

准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系 克下组沉积相研究*

丁 超¹ 林春明² 刘 军¹ 魏维航² 谭古月² 张 霞²
黄舒雅² 刘晓龙¹ 陈 朕¹ 王苏天¹

1 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000

2 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

摘 要 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系克下组 (克拉玛依组, T_2k_1) 是油气勘探的重点目的层系。综合钻井、岩心、录测井和分析化验等资料, 运用沉积学基本原理和方法, 开展了克下组的沉积相及其演化特征研究。结果表明: (1) 夏 77 地区克下组主要发育浅水扇三角洲沉积, 划分为扇三角洲平原和扇三角洲前缘亚相, 前缘亚相又分内前缘和外前缘。(2) 扇三角洲平原亚相发育重力流成因辫状河道、漫滩和碎屑流 3 种微相; 内前缘识别出水下分流河道和分流间湾 2 种微相, 牵引流成因较强、重力流成因较弱; 外前缘发育牵引流成因水下分流河道、水下分流间湾和河口坝 3 种微相。(3) 克下组沉积时期, 湖盆水体由浅变深, 地层表现为湖侵退积沉积序列, 平面上, 扇三角洲平原、内前缘和外前缘亚相向东北方向后退。

关键词 扇三角洲 沉积相 三叠系克下组 夏 77 地区 准噶尔盆地西北缘

第一作者简介 丁超, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事石油地质综合研究及管理工作。E-mail: ptrdc@petrochina.com.cn。

通讯作者简介 林春明, 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 从事沉积学和石油地质学教学与研究。E-mail: cmlin@nju.edu.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Sedimentary facies of the Triassic Lower Karamay Formation of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

DING Chao¹ LIN Chunming² LIU Jun¹ WEI Weihang² TAN Guyue² ZHANG Xia²
HUANG Shuya² LIU Xiaolong¹ CHEN Zhen¹ WANG Sutian¹

1 PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China

2 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract The Triassic Lower Karamay Formation (T_2k_1) represents the primary target for petroleum exploration in the Xia 77 area, located on the northwest margin of Junggar Basin. Integrating data from drilling, core observations, well logging, and associated analytical experiments, this study

* “准噶尔盆地西北缘夏 77 区块三叠系克下组砾岩储层精细研究”项目 (编号: C4-24013) 资助。[Financially supported by the project of “Detailed study on the conglomerate reservoir of the Triassic Lower Karamay Formation from Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin” (No. C4-24013)]

收稿日期: 2024-10-06 改回日期: 2025-01-07

applies fundamental principles of sedimentology to analyze the sedimentary facies architecture and evolutionary characteristics of the T_2k_1 . The findings reveal the following: (1) The formation was deposited within a shallow-water fan delta system, which is subdivided into two main subfacies: the fan delta plain and the fan delta front. The fan delta front can be further classified into inner and outer front subfacies. (2) Within the fan delta plain, three gravity flow-dominated microfacies were identified: braided channels, floodplains, and debris flows. In the fan delta inner front, two traction flow-dominated microfacies are recognized—subaqueous distributary channels and subaqueous distributary bays. The fan delta outer front is characterized by three traction flow-induced microfacies: subaqueous distributary channels, subaqueous distributary bays, and mouth bars. (3) During the depositional period of the Lower Karamay Formation, the lake basin underwent a gradual deepening, transitioning from shallow to deeper water conditions. This hydrodynamic shift resulted in a regressive sedimentary sequence in response to overall lake transgression. Laterally, the progradational-to-retrogradational evolution of the system led to a northeastward backstepping of the fan delta plain, inner front, and outer front subfacies.

Key words fan delta, sedimentary facies, Triassic Lower Karamay Formation, Xia 77 area, Northwest margin of Junggar Basin

About the first author DING Chao, born in 1982, is a senior engineer. He is mainly engaged in the comprehensive research and management of petroleum geology. E-mail: ptrdc@petroChina.com.cn.

About the corresponding author LIN Chunming, born in 1964, is a professor and Ph.D. supervisor. He is mainly engaged in sedimentology and petroleum geology. E-mail: cmlin@nju.edu.cn.

随着含油气沉积盆地勘探类型和领域的不断拓展和常规储集层油气藏发现难度的不断增大,以砾岩储集层油气藏等为代表的粗粒沉积岩特征、形成机制和沉积模式研究日益深入,受到越来越多地质学家的关注。

准噶尔盆地西北缘油气勘探始于 20 世纪 50 年代,历经 60 年勘探,早期油气勘探大多集中于富烃断裂带,相继在红车断裂带、中拐凸起、克百断裂带、乌夏断裂带发现砾岩油藏,之后在玛湖凹陷斜坡带发现了 10×10^8 t 级砾岩大油区(匡立春等, 2014; 张昌民等, 2020)。目前,砾岩储集层已经成为中国油气勘探开发的主要领域之一,但是,砾岩作为一种特殊的储集岩类型,尤其是作为非常规致密碎屑岩储集层,其物性相对较差,砾岩成因类型及储集层成因机理亟待深入研究。虽然前人已在乌夏断裂带构造特征和构造演化(李萧等, 2017; 孟凡超等, 2024)、地层划分(师天明等, 2015)和油气成藏(倪振等, 2016)等方面做了大量工作,取得丰硕成果,但三叠系沉积相的研究还比较薄弱(牛海青等, 2007; 吴志雄等, 2011; 倪振等, 2016),给下步精细油藏描述及效益开发带来极大的困难。以准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带夏子

街油田夏 77 地区为例,观察描述了 13 口井共 371.21 m 岩心(其中夏 042 井为系统取心井,心长 189.81 m,获含油岩心 186.28 m);利用薄片、录测井和大量分析化验资料开展了单井相和剖面相分析,运用沉积学基本原理和方法(Zhang *et al.*, 2014, 2021; 林春明, 2019; 林春明等, 2021),对准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系克拉玛依下亚组(克下组, T_2k_1)沉积特征及演化进行了较为系统地研究,这为该区油气砾岩储集层研究与预测、砾岩油藏有效开发提供了沉积地质基础和实际指导意义。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

准噶尔盆地地处中国的西北部,东西长 700 km,南北宽 370 km,总面积约 13×10^4 km²,根据盆地整体构造演化特征及各区构造演化和含油气方面的差异性,可将准噶尔盆地划分为乌伦古坳陷、陆梁隆起、中央坳陷、西部隆起、东部隆起和北天山山前冲断带 6 个一级构造单元(杨海波等, 2004; 于进等, 2016; 郑孟林等, 2019)。准噶尔

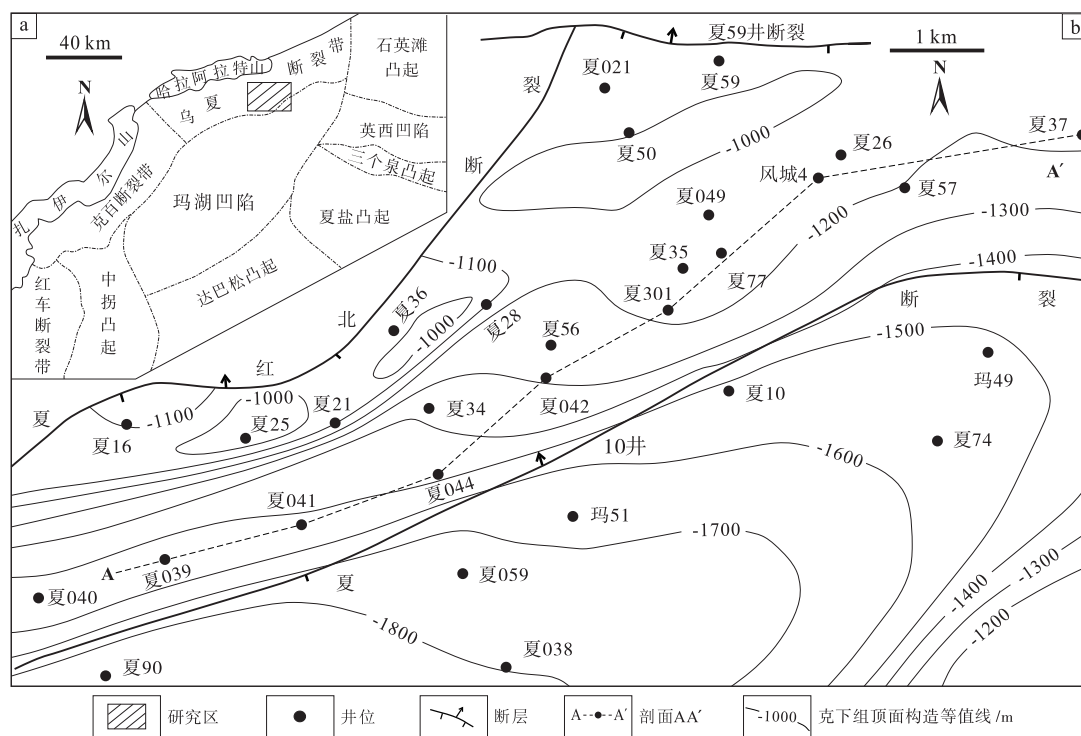
盆地是 1 个大型多期含油气叠合盆地，油气资源丰富，目前已经在石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系与新近系等发现了工业油气（支东明等，2019）。玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北部，是盆地中央坳陷西北部的 1 个次级凹陷，其东连石英滩凸起、英西凹陷、三个泉凸起和夏盐凸起；南邻中拐凸起和达巴松凸起；西接克百断裂带，北临乌夏断裂带（杨帆等，2022），凹陷面积约为 5000 km^2 （图 1-a）。

夏 77 地区区域构造位于准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带中部, 向南为玛湖凹陷(图 1-a)。夏 77 地区行政隶属于新疆维吾尔自治区塔城地区和布克赛尔蒙古自治县, 西距克拉玛依市乌尔禾区约 35 km, 处于夏子街油田东部。夏 77 地区主要开发目的层为三叠系克下组, 根据克下组顶面构造等值线解释, 夏 77 地区整体表现为南北受断裂夹持、北高南低、东高西低的近东西向狭长断块, 南部夏 038 井至北东玛 49 井为一缓慢斜坡, 夏 038 井附近克下组顶面埋藏相对最深, 约 1800 m (图 1-b)。2005 年 8 月, 射开夏 77 井三叠系克下组 1612.0~1634.0 m 后, 4 mm 油嘴自喷日产油 3.23 t/d, 日

产气 8640 m³，从而发现了夏 77 地区三叠系克下组油藏。截至 2022 年 9 月，夏 77 地区三叠系克下组试油试采多井获工业油流，单井日产油在 1.17 ~ 39.80 t/d 之间。油层埋深一般在 1600.0 ~ 1800.0 m，油层有效厚度 15.0 ~ 30.0 m，含油面积近 20 km²，石油地质储量超 3000 × 10⁴ t。

1.2 地层特征

玛湖凹陷是准噶尔盆地西北缘最重要的生烃凹陷, 深层二叠系风城组发育多套烃源岩, 油源丰富, 夏 77 地区位于玛湖生烃凹陷的上倾方向。夏 77 地区地层发育较全, 自下而上有石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及白垩系, 其中, 三叠系从下到上依次是下三叠统百口泉组 (T_1b)、中三叠统克拉玛依组 (T_2k) 和上三叠统白碱滩组 (T_3b) (表 1)。中三叠统克拉玛依组 (T_2k) 从下到上可划为克下组 (T_{2k_1}) 和克上组 (T_{2k_2}), 前者油藏的分布受控于夏子街大型扇三角洲沉积, 扇三角洲前缘相带是优质砂体沉积卸载有利场所, 优势相带与深大控藏断裂匹配形成良好的封闭条件, 优越的石油地质条件为该区三叠系克下组成藏奠定了基础(图 1)。

夏 77 地区三叠系克下组 (T_2k_1) 为研究目的

a—准噶尔盆地西北缘及玛湖凹陷构造位置; b—夏77地区区域地质背景

图 1 准噶尔盆地西北缘及夏 77 地区区域地质背景

Fig. 1 Geographical position of Xia 77 area and northwest margin of Junggar Basin

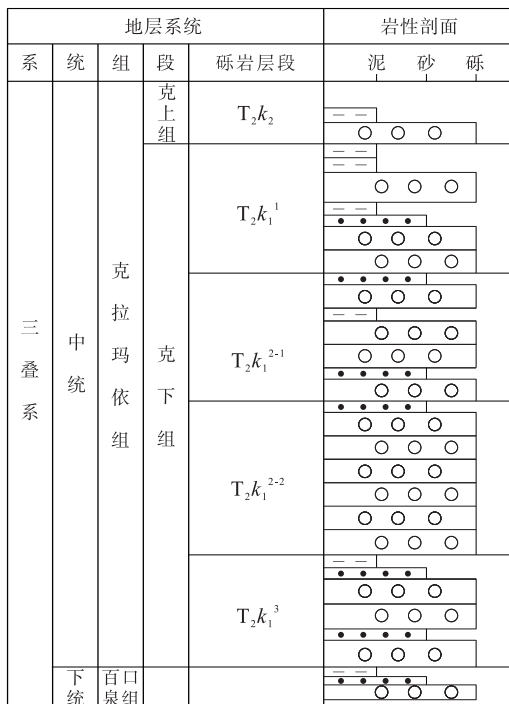


图 2 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系克下组地层柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Triassic Lower Karamay Formation of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

层段,岩性为砾岩、砂岩和泥岩,以砾岩为主(图2)。研究区地层对比是以单井的岩性和电性特征为基础、稳定标志层为控制、测井曲线为依据和地震资料为约束等基本原则来进行划分的。按照“旋回对比,分级控制”的原则及夏子街油田已开发油藏地层划分,从大到小逐级控制对比精度,并兼顾岩性组合,依据地层厚度变化的连续性和合理性,将克下组自下而上分为 $T_2k_1^3$ 、 $T_2k_1^2$ 、 $T_2k_1^1$ 共3个砾岩层段(表1),其中, $T_2k_1^1$ 砾岩层段自下而上细分为 $T_2k_1^{2-2}$ 和 $T_2k_1^{2-1}$ 共2段。 $T_2k_1^1$ 与 $T_2k_1^{2-1}$ 砾岩层段之间发育1套稳定泥岩,两者沉积特征存在差

异, $T_2k_1^1$ 以砾岩、砂岩沉积为主, $T_2k_1^2$ 和 $T_2k_1^3$ 砾岩层段 ($T_2k_1^{2+3}$) 主体部位为砾岩连续沉积, 在油藏边部发育泥岩层, 以泥岩标志层及等厚对比原则划分 $T_2k_1^{2+3}$ 地层层序, 油层在各砾岩层段均有发育。 T_2k_1 地层厚度较为稳定, 为 220.0~265.0 m, 平均 248.0 m, 可比性强, 其中, $T_2k_1^1$ 厚 47.0~86.0 m, 平均 59.4 m; $T_2k_1^{2-1}$ 厚 46.0~65.0 m, 平均 60.5 m; $T_2k_1^{2-2}$ 厚 47.0~67.0 m, 平均 56.9 m; $T_2k_1^3$ 厚 61.0~92.0 m, 平均 71.2 m (表 1)。

进入三叠纪,准噶尔盆地整体抬升,盆地进入整体陆内拗陷阶段,受印支运动影响,由 NW-SE 向挤压转为近 SN 向挤压,并伴有左旋剪切,在乌夏断裂带自南向北后展式发育了一系列近 EW 向断裂,如夏 21 井断裂、夏 10 井断裂东段、乌兰林格断裂等(李萧等,2017)。根据夏 77 地区地震剖面(图 3)可以看到,上三叠统白碱滩组(T_3b)为大套稳定泥岩沉积,测井上具有低密度、低速度、低阻抗的特点,与下部克拉玛依组砂砾岩地层存在较大阻抗界面,在地震剖面上表现为强振幅特征,分布较连续,可作为研究区主要地震标志层。下三叠统百口泉组(T_1b)与下伏二叠系下乌尔禾组(P_{1w})呈角度不整合接触,百口泉组(T_1b)底部的砂砾岩地层与下乌尔禾组顶部分布 1 套稳定泥岩,存在较大阻抗界面,在地震剖面上表现为强振幅特征,同相轴相交的反射特征清楚,可追踪性强,也可作为研究区主要地震标志层。采用井震结合的方法进行全区地质分层对比和层位标定,精确标定出 T_2k_2 底、 $T_2k_1^1$ 底、 $T_2k_1^{2-1}$ 底、 $T_2k_1^{2-2}$ 底、 $T_2k_1^3$ 底共 5 个地震反射层(图 3),研究表明,夏 77 地区夏 301、风城 4 和夏 37 井区在克下组沉积时期为一凸起,向南西夏 039 井方向地势逐渐降

表 1 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系地层划分

Table 1 Stratigraphic division of the Triassic of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

组	砾岩层段	厚度/m	岩性	与下伏地层接触关系
白碱滩组	—	0~190	厚层状灰色、深灰色泥岩	整合
克上组 (T_2k_2)	—	0~300	砾岩、砂岩、泥岩	整合
克拉玛依组	克下组 (T_2k_1)	$T_2k_1^1$	砾岩、砂岩	整合
		$T_2k_1^{2-1}$	砾岩、砂岩、少量泥岩	
		$T_2k_1^{2-2}$	砾岩、砂岩	
		$T_2k_1^3$	砾岩、砂岩、少量泥岩	
百口泉组	—	100~189	棕色砂质泥岩、泥质细砾岩及砂砾岩	不整合

注: 47.0~86.0/59.4 代表最小值~最大值/平均值。

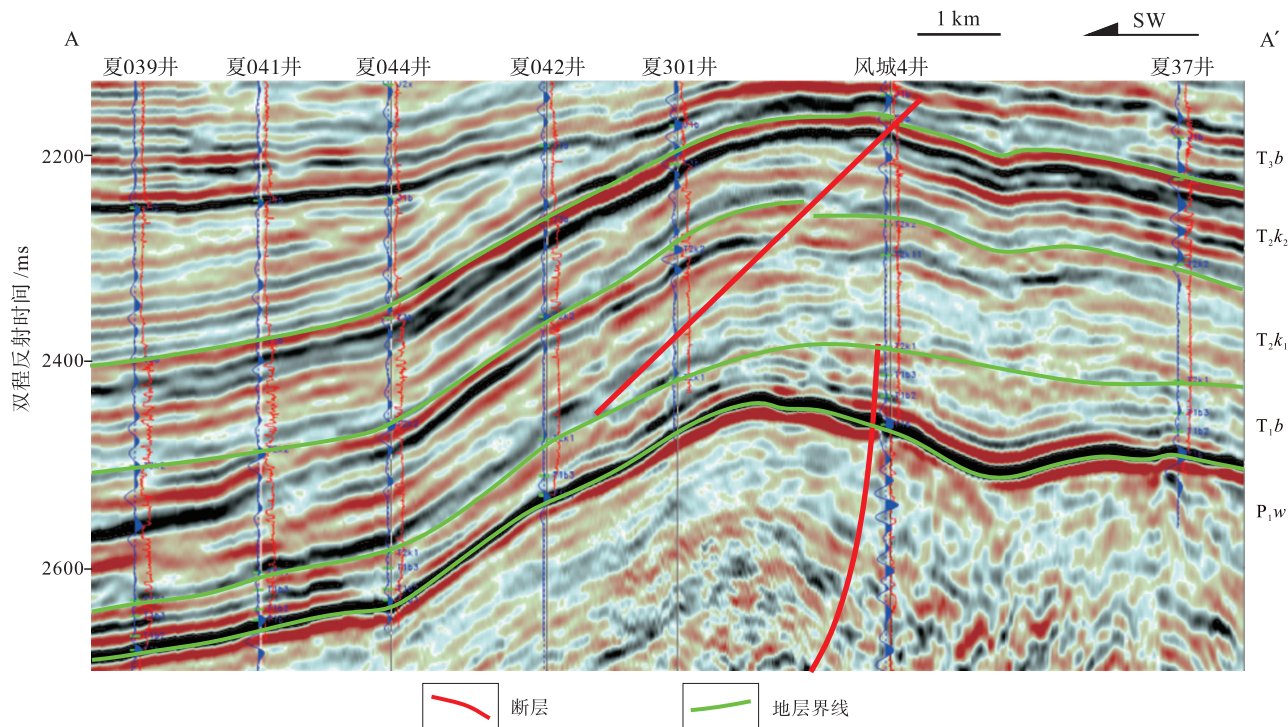


图 3 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区地震剖面特征

Fig. 3 Seismic profile characteristics of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

低，物源亦来自东北方向。

2 沉积相分析

沉积相研究是以相标志的研究为基础，以岩心描述和岩石类型的划分为依据（张霞等，2009，2018；Jiang *et al.*, 2023）；根据不同相标志组合，确定沉积微相，由微相组合确定沉积亚相和沉积体系；再结合测井曲线，将岩石类型转化为对应的测井曲线相，建立曲线相类型。在划分单井相的基础上，将曲线相推广到连井地层剖面和平面沉积相中，从而得出微相、亚相和沉积体系在空间的展布和演化规律（Zhang *et al.*, 2012, 2016；Huang *et al.*, 2021；林春明等，2023）。

2.1 岩石特征

夏 77 地区三叠系克下组岩性以系统取心的夏 042 井为例，可以识别出砾岩、砂岩和泥岩 3 种岩石类型，砾岩为主，其厚度占地层厚度 91.96%，砂岩和泥岩分别占地层厚度的 6.60% 和 1.44%（表 2；图 4）。砾岩根据砾石大小分为细砾岩（砾石直径 2~10 mm）、中砾岩（砾石直径 1~10 cm）、粗砾岩（砾石直径 10~100 cm）和巨砾岩（砾石直

径 > 100 cm），遇到砾岩中碎屑颗粒大小不一致时，可采用三级命名原则对其命名（林春明，2019）。夏 77 地区三叠系克下组砾岩按粒度由粗到细可以划分为粗—中砾岩、中砾岩、细—中砾岩、含砂中砾岩、中—细砾岩、细砾岩和砂砾岩 7 个级别，以中砾岩、细—中砾岩和含砂中砾岩为主（表 2；图 4 中的编号 2、3、4），累计厚度分别是 74.06 m、33.86 m 和 32.34 m，分别占 T_2k_1 地层厚度的 38.90%、17.78% 和 16.99%（表 2），累计占地层厚度 73.67%，其次为中—细砾岩，累计厚度 19.23 m，占地层厚度 10.10%（表 2；图 4 中的编号 5），粗—中砾岩（表 2；图 4 中的编号 1）累计 9.34 m 厚，占地层 4.91%，而细砾岩和砂砾岩不发育（表 2；图 4 中的编号 6、7），累计厚度分别为 2.50 m 和 3.76 m，占地层厚度不到 2%。砂岩以薄层形式出现在不同砾岩层段中，泥岩主要发育于 $T_2k_1^{2-1}$ 和 $T_2k_1^3$ 2 段，厚度最薄（表 2；图 4 中的编号 9）。 T_2k_1 地层砾石以次棱角—次圆为主，分选性较差。

2.2 沉积相类型

通过钻井、录井、测井、粒度、古生物等分析

表 2 准噶尔盆地西北缘夏 042 井 T_2k_1 不同砾岩层段岩石厚度及其百分比

Table 2 Thickness and percentage of rock in different conglomerate section of the Triassic Lower Karamay Formation of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

岩石类型	地层厚度/m					厚度百分比/%
	$T_2k_1^1$	$T_2k_1^{2-1}$	$T_2k_1^{2-2}$	$T_2k_1^3$	累计厚度	
粗一中砾岩	3.30	3.86	0.50	1.68	9.34	4.91
中砾岩	6.14	14.79	31.48	21.65	74.06	38.90
细一中砾岩	1.07	14.31	13.02	5.46	33.86	17.78
含砂中砾岩	3.13	6.73	15.85	6.63	32.34	16.99
中—细砾岩	0	14.31	4.63	0.29	19.23	10.10
细砾岩	0	0.33	1.31	0.86	2.50	1.31
砂砾岩	0	0.54	2.75	0.47	3.76	1.97
砂岩	2.51	2.91	3.67	3.48	12.57	6.60
泥岩	0	2.00	0	0.74	2.74	1.44

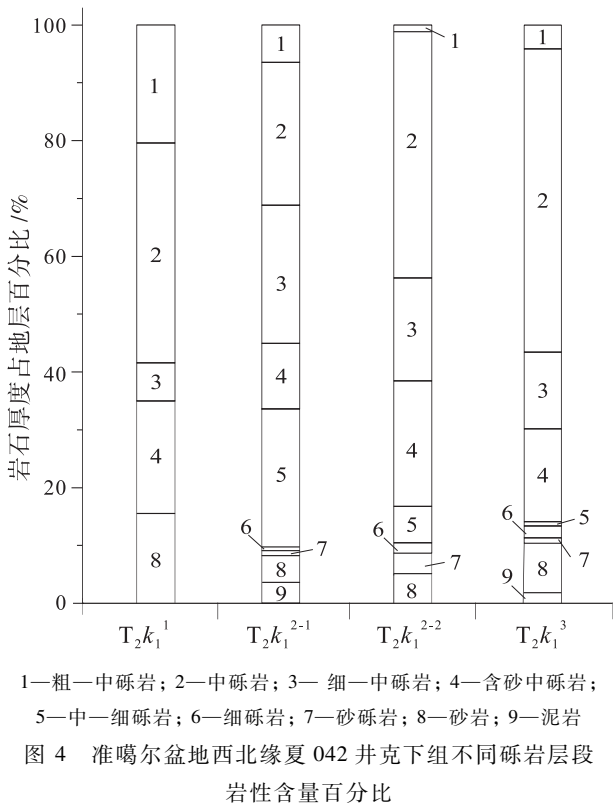


Fig. 4 Lithologic content in different conglomerate sections of the Triassic Lower Karamay Formation of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

资料，结合取心井的岩心观察和描述发现，准噶尔盆地西北缘克下组岩性以中砾岩、细一中砾岩和含砂中砾岩为主，泥岩与砂岩含量较低，砾石以次棱角—次圆为主，磨圆分选性较差。 T_2k_1 地层发育大量的原生沉积构造，包括块状层理、递变层理、平行层理等，常见泥砾、植物化石及碎片，未发现

辫状河三角洲前缘沉积常见的侧积交错层理、板状和槽状交错层理，特别是厚 0.5 m 以上的交错层理（李维锋等，2001；林春明，2019；林春明等，2023）。沉积作用以牵引流沉积为主，发育重力流沉积，水动力条件变化快。同时，克下组沉积时期气候为干旱—半干旱气候，物源来自北东方向，为近源快速沉积。综合上述分析，认为夏 77 地区三叠系 T_2k_1 地层的沉积相为浅水扇三角洲。进而根据各相类型中微环境及沉积特征，将扇三角洲划分为平原、前缘和前扇三角洲亚相，前缘亚相又分内前缘和外前缘，以及 9 种主要沉积微相，河口坝沉积微相只分布在外前缘亚相中（表 3）。扇三角洲前缘区域水动力较强且处于前缘近端，水分流河道改道周期短，造成河道下游地区很难形成稳定的河口坝和席状砂沉积，河口坝和前缘席状砂不发育，符合常见浅水扇三角洲前缘沉积特点（于建国等，2002；张辉等，2005；朱筱敏等，2013；林春明等，2023）。研究区古河道充填砾岩层，显示为浅水三角洲特征，这种现象在全球其他盆地中都有类似的描述（Leszczyński and Nemec, 2015；Martini *et al.*, 2017；Ilgar *et al.*, 2024）。

目前对于扇三角洲沉积模式、微相划分、内部砂砾体分布规律及氧化色泥岩成因等不同学者有不同认识（彭彪等，2017），但普遍认为扇三角洲沉积模式基本上概括为陆坡型、陆架型和断陷湖盆型 3 种，准噶尔盆地西北缘明显属于断陷湖盆型扇三角洲沉积体系，是介于辫状冲积扇与湖相沉积体系之间的过渡沉积（林春明，2019；Abdel-Fattah and

表 3 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系克下组沉积相类型
Table 3 Sedimentary facies of the Triassic Lower Karamay Formation of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

沉积相	沉积亚相	沉积微相
扇三角洲	扇三角洲平原	辫状河道
		漫滩
		碎屑流带
	内前缘	水下分流河道
		水下分流间湾
	扇三角洲前缘	水下分流河道
		水下分流间湾
	外前缘	河口坝
	前扇三角洲	前扇三角洲泥

Sehsah, 2023), 属于靠山型扇三角洲 (吴崇筠和薛叔浩, 1993)。

2.3 沉积相特征

通过岩心描述、沉积相标志、纵向岩性组合特

征, 结合构造背景、水动力条件的综合分析, 明确夏 77 地区三叠系克下组不同沉积微相特征(表 4)。

2.3.1 扇三角洲平原亚相沉积

扇三角洲平原为扇三角洲的陆上部分, 其范围包括从扇端至岸线之间的近湖平原地带, 以大陆流水冲积或重力流作用的粗粒沉积物为特征。夏 77 地区扇三角洲平原亚相主要发育辫状河道、漫滩和碎屑流带微相(表 3)。

辫状河道 辫状河道多以事件性洪流沉积为主, 在洪水间歇期间, 沉积物也具有牵引流沉积特征, 所以, 辫状河道沉积具有复合型水动力形成机制 (林春明, 2019)。研究区辫状河道发育于靠近山前盆地边缘, 垂向上以厚层块状韵律层叠置为特征, 底部见明显的冲刷面和泥砾(图 5; 表 4), 反映洪水频繁冲刷和充填过程。岩性主要为褐色或杂色粗一中砾岩、中砾岩, 砾石分选和磨圆差, 次圆

表 4 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系克下组扇三角洲沉积特征
Table 4 Sedimentary characteristics of fan delta of the Triassic Lower Karamay Formation of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

沉积亚相	沉积微相	岩石学特征	沉积构造	测井曲线特征
平原	辫状河道	褐色或杂色粗一中砾岩、中砾岩, 砾石分选差, 呈次圆一次棱角状, 砾石杂乱堆积, 呈颗粒支撑、多级颗粒支撑、杂基—多级颗粒支撑和杂基—颗粒支撑	厚层块状构造, 砾岩呈片状或舌状, 底部见明显的冲刷构造和泥砾	较低的自然电位、自然伽马和声波时差, 电阻率曲线呈中—高幅钟形或齿形
	漫滩	辫状河道之间未能沉积砂体的地带, 发育褐色泥岩、粉砂质泥岩	水平层理发育	高自然电位、自然伽马和声波时差, 低电阻率, 电阻率曲线呈齿化漏斗形
	碎屑流带	洪水初期的碎屑流体沿着峡谷进入扇体中上部的沟槽或扇面之上堆积形成。沉积物主要由砾岩构成, 砾石含量在 60%~90% 之间, 分选差, 常呈不接触状分布在填隙物中, 填隙物为不等粒砂级颗粒及泥质	块状构造, 砾岩呈舌状, 底部见明显的冲刷构造	高自然伽马、中高电阻率和较低声波时差, 曲线总体呈现平直形
内前缘	水下分流河道	浅灰、青灰、青和灰色中砾岩、细一中砾岩、含砂中砾岩, 砾石分选较差, 磨圆度为次棱角一次圆状, 砾石呈颗粒支撑、多级颗粒支撑和杂基—多级颗粒支撑	砾岩底部见明显的冲刷构造和泥砾。砾径向上变小, 具弱定向性和递变层理	低自然电位和自然伽马, 较低声波时差, 电阻率曲线通常呈中—高幅的齿化箱形或钟形, 有时呈齿形
	水下分流间湾	褐色泥岩, 含少量粉砂、细砂和细砾	水平层理发育	较高的自然电位、自然伽马和声波时差, 电阻率曲线呈低幅的箱形
外前缘	水下分流河道	灰色或灰绿色中砾岩、细砾岩, 分选磨圆中等。砾石呈颗粒支撑、多级颗粒支撑、杂基—多级颗粒支撑和杂基支撑	砾石定向排列	低自然电位和声波时差, 自然伽马曲线呈中—高幅的钟形, 电阻率曲线通常呈高幅的齿化箱形或钟形
	水下分流间湾	棕褐色、灰色泥岩或粉砂质泥岩, 具纹层结构	水平层理发育	高自然电位、自然伽马和声波时差, 低电阻率, 电阻率曲线呈齿化漏斗形
	河口坝	细砂—粗砂岩, 砾石呈漂浮状具有弱定向性	发育递变、块状和平行层理, 以及多期冲刷面和泥砾	较高的自然电位、自然伽马和声波时差, 较低电阻率, 电阻率曲线呈小幅箱形
前扇三角洲	前扇三角洲泥	浅灰色泥岩为主, 偶见薄层棕色泥岩, 夹少量粉砂岩条带或砂质团块	水平层理发育, 偶有波状层理、透镜状层理	自然电位曲线平直, 电阻率曲线呈低值的小齿状



图 5 准噶尔盆地西北缘夏 042 井克下组
扇三角洲平原沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of fan delta plain subfacies of the Triassic Lower Karamay Formation of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

一次棱角为主, 呈颗粒支撑(图 6-a)、多级颗粒支撑(图 6-b)、杂基—多级颗粒支撑(图 6-c)和杂基—颗粒支撑(图 6-d), 砾石杂乱堆积, 油斑或油迹常出现在岩石表面或裂缝中。辫状河道测井曲线以较低的自然电位 (SP)、自然伽马 (GR) 和声波时差 (AC), 浅侧向电阻率 (RI) 和深侧向电阻率 (RT) 曲线呈中—高幅钟形或齿形为特征(图 5; 表 4)。研究区辫状河道与冲积扇中辫流水道 (吴胜和等, 2012)、冲积扇 (洪水期) 扇中辫状水道 (刘大卫等, 2018) 特征相似。

漫滩 辫状河道之间未能沉积砂体的地带, 发育褐色泥岩、粉砂质泥岩, 水平层理发育, 测井曲线以高的 SP、GR 和 AC, 低的齿化漏斗形 RT 为特征(表 4)。

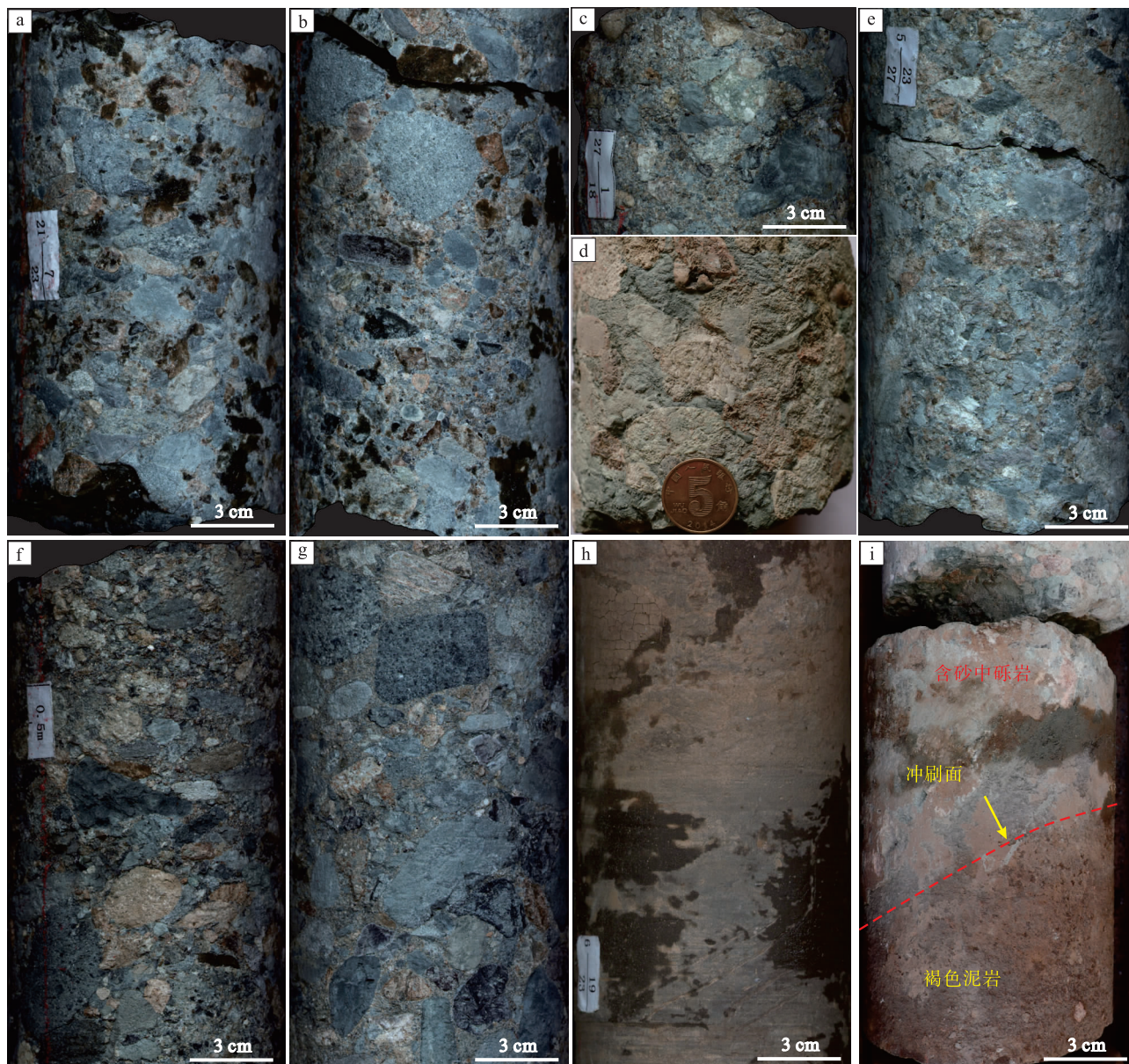
碎屑流带 是由洪水初期携带大量混杂碎屑物的碎屑流体或水体沿着峡谷进入扇体中上部的沟槽或扇面之上堆积形成。洪水规模影响碎屑流带的形态及分布, 规模小时碎屑流带主要分布于沟槽内,

呈带状分布; 规模大时碎屑流带越过沟槽进入两侧扇面沉积, 呈面状分布, 与冲积扇漫流沉积成因相似 (邹志文等, 2021)。沟槽内的碎屑流带常被后期辫状河道水流所改造, 因而分布极不稳定。碎屑流带底部冲刷面发育, 多具块状构造, 沉积物主要由砾岩构成, 砾石含量在 60%~90% 之间, 大小不等, 分选差, 常呈不接触状分布在填隙物中, 填隙物为不等粒砂级颗粒及泥质 (林春明, 2019)。测井以中高 GR、中高 RT 和较低 AC 为特征, 曲线总体呈现平直形(表 4), 表明碎屑流带砾岩分选差, 杂乱堆积。

2.3.2 扇三角洲内前缘亚相沉积

扇三角洲前缘亦称为过渡带, 位于岸线至正常浪基面之间的浅水区, 是大陆水流、波浪和潮汐相互作用地带 (林春明, 2019)。夏 77 地区扇三角洲前缘是砾岩扇体水下沉积的主体, 分布范围广, 基于砾岩油藏评价和精细挖潜的现实工作需要, 将研究区扇三角洲前缘细分为内前缘和外前缘, 使扇三角洲前缘的划分更为细致。内前缘处于湖岸边缘, 更靠近物源, 外前缘更靠近湖泊, 水体深度更大。研究区内前缘可识别出水下分流河道和水下分流间湾 2 个沉积微相(表 4), 相对来说, 水下分流河道沉积更发育, 间湾不发育(图 7)。

内前缘水下分流河道 研究区扇三角洲内前缘水下分流河道岩性主要为浅灰、青灰、青和灰色中砾岩、细—中砾岩、含砂中砾岩, 砾石分选较差, 磨圆度以次圆—一次棱角状为主, 砾石呈颗粒支撑(图 6-e)、多级颗粒支撑(图 6-f)和砂质杂基—多级颗粒支撑(图 6-g)。砾岩底部见明显的冲刷构造和泥砾, 砾石呈弱定向排列, 砾径向上变小, 具正递变层理(图 7), 表明水动力强度向上变弱。泥砾呈次圆—一次棱角、条带状、环状条带等多种形态, 具定向性, 地层底部泥砾多, 向上减少, 反映水流具有单一流向的牵引流特点。也见植物化石及碎片。内前缘水下分流河道粒度概率曲线呈典型河道沉积的“两段式”, 由跳跃和悬浮次总体组成, 以跳跃次总体为主, 占 52.9%~75.6%, 悬浮次总体占 24.4%~47.1%; 2 者交截点 Φ 值为 $-2 \sim 0 \Phi$, 粒度区间分布范围大, 为 $-4 \sim 5 \Phi$, 岩性从粗粉砂, 到细砂、中砂、粗砂、细砾、中砾(图 8-a, 8-b)。频率分布曲线呈略对称式“单峰”型, 以



a—杂色中砾岩，砾石次圆—次棱角状，颗粒支撑，杂乱堆积，1944.55~1944.74 m， $T_2k_1^{2-2}$ ，平原辫状河道；b—杂色细—中砾岩，砾石次圆—次棱角状，多级颗粒支撑，杂乱堆积，1945.59~1945.78 m， $T_2k_1^{2-2}$ ，平原辫状河道；c—杂色细—中砾岩，砾石次圆—次棱角状，砾石大小不一，砂质杂基—多级颗粒支撑，杂乱堆积，1981.36~1981.44 m， $T_2k_1^3$ ，平原辫状河道；d—杂色中砾岩，含泥砾，次棱角为主，砂质杂基—颗粒支撑，杂乱堆积，1944.89 m， $T_2k_1^{2-2}$ ，平原辫状河道；e—青灰色含砂中砾岩，次圆—次棱角状，颗粒支撑，1829.45~1829.64 m， $T_2k_1^{2-1}$ ，内前缘水下分流河道；f—青色细—中砾岩，次圆—次棱角状，多级颗粒支撑，1834.95~1835.14 m， $T_2k_1^{2-1}$ ，内前缘水下分流河道；g—青灰色含砂中砾岩，次圆—次棱角状，砂质杂基—多级颗粒支撑，1902.59~1902.78 m， $T_2k_1^{2-2}$ ，内前缘水下分流河道；h—褐色泥岩，含少量砂砾，水平层理发育，1833.82~1834.04 m， $T_2k_1^{2-1}$ ，内前缘水下分流间湾；i—从内前缘水下分流间湾褐色泥岩过渡到内前缘水下分流河道含砂中砾岩，微相之间以冲刷面为界线，1832.17~1832.36 m， $T_2k_1^{2-1}$

图 6 准噶尔盆地西北缘夏 042 井扇三角洲平原和内前缘岩心典型沉积现象

Fig. 6 Typical characteristics of core section of the fan delta plain and inner front subfacies of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

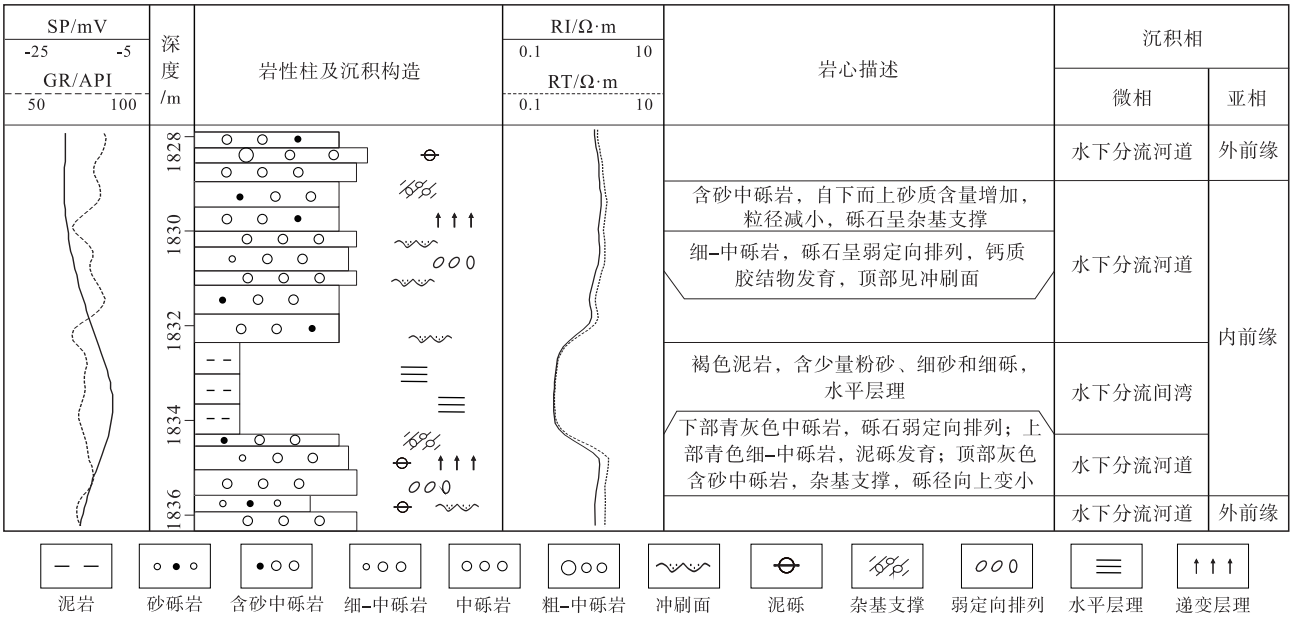


Fig. 7 Sedimentary characteristics of the fan delta inner front subfacies of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

-4~1 Φ 为主(图 8-c, 8-d), 岩性主要为粗砂、细砾和中砾。内前缘水下分流河道测井曲线具有低自然电位和自然伽马, 较低声波时差, 电阻率曲线通常呈中-高幅的齿化箱形或钟形, 有时呈齿形(图 7; 表 4)。

内前缘水下分流河道沉积与前述平原辫状河道沉积相比, 相对远离物源区, 向湖推进, 已经进入湖泊水下沉积环境。砾石分选性和磨圆度均变好, 砾石表现出弱定向性, 沉积物自下而上, 具有从粗到细的正序列沉积, 表明内前缘水下分流河道沉积物经历了一段距离的搬运, 遭受流水的冲刷淘洗作用较强, 表现为牵引流作用较强、重力流较弱的特点。

内前缘水下分流间湾 内前缘水下分流间湾垂向上处于内前缘水下分流河道之间(图 7)。在平面上为水下分流河道之间相对低洼的地区, 一些地区可以将水下分流间湾微相进一步细分为水下分流间湾(富砂)和水下分流间湾(富泥)2 类, 前者常沿水下分流河道两侧展布, 其砂地比参考值为 0.2~0.4, 含油性较好, 可作为较好储集层开发, 后者沉积在更低洼的地区, 沿水下分流间湾(富砂)间展布, 其砂地比参考值为 0~0.2, 含油性较差, 不能作为储集层(林春明等, 2023)。研究区夏 042 井 T₂k₁ 砾岩层段 1832.3~1834.3 m, 岩性

为褐色泥岩, 含少量粉砂、细砂和细砾, 水平层理发育(图 6-h), 表明水体较浅, 离物源区较近, 处于氧化的静水环境, 与上覆内前缘水下分流河道含砂中砾岩之间见冲刷面(图 6-i)。内前缘水下分流间湾测井曲线具有较高的自然电位、自然伽马和声波时差, 电阻率曲线呈低幅的箱型(图 7; 表 4)。由于水下分流河道迁移频繁及碎屑流的强大破坏作用, 水下分流间湾沉积物往往受到侵蚀破坏, 极不发育, 以大小不等的透镜体出现。

2.3.3 扇三角洲外前缘亚相沉积

夏 77 地区外前缘可识别出水下分流河道、水下分流间湾和河口坝 3 个沉积微相(表 2), 相对来说, 水下分流河道沉积更发育, 水下分流间湾和河口坝不发育。

外前缘水下分流河道相比于内前缘水下分流河道更加靠近湖盆, 其沉积物多呈灰色和绿色, 沉积物处在弱还原环境。该微相底部受到持续的水动力作用, 发育砾石的定向排列, 沉积物粒度自下而上由粗变细, 呈现正旋回沉积, 体现出明显的牵引流特征。

研究区扇三角洲外前缘水下分流河道沉积与内前缘水下分流河道有相似特点。岩性主要为浅灰、青灰和杂色中砾岩、细-中砾岩、含砂中砾岩, 砾石分选中等, 磨圆度以次棱角-次圆状为主, 砾石

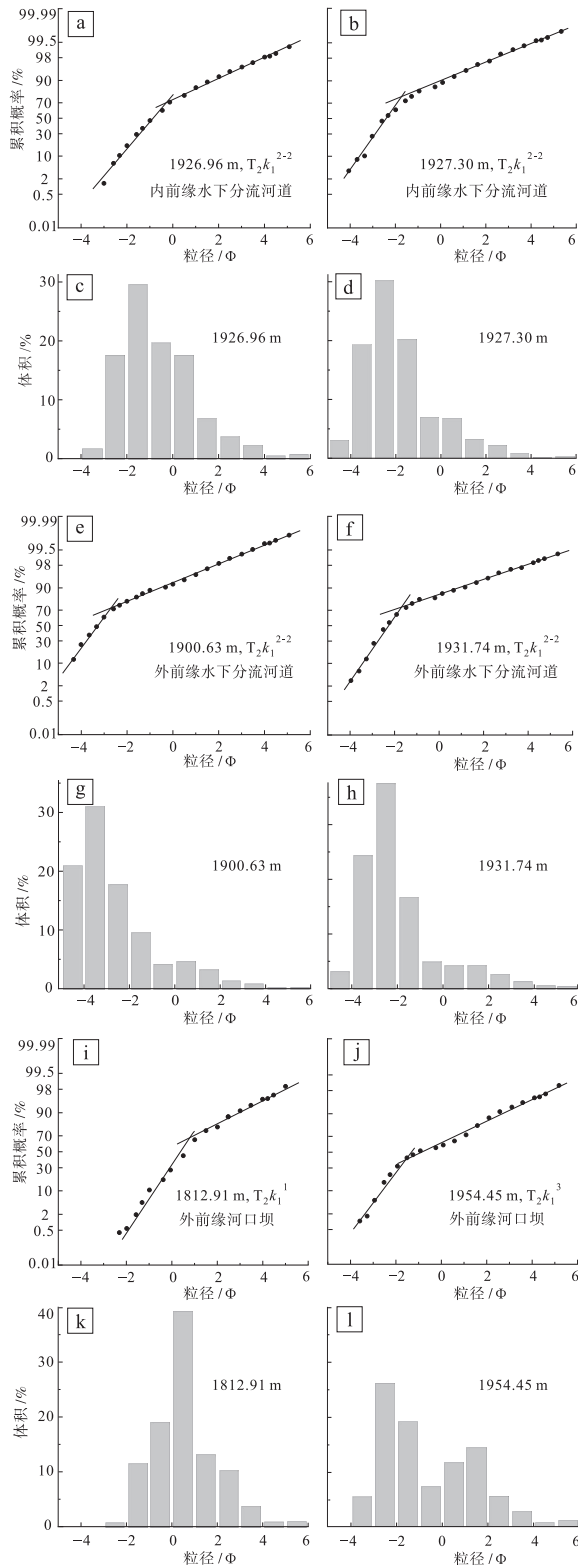


图 8 准噶尔盆地西北缘夏 042 井扇三角洲前缘储集层粒度概率累积曲线和频率分布曲线特征

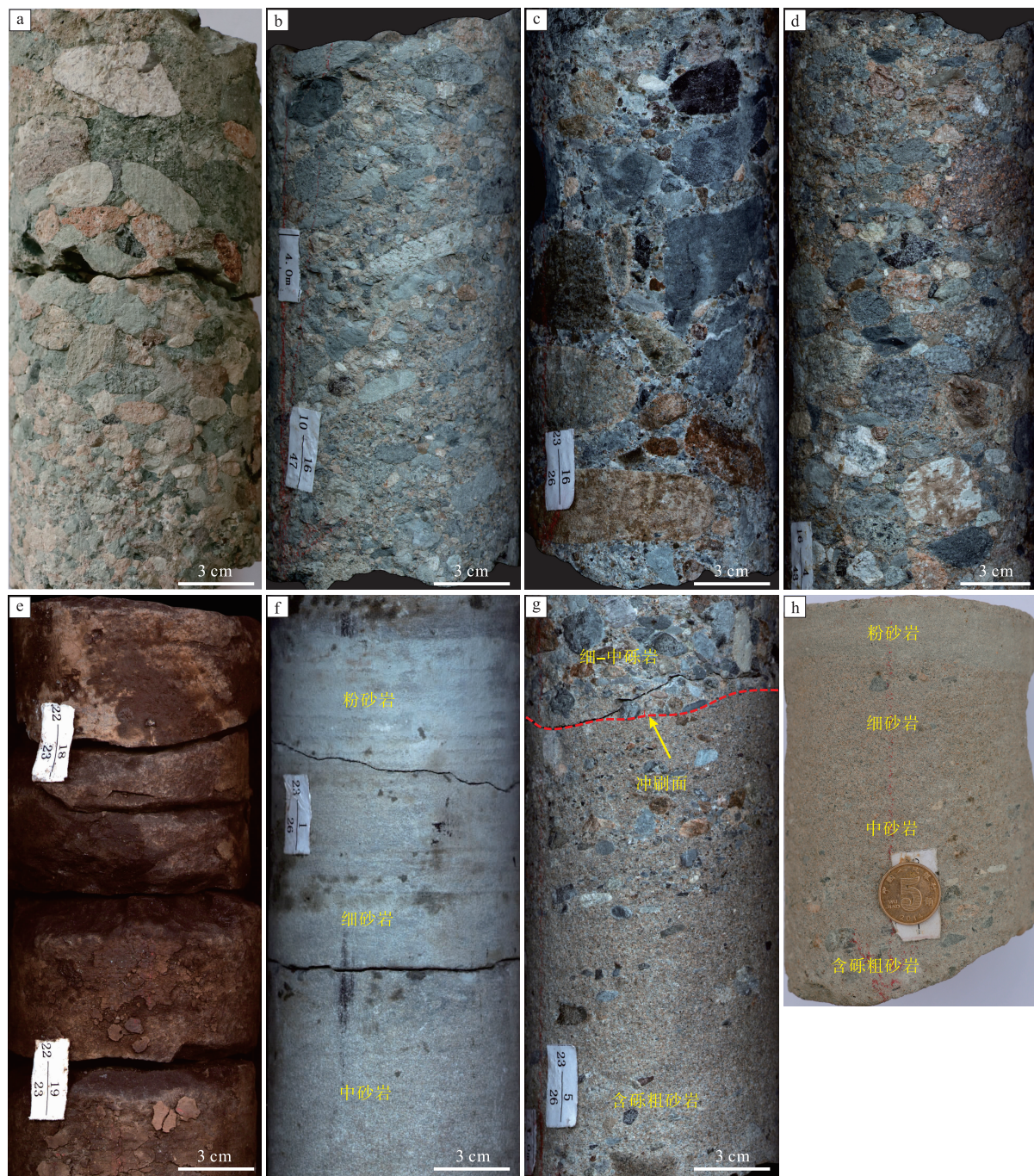
Fig. 8 Characteristics of granularity probability accumulation curves and frequency distribution curves of fan delta front reservoir of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

呈颗粒支撑(图 9-a)、多级颗粒支撑(图 9-b, 9-c)、砂质杂基—多级颗粒支撑(图 9-d)和杂基支撑。砾岩底部见明显的冲刷构造,自下而上砾径逐渐变小(图 10)。砾石具有定向性,有时发育逆粒序递变层理(图 9-a),有时具正粒序递变层理(图 10),填隙物主要为粗砂和细砂,含少量钙质胶结。外前缘水下分流河道粒度概率曲线呈两段式和三段式,以跳跃次总体为主,占 48.0%~77.0%,悬浮次总体占 3.9%~45.8%,滚动组分含量小于 10%;跳跃与悬浮次总体的交截点 Φ 值为 $-2.6 \sim -1.8 \Phi$,粒度区间为 $-4 \sim 5 \Phi$,分布范围大(图 8-e, 8-f)。频率分布曲线呈后高不对称式“单峰”型,以 $-5 \sim -1 \Phi$ 为主(图 8-g, 8-h),粒度明显比内前缘水下分流河道偏粗,岩性主要是细砾岩和中砾岩(图 10)。外前缘水下分流河道测井曲线表现为低自然电位和声波时差,自然伽马曲线呈中—高幅的钟形,电阻率曲线通常呈高幅的齿化箱形或钟形(图 10;表 4)。

外前缘水下分流河道沉积与内前缘水下分流河道沉积相比,更靠近湖泊,水体深度更大。砾石分选性和磨圆度都变好,砾石排列定向性更强沉积物具递变层理,表明外前缘水下分流河道沉积物沉积时,水动力条件更强,主要是遭受湖水反复冲刷淘洗作用,表现为明显的牵引流作用强的特点。

外前缘水下分流间湾 外前缘水下分流间湾沉积为外前缘水下分流河道之间相对低洼的地区,平面上主要沿水下分流河道两侧展布,以棕褐色泥岩(图 9-e)、灰色粉砂岩、粉—细砂岩为主,见灰色薄层细砂岩,发育水平层理、波状层理、透镜状层理,反映其位于水下弱氧化—弱还原环境,由于水体浅,泥岩颜色偏氧化色,苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组扇三角洲前缘水下分流间湾也普遍发育这种沉积现象(周健等, 2011; Zhang *et al.*, 2016; 刘玉瑞, 2017; 林春明等, 2020)。外前缘水下分流间湾测井曲线具有较高的自然电位、自然伽马和声波时差,较低电阻率,电阻率曲线呈小幅箱形(图 10;表 4)。

外前缘河口坝 扇三角洲外前缘河口坝位于外前缘水下分流河道的前方,与正常三角洲河口坝相比,外前缘河口坝的沉积范围和规模较小,但含砂量高(林春明, 2019)。岩性主要为浅灰—灰色含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩,自



a—灰色中砾岩，次棱角—次圆状，逆粒序递变层理，砾石定向排列，颗粒支撑，1972.13~1972.40 m， $T_2k_1^3$ ，外前缘水下分流河道；b—浅灰、青灰色细—中砾岩，次圆为主，砾石定向排列，多级颗粒支撑，1865.09~1865.32 m， $T_2k_1^{2-1}$ ，外前缘水下分流河道；c—青灰色细—中砾岩，次棱角—次圆状，多级颗粒支撑，1956.56~1956.79 m， $T_2k_1^3$ ，外前缘水下分流河道；d—杂色中砾岩，次棱角—次圆状，砂质杂基—多级颗粒支撑，1900.03~1900.26 m， $T_2k_1^{2-2}$ ，外前缘水下分流河道；e—棕褐色泥岩，水平层理，1953.01~1953.24 m， $T_2k_1^3$ ，外前缘水下分流间湾；f—浅灰、灰色中砂岩、细砂岩和粉砂岩，平行层理和块状层理发育，1953.90~1954.13 m， $T_2k_1^3$ ，外前缘河口坝；g—自下而上从外前缘河口坝灰色含砾粗砂岩过渡到外前缘水下分流河道细—中砾岩，微相之间以冲刷面为界线，界线深度约在 1954.72 m，河口坝含砾粗砂岩呈现出逆粒序递变层理， $T_2k_1^3$ ；h—自下而上浅灰色含砾粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩，呈现出正粒序递变层理，也见平行层理，1955.34~1955.49 m， $T_2k_1^3$ ，外前缘河口坝

图 9 准噶尔盆地西北缘夏 042 井扇三角洲外前缘岩心典型沉积现象

Fig. 9 Typical characteristics of core section of the fan delta outer front subfacies of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

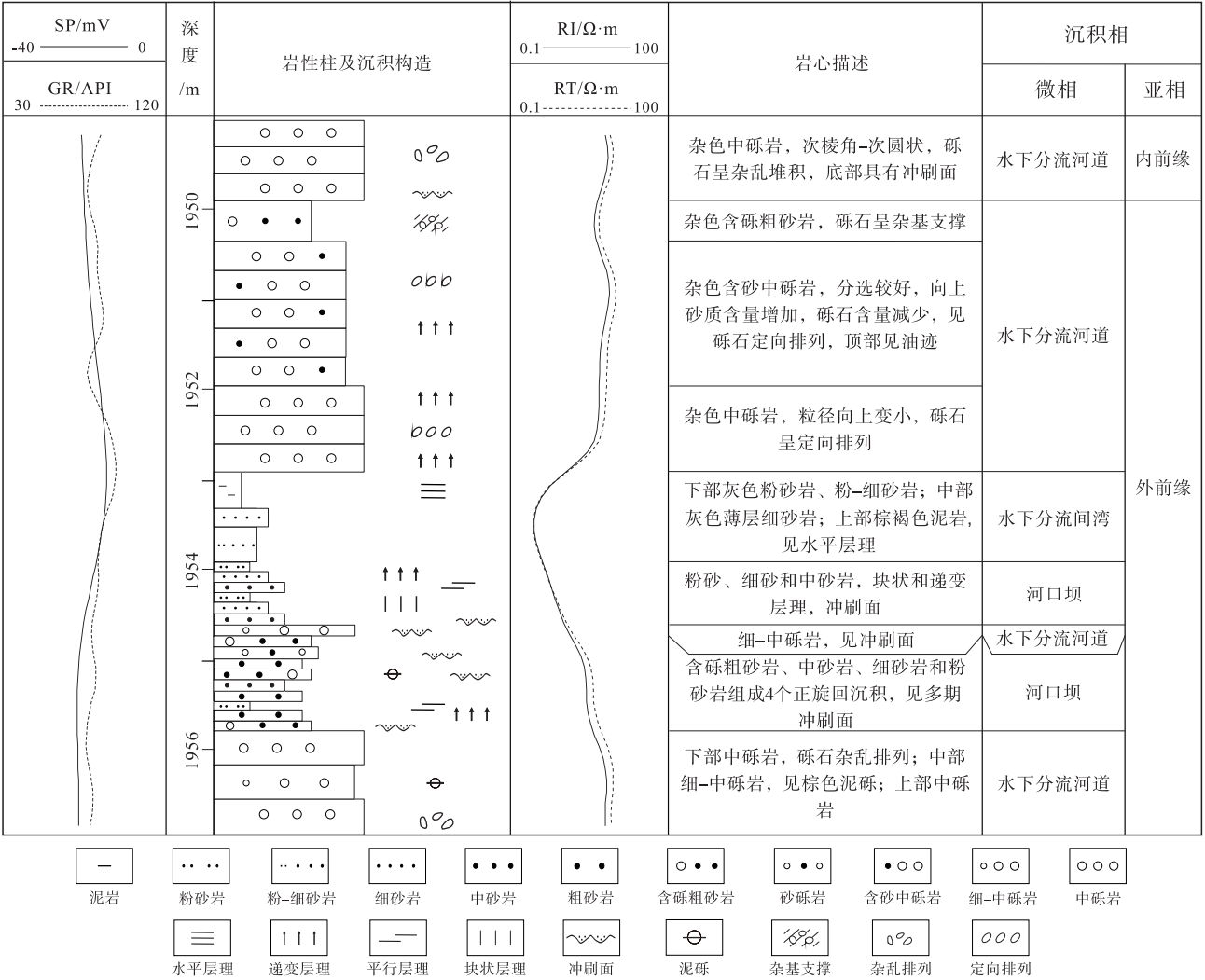


图 10 准噶尔盆地西北缘夏 042 井扇三角洲外前缘沉积特征

Fig. 10 Sedimentary characteristics of the fan delta outer front subfacies of Well Xia 042 in northwest margin of Junggar Basin

下而上组成 4 个由粗粒渐变细粒的正旋回沉积，这可能是因为湖面快速上升，湖岸线向陆地迁移、河口坝向陆地退缩、沉积层序向陆地退积所致。见多期冲刷面和泥砾，发育递变层理、块状层理和平行层理(图 9-f, 9-g, 9-h; 图 10)。外前缘河口坝概率曲线呈典型的两段式，以跳跃次总体为主，占 45.8%~70.2%，主要分布在 -3~0.5 Φ，分选较好，悬浮次总体占 29.8%~54.2%；跳跃与悬浮次总体的交截点 Φ 值为 -1.5~1 Φ，粒度区间为 -3.5~5 Φ，分布范围较大(图 8-i, 8-j)。频率分布曲线呈近对称式“单峰”型和“双峰”型，以 -3~3 Φ 为主(图 8-k, 8-l)，粒度明显比外前缘水下分流河道偏细。外前缘河口坝测井曲线具有较高的自然电位、自然伽马和声波时差，较低电阻

率，电阻率曲线呈小幅箱形(图 10; 表 4)。

从储集层粒度累积概率曲线和频率分布曲线可以看到，内前缘水下分流河道储集层、外前缘水下分流河道与外前缘河口坝储集层具有如下特征(图 8)：(1) 内前缘水下分流河道、外前缘水下分流河道和外前缘河口坝跳跃组分斜率逐渐变陡，表明后者分选性依次好于前者；(2) 内前缘水下分流河道、外前缘水下分流河道和外前缘河口坝跳跃组分粒径分别在 -4~0 Φ、-4.3~-1.8 Φ 和 -3.6~1.0 Φ 之间，表明外前缘水下分流河道储集层粒度相对较粗，反映其沉积水动力条件较强。此外，跳跃与悬浮次总体的交截点 Φ 值也可反映搬运介质的扰动强度，交截点 Φ 值越小，扰动强度越高(林春明等，1999，2021；Lin *et al.*, 2005)，研究

区内前缘水下分流河道、外前缘水下分流河道和外前缘河口坝储集层跳跃与悬浮次总体的交截点 Φ 值分别在 $-2 \sim 0 \Phi$ 、 $-2.6 \sim -1.8 \Phi$ 和 $-1.5 \sim 1 \Phi$ 之间,也反映外前缘水下分流河道水动力条件相对要强;(3)从频率分布曲线可以看到,内前缘水下分流河道、外前缘水下分流河道和外前缘河口坝储集层主要粒径在 $-4 \sim 1 \Phi$ 、 $-5 \sim -1 \Phi$ 和 $-3 \sim 3 \Phi$ 之间,外前缘水下分流河道储集层相对最粗,也反映其水动力条件明显要强;(4)内前缘水下分流河道、外前缘水下分流河道和河口坝粒度概率累积曲线以典型两段式为主,外前缘水下分流河道部分发育三段式,整体以跳跃次总体为主,其次为悬浮次总体。

2.3.4 前扇三角洲亚相沉积

前扇三角洲是指浪基面以下部分,位于扇三角洲前缘向湖方向一侧,在扇三角洲远端与滨浅湖亚相相接。夏77区块前扇三角洲主要由浅灰色泥岩

组成,偶见薄层棕色泥岩,夹少量粉砂岩条带或砂质团块,以水平层理为主,偶有波状层理、透镜状层理,总体以细粒沉积为主。前扇三角洲自然电位曲线平直,电阻率曲线呈低值的小齿状。

3 沉积相展布与演化

3.1 剖面相特征

连井地质解释剖面(图11)显示,准噶尔盆地西北缘夏77地区自北东向南西方向主要发育扇三角洲粗粒沉积体系,进一步划分为扇三角洲平原和扇三角洲前缘亚相。整体上, T_2k_1 地层岩石颜色由北东氧化环境的红棕色、褐色、杂色,向南西变为弱氧化弱还原的青灰色、青色、灰绿色、浅灰色、灰色和深灰色,纵向上由地层下部氧化色向地层上部变为弱氧化弱还原色;地层岩石粒度由北东较粗的中砾岩、细砾岩,向南西变为粒度较细的砂

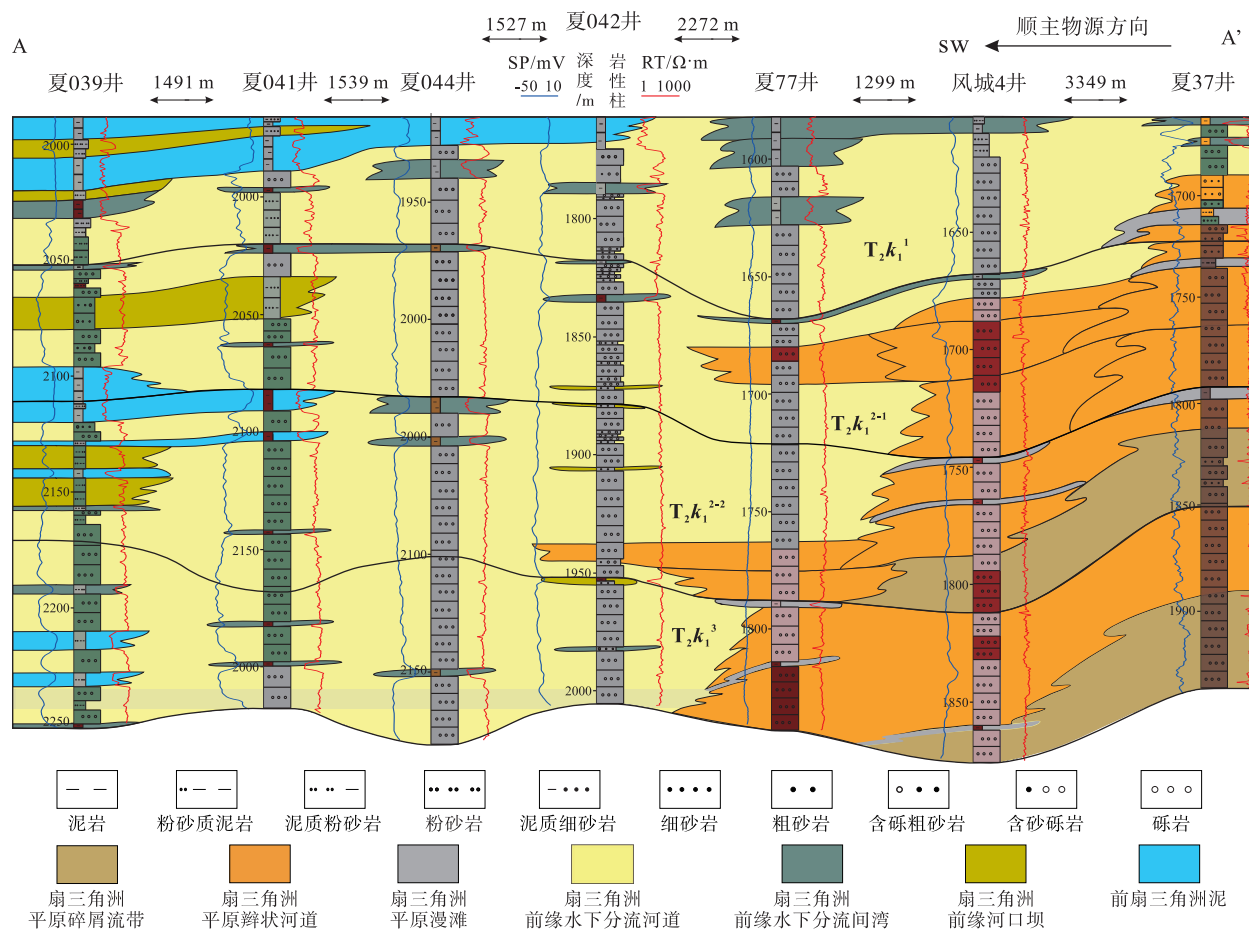


图 11 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区顺主物源方向沉积相剖面图

Fig. 11 Sedimentary facies profile of connecting wells in the direction of provenance of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

岩和泥岩，纵向上地层岩石粒度自下而上由粗变细，也就是说， T_2k_1 地层表现为湖侵退积沉积序列，呈现“水进砾退”的沉积特征。

沉积相连井剖面显示，扇三角洲平原碎屑流分布靠近山前盆地边缘的风城 4 井和夏 37 井区（图 11），纵向上主要见于 $T_2k_1^3$ 和 $T_2k_1^{2-2}$ 砾岩层段；扇三角洲平原辫状河道发育于夏 77、风城 4 和夏 37 等井区，在夏 042 井区也有局部出现（图 11），纵向上主要见于 $T_2k_1^3$ 和 $T_2k_1^2$ 砾岩层段，整体表现为湖侵退积沉积序列，但在 $T_2k_1^{2-2}$ 和 $T_2k_1^{2-1}$ 砾岩层段，沉积物也有进积现象，可能是某次洪水爆发期携带大量粗粒沉积物从凸起搬运到低洼地区堆积所致；平原漫滩褐色泥岩、粉砂质泥岩常呈薄层沉积；由北东至南西方向扇三角洲平原碎屑流带、辫状河道沉积厚度逐渐减薄，呈片状或舌状（图 11）。扇三角洲前缘亚相在研究区都有分布，前缘水下分流河道最发育，主要发育于夏 77、夏

042、夏 044、夏 041 等井区，由北东至南西方向和地层自下而上，扇三角洲前缘水下分流河道逐渐过渡到前缘水下分流间湾、前扇三角洲泥沉积（图 11），反映沉积时由北东至南西方向和地层自下而上湖盆水体逐渐加深，物源主要来自北东方向。扇三角洲外前缘河口坝发育于夏 039、夏 041 等井区，在 $T_2k_1^2$ 和 $T_2k_1^1$ 砾岩层段发育（图 11）。

3.2 平面相展布与演化

基于夏 77 地区克下组沉积特征，结合单井相和剖面相，在编制了地层厚度等值线图、砂岩厚度等值线图和砾岩占地层百分比（含砾率）等值线图基础上，绘制了克下组沉积相平面分布图（图 12），展示了夏 77 地区克下组的沉积相演化特征。研究结果表明，克下组 $T_2k_1^3$ 沉积时期（图 12-a），扇三角洲平原亚相辫状河道和碎屑流带微相在东北地区发育，即分布在含砾率在 1.0 等

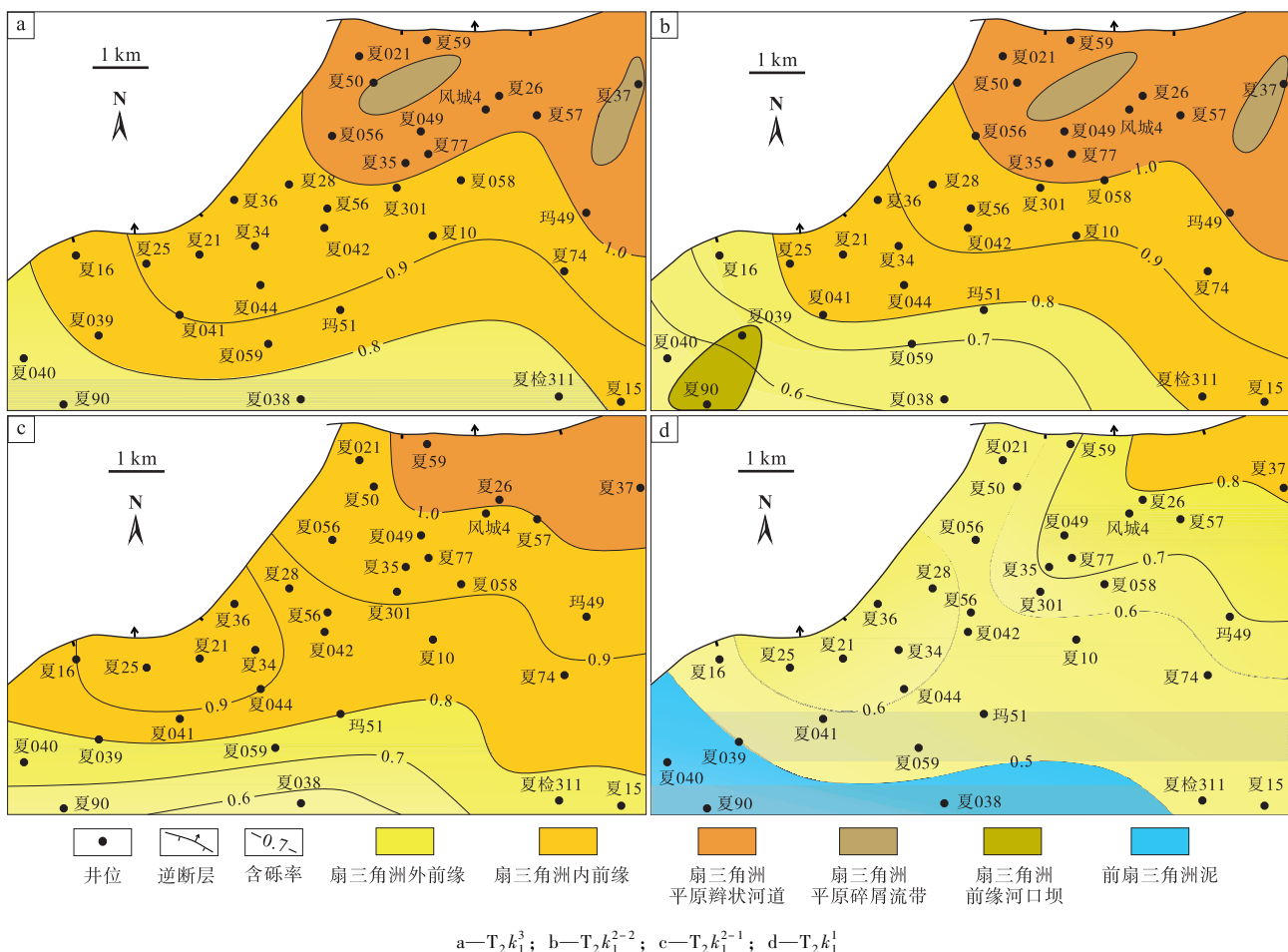


图 12 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区克下组沉积相平面分布

Fig. 12 Sedimentary facies distribution of the Triassic Lower Karamay Formation of Xia 77 area in northwest margin of Junggar Basin

值线内。辫状河道微相主要分布在夏 021、夏 59、夏 056、夏 77、风城 4、夏 26 和玛 49 等井区, 碎屑流带微相在夏 37 和夏 50 等井区分布, 呈条带状分布; 扇三角洲内前缘亚相主要分布在研究区中部, 即分布在含砾率 0.8~1.0 等值线区间; 扇三角洲外前缘亚相分布在研究区西南部, 即分布在含砾率小于 0.8 等值线区间(图 12-a)。克下组 $T_2k_1^{2-2}$ 沉积时期(图 12-b), 与 $T_2k_1^3$ 沉积时期相似, 东北地区发育辫状河道和碎屑流带微相; 扇三角洲内前缘亚相分布在研究区中部, 分布在含砾率 0.8~1.0 等值线区间, 与 $T_2k_1^3$ 沉积时期相比, 略有向东北方向退缩; 扇三角洲外前缘亚相分布在研究区西南部, 发育更广泛, 分布在含砾率 0.5~0.8 等值线区间; 此外, 在夏 039 和夏 90 等井区发育部分外前缘河口坝微相。克下组 $T_2k_1^{2-1}$ 沉积时期(图 12-c), 扇三角洲平原亚相向研究区东北部方向退去, 主要以辫状河道为主; 扇三角洲内前缘亚相在研究区中部最为发育, 扇三角洲外前缘亚相分布在研究区南部。克下组 $T_2k_1^1$ 沉积时期(图 12-d), 研究区扇三角洲平原亚相不发育; 扇三角洲内前缘亚相后退到研究区东北部零星出露; 扇三角洲外前缘亚相最发育, 向东北方向扩张至夏 59、夏 049、夏 77、风城 4、夏 57 和夏 26 等井区, 另外, 在夏 25、夏 21、夏 36、夏 28 和夏 34 等井区, 物源可能来自北部; 西南部发育前扇三角洲泥微相, 分布在夏 040、夏 039、夏 90 和夏 038 等井区, 即分布在含砾率小于 0.5 等值线区间(图 12-d)。纵向上, 地层自下而上, 由 $T_2k_1^3$ 至 $T_2k_1^1$ 沉积时期, 地层含砾率在平面上有逐渐减少趋势, 即砾岩厚度减小, 泥质沉积厚度相对增大, 与连井剖面沉积相变化(图 11)一致。平面上, 扇三角洲平原辫状河道和碎屑流带微相范围不断缩小, 并向东北方向退去; 扇三角洲内、外前缘亚相不断增大, 前扇三角洲泥微相在 $T_2k_1^1$ 沉积时期研究区西南部发育(图 12), 表明湖盆水体由浅逐渐加深的特点。

通过对准噶尔西北缘夏 77 地区克下组时期扇三角洲沉积体系沉积组合时空分布分析(图 3; 图 11; 图 12), 研究区明显属于断陷湖盆型扇三角洲沉积体系, 是介于辫状冲积扇与湖相沉积体系之间的过渡沉积(林春明, 2019; Abdel-Fattah and Sehsah, 2023), 扇三角洲前缘沉积主要由内前缘和

外前缘亚相组成, 扇三角洲平原沉积代表是陆源冲积扇沉积, 前扇三角洲细粒沉积在 $T_2k_1^3$ 至 $T_2k_1^2$ 沉积时期不发育或缺失, 仅在 $T_2k_1^1$ 沉积时期在西南局部有出露(图 12)。浅水深度和平缓至中度的湖泊坡度可能导致沿湖盆边缘分布的扇三角洲沉积受到抑制(Horton and Schmitt, 1996), 区域构造演化、古气候、物源供给条件和相对湖平面变化等多种因素控制了研究区的沉积充填演化过程(Zhang *et al.*, 2018, 2021; 林春明和张霞, 2024)。

4 结论

1) 受构造背景及北东向西南方向物源的影响, 准噶尔盆地西北缘夏 77 地区三叠系克拉玛依下亚组主要发育浅水扇三角洲沉积, 可以划分为扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲亚相, 前缘亚相又分为内前缘和外前缘, 共细分为 9 种主要沉积微相。

2) 扇三角洲平原亚相发育辫状河道、漫滩和碎屑流带 3 种微相, 辫状河道最发育, 由褐色或杂色块状粗一中砾岩、中砾岩组成, 砾石杂乱堆积, 砾石间多为砂质充填, 呈颗粒、多级颗粒、杂基—颗粒和杂基—多级颗粒支撑结构, 重力流成因。内前缘可识别出水下分流河道和分流间湾 2 种微相, 水下分流河道更发育, 由浅灰、青灰和灰色中砾岩、细一中砾岩、含砂中砾岩组成, 砾石次圆—次棱角状, 弱定向排列, 正递变层理, 牵引流成因较强、重力流成因较弱。外前缘可识别出外前缘水下分流河道、分流间湾、河口坝 3 种微相, 外前缘水下分流河道砾石分选性和磨圆度都变好, 定向排列, 递变层理发育, 牵引流成因; 河口坝微相仅在外前缘亚相中识别出来, 其沉积范围和规模较小, 但含砂量高, 冲刷面、泥砾、递变层理和平行层理发育, 属于牵引流成因; 前扇三角洲泥主要分布在 $T_2k_1^1$ 层段, 由浅灰色泥岩组成, 发育水平层理, 以细粒沉积为主。

3) 扇三角洲平原亚相发育在研究区东北部, 地层含砾率高, 内前缘亚相分布在研究区中部, 地层含砾率较高, 外前缘亚相分布在研究区西南部, 地层含砾率相对低。自 $T_2k_1^3$ 到 $T_2k_1^1$ 沉积时期, 湖盆水体深度由浅变深, 地层表现为湖侵退积沉积序列, 呈现“水进砾退”沉积特征, 地层含砾率在平面和纵向上都有逐渐减少趋势, 平面上, 扇三角

洲平原、内前缘和外前缘亚相向东北方向后退, $T_2k_1^1$ 沉积时期, 前扇三角洲在研究区西南局部有发育。

致谢 周学谦、宋福来、杨昀非、赵雨潇、王淑君、吴思学等参加了本项目野外、室内研究工作, 本论文研究工作也得到了杨立强、孙新革、杨兆臣、杨顺、钟洁等同志的支持和帮助, 匿名审稿专家提出了建设性修改意见, 在此一并向他们致以衷心的感谢。

参考文献 (References)

- 匡立春, 唐勇, 雷德文, 吴涛, 瞿建华. 2014. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践. 中国石油勘探, 19(6): 14-23. [Kuang L C, Tang Y, Lei D W, Wu T, Qu J H. 2014. Exploration of fan-controlled large-area lithologic oil reservoirs of Triassic Baikouquan Formation in Slope Zone of Mahu Depression in Junggar Basin. China Petroleum Exploration, 19(6): 14-23]
- 李维锋, 何幼斌, 彭德堂, 王方平, 刘学锋. 2001. 新疆尼勒克地区下侏罗统三工河组辫状河三角洲沉积. 沉积学报, 19(4): 512-516. [Li W F, He Y B, Peng D T, Wang F P, Liu X F. 2001. Braided-river delta of the Lower Jurassic Sangonghe Formation in the Nileke Region, Xinjiang. Acta Sedimentologica Sinica, 19(4): 512-516]
- 李萧, 劳海港, 胡秋媛, 赵利. 2017. 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带构造特征及物理模拟实验. 石油实验地质, 39(4): 567-572. [Li X, Lao H G, Hu Q Y, Zhao L. 2017. Tectonic evolution and its physical simulation of Wuxia fault belt in Northwestern margin of Junggar Basin. Petroleum Geology & Experiment, 39(4): 567-572]
- 林春明, 黄舒雅, 江凯禧, 张霞, 夏长发, 陶欣, 李铁军. 2023. 辽河坳陷大民屯凹陷古近系沙河街组沙三段沉积相研究. 地质学报, 97(6): 2002-2025. [Lin C M, Huang S Y, Jiang K X, Zhang X, Xia C F, Tao X, Li T J. 2023. Sedimentary facies of the third Member of Paleogene Shahejie Formation from the Damintun Sag, Liaohede Depression. Acta Geologica Sinica, 97(6): 2002-2025]
- 林春明, 黄志诚, 朱嗣昭, 李从先, 蒋维三. 1999. 杭州湾沿岸平原晚第四纪沉积特征和沉积过程. 地质学报, 73(2): 120-130. [Lin C M, Huang Z C, Zhu S Z, Li C X, Jiang W S. 1999. Sedimentary characteristics and processes of Late Quaternary in the Hangzhou Bay coastal plain. Acta Geologica Sinica, 73(2): 120-130]
- 林春明, 张妮, 张霞, 张志萍, 李艳丽, 周健, 岳信东, 姚玉来. 2020. 陆相断陷盆地物源体系和沉积演化: 以苏北高邮凹陷为例. 北京: 科学出版社. [Lin C M, Zhang N, Zhang X, Zhang Z P, Li Y L, Zhou J, Yue X L, Yao Y L. 2020. Provenance System and Sedimentary Evolution of Continental Faulted Basin: an Example from the Gaoyou Sag in the North Jiangsu Basin, China. Beijing: Science Press]
- 林春明, 张霞, 赵雪培, 李鑫, 黄舒雅, 江凯禧. 2021. 沉积岩石学的室内研究方法综述. 古地理学报, 23(2): 223-244. [Lin C M, Zhang X, Zhao X P, Li X, Huang S Y, Jiang K X. 2021. Review of laboratory research methods for sedimentary petrology. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(2): 223-244]
- 林春明, 张霞. 鄂尔多斯盆地三叠系碎屑岩储层沉积学研究. 2024. 北京: 科学出版社. [Lin C M, Zhang X. 2024. Sedimentology of Triassic Clastic Rock Reservoirs in Ordos Basin. Beijing: Science Press]
- 林春明. 2019. 沉积岩石学. 北京: 科学出版社. [Lin C M. 2019. Sedimentary Petrology. Beijing: Science Press]
- 刘大卫, 纪友亮, 高崇龙, 靳军, 杨召, 段小兵, 桓芝俊, 罗妮娜. 2018. 砾质辫状河型冲积扇沉积微相及沉积模式: 以准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇为例. 古地理学报, 20(3): 435-451. [Liu D W, Ji Y L, Gao C L, Jin J, Yang Z, Duan X B, Huan Z J, Luo N N. 2018. Microfacies and sedimentary models of gravelly braided-river alluvial fan: a case study of modern Baiyanghe-river alluvial fan in Northwestern margin of Junggar Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(3): 435-451]
- 刘玉瑞. 2017. 苏北盆地戴南组泥屑流扇沉积. 石油与天然气地质, 38(3): 419-429. [Liu Y R. 2017. Mud debris flow fan deposits in Dainan Formation of the Subei Basin. Oil & Gas Geology, 38(3): 419-429]
- 孟凡超, 白沅可, 祝贺, 王胜利. 2024. 新疆克拉玛依乌尔禾张扭性走滑断裂特征及其控藏作用研究. 地质科学, 59(2): 300-312. [Meng F C, Bai Y K, Zhu H, Wang S L. 2024. Characteristics of transtensional strikeslip faults and its controlling effect on hydrocarbon accumulation in Wuerhe area, Karamay, Xinjiang. Chinese Journal of Geology, 59(2): 300-312]
- 倪振, 丁超, 王贵文, 刘荷冲. 2016. 准噶尔盆地乌夏断裂带复式油气成藏特征. 石油地质与工程, 30(2): 45-48. [Ni Z, Ding C, Wang G W, Liu H C. 2016. Hydrocarbon accumulation characteristics of complicated reservoirs in Wuxia fault belt, Junggar Basin. Petroleum Geology and Engineering, 30(2): 45-48]
- 牛海青, 陈世悦, 鄯继华, 江祖强. 2007. 准噶尔盆地乌夏断裂带三叠系沉积相研究. 新疆石油地质, 28(4): 425-427. [Niu H Q, Chen S Y, Yan J H, Jiang Z Q. 2007. Sedimentary facies of Triassic in Wuxia fault belt, Junggar Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 28(4): 425-427]
- 彭彪, 金振奎, 朱小二, 崔学敏, 杨天博, 石良. 2017. 扇三角洲沉积模式探讨: 以准噶尔盆地玛北地区下三叠统百口泉组为例. 古地理学报, 19(2): 315-326. [Peng B, Jin Z K, Zhu X R, Cui X M, Yang T B, Shi L. 2017. Discussion about depositional models of fan delta: a case study from the Lower Triassic Baikouquan Formation in Mabei area, Junggar Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 19(2): 315-326]
- 师天明, 阿丽亚, 刘承伟. 2015. 准噶尔盆地西北缘克拉玛依组下亚组、上亚组时代讨论. 地质论评, 61(增刊): 701-703. [Shi T M, A L Y, Liu C W. 2015. Discussion on the chronology of Lower and Upper subformations of the Karamay Formation in Northwestern

- margin of Junggar Basin. *Geological Review*, 61 (Supplement): 701–703]
- 吴崇筠, 薛叔浩. 1993. 中国含油气盆地沉积学. 北京: 石油工业出版社. [Wu C Y, Xue S H. 1993. *Sedimentology of Petroleum Basins in China*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 吴胜和, 范峥, 许长福, 岳大力, 郑占, 彭寿昌, 王伟. 2012. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型. *古地理学报*, 14(3): 331–340. [Wu S H, Fan Z, Xu C F, Yue D L, Zheng Z, Peng S C, Wang W. 2012. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay Oilfield, Xinjiang. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 14(3): 331–340]
- 吴志雄, 杨兆臣, 丁超, 史基安, 张顺存, 张杰. 2011. 准噶尔盆地西北缘三叠系克拉玛依组扇三角洲沉积微相特征: 以 W16 井区为例. *天然气地球科学*, 22(4): 602–609. [Wu Z X, Yang Z C, Ding C, Shi J A, Zhang S C, Zhang J. 2011. Characteristics of fan delta in Triassic Karamay Formation, Northwest margin of Junggar Basin; taking W16 well area as an example. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 602–609]
- 杨帆, 卞保力, 刘慧颖, 姚宗全, 尤新才, 刘海磊, 卫延召. 2022. 玛湖凹陷二叠系夏子街组限制性湖盆扇三角洲沉积特征. *岩性油气藏*, 34(5): 63–72. [Yang F, Bian B L, Liu H Y, Yao Z Q, You X C, Liu H L, Wei Y Z. 2022. Sedimentary characteristics of fan delta in restricted lacustrine basin of Permian Xiazijie Formation in Mahu Sag. *Lithologic Reservoirs*, 34(5): 63–72]
- 杨海波, 陈磊, 孔玉华. 2004. 准噶尔盆地构造单元划分新方案. *新疆石油地质*, 25(6): 686–688. [Yang H B, Chen L, Kong Y H. 2004. A novel classification of structural units in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(6): 686–688]
- 于进, 张奎华, 林春明, 张霞, 张妮, 邓程文. 2016. 准噶尔盆地柴窝堡凹陷二叠系储层成岩作用. *岩性油气藏*, 28(2): 95–104. [Yu J, Zhang K H, Lin C M, Zhang X, Zhang N, Deng C W. 2016. Diagenesis characteristics of Permian reservoir in Chaiwopu sag, Junggar Basin. *Lithologic Reservoirs*, 28(2): 95–104]
- 于建国, 林春明, 杨云岭, 朱应科, 王金铎, 赵彦彦. 2002. 分流河道特征及其识别方法: 以东营凹陷东部地区为例. *高校地质学报*, 8(3): 152–159. [Yu J G, Lin C M, Yang Y L, Zhu Y K, Wang J D, Zhao Y Y. 2002. Features of distributary channels and their diagnosis methods: exemplified by the Eastern Dongying Depression. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 152–159]
- 张昌民, 尹太举, 唐勇, 郭旭光, 赵康, 潘进, 陈美玲. 2020. 准噶尔盆地西北缘及玛湖凹陷沉积储集层研究进展. *古地理学报*, 22(1): 129–146. [Zhang C M, Yin T J, Tang Y, Guo X G, Zhao K, Pan J, Chen M L. 2020. Advances in sedimentological reservoir research in Mahu sag and Northwest margin of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 22(1): 129–146]
- 张辉, 林春明, 崔颖凯. 2005. 三角洲沉积微相特征及其地震识别方法: 以委内瑞拉卡拉高莱斯地区为例. *石油物探*, 44(6): 557–562. [Zhang H, Lin C M, Cui Y K. 2005. The characteristics of delta sedimentary microfacies and their diagnosis seismic methods: a case study in the CARACOLE area, Venezuela. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 44(6): 557–562]
- 张霞, 林春明, 凌洪飞, 蒋少涌, 李艳丽, 高丽坤, 姚玉来, 刘晓. 2009. 浙西地区奥陶系硯瓦山组瘤状灰岩成因探讨. *古地理学报*, 11(5): 481–490. [Zhang X, Lin C M, Ling H F, Li Y L, Gao L K, Yao Y L, Liu X. 2009. Nodular limestone and its genesis from the Ordovician Yanwushan Formation in Western Zhejiang Province. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 11(5): 481–490]
- 张霞, 林春明, 杨守业, 高抒, Robert W. Dalrymple. 2018. 晚第四纪钱塘江下切河谷充填物物源特征. *古地理学报*, 20(5): 877–892. [Zhang X, Lin C M, Yang S Y, Gao S, Dalrymple W. 2018. Provenance for the late Quaternary Qiantang River incised-valley fill. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 20(5): 877–892]
- 郑孟林, 樊向东, 何文军, 杨彤远, 唐勇, 丁靖, 吴海生, 陈磊, 郭建辰. 2019. 准噶尔盆地深层地质结构叠加演变与油气赋存. *地学前缘*, 26(1): 22–32. [Zheng M L, Fan X D, He W J, Yang T Y, Tang Y, Ding J, Wu H S, Chen L, Guo J C. 2019. Superposition of deep geological structural evolution and hydrocarbon accumulation in Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 22–32]
- 支东明, 唐勇, 郑孟林, 徐洋, 曹剑, 丁靖, 赵长永. 2019. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素. *中国石油勘探*, 24(5): 615–623. [Zhi D M, Tang Y, Zheng M L, Xu Y, Cao J, Ding J, Zhao C Y. 2019. Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 615–623]
- 周健, 林春明, 张霞, 姚玉来, 潘峰, 俞昊, 陈顺勇, 张猛. 2011. 江苏高邮凹陷古近系戴南组一段物源体系和沉积体系和沉积相. *古地理学报*, 13(2): 161–174. [Zhou J, Lin C M, Zhang X, Yao Y L, Pan F, Yu H, Chen S Y, Zhang M. 2011. Provenance system and sedimentary facies of Member 1 of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou sag, Jiangsu Province. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 13(2): 161–174]
- 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 刘芬, 吴冬, 李洋, 王瑞. 2013. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 37(5): 7–14. [Zhu X M, Pan R, Zhao D N, Liu F, Wu D, Li Y, Wang R. 2013. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses. *Journal of China University of Petroleum*, 37(5): 7–14]
- 邹志文, 郭华军, 牛志杰, 徐洋, 单祥, 李亚哲, 沈金龙. 2021. 河控型扇三角洲沉积特征及控制因素: 以准噶尔盆地玛湖凹陷上乌尔禾组为例. *古地理学报*, 23(4): 756–770. [Zou Z W, Guo H J, Niu Z J, Xu Y, Shan X, Li Y Z, Shen J L. 2021. Sedimentary characteristics and controlling factors of river-dominated fan delta: a case study from the Upper Urho Formation in Mahu sag of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 23(4): 756–770]
- Abdel-Fattah Z A, Sehsah H. 2023. The Upper Neoproterozoic lacustrine-fan delta depositional systems associated with braided alluvial fans in the Nubian Shield, Egypt. *Sedimentary Geology*, 452: 106426.
- Horton B K, Schmitt J G. 1996. *Sedimentology of a lacustrine fan-delta*

- system, Miocene Horse Camp Formation, Nevada, USA. *Sedimentology*, 43: 133–155.
- Huang S Y, Lin C M, Zhang X, Zhang N. 2021. Controls of diagenesis on the quality of shallowly buried terrestrial coarse-grained elastic reservoirs: a case study of the Eocene Shahejie Formation in Damintun Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 221: 104950.
- Ilgar A, Nemec W, Tuncay E, Alcicek M C, Hakyemez A, Bozkurt A, Ciner A, Ergen A. 2024. The coeval development of conglomeratic, shoal-water and Gilbert-type deltas in the post-orogenic extensional Cardak Basin, SW Türkiye: implications for accommodation and sediment supply. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 6: 439–458.
- Jiang K X, Lin C M, Zhang X, Zhao Y Y, Lang X G, Su M, Wang C, Lei Y P, Liu J R. 2023. Storm-driven variations in depositional environments modify pyrite sulfur isotope records. *Earth and Planetary Science Letters*, 610: 118118.
- Leszczyński S, Nemec W. 2015. Dynamic stratigraphy of peripheral composite peripheral unconformity in a foredeep basin. *Sedimentology*, 62(3): 645–680.
- Lin C M, Zhuo H C, Gao S. 2005. Sedimentary facies and evolution of Qiantang River incised valley, Eastern China. *Marine Geology*, 219(4): 235–259.
- Martini I, Ambrosetti E, Sandrelli F. 2017. The role of sediment supply in large-scale stratigraphic architecture of ancient Gilbert-type deltas (Pliocene Siena–Radicofani Basin, Italy). *Sedimentary Geology*, 350: 23–41.
- Zhang X, Lin C M, Cai Y F, Qu C W, Chen Z Y. 2012. Pore-lining chlorite cements in lacustrine deltaic sandstones from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Geology*, 35(3): 273–290.
- Zhang X, Lin C M, Dalrymple W, Gao S, Li Y L. 2014. Facies architecture and depositional model of a macrotidal incised valley succession (Qiantang River estuary, Eastern China), and differences from other macrotidal systems. *Geological Society of America Bulletin*, 126(3–4): 499–522.
- Zhang X, Lin C M, Dalrymple W, Yang S Y. 2021. Source-to-sink analysis for the mud and sand in the late-Quaternary Qiantang River incised-valley fill and its implications for the delta-shelf-estuary dispersal system globally. *Sedimentology*, 68: 3228–3252.
- Zhang X, Lin C M, Yin Y, Zhang N, Zhou J, Liu Y R. 2016. Sedimentary characteristics and processes of Paleogene Dainan Formation in the Gaoyou Depression, North Jiangsu Basin, Eastern China. *Petroleum Science*, 13(3): 385–401.
- Zhang X, Dalrymple W, Lin C M. 2018. Facies and stratigraphic architecture of the late-Pleistocene to early-Holocene tide-dominated Paleo-Changjiang (Yangtze River) delta. *Geological Society of America Bulletin*, 130(3–4): 455–483.

(责任编辑 王绍华)