

基于地震沉积学的河流相储层砂体研究

房朝连*, 白海涛, 崔文福, 奚玉川

中石化胜利油田分公司孤东采油厂, 山东 东营

收稿日期: 2023年9月26日; 录用日期: 2023年11月22日; 发布日期: 2023年11月30日

摘要

研究区主要发育辫状河沉积, 储层厚度薄, 横向变化快, 导致对砂体边界及砂体之间的连通性认识不清, 制约了油气藏的勘探开发和剩余油的挖潜, 本文以孤岛油田中一区河流相整装油藏为研究目标, 以地震沉积学为基础, 分析了90°相位转换、地层切片技术、分频解释技术等关键技术的应用条件, 同时结合地质、地震及测井资料研究河流相砂体分布情况, 利用地震波形特征识别辫状河砂体分布及叠加结构, 对类似油田储层精细研究具有较好的借鉴作用。

关键词

储层砂体, 地震沉积学, 辫状河沉积, 正演模拟

Study on Fluvial Reservoir Sand Body Based on Seismic Sedimentology

Chaolian Fang*, Haitao Bai, Wenfu Cui, Yuchuan Xi

Gudong Oil Production Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

Received: Sep. 26th, 2023; accepted: Nov. 22nd, 2023; published: Nov. 30th, 2023

Abstract

The research area is mainly developed with braided river sedimentation, the reservoir thickness is thin, and changes rapidly in the lateral direction, which has resulted in a poor understanding of the boundaries of sand bodies and the connectivity between them, restraining the exploration and development of oil and gas reservoirs and the potential of leftover oil. This paper focuses on the braided river facies in Zone One of the Gudao Oil Field as the research target. Based on seismic sedimentology, it analyzes the application conditions of key technologies such as 90° phase conversion, stratum slicing, and frequency interpretation. Additionally, combining geological, seismic

*第一作者。

and well logging data to study the distribution of fluvial sand bodies, it uses seismic waveform characteristics to identify the distribution and superimposition structure of braided river sand bodies. This study is of great reference value to the fine research of similar oil field reservoirs.

Keywords

Reservoir Sand Body, Seismic Sedimentology, Braided River Deposits, Positive Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

孤岛油田作为胜利油区的主力油田,自投产以来,先后经历了开发前准备、稳健产能、产量递减、注水见效、提高井网密度来提高产量、注聚合物及科学化学驱提高采收率六个阶段。随着持续开采我国东部油区,目前胜利油区中以孤岛油田为首的整装油藏已经进入中、高含水期,综合含水率以达93%以上,储层中的剩余油高度分散、分布规律复杂,难以认识、难以寻找,限制了后期的开发调整,面临着产量递减趋势增加,含水上升加快、剩余油高度分散、产量大幅下降等问题。孤岛油田的稳产对整个胜利的稳产具有重要意义。摸清储层砂体的分布情况已成为对高含水期地区剩余油挖潜的必要措施。

20世纪70年代,Dahm和Graebner首次将地震数据应用到地质解释工作中,使用地震时间切片中振幅高分辨率影像来解释曲流河道的分布特征。1994年曾洪流博士首次提出地层切片的概念,地层切片可以准确反映等时沉积地质体的平面沉积特征,为河流相储层的沉积解释提供有力的解释。曾洪流还在其论文中提出了地震沉积学的概念,随后于2004年对地震沉积学进行了较为详细的定义,2006年董春梅对地震沉积学进行了若干探讨,她认为地震沉积学是继地层学、层序地层学之后的又一门新的边缘交叉学科,90°相位转换、地层切片和分频解释是地震沉积学中的三项关键技术。

本文以孤岛油田中一区7砂组为例,采用地震沉积学方法结合地质、测井资料,刻画了研究区河道砂体的展布特征,摸清储层砂体结构,更好地为油气田的勘探开发提供技术支撑。

2. 区域地质概况

孤岛油田是一个大型的整装油田,位于渤海湾盆地沾化凹陷东部的一个大型披覆背斜构造上,划分为中一区、中二区、东区、西区和南区等十个主要开发区块。孤岛中一区于孤岛油田披覆背斜构造的顶部,是一个由人为分隔的不封闭开发单元,地层平缓,地层倾角 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$,呈北高南低的趋势,馆陶组下段自下而上发育灰白色砾岩、砾状砂岩、含砾砂岩、砂岩和泥岩,7砂组砂体以连片席状、条带状分布,小厚度较大(平均有效厚度大于3 m),纵向上砂体叠加性较好[1]。

孤岛中一区发育河流相沉积,馆陶组7砂层组发育辫状河沉积,区内主要发育两种亚相、四类微相:河道亚相、泛滥平原亚相;心滩坝、辫状河道、河道边缘和河间滩地。研究区平面上储层物性受沉积微相控制,心滩坝微相具有厚度大,渗透率高的特点[2]。

3. 辫状河砂体地震构型叠加模式

心滩坝是辫状河的主要沉积单元,是由洪水沉积造成的,随着泥沙的淤积,心滩坝的纵向上不断增长,横向上不断展宽,发现单个心滩坝和两侧的辫状河道实际上是一个连通体,内部单元难以识别,而

研究区的地震资料具有在横向上具有高分辨率较高的特点，这时就需要利用地震的方法进行识别[3]。

根据心滩坝形成的特点，总结出辫状河的侧向组成模式(图 1)，并建立辫状河单元之间垂向叠加连通模式和侧向叠加连通模式(图 2)，同时建立相应的地震正演模型(图 3)。正演模拟有助于理解和解释基于地震波形数据的储层特征[4]，目的层的岩性主要为砂岩和泥岩，声波时差分别为 360~370 $\mu\text{s}/\text{m}$ 、390~450 $\mu\text{s}/\text{m}$ ，将正演模型中的砂岩和泥岩的声波传播速度分别赋值为 2750 m/s 和 2300 m/s，研究区中点坝厚度赋值为 10 m，本文采用垂直的 40 Hz 的 Ricker 子波创建不同辫状河单元叠加形式的二维地震正演模型(图 4)。



Figure 1. Lateral composition of braided river unit

图 1. 辫状河单元侧向组成

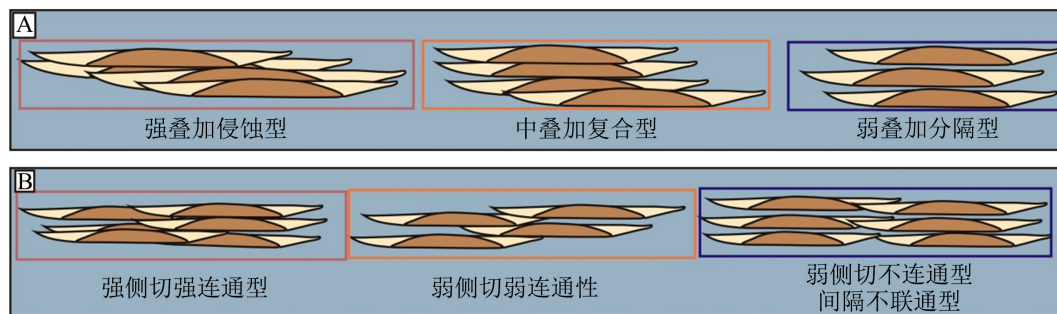
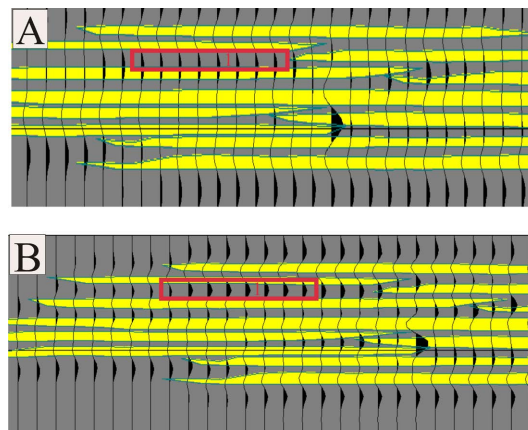


Figure 2. (A) Vertical superposition mode of braided river structural unit; (B) Lateral superimposed connection mode of braided river structural unit

图 2. (A) 辫状河结构单元垂向叠加模式；(B) 辫状河结构单元侧向叠加连通模式

通过对辫状河砂体地震构型叠加模式正演模型的建立，并利用地震沉积学中的分频技术对研究区地震资料进行提频，观察 30 Hz，45 Hz 和 60 Hz 对应的正演剖面，总结出以下规律：单一砂体上下均有明显泥岩(5~8 m)分隔，时同相轴、波形的形态变化可以反应单一砂体的形态特征(图 3(A)位置 1)；中高频信息可以预测侧向弱叠加、不连通的位置及边界砂体形态(图 3(A)~(C)位置 1)；两砂体间泥岩厚度较小时 2~3 m，两砂体位于同一有效频率的同相轴，不易区分；厚层、强叠加砂体组合中，即使泥岩厚度较小也容易形成波阻抗界面，形成连续的反射特征(图 3(D)位置 2)；强振幅、波形间连续的弱振幅反射或极性翻转趋势的弱反射可能为砂体(图 3(E)位置 3)，砂体上下泥岩较薄。



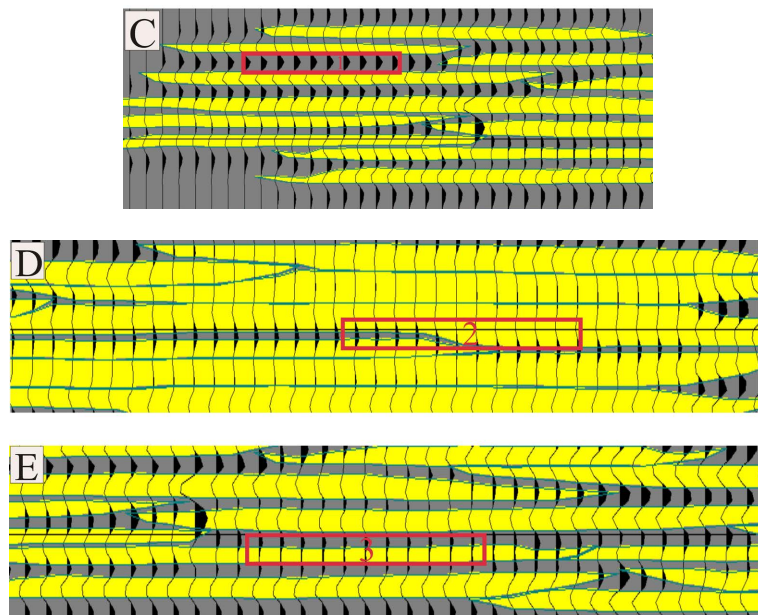


Figure 3. (A) Seismic forward section after 90° phase conversion with frequency of 30 Hz; (B) Seismic forward section after 90° phase conversion with frequency of 45 Hz; (C) Seismic forward section after 90° phase conversion with frequency of 60 Hz

图 3. (A) 30 Hz 90° 相位正演剖面; (B) 45 Hz 90° 相位正演剖面; (C) 60 Hz 90° 相位正演剖面

4. 井震标定及层位追踪

由于河流相储层砂体的横向变化较快, 在进行地震层位标定时, 经常出现地层的相位转换的情况, 因此需要结合多井标定进行等时地震追踪对比[5]。在传统的地震追踪中一直追踪波峰(图中黑线), 而目的层下部较稳定同相轴(图中红虚线)显示地层在目的层同相轴转折点处近乎平行, 而传统对比没法做的等时追踪对比(图 4)。等时地层追踪则需要在转折点处做出变化, 由转折点右侧的零相位追踪变为转折点做出的正相位追踪[6]。原始地震数据中传统地层追踪、对比时, 同相轴形态变化大, 地层线弯曲、等时性差; 标准轴控制下的中高频数据体中的地层追踪对比, 同相轴稳定性较强, 且地层线较为平缓, 等时性更强[3] (图 5)。

心滩在地震剖面上表现为正值、高振幅特征(红色区域); 砂质河道充填表现为低振幅特征(灰褐色区域); 废弃河道充填的细粒沉积岩(粉砂岩、泥岩)的厚度较小, 在地震剖面上表现为负值、高振幅特征(灰色区域) (见图 4)。因此, 根据地震剖面上不同振幅值可以刻画辫状河沉积微相[7] [8] [9]。

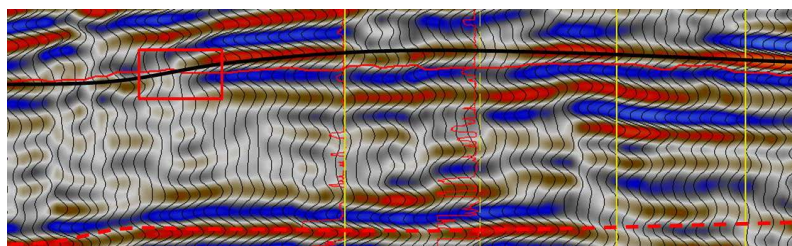


Figure 4. Multi-well calibration, isochronous formation tracking interface under standard layer constraint

图 4. 多井标定、标准层约束下的等时地层追踪

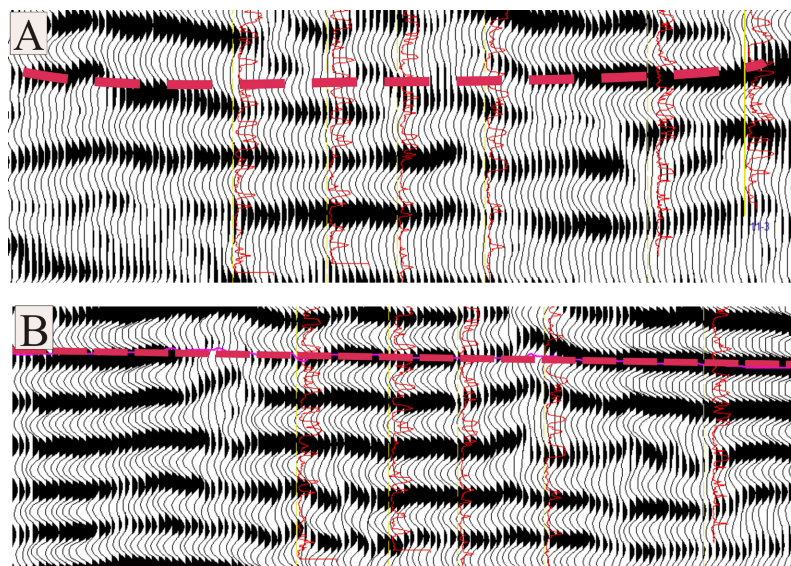


Figure 5. (A) Traditional stratigraphic tracking of original seismic data; (B) Strata tracking in medium-high frequency data volume under standard axis control

图 5. (A) 原始地震数据中传统地层追踪; (B) 标准轴控制下的中高频数据体中的地层追踪

5. 基于地震沉积学切片的储层沉积演化规律分析

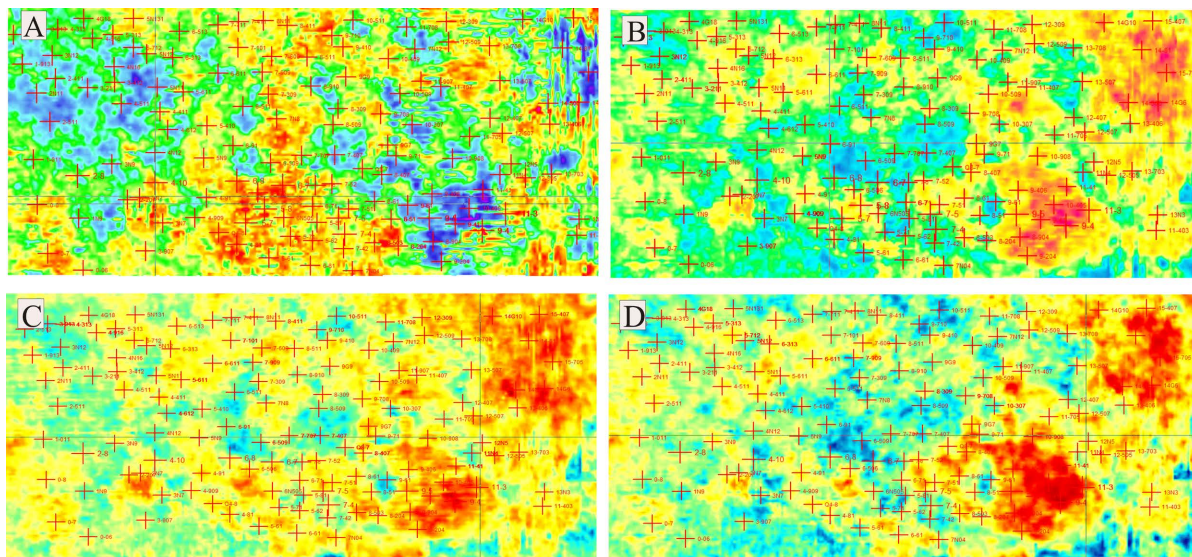


Figure 6. (A) Stratigraphic slices of the upper part of the sand group; (B) Stratigraphic slices in the upper part of the sand group; (C) Stratigraphic slices in the middle and lower parts of sand group; (D) Stratigraphic slices at the bottom of sand group

图 6. (A) 砂组上部地层切片; (B) 砂组中上部地层切片; (C) 砂组中下部地层切片; (D) 砂组底部地层切片

在刻画 7 砂组地层沉积微相平面展布时,主要通过标定井资料完成地震相并提取地层切片的方法[10],每隔 20 ms 沿着地震同相轴、垂直于时间轴方向对 90° 相位转换后的地震数据体的目的层位的顶底界面进行切片,并读取主体砂体在切片上的显示情况(图 6),4 个地层切片可以演化出 7 砂组主体砂体的沉积过程。分析地层切片可得:7 砂层组中下部与底部的辫状河带的分布具有明显的继承性,中下部辫状河带

宽度增加；中上部西侧辫状河带发育程度增加；上部辫状河带发育程度明显降低。以 60 Hz 最小振幅属性为基础通过井震结合确定一区 71 层辫状河砂体分布及河道走向(图 7)，可以观察到：Ng7¹层辫状河砂体沉积主体位于研究区中部；不同区域有串珠状弱联通带分隔。利用地震沉积学方法表征的砂体分布模式更能体现辫状河沉积特征，不发育连续稳定的分隔带[11][12][13]。

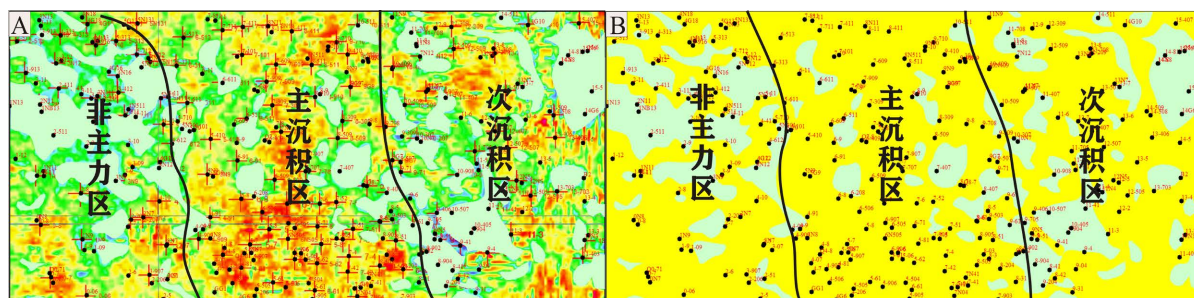


Figure 7. (A) The minimum amplitude attribute diagram of 60 Hz amplitude in Ng7¹ layer; (B) The sedimentary microfacies diagram of Ng7¹ layer

图 7. (A) Ng7¹层 60 Hz 最小振幅属性图；(B) Ng7¹层沉积微相图

6. 结论

1) 正演模拟是利用地震波形数据来描述储层的有用工具，地震波形特征的分析在河道解剖中起着重要的作用；心滩在地震剖面上表现为正值、高振幅特征；砂质河道充填呈宽条带状连片分布，表现为低振幅特征；废弃河道充填呈孤立长条状分布，表现为负值、高振幅特征。

2) 分频技术适用于预测砂体厚度较薄且岩性横向变化复杂的储层，本次研究利用分频解释技术，在原有的地震资料的基础上提高了纵向分辨率，识别出以往无法识别出的薄层砂体，读取更多等时地层信息[14][15]。

3) 地层切片充分考虑了地层沉积规律，根据井震标定，选择准确切片可以较清晰的刻画河道砂体的展布特征。

4) 经过包括 90°相位转换、地层切片分析、分频解释在内的地震沉积学分析，已完成了研究区 7 砂组在砂体展布方面的初步探索。

参考文献

- [1] 刘海, 林承焰, 董春梅, 等. 基于地震沉积学的复杂曲流带沉积相研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 30-39.
- [2] 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 915-921.
- [3] 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.
- [4] 陈仕臻, 林承焰, 任丽华, 等. 成因与演化信息约束的辫状河储层地质建模——以委内瑞拉奥里诺科重油带 M 区块为例[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(5): 1092-1101+935.
- [5] Zeng, H.L. and Backus, M.M. (2005) Interpretive Advantages of 90°-Phase Wavelets: Part 1—Modeling. *Geophysics*, **70**, C7-C15. <https://doi.org/10.1190/1.1925740>
- [6] Zeng, H.L. and Backus, M.M. (2005) Interpretive Advantages of 90°-Phase Wavelets: Part 2—Seismic Applications. *Geophysics*, **70**, C17-C24. <https://doi.org/10.1190/1.1925741>
- [7] 张锐锋, 何海清, 陈树光, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质新认识与重大发现[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 1-12.
- [8] 刘书亭, 张宪国, 任丽华, 等. 利用地震沉积学定量刻画辫状河三角洲砂体——以委内瑞拉 MPE-3 区块为例[J].

石油地球物理勘探, 2019, 54(6): 1348-1356+1177.

- [9] 董艳蕾, 朱筱敏, 胡廷惠, 等. 泌阳凹陷核三段地震沉积学研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 284-293.
- [10] 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 915-921.
- [11] 董艳蕾, 朱筱敏, 曾洪流, 等. 黄骅坳陷歧南凹陷古近系沙一层序地震沉积学研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 234-240.
- [12] Zhu, H.T., Yang, X.H., Liu, K.Y., *et al.* (2014) Seismic-Based Sediment Provenance Analysis in Continental Lacustrine Rift Basins: An Example from the Bohai Bay Basin, China. *AAPG Bulletin*, **98**, 1995-2018. <https://doi.org/10.1306/05081412159>
- [13] Zeng, H.L., Backus, M.M., Barrow, K.T., *et al.* (1998) Stratal Slicing; Part 1, Realistic 3-D Seismic Model. *Geophysics*, **63**, 502-513. <https://doi.org/10.1190/1.1444351>
- [14] Zeng, H.L., Henry, S.C. and Riola, J.P. (1998) Strata Slicing; Part II, Real 3-D Seismic Data. *Geophysics*, **63**, 514-522. <https://doi.org/10.1190/1.1444352>
- [15] Zeng, H.L. (2017) Thickness Imaging for High-Resolution Stratigraphic Interpretation by Linear Combination and Color Blending of Multiple-Frequency Panels. *Interpretation*, **5**, T411-T422. <https://doi.org/10.1190/INT-2017-0034.1>