

• 综述 •

文章编号:1000-7210(2024)01-0241-16

# 中国石油陆上高难度探区地震勘探突破与启示

赵邦六<sup>1</sup>,董世泰<sup>\*2</sup>,刘依谋<sup>1</sup>,梁菁<sup>2</sup>,马晓宇<sup>2</sup>

(1. 中国石油油气和新能源分公司,北京 100007; 2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:** 目前,中国石油油气勘探开发由隆起区向盆地斜坡、湖盆中心、盆地周缘不断拓展,目的层由中浅层向深层—超深层、对象由常规向非常规油气不断扩展,勘探开发面临探区更复杂、目标更隐蔽、作业难度更高等难题。针对陆上高难度探区地震勘探,中国石油强化地震资料采集、处理、解释等技术攻关,形成了“两宽两高(宽方位、宽频、高密度、高覆盖)”采集、“双高(高分辨率、高保真)”处理、真地表成像处理、叠前储层定量预测等技术系列,支撑了高难度探区勘探持续突破和储量长期稳定增长,实现油气产量稳中有升。以上成果的取得,得益于物探技术理念的转变,提出了“油气在地质家的脑海里,更藏在高品质的地震资料里”的找油找气新理念;得益于把握住了陆上地震勘探技术突破的牛鼻子,提出了“目标在深层,问题在浅层,关键是速度,核心是精细”的技术思路;得益于管理思路的创新与转变,建立了完整的物探技术管理体系,使各探区地震资料品质大幅度全面提升。这种认识上的突破和管理创新将指导下一步陆上油气地震勘探技术向全方位、高密度、全数字、多参数、自动化、智能化、全波形、全波场等方向发展。

**关键词:** 陆上,双复杂,地震勘探,智能化地震,全波场

中图分类号:P631

文献标识码:A

DOI:10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2024.01.018

## Breakthrough and inspiration in seismic exploration of highly difficult exploration area on land of CNPC

ZHAO Bangliu<sup>1</sup>, DONG Shitai<sup>2</sup>, LIU Yimou<sup>1</sup>, LIANG Jing<sup>2</sup>, MA Xiaoyu<sup>2</sup>

(1. Petroleum and New Energy Company, CNPC, Beijing 100007, China; 2. RIPED, CNPC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** At present, CNPC's oil and gas exploration and development are expanding from the uplift area to the basin slope, lake basin center, and basin periphery. The target layer is expanding from medium and shallow layers to deep and ultra-deep layers, and the object is expanding from conventional oil and gas to unconventional oil and gas. The exploration and development are faced with more complicated exploration areas, more hidden targets, and more difficult operations. In response to the problems of seismic exploration in highly difficult exploration areas on land, CNPC has strengthened technical research on seismic acquisition, processing, and interpretation and formed a series of technologies such as 'acquisition of wide azimuth, broadband, high density, and high fold', processing of 'high resolution and high fidelity', true surface imaging processing, and quantitative prediction of pre-stack reservoirs, which have supported continuous breakthroughs in exploration of highly difficult exploration areas and long-term stable growth of reserves, and achieved stable and rising oil and gas production. The above achievements benefit from the change in the concept of geophysical exploration technology, which brings the new concept of oil and gas exploration, 'oil and gas are not only in the mind of geologists but also hidden in high-quality seismic data'. In addition, thanks to the grasp of the breakthrough of seismic exploration technology on land, the technical idea of 'the target is located at deep layers; the problem emerges at the near-surface; the velocity serves as the key, and the refinement remains as the core' is proposed. Benefiting from the innovation and transformation of management ideas, a complete geophysical exploration technology management system has been established, which greatly improves the quality of seismic data in each exploration area. The breakthrough in understanding and management innovation will guide the development of onshore oil and gas seismic exploration technology to the all-directional, high-density, all-digital, multi-

\* 北京市海淀区学院路 20 号中国石油勘探开发研究院,100083。Email:shitai\_dong@petrochina.com.cn

本文于 2023 年 8 月 23 日收到,最终修改稿于同年 11 月 7 日收到。

parameter, automated, intelligent, full-waveform, full-wave field, and other directions.

**Keywords:** on land, double complex, seismic exploration, intelligent seismic, full-wave field

赵邦六,董世泰,刘依谋,等. 中国石油陆上高难度探区地震勘探突破与启示[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(1): 169-184.

ZHAO Bangliu, DONG Shitai, LIU Yimou, et al. Breakthrough and inspiration in seismic exploration of highly difficult exploration area on land of CNPC[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(1): 169-184.

## 0 引言

中国地质结构具有三大板块、三大构造域多旋回构造演化的特征,造就了多种类型的叠合沉积盆地,包括克拉通+前陆、断陷+坳陷、前陆+坳陷叠合盆地。大型叠合盆地是油气资源分布与勘探开发的主体<sup>[1]</sup>。根据第四次资源评价,全国石油资源量约为 $1206 \times 10^8 \text{ t}$ ,天然气约为 $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中中石油矿权内石油资源量为 $651 \times 10^8 \text{ t}$ ,占全国的54%,天然气为 $116 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占全国的56%。全国石油天然气探矿权面积为 $280 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,中石油为 $95 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占34.1%。中石油矿权以陆地为主体,占中石油总矿权的82%。陆上油气资源主要分布于渤海湾、松辽、鄂尔多斯、塔里木、四川、准噶尔、柴达木、吐哈、玉门、二连等盆地。勘探领域包括地层一岩性、前陆、海相碳酸盐岩、火山岩、潜山、致密油气、页岩油气、煤层气、煤岩气等领域。

地层一岩性领域主要包括富油气凹陷、老油区、中浅层等,以油区滚动挖潜为主,是稳产增产最为现实、潜力最大的领域,主要勘探对象包括渤海湾、鄂尔多斯、松辽、准噶尔盆地等;前陆领域主要包括复杂构造区,是石油天然气储量增长的潜力领域,主要勘探对象包括塔里木、准噶尔、柴达木、四川盆地周缘、鄂尔多斯西缘等;海相碳酸盐岩也是石油天然气储量增长的潜力领域,主要包括塔里木、四川、鄂尔多斯盆地等;火山岩、潜山在各盆地均有分布;致密油气、页岩油气、煤层气是陆上油气勘探的成长性领域,具有分布面积广、勘探领域前景大等特点。

陆上油气勘探除领域广泛外,储层类型复杂多样,包含了相变较快的陆相沉积、沉积相对稳定的海相沉积地层,由于受三大构造域多旋回构造演化的影响,地下结构复杂,空间结构变化快,加上陆上地表条件复杂,导致陆上油气地震勘探面临野外数据采集施工困难、地震资料信噪比低、地震成像精度低、圈闭描述难度大等问题。针对陆上地震勘探面临的难题,中

石油不断转变工作思路,转变物探技术应用理念,提出了“提高地震资料品质是找油找气的关键”的新认识,不断拓展技术管理认知,强化技术应用基础,强化浅表层研究,强化速度建模研究,指导开展针对性物探技术攻关,不断提高地震资料品质,提高了复杂目标成像精度和圈闭落实精度,为提高陆上油气勘探开发成效奠定了扎实的基础。

本文剖析了陆上双复杂探区勘探特点及面临的技术难题,介绍了中石油针对陆上双复杂探区地震勘探技术攻关主要成效及应用实例,阐述了在双复杂探区取得如此成效的主要启示与认识,针对未来陆上复杂区油气勘探,提出了物探技术发展主要方向。

## 1 陆上双复杂探区勘探特点

### 1.1 双复杂探区基本特征

双复杂是陆上油气勘探的基本特点。一是地表条件复杂,包括了东部水网、城镇、村镇、厂矿、工业园区等大型障碍区,中西部复杂山地、戈壁、沙漠、黄土区,造成近地表结构复杂。静校正问题突出,浅层速度模型反演精度低,地形、地貌变化剧烈,激发、接收条件横向变化大,地表一致性问题突出;铁路、公路等交通网纵横,各种干扰严重,有些干扰规律性差,造成原始资料信噪比低。塔西南、川西北、柴西南、吐哈山前等复杂山地信噪比极低,成为地震勘探久攻不克的领域<sup>[2]</sup>。如准噶尔南缘地表发育低速砾岩和高速砾岩,低速砾岩覆盖范围较大,厚度变化大,呈南厚北薄(200~500 m)分布,速度大约为1700~2400 m/s,高速砾岩分布同样也具有南厚北薄(0~2500 m)的特征,在北部尖灭,横向变化快,速度为2800~4000 m/s,砾石层底界面难以准确识别。砾岩的存在以及厚度的变化、山体区的影响,使得地震波能量下传和接收困难,且高大山体、河流及周缘表层结构变化快,使得地震勘探面临静校正精度低、表层速度结构复杂、成像难度大等问题。

二是地下结构复杂,包括东部断距较小(米级)的

0.1 km<sup>2</sup>级别的复杂断块、微幅度构造、米级薄储层、宽度几十至几百米的河道、0.1 km<sup>2</sup>级别的潜山等小尺度地质体;中西部走滑断裂、逆掩推覆体、盐相关构造等复杂构造;低孔、低渗复杂岩性,复杂碳酸盐岩、火山岩等,勘探目标普遍具有尺度小、隐蔽性强等特点(图 1)。如准噶尔南缘高泉地区速度结构复杂,表层高速砾岩厚度、速度变化快,塔西河组发育塑性膏

岩速度异常体,安集海河组发育低速泥岩,使得时间与深度域成像构造形态产生“跷跷板”现象,圈闭形态及高点准确落实难度大;且多期构造运动叠加,上组合多组同相轴交叉使得构造解释困难,下组合控藏小断裂识别及组合难度大;优质储层薄、埋深大(超过 6000 m),薄储层识别预测难度大,地质目标具有典型的隐蔽型特征。

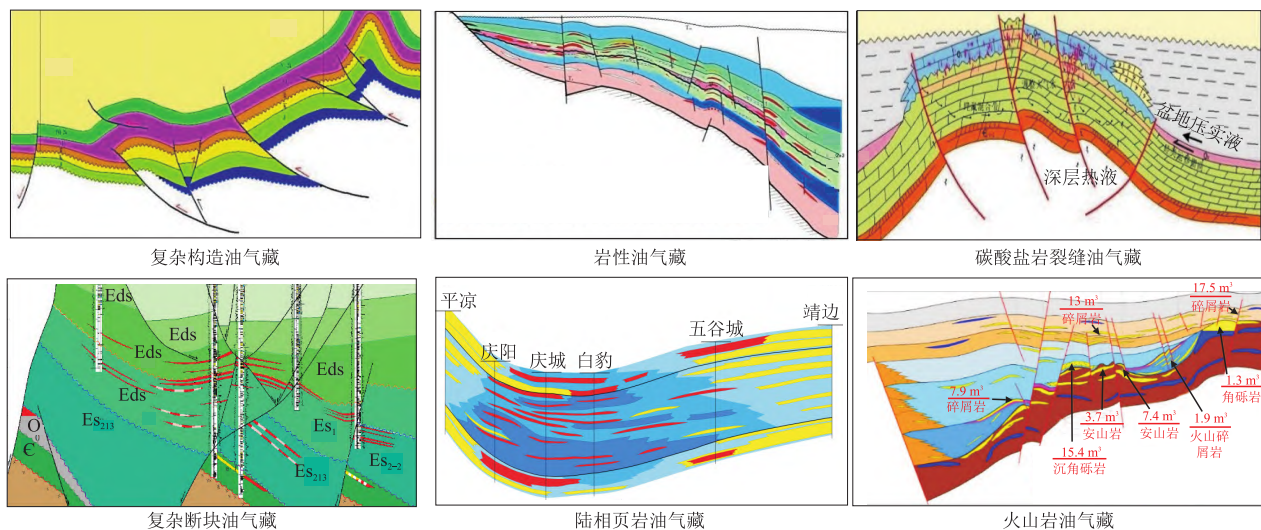


图 1 陆上典型油气藏剖面图

## 1.2 地震勘探面临的地质难题

陆上油气勘探领域复杂多变,陆相沉积物源一般较近,沉积分选差,储层物性差,勘探目标规模相对较小,各类目标分布在不同盆地、不同层系、不同深度,受剧烈构造运动影响,陆上油气勘探面临特殊地质难题。一是地层向湖盆中心超薄储层延伸,储层单层厚度小,呈现砂泥薄互层结构,物性差,非均质性强,断裂系统复杂,米级地质单元(3~10 m 厚的储层、断层和微幅构造)对地震分辨率和识别精度的要求不断提高。二是深层—超深层(超过 6000 m)勘探开发占比上升趋势明显,海相碳酸盐岩向深层白云岩拓展,构造向超深层前陆复杂构造拓展,勘探深度已延伸至 6000 m 甚至超过 9000 m,对深层—超深层的地震资料品质和深部成像精度的要求不断提升。三是勘探开发目标储层品质向低渗透、超低渗透、低丰度、低产量延伸,这类储集层物性差、规模小、非均质性强,与围岩阻抗差异不明显,储层的准确预测难度极大。四是油气目标越来越隐蔽,常规油气剩余资源分布在复杂推覆构造、盐下和盐间构造、复杂断块、复杂岩性等区带;岩性储层厚度普遍较小(1~20 m),横向变化大,地震分辨率不满足米级储层识别要求,泥质砂岩、

致密储层、微幅度构造等与围岩波阻抗差异小,储层反射弱,部分储层反射多为强屏蔽层下的弱反射,隐蔽性强,碳酸盐岩、火成岩等目的层类型多,埋深大,深层资料信噪比普遍偏低,储集空间类型多且非均质性强,储层描述困难;高陡构造和复杂断裂发育,地层褶皱严重,地层倾角大,深、浅层构造特征不一致,多重叠置现象明显,构造形态极其复杂。五是非常规油气勘探开发需求不断增长,非常规储层包括致密油气、页岩油气、煤层气等,由于非常规储层多以微小裂缝为主,成藏因素复杂,物探技术面临提高裂缝识别精度、“甜点”预测精度、提高储层物性预测精度、准确预测储层横向展布、提高小断层和薄层识别能力(东部地区小于 5 m、西部地区小于 10~15 m)的挑战。

## 1.3 地震勘探面临的技术难题

陆上双复杂探区给地震作业和准确成像带来严峻挑战。

一是地震资料信噪比提高困难。随着人文环境的不断变化,陆上地震勘探施工干扰因素较多,各种干扰严重,特别是复杂山地、巨厚黄土区、沙漠、戈壁、城镇等地区,复杂面波、散射波、多次折射、导波、多源强背景干扰、工业干扰等发育,原始资料噪声严重,尤



其是可控震源施工的资料异常噪声发育,导致资料信噪比低。虽然经过野外优选施工时段、优化检波器位置等,部分地区原始资料的信噪比仍普遍低于 1。

二是复杂地表静校正难度大。陆上近地表第四系普遍发育,多数未成岩,地表结构纵、横向变化快,造成共反射点道集地震波到达时动校正后仍存在差异,特别是中西部地表起伏较大,带来了较严重的时差问题。所以,陆上地震资料必须进行静校正处理,但静校正处理必须依赖高质量的地震初至信息,由于陆上资料信噪比低,部分陆上资料的初至拾取困难,加上近地表结构复杂,难以建立准确的近地表模型,严重影响静校正精度。

三是地表一致性处理难度大。由于陆上近地表结构复杂,纵、横向变化大,陆上地震勘探激发、接收绕不开近地表介质,必然造成平面上不同位置激发、接收到的地震信号存在差异。这种平面上的地震信号的振幅、频率等属性的不一致性,通常通过一致性处理手段进行校正,但一致性处理的地球物理响应机理较难把握,一致性处理有可能抹去或模糊因地下地层岩性、物性的差异造成的空间信号不一致。

四是地震信号吸收衰减严重。大地滤波作用,即吸收衰减是一种影响地震资料的关键因素,不同地层结构其吸收衰减特性不同,一般疏松近地表对地震波的吸收衰减最严重,速度较高的成岩地层吸收衰减较轻,但速度较高的砾岩、盐岩等地层,也会造成较严重的地震波吸收衰减,并造成较严重的地震波散射。一般通过求取衰减因子  $Q$  值,对地震资料进行吸收衰减补偿处理。但受近地表调查手段、调查密度、大炮地震资料品质的影响,求取的  $Q$  值精度受到一定影响,难以建立从地表到地下目标层的准确  $Q$  场,在信噪比较低的探区吸收衰减补偿的效果仍需提高。

五是速度建模精度低。速度模型是地震成像的关键。地震速度模型的建立依赖于地震资料的品质,一般通过对地震数据进行速度扫描或者层析反演的的方法获取。受陆上地震资料品质的影响,低信噪比地区地震成像速度模型精度较低,特别是巨厚低速带和剧烈起伏地表地区,浅层速度模型和中深层速度模型精度均受到资料品质的影响。加上复杂的地下高陡构造、复杂断裂,地震波场极端复杂,速度建模十分困难,准确成像难度极大。虽然采取了重磁电、井筒资料等多种方式辅助建模,但复杂地区的速度建模方

法仍需攻关,速度模型精度仍需不断提高。

六是储层预测存在多解性。由于陆上地震资料存在的以上问题影响,所以陆上地震资料处理的首要任务是提高资料信噪比。在提高信噪比等信号处理的过程中不可避免地会伤害有效信号的振幅、频率等属性随炮检距的变化关系以及平面属性规律,使得代表地层岩性、物性、流体性质特征的地震信号特征受到影响,进而影响地震储层预测的精度。

## 2 物探技术攻关进展及应用成效

### 2.1 物探技术攻关进展

为破解高难度探区地震勘探难题,中石油自 2006 年开始,持续地组织了针对复杂构造、复杂岩性、碳酸盐岩、火山岩、致密储层、页岩油气等领域的物探技术攻关。经过多年攻关与探索,形成了地震资料采集、处理、解释、重磁电、井中地震<sup>[3]</sup>、智能物探等六大技术系列,经济有效地攻克了陆上复杂领域勘探难题。

#### 2.1.1 “两宽两高”单点地震采集技术

在地震采集方面,形成了“两宽两高”单点地震采集、可控震源与井炮同步高效激发、低频可控震源激发、精细表层结构与吸收双调查、信息化地震采集质控与评价、智能化生产管理、海上拖缆采集、海底 OBN 采集等特色技术<sup>[4-5]</sup>。

特别是重点攻关以观测系统设计、可控震源与井炮高效激发、精细表层结构与吸收双调查、信息化地震采集质控与评价、智能化生产管理等技术为核心的“两宽两高”单点地震采集技术,大幅度提高了资料品质。横纵比达到 0.8~1.0(宽方位),有利于复杂构造成像及方位各向异性预测;激发频率为 1.5~84 Hz(宽频带),单点检波器主频 5 Hz 接收,低频改善了构造成像,高频则提高了预测精度;10~20 m 小面元、100 万道/km<sup>2</sup> 以上炮道密度(最大 1152 万道/km<sup>2</sup>)(高密度),提高复杂区成像能力;检波器灵敏度达 120 V/(m·s<sup>-1</sup>)以上<sup>[6]</sup>,自然频宽 2~160 Hz(高灵敏度单点),提高弱信号记录精度。同时,针对黄土塬、复杂山地等复杂地表,开展高精度高密度地表结构与吸收衰减双调查,优化沟谷激发点布设和突变点测量,支撑精细速度模型建立,提高全层系地震成像精度。

在激发方面,可控震源具有安全风险低、对地下水及周围环境影响小、可适应多种复杂的地表条件施

工等特点,是目前陆上地震勘探施工中首选的地震信号激发源。推广应用 EV56 高精度宽频可控震源,峰值出力由之前 62000 磅提高到 70500 磅,频率范围由 3~120 Hz 拓展到 1.6~160 Hz,超过 6 个倍频程,从低频迈向宽频。先后在准噶尔、柴达木、河套、鄂尔多斯、塔里木等盆地施工作业,激发过程中采用动态扫描技术,综合交替、滑动和同步扫描方式,科学设计时距关系曲线,提升采集效率、减小噪声影响。实践表明,宽频可控震源可以更好地改善深层激发效果,提高深层资料信噪比;可显著提高工作效率,最高日效可以达到 8000 炮,为炸药震源的 10 倍以上。

在接收方面,传统地震采集过程中通常采用有线仪器施工,由于勘探区域地表条件日益复杂,有线仪器布设难度不断加大,严重影响采集效率。近年来大力推广节点仪器,采用“节点+有线”联合接收,有效解决布线难题,节约设备资源,提高采集效率。塔里木油田秋里塔格区块地震采集过程中,运用“节点+有线”联合接收技术,降低劳动强度和安全风险,增加有效采集时间,创造了该地区地震采集平均生产日效 673 炮、最高单日采集 1331 炮的作业新记录。

在采集过程控制与评价方面,利用自主研发的“地震采集数据质量实时分析与自动评价系统”(Seis-Acq QC 软件),按照采集设计要求,开展单炮质量分析、单道质量分析、观测系统分析等方面的质控工作。根据分析参数(环境噪声、频谱、信噪比、能量、高程、炮检距、静校正量、激发能量、激发主频等),自动分析计算各个属性值;根据预设的评价标准自动进行质量评价,自动评价出不合格炮并报警;自动生成不可更改的评价报告。为现场施工队伍、油田监理及勘探管理部门协同工作提供了统一技术平台,实现了野外地震采集数据质量控制信息化、自动化;野外质控时间从过去的人工质控几分钟缩短到 10 s 之内,提高野外施工日效;实现无纸化办公,降低野外施工成本。为进一步规范地震采集现场工作流程发挥了重要作用。

### 2.1.2 真地表全深度保真成像技术

在地震资料处理方面,形成了各向异性叠前深度偏移、逆时偏移、井控提高分辨率处理、OVT 域处理、近地表吸收补偿及 Q 偏移、高精度全波形反演、5D 插值、非规则采集数据恢复、真地表全深度保真成像等特色技术。

针对前陆盆地地形起伏剧烈、表层结构多变、地下构造复杂导致的高陡构造准确成像难题,重点攻关

真地表全深度保真成像技术。其中关键技术包括近地表面波与散射噪声衰减、地表相关平滑面、近地表速度层析反演、初至波地形匹配静校正、整体全深度速度建模、真地表叠前深度偏移、TTI 各向异性叠前深度偏移等技术。准确刻画复杂构造空间形态,支撑库车、淮南、川西北等地区大批风险井取得突破。支撑库车地区勘探深度超过 8000 m;准确落实了准噶尔南缘高探 1 井三维中下组合圈闭构造形态,新发现 3 个背斜圈闭,落实圈闭 6 个,面积达 95 km<sup>2</sup>,较原二维圈闭面积增加 25 km<sup>2</sup>,调整并推动多口井位部署。

### 2.1.3 “双高”地震资料处理技术

面向叠前储层预测,开展“双高”地震资料处理技术攻关。其中,高保真处理是指地震资料处理过程中保护储层的地震反射特征,高分辨率处理是在保真处理的前提下开展全频(宽频)处理,提高储层空间分辨能力。关键技术包括近地表吸收补偿、全频保幅处理、井驱高分辨率处理、Q 偏移处理等技术,在保幅基础上提高岩性地层地震分辨率,夯实薄层预测资料基础。针对地下目标储层预测及烃类检测需求,在保护地震波特征不受破坏基础上提高资料分辨率,主要包括高精度静校正、叠前噪声压制、叠前保真处理、振幅恢复、弱信号保护、高分辨率处理等关键环节。基于上述关键技术环节,编制下发“双高”处理指导意见,规范地震资料处理过程,确保高分辨率和保真度技术应用。通过以上技术应用,已全面实现 10 m 级厚度储层分辨与识别,为岩性地层油气藏勘探突破夯实了资料基础。在鄂尔多斯、准噶尔、塔里木、四川、河套等多个盆地,为碎屑岩、碳酸盐岩、复杂断裂带、潜山内幕储层等多种复杂储层领域规模储量的提交创造了有利条件。

### 2.1.4 复杂储层叠前定量预测技术

为了提高隐蔽储层定量描述精度,发展复杂储层叠前定量预测技术,包括宽频岩石物理理论与分析、高精度地震反演、储层孔隙结构预测、流体定量预测、储层物性检测等技术,提高了隐蔽储层预测成功率。

针对地质目标储层特征识别和有效区分,大力发展宽频岩石物理分析技术。自主研发高温高压宽频岩石物理实验设备,形成动静态岩石物理模量跨频段同位测量、分析技术与能力,开展宽频实验揭示碎屑岩、碳酸盐岩、火成岩、页岩等不同类型的岩石物理特征,为理论与技术创新提供重要依据。基于宽频



岩石物理分析技术,建立了复杂孔隙介质地震波传播理论模型;形成针对双孔、裂缝、多尺度等3类岩石物理建模配套技术;提出了压裂效果驱动的非常规储层可压裂性评价模型;推动了复杂孔隙储层预测与页岩油地震预测技术研发。

针对复杂储层精细描述,重点攻关断裂地震综合预测技术。通过叠后相干、曲率、梯度结构张量等属性开展不同级别断裂定性描述,统计叠前不同方位数据振幅、时差和能量的差异,量化预测裂缝发育程度和方向,最终量化描述断裂空间展布;攻关薄层储层识别技术,创新发展了多维信息约束稀疏反射系数反演技术,基于岩石物理模型和地震正演技术,挖掘储层敏感地震信息,建立多信息加权约束收敛条件,利用迭代寻优的算法实现储层高精度量化预测,大幅提高薄层空间分辨能力和储层物性参数定量表征能力,能较好地满足厚度小、相变快、物性差等复杂地质条件下储层精细描述需求。

针对复杂孔隙储层含气性定量预测难题,发展、完善部分饱和和复杂孔隙介质理论模型,建立了孔隙度、饱和度双参数和孔隙度、饱和度、孔隙扁度三参数同步预测模板。实现孔隙度、孔隙结构、含气饱和度等关键参数的同步定量预测,降低了储层参数之间的相互干扰,提高了低孔低渗气藏含气性描述的准确性,形成复杂孔隙储层含气性定量预测技术。

此外,持续开展重磁电技术攻关,形成了三维重磁电、井筒电磁、时频电磁勘探,重磁电震联合勘探、井地电磁、宽频大地电磁勘探等特色技术,在表层建模、速度辅助建模、构造勘探、储层预测、火成岩等特殊岩性体勘探方面发挥了重要作用。持续开展井中地震技术攻关,形成了井地联合勘探、微地震监测(地面、井中)、井中分布式光纤传感等技术,在井旁构造成像、储层描述、地球物理参数提取、压裂检测等方面发挥了重要作用。大力开展智能物探技术攻关,形成了智能化地震初至拾取与去噪处理、智能化地震层位与断层识别、智能化速度谱拾取、智能化沉积相解释等技术,提高了初至拾取等地震处理环节工作效率6倍以上,提高了断裂解释、属性解释等地震解释环节的精度10%以上。

## 2.2 典型应用实例

物探技术不断取得新进展,用新的技术手段解决了复杂油气勘探地质难题,带动了高陡构造、碳酸盐岩、低渗透、致密油气、火成岩、岩性、潜山等七个领域

一批新油气田的发现<sup>[7]</sup>,支撑了中石油连续17年来探明石油储量持续保持在 $6\times 10^8\text{t}$ 以上,连续16年探明天然气储量持续保持在 $4000\times 10^8\text{m}^3$ 以上。

### 2.2.1 高陡构造领域应用实例

中石油前陆盆地剩余油气资源主要集中在地表复杂、地下构造复杂的高勘探难度地区。针对地形起伏剧烈、构造样式复杂、复杂构造区资料信噪比极低、成像难度大等难点,应用宽线、高密度三维、井震联合激发、表层精细调查、精细静校正、叠前深度偏移等技术<sup>[4]</sup>,在库车、英雄岭、阿尔金山前、淮南、川西北、吐哈北部山前等复杂圈闭落实中起到决定性作用,在许多复杂山地区油气勘探取得重大突破。

在柴达木英雄岭地区,2011年开始实施山地高密度宽方位三维地震勘探,资料品质较以往二维地震有了质的飞跃(图2),支撑探井成功率由以往的18%提高到71.4%,评价井成功率达96%。物探技术进步破解了柴达木盆地英雄岭地区勘探世界级难题,新发现落实构造圈闭32个,探明石油地质储量 $1.5\times 10^8\text{t}$ ,为英雄岭发现单个油藏储量规模最大、丰度最高、开发效益最佳的整装油气田奠定基础。建成产能 $80\times 10^4\text{t}$ ,为建设千万吨级高原油气田做出了巨大贡献。

在库车地区,“十二·五”以来,整体部署地震采集,利用高密度、宽方位+可控震源地震采集技术提高资料品质;利用复杂地表低速带层析反演、TTI各向异性速度网格层析反演、TTI各向异性叠前深度偏移、单程波叠前深度逆时偏移、真地表深度偏移等技术,有效提高叠前偏移成像精度(图3)。库车地区探井成功率由以前的不足50%提高到现今的85%,探井深度误差率由早期的7%缩小为现今的1%左右,不断发现有利区带、圈闭。天然气勘探实现持续突破,探明天然气地质储量超过 $2\times 10^{12}\text{m}^3$ ,油 $2400\times 10^4\text{t}$ 以上,建成天然气产能超过 $200\times 10^8\text{m}^3$ ,为西气东输奠定了坚实基础。利用地震资料落实构造圈闭,支撑风险探井中秋1井上钻,日产天然气 $33\times 10^4\text{m}^3$ 、凝析油 $21.4\text{m}^3$ ,新发现储量超千亿立方米整装凝析气藏,开辟了库车天然气勘探新战场。

在准噶尔南缘,高精度采集、高保真处理和精细叠前叠后储层预测,落实目标和储层展布,助推风险探井高探1井顺利上钻,高探1井日产原油 $1213\text{m}^3$ 、天然气 $32.17\times 10^4\text{m}^3$ ,获得中国陆上单井最高日产。南缘下组合展现规模前景,打开了南缘下组合油气勘

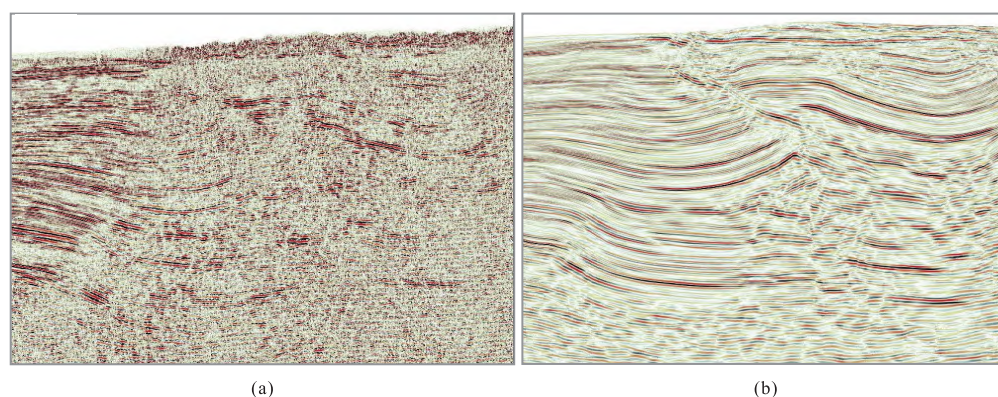


图2 英雄岭英中地区二维(a)与三维(b)叠前深度偏移剖面对比

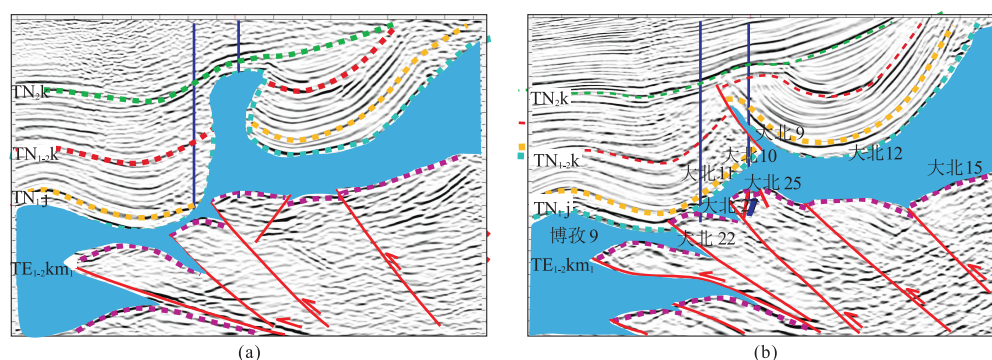


图3 过大北10构造常规叠前(a)与真地表叠前(b)深度偏移剖面对比

探新局面。

### 2.2.2 岩性—地层领域应用实例

中国大型坳陷湖盆以陆相湖泊沉积为主,大面积陆相地层岩性油气藏是勘探开发的主体,油气资源主要分布在薄储层和小幅度构造<sup>[5]</sup>。针对岩性油气藏沉积相带复杂多变,单层厚度小,油气水关系复杂,常规地震资料分辨率低,定量识别难度大,不能满足水平井轨迹设计精度要求等难题,经过“十·二五”物探技术攻关,储层预测精度大幅度提高,为环玛湖、岐口、埕北、苏里格等地区突破奠定了基础。

在玛湖地区,主要为冲积扇、扇三角洲近源快速堆积,沉积物粒度大、分选差、相变快,沉积物的厚度及分布范围受物源和湖平面升降的影响较大,中—上二叠统储层单层厚度一般为4~10 m。近几年下坡进注,斜坡区逐渐由构造勘探转为地层岩性型勘探。面对小断裂识别、沉积相刻画及优质储层预测的地质难题,应用“两宽一高”采集和处理技术,对玛湖凹陷实现了高精度三维资料整体覆盖,形成了超过4000 km<sup>2</sup>的高精度三维数据体。经过整体连片处理、多学科一体化攻关,玛湖凹陷三叠系 T<sub>1</sub>b<sub>2</sub> 沉积相解释由2012年的四大扇体修改为2014年的六大扇体,沉积扇体

系认识发生了重大变化(图4)。落实有利前缘相带总面积10000 km<sup>2</sup>,探井成功率由之前的31%提高到75%,落实了玛南玛湖1井、玛东盐北1井、风南、艾湖、玛东、达巴松—夏盐等油藏群,落实三级储量超过10×10<sup>8</sup> t,形成了亚洲最大的砂砾岩油田。

在鄂尔多斯盆地,针对黄土塬沟壑纵横、表层吸收衰减严重、地震反射信号弱、地面检波器组合难度大等难题,大胆应用高灵敏度单点检波器接收、井炮+可控震源联合激发等采集技术,攻关复杂黄土山地静校正、近地表吸收补偿、叠前Q深度偏移等技术,地震资料品质大幅度提高。精确刻画了隐蔽性地层岩性油气藏分布,颠覆了延长组传统长<sub>3</sub>—长<sub>7</sub>水平层状分层的地质认识,地层解释变为四期前积体,明确了沉积结构规律(图5)。在庆城地区预测长<sub>7</sub>页岩油有利区面积1×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,探明了10×10<sup>8</sup> t庆城大油田,支撑了华H60、华H90(水平段长5060 m,刷新亚洲陆上最长水平段水平井纪录)、华H100等一批丛式水平井轨迹设计,平均砂体钻遇率89.3%,油层钻遇率81.45%。

针对四川盆地沙溪庙河道砂体精细预测,利用高精度三维地震资料,开展双高地震资料处理,河道砂



体特征明显,易于识别。攻关以岩石物理为核心的叠前储层预测技术,定量预测储层的孔隙度、有效储层

厚度和含气性(图 6),为空间不连续河道砂体储层规模储量提交提供了高置信度的资料。准确刻画了厚

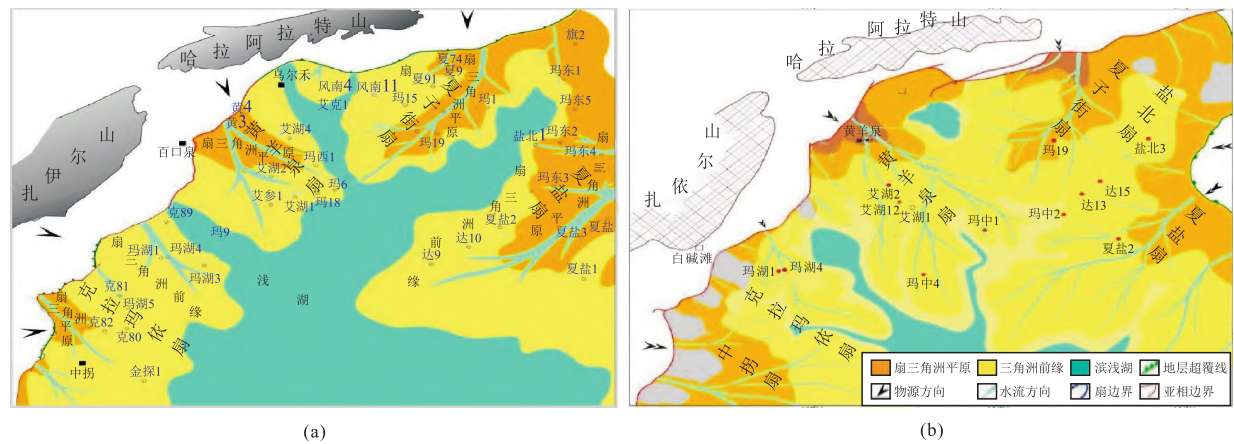


图4 玛湖凹陷三叠系百口泉组高精度三维连片处理前(a)、后(b)沉积相解释对比

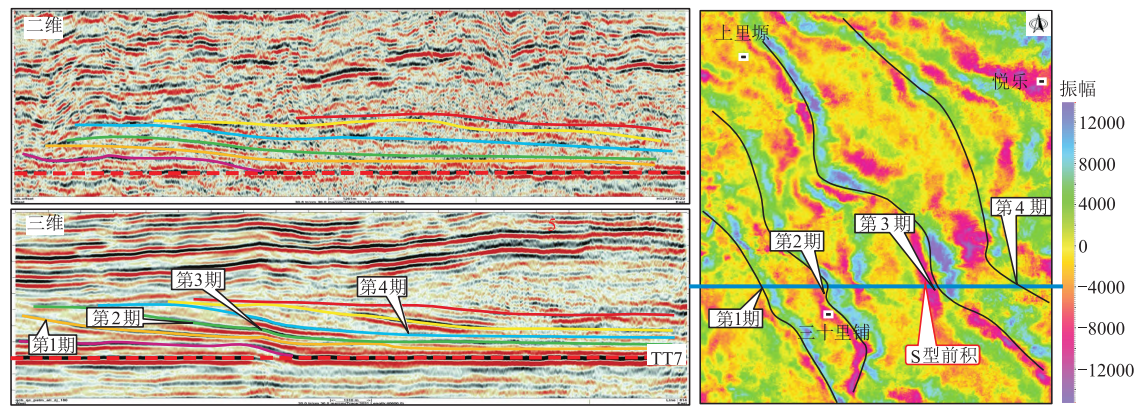


图5 鄂尔多斯庆城北二维与三维地震剖面对比(左)及1279 ms均方根振幅图(右)

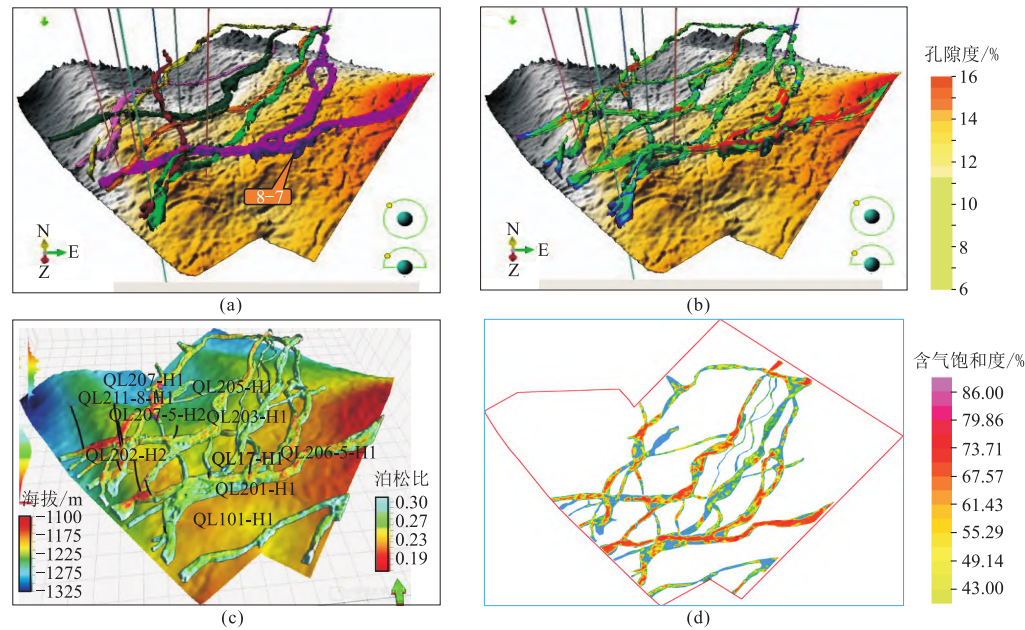


图6 四川秋林地区沙溪庙河道砂雕刻与储层定量预测图

(a)砂Ⅱ古地貌图与河道砂体刻画;(b)砂Ⅱ古地貌图与孔隙度预测;(c)砂Ⅱ构造图与含气性检测;(d)有效储层雕刻



度大于 6 m 的有效含气储层,沙溪庙河道砂体预测精度由 80% 提高到 96%,含气性预测精度达到 90%,钻井成功率达到 89%,支撑了  $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$  规模储量(探明+控制)的提交。

### 2.2.3 碳酸盐岩领域应用实例

叠合盆地深层碳酸盐岩是陆上油气储量新增增长点。剩余资源主要集中在潜山岩溶、层间岩溶、顺层深潜流岩溶、礁滩体岩溶、热流体岩溶+白云岩化储层。针对叠合盆地深层非均质碳酸盐岩油气藏埋藏深、年代老、储层非均质性强、深层地震资料品质差等问题,“十二·五”以来强化开展碳酸盐岩物探技术攻关,提高了缝洞储层雕刻精度,为大川中、塔北等探区突破和增储发挥了重要作用。在四川盆地大川中地区,整体部署高精度三维采集,开展“双高”处理,地震资料深层品质提升明显(图 7),预测了震旦系灯影组和寒武系龙王庙组缝洞性白云岩储层。利用精细解

释技术、古构造和古地貌分析技术解剖了古隆起区域深层构造格局和古地貌特征,划分了储层发育的有利沉积相带区;利用叠后地震属性分析、叠后稀疏脉冲反演、叠后地质统计学反演和叠前同时反演、叠前弹性阻抗反演、叠前分方位裂缝预测等叠后叠前相结合的物探技术,有效预测了川中古隆起区域的龙王庙组和灯影组储层、含气有利区和缝洞发育区分布特征。在大川中地区纵向上发现震旦系灯二段、灯四段、寒武系龙王庙组三个主力产层,证实了高石梯—磨溪地区台缘带灯四段富气“甜点”区面积  $1500 \text{ km}^2$ ,深度误差小于 0.5%,储层符合率 90% 以上,灯影组探井成功率达 85%,开发井成功率达 100%,获三级储量  $14507 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。证实安岳气田是中国地层最古老、热演化程度最高、单体储量规模最大的特大型气田,是 21 世纪全球古老碳酸盐岩的重大发现,是中国乃至世界天然气工业史上重大的科学发现和勘探突破。

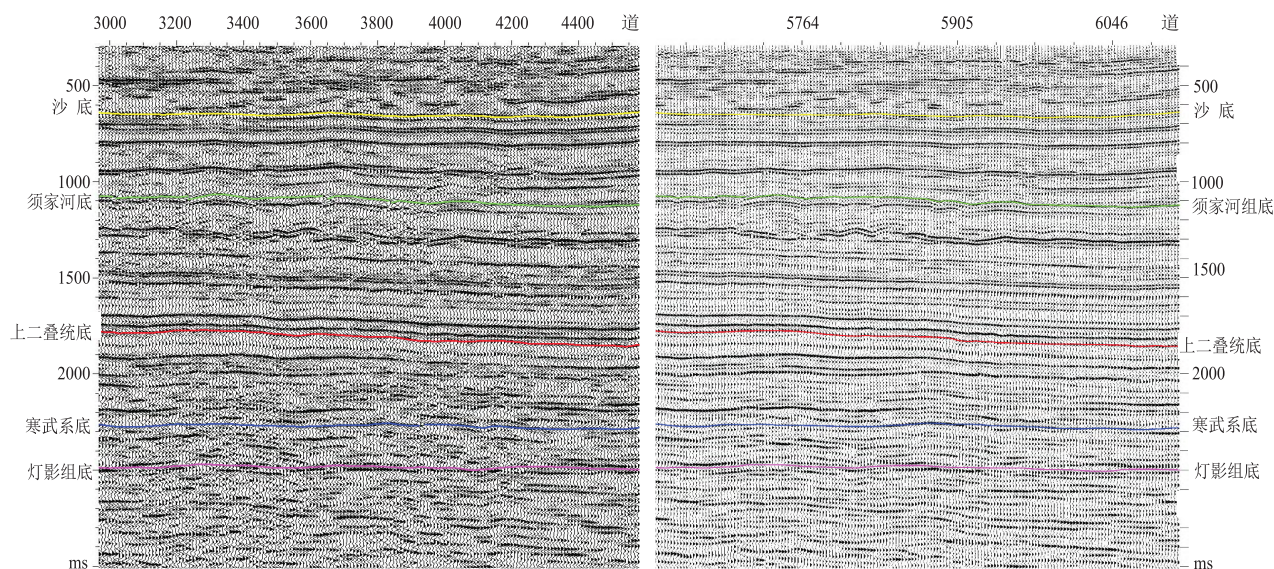


图 7 川中二维(左)与三维(右)地震资料效果对比

在川东大猫坪地区实施高精度三维地震,精细雕刻了礁滩地质体,支撑 YA012-X16 井首次实现“一井双礁”,日产气  $113.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;YA012-X11-C1 井钻遇生物礁储层 1160 m,日产气  $205.66 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,刷新四川盆地生物礁“储层段最长、储层钻遇率最高、测试产量最高”等多项纪录(图 8)。

在塔北地区,推广高精度宽方位三维地震资料采集技术、高保真各向异性叠前深度偏移处理技术、井控条件下的构造精细解释、缝洞体定量雕刻技术等,落实了构造背景、断裂组合关系、裂缝发育带,准

确刻画碳酸盐岩断溶体空间展布(图 9),实现缝洞储层空间定量雕刻。在埋深 6500~9000 m 的情况下,探井成功率由以前的 50% 左右提高到现今的 82% 以上。在富满地区落实区内 34 条走滑断裂,总长 1300 km,落实资源量油  $11.36 \times 10^8 \text{ t}$ 、气  $4624 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,碳酸盐岩勘探深度拓展到 9000 m 以上,2020—2022 年,试油百吨井 93 口。形成了缝洞储量计算新方法,并成为企业标准,直接指导开发方案编制与井位部署,支撑塔北地区碳酸盐岩持续上产增储。



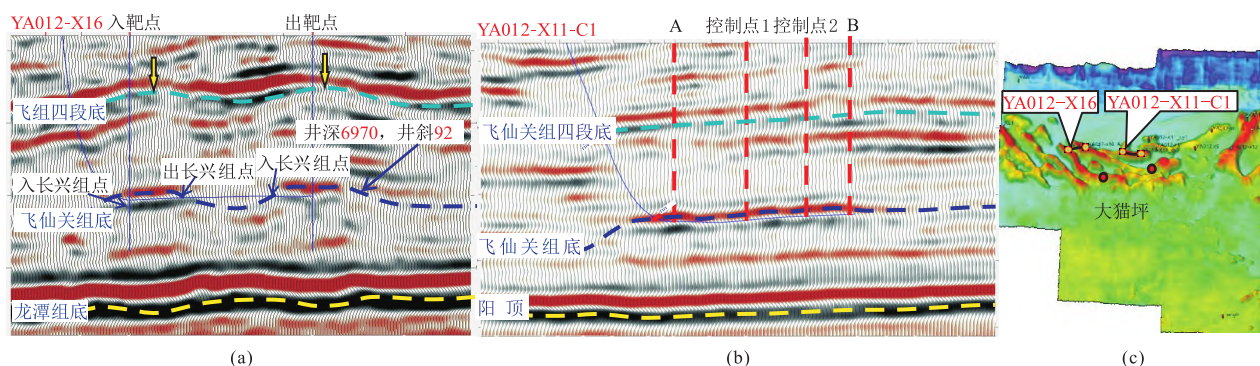


图8 大猫坪水平井轨迹及长兴组生物礁雕刻图

(a)过YA012-X16井叠前深度偏移剖面;(b)过YA012-X11-C1井叠前深度偏移剖面;(c)川东大猫坪西长兴组生物礁古地貌

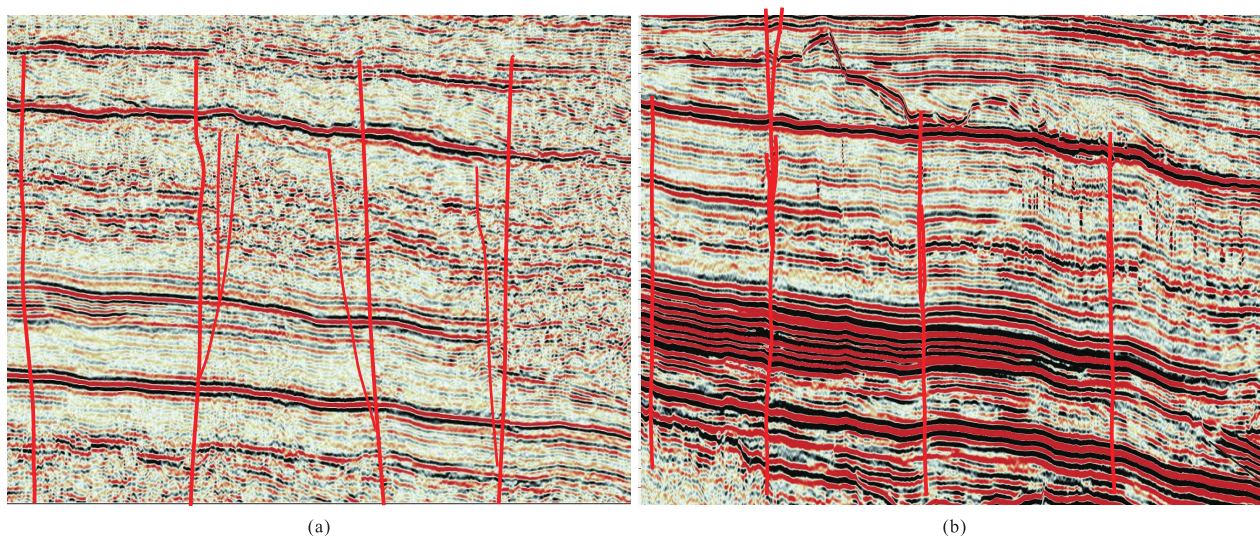


图9 富满二维和三维地震资料对比

(a)HD07-784二维地震剖面;(b)富满II期近东西向三维地震剖面

#### 2.2.4 火山岩领域应用实例

火山岩作为非沉积岩石,在喷发凝固过程或后期风化改造中形成有利储层,是天然气勘探的重要领域。针对火山岩复杂油气藏勘探面临的储层埋藏深,构造形态复杂,速度变化剧烈,波场复杂,火成岩成像困难,储层物性差,高速(4000~6000 m/s)、低孔隙度(5%~10%)、低渗透率(0.1~1 mD),岩性复杂多样,准确识别难等难题,采用重磁电震一体化技术攻关,提高火山岩油气藏的勘探精度,提高钻探成功率,实现勘探大发现。

在新疆克拉美丽地区,通过重磁、三维地震等资料于2008年探明火山岩天然气地质储量 $1053 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2009年在滴西1井区4、滴西18井区实施了精细开发三维地震勘探,基本实现了对石炭系火山岩体内幕的精细刻画(图10),有效指导了该区产能井的实施。在外围部署的评价井滴西176、滴西

177、滴西178、滴西179等井先后在石炭系获得了工业气流,滴西178井和滴西179井在上覆梧桐沟组地层取得了新的发现,展现了滴西地区巨大的开发潜力。持续实施高精度三维地震,落实了一批有利圈闭及新的火山岩有利储层发育带。复查并重新刻画了滴405井、滴西18井、滴西183井、滴西10井等7个有利目标,发现落实了滴西174西、滴西175南、滴西183东、滴西183北等6个火山口相圈闭,新落实了多个火山口和有利储层展布。新的出油气点不断增多,含油气范围呈现出复合连片趋势,为克拉美丽气田增储和开发奠定了坚实基础。克拉美丽火山岩探明天然气超过 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,车排子探明原油 $1.3 \times 10^8 \text{ t}$ ,展现了红车断裂带整体连片含油的场面。落实川西南部火成岩有利相带,部署永探1井测试日产天然气 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为四川盆地天然气勘探开辟新领域。



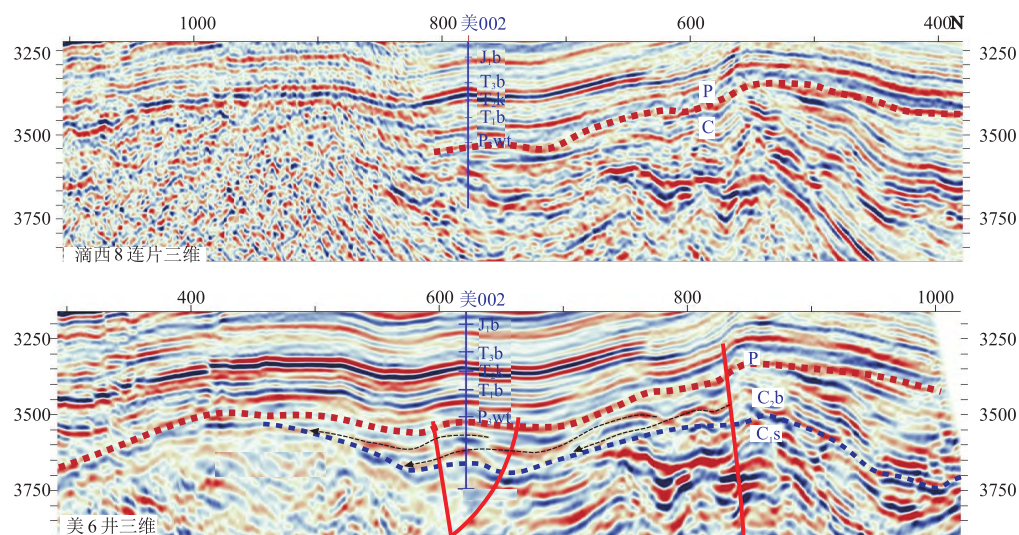


图 10 准噶尔盆地美 6 井区石炭系火山岩新(下)、老(上)剖面对比

### 2.2.5 成熟探区应用实例

地震资料挖潜是提高老区油气勘探效益的重要路径,提高采收率、支撑油气藏高效开发是物探技术面临的又一项挑战。地震资料精细处理解释是开展资料挖潜的重要技术手段。在大庆斜坡区精细勘探过程中,研发并推广表层  $Q$  补偿、黏弹性叠前偏移等新技术,地震资料有效频宽提高了 25 Hz 以上,砂体识别能力显著增强。基于井震结合构造表征、储层预测技术,实现窄小河道砂体精细刻画,精细刻画主河道,研究主河道与构造背景、圈闭、断层的匹配关系。

解决低级序断层识别难题,断距 3 m 以上断点组合率由 78.5% 提高到 94.3%,实现储层识别由定性到定量突破。厚度 2 m 以上河道矿体描述符合率由 77% 提高到 85.6%,河道表征精度由 79.6% 提高到 86.1%,砂体顶面深度误差由 3‰ 缩小到 0.5‰。井震资料结合后,断层数量增加了 71.9%,新识别出了萨南—杏北西部河流体系,深化了前缘相窄河道等典型砂体沉积模式的认识,河道刻画更加精细(图 11)。精细储层预测指导大庆长垣老区部署扩边高效井 464 口,完善和优化注采井 1419 口,增加可采储量

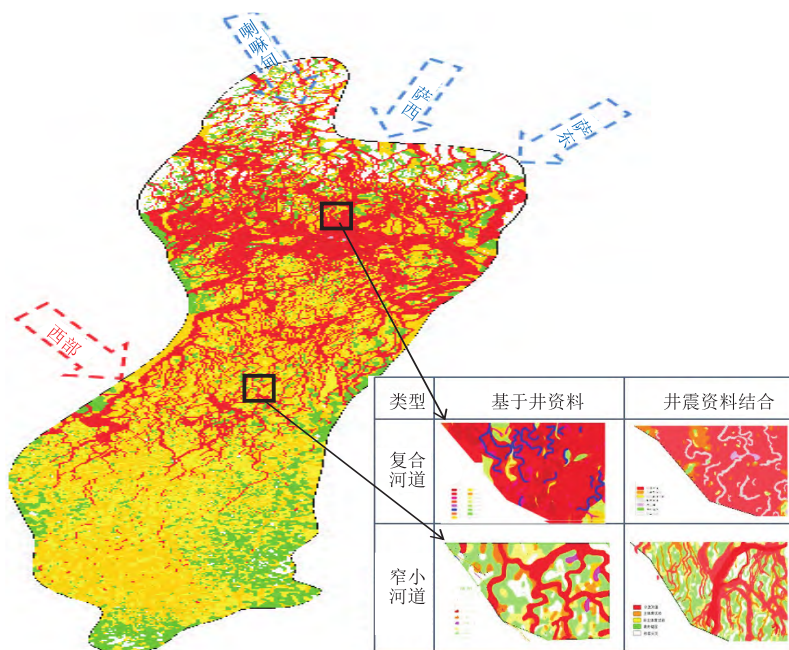


图 11 喇嘛甸、萨尔图、杏树岗油田整体沉积相带及基于井与井震资料结合河道刻画对比

$416.2 \times 10^4 \text{ t}$ , 累计增油  $313.97 \times 10^4 \text{ t}$ 。

### 2.2.6 非常规领域应用实例

非常规油气勘探开发面临小微断层和 TOC 预测难度大, 储层与围岩波阻抗差异小, 非均质性分辨和预测难, 低孔低渗, 物性差, 油气藏空间关系复杂等难题。利用岩石物理分析与测井评价技术, 储层矿物成分、裂缝、TOC 以及含气性等参数预测技术, 断层、裂缝、脆性和应力场预测技术, 微地震监测技术, 水平井地震导向技术等, 基本满足预测致密油气 ( $<4\%$ ) 储层底、微裂缝发育带、TOC、岩石脆性的要求, 在页岩油、页岩气勘探开发中见到良好效果。

围绕页岩气勘探, 运用复杂构造精细解释、地质工程“甜点”预测技术, 从岩石物理建模出发, 开展储层厚度、TOC 含量、孔隙度、含气性等关键地质参数预测。基于 CNN 的页岩储层含气量地震预测技术, 综合预测地质甜点区, 从岩石物理建模出发, 开展地层压力、地应力、脆性等关键工程参数预测。利用实

时速度跟踪和成像、地震逐点导向等技术, 调整井位轨迹, 提高储层钻遇率(图 12), 为四川盆地万亿立方米页岩气大气区探明提供技术保障。有力支撑四川盆地长宁地区页岩气勘探, 厚度 5 m 储层水平井钻遇率由 70% 提高到 85%, 落实有利面积  $3188 \text{ km}^2$ , 支撑长宁—威远和太阳区块累计探明天然气  $10610.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 形成万亿立方米页岩气大气区, 页岩气产量超过  $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

长庆油田在致密油、致密气勘探基础上大力扩展勘探领域, 2019 年在页岩油勘探领域取得重大突破。面对黄土塬山大沟深, 创新单点井震混采技术, 资料品质明显提升。采用三维反演泊松比, 预测源岩 TOC、砂体厚度、孔隙度、含油性、脆性、裂缝、孔隙压力等“甜点”参数。利用随机森林法开展“甜点”综合预测(图 13), 通过 260 口井验证, 预测符合率达到 87.7%, 不符合井主要分布在工区边缘, 为页岩油“甜点”优选和水平井导向夯实基础。助推庆城油田  $10 \times$

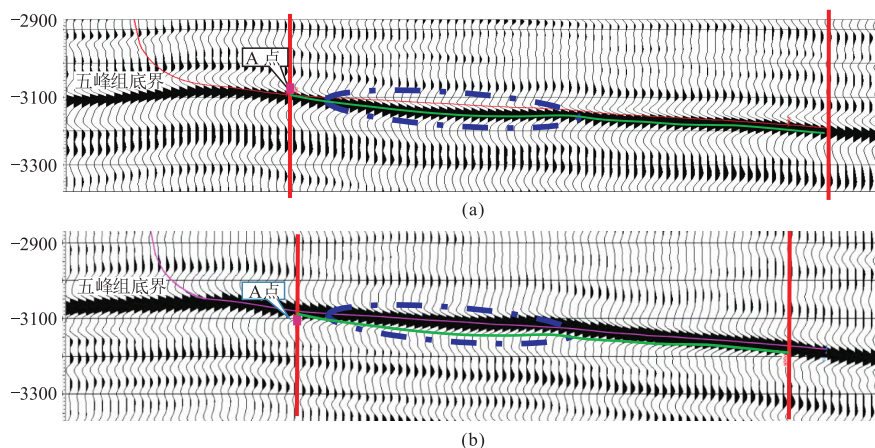


图 12 川南页岩气某水平井调整前(a)、后(b)井轨迹图

利用地震逐点导向技术实时速度调整提高箱体钻遇率, 绿线为调整前水平段井轨迹, 红线为调整后水平段井轨迹。

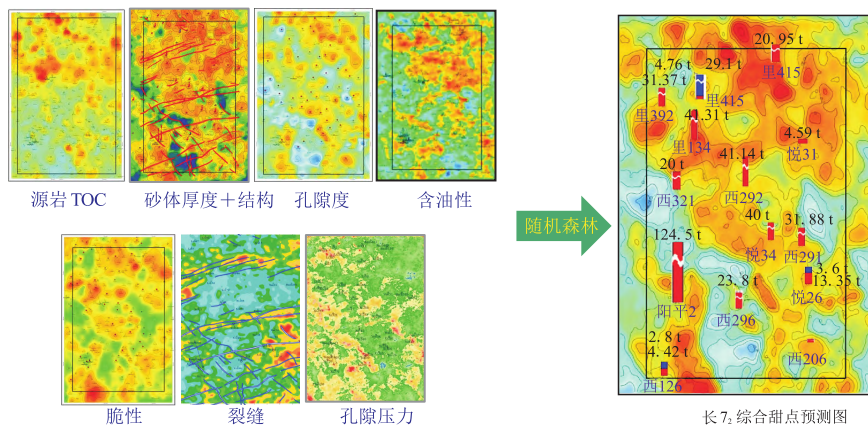


图 13 庆城北地区长<sub>7</sub>页岩油参数及综合甜点预测图



$10^8$  t 规模储量提交,成为页岩油开发成效最好的地区,为长庆油田年产量达  $6000 \times 10^4$  t 油气当量做出了巨大贡献。

### 3 认识与启示

中国石油陆上复杂油气勘探成效的取得得益于物探技术的进步和资料品质的大幅度提高。三维地震勘探在油气储量增长中发挥了重要作用,年度三维地震工作量与探明储量呈正相关关系,支撑储量长期处于高峰增长期。2000—2022 年,探明石油储量从  $4.2 \times 10^8$  t 升到  $9.2 \times 10^8$  t,年增长 4.6%,天然气储量从  $4118 \times 10^8$  m<sup>3</sup> 升到  $6975 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,年增长 4.1%。支撑原油产量连续 29 年保持  $1 \times 10^8$  t 以上,天然气产量持续保持较快增长,2020 年天然气产量当量首次超过原油,达到  $1.04 \times 10^8$  t 当量。

特别是近年来,在油气勘探程度不断提高、勘探开发难度不断加大的情况下,2011—2022 年,物探技术进步支撑中石油共发现 20 个亿吨级油田和 10 个千亿方气田,为油气产量稳中有升奠定了坚实基础。2022 年,长庆年产油气当量跃上  $6500 \times 10^4$  t,塔里木年产油气当量跨入  $3300 \times 10^4$  t,西南油气田年产油气当量迈上  $3000 \times 10^4$  t。

在勘探对象日趋多样、勘探难度不断加大、勘探历程曲折复杂的情况下,中石油为什么还能取得如此骄人的业绩?得益于对物探技术的重视,得益于对物探技术关键问题认识的转变,得益于管理思路的转变,得益于管理模式创新和方式转变。

#### 3.1 加大物探技术投入是物探技术发挥先锋作用的关键

物探技术是现代地球科学中的高新技术,既是解决油气勘探开发中各种复杂地质问题的最主要手段,也是修正和完善勘探地质理论的最重要依据。随着油气勘探领域不断向低幅度、深层、海域、非常规转移,勘探目标更加复杂、隐蔽性更强,对高精度物探资料的依赖程度越来越高。为进一步落实加大油气勘探开发力度相关要求,中石油 2018 年组织召开了各盆地座谈会,加大大地震工作量部署。2018—2022 年,三维地震年均达到  $18219$  km<sup>2</sup>,物探投资占勘探开发投资比例保持在 4.3%~5.2%。大力推广宽方位高密度三维采集技术,强化精细处理解释技术攻关,强化精细勘探,立体勘探,效益勘探,资料品质大幅度提

高,带来了一系列新的重大油气发现。充分发挥出了物探在油气勘探中的排头兵、先锋队作用,支撑探明石油储量年均增长  $8.588 \times 10^8$  t,探明天然气储量年均增长  $8505 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。

#### 3.2 油气在地质家的脑海里,更藏在高品质的地球物理资料里,深化了找油找气哲学认识,明确了物探技术应用的目标

油气埋藏在地下几千米的岩石当中,地质家通过盆地演化分析、沉积分析、构造分析、成藏分析等一系列研究,确定可能的含油气有利区和圈闭,经过钻探发现油气。其主要手段包括了地质调查、物探、钻探以及其他相关活动。随着油气勘探对象日趋复杂,借助物探手段了解地下的地质状况,认识生油、储油、油气运移、聚集、保存等条件,综合评价含油气远景,确定油气聚集的有利地区,找到储油气的圈闭并探明油气田面积,查明油气层情况和产出能力,是油气勘探的主要技术手段之一。油气勘探实践表明,物探成果的精度对油气勘探发现具有关键性作用。资料品质差,则圈闭描述精度低,储层预测可靠性差;资料品质高,则构造解释可靠,圈闭描述精度高,储层预测置信度高,钻探成功率高。

笔者提出的“油气在地质家的脑海里,更藏在高品质的地球物理资料里”理念,明确了科学、有效地组织好物探技术的研发及应用,获得高品质的物探资料,是油气勘探开发取得突破的重要条件。物探工作的重点就是要通过新技术新方法的应用,提升资料品质,充分挖掘资料潜力;通过科学管理、技术方案科学决策,严把施工过程质量关,提升物探资料品质,获得高品质的物探资料。

#### 3.3 目标在深层,问题在浅层,核心在速度,关键在创新,抓住了陆上双复杂探区物探技术难题的牛鼻子

地震勘探一般是在地面激发、接收地震波,利用地下介质弹性和密度的差异,通过分析大地对人工激发地震波的响应,推断地下岩层的性质和形态。在具体实施过程中,地震波两次穿过近地表,而近地表一般由较疏松的第四系未成岩地层、岩石出露区及风化层等组成,地表包括平原、沙漠、戈壁、山地、水网等,平面变化大。地震波穿过近地表地层时一方面受到了强的吸收衰减,使来自地层反射信号发生了强烈畸变,另一方面由于地表起伏或地表岩性的变化,地震波发生扭曲或时差变化。地震勘探的首要技术问题

是解决好浅层问题。

因此,笔者提出了地震勘探技术突破的关键是:“目标在深层,问题在浅层,核心在速度,关键在创新”,抓住了陆上双复杂探区技术问题的牛鼻子,明确了技术攻关的方向。物探技术攻关的首要目标是研究解决浅层问题,强化浅层近地表结构调查,强化静校正和波场识别,强化表层速度建模方法研究,在此基础上建立全深度速度模型,为叠前深度偏移成像奠定扎实的基础。根据新的偏移成像技术应用条件需要,强化关键技术创新,开展复杂地表数字露头建模、各向异性研究,加大复杂地表表层调查的密度和调查深度,创新应用 FWI 等表层建模方法,提高表层建模精度,促进双复杂探区成像技术进步。

### 3.4 建立完整的物探技术管理体系提升,物探技术应用的科学性

为了适应陆上双复杂探区勘探开发需求和新时代物探技术的不断提升要求,进一步规范物探管理工作,贯彻绿色环保新发展理念,创新物探技术管理,着力提质增效,制定了一系列物探技术发展规划、技术指导意见、企业标准和管理规范。规范了物探业务制度管理、标准管理、质量管理、信息化管理、科研攻关和人才培养等相关业务管理内容,形成了较完整的中国石油物探技术管理体系<sup>[8]</sup>。包括:①围绕规范指导复杂探区复杂领域的技术应用,编制了物探业务管理办法,开展物探业务管理顶层设计;②以支撑“油气储量增长高峰期”“高含水老油田二次开发”“天然气快速增长”和“压舱石工程”为目标,编制了“十二·五”物探技术发展规划和“十三·五”“十四·五”物探技术发展指导意见;③遵循物探技术发展规律,开展基础建设,强化质量控制,建设八大基础数据库,开发地震采集、处理、解释量化质量控制软件,减少了资料评价的人为性,大幅度提高质控效率;④遵循经济有效原则,在统一顶层设计下开展标准体系制修订,形成了包括国标、行标、企标和业务管理规范完整的物探标准规范体系,确保了物探技术应用有据可依,有规可循;⑤以集团公司上游业务高质量发展目标为导向,加强信息化管理平台建设,开发物探工程生产运行管理系统,实现生产动态管理、全生命周期管理,提高管理工作效率;⑥以中国石油物探技术可持续发展为根本,着力开展专项技术培训和复合型人才的实训锻炼,一大批物探人才快速成长,在物探业务关键岗位上发挥着重要作用,队伍建设取得重大成果。

中国石油物探技术管理体系的建立,形成了具有中国特色的国际一流油公司物探管理模式,实现了物探业务管理的制度化、标准化和科学化,大幅度提高了中国石油物探技术管理水平,确保了物探工程实施成效,为“双复杂”领域勘探突破、复杂非均质储层规模增储及成熟探区精细挖潜起到了十分关键的支撑保障作用<sup>[9]</sup>。

## 4 陆上双复杂探区物探技术攻关方向

工业技术、计算机、信息技术、人工智能等技术的进步,为物探技术发展带来了机遇。面向陆上深层、非常规、隐蔽储层、小尺度地质体等目标,对物探技术精度要求越来越高<sup>[10]</sup>,必将推动物探技术向更高水平发展。

### 4.1 面向极低信噪比双复杂探区,持续发展全方位超高密度真地表地震勘探技术

在采集方面,需要发展基于复杂地表高精度影像、超高密度、非规则采样地震采集设计技术,真地表地震测量与精细表层结构表征技术,自主定位、实时质控无线节点采集技术,基于直升机、无人机支持的施工作业和井震联合激发技术等<sup>[11]</sup>。在处理方面,需要发展面向高陡复杂构造、复杂断裂的真地表各向异性深度域成像技术(包括 RTM、最小二乘、FWI、倾斜正交晶系等),非规则采样的数据恢复技术,散射波压制与绕射波成像技术,极低信噪比区复杂干扰波识别与压制技术等。在解释方面,需要发展复杂构造正演模拟与地质建模技术、逆掩断裂精确解释与演化分析技术、隐蔽型走滑断裂识别与刻画技术等。

### 4.2 面向隐蔽性目标进一步发展全数字“两宽两高”采集和高精度储层成像技术

在采集方面,需要发展面向薄储层、弱反射特征地质目标的“两宽两高”单点地震采集技术,面向复杂油气藏的三维井地联采地震采集技术,浅地表未成岩地层吸收衰减调查技术(深井、多分量),基于自动收放的海洋 OBN 多源同步高效采集技术等。在处理方面,需要发展近地表未成岩地层吸收补偿技术、宽频高保真地震信号处理技术、Q 场分析与建模技术、高分辨率高精度偏移成像技术(最小二乘、Q 偏移等),面向复杂气藏气水识别的多波多分量处理技术、井地联合成像技术等。在解释方面,需要发展地震多属性



聚类、融合技术,深度域高频层序解释、储层反演技术,基于多属性高分辨率地震反演、渗透性预测、跨频带多尺度岩石物理分析技术,面向油藏的时频电磁、井中电磁流体识别技术等。

#### 4.3 面向超高密度、海量地震数据,发展经济高效的自动化、智能化物探技术

在采集方面,需要发展面向复杂地表的地震采集智能化设计、自动布点、自动钻孔与检波器埋置技术、震源自动激发、井震联合主动激发技术等。在处理方面,需要发展地震初至智能拾取技术、智能数据分离与恢复技术、非规则采集智能数据插值与恢复技术、地震干扰波智能压制技术、速度场和  $Q$  场智能建模技术等。在解释方面,需要发展地震反射层位、层序、断层、属性智能拾取技术,基于深度学习的智能化储层预测技术、多维智能岩石物理分析与建模技术、智能化地质目标综合评价技术、专家决策系统等。

#### 4.4 面向剩余油预测和未来需求,探索研究全波场多参数全波形反演和多物理场勘探技术

一是多参数场全波形联合反演技术。针对陆上地震采集数据低频缺失、信噪比低、波形复杂问题,开展全波场的子波估计技术、高精度波动方程正演技术、地质约束的反演技术、多参数反演技术等研究。开展多参数反演,通过地震炮集数据直接反演地层参数信息(纵波、横波、密度、各向异性参数和  $Q$  等),解决多参数反演收敛性问题,通过弹性参数估计刻画和描述储层。二是多物理场勘探技术。重点开展复杂地质条件下多尺度复杂地球物理波场特征与传播理论、强非均质性介质地球物理响应及地震波传播和流固作用机理研究;研发复杂地质条件下勘探装备、岩石物理测量装备和测量方法,夯实多物理场地球物理勘探技术研究基础;探索多场源多尺度联合处理方法、多物理场储层参数预测方法,形成针对复杂地质目标的多源场多尺度油气地球物理探测技术。

## 5 结束语

陆上油气目标依然是中国加大油气勘探开发的重点领域。陆上双复杂探区地震勘探技术的发展任重道远,既面临理论上的创新与突破,也面临技术应用上的创新与实践,更面临管理上的创新与认识突破。以塔西南为代表的陆上极低信噪比高难度探区、以塔里木台盆区万米深层为代表的超深层目标识别、

以渤海湾“金豆子”为代表的成熟探区剩余油描述等仍面临许多技术挑战。地震资料依然不能满足油气勘探开发需求,需要转变技术攻关与管理理念,以提升地震资料品质为宗旨,以突破近地表速度建模技术瓶颈为抓手,强化基础研究,强化关键技术攻关与集成配套,推动物探技术进步,为油气增储上产奠定高品质资料基础。

#### 参考文献

- [1] 吴晓智,柳庄小雪,王建,等.我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域[J].地学前缘,2022,29(6):146-155.  
WU Xiaozhi, LIU Zhuangxiaoxue, WANG Jian, et al. Petroleum resource potential, distribution and key exploration fields in China[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 146-155.
- [2] 刘振武,撒利明,张少华,等.中国石油物探国际领先技术发展战略研究与思考[J].石油科技论坛,2014,33(6):6-16,35.  
LIU Zhenwu, SA Liming, ZHANG Shaohua, et al. CNPC's strategy for development of international-leading geophysical technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2014, 33(6): 6-16, 35.
- [3] 赵邦六,董世泰,曾忠.井中地震技术的昨天、今天和明天——井中地震技术发展及应用展望[J].石油地球物理勘探,2017,52(5):1112-1123.  
ZHAO Bangliu, DONG Shitai, ZENG Zhong. Borehole seismic development, status quo and future: application prospect of borehole seismic[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5): 1112-1123.
- [4] 刘振武,撒利明,董世泰.加强地震技术应用提升勘探开发成效[J].石油科技论坛,2015,34(1):1-8.  
LIU Zhenwu, SA Liming, DONG Shitai. Strengthen seismic technological application; improve exploration and development efficiency[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2015, 34(1): 1-8.
- [5] 孙龙德,撒利明,董世泰.中国未来油气新领域与物探技术对策[J].石油地球物理勘探,2013,48(2):317-324.  
SUN Longde, SA Liming, DONG Shitai. New challenges for the future hydrocarbon in China and geophysical technology strategy[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(2): 317-324.
- [6] 赵邦六,董世泰,曾忠,等.单点地震采集优势与应用[J].中国石油勘探,2021,26(2):55-68.  
ZHAO Bangliu, DONG Shitai, ZENG Zhong, et al. Advantages and application of single-point receiving in seismic acquisition[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 55-68.
- [7] 赵邦六,董世泰,曾忠,等.中国石油物探技术支撑油气重大突破典型实例[M].北京:石油工业出版社,2022.  
ZHAO Bangliu, DONG Shitai, ZENG Zhong, et al. Typical Examples of Major Breakthroughs in Oil and Gas Supported by Petrochina Geophysical Exploration Technology[M]. Petroleum Industry Press, Beijing,

- 2022.
- [8] 赵邦六,董世泰,易维启,等. 中国石油物探技术管理体系创新与实践[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(1): 70-82.
- ZHAO Bangliu, DONG Shitai, YI Weiqi, et al. Innovation and practice of CNPC geophysical technological management system[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(1): 70-82.
- [9] 赵邦六,易维启,董世泰,等. 中国石油物探技术管理体系建设与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- ZHAO Bangliu, YI Weiqi, DONG Shitai, et al. Construction and Practice of Geophysical Exploration Technology Management System in China Petroleum Corporation[M]. Petroleum Industry Press, Beijing, 2022.
- [10] 何海清, 范士芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 17-30.
- HE Haiqing, FAN Tuzhi, GUO Xujie, et al. Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the 13th five-year plan period and its development strategy for the 14th five-year plan[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 17-30.
- [11] 赵邦六,董世泰,曾忠,等. 中国石油“十三五”物探技术进展及“十四五”发展方向思考[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 108-120.

ZHAO Bangliu, DONG Shitai, ZENG Zhong, et al. Geophysical prospecting technology progress of PetroChina in the 13th five-year plan period and development direction consideration in the 14th five-year plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 108-120.

(本文编辑:冯小球)

## 作者简介



赵邦六 博士,1964年生;教授级高级工程师,1985年本科毕业于长春地质学院,获应用地球物理专业学士学位;2000年获中国科学院地质与地球物理研究所岩石学与矿床学博士学位;现任中国石油勘探与生产分公司副总经理,从事地球物理勘探技术研究和管理工作。长期致力于三维地震勘探技术的国产化及深化应用研究,发表高分辨率、三分量、井中 VSP、井地联采等地震勘探新技术研究应用方面文章20余篇,编写了《多分量地震勘探技术与实践》《中国石油地球物理勘探典型范例》《生物礁地质特征与地球物理识别》等4部专著。

## · 消息 ·

### 2024年《石油地球物理勘探》征订单

欢迎您订阅2024年《石油地球物理勘探》——石油物探科技创新成果的展示平台,石油物探新技术新信息的交流园地!

《石油地球物理勘探》是一份创刊于1966年、伴随着我国石油工业的飞速发展而迅速成长起来的优秀科技期刊。她于1992年、1997年蝉联全国优秀科技期刊一等奖;1999年荣获首届国家期刊奖;2001年进入中国期刊方阵,获“双高期刊”荣誉;2003年、2005年蝉联第二届和第三届国家期刊奖“百种重点期刊”;2008年获“中国精品科技期刊”称号;2009年获“新中国60年有影响力期刊”称号;2012年荣获“中国国际影响力优秀学术期刊”荣誉;2013年、2015年、2017年连续入选全国“百强科技期刊”;自1995年以来一直为美国工程引文索引(EI)收录的源刊。

为保证您能按时收到所订刊物,请在发行凭证中将您的详细地址、单位、邮编、电话、电子邮箱等内容填写清楚,特殊情况请另作说明。订刊费请汇至如下银行账户,并务必在汇款时注明“订刊费,联系人的姓名”。

**收款单位:**中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司

**收款账号:**13001666209050000633

**开户银行:**中国建设银行股份有限公司涿州金街支行

**本刊订阅联系人:**任晓燕      订阅电话:0312-3822452      电子信箱:ogpfxq@sina.com