

川西北深层地震勘探采集关键技术及应用效果

李一苇, 潘俊吉, 杨柳, 王晓阳, 李成毅, 吴增友, 黎书琴, 巫骏*

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: 2025年1月15日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

川西北地区位于川北古中坳陷低缓构造区, 纵向上发育多套含油气层位, 是深层-超深层海相勘探有利区。为提高川西北地区深层资料信噪比和分辨率, 查清深层地腹地质构造位置和形态, 促进勘探工作的顺利进行, 通过应用深层地震勘探三维观测系统关键参数优选技术、激发参数优选技术和山地地震野外资料质量自动评价技术, 大力推进了采集技术进步与施工作业能力升级, 推动了四川盆地新区、新领域的天然气勘探历程。

关键词

川西北, 深层-超深层, 观测系统优化设计, 拓频激发技术, 自动评价技术

Key Technologies and Application Effects of Deep Seismic Exploration and Acquisition in Northwest Sichuan

Yiwei Li, Junji Pan, Liu Yang, Xiaoyang Wang, Chengyi Li, Zengyou Wu, Shuqin Li, Jun Wu*

Southwest Geophysical Branch, CNPC BGP Inc., Chengdu Sichuan

Received: Jan. 15th, 2025; accepted: Apr. 18th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

Northwest Sichuan is located in the low structural area of Paleo-middle depression of North Sichuan, and there are many sets of oil-bearing and gas-bearing horizons in the vertical direction, which is a favorable area for deep and ultra-deep Marine facies exploration. In order to improve the signal-to-noise ratio and resolution of the deep data in northwest Sichuan, clarify the position and morphology of the deep core tectonic structure, and promote the smooth progress of the exploration work,

*通讯作者。

文章引用: 李一苇, 潘俊吉, 杨柳, 王晓阳, 李成毅, 吴增友, 黎书琴, 巫骏. 川西北深层地震勘探采集关键技术及应用效果[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(4): 586-597. DOI: 10.12677/ag.2025.154058

the design technology of wide azimuth, long arrangement, high-density 3D geometries, and the optimized excitation technology based on lithology recognition and Classification of altitude for explosive design, as well as the automatic evaluation technology for mountain seismic field data quality, have vigorously promoted the progress of acquisition technology and the upgrading of construction capabilities, and promoted the natural gas exploration process in new areas and new fields of the Sichuan Basin.

Keywords

Northwest Sichuan, Deep and Ultra-Deep, Optimal Seismic Geometry Design, Extended Frequency Excitation Technique, Automatic Evaluation Techniques

Copyright © 2025 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

陆上含油气沉积盆地深层-超深层领域已经成为重要勘探领域之一[1]-[5]。我国拥有丰富的油气资源分布在深层,塔里木盆地奥陶系[6][7]、四川盆地震旦系、寒武系、石炭系和二叠系[8]、准噶尔盆地石炭系[9]、松辽盆地白垩系[10]等深层油气勘探均有重大发现和突破,是增储上产的主力军。

深层钻井高风险、高成本的特点决定了地球物理勘探技术是探测深部构造圈闭油气藏的重要手段[11],通过地震资料对深层目标的位置、规模及储层物性等进行预测至关重要。但目前深层地震勘探面临四大问题[12]:①地震波传播距离长,信号能量损耗大;②地震波高频成分损耗严重,不利于分辨率提高;③地震波传播路径复杂,不利于准确偏移归位;④勘探目标复杂、精度要求高。因此,针对深层的诸多问题,首先应从理论和实际出发,深入研究地震资料采集技术,从根本提升原始资料品质,从而提高深层勘探精度。本文以四川盆地西北部的深层勘探为例,讨论深层地震勘探采集关键技术及其应用效果,以期为后续四川盆地深层油气勘探提供依据。

2. 勘探难点及技术思路

川西北地区位于川北古中坳陷低缓构造区,纵向上从浅至深发育沙溪庙组河道砂体、须家河组三角洲砂体、长兴组生物礁滩、茅口组白云岩滩体以及灯影组台缘带丘滩体[13]-[17],圈闭类型多,是油气勘探有利区。

其下二叠统埋深在 6500 m 左右,寒武系埋深则达到 8000 m 左右,属于深层-超深层地层[18]。多数以往的三维资料受限于当时的勘探目标、采集参数和技术设备,地震资料不能满足深层-超深层的构造、圈闭和地质层位的精细刻画和精确识别,故需设计更有效观测系统,提高储层预测精度。

川西北地区近地表条件复杂,大面积出露白垩系地层,频见含砾砂岩、粗砂岩,导致激发能量散失极快,激发效果差,激发频带窄,50 Hz~100 Hz 分频滤波难见深层目的层有效反射。因此,采集设计需充分考虑拓宽单炮有效频带。同时,川西北地区的北部进入龙门山山前带,连续穿越垂直高差 80 m 以上的陡崖,地形险峻,为采集施工增加难度。

基于上述问题和难点,围绕超深层地震成像,通过应用宽方位、长排列、高密度三维观测系统设计技术、基于高精度遥感影像的井炮智能布设技术、基于岩性识别的井深设计和分海拔药量设计的优选激发技术和山地地震野外资料质量自动评价技术,实现对超深弱信号地震波场“充分、均匀、连续、宽频”

采样, 拓展资料频宽, 提升弱信号能量, 充分获取地下目标有效信息, 满足超深层精确成像需求。

3. 关键技术

3.1. 宽方位、长排列、高密度三维观测系统设计技术

川西北地区的三维地震采集面元选择经历了大面元(25 m × 25 m)向小面元(20 m × 20 m)的过渡, 勘探目标从仅仅针对浅层致密气到浅、中、深层兼顾, 设计思路紧紧围绕勘探目标, 使地震资料品质逐步提高。面向浅、中、深层目标的三维观测系统优化设计技术是为了统筹兼顾浅、中、深层目的层成像效果, 改善深层-超深层目的层成像精度和分辨率。

因此, 一方面可利用区内二维测线建立的正演速度模型(图 1), 通过对正演数据的处理、分析开展观测系统参数优选, 另一方面从实际三维资料的处理分析来优选三维观测系统关键参数, 主要针对面元、炮检距、覆盖次数等观测系统关键参数, 最终指导设计能满足超深层高精度地震成像的宽方位、长排列、高密度的三维观测系统方案。

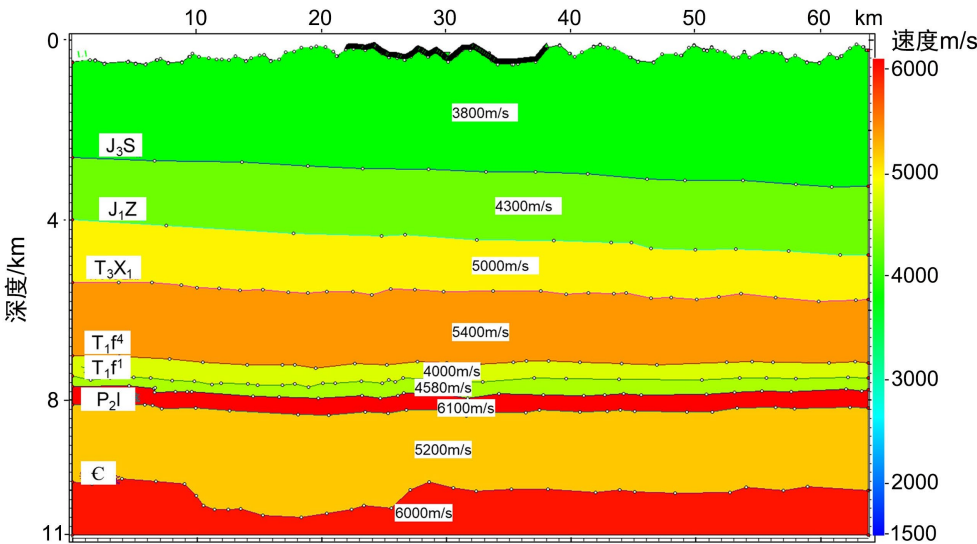


Figure 1. Forward Modeling of Velocity in CX-JG
图 1. CX-JG 地区正演速度模型

图 2 为面向川西北地区多层系立体勘探三维观测系统关键参数优选流程[1]: ① 以目的层作为成像效果评价区; ② 针对观测系统关键参数设计正演模拟方案 and 实际资料分析方案; ③ 根据方案重构三维数据体, 并开展面元、覆盖次数、最大炮检距和接收线距等关键参数的论证分析, 以及对采用不同方案的数据体进行叠加和叠前偏移处理成像; ④ 用定性和定量两种方式分析与评价地质目标成像效果, 进而确定最优的观测系统关键参数; ⑤ 指导设计经济有效的三维地震观测系统方案

3.1.1. 面元

面元尺寸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, 通过确定面元尺寸可进一步确定炮间距和道间距。合理选择面元即可减少采集费用又可以限制假频干扰, 提高成像质量和地震资料分辨率[19]。面元大小取决于: ① 目标尺度; ② 纵、横向分辨率; ③ 不出现空间假频; ④ 与邻区拼接情况。

利用正演单炮和川西北地区实际二维单炮资料及其 F-K 谱进行面元大小论证。图 3 为不同面元尺寸

正演单炮及其 F-K 谱，当面元达到 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 时，F-K 谱显示主频 35 Hz 以上会产生较为严重的假频现象。实际二维资料不同面元尺寸的单炮及 F-K 谱显示(图 4)，面元大于 20 m 时，噪声的线性特征逐渐变弱，混频现象更为严重，不利于干扰波充分采样和信噪分离。再综合考虑目标尺度，纵向分辨率、横向分辨率以及与邻区拼接等因素，推荐采用 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 面元尺寸。

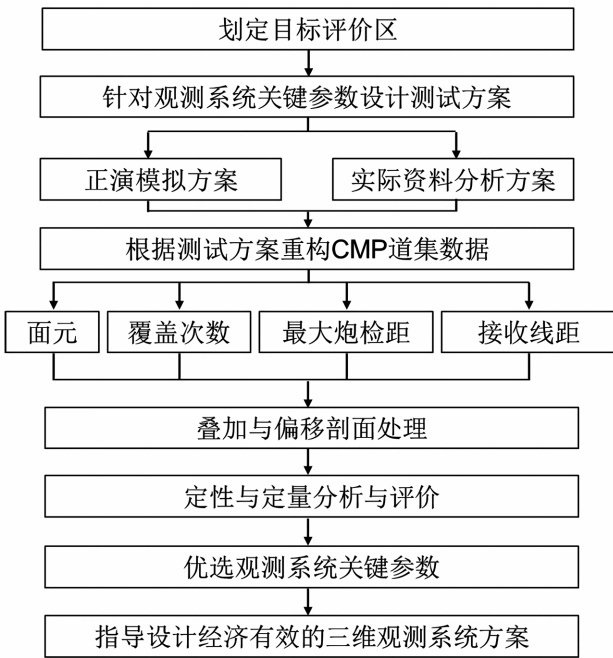
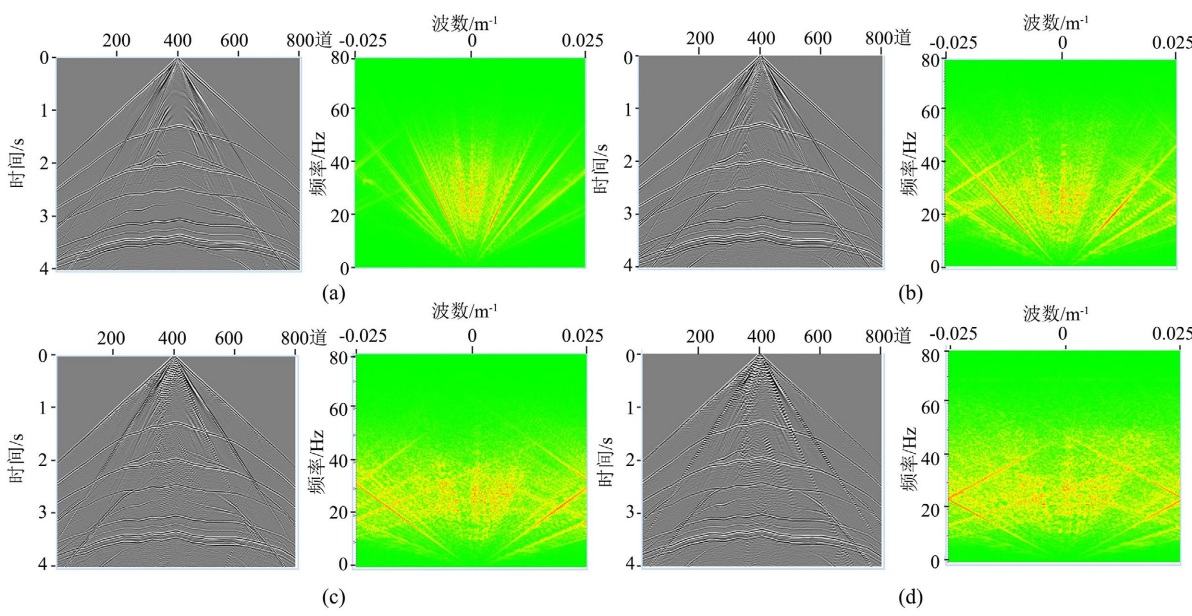
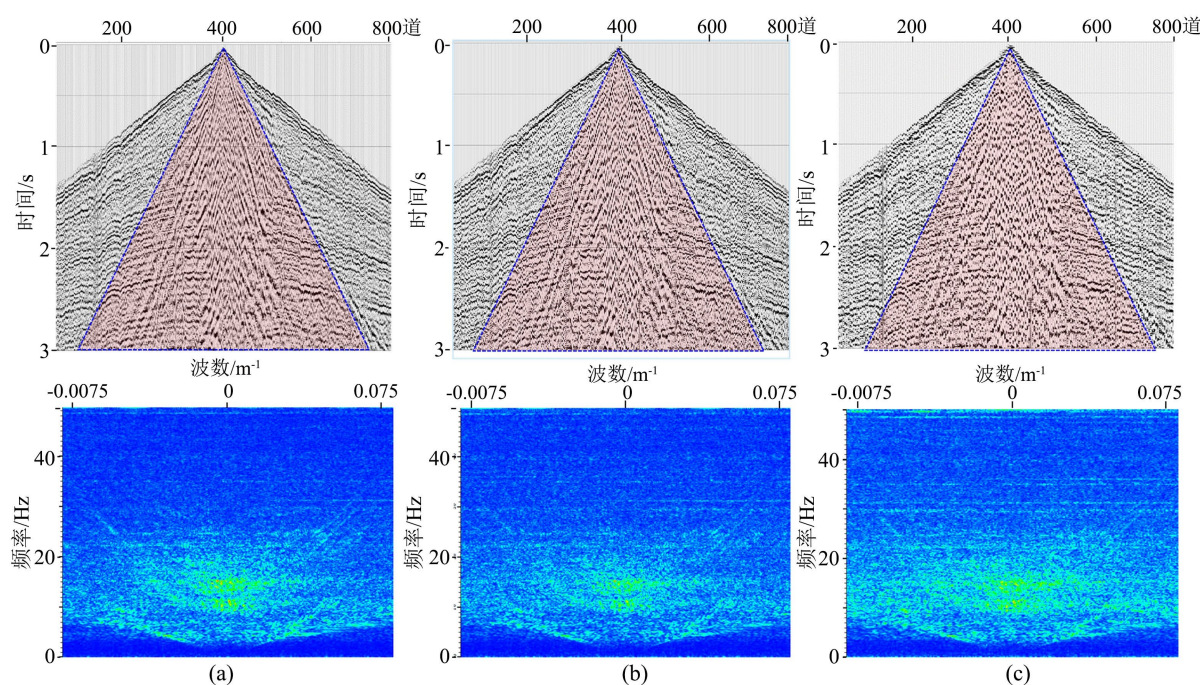


Figure 2. Optimization process of key parameters of 3D geometry for multilayer system stereoscopic exploration [1]
图 2. 多层系立体勘探三维观测系统关键参数优选流程[1]



(a) $10\text{ m} \times 10\text{ m}$; (b) $20\text{ m} \times 20\text{ m}$; (c) $30\text{ m} \times 30\text{ m}$; (d) $40\text{ m} \times 40\text{ m}$.

Figure 3. Comparison of forward model Single-shot gather and F-K spectrum with different dimensions
图 3. 不同面元尺寸正演单炮及其 F-K 谱对比



(a) 10 m × 10 m; (b) 20 m × 20 m; (c) 30 m × 30 m.

Figure 4. Comparison of F-K Spectra of Single-shot Gather with Different Dimensions in CX-JG Area of Northwest Sichuan Province

图 4. 川西北 CX-JG 地区不同面元尺寸单炮及其 F-K 谱对比

3.1.2. 最大炮检距

炮检距分布的均匀性与覆盖次数成正相关, 覆盖次数低, 炮检距分布不均, 会导致倾斜信号、震源噪声, 甚至发生一次波混叠, 而覆盖次数增加, 炮检距分布会有所改善, 均匀分布的炮检距对噪声的压制和衰减极为重要[20], 因此观测系统设计中应保证最大炮检距大于目的层深度, 最小炮检距小于目的层深度。同时最大炮检距的选择需要综合考虑动校拉伸率不超过 10%、速度分析的精度误差不高于 6%、反射系数稳定、绕射能量收敛等理论要素以及正演数据和实际资料分析的结论。

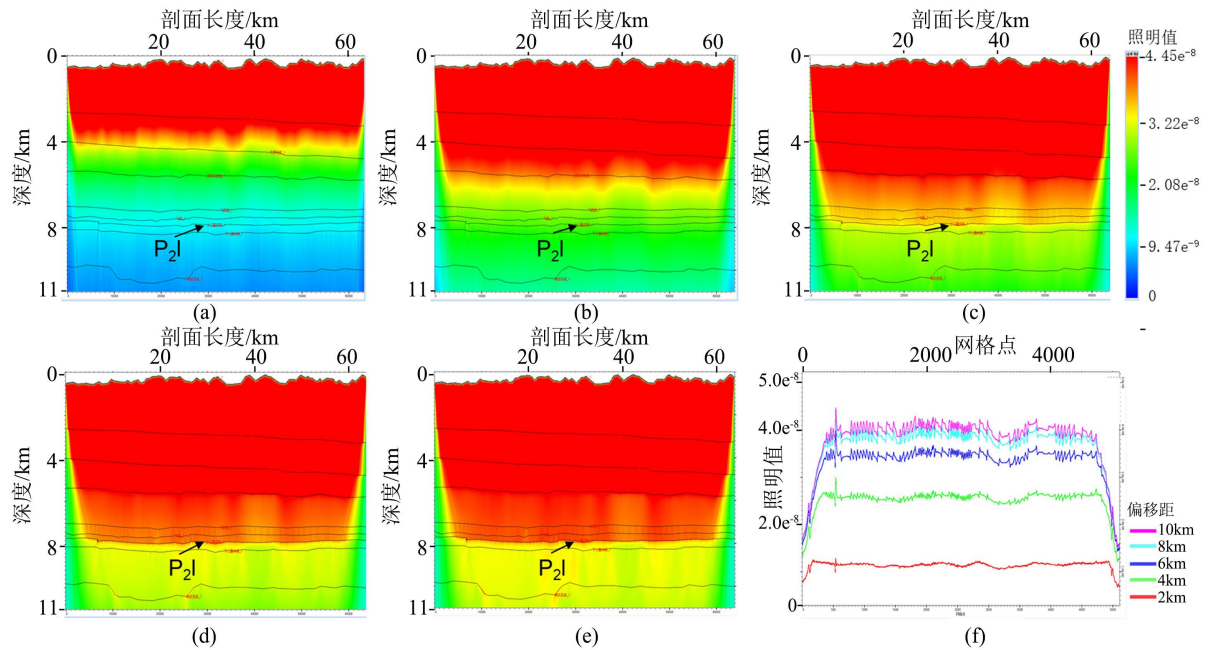
以 CX-JG 地区为例, 最深目的层 P₂l 主要埋深在 6500 m~7800 m。采用不同偏移距对速度模型进行能量照明分析(图 5), 结果显示当最大偏移距达到 8000 m 之后, 中深层照明能量变化不明显。P₂l 照明值随偏移距变化曲线(图 5(f))显示最大偏移距达到 8000 m 和 10,000 m 时, 照明值增长幅度几乎不变。利用邻区实际三维资料进行分偏移距剖面分析, 即在道集数据上将最小偏移距限定为 1000 m、2000 m、3000 m……7000 m, 最大偏移距不变, 分别将限定后的道集数据进行叠加, 叠加剖面显示当炮检距≥7000 m 后, 对目的层二叠系仍有贡献(图 6)。因此, 为了达到经济、技术一体化效果, 最大偏移距选择在 7000 m~8000 m 之间。

3.1.3. 覆盖次数

三维地震勘探中, 地震成果资料的信噪比与三维观测系统的覆盖密度成正相关[21], 尤其是在低信噪比地区, 地震成像品质随覆盖密度的增加而逐渐改善, 但在高信噪比地区则不能盲目增加覆盖密度, 应在确保可获得较好地质成像效果的前提下, 采用合适的覆盖密度, 做到降本增效。

覆盖密度与三维观测系统的纵、横向覆盖次数相关。以往采集参数的覆盖密度较低, 降低了深层目的层有效覆盖次数, 影响多次叠加效果, 导致横测线剖面质量较差。因此, 在尽量保证对比因素单一性

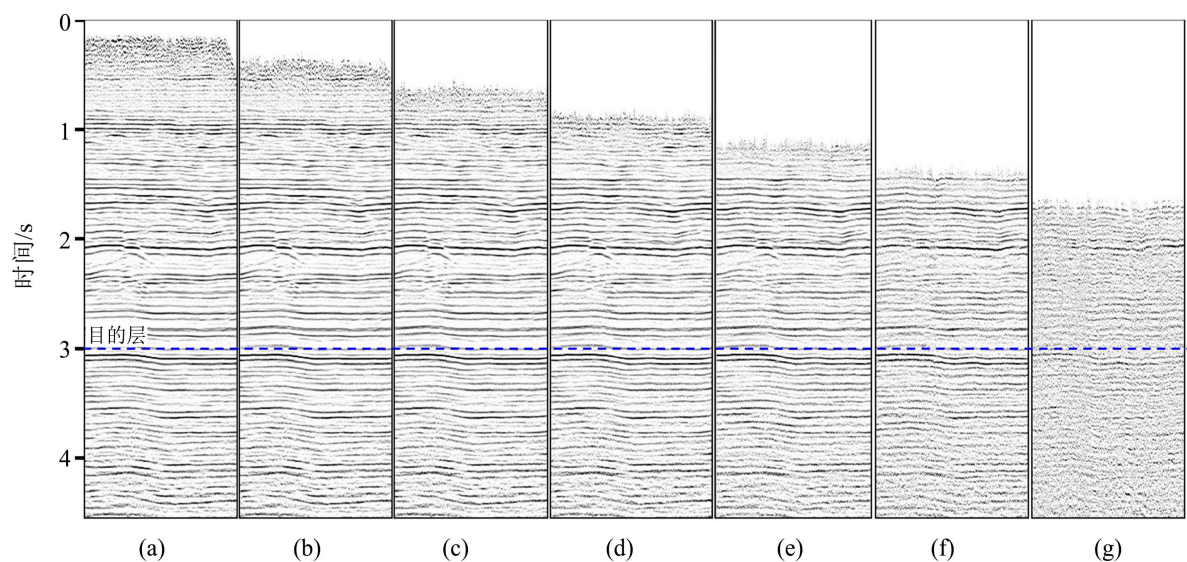
的情况下,利用实际资料开展覆盖次数退化处理试验[22],可获得适合工区的覆盖次数。本次覆盖次数退化方案是通过在三维观测系统中改变横向覆盖次数,即抽取接收线来实现的,尽可能保证对比因素单一性。



(a) 偏移距 2 km; (b) 偏移距 4 km; (c) 偏移距 6 km; (d) 偏移距 8 km; (e) 偏移距 10 km; (f) P21 照明值随偏移距变化曲线。

Figure 5. Analysis of different offset energy illumination

图 5. 不同偏移距能量照明分析



(a) 偏移距 1000~7555 m; (b) 偏移距 2000~7555 m; (c) 偏移距 3000~7555 m; (d) 偏移距 4000~7555 m; (e) 偏移距 5000~7555 m; (f) 偏移距 6000~7555 m; (g) 偏移距 7000~7555 m。

Figure 6. Different offset seismic profile analysis

图 6. 分偏移距剖面分析

表 1 为川西北 ZT 地区三维覆盖次数退化处理方案,通过抽取接收线共设计了 6 种方案,将覆盖次数由原始的 272 次逐步退化为 238 次、204 次、170 次、136 次、102 次等共 6 中不同覆盖次数三维观测系统。按照以上方案对道集数据进行抽取,形成不同覆盖次数的道集数据,再对其分别进行叠加处理,综合评价其成像效果,优选该区最优的覆盖次数参数。图 7 是不同覆盖次数叠加剖面成像效果对比,浅层对覆盖次数变化敏感度高,覆盖次数越高,信噪比提升越明显,内部弱反射成像越好;中深层二叠系及以下地层对覆盖次数变化敏感度低,整体成像效果改善不明显,但覆盖次数越高,局部细节成像有一定提升,覆盖次数大于 204 次后剖面品质整体无明显差异(图 7)。

Table 1. The scheme of gradually reducing the number of 3D fold in ZT area of northwest Sichuan
表 1. 川西北 ZT 地区三维覆盖次数退化处理方案

参数	原方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
观测系统	32L7S306R	28L7S306R	24L7S306R	20L7S306R	16L7S306R	12L7S306R
覆盖次数(纵 × 横)	17 × 16 = 272	17 × 14 = 238	17 × 12 = 204	17 × 10 = 170	17 × 8 = 136	17 × 6 = 102
面元/(m × m)	20 × 20	20 × 20	20 × 20	20 × 20	20 × 20	20 × 20
接收线距	280	280	280	280	280	280
炮线距/m	360	360	360	360	360	360

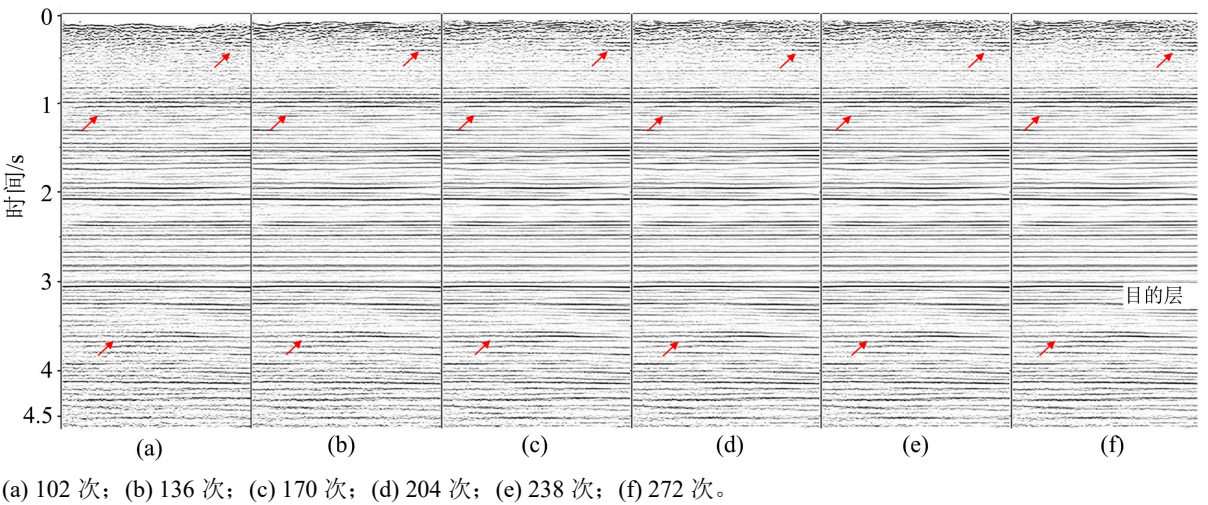


Figure 7. Comparison of stacked profile imaging effect with different fold
图 7. 不同覆盖次数叠加剖面成像效果对比

3.2. 优选激发技术

大井深和大药量有利于深层反射能量和信噪比的提升,但会损失高频成分。高频成分有利于提高分辨率,低频成分有利于提高信噪比,因此对于深层小尺度目标的刻画两者缺一不可。

3.2.1. 基于岩性识别的井深设计技术

井深的选择首先应考虑近地表结构,保证足够的井深可以打穿低降速层,在高速层中激发。川西北地区低降速层厚度多数集中在 5~8 m,少数区域低于 5 m。地表大量出露白垩系七曲寺组、白龙组 and 苍溪组,在表层 15 m 范围内,存在砂、泥岩交替出现情况。勘探证实,泥岩中激发的资料品质明显优于砂岩。因此,在川西北地区对所钻遇地层的岩性进行识别,追踪泥岩激发技术,确定最佳炸药爆炸井深范围,

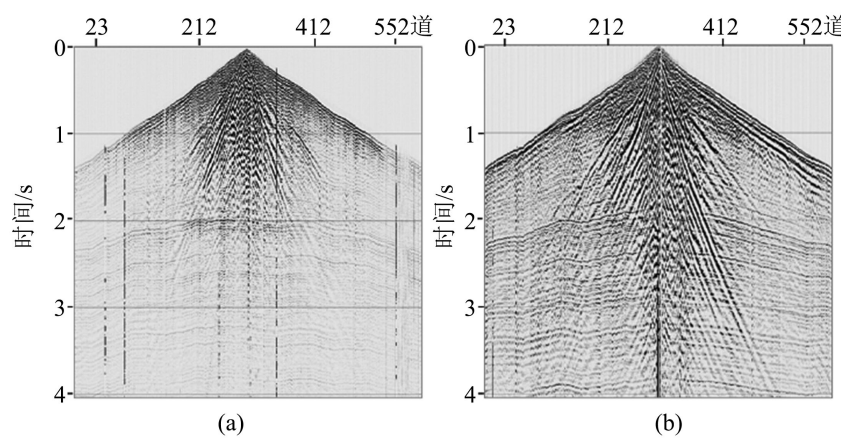
确保炸药在泥岩中激发，可有效拓宽单炮频带。

3.2.2. 分海拔激发药量设计

理论上，药量大小与有效信号能量成正相关，但增加药量的同时，近地表伴生的干扰能量也会增加，因此，合适的药量既要保证单炮能量足够，又要控制干扰能量的增长，以确保原始资料有较好的信噪比。

川西北地区由于地形、岩性复杂，导致相同地质层位、相同药量和井深激发的单炮品质可能存在较大差异。因此，对川西北地区二维资料进行多维度分析，即控制药量、岩性、地形等多种变量，从点、线、面多维度分析单炮品质在浅、中、深层变化规律，并开展分海拔药量试验，可为本区激发药量设计提供依据。

以 CX-JG 三维探区为例，区内二维单炮(图 8)和二维单线(图 9)分析显示，位于较高海拔位置的单炮，砂质含量相对较高，激发能量散失较快，单炮能量相对较弱。对区内老资料进行主频(图 10(a))和能量(图 10(b))分析，七曲寺组及西部白龙组整体主频、能量较高，东部白龙组、苍溪组整体主频、能量较低，最终结合主频和能量平面分布图，将主频和能量较低区域作为药量试验重点区，确保药量选择经济合理。



(a) 高程 580 m 激发单炮，白龙组地层，固定增益，井深 12 m，药量 8 kg；(b) 高程 450 m 激发单炮，白龙组地层，固定增益，井深 12 m，药量 8 kg。

Figure 8. Two-dimensional Single-shot Gather Display in CX-JG Area
图 8. CX-JG 区内二维单炮展示

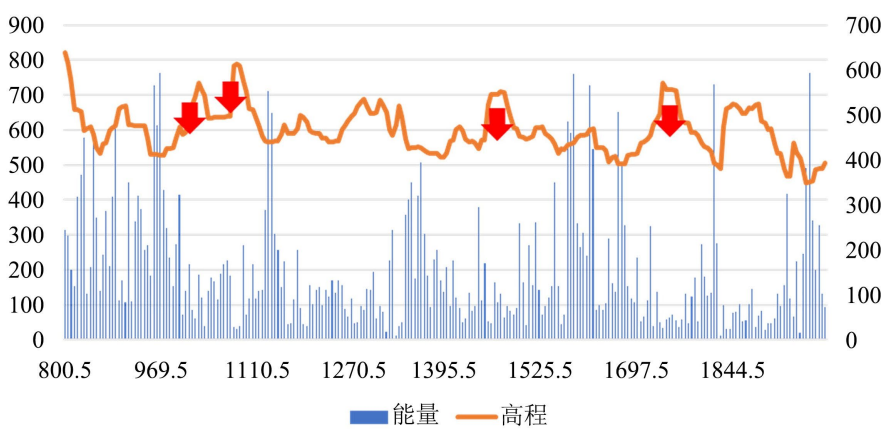
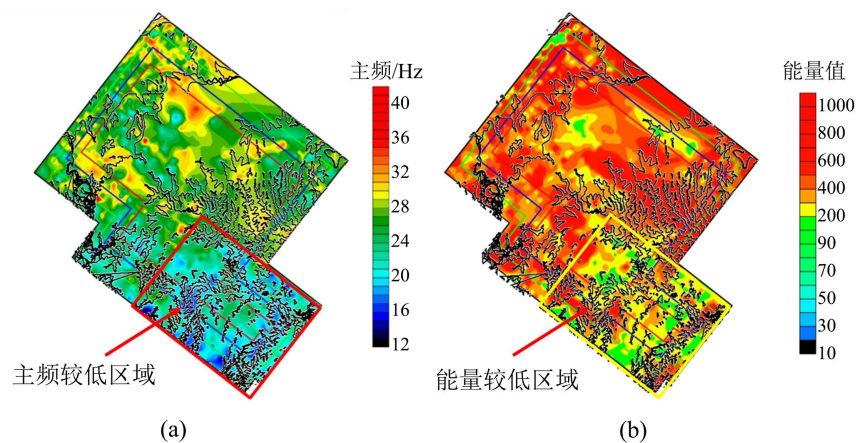


Figure 9. Single-Shot Energy-Elevation Statistical Diagram of DGM 2D Line in CX-JG Area
图 9. CX-JG 区内 DGM 二维测线单炮能量 - 高程统计图



(a) 主频分布图，时窗 1.5 s~2.5 s；(b) 能量分布图，时窗 1.5 s~2.5 s。

Figure 10. Frequency and Energy Plane Distribution of Old Data in CX-JG area
图 10. CX-JG 区内老资料主频和能量平面分布图

综上所述，CX-JG 三维探区南北海拔差异较大，因此将工区分为南、北两部分，南部以 550 m 等高线为界、北部以 650 m 为等高线为界划分为高部位和低部位，分别在高部位和低部分建立试验点，以设计出最经济有效的激发参数(表 2)。

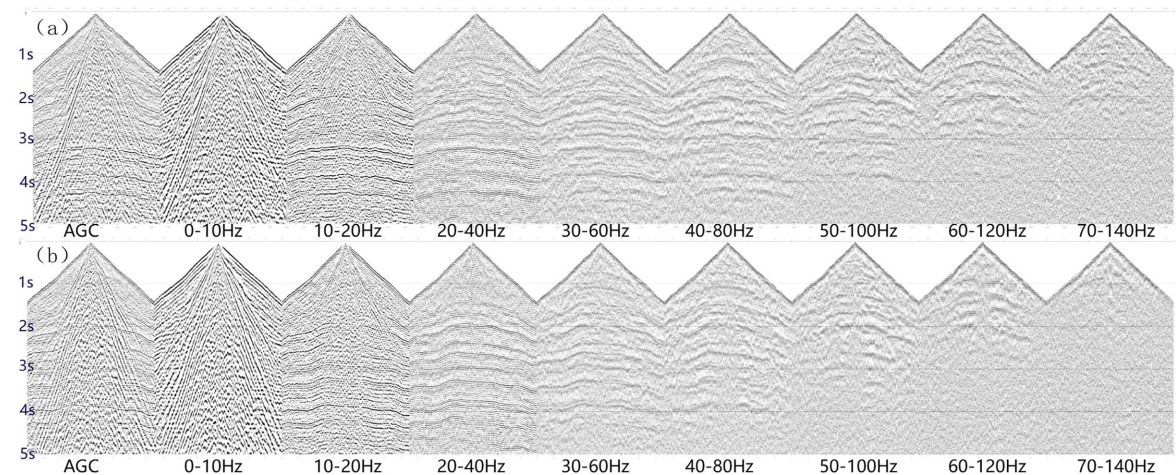
Table 2. Cretaceous formation excitation parameter table in CX-JG 3D exploration area
表 2. CX-JG 三维探区白垩系地层激发参数表

地层	区域	高程(m)	岩性	药量(kg)	井深
K	K _{1c}	西部	\	10	15~17 m
		<550	\	10	
	东部	>550	\	12	
	K _{1b}	西部	\	10	
		<550	\	10	
	东部	>550	\	12	
K _{1q}	\	\	泥岩	8	12~15 m
			砂岩	10	

应用追踪泥岩激发技术和分海拔药量设计技术在 CX-JG 三维探区取得较好效果，有效拓宽单炮频带(图 11)：与老资料单炮相对比，明显本轮三维深层有效信号能量更强且频宽更宽，高频段 70~140 Hz 时，深层 2 s 位置仍可见有效反射信号。

3.3. 山地地震野外资料质量自动评价技术

为提高质检效率、节约评价成本，目前已形成山地地震野外资料质量自动评价技术可完全代替人工评价单炮质量，通过对单炮能量、外界干扰道数、异常道数、声波干扰、面波干扰、炮检关系分析，对野外资料进行一级、二级和废品的质量评价。在施工的同时，实时监控单炮品质，对影响单炮质量的因素及时进行控制和整改，进一步保证了高质量地震原始资料的获得，实现了对山地地震资料品质影响因素的实时自动精细评价[23]。



(a) CX-JG 三维探区七曲寺组泥岩；(b) 老资料单炮。

Figure 11. Comparison of CX-JG 3D Single-shot gather frequency division with 2D old data at the same location
图 11. CX-JG 三维单炮分频与同位置二维老资料单炮分频对比

CX-JG 三维探区施工面积高达 4500 km²，属超大型三维施工，但该三维施工有效采集时窗有限。那么如何在提高施工效率的同时，地震资料品质也能得到保证成为重中之重。通过应用山地地震野外资料质量自动评价技术，该项目成功完成平均自然日效达到 1800 炮以上的工作量，同时井炮一级品率达到 95.65%，使得该项目圆满完成。

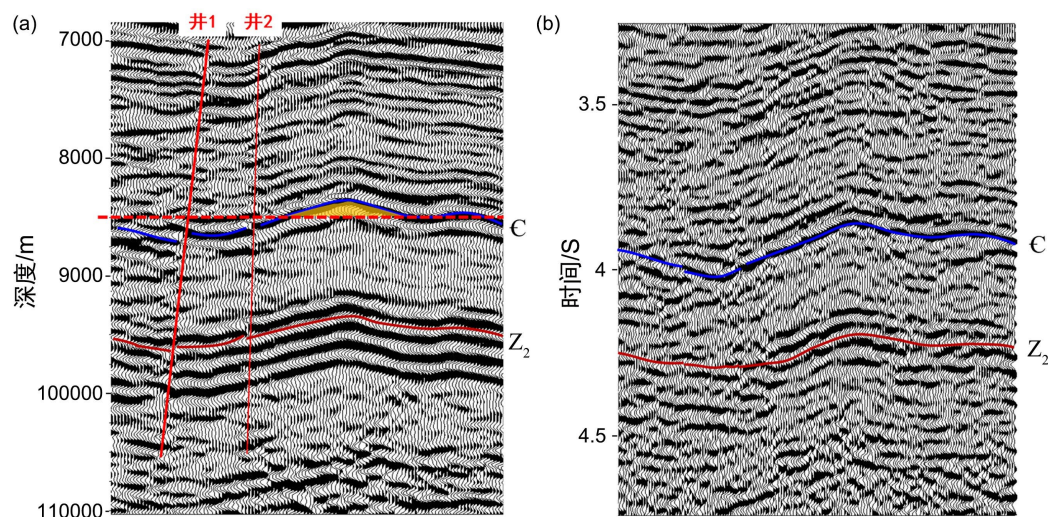
4. 应用效果

针对川西北地区目的层埋深跨度大、地表条件复杂等问题，应用超深层全方位无假频三维观测系统设计技术、复杂地表 GIS + 井炮智能布设技术和宽频均匀激发技术可有效解决超深层同相轴不连续，目标体刻画不精确等问题。

以川西北 ZT 三维探区为例，采用宽方位、长排列、高密度观测系统参数(表 3)，获得高品质地震资料。剖面上，中深层构造特征更为清晰，大断层同相轴明显错断，平面线性特征清晰，小断层同相轴挠曲、微幅褶皱，需精细刻画(图 12(a))，与同位置二维老资料相比(图 12(b))，断层位置及圈闭大小均有更新，且在寒武系发现新圈闭。

Table 3. Parameters of geometry in ZT 3D exploration area
表 3. ZT 三维探区观测系统参数

观测系统参数	方案
观测系统	32L7S306R
覆盖次数(横 × 纵)	16 × 17 = 272 次
面元大小(m)	20 (横) × 20 (纵)
接收/激发线距(m)	280/360
最大非纵距(m)	4460
最大纵距(m)	6100
最大炮检距(m)	7557
横纵比	0.73
炮道密度(万个/km ²)	68.00



(a) ZT 三维任意线叠前深偏移剖面段; (b) ZSH2451 二维叠前时间偏移剖面段。

Figure 12. Comparison of new and old sections at the same position in ZT 3D exploration area

图 12. ZT 三维探区同位置新老剖面对比

5. 结论

(1) 通过对川西北地区超深层地震勘探的持续攻关, 形成了超深层宽方位、长排列、高密度三维观测系统设计技术, 可有效解决目的层埋深跨度大而导致的深层剖面信噪比和分辨率相对较低的问题, 为后续获得高品质地震资料奠定基础。

(2) 追踪泥岩激发井深设计和分海拔激发药量设计对井炮激发参数进行了优化, 一定程度上降低了由于激发岩性中砂质含量变化对炸药震源能量散失的影响, 有利于提高资料信噪比, 拓宽频带。

(3) 山地地震野外资料质量自动评价技术确保超大型三维施工顺利进行, 保证了高质量地震原始资料的获得, 实现了对山地地震资料品质影响因素的实时自动精细评价。

参考文献

- [1] 白国平, 曹斌凤. 全球深层油气藏及其分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 19-25.
- [2] Dyman, T.S., Crovelli, R.A., Bartberger, C.E. and Takahashi, K.I. (2002) Worldwide Estimates of Deep Natural Gas Resources Based on the U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000. *Natural Resources Research*, **11**, 207-218. <https://doi.org/10.1023/a:1019860722244>
- [3] Guo, X., Hu, D., Li, Y., Duan, J., Zhang, X., Fan, X., *et al.* (2019) Theoretical Progress and Key Technologies of Onshore Ultra-Deep Oil/Gas Exploration. *Engineering*, **5**, 458-470. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.012>
- [4] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
- [5] 何海清, 范土芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 17-30.
- [6] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38-51.
- [7] 漆立新. 塔里木盆地古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771-779.
- [8] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 15-27.
- [9] 孙靖, 齐洪岩, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地深层——超深层致密砾岩储层特征及控制因素[J]. 天然气工业, 2023, 43(8): 26-37.
- [10] 杨辉, 张研, 邹才能, 等. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2006(3): 274-281.

-
- [11] 杜小弟, 姚超. 深层油气勘探势在必行[J]. 海相油气地质, 2001(1): 1-5.
- [12] 杨平, 高国成, 侯艳, 等. 针对陆上深层目标的地震资料采集技术——以塔里木盆地深层勘探为例[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 61-75.
- [13] 苏亦晴, 杨威, 金惠, 等. 川西北地区三叠系须家河组深层储层特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(5): 86-99.
- [14] 胡欣, 王宇峰, 裴森奇, 等. 川西北地区中二叠统茅口组沉积演化及其对岩溶储层发育的控制[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(4): 572-587.
- [15] 张玺华, 彭瀚霖, 文龙, 等. 四川盆地西北部灯影组深水沉积的发现及油气地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(4): 10-21.
- [16] 杨天博, 何治亮, 金振奎, 等. 川西北中二叠统超深层白云岩储层孔隙结构及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 116-131.
- [17] 王丽英, 王琳, 张渝鸿, 等. 川西地区侏罗系沙溪庙组储层特征[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(1): 1-4+9+95.
- [18] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649.
- [19] 张凯淞, 杨瑞召, 姜喆, 等. 高精度三维地震数据采集技术在 TBM 探区的应用[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(4): 75-79.
- [20] 张伟. 三维地震观测系统优化设计的方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2006.
- [21] 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+792.
- [22] 周晓冀, 杨智超, 杜文军, 等. 四川盆地泸州区块页岩气三维地震覆盖密度优选[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(2): 93-99.
- [23] 王晓阳, 张晓斌, 赵晓红, 等. 四川盆地复杂地表地震采集关键技术及其应用效果[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 15-23.