

稀疏井网下浅水三角洲多级次构型表征： 以四川盆地天府气田沙溪庙组一段为例^{*}

屈林博^{1,2} 岳大力^{1,2} 王小娟³ 王武荣^{1,2} 胡 丽³
李 伟^{1,2} 谭 玲^{1,2} 任柯宇^{1,2}

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

摘 要 浅水三角洲前缘砂体广泛发育, 是陆相盆地中极具勘探潜力的重要油气储集层类型, 但受分流河道频繁迁移改道影响, 砂体在垂向上多期叠置形成薄互层, 平面上相互交织, 构型分布较为复杂, 致使在井网稀疏条件下储层预测难度大、精度低。本研究以四川盆地天府气田简阳区块侏罗系沙溪庙组一段浅水三角洲为例, 提出“分频多属性自动化机器学习联合波形指示反演”的薄层砂体智能预测方法: 在平面上, 优选分频地震数据, 自动筛选关键属性并集成多模型学习, 建立非线性映射关系, 使地震属性与井上砂厚相关系数由 0.64 提升至 0.82, 实现稀井网条件下砂体的定量刻画; 在剖面上, 引入波形指示反演的相控约束, 并以无轴伽马为目标开展反演, 稳定识别 10 m 以上砂体, 对约 4 m 的薄层砂体亦有响应, 建立了构型单元组合样式的地震响应模板。基于上述成果, 系统识别出水下分流河道、残余河口坝、溢岸及分流间湾 4 类构型单元, 总结形成 6 种垂向叠置和侧向切叠组合样式, 并揭示了在沉积旋回控制下孤立窄河道与复合宽河道在平面展布与垂向差异演化特征, 同时在三维上厘清了由近源网状分流河道到远源舌状-朵状坝体的空间分异规律, 建立了浅水三角洲沉积构型模式。研究成果不仅实现了稀疏井网下多级次构型的精细表征, 也为复杂浅水三角洲储集层的高效勘探开发提供了新思路和方法。

关键词 浅水三角洲 多级次构型表征 薄层砂体预测 自动化机器学习 分频智能属性融合 沙溪庙组 四川盆地

第一作者简介 屈林博, 男, 1999 年生, 博士研究生, 从事智能储集层预测与构型表征研究工作。E-mail: 2023315010@student.cup.edu.cn。

通讯作者简介 岳大力, 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 从事油气田开发地质方面的教学科研工作。E-mail: yuedali@cup.edu.cn。

中图分类号: P539.2 文献标志码: A

Multi-scale architecture characterization of shallow-water delta under sparse well coverage: a case study of the Member 1 of Shaximiao Formation in Tianfu Gas Field, Sichuan Basin

^{*} 国家自然科学基金项目(编号: 42272186, 42302128, 42412179)和中国石油大学(北京)科研基金(编号: 2462023YJRC039)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272186, 42302128, 42412179) and the Scientific Research Foundation of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462023YJRC039)]

收稿日期: 2025-07-14 改回日期: 2025-09-25

QU Linbo^{1,2} YUE Dali^{1,2} WANG Xiaojuan³ WANG Wurong^{1,2} HU Li³
LI Wei^{1,2} TAN Ling^{1,2} REN Keyu^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas field Company, Chengdu 610041, China

Abstract Shallow-water delta front sand bodies are widely developed and represent important hydrocarbon reservoirs with high exploration potential in continental basins. However, frequent migration and avulsion of distributary channels result in vertically stacked thin interbeds and laterally interwoven distributions, leading to complex architectural patterns. Under sparse well coverage, this complexity makes reservoir prediction highly challenging and less accurate. This study takes the Member 1 of Jurassic Shaximiao Formation in the Tianfu Gas Field, Sichuan Basin, as a case example, and proposes an intelligent prediction method for thin sand bodies by integrating multi-frequency seismic attribute automated machine learning (AutoML) with waveform indication inversion (WII). Laterally, optimized frequency-decomposed seismic data were used to automatically select key attributes and integrate multi-model learning, building nonlinear mappings that improved the correlation between seismic attributes and well-derived sand thickness from 0.64 to 0.82. This enabled quantitative prediction of sand bodies under sparse well control. Vertically, WII introduced facies-controlled constraints and used uranium-free gamma ray as the inversion target, allowing stable identification of sand bodies thicker than 10 m and reliable responses from thin layers of about 4 m, and establishing seismic response templates of architectural element assemblages. Based on these results, four types of architectural elements were identified: distributary channel, residual mouth bar, levee, and interdistributary bay. Furthermore, six stacking patterns including vertical superimposition and lateral accretion were summarized. The results also reveal that, under different depositional cycles, isolated narrow channels and compound wide channels show distinct spatial distributions and vertical stacking characteristics. In three dimensions, a spatial differentiation pattern was clarified, evolving from near-source net-like distributary channels to distal tongue-shaped and lobe-shaped mouth bars. Finally, a depositional architectural model of the shallow-water delta was established. This study achieves fine-scale multi-level architectural characterization under sparse well conditions and provides new insights and methods for efficient exploration and development of complex shallow-water delta reservoirs.

Key words shallow-water delta, multi-scale architectural characterization, thin sandstone body prediction, automated machine learning, multi-frequency intelligent attribute fusion, Shaximiao Formation, Sichuan Basin

About the first author QU Linbo, born in 1999, is a Ph.D. candidate. He is mainly engaged in intelligent reservoir prediction and architectural characterization. E-mail: 2023315010@student.cup.edu.cn.

About the corresponding author YUE Dali, born in 1974, is a professor and Ph.D. supervisor. He is mainly engaged in teaching and scientific research in oil & gas field development geology. E-mail: yuedali@cup.edu.cn.

浅水三角洲前缘砂体广泛发育于湖盆环境,是陆相盆地中极具勘探潜力的重要油气储集层类型(李元昊等, 2009; 张昌民等, 2010; 邹才能等,

2015; Zhu *et al.*, 2017),但其内部构型复杂,给储集层精细预测与井位部署带来巨大挑战(王于恒等, 2024; Li *et al.*, 2025)。由于浅水湖盆湖平

面频繁升降,相比于正常三角洲,浅水三角洲砂体往往经历多期沉积叠置,分流河道频繁迁移改造,砂体纵向多期叠置、平面砂体相互交织,导致内部非均质性强、展布形态极为复杂(吴胜和等, 2021; Zhang *et al.*, 2022; 徐振华等, 2024)。前人对于浅水三角洲构型的表征主要依靠野外露头、现代沉积以及密井网等手段(纪友亮等, 2016; 林承焰等, 2017; 张莉等, 2017; 张宪国等, 2019; Cai *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023)。然而,在缺乏足够井控约束的稀疏井网研究区,不同成因单砂体边界难以准确厘定(邓文龙等, 2024; 孙以德等, 2024),砂体间连通性难以判别(于海波等, 2024),导致常规地质建模与地震属性预测精度显著降低,严重制约了浅水三角洲储集层的高效勘探开发。

面对沉积构型复杂、储集层非均质性强等问题,地球物理方法在薄互层,尤其是致密储集层的识别中同样存在显著技术瓶颈(Anees *et al.*, 2022; 曹思远等, 2023)。一方面,浅水三角洲河道砂体普遍具有层厚薄、泥砂互层频繁的特征,目标储集层厚度远低于地震资料 $1/4$ 波长的垂向分辨率,传统反演方法受限于分辨率难以清晰揭示薄储集层(翟亮等, 2023; 焦社宝等, 2025);另一方面,致密砂岩普遍存在孔隙度和渗透率普遍较低、波阻抗与围岩对比度低等问题,进一步削弱了地震响应特征,使储集层的准确识别和预测变得更加困难(史浩等, 2024; 王武荣等, 2024)。在此背景下,近年来发展起来的波形指示反演(Waveform Indication Inversion, WII)技术凭借其对地震波形横向变化特征的敏感识别能力,已逐步成为揭示砂体展布与沉积构型的重要工具(顾雯等, 2016; 王于恒等, 2024; 童姜楠等, 2025; 朱绍鹏等, 2025)。WII方法通过对三维地震波形的动态分析,建立波形模式与沉积相类型之间的映射关系,有效提高了薄层储集层的分辨率与相控识别能力,尤其在稀疏井网区表现出良好的适应性(陈彦虎等, 2020; Wang *et al.*, 2025a)。与此同时,自动化机器学习(AutoML)技术近年来发展迅速,作为一种新兴的数据驱动机器学习方法,有效降低了技术门槛,助力开发人员高效部署高性能模型(Shen *et al.*, 2018; He *et al.*, 2021; Zöller and Huber, 2021)。以 AutoGluon 为代表的先进框架,具备自

动参数优化、多模型融合与特征选择等功能,能够从大规模、多维度数据中高效提取关键特征组合,减少人为干预,提高模型稳定性和预测精度(Erickson *et al.*, 2020)。然而,尽管 AutoML 在其他领域应用广泛,其在地震地质领域的研究仍处于起步阶段,尤其在浅水三角洲薄层砂体的识别与定量预测方面尚属空白。

针对稀疏井网条件下浅水三角洲致密薄层砂体地震预测精度低的难题,作者提出一种面向薄层砂体识别与定量预测的新方法,融合基于自动化机器学习(AutoML)的分频多属性融合技术与波形指示反演(WII)技术,集成了自动特征选择、多模型优化与地震波形模式识别等优势,显著提升了地震对薄层砂体的响应能力与分辨率。以川中地区天府气田侏罗系沙溪庙组一段(沙一段, J_2s^1)浅水三角洲为研究对象,采用新方法实现了对浅水三角洲致密砂岩储集层的精细刻画,明确了单砂体的形态、叠置样式与空间规模,构建了浅水三角洲沉积构型模式,为复杂构型浅水三角洲储集层的智能预测与高效勘探开发提供了新的技术路径与理论支撑。

1 区域地质概况

四川盆地是扬子板块的次级构造单元,属于中新生代形成的大型稳定克拉通盆地,具有稳定背景下的多旋回沉积与构造演化特征,主要受基底结构控制(Yue *et al.*, 2018; 王翹楚等, 2025)。二叠纪前整体为碳酸盐岩地台,受元古代基底运动影响,形成川西低陡带、川北低缓带、川东高陡断褶带、川西南低褶带、川南低陡穹形带及川中平缓带 6 大构造单元(Wang *et al.*, 2025b)(图 1-a)。天府气田简阳区块位于四川省简阳市境内,构造上位于川中平缓构造带西侧,构造形态相对简单,整体为南东向北西下倾的单斜,地形平缓(图 1-b)。整体构造作用较弱,研究区断层、裂缝发育较少(杨雨等, 2023)。

四川盆地相继沉积了中、下三叠统及其以下的以碳酸盐岩为主的海相地层和上三叠统、侏罗系以砂泥岩为主的陆相地层(杨雨等, 2023),整体地层无沉积间断(图 2-a)。其中中侏罗统沙溪庙组作为简阳区块主力产气层段,发育 1 套巨厚的陆相碎屑岩,岩性主要以紫红色泥岩夹细一中粒砂岩为

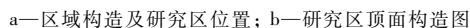


图 1 四川盆地地质概况 (据杨雨等, 2023; 有修改)

Fig. 1 Regional geological setting in Sichuan Basin (modified from Yang *et al.*, 2023)

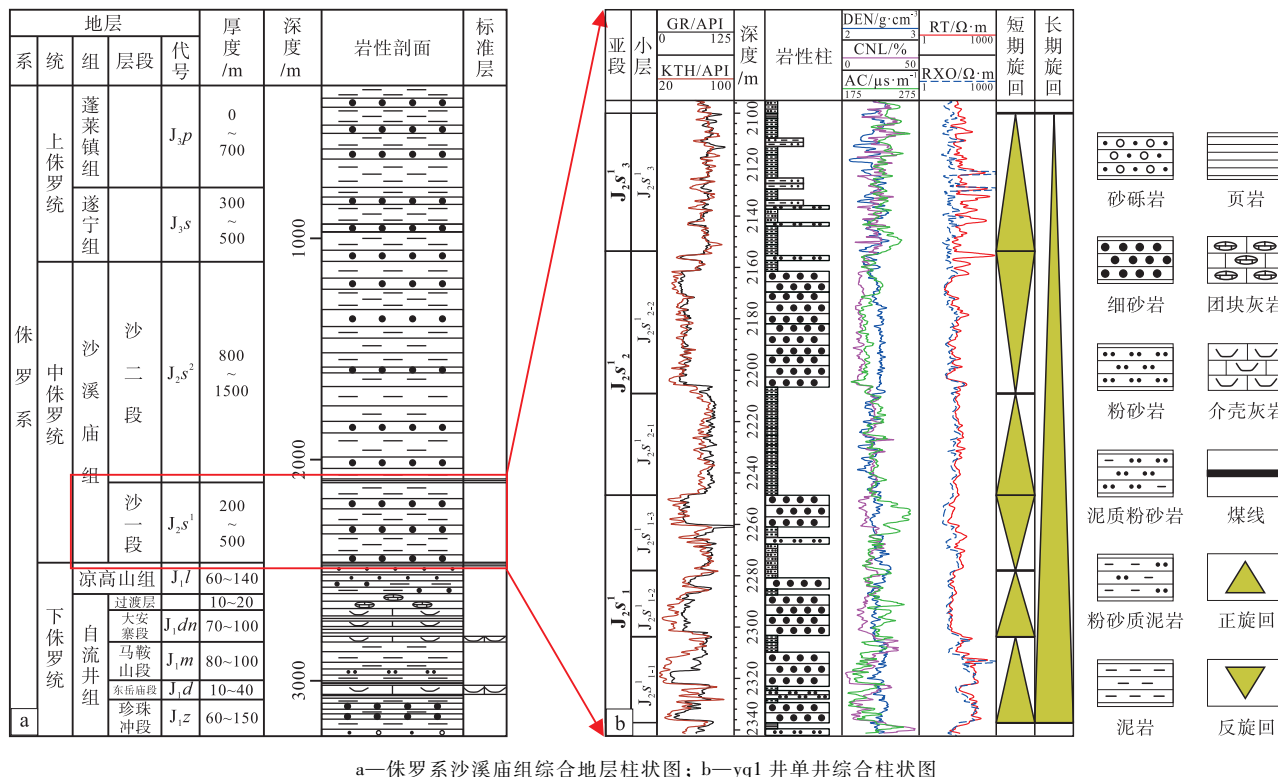


图 2 四川盆地天府气田综合地层柱状图 (据肖富森等, 2020; 有修改)

Fig. 2 Integrated stratigraphic column in Tianfu Gas Field, Sichuan Basin (modified from Xiao *et al.*, 2020)

二段。根据岩性组合、沉积旋回特征,沙一段可以划分为 3 个亚段 ($J_2s_1^1$ 、 $J_2s_1^2$ 、 $J_2s_1^3$), 根据河道砂

体河道演化特征和沉积旋回特征可将沙一段进一步细分为 6 个小层 ($J_2s_{1-1}^1$ 、 $J_2s_{1-2}^1$ 、 $J_2s_{1-3}^1$ 、 $J_2s_{2-1}^1$ 、 $J_2s_{2-2}^1$ 、 $J_2s_3^1$) (肖富森等, 2020) (图 2-b)。

川中地区沙溪庙组整体处于浅水三角洲—湖泊—河流沉积体系 (肖富森等, 2020; 杨跃明等, 2022)。在沉积期间, 气候呈现出干湿交替的特点, 水体以淡水为主, 但在局部地区也存在微咸—咸水的特征 (余文强等, 2024)。其中, 沙一段沉积期的气候环境为干湿交替, 整体处于温暖湿润与半干旱—半湿润之间, 物源充足, 发育典型的浅水三角洲内前缘沉积 (冯潇飞等, 2024; 赵晓明等, 2024)。相比于正常三角洲, 浅水三角洲内前缘的分流河道水体能量强, 河道频繁改道使前期发育的河口坝多被后期的分流河道冲刷破坏, 较少被保存下来, 仅在少量钻井岩心上见到残余的河口坝沉积物 (杨跃明等, 2022)。

2 构型单元类型及特征

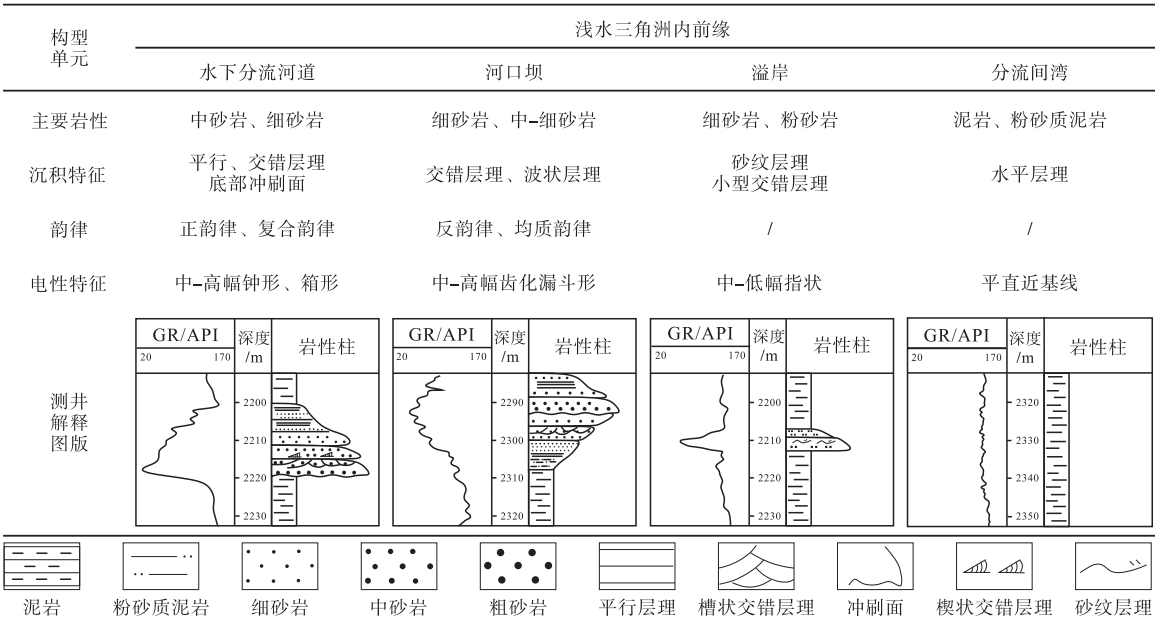
天府气田简阳地区因靠近川南物源, 湖盆水体较浅且动荡, 地形相对宽缓, 主要发育浅水三角洲内前缘沉积, 基于对取心井岩心及测井资料的分析并借鉴前人研究成果, 进一步识别出水下分流河道、河口坝、溢岸和分流间湾等构型单元 (表 1), 本研究河口坝构型单元在内前缘指受冲刷改造后的

残存坝体。

天府气田简阳地区发育的水下分流河道构成了湖盆砂体的骨架, 控制着沉积体系的空间展布与储集层发育格局。该类河道为分流河道向湖盆内部水体延伸的产物。其岩性以中砂岩和细砂岩为主, 常见楔状交错层理、槽状交错层理和平行层理, 底部多为不规则冲刷面, 局部可见定向排列的泥砾, 反映出较强的水动力环境。垂向上呈粒度向上变细的正韵律, 自然伽马曲线呈钟形或箱形, 底界多为突变接触, 顶部则为突变或渐变接触。河口坝为分流河道携带沉积物在流入湖盆水体过程中因流速骤减而沉降形成的沉积体, 岩性以细砂岩和中—细砂岩为主, 发育槽状交错层理、砂纹层理等, 具有向上粒度变粗、泥质含量减少的反韵律特征, 自然伽马曲线表现为齿化的漏斗形或箱形, 顶部为突变接触, 底部为渐变接触。需要指出的是, 在本区仅发育局部残存的河口坝沉积, 分布零星, 形态保存不完整。溢岸沉积包括天然堤与泛滥期形成于水道间低洼带的细粒沉积, 岩性多为细砂岩与粉细砂岩, 发育砂纹层理、小型交错层理, 韵律性不明显, 伽马曲线表现为齿化的漏斗形或箱形, 顶部为突变接触, 底部为渐变接触。需要指出的是, 在本区仅发育局部残存的河口坝沉积, 分布零星, 形态保存不完整。分流间湾为分布广泛的相对静水条件下的细粒沉积, 岩性以粉砂质泥岩或泥岩为主, 常含碳屑及植物根茎化石, 发育块状层理、水平层理, 自然伽马曲线平直微齿化, 缺乏明显韵律性。

表 1 天府气田简阳区块沙一段构型单元识别图版

Table 1 Identification panels of architectural elements in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field



3 复合砂体级次构型表征

3.1 基于自动化机器学习的分频属性融合砂体预测

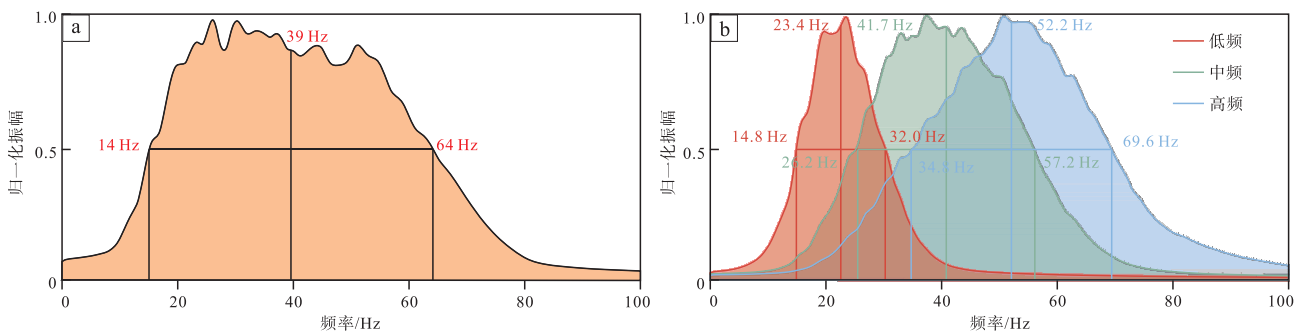
在稀疏井网条件下,地震属性分析仍是预测储集层砂体分布的关键手段之一,但受调谐效应影响,振幅与频率信息存在多解性,显著降低了地震属性对薄层砂体的识别能力,尤其在构型复杂的浅水三角洲体系中更为突出(Li *et al.*, 2019; 岳大力等, 2025)。研究区面积约 1200 km²,共部署 37 口井,其中直井/斜井 27 口、水平井 10 口。井网稀疏且分布不均,平均井距约 5.1 km,最小井距 1.45 km,按面积折算的井网密度 0.031 口/km²,显著低于成熟开发区块常见的合理井网密度(约 3 口/km²)及其对应的开发井距(约 0.4~0.8 km)(何东博等, 2013)。尽管研究区三维地震资料全区覆盖,但地震资料主频约为 39 Hz,频宽 14~64 Hz(图 3-a)。研究区小层层厚平均约 30 m,而其中单砂体厚度整体较薄(10~20 m),按主频估算的调谐厚度约 30.37 m,高于研究区目标层单砂体厚度,与地震垂向分辨率处于同一量级,易受调谐效应与多解性影响,增加了薄层砂体识别与定量预测的难度。导致传统地震属性与砂体厚度的相关性较低,其中最大相关系数仅为 0.64(表 2),仅能反映小层级次的宏观展布趋势,难以实现对储集层的精细刻画。鉴于地震属性与储集层参数之间普遍存在复杂的非线性关系,传统线性方法已难以满足薄层储集层定量预测的需求。

3.1.1 分频预处理与属性优选

单一频段地震属性包含地震信息有限,且受调谐现象影响,对砂体预测存在多解性,因此对原始

地震数据进行分频,通过融合多个频段地震属性以提高砂体预测精度(Li *et al.*, 2019)。分频技术是利用短时傅里叶变换、小波变换和 S 变换等算法,将地震数据由时间域转至频率域进行分解。小波变换对于高频分量采用窄时间窗提升时间分辨率,对于低频分量使用宽时间窗增强频率分辨率,通过自适应的时频窗口可以有效捕捉地震波传播中的非平稳特征(高静怀等, 1996)。因此,采用基于 Morlet 小波的时频变换技术,对原始地震资料在有效带宽内以 10 Hz 频段间距划分 9 个频段,结合调谐厚度与目的层 5~20 m 砂体厚度,优选主频为 23.4 Hz(频宽 14.8~32.0 Hz)、41.7 Hz(频宽 26.2~57.2 Hz)、52.2 Hz(频宽 34.8~69.6 Hz)的低、中、高频数据体(图 3-b),优选的分频数据体总频宽可覆盖原始地震数据,既保留了原始数据的有效信息,又减少了重复信息。

不同地震属性能够从不同角度表征储集层特征,其中振幅类属性可以有效指示岩性、刻画砂体厚度;相位类属性有助于识别储集层边界、断层等;频率类属性更适合反映储集层在垂向上的岩性变化(岳大力等, 2022)。本研究选取测井资料齐全的 27 口井,通过前期地震层位解释结果约束目的层层属性提取时窗,分别提取各类属性,包括振幅类、相位类、能量类及频率类等 21 种常见的、无残缺信息的地震属性。分析各属性与砂体厚度相关性,共得到 10 种与砂体厚度相关系数大于 0.4 的地震属性,由于部分地震属性间共线性较强(较强的相关性),因而在地震多属性融合前利用无监督聚类技术将 10 种地震属性进一步划分为 3 类(图 4),结合各类地震属性与砂体厚度的相关系数,最终优选出与砂体厚度相关性最好的 3 个属性



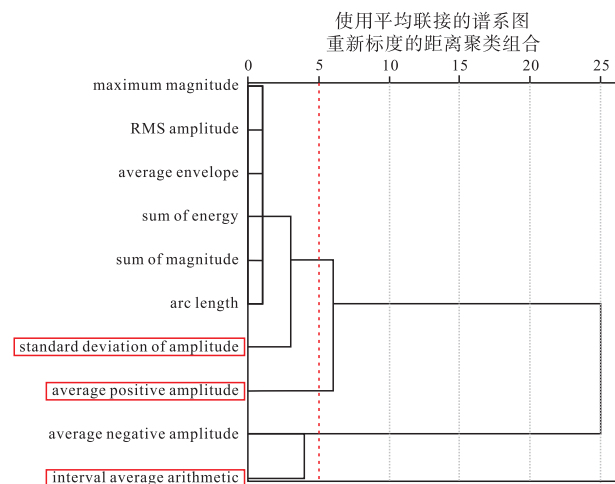
a-原始地震数据体; b-分频处理后地震数据体

图 3 天府气田简阳区块沙一段频谱分析

Fig. 3 Spectral analysis in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field

表 2 天府气田简阳区块 $J_2s_{1-2}^I$ 小层地震属性与砂体厚度相关系数Table 2 Correlation coefficients between seismic attributes and sand body thickness of sublayer $J_2s_{1-2}^I$ in Jianyang block, Tianfu Gas Field

地震属性	相关系数	地震属性	相关系数
Arc length	0.5	Maximum magnitude	0.5
Average instantaneous frequency	-0.1	Median	-0.15
Average instantaneous phase	-0.35	Mean amplitude	-0.07
Average magnitude	0.39	Most of	-0.3
Average energy	0.36	RMS amplitude	0.43
Average envelope	0.43	Standard deviation of amplitude	0.64
Average negative amplitude	-0.4	Sum of amplitudes	-0.11
Average positive amplitude	0.55	Sum of energy	0.43
Half energy	0.31	Sum of magnitudes	0.47
Interval average: Arithmetic	-0.42	Sum of negative amplitudes	-0.32
Maximum amplitude	0.16		

图 4 天府气田简阳区块 $J_2s_{1-2}^I$ 小层地震属性聚类分析树状图
Fig. 4 Dendrogram of seismic attribute clustering of sublayer $J_2s_{1-2}^I$ in Jianyang block, Tianfu Gas Field

进行属性融合，即标准差振幅（Standard deviation of amplitude）、平均正振幅（Average positive amplitude）和平均波形长度（Interval average: arithmetic）。其中标准差振幅主要反映局部振幅变化程度，高值常对应砂泥界面密集分布区，能够有效识别互层发育的复合砂体边界，而平均正振幅增强了与砂体充填有关的能量响应，有助于识别砂体主轴部位的强反射特征，对连续河道识别有明显优势，最后平均波形长度本质上反映局部波形稳定性，长波形常与连续泥质段对应，而波形突变区往往为砂体边界，有助于提高砂体边缘刻画精度。本研究优选 3 类属性具备清晰的地质意义，适用于浅水三角

洲薄互层与复杂叠置构型的识别。

3.1.2 砂体定量预测及可靠性验证

本研究针对定量储集层预测与地震属性融合的需求，基于 AutoGluon 自动化机器学习框架构建了融合分频属性的非线性回归模型，并应用于浅水三角洲致密砂体的智能预测。整体流程包括数据预处理、模型训练与评估 3 个阶段（图 5）。在优选出频段和属性的基础上，分别提取标准差振幅、平均正振幅和平均波形长度 3 类关键属性，作为输入特征的核心变量。考虑到主频差异对应不同厚度与边界特征的响应能力，该多频多属性组合有效提升了对薄层、互层及复合砂体的适应性。模型训练阶段选取研究区 27 口测井资料齐全的井，其中按约 3:1 比例划分为训练样本 20 口井与独立测试样本 7 口井，计算井点周围（半径 25 m）属性的平均值作为输入特征，并以小层的测井解释砂厚为监督标签。在完成井震标定、归一化与特征编码等预处理步骤后，利用 AutoGluon 框架进行多模型自动调参与集成学习，充分挖掘属性间的非线性耦合关系，相较于传统线性拟合方法更具泛化能力与预测精度。AutoGluon 的集成机制可自动组合多种回归模型（如 RF、XGBoost、NN 等），并动态优化其权重与结构，显著减少人为干预，提高了建模效率和适应性。在模型评估阶段，通过设置精度阈值与交叉验证策略对模型性能进行量化，若结果不达预期，可自动回溯优化输入属性组合与超参数配置，确保预测结果稳定可靠。最终，将训练完成的模型推广至全区，得到小层砂体厚度的融合属性预测

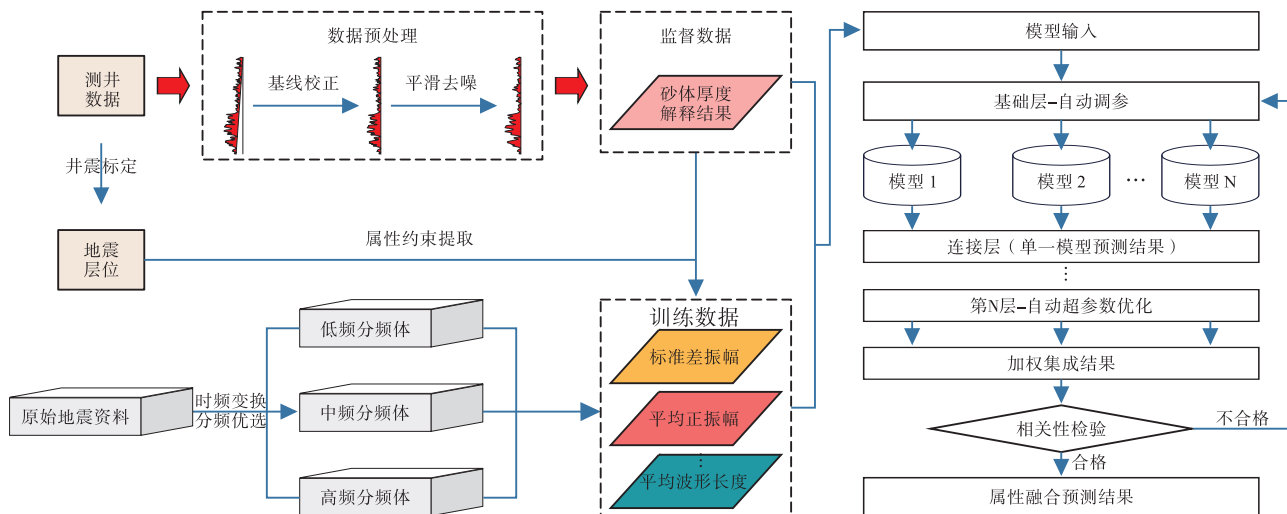


图 5 基于自动化机器学习的分频属性融合砂体预测流程

Fig. 5 Workflow of sand body prediction based on frequency-decomposed attribute fusion using AutoML

图, 实现了在井网稀疏背景下对致密砂岩储集层的定量刻画。

传统地震属性预测方法多基于主频地震体, 提取单一属性与实测砂厚建立线性关系。然而, 在浅水三角洲沉积背景下, 砂体厚度普遍小于调谐厚度, 易受频散与调谐效应干扰, 导致预测精度较低, 难以实现薄互层砂体的精细刻画。以 $J_2s_{1-2}^1$ 小层为例, 采用传统主频体提取的原始属性中, 相关性最高的为标准差振幅属性(图 6-b), 其与实测砂厚的相关系数仅为 0.638 (图 7-a), 预测能力有限, 尤其对薄层或窄河道砂体的响应效果较差。相较之下, 基于自动化机器学习的分频属性融合方法在空间识别精度和砂体边界清晰度方面表现更优, 特别是在 $J_2s_{1-2}^1$ 小层中的窄条带状河道砂体区域(图 6-a、6-b 红色箭头处), 融合后河道砂体边界更加清晰, 砂体更加连续。同时对于砂体厚度的预测与单井解释更为符合, 融合结果更能体现砂体厚度的差异, 砂体厚度预测精度显著提高, 预测结果与测井解释砂厚的相关系数由原始的 0.638 提高到 0.820 (图 7-a, 7-b), 7 口测试井的相关性也高达 0.816 (图 7-c), 进一步说明基于自动化机器学习的分频属性融合预测砂体的可靠性。

3.2 复合砂体级次构型分布特征

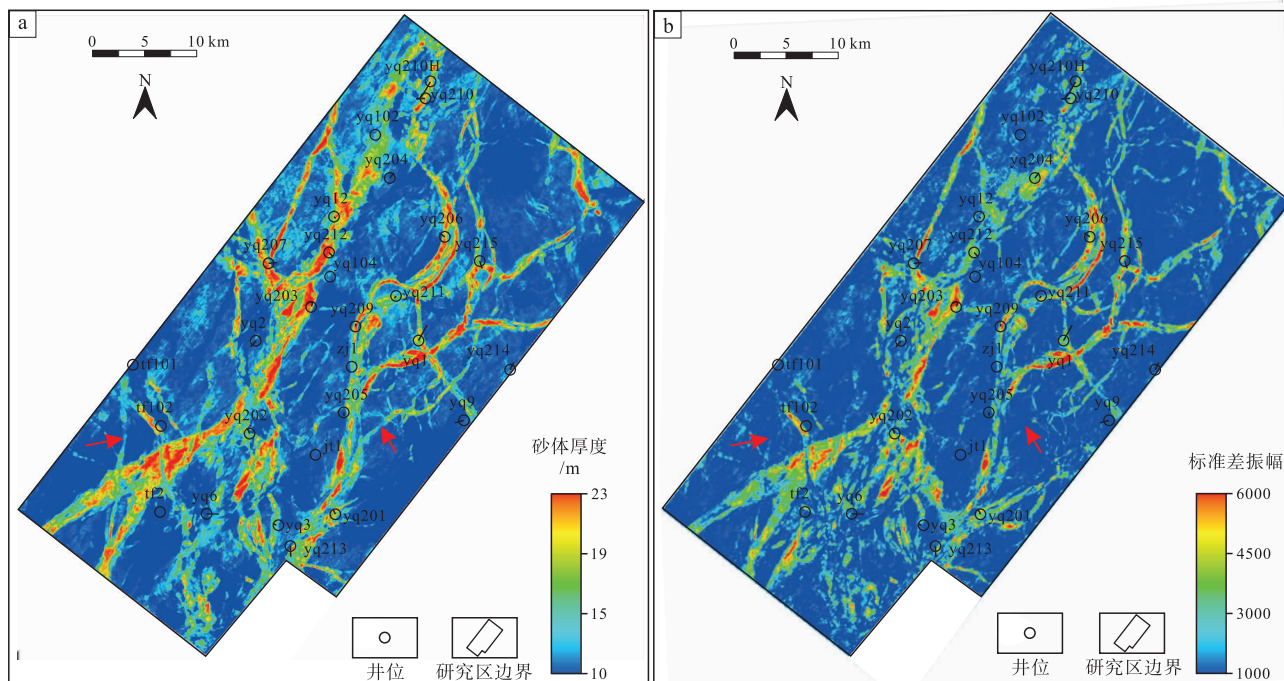
天府气田简阳区块井资料较少、井网稀疏, 无法采用传统的密井网解剖的思路。因此, 本研究综合考虑研究区沉积特征, 以单井构型解释结果及分

频属性融合砂体预测结果作为约束, 采用“平剖互动、井震结合”的思路, 表征了复合砂体级次构型的分布特征。研究区沙一段小层内部发育单一河道沉积, 在相对湿润气候条件下, 受浅水湖泊的改造, 河道频繁分叉改道, 河道对河口坝的切叠改造较为明显, 分流河道与下伏早期河口坝沉积呈冲刷接触, 仅局部发育残余河口坝, 导致形成以河道为骨干砂体的网状浅水三角洲, 发育较多分支窄河道(图 8)。简阳地区受龙门山断裂带南部的物源控制, 整体上研究区复合砂体呈西南—东北流向, 西南部河道较东北部宽, 西南部河道宽度普遍在 600 m 以上, 最大可达 2000 m, 而东北部河道宽度较小(约 300 ~ 600 m)。垂向上, 沉积旋回对砂体叠置样式具有明显控制作用。长期旋回阶段湖平面上升、可容空间增大, 河道砂体呈孤立条带状, 弯曲度逐渐增加。而高频的小幅周期波动(短期旋回)则控制了砂体的空间分布和叠置样式。以 $J_2s_1^1$ 为例, $J_2s_{1-1}^1$ 与 $J_2s_{1-2}^1$ 小层处于短期上升旋回, 分流河道规模较小, 发育较多分支窄河道(图 8-a, 8-b), 而 $J_2s_{1-3}^1$ 小层处于短期下降旋回, 河道侧向切叠明显, 发育宽度较大的复合砂体叠置体(图 8-c)。

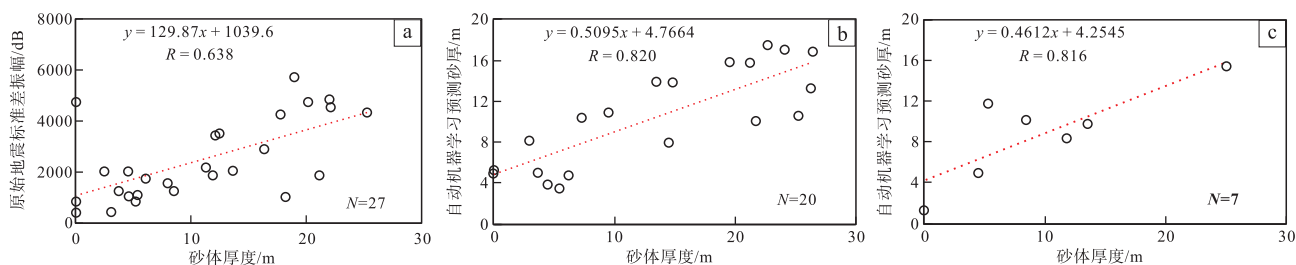
4 单砂体级次构型表征

4.1 基于地震波形指示反演的单砂体叠置样式

地震波形指示反演基于沉积学理论, 通过关联



a—基于自动化机器学习的分类属性融合图；b—原始地震数据体的标准差振幅属性图

图 6 天府气田简阳区块 J_2s_{1-2} 小层地震属性对比Fig. 6 Comparative display of seismic attributes of sublayer J_2s_{1-2} in Jianyang block, Tianfu Gas Field

a—原始地震标准差振幅属性与砂体厚度相关性图；b—训练集相关性图；c—测试集相关性图

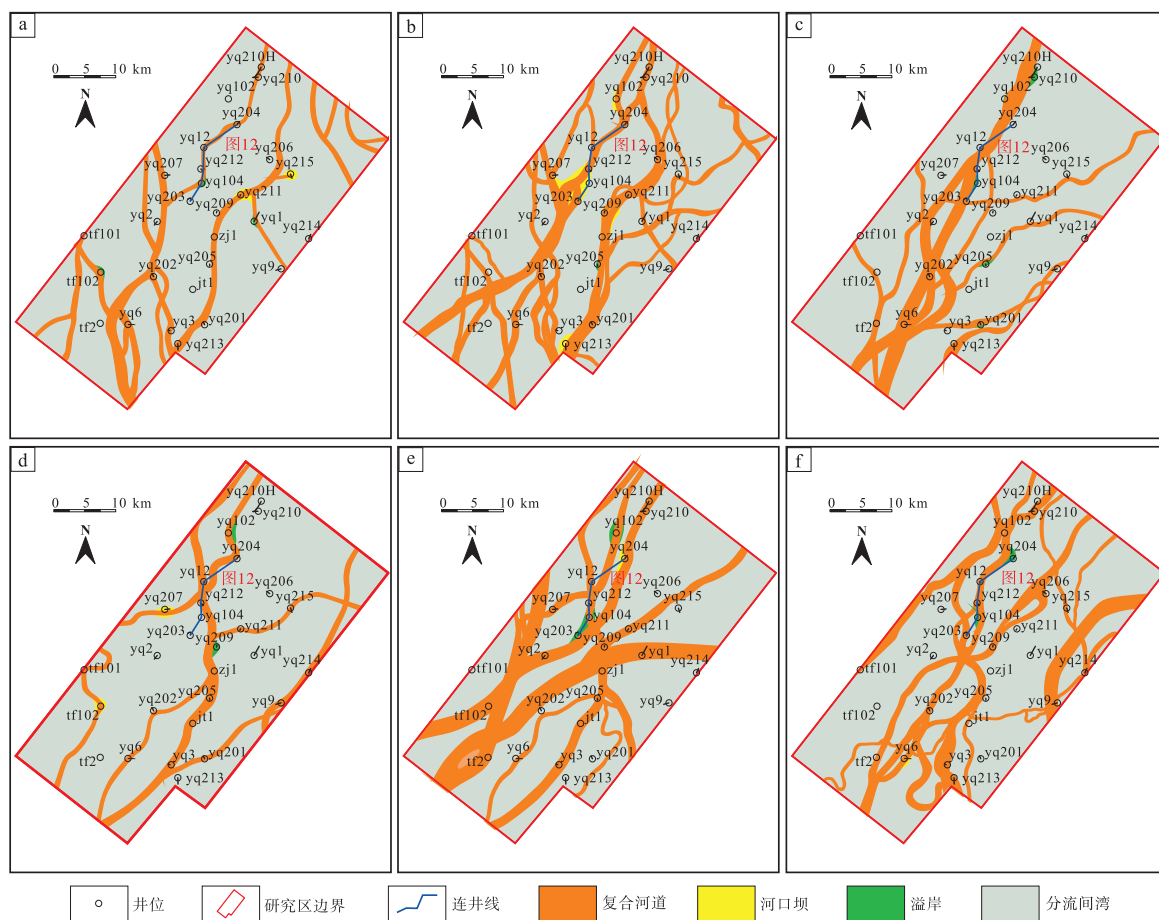
图 7 天府气田简阳区块 J_2s_{1-2} 小层实际砂体厚度与预测融合厚度相关性分析Fig. 7 Correlation analysis between actual and predicted fused sand body thickness of sublayer J_2s_{1-2} in Jianyang block, Tianfu Gas Field

地震资料横向波形变化与钻井测井曲线特征，定量反映储集层空间沉积相变规律，并通过高频成分估计预测储集层（陈彦虎等，2020）。与传统反演方法不同的是，其在样本优选统计分析中，按空间距离排序样本点，选关键井作初始模型，进行高频成分无偏最优估计（顾雯等，2016）。该方法利用储集层相变在地震波形上的响应特征差异，以地震波形横向变化为相控约束，协同模拟反演钻井数据与地震波形，有效降低了反演结果随机性，提升了储集层反演精度。尤其有利于复杂相带中砂体叠置关系及规模较小河道的精细刻画（Wang *et al.*, 2025a）。

4.1.1 反演参数优化及可靠性分析

地震反演的核心在于构建储集层特征曲线与地震属性之间的高精度映射关系，其关键在于测井参数的优选与优化。针对沙一段致密化河道砂体纵向叠置交织的特征，传统波阻抗参数对于砂泥岩识别存在重叠区，而无轴伽马（KTH）能够更好地区分砂岩、泥岩（图 9），故在测井曲线标准化的基础上，选取标准化后的无轴伽马曲线作为反演学习的目标曲线。

在研究区分别采用常规波阻抗地质统计学反演和地震波形指示反演方法，得到反演数据体，随机



a— J_2s_{1-1} 小层; b— J_2s_{1-2} 小层; c— J_2s_{1-3} 小层; d— J_2s_{2-1} 小层; e— J_2s_{2-2} 小层; f— J_2s_3 小层

图 8 天府气田简阳区块沙一段各小层复合砂体级次构型分布平面图

Fig. 8 Plan view of hierarchical architectural distribution of compound fluvial channels of sublayers in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field

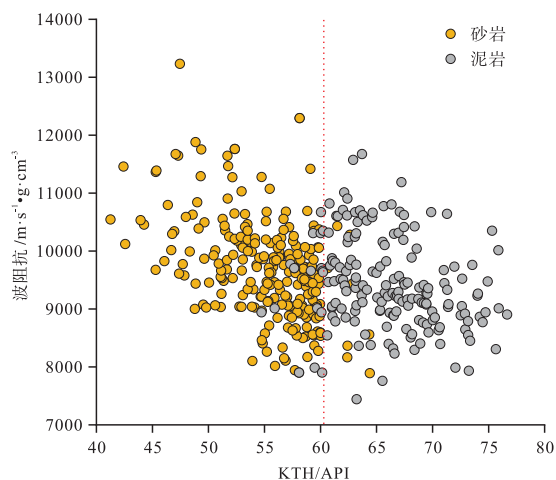


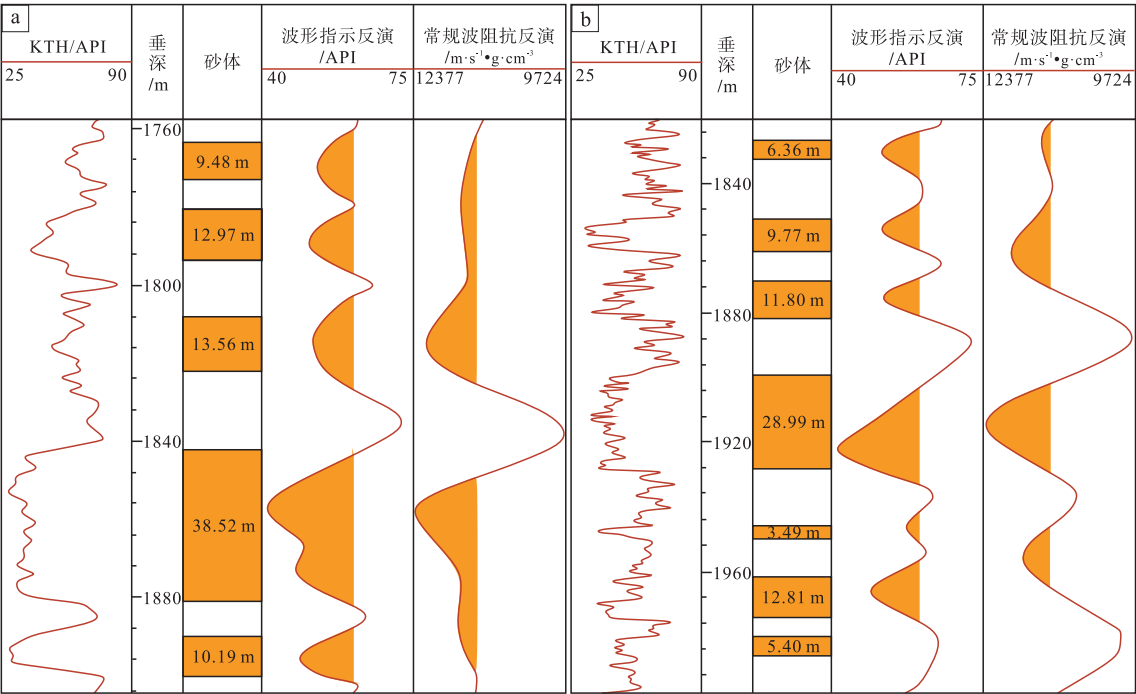
图 9 天府气田简阳区块砂泥岩波阻抗与无轴伽马曲线散点交会图

Fig. 9 Crossplot of acoustic impedance versus uranium-free gamma-ray log for sandstones and mudstones in Jianyang block, Tianfu Gas Field

选取未参与反演学习的 yq213 井与 yq214 井提取井旁道对反演结果进行对比验证(图 10-a, 10-b)。就整体而言,地震波形指示反演成果不仅与地震波形响应吻合度高,反映了反演过程充分考虑了地震信息,而且在细节上,相比于常规波阻抗地质统计学反演,地震波形指示反演分辨率更高,且与单井砂体解释吻合度高,对 10 m 以上砂体有稳定响应,垂向上可清晰区分砂泥薄互层,同时部分 4 m 左右的孤立砂体也出现了地震反演响应,可以有效区分单砂体,识别砂体叠置样式,满足稀疏井网下构型单元精细刻画的要求。

4.1.2 构型单元组合样式的地震反演响应图版

基于地震波形指示反演结果,结合砂体垂向演化规律、成因类型及单砂体侧向接触关系,建立了沙一段浅水三角洲前缘构型单元组合样式的反演图版。分析识别出 6 种构型组合样式,其中垂向叠置



a—yq213 井反演结果；b—yq214 井反演结果

图 10 天府气田简阳区块波形指示反演与常规波阻抗反演井旁道砂体响应对比

Fig. 10 Comparison of near-well sand body responses between waveform indication inversion and conventional acoustic impedance inversion in Jianyang block, Tianfu Gas Field

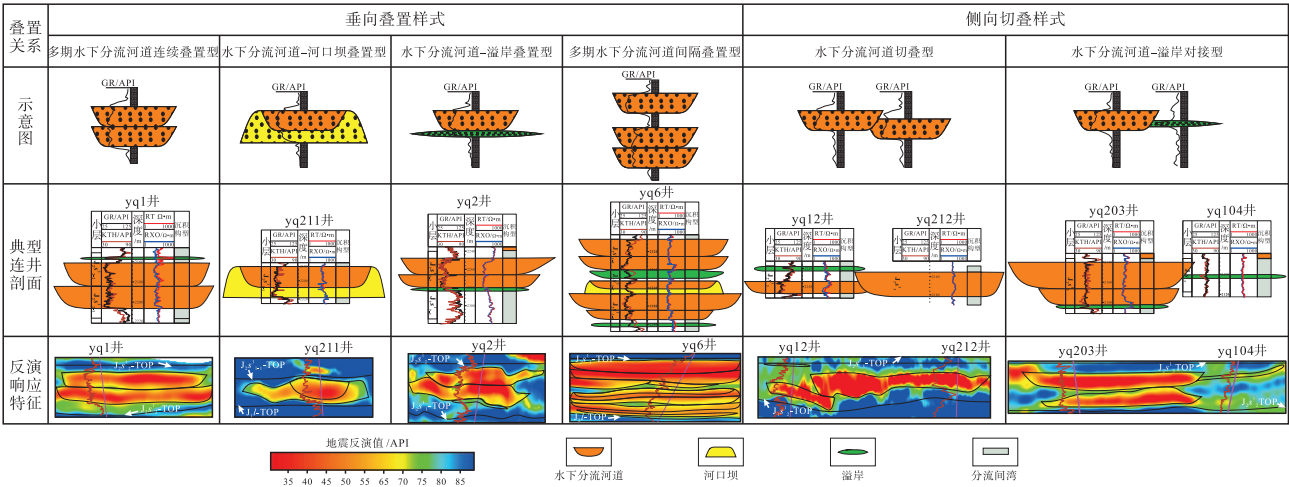


图 11 天府气田简阳区块沙一段构型单元组合样式地震反演响应图版

Fig. 11 Seismic inversion response panels of architectural element stacking patterns in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field

样式 4 种，侧向切叠样式 2 种(图 11)。

垂向叠置样式包括：多期水下分流河道连续叠置型、多期水下分流河道间隔叠置型、水下分流河道—河口坝叠置型和水下分流河道—溢岸叠置型。其中，多期水下分流河道连续叠置型、水下分流河道—河口坝叠置型和水下分流河道—溢岸叠置型多

形成于沉积物供给速率（A）大于可容空间增长速率的环境（即 $A/S > 1$ ），后期河道对前期砂体改造强，砂体叠置紧密，泥质夹层少，垂向连通性好；而多期水下分流河道间隔叠置型常发育于 $A/S < 1$ 的环境，砂体间保留细粒沉积，测井曲线可见明显回返，泥质夹层发育且较厚，连通性较差。

侧向切叠样式表现为不同期次砂体在平面上迁移、切入和拼接,形成横向连接的复合砂体,主要包括水下分流河道切叠型和水下分流河道一溢岸对接型。前者发育于 $A/S > 1$ 的条件下,河道迁移频繁,侧向侵蚀作用强,后期砂体可大面积切叠早期砂体,形成大接触面,砂体间泥质夹层少,连通性好;后者多见于 $A/S \approx 1$ 的环境,河道侧向侵蚀能力弱,叠合方式以对接为主,砂体间接触面积小,缺乏明显冲刷侵蚀界面,连通性较差。

4.2 单砂体级次构型定量表征

单砂体是指垂向上和平面上都连续,且与上、下砂体间有泥岩或不渗透夹层分隔的砂体(何文祥等,2005;张庆国等,2008)。单砂体是本研究最低的构型解剖级次,准确识别单砂体边界是构型表征的基础。在复合砂体识别与预测的基础上,进一步识别单一河道的分布边界是实现精细地质建模与储集层连通性评价的关键环节。本研究结合单井沉积相分析成果与地震波形指示反演数据,对研究区沙一段浅水三角洲前缘单一河道的垂向期次划分及侧向展布边界进行精细刻画。

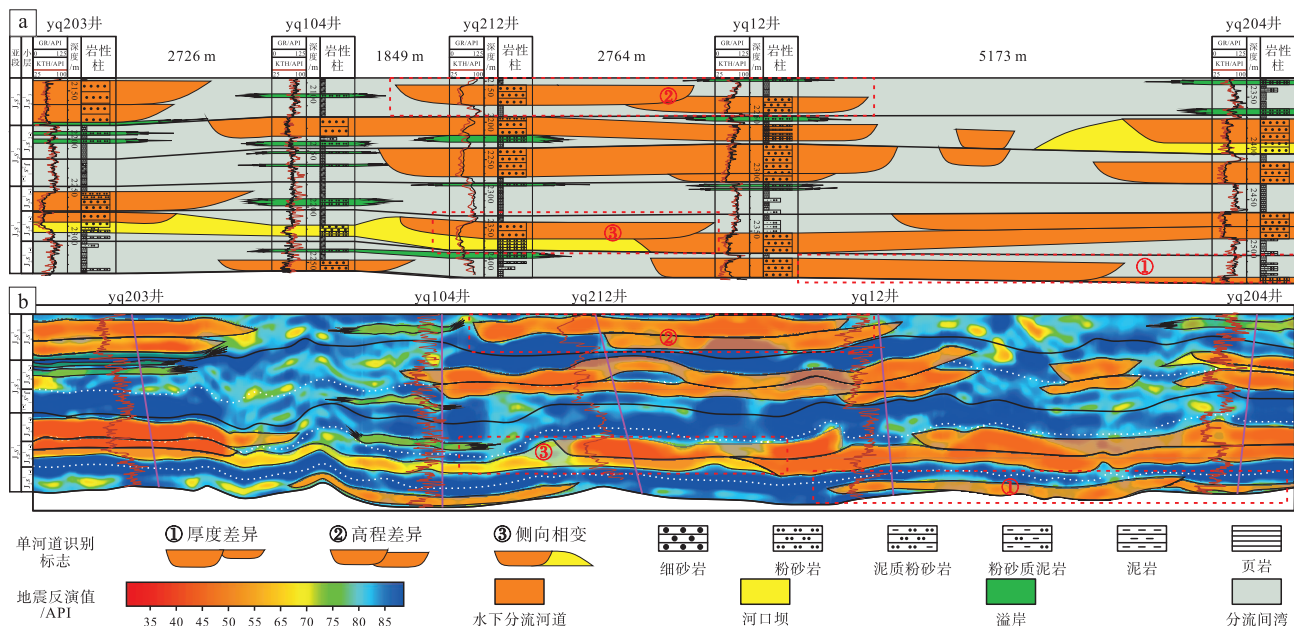
4.2.1 单砂体级次构型河道期次划分

在垂向上,单一河道期次的识别主要依赖单井

岩心及测井资料所反映的沉积间断面,判断砂体上下叠置关系。考虑地震资料的分辨率限制,仅识别可由分流间湾泥岩清晰区分的河道单元,即以泥岩隔层为界,划分叠置的单期河道砂体。该方法可有效剔除高频次小尺度的沉积变化干扰,保障了地震反演与单井资料之间的尺度匹配性。

在侧向上,单一河道的展布边界主要通过3种地震响应特征进行判识:(1)厚度差异特征:河道中心部位表现为砂体厚度最大,向边部过渡过程中砂体厚度逐渐减薄,波形指示反演成果颜色从中心的亮红色逐渐过渡到浅绿色,反映出典型的河道充填形态(图12-a,12-b中①);(2)高程差异特征:在同一沉积期内,多个河道单元发育于不同的地貌高程上,揭示了河道相对位置的差异(图12-a,12-b中②);(3)侧向相变特征:在相邻河道之间可见残存的河口坝或薄层溢岸砂体充填,波形指示反演结果颜色由亮红逐渐过渡到黄色、绿色,相变过渡特征明显,为判定河道期次及单砂体边界提供了可靠依据(图12-a,12-b中③)。

在融合多属性识别复合砂体的基础上,为进一步厘清单一河道的沉积期次,在等时地层格架约束下,采用层拉平技术,以切物源方向的波形指示反演剖面为基础,开展单期河道的期次划分分析。以



a—连井剖面砂体构型分布特征;b—波形指示反演剖面砂体构型分布特征

图 12 天府气田简阳区块沙一段砂体构型分布特征

Fig. 12 Distribution characteristics of sand body architecture in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field

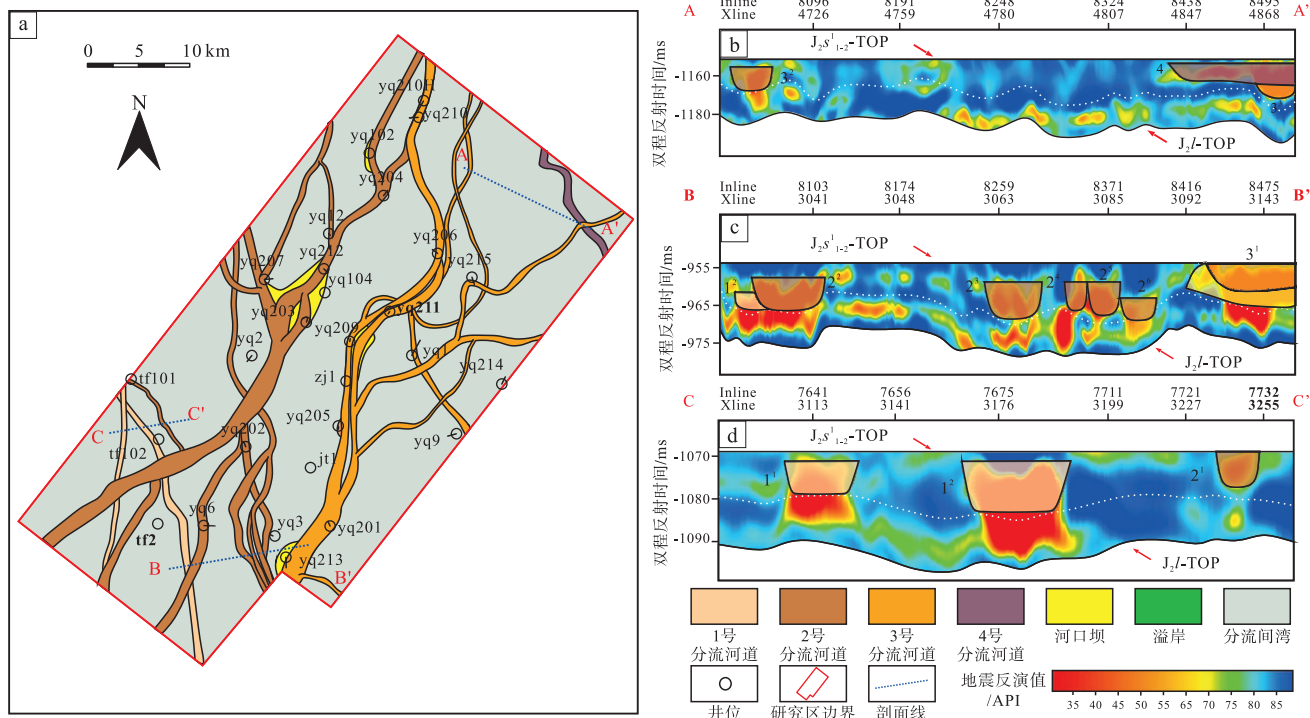
$J_2s_{1-2}^1$ 小层为例，识别出单砂体级次构型下的4期分流河道，依次为1号、2号、3号和4号河道（图13-a），表明该小层内河道体系经历了多阶段的演化过程。在精细划分过程中，考虑到河道频繁改道和分支，同一沉积期内主干河道与其分支仍存在内部期次之分。通过分析各河道顶部至 $J_2s_{1-2}^1$ 小层顶面的垂向距离，结合地震剖面叠置关系进行期次判别。以3号河道及其分支为例， 3^2 分支河道顶部高于 3^3 分支河道， 3^3 分支河道又明显切叠于4号河道之上，反映3号河道早于4号河道（图13-b）。进一步结合BB'（图13-c）与CC'剖面（图13-d），对各期河道的上下叠置关系进行验证，可明确1号河道早于2号，2号早于3号，3号早于4号。该方法有效厘清了复杂河道体系的沉积期次关系，提供了关键的期次划分依据。

4.2.2 单砂体级次构型定量规模

河道宽度是衡量河道规模及河道识别的重要参数，开展单砂体定量规模研究有助于地下储集层连通性预测，更好地服务于油气勘探开发（孙以德等，2024）。在沙一段单一河道砂体级次构型表征

的基础上，对各个小层的河道厚度与宽度进行了统计分析，结果表明沙一段各小层河道厚度与宽度具有良好的正相关关系（图14），由此建立了单一河道定量构型模式，应用该经验公式可以根据沉积条件下活动河道厚度对河道宽度进行预测，这对地下一河道识别起到了规模控制作用。

不同小层河道宽厚比差异明显，垂向上旋回对单一河道构型定量规模的控制作用明显，各个亚段表现出相似的沉积特征，底部河道沉积处于可容空间扩张阶段，河道砂体宽度厚度比值较低，地层记录上表现为向上变细的退积沉积旋回序列。随着湖盆水位下降，可容空间逐渐转换到压缩阶段，顶部河道下切能力增强，厚度逐渐增大，平面上分布广泛，整体宽厚比较大，地层沉积多表现为向上变粗的进积或加积序列。这一演化过程说明，在川中缓坡稳定的背景下，微小的构造沉降变化或湖平面振荡即可引起可容空间的阶段性增减，从而引发河道沉积形态在孤立型窄河道和叠加型宽河道之间反复循环演化（表3）。



a— $J_2s_{1-2}^1$ 小层单一河道砂体级次构型分布平面图；b, c, d—波形指示反演剖面图

图13 天府气田简阳区块 $J_2s_{1-2}^1$ 小层单一河道砂体级次平剖互动构型识别

Fig. 13 Identification of hierarchical interactive architecture of a single fluvial sand body of sublayer $J_2s_{1-2}^1$ based on plan and vertical sections in Jianyang block, Tianfu Gas Field

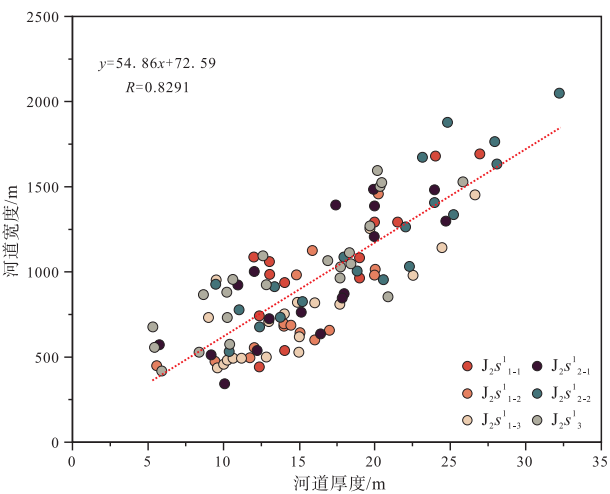


图 14 天府气田简阳区块沙一段浅水三角洲单一河道构型宽度与厚度散点交会图

Fig. 14 Crossplot of channel width versus thickness for single-channel architectures in shallow-water delta in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field

表 3 天府气田简阳区块沙一段浅水三角洲单一河道构型定量规模统计

Table 3 Statistica of quantitative dimensions of single-channel architectures in shallow-water delta in the Member 1 of Shaximiao Formation in Jianyang block, Tianfu Gas Field

小层	河道厚度/m		河道宽度/m		宽厚比
	分布范围	平均值	分布范围	平均值	
J ₂ s ₁ ¹	5.33~25.85	14.42	417.05~1594.07	985.89	68:1
J ₂ s ₂₋₂ ¹	9.49~32.23	19.63	531.55~2048.51	1182.22	60:1
J ₂ s ₂₋₁ ¹	5.75~24.72	15.69	342.07~1483.98	939.81	59:1
J ₂ s ₁₋₃ ¹	12.01~26.97	17.04	441.08~1691.53	1060.56	62:1
J ₂ s ₁₋₂ ¹	5.57~20.25	14.69	449.11~1457.70	765.92	52:1
J ₂ s ₁₋₁ ¹	9.01~26.62	14.84	436.25~1451.15	759.21	51:1
平均值	/	16.01	/	950.76	59:1

5 浅水三角洲三维构型模式

在结合前人研究成果的基础上建立了浅水三角洲不同亚相单砂体构型沉积演化模式。在四川盆地沙溪庙组浅水三角洲体系中，三维构型呈现出明显的顺物源分异特征。由近源向远源依次可划分为三角洲平原、内前缘、外前缘、前三角洲和滨浅湖 5 个亚相带（杨跃明等，2022；邓文龙等，2024）（图 15-a）。天府气田简阳地区因靠近川南物源，湖盆水体较浅且动荡，地形相对宽缓，主要发育浅水三角洲内前缘沉积。其中三角洲平原发育厚层分流河道和洪泛泥质沉积，内前缘以水下分流河道为

主，河道频繁侧向迁移，呈“网状”展布，砂体以多期叠置、相互切叠为主；外前缘水动力减弱，发育窄幅分流河道和舌状至朵状河口坝，砂体之间以垂向叠加和侧向对接为主；前三角洲主要沉积粉砂质泥岩，滨浅湖发育低能泥质沉积。整体构型由近源强动力的侵蚀—搬运—堆积，过渡至远源低能的沉降—沉积控制模式（图 15-b）。

垂向上，在切物源剖面上，分流河道砂体多呈“顶平底凸”特征，表明其基底侵蚀强烈，而河口坝砂体则呈“底平顶凸”形态，反映其在静水环境中堆积发育，形成典型河道直接叠置于河口坝之上的“坝上河”构型模式。沙一段沉积时期，研究区主要发育浅水三角洲内前缘沉积，沉积物供给速率（A）和可容空间的变化（S）直接影响内前缘的各成因单砂体发育规模和叠置关系。内前缘靠近物源，沉积物供给充足，A/S>1，河道频繁侧向迁移，在平面上呈现“网状”的形态，此时河道作用强，河口坝被河道侵蚀切割，难以形成大规模河口坝，仅以残余河口坝形式存在，水下分流河道为骨架砂体，各单砂体间以垂向侧向相互切叠接触为主。随水下分流河道不断向湖盆推进，到达外前缘沉积中心，远源区沉积物供给速率下降，搬运能力减弱，A/S<1，水下分流河道规模逐渐减小，在平面呈现窄条带状，靠近湖盆中心的砂体受潮浪改造较强，河道侵蚀作用减弱，河口坝与席状砂体开始大规模发育，河口坝与席状砂体多呈舌状分布，部分地区河口坝交织成朵状坝，显示出明显的空间演化规律（图 15-c，15-d）。

6 结论

1) 在稀疏井网条件下，采用基于自动化机器学习（AutoML）的分频多属性融合方法，结合地震波形指示反演（WII）技术，实现了致密砂岩薄层的精细表征，显著提高了浅水三角洲薄层砂体的预测精度，但受限于地震分辨率及调谐效应影响，陆相致密薄层砂体仍存在显著的不确定性与多解性挑战，未来将进一步探索新的正则化和约束机制来提高预测可靠度，将储集层非均质性特征和沉积地质模式融入深度学习框架，以期进一步提高稀疏井网下的复杂浅水三角洲致密气藏的储集层构型预测精度。

2) 在四川盆地天府气田简阳区块沙一段主要



Shaximiao Formation in Tianfu Gas Field

3) 建立了浅水三角洲沉积构型模式, 明确构型具有明显的空间分异特征, 由近源强动力的侵蚀—搬运—堆积, 逐渐过渡至远源低能的沉降—沉积控制。其中近源三角洲平原为厚层分流河道与洪泛泥; 内前缘 $A/S > 1$, 水下分流河道呈网状、多期切叠, 仅发育残余河口坝; 外前缘 $A/S < 1$, 水下河道逐渐变窄, 河口坝及席状砂呈舌—朵状; 前三角洲与滨浅湖广泛沉积泥质。

参考文献 (References)

- 曹思远,孙耀光,陈思远. 2023. 地震勘探高分辨率资料处理的挑战与对策. 煤田地质与勘探, 51(1): 277-288. [Cao S Y, Sun Y G, Chen S Y. 2023. Challenges and solutions to high-resolution data processing for seismic exploration. Coal Geology & Exploration, 51(1): 277-288]
- 陈彦虎,毕建军,邱小斌,陈有兵,杨辉,曹佳佳,邸永香,赵海山,李志向. 2020. 地震波形指示反演方法及其应用. 石油勘探与开发, 47(6): 1149-1158. [Chen Y H, Bi J J, Qiu X B, Chen Y B, Yang H, Cao J J, Di Y X, Zhao H S, Li Z X, 2020. A method of seismic waveform indicator inversion and its application. Petroleum Exploration and Development, 47(6): 1149-1158]
- 邓文龙,叶泰然,纪友亮,周勇,万宏峰,任钰涛. 2024. 川西新场构造带须二段浅水三角洲砂体结构特征及控制因素. 古地理学报, 26(3): 545-566. [Deng W L, Ye T R, Ji Y L, Zhou Y, Wan H F, Ren Y T, 2024. Sand body architecture and controlling factors of shallow-water delta in Member 2 of the Xujiahe Formation in the Xinchang structural belt, western Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(3): 545-566]
- 冯潇飞,赵晓明,张喜,葛家旺,杨长城,梁岳立, Massine Bouchakour. 2024. 川中地区中侏罗世早期天文驱动下的湖平面波动及沉积物分布规律. 石油与天然气地质, 45(5): 1368-1382. [Feng X F, Zhao X M, Zhang X, Ge J W, Yang C C, Liang Y L, Bouchakour M. 2024. Astronomically forced lake-level fluctuation and sediment distribution patterns during the Early Middle Jurassic, central Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 45(5): 1368-1382]
- 高静怀,汪文秉,朱光明,彭玉华,王玉贵. 1996. 地震资料处理中小波函数的选取研究. 地球物理学报, 39(3): 392-400. [Gao J H, Wang W B, Zhu G M, Peng Y H, Wang Y G. 1996. On the choice of wavelet functions for seismic data processing. Chinese Journal of Geophysics, 39(3): 392-400]
- 顾雯,徐敏,王铎翰,郑虹,章雄,张洞君,罗晶. 2016. 地震波形指示反演技术在薄储层预测中的应用: 以准噶尔盆地 B 地区薄层砂岩气藏为例. 天然气地球科学, 27(11): 2064-2069. [Gu W, Xu M, Wang D H, Zheng H, Zhang X, Zhang D J, Luo J. 2016. Application of seismic motion inversion technology in thin reservoir prediction: a case study of the thin sandstone gas reservoir in the B area of Junggar Basin. Natural Gas Geoscience, 27(11): 2064-2069]
- 何东博,贾爱林,冀光,位云生,唐海发. 2013. 苏里格大型致密砂岩气田开发井型井网技术. 石油勘探与开发, 40(1): 79-89. [He D B, Jia A L, Ji G, Wei Y S, Tang H F. 2013. Well type and pattern optimization technology for large scale tight sand gas, Sulige Gas Field. Petroleum Exploration and Development, 40(1): 79-89]
- 何文祥,吴胜和,唐义疆,方辉,王志欣,徐怀民. 2005. 河口坝砂体构型精细解剖. 石油勘探与开发, 32(5): 42-46. [He W X, Wu S H, Tang Y J, Fang H, Wang Z X, Xu H M. 2005. Detailed architecture analyses of debouch bar in Shengtuo Oilfield, Jiyang Depression. Petroleum Exploration and Development, 32(5): 42-46]
- 纪友亮,刘君龙,王天云,刘大卫,程同冉. 2016. 陆相湖盆三角洲—滩坝复合砂体分布模式及编图方法. 古地理学报, 18(4): 615-630. [Ji Y L, Liu J L, Wang T Y, Liu D W, Cheng T R. 2016. Distributing pattern and mapping method of delta and beach-bar composite sand-bodies in continental lacustrine basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 18(4): 615-630]
- 焦社宝,许怀智,蔡坤,常吟善,张岩. 2025. 西湖凹陷渐新统花港组浅水三角洲河道砂岩精细储层预测方法. 中国石油勘探, 30(2): 98-114. [Jiao S B, Xu H Z, Cai K, Chang Y S, Zhang Y. 2025. Fine reservoir prediction methods for shallow-water delta channel sand body in the Oligocene Huagang Formation in Xihu sag. China Petroleum Exploration, 30(2): 98-114]
- 李元昊,刘池洋,独育国,王秀娟,黄锦秀. 2009. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长 8 油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控制. 古地理学报, 11(3): 265-274. [Li Y H, Liu C Y, Du Y G, Wang X J, Huang J X. 2009. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang 8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in northwestern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(3): 265-274]
- 林承焰,张宪国,董春梅,任丽华,朱筱敏. 2017. 地震沉积学及其应用实例. 青岛: 中国石油大学出版社. [Lin C Y, Zhang X G, Dong C M, Ren L H, Zhu X M. 2017. Seismic Sedimentology and Its Application Examples. Qingdao: China University of Petroleum Press]
- 史浩,刘小波,杨桂茹,林利明,刘玉梅,张发强,王振国,郭俊超. 2024. 神经网络特征属性反演在煤系地层致密储层预测中的应用: 以鄂尔多斯盆地东缘神府木瓜区为例. 天然气地球科学, 35(10): 1886-1896. [Shi H, Liu X B, Yang G R, Lin L M, Liu Y M, Zhang F Q, Wang Z G, Guo J C. 2024. Application of neural network feature attribute inversion in the prediction of tight reservoirs in coal-bearing strata: a case study in the Shenfu Mugua area on the eastern margin of the Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 35(10): 1886-1896]
- 孙以德,刘常妮,李浩男,许允杰,吴胜和. 2024. 基于密井网和井间示踪剂资料的浅水三角洲单砂体沉积构型研究: 以东营凹陷胜坨油田二区沙二段 1-2 砂组为例. 油气地质与采收率, 31(2): 39-47. [Sun Y D, Liu C N, Li H N, Xu Y J, Wu S H. 2024. Study on sedimentary architecture of single sand body in shallow water deltas based on dense well pattern and interwell tracer data: a case study of Es21 and Es22 in Shenger District of Shengtuo Oilfield, Dongying sag. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 31(2): 39-47]
- 童姜楠,孙雄伟,王峰,李忠百,黄力,常益行,陈彤,张艺馨,金国钰,陈彦虎. 2025. 智能相控波形指示反演技术及其在煤系地层薄砂岩预测中的应用. 石油物探, 64(1): 129-137. [Tong J N, Sun X W, Wang F, Li Z B, Huang L, Chang Y X, Chen T, Zhang Y X, Jin G Y, Chen Y H. 2025. Intelligent facies-controlled seismic meme inversion and its application in predicting thin reservoirs in coal measure strata. Geophysical Prospecting for Petroleum, 64(1): 129-137]

- 王翹楚, 陈冬霞, 李莎, 陈雨荷, 岳大力, 王福伟, 屈林博. 2025. 川西坳陷新场须二段致密气藏气水分布成因机制. 天然气地球科学, 36(5): 782-797. [Wang Q C, Chen D X, Li S, Chen Y H, Yue D L, Wang F W, Qu L B. 2025. Mechanism of the gas-water distribution of the tight sandstone gas reservoirs in the second Member of the Xujiahe Formation in the Xinchang area, western Sichuan Depression. *Natural Gas Geoscience*, 36(5): 782-797]
- 王武荣, 岳大力, 李伟, 吴胜和, 芦凤明, 续一简. 2024. 分频智能反演协同三维岩相建模的单层砂体预测. 地质科学, 59(6): 1694-1707. [Wang W R, Yue D L, Li W, Wu S H, Lu F M, Xu Y J. 2024. Prediction of single-layer sand body by spectral-decomposition intelligent inversion collaborating 3D lithofacies modeling. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 59(6): 1694-1707]
- 王于恒, 于福生, 李忠诚, 王晓坤, 熊连桥, 齐伊梨, 冯桢鸣. 2024. 浅水三角洲相控储层预测研究: 以松辽盆地中央坳陷大安地区泉四段为例. 中国矿业大学学报, 53(3): 564-584. [Wang Y H, Yu F S, Li Z C, Wang X K, Xiong L Q, Qi Y L, Feng Z M. 2024. Shallow-water deltaic facies-controlled reservoir prediction study: a case study of the Quantou Formation in the Da'an area of the Central Depression, Songliao Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 53(3): 564-584]
- 吴胜和, 岳大力, 冯文杰, 张佳佳, 徐振华. 2021. 碎屑岩沉积构型研究若干进展. 古地理学报, 23(2): 245-262. [Wu S H, Yue D L, Feng W J, Zhang J J, Xu Z H. 2021. Research progress of depositional architecture of clastic systems. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(2): 245-262]
- 肖富森, 韦腾强, 王小娟, 关旭, 吴长江, 洪海涛. 2020. 四川盆地川中—川西地区沙溪庙组层序地层特征. 天然气地球科学, 31(9): 1216-1224. [Xiao F S, Wei T Q, Wang X J, Guan X, Wu C J, Hong H T. 2020. Research on the sequence stratigraphy of the Shaximiao Formation in Chuanzhong-Chuanxi area, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(9): 1216-1224]
- 徐振华, 邓航, 吴胜和, 岳大力, 刘钰铭, 李庆. 2024. 河控浅水三角洲前缘树枝状沙坝沉积构型与形成机理. 古地理学报, 26(6): 1338-1351. [Xu Z H, Deng H, Wu S H, Yue D L, Liu Y M, Li Q. 2024. Depositional architecture and formative mechanism of dendritic bars within river-dominated shallow-water delta front. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(6): 1338-1351]
- 杨雨, 谢继容, 曹正林, 文龙, 王小娟, 肖尧, 杨建, 唐青松, 唐大海, 李明秋, 关旭, 曾青高, 陈伟华, 陈康, 肖红林. 2023. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术. 石油学报, 44(6): 917-932. [Yang Y, Xie J R, Cao Z L, Wen L, Wang X J, Xiao Y, Yang J, Tang Q S, Tang D H, Li M Q, Guan X, Zeng Q G, Chen W H, Chen K, Xiao H L. 2023. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu Gas Field of Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(6): 917-932]
- 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 文龙, 吴长江, 关旭, 韦腾强, 杨曦冉. 2022. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征. 天然气工业, 42(1): 12-24. [Yang Y M, Wang X J, Chen S L, Wen L, Wu C J, Guan X, Wei T Q, Yang X R. 2022. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 42(1): 12-24]
- 于海波, 许鹏, 李龙, 王启明, 孙希家, 郭景震. 2024. 渤海海域明化镇组下段砂体构型与连通性分析. 中国海上油气, 36(4): 72-83. [Yu H B, Xu P, Li L, Wang Q M, Sun X J, Guo J Z. 2024. Analysis of sand architecture and connectivity in Lower Member of Minghuazhen Formation in Bohai Sea. *China Offshore Oil & Gas*, 36(4): 72-83]
- 余文强, 杨田, 蔡来星, 李晓芳, 何青. 2024. 四川盆地中部中侏罗统沙溪庙组沉积期古环境与古气候演化: 以永浅1井为例. 地质学报, 98(4): 1211-1228. [Yu W Q, Yang T, Cai L X, Li X F, He Q. 2024. Paleoenvironment and paleoclimate evolution during the depositional period of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin: a case study of Well Yongqian 1. *Acta Geologica Sinica*, 98(4): 1211-1228]
- 岳大力, 李伟, 杜玉山, 胡光义, 王文枫, 王武荣, 王政, 鲜本忠. 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. [Yue D L, Li W, Du Y S, Hu G Y, Wang W F, Wang W R, Wang Z, Xian B Z. 2022. Review on optimization and fusion of seismic attributes for fluvial reservoir characterization. *Earth Science*, 47(11): 3929-3943]
- 岳大力, 李伟, 王武荣, 孙盼科, 吴胜和, 徐振华, 刘磊, 邬德刚, 屈林博, 任柯宇, 林津, 张姝琪. 2025. 碎屑岩储层智能表征与建模方法研究现状及展望. 古地理学报, 27(4): 903-923. [Yue D L, Li W, Wang W R, Sun P K, Wu S H, Xu Z H, Liu L, Wu D G, Qu L B, Ren K Y, Lin J, Zhang S Q. 2025. Advances and perspectives in intelligent characterization and modeling of clastic reservoirs. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(4): 903-923]
- 翟亮, 张强, 陈永芮, 梁书义, 张凯. 2023. 一种基于岩性补偿系数的沉积约束反演方法及应用研究: 以渤海湾盆地埕岛南部东营组为例. 地球物理学进展, 38(5): 2350-2359. [Zhai L, Zhang Q, Chen Y R, Liang S Y, Zhang K. 2023. Facies-constrained inversion method and application based on a lithology-compensated coefficient: a case study of the southern part of the Chengdao Oilfield in the Bohai Bay Basin. *Progress in Geophysics*, 38(5): 2350-2359]
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 柯兰梅. 2010. 浅水三角洲沉积模式. 沉积学报, 28(5): 933-944. [Zhang C M, Yin T J, Zhu Y J, Ke L M. 2010. Shallow-water deltas and models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 933-944]
- 张莉, 鲍志东, 林艳波, 陈玉明, 林晓海, 窦鲁星, 孔彬. 2017. 浅水三角洲砂体类型及沉积模式: 以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例. 石油勘探与开发, 44(5): 727-736. [Zhang L, Bao Z D, Lin Y B, Chen Y M, Lin X H, Dou L X, Kong B. 2017. Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: a case study of the First Member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, south of Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 727-736]

- 张庆国, 鲍志东, 宋新民, 孙继武. 2008. 扶余油田扶余油层储集层单砂体划分及成因分析. 石油勘探与开发, 35(2): 157-163. [Zhang Q G, Bao Z D, Song X M, Sun J W. 2008. Hierarchical division and origin of single sand bodies in Fuyu oil layer, Fuyu Oilfield. Petroleum Exploration and Development, 35(2): 157-163]
- 张宪国, 林承焰, 张涛, 曾洪流. 2019. 河流、三角洲相储层地震沉积学方法与应用. 青岛: 中国石油大学出版社. [Zhang X G, Lin C Y, Zhang T, Zeng H L. 2019. Seismic Sedimentology Methods and Applications in Fluvial and Deltaic Reservoirs. Qingdao: China University of Petroleum Press]
- 赵晓明, 胡成军, 肖尧, 葛家旺, 杨长城, 冯潇飞, 宋林珂, 肖红林, 吴鑫涛. 2024. 四川盆地中部地区中侏罗统物源体系格局及时空演化. 天然气工业, 44(3): 72-86. [Zhao X M, Hu C J, Xiao Y, Ge J W, Yang C C, Feng X F, Song L K, Xiao H L, Wu X T. 2024. Pattern and spatiotemporal evolution of the Middle Jurassic Provenance system in central Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 44(3): 72-86]
- 朱绍鹏, 张冲, 周伟, 孟迪, 汤晓宇. 2025. 浅海重力流低渗细粒沉积砂岩储层质量评价与预测: 以莺歌海盆地东方 A 区黄流组一段为例. 海洋地质前沿, 41(6): 1-13. [Zhu S P, Zhang C, Zhou W, Meng D, Tang X Y. 2025. Quality evaluation and prediction of low permeability fine-grained sandstone reservoir of shallow marine gravity flow: a case study of the First Member of Huangliu Formation in Dongfang A area of Yinggehai Basin. Marine Geology Frontiers, 41(6): 1-13]
- 邹才能, 杨智, 朱如凯, 张国生, 侯连华, 吴松涛, 陶士振, 袁选俊, 董大忠, 王玉满, 王岚, 黄金亮, 王淑芳. 2015. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展. 地质学报, 89(6): 979-1007. [Zou C N, Yang Z, Zhu R K, Zhang G S, Hou L H, Wu S T, Tao S Z, Yuan X J, Dong D Z, Wang Y M, Wang L, Huang J L, Wang S F. 2015. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies. Acta Geologica Sinica, 89(6): 979-1007]
- Anees A, Zhang H C, Ashraf U, Wang R, Thanh H V, Radwan A E, Ullah J, Abbasi G R, Iqbal I, Ali N, Zhang X N, Tan S C, Shi W Z. 2022. Sand-ratio distribution in an unconventional tight sandstone reservoir of Hangjinqi area, Ordos Basin: acoustic impedance inversion-based reservoir quality prediction. Frontiers in Earth Science, 10: 1018105.
- Cai Q S, Hu M Y, Liu Y N, Kane O I, Deng Q J, Hu Z G, Li H, Ngia N R. 2022. Sedimentary characteristics and implications for hydrocarbon exploration in a retrograding shallow-water delta: an example from the Fourth Member of the Cretaceous Quantou Formation in the Sanzhao Depression, Songliao Basin, NE China. Petroleum Science, 19: 929-948.
- Erickson N, Mueller J, Shirkov A, Zhang H, Larroy P, Li M, Smola A. 2020. AutoGluon-tabular: robust and accurate AutoML for structured data. arXiv: 2003.06505.
- He X, Zhao K Y, Chu X W. 2021. AutoML: a survey of the state-of-the-art. Knowledge-Based Systems, 212: 106622.
- Li H, Sun L P, Wang X C. 2025. Multivariate information fusion modeling method and its application in seismic pre-stack inversion of shallow gas reservoir. Gas Science and Engineering, 139: 205615.
- Li W, Yue D L, Wang W F, Wang W R, Wu S H, Li J, Chen D P. 2019. Fusing multiple frequency-decomposed seismic attributes with machine learning for thickness prediction and sedimentary facies interpretation in fluvial reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, 177: 1087-1102.
- Shen Z Q, Zhang Y Q, Wei L N, Zhao H, Yao Q M. 2018. Automated machine learning: from principles to practices. arXiv: 1810.13306.
- Wang H R, Guo Y J, Huang Y M, Yu C Q, Huo Z P, Li X L, Chen X L. 2023. Morphologies, patterns, and filling architectures at the confluence zones of the Cretaceous shallow-water delta in the Songliao Basin, NE China. Journal of Asian Earth Sciences, 254: 105758.
- Wang J, Guan D Y, Huang X B, He Y B, Li H, Xu W, Liu R, Feng B. 2025a. Integrated SOM multi-attribute optimization and seismic waveform inversion for thin sand body characterization: a case study of the Paleogene lower E₃d² sub-member in the HHK Depression, Bohai Bay Basin. Applied Sciences, 15: 5134.
- Wang W R, Qu L B, Yue D L, Li W, Liu J L, Jin W J, Fu J L, Zhang J R, Chen D X, Wang Q C, Li S. 2025b. Integrated artificial intelligence approach for well-log fluid identification in dual-medium tight sandstone gas reservoirs. Frontiers in Earth Science, 13: 1591110.
- Yue D L, Wu S H, Xu Z Y, Xiong L, Chen D X, Ji Y L, Zhou Y. 2018. Reservoir quality, natural fractures, and gas productivity of Upper Triassic Xujiahe tight gas sandstones in western Sichuan Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 89: 370-386.
- Zhang X J, Wu D, Fu M Y, Deng H C, Xu Z Q, Chen C H. 2022. Controls of sandstone architecture on hydrocarbon accumulation in a shallow-water delta from the Jurassic Shaximiao Formation of the western Sichuan Basin in China. Energy Reports, 8: 6068-6085.
- Zhu X M, Li S L, Wu D, Zhu S F, Dong Y L, Zhao D N, Wang X L, Zhang Q. 2017. Sedimentary characteristics of shallow-water braided delta of the Jurassic, Junggar Basin, Western China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 149: 591-602.
- Zöller M A, Huber M F. 2021. Benchmark and survey of automated machine learning frameworks. Journal of Artificial Intelligence Research, 70: 409-472.

(责任编辑 王绍华)