

四川盆地秋林地区沙溪庙组二段浅水三角洲平原 多级次砂体构型表征^{*}

唐 松^{1,2,3} 屈林博^{1,2} 彭 秋³ 李洪辉^{1,2} 淦文杰³ 张浩宇^{1,2} 喻 鑫^{1,2}
岳大力^{1,2} 李 伟^{1,2} 王武荣^{1,2} 廖 月³ 李柏颀³

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分公司川中油气矿, 四川遂宁 629000

摘 要 四川盆地天府气田秋林地区沙二¹亚段为典型陆相致密砂岩气储集层, 但其沉积相类型、古气候背景及砂体构型特征仍存在不同认识, 制约了有利储集砂体的精细预测。本研究综合岩心、测井、三维地震及地球化学资料, 系统分析了沙二¹亚段古气候—古环境特征及沉积构型样式。结果表明, 沙二¹亚段形成于半湿润—半干旱过渡气候背景下的淡水—微咸水浅湖环境, 整体处于氧化—弱氧化条件, 主要发育浅水三角洲平原沉积体系, 并记录了明显的短周期湿润—干旱波动。研究区识别出主干分流河道、分支分流河道、溢岸和分流间湾 4 类构型单元, 不同砂组间河道规模、弯曲度及叠置样式差异显著, 反映出古水动力条件随气候波动发生阶段性调整。结合分频智能属性融合与叠前反演, 进一步刻画了分流河道及溢岸砂体的多种叠置模式, 揭示了其对储集层连通性的差异化控制作用, 并建立了半湿润—半干旱气候波动控制下浅水三角洲平原复合河道构型演化模式。研究结果可为分流河道型致密气藏甜点区优选与开发部署提供地质依据。

关键词 浅水三角洲平原 古气候 多级次构型表征 沙溪庙组二段 秋林地区 四川盆地

第一作者简介 唐松, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事油气勘探、开发地质方面的研究工作。

E-mail: tangsl@petroChina.com.cn。

通讯作者简介 岳大力, 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 主要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 characterization of sand bodies in shallow-water delta of the Member 2 of Shaximiao Formation in Qiulin area, Sichuan Basin

TANG Song^{1,2,3} QU Linbo^{1,2} PENG Qiu³ LI Honghui^{1,2} GAN Wenjie³ ZHANG Haoyu^{1,2} YU Xin^{1,2}
YUE Dali^{1,2} LI Wei^{1,2} WANG Wurong^{1,2} LIAO Yue³ LI Bojie³

^{*} 国家科技重大专项(编号: 2025ZD1404304)、国家自然科学基金项目(编号: 42272186, 42302128, 42412179)和中国石油大学(北京)科研基金资助项目(编号: 2462023YJRC039)联合资助。[Co-funded by the National Science and Technology Major Project (No. 2025ZD1404304), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272186, 42302128, 42412179), and the Research Fund of China University of Petroleum (Beijing) (No. 2462023YJRC039)]

收稿日期: 2025-12-14 改回日期: 2026-01-26

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 Central Sichuan Oil and Gas District, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan Suining 629000, China

Abstract Qiulin area of Tianfu Gas Field in Sichuan Basin contains typical tight sandstone gas reservoirs in the Sha 2₁ submember. However, the depositional facies and paleoclimate evolution of this interval remain controversial, which has limited the understanding of reservoir formation and sweet-spot distribution. In this study, core, well-log, 3D seismic, and geochemical data were integrated to analyze the paleoclimate, paleoenvironment, and sedimentary architecture of the Sha 2₁ submember. The results show that the Sha 2₁ submember was deposited in a freshwater to slightly brackish shallow-lake setting under a transitional semihumid to semiarid climate. The depositional environment was mainly oxidizing to weakly oxidizing, and a shallow-water delta plain system was widely developed. Clear short-term humid-arid fluctuations were also recorded. Four architectural elements were identified, including trunk distributary channels, branch distributary channels, overbank deposits, and interdistributary bays. Marked differences in channel scale, sinuosity, and stacking style among sand groups indicate staged adjustments in paleohydrodynamic conditions in response to climate fluctuations. Based on frequency-divided intelligent attribute fusion and pre-stack inversion, multiple stacking patterns of distributary-channel and overbank sand bodies were further characterized, and their different controls on reservoir connectivity were clarified. An evolutionary model of composite channel architecture in a shallow-water delta plain under semihumid-semiarid climate fluctuations was finally established. These results provide a geological basis for sweet-spot prediction and development planning of distributary-channel tight gas reservoirs.

Key words shallow-water delta plain, palaeoclimate, multi-scale architectural characterization, the Member 2 of Shaximiao Formation, Qiulin area, Sichuan Basin

About the first author TANG Song, born in 1985, is a senior engineer. He is mainly engaged in petroleum exploration and development geology. E-mail: tangsl@petroChina.com.cn.

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

浅水三角洲是陆相盆地中重要的储集层发育体系之一,其分流河道、溢岸和分流间湾等沉积单元共同控制砂体的空间连通性与内部非均质性,一直是沉积学与石油地质学关注的重点。随着陆相盆地油气勘探不断深入,许多形成于浅水三角洲环境的优质储集层相继被发现,推动了致密油气甜点预测与储集层内部构型精细表征方法的发展(胡鑫等, 2025; 万晓龙等, 2025; 王武荣等, 2025)。其中,浅水三角洲平原分流河道是控制砂体几何形态和连通性的关键载体,常与溢岸和分流间湾共同构成复合沉积单元,并在湖平面变化及频繁分叉、决口和改道作用下形成多期河道叠置格局(吴胜和等,

2012; 冯文杰等, 2017; Xu *et al.*, 2021)。现有研究多针对相对稳定的湿润型补给条件,强调持续径流下河道连续充填、分流体系相对稳定、砂泥分异清晰(Prasojo *et al.*, 2025)。相比之下,干旱一半干旱或强季节性背景下,流量峰值化与间歇性更强,洪峰期易形成宽浅多汉的高能河道复合叠置砂体,枯水期则快速淤积并转为孤立薄砂沉积,平面河网复杂度与连通性随流量变幅显著改变(李洪辉等, 2025)。在半湿润一半干旱气候波动可引起高频湖面振荡与水位快速波动(Lemons and Chan, 1999),但对于这种条件下浅水三角洲平原沉积构型特征与演化规律仍缺乏系统研究。

近年来,四川盆地天府气田沙溪庙组陆相致密砂岩气勘探取得显著进展,使得沙溪庙组成为四川盆地油气勘探的新热点,其中沙二¹亚段(J₂s₂¹)已成为主力产层之一(文龙等,2025)。随着勘探开发程度加深和基础资料逐步丰富,关于该层段沉积相类型与古气候背景的认识却尚未统一。已有研究对其沉积体系提出了曲流河、浅水三角洲—湖泊体系及分支河流体系等不同解释(杨跃明等,2022;刘浩等,2025)。此外,沉积期的古气候和古环境也是控制沉积物供给和沉积体系演化的重要因素,可以辅助论证沉积体系。尤其在构造运动相对较弱且物源供应相对稳定的情况下,气候变化是影响沉积物的供应和沉积环境的空间演化的直接原因,共同塑造了沉积相的类型和空间布局(李东伟等,2022)。但是关于沙溪庙组沉积时期的古气候,也存在半干旱—半湿润、温暖湿润及季节性干湿交替等不同认识(陈晓慧等,2019;Tan *et al.*, 2024;余文强等,2024)。沙二¹亚段处于沙一段之后首次大规模湖侵的早期阶段,是区域古气候从湿润向干旱转型,沉积环境由浅水三角洲向河流转变的关键过渡层段,上述认识分歧不仅制约了对沙溪庙组储集层形成过程的理解,也为后续勘探开发带来了较大挑战。因此,进一步厘清沙二¹亚段的沉积相类型及古气候背景,探索其与油气储集层发育之间的关系,显得尤为重要。

为了进一步明确川中地区沙二¹亚段的沉积相类型及其沉积构型分布演化特征,本研究以沉积构型相关理论为指导,综合运用精细的岩心观测、测井响应特征分析、地震智能预测等技术手段,并结合地化元素分析,明确了四川盆地天府气田秋林地区沙二¹亚段属于半湿润—半干旱气候波动背景下的水三角洲沉积,深入阐述了半湿润—半干旱气候波动背景下浅水三角洲构型的沉积演化规律。这一研究成果为理解半湿润—半干旱气候波动背景下浅水三角洲的沉积过程提供了新的理论依据,且为四川盆地天府气田及相似区域的油气高效勘探开发提供重要指导,特别是对分流河道型储集层的预测和开发策略提供重要参考。

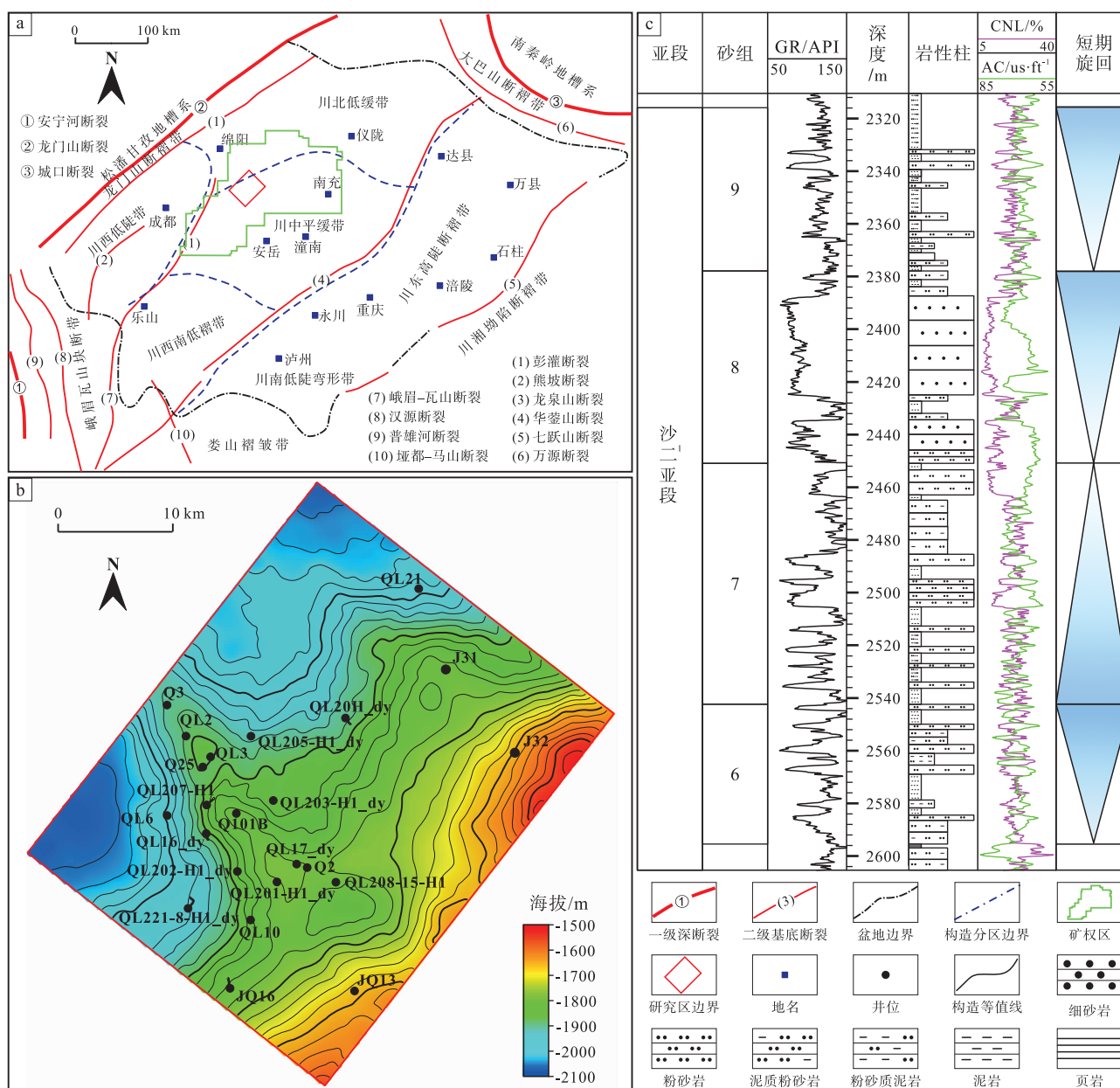
1 区域地质概况

四川盆地是发育于上扬子克拉通结晶基底之上的多旋回叠合盆地,其特点是稳定基础上的频繁波

动,沉积、构造具多旋回性(何登发等,2011;Shi *et al.*, 2024)。中三叠世以来,盆地先后经历印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动改造,形成现今周缘被多个断褶带环绕的构造格局,盆地内部以断裂为界分为川西低陡带、川北低缓带、川东高陡断褶带、川西南低褶带、川南低陡穹形带和川中平缓带等6大构造单元(图1-a)(Liu *et al.*, 2021)。受周缘造山带构造活动影响,川中地区侏罗系沙溪庙组具有多方向物源供给特征,沉积早期主要受北部大巴山长轴物源和西部龙门山南段短轴物源共同控制,沉积后期随着汉南—米仓山和龙门山中南段持续隆升,逐渐转变为以大巴山物源为主的长轴供给格局(陈伟伟等,2024;赵晓明等,2024)。其中天府气田位于川中平缓构造带西北部与川北低缓构造带西南部的交汇区域,研究区秋林16地区位于气田西北部,整体构造平缓,断层不发育,以差异升降形成的北西低、南东高单斜构造为主,局部发育鼻状构造和背斜(图1-b)。研究区侏罗系自下而上发育自流井组、凉高山组、沙溪庙组、遂宁组和蓬莱镇组,其中沙溪庙组为厚层红色泥岩与中厚层块状砂岩互层组成的陆相碎屑岩沉积,地层厚度约1000~1600 m,具有典型的泥岩包裹砂岩特征。以稳定分布的黑色叶肢介页岩为界,沙溪庙组划分为沙一段和沙二段,其中沙二段内部自下而上划分为沙二¹、沙二²、沙二³和沙二⁴亚段,本次研究目的层为沙二¹亚段,其单期河道砂体规模较小、叠置切割关系复杂,可根据河道砂体期次和短期基准面旋回进一步划分为6号、7号、8号和9号砂组(图1-c)。

2 浅水三角洲沉积环境及其气候约束

利用秋林地区沙二¹亚段的多项地球化学指标综合分析,可较为系统地恢复其古气候—古环境特征。其中C值与Sr/Cu值是陆相沉积物中常用的古气候敏感指标(Yu *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2023),此外CIA(Chemical Index of Alteration)能够表征化学风化强度(Nesbitt and Young, 1982)。沙二¹亚段C值约为0.35~0.91,平均约0.64, Sr/Cu值为2.75~12.34,平均约7, CIA值为55.7~81.9,平均约74.8,反映了沙二¹亚段总体发育在温暖湿润向半干旱—半湿润过渡的气候背景下,气候并非



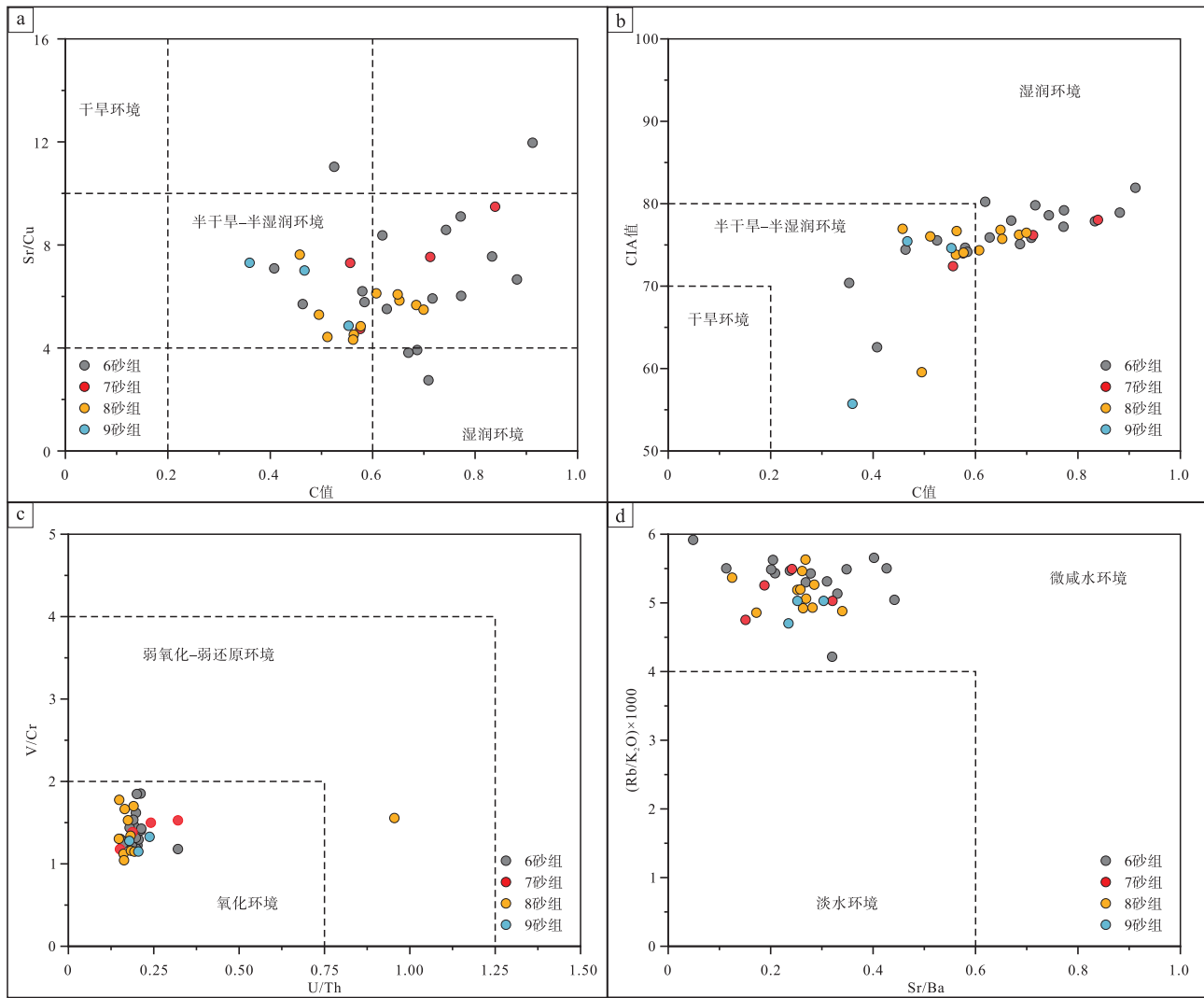
a—区域构造及研究区位置 (据杨雨等, 2023); b—秋林地区沙二¹亚段顶面构造图; c—秋林 16 井沙二¹亚段单井综合柱状图

图 1 四川盆地地质概况及综合地层柱状图

Fig. 1 Regional geological framework of Sichuan Basin and composite stratigraphic column

持续湿润, 而是存在一定干湿振荡(图 2-a, 2-b)。微量元素 U/Th 、 V/Cr 值对水体氧化还原状态极为敏感 (冯允献等, 2025)。沙二¹亚段 U/Th 值为 0.15~0.95, 绝大多数小于 0.3, V/Cr 值为 1.04~1.85。样点基本集中在氧化区, 仅极个别点向弱氧化—弱还原区过渡, 说明沉积时期水体总体处于氧化—弱氧化环境, 缺乏长期稳定的强还原条件(图 2-c)。 Sr/Ba 值与 $(Rb/K_2O) \times 1000$ 值是湖泊沉积物古盐度判别中应用最为广泛的地球化学指

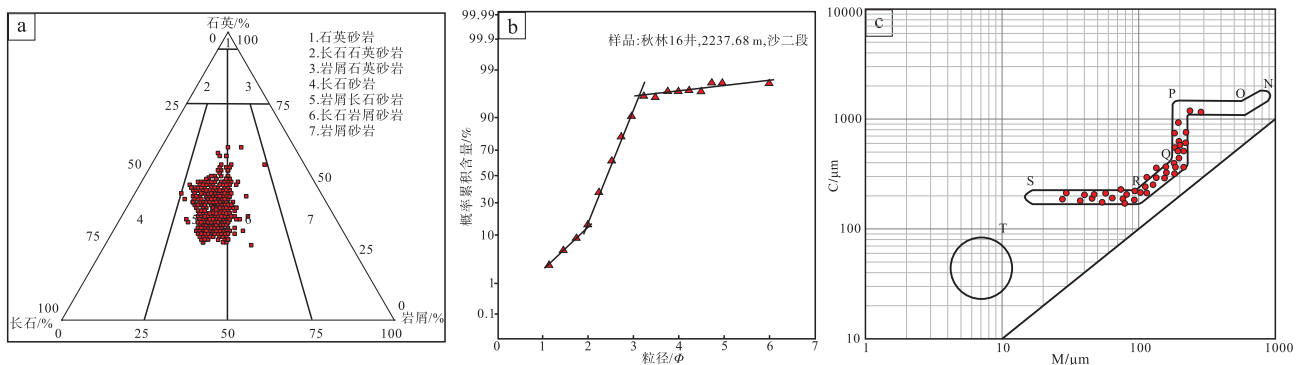
标之一 (Hirst, 1962)。沙二¹亚段 Sr/Ba 值为 0.05~0.44, 平均约 0.26, $(Rb/K_2O) \times 1000$ 值为 4.21~5.87, 平均大于 5, 指示以陆源淡水输入为主, 但受蒸发浓缩等影响具有轻微咸化趋势, 认为沙二¹亚段整体上处于低盐度的淡水—微咸水湖泊环境, 不具备真正高盐或咸化湖盆特征(图 2-d)。总体来看, 沙二¹亚段形成于半干旱—半湿润波动气候控制下的淡水—微咸水浅湖环境, 水体化学条件与氧化还原环境均呈现明显的高频振荡特征。



a—Sr/Cu 值与 C 值分布散点图；b—CIA 值与 C 值分布散点图；c—V/Cr 值与 U/Th 值分布散点图；d— $(Rb/K_2O) \times 1000$ 值与 Sr/Ba 值分布散点图

图 2 四川盆地秋林地区沙二₁ 亚段古沉积环境及古气候指标地球化学图解

Fig. 2 Geochemical interpretations of paleo-depositional environment and paleoclimatic indicators of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin



a—秋林地区沙二₁ 亚段碎屑组分三角图；b—秋林 16 井粒度概率累积曲线图；c—秋林地区沙二₁ 亚段 C-M 图

图 3 四川盆地秋林地区碎屑组分及粒度分布

Fig. 3 Detrital components and grain-size distribution characteristics in Qiulin area, Sichuan Basin

岩心、薄片及粒度资料进一步揭示了沙二¹亚段浅水、近岸和高频波动的沉积特征。该段沉积物整体粒度较细,以中—细砂岩、粉砂岩和泥岩为主,分选中等,颗粒磨圆以次棱角状—次圆状为主;储集层岩性主要为中—细粒岩屑长石砂岩及长石岩屑砂岩,长石和岩屑含量相对较高,反映物源距离较近、搬运距离较短(图 3-a)。粒度概率累积曲线多呈三段式,C-M 图数据点主要分布于 P-Q—R-S 段,说明沉积物主要以跳跃和悬浮方式搬运,属牵引流控制下的沉积产物(图 3-b, 3-c)。

泥岩颜色、生物扰动及波浪构造进一步揭示了

沉积环境的浅水波动特征。泥岩颜色主要受铁的氧化还原状态及沉积—早期成岩环境控制(王熠哲等, 2019),其中紫红色泥岩通常指示相对氧化、通气条件较好的浅水边缘环境或阶段性水上暴露过程,而灰绿色泥岩则反映水体加深或静水滞留条件下的还原—弱氧化沉积背景(杨征等, 2024)。需要指出的是,红色泥岩本身并非干旱气候的直接标志,其环境指示意义应结合沉积结构与水位变化证据综合分析。沙二¹亚段紫红色与灰绿色泥岩频繁互层(图 4-j),反映沉积期湖盆水体在氧化与弱还原条件之间频繁转换;紫红色泥岩中发育植物根茎



a—2089.32~2089.59 m, QL16 井, 灰绿色槽状交错层理砂岩; b—2216.80~2217.03 m, QL16 井, 灰白色平行层理砂岩; c—2086.38~2086.63 m, QL18 井, 灰绿色块状中—粗粒砂岩; d—2258.67~2258.82 m, QL202-H1_{dy} 井, 灰白色平行层理砂岩, 河道底部泥砾定向排列; e—2235.44~2235.67 m, QL16 井, 灰白色小型交错层理砂岩; f—2212.81~2213.07 m, QL16 井, 灰白色砂纹层理砂岩; g—2249.77~2249.96 m, QL16 井, 紫红色变形构造泥岩; h—2245.92~2246.12 m, QL16 井, 杂色泥岩; i—2378.32~2378.91 m, QL17 井, 灰黑色水平层理泥岩; j—2250.22~2250.55 m, QL16 井, 紫红色泥岩夹杂灰绿色泥岩, 可见生物扰动; k—2249.44~2249.58 m, QL16 井, 紫红色泥岩夹杂灰绿色泥岩, 可见植物根茎; l—2258.71 m, QL202-H1_{dy} 井, 暗色泥岩

图 4 四川盆地秋林地区沙二¹亚段构型单元典型岩心照片

Fig. 4 Typical core images illustrating architectural elements of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin

和根孔构造(图 4-k), 指示沉积物曾多次处于近岸浅水或短期暴露状态; 同期出现的生物扰动(图 4-j) 表明部分阶段底水含氧条件较好、沉积速率较低, 而局部暗色泥岩(图 4-l) 则记录了阶段性还原环境和有机质保存增强。此外, 沙二¹ 亚段局部泥质粉砂岩中可见典型波浪作用形成的砂纹层理(图 4-f), 指示沉积区阶段性处于可受风浪扰动的浅水带, 水动力具有往复特征 (Buatois and Mángano, 2011)。上述岩石学与沉积构造特征共同表明, 沙二¹ 亚段形成于受湖面水位频繁波动控制的浅水三角洲平原环境, 而非以持续暴露和成土作用为主的河流冲积平原。

3 浅水三角洲平原复合河道构型表征

3.1 基于分频多属性融合的砂体定量表征

在大井距条件下, 常规单一地震属性易受调谐效应干扰, 振幅与频率的多解性问题导致薄层砂体识别难度显著增加 (Li *et al.*, 2019; 刘磊等, 2024), 薄层砂体和窄河道砂体的识别精度往往受限。鉴于不同频段地震数据蕴含差异化地质信息, 挖掘其与储集层特征的响应关系可有效提升预测精度 (McArdle and Ackers, 2012; 岳大力等, 2025)。因此, 采用分频多属性智能融合技术, 将不同频段地震信息与多属性特征进行整合, 可有效提升储集层构型预测能力, 是一种有效解决大井距条件下储集层构型预测问题的途径, 尤其在薄层砂体的识别和构型分析中表现出优越性。研究区三维地震资料频谱分析表明, 原始地震数据主频约 37 Hz, 有效频宽约 14~56 Hz (图 5)。本次采用基于 Morlet 小波的时频变换技术进行分频处理, 较之传统的希尔伯特变换具有抗噪能力强、稳定性较高等优势 (高静怀等, 1996)。在确保分频结果能够覆盖原始有效带宽的基础上, 遵循避免频段冗余的原则, 在有效带宽内以 5 Hz 频段间距划分 11 个频段, 结合调谐厚度与研究区目的层 5~30 m 砂体厚度, 优选中心频率为 21 Hz、37 Hz、45 Hz 的低、中、高频数据体用于后续融合分析(图 5)。

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

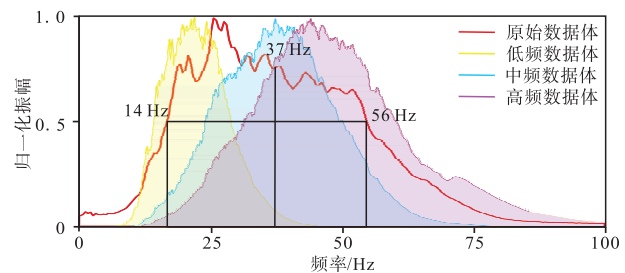


图 5 四川盆地秋林地区沙二¹ 亚段原始数据体及分频数据体归一化振幅频谱

Fig. 5 Normalized amplitude spectra of raw seismic volume and frequency-band volumes of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin

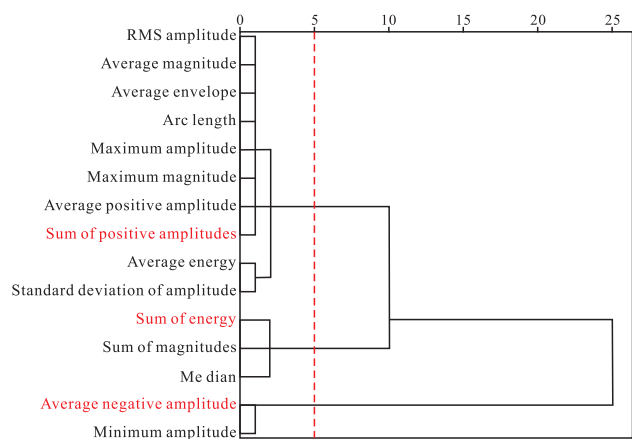


图 6 四川盆地秋林地区 8 砂组地震属性无监督聚类分析
Fig. 6 Unsupervised seismic-attribute clustering results of the Sand Group 8 in Qiulin area, Sichuan Basin

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, 2018a, 2018b)。本研究选取测井资料齐全的 23 口井, 在目的层解释层位控制下提取振幅类、相位类、能量类及频率类等 17 种数据完整的常用地震属性。分析各属性与砂体厚度相关性, 共得到 15 种与砂体厚度相关系数绝对值大于 0.5 的地震属性, 由于部分地震属性间共线性较强, 因而在地震多属性融合前利用无监督聚类技术将 15 种地震属性进一步划分为 3 类(图 6), 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最好的 3 个属性进行属性融合, 即平均负振幅 (Average negative amplitude)、总能量 (Sum of energy) 和正振幅总和 (Sum of positive amplitudes)。

在优选频段和属性的基础上, 对全区选取的测

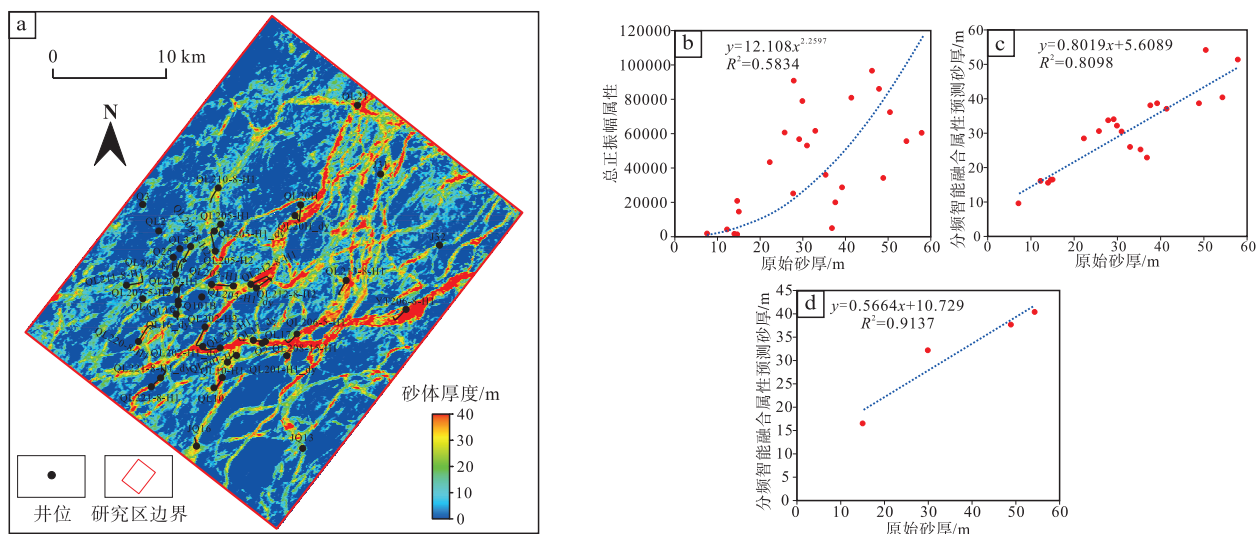
井资料齐全的 23 口井, 采用支持向量回归 (SVM) 的算法开展分频多属性智能融合。首先, 从优选出的 3 个分频数据体中分别提取了低频、中频、高频的平均负振幅 (Average negative amplitude)、总能量 (Sum of energy) 和正振幅总和 (Sum of positive amplitudes), 并计算出所有井点周围 (半径为 25 m) 属性的平均值作为井点处的地震属性, 将其设置为特征向量数据集; 将井上测井解释的砂体厚度设置为标签数据集; 其次, 选择支持向量回归算法模型 (SVR) 对特征属性与砂厚标签数据集进行训练学习, 建立测井解释砂厚与融合属性之间的非线性回归模型; 最后, 应用经过训练的回归模型得到能定量表示砂体厚度平面分布的融合属性图 (图 7-a)。

以 8 砂组为例, 相比于原始地震属性, 融合结果在砂体刻画方面更为清晰, 对于窄河道砂体的表征效果也更为出色, 分频融合的属性在河道砂体边界处呈现出较高的清晰度, 且砂体的连续性得到了显著增强 (图 7-a)。在砂体厚度预测方面, 融合结果与单井解释的契合度更高, 相较于原始属性中与砂厚相关性最高的正振幅总和属性 (其与砂厚的决定系数仅为 0.58), 分频融合的属性在河道砂体厚度预测精度上实现了显著提升。具体而言, 训练集的决定系数高达 0.81 (图 7-c), 测试集的决定系数达到了 0.91 (图 7-d), 训练集相对提升为

39.66%, 进一步印证了利用分频属性融合预测砂体的可靠性。

3.2 浅水三角洲平原构型单元类型与复合河道空间展布特征

基于岩心观察、测井响应及地震属性智能融合预测, 研究区沙二¹亚段主要发育主干分流河道、分支分流河道、溢岸和分流间湾 4 类沉积构型单元 (表 1)。其中, 主干分流河道为浅水三角洲平原的骨架性沉积单元, 主要发育于近物源端, 规模较大、下切能力强。其形成多对应相对湿润阶段, 充沛降雨增强了水动力条件和沉积物搬运能力, 从而形成厚度较大的河道砂体, 一般大于 15 m, 岩性以中砂岩、细砂岩为主, 常发育大型交错层理、块状构造和平行层理 (图 4-a, 4-b, 4-c), 在河道底部可见泥砾定向排列 (图 4-d); 纵向上多表现为正韵律或复合韵律, 测井响应以低伽马、中电阻和中声波为特征, 曲线形态多呈钟型、箱型或齿状箱型。分支分流河道在成因和规模上明显不同于主干分流河道, 多形成于相对干旱阶段, 受降雨减少和水动力减弱影响, 其规模较小、下切作用较弱, 反映了间歇性较强的水流作用 (宋璠等, 2024)。该类河道厚度一般为 10~15 m, 岩性以细砂岩为主, 发育小型槽状、板状交错层理及平行层理 (图 4-e), 整体以正韵律为主, 测井上表现为低



a—秋林地区 8 砂组智能融合属性平面分布图; b—正振幅总和属性与原始砂厚散点拟合关系; c—分频智能融合属性预测砂厚与原始砂厚拟合关系 (训练集); d—分频智能融合属性预测砂厚与原始砂厚拟合关系 (测试集)

图 7 四川盆地秋林地区 8 砂组智能融合属性平面分布

Fig. 7 Planar distribution of machine-learning integrated seismic attribute of the Sand Group 8 in Qiulin area, Sichuan Basin

表 1 四川盆地秋林地区沙二¹亚段构型单元识别图版

Table 1 Plates illustrating identification of architectural elements of the Sha-2₁ Submember of Qiulin area, Sichuan Basin

类型	主干分流河道	分支分流河道	溢岸	分流间湾
岩性特征	中砂岩、细砂岩为主	细砂岩为主	粉砂岩、粉砂质泥岩	粉砂质泥岩、泥岩为主
沉积构造	槽状、板状交错层理、平行层理及块状等	小型槽状、板状交错层理、平行层理等	小型砂纹层理、羽状交错层理等	水平层理、变形构造等
韵律特征	正韵律或复合韵律	正韵律	无明显韵律	无明显韵律
砂体厚度	大于 15 m	10~15 m	< 5 m	—
测井相	钟型、箱型、齿化箱型	钟型、箱型、齿化钟型	指状	锯齿状、曲线平直
典型图版	JINQIAN16井			
	JINQIAN16井			
	JINQIAN13井			
	JINQIAN13井			

伽马、中高电阻和中低声波特征，曲线多呈钟型、箱型或齿状钟型。研究区溢岸指分流河道在洪水期发生越岸时形成的一系列河道边缘沉积体，主要包括分流河道两侧的天然堤沉积，以及局部形成的决口扇或决口水道沉积（Miall, 1996；Bridge, 2006；吴胜和等, 2013），其厚度较小，通常小于 5 m，岩性以粉砂岩和粉砂质泥岩为主，常发育小型砂纹层理和羽状交错层理(图 4-f)，一般无明显韵律，局部可见反韵律。测井响应表现为中低伽马、中高电阻和低声波特征，曲线多呈指状，反映砂泥岩频繁互层。分流间湾则主要发育于未被河道砂体占据的低能沉积区，岩性以粉砂质泥岩和泥岩为主，受到沉积环境及气候的影响，泥岩颜色变化较快。其中泥岩可见生物扰动及植物碎屑(图 4-j, 4-k)，部分可见水平层理(图 4-i)，反映了浅水三角洲沉积气候及湖平面频繁变化的特征。其测井响应以高伽马、低电阻和高声波为特征，曲线形态整体较平缓，局部表现为齿化起伏。

在平面上，融合属性预测结果显示沙二¹亚段整体发育多期叠置、相互分叉—汇合的复合分流河道砂体，主干分流河道与分支分流河道在分流间湾背景中迂回展布，局部伴生溢岸砂体(图 7-a)。为避免分支河道尺度差异对统计结果的干扰，本研究仅选取沙二¹亚段各砂组中可稳定追踪的主干分流河道作为统计对象，对不同砂组间河道数量、几何尺度及砂体厚度进行了定量分析(表 2)。统计结

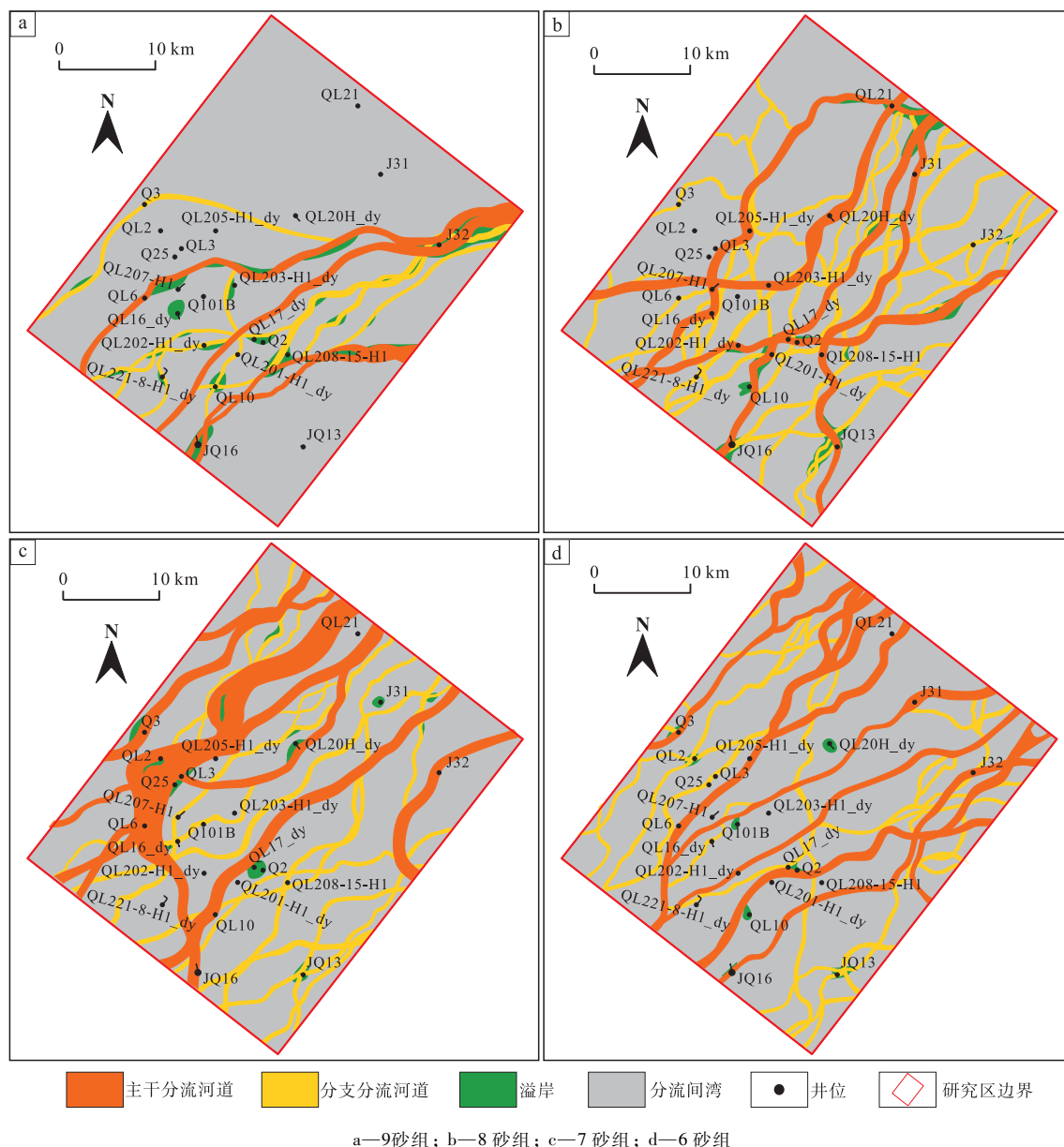
表 2 四川盆地秋林地区沙二¹亚段主干分流河道参数统计表

Table 2 Statistical parameters of main distributary channels of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin

砂组	河道数 /条	砂体厚度 /m			河道宽度 /m		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
9	4	19	6	9	1058	390	618
8	5	58	8	22	1426	615	881
7	8	27	7	20	2109	383	1148
6	11	19	10	14	990	555	762

果显示，9、8、7、6 砂组主干分流河道数分别为 4、5、8 和 11 条；河道平均宽度约为 618 m、881 m、1148 m 和 762 m，7 砂组河道规模最大，而 9 砂组与 6 砂组整体偏窄。砂体厚度方面，8 砂组平均厚度最大（22 m），9 砂组最小（9 m），指示不同阶段主干河道输砂能力与充填强度存在明显差异，反映沉积能量与古水动力条件的阶段性变化。

从砂组对比来看，9 砂组主干分流河道分布范围相对有限，河道数量较少、平均宽度较小（618 m），整体呈 NE-SW 方向展布，弯曲度较低，河道末端局部出现枝状散开形态，反映在相对弱水动力条件下，主干河道前积过程中发生的分叉及分流间湾充填作用(图 8-a)。8 砂组主干河道规模明显增大，平均宽度达 881 m，最大砂体厚度达 38 m，多期河道频繁迁移叠置，主干与分支分流河道交织发育，构成连续性良好的复合河道带，是区

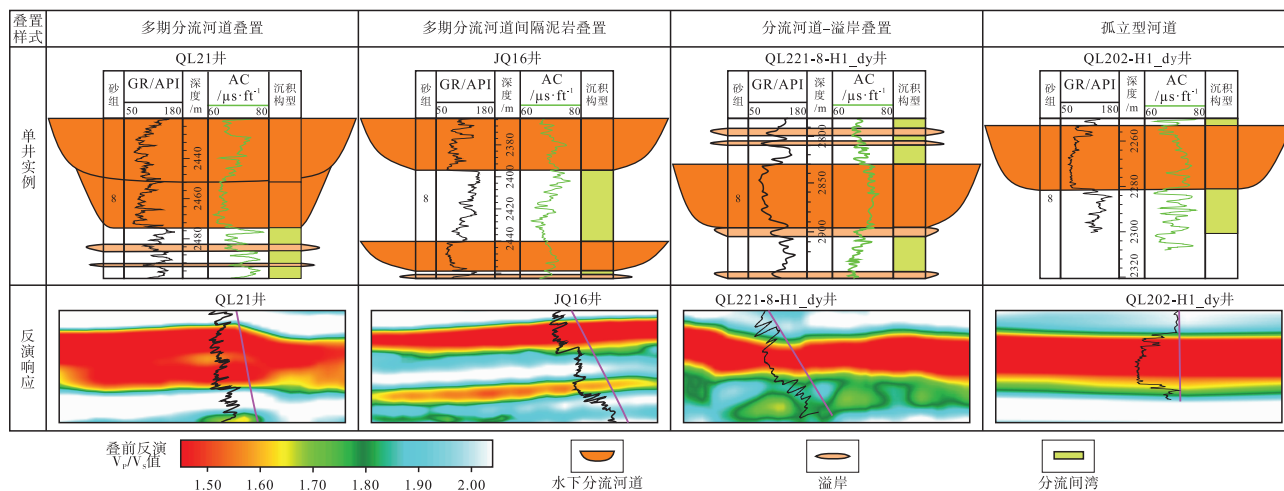
图 8 四川盆地秋林地区沙二₁亚段沉积构型平面展布Fig. 8 Planar distribution of depositional architectural elements of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin

内储集层平面连通性最好、开发潜力最大的层段(图 8-b)。7 砂组主干分流河道横向规模, 平均宽度达 1148 m, 最大宽度超过 2000 m, 河道弯曲度显著增大, 多组紧密相邻的弯曲河段指示强烈的侧向迁移及持续较高的水动力条件(图 8-c)。相比之下, 6 砂组主干河道整体规模减小, 平均宽度降至 762 m, 单条河道连续性较差, 多呈顺直—微弯曲展布, 与之配套的分支分流河道细窄而弯曲, 在平面上交织形成细长网状砂体条带, 反映该阶段水动力减弱、河道侵蚀与输砂能力受限(图 8-d)。

4 浅水三角洲平原单一河道构型表征

4.1 单一河道构型叠置样式

在单井尺度上, 通过测井曲线与地震反演响应的综合分析, 可以识别砂体构型并厘定其垂向叠置关系, 据此在研究区建立了 4 类单河道构型垂向叠置样式(图 9): (1) 多期分流河道叠置型, 由于河道发生迁移, 垂向上相邻两期河道沉积之间的时间间隔较短, 在周期性洪水事件驱动下, 新期河道砂体直接覆盖于早期废弃河道之上, 仅发育砂质沉

图 9 四川盆地秋林地区沙二¹亚段沉积构型垂向叠置样式Fig. 9 Vertical stacking styles of depositional architectural elements of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin

积, 界面测井响应突变或沉积韵律渐变为识别标志, 在反演上对应亮红色砂体色带的突然变色或截切; (2) 多期分流河道间隔泥岩叠置型, 两期河道之间夹薄层细粒沉积, 形成灰绿色、紫红色泥岩或粉砂质泥岩等泥质夹层, 自然伽马偏高、声波时差回返、振幅变小, 且在横向上连续性较差, 反演剖面上为夹在两条亮红色砂体色带之间的蓝色、白色色带; (3) 分流河道—溢岸叠置型, 为废弃河道顶部薄层、粒度较细的溢岸砂体与后期较厚、粒度较粗的河道砂体切叠, 上下砂体在厚度与粒度上反差明显, 测井上溢岸砂体多呈指状曲线, 而河道砂体表现为箱型、钟型或锯齿状, 在反演上表现为蓝色、白色色带被亮红色砂体色带的切割、色带对比鲜明; (4) 单期孤立型河道, 则表现为单期分流河道被厚层分流间湾泥岩所包裹, 河道上、下接触均为明显冲刷或尖灭界面, 伽马低、声波时差高的箱型或钟型砂体在高伽马、低声波时差泥岩背景中孤立出现, 反演剖面上则为一条亮红色带孤立与蓝色、白色背景之中, 界线清晰, 反映河道废弃后未再被后期河道复占, 是垂向上最简单、侧向展布受限的砂体类型。

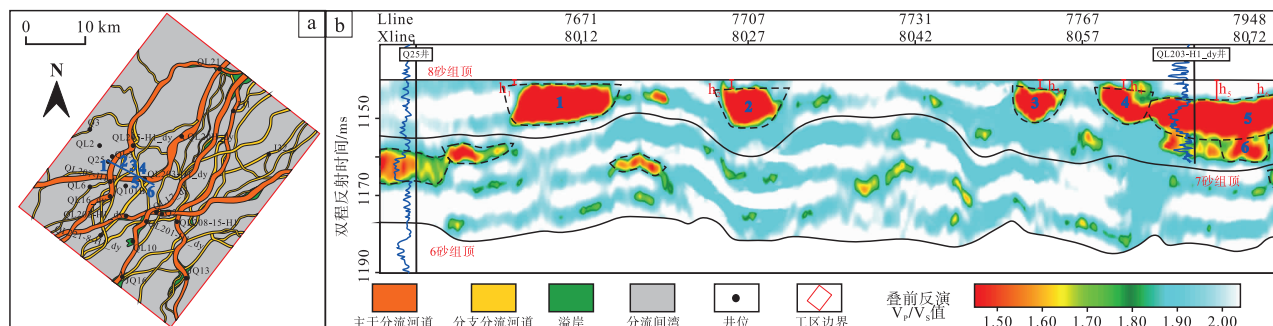
4.2 单一河道期次划分

受半干旱—半湿润气候影响, 三角洲平原广泛发育分流间湾, 河道频繁分叉与改道, 导致地层中砂泥岩互层发育且缺乏稳定的等时标志层。在井网稀疏条件下, 传统剖面对比难以实现砂体期次的准确划分。为克服这一限制, 本研究基于叠前纵横波

速比 V_p/V_s 高精度反演, 利用 V_p/V_s 对岩性与含泥量变化的敏感响应特征, 识别河道充填物的砂泥分布差异及垂向叠置关系。结合地震剖面上河道形态特征及 V_p/V_s 空间连续性变化, 实现单一河道期次的精细划分, 为该浅水三角洲沉积体系内部结构的定量表征提供了有效手段。以 8 砂组为例, 在等时地层格架约束下, 采用层顶拉平技术, 并以切物源方向的叠前 V_p/V_s 反演剖面为基础开展单期河道期次划分分析(图 10)。以剖面 AA' 为例, 将地震剖面拉平至 8 砂组顶面后, 测得各河道顶部至层拉平界面的垂向距离为: $(h_6 = 20.30 \text{ ms}) > (h_5 = 7.88 \text{ ms}) > (h_2 = 3.55 \text{ ms}) > (h_3 = 1.61 \text{ ms}) > (h_4 = 1.47 \text{ ms}) > (h_1 = 1.36 \text{ ms})$ 。由此推断河道沉积序列从早到晚依次为: 6 号、5 号、2 号、3 号、4 号、1 号河道(图 10)。其中, 5 号河道切叠于 6 号河道之上, V_p/V_s 低值带内部连续而底部局部出现高值条带, 反映了晚期河道充填能力减弱与泥质滞后沉积的特征, 进一步验证了期次划分的合理性。总体来看, 树枝状、网状砂体的展布并非单期河道分流的结果, 而是多期河道纵向叠加与横向迁移共同作用形成的复合叠加砂体。

5 半干旱—半湿润气候背景下浅水三角洲沉积构型模式

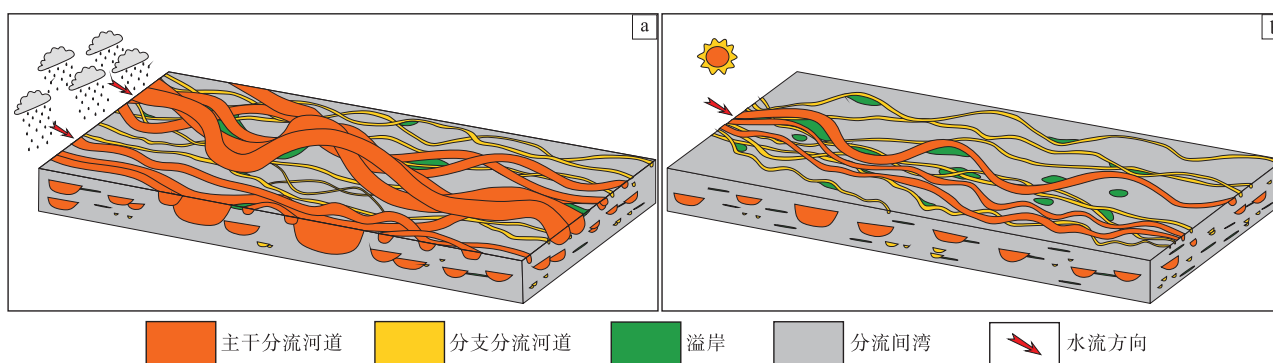
在半干旱—半湿润气候背景下, 沙二¹亚段的沉积相不仅受长期的区域供水格局制约, 更显著地



a—单一河道构型分布平面；b—叠前 V_p/V_s 反演剖面（剖面线位置见 10-a）

图 10 四川盆地秋林地区 8 砂组河道期次解剖

Fig. 10 Anatomical interpretation of channel stages of the Sand Group 8 in Qiulin area, Sichuan Basin (profile location is shown in Fig. 10-a)



a—短周期湿润阶段三角洲平原沉积构型模式；b—短周期干旱阶段三角洲平原沉积构型模式

图 11 四川盆地秋林地区沙二₁亚段构型沉积演化模式

Fig. 11 Model of depositional architectural evolution of the Sha-2₁ Submember in Qiulin area, Sichuan Basin

受到次一级短周期湿润—干旱气候摆动的控制。次一级短周期气候波动导致降水量、径流规模与湖泊水位发生周期性变化，使三角洲平原河道砂体的水动力强度、规模、侧向迁移频率以及河道间连通性呈现阶段性变化。在短周期湿润阶段，降雨集中、径流增加，主干分流河道具备更强的侵蚀能力和侧向迁移能力，易在平面上形成规模较大、连续性好的宽展型河道带，与此同时，洪峰过程可能激活原本处于低能状态的分支分流河道，导致局部干枯的分支分流河道复活，使三角洲平原呈现网状、多分汉的高连通河道体系（图 11-a）。这一阶段的沉积物供给充足，砂体在垂向上呈现多期切叠与复合叠置的特征，常形成由多次下切—充填循环构成的宽泛河道砂体复合体。相反，在短周期干旱阶段，降水减少、径流减弱，主河道规模明显缩小甚至部分废弃。此时分支分流河道只能在暴雨等短时脉冲事件中被间歇性激活，其活动频率与持续时间均显著

下降，导致砂体分布呈现出孤立化趋势（图 11-b）。随着低能背景下泥质沉积占据主导，大面积的分流间湾泥岩和粉砂质泥岩快速堆积在河道之间，形成区域性的隔夹层，使砂体在平面上相互分隔、连通性降低，构成干早期典型的窄河道间隔叠加厚层分流间湾泥岩的韵律结构。

随着短周期湿润与干旱阶段的反复交替，多期气候波动促使河道在分叉、改道与复活之间持续转换，河道体系在“强侵蚀、厚砂叠置”的高能阶段与“弱能量、孤立薄砂沉积”的低能阶段之间反复摆动，最终构建出主干河道稳定、分支分流河道间歇发育且平面结构随气候节律变化而显著差异的三角洲平原沉积格局。垂向上由早期主干河道多期下切、侧向切叠形成的多期叠置型厚层砂体向后期分支分流河道多期垂向叠置、泥质分流间湾频繁插入的孤立型河道演变。该沉积模式不仅充分体现了气候波动对河道迁移节律、砂体叠置方式及储集

层连通性所施加的关键控制作用,而且在工程开发上也具有直接指示意义。湿润阶段形成的骨架型复合河道砂体通常对应于厚层、高连通的有利储集层区,可支撑较大井距与稳产开发,实现多口井共用同一连通砂体,提高单井控制储量与稳产能力。而干旱阶段形成的孤立薄砂体则易导致储集层动用不足和开发效益差,需要依托精细构型刻画优化井网部署和体积压裂改造,最大限度避开分流间湾泥质隔夹层、提高有效砂体钻遇率与连通砂体动用程度。

6 结论

1) 综合地球化学指标、碎屑组成及泥岩颜色组合特征表明,四川盆地天府气田秋林地区沙二¹亚段形成于半湿润—半干旱过渡气候背景下的淡水—微咸水浅湖环境,整体以氧化—弱氧化条件为主,主要发育浅水三角洲平原沉积体系,三角洲平原分流河道砂体是该亚段最主要的储集砂体类型。

2) 分频多属性智能融合结合叠前 V_p/V_s 反演技术,显著提升了大井距条件下砂体定量预测与沉积构型识别精度。研究识别出 4 类典型垂向叠置样式,揭示四川盆地天府气田秋林地区沙二¹亚段砂体由多期河道叠置与侧向迁移共同作用形成的复合分流河道体系本质,而非单一期次分流的简单沉积结果。该方法体系在沙溪庙组的应用表明,其可有效提高沉积构型识别精度与储集层预测可靠性。

3) 四川盆地天府气田秋林地区沙二¹亚段沉积演化受半湿润—半干旱气候背景及其次一级湿润—干旱短周期波动的共同控制,河道水动力条件、规模及连通性呈现明显的节律性变化。湿润阶段径流增强、侵蚀能力提高,主干分流河道频繁侧向迁移并多期叠置,形成连续性好、宽展型的复合河道砂体,可作为优选开发区,适合布置较大井距并实现稳产。而干旱阶段供水衰减、分支分流河道活动减弱,砂体规模缩小并趋于孤立,分流间湾泥岩隔夹层广泛发育,需通过精细构型刻画、井网优化及体积压裂等手段提高有效动用程度。

参考文献 (References)

陈伟伟,牟传龙,王启宇,姚升阳,任鹏. 2024. 四川盆地西北部中侏罗统沙溪庙组物源: 碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据. 沉积与特

提斯地质,44(3): 613-629. [Chen W W, Mou C L, Wang Q Y, Yao S Y, Ren P. 2024. Study on U-Pb age and provenance of detrital zircons from sandstones of the Shaximiao Formation, northwest-ern Sichuan Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(3): 613-629]

陈晓慧,曾建理,张廷山,祝海华,张婧璇,李世鑫,李耀羽. 2019. 川东北地区中侏罗世新田沟期古气候波动的地球化学响应. 地质学报,93(12): 3223-3238. [Chen X H, Zeng J L, Zhang T S, Zhu H H, Zhang J X, Li S X, Li Y Y. 2019. Geochemical response to paleoclimate fluctuation during Xintiangou period (Middle Jurassic), northeastern Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3223-3238]

冯文杰,吴胜和,张可,赵文凯,贾凤娟. 2017. 曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨: 沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示. 地质学报,91(9): 2047-2064. [Feng W J, Wu S H, Zhang K, Zhao W K, Jia F J. 2017. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: insights from numerical simulation and modern deposition. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2047-2064]

冯允献,唐勇,秦志军,杨森,周圆全,阿布力米提·依明,王维,白雨. 2025. 准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡带风城组沉积特征及古环境演化. 石油学报,46(7): 1308-1326. [Feng Y X, Tang Y, Qin Z J, Yang S, Zhou Y Q, Ablimit Y, Wang W, Bai Y. 2025. Sedimentary characteristics and palaeoenvironmental evolution of Fengcheng Formation in the northern slope zone of Mahu sag, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(7): 1308-1326]

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. Study on the selection of wavelet functions in seismic data processing. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 39(3): 392-400]

何登发,李德生,张国伟,赵路子,樊春,鲁人齐,文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学,46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China. *Chinese Journal of Geology*, 46(3): 589-606]

胡鑫,朱筱敏,金绪铃,黄成,周越,程长领,修金磊,任新成. 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. [Hu X, Zhu X M, Jin X L, Huang C, Zhou Y, Cheng C L, Xiu J L, Ren X C. 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]

李东伟,龚承林,王军,李一超,李虹,戈道瑶. 2022. 河流相砂体识别预测及古气候响应: 以渤中坳陷石南地区明下段为例. 古地理学报,24(4): 742-758. [Li D W, Gong C L, Wang J, Li Y C, Li H, Ge D Y. 2022. Recognition and prediction of fluvial sand-bodies and their responses to paleoclimatic fluctuations: a case study in the Lower Member of Minghuazhen Formation in southern Shijiutuo uplift, Bozhong Depression. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(4): 742-758]

- 李洪辉,李伟,岳大力,徐振华,谭玲,吴光圳,王武荣. 2025. 流量变化对浅水三角洲沉积特征影响. 地球科学,50(6): 2428-2443. [Li H H, Li W, Yue D L, Xu Z H, Tan L, Wu G Z, Wang W R. 2025. Impact of discharge variability on sedimentary characteristics in shallow-water deltas. *Earth Science*, 50(6): 2428-2443]
- 刘浩,蒋裕强,朱讯,周亚东,杨广广,潘辉,王占磊,李杪. 2025. 纵横波速度比反演在地震沉积学中的应用: 以四川盆地中台山—八角场地区侏罗系沙溪庙组沙二段为例. 石油实验地质,47(6): 1418-1430. [Liu H, Jiang Y Q, Zhu X, Zhou Y D, Yang G G, Pan H, Wang Z L, Li M. 2025. Application of P-wave and S-wave velocity ratio inversion in seismic sedimentology: a case study from the Second Member of Jurassic Shaximiao Formation, Zhongtaishan-Bajiaochang area, Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 47(6): 1418-1430]
- 刘磊,李伟,杜玉山,岳大力,张雪婷,侯加根. 2024. 基于 Stacking 集成学习的分类地震属性融合储层预测方法. 石油地球物理勘探,59(1): 12-22. [Liu L, Li W, Du Y S, Yue D L, Zhang X T, Hou J G. 2024. Reservoir prediction method of fusing frequency-decomposed seismic attributes using stacking ensemble learning. *Oil Geophysical Prospecting*, 59(1): 12-22]
- 宋璠,孔庆圆,张学才,曹海防,焦国华,杨悦. 2024. 干旱型浅水三角洲沉积特征及沉积模式: 以准噶尔盆地腹部永进地区侏罗系齐古组为例. 石油与天然气地质,45(5): 1275-1288. [Song F, Kong Q Y, Zhang X C, Cao H F, Jiao G H, Yang Y. 2024. Sedimentary characteristics and models of shallow-water deltas in arid settings: a case study of the Jurassic Qigu Formation in the Yongjin area within the hinterland of the Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(5): 1275-1288]
- 万晓龙,吴胜和,周新平,徐振华,付金华,王梓沅,麻书玮,邬德刚,李桢,刘明成. 2025. 夹层型页岩油三维甜点分布预测方法研究: 以鄂尔多斯盆地庆城油田 B15 区块延长组为例. 地学前缘,32(5): 417-431. [Wan X L, Wu S H, Zhou X P, Xu Z H, Fu J H, Wang Z F, Ma S W, Wu D G, Li Z, Liu M C. 2025. Research on the prediction method of 3D reservoir sweet-spot distribution of shale oil in shale-intercalated layers: a case from the Yanchang Formation of B15 Block, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 32(5): 417-431]
- 王武荣,刘显阳,岳大力,万晓龙,刘瑞璟,李士祥,卢浩,刘建,吴光圳,吴胜和. 2025. 拗陷湖盆湖底扇致密砂岩储层质量差异分布: 以鄂尔多斯盆地合水地区延长组长 6 油组为例. 地学前缘,32(5): 190-204. [Wang W R, Liu X Y, Yue D L, Wan X L, Liu R J, Li S X, Lu H, Liu J, Wu G Z, Wu S H. 2025. Distribution of reservoir-quality differences in tight sandstone reservoirs of sub-lacustrine fans in depression lacustrine basins: a case study of the Chang 6 oil-bearing interval of the Yanchang Formation in Heshui area, Ordos Basin, China. *Earth Science Frontiers*, 32(5): 190-204]
- 王熠哲,吴朝东,马健,房亚男,许酌,周彦希. 2019. 准噶尔盆地白垩纪—新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化. 古地理学报,21(3): 451-468. [Wang Y Z, Wu C D, Ma J, Fang Y N, Xu Z, Zhou Y X. 2019. Strata color rhythm of the Cretaceous-Neogene and evolution of palaeoenvironment and palaeoclimate in Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(3): 451-468]
- 文龙,罗冰,王小娟,谢继容,冉崎,潘珂,金值民,关旭. 2025. 四川盆地陆相致密油气勘探新领域及资源潜力. 石油学报,46(1): 77-88. [Wen L, Luo B, Wang X J, Xie J R, Ran Q, Pan K, Jin Z M, Guan X. 2025. New exploration fields and resource potential of continental tight oil and gas in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(1): 77-88]
- 吴胜和,翟瑞,李宇鹏. 2012. 地下储层构型表征: 现状与展望. 地学前缘,19(2): 15-23. [Wu S H, Zhai R, Li Y P. 2012. Subsurface reservoir architecture characterization: current status and prospects. *Earth Science Frontiers*, 19(2): 15-23]
- 吴胜和,纪友亮,岳大力,印森林. 2013. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨. 高校地质学报,19(1): 12-22. [Wu S H, Ji Y L, Yue D L, Yin S L. 2013. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 12-22]
- 杨雨,文龙,周刚,战薇芸,李海涛,宋泽章,张晶,陶佳丽,田兴旺,苑九涛,金世贵,史国梁. 2023. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报,44(12): 2045-2069. [Yang Y, Wen L, Zhou G, Zhan W Y, Li H T, Song Z Z, Zhang J, Tao J L, Tian X W, Yuan J T, Jin S G, Shi G L. 2023. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2045-2069]
- 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]
- 杨征,吴胜和,段冬平,徐振华,熊绮聪,张玉飞. 2024. 西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型. 古地理学报,26(3): 525-544. [Yang Z, Wu S H, Duan D P, Xu Z H, Xiong Q C, Zhang Y F. 2024. Architecture characteristics of distributary channels in shallow-water delta plain of the Huagang Formation in Xihu sag, East China Sea. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(3): 525-544]
- 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. Palaeoenvironment 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,王军,王武荣,李健. 2018a. 基于分频融合地震属性的曲流带预测与点坝识别: 以渤海湾盆地埕岛油田馆陶组为例. 古地理学报,20(6): 941-950. [Yue D L, Li W, Wang J, Wang W

- R, Li J. 2018a. Prediction of meandering belt and point-bar recognition based on spectral-decomposed and fused seismic attributes: a case study of the Guantao Formation, Chengdao Oilfield, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(6): 941–950]
- 岳大力, 胡光义, 李伟, 范廷恩, 胡嘉靖, 乔慧丽. 2018b. 井震结合的曲流河储层构型表征方法及其应用: 以秦皇岛 32-6 油田为例. *中国海上油气*, 30(1): 99–109. [Yue D L, Hu G Y, Li W, Fan T E, Hu J J, Qiao H L. 2018b. Meandering fluvial reservoir architecture characterization method and application by combining well logging and seismic data: a case study of QHD32-6 Oilfield. *China Offshore Oil and Gas*, 30(1): 99–109]
- 岳大力, 李伟, 王武荣, 孙盼科, 吴胜和, 徐振华, 刘磊, 邹德刚, 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]
- 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]
- Bridge J S. 2006. Fluvial facies models: recent developments. In: Posamentier H W, Walker R G (eds). *Facies Models Revisited*. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication, 84, 85–170.
- Buatois L A, Mángano M G. 2011. The déjà vu effect: recurrent patterns in exploitation of ecospace, establishment of the mixed layer, and distribution of matgrounds. *Geology*, 39(12): 1163–1166.
- Hirst D M. 1962. The geochemistry of modern sediments from the Gulf of Paria—II. The location and distribution of trace elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26(11): 1147–1187.
- Lemons D R, Chan M A. 1999. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho. *AAPG Bulletin*, 83(4): 635–665.
- 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.
- Liu S G, Yang Y, Deng B, Zhong Y, Wen L, Sun W, Li Z W, Jansa L, Li J X, Song J M, Zhang X H, Peng H L. 2021. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China. *Earth-Science Reviews*, 213: 103470.
- Ma D, Zhang Z J, Zhou C M, Cheng D W, Hong H T, Meng H, Yu X H, Peng Z X. 2023. Element geochemical characteristics and geological significance of mudstones from the Middle Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin, southwest China. *ACS Omega*, 8(33): 29979–30000.
- McArdle N J, Ackers M A. 2012. Understanding seismic thin-bed responses using frequency decomposition and RGB blending. *First Break*, 30(12): 59–66.
- Miall A D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1–582.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Prasajo O A, Hoey T B, Owen A, Williams R D. 2025. Influence of alluvial slope on avulsion in river deltas. *Earth Surface Dynamics*, 13(3): 349–363.
- Shi S Y, Yang W, Zhou G, Jiang H, Meng H, Wu S J, Zhang Y, Lu W H, Bai Z Z. 2024. Impact of Tethyan domain evolution on the formation of petroleum systems in the Sichuan Super Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 1183–1201.
- Tan X F, Jiang W, Luo L, Gluyas J, Song L K, Liu J P, Qu X J, Wang J, Gao X B, Zhang W, Wang Q, Chen L. 2024. Variations of sedimentary environment under cyclical aridification and impacts on eodiagenesis of tight sandstones from the Late Middle Jurassic Shaximiao Formation in Central Sichuan Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 161: 106699.
- Xu Z H, Wu S H, Yue D L, Zhao J S, Deng M, Liu Z, Zhang J J, Liu M C, Feng W J. 2021. Effects of upstream conditions on digitate shallow-water delta morphology. *Marine and Petroleum Geology*, 134: 105333.
- Yu W, Tian J C, Wang F, Liang Q S, Yang T, Kneller B, Liang X W. 2022. Sedimentary environment and organic matter enrichment of black mudstones from the Upper Triassic Chang-7 Member in the Ordos Basin, northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 224: 105009.

(责任编辑 王绍华)