

The Application and Development of Geophysical Prospecting Technology for Unconventional Oil and Gas in China*

Weina Luan, Yuxiang Lin

College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao
Email: wnluan@163.com

Received: Sep. 10th, 2013; revised: Oct. 13th, 2013; accepted: Oct. 26th, 2013

Copyright © 2013 Weina Luan, Yuxiang Lin. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Weina Luan, Yuxiang Lin. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian

Abstract: There are huge amount of unconventional oil and gas resources in China, which are still in the early stage of exploration and development at present. As the key technology, geophysical prospecting has played an important role in the exploration of oil and gas. Firstly, the application status of geophysical prospecting technology for unconventional oil and gas are respectively summarized in five aspects, such as seismic prospecting, logging technology, gravity prospecting, magnetic prospecting and electrical prospecting. Finally, some suggestions for the development of geophysical technology for unconventional oil and gas are put forward in order to improve the level of exploration.

Keywords: Unconventional Oil and Gas; Geophysical Prospecting; Application; Development

中国非常规油气物探技术的应用和发展*

栾伟娜, 林玉祥

山东科技大学地质科学与工程学院, 青岛
Email: wnluan@163.com

收稿日期: 2013年9月10日; 修回日期: 2013年10月13日; 录用日期: 2013年10月26日

摘要: 中国的非常规油气可采资源量巨大, 目前仅处于勘探开发的初级阶段。地球物理勘探是油气勘探的关键技术, 笔者分别从地震勘探、测井技术、重力勘探、磁法勘探、电法勘探等方面总结了物探技术在非常规油气勘探中的应用现状, 并针对非常规油气的赋存特点, 以及地球物理勘探技术的进展, 提出了非常规油气物探技术的发展建议。

关键词: 非常规油气; 地球物理勘探; 应用; 发展

1. 引言

油气资源对现代社会的经济发展有着至关重要的影响, 全球各个国家都在想方设法增加油气储量。随着中国经济的快速发展, 对能源的需求持续增长, 中国原油进口量不断刷新历史纪录。据国家海关总

署发布的统计数据显示“2012年中国进口原油 2.71 亿吨, 同比增长 6.8%”; 另据国家发改委统计“2012年中国对外原油依存度达到了 56.4%, 较 2011 年和 2010 年进一步攀升”。这意味着自 1993 年中国成为原油净进口国以来, 原油对外依存度在十年内提高了 9 倍。国际能源署表示“中国原油需求增速未来若保持不变, 石油进口依存度将在 2035 年上升至 80%”。油

*国家自然科学基金面上项目(41172108)和国家油气专项“十二五”课题(2011ZX05033-04, 2011ZX05004-01)资助。

气资源的匮乏必将严重制约国家经济发展,威胁国家能源安全。因此,加大油气资源的勘探和开发力度迫在眉睫,除了要保障常规油气资源的生产,大力发展非常规油气资源是必然趋势。概括来讲,非常规油气是指空间分布范围大、缺乏常规圈闭且不受水动力效应明显影响的连续型聚集的油气,是利用现有技术难以进行经济开发,需采用新技术改善储集层渗透率或流体粘度以获得工业产能的油气资源^[1]。非常规油气主要分布于前陆盆地斜坡、拗陷盆地中心以及克拉通向斜部位等负向构造单元,具有油气大面积连续分布、丰度低且不均一;烃源岩与储集岩一体或紧邻;储集层物性差,油气主要聚集于纳米级孔隙中等特点^[2,3],因此勘探开发成本高、风险大。

纵观全球,作为世界上非常规天然气开发时间最早、规模最大、水平最高的国家,美国的非常规天然气产量已占其总产量的一半以上。我国的非常规油气资源丰富,发展潜力大,据估计,中国非常规石油资源约 240 亿吨,非常规天然气资源约 100 万亿方^[1]。其中,致密油、致密气、煤层气、页岩油、页岩气等非常规油气可采资源量都极为丰富,且广泛分布于松辽、鄂尔多斯、渤海湾、准噶尔、四川、沁水等盆地^[2,4]。但是,我国非常规油气勘探开发起步较晚,尚未形成系统的勘探开发技术评价体系,非常规油气的开采量很少。此外,中国大地构造背景及演化过程独特,陆块内部结构复杂,经历了多次的构造运动和强烈的后期改造^[5],这就进一步增加了非常规油气的勘探难度。鉴于非常规油气资源勘探开发的重要性和紧迫性,有必要对勘探的应用现状进行总结,明确今后的发展趋势,以求加快非常规油气资源商业开采的步伐。

2. 非常规油气资源物探技术的应用

作为近代油气勘探不可缺少的重要技术——地球物理勘探技术(简称物探技术),在我国油气发现与勘探开发历史中发挥了关键作用,是推动油气工业持续发展的核心力量^[6,7]。地球物理勘探是利用物理学的原理和方法以及相关技术,对地球的各种物理场分布及其变化进行观测,获取某些地质参数、特征和变化规律,从而对地质问题进行切合实际的分析与解释。主要方法包括地震勘探、测井技术、重力勘探、磁法

勘探和电法勘探^[8]。

2.1. 地震勘探

地震勘探是利用人工激发的地震波在弹性不同的地层内的传播规律来勘查地下的地质情况。当前地震采集和处理技术以提高构造成像精度为主,但一些技术已在非常规油气勘探中得以应用。

2.1.1. 地震属性分析技术

地震属性是指由叠前和叠后地震数据,经过数学变换后得到的地震波的几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征^[9]。地震属性分析技术包括各种常规地震属性分析、基于 AVO 的多属性分析等。地震属性在描述地震相、沉积相以及刻画裂缝等方面具有独到之处,可利用多属性融合技术预测“甜点”,利用频率域 AVO 分析技术预测致密砂岩气。蒋涔等^[10]对南海琼东南勘查区的地震数据提取“三瞬”属性进行分析,预测天然气水合物富集有利区,即用瞬时振幅识别团状分段性空白反射带顶底界面,用瞬时频率判断下覆地层不存在游离气,用瞬时相位横向追踪 BSR(似海底反射层)界面。

2.1.2. 多波多分量技术

多波多分量技术是综合利用多波地震勘探中的横波、纵波和转换波信号,结合地质、测井等进行构造或岩性的分析、推断和解释^[9]。该技术能够很好地描述储层参数和空间展布、预测裂缝发育程度、识别岩性以及储层含油气性等,如利用横波分辨率高的优势可以识别小断层、薄互层等小构造,实现构造成像;利用横波在遇到各向异性介质时会分裂成极性正交的两类横波的现象,可以识别地下裂缝带,进而预测裂缝油气藏。东方地球物理公司等单位进行了转换波与横波勘探的研究与试验,在各向异性、地下裂缝带的横波分裂等方面进行研究,提取相关物性参数,处理出泊松比剖面 and 横波剖面。值得关注的是,中石化最近发布的多分量地震处理系统 Petro-MCS2.0 可以在微观上更加准确全面地描述地质体,对各项异性裂缝,特别是对孔隙中的油气水具有很高的识别能力。

2.1.3. 储层预测技术

储层预测技术是以地震反演数据和测井数据的波阻抗反演为基础,利用表征储层特征的阻抗值对储

层进行刻画的技术。例如,吐哈盆地致密砂岩的地震储层预测技术包括:利用叠前、叠后波阻抗反演技术预测煤层厚度以及煤层下部致密砂岩的厚度;利用AVO属性和多属性融合技术预测与含气性有关的岩性参数,确定有利致密砂岩范围;利用测井解释量版,圈定致密砂岩气中的有利储层^[3]。另如,利用叠后、叠前反演结合振幅、谱分析等地震属性,可对埋深小于1200 m、厚度大于3 m的煤层气、页岩气储层进行可靠预测^[11]。周义军等^[12]分别采用弹性阻抗反演、基于部分叠加数据的同时反演和基于道集的同时反演方法对苏里格气田的含气储层进行了预测;杨华等^[13]利用全数字地震高信噪比和保真度的优势,采用以AVO属性分析及交会、叠前角度域吸收和叠前弹性反演及交会为核心的叠前储层预测技术,使鄂尔多斯盆地上古生界的薄砂岩储层的预测符合率提高到72%以上。

2.1.4. 波动方程叠前逆时偏移技术

波动方程叠前逆时偏移技术基于双程波动方程,不进行分解,计算精度高,能够对复杂高陡构造精确成像,具有适应剧烈速度变化、各向异性和振幅保真等特点。随着计算机技术的快速发展,这种技术已经在中石油、中石化的多个油田进行尝试。如吐哈盆地北部山前带巴喀地区构造主体部位地层高陡,断裂发育,且为低孔低渗储层,通过致密砂岩目标层段的叠前深度偏移构造成像可以更加准确刻画地下复杂构造形态和断层位置^[14]。

2.1.5. 井中地震技术

井中地震避开了近地表对高频地震波的吸收,可以靠近储层进行观测,从而获得高分辨率的地震资料,主要分为井间地震技术、VSP(垂直地震剖面)技术、井中时延地震技术等^[15]。其中,井间地震技术可以利用直达波信息反演井间物性,也可以利用发射波成像得到高分辨率的井间构造信息,因此能够有效获取非常规油气藏的横向展布情况,获取储层高分辨率的静态和动态数据,比地面地震高出上百倍的解析度^[4];VSP(垂直地震剖面)技术可以应用于油气储层的地震响应特征分析、油藏的精确成像等,如利用VSP资料进行泊松比参数反演可以识别有效含气致密砂岩储层和泥岩围岩^[16]。

2.1.6. 全波形反演技术

地震波全波形反演技术是基于全波场正演模拟技术,利用完整地震数据求取地层弹性参数,以叠前地震波场的运动学和动力学信息重建地下速度结构,可以反映复杂地质背景下的构造与岩性细节。全波形反演技术与地震处理技术的有机融合,能够在更加准确的地层构造成像和更加真实的振幅条件下精确揭示储层岩性与流体特征。单蕊等^[17]运用叠前全波形反演同时提取纵、横波阻抗和泊松比等岩性信息,结合孔隙结构动力学分析,对四川盆地YB地区珍珠冲段复杂的致密气储层与产层进行了有效预测。

2.1.7. 地震岩石物理技术

地震岩石物理是研究岩石岩性、孔隙大小、孔隙类型、孔隙流体、流体饱和度等对岩石弹性性质的影响,从而建立储层物性参数与地震响应特征之间的关系。随着地球物理勘探从宏观向微观的不断深入,地震岩石物理技术被更加重视,不仅可以有效模拟储层的地震响应与传播特征,而且对于研究非常规油气藏地球物理特征非常重要。张佳佳^[18]通过建立油页岩的岩石物理模型,确定了油页岩有机质含量越多,其纵波速度越低的变化关系,并提出了由速度直接反演油页岩有机质含量的方法。

2.1.8. 三维地震技术

三维地震是在一个平面上采集随时间而变化的地震信息,可以从x、y、t方向任意观测地质界面的形态,通过横剖面、纵剖面和水平切片来研究地质体在三维空间的变化。三维地震数据常用来鉴别断层和尖灭等异常构造带,从而认识复杂构造、储层非均质性、应力情况以及裂缝发育带,还可以利用速度分析预测含气层深度,甚至预测诱导裂缝的倾向。李雪峰等^[19]利用三维地震对鄂尔多斯盆地韩城地区的煤层气构造、储层预测、裂缝预测、含气性预测以及井位部署等进行了研究,通过建立高精度的偏移速度场、运用叠前时间偏移技术、建立定量波阻抗三维地质模型等方法提高小断层及薄储层的成像精度,预测储层横向展布,进而指导定向井和水平井井位部署。

2.2. 测井技术

测井,也叫地球物理测井,是利用岩层的电学、导电、声学、放射性等特性测量地球物理参数的方法。

2.2.1. 测井储层评价方法

目前非常规油气测井储层评价方法大致有基于常规油气储层评价思想的定性识别、基于体积模型、基于概率统计模型、基于神经网络模型等储层评价方法。潘仁芳等^[20]对中国南方、西北及华北的中、古生界等页岩气藏发育的有利地区进行综合测井资料分析,通过页岩气储集层在常规测井曲线上“四高两低一扩”的明显的响应特征,即高自然伽马、高声波时差、高中子孔隙度、高电阻率、低地层密度、低岩性密度、扩井径,来识别有利页岩气储层。陆敬安等^[21]在南海北部神狐海域的天然气水合物钻探通过电阻率测井、声波测井、密度测井及井径测井很好地识别出含天然气水合物层位,测井曲线表现出电阻率增大、声波速度增大、密度降低、井径曲线幅值较为稳定等特征。

2.2.2. 测井地层评价技术

非常规油气测井地层评价技术主要有:1)地层的岩性和储集参数评价,包括孔隙度、含气量、渗透率等;2)烃源岩的生烃潜力评价,包括干酪根的识别与类型划分、有机质含量、热成熟度等指标的定性或定量解释;3)岩石力学参数和裂缝发育指标的评价。例如,利用自然伽马测井能谱,对K、U、Th等放射性元素的丰度进行分析,可以确定总有机碳的含量;利用中子密度法可以指示镜质体反射率Ro值;根据补偿声波、长源距声波、补偿中子以及体积质量可以评价孔隙度;利用微电阻率扫描成像测井和核磁共振测井可以分辨天然缝、诱导缝以及断层;利用双侧向测井、感应测井、核磁共振测井可以估算含气饱和度;利用自然电位、自然伽马能谱、微电极可以进行渗透性评价;根据声波扫描测井、中子密度测井、成像测井可以综合计算岩石弹性参数,如泊松比、杨氏模量,确定地层应力和最大主应力方向。长庆油田在致密气勘探开发实践中建立了以岩石物理研究为基础,以储集层有效性、含气性评价为核心的致密气层测井精细评价技术,通过对气测数据、含气饱和度和束缚水饱和度等参数的定量评价,形成了鄂尔多斯盆地上古生界的致密气层测井解释标准^[13]。

2.2.3. 随钻测井技术

随钻测井技术可以实时监控直井、斜井以及水平井,依据测量的地质参数识别地层岩性、高压层段以

及地层破碎带,即时反应井下裂缝的发育情况,具有地层评价和地质导向的功能。其中,成像测井是随钻测井技术的重要发展方向,具有观测密度大和方位覆盖率大的特点。全井眼地层扫描成像测井技术已经广泛应用于页岩气水平井钻井中,该技术不仅可以提供构造、地层和力学特性信息,还能识别天然裂缝和钻井诱发裂缝以及地震资料无法识别的断层,提高了页岩气藏的测井评价能力^[22]。

2.3. 重、磁、电勘探

2.3.1. 重力勘探

重力勘探是利用组成地壳的各种岩体间的密度差所引起的地表重力加速度的变化研究地下构造的方法。重力勘探作为油气普查的最常规方法,除用于研究结晶基底,识别断层,确定沉积层厚度,圈定背斜构造,解决盆地结构、地层分布、坳陷分布等基本地质问题外,越来越多地是通过提高测量精度或改进观测和处理方法来提取有用的低值异常,进而深入研究与油气藏有关的沉积构造与密度的不均匀性^[23]。三维全张量重力梯度测量可以反映场源几何形态的不同信息,而且对于异常体的细节方面具有更高的分辨率。在非常规油气勘探中,可以使用小比例尺的重力异常寻找有利于油气藏形成的地段,或使用高精度的重力测量直接寻找与油气藏有关的低密度体^[24]。

2.3.2. 磁法勘探

磁法勘探是根据各种岩石和矿物磁性的不同,通过测定地面的磁力强弱研究地下岩石矿物分布和地质构造的方法。在含油气区,由于烃类向地面渗漏而形成还原环境,可使岩石或土壤中的氧化铁还原成磁铁矿,用磁力仪可以测出这种异常。磁法勘探按工作空间不同可分为航空磁法、地面磁法和井中磁法。目前主要有传统地面磁法、连续正交地面磁测法、连续正交低空磁测法、连续正交车载磁测法等。陈进超^[25]利用地面高精度磁测和激发极化法进行煤层气藏的勘探,试验证明地面高精度磁测弱负异常“亮点”集中分布区以及大面积的视极化率平面异常区均与煤层气有利富集区有较好的对应关系。

2.3.3. 电法勘探

电法勘探是按照地壳中各类岩石或矿体的电磁学的导电性、导磁性、介电性和电化学特性的差异,

通过对电磁场或电化场的空间分布规律及时间特性的观测和研究, 勘查地质构造和寻找有用矿产的方法。在油气勘探领域, 应用较多、效果较好的方法主要有固定源建场测深法、电磁阵列剖面法、大功率激电测深法、井中电磁勘探等。对于多数油气藏而言, 其上方普遍存在次生的黄铁矿晕, 并能产生激电异常, 通常称之为“烟囱效应”。杨洋等^[26]利用大深度频率域激发极化的幅频率异常, 确定黄铁矿晕的位置, 来进一步反映底部油气藏的分布情况; 孙伟^[27]利用电阻率测深、激电测深、电磁测深在地表复杂的鄂尔多斯盆地进行探测油气, 建立了鄂尔多斯盆地油藏及其上方电阻率和极化率整体相对围岩偏高的电性异常模式。目前电法勘探的主要问题是采集干扰和高维电磁问题的求解和反演, 通过加大发射功率、实施远参考测量、数字滤波分析等方法可以解决此类问题。

3. 非常规油气资源物探技术的发展

与常规油气勘探一样, 油气检测与量化储层预测也是非常规油气勘探技术发展的目标, 针对非常规油气赋存的特点, 一些新方法和新技术的应用将进一步推动目标的实现。

3.1. 非常规油气勘探理论的创新

非常规油气与常规油气的聚集类型、地质特征以及勘探技术的要求均有所不同。理论的创新也需要多学科联合交叉, 如地质力学、地球化学、岩石学、地震学、储层建模等不同学科的相互配合。常规的地震勘探理论, 如水平层状均匀介质理论、各向同性理论、线性算法等, 对于非常规油气特殊的赋存条件明显存在不适应性, 各项异性和裂缝介质、三相介质、粘弹性介质、非线性算法等新理论将逐渐得到应用和发展。邹才能等^[28]提出“纳米油气”的概念, 认为纳米孔喉油气系统聚集机理是非常规油气地质的重要基础, 应深入分析纳米孔喉油气的流动、聚集机制, 从而探索非常规油气资源的勘探评价方法。

3.2. 采集处理解释技术不断进步

3.2.1. 高精度三维地震技术

该技术的深化和推广, 使地震资料采集向全方位、高密度发展; 地震资料处理向高保真发展; 地震

成像方法向叠前逆时深度偏移发展; 地震资料解释向可视化、全息化发展^[29], 从而提高了复杂地质构造的成像精度以及优质储集空间的探测精度, 有利于深入探究低渗、裂隙、致密砂岩储层油气藏机理。

3.2.2. 采集处理解释一体化

随着计算机技术的发展, 野外地震采集仪器逐渐实现小型化, 并与现场处理系统相结合, 逐渐向解释化采集方向发展; 地震资料处理随着交互处理系统的完善及计算机群的开发利用, 逐步向解释性处理方向发展; 三维资料在工作站上实现了地震、地质、测井等资料的综合解释, 多种地震属性也得以利用, 以三维资料的体解释为基础, 以可视化技术为工具, 逐步实现了目标处理和解释一体化; 地质模型、构造解释、储层预测一体化^[30]。

3.2.3. 重磁地震联合处理解释

地震、重、磁联合反演, 特别是带约束的联合反演, 提高了解释精度, 缓解了多解性。目前国内应用最广泛、效果较好的重磁地震联合处理解释软件是石油大学开发的 EMAP 法(MT)处理解释软件。EMAP 法(MT)的基本思路是在资料编辑、圆滑、静位移校正、极化模式判别等预处理的基础上, 对资料定性分析, 结合地质资料 and 不同地质体的电性特征, 建立反演计算模型, 确定电法地质剖面。

4. 建议

随着常规油气资源的快速消耗, 全球油气资源勘探开发正在由传统的常规油气为主转变为常规与非常规油气并重的局面。我国非常规油气资源丰富, 远景广阔, 是未来现实的替代能源。地球物理勘探技术在致密气、致密油、页岩气、煤层气等非常规油气资源勘探开发中起到了关键作用, 但是中国复杂的地质构造以及非常规油气的赋存特点对物探技术提出了更高的要求。因此未来的发展仍需要:

1) 转变勘探理念, 创新地质理论。针对非常规油气的成藏特点及储层特征, 深入研究与常规油气不同的富集成藏主控因素, 应从储油气层转变到生气层, 从局部圈闭转变到大面积储集, 从构造油气藏、岩性油气藏转变到“连续型”非常规油气聚集。综合利用多种勘探手段, 发展储层评价技术, 科学合理地

选出高产富集有利区。

2) 加强技术创新, 发展特色技术。非常规油气储层渗透率低、非均质性强, 且不同地区储层差异较大, 要研究适用于这些储层特点的技术。宽方位、宽频带、高密度采集技术, 叠前逆时偏移技术、全波形反演、多波多分量、三维地震等处理解释技术, 以及采集处理解释一体化, 是目前和今后非常规油气物探技术发展的重点。

3) 优化现有工艺, 提高产能效率。国内已初步具备非常规油气的勘探开发能力, 但多是借鉴常规油气勘探技术或引进国外先进技术, 成本高、适用性差。因此, 优化改进现有工艺技术, 研发低成本、低污染、高产能、高效率, 且适合于不同储层地质条件的技术也十分重要。

4) 自主研发高性能仪器设备。目前大部分国产仪器主要应用于常规勘探, 对于阵列式大地电磁仪、万道高精度地震仪、航空物探仪等高性能仪器则需要进口。对国外仪器设备的依赖, 使我国的地球物理勘探工作难以有突破性的跃进。因此, 大力发展具有自主知识产权仪器设备的研制和开发, 尽快缩短与发达国家在硬件上的差距, 也是地球物理勘探今后的发展要求。

参考文献 (References)

- [1] 邹才能, 张国生, 杨智等 (2013) 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学. *石油勘探与开发*, **4**, 385-399, 454.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰 (2012) 中国非常规油气资源与勘探开发前景. *石油勘探与开发*, **2**, 129-136.
- [3] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛等 (2012) 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例. *石油学报*, **2**, 173-187.
- [4] 赵万金, 李海亮, 杨午阳 (2012) 国内非常规油气地球物理勘探技术现状及进展. *中国石油勘探*, **4**, 36-40.
- [5] 刘光鼎 (2012) 中国油气资源勘探与可持续发展. *中国科学院院刊*, **3**, 326-331.
- [6] 赵殿栋, 管路平, 王炳章等 (2009) 地球物理在油气勘探开发中的作用. 石油工业出版社, 北京, 1-6.
- [7] 王炳章, 蔡俩 (2011) 石油物探在我国油气发现与发展中的作用——纪念《石油物探》创刊 50 年. *石油物探*, **6**, 533-544.
- [8] 陆基孟, 王永刚 (2011) 地震勘探原理. 中国石油大学出版社, 东营, 2-3.
- [9] 刘春园, 魏修成, 徐胜峰等 (2013) 地球物理方法在碳酸盐岩储层预测中的应用综述. *地球物理学进展*, **6**, 1815-1822.
- [10] 蒋蓉, 张大海, 周英等 (2010) 琼东南勘查区天然气水合物地震属性分析研究. *海洋石油*, **1**, 18-22.
- [11] 袁秉衡, 徐礼贵, 康南昌等 (2013) 石油地震地质学及相关技术进展. *石油学报*, **3**, 580-590.
- [12] 周义军, 蒲仁海, 曾令邦 (2011) 叠前储层描述技术在岩性气藏勘探中的研究与应用. *地球物理学进展*, **1**, 229-239.
- [13] 杨华, 付金华, 刘新社等 (2012) 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发. *石油勘探与开发*, **3**, 295-303.
- [14] 苏勤, 李海亮, 吕彬等 (2011) 吐哈盆地北部山前带巴喀三维叠前地震成像处理解释技术研究及应用. *中国石油勘探*, **5-6**, 29-40.
- [15] 王炳章, 王丹, 陈伟等 (2011) 油气地震勘探技术发展趋势和发展水平. *中外能源*, **5**, 46-55.
- [16] 杜金玲, 蔡银涛, 张固澜等 (2013) VSP 资料在储层预测中的应用. *石油地球物理勘探*, **2**, 268-272.
- [17] 单蕊, 卞爱飞, 於文辉等 (2011) 利用叠前全波形反演进行储层预测. *石油地球物理勘探*, **4**, 629-633.
- [18] 张佳佳 (2010) 地震岩石物理建模方法及其在油页岩勘探中的应用. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.
- [19] 李雪峰, 温声明, 文桂华等 (2011) 三维地震技术在韩城地区的应用. 2011 年煤层气学术研讨会论文集, 地质出版社, 北京, 232-238.
- [20] 潘仁芳, 伍媛, 宋争 (2009) 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探. *中国石油勘探*, **3**, 6-9, 28.
- [21] 陆敬安, 杨胜雄, 吴能友等 (2008) 南海神狐海域天然气水合物地球物理测井评价. *现代地质*, **3**, 447-451.
- [22] 肖钢, 唐颖 (2012) 页岩气及其勘探开发. 高等教育出版社, 北京, 62.
- [23] 中国科学技术协会 (2009) 2008-2009 地球物理学学科发展报告. 中国科学技术出版社, 北京, 133-134.
- [24] 任丽, 孟, 小红, 刘国峰 (2013) 重力勘探及其应用. *科技创新导报*, **8**, 240-243.
- [25] 陈进超 (2012) 煤层气富集区非地震综合物探技术及试验研究. 博士学位论文, 成都理工大学, 成都.
- [26] 杨洋, 邓锋华, 李帝铨 (2013) 基于伪随机信号的大深度激发极化法在油气勘探中的应用. *物探与化探*, **3**, 438-442.
- [27] 孙伟 (2012) 电法勘探在鄂尔多斯盆地油气勘探中的应用研究. 硕士学位论文, 长安大学, 西安.
- [28] 邹才能, 杨智, 陶士振等 (2012) 纳米油气与源储共生型油气聚集. *石油勘探与开发*, **1**, 13-26.
- [29] 王延光, 郭树祥, 韩宏伟等 (2013) 高精度地震处理解释技术与油气勘探——纪念《油气地球物理》创刊 10 周年. *油气地球物理*, **1**, 3-8.
- [30] 马义忠 (2009) 泌阳凹陷高精度三维地震勘探技术研究与应用. 博士学位论文, 中国地质大学, 北京.