

蜀南地区页岩气高精度三维地震采集实践

杨 晓¹, 周 祺¹, 杨子卿^{2*}, 邓小江¹, 王雪梅³, 杨智超³

¹中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院, 四川 成都

²中石油深圳新能源研究院有限公司, 广东 深圳

³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: 2026年7月17日; 录用日期: 2026年9月13日; 发布日期: 2026年9月22日

摘 要

本文介绍并总结了在中国四川盆地蜀南地区, 针对埋深较深(3000~4500米)的下志留统龙马溪组页岩气藏, 实施高精度三维地震采集技术的实践与成效。研究指出, 该地区地表、地下地质条件复杂, 常规地震勘探技术难以满足“地质甜点”和“工程甜点”的精细预测需求。文章提出采用宽方位、高炮道密度、适中面元、小线距的“两宽一高”采集方案, 并详细论述了最大炮检距、覆盖次数、面元尺寸、纵横比等关键观测系统参数的选择依据, 包括利用波动方程正演进行照明度分析。通过在泸州、长宁等区块的实践应用, 该技术获得了高品质的地震资料, 显著改善了目的层弱反射的成像质量, 提高了微幅构造和断裂的预测精度。最终, 该技术实践有效支撑了水平井的钻井和压裂, 取得了96.5%的箱体钻遇率和100%的地震符合率, 验证了高精度三维地震勘探在深层页岩气勘探开发一体化中的重要价值和推广意义。

关键词

地质甜点, 工程甜点, 高炮道密度, 宽方位三维观测系统, 技术经济性

Practice of High-Precision 3D Seismic Acquisition for Southern Sichuan Shale Gas

Xiao Yang¹, Qi Zhou¹, Ziqing Yang^{2*}, Xiaojiang Deng¹, Xuemei Wang³, Zhichao Yang³

¹Southwest Geophysical Research Institute, BGP Inc., CNPC, Chengdu Sichuan

²PetroChina Shenzhen New Energy Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

³Southwest Geophysical Branch, BGP Inc., CNPC, Chengdu Sichuan

Received: July 17, 2026; accepted: September 13, 2026; published: September 22, 2026

Abstract

This paper introduces and summarizes the practices and achievements of high-precision 3D seismic

*通讯作者。

文章引用: 杨晓, 周祺, 杨子卿, 邓小江, 王雪梅, 杨智超. 蜀南地区页岩气高精度三维地震采集实践[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(9): 1327-1338. DOI: 10.12677/ag.2026.169118

acquisition technologies deployed for deep-buried (3000~4500 m) Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin, China. The study reveals that conventional seismic exploration technologies fail to meet the requirements for fine delineation of geological sweet spots and engineering sweet spots due to complex near-surface and subsurface geological conditions in the study area. A “two-wide and one-high” acquisition geometry featuring wide azimuth, high shot-receiver trace density, moderate bin size and small line spacing is proposed herein. The selection criteria for key survey geometry parameters, including maximum offset, fold coverage, bin dimension and aspect ratio, are elaborated, incorporating illumination analysis based on wave equation forward modeling. Field applications in blocks such as Luzhou and Changning demonstrate that this technology yields high-quality seismic data, drastically improves the imaging of weak reflections from target formations, and enhances the prediction accuracy of microstructures and fractures. Ultimately, this technical practice provides robust support for horizontal well drilling and hydraulic fracturing operations, achieving a reservoir compartment penetration rate of 96.5% and a seismic matching rate of 100%. The results verify the critical value and broad popularization potential of high-precision 3D seismic exploration for integrated exploration and development of deep shale gas.

Keywords

Geological Dessert, Engineering Dessert, High Shot and Trace Density, Wide-Azimuth 3D Seismic Geometry, Technical Economy

Copyright © 2026 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

蜀南五峰组~龙马溪组属于深水陆棚相沉积,发育富有机质黑色页岩;优质页岩厚度大(一般 20~70 m)、分布稳定,储层品质好,埋藏深度适中,全盆地埋深 4500 m 以浅面积大,资源量丰富。页岩气地震资料采集设计需要根据页岩气的非常规油气勘探成藏机理及成本统筹考虑,在实现地震“资料采集、处理、解释一体化”前提下,做好精细表层结构调查,优化激发、接收及组合参数,选择合理、有效的观测系统,包括面元大小、道间距、覆盖次数、最大炮检距等。总之,在经济允许的前提下,保证最大限度地提高地震资料的分辨能力。在页岩气地震勘探开发中,一般采用宽方位、高密度三维地震勘探方法,寻找“甜点”区,改善开发效果。利用三维地震研究页岩地质条件、裂缝、地应力、脆性等情况对指导水平井钻井及压裂投产,具有重要的现实意义。

笔者从我国蜀南页岩气藏所具有的地质特征、地球物理挑战出发,阐述了页岩气勘探中所面临的主要问题,需要采用的高精度三维地震勘探技术,并以蜀南高精度三维地震勘探的成功实践为例,探讨今后以泸州、长宁区块为代表具有推广意义的高精度三维地震采集技术方案,以扩大高精度三维地震勘探的地质成果。

2. 蜀南页岩气勘探关键技术需求

2.1. 页岩气藏特点

页岩气是一种典型的“自生自储”型气藏[1]。成藏必须具备发育富含有机质暗色泥页岩的沉积环境,即有大量的有机质供给、较快速的沉积条件及封闭性较好的还原环境。显然,中国南方的奥陶系-志留

系以及下寒武统均具备这样的沉积环境。前人的勘探成果也表明,中国南方广泛发育上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组两套优质烃源岩,尤其是四川盆地及其周缘龙马溪组海相沉积的暗色页岩有机质含量相对较高、有机质热演化程度相对较高且岩性分布相对稳定,具备形成大型海相页岩气田的基本成藏条件[2]。

四川盆地属于上扬子地块的叠合盆地,经历了加里东等多期次构造运动的叠加改造,导致地层强烈褶皱形变、抬升、剥蚀,因而油气保存条件复杂多变[3]。高演化程度的海相页岩气勘探中,地层构造样式的精细刻画是研究页岩气保存条件的基础,也是实现页岩气高效勘探开发的关键。鉴于海相页岩气藏复杂的成藏模式,在实际勘探中既要重视研究烃源岩生烃条件,也要加强对保存条件的研究,前者强调查明烃源岩的储层物性,后者注重查明页岩气层及其上覆盖层的构造样式及裂缝发育展布特征[4]。

2.2. 对地球物理技术的需求

与北美页岩气发育地区平坦、辽阔的地形不同相比,蜀南页岩气发育地区以山地地形为主,地形起伏剧烈,地震地质条件普遍较复杂,岩性横向变化快,地表出露老地层多,属于典型的复杂山地地形地貌特征。

页岩气藏需要寻找“生烃能力强、岩石可破裂性高、孔隙及裂缝发育、地应力非均质性弱,合适的厚度及埋深”为要义的油气富集区[5]。目前蜀南页岩气勘探开发主要在四川盆地及周缘的南方山地海相页岩气,主力层系为五峰组~龙马溪组,位于最有利的深水陆棚相,是页岩气富集高产最有利的沉积微相,埋深适中(一般 2000~4500 m,最大不超过 5000 m),优质泥页岩厚度分布横向变化大、压裂施工难度大,地表、地下构造及保存条件复杂,常规的二维、三维地震勘探技术无法准确获取评价页岩气富集规律的地质参数即无法满足精细落实页岩气一体化解决方案的落实。显然,高精度三维地震勘探技术在完成页岩气甜点预测以及水平井井位设计(泥页岩脆性指数、裂缝发育情况和断层三维空间分布情况)的地质任务中起着不可替代的作用。赵殿东,张少华等也明确指出,地球物理技术是页岩气储层评价和增产改造的关键技术,尤其是高精度三维地震勘探技术[6][7]。高精度三维地震勘探技术涉及地震资料采集、处理以及解释环节,只有实现高精度的地震采集才能获得高品质、信息丰富的三维地震勘探成果。

3. 高精度三维地震采集技术实践

3.1. 勘探难点及技术对策

页岩气藏属非均质性气藏,除常规的查清构造和预测储层外,后期需利用三维数据体开展叠前的裂缝检测、岩石脆性等预测等工作,地质任务要求较高。蜀南页岩气位于复杂山地,勘探难点表现为地表地下双复杂,探区地形起伏大、地表出露的岩层新老交替,主要为侏罗系沙溪庙组砂泥岩,构造主体部位出露少量三叠系须家河组石英砂岩和雷口坡组灰岩、二叠系灰岩及奥陶系老地层,局部老地层出露区激发条件较差;页岩层内构造相对不复杂,构造模式相对稳定,但其上覆和下伏构造复杂、断裂和微幅构造发育,主要发育北东向线性构造,构造狭窄,倾轴逆断层发育,构造间为宽缓向斜区;优质储层厚度薄,“甜点”预测难度大;地应力复杂多变,箱体钻遇率低、钻井风险高;针对以上勘探难点,采用宽方位、高密度三维地震技术对策(图 1)能获得高品质的地震资料,对寻找“甜点”区、改善勘探开发效果以及指导水平井钻井及压裂改造具有重要的现实意义。

针对页岩气勘探目标体的特征和技术难点及开发需求,威远~长宁~泸州~渝西一带,采集设计了宽方位~全方位、高覆盖次数、较高炮道密度、适中面元、大炮检距、宽频、精细表层结构调查、高灵敏度单点检波器接收的采集技术,以获得满足页岩气开发评价的高信噪比原始地震资料。其中,宽方位、大炮检距地震数据包含丰富的页岩(物)性参数信息,为岩性勘探奠定了数据基础;高覆盖次数、适中面元尺寸

和大偏移距采集了较为完备的有效反射波及干扰波的动力及运动学特征，有利于处理中压制干扰波、利用有效波，可以提高地震资料的信噪比、保真保幅和提高成像分辨率；精细的表层结构调查可以提供优化的激发参数，提高单炮品质，并提供高精度的近地表速度模型用于室内地震数据静校正处理；单点数字检波器灵敏度、稳定性和精准性很高，并且能够抗干扰、分辨率较高、实现更宽频接收，为复杂构造高精度成像及地层岩(物)性参数的准确提取提供高品质的原始数据。显然，高精度三维地震采集技术为复杂地区的页岩气勘探提供了丰富的地质信息和岩石物理信息。蜀南地区构造变化平缓，有利于宽方位勘探取得较好效果。下面从高精度采集关键参数以及地质效果方面阐述蜀南页岩气勘探的成功实践。

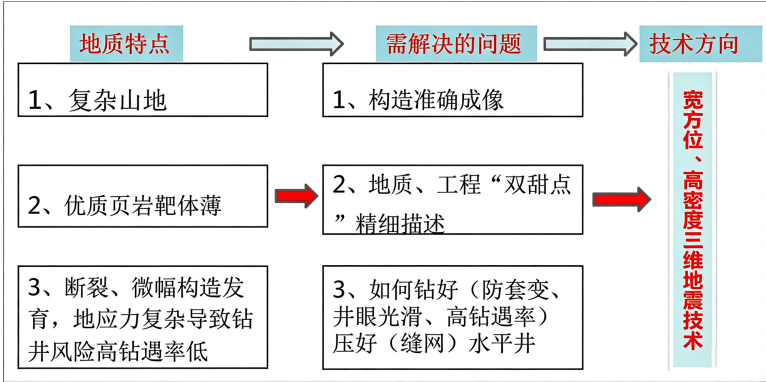


Figure 1. Block diagram: difficulties & countermeasures of high-precision shale gas prospecting
图 1. 页岩气高精度勘探技术难点与对策框图

3.2. 高精度三维采集优势

研究表明，宽方位地震观测在野外采集、数据处理及其地质解释方面有明显的优势，主要表现为：
① 宽方位采集随横向覆盖次数的增加，采集脚印减弱，同时，宽方位比窄方位更容易跨越地表障碍物和消除地下阴影带的影响；② 宽方位采集数据有利于衰减规则干扰和多次波；③ 宽方位采集数据的空间分辨率和空间连续性优于窄方位数据；④ 从宽方位采集的数据中可提取方位 AVO 信息，更有利于裂缝型储层的识别[8]。较小的接收线距有利于反射系数的稳定，有利于静校正的耦合。较高的炮道密度有利于压制噪音、提高分辨率和保真度[9]，从而提高地震资料的信噪比和构造的成像精度。采用较高炮道密度的三维观测系统，蜀南泸州、内江、大足、长宁、威远等区块的龙马溪 - 五峰组弱反射层的反射能量和视觉分辨率得到进一步提高。但炮道密度的提高也带来勘探成本的增加，因此选择一个合适的炮道密度对页岩气藏勘探尤其重要。

3.3. 三维观测系统关键参数选择

蜀南及周缘地区地表地质条件复杂，主要地貌为沟谷相间的山地，工区具有地形起伏较大、地貌复杂的特点，对地震勘探准确成像与高效采集施工影响较大。地震勘探均假设在统一的基准面进行激发接收，地形突然变化将导致部分激发点激发的地震波信号遇到峡谷、陡崖时不能有效传播，传播路径的剧烈变化，将严重降低采集资料品质[10]-[13]，影响地下构造的准确地震成像。蜀南地区根据不同区域目的层埋深和地震地质条件复杂程度不同，考虑解决地质问题的能力和成本可控性，泸州、内江、大足区块页岩气三维地震勘探观测系统参数有差异。泸州、内江、大足一般是高炮道密度(炮道密度 ≥ 49 万道/ km^2)、宽方位(纵横比 ≥ 0.8)、较小接收线距(接收线距 ≤ 300 m、炮线距 ≤ 320 m)；长宁、威远参数特点是较高炮道密度(一般炮道密度 ≥ 25 万道/ km^2)、宽方位(纵横比 ≥ 0.8)、较小接收线距(接收线距 ≤ 300 m、炮线

距 ≤ 400 m)。这里高炮道密度一般认为炮道密度达到常规三维地震勘探的 4 倍以上。下面从理论设计与实际资料分析入手,说明蜀南页岩气高精度三维观测参数如面元、覆盖次数和炮道密度、最大炮检距、纵横比、线距的经济技术型选择能够保证页岩气地震资料高精度成像,满足勘探开发一体化方案编制需求。

3.3.1. 波动方程正演照明度设计

波动方程正演是复杂地区、复杂构造地震观测系统设计的重要手段之一。选取蜀南泸州、长宁区块典型的二维地震地质综合解释剖面建立本区的真地表地质速度模型,运用地震采集软件模块开展波动方程正演,论证面元大小、偏移距等关键三维观测系统参数。基于波动方程的地震照明分析克服了射线照明方法的缺陷,能适应横向强速度变化介质,使得目标照明分析更加合理、准确。由于地表高程和地腹构造断层的影响,地震波向下传播到目的层时沿层能量会产生较大的差异,照明度就是模拟地震波向下传播后不同深度的能量,照明强度值近似代表地震波能量。不同埋深目的层的照明能量。与观测系统的最大偏移距的选取关系紧密,因此通过设计不同偏移距的观测系统进行照明度正演模拟,再提取目的层照明强度值生成能量曲线,通过分析能量曲线的变化能够帮助我们选择合理的最大偏移距。

3.3.2. 理论结合实际确定观测参数

泸州区块地震采集设计了束状正交规则 28 线 7 炮(224~252)道观测系统,观测系统面元 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,总覆盖次数 196~210 次;长宁区块采集设计了束状正交规则 26 线 6 炮(180~192)道观测系统,观测系统面元 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$,总覆盖次数 130~156 次(表 1)。

Table 1. List of 3D observation system parameters
表 1. 三维观测系统参数一览表

参数	长宁区块	泸州区块
观测系统	26L6S (180~192) R	28L7S (224~253) R
覆盖次数(纵 $\times$ 横)	130~156	196~210
面元($\text{m} \times \text{m}$)	25×25	20×20
接收线距(m)	300	280
炮线距(m)	400~450	320~360
最大非纵距(m)	3875	3900
最大纵距(m)	4775	4460~5020
最大炮检距(m)	5919.57~6149.49	5924.66~6356.92
纵横比	0.81~0.87	0.8~0.87
炮道密度(万道/ km^2)	20.80~24.96	49.00~52.50

本观测系统有以下几方面的优点:① 覆盖次数及炮道密度高,保证处理资料的信噪比,有利于开展构造精细研究;② 较小的面元尺寸,有利于提高目标地质体的分辨精度;③ 宽方位观测,有利于开展裂缝预测研究。

(1) 最大炮检距

蜀南地区页岩气藏有利开发区目的层埋深在 $3000\text{ m} \sim 3500\text{ m}$,大足区块的足 201 井和泸州区块的黄 202 井页岩气藏埋深突破了 4000 m ,三维地震最大炮检距的选择与目的层埋深紧密相关,较大的炮检距有利于叠前偏移成像,炮检距普遍采用在 6000 m 左右,利用照明度分析来论证最大偏移距大小,从照明

度(图 2)和能量(图 3)看, 6000 m 和 8000 m 炮检距断下盘沿层照明强度值接近, 选取 6000 m 左右偏移距较合适。

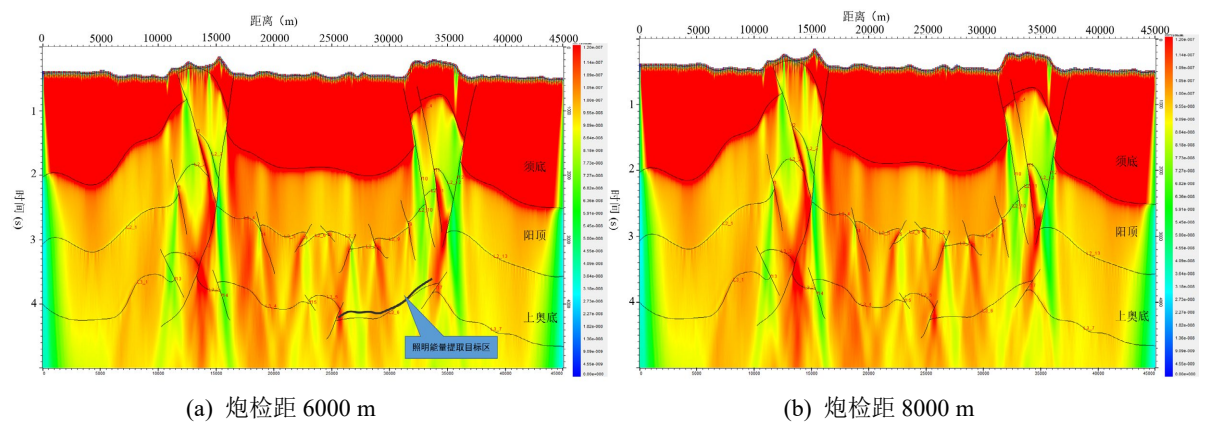


Figure 2. Illumination for various offsets
图 2. 不同炮检距照明度

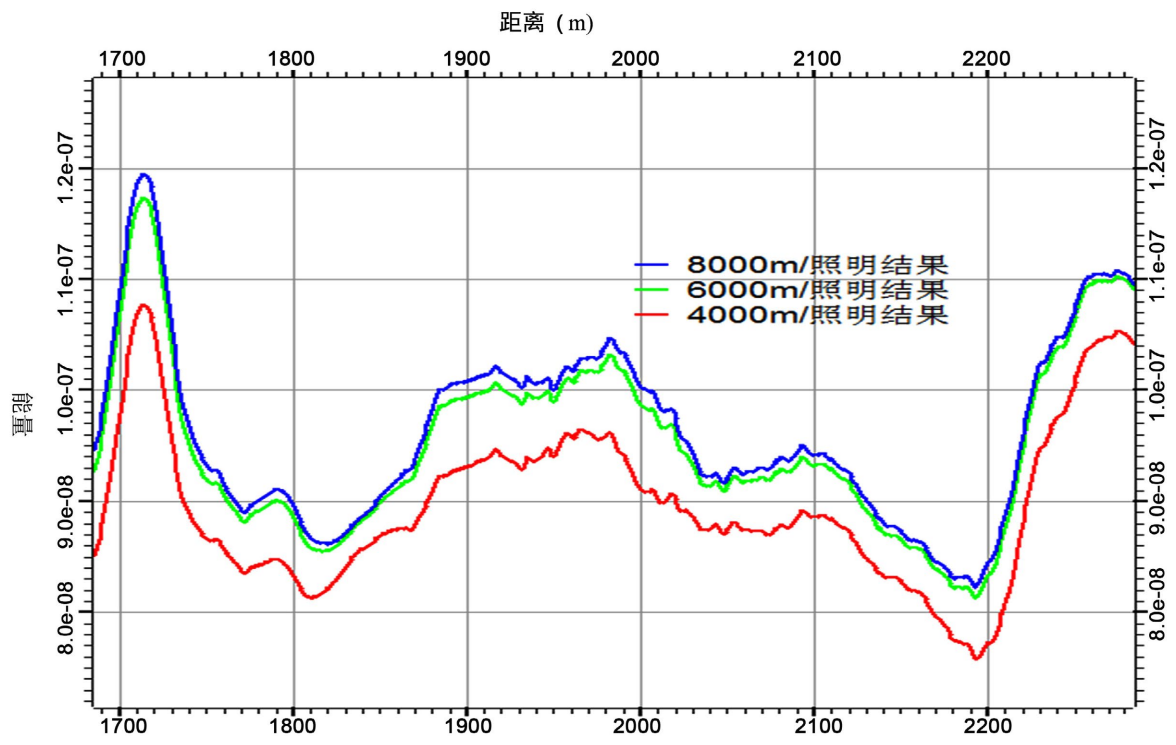
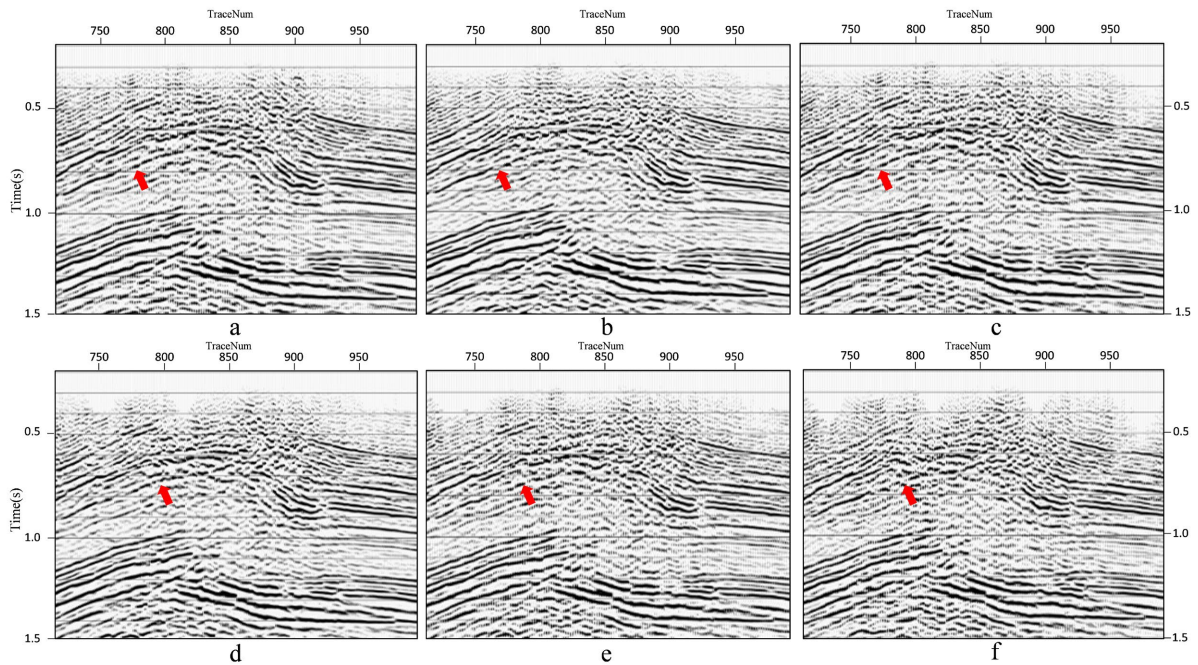


Figure 3. Illumination energy curves for various source-receiver offsets
图 3. 不同炮检距照明能量曲线图

(2) 覆盖次数和炮道密度

随着覆盖次数(或炮道密度)的增加, 目的层反射品质逐渐改善; 当覆盖次数大于 140 次(炮道密度大于 35 万道/km²), 目的层反射品质改善明显(图 4); 覆盖次数达到 196 次(炮道密度大于 49 万道/km²), 五峰组底界反射清晰、连续性强。不同覆盖次数和炮道密度叠加剖面信噪比定量分析显示, 覆盖次数达到 196 次以上, 炮道密度 49 万炮道以上, 目的层时窗内信噪比大于 1 占比 70%以上(图 5)。



a: 52 万道/km²; b: 45 万道/km²; c: 42 万道/km²; d: 35 万道/km²; e: 28 万道/km²; f: 21 万道/km²。

Figure 4. Comparison of stack sections under different fold and shot-trace density, Southern Sichuan
图 4. 蜀南地区不同覆盖次数、炮道密度水平叠加剖面对比

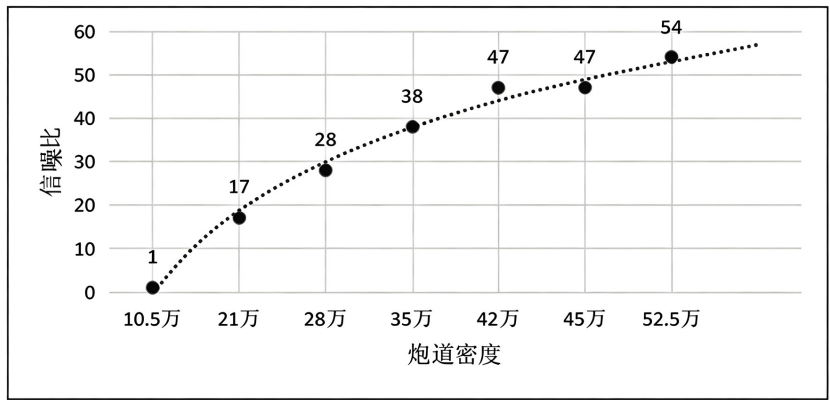


Figure 5. Curve of signal-to-noise ratio versus shot-trace density
图 5. 信噪比随炮道密度变化曲线图

(3) 面元尺寸

面元纵横向尺寸大小影响目的层微幅构造的精确成像和微小断裂的精细刻画，横向上小倾角微幅构造能否精确成像会直接影响水平井轨迹的设计，影响入靶点及水平段的实施，纵向对微小断裂能否精细刻画会进一步影响箱体的钻遇率及后期压裂效果。面元大小由道距和炮点距决定，面元越小意味着炮密度、道密度越大，即更高的成本投入。但小面元能够提高横向采样率，对于微幅构造和小断裂的刻画更好，因此面元大小的研究就显得十分必要。为此，在三维技术设计中，搜集区内老资料深度解释剖面，利用建模软件建立真地表地质模型，各层的速度取值依据钻井和地震解释时深转换层速度，通过波动方程正演来论证面元参数。以 25 Hz 主频正演，在常规偏移剖面上，10 m 断距的小断裂肉眼难以识别；以 30 Hz 主频正演，在常规偏移剖面上，10 m 断距的小断裂肉眼可以识别(图 6)。

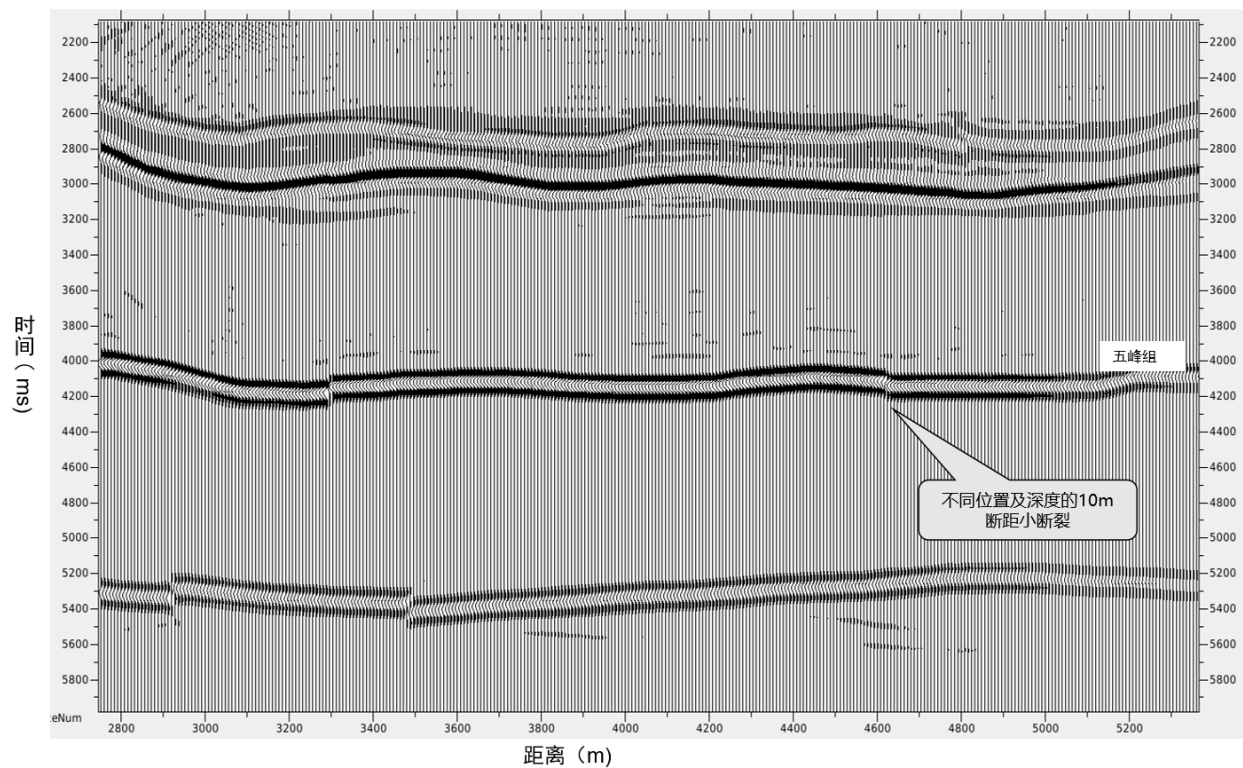


Figure 6. Migrated forward modeling section (Bin Size: 20 m)
图 6. 正演偏移剖面(面元 20 m)

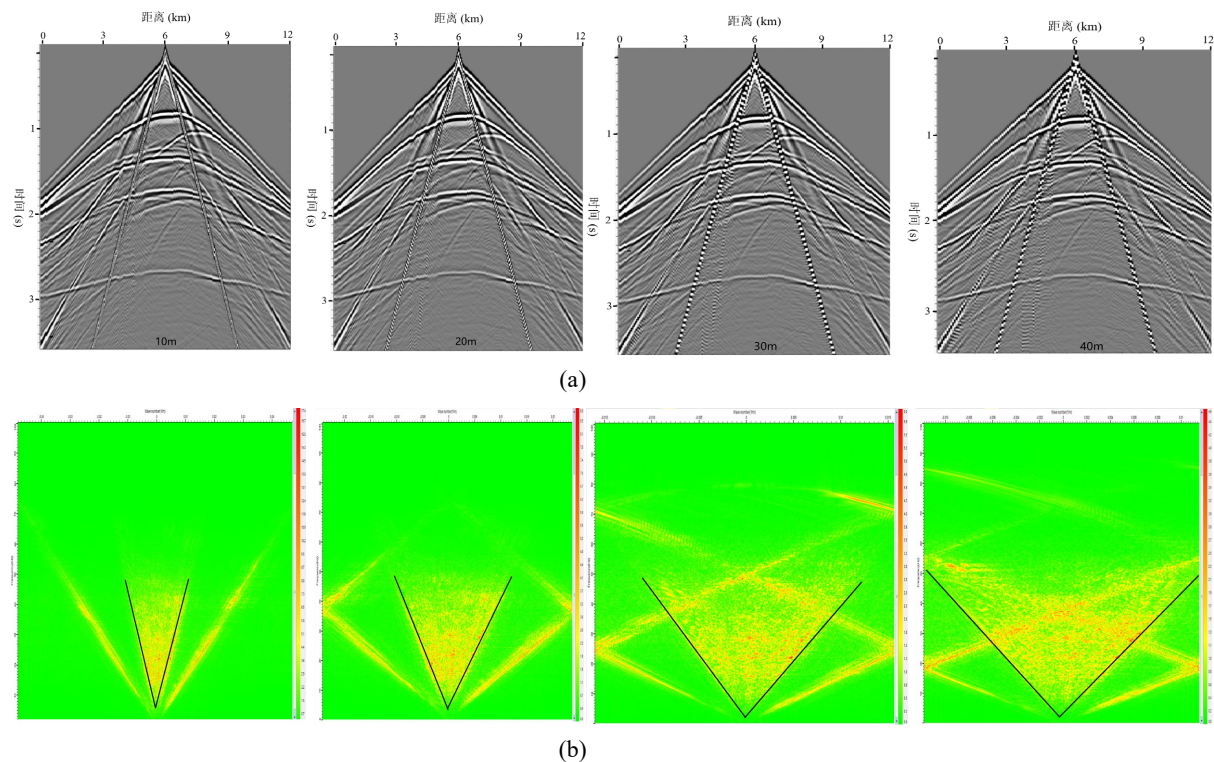


Figure 7. (a) Forward Single Shots and (b) FK Spectra for Variable Bins, 3D Survey Y101, Southern Sichuan
图 7. 蜀南地区 Y101 三维工区不同面元正演单炮(a)及 FK 谱(b)

对比分析 10 m、20 m、30 m、40 m 不同道距的单炮品质及相干噪声情况(图 7), 当道距大于 30 m 以上面波的线性特征逐渐变差, 并且随着道距的进一步增加, 假频现象逐渐严重, 分析结果认为要确保波场的充分采样, 避免道距过大产生折叠假频对有效反射形成较强的干扰, 面元选择一般不大于 30 m。按照以上思路和方法, 蜀南长宁区块基本采用 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 或 $15\text{ m} \times 30\text{ m}$ 面元, 泸州区块普遍采用 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的较小面元。

(4) 横纵比、接收线距、炮线距

页岩气三维横纵比普遍在 0.8~1, 宽方位三维观测适应叠前储层预测和分方位处理需求, 有利于解决页岩气藏非均质性强的突出问题。接收线距、炮线距、滚动方式影响面元内方位角、炮检距的分布。为减少方位角、炮检距分布不均带来的“采集脚印”, 接收线距选择应不大于目的层一个菲涅尔带半径, 并考虑合适的线距-道距比值, 接收线距随着目的层越浅而越小, 横向滚动距应尽可能小。普遍较小的接收线距是页岩气三维勘探区别于常规油气勘探的重要参数, 常用的接收线距在 280 m~300 m 之间, 常用的炮线距在 280 m~360 m 之间, 炮线距与接收线距的比值普遍在 1~1.14 (面向叠前观测系统设计为 1~1.5)。横向普遍采用单排列滚动方式, 确保观测系统属性的均匀性。

3.4. 精细表层结构调查技术

采集环节, 除了开展针对性激发、接收试验、以及观测系统设计外, 高度重视精细的近地表结构调查和 Q 模型研究, 为提高原始资料信噪比、并为室内静校正处理提供可靠的近地表速度模型和静校正量。实际工作中采用新老表层调查资料结合、均匀布设单井微测井调查点, 井深 15 m, 炮点区域内控制点平均密度达到 1 口/2km²; 在三叠系岩石破碎、垮塌区域加密调查点; 在地表岩性和地形起伏变化的区域加密调查点; 在构造主体区加密调查点; 在断块发育区加密控制点。

双井微测井技术是比常规微测井技术和小折射方法更先进的一项新技术。除了加强单井微测井调查精度, 还按照不同出露地层和复杂构造区布设双井微测井, 同一工区内调查点不少于 5 个。该方法能更准确地为野外地震资料采集选择最佳激发岩性和井深, 确保野外地震资料采集质量。用双井微测井资料可以得到地震工区内表层速度和厚度在横向上和纵向上的变化规律, 为地震资料的室内处理提供静校正量[14]。通过双井微测井调查, 根据虚反射界面、能量分析, 来确定最佳激发井深范围。双井微测井的激发井深 20 m, 接收井深 20 m, 两井井间距 3 m。激发井每间隔 1 m 放一炮, 接收井采用 12 个检波器在井内 9~20 m 接收, 间距 1 m。同时地面距激发井口 0.5 m 埋置一个检波器接收。精细的表层结构调查技术大大提高了近地表调查精度, 为激发、接收参数优选及地震资料处理奠定基础。

4. 勘探成效

通过高精度三维观测技术及地震采集和配套技术的运用, 蜀南页岩气三维获得了优质的地震采集原始资料(图 8), 通过相邻位置新老单炮分频扫描对比分析, 均能见到有效反射, 但是新资料单炮频带更宽, 主频更高(图 9), 三维叠前偏移成像目的层弱反射更加聚焦连续, 绕射更加清晰, 分辨率更高, 叠前时间偏移成像精度高(图 10), 为后续的深度偏移速度场建立奠定良好基础, 高精度采集资料能更好满足页岩气藏预测和开发需求。

蜀南地区高精度三维地震资料的最终精细处理解释成果对微幅构造和断裂的预测精度进一步提高, 采用泊松比和杨氏模量综合计算的方法预测脆性指数并获得脆性指数剖面(图 11), 地震成果有力支撑水平井导向技术的符合率[15]。实时跟踪支撑的 Y101 井测试获高产气流, 开创了埋深 3500 m 以深页岩气开发的新局面, 支撑深层页岩气取得重大突破。已经部署的大钻井其箱体钻遇率为 96.5%, 地震符合率 100%, 证明高精度三维地震勘探在页岩气勘探中的可靠性。

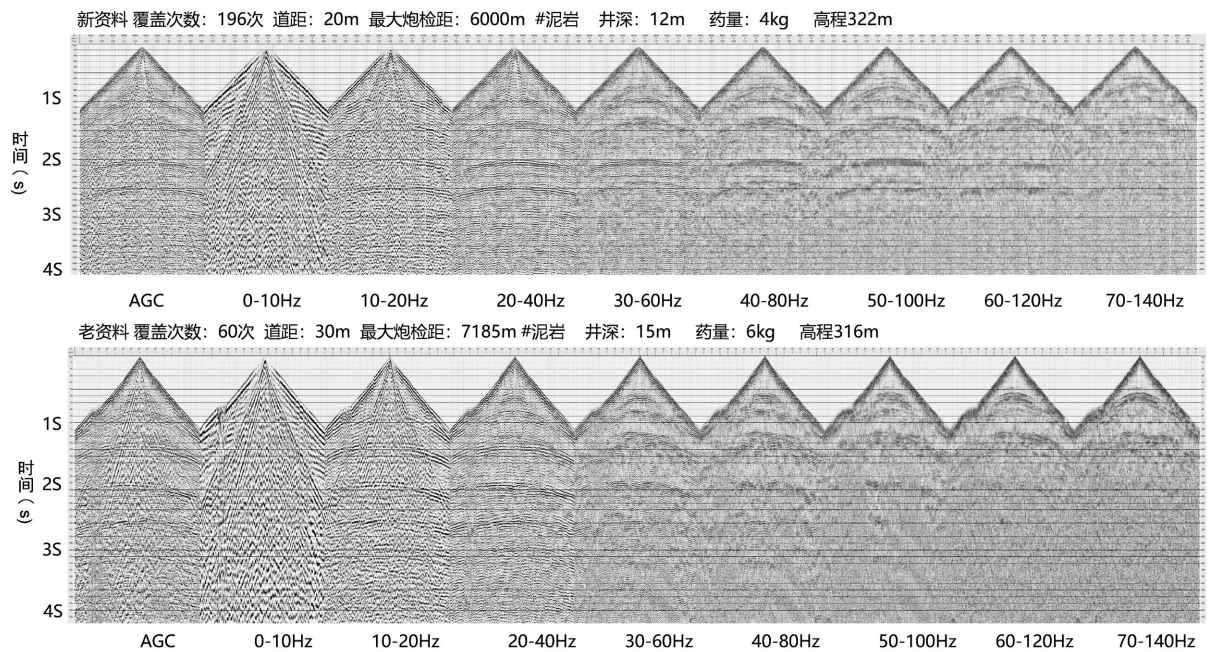


Figure 8. Frequency scans of single shots: new vs. old acquisition
图 8. 新老采集单炮分频扫描展示

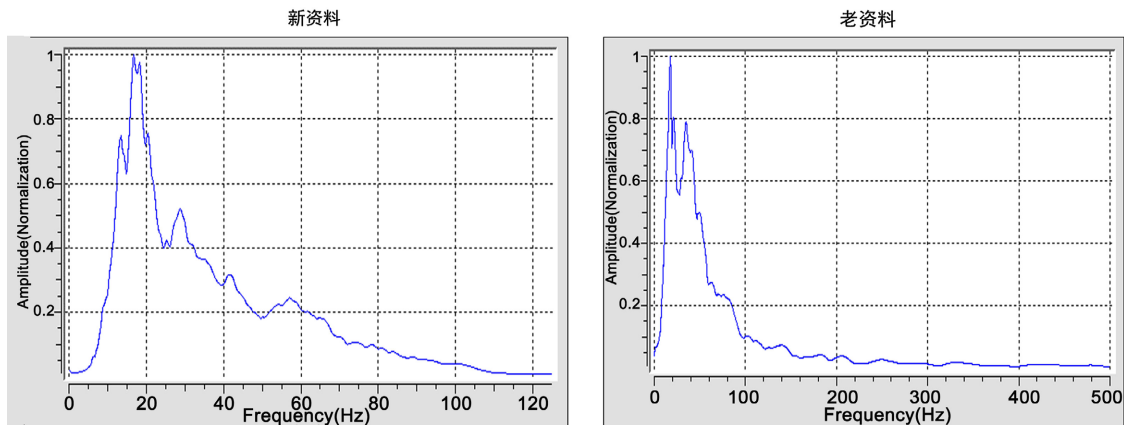


Figure 9. Spectral analysis for single shots: New vs. Old Acquisition
图 9. 新老采集单炮频谱分析

5. 结论

- 1) 高精度三维地震观测技术能改善地腹构造成像品质, 提高宽缓向斜区弱振幅的能量和视觉分辨率, 地震资料对微幅构造和断裂的预测精度进一步提高; 泸州、长宁目标区钻井分层统一, 主要目的层地震反射波形特征一致, 波组关系稳定。
- 2) 蜀南页岩气剩余有利勘探区面积大, 针对蜀南深层页岩气地质特点, 在现有束状三维采集模式下 [16], 炮道采样对称均匀的全(宽)方位、高覆盖、适中面元的三维地震采集方案, 可以最大程度地确保深层页岩气勘探所需的充分、均匀与完备的地震信息采集, 有效支撑与深层页岩气构造保存评价密切相关的复杂构造高精度地震成像, 为高精度地震资料处理解释及页岩气可压裂性“甜点”预测奠定了良好的基础。

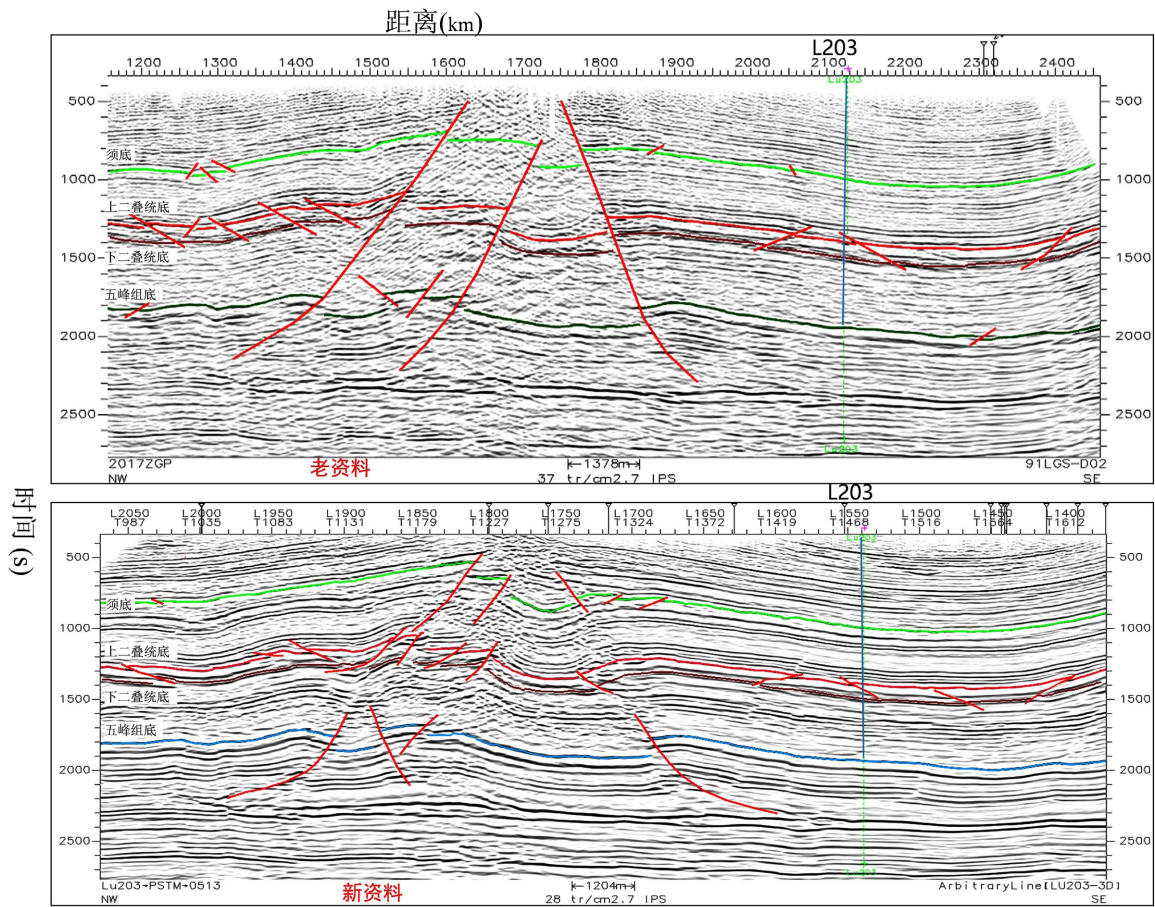


Figure 10. PSTM sections: new vs. old survey lines
图 10. 新老线资料叠前时间偏移剖面

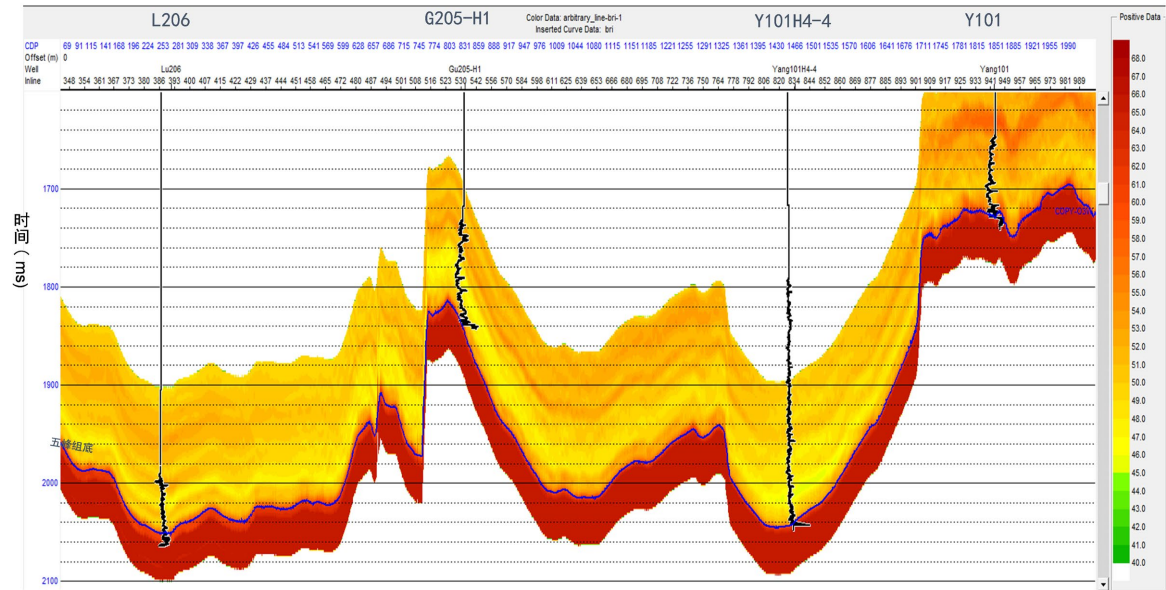


Figure 11. Brittleness index prediction section
图 11. 脆性指数预测剖面图

3) 地震采集波动方程正演设计、精细表层结构调查及采集配套工艺的改进能有效改善地震资料品质, 提高施工效率, 降低生产成本。

4) 考虑到技术经济性, 蜀南泸州区块将来可以采用优化炮道密度的全方位观测、长宁区块可以采用更加强化的炮道密度、覆盖次数的全方位观测来解决两个典型区域的地质问题, 实现勘探成本和效益之间的平衡, 助推页岩气勘探开发获得更大成效。

致 谢

本文是四川盆地蜀南地区长宁-泸州区域三维地震勘探项目部分成果展示, 衷心感谢参与该项目的各位同行!

参考文献

- [1] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008(6): 136-140+159-160.
- [3] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [4] 陈祖庆, 杨鸿飞, 王静波, 等. 页岩气高精度三维地震勘探技术的应用与探讨——以四川盆地焦石坝大型页岩气田勘探实践为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 9-20.
- [5] 刘振武, 撒利明, 杨晓, 等. 页岩气勘探开发对地球物理技术的需求[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 810-818+836+667.
- [6] 赵殿栋. 高精度地震勘探技术发展回顾与展望[J]. 石油物探, 2009, 48(5): 425-435+15.
- [7] 张少华, 邓小江, 冯许魁, 等. 川南地区深层页岩气地球物理勘探技术新进展与攻关方向[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(1): 238-248.
- [8] 王学军, 于宝利, 赵小辉, 等. 油气勘探中“两宽一高”技术问题的探讨与应用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(5): 41-53.
- [9] 刘振武, 撒利明, 董世泰, 等. 中国石油高密度地震技术的实践与未来[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 129-135.
- [10] 管西竹, 汪小将, 薛冬, 等. 地表高程变化对地震信号的散射影响分析[C]//中国石油学会石油物探专业委员会, 中国地球物理学会勘探地球物理委员会. 2022年中国石油物探学术年会论文集(上册). 2022: 382-385.
- [11] 杨小龙. 无线节点仪在复杂山地三维地震数据采集中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(2): 30-36.
- [12] 赵邦六, 董世泰. “两宽两高”地震勘探技术及应用成效[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 24-34.
- [13] 段文桑, 吴朝容, 涂远良. 川南下寒武统筇竹寺组地震勘探难点与关键采集技术[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(4): 41-50.
- [14] 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(2): 134-141+121-122+246.
- [15] 欧居刚, 王小兰, 杨晓, 等. 水平井地震导向技术探索与应用——以四川盆地复杂地区页岩气井为例[J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 551-559.
- [16] 王静波, 敬朋贵, 陈祖庆, 等. 面向深层页岩气“甜点”预测的地震勘探技术进展——以DX探区全方位三维地震为例[J]. 石油物探, 2023, 62(6): 1154-1167.