



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405156

引用格式:王善明,张希晨,崇荔萍,等.人工智能小断层预测技术在大牛地气田的应用[J].科学技术与工程,2025,25(22):9287-9295.

Wang Shanming, Zhang Xichen, Chong Liping, et al. Application of subtle fault prediction with artificial intelligence in the daniudi gas field [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9287-9295.

人工智能小断层预测技术在大牛地气田的应用

王善明¹, 张希晨^{2,3,4*}, 崇荔萍¹, 杜长江^{2,3}, 孙涵静¹, 田开琦^{2,3}, 梁琰^{2,3}, 陈雅静^{2,3}

(1. 中国石化华北油气分公司, 郑州 450006; 2. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 涿州 072751;

3. 油气勘探计算机软件国家工程研究中心, 涿州 072751; 4. 中国石油集团工程技术有限公司非常规油气工程研究所, 北京 102206)

摘要 为了充分提高小断层识别精度,研发了人工智能小断层预测方法,通过基于小断层解释成果的样本标签制作,构建基于解释成果的样本标签库;研发了针对小断层的建模和正演方法,构建基于模型正演的标签库;形成针对小断层识别的特殊神经网络,可直接形成小断层属性数据。此外,结合去强轴、构造保护平滑滤波等预处理技术提高原始地震数据的品质,并利用基于主成分分析的多属性融合反映多尺度断层信息,最后通过3种手段验证预测结果,形成了基于人工智能的小断层预测流程。本文方法和技术在鄂尔多斯盆地大牛地气田展现了良好的应用成效,相比于常规属性,小断层识别数量增加30%,预测结果的分辨率和连续性显著提升,与地震数据、井数据和常规属性吻合较好,并揭示了小断层发育特征:优势方位为北西走向,工区西部和东北部的小断层相对集中,断层间的裂缝也较为密集,部分小断层沿着储层的边界分布,或许和优质储层的发育有关。预测结果为评价下古生界优质储层、开展井位部署提供可靠的技术支撑,在类似地区具有广阔的应用前景。

关键词 小断层预测;人工智能;大牛地气田;去强轴;构造保护平滑滤波;分频融合

中图分类号 P631;

文献标志码 A

Application of Subtle Fault Prediction with Artificial Intelligence in the Daniudi Gas Field

WANG Shan-ming¹, ZHANG Xi-chen^{2,3,4*}, CHONG Li-ping¹, DU Chang-jiang^{2,3}, SUN Han-ying¹,
TIAN Kai-qi^{2,3}, LIANG Yan^{2,3}, CHEN Ya-jing^{2,3}

(1. Sinopec North China Company, Zhengzhou 450006, China; 2. BGP Inc., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, China;

3. National Engineering Research Center of Oil & Gas Exploration Computer Software, Zhuozhou 072751, China;

4. Research Office of Unconventional Oil & Gas Engineering, CNPC Engineering Technology R & D Co., Ltd., Beijing 102206, China)

[Abstract] In order to improve the accuracy of subtle fault identification, an artificial intelligence subtle fault prediction method based on the seismic data was developed. By making sample labels based on subtle fault interpretation results, a sample label library based on interpretation results was built. The subtle fault modeling and forward methods for subtle faults were developed, and a label library based on model forward was built. The special neural network for identifying subtle faults was developed, which can directly generate attribute data for subtle faults. In addition, the seismic preprocessing approaches such as removing strong seismic events and structure oriented smoothing filtering were added to improve the original seismic data. Multi-attribute fusion based on principal component was used to reflect multi-scale faults. Finally, the prediction results were verified through three steps, forming the subtle fault prediction workflow with artificial intelligence. This study demonstrates good application in the Daniudi gas field in the Ordos Basin. Compared with conventional attributes, the number of subtle fault identification has increased by 30%, and the resolution and continuity of the subtle faults have significantly improved. The prediction results are consistent with seismic data, well data, and conventional seismic attributes. Based on the subtle faults identification, the new understandings of regional structure are revealed: the dominant orientation of subtle faults is northwest, the most subtle faults are relatively concentrated in the western and northeastern parts of the survey, and the fractures between faults are also very dense. Some subtle faults are distributed along the boundary of the high-quality reservoir, perhaps related to the development of reservoirs. The prediction results contribute to evaluating high-quality reservoirs in the Lower Paleozoic and well deployment, and have application prospects for similar areas.

[Keywords] subtle fault prediction; artificial intelligence; Daniudi gas field; strong seismic events removal; structure oriented smoothing filtering; multi-frequency fusion

收稿日期: 2024-07-10; 修订日期: 2025-04-28

基金项目: 中国石化重点科技项目(P23244); 中国石油科技重大专项(2021ZG03)

第一作者: 王善明(1987—),男,汉族,河南清丰人,硕士,副研究员。研究方向:地质地球物理综合研究。E-mail:wangsm.hbsj@sinopec.com。

*通信作者: 张希晨(1993—),男,汉族,河北涿州人,硕士,工程师。研究方向:地震资料解释。E-mail:zhangxichen@petrochina.com.cn。

断层以不同的规模存在,随着地震勘探精细化程度的逐渐提升,在很多资源丰富的地区,小尺度断层对构造分析和油气藏评价的意义非常重要^[1-2]。但由于发育规模相对较小,成为构造预测的难点。例如在鄂尔多斯盆地的大牛地气田,小尺度断层在下古生界广泛发育^[3-4],具有延伸长度短、断距小的特征,规律性不明显,断层的地震响应特征较弱,导致识别难度大。

长期以来,依靠叠后地震资料的断层属性是识别断层的重要手段之一,围绕如何提高断层属性的精度,前人展开了丰富的研究^[5-8]。一方面利用地震资料中波形或振幅的横向变化,来识别断层导致的地震不连续性,如三代相干属性、分频相干属性等。另一方面,把地震数据作为地震图像,利用图像分析的相关技术来识别断层,例如曲率属性、蚂蚁体属性、边缘检测属性等。这些基于传统地球物理理论或者图像分析的属性虽然被大量推广,但是在长期应用中也存在一定的局限性,非常依赖地震数据的质量,特别是小断层对应的地震响应特征不明显,引起的波形、振幅或频率的不连续性较弱,影响了预测精度,对于具有重要价值的小尺度断层预测存在分辨能力有限、识别数量不足等问题。

随着科学技术的不断发展,人工智能(artificial intelligence, AI)技术在地球物理领域逐渐得到应用^[9-10]。近年来,中外的人工智能断层识别技术发展迅速,主要产生于图像处理领域^[11-13],在目标检测方法的基础上进行改进而来,再对其进行各种形式的变形和改造。目前较新的方法是以U型卷积神经网络或三维卷积神经网络为骨架,增加注意力机制和Transformer神经网络的相关模块。通过机器学习算法建立的断层预测模型可以减少人为的误差,进行高精度的图像识别和分析,比传统断层属性具有更高的准确性^[14-15],同时有效提高了断层解释效率,降低了时间和人力成本。

然而,以上人工智能断层预测方法也存在一些问题,如受样本库限制,现有方法大多基于固定的神经网络模型,与本地区的地震数据及地质特征不能完全匹配,难以充分识别小尺度断层,需要结合本地区标签改造算法。基于此,现提出一种基于人工智能的小断裂预测方法和流程,首先围绕实际解释成果开展样本标签制作,构建基于实际解释成果的样本标签库,再构建基于模型正演的标签库,最后形成针对小尺度断层的神经网络。同时,结合构造导向平滑滤波、多属性融合等配套技术,全面提升对小断层的识别能力。通过在鄂尔多斯盆地的大牛地气田的应用,展现出良好的成效,预测结果

与地震数据、井数据和常规属性吻合度较高,在类似地区具有广阔的应用前景。

1 方法和技术流程

为了充分提高小断层识别精度,以人工智能小断层预测为目标,结合地震预处理技术提高原始数据的品质,并利用多属性融合综合反映多尺度断层信息,最后通过多种手段验证预测结果,形成了基于传统方法与人工智能相结合的小断层预测流程,如图1所示,主要包括以下4个环节。

(1)地震数据预处理。人工智能断层属性需要在地震数据的基础上完成,首先对原始地震数据进行去强轴处理,利用复数域快速匹配追踪算法,在原始地震记录中消减追踪出的强反射波能量,或者按比例进行衰减,输出去强反射轴后的地震数据,突出受其影响的下伏地层的信息,增强目的层所对应的地震振幅^[16]。接着开展基于最大似然属性的构造保护平滑滤波,最大似然属性对小断层的敏感性较强^[17],在其约束下利用地层倾角数据和方位角数据对地震资料进行自适应平滑,遇到断层时构造平滑终止。滤波后的地震同向轴连续性增强,信噪比提升,断层响应特征更加突出,可作为人工智能断层预测的输入数据,有助于提高人工智能断层预测的识别数量、分辨率和连续性。

(2)人工智能小断层预测。围绕小断层预测目标,研发了与实际地震数据相匹配的人工智能预测方法,主要分为3个部分:①通过基于小断层解释成果的样本标签制作,构建基于解释成果的样本标签库,针对该地区实际资料,编制小断层对应的典型地震图件、解剖典型断层组合样式,形成实际资料的标签样本;②研发针对小断层的建模和正演方法,构建基于模型正演的标签库,包括基于实际资料的样本拾取和制作,以及基于随机模拟的样本标签制作;③形成针对小断层识别的特殊神经网络,经过训练获得小断层预测模型,输入三维叠后地震数据后,可直接形成相应的小断层属性数据。该方法属于体预测,在剖面断层成像、微小断层成像、深层抗噪性等方面具有明显优势,在应用过程中也无需再次训练,有助于提升小断层的识别精度和效率。

(3)多属性融合。基于不同频率地震数据的人工智能属性各有优势。首先,根据地震数据做分频处理,生成高、中、低频三个数据体,融合将不同频率成分的地震数据分别进行人工智能断裂预测,再利用主成分分析方法^[18],将多个结果属性融合成为一体,包含的小断层信息更加丰富。然后,将分频融合体和构造曲率等裂缝属性进一步融合,综合反映

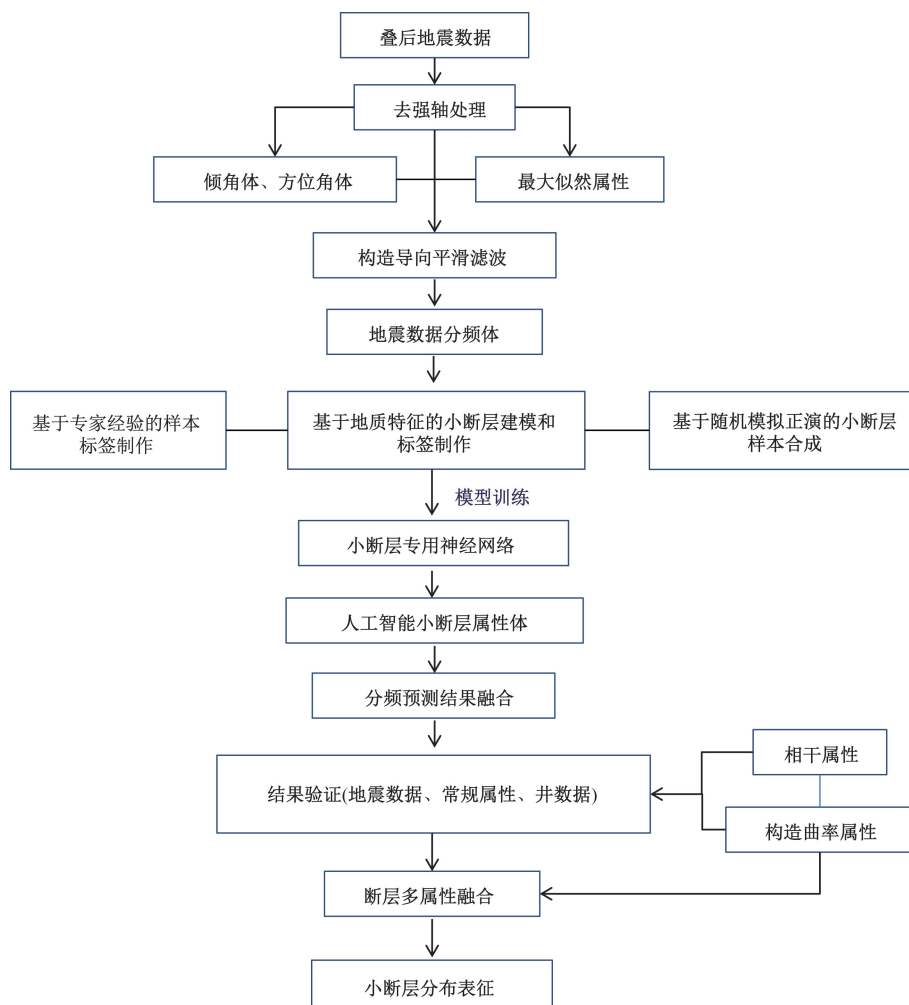


图1 人工智能小断层预测流程图

Fig. 1 The AI subtle fault prediction workflow

小断层和更小尺度的裂缝信息。

(4)结果验证。将小断层融合属性和地震数据、常规断层属性以及井数据对比,验证融合属性揭示的小断层信息是否准确。

2 应用案例

2.1 研究区概况

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地的北部(图2),近年来勘探目标开始转向下古生界,通过加强三维地震资料应用和断裂解释,逐渐探明了奥陶系马家沟组风化壳储层和白云岩储层,已获高产工业气流^[19-21],建立了碳酸盐岩“垂直渗流岩溶、水平潜流岩溶、断控岩溶”的立体岩溶模式,证明了小断层发育带控制天然气富集^[22-23]。然而,深部地层受多期构造作用,断层发育模式复杂,大多具有小、杂、乱的特点,特别是小断层预测精度低,导致断层分级、演化期次和控藏机理不明确^[24-25],因此迫切需要更先进的技术手段明确小断层分布特征,为有利圈闭评价和井位部署建立基础。

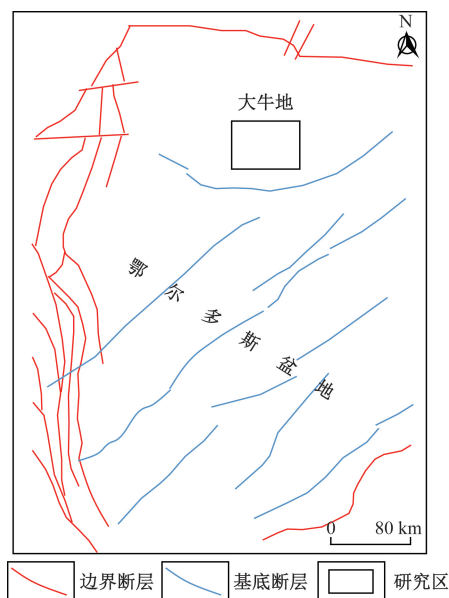


图2 鄂尔多斯盆地下古生界断裂体系分布图
Fig. 2 The fault system diagram of Lower Paleozoic in the Ordos Basin

2.2 应用效果

基于前述人工智能小断层预测流程对该区的断层进行预测。首先对地震数据进行预处理,小断层发育的 T3 层位下伏地层为寒武系-奥陶系,是重要的气藏勘探层系,然而 T3 层位附近的地震数据存在强反射(图 3),对下伏地层产生屏蔽作用,导致地震振幅较弱,对后续基于地震数据的断裂属性分析造成不利影响。通过“去强轴”地震预处理技术,提升了 T3 层位以下的地震数据品质。

最大似然属性对小尺度断层的敏感性较高,对去强轴处理前后地震数据分别提取最大似然属性,通过对比(图 4)可见,原始属性在 T1 ~ T3 层位附近难以生产断层信息,在横向上存在“空白带”,经过去强轴处理后,断层预测的“空白带”消失,断层的纵向连续性增强,为下一步构造导向平滑滤波建立基础。

之后,开展构造保护平滑滤波进一步提高地震

数据品质(图 5),使地震数据中的断层响应特征更加突出,地震同相轴的错断特征更加清晰,非断层区域的同向轴连续性增强,信噪比提升,为后续生成效果更好的断层属性建立基础。

围绕预处理后的地震数据,开展人工智能小断层预测。利用前述的适合小断层识别的特殊神经网络,在输入三维叠后地震数据后,可直接预测形成对应的人工智能断层属性数据。前期通过小断层标签,已提前完成了大数据三维模型训练,并获得了与本地区相匹配的神经网络模型,在应用过程中不需要再次训练。

由于不同频率的人工智能断层属性上断层反射各有优势,特别是高频成分的预测结果包含的小断层数量更多,信息更加丰富。根据地震数据的频带范围,在低、中、高 3 个分频地震数据的基础上,分别完成人工智能小断层预测(图 6),并将 3 个结果数据进行融合,新结果包含的小断层信息更加丰富。

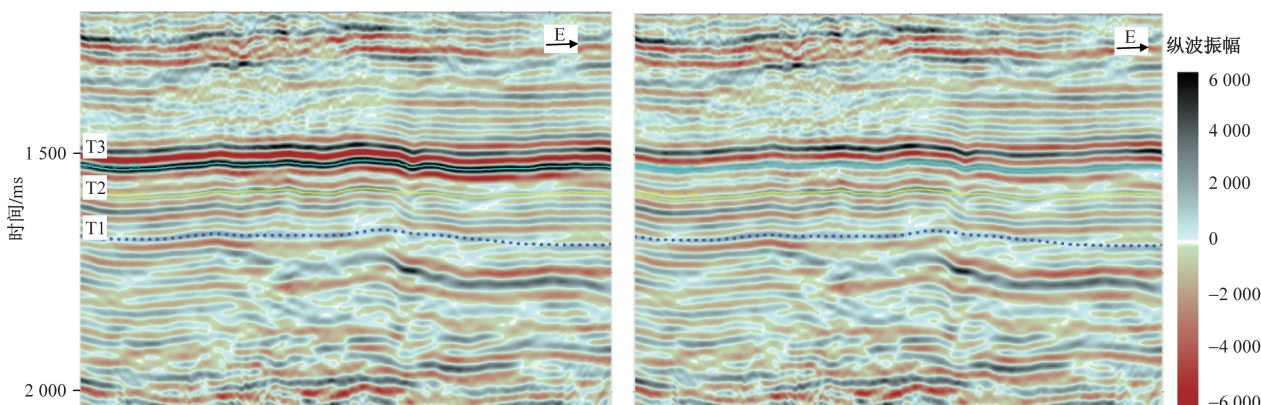


图 3 “去强轴”处理前后的地震剖面图

Fig. 3 The seismic profile before and after removing the strong events

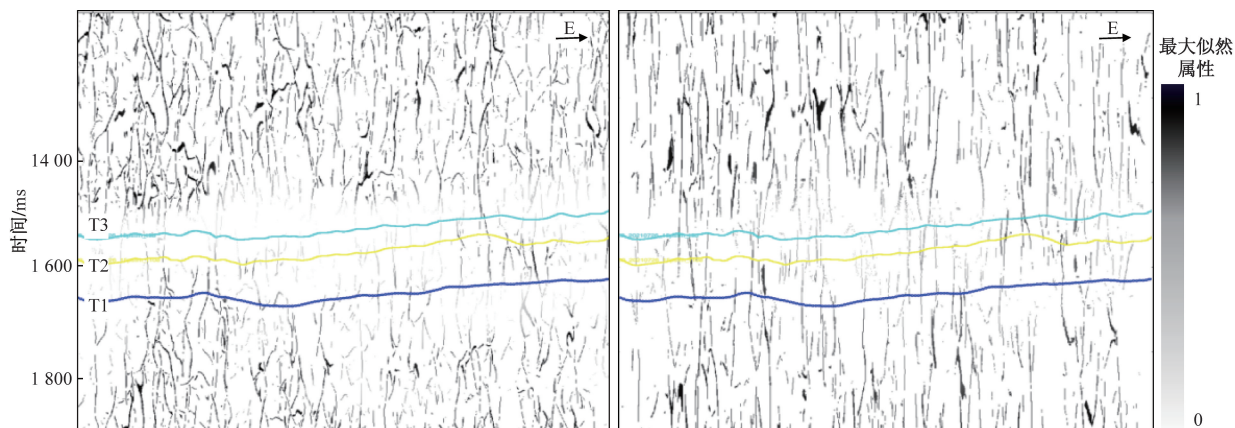


图 4 “去强轴”处理前后生成的最大似然属性剖面图

Fig. 4 The Likelihood profile generated before and after removing the seismic strong events

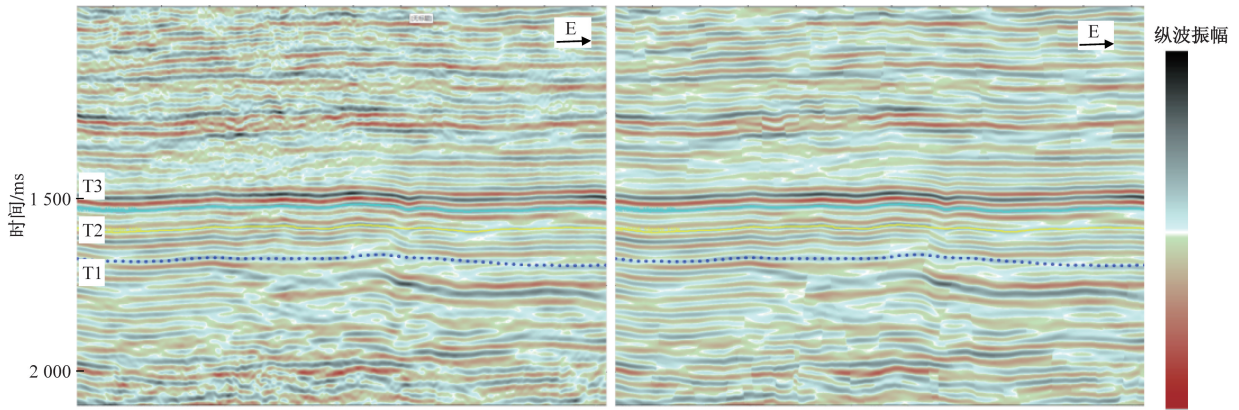


图5 构造保护平滑滤波处理前后的地震剖面图

Fig. 5 The seismic profile before and after structure oriented smoothing filtering

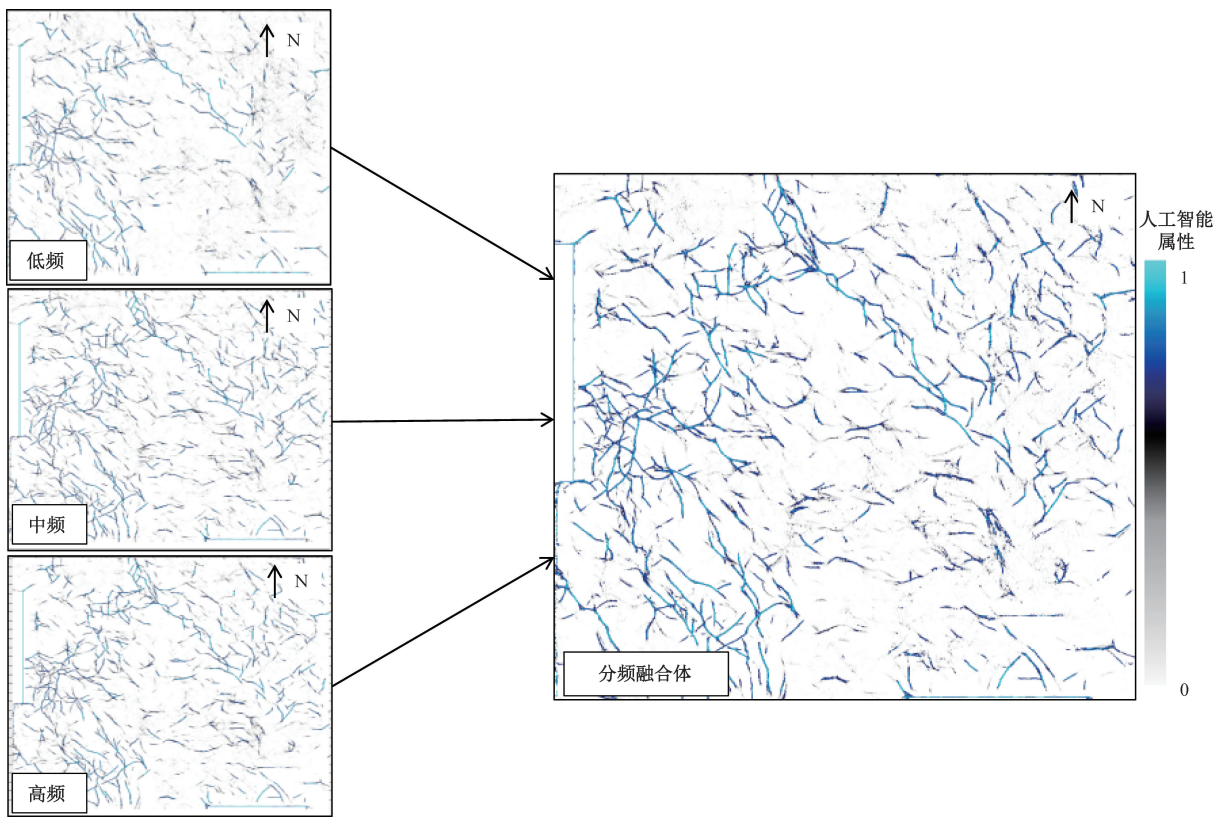


图6 基于分频地震数据的人工智能小断层预测切片和融合切片图

Fig. 6 The AI subtle fault prediction and fusion slices from multiple frequency seismic data

最后,结合地震数据、井数据以及常规断层属性对比,验证人工智能小断层融合属性的准确性。在剖面上,竖直发育的小断层地震响应较弱,常表现为同相轴的微弱错断或者振幅能量的横向变化,导致预测难度较大。通过地震数据对比(图7),将断层的分频融合结果与地震剖面叠合显示,可见在地震振幅变化处,清晰刻画出了竖直发育的小断层,延伸长短不均,符合该地区层内断层和层间断层并存、小断层广泛分布的构造背景,预测结果与地震相变化一致。

接着,利用井数据对预测结果加以验证(图8)。小断层附近遭受的溶蚀作用较强,也是该地区主要的天然气富集空间^[24],在1号断裂带和2号断裂带附近,X井的孔隙度和全烃曲线值有所升高,间接反映了小断层的发育,小断层预测结果与测井数据的一致性较好。

将人工智能融合结果与相干、曲率等传统断层属性作对比(图9),在剖面上第三代相干属性识别的断层数量较少,分辨能力有限,纵向连续性较差。最大正曲率获得的断层数量有所增加,但纵向连续

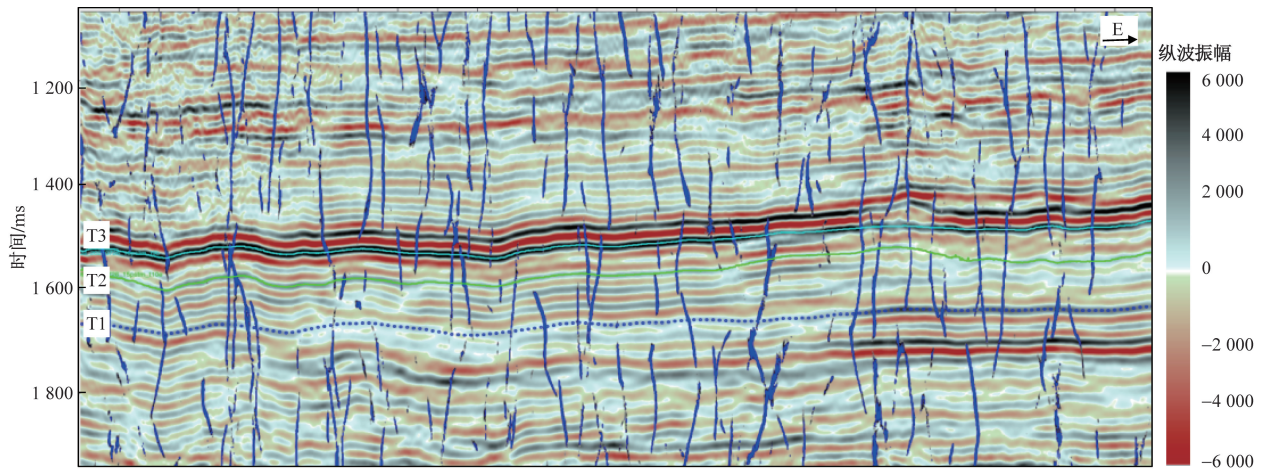


图7 人工智能分频融合结果与地震数据叠合剖面图
Fig. 7 The overlapped profile of AI fault fusion and seismic data

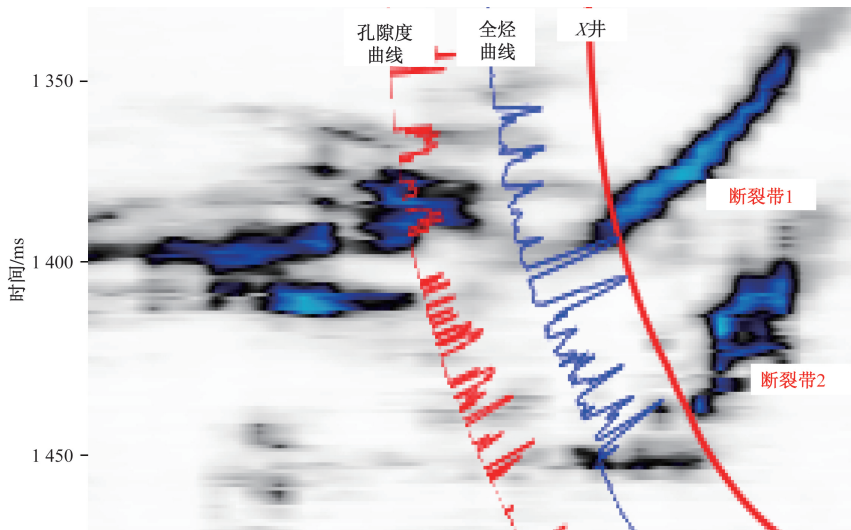


图8 人工智能小断层属性与水平井曲线叠合剖面图
Fig. 8 The overlapped profile of AI subtle fault prediction and horizontal well curves

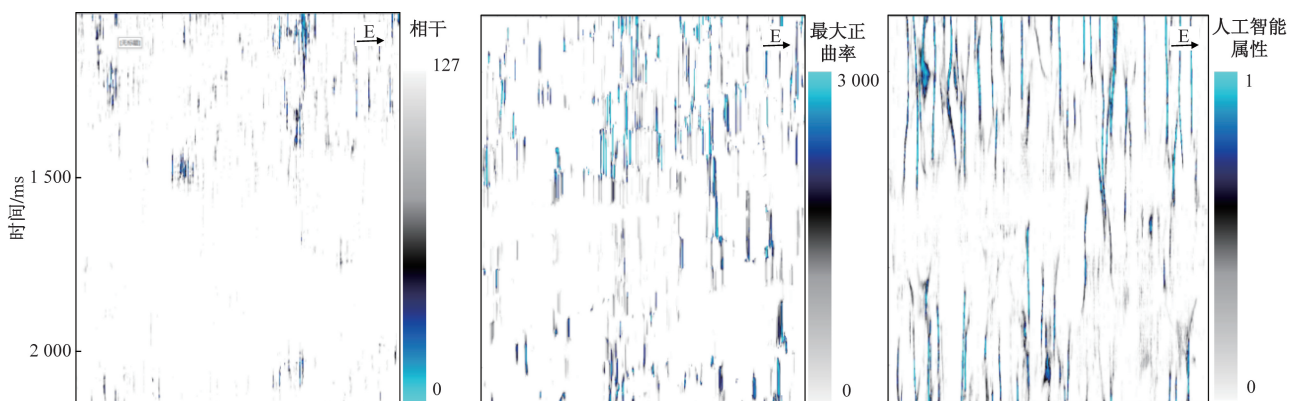


图9 第三代相干、最大正曲率和人工智能小断层属性剖面图
Fig. 9 The profiles of third generation coherence, most positive curvature and AI subtle fault attribute

性较差。而人工智能融合结果不仅识别数量最多，且包含常规预测结果反映的断层信息，分辨能力和纵向连续性均有改善。

通过平面对比(图10)表明,第三代相干属性仅能识别少数北西向断层,分辨率不高而导致较为模糊。最大正曲率能同时识别出北西向、东北向的两

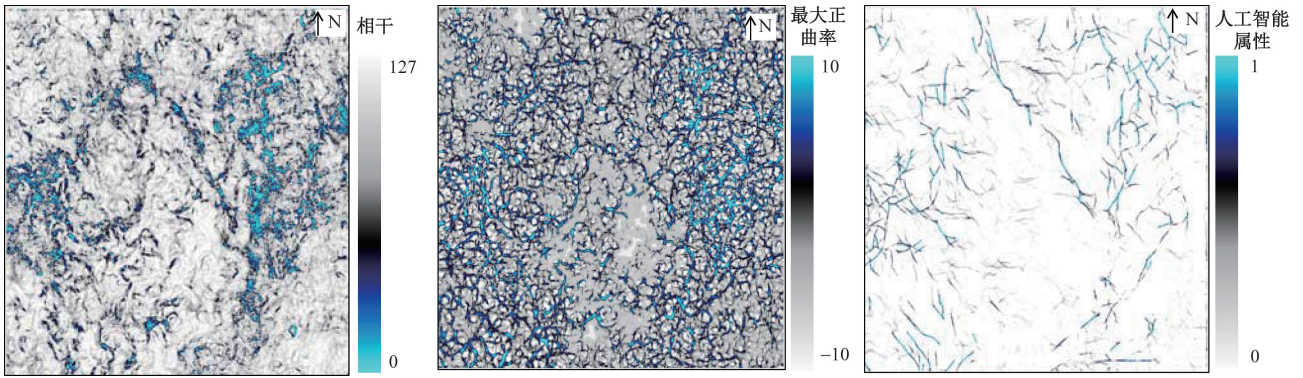


图 10 第三代相干、最大正曲率和人工智能小断层属性的平面切片图

Fig. 10 The slices of third generation coherence, most positive curvature and AI subtle fault attribute

组断层,但数量过多,分布较为杂乱,结果的准确性和对比度欠佳。相比之下,人工智能融合结果不仅能刻画出展现北西向、北东向断层,且改善了分辨能力和对比度,断层形态更加清晰。

2.3 小断层特征分析

相比于常规的第三代相干或最大正曲率属性,基于人工智能的小断层预测使断层识别数量增加超过30%,断裂预测平面图信噪比提升了20%。预测结果表明,研究区下古生界小断层分布规律复杂,断裂延伸不长,规律性不明显。另外,由于最大正曲率能够刻画更小尺度的裂缝特征,将人工智能融合结果与最大正曲率进一步融合(图11),能够反映小断裂之间的裂缝分布规律,获得以下小断层-裂缝展布特征:①小断层大多为北西走向,并存在小部分北东向及南北向小断层,在研究区北部可能存在北西向的断裂带;②小断层集中于研究区的西部和东北部,中部断层欠发育;③在小断层集中发育区,断层间的裂缝分布也较为密集,反映了构造应力的集中释放。

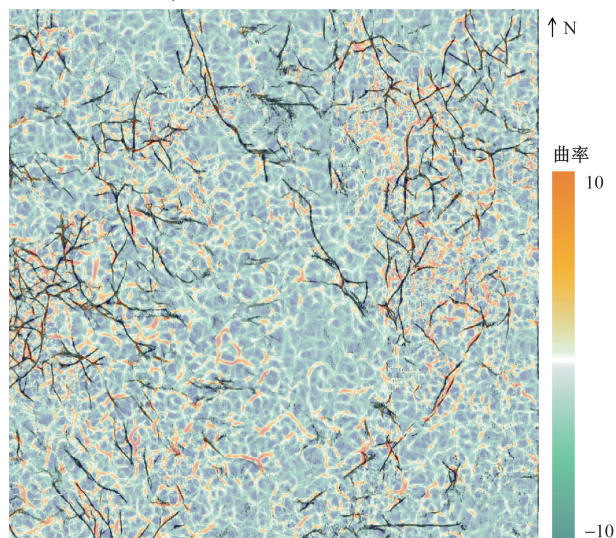


图 11 人工智能小断层融合属性和最大正曲率的融合切片图

Fig. 11 The fusion slices of AI subtle fault fusion and most positive curvature

前人的岩石物理分析表明^[19],纵波阻抗可用于识别该地区的优质孔洞型储层,将小断层预测结果与纵波阻抗反演结果叠合(图12),背景中的高亮颜色代表优质储层,可见部分小断层沿着储层的边界分布,反映小断层或许和优质储层的发育有关,为下一步研究小断层的控储控藏作用建立基础。

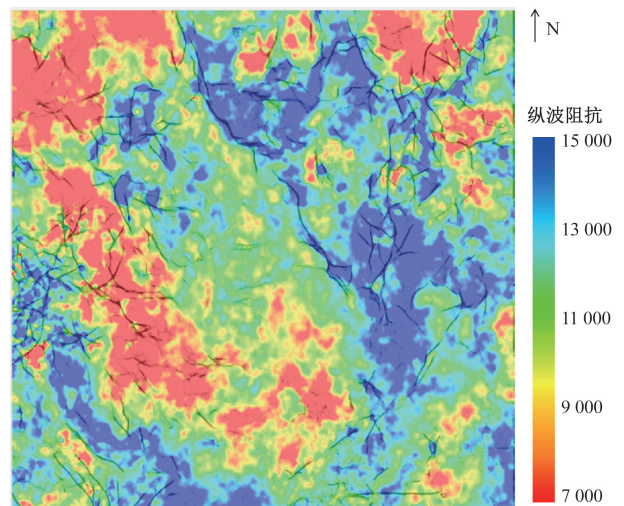


图 12 人工智能小断层融合属性和纵波阻抗反演的融合切片图

Fig. 12 The fusion slices of AI subtle fault fusion and acoustic impedance inversion

大牛地气田下古生界的小断层普遍发育,通过区域化的断层标签库构建、针对性的智能网络设计,并将传统地震解释技术与智能技术的充分结合,形成基于人工智能的小断层新流程,提高了小断层的识别能力,为评价下古生界优质储层、开展井位部署提供可靠的技术支撑,对同类地区小断层的精细预测具有广泛的应用前景。

3 结论

(1)为了充分提高小断层识别精度,研发了与实际地震数据相匹配的人工智能小断层预测方法,主要分为3个部分:①通过基于小断层解释成果的

样本标签制作,构建基于解释成果的样本标签库;②研发针对小断层的建模和正演方法,构建基于模型正演的标签库;③形成针对小断层识别的特殊神经网络,可直接形成小断层属性数据。

(2)形成了基于人工智能的小断层预测流程。结合去强轴、构造保护平滑滤波等预处理技术提高原始地震数据的品质,并利用基于主成分分析的多属性融合反映多尺度断层信息,最后通过3种手段验证预测结果。

(3)本文方法和流程在大牛地气田展现了良好的应用成效,相比于常规属性,断层识别数量增加超过30%,分辨率和连续性显著提升,与地震数据、井数据和常规属性吻合,并揭示了区域构造特征:小断层的优势方位为北西向,在工区的西部和东北部小断层相对集中,断层间的裂缝也较为密集。部分小断层沿着储层边界分布,或许和优质储层的发育有关,为评价下古生界优质储层、开展井位部署提供可靠的技术支撑,在类似地区具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 彭建伟. 低级序断层地震识别与精细描述方法应用研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2022.
Peng Jianwei. Research on the application of seismic identification and refined description of low-grade faults [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [2] 赵宏伟, 赵海波. 四川盆地营山构造自流井组页岩油层小断层和裂缝高分辨率地震预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(5): 142-148.
Zhao Hongwei, Zhao Haibo. High-resolution seismic prediction of subtle faults and fractures in shale oil reservoirs of Ziliujing Formation of Yingshan structure in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(5): 142-148.
- [3] 王睿, 李琼, 孙华军, 等. 基于主成分分析的融合方法在断裂识别的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(6): 715-723.
Wang Rui, Li Qiong, Sun Huajun, et al. Application research of fusion method based on principal component analysis in fracture recognition[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(6): 715-723.
- [4] 张威, 杨明慧, 李春堂, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地区块内走滑断裂构造特征及演化[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2267-2280.
Zhang Wei, Yang Minghui, Li Chuntang, et al. Structural characteristics and evolution of intraplate strike-slip faults in Daniudi Block, Ordos Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2267-2280.
- [5] 覃素华, 刘雷颂, 曹来圣, 等. 基于自适应窗口的第三代相干技术在X区块的应用[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(5): 610-615.
Qin Suhua, Liu Leisong, Cao Laisheng, et al. Application of adaptive coherent processing technique in blockX[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(5): 610-615.
- [6] 杨楚龙, 王怀秀, 刘最亮. 基于改进XGBoost的地震多属性地质构造识别方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12442-12450.
Yang Chulong, Wang Huaixiu, Liu Zuiliang. Seismic multi-attribute geological structure recognition method based on improved XGBoost[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12442-12450.
- [7] 马承杰. 多尺度边缘检测技术在断层识别及裂缝发育带预测中的应用——以车排子地区排691井区为例[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 85-90.
Ma Chengjie. Application of multi-scale edge detection technology to fault recognition and fracture zone prediction: a case study of Block Well P691, Chepaizi Area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 85-90.
- [8] 王楷, 印兴耀, 马正乾, 等. 基于多方位相干属性的断裂预测技术[J]. 地球物理学报, 2023, 66(9): 3828-3839.
Wang Kai, Yin Xingyao, Ma Zhengqian, et al. Fault prediction method based on multi-azimuth coherence attribute [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(9): 3828-3839.
- [9] 王胜侯. 断裂网络的智能识别表征研究[D]. 北京:中国地质大学, 2023.
Wang Shenghou. Intelligence recognition of fault networks: a case study from ultra-deep strike-slip faults in the central Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2023.
- [10] 张希晨, 韩瑞冬, 杜长江, 等. 高精度人工智能断裂预测的综合应用[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(4): 837-847.
Zhang Xichen, Han Ruidong, Du Changjiang, et al. Comprehensive application of high-precision AI fault prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(4): 837-847.
- [11] 陈桂, 刘洋. 基于人工智能的断层自动识别研究进展[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 119-131.
Chen Gui, Liu Yang. Research progress of automatic fault recognition based on artificial intelligence [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1): 119-131.
- [12] 焉磊. 基于深度学习的煤层小断层识别方法研究与应用[D]. 北京:中国矿业大学, 2023.
Yan Lei. Research and application of coal seam subtle fault identification method based on deep learning [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2023.
- [13] 胡广. 基于深度学习语义分割的断层识别应用研究[D]. 北京:中国地质大学, 2021.
Hu Guang. Application and Research on fault detection based on deep learning semantic segmentation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [14] 杨勇. 胜利油田勘探开发大数据及人工智能技术应用进展[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(1): 1-10.
Yang Yong. Application progress of big data & AI technologies in exploration and development of Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 1-10.
- [15] 杨平, 宋强功, 詹仕凡, 等. 基于深度学习的高效构造解释技术研发及工业化应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(6): 1265-1275, 1255.
Yang Ping, Song Qiangong, Zhan Shifan, et al. Research and

- industrial application of efficient structural interpretation technology based on deep learning[J]. *Oil Geophys Prosp*, 2022, 57(6): 1265-1275, 1255.
- [16] 杨杰飞. 火成岩发育区地震弱信号增强技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2024.
- Yang Jiefei. Research on seismic weak signal enhancement technology in igneous rock development areas[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2004.
- [17] 李飞跃, 王涛, 曾清波, 等. 基于构造导向的高清似然属性在白云凹陷深层断裂预测中的应用[J]. *石油物探*, 2023, 62(1): 163-172.
- Li Feiyue, Wang Tao, Zeng Qingbo, et al. Application of high-definition likelihood attributes based on structure orientation in the prediction of deep faults in Baiyun Sag[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(1): 163-172.
- [18] 张明, 牛志杰, 隋京坤, 等. 多属性分析技术在准噶尔盆地腹部油气勘探中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S1): 179-185, 14.
- Zhang Ming, Niu Zhijie, Sui Jingkun, et al. Multi-attribute analysis in the exploration of the Center Junggar Basin[J]. *Oil Geophys Prosp*, 2018, 53(S1): 179-185, 14.
- [19] 刘国文, 李涛, 徐鹏程, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地西北部地区古岩溶形成机理[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(15): 6181-6189.
- Liu Guowen, Li Tao, Xu Pengcheng, et al. Formation mechanism of paleokarst in northwestern Daniudi area, Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(15): 6181-6189.
- [20] 刘兆恒, 吴冬, 邓虎成, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田马五6~10亚段沉积相高频演化特征[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(9): 3554-3566.
- Liu Zhaocheng, Wu Dong, Deng Hucheng, et al. High-frequency evolution characteristics of sedimentary facies in Ma 5 of Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(9): 3554-3566.
- [21] 丁晓琪, 刘鑫, 祁壮壮, 等. 碳酸盐岩孔洞型储层分层次储集空间表征——以鄂尔多斯盆地大牛地中奥陶统马家沟组马五₇为例[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 689-696.
- Ding Xiaohui, Liu Xin, Qi Zhuangzhuang, et al. Reservoir space characterization of vuggy carbonate reservoirs with multiple scales: a case of Ma 5-7 interval, Middle Ordovician Majiagou Formation, Daniudi Area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 689-696.
- [22] 杨涛涛. 陕北大牛地气田马五段古岩溶储层特征及控制因素[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- Yang Taotao. Paleokarst reservoir characteristics and controlling factors of Ordovician Majiagou 5 Formation in Daniudi gas field, northern Shanxi[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [23] 孙涵静. 基于多参数反演的岩溶古地貌恢复技术在鄂尔多斯盆地大牛地气田的应用[J]. *天然气技术与经济*, 2024, 18(1): 39-45.
- Sun Hanjing. Paleogeomorphic restoring technology for karst based on multi-parameter inversion and its application to Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Technology*, 2024, 18(1): 39-45.
- [24] 孙涵静. 鄂尔多斯盆地大牛地气田马家沟组裂缝综合预测方法[J]. *天然气技术与经济*, 2023, 17(1): 29-36.
- Sun Hanjing. A comprehensive method to predict fractures in the Ordovician Majiagou Formation, Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Technology*, 2023, 17(1): 29-36.
- [25] 胥旺, 邓虎成, 雷涛, 等. 鄂尔多斯盆地东北部大牛地气田马家沟组不同性质断裂对表生岩溶的控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(3): 431-444.
- Xu Wang, Deng Hucheng, Lei Tao, et al. Control of different faults on supergene karst in the Majiagou Formation of Daniudi Gas Field, northeastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(3): 431-444.