

湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析

朱筱敏, 潘 荣, 赵东娜, 刘 芬, 吴 冬, 李 洋, 王 瑞

(中国石油大学地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 通过总结浅水三角洲沉积特征, 结合库车坳陷克拉苏冲断带白垩系巴什基奇克组浅水三角洲的研究, 对浅水三角洲特征及其分类方案进行探讨。结果表明: 根据不同的供源体系可将浅水三角洲划分为浅水扇三角洲、浅水辫状河三角洲及浅水曲流河三角洲; 浅水三角洲的发育需要稳定的构造背景、盆广坡缓、古水体浅、湖平面升降旋回变化、气候适宜、砂质底载荷河流供源充足等有利地质条件; 浅水三角洲具有粒度粗、沉积水动力强的沉积特点, 单砂体薄、复合砂体厚度大、分布面积广, 发育分流河道、河口坝难以保留, 垂向上相序不连续、缺乏传统三角洲三层式结构等特征。实例研究表明: 库车坳陷巴什基奇克组属浅水辫状河三角洲, 其成分成熟度较低、结构成熟度中等偏低, 发育交错层理等强水动力沉积构造和间断正韵律, 水下分流河道改道频繁、砂体纵横叠置、厚度大、延伸远, 有利于构成岩性油气藏。

关键词: 浅水三角洲; 沉积特征; 形成条件; 库车坳陷; 白垩系巴什基奇克组

中图分类号: TE 121.3

文献标志码: A

Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses

ZHU Xiao-min, PAN Rong, ZHAO Dong-na, LIU Fen, WU Dong, LI Yang, WANG Rui

(College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the systematic analysis of sedimentary characteristics of shallow-water deltas, and in combination of a case study of the shallow-water deltas of the Lower Cretaceous Bashijiqlike formation in Kuqa depression, the general classification of shallow-water deltas was discussed. According to different feeding system, shallow-water deltas can be divided into shallow-water fan-delta, shallow-water braided-delta and shallow-water meander-delta. The development of shallow-water deltas requires conditions such as a stable tectonic setting, a wide basin with gentle slope, shallow water, frequently varying lake levels, suitable climate, ample sandy river supplies and other favorable geological conditions. Shallow-water deltas are characteristics of coarse grain size deposited within the strong water dynamic conditions. Single delta is thin and widely spread while composite deltas cover a vast area with great thickness. Shallow-water deltas develop distributary channels but few mouth bars. Shallow-water deltas do not have continuous facies sequence in the vertical direction, and lack the three-layer structure of traditional deltas. Case study shows that the shallow-water braided delta of the Lower Cretaceous Bashijiqlike formation in Kuqa depression has the following characteristics: low compositional maturity and low to medium textural maturity, cross bedding formed by strong hydrodynamic power, intermittent positive rhythm, and frequently diverted underwater distributary channels, channel sandbodies superimposed in vertical and horizontal direction with large thickness, and far extended distance. All of the characteristics are favorable to the formation of lithologic reservoirs.

Key words: shallow-water deltas; depositional feature; formation condition; Kuqa depression; the Cretaceous Bashijiqlike formation

收稿日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272133); 国家“973”计划课题(2011CB201104); 国家科技重大专项课题(2011ZX05001-002, 2011ZX05009-002, 2011ZX05025-005)

作者简介: 朱筱敏(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学和层序地层学教学科研工作。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

三角洲的研究历史悠久,如 1885 年美国地质调查局 Gilbert 对美国 Bonneville 湖更新世三角洲进行了研究^[1]。Fisk 等^[2]对密西西比河三角洲进行研究时提出了浅水三角洲的概念,更多的学者发现水深对于三角洲的发育是一个重要的控制因素,可将三角洲分为浅水和深水三角洲两大类^[2-4]。近年来国外浅水三角洲的研究主要集中于浅水三角洲的形成动力学、微相特征和层序格架下相构型等方面^[5-8]。浅水三角洲在剖面上与传统的吉尔伯特(Gilbert)三角洲具有明显区别,其缺少明显的顶积层、前积层和底积层三层结构。中国的浅水三角洲研究始于 20 世纪 80 年代,孙永传等^[9]认为山西省沁水煤田太原组到上石盒子组发育河控浅水三角洲,继而在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地^[10-17]等地区均有浅水三角洲的研究报道。浅水三角洲的主要特点是:分流河道砂体为骨架砂,不发育河口坝沉积;主要发育平原及前缘亚相;单砂体薄而广布,复合砂体厚度大,面积广。20 世纪 90 年代,对于浅水三角洲的研究主要关注砂体形态及控制因素^[12-13],研究认为浅水三角洲前缘主要砂体形态可分为坨状、枝状、过渡状及席状,而湖平面升降变化、古气候、古地形、河流作用等对浅水三角洲的沉积具有重要控制作用。21 世纪以来,浅水三角洲的研究焦点集中于形成动力学、有利形成地质背景、形成机制及沉积模式等^[14-18],浅水三角洲通常形成于构造相对稳定、地形平缓、盆地整体缓慢沉降、水体较浅、古气候适宜、湖平面频繁多变、物源充足的环境,分流河道砂体广泛分布,湖盆具有敞流特征。大型浅水三角洲砂体是岩性油气藏勘探的重要目标,系统地研究湖盆浅水三角洲的形成背景、发育条件和沉积特征等对中国陆相盆地岩性油气藏的深入勘探具有重要意义。笔者通过调研浅水三角洲最新研究进展,结合库车坳陷克拉苏冲断带白垩系巴什

基奇克组浅水辫状河三角洲的研究,系统分析大面积浅水三角洲砂体的成因类型、形成条件、沉积特征及控制因素。

1 湖盆浅水三角洲的分类

Postma 等^[4]基于供源体系和盆地深度范围将三角洲划分为 8 种浅水三角洲和 4 种深水三角洲,并考虑三角洲前缘坡度,将浅水三角洲划分为平缓的浅水(Shoal-water)三角洲和陡倾的吉尔伯特(Gilbert)三角洲。邹才能等^[18]将供源体系简化为冲积扇、辫状河或辫状平原、曲流河三类,结合三角洲前缘倾斜坡度(陡峭、平缓)和水深(浅水区、深水区,以湖泊浪基面为界)等要素,将湖盆三角洲划分为 9 种成因-结构类型(6 种浅水三角洲和 3 种深水三角洲)。这种分类强调了供源体系和三角洲入湖口地形有无明显坡折带。中国部分学者综合考虑浅水三角洲的发育条件后,以其不同的砂体类型和展布样式将浅水三角洲划分为席状、坨状、枝状 3 种类型^[10,14-15,19],随着河流作用的强度增强,三角洲由席状→坨状→枝状方向演化。

从上面分析可以看出,不同的供源系统对三角洲的沉积作用过程和形态起着主要控制作用。一般来说,三角洲的分类方案应简单扼要、方便实用,因此提倡简化浅水三角洲分类方案。根据供源系统不同,把浅水三角洲分为浅水扇三角洲(图 1(a))、浅水辫状河三角洲(图 1(b))、浅水曲流河三角洲(图 1(c))。

浅水扇三角洲发育于滨、浅湖区。其物源体系为冲积扇,该类浅水三角洲具有近物源且物源供给快和间歇性的特点,沉积物粒度较粗、成分和结构成熟度较低,发育强水流快速沉积的多种沉积构造,常见冲刷面,盆缘坡度较大(几度至二、三十度)、三角洲朵体面积较小,常为数平方千米。

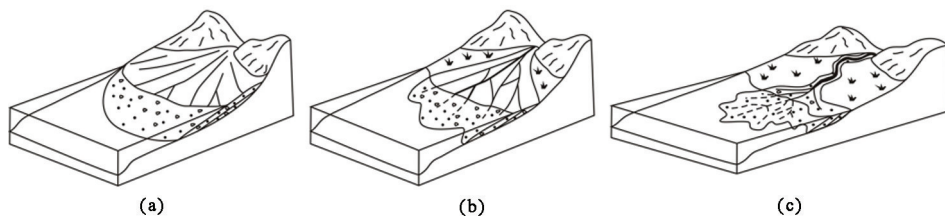


图 1 湖盆浅水三角洲分类^[4,17]

Fig. 1 Classification of shallow-water lacustrine deltas

浅水辫状河三角洲系辫状河搬运沉积物至湖盆沉积而成,盆缘坡度中等,沉积物粒度较粗、成分和结构成熟度较低,发育强水动力牵引流沉积构造、间

断正韵律和分流河道,三角洲展布面积较大(数平方千米至数百平方千米)。

浅水曲流河三角洲沉积物由曲流河供源入湖,其

粒度相对较细,成分和结构成熟度较高,发育多种牵引沉积构造和间断正韵律,河道相对稳定,盆缘坡度平缓,三角洲面积较大(数百至数千平方千米)。

湖盆浅水三角洲与正常的三角洲一样,其沉积亚相也可分为三角洲平原、三角洲前缘及前三角洲;其中平原亚相主要发育分流河道、天然堤、决口扇、河道间等微相;三角洲前缘亚相可进一步细分出以水下分流河道为主的内前缘亚相和以席状砂为主的外前缘亚相;前三角洲亚相主要为湖相泥岩或是砂泥互层的浊流沉积组合。

2 湖盆浅水三角洲的形成条件

关于湖盆浅水三角洲形成的地质条件,Donaldson^[3]和 Horne^[20]认为浅水三角洲通常形成于水体较浅和构造稳定的地台、陆表海环境;楼章华^[12]认为大型坳陷湖盆、地形平缓、整体缓慢沉降的浅水环境有利于浅水三角洲的形成。可见,大型湖盆浅水三角洲的形成主要受控于盆地构造背景^[3]、水体深度^[2-4]、河流作用、湖(海)平面变化^[21-22]、气候及物源等,需要众多地质条件匹配。

2.1 盆地整体构造稳定沉降,盆广坡缓,沉积水体浅

与正常的三角洲沉积背景相比,浅水三角洲的构造背景为稳定沉降、盆底地形平缓、坡度较小(可小于1°)。稳定的盆地构造背景有利于湖盆保持较为平缓的古地形。湖底地形的坡度直接影响水体摩擦力的大小和波浪能量对河口沉积物的改造程度。湖底地形坡度越缓,湖盆波浪作用能量损耗越为明显,对三角洲分流河道的改造较少。

盆地水深是决定水下三角洲生长的主控因素。由于不同盆地的差异性,目前尚无对浅水三角洲水体深度的定量规定。通常以湖浪波长的1/2作为浅水区的下限深度,例如美国密执安湖最大波长为30 m,中国青海湖及鄱阳湖波长一般为15 m,即通常陆相湖盆浅水三角洲沉积水深不超过15 m。

松辽盆地北部葡萄花油层浅水三角洲沉积时期,盆地地形平缓,倾角只有0.4°~0.57°^[12];现代阿拉法拉亚三角洲(Atchafalaya Delta)沉积水深只有3 m,三角洲前缘分流主河道坡度为1~2 m/km(小于0.1°),且分流河道砂体厚度小于2 m^[7](图2)。

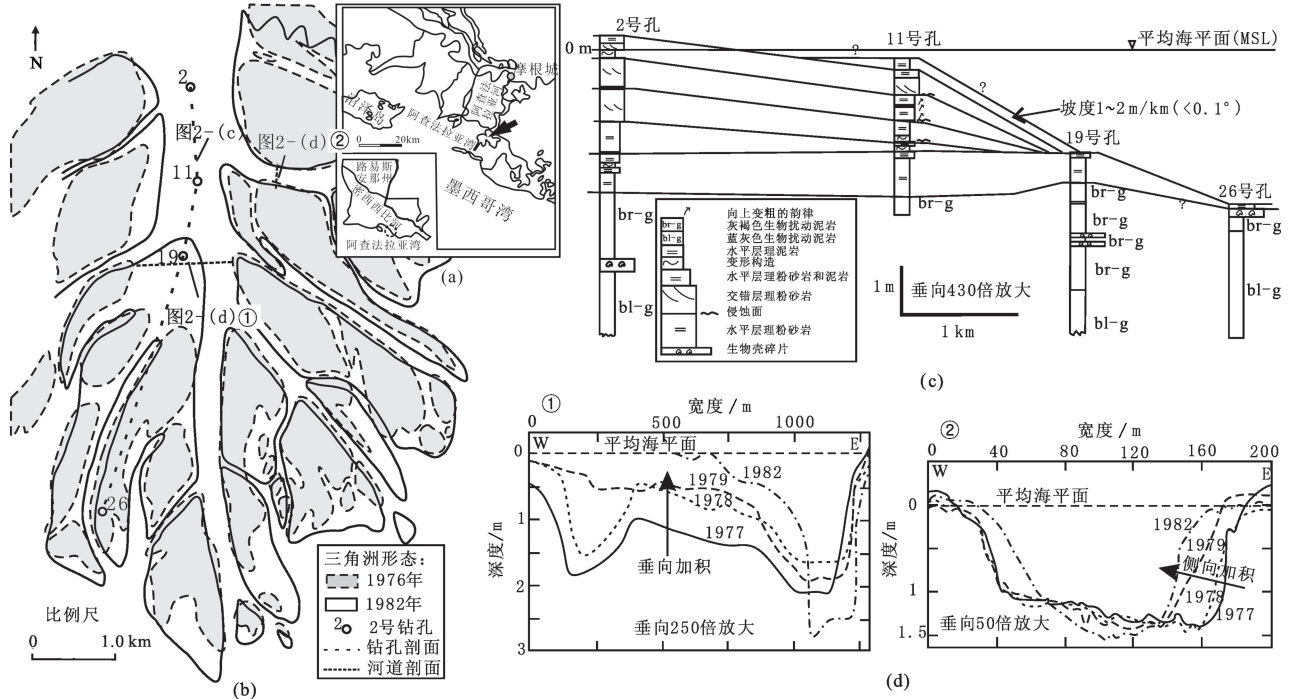


图 2 美国路易斯安那州阿拉法拉亚三角洲^[7]

Fig. 2 Atchafalaya delta in Louisiana, United States

2.2 湖平面频繁升降旋回变化,河流能量强,长距离供源

湖平面的升降旋回变化控制了三角洲沉积充填的空间展布形式;湖平面下降时期,湖水大规模收缩,

受洪水作用影响的河流可频繁改道,以决口等方式形成新的三角洲朵叶并快速向盆地中心推进;湖平面上升期,造成大部分分流河道位于水下形成水下分流河道。湖平面频繁升降旋回变化,造成多期三角洲砂体

叠置。现今江西鄱阳湖赣江三角洲便是典型的湖盆浅水三角洲,受气候变化影响湖平面发生明显变化,三角洲可以向盆地中央方向推进数十公里。

高流速、高载荷的强能量河流是大型浅水三角洲形成的重要水动力条件,此类河水入湖后能量强,利于形成水下分流河道,携带沉积物向盆地方向长距离搬运,可达数十公里,形成薄而展布广的三角洲朵叶体(图2,图中(a)为Atchafalaya三角洲位置(箭头处);(b)为三角洲的演变和河口坝生长演化;(c)为三角洲钻孔剖面;(d)为分流河道随着时间的演变剖面)。

2.3 气候周期变化,三角洲大面积分布

在不同气候下形成的浅水三角洲沉积特征各不相同,特别是三角洲前缘分流河道的组合形态和三角洲前缘的面积可发生较大变化。干旱和潮湿气候条件下都可形成浅水三角洲。如鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组沉积的浅水三角洲发育于温暖、潮湿的古气候条件下,具有较大前缘特征;松辽盆地三肇凹陷扶余油层浅水三角洲则发育于相对干旱的气候条件下,具有较大平原特征^[16-17]。

众多的地质因素耦合为浅水三角洲的发育形成提供了有利条件。总的来说,浅水三角洲主要形成于盆广坡缓古地形、干旱炎热古气候、频繁多变湖平面、动荡极浅古水深、大河充足古物源等有利地质背景^[17]。

3 湖盆浅水三角洲的沉积特征

3.1 沉积水动力强,粒度较粗、发育交错层理和间断正韵律

由于浅水三角洲形成于(近源的)浅水强水动力沉积环境,沉积岩性粒度较粗。例如,鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩岩石类型以细粒-粗粒岩屑质长石砂岩和长石质岩屑砂岩为主,颗粒分选中等。受浅水沉积环境和强河流作用的影响,发育牵引流成因的冲刷界面、砾石定向排列、层系厚度多大于3 cm的中大型交错层理,垂向上形成缺少泥岩夹层的间断正韵律^[18]。

3.2 河流作用明显,分流河道长距离延伸

浅水三角洲形成于湖底地形平坦的浅水环境,物源充足,河流能量较强,入湖河水携带大量的泥砂沉积物可以推进很远的距离。例如大庆长垣萨Ⅱ7-9水下分流河道砂体在湖盆萎缩的极浅水时期水下分流河道为骨架的砂体可延伸长达40 km^[13];松辽盆地三肇凹陷扶余油层沉积时期,气候干旱,湖泊收

缩,水下分流河道延伸距离可超过20 km;而在湿润气候条件下,湖泊扩张,分流河道在凹陷内延伸距离一般不超过15 km^[16]。

3.3 单砂体厚度较薄,复合砂体分布广,厚度大

由于湖盆浅水三角洲发育时期湖盆开阔,湖水较浅,河流携带沉积物入湖后频繁分叉,众多分流河道迅速向湖内推进,单砂体较薄,复合砂体厚,分布面积广,受河流、波浪及沿岸流的改造作用,席状砂厚度可小于1 m。赵翰卿^[10]对松辽盆地北部白垩纪叶状三角洲研究后指出,单个三角洲形如一片宽大树叶,薄而广布,厚度只有几米,面积可达上千平方千米;由于湖盆缓慢沉降和水域面积频繁变化,三角洲叶体反复迁移,使叶状复合三角洲面积辽阔,厚度巨大,具有叠叶状加积特征。美国全新世Guadalupe三角洲是个河控浅水三角洲,其前缘沉积平均厚度为1 m,最厚为2.4 m^[3]。

3.4 三角洲前缘相带宽广,骨架砂体为水下分流河道沉积,河口坝不发育

在陆相湖盆浅水三角洲沉积体系中,河流作用明显,湖水改造作用较弱,三角洲平原分流河道通过填积和频繁的分叉改道,向湖泊中心方向长距离推进,在三角洲前缘的浅水区域发育了大量水下分流河道,水下分流河道砂体相互切割、叠加,构成了浅水三角洲骨架砂体,如松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层的河控浅水三角洲沉积砂体^[10]。

较浅的水深一定程度上控制了可容空间的大小。一方面,地形平缓、水体浅,携带大量陆源碎屑物质的河流可向盆地中央方向推进更快更远,侧向加积不明显,以河道沉积为主体,在可容空间较小的背景下,使湖盆浅水三角洲单层沉积厚度薄,虽然其为水下沉积,但因水体浅,湖平面变化频繁,多表现为氧化环境,沉积物多为红色、棕色等氧化色;另一方面,可容空间小使得河口坝砂体规模较小,在河流的侵蚀作用与频繁改道过程中亦会对河口坝强烈冲刷改造,使得陆相湖盆浅水三角洲中河口坝和远砂坝沉积微相不太发育。

3.5 垂向上相序可不连续,三层式结构特征不明显

在湖盆浅水三角洲沉积物中,由于湖底地形平坦,河流作用强,加之湖平面频繁波动,有时后期浅水三角洲平原分流河道可直接覆盖于前期前三角洲泥之上,局部缺失三角洲前缘沉积,造成垂向上相序不连续。当浅水三角洲沉积水浅、坡缓、供源河流能量较强时,三角洲沉积物不断向盆地中央推进、相互叠置的三角洲朵叶体在地震剖面上表现为叠瓦状前

积地震反射^[16](图 3)。三角洲前缘沉积较为稳定,因此在前三角洲较少发现具有一定规模的重力流沉积。湖盆浅水三角洲沉积层向湖盆延伸远,沉积分异较为完善,平面上浅水三角洲平原与宽展的三角洲前缘和前三角洲平缓相接,没有明显转折,因此不具备传统三角洲的顶积、前积和底积三层结构特征。

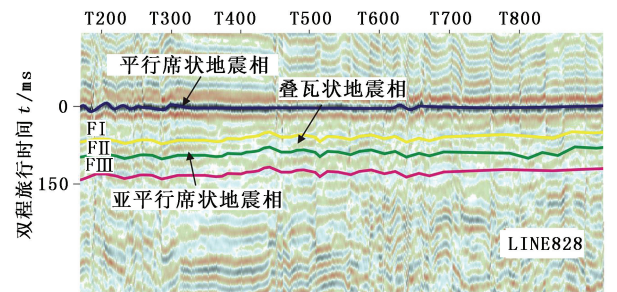


图 3 松辽盆地三肇凹陷泉四段浅水三角洲地震相特征
Fig. 3 Seismic facies characteristics of the 4th member of Quantou formation of shallow-water delta in Sanzhao sag, Songliao Basin

4 湖盆浅水三角洲研究实例

4.1 库车克拉苏冲断带白垩系地质背景

克拉苏冲断带位于塔里木盆地库车坳陷北部,

已成为库车坳陷油气最富集的构造带之一。白垩系沉积时,库车坳陷处于弱伸展裂陷盆地阶段,盆广坡缓,整体盆地构造背景稳定。早白垩世的植物化石主要为热带、亚热带植物蕨类、松柏类中喜干燥环境的分子沙草蕨、海金沙科及掌鳞松科等,表明早白垩世为干旱炎热的古气候环境^[23]。干热的古气候加剧了母源区的物理风化作用,产生了丰富的红色、红褐色碎屑物质,通过古卡普沙良河等多条河流为大型三角洲的形成提供了良好的物源条件。

4.2 白垩系浅水三角洲沉积特征

库车坳陷克拉苏冲断带白垩系巴什基奇克组三角洲供源系统以辫状河为主,形成浅水辫状河三角洲沉积,其主要相标志(图 4)如下:

(1) 沉积岩性偏粗,成熟度低。岩性以含砾岩屑砂岩为主,分选中等,磨圆次棱角,成分和结构成熟度偏低。泥岩及砂岩中的泥砾、泥岩撕裂屑以红色、红棕色为主,表明其浅水的较强水动力的氧化沉积环境。

(2) 发育丰富的强牵引流成因的沉积构造。如冲刷面、平行层理、楔状交错层理和砾石叠瓦状排列等沉积构造。



图 4 库车坳陷克拉苏冲断带巴什基奇克组浅水辫状河三角洲相标志
Fig. 4 Identification marks of shallow-water braided-delta of Bashijiqike formation sandstone in Kelasu tectonic zone, Kuqa depression

(3) 粒度概率累积曲线多为两段式,表现为跳跃总体占主体,悬浮总体含量略高,反映了牵引流沉积特点。

(4) 发育垂向叠置的间断正韵律,韵律之间泥岩夹层厚度较薄或缺少,单个韵律厚度 0.3 ~ 2 m,

反映了强水动力环境的辫状河道反复迁移、冲刷和叠置过程。

(5) 三角洲前缘水下分流河道砂构成三角洲骨架砂体,延伸 50 ~ 60 km,分布广,自然伽马曲线呈齿状箱形或钟形,值偏低。

4.3 白垩系浅水三角洲沉积模式

克拉苏冲断带白垩系巴什基奇克组沉积时,构造背景稳定,北部天山物源供源丰富,受干旱气候影响湖平面频繁升降,浅水辫状河三角洲前缘亚相非常发育;水下分流河道不稳定,在平面上频繁改道、合并和废弃,砂体横向变化快,呈朵状、裙边形叠置、大面积分布,砂体延伸远(可达 60 km)、厚度大(5 ~ 6 m),岩性多为含砾砂岩、中细砂岩,间断正韵律底部多发育冲刷面;分流间湾以泥岩、泥质粉砂岩为主,韵律顶部泥岩较薄。受构造背景和湖平面升降变化影响,三角洲可向盆地中央方向推进 35 ~ 60 km,形成“大前缘”浅水辫状河三角洲沉积体系(图 5)。水下分流河道砂体具有平面连片呈朵状,纵向多期正韵律叠置的空间分布特征,构成有利油气储集体和岩性油气藏勘探目标。

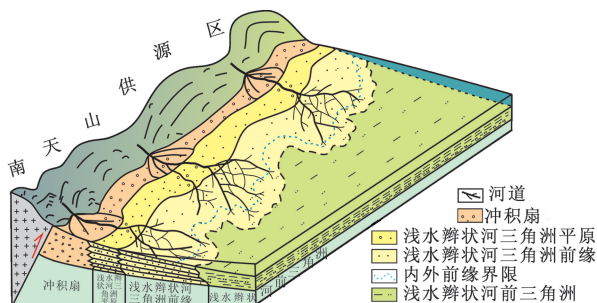


图 5 库车坳陷克拉苏冲断带白垩系浅水三角洲沉积模式

Fig. 5 Sedimentary model of shallow-water braided-delta of Cretaceous sandstone in Kelasu tectonic zone, Kuqa depression

4.4 白垩系浅水三角洲砂体与油气勘探关系

油气勘探实践表明,克拉苏冲断带中生界主力产气层多为白垩系巴什基奇克组浅水三角洲的水下分流河道砂体。这些砂体岩性偏粗、分布范围广;水下分流河道砂体物性相对较好,孔隙度为 2.4% ~ 11.21%,平均值为 4.3%;单一水下分流河道砂体厚度较薄,多小于 2 m,但垂向上叠置分布构成了较厚的油气储层。三叠系湖相泥岩及侏罗系的煤系为库车坳陷主力生油层系,其与白垩系三角洲砂体及白垩系之上广泛分布的古近系膏盐层构成了有效的生储盖组合,所以白垩系巴什基奇克组浅水三角洲水下分流河道砂体构成了克拉苏冲断带勘探的主要目的层。因此,开展沉积学综合研究,预测砂体分布规律,对油气勘探开发具有重要意义。

5 结论及讨论

(1) 陆相湖盆浅水三角洲沉积体系主要受控于平缓的地形、较浅的水深、多变的湖平面升降旋回、

充足的物源供给、频繁的气候变化以及稳定的盆地构造背景等多种地质因素。不同的供源系统对三角洲的发育、形态起重要控制作用。根据供源系统不同,可将湖盆浅水三角洲划分为浅水扇三角洲、浅水辫状河三角洲、浅水曲流河三角洲 3 种类型。

(2) 湖盆浅水三角洲具有沉积水动力强,粒度粗,发育交错层理和间断正韵律的沉积特征;水下分流河道为其骨架砂体,单个三角洲叶体较薄,延伸远,复合三角洲面积广,厚度大;河口坝不甚发育;垂向上相序可不连续,传统三角洲三层式结构特征不明显。

(3) 库车坳陷克拉苏冲断带白垩系巴什基奇克组发育浅水辫状河三角洲,稳定沉降的构造背景、干热的古气候、充足的物源、宽广平缓的古地形,为浅水三角洲的形成发育提供了有利条件。该辫状河浅水三角洲沉积岩性偏粗、发育丰富的强牵引流成因的沉积构造和间断正韵律,辫状河道反复迁移、冲刷叠置,水下分流河道砂体延伸远,平面连片呈朵状,纵向多期正韵律叠置。

(4) 浅水三角洲是目前沉积学研究热点和油气勘探开发的重要沉积类型,以陆相湖盆浅水三角洲为核心的岩性地层油气藏地质理论可以指导岩性油气藏勘探。

(5) 目前关于浅水三角洲的概念与分类、形成地质背景及主要沉积特征的研究均取得了重要进展,但不同沉积盆地类型发育浅水三角洲的特征、沉积动力学过程、不同类型浅水三角洲沉积序列、砂体形态和发育规律、储层发育特征及其与油气勘探开发之间的关系等,都是需要深入开展研究的问题。今后可考虑利用浅水三角洲经典露头分析、典型油气储集层研究、现代沉积解剖及室内沉积水槽模拟试验等研究方法,结合地球物理资料和地震沉积学理论方法进一步解决上述科学问题。

参考文献:

- [1] GILBERT G K. The topographic features of lake shores [R]. U S Geological Survey, Annual Report, 1885.
- [2] FISK H N. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24(2):76-99.
- [3] DONALDSON A C. Pennsylvanian sedimentation of central appalachians [J]. Special Papers Geological Society of America, 1974, 148:47-48.
- [4] POSTMA G. An analysis of the variation in delta architecture[J]. Terra Nova, 1990, 2(2):124-130.

- [5] LEMONS D R, CHAN M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho[J]. AAPG Bulletin, 1999,83(4):635-665.
- [6] HOY R G, RIDGWAY K D. Sedimentology and sequence stratigraphy of fan-delta and river-delta deposystems, Pennsylvanian Minturn formation, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 2003,87(7):1169-1191.
- [7] CORNEL O, JANOK P B. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006,76:212-233.
- [8] KEUMSUK L, MCMECHAN G A, GANI M Ro, et al. 3-D architecture and sequence stratigraphic evolution of a forced regressive top-truncated mixed-influenced delta, Cretaceous Wall Creek sandstone, Wyoming, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007,77(4):284-302.
- [9] 孙永传,李蕙生,邓新华,等. 山西寿阳—阳泉地区石炭—二叠系沉积环境及其沉积特征[J]. 地球科学, 1986,11(3):273-280.
SUN Yong-chuan, LI Hui-sheng, DENG Xin-hua, et al. Carboniferous-permain sedimentary environments and their sedimentary characteristics in Shouyang-Yangquan area, Shanxi province [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1986,11(3):273-280.
- [10] 赵翰卿. 松辽盆地大型叶状三角洲沉积模式[J]. 大庆石油地质与开发, 1987,6(4):1-10.
ZHAO Han-qing. A sedimentary scheme for a large leaf-like delta in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1987,6(4):1-10.
- [11] 姚光庆,马正,赵彦超,等. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征[J]. 石油学报, 1995,13(1):24-31.
YAO Guang-qing, MA Zheng, ZHAO Yan-chao, et al. Eeservoir characteristics of distributary channel sand bodies of shallow water delta [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995,13(1):24-31.
- [12] 楼章华. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用:以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例[J]. 地质学报, 1999,73(1):83-92.
LOU Zhang-hua. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta [J]. Acta Geologica Sinica, 1999,73(1):83-92.
- [13] 吕晓光,李长山,蔡希源,等. 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型[J]. 沉积学报, 1999,17(4):572-577.
LÜ Xiao-guang, LI Chang-shan, CAI Xi-yuan, et al. Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999,17(4):572-577.
- [14] 楼章华,袁笛,金爱民. 松辽盆地北部浅水三角洲前缘砂体类型、特征与沉积动力学过程分析[J]. 浙江大学学报:理学版, 2004,31(2):211-215.
LOU Zhang-hua, YUAN Di, JIN Ai-min. Types, characteristics of sandbodies in shallow-water deltafront and sedimentary models in Northern Songliao Basin, China [J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2004,31(2):211-215.
- [15] 韩晓东,楼章华,姚炎明,等. 松辽盆地湖泊浅水三角洲沉积动力学研究[J]. 矿物学报, 2000,20(3):305-313.
HAN Xiao-dong, LOU Zhang-hua, YAO Yan-ming, et al. Analysis of the sedimentary dynamic process of the shallow-water lake delta in the Songliao Basin, Northeast China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000,20(3):305-313.
- [16] 朱筱敏,刘媛,方庆,等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012,19(1):89-99.
ZHU Xiao-min, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: an example from Cretaceous Quantou formation in Sanzhao sag, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(1):89-99.
- [17] 朱筱敏,邓秀芹,刘自亮,等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式:以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 2013,20(2):19-28.
ZHU Xiao-min, DENG Xiu-qin, LIU Zi-liang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: an example from Triassic Yanchang formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013,20(2):19-28.
- [18] 邹才能,赵文智,张兴阳,等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008,82(6):813-825.
ZOU Cai-neng, ZHAO Wen-zhi, ZHANG Xing-yang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in Large open depression lake basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2008,82(6):813-825.
- [19] 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 2010,28(5):933-944.
ZHANG Chang-min, YIN Tai-ju, ZHU Yong-jin, et al.

- Shallow-water deltas and models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933-944.
- [20] HORNE J C, FERM J C, CARUCCIO F T, et al. Depositional models in coal exploration and mine planning in appalachian region[J]. *AAPG Bulletin*, 1976, 62(12): 2379-2411.
- [21] POREBSKI S J, STEEL R J. Deltas and sea-level change[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 390-403.
- [22] GARCÍA-GARCÍA F, CORBI H, SORIA J M, et al. Architecture analysis of a river flood-dominated delta during an overall sea-level rise (early Pliocene, SE Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 237(1/2): 102-113.
- [23] 朱如凯, 郭宏莉, 高志勇, 等. 塔里木盆地北部地区中、新生界层序地层、沉积体系与储层特征[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- (编辑 徐会永)
-
- (上接第6页)
- [19] 白国平, 殷进垠. 中亚卡拉库姆盆地油气分布特征与成藏模式[J]. *古地纪学报*, 2007, 9(3): 293-301.
BAI Guo-ping, YIN Jin-yin. Distribution characteristics and accumulation model for oil and gas in Karakum Basin, Central Asia[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 293-301.
- [20] 查明, 张一伟, 邱楠生, 等. 油气成藏条件及主要控制因素[M]. 北京:石油工业出版社, 2003:5.
- [21] PANG X Q, LI Y X, JIANG Z X. Key geological controls on migration and accumulation for hydrocarbons derived from mature source rocks in Qaidam Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 41: 79-95.
- [22] 查明, 陈中红, 朱筱敏. 准噶尔盆地陆梁地区油气成藏系统[J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(2): 97-99.
ZHA Ming, CHEN Zhong-hong, ZHU Xiao-min. Petroleum accumulation system of Luliang area in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2003, 24(2): 97-99.
- [23] 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 69-72.
LIN Cheng-yan, ZHANG Xian-guo, DONG Chun-mei. Concept of seismic sedimentology and its preliminary application[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2007, 28(2): 69-72.
- [24] 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. *中国科学: D 辑(地球科学)*, 2008, 38(增刊 I): 111-121.
- WU Sheng-he, YUE Da-li, LIU Jian-min, et al. Hierarchy modeling of subsurface palaeochannel reservoir architecture[J]. *Science in China (Ser D): Earth Sciences*, 2008, 38(sup I): 111-121.
- [25] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 870-874, 879.
YAN Ke, YANG Shao-chun, REN Huai-qiang. Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2008, 29(6): 870-874, 879.
- [26] 林承焰, 余成林, 董春梅. 老油田剩余油分布——水下分流河道岔道口剩余油富集[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 829-835.
LIN Cheng-yan, YU Cheng-lin, DONG Chun-mei. Remaining oils distribution in old oilfields: enrichment of remaining oils in underwater distributary channel crotches[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2011, 32(5): 829-835.
- [27] NANSHEG Q, JIAN C, YINHUI Z, et al. Thermal evolution and Lower Paleozoic source rocks maturation in the Tarim Basin Northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(5): 789-821.
- [28] QIU N S, KANG Y S, JIN Z J. Temperature and pressure field in the Tertiary succession of the Western Qaidam Basin, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 493-507.
- [29] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2013:1-36.
- (编辑 徐会永)