

doi:10.3799/dqkx.2026.080

人工智能驱动地震沉积学在零井控湖底扇富砂性预测中的应用—以渤中凹陷渤南低凸起东二下亚段为例

胡鑫^{1,2}, 雷杭山³, 周越^{1,2}, 刘鹏程³, 石诺³, 朱筱敏^{1,2}

(1.中国石油大学(北京) 油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249; 2.中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3.中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 针对渤海湾盆地渤中凹陷渤南低凸起东段东二下亚段深水湖底扇因零井控导致的成因机制不明与储层富砂性预测难题。基于三维地震及钻测井资料, 本研究提出一套人工智能驱动的地震沉积学一体化预测方法。首先, 基于凸起边缘测井资料构建富砂指数(FSI), 实现岩性与储层质量的协同量化; 其次, 采用皮尔逊相关分析与随机森林特征重要性相结合的双指标策略, 优选甜点、邻道相干和总能量三种敏感地震属性; 进而, 利用随机森林回归算法建立地震属性与FSI的定量映射模型; 最后, 在深洼区部署虚拟井D, 结合地震沉积学技术实现零井控区湖底扇垂向岩性序列预测、平面展布刻画及其富砂/泥成因机制探讨。结果表明: (1) FSI对砂岩与泥岩的识别准确率达87%以上, 模型预测精度较高($R^2=0.84$); (2) 研究区东二下亚段湖底扇整体呈现“泥包砂”特征, 砂地比不足20%, 垂向发育“厚层泥岩-薄层砂岩夹厚层泥岩-厚层泥岩”岩性组合; (3) 初步探讨其富泥性可能受构造坡折带控制、高泥质物源供给及流体分异三因素耦合影响。本研究构建的“地质机理约束+人工智能驱动+地震沉积学解释”技术流程, 旨在为陆相断陷盆地深水无井区储层预测及风险勘探规避提供了可行方案。

关键词: 地震沉积学; 湖底扇; 随机森林算法; 渤中凹陷; 东营组

中图分类号: TE121; P631.8

收稿日期: 2025-08-27

Application of AI-Driven Seismic Sedimentology to Sand-Richness Prediction in

第一作者简介: 胡鑫(1998—), 男, 中国石油大学(北京)在读博士研究生, 研究方向为源汇系统和地震沉积学。E-mail:2022310022@student.cup.edu.cn, ORCID:0009000469121289

通信作者简介: 朱筱敏(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事层序地层学和沉积地质学方面的教学与科研工作, E-mail:xmzhu@cup.edu.cn。

**Lacustrine Fan Systems with No Well Control: A Case Study from the Lower
Second Member of Dongying Formation, Eastern Bonan Low Uplift, Bozhong
Sag**

HU Xin^{1,2} , LEI Hangshan³ , ZHOU Yue^{1,2} , LIU Pengcheng³ , SHI Nuo³ , ZHU Xiaomin^{1,2}

(1. *China University of Petroleum (Beijing), National Laboratory of Oil and Gas Resources and Engineering, Beijing 102249, China* ; 2. *School of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China* ; 3. *CNOOC Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China*)

Abstract: In the deepwater lacustrine fan systems of the lower second member of the Dongying Formation in the eastern Bonan Low Uplift, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, the absence of well control poses significant challenges to understanding genetic mechanisms and predicting reservoir sand-richness. Based on 3D seismic and well-logging data from peripheral wells, this study develops an integrated workflow that combines artificial intelligence with seismic sedimentology. First, a sand-richness index (FSI) is constructed from well logs to quantitatively characterize lithology and reservoir quality. Second, a dual-criterion strategy combining Pearson correlation analysis and Random Forest feature importance is employed to select three seismic attributes most sensitive to FSI: sweetness, neighboring trace coherence, and total energy. Third, a Random Forest regression model is established to quantitatively map the relationship between these attributes and FSI. Finally, a virtual well (D) is deployed in the deep sag area to predict the vertical lithological succession of the fan, and seismic sedimentology techniques are applied to delineate its planar distribution and explore controls on sand/mud accumulation. Results indicate that: (1) FSI effectively discriminates sandstone from mudstone with an accuracy exceeding 87%, and the established model demonstrates high predictive performance ($R^2=0.84$); (2) the lacustrine fan is characterized by a "mud-enveloped-sand" architecture, with a sand-to-mud ratio below 20% and a typical vertical succession of thick mudstone – thin sandstone interbedded with thick mudstone – thick mudstone; (3) the mud-rich nature of the fan is preliminarily interpreted to result from the coupled effects of structural slope-break zones, high mud-prone provenance supply, and density-flow differentiation. The proposed workflow, integrating geological mechanism constraint, AI-driven analysis, and seismic sedimentological interpretation, provides a feasible approach for reservoir prediction and exploration risk mitigation in deepwater, well-constrained settings of

continental rift basins.

Key words : Seismic Sedimentology; Lacustrine Fan; Random Forest [Algorithm](#); Bozhong Sag; Dongying Formation

0 引言

地震沉积学作为连接地震勘探与沉积学理论的桥梁学科,自 Zeng 等(Zeng et al.,1998; 曾洪流等, 2012; 朱筱敏等, 2019)系统提出其概念与方法体系以来,通过地震属性分析、地层切片技术及三维可视化手段,显著提升了沉积体系平面展布与演化历史的刻画精度,为隐蔽性、岩性油气藏的勘探提供了有力技术支撑(Zeng et al., 2004, 2005a, 2005b)。其理论和技术核心在于利用地震资料的横向连续性与垂向分辨率,揭示沉积体几何形态、内部结构及空间配置关系,将地震信息转化为具有明确沉积学意义的地质模型(朱筱敏等, 2019, 2020; Hu et al., 2024)。经过二十余年的国内外研究发展,地震沉积学在浅水三角洲、滩坝等沉积体系表征中已取得显著成效(曾洪流等, 2018; 董艳蕾等, 2020; 付鑫等, 2021; 娄敏等, 2021; 张自力等, 2023; 胡鑫等, 2025)。然而,当研究目标转向陆相断陷盆地深水重力流系统,尤其在井控数据绝对缺失的深洼区,传统方法面临双重理论-技术瓶颈:第一,岩性-地震响应映射的复杂非线性困境。深水湖底扇沉积受控于多期次滑塌事件、流体性质转化及微地貌约束,导致其内部岩性结构与地震反射特征间存在高度非唯一性映射关系。常规地震相分析虽可识别扇体宏观几何形态,却难以量化内部富砂单元的空间展布规律。第二,零井控条件下的地质标定失耦难题。由于缺乏扇体核心区实钻资料,致使地震属性的地质意义无法通过井震联合标定进行物理约束,显著增加储层预测结果的不确定性。

渤海湾盆地作为我国东部典型陆相断陷含油气盆地,其深水-半深水沉积体系储层预测始终是油气勘探的关键科学问题与前沿技术挑战(徐长贵等, 2025)。渤中凹陷东南缘的渤南低凸起东二下亚段广泛发育三角洲-湖底扇沉积体系(刘睿等, 2021; 徐长贵等, 2025),其深洼区湖底扇储层展布与质量直接关系到该区岩性油气藏的勘探潜力。然而,受限于现有钻井均分布于构造凸起边缘地带,深洼区湖底扇主体长期处于“零井控”状态,导致三大关键地质问题亟待解决:(1)湖底扇岩性组合及富砂/富泥特性不明,储层潜力评估缺乏依据;(2)控制扇体富砂/富泥性的关键地质机制缺乏探讨;(3)缺乏针对深水无井区储层定量预测的有效技术方法。这一“深水勘探盲区”严重制约了研究区油气资源潜力评价与勘探部署优化。

近年来,人工智能与地震沉积学的融合研究不断深化,尤其在陆相断陷盆地深水体系展现出良好的应用前景(La Marca et al.,2022; 岳大力等,2022; 侯霖莉等,2024; 裴健翔等,2025)。

岳大力等(2022)系统综述了河流相储层地震属性优选与融合方法,并指出机器学习在高维非线性关系挖掘中的优势;La Marca等(2022)在新西兰 Taranaki 盆地利用无监督学习识别深水扇构型要素提升解释效率;葛家旺等(2025)在珠江口盆地建立人工智能算法驱动地震沉积学表征方法体系实现陆架砂体智能识别。然而,在陆相断陷湖盆深水湖底扇体系,尤其面对零井控条件,现有研究仍多侧重于属性优选或模型调优。缺乏从岩石物理机制出发构建综合岩性-储层量化指标,并将其与 AI 建模、地震沉积学解释系统融合的一体化工作流程。此外,传统岩性量化方法(如单一 VSH 参数)难以同时表征岩性组成与成岩改造对储层的影响,导致模型输入标签的地质代表性不足,预测结果地质可解释性弱。

鉴于此,本研究以渤中凹陷渤南低凸起东段东二下亚段为例,针对零井控深水湖底扇富砂性预测难题,提出“地质机理约束+人工智能驱动+地震沉积学解释”三位一体的研究方法。研究创新点在于:(1)构建富砂指数(FSI),融合泥质含量与孔隙度双重信息,实现对岩性及储层质量的综合量化;(2)采用皮尔逊相关性分析与随机森林特征重要性双指标筛选策略,协同优选对 FSI 敏感的地震属性;(3)建立随机森林回归模型,实现地震属性至 FSI 的定量映射,并设立虚拟井实现无井区垂向岩性序列预测;(4)结合地震沉积学技术,初步探讨湖底扇富砂/泥性潜在的成因机制。旨在形成一套适用于陆相断陷盆地深水无井区的储层预测方法体系,为类似地质背景下的油气勘探提供参考。

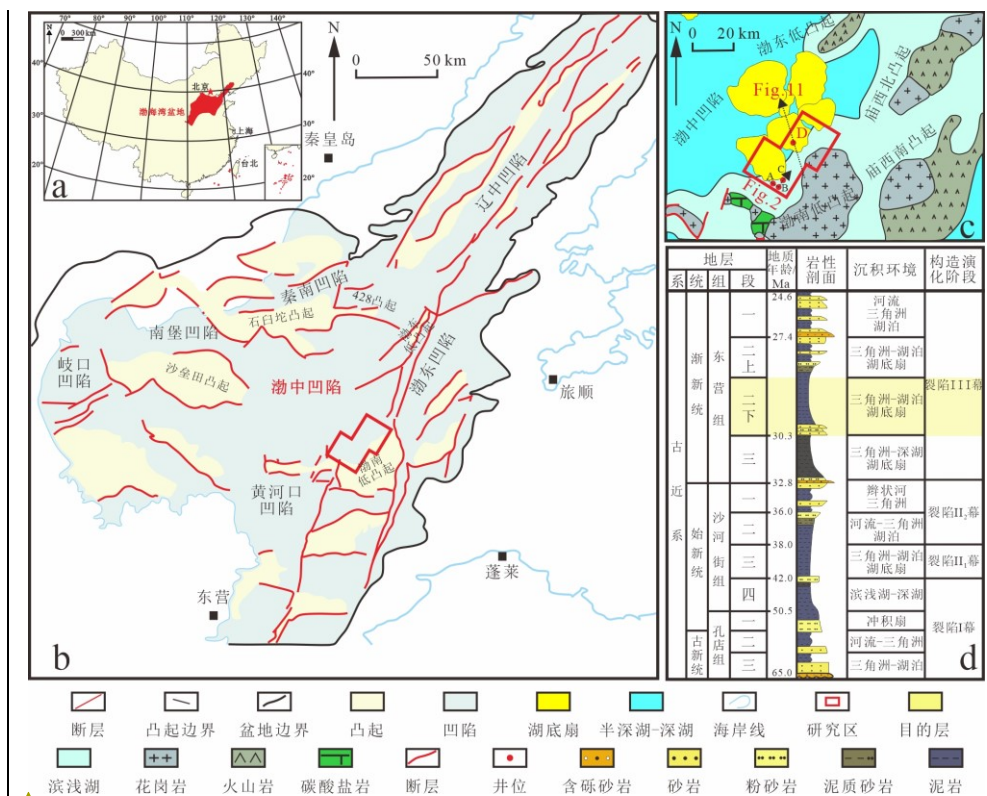
1 区域地质概况

渤海湾盆地作为我国东部典型的复合型含油气盆地(徐长贵等,2025),主体位于北纬 $37^{\circ}00'$ -东经 $118^{\circ}00'$ (图 1a)。渤中凹陷位于渤海湾盆地构造中心,东接渤东低凸起,西邻沙垒田凸起,南以渤南低凸起为界,北缘与石白坨凸起呈断裂接触(图 1b),整体呈现“四凸一凹”的构造格局(李俊伟等,2018)。渤中凹陷的构造演化主要受控于多期伸展叠合走滑活动,具有多幕裂隙、多旋回叠加的特点(龚承林等,2023)。其裂隙演化可划分为:孔店组和沙四段沉积期的裂隙I幕(65.0-50.5 Ma)、沙三段沉积期的裂隙II₁幕(42.0-38.0 Ma)、沙一段和沙二段沉积期的裂隙II₂幕(38.0-32.8 Ma)以及东营组沉积期的裂隙III幕(32.8-24.6 Ma)(龚承林等,2023)。

研究区位于渤中凹陷东南部渤南低凸起东段北侧缓坡带向凹陷中心的倾末端(图 1b 红色框内),夹持于渤东低凸起与渤南低凸起之间(图 1c)。区内古近系自下而上发育孔店组、沙河街组和东营组。东营组可进一步划分为东三段、东二下亚段、东二上亚段与东一段(图 1d),其中东二下亚段为湖底扇主要发育层位,据前人研究已识别出 5 个扇体(王启明

等, 2024; 徐长贵等, 2025)。研究区涵盖其中 2 个扇体的边缘区域, 目前尚无钻井直接揭示, 为本研究设定虚拟井 D 的关键目标区 (图 1c)。

本研究基于覆盖面积 525 km² 的三维地震资料及研究区内的钻测井资料开展。三维地震资料主频约 20 Hz, 有效频宽为 10–80 Hz。研究区东二下亚段平均速度约 3200 m/s, 地震纵向极限分辨率 ($\lambda/4$) 约 40 m。钻测井资料来自位于研究区凸起边缘的 A、B、C 三口井。连井剖面显示三口井均钻遇东二下亚段, 该段地层整体以泥岩沉积为主。其中, A 井和 B 井在中上部发育多期厚度为 5–10 m 的薄层砂体; C 井底部可见近 20 m 的厚层砂体, 为靠近凸起近源端辫状河三角洲河道砂体 (图 2)。三口已知井的自然伽马 (GR) 与声波时差 (DT) 曲线完整且质量良好, 有效解释深度区间分别为 A 井 2769–2990 m、B 井 3276.8–2997 m、C 井 2806–2984.5 m (图 2)。



带格式的: 字体: (默认) Times New Roman, (中文) 宋体, 字体颜色: 文字 1

图 1 渤中凹陷东南斜坡带区域构造位置与地层发育特征

Fig. 1 Comprehensive histogram of regional tectonic location and strata in the southeast slope zone of Bozhong Sag

a. 渤海湾盆地构造位置 b. 研究区地理位置 c. 研究区东二下亚段湖底扇平面展布 d. 渤中凹陷古近系构造-地层综合柱状图

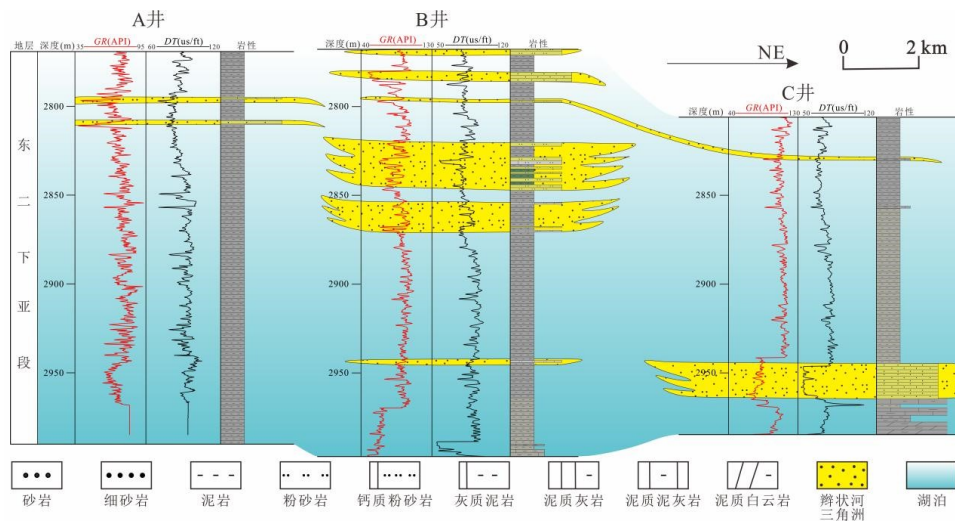


图 2 研究区 A、B、C 井沉积相连井剖面（测线位置见图 1c）

Fig. 2 Well-tie sedimentary facies profile of Wells A, B, and C in the study area (for location of the section, see Fig. 1c)

2 研究方法

2.1 基本研究思路

①基于测井与录井岩性资料，以 0.125 m 为采样间隔，提取凸起边缘 A、B、C 三口井东二下亚段自然伽马（GR）、声波时差（DT）及对应深度的岩性数据；通过构建富砂指数（FSI）计算公式，得到 FSI 序列，进而确定其区分砂泥岩的阈值，并通过与实际岩性对比验证 FSI 判别岩性的有效性。②基于地震资料提取多种振幅类属性，分别采用皮尔逊相关系数矩阵（评估线性关系）与重要性权重矩阵（评估非线性关系）进行双指标协同分析，优选出三类对 FSI 最敏感的地震属性，并确定性能最优的非线性预测算法模型（随机森林预测模型）。③为实现在无井区域的可靠岩性序列预测，将三口井共 2400 个样本按 70%与 30%的比例划分为训练集与独立测试集；利用训练集构建随机森林预测模型，再将测试集对应的三类敏感地震属性输入已训练模型，得到预测 FSI 值，并与基于测井 GR、DT 计算得到的实际 FSI 值进行对比；依据 0.53 的阈值将预测与实际 FSI 转化为砂泥岩分类结果，以模型在测试集上的泛化性能验证该方法外推至无井区域的可行性（图 3）。

最后，根据研究区湖底扇发育设置虚拟井 D，利用优选出的敏感属性与训练好的模型预测其 FSI 垂向序列，依据阈值识别东二下亚段湖底扇砂泥岩垂向分布；进一步通过三类敏感属性的 RGB 融合，实现湖底扇平面展布特征的综合刻画。

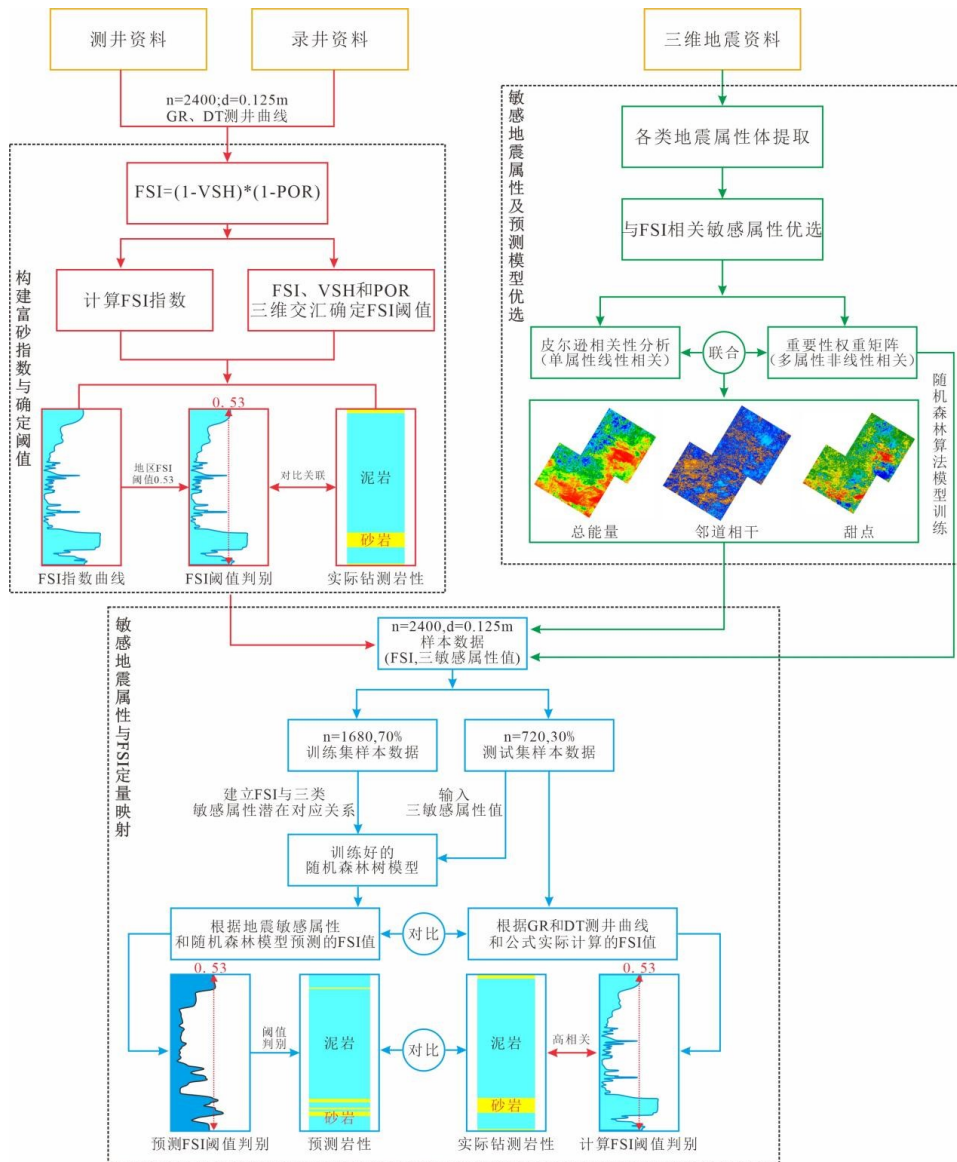


图 3 人工智能驱动地震沉积学方法零井控区湖底扇富砂性预测流程图

Fig. 3 Flowchart of AI-enhanced seismic sedimentology for sand-rich sublacustrine fan prediction under zero-well-control conditions

2.2 岩石物理机制-富砂指数构建与阈值确定

2.2.1 富砂指数的构建

基于渤南低凸起三口边缘井（A、B 和 C）录井资料揭示的东二下亚段发育砂岩和泥岩的主要岩性特征，构建相应的岩石物理概念模型，并创新性地提出富砂指数（FSI, Favorable

Sand Index)，具体表达式为：

$$FSI = (1-VSH) \times (1-POR)$$

式中，VSH为基于自然伽马测井（GR）计算的泥质体积分数：

$$VSH = (GR - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min}), \text{ 表征单位体积岩石中泥质组分的相对含量(Clavier et al., 1984)}$$

式中 GR：实测自然伽马值（API）， GR_{min} ：纯砂岩层段 GR 最小值， GR_{max} ：纯泥岩层段 GR 最大值；

式中，POR 为基于声波时差测井（ Δt ）计算的总孔隙度：

$$POR = (\Delta t - \Delta t_{ma}) / (\Delta t_f - \Delta t_{ma}), \text{ 表征单位体积岩石中孔隙空间的占比(Wyllie et al., 1956)}$$

式中 Δt ：实测声波时差（us/ft）， Δt_{ma} ：岩石骨架声波时差， Δt_f ：孔隙流体声波时差；

富砂指数（FSI）的物理意义：（1-VSH）项表征岩石中刚性颗粒与孔隙空间的相对体积，反映原始沉积的富砂程度；（1-POR）项代表经受压实、胶结等成岩改造后的岩石总骨架体积分数，其高值与建设性成岩作用增强相关。因此，FSI 的高值本质上是低泥质含量与高强度成岩骨架双重条件的耦合满足，实现从单一岩性判别向岩性-储层质量协同评价的跨越。

2.2.2 FSI 对砂泥岩区分阈值界定

采用富砂指数 FSI-有效孔隙度 Φ_e -泥质含量 VSH 三维交会分析与散点图矩阵相结合的方法，建立了储层岩性定量识别模型。确保 FSI 判识的砂岩兼具高纯砂岩骨架占比与显著有效储集空间双重特征，从而实现优质储层岩性的精准识别与评价。

2.3 人工智能驱动-地震属性双指标优选与随机森林建模

2.3.1 样本集构建、处理及敏感属性优选

基于 525 km² 的三维地震数据体，针对东二下亚段提取结构类（邻道相干、梯度模）、振幅统计类（均方根振幅、总能量）、频谱类（主频谱值、优势频率）及复合属性（甜点、瞬时 Q 因子、谱吸收因子）等 4 大类 9 种地震属性。通过合成记录精细标定，将三口边缘井（A、B 和 C）的 2400 个测井样本点投影至地震时间域。

将统计的各采样点的各岩石物理参数值（FSI 和 VSH 等）及各类地震属性参数值进行异常值去除和 Z-score 标准化处理，以避免岩石物理数值尺度差异和不同地震属性量纲差异。

最后，将处理后的富砂指数（FSI）与各类地震属性通过皮尔逊相关系数热点矩阵量化

FSI 与各属性的线性相关性(肖阳等, 2022), 进而基于随机森林算法和梯度提升树算法构建的特征重要性权重矩阵(李泉伦等, 2023), 联合优选对 FSI 具显著线性与非线性响应的前三种敏感属性。

2.3.2 随机森林模型训练与可行性验证

为确保研究方法在缺乏目标区实钻标定条件下的可靠性, 优选出随机森林 (Random Forest) 回归算法作为后续预测模型(付君豪等, 2023)。将三口边缘井的 2400 个样本点按 7:3 比例随机划分为训练集 (1680 个样本) 与独立测试集 (720 个样本); 以训练集采用随机森林回归算法, 以三类地震属性为输入变量, 以测井计算的富砂指数 (FSI) 为目标变量, 建立定量预测模型; 将测试集的地震属性输入训练好的模型, 获得 FSI 预测值。通过对比预测值与测井计算的 FSI 值, 并依据 FSI 的阈值对比岩性分类准确率, 评估模型泛化性能。该步旨在确认模型对未参与训练数据的预测能力, 从而为其在实际零井控区的应用提供可行性验证。

2.3.3 虚拟井的设定及垂向岩性序列预测

针对研究区深洼区零井控地质难题, 在湖底扇发育构造部位布设虚拟井点 (D 井); 沿东二下亚段提取甜点属性、邻道相干与总能量的三维属性序列。随后, 将所提取的地震属性数据输入经井控区样本训练完备并验证过的随机森林模型中, 反演得到连续富砂指数 (FSI) 预测曲线。最后, 依据的 FSI 阈值 (0.53) 对预测曲线进行自动岩性划分, 预测出虚拟井 D 井东二下亚段时间域岩性剖面, 从而揭示该区湖底扇的富砂/富泥特征。

2.4 地震沉积学解释及富砂/泥机制综合分析

2.4.1 地层切片

地层切片作为地震沉积学中的核心技术手段, 其基本原理是沿近似等时的地质界面提取地震属性, 以刻画沉积体系的宏观展布规律(Zeng et al., 1998; 朱筱敏等, 2019, 2020)。在本研究中, 具体以 2 ms 为等时间隔, 系统提取了 100 张地层切片, 从中筛选出能够代表东二下亚段沉积特征的关键切片, 并分别提取了甜点属性、邻道相干与总能量三类属性。通过上述属性的综合分析及解释, 有效再现了研究层段湖底扇及辫状河三角洲的平面分布几何形态及空间配置, 从而为储层预测提供了重要的地震地质依据 (董艳蕾等, 2020; 徐兆辉等, 2020; 倪长宽等, 2022)。

2.4.2 RGB (Red-Green-Blue) 融合

RGB 融合是地震沉积学中一种重要的可视化技术。该技术的核心原理在于，将三种对沉积特征具有明确指示意义的地震属性，分别赋予红、绿、蓝三个色彩通道，并依据三原色叠加原理进行图像合成(董艳蕾等, 2020; 胡鑫等, 2025)。合成图像中不同色彩及其混合色调, 直观反映了多种属性在空间上的耦合关系, 能够突出单一属性难以刻画的沉积地质信息, 从而有效增强对沉积微相边界、储层非均质性及烃类异常的综合识别能力(曾洪流, 2011; 朱筱敏等, 2019; 徐兆辉等, 2025)。在本研究中, 基于优选的甜点属性(图 11c)、邻道相干属性(图 11b)及总能量属性(图 11a), 对东二下亚段相应的属性切片进行了 RGB 融合处理(图 11d), 将经标准化处理的甜点属性赋予红色通道, 邻道相干属性赋予绿色通道, 总能量属性赋予蓝色通道; 各属性在融合前均进行线性拉伸至各自的最小值与最大值范围(总能量: $8.82 \times 10^5 \sim 7.32 \times 10^{10}$, 邻道相干: 0.896~0.9995, 甜点: 441.9~11846), 以确保三色通道的动态范围相匹配。RGB 融合图像的最终色调由三属性的相对强度共同决定, 并在此基础上开展综合地质解释(图 11e), 系统揭示了研究区湖底扇沉积相的展布特征。

3 研究结果

3.1 FSI 阈值界定

基于三口边缘井共计 2400 个采样点(包括 613 个砂岩点与 1787 个泥岩点)数据, 本研究通过构建并系统分析 FSI- Φ_e -VSH 三维分布图(图 4)与散点矩阵图(图 5), 实现对低井控条件下湖底扇体系富砂性的定量表征及各岩性参数间内在关联的量化表征。散点矩阵下三角展示参数间散点分布, 对角线为频率直方图及核密度估计曲线(KDE 线), 上三角为等值线概率云图。

FSI- Φ_e -VSH 三维分布表明, 砂岩与泥岩样点在参数空间中具有显著的空间分异特征。统计分析确定 FSI 最优阈值为 0.53, 据此对泥岩与砂岩的识别率分别达到 87.1%(1557/1787)与 87.8%(538/613)(图 4)。散点矩阵进一步显示, FSI、有效孔隙度(Φ_e)及泥质含量(VSH)均呈现典型的泥岩/砂岩双峰分布特征, 且参数之间存在明确的耦合关系: FSI 与 Φ_e 呈强正相关, 与 VSH 呈强负相关; Φ_e 与 VSH 同样表现为强负相关(图 5)。依据该阈值可划分出两类岩性响应域: 泥岩区(FSI: 0-0.53, Φ_e : 0.08-0.12, VSH: 0.56-0.83)指示优质盖层发育; 砂岩区(FSI: 0.53-1, Φ_e : 0.07-0.18, VSH: 0.02-0.33)则对应甜点储层发育。结果表明, FSI 高值区可有效筛选具有“低泥质含量-高有效孔隙度-强富砂性”有利

储集体。

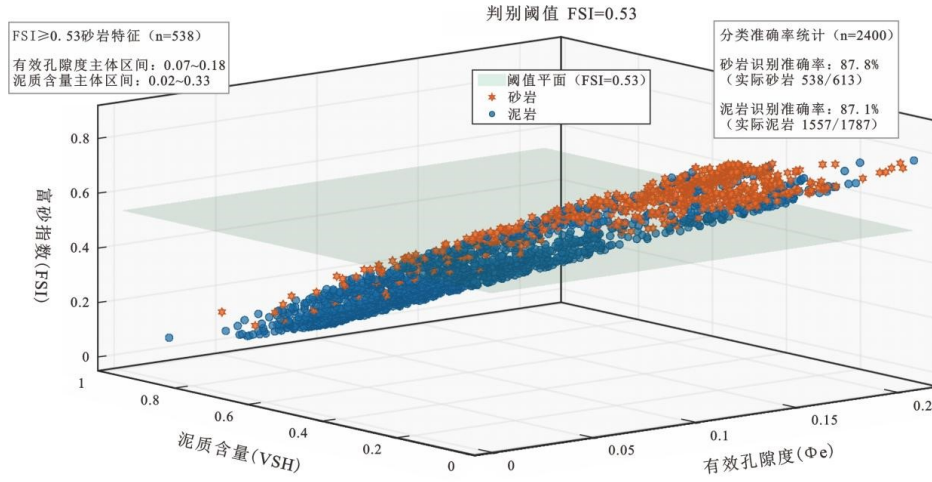


图 4 富砂指数 FSI-有效孔隙度 Φe-泥质含量 VSH 三维分布图

Fig. 4 Sandy index FSI-effective porosity Φe-mud content VSH three-dimensional distribution

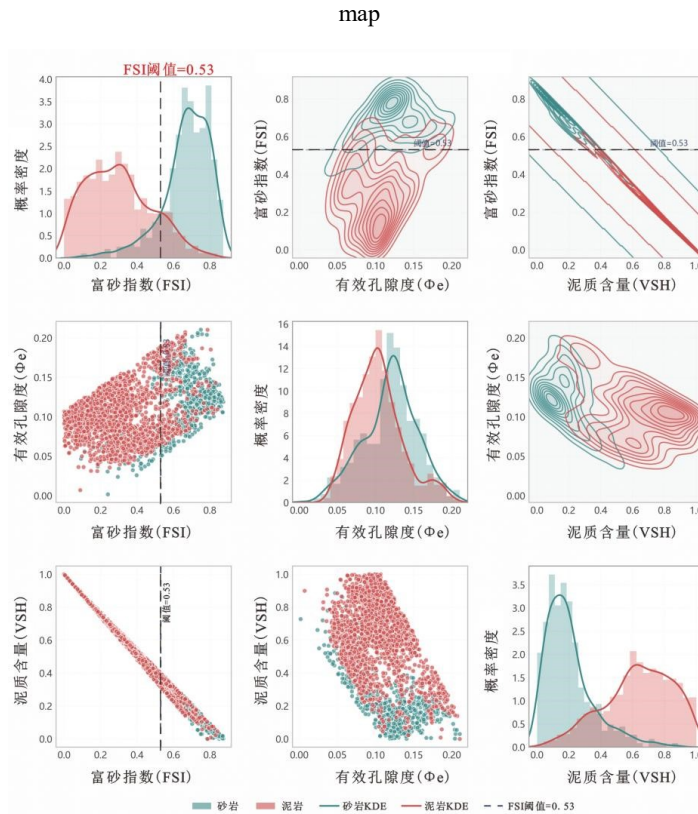


图 5 富砂指数 FSI-有效孔隙度 Φe-泥质含量 VSH 散点分布矩阵

Fig. 5 Sandy index FSI-effective porosity Φ_e -mud content VSH scatter distribution matrix

3.2 地震属性-FSI 定量映射模型的构建与性能评估

3.2.1 地震属性及算法模型优选

本研究基于叠后三维地震数据,系统提取了东二下亚段层内共9种地震属性,涵盖结构、振幅、频谱及复合四大类别。为有效识别对富砂指数(FSI)具有预测意义的敏感属性并优选建模方法,采用皮尔逊相关系数矩阵、随机森林(RF)与梯度提升树(GBDT)算法,对1680个训练样本进行了综合分析。皮尔逊相关分析结果显示,FSI与各属性间的线性相关性普遍较弱,仅与邻道相干属性呈微弱正相关($r=0.26$),与梯度模($r=-0.19$)和总能量($r=-0.18$)呈微弱负相关(图6)。该结果表明,基于线性关系的预测模型在本研究中适用性有限。进一步采用非线性机器学习模型进行对比评估。随机森林(RF)在FSI预测中表现出更高的准确性($R^2=0.902$),其性能优于梯度提升树(GBDT, $R^2=0.831$)(图7)。特征重要性分析表明,两种模型均一致识别出甜点、邻道相干和总能量为对FSI预测贡献最显著的三个属性(平均重要性为0.121)(图5)。综上,本研究优选甜点、邻道相干与总能量作为敏感属性,并采用预测性能更优的随机森林算法进行训练,构建富砂性预测模型。



图 6 研究区东二下亚段地震属性与富砂指数 FSI 皮尔逊相关系数矩阵

Fig. 6 The Pearson correlation coefficient matrix of seismic attributes and sandy index FSI in the lower ED2 formation of the east of the study area

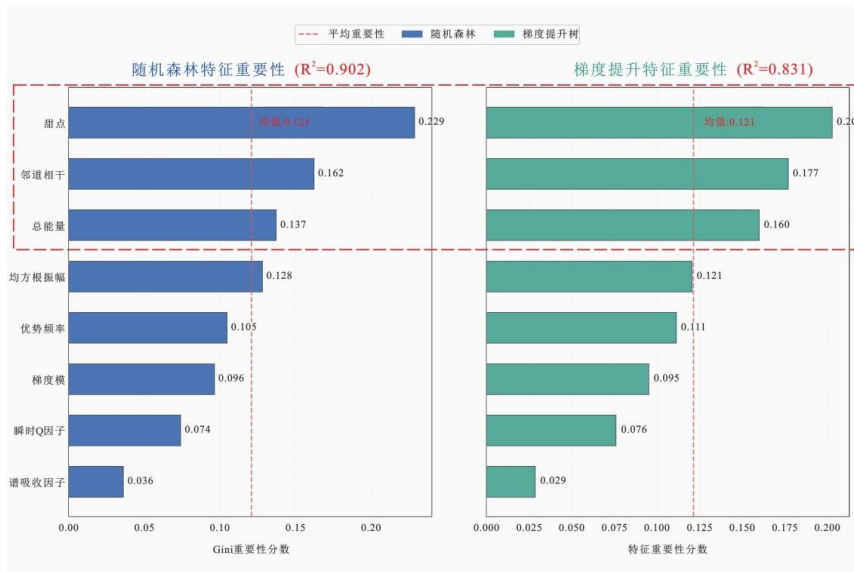


图 7 两种非线性模型（随机森林和梯度提升树）的特征重要性权重矩阵

Fig. 7 The feature importance weight matrix of two nonlinear models (Random Forest and Gradient Boosting Decision Tree)

3.2.2 模型性能测试与单井验证

利用训练好的随机森林模型对 720 个测试样本（砂岩 184 个，泥岩 536 个）进行预测，结果表明模型具有良好的泛化性能。基于三种敏感地震属性预测的 FSI 值与基于 GR、DT 测井曲线计算的实际 FSI 值之间决定系数 R^2 为 0.837，回归拟合 R^2 达 0.847；预测误差较低，均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE）分别为 0.0947 和 0.0674（图 8）。

为直观验证预测结果的可靠性与方法链外推预测的可行性，选取已知井 C 井进行单井分析。图 9 展示该井东二下亚段对应深度的 GR、DT 曲线，以及由此计算得到的实际 FSI 曲线。当以 0.53 作为 FSI 阈值时，大于该值的区间被判识为砂岩，反之为泥岩，判识结果与实际录井岩性高度吻合，进一步证实 FSI 区分砂、泥岩的有效性及其阈值的合理性。同时，提取该井段井旁地震道的三种敏感属性序列，输入给训练好的随机森林模型，获得预测 FSI 曲线。该曲线与实际 FSI 曲线形态高度一致，同样以 0.53 为阈值进行岩性判识，其结果与实际录井资料在十米级尺度上吻合良好。

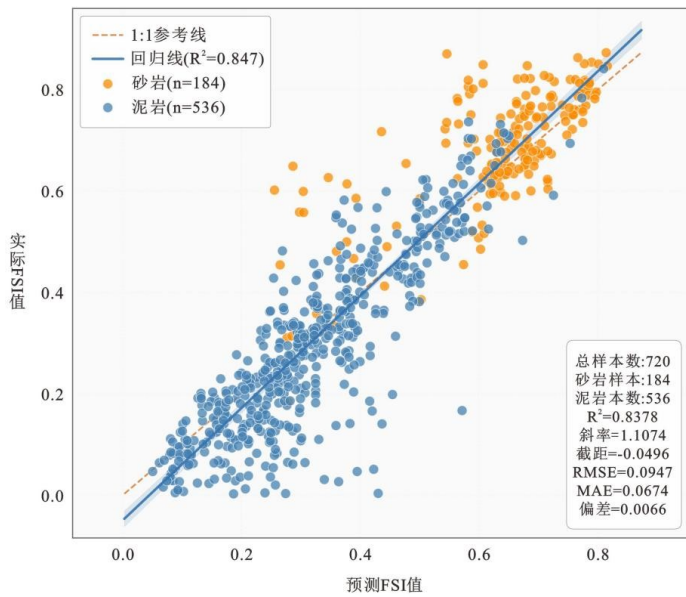


图 8 测试集 FSI 预测值与实际值散点图及误差分析

Fig. 8 Scatter plot and error analysis of predicted versus actual FSI values on the independent test set

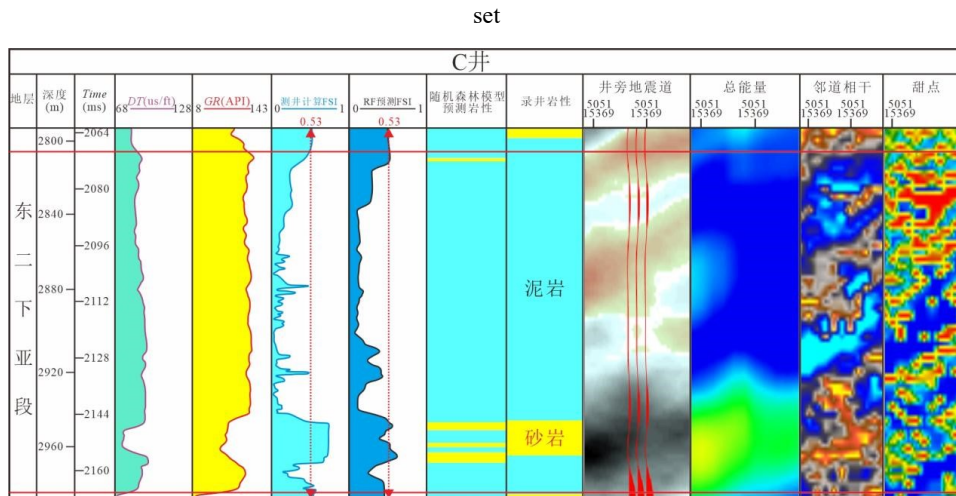


图 9 基于 C 井的 FSI 计算、模型预测及岩性识别效果对比图

Fig. 9 Comparative analysis of actual FSI, predicted FSI, and lithology identification in Well C

3.3 垂向岩性序列预测及地震沉积学解释

3.3.1 虚拟井 D 湖底扇垂向岩性序列预测

针对研究区深注带缺乏实钻资料的现实地质难题，在湖底扇根部构造位置设立虚拟井 D。沿东二下亚段层序顶、底界面，提取甜点属性、邻道相干及总能量三类地震属性的三维数据

序列；将其输入已在井控区训练完备的随机森林预测模型，从而获得虚拟井位置连续的富砂指数（FSI）预测曲线；最后，依据 FSI 阈值自动构建出虚拟井的岩性剖面。将此结果与过虚拟井 D 的顺物源方向地震剖面（图 10a）相结合，进行地震沉积学综合解析。

地震剖面揭示，东二下亚段（SQd₂^L）地震相与沉积充填特征表明，其地层结构呈现显著的不对称楔状几何形态，地层厚度自渤南低凸起向洼陷中心呈增厚，边缘减薄现象明显。洼陷带内发育多级铲式正断层系，断层倾角随深度增加而减小。凸起区可见清晰的前积反射构型，表现为 S 型斜交前积反射结构，前积层倾角约 3° -8°，向盆地方向收敛并于 SB3 界面处呈下超终止，符合辫状河三角洲前缘进积作用的沉积响应。凹陷中心区地震相类型突变，以厚层块状反射为主，振幅强度中等至强（相对振幅>0.6），频率中等，连续性指数较低（<0.4），反射结构呈蠕虫状至亚平行杂乱状，显著区别于上下地层的平行—亚平行或前积反射组合。指示湖底扇沉积体系的发育，与前人基于钻井和区域地质研究成果一致（龚承林等，2023；徐长贵等，2025）。

在研究区湖底扇发育区内设立虚拟井 D，基于模型预测获得的虚拟井 D 垂向岩性序列揭示，东二下亚段湖底扇体呈现典型的“泥包砂”结构：其底部为厚层泥岩单元；中部发育薄层砂岩与泥岩互层；上部为厚层泥岩。砂岩层段累计厚度占东二下亚段深度不足 20%（图 10a）。结果实现了对零井控区扇体内部岩性结构与组合关系的高精度刻画，也首次从岩性构成比例上定量揭示了该套湖底扇呈现富泥特征，为其勘探风险提供重要的量化评估依据。

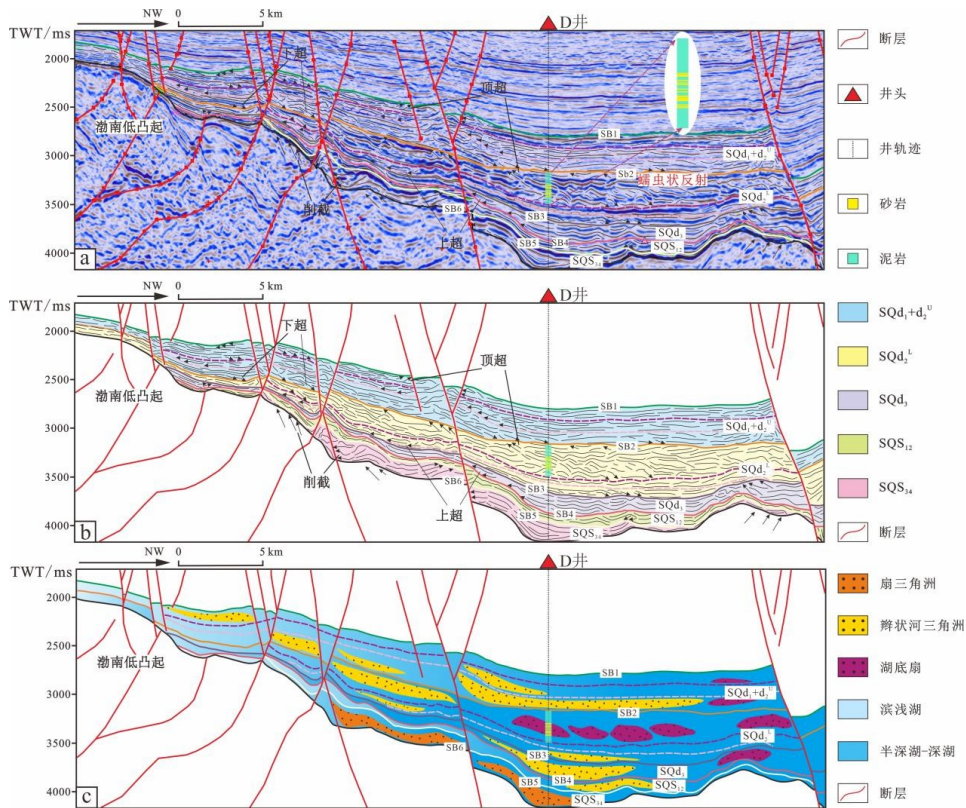


图 10 研究区过 D 井的顺物源地震剖面及剖面地质解释（测线位置见图 1c）

Fig. 10 The seismic profile along the source and the geological interpretation of the profile through the D well in the study area (for location of the section, see Fig. 1c)

a.过 D 井的顺物源地震剖面 b.过 D 井的顺物源层序划分剖面 c.过 D 井的顺物源解释剖面

3.3.2 地震沉积学平面解释

基于优选的甜点（图 11c）、邻道相干（图 11b）及总能量（图 11a）三类敏感地震属性的 RGB 融合结果显示，研究区古地貌整体表现为由南东部渤南低凸起向北西部渤中凹陷过渡的缓坡背景。在南东部渤南低凸起区，甜点、邻道相干及总能量属性均呈现高值特征，以辫状河三角洲发育为主。RGB 融合图像（图 11d）清晰显示该区地形起伏明显，地层较薄，以深蓝色等冷色调为主。东部古沟槽方向，可识别出限制性分布的辫状河三角洲朵叶体（图 11e），其在属性切片上表现为局部高值“亮点”。在北西部的渤中凹陷区，三类属性切片则整体表现为低值特征。RGB 融合图像（图 11d）显示该区地形平缓、向凹陷中心过渡，地层显著增厚，可清晰识别出紫红色等暖色调的湖底扇沉积体（图 11e）。

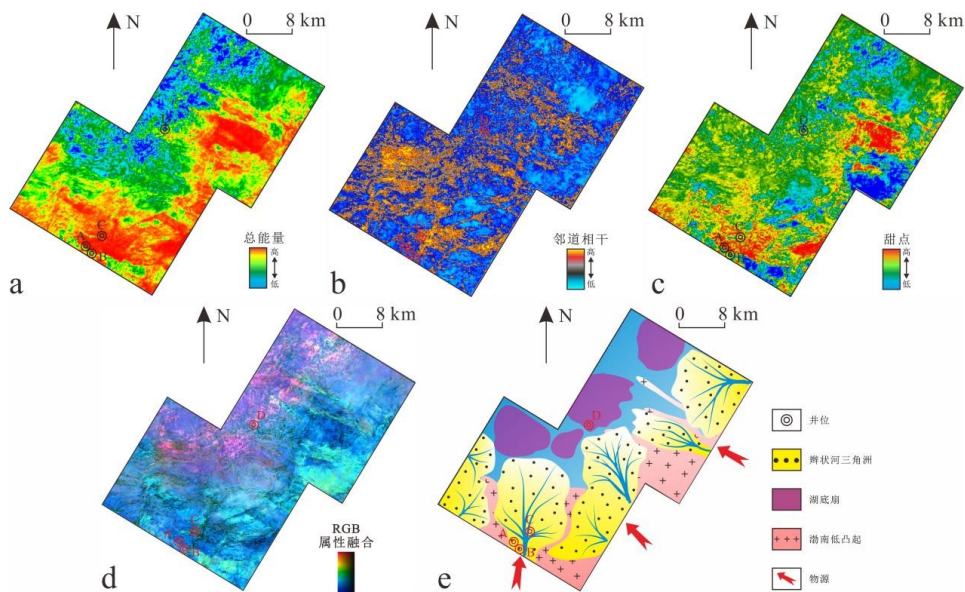


图 11 研究区东二下亚段典型三敏感属性 RGB 融合地层切片及沉积解释

Fig. 11 The typical three-sensitive attribute RGB fusion stratigraphic slice and sedimentary interpretation of the lower sub-member of the second member of the east of the study area

a.总能量属性地层切片 b.邻道相干属性地层切片 c.甜点属性地层切片 d.RGB 融合地层切片 e.

研究区东二下亚段平面沉积解释

3.3.3 研究区富泥型湖底扇成因机制探讨

结合前人研究,对东二下亚段湖底扇富泥特征的潜在成因进行了初步探讨。分析认为其主要受控于沉积时期的构造背景、物源性质及流体动力学过程三者之间的耦合作用。缓坡背景下发育的系列铲式正断层构成了阶梯状坡折带(图 10a),这一构造格架不仅为沉积物向洼陷中心的搬运提供了低角度、长距离的路径,也周期性触发上覆三角洲前缘沉积物的滑塌。滑塌所携带的沉积物,其组成深受物源区母岩性质与古气候影响。区域基底岩性(图 1c)及前人物源研究指示(李俊伟等, 2018; 王启明等, 2024; 徐长贵等, 2025),该时期存在以东部近源前寒武系花岗岩为主、南东远源古生界碳酸盐岩为辅的双物源供给(图 1c)。在该时期温暖湿润的古气候背景下(阳宏等, 2021),花岗岩强烈的化学风化作用持续向盆地输送了大量细粒黏土物质,从根本上决定了沉积物高泥质的基调。后续的搬运与沉积过程则进一步强化了这种粒度分异。初始的滑塌体在向湖盆中心运移过程中,其内部重力流会发生显著分异(葛智渊和许鸿翔, 2023)。其中,高密度浊流携带的有限砂质组分,在铲式正断层坡

脚等地形突变处因能量骤减而快速卸载，形成孤立的薄层砂岩；而细粒悬浮物质，则被低密度流携带至更远的洼陷中心区域沉降，最终形成包裹砂岩的厚层泥岩。三者因素耦合最终导致研究湖底扇以富泥为主。

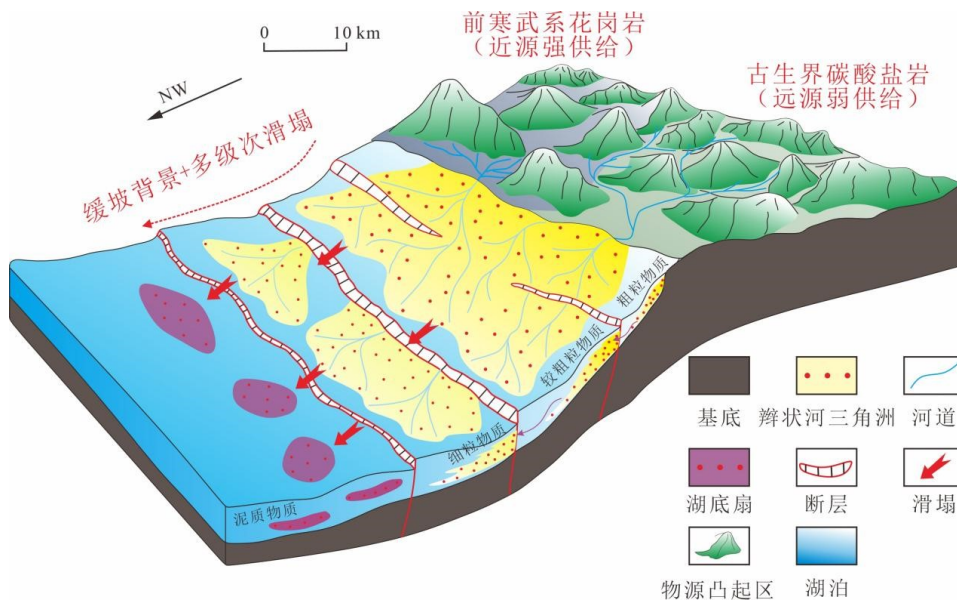


图 12 研究区富泥性湖底扇成因机制模式图

Fig. 12 The genetic mechanism model diagram of mud-rich sublacustrine fan in the study area

4 讨论

本研究构建了“地质机理约束+人工智能驱动+地震沉积学解释”一体化技术链，旨在解决陆相断陷盆地深水区在零井控条件下的储层预测难题。以下将从方法学的创新性与可靠性、技术流程的普适性以及当前局限性与未来发展三个方面进行系统论述。

4.1 方法学创新性与可靠性

4.1.1 FSI 指数：实现岩性识别与储层质量联合评价

在深水湖底扇储层预测中，基于有限边缘井资料构建兼具岩性识别与储层质量指示意义的定量标签，是确保 AI 模型有效学习的关键前提。传统方法通常依赖单一泥质含量或基于孔隙度-泥质含量交会图的经验划分，前者难以反映成岩作用对储层物性的影响，后者则受限于人为边界界定，无法形成连续、定量且适用于机器学习的高保真标签。本研究提出的富砂指数 FSI 综合了岩性与关键物性参数，实现了从单一岩性判别向岩性-储层质量协同评价的机理跨越。

4.1.2 双指标属性优选：协同挖掘线性与非线性敏感属性

深水重力流体系中岩性、物性与地震响应之间普遍存在复杂非线性关系，仅依靠经验直接采用均方根属性等易遗漏对储层敏感的非线性信息。为此，本研究采用皮尔逊相关分析与随机森林特征重要性评估相结合的双指标优选策略。皮尔逊相关分析表明，FSI 与多数单一地震属性间线性相关性较弱，揭示了采用非线性模型的必要性；而基于随机森林与梯度提升树的特征重要性评估，则从非线性决策角度量化了各属性对 FSI 预测的实际贡献。两种方法一致识别出甜点属性、邻道相干与总能量为三类核心敏感属性，为模型构建奠定了可靠基础。

4.1.3 随机森林模型：针对复杂非线性映射的优选算法

通过对比不同机器学习模型发现，随机森林表现出更优的预测性能。该模型不仅能够有效捕捉地震属性与 FSI 之间的高阶非线性关系，其 Bagging 集成与随机特征子空间机制也显著缓解了过拟合问题，提升了在样本有限条件下的泛化能力。因此，采用随机森林模型是应对此类复杂地质-地球物理映射问题的合理选择。

4.1.4 从模型验证到无井区预测：垂向岩性序列预测及验证

为实现零井控区垂向岩性序列的可靠预测，并解决缺乏实钻验证的问题，本研究构建了从模型内部验证到空间外推应用的完整技术流程。首先，将三口边缘井的 2400 个样本划分为训练集（70%）与独立测试集（30%），其目的在于模拟“已知区训练—未知区预测”的勘探场景，以独立测试集（30%）作为模型泛化能力的检验基准。模型在该测试集预测中表现出的优异性能（ $R^2=0.84$ ），且结合已知井 C 井单井分析，为其向真实无井区的外推预测奠定实验方案的可能性验证。在此基础上，再向深洼区部署虚拟井 D 进行预测，与地震剖面的反射特征对比吻合。通过这种前置验证与多源信息融合的技术途径，虚拟井 D 揭示的储层垂向结构可作为当前勘探阶段对零井控区储层展布最为合理的定量表征，为深化地质认识与勘探部署提供关键依据。

4.2 技术流程的普适性

研究成功探索并实践了“地质机理约束+人工智能驱动+地震沉积学解释”三位一体的深水储层预测技术流程。该体系以地质岩石物理模型（FSI）为机理约束与定量标定基础，通过人工智能方法挖掘地震属性与岩性之间的复杂非线性关系，并借助地震沉积学技术实现沉积过程的可视化与地质综合解释。其核心在于解决了零井控深水储层预测中长期存在的“标定失耦”与“映射非线性”两大关键难题：FSI 模型构建具有明确物理意义的标定桥梁；基于双指标优选与随机森林算法的建模策略攻克地震属性至岩性的非线性映射问题；虚拟井

技术则实现预测结果在空间上的外推及地质过程的可视化表达。

该技术方法体系在类似地质与勘探背景的区域具备良好的适用性与应用前景。例如，在松辽盆地深水重力流沉积体系及珠江口盆地陆架坡折深水区等井控程度低、岩相组合复杂、地震响应多解性显著的地区，该方法体系中的 FSI 指数构建思路、针对非线性关系的双指标属性优选与建模策略，以及基于虚拟井垂向岩性序列预测与地层切片的平面沉积解释技术结合，均可迁移应用，有助于提升储层预测精度并降低勘探风险。为岩性圈闭目标优选与井位部署提供关键依据。

4.3 方法局限性与未来发展

当前技术流程应用在取得初步成果认识的同时，也认识到当前方法体系存在若干内在局限，未来需针对性地深化研究并拓展技术边界。这些局限性主要集中体现在四个方面：一是方法在复杂构造区的稳定性受地震属性质量制约明显。尤其在断裂发育区（如断层密度 >5 条/ km^2 ），同相轴连续性受损会直接影响属性可靠性，后续可发展构造一致性增强处理流程，具体可参考的算法包括：（1）基于相干体约束的属性校正：通过计算地震数据的相干属性量化断层破碎带的影响范围，以此为约束，采用克里金或反距离加权插值等算法，对断裂带内部及其附近受扰动的属性值进行空间重构，恢复其背景趋势；（2）构造导向滤波与属性融合：首先应用构造导向滤波技术（如各向异性扩散滤波）对地震数据进行预处理，在压制随机噪声的同时保护断层边缘信息；在此基础上，提取多种对断裂敏感的几何属性（如曲率、倾角方位角），并与常规振幅属性在贝叶斯框架下进行融合，构建一个既反映岩性信息又受构造格架约束的联合属性体，作为后续 AI 模型的输入，从而降低构造对岩性预测的干扰。二是训练样本的空间代表性与地质多样性不足，制约了模型在区域尺度的外推可信度。未来可通过半监督学习框架引入大量未标注地震信息作为约束，或采用迁移学习策略整合相似地质背景的域外知识，以增强模型的泛化能力。三是现有 FSI 指数在岩性组成复杂或成岩作用强烈的层段适用性受限。需构建基于多矿物岩石物理模型、融合多类测井响应与弹性参数的综合岩相识别模板，以完善机理模型的边界条件。四是多源地球物理数据的融合层次尚显不足。当前以叠后属性为主的数据体系未能充分利用叠前反演获得的弹性参数与岩石物理之间的直接联系，未来应深化多尺度地震—测井信息在深度学习框架中的一体化融合，构建更具分辨能力的联合预测模型。

5 结论

本研究针对渤南低凸起东段东二下亚段零井控深水湖底扇的富砂性预测问题，通过岩石

物理建模、机器学习预测与地震沉积学相结合，取得以下主要认识：

(1) 构建富砂指数 (FSI) 融合泥质含量与孔隙度信息，可实现岩性与储层质量的协同表征，其阈值 0.53 对砂、泥岩识别准确率均超过 87%。基于随机森林回归建立的地震属性-FSI 映射模型预测精度较高 ($R^2=0.84$)，证实该方法在井控缺失条件下的可行性。

(2) 虚拟井 D 揭示研究区东二下亚段湖底扇具典型“泥包砂”特征，垂向呈“厚层泥岩-薄层砂岩夹厚层泥岩-厚层泥岩”岩性组合，砂岩累计占比不足 20%，整体表现为富泥特征。

(3) 研究区湖底扇富泥性可能受构造、物源和流体三因素耦合控制：铲式正断层形成的阶梯状坡折带延长搬运距离；温暖湿润气候条件下，前寒武系花岗岩风化产物提供高泥质物源；密度流分异导致细粒物质向洼陷中心沉积。

(4) 构建的“FSI 量化-属性智能优选-随机森林建模-虚拟井预测-地震沉积学解释”技术流程，初步形成“地质机理+人工智能+地震沉积学”交叉融合的预测方法，为陆相断陷盆地深水无井区储层表征提供参考。

参考文献

- [1] Clavier, C., Coates, G., Dumanoir, J., 1984. Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water Model for Interpretation of Shaly Sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 24(2):153-168. <https://doi.org/10.2118/6859-PA>
- [2] Dong, Y.L., Chen, X., Wu, W., et al., 2020. Seismic sedimentology study of the Cretaceous in Chunguang exploration area, northwest of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography*, 22(3):412-427 (in Chinese with English abstract).
- [3] Fu, J.H., Chen, H.H., Fu, X., et al., 2023. Prediction of sandstone-strata thickness ratio of Guantao Formation reservoir in Shu 21 well area of Shulu Sag via random forest algorithm. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 42(6):34-41 (in Chinese with English abstract).
- [4] Fu, X., Du, X.F., Guan, D.Y., et al., 2021. Application of seismic sedimentology in reservoir prediction in fluvial to shallow water delta facies: A case study in Guantao Formation from the Penglai A structure area in Bohai Bay. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(3):96-108 (in Chinese with English abstract).
- [5] Ge, J.W., Chen, C., Liu, P., et al., 2025. AI-driven seismic sedimentological characterization of shelf sand bodies: A case study on the Neogene Zhujiang Formation, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(3):860-875 (in Chinese with English abstract).
- [6] Ge, Z.Y., Xu, H.X., 2023. Hydraulic and sedimentary responses of turbidity current to structurally-controlled topography. *Journal of Palaeogeography*, 25(5):1090-1117 (in Chinese with English abstract).
- [7] Gong, C.L., Xu, C.G., Guan, D.Y., et al., 2023. Sequence stratigraphic model of Bozhong subbasin during a syn-rift to post-rift transition and its controls on regionally extensive sublacustrine fans. *Journal of Palaeogeography*, 25(5):992-1010 (in Chinese with English abstract).
- [8] Hu, X., Zhu, X.M., JIN, X.L., et al., 2024. Seismic Sedimentology Analysis of Meter-Scale Thin

- Sand Bodies in the Jurassic Qigu Formation, Yongjin Area, Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 169:107079. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.107079>
- [9] Hu, X., Zhu, X.M., Jin, X.L., et al., 2025. Sedimentary characteristics of the shallow-water braided river delta of Jurassic Qigu Formation in Yongjin area, Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 37(2):115-126 (in Chinese with English abstract).
- [10] Hou, L.L., Wu, S., Yi, J.Z., et al., (2024). Discriminating Deposit Types Using Chlorite Trace Elements Based on Machine Learning. *Earth Science*, 49(12):4303-4317 (in Chinese with English abstract).
- [11] Li, J.W., Niu, C.M., Guan, D.Y., et al., 2018. Sedimentary characteristics and exploration potential of large-scale sublacustrine fan in the southeast slope belt of Bozhong Sag. *Oil Drilling & Production Technology*, 40(z1):1-3 (in Chinese with English abstract).
- [12] Li, Q.L., Chen, Z.G., Jiao, F., 2023. Prediction of Oil Content in Oil Shale by Near-Infrared Spectroscopy Based on Stacking Ensemble Learning. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 43(4): 1030-1036 (in Chinese with English abstract).
- [13] Liu, R., Huang, X.B., Wang, J., et al., 2021. Sand Distribution Pattern and Content Prediction for Sublacustrine Fan Systems in the Lower ED2 Formation, Bozhong Depression. *Marine Geology Frontiers*, 37(12):10-16 (in Chinese with English abstract).
- [14] Lou, M., Liu, J., Tu, Q.C., et al., 2021. Application of seismic sedimentology to the prediction of fluvial-delta facies reservoirs with different thickness. *Progress in Geophysics*, 36(5): 2191-2203 (in Chinese with English abstract).
- [15] La, Marca K., Bedle, H., 2022. Deepwater Seismic Facies and Architectural Element Interpretation Aided with Unsupervised Machine Learning Techniques: Taranaki Basin, New Zealand. *Mar Petrol Geol*, 136: 105427. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105427>.
- [16] Ni, C.K., Su, M.J., Yuan, C., et al., 2022. Thin-interbedded reservoirs prediction based on seismic sedimentology. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4):741-751 (in Chinese with English abstract).
- [17] Pei, J.X., Wang, Y., 2025. Caprock Type and Sealing Mechanism of Quaternary Ultra Shallow Large Gas Reservoir in Deep Water Area of Qiongdongnan Basin, China. *Earth Science*, 50(1):144-157 (in Chinese with English abstract).
- [18] Wang, Q.M., Yang, H.F., Guan, D.Y., et al., 2024. Source-Sink System Coupling and Sedimentation Filling Process of a Large Sublacustrine Fan: A case study from the Dongying Formation in the southeast slope of Bozhong Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1-21 (in Chinese with English abstract).
- [19] Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W., 1956. Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media. *Geophysics*, 21(1):41-70. <https://doi.org/10.1190/1.1438217>
- [20] Xiao, Y., Wang, J.H., Li, Z.G., et al., 2022. Study on Production Difference Analysis Method of Shale Oil Play Based on Big Data. *Drilling & Production Technology*, 45(3):73-78. (in Chinese with English abstract).
- [21] Xu, C.G., Yang, H.F., Xu, W., et al., 2025. New fields and resource potential of tight oil and gas and shale oil exploration in the Bohai Sea area. *Acta Petrolei Sinica*, 46(1):173-190. (in Chinese with English abstract).
- [22] Xu, Z.H., Hu, S.Y., Wang, L., et al., 2020. The application of seismic sedimentology in studying different sedimentary facies and reservoirs. *Journal of Palaeogeography*, 22(4):727-743 (in Chinese with English abstract).

- [23] Xu, Z.H., Zeng, H.L., Hu, S.Y., et al., 2025. Application of seismic sedimentology in predicting the Lower Cambrian sedimentary structure and reservoir rocks in Gucheng area, Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 37(2):153-165 (in Chinese with English abstract).
- [24] Yang, H., Liu, C.L., Wang, F.L., et al., 2021. Paleoenvironment and development model of source rocks of Dongying Formation in Bozhong Sag. *Lithologic Reservoirs*, 33(6):81-92 (in Chinese with English abstract).
- [25] Yue, D.L., Li, W., Du, Y.S., et al., 2022. Review on seismic attribute optimization and fusion methods for fluvial facies reservoirs. *Earth Science*, 47(11):3929-3943 (in Chinese with English abstract).
- [26] Zeng, H.L., 2011. Seismic Sedimentology in China: A Review. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(3):417-426 (in Chinese with English abstract).
- [27] Zeng, H.L., Backus, M.M., 2005a. Interpretive Advantages of 90°-Phase Wavelets: Part 1—Modeling. *Geophysics*, 70(3):C7-C15. <https://doi.org/10.1190/1.1925740>
- [28] Zeng, H.L., Backus, M.M., 2005b. Interpretive Advantages of 90°-Phase Wavelets: Part 2—Seismic Applications. *Geophysics*, 70(3):C17-C24. <https://doi.org/10.1190/1.1925741>
- [29] Zeng, H.L., Henry, S.C., Riola, J.P., 1998. Stratal Slicing, Part II: Real 3-D Seismic Data. *Geophysics*, 63(2):514-522. <https://doi.org/10.1190/1.1444352>
- [30] Zeng, H.L., Hentz, T.F., 2004. High-Frequency Sequence Stratigraphy From Seismic Sedimentology: Applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal Area, Offshore Louisiana. *AAPG Bulletin*, 88(2):153-174. <https://doi.org/10.1306/10060303018>
- [31] Zeng, H.L., Zhao, W.Z., Xu, Z.H., et al., 2018. Carbonate seismic sedimentology: A case study of Cambrian Longwangmiao Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 775-784 (in Chinese with English abstract).
- [32] Zeng, H.L., Zhu, X.M., Zhu, R.K., et al., 2012. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3):275-284 (in Chinese with English abstract).
- [33] Zhang, Z.L., Li, Q., Zhu, X.M., et al., 2023. Sedimentary and seismic responses characteristics of gravity flow sublacustrine fans in lacustrine rift basin: case study on the Paleogene Shahejie Formation in Baxian sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography*, 25(5):1049-1068 (in Chinese with English abstract).
- [34] Zhu, X.M., Dong, Y.L., Zeng, H.L., et al., 2019. New development trend of sedimentary geology: Seismic sedimentology. *Journal of Palaeogeography*, 21(2):189-201 (in Chinese with English abstract).
- [35] Zhu, X.M., Dong, Y.L., Zeng, H.L., et al., 2020. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China. *Journal of Palaeogeography*, 22(3):397-411 (in Chinese with English abstract).
- [36] 董艳蕾, 陈祥, 伍炜, 等. 2020. 准噶尔盆地西北部春光探区白垩系地震沉积学研究. *古地理学报*, 22(3): 412-427.
- [37] 付君豪, 陈再贺, 付宪, 等. 2023. 利用随机森林算法预测束鹿凹陷束 21 井区馆陶组储层砂地比. *大庆石油地质与开发*, 42(6): 34-41.
- [38] 付鑫, 杜晓峰, 官大勇, 等. 2021. 地震沉积学在河流-浅水三角洲沉积相研究中的应用: 以渤海海域蓬莱 A 构造区馆陶组为例. *地质科技通报*, 40(3): 96-108.
- [39] 葛家旺, 陈聪, 刘培, 等. 2025. 人工智能驱动的陆架砂体地震沉积学表征——以珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组主力砂体为例. *石油与天然气地质*, 46(3): 860-875.

- [40] 葛智渊, 许鸿翔. 2023. 浊流对复杂构造地貌的水动力和沉积响应. 古地理学报, 25(5): 1090-1117.
- [41] 龚承林, 徐长贵, 官大勇, 等. 2023. 渤中凹陷断拗转换期湖扩—湖退型层序及其对规模湖底扇发育展布的控制. 古地理学报, 25(5): 992-1010.
- [42] 侯霖莉, 吴松, 易建洲, 等. 2024. 基于机器学习的绿泥石微量元素判别矿床类型. 地球科学, 49(12): 4303-4317.
- [43] 胡鑫, 朱筱敏, 金绪铃, 等. 2025. 准噶尔盆地永进地区侏罗系齐古组浅水辫状河三角洲沉积特征. 岩性油气藏, 37(2): 115-126.
- [44] 李俊伟, 牛成民, 官大勇, 等. 2018. 渤中凹陷东南斜坡带大型湖底扇沉积特征及勘探潜力. 石油钻采工艺, 40(z1): 1-3.
- [45] 李泉伦, 陈争光, 焦峰. 2023. 基于 Stacking 集成学习的近红外光谱油页岩含油率预测. 光谱学与光谱分析, 43(4): 1030-1036.
- [46] 刘睿, 黄晓波, 汪晶, 等. 2021. 渤中凹陷东二下亚段湖底扇分布特征及富砂性预测. 海洋地质前沿, 37(12): 10-16.
- [47] 娄敏, 刘江, 涂齐催, 等. 2021. 河流-三角洲相不同厚度储层的地震沉积学研究. 地球物理学进展, 36(5): 2191-2203.
- [48] 倪长宽, 苏明军, 袁成, 等. 2022. 基于地震沉积学的薄互层储集层分布预测方法. 石油勘探与开发, 49(4): 741-751.
- [49] 裴健翔, 王宇. 2025. 琼东南盆地深水区第四系超浅层大型气藏盖层类型及封盖机理. 地球科学, 50(1): 144-157.
- [50] 王启明, 杨海风, 官大勇, 等. 2024. 大型湖底扇源—汇系统耦合与沉积充填过程——以渤中凹陷东南斜坡带东营组为例. 沉积学报: 1-21.
- [51] 肖阳, 王家豪, 李志刚, 等. 2022. 基于大数据的页岩油区块产量差异分析方法研究. 钻采工艺, 45(3): 73-78.
- [52] 徐长贵, 杨海风, 徐伟, 等. 2025. 渤海海域致密油气及页岩油勘探新领域及资源潜力. 石油学报, 46(1): 173-190.
- [53] 徐兆辉, 曾洪流, 胡素云, 等. 2025. 地震沉积学在塔里木盆地古城地区下寒武统沉积结构与储层预测中的应用. 岩性油气藏, 37(2): 153-165.
- [54] 徐兆辉, 胡素云, 王露, 等. 2020. 地震沉积学在不同沉积相和储集层研究中的应用. 古地理学报, 22(4): 727-743.
- [55] 阳宏, 刘成林, 王飞龙, 等. 2021. 渤中凹陷东营组古沉积环境及烃源岩发育模式. 岩性油气藏, 33(6): 81-92.
- [56] 岳大力, 李伟, 杜玉山, 等. 2022. 河流相储层地震属性优选与融合方法综述. 地球科学, 47(11): 3929-3943.
- [57] 曾洪流. 2011. 地震沉积学在中国: 回顾和展望. 沉积学报, 29(3): 417-426.
- [58] 曾洪流, 赵文智, 徐兆辉, 等. 2018. 地震沉积学在碳酸盐岩中的应用——以四川盆地高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组为例. 石油勘探与开发, 45(5): 775-784.
- [59] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 2012. 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范. 石油勘探与开发, 39(3): 275-284.
- [60] 张自力, 李琦, 朱筱敏, 等. 2023. 陆相断陷湖盆重力流湖底扇沉积与地震响应特征分析: 以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组为例. 古地理学报, 25(5): 1049-1068.
- [61] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 2019. 沉积地质学发展新航程——地震沉积学. 古地理学报, 21(2): 189-201.
- [62] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 2020. 中国地震沉积学研究现状和发展思考. 古地理学报, 22(3):

397-411.