

文章编号:1000-1441(2009)05-0425-11

高精度地震勘探技术发展回顾与展望

赵殿栋

(中国石油化工股份有限公司油田勘探开发事业部, 北京 100728)

摘要:历史上物探技术的每一次进步都会带来油气储量的快速增长,高精度地震勘探技术必将成为推动国内油气储量又一次大幅增长的主要技术手段。回顾田家地区第一块高精度三维地震勘探史例,阐述其历史地位,说明田家地区高精度三维地震的勘探思想一直影响着胜利油田以及中国石化高精度地震勘探技术发展的轨迹。分析了中国石化高精度三维地震技术的发展水平,综述了其应用现状和应用效果。针对当前隐蔽油气藏、海相碳酸盐岩、山前带三大领域的勘探需求,提出了继续优先推广应用高精度三维地震技术,积极开展高密度三维地震技术先导试验和配套处理、解释技术创新研发的高精度地震勘探技术发展方向。

关键词:高精度三维地震勘探技术;田家地区;应用现状分析;应用效果分析;发展方向

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2009.05.001

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

油气勘探开发的需求是物探技术进步的源动力,物探技术的发展和进步提高了认识油气地质问题的能力。事实上,历史上物探技术的每一次进步都会带来油气储量的快速增长。20 世纪我国油气勘探探明的石油地质储量有 5 次大幅度增长,每一次都与地震技术进步有着极为密切的关系^[1]:第 1 次大幅增长是 1961 年,核心技术是综合物探技术;第 2 次是 1965 年,核心技术是复杂断块地震技术;第 3 次是 1976 年,核心技术是数字多次覆盖地震技术;第 4 次是 1984 年,核心技术是常规三维地震技术;第 5 次是 1998 年,核心技术是复杂储层预测地震技术。目前,物探技术面临着新区要寻求新突破和新发现、老区要保持增储稳产这两大迫切需求,高精度地震勘探技术成为解决新需求的主要技术手段。可以认为,国内第 6 次油气地质储量的大幅稳定增长,必将归功于已推广应用并继续发展的高精度地震勘探技术^[2]。

三维地震技术良好的勘探效益得益于其信息量大且信息成分丰富。增加地震信息量的途径,一是通过提高采样密度来增加空间信息量,二是提高频率域的地震信息量,即提高地震资料的分辨率。前者与采集仪器的装备性能及采集设计有关;后者与工区的地震地质条件、采集工艺及资料处理技术有关。减小面元尺度,提高空间采样率,并配合相应的去噪处理技术,是国内外三维地震技术向高精度发展的主要途径。目前,进入应用阶段的高精度地震勘探技术已有 3 种比较典型的代表:一是以 PGS 为代表的海上单检波器拖缆采集技术;二是 WesternGeco 的陆上野外单检波器高密度分布接

收、室内道组合压噪处理技术;三是国内根据现有技术条件和装备水平,因地制宜发展起来的采用模拟检波器组合接收、以小面元和高覆盖次数为特征的高精度三维采集技术(多用于二次勘探)。为了区别于国际上现已采用的全数字采集系统加数字检波器进行单点高密度全波场采集的“高密度三维地震技术”,我们把国内提高空间采样密度的三维地震新技术称为“高精度三维地震技术”。从“高精度三维地震技术”再到“高密度三维地震技术”,是中国特色的高精度地震勘探技术发展之路。

1 高精度三维地震技术发展回顾

中国东部探区自 20 世纪 70 年代开始实施三维地震勘探,勘探对象是规模较大的简单构造型油气藏,主要集中在浅中层。常规三维地震资料的构造解释精度比以往的二维资料明显提高,为加快油田的勘探开发建设做出了重大贡献。但前期的常规三维地震工作受地质需求、勘探设备和技术水平等条件限制,地震资料的缺陷也是明显的。仪器动态范围小,地震采集数据精度低;接收道数少,一般为 120~480 道,只能做一些简单三维项目,排列片窄,方位角窄,炮检距受到限制(最小炮检距大,最大炮检距不够),不利于各向异性复杂地质体的成像;面元在 25 m×50 m 以上,横向分辨率低;覆盖次数少,一般为 20 次,其中横向只有 2 次;激发能

收稿日期:2009-06-05;改回日期:2009-07-01。

作者简介:赵殿栋(1962—),男,教授级高级工程师,主要从事油气地球物理方法技术研究和管理工作。

量偏小,中深层资料信噪比低;对地面障碍采取回避做法,地震剖面存在较大的缺口。由于当时的地震工作重点在于浅中层勘探,所以浅中层资料的品质较好,深层地震资料的信噪比低,成像质量较差。即使后来重新进行地震资料目标处理或地震资料连片处理,深层采取针对性能量补偿等一系列措施,但由于老资料的“先天”不足,深层资料品质的改善仍然有限。随着油气勘探向深层目标发展,前期的常规三维地震资料已难以适应寻找深层复杂油气藏,如凹陷深部隐蔽油气藏、深部潜山油气藏等勘探的需求。

1998年以后,根据油气勘探开发的迫切需求,顺应物探技术的发展潮流,中国石化积极开展提高空间采样密度的高精度三维地震技术试验,使得油气地震勘探工作逐步进入高精度地震勘探技术时代^[3,4]。回顾高精度地震技术的诞生历史,能对当前地震勘探的主要手段——高精度三维地震技术的现状及未来发展有进一步的深刻理解。

1.1 高精度三维地震技术诞生的背景

20世纪90年代后期,我国石油工业的发展方针是“稳定东部,发展西部,油气并举;国内为主,国外为辅,开发与节约并重”,其中稳定东部是基础。要稳定东部,关键在于胜利油田,原因是胜利油田的地下地质情况特别复杂。胜利油田在勘探开发过程中,勘探强度大,勘探成熟度高,早在1966年就完成了世界上第1块三维地震勘探,到1998年已采集完成三维地震13 000 km²,是当时国内实施三维地震工作量最多的油田,同时也成为三维地震已基本有效覆盖勘探全区的国内第1个油田。随着勘探的不断深入,勘探难度越来越大,而地震勘探技术储备不足的问题日益突出。当时,人们提出了这样的问题:胜利油田还要不要继续开展三维地震勘探?如何开展三维地震勘探?三维地震技术向何处去?

1998年4月,在胜利油田召开了“高精度三维地震研讨会”,会议目的就是要在三维地震已基本覆盖的胜利油区,探讨和寻找今后地震工作的出路,如何进一步发展和挖掘三维地震技术的潜力,寻找更多的油气储量。胜利油田地质科学研究所、物探公司、计算中心以及有关采油厂做了关于地震采集、处理、解释和开发应用现状的汇报,李庆忠院士等12位专家做了大会发言。会议形成的主要共识及建议为:

1) 在三维地震有效覆盖勘探区的情况下,胜利油田仍有很大勘探潜力,油田的持续稳定发展需

万方数据

要有新的三维地震勘探技术做支撑,新的复杂勘探目标需要高精度地震资料才能满足要求,有必要开展新一轮高精度地震勘探,采用新技术重新采集高精度三维地震资料。

2) 进行新一轮勘探的基础是对前期勘探工作做全面总结,要认真总结30多年来的勘探经验和不足,要对整个盆地进行综合研究,对所有地质情况进行比较和分类,哪些问题已经清楚?哪些问题还比较模糊或者尚不清楚?找准目标进行针对性勘探,由易到难,循序渐进。

3) 提高工程化水平。一是要有一个统一规划、分步实施的整体部署方案;二是要开展多学科联合,包括采集、处理、解释和油气开发一系列前期试验在内的详细技术设计;三是要重视针对难题的技术开发创新,杜绝低水平重复;四是要进行全过程的质量监控。

4) 先选择开发井较多的地区进行小面积高精度三维地震攻关试验,改造扩展现有仪器的接收道数,增大排列片宽度,增大纵向和横向偏移距,做到偏移距均匀、方位角均匀,探索寻求逐步提高解决地质问题的能力。

面对严峻的勘探开发形势,胜利油田明确强调,勘探重中之重的地位不能变,勘探领先的原则不能变,勘探投入的比例不能变。这一方面表明大家都充分意识到勘探对油田稳定和发展的的重要性,另一方面也表明对地震勘探工作寄予了极大期待并提出了更高要求。

1.2 田家地区高精度三维地震勘探

1.2.1 高精度勘探思路及试验区选择

胜利油田开展新一轮高精度三维地震勘探或二次勘探的基本思路是:在油田有油的地方找油,目标确定,目的明确,经济有效。由此确定选择试验工区的原则为:一是针对重要的勘探开发区域,选择油气聚集的有利场所;二是该区域以前采集的地震资料不能满足当前勘探开发的需求;三是地质目标明确,有具体的落实圈闭数量或新增石油地质储量的目标。

田家地区处于惠民凹陷中央隆起带构造最为复杂的地区,东部为商河油田,北接滋镇洼陷,南临生油洼陷,具有得天独厚的油源条件,极为破碎的构造具有勘探及滚动勘探的巨大潜力。平均钻井密度为1口/km²,勘探开发程度较高。1983年第1次采集的三维地震资料主频为20~30 Hz,东营组以上浅部地层的地震资料存在许多缺口,断层层位延伸不清楚;中部沙河街组一段、二段和三段

($T_2 \sim T_6$) 的地震资料分辨率低, 难以进行储层研究; 深部沙河街组四段(T_7) 以下地层的地震资料信噪比低, 无法用于解释。原始资料虽然经过多次目标处理, 但仍然未见到明显效果。至 1998 年已不能继续开展研究工作, 该地区进一步勘探及滚动勘探的难度加大。

为了进一步查明田家地区深层的构造形态, 落实高点埋深以及断裂系统, 认清沙河街组二段和沙河街组三段砂体的横向变化规律, 进行储层描述, 以打开该区勘探开发的新局面, 选择了该区作为开展高精度三维地震采集的首个试验区。

1.2.2 采集设备的革新改造

当时, 地震采集仪器的最高道数是 480 道, 为了实现高精度三维采集试验的目标, 首先必须提高仪器的总道数。为此, 将 2 台 480 道 GDAPS-4 系统合并成为 1 台 960 道地震仪, 通过革新手段, 使仪器在稳定性、操作界面、质量监控方面具有明显的优势, 且还有下列优点:

1) 采集站使用了 24 位 A/D 转换器, 检波器采集的信号传输到采集站后转换成数字信号, 再经大线传输到仪器, 其信号不会受到大线传输衰减和外界干扰的影响, 提高了瞬时动态范围, 减少了相移和频率畸变, 同时降低了噪声, 有利于记录微弱高频信号。

2) 仪器的采样率为 1 ms; 通过提高 Alias 滤波器的陡度, 频带扩展至 400 Hz; 增加仪器野外现场数据处理能力, 能在仪器监视屏幕上看到背景噪声及信噪比的大小。

1.2.3 观测系统论证和优化

早期的常规三维地震采集参数论证一般只按照公式利用计算器或计算机进行单点的覆盖次数等少数几个参数的计算和论证, 没有形成参数图件, 缺乏直观性。田家地区高精度三维地震勘探首次使用了绿山软件设计系统, 采用相关参数图表、CMP 面元属性分析、二维地质模型、三维地质模型等方法, 对观测系统各项参数进行了优化设计。通过对 4 线 6 炮、8 线 5 炮、8 线 14 炮、12 线 14 炮等多种观测系统进行的优化分析, 认为 8 线 5 炮面元细分观测系统(表 1) 适合本区, 该观测系统具有宽长排列片、全炮检距、覆盖次数分布比较均匀、炮检距分布比较均匀、方位角比较均匀等特点。

由表 1 可见, 新观测系统的优势很明显, 总接收道数从 120 提高到 960, 排列片长度和宽度、方位角大幅度增加(图 1, 小方框为老观测系统的排列片), CDP 面元精度、覆盖次数、道密度等其它次万方数据

生参数提高明显, 接收道距、接收线距、激发点距和激发线距等 4 个参数变化不大^[5]。

表 1 新观测系统和老观测系统参数

参数	1983 年	1998 年	1998 年与 1983 年参数的比值
观测系统	3 线 10 炮	8 线 5 炮	
接收道距/m	50	50	1
接收线距/m	100	125	1.25
激发点距/m	100/200	100	1
激发线距/m	150	125	0.83
接收道数/道	120	960	8
纵向炮检距/m	600-2550	2000-0-3950	1.55
排列片面积/m ²	1950×200	5950×875	13.3
采样率/ms	2	1	0.5
覆盖次数/次	2×10	12×4	2.4
CDP 面元/m ²	25×50	25×25	0.5
道密度/(道·km ⁻²)	16 000	76 800	4.8

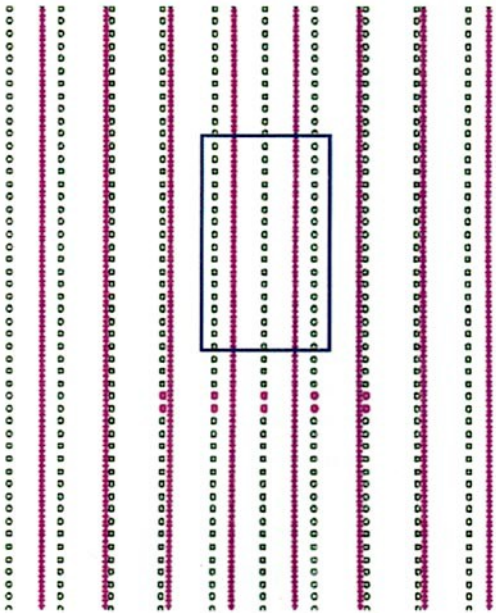


图 1 田家地区高精度三维观测系统

新观测系统的道间距(50 m)与炮线距(125 m)为非整数倍, 接收线距(125 m)与炮点距(100 m)也为非整数倍, 这是构成面元细分的关键。主面元为 25 m×25 m, 覆盖次数为 48 次, 可细分为 4 个 12.5 m×12.5 m 的子面元(12 次), 也可合并子面元形成大面元, 如 50 m×50 m(192 次)。小面元适用于浅层开发, 可提高资料的分辨率; 大面元适用于深层勘探, 可提高资料的信噪比。

1.2.4 高精度地面测量技术

高精度地面测量是提高地震勘探精度的基础

之一。GPS 系统具有实时动态定位、高度自动化和高精度等特点,田家地区高精度三维地震勘探率先引进及应用了该系统,利用 GPS 逐点定位方式和全站仪坐标实测模式,采用联合配套使用的工作方法,逐点放样检波点和炮点,进行城区和水域导线实测工作。相对于传统测量技术来说,GPS 定位测量新技术具有点位精度高、可提供三维精确坐标(平面位置与高程)、可进行恢复炮点现场实测以及不受环境影响、携带搬运方便和工作效率高等优点。

1.2.5 近地表精细地质调查

采用将小折射测量、双井微测井和岩性取心等技术有机结合的综合研究方法^[6~8],进行田家地区的低、降速带调查。在 4 个试验点进行了试验,完成小折射测量 36 个,微测井 5 口,取心井 4 口,试验炮 97 炮。通过双井微测井的单井解释对小折射解释的低、降速带厚度进行了校正,同时获得了虚反射界面和潜水面深度。通过岩性取心获取了田家地区近地表岩性,田家地区近地表岩性分为泥沙、泥、沙、胶泥,其中胶泥最有利于激发,流沙对地震能量吸收严重。综合岩性取心与小折射信息,充分了解工区近地表胶泥和流沙的分布规律,合理设计每个激发点的井深,从而避开流沙,在胶泥地段设置爆炸点。

1.2.6 现场施工质量监控

现场质量监控是保证资料采集质量的有效措施,主要包括现场监督和噪声监控。现场监督是对检波器埋置和炮点布置的质量进行实时监督。检波点埋置监督主要针对的是检波器埋置是否满足平、稳、正、直、紧的要求,是否挖坑埋置;在特殊地形区域如果无法按照设计图形进行检波器埋置,新图形的检波器组合中心必须对准桩号,杜绝“开会式”的埋置方式。对炮点的监督主要是针对激发点位置、井深、药量和雷管位置的监督。对噪声的监控是通过仪器录制的噪声记录,分析噪声水平,寻找干扰源,采取针对性的压制噪声的有效措施。此外还要对风力进行监控,风力监控采用风速仪,数据采集要求在相对平静的气候条件下进行,以避免产生高频噪声。

1.2.7 县城城区的数据采集技术

在老三维地震剖面上,县城城区部位形成了宽 3 550 m、 t_0 时间为 2 250 ms 的“V”型空白区^[9]。高精度采集对工区内的城区提前进行了勘测和测量,制定并采取了可行且有效的方案和方法。在接收方面,因地制宜地设计了多种检波器埋置方式,确保不空一道,包括水上公园、水泥地面和公路,确

万方数据

保检波器组合图形最大限度地压制环境干扰。在激发方面,提前设计炮点,现场进行炮点恢复定位,不空一炮,在确保安全的前提下,使炮点的分布做到相对均匀。施工时,白天布设检波点和激发点,确保位置准确,晚上在低噪声环境下生产,以提高资料信噪比。分析噪声记录可知,晚上的环境噪声比白天要低 15 dB,这等于拓展了有效信号的频带宽度。在勘探工区内面积达 11 km² 的县城城区,获得了与城区外品质一样且信息完整的地震资料。

1.2.8 方位角叠加和超级面元叠加

田家地区高精度三维地震勘探数据采集技术的设计体现了全方位角采集方式的理念,在一个 CMP 面元内有较宽的炮检距方位角。为了消除由地层各向异性引起的速度和振幅随方位角变化的影响,进行了划分方位角扇区的叠加。具体实现方法是:以 CMP 面元的中心点为中心,将炮点和检波点的分布区域划分为若干个等弧度的扇形区,将落在每一个扇形区(对角)的炮点和检波点所产生的地震道视为具有同一方位方向,在同一方位角内进行速度分析和叠加。为了解决深层资料噪声大、同相轴连续性差等问题,应用超级面元叠加技术,以达到提高地震资料信噪比的目的。超级面元叠加的实现方法是:在三维空间/时间域内,基于 25 m×25 m 主面元重构共深度面元,形成新的 CMP 道集,然后进行叠加。超级面元叠加要考虑 t_0 值、动校正量、时间倾角、倾斜层动校正时差在横向上的变化、梯度和动校正量在垂向的变化以及方位角的影响。

1.3 田家地区高精度三维地震资料的应用效果分析

分别针对浅层(500~1 000 ms)、中层(1 000~2 000 ms)和中深层(2 000~3 000 ms)对单炮记录进行了频率分析,各层的有效频带宽度和主频如表 2 所示。

表 2 单炮记录的频率分析结果

频率参数	浅层	中层	中深层
有效频带宽度/Hz	8~104	7~91	5~74
主频/Hz	48	36	30
反褶积后的有效频带宽度/Hz	8~125	7~115	5~91
反褶积后的主频/Hz	56	51	45

分别针对浅层(500~1 000 ms)、中层(1 000~2 000 ms)和中深层(2 000~3 000 ms)对地震剖面进行了频率分析,各层的有效频带宽度和主频如表 3 所示。

表 3 地震剖面的频率分析结果

频率参数	浅层	中层	中深层
有效频带宽度/Hz	8~114	7~101	5~75
主频/Hz	58	47	35
Q 补偿后的有效频带宽度/Hz	8~125	7~116	5~90
Q 补偿后的主频/Hz	64	56	45

假设中深层的地层速度为 3 300 m/s,主频是 45 Hz,波长则为 73.3 m,1/4 波长是 18.3 m,那么可以分辨的地层厚度为 18.3 m。与井资料联合应用,可以进一步提高分辨地层的能力。

田家地区老的常规三维地震剖面(图 2a,1983 年)频率较低,断点不清晰,同相轴的连续性较差,波形不一致现象严重,在反射时间为 2 000~3 000 ms 的主要目的层(T_6 和 T_7)有效波能量较弱,连续性差。通过以上一系列新方法新技术的应用,最终获得的田家地区高精度三维地震偏移剖面(图 2b,1998 年)真实地反映了构造形态和地层分布情况,资料的品质明显提高,主要体现在:①浅、中层地震资料的分辨率和信噪比较高;②尽管断裂系统复杂,但在剖面上断点干脆,断层清晰,构造样式清楚;③深层的 T_6 和 T_7 反射同相轴具有较好的连续性。

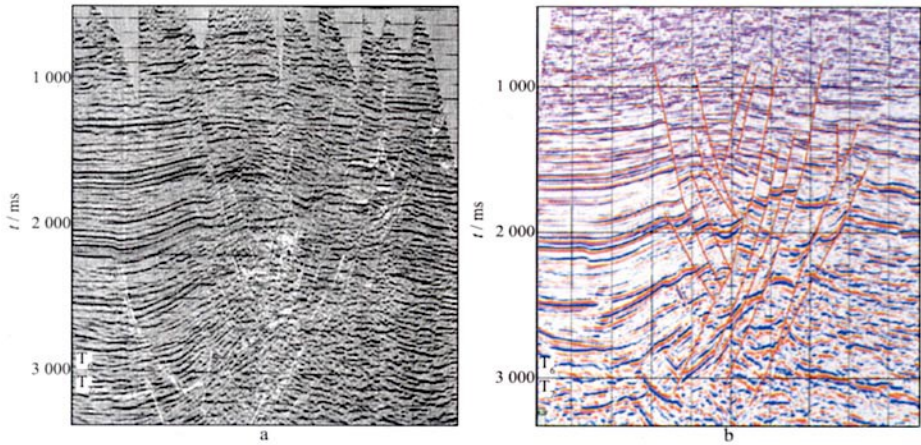


图 2 田家地区老三维(a)和新三维(b)地震剖面

1) 提高了小断层、小断块的落实程度。田 14 断块区位于田家地区花式背斜中心,断裂发育,构造破碎。利用新资料对田 14 断块区的构造进行了重新落实,理顺了断层的组合关系,在东营组和馆陶组发现了一系列含油断块。田 5-9 区块馆陶组三段发育有一条近南北走向的断层,老资料的解释结果为该断层向北延伸但未与北界断层相交,高精度资料清晰显示出该断层与北界断层搭接,相交处的断距较小。这条断层的落实,为该区块有效圈闭

预测创造了条件,新增含油面积 1.8 km²。
位于田家地区东北部的商 64 区块,有多口井钻遇沙河街组二段下段的油层,用老构造图无法解决油藏的油水关系问题,因而严重制约了该区的增储和产能建设。新资料精细地描述了沙河街组二段下段的构造形态,构造面貌整体清晰,断层组合与老构造图的差别较大(图 3)。后续开发井的钻探验证了新资料构造图的正确性,新探明该区块含油面积 0.9 km²。

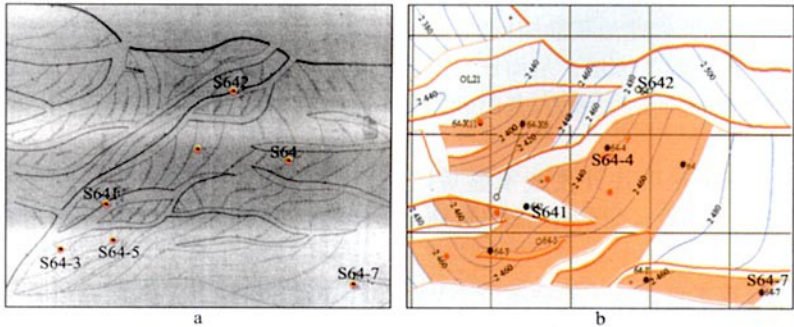


图 3 田家地区老资料(a)和新资料(b)解释的沙河街组二段下段的构造特征

2) 实现了复杂断块区的整体评价。受老资料品质的限制,前期对沙河街组三段下段、沙河街组四段的滚动勘探主要以“零敲碎打”为主,一直未能全区成图,因此制约了对这两套地层的整体评价。品质良好的新资料给全区构造解释成图和断块整体评价提供了基础,为此对深部的 T_6 和 T_7 两套层系开展了解释和成图工作,进行了断块的整体评价。

评价步骤及方法为:

a) 以二级断层为基础,理顺全区的断裂体系,进行断层编号,确定三级断块区的范围;

b) 针对三级断块区,分层系进行断块描述;

c) 应用钻井资料对钻遇的断块进行评价,分区进行油气成藏规律研究;

d) 对未钻遇的断块进行油源、储层、圈闭、封堵等综合评价。

对断块进行了分类,划分为:

a) 有利断块——构造落实,边界断层封堵性好,油源条件、储层物性好,周围类似断块含油或位于本断块低部位的井有油气显示;

b) 较有利断块——构造较为落实,边界断层封堵性较好,储层物性较好;

c) 风险断块——构造落实,边界断层封堵性较好,周围断块无油气显示。

3) 提高了岩性油藏的预测精度。自1973年完钻的商5井、商54井发现基山砂岩体岩性油藏以来,由于基山砂体为低渗透油层,且主体部位埋藏深(一般在2 800~4 200 m),同时受地震资料品质及开发工艺技术的限制,基山砂体的勘探开发一直没有大的突破。1998年利用高精度三维地震资料,结合地质、钻井、测井、试油等资料,从区域沉积体系以及基山砂岩体的成因、分布规律、储层物性、成藏规律及其勘探目标等方面展开了综合研究工作,着重对基山砂体进行描述和区带评价,从储层物性、构造配置、储盖组合、钻井情况诸方面进行成藏分析,提供岩性及构造-岩性油藏勘探目标,先后部署了6口井,有5口见到了油层。从而证实了基山砂体储量的规模和勘探的巨大潜力,基山砂体被列为主要勘探开发对象。

2001—2008年田家地区勘探开发成果显著,石油探明储量达 $2\,210 \times 10^4$ t,新钻井106口,新建产能 20.2×10^4 t。

1.4 高精度三维地震技术首次应用的启示

1) 勘探技术应用史例的总结也是一种勘探方法研究,而且是更重要的方法研究。田家地区勘探

万方数据

目标隐蔽且复杂,油藏类型以复杂小断块油藏为主,滚动开发目标也向着风险大的复杂小断块方向发展,老三维地震资料已不能满足进一步开发的需要。在这种紧迫形势下,在一次常规三维勘探技术的基础上,提出了二次勘探的高精度三维地震技术思想与方法。

2) 1998年田家地区高精度三维地震勘探拉开了向高精度地震技术进军的序幕,首次使用960道仪器,实现了从“百道仪”向“千道仪”的跨越;采集站形成数字化数据,减少了大线传输衰减和外界干扰造成的信号畸变;使用专用采集设计软件系统进行技术设计,实现了观测系统参数论证和优化;应用面元细分观测系统,采用宽长排列接收、中间激发方式,开启了宽方位、全偏移距、小面元、高覆盖次数、全数字化数据接收与传输的地震采集技术发展方向。

3) 田家地区的高精度三维地震勘探在施工工艺方面实现了较多创新,首次采用GPS测量系统,精度高、实时性强;对平原地区近地表进行精细调查,直接从井中提取近地表地层岩心,掌握了全区近地表岩性和速度信息,为激发点的井深和岩性的选择,以及后续的资料动、静校正处理等打下了基础;针对不同地表条件采用多种激发震源,保证大型城区不空炮,使得单炮资料的质量得到提高,资料不存在信息空白区;开展采集过程质量监督、现场资料处理监督等质量控制工作。

4) 在田家地区首次应用高精度三维地震技术在识别小断层和小断块、解决油藏的油水关系问题、整体评价复杂断块区、预测岩性油藏等方面取得了突破,自此以后,“千道仪”得到广泛应用,高精度三维地震勘探技术在油田迅速得到推广和发展。

2 高精度三维地震技术现状分析

自1998年以来的10余年间,地球物理勘探技术发生了巨大而深刻的变化,这一过程大致可分为两个阶段:前5年是初级阶段,联合应用常规勘探技术和高精度勘探技术;后5年是成熟阶段,几乎全部采用高精度勘探技术。

高精度三维地震勘探技术是一项整体设计、分步实施、实时质量监控、一体化思路贯穿始终的地震勘探系统工程,涉及项目部署、地震数据采集、资料处理和解释及油藏滚动勘探开发的全过程。整个过程的各环节要合理衔接,每个环节要保持高质量,所有单项新技术要协调配合,以提高资料的信

噪比、分辨率、保真度和成像精度为宗旨,以解决复杂地质问题和完成油气地质目标为目的。

2.1 高精度三维观测系统分析

以综合考虑勘探区带的油气潜力、勘探目标的复杂程度和当前物探技术的能力,作为高精度三维地震勘探选择观测系统的依据和原则。观测系统设计主要考虑 3 个方面:①针对地下地质目标;②考虑复杂地表条件;③着眼后续资料处理和解释。目前,前两个方面的技术相对成熟,最后一个方面是今后进一步发展的方向。

针对地下地质目标的观测系统设计的步骤是:①老资料综合分析;②观测系统基本参数论证,包括接收点距和线距、激发点距和线距、排列片的长

度和宽度等;③观测系统属性分析,包括 CDP 面元、覆盖次数分布、炮检距与方位角分布、炮与道密度分析、采集脚印分析、压制干扰能力分析等;④建立模型进行正演模拟分析,包括射线追踪、照明分析、CRP 分析等;⑤提出拟采用的观测系统方案。

分析近几年中国石化实施的典型高精度三维地震观测系统的面元和覆盖次数等采样密度参数,可以将其分成 4 类(表 4):一是常规采集方法,如马王庙三维项目;二是较高覆盖次数的两次采集方法,如五号桩三维项目;三是面元变小的高覆盖次数方法,如垦 71 和王集三维项目;四是细分面元方法,如永新、马厂和十屋三维项目,这 3 个勘探区域断裂均非常发育。

表 4 高精度三维地震勘探观测系统分类

分类	三维地震项目	观测系统	面元/m ²	覆盖次数/次	道密度/(道·km ⁻²)
1	马王庙	12L24S168T	25×25	84(14×6)	134 400
2	五号桩	24L24S210T	25×25	252(21×12)	403 200
3	垦 71	12L66S200T	10×10	120(20×6)	1 200 000
4	永新	48L75S128T	25×25,5×5	600(40×15),24(8×3)	960 000

第 1 类观测系统采取了技术-经济平衡型方法,适用于一般勘探目标,成本较低;第 2 类是常规网格、高覆盖次数,适用于强噪声发育区和弱有效信号区,存在的问题是,当覆盖次数达到一定程度时,过高覆盖次数的那部分区域的有效程度降低;第 3 类是小面元、高覆盖次数,适用于小断块发育区,可提高横、纵向分辨率,但勘探成本大增,此方法今后应注意地质目标、技术条件与经济成本的匹配;第 4 类是新兴的细分面元方法,炮点密度均匀,道密度均匀,炮距与道距相近,能较大程度地压制干扰波,提高有效波保真度和横向分辨率,提高叠前偏移成像精度。

细分面元方法的优点还在于可以形成多种面元,其中纵、横向尺寸均匀的面元有 25 m×25 m, 20 m×20 m,15 m×15 m,10 m×10 m 和 5 m×5 m 等,可以相应地应用在勘探开发的 5 个不同阶段,即常规解释、精细解释、勘探目标锁定、井位设计和油田开发等阶段。其中 10 m×10 m 面元是实际应用中的主面元。

预计细分面元方法会得到广泛应用,其中接收道网格、激发炮网格会受到人们的特别关注。今后的发展趋势是,在观测系统道网格 50 m×50 m、炮网格 80 m×80 m 的基础上追求炮网格与道网格一致,比如,道网格保持不变,而炮网格缩小,向道网格接近,炮距从目前的 80 m 依次变小为 70,

60,50 m。另一种趋势是,保持目前的炮点线网格不变,而加密接收点距和线距,由目前的道网格 50 m×50 m 加密为 50 m×25 m 和 25 m×25 m。

中国石化单台地震仪器接收道数能力已超过万道,地震观测方式发生了深刻变化。观测系统一般为:接收线数 10~50,激发点数 6~40,单线道数 100~400;接收道距 20~50 m,接收线距 50~240 m,激发点距 25~60 m,激发线距 80~320 m;CDP 面元多数为 25 m×25 m,细分面元可达 5 m×5 m,覆盖次数 60~600,道密度(5~100)×10⁴。

对观测系统做简单评价可从 3 个方面考虑:一是密度参数,道距 A、线距 B、炮点距 C、炮线距 D 等 4 个参数的值越小越好;二是均匀性参数,A/B, C/D 和(A/B)/(C/D)等 3 个参数越接近 1 越好;三是数量参数,总道数越多越好,纵、横两个方向的道数越相近越好(纵向上要保证足够的偏移距),此时,横纵比接近 1。其中,参数均匀性主要通过观测系统优化技术来实现,其它两类则依赖于装备水平和成本投入。按照这一评价标准推断,中国石化目前已实施的永新三维项目和马厂三维项目的观测系统是比较好的,它们的接收道网格均为 50 m×50 m、激发点网格 80 m×80 m,而总道数分别为 6 144 和 4 096。

2.2 高精度地震技术的应用现状与效果

从近几年油气勘探开发的实践与应用效果看,

中国石化的高精度地震技术取得了长足进步,应用效果显著(表 5)。

表 5 中国石化高精度地震技术应用现状

技术分类	技术名称	应用现状
成熟技术	高分辨率地震勘探技术	国际先进水平
	叠前时间偏移成像技术	国外开始应用波动方程法,国内以克希霍夫法为主
	叠后储层预测技术	软件主要依赖进口,应用居国际先进水平
发展中的技术	可视化地震解释技术	开始应用,没有产业化
	复杂地表地震勘探技术	山前带、滩浅海区有优势,大沙漠区与国外同等水平
	深海地震勘探技术	离国际水平差距较大
	叠前深度偏移技术	国外海上已得到普及,国内开展部分试验
	叠前储层预测技术	与国际先进水平有一定差距
前沿技术	烃类检测技术	天然气识别达国际先进水平
	高密度地震勘探技术	国外已获生产应用,国内开始试验,会得到较快发展
	多波地震勘探技术	已经开始应用并初见成效
	井中地震技术	国外普及,国内小规模应用
	时间推移地震技术	国外北海大规模应用,国内小规模试验

1998 年以来,中国石化每年的三维地震工作量从 3 000 km² 增加到 9 000 km²,每年新增油气探明储量从 1.8×10⁸ t(油当量)增加到 4.5×10⁸ t(油当量),二者均呈逐年递增态势。探明储量的增长与三维地震工作量的增加成正比关系,发现 1×10⁸ t 油气探明储量需要配置 2 000 km² 的三维地震工作量。物探技术尤其是高精度三维地震技术对油气勘探的贡献是十分显著的。

高精度三维地震技术有效地提高了地震资料的信噪比和成像精度,为隐蔽油气藏勘探和复杂断块油气藏滚动勘探开发提供了可靠的资料保证。随着中国石化高精度地震勘探技术的逐步完善和推广应用,地震资料的纵、横向分辨率得到较大提高,在 2 500 m 深度,能分辨断距为 10 m 的断层,厚度为 8~10 m 的储层,落实面积为 0.02 km² 的圈闭。

到 2009 年 2 月,胜利、中原、江苏、江汉、河南等油田在富油凹陷内共完成高精度三维地震满覆盖面积 1 0276 km²,占三维地震工作量的 11%。以东营凹陷为例,共完成高精度三维地震 8 块,

满覆盖面积为 1 113.53 km²,资料面积为 1 706 km²。应用这些高精度三维地震资料发现和落实各类圈闭 212 个,落实圈闭面积 274.9 km²,部署探井 33 口,滚动井近 40 口,上报探明含油面积 8.98 km²,探明石油地质储量 1 140×10⁴ t,上报预测含油面积 19.9 km²,石油地质储量 5 048×10⁴ t,圈闭资源量 9 060×10⁴ t,取得了明显的经济效益。2005—2006 年,中原油田在马厂地区完成满覆盖面积为 131.92 km² 的高精度三维地震采集,通过处理与解释,精细刻画以往常规地震资料无法落实的小断块(图 4),取得了东濮凹陷复杂断块群油气藏勘探新进展^[10]。2006—2008 年实施探井 10 口,成功率为 100%,平均单井钻遇油层厚度为 27.4 m,比 2006 年以前平均单井油层厚度(13.8 m)增加了 13.6 m,探明石油地质储量 240×10⁴ t。在开发方面,由于构造划分更细,井间油水关系清楚,有力地指导了开发井的调整,加快了储量动用。2007 年以来主要开发了 4 个区带,实施 21 口井,累计产油 1.86×10⁴ t,新增动用储量 105×10⁴ t。



图 4 马厂地区用常规三维地震资料(a)和高精度三维地震资料(b)解释的沙河街组三段下段 1 砂组底的构造特征
万方数据

3 高精度地震勘探技术发展展望

油气勘探开发对地球物理技术的需求主要在两个方面:一是勘探方面,如何在新区、老区找到更多的圈闭和储量,解决资源接替问题;二是在开发方面,如何提高采收率,延长油田寿命,实现油田价值的最大化。

自1998年高精度三维地震技术诞生以来,面对隐蔽油气藏、海相碳酸盐岩、山前带三大

勘探目标,经过持续不断的攻关试验和研发创新,以高精度三维地震技术进步为基础的中国石化陆上物探技术已经发展形成了五项关键技术系列,并且分别具备了较强的解决油气地质问题的能力(表6)。根据各探区的地质-地球物理特征、主要勘探难点、钻探成功率等情况分析,目前的物探技术能力与探区实际地质需求之间尚存在着差距,实现下步的攻关目标尚有较大难度,这也是高精度地震勘探技术发展的动力和方向。

表6 关键物探技术的现有能力及下步攻关目标

关键技术	配套技术	能力	攻关目标
隐蔽油气藏圈闭评价技术	薄储层地震预测技术	东部预测精度 8~10 m	预测精度 5~8 m
	圈闭可靠性评价技术	东部符合率 70% 西部符合率 50%	符合率 80% 符合率 60%
前陆冲断带构造建模技术	叠前深度构造成像技术	西部构造精度 200~300 m	预测精度 100 m
	构造建模技术	西部准确率 50%	准确率 60%
海相碳酸盐岩缝洞预测技术	缝洞储层地震预测技术	塔中预测精度 30~50 m	预测精度 15~30 m
老区目标精细评价技术	油气资源空间预测技术	预测符合率 60%	预测符合率 70%
	目标评价技术	符合率 60%	符合率 70%
天然气藏地震检测技术	叠前储层预测技术	川西须家河组预测精度 15~20 m	预测精度 10~15 m
	天然气藏评价技术	川东北符合率 80%	符合率 85%

3.1 优先推广应用高精度三维地震技术

中国石化老区隐蔽油气藏勘探领域剩余资源量大,增储潜力大;新区海相碳酸盐岩油气藏埋藏深、规模大,发展高精度三维地震勘探技术具有广阔的前景,需要优先推广应用高精度三维地震技术^[11~13]。目前,中国石化的地震勘探工作以每年满覆盖面积 7 000~8 000 km² 的三维工作量向前推进,其中高精度三维占 85%~90%。

应进一步提高高精度三维地震勘探的工程化设计水平,优化技术方案。目前的采集技术设计水平仍处于较少考虑后续资料处理及解释应用的技术阶段,下一步应向资料采集、处理、解释技术一体化的方向发展,模型正演和反演技术会得到实质性发展。

观测系统将广泛采用小网格、宽长排列、小面积检波器组合,以获得小面元、高覆盖次数、宽方位的海量数据。其中,宽方位采集方式会得到快速发展,即增加排列片宽度,横纵比由目前的 0.4~0.7 向 1 逼近。

室内处理将采用分方位的叠前处理技术,获得不同方位角的叠前道集和偏移剖面,以进行构造断裂系统及岩性非均质性的精细描述。处理过程包括划分方位角扇区、扇区叠前时间偏移道集、多次万方数据

波衰减、扇区高密度剩余动校正、分方位角叠加、全方位角叠加等。资料的频率会展宽 10 Hz 左右,纵、横向分辨率将得到进一步提高。

资料解释将充分利用井资料,进一步发展叠前反演技术、叠前属性提取技术、复杂储层预测技术,更直接向油藏建模和油藏模拟地震技术发展。继续提高分辨率、信噪比、成像精度和保真度,使薄互层、特殊岩性体、复杂小断块、裂缝发育带的成像特征更加清楚,满足现阶段老区隐蔽油气藏和新区海相碳酸盐岩复杂储层油气勘探的需要。

3.2 开展高密度三维地震技术先导试验

所谓高密度三维地震就是采用全数字采集系统、数字检波器、单点接收、更小接收道距及线距、更小激发点距及线距、长宽排列、超高单炮道数,获得小面元、全方位、高覆盖次数的海量地震数据。野外真实记录全波场信息,室内进行噪声分类识别,进行检波器数字组合叠加(DGF),剔除相干噪声和不相干噪声,提取真实有效波。

2008年9月,在胜利油田罗家地区实施了高密度三维三分量(3D3C)地震先导试验采集。观测系统为 28L10S400T2R140F,道间距 12.5 m,炮点距 25 m,接收线距 125 m,炮线距 125 m,检波器

道数 11 200 道(400×28), 仪器记录道数 33 600 (三分量, $11\ 200 \times 3$), 纵横比 0.724, 面元 $6.25\text{ m} \times 6.25\text{ m}$, 覆盖次数 $140(20 \times 7)$, 道密度 358.4×10^4 道(仅单分量), 获得资料面积为 42 km^2 。

罗家地区高密度 3D3C 地震先导试验的数据采集特点为:

a) 仪器因素为宽频带($0 \sim 800\text{ Hz}$)、大动态范围($0 \sim 120\text{ dB}$)、24 位 A/D 转换。

b) 超万道采集。野外接收道数 11 200 道, 仪器记录道数 33 600 道, 形成了海量数据, 单炮数据量 940.8 MB。海量数据对仪器带道能力、数据存储、数据高速运算、超万道生产质量监控和生产组织等均提出了严峻挑战。

c) 放弃了传统的检波器组合, 采用单点全数字采集, 波场面貌更为真实, 远道有效波反射能量没有畸变。

d) 三分量采集, 记录了多波全波场信息。

高密度地震采集的单炮资料频带宽、主频高, 信噪比较好。单炮记录的主频比老资料提高了 $10 \sim 15\text{ Hz}$, 频带展宽了 $40 \sim 50\text{ Hz}$, 其中, 沙河街组一段优势频带(-18 dB , 以下同)为 $5 \sim 85\text{ Hz}$, 有效频带宽度为 $2 \sim 115\text{ Hz}$, 主频为 45 Hz ; 沙河街组三段、沙河街组四段优势频带为 $4 \sim 60\text{ Hz}$, 有效频带宽度为 $2 \sim 90\text{ Hz}$, 主频为 33 Hz 。在资料处理中, 通过在叠前和叠后应用提高分辨率技术^[14], 使剖面的优势频带比老资料提高了 $16 \sim 18\text{ Hz}$, 其中, 沙河街组一段的优势频带宽度达到 $6 \sim 91\text{ Hz}$, 比老资料提高了 18 Hz ; 沙河街组三段、沙河街组四段的优势频带宽度达到 $7 \sim 83\text{ Hz}$, 提高了 16 Hz 。

中国石化的高密度三维地震技术研究工作已经启动, 在未来几年会得到稳步发展:

a) 采集仪器采用大道数、轻便、有线和无线兼容的方式;

b) 观测方式以单点数字检波器、小网格、宽方位、高炮密度、高道密度、高覆盖次数为特点;

c) 激发方式^[15]仍以炸药震源激发为主, 在沙漠区将主要使用可控震源, 遵循大能量、少震次、不组合的技术发展潮流;

d) 野外施工组织方面, 强调在不降低采集质量的前提下尽力提高采集效率;

e) 资料处理方面, 基于全波动方程的逆时叠前深度偏移技术将得到快速发展;

f) 资料解释将向叠前解释、全信息解释发展, 重点研究以地震属性分析为核心的综合构造描述、储层预测、油气检测^[16,17]、地质综合研究、油藏地

质建模和油藏模拟等技术;

g) 可视化及虚拟现实等新技术将得到广泛使用, 全三维解释、多属性体联合解释及多学科一体化综合研究是必然发展方向。

4 结束语

油气地质的需求是推动地球物理技术进步的源动力。1998 年胜利油田召开的高精度三维地震研讨会意义重大, 它所提出的二次高精度勘探思想一直影响着胜利油田以及中国石化地震勘探技术的发展轨迹。从田家地区高精度三维地震技术的首次创新性应用开始, 经过 10 年多的攻关试验和研发创新, 高精度三维地震技术已经成为中国石化解决复杂油气地质问题, 特别是隐蔽油气藏勘探和复杂断块油气藏滚动勘探开发的有效技术手段。

随着高精度地震勘探技术的发展, 地震采集技术遵循采集、处理、解释一体化的发展思路, 借助于先进仪器装备和各种采集新技术的不断推出, 不断向着适应更恶劣地表条件、更复杂地下构造和更隐蔽油气圈闭的勘探需求方向发展。具体体现在采用 24 位超万道地震仪、数字检波器加网络技术支持的全数字采集系统, 进行单点接收、大动态范围、超多道记录、小面元网格、高覆盖次数、高品质震源、多分量接收、全方位信息、环保型作业的高密度三维全波场采集。全数字采集采用 MEMS 数字检波器, 大大扩展了动态范围($>90\text{ dB}$), 从而更有利于提高深层弱反射信号和拓展地震频带; 全波场采集同时获取转换波资料, 有利于缝洞识别、各向异性研究和油气流体检测。

从国外目前已经推出的高精度地震采集新技术来看, 无论是 WesternGeco 的 Q-技术、CGG-Veritas 的 Eye-D 技术、PGS 的 HD3D 采集模式, 还是海上宽方位多缆采集技术和海底电缆(OBC)以及海底节点地震(OBN)新技术, 都是强调以质量和环保为核心的精细地震采集系列技术方案, 更是贯穿油气藏勘探开发全过程的地震数据采集、处理、解释一整套新技术的综合。高密度地震数据采集给地震资料的处理和解释带来的一系列新技术和新成果, 包括高品质成像、多道滤波、Radon 保真去除多次波、地表相关去除多次波(SRME)、精确的 AVO-AVA 分析、油藏描述与流体检测、四维地震监测、方位数据规则化、方位偏移、方位各向异性计算与应用, 等等。

由此可见, 高精度地震勘探技术的发展是地球

物理技术整体进步的体现,更是油气勘探开发战略思想、技术思路和管理水平整体进步的体现。所以,面对中国石化东部、西部、南方等地区油气勘探开发的迫切需求,针对隐蔽油气藏、海相碳酸盐岩、山前带三大勘探领域,围绕以“复杂地表、复杂构造、复杂储层”为显著特点的勘探目标,中国石化将制定有针对性的技术对策,发展有针对性的物探技术系列,大力发展和推广应用高精度地震勘探技术,在未来至少5年时间内,高精度三维地震技术将继续发挥主导作用。同时,致力于开展高密度三维地震技术的先导试验和配套处理、解释技术的创新研发,使新兴的高密度三维地震技术与日趋成熟的高精度三维地震技术共存发展,针对不同的地质需求发挥各自的技术优势,将高精度地震勘探技术推向一个崭新的水平,以解决更为复杂的油气地质问题,发现更多隐蔽油气资源。

致谢:本文撰写过程中,于世焱、王炳章、宋桂桥、闫昭岷、杨德宽、张树海给予了大量帮助,在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 刘雯林,张颖. 石油地球物理发展历程回顾、启示及对策建议[J]. 石油科技论坛,2003(10):42~52
- 2 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京:石油工业出版社,1993. 73
- 3 马在田. 地震成像技术有限差分偏移[M]. 北京:石油工业出版社,1989. 41,161
- 4 赵殿栋,吕公河,张庆淮,等. 高精度三维地震采集技术及应用效果[J]. 石油物探,2001,40(1):1~8
- 5 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
- 6 于世焱,丁伟,徐淑合,等. 延迟震源技术在三维高分辨率地震勘探中的应用[J]. 石油物探,2004,43(2):111~115
- 7 陆从德,凌云,高军. 陆上地震勘探的近地表影响检测与分析[A]. CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition[C]. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会,2009. 1 063
- 8 李磊,梁德勇,戴云,等. 乍得 Maye 三维工区表层调查和静校正方法研究[A]. CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition[C]. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会,2009. 1 081
- 9 邱毅,白旭明,唐传章. 中国东部大型城矿区高精度三维地震勘探技术[J]. CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition[C]. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会,2009. 1 055
- 10 秦亚玲,侯春丽,计平,等. 东濮凹陷高精度地震资料处理[J]. 勘探地球物理进展,2002,(2):16~20
- 11 胡中平,孙建国. 高精度地震勘探问题思考及对策分析[J]. 石油地球物理勘探,2002,37(5):530~536
- 12 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
- 13 赵贤正,张以明,唐传章,等. 高精度三维地震采集处理解释一体化勘探技术与管理[J]. 中国石油勘探,2008,13(2):74~82
- 14 秦晓华,李虹,蔡希玲. 高密度地震数据处理技术研究及应用[A]. CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition[C]. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会,2009. 1 116
- 15 吕公河. 地震勘探中次生干扰弹性动力学分析[J]. 石油物探,2001,40(3):76~81
- 16 唐建明,徐向荣,李显贵. 三维三分量技术在深层致密储层裂缝预测中的应用——以新场气田上三叠统须家河组二段气藏勘探为例[A]. CPS/SEG Beijing 2009 International Geophysical Conference & Exposition [C]. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会,2009. 1 244
- 17 王兴谋,韩文功,李红梅,等. 浅层岩性气藏地震检测的陷阱分析[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(1):19~22

(编辑:蔡 俩)