

浅水三角洲研究进展与陆相湖盆实例分析

刘自亮^{1,2}, 沈芳¹, 朱筱敏^{2,3}, 廖纪佳⁴, 张修强⁵, 孟昊²

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 4. 西南石油大学, 四川 成都 620500; 5. 中国石油 东方地球物理公司研究院, 河北 涿州 072750)

摘要:通过总结浅水三角洲的研究进展,结合鄂尔多斯盆地延长组浅水三角洲的研究,对浅水三角洲沉积特征进行讨论。结果表明:稳定的构造背景、盆地面积大、古地形坡度缓、湖平面频繁升降变化、水体浅及物源供给充分是浅水三角洲发育的基本条件;总体而言,浅水三角洲沉积缺少传统三角洲三层式结构特征,不同类型浅水三角洲沉积体存在差异,如浅水辫状河三角洲沉积物粒度粗,水体能量强,垂向上相序不完整,河口坝微相难于保存,而在浅水曲流河三角洲沉积体系中则河口坝砂较为常见。实例分析表明:鄂尔多斯盆地延长组下组合发育浅水辫状河三角洲和浅水曲流河三角洲两种类型,具有三角洲平原分布范围小、三角洲前缘分布广的特征。河道宽深比大,沉积物相对较粗,平原分流河道沉积中可见多次叠置的冲刷面构造和大型槽状、楔状交错层理等。三角洲前缘延伸远,长度可达一百多千米,水下分流河道在平面上多分支和分叉,垂向上多为间断正韵律。最后,讨论了研究区浅水三角洲沉积体系时空演化规律。

关键词:形成机理;分类体系;浅水三角洲;沉积相;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Progress of shallow-water delta research and a case study of continental lake basin

Liu Ziliang^{1,2}, Shen Fang¹, Zhu Xiaomin^{2,3}, Liao Jijia⁴, Zhang Xiuqian⁴, Meng Hao²

(1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. School of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 620500, China; 5. Research Institute of BEG, CNPC, Zhuozhou, Hebei, 072750, China)

Abstract: By summarizing the research progress of shallow water delta and combining with the study of shallow delta of the Yanchang Formation in Ordos Basin, this paper discussed the sedimentary characteristics of the shallow water delta. The results indicate that the basic conditions for development of shallow water delta include stable tectonic setting, large basin area, low relief of paleotopography, frequent changes of lake level, shallow water and abundant provenance supply. In general, shallow water delta deposition lacks the traditional characteristics of three-tier structure. There are differences between different types of shallow water delta sedimentary bodies. For example, shallow braided river delta features in coarse grained sediments, strong water energy, incomplete vertical facies sequence, and poor preservation of mouth bar. In contrast, mouth bar is common in shallow water meandering river delta. The case study of continental lake basin shows that the Yanchang Formation of Ordos Basin developed shallow water braided delta and shallow water meandering delta, which are characterized by small area of delta plain and widespread delta front zone. Its width-depth ratio of channel is large, the sediments are coarse, and it is common to find multiple superimposed erosion surfaces and large trough-shaped, wedge-shaped cross-bedding in plain distributary channel deposits. Delta front can extend more than one hundred kilometers and underwater distributary channels are characterized by lateral branches and bifurcate and vertical intermittent fining upwards rhythm. Moreover, the space-time evolution of shallow water delta sedimentary system in the study area is also discussed.

Key words: genetic mechanism, classification system, shallow-water delta, sedimentary facies, Yanchang Formation, Ordos Basin

收稿日期:2014-08-30;修订日期:2015-06-20。

第一作者简介:刘自亮(1978—),男,讲师,沉积学与层序地层学。E-mail:bugliu2001@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05001-003-03)。

自 Fisk(1954) 提出“浅水三角洲”的概念以来^[1], 并且由于浅水三角洲沉积体中赋存丰富的油气资源, 已成为油气工业部门勘探开发的重要目标, 特别是近年来油气资源短缺的形势越来越严峻, 更成为我国油气勘探地质学家, 特别是沉积学家研究的热点^[2-30]。因此, 加强陆相湖盆浅水三角洲沉积特征、形成机理, 深入分析和对比不同类型湖盆浅水三角洲发育特征、同一盆地内浅水三角洲沉积构成差异及形成机理等科学问题, 具有重要科学价值。

国内鄂尔多斯盆地、松辽盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地、准格尔盆地等坳陷和断陷湖盆均发育浅水三角洲。目前研究主要集中在浅水三角洲的概念和分类、形成地质背景及主要沉积特征等方面, 且取得一些重要进展。但对于不同盆地类型浅水三角洲沉积特征, 特别是同一盆地内不同类型浅水三角洲前缘沉积构成差异, 包括相序演化, 微观孔隙结构特征, 砂体形态、内部构型和发育规律等方面, 分歧仍然较大, 这些都是需要深入探讨的沉积学问题。

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组在不同地区的浅水三角洲沉积特征存在明显差异, 比如盆地西南缘水下分流河道发育, 残存或者缺少河口坝沉积物, 而东北部则河口坝砂体富集。这些沉积记录的差异, 在已发表的文献中, 鲜有报道。因此, 本文将在讨论国内外浅水三角洲研究进展的基础上, 以鄂尔多斯盆地延长组为例, 开展沉积学研究, 明确延长组浅水三角洲沉积相和沉积体系类型, 讨论沉积体系演化特征。

1 浅水三角洲研究进展

20 世纪 80 年代, 国内学者开始对浅水三角洲进行研究, 主要强调浅水三角洲与传统的吉尔伯特型三角洲模式的差异^[3-6]。进入 21 世纪, 国内学者主要集中在松辽盆地^[7-14]、鄂尔多斯盆地^[2,15-21]、四川盆地^[21]等地区, 展开浅水三角洲的研究(表 1)。逐步从浅水三角洲类型、形成条件深入到对浅水三角洲形成动力学过程和形成机制的研究, 从宏观沉积特征描述深入到内部结构解剖和形成机理的探讨。

1.1 概念与分类

Fisk 在研究密西西比河三角洲时提出浅水三角洲的概念, 将河控三角洲划分为深水型和浅水型^[1]。Postma 等将低能盆地中河控三角洲分为浅水型和深水型, 并进一步区分出 8 种浅水三角洲类型和 4 种深水三角洲类型^[31], 并考虑三角洲前缘坡度, 将浅水三角洲划分为缓坡型浅水三角洲和陡坡吉尔伯特型三角洲。

楼章华等从浅水三角洲的展布形态角度, 将浅水三角洲分为席状浅水三角洲、坳状浅水三角洲、枝状浅水三角洲和鸟足状浅水三角洲, 强调从湖盆范围演化、湖平面升降变化的幅度和频率等方面, 分析三角洲形态转化的动力学过程^[22]。张昌民从沉积体成因角度, 将浅水三角洲划分为分支砂坝型和分流水道型两种浅水三角洲类型^[32]。邹才能等则以供源体系为基础, 结合前缘斜坡坡度和古水深, 将湖盆三角洲划分为 6 种浅水三角洲和 3 种深水三角洲^[19]。朱筱敏强调供源系统对三角洲的控制作用, 将浅水三角洲划分为浅水扇三角洲、浅水辫状河三角洲和浅水曲流河三角洲^[27]。

1.2 形成条件

Donaldson 等进一步研究浅水三角洲的形成条件后, 认为在水体较浅和构造稳定的台地、陆表海或地形平缓整体缓慢沉降的坳陷盆地条件下易于形成浅水三角洲^[33]。楼章华认为大型坳陷湖盆、地形平缓的浅水环境有利于浅水三角洲的形成^[22]; 朱筱敏也认为在大型坳陷湖盆的缓坡浅水区易于形成大型浅水三角洲^[27]。大型坳陷湖盆浅水三角洲的形成主要受大地构造背景^[33]、古水体深度^[34]、河流作用强度^[3,35]、湖(海)平面变化^[36-39]、气候和物源^[40]等众多地质条件的控制。

1.3 主要沉积特征

近年来, 在 Postma 的分类基础上, 国外对浅水三角洲的研究已逐步深入, 主要涉及浅三角洲形成动力学, 沉积作用过程, 微相识别及砂体构型等, 众多学者认为浅水三角洲主要形成于水体较浅、地形平缓、构造缓慢的条件下, 以分流河道砂为骨架, 河口坝不发育, 砂体分布明显受水体深度^[41]、河流作用^[43-44]、湖平面变化^[37-38]、气候及物源^[44-45]等因素控制。

20 世纪 80 年代开始, 国内学者强调分析浅水三角洲沉积与吉尔伯特型三角洲在亚相划分^[10,46]、沉积结构^[4-6]、沉积模式^[12,14,29,47]等方面的差异。近年来, 则深入到对浅水三角洲沉积相带划分、砂体分布和影响因素的分析。但众多学者的看法并不一致, 一些学者把浅水三角洲沉积体系划分为上三角洲平原、下三角洲平原、三角洲前缘和前三三角洲亚相^[8-9,21]。李元昊等则把浅水三角洲前缘细分为“内前缘”和“外前缘”, 湖岸线控制了砂体展布的形态^[17]。操应长等强调浅水三角洲砂体成因和分布主要受河流、波浪和湖流的共同作用^[48]。朱筱敏等认为大型坳陷湖盆浅水三角洲平面上成宽广分布, 呈现满盆含砂的特点^[2,7,11,13-14]。

1.4 沉积机理

进入 21 世纪,国内学者深入到对浅水三角洲形成动力学过程和形成机制的研究,从宏观沉积特征描述深入到内部结构解剖和形成机理的探讨,但认识和观点上存在分歧。主要观点认为后期席状化改造^[12]、河流作用、古地形^[49]、湖平面变化^[14]影响浅水三角洲发育的类型和规模。河水能量^[32]、物源和水量^[51-52]、古地貌、湖岸线^[17]、湖平面变化^[14]等因素控制了浅水三角洲砂体形态等。近年来,金振奎等人也试图通过现代现代湖泊浅水三角洲考察,分析和讨论浅水三角洲的形成机理^[52-53]。

2 湖盆浅水三角洲研究实例

2.1 鄂尔多斯盆地地质背景

鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组沉积期为大型坳陷湖盆,在东南部与大华北盆地相连。研究区西部为天环坳陷,并与西缘冲断构造带相邻,东部为陕北斜坡的西南部,南部与渭北隆起区相邻,包括面积达 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的西峰、庆阳、环县和华池等地区(图 1)。延长组沉积时,表现为西高东低,发育一套随构造沉降和湖平面变化而改变的冲积扇与辫状河—三角洲—湖泊陆源碎屑沉积体系。

2.2 沉积相特征

2.2.1 三角洲平原亚相

三角洲平原亚相以砂/泥岩互层以及泥炭沼泽沉

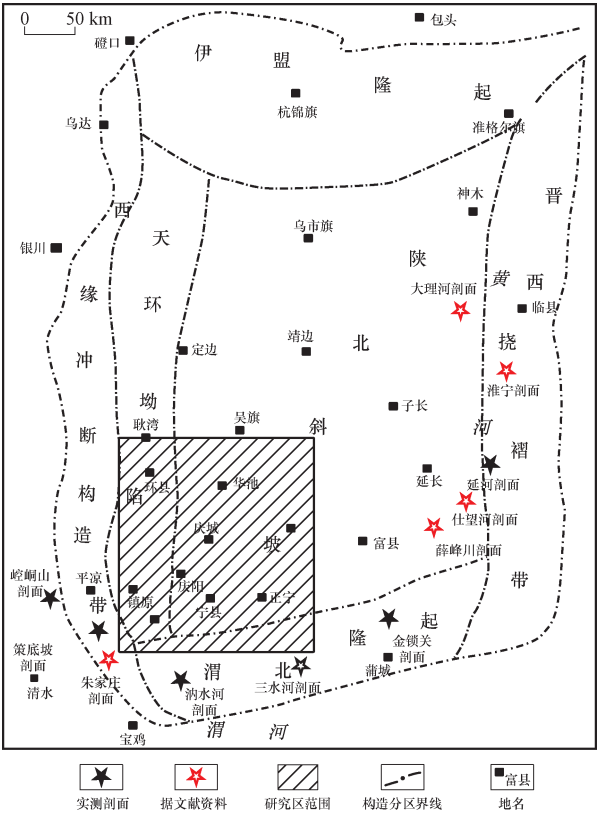


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及研究区位置
Fig. 1 Structure units of Ordos Basin and location of the study area

积为主,主要发育分流河道和河间洼地微相。分流河道沉积最为典型,具有底冲刷面,向上变细的沉积序列,发育槽状交错层理、平行层理和砂纹交错层理等,在平原亚相发育典型的薄煤层或者煤线,在垂向上组成向上粒度变细的沉积序列(图 2)。

2.2.2 三角洲前缘亚相

前缘亚相主要发育细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与

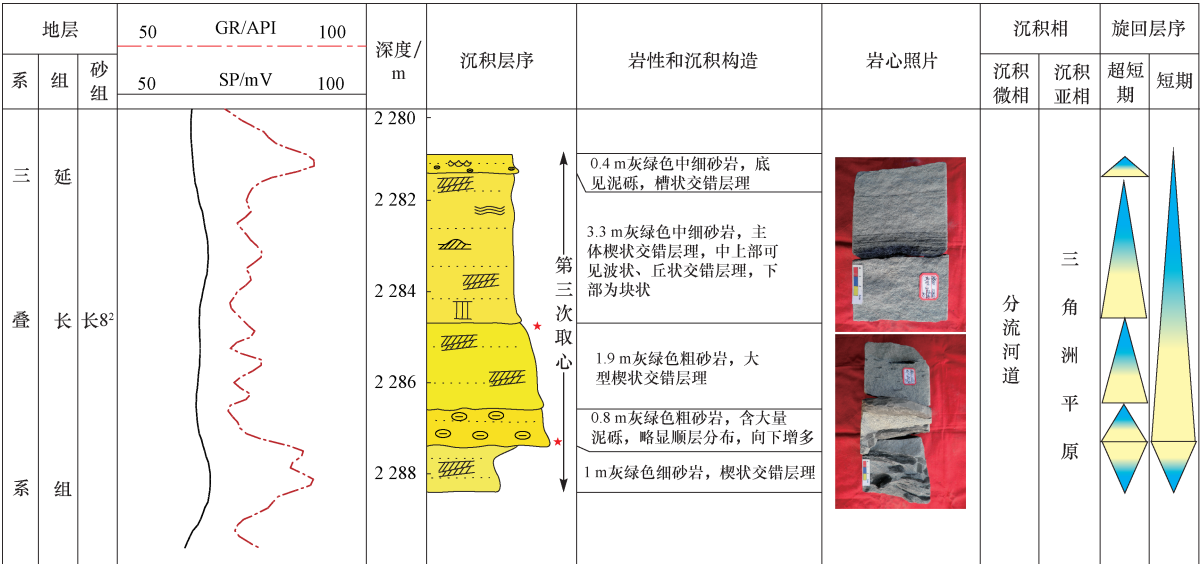


图 2 鄂尔多斯盆地陇东地区辫状河三角洲平原沉积序列特征(演 40 井)
Fig. 2 Sedimentary cycles of shallow water braided delta plain in the Longdong area of Ordos Basin(Well Yan40)

粉砂质泥岩。常见冲刷面和岩性突变面。发育各种反映牵引流成因的沉积构造,如平行层理、槽状交错层理、波状交错层理、砂纹层理等,常见植物碎片和虫孔构造。水下分流河道是前缘中最重要的沉积单元,常与分流间湾频繁互层。河口坝沉积不发育,在水下分流河道底部能见到残余的河口坝沉积。

1) 水下分流河道

由于水体较浅、河流作用强、发育规模大、延伸远,水下分流河道为浅水三角洲前缘的主要沉积单元。平面上多分叉,垂向上表现为复合正韵律或间断正韵律(图 3),常见多个冲刷面相互叠置,表现为多层定向排列的泥砾层。常见反映强水动力条件的沉积构造,粒度概率曲线主要为强水动力作用的两段式,反映了分流河道能量高、跳跃式搬运、沉积快的牵引流特征^[12]。常对应平行层理、各种交错层理的中砂岩、细砂岩。测井相特征明显,电阻率曲线和自然电位曲线常呈钟形和箱形,钟形反映了典型向上变细的垂向系列,箱形尤其是厚层状箱形反应多期河道砂体垂向叠置的特征。

2) 分流间湾

分流间湾微相主要以悬浮沉积为主,岩性为层状灰黑色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥岩。常见植物叶片化石。常见沙纹层理,层面面炭屑富集,垂向虫孔发育。自然电位曲线相对低平,自然伽马曲线中高值,电阻率曲线呈中低幅齿状。

3) 河口坝

由于水体较浅、河流能量强,河口坝不太发育或者由于前期河口坝被后期河道冲刷破坏,很少被保存下来,仅在少量钻井岩心上见到残余的河口坝沉积物。主要为灰色、深灰色细粒砂岩、粉砂岩沉积,分选较好,表现为反粒序结构的垂向沉积序列,常见平行层理、沙纹层理和小型交错层理。自然电位、自然伽马曲线通常呈漏斗形。

2.2.3 前三三角洲

前三三角洲亚相的沉积物以深灰色泥岩沉积为主,泥岩较为纯净,见水平层理和季节纹层,常夹粉砂岩薄层,为河流携带入湖的泥质和细粉砂等细粒沉积物,呈悬浮状态搬运到水体较深、水动力能量较弱的安静环境下沉积形成。

2.3 沉积相演化特征

鄂尔多斯盆地延长组基本继承了纸坊组沉积时东北高西南低的不对称的拗陷特征。长 10 段沉积期鄂尔多斯盆地已具雏形,长轴呈北西-南东向展布,湖区的面积约 $3.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。进入长 9 段沉积期,盆地下沉速度明显加快,湖盆面积约 $6.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,明显比长 10 油层组的湖盆范围大。

长 9 段沉积期湖岸线在虎洞-演武-镇原-丰台-

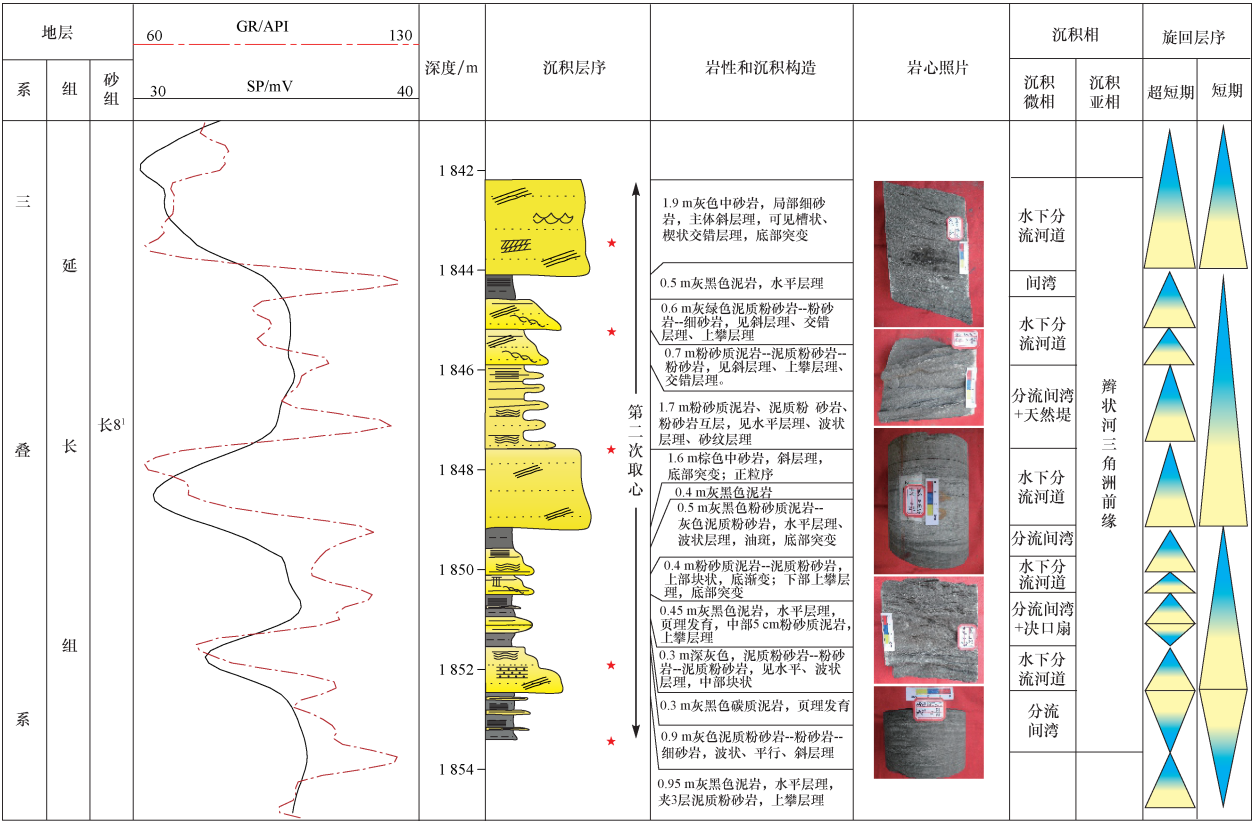


图 3 鄂尔多斯盆地陇东地区辫状河三角洲前缘垂向沉积序列特征(西 64 井)

Fig. 3 Sedimentary cycles of shallow water braided delta front in the Longdong area of Ordos Basin (Well Xi64)

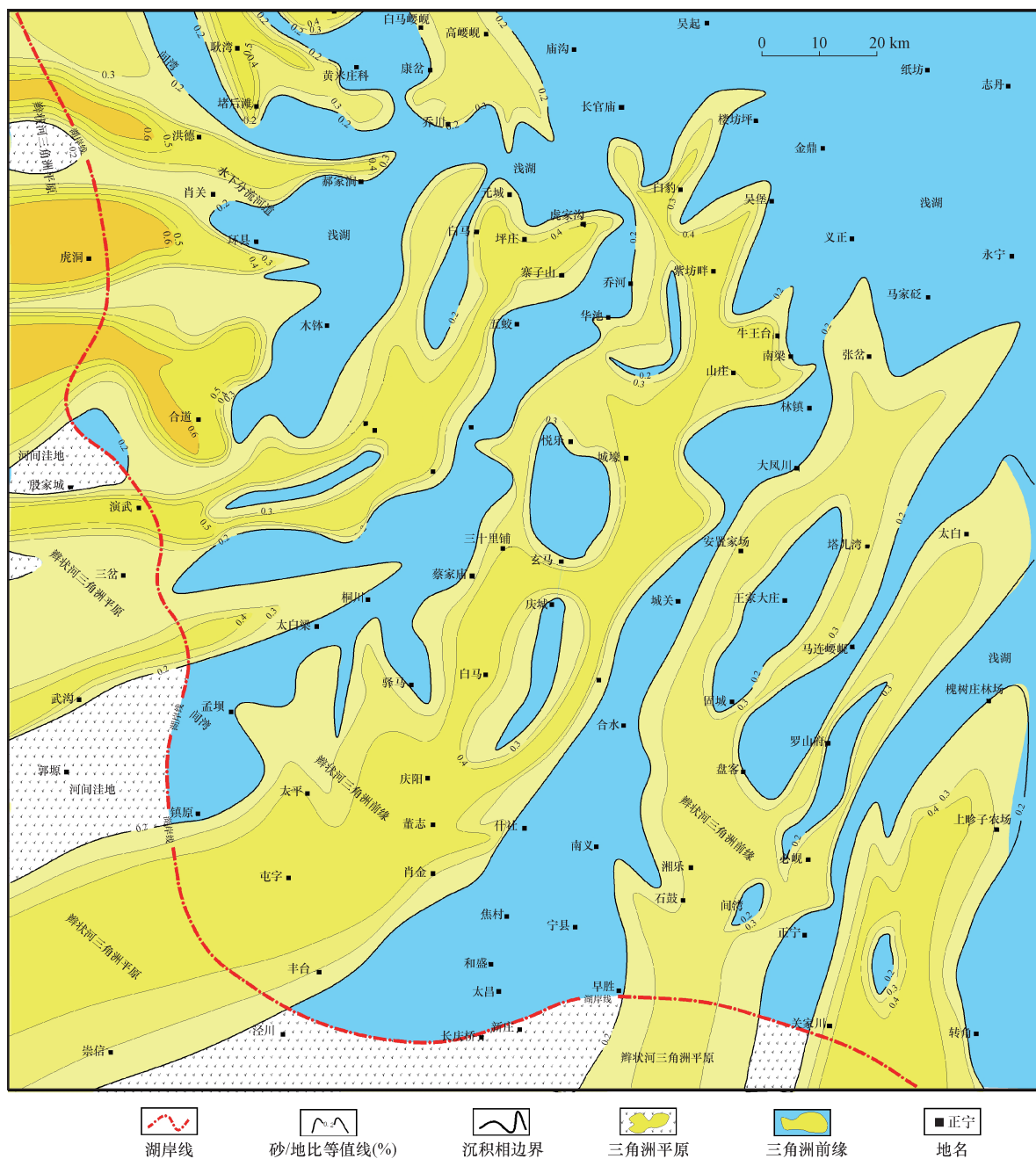


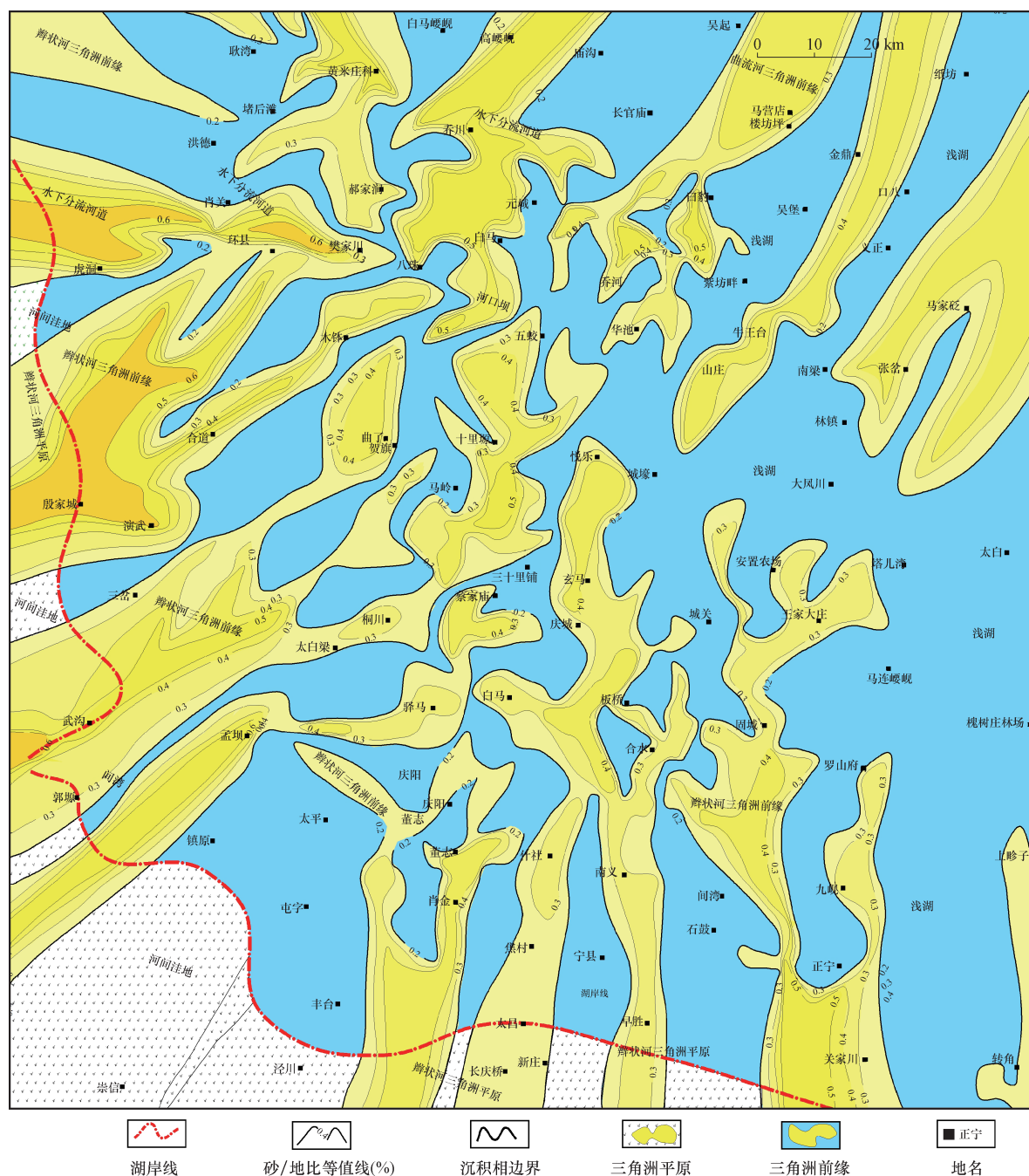
图4 鄂尔多斯盆地陇东地区长 9^1 沉积期沉积体系分布

Fig. 4 Depositional system of Yanchang Fm. (Chang 9^1) in the Longdong area of Ordos Basin

太昌—关家川一线,该线西南为三角洲平原沉积,东北为三角洲前缘沉积。研究区不发育深湖相,以辫状河三角洲沉积为主,主要发育四支三角洲沉积体系(图4)。4条三角洲砂体宽约30~70 km,砂体厚度10~70 m,延伸距离远,多分叉,形成多个朵叶体。如沿丰台—庆阳—白马—城壕—白豹一线发育的辫状河三角洲前缘砂体,宽度62 km左右,地层厚度27~85 m,砂体厚度6~25 m,砂地比23%~70%。砂体呈条带状展布,砂体发育规模最大,主要为三角洲前缘水下分流河道,由西南向东北向深水区推进,不断向两侧分叉,发育多个朵叶体。砂体推进至庆阳时,河道分为三支:

一支向正北偏西驿马方向推进,宽度15 km左右,延伸较短,在桐川附近尖灭;另两支均继续沿正北偏西方向推进,宽度约20 km,东侧一支在南梁附近尖灭,西侧一支在城壕一带与东侧一支连为一片,又延伸入深湖,在白豹一带呈朵状展开。

长8段沉积期,盆地基底仍然是处于沉降的过程,湖盆面积扩大,整体仍处于湖盆的发展阶段。三角洲沉积体基本上继承了长9段沉积时的展布形态,并沿物源方向,围绕湖岸线呈环带状分布,形成浅水三角洲群,主要发育浅水三角洲平原、浅水三角洲前缘和滨浅湖等亚相,深湖相不发育(图5)。该时期由于物源的

图5 鄂尔多斯盆地陇东地区长8²沉积期沉积体系分布Fig. 5 Depositional system of Yanchang Fm. (Chang⁸₂) in the Longdong area of Ordos Basin

差异,三角洲发育规模发生变化,来自西南部物源区的三角洲规模变小,而来自东北部物源区的浅水曲流河三角洲发育规模变大,开始进入陇东地区。

长8段沉积期,湖岸线位于虎洞-殷家城-武沟-镇原-泾川-太昌一线。围绕湖盆,共发育来自西和西南部物源多支浅水辫状河三角洲和来自北部和东北部物源的浅水曲流河三角洲。浅水三角洲前缘分布范围广、厚度大。不同物源的浅水三角洲在类型和平面形态均存在差异。在研究区西部和西南部主要发育来自南部和西部西南部物源区的浅水辫状河三角洲沉积体系,其沉积砂体单层厚度较长9段沉积期变薄,砂地比变

小,三角洲前缘朵叶体成鸟足状。如在宁县-正宁地区,主要发育来自南部物源主要发育4支浅水辫状河三角洲,整体呈南北向展布。宽度达10~27 km,砂体厚度8~28 m,砂地比20%~55%。水下分流河道不断分叉,形成多个鸟足状朵叶体。在研究区东北部主要发育来自东北部物源的浅水曲流河三角洲,主要发育浅水曲流河三角洲前缘亚相,平面上呈条带状,局部地区连片(图5)。

3 结论及讨论

1) 浅水三角洲的研究起始于20世纪50年代,目

前仍处于发展时期。近年来,国内外学者在浅水三角洲的分类、形成条件、主要沉积特征、内部结构特征及形成机理等方面,都取得了一些列重要的认识和进展。但需要进一步讨论不同盆地类型浅水三角洲沉积特征,包括浅水环境鉴别标志、相序演化,微观孔隙结构,砂体形态、内部构型和发育规律,以及对同一盆地内大量发育的浅水三角洲沉积构成特征和形成机理等。

2) 鄂尔多斯盆地构造背景相对简单、盆地面积大、水体浅、周边物源供给充分,具备了发育浅水三角洲的地质条件。延长组下组合发育典型的浅水三角洲沉积,可划分为浅水辫状河三角洲平原、浅水辫状河三角洲前缘和前浅水辫状河三角洲,具有“小平原、大前缘”的特征,其前缘是该区有利储层发育带,是目前油气勘探开发的重点地区。

3) 长9-长8段沉积期,物源相对较近,河道宽深比大,沉积物相对较粗。辫状河三角洲平原主要发育含砾石的中-粗砂岩和泥炭沼泽沉积,沉积粒度向上变细的平原分流河道沉积,可见多期冲刷面构造垂向和大型槽状、楔状交错层理等,泥炭沼泽中可见到薄层的煤和煤线。浅水辫状河三角洲前缘延伸长度可达一百多千米,水下分流河道是优质储层砂体主要发育相带,平面上多分叉和分支,垂向上多为间断正韵律。

参 考 文 献

- [1] Fisk H N. Sedimentary framework of the modern Mississippi Delta [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, 24(2): 76-99.
- [2] 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 Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, 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.
- [3] 龚绍礼. 河南禹县早二叠世晚期浅水三角洲沉积和聚煤环境 [J]. *煤田地质与勘探*, 1986, 14(6): 2-9.
Gong Shaoli. Shallow delta and coal environment of upper Permian in Yuxian, Henan [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1986, 14(6): 2-9.
- [4] 苏春乾,刘继庆. 呼鲁斯太幅石炭系浅水三角洲沉积体系 [J]. *长安大学学报(地球科学版)*, 1993, 15(S1): 23-28.
Su Chunqian, Liu Jiqing. Shallow delta system of the carboniferous system in hulustai [J]. *Journal of Chang'an University*, 1993, 15(S1): 23-28.
- [5] 李增学,魏久传,李守春. 鲁西河控浅水三角洲沉积体系及煤聚集规律 [J]. *煤田地质与勘探*, 1995, 23(2): 7-13.
Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Li Shouchun. The depositional system of fluvial-controlled shallow water delta and coal-accumulation analysis in western Shandong [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1995, 23(2): 7-13.
- [6] 佟斯琴,李斌,罗群,等. 松辽盆地古龙南凹陷葡萄花油层储层单砂层沉积微相研究及有利砂体预测 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 517-525.
Tong Siqin, Li Bin, Luo Qun, et al. Single-sandstone-layer sedimentary microfacies and favorable sandbody prediction of Putaohua reservoir in south Gulong sag, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 517-525.
- [7] 王家豪,陈红汉,江涛,等. 松辽盆地新立地区浅水三角洲水下分流河道砂体结构解剖 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, 37(3): 556-564.
Wang Jiahao, Chen Honghan, Jiang Tao, et al. Sandbodies frameworks of subaqueous distributary channel in shallow-water delta, Xinli Area of Songliao Basin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(3): 556-564.
- [8] 亚东菊,张金亮,赵红娟. 松辽盆地黑帝庙地区姚一段浅水三角洲沉积特征及沉积演化 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(S1): 299-304.
Ya Dongju, Zhang Jinliang, Zhao Hongjuan. Shallow-water delta sedimentary characteristic and evolution of the 1st member of yaojia formation, heidimiao area [J]. *Periodical of Ocean University of China (Science & Technology Edition)*, 2011, 41(S1): 299-304.
- [9] 肖佃师,卢双舫,陈海峰,等. 大庆长垣以西泉四段浅水三角洲沉积特征及模式 [J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(21): 4986-4992.
Xiao Dianshi, Lu Shuangfang, Chen Haifeng, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow delta of Quan-4 Member in the West of Daqing Placanticline [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(21): 4986-4992.
- [10] 孙雨,马世忠,姜洪福,等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层河控浅水三角洲沉积模式 [J]. *地质学报*, 2010, 84(10): 1502-1509.
Sun Yu, Ma Shizhong, Jiang Hongfu, et al. Sedimentary mode of shallow lacustrine fluvial-dominated delta of putaohua reservoirs in the Sanzhao Depression, Songliao Basin [J]. *ACTA Geologica Sinica*, 2010, 84(10): 1502-1509.
- [11] 李洋,朱筱敏,宋英琦,等. 松辽盆地榆树林油田下白垩统泉头组扶余油层浅水三角洲沉积特征及其演化 [J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 23-31.
Li Yang, Zhu Xiaomin, Song Yingqi, et al. Sedimentary characteristics and evolution of shallow-water delta of the Lower Cretaceous Fuyu reservoir in the Yushulin Oilfield, Songliao Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1): 23-31.
- [12] 王建功,王天琦,卫平生,等. 松辽盆地北部葡萄花油层浅水湖泊三角洲沉积特征及对油气分布的控制 [J]. *中国石油勘探*, 2008, 13(1): 28-34.
Wang Jiangong, Wang Tianqi, Wei Pingsheng, et al. Sedimentary mode of shallow lacustrine delta of large continental basin—An example from Putaohua Formation in northern Songliao Basin [J]. *Northwest Oil & Gas Exploration*, 2008, 13(1): 28-34.
- [13] 王立武. 坳陷湖盆浅水三角洲的沉积特征—以松辽盆地南部姚一段为例 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1053-1060.
Wang Liwu. Forming conditions and depositional characteristics of shallow-water deltas in depression basins: A case study of K2yin the south of Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1053-1060.
- [14] 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 Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake, example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 89-99.
- [15] 李洁, 陈洪德, 林良彪, 等. 鄂尔多斯盆地西北部盒8段浅水三角洲砂体成因及分布模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 132-139.
- Li Jie, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. Genesis and distribution pattern of shallow water delta sandbodies in Member 8 of lower Shihezi Formation in the northwest Ordos basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(2): 132-139.
- [16] 刘自亮, 朱筱敏, 廖纪佳, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组层序地层学与砂体成因研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 1-9.
- Liu Ziliang, Zhu Xiaomin, Liao Jijia, et al. Sequence stratigraphy and genesis of sand bodies of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern margin of Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 1-9.
- [17] 任战利, 李文厚, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 190-198.
- Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 190-198.
- [18] 李相博, 付金华, 陈启林, 等. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地延长组深水沉积研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 286-294.
- Li Xiangbo, Fu Jinhua, Chen Qilin, et al. The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation deep water sedimentation of the Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(3): 286-294.
- [19] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流拗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 Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, 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.
- [20] 王昌勇, 郑荣才, 田永强, 等. 陇东地区长9油层组浅水三角洲沉积特征及成藏条件研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(8): 11-15.
- Wang Changyong, Zheng Rongcai, Tian Yongqiang, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation law of shallow-water delta of chang9 reservoir in longdong area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(8): 11-15.
- [21] 刘柳红, 朱如凯, 罗平, 等. 川中地区须五段—须六段浅水三角洲沉积特征与模式[J]. 现代地质, 2009, 23(4): 667-675.
- Liu Liuhong, Zhu Rukai, Luo Ping, et al. Characteristics and depositional models for the shallow-water deltas of the 5th-6th interval, Xujiahe Formation, Upper Triassic in Central Sichuan Basin, China[J]. Geoscience, 2009, 23(4): 667-675.
- [22] 封从军, 鲍志东, 单启铜, 等. 三角洲平原复合分流河道内部单砂体划分——以扶余油田中区南部泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 77-83.
- Feng Congjun, Bao Zhidong, Shan Qitong, et al. Single sand body identification in compound distributary channel of delta plain; a case study from the fourth member of Quantou Formation in the southern part of central Fuyu oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 77-83.
- [23] 席胜利, 李文厚, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地神木地区下二叠统太原组浅水三角洲沉积特征[J]. 古地理学报, 2009, 12(2): 187-194.
- Xi Shengli, Li Wenhui, Liu Xinshe, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta of the Lower Permian Taiyuan Formation in Shenmu area, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 12(2): 187-194.
- [24] 刘双莲, 李浩, 周小鹰. 大牛地气田大12—大66井区沉积微相与储层产能关系[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 45-49.
- Liu Shuanglian, Li Hao, Zhou Xiaoying. Relationship between sedimentary microfacies and reservoir productivity in Da12-Da66 well-block, Daniudi gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 45-49.
- [25] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.
- Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 575-582.
- [26] 代黎明, 李建平, 周心怀, 等. 渤海海域新近系浅水三角洲沉积体系分析[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 75-81.
- Dai Liming, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Depositional system of the Neogene shallow water delta in Bohai Sea area[J]. Lithologic reservoirs, 2007, 19(4): 75-81.
- [27] 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 7-14.
- Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 7-14.
- [28] 薛庆远. 山东滕南矿区山西组浅水三角洲的沉积构成和聚煤特征[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(2): 43-50.
- Xue Qingyuan. Depositional architectures and coal-forming features of shallow-water delta system in the Tengnan coal mining district, Shandong province[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(2): 43-50.
- [29] 施辉, 刘震, 连良达, 等. 柴西南红柳泉地区古近系下干柴沟组下段浅水三角洲控砂特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(3): 66-74.
- Shi Hui, Liu Zhen, Liu Liangda, et al. Sandbody-control characteristics of shallow water delta from lower Member of Xiagangou Formation in Hongliuquan Area of southwestern Qaidam Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(3): 66-74.
- [30] 胡忠贵, 胡明毅, 胡九珍, 等. 潜江凹陷东部地区新沟组下段浅水三角洲沉积模式[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1263-1273.
- Hu Zhonggui, Hu Mingyi, Hu Jiuzhen, et al. Shallow water delta depositional model of the lower segment of the Xingouzui Formation in eastern Qianjiang depression[J]. Geology in China, 2011, 38(5):

- 1263 – 1273.
- [31] Postma G. An analysis of the variation in delta architecture. *terra nova* [J]. 1990, 2(2): 124 – 130.
- [32] 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 Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933 – 944.
- [33] Donaldson A C. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians [J]. *The Geological Society of America*, 1974, 148(s): 47 – 48.
- [34] Jiang B, Fürsich F T, Hethke M. Depositional evolution of the Early Cretaceous Sihetun Lake and implications for regional climatic and volcanic history in western Liaoning, NE China [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 257 – 260(1): 31 – 44.
- [35] Cahoon D R, White D A, Lynch J C. Sediment infilling and wetland formation dynamics in an active crevasse splay of the Mississippi River delta [J]. *Geomorphology*, 2011, 131(3 – 4): 57 – 68.
- [36] Sergio G, Longhitano. Sedimentary facies and sequence stratigraphy of coarse-grained Gilbert-type deltas within the Pliocene thrust-top Potenza Basin (Southern Apennines, Italy) [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 210(3 – 4): 87 – 110.
- [37] 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.
- [38] Romans B W, Fildani A, Hubbard S M, et al. Evolution of deep-water stratigraphic architecture, Magallanes Basin, Chile [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 612 – 628.
- [39] Chien C, Huang C, Chen Z, et al. Miocene shallow-marine cold seep carbonate in fold-and-thrust Western Foothills, SW Taiwan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 56(29): 200 – 211.
- [40] Nagy J, Hess S, Alve E. Environmental significance of foraminiferal assemblages dominated by small-sized *Ammodiscus* and *Trochammina* in Triassic and Jurassic delta-influenced deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(1 – 2): 31 – 49.
- [41] 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.
- [42] Fernando G, Juan F, Cesar V, et al. Architecture and sedimentary facies evolution in a delta stack controlled by fault growth (Betic Cordillera, southern Spain, late Tortonian) [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185(1 – 2): 79 – 92.
- [43] Cornel O, Janok P B. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(2): 212 – 233.
- [44] Keumsuk L, Memechan G A, Gani M R, 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.
- [45] Ridente D, Trincardi F, Piva A, et al. The combined effect of sea level and supply during Milankovitch cyclicity: Evidence from shallow-marine $\delta^{18}\text{O}$ records and sequence architecture (Adriatic margin) [J]. *Geology*, 2009, 37(11): 1003 – 1006.
- [46] 纪友亮, 卢欢, 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组一段浅水三角洲和滩坝沉积模式 [J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 729 – 740.
- Ji Youliang, Lu Huan, Liu Yurui. Sedimentary model of shallow water delta and beach bar in the member 1 of paleogene Funing Formation in Gaoyou sag, Subei Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 729 – 740.
- [47] 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 断陷湖盆萎缩期浅水三角洲沉积演化与沉积模式——以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙三段上亚段和沙二段为例 [J]. 地质学报, 2011, 85(6): 1019 – 1027.
- Zhao Wei, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. Depositional evolution and model of shallow-water delta in the rifting lacustrine basins during the shrinking stage: a case study of the Third member and Second Member of Paleogene Shahejie Formation in the Niuzhuang Subsag, Dongying Sag [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 1019 – 1027.
- [48] 操应长, 韩敏, 王艳忠, 等. 济阳拗陷牛庄洼陷沙二段浅水三角洲沉积特征及模式 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 576 – 582.
- Cao Yingchang, Han Min, Wang Yanzhong, et al. Sedimentary characteristics and models of shallow-water delta deposits in the second member of the Shahejie Formation in the Chezhen Sag, the Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 576 – 582.
- [49] 尹太举, 张昌民, 朱永进, 等. 叠覆式三角洲——一种特殊的浅水三角洲 [J]. 地质学报, 2014, 88(2): 263 – 284.
- Yin Taiju, Zhang Changmin, Zhu Yongjin, et al. Overlapping delta: a new special type of delta formed by overlapped lobes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(2): 263 – 284.
- [50] 尹太举, 李宜玥, 张昌民, 等. 现代浅水湖盆三角洲沉积砂体形态特征——以洞庭湖和鄱阳湖为例 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34(10): 1 – 7.
- Yin Taiju, Li Xuanyue, Zhang Changmin, et al. Sandbody shape of modern shallow lake basin delta sediments-by taking Dongting lake and Poyang Lake for example [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(10): 1 – 7.
- [51] 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 等. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(5): 1005 – 1013.
- Huang Xiu, Liu Keyu, Zou Caineng, et al. Forward stratigraphic modelling of the depositional process and evolution of shallow water deltas in the Poyang Lake, Southern China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 1005 – 1013.
- [52] 金振奎, 李燕, 高白水, 等. 现代缓坡三角洲沉积模式——以鄱阳湖赣江三角洲为例 [J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 710 – 723.
- Jin Zhenkui, Li Yan, Gao Baishui, et al. Depositional model of modern gentle-slope delta: a case study from Ganjiang Delta in Poyang Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 710 – 723.
- [53] 李燕, 金振奎, 李桂仔, 等. 江西省鄱阳湖信江决口三角洲沉积特征及模式 [J]. 古地理学报, 2014, 16(2): 274 – 284.
- Li Yan, Jin Zhenkui, Li Guizai, et al. Depositional characteristics and model for crevasse delta of Xinjiang River in Poyang Lake area, Jiangxi Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(2): 274 – 284.