准噶尔盆地东湾构造带下组合储层反演研究

薛 莲 张 珊 曾小兰 曹 淼 汤艳玲
东方地球物理公司研究院 河北 涿州 072751

摘 要 准噶尔盆地天山北麓东湾构造带深层下组合储层具有强非均质性、复杂空间叠置关系等特征。本文以该区下组合复杂储层为研究靶区，旨在揭示波形指示反演失效的深层机理并提出针对性优化方案。研究首先系统剖析了东湾构造带区域地质背景及下组合两套储层的岩性、矿物组成及储集空间特征；其次，开展波形指示反演实践；再次，剖析波形指示反演技术失效机理；最后，针对失效机理构建“岩石物理建模—叠前反演—频率融合”一体化优化技术体系，应用验证表明该体系可有效弥补传统方法分辨率缺陷，结果与地质认识高度吻合。本文厘清的复杂储层波形指示反演技术失效机理及构建的一体化优化方案，为同类超深、致密、非均质复杂储层的反演技术选型与优化提供了重要理论依据和实践参考。

关键词 东湾构造带；反演方法；储层预测；波形指示反演

Inversion Study of Lower Assembled Reservoir in Dongwan Tectonic Belt of the Junggar Basin

Xue Lian, Zhang Shan, Zeng Xiao-lan, Cao Miao, Tang Yan-ling
Research Institute of Oriental Geophysical Company, Zhuozhou 072751, Hebei Province, China

Abstract The deep and lower combination reservoirs in Dongwan structural belt at the northern foot of Tianshan Mountains in the Junggar Basin are characterized by strong heterogeneity and complex spatial superimposition. This article focuses on the complex reservoir under this area as the research target, aiming to reveal the deep mechanism of waveform indication inversion failure and propose targeted optimization solutions. The study first systematically analyzed the geological background of the Dongwan tectonic zone and the lithology, mineral composition, and reservoir space characteristics of the two sets of reservoirs in the lower combination; Secondly, carry out waveform indication inversion practice; Furthermore, analyze the failure mechanism of waveform indication inversion technology; Finally, an integrated optimization technology system of “rock physics modeling pre stack inversion frequency fusion” was constructed for the failure mechanism. Application verification showed that this system can effectively compensate for the resolution deficiency of traditional methods, and the results are highly consistent with geological understanding. The failure mechanism of complex reservoir waveform indication inversion technology clarified in this article and the integrated optimization scheme constructed provide important theoretical basis and practical reference for the selection and optimization of inversion technology for similar ultra deep, dense, and heterogeneous complex reservoirs.

Key words Dongwan structural belt inversion method, reservoir prediction, waveform indication inversion

准噶尔盆地天山北麓的东湾构造带油气资源潜力巨大，但近两年的油气勘探结果表明，其深层下组合储层具有强烈的非均质性和复杂的空间叠置关系，传统储层预测方法面临严峻挑战。近年来，波形指示反演凭借其在高分辨率储层预测方面的潜力，在多个盆地复杂储层中得到了广泛应用[1-3]。然而，在东湾构造带下组合的勘探实践中，波形指示反演技术的储层预测结果与钻井揭示的实际地质情况存在系统性偏差。

本文旨在以准噶尔盆地天山北麓东湾构造带下组合复杂储层为研究靶区，通过厘清波形指示反演技术的核心原理，并将这些技术原理与区域特有的地质背景、岩石物理特征及数据基础进行匹配分析，逐层揭示技术应用受限的科学本质。本研究致力于构建一个“方法原理—地质条件—失效机理—方法优化”的分析框架，为同类复杂地区的技术优选与改进提供理论依据和决策支持。

1 东湾构造带区域背景及下组合储层特征

准噶尔盆地天山北麓前陆冲断带是我国西北天然气富集核心区，东湾构造带作为天山北麓规模最大的构造带，因圈闭条件优越、烃源配置良好，被视为油气勘探的长期战略重点目标。

前期勘探实践与研究成果普遍认为，东湾构造带下组合目

的层清水河组（K_1q）的有效储层是底部的含砾砂岩。新资料证实，在清水河组一段（K_1q_1），除了底部的常规砂砾岩储层外，顶部还发育了一套纹层状细粒岩储层[4]。

从沉积演化角度分析，K_1q以辫状河三角洲前缘相沉积为主，可划分为3个连续的沉积阶段。第一阶段：水动力强，物源供应充足，快速堆积形成了一套粗粒的底砂岩；随后水体快速加深，沉积环境由浅水高能迅速转为深水低能，形成了一套分布稳定的泥岩。第二阶段：沉积环境趋于稳定，气候转为干燥，蒸发作用增强，地层中碳酸盐岩含量显著增加。第三阶段：水体再度缓慢上升，水动力持续减弱，沉积环境更为稳定，沉积物经受充分淘洗，纵向序列上粒度明显变细。此阶段形成的地层，泥质含量高，呈砂泥岩薄互层状，岩性致密，但成岩及构造作用下裂缝极为发育。值得注意的是，这套致密的薄互层泥质粉砂岩本身具备一定的生烃潜力，呈现“自生自储”的特征。而其上覆的K_1q二段厚层泥岩，构成了优质的顶部盖层，从而与下伏的裂缝型储层共同组合成一个完整的、内在的储盖系统。

储层特征显示，K_1q_1两套储层均呈致密特征（孔隙度2.3%～6.6%），且同为孔缝双储介质，但岩性与矿物组成差异显著：底砂岩以含砾砂岩、细砂岩为主，硅酸盐矿物占比突出，碳酸盐矿物和黏土矿物含量较低；纹层状细粒岩以纹层状泥质粉砂岩为主，部分为长英质粉砂岩与钙质泥岩纹层“复合体”，黏土矿物含量较高。两套储层的产能均与储层厚度、裂缝发育程度密切相关。

2 东湾构造带波形指示反演应用效果

波形指示反演的理论核心是“以地震波形为约束，融合测井高频信息，实现地下纵波阻抗参数的高分辨率重构”[5]，主要分为以下3步。

1.波形—岩性关联性假设。地下相同岩性组合（如砂岩—泥岩互层）会产生相似的地震反射波形，即波形是岩性组合的“地质指纹”，这是波形指示反演的基础。

2.地震波形聚类。通过奇异值分解、K均值聚类等算法，将全工区地震波形按形态相似性分类，每类波形对应一组测井数据样本，实现“波形分类—岩性标签”的映射。

3.井震标定与贝叶斯迭代反演。以测井纵波阻抗曲线为“高频基准”，通过井震标定建立“测井纵波阻抗—地震波形”的定量关联，再基于贝叶斯框架，融合地震中频信息与测井高频信息，迭代优化地下纵波阻抗模型，最终实现横向覆盖广、纵向分辨率高的纵波阻抗数据体的重构。

针对东湾构造带下组合储层特征，本次波形指示反演基于工区5口钻井的纵波阻抗数据与地震资料开展，本次反演虽得到纵波阻抗反演数据体并初步展现底砂岩宏观分布，但无法有效识别顶部纹层状细粒岩储层，且底砂岩纵向表征精度不足，见图1。

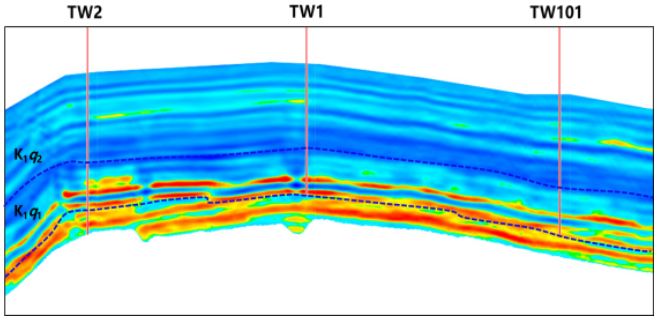


图1 波形指示反演

3 东湾构造带储层波形指示反演失效机理

3.1 波形聚类失效

波形聚类是波形指示反演的核心原理，其核心逻辑是通过地震波形形态相似性聚类，建立“波形分类—岩性标签”的映射关系，为反演提供约束。但在东湾构造带下组合储层，这一逻辑完全失效，核心原因是储层与非储层测井响应显著趋同：底砂岩与上覆高碳酸盐含量的泥岩的声波时差曲线、密度曲线形态高度一致；顶部纹层状细粒岩储层与周围非储层的测井响应也无明显差异[6]。

由于纵波阻抗由“密度×声波时差”曲线计算得出，测井响应趋同直接导致储层与非储层纵波阻抗丧失区分度。而纵波阻抗是控制地震波形的核心参数，最终使得不同岩性、物性的地层产生相似地震波形。聚类时，每类波形对应的测井样本混杂了不同岩性的地质体，无法建立可靠的“波形分类—岩性标签”映射关系，导致传统波形指示反演的核心约束缺失，构成精准反演的根本性障碍。

3.2 特征曲线的敏感性不足

纵波阻抗并非唯一存在敏感性缺陷的特征曲线，在东湾构造带下组合储层中，伽马曲线、电阻率曲线、中子孔隙度曲线等常规测井特征曲线，同样因无法有效区分储层与非储层的岩性、物性差异，成为制约反演效果的重要因素。

3.3 井点数量有限

一方面，测井高频信息覆盖有限，无法为井间区域提供有效约束，导致传统反演所需的“测井—地震”关联模型、初始低频模型难以精准构建；另一方面，有限的井点数量无法支持地质统计学反演等依赖大量井数据约束的高分辨率方法。

4 东湾构造带储层反演方法优化

针对准噶尔盆地天山北麓东湾构造带超深K_1q_1两套储层岩性差异显著、储集空间复杂、非均质性强及正交各向异性显著的核心问题，依托“两宽一高”地震资料的高品质基础，构建“岩石物理建模—叠前反演—频率融合”的一体化技术体系。

以岩石物理建模为约束开展叠前弹性参数反演，虽揭示了两套储层的横向分布，但受超深储层地震资料分辨率限制，反演结果存在底砂岩横向厚度变化不显著、顶部纹层状细粒岩储层表征精度不足的问题。经交汇分析，两套储层均为高孔隙度特征，据此采用波形指示模拟得到高分辨率孔隙度体；再将叠前纵横波速度比反演的低频分量与孔隙度模拟的高频分量进行频率融合，弥补了单一方法的分辨率缺陷，在致密砂岩薄储层刻画中效果显著。优化后的反演结果分辨率大幅提升，既能清晰展现TW1井至TW2井底砂岩从26 m减薄至7 m的厚度变化，也精准表征了TW2井顶部19.5 m纹层状细粒岩储层发育段（见图2），两套储层的纵向分辨能力与横向展布特征均与地质认识高度吻合。

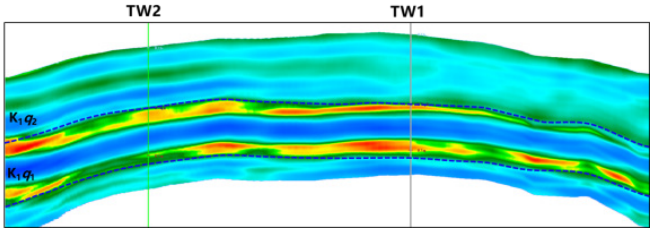


图2 叠前弹性参数反演及孔隙度波形指示模拟频率融合

5 结束语

波形指示类技术在东湾构造带下组合的应用瓶颈，其本质是储层与非储层纵波阻抗响应趋同导致的“波形—岩性”映射关系失效，以及纵波阻抗参数对储层敏感性不足。

以东湾构造带下组合储层的高孔隙度特征为桥梁，将叠前纵横波速度比反演的低频组分与孔隙度波形指示模拟的高频组分进行融合，是突破单一方法分辨率、实现超深致密薄储层精细刻画的可行路径，对同类复杂储层预测具有借鉴意义。

参考文献

[1]杨光,王立贤,胡佳,等.地震波形指示反演方法在叠置薄砂岩预测中的应用——以松辽盆地南部乾安油田高台子油层为例[J].物探与化探,2025,49(4):846-854.

[2]张岚,王少鹏,张立安,等.基于波形指示反演的窄薄储层定量预测[J].海洋石油,2024,44(1):8-13.

[3]熊晓军,罗海龙,肖尧,等.基于波形指示反演方法的川中二叠系栖霞组薄储层预测研究[J].地球物理学进展,2022,37(6):2460-2468.

[4]庞志超,李静,王俊,等.准噶尔盆地南缘东湾构造带QB 1井重大发现及下组合勘探前景[J].石油学报,2025,46(12):2245-2258.

[5]陈彦虎,毕建军,邱小斌,等.地震波形指示反演方法及其应用[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1149-1158.

[6]盛述超,毕建军,李维振,等.关于地震波形指示模拟反演(SMI)方法的研究[J].内蒙古石油化工,2015,41(21):147-151.

（本文编辑 杜宇琪）

