

引用格式: 吴和源, 吴涛, 唐勇, 等. 2026. 准噶尔盆地中拐地区断阶型扇三角洲沉积模式及勘探意义[J]. 沉积学报, 44(4): 1458-1470.

WU HeYuan, WU Tao, TANG Yong, et al. 2026. Depositional Model and Exploration Significance of the Fault-Terrace-Controlled Fan Delta in the Zhongguai Area, Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1458-1470.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.028

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.028

准噶尔盆地中拐地区断阶型扇三角洲沉积模式及勘探意义

吴和源^{1,2}, 吴涛³, 唐勇⁴, 刘海磊³, 景涛涛³, 吴伟涛³, 闫文琦³, 江祖强³, 杨梦云³, 刁志龙³, 郭睿良^{1,2}, 刘博彪^{1,2}

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065

2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065

3. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

4. 怀柔实验室新疆研究院, 乌鲁木齐 830000

摘要 【目的】准噶尔盆地中拐地区二叠系佳木河组发育一套断拗转换背景下的近物源粗碎屑沉积, 但其沉积体系类型、沉积模式以及厚层砾岩形成机制认识尚不明确, 制约了区域砾岩类储层的油气勘探进程。【方法】以中拐地区佳木河组粗碎屑岩为研究对象, 开展深入的岩相分析和沉积微相划分, 同时基于重矿物组合特征分析、古地貌演化恢复、地震剖面解译建立沉积模式, 结合构造演化与断裂刻画研究成果揭示佳木河组厚层砾岩形成的地质规律及其油气勘探意义。【结果】中拐地区佳木河组发育扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲3类亚相及9种沉积微相, 整体属于受多级同沉积断阶控制的进积型扇三角洲沉积体系。其受四方面因素共同控制: (1)断拗转换阶段山体高耸、物源充沛、势能大, 粗碎屑沉积物供给富足; (2)干旱—半干旱气候条件短时强降水频发, 诱发洪流、泥石流与碎屑流等高能搬运过程; (3)同沉积断裂持续活动形成高可容纳空间, 促进厚层砾岩持续加积; (4)多期断阶发育控制水下扇体持续进积, 形成了满凹砾岩的展布特征。据此建立了断阶型扇三角洲沉积模式。【结论】断阶型扇三角洲是一类发育于断拗转换背景下、受多级同沉积断阶控制、以近源高能粗碎屑持续供给为特征的扇三角洲沉积体系, 表现出持续进积与加积、多种高能搬运机制复合作用及厚层贫泥砾岩连续叠置等特点。该模式打破了“近物源等同于差储层”的传统认识, 也为其他盆地凹陷和斜坡区、断裂转换带和隐伏断阶带内深层—超深层砾岩油气藏勘探提供沉积模式借鉴。

关键词 扇三角洲; 沉积模式; 佳木河组; 中拐凸起; 准噶尔盆地

第一作者 吴和源, 男, 1986年出生, 博士, 副教授, 沉积学与油气储层地质学, E-mail: why@xsyu.edu.cn

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)04-1458-13

0 引言

断陷盆地在由断陷期向拗陷期过渡的构造转换阶段, 盆地构造格局与沉积体系往往发生显著调整(鄢继华等, 2007; 于兴河等, 2007; 朱红涛等, 2018; Zhi *et al.*, 2022)。该时期受盆缘断裂活动、物源区抬升及地形坡降变化等因素共同控制, 沉积物供给强度增强, 盆地边缘及斜坡区易发育以粗碎屑为主的高能沉积体系(牟泽辉等, 1992; 郭沫贞等, 2017; 王韬等, 2021; 杨川等, 2023; Yao *et al.*, 2023)。

前人研究表明, 在此类构造背景下, 冲积扇或扇三角洲广泛发育(Mcpherson *et al.*, 1987; Nemec and Steel, 1988; Kazanci and Varol, 1990; 赵玉光和肖林萍, 1994)。准噶尔盆地中拐凸起及其周缘二叠系佳木河组沉积期为断拗转换的构造背景(王小军等, 2022), 沉积期构造活动较为强烈(董雪梅等, 2023; 潘虹等, 2024), 沉积区临近物源, 沉积能量高, 形成了以近物源粗碎屑沉积为特征的砾岩沉积体系(张顺存等, 2011; 吴和源等, 2017)。然而, 不同学者对其沉积体系类型的界定尚存在争议, 主要焦点在于

收稿日期: 2026-04-13; 修回日期: 2026-06-01; 录用日期: 2026-07-23; 网络出版日期: 2026-07-23

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD1400302); 新疆维吾尔自治区“天山英才”科技创新领军人才项目(2023TSYCLJ0001)

是冲积扇沉积还是扇三角洲沉积(郝诚等,2015;张昌民等,2020;张志杰等,2023),对其沉积模式类型以及相关沉积过程的认识仍有待深化。尤其是在断拗转换背景下,同沉积断裂持续活动、粗碎屑强力供给、沉积环境长期处于高能水动力条件,这些因素对佳木河组厚层砾岩的形成均具有重要影响,但相关沉积学研究多停留在宏观相带划分层面,对沉积微相形成的水动力过程缺乏分析,制约了对厚层砂砾岩的空间分布和形成机理的认识。基于此,本文以中拐凸起佳木河组为研究对象,综合岩心、测井、地震和分析化验资料,结合区域构造和沉积背景,对沉积相与沉积微相特征进行系统分析,重点探讨断拗转换背景下近物源粗碎屑沉积体系的沉积特征及其控制因素,在此基础上尝试建立中拐凸起佳木河组沉积模式,为准噶尔盆地深层砾岩储层的勘探评价提供理论框架。

1 地质背景

中拐地区位于准噶尔盆地西北缘西部隆起带东斜坡,处于克百断裂带与红车断裂带转换部位,东连玛湖凹陷,南邻盆1井西凹陷和沙湾凹陷(图1),整体表现为向东南倾没的鼻状古隆起,是盆地西北缘重要的构造—沉积转换带(王小军等,2022),周缘形成北部鼻隆、中部鼻隆和中佳鼻隆,分别向玛湖凹陷、盆1井西凹陷和沙湾凹陷延伸的古地貌格局,研究区涵盖了中拐凸起以南以及中部鼻隆以西区域。早一中二叠世,准噶尔盆地处于断陷与拗陷的构造转换阶段,盆地内部隆拗格局逐步定型,边界断裂持续活动,为佳木河组提供了充足的近源粗碎屑,沿断阶带持续沉积,形成了断裂活动与沉积充填耦合控制的厚层砂砾岩,为区域油气成藏奠定了重要的物质基础(图2)。

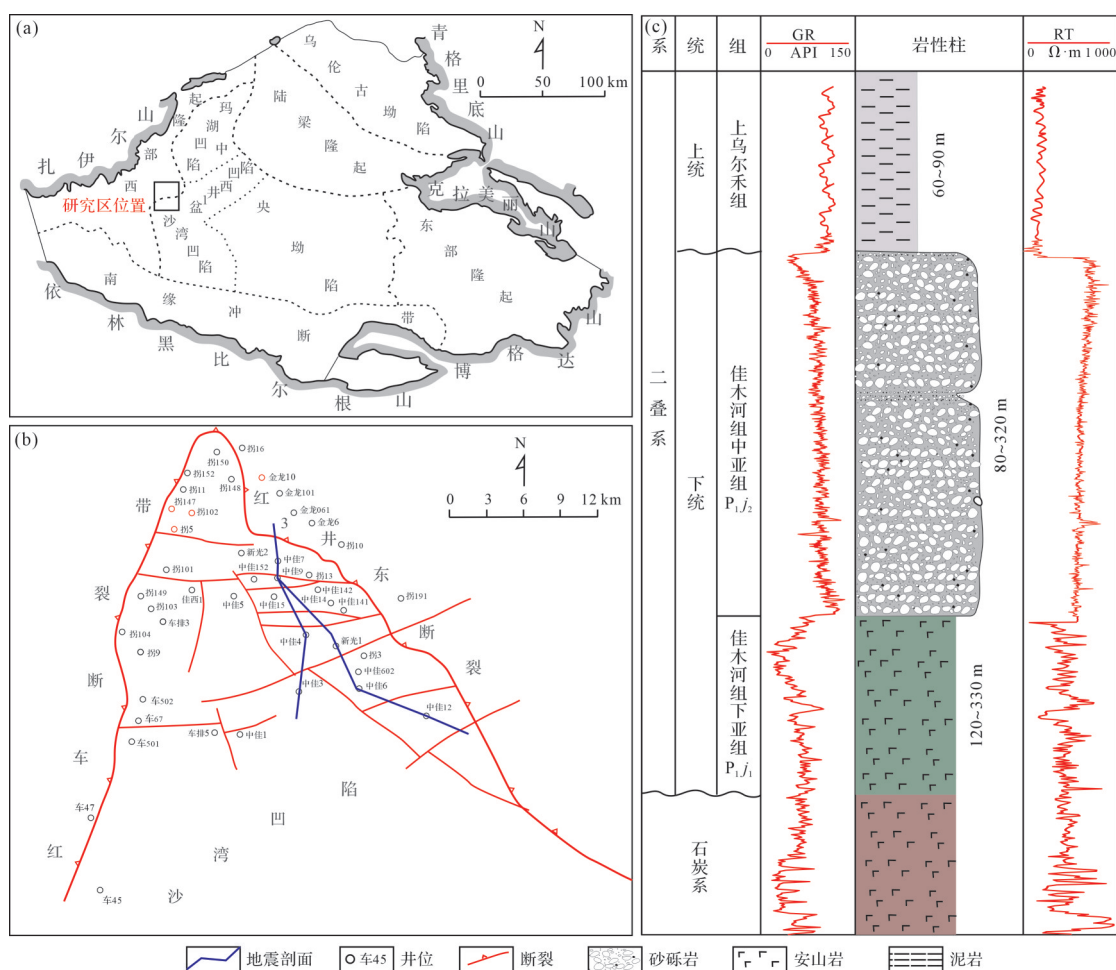


图1 中拐凸起构造背景及佳木河组纵向岩性发育特征

(a)准噶尔盆地构造单元划分;(b)中拐凸起井位分布与断裂发育特征;(c)中拐凸起佳木河组岩性特征示意图

Fig.1 Tectonic setting of the Zhongguai uplift and vertical lithologic development (lithologic succession) of the Jiamuhe Formation

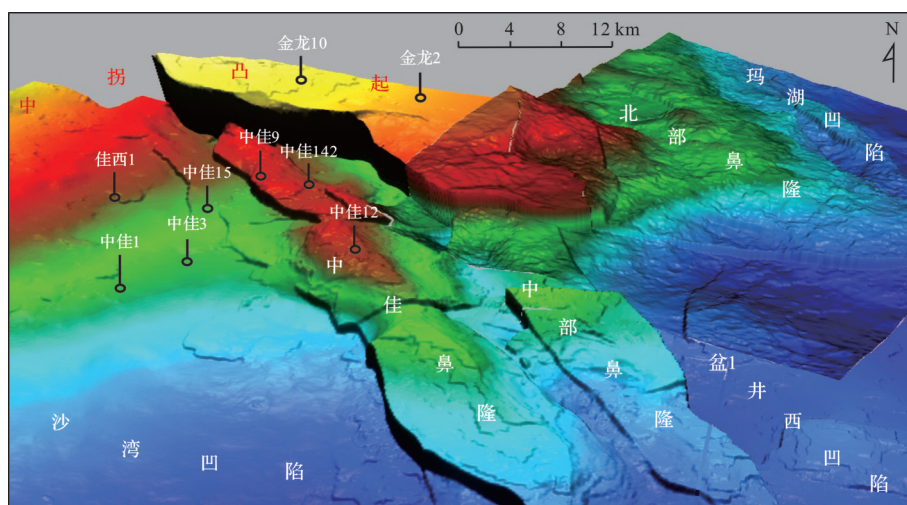


图2 中拐凸起周缘佳木河组沉积期古地貌图

Fig.2 Paleogeomorphological map of the Jiamuhe Formation depositional period around the Zhongguai uplift

2 沉积特征与沉积模式

2.1 岩石相类型

佳木河组地层厚度变化大,岩性复杂,自下而上可细分为3个亚组(P_{ij1} 、 P_{ij2} 、 P_{ij3})。中拐凸起发育中亚组(P_{ij2})和下亚组(P_{ij1}),缺失上亚组(P_{ij3})地层(图1)(孔玉华等,2014;邹姐姐等,2017;魏小松等,2025);上亚组(P_{ij3})和下亚组(P_{ij1})发育不同类型火山岩相组合,中亚组(P_{ij2})为粗碎屑岩沉积。结合岩石颜色、粒度、沉积构造与砾石支撑样式等参数,中亚组(P_{ij2})粗碎屑岩可识别出12种岩相(图3),包括泥质杂基支撑漂浮砾岩相(G_{mz})、砂质支撑砾岩相(G_{ms})、同级颗粒支撑砾岩相(G_{cs})、多级颗粒支撑砾岩相(G_{cm})、块状砾岩相(G_m)、粒序层理砾岩相(G_g)、叠瓦状砾岩相(G_i)、交错层理砾岩相(G_{t-p})、交错层理砂岩相($St-p$)、褐色泥岩相(M_{mr})、灰色粉砂质泥岩或泥岩相(F_m/M_{mh})以及浊积砂—泥岩相(Sp),复杂的岩相发育类型展现了佳木河组沉积期多类型流体搬运机制共同控制的特点。

泥质杂基支撑漂浮砾岩相(G_{mz}):砾石与泥质混杂堆积,砾石之间不接触,被泥质基质包裹,无分选,反映泥石流特征;块状砾岩相(G_m)与粒序层理砾岩相(G_g):砾石粒径差异大,砂质基质增多,砾石间形成砂泥质支撑,分选差,缺乏牵引流层理构造类型,反映碎屑流的搬运特点;多级颗粒支撑砾岩相(G_{cm})、同级颗粒支撑砾岩相(G_{cs})与叠瓦状砾岩相(G_i):颗粒粒径变化大,层理明显,分选中等,反映洪流特征;交错层理砾岩相(G_{t-p})、交错层理砂岩相

($St-p$)与叠瓦状砾岩相(G_i)反映稳定水动力条件下的牵引流沉积,褐色泥岩相(M_{mr})、灰色粉砂质泥岩相(F_m/M_{mh})反映悬浮式搬运的特点,浊积砂—泥岩相(Sp)则反映牵引流与重力流共同作用沉积。

佳木河组粗碎屑岩石相空间上呈现快速变化的特点。红车断裂与红3井东断裂附近多沉积泥质含量高、氧化色岩石类型(如图4拐102井所示),发育以杂基支撑为主的褐红色砾岩相(G_{mz} 、 G_m 、 G_g)和以砂质或颗粒支撑为主的砾岩相(G_{ms} 、 G_m 、 G_i 、 G_{t-p} 、 G_{cs} 、 G_{cm}),表现为中层到厚层特点,与褐色薄层或透镜状交错层理砂岩相($St-p$)或泥岩相(M_{mr})构成纵向岩相组合(图4)。中佳古凸与红车断裂带以东大部分区域,沉积岩石类型多具有贫泥、弱还原色的特点(图4中佳142井、中佳4井、中佳6井),呈浅灰色或浅绿灰色,砂砾岩厚度大,呈厚层块状,以砂质支撑砾岩相为主(G_{ms} 、 G_m 、 G_i 、 G_{t-p}),局部少量泥质杂基支撑砾岩相发育(G_m 、 G_g),与中薄层砂岩或泥岩($St-p$ 、 F_m)构成纵向岩相组合,局部发育韵律层理的浊积砂—泥岩。深灰色暗色泥岩相(M_{mh})仅在局部井中零星发育。

2.2 沉积微相划分与展布

基于沉积期古地貌(图2)以及重矿物平面展布特征(图5a),认为中拐凸起及其周缘佳木河组表现为北部与西部物源共同供给控制。西部物源区垂直于红车断裂带向斜坡凹陷区持续供给粗碎屑物,缓斜坡的沉积背景导致沉积厚度变化小。红3井东断裂带附近为高势差沉积背景,受中佳鼻凸古构造影响,沉积区地貌起伏大,沉积厚度变化大。在岩心岩

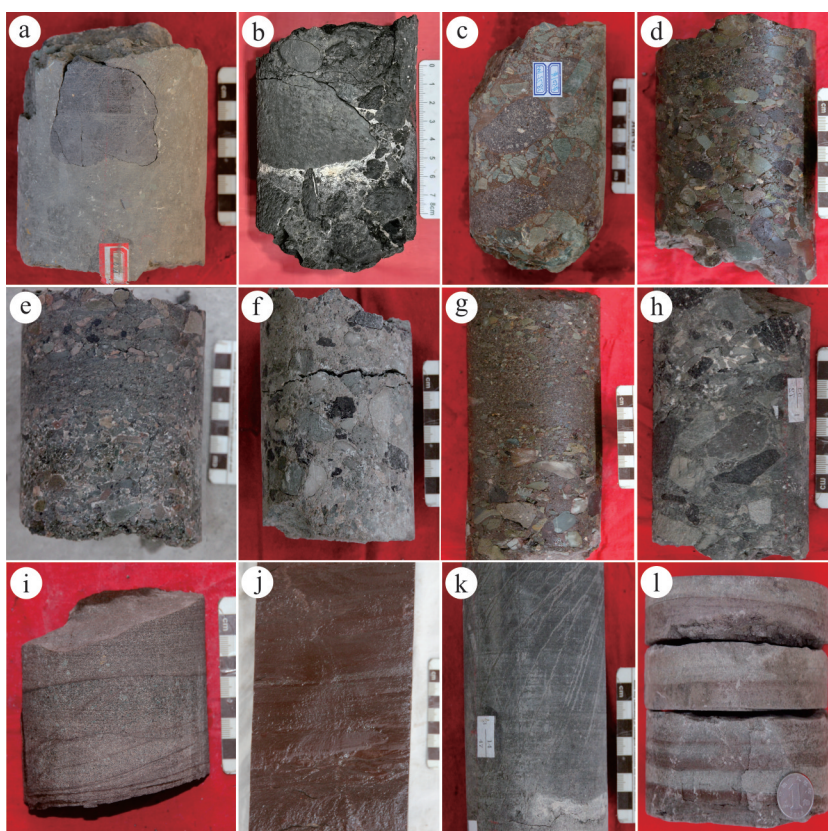


图3 中拐凸起及周缘主要岩相类型

(a)车67井,泥质杂基支撑漂浮砾岩相(Gmz);(b)中佳15井,块状砾岩相(Gm);(c)车501井,多级颗粒支撑砾岩相(Gcm);(d)拐147井,同级颗粒支撑砾岩相(Gcs);(e)车501井,交错层理砾岩相(St-p);(f)中佳6井,砂质支撑砾岩相(Gms);(g)拐147井,粒序层理砾岩相(Gg);(h)中佳1井,叠瓦状砾岩相(Gi);(i)车501井,交错层理砂岩相(St-p);(j)拐9井,褐色泥岩相(Mmr);(k)中佳6井,灰色粉砂质泥岩相(Fm);(l)中佳4井,浊积砂泥岩相(Sp)

Fig.3 Major lithofacies types of the Zhongguai uplift and its surrounding areas

相识别的基础上,结合岩相组合、古地貌特征以及沉积环境氧化条件差异,进一步将中拐凸起及周缘佳木河组划分为3种亚相9种沉积微相(表1)。扇三角洲平原亚相主要分布于断裂带向古凸方向延伸处,向凹陷区延伸不远(图5b、图6),发育水上泥石流、洪流辫状水道、辫流砂岛以及漫流沉积微相(表1),沉积岩相呈现褐色或杂色。水上泥石流微相以泥质杂基支撑漂浮砾岩相(Gmz)、块状砾岩相(Gm)与粒序层理砾岩相(Gg)为主,呈巨厚层产出,形成泥质含量高、分选差的粗—巨砾岩组合;洪流辫状水道微相发育砂质支撑砾岩相(Gms)、块状砾岩相(Gm)、叠瓦状砾岩相(Gi)以及交错层理砾岩相(Gt-p),表现为厚层到巨厚层状,形成泥质含量低、分选差的砂—砾质支撑的粗砾岩组合;辫流砂岛微相沉积同级颗粒支撑砾岩相(Gcs)和多级颗粒支撑砾岩相(Gcm),形成近乎无泥质且分选中等—好的粗砾岩组合;漫流微相则以中薄层交错层理砂岩相(St-p)和褐色泥岩相(Mmr)为主。

扇三角洲前缘亚相主要分布于中部鼻隆以西、新光2至中佳7井以南,发育碎屑流、水下分流河道、分流河道间以及浊积微相,沉积岩相表现为灰色—灰绿色。碎屑流微相主要发育厚层块状砾岩相(Gm)和粒序层理砾岩相(Gg),形成低泥质含量、砂质支撑的中粗砾岩组合,常形成叠复递变层理;水下分流河道微相以中厚层砂质支撑砾岩相(Gms)、块状砾岩相(Gm)以及叠瓦状砾岩相(Gi)为主,夹交错层理砾岩相(Gt-p),形成下粗上细的正韵律中粗—中细砾岩组合;水下分流间湾微相以灰色粉砂质泥岩或泥岩相(Fm/Mmh)为主,常与浊积砂—泥岩相(Sp)互层形成韵律层理。前扇三角洲则以泥岩为主,推测其分布范围为中佳1井与中佳3井之间或以南较大埋深区域。

与常规的扇三角洲沉积环境类比,中拐凸起区佳木河组中亚组具有独特的沉积特点:(1)平面上的砾岩沉积体粒度分异小,平原亚相与前缘亚相均表现为中粗砾岩沉积为主,外前缘则以中粗砾岩向中砾岩和中细砾岩过渡,平面跨度约20 km;(2)佳木河

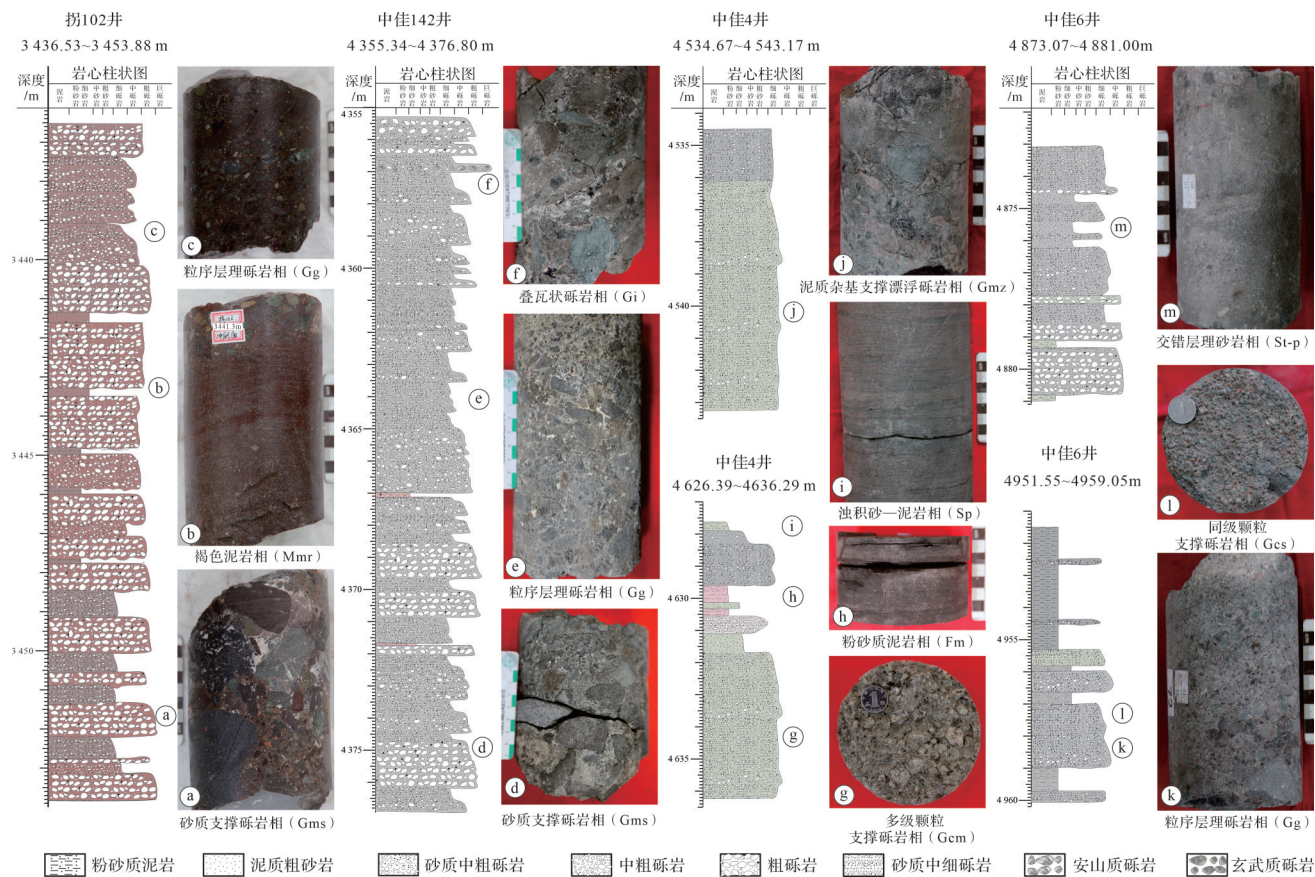


图4 中拐凸起佳木河组砂砾岩岩相组合特征对比

Fig.4 Comparison of lithofacies assemblage characteristics of conglomerate reservoirs in the Jiamuhe Formation of the Zhongguai uplift

组粗碎屑岩未见明显的湖侵与湖退交互特征,砾岩呈现平面上连续进积、空间上持续加积的沉积特征,形成砾岩的大面积连续分布;(3)以细粒沉积为主的水下分流间湾仅在前缘亚相个别井中相对富集(图6,中佳6井),其余各区域仅以少量薄夹层形式产出,且多具有浊积岩特点。因此,其形成了与中国东部断陷湖盆陡坡扇三角洲(鲜本忠等,2007;赵文智和方杰,2007;刘磊等,2015;朱筱敏等,2022)以及区域环玛湖凹陷退覆式扇三角洲不同的沉积模式(唐勇等,2018)(表2)。

2.3 断阶型扇三角洲沉积模式

基于沉积相研究认识,综合油田古地貌恢复、构造演化与断裂刻画研究成果,认为佳木河组粗碎屑与环玛湖凹陷百口泉组和乌尔禾组的砂砾岩沉积模式显著不同,环玛湖凹陷百口泉组和乌尔禾组为受多级坡折带控制的退覆式扇三角洲沉积,而佳木河组为断阶型扇三角洲沉积(表2)。该类型三角洲发育于断拗转换阶段或强断裂活动背景下,受多级同沉积断阶与高势差古地貌共同控制,近源粗碎屑在洪流、泥石流、碎屑流及牵引流等多类型高能搬运机制作用下,沿多级断阶向凹陷区持续进积与

表2 三种类型扇三角洲特征对比

Table 2 Comparison of characteristics among three types of fan deltas

判别项	断阶型扇三角洲	退覆式扇三角洲	常规陡坡型扇三角洲
构造背景	多级断阶+断拗转换	坡折带控制	单一陡坡断裂
进积方式	分段持续进积	旋回式前积-退积	近陡坡急剧卸载
垂向特征	多期持续加积	退覆式叠置	局部厚层加积
岩相特征	厚层贫泥砾岩	砂泥互层明显	高泥质含量粗碎屑
前缘沉积	细碎屑沉积贫乏	细粒沉积较发育	细粒沉积较局限
储层特征	连续优质砾岩	相带控制明显	非均质强

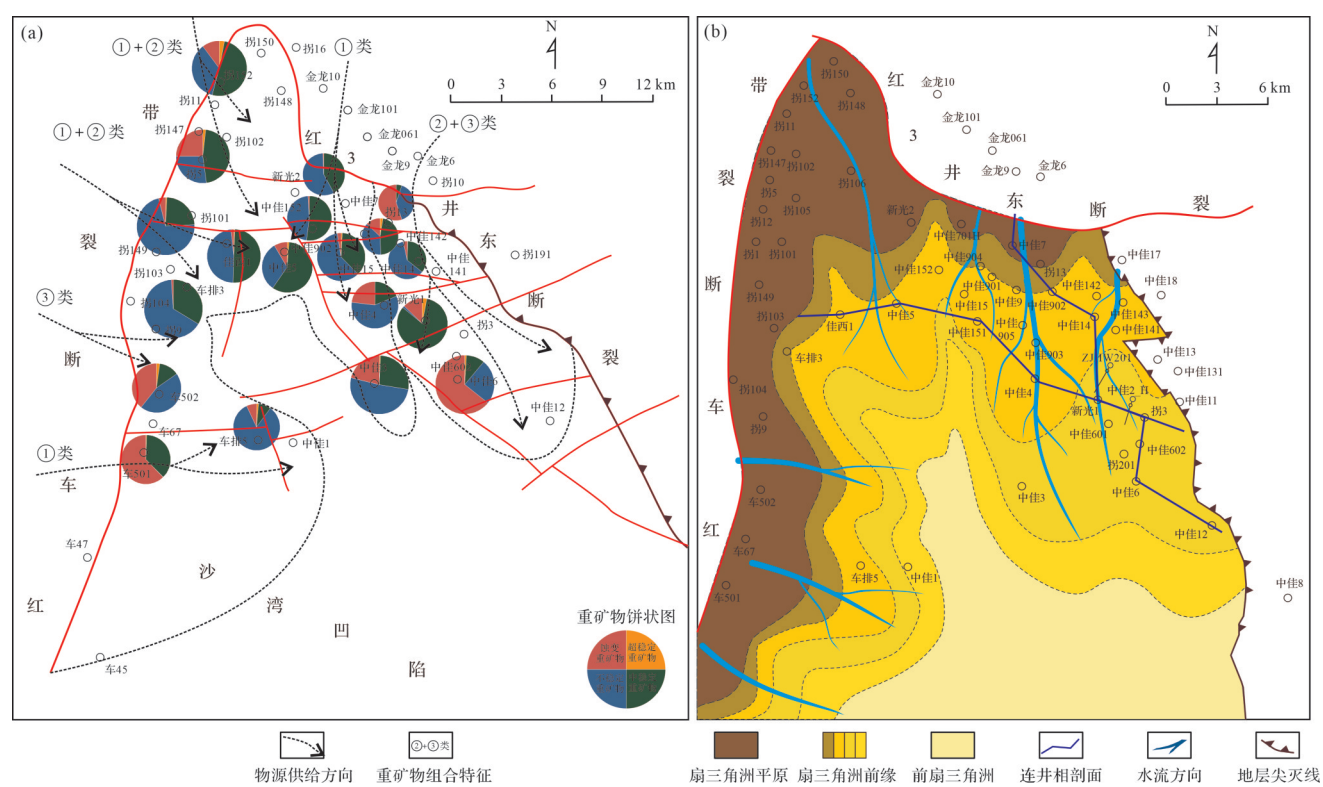


图5 中拐凸起佳木河组沉积期重矿物与沉积相展布图

(a)佳木河组沉积期重矿物分布图;(b)佳木河组沉积相平面图;佳木河组碎屑岩矿物成熟度较低,搬运距离较短;重矿物以普通辉石、磁铁矿、钛铁矿和褐铁矿为主,绿帘石和白钛矿次之,表现为不稳定矿物+中稳定矿物+蚀变型中稳定矿物的组合特点;不稳定重矿物为:普通辉石+绿帘石;中稳定重矿物:磁铁矿+钛铁矿,蚀变型中稳定重矿物:褐铁矿+白钛矿;重矿物平面组合表现为①类(不稳定矿物为主+中稳定矿物为辅),②类(中稳定矿物为主+不稳定矿物为辅),③类(蚀变重矿物为主+中稳定矿物为辅)或其间2类的叠加组合样式

Fig.5 Distribution map of heavy minerals and sedimentary facies of the Jiamuhe Formation during the depositional period in the Zhongguai uplift

表1 中拐凸起佳木河组碎屑岩沉积微相与岩相特征表

Table 1 Sedimentary microfacies and lithofacies characteristics of the clastic rocks in the Jiamuhe Formation of the Zhongguai uplift

亚相	扇三角洲平原				扇三角洲前缘				前扇三角洲
微相	水上泥石流	辫状水道	辫流砂岛	漫流	碎屑流	水下分流河道	水下分流河道间	浊积岩	前扇三角洲泥
搬运介质	重力流	牵引流	牵引流	牵引流	重力流	牵引流	牵引流	重力流	牵引流
颜色	褐色、杂色	褐色、杂色	褐色、杂色	褐色	杂色—灰色	灰色—灰绿色	灰—灰绿色	灰色	灰—灰黑色
粒度	巨砾—泥	粗砾为主	粗砾为主	砂质—泥质	粗—中砾	粗—中砾	砂—泥	粉砂—细砂	泥
沉积构造	厚层块状	槽状交错层理冲刷面构造	厚层块状	交错层理	漂浮的砾石泥岩撕裂屑粒序层理	交错层理冲刷面定向砾石	水平层理	韵律层理	水平层理
沉积结构	杂基支撑分选差磨圆度差	砂质/颗粒支撑分选中—差磨圆度差	颗粒支撑分选中—好渗透结构磨圆度差	高含量杂基分选中等	砂质支撑分选差磨圆度中—差	砂质支撑分选中等磨圆度中—差	泥质含量高分选中—好	砂质支撑分选中等磨圆度中—差	黏土含量高分选好
发育岩相	Gmz Gm Gg	Gms Gm Gi Gt-p	Gcs Gcm	St-p Mmr	Gm Gg	Gms Gm Gi Gt-p	St-p Fm	Sp	Fm Mmh
岩心照片									

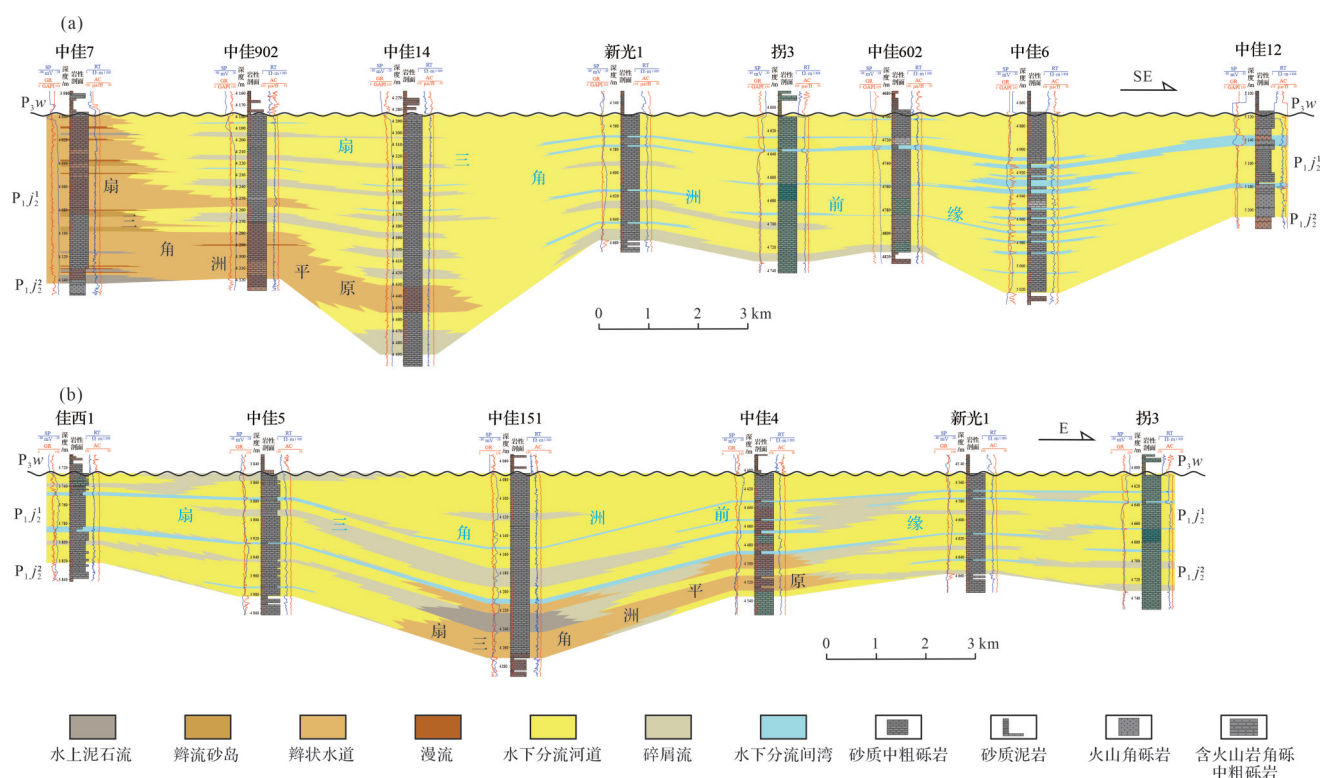


图6 准噶尔盆地中佳地区连井沉积相剖面图

(a)北西—南东向剖面;(b)近东西向剖面,剖面图位置见图5

Fig.6 Sedimentary facies correlation section across wells in the Zhongjia area, Junggar Basin

垂向加积,形成厚层贫泥粗碎屑岩的一类扇三角洲沉积体系。

从平面展布来说,中拐地区受北部与西部多物源供给共同控制,粗碎屑沿断裂控制的坡降方向快速入湖,在断阶前缘和下降盘一侧厚层堆积,形成多个彼此连接又相互独立的扇体或复合扇体(图7)。受断裂分段活动及古地貌起伏影响,粗碎屑分段推进,向深凹区逐步进积。从剖面结构来说,断阶型扇三角洲具有多期加积和旋回性叠置的特点。多级同沉积断裂不断提供新的可容纳空间,导致粗碎屑沉积在断阶前缘持续加积,垂向上形成厚层到巨厚层反复叠置的砾岩沉积体。从沉积动力学过程来看,中拐地区佳木河组扇三角洲沉积并非由单一牵引流控制而成,而是多种高能搬运机制共同作用的结果。浅水近源陡坡断裂带环境下形成泥石流+牵引流的沉积岩相类型,深水断阶环境形成重力碎屑流+牵引流的沉积岩相特征,粒序层、厚层块状层、叠复递变层广泛分布,反映出明显的高频事件沉积特征。尤其是断阶根部,由于坡度突变,流体携带粗碎屑快速卸载,集中堆积,形成厚层贫泥砾岩的集中发育带。

以中佳14井区为例,北部物源穿越红3井东断裂,在断裂带向物源方向表现为厚层泥石流夹辫状水道的砾岩沉积。由于红3井东断裂同沉积生长的特点,在断裂带以南形成高势差水下沉积环境,洪积扇高泥质含量碎屑物在重力作用和牵引流共同控制下,高能态入湖,形成水下扇体沉积,粗碎屑物与细粒泥质成分分离,形成厚层块状粒序层理砾岩,中佳701井和中佳7井周缘,由于断裂带附近以重力垮塌作用为主,形成棕褐色或红褐色泥质支撑砾岩,其余整体表现为以灰褐色或浅褐灰色砂质支撑中粗砾岩为主,细粒泥质则以夹层形式沉积于水道间或向坳陷区悬浮搬运。与此同时,受同沉积断阶影响,近断裂带断阶处形成的厚层粗碎屑沉积,在凹陷区各断阶附近,受重力和水道控制,形成次级水下扇体向前延伸,经过二次水下扇体的搬运,前期的贫泥粗碎屑夹少量含泥砾岩,以碎屑流和牵引流形式被再分配沉积,形成厚层块状、粒度粗、贫泥质、砂质支撑的砂砾岩体。以中佳142井为例,佳木河组纵向201.6 m岩心整体以厚层砂质粗砾岩和中粗砾岩为主,仅局部发育薄层泥岩,为后期油气成藏奠定了重要的储层物质基础。

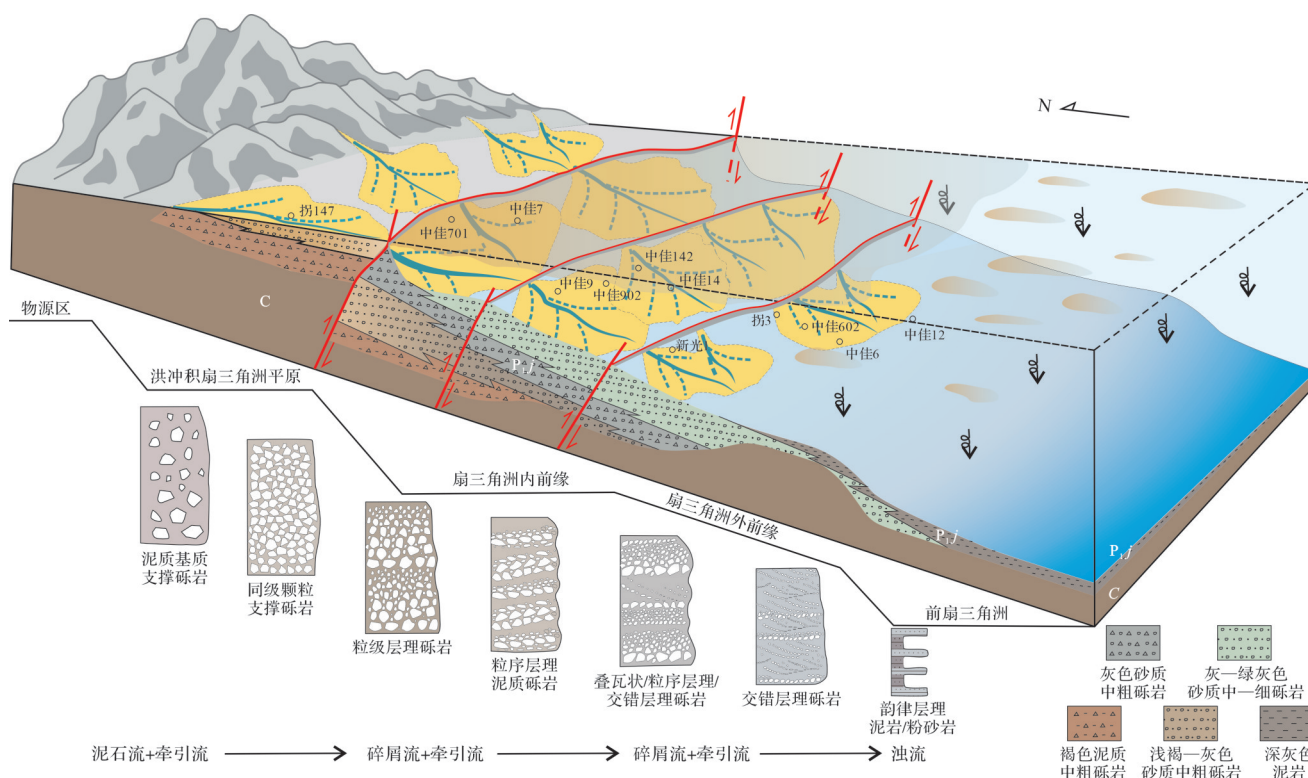


图7 中拐凸起佳木河组断阶型扇三角洲沉积模式

Fig.7 Depositional model of the fault-terrace-controlled fan delta in the Jiamuhe Formation, Zhongguai uplift

3 断阶型扇三角洲形成机制及油气勘探意义

3.1 断阶型扇三角洲沉积成因与控制因素

中拐凸起佳木河组厚层砾岩的形成是多类型环境参数耦合作用的结果。构造发育情况、物源供给特征、搬运介质变化与沉积地貌条件相互影响,形成满凹砾岩的时空展布格局。

1) 断拗转换期提供充足物源供给

中拐凸起处于准噶尔盆地西北缘的山前拗陷区,石炭纪至早二叠世,区域构造背景表现为伸展—弱张扭应力场,为裂陷—断陷的初始阶段(吴孔友等,2017),石炭系基底断裂开始活动,形成早期断阶式地貌雏形,为后期继承性断裂活动构造的发育奠定了基础。早中二叠世断—拗转换背景下,区域应力场由伸展向挤压走滑过渡,盆地由裂陷向拗陷转换,拗陷边缘持续活动的同沉积断裂为凹陷区提供了丰富的物源供给。以中佳地区最大主物源方向为例(图8),红3井东断裂在早二叠世持续逆冲推覆(吴孔友等,2017;张欣欣等,2018;李道清等,2024),北部凸起区持续抬升,形成物源区与沉积区之间的

高势差,凸起区石炭系火山岩为凹陷区提供了丰富的安山岩和玄武质安山岩碎屑。

2) 短时强降水形成复杂搬运机制

佳木河组沉积期在泛大陆内部环境及盆地封闭性的共同作用下,整体表现为干旱—半干旱气候背景(吴绍祖,1998;曹正林等,2024),降水以间歇性强降水事件为主,易诱发短时洪水,从而在短期内形成强物源供给和高能洪流活动。北部凸起区粗碎屑物在高势差背景下,随高能泥石流或洪流穿越红3井东断裂,持续向凹陷区搬运粗碎屑,为中拐地区满凹砾岩的发育提供了强有利的水动力条件。

3) 边缘同沉积断裂造就高可容纳空间背景

中拐地区佳木河组沉积区为准噶尔盆地西部拗陷斜坡区上的局部凹陷(图8),沉积面积为200~220 km²,平面跨度小,展布范围窄,断裂凸起区持续供给的粗碎屑未经过长距离的搬运,集中沉积于该局部凹陷之内,因此平面上粒度分异小,整体呈现砾岩沉积的特点。

中拐凸起以南—中部鼻凸以西(图2),沉积水深差异显著,导致砂砾岩颜色平面变化大。红车断裂带附近井位以及红3井东断裂附近少数井位呈现

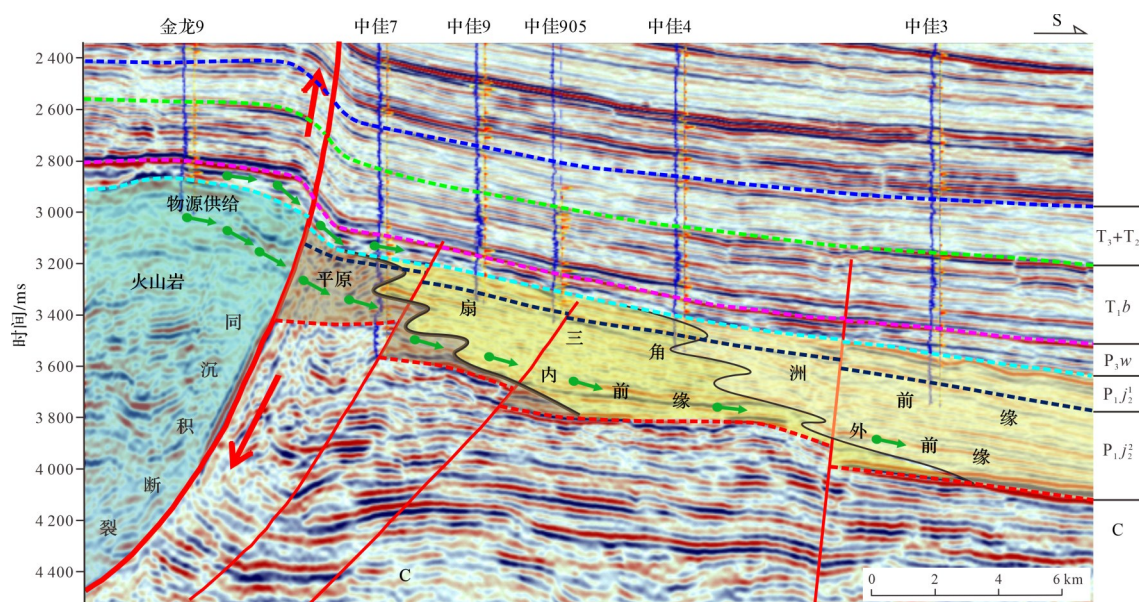


图8 垂直红3井东断裂带佳木河组最大主物源方向地震剖面

Fig.8 Seismic profile along the fault belt of east of well Hong 3, showing the direction of the main maximum sediment-source supply of the Jiamuhe Formation

为浅水氧化环境的褐红色或杂色,远离断裂带向凹陷区,岩石颜色多表现为深水沉积的浅灰或浅绿灰色,呈水下游还原环境沉积的特点。浅水氧化色岩石砾间多富泥质杂基,泥石流沉积富足,深水还原色岩石砾间为贫泥质杂基、富砂质或细砾支撑的特点,主要为水下分流河道与碎屑流沉积,该类型岩相和微相展布样式与区域断裂发育史密切相关。红车断裂带与红3井东断裂具有同沉积断裂的特点(图8),形成水上洪积扇平原沉积区与水下前缘沉积区的高势差背景,富泥质杂基砾岩进入水下沉积区后,在高压水动力条件下,细粒杂基呈悬浮式搬运为主,与砾石颗粒直接分离,形成了砾岩贫泥的特点。与此同时,同沉积断裂背景下,凹陷区可容纳空间持续增加,为厚层砾岩储层的形成提供了持续加积的可能。

4) 多期断阶发育控制砾岩进积展布

除盆缘逆冲推覆断裂带之外,佳木河组沉积期凹陷区内发育多区域小型逆冲和同沉积走滑断层(吴孔友等,2017;李道清等,2024),形成多断阶的沉积背景(图7,9)。凸起物源区提供的粗碎屑物被搬运至同沉积断裂带后,进入凹陷区水下沉积环境,在水下断阶的控制下,重力流与牵引流共同作用,形成多次断阶型水下扇沉积,粗碎屑沉积物通过水下扇分流河道和多区域重力碎屑流接力的形式,持续向凹陷前缘进积搬运,形成了满凹的砂砾岩沉积展布特征。

3.2 油气勘探意义

准噶尔盆地中拐凸起佳木河组油气勘探经历了由发现验证向沉积模式主导的深化转变过程。早期以拐3井获得工业气流为代表,证实了佳木河组冲积扇型粗碎屑岩具备成藏潜力,但对沉积体系类型、优质储层发育以及油气富集控制作用认识不足;随着新光1井等多口井油气显示与试油见流,逐步明确沉积相带展布与油气分布的关系,勘探思路由单一构造目标转向沉积相约束下的综合地质评价,促进了沉积相的系统研究。近年来,通过多口高产井及连续取心资料的积累,深化了砂砾岩储层“甜点”形成机制的认识,沉积认识由相带划分向沉积体系与沉积模式提升,最终形成了断阶型扇三角洲沉积模式。断阶型扇三角洲砾岩沉积模式揭示了优质砂砾岩储层的发育特征及其形成机制,对中拐凸起佳木河组油气勘探具有重要意义。一方面,断一拗转换阶段持续活动的同沉积断裂不仅为粗碎屑物质提供了稳定的物源供给和高势差沉积环境,而且通过断阶式地貌构建了有利于厚层砾岩持续加积的沉积空间,使近断裂带及其向凹陷过渡部位成为厚层、贫泥、砂质支撑砾岩的集中发育区,是优质储层最具潜力的空间单元。另一方面,在短时性洪流、泥石流与牵引流的共同作用下,粗碎屑物质在水下高能环境中发生有效快速分选与再分配,形成多期叠置的水下扇及次级水下扇体,该类砂砾岩体粒度粗、泥质含量

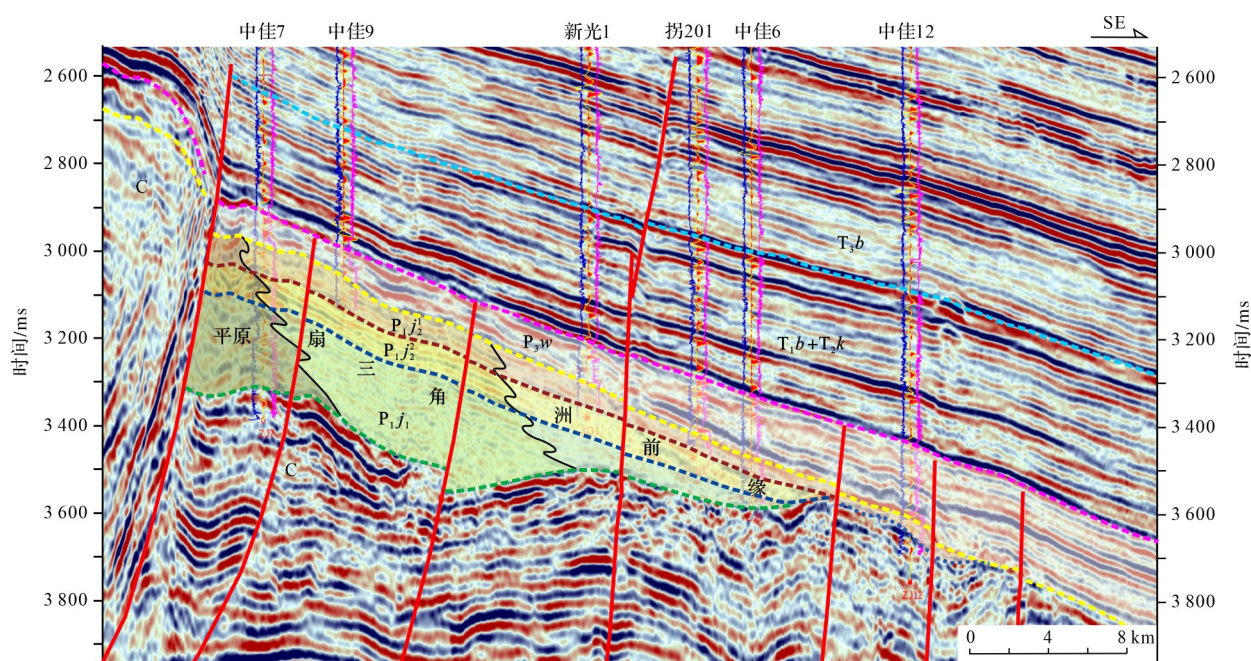


图9 中拐凸起凹陷区断阶分布地震示意图

Fig.9 Seismic profile showing the distribution of fault-terraces in the depression area of the Zhongguai uplift

低、纵向旋回叠置频繁,为优质储层的形成提供了良好的物质基础。同时,多期同沉积断阶控制下的扇体前展与叠置,不仅增强了优质储层的纵向叠合和横向连通,也有利于断裂输导体系与砂砾岩体之间形成良好的配置关系,为油气近源充注、短距离运移及规模性聚集提供了优越的储集与输导条件。在断阶型扇三角洲沉积模式的指导下,中拐地区先后发现了中佳142井、中佳14井以及中佳143井等高产油气井,为佳木河组油气藏的规模集中勘探提供了统一的沉积学框架。

4 结论

(1) 中拐凸起佳木河组粗碎屑岩为二叠系断一坳转换背景下的断阶型扇三角洲沉积,粗碎屑主要由碎屑流、高密度洪流和牵引流共同搬运,形成平原泥石流和洪积扇向前缘水下扇的演变机制,多期扇体在凹陷区内纵向厚层加积、侧向接替进积,形成满凹展布的砾岩沉积体。

(2) 研究区断阶型扇三角洲的形成主要受四方面因素控制:断一坳转换期稳定而充足的物源供给为水下扇体持续前展提供物质基础;短时强降水造就复杂搬运机制;同沉积断裂创建高可容纳空间有利于厚层砾岩持续加积;断阶发育的古地理背景是

砾岩满凹展布的关键。

(3) 断阶型扇三角洲沉积模式的建立,深化了对中拐凸起佳木河组砾岩储层成因及空间展布规律的认识,为优选有利勘探区带和部署近断裂带及断阶控制下的“甜点”井位提供了重要地质依据。该模式揭示了类似断坳转换背景下近源高能粗碎屑沉积形成厚层、贫泥质优质储层的内在规律,可为其他盆地凹陷斜坡带、断裂转换带及隐伏断阶带的深层—超深层粗碎屑岩油气勘探提供类比依据。

数据可用性声明

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行 (Science Data Bank, ScienceDB) 平台公开发布,访问地址为 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.cjxb.00032> 和 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.cjxb.00032>。

致谢 感谢张昌民教授在文章修改过程中给予的帮助。

参考文献 (References)

- 曹正林,周川闽,龚德瑜,等. 2024. 准噶尔盆地中—下二叠统构造—岩相古地理特征与烃源岩分布[J]. 石油学报, 45(9): 1349-1371. [Cao Zhenglin, Zhou Chuanmin, Gong Deyu, et al. 2024. Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle-Lower Permian in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 45(9): 1349-1371.]

- 董雪梅,李静,潘拓,等. 2023. 准噶尔盆地红车断裂带油气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 44(5): 748-764. [Dong Xuemei, Li Jing, Pan Tuo, et al. 2023. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of Hongche fault zone in Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 44(5): 748-764.]
- 郭沫贞,徐洋,寿建峰,等. 2017. 准噶尔盆地西北缘二叠系碎屑岩次生孔隙发育控制因素[J]. 沉积学报, 35(2): 330-342. [Guo Mo-zhen, Xu Yang, Shou Jianfeng, et al. 2017. Controlling factors of secondary pore development and petroleum exploration significance of Permian clastic rocks in northwest margin of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(2): 330-342.]
- 孔玉华,鲍海娟,李振华,等. 2014. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组层序地层模式[J]. 特种油气藏, 21(5): 60-64. [Kong Yuhua, Bao Haijuan, Li Zhenhua, et al. 2014. Sequence stratigraphic mode of Jiamuhe Formation in Zhongguai Bulge, Junggar Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 21(5): 60-64.]
- 李道清,兰浩,郭巧珍,等. 2024. 准噶尔盆地中拐凸起南部构造演化及油气地质意义:以中佳地区下二叠统佳木河组为例[J]. 东北石油大学学报, 48(5): 48-61. [Li Daoqing, Lan Hao, Guo Qiaozhen, et al. 2024. Structural evolution and geological significance of hydrocarbons in the south of Zhongguai uplift, Junggar Basin: A case study of the Jiamuhe Formation of the Lower Permian in Zhongjia area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 48(5): 48-61.]
- 刘磊,钟怡江,陈洪德,等. 2015. 中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究[J]. 沉积学报, 33(6): 1170-1181. [Liu Lei, Zhong Yijiang, Chen Hongde, et al. 2015. Contrastive research of fan deltas and braided river deltas in half-graben rift lake basin in East China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(6): 1170-1181.]
- 牟泽辉,朱德元,卿崇文. 1992. 准噶尔盆地石炭、二叠系沉积相和模式[J]. 新疆石油地质, 13(1): 35-48. [Mou Zehui, Zhu Deyuan, Qing Chongwen. 1992. Sedimentary facies and patterns of Carboniferous and Permian in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 13(1): 35-48.]
- 潘虹,于庆森,李晓山,等. 2024. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系重新认识及油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 45(1): 215-230. [Pan Hong, Yu Qingsen, Li Xiaoshan, et al. 2024. Recognition of the Carboniferous strata in the Hongche fault zone, Junggar Basin and its hydrocarbon accumulation characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 45(1): 215-230.]
- 唐勇,徐洋,李亚哲,等. 2018. 玛湖凹陷大型浅水退覆式扇三角洲沉积模式及勘探意义[J]. 新疆石油地质, 39(1): 16-22. [Tang Yong, Xu Yang, Li Yazhe, et al. 2018. Sedimentation model and exploration significance of large-scaled shallow retrogradation fan delta in Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 39(1): 16-22.]
- 王韬,郑孟林,任海蛟,等. 2021. 准噶尔盆地玛湖凹陷及周缘佳木河组划分对比新认识与天然气勘探方向[J]. 中国石油勘探, 26(4): 99-112. [Wang Tao, Zheng Menglin, Ren Haijiao, et al. 2021. New understandings of stratigraphic division and correlation of Jiamuhe Formation and natural gas exploration target in Mahu Sag and its periphery, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(4): 99-112.]
- 王小军,宋永,郑孟林,等. 2022. 准噶尔西部陆内盆地构造演化与油气聚集[J]. 地学前缘, 29(6): 188-205. [Wang Xiaojun, Song Yong, Zheng Menglin, et al. 2022. Tectonic evolution of and hydrocarbon accumulation in the western Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 29(6): 188-205.]
- 魏小松,严德天,郑孟林,等. 2025. 准噶尔盆地西部地区主要不整合面形成演化与油气地质意义[J]. 地质学报, 99(12): 4019-4037. [Wei Xiaosong, Yan Detian, Zheng Menglin, et al. 2025. The formation, evolution, and petroleum geological significance of major unconformities in the western region of the Junggar Basin, China [J]. Acta Geologica Sinica, 99(12): 4019-4037.]
- 吴和源,唐勇,常秋生. 2017. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组沸石类胶结砂砾岩储集层成因机理[J]. 新疆石油地质, 38(3): 281-288. [Wu Heyuan, Tang Yong, Chang Qiusheng. 2017. Genesis of sandy conglomerate reservoirs cemented by zeolites in Jiamuhe Formation of Zhongguai swell, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 38(3): 281-288.]
- 吴孔友,刘波,刘寅,等. 2017. 准噶尔盆地中拐凸起断裂体系特征及形成演化[J]. 地球科学与环境学报, 39(3): 406-418. [Wu Kongyou, Liu Bo, Liu Yin, et al. 2017. Characteristics, formation and evolution of fault system in Zhongguai uplift of Junggar Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 39(3): 406-418.]
- 吴绍祖. 1998. 从气候探讨新疆北部石炭—二叠纪生油层位[J]. 新疆地质, 16(1): 58-68. [Wu Shaouzu. 1998. Paleoclimatic discussion on Carboniferous-Permian oil-generating strata in the northern Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 16(1): 58-68.]
- 郗诚,高军,魏利燕,等. 2015. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组潜力区预测[J]. 新疆石油地质, 36(4): 385-388, 400. [Xi Cheng, Gao Jun, Wei Liyan, et al. 2015. Prediction of potential area of Jiamuhe Formation of Lower Permian in Zhongguai Swell in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 36(4): 385-388, 400.]
- 鲜本忠,王永诗,周廷全,等. 2007. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素:以渤海湾盆地济阳拗陷车镇凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 34(4): 429-436. [Xian Benzhong, Wang Yongshi, Zhou Tingquan, et al. 2007. Distribution and controlling factors of glutinite bodies in the actic region of a rift basin: An example from Chechen Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 34(4): 429-436.]
- 鄯继华,张鹏,陈世悦,等. 2007. 沾化凹陷断拗转换期层序地层及沉积特征[J]. 新疆石油地质, 28(4): 465-467. [Yan Jihua, Zhang Peng, Chen Shiyue, et al. 2007. Sequence stratigraphy and sedimentary response of fault-depression transform period in Zhanhua Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 28(4): 465-467.]
- 杨川,李啸,吴涛,等. 2023. 准噶尔盆地致密砾岩储层特征及“甜点”

- 预测:以中佳地区佳木河组二段一砂组储层为例[J]. 天然气地球科学, 34(2): 253-270. [Yang Chuan, Li Xiao, Wu Tao, et al. 2023. Characteristics and "sweet spot" prediction of tight conglomerate reservoir: Case study of the first sand group of the Second member of Jiamuhe Formation in the Zhongjia area, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 34(2): 253-270.]
- 于兴河,姜辉,李胜利,等. 2007. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素:以济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 19(1): 39-45. [Yu Xinghe, Jiang Hui, Li Shengli, et al. 2007. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China: A case study of Dongying Sag of Jiyang Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 19(1): 39-45.]
- 张昌民,朱锐,郭旭光,等. 2020. 干旱地区河流扇三角洲—河流扇演变模式:来自黄羊泉扇的启示[J]. 地球科学, 45(5): 1791-1806. [Zhang Changmin, Zhu Rui, Guo Xuguang, et al. 2020. Arid fluvial fan-delta-fluvial fan transition: Implications of Huangyangquan fan area[J]. Earth Science, 45(5): 1791-1806.]
- 张顺存,姚卫江,邢成智,等. 2011. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起:五、八区火山岩岩相特征[J]. 新疆石油地质, 32(1): 7-10. [Zhang Shuncun, Yao Weijiang, Xing Chenzhi, et al. 2011. Lithofacies of volcanic rocks from Zhongguai swell to district-5 and district-8 in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 32(1): 7-10.]
- 张欣欣,高凤琳,张旺,等. 2018. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起断裂发育特征及构造变形过程[J]. 科学技术与工程, 18(10): 6-11. [Zhang Xinxin, Gao Fenglin, Zhang Wang, et al. 2018. Fault characteristics and deformation process of Zhongguai uplift in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 18(10): 6-11.]
- 张志杰,周川闽,袁选俊,等. 2023. 准噶尔盆地二叠系源—汇系统与古地理重建[J]. 地质学报, 97(9): 3006-3023. [Zhang Zhijie, Zhou Chuanmin, Yuan Xuanjun, et al. 2023. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in the Junggar Basin, northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 97(9): 3006-3023.]
- 赵文智,方杰. 2007. 不同类型断陷湖盆岩性—地层油气藏油气富集规律:以冀中坳陷和二连盆地岩性—地层油气藏对比为例[J]. 石油勘探与开发, 34(2): 129-134. [Zhao Wenzhi, Fang Jie. 2007. Petroleum enrichment rules in lithologic and stratigraphic pools in different faulted basins: An example from the correlation of lithologic and stratigraphic pools in Jizhong Depression and in Erlian Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 34(2): 129-134.]
- 赵玉光,肖林萍. 1994. 准噶尔盆地地壳动力学与油气储集层沉积相模型[J]. 岩相古地理, 14(2): 10-24. [Zhao Yuguang, Xiao Linping. 1994. Crustal dynamics and sedimentary facies models of the oil and gas reservoirs in the Junggar Basin[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 14(2): 10-24.]
- 朱红涛,刘可禹,朱筱敏,等. 2018. 陆相盆地层序构型多元化体系[J]. 地球科学, 43(3): 770-785. [Zhu Hongtao, Liu Keyu, Zhu Xiaomin, et al. 2018. Varieties of sequence stratigraphic configurations in continental basins[J]. Earth Science, 43(3): 770-785.]
- 朱筱敏,陈贺贺,葛家旺,等. 2022. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. 石油与天然气地质, 43(4): 746-762. [Zhu Xiaomin, Chen Hehe, Ge Jiawang, et al. 2022. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins[J]. Oil & Gas Geology, 43(4): 746-762.]
- 邹姐姐,张大权,聂波,等. 2017. 准噶尔盆地中拐凸起上二叠统佳木河组火山岩油气成藏演化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 32(6): 44-50. [Zou Niuniu, Zhang Daquan, Nie Bo, et al. 2017. Evolution of volcanic hydrocarbon reservoirs of the Upper Permian Jiamuhe Formation in Zhongguai uplift, Junggar Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 32(6): 44-50.]
- Kazanci N, Varol B. 1990. Development of a mass flow-dominated fan-delta complex and associated carbonate reefs within a transgressive Paleocene succession, Central Anatolia, Turkey[J]. Sedimentary Geology, 68(4): 261-278.
- McPherson J G, Shanmugam G, Moiola R J. 1987. Fan-deltas and braid deltas: Varieties of coarse-grained deltas[J]. Geological Society of America Bulletin, 99(3): 331-340.
- Nemec W, Steel R J. 1988. What is a fan delta and how do we recognize it? [M]//Nemec W, Steel R J. Fan deltas: Sedimentology and tectonic settings. London: Blackie & Son Ltd. : 3-15.
- Yao Z Q, Yu H T, Yang F, et al. 2023. Provenance, depositional environment, and paleoclimatic conditions of a near-source fan delta: A case study of the Permian Jiamuhe Formation in the Shawan Sag, Junggar Basin[J]. Minerals, 13(10): 1251.
- Zhi D M, Liu M X, Chen X W, et al. 2022. Stratigraphic characteristics and sediment-filling process of the Early Permian Fengcheng Formation in the northwestern margin of the Junggar Basin, Northwest China[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 945563.

Depositional Model and Exploration Significance of the Fault-Terrace-Controlled Fan Delta in the Zhongguai Area, Junggar Basin

WU HeYuan^{1,2}, WU Tao³, TANG Yong⁴, LIU HaiLei³, JING TaoTao³, WU WeiTao³, YAN WenQi³, JIANG ZuQiang³, YANG MengYun³, DIAO ZhiLong³, GUO RuiLiang^{1,2}, LIU BoBiao^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

4. Xinjiang Research Institute of Huairou Laboratory, Urumqi 830000, China

Abstract: [Objective] The Permian Jiamuhe Formation in the Zhongguai area of the Junggar Basin contains a suite of proximal coarse clastic deposits developed during the tectonic transition from rifting to depression. However, the depositional system type, depositional model, and formation mechanism of thick conglomerates remain poorly constrained, thereby limiting hydrocarbon exploration of conglomeratic reservoirs in the region. This study aims to clarify the depositional system type of the coarse clastic succession in the Jiamuhe Formation, reveal the controlling factors governing the development of thick conglomerates, establish a depositional model, and discuss its exploration significance. [Methods] Based on analyses of heavy mineral assemblages, paleogeomorphologic reconstruction, and seismic profile interpretation, combined with results from tectonic evolution and fault characterization, extensive core-based lithofacies analyses were conducted. On the basis of sedimentary microfacies identification and classification, the depositional system was summarized, the geological controls on thick conglomerate formation in the Jiamuhe Formation were clarified, and a depositional model was established. [Results] Three subfacies—fan delta plain, fan delta front, and pro-fan delta—and nine sedimentary microfacies were identified in the Jiamuhe Formation of the Zhongguai area, indicating an overall progradational fan delta depositional system controlled by multiple syndepositional fault terraces. The depositional development was jointly governed by four major factors: (1) during the rift-depression transitional stage, elevated topography, abundant sediment supply, and high topographic potential energy provided sufficient coarse clastic input; (2) under arid to semi-arid climatic conditions, frequent short-duration intense precipitation triggered high-energy transport processes including flood flows, debris flows, and clastic flows; (3) continuous syndepositional fault activity generated large accommodation space, promoting sustained aggradation of thick conglomerates; and (4) the development of multi-stage fault terraces controlled the continuous progradation of subaqueous fan bodies, resulting in basin-filling conglomerate distribution. Based on these characteristics, a fault-terrace-controlled fan delta depositional model was established. [Conclusions] The fault-terrace-controlled fan delta represents a distinctive fan delta depositional system developed under a rift-depression transitional tectonic setting, controlled by multiple syndepositional fault terraces and characterized by sustained proximal supply of high-energy coarse clastic sediments. It exhibits continuous progradation and aggradation, the combined action of multiple high-energy transport mechanisms, and the superposition of thick, mud-poor conglomerates. This model challenges the traditional perception that “proximal source areas necessarily correspond to poor reservoirs” and provides a depositional analogue for hydrocarbon exploration of deep to ultra-deep conglomeratic reservoirs in basin depressions and slope zones, fault transition belts, and concealed fault-terrace zones in other basins.

Key words: fan delta; depositional model; Jiamuhe Formation; Zhongguai uplift; Junggar Basin