

扇三角洲砂体几何形态沉积数值模拟方法研究

陈戈¹, 斯春松¹, 张惠良¹, 闫晓芳¹, 刘永福²

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:扇三角洲是陆相碎屑岩重要的沉积类型之一。利用砂体沉积过程数值模拟方法可以预测扇三角洲砂体的几何形态。在利用泥沙冲淤动力学模式建立扇三角洲沉积过程的数学方程后, 根据现代三角洲沉积特征, 设计了其沉积过程的模拟条件, 计算域长 100 km、宽 50 km, 流量按 50 年一遇洪水设计, 模拟过程到 2 000 年时, 扇三角洲沉积过程基本达到平衡状态, 此时前缘复合砂体最大厚度约 39 m。通过对扇三角洲前缘砂体几何形态的模拟研究, 总结出扇三角洲沉积体储层建筑结构的模拟与预测方法。计算过程中可识别出 4 种沉积砂体, 包括水下分流河道(砂体的平均长宽比为 2.68, 平均宽厚比为 79.8)、河口砂坝(平均长宽比为 2.02, 平均宽厚比为 68.2)、远砂坝(平均长宽比为 1.65, 平均宽厚比为 58.3)、水下溢岸沉积。主要沉积单元砂体几何参数之间的相关关系较好。实验结果表明, 利用泥沙冲淤动力学模式可以较好地揭示扇三角洲发育过程, 进而可以预测扇三角洲砂体的几何形态。

关键词:数值模拟; 扇三角洲; 几何形态; 砂体预测

中图分类号: P628⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-3636(2013)02-0178-05

0 引言

扇三角洲是冲积扇或辫状河直接入湖形成的中—粗粒碎屑岩沉积体系, 由于扇三角洲多与生油凹陷相邻, 油源充足, 而且扇三角洲前缘砂质粒度适中, 物性较好, 是良好的油气储集体, 现在已经成为寻找隐蔽油气藏的有利勘探目标之一, 具有广阔的勘探开发前景。因此, 近 20 年来, 国内外开展了多种方法的沉积物理数值模拟对湖盆沉积砂体的形成过程及演变规律进行研究。在前人的研究成果中, 采用最多的是沉积物理模拟技术, 随着计算机技术的迅速发展, 计算机数值模拟作为另一项模拟技术日趋成熟。由于扇三角洲形成过程中水动力条件的多样性, 使其数值模拟难度较大(朱筱敏等, 1994)。从其流体力学角度出发, 认为扇三角洲主要为碎屑流、牵引流和重力流交替作用的结果(李敏等, 2010), 而泥沙冲淤动力学模式兼顾 3 种流体力学, 关于泥沙冲淤的动力学研究成果在钱宁等(2003)和郭冬建等(1996)的论文和专刊中有系统的总结。

据此, 笔者尝试利用这些成果, 采用计算地球流体力学方法, 对扇三角洲发育过程作数值模拟研究。

1 动力学模式

考虑到实验操作的可行性, 本次模拟设定为浅水情况, 取二维流动, 利用泥沙冲淤动力学模式设计实验模型, 这一模型主要由水动力基本方程、泥沙冲淤动力运动方程及河床变形方程构成(张春生, 2003)。

1.1 水动力基本方程

在泥沙冲淤动力学模式下, 不考虑水流为多相流(即除摩擦外, 略去泥沙对水流的影响), 取二维流动, 于是沿垂直方向平均的水流动力学方程如下(Leeder et al, 1987):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f(v) = -g \frac{\partial z}{\partial x} + k \Delta u - \tau_x / h p_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f(u) = -g \frac{\partial z}{\partial x} + k \Delta v - \tau_y / h p_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

收稿日期: 2012-06-11; 修回日期: 2013-03-28; 编辑: 侯鹏飞

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2008ZX05004-002)资助

作者简介: 陈戈(1980—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事油气储集层地质与油气藏描述研究的科研工作, E-mail: cheng_hz@petrochina.com.cn

其中, $u、v$ 为水流速度分量; z 为水面高度; $\tau_x、\tau_y$ 为底摩擦; k 为侧向混合系数; Δ 为二维拉普拉斯算子; g 为自由落体加速度; $\rho_0 = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 为水密度; h 为水层高度, z_b 为底床高度

$$h = z - z_b \tag{4}$$

1.2 泥沙冲淤动力运动方程

泥沙冲淤动力运动方程为

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \cdot \nabla S = k \Delta S + \frac{1}{h} G \tag{5}$$

其中, S 为水中含砂量, 即单位体积的水中的干砂体积质量 (kg/m^3); ∇ 为二维梯度算子; k 为侧向混合系数; G 由水流挟砂能力决定, 即为底床面上泥沙的湍流扬起通量和重力沉降通量之差 (郭冬建等, 1996; Howell et al, 1996; Leeder et al, 1987)。

1.3 河床变形方程

底床高度变化由泥沙沉积率即悬移质河床变形方程 (6) 和推移质河床变形方程 (7) 所决定, 即

$$r \partial z_b / \partial t = \sum_{k=1}^M a \omega A (S^k - S_k^*) \tag{6}$$

$$r \partial z_{0bk} + \partial g_{bxk} / \partial y = 0 \tag{7}$$

综上 2 式, 可写成:

$$\frac{z_b}{\partial t} = \frac{1}{p_1} (S_e + T_r) \tag{8}$$

其中, p_1 为床砂的干密度, 沉积率 S_e 其实即为 $-G$ (暂且不考虑岸崩侵蚀作用), 而 T_r 由推移质通量的散度所决定, 即

$$T_r = - \nabla \cdot v F \tag{9}$$

其中: v_i 为推移质的运动速度, $F = p_1 h_1$, h_1 为泥沙移动层的厚度。据文献 (郭冬建等, 1996; 陈界仁等, 2001; 张春生, 2003), 取半理论半经验公式:

$$\tau = p_0 c_0^{-2} |v| v \tag{10}$$

$$G = - a w s (s - s^*) \tag{11}$$

$$S^* = K \left(\frac{|v|^3}{ghw} \right)^m \tag{12}$$

$$v_i F = r \left(1 - \frac{v_c}{|v|} \right) |v|^n h^p d^q \tag{13}$$

其中, s^* 即所谓水流挟砂能力, w 为泥沙重力沉降速度, d 为泥沙粒径, v_c 为起动流速; $a、k、v_c、m、n、p、q$ 为经验常数。

前述方程是多组偏微分方程, 对于设定的沉积条件, 利用有限元或有限差分方法可获得数值解 (张春生, 2003; 陈界仁等, 2001)。

2 数值模拟条件的设计

扇三角洲平原河流为常见河流, 以流路多变、河道宽浅、河岸不稳定、水动力条件复杂多变为特征, 砂体沉积厚度变化较大, 平面宏观非均质性较强 (李敏等, 2010)。要想通过数值模拟准确预测其沉积砂体的几何特征, 就必须提高计算精度, 缩小计算网格, 以模拟其复杂多变的沉积过程。

2.1 计算网格点的确定

为优化计算进程, 提高计算效率, 设计如图 1 所示的原始河湖区域, 其东西方向 (X 方向) 长 100 km, 南北 (Y 方向) 宽 50 km, 河流原始入口宽 1 km, 以此范围作为计算域。为便于计算, 计算风格采用立方体, 步长 $d_x = d_y = 50 \text{ m}$, 东西 (X 方向) 网格为 2 000 个, 南北 (Y 方向) 网格为 1 000 个, 总网格为 200 万个。

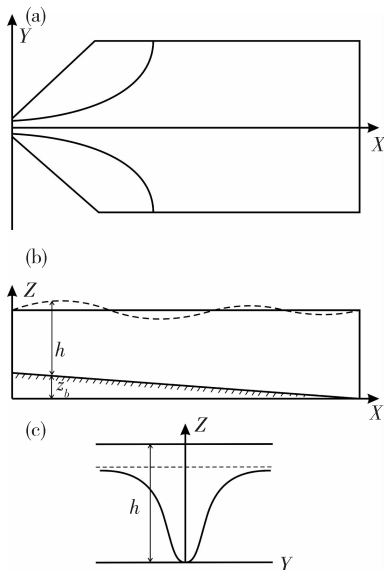


图 1 数值模拟计算的河湖区域分布 (a)、东西方向底床剖面 (b) 和南北方向底床剖面 (c)

2.2 计算底形条件的确定

初始时刻底床沿东西方向有均一的坡度, 设计原始坡降为 4% 的斜坡, 其后的坡度由沉积过程自然调整。

2.3 物源条件的确定

扇三角洲砂体沉积过程的物源条件参考现代沉积砂砾质辫状河的粒度条件确定, 粒度组成设定 6 级, 即小砾 (编号 1)、粗砂 (编号 2)、中砂 (编号 3)、

细砂(编号4)、粉砂(编号5)和泥(编号6),上述粒度的百分组成分别按10%、10%、15%、15%、20%、30%给定,加砂总量控制为:洪水期2 000 t/s,平水期600 t/s,枯水期200 t/s。

2.4 河床高程及水位

计算过程中,设定初始河床高程为75 m,初始水深10 m,在计算过程中随机调整水深,其调整过程分为2个方面,其一为沉积过程的自动调整,其二为构造运动的调整,以模拟基准面的升降过程。

2.5 流量及流速

计算初始时刻洪水期给定起动流速2.1 m/s,平水期0.8 m/s,枯水期0.4 m/s,起动流速的给定标准以能够起动和搬运给定的粒径为标准。洪水期流量给定为8 000 m³/s,平水期2 500 m³/s,枯水期800 m³/s;特大洪水按50年一遇考虑,其流量为20 000 m³/s,以后的流量过程由沉积作用自动调整(张春生,2003;Kubo et al,2003;Van Heijst et al,2001)。

3 计算过程监控

以平水期为初始状态,设定出口处流量 u_h 等于入流量,计算过程中发现:流场和 S 的分布很快变成准常定状态,最初的沉积量极微,沉积物只是在以后较长时段才能显著积累,且影响水流状况。由于这是一个具有多时间尺度的动力学问题,将整个过程分为3段式监控:(1)取常定的 z_b ,计算 v 和 z ,实际上计算到准常定状态;(2)取计算出的 v ,代入式

(5)、式(9)和式(10),计算 S 到准常定状态;(3)取 v 和 S ,代入式(6)和式(9)一式(11)中,计算 z_b 的变化,并计算出所需的时间,然后取此改变了的 z_b ,最后返回重复计算。计算过程中发现,即使初始场处于很不平衡的状况,水流进入准常定状况也只需30~50h的时间, S 进入准常定状况需几小时,而欲使 z_b 等于0.5 m则需上百个小时。上述分解算法完全可以给出足够的精度。

4 数值模拟结果分析讨论

扇三角洲砂体沉积过程的数值模拟共计算了2 500年,每10年记录1次计算结果,计算时间共计720h。数值模拟完成的标准以50年一遇的特大洪水对砂体几何形态的影响平面上不大于10 m、垂向上不大于5 m为准。

在计算过程中,河口砂体开始沉积时分布规律性不强,砂坝易生易灭,一旦出现水流低速区,砂坝便在此处形成,但当流场变化流速增大时,砂坝又极易消失或迁移。直到沉积过程进行到1 980年时,河口砂坝的分布位置及几何形态逐渐稳定。按50年一遇的洪水过程计算至2 000年时,砂体分布特征基本定型。图2是数值模拟最后结果中叠合扇三角洲水下部分断面的砂体几何形态,可见在所设定的流场条件下,扇三角洲前缘以中—细砂沉积为主,粗砂和粉砂相对较少。水下部分计算域内河道砂体的非均质性较强,泥质岩的分布范围不稳定,砂体的横向连通性中等,砂体呈片状展布。

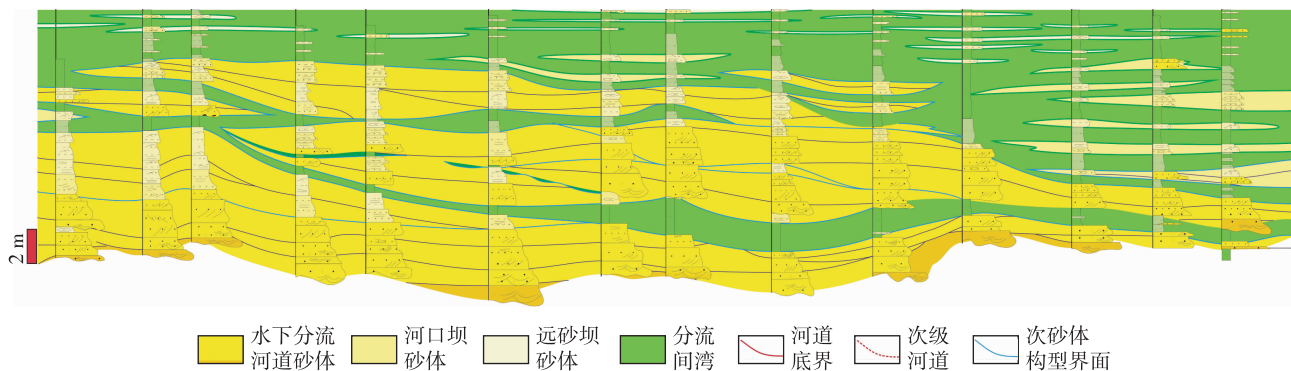


图2 数值模拟至最终叠合扇三角洲前缘砂体分布图

在扇三角洲沉积数值模拟完成后,可识别的主要沉积结构单元包括水下分流河道、河口砂坝、远砂坝、废弃河道及水下溢岸沉积。河口砂坝主要出现在较大规模的辫状水道入湖口,呈底平顶凸的透镜状;水下分流河道形态呈顶平底凸的透镜状;废弃河道砂体形态呈楔状,条带状;溢岸沉积砂体形态呈席状、毯状。

计算过程中分别统计了上述沉积单元砂体几何形态参数(表 1),砂体几何参数之间存在较好的相关关系。其中水下分流河道长度与宽度的相关系数达到 0.798 3(图 3a),宽度与厚度的相关系数达到 0.712 5(图 3b),较好的相关性是砂体稳定沉积的有力证据。

表 1 扇三角洲数值模拟砂体几何特征

砂体几何参数	砂体结构单元			
	水下分流河道	河口砂坝	远砂坝	水下溢岸沉积
最大长度/m	7 685.5	2 351.8	1 983.2	963.6
平均长度/m	4 136.3	1 218.7	1 365.9	503.1
最大宽度/m	1 200.0	1 288.0	1 763.5	536.0
平均宽度/m	897.5	980.0	1 158.0	458.3
最大厚度/m	28.0	18.9	9.4	3.9
平均厚度/m	19.1	13.8	8.7	3.7
最大长宽比	6.40	1.83	1.12	1.80
平均长宽比	4.61	1.24	1.18	1.10
最大宽厚比	63.16	75.76	188.01	137.44
平均宽厚比	59.05	71.01	133.56	123.86

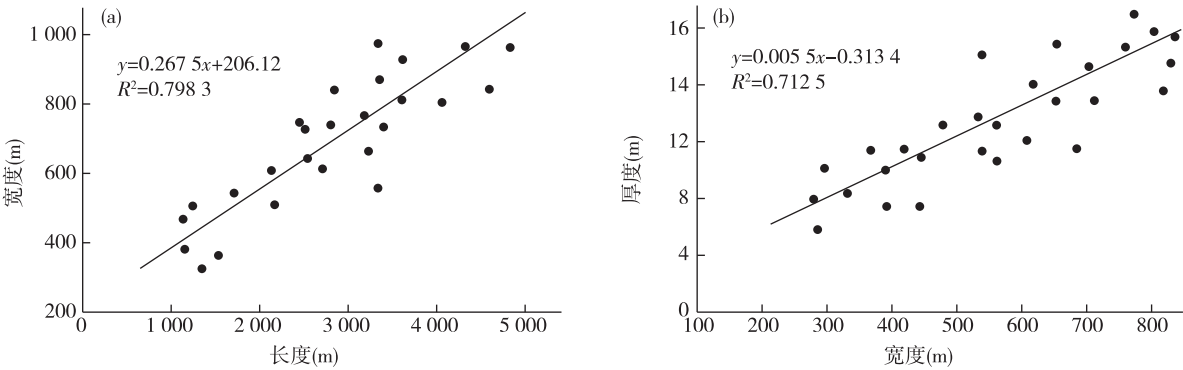


图 3 水下分流河道长度 - 宽度和宽度 - 厚度关系曲线

5 结 论

根据现代扇三角洲沉积特征,利用泥沙冲淤动力模式,设计了扇三角洲沉积过程的模拟条件,探索了扇三角洲形成过程及机理,形成了如下结论和认识。

- (1) 泥沙冲淤动力模式可以较好地揭示扇三角洲发育过程。
- (2) 数值模拟扇三角洲演化过程稳定后,可识别出 5 种主要沉积结构单元砂体,其几何参数之间存在较好的相关关系。
- (3) 湖平面变化决定了扇三角洲分流河道的发育特征。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最多、改道频繁;湖平面下降期分流河道发育稳定。

(4) 上述数值模拟结果表明,利用泥沙冲淤动力模式可以较好地揭示扇三角洲发育过程,进而可以预测扇三角洲砂体的几何形态。但在运用到实际井下对比的情况时,需要有适合于所在地区的经验参数,甚至更复杂的经验公式才能有较好的计算结果。同时考虑到泥沙的粒配(粒径的谱分布)甚至砾石等的影响、入口处边界条件设定等。

参考文献:

陈界仁,陈国祥. 2001. 黄河河口三角洲演变的数学模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,29(1):103-106.

郭冬建,曾庆存,朱江,等. 1996. 河湖沙冲淤和三角洲发育的长期数值模拟研究[J]. 气候与环境研究,(1):30-37.

李敏,朱红涛,郭巧珍,等. 2010. 沉积物理模拟技术进展及发展趋势[J]. 地质科技情报, 29(4):137-142.

钱宁,万兆惠. 2003. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社.

朱筱敏,信荃麟. 1994. 湖泊扇三角洲的重要特性[J]. 石油大

- 学学报:自然科学版, 18(3):6-11.
- 张春生. 2003. 碎屑岩沉积模拟技术[M]. 北京:石油工业出版社.
- 张春生, 刘忠保, 施东, 等. 2003. 砂质扇三角洲沉积过程实验研究[J]. 江汉石油学院学报, 25(2):1-3.
- BEST J L, ASHWORTH P J. 1997. Scour in large braided rivers and the recognition of sequence stratigraphic boundaries [J]. *Nature*, 387(3):275-277.
- HOWELL J A, FLINT S S. 1996. A model for high resolution sequence stratigraphy within extensional basins[C]//High resolution sequence stratigraphy: innovations and applications. London: Geological Society, Special Publications, 104:189-193.
- KUBO Y, NAKAJIMA T. 2003. Laboratory experiments and numerical simulation of sediment-wave formation by turbidity currents[J]. *Marine Geology*, 192(1):105-122.
- LEEDER M R, GAWTHORPE R L. 1987. Sedimentary models for extensional tiltblock/half-graben basins[C]//Continental extensional tectonics. London: Geological Society, Special Publications, 28:139-152.
- MCCLAY K R, DOOLEY T, LEWIS G. 1998. Analog modeling of progradational delta systems[J]. *Geology*, 26(4):771-774.
- VAN HEIJST M W I M, POSTMA G. 2001. Fluvial response to sea-level changes: a quantitative analogue, experimental approach[J]. *Basin Research*, 13:269-292.

Study on sedimentary numerical simulation method of fan delta sand body

CHENG Ge¹, SI Chun-song¹, ZHANG Hui-liang¹, YAN Xiao-fang¹, LIU Yong-fu²

(1. Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China; 2. Exploration and Development Institute of Tarim Oilfield Company, Korla 841000, Xinjiang)

Abstract: Fan delta was one of the important sediment types for continental clastic rocks. The fan delta sand body geometrical shape could be forecasted by using numerical simulation method of dynamic model of sediment transport. After mathematic equations of fan delta sand body deposition process were established, simulation conditions were designed for fan delta sedimentation process based on deposition characteristics of modern delta. The length and width of the calculation field were 20 km and 10 km. The flow rate was designed as the most serious flood in 50 years. When simulation process carried through the year 2 000, fan delta sedimentation process reached stabilization state with the largest sand thickness of 39 m, medium sand was the main sediment. By fan delta lithology simulation study, a set of technology about reservoir structure simulation and prediction of fan delta was established. Four sediment units could be identified: underwater distributary channel with an average length-width ratio of 2.68 and average width-thickness ratio of 79.8; debouch bar with average length-width ratio of 2.02 and average width-thickness ratio of 68.2; distal bar with average length-width ratio of 1.65 and width-thickness ratio of 58.3; underwater overflow sedimentation. The correlativity among the sand body geometry parameters was preferable. The experimental results showed that the dynamic model of sediment transportation could better revealed the fan delta development process by using numerical simulation method, and then could forecast the sand body geometrical shape of the fan-delta.

Keywords: Numerical simulation; Fan delta; Geometrical shape; Sand body forecast