

基于格子Boltzmann方法的孔隙尺度水驱油数值模拟研究

黄柯*, 周晓龙, 段晨曦

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月8日; 录用日期: 2026年5月10日; 发布日期: 2026年5月27日

摘要

针对长期水驱后储层内部剩余油微观分布难以准确表征的问题, 本文基于格子Boltzmann方法建立了孔隙尺度水驱油数值模拟模型。采用多组分多松弛时间格子Boltzmann模型描述复杂孔隙介质中油水两相流动, 并结合半步反弹边界、Zou-He速度入口和零梯度出口边界实现驱替过程模拟。通过接触角验证和Poiseuille流动验证, 证明所建模型具有较好的数值精度与可靠性。在此基础上, 利用CT扫描铸体薄片二值化图像构建孔隙介质模型, 对水湿和油湿条件下的水驱过程进行了对比分析。结果表明, 润湿性显著影响水相推进路径、驱替前缘形态及剩余油赋存特征; 与油湿条件相比, 水湿条件下水相波及范围更大, 剩余油分布更分散, 驱替效率更高。研究结果可为孔隙尺度剩余油识别及提高采收率机理研究提供参考。

关键词

水驱, 剩余油, 格子Boltzmann, 提高采收率

A Pore-Scale Numerical Study of Waterflooding in Oil Reservoirs Based on the Lattice Boltzmann Method

Ke Huang*, Xiaolong Zhou, Chenxi Duan

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: April 8, 2026; accepted: May 10, 2026; published: May 27, 2026

Abstract

To address the difficulty in accurately characterizing the microscopic distribution of residual oil in

*通讯作者。

文章引用: 黄柯, 周晓龙, 段晨曦. 基于格子 Boltzmann 方法的孔隙尺度水驱油数值模拟研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 692-702. DOI: 10.12677/me.2026.143069

reservoirs after long-term water flooding, a pore-scale numerical model for water flooding was established based on the lattice Boltzmann method. A multicomponent multi-relaxation-time lattice Boltzmann model was employed to describe oil-water two-phase flow in complex porous media, and the displacement process was simulated using half-way bounce-back boundaries, a Zou-He velocity inlet, and a zero-gradient outlet boundary. Contact angle validation and Poiseuille flow validation demonstrated that the proposed model has good numerical accuracy and reliability. On this basis, a porous medium model was constructed from binarized CT images of cast thin sections, and comparative simulations of water flooding under water-wet and oil-wet conditions were carried out. The results show that wettability significantly affects the advance path of the water phase, the morphology of the displacement front, and the distribution characteristics of residual oil. Compared with the oil-wet condition, the water-wet condition exhibits a larger sweep area, a more dispersed residual oil distribution, and higher displacement efficiency. The results provide a useful reference for pore-scale residual oil characterization and the study of enhanced oil recovery mechanisms.

Keywords

Water Flooding, Residual Oil, Lattice Boltzmann, Enhanced Oil Recovery

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石油与天然气资源是关系国家经济发展与能源安全的重要战略资源，也是维系现代工业体系稳定运行的重要物质基础[1] [2]。截至 2024 年底，我国石油与天然气对外依存度分别达到 71.9%和 41%，油气供给压力依然突出。因此，提高国内油气资源开发效率、增强资源自给能力，对保障国家能源安全具有重要意义。水驱作为我国油田开发中最广泛应用的二次采油方式，在长期开发中发挥了重要作用[3]。然而，经过长期水驱后，我国多数老油田已进入高含水、低产油开发阶段，地下油水分布日益复杂，剩余油多以孤立状、膜状或滞留于微细孔喉中的形式存在，其赋存状态难以直接识别[4] [5]。准确揭示长期水驱后储层内部剩余油分布规律，是老油田进一步挖潜增产、提高采收率的重要基础。

目前，CMG、Petrel RE、ECLIPSE 等数值模拟软件多用于矿场尺度开发动态预测，能够较好描述压力场与饱和度场演化，但其建立在连续介质假设基础上，难以刻画微细孔隙中油水两相界面运移及剩余油微观滞留特征。尤其对于低渗带和复杂孔喉中的残余油分布，矿场尺度模拟存在明显局限。格子 Boltzmann 方法是一种介于连续介质方法与分子动力学方法之间的介观数值方法，通过分布函数演化描述流体运移规律，不同于传统基于 Navier-Stokes 方程的数值模拟，也不同于直接追踪分子运动的微观方法[6] [7]。该方法具有边界处理方便、易于表征复杂孔隙结构、能够较好捕捉多相界面演化等优点，因而在孔隙尺度多相渗流研究中展现出独特优势[8] [9]。近年来，学者已将其用于油水两相流动、剩余油赋存及驱替机理研究，但针对长期水驱背景下复杂孔隙内剩余油分布与演化规律的研究仍不够系统[10] [11]。

基于此，本文采用格子 Boltzmann 方法开展孔隙尺度水驱油数值模拟研究，重点分析复杂孔隙结构中油水界面推进、剩余油形成与滞留特征，揭示水驱过程中剩余油的微观分布规律，为老油田提高采收率研究提供理论依据。

2. 模型与方法

2.1. 格子 Boltzmann 模型

在格子 Boltzmann 方法中, 多孔介质内流体运动通常采用 Bhatnagar-Gross-Krook (BGK)模型进行描述。但在多组分多相流动模拟中, BGK 模型存在稳定性不足、数值计算易发散等缺陷。为此, 本文采用多组分多松弛时间格子 Boltzmann 模型(Multicomponent and Multiphase Multi-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Model, MCMP-MRT-LBM)对孔隙尺度下水驱油两相流动进行模拟。其控制方程为:

$$f_{\alpha}(x + e_{\alpha}\delta_t, t + \delta_t) = f_{\alpha}(x, t) - (M^{-1}\Lambda M)_{\alpha\beta} (f_{\beta} - f_{\beta}^{eq}) + \delta_t F'_{\alpha} \quad (1)$$

其中, f_{α} 表示密度分布函数, f_{α}^{eq} 表示平衡态密度分布函数, t 表示格子时间, x 表示格点位置, e_{α} 表示第 α 方向上的离散速度, δ_t 表示格子时间, F'_{α} 表示速度空间中的力项, M 表示正交变换矩阵, Λ 表示松弛对角矩阵, 其分别可以表示为:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & -2 & -2 & -2 & -2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 2 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\Lambda = \text{diag}(\tau_{\rho}^{-1}, \tau_e^{-1}, \tau_s^{-1}, \tau_j^{-1}, \tau_q^{-1}, \tau_j^{-1}, \tau_q^{-1}, \tau_v^{-1}, \tau_v^{-1}) \quad (3)$$

其中, τ_i^{-1} 表示分布函数空间 f_{α} 中各距分量对应的松弛率, τ_{ρ}^{-1} 和 τ_j^{-1} 分别对应密度与动量守恒量, τ_e^{-1} 、 τ_s^{-1} 、 τ_q^{-1} 和 τ_v^{-1} 则分别对应能量、能量平方、能量通量以及应力张量等非守恒量。其中, τ_e^{-1} 、 τ_s^{-1} 和 τ_q^{-1} 均为可调自由参数, 可根据数值稳定性和数值需求自由取值。 τ_v^{-1} 与流体动力粘度有以下关系:

$$\nu = c_s^2 \left(\tau_v - \frac{1}{2} \right) \delta_t \quad (4)$$

其中, $c_s = 1/\sqrt{3}$ 为格子速度, ν 为流体动力粘度。平衡态密度分布函数可表示为:

$$f_{\alpha}^{(eq)} = w_{\alpha} \rho_{\alpha} \left[1 + \frac{e_{\alpha} \cdot u^2}{c_s^2} + \frac{(e_{\alpha} \cdot u^{eq})^2}{2c_s^4} - \frac{u^{eq^2}}{2c_s^2} \right] \quad (5)$$

$$w_{\alpha} = \begin{cases} 4/9 & \alpha = 1 \\ 1/9 & \alpha = 2-5 \\ 1/36 & \alpha = 6-9 \end{cases} \quad (6)$$

其中, w_{α} 表示权重, ρ_{α} 和 u^{eq} 分别表示流体密度和平衡速度, 平衡速度计算如下:

$$u^{eq} = (u_x^{eq}, u_y^{eq}) = \frac{\sum_{\sigma} \rho_{\sigma} u_{\sigma}}{\sum_{\sigma} \rho_{\sigma}} \quad (7)$$

分量 σ 的速度可表示为:

$$\rho_\sigma u_\sigma = \sum_\sigma e_\sigma f_{\sigma,\alpha} + \frac{F_\sigma}{2} \quad (8)$$

其中, $F_\sigma = (F_{\sigma,x}, F_{\sigma,y})$ 为外部合力, 并且 $F_\sigma = F_{\sigma,int} + F_{\sigma,ads}$, $F_{\sigma,int}$ 表示两个不同组分之间的相互作用力, $F_{\sigma,ads}$ 表示每个组分与固体之间的粘附力。对于 MCMP 流动, 每个力项可以分别表示为:

$$F_{\sigma,int}(x) = -G_{\sigma\sigma'} \varphi_\sigma(x) \sum_\alpha w(|e_\alpha|^2) \varphi_{\sigma'}(x + e_\alpha \delta_t) e_\alpha \quad (9)$$

$$F_{\sigma,ads} = -G_{\sigma s} \varphi_\sigma \varphi_\sigma(x) \sum_\alpha w(|e_\alpha|^2) \varphi[\rho_s(x + e_\alpha \delta_t)] e_\alpha \quad (10)$$

其中 $G_{\sigma\sigma'}$ 表示不同组分之间的相互作用强度, $G_{\sigma s}$ 表示各组分与固体之间的相互作用强度, $\varphi_\sigma = 1 - \exp(-\rho_\sigma)$ 表示伪势模型中的伪势, $\varphi[\rho_s(x + e_\alpha \delta_t)]$ 表示壁面虚拟密度伪势。 $w(|e_\alpha|^2)$ 表示计算各力项时 σ 方向的权重系数:

$$w(|e_i|^2) = \begin{cases} = 0, & |e_i|^2 = 0 \\ = 1, & |e_i|^2 = \frac{1}{3} \\ = 2, & |e_i|^2 = \frac{1}{12} \end{cases} \quad (11)$$

通过变换矩阵 \mathbf{M} , 密度分布函数 f_α 及其平衡分布函数 $f_\alpha^{(eq)}$ 可以分别通过 $m_\sigma = \mathbf{M}f_\sigma$ 和 $m_\sigma^{eq} = \mathbf{M}f_\sigma^{eq}$ 投影到模型的矩空间上, 对于 D2Q9 模型, 其平衡分布 m_σ^{eq} 为:

$$m_\sigma^{eq} = \rho_\sigma \left(1, -2+3|u^{eq}|^2, 1-3|u^{eq}|^2, u_x^{eq}, -u_x^{eq}, u_y^{eq}, -u_y^{eq}, u_x^{eq}u_y^{eq}, -u_x^{eq}u_y^{eq}, u_x^{eq}u_y^{eq} \right)^T \quad (12)$$

通过考虑变换矩阵 \mathbf{M} , 可以将式(1)改写为:

$$\mathbf{m}^* = \mathbf{m} - \Lambda(\mathbf{m} - \mathbf{m}^{eq}) + \delta_t \left(\mathbf{I} - \frac{\Lambda}{2} \right) \mathbf{S} \quad (13)$$

其中, \mathbf{I} 为单位张量, \mathbf{S} 为矩空间中的外力项, 且 $\left(\mathbf{I} - \frac{\Lambda}{2} \right) \mathbf{S} = \mathbf{M}\mathbf{F}'$, \mathbf{S} 可以被表示为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6\mathbf{u} \cdot \mathbf{F} \\ -6\mathbf{u} \cdot \mathbf{F} \\ F_x \\ -F_x \\ F_y \\ -F_y \\ 2(u_x F_x - u_y F_y) \\ u_x F_y + u_y F_x \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2. 边界条件

根据不同模拟模型中的流动特点, 本文分别施加了相应的边界条件。对于接触角验证和泊肃叶流动验证, 计算域进出口方向采用周期边界, 固体壁面采用半步反弹边界。周期边界可表示为:

$$f_{2,6,9}(1, y) = f_{2,6,9}(N_x, y) \quad (15)$$

$$f_{4,7,8}(N_x, y) = f_{4,7,8}(1, y) \quad (16)$$

半步反弹边界用于实现固体壁面的无滑移条件，其表达式为：

$$f_{\bar{\alpha}}(x_f, t + \delta_t) = f_{\alpha}^*(x_f, t) \quad (17)$$

其中， x_f 表示流体节点位置， $\bar{\alpha}$ 表示与 α 相反的离散速度方向， f_{α}^* 为碰撞后的分布函数。

对于水驱油过程，入口边界采用了 Zou-He 速度边界，出口边界采用零梯度出流边界，固体内边界仍采用半步反弹边界处理。Zou-He 入口速度边界可表示为：

$$\rho_{in} = \frac{f_0 + f_2 + f_4 + 2(f_3 + f_6 + f_7)}{1 - u_{in,x}} \quad (18)$$

$$f_1 = f_3 + \frac{2}{3} \rho_{in} u_{in,x} \quad (19)$$

$$f_5 = f_7 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6} \rho_{in} u_{in,x} + \frac{1}{2} \rho_{in} u_{in,y} \quad (20)$$

$$f_8 = f_6 - \frac{1}{2}(f_2 - f_4) + \frac{1}{6} \rho_{in} u_{in,x} - \frac{1}{2} \rho_{in} u_{in,y} \quad (21)$$

2.3. 模型验证

2.3.1. 接触角验证

本文基于 Matlab 编写了相应的计算程序，并开展不同模型的数值模拟。为验证所构建数值模拟模型对壁面润湿性的表征能力，计算域尺寸设置为 $260 \times 180 \text{ lu}$ ，上下边界设为固体壁面，并采用半步反弹边界条件，左右边界设为周期边界。初始条件下，在下壁面上方两个格子处放置一个半径为 24 lu 的液滴，液滴外部区域为气相。其中，液滴初始密度设为 1.85 ，气相初始密度设为 0.2 。通过调节虚拟密度参数，可获得不同润湿条件的接触角，从而验证模型在壁面润湿性表征方面的有效性。图 1 和图 2 分别给出了计算达到稳定状态后的接触角模拟结果以及不同虚拟密度对应的接触角变化关系。结果表明，所建立的数值模拟模型能够较好地表征壁面润湿特性，模拟结果具有较好的合理性与可靠性。

2.3.2. Poiseuille 流动验证

为验证格子 Boltzmann 模型对层流流动的模拟精度，本文采用经典的 Poiseuille 流动进行数值模拟验证。Poiseuille 流动是指在两块固定平板间受压差驱动所形成的稳定层流。对于该流动，在入口与出口压差作用下，流体沿主流方向运动，其在任一截面上的速度分布可由解析解表示为：

$$u = \frac{G}{2\mu} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (22)$$

$$p(x) = p_m - Gx \quad (23)$$

其中， u 为剖面速度， G 为压力梯度， μ 为流体动力粘度， h 为平板间的距离， $p(x)$ 为沿流动方向的压力分布， p_m 为入口端压力。

模拟参数设置如下： $N_x = 21$ ， $N_y = 21$ ， $\rho = 3$ ， $\nu = 1/6$ 。入口端压力取 $p_m = 1.001$ ，出口端压力取 $p_{out} = 1.000$ 。模型收敛判据定义为：

$$\frac{\sqrt{\sum [u(t) - u(t-100)]^2}}{\sqrt{\sum u(t)^2}} \leq 10^{-14} \quad (24)$$

图 3 给出了 Poiseuille 流动的速度分布结果，图 4 展示了达到稳态后流速剖面及沿主流方向压力分布

的模拟结果与理论解的对比。结果表明，速度剖面分布及压力变化规律与解析解吻合较好，说明本文建立的格子 Boltzmann 模型能够较为准确地表征 Poiseuille 流动过程，具有良好的数值精度与可靠性。

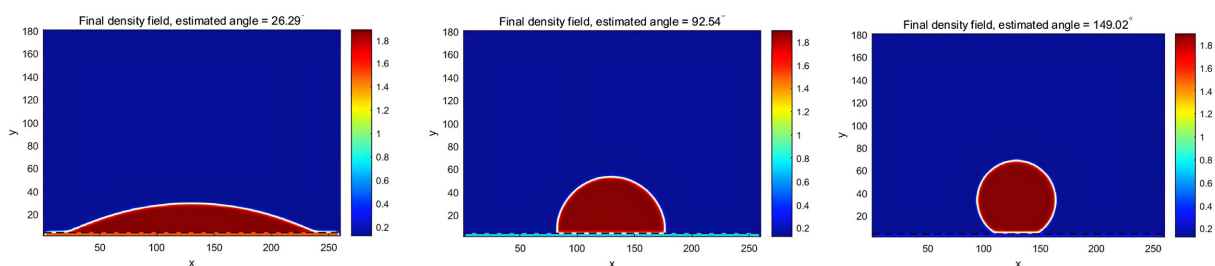


Figure 1. Simulation diagram of contact angle
图 1. 接触角模拟图

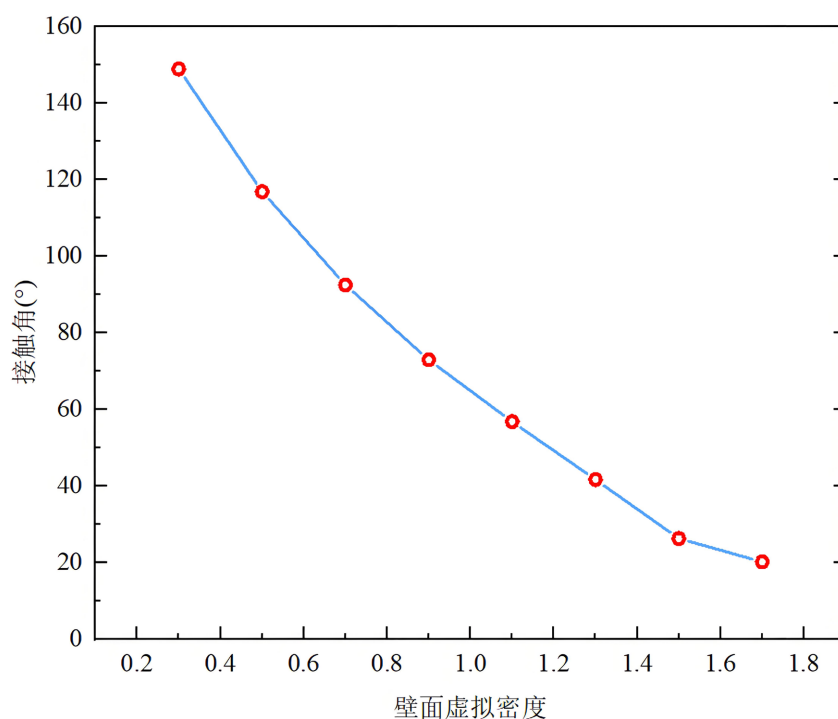


Figure 2. Schematic illustration of contact angles under different virtual density values
图 2. 不同虚拟密度取值下的接触角示意图

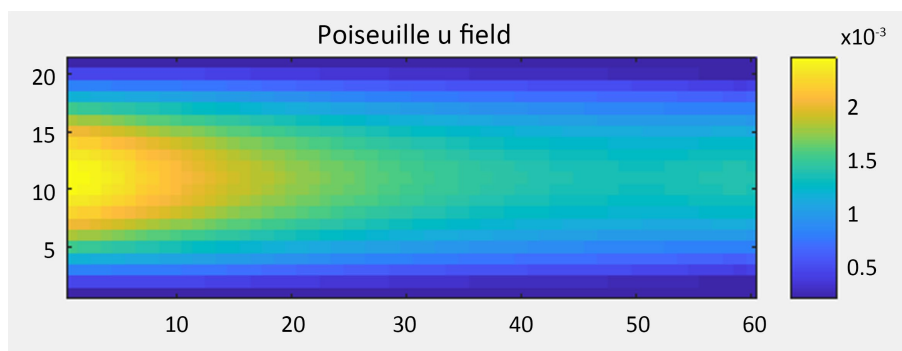


Figure 3. Schematic diagram of Poiseuille flow
图 3. Poiseuille 流动示意图

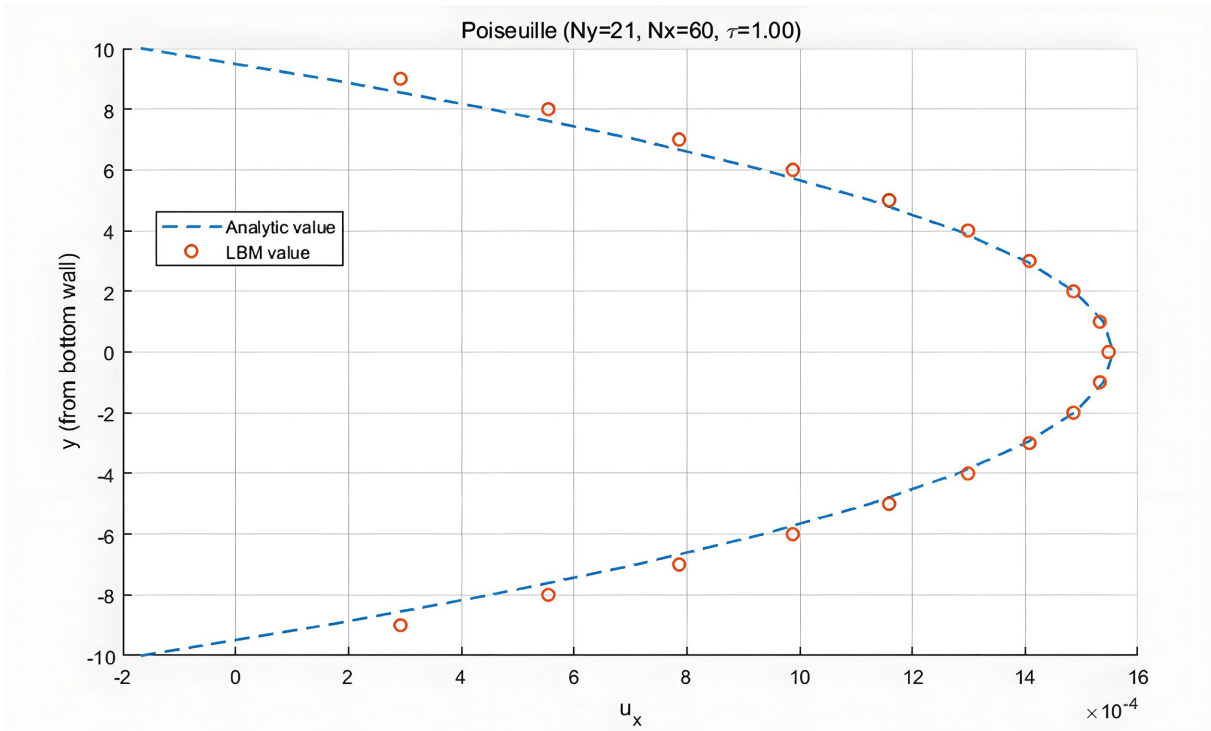


Figure 4. Comparison between the analytical and simulated velocity profiles for Poiseuille flow
 图 4. Poiseuille 流速度解析解与模拟解对比

2.4. 无因次参数定义及格子单位转化

为定量表征水驱油过程中粘性力与毛管力的相对重要性，本文引入毛细数和粘度比两个关键无因次参数。毛细数定义为：

$$Ca = \frac{\mu_w v}{\sigma} \tag{25}$$

其中， μ_w 为水相粘度， v 为特征速度， σ 为油水界面张力。本文中， v 取流场平均速度， σ 可由 Laplace 验证求得。粘度比定义为：

$$M = \frac{\mu_w}{\mu_o} \tag{26}$$

其中， μ_o 为油相动力粘度。动力粘度 μ_α 可由运动粘度换算得到，可表示为：

$$\mu_\alpha = \rho_\alpha \nu_\alpha \tag{27}$$

其中， ρ_α 和 ν_α 分别表示第 α 相的密度和运动粘度。

在格子 Boltzmann 模拟，计算通常在格子单位下进行。为建立格子单位与实际物理单位之间的联系，可定义格子步长 Δx ，时间步长 Δt 以及参考密度 ρ_{ref} ，对于物理尺度下的格子单位映射关系为：

$$x_{phys} = x_{lu} \Delta x \tag{28}$$

$$t_{phys} = t_{lu} \Delta t \tag{29}$$

$$u_{phys} = u_{lu} \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{30}$$

$$v_{phys} = v_{lu} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad (31)$$

$$\mu_{phys} = \mu_{lu} \rho_{ref} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad (32)$$

其中, $phys$ 下标表示物理单位, lu 下标表示格式单位。

3. 结果与讨论

3.1. 参数设置

数值模拟所采用的孔隙模型来源于由 CT 扫描获取的铸体薄片图像。为便于开展格子 Boltzmann 模拟, 首先对原始图像进行了灰度分割、二值化及必要的图像预处理, 以获得清晰的孔隙 - 骨架结构边界。在此基础上, 选取其中具有代表性的局部区域建立了二维孔隙介质模型, 如图 5 所示。最终构建的计算区域为 $300 \times 300 lu$, 孔隙度约为 33%, 从图像几何特征上看, 该区域孔隙与喉道发育不均, 局部存在较明显的大孔隙 - 细喉道结合, 孔隙连通通道具有一定曲折性, 能够在一定程度上反映复杂孔喉结构对油水两相运移路径和界面推进方式的控制作用。

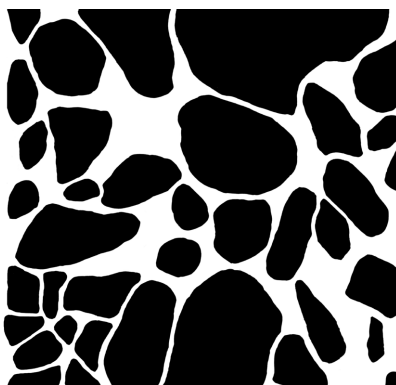


Figure 5. Porous medium domain used for numerical simulation

图 5. 数值模拟所采用的多孔介质区域

模拟所采用的油相与水相的基础物性参数、初始润湿条件以及关键无因次参数见表 1。

Table 1. Basic physicochemical properties of the oil–water two-phase system and initial wettability conditions

表 1. 油水两相基础物性参数及初始润湿条件

参数	值
油密度	0.8
水密度	1
油运动粘度	0.3
水运动粘度	0.1
毛管数	1.68×10^{-5}
流度比	0.42
初始润湿性	水湿
	油湿

3.2. 驱油结果对比

图 6 展示了不同润湿条件下孔隙尺度水驱过程中剩余油的动态演化特征，其中黑色为固体骨架，蓝色为注入水相，红色为油相。(a)为水湿条件，(b)为油湿条件。结合关键无因次参数分析可知，本文工况处于低毛管数驱替范围，表明毛管力在界面推进和剩余油滞留中占据重要地位；同时，黏度比 $M = 0.42$ 表明黏性力对驱替前缘稳定性亦具有一定影响。因此，不同润湿条件下驱替模式的差异，并非仅由润湿性单独决定，而是孔喉几何、毛管力和黏性力共同作用的结果。为进一步揭示其机理，本文将模拟过程中观察到的典型现象与活塞式驱替、Haines jump、膜状流、绕流及毛管捕获等孔隙尺度过程进行对应分析。

在驱替初期(Step-1 至 Step-5000)，两种条件下水相均从左侧优先进入连通性较好的孔喉通道，但其推进方式存在明显差异。水湿条件下，水相作为润湿相，更容易沿孔壁和角隅区域铺展，并推动油水界面整体向前推进，前缘形态相对连续、平缓，表现出较明显的活塞式驱替特征。这说明在水湿介质中，毛管力有利于水相优先占据孔壁附近区域，从而增强界面整体推进能力。相比之下，油湿条件下岩石表面对油相具有更强亲和性，水相作为非润湿相进入小孔喉时需要克服更大的毛管进入压力，因此其推进更倾向于沿少数阻力较低的优势通道进行，表现出较明显的绕流与局部指进特征。对于部分收缩 - 扩张

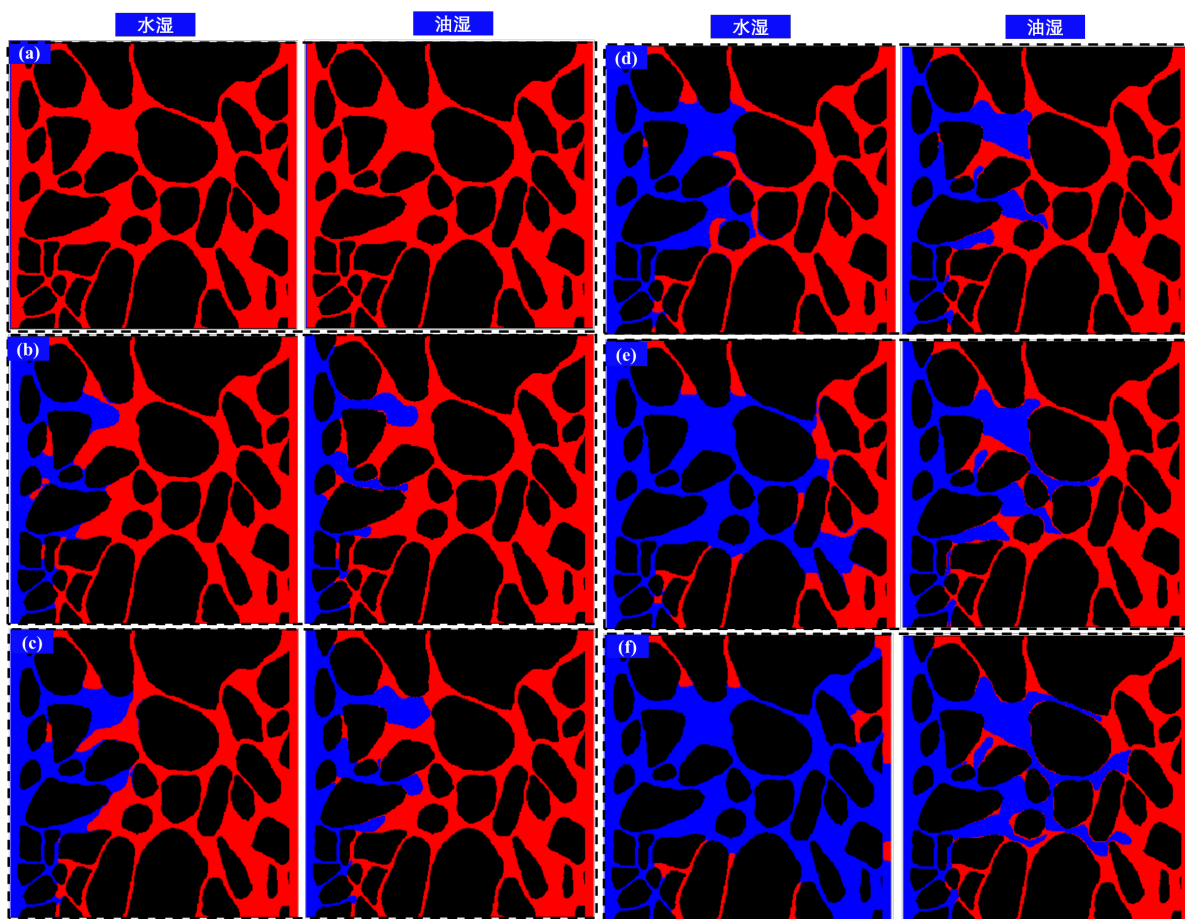


Figure 6. Distribution of residual oil in the pore space after water flooding under water-wet and oil-wet conditions: (a) step = 0, (b) step = 5000, (c) step = 10,000, (d) step = 15,000, (e) step = 20,000, (f) step = 25,000

图 6. 水湿和油湿孔隙水驱后孔隙空间内剩余油分布: (a) step = 0, (b) step = 5000, (c) step = 10,000, (d) step = 15,000, (e) step = 20,000, (f) step = 25,000

型孔喉结构,当油水界面在喉部积聚足够毛管压力后,会快速跃迁进入下游较大孔隙,呈现出类似 Haines jump 的局部突进特征,从而导致前缘推进的不连续性增强。

在驱替中期(Step-10,000 至 Step-15,000),水湿条件下水相逐步贯通更多中小孔喉,并对中心区域油相形成持续切割作用,连续油相逐渐被分割为多个不连续团簇和孤立油滴。该现象表明,在水湿条件下,除主通道推进外,水相还沿孔壁表现出与膜状流相一致的附壁铺展特征,从而增强了对附壁油和角隅油的剥离作用,提高了横向波及能力。与此同时,部分油相在狭窄喉道、死端孔以及局部封闭区域中因界面曲率和毛管压力重新分布而发生滞留,开始形成孤立状、簇状和膜状剩余油。相比之下,油湿条件下水相虽然也可沿主通道继续推进,但其对孔壁附近油相的剥离作用较弱,许多孔隙仍被油相占据。由于水相优先沿连通性较好的中心流道运移,绕流后形成的未波及区和旁通油持续存在,油相在孔壁附近仍保持较好的连续性,因此剩余油更容易表现为附壁状和连通状滞留。

在驱替后期(Step-25,000),两种润湿条件下的差异进一步扩大。水湿条件下,水相已在大部分连通孔隙中形成较完善的流动网络,油相显著减少,剩余油主要以离散斑块、细小油滴和局部薄膜的形式滞留于大孔隙边角、死端区域及个别未充分连通的微细孔喉中。这类残余油主要属于界面切割后形成的毛管捕获型残余油,其形成与局部几何封闭、毛管压力平衡及角隅滞留密切相关。油湿条件下到驱替后期仍保留了较大面积的连续油相残留,尤其在孔壁附近、孔喉转折处以及若干较大孔隙中仍存在明显富集。这说明在油湿介质中,油相更易在壁面形成附着油膜或连通油带,水相难以有效进入部分小孔喉和边角区域,导致残余油更多表现为附壁状、连片状和网络状滞留,其本质在于油相与固体表面之间较强的黏附作用抑制了油相的进一步剥离。

综合来看,不同润湿条件下的驱替差异可从孔隙尺度物理机制上得到解释。水湿条件下,活塞式驱替、附壁铺展及局部膜状推进共同提高了水相对孔喉空间的动用程度,使油相更易被切割并最终转化为分散型残余油;而油湿条件下,绕流、局部指进、附壁滞留及毛管捕获共同作用,使油相更容易保留为连通状和附壁状残余油,从而降低最终驱替效率。这表明,润湿性不仅影响界面推进路径,也通过改变毛管进入条件和附壁流动方式控制孔隙尺度剩余油的形成与分布。

4. 结论

本文基于格子 Boltzmann 方法建立了适用于孔隙尺度水驱油模拟的多组分多松弛时间模型,结合半步反弹边界、Zou-He 速度入口和零梯度出口边界,实现了复杂孔隙介质内油水两相流动过程的稳定求解。接触角验证与 Poiseuille 流动验证结果表明,所建模型能够较好表征壁面润湿特性及层流流动规律,具有较好的数值稳定性与可靠性。在此基础上,对不同润湿条件下的水驱过程进行了对比分析。结果表明,润湿性显著影响水相推进路径、驱替前缘形态及剩余油赋存特征。与油湿条件相比,水湿条件下水相更易沿孔壁铺展并进入中小孔喉,驱替波及范围更大,油相更易被切割和剥离,剩余油主要以离散斑块、细小油滴和局部薄膜形式滞留;而在油湿条件下,油相更易附着于孔壁并形成连片状、网络状残余油,导致驱替效率下降。研究表明,改善储层润湿性、增强岩石亲水性,是降低残余油饱和度、提高水驱采收率的重要途径。值得注意的是,本文仍存在一定局限性:一方面,基于 CT 铸体薄片图像构建的二维孔隙模型难以完整反映真实三维孔隙网络的连通关系与界面演化过程;另一方面,单一孔隙结构样本的代表性有限。因此,本文结论更适用于该类孔隙结构条件下的机理分析,后续仍需结合多样本与三维数字岩心进一步验证和完善。

基金项目

重庆市研究生科研创新项目(CYS25814)。

参考文献

- [1] Meng, L. and Li, J. (2024) Natural Resources Volatility and Geopolitical Risk: A Novel Perspective of Oil and Mineral Rents Using Quantile-Quantile Regression for China. *Resources Policy*, **88**, Article ID: 104499. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104499>
- [2] Yuan, F. and Zhang, P. (2024) Are Natural Resources, Sustainable Growth and Entrepreneurship Matter Endogenous Growth Theory? The Strategic Role of Technical Progress. *Resources Policy*, **96**, Article ID: 105189. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105189>
- [3] 张龙, 王建宁, 刘光海. 砂岩油田水驱特征开发效果评价方法研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(15): 3-4.
- [4] 李照永, 罗雕, 迟博, 等. 基于高精度 CT 扫描的水驱剩余油赋存状态与演化规律——以松辽盆地大庆长垣东部白垩系萨葡油层为例[J/OL]. 岩性油气藏, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/62.1195.TE.20260210.1125.005>, 2026-05-19.
- [5] 任梦瑶, 石强, 辛骅志, 等. 砾岩油藏水驱剩余油分布特征及技术对策[J]. 特种油气藏, 2023, 30(1): 147-153.
- [6] 赵勇, 肖奇, 陈鑫梦, 等. 一类求解不可压 Navier-Stokes 方程的二阶有限差分格子 Boltzmann 方法[J]. 力学学报, 2025, 57(11): 2709-2721.
- [7] 赵勇, 葛懿萱, 陈鑫梦, 等. 基于对流扩散系统的不可压 Navier-Stokes 方程的多分布正则化格子 Boltzmann 方法[J]. 力学学报, 2025, 57(7): 1597-1610.
- [8] 龚文波, 陈志强, 郑江韬, 等. 页岩油孔隙微纳渗流的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 力学学报, 2025, 57(12): 2802-2813.
- [9] 王瀚, 苏玉亮, 王文东, 等. 基于格子 Boltzmann 方法的页岩纳米多孔介质流体流动模拟[J]. 石油学报, 2023, 44(3): 534-544.
- [10] 杨柳, 高敬威, 郑元涵, 等. 基于 LB 方法的非均质砂质砾岩渗吸规律数值模拟[J]. 计算物理, 2021, 38(5): 534-542.
- [11] 汪勇, 孙业恒, 梁栋, 等. 基于数字岩心与格子 Boltzmann 方法的致密砂岩自发渗吸模拟研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(4): 458-466.