

塔里木盆地塔北隆起YKD区块高精度三维地震采集实践

巫 骏, 黄宇飞, 王扶国, 郑 东, 杜均国, 张红宁, 刘 维, 王虹丁, 祝建军

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年1月19日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘 要

为了寻找有利接替区块, 实现快速增储上产, 围绕断裂及其控制的储层发育区在塔里木盆地塔北隆起YKD区块部署了三维地震采集。针对落实断裂组合、搞清缝洞储层的技术要求, 结合工区的自身特点, 从获取高信噪比、高分辨率地震资料的目标出发, YKD区块的高精度采集实践通过采用精细观测系统设计、优化激发接收条件以及加强干扰调查分析与控制等措施, 获得了高品质的地震资料, 为圈闭、井位研究和上产增储奠定了基础。

关键词

断裂, 缝洞, 观测系统设计, 激发, 接收

High Precision 3D Seismic Acquisition Practice in the YKD Block of Tabei Uplift, Tarim Basin

Jun Wu, Yufei Huang, Fuguo Wang, Dong Zheng, Junguo Du, Hongning Zhang, Wei Liu, Hongding Wang, Jianjun Zhu

BGP Southwest Geophysical Branch, CNPC, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 19th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

In order to find favorable replacement blocks and realize rapid reserve increase and production increase, 3D seismic acquisition was deployed in the YBD block of Tabei uplift in Tarim Basin

文章引用: 巫骏, 黄宇飞, 王扶国, 郑东, 杜均国, 张红宁, 刘维, 王虹丁, 祝建军. 塔里木盆地塔北隆起 YKD 区块高精度三维地震采集实践[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(4): 521-530. DOI: 10.12677/ag.2024.144049

around the fault and its controlled reservoir development area. In response to the technical requirements for implementing fault combinations and clarifying fracture and cave reservoirs, combined with the characteristics of the work area, and with the goal of obtaining high signal-to-noise ratio and high-resolution seismic data, the high-precision acquisition practice of YKD block has obtained high-quality seismic data through measures such as using precise observation system design, optimizing excitation and reception conditions, and strengthening interference investigation, analysis, and control. This has laid the foundation for trap, well location research, and production and storage increase.

Keywords

Fractures, Cracks and Holes, Design of Geometry, Excite, Receive

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔里木盆地塔北、塔中两大隆起以阿满过渡带相连接，塔北 - 阿满过渡带 - 塔中是整体含油气、局部富集的大油气区，目前中石油矿权内埋深小于 7500 m 的预测资源量 30 亿吨，7500 m~8000 m 的预测资源量 10 亿吨，区域勘探前景广阔。随着碳酸盐岩勘探开发对象不断丰富，从潜山型、层间型再到断控型，目前断控型探明程度最低，剩余资源量超 10 亿吨，是增储上产的主要领域。该领域位于寒武系玉尔吐斯组生烃中心之上，同时深层震旦 - 南华系裂坳体系发育，烃源岩厚度大，有利于后期油气富集。断裂控圈、控储、控藏，找到断裂就能找到油气。富满油田寒武系多期供烃，断裂破碎带控储，走滑断裂原地垂向运聚，断裂带分段富集，早期充油，晚期注气，断控缝洞体内油气富集[1]-[6]。

三维部署围绕断裂及其控制的储层发育区寻找有利接替区块，扩大富满油田奥陶系富油气区，实现快速增储上产。应用 2020 年已采集邻区三维资料，3 口井已获油气突破。本次部署 YKD 区块紧邻 2020 年采集的区块东部，工区内未采集三维，二维地震资料显示部署区内走滑断裂发育，但断面位置不清楚，串珠成像不聚焦，需三维资料进一步落实。

本次地震采集的主要目的层为奥陶系，兼探寒武系，地质任务主要包括：1) 精细刻画 I 级、II 级走滑断裂，识别 III 级走滑断裂，落实断裂组合样式；2) 提高奥陶系一间房组 - 鹰山组缝洞体成像精度，搞清缝洞型储层发育情况；3) 为圈闭、井位研究和增储上产奠定基础，为富满油田向东扩展提供高品质三维资料；4) 落实寒武 - 前寒武系深层结构特征，为台缘油气勘探提供高品质资料。

为了提高成像精度，保证主要目的层段获得高品质地震资料，本项目合理设计了采集方案，并进一步优化采集参数，优选激发、接收条件，努力减少野外各种噪音干扰，提高地震资料信噪比和分辨率，为奥陶系各级别断裂识别、油气藏精确描述和寒武 - 前寒武系深层结构落实提供了保障。

2. 部署区地震地质特征

2.1. 表层地震地质条件

整体上，富满油田地区地表自北向南由湿地、浮土过渡到沙漠，地表条件逐渐变差。本次 YKD 三维区地表南部为沙漠区、北部为浮土区，激发范围沙漠区占 67.20%，浮土区占 34.10%；接收范围沙漠区占

64.06%，浮土区占 37.48%。YKD 三维与邻区三维地表高程相似，整体较为平缓，海拔在 920 m~950 m 之间，地表西高东低，南部相对高差 5 m~15 m，北部相对高差 2~8 m。

工区近地表结构特征与地表类型相关性高，沙漠区相比浮土区近地表介质更加疏松，表层速度低。整体近地表结构可分为两层结构(图 1)，高速顶界面为潜水面，速度在 1600 m/s~1800 m/s，变化比较平缓，呈西高东低趋势。低速厚度范围为 0.9 m~28 m，其中大于 10 m 占 48.8%，小于 10 m 占 51.2%，平均厚度 8.9 m。

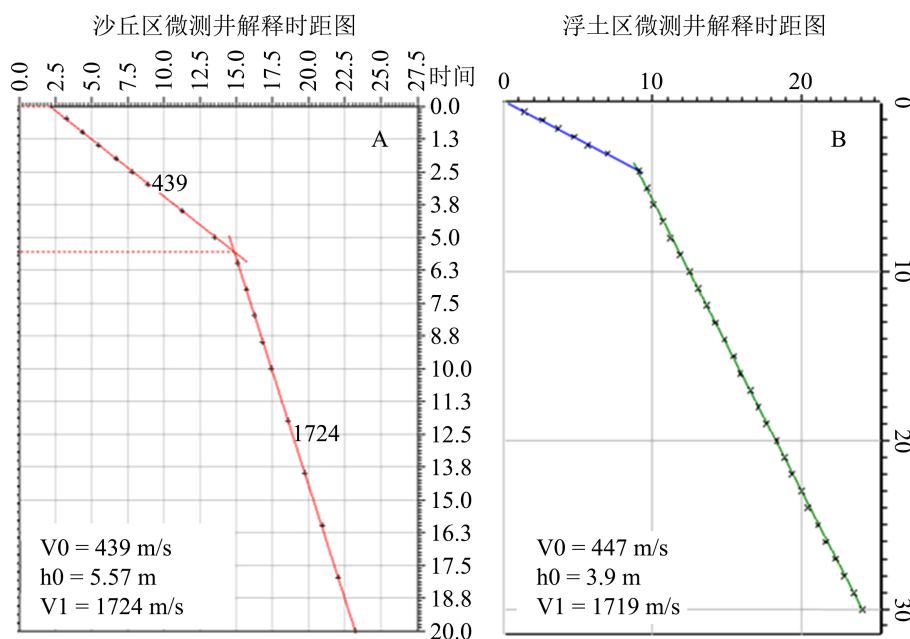


Figure 1. Time-distance graph of micrologs interpretation

图 1. 微测井解释时距图

2.2. 深层地震地质条件

YKD 三维位于塔里木盆地北部坳陷阿满过渡带东部、满西低梁北部。主要目的层奥陶系构造特点表现为西北浅、东南深的斜坡特征，埋深约 8300 m~9400 m，与邻区相比埋深加深约 400 m。

经钻探证实，本区地层发育较全，自上而下为新生界第四系、上第三系、下第三系、中生界白垩系、侏罗系、三叠系，古生界二叠系、石炭系、志留系、奥陶系，泥盆系缺失。

部署区奥陶系油藏具有整体含油、局部富集的特征，断裂对埋藏岩溶区油气富集具有明显的控制作用，断裂附近岩溶储层发育、缝洞连通性好，油气易沿断裂带整体富集。

奥陶系一间房组(砂屑灰岩)顶界面为中强反射(T_{O3t})，地震剖面上表现为低频、连续的强波峰；奥陶系内幕反射较弱，一间房组顶(T_{O3t})至奥陶底(T_H)在地震剖面上的反射时间在 4.5 s~5.5 s 之间。奥陶系油藏的储层类型以裂缝岩溶洞穴为主，北东向走滑断裂较为发育，走滑断裂体系特征清楚。

3. 资料分析及技术对策

3.1. 二三维老资料分析

1) 干扰波特征分析

工区主要干扰为面波、浅层折射波、随机干扰波等。面波形态特征主要与地表有关，面波干扰能量

强, 在原始记录上分布较集中, 对浅、中、深层都有影响, 频率相对较低, 主要在 15 Hz 以内。折射波能量相对较强, 频率范围较宽, 衰减相对较慢。主要干扰波特征参数见表 1。

Table 1. Main interference wave characteristic parameters in the work area

表 1. 工区主要干扰波特征参数

a、近南北方向				b、近东西方向			
噪音类型	视速度(m/s)	频率(Hz)	视波长(m)	噪音类型	视速度(m/s)	频率(Hz)	视波长(m)
面波I	420	3~6	70~140	面波I	410	3~6	68~136
面波II	615	2~5	123~307	面波II	696	3~6	116~232
折射I	1788	15~28	65~119	折射I	1812	12~28	64~151
折射II	2873	9~32	89~319	折射II	2840	7~20	142~405

2) 工区原始资料分析

工区内 2002 年采集的单线二维观测系统为 5445-15-30-15-5445, 覆盖次数为 60 次, 激发采用 1 口 \times 潜水面下 5 m \times 4 kg~14 kg, 接收采用 2 串面积组合(1 串 12 个)。在近东西向某测线选择 4 个位置分别进行单炮分析。

从单炮记录看, 工区内单炮品质相对较好, 目的层可见有效反射。二维资料单炮信噪比较高, 石炭系 20 Hz~40 Hz 优势频段有效反射清晰, 奥陶系 40 Hz 内可见有效信号(图 2); 优势频段信噪比东西部基本一致(图 3)。

选取邻区三维单炮, 从南向北依次选取 4 个位置分别进行单炮分析, 从单炮记录看, 工区内单炮品质相对较好, 目的层有效反射较清晰, 优势频段信噪比南北部基本一致。

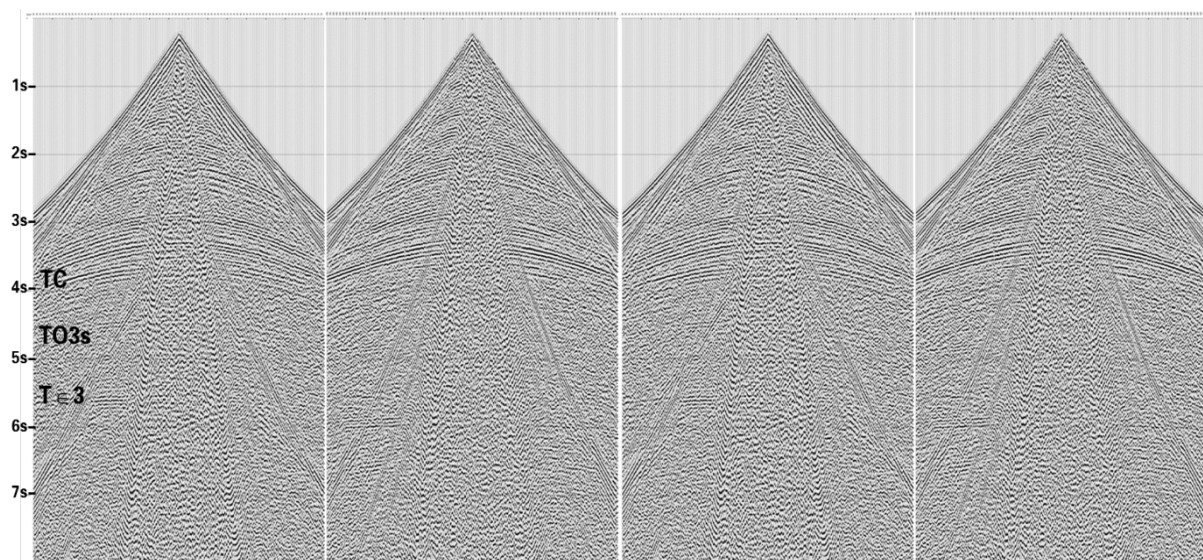


Figure 2. AGC Display of single shot records for 2D survey line

图 2. 二维测线单炮 AGC 显示

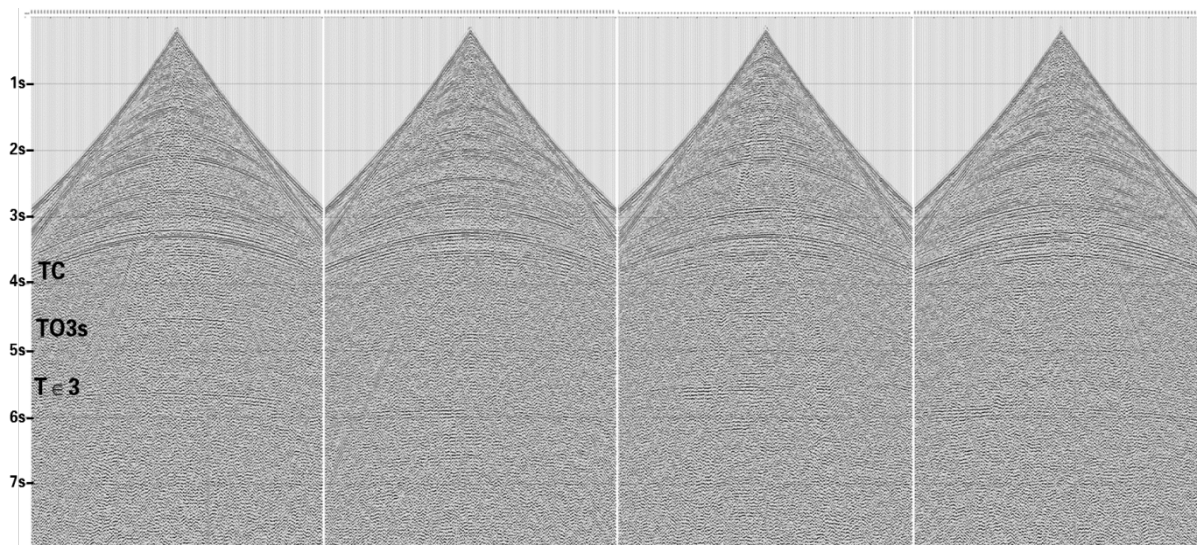


Figure 3. Typical single shot records of 2D survey line (BP20~40 Hz)

图 3. 二维测线典型单炮记录(BP20~40 Hz)

3) 工区剖面品质分析

从工区内不同测线剖面看, 部署区资料品质与邻区整体差别不大, 石炭系以上地层为平缓连续反射, 石炭系以下地层向东南逐步加深, 二叠系火成岩相对稳定, 横向变化较小, 奥陶系顶为强反射界面, 内幕反射弱。

4) 邻区三维资料品质分析

2012 年以来, 针对塔北南缘奥陶系开展了多块三维勘探, 采集方法随勘探目标和地震地质条件的变化逐步强化, 促进了富满油田的持续突破。富满油田地震采集技术日趋成熟, 2017 年以前的采集观测系统通过减小接收线距、增加接收线数, 提高覆盖次数, 从而提高炮道密度; 2017 年以后通过缩小面元、减小线距、增加接收线数, 进一步提高炮道密度。2017 年及以后激发参数全部采用 12 kg 高密硝铵, 接收参数主要采用 2 串组合。

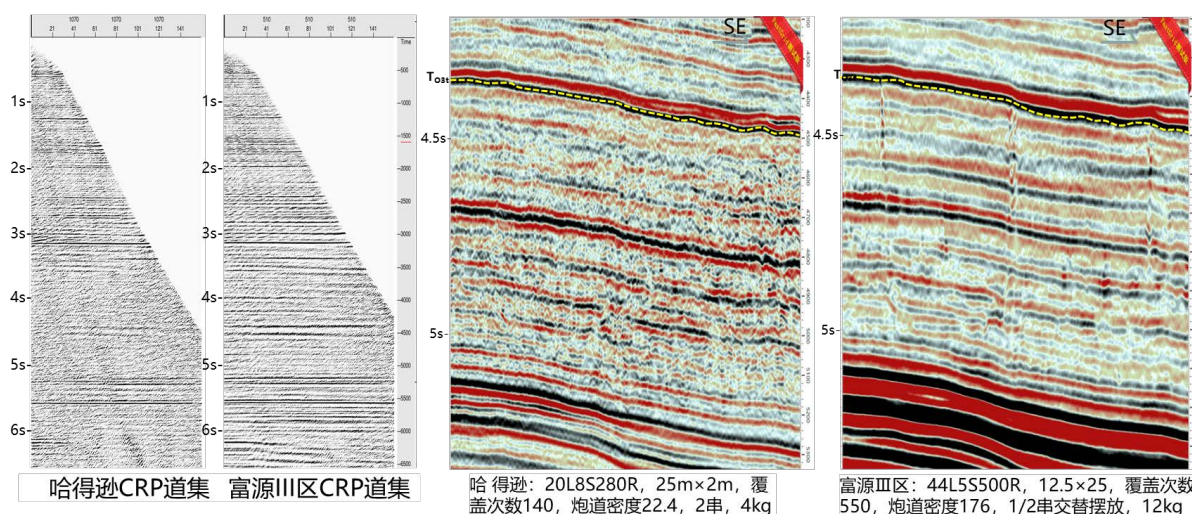


Figure 4. Gathers and prestack time migration profiles of surrounding 3D work areas

图 4. 周边三维道集和叠前时间偏移剖面

图4为2012年哈德逊三维与2020年采集的富源III区三维满覆盖相接区叠前时间偏移剖面 and 道集对比。从道集上看小线距、小面元(小道距)、高覆盖、宽方位三维优势明显,奥陶系内幕信噪比更高。从剖面来看,富源III区道集信噪比更高,偏移剖面成像改善明显,串珠更加收敛,断裂更加清晰。富源III区资料平面相干属性显示走滑断裂清晰可见,利用该资料部署井位获得高产。剖面上看,YK三维覆盖次数低、纵横比小,基本可识别II级断裂,不能满足断裂细致刻画需求;平面上看,富源III区采用高炮道密度、较小面元、适中药量,断裂和储层刻画精度更高。

3.2. 技术难点及技术对策

根据工区资料特点和深层特征,结合地质任务和需求,本次采集主要存在以下技术难点:1)奥陶系内幕反射能量弱,对激发参数选择、检波器埋置质量及吸收衰减调查要求高;2)奥陶系内幕非均质强,对面元属性的均匀性要求高;3)走滑断裂与缝洞储层精细刻画难,需要高分辨率地震资料。

围绕提高走滑断裂和缝洞储层识别精度,借鉴富源III区三维采集技术经验,结合工区地质目标需求,开展针对性设计:1)针对奥陶系内幕反射能量弱,通过较高覆盖、潜水面下激发+组合接收、精细表层调查,提高奥陶系内幕信噪比;2)针对奥陶系内幕非均质强,通过较小线距、宽方位采集,提高面元属性的均匀性;3)针对走滑断裂与缝洞储层精细刻画难,通过较小面元、较小线距、较宽方位,提高分辨率,满足断裂、缝洞储层刻画需求。

4. 采集技术方案设计

4.1. 观测系统参数论证

地震采集质量直接影响数据的处理结果和解释精度[7]。目前,观测系统设计大多是先通过采集参数论证提出几套候选方案,然后进行论证分析确定最佳的采集方案[8][9][10],论证的参数主要包括满足面元大小、覆盖次数、最大炮检距、最大非纵距和接收线距等[11][12][13][14][15]。

基于参数论证的方法设计要求论证点选取要有代表性,能够控制全区构造特征的原则,根据本区构造特点、目的层埋深,在不同部位选择5个代表性论证点,先得到工区的地球物理参数。然后开展观测系统参数论证,依次论证了面元大小、覆盖次数、最大炮检距、接收线距和最大非纵距、观测方向、观测系统类型等。下面以面元大小和最大炮检距的论证为例加以说明。

1) 面元论证

面元尺寸一般需要考虑满足横向分辨率要求和满足反射波、绕射波不产生空间假频的要求。在低信噪比地区,当工区存在较强的相干噪音时,还需满足干扰波不出现空间假频的要求。除此之外,从实际资料效果进行分析,根据工区内以往采集单炮规则干扰波特征,满足对折射波、多次折射的充分采样的需要,面元尺寸应不大于17 m;为满足面波充分采样,面元30 m单炮面波频散严重,折叠频率18 Hz,干扰有效信号,面元尺寸应不大于20 m(图5)。通过二维模型正演,较小面元采集数据的洞穴间横向分辨率更高(图6)。

2) 最大炮检距的选择

最大炮检距的选择主要从4个方面进行考虑,一是保证主要目的层的反射系数稳定,避免因入射角过大而引起的波形畸变和寄生折射;二是要减小动校拉伸畸变,一般要求动校拉伸畸变不超过12.5%;三是保证速度分析精度,一般保证速度分析误差不大于6%;四是从速度谱、大道集和限偏移距叠加剖面等实际资料分析来选择最大炮检距。

根据地质模型照明能量分析,最大偏移距8000 m以下照明能量增长较快,最大偏移距大于8000 m后,目的层能量增长缓慢,因此最大炮检距应达到8000 m左右(图7)。

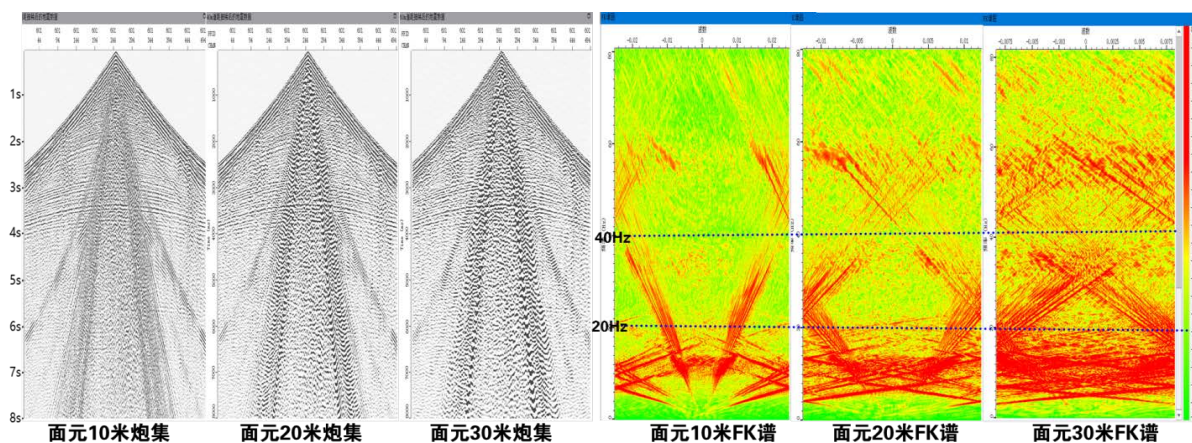


Figure 5. Comparison of original single shot and FK spectra with different bins
图 5. 不同面元原始单炮和 FK 谱对比

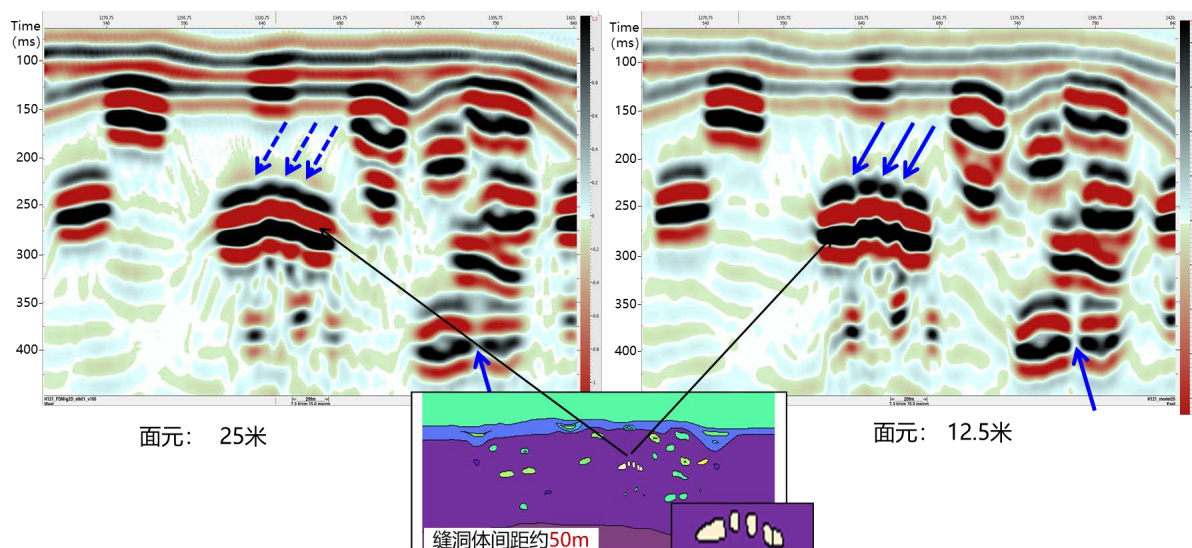


Figure 6. Analysis of the effect of different bins on 2D forward modeling of fractures and caves
图 6. 不同面元二维正演缝洞体效果分析

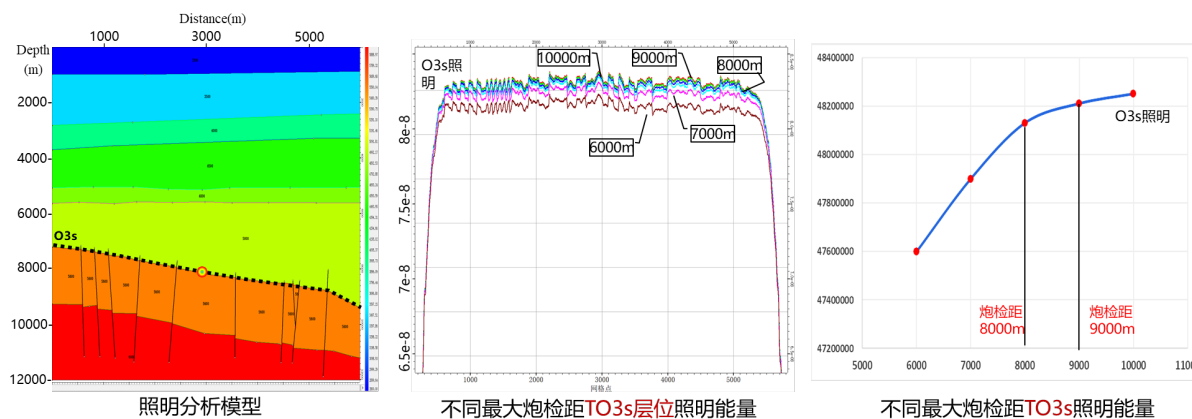


Figure 7. Energy analysis of geological model illumination
图 7. 地质模型照明能量分析

4.2. 激发参数分析

1) 激发类型的选择分析

工区地表分为浮土、沙丘, 低降速层厚度较薄, 高速顶界面为潜水面, 趋势平缓。本工区井炮易实现潜水面以下激发, 激发效果明显优于可控震源, 本次采集采用激发方式为井炮激发。

2) 井炮激发参数的选择分析

邻区相似地表条件以往开展过大量激发接收试验, 该区激发接收方法成熟, 富源 III 区、富满油田 II 区三维均采用了这些成熟的激发接收方法, 取得了较好的效果, 推荐该区采用 12 kg 药量激发。

4.3. 接收参数分析

1) 仪器参数的选择

地震采集仪器应具备 24 位 A/D 转换器、大动态范围, 提高对信号的接收能力和对信号的高保真度, 降低等效输入噪音、漂移、谐波畸变、串音等指标, 具备良好的道间振幅和相位的一致性性能。高分辨率采集主要考虑选择较大动态范围的仪器, 以便能够将来自深层的高频弱反射和低频强反射信息同时记录下来。本次采集采用 G3i 或 SerCEL428XL 数字地震仪均可满足采集要求。

根据采样定理, 为保证对高频信号 A/D 转化后高频信息的可恢复性, 对应的尼奎斯特频率的 0.8 倍应大于需保护的最高频率。在考虑仪器前放增益时, 借鉴以往实际测试结果, 地震仪器入口噪声水平当增益愈大时, 固有噪声换算到入口处的水平是降低的, 入口噪声水平数值的降低对于进到入口处的高频弱反射信号恰恰是有利的。因此, 在本工区施工中, 应采用较大的仪器前放增益 12 dB。另外, 根据采样定理, 为保证对高频信号 A/D 转化后, 高频信息的可恢复性, 本次采集采样间隔设计为 1 ms。

记录长度应满足最深目的层叠前偏移绕射能量归位需求。通过对以往地震剖面分析, 工区奥陶系内幕最大反射时间超过 5 s, 增加记录时间将使得绕射信息更加丰富, 可以改善成像效果。同时兼顾工区寒武系成像, 建议记录长度 10 s。

2) 检波器组合参数

参考邻区的接收参数, 同时考虑奥陶系目的层埋藏较深, 内幕反射较弱, 拟定本工区仍然采用 2 串组合接收。

组合参数设计应考虑保护有效波和有效识别干扰波的要求。取目的层最小视速度 4600 m/s, 保护 50 Hz 高频信号, 组合基距不应大于 40.5 m。根据本区干扰波特点, 面波视波长较长(约为 62.5 m), 放大组合基距, 必然压制高频有效波, 因此不宜采用大组合基距。再考虑组内距应大于随机干扰相关半径(3.5 m~5 m), 因此建议组内距不小于 3.5 m。

同一道内的组合高差大小必须以保护所要求的最高频率为原则, 引起的时差应小于 1/4 周期, 通过理论计算, 组合高差应不大于 2 m。

5. 应用效果分析

本轮三维采集通过采用小面元、宽方位、高密度、高覆盖次数观测系统, 配套精细表层结构调查、精细干扰调查分析与控制以及动态井深激发、检波器组合接收等, 确保了资料品质, 获得了高信噪比、高分辨率的地震资料。

从图 8 新老资料的对比可以看出, 本轮三维资料与二维老成果资料相比, 资料成像品质明显提高。本轮现场处理成果剖面成像质量较好, 从整体上看, 浅中深层能量适中, 信息丰富, 信噪比较高, 连续性较好, 易于追踪; 目的层断裂特征清晰明显, 易于识别。

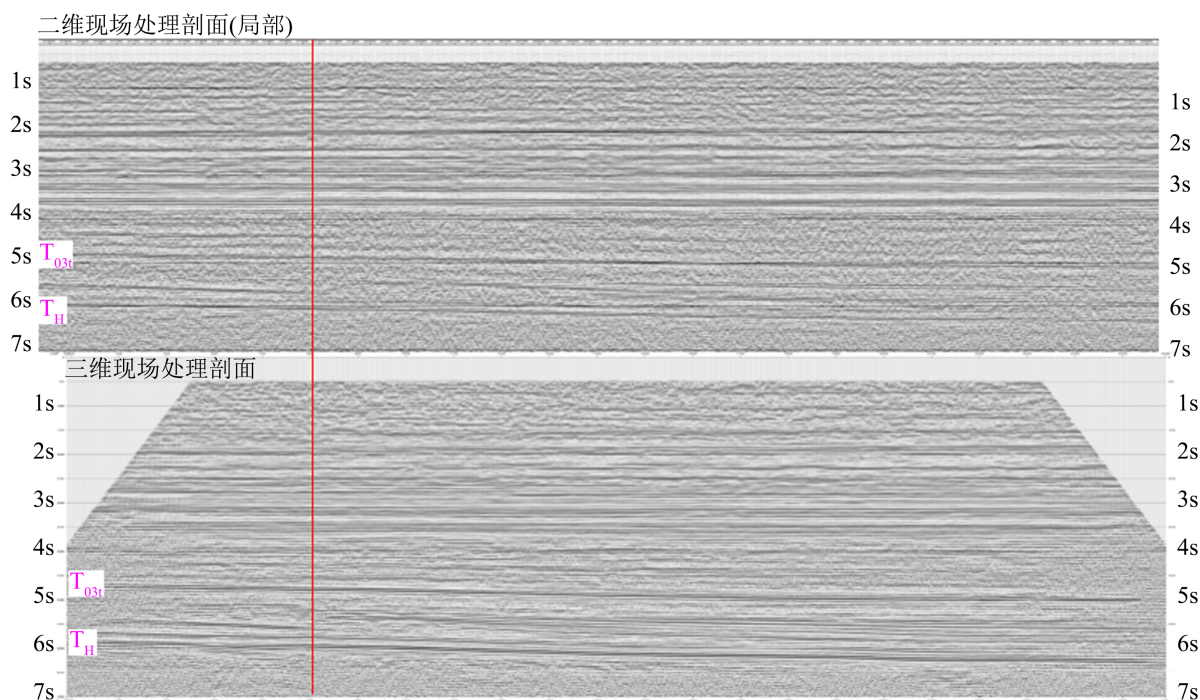


Figure 8. Comparison of new and old profile

图 8. 新(下)老(下)剖面对比

6. 结论

塔里木盆地塔北隆起 YKD 三维项目通过高精度地震资料采集,特别是通过精细的观测系统设计和激发、接收条件优化等措施,提高了奥陶系一间房组 - 鹰山组缝洞体成像精度,提高了地震资料的信噪比和分辨率,提供了高品质的三维地震资料,为奥陶系各级别断裂识别、油气藏精细描述和寒武 - 前寒武系深层结构落实提供保障,为圈闭、井位研究和上产增储奠定了基础。

致 谢

本论文是塔里木盆地塔北隆起 YKD 三维地震采集项目部分成果的展示,衷心感谢参与该项目的各位同事!

参考文献

- [1] 田军, 玉清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 272-282.
- [2] 江同文, 昌伦杰, 邓兴梁, 等. 断控碳酸盐岩油气藏开发地质认识与评价技术: 以塔里木盆地为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 1-9.
- [3] 倪新锋, 等. 塔里木盆地轮南地区深层寒武系台缘带新认识及盐下勘探区带[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 289-302.
- [4] 韩剑发, 张海祖, 于红枫, 等. 塔中隆起海相碳酸盐岩大型凝析气田成藏特征与勘探[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 769-782.
- [5] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
- [6] 常媛, 贾鹏飞. 塔里木盆地塔中地区连续型碳酸盐岩油气藏地质特征且形成原因[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(2): 11-15.
- [7] 李伟波, 胡永贵, 张少华. 地震采集观测系统的构建与优选[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 845-848.

-
- [8] 刘振宽, 王成, 赵福海. 高精度三维地震技术及其在松辽盆地北部致密气勘探中的应用[C]//中国石油学会石油物探专业委员会(SPG), 国际勘探地球物理学家学会(SEG), SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论文集. 北京: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2020: 1310-1313.
- [9] Wu, J., Chen, J., Yang, L., Liu, P., Wang, B., Liu, W., Li, Y. and Zhang, X. (2021) Application of 3D Acquisition Design Technology in HCX Gas Storage Project. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **9**, 176-181. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.95013>
- [10] Wu, J., Li, S.-Q., Yang, L., *et al.* (2022) Application of Geometry Optimization Technology of Complex Obstacles in QLB Area of Sichuan Basin. In: Lin, J., Ed., *Proceedings of International Field Exploration and Development Conference 2021*, Springer, Singapore, 3076-3083. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2149-0_286
- [11] 尹成, 吕公河, 田继东, 等. 三维观测系统属性分析与优化设计[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 495-509.
- [12] 巫骏, 张鹏, 王博涛, 等. 高精度三维地震采集技术在 YX 区块页岩气勘探中的应用[C]//第十一届全国天然气藏高效开发技术研讨会论文集. 北京: 中国石油大学, 2021: 153-156.
- [13] 马义忠, 魏伟, 孙伟佳, 等. 南阳凹陷高精度三维地震采集观测系统设计[J]. 石油物探, 2008, 47(5): 498-504.
- [14] 巫骏, 赵容容, 黎书琴, 等. 观测系统优化技术在四川盆地 M & L 储气库地震勘探中的应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 12(11): 1552-1558.
- [15] 张军华. 三维地震资料采集中观测系统设计探讨[J]. 能源技术与管理, 2017, 42(6): 185-199.