

引用格式:张祥辉,张昌民,杨威,等. 2026. 分支河流体系沉积特征与沉积模式——以川西北地区侏罗系沙溪庙组为例[J]. 沉积学报, 44(5): 1636-1651.

ZHANG XiangHui, ZHANG ChangMin, YANG Wei, et al. 2026. Sedimentary Characteristics and Depositional Models of Distributive Fluvial Systems: A case study from the Jurassic Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(5): 1636-1651.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.049

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.049

分支河流体系沉积特征与沉积模式 ——以川西北地区侏罗系沙溪庙组为例

张祥辉¹, 张昌民¹, 杨威², 朱锐¹, 付文俊³

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570100

摘要 【目的】为突破沉积体系准确预测难而形成的油气勘探成本高的瓶颈。【方法】基于分支河流体系理论,以四川盆地川西北地区侏罗系沙溪庙组为对象,综合野外露头、岩心以及测—录井等资料,运用地面和地下分析相结合、定量和定性分析相结合的研究方法,实现对川西北地区沙溪庙组沉积体系展布的定量表征。【结果】(1)川西北地区沙溪庙组发育分支河流体系、三角洲体系和湖相体系三种沉积体系类型,分支河流体系主要包括3种亚相、6种微相类型,三角洲体系主要包括2种亚相、4种微相类型,湖相体系主要包括滨浅湖滩坝沉积;(2)分支河流体系近端亚相砂地比介于50%~70%,砂体呈厚层相互叠置关系;中部亚相砂地比介于30%~50%,砂体呈厚层连片展布;远端亚相砂地比介于20%~30%,砂体呈孤立状;(3)研究区主要受河流作用的影响,沙一段表现为分支河流体系终止于范围较大的湖相沉积,沙二段表现为分支河流体系沉积终止于一些小的暂时性湖泊;(4)与现代沉积相类比,建立沉积体系定量预测模型,除在三角洲体系发育大片优质储集层外,分支河流体系中部和远端相带同样可以形成连片的河道砂体储集层。【结论】研究结果对于精细刻画不同微相砂体的发育规模、叠置样式具有重要的指示意义,同时也为类似河流沉积背景下沉积体系展布的研究提供参考依据。

关键词 四川盆地;沙溪庙组;分支河流体系;沉积模式;定量刻画;油气勘探

第一作者 张祥辉,男,1993年出生,博士,硕士生导师,沉积学、储层地质学, E-mail: zxhedu@126.com

通信作者 张昌民,男,教授,沉积学、储层与油气田勘探开发地质学, E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn

中图分类号: P618.13 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0550(2026)05-1636-16

0 引言

随着油气勘探开发工作的不断深入,对地质理论和技术创新提出了更高的要求(赵文智, 2019; 贾承造, 2020; 匡立春等, 2021)。分支河流体系(DFS)是在2010年前后由英美等国的沉积地质学者提出的陆相盆地沉积体系新概念(Weissmann *et al.*, 2010; Hartley *et al.*, 2010),其基本特征表现为“河流从某一顶点开始进入盆地并呈放射状展布”。分支河流体系理论的提出是地理信息技术不断发展的结果,是沉积学、地貌学以及计算机科学交叉融合产生

的新领域,近十年来受到越来越多的学者关注(张昌民等, 2017; 胡赛寅等, 2023; 夏雨等, 2025; Batezelli *et al.*, 2025; de Lima *et al.*, 2025),目前已被广泛用于现代沉积(张祥辉等, 2021; 王令辉等, 2025)、露头分析(Phillips *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2025)、地下地质对比(何苗等, 2021),甚至行星沉积学(Adeli *et al.*, 2016; Cartwright and Burr, 2017)等研究领域。随着对分支河流体系的研究不断深入,相关理论和方法日益趋于系统化(张昌民等, 2023; 李赛云等, 2026),该理论也显示出一定的科学属性和应用价值(张金亮,

收稿日期: 2024-10-25; 修回日期: 2025-08-11; 录用日期: 2025-10-20; 网络出版日期: 2025-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130813, 42502097); 中国石油科技创新基金项目(2024DQ02-0502); 湖北省自然科学基金项目(2024AFB344)

2019;张昌民等,2020;张元福等,2020;高志勇等,2023)。然而,目前关于分支河流体系的沉积特征和沉积模式的研究仍然主要集中在卫星影像和现代沉积环境的观察上(Zhang *et al.*, 2023; 孙家惠等, 2024),缺乏将这些研究与地下地质特征结合的实例分析。四川盆地侏罗系沙溪庙组属于中生代红层,是典型的热带荒漠季节性河流沉积(肖富森等,2020),为分支河流体系研究提供了良好的应用案例。

早期在四川盆地陆相地层油气勘探中,沙溪庙组并非重点层位,研究程度总体较低,仅在川西南平落坝、川东北五宝场、蜀南大塔场、川西中江等地有零星发现(韦腾强等,2021)。经过近几年对沙溪庙组系统的地质勘探,目前已在川西北地区秋林、金华、八角场、盐亭等地获得重大天然气勘探突破(汪泽成等,2004;梁狄刚等,2011)。沙溪庙组天然气具有埋藏浅、开发成本低、周期短、见效快等优点(肖富森等,2019),是低成本高效益开发的重要实现领域之一(贾承造等,2018;杨智等,2021),同时也受到了广泛关注(陈贤良等,2019;段文燊,2021)。前人对沙溪庙组沉积体系的认识主要有三种类型:(1)冲积扇—河流—三角洲—湖泊(刘君龙等,2017;于海跃等,2019);(2)曲流河(辫状河)—三角洲—湖泊(谭万仓等,2008;李国新等,2012;张小菊等,2024);(3)三角洲—湖泊(杨雪飞等,2014)。由于川西北地区面积大、范围广,目前的研究集中在各开发区(段永明等,2020;付蕾等,2022),缺少关于盆地范围内沉积体系展布及砂体刻画的系统研究。分支河流体系的提出是基于卫星遥感图像对地表冲积河流体系的统计,具有立足点高、范围大等特点(张昌民等,2017,2020)。在分支河流体系理论的指导下不再局限于一条剖面、一处露头或一种河道类型的解剖和描述,而是结合从一个观测点获得的地质信息,实现对沉积体系展布范围的精确预测(张昌民等,2020)。

结合川西北地区侏罗系沙溪庙组沉积背景研究,本文以分支河流体系观点对沙溪庙组进行解释,通过与现代沉积类比,进一步建立分支河流体系定量刻画依据。研究将分支河流体系与油气勘探开发实际应用相结合,在大尺度范围内解释不同类型河道在平面上的相互联系,研究结果对于精细刻画不同微相砂体的发育规模、叠置样式具有重要的指示意义,同时也为类似河流沉积背景下沉积体系展布的研究提供参考依据。

1 区域背景

四川盆地为中上扬子地块之上的叠合盆地,是中国最古老的含油气盆地之一(何登发等,2011)。自三叠纪以来,先后受到印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动的影响,形成现今的构造格局(图1a)。在晚三叠纪末,受印支运动的影响,四川盆地由晚三叠世的湿热气候演变为侏罗纪的炎热、干旱气候,进而形成了侏罗系的红层沉积(肖富森等,2020)。本次研究的区域位于川西北地区,被龙门山褶皱带、大巴山褶皱带和米仓山隆起带所环绕,总体具有西北高、东南低的地势特征(曹甲新等,2025)(图1c)。

川西北地区在侏罗系先后接受了下侏罗统自流井组,中侏罗统凉高山组、沙溪庙组,上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组的沉积(图1b)。目的层位沙溪庙组是一套巨厚红色地层,以暗紫红色泥岩为主,夹中厚层块状砂岩(肖富森等,2019)。该套地层以最大湖泛面沉积的一套数米厚“黑色叶肢介页岩”为界可划分为沙一、沙二两段,沙一段厚度为300~500 m,沙二段厚度变化大,一般为1 000~1 700 m。其中在沙一段地层沉积时期,研究区内湖水已经退出,盆地北部以河流相为主,岩性主要为紫红色泥岩夹浅灰色砂岩。沙一段沉积末期盆地经历了一个短暂的浅湖亚相沉积环境,很快又恢复了河流相沉积。沙二段沉积时期盆地主要为陆上强氧化沉积环境,沉积了大套厚层的河流相地层,直至沙溪庙组沉积结束(肖富森等,2020),地层岩性特征为大套的紫红色泛滥平原泥岩夹灰色、灰绿色河道砂岩。本次研究以沙溪庙组为例,结合沙溪庙组丰富的河流沉积背景,为开展分支河流体系的地下地质研究提供支撑。

2 沉积体系类型及典型相划分

在四川盆地川西北地区,侏罗系沙溪庙组的沉积体系研究显示出其复杂多样的沉积特征。通过岩心观察、野外露头及测井数据的综合分析,可以将沙溪庙组的沉积体系主要划分为分支河流体系、三角洲体系以及湖泊体系三种类型(图2)。结合各沉积体系水动力条件特征,将以河流作用为主的分支河流体系划分为近端、中部、远端三种相带类型(图2),其中近端主要发育于沉积体系的源区附近,沉积能量最高,以粗粒砂体为主,砂层厚大、连续性强,岩性以中—粗砂岩为主,常见厚层叠置的河道充填;中部

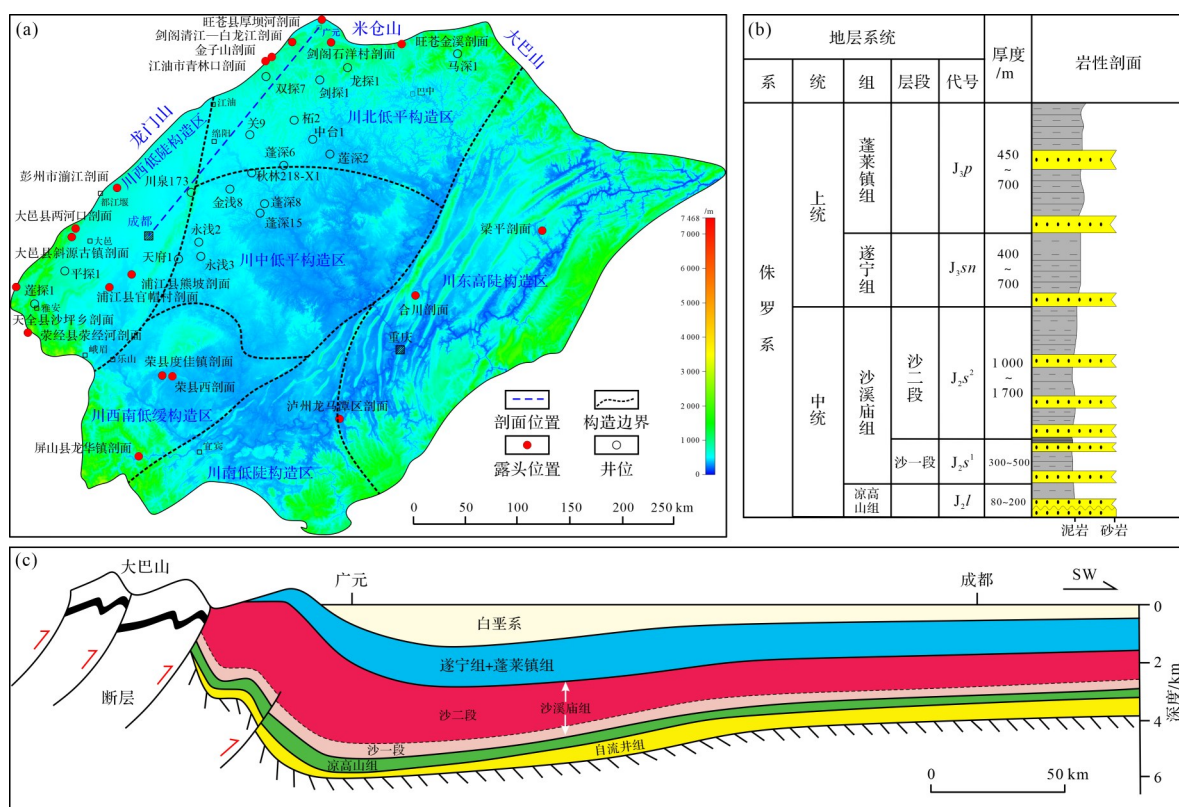


图1 研究区位置及地质特征

(a)研究区位置;(b)侏罗纪地层沉积特征;(c)盆地构造特征

Fig. 1 Location of the study area and geological background

(a) location of the study area; (b) sedimentary characteristics of Jurassic strata; (c) tectonic features of the basin

相带沉积能量有所减弱,砂体厚度较近端减薄,泥质组分相对增加,砂体展布呈透镜状或条带状;远端相带沉积能量最低,砂体分布零散,常与泥质互层,岩性以薄层细砂岩、粉砂岩和泥岩为主,砂体规模小,呈透镜状。将以河流作用和湖泊作用共同控制的三角洲体系划分为三角洲内前缘、三角洲外前缘两种相带类型,其中三角洲内前缘主要发育于河流入湖口附近,仍处于河流主导作用的影响范围,该相带沉积能量相对较高,砂体厚度较大,局部夹少量粉砂岩,是河流沉积体系向湖泊沉积体系过渡的重要区域;三角洲外前缘发育于内前缘的外侧,沉积水深加大,河流输入作用显著减弱,湖泊作用增强,该相带沉积能量低,岩性以粉砂岩、泥岩为主,砂体规模较小、分布零散。另外,将以湖泊作用为主的滨浅湖—半深湖体系进一步细分为滩坝沉积(图2)。

2.1 分支河流体系沉积特征

分支河流体系是河流从出山口到汇入湖泊之间的区域,主要分布在研究区的大巴山和龙门山山前范围。通过比较野外露头砂体规模和测井曲线特

征,在近端河流沉积剖面主要发育大型板状交错层理和槽状交错层理,底部具有明显的冲刷沟槽,并含有砾石(图3a)。剖面整体以砂质为主,泥质含量较少,自下而上表现为多个下粗上细的正韵律。河道砂体在横切面上,由许多顶平底凸的透镜状砂体叠置形成复合河道砂体(图3a),表现为明显辫状河道沉积(图4a)。测井曲线形态呈现为明显的箱形(图2)。

中部剖面沉积特征相比于近端,层理规模相对较小,沉积物粒度也更细,除具有典型的河流二元结构外,中部剖面泥质含量明显增加(图3b)。砂体呈条带状,在厚层砂体顶部,有许多薄的砂泥互层,根据其沉积构造特征,认为中部主要表现为典型的曲流河沉积特征(图4b)。测井曲线上河道砂体表现为明显的钟形,溢岸砂则表现为明显的指形(图2)。远端剖面沉积特征以一些小型槽状交错层理、沙纹层理为主(图4c)。由于地势平坦,远端河道频繁改道,在剖面上可观察到明显的河道迁移。沉积剖面整体以泥质沉积为主,夹一些薄的透镜状砂岩(图3c)。

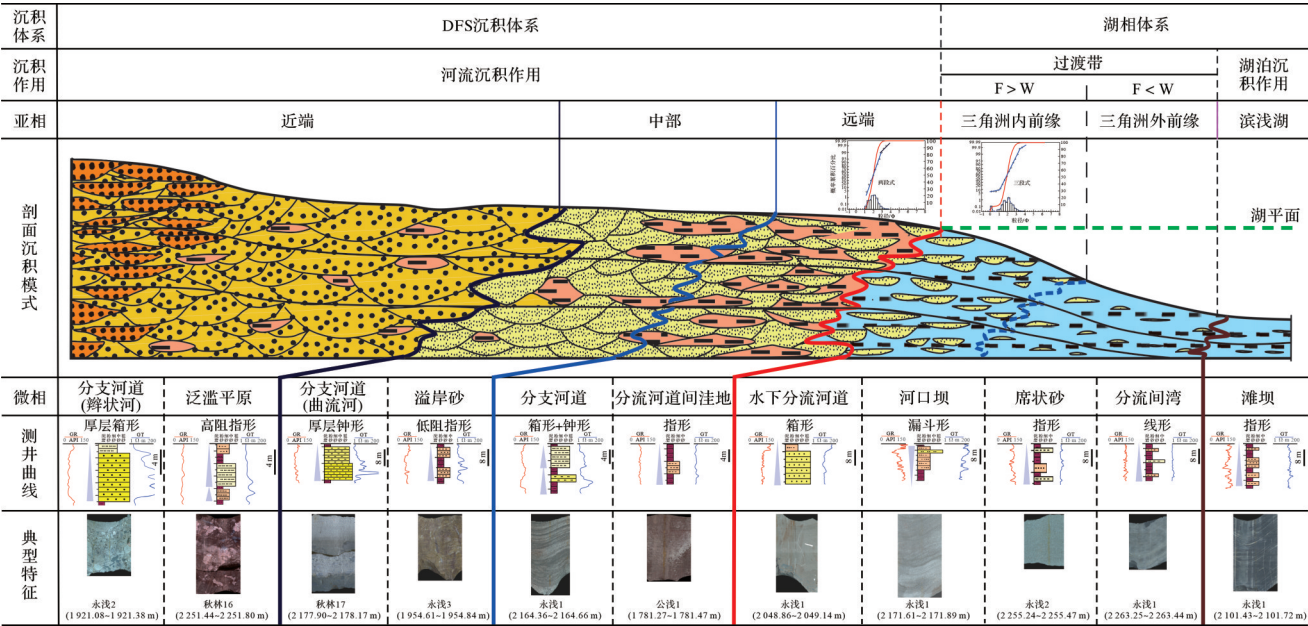


图2 川西北地区沙溪庙组沉积体系划分及典型沉积相识别标志

Fig. 2 Sedimentary system division of the Shaximiao Formation and identification marks of typical sedimentary facies in the northwestern Sichuan Basin

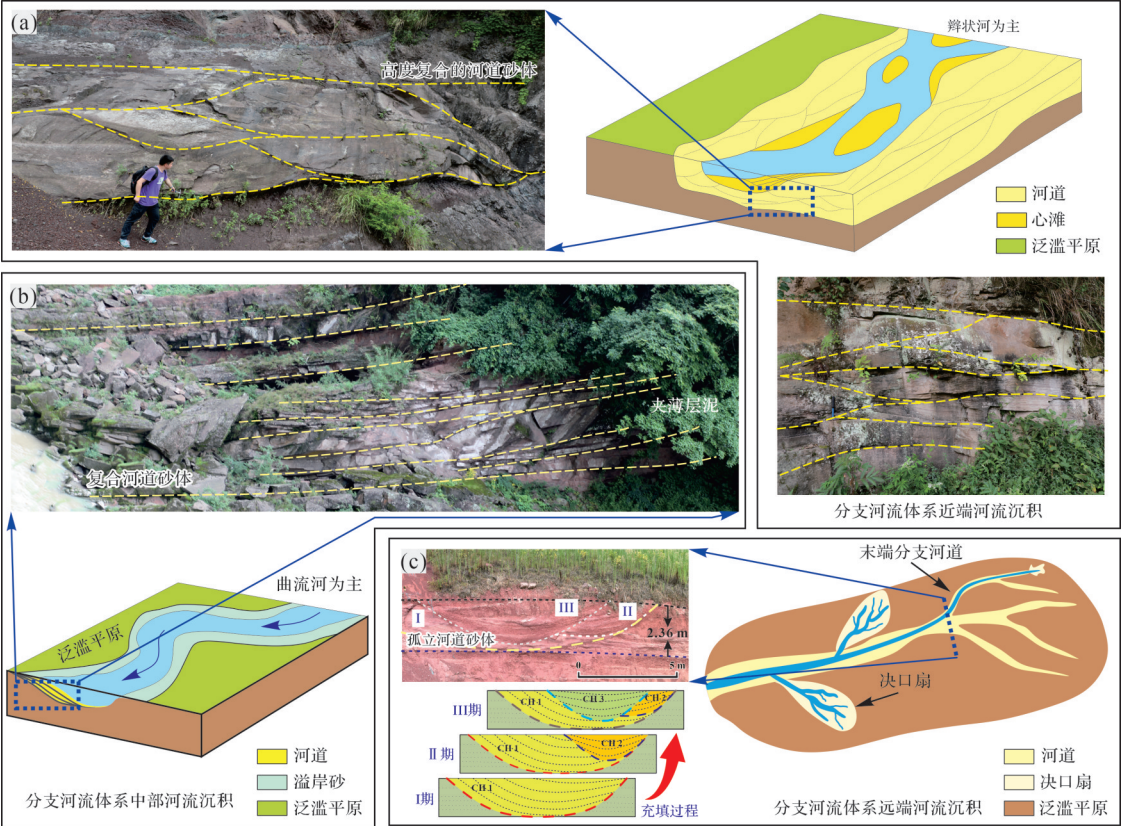


图3 分支河流体系各相带典型特征

(a) 分支河流体系近端沉积特征, 旺苍县厚坝河剖面; (b) 分支河流体系中部沉积特征, 大邑县两河口剖面; (c) 分支河流体系远端沉积特征, 蒲江县熊坡剖面

Fig. 3 Typical characteristics of each facies in the distributive fluvial system (DFS)

(a) proximal sedimentary characteristics of the DFS, Houba River section in Wangcang county; (b) middle sedimentary characteristics of the DFS, Lianghekou section in Dayi county; (c) distal sedimentary characteristics of the DFS, Xiongpo section in Pujiang county

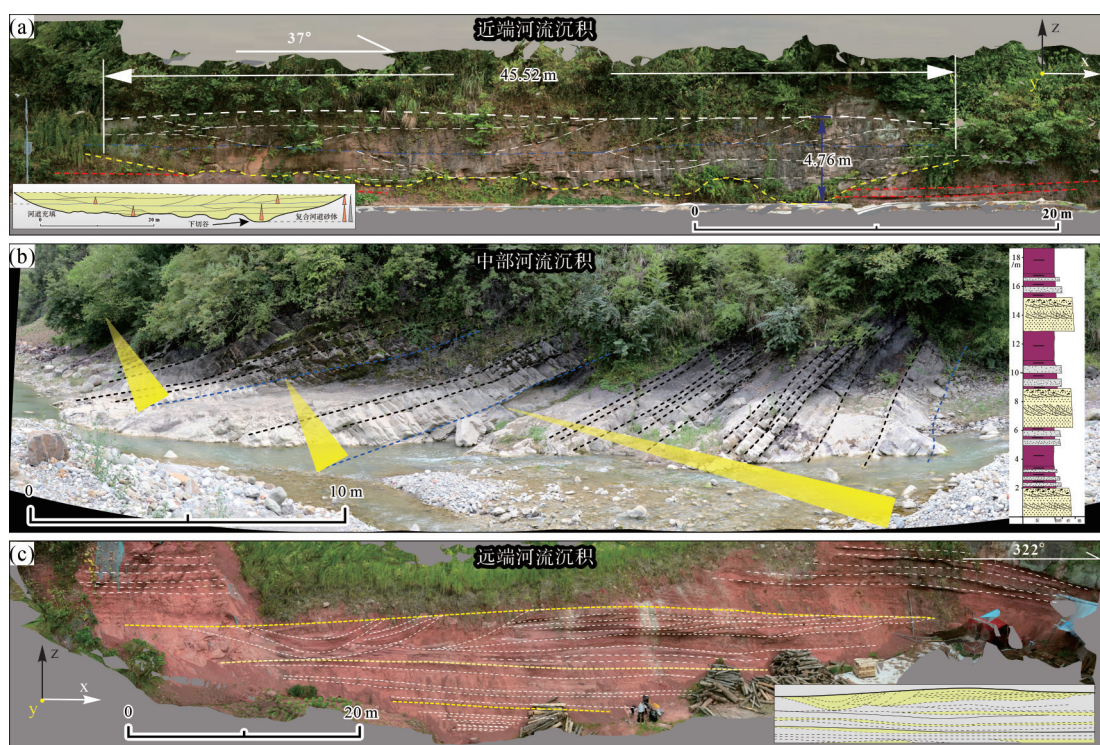


图4 川西北地区沙溪庙组分支河流体系野外露头沉积特征

(a) 剑阁县石洋村剖面; (b) 旺苍县金溪剖面; (c) 蒲江县熊坡剖面

Fig. 4 Sedimentary characteristics of field outcrops from the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) Shiyang village section in Jiangue county; (b) Jinxi section in Wangcang county; (c) Xiongpo section in Pujiang county

远端河道沉积测井曲线特征表现为小的箱形与钟形(图2)。河道间还存在一些滞水洼地,测井曲线特征表现为低阻指形(图2)。

2.2 三角洲体系

三角洲体系主要分布在研究区的川中低平构造区(图1a)。与传统的三角洲解释不同,分支河流体系的观点将三角洲的陆上沉积区划分在分支河流体系的远端(图2)。而水下沉积区,则根据水动力条件强弱,将河流作用大于湖泊作用的部分划分为三角洲内前缘;将河流作用小于湖泊作用的部分划分为三角洲外前缘(图2)。分支河流体系远端的河道进入湖泊后由于水动力条件的改变与携带沉积物的卸载,河道下切能力减弱。在内前缘部分,受河流作用影响,主要表现为水下分流河道和河口坝沉积(图5)。砂质沉积物含量高,细粒泥质及粉砂质沉积物相对较少。由于河道的频繁迁移,造成内前缘砂体连片分布,细粒沉积物往往难以保存,分流间湾分布比较局限(图5a)。水下分流河道与曲流河道测井曲线特征类似,均表现为钟形,钟形—箱形,但水下分流河道箱形砂体的厚度相对较小。河口坝曲线特征

则表现为漏斗形(图2)。继续向湖盆中心方向进入外前缘,水体深度增加,河流作用已大幅度减弱,以湖浪、潮流作用为主。沉积物散开形成连片的席状砂,仅局部水动力条件较强的单支河道可以从内前缘延伸到外前缘(图5b)。在蒲江县熊坡露头剖面上(图1a),沉积物以细粒泥质及粉砂质沉积物为主,砂质含量少,由于沉积环境长期处于水下,沉积物颜色表现为暗灰色(图5b)。薄层的席状砂沉积测井曲线特征表现为指形(图2)。

2.3 湖相体系

在沙溪庙组沉积体系中,湖相体系主要分布在川中—川西南等地区。由于侏罗系沙溪庙组属于干旱条件下典型的中生代红层,湖相体系一般表现为一些小的河漫湖泊和暂时性浅水湖泊(图6)。其中河漫湖泊发育在分支河流体系的远端区域,沉积特征与分流河道间洼地沉积特征类似,垂向序列上,表现为薄的砂泥互层,泥岩颜色主要为红褐色,指示浅水氧化沉积环境。砂岩在测井曲线上表现为指形(图2)。而暂时性浅水湖泊与河漫湖泊相比,其规模更大,水体也更深。在沉积剖面的下部可观察到一

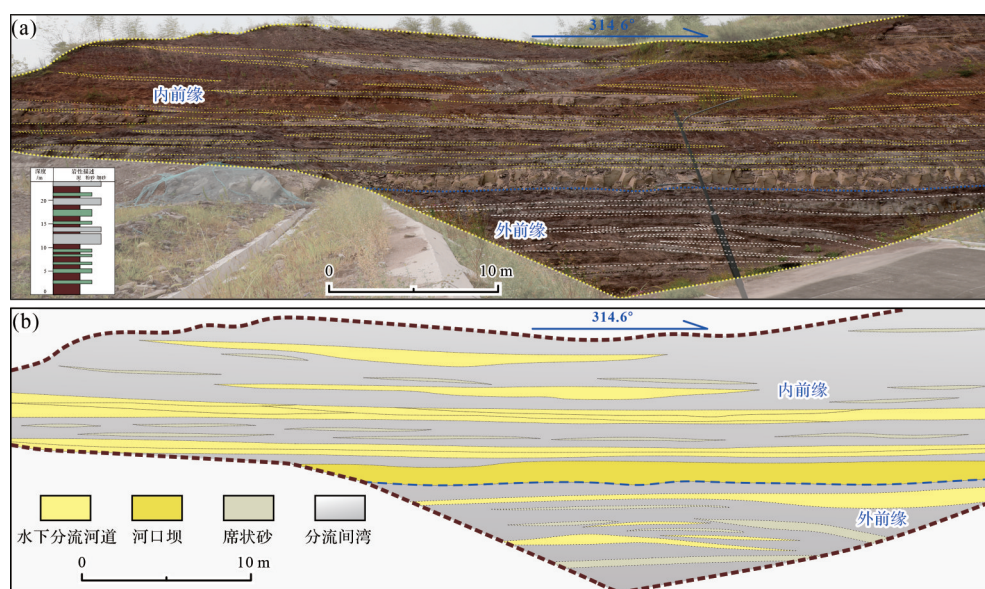


图5 川西北地区沙溪庙组三角洲体系野外露头沉积特征

(a) 荣经县荣经河剖面; (b) 剖面沉积特征

Fig. 5 Field outcrop depositional characteristics for the deltaic system of the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) Yingjing River outcrop in Yingjing county; (b) interpretation of outcrop sediments

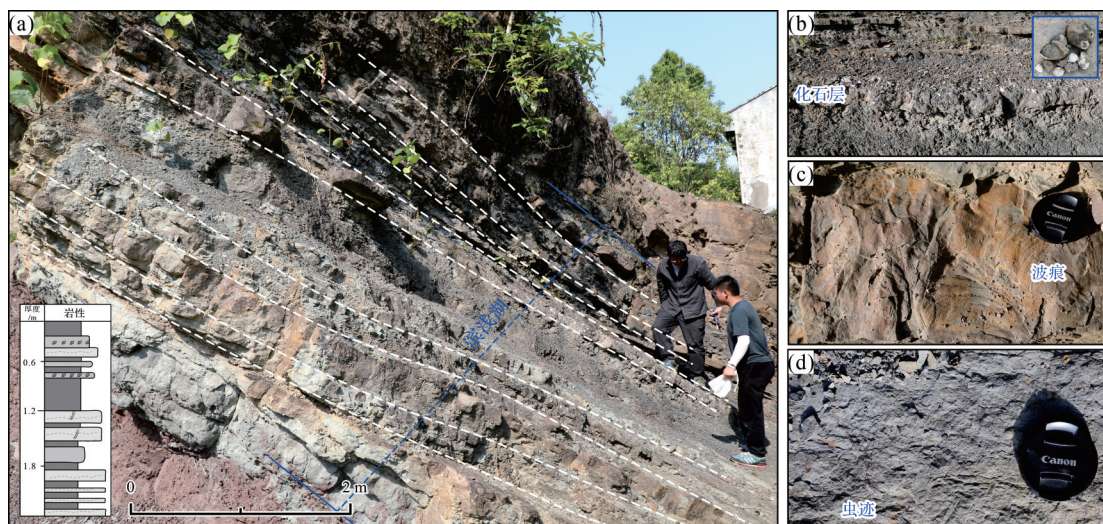


图6 川西北地区沙溪庙组湖相体系野外露头沉积特征

(a) 湖相体系沉积特征, 蒲江县官帽寺村剖面; (b) 生物化石; (c) 波痕; (d) 虫迹

Fig. 6 Field outcrop depositional characteristics for the lacustrine system of the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) sedimentary characteristics of lacustrine system, Guanmaotou village outcrop of Pujiang county; (b) biological fossils; (c) ripple marks; (d) insect traces

些明显的波痕(图6c),在剖面的上部,相比于沙溪庙组典型中生代红层特征,其泥岩颜色主要为灰褐色,指示还原沉积环境。细粒沉积物受波浪冲洗改造,在剖面上形成一些分布范围广、厚度薄的砂坝沉积(图6a)。受水文条件的影响,这些暂时性浅水湖泊在干旱期湖水干涸,野外沉积剖面上可观察到大大

积的双壳类化石层(图6b)和一些生物遗迹(图6d)。化石层厚度达20 cm,单个化石个体介于3~5 cm(图6b),除湖水突然干涸成因外,这种大片化石层也可能是受波浪建造形成的生物滩(图6a)。滩坝沉积的测井曲线特征与河漫湖泊不同,主要表现为高阻指形(图2)。

3 沉积相分析

3.1 单井相分析

单井相分析是沉积相划分的基础,也是开展连井相分析和平面相分析的前提。本文以三种典型沉积体系类型井段为例进行单井相分析。剑探1井位于四川盆地川西北地区,参考典型相识别标志(图2),对该井完成单井沉积相分析(图7)。在3 040~3 320 m深度范围内主要发育分支河流体系沉积(图7a)。由底向顶,依次为远端相带,深度介于3 220~3 320 m,主要为分支河道与一些河道间洼地沉积,岩性以泥质沉积为主、夹一些薄层砂岩,GR曲线呈现为高幅锯齿形。中部相带其深度介于3 130~3 220 m,主要发育曲流河与溢岸砂沉积,岩性以砂岩为主夹薄层泥质沉积,GR曲线呈现高幅钟形。近端相带其深度范围为3 040~3 130 m,主要为辫状河道与泛滥平原沉积,岩性以砂质沉积为主,GR测井曲线呈现为厚层的高幅箱形(图7a)。

秋林218-X1井与秋林16井位于四川盆地川西北—川中地区,选取的井段分别表现为典型的三角洲沉积(图7b)和滨浅湖沉积(图7c)。在秋林218-X1井段底部2 400~2 560 m,其沉积特征主要表现为三角洲外前缘沉积,发育水下分流河道和席状砂以及分流间湾三种微相类型,GR测井曲线表现为中幅锯齿形。该井在2 240~2 400 m范围内主要发育三角洲内前缘沉积,与外前缘沉积相比,该区域砂体厚度较大,测井曲线表现为中幅钟形—箱形(图7b)。在秋林16井单井沉积特征中,与三角洲外前缘沉积相似,但在沙溪庙组的滨浅湖沉积中,GR曲线的幅度更低,主要一些低幅锯齿形。在1 930~2 190 m范围内主要为三角洲外前缘与滩坝沉积的相互过渡(图7c)。这种现象在川中秋林地区的其他井中也有体现(秋林17),仅通过测井曲线特征很难区分三角洲外前缘与滩坝沉积,具体需要结合岩心资料(图2)。

3.2 连井相对比

以单井相分析为基础,利用连井相对比法,综合确定沉积微相规模,分析沉积微相的横向变化规律。以过金溪剖面—龙探1—剑探1—柘2—关9—秋林218-X1—蓬深16等井为例,开展连井相分析(图8)。连井剖面由川西北沿西南方向穿越川中地区(图8)。主要包括沙一段和沙二段,沙一段沿金溪剖面向秋林218-X1方向依次发育分支河流体系沉积—三角洲沉积—滨浅湖沉积,从各相带延伸范围看,在沙一段时期,湖相沉积发育面积较大,一直延伸到关9井附近(图8b)。而随着沉积体系的不断向前推进,湖相范围在沙二段时期缩小,仅在蓬深15井附近表现有典型的滨浅湖沉积特征(图8a)。

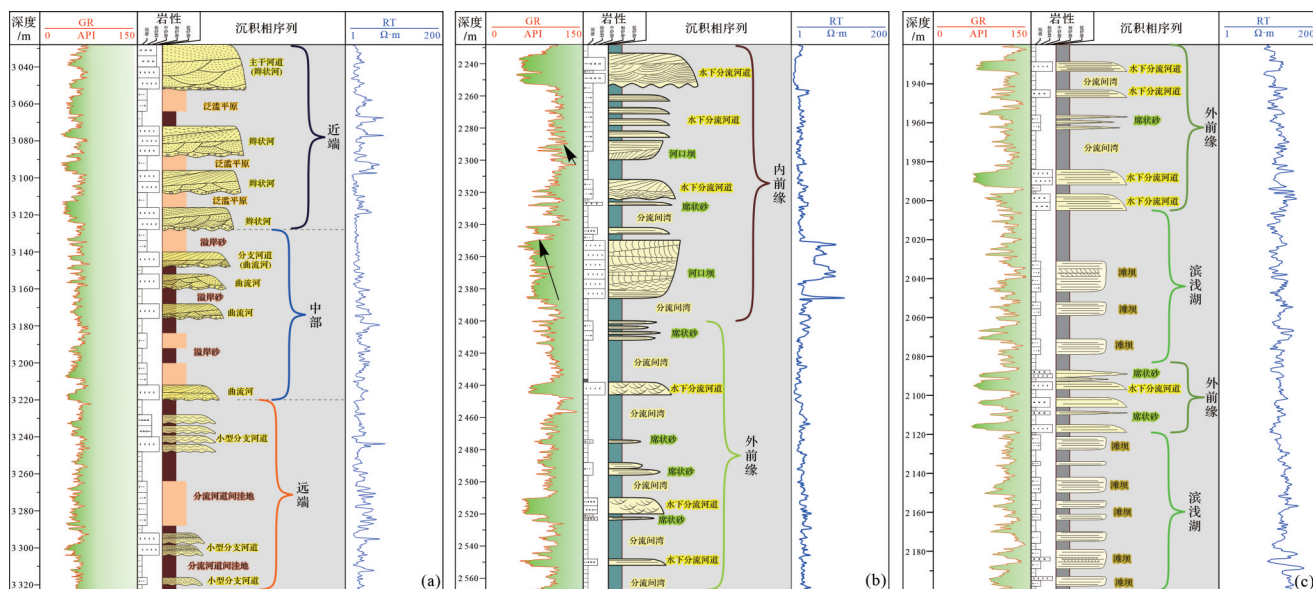


图7 研究区典型井单井相分析

(a) 剑探1井; (b) 秋林218-X1井; (c) 秋林16井

Fig. 7 Single-well facies analyses of typical wells in the study area

(a) well Jiantan 1; (b) well Qiulin 218-X1; (c) well Qiulin 16

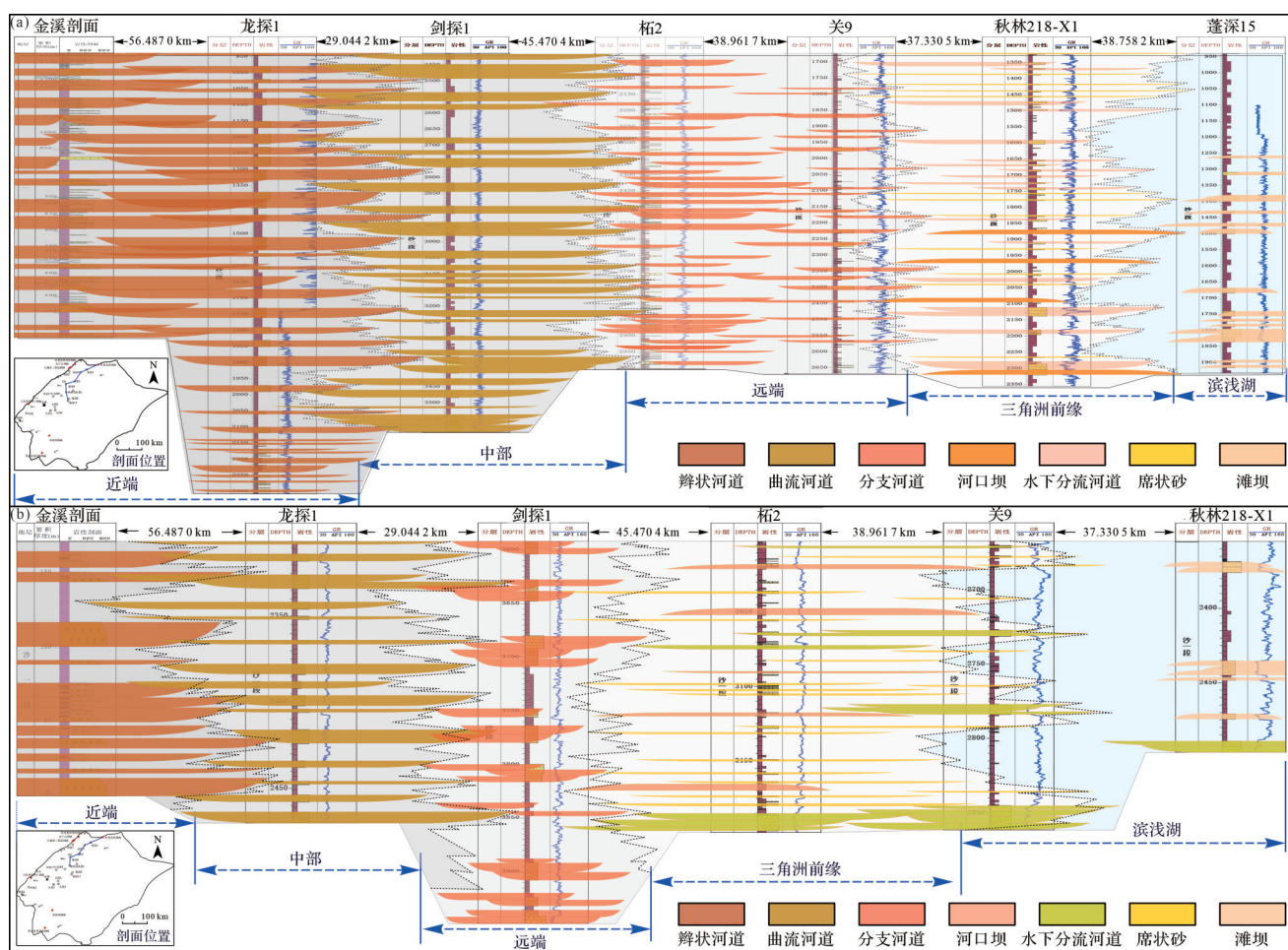


图8 川西北地区沙溪庙组连井沉积微相对比

(a)沙二段;(b)沙一段

Fig. 8 Sedimentary microfacies comparisons of connected wells of the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) Sha 2 member; (b) Sha 1 member

3.3 平面相分布

根据各单井相、连井相特征,结合研究区统计的砂地比变化规律,确定了沙溪庙组川西北地区平面相展布(图9)。研究认为,沙溪庙组沉积时期总体以河流沉积为主,分支河流体系沉积广泛分布在四川盆地周缘,而湖相体系沉积的范围相对较为局限。沙一段还发育范围较大的湖相沉积,包括秋林、天府等地区(图9a),而沙二段随着沉积体系的不断推进以及气候的干旱,大面积的浅水湖泊干涸,局部地区表现为一些小的暂时性湖泊(图9b)。

3.4 沉积模式

通过对研究区连井相特征与平面相展布的综合分析,川西北地区,沙溪庙组主要表现为分支河流体系沉积,在分支河流体系末端入湖时,明显受湖泊作用的影响。沙一段到沙二段气候的干旱程度增加,

因此也造成了不同时期湖平面范围升降的变化(图10)。其中沙一段沉积时期,各相带的展布范围表现为分支河流体系近端亚相延伸长度约6.9 km,以辫状河沉积为主;中部亚相延伸可达29.2 km,以曲流河沉积为主;而远端亚相延伸长度约79.4 km,主要表现为分流河道;三角洲前缘亚相延伸长度为25.9 km(图9c)。湖平面属于高位期次,表现为分支河流体系终止于大的湖泊体系,并且湖泊作用的水动力条件较强,三角洲和滩坝沉积广泛发育(图9c)。沙二段沉积时期,各相带的展布范围表现为分支河流体系近端亚相延伸长度约47.1 km,以辫状河沉积为主;中部亚相延伸可达59.9 km,以曲流河沉积为主;而远端亚相延伸长度约29.8 km,主要表现为分流河道;三角洲前缘亚相延伸长度为11.5 km(图9d)。湖平面属于低位期次,湖泊面积萎缩,形成一些小的局限性湖

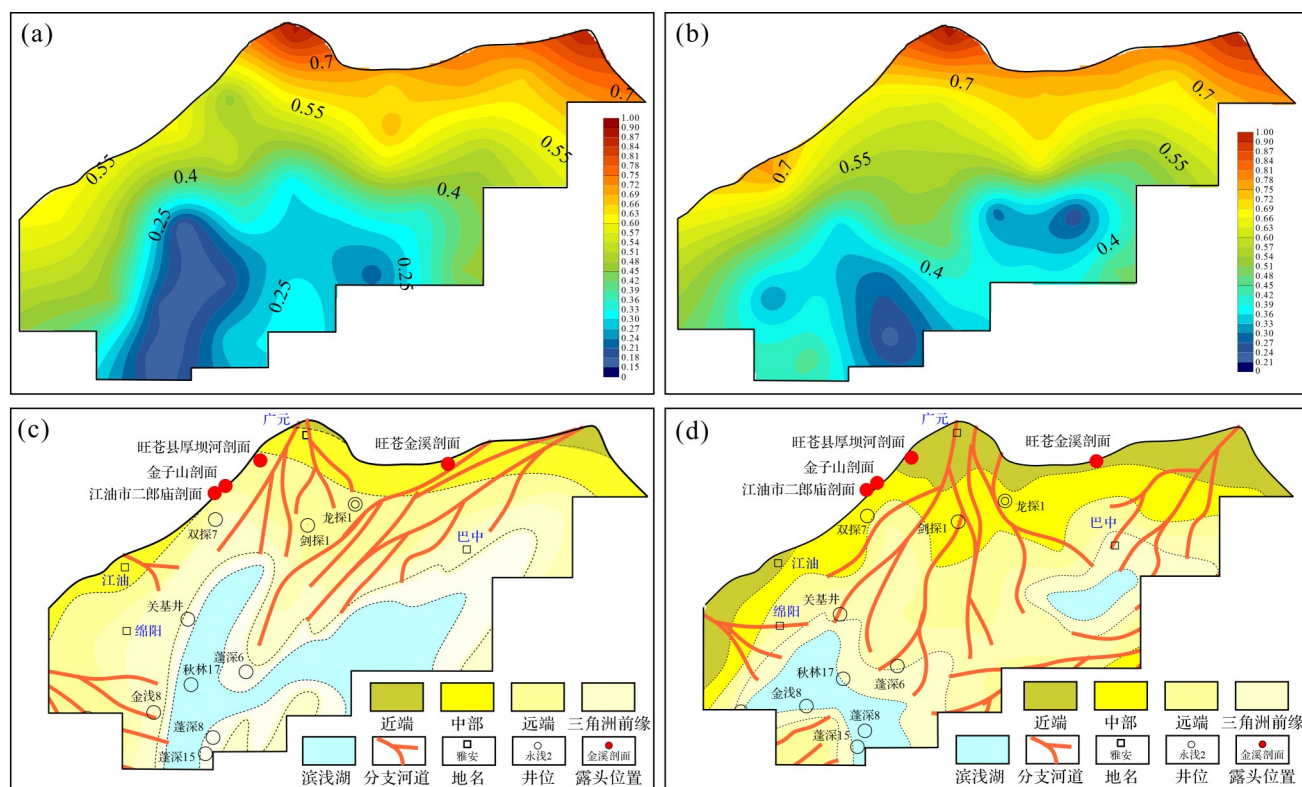


图9 川西北地区沙溪庙组砂地比及沉积相平面展布

(a)沙一段砂地比平面图;(b)沙二段砂地比平面图;(c)沙一段平面相图;(d)沙二段平面相图

Fig. 9 Sand to ground ratio and sedimentary facies planar distribution of the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) sand to ground ratio of Sha 1 member; (b) sand to ground ratio of Sha 2 member; (c) planar facies of Sha 1 member; (d) planar facies of Sha 2 member

泊,由于湖泊作用的范围减小,水动力条件以河流作用为主,滩坝沉积相对较少,一些小的局限性湖泊由于面积较小,很快被河流沉积填满,表现为典型的分支河流体系远端相带沉积特征(图9d)。

4 沉积体系定量刻画

前人在沙溪庙组的研究过程中,建立了多种沉积演化模式(谭万仓等,2008;刘君龙等,2017;于海跃等,2019),但由于研究区面积达 $2.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、南

北跨度较大(图1a),难以控制沉积体展布细节,目前具体的河流类型、河流沉积特征尚不明确。而分支河流体系的理论恰好能解决河流相类型的问题(张昌民等,2020,2023)。该观点认为不同河流相类型是分支河流体系内部河流形态演变的结果,运用分支河流体系沉积模式对沙溪庙组进行解释(图10),与单个河流相模式相比能显示更大范围的沉积体系特征。而这种更大范围的河流沉积体系特征建立在定量刻画的基础之上,是通过对现代分支河流体系面积、泛滥平原面积、半径、河道宽度以及弯曲度等

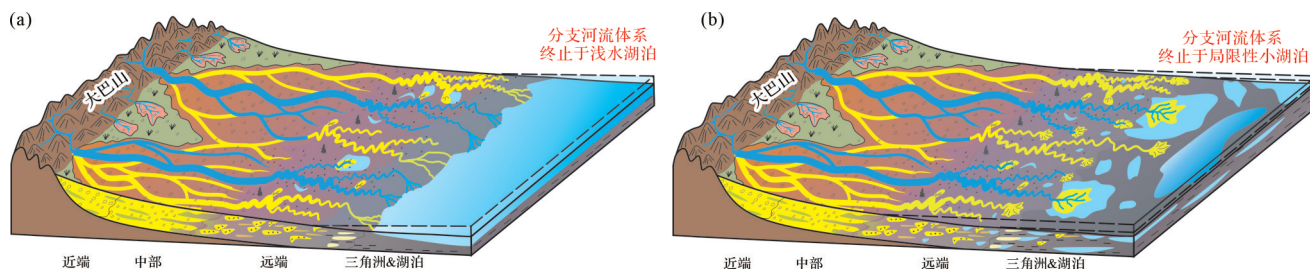


图10 川西北地区沙溪庙组沉积模式

(a)沙一段;(b)沙二段

Fig. 10 Sedimentary model of the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) Sha 1 member (b) Sha 2 member

参数进行大量数据统计的结果(表1、图11)。结合上述关于川西北地区沉积特征与沉积模式的研究,建立了沙溪庙组各相带定量刻画的预测模型。

4.1 现代分支河流体系沉积类比

塔里木盆地北缘是典型的前陆盆地,气候干旱,降水稀少。与四川盆地侏罗系沙溪庙组沉积时期的盆地类型(同为前陆盆地)和干旱背景气候条件具有明显的相似性,为两者的沉积体系类比提供了重要的地质基础。现代分支河流体系在塔里木盆地北缘广泛发育(黄若鑫等,2022),刘君龙等(2016)已成功利用该区域的现代沉积体系作为模板,对沙溪庙组的源汇系统进行了定量分析。这验证了现代—古代类比在满足相似沉积环境和背景前提下的可行性。其中塔里木盆地最大的叶尔羌河分支河流体系,纵向延伸约275 km,横向宽度约85 km,其覆盖面积与川西北地区(沙溪庙组研究区)相近(图11)。因此,在确保与研究区(四川盆地沙溪庙组)具有相似沉积环境(前陆盆地)和沉积背景(干旱气候)的前提下,利用塔里木盆地丰富的地表现代沉积现象作为参照标准。通过叶尔羌河分支河流体系直观的现代沉积特征,对沙溪庙组分支河流体系内部各区域(近端、中部、远端等)的河流形态特征以及各沉积单元(如河道、堤岸、泛滥平原)的规模进行定量类比(图11)。

根据地貌特征、河流形态特征,叶尔羌河分支河流体系共可划分为4个区域。其中近端纵向延伸约57 km,河流平均弯曲度为1.15,主要表现为辫状河沉积,河道内砂坝较为发育,河道宽而浅,最大河道宽度约4 361.9 m。中部区域纵向长度约86 km,河流平均弯曲度为1.47,河流形态表现为由辫状河向曲流河过渡,边滩较为发育,河道窄而深,最大河道宽度仅为2 004.3 m。远端沉积区是分支河流体系纵向延伸最长的区域,约94 km,受分汊和下渗的影响,河流

形态呈现为细小的分汊状,部分河道在旱季干涸,仅主干河道(分流河道)有水体流动。河流沿远端继续往下,终止于一些小湖泊,形成三角洲沉积(图11)。

在三角洲和湖相沉积范围,卫星图像上三角洲前缘砂体呈连片分布(图12b,红色区域),而这种连片分布的砂体主要是分支河流体系远端主干河道的频繁迁移造成,仅在2011—2021年,远端的主干河道由原来的正北方向逐渐迁移到东北方向(图12d~f)。这种主干河道的迁移不仅形成了三角洲前缘砂体的连片化,同时也使三角洲前缘朵体向前推进。图中可观察到明显的五期朵体迁移(图12a),目前主要活动的朵体为第5号朵体,而在废弃的4号朵体外侧,卫星影像上可观察到明显的砂坝沉积,以湖平面为界,由岸向湖,依次表现为沿岸砂坝、近岸砂坝和远岸砂坝(图12c)。通过现代沉积体系由河流从出山口到最终入湖的系统分析,在研究区沙溪庙组中也存在类似的沉积体系类型(图2)。

4.2 分支河流体系定量刻画

在川西北地区青林口剖面(105°7′36″E, 32°1′8″N)分支河流体系垂向演化过程中,远端相带以泥质沉积为主,砂体较薄,最大砂体厚度为1.62 m,砂地比为8.5%;随着沉积体系向前推进,中部相带最大砂岩厚度增大,砂地比达57.3%;而近端最大砂体厚度为23.05 m,砂地比达89.7%(图13)。这种垂向上不断递进的变化规律,在叶尔羌河分支河流体系的河流宽度与面积变化中也有体现,近端河道平均宽度约2 294.5 m,河道面积占63.2%;中部平均河道宽度约1 207.4 m,河道面积占比42.3%;远端平均河道宽度562.4 m,河道面积占18.7%(图11)。对比沙溪庙组沉积学特征与叶尔羌河分支河流体系河道信息参数特征,确定将“最大砂体厚度”和“砂地比”作为地下地质类比关键参数,进而建立川西北地区沙溪庙组各相带定量刻画模式(图13)。

表1 叶尔羌河分支河流体系沉积参数
Table 1 Sedimentary parameters of the DFS in the Yarkant River

相带位置	纵向延伸 长度/km	河道平均 宽度/m	河道最大 宽度/m	河道面积 占比/%	平均弯曲度	河道形态与沉积特征
近端	~57	2 294.5	4 361.9	63.2	1.15	河道宽而浅,辫状河,发育砂坝,搬运能力最强
中部	~86	1 207.4	2 004.3	42.3	1.47	河道较窄而深,河流形态由辫状河向曲流河过渡,边滩发育
远端	~94	562.4	1 087.3	18.7	1.87	河道分汊,部分季节性干涸,仅主干分流河道保持水流
入湖区(三角洲前缘)	~31	—	—	—	—	河口坝、席状砂发育,湖浪改造作用明显

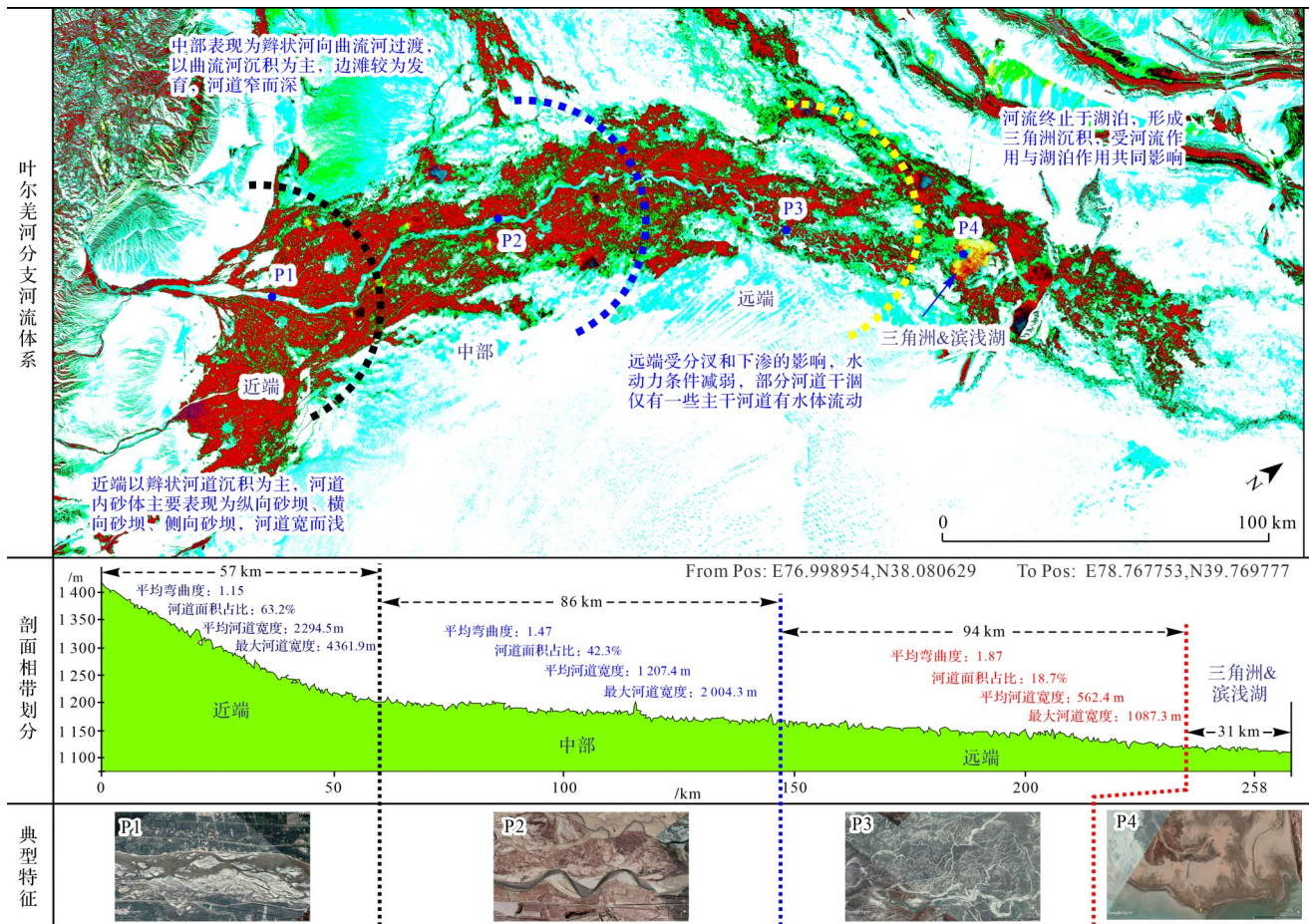


图 11 叶尔羌河现代分支河流体系沉积特征

Fig. 11 Sedimentary characteristics of the modern DFS of the Yarkant River

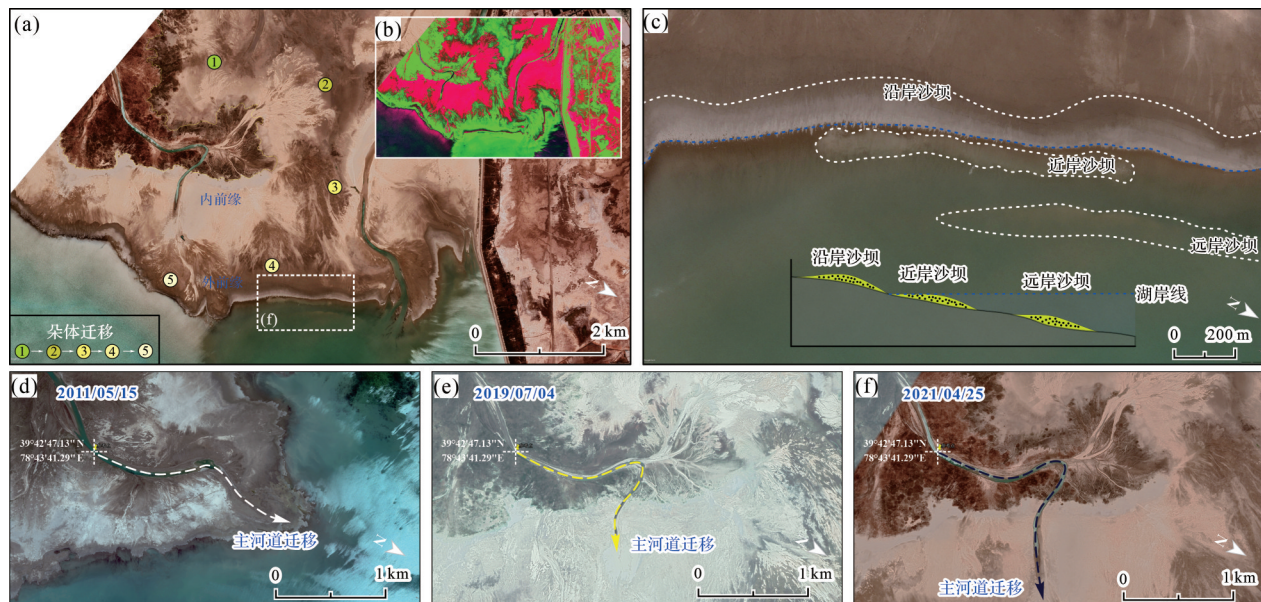


图 12 叶尔羌河三角洲前缘砂体展布及滩坝沉积特征

(a, b)三角洲前缘朵体迁移; (c)沙坝平面展布; (d-f)不同时期主干河道位置

Fig. 12 Sand body spreading and beach dam depositional characteristics of the Yarkant River delta front

(a, b) the lobe migration of the delta front; (c) sandbar deployment; (d-f) the location of the main channel in different periods

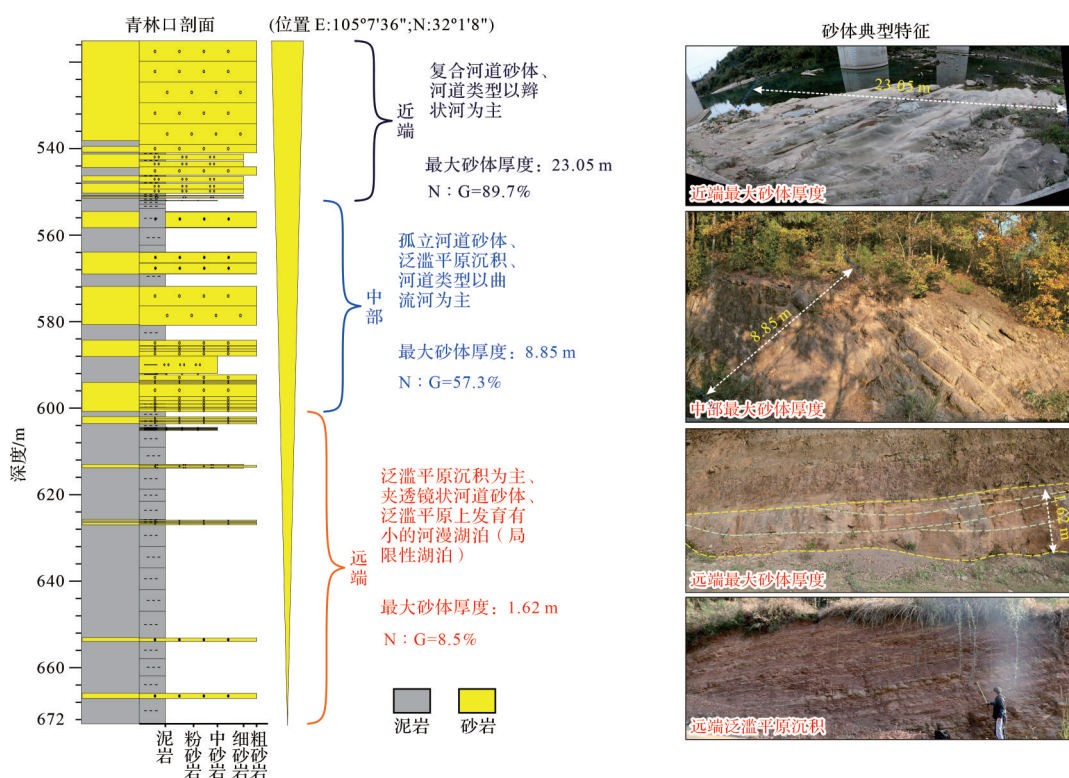


图 13 川西北地区沙溪庙组分支河流体系定量刻画关键参数分析

Fig. 13 Quantitatively inscribed key parameters analysis of the DFS from the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

本研究建立的分支河流体系定量刻画模式包含砂地比相对百分含量、河道占比以及砂体叠置方式等参数,这些参数主要通过多重约束确定,包括:(1)野外露头与岩心测量的砂地比统计分析;(2)基于现代类比(叶尔羌河)的沉积体系分析;(3)测井曲线响应特征;(4)不同相带砂体厚度与分布规律的对比研究(图14)。研究区沙溪庙组近端相带砂地比介于50%~70%,砂体主要表现为厚层的复合河道砂体;中部相带砂地比介于30%~50%,砂体表现为连片的叠置河道砂体;远端相带砂地比介于20%~30%,砂体表现为孤立的单一河道砂体;而在三角洲与滨浅湖沉积区,砂地比一般小于15%(图14)。相比传统定性方法(基于微相组合划分亚相),本研究侧重于定量分析,并更强调集成多属性、多指标的综合储层预测方法(图14)。

目前,关于沙溪庙组研究的主流观点为在三角洲相带可以形成厚层、连片的砂体(图14),忽略了分支河流体系中部和远端相带发育的大片河道砂体储集层(图4)。总结川西北地区沙溪庙组砂地比变化规律发现,中部和远端相带砂地比远高于三角洲前

缘相带(图14),在不考虑其他因素影响的情况下,这些部位同样能够形成较好的储层;同时,如果将中部和远端这种连片分布的砂体均认为是三角洲沉积环境,有可能造成对沉积环境的误判(图11)。沙溪庙组沉积时期,四川盆地整体处于一个干旱、炎热的背景,湖浪作用的范围有限,很难波及到中部和远端区域。类似现象在叶尔羌河分支河流体系中也有体现,卫星影像上该沉积体系末端的湖泊作用的影响范围仅约3 km(洪水期—枯水期湖平面间距离),而分支河流体系远端的纵向延伸达94 km,95%以上面积的沉积区主要受河流作用影响(图11)。

5 结论

川西北地区沙溪庙组发育分支河流体系、三角洲体系和湖相体系三种沉积体系类型,分支河流体系主要包括3种亚相、6种微相类型,三角洲体系主要包括2种亚相、4种微相类型,湖相体系主要包括滨浅湖滩坝沉积。分支河流体系近端亚相砂地比介于50%~70%,砂体呈厚层相互叠置关系;中部亚相砂地比介于30%~50%,砂体呈厚层连片展布;远端

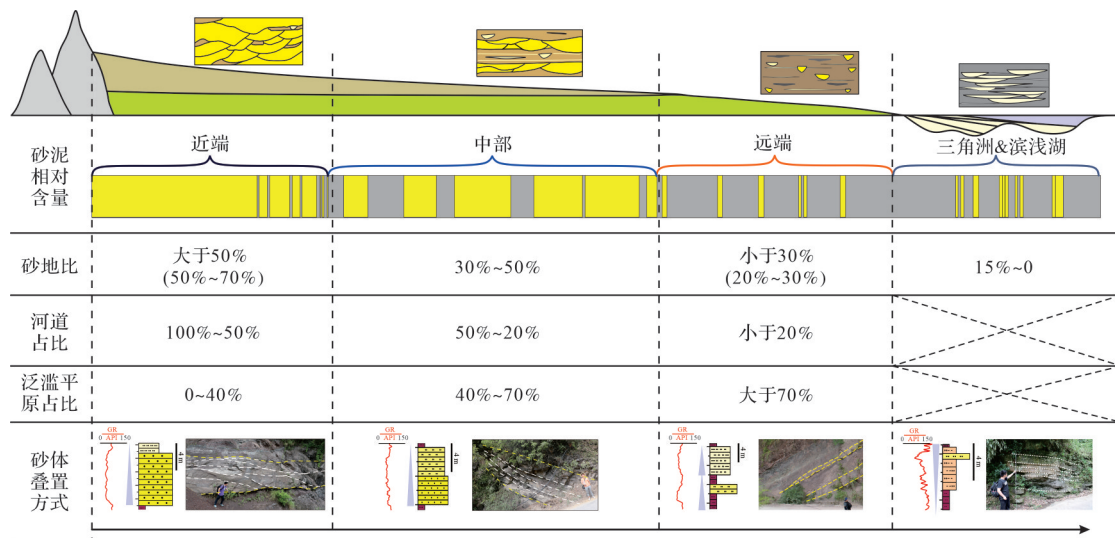


图14 川西北地区沙溪庙组分支河流体系定量刻画模型

Fig. 14 Quantitatively inscribed model of the DFS from the Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

亚相砂地比介于20%~30%,砂体呈孤立状。研究区主要受河流作用的影响,沙一段表现为分支河流体系终止于范围较大的湖相沉积,沙二段表现为分支河流体系沉积终止于一些小的暂时性湖泊,与现代沉积相类比,确定将“砂地比”和“最大单砂体厚度”作为关键参数,建立沙溪庙组分支河流体系定量刻画模型。在沙溪庙组沉积体系中,除在三角洲体系发育大片优质储集层外,分支河流体系中部和远端相带同样可以形成连片的河道砂体储集层。

致谢 地下地质资料均来自中国石油勘探开发研究院,感谢地质所杨威书记对分支河流体系观点的支持与指导。另外,中国石油勘探开发研究院王志宏、崔俊峰、金惠等专家在论文完善过程中给予了大量的建议与帮助,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- 曹甲新,徐文礼,曹脊翔,等. 2025. 川中地区中侏罗统沙溪庙组一段物源分析[J]. 沉积学报, 43(6): 2237-2248. [Cao Jiaxin, Xu Wenli, Cao Jixiang, et al. 2025. Provenance analysis of the First member of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(6): 2237-2248.]
- 陈贤良,纪友亮,杨克明. 2019. 川西中段上沙溪庙组层序格架下成岩相及储层评价[J]. 断块油气田, 26(5): 550-554. [Chen Xianliang, Ji Youliang, Yang Keming. 2019. Diagenetic facies and reservoir evaluation in sequence framework of upper Shaximiao Formation in middle area of western Sichuan Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 26(5): 550-554.]
- 段文荣. 2021. 四川盆地中侏罗统下沙溪庙组致密气勘探潜力及有利方向[J]. 石油实验地质, 43(3): 424-431, 467. [Duan Wen-shen. 2021. Exploration potential and favorable direction of tight gas in Middle Jurassic Xiashaximiao Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 43(3): 424-431, 467.]
- 段永明,曾焱,刘成川,等. 2020. 窄河道致密砂岩气藏高效开发技术:以川西地区中江气田中侏罗统沙溪庙组气藏为例[J]. 天然气工业, 40(5): 58-65. [Duan Yongming, Zeng Yan, Liu Chengchuan, et al. 2020. Technologies for the efficient development of tight sandstone gas reservoirs in narrowchannels: A case study of Middle Jurassic Shaximiao Formation gas reservoir in the Zhongjiang gas field of western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 40(5): 58-65.]
- 付蕾,张本健,曹正林,等. 2022. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻[J]. 石油实验地质, 44(1): 85-93. [Fu Lei, Zhang Benjian, Cao Zhenglin, et al. 2022. Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 44(1): 85-93.]
- 高志勇,冯佳睿,石雨昕,等. 2023. 干旱气候下冲积扇—冲积平原曲流河沉积演化过程与展布:以新疆库车河现代沉积为例[J]. 沉积学报, 41(6): 1954-1969. [Gao Zhiyong, Feng Jiarui, Shi Yuxin, et al. 2023. Sedimentary evolution and distribution characteristics of alluvial fan and meandering rivers in an alluvial plain with an arid climate: A case of modern sedimentation in the Kuqa River, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(6): 1954-1969.]
- 何登发,李德生,张国伟,等. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589-606. [He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606.]
- 何苗,秦兰芝,尹太举,等. 2021. 分支河流体系在东海西湖凹陷南部的运用及其对油气潜力的指示[J]. 中国地质, 48(3): 820-831. [He Miao, Qin Lanzhi, Yin Taiju, et al. 2021. The application of the distributive fluvial system in the south Xihu Depression, East China Sea and its indication of oil and gas potential[J]. Geology in

- China, 48(3): 820-831.]
- 胡赛寅, 刘宗堡, 卢志霖, 等. 2023. 黑河分支河流体系地貌特征和沉积模式[J]. 西安理工大学学报, 39(2): 216-226. [Hu Saiyin, Liu Zongbao, Lu Zhilin, et al. 2023. The geomorphological characteristics and sedimentary model for Heihe distributive fluvial system [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 39(2): 216-226.]
- 黄若鑫, 张昌民, 冯文杰. 2022. 冲断带构造作用控制下的分支河流体系特征及其成因分析: 以塔里木盆地西北缘柯坪地区为例[J]. 沉积学报, 40(1): 166-181. [Huang Ruoxin, Zhang Changmin, Feng Wenjie. 2022. Characteristics and factor analysis of distributive fluvial systems due to tectonic thrust belt activity: Example of Keping area, northwestern Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(1): 166-181.]
- 贾承造. 2020. 中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J]. 石油学报, 41(12): 1445-1464. [Jia Chengzao. 2020. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream[J]. Acta Petrolei Sinica, 41(12): 1445-1464.]
- 贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 2018. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 45(4): 546-560. [Jia Chengzao, Zou Caineng, Yang Zhi, et al. 2018. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of central and western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 45(4): 546-560.]
- 匡立春, 刘合, 任义丽, 等. 2021. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 48(1): 1-11. [Kuang Lichun, Liu He, Ren Yili, et al. 2021. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration & Development, 48(1): 1-11.]
- 李国新, 徐胜林, 陈洪德, 等. 2012. 川西坳陷中段中侏罗统上沙溪庙组层序岩相古地理及砂体展布特征[J]. 中国地质, 39(1): 96-105. [Li Guoxin, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. 2012. Sedimentary facies and sand body distribution of the Middle Jurassic upper Shaximiao Formation in the middle segment of western Sichuan Depression[J]. Geology in China, 39(1): 96-105.]
- 李赛云, 尹太举, 张昌民, 等. 2026. 狭长浅水湖盆分支河流体系演化过程和沉积模式: 基于水槽沉积模拟实验[J]. 沉积学报, 44(3): 856-868. [Li Saiyun, Yin Taiju, Zhang Changmin, et al. 2026. Evolution and depositional model of distributive fluvial system in narrow and shallow lacustrine basin: Insights from flume experimental simulation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(3): 856-868.]
- 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 2011. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 32(1): 8-17. [Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. 2011. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 32(1): 8-17.]
- 刘君龙, 纪友亮, 杨克明, 等. 2017. 川西地区中侏罗世前陆盆地河流层序结构及控制因素[J]. 天然气地球科学, 28(1): 14-25. [Liu Junlong, Ji Youliang, Yang Keming, et al. 2017. Sequence architecture and its controlling factors of Middle Jurassic fluvial successions in western Sichuan foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 28(1): 14-25.]
- 刘君龙, 纪友亮, 张克银, 等. 2016. 川西前陆盆地侏罗系沉积体系变迁及演化模式[J]. 石油学报, 37(6): 743-756. [Liu Junlong, Ji Youliang, Zhang Keyin, et al. 2016. Jurassic sedimentary system transition and evolution model in western Sichuan foreland basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 37(6): 743-756.]
- 孙家惠, 张昌民, 王浩楠, 等. 2024. 分支河流体系河道弯度沿程变化规律: 以格尔木河流扇为例[J]. 沉积学报, 42(3): 981-993. [Sun Jiahui, Zhang Changmin, Wang Haonan, et al. 2024. Downstream river channel sinuosity variation of the distributive fluvial system: A case study from the Golmud fluvial fan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(3): 981-993.]
- 谭万仓, 侯明才, 董桂玉, 等. 2008. 川西前陆盆地中侏罗统沙溪庙组沉积体系研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 31(4): 336-343. [Tan Wancang, Hou Mingcai, Dong Guiyu, et al. 2008. Research on depositional system of Middle Jurassic Shaximiao Formation in western Sichuan foreland basin[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 31(4): 336-343.]
- 王令辉, 张昌民, 张祥辉, 等. 2025. 柴达木盆地格尔木扇河网密度沿程变化规律[J]. 沉积学报, 43(2): 609-621. [Wang Linghui, Zhang Changmin, Zhang Xianghui, et al. 2025. Variation of the drainage density of the Golmud fan in Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(2): 609-621.]
- 汪泽成, 邹才能, 陶士振, 等. 2004. 大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析[J]. 石油学报, 25(6): 23-28. [Wang Zecheng, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. 2004. Analysis on tectonic evolution and exploration potential in Dabashan foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 25(6): 23-28.]
- 韦腾强, 张本健, 王小娟, 等. 2021. 四川盆地秋林地区侏罗系沙溪庙组二段河流相沉积特征及储集差异性分析[J]. 科学技术与工程, 21(29): 12438-12446. [Wei Tengqiang, Zhang Benjian, Wang Xiaojuan, et al. 2021. Sedimentary characteristics of fluvial facies and analysis of reservoir differences in the Second member of Jurassic Shaximiao Formation in Qiulin area, Sichuan Basin[J]. Science Technology and Engineering, 21(29): 12438-12446.]
- 夏雨, 王俊辉, 向显鹏, 等. 2025. 干旱型分支河流体系朵体构型及沉积特征: 水槽沉积模拟实验研究[J]. 古地理学报, 27(3): 641-659. [Xia Yu, Wang Junhui, Xiang Xianpeng, et al. 2025. Configuration and depositional characteristics of lobe of arid distributive fluvial system: A flume experimental study of depositional simulation[J]. Journal of Palaeogeography, 27(3): 641-659.]
- 肖富森, 黄东, 张本健, 等. 2019. 四川盆地侏罗系沙溪庙组天然气地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 40(5): 568-576, 586. [Xiao Fusen, Huang Dong, Zhang Benjian, et al. 2019. Geochemical characteristics and geological significance of natural gas in Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(5): 568-576, 586.]

- 肖富森, 韦腾强, 王小娟, 等. 2020. 四川盆地川中—川西地区沙溪庙组层序地层特征[J]. 天然气地球科学, 31(9): 1216-1224. [Xiao Fusen, Wei Tengqiang, Wang Xiaojuan, et al. 2020. Research on the sequence stratigraphy of the Shaximiao Formation in Chuanzhong-Chuanxi area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 31(9): 1216-1224.]
- 杨雪飞, 王兴志, 张哨楠, 等. 2014. 川西北厚坝地区上沙溪庙组沉积特征及油砂预测[J]. 地质科技情报, 33(3): 112-117. [Yang Xuefei, Wang Xingzhi, Zhang Shaonan, et al. 2014. Sedimentary characteristic and oilsands prediction in the upper Shaximiao Formation, Houba area, northwestern Sichuan Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 33(3): 112-117.]
- 杨智, 邹才能, 陈建军, 等. 2021. “进(近)源找油”: 油气地质理论创新与重点领域勘探思考[J]. 石油学报, 42(10): 1310-1324. [Yang Zhi, Zou Caineng, Chen Jianjun, et al. 2021. “Exploring petroleum inside or near the source kitchen”: Innovations in petroleum geology theory and reflections on hydrocarbon exploration in key fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(10): 1310-1324.]
- 于海跃, 尹伟, 刘君龙. 2019. 龙门山山前带侏罗系近源冲积体系沉积特征与成因模式[J]. 断块油气田, 26(3): 273-278. [Yu Haiyue, Yin Wei, Liu Junlong. 2019. Sedimentary characteristics and genetic model of Jurassic alluvial deposits in piedmont zone of Longmen Mountain[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 26(3): 273-278.]
- 张昌民, 胡威, 朱锐, 等. 2017. 分支河流体系的概念及其对油气勘探开发的意义[J]. 岩性油气藏, 29(3): 1-9. [Zhang Changmin, Hu Wei, Zhu Rui, et al. 2017. Concept of distributive fluvial system and its significance to oil and gas exploration and development[J]. Lithologic Reservoirs, 29(3): 1-9.]
- 张昌民, 宋新民, 支东明, 等. 2020. 陆相含油气盆地沉积体系再思考: 来自分支河流体系的启示[J]. 石油学报, 41(2): 127-153. [Zhang Changmin, Song Xinmin, Zhi Dongming, et al. 2020. Re-thinking on the sedimentary system of terrestrial petroliferous basins: Insights from distributive fluvial system[J]. Acta Petrolei Sinica, 41(2): 127-153.]
- 张昌民, 张祥辉, 朱锐, 等. 2023. 分支河流体系研究进展及应用前景展望[J]. 岩性油气藏, 35(5): 11-25. [Zhang Changmin, Zhang Xianghui, Zhu Rui, et al. 2023. Research progress and application prospect of distributive fluvial system[J]. Lithologic Reservoirs, 35(5): 11-25.]
- 张金亮. 2019. 河流沉积相类型及相模式[J]. 新疆石油地质, 40(2): 244-252. [Zhang Jinliang. 2019. Fluvial facies styles and their sedimentary facies models[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 40(2): 244-252.]
- 张祥辉, 张昌民, 冯文杰, 等. 2021. 干旱地区分支河流体系沉积特征: 以疏勒河分支河流体系为例[J]. 石油勘探与开发, 48(4): 756-767. [Zhang Xianghui, Zhang Changmin, Feng Wenjie, et al. 2021. Sedimentary characteristics of distributive fluvial system in arid area: A case study of the Shule River distributive fluvial system [J]. Petroleum Exploration and Development, 48(4): 756-767.]
- 张小菊, 邓虎成, 伏美燕, 等. 2024. 多级界面约束下构型对储层非均质性控制作用: 以川西沙溪庙组曲流河为例[J]. 沉积学报, 42(4): 1384-1400. [Zhang Xiaoju, Deng Hucheng, Fu Meiyan, et al. 2024. Controls of architecture under the constraints of a multi-level interface on physical property heterogeneities from the meandering river of the Shaximiao Formation in western Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(4): 1384-1400.]
- 张元福, 戴鑫, 王敏, 等. 2020. 河流扇的概念、特征及意义[J]. 石油勘探与开发, 47(5): 947-957. [Zhang Yuanfu, Dai Xin, Wang Min, et al. 2020. The concept, characteristics and significance of fluvial fans[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(5): 947-957.]
- 赵文智. 2019. 中国油气勘探行业面临的五大挑战[J]. 世界石油工业, 26(2): 1-2. [Zhao Wenzhi. 2019. Five challenges of oil and gas exploration in China[J]. World Petroleum Industry, 26(2): 1-2.]
- Adeli S, Hauber E, Kleinhans M, et al. 2016. Amazonian-aged fluvial system and associated ice-related features in Terra Cimmeria, Mars [J]. Icarus, 277: 286-299.
- Batezelli A, Ladeira F S B, Blanco L A D, et al. 2025. Geomorphological control on the palaeosol evolution in an Upper Cretaceous distributive fluvial system (Bauru Basin, Brazil) [J]. Catena, 258: 109278.
- Cartwright R J, Burr D M. 2017. Using synthetic aperture radar data of terrestrial analogs to test alluvial fan formation mechanisms on Titan[J]. Icarus, 284: 183-205.
- de Lima P L, dos Santos Scherer C M, Manna M O, et al. 2025. Medial and distal portions of distributive fluvial system: Case study of the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin, south Brazil)[J]. Journal of South American Earth Sciences, 152: 105293.
- Hartley A J, Weissmann G S, Nichols G J, et al. 2010. Large distributive fluvial systems: Characteristics, distribution, and controls on development[J]. Journal of Sedimentary Research, 80(2): 167-183.
- Phillips S P, Howell J A, Hartley A J, et al. 2021. Coarse-grained meandering distributive fluvial system of the basal Cedar Mountain Formation, U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 91(11): 1188-1205.
- Weissmann G S, Hartley A J, Nichols G J, et al. 2010. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: Distributive fluvial systems [J]. Geology, 38(1): 39-42.
- Zhang X H, Zhang C M, Hartley A, et al. 2023. Analysis of the sedimentary characteristics of a modern distributive fluvial system: A case study of the Great Halten River in the Sugan Lake Basin, Qinghai, China[J]. Journal of Earth Science, 34(4): 1249-1262.
- Zhang X H, Zhang C M, Yang W, et al. 2025. Characteristics of channel sand body based on 3D digital outcrop model: A case study of Shaximiao Formation outcrop, in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Earth Science, 36(4): 1766-1779.

Sedimentary Characteristics and Depositional Models of Distributive Fluvial Systems: A case study from the Jurassic Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin

ZHANG XiangHui¹, ZHANG ChangMin¹, YANG Wei², ZHU Rui¹, FU WenJun³

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

3. Hainan Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Haikou 570100, China

Abstract: [Objective] This study sought to contribute to reducing oil and gas exploration costs by enhancing the understanding and prediction of sedimentary systems. [Methods] Based on the theory of distributive fluvial systems, this study used the Jurassic Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin as a case study. It synthesized data from field outcrops, cores, and well logs, and employed integrated surface and subsurface analyses with both quantitative and qualitative approaches. The objective was to achieve a quantitative characterization of the sedimentary system within the Shaximiao Formation. [Results] (1) The Shaximiao Formation in the northwestern Sichuan Basin has developed three types of sedimentary systems: distributive fluvial, delta, and lacustrine. The distributive fluvial system of the Shaximiao Formation can be further divided into three subfacies and six microfacies, the delta system into two subfacies and four microfacies, and the lacustrine system into shore-shallow lake beach-bar deposits. (2) The proximal subfacies net-to-gross ratio is 50%-70%, and the sand bodies are superimposed with thick layers. The medial subfacies net-to-gross ratio is between 30%-50%, and the sand body is distributed in thick layers. The distal subfacies net-to-gross ratio is 20%-30%, and the sand body is isolated. (3) The Shaximiao Formation in the study area is primarily influenced by fluvial action, with the Sha 1 member showing the distributive fluvial system terminating in a larger range of lacustrine deposits, and the Sha 2 member showing the distributive fluvial system terminating in several small temporary lakes. (4) Based on the modern sedimentary reference, in addition to the development of large high-quality reservoirs in the delta system, the medial and distal facies of the distributive fluvial system can form continuous channel sand reservoirs. [Conclusions] The results of the research are significant for characterizing the development scale and overlay style of different sand bodies, providing a reference basis for the study of the distribution of sedimentary systems in the context of similar fluvial deposits.

Key words: Sichuan Basin; Shaximiao Formation; distributive fluvial system; sedimentary model; quantification; hydrocarbon exploration

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42130813, 42502097; CNPC Innovation Fund, No. 2024DQ02-0502; Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2024AFB344

Corresponding author: ZHANG ChangMin, E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn