

水沙仿真技术在X区块油气储层 预测中的应用

张桂甲 李从先

(同济大学海洋地质与地球物理系, 上海 200092)

路九华 梁书兰 谷云飞 周发平

(辽河油田勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

水沙仿真技术是运用成熟的流体力学、泥沙运动学方程和经验公式来控制其运动, 并借助计算机技术定量地描述其动力地质过程及结果的一种动态模拟模型。应用水沙仿真技术对X区块九佛堂组上段下部模拟结果表明, 该区物源区位于东南盆地边缘, 沉积呈扇状向西北扩散, 古水流主要为 $290^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 之间, 与沉积物扩散方向基本一致。模拟预测的砂体厚度与钻井揭示的厚度吻合率达80%。

关键词 水沙仿真 技术 动态模拟 储层预测

第一作者简介 张桂甲 男 32岁 博士 海洋地质学

80年代初, 随着计算机技术, 特别是图形技术的高度发展, 人们开始探索建立模拟模型来描述水沙运动, 本文汲取国外最新研究成果, 并对其改进发展, 建立了水沙仿真软件, 对X区块进行储层研究, 取得了良好的效果。

1 原理

1.1 泥沙运动模型

以往描述水流及泥沙运动的模型可分为两大类, 即物理模型(如水槽试验)和数学模型。物理模型直接代表真实的系统, 因地质现象牵涉的范围一般比较广阔, 必须按比例进行缩小, 但许多参数(如流体的密度和粘度)却不能相应地缩小, 这就决定了物理模型有很大的局限性, 乃至不可行性; 数学模型避免了这种比例缩放的局限性, 但出于计算的可行性, 它必须对边界条件、维数及时空的变化度做出极大的限制, 这也阻碍了它的实践性。

水沙仿真技术是一种动态模拟模型, 它通过因果定律, 从完全随机的元素决定系统的转化发展。这种转化遵从马尔可夫定律, 前一状态完全决定了后一状态, 而且后一状态又完全受制于前一状态。它利用成熟的流体力学泥沙运动学的方程和经验公式, 控制流体的侵蚀、搬运和沉积, 从而定量地描述其动力地质过程及其结果。

1.2 基本原理

对牛顿流体, 若假定其密度和粘度为常数, 且不考虑地球自转力, 则流体的质量守恒和动量守恒方程可分别表示为^[1]:

$$\nabla q = 0 \text{ 和 } \partial q / \partial t + (\vec{q} \nabla) \vec{q} = -\nabla p / \rho + \mu / \rho \nabla^2 \vec{q} + \vec{g}$$

式中 $\vec{q}$ 为流体矢量; t 为时间; ρ 为流体密度; ∇ 为拉普拉斯因子; μ 为流体粘度; p 为流体压力; $\vec{g}$ 为重力加速度。

当流体初始条件 $\vec{q}_0 = \vec{q}(x, y, z, t_0)$ 决定后, 流体的转化将完全受到上述两个方程的控制。如果我们考虑了流体的底摩擦和内部摩擦, 则其流体方程为:

$$\partial Q / \partial t + (Q \nabla) Q = -g \nabla H + C_2 / \rho \nabla^2 Q - C_1 Q |Q| / h$$

式中 Q 为流体速度; t 为时间; ρ 为流体密度; C_1 为底部摩擦系数; H 为水面高度; h 为流体深度; g 为重力加速度; C_2 为内摩擦系数。

写成拉格朗日形式, 则成为: $dQ/dt = -g \nabla H + C_2 / \rho \nabla^2 Q - C_1 Q |Q| / h$, 为方便计算机处理, 可写成差分形式: $dQ/dt \cong \Delta Q / \Delta T = (Q_{t+1} - Q_t) / \Delta T$ 。

令 $C = -g \nabla H + C_2 / \rho \nabla^2 Q - C_1 Q |Q| / h$, 则流体元素的流速为: $Q_{k,t+1} = Q_{k,t} + C \Delta T$ (式中 k 表示第 k 个流体元素)。

每个流体元素的位置, 则可表示为: $X_{k,t+1} = X_{k,t} + (Q_{k,t+1} + Q_{k,t}) / 2 \Delta T$ 。

这些流体方程, 精确地描述了流体元素的运动, 但并没有考虑到它所引起的侵蚀、搬运和沉积作用。因此, 我们要描述沉积物的状态, 还必须引进一些描述泥沙运动的方程。理论上某一时间增量内剥蚀掉的沉积物数量等于新加进流体的沉积物的数量, 而沉积的沉积物数量等于从流体中减掉的沉积物的数量^[1], 即:

$$(H - Z) dl / dt = -\partial Z / \partial t$$

式中 H 为水面高度; Z 为地形表面高度; l 为单位体积内沉积物数量; t 为时间。

但究竟是沉积还是剥蚀, 还须通过进一步的计算确定:

如果, $\Lambda - l / f_1 < 0$ 或 $\tau_0 \geq f_3$, 则沉积 $(H - Z) dl / dt = (\Lambda - \Lambda_0) \geq f_2$

$\Lambda - l / f_1 \geq 0$ 及 $\tau_0 < f_3$ 则侵蚀 $(H - Z) dl / dt = 0$

式中 Λ 为流体搬运能力; Λ_0 为沉积物有效浓度; τ_0 为河床剪切力; f_1 为沉积物搬运率; f_2 为侵蚀-沉积系数; f_3 为沉积物运动的临界剪切力。

建立了如上的数学模型, 并使之计算机程序化, 再给定必要的边界参数和初始条件, 则可以模拟在给定的地形系统中流体的运动, 沉积物的侵蚀、搬运、堆积, 从而定量地描述沙体的分布。

1.3 处理流程

水沙仿真技术程序由原始数据模块、运算模块、数据转换模块及输出模块构成。其中原始数据主要包括古地形、古水流、沉积物粒度参数, 还有一些相对稳定的边界参数如糙度系数、粘度系数等。输出模块包括数据文件输出和图形输出(图1)。

2 地质概况

2.1 构造背景

X 区块位于某拗陷盆地的边缘。在石炭-二叠纪时广泛发育裂谷构造, 晚侏罗纪处在裂谷

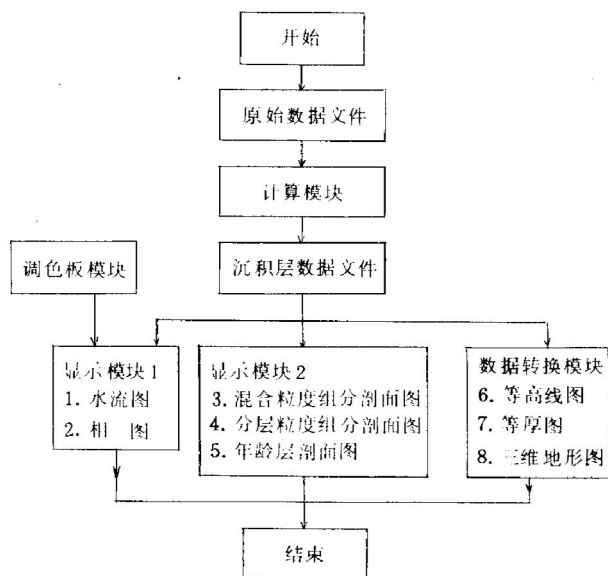


图1 水沙仿真程序流程图

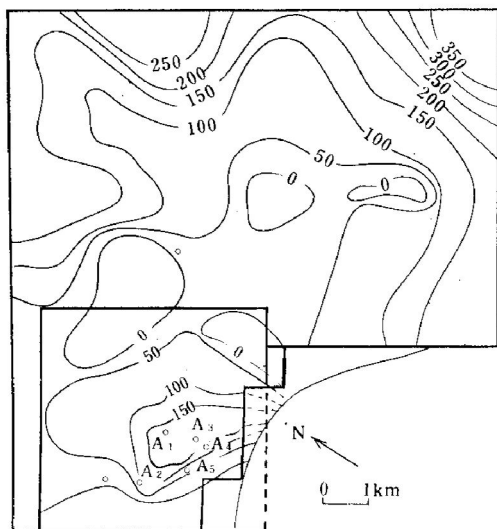


图2 X区块古地形及钻孔位置图

发育期的张裂-萎缩阶段,裂谷构造的演化使其在侏罗纪九佛堂期出现强烈沉陷,碎屑物质进入盆地,致使南部陡坡上出现一系列扇三角洲和深水扇沉积,成为后来油气聚集的良好储层。本文的模拟层即为九佛堂组上段下部的的主要砂层,属扇三角洲复合体系(图2)。

2.2 岩性特征

X区块侏罗纪系九佛堂组上段下部为砾岩、砂砾岩、砂岩和粉砂岩占优势,根据 A_1 、 A_2 、 A_3 井岩芯观察和部分分析资料,主要岩性特征如下:(1)砂砾岩,砾石磨圆差,砾径悬殊,不显层理;(2)灰黑色、灰绿色、灰色中、细砂岩,夹泥砾及泥质透镜体,发育交错、板状层理,可见泥质和碳质纹层,出现微断层和揉皱现象,为该区段主要的岩体,占80%以上;(3)粉砂岩为浅灰色、灰白色、灰黑色,夹黑色泥质和碳质纹层,显水平和平行层理,出现粒

序层,偶见揉皱现象;(4)泥质层包括泥碳和油页岩,多为黑色,富含碳屑、植物残体,夹粉、细砂纹层,显示清楚的水平层理。

2.3 沉积环境

从岩芯观察和岩相分析可以看出,牵引流形成的各种沉积构造占优势,虽可见滑塌产生的揉皱现象和粒序层,但具有局部性质,且粒序层也可在其它环境中产生,浊流并不是唯一的成因。由以上特征推断,X区块九佛堂组上段下部的粗粒层是近源快速沉积,搬运和沉积主要为牵引流,因此可以把该层解释为扇三角洲复合体系,并且在钻孔所揭示的范围内可以看到扇三角洲上部、中部和下部沉积的变化。扇三角洲复合体下部为靠近物源的扇三角洲上部组合,向上逐渐过渡为远离物源的扇三角洲复合体边缘部分的沉积相组合,反映出水进过程。

3 参数的选取

分析地质概况和沉积特征是使用水沙仿真技术的基础,是合理选择模拟参数的依据。为了应用水沙仿真技术预测X区块砂岩体的分布,须要确定边界条件和若干参数。

3.1 古地貌及物源区

三维地震数据经过特殊处理分别得出X区块侏罗系九佛堂组上段顶底构造层的等埋深图,由各点顶、底板等埋深值的差求得古地形图。该方法的实质是,假定九佛堂组上段油页岩的顶板,其沉积时高程是相等的,由此求得九佛堂组上段的底板的高差即为古地形起伏,这就是九佛堂组上段开始沉积的古地貌图。由图2可以看出,物源区位于X区块东南的盆地边缘,沉积物呈扇状向西北扩散。

虽然由地震资料确定了X区块古地貌的基本轮廓,但是所得到古地形的绝对值不一定符合实际情况,原因可能是多方面的。第一,油页岩的沉积顶面不一定在同一高程上;第二,在油页岩沉积长达数千万年的过程中,构造仍然活动,边沉积边沉降;第三,油页岩和砂岩在成岩过程中的压缩系数不同;第四,更重要的是,图2所得到的如此巨大的坡度在现代湖泊中难以找到,且通常是剥蚀侵蚀区。因此图2虽然给出了古地貌的基本轮廓,并可由此推断物源区和沉积物的扩散方向,但确定古地形还须考虑现代湖泊的情况和地形变化范围,进行一定的修正。

3.2 古流向

在 A_1 、 A_2 、 A_3 井侏罗系九佛堂组上段下部不同深度取砂岩样品,进行沉积磁组构的综合

分析,并由钻井的地理位置推算,古水流的方向变化在 $290^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 之间,与地震资料分析的沉积物扩散方向基本一致。

3.3 模拟区块选择及地形高程设定

由综合地质背景资料和古地磁资料可以看出,X区块主要的物源应位于 A_2, A_3 井东南部位,其古水流的主要方向为 $290^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 。据此我们选定了具体的模拟区块(图2),并将其分为 30×30 的网格,网格间距为175 m。

由于从三维地震资料经过特殊处理得出初步原始地形数据,存在诸多前已述及的问题,我们参照现有冲积扇和扇三角洲的坡度变化范围,对其进行了一些技术处理,主要是成比例地适当地降低了它的坡度,从而适应大多数冲积扇的情形。至于其标高,因计算机模拟只涉及它们的相对高程,因此我们便选定某一高程为零点,而将其它的高程作相应的调整,从而得出原始地形数据。

3.4 粒度参数

因油气储层主要为砂岩,选定粗砂砾、中砂、细砂、粉砂粒级作为仿真技术模拟的粒度参数。对仅有的 A_1, A_2 和 A_3 井进行了岩芯观察和测量,估算各种岩类的比例,再根据大量岩石薄片统计出的不同岩石中的各种粒级的相对含量,从而计算出物源区各粒级的含量。X区块含量分别为10%,15%,55%和20%。

4 模拟及结果

4.1 古水流

古水流方向和流速大小的确定,对恢复古地理、确定沉积环境及预测砂体分布有着重要的意义。水沙仿真技术可以提供两种形式的流速图,即瞬时流速图(图3)和模拟时间内的平均流速图(图4)。瞬时流速图中的线段,为不同质点的迹线;平均流速图中箭头方向即为古水流方向,而箭头的长短则代表了古水流的流速。

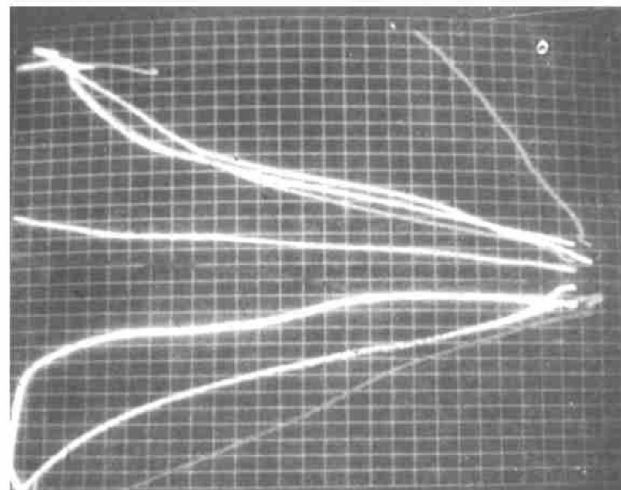


图3 X区块流场瞬时流速图

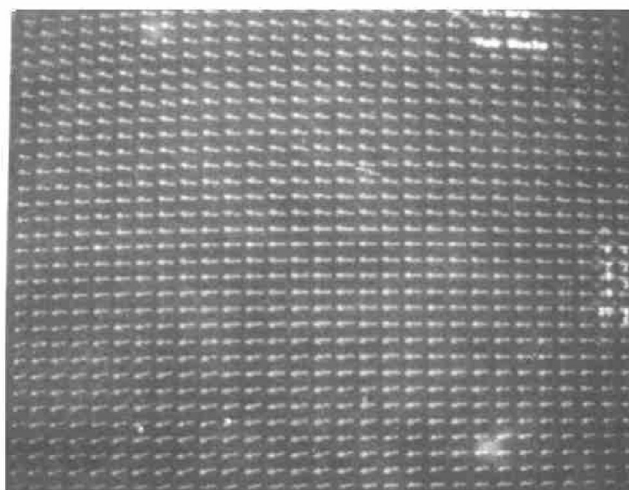


图4 X区块模拟时间内的平均流速图

4.2 沉积物分布图

为了直观地描述沉积物的粒度组成,本程序使用彩色图形输出,它比数字输出要易读得多,而且在同一张图上所包含的信息量也大得多。解读这种沉积物分布图,必须通过事先设计好的调色板。我们先设定100%红色代表粗砂及砾石沉积物,100%绿色代表中砂沉积物,

100%蓝色代表细砂沉积物,100%灰色代表粉砂沉积物。计算机根据它们的相对含量选择对应的颜色,从而形成了调色板。调色板颜色的形成完全遵从颜色组合原理,如50%红色与50%绿色混合呈黄色,红、绿、蓝等比例的混合则呈白色等等。从模拟得出的X区块九佛堂组上段下部的沉积物粒度组成相图中可以看出:在盆地的边缘源区粗组分占优势,颜色为红褐色,而向盆地内部总的趋势是沉积物颗粒变细,从红褐色、白色等渐变为蓝色、灰色等,但不是均匀的衰减,在某些局部区域,相对粗粒的组分较为富集,而且粗粒组分呈指状形态分布。这种分布受制于原始地形及其后期的水流变化和沉积作用。

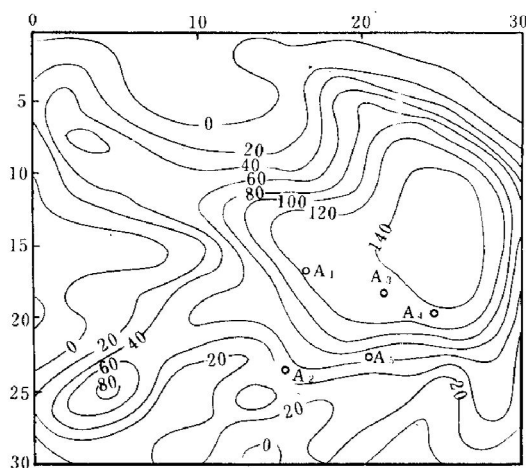


图5 主要目的层砂体分布等厚图

4.3 沉积物等厚图

为了直观、定量地描述沉积层的分布特征,水沙仿真程序将区块中各点的沉积物的厚度以等厚图的形式输出。图5表示了砂体的厚度分布,可以为油气勘探中储集层的寻找提供极有价值的线索。另外,为了比较各种粒级沉积物的分布特点,程序还可就不同粒级分别给出它们的等厚图。

5 结束语

水沙仿真技术作为一种模拟模型,同先前的物理模型和数学模型相比前进了一大步。它克服了物理模型比例缩放的难题,也解决了数学模型对边界条件过度严格的限制。对适用于马尔可夫链的水沙

运动,从某一完全随机的状态出发,随着时间的发展,水沙仿真软件模拟出系统运动的结果。这种结果具有严格的、精确的可重复性,尽管原始条件的微小变化可能会导致系统的极大差异。这次模拟项目完成后,在本区又有两口钻孔(A_4 , A_5)完钻,经检查钻孔揭示的砂岩体的厚度与模拟预测的砂体的厚度吻合率高达80%。

水沙仿真技术涉及了大量的地质数据,然而地质现象往往要比人们所能认识、甚至所能想象的情形要复杂得多。从计算机模拟的效果来说,原始数据越详细、越精确,模拟所得的结果越可靠;但从另一方面,太多、太全的原始数据的确定需要大量而细致的地质工作,有时甚至不可能满足,从而使模拟失去意义,甚至无法进行。因此水沙仿真软件去粗取精,主要依赖原始地形、物源区位置、物源粒度组成及水流方向和速度等参数,而对沉积物本身的后期及同期变化(如压实作用、孔隙度变化等)未加考虑,对它们的定量描述也许须要建立另一软件。

致谢:在本项目的研究过程中,阎火高工程师为有关人员介绍了该区的地质背景,并陪同研究组人员冒着严寒,仔细地研究了仅有的几口钻孔;丛友滋教授测定了大量古地磁样品,确定了古水流方向;另外,陈庆强、赵娟、冯殿生、吴梅英等同志参与了岩石薄片磨制、鉴定、图表清绘等工作,作者向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Tetzlaff D M, Harbaugh J W. Simulating clastic sedimentation. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989. 15~60

APPLICATION OF FLUID-SEDIMENT SIMULATING TECHNIQUE IN OIL-GAS RESERVOIR PREDICTION OF X REGION

Zhang Guijia Li Congxian

(Department of Geophysics, Tongji University, Shanghai)

Lu Jiuhua Liang Shulan Gu Yunfei Zhou Faping

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Liaohe Oilfields, Panjin, Liaoning)

Abstract

Fluid-sediment simulation technique is a kind of dynamic simulation model in which hydrodynamic and kinetic formulars and equations are used to control and describe the transportation and deposition processes of sediments with the help of computer. This technique is used in the simulation of the lower part of the upper member of the Jiufutang Formation in X region. The results suggest that the provenance of the sediments is in the margin of the basin southeast to the region; the sediments shaped as a fan spreading northwestward. The paleocurrents there are between $29^{\circ}\sim 34^{\circ}$, which basically coincide with the spreading direction of the sediments, 80% of the predicted thicknesses of the sand bodied coincide with that proved by drilling.