

# 深层油气地球物理勘探基础研究

杨文采, 于常青

(中国地质科学院地质所, 北京 100037)

**摘 要** 本文讨论当前我国深层油气地震勘探面临的难题及基础研究的三个主攻方向, 包括: 困难地区深层地震反射体准确成像, 地震波场信息学、油气田直接预测的地球物理方法技术等。

**关键词** 深层油气, 地震波场信息学, 油气田直接预测

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)04-1238-05

## On basic research problems in applied geophysics for deep oil and gas fields

YANG Wen cai, YU Chang qing

(Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

**Abstract** This paper discusses the current basic research problems mainly in reflection seismology involved in petroleum exploration in China. They are accurate imaging deep reflectors in difficult areas; information theory of seismic wavefield; and direct prediction of buried oil and gas fields via geophysical data.

**Keywords** deep oil and gas, information theory of seismic wavefield, direct prediction of buried oil and gas

### 0 油气勘探面临的挑战

解决 21 世纪人类社会高消耗生活方式与自然资源日见枯竭之间的矛盾是社会可持续发展的关键问题之一。进入 21 世纪以来, 万吨石油进口的前景制约了国家可持续发展与能源安全, 油气资源的问题再次引起社会的广泛关注。

沉积盆地是地球上储存淡水和能源资源的宝库, 是寻找油气资源的主要基地。随着人类的工业化伴随而来的能源消耗, 盆地浅层油气资源日益枯竭, 21 世纪油气勘查开发的对象将主要依赖于盆地深层油气藏和深海盆地油气藏, 以及已开发油气田采收率的提高。人类关于沉积盆地形态组构的知识主要来自地球物理信息, 而盆地深部组构及流体信息的提取取决于地球物理学研究深入和方法技术的革新。

大型沉积盆地经过两百年的油气地质调查, 未经勘探的处女盆地越来越少, 油气资源越来越难找

了。中国陆上的大型沉积盆地大多已经过详细的勘探, 盆地上部的油气田大多已被勘探开发。地震勘探的探查深度应达到 5000~10000 米。如何揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模的问题, 已成为当前油气勘探面临的头号困扰。问题的答案仍然只有两个: 一是靠石油地质学的理论, 二是靠地球物理方法技术的进步。地质学家们利用地震剖面分辨地下构造与可能的油气圈闭, 按石油地质学的理论推测勘探靶区, 试探盆地的含油气前景。据统计, 上世纪后期野猫井的成功率只有 15% 左右, 说明石油地质学的理论在油气田勘查方面的效果不够理想。世界上没有完全相同的沉积盆地, 石油地质学的理论带有明显的区域特征, 只有结合本区的地质演化和沉积历史才能起作用。

对于盆地深层的油气勘探, 石油地质学家苦于能够取得的信息太少, 而深层地质信息主要来源于地球物理调查。然而, 地球物理勘探的方法技术也面临许多难题, 如复杂的地形及地表条件、深层信号高

收稿日期 2007-04-10; 修回日期 2007-05-20.

基金项目 国家高科技基础研究“973 项目”2003CB716505 课题资助。

作者简介 杨文采, 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 地球物理学家, 1984 年在加拿大 McGill 大学取得博士学位。(E-mail: yangwencai@163.net.cn)

频成分的衰减快,上部常存在高速层屏蔽,使深层记录品质明显降低等等。但是,当前地球物理勘探还没有充分发挥其高科技产业在直接发现油气田方面的作用。因此,充分提取地球物理信息来揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模,进行油气盆地中深层油气藏的定位(靶区快速优选)研究,发展第四代的油气地震勘探采集、处理和定量解释方法技术,乃是迎接深层油气勘探的挑战,实现中国油气第二次创业的必由之路。

地球物理数据采集仪器在 21 世纪已经更新换代了。地球物理数据处理方法技术的发展,也经历了多次高潮。

第一代: 24 道电子管仪器,用于揭示地下构造。在上世纪 60 年代,基于调和分析和反褶积原理的数字滤波风潮,为地球物理数字信息技术的开拓打下了基础。

第二代: 64 道晶体管仪器,用于揭示油气圈闭。上世纪 80 年代,随着集成电路的发展大存储量的高速数字计算机得以普及,使反演和成像方法技术在地球物理行业得以广泛应用,形成了地球物理数字处理的第二次高潮。这两波的高潮原理上虽然有从积分方程向数学物理方程的跃迁,但总体上还没有跳出线性处理的框架。

第三代: 百道集成电路仪器,用波动方程偏移等方法处理三维地震数据体,以建立定量的地下构造模型。在上世纪 90 年学术界开始探索非线性地球物理处理的原理与方法技术,掀起了小波变换应用等非线性地球物理数据处理的小高潮,但影响不如上两波广泛及迅速。

第四代: 万道高效地震仪器加多分量数字检波器,面临高密度非规则采集的革命。服务于直接建立定量的地质构造、岩性与储层模型。

发展深层油气地震勘探处理和定量解释方法技术面临难题,包括:

(1) 复杂地形与地表条件下陆上地震信号的采集与处理问题,因为严重违反了反射地震学的假设前提,对扬子区古生界油气勘探、北方沙丘及黄土复盖区油气地震勘探造成严重困难。

(2) 深层宽带地震信号的接收、提取及保真。由于深层信号高频成分衰减快,讯息弱,使深层记录品质明显降低。

(3) 深层油气勘探更要求建立准确的深层地震波速模型,以实现准确成像及时间-深度转换。但是,现有反射地震观测系统不能取得深层波速信息,只

能主要根据测井资料建立波速模型,这在新区几乎不可能。

(4) 地球物理勘探在直接检测深层地层组构奇异性、流体及油气信息的作用,为发现深层油气田提供直接信息。这方面的研究还非常薄弱。

(5) 井间地震是近年来为提高油气采收率发展的新方法,其中接收仪器和井中震源去年刚刚引进,开始在东部老油田试验。井间地震具有多波接收、高主频与高分辨率等一系列优点,可用来划分油气储层边界、了解开发过程中井间油气水三相物质的分布,圈定地下剩余油气范围,为准确高效布置采油工程提供依据,是提高采收率的关键方法技术之一。

## 1 深层地震反射体准确成像

当前油气地震勘探基础研究的主要目标,应是在完善以地震波场准确叠前偏移成像的同时,创新与发展第四代的油气地震勘探处理和定量解释方法技术,克服复杂地表和深层高频衰减等因素造成的地震记录品质下降,充分提取地球物理信息来揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模,进行油气盆地中深层靶区快速优选及油气藏定位研究。研究课题包括。

### 1.1 深层频带保宽的叠前波动方程偏移

由于深层地震勘探时震波高频成份衰减严重,大大降低了分辨率。从沉积相分析油气藏必须有高分辨率的地震数据体,而高分辨率的关键在于扩展高频段的有效信号。无论是海上还是陆上资料,频带展宽都是重点。如何补偿高频成分的衰减使地震信号宽带缩小,同时不放大噪音? 涉及波动理论、地震学、应用数学、信息论等综合学科。主攻方向有研究基于粘弹性介质波动方程的叠前波动方程偏移,基于香农信息传输第二方程式的高频补偿与能谱均衡技术,建立深、浅层分开的多重处理方法及匹配技术。

### 1.2 复杂地形与地表条件下波场偏移成像理论与方法

复杂地形与地表条件下陆上地震信号的采集与处理问题,对扬子区古生界油气勘探、北方沙丘山区、沙丘、岩溶区、山前砾石堆积带及黄土复盖区油气地震勘探造成严重困难。在地震采集方面的对策是按地形设计的非线性观测系统。主攻方向为表层不均匀地震波场快速计算与反匹配。

### 1.3 深层波速调查与计算

地震偏移与时深转换都要求准确的波速模型。

如何建立准确深层波速模型?这是当前地震处理解释的瓶颈.期望通过波动理论、地震学、信息论、应用数学学科交叉,地震层析成像理论与反射地震成像方法的融合来提高建立准确深层波速模型的能力.

## 2 地震波场信息学理论与方法

石油和天然气是过去地球内外碳氢循环产生的一种特殊的流体,其物理化学性质与地壳岩石有明显的差别.不仅如此,包含大型油气田的地层和不包含大型油气田地层在物理性质上也有明显的差别.这种差别可体现在对地震波或电磁波的传播上,也可体现在对地震波或电磁波的吸收及能量转换上,现代数字化的地球物理仪器可以把有关信息快速记录下来,并通过现代信号处理方法提取出来.沉积盆地中巨量的地震数据含有极其丰富的地层、岩性和流体信息,而现今的地震数据处理却主要是针对构造成像设计的,并未系统地提取其它信息.因此,系统地提取所有信息以揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模,通过宏观指导使勘探直接进入最有远景的区段,大幅度减少勘探成本和风险,便成为勘探家的首选,也是对油气勘探技术创新的重要挑战.

沉积盆地中巨量的地震数据含有极其丰富的地层、岩性和流体信息,而现今的地震数据处理却主要是针对构造成像设计的,并未系统地提取其它信息.地震学探测石油曾经是现代信息科学的发源地,后来,生命科学迅速发展,探测水平超过了地震勘探,地震勘探向生命科学学习与借鉴的过程开始了地震波场中反映地质事件,涉及科学问题为地震波场中事件的识别、分类、评价与提取方法,地震事件分辨成像(ERI)原理与方法等,交叉学科包括波动理论、地质学、信息论、地震学.

### 2.1 双孔隙介质弹性波动力学

双孔隙介质模型是指具有两种不同孔隙类型(如孔隙、裂隙)的介质模型,如 Berryman 的双孔双渗介质弹性波动理论, Kuster-Toksöz 双相等效孔隙介质弹性理论等.研究弹性波在双孔隙岩石中传播的一般规律,对于裂缝—孔隙型油气藏的勘探开发具有重要意义.

科学问题为裂缝—孔隙型储层弹性波传播的一般规律,波属性与双孔隙岩石特性参数间的基本关系.主攻方向为,应用 Berryman 的双孔双渗介质弹性波动理论分析双孔隙类型储集层的地震和声波响应特征.

### 2.2 地震波场分解与事件识别

基于少数质点运动规律建立起来的经典物理力学是否适合于地球这么复杂的物质运动体系?这种怀疑使人追求关于地震波场的新的理论,这种理论适宜于无数性质有别的质点的震动.研究大概率的波场行为及相变—自组织事件.信息蕴含在不确定性中,地震数据体包含大概率信息与小概率地质事件信息,如何评价与提取大概率与小概率地质事件?主攻方向应为研究波场分解的理论及算法.

### 2.3 地震波场小概率地质事件提取

课题的对象小概率事件:沉积相、流体、油气藏.相干性不强的特殊地震组构,发生的形式多变而几率不大,与流体及油气成藏作用关系密切.根据信息论可知,上述信息量更大的信息过去在地震勘探中被忽略了,现今的商业化地震处理软件系统都不是为提取这一类信息设计的.如何识别、提取特殊的地质事件?要从地震沉积学与地震岩性学的理论及方法研究出发,开创地震波场信息学研究.

### 2.4 地震信息提取的新方法

如何将信息科学中的最新成果应用到地震勘探中来以指示岩性、流体和油气藏?基于高维可视化理论的地球物理数据处理技术.不仅可从反射、折射、透射全部波场中提取几何学属性及构造信息,还可以提取出地层局部空间反映物质成份与状态的物理学属性.反射界面按属性自动分类和自动构造解释,断层检测与计算机拾取.小波变换,自组织人工神经网络,人工蚂蚁法自动提取事件及断层.波场变换与事件鉴别技术、广义智能化理论与方法,生物信息学方法...信息科学中的最新成果层出不穷.

## 3 直接探测油气藏的地球物理方法

油气勘探的探测对象是油气藏的空间分布,科学问题是油气藏的在地球物理场中的响应特征是什么?能否用于勘探?与此问题相关的交叉学科为地球物理学、石油地质学和信息论.石油和天然气是过去地球内外碳氢循环产生的一种特殊的流体,其物理化学性质与地壳岩石有明显的差别.这种差别可体现在对地震波或电磁波的传播上,也可体现在对地震波或电磁波的吸收及能量转换上,通过现代信号处理方法提取出来.系统地提取所有信息以揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模,通过宏观指导使勘探直接进入最有远景的区段,可大幅度减少勘探成本和风险.

### 3.1 直接探测油气藏的地震学理论与方法

如何根据地震波场特征指示流体或油气?在单

一沉积盆地内,地震波场属性与区域石油地质特征的结合已经在直接探测油气藏方面取得了一些效果.

### 3.2 直接探测油气藏的电磁学理论与方法

如何根据电磁波场特征指示流体或油气?这是电磁场论、信息论、地质学学科交叉研究的课题.在海洋勘探时,可控源大地电磁(CSEM)用于钻前预测的油气直接指示信息(DHI),取得了一定效果.下方有高阻油藏使电磁场的径向衰减弱化,而出现平行油层传播的趋势;这种二次场能量衰减较慢并可返回海底,而被海底测站观测到.径向分量与切向分量的比值也沿油层上方发生变化,油层的端点可以识别.研究主攻方向为陆地石油地质特征及其电磁响应的规律.

### 3.3 过井地震波场反演与层析成像

井间地震发现井间剩余油的理论基础包括地震层析反演及成像方法技术.全面利用井间地震信号多波和高频带的优点,充分提取储层与流体分布信息,实现准确了解开发过程中井间油气水分布、圈定地下剩余油气范围的目标.目前井间地震技术还只能进行纵波速度和反射波构造成像.创新包括地震纵波走时层析反演理论方法,地震横波走时层析反演理论方法及波速比、泊松比层析成像,地震纵波波场高分辨率层析反演理论方法,地震横波波场高分辨率层析反演理论方法,地震广角反射横波偏移成像等.

### 3.4 声波测井中油气信息的识别与提取

三分量声波波场测井取得了大量信息,目前尚未充分利用.如何用三分量声波动场指示井旁油气储集体?涉及交叉学科波动理论、地质学、信息论、应用数学.主攻方向可从声波序列信号分析与事件检测入手.

通过以上讨论可以认为,当前油气地震勘探的主要目标,是在完善以叠前偏移为主流方法技术并扩大其应用效果的同时,创新与发展第四代的油气地震勘探处理和定量解释方法技术,克服复杂地表和深层高频衰减等因素造成的地震记录品质下降,充分提取地球物理信息来揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模,进行油气盆地中深层靶区快速优选及油气藏定位研究.

建议从四种尺度揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模.这四种尺度分别为区域尺度、盆地尺度、圈闭尺度及油气储层尺度.

(1) 区域尺度.在汇编、标定和同化地磁场、重

力场、地温场、大地电磁场、地震波速度场的基础上,依据大地构造物理学理论和方法,查明区域地壳与上地幔物理性质的不均匀特性及其发生原因,进行上述地球物理场跨学科的综合分析与地质、地球物理解译,提取出中下地壳流体活动与盆地油气生成的相关信息,为我国沉积盆地油气评价和新区油气资源远景评估提供基础资料.

(2) 盆地尺度.石油和天然气是过去地球内外碳氢循环产生的一种特殊的流体,其物理化学性质与地壳岩石有明显的差别.不仅如此,包含大型油气田的地层和不包含大型油气田地层在物理性质上也有明显的差别.这种差别可体现在对地震波的吸收及能量转换上,并通过现代信号处理方法提取出来.沉积盆地中巨量的地震数据含有极其丰富的地层、岩性和流体信息,有源体波CT技术可准确地测量和反演P、S波波速,为盆地深层的油气勘探提供地层物性及流体组构方面的指示.系统地提取奇异性以揭示沉积盆地中深层油气赋存的空间与规模,通过宏观指导使勘探直接进入最有远景的区段,大幅度降低勘探成本和风险.

(3) 圈闭尺度.在完善以叠前偏移为主流的构造成像的基础上,开展基于第四代地震资料处理方法研究.现今的地震数据处理主要是针对构造成像设计的,并未系统地提取其它地层、岩性和流体信息.系统地提取深层油气赋存的地层、岩性和流体信息,通过宏观指导使钻探工程布设在最有油气远景的复杂圈闭区段,可大幅度降低勘探成本.

(4) 油气储层尺度.主要为开展井间地震发现井间剩余油的方法技术研究和试验.

### 参 考 文 献 (References):

- [1] 杨文采. 油储地球物理学的开拓与发展[J]. 中国科学基金, 1990, 2: 30~ 36.
- [2] 杨文采. 应用于地质勘探和矿产开发的地震层析成像[J]. 中国地质, 1991, 7: 22~ 25.
- [3] 杨文采. 应用地震学中的某些前沿问题[J]. 中国科学基金, 1991, 2: 30~ 36.
- [4] 刘光鼎, 杨文采. 迈向新体系的应用地震学[J]. 地球物理学进展, 1990, (5) 1: 1~ 8.
- [5] 杨文采. 油气勘查与储层地球物理新进展[J]. 中国科学基金, 1996, 1: 36~ 41.
- [6] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [7] 杨文采. 后板块地球内部物理学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [8] 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 程振炎. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报, 2001, 44(4): 534~ 541.

- [9] 杨文采. 非线性地球物理反演方法: 回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 255~ 261.
- [10] 杨文采, 张春贺, 黄秋平, 程振炎. 线形区域的主辅线反射地震调查方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1325~ 1335.  
Yang W C, Zhang C H, Huang Q P, Cheng Z Y. Additional observation seismic reflection method for investigation of linear areas[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(6): 1325~ 1335.
- [11] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区的地震波速模型[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 477~ 489.  
Yang W C, Yang W Y, Cheng Z Y. Seismic velocity model of the Chinese continental scientific drilling site[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(2): 477~ 489.
- [12] 杨文采, 刘光林, 杨 锴, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区全观式三维地震采集[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 735~ 744.  
Yang W C, Liu G L, Yang K, Cheng Z Y. All-laid-out three dimensional seismic survey at the Chinese Continental Scientific Drilling site[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(3): 735~ 744.

## 《地球物理学进展》2008 年征订启事

各期刊订户:

2008 年《地球物理学进展》为双月刊, 每年 6 期, 每期定价 35 元, 全年定价为 210 元。特此通知。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部( 邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-62007709, 010-62007696, 010-62369620

联系人 刘少华, 肖台琴

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

开户行 中国农业银行北京建德支行 账号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

( 务必在注释行写上: 购《地球物理学进展》款, 同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378, 022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn