

# 濮阳凹陷白庙气田沙河街组三段下亚段 扇三角洲沉积模拟研究\*

夏长淮<sup>1</sup>, 张春生<sup>2</sup>, 周海彬<sup>3</sup>, 施斌全<sup>4</sup>, 刘忠保<sup>2</sup>, 李力<sup>3</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 750000; 2. 江汉石油学院地球科学系, 湖北荆州 434102;

3. 中原石油勘探局钻井综合工程处, 河南兰考 475300; 4. 胜利油田测井公司, 山东河口 257200)

**摘要:** 根据白庙地区砂体沉积特征设计的沙三下砂体形成过程模拟实验表明, 沙三下扇三角洲主要是碎屑流和牵引流交替作用的结果, 洪水期以碎屑流作用为主, 平水期以牵引流作用为主, 扇三角洲存在叠置与展开两种结合形式, 前者厚度大而面积小, 后者厚度小而面积大。它的发育和演变主要受上游水流强度、泥砂搬运、水流分汉变迁、湖水位升降及活动底板下降速率等因素的影响。模拟认为, 沙三下扇三角洲在形成过程中, 在白5井、白3井和白28井之间及白7井一带主要发育3条主辫状河道, 最宽达750 m, 最窄为300 m; 辫状河道在杜寨断层处, 砂岩质纯、厚度大、物性好, 在兰聊断层与杜寨断层之间, 砂岩厚度大且分布普遍, 而在靠近兰聊断层处则砂岩厚度减薄, 物性变差。

**关键词:** 扇三角洲; 模拟; 发育过程; 控制因素; 分布; 白庙地区

**第一作者简介:** 夏长淮, 男, 39岁, 高级工程师, 石油地质学

中图分类号: P588.2

文献标识码: A

## 1 原型模型

白庙气田位于山东省菏泽市与东明县交界处, 南面紧邻葛岗集, 北面倾伏于前梨园次洼, 东以兰聊断裂为界, 西与桥口油气田相望, 面积约120 km<sup>2</sup>。到目前为止, 全区共钻各类井45口, 系统取芯井4口, 间断取芯井20口, 其中油气显示井40口。发现沙河街组二段下亚段、沙河街组三段上亚段、沙河街组三段中亚段、沙河街组三段下亚段-沙河街组四段上亚段4套含油气层系。其中沙河街组三段下亚段-沙河街组四段上亚段探明天然气面积11.6 km<sup>2</sup>, 天然气储量29.16 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 凝析油储量121.6 × 10<sup>4</sup> t, 是近期滚动勘探开发的重点层系。

白庙构造整体是一个在基底隆起背景上受兰聊断层控制、继承性发育的西倾平缓半背斜构造, 又被同生杜寨断层切割为下降盘的逆牵引断鼻构

造和上升盘的二台阶构造带, 二台阶被两组近EW向的断层切割使其内部构造进一步复杂化。

白庙地区断层按其规模大小、活动时期及对沉积的控制作用分为3个级别。

**I级断层——兰聊断层**是东濮凹陷的控边断层, 走向NNE, 倾向NNW, 上陡下缓, 倾角60°~70°, 断距约4 000~4 200 m, 它不仅直接控制着白庙构造的形成, 而且对东濮凹陷的形成和演化起着重要的控制作用;

**II级断层——杜寨断层**与兰聊断层近平行展布且与其同期形成, 走向NNE, 倾向NNW, 倾角45°~60°, 断距250~400 m;

**III级断层——白10、白12断层**使白庙二台级上的构造进一步复杂化, 使得全气田不存在统一的构造圈闭, 活动时间晚于II级断层。

岩芯粒度分析表明, 沙河街组三段下亚段(简称沙三下, 下同)扇三角洲主要由粉细砂岩组成, 其中粉砂占40%~60%, 平均49%, 中细砂占20%~52%, 平均36%。紧靠兰聊断层发育有杂色砾岩及粗砂岩, 但含量一般不超过10%。沙三下厚度400~500 m, 西面受杜寨同生断层影响, 在其下降盘一侧地层厚度明显增大。古构造研究认为, 沙三

\* 国家“973”项目子课题“储集层原型地质规律研究”, CNPC石油中青年创新基金“盆地陡坡带沉积模拟研究”, Petro-China重点实验室课题“扇三角洲及辫状河储层沉积过程物理模拟与数值模拟”资助

收稿日期: 2002-05-13

下沉积时, 原始底形坡度约  $6^{\circ} \sim 10^{\circ}$ , 水深 62 m。该时期构造运动相对平稳, 但活动强度有逐渐减小的趋势。

## 2 实验模型与参数

### 2.1 模拟区域

以兰聊断层和杜寨断层之间作为模拟实验的控制区, 南北向( $Y$  方向)长约 10 km, 东西向( $X$  方向)宽约 6 km,  $X$  方向比尺 1: 1 000, 设计  $Y$  方向比尺 1: 1 500,  $Z$  方向厚度比尺为 1: 50, 粒度比尺确定为 1: 100, 因此该模型为一个变率为 1.5 的变态模型; 沿  $Y$  方向  $Y=7$  m 模拟兰聊断层,  $Y=12.5$  m 模拟杜寨断层; 测量的平面有效范围为  $X$  方向: 0.5~5.5 m,  $Y$  方向: 6.0~14.50 m; 物源设计在兰聊断层附近, 方向与兰聊断层垂直自东向西搬运沉积物。入湖河流条数由底形条件自然形成。

### 2.2 原始坡降与基底升降

按原型资料设计原始底坡  $0.75\theta \sim 0.8\theta$ , 同时根据沙三下构造运动的规模和特点, 在实验过程中活动底板共下降两次, 每次下降 5.5 cm, 第一次按每 10 min 下降 1 cm 的沉降速度控制, 第二次按每 20 min 下降 1 cm 的沉降速度控制。

### 2.3 原始沉积地形

沉积模拟实验的原始底形十分重要, 它控制着其后沉积体系的展布<sup>[2]</sup>。本次实验以沙三第四亚段沉积后的古地形为依据制作底形(图 1)。

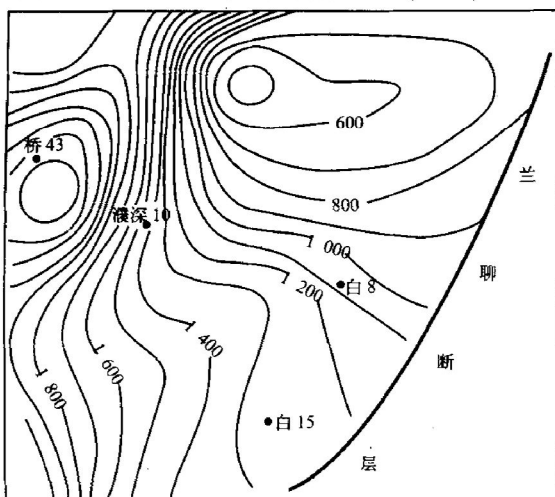


图 1 白庙地区沙河街组三段第四亚段地层等厚图

Fig. 1 Stratigraphic isopach map of sub-member

IV of  $E_3$  in Baimiao region

### 2.4 水动力参数

实验过程中主要控制的水动力参数包括流量、加沙量、湖水位、放水历时、粒度等(表 1)。根据扇

三角洲形成特点, 以及自然界河流洪水、平水、枯水的流量比例, 根据将今论古的原则, 设计白庙扇三角洲入湖河流洪水、平水、枯水的流量比例为 6: 3: 1<sup>[2]</sup>, 实验中选定洪水期流量为 6 L/s, 平水期流量为 3 L/s, 枯水期流量为 1 L/s; 实验过程中, 按洪水、平水、枯水的粒度组成加沙, 含沙量与流量比例匹配, 设计为 6: 3: 1; 自然界中洪水期、平水期、枯水期的时间变化具有一定的规律<sup>[3]</sup>, 设计洪水、平水、枯水的时间比例为 1: 2: 6。

表 1 沙三下模拟实验主要水动力参数

Table 1 Main hydrodynamic parameters for simulating experiment in sha-3 member

| 来水周期 | 流量<br>$/(L \cdot s^{-1})$ | 加沙量<br>$/(g \cdot s^{-1})$ | 含沙量<br>$/\theta$ | 湖水深度<br>$/cm$ | 放水历时<br>$/h$ |
|------|---------------------------|----------------------------|------------------|---------------|--------------|
| 洪水   | 6                         | 180                        | 16~18            | 24            | 15           |
| 平水   | 3                         | 90                         | 10~12            | 18            | 30           |
| 枯水   | 1                         | 30                         | 4~6              | 12            | 90           |

注: 颗粒直径以原型砂体相应粒度组成的 1: 100 计算。

实验共进行 6 轮, 约 135 h, 每轮模拟一个砂层组, 共模拟 6 个砂层组, 每个砂层组的实验条件均不完全一样, 但都在一定的变化范围之内。

### 2.5 加沙组成

白庙扇三角洲主要由粉砂岩、中细砂岩组成, 而且每个沉积时期的岩性又各不相同。考虑到实验过程的可操作性、水流的搬运能力以及实验原型洪水期、平水期、枯水期含沙量的变化, 设计加沙组成(表 2)。

表 2 白庙气田沙三下实验加沙组成

Table 2 Sand-bearing ratio of design for Simulating experiment in sha-3 member of Baimiao gasfield

| 来水周期 | 加沙组成体积百分比/ $\theta$ |    |     |    |
|------|---------------------|----|-----|----|
|      | 砾石                  | 粗沙 | 中细沙 | 粉沙 |
| 洪水   | 2                   | 3  | 60  | 35 |
| 平水   | 0                   | 2  | 20  | 78 |
| 枯水   | 0                   | 0  | 10  | 90 |

## 3 主要认识

### 3.1 发育过程

#### 3.1.1 两种水动力机制

白庙扇三角洲形成过程中, 水流的作用机制分两种类型, 洪水期在扇三角洲平原多呈碎屑流形式

搬运。在扇三角洲前缘,尤其是远岸河道中,则多以牵引流形式搬运;扇三角洲前缘近端河道,碎屑流和牵引流两种搬运形式都存在。平水期扇三角洲沉积的主要搬运方式为牵引流,几乎不存在碎屑流。扇三角洲平原和扇三角洲前缘的沉积方式主要表现为前积作用,前扇三角洲沉积方式主要表现为垂积作用。

3.1.2 建设期有张有弛

扇三角洲的形成发展过程中,每期建造后均伴随着砂体发育间断期。间断期中形成暗色泥岩或杂色泥岩,纵向上构成较好的生、储配置。在沙三下沉积建造时期,扇三角洲广泛发育,各砂组中均有不同规模的扇三角洲存在,累计厚度达 3~9.5 m,占地层厚度的12%~ 18%。实验表明,白庙扇三角洲的规模主要受兰聊断裂活动的周期性和强度大小控制。

3.1.3 组合形式

白庙地区不同时期的扇三角洲沉积体的组合形式有两种情况。

其一是叠置型扇三角洲,表现为沉积速度与沉降速度基本适应。这样扇三角洲在平面上的位置变化不大,造成各期扇三角洲重叠发育,扇三角洲厚度较大,沙三下 VI, II, I 砂组扇三角洲沉积时主要表现为这种方式。这一类型的扇三角洲上的探井成功率较高,因为一口井可以穿过两个以上的扇三角洲砂体。

其二是展开型扇三角洲,表现为沉积速度大于沉降速度,扇三角洲砂体层层向湖心推进,形成扇三角洲在平面上的大连片,扇三角洲沉积厚度相对较小,沙三下 V, IV, II砂组扇三角洲沉积时主要为这种形式。勘探过程中,一口井往往只穿过一个扇三角洲砂体,如果没有其他有利储层存在,失败的可能性就比较大。

3.2 控制因素

3.2.1 河道水流强度

实验初期,因沙四地形较平坦,原始河道宽浅,水流强度较低,泥沙呈舌状缓慢沉积在扇三角洲平原主河道中,使河床抬高,床面坡降变大,水流强度增强,泥沙搬运加快,直至形成射流入湖。入湖后,过水断面变大,流速锐减,水流强度变小,砂体主要在河口部位沉积,形成扇三角洲前缘雏形。随着沉积作用的进行,河口部位沉积的砂体范围不断增大,扇三角洲砂体逐渐发育,并呈舌状展布。

3.2.2 分汊变迁

砂体发育到一定规模以后,沿扇三角洲前缘辫状河道沉积的砂体使得河床抬高,顺水流方向产生纵比降,垂直于水流方向则产生横比降,水砂响应及自我调整的直接结果是砂体横向展宽及纵向伸长<sup>[4]</sup>。在扇三角洲前缘发育的早期,扇三角洲砂体以横向展宽为主,晚期则以纵向伸长为主,当砂体纵向延伸所遇到的阻力大于横向展宽的阻力时,扇三角洲前缘又以横向展宽为主,扇三角洲的形成过程就是在这种横向展宽和纵向伸长的相互交替中完成的。

3.2.3 水位的升降

基准面下降时,伴随着水面比降增大,水流强度增大,扇三角洲砂体向前推进的速率加快,推进的距离也更远,对前期沉积的砂体造成广泛的切割,扇三角洲的形成过程以冲刷为主,该过程进一步加速了扇三角洲辫状河道形成及演变,导致扇三角洲的发育以鸟足状为主<sup>[5]</sup>;相反,基准面上升(湖水位升高),沉积可容纳空间增大,水流速度减小,扇三角洲形成过程以沉积为主,扇三角洲上辫状河道相对稳定,辫状河道中砂岩厚度比较大,扇三角洲以舌状形态为主(表 3)。

表 3 湖水位变化与扇三角洲形态的关系

Table 3 Correlation diagram showing water level variations of the lake and the pattern of the fan delta

| 实验<br>轮次 | 水位<br>/ cm | 砂体特征  |       |                | 冲淤<br>特征 | 形态   |
|----------|------------|-------|-------|----------------|----------|------|
|          |            | 长/ cm | 宽/ cm | y = 9 m 处厚/ cm |          |      |
| 1        | 18         | 532   | 458   | 6.2            | 沉积       | 近舌状  |
| 2        | 14         | 614   | 405   | 5.8            | 冲刷       | 近鸟足状 |
| 3        | 12         | 673   | 395   | 5.1            | 冲刷       | 鸟足状  |
| 4        | 16         | 541   | 440   | 6.7            | 沉积       | 近舌状  |
| 6        | 18         | 436   | 428   | 7.9            | 沉积       | 舌状   |
| 5        | 12         | 708   | 303   | 3.2            | 冲刷       | 鸟足状  |

3.2.4 来水状况

洪水对扇三角洲辫状河道迁移及河口砂坝沉积起决定性作用<sup>[6]</sup>。大流量的洪水水流集中时,因水流强度大,冲刷能力强,先快速切割原砂体表面,后携带泥砂沿水流惯性方向呈长条状入湖前行;而大流量的洪水呈分散状时,强片流洪水大范围向前及向两侧推进,砂体横向展宽,纵向伸长。平水期水流对砂体的改造影响较小,砂体主要是沿辫状河道延伸方向发育。枯水期水流主要沿袭原有辫状

河道, 对砂体起细化作用<sup>[7]</sup>, 基本不影响扇三角洲其他部位的沉积特征。

### 3.2.5 底板及湖平面下降速率

实验过程表明, 活动底板(构造运动)的下降速率越大, 扇三角洲辫状河道迁移速率也越快, 二者之间呈正比例关系。构造运动相对平稳期, 也是扇三角洲上辫状河道的稳定沉积期, 构造运动从剧烈至平缓的变化过程也正是辫状河道从不稳定到稳定的变化过程; 同理, 湖平面下降速率越大, 扇三角洲辫状河道迁移速率也越大, 二者之间也存在正比例关系(图2, 3)。

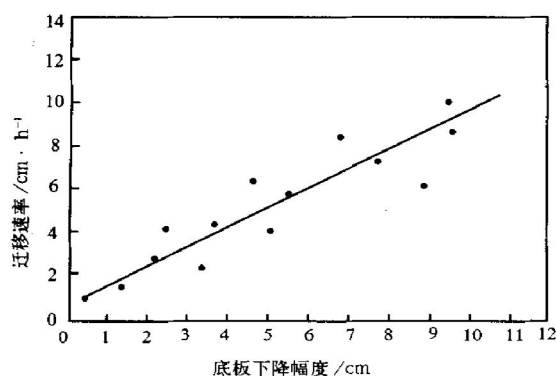


图2 活动底板下降幅度与辫状河道迁移速率的关系

Fig. 2 Correlation diagram showing subsidence range of the mobile bottom bed and migration rate of the braided channels

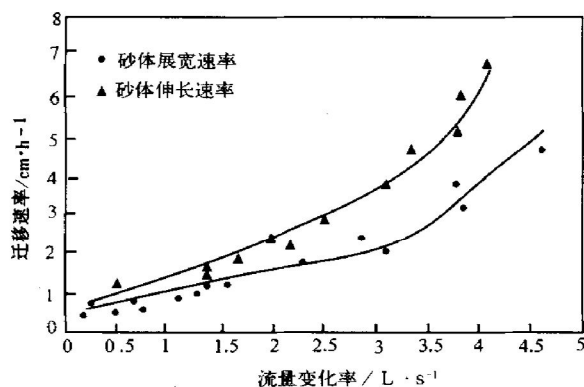


图3 流量变化率与砂体演变速率的关系

Fig. 3 Correlations between flowing quantity rate and evolution rate of the sandbody

### 3.3 砂体展布

实验过程表明, 白庙地区沙三下扇三角洲沉积在兰聊断层与杜寨断层之间, 主要发育扇三角洲平原及扇三角洲前缘两个亚相, 前扇三角洲沉积则主要分布在杜寨断层以西的深湖区。扇三角洲平原亚相分布范围十分有限。砾石及粗砂主要堆积在靠近兰聊断层的下部, 约占模拟实验区的90%。白

庙地区油气勘探过程中, 仅在少数几口井(白7、白14、白22等)中发现有基质支撑和碎屑支撑的杂砾岩, 同样说明扇三角洲平原沉积范围局限。扇三角洲前缘亚相以辫状分流河道沉积微相为主, 其次是河口砂坝, 第三为辫状河道间沉积。在扇三角洲发育的不同时期, 尽管河口砂坝沉积微相所占比重不同, 而且有一定规模和保存时间, 但多数又被后期的辫状河道所切割。目前测井曲线所反映的砂体沉积微相大都以辫状分流河道为主, 乃是后期辫状河道的延伸、迁移、摆动对其他沉积微相破坏的结果。

白庙地区沙三下储层发育过程中, 扇三角洲平原上主要发育3条主辫状水道, 其中白5井主辫状水道最宽, 约750 m左右, 自SE向NW方向延伸; 白3井与白28井之间主辫状水道最窄约300 m, 亦呈SE-NW向展布; 白7井主辫状水道规模居中, 宽度约500 m, 呈EW向展布(图4)。主辫状水道

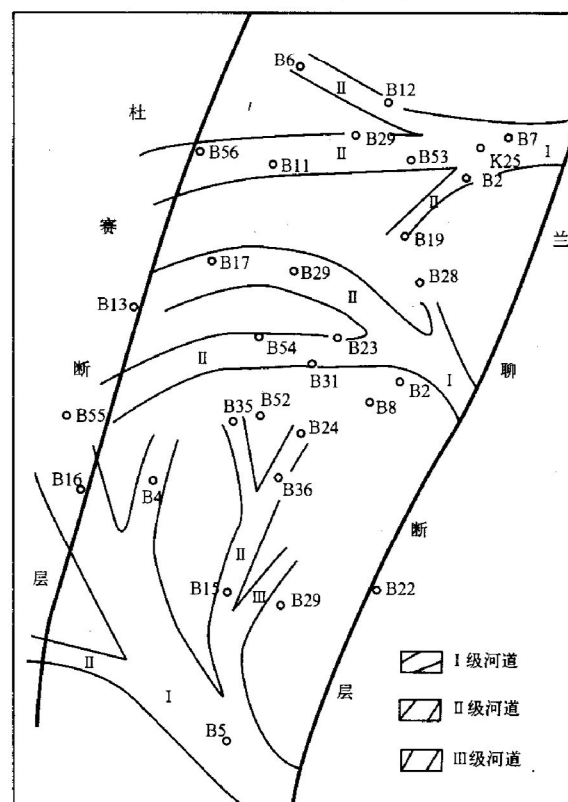


图4 白庙地区沙三下辫状河道分布图

Fig. 4 Distribution diagram of the braided channels in shia-3 member of Baimiao region

向前延伸进入扇三角洲前缘地区开始分汊, 形成辫状分支河道。一般情况下, 以形成3支为主。由于受杜寨断层的影响, 沙三下扇三角洲辫状分支河道延伸至杜寨断层消失。白5井主辫状河道形成的

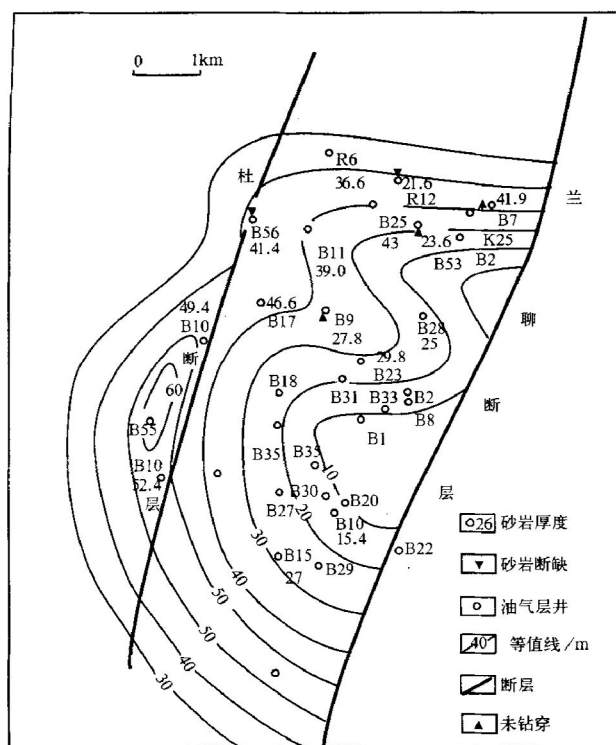


图 5 白庙地区沙三下砂岩等厚图

Fig. 5. Isopach diagram for sha-3 member sandstones in Baimiao region

其中一支辫状分支河道向北沿兰聊断层平行方向延伸, 该辫状分支河道经过白 15 井、白 36 井, 在发展过程中再次发生分叉, 形成 III 级分支河道, 据统计该区的河道密度是最大的, 是目前有利的目标区。此外, 在扇三角洲前缘辫状河道演化过程中, 北部河道位置迁移较快, 砂岩分布较广, 是滚动勘

探开发的又一有利地区。

白庙地区沙三下砂岩厚度在扇三角洲前缘地区较厚, 尤其在靠近杜寨断层的辫状水道前缘地区, 由于辫状河道的卸载作用, 形成的砂岩厚度一般大于 40 m (图 5), 而且, 岩性较纯, 物性较好, 远离杜寨断层进入深湖区, 砂岩厚度急剧减薄。兰聊断层与杜寨断层之间, 辫状河道位置砂岩厚度较大, 同时由于扇三角洲前缘辫状河道迁移改道频繁, 使得白庙地区沙三下砂岩分布普遍。靠近兰聊断层, 扇三角洲平原地区砂岩厚度减薄, 而且以杂乱堆积砾岩为主, 物性差, 不利于油气聚集与保存。

#### 参 考 文 献

- 1 Hooke R B. Model geology: prototype and laboratory streams: discussion [J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1988, 79(3): 391~ 394
- 2 张春生. 曲流河凹岸滩坝沉积模拟研究[J]. 江汉石油学院学报, 1997, 20(3): 19~ 23
- 3 Dietrich W E, Smith J D, Dunne T. Flow and sediment transport in a sand bedded meander[J]. Geology, 1978, 87(3): 305~ 315
- 4 张春生. 扇三角洲形成过程及演变规律[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 521~ 526
- 5 Begg S H. Characterization of a complex fluvial- deltaic reservoir for simulation[J]. SPE Formation Evaluation, 1996, 11(3): 147~ 154
- 6 Bridge J S, Jarvis J. Flow and sedimentary processes in the meandering river South Esk, Glen Clova, Scotland[J]. Earth Surface Processes, 1976, 1(3): 303~ 306
- 7 Schumm S A, Khan H R. Experimental study of channel pattern[J]. Bull. Geol Soc Am, 1972, 83(2): 1 755~ 1 770

## STUDY ON SEDIMENTARY SIMULATION OF FAN DELTA IN LOWER SUB- MEMBER $E_s^3$ OF BAIMIAO GAS FIELD IN PUYANG DEPRESSION

Xia Changhuai<sup>1</sup> Zhang Chunsheng<sup>2</sup> Zhou Haibin<sup>3</sup> Shi Bingquan<sup>4</sup> Liu Zhongbao<sup>2</sup> Li Li<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Geochemical Research Institute of the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou; 2. Earth Science Department, Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei; 3. Multi- Well Drilling Engineering Section of Oil Exploration Bureau of Zhongyuan Oilfield; 4. Shen Li Oilfield well- logging corporation, Hekou, Shandong)

**Abstract:** Simulation of genetic process of sand body in sub- member  $E_s^3$  which is designed on the basis of sedimentation characteristics of the sandbody in Baimiao region indicates that the development of delta in sub- member  $E_s^3$  fan is the result and caused chiefly by the intersected process of elastic current and traction current. The elastic current played a main rule in the flooding period while the traction current played a chief rule in the period of normal water level year; Two types of combinations(stack and spread) exist in the fan delta, the former with small size but in great thickness, and the later in small thickness but with big size. The development and evolution of sub- member  $E_s^3$  fan delta is largely effected by several factors of upper reaches current intensity, migration of muddy sand, braiding and migration of water current, uplift and subsidence of lake water level as well as subsidence rate of the mobile bottom bed

etc. . It is believed by simulating that the width of three braided channels between Bai No. 5 , and No. 3 and No. 28, and No. 7 well which mainly developed in the process of the development of the delta in sub- member E<sub>s</sub><sup>3</sup> fan are 750m at maximum and 300m at minimum; In Duzai fault where purified sandstones are found in the braided channels with great thickness and good physical property, between Lanqing fault and Duzai fault sandstones are with great thickness and widely spread while sandstones near Lanqing fault become thinner and thinner and with poor property.

**Key words:** fan delta; simulation; develop process; controlling factor; distribution; Baimiao region

( 上接第 206 页)

## MODELING MODEL FOR HYDROCARBON EXPULSION IN CARBONATE SOURCE ROCKS AND ITS APPLICATION IN PRACTICE: EXAMPLE FROM THE MAJIAGOU FORMATION OF ORDOVICIAN IN ORDOS BASIN

Chen Yicai<sup>1</sup> Shen Zhongmin<sup>1</sup> Huang Zeguang<sup>1</sup> Li Yanjun<sup>2</sup> Guo Xiuying<sup>2</sup> Lü Qiang<sup>3</sup>  
Zhang Jun<sup>3</sup> Shi Xiaoying<sup>3</sup>

(1. *Chengdu University of Science and Engineering, Chengdu, Sichuan*; 2. *Xinan Petroleum  
Institute, Nanchong, Sichuan*; 3. *Changqing Administration Bureau of Petroleum  
Exploration, Xian Shanxi* )

**Abstract:** With well development of cementation, carbonate hydrocarbon source rocks would be consolidated into rocks quite earlier, therefore, compaction effect is not merely chief one instead of multi- effects existence in hydrocarbon expulsion. Different evolution stages with various ways of hydrocarbon expulsion, in the higher- over maturation stage, micro- fissure hydrocarbon expulsion and molecular diffusion are believed to play a chief role. A mathematical model of diffusively hydrocarbon expulsion and micro- fissure hydrocarbon expulsion can be established quantitatively in line with the principle of mass conservation of hydrocarbon generation and expulsion on the basis of one dimensional geological model. Modeling results from this model indicate that Majiagou Formation in the Ordovician in Ordos basin had entered hydrocarbon generation threshold by the end of the earlier Permian and reached the peak of hydrocarbon generation in the Triassic, and began getting into the over saturation - dry stage in the earlier Cretaceous; Accumulative total hydrocarbon expulsion rate is 60% - 80%, of which compactively hydrocarbon expulsion, diffusively hydrocarbon expulsion and micro fissure hydrocarbon expulsion are predominant whereas water soluble facies hydrocarbon expulsion occupies a small proportion.

**Key words:** carbonate source rock; hydrocarbon expulsion; microfissure; Majiagou Formation; Ordos basin