

刘欣欣, 吴国忱, 梁 锴. 单点高密度地震勘探技术研究综述. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1354~1366, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.025.

Liu X X, Wu G C, Liang K. The review of point-source/point-receiver high density seismic exploration technology. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(4): 1354~1366, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.025.

单点高密度地震勘探技术研究综述

刘欣欣, 吴国忱, 梁 锴

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东青岛 266555)

摘 要 常规组合采集方法存在组内干扰等缺点, 不能满足高精度地震勘探的需要. 为此, 单点高密度地震勘探技术受到越来越广泛的关注. 该技术采用点激发、点接收、小道距、大道数的采集方式, 在室内进行数字组合等处理, 与常规组合勘探相比可以提高施工效率; 消除组内干扰; 提高噪声压制的精度; 输出多种组合数据; 提高地震资料的分辨率和成像精度, 改善油藏特征描述等, 很好地适应日益复杂的勘探形势的需要. 该技术的理论研究已经取得了许多进展, 实际应用效果也比较好. 尤其是 WesternGeco 公司, 走在该技术的发展前沿, 进行了许多成功的陆上和海上勘探试验. 但是该技术存在信噪比低, 数据量大等问题, 其具体实施方法还有待进一步研究.

关键词 点激发, 点接收, 高密度, 数字组合

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.04.025

中图分类号 P631

文献标识码 A

The review of point-source/point-receiver high density seismic exploration technology

LIU Xin-xin, WU Guo-chen, LIANG Kai

(College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum (East China), Qing Dao 266555, China)

Abstract Because of geophysical drawbacks such as intra-array perturbation, conventional acquisition technology which uses geophone arrays in the field can't satisfy the exploration requirement of high precision. As a result, point-source/point-receiver high density seismic exploration becomes more and more popular. It uses the way of point-source, point-receiver, small trace interval and dense traces in the field, and digital group-forming in the data processing center. Compared with conventional array technology, it can improve construction efficiency; avoid perturbations within the array; improve the precision of noise identification, analysis and attenuation; output group-forming data of varied sampling interval; improve resolution and imaging precision of seismic data; enhance the description of reservoir characterization and can satisfy the requirement of the increasing complication of seismic exploration. At present, there are many great progresses in the theoretical researches and many effective new methods in acquisition, processing and interpretation for point-source/point-receiver high density seismic technology. WesternGeco is the world's leading supplier of this technology, who has already conducted many successful pilot studies both in land and marine. The result shows the above advantages of the technology. However, because of low S/N and large quantity of data, more researches need to be done on the practical application.

Keywords point-source, point-receiver, high density, digital group-forming

0 引言

随着石油工业的不断发展,国家能源开发战略已转向新、难、深领域,地震油气勘探的难度和复杂程度不断增加,对地震勘探精度的要求也越来越高。然而,常规组合勘探方法中,信号传输道和检波器动态范围有限,采集道距较大,组合输出是对组合内每个检波器输出的简单叠加。组合内检波器之间的耦合误差、定位误差、敏感度差异等因素都会引起组内干扰,导致波形畸变和空间假频,使组合输出的质量变差^[1],地震勘探的分辨率降低,得到的成像结果不能满足高分辨率勘探的要求。为此单点高密度地震勘探技术受到越来越广泛的关注。该技术与常规组合方法的区别是放弃野外组合,而采用单点接收、小道距、高道数、大动态范围的地震采集方式,沿着测线等距离或非等距离布设单个检波器,每个检波器作为一道,独立记录,之后在室内再进行组合等处理。该技术一般用作 3D 精细勘探,可以很好地适应日益复杂的勘探形势,在提高资料分辨率、改善油藏特征描述、解决复杂构造成像精度等方面展现出了独特的优势。尤其是新一代的万道采集技术,得到的地震资料有很高的纵横向分辨率,对发现小段块、小幅度构造、小潜山、薄储层、小砂体及精细油藏描述等有重要的意义^[2,3]。

目前,国内外许多石油公司已经做了一些相关研究,开展了许多实际的勘探工作,取得了很好的应用效果^[4]。相比之下,国外的研究进展更快一些,WesternGeco 公司于 2001 年推出了 Q-Technology 技术,在中东陆上以及墨西哥湾海上进行了多次勘探^[5],得到的数据质量较常规勘探有很大的提高,为精细油藏描述等工作提供了很好的先决条件;后来又推出了数字组合(DGF)室内处理方法,应用效果也很好^[6~14],2008 年,国内上海石油公司首次使用 Q-Marine 技术,使得平湖油田的成像分辨率得到了很大的提高^[15]。2001 年,I/O 公司推出的正交三分量 MEMS 数字检波器 VectorSeis^[16],有很高的向量保真度,能适应单点采集的要求;法国 CGG 公司于 2004 年 6 月正式投放市场的 Eye-D(Enhanced Reservoir Solutions)技术,在野外采集中,采用小道距、小炮点距、宽方位等手段获取高质量的地下数据,其中 V1 是高性能的单点可控震源采集技术,能较好地保真震源能量和信号振幅^[17]。挪威 PGS 公司推出了高密度 3D 地震(HD3D)技术,在海上勘探中应用较多。此外,还有英国 Vibtech 公司开发的

IT 系统,美国 Smart Instrument(简称 SI)公司研发的 SI 地震数据采集系统^[18]等。这些技术的出现对单点高密度技术的发展起到了很大的推动作用。目前,根据具体实施方法,这些技术可以归为两类,一类是以 Q-Technology 技术为代表的单点接收高密度地震技术,核心思想是单点接收室内数字组合;二是以 HD3D 和 Eye-D 技术为代表的小道间距高成像道密度技术,核心思想是增加接收点和炮密度^[19]。国内方面,东方地球物理公司和中石化等也开展了单点高密度地震试验和研究,如胜利油田的垦 71 高精度地震勘探,马厂油田高密度三维采集等^[20,21]。单点高密度技术在精细地质调查、煤田勘探、工程物探等领域中也得到了应用^[22~25]。

虽然进行了很多成功的勘探试验,但是由于该技术起步较晚,采集和处理等技术还不完善,存在信噪比低,数据量大等问题,导致其应用受到一定的限制。尤其是在陆上信噪比低的地区,单点高密度勘探成果的优势不是很明显。与陆上勘探相比,海上单点高密度勘探的采集成本低,用拖缆系统布置检波器比较方便,因此效果较为显著^[11,12,26]。

1 单点高密度地震勘探的发展

有关单点地震勘探的思想可以追溯到上世纪 70 年代。1973 年,Newman 和 Mahoney 描述了检波器定位和耦合的误差会影响野外组合的输出响应^[27];Ongkiehong 等(1987,1998)进一步定量分析了组合内单个传感器的敏感度、定位、耦合和时差等对组合响应的影响,证实了野外组合中单个传感器之间的非相关干扰会产生伪随机噪声^[28,29]。这些研究为单点技术的出现奠定了基础,同时也是实施单点技术必要性的重要依据。Burger 等人(1997)研究证明,每道采用单独检波器接收时,高频信号只出现在噪声主频范围之外,而组合接收时,部分信号高频成分出现在噪声主频范围内,如果在野外进行质量控制,并对每个检波器的数据进行预处理,2D 炮记录的质量会大大提高^[30]。Baeten(2000)等人分析了单点接收与常规组合方法的区别,如图 1 所示,还系统地介绍了点接收和点激发采集在采样密度、避免假频和室内处理等方面的优势,分析了点激发和点接收之间的关系,认为点震源采集和点接收采集是两个互补的过程,最好同时使用^[1,31],这可以看作单点技术理论研究的一个里程碑。此后对于单点高密度技术的理论和实际应用研究越来越多,尤其是 2004 年以后,该技术逐渐丰富和成熟起来,Vermeer

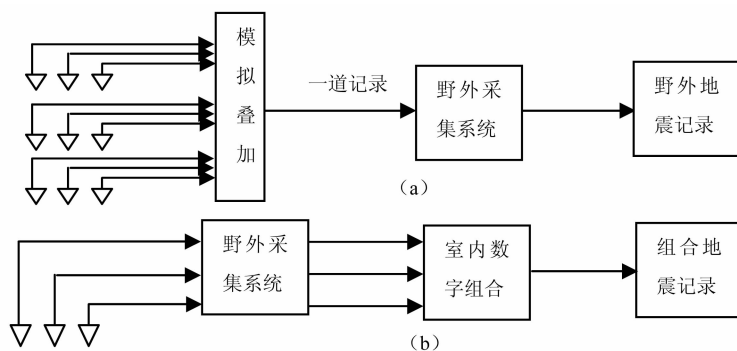


图1 模拟组合与数字组合示意图

Fig. 1 Comparison of conventional array group (top) and digital group (bottom)

(2004)认为数字检波器技术的成熟必然会推动单点勘探技术的发展^[32]. Quigley(2004)提出了宏观和微观排列形态的概念,前者是记录排列量版,后者是在宏观排列形态确定的空间采样位置上防止空间假频、压制噪声并保真信号.常规组合勘探中宏观排列形态是确定的,道的位置是组合的中心点.而对于点激发/点接收连续波场采集技术,宏观排列形态是可变的处理参数,可以用数字组合技术对连续波场的数据进行空间重采样,直接解决微观排列形态问题^[33,34],这是单点技术和常规勘探技术一个很大的区别.董世泰等人(2005)系统地分析了单点接收的优势、特点及与之适应的设备和软件^[35].大量研究证明,进行单点勘探时增加采集道数,更有利于记录高保真度的地震数据.蔡希玲等人(2006)分析了高密度空间采样地震数据的特征,结合点接收和点激发采集技术,认为高密度空间采样可以提高勘探精度,减少假频,提供更详细的信息改善反演和静校正精度,方便数学变换以及波场分离等^[36].这样就将单点技术和高密度技术结合起来.

Q-Technology 技术出现,使得单点高密度技术的实际应用日渐成熟.2001年,Phil Christie 等人分析了海上勘探中噪声产生的原因以及组合记录存在的问题,提出了改善采集效果的措施,指出单点高密度勘探加上室内数字组合可以得到更大的带宽,更高的分辨率和精度,还可以进行重复勘探,监测油藏动态变化^[37].2004年,WesternGeco 与 Kuwait 石油公司合作在 Minagish 油田进行了首次真正意义上的单点高密度勘探试验,得到了很好的地震时延响应,改善了资料的纵横向分辨率,提高了成像精度^[38,39].2004年,在北海中部进行 Q-Marine 勘探,根据采集的高分辨率数据绘制了油藏砂体分布图,单个地质体的厚度和形状以及油藏空间接触关系

图,并使用多属性分类方法,成功进行了岩性预测^[40].早在2003年,McHugo 等人使用单点数据进行叠前反演,得到的结果可以进行高分辨率油藏描述^[41].Khaled 等人(2006)对 Magwa 油田 Wara 油藏的单个数据进行岩石物理分析、地震数据反演、多属性分析以及神经网络分析等处理,得到了更为精细的油藏解释结果,该研究证明,单点高密度地震数据更有利于精细显示,提高了弹性阻抗反演的精度^[42].Malcolm 等人(2007,2008)分析了陆上采集时的几个问题,认为使用单点技术可以进行高精度、高密度、多分量地震勘探,但同时也采集了更多的噪声,因此采集时需要加密采集道数,处理时需要使用更先进的数据处理方法^[43,44].

2 单点高密度地震勘探的优势

该技术的出发点有两个:一是采用单点接收,记录最原始的地震信息,在室内进行处理,提高信号的信噪比、分辨率和保真度;二是采用小道距,避免假频,采集高保真度的地震信息,提高空间采样率和分辨率.因此单点高密度地震勘探在野外放弃组合,而采用单点接收、小道距、高道数、大动态范围的地震采集方式,与常规组合勘探方法相比有很多优势:

(1)提高野外施工效率.野外施工时,常规组合采集方法沿线排列或平面排列放置检波器,布置和回收较慢;一个组合输出一道,若组内有一个检波器出现故障,会影响整个组合,而且不便于测试.采用单点高密度采集方式,野外不用组合,陆上在采集网格内布置单个检波器,野外布置和回收较快,海上,拖缆采集系统具有精确的定位能力,提高水听器部署和回收的效率,还可以缩短测线改变的时间以及天气等因素导致的停工时间^[45],提高了施工效率.

(2)大动态范围.单点记录方式可以校正组内静

态干扰、振幅变化、“死”传感器、极性反转等小尺度扰动,提高瞬时动态范围^[46]。目前,单点采集时通常使用数字检波器,记录的失真度小,动态范围大,采集的单点数据动态范围大。

(3)消除组内干扰。每个检波器的灵敏度、自然频率、高程、与地面的耦合情况、剩余时差和静校正量不同,导致不同检波器接收的信号之间存在振幅和相位差异。常规勘探中,组合输出是组内所有检波器输出的算术平均,干扰使组合输出质量下降^[1]。进行单点地震勘探,可对每个检波器的信息进行再分析,排除故障检波器,补偿定位和耦合等误差,校正伪振幅变化以及沿组合方向的静校正差异,从而避免组内干扰,减少非同相叠加造成的信号畸变和属性失真,提高了信号保真度^[36,46]。

(4)良好的波数响应,大带宽。常规组合输出是正弦波数响应,存在旁瓣且通带不理想。单点高密度采集能对地震波场进行充分的采样,得到时间相关和频率相关的波数响应^[1],且增大了带宽,如 Q-Land 在利比亚(2006~2007)进行的单点地震勘探,地震资料的带宽得到了很大的提高^[47]。

(5)空间采样率高,避免假频。新型海上拖缆地震数据采集系统可以同时使用 20 多条拖缆,每条拖缆上可有 4000 多个独立水听器,总共 80000 道^[48]。陆上可布置多于 30000 道,采样间距可达到 5 m×5 m,大大提高了采样率,能够对地震波场进行无假频采样且记录更多的地震能量。图 2 为 WesternGeco 公司进行的点激发/点接收试验,使用单点可控震源,检波器间距为 2 m。组合长度为 2 m 时,记录上所有的波型都没有假频。随着组合长度增加,空气波、地滚波、初至波依次出现假频。在 $x-t$ 域,假频与信号交错混叠;在 $f-k$ 域,假频表现为噪声能量的卷绕。而且组合长度越大,高频能量损失越多^[49,50]。

(6)提高噪声识别、分析和压制精度。高密度采样时,记录的干扰波场连续且无假频,便于分析;道间距越小, $f-k$ 域中视速度不同的波的假频越弱,越有利于噪声压制与波场分离^[35,49~51]。

(7)组合方式灵活,输出采样可变。Hoffe(2002)等人分析了 $t-x$ 域、 $f-k$ 域中共炮点道集的不同组合效应以及叠后资料,指出短组合能更好的保真信号,而长组合在噪声压制方面有优势^[52]。对于单点数据,根据不同的数据特点以及处理要求,可用不同的组合方式进行重采样,为后续处理提供多种选择。

(8)详细地反映近地表结构。单点数据详细记录了初至波场,方便了初至波场的连续追踪与准确拾

取。而且,近炮检距反射波场很小,浅层的覆盖次数较高,提高了浅层勘探精度和分辨率,有利于准确的静校正,反演近地表模型,研究近地表结构变化对深层地震数据特征的影响^[35]。在内蒙古自治区阿龙山地区进行的单点地震,能有效推断浅层地质体接触带以及圈定地质体的起伏形态^[53]。

(9)提高成像精度和分辨率。单点高密度勘探减小采集面元,提高了资料的横向和纵向分辨率^[54~56],得到更好的成像结果^[43]。而且采用 DGF 等先进的处理技术,提高了数据质量,有利于后续数据处理。叠加剖面、偏移剖面、时间切片等的分辨率都得到了提高。尤其是在海上,不增加太多成本的同时,明显提升高频,改善分辨率。图 3 是 Minagish 油田两个叠加剖面相同部分的比较。左图是 1996 年地震数据的叠加剖面,右图是 2004 年 Q-Land 单传感器采集得到的叠加剖面,数据的带宽由 44 Hz 提高到 70 Hz^[38]。

(10)缩短开发周期,降低勘探投资。在油田勘探开发过程中可能重复进行多次 3D 勘探,高道数的综合单传感器采集与处理系统的出现,使交错扫描等先进的地震勘探方法取得了成功。该方法对稀疏采样勘探进行交错扫描,相当于加密了采集道数,还可以重复利用以前采集的数据,这就意味着资产开发周期的缩短和总采集投资的降低^[57,58]。

(11)改善储层监测的重复能力——在海上,拖缆系统还可对震源和检波器进行标定,消除炮点、检波点位置差异,纵横测线的排列差异等,达到很高的重复性。可以采集时间延迟地震数据,进行 4D 勘探,监测较弱的时间延迟响应,对油藏进行动态监测^[59]。

3 相关的采集方法

与常规勘探相比,单点高密度采集的主要变化是在野外布置单个检波器,减小采集面元,增加采集道数,因此检波器不必局限于线型排列或面积排列,观测系统的设计更加灵活。这样,许多不规则的或效果较差的常规组合采集方法可能会展现出一定的优势。增大采集道密度有利于实现地震波场的连续、均匀、对称采样^[60]。Vermeer(1998)提出了三维对称采样方法,对称采样时地震数据的特征与纵测线方向无关,有更好的空间连续性,覆盖次数规则,采集足迹最小,可以更好地压制叠前噪声,最大限度地减少叠前偏移假象,并便于地震数据的后续处理,如 AVO 分析,反演等^[61~63]。Quigley(2004)比较了两

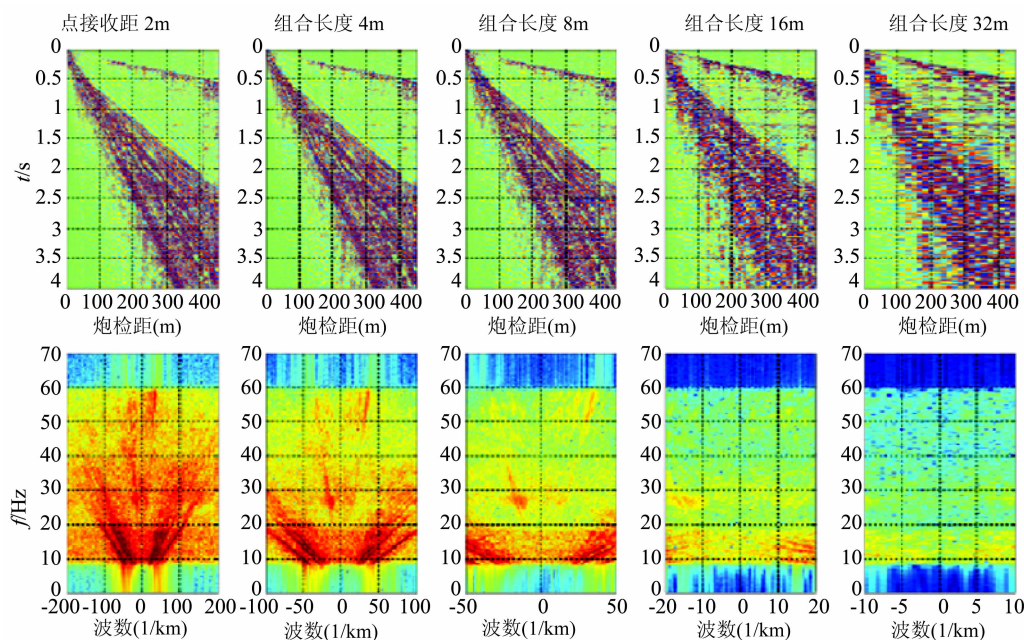


图 2 不同检波器间距的炮记录以及它们的 $f-k$ 谱
 Fig. 2 Shot records and the corresponding $f-k$ spectrums
 for different group intervals

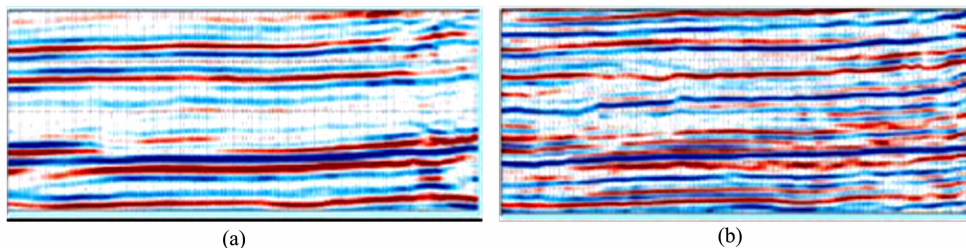


图 3 常规数据叠加剖面(a)和单传感器数据叠加剖面(b)
 Fig. 3 Stack sections for conventional data(a) and single-sensor data(b)

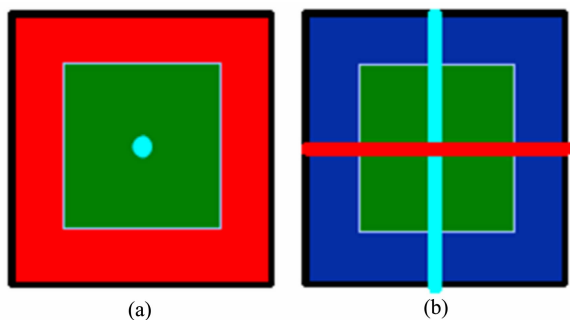


图 4 面积法观测系统(a)和十字排列观测系统(b)
 Fig. 4 Nominal carpet(a) and cross-spread geometries(b)

种连续波场采集技术:地毯法是在一个规则采样网格中单点放炮;十字排列法中,震源线与接收器线正交.如图 4 所示,红色的部分放置接收器,蓝色部分放置震源.从图中可以看出,两种采集方法的覆盖区

(绿色部分)是相同的,可用于连续地震波场采集^[64].在单点高密度勘探中经常使用十字排列法,野外采集时放弃组合,采用小采样间距,确保对波场进行无假频采样,采集的数据有较好的空间连续性及较合理的方位角分布.这些数据可以很好地对信号和噪声进行估计与分析,从而压制噪声.这种方法比较简单,但是增大采样密度会增大采集成本.用该方法在北非和中东地区的两次点激发/点接收勘探试验,取得了很好的效果.

为了减小采样点数,提高采集效率,Özbek 等人(2004)提出了六边形交错采样方法:使奇数行采样间隔与偶数行采样间隔的一半重合.当纵测线方向和横测线方向采样密度相等时,每一个采样位置都有 6 个最近的邻域.进行交错网格采样时,若要达到相同的谱分辨率,六边形采样的采样点比矩形采样

少 13%, 比矩形采样更有效^[65]. 但是该方法采集的数据需要使用特殊的 APOCS 的滤波器设计方法对数字化组合进行最佳 3-D FIR 滤波器设计, 而且还需要使用约束条件来保证收敛.

单点采集对检波器的保真度要求很高. Thompson 指出, 矢量保真度是对地面真实运动准确度的度量, 若一个单位脉冲指向某个分量时, 在该脉冲所指方向上生成一个与该脉冲相同的响应函数, 而对其他分量产生的脉冲响应为零, 那么这个多分量数据就具有矢量保真度. 基于这个理论, Maxwell(2004)提出了矢量采集的概念, 指出要得到准确的矢量数据, 检波器必须满足 4 个条件: 高校准精度、正交坐标轴、最小轴间串音和足够大的带宽. 前三个条件保证向量保真度, 足够大的带宽保证充分采样. 矢量采集数据代表全波场信息, 能实现准确的炮点-接收点旋转, 也可以使用矢量滤波等先进的噪声衰减算法, 还可以做倾角叠加^[66].

WesternGeco 的 Q-Land VIVID (Value In Variable Image Density) 是一种先进的交错扫描采集方法: 将第二次采集与第一次采集在 X 和 Y 方向上偏离半个网格位置, 进行交错扫描, 得到的结果的采样间隔是原来的 1/2, 覆盖次数是原来的 2 倍. 这是将一次或多次后续高密度单点接收地震作业区块加入到油田勘探开发的整个过程中, 并与原区块一起形成更高覆盖的数据, 可以提高成像精度, 适应不同勘探开发阶段的要求, 节省采集成本, 缩短开发周期^[57].

在点激发方面, 震源数目决定 CMP 域的抽样情况, 单点震源可使 CMP 域有更高的覆盖次数和更好的波场采样^[67]. 而且目前的可控震源技术为高密度采集提供了很好的条件^[68, 69]. 例如, CGG 研发出高性能的单点可控震源采集系统—V1, 该系统采集的数据比常规的震源组合数据有更高的信噪比和分辨率^[70]. Martin 和 Bacon(1993)讨论了震源分离的有效性. Allen(1998)等人提出了震源分离的 HFVS(High Fidelity Vibratory Seismic, 即高保真度可控震源地震采集)技术^[71]. Krohn(1998)等人提出 HFVS 方法是很好的震源分离方法^[72]. Baeten 等人(2000)分析了得到点震源分量的几种方法: HFVS 方法, 可控震源组合分解(VAD)法和 FUND 方法^[31]. 震源组合分离可以增加激发点的密度, 提高覆盖次数, 但是不利于压制环境噪声. 采集过程中, 要根据工区的实际情况决定是否进行震源分离, 如何分离等^[73].

4 相关的处理方法

单点高密度技术的一个难点是地震资料处理. 由于数据采样密度大, 记录的噪声多, 因此要进行合适的预处理以及噪声压制, 提高数据的信噪比和分辨率^[74]. 因此, 噪声压制是很重要的处理过程. 使用一些常规处理方法对高密度数据进行处理, 可以取得较好的效果, 这里不再赘述. 单点高密度数据特有的处理方法是进行室内数字组合处理, 可以得到不同方式的组合输出.

4.1 噪声压制

噪声压制是地震数据处理的重点也是难点. 用各种方法对地震资料进行信号分析后^[75], 针对不同的噪声有许多不同的压制方法, 如压制相干噪声的频率域高通滤波、 $f-k$ 滤波、 $k-l$ 滤波、自适应滤波、小波方法、径向道变换方法、Ridglet 域方法等^[76~83]; 压制随机干扰的 $f-k$ 预测滤波等; 压制多次波的匹配滤波、Radon 变换方法等^[84, 85]. 其中一些方法已经成功地应用于单点高密度数据, 并取得了较好的效果.

在背景噪声压制方面, 背景噪声带宽较宽, 且以高频成分为主. 在 $t-x$ 域中, 噪声能量沿时间轴很稳定, 而且随着噪声源到接收器的距离增大, 噪声衰减很快. 所以, 通过初至前的能量可以识别出噪声道. 然后, 将输入道集中的每一道变换到频率域. 在 $f-x$ 域中, 对正常道振幅包络进行内插, 就可以压制噪声道的振幅包络. 这种方法适用于压制背景噪声, 但是为了保真信号的频率分布, 振幅包络压制应该主要在高频范围内进行, 并且避开信号的主频范围^[86].

对于地滚波等相干噪声, 自适应滤波方法是一种应用很广的方法^[87~89]. 首先, 取滑动时窗, 对采集的多分量地震数据中的垂向道和水平道做互相关, 产生相关信息. 然后对这些互相关做反滤波, 并将反滤波的结果和垂向道做褶积. 这样就从垂向道中减去了相关信息, 剩下的是有用信号.

图 5 是二维原始炮记录(地滚波无假频)进行自适应滤波后的振幅谱. 原始数据用三分量数字检波器记录, 有较高的向量保真度. 滤波后, 地滚波能量有近 10 dB 的衰减(2 Hz 到 20 Hz). 可以看出, 自适应滤波方法只减去了低频噪声, 并没有改变信号的振幅谱, 因此提高了数据的保真度. 自适应滤波用于有假频的地滚波时也可取得很好的效果. 但是该方法要求采集多分量、高保真度的数据并且要求数据在滤波前未做增益、反褶积以及带通滤波等. 若滤波

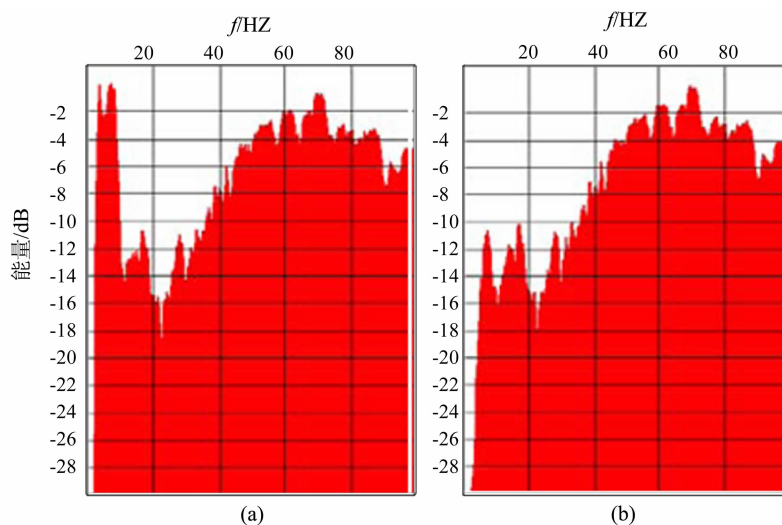


图 5 未滤波记录的振幅谱(a)和滤波记录的振幅谱(b)

Fig. 5 Amplitude spectra from the un-filtered (a) and filtered(b) records

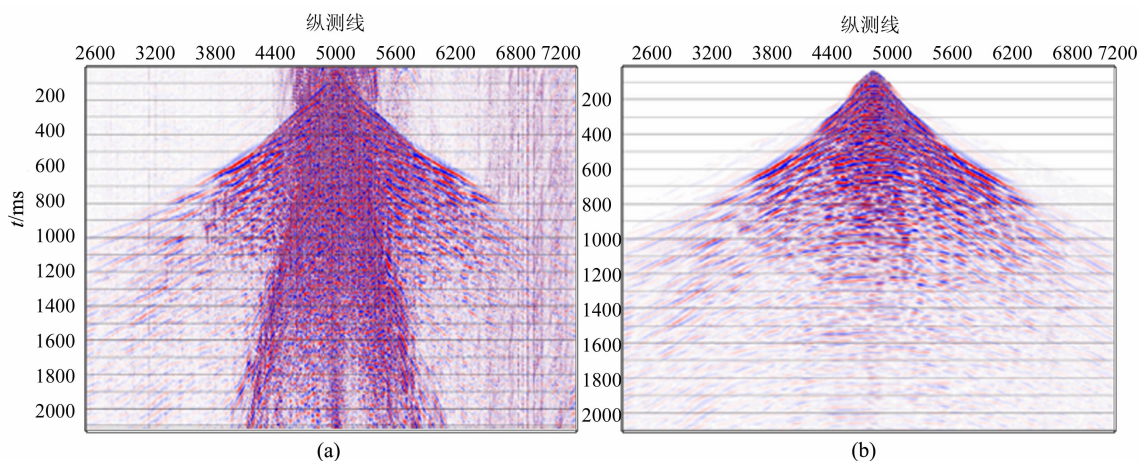


图 6 原始数据(a)和数字化室内组合的数据(b)

Fig. 6 Common shot gathers from North Africa; raw data (a), after digital group-forming (b)

前作了增益和反褶积, SWNA(Landmark ProMAX 地表波噪声压制模块)方法效果较好. 这种方法只需要单分量地震数据, 通过做频率相关叠加形成低频组合来压制相干能量, 它也可用于处理有假频的地震数据^[90].

在相干噪声压制方面, Özbek(2004)提出了一个用 APOCS(凸集交错映射)算法设计 3-D 有限脉冲响应滤波器的方法. 许多约束最优化问题的约束条件是在不同的域中定义的, 如时间(采样)或频率域. 将这些约束变换到同一个域中不一定可行. Gubin 等人(1967)证明, 如果约束确定了一个平方和序列集合中的凸集, 然后对它们使用交错正交映射, 就会收敛到最优解, 这称作凸集交错映射法

(APOCS). 对于用交错排列采集的数据, 根据此方法设计的滤波器取得了很好的效果^[65,91]. 图 6 中, 左图是北非 3D 勘探的原始炮集, 右图是其数字组合后的结果, 数字组合的主要步骤是用 APOCS 方法设计 3D 滤波器. 噪声分量得到了有效地压制, 反射波场得到了保护^[65].

4.2 数字组合处理

对地震波场进行合理采样以后, 可以使用地球物理方法压制噪声, 然后构建数字化组合并做干扰校正以保真信号, 在目标体的真实空间位置上输出地震道. 这个噪声压制与信号保真的过程称为数字化组合(DGF). 对小组距基距的接收数据进行室内组合可以增大组合基距, 压制面波. 使用道组合处理

的测线剖面背景噪声更小,剖面品质有一定的改善^[92].组合的方式多种多样,可以针对不同的勘探要求以及资料的特点选取不同大小的面元、不同覆盖次数以及组合长度等组合参数^[52,93~95].图7是WesternGeco提出的数字组合方法的流程图.

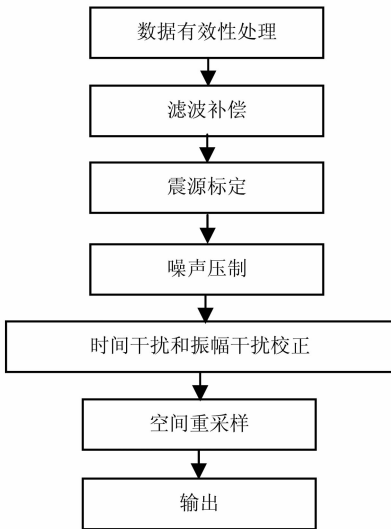


图7 DGF流程图

Fig.7 WesternGeco Workflow of DGF

5 相关争议

单点高密度技术在有些地区的使用效果不是很好,而且相对常规组合方法有一些不足,因此在某些地区,是否使用这个方法以及如何使用还存在争议.

5.1 低信噪比问题

单点高密度地震勘探采集的数据信噪比很低,这是由于:一方面,在各个方向上都有优良的采样,在对反射波场进行充分采样的同时,也全面地记录了各种噪声,另一方面,在野外不能利用干扰波传播的方向特性和组合压噪特性来压制沿近地表传播的各种干扰波^[94].因此,在信噪比低的地区使用单点接收方式很难提高地震数据的信噪比^[96].国内,在准噶尔盆地的却什和乌勒两个地区进行了高密度地震勘探,通过分析其结果得出,要在低信噪比地区使用高密度采集技术提高数据质量,重点在于提高原始数据的信噪比,单点技术目前还不能完全代替野外检波器组合.因此,在低信噪比地区或者新的探区,野外采集过程中使用小面元,合理的检波器组合,再加上适当的室内组合能很好地提高数据质量^[4,97].

李庆忠院士等人认为对有效波衰减起最主要作

用的不是组合效应,而是大地吸收作用.中国西部地区地层对地震波的吸收衰减非常严重,侧面散射干扰很强,地震信噪比非常低,接收到的高频信号非常弱.在这种情况下,采用高密度地震采集不会明显提高信噪比,而在不提高信噪比的情况下,提高分辨率是没有意义的,这时采用高密度地震采集只会增加野外采集的工作量以及处理的难度,却不会见到明显的效果.但是如果工区在海上,因为海水不存在吸收作用,并且也不存在野外组内高差,道距减小可记录到的目的层最高频率会显著提高,高密度地震采集会见到明显的成效^[98].2000年,PGS公司在挪威进行海上单点震源勘探,与以前进行的双检勘探相比,地震资料的覆盖次数和S/N都有了很大的提高^[99].

5.2 覆盖次数问题

覆盖次数的选择主要取决于单炮地震记录的信噪比,不同地区的覆盖次数应有所差异.特别是低信噪比地区,要得到地下的构造形态,主要追求较高的信噪比;在高精度勘探中,不仅要有较高的信噪比,还要有较高的分辨率.所以覆盖次数不是越高越好,当覆盖次数较高时,信噪比高,但分辨率会降低;覆盖次数较低时,分辨率较高,但信噪比低^[100].高密度采集的覆盖次数较高,相应地原始资料的分辨率较低.因此,不要盲目使用单点高密度勘探方法,要通过试验段的处理分析确定合适的覆盖次数.

5.3 数据量大,需要高性能的采集与处理设备

采集过程中需要使用高性能的地震勘探仪器^[101].如在垦71地区进行的多波多分量地震采集中,使用三分量检波器单点接收,点距为5m.然后通过数字三分量检波器数据的室内各种组合研究,进行超线元叠加,有效地改善了资料的信噪比,对分辨率基本没有影响^[102].高密度采集的效果是肯定的,关键是如何运用好这项技术^[60].一方面,使用高性能的检波器会增加采集成本;另一方面,到目前为止,某些地区仍然不具备使用数字检波器的条件,尤其是在低信噪比地区,更适合使用模拟检波器.如在准噶尔盆地腹部,信噪比很低而且横向干扰很严重,用数字检波器进行点接收高密度采集很有潜力,但是仍需要更加可靠的采集与处理试验^[103].

单点高密度勘探记录的道数大大增加了,尤其是万道地震仪的出现,使对地震波场的采样率大大提高了,记录的数据量比常规方法大得多.处理过程中必须使用能处理海量数据的计算机软件和硬件设备,还要研究并行计算机算法^[104].

6 总结和展望

通过以上分析和讨论,得出下面的结论:

(1)与常规组合勘探相比,单点高密度地震勘探技术具有消除组内干扰、提高噪声压制的精度、组合方式灵活、提高地震资料的分辨率和成像精度、改善油藏特征描述等优势,很好地适应日益复杂的勘探形势的需要。

(2)单点高密度地震勘探技术向小采集面元、高道数、宽方位、对称均匀采样等方面发展,相信该技术定会有很好的应用前景。

(3)该技术起步较晚,相应的理论分析以及处理、解释技术还不成熟。由于存在原始资料信噪比低,数据量大,对设备的需求高等特点,其具体实施应用还有很多的争议。

(4)实际应用时,要针对点激发/点接收地震勘探的特殊性,根据实际工区的情况进行分析研究,确定合适的采集方法,不能盲目使用单点高密度技术,否则不仅得不到期望的处理精度,还会增加成本,造成不必要的浪费。在新探区,要先用常规组合勘探方法探明整体构造,工区信噪比等基本情况,然后随着勘探程度的加深,勘探精度要求越来越高,进入高精度勘探或者油藏描述阶段再进行单点高密度勘探。在复杂的老油区或者需要精细解释的地区,将单点高密度勘探技术与许多高精度的勘探方法联合使用,如多分量勘探,广角勘探,横波勘探,4D地震勘探等,得到更详细准确的油藏信息。

参 考 文 献 (References):

[1] Baeten G J M, Belougne V, Combee L, *et al* Acquisition and processing of point receiver measurements in land seismic[A]. Expanded Abstract of 70th Annual International SEG Meeting [C], 2000, 41~44.

[2] 杨勤勇. 油气地球物理技术发展新动向[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(2): 77~84.
Yang Q Y. Latest development of geophysical prospecting for petroleum[J]. PEG, 2007, 30(2): 77~84.

[3] 曲寿利. 地震勘探技术的发展促进油气勘探新发现——以胜利油田 40 年地震勘探历程为例[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 366~370.
Qu S L. Development of seismic exploration promoting new discovery of oil/gas exploration—taking 40 years' history of seismic exploration in Shengli Oilfield as an example[J]. Oil Geophysical Prospecting (OGP), 2005, 40(3): 366~370.

[4] 王喜双, 谢文导, 邓志文. 高密度空间采样地震勘探技术与展望[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1): 49~53.
Wang X S, Xie W D, Zheng Z W. Development and prospect

of high density spatial sampling of seismic technology [J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(1): 49~53.

[5] Carbonates—a tough but worthwhile challenge[J]. Oil Review Middle East, 2007, 6: 100~101.

[6] Europa field, Gulf of Mexico: A shallow water-flow study [OL]. Q case study of WesternGeco, 2007.

[7] Magnus field, UK North Sea—A strategy for improved oil recovery[OL]. Q case study of WesternGeco, 2007.

[8] UK North Sea—Targeting bypassed pay to extend the life of a mature field[OL]. Q case study of WesternGeco, 2007.

[9] Stephen P. Q-Reservoir: Advanced seismic technology for reservoir solutions[J]. Oil & Gas North Africa Magazine, 2003, 26~30.

[10] Ghassan R, Abdulaziz A F. Single-sensor 3D land seismic acquisition in Kuwait[A]. Expanded Abstract of 76th Annual International SEG Meeting[C], 2006, 61~64.

[11] Jeff P, Nick M. Single-sensor towed streamer acquisition: a case study from the Gulf of Mexico[A]. Expanded Abstract of 71th Annual International SEG Meeting[C], 2001, 33~36.

[12] Leif L. Q-Marine seismic acquisition results: report from WesternGeco[J]. First Break, 2002, 20(12): 778~781.

[13] Mohammad R, Ibrahim A H, John G. Single-sensor recording—a case study from a mature field in the Partitioned Neutral Zone, Kingdom of Saudi Arabia and Kuwait[A]. Expanded Abstract of 76th Annual International SEG Meeting [C], 2006, 562~565.

[14] Rached C, *et al*. KOC pioneers single-sensor seismic [J]. E&P, 2005, 78(7): 68~69.

[15] Garden M, Bunting T, Flack B, *et al*. Imaging gas reservoirs of Pinghu field, East China Sea [J]. Geology & Geophysics, 2008, 7.

[16] 付清锋. 地震检波器新技术发展方向[J]. 石油仪器, 2005, 19(6): 1~4.
Fu F Q. New development of the seismic geophone [J]. Petroleum Instruments, 2005, 19(6): 1~4.

[17] Jean-Jacques P, Julien M. Thomas Bianchi and Roger Taylor. V1: Implementation and application of single-vibrator acquisition[J]. The Leading Edge, 2008, 27(5): 604~608.

[18] 陈光明, 陈莉, 候树麒. SI 数据采集系统简介[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(5): 101~103.
Chen G M, Chen L, Hou S Q. A brief introduction to SI data acquisition system[J]. Geology of China, 2005, 17(5): 101~103.

[19] 刘振武, 撒利明, 董世泰, 等. 中国石油高密度地震技术的实践与未来[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 129~135.
Liu Z W, Sa L M, Dong S T, *et al*. Practices and expectation of high-density seismic exploration technology in CNPC [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 129~135.

[20] 毕丽飞, 孟宪军, 冯刚, 等. 三维转换波资料处理方法研究及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊 2): 150~154.

- Bi L F, Meng X J, Feng G, *et al.* Study on 3D converted wave data processing method and application [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(Supplement 2): 150~154.
- [21] 碗学俭,吴树奎,杨素玉,等. 马厂油田高密度三维观测系统设计研究[J]. *石油物探*, 2008,47(6): 598~603, 608.
Wan X J, Wu S K, Yang S Y, *et al.* Research on high density 3-D geometry design in Machang oilfield [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(6): 598~603,608.
- [22] 武喜尊. 高精度煤炭三维地震勘探技术[J]. *物探与化探*, 2008,32(1):23~27.
Wu X Z. High-precision three-dimensional seismic technique for coal exploration [J]. *Geophysical&Geochemical Exploration*, 2008,32(1):23~27.
- [23] 武喜尊. 关于煤炭三维地震勘探发展的几点思考[J]. *中国煤田地质*, 2007,19(2):66~69.
Wu X Z. Some pondering on coal 3D seismic prospecting development[J]. *Coal Geology of China*, 2007, 19(2):66~69.
- [24] 苗庆库,李玮,朱旭东. 高密度地震法在工程勘察中的应用[J]. *物探装备*, 2002,12(2):132~133,141.
Miao Q K, Liu W, Zhu X D. Application of high-dense seismic prospecting method in engineering survey[J]. *EGP*, 12(2):132~133,141.
- [25] 张勇,田双凤,王建华. 浅海工程中小道距高分辨率多道地震方法的应用[J]. *海洋技术*, 2008,27(4):75~77,114.
Zhang Y, Tian S F, Wang J H. Application of small group interval high-resolution multi-channel seismic system surveys to shallow marine engineering[J]. *Ocean Technology*, 2008, 27(4):75-77,114.
- [26] 李军峰,肖都,孔广胜,等. 单道海上反射地震在海上物探工程中的应用[J]. *物探与化探*, 2004, 28(4):365~368.
Li J F, Xiao D, Kong G S, *et al.* The Application of single-channel marine reflection seismic survey to marine geophysical exploration [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2004, 28(4):365~368.
- [27] Newman P, Mahoney J T. Patterns-With a pinch of salt[J]. *Geophys. Prosp.*, 1973,21(02):197~219.
- [28] Ongkiehong L, Huizer W. Dynamic range of the seismic system[J]. *First Break*, 1987,05(12):435~439.
- [29] Ongkiehong L. A changing philosophy in seismic data acquisition[J]. *First Break*. 1988, 6(9): 281~284.
- [30] Patrick B, Robert G, Pierre Y G. Improving resolution and seismic quality assurance through field preprocessing [A]. *Expanded Abstract of 67th Annual International SEG Meeting [C]*, 1997, 100~103.
- [31] Baeten G J M, Belougne V, Daly M, *et al.* Acquisition and processing of point source measurements in land seismic[A]. *Expanded Abstract of 70th Annual International SEG Meeting [C]*, 2000, 45~48.
- [32] Vermeer J O. An ambitious geometry for 3D land acquisition [J]. *The Leading Edge*, 2004, 1043~1046.
- [33] John Q. An integrated 3D acquisition and processing technique using point sources and point receivers [A]. *Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting [C]*, 2004,17~20.
- [34] 郭建. 2004年SEG年会地震勘探技术最新进展[J]. *勘探地球物理进展*, 2005,28(2):137~150.
Guo J. Advances in exploration geophysical technologies in 2004 SEG Annual International meeting [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2005, 28(2):137~150.
- [35] 董世泰,高红霞. 单点单检波器地震勘探技术[J]. *石油仪器*, 2005,19(2):66~68.
Dong S T, Gao H X. Seismic exploration technology of single point with one geophone[J]. *Petroleum Instruments*, 2005, 19(2) 66~68
- [36] Cai X L, Liu X W, Deng C Y, *et al.* Characteristics analysis on high density spatial sampling seismic data [J]. *Applied Geophysics*, 2006, 3(1):48~54.
- [37] Phil C, David N, *et al.* Rising the standards of seismic data quality[J]. *Oilfield Review*. 2001,13(2):16~31.
- [38] Ayman S, Andy S, Boff A, *et al.* How single-sensor seismic improved image of Kuwait's Minagish Field[J]. *First Break*, 2005,23(2):63~69.
- [39] Jonathan A, Andrew S, Ayman S, *et al.* Solving an imaging problem in Kuwait Oil Company's Minagish field using single-sensor acquisition and processing[A]. *Expanded Abstract of 75th Annual International SEG Meeting [C]*, 2005; 502~505.
- [40] UK North Sea lithology prediction [OL]. Q case study of WesternGeco. 2004.
- [41] McHugo S, Ramsden P, Cooke A J, *et al.* Use of point-receiver seismic acquisition in description of a highly complex reservoir—A case history from the UK North Sea[A]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts [C]*, 2003,22: 386~389.
- [42] Osman A K, Yousef A Z, Mafizar R, *et al.* Seismic inversion of single sensor land 3D seismic survey: Kuwait, Magwa field, Wara reservoir[A]. *Expanded Abstract of 76th Annual International SEG Meeting [C]*, 2006:2102~2106.
- [43] Malcolm L, Mike L, Shuki R. Land 3D: groups or single sensors? cables or radio? geophysical and operational considerations[A]. *SEG/San Antonio 2007 Annual Meeting [C]*. 6~10.
- [44] Malcolm L, Mike L, *et al.* Modern land recording systems: How do they weigh up? [J]. *The Leading Edge*, 2008,888~894.
- [45] James M, Ali Ö, Leendert C, *et al.* Acquisition of marine point receiver seismic data with a towed streamer [A]. *Expanded Abstract of 70th Annual International SEG Meeting [C]*, 2000,37~40.
- [46] Gerrit B, Leo O. Single sensor recording: anti-alias filtering, perturbations and dynamic range[A]. *Expanded Abstract of*

- 70th Annual International SEG Meeting [C], 2000, 19: 33~36.
- [47] Abdul B R, Sayed K, Bob V, *et al.* Increasing bandwidth with single sensor seismic data-the Lehib oilfield case study [J]. *First Break*, 2008, 26(2): 79~84.
- [48] Quigley J, Patrick T. A comparison of seismic explosives-a case history [A]. Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting [C], 2004: 25~28.
- [49] 曹务祥. 高空间密度采样资料分析 [J]. *勘探地球物理进展*, 2006, 29(3): 178~182.
- Cao W X. Analysis of seismic data of dense spatial sample [J]. *Progress in Exploration Geophysical*. 2006, 29(3): 178~182.
- [50] Nick M, Juan U, Dave S. Point-source/point-receiver land acquisition; Torrecillas-Mexico experiment [A]. Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting [C], 2004, 21~25.
- [51] 曹务祥. 单道接收地震资料的室内组合法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(6): 615~618.
- Cao W X. Indoor array for unite single trace receiving seismic data [J]. *OGP*, 2006, 41(6): 615~618.
- [52] Brian H H, Gary F M, Robert R S, *et al.* Analyzing the effectiveness of receiver arrays for multicomponent seismic exploration [J]. *Geophysics*, 2002, 67(6): 853~1868.
- [53] 石战结, 田钢, 薛建, 等. 单点地震技术在浅覆盖区区域地质调查中的应用研究 [J]. *世界地质*, 2003, 23(1): 86~89.
- Shi Z J, Tian G, Xue J, *et al.* The Application of the single-receiver seismic to geological survey in the shallow covered areas [J]. *Global Geology*, 2003, 23(1): 86~89.
- [54] 狄帮让, 熊金良, 岳英, 等. 面元大小对地震成像分辨率的影响分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(4): 363~368.
- Di B R, Xiong J L, Yue Y, *et al.* Analysis on influence of bin size on resolution of seismic imaging: study of acquisition parameters based on seismic physical modeling [J]. *OGP*, 2006, 41(4): 363~368.
- [55] 熊金良, 岳英, 杨勇, 等. 面元大小与纵向分辨率关系 [J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(4): 489~491.
- Xiong J L, Yue Y, Yang Y, *et al.* Relationship between bin size and inline resolution [J]. *OGP*, 2006, 41(4): 489~491.
- [56] Vermeer G J O. Factors affecting spatial resolution [J]. *The Leading Edge*, 1998, 17(8): 1025~1029.
- [57] Boff A, Peter V B, Mark D, *et al.* Point-receiver seismic data offers new approach to managing onshore E&P development cycle [J]. *First Break*, 2006, 24(2): 63~69.
- [58] Patrick B. Comparison between single and multi-channel cable telemetry systems in harsh terrains [J]. *First Break*, 2000, 18(2): 53~59.
- [59] Jenkerson M, Houck R, Walsh M. Signal preserving swell noise attenuation using point receiver seismic data [A]. Expanded Abstract of 70th Annual International SEG Meeting [C], 2000: 2085~2087.
- [60] 熊翥. 高精度三维地震 (I): 数据采集 [J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(1): 1~11.
- Xiong Z. High-precision 3-D seismic: Part I Data acquisition [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(1): 1~11.
- [61] Vermeer G J O. A comparison of two different approaches to 3D seismic survey design [A]. Expanded Abstract of 73th Annual International SEG Meeting [C], 2003: 2152~2155.
- [62] Vermeer G J O. 3-D symmetric sampling [A]. SEG Technical Program Expanded Abstracts [C], 1994: 906~909.
- [63] Vermeer G J O. 3D symmetric sampling in theory and practice [J]. *The Leading Edge*, 1998: 1514~1519.
- [64] 朱海龙. 第 74 届 SEG 年会综述 [J]. *勘探地球物理进展*, 2005, 28(2): 129~136.
- Zhu H L. A review of the 74th SEG annual international meeting [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2005, 28(2): 129~136.
- [65] Ali Ö, Leila H, Gabriela D. 3-D filter design on a hexagonal grid with applications to point-receiver land acquisition [A]. Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting [C], 2004: 1965~1968.
- [66] Peter W M, Donald N B, Jason C C. Principles behind vector acquisition [A]. Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting [C], 2004: 1~4.
- [67] Nick M, Pedro M, Mark K, *et al.* Single source vs. dual source in marine acquisition: is single source really needed? [A]. Expanded Abstract of 75th Annual International SEG Meeting [C], 2005: 21~24.
- [68] 凌云, 高军, 孙德胜, 等. 可控震源在地震勘探中的应用前景与问题分析 [J]. *石油物探*, 2008, 47(5): 425~438.
- Ling Y, Gao J, Sun D S, *et al.* Analysis of vibroseis in seismic exploration and its application [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(5): 425~438.
- [69] 曹务祥, 张慕刚. 滑动扫描谐波分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(5): 499~503, 509.
- Cao W X, Zhang M G. Slide-sweeping harmonic analysis [J]. *OGP*, 2005, 40(5): 499~503, 509.
- [70] Julien M, Thomas B, Jean J P, *et al.* The future of vibroseis for high-density wide-azimuth land acquisition [J]. *First Break*, 2000, 18(2): 53~59.
- [71] Allen K P, Johnson M L, May J S, *et al.* High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS) Method for Acquiring Seismic Data [A]. Expanded Abstract of 68th Annual International SEG Meeting [C], 1998: 140~143.
- [72] Christine E K, Marvin L J. High fidelity vibratory seismic (HFVS) II: Superior source separation [A]. Expanded Abstract of 73th Annual International SEG Meeting [C], 2003: 47~50.
- [73] 钱荣钧. 关于地震采集空间采样密度和均匀性分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(2): 235~243.
- Qian R J. Analysis on spatial sampling density and uniformity of seismic acquisition [J]. *OGP*, 2007, 42(2): 235~243.
- [74] 冯刚, 毕丽飞, 李建国, 等. 单点数字检波器地震资料特点及

- 处理对策[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊 2): 115~120.
- Feng G, Bi L F, Li J M, *et al.* Seismic data character of single-point digital geophone and processing strategy [J]. OGP, 2008, 43(Supplement 2): 115~120.
- [75] 刘喜武, 张宁, 勾永峰, 等. 地震勘探信号时频分析方法对比与应用分析[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 743~753.
- Liu X W, Zhang N, Gou Y F, *et al.* The comparison and application of time-frequency analysis methods to seismic signal[J]. Progress in Geophysics. (in Chinese), 2008, 23(3): 743~753.
- [76] Ali Ö. Adaptive Beam forming with Generalized Linear Constraints [A]. Expanded Abstract of 70th Annual International SEG Meeting[C], 2000.
- [77] 夏洪瑞, 朱勇, 周开明. 小波变换及其在去噪中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(3): 274~285.
- Xia H R, Zhu Y, Zhou K M. Wavelet transform and its application to noise elimination[J]. OGP, 1994, 29(3): 274~285.
- [78] 柳建新, 韩世礼, 马捷. 小波分析在地震资料去噪中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 541~545.
- Liu J X, Han S L, Ma J. Application of wavelet analysis in seismic data denoising [J]. Progress in Geophysics. (in Chinese), 2006, 21(2): 541~545.
- [79] 吴招才, 刘天佑. 地震数据去噪中的小波方法[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 493~499.
- Wu Z C, Liu T Y. Wavelet transform methods in seismic data noise attenuation [J]. Progress in Geophysics. (in Chinese), 2008, 23(2): 493~499.
- [80] 徐鑫, 张学强, 徐涛, 等. 小波变换在压制面波中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(2): 196~200.
- Xu X, Zhang X Q, Xu T, *et al.* Application of Wavelet Transform in Surface Wave Elimination[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(2): 196~200.
- [81] 刘志鹏, 陈小宏, 李景叶. 径向道变换压制相干噪声方法研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1199~1204.
- Liu Z P, Chen X H, Li J Y. Study on coherent noise attenuation using radial trace transform filtering[J]. Progress in Geophysics. (in Chinese), 2008, 23(4): 1199~1204.
- [82] 包乾宗, 高静怀, 陈文超. 面波压制的 Ridgelet 域方法[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1210~1215.
- Bao Q Z, Gao J H, Chen W C. Ridgelet domain method of ground-roll suppression[J]. Chinese Journal of Geophysics. (in Chinese), 2007, 50(4): 1210~1215.
- [83] 刘志鹏, 陈小宏, 李景叶, 等. 径向道变换压制高密度采集资料中的相干噪声[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(3): 321~326.
- Liu Z P, Chen X H, Li J Y, *et al.* Study on using radial trace transform to depress coherence noise in high-density acquired data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(3): 321~326.
- [84] 李景叶, 陈小宏, 芮振华. 基于匹配滤波的多次波压制方法研究[J]. 地球物理学进展. 2007, 22(1): 200~206.
- Li J Y, Chen X H, Rui Z H. Study on multiple attenuation method based on match filter[J]. Progress in Geophysics. (in Chinese), 2007, 22(1): 200~206.
- [85] 王维红, 崔宝文, 刘洪. 表面多次波衰减的研究现状与进展[J]. 地球物理学进展. 2007, 22(1): 156~164.
- Wang W H, Cui B W, Liu H. Research progress in surface-related multiple attenuation[J]. Progress in Geophysics, (in Chinese), 2007, 22(1): 156~164.
- [86] Li Y P, Tang D L. Background noise identification and attenuation using point receiver seismic data[A]. Expanded Abstract of 75th Annual International SEG Meeting [C], 2005, 2205~2208.
- [87] Ristau J P, Woolf M M. Adaptive filtering of random noise in 2-D geophysical data[J]. Geophysics, 2001, 66(1): 342~349.
- [88] Richard G A, George A M. Noise-adaptive filtering of seismic shot records[J]. Geophysics, 1988, 53(5): 638~649.
- [89] 魏巍, 刘学伟. 自适应噪声抵消技术在地震资料处理中的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(4): 79~83.
- Wei W, Liu X W. Application of Self-adaptive Noise-cancellation Technique in Seismic Data Processing [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(4): 79~83.
- [90] Burch D, Kappius R, Tessman J. Successful noise attenuation using point receivers in the presence of aliased noise[A]. Expanded Abstract of 74th Annual International SEG Meeting[C], 2004, 13~16.
- [91] Malik A M, Mohamed Z B, *et al.* New dimensions in land seismic technology [OL]. Q case study of WesternGeco, 2007.
- [92] 熊永学, 晁元萍, 康平, 等. 柴达木盆地小组合基距地震资料干扰波分析及去噪对策[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(增刊): 66~70.
- Xiong Y X, Chao Y P, Kang P, *et al.* Noise analysis and attenuation of small array-distance seismic data in qaidam basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(Supplement): 66~70.
- [93] 高银波, 张研. 关于面元计算和观测系统设计的思考[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(4): 383~386, 396. Data acquisition
- Gao Y B, Zhang Y. Redefining bin size and folds in 3-D seismic exploration[J]. OGP, 2008, 43(4): 383~386, 396.
- [94] 吕河. 高精度地震勘探采集技术讨论[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 261~266.
- Lu G H. Discussion of high-precision seismic prospecting acquisition technology[J]. OGP, 2005, 40(3): 261~266.
- [95] 杨照海, 凡正才, 赵前华. 单点数字检波器道组合技术[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊 2): 88~93.
- Yang Z H, Fan Z C, Zhao Q H. Overlapping technique of single-point digital geophone [J]. Oil Geophysical

- Prospecting, 2008, 43(Supplement 2):88~93.
- [96] 曹务祥. 检波器组合问题的分析[J]. 石油物探, 2008, 47(5):505~510.
Cao W X. Analysis on the problems of geophone array[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(5): 505~510.
- [97] Liu X W, Yan F, Shi H F. Application of high-density sampling acquisition technique in complicated mountain area [A]. SEG International Exposition and 74th Annual Meeting [C]. 2004.
- [98] 李庆忠, 魏继东. 高密度地震采集中组合效应对高频截止频率的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4):363~369.
Li Q Z, Wei J D. Influence of array effect on cutoff frequency of high frequency in high-density seismic acquisition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(4):363~369.
- [99] Stian H, Bard K, Tormod S. Single source 3D acquisition-a high quality and cost-effective alternative [A]. SEG International Exposition and Annual Meeting[C], 2001, 48~51.
- [100] 赵会欣, 晋志刚, 张宇生, 等. 高密度空间采样地震采集覆盖次数的选择[J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊 A):68~69.
Zhao H X, Jin Z G, Zhang Y S, *et al.* Seismic acquisition fold selection of high-density acquisition[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (Supplement A): 68~69.
- [101] 夏颖, 祝彩霞, 孙灵群. 地震勘探仪器在高密度采集中的应用[J]. 物探装备, 2008, 18(1):7~10, 21.
Xia Y, Zhu C X, Sun L Q. Application of seismograph in high-density acquisition[J]. EGP, 2008, 18(1): 7~10, 21.
- [102] 曹国滨, 李云伟, 崔汝国. 垦 71 地区多波采集方法研究及应用效果[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5):1510~1516.
Cao G B, Li Y W, Cui R G. The multi-wave seismic acquisition method and applied result in Ken 71 area[J]. Progress In Geophysics, 2007, 22(5):1510~1516.
- [103] Peng X, Qin X, Yang W X. Application of high density acquisition in Jungar Basin, western China[A]. Expanded Abstract of 76th Annual International SEG Meeting [C], 2006, 90~94.
- [104] 曲寿利. 高密度三维地震技术—老油区二次勘探的关键技术之一[J]. 石油物探, 2006, 45(6):557~562.
Qu S L. High-density 3-D seismic technique—One of the key techniques of the secondary exploration in old oil region[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum. 2006, 45(6):557~562.