

引用格式:张强,吕世超,许彦群,等.油气田开发地震技术研究现状与展望——以济阳拗陷为例[J].油气地质与采收率,2024,31(5):130-141.

ZHANG Qiang, LÜ Shichao, XU Yanqun, et al. Current status and prospects of research on development seismic technologies for oil and gas fields: A case study of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 130-141.

## 油气田开发地震技术研究现状与展望

——以济阳拗陷为例

张强,吕世超,许彦群,谭琴辉,房环环,徐鹏晔

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015)

**摘要:**胜利油田整体进入开发中后期,精细油藏开发与进一步提高油气采收率对开发地震技术提出了更高的要求。但由于济阳拗陷常规油藏受埋深差异大、多期构造运动、沉积类型多样等因素影响,储层展布与连通关系复杂;同时受到地震识别能力的制约,部分油藏井-震关系不明确,限制了储层精细表征精度。针对胜利油田不同类型常规油藏开发需求,通过实践形成了一系列开发地震技术,包括多方法集成的中浅层河流相储层预测技术、断棱精细刻画技术与多属性组合的一体化复杂断块油藏断裂系统精细描述技术、中深层低渗透储层预测技术、“断-缝-溶复合储集体”多参数融合的潜山油藏储层描述技术,为油藏开发提供了有力支持。但随着开发目标油藏“更深、更薄、更小”并逐步拓展至非常规油藏,对开发地震技术提出了更高要求和挑战,需要推进处理解释一体化进程,强化岩石物理理论研究,推广OVT域叠前反演在多类型油藏描述中的应用,攻关复杂断块-岩相油藏精细描述技术,突破井-地联采与重磁地震联合技术瓶颈,实现人工智能技术在开发地震领域的应用,进一步提高油藏开发水平。

**关键词:**油藏开发;开发地震技术;断裂系统;储层预测;低渗透;碳酸盐岩潜山;济阳拗陷

文章编号:1009-9603(2024)05-0130-12

DOI:10.13673/j.pgre.202405029

中图分类号:TE319

文献标识码:A

## Current status and prospects of research on development seismic technologies for oil and gas fields: A case study of Jiyang Depression

ZHANG Qiang, LÜ Shichao, XU Yanqun, TAN Qinhui, FANG Huanhuan, XU Pengye

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** Shengli Oilfield has entered the middle and later development stages, and higher requirements for development seismic technologies have been set to develop reservoirs and further enhance oil recovery finely. The distribution and connectivity of conventional reservoirs in Jiyang Depression are complex due to different buried depths, multi-stage tectonic movements, various sedimentary types, and other factors. At the same time, constrained by seismic recognition, the well-seismic correspondences of some reservoirs are unclear, limiting the accuracy of fine reservoir characterization. In response to the development needs of different types of conventional reservoirs in Shengli Oilfield, a series of development seismic technologies have been formed through practice. These technologies include multi-method integrated reservoir prediction technology for middle and shallow fluvial facies reservoirs, integrated fine description technology for fracture systems in complex fault block reservoirs combining fine fault edge depiction and multiple attributes, prediction technology for middle-deep reservoirs with low permeability, and description technology of buried hill reservoirs fusing multiple parameters of “fault-fracture-dissolution composite storage space.” These technologies provide strong support for reservoir development. However, as the target reservoirs for development get deeper, thinner, and smaller and expand into

收稿日期:2024-05-13。

作者简介:张强(1973—),男,陕西渭南人,高级工程师,博士,从事油田开发地震技术及应用研究。E-mail: zhangqiang108.slyt@sinopec.com。

unconventional reservoirs, the development seismic technologies faces higher requirements and challenges. It is necessary to accelerate the integration process of processing and interpretation, strengthen the theoretical research of rock physics, promote the application of OVT domain pre-stack inversion in the description of multi-type oil reservoirs, tackle the fine description technologies of complex fault block-lithofacies reservoirs, break through the technical bottleneck of well-ground joint acquisition and gravity-magnetic-electric-seismic technology, and realize the application of artificial intelligence technology in the development seismic field, so as to further promote reservoir development.

**Key words:** reservoir development; development seismic technology; fault system; reservoir prediction; low permeability; carbonate buried hill; Jiyang Depression

济阳坳陷是中国东部典型的陆相断陷盆地,也是胜利油田重要的含油气盆地。受物源供给体系复杂、湖盆水体多期变化、多期构造运动等因素影响,济阳坳陷沉积类型多样、油藏类型复杂,与海相沉积相比,具有油藏规模小、储层厚度薄、断裂系统复杂的特征。随着胜利油田整体进入开发中后期,开发目标由中浅层构造油藏转为深层致密、复杂小断块以及复杂潜山等油藏,油藏描述目标从构造圈闭、厚层砂岩转变为岩性圈闭、薄互层、裂缝型储层和剩余油分布,对油藏精细描述提出了更高要求。

在油田开发需求导向驱动下,开发地震技术的发展与应用促进了不同类型油藏储层描述精度的提高,使更准确、更有针对性地开展油藏开发成为现实。近年来,胜利油田针对中浅层河流相储层预测、复杂断块油藏断裂系统精细描述、中深层低渗透油藏储层预测以及潜山油藏储层描述等形成了相应的技术,有效提高各类型油藏的地震解释和储层预测精度,促进了油藏的有效开发动用,为胜利油田  $2\ 340 \times 10^4$  t 年产量稳定并持续提升提供了重要的支撑作用。胜利油田开发实践表明,开发地震新技术、新方法的发展与推广是目前开发阶段提高开发效果和开发效益的重要推动因素。

随着开发目标埋藏更深、尺度更小、储层特征更复杂,常规油藏描述精度的要求超出地震描述技

术能力;同时开发领域由常规油藏转向非常规油藏,新的油藏描述目标、低品位油藏的效益开发和进一步提高采收率等需求对油藏描述提出了更高的要求,给开发地震技术提出了更大的问题和挑战。面对这些问题和挑战,开发地震需要进一步提高基础理论研究和新技术攻关应用,推进处理-解释、地震-地质、地震-非地震等一体化融合,引入人工智能等技术应用,不断突破技术瓶颈。为此,笔者梳理了胜利油田开发地震技术的发展现状,总结了其面临的问题和挑战,并提出未来发展趋势,以期促进开发地震技术在油田开发中起到更大作用。

## 1 油气田开发地震技术研究现状

### 1.1 中浅层河流相储层预测技术

济阳坳陷中浅层河流相油藏未动用储量集中在胜利油田滩海地区,砂体具有河道窄、厚度薄、横向变化快的特征。为了保证薄层砂体的精细描述,应用炮域一致性反褶积、共成像点域预测反褶积、叠后反Q滤波等技术对原始地震资料进行提频处理,拓宽原始地震频带,进一步提高地震识别能力。根据实钻井储层地震正演模拟(图1)和井旁道分析研究,明确不同厚度砂体、不同厚度泥岩隔层的地震响应特征,指导砂岩储层的预测和解释<sup>[1]</sup>。

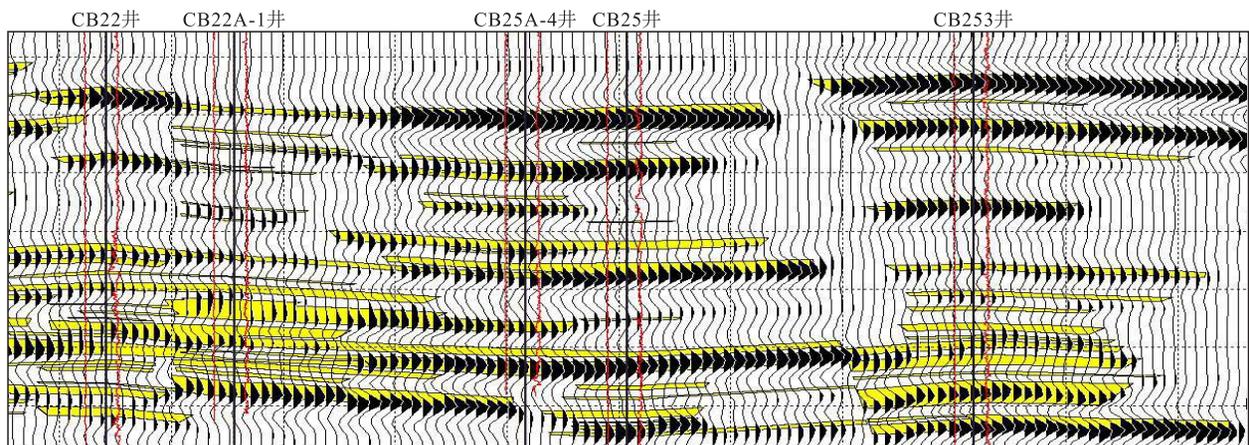


图1 实钻井储层地震正演模拟剖面  
Fig.1 Seismic forward simulation profile of drilled well

针对海上新区探井少、砂体横向变化快的问题,形成河流相薄储层预测技术。根据地震响应特征存在的差异,在区域沉积规律指导下,优选不同厚度砂体的优势频率及其对应的属性参数进行砂体边界精细刻画。为识别河道边缘、河漫滩等常规地震剖面及单一地震属性无法识别的薄层砂体,根据不同厚度砂体多属性综合分析研究,建立薄层指示敏感因子,实现对薄层砂体的预测。薄层指示敏感因子通过对反映储层不同敏感属性进行加权与组合,进一步突出薄层砂体属性特征<sup>[2]</sup>。由图2可见,在常规地震剖面上无法识别出的薄层砂体,在薄层指示敏感因子剖面上地震响应明显。为实现薄层砂体的定量刻画,建立分频段协同反演预测技术,在常规反演基础上加入井-震协同的高频模拟信息,大幅提高反演分辨率。薄层指示敏感因子与分频段协同反演预测技术广泛应用于海上新区,砂体预测厚度从5 m提高到2~3 m,大幅提高了储层预测精度。

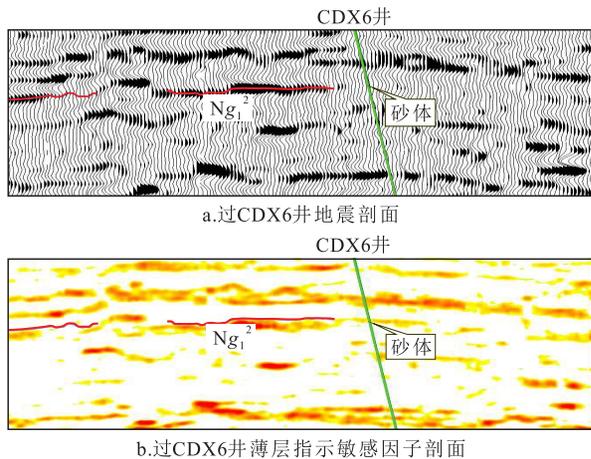


图2 常规地震剖面与薄层指示敏感因子剖面

Fig.2 Conventional seismic profile and thin-layer indicator sensitivity factor profile

为解决流体分布复杂,含油砂体预测难的问题,应用多砂体含油性递进式地质地震联合预测技术进行预测。主要步骤为:①在区域成藏规律分析的基础上,确定成藏控制因素。②进行流体运聚模式及运移通道判识,包括主油源断层、微小断层、差储层、砂体搭桥或对接、砂体叠加通道等。③采用基于谱分解的地震时频分析、频率衰减技术定性描述流体分布<sup>[3]</sup>。④采用叠前弹性反演方法确定流体敏感弹性参数,得到不同岩相的概率密度分布范围。⑤应用地质统计学方法预测油气空间展布形态及分布范围,定量刻画含油砂体厚度。此技术应用于油水关系复杂的海上河流相储层,平均单井油层钻遇吻合率达到80%,大幅提高了钻井成功率(图3)。

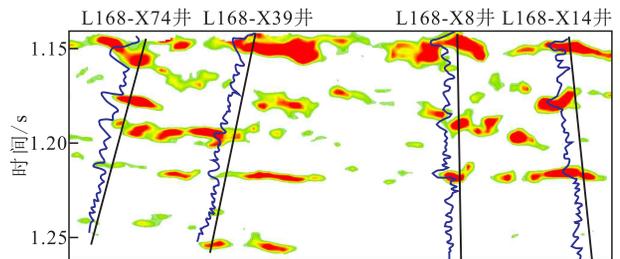


图3 胜利油田滩海地区浅层含油砂体分布剖面

Fig.3 Shallow oil-bearing sand body distribution profile of beach area in Shengli Oilfield

“十二五”至今,通过上述技术在中浅层河流相储层预测方面的应用,累计动用储量为 $4\ 500\times 10^4$  t,新建产能超 $100\times 10^4$  t,助力胜利油田海上持续上产。

## 1.2 复杂断块油藏断裂系统精细描述技术

复杂断块油藏面积小、油层多、含油井段长,断裂系统对油气分布起关键作用,其中大断层控制油气成藏,断层附近高部位油气富集;低序级断层将油藏复杂化且控制油水关系。特高含水开发后期,断块破碎、油水关系复杂、层间非均质性等因素制约了复杂断块油藏的高效开发<sup>[4]</sup>。这就要求必须对断裂系统进行精细描述,落实控油断棱位置及识别低序级断层,明确断裂系统对剩余油分布的控制作用<sup>[5]</sup>。针对断裂系统精细描述过程中存在断层密度大、级别低、地震资料分辨率有限等问题,采用由大到小、由粗到细,多手段相结合、井-震交互精细解释的模式逐级进行精细描述,从而明确断裂系统分布特征,为复杂断块油藏剩余油高效挖潜、开发井网调整、提高原油采收率技术研究等提供重要的地质基础。

常规构造解释中只针对地震反射特征稳定、能量强的层位进行解释,控油断棱位置则依据油层上下大层的断棱位置推测,推测位置与实际位置存在15 m左右的误差,影响了小型断块剩余油挖潜。针对以上问题,采用“多元综合标定定层位、多层近层追踪卡断面、‘井-震-模’结合推小层”的断棱精细刻画技术对控油断棱位置进行精细描述<sup>[6-7]</sup>。主要步骤为:①多块、多井全层位进行合成地震记录波组匹配标定,消除横向块间速度差异问题;同时利用断点、特殊岩性、地层厚度变化等地质信息约束,确定地震子波极性,消除由层位标定中子波极性错误引起的断棱位置误差(30~50 m)。②对地震反射特征稳定的砂层组和较稳定的主力层位进行追踪解释,同时多个层系加密解释,从而控制断棱的形态变化;打破常规波峰或波谷的追踪解释模式,按照层位标定追踪解释,从而消除由于追踪位置不准

引起的断棱位置误差(10~30 m)。③井-震精细匹配,地震解释断面与井上断点一一对应,建立三维构造模型,通过断面与层面相交,得到各油层的断棱位置(图4)。④采用层层递进、多手段相结合的精细构造解释,实现从砂层组到主力层位、从二维到三维一体化的断棱位置精细刻画。通过断棱位置精细刻画,明晰了剩余油富集区,为剩余油高效挖潜及井网完善指引方向<sup>[8]</sup>。

复杂断块油藏构造破碎,单一地震属性识别低序级断层难度较大(图5a)。因此,根据各地震属性的适应性,进行多属性组合应用,结合井上动、静态资料对低序级断层进行精细刻画<sup>[9]</sup>。主要步骤为:①根据实际区块特征,对不同地震属性进行组合,如倾角导向断层增强+蚂蚁体、蚂蚁体+相干属性(图5b)、扩散滤波断层增强分频蚂蚁体等,寻找识别低序级断层的最佳属性组合。②结合井点对比识别的小断点指导地震剖面解释,准确刻画断层空间位置(图5c)。③结合小层的油水关系对识别的低序级断层进行平面组合(图5d)。④通过井点及属性引导、井-震结合、点线面相互印证、开发动态检验的一体化低序级断层交互解释,解决油水关系矛盾、井间注采矛盾<sup>[10]</sup>。

### 1.3 中深层低渗透油藏储层预测技术

济阳坳陷低渗透油藏主要有滩坝砂、砂砾岩、

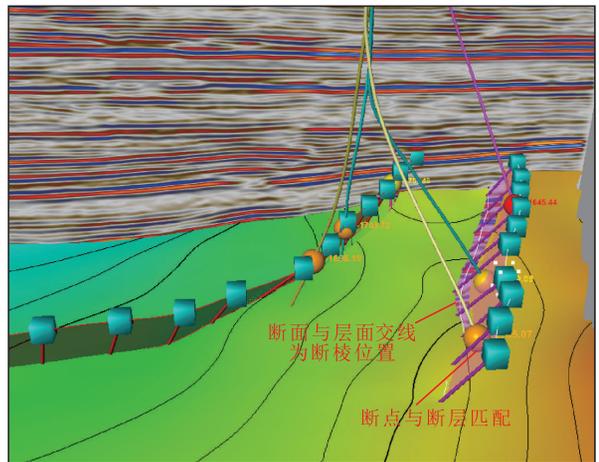


图4 三维一体化刻画断棱位置  
Fig.4 Fault edge position description in 3D integration

油积岩3种类型。其中滩坝砂、砂砾岩油藏是近年来规模建产开发的主要方向,都具有埋深大、储层物性差的特征,受制于地震分辨率和地球物理描述手段,长期难以实现有效动用。随着开发地震技术的发展,针对性地形成了滩坝砂油藏储层预测与砂砾岩油藏地震描述技术,推动了中深层低渗透油藏的规模开发动用。

#### 1.3.1 滩坝砂油藏储层预测技术

滩坝砂油藏埋藏深、单砂体厚度薄、横向非均质性强、地震响应弱,受地震资料品质限制,砂体刻画和描述困难<sup>[11]</sup>。为有效识别并动用滩坝砂油藏,

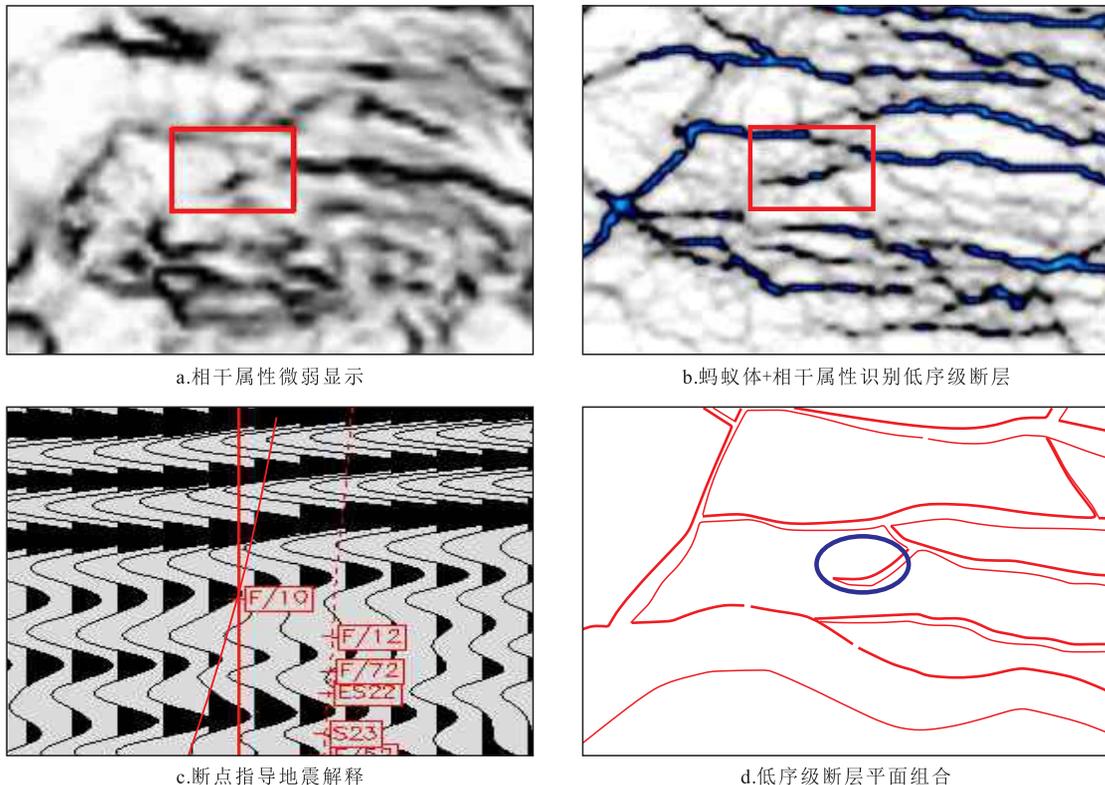


图5 地震属性组合与井上断点结合识别低序级断层  
Fig.5 Low-order fault recognition combining seismic attributes and well fault points

针对其储层预测难点,开展了高精度古地貌恢复、叠前叠后多级拓频及敏感属性智能分析等研究。

**高精度古地貌恢复** 以构造解释为基础,采用印模法进行古地貌分析,在稳定标志层拉平的基础上进行压实校正和沉积环境校正(图6),高精度恢复滩坝沉积时期的古地貌,结合古沉积环境水动力条件预测滩坝砂岩沉积有利部位<sup>[12]</sup>。

**叠前叠后多级拓频** 为缓解信噪比和分辨率之间的矛盾,提高滩坝砂岩薄互层地震分辨率,提出了“多信息约束,全过程拓频”的新思路,形成了基于盲源反褶积和井控提频的叠前叠后多级拓频技术。该技术应用于高892井区,地震资料主频由25

Hz提高到37 Hz,频带由8~43 Hz拓宽到6~65 Hz,地震信号有效频带范围得到拓宽,砂体识别能力大幅提高。

**敏感属性智能分析** 结合钻井与正演模拟明确坝砂、滩砂集中段、薄层滩砂的振幅、频率、波形等地震响应特征,在此基础上针对性地提取多种沿层地震属性<sup>[13-14]</sup>。将敏感属性与储层参数采用BP神经网络或深度学习算法进行人工智能储层预测,实现储层定量评价<sup>[15-16]</sup>。该方法应用在高892井区1砂组滩坝砂累加厚度预测(图7),有效指导了8口开发井的部署,预测累加厚度与实钻井砂体累加厚度吻合率达到84%。

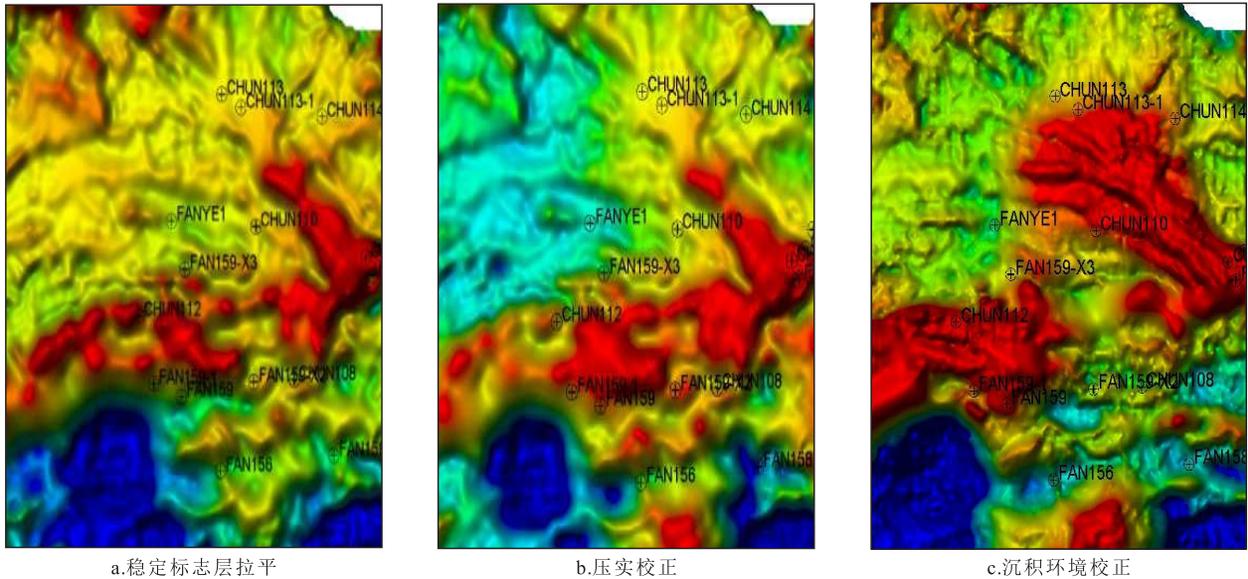


图6 高精度古地貌恢复

Fig.6 High-precision restoration of paleogeomorphology

### 1.3.2 砂砾岩油藏地震描述技术

砂砾岩油藏广泛发育于断陷盆地陡坡带,具有典型的重力流沉积特征,粒度差异大、储层物性差。其沉积厚度大,且紧邻洼陷内优质烃源岩,成藏条件好。但砂砾岩体也存在沉积变化快、井-震特征复杂、埋深大、地震分辨率低等问题,有利储层刻画难度大<sup>[17]</sup>。针对砂砾岩油藏特征,采用由粗到细,由宏观到局部的思路开展地震描述工作。

首先通过井-震结合明确不同沉积亚相的地震反射特征,划分出3种地震相(表1)。结合其在频带、振幅、波形等方面的不同特征,针对性地提取主频、频宽、均方根振幅、反射强度、杂乱度、纹理、曲率、倾角等地震体属性,从而反映砂砾岩地震相变化以及砂砾岩与湖相沉积之间的变化特征包络面<sup>[18]</sup>。将地震相特征作为控制条件,利用较丰富的完钻井信息,采用多属性机器学习、贝叶斯随机反

演等方法对原始地震资料所缺失的低频和低频信息进行补充,形成陡坡带砂砾岩相控分步反演技术(图8),得到符合砂砾岩沉积特征且具有较高分辨率的储层预测结果<sup>[19-21]</sup>。结合储层预测结果对砂砾岩体的空间展布和接触关系进行刻画,进一步总结不同地震相的砂砾岩连通特征,为开发注采调整提供可靠依据。

该技术应用于东营凹陷北带盐22块等油藏,反演结果能够反映出砂砾岩体由扇根向扇端粒度变细、砂地比降低的特征,反演分辨率由50 m提高至15 m,基于反演数据对砂砾岩连通砂体进行雕刻与刻画(图9),为砂砾岩油藏动态分析与调整提供了依据与支撑。“十三五”以来,应用砂砾岩相控分步反演技术预测砂砾岩有效储层,实现了东营凹陷北带、渤南洼陷北带等区带砂砾岩油藏的有效动用,推动砂砾岩油藏年产量突破百万吨。

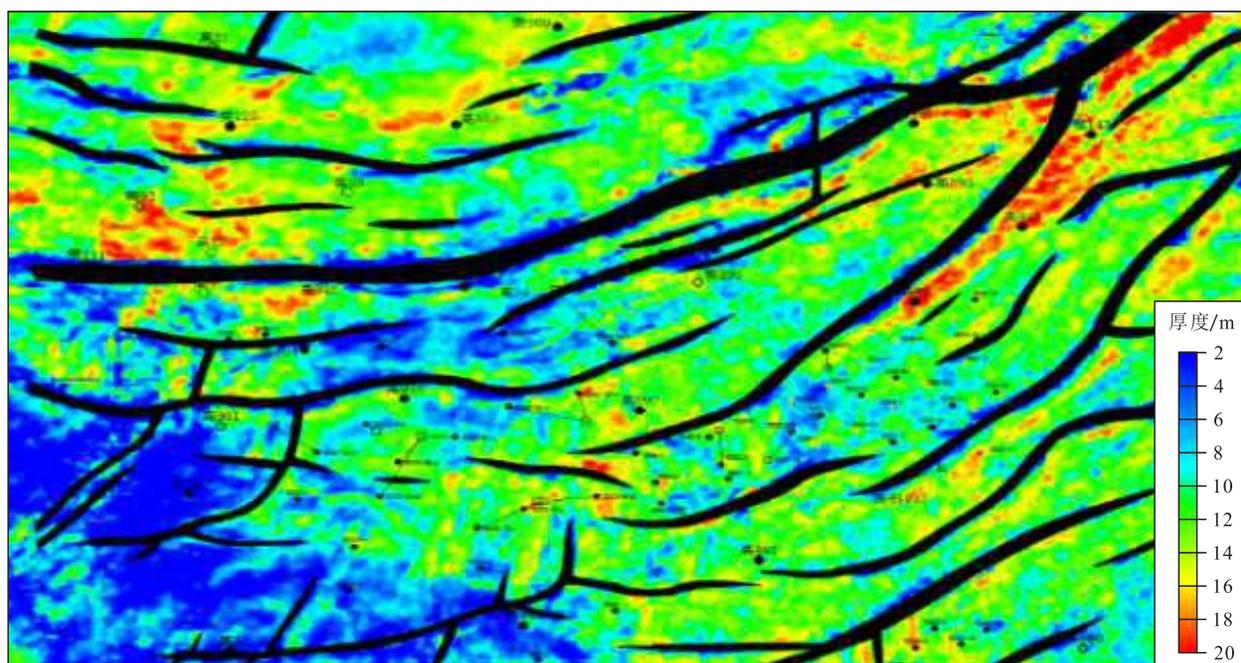


图7 高892井区1砂组滩坝砂累加厚度预测

Fig.7 Prediction of cumulative thickness of beach bar sand in sand group 1 of Gao892 Block

表1 砂砾岩地震相分类及其地震反射特征  
Table1 Classification of seismic facies of glutenite and seismic reflection characteristics

地震相	频带/Hz	振幅	波形	反射形态
扇根	4~28	弱	杂乱	向上弯曲
扇中	11~22	中	较连续	向上弯曲
扇端(含湖相泥岩)	9~25	强	连续	平缓

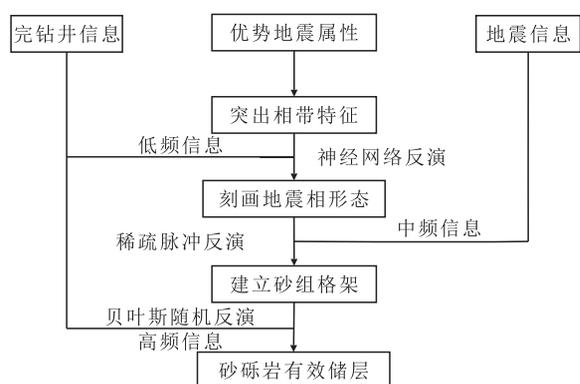


图8 砂砾岩相控分步反演技术流程

Fig.8 Phase-controlled stepwise inversion technology process for glutenite

### 1.4 潜山油藏储层描述技术

胜利油田潜山油藏构造复杂、断层发育、地层剥蚀严重、储层类型多样、断层-裂缝型储层与溶蚀孔洞型储层共同发育。断层-裂缝型储层由多幕构造运动产生,分布于断层周围;溶蚀孔洞型储层为沿断层及断层派生裂缝顺缝溶蚀产生厘米-毫米级孔洞发育带(图10)。潜山地震反射特征表现为空白或杂乱反射,空间描述难度大<sup>[22]</sup>。通过地层分布

规律研究,确定地层出露规律,明确潜山“断-缝-溶复合储集体”主要受地层岩性、断层风化淋滤等多重因素控制<sup>[23-25]</sup>。根据不同类型储层成因及发育控制因素,优化储层预测方法,开展储层预测。

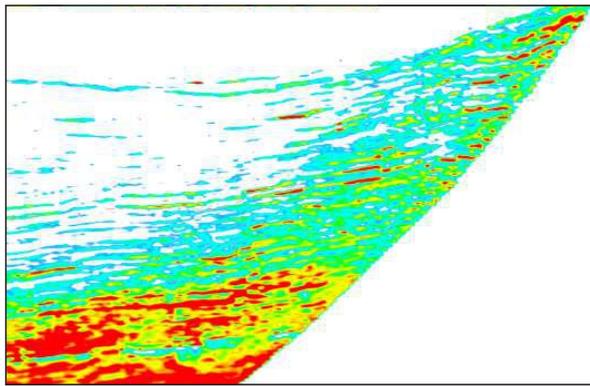
针对储层类型多、尺度小的特点,采用分类预测、综合描述方法,形成“断-缝-溶复合储集体”多参数融合技术<sup>[26-27]</sup>。具体步骤为:①采用相干体切片结合地震剖面,准确描述宏观构造形态,确定断裂系统,理清断裂发育规律。②通过井-震一体化,提取地震杂乱度属性,采用方向滤波技术,突出老断层信息,预测大尺度裂缝带分布,小尺度微裂缝带分布特征则采用波形指示反演方法预测<sup>[28]</sup>。③采用多参数融合技术对断层-裂缝型储层进行综合预测描述。应用该技术对埕北30-306潜山油藏储层进行了三维雕刻(图11),定量描述储集体空间分布特征,取得了良好效果,最终埕北30-306潜山完钻7口井,投产初期日产油量达70 t/d。该技术解决了潜山地震内幕反射差、有利储层难以识别的难题,实现了断层-裂缝型储层预测从定性到定量预测技术的突破,指导高效井位部署<sup>[29-30]</sup>。

## 2 面临的挑战与发展方向

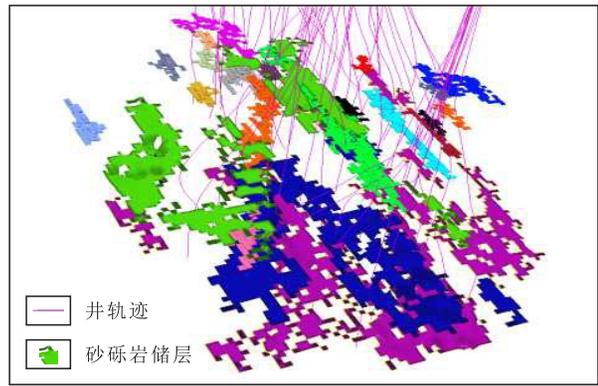
### 2.1 面临的挑战

#### 2.1.1 开发目标精度对储层预测极限的挑战

随着胜利油田逐步进入开发中后期,对储层精



a.反演SN向纵波阻抗剖面



b.砂砾岩连通砂体空间分布

图9 砂砾岩反演效果

Fig.9 Glutenite inversion result

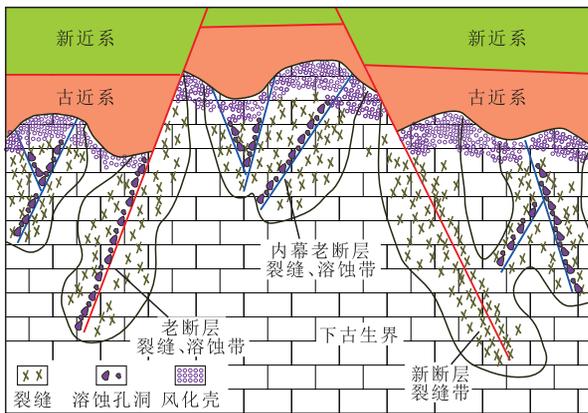


图10 胜利油田潜山油藏储层发育模式

Fig.10 Development patterns of buried hill reservoir in Shengli Oilfield

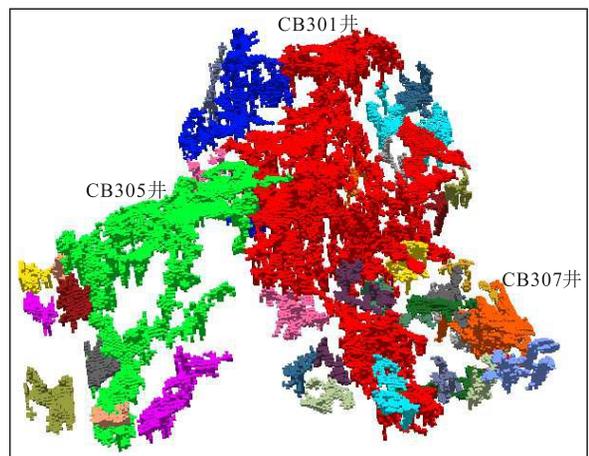


图11 埕北30-306潜山油藏储层三维雕刻

Fig.11 3D characterization of buried hill reservoir in Chengbei30-306 Block

细描述的要求进一步提高。尤其进入超深层(埋深>3 500 m)后,地震分辨率降低,开发目标尺度进一步变小,且油藏开发的工艺技术、开发经济性对滩坝砂、浊积砂及河流相等沉积类型储层地质目标体的描述精度又提出了更高的要求。随着开发地震技术的进步,高密度地震资料逐步普及,地震成像精度和分辨能力得到了一定程度的提高,然而复杂构造准确成像、米级薄储层准确识别、复杂储层精细描述等技术还不能完全满足油气勘探开发需求<sup>[31]</sup>。

**滩坝砂油藏** 滩坝砂油藏纵向砂泥互层,横向连续性差,单砂体平均厚度为1.4 m,其中坝砂平均厚度为3.5 m,滩砂平均厚度为1.0 m,地震主频低、反射信号弱,基于传统地震属性及反演的单砂体边界刻画、砂体连通性描述技术始终难以突破地震分辨率极限,预测精度低。

**浊积岩油藏** 浊积岩油藏普遍具有埋藏深、砂体延展范围小(砂体面积为0.1~0.3 km<sup>2</sup>)、厚度薄(油层厚度为2~4 m)、砂体横向变化快等特点,部分油藏上覆灰岩、白云岩地层,形成强反射屏蔽下

部地震信息,对目标砂体干扰严重,依靠单一地震属性无法实现储层的准确预测,叠后反演难以解决灰质干扰问题,常规的三参数叠前反演预测受灰质干扰,准确度也有限。

**海上中浅层河流相油藏** 海上中浅层河流相油藏沉积演化复杂,砂体叠置样式多,大井距下单砂体连通程度定量表征难;河流相储层相变快、厚度薄、取心资料少,静态非均质性表征难度大;开发过程中经历了强注强采,孔喉结构及流体赋存状态变化大,动态非均质性强。目前储层预测技术对复合砂体连通关系识别及单砂体精细表征还存在不适用性,需要进一步开展技术攻关研究。

### 2.1.2 复杂油藏类型的挑战

地震岩石物理模型建立了地层岩石物性参数和弹性参数之间的关系,是储层预测和储层性质间的桥梁,准确建立地震岩石物理模型是利用地震资料预测储层参数的基础<sup>[32]</sup>。胜利油田中深层低渗透油藏沉积类型复杂,骨架结构、矿物成分、孔隙类

型以及成岩过程等因素使其岩石物理特征较常规油藏更为复杂,建立地震岩石物理模型难度较大,限制了低渗透油藏储层参数预测的发展。目前还无法准确厘定储层参数变化对纵波、横波速度等地震弹性参数的影响,进一步制约了地震反演技术在低渗透油藏中的应用<sup>[33-34]</sup>。

随着油藏开发目标由常规向非常规迈进,页岩油成为今后一个重要的开发方向。胜利油田页岩油主要为半深湖-深湖相沉积<sup>[35]</sup>,受强烈构造运动以及演化程度等影响,其岩相类型多样,储层非均质性强,含油性差异大,有利岩相判识方法有待进一步研究<sup>[36-37]</sup>;其断裂系统发育,裂缝类型多样,主要发育层理缝和构造缝,但裂缝影响因素及分布规律认识不清,缺乏不同类型裂缝的描述方法,裂缝展布规律及分布特征的预测准确度较低,难以满足钻井及压裂需求;地应力预测中断层和裂缝对地应力场模拟结果的影响很大,不同活跃程度的断层会导致地应力场模拟结果发生较大变化,目前断层和裂缝的地质特征及其对应的岩石物理特征还无法准确表征,从而制约了地应力预测的准确性<sup>[38-39]</sup>。

### 2.1.3 油藏开发需求的挑战

对常规砂岩油藏而言,为进一步提高采收率,需要采用注水、注CO<sub>2</sub>等开发方式补充地层能量,这些开发方式要求对储层展布、连通性以及剩余油分布有较准确的认识。随着开发目标储层厚度变薄、沉积规律更加复杂、叠置连通关系更难以认识,油藏的精细开发对开发地震技术提出更高的要求。尤其对于海上油田,由于井控程度低,储层预测与描述更加依赖于开发地震技术。

目前胜利油田潜山油藏开发以弹性开发为主,不同类型储层的水淹规律复杂,油井见水后,由于对潜山内部裂缝延伸、连通规律认识不清,缺乏有效的开发调整对策。如何提高裂缝走向、发育密度的预测,是提高潜山油藏开发效果的关键,而潜山内幕断层的准确刻画是预测裂缝发育规律的主要因素之一。

## 2.2 发展方向

面对不断提升的油藏开发需求及不同油藏类型给开发地震技术带来的问题和挑战,需要进一步打破常规思维,利用人工智能、多维地震技术进一步挖掘地震资料信息,促进多专业一体化融合,不断提升地震描述精度和对储层的识别能力。

### 2.2.1 推进处理解释一体化进程

常规油藏、非常规油藏的勘探开发都是一个系

统的工程,既需要针对影响地震资料品质处理解释的关键环节与瓶颈技术进行攻关和创新,更需要从后期地震解释需求出发,从一体化角度优化技术方法和参数处理,从而满足油藏开发的要求<sup>[40-41]</sup>。

以胜利油田页岩油藏为例,构造解释过程中,在构造起伏大、速度场空间差异较大的区域,水平井的设计误差、钻井跟踪调整难度均较大,因此应该充分应用多井合成地震记录标定等资料,在构造控制下建立三维速度场,推进处理解释一体化进程,通过实钻井标定持续迭代优化速度场,多次迭代提高地震资料的成像效果及时深转换精度,提高构造解释的准确性,满足长水平段水平井设计钻井跟踪对构造精度的要求,进而利用高质量处理资料实现精细识别岩相以及裂缝表征。

### 2.2.2 强化岩石物理理论研究

在进一步优化面向常规油藏的等效各向异性物理模型的基础上,强化裂缝型等储层等效各向异性理论岩石物理模型研究,进一步明确裂缝参数的地球物理响应,充分利用高密度宽方位资料优势,量化挖掘OVT域地震资料信息,夯实深层致密砂岩、碳酸盐岩潜山、页岩等复杂油藏定量地震预测的理论基础。同时搭建岩石物理机制和开发需求间的桥梁,明确工程甜点的弹性参数特征,推进地质工程一体化。

### 2.2.3 推广OVT域数据应用

与常规地震资料相比,宽方位地震资料的方位角和炮检距分布范围较广且更均匀,可更好地分析地震波在各向异性介质中传播的旅行时、速度、振幅、频率和相位差异性,识别地层的各向异性特征<sup>[42]</sup>。以方位各向异性分析为核心的OVT域叠前地震解释技术充分利用宽方位叠前地震资料蕴含的丰富地质和流体信息,可以根据纵波传播规律采用AVAZ或VVAZ反演技术预测裂缝发育密度和走向,为页岩油、潜山油藏储层精细预测提供了一条有效途径<sup>[43]</sup>。OVT域叠前地震解释技术突破了以叠后地震解释为传统的传统解释模式的局限性,实现了地震解释技术从叠后向叠前的跨越。

### 2.2.4 攻关复杂断块-岩相油藏精细描述技术

复杂断块-岩相油藏精细描述需要解决低序级断层发育和岩相变化快的双重难题,涉及复杂断块油藏断裂系统精细描述技术和储层精细描述技术。由于断层密度大且受地震分辨率限制,5 m左右的低序级断层识别难度较大,且低序级断层与岩性尖灭点地震反射特征相似,复杂断块-岩相油藏精细描

述难度较大<sup>[44]</sup>。储层预测方法经过多年的发展,不同的储层类型有不同的预测手段,预测精度也不断提高。近几年相控分步反演技术在致密砂砾岩优质储层、致密薄砂层、生物礁储层、三角洲储层的预测中取得了较好的应用效果,能有效预测5 m左右的储层,且能清晰刻画岩性边界。相控分步反演技术在地震、测井、构造解释等约束条件下,引入了地质储层参数,得到多种地质属性结果,具有较高分辨率的波阻抗或速度,达到精准识别岩性构造油气藏的目的<sup>[45-47]</sup>。同时,相控分步反演对岩性边界敏感,可用于区分复杂断块-岩相油藏中的岩性边界和断层边界,解决其精细描述难度大的问题。三维地质建模充分利用密井网的优势,依托井上的精细断点对比及地震资料对断层的描述,可实现断裂系统空间精细刻画,且能够对井间储层参数进行预测,并对储层各种属性进行定量研究,从而达到精细描述储层的目的。因此,开展相控分步反演及沉积相控制下的三维地质建模技术研究<sup>[48]</sup>,对复杂断块-岩相油藏精细描述意义重大。

### 2.2.5 突破井-地联采与重磁电震联合技术瓶颈

油藏开发后期对地震资料的高分辨率需求,仅单一利用地面地震无法完全满足,需要综合井中(井间地震和VSP技术)与地面地震的各自优势,进一步探索井中激发-地面三维高密度检波器接收或地面激发-井中接收等多种井-地三维高精度地震技术,形成高分辨率的可用于地震油藏动态监测新技术。二者如何联合采集、联合处理,是下一步的主要研究方向<sup>[49]</sup>。

同样,重磁电地球物理技术能够得到更多的储层信息,需要结合多专业优势和特点进行分析,综合研究以提高研究精度和质量。因此,在加大开发地震技术攻关研究的基础上,要着力开展高精度重力、电磁处理和解释技术研究,利用重磁电震联合,提高对特殊地质体、流体变化的识别与预测精度,解决开发难题。

### 2.2.6 实现人工智能技术应用

现在和未来,地球物理数据解释面临着海量数据、多源数据、多解性、主观性等技术难点和挑战,应用机器学习尤其是深度学习新技术建立地震大模型、测井大模型等行业语言AI大模型,进而实现地球物理数据的智能分析与解释是一个高效可行的未来发展方向。以AI大模型为基础,通过少量的专家标注并结合机理模型,建立适用于构造解释、储层预测、单井岩相解释等应用场景的基础样本

库,并通过大模型微调构建适用于该应用场景的预测模型,将获得较好的预测效果。AI大模型可通过零样本、小样本学习即可获得领先效果,同时形成地球物理数据智能解释新范式。与传统方法相比,基于AI大模型的地球物理数据智能解释不仅摆脱或降低对人工经验的依赖,克服人工解释的主观性和低效率,而且大幅度提升数据分析解释的客观性、可靠性、适应性和工作效率<sup>[50-51]</sup>。

## 3 结论

胜利油田开发实践表明,开发地震技术在对各种类型油藏开展精细油藏描述、提高油藏开发效果方面具有明显的应用潜力,并针对中浅层河流相储层、复杂断块油藏、中深层低渗透油藏以及潜山油藏的特征,形成相应的储层预测技术与断裂系统精细描述技术,为胜利油田实现稳产起到了巨大的支撑作用。

随着开发目标逐渐由浅层向深层、由简单向复杂、由常规向非常规转化,油藏开发对地震技术提出了更高的挑战,需要进一步夯实开发地震技术理论基础、引入新技术新方法、扩展更新应用理念,以面对油田开发带来的更高要求。未来需要进一步推进处理解释一体化,强化岩石物理理论研究,推广OVT域数据应用,攻关复杂断块-岩相油藏精细描述技术,突破井-地联采与重磁电震联合储层描述等技术瓶颈,实现人工智能技术在开发地震领域的应用,进一步提高油田开发水平和开发效果,推进胜利油田全面高质量发展。

### 参考文献

- [1] 张显文, 范廷恩, 张晶玉, 等. 河流相储层不连续界限地震响应特征研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(2): 106-113.  
ZHANG Xianwen, FAN Tingen, ZHANG Jingyu, et al. Study on seismic response characteristics of fluvial reservoir discontinuous boundary [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(2): 106-113.
- [2] 岳大力, 李伟, 杜玉山, 等. 河流相储层地震属性优选与融合方法综述[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3 929-3 943.  
YUE Dali, LI Wei, DU Yushan, et al. Review on optimization and fusion of seismic attributes for fluvial reservoir characterization [J]. Earth Science, 2022, 47(11): 3 929-3 943.
- [3] 国春香, 郭淑文, 朱伟峰, 等. 河流相砂泥岩薄互层预测方法研究与应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 594-599.  
GUO Chunxiang, GUO Shuwen, ZHU Weifeng, et al. Research and application of fluvial sand-shale thin interbedding prediction method [J]. Geophysical and Geochemical Explora-

- tion, 2018, 42(3): 594-599.
- [4] 江春明. 大庆太190地区复杂断块油藏描述及剩余油分布研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.  
JIANG Chunming. A study on reservoir characterization and distribution of remaining oil of complicated faulted-blocks, in Tai 190 area, Daqing Oil Field, China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.
- [5] 甘利灯, 戴晓峰, 张昕, 等. 高含水油田地震油藏描述关键技术[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 365-377.  
GAN Lideng, DAI Xiaofeng, ZHANG Xin, et al. Key technologies for the seismic reservoir characterization of high water-cut oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 365-377.
- [6] 钱志, 魏国华, 陈雨茂, 等. 井-震-动态多级联合复杂断裂系统描述技术[J]. 地质论评, 2023, 69(1): 381-382.  
QIAN Zhi, WEI Guohua, CHEN Yumao, et al. A description technology of well-seismic-dynamic multi-level combined complex fault system [J]. Geological Review, 2023, 69(1): 381-382.
- [7] 孙晓霞. 复杂断块断棱刻画技术研究[J]. 断块油气田, 2013, 20(1): 59-62.  
SUN Xiaoxia. Research on fault edge depiction in complex fault block [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(1): 59-62.
- [8] 刘显太, 李军, 王军, 等. 低序级断层识别与精细描述技术研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 44-47.  
LIU Xiantai, LI Jun, WANG Jun, et al. Study on the technologies of identification and delicate description of low level faults [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 44-47.
- [9] 胡滨. 复杂断裂精细解释技术组合及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(3): 608-616.  
HU Bin. Multi-technique combination for the complex-fault elaborate interpretation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 608-616.
- [10] 陈国飞. 喇嘛甸油田井震结合断层识别技术[J]. 特种油气藏, 2015, 22(3): 131-134.  
CHEN Guofei. Fault identification by logging-seismic combination in Lamadian Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(3): 131-134.
- [11] 刘启亮. 提高Y101井区储层预测精度的方法研究[J]. 油气地球物理, 2018, 16(4): 49-56.  
LIU Qiliang. Research on the methods of improving reservoir prediction accuracy in Y101 well area [J]. Petroleum Geophysics, 2018, 16(4): 49-56.
- [12] 高艺, 姜在兴, 李俊杰, 等. 古地貌恢复及其对滩坝沉积的控制作用——以辽河西部凹陷曙北地区沙四段为例[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 40-46.  
GAO Yi, JIANG Zaixing, LI Junjie, et al. Restoration of paleogeomorphology and its controlling effect on deposition of beach-bar sand bodies: a case study of the fourth member of Shahejie Formation, Shubei area, Liaohe Western Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 40-46.
- [13] 韩宏伟. 薄互层地震波形特征研究——以博兴洼陷沙四段滩坝砂为例[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 349-355.  
HAN Hongwei. Research on the characteristics of thin-alternating-bed seismic waveform—a case study of the beach bar sandstones of Es<sub>4</sub> in Boxing Sag [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 349-355.
- [14] 骆璞. 地震反射特征研究在储层预测中的应用[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(2): 36-39, 46.  
LUO Pu. Application of seismic reflection characteristics in reservoir prediction [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2021, 14(2): 36-39, 46.
- [15] 王俊, 曹俊兴, 周欣. 基于深度双向循环神经网络的储层孔隙度预测[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 267-274.  
WANG Jun, CAO Junxing, ZHOU Xin. Reservoir porosity prediction based on deep bidirectional recurrent neural network [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 267-274.
- [16] 单敬福, 陈欣欣, 赵忠军, 等. 利用BP神经网络法对致密砂岩气藏储集层复杂岩性的识别[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1 257-1 263.  
SHAN Jingfu, CHEN Xinxin, ZHAO Zhongjun, et al. Identification of complex lithology for tight sandstone gas reservoirs based on BP neural net [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1 257-1 263.
- [17] 邱隆伟, 韩晓彤, 宋璠, 等. 东营凹陷盐22区块沙四上亚段近岸水下扇岩相特征及沉积演化[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(1): 26-37.  
QIU Longwei, HAN Xiaotong, SONG Fan, et al. Lithofacies characteristics and sedimentary evolution of the near-shore subaqueous fans in the upper submember of Es<sub>4</sub> in Block Yan22 of Dongying Sag [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(1): 26-37.
- [18] 雷蕾, 韩宏伟, 于景强. 近岸水下扇沉积样式及地震响应特征新认识[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(5): 1 151-1 158.  
LEI Lei, HAN Hongwei, YU Jingqiang. New understandings of near-shore subaqueous fan sedimentary styles and its seismic responses [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(5): 1 151-1 158.
- [19] 王林生, 艾建华, 伍顺伟, 等. 基于扩展弹性阻抗反演的致密砂砾岩储层定量预测技术——以玛湖凹陷达13井区为例[J]. 油气地质与采收率, 2022, 39(3): 36-44.  
WANG Linsheng, AI Jianhua, WU Shunwei, et al. Quantitative prediction technology for tight glutenite reservoirs based on EEI inversion: a case of Well Da13 Area in Mahu Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 39(3): 36-44.
- [20] 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 Nan, LIU Yuan, LENG Yue, 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.
- [21] SU Zhou, LIU Yongfu, HAN Jianfa, et al. Application of ultra-deep sandstone reservoirs prediction technology under controlled seismic facies in Yudong block of Tabei Uplift, Tarim Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2020, 5(3):

- 157-167.
- [22] 田涛, 李少轩, 高阳, 等. 变质岩潜山裂缝型储层精细预测技术——以渤海海域A油田为例[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(6): 8-13.  
TIAN Tao, LI Shaoxuan, GAO Yang, et al. Fine prediction technology of fractured reservoir in metamorphic buried hill-by taking A oilfield in Bohai Sea as an example [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(6): 8-13.
- [23] 郑华, 康凯, 刘卫林, 等. 渤海深层变质岩潜山油藏裂缝主控因素及预测[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 29-38.  
ZHENG Hua, KANG Kai, LIU Weilin, et al. Main controlling factors and prediction of fractures in deep metamorphic buried hill reservoirs in Bohai Sea [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(3): 29-38.
- [24] 杨一珉, 罗健, 徐云龙, 等. 渤南低凸起下古生界碳酸盐岩潜山储层特征及控制因素[J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 448-453.  
YANG Yimin, LUO Jian, XU Yunlong, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of carbonate buried hill in the Lower Paleozoic of Bonan low uplift [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(4): 448-453.
- [25] 胡志伟, 吕丁友, 王德英, 等. 渤海海域前新生代关键构造期变形特征与潜山油气成藏意义[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 50-62.  
HU Zhiwei, LÜ Dingyou, WANG Deying, et al. Deformation characteristics of critical tectonic periods during pre-Cenozoic and significance of buried hill hydrocarbon accumulation in the Bohai sea area [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(1): 50-62.
- [26] 周东红. 渤海油田深埋潜山储层预测关键技术研究——以渤中19-6潜山为例[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 69-76.  
ZHOU Donghong. Research on key technologies of deep buried hill reservoir prediction in Bohai oilfield: a case study of BZ19-6 buried hill [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(3): 69-76.
- [27] 王成泉, 王孟华, 周佳宜, 等. 多属性融合定量储层预测方法研究与应用——以廊固凹陷杨税务潜山为例[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 87-95.  
WANG Chengquan, WANG Menghua, ZHOU Jiayi, et al. Application of multi-attribute fusion in quantitative prediction of reservoirs: a case study of Yangshuiwu buried hill in Langgu sag [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(1): 87-95.
- [28] 韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 基于地震波形指示的碳酸盐岩储集体反演方法——以塔河油田中一下奥陶统为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 822-830.  
HAN Changcheng, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Waveform-indication-based seismic inversion of carbonate reservoirs: a case study of the Lower-Middle Ordovician in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 822-830.
- [29] 李娟, 孙松领, 陈广坡, 等. 海拉尔盆地浅变质岩潜山岩性控制特征及储层岩性序列识别[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(4): 26-36.  
LI Juan, SUN Songling, CHEN Guangpo, et al. Controlling of epimetamorphic rock lithology on basement reservoir and identification of lithological sequence of reservoir in Hailar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(4): 26-36.
- [30] 陈人杰, 刘杰, 徐乐意, 等. 潜山储层定量预测技术研究与应——以珠江口盆地惠州凹陷H潜山为例[J]. 石油物探, 2024, 63(1): 229-237.  
CHEN Renjie, LIU Jie, XU Leyi, et al. Quantitative characterization of buried-hill reservoirs: a case study of a buried hill in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2024, 63(1): 229-237.
- [31] 王延光, 尚新民, 芮拥军. 单点高密度地震技术进展、实践与展望[J]. 石油物探, 2022, 61(4): 571-590.  
WANG Yanguang, SHANG Xinmin, RUI Yongjun. Progress, practice, and prospect of single-sensor high-density seismic technology [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(4): 571-590.
- [32] 印兴耀, 马正乾, 向伟, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(I)——裂缝储层岩石物理理论[J]. 石油物探, 2022, 61(2): 183-204.  
YIN Xingyao, MA Zhengqian, XIANG Wei, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory (I): effective anisotropic seismic rock physics theory [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(2): 183-204.
- [33] 邓继新, 柴康伟, 宋连腾, 等. 差异性成岩过程对百口泉组砂砾岩岩石物理特征的影响[J]. 地球物理学报, 2022, 65(11): 4 448-4 459.  
DENG Jixin, CHAI Kangwei, SONG Lianteng, et al. The influence of diagenetic evolution on rock physical properties of sandy conglomerate of Baikouquan formation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(11): 4 448-4 459.
- [34] 印兴耀, 马正乾, 宗兆云, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(II)——五维地震裂缝预测技术[J]. 石油物探, 2022, 61(3): 373-391.  
YIN Xingyao, MA Zhengqian, ZONG Zhaoyun, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory (II): fracture prediction from five-dimensional seismic data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(3): 373-391.
- [35] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1): 1-20.  
YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: a case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(1): 1-20.
- [36] 王永诗, 唐东. 威化断陷湖盆典型页岩剖面地质特征——以东营凹陷为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 181-191, 203.  
WANG Yongshi, TANG Dong. Geological characteristics of typical shale profile in a saline lacustrine rift basin: a case study of Dongying sag [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 181-191, 203.
- [37] 彭艳霞, 杜玉山, 蒋龙, 等. 济阳拗陷缓坡带页岩油储层微观孔

- 隙结构及分形特征[J]. 断块油气田, 2023, 30(4): 535-544.
- PENG Yanxia, DU Yushan, JIANG Long, et al. Micropore structure and fractal characteristics of shale oil reservoir in gentle slope zone of Jiyang Depression [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(4): 535-544.
- [38] 王霞, 李丰, 张延庆, 等. 五维地震数据规则化及其在裂缝表征中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 844-852.
- WANG Xia, LI Feng, ZHANG Yanqing, et al. 5D seismic data regularization and application in fracture characterization [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(4): 844-852.
- [39] 印星耀, 马妮, 马正乾, 等. 地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 488-504.
- YIN Xingyao, MA Ni, MA Zhengqian, et al. Review of in-situ stress prediction technology [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(4): 488-504.
- [40] 甘利灯, 戴晓峰, 徐右平, 等. 处理解释一体化的层间多次波识别与压制——以四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组为例[J]. 石油物探, 2022, 61(3): 408-422.
- GAN Lideng, DAI Xiaofeng, XU Youping, et al. Recognition and suppression of interlayer multiples based on integration of processing and interpretation—a case study of Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(3): 408-422.
- [41] 冷雪梅, 潘龙, 林娟, 等. 处理解释一体化技术在东道海子凹陷滴南地区油气勘探中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(S2): 168-174.
- LENG Xuemei, PAN Long, LIN Juan, et al. Integrated processing and interpretation technology applied in oil and gas exploration in Dinan area, Dongdaohaizi Depression [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(S2): 168-174.
- [42] 李红星. 一种基于OVT域的地震储层预测方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 52-57.
- LI Hongxing. A seismic reservoir prediction based on OVT domain [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(4): 52-57.
- [43] 朱培民, 王家映, 於文辉, 等. 用纵波AVO数据反演储层裂隙密度参数[J]. 石油物探, 2001, 40(2): 1-12.
- ZHU Peimin, WANG Jiaying, YU Wenhui, et al. Inverting reservoir fracture density using P-wave AVO data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2001, 40(2): 1-12.
- [44] 张振国. 开发地震在复杂断块油田开发中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- ZHANG Zhenguo. The application of development seismic in the complex fault block [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [45] 王彬权, 向雪梅, 伍国勇, 等. 基于地震响应分析的相控反演技术在生物礁滩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2023, 62(S1): 126-133.
- WANG Binquan, XIANG Xuemei, WU Guoyong, et al. Facies-controlled inversion technology based on seismic response analysis for predicting bio-reef shoal reservoirs [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(S1): 126-133.
- [46] 张枫, 贾学成, 张晓敏, 等. 相控反演薄储层预测技术在鄂尔多斯盆地东缘的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(S1): 215-222.
- ZHANG Feng, JIA Xuecheng, ZHANG Xiaomin, et al. Application of thin reservoir prediction technology based on facies-controlled inversion at eastern margin of Ordos Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(S1): 215-222.
- [47] 张志伟, 王春生, 林雅平, 等. 地震相控非线性随机反演在阿姆河盆地A区块碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 304-310.
- ZHANG Zhiwei, WANG Chunsheng, LIN Yaping, et al. Applications of facies-controlled nonlinear random inversion for carbonate reservoir prediction in Block A of Amu-darya Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(2): 304-310.
- [48] 王江, 王雪峰, 付尤中, 等. 基于小波边缘分析与井-震联合建模的波阻抗反演技术在乌尔逊断陷储层预测中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(2): 133-142.
- WANG Jiang, WANG Xuefeng, FU Youzhong, et al. Application of wave impedance inversion technology based on wavelet edge analysis and well-seismic joint modeling in reservoir prediction of Wuerxun rift [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(2): 133-142.
- [49] 李彦鹏, 刘学刚, 王大兴, 等. DAS井地联合勘探实例分析——以长庆油田环县三维井地联采为例[J]. 石油物探, 2022, 61(1): 112-121.
- LI Yanpeng, LIU Xuegang, WANG Daxing, et al. DAS joint VSP and 3D surface seismic: a case study on HX 3D in the Changqing oilfield [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(1): 112-121.
- [50] 钱玉贵. 机器深度学习技术在致密砂岩储层预测中的应用——以川西坳陷新场须家河组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(5): 600-607.
- QIAN Yugui. Application of machine deep learning technology in tight sandstones reservoir prediction: a case study of Xujiahe Formation in Xinchang, western Sichuan Depression [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(5): 600-607.
- [51] 陈雨茂, 赵虎, 杨宏伟, 等. 基于小样本数据深度学习的砂体厚度预测方法及应用[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(2): 231-237.
- CHEN Yumao, ZHAO Hu, YANG Hongwei, et al. A sand body thickness prediction method based on deep learning from small sample data and its application [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(2): 231-237.