中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 1 期: 8 ~ 21
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

岩石物理驱动下地震流体识别研究

印兴耀*, 宗兆云, 吴国忱

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580
* E-mail: xyyin@upc.edu.cn

收稿日期: 2014-05-19; 接受日期: 2014-08-26; 网络版发表日期: 2014-12-22
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2013CB228604)、国家油气重大专项项目(编号: 2011ZX05030-004-002)、中国博士后科学基金项目、青岛博士后应用项目和中石化重点实验室基金项目资助

摘要 地震流体识别指利用地震资料对储层含流体特征进行识别与描述. 含流体储层地震岩石物理是地震流体识别的基础, 是搭建储层弹性参数与物性参数的桥梁, 是实现含油气储层流体定量表征的重要发展方向. 岩石物理驱动下地震流体识别研究有助于认识地下油气储层含流体特征及分布规律. 文章概述地震流体识别及相关基础研究中的关键科学问题, 着重评述国内外岩石物理驱动下地震流体识别研究的主要进展, 探究地震流体识别研究面临的机遇, 挑战及未来的研究方向. 理论研究和实际应用表明, 地震流体识别要以岩石物理及数值模拟为理论基础, 发展有效的流体敏感参数构建及评价方法; 以地震资料为数据支撑, 形成有效的地震资料品质评价方法; 以地震反演为技术保障, 发展可靠的地震反演策略.

关键词
流体识别
地震岩石物理
地震反演
流体因子

地震流体识别, 即利用地震资料对储层含流体特征进行识别与描述, 是勘探地球物理学研究的热点和难点问题之一, 究其原因是研究对象的特殊性、地下埋藏条件的复杂性以及相应地球物理数学特征的多解性. 岩石物理驱动下地震流体识别是在地震岩石物理理论指导下将与孔隙流体有关的异常特性表征为流体因子或通过地震岩石物理建立储层流体类型与弹性参数间的量化关系, 利用地震资料丰富的振幅、频率、相位及其变化特征信息等实现流体因子反演或流体类型预测的过程.

地震流体识别始于 20 世纪 70 年代, 也正是这种利用地震资料直接进行储层流体检测的潜在应用价值引起了地震处理和解释技术的重大变革, 其中, 地震技术的数字化是变革的主要动力. 地震技术的数字化使得采集到解释过程中的真振幅或相对振幅的保持成为了可能, 而利用高于周围振幅的强反射振幅寻找地下含气层的“亮点”技术在当时得到广泛研究和应用. 随着研究深入, 相继出现了“暗点”、“相位反转”和“平点”现象等烃类识别方法(Backus 和 Chen, 1975; Hilterman, 2001). 然而, 随着实践中发现“亮点”技术存在的局限性和多解性, 振幅随偏移距的变化特征(amplitude variation with offset, AVO)得到国内外学者的广泛关注. 1982 年, Ostrander 提出了利用反射系数随入射角的变化来判识“亮点”型含气砂岩的技术, 这标志着利用 AVO 技术进行流体识别的出现. Ruthorford 等(1989)把含气层 AVO 响应分为三类, Castagna 等(1998)将其分为四类, 为 AVO 分析奠定了基础. 后期基于 AVO 分析技术又发展了基于 AVO 截距和梯度交会图的烃类检测方法, AVO 烃类检测因子方法等. 目前, AVO 分析技术仍是地震流体识别

中文引用格式: 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
英文引用格式: Yin X Y, Zong Z Y, Wu G C. 2015. Research on seismic fluid identification driven by rock physics. Science China: Earth Sciences, 58: 159–171, doi: 10.1007/s11430-014-4992-3

的主流方法之一. “亮点”和 AVO 属性分析技术作为地震流体识别定性分析技术在实际生产中取得一定成效, 然而, 目前隐蔽型岩性油气藏和非常规致密储层的出现对地震流体识别方法带来了新的挑战(Yin 等, 2008; 宗兆云等, 2012b; Yuan 和 Wang, 2013; 印兴耀等, 2014). 随着地震反演理论的发展, 特别是地震岩石物理理论的崛起, 在地震岩石物理驱动下, 利用地震反演方法进行储层流体识别成为现阶段储层含油气性判识的主流研究方向(宗兆云等, 2012a). 地震岩石物理的发展促使地震流体识别由“定性”预测向“定量”描述过渡.

储层中流体的存在形式、特性及其分布特征对地震波具有复杂的改造作用, 其影响主要体现在地震波旅行时, 振幅、频率和相位等运动学或动力学参数变化上. 流体识别是油气勘探工作者的重要目标, 为可靠获取储层流体分布, 实现储层流体量化预测, 需要理解储层流体存在形式, 特性及其分布特征对地震波的改造机理, 发展地震流体识别的地球物理理论基础和方法. 本文中, 我们概述地震流体识别研究中的关键科学问题, 评述国内外主要研究进展, 并探究地震流体识别面临的机遇、挑战及未来的研究方向.

1 地震流体识别中的关键科学问题

1.1 流体是如何影响地震波速度的?

储层中流体的特性及分布特征对地震波速度的影响一般通过岩石物理实验及理论模型的构建来研究. 含流体储层一般等效为孔隙介质, 包括多种相态, 如由固体骨架和孔隙内充填的流体构成的双相介质等流体的分布特征不同, 所建立的地震岩石物理模型各异, 对地震波速度的影响亦不同. 当波在均匀多孔介质中传播, 波长与地层厚度可比时, 岩石表现出宏观各向同性和均匀性. 波的传播导致介质内部分界面上发生流体的流动, 引起波的频散和衰减(Brajanovski 等, 2005), 衰减的特征频率取决于孔隙流体压力弛豫的时空尺度(Wenzlau 等, 2010). 分界面两侧流体性质的差别越小, 波的频散和衰减越弱(Brajanovski 等, 2005). 岩石的流体饱和度呈斑块分布时, 体积模量较大的流体对应着较强的波衰减(Masson 等, 2006). 斑块大小和含气饱和度对波诱导的流体流动效应(频散和衰减)有重要的作用, 当气体密度低且斑块尺度相对较大时, 含气饱和度的作用较为明显(Rubino 等, 2011). 流体非均匀饱和对地震波传播和衰减也有很大的影响(Vogelaar 和 Smeulders, 2007). 流体非均匀饱和时, 纵波速度随含油气饱和度的变化相对于流体均匀饱和情况下更加连续(侯波等, 2012), 孔隙含油水比只含气时纵波速度传播更快, 含气饱和度增大, 岩石的刚度降低, 波速的低频极限降低(Brajanovski 等, 2005). 含气饱和度较高时, 岩石密度随含气饱和度增加而降低, 导致波速增加等(Knight 等, 2010). 目前, 科学界对储层流体的存在形式及分布特征以及由此而建立的地震岩石物理理论模型的认识尚未达成共识, 如何更合理地认识储层流体对地震波速度的影响是开展地震流体识别研究的关键科学问题之一.

1.2 流体是如何影响地震波响应的?

储层中流体的特性及分布特征对地震波响应的影响一般通过物理模拟或数值模拟来研究. 流体性质不同, 对地震波响应的影响各异. 如, 孔隙流体黏滞性是引起储层岩石以及其他流体饱和多孔介质弹性波衰减的重要原因(Sharma, 2005). 与气体相比, 液相的黏滞性对两种快波(快纵波和 SV 波)的速度影响更大, 气体和液体黏滞性对这些波的衰减作用是类似的. 随黏滞系数增大, 横波液相分量的振幅略有增大, 固相分量振幅略有减小, 慢纵波的振幅逐渐减小, 到黏滞边界条件下, 慢纵波衰减较快, 在快照中看不到慢纵波. 实际介质大部分都具有黏滞边界, 这也是在实际观测中很难观测到慢纵波的主要原因(卢明辉等, 2009). 流体渗透率亦会对地震波响应有直接影响, 双孔隙度模型表明了频散和衰减与孔隙度和渗透率的关系(Pride 和 Berryman, 2003), 纵波衰减系数与频率的相关性, 以及各向异性对渗透率的变化很敏感(Shapiro 和 Müller, 1999), 介质中不渗透的地质体能引起横波衰减明显增加. 横波衰减可以作为油藏中渗透率变化的指示(Wenzlau 等, 2010). 渗透率减小, 慢纵波的振幅明显减小, 而速度变化不明显, 快纵波和横波无明显变化(卢明辉等, 2009), 除此之外, 流体类型、分布均匀性、饱和度和温压条件等对地震波响应都有直接或间接的影响, 如何在地震岩石物理模型构建基础上建立合理的数学物理方程, 发展相应的模拟方法研究流体对地震波的影响亦是开展地震流体识别研究的关键科学问题.

1.3 如何从地震数据中获取有效流体信息?

地震资料中蕴含着丰富的运动学及动力学信息, 这些信息是地下介质岩性、物性和流体等储层特征参数的综合体现. 从地震资料中获取有效流体信息主要有模型驱动和数据驱动两种方式. 模型驱动是考虑地下介质地质地球物理特征, 选择合理的模型参数和边界条件建立地震波特征方程, 利用地震反演方法实现地有效流体信息估计的过程. 数据驱动是指基于信号理论, 选择合适的数据信号变换方法, 将观测数据作为地震信号实现地下流体信息估计的过程, 该方法可实现地震蕴含的与流体直接关联的信息的提取. 具体来讲, 基于数据驱动的地震反演可利用信号的相关表示理论(如稀疏表示、匹配追踪和基追踪等), 选择合理的信号原子或字典, 实现地震信号直接关联的流体敏感参数估计. 相比数据驱动, 采用基于模型驱动的地震流体方法得到的流体敏感参数更具有岩石物理意义. 受观测资料、模型参数化、正演算子和反演优化算法等多方面影响, 采用基于模型驱动的方式获取储层有效流体信息仍面临很大挑战.

2 含流体储层地震岩石物理

含流体储层岩石物理等效模型主要包括三类: 对矿物性质进行体积平均的有效介质理论(Wood, 1941; Wyllie 等, 1956; Raymer 等, 1980), 基于颗粒接触关系等效的接触介质理论(Walton, 1987; Dvorkin 和 Nur, 1996)和岩石内部矿物、孔隙形状及流体等效的自适应理论(Gassmann, 1951; Biot, 1956a, 1956b; Berryman, 1995).

在岩石中的孔隙相互连通, 孔隙中流体在流动过程中与骨架之间没有摩擦且不会起化学作用等假设条件下建立的低频 Biot-Gassmann 理论是研究孔隙介质的基础, 孔隙介质主要包括岩石基质、干岩石骨架和饱和岩石及孔隙流体四部分(图 1), 利用骨架模量和孔隙中流体模量, 计算低频下的饱和岩石体积模量和剪切模量, 从而求取与流体性质有关的纵波速度和横波速度. Nolen-Hoeksema(2000)分析了流体、岩石骨架与饱和岩石模量之间的关系. Han 等(2004)指出在利用 Gassmann 方程进行流体替换时, 输入参数的不准确往往导致错误的估计流体的影响, 并推导得到简化的 Gassmann 关系. Adam 等(2006)研究了在实验室地震和超声波测量下碳酸盐岩中的流体替换和剪切模量, 发现在碳酸盐岩中流体替换会导致岩石剪切模量的变化. Grochau 等(2009)对浊流岩岩样进行声波和超声波测量, 证实 Gassmann 流体替换与测量数据吻合, 并指出可以利用 Gassmann 理论来解释砂岩储层的延时效应. Li(2012)建立了流体替换前后 AVO 属性的线性方程, 利用属性交汇图实现气藏识别. 然而, 该理论建立的方程只有在特定孔隙度、流体黏滞性和特定频带下适用, 在孔隙小、连通性差的条件下, 该理论不再适用. Ciz 等(2007)将各向异性 Brown-Korringa 公式(Brown 和 Korringa, 1975)进行推广, 得到可以解释孔隙流体不可忽视的剪切模量的广义 Gassmann 方程, 使用广义 Gassmann 方程计算的饱和岩石剪切模量与干岩石模量不同. Xu 等(1996)提出了 Xu-White 模型, 将硅质碎屑岩的孔隙类型分为砂岩孔隙和泥岩孔隙, 更加符合碎屑岩情况(Keys 和 Xu, 2002). 张广智等(2013)和 Xu 等(2010)发展了针对缝洞型碳酸盐岩的地震岩石物理模型(图 2), 反演孔隙度和孔隙纵横比, 更准确地表述孔隙流体分布特征. Ruiz 等(2008)利用接触理论提出了针对高孔隙度海相碳酸盐岩的流体替换方法.

地震波在实际地球介质中传播时, 其振幅会由于各种可在宏观上归纳为“内摩擦”的过程而衰减, 导致质点运动的总能量减少, 衰减的过程伴随着一定的频散(Aki 和 Richards, 1980). Pride 等(2004)将地震波的衰减归结为两个方面——散射引起的衰减和地层的吸收作用引起的固有衰减. 散射衰减将能量以尾波的形式转移, 它与非均质体的尺度有关, 当非均质体的尺度远小于地震波长时, 高频成分会因相

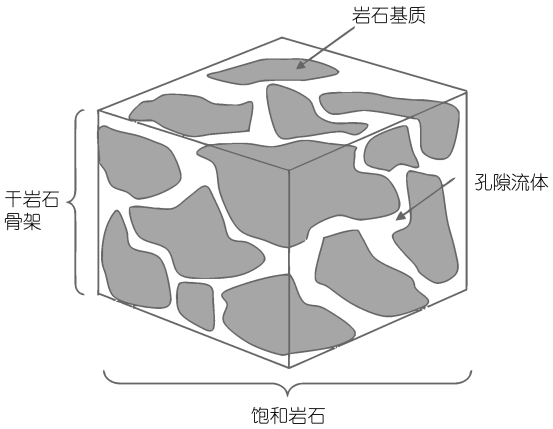

图 1 饱和流体孔隙介质模型

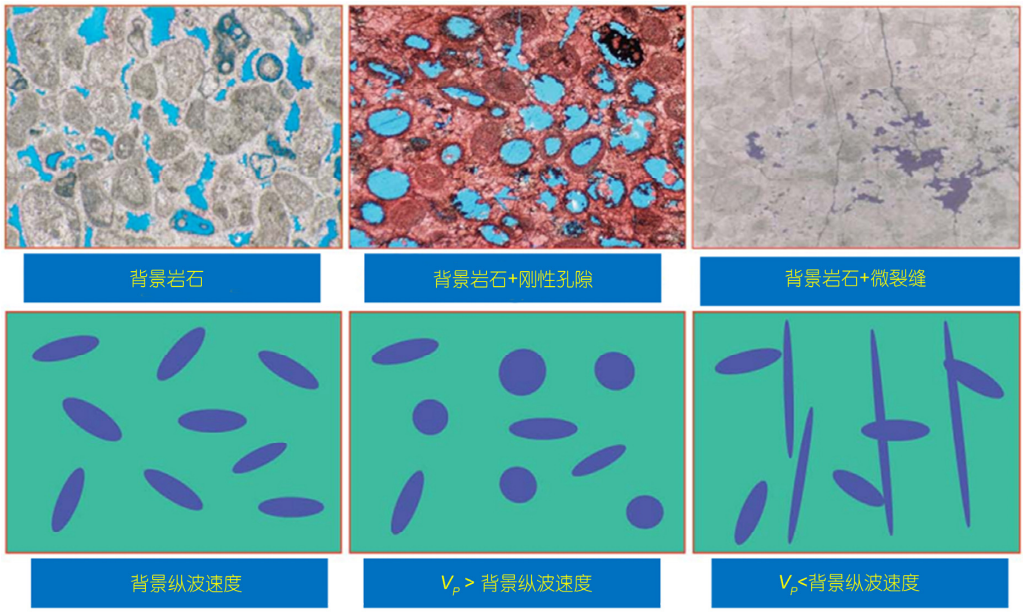

图 2　碳酸盐岩孔隙类型示意图

引自 Xu 等(2010)

消干涉而损失. 对于油气勘探, 岩石孔隙流体引起的地震波衰减是勘探地震研究的重要内容之一. 流体引起地震波衰减的基本假设为, 地震波在干燥的岩石中没有衰减, 因此衰减可以归因于当波动经过岩石时, 引起孔隙流体的流动, 这种流体流动因摩擦将一部分能量转化为热能而衰减. 在含气部分饱和岩石中, 这种衰减更明显. 与衰减及速度频散有关的地震属性已经用于地震解释和储层描述(Taner 等, 1979; Castagna 等, 2003; Ebrom, 2004; Chapman 等, 2006; Odebeatu 等, 2006; 陈学华等, 2009).

波动引起流体流动(wave induced by fluid flow, WIFF)是导致地震波衰减及速度频散的主要原因之一(Müller 等, 2010), 当地震波经过时, 由于岩石骨架或孔隙流体分布不均匀, 产生压力梯度, 从而导致流体流动引起地震波衰减和频散. 与流体有关地震波吸收衰减的岩石物理理论可以从尺度上分为三类: 宏观、中观(或介观、细观)和微观机制. 由于地震数据主频在几十赫兹, 频带宽度有限, 中观吸收衰减机制是最重要的. 这种理论的研究已从一维层状介质发展到三维空间非均匀分布的介质(White, 1975; Mavko 等, 1979; Dutta 和 Seriff, 1979; Müller 和 Gurevich, 2005). WIFF 机制本质上是流体压力松弛引起衰减, 有学者尝试用黏弹性介质来对其衰减和频散特征进行近似, 其中最常用的是标准线性体模型(Mavko 等, 2009), 这是一种基于表象的方法, 缺少岩石物理意义, 难以用测量的岩石物理特性进行解释. 在中观衰减方面, White(1975)提出中观尺度地震岩石物理理论, 构建了包含气泡的球状和由含水多孔介质单元层与含气多孔介质单元层周期叠置而成的斑块饱和模型, 之后 Dutta 等(1979)对其进行了改善. 除了多相流体的渗入以及非均匀饱和导致的中观非均匀岩石物理模型外, 岩石骨架结构、孔隙形状与分布等因素的非均匀性也可以导致中观衰减, 其中最具代表性的是双孔隙介质模型. Berryman 等(1995)首先研究了双孔隙介质控制方程及其各个参数的定义和计算方法. Pride 等(2003)基于体积平均假设, 推导了各向同性双孔隙介质流体渗流控制方程, 指出其存在两种流体渗流模式. Pride 等(2004)对地震波的衰减与速度频散进行了详细研究, 指出中观尺度非均匀的多孔固体骨架模型和多相流体非均匀饱和模型均能够在地震频带范围内产生与实际观测吻合的纵波频散.

国内学者也进行了一些关于地震岩石物理衰减理论及速度频散的研究, 大多集中在宏观和微观尺度. 杨顶辉(1998)研究了孔隙各向异性的宏观-喷流理论(Biot-Squirt, BISQ 理论), 拓展了 BISQ 理论的应用范围. 朱建伟等(2001)推导了含油水两相流体孔隙

介质的地震波传播方程, 并进行正演模拟. 聂建新等(2010)基于等效介质理论, 研究了部分饱和孔隙弹性介质中 BISQ 模型, 并对波的传播规律进行分析. 唐晓明(2011)考虑了孔隙与裂隙的相互作用, 对 Biot 理论和 BISQ 理论进行推广, 并分析了裂隙对衰减和频散特征的影响(图 3). 巴晶等(2012)利用双孔隙度模型和伪谱法数值模拟了多孔介质地震波场, 分析了中观尺度流体流动引起的地震波衰减. 刘炯等(2010)利用不同斑块饱和模型研究了地震波的衰减和频散特征. 在地震波衰减机制研究的基础上, 充分考虑宏观、中观及微观孔隙流体流动衰减影响, 可构建跨尺度岩石物理模型, 探索适用于地震频带的有效衰减理论, 同时结合孔隙流体介质弹性波动方程, 选择合理的边界条件, 建立相应数学物理方程, 通过方程求解, 建立地层吸收参数与储层物性及孔隙流体参数间量化关系. 图 4 为跨尺度全频带条件下地层吸收参数与储层渗透率之间的关系曲线, 从图中可知, 随储层渗透率降低, 地震波的衰减主频降低, 这为利用地层吸收参数等衰减属性进行致密油气储层流体识别研究奠定了理论基础.

3 流体特性地震波响应及敏感参数构建

储层流体地震波响应模拟对于认识流体分布, 黏滞性和渗透率等特性对地震波的影响具有重要意义, 是构建储层流体敏感参数的基础. White(1975)研

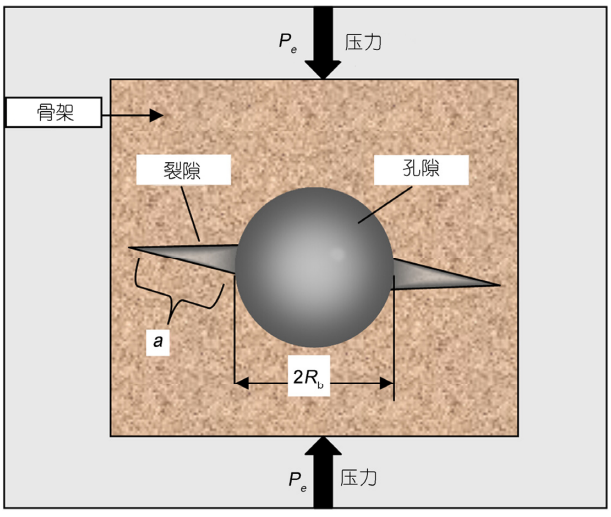

图 3 含裂隙-孔隙统一模型

改自唐晓明(2011)

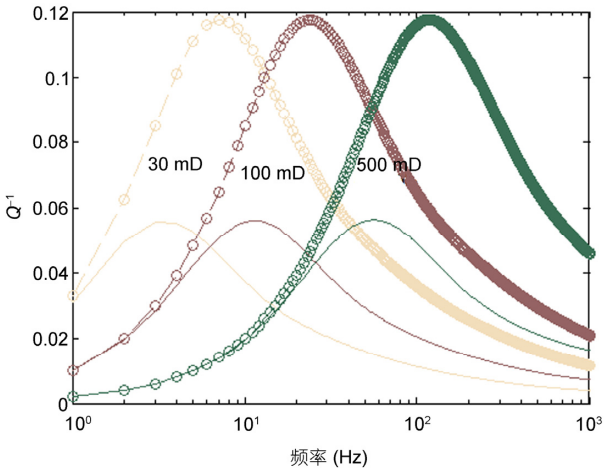

图 4 跨尺度全频带地层吸收参数与油气储层渗透率间的变化关系

究了低频纵波垂直于非均匀饱和介质内部边界传播时的声学性质. Murphy 等(1986)描述了局部流体流动对于声波性质的影响, 黏滞性流体流动导致能量耗散. Cadoret 等(1995)观测到了不同频段下, 流体斑块饱和对声波性质的影响, 速度随饱和度的变化与频率有关, 且频散在饱和度高时较强. Gurevich 等(1995)和 Gelinsky 等(1998)的研究结果表明在渗透性层状岩石多孔介质中, 波传播引起界面上流体发生局部流动, 导致的波衰减与周期层状介质模型中有明显不同. Pham 等(2002)将地震波速度和衰减与多孔弹性固体的孔隙压力及饱和度联系起来, Carcione 等(2003)使用数值实验模拟了球形 White 模型中的弛豫现象, 发现了类似的趋势. Gei 等(2003)校正了流体混合经验定律以及高频下的球状斑块饱和模型, 得到岩石的速度和衰减表达式, 两者是孔隙压力、温度、频率和饱和度的函数. Müller 等(2005)分析了波传播过程中引起的流体流动对衰减和频率的影响, 低频平面纵波的衰减系数的低频极限与频率的平方成正比, 高频范围内, 衰减系数与频率的平方根成正比. Brajanovski 等(2005)模拟包含定向裂缝的多孔介质中波的频散和衰减, 指出两者的特征频率取决于背景介质的渗透率, 流体的黏度以及裂缝的密度和间距. 孙林洁等(2011)对非均匀孔隙介质中的地震波进行了正演模拟, 分析了孔隙度和流体类型对地震波反射特征的影响. 孔隙度参数对地震反射波振幅和相位的影响较大. 孔隙度增加导致双相介质界面反射波旅行时变化, 且反射波振幅增加, 而油水两相并

存时, 含水饱和度增加导致反射波旅行时增加, 气水并存时, 含气饱和度增大, 反射波振幅迅速增大, 当含气饱和度增加到 10%左右时, 振幅达到最大值, 随后随含气饱和度上升缓慢下降. 数字岩石物理(the digital rock physics, DRP)使用现代显微成像以及先进的数值方法来模拟岩石的物理性质(Saenger 等, 2011; Madonna 等, 2012). DRP 在不同的尺度下对岩石的结构进行 3D 数字建模, 在完成实验测量的同时使用数值方法计算岩石的有效弹性参数(Ringstad 等, 2013). DRP 技术可以比室验更快地提供准确的岩石信息, 可用在孔隙尺度上对油藏进行敏感性分析、压裂方案设计、压力变化分析以及油藏描述, 提高油藏预测、产量预测以及井位确定的精度, 提高油气采收率(Kalam 等, 2011).

在考虑流体黏滞性方面, Borcherdt(1977, 1982)研究了黏弹性固体中非均匀波的反射和绕射. Sharma 等(1991)研究了黏弹性各向同性多孔固体中饱和黏滞性流体时反射系数. Gurevich(2002)研究了多孔岩石中流体的黏度对地震波衰减的影响. Liu 等(1990)提出由于流体的黏滞效应, 孔隙介质中固液两相除相对平动外, 还存在相对转动, 由此在含黏滞性流体孔隙介质的固液分界面上会出现第二类横波, 它的高频散、强衰减也是孔隙介质中波传能量耗散的原因之一. 卢明辉等(2009)分析了含黏滞流体孔隙介质中弹性波的频散和衰减, 指出慢横波主要在孔隙流体中传播, 高频低孔隙度时, 相速度较高. 在考虑流体渗透率方面, Shapiro 等(1999)指出纵波衰减系数与频率的相关性, 以及各向异性对渗透率的变化很敏感. 介质中不渗透的地质体能引起横波衰减明显增加. 横波衰减可以作为油藏中渗透率变化的指示. 数值模拟结果表明, 渗透率减小, 慢纵波的振幅明显减小, 而速度变化不明显, 快纵波和横波无明显变化.

在地震岩石物理模型构建及储层流体地震波响应分析基础上, 可将与孔隙流体有关的异常特性表征为流体因子, 依托流体因子实现储层含流体类型的判识, 因此, 流体因子的构建是地震流体识别的关键. Smith 等(1987)利用纵横波速度相对变化量的加权叠加来判别储层含烃异常, 并首次提出了流体因子的概念. Smith 等(2003)又提出了流体因子角和交会图角两种流体因子概念. Goodway 等(1997)提出了 LMR 技术, 通过研究地下岩层的拉伸特性异常实现储层含流体类型的判识. Quakenbush 等(2006)提出了泊松阻抗的概念. Russell 等(2003)在多孔弹性介质岩石物理理论的指导下, 基于 Biot-Gassmann 方程推导出了可以反映孔隙流体类型的ρf 参数, 指出可将其直接作为流体因子判识储层孔隙流体类型(Russell 等, 2011). 有研究表明, 对常规固结成熟的碎屑岩储层来说, Gassmann 流体项f具有较高的流体指示敏感性, 但 Zhang 等(2010)在实际资料应用中发现在固结程度较为复杂的地区, 受储层孔隙度影响, Gassmann 流体项f会产生一定的孔隙流体识别假象. 由图 5(b)可知, f 除受孔隙流体影响之外, 还受到岩石骨架固有的固

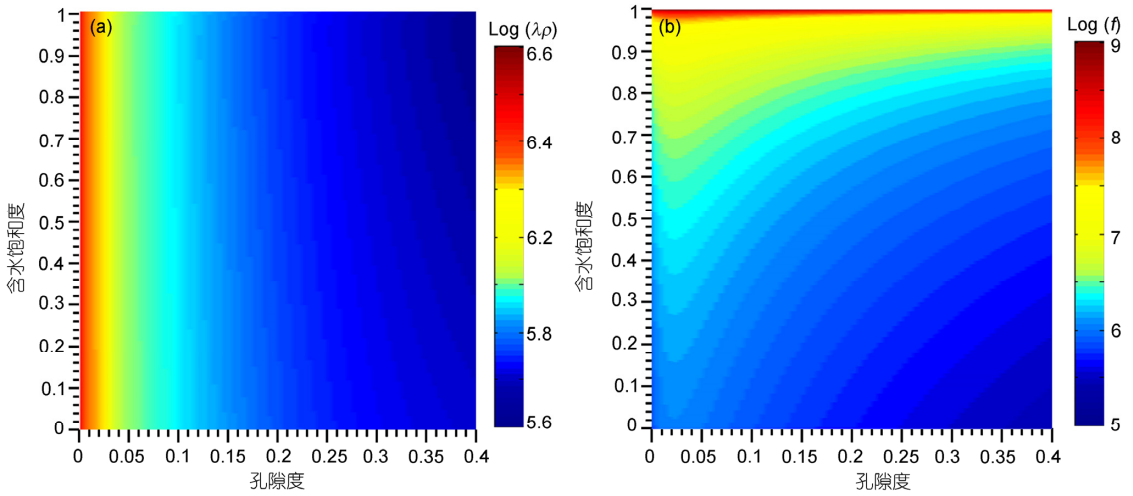

图 5　流体因子随孔隙度与含水饱和度的变化趋势图

(a) $\lambda\rho$; (b) Gassmann 流体项 f. 引自印兴耀等(2013a). 岩石孔隙饱含水和气

体效应(岩石基质和孔隙度等)的综合影响, f 随含水饱和度变化趋势受孔隙度影响造成一定的畸变, 因此, 在某些工区的实际应用中还需要注意储层岩石的固体效应(特别是孔隙度)造成的流体识别假象. 而影响流体项 f 取值的主要因素是孔隙流体体积模量与固体骨架孔隙度, 并且结合岩石物理实验得到的经验关系式, 利用测井资料实现了流体体积模量 K_f 的估算. 图 6 所示为不同孔隙度与含水饱和度情况下的 K_f 变化趋势, 从图中我们可以看到 K_f 与含水饱和度成完全线性变化趋势, 且完全不受孔隙度的影响. 因此, 如果我们采用特定的地球物理方法从地震资料中提取出流体体积模量参数 K_f, 将流体体积模量 K_f 作为一项流体因子参与流体识别, 即可实现固体骨架与流体弹性效应的解耦, 从而有效的提高了储层孔隙流体识别的可靠性. 此外, 针对致密油气储层, 可考虑跨尺度全频带条件下构建的地层吸收参数作为流体因子, 实现致密储层油气识别. 图 7 为某致密储层

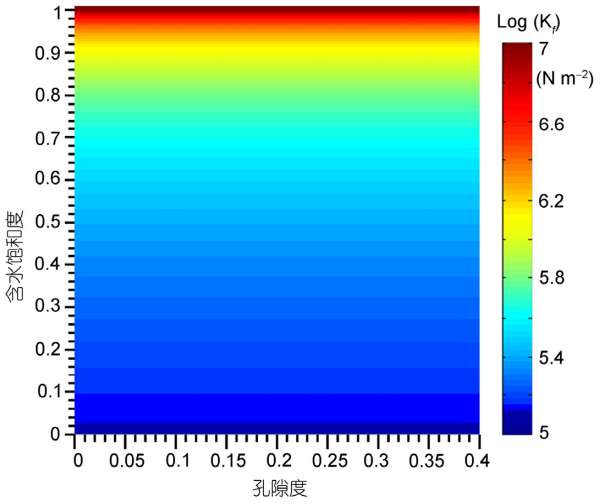

图 6　流体体积模量随孔隙度与含水饱和度的变化趋势图

引自印兴耀等(2013a)

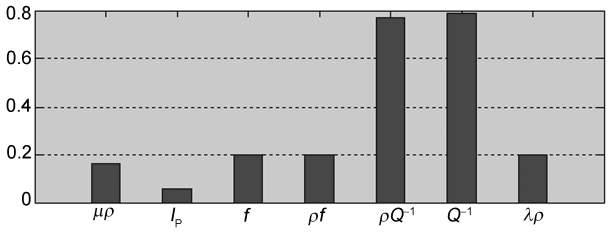

图 7　致密储层流体指示系数比较图

不同流体敏感指示系数比较图, 其中, $\mu\rho$ 为剪切模量与密度的乘积, I_p 为纵波阻抗, f 为 Gassmann 流体项, ρf 为 Gassmann 流体项与密度的乘积, ρQ^{-1} 为密度与地层衰减参数的乘积, Q^{-1}(地层吸收参数的倒数)指示地层衰减, $\lambda\rho$ 拉梅参数与密度的乘积. 从图 7 中可以看出, 地层吸收参数对致密储层流体存在具有较高的敏感度, 可有效识别储层的含流体段.

4　地震流体识别方法

地震流体识别方法主要研究如何利用地震资料的振幅, 频率及相位等获取有效的储层流体信息. 在地震资料解释过程中, 振幅信息主要应用于进行波的对比, 利用薄层反射振幅来估算薄层厚度, 利用反射振幅在纵横向的差异变化进行储层预测及烃类检测等(王永刚, 2007). 叠前地震反演是基于模型驱动的流体识别的主要手段. 为了提高反演质量, 学者们对反演算法进行了大量的研究(刘福平等, 2010; 候遵泽等, 2011). 基于波动方程的弹性波反演理论出现的比较早, 其直接利用地震炮集数据, 综合考虑所有类型的波来反演储层的弹性参数. Kennett(1986)利用地震波动力学与运动学理论, 基于传播矩阵的方法提出了反射系数模型的反演方法. Tarantola(1986)进一步利用先验约束信息改进了反演方法, 利用最小二乘准则将观测数据与模型计算数据的误差进行最小化处理. Sen 等(1991, 1992)则采用模拟退火, 遗传算法以及梯度优化算法对波形反演进行了研究. Mallick(1995)利用遗传算法求解模型的最大后验概率密度函数来实现弹性参数反演. 此类弹性波非线性反演方法在理论上较为成熟, 但受其计算效率低, 稳定性差以及易受噪声影响等原因的制约, 在实际生产中并没有得到广泛应用.

现阶段, 基于射线理论的叠前反演方法仍然在叠前地震反演的实际应用中占据主导地位. 基于射线理论的叠前反演包括 AVO 反演和叠前弹性阻抗反演, 前者利用反射系数及其近似公式(Yin 等, 2013; Zong 等, 2013a, 2013b), 后者采用弹性阻抗方程(宗兆云等, 2012a; Zong 等, 2013c). 在 AVO 反演方面, Buland 等(2003)将贝叶斯理论引入叠前 AVO 反演中, 实现了纵横波速度以及密度的三参数同步反演. Downton 等(2001, 2005)基于贝叶斯理论研究了两项和三项 AVO 反演, 并且讨论了先验约束分布的选取

对反演结果的影响. 张繁昌(2004)研究了层状半空间地震数据的波形反演方法. 殷文(2006)对叠前弹性波正反演的并行化进行了深入的研究, 并开发了基于微型计算机集群环境下的地震反演并行软件系统. 陈建江(2007)对三参数 AVO 波形反演和同步反演进行了深入研究, 取得了较好的效果. 杨培杰(2008)提出了地震盲反演的概念, 并发展了点约束稀疏脉冲叠前反演和非线性二次规划叠前反演两种非线性叠前地震反演方法. 曹丹平(2008)建立了多尺度地震资料联合反演方法体系. 张璐(2009)利用 Xu-White 模型, 结合测井重构反演和叠前波形反演来估算精细横波速度, 为叠前地震反演提供了精确的横波先验信息. 张广智等(2011)研究了基于马氏链蒙特卡罗法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)的非线性 AVO 反演方法, 取得了较好的实际应用效果. 在弹性阻抗及其反演方法方面, Connolly(1999)提出了一种结合了叠后波阻抗反演和 AVO 反演特点的弹性阻抗反演方法. Cambois(2000)认为利用角度叠加道集的弹性阻抗反演技术具有更好的抗噪能力, 因此弹性阻抗的反演效果要好于 AVO 反演. Whitcombe(2002)利用归一化的方法改进了 Connolly 弹性阻抗方程, 解决了数值量纲随角度变化的问题. 印兴耀等(2004)发展了基于弹性阻抗的弹性参数提取方法. 李爱山等(2009)针对深层储层提出了基于两个角度弹性阻抗的纵横波阻抗反演方法. 王保丽等(2007)推导了以拉梅参数表示的弹性阻抗公式, 提高了拉梅参数的反演精度. 印兴耀等(2010)提出了包含 Gassmann 流体项的弹性阻抗方程, 通过弹性阻抗反演可以直接反演高精度的流体项, 对某工区沙二段砂体(Es25)进行含烃异常检测, 得到 Es25 砂体的 Gassmann 流体项平面分布图如图 8 所示. Zong 等(2012)建立了利用纵横波模量表示的孔隙弹性理论和反射系数近似方程, 并发展了基于纵横波模量 AVO 反演的流体识别方法. 张世鑫(2012)发展了基于固液解耦的地震流体识别方法, 克服了常规流体识别方法受孔隙度影响造成的流体识别假象(图 9). 印兴耀等(2013b)提出了面向非均质储层的流体识别方法, 取得较好的实际应用效果.

利用地震振幅信息的 AVO 反演及分析技术在地震流体识别中发挥了重要作用. 然而, 在实际情况中仍然存在一些传统 AVO 技术解决不了的问题. 与油气藏有关的低频阴影现象一直为地球物理学家关注的热点(Goloshubin 和 Korneev, 2000; Castagna 等,

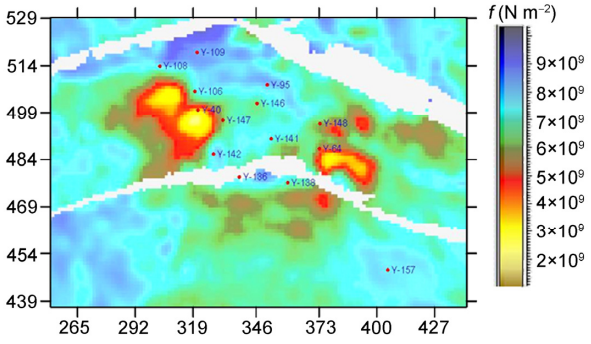

图 8　某工区 Es25 砂体的 f 值平面分布图

引自印兴耀等(2010)

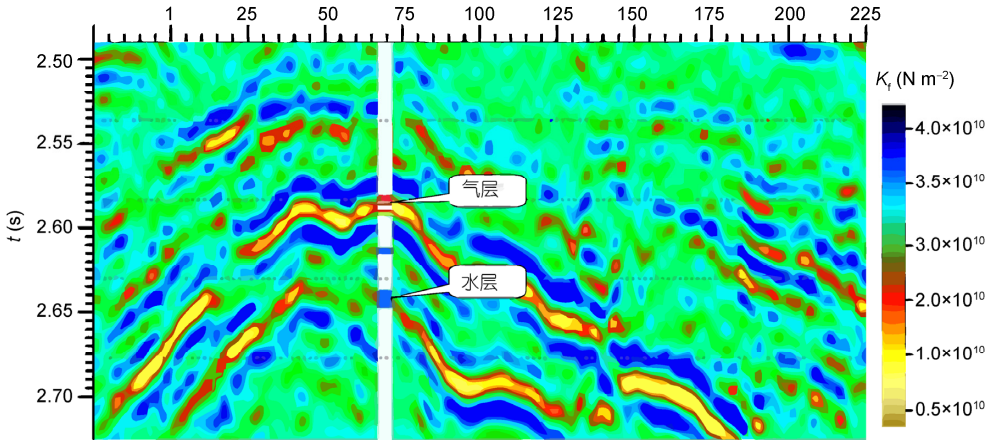

图 9　流体等效体积模量剖面

引自张世鑫(2012)

2003; Ebrom, 2004; Korneev 等, 2004; Chapman 等, 2006). 大量证据表明当地震波传播经过油气藏时, 波的衰减会引起频率异常变化. 强衰减的油气饱和地层往往品质因子低(Klimentos, 1995; Dasgupta 和 Clark, 1998; Dasios 等, 2001; Maultzsch 等, 2003; Rapoport 等, 2004). 与衰减相伴随的是速度频散, 一些学者基于速度频散与地震反射特征之间的数学关系, 对 AVF(振幅随频率的变化, amplitude variation with frequency)理论进行系统研究(Cooper Jr, 1967; Krebes, 1984; Nechtschein 和 Hron, 1997; Ursin 和 Stovas, 2002; Sidler 和 Carcione, 2007). Ren 等(2009)研究了垂直入射时, 在非频散介质和频散介质界面处振幅和相位角随着频率的变化, 并总结了三种不同模型相应的三类 AVF 响应. Innanen(2011)根据吸收反射系数公式, 研究了吸收反射系数随入射角, 频率以及品质因子的变化, 进一步讨论了反演目标介质 Q 的 AVF 反演方法. 在与频散有关的地震属性提取方法及引用方面, Wilson 等(2009)提出了一种实用的频散属性计算方法. Wu 等(2010)基于叠前地震资料进行了频变 AVO 反演. Zhang 等(2011)提出了基于纵波速度频散程度和梯度的反射系数近似式, 并实现了纵波速度频变反演. Chen 等(2012a)利用物理模型实例数据分析证实了不同流体充填后所产生的 AVO 响应特征异常. Cheng 等(2012)推导了一系列频变 AVO 属性, 并构建了计算频变 AVO 属性的公式. 赵万金等(2012)将频率域 AVO 流体识别技术应用到苏里格低渗透致密砂岩薄气层. Zhang 等(2013)提出了频变流体因子反射系数方程, 发展了频变流体因子反演方法, 并对实际资料进行了处理, 取得较好的应用效果(图 10). 还有学者发展了基于数据驱动的与频率有关的流体识别方法, 直接提取与频率有关的地震属性来识别油气(Xu 等, 2011; Chen 等, 2012b; Ahmed, 2012; 王小杰等, 2012; 王开燕等, 2013).

除振幅和频率信息外, 利用地震波相位信息亦可获取储层流体信息. Rafipour 等(1986)基于水平层状孔隙介质, 研究相位变化与孔隙流体, 入射角(即偏移距)和频率的关系. Mazzotti(1991)将振幅、频率和相位随偏移距的变化分析相结合, 利用振幅、频率和相位三种指示因子, 估计流体信息. Ravagnan 等(1992)利用 AVO 响应以及频率和相位随偏移距的变化作为指示因子描述含气砂岩、褐煤砂岩以及海底凝灰岩的反射. Zhu 等(2012)对相位随入射角的变化(Phase Variation with incident Angle, PVA)反演方法进行了模型测试, 比较了平面波法、球面波法和反射系数法三种正演方法, 通过逆时偏移证明了 PVA 信息的保真性优于 AVO 信息, 即多层介质深层反射的相位相比振幅受透射损失影响相对较小, 并且 PVA 数据可以提供反演所需的广角反射信息. 同样, 针对致密油气储层, 可考虑跨尺度全频带条件下构建的地层吸收参数进行储层流体识别, 如图 11 所示, 跨尺度全

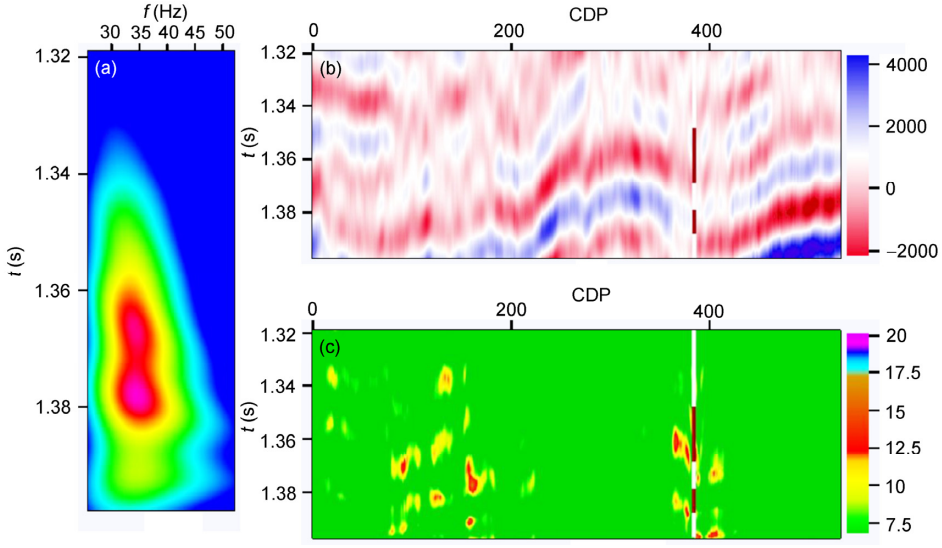

图 10　频变流体因子反演结果

(a) 地震道集的时频谱; (b) 角度地震道集; (c) 频变流体因子(井上紫色段为含气段). 引自 Zhang 等(2013)

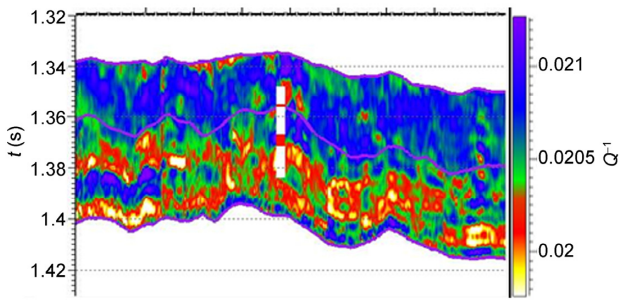

图 11　致密储层跨尺度全频带地层品质因子剖面

井上红色段为含气段

频带地层品质因子可对致密储层含流体位置进行有效识别.

5　机遇与挑战

地震流体识别是油气勘探地球物理的前沿基础课题, 我国地震流体识别研究在国际学术界已占有自己的地位. 然而, 随着油气勘探深入细化和能源需求加大, 油气勘探由常规构造油气藏向隐蔽岩性油气藏, 非常规油气藏勘探过渡, 由陆上平地, 浅海勘探向陆上山地, 深海勘探挺进. 地震勘探技术需求由勘探走向开发, 由浅层走向深层, 由储层预测走向流体识别, 物性预测. 为最大限度降低勘探风险, 对地震流体识别的精度和可靠性提出了更高的要求, 特别地, 非均质性强的横向不连续, 纵向叠置致密砂岩储层, 缝洞型碳酸盐岩储层以及非常规油气藏的出现更是给地震流体识别研究带来新的挑战. 为在地震流体识别研究中取得突破性进展, 我国地震流体识别研究工作者还需在以下三个方面付出更大努力.

(1) 地震岩石物理方面, 应加大地震频带岩石物理测试仪器研发, 加强地震频带或跨尺度地震岩石物理模型研究. 文献上目前仅见到以科罗拉多矿业学院为代表的为数不多的几家单位发表的地震频带岩石物理测量数据, 该数据为开展地震频带或跨尺度地震岩石物理模型研究奠定了数据基础. 近年来, 地震频带地震波衰减机制成为勘探地球物理工作者的研究热点, 以期明确地震波衰减或与地震波频率有关的地震属性与储层流体或骨架之间的量化关系, 这在国内尚刚刚起步, 虽有少数几篇有关地震频带岩石物理模型的报道, 却又难有自己的实验数据支撑, 因此, 迫切开展地震频带岩石物理测量仪器研发, 形成具有自主知识产权的地震频带岩石物理测试仪器, 这将引领我国地震岩石物理研究走向世界前列. 此外, 非常规致密、页岩油气地震岩石物理测试及基础理论研究均刚刚起步, 在综合考虑我国非常规油气储层特殊性的基础上进行非常规油气储层岩石地震岩石物理测试及基础理论研究迫在眉睫.

(2) 基于地震反演的流体识别方法研究方面, 地震反演主要采用地震资料中的振幅信息, 有学者开始尝试采用频率, 甚至相位信息来反演流体因子. 然而, 利用地震频率信息反演流体因子的基础理论方面还有待进一步深入研究, 现阶段采用的通过对反射系数求导方式获取频变流体因子的方法虽然在实际应用中取得了一定的效果, 但其物理意义尚待进一步明确. 而在利用地震波相位信息反演流体因子方面, 如何从地震数据中提取稳定的相位信息目前还具有很大的挑战.

(3) 流体因子反演方法在复杂油气流体识别中的应用方面, 现有实际生产中采用的流体因子反演方法大都利用在均匀或水平层状假设条件建立的反射特征方程, 受地震资料品质等影响, 方法的稳定性和可靠性有待改善提高, 缺乏面向较强非均质性储层的地震反演方法, 除需增强常规方法在非均质储层应用中的适用性外, 还需从理论上探索面向非均匀介质的介质参数叠前地震反演策略与方法. 此外, 针对中深部油气储层, 致密储层, 非常规油气储层等复杂油气储层的地震流体识别方法还有待深入研究.

致谢　感谢中国科学院地质与地球物理研究所张忠杰先生于 2013 年 5 月在第一届地球科学前沿论坛学术会议上对本文的建议和指导. 感谢澳大利亚联邦政府、西澳大利亚州政府、西北大陆架液化天然气合资公司等各方的资助以及西澳能源联合研究中心的支持.

参考文献

巴晶, 曹宏, 杜启振, 等. 2012. 非饱和岩石中的纵波频散与衰减: 双重孔隙介质波传播方程. 地球物理学报, 55: 219–231

曹丹平. 2008. 多尺度地震资料正反演方法研究. 博士学位论文. 山东: 中国石油大学(华东)
陈建江. 2007. AVO 三参数反演方法研究. 博士学位论文. 山东: 中国石油大学(华东)
陈学华, 贺振华, 黄德济, 等. 2009. 时频域油气储层低频阴影检测. 地球物理学报, 52: 215–221
侯波, 陈小宏, 李景叶. 2012. 三相流体非均匀饱和多孔岩石声学模拟与分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 42: 259–270
侯遵泽, 杨文采. 2011. 塔里木盆地多尺度重力场反演与密度结构. 中国科学: 地球科学, 41: 29–39
李爱山, 印兴耀, 陆娜, 等. 2009. 两个角度弹性阻抗反演在中深层含气储层预测中的应用. 石油地球物理勘探, 44: 87–92
刘福平, 孟宪军, 王玉梅, 等. 2010. 反演纵横波速度的 Jacobian 矩阵及精确计算方法. 中国科学: 地球科学, 40: 1608–1616
刘炯, 马坚伟, 杨慧珠. 2010. White 球状 Patchy 模型中纵波传播研究. 地球物理学报, 53: 954–962
卢明辉, 巴晶, 杨慧珠. 2009. 含黏滞流体孔隙介质中的弹性波. 工程力学: 36–40
聂建新, 杨顶辉, 巴晶. 2010. 含泥质低孔渗各向异性黏弹性介质中的波频散和衰减研究. 地球物理学报, 53: 385–392
孙林洁, 印兴耀. 2011. 基于 PML 边界条件的高倍可变网格有限差分数值模拟方法. 地球物理学报, 54: 1614–1623
唐晓明. 2011. 含孔隙, 裂隙介质弹性波动的统一理论——Biot 理论的推广. 中国科学: 地球科学, 41: 784–795
王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 2007. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演. 石油地球物理勘探, 42: 435–439
王开燕, 徐清彦, 张桂芳, 等. 2013. 地震属性分析技术综述. 地球物理学进展, 28: 815–823
王小杰, 印兴耀, 吴国忱. 2012. 基于 S 变换的吸收衰减技术在含气储层预测中的应用研究. 石油物探, 51: 37–42
王永刚. 2007. 地震资料综合解释方法. 东营: 中国石油大学出版社
杨顶辉. 1998. 孔隙各向异性介质中基于 BISQ 模型的弹性波传播理论及有限元方法. 博士后研究报告. 北京: 中国石油大学
杨培杰. 2008. 地震子波盲提取与非线性反演. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东)
殷文. 2006. 叠前弹性波正反演并行方法研究. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东)
印兴耀, 袁世洪, 张繁昌. 2004. 从弹性波阻抗中提取岩石物性参数. CPS/SEG 2004 国际地球物理会议. 北京
印兴耀, 张世鑫, 张繁昌, 等. 2010. 利用基于 Russell 近似的弹性波阻抗反演进行储层描述和流体识别. 石油地球物理勘探, 45: 373–380
印兴耀, 李超, 张世鑫. 2013a. 基于双相介质的地震流体识别. 中国石油大学学报: 自然科学版, 37: 38–43
印兴耀, 宗兆云, 吴国忱. 2013b. 非均匀介质孔隙流体参数地震散波反演. 中国科学: 地球科学, 43: 1934–1942
印兴耀, 周琪超, 宗兆云, 等. 2014. 基于 *t* 分布为先验约束的叠前 AVO 反演. 石油物探, 53: 84–92
张繁昌. 2004. 叠前地震数据的弹性波反演方法研究. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东)
张广智, 陈怀震, 王琪, 等. 2013. 基于碳酸盐岩裂缝岩石物理模型的横波速度和各向异性参数预测. 地球物理学报, 56: 1707–1715
张广智, 王丹阳, 印兴耀, 等. 2011. 基于 MCMC 的叠前地震反演方法研究. 地球物理学报, 54: 2926–2932
张璐. 2009. 基于岩石物理的地震储层预测方法应用研究. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东)
张世鑫. 2012. 基于地震信息的流体识别方法研究与应用. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东)
赵万金, 杨午阳, 张巧凤, 等. 2012. 一种频率域 AVO 油气检测方法. 石油地球物理勘探, 47: 436–441
朱建伟, 何樵登, 田志禹. 2001. 基于 BISQ 机制的含油水孔隙介质地震波波动方程. 石油物探, 40: 8–13
宗兆云, 印兴耀, 吴国忱. 2012a. 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: 284–292
宗兆云, 印兴耀, 张峰, 等. 2012b. 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: 3786–3794
Adam L, Batzle M, Brevik I. 2006. Gassmann's fluid substitution and shear modulus variability in carbonates at laboratory seismic and ultrasonic frequencies. Geophysics, 71: 173–183
Ahmed F. 2012. Gas detection using matching pursuit spectral decomposition seismic attribute. 74th EAGE Conference & Exhibition. Copenhagen
Aki K, Richards P G. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods. vol.(I) and (II). New York: WH Fremman
Backus M M, Chen R. 1975. Flat spot exploration. Geophys Prospect, 23: 533–577
Berryman J G. 1995. Mixture theories for rock properties. In: Ahrens T J, ed. Rock Physics and Phase Relations. Washington: American Geophysical Union. 205–228
Berryman J G, Wang H F. 1995. The elastic coefficients of double-Porosity models for fluid transport in jointed rock. J Geophys Res, 100: 24611–24627
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: 167–178
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
Borcherdt R D. 1977. Reflection and refraction of type-II S waves in elastic and anelastic media. Bull Seismol Soc Amer, 67: 43–67
Borcherdt R D. 1982. Reflection-refraction of general P- and type S- waves in elastic and anelastic solids. Geophys Roy Astron Soc, 70: 621–638

Brajanovski M, Gurevich B, Schoenberg M. 2005. A model for P-wave attenuation and dispersion in a porous medium permeated by aligned fractures. Geophys J Int, 163: 372–384

Brown R J S, Korringa J. 1975. On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid. Geophysics, 40: 608–616

Buland A, Omre H. 2003. Bayesian linearized AVO inversion. Geophysics, 68: 185–198

Cadoret T, Marion D, Zinszner B. 1995. Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones. J Geophys Res, 100: 9789–9803

Cambois G. 2000. AVO inversion and elastic impedance. SEG Tech Prog Exp Abs, 142–145

Carcione J M, Helle H B, Pham N H. 2003. White's model for wave propagation in partially saturated rocks: Comparison with poroelastic numerical experiments. Geophysics, 68: 1389–1398

Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. 2003. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons. The Leading Edge, 22: 120–127

Castagna J P, Swan H W, Foster D J. 1998. Framework for AVO gradient and intercept interpretation. Geophysics, 63: 948–956

Chapman M, Liu E, Li X Y. 2006. The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis. Geophys J Int, 167: 89–105

Chen S Q, Li X Y, Wang S X. 2012a. The analysis of frequency-dependent characteristics for fluid detection: A physical model experiment. Appl Geophys, 9: 195–206

Chen X H, He Z H, Zhu S X, et al. 2012b. Seismic low-frequency-based calculation of reservoir fluid mobility and its applications. Appl Geophys, 9: 326–332

Cheng B J, Xu T J, Li S G. 2012. Research and application of frequency dependent AVO analysis for gas recognition (in Chinese). Chin J Geophys, 55: 608–613

Ciz R, Shapiro S A. 2007. Generalization of Gassmann equations for porous media saturated with a solid material. Geophysics, 72: A75–A79

Connolly P. 1999. Elastic impedance. The Leading Edge, 18: 438–452

Cooper Jr H F. 1967. Reflection and transmission of oblique plane waves at a plane interface between viscoelastic media. J Acoust Soc Am, 42: 1064–1069

Dasgupta R, Clark R A. 1998. Estimation of Q from surface seismic reflection data. Geophysics, 63: 2120–2128

Dasios A, Astin T, McCann C. 2001. Compressional-wave Q estimation from full-waveform sonic data. Geophys Prospect, 49: 353–373

Downton J E. 2005. Seismic parameter estimation from AVO inversion. Dotoral Dissertation. Geophys Prospect: University of Calgary

Downton J E, Lines L. 2001. Constrained three parameter AVO inversion and uncertainty analysis. SEG Tech Prog Exp Abs, 251–254

Dutta N, Seriff A. 1979. On White's model of attenuation in rocks with partial gas saturation. Geophysics, 44: 1806–1812

Dvorkin J, Nur A. 1996. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets. Geophysics, 61: 1363–1370

Ebrom D. 2004. The low-frequency gas shadow on seismic sections. The Leading Edge, 23: 772–772

Gassmann F. 1951. Elastic waves through a packing of spheres. Geophysics, 16: 673–685

Gei D, Carcione J M. 2003. Acoustic properties of sediments saturated with gas hydrate, free gas and water. Geophys Prospect, 51: 141–158

Gelinsky S, Shapiro S, Müller T, et al. 1998. Dynamic poroelasticity of thinly layered structures. Int J Solids Struct, 35: 4739–4751

Goloshubin G M, Korneev V A. 2000. Seismic low-frequency effects from fluid-saturated reservoir. SEG Tech Prog Exp Abs, 1671–1674

Goodway B, Chen T, Downton J. 1997. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; "$\lambda\rho$", $\mu\rho$, $\lambda\mu$ fluid stack", from P And S inversions. SEG Tech Prog Exp Abs, 183–186

Grochau M, Gurevich B. 2009. Testing Gassmann fluid substitution: Sonic logs versus ultrasonic core measurements. Geophys Prospect, 57: 75–79

Gurevich B. 2002. Effect of fluid viscosity on elastic wave attenuation in porous rocks. Geophysics, 67: 264–270

Gurevich B, Lopatnikov S. 1995. Velocity and attenuation of elastic waves in finely layered porous rocks. Geophys J Int, 121: 933–947

Han D, Batzle M L. 2004. Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities. Geophysics, 69: 398–405

Hilterman F J. 2001. Seismic amplitude interpretation: 2001 distinguished instructor short course. Huston: Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers

Innanen K A. 2011. Inversion of the seismic AVF/AVA signatures of highly attenuative targets. Geophysics, 76: 1–14

Kalam Z, Dayyani T, Grader A, et al. 2011. Digital rock physical analysis in complex carbonates. World Oil, 232: 1–5

Kennett B. 1986. Seismic wave propagation in stratified media. Geophys Roy Astron Soc, 86: 219–220

Keys R G, Xu S. 2002. An approximation for the Xu-White velocity model. Geophysics, 67: 1406–1414

Klimentos T. 1995. Attenuation of P-and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water. Geophysics, 60: 447–458

Knight R, Pyrak-Nolte L, Slater L, et al. 2010. Geophysics at the interface: Response of geophysical properties to solid-fluid, fluid-fluid, and solid-solid interfaces. Rev Geophys, 48: RG4002

Korneev V A, Goloshubin G M, Daley T M, et al. 2004. Seismic low-frequency effects in monitoring fluid-saturated reservoirs. Geophysics, 69: 522–532

Krebes E. 1984. On the reflection and transmission of viscoelastic waves—Some numerical results. Geophysics, 49: 1374–1380

Li J Y. 2012. Gas reservoir identification by seismic AVO attributes on fluid substitution. Applied Geophysics, 9: 139–148

Liu Q R, Katsube N. 1990. The discovery of a second kind of rotational wave in a fluid–filled porous material. J Acoust Soc Am, 88: 1045–1053

Madonna C, Almqvist B S G, Saenger E H. 2012. Digital rock physics: Numerical prediction of pressure—Dependent ultrasonic velocities using micro-CT imaging. Geophys J Int, 189: 1475–1482

Mallick S. 1995. Model-based inversion of amplitude-variations-with-offset data using a genetic algorithm. Geophysics, 60: 939–954

Masson Y J, Pride S R, Nihei K T. 2006. Finite difference modeling of Biot's poroelastic equations at seismic frequencies. J Geophys Res, 111: 1–13

Maultzsch S, Chapman M, Liu E, et al. 2003. Modelling frequency-dependent seismic anisotropy in fluid-saturated rock with aligned fractures: Implication of fracture size estimation from anisotropic measurements. Geophys Prospect, 51: 381–392

Mavko G, Kjartansson E, Winkler K. 1979. Seismic wave attenuation in rocks. Rev Geophys, 17: 1155–1164

Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. 2009. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge: Cambridge University Press

Mazzotti A. 1991. Amplitude, phase and frequency versus offset applications. Geophys Prospect, 39: 863–886

Müller T M, Gurevich B. 2005. Wave-induced fluid flow in random porous media: Attenuation and dispersion of elastic waves. J Acoust Soc Am, 117: 2732–2741

Müller T M, Gurevich B, Lebedev M. 2010. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks—A review. Geophysics, 75: 147–164

Murphy III W F, Winkler K W, Kleinberg R L. 1986. Acoustic relaxation in sedimentary rocks: Dependence on grain contacts and fluid saturation. Geophysics, 51: 757–766

Nechtschein S, Hron F. 1997. Effects of anelasticity on reflection and transmission coefficients. Geophys Prospect, 45: 775–793

Nolen-Hoeksema R C. 2000. Modulus-porosity relations, Gassmann's equations, and the low-frequency elastic-wave response to fluids. Geophysics, 65: 1355–1363

Odebeatu E, Zhang J, Chapman M, et al. 2006. Application of spectral decomposition to detection of dispersion anomalies associated with gas saturation. Leading Edge, 25: 206–210

Ostrander W J. 1982. Plane wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence. SEG Tech Prog Exp Abs, 1637–1648

Pham N H, Carcione J M, Helle H B, et al. 2002. Wave velocities and attenuation of shaley sandstones as a function of pore pressure and partial saturation. Geophys Prospect, 50: 615–627

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

Pride S R, Berryman J G, Harris J M. 2004. Seismic attenuation due to wave-induced flow. J Geophys Res, 109: B01201

Quakenbush M, Shang B, Tuttle C. 2006. Poisson impedance. Leading Edge, 25: 128–138

Rafipour B, Herrin E. 1986. Phase offset indicator (POI): A study of phase shift versus offset and fluid content. Geophysics, 51: 679–688

Rapoport M B, Rapoport L I, Ryjkov V I. 2004. Direct detection of oil and gas fields based on seismic inelasticity effect. Leading Edge, 23: 276–278

Ravagnan G, Mazotti A, Melis A, et al. 1992. Prestack seismic signatures of actual and synthetic reflections from different petrophysical targets. 54th EAGE Conference & exhibition. Paris

Raymer L, Hunt E, Gardner J. 1980. An improved sonic transit time-to-porosity transform. SPWLA Tech Prog Exp Abs

Ren H, Goloshubin G, Hilterman F J. 2009. Poroelastic analysis of amplitude-versus-frequency variations. Geophysics, 74: 41–48

Ringstad C, Westphal E, Mock A, et al. 2013. Elastic Properties of Carbonate Reservoir Rocks Using Digital Rock Physics. 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. London

Rubino J G, Velis D R, Sacchi M D. 2011. Numerical analysis of wave-induced fluid flow effects on seismic data: Application to monitoring of CO_2 storage at the Sleipner field. J Geophys Res, 116: B03306

Ruiz F, Dvorkin J. 2008. Sediment with porous grains: Rock-physics model and application to marine carbonate and opal. Geophysics, 74: 1–15

Russell B H, Gray D, Hampson D P. 2011. Linearized AVO and poroelasticity. Geophysics, 76: 19–29

Russell B H, Hedlin K, Hilterman F J, et al. 2003. Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective. Geophysics, 68: 29–39

Rutherford S R, Williams R H. 1989. Amplitude-versus-offset variations in gas sands. Geophysics, 54: 680–688

Saenger E H, Enzmann F, Keehm Y, et al. 2011. Digital rock physics: Effect of fluid viscosity on effective elastic properties. J Appl Geophys, 74: 236–241

Sen M K, Stoffa P L. 1991. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing. Geophysics, 56: 1624–1638

Sen M K, Stoffa P L. 1992. Rapid sampling of model space using genetic algorithms: Examples from seismic waveform inversion. Geophys J Int, 108: 281–292

Shapiro S A, Müller T M. 1999. Seismic signatures of permeability in heterogeneous porous media. Geophysics, 64: 99–103

Sharma M. 2005. Propagation of inhomogeneous plane waves in dissipative anisotropic poroelastic solids. Geophys J Int, 163: 981–990

Sharma M, Gogna M. 1991. Seismic wave propagation in a viscoelastic porous solid saturated by viscous liquid. Pure Appl Geophys, 135: 383–400

Sidler R, Carcione J M. 2007. Wave reflection at an anelastic transversely isotropic ocean bottom. Geophysics, 72: 139–146

Smith G C, Gidlow M, 2003. The fluid factor angle and the crossplot angle. SEG Tech Prog Exp Abs: 185–188

Smith G C, Gidlow P M. 1987. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas. Geophys Prospect, 35: 993–1014

Taner M T, Koehler F, Sheriff R. 1979. Complex seismic trace analysis. Geophysics, 44: 1041

Tarantola A. 1986. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data. Geophysics, 51: 1893–1903

Ursin B, Stovas A. 2002. Reflection and transmission responses of a layered isotropic viscoelastic medium. Geophysics, 67: 307–323

Vogelaar B, Smeulders D. 2007. Extension of White's layered model to the full frequency range. Geophys Prospect, 55: 685–695

Walton K. 1987. The effective elastic moduli of a random packing of spheres. J Mech Phys Solids, 35: 213–226

Wenzlau F, Altmann J B, Müller T M. 2010. Anisotropic dispersion and attenuation due to wave-induced fluid flow: Quasi-static finite element modeling in poroelastic solids. J Geophys Res, 115: B07204

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

White J. 1975. Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation. Geophysics, 40: 224–232

Wilson A, Chapman M, Li X Y. 2009. Frequency-dependent AVO inversion. SEG Tech Prog Exp Abs: 341–345

Wood A B, 1941. A textbook of sound: Being an account of the physics of vibrations with special reference to recent theoretical and technical developments. New York: The Macmillan Company

Wu X, Chapman M, Wilson A, et al. 2010. Estimating seismic dispersion from pre-stack data using frequency-dependent AVO inversion. SEG Tech Prog Exp Abs: 425–429

Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics, 21: 41–70

Xu D, Wang Y, Gan Q et al. 2011. Frequency-dependent seismic reflection coefficient for discriminating gas reservoirs. J Geophys Eng, 8: 508–513

Xu S, Saltzer R, Keys R. 2010. Integrated anisotropic rock physics model. WO Patent, US7676349 B2, 2010-03-09

Xu S, White R E. 1996. A physical model for shear-wave velocity prediction. Geophys Prospect, 44: 687–717

Yin X Y, Yang P J, Zhang G Z. 2008. A novel prestack AVO inversion and its application. SEG Tech Prog Exp Abs: 2041–2045

Yin X Y, Zong Z Y, Wu G C. 2013. Improving seismic interpretation: A high-contrast approximation to the reflection coefficient of a plane longitudinal wave. Pet Sci, 10: 466–476

Yuan S Y, Wang S X. 2013. Spectral sparse Bayesian learning reflectivity inversion. Geophys Prospect, 61: 735–746

Zhang S, Yin X, Zhang F. 2010. Quasi fluid modulus for delicate lithology and fluid discrimination. SEG Tech Prog Exp Abs, 29: 404–408

Zhang S X, Yin X Y, Zhang G Z. 2011. Dispersion-dependent attribute and application in hydrocarbon detection. J Geophys Eng, 8: 498

Zhang Z, Yin X, Zong Z. 2013. A New Frequency-dependent AVO Attribute and its Application in Fluid Identification. 75th EAGE Conference & Exhibition. London

Zhu X, McMechan G A. 2012. Elastic inversion of near- and postcritical reflections using phase variation with angle. Geophysics, 77: 149–159

Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. 2012a. AVO inversion and poroelasticity with P- and S-wave moduli. Geophysics, 77: 29–36

Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. 2013a. Direct inversion for a fluid factor and its application in heterogeneous reservoirs. Geophys Prospect, 61: 998–1005

Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. 2013b. Multi–parameter nonlinear inversion with exact reflection coefficient equation. J App Geophy, 98: 21–32

Zong Z Y, Yin X Y, Wu G C. 2013c. Elastic impedance variation with angle inversion for elastic parameters. J Geophys Eng, 9: 247–260