

文章编号: 1000-0887(1999)09-0933-10

三维油资源运移聚集的模拟和应用^{*}

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 257022)

(李家春推荐)

摘要: 盆地发育的运移聚集史数值模拟, 其功能是重建油气盆地的运移聚集演化史, 它对于油资源的勘探, 确定油藏位置和计算油藏贮量, 寻找新的油田, 具有极其重要的价值。本文从地质科学实际出发, 研究了三维问题的地质和渗流力学特征, 提出二阶修正算子分裂隐式迭代格式, 对著名油水运移聚集实验进行了数值模拟, 结果基本吻合, 并对胜利油田东营凹陷的实际问题进行数值模拟试验, 结果和实际地质情况(油田位置等)基本吻合, 成功解决了这一著名问题。

关键词: 渗流力学; 三维油运移聚集; 算子分裂法; 数值模拟; 东营凹陷

中图分类号: O241.82 **文献标识码:** A

引 言

沉积盆地中油的生成、排驱、运移、聚集和最后形成油藏是研究油资源勘探中的核心问题之一。油依据渗流力学的规律如何运移聚集到现今的圈闭中, 油在盆地中是如何分布的, 这些都是三维油二次运移聚集数值模拟所研究的重要内容^[1-5]。

三维油运移的过程是从低孔、低渗的生油层运移到相对高孔、高渗的运载层, 最终在储集层中形成一个集中的烃类聚集。油二次运移是指继初次运移之后, 油通过高孔、高渗运载层内的运移和油沿断层、裂缝通道的运移, 若遇到合适的油藏构造, 就形成油藏, 其最大距离可达数十公里^[5, 6]。

盆地发育数值模拟是从石油地质科学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、运移和聚集的发育演化过程。本文研究三维盆地发育史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, 又称油气二次运移聚集史, 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^[7-9]。

三维油资源运移聚集史的物理和地质模型, 具有很强的双曲特性, 且需要长达数百万年乃至千万年稳定、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, 是当前国际石油地质科学的著名问题^[5, 7]。到目前为止仅对二维剖面问题国内外有一些初步的模拟结果^[8, 9], 对三维问题完全是空白的^[5, 6, 9]。我们从生产实际出发, 深入研究和分析了

* 收稿日期: 1998_01_06; 修订日期: 1999_04_05

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)、国家博士点基金资助课题(96042202)

作者简介: 袁益让(1935~), 男, 教授, 博导, 研究所副所长, 实验室主任。

三维问题的地质和渗流力学特征和困难, 率先提出新的修正二阶算子分裂隐式迭代格式。我们对 Hubbert, Dembicki, Calalan 等学者做过的油水二次运移聚集的石油地质科学著名实验^[10~12]进行数值模拟计算, 结果与实验基本吻合, 并具有很强的物理力学特性, 十分清晰地看到油水运移、分离、聚集的全过程。同时也指明计算格式具有很强的稳定性和收敛性。在此基础上我们成功地对胜利油田东营凹陷的实际问题进行数值模拟计算, 结果和实际地质情况(油田位置等)基本吻合, 成功地解决了这一国际著名问题。

1 渗流力学模型

本文仅研究油资源的运移聚集, 同时忽略了温度对流动的影响^[5~7]。因为问题是考虑油水运移、分离、聚集的全过程, 油是不相混溶的, 在这里必须考虑毛细管压力的作用。油水资源二次运移的机理是:

(i) 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)运移至低势区的势梯度。

(ii) 二次运移的主要制约力是毛细压力, 当孔径变小时增加, 在毛细压力超过驱动力时, 就出现滞留现象。

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动力的方向和力的大小。

1.1 Darcy 定律

$$\mathbf{u}_o = -K \frac{k_{ro}(s)}{\mu_o} \dot{\gamma} \Phi_o, \quad \mathbf{u}_w = -K \frac{k_{rw}(s)}{\mu_w} \dot{\gamma} \Phi_w, \quad (1)$$

式中 \mathbf{u}_o 、 \mathbf{u}_w 分别为油相、水相流速, μ_o 、 μ_w 分别为油水粘度, K 为地层绝对渗透率, k_{ro} 、 k_{rw} 分别为油相、水相渗透率, Φ_o 、 Φ_w 分别为油相、水相流动势。

$$\Phi_o = p_o - \rho_o gh, \quad \Phi_w = p_w - \rho_w gh, \quad h = h_o - z, \quad (2)$$

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

$$-\dot{\gamma} \cdot \mathbf{u}_o = \Phi \frac{\partial s_o}{\partial t}, \quad -\dot{\gamma} \cdot \mathbf{u}_w = \Phi \frac{\partial s_w}{\partial t}, \quad (3)$$

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

a. 毛细管压力 $p_c = p_o - p_w = p_c(s_w)$,

b. $s_o + s_w = 1$ 。

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

$$\dot{\gamma} \cdot \left[K \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{\gamma} \Phi_o \right] = -\Phi \frac{\partial s}{\partial t}, \quad \dot{\gamma} \cdot \left[K \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{\gamma} \Phi_w \right] = \Phi \frac{\partial s}{\partial t}, \quad (4)$$

若将 $\partial s / \partial t$ 表示为:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{ds}{dp_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} = s \left\{ \frac{\partial \Phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \right\},$$

此处, $s \approx ds / dp_c$ 。则流动方程(3)可写为:

$$\dot{\gamma} \cdot \left[K \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{\gamma} \Phi_o \right] = -\Phi \left\{ \frac{\partial \Phi_o}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \right\}, \quad (5a)$$

$$\dot{y} \cdot \left[K \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \Phi_w \right] = \Phi_0 \left[\frac{\partial \Phi_0}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \right], \quad (5b)$$

若考虑源汇项, 则流动方程可写为:

$$\dot{y} \cdot \left[K \frac{k_{ro}}{\mu_o} \dot{y} \Phi_o \right] + B_o q = - \Phi_0 \left[\frac{\partial \Phi_0}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \right], \quad M = (x, y, z)^T \in \Omega, \quad t \in J, \quad (6a)$$

$$\dot{y} \cdot \left[K \frac{k_{rw}}{\mu_w} \dot{y} \Phi_w \right] + B_w q = \Phi_0 \left[\frac{\partial \Phi_0}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} \right], \quad M \in \Omega, \quad t \in J, \quad (6b)$$

此处 B_o 、 B_w 为流动系数,

$$B_o = \frac{k_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right]^{-1}, \quad B_w = \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{k_{ro}}{\mu_o} + \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right]^{-1}, \quad (7)$$

$q(x, t)$ 为源汇函数。此外还必须给出初始和边界条件。

2 数值方法和分析

对这样的石油地质科学新课题, 我们提出二阶修正算子分裂隐式迭代格式, 成功解决了这一著名问题^[5,9]。

设 x, y, z, t 方向步长分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$, 在 x, y, z 方向作长方体网格剖分, 记 $M_{ijk} = (i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z)^T, t^m = m \Delta t$, 问题是若 $t = t^m$ 时刻的 Φ_o^m, Φ_w^m 已知, 需要寻求下一时刻的 $\Phi_o^{m+1}, \Phi_w^{m+1}$ 。记

$$\Delta(A \Delta \Phi^{m+1})_{ijk} = \Delta_x^-(A_x \Delta_x \Phi^{m+1})_{ijk} + \Delta_y^-(A_y \Delta_y \Phi^{m+1})_{ijk} + \Delta_z^-(A_z \Delta_z \Phi^{m+1})_{ijk}, \quad (8)$$

式中

$$\Delta_x^-(A_x \Delta_x \Phi^{m+1})_{jk} = A_{x, i+1/2, jk} (\Phi_{i+1, jk} - \Phi_{jk})^{m+1} - A_{x, i-1/2, jk} (\Phi_{jk} - \Phi_{i-1, jk})^{m+1}, \quad (9)$$

此处 $A_{x, i+1/2, jk} = \left(\frac{K \Delta y \Delta z}{\Delta x} \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right)_{i+1/2, jk}$, 系数按偏上游原则取值。为书写简便, 下面将下标

(ijk) 省略。

方程(6)差分离散化得:

$$\Delta(A_w \Delta \Phi_w^{m+1}) + B_w^m q^{m+1} = G \Delta_t \Phi_w^m - G \Delta \Phi_o^m, \quad (10a)$$

$$\Delta(A_o \Delta \Phi_o^{m+1}) + B_o^m q^{m+1} = -G \Delta_t \Phi_o^m + G \Delta_t \Phi_w^m, \quad (10b)$$

此处 $G = -V_p \Phi_0 \Delta t, V_p = \Delta x \Delta y \Delta z, \Delta_t \Phi_w^m = \Phi_w^{m+1} - \Phi_w^m, \Delta_t \Phi_o^m = \Phi_o^{m+1} - \Phi_o^m, s$ 的第 $(l+1)$ 次迭代由下述公式计算:

$$s^{(l+1)} = \omega_1 \left[\frac{s^{(l)} - s^m}{p^c - p^c} \right] + (1 - \omega_1) s^{(l)}, \quad (11)$$

此处 l 是迭代次数, $0 < \omega_1 < 1$ 是平滑因子。

若能求出 t^{m+1} 时刻的 $\Phi_o^{m+1}, \Phi_w^{m+1}$, 则饱和度按下述公式计算:

$$s^{m+1} = s^m + \mathcal{S} (\Phi_o^{m+1} - \Phi_o^m - \Phi_w^{m+1} + \Phi_w^m), \quad (12)$$

针对大范围、非线性、超长模拟时间、高精度和强稳定性的要求, 我们提出一类新的修正二阶算子分裂隐式迭代格式, 成功的解决了这一著名问题。从基本差分离散方程(10)出发。

在 z 方向:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_z^-(A_{zw} \Delta_z \Phi_w^*) + \frac{1}{2} \Delta_z^-(A_{zw} \Delta_z \Phi_w^{(l)}) + \Delta_y^-(A_{yw} \Delta_y \Phi_w^{(l)}) + \\ & \Delta_x^-(A_{xw} \Delta_x \Phi_w^{(l)}) - G \Phi_w^* + G \Phi_o^* = \\ & H_{l+1} \left(\sum A_w \right) (\Phi_w^* - \Phi_w^{(l)}) - B_w^m q^{m+1} - G \Phi_w^m + G \Phi_o^m, \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{z}}(A_{z_0} \Delta_z \Phi_0^*) + \frac{1}{2} \Delta_{\bar{z}}(A_{z_0} \Delta_z \Phi_0^{(l)}) + \Delta_{\bar{y}}(A_{y_0} \Delta_y \Phi_0^{(l)}) + \\ & \Delta_{\bar{x}}(A_{x_0} \Delta_x \Phi_0^{(l)}) + G \Phi_0^* + G \Phi_0^{(l)} = \\ & H_{l+1}(\sum A_o)(\Phi_0^* - \Phi_0^{(l)}) - B_o^m q^{m+1} + G \Phi_0^m - G \Phi_0^{(l)}; \end{aligned} \quad (13b)$$

此处 H_{l+1} 为迭代因子, $\sum A_l = A_{l, i+1/2, jk} + A_{l, i-1/2, ij} + A_{l, i, j+1/2, k} + \dots + A_{l, ij, k-1/2}$, $l = w, o$

在 y 方向:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_w} \Delta_y \Phi_w^{**}) - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_w} \Delta_y \Phi_0^{(l)}) - G \Phi_w^{**} + G \Phi_0^{**} \\ & = H_{l+1}(\sum A_w)(\Phi_w^{**} - \Phi_0^{**}) - G \Phi_w^{**} + G \Phi_0^{**}, \end{aligned} \quad (13c)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_o} \Delta_y \Phi_o^{**}) - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_o} \Delta_y \Phi_0^{(l)}) + G \Phi_o^{**} - G \Phi_0^{**} \\ & = H_{l+1}(\sum A_o)(\Phi_o^{**} - \Phi_0^{**}) + G \Phi_o^{**} - G \Phi_0^{**}; \end{aligned} \quad (13d)$$

在 x 方向:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_w} \Delta_x \Phi_w^{(l+1)}) - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_w} \Delta_x \Phi_w^{(l)}) - G \Phi_w^{(l+1)} + G \Phi_0^{(l+1)} \\ & = H_{l+1}(\sum A_w)(\Phi_w^{(l+1)} - \Phi_w^{**}) - G \Phi_w^{**} + G \Phi_0^{**}, \end{aligned} \quad (13e)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_o} \Delta_x \Phi_o^{(l+1)}) - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_o} \Delta_x \Phi_0^{(l)}) + G \Phi_w^{(l+1)} - G \Phi_0^{(l+1)} \\ & = H_{l+1}(\sum A_o)(\Phi_o^{(l+1)} - \Phi_0^{**}) + G \Phi_w^{**} - G \Phi_0^{**}; \end{aligned} \quad (13f)$$

为达到高精度的目的, 我们引入残量计算量:

$$P_z = \Phi_w^* - \Phi_0^{(l)}, \quad P_y = \Phi_w^{**} - \Phi_w^*, \quad P_x = \Phi_w^{(l+1)} - \Phi_w^{**}, \quad (14a)$$

$$R_z = \Phi_o^* - \Phi_0^{(l)}, \quad R_y = \Phi_o^{**} - \Phi_o^*, \quad R_x = \Phi_o^{(l+1)} - \Phi_o^{**}. \quad (14b)$$

最后我们提出新的关于残量的二阶算子分裂隐式迭式格式:

在 z 方向:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{z}}(A_{z_w} \Delta_z P_z) - (G + H_{l+1} \sum A_w) P_z + G R_z \\ & = - [\Delta(A_w \Delta \Phi_w^{(l)}) + B_w q - G(\Phi_w^{(l)} - \Phi_w^m) + G(\Phi_0^{(l)} - \Phi_0^m)], \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \Delta_{\bar{z}}(A_{z_o} \Delta_z R_z) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_z + G P_z \\ & = - [\Delta(A_o \Delta \Phi_0^{(l)}) + B_o q + G(\Phi_w^{(l)} - \Phi_w^m) - G(\Phi_0^{(l)} - \Phi_0^m)]; \end{aligned} \quad (15b)$$

在 y 方向:

$$\frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_w} \Delta_y P_y) - (G + H_{l+1} \sum A_w) P_y + G R_y = - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_w} \Delta_y P_z), \quad (15c)$$

$$\frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_o} \Delta_y R_y) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_y + G R_y = - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{y}}(A_{y_o} \Delta_y R_z); \quad (15d)$$

在 x 方向:

$$\frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_w} \Delta_x P_x) - (G + H_{l+1} \sum A_w) P_x + G R_x = - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_w} \Delta_x (P_y + P_z)), \quad (15e)$$

$$\frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_o} \Delta_x R_x) - (G + H_{l+1} \sum A_o) R_x + G P_x = - \frac{1}{2} \Delta_{\bar{x}}(A_{x_o} \Delta_x (R_y + R_z)). \quad (15f)$$

当迭代误差达到我们精度要求时, 取此时的迭代值 $\Phi_0^{(l+1)}$ 、 $\Phi_w^{(l+1)}$ 为 Φ_0^{m+1} 、 Φ_w^{m+1} ; 再由(12) 求出 S^{m+1} 来。

3 模型问题的数值结果和分析

Hubbert, Dembicki, Calalan 等学者做过的油水二次运移聚集的著名石油地质水动力学实验, 在实验室理想条件下显示了油水运移、聚集、分离的过程^[10-12]。我们以胜利油田提供的地质参数, 模仿 Hubbert 等人的著名实验进行数值模拟, 模拟结果和实验结果基本吻合, 且有很强的物理力学特性, 十分清晰地看到油水运移、分离、聚集的全过程。同时得知计算格式具有很强的稳定性和收敛性。

数值试验包括不同形状的模拟区域以及源汇项(流入、流出量)在边界上不同的分布等情形。模拟时间均为 300 万年, 模拟区域的水平尺度为 400m × 400m, 厚度为 400m, 计算网格为 8 × 8 × 8。我们给出某些时间步上的含水饱和度等值线图, 从初始至 300 万年每隔 30 万年显示一次, 在所给的等值线图中, 分别为纵剖面等值线图和横切面等值线图。

表 1 模型参数表(全部数据均采用水动力学标准单位)

s	$k_{ro}(s)$	$k_{rw}(s)$	s	$p_c(s)$	地质参数	
0.30	0.700 0	0.000	0.200	4.500 0	Φ	0.3
0.35	0.400 0	0.004	0.300	0.175 0	$\Delta\rho g$	0.5×10^{-3}
0.40	0.260 0	0.009	0.320	0.117 0	h_o^*	0.1177×10^4
0.45	0.165 0	0.015	0.360	0.064 8	μ_w	0.4
0.50	0.104 0	0.023	0.410	0.037 8	μ_o	20.0
0.55	0.064 0	0.031	0.460	0.027 0	K	2.0
0.60	0.034 0	0.040	0.510	0.022 5		
0.65	0.015 0	0.052	0.750	0.011 3		
0.70	0.001 5	0.066	0.760	0.000 0		
0.75	0.000 0	0.085	0.800	-1.150 0		

3.1 三维模型问题 I

我们对长方体区域(图 1)进行了数值模拟, 初始条件为静止的水, 流入量为 2.02943×10^{-2} , 含油量为 10%, 流入流出边界在图 1 中由 \rightarrow 标出, 模拟时间为 300 万年。计算结果表明油聚集到一定的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 油聚集在拱顶。从水饱和度等值线图可清晰地看出油水运移聚集的全过程。这里给出了对应图 1 的 120 万年、300 万年的水饱和度纵剖面 and 横切面等值线图 1(a) 至图 1(d)。

3.2 模型问题 II

模拟区域顶部为拱状(图 2), 初始条件为静止的水, 油从底部边界流入, 流入量为 2.02943×10^{-2} , 流出量等于流入量。模拟结果显示油主要聚集在拱顶, 而整个运移聚集过程亦符合问题 I 所显示的规律, 参看含水饱和度等值线图 2(a) ~ 2(d)。

4 关于东营凹陷数值模拟和分析

关于油资源运移聚集软件系统, 在对数学模型、数值方法、理论分析和模型问题试算的

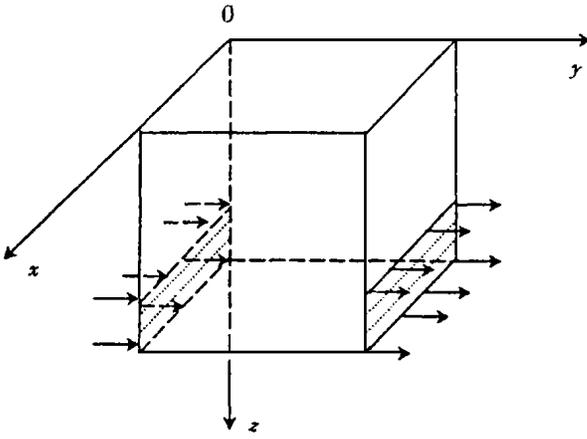


图 1

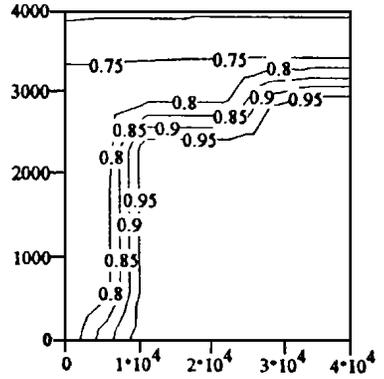


图 1(a) 120 万年含水饱和度纵剖面等值线图

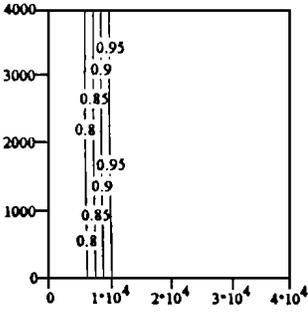


图 1(b) 120 万年含水饱和度横切面等值线图

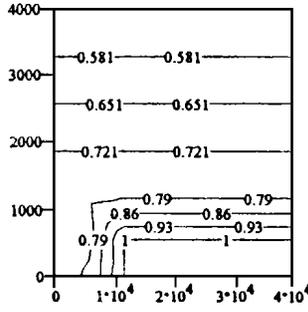


图 1(c) 300 万年含水饱和度纵剖面等值线图

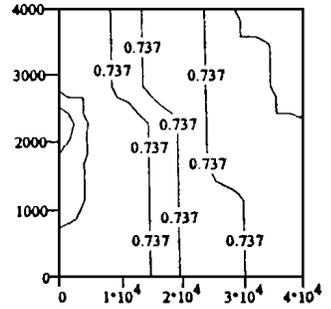


图 1(d) 300 万年含水饱和度横切面等值线图

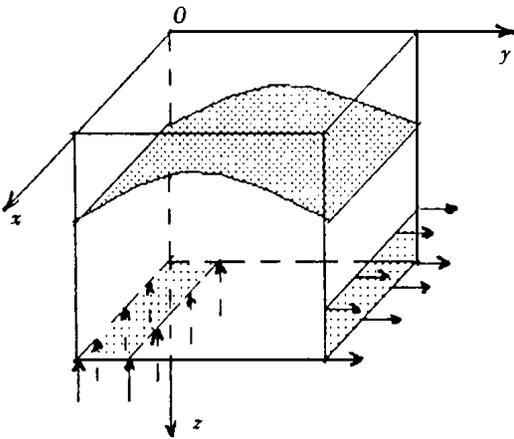


图 2

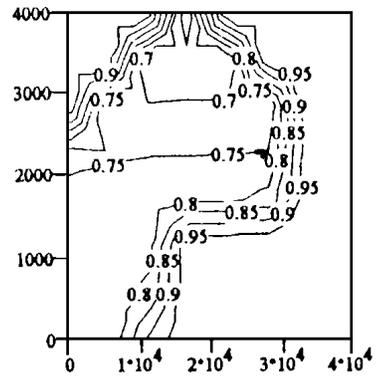


图 2(a) 120 万年纵剖面水饱和度等值线图

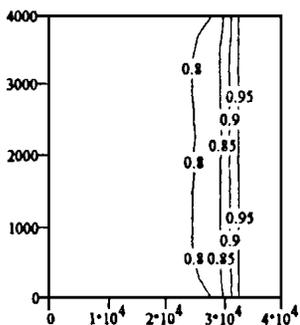


图 2(b) 120 万年横切面水饱和度等值线图

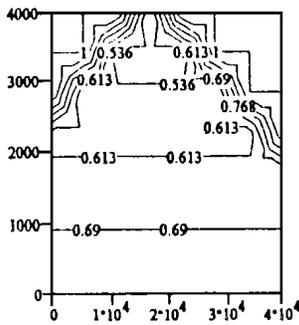


图 2(c) 300 万年纵剖面饱和度等值线图

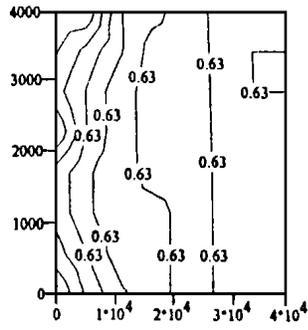


图 2(d) 300 万年横切面饱和度等值线图

基础上,我们对胜利油田东营凹陷的实际问题进行三维数值模拟试验。东营凹陷是济阳坳陷的主要含油区,也是东部陆相断陷含油气盆地的典型代表,目前勘探程度已达到 50~60%,研究程度也较高,因此选择东营凹陷作为研究目标具有代表性的实际意义^[6,13]。

模拟区域: 东营凹陷区沙三中(大地坐标)(m)

x : 20 593 246– 20 639 246

y : 4 119 110– 4 159 110

水平尺度: 48 000×42 000(m), 垂向跨度: 1 863m, 模拟总时间: 2 500 万年, 时间步长: 100 年, 空间网格: 24×21×50, 地层数据和排烃数据由胜利油田计算中心提供。我们将三维模拟结果以 x , y , z 三个方向的剖面或切面上水饱和度等值线图的形式给出(图 3)。

我们给出 2 500 万年时刻 x 方向($i = 8, 9$)等垂直剖面上含水饱和度等值线图(图 3(a)、图 3(b))及 y 方向($j = 2, 7$)垂直剖面上含水饱和度等值线图(图 3(c)、图 3(d)); 和水平横切面($k = 13, 19$)的水饱和度等值线图(图 3(e)、图 3(f))。

从数值模拟油、水位势和水饱和度在各个时刻的等值线图及其变化趋势可以看到,东营凹陷区沙三中的油藏主要在后 500 万年运移聚集而成。在以前的时间里,只有水的流动,而没有油的流动。数值结果清晰地显示出油水分离运移聚集的全过程,符合运移聚集的物理力学特性,油从高位势向低位势方向运移,最后聚集在油位势较低的区域,从而指明数值模拟结果是稳定可靠的。且数值模拟结果 2500 万年时刻水饱和度分布的等值线图可以看到成油藏位置分别与现在单家寺油田、纯化油田、乔庄油田、八面河油田等油田的位置基本吻合,这说明数值模拟方法是准确的,成功的解决了这一著名问题。它对油资源的评估、油藏位置的确定,寻找新的油田,均有重要的理论和实用价值。

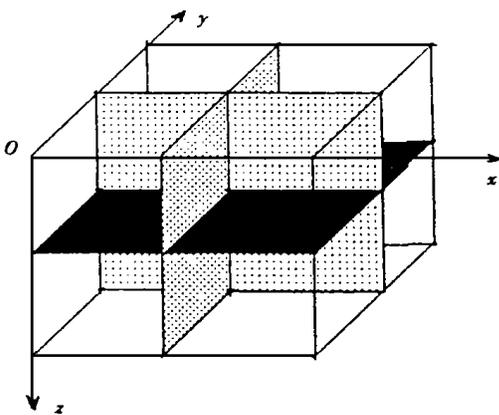


图 3 模拟区域示意图

本课题在研究过程中曾和美国 R. E. Ewing 教授讨论过,主要结果在胜利油田管理局和石油天然气总公司的“8·5”攻关项目评估会上报告过,对专家们的意见和建议特此表示感谢。

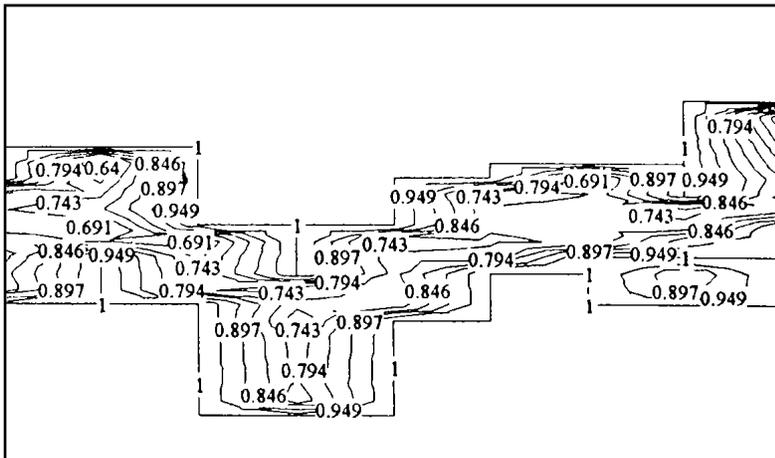


图 3(d) 东西剖面 $y = 4\ 148\ 110$, 水饱和度等值线图 ($j = 7$)

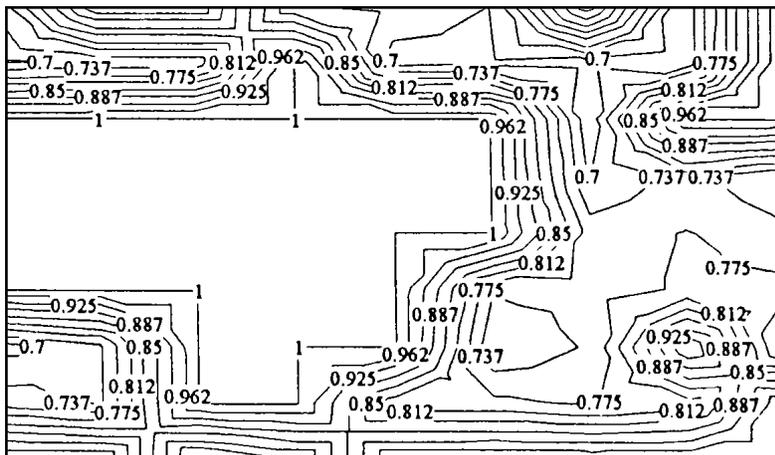


图 3(e) 横切面 $K = 13$, 水饱和度等值线图

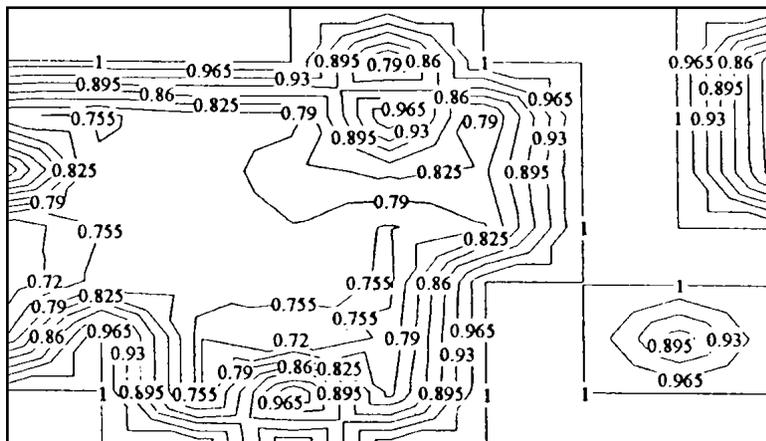


图 3(f) 横切面 $K = 19$, 水饱和度等值线图

[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 thermodynamic development of a sedimentary basin[J]. Geol Rundschau, 1978, **67**(3): 966~ 979.
- [3] 袁益让, 王文洽, 羊丹平, 韩玉笈, 杨成顺. 三维盆地发育史的数值模拟[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和分析[J]. 中国科学, A辑, 1996, **26**(1): 11~ 22.
- [5] P A 艾论, J R 艾论. 盆地分析——原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [6] 朱筱敏. 含油气断陷湖盆地分析[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] 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 [M]. Paris: Editions Technip, 1987, 414~ 455.
- [9] Ungerer P. Fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. AAPG Bull, 1990, **74**(3): 309~ 335.
- [10] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bull, 1953, **37**(8): 1954~ 2026.
- [11] Dembicki H, Jr, et al. Secondary migration of oil experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits[J]. AAPG Bull, 1989, **73**(8): 1018~ 1021.
- [12] Calalan L, et al. An experimental study of secondary oil migration[J]. AAPG Bull, 1992, **76**(5): 638~ 650.
- [13] 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

Simulation and Application of Three-Dimensional Migration-Accumulation of Oil Resources

Yuan Yirang¹, Zhao Weidong¹, Cheng Aijie¹, Han Yuji²

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

2 Computer Centre of Shengli Petroleum Administration,

Dongying, Shandong 257022, P R China)

Abstract: Numerical simulation of oil migration and accumulation are to describe the history of oil migration and accumulation in basin evolution. It is of great value in the exploration of oil resources and their rational evaluation. In this thesis, from such actual conditions as the effects of mechanics of fluids in porous media and 3-dimensional geology characteristics, a kind of modified method of second order splitting-up implicit interactive scheme is put forward. For the famous hydraulic experiment of secondary migration-accumulation, the numerical simulation test has been done, and both the computational and experimental results are basically identical. For the actual problem of Dongying hollow of Shengli Petroleum Oil Field, our numerical simulation test and the actual conditions are basically coincident. Thus the well-known problem has been solved.

Key words: mechanics of immiscible flow; 3-dimensional migration-accumulation of oil resources; splitting-up; numerical simulation; Dongying hollow