

文章编号: 1000\_0887(2004) 05\_0511\_12

# 油资源二次运移大规模并行数值模拟及其在胜利油田应用\*

袁益让<sup>1</sup>, 韩玉笈<sup>2</sup>

(1. 山东大学 数学研究所, 济南 250100;

2. 胜利石油管理局勘探研究院, 东营 257022)

(李家春、刘慈群推荐)

**摘要:** 从生产实际出发, 开展了多层问题的石油地质和渗流力学特征研究, 提出了新的数学模型, 构造了适合并行计算的耦合算子分裂隐式迭代格式, 并成功地对胜利油田东营凹陷(四层)和滩海地区(三层)的实际问题进行了大规模并行计算的数值模拟, 计算结果在油藏位置等方面和实际情况相吻合, 成功地解决了这一计算渗流力学和石油地质的重要问题。

**关键词:** 油资源运移; 多层; 并行计算; 胜利油田; 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核心问题之一。油是如何运移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、聚集过程中数值模拟所要研究的重要内容。它是近代计算流体力学和石油地质的著名问题<sup>[1~5]</sup>。盆地发育的渗流力学数值模拟是从渗流力学和石油地质的机理出发, 在时空概念下由计算机定量的模拟盆地的形成、演化、烃类的生成、运移和聚集的发展过程。本文研究多层油资源二次运移大规模并行计算数值模拟, 其功能是重建油气盆地运移聚集演化史, 它是盆地模拟最重要最困难的部分, 它对油气资源评、确定油藏位置和寻找新的油田具有极其重要的价值。是国际渗流力学、石油地质的重要问题, 也是世界工业国家重点研究的热门课题<sup>[4~6]</sup>。

多层油资源运移聚集史的数学模型, 具有很强的双曲特性, 由于油资源运移聚集史的全过程长达数百万年乃至数千万年, 因此需要超长时间的稳定、可靠、高精度的数值模拟, 其数值方法在数学上和渗流力学上都是十分困难的, 是当前计算渗流力学和石油地质科学的重要问题。这一领域已有法国 Ungerer, P., 德国 Walte, D. H. 和 Yukler, M. A. 等人的著名工作<sup>[7~8]</sup>, 他们研究了二维剖面问题的数学模型和数值模拟, 并在北海油田得到实际应用。在国

\* 收稿日期: 2002\_07\_08; 修订日期: 2003\_12\_23

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(10372052, 10271066); 国家教育部博士点基金项目(20030422047)

作者简介: 袁益让(1935—), 男, 教授, 博士生导师, 科学与工程计算实验室主任(联系人, Tel: + 86\_531\_8364732; Fax: + 86\_531\_8564652; E\_mail: Yiyuan@math.sdu.edu.cn).

内主要有王捷、查明等人的重要工作<sup>[4,9]</sup>,他们主要从石油地质学方面来研究该问题。对单层问题在这一领域已有作者们的初步成果<sup>[4,10-12]</sup>。本文从生产实际出发应用现代并行计算技术,开展了多层问题的渗流力学、石油地质特征的研究,提出了新的数学模型,构造了适合并行计算的耦合修正分数步隐式迭代格式,并成功的对胜利油田东营凹陷(四层)和滩海地区(三层)的实际问题进行大规模的并行计算数值模拟,计算结果在油藏位置等方面基本和实际情况相吻合,成功的解决了这一重要问题。

## 1 数学模型

油水资源二次运移的机理:

A) 二次运移的主要驱动力是由运载层的油和孔隙水之间密度差引起的浮力和企图把全部孔隙流体(水及油)运移至低位势区的位势梯度。

B) 二次运移的主要制约力和毛细管压力有关,当孔径变小时增加,在毛细管压力超过驱动力时,就可能出现滞留现象。原油和地下水在地层中运移主要是一种渗流过程,油势场和水势场控制着原油和地下水渗流的方向和大小。

在多层运移聚集数值模拟时,当第一层、第三层近似地认为水平流动,而它们中间的层(弱渗透层)仅有垂直流动时,经过严谨的模型分析和科学的数值试验,创造性提出全新合理的数学模型。对于多层运移聚集数学模型:

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_1 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dots \phi_o \right] + B_o q - \left[ K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} \right]_{z=H_1} = \\ & - \Phi \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \mathbf{X} = (x, y)^T \in \Omega_1, t \in J = (0, T], \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_1 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dots \phi_w \right] + B_w q - \left[ K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right]_{z=H_1} = \\ & \Phi \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \mathbf{X} \in \Omega_1, t \in J, \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} \right] &= - \Phi \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \\ \mathbf{X} &= (x, y, z)^T \in \Omega, t \in J, \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right] = \Phi \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \mathbf{X} \in \Omega, t \in J, \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_2 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dots \phi_o \right] + B_o q + \left[ K_3 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} \right]_{z=H_2} = \\ & - \Phi \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \mathbf{X} = (x, y)^T \in \Omega_1, t \in J, \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_2 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dots \phi_w \right] + B_w q + \left[ K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right]_{z=H_2} = \\ & \Phi \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \mathbf{X} \in \Omega_1, t \in J, \end{aligned} \quad (3b)$$

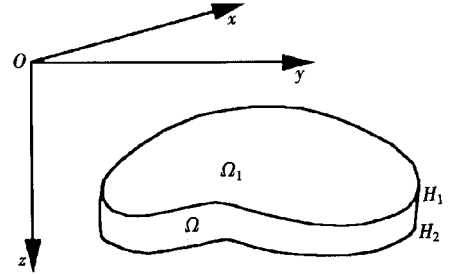


图1 二层问题  $\Omega_1$ 、 $\Omega$  的示意图

此处  $\phi_o$ 、 $\phi_w$  分别为油、水位势是需要寻求的基本未知函数。•  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为相应层的地层渗透率,  $\mu_o$ 、 $\mu_w$  分别为油相、水相粘度,  $k_{ro}$ 、 $k_{rw}$  分别为油相、水相的相对渗透率。•  $s \gg ds/dp_c$ ,  $s$  为含水饱和度,  $p_c(s)$  为毛管力函数。•  $B_o$ 、 $B_w$  为流动系数,

$$B_o = \frac{k_{ro}}{\mu_o} \left[ \frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right]^{-1}, \quad B_w = \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left[ \frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right]^{-1},$$

$q(x, t)$  为源(汇)函数。按渗流力学的达西定律,

$$-K_2 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial z} = q_{h, o}, \quad -K_3 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = q_{h, w}.$$

此处还必须给出初始和边界条件。

## 2 数值方法

多层油资源运移聚集的物理和数学模型, 具有很强的双曲特性, 具需要对长达数百乃至数千万年的油资源运移聚集过程的稳定、可靠、高精度的数值模拟, 其数值方法在数学上和力学上都是十分困难的。我们深入分析和研究了其物理和力学特征, 率先提出修正算子分裂隐式迭代格式。

### 2.1 三维问题的修正算子分裂隐式迭代格式

在  $z$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z \phi_w^*) + \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z \phi_w^{(l)}) + \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{(l)}) + \Delta_x (A_{zx} \Delta_x \phi_w^{(l)}) - G \phi_w^* + G \phi_o^* = H_{l+1} \left[ \sum A_w \right] (\phi_w^* - \phi_w^{(l)}) - B_w q^{m+1} - G \phi_w^m + G \phi_o^m, \quad (4a)$$

$$\frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z \phi_o^*) + \frac{1}{2} \Delta_z (A_{zw} \Delta_z \phi_o^{(l)}) + \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_o^{(l)}) + \Delta_x (A_{zx} \Delta_x \phi_o^{(l)}) + G \phi_w^* - G \phi_o^* = H_{l+1} \left[ \sum A_o \right] (\phi_o^* - \phi_o^{(l)}) - B_o q^{m+1} + G \phi_w^m - G \phi_o^m. \quad (4b)$$

在  $y$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{**}) - \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yw} \Delta_y \phi_w^{(l)}) - G \phi_w^{**} + G \phi_o^{**} = H_{l+1} \left[ \sum A_w \right] (\phi_w^{**} - \phi_w^{(l)}) - G \phi_w^* + G \phi_o^*, \quad (4c)$$

$$\frac{1}{2} \Delta_y (A_{yo} \Delta_y \phi_o^{**}) - \frac{1}{2} \Delta_y (A_{yo} \Delta_y \phi_o^{(l)}) + G \phi_w^{**} - G \phi_o^{**} = H_{l+1} \left[ \sum A_o \right] (\phi_o^{**} - \phi_o^{(l)}) + G \phi_w^* - G \phi_o^*. \quad (4d)$$

在  $x$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^{(l+1)}) - \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xw} \Delta_x \phi_w^{(l)}) - G \phi_w^{(l+1)} + G \phi_o^{(l+1)} = H_{l+1} \left[ \sum A_w \right] (\phi_w^{(l+1)} - \phi_w^{(l)}) - G \phi_w^{**} + G \phi_o^{**}, \quad (4e)$$

$$\frac{1}{2} \Delta_x (A_{xo} \Delta_x \phi_o^{(l+1)}) - \frac{1}{2} \Delta_x (A_{xo} \Delta_x \phi_o^{(l)}) + G \phi_w^{(l+1)} - G \phi_o^{(l+1)} = H_{l+1} \left[ \sum A_o \right] (\phi_o^{(l+1)} - \phi_o^{(l)}) + G \phi_w^{**} - G \phi_o^{**}, \quad (4f)$$

此处

$$\Delta_x (A_x \Delta_x \phi^{m+1})_{ijk} = A_{x, i+1/2, jk} (\phi_{i+1, jk} - \phi_{jk})^{m+1} - A_{x, i-1/2, jk} (\phi_{jk} - \phi_{i-1, jk})^{m+1},$$

$$A_{xw, i+1/2, jk} = \left[ \frac{K \Delta y \Delta z k_{rw}}{\Delta x \mu_w} \right]_{i+1/2, jk}, \quad \dots,$$

系数按偏上游原则取值。  $G = -V_p \Phi \Delta t$ ,  $V_p = \Delta x \Delta y \Delta z$ ,  $s$  的  $(l+1)$  次迭代由下述公式计算:

$$s^{(l+1)} = \omega_1 \left[ \frac{s^{(l)} - s^m}{p_c^{(l)} - p_c^m} \right] + (1 - \omega_1) s^{(l)}, \quad (5)$$

此处  $l$  是迭代次数,  $0 < \omega_1 < 1$  是平滑因子。

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:

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

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

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

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

$$\frac{1}{2} \Delta z (A_{zo} \Delta z R_z) - \left[ G + H_{l+1} \sum A_o \right] R_z + GP_z = - [\Delta (A_o \Delta \phi_o^{(l)}) + B_o^m q^{m+1} + G(\phi_w^{(l)} - \phi_w^m) - G(\phi_o^{(l)} - \phi_o^m)], \quad (7b)$$

在  $y$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta y (A_{yw} \Delta y P_y) - \left[ G + H_{l+1} \sum A_w \right] P_y + GR_y = - \frac{1}{2} \Delta y (A_{yw} \Delta y P_z), \quad (7c)$$

$$\frac{1}{2} \Delta y (A_{yo} \Delta y P_y) - \left[ G + H_{l+1} \sum A_o \right] P_y + GR_y = - \frac{1}{2} \Delta y (A_{yo} \Delta y R_z), \quad (7d)$$

在  $x$  方向

$$\frac{1}{2} \Delta x (A_{xw} \Delta x P_x) - \left[ G + H_{l+1} \sum A_w \right] P_x + GR_x = - \frac{1}{2} \Delta x (A_{xw} \Delta x (P_y + P_z)), \quad (7e)$$

$$\frac{1}{2} \Delta x (A_{xo} \Delta x P_x) - \left[ G + H_{l+1} \sum A_o \right] P_x + GP_x = - \frac{1}{2} \Delta x (A_{xo} \Delta x (P_y + P_z)), \quad (7f)$$

当迭代误差达到我们精度要求时, 取此时的迭代值  $\phi_o^{(l+1)}$ 、 $\phi_w^{(l+1)}$  取为  $\phi_o^{m+1}$ 、 $\phi_w^{m+1}$ ; 则饱和度按下述公式计算:

$$s^{m+1} = s^m + \Phi \phi_o^{m+1} - \phi_o^m - \phi_w^{m+1} + \phi_w^m. \quad (8)$$

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。

## 2.2 准三维(单层)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。

$$\dots \cdot \left[ K \frac{\Delta z k_{ro}}{\mu_o} \dots \phi_o \right] + B_o q \Delta z = - \Phi \Delta z \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \quad (9a)$$

$$\dots \cdot \left[ K \frac{\Delta z k_{rw}}{\mu_w} \dots \phi_w \right] + B_w q \Delta z = \Phi \Delta z \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \quad (9b)$$

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

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

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

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

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

关于准三维问题(9)提出一种新的修正算子分裂隐式迭代格式:

在  $x$  方向

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

$$\Delta_x(A_{xo} \Delta_x \phi_o^*) + \Delta_y(A_{yo} \Delta_y \phi_o^{(l)}) + G\phi_w^* - G\phi_o^* = H_{l+1} \left( \sum A_o \right) (\phi_o^* - \phi_o^{(l)}) - B_o q^{m+1} + G\phi_w^m - G\phi_o^m, \quad (10b)$$

在  $y$  方向

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

$$\Delta_x(A_{xo} \Delta_x \phi_o^*) + \Delta_y(A_{yo} \Delta_y \phi_o^{(l+1)}) + G\phi_w^{(l+1)} - G\phi_o^{(l+1)} = H_{l+1} \left( \sum A_o \right) (\phi_o^{(l+1)} - \phi_o^*) - B_o q^{m+1} + G\phi_w^m - G\phi_o^m, \quad (10d)$$

此处  $G = -V_p \Phi \Delta t$ ,  $V_p = \Delta x \Delta y$ ,  $H_{l+1}$  为迭代因子,

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

为了提高精度, 记残量

$$P_x = \phi_w^* - \phi_w^{(l)}, P_y = \phi_w^{(l+1)} - \phi_w^*, R_x = \phi_o^* - \phi_o^{(l)}, R_y = \phi_o^{(l+1)} - \phi_o^*,$$

则可将方程组(10a)~(10b)改写为下述残量方程的形式:

$$\Delta_x(A_{xw} \Delta_x P_x) - \left[ G + H_{l+1} \sum A_w \right] P_x + G R_x = - [\Delta(A_w \Delta \phi_w^{(l)}) + B_w q - G(\phi_w^{(l)} - \phi_w^m) + G(\phi_o^{(l)} - \phi_o^m)] = -B_1 X^{(l)}, \quad (11a)$$

$$\Delta_x(A_{xo} \Delta_x R_x) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_x + G P_x = - [\Delta(A_o \Delta \phi_o^{(l)}) + B_o q + G(\phi_w^{(l)} - \phi_w^m) - G(\phi_o^{(l)} - \phi_o^m)] = -B_2 X^{(l)}. \quad (11b)$$

对于  $P_y$ 、 $R_y$  同样可写出  $y$  方向的类似求解方程组。当迭代误差达到我们精度要求时, 取

此时的迭代值  $\phi_w^{(l+1)}$ 、 $\phi_o^{(l+1)}$  为  $\phi_w^{m+1}$ 、 $\phi_o^{m+1}$ ; 再由(8) 求出饱和度  $S^{m+1}$  来。

差分方程(11) 可归结为下述形式的二阶块三角方程组:

$$a_i^{(1)} x_{i-1} + b_i^{(1)} x_i + c_i^{(1)} x_{i+1} = f_i^{(1)} + d_i^{(1)} y_i, \quad (12a)$$

$$a_i^{(2)} y_{i-1} + b_i^{(2)} y_i + c_i^{(2)} y_{i+1} = f_i^{(2)} + d_i^{(2)} x_i, \quad (12b)$$

此处

$$\begin{aligned} x_{i-1} &= P_{x, i-1, j}, x_i = P_{x, ij}, x_{i+1} = P_{x, i+1, j}, y_{i-1} = R_{x, i-1, j}, y_i = R_{x, ij}, \\ y_{i+1} &= R_{x, i+1, j}; a_i^{(1)} = A_{xw, i-1/2, j}, c_i^{(1)} = A_{xw, i+1/2, j}, a_i^{(2)} = A_{xo, i-1/2, j}, \\ c_i^{(2)} &= A_{xo, i+1/2, j}, b_i^{(1)} = - (A_{xw, i-1/2, j} + A_{xw, i+1/2, j}) - (G + H_{l+1} \sum A_w), \\ b_i^{(2)} &= - (A_{xo, i-1/2, j} + A_{xo, i+1/2, j}) - (G + H_{l+1} \sum A_o), \\ f_i^{(1)} &= -B_1 X^{(l)}, f_i^{(2)} = -B_2 X^{(l)}, d_i^{(1)} = -G_{ij}, d_i^{(2)} = d_i^{(1)}. \end{aligned}$$

当  $i = 1$  时  $a_1^{(1)} = a_1^{(2)} = 0$ , 当  $i = N$  时,  $c_N^{(1)} = c_N^{(2)} = 0$ 。

为了用追赶法求解, 将其写为下述形式:

$$x_i = A_i + B_i x_{i+1} + C_i y_{i+1}, y_i = E_i + F_i x_{i+1} + G_i y_{i+1}, \quad (13a)$$

$$x_{i-1} = A_{i-1} + B_{i-1}x_i + C_{i-1}y_i, y_{i-1} = E_{i-1} + F_{i-1}x_i + G_{i-1}y_i \quad (13b)$$

将(13)代入(12)经整理可得:

$$(a_i^{(1)}B_{i-1} + b_i^{(1)})x_i + (a_i^{(1)}C_{i-1} - d_i^{(1)})y_i = f_i^{(1)} - a_i^{(1)}A_{i-1} - c_i^{(1)}x_{i+1}, \quad (14a)$$

$$(a_i^{(2)}F_{i-1} - d_i^{(2)})x_i + (a_i^{(2)}G_{i-1} + b_i^{(2)})y_i = f_i^{(2)} - a_i^{(2)}E_{i-1} - c_i^{(2)}y_{i+1} \quad (14b)$$

记

$$a_1 = a_i^{(1)}B_{i-1} + b_i^{(1)}, a_2 = a_i^{(2)}C_{i-1} - d_i^{(1)}, a_3 = a_i^{(2)}F_{i-1} - d_i^{(2)},$$

$$a_4 = a_i^{(2)}G_{i-1} + b_i^{(2)}, a_5 = -a_i^{(1)}A_{i-1} + f_i^{(1)},$$

$$a_6 = -a_i^{(2)}E_{i-1} + f_i^{(2)}, a_0 = (a_1a_4 - a_2a_3)^{-1}.$$

由(14)解出  $x_i, y_i$  得:

$$x_i = a_0[a_4(a_5 - c_i^{(1)}x_{i+1}) - a_2(a_6 - c_i^{(2)}y_{i+1})], \quad (15a)$$

$$y_i = a_0[-a_3(a_5 - c_i^{(1)}x_{i+1}) + a_1(a_6 - c_i^{(2)}y_{i+1})]. \quad (15b)$$

比较(13)和(15)的系数可得:

$$A_i = a_0(a_4a_5 - a_2a_6), B_i = -a_0a_4c_i^{(1)}, C_i = a_0a_2c_i^{(2)}, \quad (16a)$$

$$E_i = a_0(-a_3a_5 + a_1a_6), F_i = a_0a_3c_i^{(1)}, G_i = a_0a_1c_i^{(2)}. \quad (16b)$$

追过程求系数  $A_i, B_i, \dots, G_i$ , 注意到  $i = 1$  时有  $a_i^{(1)} = a_i^{(2)} = 0, a_1 = b_1^{(1)}, a_2 = -d_1^{(1)}, a_3 = -d_1^{(2)}, a_4 = b_1^{(2)}, a_5 = f_1^{(1)}, a_6 = f_1^{(2)}$ . 从而由(16) 让  $i = 2, \dots, N$ , 可求出全部的  $A_i, B_i, \dots, G_i$ . 赶过程计算  $x_i, y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , 注意到  $i = N$  时,  $c_N^{(1)} = c_N^{(2)} = 0, x_N = a_0(a_4a_5 - a_2a_6), y_N = a_0(-a_3a_5 + a_1a_6)$ , 由(15) 让  $i = N - 1, \dots, 1$  即可求出全部  $x_i, y_i$  来.

### 2.3 多层问题的计算格式

对于多层运移聚集的耦合修正算子分裂隐式迭代格式

对第一层的格式:

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_1 \Delta z_1 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dots \phi_o \right] + B_o q \Delta z_1 + q_{h,o}^1 = \\ & - \Phi \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \quad \mathbf{X} \in \Omega_1, t \in J, \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_1 \Delta z_1 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dots \phi_w \right] + B_o q \Delta z_1 + q_{h,w}^1 = \\ & \Phi \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \quad \mathbf{X} \in \Omega_1, t \in J, \end{aligned} \quad (17b)$$

此处

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

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

对第二层的格式:

$$\begin{aligned} & \dots \cdot \left[ K_2 \Delta z_2 \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dots \phi_o \right] + B_o q \Delta z_2 - q_{h,o}^2 = \\ & - \Phi \left[ \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right], \quad \mathbf{X} \in \Omega_1, t \in J, \end{aligned} \quad (18a)$$

$$\dots \cdot \left[ K_2 \Delta z_2 \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dots \phi_w \right] + B_o q \Delta z_2 - q_{h,w}^2 =$$

$$\Phi_3 \left\langle \frac{\partial \phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\rangle, \mathbf{X} \in \Omega_1, t \in J, \quad (18b)$$

此处  $K_2, \Phi, \dots$  均有相应的积分平均表达式·

$$K_2 = \frac{1}{\Delta z_2} \int_{h_1^2(x,y)}^{h_2^2(x,y)} K_2(x, y, z) dz, \dots$$

在此方程组(17)、(18)中可以认为  $q_{h,o}^1 \approx q_{h,o}^2, q_{h,w}^1 \approx q_{h,w}^2$  用达西定理将此二层问题耦合起来·对方程(17)和(18)分别应用2.1准三维问题提出的格式进行计算,它们之间应用达西定理将二层耦合起来,即

$$q_{h,o}^1 = q_{h,o}^2 = -\frac{1}{2} \left\{ K_1 \left[ \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right]_1 + K_2 \left[ \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right]_2 \right\} (\phi_{o,2} - \phi_{o,1}) / \Delta z, \quad (19a)$$

$$q_{h,w}^1 = q_{h,w}^2 = -\frac{1}{2} \left\{ K_1 \left[ \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right]_1 + K_2 \left[ \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right]_2 \right\} (\phi_{w,2} - \phi_{w,1}) / \Delta z, \quad (19b)$$

成功的解决了这一重要问题·对多层问题可进行类似的推广·

对简化模型问题,利用微分方程先验估计的理论和技巧,可以证明上述数值方法的收敛性·

### 3 大规模并行计算程序

多层二次运移数值模拟的核心是求解大型耦合偏微分方程组·它包括求解每个单层的油位势和水位势所满足的微分方程组和沿着断层或不整合面等通道垂向窜流的微分方程·从软件系统体系结构来看,其核心部分是一个四重循环的结构·第一层循环是描述各个盆地发育地质时期的信息·例如按时间顺序划分,下第三系的沙河街组、东营组、沉积间断、上第三系的馆陶组、明化镇组以及第四系的平原组·第二层循环是在一个地质时期内时间步长的循环·由于我们计算格式的强稳定性,一般时间步长取一个世纪或半个世纪·第三层循环是层循环,跑完一层再跑下一层·第四层循环是对差分方程组使用迭代法求解,当计算满足误差要求时,就转入下一个时间步长计算·当计算规模大时,例如层内网格划分的比较细,节点数目较多,计算的层数也较多时,在计算机上用的机时就很多了·

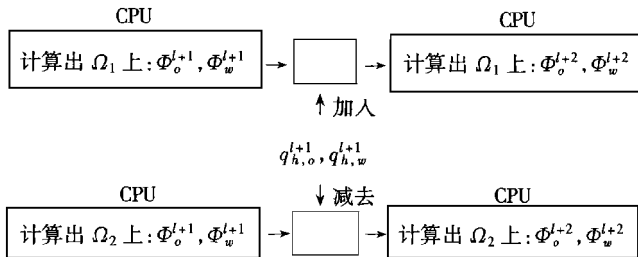


图2 区域分裂并行计算框图

### 4 数值模拟的实际应用

我们对国际著名学者 M. K. Hubbert, H. Dembicki, L. Catalan 等做过的油水二次运移聚集的著名水动力学实验<sup>[13~15]</sup>进行了数值模拟,结果与实验完全吻合,并具有很强的物理学特性,十分清晰地看到油水运移、分离、聚集的全过程,同时计算格式具有很强的稳定性、高阶收敛性和很高的精确度,完全适合于大规模科学和工程计算·

在此基础上我们成功地对胜利油田东营凹陷和滩海地区的实际问题进行数值模拟计算·

0 10 km 20 km

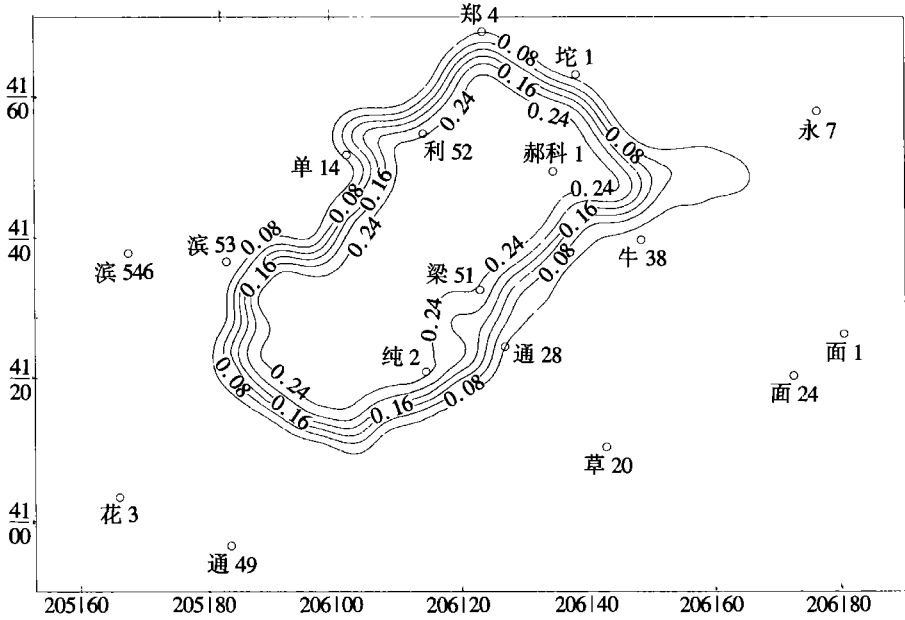


图 3(a) 东营凹陷沙三上多层含油饱和度等值线图

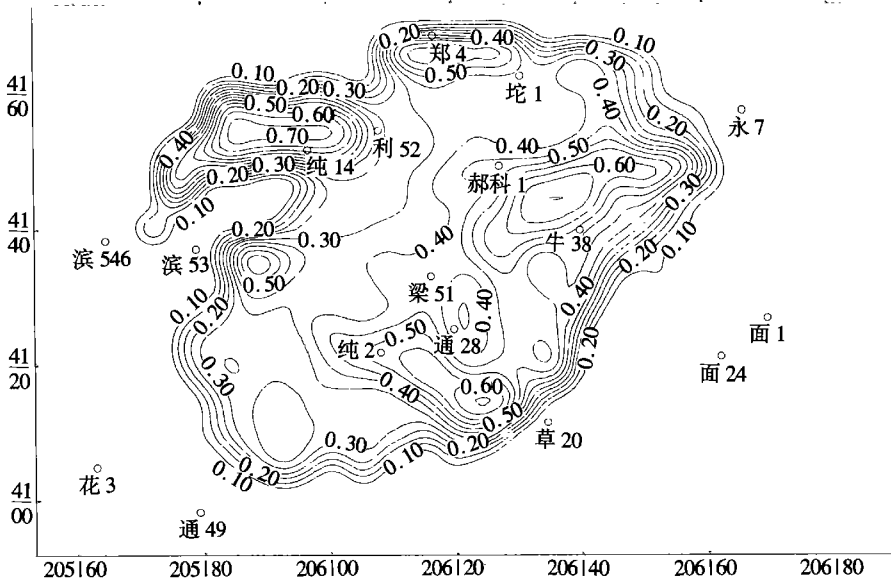


图 3(b) 东营凹陷沙三中多层含油饱和度等值线图

按石油地质和计算渗流力学理论指明含油饱和度较高的地区为油资源聚集区,即为油田对应的地区<sup>[3~6]</sup>。我们计算结果在油田位置等方面和实际情况基本吻合。成功地解决了这一国际的渗流力学和石油地质问题。

#### 4.1 胜利油田东营凹陷的并行数值模拟和分析

东营凹陷是渤海湾盆地东南部的一个次级构造盆地,东西长 90 km,南北宽 65 km,面积 5 700 km<sup>2</sup>。东营凹陷油资源数值模拟包含以下四个层段:沙四上亚段、沙三下亚段、沙中亚段、沙三上亚段。工区范围为(20 551 000 m, 4 080 000 m)、(20 695 000 m, 4 172 000 m),模拟工



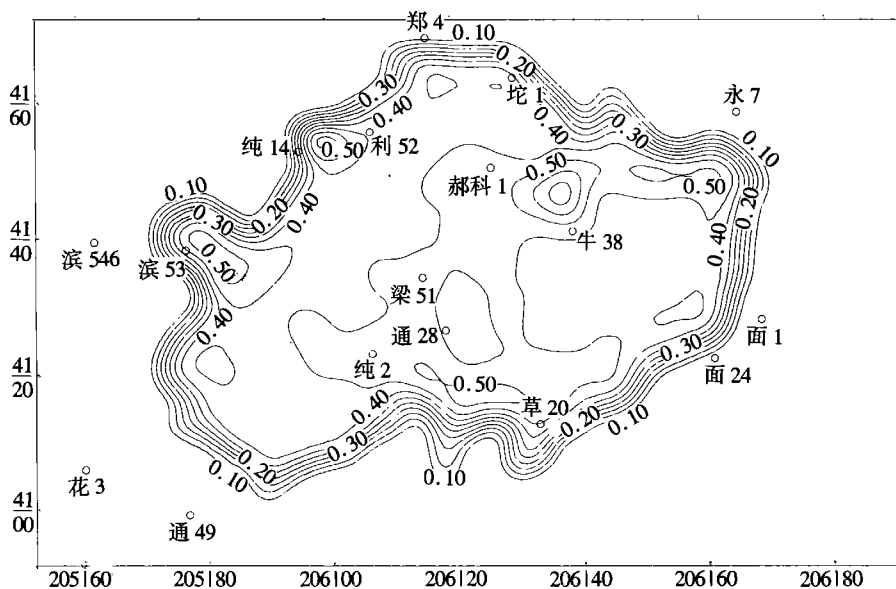


图 3(c) 东营凹陷沙三下多层含油饱和度等值线图

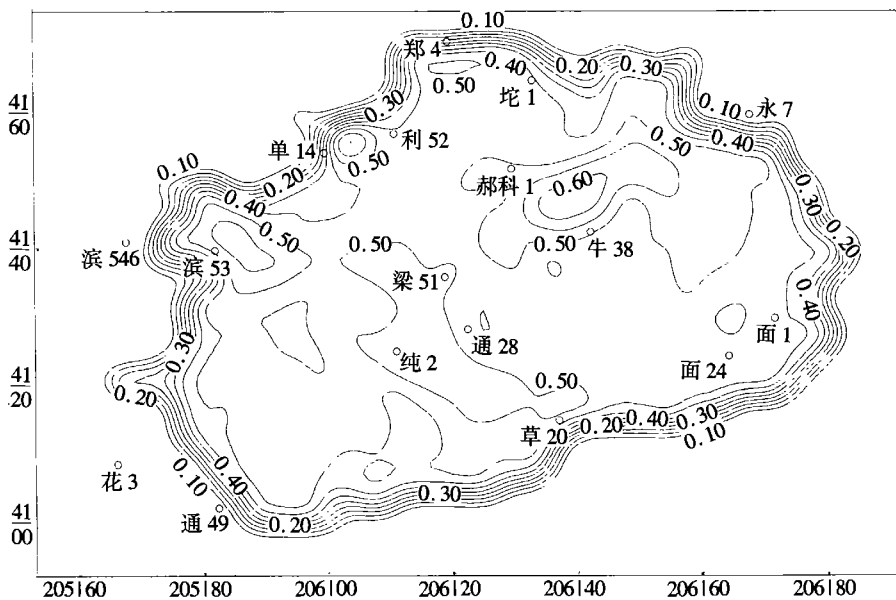


图 3(d) 东营凹陷沙四上多层含油饱和度等值线图

区东西长 144 km, 南北宽 84 km, 模拟工区面积为  $11\,928\text{ km}^2$ , 网格划分为:  $x$  方向步长为 2 000 m, 网格数 71,  $y$  方向 2 000 m, 网格数为 42, 时间步长大部分为 1 000 年。数值模拟时间  $3.0 \times 10^7$  年, 模拟结果图 3(a), 3(b), 3(c), 3(d)。

从含油饱和度等值图 3(a)~(d), 完全可以看出, 东营凹陷北部陡城带、中央背斜带、南部斜坡带、纯化鼻状构造带……等具有较高的含油饱和度, 是最有利的勘探区域和保证东营凹陷稳产的主阵地。

#### 4.2 胜利油田滩海地区油资源并行数值模拟和分析

滩海地区的工区范围为(20 611 700 m, 4 169 000 m)、(20 717 000 m, 4 253 000 m), 盆地面

0 10 km 20 km

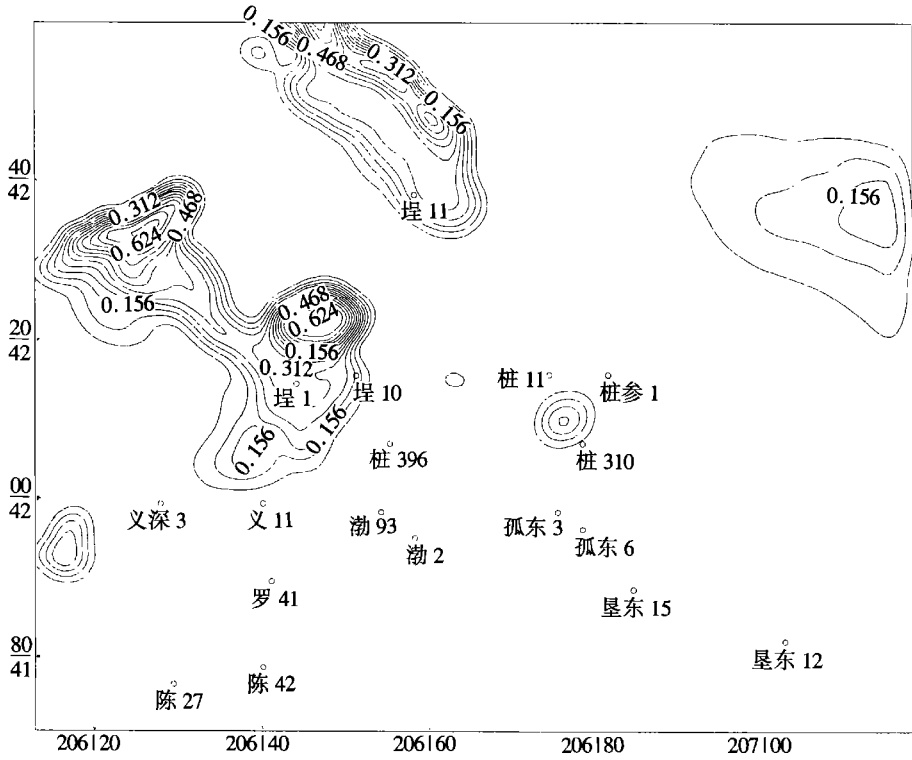


图 4(a) 滩海地区沙三上多层含油饱和度等值线图

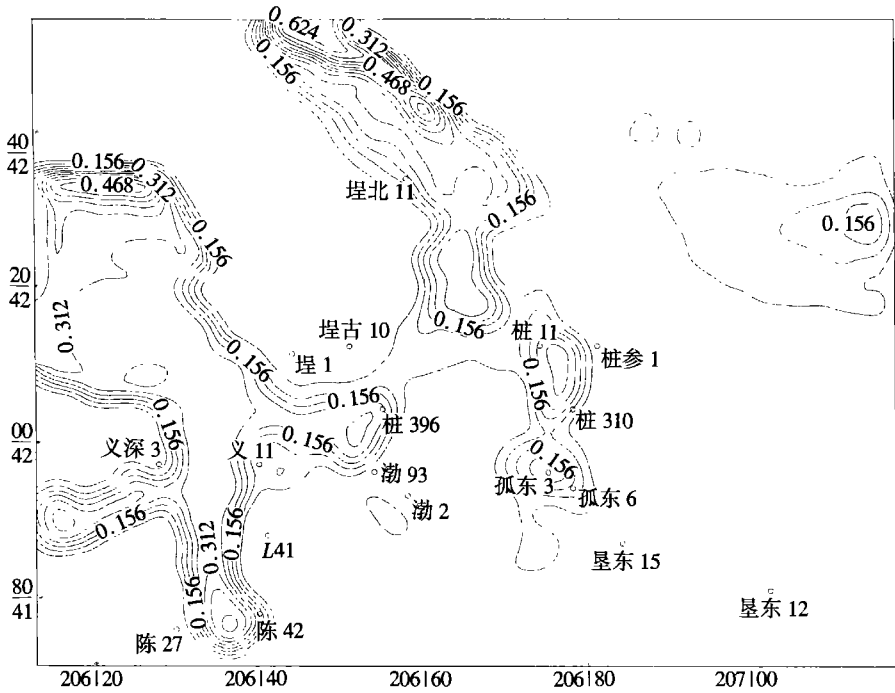


图 4(b) 滩海地区沙三中多层含油饱和度等值线图

积为 8 845.2 km<sup>2</sup>, x 方向网格步长为 1 620 m, 网格数为 65, y 方向网格步长为 1 680 m, 网格数

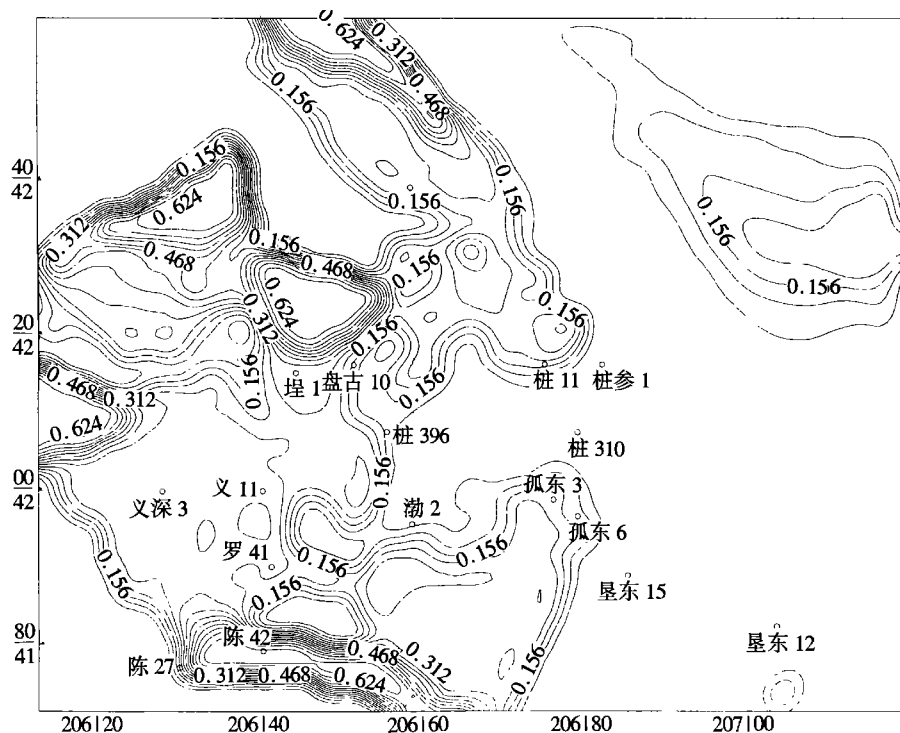


图 4(c) 渤海地区沙三下多层含油饱和度等值线图

为 50, 时间步长为 500 年。渤海地区多层油资源运移聚集数值模拟包括以下三个层段: 沙三下段、沙三中段、沙三上段。

数值模拟结果(模拟时间  $3.0 \times 10^7$  年, 图 4(a), 4(b), 4(c) 分析: 计算结果看出沙三下段和沙三中段的油沿着断层向沙三上段运移, 并在洼陷周围的隆起和斜坡带聚集, 即埕岛地区、老河口、五号桩及孤东地区, 这与胜利油田现今的油田、勘探形势现状基本吻合。

上述计算和分析表明我们的油资源二次运移并行数值模拟软件系统, 可以应用于油资源的评估和油田勘探<sup>①</sup>。

#### [参 考 文 献]

- [1] Walte 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, Walter D H. One dimensional model to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic development of a sedimentary basin [J]. Geol Rundschau, 1978, 67(3): 966—979.
- [3] P A 艾伦, J R 艾伦. 盆地分析——原理及应用[M]. 陈全茂译. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [4] 王捷, 关德范. 油气生成运移聚集模型研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [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] Ewing R E. The Mathematics of Reservoir Simulation [M]. Philadelphia: SIAM, 1983.
- [7] Ungerer P, Burous J, Doliges B, et al. A 2\_D model of basin petroleum by two phase fluid flow, ap-

① 山东大学数学研究所, 胜利油田物探研究院: 多层油资源运移聚集定量数值模拟技术研究, 2001. 4.

- plication to some case studies[ A ]. In: Doligez Ed. Migration of Hydrocarbon in Sedimentary Basins [ C ]. Paris: Editions Technip, 1987, 414—455.
- [8] Ungerer P. Fluid flow, hydrocarbon generation and migration [ J ]. AAPG Bull, 1990, **74**(3): 309—335.
- [9] 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集[ M ]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [10] 袁益让, 赵卫东, 程爱杰, 等. 油水运移聚集数值模拟和分析[ J ]. 应用数学和力学, 1999, **20**(4): 386—392.
- [11] 袁益让, 赵卫东, 程爱杰, 等. 二维油资源运移聚集的模拟和分析[ J ]. 应用数学和力学, 1999, **20**(9): 933—942.
- [12] 袁益让. 可压缩两相驱动问题的分数步长特征差分格式[ J ]. 中国科学( A 辑 ), 1998, **28**(10): 893—902.
- [13] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[ J ]. AAPG Bull, 1953, **37**(8): 1954—2026.
- [14] Dembicki H Jr, Anderson M J. Secondary migration of oil experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits[ J ]. AAPG Bull, 1989, **73**(8): 1018—1021.
- [15] Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I. An experimental study of secondary oil migration[ J ]. AAPG Bull, 1992, **76**(5): 638—650.

## Parallel Arithmetic Numerical Simulation and Application of Secondary Migration\_ Accumulation of Oil Resources

YUAN Yi\_rang<sup>1</sup>, HAN Yu\_ji<sup>2</sup>

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

2. Exploration Institute of Shengli Petroleum Administration,  
Dongying, Shandong 257022, P. R. China )

**Abstract:** From such actual conditions as the effects of characteristics of multilayer petroleum geology and permeation fluid mechanics, a new numerical model is put forward and coupling splitting up implicit interactive scheme is formed. For the actual situation of Dongying hollow ( four\_layer ) and Tanhai region ( three\_layer ) of Shengli Petroleum Field, the numerical simulation test results and the actual conditions are coincident.

**Key words:** secondary migration of oil; multilayer; parallel arithmetic; Shengli Petroleum Field; numerical simulation