

石油物探

GEOPHYSICAL PROSPECTING FOR PETROLEUM

川中古隆起北斜坡超深层气藏地震高分辨成像与岩性圈闭识别技术

张旋 张福宏 许翔 闫媛媛 韩嵩 代瑞雪 陈康 张宇生 汤聪

High-resolution seismic imaging and lithologic trap identification for ultra-deep gas reservoirs in northern slope of Central Sichuan Paleo-Uplift

ZHANG Xuan, ZHANG Fuhong, XU Xiang, YAN Yuanyuan, HAN Song, DAI Ruixue, CHEN Kang, ZHANG Yusheng, TANG Cong

引用本文:

张旋, 张福宏, 许翔, 等. 川中古隆起北斜坡超深层气藏地震高分辨成像与岩性圈闭识别技术[J]. 石油物探, 2026, 65(1): 166–175. DOI: [10.12431/issn.1000-1441.2024.0302](https://doi.org/10.12431/issn.1000-1441.2024.0302)

ZHANG Xuan, ZHANG Fuhong, XU Xiang, et al. High-resolution seismic imaging and lithologic trap identification for ultra-deep gas reservoirs in northern slope of Central Sichuan Paleo-Uplift[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2026, 65(1): 166–175. DOI: [10.12431/issn.1000-1441.2024.0302](https://doi.org/10.12431/issn.1000-1441.2024.0302)

在线阅读 View online: <https://www.geophysics.cn/article/doi/10.12431/issn.1000-1441.2024.0302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂地质条件下超深层碳酸盐岩断控缝洞体成像及预测技术

Imaging and prediction technology of fault-karst reservoirs in ultra-deep carbonate rocks under complex geological conditions
石油物探. 2022, 61(5): 865–875 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1441.2022.05.011>

基于自注意力机制的卷积自编码器多次波压制方法

A multiple suppression method based on self-attention convolutional auto-encoder
石油物探. 2022, 61(3): 454–462 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1441.2022.03.007>

基于人工智能的残余绕射多次波衰减技术研究及应用

Diffracted multiples attenuation based on artificial intelligence
石油物探. 2024, 63(6): 1177–1185 <https://doi.org/10.12431/issn.1000-1441.2024.63.06.008>

海相超深层碳酸盐岩地震地质综合模型建模方法研究

Research on integrated seismic-geologic modeling of ultra-deep marine carbonate reservoirs
石油物探. 2024, 63(6): 1247–1258 <https://doi.org/10.12431/issn.1000-1441.2024.63.06.015>

基于载波调制的高分辨率地震双向拓频技术及其应用

High-resolution seismic bidirectional frequency extension based on carrier modulation
石油物探. 2021, 60(6): 954–963 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1441.2021.06.009>

高分辨率井周储层深探测反射声波测井成像方法

High-resolution reflection acoustic logging imaging method for deep reservoir around a well
石油物探. 2022, 61(6): 1077–1089 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1441.2022.06.013>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张旋, 张福宏, 许翔, 等. 川中古隆起北斜坡超深层气藏地震高分辨成像与岩性圈闭识别技术[J]. 石油物探, 2026, 65(1): 166-175
ZHANG Xuan, ZHANG Fuhong, XU Xiang, et al. High-resolution seismic imaging and lithologic trap identification for ultra-deep gas reservoirs in northern slope of Central Sichuan Paleo-Uplift[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2026, 65(1): 166-175

川中古隆起北斜坡超深层气藏地震高分辨成像 与岩性圈闭识别技术

张旋¹, 张福宏², 许翔¹, 闫媛媛¹, 韩嵩¹, 代瑞雪¹, 陈康¹, 张宇生², 汤聪¹

(1. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610041; 2. 中国石油西南油气田公司, 四川成都 610041)

摘要: 川中古隆起北斜坡下古-震旦系岩性圈闭埋深超 6000 m, 地震信号高频衰减现象显著, 主频小于 30 Hz, 60 Hz 以上频段的能量损失超过 70%, 同时, 白云岩、灰岩与硅质层的纵波阻抗重叠率较高, 导致岩性圈闭识别存在强多解性。针对超深层弱信号保真恢复以及复杂岩性叠置等难题, 提出了高分辨成像-智能解释-定量评价一体化技术体系。其中, 基于多尺度信息蒸馏网络的智能去噪技术可使峰值信噪比提升 10 dB 以上, 小波变换时频域能量补偿技术将地震信号主频提升至 35 Hz, 有效频带拓宽 27%, 全波形叠前反演多次波压制技术使井震标定吻合度达到 92%, 实现了超深层弱信号的高保真恢复与复杂波场的准确重构; 相位旋转层序解释方法与地质-地球物理协同反演体系使储层预测误差小于 15%, 有效提高了超深层复杂圈闭的识别精度。应用结果表明, 研究区岩性圈闭识别符合率从 62% 提升至 81%。人工智能驱动的地震数据处理及资料解释技术为超深层弱信号恢复与岩性差异表征提供了智能解决方案, 对于国内其他区域的复杂油气藏勘探具有重要借鉴意义。

关键词: 超深层; 岩性圈闭识别; 高分辨率成像; 人工智能; 多次波压制; 储层预测

中图分类号: TE; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2026)01-0166-10

DOI: 10.12431/issn.1000-1441.2024.0302

High-resolution seismic imaging and lithologic trap identification for ultra-deep gas reservoirs in northern slope of Central Sichuan Paleo-Uplift

ZHANG Xuan¹, ZHANG Fuhong², XU Xiang¹, YAN Yuanyuan¹, HAN Song¹, DAI Ruixue¹,
CHEN Kang¹, ZHANG Yusheng², TANG Cong¹

(1. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The Lower Paleozoic-Sinian lithologic traps on the northern slope of the Central Sichuan Paleouplift, at depths exceeding 6,000 m, exhibit significant high-frequency seismic attenuation. This is evidenced by dominant frequencies below 30 Hz and over 70% energy loss in the 60 Hz band. Furthermore, the P-impedance distributions of dolomites, limestones, and siliceous layers show an overlap over 70%, resulting in great uncertainties of lithologic trap identification. To address the challenges of ultra-deep weak signal recovery and complex lithology discrimination, this study proposes an integrated technical suite comprising true signal recovery, high-resolution imaging, intelligent interpretation, and quantitative evaluation. Intelligent denoising using a multi-scale information distillation network boosts the peak signal-to-noise ratio by over 10 dB. The wavelet transform-based time-frequency energy compensation technique elevates the dominant frequency to 35 Hz and broadens the effective band

收稿日期(Received): 2024-11-27; 接收日期(Accepted): 2025-04-14; 网络出版(Published): 2025-10-29。

第一作者简介: 张旋 (1987—), 男, 高级工程师, 从事碳酸盐岩地球物理科研工作。E-mail: 575511740@qq.com

基金项目: 中国石油集团攻关性应用性科技专项 (2023ZZ16) 和新型油气勘探开发国家科技重大专项 (2025ZD14025) 共同资助。

This research is financially supported by the Key Applied Research Program of China National Petroleum Corporation (Grant No. 2023ZZ16) and the National Science and Technology Major Project of China for New-type Oil and Gas Exploration and Development (Grant No. 2025ZD14025).

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

by 27%. The FWI-based multiple suppression technique, which reconstructs multiples' travel paths via wave equation-based forward modeling and FWI, achieves a 92% well-to-seismic correlation. These techniques collectively enable high-fidelity recovery of ultra-deep weak signals and accurate reconstruction of complex subsurface wavefields. The integration of phase rotation-based sequence interpretation (with vertical resolution of 10 m) and a geological-geophysical co-inversion strategy (with reservoir prediction error below 15%) facilitates a dramatic improvement in both qualitative and quantitative identification of ultra-deep complex lithologic traps. Field applications in the gas field demonstrate a significant increase in lithologic trap identification accuracy from 62% to 81%. This AI-driven seismic data processing and interpretation system provides an intelligent solution for ultra-deep weak signal recovery and lithology differentiation, and its success offers a valuable reference for the exploration of other complex hydrocarbon reservoirs in China.

Keywords: ultra-deep, lithologic trap identification, high-resolution imaging, artificial intelligence, multiple suppression, reservoir prediction

川中古隆起北斜坡位于四川盆地中部,安岳气田以北,属于川中古隆起的北翼部分,其超深层岩性圈闭的目的层位为下古-震旦系,埋深超过 6 000 m。该区域经历了多期构造运动,包括桐湾运动、加里东运动、东吴运动、印支运动以及燕山-喜山运动等,导致地质条件复杂^[1-3]、地层结构多变、岩性变化频繁。丘间洼地致密层通过侧向封堵作用形成岩性圈闭,有利于成藏,但也使得储层分布规律难以掌握,岩性圈闭识别难度大。随着安岳气田全面进入开发阶段,2018 年,北斜坡地区开启风险勘探,目前已发现多个气藏,正处于多层系集中勘探阶段。然而,当前勘探对象已逐渐转向岩性气藏,面临岩性圈闭识别与刻画难题。早期勘探主要采用常规技术初步探测,随后引入了高分辨率勘探技术,但对超深层岩性圈闭的勘探效果仍不理想。传统的叠前时间偏移、叠后反演等技术难以有效恢复超深层的微弱地震信号,影响了成像精度。同时,传统岩性圈闭识别方法受实钻井资料的限制,对圈闭边界的判定不够准确。

研究区地震资料品质较低,岩性圈闭识别面临三大核心挑战。①地震信号高频衰减严重。受深层强吸收作用的影响,地震信号高频衰减显著,有效频宽较窄,信噪比低(小于 0.5),常规数据处理后的地震信号主频不足 30 Hz,纵向分辨率低于 30 m,严重制约了岩性圈闭的识别与刻画。②白云岩与硅质层、灰岩的纵波阻抗重叠率超过 70%,叠后反演结果多解性显著,难以准确区分不同岩性,岩性差异表征困难。③采用传统相面法进行圈闭定位时,岩性边界定位偏差为 20%~30%,难以满足当前高精度地震勘探的需求。

人工智能技术的兴起为弱信号恢复与岩性识别提供了一种有效的解决手段。以岩性圈闭精细成像和岩性圈闭定性定量表征为问题导向,建立了高分辨成像-智能解释-定量评价三位一体的技术体系,有效

提升了超深层岩性圈闭的识别精度,拓展了地震勘探技术在超深层领域的应用。

1 超深层岩性圈闭成像关键技术

图 1 为过 ZJ2-ZJ101-ZJ103 井连井地震叠前时间偏移剖面。其地震动力学特征显示,ZJ101 井区(储层欠发育)的地震属性表现为低频强反射,与 ZJ2 井区(储层发育)的高频杂乱地震相存在明显差异,与 ZJ103 井区(储层发育)岩性圈闭具有相似特征,可见传统地震成像在识别复杂岩性边界时存在多解性问题。从地质成因来看,川中古隆起北斜坡经历多期构造叠加改造,导致地层非均质性强、岩性界面波阻抗差异小,给岩性圈闭成像带来挑战。

地球物理约束条件则显示^[4]:①超深层覆盖层会产生复合滤波效应,高频成分(大于 60 Hz)在经过志留系至寒武系的多套泥页岩层系后,衰减幅度超过 70%;②浅层多套低速层(速度小于 3 000 m/s)会引发速度-密度双界面效应,造成地震波场相位畸变并混入多次波;③深层地震子波的主频降至 15 Hz 以下,根据波长计算公式可知,其分辨率已突破岩性体尺度的识别阈值。基于地震波场传播方程与岩石物理的耦合分析可知,当前的地震资料频带(8~55 Hz)缺失和保真度不足(信噪比小于 2.0),难以实现岩性圈闭的精准成像。因此,亟需发展一套针对岩性圈闭成像的宽频、高保真地震数据处理技术体系,为岩性圈闭识别提供高品质地震数据。

成像研究主要开展了 3 个方面的技术攻关:①利用基于多尺度信息蒸馏网络的智能去噪算法提取高频端弱信号;②引入倍频程理念,开展地震子波分频能量补偿研究,恢复各频段信号能量;③利用基于全波形叠前反演的多次波预测技术降低多次波对地震数据偏移质量的影响,提高井震吻合度。

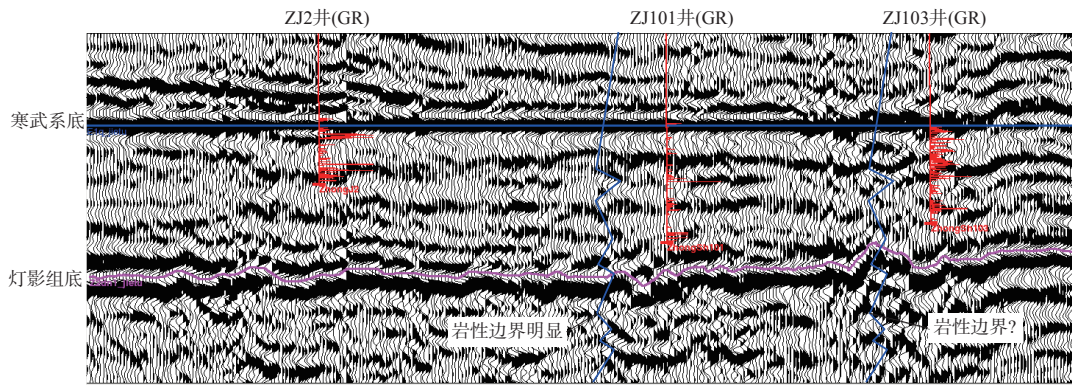


图 1 过 ZJ2-ZJ101-ZJ103 井连井地震叠前时间偏移剖面

Fig. 1 Cross-well (ZJ2-ZJ101-ZJ103) section after prestack time migration

1.1 基于多尺度信息蒸馏网络的智能去噪

传统的时间-空间域与频率-波数域方法受傅里叶基函数全局平稳性假设的制约,在信号与噪声的频谱发生混叠的区域难以构建有效的判别边界,导致传统方法处理后 50~100 Hz 频段的信噪比仍然低于地质解释的要求^[5]。

为解决超深层地震勘探中高频弱信号与强噪声谱重叠的难题,区别传统线性变换技术思路,提出基于特征空间解耦的多尺度智能去噪技术,其创新点有以下 3 个方面:首先,构建多尺度信息蒸馏网络,将物理场信号分离问题转化为特征空间的非线性映射学习,具体技术流程如图 2 所示。该网络通过变尺度卷积核自适应提取地震波场的多尺度特征,实现信号与噪声在特征空间的高精度解耦。其次,研发了面向地质场景的数据增强体系,采用旋转、缩放、噪声扰动等复合增强策略,显著提升模型对复杂地质构造的泛化能力。第三,实现了超深层信号保真与保幅的双重技术增量——在埋深超过 6000 m 的震旦系灯影组储层反射信号处理中,该网络不仅实现-25 dB 强噪声背景下弱反射同相轴的精确保留,同时能将振幅相对误

差控制在 5% 以内,降低了传统方法因人工参数调节导致有效信号畸变的技术误差。

基于多尺度信息蒸馏网络的智能去噪技术的具体应用步骤如下:①基于北斜坡工区的实际数据与正演数据,构建多维度训练集;②利用基于地质物理约束的数据增强技术提升模型鲁棒性;③构建深度学习网络,用以学习信号特征、噪声特征及其非线性差异;④采用动态聚焦损失函数,对网络参数进行迭代优化;⑤形成可迁移的智能数据处理模型。

图 3 为 PT1 井区常规去噪与深度学习处理的分频叠加剖面。可以看出,相较于传统去噪方法,深度学习方法提升了高频端(大于 40 Hz)的信噪比和分辨率,高频端有效信号明显增多,其信噪分离结果相比传统方法提升 2.8 dB,显著提升了薄互层地质体的成像精度,更有利于后续开展岩性解释工作。实际资料应用结果表明,基于多尺度信息蒸馏网络的智能去噪技术在超深层地层吸收衰减区可使信噪比有效提升,为超深层岩性圈闭识别提供高保真的地震数据。

1.2 基于小波变换时频域分析的能量补偿

针对传统全频带能量补偿方法在强衰减条件下

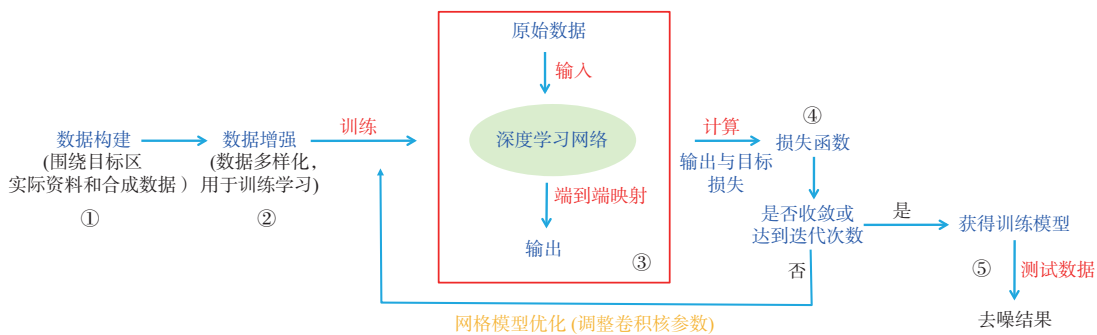


图 2 基于多尺度信息蒸馏网络的智能去噪技术流程

Fig. 2 Workflow of intelligent denoising based on multi-scale information distillation network

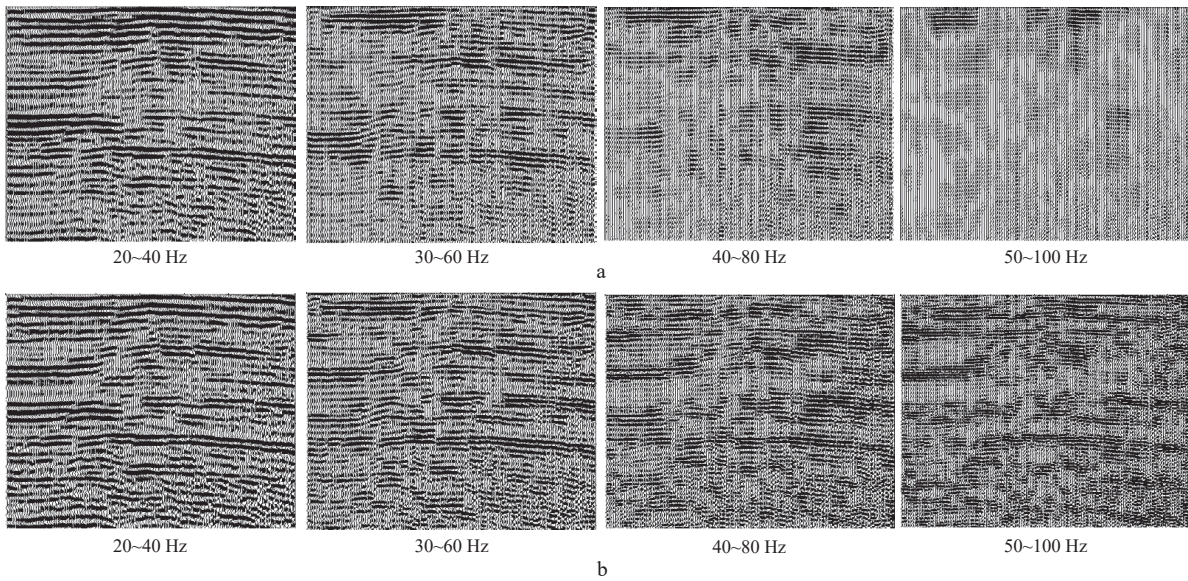


图 3 PT1 井区常规去噪 (a) 与深度学习处理 (b) 的分频叠加剖面

Fig. 3 Frequency-division stacked sections across PT1 well field after routine denoising(a) and deep learning-based denoising(b)

难以实现分频段的精细调控且易引发假频干扰等问题^[6-7],提出了基于小波变换时频域分析的能量补偿技术,具体技术流程如图 4 所示。考虑到地震信号的低频成分蕴含着储层流体信息,而高频成分控制着薄层分辨率,引入倍频程分解与重构理论,利用小波基函数所具有的时频局部化特性,实现地震子波的多尺度分解。在此基础上,依据 VSP 实测子波建立空变频带约束模型,将构建的各频段能量包络趋势面作为补偿基准面,进而改进了传统固定门限补偿的线性处理模式。该技术采用时频双域联合迭代优化算法,在消除频带间能量跃变的同时,能够保持子波相位的稳定性,实现对 5~65 Hz 宽频地震信号的保真补偿。

图 5 展示了基于小波变换时频域分析的能量补偿与地表一致性振幅补偿后的地震剖面及其频谱。可见,基于小波变换时频域分析的能量补偿技术在拓宽

有效频带(从 8~55 Hz 拓宽至 5~65 Hz, -20 dB)的同时,既规避了高频段的假频干扰,又完整保留了低频成分的油气响应特征,使目的层主频提升了 15%,且频带能量结构更接近真实地层响应。相较于传统全频带补偿方法(如地表一致性振幅补偿),基于小波变换的能量补偿方法在强衰减条件下(Q 值小于 80)展现出独特优势,其分频补偿精度达到 ± 1.5 dB,假频抑制率超过 85%,有效规避了宽频补偿过程中信号失真的风险。

1.3 全波形叠前反演多次波压制

研究区浅层低速层广泛发育,导致目的层存在大量复杂层间多次波。这类异常波严重制约了地震资料成像精度,其所产生的虚假反射同相轴不仅会造成构造解释偏差,还会影响波阻抗反演结果的可靠性。以 PT1 井为例,寒武系底界下方出现的异常强反射在

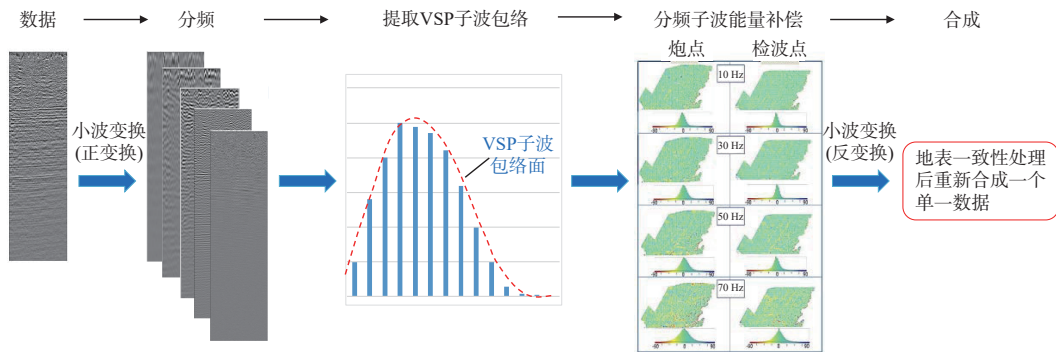


图 4 基于小波变换时频域能量补偿技术流程

Fig. 4 Workflow of wavelet transform-based time-frequency energy compensation

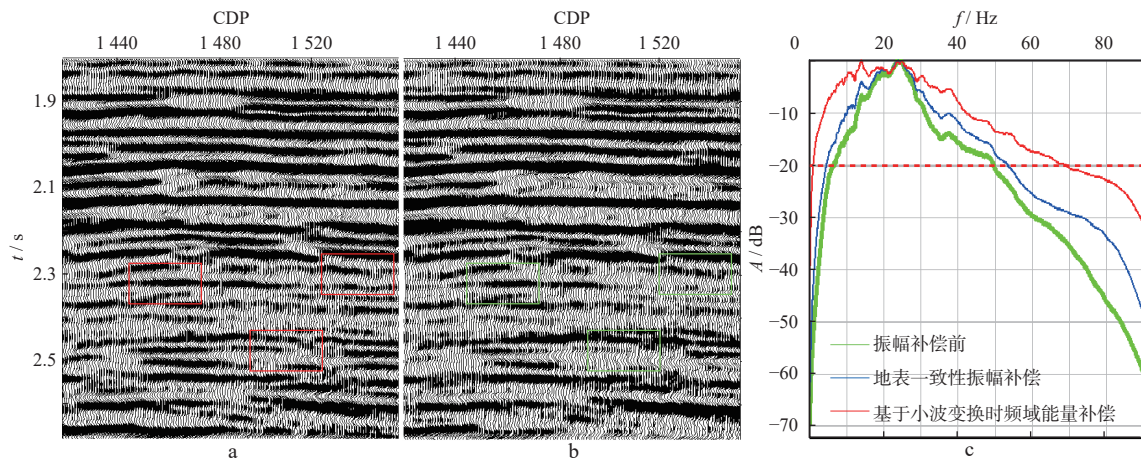


图 5 基于小波变换时频域分析的能量补偿 (a) 与地表一致性振幅补偿 (b) 的地震剖面及其频谱 (c)

Fig. 5 Seismic sections after wavelet transform-based time-frequency energy compensation (a) and surface-consistent amplitude compensation (b) as well as their spectra (c)

合成记录与测井曲线中均找不到对应的阻抗界面, 经证实为典型多次波干扰^[8](图 6a)。为解决传统速度谱法在识别短程层间多次波方面的难题, 采用全波形反演 (FWI) 技术构建了高精度速度-阻抗模型。该方法首先通过 VSP 速度约束建立低频速度场, 利用叠后正演结果逼近实际叠加剖面; 再基于非线性最优化理论, 以偏移后的共反射点道集 (CRP) 为约束条件, 通过多轮迭代反演逐步修正速度场的高频分量; 最后借助双程波波动方程正演模拟技术精确重构多次波的传播路径, 并建立干扰波场模型。经过正演 CRP 道集与原始道集匹配相减处理后, PT1 井区灯影组内部的异常波峰得以有效压制, 其井震标定的吻合度显著提

升(图 6b 至图 6e)。该技术体系将波动方程正演与反演进行耦合迭代, 摆脱了传统方法对多次波运动学特征的依赖, 为复杂波场环境中真、伪反射的识别提供了新的地球物理解决方案。

综合上述各项技术, 构建了去噪-补偿-波场重构一体化处理流程。图 7 为一体化处理前、后地震成像剖面。对比可见, 该流程显著提升了超深层岩性圈闭的成像精度, 一体化处理后的成像目的层波组特征清晰, 内幕层次丰富、细节分明, 横向地震相变化明显, 可解释性增强, 与老资料相比, 其岩性圈闭识别能力明显更优。该技术流程为复杂地质条件下隐蔽性岩性圈闭的精准识别提供了系统性的解决方案。

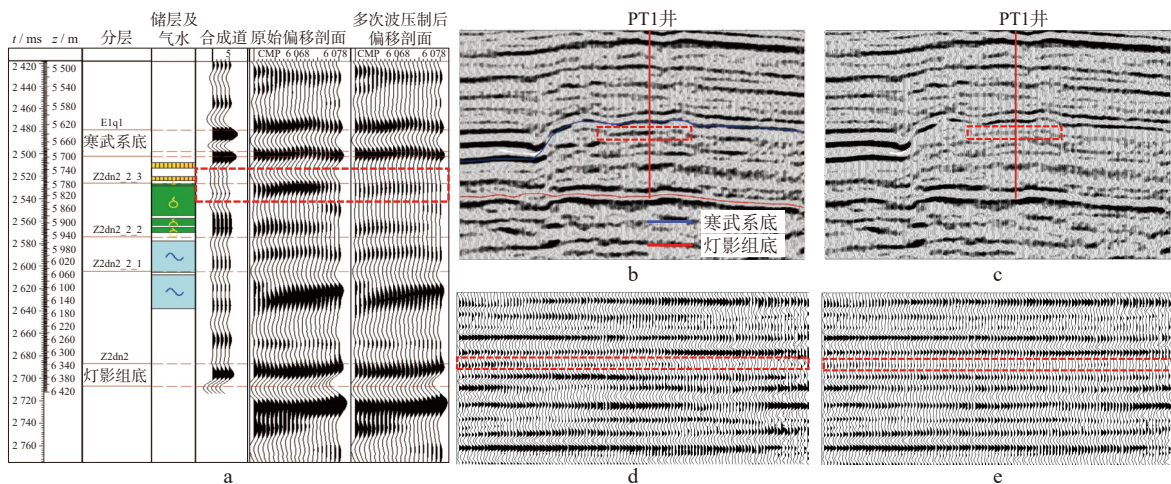


图 6 利用 FWI 方法压制多次波前、后的偏移剖面及道集

a 合成记录标定及多次波展示^[8]; b 原始偏移剖面; c 多次波压制后的偏移剖面; d 原始道集; e 多次波压制后的道集

Fig. 6 Stacked sections and gathers before and after FWI-based multiple suppression

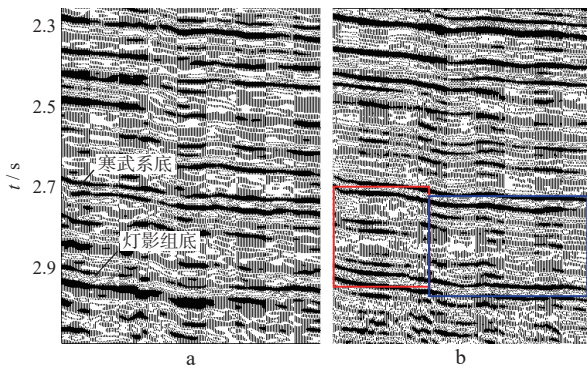


图 7 一体化处理前 (a)、后 (b) 地震成像剖面

Fig. 7 Seismic sections before (a) and after (b) processing using proposed methods

2 超深层岩性圈闭识别关键技术

研究区岩性圈闭纵向叠置复杂、储层非均质性强,传统地震相分析技术存在小层追踪多解性显著、储层响应特征模糊等缺陷^[9]。为此,通过技术创新与多维度数据融合,构建了高频层序约束-储层智能表征-反演方法集成的超深层岩性圈闭识别技术体系,实现了从定性识别到定量表征的技术增量。

2.1 基于高频层序约束的岩性圈闭定性识别

针对灯二下₃底界层位的追踪难题,借鉴用于识别河道砂的 -90° 相位移方法^[10],并将其应用于碳酸盐岩地层,即对地震数据进行相位旋转,将反射波波谷转换至岩性体中心位置,使地震同相轴的顶、底界能

直接反映岩性体的顶、底界,从而更利于层序追踪。利用该技术完成了灯二下₃底界的对比与追踪,结果如图 8 所示。可见,灯二下₃底界由原始的“单-多波谷”形态转换为统一的“临界点”形态,有效降低了碳酸盐岩地层薄层追踪的多解性,明确了其追踪结果,常规剖面追踪难题得到有效解决。此外,利用高频层序界面实现了精细古地貌恢复、地层展布分析以及小层控制下的沉积-地震相分析,定性刻画了灯二下、灯二上和灯四段的岩性圈闭,并明确了岩性圈闭内储层相对发育区和岩性圈闭外储层欠发育区。

2.2 超深层多尺度储层智能定量表征

传统叠后递推反演结果的纵向分辨率低,难以分辨目的层中的薄储层。基于模型的反演方法,其结果受模型影响很大,难以反映客观的地质规律^[11]。而叠后波阻抗反演方法无法区分硅质、灰岩等低速假储层的地球物理特征,且叠前反演对叠前 AVO 的要求较高,目前在埋藏 6000 m 以深地区,叠前地震资料品质相对较低。为解决上述问题,提出了动态波形自动匹配与地质-地球物理协同反演的技术体系。

2.2.1 动态波形自动匹配

传统基于波形的储层预测方法是利用测井信号(包含电阻率、声波时差等岩石物理参数)与地震信号(反映波阻抗空间变化)的异构特征建立地质与地震的跨域关联模型^[12],但其结果中已知钻井波形与未知波形的匹配度较低。为了提高波形匹配度,提出了一种基于动态滑动时窗的地球物理多尺度数据融合方

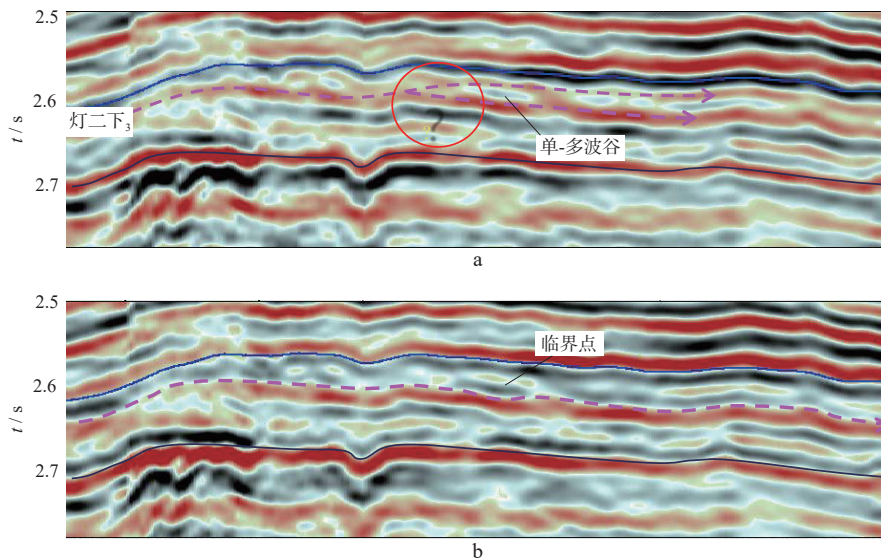


图 8 -90° 相位移方法应用前 (a)、后 (b) 地震剖面及解释结果

Fig. 8 Seismic sections and interpretation before (a) and after (b) -90° phase shift

法。该方法的原理如图 9 所示,具体技术流程为:①挖掘测井数据,构建储层特征参数空间,量化孔隙度、渗透率等关键地质属性;②设计动态滑动时窗算法,在时空域中同步优化时窗位置和尺度参数,并采

用相关系数-欧氏距离复合判据实现波形特征与储层属性的非线性映射;③引入迁移学习机制,将井点处建立的关联模型向三维地震体进行空间外推,形成具有地质可解释性的储层概率分布模型。图 10 展示了

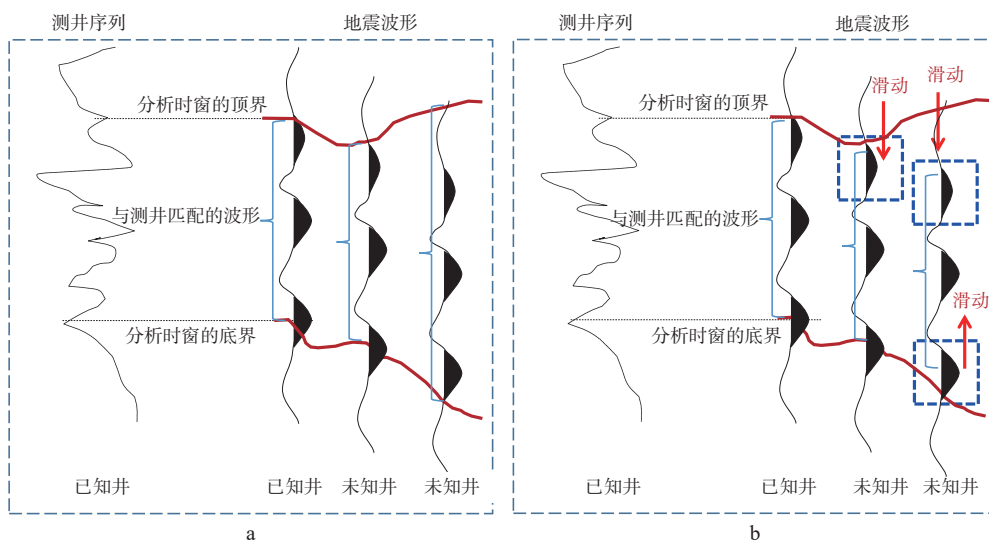


图 9 固定分析时窗 (a) 与滑动分析时窗 (b) 的原理示意

Fig. 9 Schematic diagram illustrating the principle of fixed-window(a) and sliding-window(b) analysis

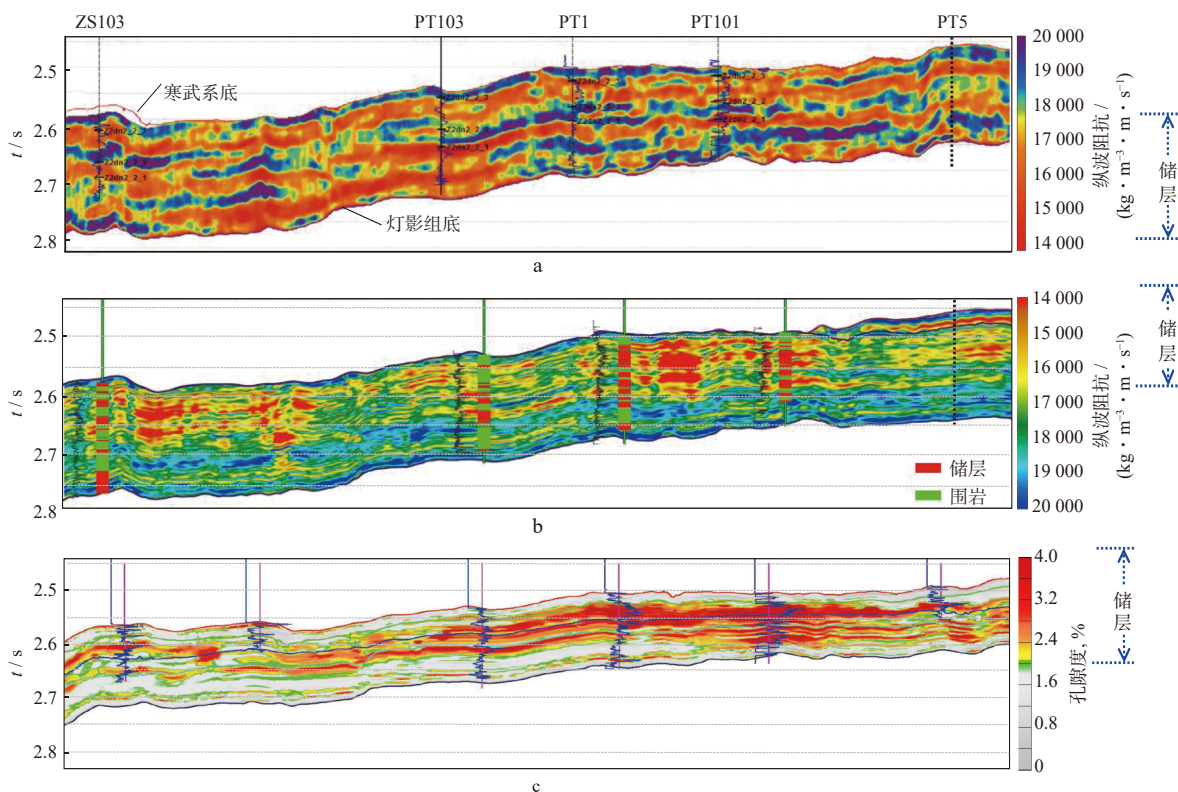


图 10 叠后储层预测方法对比剖面 (测井曲线为孔隙度曲线, 其基线均为 2%)

a 递推反演; b 模型反演; c 基于滑动时窗的测井信号与地震信号自动匹配

Fig. 10 Comparison of poststack reservoir prediction methods (with log-interpreted porosity curves, 2% baseline)

叠后储层预测方法对比剖面。该方法结合三维波形属性融合分析,将灯影组储层识别吻合率较常规方法提升了 23%,尤其对于薄互层状储集体的纵向分辨率达到了 5 m 量级。区别于传统“固定时窗”的常规思路,基于滑动时窗的测井信号与地震信号自动匹配技术实现了同一波形的多点自动动态追踪与匹配,寻求波形相似最优解,提高储集体预测精度,有效克服了地层界面不确定性对匹配精度的干扰。

2.2.2 地质-地球物理协同反演

叠前与叠后地震反演在油气勘探开发领域得到了广泛且成功的应用,其中波阻抗反演技术已成为储层预测的核心手段^[13-14]。近年来,多种反演软件应运而生,这些反演软件各具优势。然而,针对川中古隆起北斜坡灯四段,究竟哪种反演方法和软件最为适用,一直未有定论。依据灯四段实际钻井参数和现有地质认识构建了地质模型,并基于该地质模型进行弹性波动方程正演模拟,获取正演理论地震数据。随后,利用基于正演数据对不同反演方法进行测试,进而在已知地下地质特征的前提下,利用反演结果客观评价不同反演方法对研究区实际地质条件的预测和识别效果。

图 11 为 DB1 井储层模型。图 12 为不同叠前、叠后反演方法的过 DB1 井剖面。由图 12 可见,地质统计学反演方法凭借其空间变异结构的表征优势,适用于顶部 I 类储层(孔隙度大于 3%)与灰岩薄层的预测,通过克里金算法融合井点参数与地质先验信息,

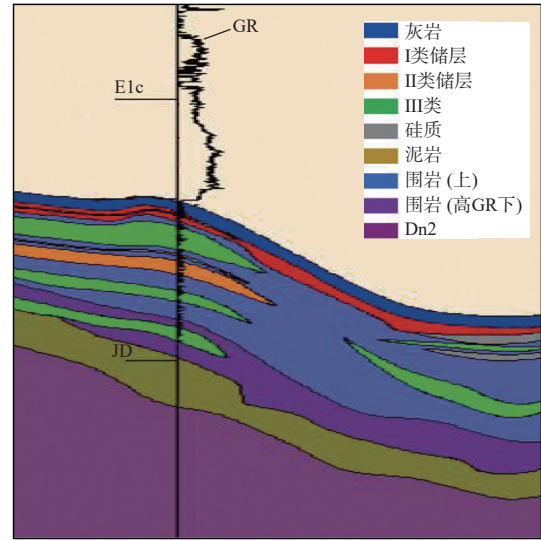


图 11 DB1 井储层模型

Fig. 11 The reservoir model of Well DB1

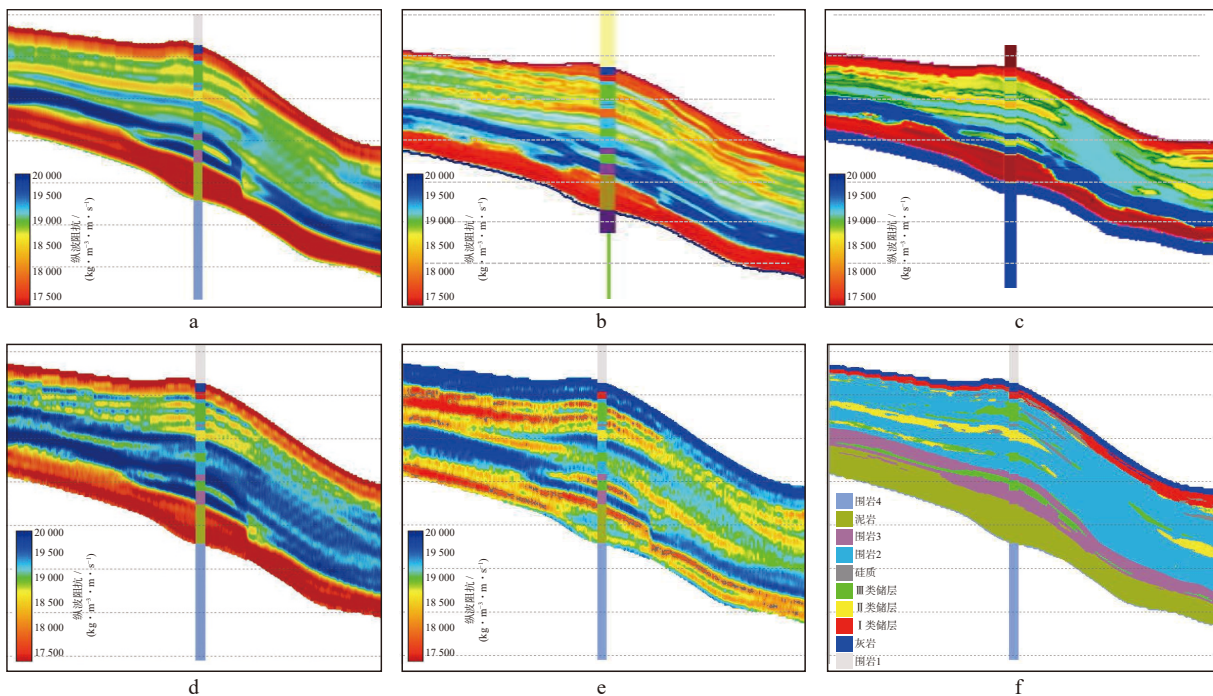


图 12 不同叠前、叠后反演方法的过 DB1 井剖面

a 叠后稀疏脉冲反演; b 叠后波形指示反演; c 基于滑动时窗的测井信号与地震信号自动匹配; d 叠前同时反演; e 叠前同时纵横波速度比反演; f 叠前地质统计学反演

Fig. 12 Prestack and poststack inversion sections across Well DB1

有效刻画储层非均质性;针对硅质层和泥岩层独特的地震响应特征,提出叠前-叠后联合反演策略,其中叠前 AVO 属性捕捉岩性敏感参数,叠后反演提供背景约束以压制强反射界面干扰,二者协同作用提升了薄互层的分辨率;对于孔隙度小于 3% 的 II/III 类储层,采用叠后稀疏脉冲反演方法建立宏观骨架,并结合地质统计学反演方法进行物性精细表征,实现了计算效率与预测精度的平衡。基于构建已知模型-生成模拟数据-方法测试的地震反演方法实现了对不同反演结果的定量评价。

3 勘探成效分析

岩性圈闭评价的关键参数是储层厚度与物性非均质性。如图 13 所示,研究区灯四段储层厚度介于

10~80 m,高孔渗储层(孔隙度大于 3%)主要分布于丘滩相带(图 13 中黑色圈内区域),其地震响应表现为高频杂乱反射特征,与围岩的低频强轴形成明显差异,这为岩性圈闭的识别提供了地球物理依据。储层内部致密夹层(图 13 中黑色圈外的蓝色区域)的分布进一步加剧了非均质性,导致局部圈闭边界模糊。利用动态波形匹配技术与地质统计学反演方法对岩性圈闭进行了评价,明确了致密夹层与白云岩储层的波阻抗差异,有效降低了识别过程中的多解性,精准刻画了圈闭边界,实现了川中北斜坡超深层岩性圈闭的定位、定性及定量刻画。经研究区多口井验证,圈闭识别符合率超过 80%。应用该研究成果,在川中古隆起北斜坡刻画面积大于 30 km² 的灯二段岩性圈闭 7 个、灯四段岩性圈闭 13 个,支撑了研究区灯影组灯二段和灯四段井位论证跟踪、储量预测等工作。

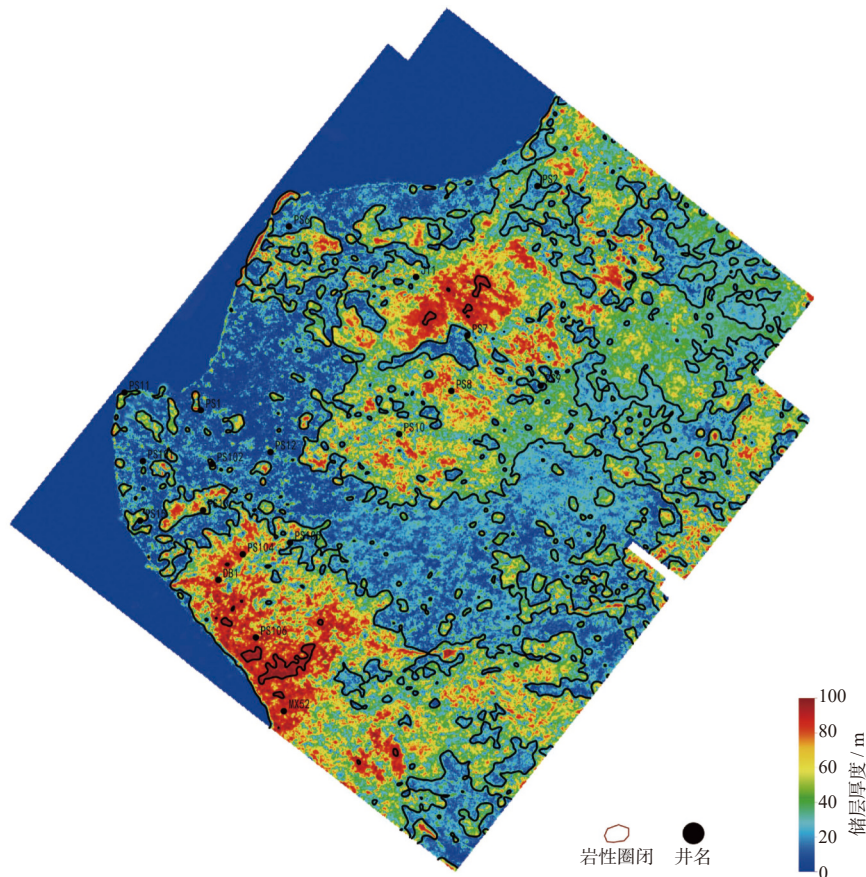


图 13 灯四段储层厚度及岩性圈闭平面分布

Fig. 13 Reservoir thickness and lithologic trap distribution in the fourth member of the Dengying Formation

4 结束语

针对川中古隆起北斜坡超深层岩性圈闭勘探中

地震信号高频衰减严重、岩性差异表征模糊及边界定位偏差大等难题,通过多学科交叉融合,构建了高分辨成像-智能解释-定量评价一体化技术体系。在地

震数据处理方面,基于深度学习特征空间解耦,提出了多尺度信息蒸馏网络智能去噪技术,实现了强噪声下弱信号的高保真恢复(峰值信噪比提升 10 dB 以上);结合小波变换时频域能量补偿技术,通过倍频程分解与空变频带约束模型,将地震信号主频提升至 35 Hz、有效频带拓宽了 27%,降低了传统振幅补偿方法的假频效应;基于全波形叠前反演的多次波压制技术利用波动方程正演与反演迭代耦合,使井震标定吻合度提升至 92%,显著压制了浅层低速层速度的干扰。在地震解释方面,相位旋转层序解释技术解决了碳酸盐岩地层小层追踪的多解性难题;地质-地球物理协同反演体系融合了动态波形匹配与迁移学习机制,使储层纵向分辨率达到 5 m。在应用成效方面,川中北斜坡超深层岩性圈闭识别符合率从 62% 提升至 81%,为井位部署和储量预测提供了有力支撑。但是,本文一体化技术体系仍在一定程度上依赖原始地震数据品质与样本井的数量,未来需进一步融合多源异构数据、强化学习算法,构建具备自适应地质约束的智能勘探系统,以实现更广域、更深层的精准预测。

参考文献 (References)

- [1] 赵邦六,董世泰,刘依谋,等.中国石油陆上高难度探区地震勘探突破与启示[J].石油地球物理勘探,2024,59(1):169-184.
ZHAO B L, DONG S T, LIU Y M, et al. Breakthrough and inspiration in seismic exploration of highly difficult exploration area on land of CNPC[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(1): 169-184.
- [2] 杨跃明,文龙,罗冰,等.四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征[J].石油勘探与开发,2016,43(2):179-188.
YANG Y M, WEN L, LUO B, et al. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnusi paleohigh, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 179-188.
- [3] 罗冰,罗文军,王文之,等.四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系气藏形成机制[J].天然气地球科学,2015,26(3):444-455.
LUO B, LUO W J, WANG W Z, et al. Formation mechanism of the Sinian natural gas reservoir in the Leshan-Longnusi Paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 444-455.
- [4] 罗冰,杨跃明,罗文军,等.川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J].石油学报,2015,36(4):416-426.
LUO B, YANG Y M, LUO W J, et al. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 416-426.
- [5] 张旋,冉崎,陈康,等.川中地区安岳气田走滑断裂对灯影组储层及含气富集的控制作用[J].天然气地球科学,2022,33(6):917-928.
ZHANG X, RAN Q, CHEN K, et al. The controlling effect of strike-slip fault on Dengying Formation reservoir and gas enrichment in Anyue Gas Field in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 917-928.
- [6] 李海英,陈俊安,龚伟,等.基于多属性融合叠前反演预测超深层断控储集体性和流体性质[J].石油物探,2022,61(3):543-555.
LI H Y, CHEN J A, GONG W, et al. Prediction of physical and fluid properties of ultra-deep fault-controlled reservoirs based on multi-attribute fusion prestack inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(3): 543-555.
- [7] 甘利灯,戴晓峰,徐右平,等.处理解释一体化的层间多次波识别与压制——以四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组为例[J].石油物探,2022,61(3):408-422.
GAN L D, DAI X F, XU Y P, et al. Recognition and suppression of interlayer multiples based on integration of processing and interpretation—A case study of Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(3): 408-422.
- [8] 吕丙南,陈学华,吴昊杰,等.复杂碳酸盐岩缝洞型储层的地震精细预测方法[J].石油物探,2024,63(2):426-436.
LV B N, CHEN X H, WU H J, et al. A fine seismic prediction method for complex carbonate fractured-vuggy reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(2): 426-436.
- [9] 李亚林.超深层油气地震勘探技术进展[J].石油地球物理勘探,2024,59(4):915-924.
LI Y L. Ultra-deep oil and gas reservoir seismic prospecting technologies progress[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(4): 915-924.
- [10] 李闯,韩令贺,杨哲,等.深层—超深层海相碳酸盐岩地震勘探技术发展及攻关方向[J].石油地球物理勘探,2024,59(2):368-379.
LI C, HAN L H, YANG Z, et al. Development and tackling directions of seismic exploration technology for deep and ultra-deep marine carbonate rocks[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(2): 368-379.
- [11] 刘韬,王铁一,孙珂,等.碳酸盐岩缝洞型储层叠前—叠后地震综合预测方法及应用[J].石油地球物理勘探,2023,58(6):1463-1471.
LIU T, WANG T Y, SUN K, et al. Pre-stack and post-stack seismic comprehensive prediction method and its application in carbonate fractured-vuggy reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(6): 1463-1471.
- [12] 常少英,穆晓亮,曾灏辉,等.深层隐伏型岩溶储集体地震预测关键技术及应用[J].石油地球物理勘探,2022,57(增刊2):80-86.
CHANG S Y, MU X L, ZENG J H, et al. Key technologies for deep concealed karst reservoirs prediction based on seismic data and application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(S2): 80-86.
- [13] 曾华会,苏勤,张光荣,等.宽频地震勘探技术在深层碳酸盐岩成像中的应用[J].石油地球物理勘探,2022,57(增刊1):21-28.
ZENG H H, SU Q, ZHANG G R, et al. Application of broadband seismic exploration technologies in deep carbonate imaging[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(S1): 21-28.
- [14] 王立歆,李海英,李弘,等.复杂地质条件下超深层碳酸盐岩断控缝洞体成像及预测技术[J].石油物探,2022,61(5):865-875.
WANG L X, LI H Y, LI H, et al. Imaging and prediction technology of fault-karst reservoirs in ultra-deep carbonate rocks under complex geological conditions[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(5): 865-875.