

引用格式:刘明,薛野,刘田田,等.苏北盆地溱潼凹陷三维地震勘探进展及下步攻关方向[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):163-172.

LIU Ming, XUE Ye, LIU Tiantian, et al. Progress and direction of 3D seismic exploration in Qintong Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 163-172.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.004

# 苏北盆地溱潼凹陷三维地震勘探进展及下步攻关方向

刘明,薛野,刘田田,赵苏城,蓝加达,史梦君,杨帆  
(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京210019)

**摘要:**苏北盆地溱潼凹陷油气成藏层系多、资源丰度高、勘探潜力大,但地质目标具有“薄、碎、小、散、隐”的复杂特点。1989年以来,在该区开展了一系列地震技术攻关,从常规三维发展到了二次采集高精度三维,建立了“全数字检波器单点宽频接收、中等面元网格、较高覆盖次数”采集方法,以连片处理、提高信噪比处理、提高分辨率处理、构造约束网格层析速度建模与逆时叠前深度偏移成像等为主的处理技术体系,以自然电位一波形指示模拟为核心的薄层砂岩预测技术,支撑了溱潼凹陷从简单构造油藏到复杂小断块油藏,再到构造-岩性复杂隐蔽油藏勘探的转变。分析认为,多期次采集数据差异大、原始资料频带窄、波场采样密度低等因素限制了高信噪比、高分辨率及保幅处理的效果,下一步攻关方向应开展无线节点单点宽频接收、单点宽频激发以及小面元、高炮道密度、宽方位地震采集,保幅量化质量控制、宽频全方位处理和五维解释、深度域解释等,以进一步解决复杂隐蔽油藏的地震勘探难题。

**关键词:**溱潼凹陷;复杂隐蔽油藏;高精度三维地震;保幅处理;提高分辨率;储层反演

中图分类号:P631

文献标识码:A

## Progress and direction of 3D seismic exploration in Qintong Sag of Subei Basin

LIU Ming, XUE Ye, LIU Tiantian, ZHAO Sucheng, LAN Jiada, SHI Mengjun, YANG Fan

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

**Abstract:** Qintong Sag of Subei Basin has high abundance of oil and gas resources and great exploration potential, but the geological target has the complex characteristics of “thin, broken, small, scattered and hidden”. Since 1989, there is a series of seismic technical breakthroughs in this area. From conventional 3D to high-precision 3D for secondary acquisition, the acquisition method of “single point broadband receiving with digital geophone, medium surface element grid and high coverage times” is established, a series of processing technologies have been formed, such as sequential processing, improved SNR processing, improved resolution processing, structural-constrained mesh tomographic velocity modeling and reverse-time prestack depth migration imaging, etc., as well as the thin-bedded sandstone prediction technology with the waveform indication inversion of SP sensitive curves. Technological progress has promoted the transformation from simple structural reservoir to complex small fault block reservoir, and then to complex structure-lithology subtle reservoir exploration in Qintong Sag. The analysis shows that the high SNR, high resolution and amplitude-preserving processing effect are limited by the large difference of multi-phase data collection, narrow frequency band of original data and low sampling density of wave field. In order to solve the further problems of the complex subtle reservoir seismic exploration, wireless single-point receiving, single-point broadband excitation, small surface element, high coverage density, wide azimuth seismic acquisition, amplitude quantization quality control, broadband omnidirectional processing and five-dimensional interpretation should be explored.

**Keywords:** Qintong Sag; complex subtle reservoir; high precision 3D seismic; amplitude preserving processing; improved resolution processing; reservoir inversion

收稿日期:2021-11-03。

第一作者简介:刘明(1982—),男,高级工程师,主要从事物探技术研究和物探科技管理工作。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail:lium.hdsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技开发部项目“苏北盆地页岩油地质工程一体化关键技术研究”(P21112)。

溱潼凹陷是苏北盆地的一个三级构造单元,常规油资源量为  $1.32 \times 10^8$  t,具有较大勘探潜力<sup>[1-2]</sup>。1989年至2005年,中国石化华东油气分公司采用常规三维技术,整体落实溱潼凹陷构造格局,以简单构造型油藏勘探为主,先后发现草舍、红庄、边城、茅山等14个油田,累计探明石油地质储量  $2\,766.49 \times 10^4$  t。随着勘探程度的深入,构造油藏的勘探难度越来越大。为实现溱潼凹陷油气勘探可持续发展,针对资源品位逐渐变差的情况,调整勘探思路,由简单构造型油藏勘探转变为复杂断块、构造-岩性及地层岩性等隐蔽油藏勘探。溱潼凹陷隐蔽油藏具有单砂体厚度薄、油藏面积小、储量丰度低等特点,常规三维地震已不能满足勘探需求,急需开展新一轮高精度地震技术攻关。

前人在隐蔽油藏地震勘探技术研究方面取得了积极进展<sup>[3-7]</sup>,但缺乏针对溱潼凹陷隐蔽油藏高精度三维地震采集、处理、解释一体化技术的系统性研究。自2007年以来,中国石化华东油气分公司围绕提高溱潼凹陷复杂隐蔽油藏的识别与描述精度,实施7块、满覆盖面积  $883 \text{ km}^2$  二次采集高精度三维,提高了地震分辨率与保幅性,加强小断层识别能力、薄砂层预测可靠性,发现一批有利目标,支撑了溱潼凹陷从简单构造油藏到复杂小断块油藏,再到构造-岩性复杂隐蔽油藏勘探的转变。首先介绍了溱潼凹陷二次采集高精度三维地震采集、处理以及解释技术取得的最新进展,然后分析了目前仍存在的问题,最后探讨了下一步攻关方向。

## 1 高精度三维地震勘探关键技术及效果

### 1.1 地震采集技术

溱潼凹陷地震采集主要面临如下困难:①地下地质条件复杂,断层多、构造破碎,局部火成岩发育,储层薄且横向变化快,对地震成像精度和纵横向分辨率要求高;②近地表结构复杂,流沙和软泥分布广,激发和接收的资料品质变化大,存在较强的静校正问题;③城镇、工厂、公路、河流等障碍多而密集、干扰严重,井炮布设限制因素多,难以保持规则观测系统,波场空间采样密度不均。针对上述诸多影响因素,形成了全数字检波器单点接收、多震源联合激发以及“高覆盖次数、中等面元”观测系统设计等技术。

#### 1.1.1 全数字检波器单点接收

二次采集高精度三维勘探初期(2007—2012年),采用408XL地震仪记录、模拟检波器较大组内基距(15~22 m)的组合接收,提高了资料信噪比。但检波器组合接收带来3方面问题:一是混叠波场原始特征降低资料保真性;二是不同相叠加降低频率;三是各道间的不一致性。检波器组合接收单炮主频低(20~25 Hz)、频带窄(10~59 Hz),难以满足高分辨率处理需求(图1)。

为加强高频、弱小信息的获取能力,拓宽原始采

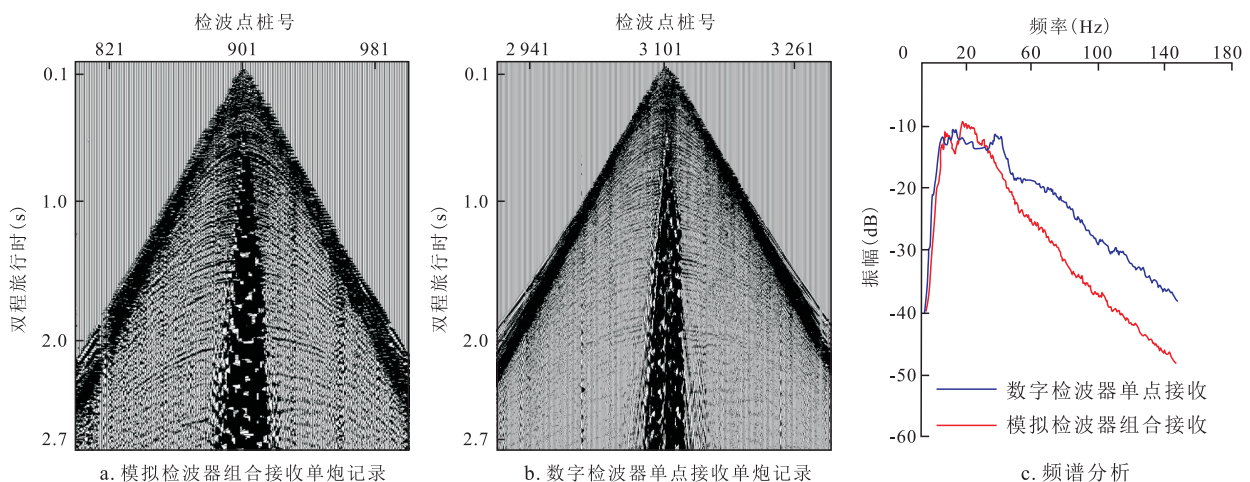


图1 模拟检波器组合接收与数字检波器单点接收单炮记录与频谱对比

Fig. 1 Comparison of single-shot records and spectrum received by analog geophones and digital geophones

集资料频带,自2013年起,引进了DSU1数字检波器,开展单点接收技术攻关。DSU1数字检波器单点接收具有灵敏度高、频带宽、动态范围大以及相位一致性好等特点<sup>[8-10]</sup>。实践证明,数字检波器单点接收原始单炮主频较高(35~40 Hz)、频带宽(7~96 Hz),为高分辨率处理奠定基础(图1)。

### 1.1.2 多震源联合激发

针对地震激发环节,一方面通过针对性设计井深、优化施工工艺、减少流沙发育区激发点,提高了井炮激发单炮品质与激发子波的一致性;另一方面采用井炮与可控震源联合激发技术,确保资料采集完整性。溱潼凹陷地表建筑物密集,对井炮激发限制大,单一的井炮激发方式不能满足地震勘探的需

求。开展针对KZ28AS型可控震源在溱潼凹陷的地震激发试验,建立了4台震源、4次震动次数、12 s扫描长度、75%驱动幅度、8~80 Hz扫描频率的激发参数。应用可控震源进行激发,保证了激发点位分布均匀,弥补了资料缺失,确保了资料品质(图2)。

### 1.1.3 观测系统

针对溱潼凹陷二次采集高精度三维观测系统进行持续优化设计,主要包括2个阶段:

第一阶段采用“模拟检波器组合接收”技术,接收道数为1 728~2 352道,束间滚动距为720~1 800 m,面元大小为25 m×25 m至20 m×20 m,覆盖次数为48~84次,炮道密度为7.7~21.0万道/km<sup>2</sup>(表1)。图3所示为溱潼凹陷一次采集成果剖面与2012年二

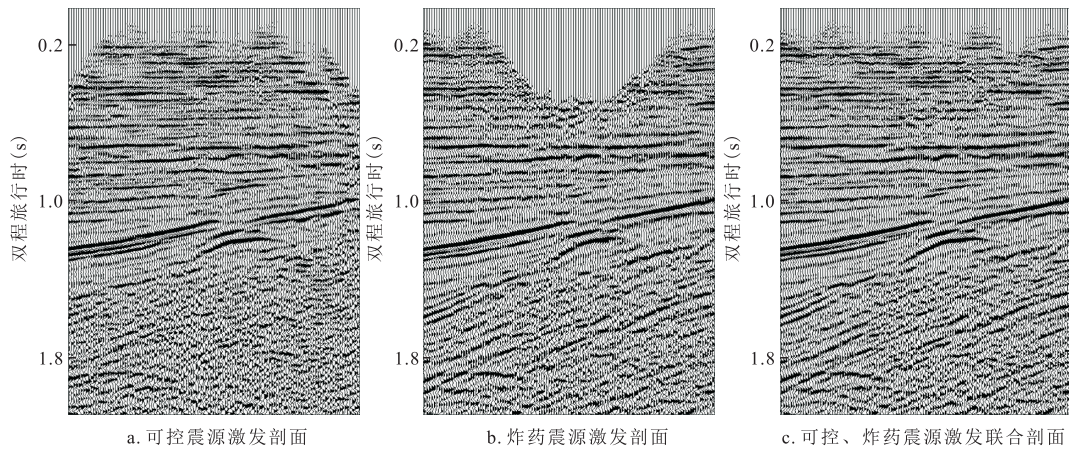


图2 可控震源、炸药震源与双震源联合激发剖面对比

Fig. 2 Comparison among vibroseis, explosive sources and dual sources combined excitation profiles

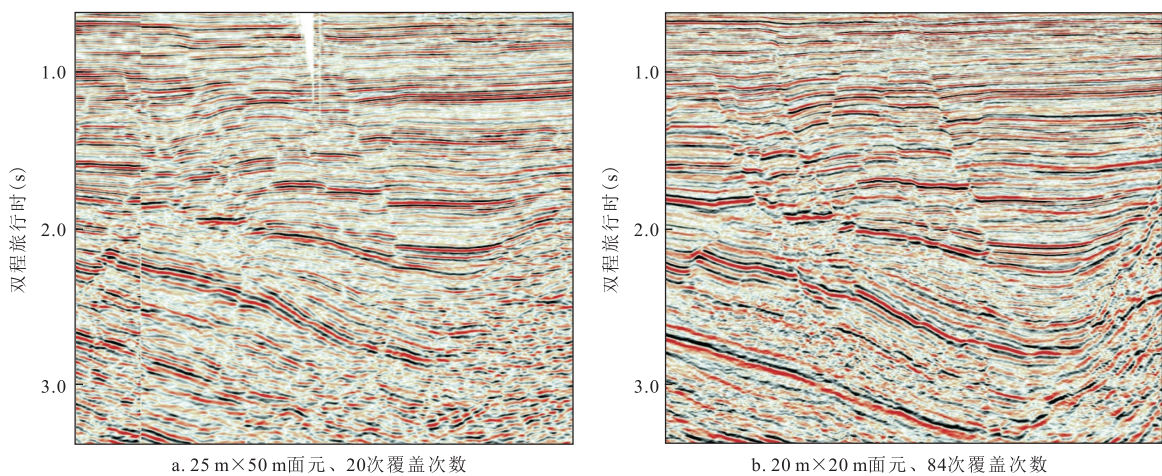


图3 溱潼凹陷一次采集戴南三维与二次采集帅垵—唐刘三维剖面对比

Fig. 3 Comparison between 3D seismic profile onetime acquisition for Dainan Formation and secondary acquisition for Shuaiduo-Tangliu Formation in Qintong Sag

次采集帅垛—唐刘三维成果剖面对比,可见成像精度大幅提升,波组信噪比更高、特征更加清楚,断层断点干脆,层间内幕反射信息更加丰富。

第二阶段为提高地震分辨率,开展了基于全数字检波器单点接收的观测系统设计。考虑数字检波器单点接收具有噪声压制能力弱、采集资料信噪比低的特点,接收道数增加至5 824~8 640道,覆盖次数提高至104~180次,炮道密度提高至52.0~90.0万道/km<sup>2</sup>;采用小束间滚动距(200~240 m),中等大小面元(10 m×20 m)(表1)。图4为溱潼凹陷一次采集三维(模拟检波器组合接收)成果剖面与2013年二次采集华庄三维(数字检波器单点接收)成果剖面对比,可见二次采集高精度三维地震层间弱反射信息更加丰富、剖面分辨率更高,频谱分析显示地震剖面主频由20 Hz提高至30 Hz,有效频带由10~54 Hz拓宽至9~67 Hz。

## 1.2 地震处理技术

不断发展完善三维连片处理、提高信噪比、提高分辨率、偏移成像4方面处理技术。

### 1.2.1 连片处理

受不同年代地震采集施工的仪器设备与施工工艺的差异、复杂地表激发接收效果的差异等影响,不同期次三维地震的观测系统属性差异较大,原始资料振幅、频率、相位等地震波动力学特征变化大。因此,地震连片处理的重点应是消除不一致性问题。

#### 1) 能量一致性处理

首先,全面统计不同期次三维、不同震源类型、不同接收因素等记录的平均能量,进行能量匹配处理,实现全区能量基本统一;其次,开展球面扩散补偿处理,补偿地震波能量在空间传播上的衰减;再

表1 溱潼凹陷二次采集高精度三维地震观测系统参数对比

Table 1 Parameter comparison of secondary high precision 3D seismic observation system in Qintong Sag

三维名称	年度	观测系统	接收道数(道)	道距(m)	线距(m)	炮点距(m)	炮线距(m)	排列长度(m)	束间滚动距(m)	纵横比	面元	覆盖次数(次)	炮道密度(万道/km <sup>2</sup> )
草舍—台兴	2007	12L36S144T	1 728	50	300	50	450	3 575	1 800	0.71	25 m×25 m	48	7.7
祝庄—边城	2008	12L18S196T	2 352	40	240	40	280	3 900	720	0.42	20 m×20 m	84	21.0
帅垛—唐刘	2012	12L18S196T	2 352	40	240	40	280	3 900	720	0.42	20 m×20 m	84	21.0
华庄	2013	16L5S364T	5 824	20	200	40	280	3 630	200	0.44	10 m×20 m	104	52.0
广山	2013	16L5S364T	5 824	20	200	40	280	3 630	200	0.44	10 m×20 m	104	52.0
兴旺	2014	16L5S364T	5 824	20	200	40	280	3 630	200	0.44	10 m×20 m	104	52.0
青蒲	2016	20L6S432T	8 640	20	240	40	240	4 310	240	0.56	10 m×20 m	180	90.0

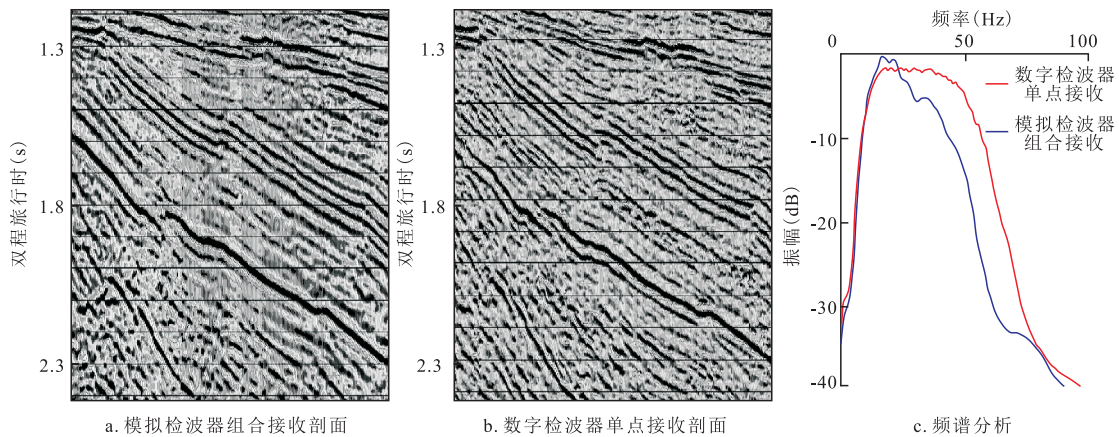


图4 模拟检波器与数字检波器接收叠加剖面与频谱对比

Fig. 4 Seismic profile and spectrum comparison of single-shoot records received by analog geophones and digital geophones

次,开展循环地表一致性能量补偿处理,提取能量补偿因子,消除不同期次三维在横向的能量差异;最后,采用剩余振幅补偿处理技术,细化调整,进行辅助性振幅补偿处理,确保地震振幅间相对变化能够反映地下地质体的横向特征。

### 2) 频率一致性处理

频率一致性处理的主要目的是消除非地质因素造成的炮、道间频率的差异,实现同相叠加,提高资料的信噪比与波形的保真性。采用地表一致性反褶积技术,在共偏移距、共炮点、共检波点和共反射点4个域集求取反褶积因子,保证反褶积后地震子波的统一。通过地表一致性反褶积处理实现频率一致,可实现同相叠加,提高资料信噪比与分辨率。

### 3) 相位一致性处理

一是针对不同震源资料间由于子波差异导致相位特征差异很大而无法同相叠加的问题,采用匹配滤波方法,选取资料信噪比较高的重叠段作为参考段,通过分析求取匹配滤波器,以信噪比最高区域的炸药震源记录为标准,对其他震源记录进行匹配滤波处理,消除子波相位差;二是针对不同块三维间存在相位时差问题,选取浅、中、深多套强反射波组为标志层,采用互相关技术识别时差并校正。图5为子波一致性处理前后对比剖面,处理前不同震源剖面间存在明显的相位差和时差,处理后两种震源剖面主要标志层反射特征基本一致。

### 4) 面元属性规则化处理

受苏北盆地复杂水网、城镇地表影响,造成地震

采集炮点、检波点变观严重,同一块三维地震覆盖次数、方位角及偏移距等面元属性空间差异大,甚至出现空洞,造成波场空间采样的不均匀性;不同期次采集三维间面元网格、覆盖次数、观测方位、偏移距等观测系统属性差异较大,影响整体偏移效果。

主要采用匹配追踪傅里叶(MPFI)多维数据规则化技术,开展数据规则化处理。该技术是基于反假频傅里叶变换,通过线域、点域、时间域、炮检距域、方位角域五维空间的插值和重构实现数据规则化,适用于任意不规则观测系统,适应假频严重数据及复杂构造,具有较好的保真度和补缺口能力<sup>[11]</sup>。考虑溱潼凹陷二次采集高精度三维中的华庄、广山、兴旺3块三维地震的观测系统一致(表1),并占总面积51%,处理中以上述3块三维的观测系统为基准进行数据规则化。

### 1.2.2 提高信噪比处理

溱潼凹陷原始单炮记录上干扰波类型较多,主要有面波、线性干扰、50 Hz工业电干扰、强能量异常振幅随机干扰、风噪以及层间多次波干扰,严重影响地震信噪比、降低分辨率。采用了分步多域组合去噪的思路进行噪声压制。针对面波、线性干扰等规则干扰,利用均值加权方法提取相干干扰,在原始记录中将噪音减去;针对工业电干扰,采用单频自适应去噪方法在全区记录中减去50 Hz干扰的噪音记录;针对强能量异常振幅随机干扰,采用地表一致性振幅分析方法,从共炮点域、共检波点域分析地震信号

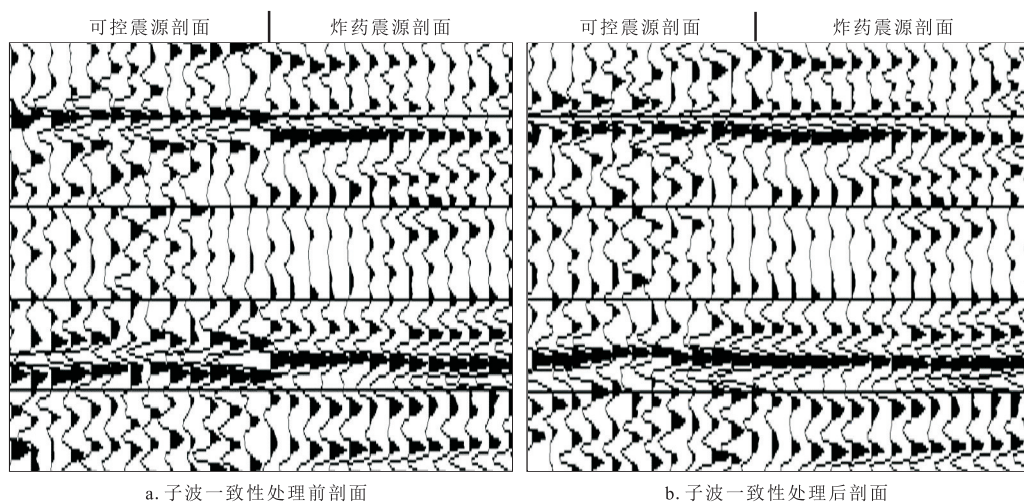


图5 子波一致性处理前后剖面对比

Fig. 5 Profile comparison before and after wavelet consistency processing

的最大振幅、均方根振幅识别异常振幅并进行压制;针对风噪等高频异常噪音,采用宽窗口、分频带压制的方法,识别噪声主要分布频带进行压制;针对层间多次波干扰,利用多次波与一次波的正常时差以及倾角差异<sup>[12-14]</sup>,采用高分辨率抛物线 Radon 变换法进行滤波,以及利用多次波存在剩余时差而不能同相叠加的特点,采用共中心点叠加技术进一步压制多次波。在去噪过程中,注重在炮域、共检波点域、CMP域等进行噪声的识别和压制,优先压制频率、速度以及分布区域相对规则的噪声,再对随机噪声进行精细的压制;采用残差法加强去噪质控,确保噪音压制不损伤有效信号<sup>[15]</sup>。

### 1.2.3 提高分辨率处理

联合采用地表一致性反褶积与井控反Q滤波技术,开展提高分辨率处理。地表一致性反褶积的目的是压缩子波以提高地震垂向分辨率,通过自相关时窗、白噪系数、预测距离、算子长度等参数优化,在保持资料波组特征及信噪比前提下,拓宽频谱。溱潼凹陷地表对地震波的吸收衰减作用明显,对此进一步开展井控时变反Q滤波处理,综合利用测井信息、近地表调查资料以及地震初至波幅值,求取适用于本区的Q因子,在构造模型的约束下进行井控反Q滤波处理。提高分辨率处理应遵循以下原则:①在压缩子波、提高分辨率的同时,子波应保持较高的相似性,保持波组特征不被破坏;②以分辨率与信噪比达到最佳平衡为原则,避免过多高频噪音的不利影响,确保资料保真度;③在子波压缩、频率补偿时尽量恢复激发子波的频率成分,且使其不超过激发子波的频带宽度,避免引入假频。通过地表一致性反

褶积与井控反Q滤波技术的串联组合应用,目的层地震主频提高5~10 Hz,频带拓宽10~20 Hz(图6)。

### 1.2.4 逆时叠前深度偏移

速度建模由常规建模方法发展到构造约束网格层析速度建模,偏移成像由叠后时间偏移、叠前时间偏移发展到逆时叠前深度偏移成像,提升了成像效果。

#### 1) 构造约束网格层析速度建模

地震层析反演速度分析就是利用层析反演技术对地震道集中存在的剩余时差进行反演处理,求取速度模型更新量。常规的网格层析速度建模方法,通常只能获得大尺度较为平滑的速度模型,适用于构造平缓、断裂不发育区,该方法得到的速度模型很难描述出速度突变的特征,导致在速度快速变化的复杂断块或陡倾角构造区的成像效果不好,对此,提出了构造约束网格层析速度建模。首先,采用叠前时间偏移的速度模型作为叠前深度偏移的初始速度模型;其次,利用提高信噪比处理后的CRP(共反射点道集)道集进行剩余曲率拾取,确保剩余曲率拾取的范围可覆盖全部有效偏移距;再次,先采用无构造约束的网格层析反演技术,进行速度迭代优化,将速度的横向变化规律大致刻画清楚;最后,基于测井、构造解释成果建立精细地质构造模型,用于提供构造约束条件,同时综合利用构造倾角、方位角等信息,由浅至深逐层进行构造约束下的网格层析速度反演,精细刻画出速度的空间变化特征。采用相同道集条件下,较常规速度建模叠前深度偏移剖面,构造约束网格层析速度建模偏移剖面信噪比提升明显,复杂小断块的成像精度明显改善(图7)。

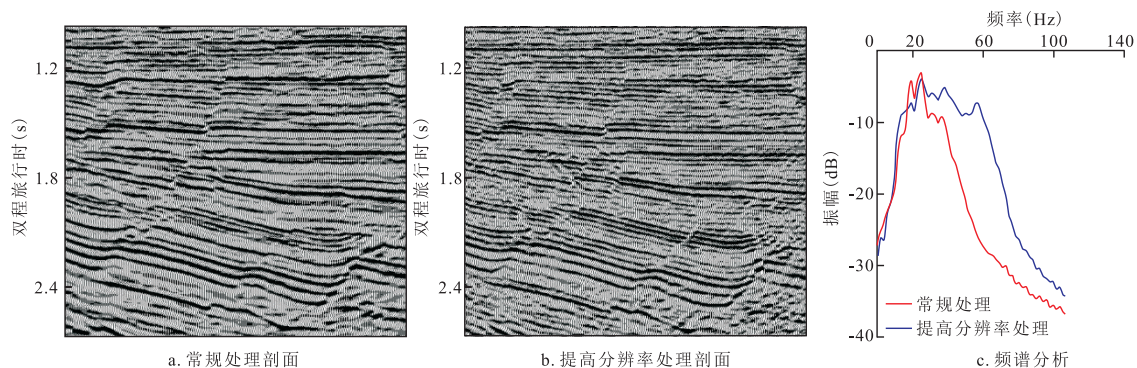


图6 提高分辨率处理前后剖面与频谱对比

Fig. 6 Comparison of seismic profile and spectrum before and after improved resolution processing

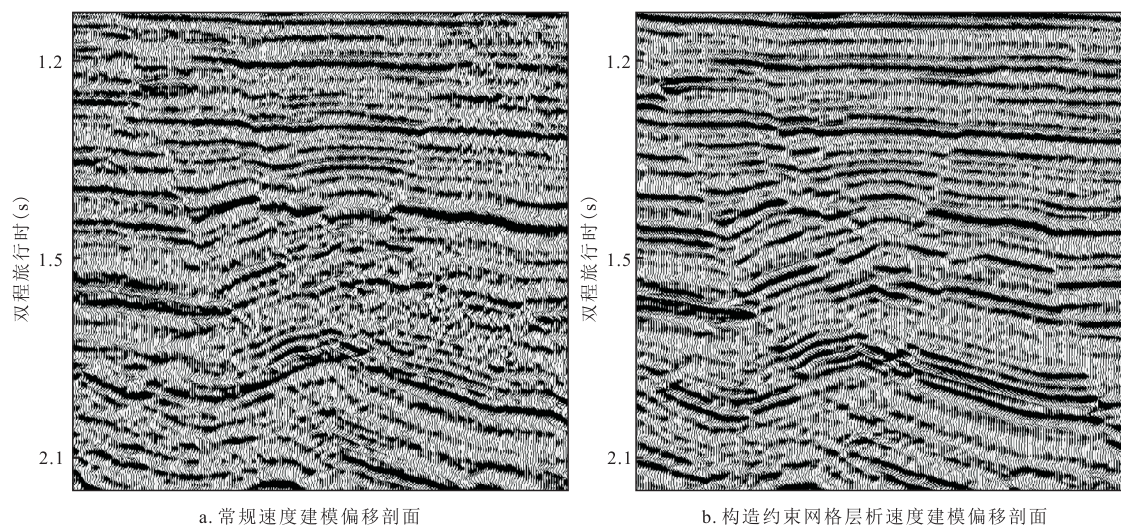


图7 常规速度建模与网格层析速度建模偏移剖面对比

Fig. 7 Comparison of migration profiles between conventional velocity modeling and mesh tomography velocity modeling

## 2) 逆时叠前深度偏移

基于波场延拓的逆时叠前深度偏移(RTM)采用描述地震波在复杂介质中传播过程的波场延拓算子进行偏移成像,具有以下优势:①可使高陡地层和反转构造精确成像;②适应强烈的纵、横向速度变化;③能处理多路径问题以及由速度变化引起的聚焦或焦散效应;④可利用多种波场信息(回折波、棱柱波、多次波、折射波等)成像;⑤具有很好的振幅保持特性<sup>[16-17]</sup>。

溱潼凹陷断阶带构造十分复杂,断裂发育、断块小、断裂关系复杂、断面倾角大,与Kirchhoff叠前深度偏移相比,逆时叠前深度偏移剖面高陡断面成像效果更好、构造格局更加清晰,提高地震可解释性(图8)。

## 1.3 地震解释技术

随着溱潼凹陷勘探目标由简单构造油藏向复杂小断块油藏、岩性油藏勘探的转变,发展了低序级断层识别和薄砂体预测地震解释技术。

### 1.3.1 低序级断层识别

溱潼凹陷地层接触关系及断裂系统复杂,低序级断层识别及组合困难。采用了基于地震正演分析与井震结合的低序级断层地震描述方法。具体思路为:一是建立不同断距、不同砂体厚度条件下的地质模型,在不同主频条件下开展正演模拟,综合对比分

析地震正演结果与井上钻遇断点处地震反射特征,建立低序级断层地震识别标志,指导识别无井区低序级断层;二是综合应用相干分析、曲率分析、频谱分解等技术,加强断块群刻画,提高低序级微小断层识别精度;三是井控多层位追踪与断层空间叠合校验相结合精细刻画断层空间位置及断面形态。

### 1.3.2 薄砂层地震预测

利用小波分频成像改善地震资料视分辨率,结合正演模拟建立夹角外推量板,精细刻画砂岩尖灭线、地层尖灭线;利用地震相寻找有利相带,通过地震属性与地层、含油气特征等方面的关系来识别岩性圈闭有利分布区带;针对砂体厚度薄、砂岩与泥岩波阻抗叠置严重、常规波阻抗叠后反演分辨率低的问题,采用自然电位作为特征曲线模拟,以地震波形特征控制反演技术为主要手段<sup>[18-22]</sup>,开展薄砂体储层预测,砂体厚度识别能力由原来的18 m提高至10 m。图9为溱潼凹陷过J3井自然电位一波形指示模拟剖面,预测该井处阜三段砂体总有效厚度为12 m,实际钻遇油层10.6 m。

## 1.4 勘探进展与应用效果

“十二五”期间,利用二次采集高精度三维资料,溱潼凹陷西部斜坡带帅垛—陈家舍地区戴一段超覆尖灭型油藏取得重大发现,帅1井试获日产油32 t,陈2井试获日产油61 t的高产;西部斜坡带阜三段

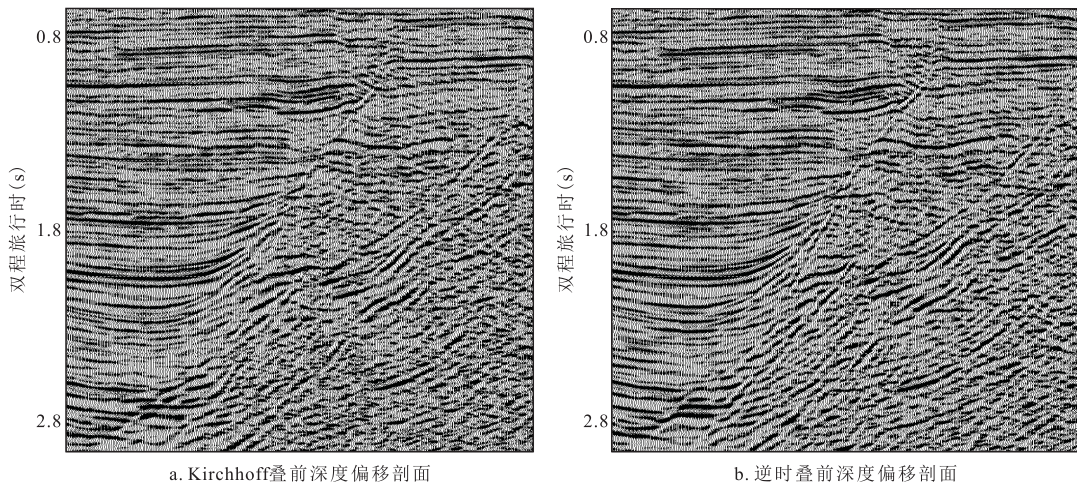


图8 Kirchhoff叠前深度偏移与逆时叠前深度偏移剖面对比

Fig. 8 Comparison of Kirchhoff prestack depth migration and reverse-time prestack depth migration profiles

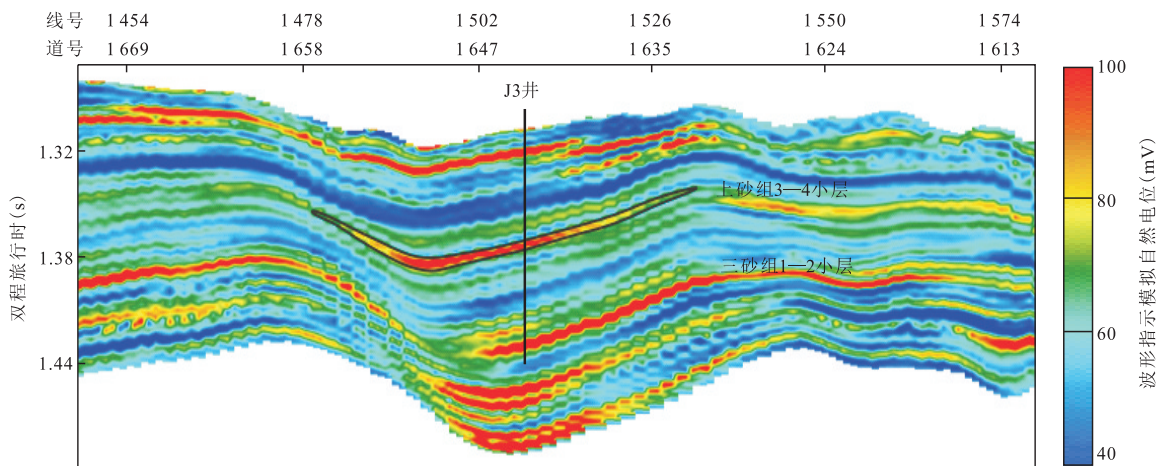


图9 溱潼凹陷过J3井自然电位—波形指示模拟剖面

Fig. 9 SP-seismic waveform indication inversion profile through Well-J3 in Qintong Sag

构造-岩性油藏发现并落实两个千万吨级富集区,俞垛—华庄地区阜三段落落实含油面积 $15.14\text{ km}^2$ ,提交控制石油地质储量 $1\ 348\times 10^4\text{ t}$ ,帅垛地区阜三段新增预测石油地质储量 $1\ 589.55\times 10^4\text{ t}$ 。“十三五”期间,通过地震提高分辨率目标处理、波形指示模拟研究,溱潼凹陷西部斜坡带落实南华—仓吉地区阜三段千万吨级岩性油藏优质储量,提交探明储量超千万吨;针对西部斜坡带蔡西地区落实一系列垛一段构造-岩性圈闭,圈闭资源量近千万吨;加强小断层刻画,重新梳理东斜坡泰州组构造特征,落实一系列泰州组圈闭,圈闭资源量近千万吨。实际应用揭示,二次采集三维地震精度明显提升,识别最小圈闭面积 $0.1\text{ km}^2$ ,

最小断层断距 $15\text{ m}$ ,最小储层厚度 $10\text{ m}$ 。

## 2 存在问题

随着油气勘探工作的持续深入,目标更加复杂、隐蔽化。现有地震已不能满足当前勘探需求,主要存在两方面不足:①地震分辨率待进一步提升,纵向上厚度小于 $10\text{ m}$ 的砂体储层预测可靠性低、幅度小于 $40\text{ m}$ 的微幅构造不落实,横向上 $10\text{ m}$ 以下断距的断层与地层岩性尖灭点的识别难度大、面积小于 $0.1\text{ km}^2$ 的圈闭边界刻画不准确;②断阶带复杂构造区地层反射波组杂乱,断裂关系不清,导致构造落实程度低。

分析认为,以下因素限制了二次采集三维高信噪比、高分辨率及保幅处理的效果:

1) 多期次采集间数据一致性差。二次三维采集历时10 a分7块完成,观测系统、激发与接收因素、施工工艺等差别大,造成数据间一致性差,影响地震保幅性与分辨率。

2) 原始地震采集资料频带不足。2007—2012年,采用了模拟检波器大基距组合接收,原始采集单炮主频低、频带窄;2013年及以后采用数字检波器单点接收,存在噪声压制能力弱的缺点,原始单炮信噪比较低,尤其是高频段干扰严重。

3) 地震反射波场采样密度不足。二次采集三维平均炮道密度40万道/km<sup>2</sup>,平均面元网格272 m<sup>2</sup>,纵横比以0.44为主,地下反射波场的连续空间采样密度不足。

### 3 下步攻关方向

针对溱潼凹陷当前勘探开发面临的复杂地质问题,应坚持采集、处理、解释一体化攻关思路,首先开展新一轮地震采集技术攻关,使原始资料能满足高信噪比、保幅保真、高分辨率处理的需求,再进一步研究新的处理及解释方法,提升复杂隐蔽油藏的识别与描述精度。

#### 1) 地震采集攻关方向

接收工艺方面,应探索无线节点仪单点接收技术。无线节点仪接收具有轻便可靠、布设简单、施工效率高等优势,可实现真正意义上的小道距、小接收线距接收采集;同时单点接收技术可降低波场混叠效应,提高分辨率与各道间的一致性。

激发工艺方面,一是探索宽频激发技术,综合多手段表层结构调查,优选最佳激发岩性,提高地震激发能量与频带宽度;二是开展多震源(可控震源、电火花震源、炸药震源、气枪震源等)在水网、城镇地表区的综合应用,提高炮点布设均匀性与面元属性一致性。

观测系统方面,应开展小面元、高覆盖次数、高炮道密度、宽方位地震观测技术的应用研究。小面元利于提高地震反射波场空间采样的连续性,降低混叠效应、提高地震纵横向分辨率;高覆盖次数是提高资料信噪比的重要保障,考虑无线节点仪单点接收压噪能力弱的问题,需确保足够覆盖次数;高炮道

密度利于提高波场采样的充分性,考虑溱潼凹陷地表条件异常复杂,井炮布设难度大,应大幅缩小检波线距,以提高道密度为主;宽方位观测利于提高地下复杂波场的采样能力,利于火成岩下覆构造、断阶带高陡断面的波场获取,同时获取丰富的各向异性信息,是后期地震各向异性精细成像、裂缝及烃类检测的基础。

#### 2) 地震处理攻关方向

开展炮检距向量片(OVT域)全方位速度建模与精确成像技术研究,保留数据的方位角信息,消除方位各向异性的影响,提高成像精度;开展Q偏移成像,通过有效Q场的求取、Q层析反演、Q叠前深度偏移等处理技术的应用,提高地震分辨率;建立地震保幅处理的评价准则与质量控制体系,确保成果保幅保真。

#### 3) 地震解释攻关方向

开展五维数据解释,加强储层方位AVO(振幅随偏移距的变化)特征分析、方位各向异性岩石物理研究、优势方位地震解释、各向异性裂缝预测以及地应力场信息预测,提高储层预测精度,加强圈闭评价,提高钻井成功率;在实现高精度深度域构造成像基础上,开展深度域地震正演模拟、构造解释,落实隐蔽、微幅构造,并探索深度域地震反演及储层预测工作。

## 4 结论

1) 中国石化华东油气分公司溱潼凹陷二次采集高精度三维地震攻关取得了积极进展,建立了“全数字检波器单点宽频接收、中等面元网格(面元边长10~20 m)、较高覆盖次数”三维采集方法,以连片处理、提高信噪比处理、提高分辨率处理、构造约束网格层析速度建模与逆时叠前深度偏移成像等为主的处理技术体系,以自然电位—波形反演为核心的薄层砂岩预测技术,提高了地震勘探精度,支撑了溱潼凹陷从简单构造油藏到复杂小断块油藏,再到构造-岩性复杂隐蔽油藏勘探的转变。

2) 多期次采集数据差异大、原始资料频带窄、波场采样密度低等是限制地震高信噪比、高分辨率及保幅处理效果的主要因素。

3) 新一轮地震攻关,应探索无线节点仪单点接收、宽频带地震激发以及小面元、高覆盖次数、高炮道密度、宽方位地震观测技术的应用研究;开展全方位速度建模与精确成像、Q偏移成像以及保幅处理方

法研究;推进多维数据解释、深度域解释与反演,提高储层预测与圈闭描述精度。

#### 参考文献

- [1] 李东海, 咎灵, 黄文欢, 等. 溱潼凹陷西斜坡阜三段隐蔽油藏勘探开发一体化实践[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 281-290.  
LI Donghai, ZAN Ling, HUANG Wenhuan, et al. Exploration and development integration practice of subtle reservoir of 3rd member of Funing Formation in western slope of Qintong depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 281-290.
- [2] 吴群, 余文端, 骆卫峰, 等. 苏北盆地溱潼凹陷岩性油藏勘探成果及启示[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 99-107.  
WU Qun, YU Wenduan, LUO Weifeng, et al. Achievements and recognitions of exploration in lithologic reservoirs in Qintong Sag, North Jiangsu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 99-107.
- [3] 宋瑞有, 陈奎, 李安琪, 等. 天然气水合物裂隙输导系统地震表征[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 136-143.  
SONG Ruiyou, CHEN Kui, LI Anqi, et al. Representation of gas hydrate fracture migration system by seismic[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 136-143.
- [4] 刘丽媛, 杨宏伟, 李九生, 等. 地层切片技术在油藏开发储层描述中的应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(3): 320-323.  
LIU Liyuan, YANG Hongwei, LI Jiusheng, et al. Application of stratigraphic slice in reservoir exploration and interpretation[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2016, 23(3): 320-323.
- [5] 张生, 黄捍东, 张金伟, 等. 车西洼陷西北陡坡沙三下亚段地震相控反演砂砾岩储层预测[J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 210-220.  
ZHANG Sheng, HUANG Handong, ZHANG Jinwei, et al. Prediction of sand-conglomerate reservoirs via seismic facies controlled inversion in the Lower Es-3 of the northern steep slope of the Chexi Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 210-220.
- [6] 郭元岭, 刘翠荣, 李红梅, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷油藏地震描述有效性技术研究[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 121-127.  
GUO Yuanling, LIU Cuirong, LI Hongmei, et al. Effective techniques for seismic description of reservoirs in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 121-127.
- [7] 李珊珊, 姜鹏飞, 刘磊, 等. 四川盆地高磨地区寒武系沧浪铺组碳酸盐岩颗粒滩地震响应特征及展布规律[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(4): 22-31.  
LI Shanshan, JIANG Pengfei, LIU Lei, et al. Seismic response characteristics and distribution law of carbonate shoals of Cambrian Canglangpu Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(4): 22-31.
- [8] 尚新民, 芮拥军, 石林光, 等. 胜利油田高密度地震探索与实践[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1545-1553.  
SHANG Xinmin, RUI Yongjun, SHI Linguang, et al. Exploration and practice of high-density seismic survey in Shengli Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1545-1553.
- [9] 翟桐立, 张洪军, 祝文亮, 等. 全方位高密度单点接收地震采集技术[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 56-63.  
ZHAI Tongli, ZHANG Hongjun, ZHU Wenliang, et al. Full-azimuth high-density single-point receiving technology for seismic acquisition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 56-63.
- [10] 宋明水, 尚新民, 王延光, 等. 罗家单点高密度三维地震与效果[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1089-1095.  
SONG Mingshui, SHANG Xinmin, WANG Yanguang, et al. Single-point high-density 3D seismic and its application in Luoja area[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1089-1095.
- [11] 刘田田. 五维规则化技术在溱潼断阶带地震资料处理中的应用[J]. 地质学刊, 2021, 45(2): 168-176.  
LIU Tiantian. Application of five-dimensional regularization in seismic data interpretation of Qintong step-fault area[J]. Journal of Geology, 2021, 45(2): 168-176.
- [12] 刘田田, 薛野, 唐新媛, 等. QT地区层间多次波识别与压制方法[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(6): 121-125.  
LIU Tiantian, XUE Ye, TANG Xinyuan, et al. The identification and suppression methods of internal multiples in QT area[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(6): 121-125.
- [13] 罗玮. 保真保幅处理技术在溱潼凹陷地区的应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2020, 33(6): 4-7.  
LUO Wei. Application of fidelity-and amplitude-preserving processing technology in Qintong Depression[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2020, 33(6): 4-7.
- [14] 戴晓峰, 徐右平, 甘利灯, 等. 川中深层—超深层多次波识别和压制技——以高石梯—磨溪连片三维区为例[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(1): 54-64.  
DAI Xiaofeng, XU Youping, GAN Lideng, et al. Deep & ultra-deep multiple suppression in Central Sichuan: An example of Gaoshiti-Moxi[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(1): 54-64.
- [15] 尚新民. 地震资料处理保幅性评价方法综述与探讨[J]. 石油物探, 2014, 53(2): 188-195.  
SHANG Xinmin. The summary and discussion of amplitude preservation evaluation method in seismic data processing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(2): 188-195.
- [16] 王瑞贞, 王金宽, 晏丰, 等. 共和盆地干热岩地震勘探技术研究[J]. 非常规油气, 2022, 9(4): 9-15.  
WANG Ruizhen, WANG Jinkuan, YAN Feng, et al. Research on seismic exploration technology of hot dry rock in Gonghe Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(4): 9-15.
- [17] 杨勤勇, 段心标. 最小二乘偏移研究现状及发展趋势[J]. 石油物探, 2018, 57(6): 795-802.  
YANG Qinyong, DUAN Xinbiao. Research status and development trend of least square migration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(6): 795-802.
- [18] 陈彦虎, 陈佳. 波形指示反演在煤层屏蔽薄砂岩分布预测中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1254-1261.

(下转第253页)

- Drilling & Production Technology, 2022, 24(S1): 60-63.
- [8] 何更生. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社, 2006.  
HE Gengsheng. Petrophysics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [9] 罗英俊, 万仁溥. 采油技术手册[M]. 北京:石油工业出版社, 2005.  
LUO Yingjun, WAN Renpu. Handbook of oil production technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [10] 李颖川. 采油工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.  
LI Yingchuan. Oil production engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [11] 姜民政, 李葳, 徐书凡, 等. 抽油机井杆柱系统防偏磨装置设计与优化[J]. 石油机械, 2019, 47(8): 112-118.  
JIANG Minzheng, LI Wei, XU Shufan, et al. Design and optimization of anti-eccentric device for rod string system in pumping wells[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(8): 112-118.
- [12] 孔令维. 水平井深抽配套工艺技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(3): 135-138.  
KONG Lingwei. The matching engineering technology of deep pumping for horizontal wells[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2011, 30(3): 135-138.
- [13] 郑小雄. 小泵深抽技术在高气液比低产液井上的研究与应用[J]. 石化技术, 2016, 23(7): 164.  
ZHENG Xiaoxiong. Applied study of depth-pumping with small diameter pump in high gas fluid ratio and low production wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(7): 164.
- [14] 余铁静, 侯双亮, 李鹏, 等. 稠油强启闭抽油泵的研制与应用[J]. 石油机械, 2014, 42(7): 89-91.  
YU Tiejing, HOU Shuangliang, LI Peng, et al. Development and application of forced-open/close pump for heavy oil[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(7): 89-91.
- [15] 李枝梅. 低渗油藏有杆泵深抽采油配套技术[J]. 特种油气藏, 2005, 12(4): 76-78.  
LI Zhimei. Deep pumping by sucker of rod in low permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005, 12(4): 76-78.
- [16] 方达科, 董长银, 黄亮, 等. 多层滤网机械防砂完井筛管动态腐蚀试验研究[J]. 石油机械, 2020, 48(1): 12-19.  
FANG Dake, DONG Changyin, HUANG Liang, et al. Dynamic corrosion experiment of multi-layer metal mesh screen for sand control completion[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 12-19.
- [17] 李学良. 化学防砂和机械防砂综合应用[J]. 石化技术, 2015, 22(8): 143.  
LI Xueliang. Integration of chemical and mechanical sand control[J]. Petrochemical Technology, 2015, 22(8): 143.
- [18] 张正禄, 刘运荣, 李红, 等. 金属隔膜防砂抽油泵的研制与应用[J]. 石油机械, 2013, 41(12): 121-123.  
ZHANG Zhenglu, LIU Yunrong, LI Hong, et al. Development and application of metal diaphragm sand control subsurface pump[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(12): 121-123.
- [19] 李书应, 顾文忠. 小泵深抽技术在低渗油藏中的应用研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 70-73.  
LI Shuying, GU Wenzhong. Applied study of depth-pumping with small diameter pump in low-permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(6): 70-73.
- [20] 吴克柳, 李相方, 樊兆琪, 等. 低渗特低渗油藏非稳态油水相对渗透率计算模型[J]. 中国石油大学学报, 2013, 37(6): 76-81.  
WU Keliu, LI Xiangfang, FAN Zhaoqi, et al. Unsteady-state model for calculating oil-water relative permeability for reservoirs with low and ultra-low permeability[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(6): 76-81.

(编辑 郭群)

(上接第172页)

- CHEN Yanhu, CHEN Jia. The application of seismic meme inversion to thin sand distribution prediction under coal shield [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1254-1261.
- [19] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 142-145.  
GAO Jun, BI Jianjun, ZHAO Haishan, et al. Seismic waveform inversion technology and application of Thinner reservoir prediction[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 142-145.
- [20] 孟美辰. 漆潼凹陷西斜坡构造-岩性圈闭识别技术及应用效果[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 46-52.  
MENG Meichen. Identification technology of structural-lithologic traps and its application effect in the western slope of Qintong Sag, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(1): 46-52.
- [21] 付蕾, 张本健, 曹正林, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 85-93.  
FU Lei, ZHANG Benjian, CAO Zhenglin, et al. Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 85-93.
- [22] 常少英, 刘玲利, 崔钰瑶, 等. 浅水三角洲薄砂层地震沉积表征技术: 以准噶尔盆地芳草湖地区清水河组为例[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 139-147.  
CHANG Shaoying, LIU Lingli, CUI Yuyao, et al. Seismic sedimentary characterization of thin sand layers of shallow water deltas: A case study of Qingshuihe Formation in Fangcaohu area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 139-147.

(编辑 柳超超)