



辽河拗陷大民屯凹陷 S281 块高密度宽线二维地震采集实践

赵超峰, 田建涛, 张伟, 韩继伟, 付昌, 任丽莹, 张晴, 刘志伟

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司辽河物探处, 辽宁 盘锦 124010

摘要: 辽河拗陷大民屯凹陷 S281 块 X 井钻井显示该块油气潜力较大, 但以往地震资料采集时间早, 覆盖次数较低, 成像精度差, 导致主体断裂位置和微断裂体系难以落实, 制约区块成藏解释和后续开发。为此, 开展了高密度宽线二维地震资料采集, 并基于采集数据开展了观测系统退化分析。研究表明, 新采集的高密度宽线二维地震成像剖面较以往三维地震成果剖面断点更清晰, 断裂系统刻画更清楚, 构造形态更自然, 层间信息更丰富, 信噪比更高, 落实了的西部斜坡带的构造特征; 超高密度、极小面元对高陡构造和断裂刻画更清楚, 是提高复杂地质目标成像的有效方法; 退化处理说明 S281 块的地震资料采集观测系统的面元边长不能大于 12.5 m, 最大炮检距不能小于 3 500 m, 覆盖次数不能小于 1 200 次。本研究可为大民屯凹陷西部斜坡带的下步地震资料采集和勘探开发提供借鉴。

关键词: 大民屯凹陷; 高密度; 宽线二维地震采集; 小面元; 高灵敏度检波器; 退化分析; 辽河拗陷

HIGH DENSITY WIDE LINE 2D SEISMIC ACQUISITION PRACTICE IN S281 BLOCK OF DAMINTUN SAG, LIAOHE DEPRESSION

ZHAO Chao-feng, TIAN Jian-tao, ZHANG Wei, HAN Ji-wei, FU Chang, REN Li-ying, ZHANG Qing, LIU Zhi-wei
Liaohu Geophysical Exploration Company, Bureau of Geophysical Prospecting INC., CNPC, Panjin 124010, Liaoning Province, China

Abstract: The drilling of well X in S281 block of Damintun sag, Liaohe depression, shows a great oil and gas potential. However, it is difficult to determine the main fault position and microfracture system due to the old acquisition time of previous seismic data, low coverage times and poor imaging precision, which restricts the interpretation of block accumulation and subsequent development. Therefore, the study carries out the high density wide line 2D seismic data acquisition and degradation analysis of the observation system based on the data. The results show that, compared with the previous 3D seismic imaging section, the newly acquired high density wide line 2D seismic imaging section has clearer breakpoints, clearer delineation of fault system, more natural structural configuration, richer interlayer information, and higher signal-to-noise ratio, which accurately realizes the structural characteristics of western slope zone. The ultrahigh density and minimum bin can depict high-steep structures and faults more clearly, which is an effective method to improve the imaging of complex geological targets. The degradation processing indicates that the bin side length of seismic data acquisition and observation system of S281 block should not be greater than 12.5 m, the maximum offset should not be less than 3 500 m, and the coverage times should not be less than 1 200 times.

收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2023-01-29. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科研项目“干热岩资源勘探开发关键技术研究”(2022DJ5503); 东方地球物理勘探有限责任公司科研项目“地震采集方法基础研究”(03-01-2022).

作者简介: 赵超峰(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震资料采集工作, 通信地址 辽宁省盘锦市兴隆台区物探公司研究所, E-mail/1120201698@qq.com

The study can provide reference for the next seismic data acquisition and exploration in the western slope zone of Damintun sag.

Key words: Damintun sag; high density; wide-line 2D seismic acquisition; small bin; high-sensitivity geophone; degradation analysis; Liaohe depression

0 引言

随着陆上油气勘探开发程度的不断深入,勘探开发的重点向复杂高陡构造、碳酸盐岩、地层岩性、非常规油气、超深层油气等领域转移^[1-3],对地震勘探方法提出更高的挑战。目前,以“两宽一高”为代表的三维地震数据采集在国内各大油气田应用最为广泛,成为勘探的主要方法^[4-6]。但在金属矿探测、煤田探测、深反射地震以及油田新区勘探或勘探程度较低的地区,在经济有效的前提下,宽线二维地震采集是较为有效手段^[7-10]。刘建勋等^[11]研究了高陡构造区二维地震测线观测方位选择问题,完善了二维地震数据采集方法;白旭明等^[12]将二维地震勘探技术应用到喀拉通克金属矿勘查中,获得了信噪比较高的金属矿区地震成像剖面,指导了矿区钻孔,且钻孔验证结果与地震解释基本吻合,证明了二维地震勘探方法的有效性;陈耀等^[9]在页岩气勘查空白区,利用二维地震剖面指导井位部署,揭示了五峰组-高家边组地层的页岩气资源前景;何宝庆等^[13]从理论分析和数值模拟角度研究了宽线地震数据采集和处理,为宽线地震方法提供了理论依据。宽线地震采集是介于二维地震采集和三维地震采集之间的采集方式,是二维地震勘探的一种升级。宽线地震采集到的属性信息比二维地震采集丰富,能增强来自垂直方向的有效反射信号,同时压制侧向反射和近地表散射所产生的干扰,适合勘探程度较低、成本投入较小的地区开展勘探先导试验和应用^[7]。

辽河拗陷大民屯凹陷 S281 块属于勘探程度较低的地区,三维地震采集年度较早,现有地震资料分辨率不足,主体断裂位置和微断裂体系难以落实,制约了 S281 块成藏解释和下步开发。为此,在 S281 块开展了高密度宽线地震采集,获得了高质量的成像剖面,落实了该块的断裂系统,指导了 X-1 井的部署,实现了勘探突破。

1 地质背景

大民屯凹陷位于辽河拗陷的北部,是发育在太古

宙花岗片麻岩、混合花岗岩和元古宙碳酸盐岩组成的基底之上的中生代陆相凹陷^[14-15]。大民屯凹陷在构造上,东、西、南三面为断层所围限,呈东西分带、南北分块及西缓、中凹、东陡的特点。根据基底结构特点、沉积特征、构造类型及其发育演化特征,大民屯凹陷划分为西部斜坡带、中央深陷带和东侧陡坡带 3 个构造单元,其中西部斜坡带的整体构造形态为西高东低的单斜,地层倾角大(18~25°),西边界断层、西侧断层、平安堡断层将研究区划分为 2 个狭长区带,内部被次级正断层切割形成多个断块(图 1)。

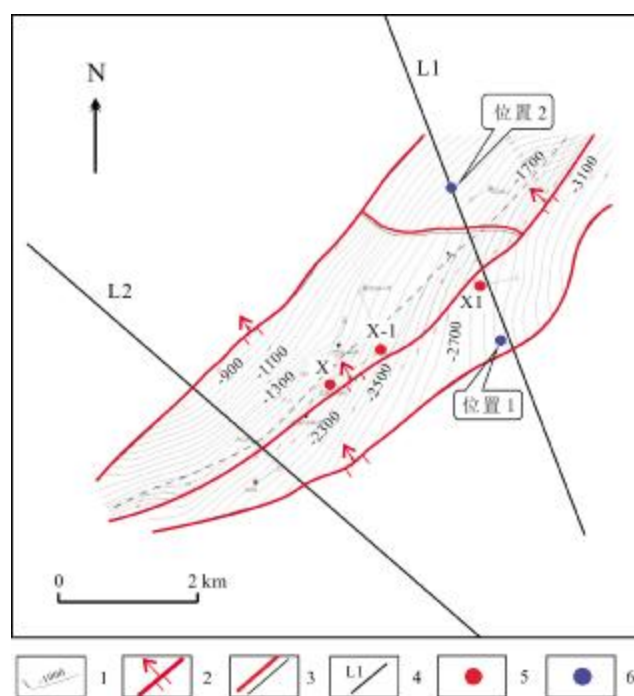


图 1 大民屯凹陷 S281 块老构造图

Fig. 1 Old structure map of S281 block in Damintun sag
1—等高线(contour line); 2—逆断层(reverse fault); 3—正断层(normal fault); 4—测线及编号(survey line and number); 5—井底(bottom hole); 6—单炮位置(position of single shot)

西部斜坡带沙四段油藏的勘探始于 1990 年代。2021 年,西部斜坡带 S281 块构造高部位部署的 X 井在西边界断层的上盘和下盘钻遇的油气显示层厚度超过了 150 m,揭示了大民屯凹陷西部斜坡带的巨大勘

探潜力,也突破了长久以来大民屯凹陷西边界断层上盘不成藏的认识(图1、2)。一方面,大民屯凹陷构造运动频繁,使得凹陷内地质构造十分复杂,东、西两侧边界断层附近地层支离破碎;另一方面,由于该区块地震资料采集的年度较早,采集方法简单,地震资料品质有限。这两方面原因导致了S281块的地震资料成像精度低,主体断裂位置和微断裂体系难以落实,制约了S281块成藏解释和下步开发。因此,迫切需要查清西边界断层、西侧断层以及次级断层的平面展布及发育特征并预测油层顶面的构造形态及有利砂体展布,以指导区块的下步开发。

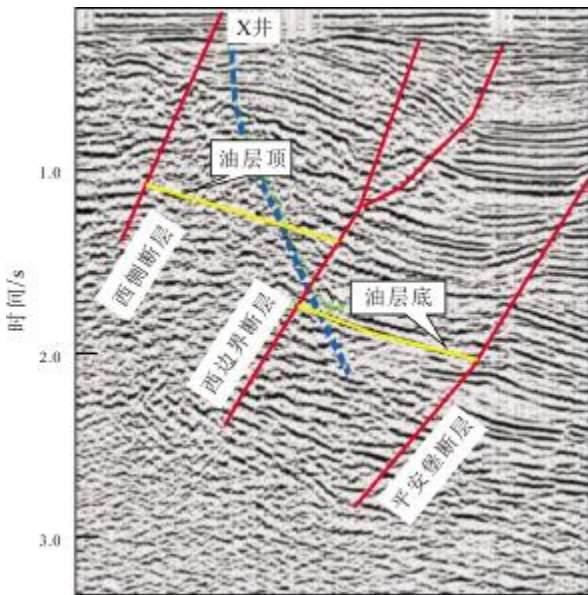


图2 过X井地震剖面

Fig. 2 Seismic profile across well X

2 地震资料采集方法

2.1 以往地震采集资料分析

2.1.1 采集方法分析

S281块最新的三维地震资料于2003年采集,采集参数见表1。可以发现,以往采集受当时勘探技术、采集设备的限制,覆盖次数和观测密度均较低;以往采集单炮的道距为50 m,限制了水平方向的空间采样,导致无法满足大倾角地层和高陡断裂的成像需求;以往地震采集的面元较大,纵横比、观测密度不足,导致无法有效判定主要断层位置。因此,S281块以往地震资料采集年代较早,分辨地质体的能力不足,不利于复杂高陡构造成像,无法满足断裂系统精细刻

画和有利砂体展布落实的地质需求。

表1 S281块以往三维采集参数表

Table 1 Previous 3D acquisition parameters of S281 block

参数	数值
观测系统	12L24S192T6R 斜交
面元/m ²	25×25
覆盖次数	12×6=72
接收道数	2304
接收线距/m	200
道间距/m	50
炮线距/m	400
炮点距/m	50/50
最大炮检距/m	5060.26
纵横比	0.35
炮道密度/(万道/km ²)	11.52
激发方式	SN4-10,2 串串联
接收方式	5井2 kg

2.1.2 采集资料分析

1) 原始采集单炮分析

选取S281块2个位置(图1)的以往三维地震采集单炮进行分析。根据图3,位置1洼陷附近的单炮整体资料较好,分辨率较高,2.5 s处仍可见较强的连续反射信号(图3a);位置2斜坡部位单炮(图3b左侧)资料信噪比较差,深层反射信号较弱,洼陷位置(图3b右侧)分辨率较高。根据图3a和图3b目的层频谱分析结果,原始单炮频率主要集中在10~40 Hz,地震资料有效频宽总体较窄,尤其低频不足。

2) 干扰波分析

S281块地表较为平坦,规则干扰波主要为面波、折射波和环境噪声。面波的频率在5~15 Hz,浅层折射波频率在20~39 Hz。

3) 成像剖面分析

根据图2可以看出,老资料西侧斜坡部位资料信噪比较差,西边界断层不落实,断点不清晰,东侧资料相对较好。

2.2 宽线二维地震采集方法

为了落实西边界断层、西侧断层及次级断层的准确位置和预测测线方向油层顶面的构造形态及有利砂

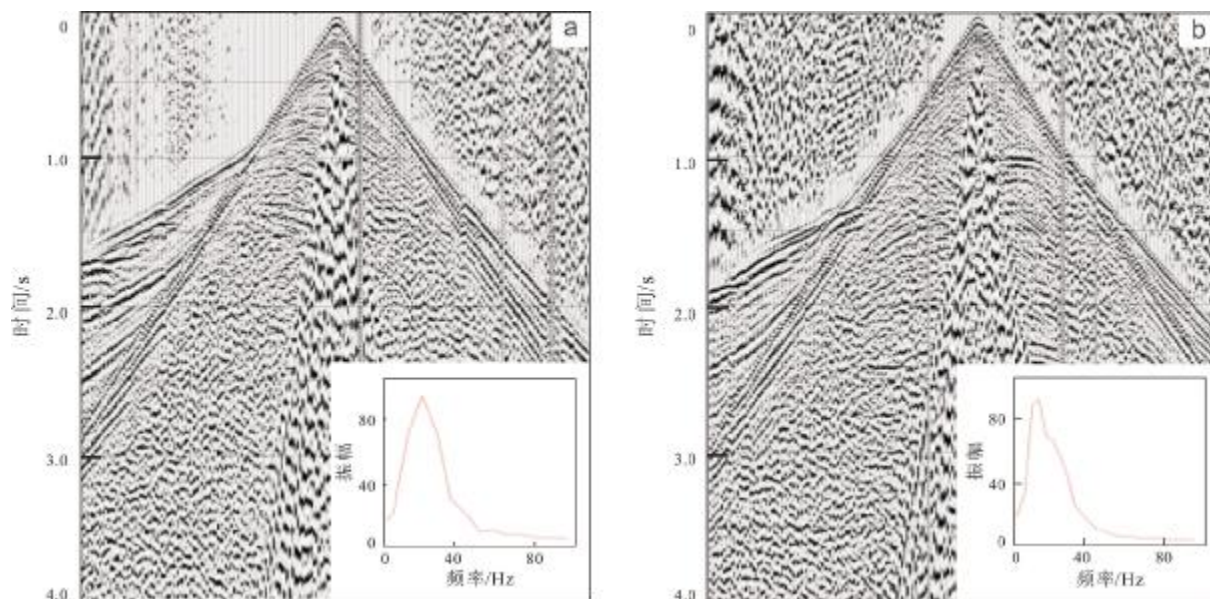


图 3 三维地震采集单炮及频谱分析

Fig. 3 Single shot and spectrum analysis of 3D seismic acquisition

a—位置 1 单炮(single shot at Position 1); b—位置 2 单炮(single shot at Position 2)

体展布特征,结合以往地震资料分析结果,确立了“小面元、高覆盖、宽频带、高保真”地震资料采集方法. 小道距、高覆盖可提高地震资料微断裂识别能力;宽频激发、高灵敏度检波器可接收有效拓展频宽,提高薄储层识别能力,提高地震资料分辨率.

2.2.1 观测系统设计

根据目的层层位数据和以往地震剖面,建立二维地质模型,并根据地质模型进行射线追踪和各向异性弹性波正演分析,结合理论分析和实际资料,优选采集参数.

1) 面元边长

面元边长与分辨率和信噪比有直接关系,确定面元边长后可进一步确定炮点距和道间距^[16]. 理论计算要使面元边长满足横向分辨率、最高无混叠频率和 30° 绕射能量收敛要求. 根据 S281 块论证点地球物理参数,要使目的层满足上述 3 个指标,面元边长不应超过 22 m.

面元也要满足大倾角地层空间采样要求. 按照目的层最大倾角为 15° 计算,为了保证反射信号同相叠加,面元尺寸应小于 11.8 m.

小道距采集可以对面波等线性噪声充分采样,提高资料去噪能力^[17]. 以往三维采集单炮 F-K 谱分析

结果表明面元边长为 6.25 m,能满足 80 Hz 以内有效信号无污染采样.

综合以上理论计算和实际资料分析,确定采集面元边长为 6.25 m,道距为 12.5 m.

2) 最大炮检距

大炮检距可以提高速度分析精度,提高深层成像效果. 但考虑到动校正拉伸的影响,炮检距不宜过大,需综合目的层埋深、速度分析精度、动校正拉伸等因素对最大炮检距进行论证^[18-19]. 最大炮检距论证分别从理论计算、模型波动方程正演两个方面来进行. 最大炮检距理论计算主要考虑动校拉伸畸变不超过 12.5%,速度分析精度误差不大于 6%,同时考虑目的层反射信号的有效接收和照明强度. 基于二维地质体模型进行波动方程正演单炮最大炮检距分析,要使不同部位正演单炮记录经静校正后,满足深层目的层反射波要求. 经理论计算和模型正演后,确定最大炮检距应不小于 3 681 m.

3) 覆盖次数

覆盖次数的选择应以提高资料信噪比,保证主要目的层有足够的有效覆盖次数为主. 2020 年,相邻探区 SJP 地区实施了“两宽一高”地震采集,采用高精度可控震源 EV56 激发,扫描频率为 2~130 Hz,覆盖次数

为 748 次,新采集资料潜山顶面及内幕清楚,复杂断裂成像精度大幅提高,资料品质显著提升^[20]. 因此,参考 SJP 地区“两宽一高”地震采集参数,按照二维、三维覆盖次数关系,本次二维覆盖次数应在 1 047 次左右.

4) 宽线线距

对于低信噪比区二维地震采集,采用二维宽线能有效增加覆盖次数,提高地震资料品质,具有相对较宽的炮-检方位角分布,有利于地下地质体横向的分辨及成像;有利于压制侧向干扰及随机干扰,提高信噪比;能接收更多射线路径的反射,提高复杂目标的成像精度.

采用二维宽线进行接收,要保证共反射点面元同相叠加,接收线距需满足如下公式:

$$L \leq V / (8f_{\text{dom}} \sin \theta) \quad (1)$$

式中, L 为反射条带横向宽度, V 为目的层层速度, f_{dom} 为目的层反射波主频, θ 为目的层地层倾角.

通过理论计算, S281 块宽线采集的线距应不大于 36.7 m.

2.2.2 宽频激发与宽频接收

地震勘探采集地震信号频带越宽,其携带信息越丰富,分辨率越高,解决复杂地质目标能力越强.

目前, EV56 高精度宽频可控震源扫描频率可达到 1.5~160 Hz,极大拓展了激发信号的频宽. 实践表明,宽频可控震源激发可有效改善深层的成像效果,提高深层资料信噪比^[1]. 借鉴 SJP 地区“两宽一高”地震资料采集经验, S281 块宽线二维地震采集使用 EV56 可控震源激发,扫描频率为 2~130 Hz.

宽频接收要求检波器具有低自然频率、高灵敏度、高假频、低失真等特性. 检波器的自然频率越低,对低频响应能力越好,越有利于增加采集地震信号的低频成分,拓展带宽;检波器的灵敏度越高,记录弱信号的能力越强.

与组合接收相比,单点高密度可以真实记录地震波场,拓展采集信号的频宽,更有利于保幅保真处理,提高深层资料信噪比,有利于高陡复杂构造成像,同时

可提高薄互层分辨率. 因此, S281 块宽线二维地震采集使用自然频率为 5 Hz、灵敏度为 279.6 V/(m/s)、阻尼系数为 0.6 的宽频检波器单点接收.

为落实西部斜坡带构造,部署地震采集二维测线 2 条,其中 L1 测线长度为 9 km,方位为北偏东 159.6°; L2 测线长度为 11.5 km,方位为北偏东 131.9°(图 1). 最终确定的采集参数见表 2.

3 应用效果分析

3.1 处理效果

以 L1 线局部成像结果为例,分析新采集的二维地震资料成像效果. 根据图 4 剖面图可以看出,新采集的二维地震资料成果剖面较老三维地震成果剖面分辨率、信噪比更高,断层的断点和产状更清晰,构造形态更自然,层间信息更丰富,砂体可追踪性更强,地层产状更加落实. 根据新采集的二维地震剖面落实了 S281 块构造形态和块内边界断层及西侧逆断层位置,深化了对西部斜坡带构造特征的认识.

根据新采集资料对区块进行重新构造解释(图 5),与图 1 对比可以看出,新构造图地层产状变缓;西侧边界断层通过剖面落实和平面组合,断层位置基本没有变化,但上、下盘断距变化较大; X 井附近新落实了断鼻. 综上,构造图的平面分析与纵向地震剖面的认识一致.

依托本次高密度宽线二维地震成果对西侧逆断层性质的认识和对西侧逆断层、西边界断层的位置落实,同时结合该区以往三维地震资料,对目的层的构造进行了重新梳理,并部署了 X-1 井. X-1 井测井解释结果表明,上盘地层倾角平均 20°,倾向为南东方向,下盘地层倾角平均 25°,倾向为南东方向. 钻井结果表明 X-1 井钻遇顶界与新解释方案一致,证明了二维地震成果的有效性.

3.2 观测系统退化分析

3.2.1 接收排列退化分析

长排列接收可增强埋深大、倾角陡的地层反射信

表 2 S281 块高密度宽线二维采集参数表

Table 2 High-density wide line 2D acquisition parameters of S281 block

观测系统	道距/m	炮点距/m	覆盖次数(满覆盖)	接收道数	接收线距/m	接收方式	激发方式
3L×2S	12.5	12.5	1000~4056	全排列接收	25	GT-DS-5H3X1 超高灵敏度检波器,单点接收	EV56 可控震源 2~130 Hz, 1 台 1 次

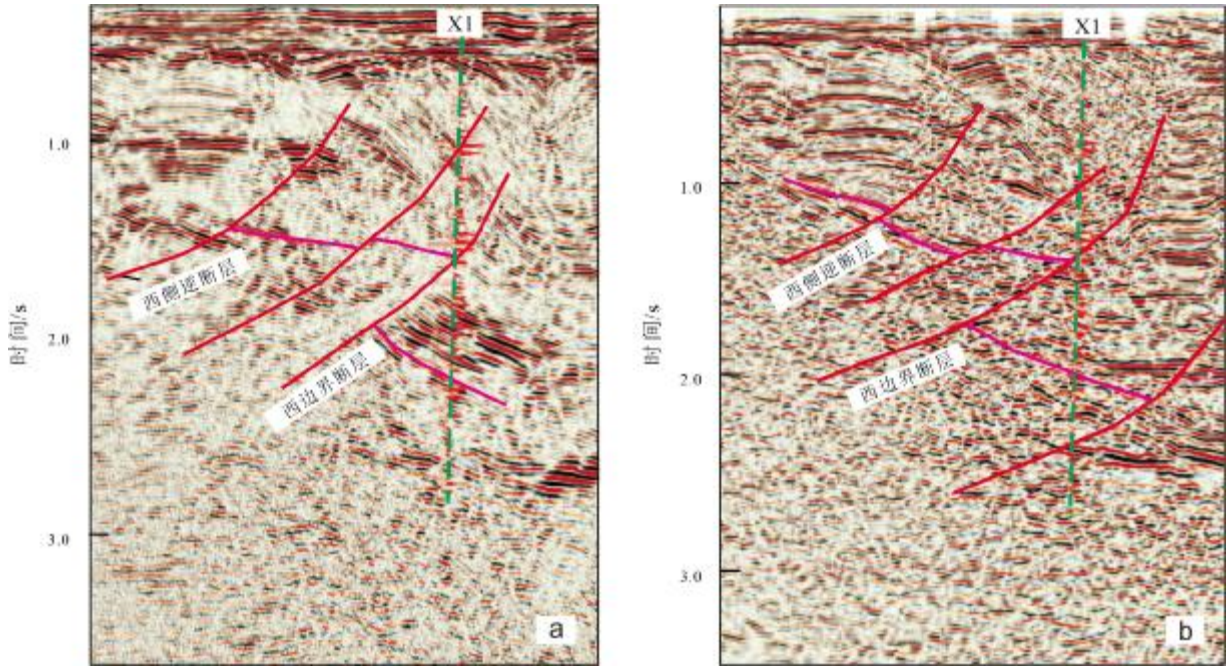


图 4 L1 线新老偏移剖面局部对比

Fig. 4 Local comparison of new and old migration profiles along Line L1

a—老三维地震剖面(old 3D seismic profile); b—新二维地震剖面(new 2D seismic profile)

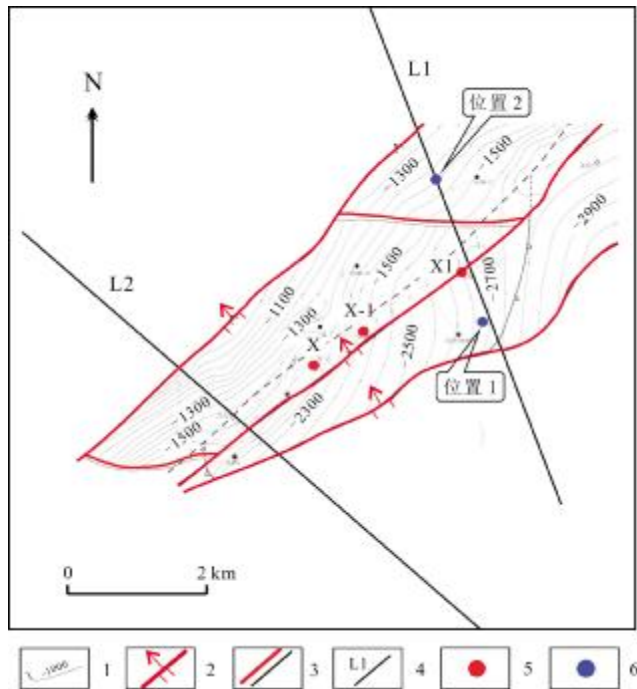


图 5 大民屯凹陷 S281 块新构造图

Fig. 5 New structure map of S281 block in Damintun sag

1—等高线(contour line); 2—逆断层(reverse fault); 3—正断层(normal fault); 4—测线及编号(survey line and number); 5—井底(bottom hole); 6—单炮位置(position of single shot)

号接收,提高成像效果. 然而考虑成本时,需要确定最大炮检距. 图 6 为 L2 线不同炮检距叠加剖面局部对比. 可以发现,浅层成像效果随着炮检距增大变化不大(白色方框);深层成像效果随着炮检距的增大,剖面信噪比增加,波组连续性变好,但当最大炮检距增加到 3 500 m 后,改善程度下降(红色方框). 因此, S281 块地震二维地震采集最大炮检距不能小于 3 500 m,与观测系统理论分析的结论基本一致.

3.2.2 覆盖次数退化分析

通过对不同覆盖次数叠加剖面对比(图 7),可以看出,随着覆盖次数的增加,红色箭头位置波组连续性变好,白色方框位置的信噪比分别为 1.75、2.5、3.0、3.5,表现为逐渐增加;当覆盖次数达到 1200 次,变化趋于平缓.

3.2.3 道距分析

图 8a 为原始采集单炮,可以看出, 12.5 m 的道距可以保证 60 Hz 以内有效信号无污染采样;图 8b 为本次二维地震采集原始单炮抽稀道距变为 25 m 后的 FK 谱,可以看出,单炮折射波和面波都出现明显假频现象(黑色椭圆区域内). 因此, S281 块地震采集道距应不小于 12.5 m.

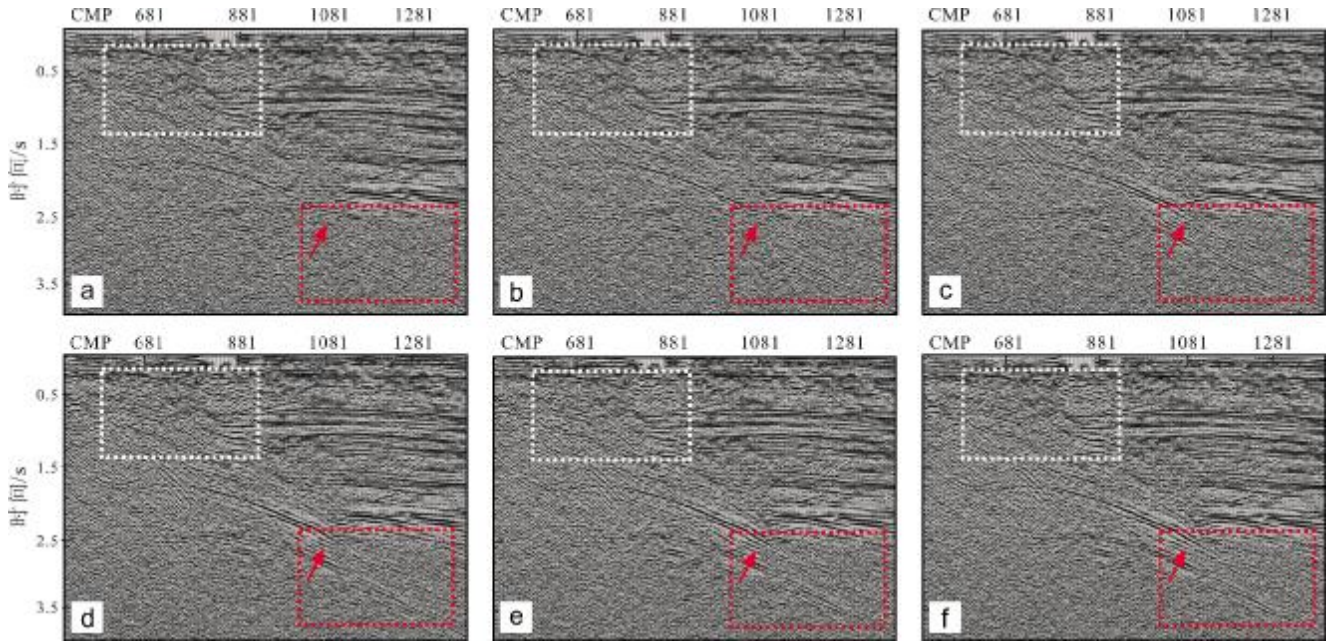


图6 L2线不同炮检距叠加剖面局部对比

Fig. 6 Local comparison of stack profiles with different offsets along line L2

炮检距(shot offset): a— 2800 m; b— 3000 m; c— 3500 m; d— 3800 m; e— 4000 m; f— 4500 m

4 结论

1) 高密度宽线二维地震采集成果落实了S281块西边界断层、西侧断层及次级断层的位置,落实了测线方向油层顶面的构造形态及有利砂体展布特征,指导了X-1井的部署,加快推进了S281块的开发。

2) 超高密度、极小面元对高陡构造和断裂刻画更清楚,可有效提高地震资料空间分辨率和保真度,是改善复杂地质目标成像的有效方法。

3) S281块复杂高陡构造的地震采集观测系统的面元边长不能大于12.5 m,最大炮检距不能小于3 500 m,覆盖次数不能小于1 200次,为区块下步地震资料采集提供了经验。

参考文献(References):

- [1] 赵邦六,董世泰,曾忠,等. 中国石油“十三五”物探技术进展及“十四五”发展方向思考[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 108-120.
Zhao B L, Dong S T, Zeng Z, et al. Geophysical prospecting technology progress of PetroChina in the 13th Five-Year Plan period and development direction consideration in the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 108-120.
- [2] 张丽艳,李昂,黄一鸣,等. 宽方位宽频带保幅处理技术在页岩油勘探中的应用[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 385-394, 365.
Zhang L Y, Li A, Huang Y M, et al. Application of wide-azimuth and

broadband amplitude preserving processing technique in shale oil exploration[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 385-394, 365.

- [3] 袁永真,方慧,裴发根,等. 松辽盆地上古生界深层系展布特征——来自综合地球物理资料的依据[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 395-403.

Yuan Y Z, Fang H, Pei F G, et al. Distribution characteristics of Upper Paleozoic deep strata series in Songliao Basin: Evidence from comprehensive geophysical data[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 395-403.

- [4] 赵邦六,董世泰,曾忠,等. 单点地震采集优势与应用[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 55-68.

Zhao B L, Dong S T, Zeng Z, et al. Advantages and application of single-point receiving in seismic acquisition [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 55-68.

- [5] 陈学强,王彦峰,吕景峰,等. 库车坳陷复杂山地震采集适用技术及效果[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(4): 806-814.

Chen X Q, Wang Y F, Lyu J F, et al. Seismic exploration technologies and applications in complex mountain areas of Kuqa depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(4): 806-814.

- [6] 丁秋红,李晓海,李文博,等. 辽宁北部秀水盆地义县组地层划分的地球物理响应特征[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 44-52, 6.

Ding Q H, Li X H, Li W B, et al. Geophysical response of the stratigraphic division of Yixian Formation in Xiushui Basin, northern Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 44-52, 6.

- [7] 王兴宇,刘艳丽,郭盈宇. 复杂区宽线地震资料处理技术及应用

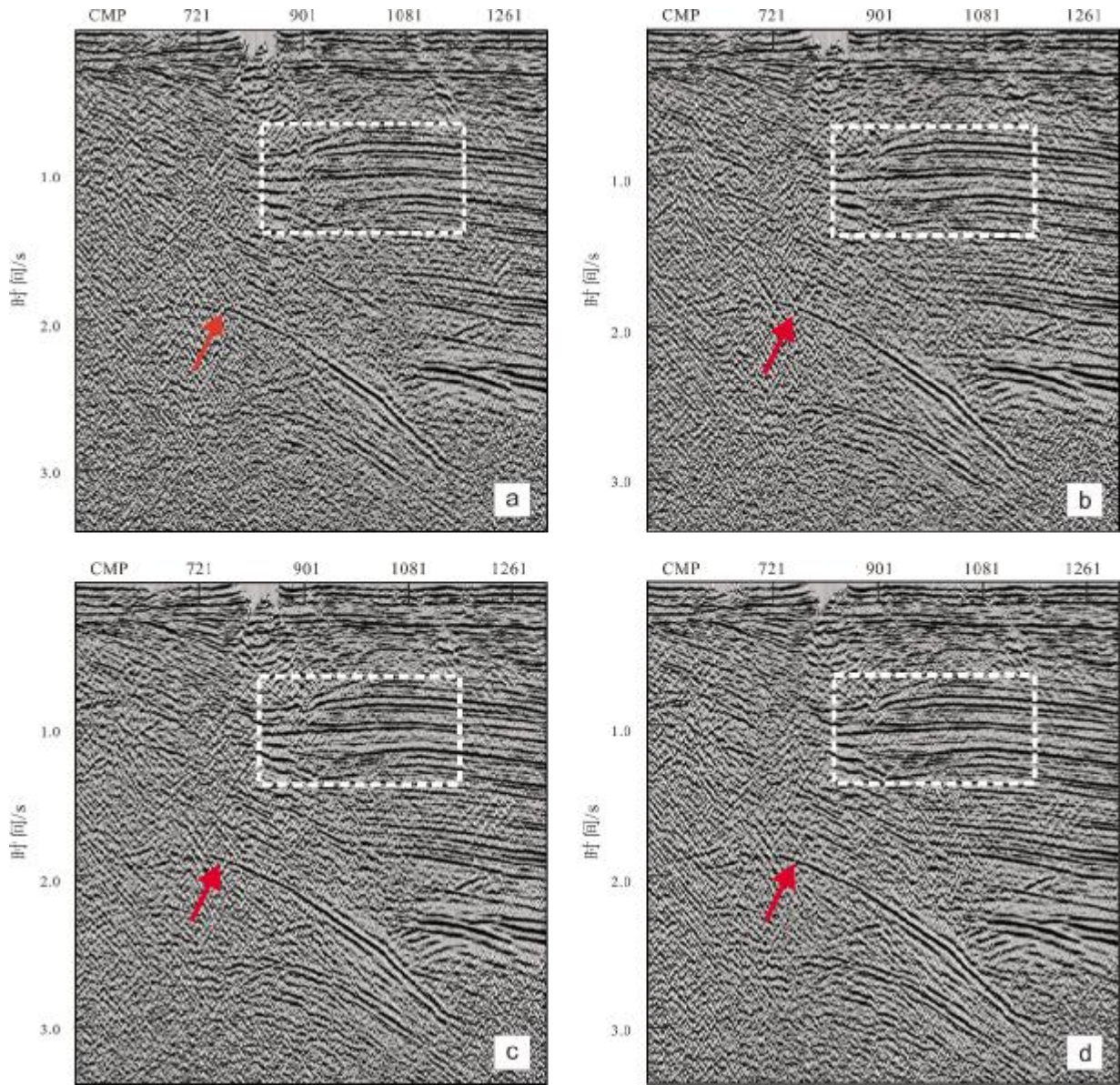


图 7 L2 线不同覆盖次数叠加剖面局部对比

Fig. 7 Local comparison of stack profiles with different coverage times along line L2

覆盖次数(coverage time): a— 600; b— 1200; c— 1800; d— 3600

[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4): 766-773.

Wang X Y, Liu Y L, Guo Y Y. Application of wide-line seismic data processing technique in complex areas[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(4): 766-773.

[8]孙月成, 李永飞, 孙守亮, 等. 火成岩覆盖区地震有效成像技术探讨及其在辽西金羊盆地油气调查中的应用[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1469-1484.

Sun Y C, Li Y F, Sun S L, et al. Effective seismic imaging technology in igneous rock coverage area and its application to oil and gas investigation in Jinyang Basin of western Liaoning[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1469-1484.

[9]陈耀, 熊强青. 二维地震勘探在页岩气勘查空白区的应用效果——

以下扬子巢湖地区五峰组-高家边组下段为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6822-6829.

Chen Y, Xiong Q Q. Application effect of 2D seismic exploration in shale gas exploration blank area: A case study of the Wufeng Formation-Gaojiabian Formation Lower-Member in Chaohu area [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6822-6829.

[10]王建民, 杨宝俊, 李占林, 等. 松辽盆地东缘域地壳结构及其地质意义: 深反射地震[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3478-3490.

Wang J M, Yang B J, Li Z L, et al. Crustal structure between the eastern margin of the Songliao Basin and its geological implication: Deep seismic reflection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(9): 3478-3490.

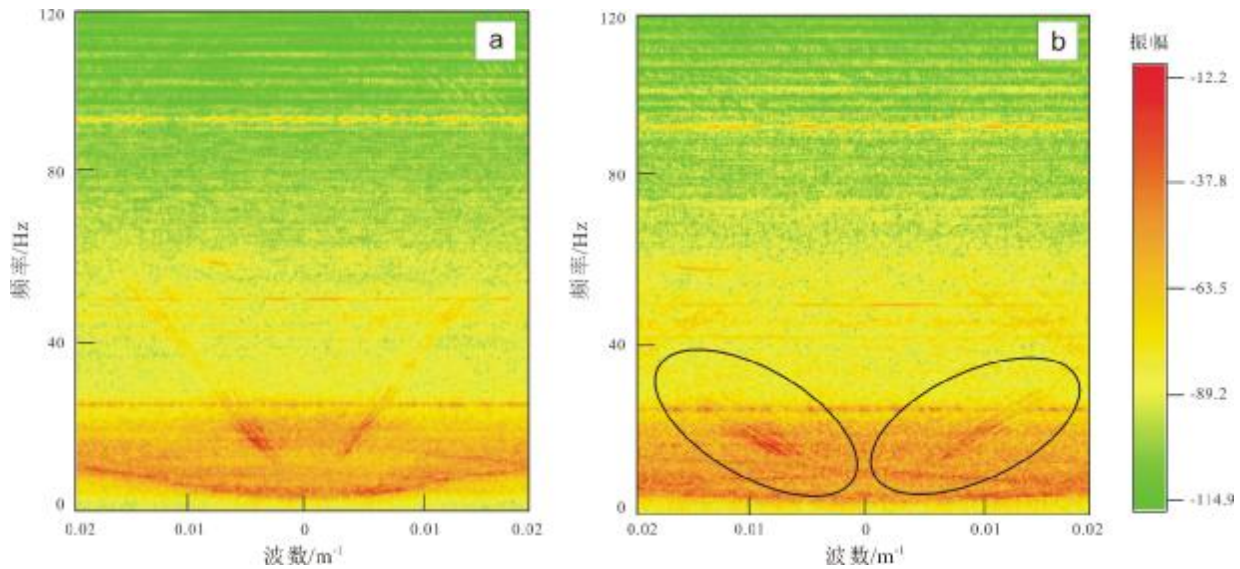


图8 原始单炮FK谱

Fig. 8 FK spectrum of original single shot

a—面元 6.25 m, 道距 12.5 m (side length of bin 6.25 m and track spacing 12.5 m); b—面元 12.5 m, 道距 25 m (side length of bin 12.5 m and track spacing 25 m)

- [11]刘建勋, 周建勇, 徐明才, 等. 地震勘查技术在喀拉通克矿区的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(3): 437-444.
Liu J X, Zhou J Y, Xu M C, et al. The application of seismic exploration technology in the Kalatongke orefield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3): 437-444.
- [12]白旭明, 熊峰, 崔宏良, 等. 高陡构造区二维地震测线观测方位探讨[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 112-117.
Bai X M, Xiong F, Cui H L, et al. Discussion on observation orientation of 2D seismic line in high-steep structural area[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 112-117.
- [13]何宝庆, 谢小碧. 宽线地震数据采集和处理的数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(3): 500-511.
He B Q, Xie X B. A numerical investigation on wide-line seismic data acquisition and processing [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 500-511.
- [14]李晓光, 刘兴周, 李金鹏, 等. 辽河拗陷大民屯凹陷沙四段湖相页岩油综合评价及勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 636-648.
Li X G, Liu X Z, Li J P, et al. Comprehensive evaluation and exploration practice of Sha 4 lacustrine shale oil in Damintun Sag, Liaohe Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 636-648.
- [15]周旭红. 大民屯凹陷西斜坡砂砾岩体储层预测技术[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(5): 54-57, 86.
Zhou X H. Reservoir prediction technology of sandstone reservoir in western slope of Damintun Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(5): 54-57, 86.
- [16]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, 59.
Cui Q H, Shang X M, Teng H H, et al. Design of a high-density three-dimensional seismic geometry and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1): 12-22, 59.
- [17]曲寿利. 面向深层复杂地质体油气勘探的地震一体化技术[J]. 石油物探, 2021, 60(6): 879-892.
Qu S L. An integrated seismic technology for oil and gas exploration in a deep complex geological body[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(6): 879-892.
- [18]肖关华, 张伟, 陈恒春, 等. 浅层地震技术在济南地下空间探测中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 96-103.
Xiao G H, Zhang W, Chen H C, et al. Application of shallow seismic reflection surveys in the exploration of urban underground space in Jinan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 96-103.
- [19]王飞, 孙亚杰, 裴金梅, 等. 高密度单点接收地震采集数据的处理方法讨论[J]. 物探与化探, 2021, 45(6): 1469-1474.
Wang F, Sun Y J, Pei J M, et al. A discussion on the processing method of high density single point seismic acquisition data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1469-1474.
- [20]董金伟, 张宏, 黄凯, 等. 无线节点采集技术在东部复杂地表区地震勘探中的应用及效果[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 1948-1955.
Dong J W, Zhang H, Huang K, et al. Application and effect of wireless node acquisition technology in seismic exploration in the eastern complex surface area[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 1948-1955.