

吕华星,陈兆明,张振波,等. 机器学习高分辨融合反演在地层对比中的应用:以珠江口盆地开平凹陷开平 A 构造带为例. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):289-297. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230196.

Lyu Huaxing, Chen Zhaoming, Zhang Zhenbo, et al. Application of Machine Learning High-Resolution Fusion Inversion in Stratigraphic Correlation: A Case Study of Kaiping A Structural Belt in Kaiping Sag of the Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55 (1): 289-297. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230196.

机器学习高分辨融合反演在地层对比中的应用 ——以珠江口盆地开平凹陷开平 A 构造带为例

吕华星,陈兆明,张振波,姜大朋,李克成,郭 伟

中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518000

摘要:开平凹陷已发现的主要含油气层段主要位于古近系恩平组 and 文昌组,沉积环境主要为辫状河三角洲平原亚相,以分流河道微相为主。由于多期河道横向摆动,地层具有较强的非均质性,导致地层对比难度极大。本文利用机器学习算法支持向量机强大的数据拟合能力获得低频、中频和高频三部分数据的最佳融合频率及权重,得到具有高纵向分辨率和高横向地震分辨率细节特征的反演结果,提升井间地层尖灭位置和地层连通性描述精度。高分辨率 v_p/v_s 反演结果表明,该方法能够识别厚度为 6 m 的储层,具有较高的纵向和横向分辨率,有利于在研究区进行地层对比。

关键词:开平凹陷;古近系;机器学习高分辨融合反演;地层对比

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230196

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

Application of Machine Learning High-Resolution Fusion Inversion in Stratigraphic Correlation: A Case Study of Kaiping A Structural Belt in Kaiping Sag of the Pearl River Mouth Basin

Lyu Huaxing, Chen Zhaoming, Zhang Zhenbo, Jiang Dapeng, Li Kecheng, Guo Wei

Shenzhen Branch, CNOOC China Limited, Shenzhen 518000, Guangdong, China

Abstract: The main oil and gas-bearing strata discovered in Kaiping sag are primarily located in the Paleogene Enping Formation and Wenchang Formation. The depositional environment is mainly braided river delta plain subfacies, and the microfacies of underwater distributary channel is dominant. Due to the lateral oscillation of multiple river channels, the strata have strong heterogeneity, making stratigraphic correlation extremely difficult. This paper utilizes the powerful data fitting capabilities of

收稿日期:2023-08-09

作者简介:吕华星(1988—),男,工程师,硕士,主要从事地震综合解释和储层预测等研究工作,E-mail: lvhx5@cnooc.com.cn

基金项目:中海石油深海开发有限公司综合科研项目(KJGG2022-0104)

Supported by the Comprehensive Scientific Research Project of CNOOC China Limited (KJGG2022-0104)

machine learning algorithm support vector machine to determine the optimal fusion frequencies and weights for low, medium, and high-frequency data segments. This process yields inversion results with enhanced vertical resolution and detailed lateral seismic characteristics, thereby improving the accuracy of interwell stratigraphic pinchout positions and the description of stratigraphic connectivity. The high-resolution v_p/v_s inversion results demonstrate that this method is capable of identifying reservoirs with a thickness of 6 m. It offers superior vertical and horizontal resolution, which is conducive to stratigraphic correlation within the study area.

Key words: Kaiping sag; Paleogene; machine learning high-resolution fusion inversion; stratigraphic comparison

0 引言

开平凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷西部,由主洼、北洼、西洼、西南洼和东洼五个次洼组成,海水深度介于 200~500 m。开平 A 构造带位于开平主洼南部斜坡带,已钻井证实该区为优势油气汇聚单元,成藏条件优越。其目的层为古近系恩平组和文昌组,油气显示丰富,见砂即见显示且充满度高。沉积亚相为辫状河三角洲平原,多期河道横向摆动,砂体叠置发育,横向变化快,非均质性强,地层及油层对比难度极大^[1-7]。

传统的地层对比方法主要依赖于高分辨率层序地层学、沉积旋回等理论^[8-13],基于测井曲线的相似性开展井间横向对比,但对井间砂体的尖灭位置及其连通性问题仍无法进行准确描述。基于地震数据开展高分辨反演,得到“双高”(高纵向分辨率和高横向地震分辨率细节)特征的反演成果并应用于地层对比,为解决上述问题提供了新的方向。但受到地震资料本身分辨率的影响,传统高分辨反演方法应用效果不佳(如纵向分辨率不够高、横向地震细节特征缺乏等),推广并不广泛。

本文同样将地震高分辨反演的成果应用到地层和油层对比中,但在方法上做了进一步优化和改进。针对常规稀疏脉冲反演方法分辨率不足,以及传统地质统计学反演方法缺乏横向地震特征细节的缺陷,利用地震特征控制的机器学习高分辨融合反演技术,将支持向量机(support vector machine, SVM)算法与分频反演相结合,发挥算法优势,在高分辨反演的过程中自动学习匹配并建立高精度测井数据(低频、高频)与地震数据(中频)间的权重映射关系,得到“双高”的反演结果,并应用到地层和油层对比中,刻画靶区古近系河道微相储层。

1 技术方法

1.1 地震特征控制的机器学习高分辨融合反演原理

传统的地质统计学高分辨反演是以地质统计分析为基础,以地震数据为约束(并未直接参与其中),采用马尔科夫链-蒙特卡洛算法(Markov chain-Monte Carlo, MCMC),将确定性反演与地质统计随机模拟相结合的一种反演方法,包括随机模拟过程以及对模拟结果进行优化使之符合地震数据的反演过程。由于地质统计学反演的随机模拟结果中并没有引入地震数据,所以地震数据对其结果的约束作用弱,无法做到有效的地震数据特征控制,其结果必然缺少地震相的特征,特别是一些地震特征突变代表的地质现象(如河道、尖灭、串珠状缝洞等)在反演结果中得不到体现^[14-18]。

而地震特征控制的机器学习高分辨融合反演则可有效弥补地质统计学反演的不足。以波阻抗为例,绝对波阻抗或测井波阻抗与低频、中频和低频波阻抗的关系可以用一个函数来表示:

$$Z = f(Z_l, Z_m, Z_h)。 \quad (1)$$

式中: Z 为绝对波阻抗; Z_l 、 Z_m 和 Z_h 分别为归一化后的低频波阻抗、中频波阻抗和高频波阻抗。常规地震反演的本质是地震数据的中频成分加上测井数据的低频成分,将这一思路推广到高分辨反演,即再加上测井数据的高频成分就得到了高分辨反演的结果。

李庆忠^[19-21]提出了高分辨反演研究思路,即采用地震和测井数据相结合的融合反演方法,将地震数据(提供中频部分)与测井数据模型(提供低频和高频部分)进行融合反演,并引入机器学习算法 SVM,在高分辨反演过程中自动学习匹配并建立高精度测井数

据(低频、高频)与地震数据(中频)间的权重映射关系,得到双分辨率的反演成果数据体,在提高纵向分辨率的同时,最大限度地保持住了地震横向细节变化特征(如河道、尖灭、串珠状缝洞等)。

地震特征控制的机器学习高分辨融合反演方法的思路 and 流程是:根据目标地质体预测的分辨率要求设置合理的截止频带,对目标测井曲线开展滤波处理,得到测井的低频和 高频数据,并与地震的中频数据一起作为输入,以目标测井曲线作为标签数据(也可适当开展滤波处理,相当于适当降频处理)开展机器学习模型训练,得到高精度映射模型,将其应用到整个三维地震数据体的反演中,原理见图 1。

机器学习 SVM 算法的优势是:适合小样本训练数据;适用于二维空间复杂非线性分类或回归问题;全局优化,精度高;泛化能力强,通常不会出现过拟合现象。

1.2 叠前弹性参数 v_P/v_S 求解原理

在油气勘探开发中,由于埋深压实作用的影响,叠后反演得到的纵波阻抗对中深层地层岩性、物性和含油气性的识别效果较差,而其他叠前弹性参数,如纵横波速度比、密度、泊松比等则可以弥补纵波阻抗的不足,对地下储层的岩性、物性和含油气性具有较好的识别效果。纵横波速度比、密度、泊松比等参数可以通过 Aki & Richards 方程求解:

$$R_P(\theta) \approx \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \cdot \frac{\Delta v_P}{v_P} - 4 \left(\frac{v_S}{v_P} \right)^2 \sin^2 \theta \cdot$$
$$\frac{\Delta v_S}{v_S} + \frac{1}{2} \left[1 - 4 \left(\frac{v_S}{v_P} \right)^2 \sin^2 \theta \right] \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}.$$

(2)

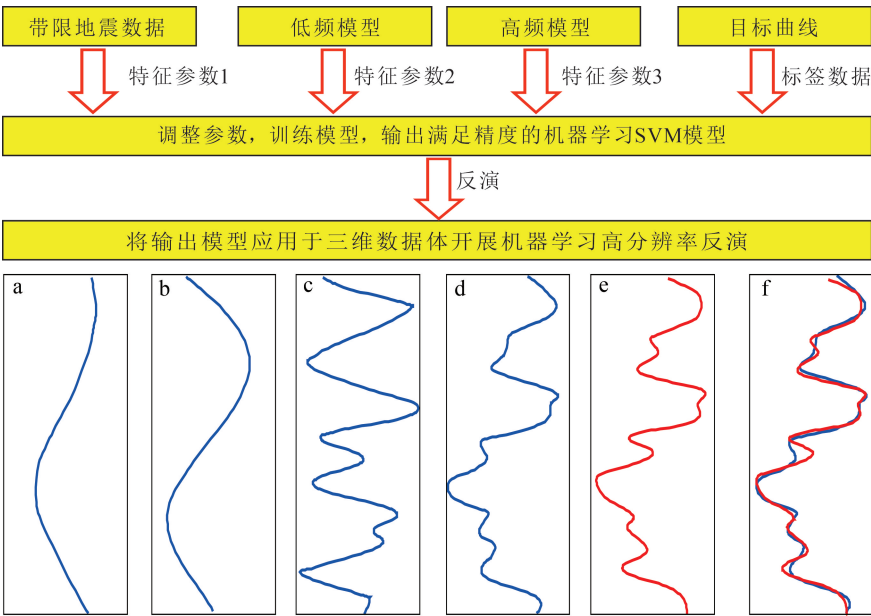
式中: R_P 为地震纵波反射系数; θ 为纵波入射角; v_P 为纵波速度; Δv_P 为纵波速度变化量; v_S 为横波速度; Δv_S 为横波速度变化量; ρ 为地层密度; $\Delta \rho$ 为地层密度变化量。

Aki & Richards 方程(式(2))基于 Zoeppritz 线性方程推导得出,输入叠前共反射点道集数据和偏移速度数据,通过 AVO(amplitude variation with offset)三参数反演方程即可直接求解纵波速度变化率($\Delta v_P/v_P$)、横波速度变化率($\Delta v_S/v_S$)和密度变化率($\Delta \rho/\rho$),再进行无井反演得到 v_P 、 v_S 和 ρ 相对值,最终通过机器学习高分辨融合反演得到 v_P/v_S 反演结果。

2 应用效果

2.1 恩平组-文昌组砂岩敏感性筛选分析

开平 A 构造带位于开平主洼中心位置(图 2),恩平组-文昌组时期同时受开平凹陷南北两个物源的影响。恩平组发育两期辫状河三角洲沉积,上恩平时期发育以北部物源神狐沙隆起为主的辫状河



a. 曲线滤波(低频);b. 井旁道地震(中频);c. 曲线滤波(高频);d. 目标曲线;e. 机器学习预测曲线;f. 机器学习预测曲线和目标曲线叠合。

图 1 机器学习高分辨融合反演流程及原理

Fig.1 Process and principle of machine learning high-resolution fusion inversion

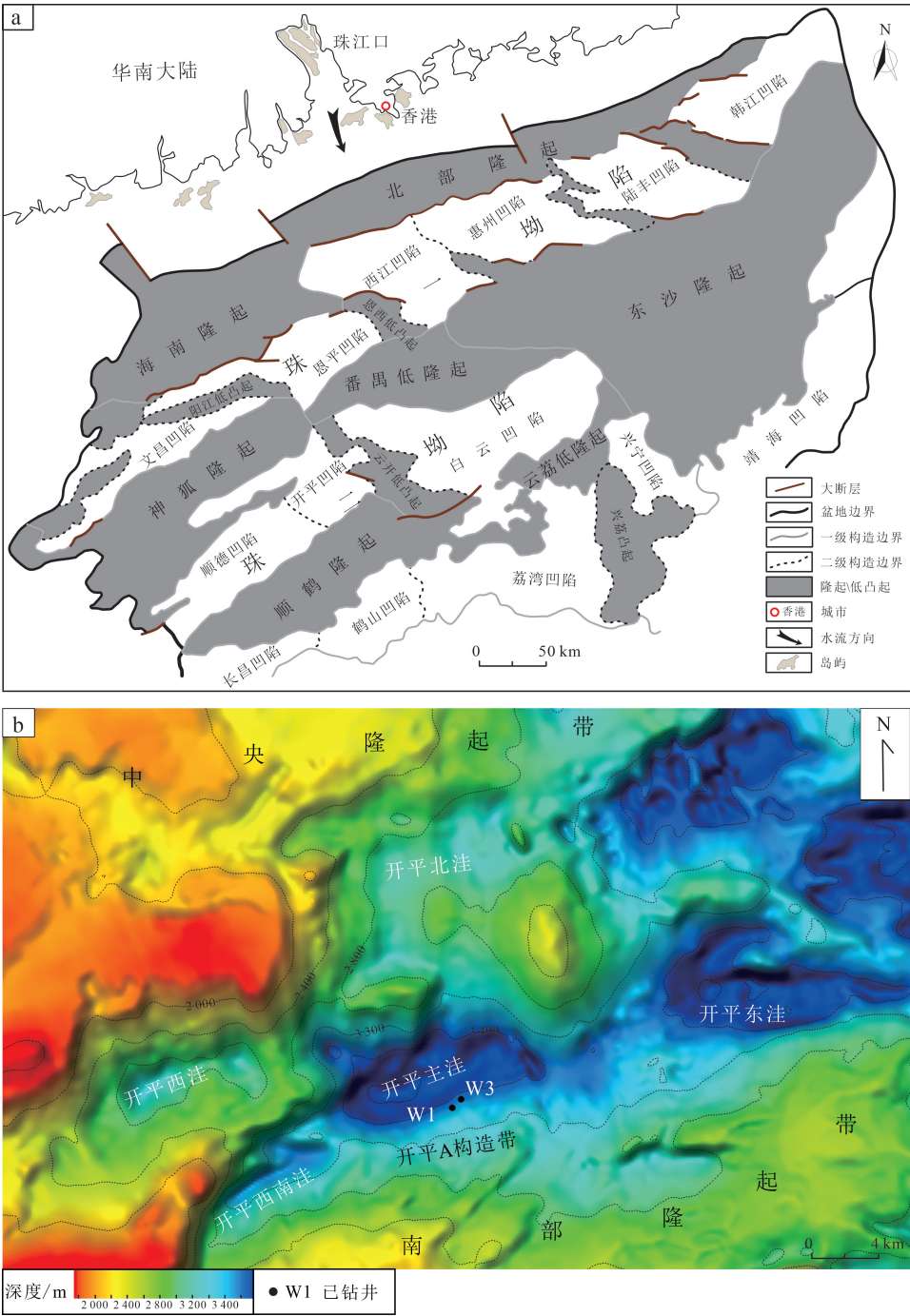


图 2 开平凹陷位置图(a)及构造图(b)

Fig.2 Location map (a) and structural map (b) of Kaiping sag

三角洲体系,下恩平时期发育以南部物源顺鹤隆起为主的辫状河三角洲体系;前缘和平原内分流河道储层物性较好,发育以南部顺鹤隆起为物源的辫状河三角洲沉积,砂体以前缘和平原内的分流河道相为主体,物性较好。

已钻 W1 和 W3 两口探井证实,恩平组整体表

现为厚砂岩薄泥岩互层特征,岩性以中-细砂岩为主,储层具分选中等一好和磨圆较好的特征。沉积相分析认为恩平组发育辫状河三角洲沉积体系,沉积亚相为三角洲平原相,井点处发育分支河道砂岩沉积。文昌组同样表现为厚砂岩薄泥岩互层特征,岩性以含砾中-粗砂岩、砂砾岩、中砂岩、细砂岩为

主,储层具分选差一中等和磨圆较好的特征。沉积相分析认为文昌组发育以南部斜坡带为物源的辫状河三角洲沉积体系,沉积亚相为三角洲平原和前缘相,井点处发育分支河道和水下分流河道砂岩沉积。

系统的岩石物理筛选分析结果(图 3)表明:开平 A 构造带恩平组-文昌组的砂、泥岩阻抗差异较小,阻抗叠置严重,常规叠后阻抗反演难以用于靶区的储层识别;但目的层砂岩具有明显的低纵横波速度比(v_P/v_S)、低密度趋势,尤其是低 v_P/v_S 特征最为明显,利用 v_P/v_S 属性可有效区分靶区目标层的砂、泥岩。

2.2 v_P/v_S 机器学习高分辨融合反演及效果分析

针对岩石物理优选的最敏感弹性参数 v_P/v_S 开展机器学习高分辨融合反演。在 v_P/v_S 无井反演结果的基础上,利用地震特征控制的机器学习高分辨融合反演方法,同时补充低频和高频信息,得到最终的 v_P/v_S 高分辨反演结果。

由于稀疏脉冲反演和地质统计学反演均为基于模型的反演方法,反演结果的好坏受初始模型的影响较大。初始地质模型基于测井数据以及地震控制的网格数据共同构建,在对地震提供的中频信息补充低频和高频信息的过程中,难以避免模型化的影响。

开平 A 构造带恩平组-文昌组无井反演与机器学习高分辨融合反演对比如图 4 所示。无井反演结果优势是具有高横向地震分辨率细节,缺点是反演结果缺少低频和高频信息,纵向分辨率不足,对部分厚层和薄层的响应偏弱;抛开这些缺点,反演结果仍与已钻井 W1 井和 W3 井 GR 曲线对应较好,证明了 v_P/v_S 反演结果在靶区预测砂体的适用性(图 4a)。地震特征控制的 v_P/v_S 机器学习高分辨融合反演结果相对 v_P/v_S 无井反演结果纵向分辨率明显提高,深部厚层和中-浅层薄层砂体与 W1 井和 W3 井 GR 曲线吻合更好;更重要的是由于降低了初始模型的影响,地震横向细节变化特征得到很好保留(图 4b)。

图 5 分别展示了开平 A 构造带恩平组-文昌组稀疏脉冲反演和机器学习高分辨融合反演结果。通过对比可知,地震特征控制的 v_P/v_S 机器学习高分辨融合反演结果纵向分辨率更高,横向地震细节特征更突出。如箭头所指厚度约 6 m 的储层由 W1 井到 W3 井方向逐渐尖灭,常规 v_P/v_S 反演结果已难以识别,但地震特征控制的 v_P/v_S 机器学习高分辨融合反演结果可清晰地刻画出该套砂体的尖灭位

置、横向展布特征。该成果能很好地应用到地层和油层对比中。

图 6 为开平 A 构造带恩平组-文昌组地震资料和机器学习高分辨融合反演结果对比。地震特征控

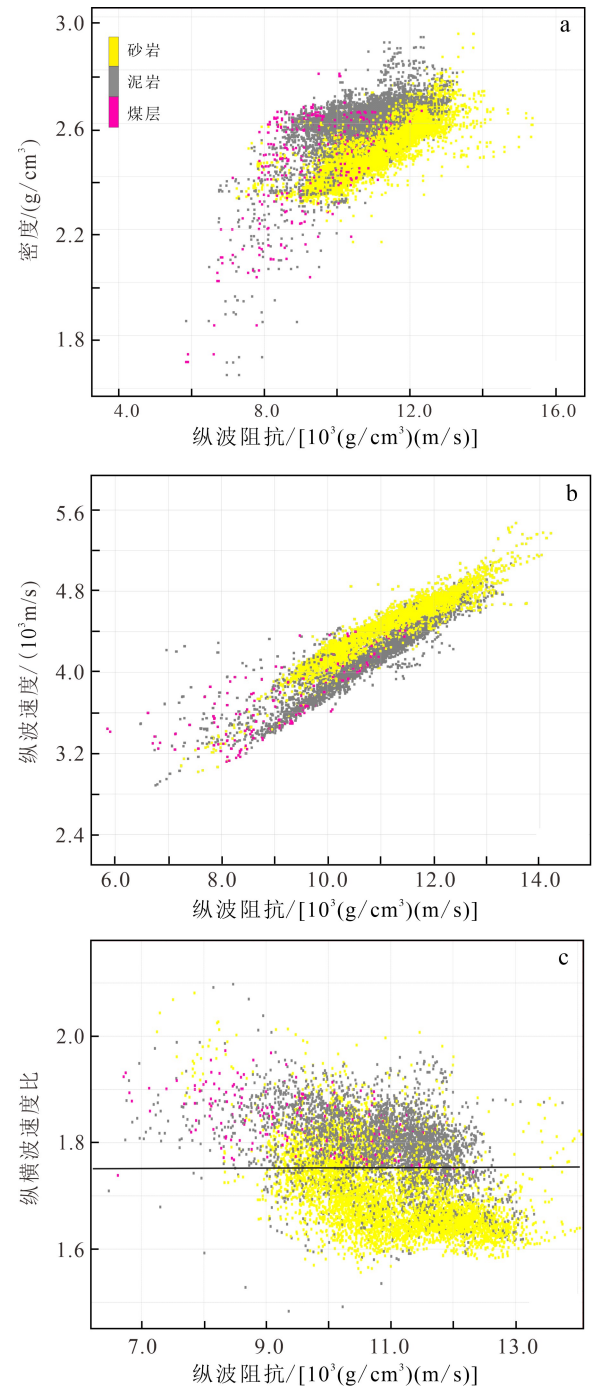
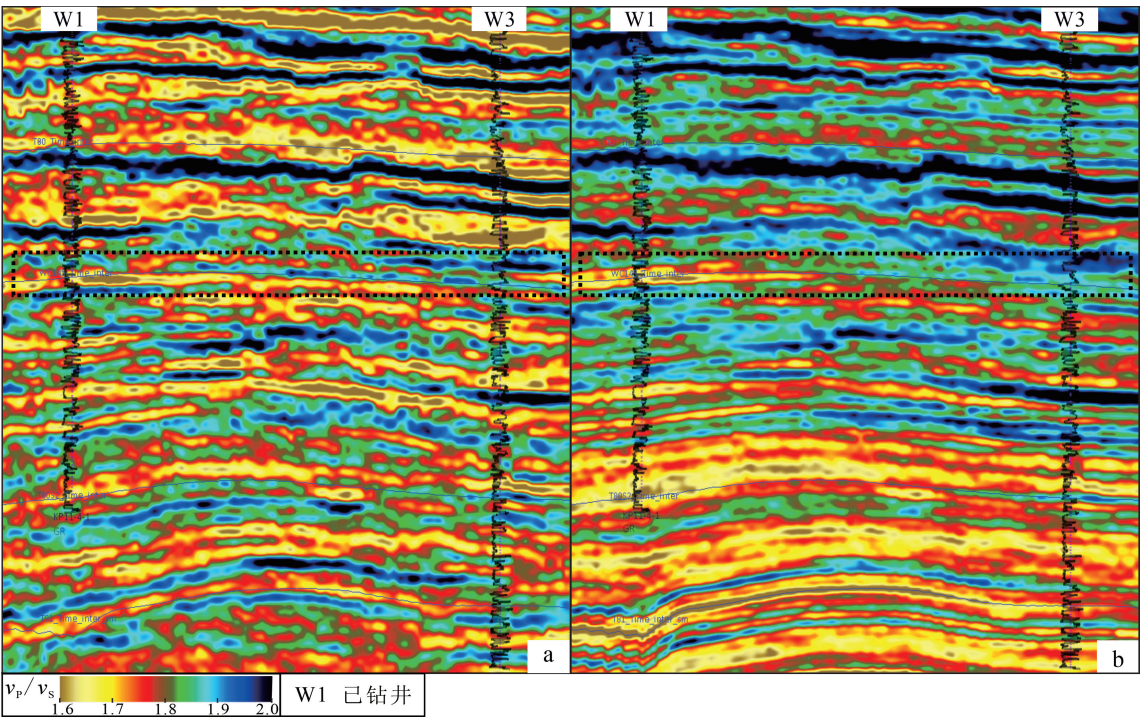


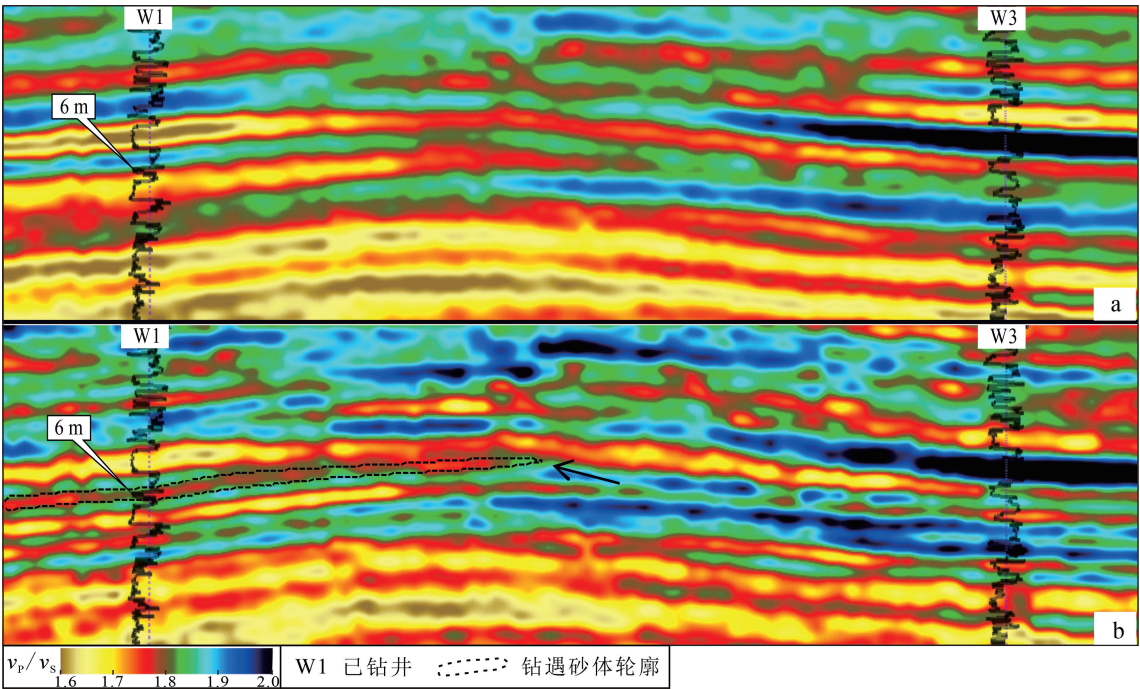
图 3 开平 A 构造带恩平组-文昌组砂岩敏感参数分析
Fig.3 Analysis of sensitive parameters of sandstone in Enping Formation and Wenchang Formation of Kaiping A structural belt



图中井曲线为自然伽马(GR)曲线。

图 4 开平 A 构造带恩平组-文昌组无井反演(a)和机器学习高分辨融合反演(b)对比

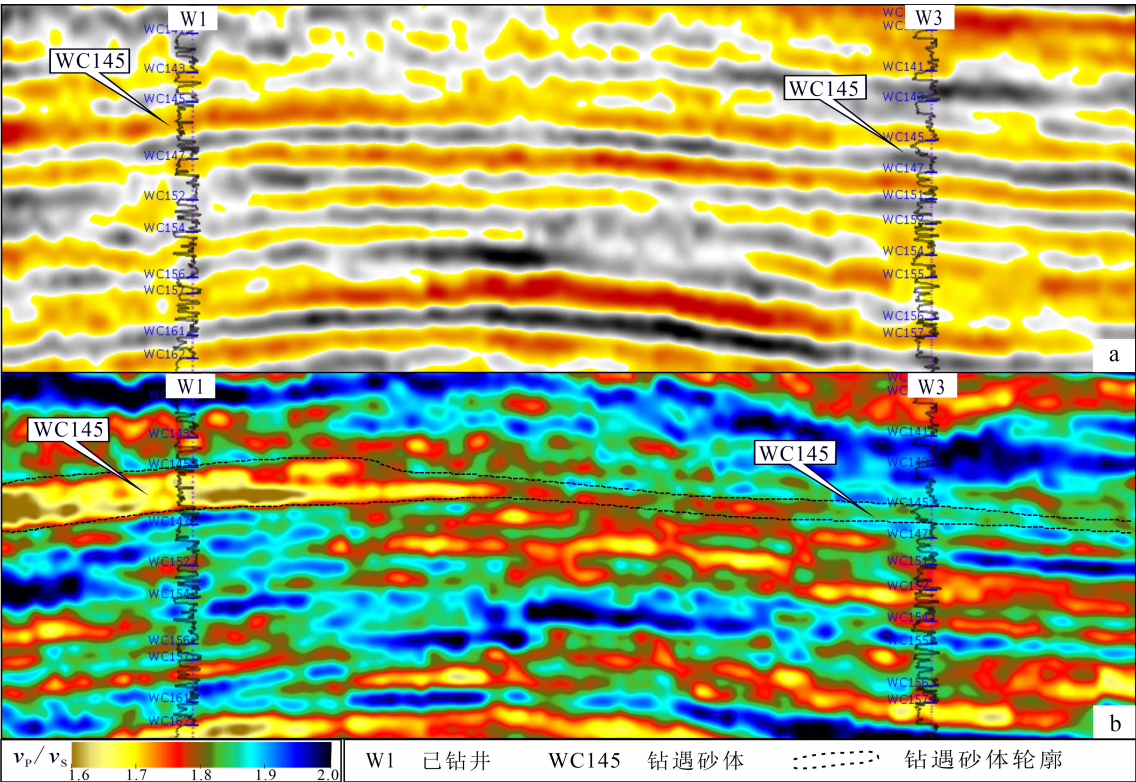
Fig.4 Comparison of inversion without well control (a) and machine learning high-resolution fusion inversion (b) in Enping Formation and Wenchang Formation of Kaiping A structural belt



图中井曲线为 GR 曲线。

图 5 开平 A 构造带恩平组-文昌组稀疏脉冲反演(a)和机器学习高分辨融合反演(b)对比

Fig.5 Comparison of sparse-spike inversion (a) and machine learning high-resolution fusion inversion (b) in Enping Formation and Wenchang Formation of Kaiping A structural belt



图中井曲线为 GR 曲线。

图 6 开平 A 构造带恩平组-文昌组地震资料(a)和机器学习高分辨融合反演(b)对比

Fig.6 Comparison of seismic data (a) and machine learning high-resolution fusion inversion (b) in Enping Formation and Wenchang Formation of Kaiping A structural belt

制的 v_p/v_s 机器学习高分辨融合反演结果在靶区恩平组-文昌组地层对比中应用效果良好。如 W1 井钻遇 40 m 厚的优质砂岩储层 WC145,参考叠后地震剖面及稀疏脉冲反演结果,钻前预测认为在 W3 井位置砂体厚度变化不大。实钻井结果证实,在 W3 位置,WC145 储层厚度明显减薄,砂体横向展布具有从 W1 井到 W3 井方向逐渐减薄的特征。地震特征控制的 v_p/v_s 机器学习高分辨融合反演结果(图 6b)与后钻井情况相吻合;而叠后地震数据(图 6a)分辨率低,阻抗难以反映砂、泥岩特征,因此难以刻画 WC145 储层横向展布特征,从而导致钻前预测出现失误。

2.3 高分辨反演结果应用于地层对比

地震特征控制的 v_p/v_s 机器学习高分辨融合反演结果具有“双高”的特点,能够较好地刻画 WC145 油层的尖灭位置、横向展布特征。在研究靶区,综合利用钻井、测井、地震以及高分辨率反演结果进行古近系陆相沉积的地层对比工作,针对沉积地层进行了砂体尖灭识别和薄层砂体预测,取得了良好的应

用效果(图 7)。

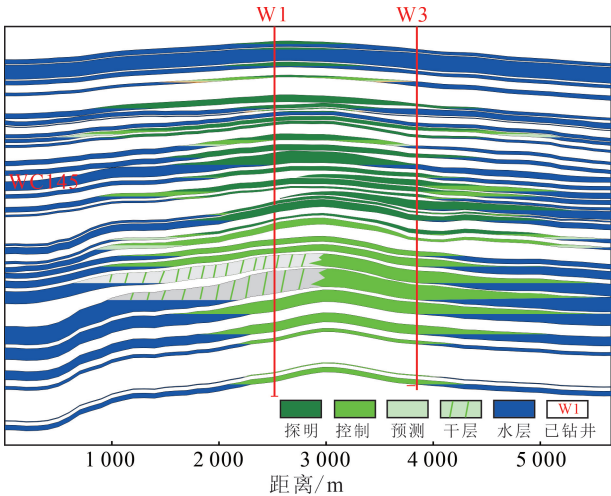


图 7 基于机器学习高分辨率融合反演的开平 A 构造地层对比图

Fig.7 Stratigraphic correlation map of Kaiping A structure based on high-resolution fusion inversion of machine learning

3 结论

1)针对常规稀疏脉冲反演方法分辨率不足、传统地质统计学反演方法缺乏横向地震细节特征的缺陷,利用地震特征控制的机器学习高分辨融合反演技术,针对靶区恩平组-文昌组对砂岩最敏感的弹性参数 v_p/v_s 开展高分辨反演。

2)反演得到了“双高”(高纵向分辨率、高横向地震分辨率细节特征)的砂岩预测成果,并被后续钻井证实能较好地应用到靶区的地层及油层对比中。

3)该方法对于刻画古近系河道微相储层有很强的实用性,为开发中-后期砂体的连通性研究奠定了基础,在类似地质背景地区有一定的推广意义。

参考文献(References):

[1] 高阳东,彭光荣,陈兆明,等. 珠江口盆地开平凹陷油气地质新认识与勘探突破[J]. 中国海上油气,2023, 35(1): 1-13.
Gao Yangdong, Peng Guangrong, Chen Zhaoming, et al. New Understanding and Exploration Breakthrough of Petroleum Geology in Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 1-13.

[2] 蔡嵩,彭光荣,陈兆明,等. 珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,2023, 43(2): 106-118.
Cai Song, Peng Guangrong, Chen Zhaoming, et al. Paleogene Tectonic Evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2023, 43(2): 106-118.

[3] 单玄龙,热西提·亚力坤,刘培,等. 珠江口盆地西江主洼珠琼运动的沉积响应及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023, 53(2): 329-342.
Shan Xuanlong, Yalikun · Rexiti, Liu Pei, et al. Sedimentary Response and Tectonic Significance of Zhuqiong Movement in Xijiang Main Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 329-342.

[4] 魏山力. 基于地震资料的陆相湖盆“源-渠-汇”沉积体系分析:以珠江口盆地开平凹陷文昌组长轴沉积体系为例[J]. 断块油气田,2016, 23(4): 414-418.
Wei Shanli. “Source-Transportation-Sink” Analysis Method and Application in Continental Lacustrine Basin Sedimentary System Based on 2D Seismic Data: An Example from Wenchang Formation of Long Axis Direction, Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin[J].

Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 414-418.

[5] 庞雄,陈隽,戴一丁,等. 珠江口盆地白云西一开平凹陷油气聚集及勘探目标研究[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(4): 237-245.
Pang Xiong, Chen Juan, Dai Yiding, et al. Study on Hydrocarbon Accumulation and Exploration Targets in West Baiyun-Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(4): 237-245.

[6] 罗超,李晓颜,刘渠洋,等. 砂质辫状河储层构型差异特征分析:以苏里格气田盒8下亚段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023, 53(1): 30-43.
Luo Chao, Li Xiaoyan, Liu Quyang, et al. Architecture Differences Analysis in Sandy Braided River Facies: A Case Study of Lower He8 Member in Sulige Gasfield[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 30-43.

[7] 熊连桥. 开平凹陷文昌组沉积特征及半深湖空间分布[J].中国海上油气,2021, 33(5): 51-61.
Xiong Lianqiao. Sedimentary Characteristics and Semi-Deep Lacustrine Facies Spatial Distribution of Wenchang Formation in Kaiping Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 51-61.

[8] 郑荣才,李国晖,雷光明,等. 四川盆地须家河组层序分析与地层对比[J]. 天然气工业,2011, 31(6): 12-20.
Zheng Rongcai, Li Guohui, Lei Guangming, et al. Sequence Analysis and Stratigraphic Correlation of the Xujiache Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 12-20.

[9] 罗洪浩,孙平昌,吴会永,等.河南省太行山东麓深部晚古生代层序地层及其含气系统划分[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022, 52(5):1718-1734.
Luo Honghao, Sun Pingchang, Wu Huiyong, et al. Late Paleozoic Sequence Stratigraphy and Coal Accumulation in the Deep Part of Eastern Foot of Taihang Mountains, Henan Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1718-1734.

[10] 葛家旺,朱筱敏,黄捍东,等. 稀疏井区辫状河三角洲地层精细对比:以惠州凹陷 HZ-A 油田文昌组为例 [J]. 高校地质学报,2015, 21(3): 440-448.
Ge Jiawang, Zhu Xiaomin, Huang Handong, et al. Fine Stratigraphic Correlation of Braided Delta Formation in Sparse Well Area: A Case Study of the Wenchang Formation in HZ-A Oil Field, Huizhou Depression [J]. Geological Journal of China

- Universities, 2015, 21(3): 440 - 448.
- [11] 刘文岭,王大星,萧希航,等. 复杂油藏井震联合等时地层对比技术与应用:以大港王徐庄油田为例[J]. 石油物探,2016, 55(4): 540 - 549.
- Liu Wenling, Wang Daxing, Xiao Xihang, et al. Isochronous Stratigraphic Correlation of Logging-Seismic Combination for Complex Reservoirs: A Case Study from Wangxuzhuang Oil Field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(4): 540 - 549.
- [12] 居字龙,唐辉,刘伟新,等. 泥岩标志层在海陆过渡沉积环境地层对比中的应用:以珠江口盆地陆丰凹陷 A 油田古近系为例[J]. 海相油气地质,2017, 22(2): 89 - 94.
- Ju Zilong, Tang Hui, Liu Weixin, et al. Identification of Mudstone Markers and Its Application in Stratigraphic Correlation in Transitional Sediments: A Case of the Paleogene in Oilfield A, Lufeng Sag, Zhujiangkou Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(2): 89 - 94.
- [13] 贾军涛,王璞珺,邵锐,等. 松辽盆地东南缘营城组地层序列的划分与区域对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007, 37(6): 1110 - 1123.
- Jia Juntao, Wang Pujun, Shao Rui, et al. Stratigraphical Sequence and Regional Correlation of Yingcheng Formation in the Southeast of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1110 - 1123.
- [14] 周爽爽,印兴耀,裴松,等. 地震波形约束的蒙特卡罗-马尔科夫链随机反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3): 543 - 554.
- Zhou Shuangshuang, Yin Xingyao, Pei Song, et al. Monte Carlo-Markov Chain Stochastic Inversion Constrained by Seismic Waveform [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(3): 543 - 554.
- [15] 林利明,郑颖,史浩,等. 基于相控地质统计学叠前反演的致密砂岩薄储层含气性预测:以鄂尔多斯盆地临兴中区为例[J]. 天然气工业,2023, 43(2): 56 - 66.
- Lin Liming, Zheng Ying, Shi Hao, et al. Gas-Bearing Prediction of Thin Tight Sandstone Reservoirs Based on Facies-Controlled Geostatistical Pre-Stack Inversion: A Case Study of the Middle Linxing Block in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(2): 56 - 66.
- [16] 印兴耀,贺维胜,黄旭日. 贝叶斯一序贯高斯模拟方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(5): 28 - 32.
- Yin Xingyao, He Weisheng, Huang Xuri. Bayesian Sequential Gaussian Simulation Method[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(5): 28 - 32.
- [17] 孙月成,周家雄,马光克,等. 叠前随机反演方法及其在薄层预测中的应用[J]. 天然气工业,2010, 30(12): 29 - 32.
- Sun Yuecheng, Zhou Jiaxiong, Ma Guangke, et al. Stochastic Pre-Stack Seismic Inversion and Its Application to Thin Layer Prediction[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 29 - 32.
- [18] 黄捍东,张如伟,魏世平. 地震非线性随机反演方法在陆相薄砂岩储层预测中的应用[J]. 石油学报,2009, 30(3): 386 - 390.
- Huang Handong, Zhang Ruwei, Wei Shipping. Research on Application of Seismic Nonlinear Random Inversion to Reservoir Prediction in the Thin Sandstone of Continental Deposits[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 386 - 390.
- [19] 李庆忠. 地震高分辨率勘探中的误区与对策[J]. 石油地球物理勘探,1997, 32(6): 751 - 783.
- Li Qingzhong. Some Mistaken Concepts in High-Resolution Seismic Exploration and the Corresponding Countermeasures[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(6): 751 - 783.
- [20] 李庆忠. 岩性油气藏地震勘探若干问题的讨论(II): 关于垂向分辨率的认识[J]. 岩性油气藏,2008, 20(3): 1 - 5.
- Li Qingzhong. Discussion on Seismic Exploration of Lithologic Reservoirs (II): Seismic Vertical Resolution[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(3): 1 - 5.
- [21] 李庆忠. 论地震约束反演的策略[J]. 石油地球物理勘探,1998, 33(4): 423 - 438.
- Li Qingzhong. On Strategy of Seismic Restricted Inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(4): 423 - 438.