文章编号:1673-5005(2009)06-0001-04

湖平面变化对扇三角洲发育影响的模拟试验

鄢继华¹,陈世悦¹,程立华²,吴中彬³

(1.中国石油大学地球资源与信息学院,山东东营 257061;2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083;
 3.中石化胜利油田 桩西采油厂,山东东营 257237)

摘要:通过水槽试验模拟扇三角洲的形成过程,考察湖平面变化对扇三角洲发育的影响。试验结果表明:湖平面上 升期扇面以片流沉积为主,分流河道不明显;湖平面稳定期扇面分流河道侧向侵蚀作用较强,改道频繁,底砾层在剖 面上呈倾斜的月牙状杂乱分布;湖平面下降期扇面分流河道数量少且发育稳定,下切作用明显,剖面上底砾层为平 行下凹的月牙形;随着湖平面由上升至稳定再至下降,扇三角洲垂向加积程度减弱、侧向进积程度增强,扇体厚度减 薄、范围扩大,扇缘由圆滑弧形变为不规则弧形,扇面粒度分布差异性亦明显减小。

关键词:湖平面;扇三角洲;水槽试验;扇面沟道;粒度分布 中图分类号:TE 121.3 文献标识码:A

Simulation experiment for effects of lake level change on fan delta development

YAN Ji-hua¹, CHEN Shi-yue¹, CHENG Li-hua², WU Zhong-bin³

College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
 Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
 Zhuangxi Oil Production Plant of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257237, China)

Abstract: The formation of fan delta was simulated by flume experiment, and the effects of lake level change on fan delta development were investigated. The experimental results show that in the period of lake level ascending, sheet deposits develop on fan surface and the distributary channels are indistinct. When the lake level is immobile, the fan-surface channels laterally erode strong and changed the routes frequently. Basal debris beds distribute in a jumble with the shape of angled crescents in profile. In the period of lake level descending, the fan-surface channels develop steadily with obvious vertical erosion. And the basal debris beds develop like parallel and concave crescents in profile. And also, with lake level from ascending to immobile, then to descending, the vertical accretion of fan delta is reduced, but the lateral progradation is intensified. The thickness of fan delta decreases, but the range extends. The boundary of fan delta changes from smoothing arc-like to irregular arc-like. The difference of grain distribution on fan surface decreases.

Key words: lake level; fan delta; flume experiment; fan-surface channel; grain distribution

扇三角洲是冲积扇直接入湖(海)形成的碎屑 岩沉积体系,其形成的重要条件是坡陡、地形高差 大、近物源且碎屑物供应充足^[1]。前人总结扇三角 洲形成的控制因素主要包括古构造、古地形、古气候 和古水流等^[2],在不同控制条件下形成的扇三角洲 类型不同,形成过程和发育特征也不一样。除了这 些条件以外,湖平面变化对扇三角洲的形成也有重 要影响,但是由于扇三角洲的形成具有近源、快速沉 积的特点,人们往往忽略了湖平面变化对其的影响。 因此,笔者通过水槽试验研究在湖平面上升、下降和 基本保持不变的情况下扇三角洲的形成过程和发育 特征,以利于进一步认识扇三角洲的沉积特征、预测

收稿日期:2009-05-18

基金项目:国家油气重大专项(2008ZX05051-02);国家自然科学基金(20972080);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0604) 作者简介:鄢继华(1977-),男(汉族),辽宁盘锦人,讲师,博士,主要从事沉积学方面的研究。

有利储层以及判断沉积环境。

1 扇三角洲形成过程的模拟试验

模拟试验在中国石油大学(华东)海洋馆内的 大型水池内进行。水池长 30 m,宽 10 m,高 1.4 m, 设有 1 个固定排水口,1 个潜水泵活动排水口,水池 长轴一侧为倾角 15°的固定斜面,含砂水流从斜面 上沿注砂槽向下流入池内。各组试验碎屑物质组成 相同,单组试验中水流流速和加砂速度为恒量,通过 调节排水量来控制湖平面变化。为了观察湖平面变 化对扇体的影响,分别模拟了湖平面上升、湖平面基 本保持不变和湖平面下降3种情况下扇三角洲的形 成过程^[3]。试验参数参考了张春生等的扇三角洲 模拟^[4-5]以及东营凹陷北部陡坡带扇三角洲沉积背 景^[6],具体参数见表1。

表 1 水槽模拟试验参数 Table 1 Parameters in flume simulating experiments

| | 开始水深 h ₁ /cm | 结束水深 h ₂ /cm | 试验时间 t/min | 流速 v⁄(L・s ⁻¹) | 加砂速度 q/(kg・s ⁻¹) | 总加砂量 m/kg | 加砂组成 w/% | | | |
|-----|----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------------|--------------|----------|-------|-------|-----|
| | | | | | | | 砾石 | 粗砂 | 中砂 | 细砂 |
| 一号扇 | 76.0 | 83.5 | 140 | 2.5 | 0. 185 | 1 551 | 26.6 | 34.5 | 36. 9 | 2.0 |
| 二号扇 | 85.0 | 82. 7 | 220 | 1.8 | 0.100 | 1 320 | 26.6 | 34. 5 | 36.9 | 2.0 |
| 三号扇 | 23. 5 | 13.0 | 290 | 1.8 | 0.100 | 1 738 | 26.6 | 34. 5 | 36.9 | 2.0 |

试验表明,扇三角洲的形成实际上是一个砂砾 岩体不断充填地形坡度与水平面之间所产生的可容 空间的过程。在这个过程中,只要物源充分,砂砾岩 体就会不断地向上加积、向前进积,迫使岸线向盆地 方向推进,湖平面变化对扇三角洲的这一生长规律 并不会产生本质的影响^[7]。砂砾岩体的进积和加 积使扇三角洲分为明显的平原、前缘斜坡和前扇三 角洲3部分(图1),碎屑物质主要通过平原扇面沟 道不断地向盆地内搬运,并在河口处由于水体的阻 力而快速沉积,扇面沟道的频繁改道是扇三角洲发 育的主要原因。试验发现,湖平面的变化决定了扇 面沟道的发育特征,也进一步影响了扇体的进积和 加积程度、扇体的形态以及扇面粒度分布。





2 湖平面变化对扇三角洲的影响

2.1 扇面沟道

扇三角洲的发育过程是扇面沟道不断携带碎屑 物质至湖盆内完成的。试验表明,在扇三角洲的形 成过程中,扇面沟道的发育情况直接受到湖平面变 化的影响。湖平面上升时期,扇体根部以片流沉积 为主,扇体向岸溯源生长,向前缘方向扇面分支出众 多水道,但水道细小甚至难以识别,水携能量弱、主 次不分明,接近片流沉积(图2(a))。在湖平面基 本保持不变的情况下,扇面发育多条辫状沟道,每个 辫状沟道前端还可以进一步分成2~3个次一级的 分支水道(图2(b))。与湖平面上升期相比,辫状 沟道主次分明、水携能力强且改道频繁。碎屑物质 通过辫状沟道向前搬运,在河口处不断堆积,当河口 处沉积厚度高于相邻地区时,迫使原辫状沟道迁移 而发生改道,属被动式改道。湖平面下降时,扇面沟 道数量少,发育相对稳定。与前两种情况相比湖平 而下降时所发育的扇面沟道河道宽、水携能量强、河 口坝向盆地方向延伸距离远(图2(c))。随着湖平 面的降低扇面主沟道条数也减少,至扇体发育后期 其至仅存在1~2条主沟道,水流及其携带碎屑物质 几乎全部由此搬运至扇体前端(图3)。湖平面下降 期扇面沟道也会发生改道,但改道频率低。与湖平 面基本保持不变情况不同,湖平面下降期扇面沟道 改道主要靠沟道的下切作用,表现为突然的决口,为 主动式改道。



and development of fan-surface channels

勘探实践表明,扇三角洲相是油气储集的有利 相类型之一,而其中的分流河道是扇三角洲中油气 储集的最有利相带^[8-10]。通过对模拟试验扇体的解 剖,发现在湖平面不同变化情况下形成的扇三角洲, 其分流河道的空间分布规律也不一样。水进时期, 在垂直扇体进积方向的剖面上粗、细粒物质成层分 布,扇体中间底砾层近于平直,两翼纹层向下弯曲, 整体似弧形(图4(a)),是由扇体形成过程中扇面 的片流式搬运沉积所致;湖平面基本保持不变的情 况下,表现为众多窄小底砾层杂乱分布于剖面的不 同位置,底砾层为倾斜的月牙形(图4(b)),是主沟 道不断侧向侵蚀的结果,数量众多的底砾层也反映 了扇体形成过程中扇面河道改道的频繁性;湖平面 下降期,底砾层个数少、厚度及宽度大,形态为平行 下凹的月牙状(图4(c)),反映扇体形成过程中扇 面沟道相对稳定且下切作用强。



图 3 试验开始 100 min 时三号扇体 沉积特征(发育 1 条主沟道) Fig. 3 Sedimentary feature of the third fan after experiment of 100 minutes

(develop one main channel)



图 4 湖平面不同变化情况下扇三角洲分流 河道剖面分布示意图



2.2 扇体进积、加积程度

对于一期扇三角洲,扇体的生长不论在湖平面 上升、下降,还是稳定的情况下,都存在加积和进积 作用。进积是扇体向盆地方向生长延伸,加积是扇 体沿垂向加厚。由扇根至扇缘扇体的加积趋势逐渐 减弱,进积趋势增强,这与 Prabir Dasgupta 研究的水 下扇沉积模式相吻合^[11]。但是,对应不同的湖平面 变化情况,加积和进积作用的相对强度会发生改变。 湖平面稳定情况下,扇体一方面向前进积生长,一方 面向上稳定地加积生长;在湖平面上升情况下,进积 作用减弱,加积作用相对增强;湖平面下降情况下, 进积作用占主导地位,加积作用则明显减弱。湖平 面的下降有利于扇体的进积,湖平面上升有利于扇 体的加积。

在水进时期形成的扇三角洲,其扇体沉积厚度 大但分布范围小,而水退时期形成的扇三角洲扇体 沉积厚度小,延伸范围则相对较广。

2.3 扇体形态

湖平面的升降对扇体形态的影响主要体现在扇体边缘形态的差异和水上扇面范围的不同。水进时 期扇面以片流沉积为主,水上扇面和扇体边缘都呈圆滑的弧形;水体基本保持不变的情况下,由于辫状 沟道的出现和频繁改道,使得扇体呈不规则状向湖 盆内生长,扇体边缘对应辫状沟道末端为一系列小 的朵叶体;水退时期主沟道搬运能力强,沟道末端扇 体生长速度快,往往对应一个较大的朵叶体,扇体的 形态随着主沟道的改道而不断发生变化。

此外,模拟试验结果分析表明,对于湖平面上 升、湖平面基本保持不变和湖平面下降3种情况,水 上扇面占整个扇体延伸长度(不包括前扇三角洲) 的比例分别为0.493,0.540和0.625。也就是说,随 着沉积物的不断供应,水上扇面部分不断的向前推 移,但是推移的程度取决于湖平面的变化情况,在湖 平面下降时推移速度最快。

2.4 扇面粒度分布

试验结束后从各组扇体表面取样并进行粒度分 析。结果表明,扇三角洲扇面平原粒度从扇根到扇 缘呈递减趋势,其中根部扇面平原粒度递减速度最 快,而前缘扇面平原粒度变化平缓。前缘斜坡处重 力作用是碎屑颗粒搬运的主要动力,其粒度反而是 坡底大于坡顶。粒度中值小于1 mm 的砂岩主要分 布在水下扇面及前缘斜坡的中上部(图5),其粒度 分布相对稳定,分选较好,对应于油气储集的有利区 带。

虽然扇面粒度总的变化趋势相同,但是对于湖 平面的不同变化情况,扇面粒度的分布也有一定差 异。从扇体中线(由扇根至扇缘垂直于岸线)扇面 粒度中值的变化情况来看(图6),由扇根至扇缘扇 面粒度中值变化梯度一号扇最大,二号扇居中,三号 扇最小,其拟合趋势线逐渐平缓,说明随着湖平面由 上升转为稳定,再至快速下降,扇体发育的面积逐渐



图 5 各组模拟试验扇三角洲扇面粒度中值等值线图



图 6 模拟试验扇面中线粒度中值随 距离变化关系对比



3 结 论

(1)湖平面变化决定了扇三角洲分流河道的发育特征。一般来说,湖平面上升期分流河道不明显; 湖平面稳定期分流河道数量多、改道频繁;湖平面下降期分流河道数量少、发育稳定。

(2)湖平面变化影响了扇三角洲的空间形态。 湖平面上升有利于沉积物的垂向加积,扇体厚度大、 范围小,扇缘呈圆滑弧形;湖平面下降有利于沉积物 向盆地进积,扇体厚度薄、沉积范围广,扇缘呈不规 则弧形,且湖平面下降越快,扇体形态越不规则。

(3) 湖平面变化导致了扇三角洲扇面粒度分布 的差异性。由扇根至扇缘扇面粒度的递减梯度随着 湖平面由上升至下降而减小。水下扇面及前缘斜坡 中上部砂体粒度分布相对稳定,物性较好,且在湖平 面下降情况下分布范围最广。

参考文献:

- [1] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003: 394.
- [2] 赵澄林. 沉积学原理[M]. 北京:石油工业出版社,

2001;91.

[3] 程立华,陈世悦,吴胜和,等.断陷盆地陡坡带扇三角 洲模拟及沉积动力学分析[J].海洋地质与第四纪地 质,2005,25(4):29-34.

CHENG Li-hua, CHEN Shi-yue, WU Sheng-he, et al. The simulation and sedimentary dynamic analysis of fan delta in the steep slope of fault basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005,25(4):29-34.

- [4] 张春生,刘忠保,施冬,等. 扇三角洲形成过程及演变规律[J]. 沉积学报,2000,18(4):521-526.
 ZHANG Chun-sheng, LIU Zhong-bao, SHI Dong, et al.
 Formed proceeding and evolution disciplinarian of fan delta
 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000,18(4):521-526.
- [5] 张春生,刘忠保.现代河湖沉积与模拟实验[M].北 京:地质出版社,1997:172.
- [6] 孔凡仙.东营凹陷北带砂砾岩扇体勘探技术与实践
 [J].石油学报,2000,21(5):27-31.
 KONG Fan-xian. Exploration technique and practice of sandy-conglomeratic fans in the northern part of Dongying depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000,21(5):27-31.
- [7] LÓPEZ-BLANCOM, MARZO M, BURBANK D W, et al. Tectonic and climatic controls on the development of foreland fan deltas: Montserrat and Sant Llorenç del Munt systems (Middle Eocene, Ebro Basin, NE Spain)
 [J]. Sedimentary Geology, 2000, 138:17-39.
- [8] 罗水亮,林承焰,翟启世,等. 滨南油田毕家地区沙三下亚段沉积特征及沉积模式[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版,2009,33(2):12-17. LUO Shui-liang, LIN Cheng-yan, ZHAI Qi-shi, et al. Reservoir sedimentation characteristics and sedimentation model of lower Es₃ of Bijia block in Binnan Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(2):12-17.

(下转第10页)

ZHU Xiao-min, XIN Quan-lin, ZHANG Jin-ren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down lacustrine basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994,12(2):20-28

- [3] ZHANG Jin-liang, WANG Bao-qing. Beach and bar deposits of the Palaeogene Dongying formation in the Henan Oilfield[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995,4(4):497-504.
- [4] 周丽清,邵德艳,房世瑜,等.板桥凹陷沙河街组滩坝砂体[J].石油与天然气地质,1998,19(4):351-355.
 ZHOU Li-qing, SHAO De-yan, FANG Shi-yu, et al. Beach and bar sandbodies of Shahejie formation in Banqiao depression[J]. Oil & Gas Geology, 1998,19(4):351-355.
- [5] 邬金华,张哲,王柏轩.东营凹陷沙一段滩坝-泻湖沉积体系和层序发育的控制特点[J].地球科学——中国地质大学学报,1998,23(1):21-25.
 WU Jin-hua, ZHANG Zhe, WANG Bo-xuan. Barrier-lagoon sedimentary system and sequence development control of Shahejie formation member 1 of Dongying sag[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998,23(1):21-25.
- [6] WANG Ping, Jr DAVIS Richard A. A beach profile model for a barred coast; case study from sand key, west-central Florida[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(3): 981-991.
- [7] 陈世悦,杨剑萍,操应长.惠民凹陷西部下第三系沙河街 组两种滩坝沉积特征[J].煤田地质与勘探,2000,28
 (3):1-3.

CHEN Shi-yue, YANG Jian-ping, CAO Ying-chang. Sedimentary characteristics of two kinds of beach-bars of Oligocene Shahejie formation in the Western Huiming depression [J]. China Coal Geology & Exploration, 2000,28(3):1-3.

(上接第4页)

[9] 杨剑萍,赵卫卫,姜在兴. 沾化凹陷孤北油田古近系沙 三段扇三角洲沉积特征及油气储层意义[J]. 石油与天 然气地质,2003,24(2):157-161.

YANG Jian-ping, ZHAO Wei-wei, JIANG Zai-xing. Sedimentary characteristics and reservoir significance of Eogene Es₃ fan delta in Gubei Oilfield, Zhanhua depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003,24(2):157-161.

[10] 史文东,赵卫卫. 沾化凹陷孤北洼陷下第三系沙三段 扇三角洲沉积体系及其与油气聚集的关系[J]. 石油 [8] 李秀华,肖焕软,王宁.东营凹陷博兴洼陷沙四段上亚段 储集层特征及油气富集规律[J].油气地质与采收率, 2001,8(3):21-24.

LI Xiu-hua, XIAO Huan-qin, WANG Ning. Reservoir characteristics and hydrocarbon enrichment rules in upper Es₄ of Boxing subsag in Dongying sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001,8(3):21-24.

- [9] JIANG Zai-xing, CAO Ying-chang, YANG Jian-ping. Sedimentology characters and models of the upper Sha-III member of the Oligocene Shahejie formation in the central uplift zone, Huimin depression, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1999,8(2):169-176.
- [10] JOHNSTON John W. Sedimentology and depositional history of two barrier beach complexes along Lake Huron, Ontario[J]. Abstracts with Programs-Geological Societyof America, 1999,31(7):50.
- [11] 刘伟,吕优良,徐徽,等.东营凹陷南斜坡东段沙四上亚段沉积相与砂体展布研究[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(2):23-25.
 LIU Wei, LÜ You-liang, XU Wei, et al. Sedimentary microfacies and sandbody distribution in the upper members of Es₄ in the south slope of Dongying depression[J].

Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004,26(2):23-25.

[12] 王艳忠,操应长,宋国奇,等.东营凹陷古近系深部碎屑 岩有效储层物性下限的确定[J].中国石油大学学报: 自然科学版,2009,33(4):16-22.
WANG Yan-zhong, CAO Ying-chang, SONG Guo-qi, et al. Determination of physical property reservoirs of Paleogene lower limit of deep clastic effective in Dongying depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2009,33(4):16-22.

(编辑 徐会永)

大学学报:自然科学版,2003,27(2):15-18.

SHI Wen-dong, ZHAO Wei-wei. Sedimentary characteristics of fan-deltaic depositional system in third member of Shahejie formation in Gubei Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(2):15-18.

[11] PRABIR Dasgupta. Architecture and facies pattern of a sublacustrine fan, Jharia Basin, India [J]. Sedimentary Geology, 2002, 148(3/4):373-387.

(编辑 徐会永)