

多尺度迭代地震高分辨率反演算法 在W地区薄储层识别中的应用

石美璟, 刘晓晶

中国石化勘探分公司物探研究院, 四川 成都

收稿日期: 2023年2月17日; 录用日期: 2023年3月25日; 发布日期: 2023年3月31日

摘要

陆相页岩气薄互层发育、非均质性极强、岩性组合复杂, 目前现有的地震反演分辨率无法满足精度需求。本文利用基于频谱延拓的高分辨率处理技术, 构建频变频谱拓展因子及高分辨率处理传导算子, 将其应用到地震数据处理中, 数据频带宽度由8~70 Hz扩展到5~120 Hz, 地震数据分辨率显著提升。在此基础上, 通过小波变换多尺度分解技术, 使得低、中、高频段的地震信息能够充分利用, 有效缓解了常规反演方法高低频缺失的问题, 高低频相融合提高反演分辨率, 实现W地区陆相页岩气薄储层预测。

关键词

频谱延拓, 小波变换, 高分辨率, 多尺度迭代

Application of Multiscale Iterative Seismic High-Resolution Inversion Algorithm in Thin Reservoir Identification in the W Region

Meijing Shi, Xiaojing Liu

Geophysical Prospecting Institute, Sinopec Exploration Company, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 17th, 2022; accepted: Mar. 25th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

The continental shale gas in the W region is characterized by thin interbeds, extreme heterogene-

ity, and complex lithologic combinations. The existing seismic inversion techniques cannot meet the accuracy requirements due to the poor resolution. In this paper, a high-resolution processing technique based on spectrum extrapolation is used to construct a frequency-dependent spectrum extension factor and high-resolution processing operator, which are applied to seismic data processing. The data frequency bandwidth is extended from 8~70 Hz to 5~120 Hz, significantly improving the seismic data resolution. Based on this, the multi-scale decomposition technique of wavelet transform is used to fully utilize the seismic information in the low, medium, and high frequency bands, effectively alleviating the problem of missing high and low frequencies in conventional inversion methods. The fusion of high and low frequencies improves the inversion resolution and achieves the prediction of thin reservoirs of continental shale gas in the W region.

Keywords

Spectrum Extrapolation, Wavelet Transform, High Resolution, Multiscale Iteration

Copyright © 2023 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

地震数据是不同频率地震波的综合响应, 常规地震反演方法受实际地震资料频带宽度限制, 存在分辨率不高及多解性等问题[1] [2] [3] [4] (杨培杰, 2008; 印兴耀等, 2014, 2015; 李坤等, 2016)。W 地区侏罗系富有机质泥页岩厚度薄, 部分泥页岩层厚度在 15 米以下, 岩相变化快, 纵向及横向非均质性极强 [5] [6] [7] [8]。识别 15 米地层需要地震主频达到 67 Hz, 现有地震资料的主频仅 45 Hz, 难以识别储层。地震资料的分辨率不足, 制约了湖相页岩薄储层的描述与甜点预测, 亟需开展提高分辨率处理技术攻关, 为进一步的高精度地震反演提供高品质地震基础数据, 以满足高质量油气勘探需求。

近年来, 地震采集技术取得了突破性进展, 为获得高分辨率地震剖面奠定了基础, 但仍需要应用一些处理技术来追求更高的分辨率。为了提高地震资料的垂向分辨率, 许多技术得以发展, 如反褶积、反 Q 滤波等, 这些方法能够拓展地震数据高频成分信息, 但无法补偿低频信息, 影响了成像和储层反演的精度。

针对以上问题, 本文将采用基于频率延拓的多尺度逐步迭代地震高分辨率反演, 构建频变频谱拓展因子及高分辨率处理传导算子, 拓宽地震数据频带, 提升地震数据分辨率[9] [10] [11] [12] [13]。在此基础上, 将通过小波变换多尺度分解技术, 充分利用低、中、高频段的地震信息, 兼顾低频宏观地质背景, 突出薄层敏感频带的地震信息, 从而实现高分辨率地震反演[14] [15] [16] [17]。该方法在 W 地区的应用取得了良好效果。

2. 基于频谱延拓的高分辨率处理技术

2.1. 基本思路

理论模型正演分析表明地震低频信息能够有效压制子波旁瓣, 提高地震数据对地质薄层的分辨能力。研究过程中创新提出了基于频率延拓的地震高分辨率处理技术。

基于傅里叶理论, 构建了频变频谱拓展因子 $a(f)$ (式 1):

$$a(f) = \begin{cases} \frac{f_r + f}{2f_r}, & 0 \leq f < f_r, \\ \frac{(n-2)f_r + f}{(n-1)f_r}, & f_r \leq f < nf_r, \\ 2, & f \geq nf_r. \end{cases} \quad (式 1)$$

其中 f 为频率, f_r 为参考频率, $n \geq 5$, 是个可调节的整数, 本研究中我们设置 $n = 5$ 。

当应用基于频谱拓展因子到频谱后, 对原始地震子波低频段拉伸、高频段压缩, 生成了具有高低频信息的新子波(式 2):

$$\hat{W}(f) = \frac{1}{\hat{a}} \left| W \left(\frac{f}{a(f)} \right) \right| \exp \left(i \phi \left(\frac{f}{a(f)} \right) \right) \quad (式 2)$$

这里 $\hat{W}(f)$ 为频率拓展后的子波频谱, $\left| W \left(\frac{f}{a(f)} \right) \right|$ 为频率拓展后的振幅谱, $\phi \left(\frac{f}{a(f)} \right)$ 为频率拓展后的相位谱, 频谱会同时拓展到高频和低频方向。

$$H = (\bar{W}W + \sigma^2)^{-1} \bar{W}\hat{W} \quad (式 3)$$

然后, 通过子波替换技术构建了高分辨率处理传导算子(式 3), W 是原始子波的频谱, \bar{W} 是 W 共轭复数, \hat{W} 是拓展后子波的频谱, σ^2 是一个正的微小值, 用来稳定最小二乘解。最终将其应用到地震数据中, 在拓展高频成分的同时, 也保护和补偿了低频信息, 解决了常规方法无法恢复低频信息的难题, 地震频带宽度由 8~70 Hz 扩展到 5~120 Hz, 地震数据分辨率得到显著提升, 进而为后续的油藏描述和甜点预测服务。

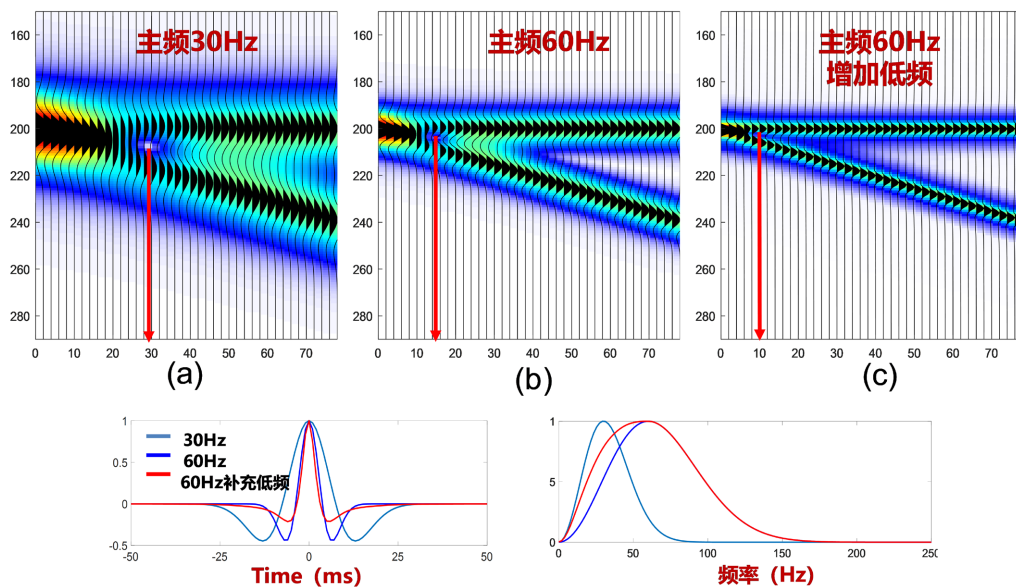


Figure 1. Wedge model display, different seismic wavelets have different longitudinal resolutions
图 1. 楔状模型展示, 不同地震子波有不同的纵向分辨率

不同的地震子波会有不同的纵向分辨率。图 1 展示的楔状模型中, 图(a)和图(b)的子波相同, 只是图(b)主频比图(a)主频高一倍, 那么, 分辨率就高一倍, 从 30 m 到 15 m。而尤为重要是图(b)和图(c)的差

别, 两者主频一样, 但是, 图(c)的低频成分丰富, 其分辨率进一步提高, 能够达到 10 m。低频成分的丰富不但增加了频带宽度, 更重要的是抑制了子波旁瓣, 从而能够有效提高识别薄层的能力。图(c)和图(a)比较, 主频高一倍, 且增加了低频信息, 频谱宽度得到了扩展, 由 0~60 Hz 扩展到了 0~120 Hz, 薄层识别能力得到了显著提升, 由 30 m 提高到了 10 m, 高低频对地震分辨率的影响较大。

2.2. 实际应用效果分析

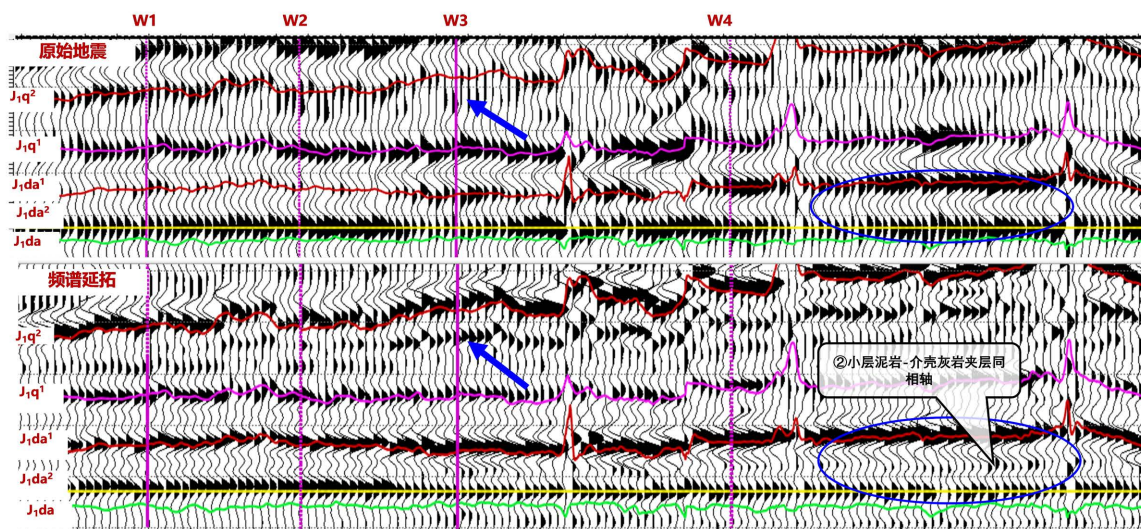


Figure 2. Comparison of high-resolution processing and original seismic well-tie sections

图 2. 高分辨率处理与原始地震连井剖面对比

通过对研究区实际数据的处理, 从图 2 可以看出, 原始地震数据大二亚段顶界面到底界面为波峰至波峰的反应特征, 内部为完整的波谷, 原始地震数据无法识别大二亚段内部地质小层; 基于频谱延拓提高分辨率处理的地震数据大二亚段内部出现弱波峰, 增加了地震反射同相轴, 纵向分辨率有了显著提高; 千一段顶部(蓝色箭头处)同相轴连续性变好, 信噪比提高。从图 3 可以看出基于频谱延拓的提高分辨率处理成果地震频带加宽了, 高低频都得到了有效补偿。

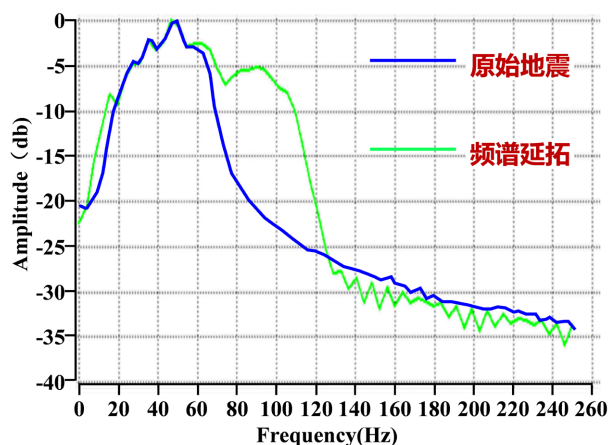


Figure 3. Spectrum comparison between high-resolution processed data and original seismic data

图 3. 高分辨率处理数据与原始地震数据频谱对比图

分别针对原始数据和提高分辨率处理数据开展 W4 井人工合成记录标定(图 4), 基于频谱延拓算法的提高分辨率地震数据大二亚段内部出现的弱波峰, 对应为大二亚段②小层顶部泥岩到中部介壳灰岩夹层的地震响应特征, 符合地质规律, 增加的反射同相轴真实有效; 相较原始地震数据, 提高分辨率地震数据与 W4 井合成记录吻合度较高, 分辨率有了显著提高。

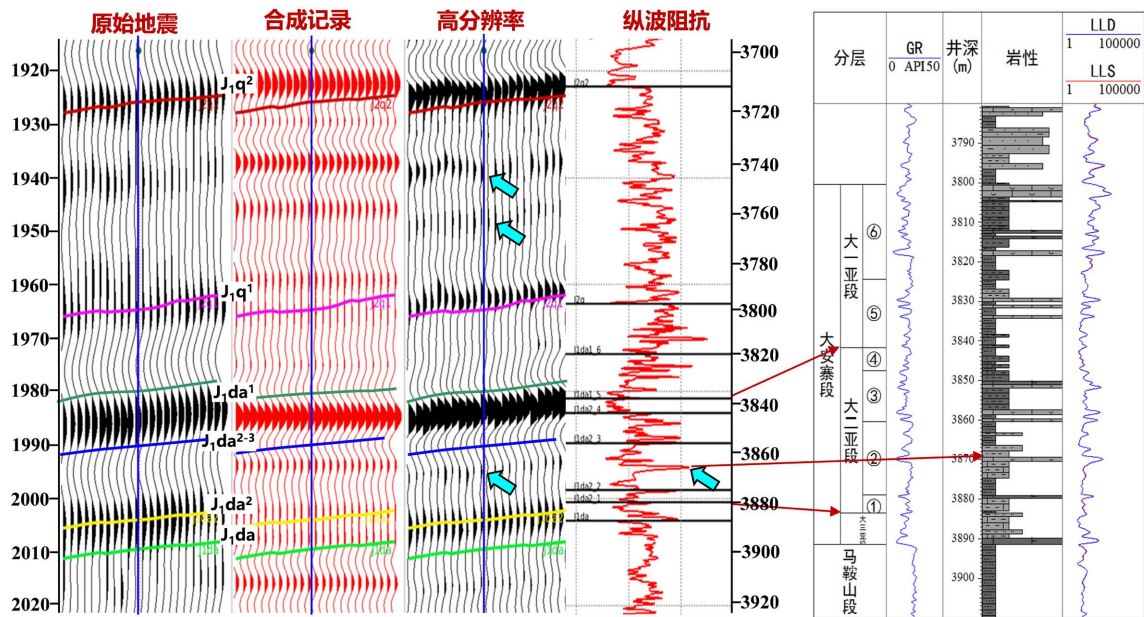


Figure 4. Well4 synthetic record comparison
图 4. W4 井人工合成记录对比

3. 多尺度逐步迭代高分辨率反演技术

3.1. 基本思路

提高分辨率处理地震数据频带拓宽, 常规反演方法直接提取子波, 子波频带较窄, 不能充分利用地震高、低频信息; 地震反演小层识别精度低, 常规反演方法对宽频地震资料不适用, 需开展高分辨率地震反演技术攻关, 提高预测精度。

通过小波变换多尺度分解技术, 将基于频谱延拓的高分辨率处理地震数据分解为不同频率(尺度)的数据, 其中低频资料反映横向相带的宏观变化趋势, 高频资料突出反映纵向岩性组分的微观变化特征[18]。通过提取多尺度子波, 降低单一子波对反演结果的影响; 基于自然邻域法插值法建立初始模型, 开展多尺度迭代反演, 上一尺度反演结果作为下一尺度反演的初始模型, 使得低、中、高频段的地震信息能够得到充分利用, 兼顾低频宏观地质背景, 突出薄层敏感频带的地震信息, 从而实现高分辨率地震反演。相比于常规反演方法, 该方法预测结果分辨率更高, 反演结果能够预测 10 m 以上薄储层(储层预测精度由 20 m 提高至 10 m)钻前预测结果与实钻情况相一致, 大幅提高了关键甜点参数的地震预测精度。

3.2. 实际应用效果分析

多尺度逐步迭代高分辨率叠前反演方法的技术路线如图 5 所示。基于提高分辨率数据体, 通过小波变换谱分解技术, 可以将高分辨率处理资料分解得到不同频率的资料, 地震低频资料反映沉积相带变化, 高频资料反映了地层的纵向细节反射特征。图 6 为研究区实际地震资料经过三个尺度的 morlet 小波(图 7)

分解后所得不同尺度地震数据, 低频剖面反映了地层的格架特征, 中、高频剖面可以看出地震数据分辨率得到提升, 保持了一定的地层格架信息, 同时地层的纵向细节反射特征也更加明显, 表明随着分解频率的增加, 地震资料对小地质体的识别能力逐渐提升, 有助于提升湖相页岩气甜点预测分辨率。

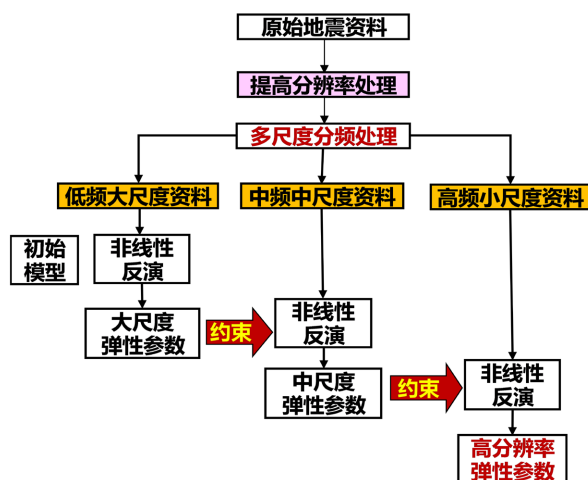


Figure 5. Technical route of multi-scale stepwise iterative high-resolution pre-stack inversion method

图 5. 多尺度逐步迭代高分辨率叠前反演方法的技术路线

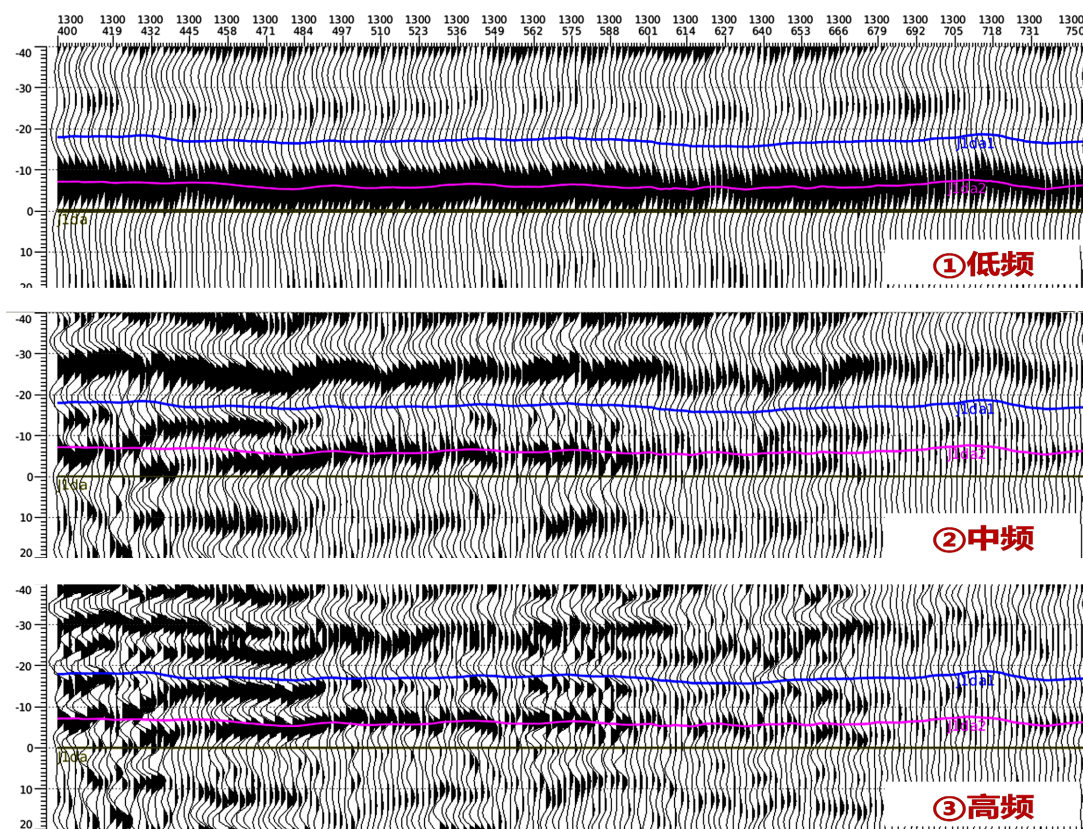


Figure 6. Wavelet decomposition of different scale seismic data

图 6. 小波分解不同尺度地震数据

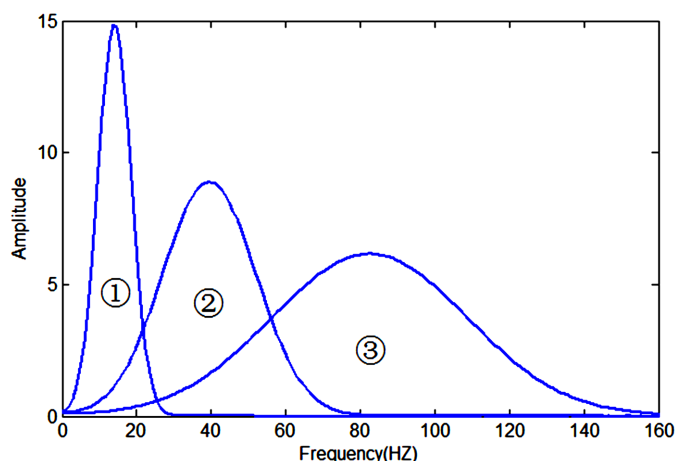


Figure 7. Three-scale Morlet wavelet frequency features
图 7. 三个尺度 Morlet 小波频率特征

为充分应用宽频信息, 基于提高分辨率数据体, 运用小波变换分频方法开展地震资料多尺度分解, 通过多尺度逐步迭代高分辨率反演, 将分频反演和多尺度逐步迭代约束稀疏脉冲反演相结合, 高低频相融合, 提高反演结果对薄层泥页岩储层的分辨能力。

本次研究的多尺度逐步迭代高分辨率反演方法与常规反演方法在低频模型构建方面有所不同, 该方法在低频数据约束稀疏脉冲反演的基础上, 将低频数据地震反演结果作为中频数据地震反演的低频模型, 在此基础上得到中频数据的波阻抗反演成果, 再将此结果作为低频模型进一步约束高频数据地震反演, 得到最终高分辨率波阻抗反演成果, 达到迭代反演的目的, 具体步骤如下:

- 1) 通过小波分解分别得到低频、中频以及高频地震数据, 针对低频数据体应用测井插值获取低频模型, 通过常规方法提取子波并反演得到低频的波阻抗反演结果;
- 2) 以低频波阻抗反演结果作为低频模型, 对中频数据进行常规方法子波提取和反演得到中频的波阻抗反演结果, 在此过程中将补充的低频设置为中频数据体的低频, 保证地震信息不缺失;
- 3) 以中频波阻抗反演结果作为低频模型, 对高频数据进行常规方法子波提取和反演得到中频的波阻抗反演结果, 在此过程中将补充的低频设置为高频数据体的低频, 保证地震信息不缺失。

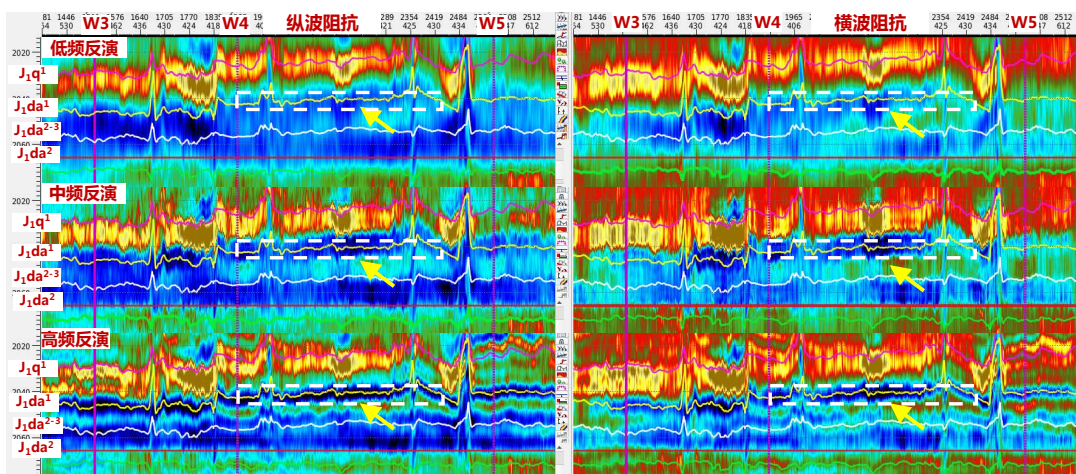


Figure 8. Impedance inversion results of seismic data at different scales in the Da'anzhai segment of the W region
图 8. W 地区大安寨段不同尺度的地震数据阻抗反演结果

通过上述方法实现低频向中、高频逐级融合的思想, 充分利用不同频带的地震信息, 提高反演的分辨率。如图 8, 从上至下依次为小波变换分解所得的大中小尺度地震数据迭代反演结果, 经过多次迭代反演得到 W 地区大安寨段最终高分辨率纵、横波阻抗。

W 地区大二亚段为湖侵体系域的中期旋回, 整体水体较深, 低频大尺度反演结果表明大二亚段整体波阻抗较低, 反映了深水沉积环境, 低频大尺度反演结果反映了相带变化及地质背景; 大二亚段内部存在多个短期旋回, 大三段水体较浅, 大二段从①号层开始水体加深, ②号层达到最深, 达到最大湖泛面, ③号层水体有变浅的特征, ④号层又经历小范围水进, 水体变深(图 9)。从中频中尺度反演到高频小尺度反演, 逐步提高了反演精度, 从高频小尺度反演成果来看 W 地区大二段②、④小层为一套低阻抗响应的泥页岩, 大二段③小层一套中高阻抗响应特征的灰岩、砂岩层(黄色箭头所指处), 反映了大二亚段内部水体加深到变浅, 再到加深的次级旋回沉积特征(图 7)。多尺度逐步迭代高分辨率波阻抗反演成果准确识别了大二内部的地质小层, 与地质认识相一致, 解决了地质小层薄无法准确识别的难题。

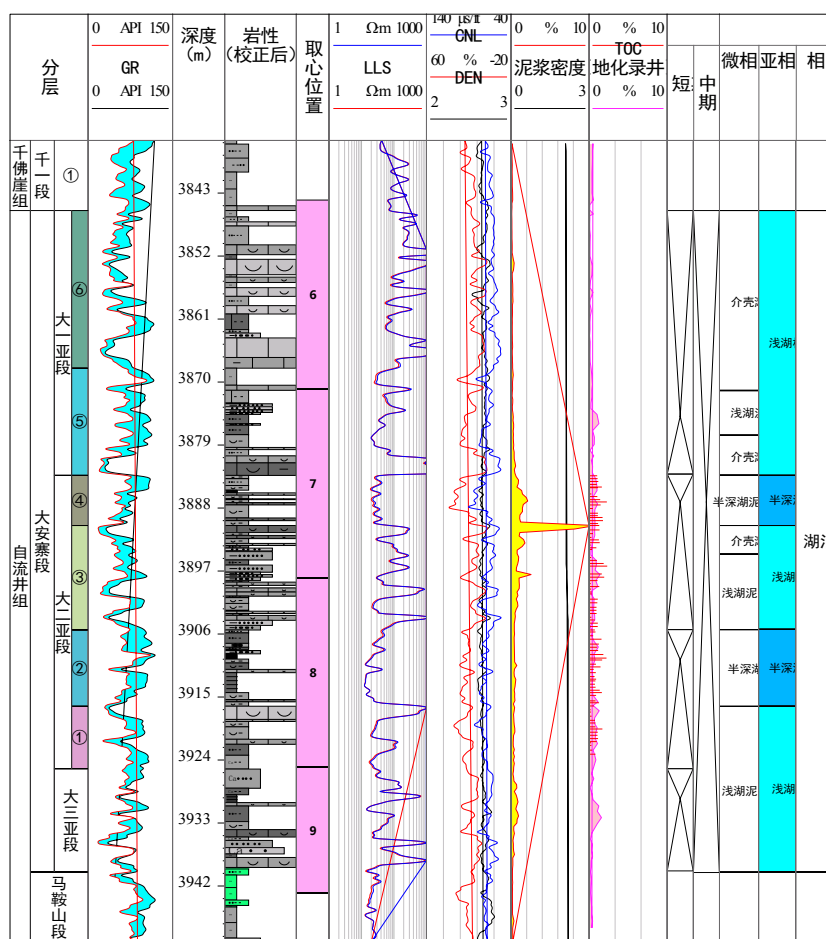


Figure 9. The synthesis histogram in Da'anzhai segment of well W1

图 9. W1 井大安寨段综合柱状图

4. 预测效果对比分析

由图 10 可以看出, W1 井大二亚段自下而上发育四套地质小层, 其中①号小层以含介壳/粉砂质泥岩为主, 地层厚度 10.2 m; ②号小层岩性主要为灰黑色含粉砂/含介壳页岩沉积, 地层厚度 11 m; ③号小

层主要以介壳灰岩为主, 地层厚度 14.8 m, 为四个小层中厚度最大; ④号层以灰黑色含介壳泥页岩为主, 地层厚度 7.2 m。②、④小层发育暗色泥页岩, 页岩连续厚度较大, 为大二亚段优质页岩层。

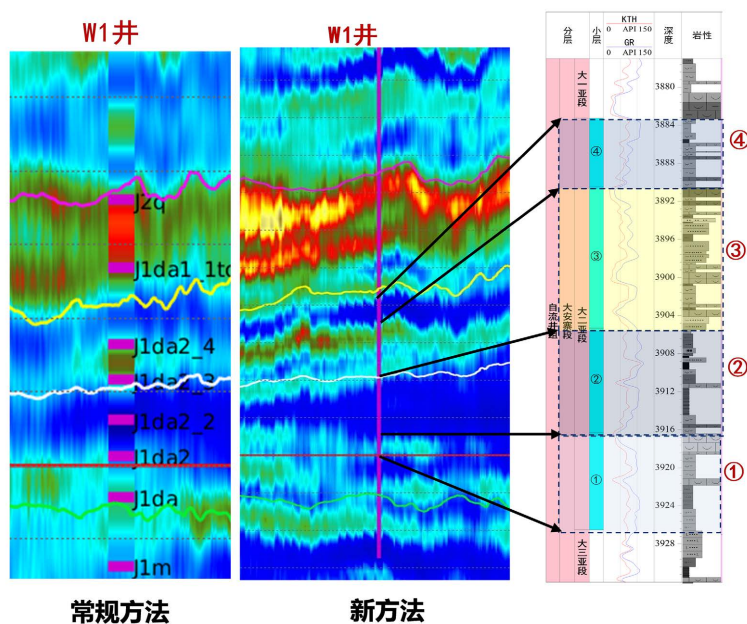


Figure 10. Well-seismic combination comparison of different inversion methods results of Da'anzhai segment in the W region

图 10. W 地区大安寨段不同反演方法结果井震结合对比

常规反演方法无法清晰划分大二亚段④号泥岩层和③号灰岩层, ①、②层也没有清晰的分界面; 多尺度逐步迭代高分辨率反演结果 4 套地层和实钻地质小层一一对应, 清晰识别出了②、④号泥岩层, 以及③、①号砂岩、灰岩层, 与测井吻合度更好, 纵向分辨率更高。

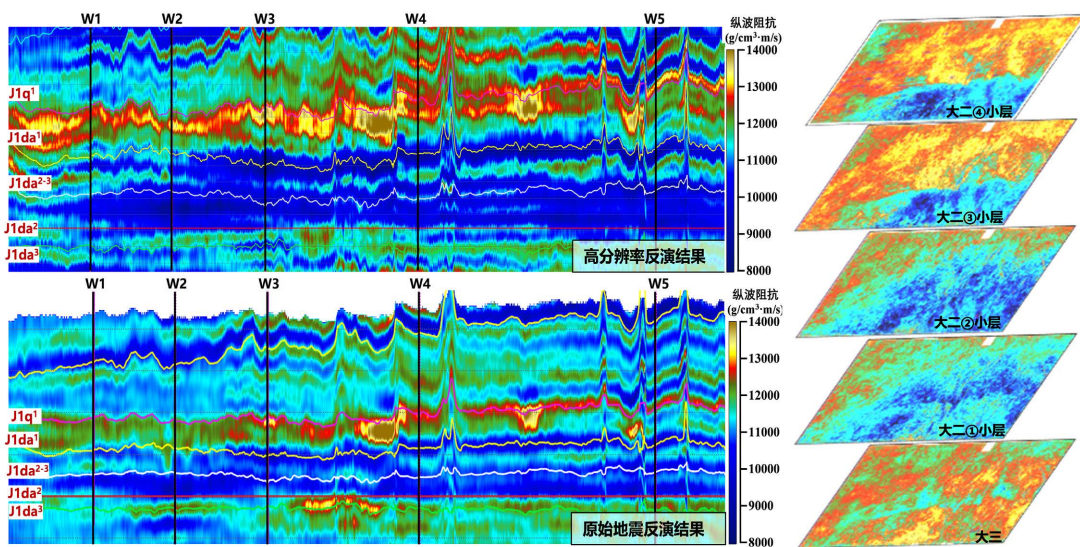


Figure 11. Comparison of P-wave impedance results between different inversion methods in the W region Da'anzhai segment

图 11. W 地区大安寨段不同反演方法纵波阻抗结果对比

由多尺度逐步迭代高分辨率预测结果(图 11)可知泥页岩发育的②、④号小层对应低阻抗响应特征, 波阻抗值小于 $11,500 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$, ①③号小层含较厚介壳灰岩砂岩层, 对应中高阻抗响应特征, 波阻抗值在 $11,500 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 以上, 预测结果准确的划分出了大二亚段内 4 个地质小层, 纵向上界面清晰, ②、④号泥岩层在区域上稳定连续, 预测结果分辨率较高, 符合地质认识。常规的波阻抗反演结果未能准确区分③④号小层, 以及①②号小层。高精度反演结果相较于常规的反演方法预测结果精度有了较大提高, 方法更先进。

以实钻井页岩厚度为基础, 结合多尺度逐步迭代高分辨率波阻抗反演成果, 深化了沉积相认识, 落实了大二亚段半深湖相带边界。半深湖有利相带主要分布在 W3 井~W5 井区, 大安寨段二亚段半深湖相沉积中心可能位于 W 以南地区, W 地区半深湖相泥岩厚度薄, 预测结果和地质认识一致。

5. 结论

W 地区侏罗系富有机质泥页岩厚度薄, 部分泥页岩层厚度在 15 米以下, 现有地震资料识别能力有限。基于频谱延拓的提高分辨率处理技术在拓展高频成分的同时, 补偿低频信息, 有效提高了地震数据的分辨率, 为进一步的高分辨率地震反演奠定了良好的数据基础。

多尺度逐步迭代高分辨率反演技术充分利用地震的低、中、高频段信息, 兼顾低频宏观地质背景, 突出薄层敏感频带的地震信息, 相比于常规反演方法, 预测精度更高。新方法预测结果准确区分了 W 地区侏罗系湖相页岩层地质小层, 预测结果与实钻井情况相一致, 纵向分辨率大幅提高。反演成果结合地质认识, 落实了大安寨二亚段半深湖相展布特征。多尺度逐步迭代高分辨率反演技术解决了 W 地区侏罗系富有机质泥页岩厚度薄, 无法准确识别的难题, 为“甜点”预测奠定了基础。

基金项目

中国石化股份公司“十条龙”项目(P21078-1)与基础研究项目(P22159)联合资助。

参考文献

- [1] 杨培杰, 印兴耀. 地震子波提取方法综述[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 123-128.
- [2] 印兴耀, 孙瑞莹, 张广智, 王保丽. 基于分形高频初始模型和低频先验信息的物性参数随机反演[J]. 石油物探, 2014, 53(5): 537-544.
- [3] 孙瑞莹, 印兴耀, 王保丽, 浦义涛. 基于分形先验信息的非线性反演[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(1): 97-105.
- [4] 李坤, 印兴耀, 宗兆云. 利用平滑模型约束的频率域多尺度地震反演[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(4): 760-768.
- [5] 彭嫦姿, 彭俊, 陈燕辉, 张汉荣. 四川盆地元坝地区大安寨段页岩气“甜点”地震预测[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 42-47.
- [6] 周德华, 焦方正. 页岩气“甜点”评价与预测——以四川盆地建南地区侏罗系为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 109-114.
- [7] 赵殿栋. 我国陆相页岩油勘探开发物探技术需求及对策分析[J]. 石油物探, 2022, 61(6): 963-974.
- [8] 郭旭升, 郭彤楼, 魏志红, 等. 中国南方页岩气勘探评价的几点思考[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 101-105.
- [9] 云美厚, 赵秋芳, 李晓斌. 地震分辨率思考与高分辨率勘探对策[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(5): 1250-1262.
- [10] 韩鹤威. 时频分析技术在薄层反演中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [11] 刘立彬, 周小平, 魏庆, 陈双全. 面向小尺度地质目标体的地震信号谐波预测拓频技术及应用[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(4): 460-467.
- [12] 陈双全, 李向阳. 应用傅里叶尺度变换提高地震资料分辨率[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(2): 213-218.
- [13] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.

- [14] 赵小龙, 吴国忱, 曹丹平. 多尺度地震资料稀疏贝叶斯联合反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(6): 1156-1163.
- [15] 撒利明, 杨午阳, 姚逢昌, 印兴耀, 雍学善. 地震反演技术回顾与展望[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 184-202.
- [16] 印兴耀, 裴松, 李坤, 林海鲲. 多尺度快速匹配追踪多域联合地震反演方法[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3431-3441.
- [17] 杨千里, 吴国忱. 基于贝叶斯理论的多尺度地震反演方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 31(3): 1246-1256
- [18] 曹丹平, 印兴耀, 张繁昌, 孔庆丰. 多尺度地震资料联合反演方法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1059-1067.