

文章编号: 1001-1749(2023)04-0435-08

古潜山内幕构造及储集体刻画

——以胜利油区富台潜山为例

李卿武¹, 王兴建^{1,2}, 张强³, 杜玉山³, 翟亮³, 徐耀东³, 徐彦群³

(1. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059;

2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059;

3. 中国石化 胜利油田分公司勘探开发研究院, 东营 2570121;)

摘要: 碳酸盐岩潜山储层蕴含资源量巨大, 勘探前景广阔, 是胜利油田的接替新领域。碳酸盐岩潜山油气藏多受构造活动、岩性变化和流体溶蚀等影响, 其内幕储集空间非常复杂, 油气开发难度大, 准确地描述裂缝空间分布是潜山油气藏开发的基本前提。这里以胜利油区富台潜山为例, 通过研究该区域的地质背景并结合测井、地震资料对其进行地层划分, 以深度学习为辅助手段实现了对全区进行高效的裂缝预测; 在裂缝预测结果基础上进行断缝溶储集体刻画, 并结合多地层的古地貌准确直观地展示了刻画结果。

关键词: 油气勘探; 富台潜山; 深度学习; 裂缝预测; 储集体

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.04.04

0 引言

我国海相碳酸盐岩地层分布广, 其中蕴含大量油气资源, 故其在油气勘探领域中有举足轻重的地位^[1]。随着勘探程度加深, 碳酸盐岩潜山储层也成为众多学者和勘探家关注的重点。我国多个含油气盆地内均发现碳酸盐岩储层, 如渤海湾任丘潜山储层、冀中坳陷潜山储层、鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层、南堡凹陷寒武—奥陶系和济阳坳陷车镇地区下古生界碳酸盐岩储层等^[2]。富台地区地层出露规律非常复杂, 加之富台潜山经历多期次构造运动、岩溶地层差异发育, 导致潜山内幕地层发育特征认识不清、潜山内幕断裂系统落实难度大。富台潜山油藏碳酸盐岩储层原生空隙不发育, 对油气起决定性作用的是次生空隙, 而富台地区存在晶间空隙、裂缝、溶孔、溶洞等多种储集空间类型, 属于裂缝型复

杂潜山油藏。裂缝型油气藏的勘探开发, 裂缝预测的准确性十分重要, 对于常规潜山的内幕构造刻画, 主要有基于裂缝成因分析的预测方法和基于裂缝地震响应特征的预测方法, 而这些传统方法对潜山裂缝、断层地识别有诸多局限性(如细小断层识别不清、裂缝预测速度慢等), 这对准确预测储层位置十分不利。笔者通过地层对比为油气勘探工作进行指导, 将地震资料进行高品质处理, 以消除噪声对弱反射同相轴的影响, 在此基础上利用深度学习的方法, 对油藏区域进行了自动断层识别并取得了良好的效果; 储集体刻画中采用 EMD 算法对储层甜点进行有效预测, 同时结合地震参数反演和多尺度属性融合对储集体进行刻画。

1 研究区概况

富台潜山位于渤海湾盆地济阳坳陷以北, 埕南

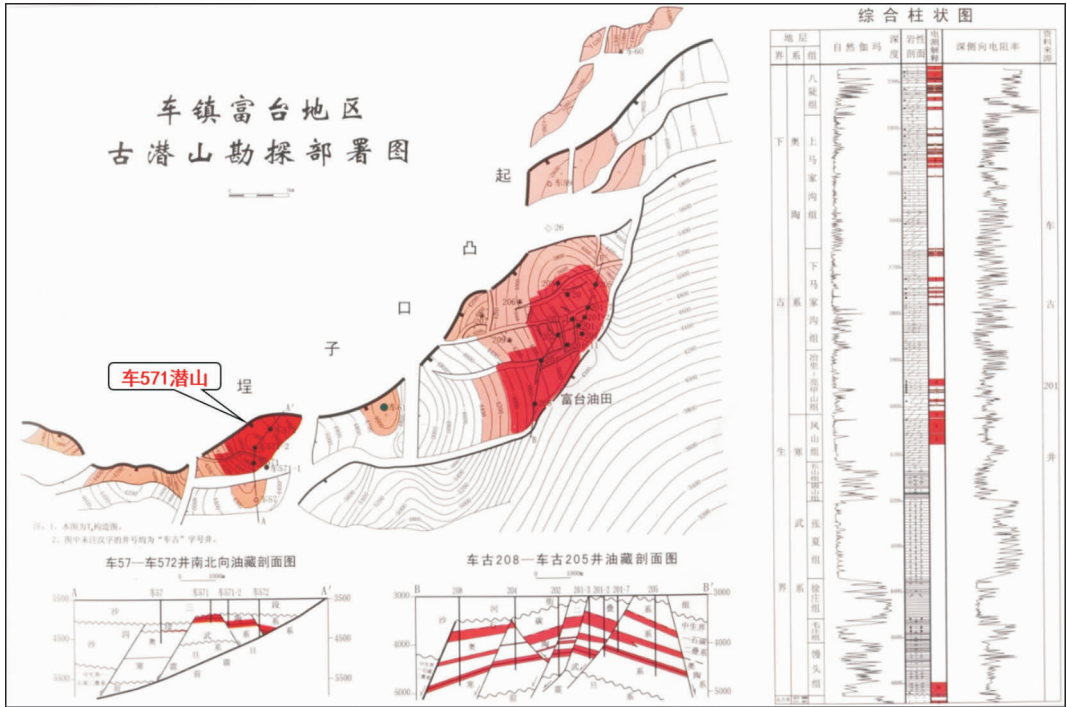


图1 富台地区潜山勘探部署图

Fig. 1 Buried hill exploration deployment in Futai area

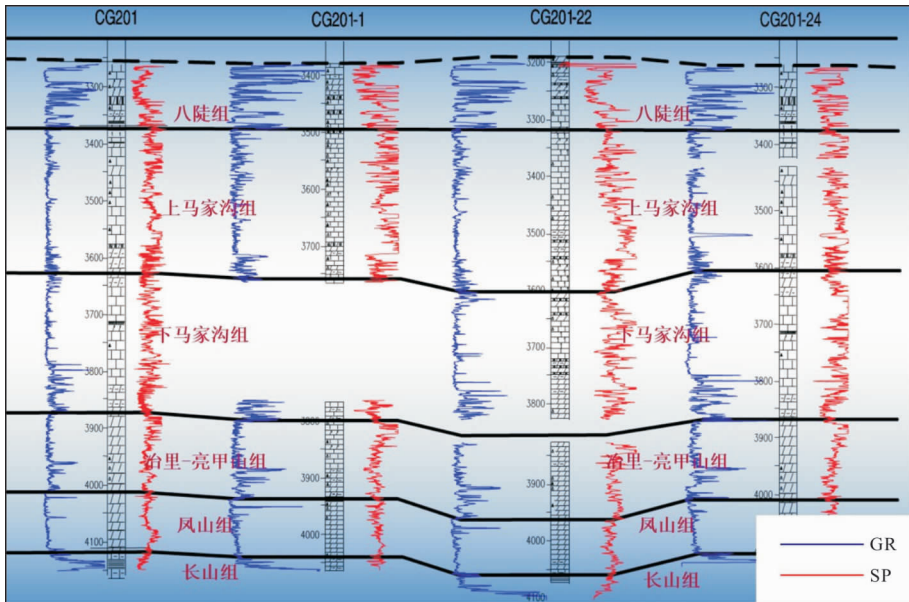


图2 车古201井—车古201—24井下古生界地层对比图

Fig. 2 Stratigraphic correlation of Paleozoic in well Chegou 201-24

断裂带的下降盘,南部以二台阶断层为界,北部紧邻坨子口凸起部,潜山构造以奥陶系和寒武系地层为主(图1)。燕山期的冲断褶皱作用使车镇凹陷发育了许多规模不等的断展背斜构造,后期经过喜马拉雅运动,使潜山小型断块尤为发育。富台潜山表现为“三山两凹”格局,潜山通过大断裂与沙三段油源

直接对接,构造圈闭形态较好^[3]。

富台潜山经过三个主要阶段演化后逐渐形成潜山构造:①古生代稳定沉降阶段,蓟县运动后富台地区开始稳定沉降,经历了寒武系和奥陶系海相碳酸盐岩沉积,并因加里东运动缺失了奥陶统一下石炭统地层;②中生代末挤压冲断—褶皱阶段,富台地区

接受侏罗系、白垩系沉积,因燕山运动的影响,使古生界发生强烈褶皱变形并造成中生界强烈剥蚀;③新生代伸展断陷—拗陷阶段,受济阳运动影响,富台潜山逐步被切割成多个断块,该地区进入拗陷盆地阶段,潜山最终定型。

地层划分与对比工作是开展地质研究的基础,层位地准确解释是基于地震资料进行古地貌恢复及内幕断裂刻画的基本条件。研究区主力生油层属于海相沉积,地层残留较薄,横向变化快,地层精细划分与对比难度较大,需要结合地震、地质资料以提高地层划分的准确性。从地质情况来看,该地区地层主要为太古界变质岩,经过长时间的地层沉,古生界、中生界和新生界相继出现,相邻地区凹陷中心沉积岩厚度达 10 000 m。根据测井资料对富台车古 201—5 井和车古 203 井下古生界地层进行对比分析,得出车古 201 潜山的地层至下而上分别为:太古界、下古生界寒武系(下统府君山组、馒头组、毛庄组、中统徐庄组、张夏组、上统崮山组、长山组、凤山组)、奥陶系(下统冶里—亮甲山组、中统下马家沟组、上马家沟组、八陡组)、上古生界石炭—二叠系、下第三系沙河街组、东营组、上第三系馆陶组、明化镇组及第四系平原组。虽富台油区地层层序多,但含油层位主要集中于下古生界寒武—奥陶系,图 2 为下古生界地层对比图。富台潜山断裂系统复杂,所含断层种类多,以小断层为主。常规的断层识别方法如通过地震剖面识别断层、基于地震属性的断层识别方法(相干体技术、曲率属性、方差体技术、蚂蚁属性等),在普通断层识别的应用中已经取得了不错的成绩,对于断距较小的断层识别效果则很不理想。基于深度学习的断层识别不仅能克服由地质工作者经验造成的主观影响,还能极大地缩短工作时长。

2 深度学习断层识别

随着人工智能领域的飞速发展,深度学习在断层识别中地应用已经十分成熟,实验证明它能准确地快速找出富台潜山区域中的小断层^[4],能够胜任传统断层识别方法无法完成的工作。本次实验用深度学习的方法对经高品质处理的地震数据进行自动断层识别,为后续储集体的准确刻画提供了保障。

2.1 方法原理

常见的深度学习算法有 SA、RBM、DBN、GAN 以及 CNN 等,卷积神经网络(CNN)在图像识别中

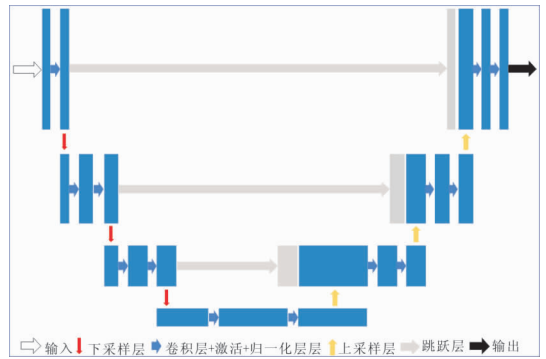


图 3 3D-UNet 网络模型结构

Fig. 3 Structure of 3D-UNet network model

表现出超强的自主学习能力,并被广泛应用于地震断层识别领域。故本次实验中选用卷积神经网络结构中的 3D-UNet++ 模型进行断层自动识别,相比于 2D 卷积神经网络,3D 卷积神经网络可以更加有效地挖掘数据内部的隐藏信息,极大地提升断层识别效果^[5]。

图 3 中蓝色箭头表示卷积层、激活层和池化层,卷积层用于提取数据的局部结构特征^[6]。单个卷积层是一种线性运算,无法很好的捕捉非线性关系,激活层的作用就在于其能够以一种非线性方法保留提取的局部结构特征。归一化层中有两个参数 λ 和 β 需要更新,原理如下:

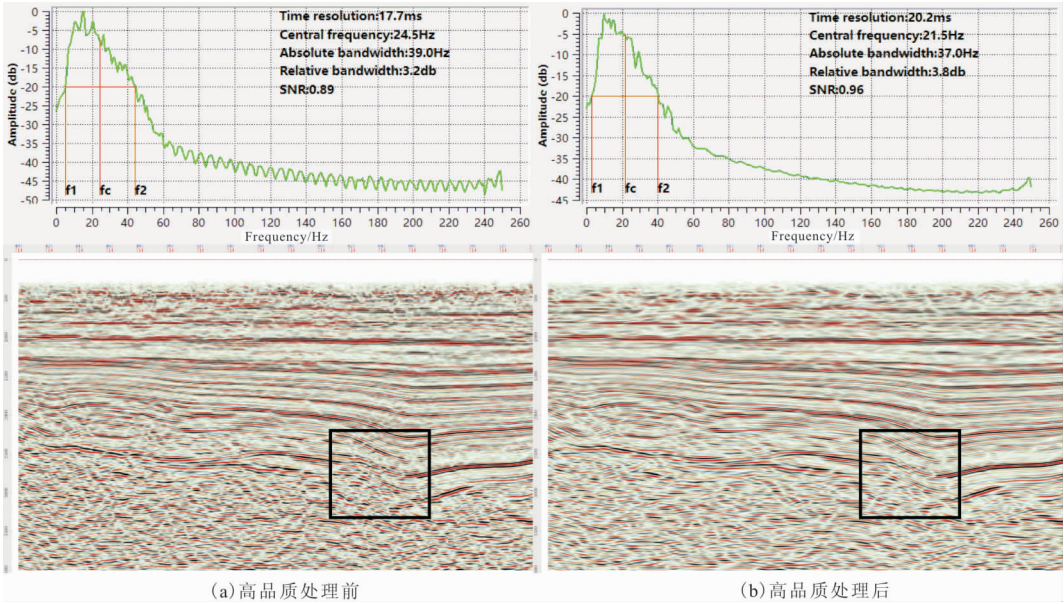
$$B(u_k) = \lambda \frac{u_k - E(u_k)}{\sqrt{V(u_k)}} + \beta \quad (1)$$

式中: λ 为缩放尺度参数; β 为平移参数。图 4 中红色箭头表示下采样,作用在于减小过拟合并提高模型的容错性;再通过上采样操作(黄色箭头)将断层信息进行逐层恢复;其中灰色箭头代表跳跃层,让不同尺度的结构特征参与到数据还原过程中,增加网络结构的多尺度性,以便更精确的恢复小尺度断层结构。

深度神经网络的训练过程就是最小化损失函数的过程,本次实验采用加权的二元交叉损失函数为式(2)。

$$L = -\epsilon \sum_{i=0}^{i=n} y_i \log(p_i) - (1-\epsilon) \sum_{i=0}^{i=n} (1-y_i) \log(1-p_i) \quad (2)$$

式中: N 为训练样本数量; ϵ 为断层与非断层的比例; y_i 为真实标签值(1 表示断层,0 表示非断层); $p_i \in (0,1)$ 表示地震数据预测的断层值。深度学习模型训练往往依赖于大量的训练样本,增加损失函数中的 ϵ 可使模型训练过程中跟加侧重于学习对应标



(a) 高品质处理前

(b) 高品质处理后

图 4 高品质处理前后对比图

Fig. 4 Comparison before and after high quality treatment

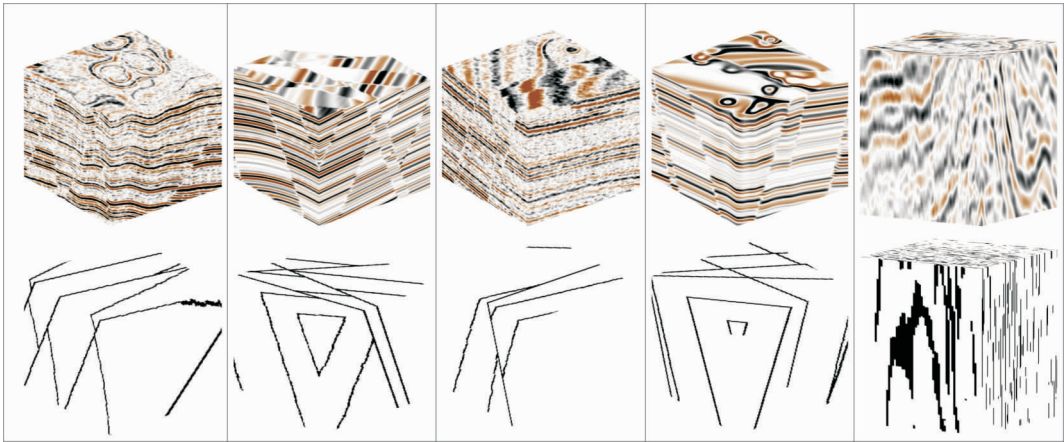


图 5 训练数据及其对应的断层模型

Fig. 5 Training data and its corresponding fault model

签较少的样本,以解决正负样本不均衡的问题。实验所用的训练数据集中在数量上断层点要远小于非断层点,故交叉熵损失函数能够加强对断层点的学习,提高训练效果。

2.2 实际应用

该工区叠后地震数据共有 364 条测线,每条测线 401 道,采样间隔 2 ms,采样点数为 2 000。通过分析地震数据得出,地震数据中含有一定的随机噪声,深层地震数据同相轴连续性差,噪声影响严重,无法对同相轴进行很好追踪,对后期地震资料解释和断层划分尤其是小断层识别造成严重干扰,因此地震数据进行高品质处理对实验具有重要意义。

本次实验采用低秩约束方法来提高地震数据品质,在低秩约束中,地震记录在局部上可以看作是由 K 个线性同相轴叠加而成,如此一来,由该数据频率切片的 Hankel 矩阵的秩便与 K 相等^[7-8]。不含噪声的地震数据具有低秩结构,而随机噪声的存在会增加 Hankel 矩阵的秩,因此地震数据去噪问题就转化为了对 Hankel 矩阵进行降秩的问题^[9]。设地震数据为 $D(t, x)$,傅里叶变化后组成 Hankel 矩阵 $\mathbf{D}(\omega, x)$,假设频率域中一个线性信号可表示为 $A(\omega)e^{-i\omega(qx + pt)}$,低秩约束全过程可表示为式(3)。

$$\mathbf{D}(\omega, x) = A R_k H[\mathbf{D}(\omega, x)] = P_k \mathbf{D}(\omega, x) \quad (3)$$

式中: A 为反交线平滑算子; $P_k = A P_k H$ 为低秩约

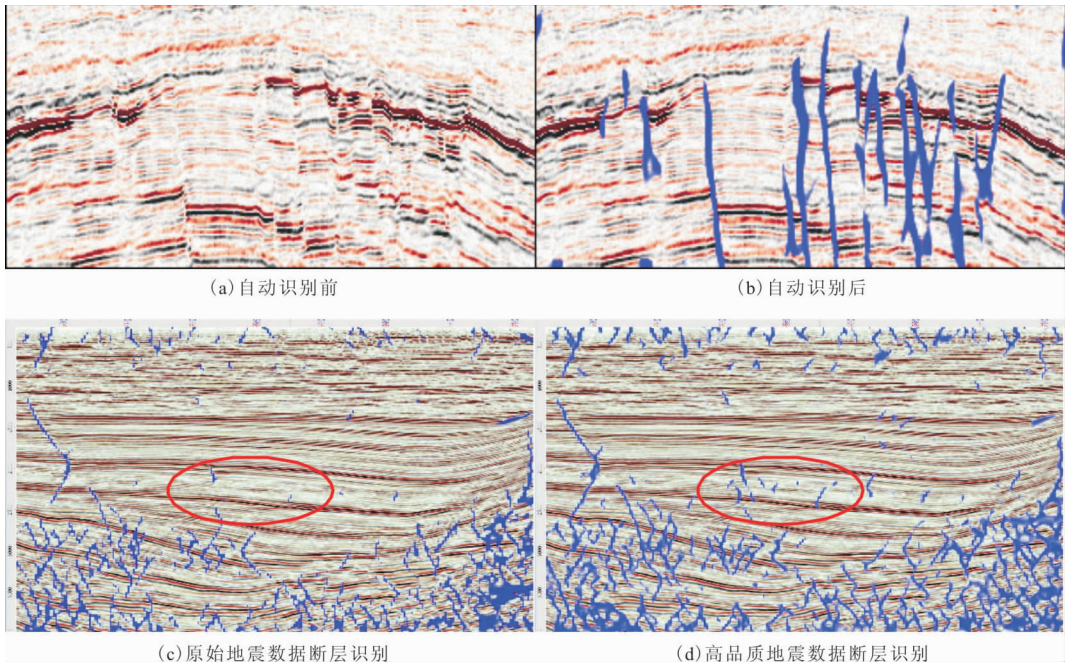


图 6 断层识别效果对比图

Fig. 6 Comparison of fault identification effects

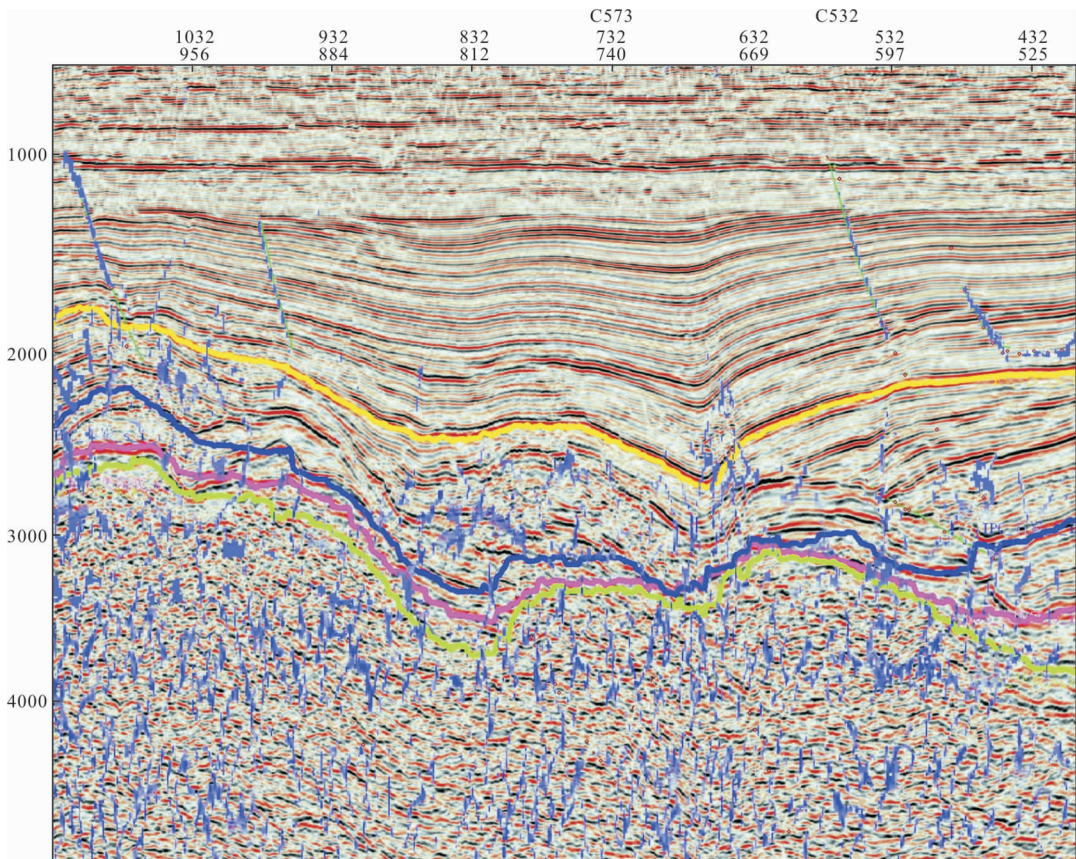


图 7 基于深度学习的全区断层识别结果

Fig. 7 Fault recognition results of the whole region based on deep learning

束算子。通过低秩处理,信号和噪声因其特征不同而产生分离,从而在保护了地震数据细小特征的情况下提高地震数据信噪比。

图 4 为地震数据的二维切片高品质处理前后对比图,从图 4 可以看出,经过高品质处理后 SNR 明显提高。对比红框区域可以看出,高品质处理后,随机噪声被很好的压制掉,同相轴变得更加清晰连续,数据质量得到了显著提升,为后期断层识别提供高品质地震数据。

笔者针对潜山内幕断层的识别,构建了两部分训练数据:①模拟数据,分别构建了三维叠后数据及其对应的断层模型作为训练数据对,包含 200 组训练样本集和 20 组验证样本集;②实际工区地震数据和对应的断层标签,其中包含 100 组训练样本集和 10 组验证样本集。两部分训练集中均包含正断层、逆断层等不同类型的断层模型,最大化模拟了实际工区种可能遇到的各种地震断层情况。采用模拟数据和部分实际数据对网络模型进行了训练,深入挖掘地震数据与断层结构之间的非线性映射关系,由此训练出的网络模型能够更加准确的进行断层识别。图 5 为模拟地震数据(其中包含不同断层结构)、实际地震数据及其对应的断层模型标签。

网络模型训练完毕后分别将该网络模型应用于原始地震数据和高品质处理后的地震数据进行断层识别,为更加细致地展现断层识别结果,对原始地震数据和高品质处理后的地震数据断层自动识别结果进行对比。图 6 为断层识别效果对比,对比效果分为两组:①为具有明显断裂的地震剖面断层自动识别前后对比;②同一地震剖面高品质处理前后的断层自动识别效果对比。对比图 6 中标记部分可以发现,经过高品质处理后的数据断层识别结果更加清晰连续,证明该方法效果良好,将该模型应用于全区地震数据,实现全区断层识别(图 7)。从图 7 中可以明显看出,该方法成功检测出上覆断裂,间接证明方法在内幕断层检测中的可靠性,断层识别结果用于后续有利储层发育带的确定,为储集体刻画奠定基础。

3 断溶储集体刻画

在断层裂缝特征确定的基础上,采用两步法识别内幕断层,确定有利储层发育带。相干体和井震一体化结合,确定内幕断层走向^[10]。

地震相干体技术是裂缝预测的传统方法之一,

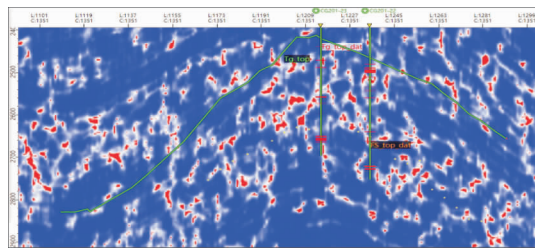


图 8 富台地区杂乱度属性分析结果
Fig. 8 Analysis results of clutter attribute in Futai area

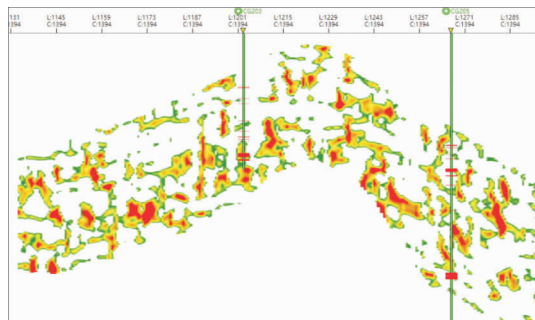


图 9 多尺度属性融合结果
Fig. 9 Multiscale attribute fusion results

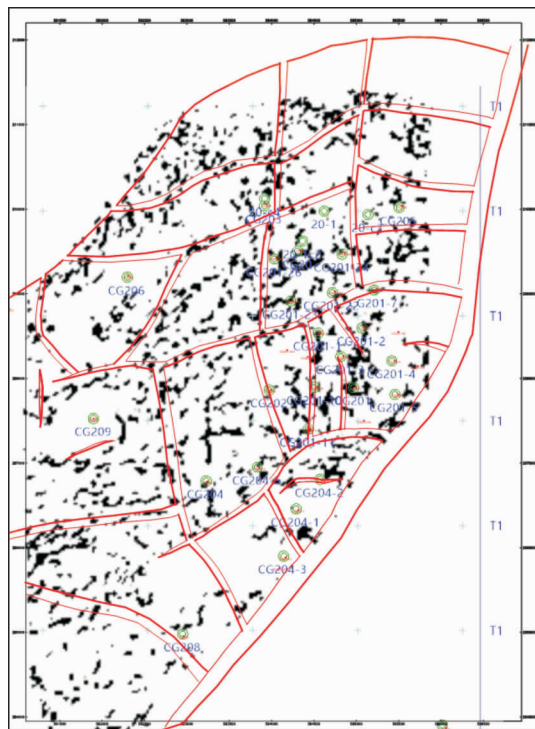


图 10 富台潜山储集体识别切片图
Fig. 10 Identification slice of Futai buried hill reservoir

其原理是通过局部三维地震数据进行相似性分析,从而达到对地震数据中裂缝及断层增强显示的

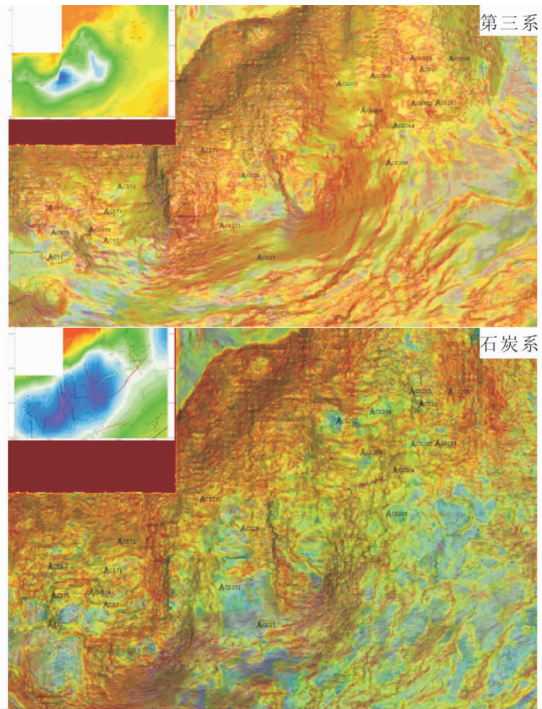


图 11 第三系、石炭系古地貌断缝溶储集体刻画结果
Fig. 11 Depiction results of fracture solution reservoirs
in paleogeomorphology of tertiary
and Carboniferous

效果。地震相干体技术利用地震数据相邻道集之间的非连续性特征,将其转化为相干值的变化从而达到突出裂缝和断层的非连续性结构,压制噪声的干扰^[11]。

由于断层及大尺度裂缝存在,造成裂缝周围地震波形出现变化,运用这一特性,提取地震杂乱度属性描述大尺度裂缝发育带^[12],图 8 为采用杂乱度对富台地区储集体进行识别分析的结果。图 10 采用体切片分析结合地震剖面,可以准确对宏观构造形态和断裂系统进行描述,两者结合用于确定有利储层发育带,同时为断缝溶储集体刻画结果的准确性提供判断依据。

采用分级多属性融合技术对断缝溶储集体进行多尺度刻画,为缝洞储集体的识别与表征提供了指导作用,图 9 为多尺度融合结果。大断层识别的主要目标为地震剖面上能够识别出的、持续活动的断层,利用相干体分析技术增强断层,从而落实大断层的发育情况;内幕断层分析的目标主要为地震上无法识别、后期不太活跃的断层,采用杂乱度分析技术,从而对内幕断层进行描述,刻画大尺度裂缝及其溶蚀带情况。针对受构造和岩性控制的储集体主要采用波形反演技术进行处理,从而预测中小尺度裂

缝和晶间孔发育情况^[13]。通过融合不同尺度的分析结果,完成储集体空间分布的雕刻。综合以上资料处理分析结果并结合古地貌,采用最大似然法将各个资料分析结果进行加权,对不同地层的断、缝、溶储集体进行刻画,图 11 为第三系和石炭系古地貌断缝溶储集体刻画结果。

4 结论

通过本次研究取得了以下成果与认识:

1) 在区域地质背景调查的基础上,综合沉积地质学资料、地震资料和测井资料对富台地区地层进行划分。分析得出,主要含油层位于下古生界,油气的运移和储集空间为裂缝,对富台潜山油藏而言,裂缝的准确预测和评价是其油气开采的关键。

2) 基于低秩处理完成了对地震数据的高品质处理,通过低秩处理完成地震资料的高品质处理,有效降低噪声对有效信号的干扰,并以深度学习为主要手段,完成对富台潜山断层地识别。

3) 结合多维度资料,对数据进行多尺度属性分析,利用最大似然算法将多维度、多尺度属性分析结果进行优化与加权分析,结合古地貌准确直观地刻画出地下储集体断、缝、溶体。

参考文献:

- [1] 马永生,何登发,蔡勋育,等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报,2017, 33(04): 1007—1020.
MA Y S, HE D F, CAI X Y, et al. Distribution of marine carbonate rocks and basic problems of oil and gas geology in China [J]. Journal of Rock, 2017, 33 (04): 1007—1020. (In Chinese)
- [2] 王招明. 塔里木盆地礁滩体与层间岩溶油气藏的重大发现及勘探前景[Z]. 北京: 中国石油学会, 2013:123—129.
WANG Z M. Major discovery and exploration prospect of reef beach body and interlayer karst oil and gas reservoir in Tarim Basin [Z]. Beijing: China Petroleum Society, 2013:123—129. (In Chinese)
- [3] 陈晶. 渤海湾盆地差异演化及其对优质烃源岩发育的控制[D]. 中国地质大学(武汉), 2012.
CHEN J. Differential evolution of Bohai Bay Basin and its control on the development of high-quality source rocks [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012. (In Chinese)
- [4] 段艳廷,郑晓东,胡莲莲,等. 基于 3D 半密度卷积神经

- 网络的断裂检测[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(06): 2256—2261.
- DUAN Y T, ZHENG X D, HU L L, et al. Fracture detection based on 3D half density convolution neural network [J]. Advances in Geophysics, 2019, 34(06): 2256—2261. (In Chinese)
- [5] X WU, GENG Z, SHI Y, et al. Building realistic structure models to train convolutional neural networks for seismic structural interpretation[J]. Geophysics, 2019, 85(4): 1—48.
- [6] SHENGRONG L. Seismic fault detection using an encoder—decoder convolutional neural network with a small training set[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2019, 16(1): 175—189.
- [7] CHENG J, SACCHI M D. Fast dual—domain reduced—rank algorithm for 3D deblending via randomized QR decomposition[J]. Geophysics, 2016, 81(1): V89—V101.
- [8] CHENG J, SACCHI M D. Separation and reconstruction of simultaneous source data via iterative rank reduction[J]. Geophysics, 2015, 80(4): V57—V66.
- [9] XUE Y, CHANG F, ZHANG D, et al. Simultaneous Sources Separation via an Iterative Rank—Increasing Method[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016: 1—6.
- [10] 朱明, 袁波, 梁则亮, 等. 准噶尔盆地周缘断裂属性与演化[J]. 石油学报, 2021, 42(09): 1163—1173.
- ZHU M, YUAN B, LIANG Z L, et al. Attribute and evolution of peripheral faults in Junggar basin [J]. Journal of petroleum, 2021, 42(09): 1163—1173. (In Chinese)
- [11] 廖龙. 基于地震相干体数据的裂缝及断层检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- LIAO L, Research on fracture and fault detection method based on seismic coherent volume data [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020. (In Chinese)
- [12] 刘杰. 方向场滤波法在压制地震资料相干噪声中的研究及应用[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2018.
- LIU J. Research and application of directional field filtering method in suppressing coherent noise of seismic data [D] Langfang, College of Disaster Prevention and Technology, 2018. (In Chinese)
- [13] WANG Y S, GAO Y, FANG Z W. Pore throat structure and classification of Paleogene tight reservoirs in Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2021, 48(2): 308—322.

Interior structure and reservoir characterization of buried hill based on deep learning

——A case study of Futai buried hill in Shengli Oilfield

LI Qingwu¹, WANG Xingjian^{1,2}, ZHANG Qiang³, DU Yushan³,
ZHAI Liang³, XU Yaodong³, XU Yanqun³

(1. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of oil and gas reservoir geology and development engineering,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Exploration and Development Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 2570121, China)

Abstract: Carbonate buried hill reservoir has vast resources and broad exploration prospects, a new field of succession in Shengli Oilfield. Carbonate—buried hill reservoirs are affected mainly by tectonic activities, lithologic changes, and fluid dissolution. The inner reservoir space is very complex, and the oil and gas development is difficult. An accurate description of fracture spatial distribution is the basic premise of buried hill reservoir development. In this paper, taking Futai buried hill in Shengli Oilfield as an example, through studying the geological background of the region and combining with logging and seismic data, the strata are divided, and deep learning is used as an auxiliary means to realize the efficient fracture prediction in the whole area. Based on the fracture prediction results, the fracture—dissolution—reservoir collective is characterized, and the characterization results are displayed accurately and intuitively in combination with the paleogeomorphology of multiple strata.

Keywords: oil and gas exploration; futai buried hill; deep learning; fracture prediction; storage collective