

川西北部多波多分量地震勘探采集观测系统关键参数优选技术及应用效果

王晓阳¹, 赵容容², 吴增友¹, 任 聪², 李明翼², 李一苇¹, 黎书琴¹, 房平超², 杜均国¹

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分公司, 四川 成都

²中国石油西南油气田公司勘探事业部, 四川 成都

收稿日期: 2024年1月19日; 录用日期: 2024年6月28日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

四川盆地致密气资源潜力巨大, 是西南油气田积极推进“建设300亿, 奋斗500亿”战略目标的重要领域, 近年来已进入加快发展新时期。针对致密气藏多期河道叠置、非均质性强、单层厚度薄的地质特点, 单一纵波资料面临“砂体刻画精度低、含气预测多解性强”两大难题, 横波沿岩石骨架传播, 受流体影响较小, 多波多分量地震勘探技术在储层成像、岩性和流体识别等方面具有独特优势, 成为解决特定地质难题, 提高油气勘探精度的物探技术。本文结合理论方法与实际资料处理分析, 通过面元、覆盖次数、最大偏移距等采集观测系统关键参数的优选, 获得了适合川西北部地区多波多分量采集观测系统方案, 实施后获得了高品质的多波地震资料, 为后续处理解释工作奠定了基础。

关键词

致密气, 纵横波, 观测系统, 优选

Key Parameter Optimization Technology and Application Effect of Acquisition Observation System of Multi-Wave and Multi-Component Seismic Exploration in the Northwest of Sichuan

Xiaoyang Wang¹, Rongrong Zhao², Zengyou Wu¹, Cong Ren², Mingyi Li², Yiwei Li¹, Shuqin Li¹, Pingchao Fang², Junguo Du¹

¹BGP Southwest Geophysical Branch, CNPC, Chengdu Sichuan

²Exploration Business Department of Southwest Oil and Gas Field Company, CNPC, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 19th, 2024; accepted: Jun. 28th, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

The Sichuan Basin has enormous potential for tight gas resources and is an important area for the Southwest Oil and Gas Field to actively promote the strategic goal of “building 30 billion and striving for 50 billion”. In recent years, it has entered a new era of accelerated development. In response to the geological characteristics of multi-stage river stacking, strong heterogeneity, and thin single-layer thickness in tight gas reservoirs, a single longitudinal wave data faces two major challenges: low accuracy in sand body characterization and strong multi resolution in gas content prediction. Shear waves propagate along the rock skeleton and are less affected by fluids. Multi wave and multi-component seismic exploration technology has unique advantages in reservoir imaging, lithology, and fluid identification, and has become a geophysical exploration technology to solve specific geological problems and improve oil and gas exploration accuracy. This article combines theoretical methods with practical data processing and analysis, and through the optimization of key parameters such as panel elements, coverage times, and maximum offset of the acquisition and observation system, obtains a multi wave and multi component acquisition and observation system scheme suitable for the northwest Sichuan region. After implementation, high-quality multi wave seismic data is obtained, laying a foundation for subsequent processing and interpretation work.

Keywords

Tight Gas, P-Wave and S-Wave, Observation System, Optimization

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

川西北部河道砂体叠置发育，二维剖面显示河道砂体亮点反射特征清楚，区内及周边钻井过程中油气显示频繁，共有 7 口井累计 10 次油气显示，其中 G4 井在沙一段测试获日产气 2.16 万方，截止目前已累产气 0.25 亿方。同时，地震地质综合预测 ZT 地区沙一段发育 5 期砂体，累计面积三千多平方公里，资源量四千多亿方，砂体厚度大、物性好，展现出该区巨大的勘探潜力。其次，本区须家河组须二、须三段砂体叠置连片发育，地震资料初步刻画须二段有利面积六百多平方公里，须三段有利面积四百多平方公里；另外，本区位于二叠系茅口组台缘滩和灯影组灯二段台缘带丘滩体发育有利区，具备多层系立体勘探优势[1]-[4]。因此，为进一步落实川西北部地区沙溪庙组、须家河组河道砂组展布特征及规模，兼顾海相二叠系茅口组和震旦系灯影组多层系勘探，加快该区油气勘探进程，为下步井位目标落实及增储上产提供支撑，决定在该区部署三维地震勘探。

常规勘探三维地震资料存在成像精度低、横向保幅能力较差、分辨率低等问题，对河道砂体横向边界预测精度较低。道集中的远炮检距信息不足，造成高置信度的 AVO 属性分析无法实施，制约了对含气甜点砂体的识别[5]-[10]。因此在川西北部部署的三维地震勘探采用多波多分量地震勘探，让转换波地震成果在砂体识别、含气性预测等方面与纵波地震成果形成互补，在四川盆地陆相致密油气藏勘探开发中发挥重大作用。

2. 纵横波联合勘探的观测系统参数优化技术

勘探的过程相互独立又相互衔接。地震勘探采集的资料品质与其后续处理和解释成果有重要的联系。地震采集工作中, 观测系统与野外生产的效率、难度以及成本密切相关, 对地下地质体成像精度影响很大。因此, 开展观测系统参数优化技术研究, 科学合理的设计采集参数, 在保证地震资料品质的前提下, 获得较高性价比的观测系统参数, 为勘探部署、开发及工程部署提供充足可靠的依据意义重大[11]-[14]。

本次多波多分量地震勘探的观测系统参数优化主要通过深入分析转换波传播与纵波的差异, 明确其传播特征, 结合工区三维观测系统, 确定并开展转换波关键参数论证分析, 开展模型正演分析和实际观测系统退化验证, 形成转换波观测系统论证方法。

通过研究, 发现转换波传播具有以下特征: 1) 共转换点具有非对称性特征, 转换点靠近接收点一侧, 覆盖次数不均匀(如图 1 所示); 2) 转换波速度低于纵波速度, 转换波对应的观测系统面元与纵波不一致; 3) CCP 面元内, 炮检距和方位角分布在连续性、均匀性上较 CMP 稍差; 4) 转换波只是在中等炮检距上会有较大的能量。

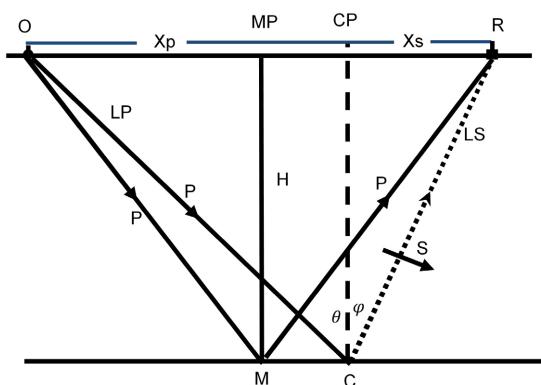


Figure 1. Propagation path of P-SV and P-P
图 1. 转换波 P-SV、纵波 P-P 传播路径

对转换波、纵波叠前道集数据从面元、覆盖次数(炮道密度)、偏移距、接收线距、横纵比方面考虑, 进行不同方式抽取重新构建观测系统, 便于下一步进行观测系统参数分析评价, 从而优选观测系统参数(图 2)。

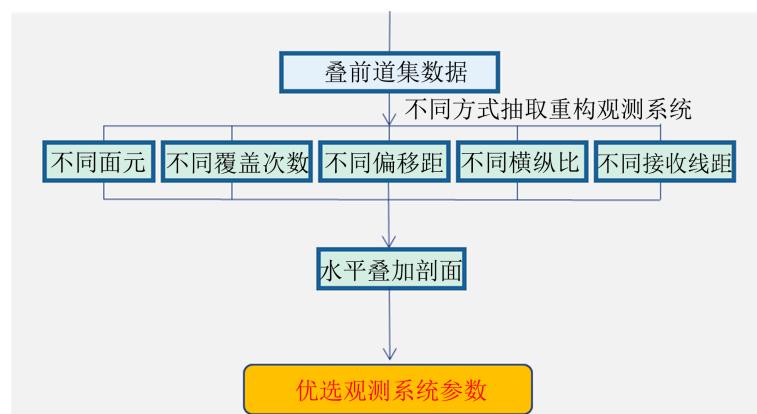


Figure 2. Flow chart of parameter reconstruction technology for geometry
图 2. 观测系统参数重构技术流程图

选取工区三维满覆盖内地表地腹地质条件较好的区域开展多波多分量观测系统退化分析，分析方案详见表 1。

Table 1. Table of degradation analysis schemes for multi wave and multi-component geometry
表 1. 多波多分量观测系统退化分析方案表

原始参数		对比分析参数		工作量(套)	
面元		20×20		20×40、40×20、40×40	
覆盖次数		272		208、176、144、112、80	
偏移距(m)	限最大偏移距	0~7556	0~1000、0~2000、……、0~6000	6×2=12	
	等偏移距		0~1000、1000~2000、……、6000~7556	6×2=12	36
	限最小偏移距	0~7556	1000~7556、……、6000~7556	6×2=12	
接收线距(m)	280		560	1×2=2	
合计				54	

2.1. 偏移距分析

1) 偏移距分析 - 理论分析

最大炮检距有三条要求：1) 要大于目的层深度；2) 入射角要小于临界角；3) 保证最大炮检距动校拉伸后不被切除；在平面 P 波入射时，P 波、SV 波的反射和透射能量分配遵循以下 Zoeppritz 方程(图 3)。

$$\begin{bmatrix} \sin\alpha_1 & \cos\beta_1 & -\sin\alpha_2 & \cos\beta_2 \\ \cos\alpha_1 & -\sin\beta_1 & \cos\alpha_2 & \sin\beta_2 \\ \sin 2\alpha_1 & \frac{V_p}{V_s} \cos 2\beta_1 & \frac{\rho_2 V_{s2}^2 V_p}{\rho_1 V_{s1}^2 V_p} \sin 2\alpha_2 & -\frac{\rho_2 V_{s2} V_p}{\rho_1 V_{s1}^2} \cos 2\beta_2 \\ \cos 2\beta_1 & -\frac{V_s}{V_p} \sin 2\beta_1 & -\frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1 V_p} \cos 2\beta_2 & -\frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1 V_p} \sin 2\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha_1 \\ \cos\alpha_1 \\ \sin 2\alpha_1 \\ -\cos 2\beta_1 \end{bmatrix}$$

Figure 3. Zoeppritz equation

图 3. Zoeppritz 方程

根据工区主要目的层属性建立多层模型，计算四个目的层的 PP 波和 PS 波的反射系数，论证沙溪庙组底界反射系数随炮检距变化的情况。论证结果表明，对于沙溪庙组，PP 波、PS 波反射系数随炮检距变化均在小于 4500 范围内，能量稳定。

2) 偏移距分析 - 实际资料分析

按照表 2 的分析方案，对工区多波、纵波资料进行偏移距分析。

Table 2. Parameter table of offset analysis

表 2. 偏移距分析参数表

序号	实现方式	偏移距范围(m)						
1	限最大偏移距	0~1000	0~2000	0~3000	0~4000	0~5000	0~6000	0~7556
2	等偏移距	0~1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000	4000~5000	5000~6000	6000~7556
3	限最小偏移距	0~7556	1000~7556	2000~7556	3000~7556	4000~7556	5000~7556	6000~7556

根据实际资料分析结果显示,偏移距小于3000 m,转换波信息较少,信噪比低。偏移距大于4000 m,纵波沙底成像效果改善不明显。从速度谱分析来看(图4、图5),随着偏移距增加,沙底能量团逐渐收敛,当偏移距大于4000 m后,沙底能量团变化不明显。

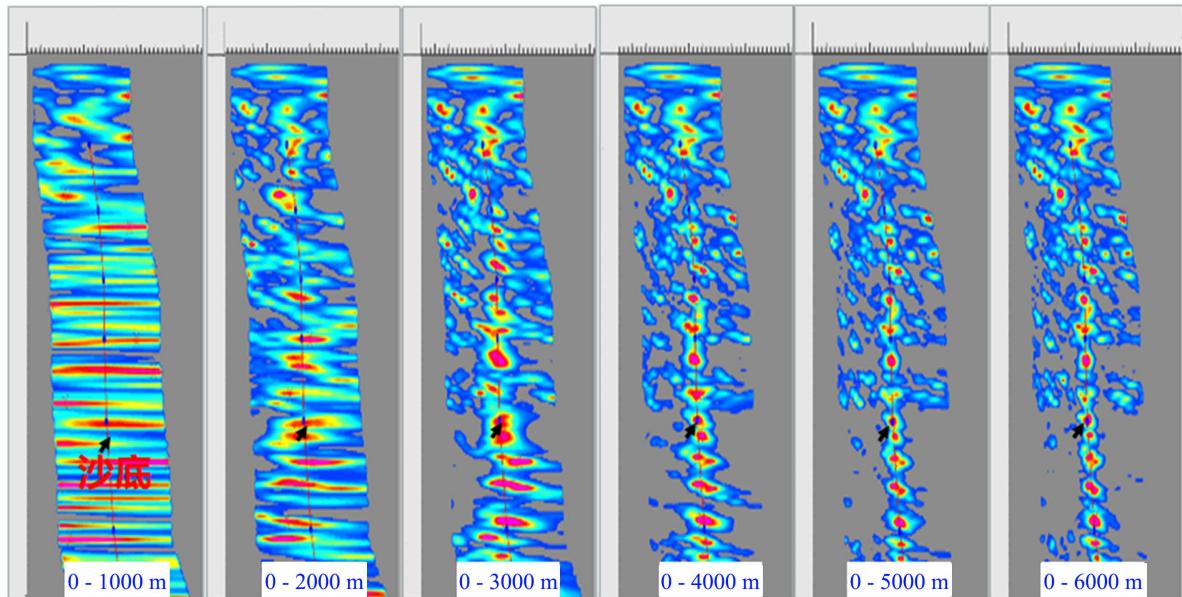


Figure 4. Comparison of velocity spectrum effects at different offset distances (P-SV)

图 4. 不同偏移距速度谱效果对比(P-SV)

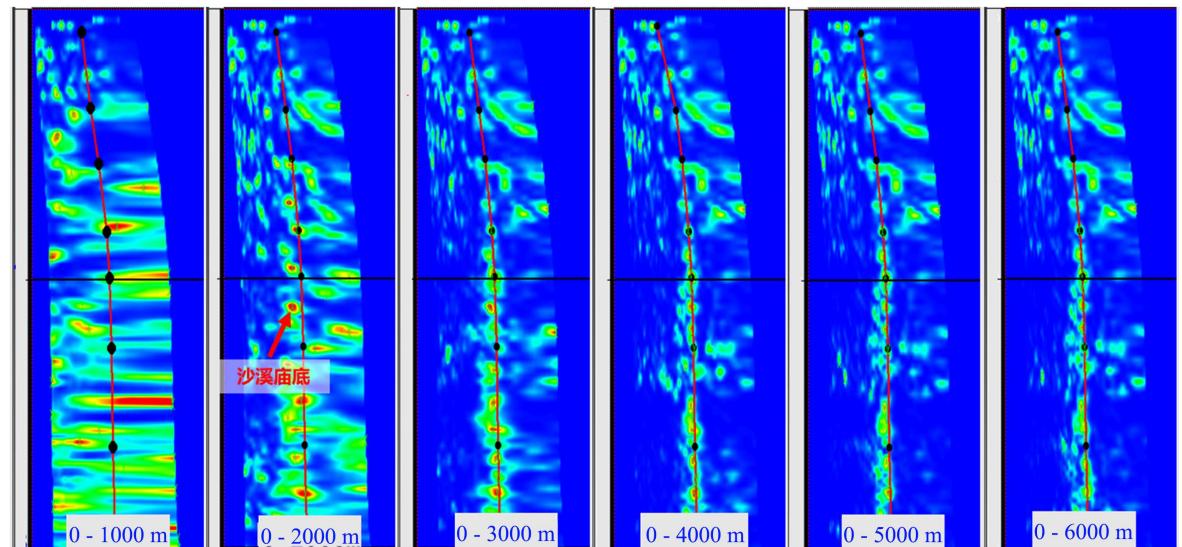


Figure 5. Comparison of velocity spectrum effects at different offset distances (P-P)

图 5. 不同偏移距速度谱效果对比(P-P)

理论论证与数据重构处理评价结果如下:

偏移距对川西北地区转换波成像影响较大,川西北致密气多波勘探,针对沙溪庙组目的层偏移距应在4000 m~4500 m,可以同时满足纵波和转换波获得高信噪比成像需求。转换波等偏资料显示:近偏移距转换波反射信息较少,0 m~1000 m主要是噪音干扰,远偏移距转换波信息对成像贡献较少:4000

m~6000 m 段剖面上, 沙溪庙内部有效反射信息较少; 最有利的高信噪比成像范围在 3000 m~4000 m 偏移距之间。纵波等偏资料显示: 偏移距在 4000 m 以上, 对目的层成像没有贡献。

2.2. 覆盖次数分析

1) 理论分析

由于转换点出现位置的不对称性, 覆盖次数出现高低交替出现, 分布极不均匀。

根据工区观测系统(32L7S306R 正交, RI = SI = 40, RLI = 280, SLI = 360, BIN: 20 * 20), 开展理论计算, 纵波和不同目的层转换波的覆盖次数。

纵波覆盖次数均匀分布稳定, 满覆盖区域稳定、边界清晰(图 6); 转换波覆盖次数分布极不均匀, 相对纵波的满覆盖区域, 覆盖次数高低交替出现, 最高达到 307 次。转换波覆盖次数与地层深度有更高的相关度, 随着目的层深度的增加, 一次覆盖区域逐渐变小, 覆盖次数逐渐变好。

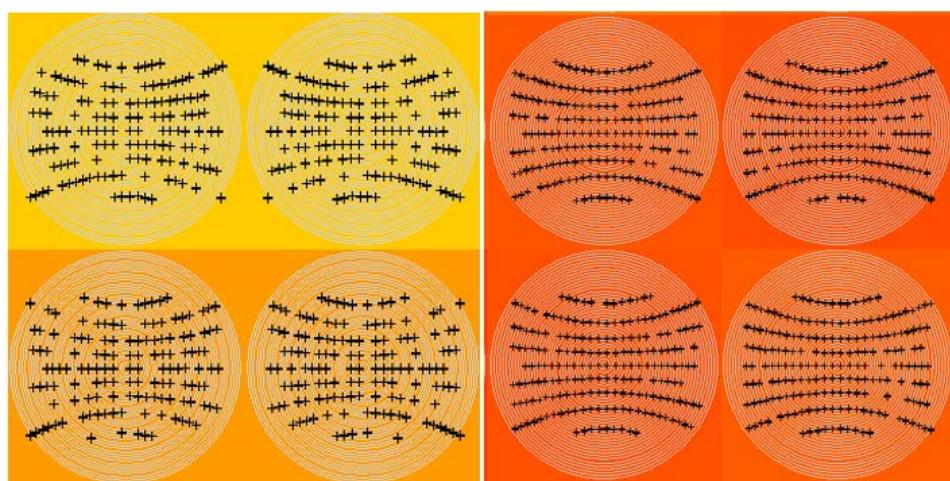


Figure 6. Schematic diagram of the distribution of folds within a bin (Left Bin 20×20 , Right Bin 26.6×26.6)
图 6. 面元内覆盖次数分布示意图(左面元 20×20 , 右面元 26.6×26.6)

2) 实际资料分析

按照表 3 的分析方案, 对工区三维多波、纵波资料进行覆盖次数分析(观测系统 32L7S306R, 接收线距 280 m)。

Table 3. Parameter table of folds analysis

表 3. 覆盖次数分析参数表

序号	实现方式	接收道数	炮线距(m)	纵向面元(m)	横向面元(m)	覆盖次数(次)
1	原始	306	360	20	20	16(横) * 17(纵) = 272
2	炮线 17 抽 2	306	非均匀	20	20	16(横) * 15(纵) = 240
3	炮线 17 抽 4	306	非均匀	20	20	16(横) * 13(纵) = 208
4	炮线 17 抽 6	306	非均匀	20	20	16(横) * 11(纵) = 176
5	炮线 17 抽 8	306	720	20	20	16(横) * 9(纵) = 144
6	炮线 17 抽 10	306	非均匀	20	20	16(横) * 7(纵) = 112
7	炮线 17 抽 12	288	非均匀	20	20	16(横) * 5(纵) = 80

从不同覆盖次数叠加剖面转换波资料可以明显看出：随着覆盖次数的增加，剖面由浅至深成像品质呈逐渐改善趋势；沙底覆盖次数大于 98 次后，成像质量总体差异不大。从等时切片振幅能量图(图 7)可以分析出，随着覆盖次数的增加，等时切片振幅能量逐渐增强，沙底覆盖次数大于 98 次后，振幅能量总体差异不大。

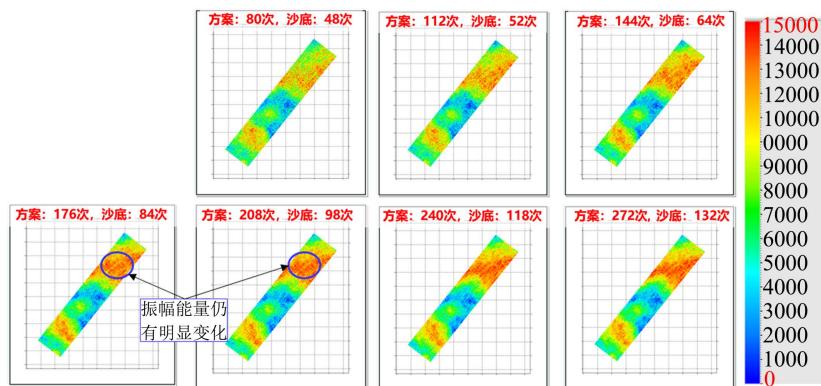


Figure 7. Amplitude energy map of isochronous slices with different folds
图 7. 不同覆盖次数等时切片振幅能量图

从不同覆盖次数信噪比曲线图可以分析出：当沙底覆盖次数达到 98 次(总覆盖次数 208 次)，信噪比增加变缓，因此采用 200 次左右覆盖能够满足纵波、转换波获得较高品质成像需求。

2.3. 面元大小分析

1) 理论分析

随着波速比增加，转换波对应的观测系统面元大小是逐渐增加的；侏罗系沙溪庙组致密气勘探，转换波面元大小的需求小于纵波，约为纵波面元的 1.3 倍。

转换波面元大小：

$$Bin_{p-sv} = \frac{\Delta_x}{1 + v_s/V_p} \times \frac{\Delta_s}{1 + v_s/V_p},$$

其中 Δ_x 为道距， Δ_s 为炮距。

转换波面元大小与波速度比、纵波面元大小有关系。随着波速比增加，转换波满足空间采样要求面元大小是逐渐降低；侏罗系沙溪庙组致密气勘探，转换波空间采样要求面元大小的需求小于纵波，约为纵波面元的 1.6 倍。针对深度为 3000 米左右的侏罗系沙溪庙组致密气勘探，纵波面元大小能够满足转换波勘探需求。

2) 实际资料分析

对三维多波、纵波资料进行覆盖次数分析。纵向面元对纵波资料成像影响较大，对转换波成像影响较小；纵向面元增大为 40 m，纵波剖面横向分辨率和信噪比下降较为明显。横向面元变化，对纵波资料成像影响较大，对转换波成像影响较小；横向面元增大为 40 m，纵波剖面信噪比下降。

从转换波等时切片可以看出，随着面元变大，等时切片上整体振幅能量略有降低，但不影响振幅能量变化趋势。

2.4. 接收线距分析

1) 理论分析

接收线距一般不大于垂直入射时的菲涅尔带半径:

$$R = \sqrt{z_0 \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} \approx \sqrt{\frac{z_0 \lambda}{2}} = \sqrt{\frac{z_0 v_{int}}{2 f_{dom}}}$$

以沙溪庙组转换波接收线距论证为例, 随着波速比的增加, 转换波对接收线距要求严格。当波速比为 2 时, 转换波和纵波对接收线距要求近似。接收线距对致密气成像影响较为重要, 线距过大会导致浅层无法成像。

2) 实际资料分析

280 m 小接收线距相对 560 m 大接收线距对浅层的资料成像更好, 有效反射更清晰可见, 能量更强。

2.5. 观测系统均匀性分析

观测系统设计时, 面元覆盖次数、炮检距、方位角的均匀性是评价观测系统好坏的重要属性之一, 转换波传播射线路径不对称导致不同面元覆盖次数极不均匀, 因此, 采用离散度和变异度对不同面元大小的观测系统进行评价。

开展不同面元大小、相同速度比条件下元属性变异度分析和相同面元大小、不同速度比条件下元属性变异度分析, 得到转换波勘探面元属性变化规律, 形成面元均匀性评价方法。

以工区三维观测系统出发, 论证沙溪庙组面元属性均匀性, 认为面元大小在 20~30 之间, 面元的属性均匀稳定。

川西北部致密气多波多分量地震勘探观测系统关键参数优选结论: 沙溪庙组底覆盖次数大于 98 次; 针对沙溪庙组最大偏移距 4000 m~4500 m; 面元不大于 20 m。

3. 应用效果分析

本轮川西北部三维勘探通过对面元、覆盖次数、最大偏移距、接收线距等观测系统关键参数进行优选, 理论分析与实际资料分析相结合, 评价了不同参数资料成像效果, 并确定了多波多分量地震勘探的采集观测系统参数, 采用宽方位、高密度、高覆盖次数观测系统, 结合创新的三分量检波器标准化埋置工艺、激光雷达+软件智能布设物理点以及精细的过障碍观测系统设计等, 获得了高信噪比、高分辨率的地震资料。

从图 8 新老剖面对比中可以看出, 本轮工区多分量剖面层位特征明显、层间信息更丰富, 品质较邻区有明显提升。

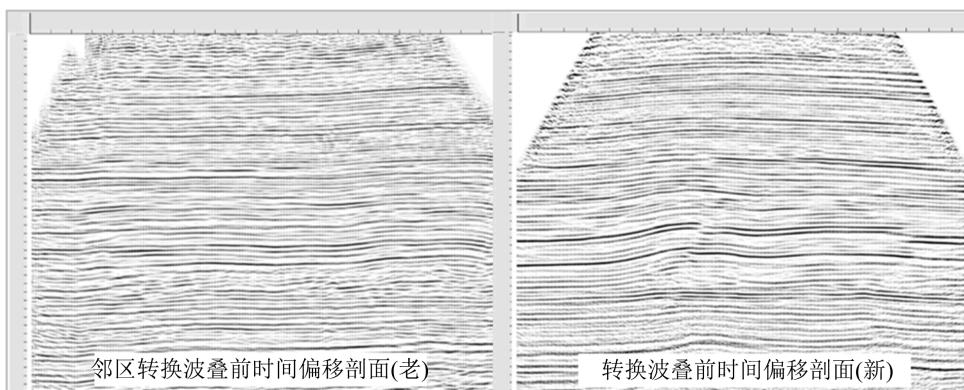


Figure 8. Comparison of new and old PSTM profiles

图 8. 新老资料叠前时间偏移剖面对比

4. 结论

川西北部多波多分量地震勘探通过高精度地震资料采集，特别是观测系统关键参数进行优选等技术的应用，提高了二叠系茅口组像精度，提高了地震资料的信噪比和分辨率，确保了分布均匀的、高质量、高信噪比三维原始地震数据的获得。

致 谢

本论文是川西北部致密气多波多分量地震勘探技术攻关研究及现场试验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] 李广超. 三维 SH 波地震勘探关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [2] 张虹, 李曙光, 徐天吉, 等. 川西深层致密气藏多波地震预测技术及应用[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 91-95.
- [3] 王彦峰, 王乃建, 苏欢欢, 等. 转换波三维地震观测系统关键参数选择[C]//中国石油学会 2015 年物探技术研讨会论文集. 2015 年卷. 涿州: 石油地球物理勘探编辑部, 2015: 733-736.
- [4] 李怀良. 复杂山地多波宽频带地震数据采集关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [5] 吴东国, 刘百红, 孙成龙. 三维三分量地震资料采集设计研究[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1): 85-90.
- [6] 马昭军, 唐建明, 徐天吉. 多波多分量地震勘探技术研究进展[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(4): 247-253.
- [7] 刘振武, 撒利明, 张明, 等. 多波地震技术在中国部分气田的应用和进展[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 668-672.
- [8] 魏建新, 狄帮让. 多波多分量波场的地震物理模型观测[J]. 石油物探, 2005(6): 19-24.
- [9] 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, 59(1): 12-22.
- [10] 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, 40(5): 495-498.
- [11] 张文璨. 三维地震观测系统的优化设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [12] 李军华. 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.
- [13] 张志林, 程登峰, 赵娟. 基于处理的观测系统优化技术[J]. 石油仪器, 2013, 27(2): 46-48.
- [14] 王德志, 贾烈明, 王帮助, 等. 基于勘探目标的观测系统设计[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 498-503.