doi: 10.11720/wtyht.2026.1380
秦赛赛, 王晓辉, 王兵, 等. 多源反演数据优势频段融合薄储层预测技术及应用——以准噶尔盆地火烧山油田 H_3 为例[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 65-75. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1380
Qin S S, Wang X H, Wang B, et al. Thin reservoir prediction technology based on dominant frequency band fusion of multi-source inversion data and its application: A case study of H_3 reservoir of the Huoshaoshan Oilfield, Junggar Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 65-75. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1380

多源反演数据优势频段融合薄储层预测技术及应用——以准噶尔盆地火烧山油田 H_3 为例

秦赛赛, 王晓辉, 王兵, 贺忠, 王科朋, 林聪
(中国石油集团东方地球物理公司研究院乌鲁木齐分院, 新疆 乌鲁木齐 830016)

摘 要: 针对准噶尔盆地火烧山油田 H_3 段 4~6 m 薄砂体开发中纵横向预测难题, 提出“谱蓝化拓频—多源反演数据优势频段融合”技术。基于测井反射系数“蓝谱”特征, 通过井震联合模拟拓展叠前地震高频段至 120 Hz, 增强 60 Hz 以上储层响应并压制低频噪声。对三类数据体分频处理: 低频模型(0~8 Hz)保留构造趋势, 中频叠前波形指示反演 V_P/V_S 体(8~60 Hz)刻画岩性边界, 高频叠前地质统计学反演 V_P/V_S 体(60~120 Hz)捕捉薄砂细节, 经自适应权值分配实现全频段优势互补, 突破传统反演对 8~10 m 地震调谐厚度的识别局限。应用显示, 融合数据体可清晰识别 4 m 薄砂体, 横向井间连通性误差较传统反演降低 25%。该技术构建的“低频控趋势—中频控边界—高频显细节”多尺度协同范式, 突破单一反演多解性瓶颈, 其全频段信息融合思路为陆相碎屑岩薄互层储层精细评价提供可复制技术路径, 对同类复杂储层开发具显著方法论借鉴意义。

关键词: 准噶尔盆地; 薄砂体; 谱蓝化拓频; 优势频段融合
中图分类号: P31; P631.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0065-11

0 引言

在全球能源需求攀升与老油田开发进入中后期的背景下, 4~10 m 薄砂体储层作为老油田挖潜的核心目标, 其纵横向精准预测已成为油藏评价领域亟待突破的关键挑战。此类储层因单层厚度接近地震调谐厚度(1/4 波长)、砂泥岩速度差异显著, 传统方法难以精细表征, 严重制约老油田高效开发[1]。

当前主流技术以高分辨率处理、地震反演及多属性融合为主[2-3], 但局限突出: 叠后 (叠前) 反演对砂体的纵向分辨下限仍达 8~10 m, 叠前地质统计学反演在相带变化区的砂体预测吻合度不足 60%[4]。传统单一反演对 4~6 m 砂体的识别符合率仅 45%~55%。核心瓶颈在于如何将提频得到的高频信息与反演体的低中频信息进行协同融合。

火烧山油田位于准噶尔盆地东部隆起沙帐断褶带, 主体为背斜构造, 受 NE、NW 双物源控制, 以三角洲前缘亚相沉积为主, 砂层组厚度随相带变迁呈规律性展布[5]。地层剖面呈现砂岩、泥岩交互的薄互层结构。开发区纵向叠置发育多套 4~6 m 薄砂体, 形成复杂储层空间配置。其主要开发层系为二叠系平地泉组 H_3 段碎屑岩, 目前主体区开发前期基于构造油藏模式部署。随着背斜低部位扩边井在薄砂体储层中获得高产, 油藏开发思路逐步转向岩性控藏, 重点针对纵向多套薄砂体叠合区及横向相带过渡带开展精细评价。目前研究面临几方面困难: 一是纵波阻抗下砂、泥岩界线重叠严重, 叠后储层预测方法难以有效表征有利砂体; 二是主力含油气砂层薄、呈透镜状且分布范围小, 砂体连通关系复杂, 致使叠前地质统计学反演结果规律性差, 难以满足评价开发阶段的油藏解剖。

针对火烧山油田 4~6 m 薄砂体, 旨在解决砂泥岩识别难、薄透镜砂体横向预测精度低等问题, 文中

收稿日期: 2025-10-20; **修回日期**: 2025-12-01
基金项目: 中国石油天然气集团有限公司项目“十亿级超高密度压缩感知地震勘探技术研究”(2024ZG44)
第一作者: 秦赛赛(1988-), 女, 江苏南通人, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气勘探开发工作。Email: qinsaisai@cnpc.com.cn

提出基于拓频驱动的多源反演体频率融合的薄储层预测方法，以提高薄储层纵横向预测精度，完善薄砂体预测理论体系，为同类老油田挖潜提供技术参考，又能直接指导火烧山油田开发方案优化，提升剩余油采收率，具有重要理论及实践意义。

1　方法概述

1.1　叠前“蓝化”井震拓频

常规地震处理基于反射系数序列为白噪序列的假设，常通过“谱白化”处理提升分辨率。然而，对测井反射系数频谱的研究发现，其频谱并非“白谱”。Walden 等[6] 指出，反射系数序列频谱整体呈“蓝谱”特征，即频率越高振幅越强。Kazemeini 等[7]、Blache-Fraser 等[8] 提出的“叠后谱蓝化”提频技术，通过匹配测井反射系数的蓝谱特征，在保真前提下有效提高了叠后地震资料分辨率。

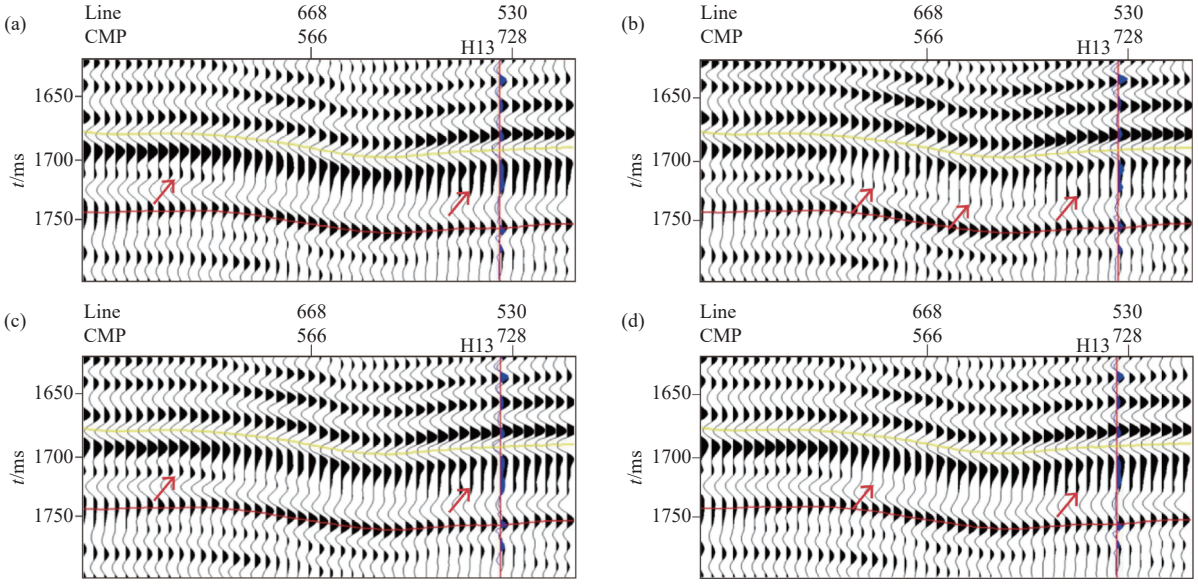
本次研究将谱蓝化技术拓展至叠前领域，开展“叠前谱蓝化”井震联合模拟拓频技术[9]。该技术继承了叠后谱蓝化的保真优势[10]，通过井震联合约束，在压制低频噪声的同时，显著增强 36 Hz 以上高频储层响应特征，为薄互层储层识别提供了更清晰的地震依据。其核心原理公式如下：

$$S_{\text{enhanced}}(f)=S_{\text{original}}(f)\cdot\left[1+\alpha\cdot\left(\frac{f-f_{\min}}{f_{\text{range}}}\right)^{\beta}\right]\cdot\text{Window}(f),\tag{1}$$

式中：$S_{\text{enhanced}}(f)$ 为增强后的地震信号频谱；$S_{\text{original}}(f)$ 为原始地震信号频谱；α 为蓝化增益系数（控制高频增强幅度）；$f_{\min}$ 为低频起始频率（保留地质背景下限）；f_{range} 为有效频带宽度（控制增强范围）；β 为幂指数（控制增益曲线形状）；Window(f) 为频带窗口函数（确保频谱平滑过渡）。

通过参数试验设定谱蓝化算子有效频率范围，保持谱平滑半径（10 Hz）和低频端（8 Hz）不变，仅将高频端拓展至 120 Hz 时，强振幅反射保持清晰，弱复波即图 1 红色箭头所指处能量得到提升，低频叠合的单一弱反射轴分离为两个独立的中高频反射轴（图 1）。db 频谱叠合分析表明（图 2），拓频后仅高频端有一定提高，低频端稳定，既保证了资料保真度，又通过高频拓展有效提升了薄互层纵向分辨率。振幅谱叠合分析表明（图 3），提频后 20 Hz 弱反射能量在高频端增强与分解，40 Hz 强振幅因频带展宽更显突出，20 Hz 弱反射能量通过提频实现频率域能量重新分配，使叠合的地震响应分解为更精细的双轴反射特征，对应振幅谱中低频弱能量向高频有效频带迁移聚焦，地震剖面呈现弱反射增强与分辨率提升的效果。

谱蓝化处理有效改善了井震标定效果，在 H13 井附近目的层表现尤为明显（图 4）。处理前，该区域为低频、中振幅的单波峰反射（图 1a）；经过保幅提频后，转变为上下两个高频、中振幅的波峰反射，具体位置如图 4 黑色箭头所示。这种反射特征的转变，不仅直观体现了地震资料分辨率的提升，更增强了地质解释能力，使井震标定结果更贴合地质实际，为后续油藏研究提供了更可靠的基础。

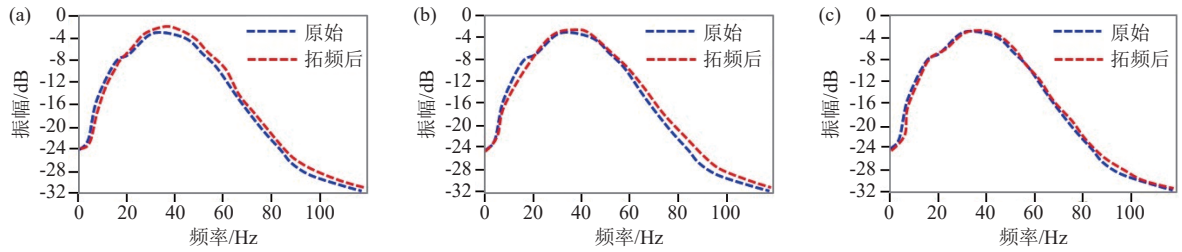


a—拓频前；b—高频拓展至 120 Hz；c—高频拓展至 100 Hz；d—高频拓展至 80 Hz

a—before frequency; b—high frequency is extended to120 Hz; c—high frequency is extended to 100 Hz; d—high frequency extended to 80 Hz

图 1　不同拓频参数的地震波形剖面

Fig. 1　Seismic waveform profiles with different topological frequency parameters

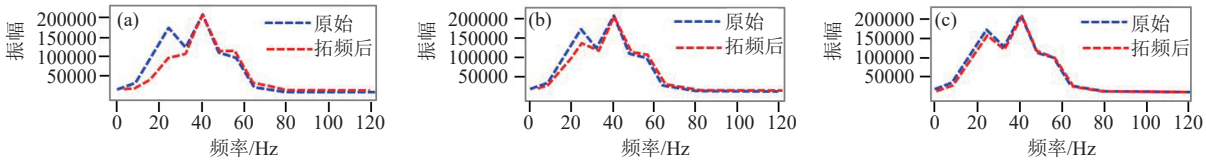


a—拓展至 120 Hz; b—拓展至 100 Hz; c—拓展至 80 Hz

a—frequency is extended to 120 Hz; b—frequency is extended to 100 Hz; c—frequency is extended to 80 Hz

图 2　不同拓频参数对应的拓频前后 db 频谱叠合分析

Fig. 2　The db spectrum superposition analysis diagram before and after frequency extension corresponding to different frequency extension parameters



a—拓展至 120 Hz; b—拓展至 100 Hz; c—拓展至 80 Hz

a—frequency is extended to 120 Hz; b—frequency is extended to 100 Hz; c—frequency is extended to 80 Hz

图 3　不同拓频参数对应的拓频前后振幅谱叠合分析

Fig. 3　The amplitude spectrum superposition analysis diagram before and after frequency expansion corresponding to different frequency expansion parametersa

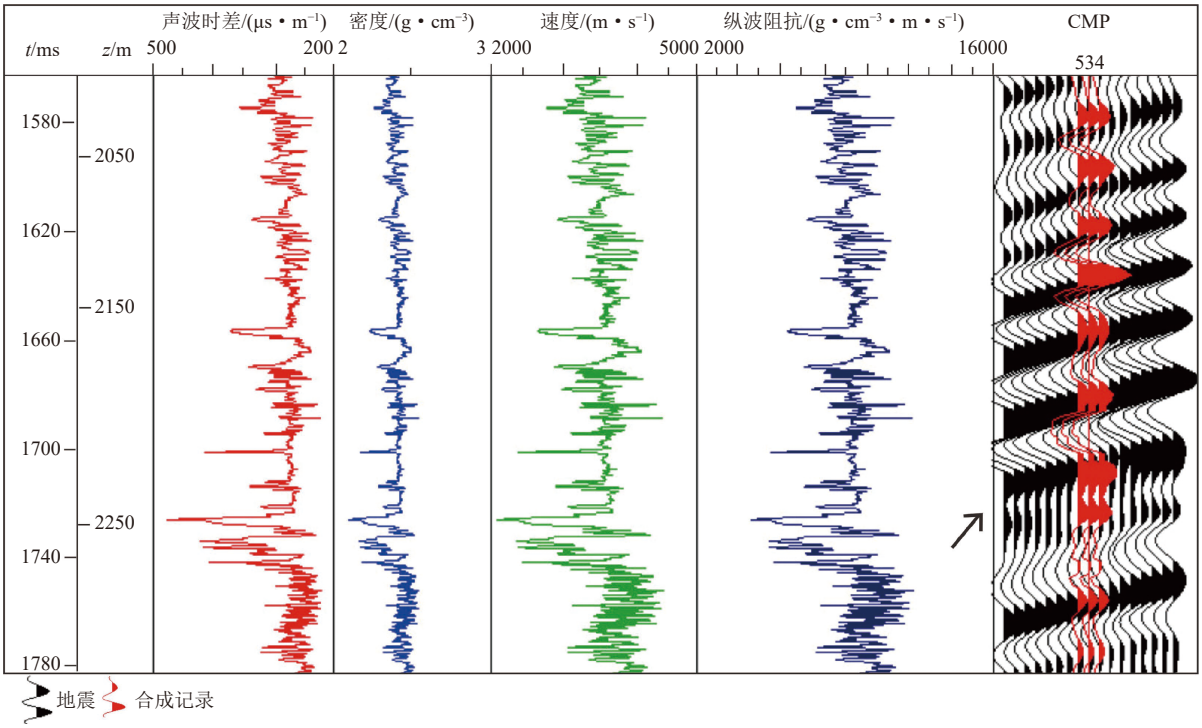


图 4　H13 井井震合成记录标定提频后的全角度叠加地震

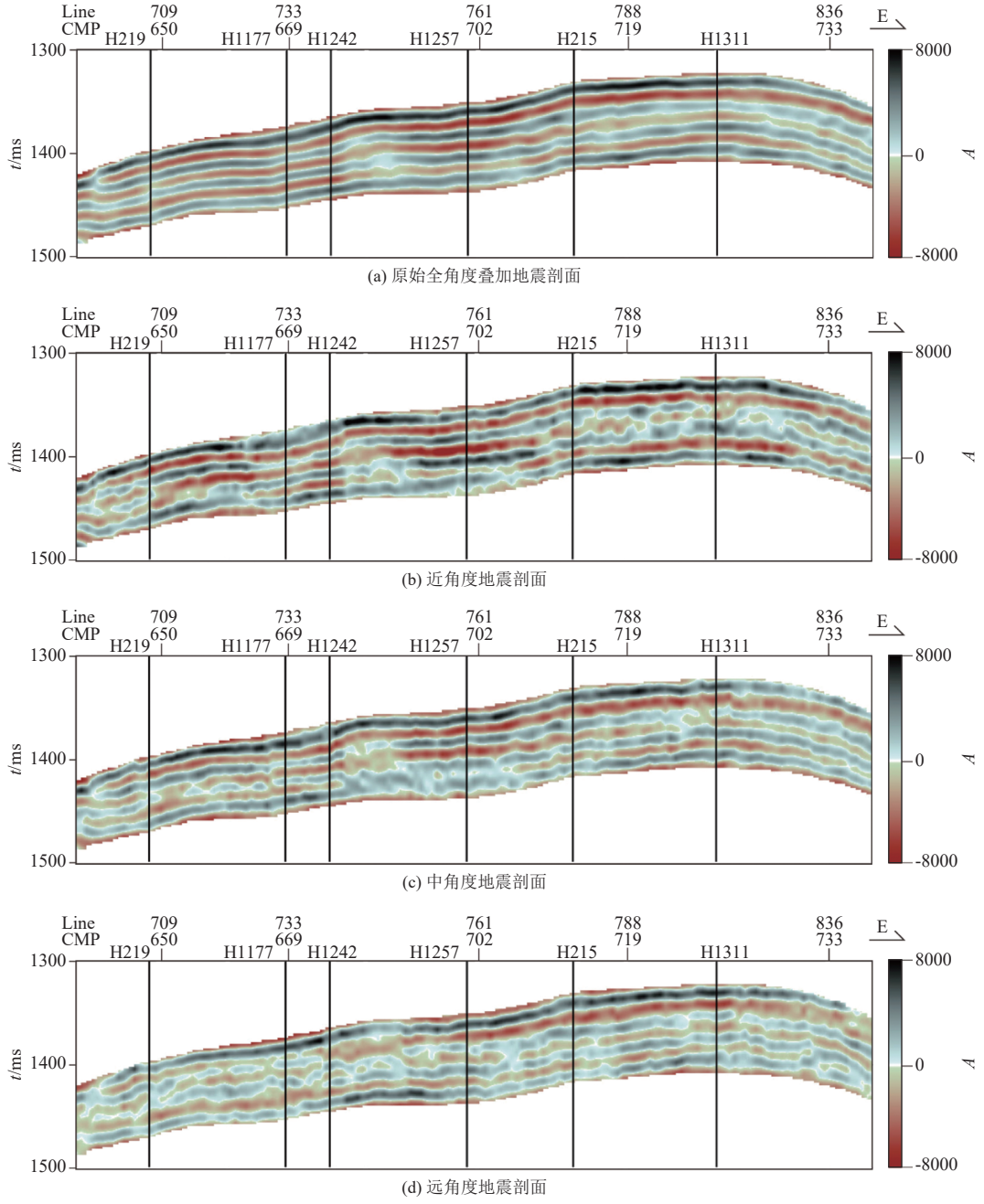
Fig. 4　Full-angle superimposed earthquake after frequency increase with calibration of well-seismic synthetic record of H13 well

叠前波形指示反演以地震波形为核心，通过理论与实测波形迭代匹配反演弹性参数。其基于 Zoeppritz 方程建立参数与反射信号关联，利用不同角度道集对弹性参数的敏感差异，经分角度标定确保道集与测井曲线匹配后，通过最小化波形残差分角度反推纵波速度、横波速度、密度。实现分 4 步：①预处理叠前道集分角度标定，使道集反射特征与测井响应一致；②构建初始模型；③正演生成理论波

形；④分角度迭代修正，利用敏感差异优化参数至波形吻合。关键参数中，横波速度依托 Gassmann 方程推导；纵波速度来自叠前速度模型；密度用测井或 Gardner 公式求得；研究区 H_3 段砂泥岩 V_P/V_S 门槛值为 1.8；子波从波形提取，经分角度标定后优选一致性最高的；正则化参数依地质调整，迭代次数据残差收敛判定。

拓频前后分角度地震数据叠前波形指示反演对比表明：拓频前常规模型反演中，$V_P/V_S \leqslant 1.8$ 对应井上有利砂岩段，井间砂体连通性及砂层组特征与井吻合，横向展布规律与图 5 地震波形宏观特征一致性强，但 H1311、H1257 等井区 4~10 m 单砂体纵向分辨率不足，黑色箭头所示多套砂体未呈现暖色调响应特征（图 6）；拓频后谱蓝化数据反演表明，8~10 m 薄单砂体在波形约束下可有效识别，黑色箭头处多数砂体因高频增强得以显现，砂体横向连续性与沉积规律吻合，但 H1311 井处 4~6 m 超薄砂体仍无法分辨（图 7）。对比图 6 与图 7 可见，拓频前存在砂体漏判现象，而拓频后薄储层识别能力显著提升，证实高频增强对薄储层识别具有促进作用。

为识别 4~6 m 薄砂体，对拓频后分角度地震数据开展基于序贯高斯模拟的叠前地质统计学反演。



(a) 原始全角度叠加地震剖面

(b) 近角度地震剖面

(c) 中角度地震剖面

(d) 远角度地震剖面

图 5　原始全叠加地震剖面及近中远分角度地震剖面

Fig. 5　The original fully superimposed seismic profile and near-medium and far-angle seismic profile

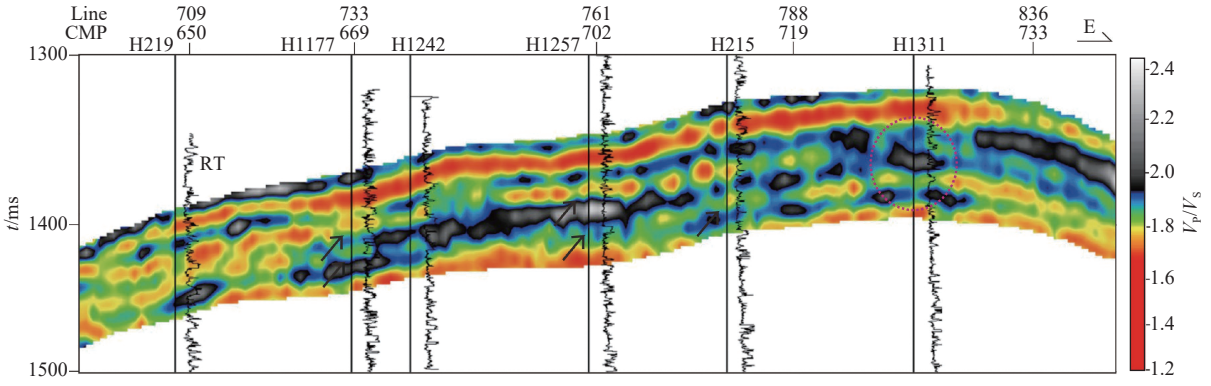


图 6　拓频前叠前波形指示反演 V_P/V_S 结果

Fig. 6　Pre-stack waveform indicator inversion V_P/V_S results before frequency extension

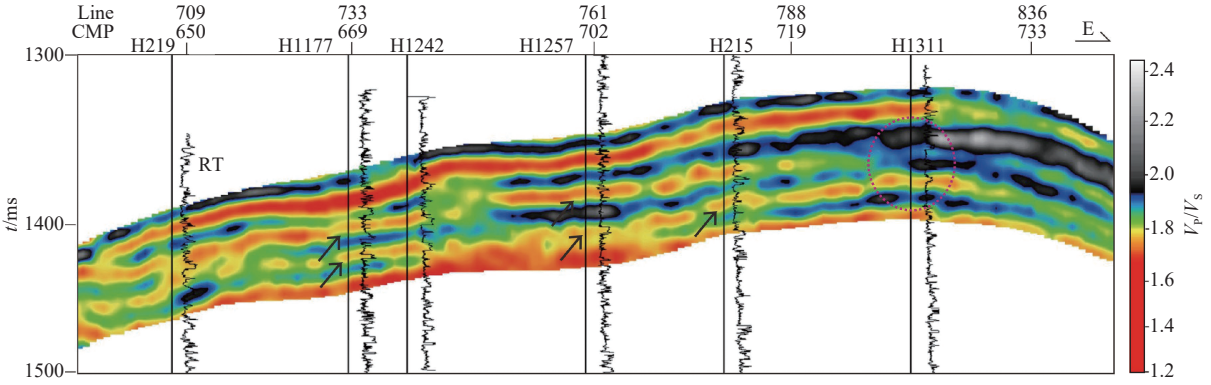


图 7　拓频后叠前波形指示反演 V_P/V_S 结果

Fig. 7　Pre-stack waveform indicator inversion V_P/V_S results after frequency extension

经井数据约束可突破地震调谐厚度限制, 识别≤4 m 薄砂体, 避免调谐效应合并漏判并提升岩性参数定量精度, 但对井数据依赖性极强, 井网稀疏区易因地震分辨率与网格尺度矛盾出现高频噪声放大, 且先验模型主导致储层形态预测可靠性低。相控约束以沉积微相模型为先验框架, 独立设置相带变差函数与岩性概率模型, 虽强化了沉积相空间展布约束、提升纵横向分辨率, 但井网稀疏区相模式外推存在模式化严重、横向精度不足, 井间砂体叠置关系仍缺乏规律性[11-13]。

拓频后叠前地质统计学反演结果显示, 黑色箭头标注的砂体均被准确识别, H1311 井 4~6 m 薄砂体可有效分辨 (图 8 中紫色圈位置), 但横向展布与图 5 地震波形宏观特征一致性较差, H1177-H1242-H1257 井段砂体呈断续孤立“透镜状”, 与扇三角洲前缘“朵状—枝状”及“主河道砂体连续叠覆—侧翼席状砂渐变相变”的沉积规律相悖(图 8)。推测与扇三角洲前缘亚相边界复杂、井网稀疏区沉积微相外推误差及反演高频噪声放大相关, 导致横向砂体连通性刻画与水动力沉积能量衰减规律偏差。

1.2　多源反演数据融合

针对复杂薄互层储层横向趋势约束与纵向多套薄砂体精准预测的技术需求, 研究提出基于频率域融合的多源数据体合并方法。该方法适用于多类型体数据的频带信息整合, 其核心原理是通过对不同数据体进行分频滤波处理, 将各频段优势信息有机融合至单一数据体中。具体实施步骤如下: 首先对首个体数据实施低通滤波(保留 0~10 Hz 低频构造趋势), 后续对第 2~n 个体数据依次进行带通滤波(分别提取 10~60 Hz 中频段岩性响应、60 Hz 以上高频段薄储层特征等), 形成多组不同频带的子数据体; 继而在频率域内对各子数据体进行加权叠加计算, 通过自适应权值分配实现全频段信息互补。其数学表达式可概括为:

$$S = LF\left\{HP\left[f_c(1)-\frac{g(1)}{2}\right];\ HC\left[f_c(1)+\frac{g(1)}{2}\right]\right\}*w(1)+$$
$$\sum_{i=2}^{n} BF\left\{LC\left[f_c(i-1)-\frac{g(i-1)}{2}\right];\ LP\left[f_c(i-1)+\frac{g(i-1)}{2}\right];\ HP\left[f_c(i)-\frac{g(i)}{2}\right];\ HC\left[f_c(i)+\frac{g(i)}{2}\right]\right\}*w(n),\quad (2)$$

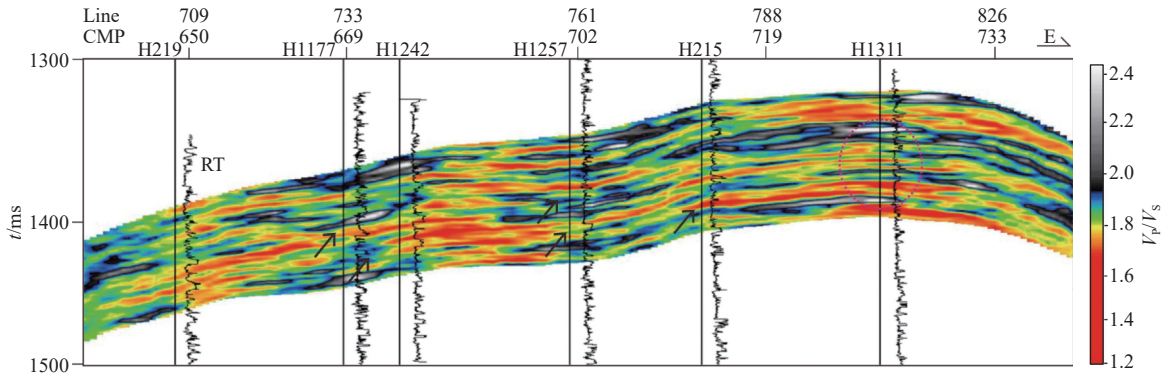


图 8　拓频后叠前地质统计学反演 V_P/V_S 结果

Fig. 8　Pre-stack geostatistical inversion V_P/V_S results after frequency extension

式中：S 代表 n 个数据的融合结果；f_c 代表当前频率的高截频率，也是下一属性的低截频率，截止频率顺序递增；g 代表截止频率梯度；w 代表合并时该属性在该频段的缩放因子；LC、LP、HP、HC 分别代表低截频、低通频、高通频、高截频；LF、BF 分别代表低通滤波、带通滤波。

该方法通过分频滤波与加权融合协同，既保留低频数据体区域构造趋势，又整合中高频数据体的薄储层细节，为储层横向连续性刻画与纵向薄层识别提供兼具趋势约束与细节分辨能力的技术方案。

基于多尺度信息协同理论，构建 3 类数据体融合框架。低频模型（0~10 Hz）采用克里金插值算法，将区域构造应力场演化、沉积古地貌等地质先验信息，转化为地震低频缺失分量的约束条件，通过变差函数建模量化空间相关性，抑制井控不足区域的反演多解性[14]；叠前反演 V_P/V_S 体（10~60 Hz）基于贝叶斯概率框架，利用中频段地震响应构建岩性参数联合概率密度函数，通过马尔科夫链蒙特卡洛采样实现岩性界面的概率化反演[15]；叠前地质统计学反演 V_P/V_S 体（60 Hz 以上）运用序贯高斯模拟算法，结合测井高频波形特征训练模板库，突破地震调谐厚度限制实现薄储层空间展布精细刻画[16-17]。三者通过自适应加权融合，基于信息熵准则动态分配权值，实现全频段优势互补，为复杂储层定量表征提供理论与技术支撑。

针对目的层砂泥互层结构构建理论地质模型，基于实际地震主频 38 Hz 开展正演分析（图 9）。通过设计参数敏感性试验，系统剖析高频滤波端（80 Hz、100 Hz、120 Hz）与权重（1、2、3）对频率融合的影响（图 10），并对比低频参数效应。结果表明，高频参数主导融合精度：80 Hz 下权重 1 增至 3，使纵向分辨率提升 18%，权重 3 时截止频率提至 120 Hz，纵向分辨率再再升 12%，揭示“信息增益—噪声放大”的平衡关系。低频、中频参数虽非决定性因素，但通过约束构造背景与岩性边界，与高频形成“低频控趋势、中频控边界、高频显细节”的协同机制。

基于此，输入 V_P/V_S 低频模型作为低频端，叠前波形指示 V_P/V_S 反演体作为中频端，叠前统计学 V_P/V_S 反演体作为高频端（图 11），根据前面的融合算子在频率域窗函数实现各频段优势信息的加权叠加。优

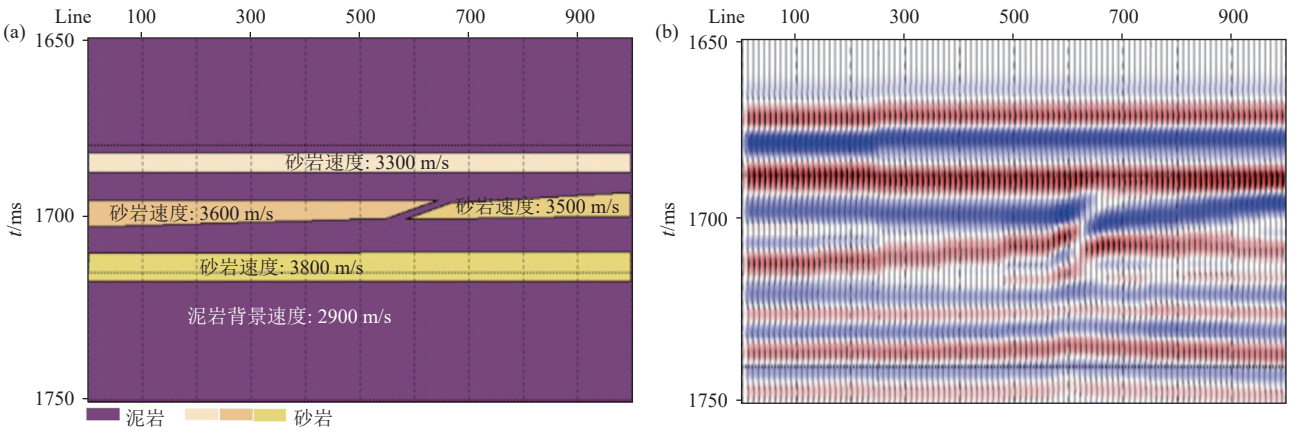
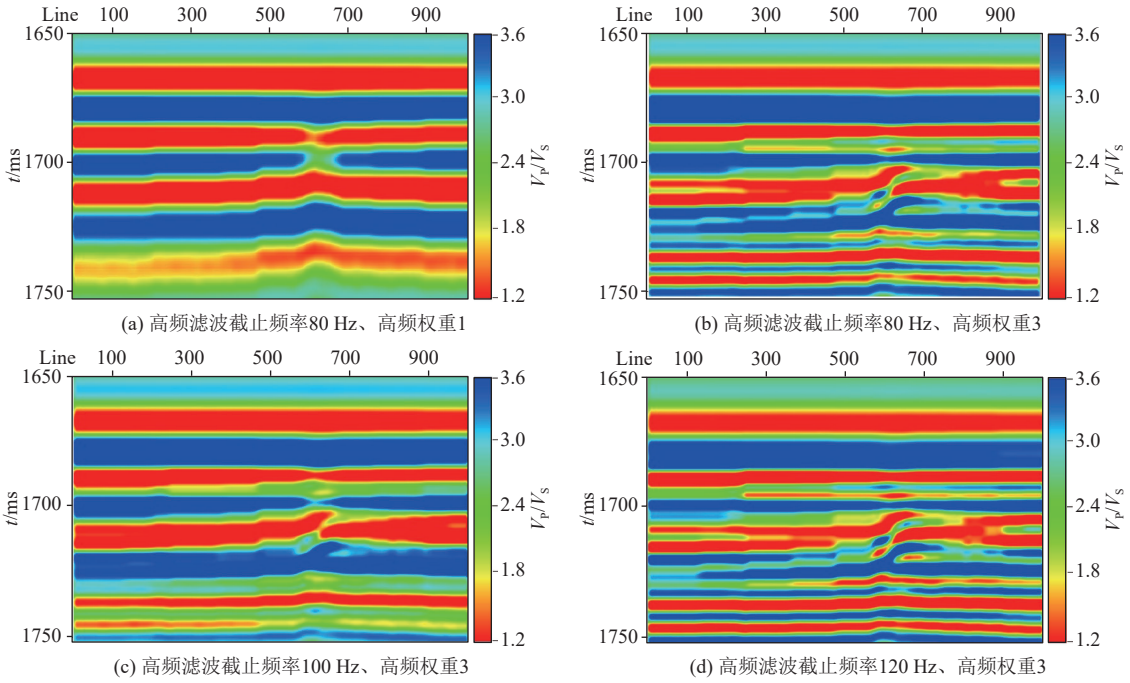


图 9　地质理论模型 (a) 及正演地震剖面 (b)

Fig. 9　Geological theoretical model(a) and forward seismic profile(b)

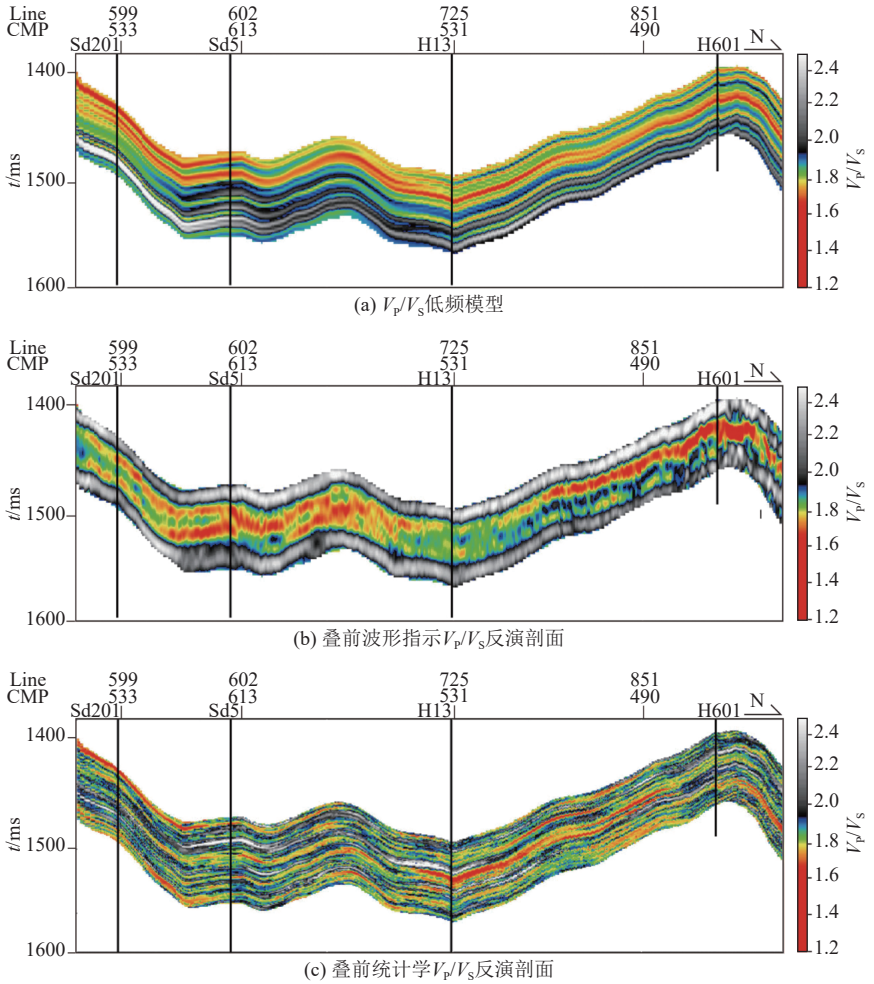


(a) 高频滤波截止频率80 Hz、高频权重1　　(b) 高频滤波截止频率80 Hz、高频权重3

(c) 高频滤波截止频率100 Hz、高频权重3　　(d) 高频滤波截止频率120 Hz、高频权重3

图 10　同频不同权重合并、同权重不同频率合并后理论模型 V_P/V_S 对比

Fig. 10　Comparison of V_P/V_S of theoretical models after merging with different weights at the same frequency and merging with different frequencies at the same weight



(a) V_P/V_S低频模型

(b) 叠前波形指示V_P/V_S反演剖面

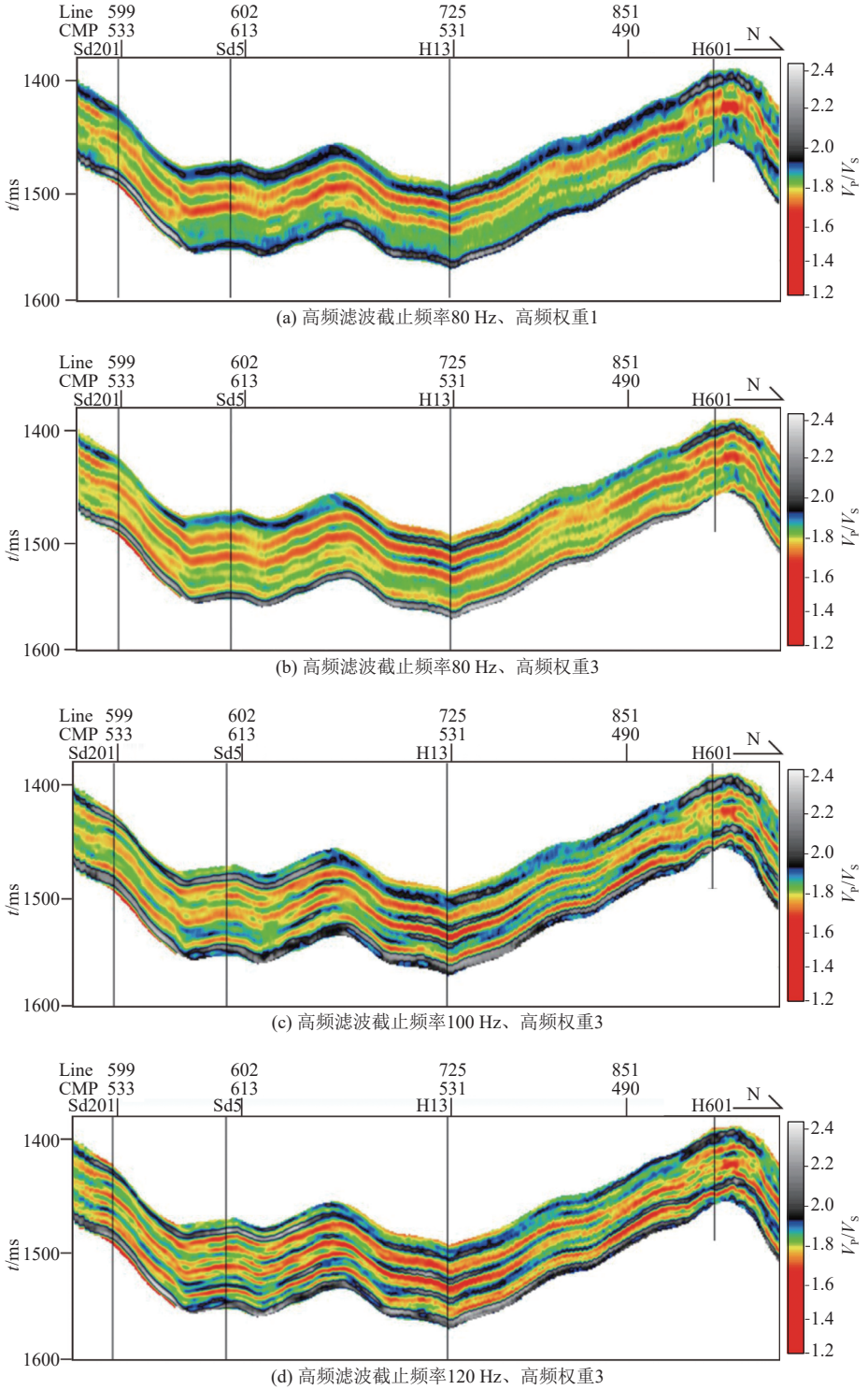
(c) 叠前统计学V_P/V_S反演剖面

图 11　V_P/V_S 低频模型与叠前反演剖面

Fig. 11　V_P/V_S low-frequency model and pre-stack inversion profile

选中频叠前波形指示反演体为基准，设定低频 8 Hz、中频 60 Hz、高频 120 Hz 及权重 3 应用于实际工区（图 12），图 12d 剖面显示，Sd201、Sd5、H601 井纵向砂体的分辨率显著提升，横向井间趋势与沉积规律吻合。开发盲井验证表明（图 13），开发井射孔段与反演剖面吻合度高。

多源反演体通过分配滤波与加权融合的协同作用，既保留了低频数据体的区域构造趋势，又整合了中高频数据体的薄储层细节，该优势频段融合方法有效解决了横向井间砂体连通性刻画不准、纵向分辨率不足的问题，实现 4~6 m 薄砂体的纵向精准识别与横向井间关系优化。



(a) 高频滤波截止频率80 Hz、高频权重1

(b) 高频滤波截止频率80 Hz、高频权重3

(c) 高频滤波截止频率100 Hz、高频权重3

(d) 高频滤波截止频率120 Hz、高频权重3

图 12　同频不同权重合并、同权重不同频率合并后实际 V_P/V_S 剖面对比

Fig. 12　Comparsion of actual V_P/V_S profiles after merging with different weights at the same frequency and merging with different frequencies at the same weight

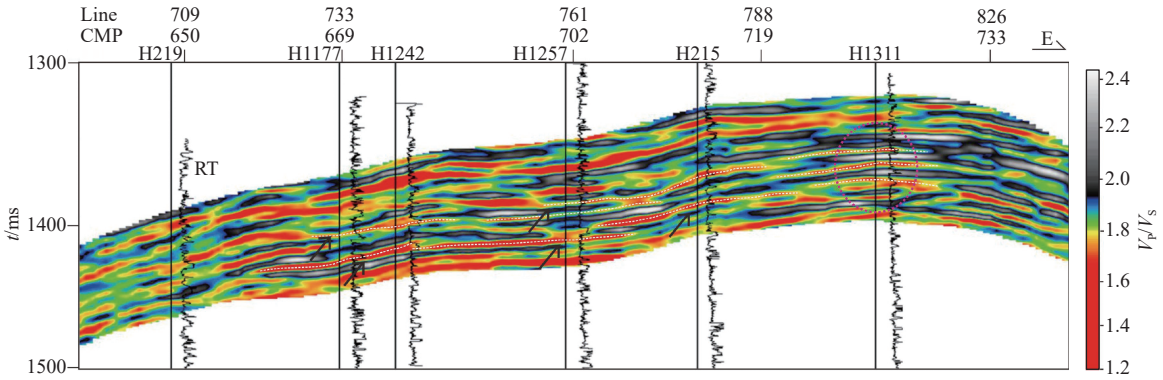


图 13　优势频率合并后 V_P/V_S 结果

Fig. 13　V_P/V_S results after the combination of dominant frequencies

2　应用结果及分析

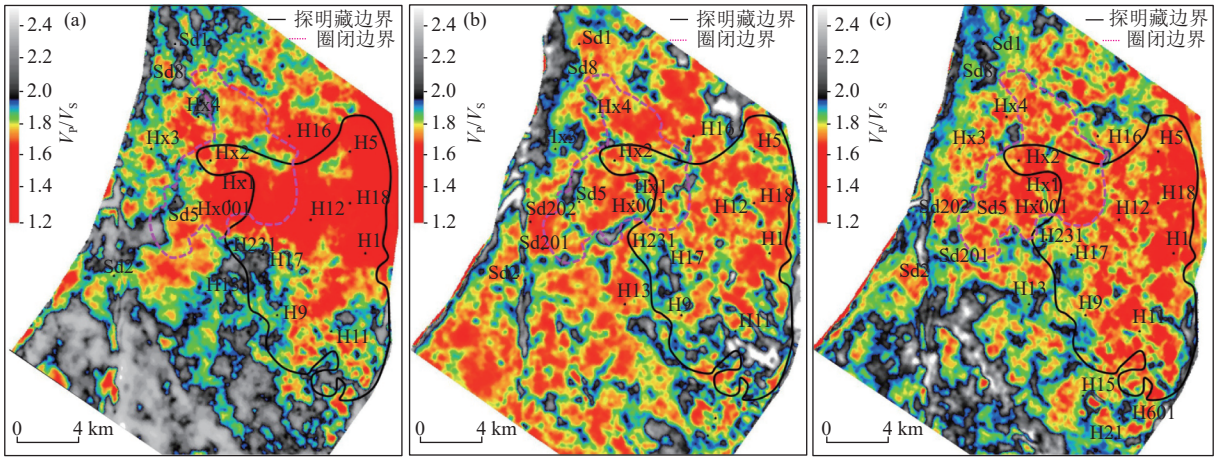
本次研究区 96 口钻井中, 80 口参与反演, 16 口作为后验井验证精度。定量分析显示, 多源反演数据融合预测的砂岩厚度与测井解释结果高度吻合, 16 口后验井中 4~6 m 薄互层砂体的纵向预测吻合率达 89%(表 1), 显著优于传统单一反演方法。

基于融合反演成果对 H_3^2 亚段砂岩展布分析发现: 研究区北部 4~6 m 薄砂体发育程度明显高于南部, 砂体在纵向上呈现多期叠置特征, 单层厚度普遍介于 4~6 m; 平面上, 砂体呈 NE 向条带状展布, 与 NE 向沉积物源方向一致, 其低 V_P/V_S 属性特征在地震属性图中呈现暖色调异常(图 14)。研究表明, 受物源供给强度差异影响, 北部物源区距离近、能量强, 更利于薄砂体的沉积与保存, 而南部受沉积能量衰减影响, 砂体厚度减薄、连续性变差, 这与反演结果中砂体平面展布规律高度契合, 验证了该技术在

表 1　砂岩反演厚度符合率统计

Table 1　Statistics of sandstone inversion thickness coincidence rate

井名	测井解释厚度/m	预测厚度/m	符合率/%
H1224	4.2	4.8	87.5
H1225	6	6	100
H1236	5.5	6.4	86
H1249	5	5.4	92.6
H1250	6	6.5	92.3
H1263	3.6	4	90
H1327	4.3	5	86
H1342	5	5.6	89.2
H1455	5	5	100
H1460	6	6.5	92.3
H1475	4	4.8	83.3
H1398	5	5.3	94.3
HH1484	6	6.5	92.3
HH1403	3.5	4	87.5
H213	1	2	50
H2311	5	5	100
平均			89



a—合并前叠前波形指示反演的 V_P/V_S; b—合并前叠前统计学反演的 V_P/V_S; c—合并后的 V_P/V_S

a—V_P/V_S of pre-stack waveform indication inversion before combined; b—V_P/V_S of pre-stack statistical inversion before cmobined; c—the combined V_P/V_S

图 14　优势频率合并前后 H_3^2 亚段 V_P/V_S 平面预测结果对比

Fig. 14　Comparison of V_P/V_S plane prediction results of H_3^2 sub-segment before and after dominant frequency merging

刻画薄互层砂体沉积特征方面的有效性。

基于“低频控趋势—中频控边界—高频显细节”协同机制，图 14a 常规叠前波形指示反演受地震波形约束，横向砂体展布与沉积规律吻合率高，但 4~6 m 薄砂体纵向识别能力不足；图 14b 叠前统计学反演虽凭借高频信息提升纵向分辨率，却因西南斜坡区井控缺失导致横向砂体展布失真。通过融合低频模型、中频波形指示反演体与高频统计学反演体优势频带，图 14c 实现协同效应，既依托中频信息维持砂体展布与沉积规律的一致性，又借助高频信息强化薄砂体纵向分辨能力，且砂体分布范围与探明油藏边界高度吻合，同步揭示探明藏外围滚动评价潜力。

在 H_3 段加密调整方案实施中，该技术显著提升储层预测精度，砂岩储层反演纵向分辨率提高 35%，砂体横向预测吻合度达 92%。开发井补孔成功率从 65% 提升至 90%，其中 H3-5 井补孔后日产油量由 1.2 t 增至 3.5 t，H3-12 井补孔后含水率下降 15%、日产油量增加 2.8 t。依托技术优势，预计可落实 100 万 t 储量扩边目标，为老油田高效挖潜提供了可复制的效益提升范例。

3　结论

本文提出“叠前谱蓝化拓频—多源反演数据分频融合”技术体系，核心是将谱蓝化技术拓展至叠前领域并结合多源反演数据协同融合，最终实现 4~6 m 薄砂体精准预测与开发效益提升。通过多源反演数据融合数学公式及模型正演，得出以下结论及认识：

1）“叠前谱蓝化”井震联合模拟拓频技术，既继承了叠后谱蓝化的保真优势，又借助井震联合约束压制低频噪声，显著增强 60 Hz 以上高频储层响应，为薄互层识别提供准确地震资料依据。

2）多源反演数据优势频段融合通过“低频控趋势—中频控边界—高频显细节”协同机制，突破单一反演纵横向多解性瓶颈，实现高频端 120 Hz、权重 3 的参数优化，使 4~6 m 薄砂体纵向分辨率提升 30%，横向吻合度达 92%，突破地震调谐厚度（8~10 m）的识别极限，其优势频段融合思路为陆相碎屑岩薄互层储层精细评价提供可复制技术路径，对同类复杂储层开发具显著方法论借鉴意义。

参考文献（References）：

[1] 米信武，周成刚，田军，等. 塔里木盆地轮南地区三叠系非均质薄砂岩储层预测 [J]. 物探与化探，2025，49(2)：321−329.
Mi X W, Zhou C G, Tian J, et al. Prediction of heterogeneous, thin Triassic sandstone reservoirs in the Lunnan area, Tarim Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(2): 321−329.

[2] 童姜楠，孙雄伟，王峰，等. 智能相控波形指示反演技术及其在煤系地层薄砂岩预测中的应用 [J]. 石油物探，2025，64(1)：129−137.
Tong J N, Sun X W, Wang F, et al. Intelligent facies-controlled seismic meme inversion and its application in predicting thin reservoirs in coal measure strata[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(1): 129−137.

[3] 黄闻露，阎建国，任立龙，等. 模型反演和深度学习反演联合的地震波阻抗优化反演 [J]. 物探与化探，2024，48(4)：1076−1085.
Huang W L, Yan J G, Ren L L, et al. Seismic impedance optimization inversion combining model inversion with deep learning inversion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(4): 1076−1085.

[4] 陈国飞，石颖，高兴友，等. NBR 油田优质储层叠前叠后联合反演与应用 [J]. 地球物理学进展，2023，38(1)：159−170.
Chen G F, Shi Y, Gao X Y, et al. Pre-stack and post-stack joint inversion and application of high-quality reservoirs in NBR oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 159−170.

[5] 张丽霞，柳益群，向辉，等. 凝灰岩型含油层系特征与成因分析——以准噶尔盆地火烧山油田二叠系平地泉组为例 [J]. 沉积学报，2018，36(4)：768−776.
Zhang L X, Liu Y Q, Xiang H, et al. Characteristics and origin of Tuffaceous tight oil: Based on a reference of tight oil in Permain Pingdiquan Formation in Huoshaoshan oil field, Jung-gar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 768−776.

[6] Walden A T, Nunn K R. Correcting for coloured primary reflectivity in deconvolution[J]. Geophysical Prospecting, 1988, 36(3): 282−297.

[7] Kazemeini S H, Yang C, Juhlin C, et al. Enhancing seismic data resolution using the prestack blueing technique: An example from the Ketzin CO2 injection site, Germany[J]. Geophysics, 2010, 75(6): V101−V110.

[8] Blache-Fraser G, Neep J. Increasing seismic resolution using spectral blueing and colored inversion: Cannonball field, Trinidad[C]// SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004,Society of Exploration Geophysicists, 2004: 1794-1797.

[9] 李贤兵，赵俊杰，晋剑利，等. 叠前谱蓝化提频技术在乍得 Baob 油田储层预测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探，2020，55(6)：1343−1348，1166.
Li X B, Zhao J J, Jin J L, et al. Pre-stack spectrum blueing frequency increasing technique: A case study on reservoir prediction in Chad Baob Oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(6): 1343−1348, 1166.

[10] 靳雪彬，李丙喜，张振国，等. 匹配追踪分频谱蓝化在叠后地震提频中的应用 [J]. 吉林大学学报：地球科学版，2025，55(2)：646−656.
Jin X B, Li B X, Zhang Z G, et al. Application of matching pursuit frequency-division spectrum blueing in post-stack seismic frequency enhancement[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2025, 55(2): 646−656.

[11] 赖未蓉, 杨国鹏, 宋沛东, 等. 相控叠前地质统计学反演在储层预测中的应用——以四川盆地川西坳陷须家河组二段致密砂岩储层为例 [J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 586−592.
Lai W R, Yang G P, Song P D, et al. Application of facies-controlled prestack geostatistical inversion in reservoir prediction: A case study of tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 586−592.

[12] 王朋, 徐立恒, 杨会东, 等. 相控叠前地质统计学反演在剩余油预测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(5): 1192−1201.
Wang P, Xu L H, Yang H D, et al. Application of facies-controlled pre-stack geostatistical inversion in residual oil prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(5): 1192−1201.

[13] 石楠, 刘源, 冷玥, 等. 基于低频模型优化的相控地质统计学反演方法及应用 [J]. 新疆石油地质, 2023, 44(3): 375−382.
Shi N, Liu Y, Leng Y, et al. Facies-controlled geostatistical inversion method based on low-frequency model optimization and its application[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(3): 375−382.

[14] 张振波, 刘灵, 刘道理, 等. 番禺 4 洼古近系储层叠前反演预测技术研究 [J]. 物探与化探, 2025, 49(2): 312−320.
Zhang Z B, Liu L, Liu D L, et al. Pre-stack inversion for prediction of the Paleogene reservoirs in the Panyu 4 Sag[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(2): 312−320.

[15] 张兵, 米洪刚, 刘红星, 等. 基于岩石物理约束的复杂致密砂岩储层叠前地震反演方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2025, 40(1): 220−229.
Zhang B, Mi H G, Liu H X, et al. Pre-stack seismic inversion method for physical properties of complex tight sandstone reservoirs based on the rock physics model[J]. Progress in Geophysics, 2025, 40(1): 220−229.

[16] 赵晨, 张广智, 张佳佳, 等. 基于 Metropolis 优化的叠前全局迭代地质统计学反演方法 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(8): 3116−3130.
Zhao C, Zhang G Z, Zhang J J, et al. Prestack global iteration geostatistical inversion method based on Metropolis sampling algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(8): 3116−3130.

[17] 周单. 基于空变数据的相控贝叶斯—序贯高斯模拟方法 [J]. 石油物探, 2024, 63(3): 610−622.
Zhou S. Facies-controlled Bayesian-sequential Gaussian simulation based on space-variable data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(3): 610−622.

Thin reservoir prediction technology based on dominant frequency band fusion of multi-source inversion data and its application: A case study of H_3 reservoir of the Huoshaoshan Oilfield, Junggar Basin

QIN Sai-Sai, WANG Xiao-Hui, WANG Bing, HE Zhong, WANG Ke-Peng, LIN Cong
(*Urumqi Branch, Research Institute, BGP Inc., China National Petroleum Corporation, Urumqi* 830016, *China*)

Abstract: The development of thin sand bodies (thickness: 4~6 m) in H_3 reservoir, the Huoshaoshan Oilfield, Junggar Basin, faces vertical and horizontal prediction challenges. Given this, this paper proposed a technology that combines spectrum bluing for frequency broadening with dominant frequency band fusion of multi-source inversion data. Based on the blue spectrum of logging-derived reflection coefficient, the proposed technology expanded the pre-stack seismic high-frequency band to 120 Hz through well-seismic modeling. By doing so, it can enhance reservoir responses above 60 Hz and suppress low-frequency noises. The frequency-specific processing was then conducted for the three types of data volumes. Specifically, the low-frequency model (0~8 Hz) retained the structural trend, while the intermediate-frequency pre-stack waveform indicator inversion V_P/V_S volume (8~60 Hz) depicts the lithological boundary. The high-frequency pre-stack geostatistical inversion V_P/V_S volume (60~120 Hz) captures details of thin sand bodies. The adaptive weighting allocation achieved full-band synergistic integration, overcoming the identification limitations (8–10 m seismic tuning thickness) of traditional inversion methods. The application of this technology shows that the fused data volumes can clearly identify thin sand bodies (4 m), with the lateral inter-well connectivity error reduced by 25% compared to conventional inversion methods. This technology established a multi-scale collaborative model of "trend controlling in low-frequency bands, boundary controlling in intermediate-frequency bands, and detail capturing in high-frequency bands", breaking through the bottleneck of multi-solutions from single-source inversion. The information fusion of full-frequency bands provides a replicable technical path for the detailed assessment of continental clastic reservoirs with thin interbeds. It also offers methodological inspirations for the development of similar complex reservoirs.

Key words: Junggar Basin; thin sand body; spectrum bluing; dominant frequency band fusion

(本文编辑: 叶佩)