

文章编号: 1000-0887(2002) 08-0827-10

# 多层油资源运移聚集的数值模拟 和实际应用\*

袁益让<sup>1</sup>, 赵卫东<sup>1</sup>, 程爱杰<sup>1</sup>, 王文洽<sup>1</sup>, 韩玉笈<sup>2</sup>

(1 山东大学 数学研究所, 济南 250100; 2 胜利油田 计算中心, 山东 东营 257022)

(戴世强推荐)

**摘要:** 研究了三维问题的石油地质和渗流力学特征, 提出了数学模型, 构造了新的算子分裂隐式迭代格式, 并成功地对胜利油田东营凹陷(厚层)和惠民凹陷(多层)带断层和通道的实际问题进行了大规的数值模拟计算. 计算结果在油藏位置等方面和实际情况相吻合, 完整地解决了这一石油地质和渗流力学的国际著名问题.

**关键词:** 多层; 运移和聚集; 东营凹陷; 惠民凹陷; 数值模拟

**中图分类号:** O241.82      **文献标识码:** A

## 引 言

沉积盆地中油的生成、排烃、运移、聚集和最后形成油藏是研究油气勘探中的核心问题之一. 油是如何运移并聚集到现今的圈闭中的, 油在盆地中是如何分布的, 这些都是油二次运移(图 1)和聚集过程的数值模拟所要研究的重要内容, 它是现代石油地质和计算渗流力学的著名问题<sup>[1~5]</sup>.

盆地发育的渗流力学数值模拟是从石油地质和渗流力学的机理出发, 在时空概念下由计算机定量地模拟盆地的形成、演化、烃类的生成、运移和聚集的发展过程. 本文研究盆地发育的运移聚集数值模拟, 其功能是重建油气盆地的运移聚集演化史, 又称油二次运移聚集史, 它是盆地模拟最重要最困难的部分, 它对油气资源评价、确定油藏位置和寻找新的油田具有极其重要的价值.

油资源运移聚集史的数学模型, 具有很强的双曲特性, 且需长达数百万年乃至数千万年

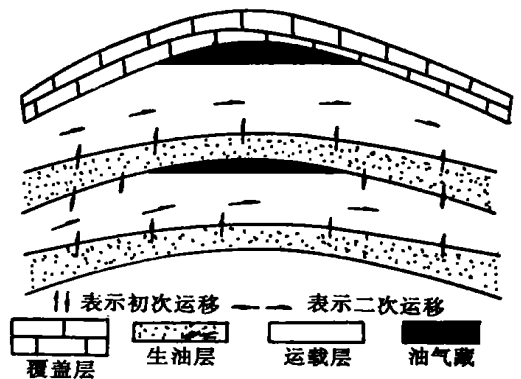


图 1 油气初次运移和二次运移示意图

\* 收稿日期: 2000\_06\_05; 修订日期: 2002\_03\_22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999032803); 国家自然科学基金资助项目(19871051, 19972039); 国家教委博士点基金资助项目(96042202)

作者简介: 袁益让(1935—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 科学与工程计算实验室主任(E-mail: YRYUAN@Math.sdu.edu.cn).

稳定、可靠、高精度的模拟, 其数值方法在数学上和渗流力学上都是十分困难的, 是当前国际石油地质科学和计算渗流力学的著名问题<sup>[3-7]</sup>。到目前为止国内外仅对二维剖面问题有一些初步结果<sup>[3-5]</sup>。本文从生产实际出发, 研究三维空间问题, 深入分析了问题的上述特性, 提出了数学模型, 构造了新的修正算子分裂隐式迭代格式。我们对 M. K. Hubbert, H. Dembicki, L. Catalan 等学者做过的油水二次运移聚集的著名水动力学实验<sup>[8-10]</sup>进行了数值模拟试验, 计算结果与实验结果吻合。在此基础上我们成功地对胜利油田东营凹陷(厚层)和惠民凹陷(多层)带断层和通道的实际问题进行大规模的数值模拟实际计算, 计算结果在油田位置等方面基本和实际情况相吻合<sup>①②</sup>, 并进一步应用到济阳凹陷和滩海凹陷深层资源评估<sup>③</sup>。成功地解决了这一国际著名的石油地质、计算渗流力学的困难问题。它对油资源评估, 油藏位置的确定, 寻找新的油田, 均具有重要的理论和实用价值。本文进一步对计算格式进行严谨的数值分析, 得到最佳阶误差估计, 使应用软件建立在坚实的数学基础上。

### 1 数学模型和计算格式

原油和地下水在地层中运移主要是一种渗流过程, 油、水势场控制着原油和地下水渗流动力的方向和力的大小。由 Darcy 定律、连续性方程、状态方程和流动方程可以推出问题的数学模型是下述一组非线性偏微分方程的初边值问题:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} \cdot \left[ K \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \phi_o \right] + B_o q = - \mathcal{Q}' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \\ X = (x, y, z)^T \in \Omega, t \in J = (0, T], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{y} \cdot \left[ K \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \phi_w \right] + B_w q = \mathcal{Q}' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega, t \in J, \quad (2)$$

此处  $\phi_o$ 、 $\phi_w$  是油相、水相流动位势,  $K$  为绝对渗透率,  $k_{ro}$ 、 $k_{rw}$  分别为油相、水相相对渗透率,  $\Phi$  为孔隙度,  $s' = ds/dp_c$ , 此处  $s$  为水饱和度,  $p_c(s)$  为毛细管压力函数,  $B_o = (k_{ro}/\mu_o)(k_{ro}/\mu_o + k_{rw}/\mu_w)^{-1}$ ,  $B_w = (k_{rw}/\mu_w)(k_{ro}/\mu_o + k_{rw}/\mu_w)^{-1}$  为油、水流动系数,  $q$  为源汇项。还需要给出初始条件和边界条件。

设  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $t$  方向的步长分别为  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\Delta t$ , 在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向作长方体网格, 记  $M_{ijk} = (i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z)^T$ ,  $t^m = m \Delta t$ , 问题是  $t = t^m$  时刻的  $\phi_w^m$ 、 $\phi_o^m$  已知, 需要寻求下时刻的  $\phi_w^{m+1}$ 、 $\phi_o^{m+1}$ 。记

$$\Delta(A \Delta \phi) = \Delta_x(A_x \Delta_x \phi) + \Delta_y(A_y \Delta_y \phi) + \Delta_z(A_z \Delta_z \phi), \quad (3)$$

式中  $\Delta_x(A_x \Delta_x \phi^{m+1}) = A_{x, i+1/2, jk}(\phi_{i+1, jk} - \phi_{ijk})^{m+1} - A_{x, i-1/2, jk}(\phi_{jk} - \phi_{i-1, jk})^{m+1}$ , 此处  $A_{x, i+1/2, jk} = \left\{ K(\Delta y \Delta z / \Delta x)(k_{rw} / \mu_w) \right\}_{i+1/2, jk}$ , 系数按偏上游原则取值。若能求出  $t^{m+1}$  时刻的  $\phi_w^{m+1}$ 、 $\phi_o^{m+1}$ , 则饱和度  $s^{m+1}$  按下述公式计算:

$$s^{m+1} = s^m + s'(\phi_o^{m+1} - \phi_o^m - \phi_w^{m+1} + \phi_w^m). \quad (4)$$

#### 1.1 三维问题的修正算子分裂隐式迭代格式

- ① 胜利石油管理局计算中心、山东大学数学研究所: 油资源运移聚集软件系统研究, 1998, 3
- ② 山东大学数学研究所: 多层油资源运移聚集定量数值模拟技术研究, 1999, 7
- ③ 胜利油田管理局地质科学研究所、胜利石油管理局计算中心: 济阳拗陷深层油气资源评价研究, 1999, 4

在  $z$  方向

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z \phi_w^*) + \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z \phi_w^{(l)}) + \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{(l)}) + \Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^{(l)}) - \\ & G\phi_w^* + G\phi_o^* = \\ & H_{l+1} (\sum A_w) (\phi_w^* - \phi_w^{(l)}) - B_w^m q^{m+1} - G\phi_w^m + G\phi_o^m, \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zo} \Delta_z \phi_o^*) + \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zo} \Delta_z \phi_o^{(l)}) + \Delta_y (A_{yo} \Delta_y \phi_o^{(l)}) + \Delta_x (A_{xo} \Delta_x \phi_o^{(l)}) + \\ & G\phi_w^* - G\phi_o^* = \\ & H_{l+1} (\sum A_o) (\phi_o^* - \phi_o^{(l)}) - B_o^m q^{m+1} + G\phi_w^m - G\phi_o^m; \end{aligned} \quad (5b)$$

在  $y$  方向

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{**}) - \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{(l)}) - G\phi_w^{**} + G\phi_o^{**} = \\ & H_{l+1} (\sum A_w) (\phi_w^{**} - \phi_w^*) - G\phi_w^* + G\phi_o^*, \end{aligned} \quad (5c)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yo} \Delta_y \phi_o^{**}) - \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yo} \Delta_y \phi_o^{(l)}) + G\phi_w^{**} - G\phi_o^{**} = \\ & H_{l+1} (\sum A_o) (\phi_o^{**} - \phi_o^*) + G\phi_w^* - G\phi_o^*; \end{aligned} \quad (5d)$$

在  $x$  方向

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^{(l+1)}) - \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^{(l)}) - G\phi_w^{(l+1)} + G\phi_o^{(l+1)} = \\ & H_{l+1} (\sum A_w) (\phi_w^{(l+1)} - \phi_w^{**}) - G\phi_w^{**} + G\phi_o^{**}, \end{aligned} \quad (5e)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xo} \Delta_x \phi_o^{(l+1)}) - \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xo} \Delta_x \phi_o^{(l)}) + G\phi_w^{(l+1)} - G\phi_o^{(l+1)} = \\ & H_{l+1} (\sum A_o) (\phi_o^{(l+1)} - \phi_w^{**}) + G\phi_w^{**} - G\phi_o^{**}. \end{aligned} \quad (5f)$$

对三维问题, 为达到数值解高精度的目的, 必须引入残量的计算:

$$P_z = \phi_w^* - \phi_w^{(l)}, P_y = \phi_w^{**} - \phi_w^*, P_x = \phi_w^{(l+1)} - \phi_w^{**}, \quad (6a)$$

$$R_z = \phi_o^* - \phi_o^{(l)}, R_y = \phi_o^{**} - \phi_o^*, R_x = \phi_o^{(l+1)} - \phi_o^{**}. \quad (6b)$$

最后提出新的关于残量的二阶算子分裂隐式迭代格式:

在  $z$  方向

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z P_z) - (G + H_{l+1} \sum A_w) P_z + GR_z = \\ & - [\Delta (A_w \Delta \phi_w^{(l)}) + B_w^m q^{m+1} - G(\phi_w^{(l)} - \phi_w^m) + G(\phi_o^{(l)} - \phi_o^m)], \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zo} \Delta_z R_z) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_z + GP_z = \\ & - [\Delta (A_o \Delta \phi_o^{(l)}) + B_o^m q^{m+1} + G(\phi_w^{(l)} - \phi_w^m) - G(\phi_o^{(l)} - \phi_o^m)]; \end{aligned} \quad (7b)$$

在  $y$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta_y (A_{yw} \Delta_y P_y) - (G + H_{l+1} \sum A_w) P_y + GR_y = - \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yw} \Delta_y P_z), \quad (7c)$$

$$\frac{1}{2} \Delta_y (A_{yo} \Delta_y R_y) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_y + GP_y = - \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yo} \Delta_y R_z); \quad (7d)$$

在  $x$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta_x (A_{xw} \Delta_x P_x) - (G + H_{l+1} \sum A_w) P_x + GR_x =$$

$$- \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xw} \Delta_x (P_y + P_z)), \tag{7e}$$

$$\frac{1}{2} \Delta_x (A_{x0} \Delta_x P_x) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_x + GP_x = - \frac{1}{2} \Delta_x (A_{x0} \Delta_x (R_y + R_z)) \cdot \tag{7f}$$

当迭代误差达到我们精度要求时, 取此时的迭代值  $\phi_o^{(l+1)}$ 、 $\phi_w^{(l+1)}$  为  $\phi_o^{m+1}$ 、 $\phi_w^{m+1}$ ; 再由(4) 求出  $s^{m+1}$  来。

在实际数值计算时, 必须对地质参数  $k_{rw}$ 、 $k_{ro}$ 、 $p_c(s)$  进行数据处理和滤波, 去伪存真, 才能得到正确的结果。

### 1.2 准三维问题的数学模型和算法

当运载层的实际厚度比水平方向模拟区域尺寸小得多, 我们提出按下述方法将其化为二维问题求解, 故此问题亦称准三维问题。将方程(1)、(2)对  $z$  积分平均得:

$$\dot{y} \cdot \left[ K \frac{\Delta z k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \phi_o \right] + B_o q \Delta z = - \Phi'_3 \Delta z \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \tag{8}$$

$$\dot{y} \cdot \left[ K \Delta z \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \phi_w \right] + B_w q \Delta z = \Phi'_3 \Delta z \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \tag{9}$$

其中  $\Delta z$  是运载层的厚度它是  $(x, y)$  的函数。

$$K = \frac{1}{\Delta z} \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} K(x, y, z) dz, \quad \Phi = \frac{1}{\Delta z} \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} \Phi(x, y, z) dz,$$

$$q = \frac{1}{\Delta z} \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} q(x, y, z) dz,$$

此处  $h_1(x, y)$ 、 $h_2(x, y)$  分别为运载层在  $(x, y)$  处上边界与下边界的深度。

对问题(1)、(2)关于准三维问题(8)、(9)提出一种新的修正算子分裂隐式迭代格式:

在  $x$  方向

$$\Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^*) + \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{(l)}) - G \phi_w^* + G \phi_o^* = H_{l+1} ( \sum A_w ) ( \phi_w^* - \phi_w^{(l)} ) - B_w^m q^{m+1} - G \phi_w^m + G \phi_o^m, \tag{10a}$$

$$\Delta_x (A_{x0} \Delta_x \phi_o^*) + \Delta_y (A_{y0} \Delta_y \phi_o^{(l)}) + G \phi_w^* - G \phi_o^* = H_{l+1} ( \sum A_o ) ( \phi_o^* - \phi_o^{(l)} ) - B_o^m q^{m+1} + G \phi_w^m - G \phi_o^m; \tag{10b}$$

在  $y$  方向

$$\Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^*) + \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{(l+1)}) - G \phi_w^{(l+1)} + G \phi_o^{(l+1)} = H_{l+1} ( \sum A_w ) ( \phi_w^{(l+1)} - \phi_w^* ) - B_w^m q^{m+1} - G \phi_w^m + G \phi_o^m, \tag{11a}$$

$$\Delta_x (A_{x0} \Delta_x \phi_o^*) + \Delta_y (A_{y0} \Delta_y \phi_o^{(l+1)}) + G \phi_w^{(l+1)} - G \phi_o^{(l+1)} = H_{l+1} ( \sum A_o ) ( \phi_o^{(l+1)} - \phi_o^* ) - B_o^m q^{m+1} + G \phi_w^m - G \phi_o^m; \tag{11b}$$

此处  $G = - V_p \Phi'_3 / \Delta t$ ,  $V_p = \Delta x \Delta y$ ,  $H_{l+1}$  为迭代因子,

$$\sum A_w = A_{w, i+1/2j} + A_{w, i-1/2j} + \dots + A_{w, i, j-1/2}, \quad \sum A_o = \dots$$

### 1.3 多层问题的数学模型和算法

对于多层(带断层、通道(图2))运移聚集的数学模型:

$$\dot{y} \cdot \left[ K_1 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \phi_o \right] + B_o q - \left[ K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} \right]_{z=H_1} = - \Phi'_3 \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right] \tag{12a}$$

$X \in \Omega_1, t \in J,$

$$\dot{y} \cdot \left[ K_1 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \phi_w \right] + B_w q - \left[ K \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right]_{z=H_1} = \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_1, t \in J; \tag{12b}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} \right] = - \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_3, t \in J, \tag{13a}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right] = \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_3, t \in J; \tag{13b}$$

$$\dot{y} \cdot \left[ K_2 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \phi_o \right] + B_o q + \left[ K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} \right]_{z=H_2} = - \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_2, t \in J, \tag{14a}$$

$$\dot{y} \cdot \left[ K_2 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \phi_w \right] + B_w q + \left[ K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right]_{z=H_2} = \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_2, t \in J; \tag{14b}$$

按渗流力学的达西定律,

$$- K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} = q_{h,o}, \quad - K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = q_{h,w}.$$

在作数值计算时,可分别应用准三维问题的数值格式·

对第一层的格式:

$$\dot{y} \cdot \left[ K_1 \Delta z_1 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \phi_o \right] + B_o q \Delta z_1 + q_{h,o}^1 = - \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_1, t \in J, \tag{15a}$$

$$\dot{y} \cdot \left[ K_1 \Delta z_1 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \phi_w \right] + B_w q \Delta z_1 + q_{h,w}^1 = \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_1, t \in J, \tag{15b}$$

此处

$$\bar{K}_1 = \frac{1}{\Delta z_1} \int_{h_1^1(x,y)}^{h_2^1(x,y)} K_1(x,y,z) dz, \quad \Phi_1 = \frac{1}{\Delta z_1} \int_{h_1^1(x,y)}^{h_2^1(x,y)} \Phi(x,y,z) dz,$$

$$q = \frac{1}{\Delta z_1} \int_{h_1^1(x,y)}^{h_2^1(x,y)} q(x,y,z) dz.$$

对第二层的格式:

$$\dot{y} \cdot \left[ K_2 \Delta z_1 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \phi_o \right] + B_o q \Delta z_2 - q_{h,o}^2 = - \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_2, t \in J, \tag{16a}$$

$$\dot{y} \cdot \left[ K_2 \Delta z_2 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \phi_w \right] + B_w q \Delta z_2 - q_{h,w}^2 = \Phi_3' \left( \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right) \quad X \in \Omega_2, t \in J, \tag{16b}$$

此处  $K_2 = \frac{1}{\Delta z_2} \int_{h_1^2(x,y)}^{h_2^2(x,y)} K_2(x,y,z) dz, \dots$  在方程组(15)、(16)中可以认为  $q_{h,o}^1 \approx q_{h,o}^2, q_{h,w}^1 \approx q_{h,w}^2$ , 用达西定理将此二数值格式组合起来·

## 2 东营凹陷沙四上大规模数值模拟和分析

我们对胜利油田东营凹陷的实际问题进行数值模拟试验· 东营凹陷是济阳坳陷的主要

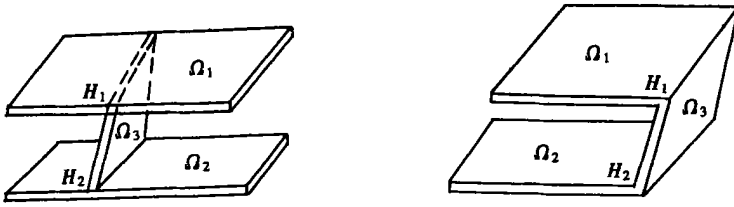


图2 断层与通道主要是垂直方向示意图

含油区，也是东部陆相断陷含油气盆地的典型代表，目前勘探程度也较高。虽然已进行了两轮油气资源定量模拟和评价，然而目前对凹陷内油气二次运移的系统性研究，尤其对运移的动力学条件及其定量模拟工作很少，因此选择东营凹陷作为研究目标具有代表性实际意义<sup>[11, 12]</sup>。

选择整个东营凹陷沙四上进行运移聚集三维数值模拟。其特点是：

- i) 模拟区域面积大，为  $142 \times 84 \text{ km}^2$ 。
- ii) 沙四上的生烃、排烃强度大。
- iii) 运移聚集时间长达 3 000 多万 a。

因此选择东营凹陷沙四上进行二次运移聚集三维数值模拟具有特殊重要的意义，一方面可以考验该软件对大规模区域数值模拟的适应性，另一方面可以考察该系统在长达数千万年模拟过程中的稳定性，模拟最终结果将为石油地质专家对这一区块含油潜力及分布情况进行合理评价提供重要依据。

为了进行大规模计算，直接应用方程(1)、(2)和格式(7)由于工作量太大，在一般工作站或计算机上是无法进行了，我们采用区域变换技术，将原来的一般区域  $\Omega$ (图3)变为标准的长方体区域  $\Omega'$ (图4)，在区域  $\Omega'$ 上应用格式(7)计算。

$$x = \xi, y = \eta, z = h_1(x, y) + \frac{[h_2(x, y) - h_1(x, y)]}{z_2 - z_1} (\zeta - z_1),$$

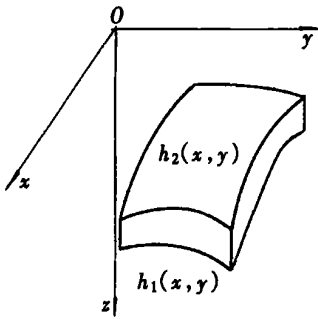


图3 沙四上域  $\Omega$  示意图

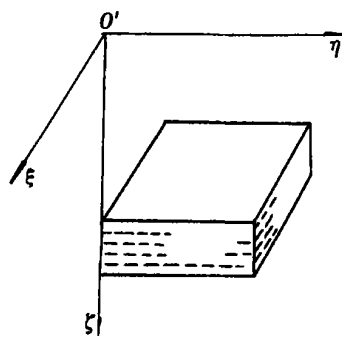


图4 沙四上域  $\Omega'$  示意图

此处  $h_1(x, y)$ ,  $h_2(x, y)$  为运载层上、下底埋深,  $z_2 = \max h_2(x, y)$ ,  $z_1 = \min h_1(x, y)$ 。

模拟区域: 大地坐标(m) (20 552 246.00, 20 694 246.00)和(4 090 110.00, 4 174 110.00), 水平网格数为  $71 \times 42$ , 将沙四上沿地层走向分成 5 层, 自上而下排序, 网格步长  $\Delta x = \Delta y = 2\ 000 \text{ m}$ ,  $\Delta z = 100 \text{ m}$ 。为了使计算适应各地质年代排烃排液量的差异并保持稳定, 我们采用时间变步长技术, 在这里选取的时间步长 200~ 1 000 a 之间。这里给出渗流力学数值模拟  $3.25 \times 10^7 \text{ a}$  的沙四上砂层各层面上含水饱和度等值线图(图 5~ 7)和储油强度等值线图(图



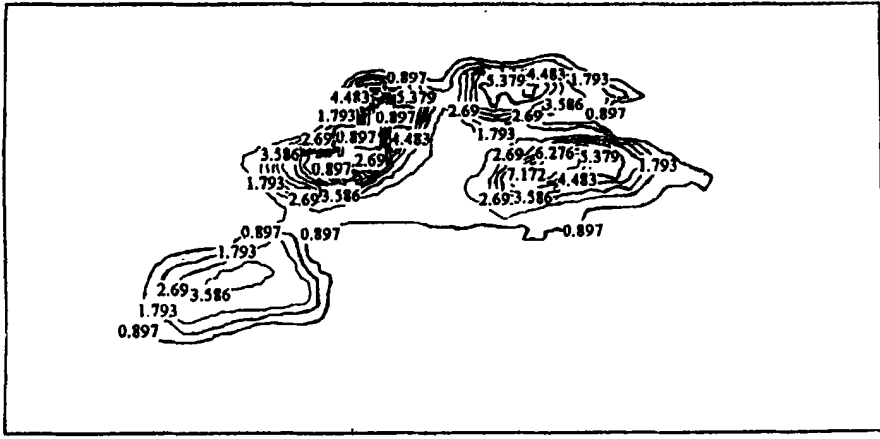


图 8 沙四上 3 25×10<sup>7</sup> a 储油强度等值线图

过程。模拟结果符合油水运移聚集的渗流力学特征。油聚集到一定饱和度后,在油水位势综合作用下,油在三维空间中从高位势向低位势方向运移,在油的局部低位势区,发生聚集,并可能成藏;时间越长,排量越大,聚集的油越多,最后聚集到油位势低的区域,形成油藏。

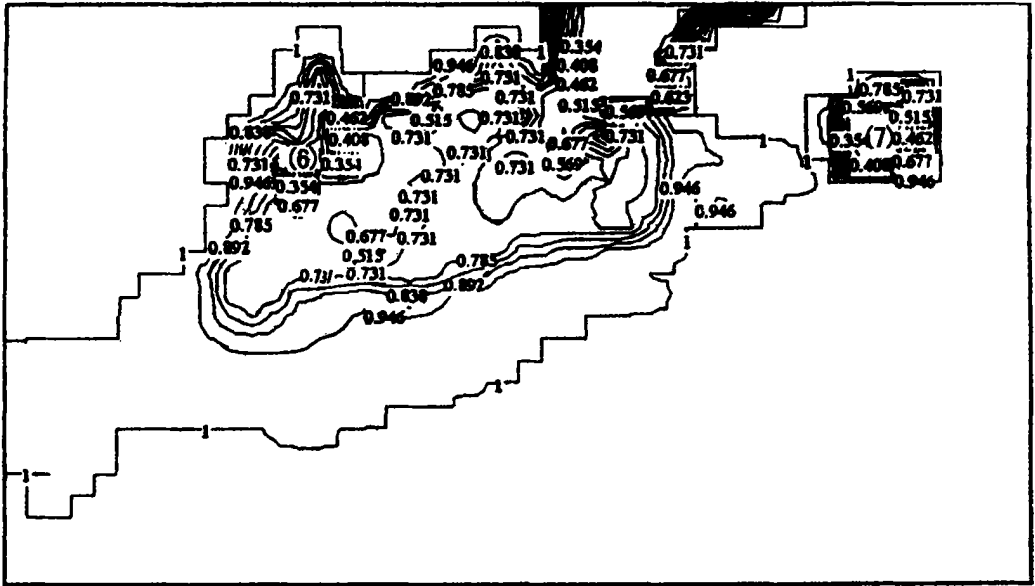


图 9a 沙三上、沙三下双层数值模拟结果,沙三上水饱和度等值线图

ii) 渗流力学数值模拟结果与东营凹陷的实际油田分布情况对比,模拟结果成藏位置(1)、(2)、(3)、(4)与实际纯化等油田的位置基本吻合,在储油强度方面也与实际地质资源情况基本一致。

iii) 数千万年的超长时间的成功数值模拟表明我们的数值模拟方法是强稳定的,高效率的,高精度的。

### 3 惠民凹陷(多层、带断层和通道)的数值模拟和分析

我们对胜利油田惠民凹陷沙三上、沙三下双层带断层和通道的实际问题进行数值模拟试



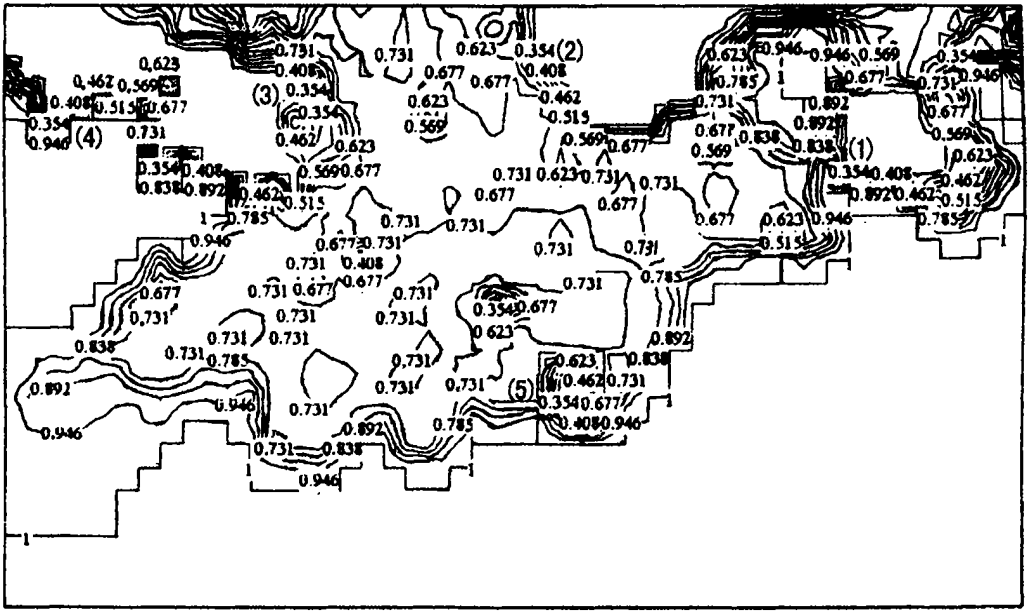


图 9b 沙三上、沙三下双层数值模拟结果, 沙三下水饱和度等值线图

验<sup>②</sup>。数值模拟结果(图 9a, b)指明:

- i) 数值模拟结果符合油水运移聚集规律, 可清晰地看到油在下层运移聚集的情况, 并由断层通道进一步运移聚集到上层, 最后形成油藏的全过程。
- ii) 数值模拟成藏位置(1)~(7)基本上与惠民油田的位置一致。
- iii) 在 SGI 的工作站上能完成全部数值模拟计算, 使本软件系统有着重要的推广价值。

[参 考 文 献]

- [1] Wette D H, Yukler M A. Petroleum origin and accumulation in basin evolution—A quantitative model [J]. AAPG Bull, 1981, 65(8): 1387—1396.
- [2] Yukler M A, Cornford C, Welte D H. One-dimensional to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic development of a sedimentary basin[J]. Geol Rundschau, 1978, 67(3): 966—979.
- [3] Ungerer P, Burous J, Doligez B, et al. A 2-D model of basin petroleum by two-phase fluid flow, application to some case studies[A]. In: Doligez Ed. Migration of Hydrocarbon in Sedimentary Basins [C]. Paris: Editions Technip, 1987, 414—455.
- [4] Ungerer P, Fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. AAPG Bull, 1990, 74(3): 309—335.
- [5] 张厚福. 油气运移研究的回顾与展望[A]. 见: 张厚福 主编. 油气运移研究论文集 [C]. 山东东营: 石油大学出版社, 1995, 3—6
- [6] P A 艾伦, J R 艾伦. 盆地分析——原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995
- [7] Ewing R E. The Mathematics of Reservoir Simulation [M]. Philadelphia: SIAM, 1983.
- [8] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bull, 1953, 37(8): 1954—2024.
- [9] Dembicki H Jr. Secondary migration of oil experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits[J]. AAPG Bull, 1989, 73(8): 1018—1021.
- [10] Calalan L. An experimental study of secondary oil migration[J]. AAPG Bull, 1992, 76(5): 638—

650.

- [11] 韩玉笈, 王捷, 毛景标. 盆地模拟方法及应用[A]. 见:《油气资源评价方法研究与应用》编委会编. 油气资源评价方法研究与应用[C]. 北京: 石油工业出版社, 1988, 58—75
- [12] 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [13] YUAN Yi\_rang, C\_F\_D method for moving boundary value problem[J]. Science in China, Series A, 1994, 37(12): 1442—1453.
- [14] YUAN Yi\_rang. Characteristic mixed finite element method[J]. Science in China, Series A, 1996, 39(3): 276—288.
- [15] YUAN Yi\_rang. Finite difference method[J]. Science in China, Series A, 1996, 39(1): 1140—1151.

## Numerical Simulation of Oil Migration Accumulation of Multilayer and Its Application

YUAN Yi\_rang<sup>1</sup>, ZHAO Wei\_dong<sup>1</sup>, CHENG Ai\_jie<sup>1</sup>,  
WANG Wen\_qia<sup>1</sup>, HAN Yu\_ji<sup>2</sup>

(1. Institute of Mathematics, Shandong University, Jinan 250100, P R China;

2. Computer Centre of Shengli Petroleum Administration, Dongying,  
Shangdong 257022, P R China)

**Abstract:** From such actual conditions as the effects of fluid mechanics in porous media and three-dimensional geology characteristics, the mathematical model and a kind of modified method of second order splitting up implicit interactive scheme were put forward. For the actual problem of Dongying hollow(single layer) and Huimin hollow(multilayer) of Shengli Petroleum Oil Field, this numerical simulation test and the actual conditions are basically coincident, thus the well-known problem has been solved.

**Key words:** multilayer; migration accumulation; Dongying hollow; Huimin hollow; numerical simulation