

文章编号: 1000-0887(1999) 04-0386-07

油水运移聚集数值模拟和分析

袁益让¹, 赵卫东¹, 程爱杰¹, 韩玉笈²(¹ 山东大学 数学研究所, 济南 250100; ² 胜利石油管理局 计算中心, 山东 东营 257002)

(戴世强推荐)

摘要: 油资源的运移聚集数值模拟是描述在盆地发育中油水运移聚集演化的历史, 它对于油田的勘探和合理开发有着重要的价值。本文提出问题的数学模型和修正交替方向隐式迭式格式对于著名的二次运移聚集的水动力学实验(剖面和平面的问题), 进行了数值模拟, 模拟结果和实验结果是完全吻合的。

关键词: 油和水; 运移和聚集; 数值模拟; 交替方向; 隐式迭代

中图分类号: O241.82 **文献标识码:** A

引 言

盆地发育史数值模拟是从石油地质和渗流力学的机理出发, 由现代电子计算机定量地模拟盆地的形成、演化、烃类的生成、运移、聚集的全过程^[1~4]。本文研究油资源二次运移聚集的二维(剖面和平面的问题)数值模拟, 它是盆地模拟最重要、最困难的部分, 它对油资源的评估和确定油藏位置, 有着重要的价值。

油运移聚集的过程是从低孔、低渗的生油层运移到相对高孔、高渗的运载层, 最终在聚集层形成一个烃类聚集。初次运移的最大距离可达数公里。二次运移是指继初次运移后, 油通过高孔、高渗运载层内的运移, 油沿断层、裂缝通道的运移, 若遇到合适的油藏构造, 油聚集就形成油藏。历经时间长达数百万年, 其最大运移距离可达数十公里。

二次运移聚集的数学模型, 具有强双曲特性, 其数值模拟需要长达数百万年乃至千万年的强稳定和高精度的要求, 因此数值方法无论在数学上或力学上都是十分困难的^[5,6]。到目前为止仅对剖面问题国内外有一些定性的初步数值模拟结果^[7,8]。

1 数学模型

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石油和地下水渗流运动的方向和力的大小^[6]。

1.1 Darcy 定律

$$\mathbf{u}_o = -K \frac{k_{ro}(s)}{o}, \quad \mathbf{u}_w = -K \frac{k_{rw}(s)}{w} \quad (1)$$

来稿日期: 1996_08_27; 修订日期: 1997_04_15

基金项目: 国家攀登计划资助课题(85.2); 国家自然科学基金资助课题(19871051); 国家教育部博士点基金资助课题(96042202)

作者简介: 袁益让(1935~), 男, 教授, 博士生导师, 山东大学数学研究所副所长。

式中 u_o 、 u_w 分别为油相、水相流速, ρ_o 、 ρ_w 分别为油相、水相粘度, K 为地层绝对渗透率, k_{ro} 、 k_{rw} 分别为油相、水相渗透率, ρ_o 、 ρ_w 分别为油相、水相流动势

$$\rho_o = \rho_o - \rho_o gh, \quad \rho_w = \rho_w - \rho_w gh, \quad h = h_o - z, \quad (2)$$

此处 p_o 、 p_w 分别为油相、水相压力, ρ_o 、 ρ_w 为油、水密度, h_o 为基准高度

1.2 连续性方程

$$-\frac{\partial u_o}{\partial x} = \frac{\partial s_o}{\partial t}, \quad -\frac{\partial u_w}{\partial x} = \frac{\partial s_w}{\partial t}; \quad (3)$$

式中 ϕ 为孔隙度, s_o 、 s_w 分别为油、水饱和度

1.3 状态方程

$$(\quad) \text{ 毛细管压力, } p_c = p_o - p_w = p_c(s_w); \quad (4)$$

$$(\quad) s_o + s_w = 1 \quad (5)$$

1.4 流动方程

将 Darcy 定律和状态方程代入连续性方程, 并记 $s = s_w$, 得:

$$\left[K \frac{k_{ro}}{\rho_o} \right] \frac{\partial s}{\partial x} = - \frac{\partial s}{\partial t}, \quad \left[K \frac{k_{rw}}{\rho_w} \right] \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial t}, \quad \text{至千} \quad (6)$$

若将 $\frac{\partial s}{\partial t}$ 表示为 $\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{ds}{dp_c} \frac{dp_c}{dt} = s \left[\frac{\partial s}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right]$, (

此处 $s = ds/dp_c$ 则方程(3)可写为:

$$\left[K \frac{k_{ro}}{\rho_o} \right] \frac{\partial s}{\partial x} + B_o q = - \frac{\partial s}{\partial t} \left[\frac{\partial s}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right], \quad (7)$$

$$\left[K \frac{k_{rw}}{\rho_w} \right] \frac{\partial s}{\partial x} + B_w q = \frac{\partial s}{\partial t} \left[\frac{\partial s}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right], \quad (8)$$

此处 B_o 、 B_w 为流动系数,

$$B_o = \frac{k_{ro}}{\rho_o} \left[\frac{k_{ro}}{\rho_o} + \frac{k_{rw}}{\rho_w} \right]^{-1}, \quad B_w = \frac{k_{rw}}{\rho_w} \left[\frac{k_{ro}}{\rho_o} + \frac{k_{rw}}{\rho_w} \right]^{-1} \quad 44$$

1.5 初始条件和边界条件

$$S_o(M, 0) = 0, \quad S_w(M, 0) = 1, \quad (9)$$

初始位势值:

$$w = p_w - \rho_w gh = p_{dm}, \quad \rho_o = p_{dm} + (\rho_w - \rho_o) gh + p_c, \quad (10)$$

边界条件可分为两类, 一类是不流动边界:

$$\frac{\partial s}{\partial n} \Big|_M = 0, \quad \frac{\partial s}{\partial n} \Big|_J = 0, \quad (l = o, w), \quad M, \quad t, \quad J, \quad (11)$$

此处 n 为边界 M 的外法线方向 另一类是流动边界, 对于流入、流出边界, 可视为具有源汇项的不流动边界处理, 流入边界称源取正号, 流出边界称汇取负号

2 数值解法

对这样的渗流力学新问题, 我们提出修正交替方向隐式迭代格式, 成功的解决了这一困难问题 设 x , y , z , t 方向步长分别为 Δx , Δy , Δz , Δt , 在 x , y , z 方向作长方体网格记

$$A = \Delta x A_x + \Delta y A_y + \Delta z A_z, \quad (12)$$

式中

$$A_{x, i+1/2, jk} = A_{x, i+1/2, jk} (i+1, jk - ij k)^{m+1} - A_{x, i-1/2, jk} (ijk - i-1, jk)^{m+1}, \quad (13)$$

此处 $A_{x, i+1/2, jk} = \left[\frac{K_{rw}}{x} \frac{y}{w} \frac{z}{i+1/2, jk} \right]$, 系数按偏上游原则取值

方程(7)、(8)差分离散化得:

$$A_w w + B_w q = G_{t w} - G_{t o}, \quad (14)$$

$$A_o o + B_o q = -G_{t w} + G_{t o}, \quad \text{准高} \quad (15)$$

此处 $G = -V_p s / t$, $V_p = x y z$, $t_w = \frac{m+1}{w, jk} - \frac{m}{w, jk}$, $t_o = \frac{m+1}{o, jk} - \frac{m}{o, jk}$, s 的第 $(l+1)$ 次迭代由下述公式计算:

$$s^{(l+1)} = \left[\frac{s^{(l)} - s^m}{p_c^{(l)} - t p_o^m} + (1 - \alpha) s^{(l)} \right], \quad (16)$$

此处 l 是迭代次数, $0 < \alpha < 1$ 是平滑因子

饱和度按下述公式计算:

$$s^{m+1} = s^m + s \left(\frac{m+1}{o} - \frac{m}{o} - \frac{m+1}{w} + \frac{m}{w} \right), \quad (17)$$

我们提出修正交替方向隐式迭代格式:

在 x 方向

$$x A_{xw} x_w^* + y A_{yw} y_w^{(l)} + z A_{zw} z_w^{(l)} - G_w^* + G_o^* = H_{l+1} (A_w) (w^* - w^{(l)}) - B_w q - G_w^m + G_o^m, \quad (18)$$

$$x A_{xo} x_o^* + y A_{yo} y_o^{(l)} + z A_{zo} z_o^{(l)} + G_w^* - G_o^* = H_{l+1} (A_o) (o^* - o^{(l)}) - B_o q + G_w^m - G_o^m, \quad (19)$$

此处 H_{l+1} 为迭代因子, $A_w = A_{w, i+1/2, jk} + A_{w, i-1/2, jk} + A_{w, i, j+1/2, k} + A_{w, i, j, k-1/2}$

在 y 方向

$$x A_{xw} x_w^* + y A_{yw} y_w^{**} + z A_{zw} z_w^{(l)} - G_w^{**} + G_o^{**} = H_{l+1} (A_w) (w^{**} - w^*) - B_w q - G_w^m + G_o^m, \quad (20)$$

$$x A_{xo} x_o^* + y A_{yo} y_o^{**} + z A_{zo} z_o^{(l)} + G_w^{**} - G_o^{**} = H_{l+1} (A_o) (o^{**} - o^*) - B_o q + G_w^m - G_o^m; \quad (21)$$

在 z 方向

$$x A_{xw} x_w^* + y A_{yw} y_w^{**} + z A_{zw} z_w^{(l+1)} - G_w^{(l+1)} + G_o^{(l+1)} = H_{l+1} (A_w) (w^{(l+1)} - w^{**}) - B_w q - G_w^m + G_o^m, \quad (22)$$

$$x A_{xo} x_o^* + y A_{yo} y_o^{**} + z A_{zo} z_o^{(l+1)} + G_w^{(l+1)} - G_o^{(l+1)} = H_{l+1} (A_o) (o^{(l+1)} - o^{**}) - B_o q + G_w^m - G_o^m \quad (23)$$

为了提高精度, 引入残量计算:

$$P_x = w^* - w^{(l)}, P_y = w^{**} - w^*, P_z = w^{(l+1)} - w^{**}, \\ R_x = o^* - o^{(l)}, R_y = o^{**} - o^*, R_z = o^{(l+1)} - o^{**}$$

于是可将(18)~(23)改写为下述形式:

在 x 方向

$$x A_{xw} x P_x - (G + H_{l+1} A_w) P_x + G R_x = - [A_w w^{(l)} + B_w q - G (w^{(l)} - \frac{m}{w}) + G (o^{(l)} - \frac{m}{o})], \quad (24)$$

$$x A_{xo} x R_x - (G + H_{l+1} A_o) R_x + G P_x =$$

$$- [A_o \quad \begin{matrix} (l) \\ o \end{matrix} + B_o q + G(\begin{matrix} (l) \\ w \end{matrix} - \begin{matrix} m \\ w \end{matrix}) - G(\begin{matrix} (l) \\ o \end{matrix} - \begin{matrix} m \\ o \end{matrix})], \quad (25)$$

对其他方向是类似的

本文研究二维问题的数值模拟，即剖面问题和平面问题。对于剖面油水二次运移聚集问题的数学模型和数值方法，在形式上和三维问题相同，只要将相应的 y 方向去掉即可，这样的格式是稳定且收敛的。

对平面问题的数学模型为：

$$\begin{cases} K_1 z \frac{k_{ro}}{o} \quad o + B_b q_1 z = - \quad 1s \quad z \left(\frac{o}{t} - \frac{w}{t} \right), & (26) \\ K_1 z \frac{k_{rw}}{w} \quad o + B_w q_1 z = \quad 1s \quad z \left(\frac{o}{t} - \frac{w}{t} \right), & (27) \end{cases}$$

其中 $z = h_2(x, y) - h_1(x, y)$, $K_1 = \frac{1}{z} \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} K(x, y, z) dz$,

$$B_b = \frac{1}{z} \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} B_b(x, y, z) dz, \quad B_w = \frac{1}{z} \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} B_w(x, y, z) dz,$$

$h_1(x, y)$ 、 $h_2(x, y)$ 分别为运载层的上、下边界深度函数。本模型适用于运载层厚度比水平方向模拟区域尺寸小得多的情况。

3 数值模拟结果与分析

我们对胜利油田提供的地质参数和数据，对 M. K. Hubbert, H. Dembicki, L. Calalan 等学者做过的油气二次运移聚集的著名模拟水动力学实验^[9~11]进行数值模拟，数值结果和实验结果基本吻合，并且具有很强的物理、力学特性，十分清晰的看到油水运移、分离、聚集的全过程。同时可得知所提计算格式具有很强的稳定性和收敛性^[12,13]。

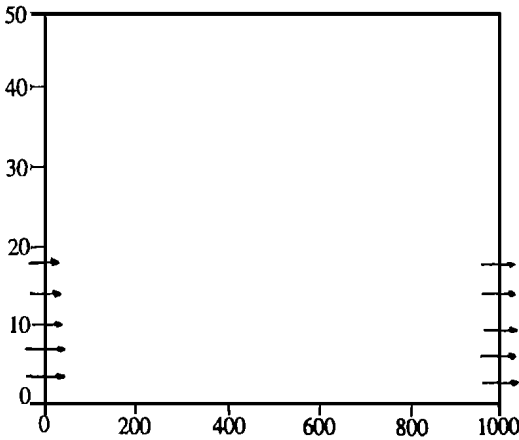


图 1

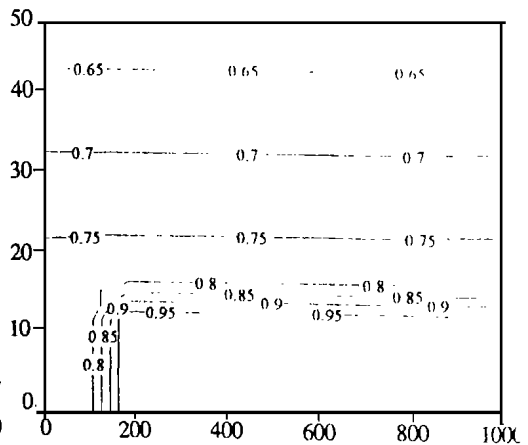


图 1a 112@10⁶a 水浓度等值线图

3.1 剖面问题的数值模拟

我们对长方形区域(图 1)和斜背状区域(图 2)进行了数值模拟，初始条件为静止的水，流入量为 1.4268×10^{-6} ，含油量为 10%，流入流出边界在图 1、2 中由 y 标出，模拟时间为 4.5×10^6 。计算结果表明油聚集到一定浓度后，在浮力和动力作用下向上运移，在顶部聚集，随着油浓度的增加(水浓度的减少)，油沿顶部边界运移，且向纵深扩展。对图 1，油主要聚集在上部；对图 2 油聚集在弓顶。从水饱和度等值线图可清晰地看到油水运移聚集的全过程。

这里给出了对应图 1、图 2 的 $112 @ 10^6 a$ 、 $310 @ 10^6 a$ 、 $415 @ 10^6 a$ 的水饱和度等值线图 1a 至 1c, 图 2a 至 2c#

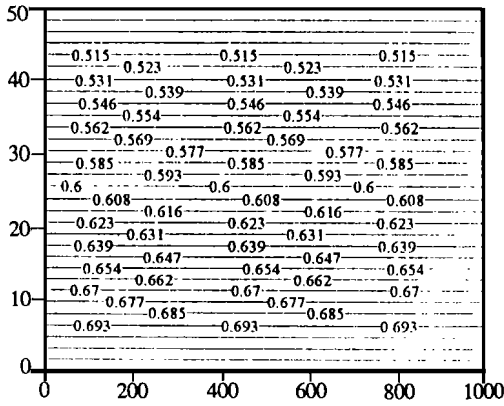


图 1b $310 @ 10^6 a$ 水浓度等值线图

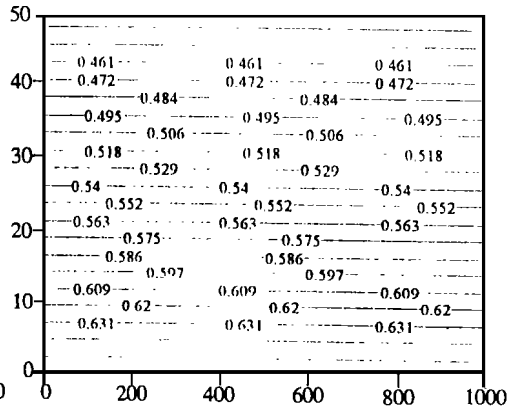


图 1c $415 @ 10^6 a$ 水浓度等值线图

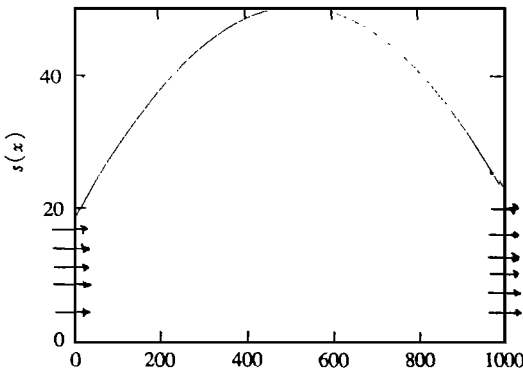


图 2

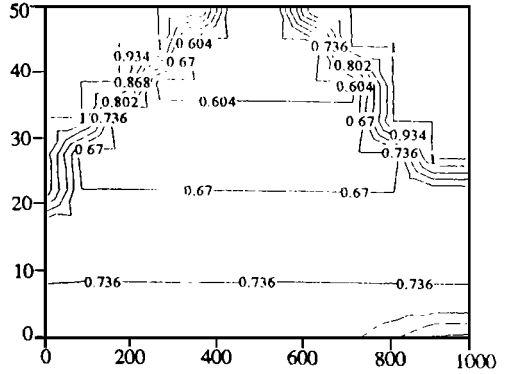


图 2a $112 @ 10^6 a$ 水浓度等值线图

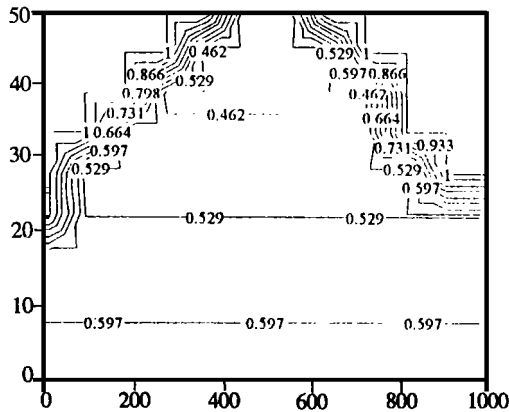


图 2b $310 @ 10^6 a$ 水浓度等值线图

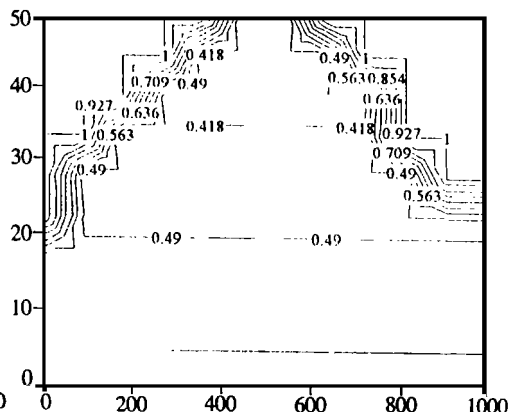


图 2c $415 @ 10^6 a$ 水浓度等值线图

在实际问题中, 如果油层的厚度与模拟区域的尺寸相比很小, 油水二次运移聚集问题可用平面问题来解# 数学模型为(26)、(27), 数值方法类似于剖面问题#

我们数值模拟带有面源的斜平面问题, 如图3# 斜平面方程:

$$z(x, y) = \frac{200L_y L_y - x}{L_x L_x}, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y$$

面源是:

$$q(x, y) = 9.1324 \cdot \frac{L_y + d_x - x}{L_x}$$

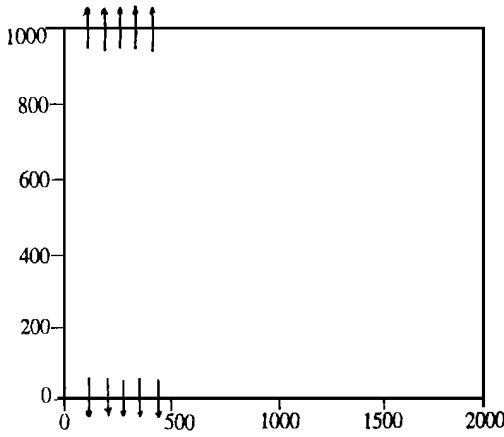


图3

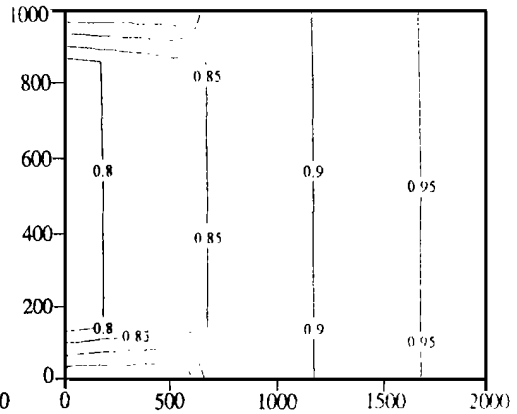


图3a 1@10⁶a水浓度等值线图

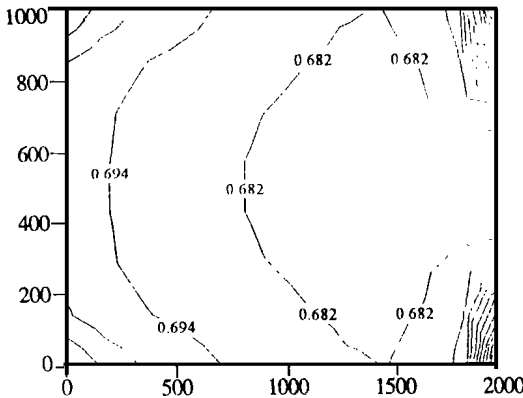


图3b 3@10⁶a水浓度等值线图

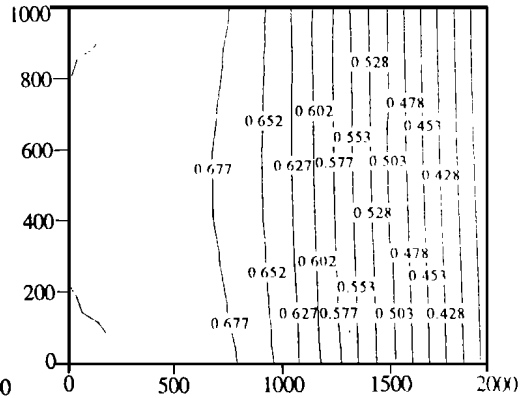


图3c 4@10⁶a水浓度等值线图

d_x 是空间 x 方向步长# 初始条件为静态的, 模拟时间为 4.0×10^6 a# 这里给出了对应于图3的 1×10^6 a、 3×10^6 a、 4×10^6 a 的水饱和度等值线图3a至图3c# 计算结果表明油聚集到一定浓度后, 在浮力和动力作用下向上运移, 在顶部聚集#

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): 1367~ 1396.
- [2] Yukler M A, Comford C, Walte D H. One-dimensional model to simulate geologic, hydrodynamic and

Geol Rundschau, 1978, 67(3): 966~ 979.

- [3] 袁益让, 王文洽, 羊丹平, 等. 三维盆地发育史数值模拟[J]. 应用数学和力学, 1994, 15(5): 409~ 420.
- [4] 袁益让. 三维动边值问题的特征混合元方法及分析[J]. 中国科学(A 辑), 1996, 39(3): 276~ 288.
- [5] Allen P A, Allen J R. Basin Analysis: Principles and Applications[M]. Beijing: Petroleum Press, 1995.
- [6] Ewing R E. The Mathematics of Reservoir Simulation[M]. Philadelphia: SIAM, 1983.
- [7] 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.
- [8] Ungerer P. Fluid flow, hydrocarbon generation and migration[J]. AAPG Bull, 1990, 74(3): 309~ 335.
- [9] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bull, 1953, 37(8): 1954~ 2026.
- [10] 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.
- [11] Cataian L. An experimental study of secondary oil migration[J]. AAPG Bull, 1992, 76(5): 638~ 650.
- [12] N N 雅宁柯, 分数步长))) 数学物理中多变量问题的解法[M]. 何登发译. 北京: 科学出版社, 1992.
- [13] Marchuk G I. Methods of Numerical Analysis[M]. New York-Heidelberg-Berlin: Springer-Verlag, 1975.

N u m e r i c a l S i m u l a t i o n A n a l y s i s f o r M i g r a t i o n - A c c u m u l a t i o n o f O i l a n d W a t e r

Yuan Yirang¹, Zhao Weidong¹, Cheng Aijie¹, Han Yuji²

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

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

Abstract: Numerical simulation of oil migration and accumulation is to describe the history of oil migration and accumulation in basin evolution. It is of great value in the exploration oil resources and their rational evaluation. This paper, puts forward the mathematical model and the modified method of alternating-direction implicit interactive scheme. For the famous hydraulic experiment of secondary migration-accumulation (cut plane and plane problem), it has been done the numerical simulation test, and both the computational and experimental results are identical.

Key words: oil and water; migration-accumulation; numerical simulation; alternating-direction; implicit interactive scheme