

孙洪伟,周新茂,李顺利,等,2023. 点物源扇三角洲的岩相与构型特征:以希里沟湖现代扇三角洲为例[J]. 沉积与特提斯地质,43(4):722-733. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.04003

SUN H W, ZHOU X M, LI S L, et al., 2023. Sedimentary facies and architecture of point-provenance fan deltas: A case study of modern lacus fan delta in the Xiligou Lake[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(4): 722–733. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.04003

点物源扇三角洲的岩相与构型特征:以希里沟湖 现代扇三角洲为例

孙洪伟¹,周新茂²,李顺利¹,于兴河^{1*},马 嫡¹,高明轩¹

(1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要: 扇三角洲沉积体具有良好的储集性能,是重要的油气储层。为了阐明扇三角洲储层的岩相与构型特征,定量表征构型单元的几何属性,明确构型分布规律,应用探地雷达技术和野外剖面观察技术,采用露头实测、精细构型解释等方法,对青海省乌兰县希里沟湖现代点物源扇三角洲进行了系统研究,共识别出16种岩相类型、8种垂向序列和8种构型单元。 点物源扇三角洲主要发育主水道(MCH)、分支辫状水道(DCH)、片状洪流沉积(SF)、辫流坝(CB)、洪漫沉积 (OF)、水下分流河道(UCH)、河口坝(RMB)以及间湾/席状砂(SS)共计8种典型构型单元,以分支辫状水道和辫 流坝构型单元为主。分支辫状水道构型单元厚度1.5~2.0 m,宽厚比30~70。辫流坝厚度2.0~3.0 m,宽厚比50~70。同一沉 积时期,点物源扇三角洲发育5种基本构型单元组合,分别为SF-MCH-SF、OF-DCH-CB-DCH-OF、SS-UCH-RMB-UCH-SS、SS-RMB-SS和SS-UCH-SS。不同沉积时期的构型单元分布表现为4种基本组合类型在横向上的重复和垂向上的 叠加。

关 键 词:油气储层;探地雷达(GPR);点物源扇三角洲;岩相;垂向序列;构型单元 中图分类号: P588.21+2 文献标识码:A

Sedimentary facies and architecture of point-provenance fan deltas: A case study of modern lacus fan delta in the Xiligou Lake

SUN Hongwei¹, ZHOU Xinmao², LI Shunli¹, YU Xinghe^{1*}, MA Di¹, GAO Mingxuan¹

(1. School of Energy Resources, China University of Geoscience, Beijing, 100083; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing, 100083)

Abstract: Fan delta deposits are important reservoirs for oil and gas. To illustrate the sedimentary facies and architecture of lacustrine fan delta deposits, we have quantitatively characterized the geometric attributes of different architecture units and clarified the regularity of their distribution. Based on detailed outcrop measurements and architecture interpretations using ground penetrating radar, we have recognized 16 sedimentary facies, eight vertical sequences, and eight architecture units, including main channel (MCH), distributary channel (DCH), sheet flood (SF), braided bar (CB), overbank flow (OF), subaqueous distributary (UCH), river mouth bar (RMB), and sheet sand (SS). The thickness of the distributary braided channels varies from 1.5 m to 2.0 m, with a width-to-

收稿日期: 2021-03-28; 改回日期: 2021-04-16; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 孙洪伟(1994—),男,博士研究生,矿产普查与勘探专业,研究方向为沉积学理论与应用,沉积动力 学。E-mail: sunhongwei12560@foxmail.com

通讯作者: 于兴河(1958—),男,教授,主要从事储层地质学领域研究。E-mail: billyu@cugb.edu.cn

资助项目: 国家科技重大专项(2017ZX05001-002-004); 国家自然科学基金面上项目(42272124)

thickness ratio of 30 to 70. The thickness of the braided bar varies from 2.0 m to 3.0 m, with a width-to-thickness ratio of 50 to 70. During the same sedimentary period, lacustrine fan delta developed five basic architectural unit combinations, namely, SF-MCH-SF, OF-DCH-CB-DCH-OF, SS-UCH-RMB-UCH-SS, SS-RMB-SS, and SS-UCH-SS. The distribution of architecture units in different depositional periods shows lateral repetition of the five basic combinations and vertical superposition.

Key words: reservoir for oil and gas; ground penetrating radar; point-provenance fan delta; sedimentary facies; sedimentary sequence; architecture unit

0 引言

砾岩油藏越来越受到公众的重视,随着油田开 发程度的不断深入,为满足粗粒油藏剩余油挖潜的 需求,其内部构型研究迫在眉睫(于兴河等,2018)。 构型研究主要集中在曲流河及辫状河上,且已相对 比较成熟(Miall,1985,1988;陈彬滔等,2015;胡光 义等,2017)。在河流基础上,冲积扇的构型研究也 逐步展开并建立了一定的研究体系(吴胜和等,2016)。

而针对扇三角洲开展的储层构型研究则比较 薄弱,并且研究对象多是古代油藏,以岩电震等手 段对储层单一河道边界及规模的识别、构型要素 的单井相划分及组合模式(姜建伟等,2016;李岩, 2017;潘进等,2019;孙乐等,2017a;王珏等,2016)、 储层夹层类型的划分(林煜等,2013)、构型界面的 分级(宋璠等,2015)、水进水退对构型展布的控制 作用(孙乐等,2017b)等方面内容所进行的分析,着 重于砂体的刻画,缺乏对构型组合方式与相带分布 规律系统的认识。

冲积扇主要发育在盆地边缘,断层的组合特征 控制着沉积物的搬运和沉积(Feng et al., 2013; 吴孔 友等, 2014)。冲积扇主要沉积于各单一断裂坡折 内部可容纳空间较大的部位(即断距大的部位),扇 体沿着坡折带内低部位的连线迁移(王英民等, 2003),内部由多个侧向迁移、叠覆的朵叶构成(印 森林等, 2014)。根据断层对扇体物源的控制类型, 可以将扇体划分为点状物源供给、线状(多点)物 源供给(Reading and Richards, 1994)。扇三角洲作 为冲积扇入水形成的沉积体系(于兴河, 2008),在 物源上同样受到构造破折的控制,也可以分为点物 源扇三角洲与线物源扇三角洲(Wescott and Ethridge, 1980)。

野外露头观察与描述是石油地质研究中的一 项基础工作,现代沉积的观测有助于建立完整的模 式和揭示系统的规律,在油气地质勘探和开发过程 中有至关重要的作用。形成比油气区井网更加精 细的露头尺度地质规律认识,是指导地下储层构型 模式的建立的关键。探地雷达(Ground Penetrating Radar)是一种高效的浅层地球物理探测技术,它通 过向地下发射高频电磁脉冲,利用地下介质电性参 数差异,根据回波的振幅、波形和频率等特征来分 析和推断浅层沉积体结构和物性特征(Bristow, 2016),在沉积构型分析方面具有十分突出的优势 (James et al., 2003)。

本次研究旨在通过对希里沟湖现代扇三角洲 天然剖面的实测、探地雷达的解译、精细构型解释 和定量化,厘清点物源扇三角洲的构型单元类型、 组合特征及分布规律,定量表征构型单元的几何属 性,为储层分布的分析与预测和剩余油挖潜提供必 要的基础地质依据。

1 区域地质概况

1.1 地理位置与气候

研究对象位于青藏高原西北部,青海省乌兰县 正南方7km处,发源于希里沟湖南山,向北展开, 扇体形态规整,半径约为7.4km,展角约117°,总面 积约为50km²。物源出山口海拔3200m,湖面海拔 2934mm,物源区与沉积区高差约300m。该地区 为典型的内陆高原半干旱高寒气候区,气候干燥, 气温年较差和日较差大,据乌兰县气象站近年来气 候数据统计,年平均降水量为211.16mm,年平均 气温为4.33°C(吕顺昌, 2018)。

1.2 构造沉积特征

希里沟湖位于狭长的 NWW 向希—赛盆地,处 于柴达木盆地东北部盆缘地带,为逆冲断层围限的 山间断陷盆地(吕顺昌,2018)。盆缘受倾向正北、 倾角 30°的正断层所控制,断块撕裂形成沟谷,成为 了希里沟湖扇三角洲出山口,以单点方式为扇体发 育供源。在平面上扇体具有"大平原、小前缘" 的相带分布特征,根部发育主水道,向端部逐渐形 成分支水道向侧面展布而形成扇形。在垂向上希 里沟湖具有间歇性河流沉积特点(高崇龙等,2020;

2 岩相类型与垂向序列

2.1 岩相类型

岩相的主要识别标志在于岩性、粒度、沉积构造以及颜色(于兴河,2008)。Miall(1988)对河流沉积物划分出22种岩相,本文沿用Miall的划分方法,同时根据实际构造特征略有修改。岩相的划分以及命名,采用"岩性+沉积构造+其他"的表达方式,首先依据岩性划分出:G—砾岩、S—砂岩、F—粉

砂岩、M—泥岩;依据沉积构造划分:t—槽状交错 层理、p—板状交错层理、m—块状层理等;若有其 他典型特征时,用相应描述的缩写代表,例如砾石 质杂基支撑砾岩相为 Gmg。

通过对野外 21 个观测剖面的详细描述, 在希 里沟湖扇三角洲共识别出 16 种岩相(图 2), 其中 砾岩相 9 种, 包括: 砾石质杂基支撑漂浮砾岩相 (Gmg)、砂质杂基支撑漂浮砾岩相(Gms)、多级颗 粒支撑砾岩相(Gcm)、同级颗粒支撑砾岩相(Gcs)、 叠瓦状砾岩相(Gi)、槽状交错层理砾岩相(Gt)、板 状交错层理砾岩相(Gp)、粒序层理砾岩相(Gg)及



Fig. 1 Photos and the measured columnar section of the study area



a.砾石质杂基支撑漂浮砾岩相(Gmg); b.砂质杂基支撑漂浮砾岩相(Gms); c.多级颗粒支撑砾岩相(Gcm); d.叠 瓦状砾岩相(Gi); e.槽状交错层理砾岩相(Gt); f.板状交错层理砾岩相(Gp); g.粒序层理砾岩相(Gg); h.支 撑岩相(Gco); i.同级颗粒支撑砾岩相(Gcs); j.槽状交错层理砂岩相(St); k.板状交错层理砂岩相(Sp); l.平 行层理砂岩相(Sh); m.冲洗层理砂岩相(Ss); n.浪成沙纹粉砂岩相(Fr); o.炭质泥岩相(Mc)。

图 2 希里沟湖扇三角洲典型岩相照片

Fig. 2 Photos showing lacus fan delta sedimentary facies of the Xiligou Lake

支撑岩相(Gco);砂岩相5种,包括:板状交错层理 砂岩相(Sp)、槽状交错层理砂岩相(St)、平行层理 砂岩相(Sh)、冲洗层理砂岩相(Ss)及浪成沙纹粉 砂岩相(Fr);泥岩相2种,包括暗色泥岩(M)与炭 质泥岩相(Mc)。

2.2 垂向序列

根据野外剖面的精细描述与沉积成因分析,希 里沟湖扇三角洲主要发育 8 种典型的垂向序列类 型(图3)。

2.2.1 FA-1 垂向序列: Gms-Gmg-Gg-Sm

该岩相序列为典型的碎屑流主辫状水道沉积。 砾石以中、细砾石为主,偶见粗砾石,分选极差、磨 圆极差。混杂堆积,块状或弱的正粒序,可见大量 直立砾石。下切侵蚀能力较强,整体厚度较大,约 2.0~4.5 m。底部发育冲刷面,典型碎屑流沉积 (Gms),沉积速度快,块状结构(靳军等,2019);向 上砂质杂基相对减少,以砾石基质支撑为主(Gmg), 由于浮力的作用而呈现微弱反粒序;上部由于沉积 相对较慢,重力分异作用明显而呈现正粒序(Gg); 在岩相顶部或发育洪退期块状砂。

2.2.2 FA-2 垂向序列: Gg-Gi-Gcs-Sh

该岩相代表了洪水期溢散流沉积。砾石以中、 细砾石为主,分选相对较好、磨圆极差。整体呈现 明显的正粒序,厚度相对较薄,为1.0~2.5 m。底部 发育冲刷面,砂质基质支撑,重力分异作用明显,砾 石不明显定向排列(Gg)。向上杂基含量明显降低, 砾石呈现明显定向排列(Gi)。顶部沉积较细砾石, 多级颗粒支撑,砾石无定向排列特征(Gcs)。顶部 发育平行层理砂岩。在垂向上构成了水动力逐渐 减弱的垂向序列,中部沉积呈现片流特征,顶部沉 积向牵引流水道过渡。

2.2.3 FA-3 垂向序列: Gcm-Gt-St-Sh-M

该岩相序列为典型的辫状水道沉积。以中、 细砾石沉积为主,分选磨圆中等,杂基含量低,整体 呈现明显的正粒序(盛和宜,1993),不对称二元结 构,厚度为1.5~2.0 m。底部发育冲刷面,河底滞留 沉积(Gcm)。向上发育槽状交错层理、板状交错层 理,顶部发育平行层理砂岩与块状泥岩。

2.2.4 FA-4 垂向序列: Gmg-Gcm-Gcs-Sm

该岩相序列为典型的辫流坝沉积。以中、粗



图 3 希里沟湖扇三角洲岩相垂向序列类型

Fig. 3 Sedimentary sequences of the lacus fan delta deposits of the Xiligou Lake

砾石沉积为主,分选磨圆中等,杂基含量低,整体呈现明显的反粒序,厚度为 2.0~3.0 m。底部发育砾质基质支撑砾岩相,块状层理,向上杂基逐渐减少,并具有明显的沉积分异作用,由多级颗粒支撑过渡为同级颗粒支撑。顶部或发育洪水期漫溢沉积块状砂。

2.2.5 FA-5 垂向序列: Gms-Sm-Sp-M

该岩相序列代表了洪水期漫溢,分支水道间沉积。是分支水道中水流漫溢出水道边界,裹挟着附近的沉积物形成的二次搬运沉积,厚度为1.0~1.5m。底部常可见较大砾石孤立漂浮于较细粒砾石沉积中,块状构造。上部沉积发育以砂为主的平行层理或者板状交错层理,以板状交错层理为主。顶部发育洪退期块状泥。

2.2.6 FA-6 垂向序列: St-Sp-Sh-Fr-M

该岩相序列是典型的水下分流河道沉积。以 含细砾中粗砂沉积为主,厚度为0.5~1.0m。底部 发育槽状交错层理,砾石在底部岩纹层定向排列; 向上过渡为板状交错层理、平行层理。顶部发育 流水沙纹与块状炭质泥。

2.2.7 FA-7 垂向序列: Fh-Sp-Gp-M

该岩相序列代表了河口坝沉积。以中粗砂、 细砾沉积为主,厚度为 1.0~1.5 m。底部水平层理 粉砂岩向上发育板状层理砂与板状层理细砾石,顶 部发育炭质泥。该坝体发育以河流作用为主,受波 浪影响不大。

2.2.8 FA-8 垂向序列: Sh-Ss-Sw-M

该岩相序列代表了席状砂/分流间湾沉积。发 育席状砂典型层理特征——冲洗层理,以及平行层 理和浪成沙纹,顶部发育炭质泥。由于该扇三角洲 波浪作用不大,因此席状砂发育规模较小,厚度为 $0.3{\sim}0.5~m_{\circ}$

3 构型单元类型

详细的野外剖面实测和探地雷达精细解译结 果表明,希里沟湖扇三角洲发育8种典型的构型单 元(表1)。

3.1 水道(CH)

辫状水道是最常见的构型单元之一,在剖面上 通常呈顶平底凹的透镜状。根据发育的位置以及 水动力类型分为主辫状水道(MCH)(图 4a)和分支 辫状水道(DCH)(图 4b)。主辫状水道(MCH)在靠 近出山口位置,以碎屑流作用为主(McPherson et al., 1987),构型内部发育岩相序列 FA-1。随着水 动力的减弱与沉积物的卸载,流态逐渐向牵引流过 渡,分支辫状水道(DCH)发育,对应发育岩相序列 FA-3。野外剖面实测结果与探地雷达剖面解译表 明,河道构型单元的厚度介于 1.5~4.5 m,宽度介 于 50~200 m,宽厚比约为 30~50。

3.2 片状洪流沉积(SF)

片状洪流沉积是发育规模较小的构型单元,通 常呈薄板状(图 4b,图 5a),平面延伸距离与水动力 强弱成正相关。垂向序列对应于岩相序列 FA-2。 随着沉积物卸载,顶部可发育小型辫状水道,沉积 平行层理中粗砂。野外剖面实测结果与探地雷达 剖面解译表明,片状洪流沉积构型单元的厚度介 于 1.0~2.5 m,宽度可达几十米至几百米,平面展 布通常无固定形态。

3.3 辫流坝(CB)

辫流坝是另一个常见的构型单元,在剖面上通常呈底平顶凸的透镜状(图 4b),垂向序列对应于 岩相序列 FA-4。顶部通常因后期水流冲刷而形成

表 1 希里沟湖扇三角洲构型单元特征 Table 1 Characteristics of configuration units of the lacus fan delta deposits of the Xiligou Lake

	代码	垂向序列	剖面结构	实测数据		
构堂单儿名林				宽度范围/m	厚度范围/m	宽/厚比范围
主水道	МСН	Gms-Gmg-Gg-Sm	66000000000000000000000000000000000000	100~200	2.0~4.5	40~50
片状洪流沉积	SF	Gg-Gi-Gcs-Sh	22 <i>233,2</i> 23,2	—	1.5~2.5	—
分支辫状水道	DCH	Gcm-Gt-St-Sh-M		50~150	1.5~2.0	30~70
辫流坝	CB	Gmg-Gcm-Gcs-Sm		100~200	2.0~3.0	50~70
洪漫沉积	OF	Gms-sp-M	•••0• •••••••••	—	1.0~1.5	—
水下分流河道	UCH	St-Sp-Sh-Fr-M		40~70	0.5~1.0	70~80
河口坝	RMB	Sh-Sp-Gp-M	1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0	80~140	1.0~1.5	80~90
席状砂	SS	Sh-Ss-Sw-M	<	_	0.3~0.5	_



a. 上平原横切物源雷达剖面;
b. 下平原横切物源雷达剖面。
图 4 希里沟湖扇三角洲雷达剖面构型单元划分

Fig. 4 Configuration units identified by GPR in the lacus fan delta deposits of the Xiligou Lake.

小型冲沟(James et al., 2003)。野外剖面实测结果 与探地雷达剖面解译表明, 辫流坝构型单元的厚度 介于 2.0~3.0 m, 宽度介于 100~200 m, 宽厚比约为 50~70。总体而言, 辫流坝构型单元与河道构型单 元的厚度范围相近, 但是辫流坝构型单元的宽度和 宽厚比明显大于辫状水道构型单元。

3.4 洪漫沉积(OF)

洪漫沉积是分支辫状水道间沉积的构型单元, 通常呈薄饼状(图 5a),平面延伸距离与水动力强 弱成正相关。垂向序列对应于岩相序列 FA-5。该 构型以二次搬运再沉积为主要特点,在沉积物上表 现为孤立大砾石漂浮于较小粒度沉积中。野外剖 面实测结果与探地雷达剖面解译表明,洪漫沉积构 型单元的厚度介于 1.0~1.5 m,宽度可达到几十米 至上百米,平面展布通常无固定形态。

3.5 水下分流河道(UCH)

水下分流河道是一个常见的构型单元,在剖面 上通常呈顶平底凹的透镜状(图 5b),垂向序列对 应于岩相序列 FA-6。水下河道水动力较弱,以垂 向加积作用为主,随着向水体推进逐渐消亡。野外 剖面实测结果与探地雷达剖面解译表明,水下分流 河道构型单元的厚度介于 0.5~1.0 m,宽度介于 40~ 70 m,宽厚比约为 70~80。

3.6 河口坝(RMB)

河口坝在剖面上通常呈底平顶凸的透镜状 (图 5b), 垂向序列对应于岩相序列 FA-7。河口坝 是河流作用与波浪作用的共同产物, 但扇体波浪作 用较弱, 相应沉积构造不发育, 坝体以板状交错层 理为主要特征。野外剖面实测结果与探地雷达剖 面解译表明, 河口坝构型单元的厚度介于 1.0~1.5 m, 宽度介于 80~140 m, 宽厚比约为 80~90。

3.7 席状砂(SS)

席状砂在剖面上通常呈薄层席状(图 5b), 垂向序列对应于岩相序列 FA-8。席状砂是波浪对河口坝改造, 使得砂体在平面铺开形成的构型单元。 野外剖面实测结果与探地雷达剖面解译表明, 席状砂构型单元的厚度介于 0.3~0.5 m, 平面范围无定形态, 可延伸几十米至上百米。

水下分流间湾沉积常与河口坝以及席状砂交 互出现,以炭质泥沉积为主要特征,在河流作用间 歇期常发育在河口坝、水下分流河道与席状砂顶 部,因此在构型上与席状砂不作区分。

4 构型单元分布规律

希里沟湖扇三角洲具有"大平原、小前缘" 的特征,因此其扇三角洲平原特征与冲积扇极其相 似,并且平原流态存在碎屑流过渡为洪流,继而为 牵引流的特征(李维锋等,1999;张春生等,2000)。 根据冲积扇扇根、扇中的划分依据,将希里沟湖扇 三角洲平原分为上平原与下平原。同期次构型单 元具有5种组合方式(表2)。 上平原以碎屑流主水道、片状洪流沉积为主 要构型单元,在剖面上表现为碎屑水道孤立发育于 片状洪流沉积中。垂向上表现为多期碎屑水道的 叠置,新水道在旧水道上继承发育,由于供源大小 的不同,而使得原有水道扩宽或缩窄(图 6A)。在



a. 下平原横切物源露头剖面; b. 前缘横切物源露头剖面。

图 5 希里沟湖扇三角洲露头剖面构型单元划分

Fig. 5 Configuration units identified in outcrops in the lacus fan delta deposits of the Xiligou Lake

表 2	希里沟湖扇三角洲构型单元组合类型

Table 2	Combination types	of configuration	units in the lacus	fan delta deposits	of the Xiligou Lake
	• •	0		-	0



上平原坝体不发育,主要原因在于碎屑流黏度较大, 块状沉积,内部沉积分异较差(McPherson et al., 1987)。 下平原以辫状水道、辫流坝以及洪漫沉积为 主要构型单元,在剖面上同期次表现为两道夹一坝、 两道间洪漫,不同期次垂向上道坝接割频繁。水道



A.点物源扇三角洲上平原构型叠加样式; B.点物源扇三角洲下平原构型叠加样式; C.点物源扇三角洲前缘构型叠加样式。

图 6 希里沟湖点物源扇三角洲构型分布规律

Fig. 6 Distribution of configuration units of the lacus fan delta deposits of the Xiligou Lake

分叉的根本原因在于流态降低的沉积分异作用,先 滞留下来的沉积物对水流造成阻碍,使得滞留堆积 不断加大(Postma, 1990),最终形成分支水道(图 6B)。 下平原是辫流坝发育的主要相带,也是储层物性较 好的相带。

前缘以水下分流河道、河口坝以及席状砂为 主要构型单元,在剖面上变现为孤立水道、孤立坝 体、两道夹一坝,间湾可以发育在两道之间、两坝 之间以及两道之间。前缘构型组合虽然也是"道 坝间"的模式,但是其组合类型较下平原更为丰富 (图 6C),主要原因在于水下间湾发育较为广泛,同 时水下分流河道的水动力较低,难以形成一定规模 的分支河道。通常在下平原河道入水后,由于水动 力骤减,沉积物卸载形成河口坝,分支水道入水后 延伸不远随即消失。由于河口坝沉积多为悬浮搬 运物质的卸载,因此砾石较为不发育。前缘砾石多 以河底滞留沉积形式存在。

席状砂是河口坝等砂体经过波浪改造后的产物(于兴河,2008),席状砂较为发育代表了河口坝的破坏。席状砂通常发育在河口坝的底部,代表在 洪退期、间洪期,河流作用减弱,波浪作用为主的 砂体沉积与改造。

正因前缘相带存在河流与波浪的共同作用,其 沉积物往往分选、磨圆好,杂基含量低。同时由于 不断的物源输入,河口坝的沉积规模不断增大,经 过成岩作用以后能够形成规模大的优质储层,是勘 探开发的有利相带。

5 结论

(1)希里沟湖点物源扇三角洲野外观测发育 16种典型的岩相类型、8种垂向序列,总体以河道 下切侵蚀、侧向迁移摆动以及充填形成的块状层 理砂砾、槽状交错层理砂砾、板状交错层理砂为主。

(2)点物源扇三角洲发育 8 种构型单元,分别 为主水道(MCH)、片状洪流沉积(SF)、分支辫状 水道(DCH)、辫流坝(CB)、洪漫沉积(OF)、水下 分流河道(UCH)、河口坝(RMB)和席状砂(SS)。 辫状水道宽度 50~150 m,宽厚比 25~30,辫流坝宽 度 100~200 m,宽厚比 50~70。坝体规模约为河道 的 2 倍,宽厚比也约为 2 倍。水下分流河道宽度 40~70 m,宽厚比 70~80,河口坝宽度 80~140,宽厚 比 80~90。坝体发育规模约为河道的 2 倍,但宽厚 比接近。这主要是由于蓄水体对流水作用的限制, 使得河道与坝体均以垂向加积作用为主。

(3)同一沉积时期, 点物源扇三角洲存在 5 种 基本构型组合单元, 上平原由于碎屑沉积黏度较大, 水道孤立发育与片状洪流中,形成片状洪流-主水道-片状洪流组合类型(SF-MCH-SF); 下平原流体性质 向牵引流过渡, 分支水道形成, 发育洪漫沉积-分 支辫状水道-辫流坝-分支辫状水道-洪漫沉积 (OF-DCH-CB-DCH-OF); 前缘由于河道人水动力 不同, 水下分流河道发育规模存在差异, 形成间湾/ 席状砂-水下分流河道-河口坝-水下分流河道-间湾/席状砂(SS-UCH-RMB-UCH-SS)、间湾/席状 砂-河口坝-间湾/席状砂(SS-RMB-SS)、间湾/ 席状砂-水下分流河道-间湾/席状砂(SS-UCH-SS)三种组合类型。不同时期的构型单元空间分布, 为以上 5 种组合类型在垂向和横向上的重复或叠加。

(4)扇三角洲前缘相带存在河流与波浪的共同 作用,沉积物的物性好。同时由于不断的物源输入, 沉积规模相对较大,经过成岩作用以后能够形成大 规模的优质储层,是勘探开发的有利相带。其次为 扇三角洲下平原相带,因辫流坝广泛发育而具有相 对较高的储集性能,但是分布零散,单个储层规模 较小。

致谢:感谢我的师兄弟姐妹们的支持与帮助! 感谢审稿人对文章内容的认可以及提出的宝贵意 见!感谢郭秀梅编辑的大力支持与热心帮助!

References

- Feng Y L, Li S T, Lu Y C, 2013. Sequence stratigraphy and architectural variability in Late Eocene lacustrine strata of the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Sedimentary Geology, 295: 1 – 26.
- James L B, Philip J A, Bristow C S, et al., 2003. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh[J]. Journal of Sedimentary Research, 73: 516 – 530.
- 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: 331 – 340.
- Miall A D, 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth-Science Reviews, 22 (4) : 261 – 308.
- Miall A D, 1988. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado[J]. Sedimentary Geology, 55 (3–4) : 233 –

262

- Postma G, 1990. Depositional Architecture and Facies of River and Fan Deltas: A Synthesis [M]. Coarse-Grained Deltas, 10: 13 27.
- Reading H G, Richards M, 1994. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 78 (5): 792 - 822.
- Wescott W A, Ethridge F G, 1980. Fan-delta sedimentology and tectonic setting —Yallahs Fan Delta, Southeast Jamaica[J]. AAPG Bulletin, 64: 374 - 399.
- Chen B T, Yu X H, Wang T Q, et al., 2015. Lithofacies and architectural characteristics of sandy braided river deposits: a case from outcrops of the Middle Jurassic Yungang Formation in the Datong Basin, Shanxi Province[J]. Oil & Gas Geology, 36 (1): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- Gao C L, Ji Y L, Jin J, et al., 2020. Sedimentary characteristics and evolution model of fluvial fan dominated by intermittent flood flows:a case study of Baiyang alluvial fan within the northern margin of Heshituoluogai Basin. Acta Petrolei Sinica, 41 (3) : 310-328.
- Hu G Y, Fan T E, Chen F, et al., 2017. From Reservoir Architecture to Seismic Architecture Facies: Characteristic Method of a High-Resolution Fluvial Facies Model [J]. Acta Geologica Sinica, 91 (2): 465 – 478 (in Chinese with English abstract).
- Jiang J W, Xiao M H, Wang J P, et al., 2016. Detailed reservoir architecture of fan-delta front in Shuanghe Oilfield,Biyang Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 23 (5) : 560 - 568 (in Chinese with English abstract).
- Jin J, Liu D W, Ji Y L, et al., 2019. Research on Lithofacies Types, Cause Mechanisms and Distribution of a Gravel Braided-River Alluvial Fan:A case study of the modern Poplar Riv-er alluvial fan, northwestern Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37 (2): 254 – 267 (in Chinese with English abstract).
- Li W F, Gao Z Z, Peng D T, et al., 1999. Comparative Study of Fandeltas,Braided-river Deltas and Meandering-river Deltas of Mesozoic Erathem in Kuche Depression,Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 17 (3): 430 – 434 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, 2017. Reservoir architecture of fan delta front and its oil-control models: a case of Eh_3 IV3¹ reservoir in Zhaowa block of Zhaowa Oilfield, Biyang Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 29 (3) : 132 139 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y, Wu S H, Yue D L, et al., 2013. Fine Anatomizing Reservoir Architecture of Fan-delta Front: A Case Study on Dujiatai Reservoir in Shu2-6-6 Block,Liaohe Oilfield[J]. Natural Gas Geoscience, 24 (2): 335 – 344 (in Chinese with English abstract).
- Lü S C, 2018. Study on "Lake ¹⁴C Reservoir Effect " in Qinghai Lake and Xiligou Lake[D]. Xining: Qinghai Normal University, 11 21.
- Pan J, Zhang C M, Pang L, et al., 2019. Depositional evolution characteristics of the Triassic Baikouquan Formation in Xiazijie fan area of Mahu sag,Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 21 (6) :913 – 924 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Y N, Xiao J X, Xue P H. 1982. Discussion on category of lake deltas. Petroleum Exploration and Development, 9 (1) : 1-11.

Sheng H Y, 1993. The application of grain size analysis to the

classification of fan-deltas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 15 (2) : 185 – 191 (in Chinese with English abstract).

- Song F, Yang S C, Su N N, et al., 2015. Division and recognition of architecture interfaces of fan- delta front reservoir: taking Dujiatai reservoir of Jin-99 block in Huanxiling Oilfield, Liaohe Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 30 (1): 7-13 (in Chinese with English abstract).
- Sun L, Wang Z Z, Yu X H, et al., 2017. Study on reservoir architecture of fan delta in the Upper Karamay Formation of eastern Block Wu2, Karamay Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 24 (4): 8-15 (in Chinese with English abstract).
- Sun L, Yu X H, Li S L, et al., 2017. Sedimentary characteristics of transgressive fan delta of the 3rd Member of Eocene Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin[J]. Geology in China, 44 (3) : 485 – 498 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Chen H Q, Zhou J J, et al., 2016. Configuration characterization of the fan-delta-front reservoirs-taking Yulou oil layers in West Liaohe Sag as a case[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 35 (2) : 20 – 28 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y M, Jin W D, Liu S H, et al., 2003. Genetic types, distribution and exploration significance of multistage slope breaks in rift lacustrine basin[J]. Oil & Gas Geology, 24 (3) : 199 – 203, 214 (in Chinese with English abstract).
- Wu K Y, Qu J H, Wang H H, 2014. Strike-slip characteristics, forming mechanisms and controlling reservoirs of Dazhuluogou fault in Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 38 (5): 41-47.
- Wu S H, Feng W J, Yin S L, et al., 2016. Research advances in alluvial fan depositional architecture[J]. Journal of Palaeogeography, 18 (4) : 497 512 (in Chinese with English abstract).
- Yin S L, Wu S H, Li J F, et al., 2014. The Controlling Effect on High Frequency Sequence Stratigraphic Architecture and Depositional Filling by Normal Drag Structure, Caused by Contemporaneous Reverse Fault[J]. Geological Review, 60 (2) : 310 - 320 (in Chinese with English abstract).
- Yu X H, et al., 2002. Sedimentology of oil and gas reservoirs in clastic rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Yu X H, Li S L, Tan C P, et al., 2018. Coarse-grained deposits and their reservoir characterizations: A look back to see forward and hot issues[J]. Journal of Palaeogeography, 20 (5) : 713 - 736 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C S, Liu Z B, Shi D, et al., 2000. Formed Proceeding and Evolution Disciplinarian of Fan Delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18 (4) : 521 – 526, 655 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Bristow C S, 2016. 探地雷达技术在沉积物研究中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 32-78.
- 陈彬滔,于兴河,王天奇,等, 2015.砂质辫状河岩相与构型特征—

以山西大同盆地中侏罗统云冈组露头为例[J].石油与天然气地质,36(1):111-117.

- 高崇龙,纪友亮,靳军,等,2020.阵发性洪水控制的河流型冲积 扇沉积特征及沉积演化模式——以和什托洛盖盆地北缘现代白 杨冲积扇为例[J].石油学报,41(3):310-328.
- 胡光义,范廷恩,陈飞,等,2017.从储层构型到"地震构型相"—— 一种河流相高精度概念模型的表征方法[J].地质学报,91(2): 465-478.
- 姜建伟,肖梦华,王继鹏,等,2016. 泌阳凹陷双河油田扇三角洲 前缘构型精细解剖[J]. 断块油气田,23(5):560-568.
- 靳军,刘大卫,纪友亮,等,2019.砾质辫状河型冲积扇岩相类型、 成因及分布规律——以准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇为 例[J].沉积学报,37(2):254-267.
- 李维锋,高振中,彭德堂,等,1999.库车坳陷中生界三种类型三 角洲的比较研究[J]. 沉积学报,17(3):430-434.
- 李岩,2017.扇三角洲前缘储层构型及控油作用——以赵凹油田赵 凹区核桃园组三段Ⅳ₃¹厚油层为例[J].岩性油气藏,29(3): 132-139.
- 林煜,吴胜和,岳大力,等,2013. 扇三角洲前缘储层构型精细解 剖——以辽河油田曙 2-6-6 区块杜家台油层为例[J]. 天然气地球 科学,24(2):335-344.
- 吕顺昌,2018. 青海湖和希里沟湖"湖泊碳库效应"研究[D]. 西宁: 青海师范大学,11-21.
- 潘进,张昌民,庞雷,等,2019.准噶尔盆地玛湖凹陷夏子街扇区 三叠系百口泉组沉积演化特征[J].古地理学报,21(6):913-924.
- 裘亦楠,肖敬修,薛培华,1982.湖盆三角洲分类的探讨[J].石油勘 探与开发,9(1):1-11.
- 盛和宜, 1993. 粒度分析在扇三角洲分类中的应用[J]. 石油实验地

质,15(2):185-191.

- 宋璠,杨少春,苏妮娜,等,2015.扇三角洲前缘储层构型界面划 分与识别——以辽河盆地欢喜岭油田锦99区块杜家台油层为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),30(1):7-13.
- 孙乐,王志章,于兴河,等,2017.克拉玛依油田五2东区克上组 扇三角洲储层构型分析[J].油气地质与采收率,24(4):8-15.
- 孙乐,于兴河,李胜利,等,2017.北部湾盆地乌石凹陷东区始新 统流三段水进型扇三角洲沉积特征[J].中国地质,44(3):485-498.
- 王珏, 陈欢庆, 周俊杰, 等, 2016. 扇三角洲前缘储层构型表征—— 以辽河西部凹陷于楼为例[J]. 大庆石油地质与开发, 35(2):20-28.
- 王英民,金武弟,刘书会,等,2003.断陷湖盆多级坡折带的成因 类型、展布及其勘探意义[J].石油与天然气地质,24(3):199-203,214.
- 吴孔友, 瞿建华, 王鹤华, 2014. 准噶尔盆地大侏罗沟断层走滑特 征、形成机制及控藏作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学 版), 38(5): 41-47.
- 吴胜和, 冯文杰, 印森林, 等, 2016. 冲积扇沉积构型研究进展[J]. 古地理学报, 18(4): 497-512.
- 印森林,吴胜和,李俊飞,等,2014.同生逆断层正牵引构造对高频层序地层结构及沉积充填的控制作用[J].地质论评,60(2): 310-320.
- 于兴河,等,2008.碎屑岩系油气储层沉积学第2版[M].北京:石 油工业出版社,379-395.
- 于兴河,李顺利,谭程鹏,等,2018. 粗粒沉积及其储层表征的发 展历程与热点问题探讨[J]. 古地理学报,20(5):713-736.
- 张春生,刘忠保,施冬,等,2000.扇三角洲形成过程及演变规律 [J]. 沉积学报,18(4):521-526,655.