\frac{bK_{\mathrm{m}}}{aG_{\mathrm{m}}}-\frac{bK_{\mathrm{m}}}{aG_{\mathrm{m}}}(1-\phi)^{a}\right]^{\frac{S_0}{b}}}, \tag{2}$$

$$G_{\mathrm{dry}}=G_{\mathrm{m}}\frac{(1-\phi)^{S_0\left[S_1+S_2-S_3+\frac{(S_1-S_3)(S_2-S_3)}{S_3+K_{\mathrm{m}}/G_{\mathrm{m}}}\right]-a}}{\left[1+\frac{bK_{\mathrm{m}}}{aG_{\mathrm{m}}}-\frac{bK_{\mathrm{m}}}{aG_{\mathrm{m}}}(1-\phi)^{a}\right]^{\frac{S_0}{b}-1}}. \tag{3}$$

式中, K_{dry}、G_{dry}分别为干岩石骨架的体积和剪切模量, ϕ为孔隙度, K_{m}、G_{m}分别为固体岩石基质的体积和剪切模量, $S_0=\dfrac{2-3g-3\theta}{2\left(2\theta-3\theta^2-2g\right)}$, $S_1=\dfrac{\theta-g}{2-3g-3\theta}$, $S_2=\dfrac{4}{3}$, $S_3=\dfrac{2(\theta-g)}{3\left(2\theta-3\theta^2-2g\right)}$, $\theta=\dfrac{\alpha}{(1-\alpha^2)^{3/2}}\left[\cos^{-1}(\alpha)-\alpha\sqrt{1-\alpha^2}\right]$,

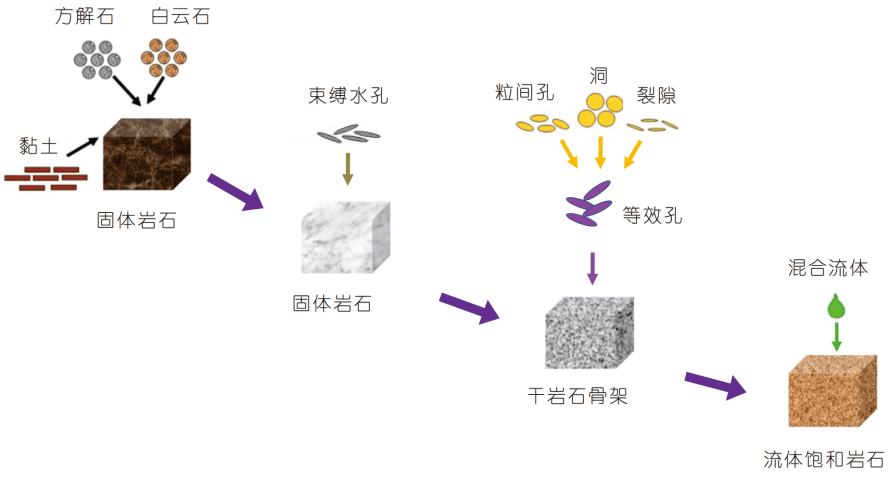


图 1　碳酸盐岩储层岩石物理建模流程图

修改自Xu和Payne(2009)

$g=\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2}(3\theta-2)$, α为岩石的孔隙扁度, 亦称为孔隙纵横比(α<1). 常数a和b分别为满足等效介质极化因子之差$P^{*i}-Q^{*i}=a+bK^*(y)/G^*(y)$的梯度和截距(Li和Zhang, 2010; 李宏兵和张佳佳, 2014). 椭球包裹体的极化因子之差$P^{*i}-Q^{*i}$及其一阶导数见Li和Zhang(2011)中的附录A.

2.3　基于Gassmann方程的饱和岩石弹性模量模拟

在低频假设下, Gassmann, (1951)给出了流体饱和岩石弹性模量的计算公式

$$K_{\rm sat}=K_{\rm dry}+\frac{(1-K_{\rm dry}/K_{\rm m})^2}{\phi/K_f+(1-\phi)/K_{\rm m}-K_{\rm dry}/K_{\rm m}^2}, \tag{4}$$

和

$$G_{\rm sat}=G_{\rm dry}, \tag{5}$$

式中, $K_{\rm sat}$、$G_{\rm sat}$分别为流体饱和岩石的体积和剪切模量, K_f为流体的体积模量, 它可以利用Brie流体分布模型(Brie等, 1995)来计算. 岩石孔隙中充填水和天然气混合体的Brie流体分布模型可表达为

$$K_f=S_{\rm w}^e(K_{\rm w}-K_{\rm g})+K_{\rm g}, \tag{6}$$

式中, $S_{\rm w}$为含水饱和度, $K_{\rm w}$、$K_{\rm g}$分别为水和天然气的体积模量, e为经验指数因子. 相应的流体密度ρ_f可利用下式计算

$$\rho_f=S_{\rm w}\rho_{\rm w}+(1-S_{\rm w})\rho_{\rm g}, \tag{7}$$

式中, $\rho_{\rm w}$为水的密度, $\rho_{\rm g}$为天然气的密度.

由Gassmann方程获得饱和流体岩石的体积和剪切模量后, 饱和流体岩石的纵、横波速度可表示为

$$V_{\rm P}=\sqrt{\frac{K_{\rm sat}+\frac{4}{3}G_{\rm sat}}{\rho}}, \tag{8}$$

$$V_{\rm S}=\sqrt{\frac{G_{\rm sat}}{\rho}}, \tag{9}$$

$$\rho=(1-\phi)\rho_{\rm m}+\phi\rho_f, \tag{10}$$

式中, $V_{\rm P}$、$V_{\rm S}$、ρ分别为流体饱和岩石的纵波速度、横波速度和密度, $\rho_{\rm m}$为固体岩石基质的密度.

2.4　多孔岩石叠前地震响应特征模拟

基于上述的地震岩石物理模型, 利用岩石的物性和孔隙结构参数正演得到饱和流体岩石的弹性参数即纵、横波速度和密度, 就可以基于AVO理论或弹性阻抗方程(Aki和Richards, 1980; Connolly, 1999)模拟复杂孔隙储层的叠前地震响应特征.

用纵、横波速度及密度表示的地震反射系数近似方程可表示为(Aki和Richards, 1980)

$$R_{\rm PP}(\theta)=(1+\tan^2\theta)\frac{\Delta V_{\rm P}}{2V_{\rm P}}-8K\sin^2\theta\frac{\Delta V_{\rm S}}{2V_{\rm S}}+(1-4K\sin^2\theta)\frac{\Delta\rho}{2\rho}, \tag{11}$$

和归一化弹性阻抗方程(Whitcombe, 2002)

$$\mathrm{EI}(\theta)=V_{\mathrm{P}_0}\rho_0\left(\frac{V_{\mathrm{P}}}{V_{\mathrm{P}_0}}\right)^{(1+\tan^2\theta)}\left(\frac{V_{\mathrm{S}}}{V_{\mathrm{S}_0}}\right)^{(-8K\sin^2\theta)}\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{(1-4K\sin^2\theta)}, \quad (12)$$

式中, $R_{\mathrm{PP}}(\theta)$、$\mathrm{EI}(\theta)$分别是反射角度为θ的反射系数和归一化弹性阻抗, V_{P_0}、V_{S_0}和ρ_0分别是定义的参考纵波、横波速度和密度, $K=(V_{\mathrm{S}}/V_{\mathrm{P}})^2$, 通常取常数0.25.

首先建立一个简单的两层地质模型(表1), 通过Zoeppritz方程和式(12)的正演模拟来揭示岩石孔隙度、含水饱和度及孔隙扁度的变化对AVO反射振幅和弹性阻抗的影响情况(图2和3). 用于正演模拟的参考弹性参数分别取为V_{P_0}=7200m s^{-1}, V_{S_0}=3750m s^{-1}, ρ_0=2.817g cm^{-3}. 图2a和3a是固定储层的含水饱和度和孔隙扁度而改变孔隙度时AVO反射振幅和弹性阻抗的变化情况, 孔隙度的变化范围在0~30%, 含水饱和度为100%, 孔隙扁度为0.15. 可以发现随着孔隙度的增大, 归一化弹性阻抗逐渐降低, 且归一化弹性阻抗的非线性随入射角逐渐增强; 而AVO幅值和梯度则随着孔隙度增大出现反转. 图2b和3b是固定储层的孔隙度和含水饱和度而改变孔隙扁度时AVO反射振幅和弹性阻抗的变化情况, 孔隙扁度的变化范围在0.05~1.0, 相当于孔隙类型从微裂隙-孔-溶洞变化, 孔隙度为0.15, 含水饱和度为100%. 可以发现随着孔隙扁度的增大, 归一化弹性阻抗逐渐增大, 且归一化弹性阻抗的非线性随入射角逐渐变弱; 而AVO则随着孔隙扁度增大, 从III类逐渐变为II类, 梯度也出现反转. 图2c和3c是固定储层的孔隙度和孔隙扁度而改变含水饱和度时AVO反射振幅和弹性阻抗的变化情况, 含水饱和度的变化范围在0~100%, 相当于流体成份从气-水变化, 孔隙度为0.15, 孔隙扁度为0.15. 可以发现随着含水饱和度的增大, 归一化弹性阻抗逐渐增大但增大的幅度较小, 且归一化弹性阻抗的非线性随入射角变化不大; AVO具有类似的特征. 根据图2a和3a依次计算在含水饱和度S_{w}=100%、孔隙扁度α=0.15时各个入射角的反射系数和归一化弹性阻抗随孔隙度变化的偏导数, 根据图2b和3b依次计算在孔隙度ϕ=15%、含水饱和度S_{w}=100%时各个入射角的反射系数和归一化弹性阻抗随孔隙扁度变化的偏导数, 根据图2c和3c依次计算在孔隙度ϕ=15%、孔隙扁度α=0.15时各个入射角的反射系数和归一化弹性阻抗随含水饱和度变化的偏导数. 图4分别给出了各个入射角处的反射系数和归一化弹性阻抗相对于孔隙扁度、孔隙度和含水饱和度变化率的平均值, 可以发现零角度处反射系数相对于孔隙扁度、孔隙度和含水饱和度变化率的平均值分别为–1.8235、–0.0069、1.8133; 归一化弹性阻抗相对于孔隙扁度、孔隙度和含水饱和度变化率的平均值则分别为–37045.4、873.42、21786.5. 综上分析表明: 孔隙度

表 1　两层地质模型使用的弹性模量及密度

矿物/流体	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)	密度(g cm^{-3})
储层	84	38.7	2.88
盖层	47.6	30.8	2.71
水	2.2	0	1.0
气	0.021	0	0.103

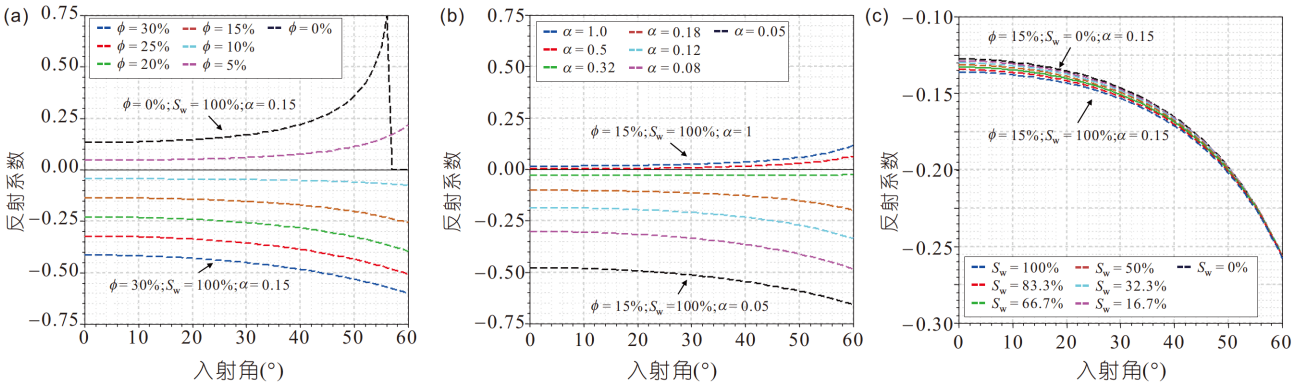


图 2　孔隙度、孔隙扁度及含水饱和度对地震反射系数的贡献度

(a) 孔隙度对AVO反射系数的影响, 孔隙扁度α=0.15, 含水饱和度S_{w}=100%; (b) 孔隙扁度对AVO反射系数的影响, 孔隙度ϕ=0.15; 含水饱和度S_{w}=100%; (c) 含水饱和度对AVO反射系数的影响, 孔隙度ϕ=0.15, 孔隙扁度α=0.15

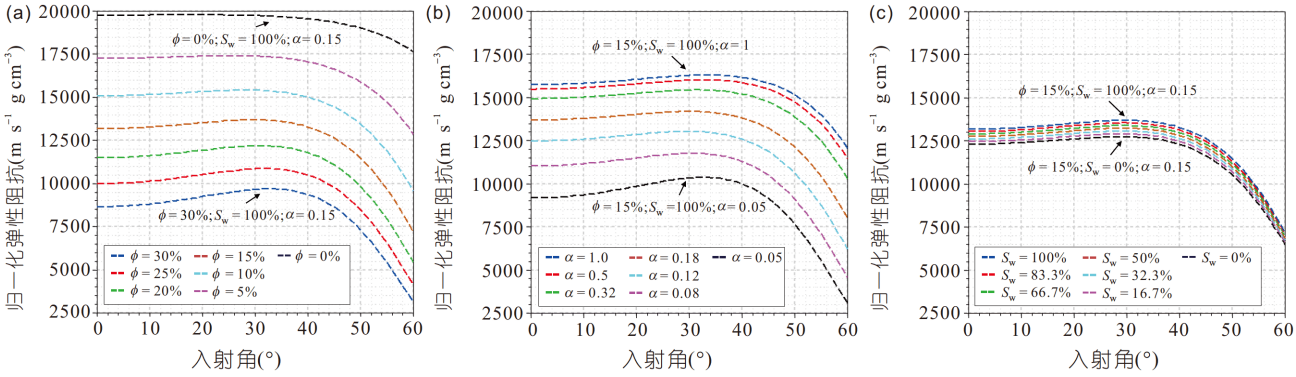


图 3　孔隙度、孔隙扁度及含水饱和度对地震弹性阻抗的贡献

(a) 孔隙度对弹性阻抗的影响, 孔隙扁度α=0.15, 含水饱和度S_w=100%; (b) 孔隙扁度对弹性阻抗的影响, 孔隙度ϕ=0.15; 含水饱和度S_w=100%; (c) 含水饱和度对弹性阻抗的影响, 孔隙度ϕ=0.15, 孔隙扁度α=0.15

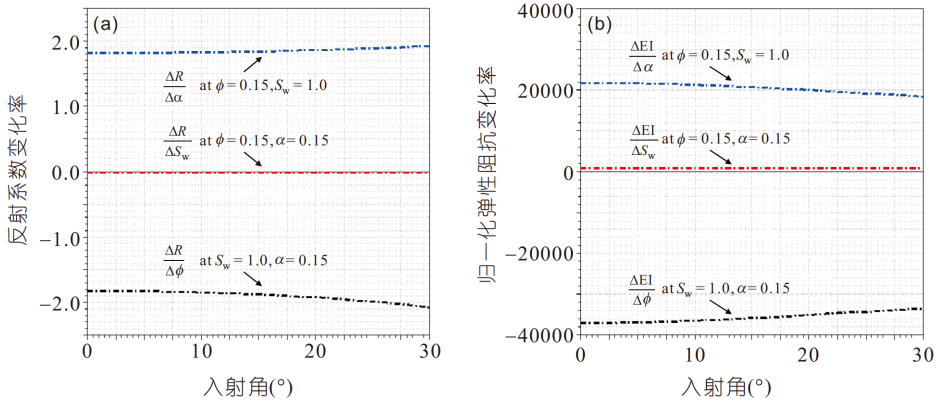


图 4　反射系数R(a)和弹性阻抗EI(b)相对于孔隙度、孔隙扁度及含水饱和度的平均变化率随入射角变化

对弹性阻抗和AVO反射系数的影响最大, 孔隙扁度的影响仅次于孔隙度, 含水饱和度的影响最小. 也就是说, 孔隙度和孔隙扁度对弹性阻抗和AVO反射系数的贡献度要远远大于含水饱和度. 因此, 对于碳酸盐岩等复杂孔隙储层, 不应忽视孔隙结构参数即孔隙扁度对地震反射振幅和弹性参数的影响, 在物性参数反演时要同时考虑孔隙结构参数这一关键参数.

2.5　贝叶斯非线性同步反演

利用前面2.1~2.3小节的岩石物理模型和2.4小节的AVO理论, 可以实现储层孔隙结构和物性参数的岩石物理反演. 在这个岩石物理反演问题中, 把弹性阻抗看作为观测数据, 储层物性和孔隙结构参数为待反演的未知模型参数. 根据贝叶斯理论, 待反演模型参数的后验概率密度函数可以表示为先验概率密度函数和似然函数的乘积, 则有

$$p(\mathbf{m}|\mathbf{d})=\frac{p(\mathbf{d}|\mathbf{m})p(\mathbf{m})}{p(\mathbf{d})}\propto p(\mathbf{d}|\mathbf{m})p(\mathbf{m}), \tag{13}$$

式中, $p(\bullet)$为概率密度函数算子, $\mathbf{d}$是各个角度弹性阻抗构成的向量, $\mathbf{m}$是模型参数, 分别为孔隙度、饱和度和等效孔隙扁度构成的向量.

假设模型参数先验信息的概率密度$p(\mathbf{m})$和似然函数$p(\mathbf{d}\,|\,\mathbf{m})$均服从高斯分布, 则

$$p(\mathbf{d}\,|\,\mathbf{m})=\left[(2\pi)^{N_d}\,|\,C_{\mathbf{d}}|\right]^{-1}\times\exp\left[-\frac{1}{2}(f(\mathbf{m})-\mathbf{d})^{\mathrm{T}}C_{\mathbf{d}}^{-1}(f(\mathbf{m})-\mathbf{d})\right], \tag{14}$$

和

$$p(\mathbf{m})=\left[(2\pi)^{N_m}\,|\,C_{\mathbf{m}}|\right]^{-1}\times\exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{m}-\overline{\mathbf{m}})^{\mathrm{T}}C_{\mathbf{m}}^{-1}(\mathbf{m}-\overline{\mathbf{m}})\right], \tag{15}$$

式中, $f(\mathbf{m})$是由储层物性和孔隙结构参数构成的模型参数向量$\mathbf{m}$通过岩石物理模型构建的模拟弹性阻抗, $C_\mathbf{d}$是观测弹性阻抗$\mathbf{d}$和模拟弹性阻抗$f(\mathbf{m})$间的协方差矩阵, $C_\mathbf{m}$是模型参数向量$\mathbf{m}$的协方差矩阵, 反映先验模型不确定性, $\overline{\mathbf{m}}$是数学期望, $|\ |$是行列式, T是矩阵转置, 协方差矩阵的上标−1表示矩阵的逆. N_d是观测数据的维数, N_m是模型空间的维数.

最大化后验概率密度的目标函数为

$$p(\mathbf{d}|\mathbf{m}) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}S(\mathbf{m})\right], \tag{16}$$

其中

$$\begin{aligned} S(\mathbf{m}) = &(f(\mathbf{m})-\mathbf{d})^{\mathrm{T}}C_\mathbf{d}^{-1}(f(\mathbf{m})-\mathbf{d}) \\ &+(\mathbf{m}-\overline{\mathbf{m}})^{\mathrm{T}}C_\mathbf{m}^{-1}(\mathbf{m}-\overline{\mathbf{m}}). \end{aligned} \tag{17}$$

寻找$\mathbf{m}$使式(16)的概率密度最大, 与寻找$\mathbf{m}$使式(17)最小是等效的. 对上述方程求解, 可参照Grana(2016)提出的贝叶斯线性反演方法, 通过对弹性参数进行泰勒展开, 借助于岩石物理模型把弹性参数关于物性和孔隙结构参数的雅可比矩阵, 甚至是海色矩阵引入到反演公式中利用梯度等信息通过反复迭代, 求解反演问题的最优解(González等, 2008; Grana, 2016), 这种方法收敛速度快, 适用于大数据量的反演问题, 但该方法依赖于模型参数的初始值, 容易陷入局部极小(Grana, 2016). 由于式(17)具有强非线性, 本文使用非线性全局寻优中的快速模拟退火方法(Ingber, 1989)从式(17)中反演储层参数, 试图避免常规线性近似法过分依赖于初始模型的问题. 图5是叠前孔隙结构与物性参数同步反演技术流程图. 首先根据测井数据确定研究区孔隙扁度、孔隙度及含水饱和度的取值范围, 在本文的反演实例中孔隙扁度、孔隙度及含水饱和度的幅值范围分别取为(0~1.0)、(0~30%)和(0~100%), 并在此范围内随机选定孔隙扁度、孔隙度及含水饱和度; 然后, 选择合适的岩石物理模型即式(2)~(3)的干岩石骨架模型、式(6)的流体分布模型, 分别计算岩石的骨架模量和流体模量, 运用式(4)~(5)的Gassmann方程、式(7)和式(10)计算饱和岩石的纵、横波速度和密度; 然后利用式(12)正演模拟弹性阻抗, 与实际地震反演的弹性阻抗比较, 代入式(17)的目标函数中, 运用模拟退火算法得到最优的孔隙扁度、孔隙度及含水饱和度, 完成储层参数预测.

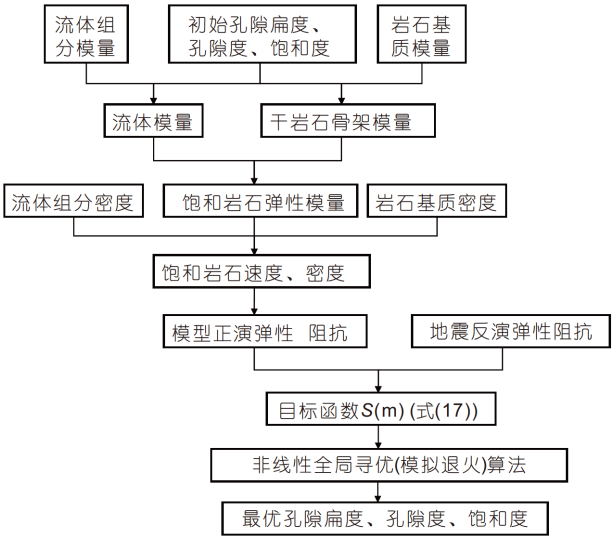


图 5　叠前孔隙结构与物性参数同步反演流技术流程图

3　模型测试及实际应用

将贝叶斯非线性同步反演方法应用到四川安岳磨溪气田龙王庙组白云岩气藏的实际地震资料储层预测中. 安岳磨溪气田位于四川盆地川中古隆中斜平缓构造带南部, 龙王庙组位于下寒武统顶部, 是一套碎屑岩陆棚之上的碳酸盐岩台地沉积, 与其上、下地层整合接触, 其上部地层为高台组, 岩性为紫红色杂色砂、泥岩夹白云岩; 下部地层为沧浪铺组, 岩性为砂岩夹页岩、碳酸盐岩夹页岩. 龙王庙组主要发育砂屑云岩、细晶云岩、泥晶云岩等, 其中滩相砂屑云岩的孔隙和裂缝发育, 整体呈块状, 垂向上连续, 平面上连片叠置分布, 是优质的天然气储集岩(金民东等, 2014). 研究区储层非均质性强, 孔隙度和渗透率较低, 岩心的孔隙度为2~15%, 渗透率为0.001~2mD. 储集空间被划分为孔隙、溶洞和缝三种, 其中孔隙包括粒间溶孔, 晶间溶孔, 粒内溶孔和残余粒间孔等, 裂缝以网状微缝发育为特点, 宏观缝欠发育(金民东等, 2014). 用于试验的数据集包括一组测井曲线(纵、横波速度和密度)和计算的物性参数(有效孔隙度、黏土含量和含水饱和度)以及一条横跨工区的连井地震测线.

3.1　测井数据岩石物理反演试验

图6是研究区一口工业气井W12的测井数据, 图中黑色曲线为测井测量的纵、横波速度和密度以及解释

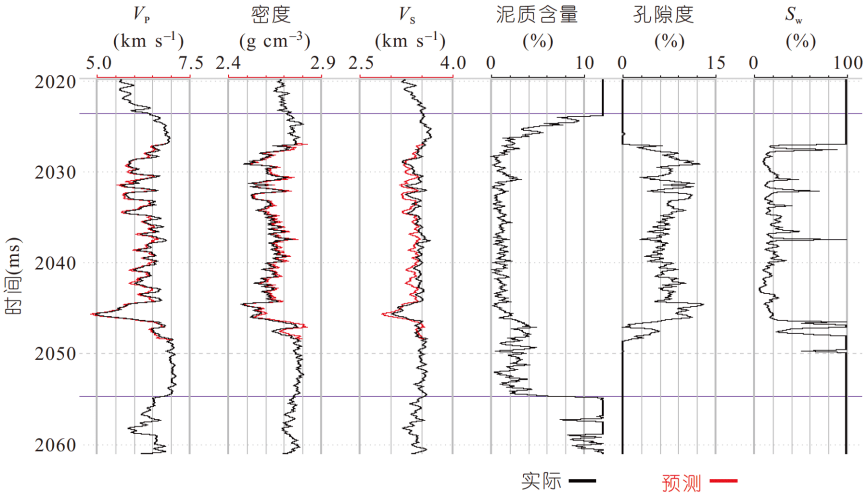


图 6　研究区W12测井数据

黑色曲线为测井测量和解释成果, 红色曲线为岩石物理建模结果

的泥质含量、孔隙度和含水饱和度, 红色曲线为利用本文2.1~2.3小节的岩石物理建模方法得到的理论纵、横波速度和密度. 可以看到, 该井储层发育, 孔隙度较高, 含气性好, 有效储层在5~12%; 储层中绝大部分为白云岩, 只有少量黏土, 其体积含量几乎不变, 顶部和底部有极少量石英矿物. 在岩石物理建模和反演过程中, 需要碳酸盐岩地层的骨架矿物成分及流体等弹性模量参数. 其中, 岩石的骨架矿物成分由测井资料提供, 矿物和流体弹性模量可以通过岩石物理实验室测量, 或由偶极子声波测井数据分析得到. 由于研究区储层主要矿物为白云岩, 储层中泥质含量小且几乎不变, 因此, 取目的层段的泥质含量为常数, 这样由白云岩和泥岩混合物构成岩石的基质, 建模岩石基质弹性模量K_m=85.5GPa, G_m=46.5GPa, 密度ρ_m=2.817g cm^{-3}, 流体的体积模量见表1. 从图6我们还可以发现, 红色曲线与黑色曲线高度吻合, 说明岩石物理建模方法是有效的, 适用于碳酸盐岩复杂储层的岩石物理弹性参数建模.

利用式(17)进行储层参数反演时, 需要提供储层参数的先验信息, 即式(17)中的数学期望$\overline{\mathbf{m}}$和协方差矩阵$\mathbf{C}_\mathbf{m}$. 先验信息通常由研究区的测井数据提供, 待反演的物性参数孔隙度和含水饱和度在常规的测井解释中很容易获得, 等效孔隙扁度是一个目前还不常用的孔隙结构参数, 但可从纵、横波速度和密度数据中反演得到(李宏兵等, 2013). 先验分布可以用单高斯模型也可以用高斯混合模型来描述, 这里简单地采用单高斯模型描述孔隙度、含水饱和度和等效孔隙扁度三参数间的概率分布. 图7是孔隙度、饱和度和等效孔隙扁度间的两两二维概率边缘分布, 可以发现, 它们之间的相关程度和分布形态并不完全相同.

首先用模型正演和测井的纵、横波速度和密度生成的弹性阻抗反演储层的孔隙度、等效孔隙扁度和含水饱和度, 并与实际测井解释成果对比(图8~9). 图8a是由岩石物理建模得到的纵、横波速度和密度(图6中红色曲线)生成的归一化弹性阻抗角道集剖面, 入射角范围0°~30°; 图8b为利用2.5小节的贝叶斯非线性同步反演得到的储层孔隙度(Porosity)、含水饱和度(S_w)和等效孔隙扁度(Pore AR, Aspect Ratio), 图中黑色曲线分别表示测井数据解释的孔隙度与含水饱和度曲线, 红色曲线表示反演的孔隙度、含水饱和度及等效孔隙扁度. 可以看到, 反演的孔隙度值与测井解释结果完全重合, 两者间的相关系数达到0.999; 反演的含水饱和度值与测井解释结果有细微差异, 两者间的相关系数达到0.976, 这说明反演算法是可行的. 图8c是反演的归一化弹性阻抗残差剖面, 图8d是相应的残差直方图. 可以看到拟合的误差非常小, 残差主要集中在零附近, 特别是小角度道残差比大角度的小很多, 进一步佐证了反演算法的准确性. 图9a是由测井测量的纵、横波速度和密度(图6中黑色曲线)生成的归一化弹性阻抗角道集剖面, 图9b为利用2.5小节的贝叶斯非线性同步

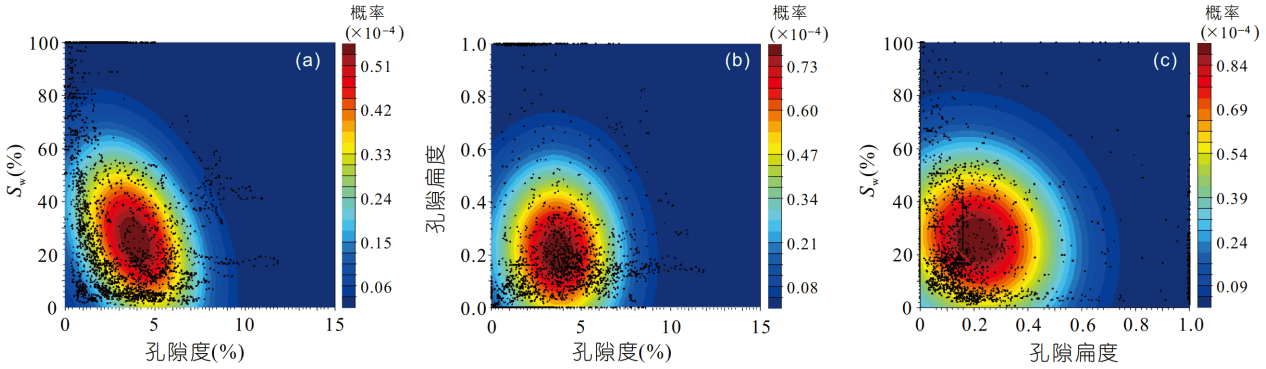


图 7　描述物性参数、等效孔隙扁度间单高斯模型二维概率边缘分布

(a) 孔隙度与含水饱和度; (b) 孔隙度与等效孔隙扁度; (c) 含水饱和度与等效孔隙扁度

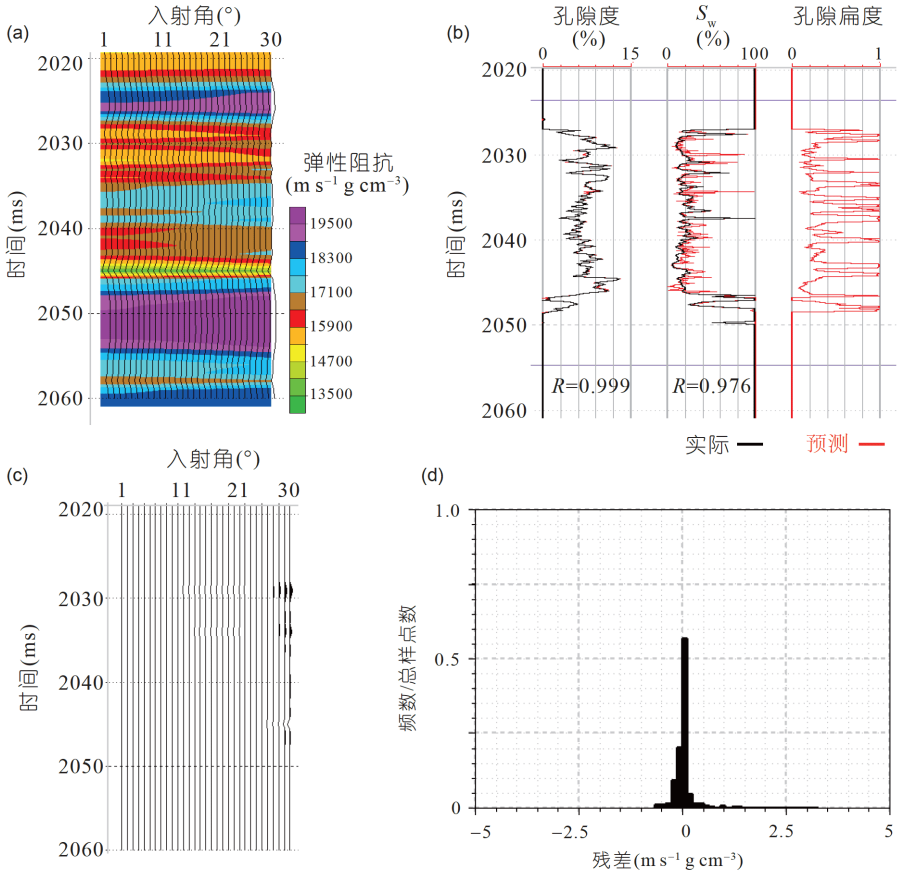


图 8　由理论模拟的纵、横速度和密度(图6中红色曲线)生成的归一化弹性阻抗EI(a)、其孔隙度、含水饱和度和等效孔隙扁度反演(b)、残差剖面(c)及残差直方图(d)

反演得到的储层孔隙度、含水饱和度和等效孔隙扁度. 可以看到, 在储层孔隙度大于2.5%时, 反演的孔隙度值与测井解释结果相当吻合, 两者间的相关系数达到0.956; 反演的含水饱和度值与测井解释结果有差异, 两者间的相关系数达到0.801, 这可能是岩石物理理论模型预测的弹性参数与实际测量的存在近似误差

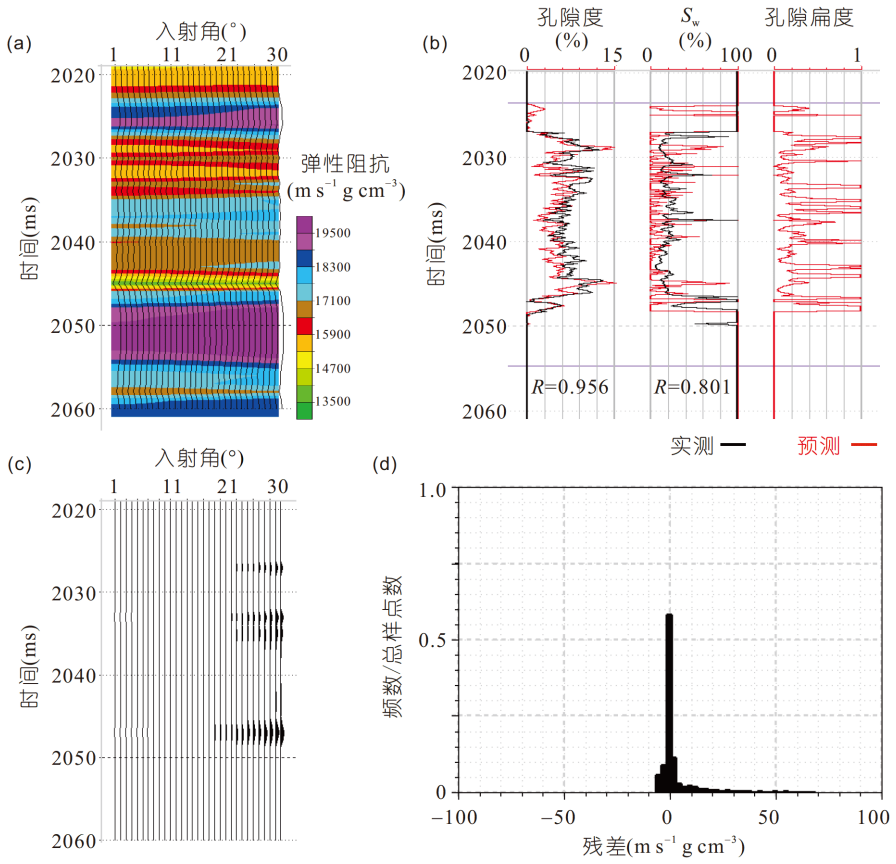


图 9　由测井测量的纵、横速度和密度(图6中黑色曲线)生成的归一化弹性阻抗EI(a)及其孔隙度、含水饱和度和等效孔隙扁度反演(b)、残差剖面(c)及残差直方图(d)

所致, 但它们都预测该井的含气饱和度较高, 与实际钻探结果一致. 图9c是反演的归一化弹性阻抗残差剖面, 图9d是相应的残差直方图, 与图8c和8d相比, 残差依然集中在零附近, 但最大残差放大了很多, 特别是大角度道残差相比于小角度道要大很多, 这说明入射角度对弹性阻抗存在一个放大作用. 当实际测井测量的纵、横波速度和密度与岩石物理模型预测的结果存在偏差时, 它不仅影响孔隙扁度、孔隙度和含水饱和度估计, 同时也会影响弹性阻抗计算及残差的分布. 图8~9理论模型的物性参数反演结果与测井解释结果具有很高的相关性, 充分说明在本文方法反演的储层物性参数是可信的, 特别是选择的岩石物理模型与实际介质完全吻合时可得到精确的孔隙结构和物性参数. 孔隙扁度是一种表征孔隙形状的参数, 测井解释一般不提供, 因此无法对比. 孔隙扁度大小在一定程度上可以反映储层裂缝的发育情况(Sayers, 2008). 从反演的结果看, 储层段的等效孔隙扁度变化范围大, 大部分位于0.1~1.0.

3.2　地震数据岩石物理反演

图10是该连井地震测线的共角度道地震数据, 入射角分别为6°、18°和30°, 采样间隔为2ms, 该测线经过4口井, 其中W13和W4井是两口试气产量达到百万方的高产工业气井, W19是试气产量十万方的工业气井, 而W3井在目的层上段是孔隙度极低的致密层, 下段虽有储层发育但是产水层. 目的层位于地震层位E2g和E1l之间.

图11是利用测井约束反演技术由图10得到的三个角度的归一化弹性阻抗数据, 目的层段的归一化弹性阻抗在14000~22000m s^{-1} g cm^{-3}, 用于反演的参考弹性参数分别取为V_{P_0}=7200m s^{-1}、V_{S_0}=3750m s^{-1}、ρ_0=2.817g cm^{-3}. 从共角度道归一化弹性阻抗难以直观

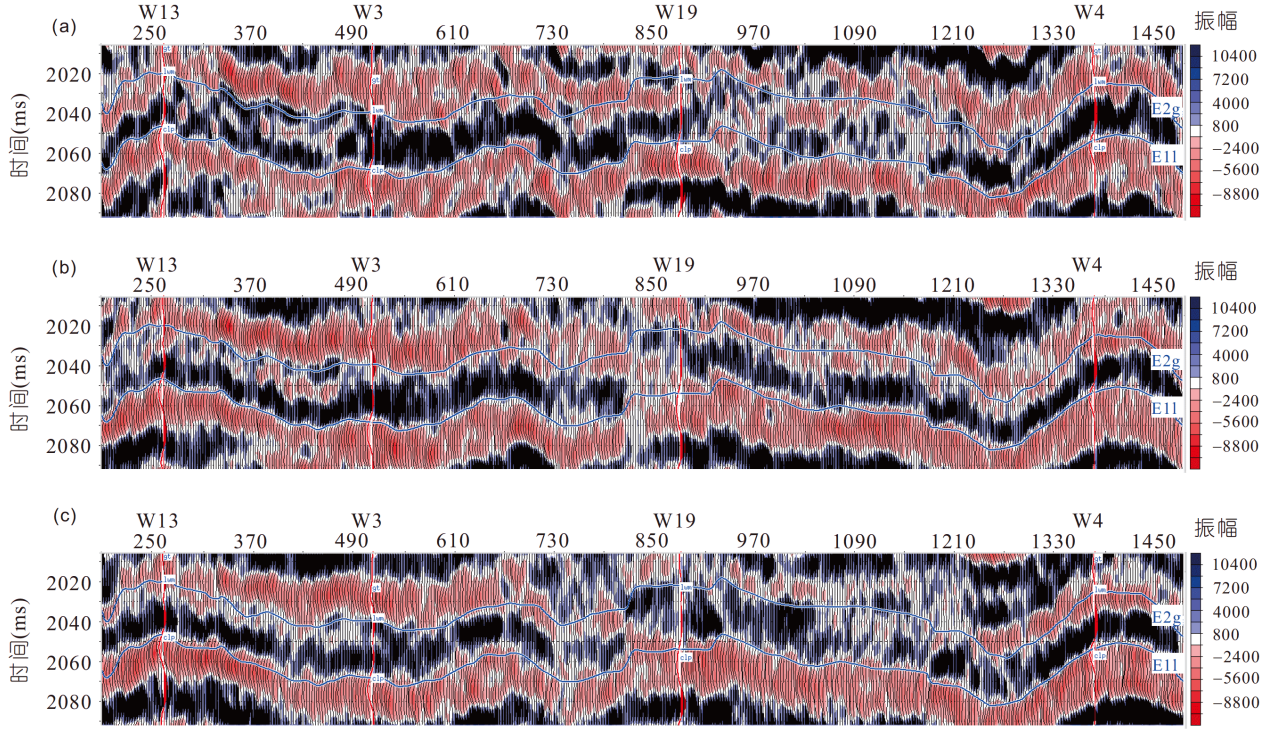


图 10　研究区共角度叠加连井地震数据

(a) 6°; (b) 18°; (c) 30°

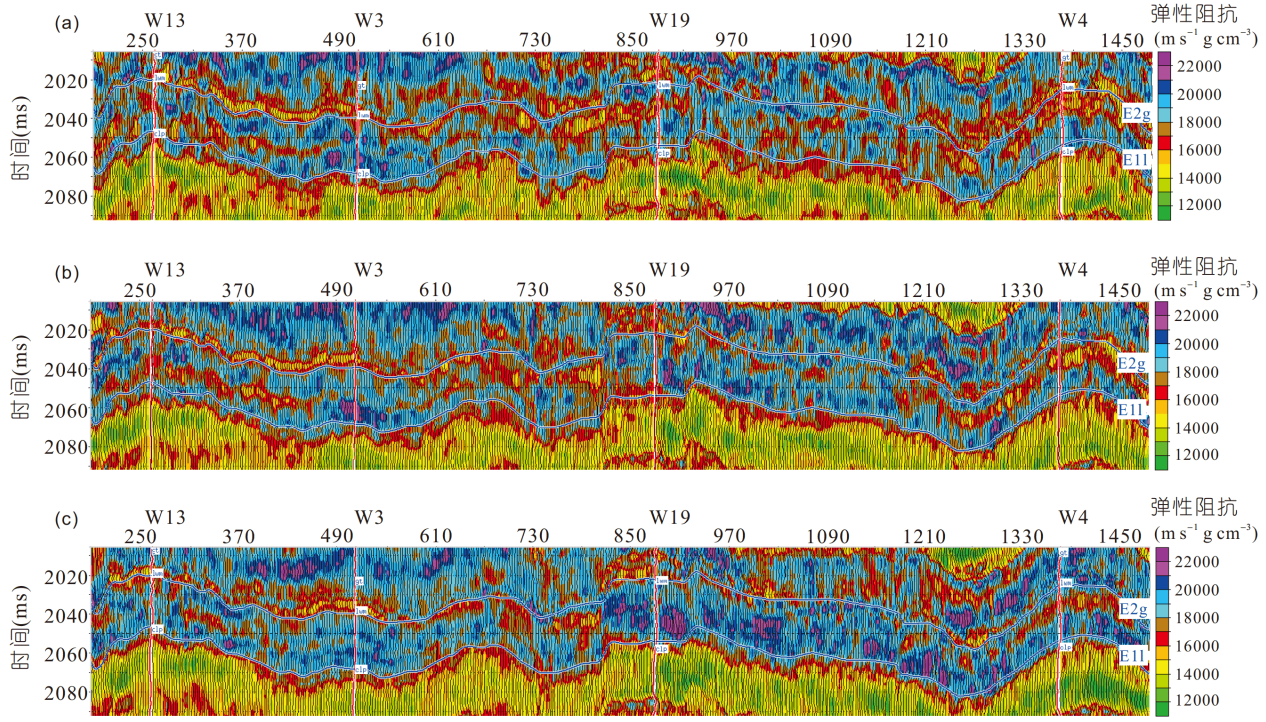


图 11　共角度道归一化弹性阻抗EI反演数据

(a) 6°; (b) 18°; (c) 30°

地辨识出储层的发育程度和含气性情况.

图12是利用贝叶斯非线性同步反演从图11的归一化弹性阻抗数据中推得的等效孔隙扁度及孔隙度和含水饱和度. 图12a为反演的孔隙度连井剖面, 工业气井W4、W13和W19都位于局部高点, 孔隙度较高, 而产水井W3井位于次高点, 孔隙度低. 图12b为反演的含水饱和度连井剖面, 位于局部高点的工业气井W4、W13和W19含气饱和度较高, 而位于次高点产水井W3井含气饱和度低. 图12c为反演的等效孔隙扁度连井剖面: W19和W3井附近的等效孔隙扁度较大, 说明岩石的孔隙比较硬; W4和W13井的等效孔隙扁度偏小, 说明岩石的孔隙偏软. 等效孔隙扁度的大小在一定程度上可以反映储层裂缝的发育情况, 由于裂缝是扁平和狭长的, 它的存在往往导致储层整体的孔隙扁度值偏低. 反演结果表明, 储层的孔隙度和等效孔隙扁度横向变化大, 说明白云岩储层的非均质性非常强; 同时, 还发现, 在W3和W19之间的局部高点处预测的孔隙度、含气饱和度都比较高, 与右边的W4井具有相同的特征,

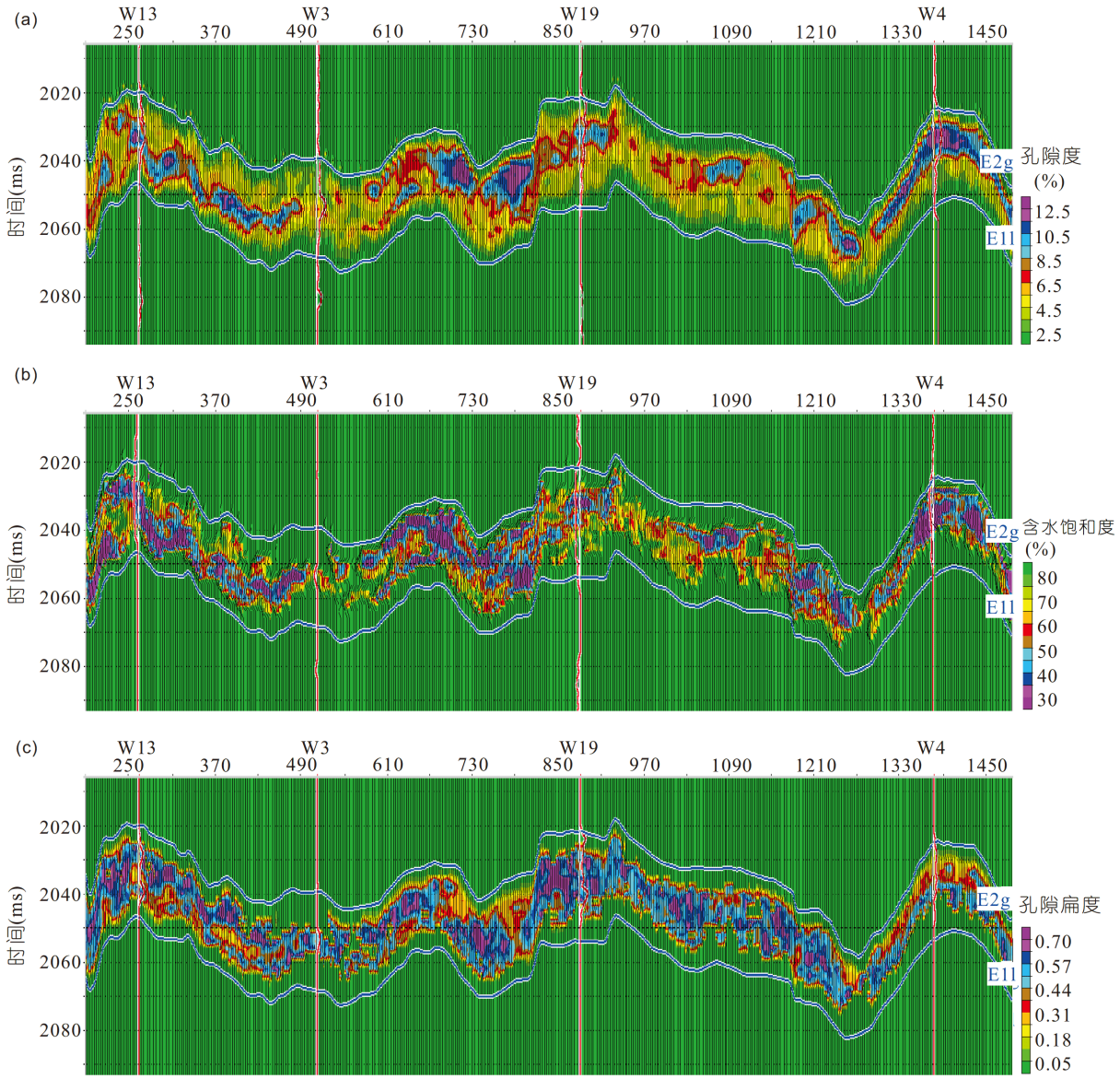


图 12　研究区岩石物理反演结果

(a) 孔隙度; (b) 含水饱和度; (c) 等效孔隙扁度. 红色曲线分别对应为测井解释的孔隙度、饱和度和等效孔隙扁度

是一个潜在的气藏有利区.

4 讨论

需要指出的是, 本文提出的孔隙结构和物性参数同时反演方法是基于Gassmann方程, 该方程是基于低频假设提出的, 适用于地震频带, 这也是绝大多数学者提出的储层参数反演方法中普遍采用的模型(Sun, 2004; Bachrach, 2006; Xu和Payne, 2009; Grana和Rossa, 2010; Grana, 2016; Zhao等, 2013; 李坤等, 2020). 目前, 也有部分学者(聂建新等, 2004; Fang和Yang, 2015)采用了考虑地震波速度频散和振幅衰减的孔隙弹性理论模型, 如BISQ模型(Dvorkin和Nur, 1993; Yang和Zhang, 2002)、双孔模型(Pride和Berryman, 2003; Ba等, 2017)和非均质多尺度模型(Zhang等, 2019), 尽管这些模型能够更加精确地描述双相介质, 但是由于其公式中含有喷射流长度、孔隙流体黏度和孔隙曲折度等诸多微观参数, 它们在实际生产中无法准确获取, 因而这些模型还没有得到广泛应用. 基于孔隙弹性理论模型的储层参数反演是一个最具潜力的研究方向, 是下一步的研究重点.

本文提出的孔隙结构与物性参数非线性同步反演目标函数具有很强的非线性特征, 需要使用全局寻优算法求解, 以保证解的精度. 文中选用的是经典的模拟退火算法, 该算法能够有效的解决在优化过程中陷入局部极小值的问题, 并且能够克服初值的依赖性, 文中的理论模型反演结果也证实经典的模拟退火算法可得到准确的孔隙结构与物性参数, 可以满足本文反演方法的精度要求. 虽然模拟退火算法全局寻优能力较强, 但是其运行效率和所得解的质量依赖于退火参数(刘洪普和侯向丹, 2008). 目前非线性全局寻优算法有很多例如杂交遗传算法(Fang和Yang, 2015)、量子退火算法(张广智等, 2018)、粒子群优化算法(罗腾等, 2019)等, 这些算法都可以用来求解本文的孔隙结构与物性参数.

5 结论

本文提出了一种基于弹性阻抗的贝叶斯非线性同步反演新方法, 适用于碳酸盐岩复杂孔隙储层的孔隙结构和物性参数预测, 将把多孔介质岩石物理模型、Gassmann方程、AVO理论、贝叶斯理论和非线性反演算法结合起来, 实现复杂孔隙储层的孔隙扁度、孔隙度和含水饱和度的定量同步预测.

新方法建立了弹性阻抗与孔隙度、含水饱和度和等效孔隙扁度间的定量关系, 模型正演揭示了孔隙结构参数是复杂孔隙储层地震定量描述中不可忽视的重要参数, 其对弹性阻抗和AVO反射系数的贡献度仅次于孔隙度, 远远大于含水饱和度的影响.

实际测井数据应用表明, 利用叠前贝叶斯非线性同步反演方法预测的储层孔隙度和饱和度, 与测井解释结果都相吻合, 特别是对于孔隙度大于3%的储层, 具有很高的吻合度. 实际地震数据应用表明, 新方法可以准确预测高产气井和含水井的孔隙度与饱和度及其横向分布, 并可用于评价有效储层的孔隙结构.

叠前贝叶斯非线性同步反演储层等效孔隙扁度、孔隙度、饱和度, 是一种确定性的岩石物理反演方法, 对输入数据有较高的要求, 需要准确的弹性阻抗数据. 因此, 应用该方法需要精细的叠前弹性阻抗反演, 以保证岩石物理反演结果的准确性.

致谢 感谢编委和匿名审稿人对本文提出的宝贵修改意见和建议.

参考文献

金民东, 曾伟, 谭秀成, 李凌, 李宗银, 罗冰, 张静蕾, 刘吉伟. 2014. 四川磨溪-高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素. 石油勘探与开发, 41: 650–660

李宏兵, 张佳佳. 2014. 多重孔岩石微分等效介质模型及其干燥情形下的解析近似式. 地球物理学报, 57: 3422–3430

李宏兵, 张佳佳, 蔡生娟, 潘豪杰. 2019. 复杂孔隙储层三维岩石物理模版. 地球物理学报, 62: 2711–2723

李宏兵, 张佳佳, 姚逢昌. 2013. 岩石的等效孔隙纵横比反演及其应用. 地球物理学报, 56: 608–615

李坤, 印兴耀, 宗兆云. 2020. 岩石物理驱动的相约束叠前地震概率化反演方法. 中国科学: 地球科学, 50: 832–850

刘洪普, 侯向丹. 2008. 模拟退火算法中关键参数的研究. 计算机工程与科学, 30: 55–57

罗腾, 冯晅, 郭智奇, 刘财, 刘喜武. 2019. 基于模拟退火粒子群优化算法的裂缝型储层各向异性参数地震反演. 吉林大学学报(地球科学版), 49: 1466–1476

聂建新, 杨顶辉, 杨慧珠. 2004. 基于非饱和多孔隙介质BISQ模型的储层参数反演. 地球物理学报, 47: 1101–1105

印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 2015. 岩石物理驱动下地震流体识别研究.

中国科学: 地球科学, 45: 8–21
印兴耀, 崔维, 宗兆云, 刘晓晶. 2014. 基于弹性阻抗的储层物性参数预测方法. 地球物理学报, 57: 4132–4140
张广智, 赵晨, 涂齐催, 刘江, 张佳佳. 2018. 基于量子退火Metropolis-Hasting算法的叠前随机反演. 石油地球物理勘探, 53: 153–160
张佳佳, 印兴耀, 张广智, 谷一鹏, 樊祥刚. 2020. 基于线性化岩石物理反演的物性参数预测方法. 石油勘探与开发, 47: 57–64
Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology. San Francisco: W. H. Freeman &Co
Anselmetti F S, Eberli G P. 1993. Controls on sonic velocity in carbonates. Pure Appl Geophys, 141: 287–323
Avseth P, Mukerji T, Mavko G. 2005. Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk. Cambridge: Cambridge University Press
Ba J, Xu W H, Fu L Y, Carcione J M, Zhang L. 2017. Rock anelasticity due to patchy saturation and fabric heterogeneity: A double double-porosity model of wave propagation. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 1949–1976
Bachrach R. 2006. Joint estimation of porosity and saturation using stochastic rock-physics modeling. Geophysics, 71: O53–O63
Baechle G T, Colpaert A, Eberli G P, Weger R J. 2008. Effects of microporosity on sonic velocity in carbonate rocks. Leading Edge, 27: 1012–1018
Biot M A. 1956a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. J Acoust Soc Am, 28: 168–178
Biot M A. 1956b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. J Acoust Soc Am, 28: 179–191
Bosch M, Carvajal C, Rodrigues J, Torres A, Aldana M, Sierra J. 2009. Petrophysical seismic inversion conditioned to well-log data: Methods and application to a gas reservoir. Geophysics, 74: O1–O15
Brie A, Pampuri F, Marsala A, Meazza O. 1995. Shear sonic interpretation in gas-bearing sands. SPE Annual Technical Conference and Exhibitionn. Society of Petroleum Engineers. 701–710
Connolly P. 1999. Elastic impedance. Leading Edge, 18: 438–452
Dou Q, Sun Y, Sullivan C. 2011. Rock-physics-based carbonate pore type characterization and reservoir permeability heterogeneity evaluation, Upper San Andres reservoir, Permian Basin, west Texas. J Appl Geophys, 74: 8–18
Dvorkin J, Nur A. 1993. Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms. Geophysics, 58: 524–533
Fang Z L, Yang D H. 2015. Inversion of reservoir porosity, saturation, and permeability based on a robust hybrid genetic algorithm. Geophysics, 80: R265–R280
Gassmann F. 1951. Über die elastizität poröser medien. Vier der Natur Gesellschaft Zürich, 96: 1–23
González E F, Mukerji T, Mavko G. 2008. Seismic inversion combining rock physics and multiple-point geostatistics. Geophysics, 73: R11–R21
Grana D. 2016. Bayesian linearized rock-physics inversion. Geophysics, 81: D625–D641
Grana D, Rossa E D. 2010. Probabilistic petrophysical-properties estimation integrating statistical rock physics with seismic inversion. Geophysics, 75: O21–O37
Ingber L. 1989. Very fast simulated re-annealing. Mathemat Comput Model, 12: 967–973
Kuster G T, Toksöz M N. 1974. Velocity and attenuation of seismic waves in two media, Part I. Theoretical considerations. Geophysics, 39: 587–606
Lang X, Grana D. 2018. Bayesian linearized petrophysical AVO inversion. Geophysics, 83: M1–M13
Li H B, Zhang J J. 2010. Modulus ratio of dry rock based on differential effective-medium theory. Geophysics, 75: N43–N50
Li H B, Zhang J J. 2011. Elastic moduli of dry rocks containing spheroidal pores based on differential effective medium theory. J Appl Geophys, 75: 671–678
Li H B, Zhang J J, Cai S J, Pan H J. 2020. A two-step method to apply Xu–Payne multi-porosity model to estimate pore type from seismic data for carbonate reservoirs. Pet Sci, 17: 615–627
Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. 2009. The Rock Physics Handbook. Cambridge: Cambridge University Press
Mori T, Tanaka K. 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. Acta Metall, 21: 571–574
Mukerji T, Jørstad A, Avseth P, Mavko G, Granli J R. 2001. Mapping lithofacies and pore-fluid probabilities in a North Sea reservoir: Seismic inversions and statistical rock physics. Geophysics, 66: 988–1001
Norris A N. 1985. A differential scheme for the effective moduli of composites. Mech Mater, 4: 1–16
Pride S R, Berryman J G. 2003. Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials. I. Governing equations and acoustic attenuation. Phys Rev E, 68: 036603
Russell B. 1988. Introduction to seismic inversion methods. SEG Course Notes Series
Sayers C M. 2008. The elastic properties of carbonates. Leading Edge, 27: 1020–1024
Spikes K, Mukerji T, Dvorkin J, Mavko G. 2007. Probabilistic seismic inversion based on rock-physics models. Geophysics, 72: R87–R97
Sun Y F. 2004. Pore structure effects on elastic wave propagation in

rocks: AVO modelling. J Geophys Eng, 1: 268–276

Whitcombe D N. 2002. Elastic impedance normalization. Geophysics, 67: 60–62

Xu S, Payne M A. 2009. Modeling elastic properties in carbonate rocks. Leading Edge, 28: 66–74

Yang D, Zhang Z. 2002. Poroelastic wave equation including the Biot/Squirt mechanism and the solid/fluid coupling anisotropy. Wave Motion, 35: 223–245

Yuan S, Liu Y, Zhang Z, Luo C, Wang S. 2019. Prestack stochastic frequency-dependent velocity inversion with rock-physics constraints and statistical associated hydrocarbon attributes. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 16: 140–144

Zhang B, Yang D, Cheng Y, Zhang Y. 2019. A unified poroviscoelastic model with mesoscopic and microscopic heterogeneities. Sci Bull, 64: 1246–1254

Zhang T T, Zhang R F, Tian J Z, Lu L F, Qin F Q, Zhao X Z, Sun Y F. 2018. Two-parameter prestack seismic inversion of porosity and pore-structure parameter of fractured carbonate reservoirs: Part 2—Applications. Interpretation, 6: 1–36

Zhao L, Nasser M, Han D. 2013. Quantitative geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs. Geophys Prospect, 61: 827–841

(责任编委: 印兴耀)