

地震储层研究的现状及展望

刘宪斌^{1,2)} 林金逞²⁾ 韩春明²⁾ 穆剑²⁾

(1)中国地质大学,北京,100083 (2)天津轻工业学院海洋科学与工程学院,天津塘沽,300450)

摘要 在阐明地震储层概念及其不同阶段主要研究内容的基础上,详细分析了交互迭后处理、测井资料的应用、层位标定、三维地震资料精细解释、层位自动拾取、层面切片、断层切片、相干数据体、多线剖面、三维可视化、地震储层参数预测、烃类检测、地震属性分析及地质统计学和时间推移地震等技术的应用现状,最后对地震储层研究今后的发展提出了意见和建议。

关键词 地震储层 地震资料 储层反演 油气勘探

Present Conditions and Prospects of the Researches on Seismic Reservoir

LIU Xianbin LIN Jincheng HAN Chunming MU Jian²⁾

(1)China University of Geosciences, Beijing, 100083;

2)College of Marine Science and Engineering Tianjin Institute of Light Industry, Tanggu, Tianjin, 300450)

Abstract Based on a discussion on the concept of seismic reservoirs and the main research content at different stages, this paper has dealt with the applying conditions of such seismic reservoir techniques as interpoststack processing, utilization of logging data, horizon calibration, fine interpretation of 3D seismic data, horizon auto-picking, bedding slice, fault horizon, coherence algorithm, multi-line profiles, 3D volume visualization, prediction of seismic reservoir parameters, hydrocarbon monitoring, analysis of seismic attributes, geological statistics and time lapse seismic reservoir monitoring. Suggestions are also made concerning further researches on seismic reservoirs.

Key words seismic reservoir seismic data reservoir inversion oil and gas exploration

油气勘探的地震解释工作大体经历3个阶段,即地震构造解释阶段、地震地层学解释阶段和开发地震阶段(地震精细解释阶段)(袁秉衡,1992)。

地震储层研究是指以地震勘探信息为主,综合测井、试井、地质、采油及分析化验等各种资料研究储集层的分布情况、岩性变化、厚度变化、物性特征、所含流体情况和油气藏等一项综合的研究课题。其目的是提高勘探开发的整体效益。地震储层研究工作贯穿于油气勘探、开发的整个过程。

1 地震储层研究的内容

1.1 油气勘探早期的区域性储层研究

一个盆地在勘探早期探井不多,处于已有发现井或尚未钻出发现井的时期,主要利用地震资料,结合露头地质资料,应用地震地层学及层序地层学的方法预测有利储层的区域展布(陆基孟,1993)。

(1)各种类型湖泊盆地的岩相古地理研究:这项研究的目的是预测各种沉积体系的配置及其空间展布,指出有利储集体的位置,如坡积或滑塌的砂砾岩、洪冲积扇、扇三角洲的砂砾岩、河流砂体、三角洲砂体、浊积砂体、滩、坝砂体和生物滩、鲕滩等。

(2)海相碳酸盐岩和碎屑岩岩相古地理研究:目的是解决海相地层的相带划分,预测有利的碳酸盐岩和碎屑岩储集体。

(3)岩浆岩和变质岩等特殊储层的研究:目的是预测岩浆岩和变质岩等特殊储层的分布范围和厚度。

1.2 油气勘探中后期(滚动勘探和开发初期)的储层研究

该项研究也就是储层或油藏描述,是在发现油气田后,从少数几口井出发研究储层的特征。

(1)碎屑岩储层研究:主要对各种成因类型的砂

岩、砂砾岩储层进行储层横向预测。

(2)非碎屑岩储层的研究:中国东部中生代断陷湖泊盆地中存在一些淡水湖相碳酸盐岩,如渤海湾盆地中广泛分布的沙河街组一段、三段的“特殊岩性段”,即白云岩、泥灰岩、生物灰岩等均是良好的储层。某些油田的岩浆岩和变质岩也可形成良好的储油岩层。利用地震技术可以横向预测储层。

(3)裂缝储层发育带的预测:辽河变质岩、四川和塔里木轮南碳酸盐岩裂缝发育带都是高产油气流储层,利用地震分形分维、神经网络、相干数据体、AVO和多波勘探等技术可以预测裂缝发育带。

(4)不整合面的研究:不整合面不仅是重要的油气运移通道,而且可以形成不整合油气藏,例如在鄂尔多斯及西部的一些盆地中,奥陶系顶部的侵蚀面和渤海湾盆地冀中和黄骅坳陷的震旦系顶部侵蚀面均含有丰富的油气。利用地震资料可以预测不整合面的分布范围及含油气性。

(5)储层物性研究:利用地震信息预测储层的分布范围、厚度、孔隙度、渗透率、含油饱和度、孔隙中流体性质和异常压力特征等,但精度有待于进一步提高(刘震,1997)。

(6)含油气面积及储量的预测:根据地震信息可以预测含油气面积,进而计算储量,效果较好。

1.3 油田开发阶段的储层研究(开发地震)

开发地震是20世纪80年代兴起的一门新学科,它是一项紧密结合已有地质、钻井、测井、试油、试采以及分析化验等多学科科研成果,以现代地震采集、处理、解释方法为主要手段,用于查明油气储层的构造形态、厚度变化、物性分布和油气范围等地质规律的应用性综合技术。该项研究又称为油藏地震学、油藏监测、四维地震(李承楚等,1999)。其技术特点是以钻井资料为依据,用地质原理作指导,充分发挥地震资料大面积密集采集的优势,研究储层的分布及其变化细节。其基础工作是“三高”(高分辨率、高信噪比和高保真度)地震目标处理,核心技术是地震反演,技术关键在于提取多种地球物理信息进行综合分析、综合多学科资料进行综合评价。即在油气田开发过程中,利用以地震为主的物探方法监测油藏动态,包括气顶变化、油水边界变化、注水效果及剩余油的分布等。四维地震技术的关键是如何把四维地震信息结合钻井资料反演解释给出精确的油气藏空间位置、油气运移的图象等。四维地震目前处于试验阶段,今后该项技术将有较大发展,如发展超前四维地震,即六维地震(三维+时间+炮

检距+方位角)研究。

2 地震储层研究中的主要技术

2.1 交互迭后处理

交互迭后处理是在解释之前利用解释工作站完成的。由于用于解释的地震资料都是计算中心批量处理的成果,有许多地方不能满足解释人员的需要,因此必须进行有针对性的迭后处理。许多油田在解释工作站原有的少量迭后处理模块的基础上又增加了许多处理模块,如振幅处理、迭后偏移、AVO、常相位校正、道积分、波阻抗等,其目的是提高讯噪比和分辨率。这些处理功能的联合应用为地震储层表征打下了良好的基础。

2.2 测井资料应用

充分利用已有的测井资料,如测井曲线的分层数据、井点处的油藏参数、速度参数、岩性特征等,从已知井出发,利用地震资料预测未知地区,才能不断提高储层表征的精度。主要资料包括:①地质分层和储层顶、底面的深度;②主要目的层的砂岩厚度;③各种测井曲线及环境校正;④测井曲线解释的岩性、岩相、储层物性参数和含油气性;⑤单井测井综合图和单井储层评价;⑥多井对比分析。

地震从测井出发做储层表征是当前技术发展的总趋势。

2.3 层位标定

精确的层位标定是一切解释工作的前提,现已由过去只靠制作合成地震记录来标定发展为使用多种信息对储层反射进行精细的综合标定。其方法为:①将测井解释的岩性柱(时间域)插入地震剖面;②将各种测井曲线(深度域)插入地震剖面;③把经滤波的声波曲线与波阻抗剖面进行对比;④对测井曲线进行环境校正和常相位校正制作合成地震记录,与地震剖面进行对比;⑤将利用测井资料解释的物性参数(孔隙度、渗透率、含油饱和度和泥质含量)、岩性等插入地震剖面进行对比;⑥利用VSP测井资料的走廊叠加记录进行桥式标定;⑦在各种特殊处理的剖面上标定储层。

在标定的过程中,应注意记录的极性。

2.4 三维地震资料精细解释

20世纪70年代三维地震勘探方法出现以来,由于提高了地震分辨率,解释成果的可靠性和精度得到了很大的提高(李庆忠,1993)。这是因为三维数据信息量大,纵测线和横测线方向具有同一数量级的采样间隔,地下CMP分布均匀、密集,三维数

据的采集是同年施工、同一处理流程、参数相同、同时显示,剖面特征稳定。由于处理时采用了三维速度分析、三维深度偏移,地下反射点可以正确归位,可以直接与测井、钻井闭合。三维数据显示方式多种多样、灵活、方便,尤其是彩色显示,扩大了动态显示范围,提高了空间分辨率,有利于对构造细节、小幅度构造、小断层及复杂地质现象的识别和解释。

全三维数据体解释是指直接利用可视化工具对三维数据体做地层标定、断层、岩性、沉积、储层分析和油气识别等进行的交互解释,是针对数据体,即从三维可视化显示出发,以地质体或三维研究区块为单元,采用点、线、面相结合的空间可视化解释。

2.4.1 自动拾取技术 自动拾取技术又称为自动追踪技术。具体方法是解释员把“种子点”标在三维工区的纵横线上,控制自动拾取计算,依据计算在相邻的地震道上寻找相似的特征点,如果在规定的条件下找到了这点就取出来,再计算下一道,在追踪过程中没有找到满足上述条件的点,自动追踪就停在这一道上。自动追踪拾取有 2 种准则:一种是特征追踪,它是寻求倾角时窗内样点相似的结构形态,而在道之间不作任何相关计算,逐道追踪定义的波峰、波谷和零交叉点等;另一种是相关追踪,它是以“种子点”为中心截取一段地震道,使用一组定义在倾角时窗内的时间延迟作为约束条件,把该段地震道做相关,如果找到某一时间延迟内有可以接受的相关质量因子,在这一道上的拾取就固定下来,然后,自动拾取进行到下一道(王强,1995)。

2.4.2 层面切片技术 水平切片是三维地震解释特有的一种显示方式,是三维解释突出的特点。每一张切片都是地下不同层位的信息在同一时间的反映,包括的信息有地震波的振幅强弱、频率高低、信噪比的变化及断层显示。该项技术主要是对数据时间切片上的部分层位进行局部的解释和可视化。

2.4.3 断层切片技术 是在三维数据体中对某解释好的断层,以断层面为零间距,分别沿断层上盘、下盘切出的平行于该断层面的一系列剖面。精细解释断层的性质,进行岩性标定,在零间距的断层切片上可以显示上升盘和下降盘的岩性接触关系,进而确定有无断层封堵,以及封堵的范围和高度等(王强,1995)。

2.4.4 相干数据体技术 相干是多道数据间相似程度的一种度量(M. Bahorich 等,1996),是利用三维数据体中数据之间的相干性来显示数据的连续或中断,计算三维数据体中的某一道与相邻若干道的

相关系数,然后对其进行统计分析,其结果为某道的输出道。

相干数据体是通过分析在纵、横测线方向上的局部波形获得三维地震相干的估计而生成的。应用统计学原理,从不相干性、随机的同相轴中勾绘出相干的空间同相轴,如断面的反射等。被断层截断的地震道区域由于断层的存在,使逐道相干的数据突然中断,造成沿断层存在弱相干的轮廓,使断层、河道、三角洲沉积和特殊岩性体等能够被清楚地分辨出来。

2.4.5 多线剖面 多线剖面是一种新的地震资料显示方式。不需要经过处理,它是将三维数据体沿某一层位,按一定的时窗大小,将时窗内的地震数据提取出来,按顺序排列,组成一个新的剖面,水平方向是 CDP 点号,垂直方向是测线号。其特点是对小断层敏感,断点清晰,可以直接进行断层组合,提高三维地震解释的精度和效率(文森来,1996)。

2.4.6 三维可视化 三维可视化是用于显示、描述和理解地下和地面诸多现象特征的一种新工具,是三维数据和模型的图象显示。通过图象之间的相互作用,彩色高分辨率,实时、光滑地移动旋转图象,使我们看到所需解释的某一部分。其优点是可以灵活方便地通讯,个人可以直接与数据对话。作为解释工具的可视化技术在地震解释中主要包括:

(1) 地层可视化 地震层序可视化使解释和研究集中在感兴趣的单独或多个地层及构造区。可选择的技术包括地层可视化窗口功能和透明选项。

(2) 构造可视化 立体显示增强了对三维数据的理解,有利于解决复杂断层区的断层模式、类型、断距和可能的断层圈闭。可利用由体到面的灵活转换,同时显示结合功能和多层可视化功能(图 1)。

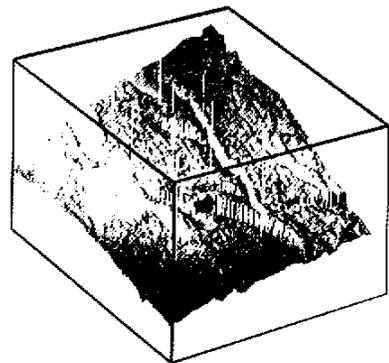


图 1 大庆某区块构造可视化立体图

(3) 振幅可视化 强振幅很容易从三维空间立即突出出来,预期的研究区块能被快速选择、提出并进行可视化评估(图2)。利用这一功能,可以查明有利区块及其地层信息,解释复杂地层系统,结合不透明显示功能使重点区分解成几个独立的分析系统,或把几个独立的系统进行合并,对整个沉积体系进行可视化,以便进行综合研究。现代三维可视化技术能够使地球物理学家、地质学家和油藏工程师、钻井工程师“钻入”到相同的数据体中,用同样的数据进行工作。完整的解释、开发和钻井设计之间的相互沟通和综合,是三维可视化解释的发展方向。

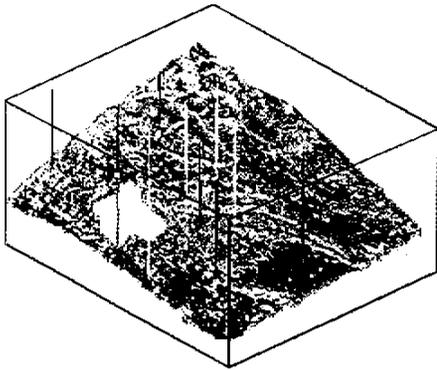


图2 大庆某区振幅可视化图

Fig. 2 Amplitude visibility map in Daqing some area

2.5 地震储层参数预测

利用地震资料进行储层预测是指利用钻井资料作为控制和标定点,充分利用面积上的地震资料对储层进行预测。地震反演是储层地球物理的一项核心技术(刘雯林,1996)。地震反演是指利用地震资料,以已知地质规律、钻井和测井资料为约束,对地下岩层的空间结构和物理性质进行成像的过程,广义的地震反演包括了地震处理和解释的全部内容。经过地震反演,可以把界面型的地震资料转换成岩层型的测井资料,使其能够与钻井和测井资料直接进行对比,以岩层为单元进行地质解释,充分发挥地震在横向上资料密集的优势,研究储层的空间变化(图3)。

波阻抗反演是指利用地震资料反演地层波阻抗(或速度)的特殊物理解释技术。与地震模式识别预测油气、神经网络预测地层参数、振幅拟合预测储层厚度等统计方法相比,波阻抗反演具有明确的物理意义,是储层岩性预测、油藏特征描述的确切性方法,是高分辨率地震资料处理的最终表达方式。地

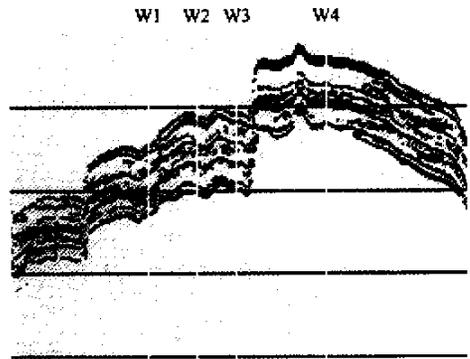


图3 大庆某区地震反演剖面图

Fig. 3 Seismic inversion profile in Daqing some area

震反演通常分为迭前和迭后反演两大类;按测井资料在其中所起的作用大小又可以分为4类:地震直接反演、测井约束地震反演、测井-地震联合反演和地震控制下的测井内插外推;从实现方法上可以分为3类:连续反演、递推反演和基于模型反演。

2.5.1 道积分 道积分是利用迭后地震资料计算地层相对波阻抗(速度)的直接反演方法,因为它是在地层波阻抗随深度连续可微条件下推导出来的,所以又称为连续反演。这种反演不需要钻井控制,在勘探初期就可以推广使用,实用性较强。主要优点是:计算简单、递推累计误差小,计算结果直接反映了岩层的速度变化,可以岩层为单元进行地质解释。缺点是:①受地震固有频率的限制,分辨率低,不能进行薄层解释;②无法求得地层的绝对波阻抗和绝对速度,不能用于定量计算储层参数;③这种方法在处理过程中不能用地质或测井资料对其进行约束控制,其结果比较粗略。

2.5.2 递推反演 递推反演是基于反射系数递推计算地层波阻抗的地震反演方法。其关键在于从地震记录中正确估算地层反射系数,得到与已知钻井最佳吻合的波阻抗信息,测井资料主要起标定和质量控制的作用,所以又称为直接反演或测井控制下的地震反演。比较典型的实现方法有:

(1) 基于地层反褶积方法、稀疏脉冲反演和测井约束地震反演。优点为:比较完整地保留了地震反射的基本特征;不存在基于模型地震反演的多解性;能够明显地反映岩相、岩性的空间变化;在岩性相对稳定的条件下,能够较好地反映储层的物性变化。

(2) 应用领域较宽,在勘探初期,只有很少钻井的条件下,通过反演资料可以进行岩相分析,确定各

种沉积体系,对储层进行横向预测,确定评价井;开发前期,在储层较厚的条件下,可以为地质建模提供较可靠的构造、厚度和物性信息,优化开发方案设计;在油藏监测阶段,提供时延地震反演速度差异分析,确定储层压力、物性的空间变化,判断油气的运移情况。缺点是:由于受地震频带宽度的限制,分辨率相对较低,不能满足薄储层研究的需要。

2.5.3 基于模型的地震反演 基于模型的地震反演又称为测井约束地震反演,是从地质模型出发,采用模型优选迭代扰动算法,提供不断修改更新模型,使模型正演合成地震记录与实际地震数据最佳吻合,最终的模型数据便是反演结果。其实质是地震-测井联合反演,低、高频信息来源于测井资料,构造特征和中频段取决于地震资料。其精度不仅依赖于研究目标的地质特征、钻井数量、井位分布以及地震资料的分辨率和信噪比,还取决于处理的精度。主要技术环节有:储层地球物理特征分析、地震子波提取和建立初始波阻抗模型。主要优点是把地震与测井有机地结合起来,突破了传统意义上的地震分辨率的限制,理论上可以得到与测井资料相同的分辨率,是油田开发阶段精细描述的关键技术。缺点是具有多解性,多解性主要取决于初始模型与实际地质情况的符合程度,在同样的地质条件下,钻井越多精度越高。提供地震资料自身的分辨率是减少多解性的重要途径。

2.6 烃类检测

1972年,西方国家根据反射地震资料成功地直接预测了浅海天然气田的存在,地震勘探开始直接用“亮点”标志找油。随着“亮点”技术的实践,人们开始认识到该技术存在的局限性,后来又进一步发展了AVO技术。

2.6.1 “亮点”技术 “亮点”是指在地震剖面上由于地下油、气藏的存在所引起的地震反射振幅相对增强的“点”,它主要利用振幅信息。由于某些特殊的地质体也可以产生亮点,使解释结论存在多解性。

2.6.2 AVO技术 AVQ (Amplitude Variation with Offset)是振幅随偏移距变化或振幅与偏移距关系 (Amplitude Versus Offset)的英语缩写。AVO分析是一项利用振幅随偏移距的变化特征来分析岩性和进行油气藏监测的地震勘探新技术。在应用中必须结合工区的钻井和地震资料特点,建立AVO识别标志,进行综合解释,从某种意义上说,AVO更适合

于在气藏描述阶段使用。其基本原理为:在一定条件下,含气、油砂岩,其顶、底面反射振幅绝对值随炮检距(入射角)的增加而增加,而含水砂岩和干砂岩却没变。利用这一特点可以定量检测油气。

2.7 地震属性分析与地质统计学方法

地震属性指的是由迭前或迭后的地震数据,经过数学变换而导出的有关地震波的几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征。这既是储层描述的需要,也是三维数据体解释的需要。具体作法是利用测井资料解释储层物性参数与井旁地震道地震属性直接的相关性,将地震属性转换成储层物性,并推算到井间或无井区。通常把地震属性分为两大类:界面属性和体积属性。界面属性是在三维数据体内沿三维层面求取的、与分界面相关的地震属性,它提供了沿分界面或在两个分界面之间的变化信息,拾取的方法有:瞬时属性拾取、单道时窗属性拾取和多道时窗属性拾取。体积属性是指由三维地震数据体导出的完整的属性立方体,是地震数据的另一类图像,这种图像可以揭示使用其它剖面或图像难以识别的地震特征,如河道砂体、礁块和各类地层学单元的沉积特征等。条件属性的拾取方法与界面属性的拾取方法相同。地震属性与测井数据相比,只能是一种“软”数据,但地震测量密度大,测网空间分布均匀,可以作为储层空间变化的依据。联合使用地震数据和测井数据可以改善储层预测的精度和可靠性。要建立地震属性与储层岩石物性之间的一些定量关系,必须改变我们一贯从理论或理论近似化出发的研究方法,采用实验数据导出法,建立起它们之间的有效的统计关系(Chen Q等,1997)。

地质统计学是将空间随机变量的统计、估计技术应用到地质、地球物理问题的方法,包括根据相关性和概率原则对测量数据进行内插和外推的技术。在地震属性分析中使用地质统计学方法,就是利用计算机算法和直接推断的统计学原理对地震属性进行标定,并转换为储层物性参数。该方法要求使用测井资料作为控制点,对地震数据进行严格的标定。常用的方法包括:多元统计分析、相关滤波技术、克里金预测技术和神经网络预测技术等。

2.8 时间推移地震(四维地震)

寻找油气最好的地方就是在现今已发现油气的地方。时间推移地震是指每间隔一定的时间进行一次三维观测,对不同时间观测的三维数据体进行互

均化处理,使那些与油藏无关的反射波具有可重复性,保留与油藏有关的反射波之间的差异,通过与初始观测的数据体相减,来确定油藏随时间的变化情况。综合利用岩石物理学、地质学和油藏工程资料,对油藏及时进行动态监测,快速做出油藏评价,调整开发方案,对油气田进行有效的开发,提高采收率。由于这种方法是三维加上时间维,所以又称为四维地震。该方法主要用于:①寻找死油区,确定加密井、扩边井井位以及老井重新作业;②监测注入流体,如水、蒸汽、CO₂和天然气等流体的移动,监测压裂,预测渗透率各向异性,调整注水井和采油井等。

3 今后工作展望

储层预测、储层描述、储层表征和储层监测等许多与油气田勘探与开发的工作需要我们去完成。为此需要地震勘探提供更多、更准确的信息,如提高分辨率,进一步做好地震反演、迭前深度偏移,提供较准确的岩性剖面,加强时间推移地震技术的研究。

地震解释工作要进行精细的断块解释,识别 5 m 以上的小断层,进行精细的大深度、小幅度构造研究,对小于 5 m 的薄储层进行精细描述,包括砂体的连通性,石灰岩裂缝的预测等。

钻井资料的特点是纵向精细,横向稀疏,地震资料则纵向粗略,横向密集。多解性是地震储层研究的重要特征,要得到正确反映储层细节变化的地质成果,必须将二者的优势有机地结合起来,对各种有效的地震信息进行综合分析。

对于所面临的任务,要求地震地质解释工作者做好更广泛的精细解释。掌握好利用人机联作解释工作站进行交互处理与交互解释,例如相干数据体、地震切片、三维可视化、多线剖面、层拉平、地震属性分析和地质统计学等;层序地层学研究要努力向高分辨率层序地层学分析发展,要综合利用地质、岩心、测井和地震资料,提高对储层的识别能力。

时间推移地震是一项加强油藏管理、降低成本、提高经济效益的高新技术,难度较大。应加强岩石

物理学方面的基础研究工作,发展如何获取和利用横波信息的技术,例如三分量时间推移地震,三维 AVO 时间推移地震等。

参 考 文 献

- 李承楚,吴律. 1999. 地震勘探新技术. 北京:石油工业出版社.
 李庆忠. 1993. 走向精确勘探的道路. 北京:石油工业出版社.
 陆基孟. 1993. 地震勘探原理. 山东东营:石油大学出版社.
 刘雯林. 1996. 油气田开发地震技术. 北京:石油工业出版社.
 刘震编著. 1997. 储层地震地层学. 北京:地质出版社.
 王强等. 1995. 地震资料人机交互解释. 北京:石油工业出版社.
 温森来. 1996. 多线地震剖面的应用. 石油地球物理勘探, 31: 10~20.
 袁秉衡主编. 1992. 应用地震技术研究储层. 北京:石油工业出版社.

References

- Bahorich M and Farmer S. 1995. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube [J]. The Leading Edge, 14(10):1053~1058.
 Chen Q, Sideney S. 1997. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring [J]. The Leading Edge, 16(5):445~456.
 Li Chengchu, WuLu. 1992. Seismic prospecting new techniques. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
 Li Qingzhong. 1993. The way to accuracy survey. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
 Liu Wenlin. 1996. Seismic techniques in oil and gas development. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
 Liu Zhen. 1997. Reservoir seismic stratigraphy. Beijing: Geological Publishing House, 1997 (in Chinese).
 Lu Jimeng. 1993. Seismic prospecting principle. Shandong Dongying: Oil University Press (in Chinese).
 Wan Qiang et al. . 1995. Seismic data interactive interpretation. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
 Wen Senlai. 1996. Application of multiline seismic profile. Oil Geophysical Prospecting, 31: 10~20 (in Chinese).
 Yuan Bingheng. 1992. Applying seismic techniques to study reservoir. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).