

崔庆辉,尚新民,滕厚华,等.高密度三维地震观测系统设计技术与应用[J].石油物探,2020,59(1):12-22

CUI Qinghui, SHANG Xinmin, TENG Houhua, et al. Design of a high-density three-dimensional seismic geometry and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1): 12-22

高密度三维地震观测系统设计技术与应用

崔庆辉,尚新民,滕厚华,关 键,芮拥军

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司胜利物探研究院,山东东营 257055)

摘要: 经过常规三维地震采集和高精度三维地震采集后,我国东部产油区油气勘探正在向高密度三维地震采集方式过渡。基于前期丰富的地震和地质资料,提出了一套适用于成熟勘探区的高密度三维地震观测系统设计技术。首先将已有高密度采集数据的退化处理结果用于炮道密度的论证,以实现经济成本和勘探效果的平衡,并用于指导本地区新一轮高密度三维地震观测系统的设计;然后对面元边长、最大炮检距、接收线距等主要的观测系统参数,充分利用已有的地震、地质资料,基于目的层地震地质参数模型进行观测系统参数宏观论证;再建立目标地质模型,通过波动方程正演进行观测系统参数精细论证;最后将该技术应用于胜利油田高密度三维地震采集观测系统设计,采集结果表明地震剖面信噪比和分辨能力明显改善,断裂系统刻画清晰,成像精度大幅提高。

关键词: 高密度;观测系统设计;退化处理;炮道密度;参数论证;目的层;地质目标;正演模拟

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-1441(2020)01-0012-11

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2020.01.002

Design of a high-density three-dimensional seismic geometry and its application

CUI Qinghui, SHANG Xinmin, TENG Houhua, GUAN Jian, RUI Yongjun

(Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257055, China)

Abstract: Conventional and high-precision techniques for three-dimensional (3D) seismic exploration are unable to meet the demand for increasingly fine exploration in the eastern oil region of China. Nonetheless, high-density 3D seismic exploration continues to be developed. Based on the large availability of seismic and geological data, a set of techniques for designing high-density 3D seismic geometries in mature exploration areas was proposed. First, the density of seismic shots and traces was analyzed through degradation processing of existing high-density seismic data, with the aim of balancing the economic cost and “exploration effect,” which acts as a guiding principle for the design of new high-density seismic acquisition in the areas. To obtain other geometric parameters, such as the bin size, maximum offset, and receiving line spacing, we first performed a macro-analysis based on the seismic and geological model parameters of the target layers. We then established the geological model of these layers and carried out a fine analysis of the geometric parameters through wave equation modeling. This technique has been used to guide the geometric design of high-density seismic acquisition in the Shengli Oilfield in recent years. The results showed that the signal-to-noise ratio and resolution of the seismic sections could be improved by using the proposed seismic geometry, and the fracture systems could be more clearly characterized.

Keywords: high-density, seismic geometry design, degradation processing, density of seismic shots and traces, parameters analysis, target layer, geological target, modeling

收稿日期:2019-09-05;改回日期:2019-11-05。

作者简介:崔庆辉(1984—),男,研究员,博士,主要从事地震勘探观测系统设计、近地表校正及水力压裂微地震监测的研究工作。Email: 278066473@qq.com

基金项目:重大专项“地震与井筒精细勘探关键技术”(2016ZX05006002)资助。

This research is financially supported the National Science and Technology Major Project (Grant No.2016ZX05006002).

高密度三维地震采集代表着当前我国地震勘探技术的发展方向,国内各大油田正逐步向高密度三维地震勘探过渡^[1],胜利油田经过几年的探索,目前已经全面进入高密度地震采集阶段^[2]。观测系统设计是地震采集中的关键环节,针对高密度地震采集观测系统设计,国内许多学者开展了相关研究,并将研究成果应用于各个油田,取得了良好的效果。姜福豪等^[3]从信噪比、分辨率和空间采样等几个方面论述了高密度三维地震观测系统设计的基本方法;邸志欣等^[4]建立了塔河油田典型的“串珠”地质模型,通过正演模拟方法对面元大小和排列滚动距离进行了重点分析;陈学强等^[5]对沙漠地表条件下小缝洞型储层展开地震勘探,提出了面元属性均匀的主要原则,给出了炮道密度设计公式;刘依谋等^[6]详细分析了面元大小、覆盖次数和纵横比等主要观测参数对缝洞储层成像和油藏精细描述的影响,通过高密度地震采集实例证明了“小道距、宽方位、高覆盖次数”可明显改善缝洞储层成像效果和油藏精细描述,研究成果对于同类地区具有指导意义;郭念民等^[7]进一步发展了刘依谋等^[6]的研究成果,大幅减小面元、加宽方位、提高覆盖次数,并利用单点接收方法更好地提高了碳酸盐岩储层勘探精度。

相较于常规三维地震采集,高密度三维地震采集对观测系统设计提出了更高的要求,需要解决以下问题:一是如何实现地质任务与经济成本的平衡;二是如何针对地质目标进行观测系统设计。对于第一个问题,有些学者提出了“退化处理”的思路,该思路对于此类问题的研究具有指导意义^[8-10]。对于第二个问题,目前主要采用“点”论证方法、射线类模拟或照明分析方法,但这些方法已不能适应当前勘探精度的要求。

为解决以上问题,本文提出了面向地质目标的高密度三维地震观测系统设计技术,在深入分析老资料和提升地质认识的基础上,对基于实际高密度地震采集资料退化处理后的参数优化、基于目的层的全区观测系统参数宏观论证、基于正演模拟的观测系统参数精细论证,平衡经济与地质效果,获得最佳观测系统方案。

1 技术方法

基于叠后偏移的常规观测系统设计中,主要考虑覆盖次数对资料信噪比的影响。炮道密度可用

于检验高密度地震采集观测系统叠前成像效果^[8],同时炮道密度也是影响采集成本的主要指标之一。目前高密度三维地震采集处于过渡期,对于多大的炮道密度能够满足当前的地质任务并无明确认识,而且影响炮道密度的因素较多,如工区原始资料的信噪比、工区地表激发接收条件、地下构造复杂程度等。可通过对已有高密度地震采集资料的退化处理实现炮道密度的优化,进而找到地质任务与采集成本之间的平衡点,得到适用于同一地区的宏观指导原则。

根据上述指导原则,首先充分利用工区已有的地震、地质资料成果,建立目的层系地震、地质综合模型,进而展开全区观测系统参数的宏观论证,得到各参数的合理分布范围,然后建立工区典型地质目标精细模型,再通过波动方程正演对观测系统参数进行精细的分析论证,最后结合经济成本和施工条件得出最佳的观测系统方案。该技术流程如图 1 所示。

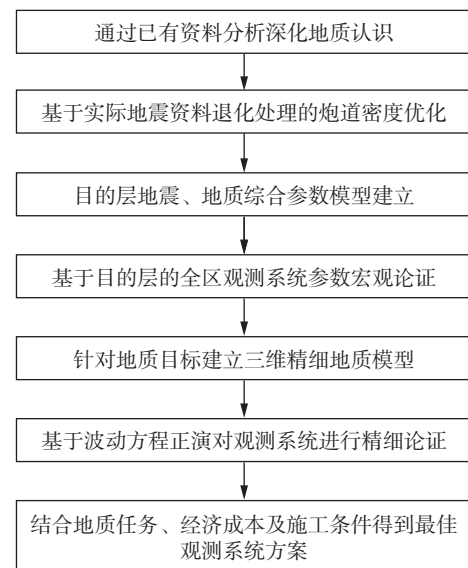


图 1 面向地质目标的高密度地震采集三维观测系统设计技术流程

1.1 基于实际地震资料退化处理的炮道密度优化

屠世杰^[8]对高密度三维地震资料进行退化处理并选取合适的炮道密度,张伟等^[9]对实际地震资料进行面元、炮数和排列长度等采集参数的“退化性”处理试验,徐辉等^[10]对实际资料观测系统进行退化分析,得到了覆盖次数与信噪比的关系。本文借助前人的研究成果与思想,以胜利油田高密度三维地震采集资料为基础,以炮道密度作为主要变量,逐步退化观测

系统,并根据退化后的地震资料成像情况,得出成像精度与炮道密度之间的关系,作为该地区今后高密度地震采集观测系统设计的重要依据。

L 工区高密度三维地震采集资料是目前胜利油田炮道密度最高、面元最小的一块三维地震资料。在保持偏移距与方位角分布规律基本不变的前提下,采用抽稀炮排和道距的方式使炮道密度随机退化,分析炮道密度在 35.8~358.4 万道/km² 的变化过程中,叠前时间偏移成像剖面信噪比的变化规律。

对 L 工区高密度三维地震采集资料进行退化处理,得到不同炮道密度条件下的叠前时间偏移剖面如图 2 所示,图 3a 为该工区 1600~2200 ms 地震数据统计得到的偏移剖面信噪比与炮道密度的变化曲线,红色曲线为全频带统计结果,蓝色曲线为对数据进行 60 Hz 高通滤波后的统计结果。为了更直观呈现信噪比随炮道密度增加产生的变化,将每一个炮道密度的信噪比与上一炮道密度的信噪比之差作为信噪比增

速,得到的变化曲线如图 3b 所示。可以看出,炮道密度为 0~120 万道/km² 时,随着炮道密度的提高,偏移剖面信噪比迅速增加,此时通过增加炮道密度提高成像质量,性价比最高;炮道密度为 120~220 万道/km² 时,随着炮道密度的增加,偏移剖面信噪比增速减小;炮道密度为 220~320 万道/km² 时,随着炮道密度的提高,偏移剖面信噪比增速明显变缓;炮道密度 >320 万道/km² 时,偏移剖面信噪比增速接近停滞。为此本文将 120 万道/km² 的炮道密度作为高密度三维地震采集的一个重要参考指标,用于指导胜利油田东部地区高密度三维地震采集观测系统设计。

1.2 基于目的层的全区观测系统参数宏观论证

常规的观测系统参数论证一般基于“点论证”,即选取具有代表性的论证点,根据以往勘探成果提取论证点的目的层埋深、地层倾角、速度、双程旅行时等地震地质信息,对观测系统参数进行论证。对于地质目标复杂的高密度三维地震采集观测系统,常规的“点

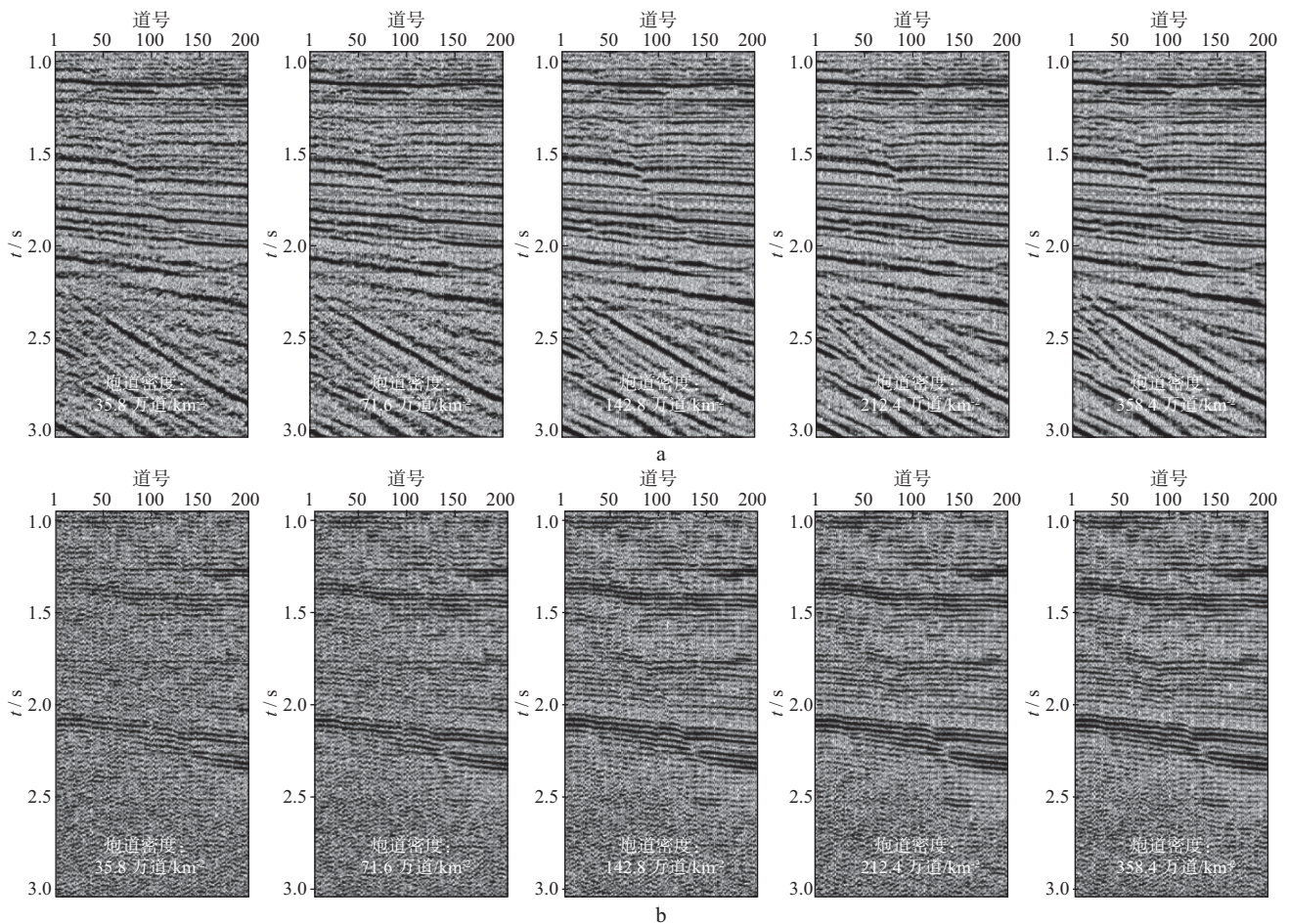


图 2 L 工区不同炮道密度条件下的叠前时间偏移剖面

a 全频带; b 60 Hz 高通滤波后

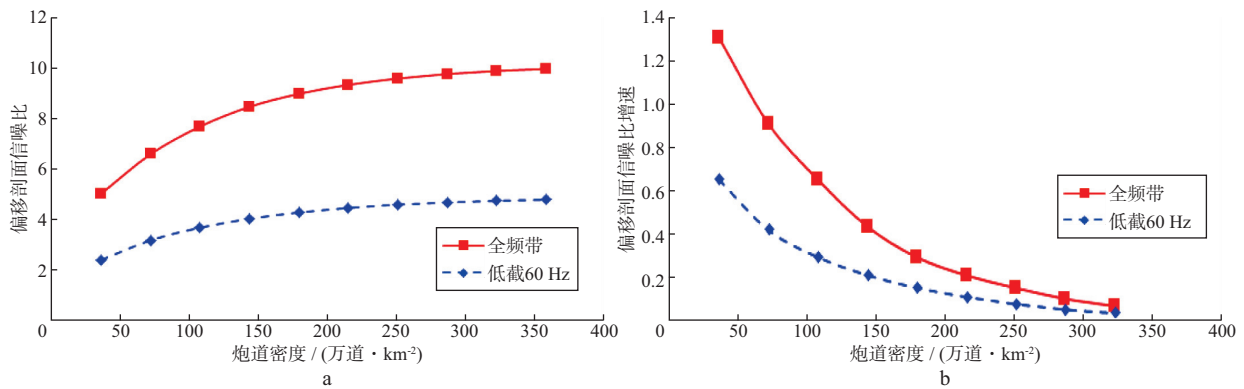


图 3 L 工区 1600~2200 ms 地震数据统计得到的偏移剖面信噪比与炮道密度(a)以及偏移剖面信噪比增速与炮道密度(b)的变化曲线

论证”方式已经不再适用,本文提出了基于目的层的全区高密度三维观测系统参数宏观论证方法,并采用该方法得到了主要观测系统参数的合理范围。

1.2.1 目的层地震地质综合参数模型建立

首先根据工区老资料处理得到的地震速度和解释的层位信息,对目的层进行网格化,再利用层位信息赋予网格化后的地层深度值,将所有层位控制点的地震均方根速度由“时间-速度”对转换成“深度-速

度”对,然后根据该层位控制点的地层深度进行计算获得该点的倾角、双层旅行时和均方根速度,最后遍历所有层位网格,利用基于网格索引的逐步外推等距离反比加权插值方法给没有双程旅行时和均方根速度的层位网格赋值,最终建立具有深度、倾角、双程旅行时和均方根速度信息的综合层位模型,具体流程见图 4。图 5 为 L 工区 T₇ 目的层地震地质参数模型平面显示。

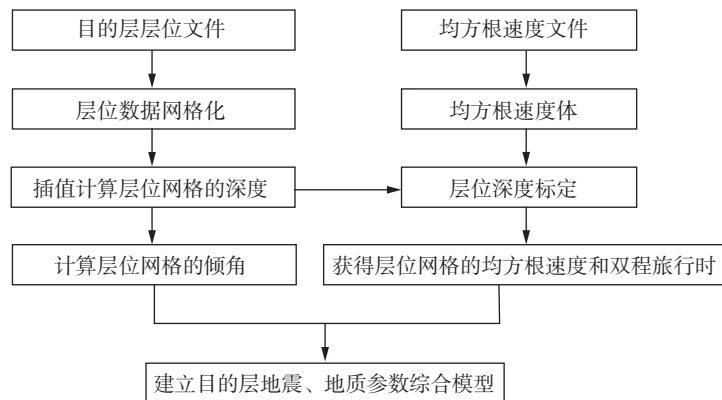


图 4 目的层地震地质综合层位模型建立流程

1.2.2 基于目的层的全区观测系统参数论证

观测系统设计时需要考虑的主要参数包括面元边长、最大炮检距、接收线距、最大非纵距,基于建立的目的层地震地质综合模型,对目的层上每个论证网格点依据理论公式计算上述参数,最终得到全目的层观测系统参数论证结果。

1) 面元边长。

面元边长是观测系统中的关键参数之一,与分辨率和信噪比有直接关系。面元边长确定后可进一步确定出炮间距和道间距。面元边长需要满足最高无

混叠频率和横向分辨率的要求。

为了使偏移成像时不产生假频噪声,面元边长需要满足以下条件:

$$b_1 \leq v_{RMS} / (4 \times f_{max} \times \sin\theta) \quad (1)$$

式中: b_1 为满足最高无混叠频率要求的面元边长; v_{RMS} 为目的层论证网格点上覆地层均方根速度; f_{max} 为目的层论证网格点最高无混叠频率; θ 为目的层论证网格点的地层倾角。 v_{RMS}, θ 均根据目的层地震地质综合参数模型得到, f_{max} 根据所需解决的地质任务确定。

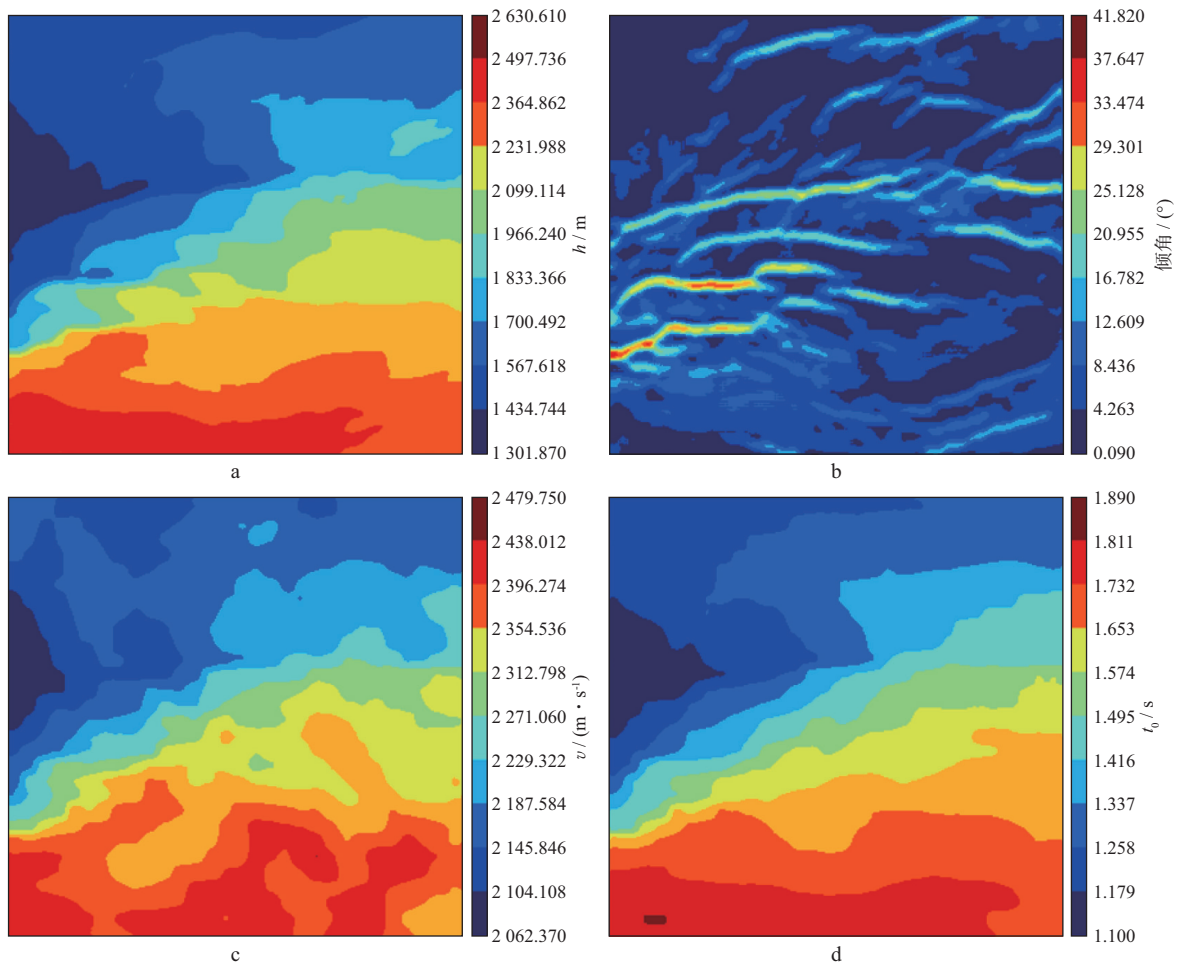


图 5 L 工区 T₇ 目的层地震地质参数模型平面显示

a 深度; b 倾角; c 均方根速度; d 双程旅行时

根据空间采样原理,当地震信号每个优势频率的波长内有 2 个以上的采样点时,才能保证地震资料在空间上具有良好的横向分辨率,因此面元的边长需要满足以下条件^[11]:

$$b_2 \leq v_{\text{RMS}} / (2 \times f_p) \quad (2)$$

式中: b_2 为满足横向分辨率要求的面元边长; f_p 为目的层论证网格点主频,根据所需解决的地质任务确定。

对目的层上所有论证网格点的面元边长分别按照公式(1)和(2)计算,将单一论证网格点的面元最小值作为最终结果,并对全区目的层论证网格点的最终结果进行统计,设定百分比门槛值以得到一个适用于全区目的层的面元边长。

2) 最大炮检距。

大炮检距有利于提高速度分析精度,对于深层成像也必不可少,但考虑到动校正拉伸的影响,炮检距

不宜过大,综合目的层埋深、速度分析精度、动校正拉伸等因素对最大炮检距进行论证。

大炮检距处动校正造成的波形拉伸畸变较为严重,在论证最大炮检距时必须将有效波畸变限定在一定范围内,并应尽量减少动校正拉伸对频率的影响,一般将动校正拉伸率控制在 12.5%。考虑动校正拉伸影响的最大炮检距如下^[12]:

$$O_1 \leq \sqrt{2t_0^2 v_{\text{RMS}}^2 d} \quad (3)$$

式中: O_1 为满足动校正拉伸限制的最大炮检距; t_0 为双程旅行时; d 为动校正拉伸率。

足够的排列长度能保证叠加速度分析的精度,速度分析精度与最大炮检距有如下关系^[11]:

$$O_2 \geq \sqrt{\frac{2t_0}{f_p \left[\frac{1}{v_{\text{RMS}}^2 (1-P)} - \frac{1}{v_{\text{RMS}}^2} \right]}} \quad (4)$$

式中： O_2 为满足速度分析精度的最大炮检距； P 为速度分析误差，其大小根据地质任务确定，一般取 2%~4%。

对目的层上所有论证网格点的最大炮检距分别按照(1)式和(2)式计算并统计，得到全区目的层的最大炮检距范围。

3) 接收线距和最大非纵距。

为了满足后续处理时的速度分析、AVO 分析、空间插值等要求，接收线距通常不大于垂直入射时的菲涅尔带半径^[12]，即：

$$R \leq \sqrt{\frac{v_{RMS}^2 t_0}{4f_p} + \left(\frac{v_{RMS}}{4f_p}\right)^2} \quad (5)$$

式中： R 为接收线距。

随着非纵距的增加，方位角分布范围更宽，非纵观测误差也随之增大。因此在设计三维地震观测系统时，除非对方位有特殊要求，否则应对最大非纵距加以限制。从减小非纵观测误差角度考虑，最大非纵距应满足以下条件：

$$Y_{max} \leq \frac{v_{RMS}}{2\sin\theta} \sqrt{\frac{t_0}{f_p}} \quad (6)$$

式中： Y_{max} 为最大非纵距。

以 L 工区某目的层为例，说明以上参数论证方法的效果。图 6 为针对该目的层的面元论证结果，图 6 中 L 工区某目的层每个论证网格需要的面元边长以不同颜色标注，断层及大倾角区域需要的面元边长明显小于其它区域需要的面元边长，因此最终选取的结果只需满足断层及大倾角区域即可，本例中断层和地层的大倾角区域的面元边长约为 8 m。

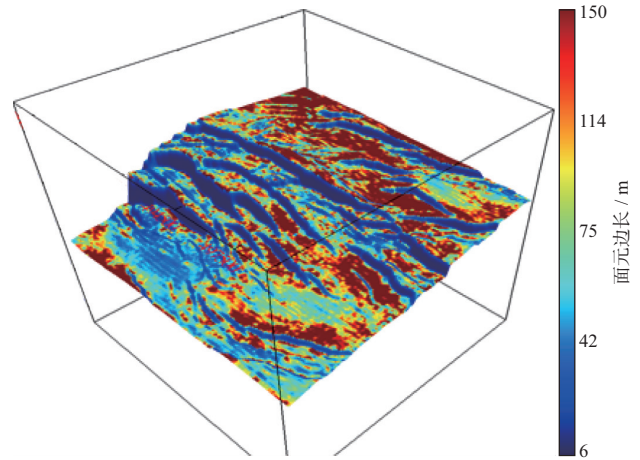


图 6 L 工区某目的层的面元论证结果

为了更好地分析参数论证结果，本文对参数论证结果与目的层地质参数进行交会显示，以找出对观测系统参数最敏感的地层信息，再根据敏感地层信息对观测系统参数进行论证。图 7 为 L 工区某目的层面元边长、接收线距分别与目的层倾角的交会分析结果，可以看出面元长度和接收线距均对地层倾角敏感性高，在实际设计中可以根据目的层地层和断层倾角，选择合适的面元长度和接收线距。以图 7a 为例，该目的层断层倾角约为 45°，对应的面元为 10 m，接收线距为 110 m。

1.3 基于正演模拟的精细观测系统参数论证

基于 L 工区目的层地震地质模型的宏观参数论证得到的是各观测系统参数的大概范围，为了精确地设计观测系统，可根据已有地质认识建立精细目标地质模型，设定不同的观测系统参数，根据正演单炮记

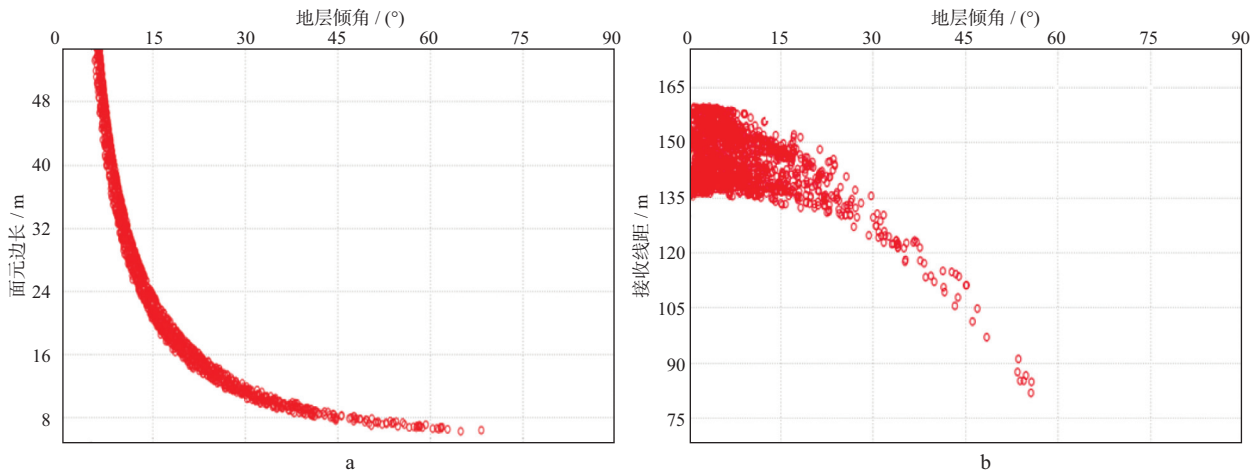


图 7 L 工区某目的层观测系统参数-地质参数交会显示结果

a 面元边长与地层倾角；b 接收线距与地层倾角

录叠前偏移成像和叠前属性反演的结果确定最佳的观测系统参数。

常规的二维波动方程正演模拟或者三维射线追踪正演模拟,不能得到复杂地下构造和精细储层结构的真实波场特征,三维波动方程正演模拟是最佳选择。基于三维波动方程正演模拟的观测系统设计主要包括三维地震数据正演和地震照明计算两种方法^[13-16]。将三维波动方程正演模拟应用于高密度地震采集观测系统设计,其关键在于实现三维复杂地质建模和提高三维正演的效率,为此本文研究了基于 CPU/GPU 并行的三维波动方程正演模拟技术。

1.3.1 三维精细地质建模

将地质人员已有的认知融入三维精细地质模型,是验证观测系统模拟效果的前提,为此提出以下技术思路:加入解释的断层与层位等数据,利用自动曲面融合算法得到多个封闭的“块体”;加入解释的薄层、砂体等小地质体数据,结合井数据进行交互精细建模。图 8 为根据以上方法建立的 L 工区三维精细地质模型。

1.3.2 基于 CPU/GPU 并行的三维波动方程正演

有限差分模拟是目前理论最成熟、应用最广泛的波动方程正演数值模拟方法。该方法理论简单,但是计算效率低,特别是三维正演模拟时计算量巨大,难以在实际生产中得到应用。该方法对每个网格点上的时间层更新计算时,只涉及与该网格点相邻的若干网格点的上一时间层的波场值,因此每个网格点上的计算都是独立的,可以进行并行计算^[17-18]。利用这一特点,考虑到算法的多重嵌套循环结构,基于 CPU+GPU 的异构平台,设计使用 MPI+CUDA 的并行程

序设计,可实现算法的多级并行加速。另外,为解决三维正演算法内存需求大的问题,采用了区域分解策略,即将同一炮的计算分配到多个节点上并行执行,这不仅分摊了各个节点的内存压力,还加大了算法的并行力度,进一步提高了计算效率。经过加速改造后,较常规的三维有限差分正演模拟方法,该方法加速比超过 700。

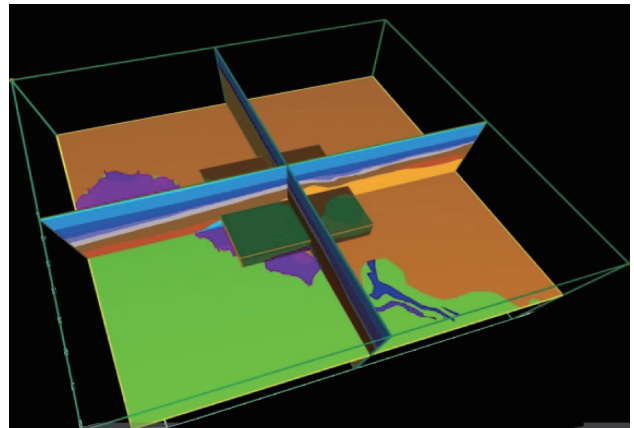


图 8 L 工区三维精细地质模型

1.3.3 基于模型正演的观测系统参数设计

将三维精细地质建模和三维波动方程正演模拟用于 L 工区观测系统设计。该地区面临的主要地质问题为:纵向目的层段的薄储层无法识别,横向展布范围和尖灭点位置难以落实,针对以上问题建立薄储层地质模型,图 9 为该模型一条南北向剖面的局部显示。基于该模型设计不同的观测系统参数进行波动方程正演,根据正演得到的单炮数据进行偏移成像和波阻抗反演。

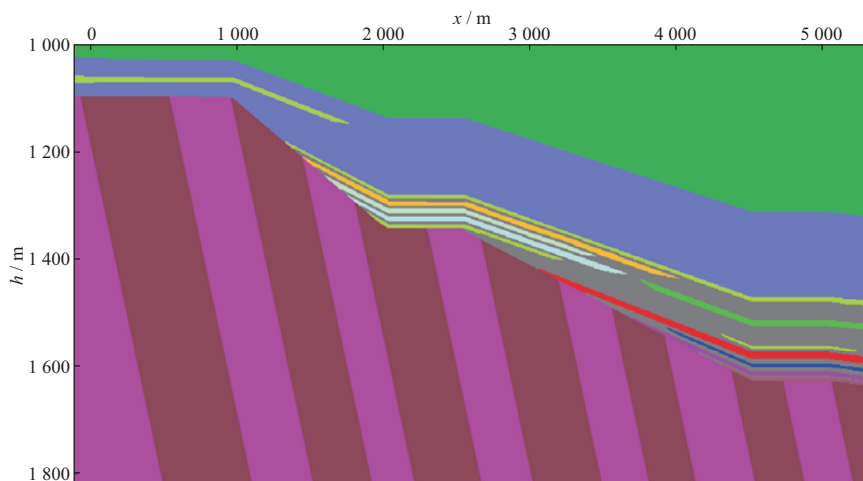


图 9 L 工区薄储层模型南北向剖面的局部显示

首先对 L 工区地震子波主频 45 Hz 时不同道间距的正演模拟数据为叠前深度偏移,图 10 为局部叠前深度偏移剖面,图 11 为不同道间距尖灭点识别误差曲

线,可以看出道间距 > 25 m 时误差快速增加,道间距 < 25 m 时误差增加趋于平缓,道间距 < 10 m 时误差基本不变,因此本文将道间距设定为 ≤ 25 m。

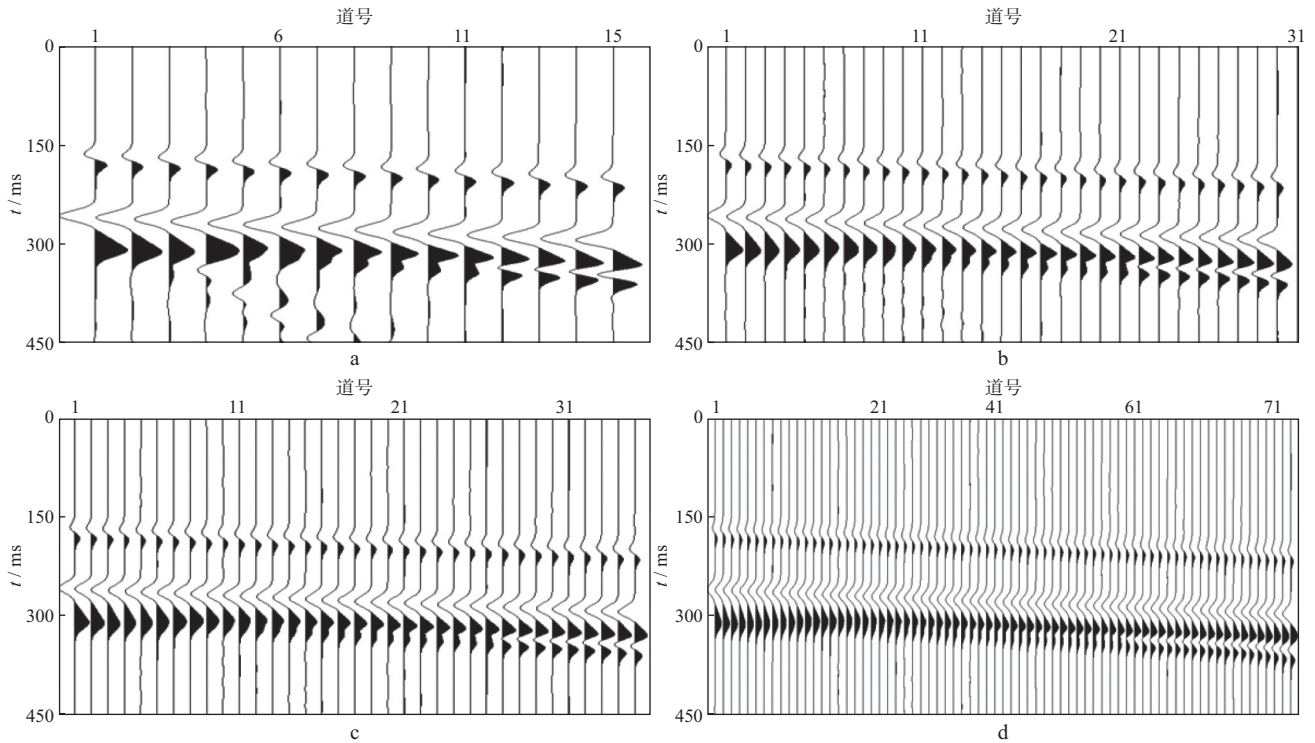


图 10 L 工区不同道间距正演模拟数据的局部叠前深度偏移剖面
a 道间距 50 m; b 道间距 25 m; c 道间距 20 m; d 道间距 10 m

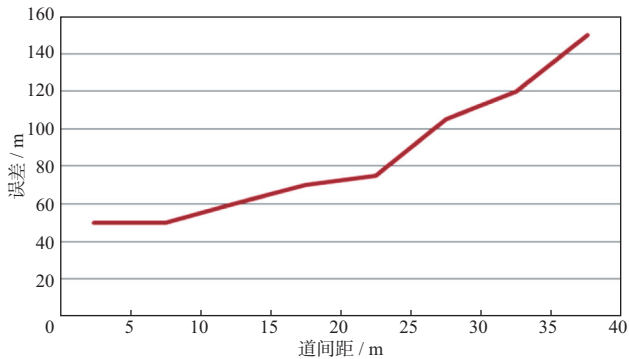


图 11 不同道间距尖灭点识别误差曲线

针对薄砂体和尖灭点,通过不同地震子波主频的正演模拟、叠前深度偏移和波阻抗反演处理,可以得到最佳的激发地震子波主频。表 1 为不同主频地震子波正演数据偏移和反演分辨率及尖灭点识别误差统计结果,图 12 为不同主频地震子波正演模拟数据的波阻抗反演剖面。从图 12 可以看出,地震子波主频越高,目的层成像纵向分辨率越高,尖灭点识别误

差越小,与井的吻合程度越高(图 12 中紫色曲线为测井曲线)。结合表 1 和图 12b 可以看出,主频 45 Hz 的地震子波正演数据成像剖面上目的层段可识别,可分辨 18 m 左右的砂体,利用稀疏脉冲反演,纵向分辨率可进一步提高到 9 m。消除了地震子波干涉和调谐影响,储层表征能力更强。从图 12 中黑色圆圈内可以看出,第 2 套薄储层在主频 45 Hz 地震子波正演数据的反演剖面上更加清晰。考虑实际激发因素,45 Hz 的地震子波具有可行性。

表 1 不同主频地震子波正演数据偏移和反演分辨率及尖灭点识别误差

地震频率/Hz	30	45	60
偏移纵向分辨率/m	28	18	14
反演纵向分辨率/m	14	9	7
偏移尖灭点识别误差/m	240	75	60
反演尖灭点识别误差/m	120	50	40

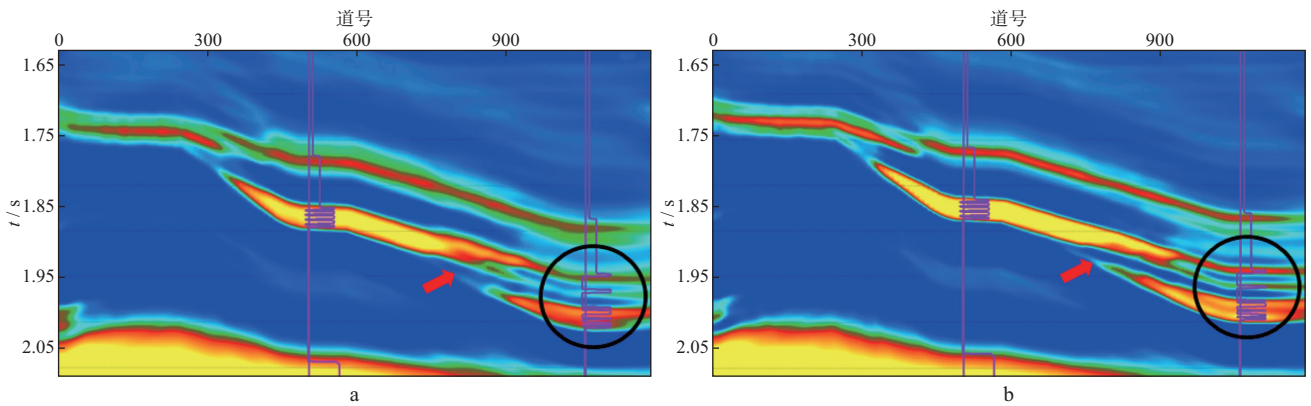


图 12 不同主频地震子波正演模拟数据的波阻抗反演剖面
a 30 Hz; b 45 Hz

2 实际应用效果

将本文提出的高密度三维地震观测系统设计技术应用于胜利油田近年的三维地震采集观测系统设计,以 L 工区为例,采用本文方法设计得到的正交观测系统参数见表 2。从图 13 可以看出,新采集地震资料信噪比大幅提升,小断层、断块成像效果得到了明显改善,目的层分辨率明显提高。

表 2 L 工区高密度地震采集观测系统参数

参数	数值
观测系统模板	32L7S
纵向观测系统	3487.5-12.5-25-12.5-3487.5
道数	$32 \times 280 = 8\ 960$
面元长度/m	12.5
覆盖次数	$20 \times 8 = 160$
道间距/m	25
接收线距/m	175
炮点距/m	50
炮线距/m	175
束线间距/m	350
最大炮检距/m	4 511
最大非纵距/m	2 862.5
炮道密度/(万道 \cdot km ⁻²)	102.4

从图 14 可以看出,得益于小面元、高覆盖次数、大炮检距的优势,浅层的河道在新采集资料的处理剖面上得到了更加清晰的展现(图 14a 和图 14b),深层

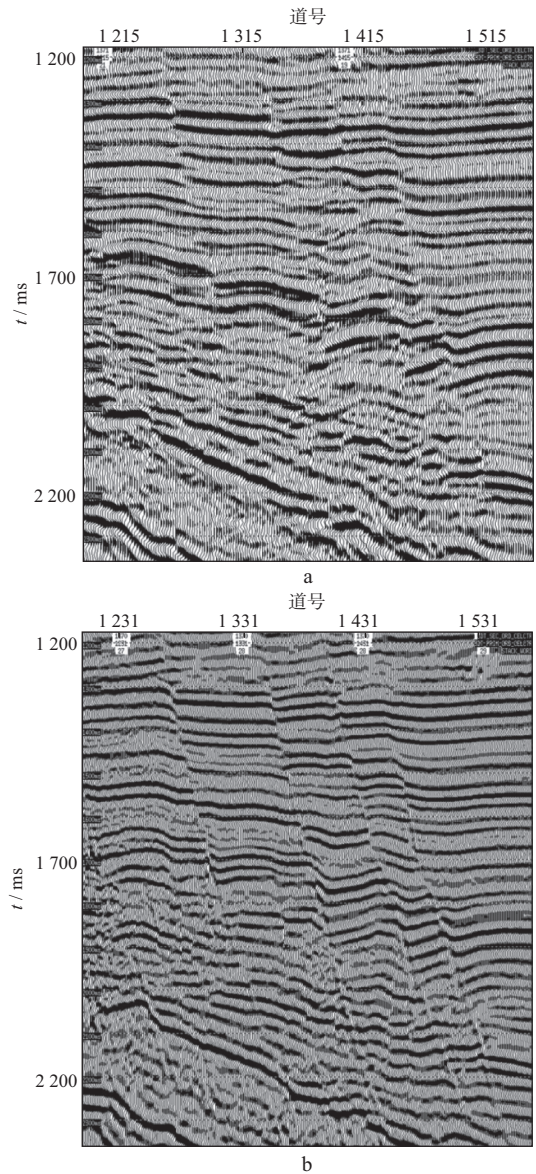


图 13 L 工区地震资料的叠前时间偏移剖面
a 老资料; b 新采集资料

的地层反射信噪比明显提高(图 14c 和图 14d)。利用新采集资料进行解释,部署探井 1 口,单井控制储

量为 1.36×10^6 t。目前共落实有利圈闭面积 54.6 km^2 ,预测资源量为 3.494×10^7 t。

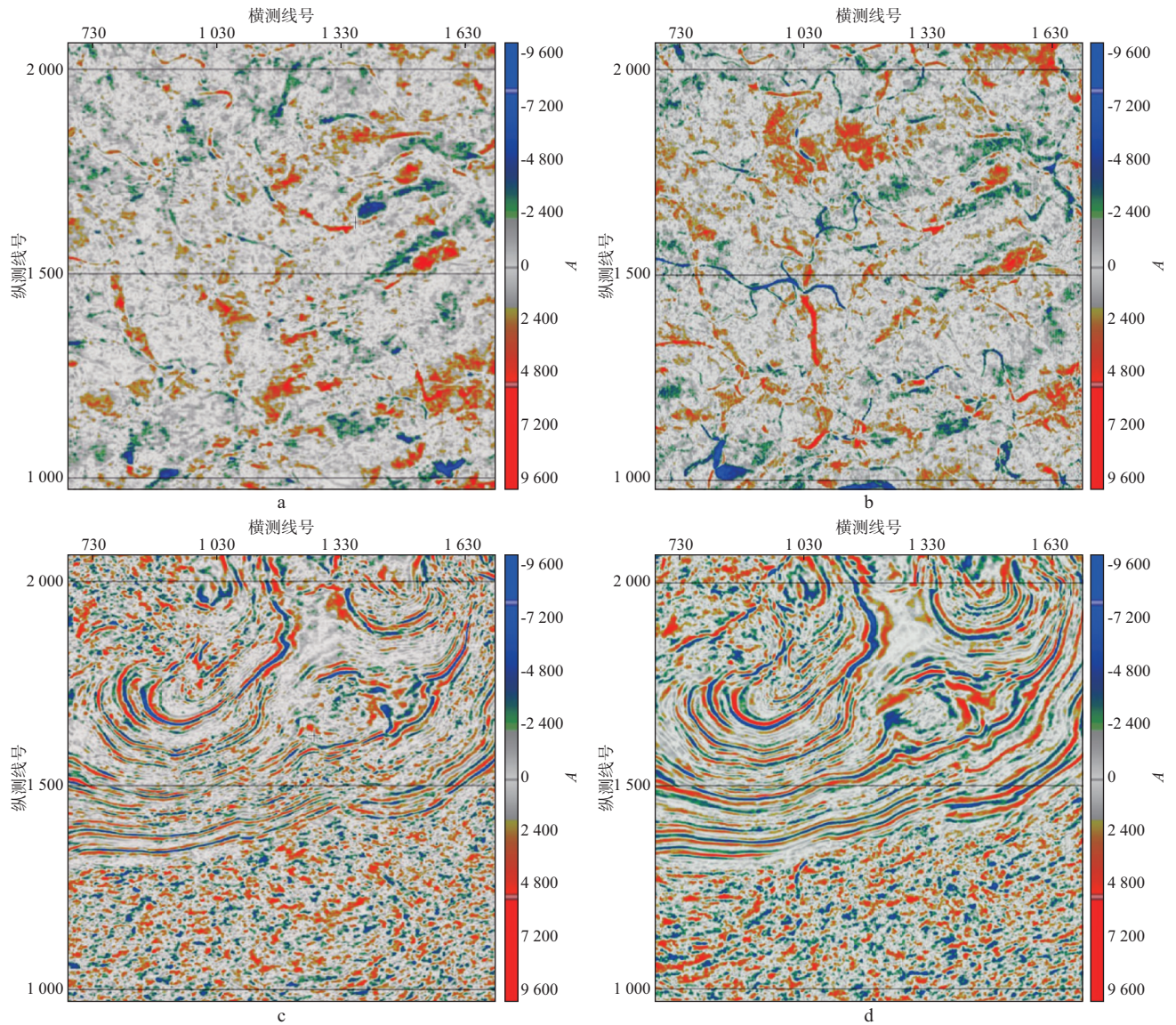


图 14 L 工区地震资料叠前时间偏移剖面的时间切片

a 老资料(940 ms); b 新采集资料(940 ms); c 老资料(3 040 ms); d 新采集资料(3 040 ms)

3 结束语

本文面向地质目标,充分挖掘东部老产油区地震地质资料丰富的优势,以实际资料为驱动、理论公式为依据、精细建模和正演为手段,针对目的层进行全区观测系统参数详细论证,提出了适用于高密度地震采集的观测系统设计技术,在胜利油田近几年的高密度地震勘探中取得了良好效果,并得到以下 3 点认识。

1) 炮道密度是高密度地震采集观测系统设计中关键的参数,通过对实际高密度地震采集资料进行炮道密度退化处理,找出地质任务与经济成本之间的平衡点,进而指导同一地区高密度地震采集观测系统的设计。对于大多数尚未进行过高密度地震采集的地区,建议选取典型区块开展试验性采集,为后续高密度地震采集观测系统参数优化提供重要依据。对建立的三维地震地质模型,进行三维波动方程正演模拟得到单炮数据,再进行观测系统退化处理,也能对炮

道密度的优化设计起到一定的指导作用。

2) 以工区原有的地震地质成果资料为依据,基于目的层地震地质综合模型,利用理论公式对观测系统参数进行全区宏观论证,并利用交会分析方法建立观测系统参数和目的层地震地质参数之间的联系,相对于常规的“点论证”方式,上述方法精度更高,结果更合理。

3) 高密度三维地震采集时面对的是复杂地下目标体,常规的建模和正演模拟方法已经不再适用,三维精细地质建模和正演是高精度三维地震采集观测系统设计的有效工具,但目前三维波动方程正演的计算效率还需要进一步提高以适应实际生产需要。

致谢:感谢胜利油田物探院的同事对本文提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] 李燕燕,赵殿栋,于世煥,等.中国石化陆上地震采集技术现状与发展趋势[J].石油物探,2013,52(4):363-371
LI Y Y, ZHAO D D, YU S H, et al. Status and trend on land seismic acquisition technique of SINOPEC[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(4): 363-371
- [2] 尚新民,芮拥军,石林光,等.胜利油田高密度地震探索与实践[J].地球物理学进展,2018,33(4):1545-1553
SHANG X M, RUI Y J, SHI L G, et al. Exploration and practice of high-density seismic survey in Shengli Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1545-1553
- [3] 姜福豪,李培明.陆上高密度三维观测系统设计方法分析[C]//2015年物探技术研讨会论文集.宜昌:中国石油学会,2015:22-25
JIANG F H, LI P M. Analysis of land high density 3D geometry design methods[C]//2015 Geophysical exploration technology seminar. Yichang: Chinese Petroleum Society, 2015: 22-25
- [4] 邸志欣,张丽娜,邓光校.塔河油田高精度勘探地震采集技术分析与实践[J].石油物探,2016,55(4):493-505
DI Z X, ZHANG L N, DENG G X. Analysis and application on high-precision seismic acquisition technology in Tahe Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(4): 493-505
- [5] 陈学强,白文杰,黄有晖.高精度三维地震采集技术在塔中沙漠区碳酸盐岩勘探中的应用[J].石油物探,2011,50(1):76-81
CHEN X Q, BAI W J, HUANG Y H. Application of 3D high precision seismic acquisition technology for carbonate exploration in the Central Tarim Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(1): 76-81
- [6] 刘依谋,梁向豪,印兴耀,等.面向碳酸盐岩缝洞型储层的高密度全方位三维地震采集技术及应用效果[J].石油物探,2013,52(4):372-382
LIU Y M, LIANG X H, YIN X Y, et al. High-density full-azimuth 3D seismic acquisition and its application on fractured-cavernous carbonate reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(4): 372-382
- [7] 郭念民,陈猛,崔永福,等.碳酸盐岩储层单点高密度采集三维地震勘探实例[J].石油物探,2016,55(6):771-780
GUO N M, CHEN M, CUI Y F, et al. The application of single-point high-density seismic acquisition for carbonate reservoir 3D seismic exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(6): 771-780
- [8] 屠世杰.高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择—YA高精度三维勘探实例[J].石油地球物理勘探,2010,45(6):926-936
TU S J. Selection of shot density and trace density in high precision 3D seismic exploration—a high precision 3D exploration case in YA area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(6): 926-936
- [9] 张伟,尹成,田继东,等.三维观测系统参数的退化性处理试验[J].石油物探,2007,46(1):69-74
ZHANG W, YIN C, TIAN J D, et al. Degradation processing experiment based on 3D geometry parameters[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(1): 69-74
- [10] 徐辉,韩文功,单联瑜,等.基于实际地震资料的覆盖次数和信噪比关系分析[J].石油物探,2011,50(2):181-186,205
XU H, HAN W G, SHAN L Y, et al. The analysis on the quantitative relationship between the fold and SNR of the seismic data[J]. Petroleum Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(2): 181-186, 205
- [11] GIJS J O V.三维地震勘探设计[M].李培明,何永清,译.北京:石油工业出版社,2008:25-40
GIJS J O V. 3-D seismic survey design[M]. LI P M, HE Y Q, translators. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 25-40
- [12] 高海燕.辽河盆地精细三维地震采集技术研究与应用[D].北京:中国地质大学(北京),2018
GAO H Y. The application of fine 3D seismic acquisition in the Liaohe Oilfield[D]. Beijing: China University Of Geosciences(Beijing), 2018
- [13] 李万万.基于波动方程正演的地震观测系统设计[J].石油地球物理勘探,2008,43(2):134-141
LI W W. Design of seismic geometry based on wave equation forward simulation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(2): 134-141
- [14] 殷厚成,邓飞.三维高斯射线束观测系统照明及优化方法研究[J].石油物探,2015,54(4):376-381