doi: 10.11720/wtyht.2026.1384
李振周, 吴振东, 刘苗, 等. 黄骅坳陷千米桥奥陶系潜山缝洞体预测[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 469-480. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1384
Li Z Z, Wu Z D, Liu M, et al. Prediction of fractured-vuggy reservoirs within the Ordovician buried hills in the Qianmiqiao block, Huanghua depression[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 469-480. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1384

黄骅坳陷千米桥奥陶系潜山缝洞体预测

李振周, 吴振东, 刘苗, 王文庆, 郑华灿, 胡雷, 周雯
(中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司 研究院大港分院, 天津 300280)

摘 要: 大港油田千米桥奥陶系潜山气藏发现已 20 余年, 由于对油气成藏模式、富集规律认识不清, 导致勘探开发历经挫折。近年来, 逐渐认识到碳酸盐岩缝洞体控藏、控富集, 改变了以往构造型层状油气藏的传统认识。本文针对缝洞体预测, 利用面向缝洞体成像的高精度三维地震资料, 通过精细储层标定, 明确缝洞体地震响应特征。在此基础上, 针对缝洞体预测的两个方面, 即横向识别缝洞体平面发育位置和纵向分辨缝洞体顶底位置, 分别开展地震相识别和地震相驱动的约束稀疏脉冲反演, 实现了缝洞体空间预测; 预测结果符合地质规律, 与实际钻探结果吻合度高。本研究为千米桥潜山碳酸盐岩缝洞型油气藏高效井位的优选、设计、部署提供了强有力的支撑, 同时也为渤海湾盆地类似区块的碳酸盐岩潜山油气藏研究提供借鉴和参考。

关键词: 缝洞体; 潜山; 储层; 碳酸盐岩; 约束稀疏脉冲反演; 地震相
中图分类号: P31; P631.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)03-0469-12

0 引言

渤海湾盆地黄骅坳陷千米桥潜山碳酸盐岩气藏发现于 1999 年, 目的层为奥陶系峰峰组和马家沟组[1]。前期研究认为, 千米桥潜山经历两期古岩溶, 即加里东期和印支—早燕山期, 其中, 晚期岩溶对优质储层的形成具有至关重要的作用, 经过长期的风化、淋浴, 储层以次生的溶蚀孔洞和裂缝为主[2-4], 横向准层状分布, 气藏为构造控制的边水层状气藏。随着勘探开发的深入, 千米桥潜山气藏的复杂性逐渐显现。2000~2020 年, 共部署钻井 14 口, 其中地质报废井 5 口, 工程报废井 1 口, 获得工业油气井 8 口(投产井 6 口, 其中高效井 3 口, 有效井 2 口, 低效井 1 口)。整体而言, 气藏具有气、水关系复杂, 多个压力系统并存, 产液特征差异大等特点[5]。油气成藏模式、富集规律认识不清, 导致勘探开发历程一波三折, 探明储量一直难以有效动用。

2022 年, 大港油田提出“四上千米桥”的决策部署, 随后评价井 bs16-19 在奥陶系峰峰组漏失大量钻井液, 试油喜获高产工业油气流。研究人员敏锐地捕捉到该井传递的地质信息, 结合前期工作, 通过深入分析, 创新提出缝洞体控藏、控富集的新认识。新认识的提出为千米桥潜山气藏的高效开发指明了方向, 同时也指出缝洞体预测是气藏描述、井位部署的关键。

目前, 对于如何利用三维地震资料预测千米桥潜山缝洞体的空间展布特征, 相关研究工作少之又少, 仅有闫家伟等[6] 利用波形指示反演预测层状溶蚀孔洞储层, 但由于地质认识和方法的局限性, 导致预测结果难以反映碳酸盐岩储层的横向非均质性。为此, 笔者基于面向缝洞体成像的高精度三维地震资料, 在储层地震响应特征分析的基础上, 从平面识别和纵向分辨两个方面, 分别通过地震相识别和叠后波阻抗反演, 实现缝洞体空间预测, 为千米桥潜山气藏的开发动用奠定基础, 同时也为渤海湾盆地类似区块的碳酸盐岩储层预测提供借鉴和参考。

1 缝洞体成像处理

地震资料解释思路决定了地震资料的处理方向。前期研究认为千米桥潜山构造控藏, 构造、地层

收稿日期: 2025-10-21; **修回日期**: 2026-02-06
第一作者: 李振周(1985-), 男, 高级工程师, 从事地震资料解释及地质综合研究工作。Email: diwu129@126.com

成像是关键，提高地震资料信噪比是处理重点；最新研究认为缝洞体控藏、控富集。解释思路的转变对地震资料提出了新的要求，高精度储层成像是关键，高保真、保幅处理是重点。

千米桥潜山缝洞体成像处理面临诸多地震地质难点：一是潜山埋藏深，超过 4 000 m；二是相对于砂岩储层，单个缝洞体空间展布范围有限，规模小；三是潜山经历多期构造运动，早期挤压逆冲，晚期拉张伸展，断裂极其发育，纵横交错，构造破碎。对此，研究人员通过方法对比、参数试验，提出了细化速度模型、弱化叠后修饰、优化偏移距叠加的配套处理方法，在保证构造成像的基础上，提高了缝洞体尤其是小尺度缝洞体的成像精度。相对于早期处理资料（图 1a），新资料（图 1b）反射能量更为聚焦，对缝洞体横向分辨能力更高，奥陶系潜山内幕局部点状强振幅异常明显、相间出现，充分反映了碳酸盐岩储层的非均质性，与地质认识相符。此外，bs16-19 井钻井液漏失量大，说明钻遇一个规模较大的缝洞体，但早期处理资料的地震反射异常不明显，而新资料中串珠状反射特征清楚，与实际钻探情况更为吻合。

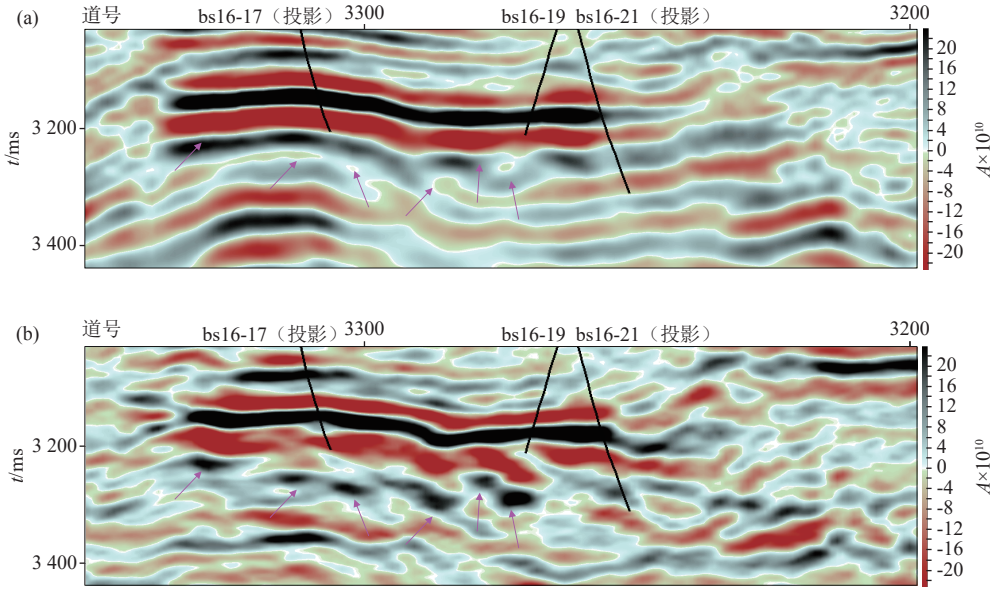


图 1　早期处理（a）与新处理（b）的地震剖面对比

Fig. 1　Seismic profiles: old (a) and new (b)

2　地震储层预测

结合研究区实际地震地质特点，厘定缝洞体地震预测思路（图 2）：首先，综合应用钻井、地质、生产资料，定性描述钻井周缘储层发育程度、储集空间类型；其次，结合地震、测井资料精细标定，明确储层地震响应特征；最后，综合应用地震相识别和地震相驱动约束稀疏脉冲反演，预测储层空间展布特征。其中储层地震相识别最为关键，具有承上启下的作用，直接关系到储层横向识别精度，同时也影响到后续储层纵向分辨精度。

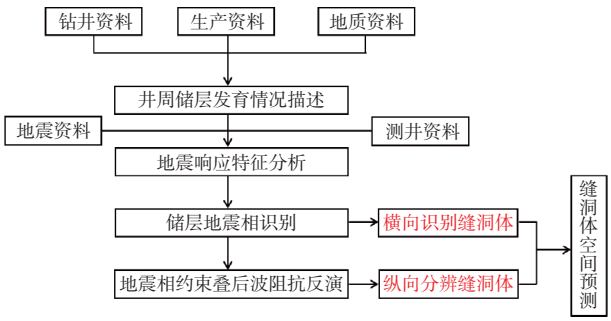


图 2　碳酸盐岩储层预测技术流程

Fig. 2　Flow chart of prediction technique for carbonate reservoir

2.1　钻井周缘储层发育特征描述

钻井具有“一孔之见”，相对于砂岩储层，碳酸盐岩缝洞型储层横向非均质性强，钻井钻遇储层往往并不能真正代表其周缘储层发育情况。A、B 井均钻遇裂缝–孔洞型储层，B 井钻遇储层能够基本反映其周缘储层整体发育情况，但是 A 井周缘以洞穴型储层为主，与其钻遇储层类型差异较大（图 3）。对此，本文创新性提出利用生产动态资料，即累积产量与累积压降之间的交会关系，定性描述钻井周缘储层的发育特征。

实验表明，不同类型的储集空间呈现不同的累

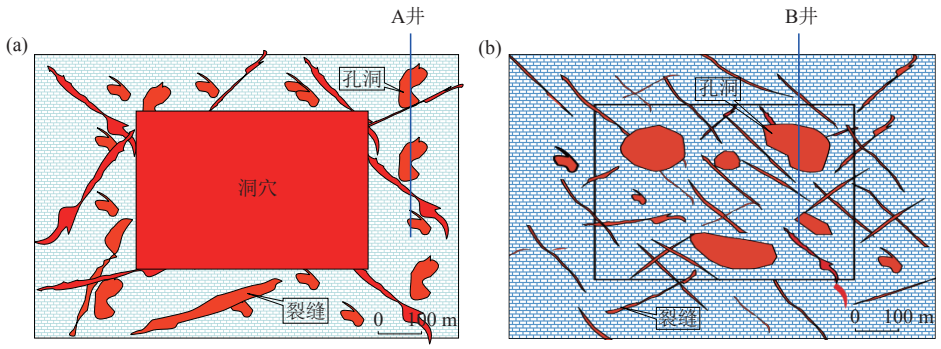


图 3　A 井(a)、B 井(b)周缘储层发育情况剖面示意

Fig. 3　Schematic section of peripheral reservoir development: Well A(a) and Well B(b)

积压降—累积产量关系。如图 4a 所示，对于裂缝—孔洞型储层，前期裂缝供液，油气累积产量随着累积压降的增大而线性缓慢增加，当累积压降超过某一门槛值，孔洞开始供液，累积产量指数式增加；洞穴型储层，随着累积压降的增大，累积产量以较大的梯度线性增加；洞穴+裂缝孔洞型储层，前期洞穴供液，累积产量线性增加，后期孔洞供液，累积产量指数式增加。依据实验数据建立的累积压降—累积产量关系模板，对实际生产井累积产量与累积压降之间的交会关系进行解释，从而间接、定性判断井周发育特征、储集空间类型。随着累积压降的增加，bs8 井(图 4b)累积产量呈现两段式线性增加的特征，中前期增加梯度大，晚期缓慢增加，据此判断前期为规模较大、类似溶洞的储集体供液，后期为规模较小的储集体供液。bs7 井(图 4c)累积产量前期线性增加，后期呈指数式增加，为典型的裂缝—孔洞型储层供液。qian16-16 井(图 4d)累积产量呈现三段式线性增加的特征，多储集体供液的特征清楚。基于动态资料的井周储层发育特征描述为有利储层地震相识别奠定了基础，同时可以作为储层反演的评价依据。

2.2　储层地震响应特征分析

在钻井周缘储层发育特征描述的基础上，通过精细储层标定，确定储层纵向发育位置，明确储层地震响应特征，为储层横向展布特征预测奠定基础。

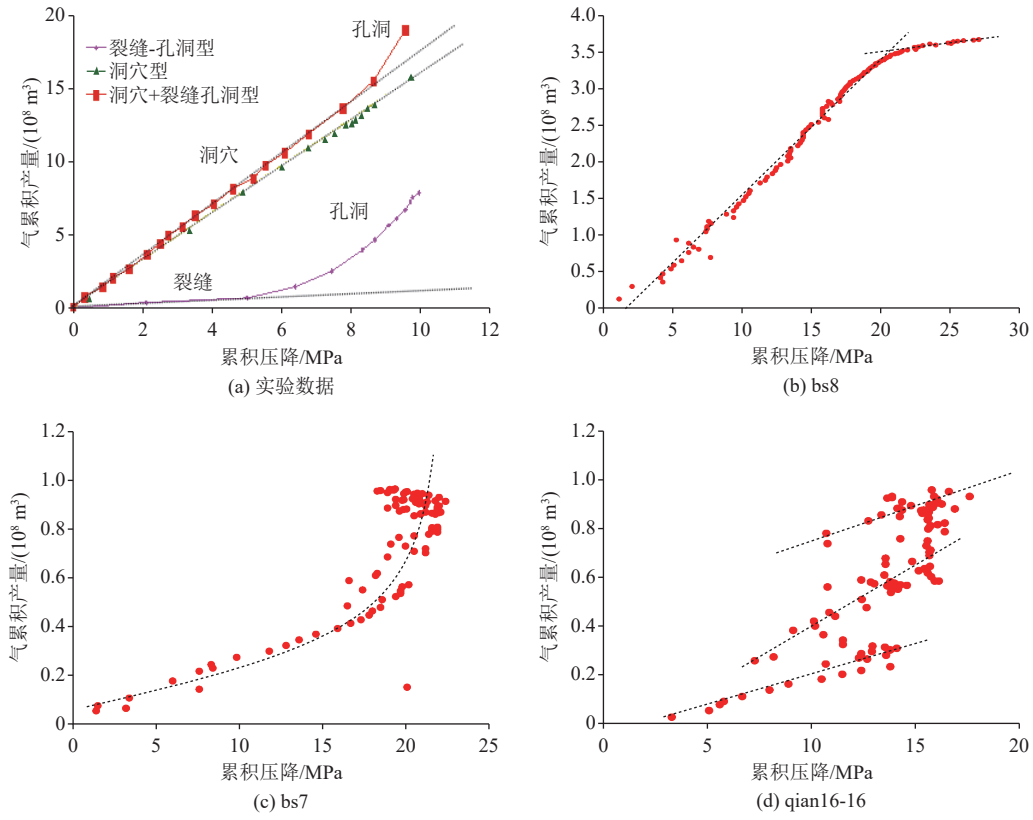


图 4　累积压降—累积产量交会关系

Fig. 4　Cross of cumulative pressure drop vs cumulative production

通过单井、连井精细储层标定、对比分析，认识到串珠状、杂乱状和夹心状这 3 种反射是规模优质储层的主要地震响应特征（表 1、图 5）。需要特别说明的是，相对于测井，虽然地震纵向的探测深度（可达数千米）和横向探测距离（可达几十、几百千米）比较大，但空间分辨率较低。就千米桥潜山地震资料而言，纵向分辨率 30 m 以上，横向分辨率约 100 m，受此影响，地震只能识别相对大尺度的缝洞体，即能够识别的地震反射异常一定是规模较大缝洞体的地震响应。地震反射异常不明显可能反映两种情况：一是地下缝洞体根本不发育，二是地下发育缝洞体，但规模太小。

表 1　地震相统计

Table 1　Statistical of seismic facies

地震反射类型	储层类型	钻井工程特征	典型井
串珠状	以洞穴型储层为主	常见漏失、放空	qian16-16
杂乱状	以孔洞、裂缝–孔洞型储层为主	无放空，偶见漏失	bs8
夹心状	以裂缝–孔洞型储层为主	无放空，偶见漏失	qian4-18

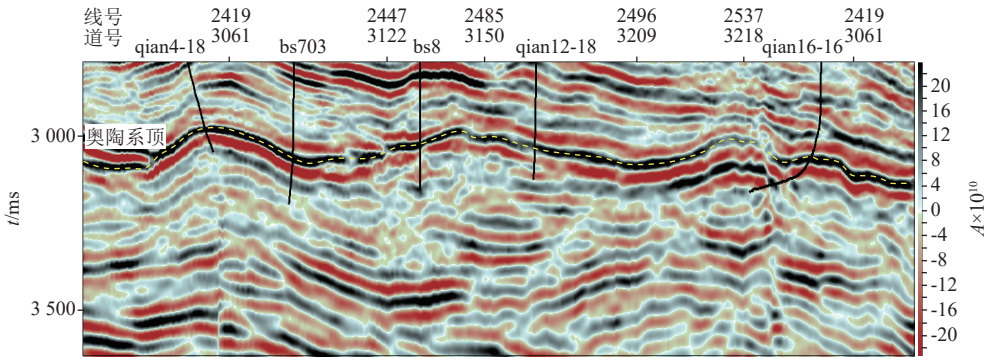


图 5　连井地震剖面

Fig. 5　Well-connected seismic profile

2.3　储层空间展布特征预测

缝洞体空间展布预测包括两个方面，一是横向识别缝洞体平面发育位置，二是纵向分辨缝洞体，即相对准确地识别缝洞体纵向顶底位置。针对这两个方面，分别采取相应的技术手段。

2.3.1　地震相识别

针对不同类型的储层地震响应特征，应用针对性的方法，开展地震相识别，充分挖掘地震资料中隐含的储层信息，预测储层平面展布特征。

2.3.1.1　串珠状反射

地震串珠状反射具有两个明显的特点：一是纵向上至少存在 2 个连续相位（相邻波峰和波谷）的强振幅反射异常，二是横向展布范围小，平面形态多呈椭圆形。基于缝洞体强振幅异常的特点，振幅类属性被广泛应用于中国西部油田碳酸盐岩缝洞体的预测[7-10]。相较于西部碳酸盐岩油田，千米桥潜山缝洞体纵向发育位置距离潜山顶面较近，由于潜山顶界面本身是强反射界面，可能会掩盖下伏缝洞体的有效反射信息，从而导致缝洞体难以被识别。

针对上述问题，通过攻关试验，本文提出了去背景解释性处理方法，即从原始数据体（图 6b）中减去背景反射信息（图 6c 背景数据体），得到差异数据体（图 6d），该数据体可以突出局部振幅异常，尤其是靠近潜山顶面缝洞体的反射信息。该方法的关键是背景数据体的获取。该数据体是原始数据体空间滤波的结果，其原理是：根据纵向时间门和横向道数定义的三维窗口（图 6a），计算相邻地震采样点的中值或平均值（图 6a 蓝色球），然后将其赋予三维窗口中心点位置（图 6a 红色球）。在滤波过程中，涉及多个参数需要优化，其中最为关键的参数有两个，一是空间滤波方式，采用等时（深）滤波和沿层滤波，差异在于前者未考虑地层产状，沿着水平等时（深）面滤波，后者沿着地层倾角方向滤波；二是三维窗口，窗口太小，差异数据体无法突出局部振幅异常，窗口太大，差异数据体背景噪音能量增强，需要综合考虑。在参数优化过程中，需遵循两个原则：一是原始数据体中肉眼可见的串珠状反射信息完全保留下来，二是潜山顶面的影响要尽可能地消除。滤波参数、方法对比试验表明，沿层滤波方式最佳，纵向时间 50 ms、横向（主测线和联络线方向）15 道的三维窗口大小最为合适。

方法的应用取得了比较好的效果。bs16-17 是

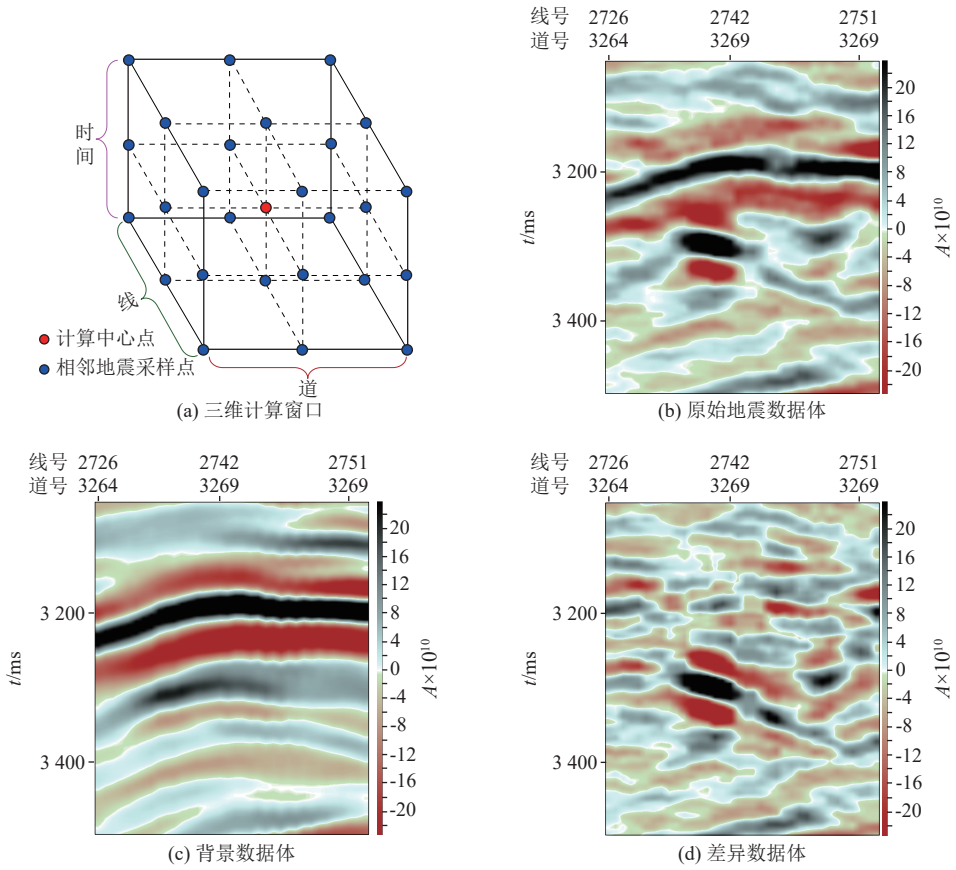


图 6　去背景解释性处理方法原理示意及地震剖面

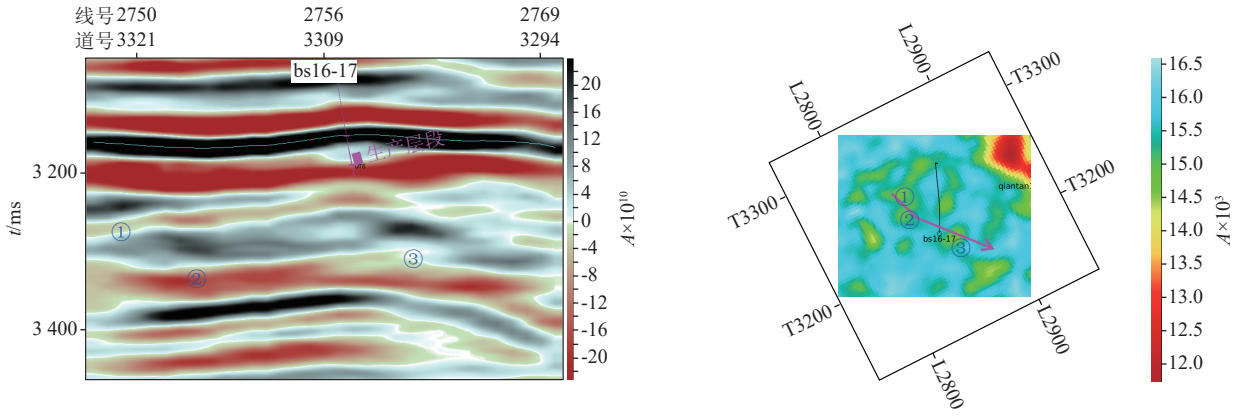
Fig. 6　Principle diagram and seismic profile of explanatory processing methods for background removal

一口高效井, 截止到目前, 累积产气 2.07 亿 m^3, 产油 3.05 万 t, 产水 0.86 万 t。原始地震数据体揭示该井周缘存在多个点状的、微弱的振幅异常, 指示潜山内幕较深位置发育缝洞体, 但与实际生产层段位置相距较远, 供液的可能性较小(图 7a)。去背景处理后, 潜山顶面的影响得以消除, 临近潜山顶面的缝洞体更易于识别。差异数据体揭示: bs16-17 井底东南方向存在 2 个明显的点状强振幅异常(图 7b), 同样指示缝洞体较发育, 但相对于原始数据体的识别结果, 缝洞体更靠近潜山顶面, 与生产层段位置更为匹配, 缝洞体持续供液的可能性较大, 从而使得 bs16-17 井高产高效。

综合利用上述方法, 千米桥潜山共识别串珠状反射 93 个, 总面积 12.7 km^2,串珠主要分布于 bs4、qian18-18、bs703 井区, 其他区域零星分布(图 8a)。

2.3.1.2　杂乱状反射

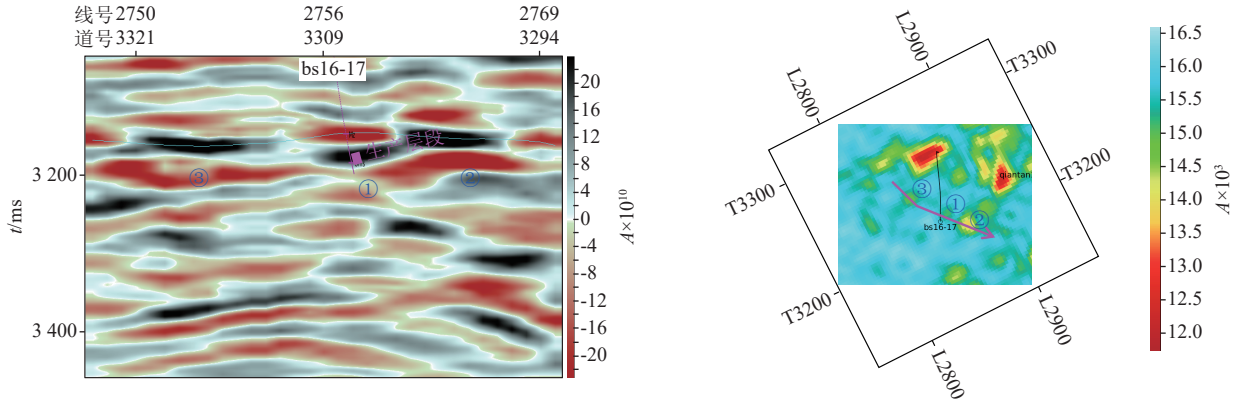
对于杂乱状反射, 通过多方法对比分析, 敏感属性优选, 认为混沌属性体能较好反映地震数据杂乱



(a) 原始地震剖面及振幅属性

图 7-1　bs16-17 井区缝洞体预测结果

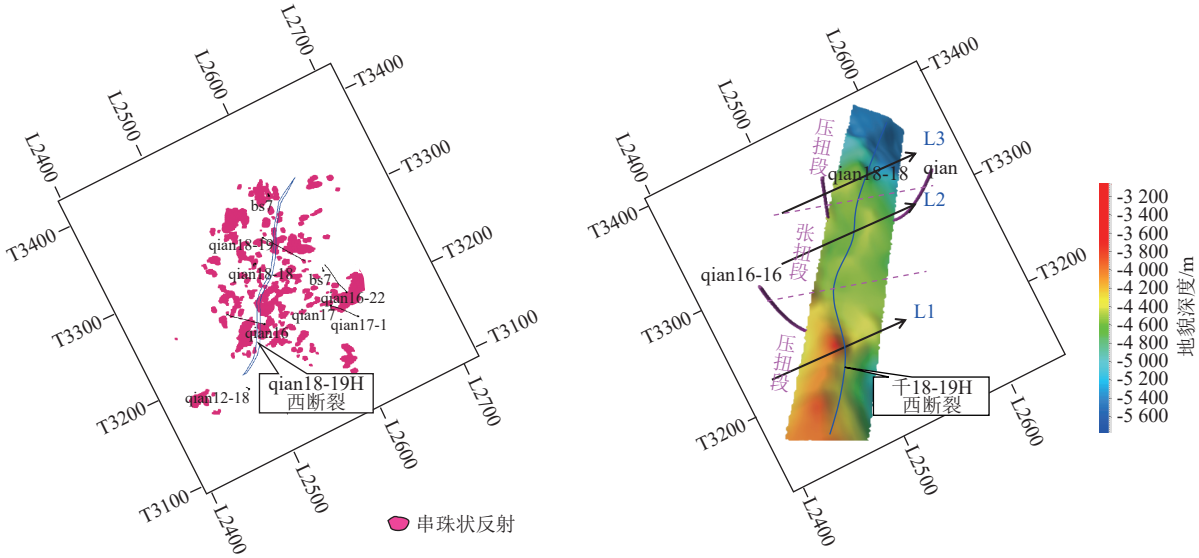
Fig. 7-1　Prediction of fracture-cavity body in area around well bs16-17



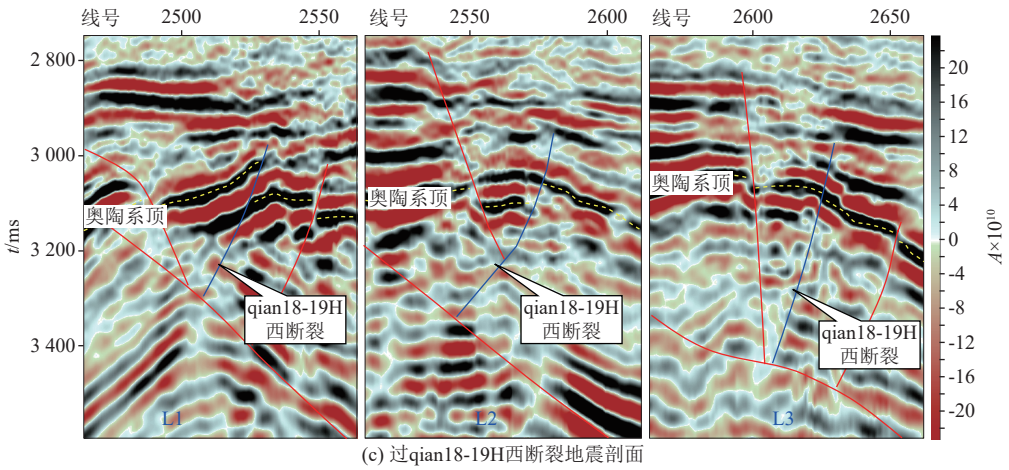
(b) 差异地震剖面及振幅属性

图 7-2　bs16-17 井区缝洞体预测结果

Fig. 7-2　Prediction of fracture-cavity body in area around well bs16-17



(a) 串珠状反射分布　　(b) 潜山顶面构造



(c) 过qian18-19H西断裂地震剖面

图 8　qian18-19H 井区储层与断裂分析结果

Fig. 8　Analysis m ap of reservoir and fault in area around well qian18-19

程度。该属性主要基于张性算法，通过计算地震反射同相轴倾角相似性，描述地震反射特征及反射结构的连续性变化，以检测有序反射间的无反射带，突出地震杂乱反射相[11]。混沌属性值大，反映地震反射同相轴连续性差、杂乱程度高，储层发育；混沌属性值小，说明地震反射同相轴连续性好、杂乱程度

小, 储层不发育(图 9)。在千米桥潜山应用该方法, 共识别杂乱反射面积 13.1 km^2, 主要分布于 bs7 和 bs8 井区(图 8b)。

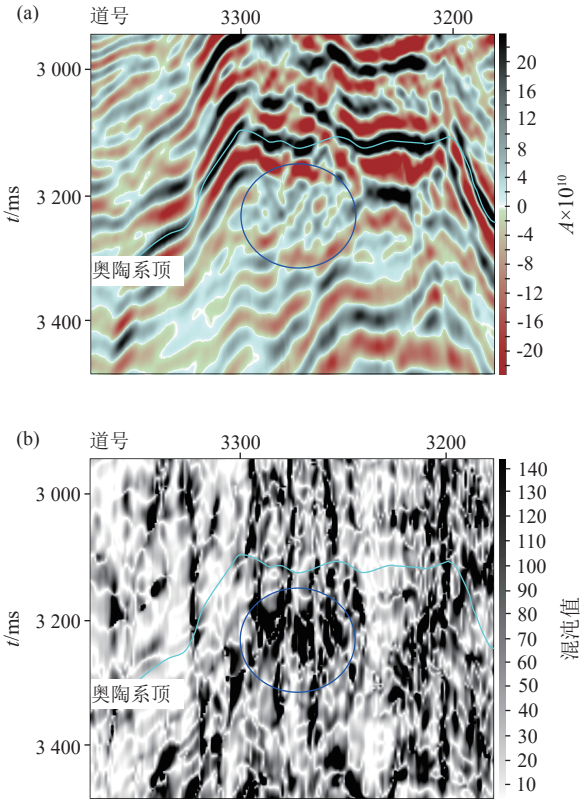


图 9　地震(a)与混沌属性体(b)剖面

Fig. 9　Seismic profile (a) and chaotic body profile (b)

2.3.1.3　夹心状反射

所谓夹心状反射, 即连续波峰或波谷反射同相轴局部夹杂着断续弱波谷、弱波峰反射, 可借助瞬时相位属性体提高识别精度。瞬时相位是地震反射同相轴连续性的量度, 地震波在地下各向异性的均匀介质中传播时, 其相位是连续的, 一旦遇到地质异常体, 其相位将发生显著变化, 连续性差, 据此可以判断地质异常体的存在与否[12]。该属性体的最大优点是与反射能量强弱无关, 即使是弱振幅反射信息也能得到凸显(图 10)。此外, 局部表现为串珠或杂乱状反射的区域同时也可能表现为夹心状反射, 为此, 在实际识别过程中, 仅对串珠状反射和杂乱状反射以外的区域进行夹心状反射识别。千米桥潜山共识别夹心状反射面积 3.36 km^2, 主要分布于 qian17-17 和 qian4-18 井区, 其他井区零星分布(图 10b)。

储层主控因素分析表明, 研究区主要发育两种类型的储集体: 一是受潜山岩溶地貌控制, 发育以杂乱和夹心状发射为主要地震响应特征的风化壳储集体, 岩溶地貌高部位经过长期的风化、淋浴, 溶蚀作用强烈, 缝洞型储层发育, 低部位储层欠发育

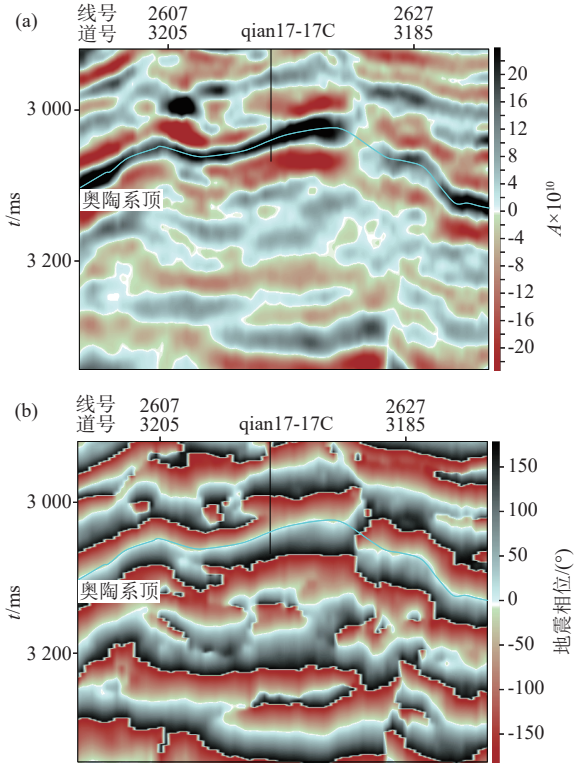


图 10　地震(a)与瞬时相位(b)剖面

Fig. 10　Seismic profile (a) and instantaneous phase profile (b)

(图 11a); 二是在潜山岩溶的基础上, 局部叠加了断控岩溶, 发育以串珠状反射为主要地震响应特征的断溶体(图 11b)。断裂, 尤其是燕山期形成的、近 NS 走向断裂, 控制了以串珠状反射为主要地震响应特征的缝洞体的平面展布, 其中 qian18-19h 西断裂周缘储层最为发育, 共有串珠 41 个, 集中分布于 qian18-19h 西断裂两侧 2 km 的范围之类, 受断裂的控制作用明显(图 8a)。该断裂平面上呈现明显的分段性(图 8b、图 8c): 北段和南段为压扭段, 以挤压应力为主, 表现为逆断层的特征, 相较于北段, 南段应力更强, 断层断距更大; 中段为张扭断, 以拉张应力为主, 表现为正断层的特征。平面上丝带效应明显, 该断裂具有走滑性质。走滑断层具有两大特点: 一是高角度, 近似直立; 二是断裂破碎带较宽。这两大特点使得大气降水或深层热液更易沿着断裂方向下渗或上涌, 从而改造了破碎带溶蚀, 形成规模更大的溶蚀孔洞。野外露头以及塔里木盆地碳酸盐岩勘探实践已经证实了走滑断层对碳酸盐岩缝洞型储层的控制作用[13-14]。

2.3.2　地震相驱动的约束稀疏脉冲反演

受地震资料分辨率的客观限制, 地震资料本身不能真实反映缝洞体的纵向发育位置和高度。为了说明这个问题, 开展二维地震正演模拟, 图 12a 是地

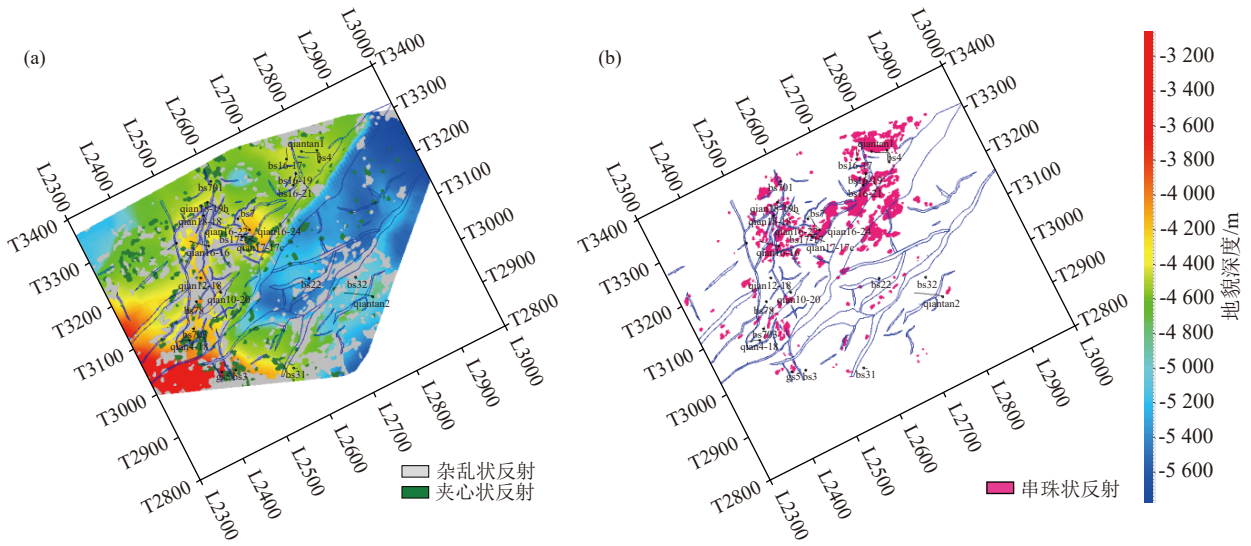


图 11　储层地震相与奥陶系古地貌 (a) 和断裂 (b) 的叠合

Fig. 11　Overlay of reservoir seismic facies with Ordovician paleogeomorphology (a) and faults (b)

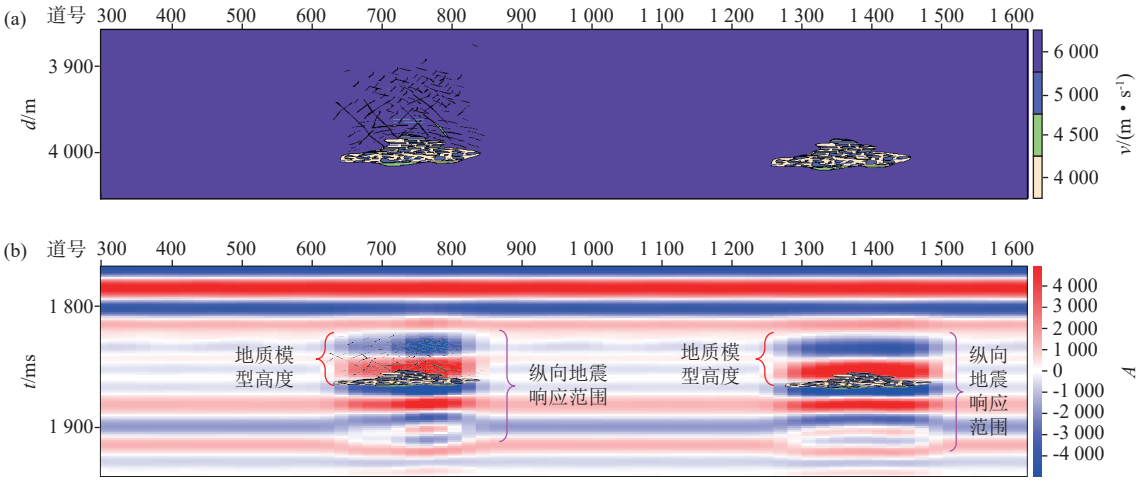


图 12　缝洞体正演模型(a)和正演模拟(b)剖面

Fig. 12　Forward model (a) and forward simulation profile (b) of fracture-cavity body

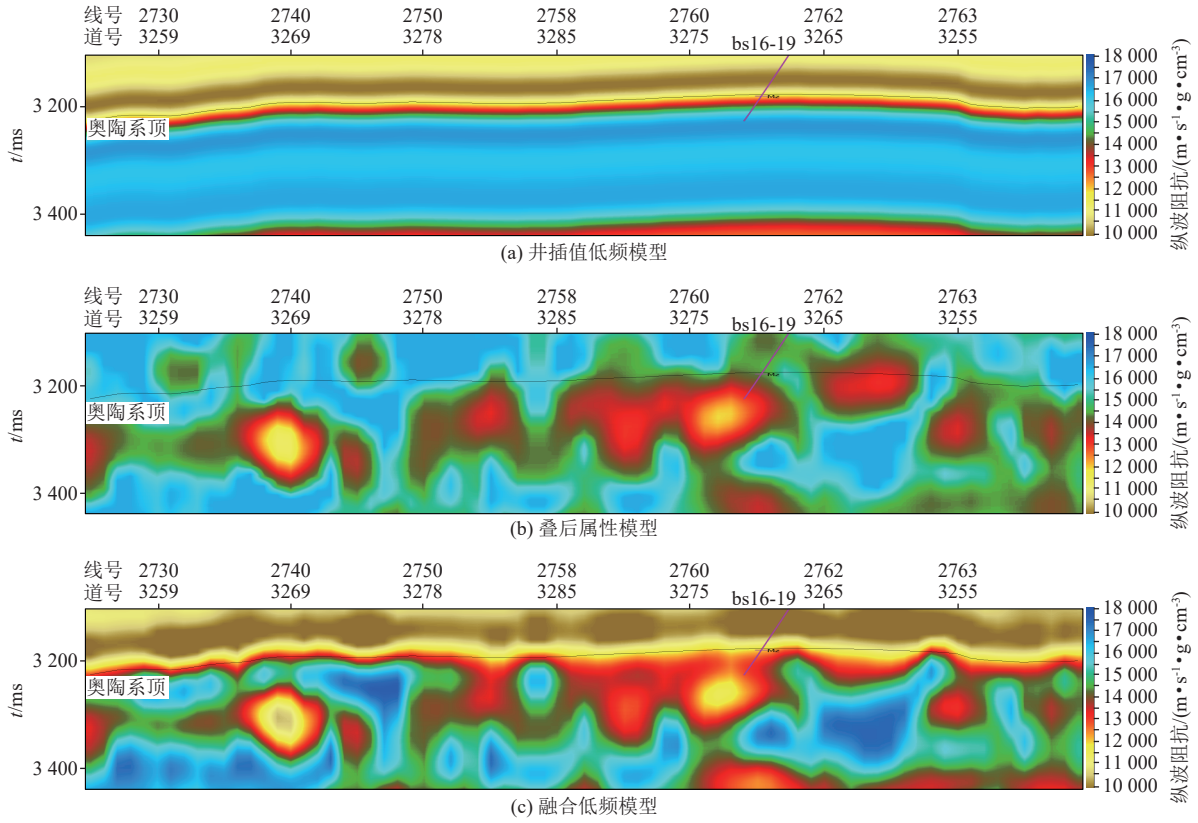
质模型，包含两个缝洞体，左侧缝洞体下部为溶洞，上部为洞顶垮塌缝，右侧缝洞体只有溶洞，从正演模拟结果看(图 12b)，虽然两个缝洞体的顶面位置、纵向高度有差异，但是二者纵向地震响应范围几乎一致。此外，对深度域的缝洞体进行标定，并与正演模拟结果进行叠合，发现缝洞体纵向地震响应范围大于甚至是远大于时间域缝洞体的高度，这充分说明了仅依靠原始地震资料，难以相对准确地识别缝洞体顶底位置及其高度。

实践表明，地震反演是预测缝洞体纵向发育位置和高度的最佳方法。比如最为常用的约束稀疏脉冲反演，它是一种基于地震的叠后波阻抗反演方法，反演结果很好地遵从原始地震是其最大优势[15-18]，被广泛应用于中国西部油田碳酸盐岩缝洞型储层预测。但该方法也存在诸多问题，主要有两点：一是低阻缝洞体顶部或底部常伴生阻抗远大于围岩背景的高阻异常体，与实际情况不符；二是反演缝洞体的纵向发育位置与实际往往有偏差。问题的根源在于低频模型：常规约束稀疏脉冲反演的低频信息来源于钻井，即在地震解释层位的控制下，通过井间插值建立低频波阻抗模型；该方法适用于层状或准层状的碎屑岩储层，但对以次生孔隙为主的横向非均质性强的碳酸盐岩储层而言，其适用性大打折扣。

针对上述问题，本文提出优化低频模型建立过程的针对性方法。具体来说，基于去背景处理后的差异数据体，优选能够反映缝洞体轮廓的叠后属性体(图 13b)，反射强度体最为常用，并对其进行属性值刻度，使其奥陶系背景值与实际碳酸盐岩非储层波阻抗相当；然后将其镶嵌、融入常规低频波阻抗模型(图 13a)，建立融合低频波阻抗模型(图 13c)；在此

基础上, 开展地震相驱动的约束稀疏脉冲反演。

相对于常规约束稀疏脉冲反演(图 14b), 地震相驱动的约束稀疏脉冲反演(图 14c)结果消除了高阻异常体的影响, 缝洞体的特征更为清楚, 局部储层受控于走滑断层的特征也较为明显, 充分反映了碳酸盐岩储层横向非均质性强的特点。



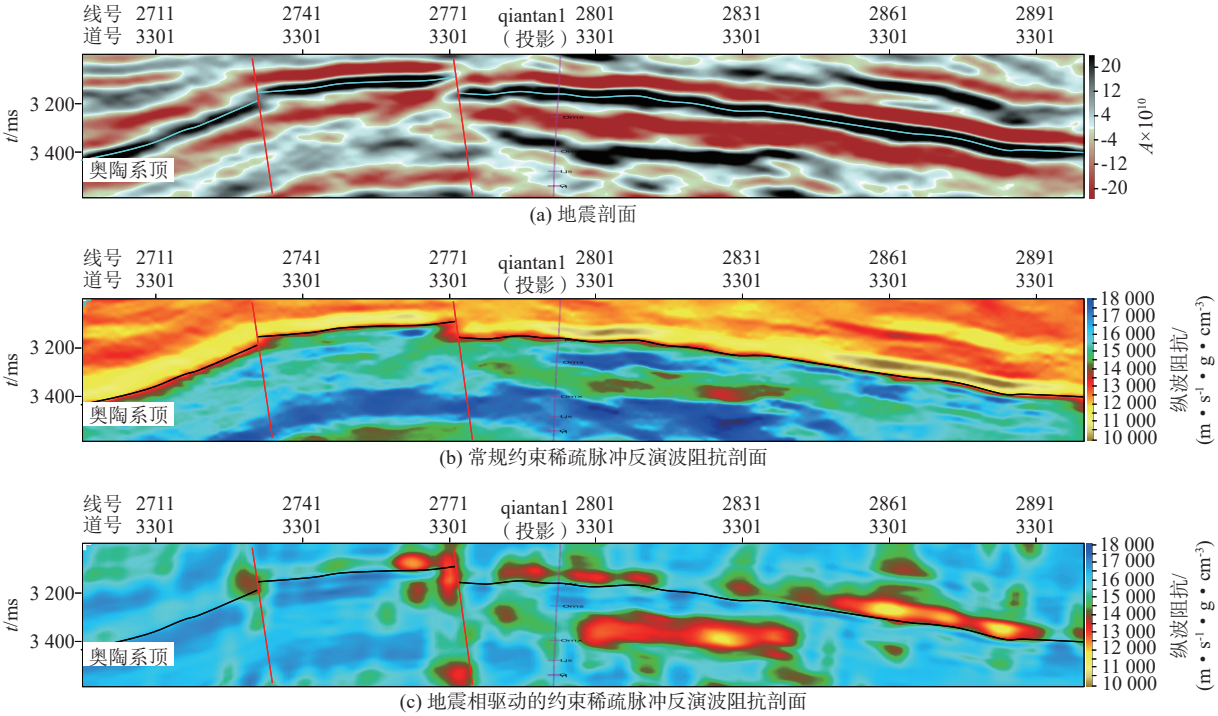
(a) 井插值低频模型

(b) 叠后属性模型

(c) 融合低频模型

图 13　过 bs16-19 的低频波阻抗模型

Fig. 13　Impedance model through well bs16-19



(a) 地震剖面

(b) 常规约束稀疏脉冲反演波阻抗剖面

(c) 地震相驱动的约束稀疏脉冲反演波阻抗剖面

图 14　过 qiantan1 井地震及波阻抗剖面

Fig. 14　Seismic and impedance profiles through well qiantan1

3　应用效果分析

图 15 为 bs16-19 井震分析结果，图中红黄色为缝洞体主体部位，以溶洞为主，绿色为溶洞周缘溶蚀破碎带，以溶蚀裂缝为主。bs16-19 钻至井深 4 762 m，漏失钻井液 1 489 m^3，漏失点恰好位于红绿过渡带，即缝洞体主体顶面，反演结果与实际钻探结果一致。

图 16 为 bs16-21 井震分析结果，从沿井轨迹反演剖面看，缝洞型储层主要发育于逆冲断层下盘的峰峰组和上盘的上马家沟组，而钻井揭示逆冲断层下盘峰峰组一、二类储层占比最高，储层最为发育，其次是上盘的上马家沟组，但是都没有达到漏失的级别，从过井底垂直井轨迹的反演剖面看，缝洞体主体位于井底的东侧，bs16-21 井钻遇缝洞体边部，没有发生漏失，但通过酸化压裂，沟通了缝洞主体，试

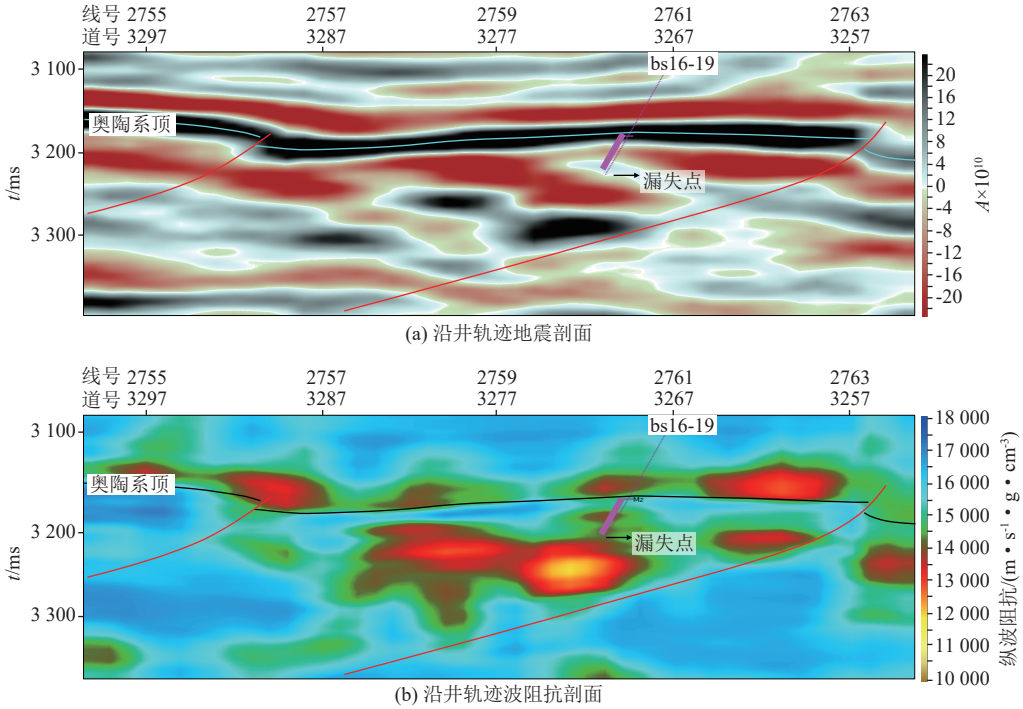


图 15　bs16-19 井震分析结果

Fig. 15　Analysis results of seismic and well bs16-19

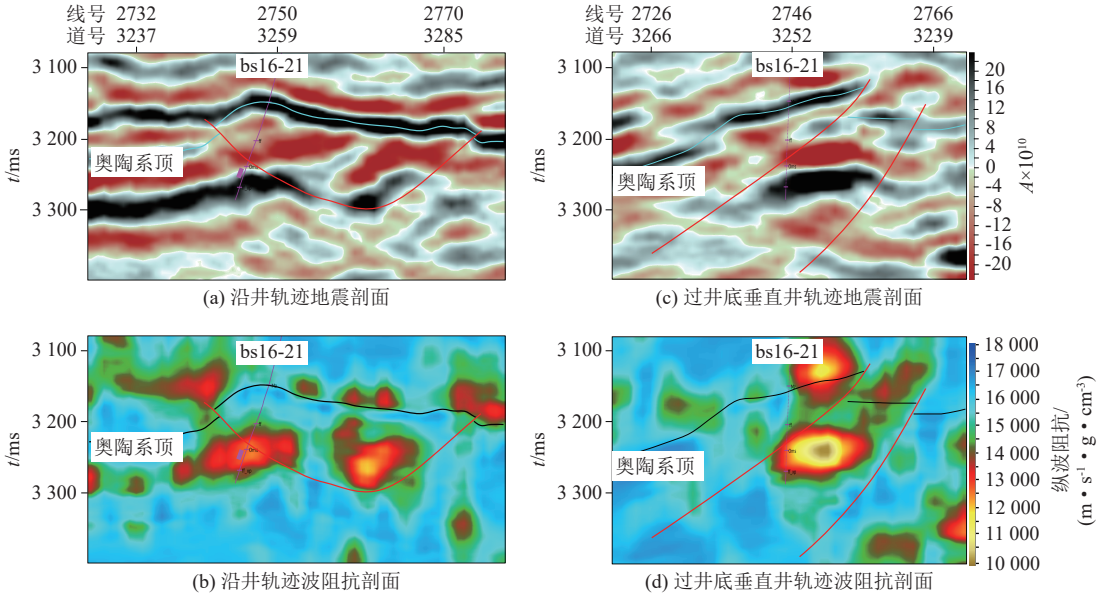


图 16　bs16-21 井震分析结果

Fig. 16　Analysis results of seismic and well bs16-21

油获得高产工业油气流, 井震一致。

井分析表明, 缝洞体预测精度高, 总体吻合度达到 85%, 预测结果能够指导井位优选、设计、部署, 推动研究区增储上产。

4　结论

1)在碳酸盐岩缝洞体控藏、控富集这一新认识的指导下, 针对缝洞体成像, 探索形成细化速度模型、弱化叠后修饰、优化偏移距叠加的配套处理技术方法, 大幅提高了碳酸盐岩缝洞体的成像精度和横向分辨能力, 目标处理资料对井吻合程度高, 满足了高精度地震储层预测的需求。

2)创新应用生产动态资料, 定性描述完钻井周缘储层整体发育状况, 结合测井、地震资料, 明确了串珠、杂乱、夹心这 3 种有利储层地震相, 并应用针对性的识别方法, 预测了 3 种地震相的平面展布。

3)在有利储层地震相识别的基础上, 通过优化低频模型建立过程, 创新提出了地震相驱动的约束稀疏脉冲波阻抗反演, 大大提高了缝洞体空间预测精度, 为碳酸盐岩缝洞型油气藏高效井位的优选、部署提供了依据。

参考文献(References):

[1] 郑亚斌, 肖毓祥, 龚幸林, 等. 千米桥潜山油气储集成藏模式探讨 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 848−853.
Zheng Y B, Xiao Y X, Gong X L, et al. Research on hydrocarbon accumulation pattern of qianmiqiao buried hill, dagang oilfield[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 848−853.

[2] 姜平, 王建华. 大港地区千米桥潜山奥陶系古岩溶研究 [J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2005, 32(1): 50−53.
Jiang P, Wang J H. Study of Ordovician paleokarst in Qianmiqiao buried hill in Dagang oil field, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology:Science & Technology Edition, 2005, 32(1): 50−53.

[3] 马小明, 余元洲, 李云, 等. 千米桥古潜山凝析气藏油气富集规律新认识 [J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 25−26, 131−132.
Ma X M, Yu Y Z, Li Y, et al. Research on hydrocarbon enrichment in condensate gas reservoirs in Qianmiqiao buried hill[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4): 25−26, 131−132.

[4] 付立新, 杨池银, 肖敦清. 大港千米桥潜山储层形成对油气分布的控制 [J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 33−38.
Fu L X, Yang C Y, Xiao D Q. Controls of carbonate reservoir diagenesis on hydrocarbon distribution in qianmiqiao buried-hill reservoirs, Bohaiwan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(2): 33−38.

[5] 吴永平, 杨池银, 付立新, 等. 中国海相油气田勘探实例之九渤海湾盆地千米桥凝析油气田的勘探与发现 [J]. 海相油气地质, 2007, 12(3): 44−52.
Wu Y P, Yang C Y, Fu L X, et al. Case of discovery and exploration of marine fields in China (part 9): Qianmiiqao Ordovician condensate field in Bohaiwan basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(3): 44−52.

[6] 闫家伟, 王文庆, 吕芳芳, 等. 复杂碳酸盐岩储层多数据融合预测技术——以千米桥潜山奥陶系为例 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3): 583−592.
Yan J W, Wang W Q, Lyu F F, et al. Fusion of multiple data for predicting complex carbonate reservoirs and its application: A case study on Ordovician of Qianmiqiao buried hills[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(3): 583−592.

[7] 韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 863−868.
Han G H, Qi L X, Li Z J, et al. Prediction of the Ordovician fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 863−868.

[8] 温志新, 王红漫, 漆立新, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层预测研究 [J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 94−100.
Wen Z X, Wang M H, Qi L X, et al. Research on the Prediction of Ordovician carbonatite reservoir of fissure-cave type in the Tahe oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 94−100.

[9] 王光付. 溶洞型碳酸盐岩油藏高效开发实践—以塔河油田区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 704−708.
Wang G F. Efficient development of vuggy carbonate reservoirs: an example from the Block 11 of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 704−708.

[10] 刘军, 黄超, 杨林, 等. 顺北地区碳酸盐岩断控缝洞体油气产能定量化估算技术 [J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 747−756.
Liu J, Huang C, Yang L, et al. Quantitative prediction technology for the hydrocarbon production capacity of fractures and vugs in fault-controlled carbonate reservoirs in the Shunbei area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 747−756.

[11] 张永华, 张悦, 杜伟, 等. 混沌属性预测泌阳凹陷陡坡带小型砂砾岩体 [J]. 特种油气藏, 2016, 23(3): 12−14.
Zhang Y H, Zhang Y, Du Wei, et al. Application of Chaos Attributes to Predict the Small-Scale Glutenite Bodies in the Steep-Slope Zone of Biyang Depression[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 12−14.

[12] 张永华, 张悦, 杜伟, 等. 地震瞬时属性分析技术在岩溶勘查中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(1): 30−31.
Zhang Y H, Zhang Y, Du W, et al. The application of the seismic instantaneous attributes in the karst exploration[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 30(1): 30−31.

[13] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力 [J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1297−1305.
Han J F, Su Z, Chen L X, et al. Reservoir- controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim basin[J]. Acta Petroleum Sinica, 2019, 40(11): 1297−1305.

[14] 李相文, 冯许魁, 刘永雷, 等. 塔中地区奥陶系走滑断裂体系解剖及其控储控藏特征分析 [J]. 石油物探, 2018, 57(5): 764−774.
Li X W, Feng X K, Liu Y L, et al. Characteristic of the strike–slip

faults system and effect of faults on reservoir and hydrocarbon accumulation in Tazhong area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(5): 764−774.

[15] 宋增强. 叠后地震反演技术预测河道砂体 [J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(4): 152−154.
Song Z Q. Prediction of the channel sandbody by post-stack seismic inverting technique[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(4): 152−154.

[16] 杨仓, 邹荃, 客伟利, 等. 约束稀疏脉冲储层反演技术在 Sufyan 凹陷的应用 [J]. 非常规油气, 2017, 4(4): 47−54.
Yang C, Zou Q, Ke W L, et al. The application of constrained sparse spike inversion in sufyan sag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(4): 47−54.

[17] 边树涛, 狄帮让, 董艳蕾, 等. 地质统计反演在东濮凹陷白庙气田沙三段储层预测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 400−404.
Bian S T, Di B R, Dong Y L, et al. Application of geostatistical inversion in reservoir prediction in the third member of Shahejie Formation, Baimiao Gas-field, Dongpu Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 400−404.

[18] 李国发, 王艳仓, 熊金良, 等. 地震波阻抗反演实验分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 869−873.
Li G F, Wang Y C, Xiong J L, et al. Experimental analysis on seismic impedance inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(6): 869−873.

Prediction of fractured-vuggy reservoirs within the Ordovician buried hills in the Qianmiqiao block, Huanghua depression

LI Zhen-Zhou, WU Zhen-Dong, LIU Miao, WANG Wen-Qing, ZHENG Hua-Can, HU Lei, ZHOU Wen

(*Dagang Branch*, *Research Institute*, *BGP Inc.*, *China National Petroleum Corporation*, *Tianjin* 300280, *China*)

Abstract: Gas reservoirs occurring within the Ordovician buried hills in the Qianmiqiao block of the Dagang oilfield have been identified for over two decades. However, the hydrocarbon accumulation model and enrichment patterns of these reservoirs remain unclear, leading to a torturous exploration and exploitation process, along with difficulties with the effective production of proven reserves. In recent years, with the advancement in related studies, researchers have gradually recognized the controlling effects of fractured-vuggy carbonate reservoirs on hydrocarbon accumulation and enrichment, changing the previous view of structurally controlled, layered hydrocarbon reservoirs. To predict fractured-vuggy reservoirs, this study employed high-accuracy 3D seismic data tailored to reservoir imaging. Through fine-scale reservoir calibration, the seismic responses of the fractured-vuggy reservoirs were determined. To achieve lateral identification of their planar positions and the vertical delineation of their top and bottom boundaries, this study conducted seismic facies identification and seismic facies-driven constrained sparse spike inversion (CSSI) by fully mining the reservoir information implicit in seismic data and innovating technical approaches. As a result, the spatial distribution of fractured-vuggy reservoirs was predicted. The prediction results, consistent with geological laws and aligning highly with actual drilling results, provide strong support for the selection, design, and deployment of efficient well locations in the fractured-vuggy carbonate reservoirs hosted by buried hills in the Qianmiqiao block. The results also serve as a reference for research on hydrocarbon reservoirs within buried hills in similar blocks of the Bohai Bay Basin.

Key words: fractured-vuggy reservoir; buried hill; reservoir; carbonate rock; constrained sparse spike inversion (CSSI); seismic facies

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)