

引文: 郭贵安, 关旭, 肖富森, 等. 四川盆地中部侏罗系沙溪庙组致密砂岩气藏地震一体化描述技术 [J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 40-50.
GUO Gui'an, GUAN Xu, XIAO Fusen, et al. Integrated seismic description technology for tight sandstone gas reservoir of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 40-50.

四川盆地中部侏罗系沙溪庙组致密砂岩气藏地震一体化描述技术

郭贵安¹ 关旭² 肖富森² 张本健² 文龙²
杨广广² 张晓丽² 吕龔² 千大勇² 夏小勇²

1. 中国石油西南油田公司 2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院

摘要: 四川盆地中部中侏罗统沙溪庙组砂体具有“期次多、分布广、宽度窄、厚度薄”的地质特征, 砂岩储层致密, 非均质性较强, 砂岩地震识别及精细刻画、储层预测及含气性预测配套技术不成熟, 制约了该区致密气勘探开发进程和效果。为此, 通过地震处理、解释联合攻关, 研究形成了适用于沙溪庙组致密砂岩气藏的地震一体化描述技术。研究结果表明: ①面向沙溪庙组目的层的保真、保幅、宽频、高分辨率地震处理技术, 可以有效地提高河道砂体地震资料纵横向分辨率及地震成像, 砂体特征更突出, 断层成像更清晰, 道集质量明显提高, 为后续叠前地震储层及含气性检测提供了可靠数据; ②在明确砂体地震反射特征的前提下, 通过河道砂组地震层序划分及砂体精细雕刻技术, 可以确定沙溪庙组河道砂体空间期次、重点砂体及单河道横向展布, 岩性预测吻合率 100%; ③形成针对重点河道致密砂岩储层及含气性预测的有效技术手段及高产井部署地震模式, 定量预测储层厚度、孔隙度及含气性的误差均小于 10%, 高产井模式有效地指导了水平井部署。结论认为, 形成的沙溪庙组致密砂岩气藏地震一体化描述技术经实际应用证明较为成熟, 获气井成功率大幅提升, 单井产气量不断获得新突破, 该技术有效地支撑了致密砂岩气藏的勘探开发成效显著。

关键词: 四川盆地中部; 中侏罗统; 沙溪庙组; 致密砂岩; 地震处理; 砂体刻画; 储层预测; 含气性预测

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.01.004

Integrated seismic description technology for tight sandstone gas reservoir of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin

GUO Gui'an¹, GUAN Xu², XIAO Fusen², ZHANG Benjian², WEN Long²,

YANG Guangguang², ZHANG Xiaoli², LYU Yan², GAN Dayong², XIA Xiaoyong²

(1. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.1, p.40-50, 1/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The sandbodies of Shaximiao Formation of Middle Jurassic in the central Sichuan Basin are geologically characterized by multiple stages, wide distribution, narrow width and small thickness, and the sandstone reservoirs are tight with stronger heterogeneity. In addition, the support technologies for seismic identification and fine description of sandstone, reservoir prediction and gas content prediction are not mature, which restricts the process and effect of tight gas exploration and development in this area. By researching seismic data processing and interpretation jointly, this paper develops an integrated seismic description technology which is applicable to the tight sandstone gas reservoir of Shaximiao Formation. And the following research results are obtained. First, the seismic data processing technology of fidelity, preserved amplitude, wideband and high resolution which is developed for the target layer of Shaximiao Formation can effectively improve the vertical and horizontal resolution of seismic data and the seismic imaging of channel sand bodies, so the characteristics of sand bodies are more prominent, fault imaging is clearer, the quality of the trace gather is improved greatly, which provides reliable data for the subsequent pre-stack seismic reservoir and gas content detection. Second, while the seismic reflection characteristics of sand bodies are clarified, the spatial period of Shaximiao Formation channel sand bodies and the lateral distribution of key sand bodies and single channels can be figured out by means of seismic sequence division of channel sand body and fine description of sand body, and the coincidence rate of lithology prediction is 100%. Third, the effective technical method for the prediction of key channel tight sandstone reservoir and its gas content and the seismic mode for the deployment of high-yield well are developed, which ensure the quantitative prediction error of reservoir thickness, porosity and gas content less than 10% and provide effective guidance for the deployment of horizontal wells. In conclusion, practical application shows that the integrated seismic description technology for the tight sandstone gas reservoir of Shaximiao Formation is relatively mature, which improves the success ratio of production tests greatly and realizes new breakthroughs in single-well gas production continuously. This technology effectively supports the exploration and development of tight sandstone gas reservoirs, and the achievements are remarkable.

Keywords: Central Sichuan Basin; Middle Jurassic; Shaximiao; Tight sandstone; Seismic data processing; Sand body description; Reservoir prediction; Gas content prediction

基金项目: 中国石油西南油气田公司科技研究与技术开发项目“川中—川西过渡带侏罗系沙溪庙组成藏机制及勘探潜力评价研究”(编号: 20200301-23)。

作者简介: 郭贵安, 1964 年生, 正高级工程师, 硕士; 主要从事天然气地质开发研究及技术管理工作。地址: (610051) 四川省成都市成华区府青路一段 3 号。ORCID: 0000-0001-6192-7131。E-mail: gguian@petrochina.com.cn

通信作者: 关旭, 1984 年生, 高级工程师, 博士; 主要从事地球物理综合研究工作。地址: (610041) 四川省成都市高新区天府大道北段 12 号。ORCID: 0000-0002-5098-9289。E-mail: guanxu02@petrochina.com.cn

0 引言

四川盆地中部（以下简称川中地区）中侏罗统沙溪庙组发育以三角洲—河流相沉积体系为主的致密砂岩气藏，优质储层集中发育在边滩微相内^[1,2]。早期天然气勘探开发主要集中在川西南部、川东北部等地区，川中地区未作为重点领域进行天然气勘探开发^[3]。2018年，在地质有利条件分析及地震落实河道砂体基础上，为了评价秋林区块沙溪庙组二段（以下简称沙二段）砂体的含油气性，对秋8井和秋林10井的沙二段8号砂组进行老井试修，测试分别获得日产量为 $2.01 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $1.41 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的天然气流，发现了沙溪庙组气藏。此后，川中地区沙溪庙组多口井获工业气流，平均测试日产气量为 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，揭示了沙溪庙组良好的勘探开发潜力。由于沙溪庙组砂体纵向叠置发育，横向交错分布，致密砂岩储层非质性强，含气性差异大，致密砂体刻画、储层及含气性定量预测成为制约该区天然气勘探开发的关键地球物理问题。针对上述难题，笔者以保真、保幅、宽频、高分辨率地震资料处理为基础，通过地震、地质相结合，厘清致密砂岩地震响应特征，应用高频地震层序技术实现纵向河道砂组期次统一划分，河道砂体多属性融合刻画技术实现河道砂体识

别刻画及单河道精细剥离，应用地震振幅属性、叠前地质统计学反演等方法实现储层定性、定量预测，并基于岩石物理分析的叠前含气性定量预测技术实现河道致密砂岩储层含气性定量预测，初步形成了一套适用于川中地区沙溪庙组的“致密砂岩气藏地震一体化描述”技术，为井位部署提供了技术支撑，并在实际应用中取得了良好的勘探开发效果。

1 地质背景

川中地区侏罗系为一套巨厚的陆相地层，下侏罗统自流井组、凉高山组和中侏罗统沙溪庙组保存完整，上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组部分剥蚀（图1）。其中，沙溪庙组为一套巨厚的陆相碎屑岩沉积，地层厚度介于1 000~1 500 m，岩性为杂色泥岩夹灰色、灰绿色细—中粒砂岩，具有典型“泥包砂”的特点（单砂体厚度介于10~30 m），以叶肢介页岩为标志层分为上下两段。沙溪组下段（即沙一段）以三角洲相沉积为主，顶部叶肢介页岩为一套最大湖泛期的产物，该标志层在川中大部分地区可以进行对比^[4]，沙溪庙组上段（即沙二段）以浅水三角洲相—河流相沉积为主。川中地区沙溪庙组底界构造为北西—南东向的单斜，地层倾角介于 $2^\circ \sim 3^\circ$ ，构造平缓，主要发育

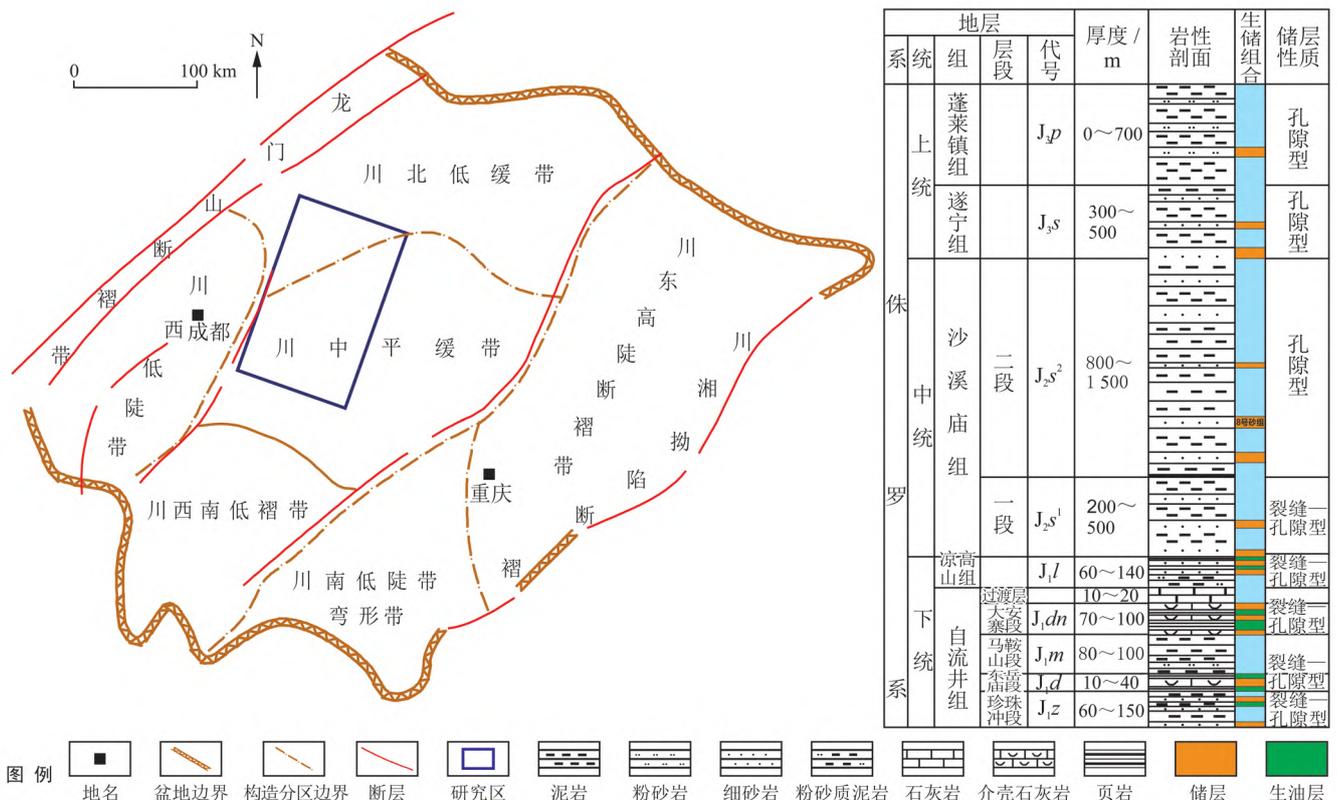


图 1 研究区位置及侏罗系地层柱状图

小规模的正断层。物源方向同时受到北面的大巴山和西面的龙门山北段影响,但以东北向物源为主^[5-6]。目前已发现的沙溪庙组气藏主要分布在沙二段,砂岩储层低孔—低渗,覆压渗透率小于 0.1 mD,属于典型的受岩性控制的致密砂岩气藏^[7-8]。

2 勘探开发面临的主要地震问题

川中地区沙溪庙组沉积厚度大,河道砂体纵向多层,平面广泛分布,且具有砂体厚度较薄、储层非均质性强、储层含气性差异大等特点,前期地震采集、处理、解释工作主要面向深层碳酸盐岩地层,未针对浅层沙溪庙组开展系统地震研究,勘探开发面临以下几大地震难点。

2.1 三维地震针对性弱,难以满足沙溪庙组精细勘探开发需求

川中地区前期三维地震针对浅层沙溪庙组的有效覆盖次数较低,采集脚印现象严重,静校正问题较为突出,常规地震处理方法在低频保护、分辨率提高、AVO 特征的道集保护等方面针对性不强,导致沙溪庙组地震资料信噪比低、砂体及断层成像精度低、地震道集资料较差,AVO 响应特征分析受到影响较大,难以满足河道砂体识别及地震精细刻画、烃源断裂地震精细刻画、储层及其含气性定量预测需求。

2.2 砂体纵向多期叠置,基于地震数据驱动的河道砂组期次划分、砂体识别与精细刻画难度大

研究区河道砂体纵向多期广泛分布,但缺乏明显的标志层作为期次统一划分标准,单纯依靠测井曲线、岩性、地震层位对比等方法难以进行精细的地层划分和小层对比,砂层组对比容易出现穿时现象,基于传统地质、地震手段难以厘定河道砂组纵向期次;同期河道砂体横向个数众多、流向广,分支交错现象普遍,地震资料同一相位内也存在多套河道砂体。前期砂体识别及刻画技术无法将同期发育的多套河道砂体进行剥离,难以满足后期单河道砂体气藏精细勘探开发需求。

2.3 储层非均质性强,含气性差异大,亟需地震定量预测方法指导井位部署

研究区河道致密砂岩气藏为岩性气藏,其具有以单河道为储集单元的特征,同层段内的不同河道,甚至同河道不同位置砂体,受烃源断层配置条件及圈闭条件、沉积微相、储层特征等差异影响,均会导致砂体储层物性及含气性存在明显差异。因此,寻

找有效的储层及含气性地震预测方法,对储层厚度、孔隙度、含气性的定量预测,明确优势储层及含气甜点区纵横向展布特征,指导后续勘探开发水平井位优选及部署,实现规模效益开发,是地球物理面临的直接难题。

3 保真保幅宽频高分辨率地震叠前成像技术

川中地区浅层干扰严重,地震资料信噪比低、分辨率低、断层与砂体的成像精度低,采用以下关键地震处理技术对策,可有效地提高目的层资料主频和频宽,河道砂体“亮点”特征更突出,断层成像更清晰。

3.1 微测井分步约束层析静校正技术

层析静校正是一种非线性反演,主要利用地震初至波射线的走时和传播路径反演介质的速度结构,能同时利用直达波、回折波、折射波等不同类型的初至时间,不受地表及近地表结构变化的约束,具有广泛的适用性。微测井分步约束层析静校正^[9]充分结合微测井、小折射等资料,首先利用微测井和近炮检距初至信息反演低速层速度,再利用微测井和中、远炮检距的初至信息,进一步约束低速层、降速层反演精度,通过自适应算法求取权系数,减少迭代次数和提高反演精度,使反演得到的近地表速度模型更贴近真实地表地质情况,静校正效果最佳。

3.2 井控保真高分辨率处理技术

VSP 井控 Q 补偿技术^[10]可以消除由地层地质特性引起的地震波吸收衰减效应对地震资料的不利影响。利用微测井、VSP 信息建立精细 Q 体模型,结合地震反射层位进行匹配分析,求取相对准确的 Q 值,使井震符合率最高,恢复由于近地表吸收造成的地震子波能量衰减,在一定程度上改善地震资料的频率特征,使目的层反射同相轴一致性变好,振幅特征更可靠。

速度场的精度影响叠前偏移成像质量。由于沙溪庙组埋藏浅、覆盖次数低、地震资料信噪比低,浅层速度精细拾取难度大,常规速度建模的偏移成像效果差。采用基于井控速度建模技术^[11]可以提高速度场精度,改善成像质量。利用 VSP 资料约束初始速度模型的建立,确定区域速度变化规律,利用层控速度建模构建速度模型的低频分量,利用层控网格层析构建速度场的高频分量,也可以结合钻井资料,进行各向异性校正,降低误差,进一步提高成像精度。

3.3 OVT 域叠前处理技术

常规窄方位角地震资料分方位处理时为了满足一定的覆盖次数和各方位之间的均匀，将方位角划分得较大，导致方位角信息模糊和采样稀疏，不利于准确反映方位各向异性，影响成像精度。OVT 域叠前处理技术^[12-13]是一种高密度宽方位地震处理技术，通过 OVT 域数据规则化处理，补全缺失的地震道，消除空间采样不规则对成像效果影响。将 OVT 道集偏移后抽取共成像点道集（螺旋道集），可以划分更精细的方位角，方位各向异性特征反映更明显。在叠加成像前，消除方位各向异性的影响，能够有效地提高叠加成像的质量。

通过上述多种处理技术的综合应用，极大地改善了沙溪庙组三维地震成像质量，浅层地震资料信噪比明显提高，砂体“亮点”特征更突出，边界更清晰、连续性更好，断层成像更清晰可靠。目的层沙溪庙组地震优势频带介于 8 ~ 75 Hz，主频介于 35 ~ 40 Hz，低频信号有效增强，为构造精细解释、河道砂体精细刻画、叠前（叠后）储层预测及烃类检测研究奠定良好数据基础（图 2）。

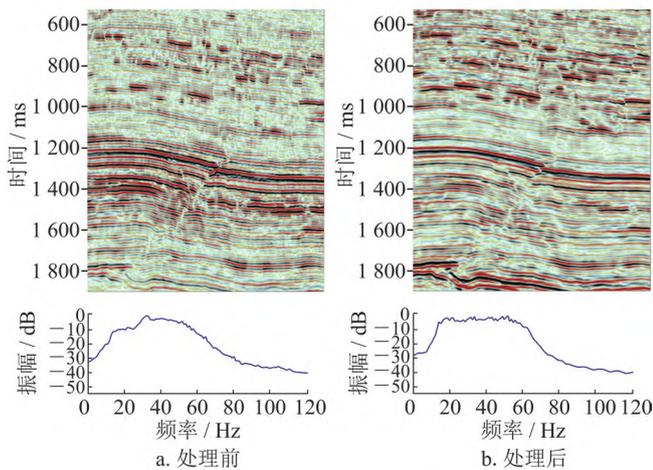


图 2 沙溪庙组三维地震资料针对性处理前后效果对比图

4 河道砂体地震层序划分及精细雕刻技术

研究区沙溪庙组河道砂体纵向上多期频繁叠置，甚至自同一地震相位内发育多套河道砂体，不同期次的河道砂体难以有效区分。在明确河道砂体地震响应特征的基础上，利用基于高密度层序地层切片技术、匹配追踪分频、RGB 像素融合成像、多属性融合、叠置河道识别等技术，对研究区沙溪庙组叠置河道进行了河道期次划分和河道外形精细雕刻，并实现了同一地震相位内不同期次河道的剥离，奠定了河道内幕井位精细部署的基础。钻井证实该技术方法砂体岩性预测吻合率 100%。

4.1 致密砂岩储层地震响应特征

基于实际岩心及测井曲线分析，研究区沙溪庙组纵向发育多期叠置砂体，沙一段自下而上泥质含量逐渐减少，砂岩自然伽马低、声波时差小、孔隙度较低，总体物性中等。沙二段砂泥岩分异明显，砂岩自然伽马低、声波时差大、孔隙度高，总体物性较好，优质储层发育。

根据砂岩储层物性差异，基于实钻井测井岩石物理分析结果，采用等效介质正演模型，应用与区内三维地震主频一致的 35 Hz 雷克子波，开展地震正演模拟分析，总结沙溪庙组致密砂岩储层为 2 种储层地震响应特征（图 3）。①储层地震响应特征 1：典型沙二段高孔砂岩，砂体声波速度及密度明显低于上下泥岩地层，地震波阻抗表现明显的低波阻抗特征，砂体顶界对应强波谷反射，砂体底界在波阻抗界面对应强波峰反射，砂体在地震剖面上表现为明显的短轴状顶谷—底峰“亮点”特征。②储层地震响应特征 2：沙一段中低孔砂岩，砂体声波速度高于或接近周围泥岩地层，密度低于或接近泥岩地层，砂体地震波阻抗高于围岩地层，砂体顶界表现为中—

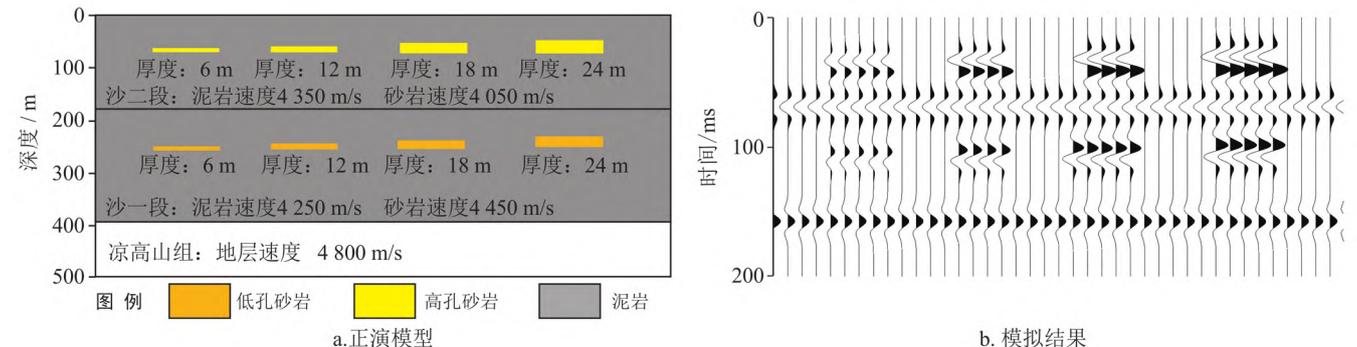


图 3 沙溪庙组高孔砂体及中低孔砂体地震正演模拟结果图

强波峰反射，底界表现为中—强波谷反射，砂体在地震剖面横向上反映较为明显的顶峰—底谷“亮点”特征。

分析两种砂体储层地震响应特征异同，砂体相较于围岩均表现为“亮点”反射特征，但第一种砂体储层响应特征，主要位置在沙二段，储层孔隙度多大于 10%，整体物性条件更好，是目前天然气勘探开发的主要砂体。第二种砂体储层地震响应特征，主要位于沙一段，储层孔隙度大多介于 6%~10%，储层物性条件中等，但仍具有较好天然气勘探开发潜力，是下一步致密砂岩效益开发的重要目标层段。

4.2 基于地震沉积学的砂组期次划分

前期，肖富森等^[14]基于陆相层序地层理论将沙溪庙组划分为 3 个三级与 5 个四级基准面旋回，并将沙二段细分为沙二¹、沙二²、沙二³、沙二⁴共 4 个亚段。但沙溪庙组厚度大，河道砂组纵向分布期次多，单一地层层序划分难以满足精细勘探开发需求，制约后续不同砂体井位部署、储量计算、开发单元描述等工作的开展。针对该问题，以地震沉积学原理为基础，应用全局自动等时建模技术实现研究区等时可靠的河道砂组期次划分^[15-16]。该方法以“最小成本函数”为核心，结合地质沉积“泥包砂”、地震反射“强亮点”等特征及河道纵横向出现顺序，开展全局人工智能等时建模，确定单期河道砂组顶底等时界面。依次刻画出各期河道横向展布和纵向叠置关系。再以单期砂层组为框架，以处理后的高分辨率地震数据为基础，依次刻画出各期河道砂组横向展布和纵向叠置关系。通过该方法的有效应用，将川中地区沙溪庙组统一划分出 23 期河道砂组，主要砂体具有“宽度窄，延伸远”的特征。

4.3 河道砂体识别及空间雕刻技术

4.3.1 分频 RGB 像素融合技术

地震资料受分辨率的限制，在砂体识别方面纵向上主要依据地震反射能量的变化对单一砂体进行分析，横向上由于砂体边界受岩性、物性影响导致地震反射特征变化较大，单一砂体边界的地震识别存在多解性^[17]。将频谱分解技术结合 RGB 像素融合技术引入沙溪庙组河道砂体地震属性分析中，可将不同频段振幅能量互不重叠的地震体进行 RGB 模式的混合显示，形成具有通频信息的 RGB 混频数据体，可在一定程度上增强或细化河道砂体在平面上的属性响应。若三维地震数据中河道砂体能量较弱，单一频率能量属性体是很难分辨其分布特征，但采用多个分频

能量属性 RGB 模式混合后，河道砂岩与围岩会呈现明显的差异；若均表现为较强能量特征，在 RGB 混频后河道砂体就会以近白色特征很清晰地呈现出来。此方法可以突出共性、弱化差异，对于突出各分频属性中能量近似区域有很好的效果，对河道边界的确定有较好的应用效果。笔者选取 15 Hz、35 Hz、55 Hz 的单频体进行了 RGB 融合，其中 15 Hz 数据更加突出厚层河道砂体的分布特征，而 55 Hz 的高频数据体在早期河道砂体细节的刻画上则更加具有优势（图 4）。

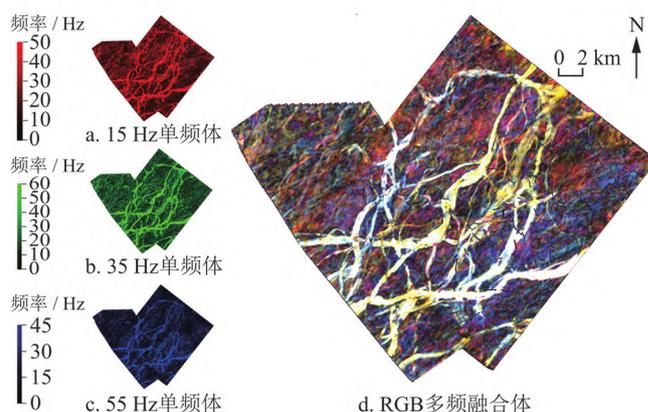


图 4 沙溪庙组 8 号砂组 RGB 融合显示图

4.3.2 多属性融合技术判别河道轮廓

地震属性能反映地下地质体及其地球物理性质的变化，但是每一种地震属性只对某种地质特征敏感^[18]。地震属性的多属性融合砂体雕刻技术方法，可同时使用多种对砂体敏感的属性及反演结果表征河道砂体，从不同角度剔除围岩影响，降低砂体判别多解性；比单一地震属性、单一阈值更能精确判别河道轮廓。在精细地层层序模型约束下，通过多属性融合技术，可以精细雕刻河道砂体。

研究区沙溪庙组岩性组合特征以“泥包砂”为主，尤其是沙二段砂岩以低波阻抗砂体为主，与围岩的地球物理性质具有较大的差异性，所以地震属性对河道砂体边界有较为明显的响应。在砂体精细标定、地层对比追踪基础上，进行三维沿层属性参数提取。在相干属性中，河道外形更加明显；在波阻抗属性中，砂体内幕更加清晰。两者融合的效果则充分发挥了各自的优势，揭示了河道砂体外形—内幕的变化特征。

4.3.3 河道砂体空间精细雕刻技术

多种地震方法明确河道轮廓基础上，基于三维体空间雕刻技术刻画河道砂体空间展布。该方法结合河道砂体精细识别边界成果及地震振幅“亮点”特征，选取砂体边界约束的动态门槛下限值为“种子点”，

进行三维地震空间内人机交互式的快速河道砂体追踪,可实现快速、准确雕刻河道砂体空间形态及分布特征。为沙溪庙组纵向多层河道砂体立体勘探开发、目标靶体优化设计提供更为直观的数据信息。目前已全面应用于川中地区连片地震三维河道砂体刻画中。

4.4 单河道砂体精细剥离描述技术

由于物源、形态、后期改造压实作用以及成藏等因素不同,在同一期次的砂组内,形成时期紧邻的河道砂体也会呈现出不同的物性和含气性,即“多期河道,差异成藏”^[19-20]。因此,对同一期次砂组内不同河道进行拆分和分选,分析出有利砂组中的优势砂组,对后续开发具有重要的意义。

面对砂体叠置发育区,针对 8 号砂组单条河道分选,主要通过两项研究技术来开展:①剖面与平面

动静态结合分析技术,基于地震资料识别同期河道砂体“亮点”反射之间的叠置关系,在平面属性图上分析剖面上各个河道砂体“亮点”在平面上的展布特征;②基于高密度层序地层模型的动态切片分析技术,在单期砂体内形成高密度等时切片,实现动态模式下由砂体底到砂体顶的属性切片播放,进而分析每条河道从出现到消失的先后顺序,全局分析河道同期范围内不同砂体的地质关系。通过该方法,对重点河道砂体开展单河道的地震精细剥离,实现同期河道复合相位内多条单河道识别与精细刻画,明确各单河道纵向演化特征,实现单河道精细评价(图 5),为河道砂体“一河一藏”的精细气藏描述、“一河一策”的精准开发施策提供良好基础。在其他期次砂体,以及在整个川中地区都具有广泛的适用性。

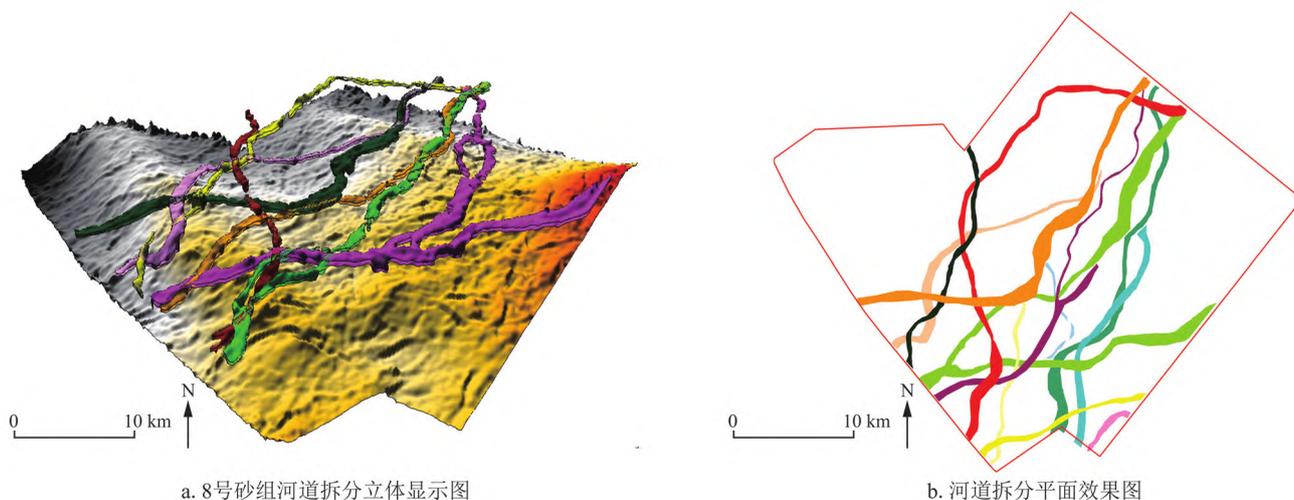


图 5 沙溪庙组 8 号砂组单河道拆开展示图

5 河道致密砂岩储层及含气性预测技术

在实现砂体空间精细刻画、明确展布特征的基础上,针对勘探开发重点砂体,运用地震属性分析方法与砂体储层测井评价参数结合,发现地震振幅能量与井上储层物性具有明显正相关关系,振幅能量可较好地识别同期河道砂组内优质砂岩储层;运用基于有井约束的随机反演技术可实现储层参数定量预测,且预测精度较高。通过测井岩石物理分析明确纵横波速度比为弹性敏感参数,并在此基础上,开展地震振幅随偏移距变化特征(AVO特征)分析,结合OVT处理后的优化道集分析,明确高孔含气砂岩为III类AVO响应特征。综合分析认为,优选叠前弹性参数反演可定量预测砂体含气性。最终实现了由定性到定量,由储层到含气性,由相带找甜点的

河道致密砂岩储层及含气性预测。

5.1 河道砂岩储层定性定量预测技术

5.1.1 河道砂岩储层定性预测技术

地震属性在油气田勘探开发中应用于地震构造解释、地质相、油气藏特征描述等各个领域。其中,地震振幅类属性能够反映地层岩性变化、沉积相变化、岩性尖灭、不整合等地质学特征,亦可以反映储层厚度、AVO等储层参数特征,地震振幅属性广泛应用于储层的油气预测^[21-23]。笔者尝试建立地震振幅属性与重点河道砂岩储层物性之间的关系。研究区重点勘探开发的 8 号砂组实钻井砂岩厚度介于 10 ~ 30 m,储层厚度介于 8 ~ 22 m,孔隙度介于 6% ~ 15%,基于实钻井岩性、物性参数建立储层地震正演模型,并开展正演模拟分析,正演结果表明:①受地震调谐

厚度理论影响,在现有地震主频条件下(35 Hz),砂岩储层厚度介于6~25 m时,地震振幅能量随储层厚度变大而变大,储层厚度小于6 m时地震难以有效区分,储层厚度大于25 m时,振幅能量无明显增强;②储层厚度不变,储层孔隙度由6%逐渐增大至15%,振幅能量逐渐增强。进一步研究结果发现,地震振幅能量与储层厚度、储层孔隙度有较好的正相关关系,尤其在重点开发区内,振幅能量与储层厚度、孔隙度相关性超过0.8。总体而言,通过振幅能量属性可以定性预测优质河道砂体的展布规律及储层分布位置,为井位部署提供依据。

5.1.2 河道砂岩储层定量预测技术

储层预测技术是岩性油气藏勘探开发的重要手段,且方法众多^[24-26]。研究区沙溪庙组重点河道砂岩纵波阻抗与孔隙度具有很高的线性相关性,在剔除泥岩影响后,砂岩储层孔隙度越高,纵波阻抗越低,针对研究区沙溪庙组砂岩储层预测,可以用纵波阻抗定量表征储层孔隙度。笔者应用基于有井约束的随机反演进行波阻抗预测。根据对地震反射层的对比追踪来确定反演结果的中频段,以测井资料的高频信息和低频成分补充地震数据有限带宽的不足,进而获得高分辨率的波阻抗资料,便于更准确、精细地预测沙二段重点河道砂岩储层孔隙度、厚度等参数。预测的储层厚度、孔隙度结果与实际验证井吻合好,预测误差小于10%,实现了河道砂岩储层的定量预测。

5.2 储层含气性检测技术

5.2.1 沙溪庙组岩石物理及 AVO 特征

地震岩石物理学是油气勘探的基础,利用岩石物理技术研究成果,寻找储层识别及含油气性分析的敏感岩石物理参数,可有效地指导储层预测及烃类检测^[27-29]。笔者针对沙溪庙组重点含气河道砂岩,利用地质研究、测井资料及完钻测试结果,开展基于阵列声波测井的岩石物理分析,寻找砂岩储层含气性敏感参数。研究表明,纵横波速度比可较好地分选含气层。如图6所示,不同井气层与干层的纵横波速度比阈值为1.72,可通过该阈值来区分含气层与围岩,对气层的识别能力突出,能较好地指示重点含气砂岩。通过纵横波速度比作为含气敏感参数的地震预测来表征含气层具备可行性。

通过已钻井产气层 AVO 正演模拟与基于道集保护处理后的实际道集资料对比分析气层 AVO 特征,发现高孔含气砂层随偏移距的增大振幅能量逐渐增

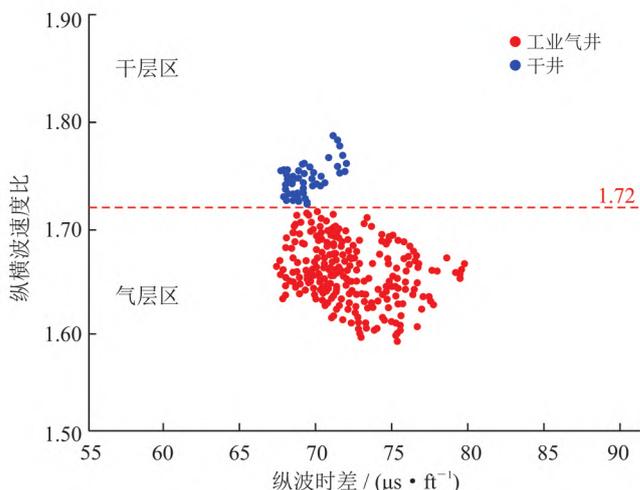


图6 河道砂岩测井解释含气性与纵横波速度比关系图
(1 ft=0.304 8m)

强,即典型的III类 AVO 特征。基于单井测井曲线正演道集的 AVO 变化特征与实际浅层处理地震资料的实际道集特征基本一致,表明基于地震近远道集差异的 AVO 属性及叠前弹性参数定量预测储层含气性具备实际地震地质基础。

5.2.2 致密砂岩储层含气性定量预测技术

基于叠前弹性参数反演获得的纵横波速度比,其垂向分辨率较高,储层含气性预测多解性低,预测结果表明,研究区8号砂组总体含气性较好,西南部多个砂体纵横波速度比预测结果均小于1.72(黄色、红色),多条河道砂体含气性好,后续实钻井证实定量含气性预测结果吻合度高,该方法可用于含气层的预测(图7)。因此,叠前弹性参数反演所得的纵横波速度比是沙溪庙组储层含气性评价的重要参考指标。

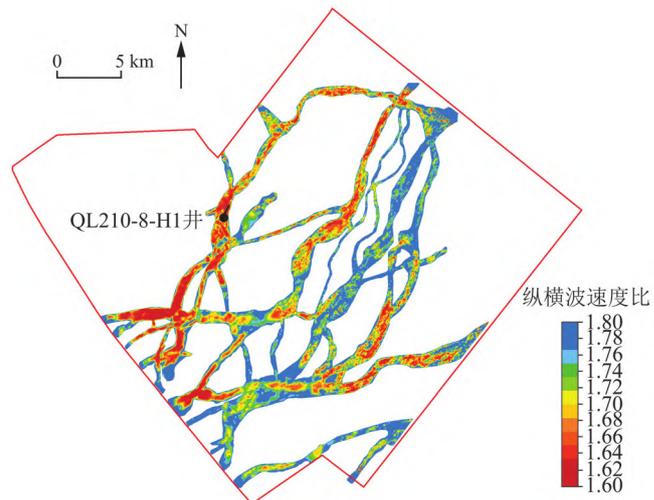


图7 沙溪庙组8号砂组储层含气性定量预测图

6 高产井地震模式

2018 年以来，以勘探开发一体化部署为原则，针对四川盆地中西部沙溪庙组致密砂岩气藏，通过三维地震一体化技术开展关于砂体刻画、储层及含气性预测，并结合河道砂岩气井高产 3 大主控因素（优质储层发育程度、储层富气程度以及压裂改造），明确高产井地震模式：①在河道精细刻画基础上，基于砂体振幅能量定性预测储层发育程度，振幅能量越强，储层发育程度越高；②结合储层孔隙度大于 10% 对产能的高贡献率^[30]，优选砂岩储层定量预测孔隙度大于 10% 部署井位；③基于岩石物理实验分析纵横波速度比小于 1.72，储层含气性定量预测结

果优选低纵横波速度比甜点区部署井位。在保证“振幅能量值高、储层预测孔隙度高、含气性预测纵横波速度比低”的“两高一低”的高产井地震模式基础上，尽量保证水平井轨迹与地层最大主应力方向保持垂直，储层改造及测试效果更优。例如 QL210-8-H1 井（图 8），水平井设计优选均方根振幅能量大于 5 500，预测孔隙度介于 11% ~ 13%，含气性预测纵横波速度比介于 1.68 ~ 1.55。实钻井结果表明，储层实际孔隙度介于 10% ~ 13%，测井解释含气饱和度介于 67% ~ 80%，实钻井结果与地震储层及含气性预测结果一致，该井测试无阻流量为 $92.63 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，测试日产气量为 $42.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，证实了按照高产井地震模式部署的有效性。

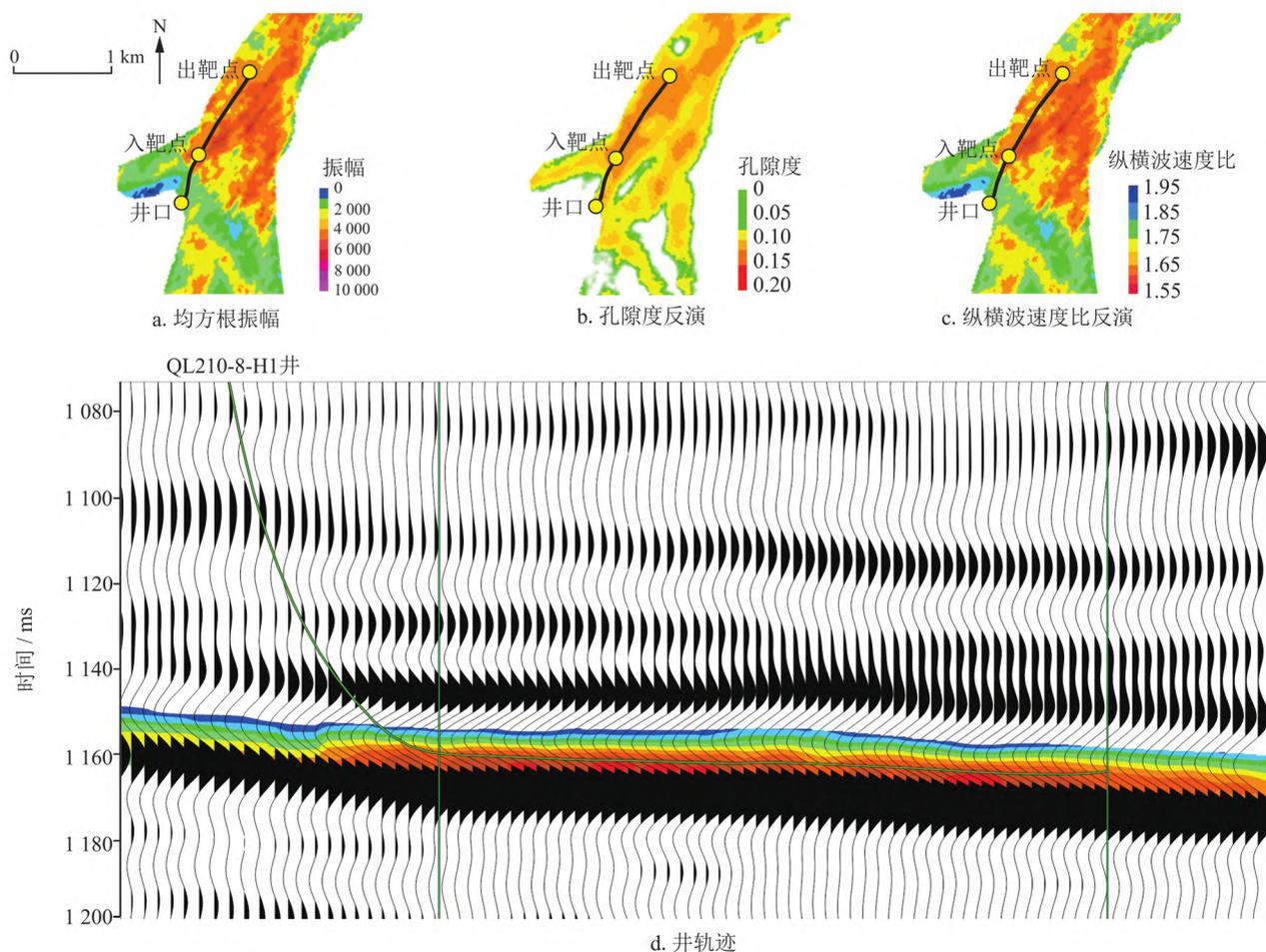


图 8 QL210-8-H1 井 8 号砂组水平井轨迹设计图

7 应用效果

2018 年以来，以沙溪庙组致密砂岩气藏勘探开发一体化部署为原则，通过大面积三维浅层目标处理、河道砂体精细刻画、储层及含气性预测，有效地支撑了井位目标论证及水平井优化，勘探开发效

果明显。水平井储层钻遇率由早期的 72% 提高至目前的 85% 以上；重点开发区块 8 号砂组水平井成功率达 100%；结合水平井工艺改造，单井测试日产气量由早期的 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提高到目前的 $53.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。致密砂岩气藏地震一体化描述技术为四川盆地致密气整体效益开发提供有力的技术保障。

川中地区通过对沙溪庙组河道砂体三维地震处理解释,形成准确的储层厚度、储层孔隙度等预测成果,为储量申报提供可靠的储层参数,支撑了沙溪庙组致密气砂藏的三级储量申报工作;同时,支撑了多个区块开发先导试验方案的井位部署,为沙溪庙组致密气藏增储上产、效益开发提供有效帮助。

8 结 论

1) 针对川中地区沙溪庙组目的层的保真、保幅、宽频、高分辨率地震处理,可以有效地提高河道砂体地震资料纵横向分辨率及地震成像,砂体特征更加突出,道集质量明显提高,有助于后续砂体刻画、疏导断裂解释,并为叠前地震储层及含气性检测提供可靠数据。

2) 在明确河道砂岩“亮点”地震反射特征的前提下,通过有效的地震技术手段对区内砂组开展期次统一划分、砂体空间精细刻画,落实了沙溪庙组河道砂组空间期次、各期次砂组及单河道横向展布,为后续地质研究、资源规模评估、整体勘探开发部署等工作奠定坚实基础。

3) 通过建立河道砂岩储层物性与振幅能量、储层孔隙度与地震波组抗、纵横波速度比与含气性之间的紧密相关性,形成了针对河道致密砂岩储层及含气性预测的有效技术手段及高产井部署地震响应模式,其成果在钻井实践中已获充分验证,是四川盆地致密砂岩气藏高效开发的重要技术手段之一,有力地支撑了致密砂岩气藏勘探开发的进步。

4) 随着川中地区沙溪庙组致密气领域勘探开发不断深入,针对薄层叠置河道砂体识别、疏导断裂刻画、不同类型砂岩储层及含气性分级、分类评价等方面提出了更高的技术需求,地震资料提高分辨率处理、提高成像质量、高速砂岩储层及含气性预测方法等方面是下一步地球物理勘探开发技术持续攻关的重点方向。

致谢:在本次技术研究期间,中国石油西南油气田公司杨雨总地质师、勘探开发研究院冉崎副院长、川西北气矿唐大海副矿长给予的指导和帮助,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

[1] 王世谦,罗启后,邓鸿斌,等.四川盆地西部侏罗系天然气成藏特征[J].天然气工业,2001,21(2):1-8.
WANG Shiqian, LUO Qihou, DENG Hongbin, et al. Characteris-

tics of forming Jurassic gas reservoirs in the west part of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(2): 1-8.

- [2] 唐大海,陈洪斌,谢继容,等.四川盆地西部侏罗系沙溪庙组气藏成藏条件[J].天然气勘探与开发,2005,28(3):14-19.
TANG Dahai, CHEN Hongbin, XIE Jirong, et al. Reservoir forming conditions of Jurassic Shaximiao Formation, West Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2005, 28(3): 14-19.
- [3] 肖富森,黄东,张本健,等.四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J].石油学报,2019,40(5):568-576.
XIAO Fusen, HUANG Dong, ZHANG Benjian, et al. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 568-576.
- [4] 钱利军,陈洪德,林良彪,等.四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组地球化学特征及其环境意义[J].沉积学报,2012,30(6):1061-1071.
QIAN Lijun, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of Middle Jurassic Shaximiao Formation, western margin of Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 1061-1071.
- [5] 安红艳,时志强,张慧娟,等.川西坳陷中段中侏罗统沙溪庙组储层砂岩物源分析[J].四川地质学报,2011,31(1):29-33.
AN Hongyan, SHI Zhiqiang, ZHANG Huijuan, et al. On material source of sandstone reservoir of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in West Sichuan Depression[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(1): 29-33.
- [6] 沈传波,梅廉夫,徐振平,等.四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化[J].大地构造与成矿学,2007,31(3):288-299.
SHEN Chuanbo, MEI Lianfu, XU Zhenping, et al. Architecture and tectonic evolution of composite basin-mountain system in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3): 288-299.
- [7] 叶素娟,李嵘,杨克明,等.川西坳陷叠覆型致密砂岩气区储层特征及定量预测评价[J].石油学报,2015,36(12):1484-1494.
YE Sujuan, LI Rong, YANG Keming, et al. Characteristics and quantitative prediction of tight sand gas reservoirs in superimposed tight sandstone gas-bearing area, western Sichuan Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1484-1494.
- [8] 李忠平,冉令波,黎华继,等.窄河道远源致密砂岩气藏断层特征及天然气富集规律——以四川盆地中江气田侏罗系沙溪庙组气藏为例[J].天然气工业,2016,36(7):1-7.
LI Zhongping, RAN Lingbo, LI Huaji, et al. Fault features and enrichment laws of narrow-channel distal tight sandstone gas reservoirs: A case study of the Jurassic Shaximiao Fm gas reservoir in the Zhongjiang Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(7): 1-7.
- [9] 王孝,曾华会,刘文卿,等.基于微测井分步约束的近地表速度层析反演[J].石油地球物理勘探,2018,53(增刊1):69-74.
WANG Xiao, ZENG Huahui, LIU Wenqing, et al. Near-surface velocity tomographic inversion with a joint stepped-constraint of uphole and first break information[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S1): 69-74.

- [10] 杨广广, 吕龔, 韩嵩, 等. “双高”地震资料处理技术与应用——以四川盆地射洪区块沙溪庙组河道砂岩层成像为例 [J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(2): 1-8.
YANG Guangguang, LYU Yan, HAN Song, et al. "Double-high" seismic-data processing technology and its application: An example from imaging of channel sandbody reservoirs of Shaximiao Formation, Shehong block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(2): 1-8.
- [11] 张在金, 陈可洋, 范兴才, 等. 井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术及应用 [J]. 石油物探, 2020, 59(2): 208-217.
ZHANG Zaijin, CHEN Keyang, FAN Xingcai, et al. Seismic wave velocity modelling through grid tomography inversion constrained by well logging and structural modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 208-217.
- [12] 曾鸣, 陈骁, 韩嵩, 等. 高分辨精细成像技术在川西北双鱼石地区的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(增刊 1): 83-88.
ZENG Ming, CHEN Xiao, HAN Song, et al. Seismic high-resolution imaging in Shuangyushi, Northwest Sichuan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S1): 83-88.
- [13] 李博. OVT 域地震数据规则化技术及应用 [J]. 石油物探, 2019, 58(1): 53-62.
LI Bo. Seismic data regularization in the OVT domain and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 53-62.
- [14] 肖富森, 韦腾强, 王小娟, 等. 四川盆地川中—川西地区沙溪庙组层序地层特征 [J]. 天然气地球科学, 2020, 31(9): 1216-1224.
XIAO Fusen, WEI Tengqiang, WANG Xiaojuan, et al. Research on the sequence stratigraphy of the Shaximiao Formation in Chuanzhong-Chuanxi area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1216-1224.
- [15] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考 [J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 397-411.
ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, ZENG Hongliu, et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(3): 397-411.
- [16] 李明, 李飞, 杨宗恒, 等. 基于地震沉积学原理的河道砂体精细刻画——以四川盆地龙岗地区沙溪庙组致密气藏为例 [J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(2): 76-83.
LI Ming, LI Fei, YANG Zongheng, et al. Precise depicting channel sandbodies based on seismic sedimentology: An example from tight gas reservoirs of Shaximiao Formation, Longgang area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(2): 76-83.
- [17] 刘金连, 张建新. 济阳探区单一河道砂体边界地质建模及其地震正演响应特征分析 [J]. 石油物探, 2010, 49(4): 344-350.
LIU Jinlian, ZHANG Jianning. Geological modeling and seismic forward response characteristics analysis of single channel sand body boundary in Jiyang prospecting area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 344-350.
- [18] 赵虎, 尹成, 朱仕军. 多属性融合技术研究 [J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(2): 119-121.
ZHAO Hu, YIN Cheng, ZHU Shijun. Technique of seismic multi-attribute fusion[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009, 32(2): 119-121.
- [19] 陈冬霞, 王雷, 庞雄奇, 等. 断裂对川西坳陷致密砂岩气藏天然气运聚的控制作用 [J]. 现代地质, 2013, 27(5): 1137-1146.
CHEN Dongxia, WANG Lei, PANG Xiongqi, et al. The controlling of fault on the tight sandstone gas migration and accumulation in West Sichuan Depression[J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1137-1146.
- [20] 黎华继, 周文雅, 代平, 等. 川西坳陷致密河道砂岩气藏类型及其高产富集模式 [J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(2): 7-14.
LI Huaji, ZHOU Wenya, DAI Ping, et al. Types, and high-yield and enrichment modes of tight channel sandstone gas reservoirs, Western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(2): 7-14.
- [21] 吕公河, 于常青, 董宁. 叠后地震属性分析在油气田勘探开发中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 161-166.
LYU Gonghe, YU Changqing, DONG Ning. The application of post-stack seismic attribute analysis in the oil-gas exploration and development[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 161-166.
- [22] 干大勇, 黄天俊, 吕龔, 等. 地震振幅能量表征河道砂体及其储层物性——以川中地区中侏罗统沙溪庙组为例 [J]. 天然气工业, 2020, 40(10): 38-43.
GAN Dayong, HUANG Tianjun, LYU Yan, et al. Characterization of channel sand body and its reservoir physical properties based on seismic amplitude energy: A case study of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(10): 38-43.
- [23] 张艺山, 徐怀宝, 齐洪岩, 等. 基于 XGBoost 算法的地震多数数据体识别含油河道砂体 [J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 477-482.
ZHANG Yishan, XU Huaibao, QI Hongyan, et al. Using multiple seismic data volume to identify oil-bearing channel sandbodies based on XGBoost algorithm[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4): 477-482.
- [24] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 3-9.
JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, et al. Two key technologies about exploration of stratigraphic/lithological reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 3-9.
- [25] 王香文, 刘红, 滕彬彬, 等. 地质统计学反演技术在薄储层预测中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 730-735.
WANG Xiangwen, LIU Hong, TENG Binbin, et al. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 730-735.
- [26] 李庆忠. 走向精确勘探的道路 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
LI Qingzhong. The road to fine exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [27] 尚新民, 李红梅, 韩文功, 等. 基于岩石物理与地震正演的 AVO 分析方法 [J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 64-66.
SHANG Xinmin, LI Hongmei, HAN Wengong, et al. AVO analysis technology based on petrophysics and seismic forward modeling[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 64-66.
- [28] 王斌, 陈祥忠, 陈娟, 等. 四川盆地侏罗系致密砂岩弹性特征及岩石物理建模 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(12): 4528-4539.
WANG Bin, CHEN Xiangzhong, CHEN Juan, et al. Elastic characteristics and petrophysical modeling of the Jurassic tight sand-

stone in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(12): 4528-4539.

[29] 刘道理, 李坤, 杨登峰, 等. 基于频变 AVO 反演的深层储层含气性识别方法 [J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 48-54.

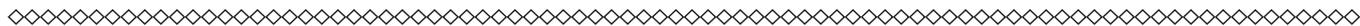
LIU Daoli, LI Kun, YANG Dengfeng, et al. A gas-bearing property identification method for deep reservoirs based on frequency-dependent AVO inversion. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 48-54.

[30] 朱讯, 肖富森, 洪海涛, 等. 四川盆地中部地区致密河道砂岩气藏高产井地震模式及井轨迹设计 [J]. 天然气勘探与开发,

2020, 43(3): 86-93.

ZHU Xun, XIAO Fusen, HONG Haitao, et al. Seismic model and wellbore trajectory design for high-yield wells of tight channel sandstone gas reservoirs, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(3): 86-93.

(修改回稿日期 2021-12-15 编辑 陈古明)



含工业电干扰地震道的自动识别和自适应压制技术

1. 存在问题

在油气勘探成熟地区, 地震资料的品质受密集电网电磁场的影响较为严重, 形成的工业电干扰叠加使得野外采集的地震资料品质大幅度降低, 在一定程度上影响了对地层和岩性油气藏的地震精细预测和发现。

现有的商业化地震处理软件还没有自动识别含工业电干扰地震道的相关模块, 通常借助人工交互方式通过统计共检波点道集能量来参与识别, 同时对识别出的地震道需要给定较准确的工业电干扰频率(如 50 Hz)从而实现有效压制。然而, 大量实际资料分析结果表明, 工业电干扰的频率并不是严格的 50 Hz, 而是在 50 Hz 附近(±1 Hz)动态范围内变化, 同时对含弱能量的工业电干扰地震道的识别也无能为力。这就使得现有软件处理模块压制工业电干扰不彻底、保真保幅性差。

2. 采用方法

为了解决上述问题, 采用了一种时间域寻优的含工业电干扰地震道逐道迭代识别和自适应压制方法技术。其具体计算步骤如下: ①初始化工业电干扰频率, 例如 50 Hz; ②建立工业电干扰的离散数学模型(余弦函数形式或正弦函数形式); ③建立目标函数, 即离散数学模型与实际地震道的残差能量; ④采用最小二乘法求解目标函数, 使目标函数残差能量最小化, 获得工业电干扰的振幅和相位公式; ⑤根据牛顿迭代法寻优逼近工业电干扰频率的精确解; ⑥采用归一化互相关系数作为含工业电干扰地震道的识别准则(门槛值大于 0.2 时该地震道识别为含工业电干扰地震道); ⑦对识别出的含工业电干扰的地震道, 重复步骤④和⑤, 获得精确的工业电干扰振幅、频率和相位; ⑧从该实际地震道中减掉预测出的工业电干扰模型, 最终得到压制工业电干扰后的高信噪比地震记录。对于步骤⑥中未识别出含工业电干扰的地震道, 则不作任何处理。按照步骤①到步骤⑧完成所有含工业电干扰地震道的自动识别和自适应压制处理。对于含多种频率成分工业电干扰的地震道, 在 Linux 平台采用多线程并行计算研发模块(图 1), 并实现技术的高效并行化处理。



图 1 多线程并行计算研发模块示意图

3. 作用和效果

该项技术能够逐道自动识别待处理地震道是否含有工业电干扰, 不需要人工参与识别, 并且不受地震处理域的限制(例如共炮点域、共检波点域等), 而且还能够精确估算每个地震道中多种工业电干扰的振幅、相位、频率信息, 实现含多种工业电干扰地震道的自动识别和自适应压制, 并兼顾弱能量工业电干扰的压制。该项技术具有如下优点: ①抗干扰能力强, 对有效信号无损伤, 工业电干扰部分无有效信号, 在工业电干扰位置频谱过度自然; ②能够实现含多个频率工业电干扰地震道的同步保幅压制, 且不受分析时窗位置的限制; ③构建了全新的工业电干扰处理流程, 降低了常规处理流程的复杂度, 实现了对工业电干扰的自动识别和自适应压制; ④适合共炮点、共检波点、共中心点道集等任何类型原始地震数据处理; ⑤开发了多核多线程并行计算可执行程序, 通过模块化封装, 计算效率明显提高, 并支持多 SEG Y 文件输入和输出。该项技术解决了油气勘探中的一个关键性和共性的问题, 因不需要人工参与识别, 其在处理效率、计算复杂度、保真保幅性等方面都具有显著的优势, 可以为当前精细地震勘探提供重要的技术支撑。目前该项技术已获得授权发明专利 1 项(专利号: ZL201610511644.6)、软件著作权 1 项(软件著作权编号: 2019SR1108444), 并在大庆探区 5 个以上的勘探开发区块进行了推广应用, 支撑了油气精细勘探部署, 是目前商业化地震处理软件中工业电干扰压制模块的有效补充, 具有广阔的应用前景。

(陈可洋: 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院地震处理研究室; 杨微: 大庆油田有限责任公司第六采油厂地质研究所攻关队。第一作者邮件地址: keyangchen@163.com 本期特约栏目主编 熊波 编辑 居维清)