

基于高阶格式的高精度化学驱模拟

朱舟元^{1,4*}, 李明辉², 雷征东³, 陈掌星^{1,4}

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102200

2 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102200

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4 中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102200

* 通信作者, zhuzy02@cup.edu.cn

收稿日期: 2017-11-21

中国石油大学(北京)科研基金项目(编号: 2462016YJRC016)资助

摘要 油藏数值模拟的精度取决于网格尺寸, 网格越小, 模拟结果的精度越高, 结果越趋近于收敛。大尺寸网格往往伴随着严重的数值扩散现象。化学驱作为一种复杂的提高采收率过程, 由于其复杂的机理(如乳液的相态变化), 往往需要很小尺寸的网格以获得精确的模拟结果。本文重点探讨使用高阶格式来改进化学驱模拟的精度。首先对提高油藏数值模拟精度的主流方法进行了全面的分析, 包括网格粗化方法、自适应网格加密方法和高阶格式方法。考虑到化学驱模拟的特点, 本文选用高阶格式方法对化学驱模拟的精度进行改进提升。随后测试了一维、二维和三维矿场尺度的ASP三元复合驱模拟问题, 结果发现模拟的精度高度依赖于所用的网格尺寸。为了获得接近收敛的结果, 化学驱所需的网格尺寸远小于水驱模拟。一维化学驱中, 网格越粗, 表面活性剂分布越“平均化”, 最终采收率越低。使用二阶和三阶格式, 一维、二维和三维矿场尺度三元复合驱模型测试的模拟精度均有大幅提升。使用较粗的网格及高精度格式, 即可获得与细网格类似的精度。高精度格式为降低数值黏性、提高精度、降低模拟所需网格数和计算时间, 提供了有效的解决办法。该方法也有助于大型油田化学驱的快速精确数值模拟、历史拟合、优化等技术的顺利实施。

关键词 油藏数值模拟; 化学驱; 模拟精度; 高阶格式; 数值模拟效率

0 引言

复杂油气藏采收过程的数值模拟往往包含了复杂的物理化学过程, 油藏网格作为模拟多相多组分流动的基本单元, 它的尺寸大小对于复杂开采过程的模拟精度有着重要的影响。一般认为网格尺寸越小, 模拟结果的精度越高, 越趋近于收敛的解。网格尺寸越大, 数值误差越大, 造成数值弥散、耗散等现象, 模拟结果越不精确^[1]。故在可行的情况下, 模拟必须采用足够精细的网格以获得可靠的结果。对于大型油气藏矿场尺度的模拟, 精细的网格往往意味着高昂的代价和

冗长的模拟机时, 其模拟机时甚至于超出现有计算机的模拟能力。

化学驱的驱替过程往往同时存在十多个组分和油、气、水、乳液等多个相态。过程中的各种效应高度耦合, 存在较强的非线性相互作用。同时, 其驱替效率又很大程度依赖于局部的化学剂浓度(如表面活性剂浓度)和乳液相态变化。故化学驱模拟过程对网格尺寸的敏感性较高, 需要精细的网格以获得精确的模拟结果^[2-4]。

本文首先综述用以提高油藏数值模拟精度的3种主流方法: 动态网格加密、粗化技术和高精度数值模

引用格式: 朱舟元, 李明辉, 雷征东, 陈掌星. 基于高阶格式的高精度化学驱模拟. 石油科学通报, 2018, 02: 215-231

ZHU Zhouyuan, LI Minghui, LEI Zhengdong, CHEN Zhangxing. High resolution chemically enhanced oil recovery simulation using higher order differential schemes. Petroleum Science Bulletin, 2018, 02: 215-231. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.021

拟格式。对于化学驱,特别是三元复合驱 ASP(Alkaline Surfactant Polymer)问题,总结了前人在动态网格加密和粗化技术上的成果,并提出了第3种有效的解决方案:使用高精度格式进行模拟。其次,利用化学驱模拟软件 UTCHEM,对不同网格尺寸下的一维、二维 ASP 模型进行模拟。发现模拟结果对使用的网格尺寸高度敏感,对于矿场尺度而言,异常精细的网格才能获得相对收敛的计算结果。通过比较模拟结果,特别是同一时刻下化学剂浓度的分布,发现模拟精度对网格尺寸具有高敏感性是因为大尺寸网格对于化学组分及化学剂浓度存在过度的“人工稀释”效应。最后,根据这一发现,本文选用高精度格式以更加精确地刻画网格内部组分及化学剂的浓度分布。数值模拟测试表明,高精度格式可以大大提高模拟精度,或者满足一定精度所需的网格尺寸要求。这对于降低模拟计算成本、提高模拟精度有着巨大的帮助。使用高阶格式的化学驱模拟将为油田矿场尺度大型化学驱数值模拟提供有效的技术解决方案。

1 油藏数值模拟精度改进的主流方法

主流的商业或学术型油藏数值模拟器都基于基本的一阶迎风格式有限差分或有限体积方法^[11-12]。其特点为,在网格间流量计算时使用上游(迎风向)网格内平均的压力、饱和度、组分浓度等物理量来计算多相达西定律所决定的流量。一阶迎风格式的网格内物理量完全平均造成较大的模拟误差。这在复杂技术提高采收率过程中尤为显著,比如火烧油层^[9]、混相、非混相气驱和凝析气开采^[7-8]等。

改进基于一阶迎风格式的油藏数值模拟精度有3种主流方法:动态网格加密、粗化技术和高精度数

值模拟格式。

动态网格加密方法是根据当时动态的流场信息,仅在油藏中物理量变化剧烈的区域或重点研究部分使用加密的网格,而其他部位仍使用粗网格的模拟方法。该方法的优点是能显著降低计算模拟成本。缺点是编程实现较为复杂,实际效果高度依赖于使用经验,即如何设定恰当的参数以命令程序在特定区域内加密而在其他区域内粗化。目前,CMG STARS 软件已经具备热采模拟的动态网格加密功能^[11]。李建芳^[3]等实验研究了化学驱数值模拟的动态网格加密技术。

在油藏模拟中利用拟属性等方法,把细网格模拟粗化为粗网格模拟,并对粗网格模拟结果进行校正的技术称为粗化技术。比如,利用拟相渗曲线方法,可以将黑油问题或多层水驱过程用粗网格进行模拟并保持类似的模拟精度^[14-15]。同样,利用拟分流函数方法,水气交替混相气驱问题可以使用粗网格进行模拟^[13]。在火烧油藏模拟中,燃烧反应的燃料值作为关键属性被用于大尺度网格的粗化模拟^[9]。拟属性方法同样也被运用到了化学驱的模拟中^[10]。同样地,拟属性还被用于粗化模型物质平衡中网格间流量的计算。

高阶格式也被用于精细模拟提高采收率过程。如图1所示,二阶格式有限体积方法中,物理量在每个网格当中进行线性重构(三阶格式为二次多项式)。当进行流量计算时,我们代入迎风方向的网格边界处的物理量(如各相饱和度或组分浓度)。目前,求解双曲型对流方程(例如油藏模拟中基于达西定律的每个组分的物质平衡方程)主流的高精度格式为基于 Total Variance Diminishing(TVD)概念的格式^[5-6]。常见的包括二阶 TVD 格式和三阶 Essentially Non-Oscillatory(E-NO)格式。高阶格式对于混相、非混相气驱及凝析气开采中精确捕捉间断或激波展现出独特的优势^[7-8]。对

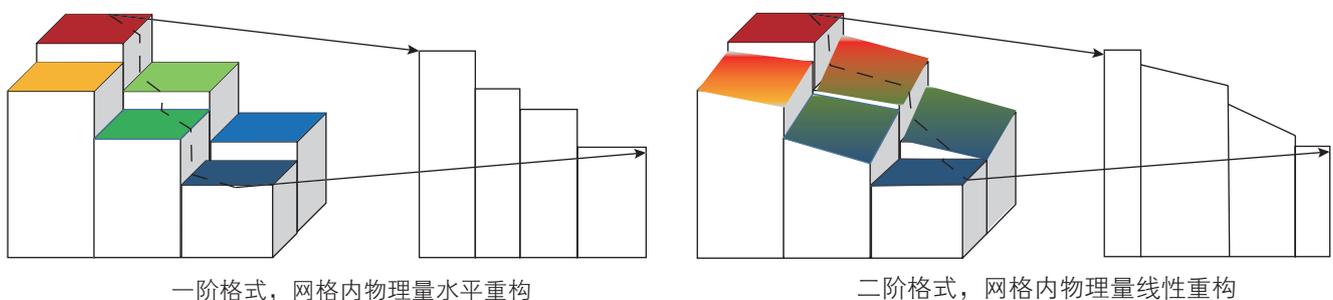


图1 一阶与二阶格式的网格内物理量分布:左图的一阶格式网格内物理量为平均分布;右图的二阶格式网格内物理量为线性分布

Fig. 1 Physical property distribution in the first order and second order finite difference schemes, with the top figure showing flat distribution of averaged physical properties in first order scheme, and the figure below showing piece-wise linear distribution of the physical properties in second order scheme

于化学驱,特别是三元复合驱ASP问题,高阶精度格式也已在模拟软件UTCHEM中实现^[12]。本文即在探讨该方法对于降低计算成本和提高精度的显著作用。

2 化学驱模拟精度的网格敏感性分析

2.1 一维模型模拟精度的网格敏感性分析

建立一维岩芯尺度模型,模型长0.8789 m,宽0.1 m,厚0.1 m,地层原始压力为0.1 MPa,含油饱和度为0.6171。在模型前端置一口注入井,定流量注入,注入过程主要包括4个阶段(详细注入液组分及每个阶段的注入速率见表1):第1阶段注入速度为0.491 mL/min、累计注入0.679 PV(Pore Volume);第2阶段注入速度为0.052 mL/min、累计注入0.3 PV的化学段塞(段塞化学组成为体积分数2%的表面活性剂、质量分数为0.15聚合物、 5.11×10^{-3} mol/L的碳酸钠溶液);第3阶段注入速度为0.052 mL/min、累计注入1.05 PV;第4阶段0.052 mL/min、累计注入1.7 PV。整个过程总注入孔隙体积为3.739 PV。模型末端置一口生产井,定井底压力(0.1 MPa)开采,地层孔隙度为0.1988, x 、 y 、 z 方向绝对渗透率为236 mD、236 mD、23.6 mD,地层水黏度0.995 mPa·s,密度1.005 g/cm³,原油黏度24.3 mPa·s,原油密度为0.84 g/cm³,体积系数为1.101,表面活性剂临界胶束浓度CMC(Critical Micelle Concentration)为0.0001 vol%(体积分数)。分6类网格尺寸模拟,分别在 x 方向划分10、20、40、80、160、240个网格进行先水驱后ASP三元化学驱模拟。在此6种模拟方案中模型的网格数量不同,其他模拟参数均一致,采用组分模拟软件UTCHEM进行模拟。

不同网格数的油藏采收模拟过程见图2,在不同

网格数模拟下油藏累计采收率出现差异,最细网格(240网格)的最终采收率达到了76.13%,而最粗网格(10网格)的最终采收率仅为63.09%,绝对采收率相差13.04%。在此模型中,布置240个网格已经达到足够精确,如果以240网格的模拟采收率作为基准,则10网格模拟结果与240网格模拟结果相对误差达到17.13%。事实上在对矿场尺度油藏模拟时,即使在此例范围内布置最粗网格(10网格),由于其占据巨大的计算内存及计算量以至于模拟不能正常实现,这无疑使得模拟结果更加偏离实际情况。此外,在图2中,前期水驱过程中无论网格尺寸怎样变化,各油藏模拟采收过程高度一致并与水驱阶段的采收率相同;而在后期ASP三元化学驱中,模拟油藏采收率均出现大幅增加,但在不同网格数模拟采收过程中出现了差异。具体表现为网格尺寸越精细,油藏最终采收率越高。这说明化学驱可以大幅度提高采收率,并且化学驱较水驱对网格敏感性更高,需要更细网格进行模拟。在此例中,若规定相对误差小于5%,则此模型中采用80网格以上,采收率稳定并趋于收敛。

本文进一步验证时间离散误差对于此类型三元复合驱模拟精度的影响。针对此模型进行时间步长的敏感性分析。UTCHEM软件通过设定模拟中最大和最小CFL数(Courant-Friedrichs-Lewy)来控制时间步长。通过改变CFL数范围,来设定不同的时间步长,以比较不同的时间离散误差。这里针对一维10个网格的模型进行了3组模拟。试验a、b与自动调节步长实验c的CFL值范围分别为:(a)CFL最大值和最小值均为0.0001;(b)CFL最大值和最小值等于0.1;(c)CFL最大值为0.1、最小值为0.0001(在此区间内自动调节)。3个模型采收过程如图3所示,a、b、c模型最终油采收率分别为64.32%、63.25%、63.09%,差异均小于2%。说明时间步长对结果影响很小,时间离散误差对

表1 不同阶段(不同累计注入孔隙体积)下的注入液组分及注入速率

Table 1 Composition of injectant and injection speed during different stages, measured by cumulative pore volume injected

| | 单位 | 0.0~0.679 PV | 0.679~0.989 PV | 0.989~2.039 PV | 2.039~3.739 PV |
|---------|------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| 注入速率 | mL/min | 0.491 | 0.052 | 0.052 | 0.052 |
| 表面活性剂含量 | vol% | 0.000 | 0.020 | 0.000 | 0.000 |
| 聚合物含量 | wt% | 0.000 | 0.150 | 0.015 | 0.000 |
| 氯离子浓度 | 10 ⁻³ mol/L | 7.333 | 0.110 | 2.517 | 1.662 |
| 钙离子浓度 | 10 ⁻³ mol/L | 0.084 | 0.084 | 0.084 | 0.068 |
| 镁离子浓度 | 10 ⁻³ mol/L | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.125 |
| 碳酸根离子浓度 | 10 ⁻³ mol/L | 0.087 | 5.119 | 0.087 | 1.567 |
| 钠离子浓度 | 10 ⁻³ mol/L | 11.248 | 13.227 | 3.816 | 4.535 |

于此类化学驱问题相比空间离散误差较小, 本文不做重点考虑。本文中其他所有一维模型均采用CFL最大值为0.1、最小值为0.0001的自动时间步长设置。

为探索化学驱较水驱对网格具有高敏感度的原因, 不同网格数模拟条件下, 在化学驱过程中的中间时刻(驱替时间为0.735 d)时, 选取表面活性剂体积分数(图4)以及剩余油饱和度的分布图进行分析(图5)。如图4所示, 当驱替时间为0.735 d时, 与细网格相比, 粗网格表面活性剂浓度出现了“人工稀释”现象, 即粗网格模拟表面活性剂体积分数较细网格模拟值在峰值处低, 但在靠近井口处高。这是粗网格模

拟计算中的数值弥散现象, 这种现象直接影响了化学驱驱替过程中油水界面张力, 另一方面可能使得化学驱流体相态发生变化, 导致化学驱替过程中驱油效率降低。驱替效率可以具体表现为该时刻下原油剩余饱和度的分布差异如图5所示。在驱替前缘经过的地层, 细网格剩余原油饱和度较粗网格分布更低, 即细网格驱油效率高, 粗网格驱油效率低。粗网格出现的化学剂“人工稀释”现象导致化学驱替过程累计采收率较低。

由此模拟结果可发现, 在同一模型下, 网格数量影响了化学驱模拟的精度, 网格数量越多或网格划分

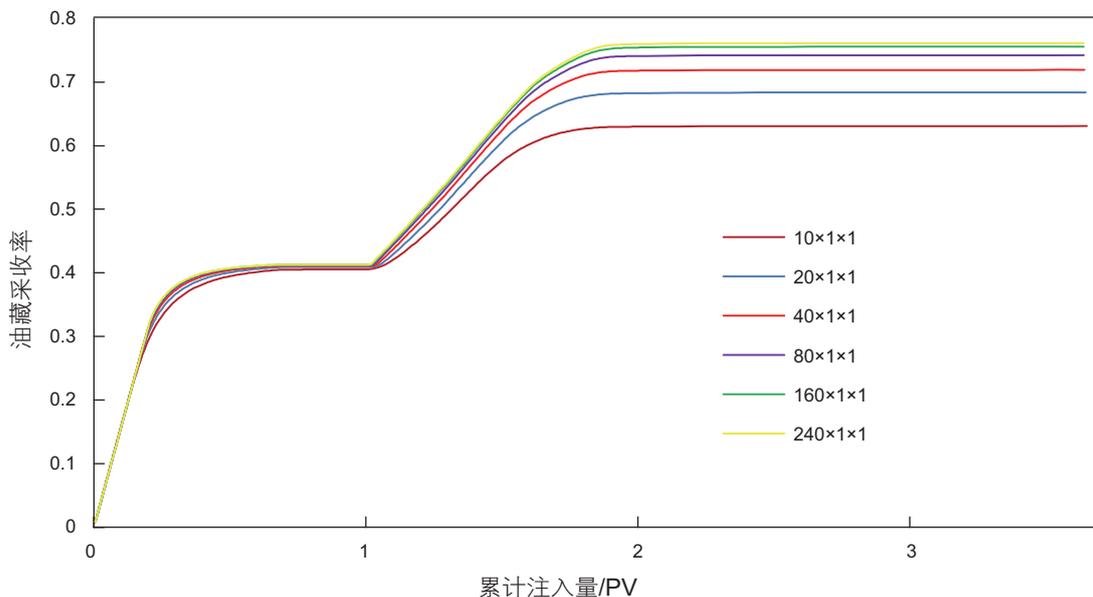


图2 采用不同网格数的一维ASP模拟的采收过程

Fig. 2 1D ASP reservoir recovery process simulation using different number of grid blocks

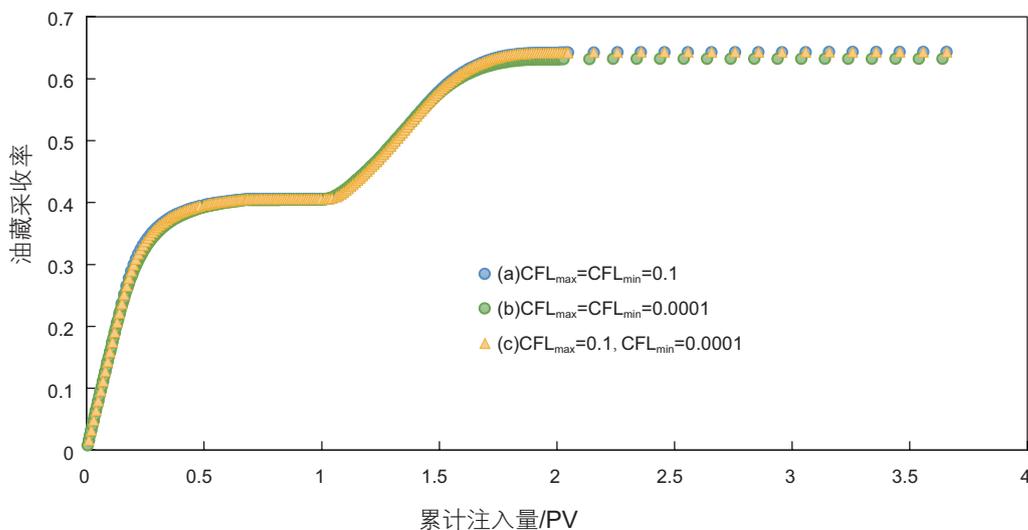


图3 采用不同的时间步长(即不同的CFL值)下的一维ASP驱数值模拟采收率(空间离散为10个网格)

Fig. 3 The reservoir recovery of one-dimensional ASP flood using different time step sizes (different CFL values)

越细其化学剂精度越高，模拟结果更精确。

2.2 二维模型模拟精度的网格敏感性分析

建立二维油藏模型，长 1 m，宽 1 m，厚 0.1 m，岩石性质、流体性质及注入方式与 2.1 中一维模型参

数保持一致，注入井与生产井呈对角分布，上、下对角分别布置 1 口注入井、1 口生产井，采用 4 种不同网格尺寸对同一模型进行模拟，即在长、宽、高方向分别布置 $5 \times 5 \times 1$ 、 $10 \times 10 \times 1$ 、 $20 \times 20 \times 1$ 、 $30 \times 30 \times 1$ 网格数。油藏采收率模拟结果如图 6，结果

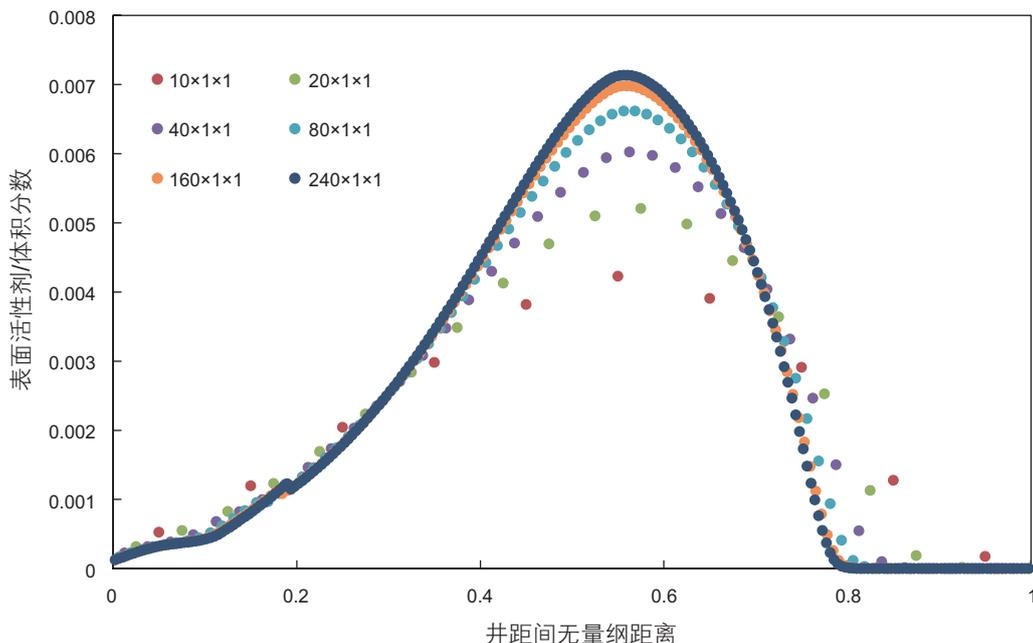


图 4 采用不同网格数进行一维 ASP 模拟得到的表面活性剂体积分数分布 (0.735 d)

Fig. 4 The volume fraction distribution of surfactant in simulation under different number of grid blocks in one dimensional ASP flood (0.735 days)

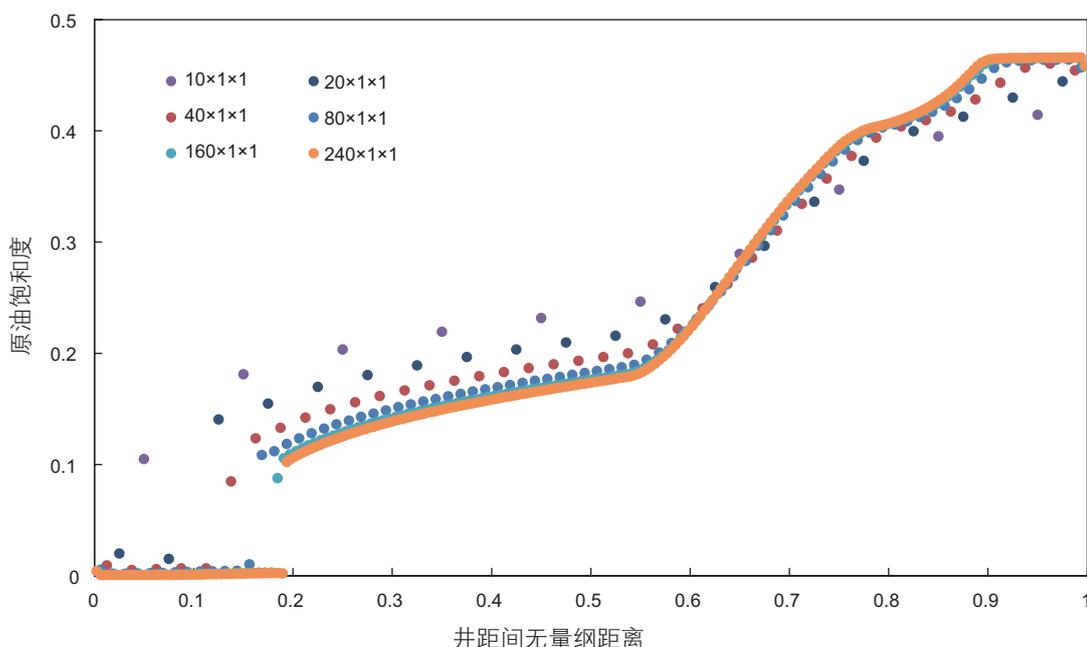


图 5 采用不同网格数进行模拟得到一维 ASP 模拟的原油饱和度分布 (0.735 d)

Fig. 5 Oil saturation distribution in simulation under different number of grid blocks in one dimensional ASP flood (0.735 days)

证明二维模拟与一维模拟具有一致性，即化学驱模拟精度高度依赖网格尺寸大小或网格数目，网格尺寸越小，网格越细，化学驱模拟结果越精确。

与一维模型分析类似，取二维模型化学驱驱替

中间时刻 7.35 d 时，表面活性剂体积分数及剩余油饱和度分布如图 7、图 8 所示，随着网格数的减少，网格内部的表面活性剂体积分数呈现出与一维模型一致的现象，即表面活性剂呈现“人工稀释”现象。

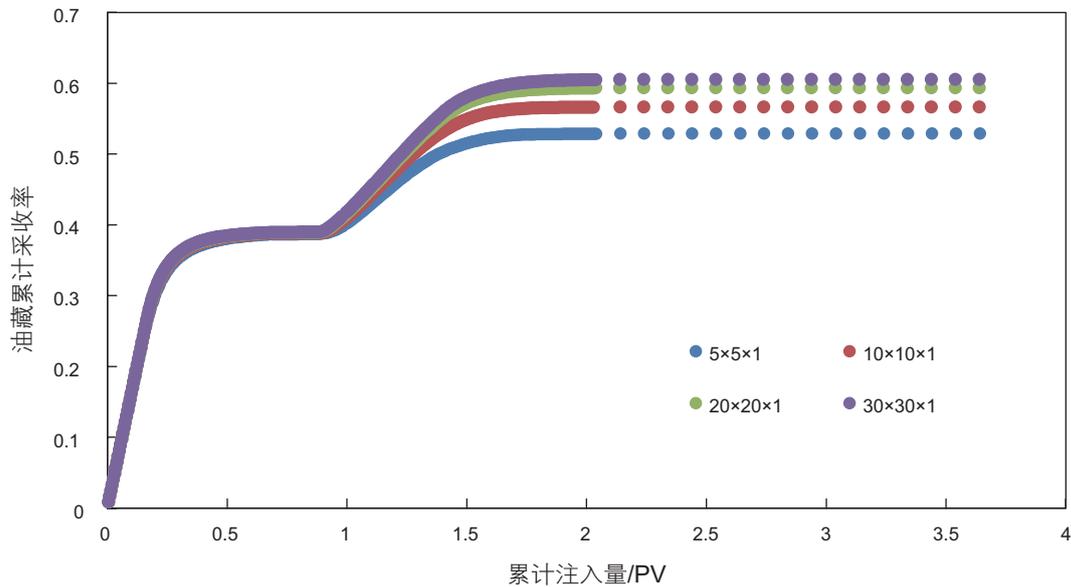


图 6 采用不同网格数下的二维 ASP 模拟的采收过程

Fig. 6 Simulated recovery factor to pore volume injected in two dimensional ASP model by using different number of grid blocks

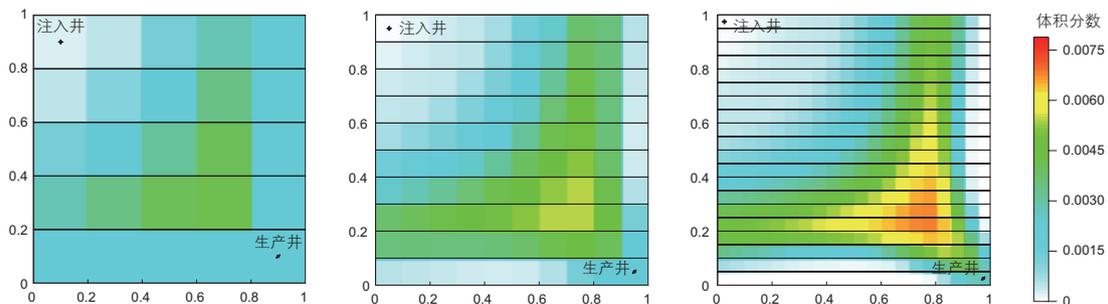


图 7 使用 $5 \times 5 \times 1$ 、 $10 \times 10 \times 1$ 、 $20 \times 20 \times 1$ 网格时的二维 ASP 模拟的表面活性剂体积分数分布 (7.35 d)

Fig. 7 Surfactant volume fraction in 2D ASP process at 7.35 days using $5 \times 5 \times 1$, $10 \times 10 \times 1$, $20 \times 20 \times 1$ grid system

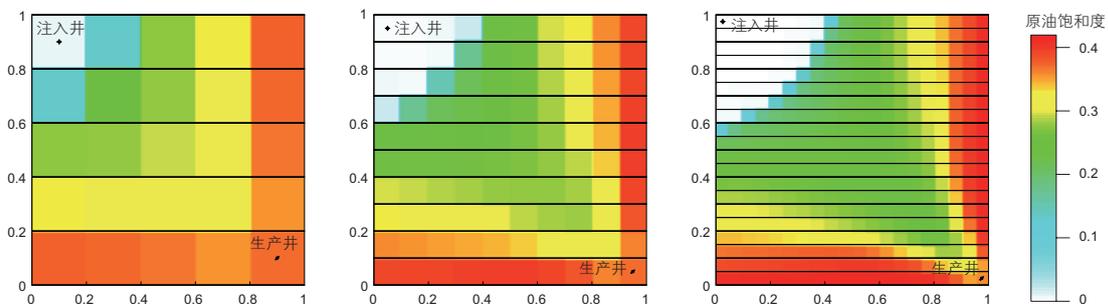


图 8 使用 $5 \times 5 \times 1$ 、 $10 \times 10 \times 1$ 、 $20 \times 20 \times 1$ 网格时的二维 ASP 模拟的原油饱和度分布 (7.35 d)

Fig. 8 Oil saturation distribution in 2D ASP process at 7.35 days using $5 \times 5 \times 1$, $10 \times 10 \times 1$, $20 \times 20 \times 1$ grid system

出现这种“人工稀释”现象时，此时的剩余油饱和度分布(图 8)显示，粗网格模拟在驱替前缘经过的地层的剩余油饱和度，要高于细网格模拟。这说明在化学驱驱替阶段的低网格数目模拟的驱油效率降低了。这种现象是造成粗网格模拟油藏累计采收率降低的原因。

与一维时间离散误差分析类似，在此针对二维 $5 \times 5 \times 1$ 模型采用 3 种不同 CFL 值设定以检验时间步长对于二维模型的影响。3 种模型 CFL 数分别为：(a)CFL 最大值和最小值均为 0.0001；(b)CFL 最大值和最小值均为 0.1；(c)CFL 最大值为 0.1、最小值为 0.0001(在此区间内自动调节)。油藏采收情况如图 9 所示，a、b、c 模型最终采收率分别为 52.87%、52.81%、52.89%，三者采收率差异小于 1%。由此得知，二维模型结果对于时间步长不敏感。本文中其他所有二维模型均采用 CFL 最大值为 0.1、最小值为 0.0001 的自动时间步长设置。

3 高阶格式化学驱模拟

3.1 化学驱高阶格式求解方法

首先，考虑一维多组分多相多孔介质流动的控制方程：

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x} = 0$$

$$C_i = \sum_j \rho_j S_j x_{ij}, \quad F_i = \sum_j \rho_j u_j x_{ij}$$

这里 C_i 和 F_i 分别是第 i 个组分的浓度和流量。 u_j 为第 j 相的达西流动速度：

$$u_j = -\frac{Kk_{rj}}{\mu_j} \frac{\partial P}{\partial x}$$

当采用有限体积方法求解该问题时，第 k 个网格的离散化的控制方程为：

$$\frac{C_{i,k}^{n+1} - C_{i,k}^n}{\Delta t} + \frac{F_{i,k+\frac{1}{2}}^n - F_{i,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} = 0$$

Δt 和 Δx 分别为时间和空间步长， $k-1/2$ 和 $k+1/2$ 分别为第 i 个组分在第 k 个网格左侧和右侧网格边界的流动通量。当采用一阶迎风格式时，网格内的物理量采用常值进行重构(零阶多项式)。一阶格式，当第 k 个网格右侧网格边界的流量向右及向左时， $k+1/2$ 处的通量分别为为：

$$F_{i,k+\frac{1}{2}}^n = F(C_{i,k}^n), \quad F_{i,k-\frac{1}{2}}^n = F(C_{i,k+1}^n)$$

当采用二阶格式时，网格内的物理量采用线性重构(一阶多项式)。当第 k 个网格右侧网格边界的流量向右时，其 $k+\frac{1}{2}$ 处的通量为：

$$F_{i,k+\frac{1}{2}}^n = F\left(C_{i,k}^n + \frac{\phi(r_k)}{2}(C_{i,k+1}^n - C_{i,k}^n)\right)$$

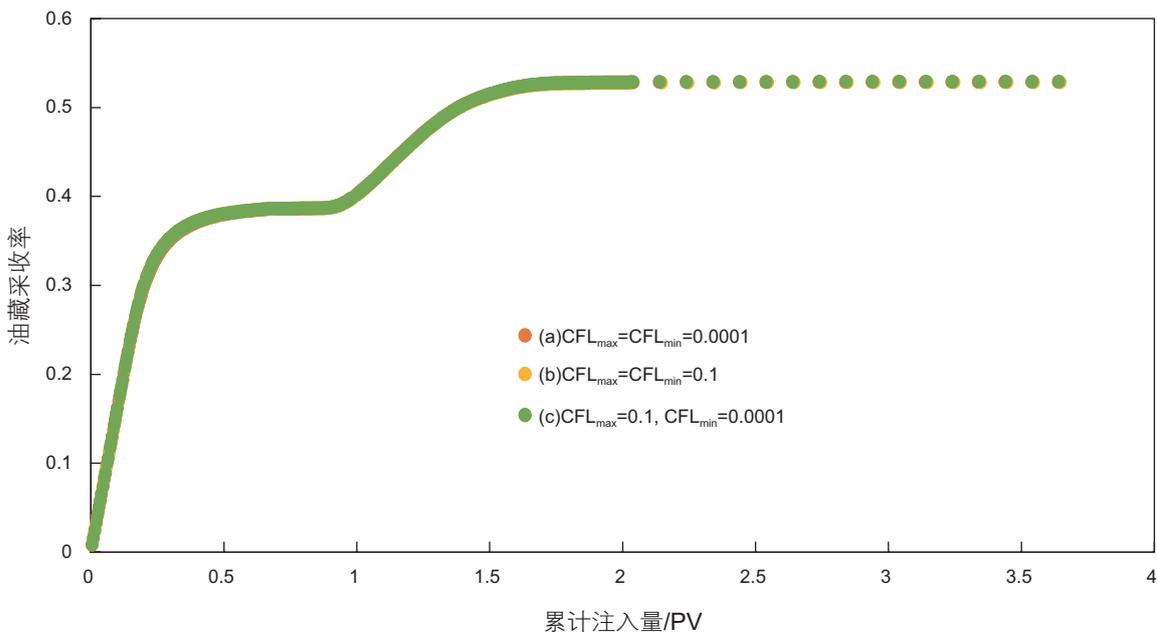


图 9 在不同 CFL 值(即时间步长)下的二维 ASP 模型的采收率(5 × 5 × 1 网格)

Fig. 9 Recovery of two-dimensional 5 × 5 × 1 ASP model under different CFL values

二阶格式往往伴随着间断处的数值震荡,需要加入一定的数值黏性以消除震荡,基于Total Variance Diminishing概念的二阶TVD格式随之而生^[5-6]。其核心理念为设计一系列数值格式,以控制物理量的Total Variance不随时间而放大:

$$TV(C^n) = \sum_i |C_i^{n+1} - C_i^n|, TV(C^{n+1}) \leq TV(C^n)$$

常见的二阶TVD格式采取以下形式:

$$r_k = \frac{C_i^n - C_{i-1}^n}{C_{i+1}^n - C_i^n}, \phi(r_k) = \begin{cases} \max[0, \min(1, r)] \\ \max\left[0, \min\left(2, 2r, \frac{1+r}{2}\right)\right] \end{cases}$$

$$F_{i,k+\frac{1}{2}}^n = F\left(C_{i,k}^n + \frac{\phi(r_k)}{2}(C_{i,k+1}^n - C_{i,k}^n)\right)$$

$\phi(r_k)$ 为Flux Limiter函数。当 $\phi(r_k)=1$ 时,格式退化为普通二阶格式。这里的两种Flux Limiter函数分别为常见的Min mod函数和Fromm函数。

高阶格式(如三阶的ENO格式)的构建与二阶格式类似,即在考虑迎风的情况下对网格内部的物理量进行二阶及更高阶的多项式重构,并计算网格边界处 $k-1/2$ 、 $k+1/2$ 处的通量。同样加入修正项以保证对间断的正确捕捉和防止震荡产生。高阶格式带松弛的Total Variance限制条件为(n 为格式的阶数):

$$TV(C^{n+1}) \leq TV(C^n) + O(\Delta x^n)$$

三维空间的多组分多相油藏数值模拟与之类似。考虑迎风的情况下,一阶格式、二阶格式和三阶格式在网格内分别对物理量进行空间3个方向上的常值、线性和二次多项式重构。利用类似的修正方法,高阶格式在间断附近的震荡可被消除,最终达到精确描述流动过程的目的。

3.2 高阶格式一维化学驱模拟

分别用二阶、三阶格式对章节2.1中一维岩心模型进行模拟运算,高阶格式运算使用UTCHEM软件内置的功能,其油藏采收过程如图10所示。

结果表明:二阶、三阶格式模拟采收率结果比一阶格式更接近细网格模拟结果。具体表现为:采用 $20 \times 1 \times 1$ 网格的三阶格式的模拟结果与 $240 \times 1 \times 1$ 一阶格式的结果十分接近,也可以说在采收率精度上两者相当;三阶格式模拟采收率则较二阶格式更接近细网格模拟结果。对化学驱中间时刻(驱替时间为0.735 d)的表面活性剂体积分数分布(图11)以及残余油饱和度分布(图12)进行分析,发现出现了同样的现象。如20网格三阶格式下表面活性剂和剩余油饱和度分布与240网格一阶格式模拟结果基本一致。此模型中,在达到240网格一阶格式结果精度的条件下,三阶格式模拟仅需使用20网格。

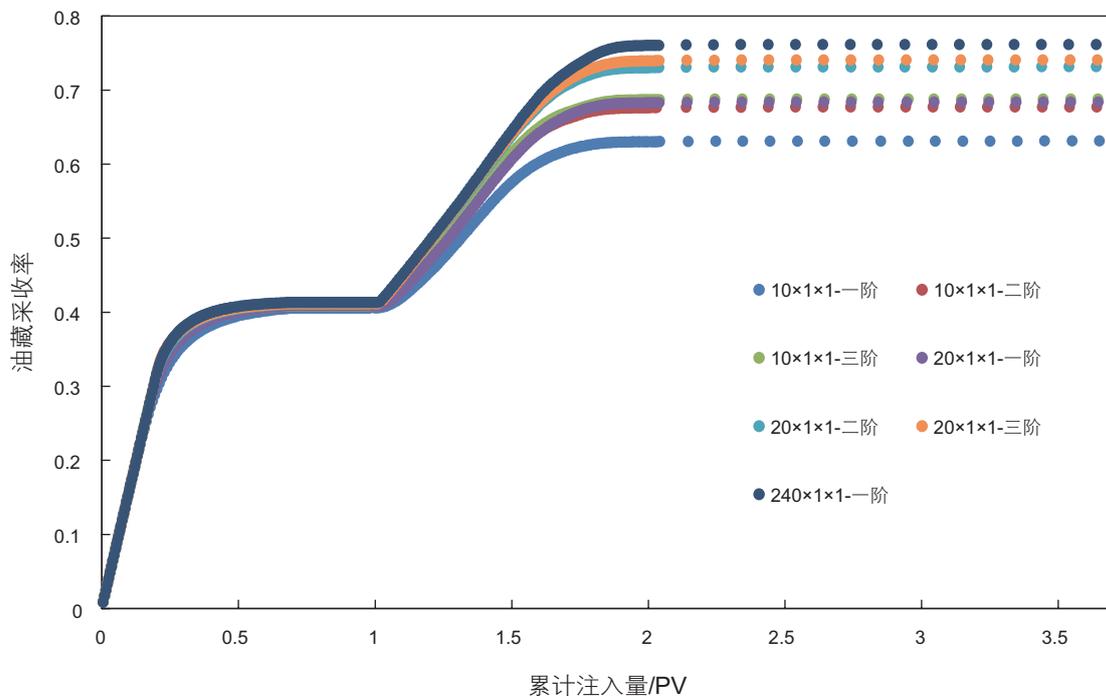


图10 使用不同格式及不同网格数下一维ASP模型的采收过程

Fig. 10 One-dimensional ASP recovery process by using different number of grid blocks and different numerical schemes

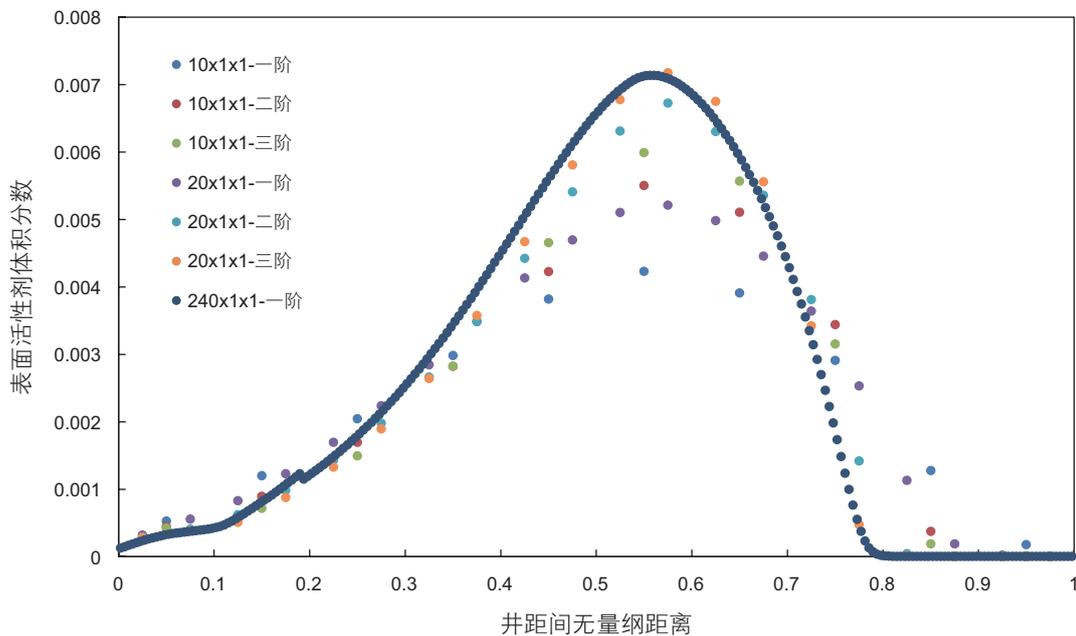


图 11 使用不同格式及不同网格数下的一维 ASP 模拟的表面活性剂分布 (0.735 d)

Fig. 11 The volume fraction distribution of surfactant in one-dimensional ASP model by using different numerical schemes and different number of grid blocks (0.735 days)

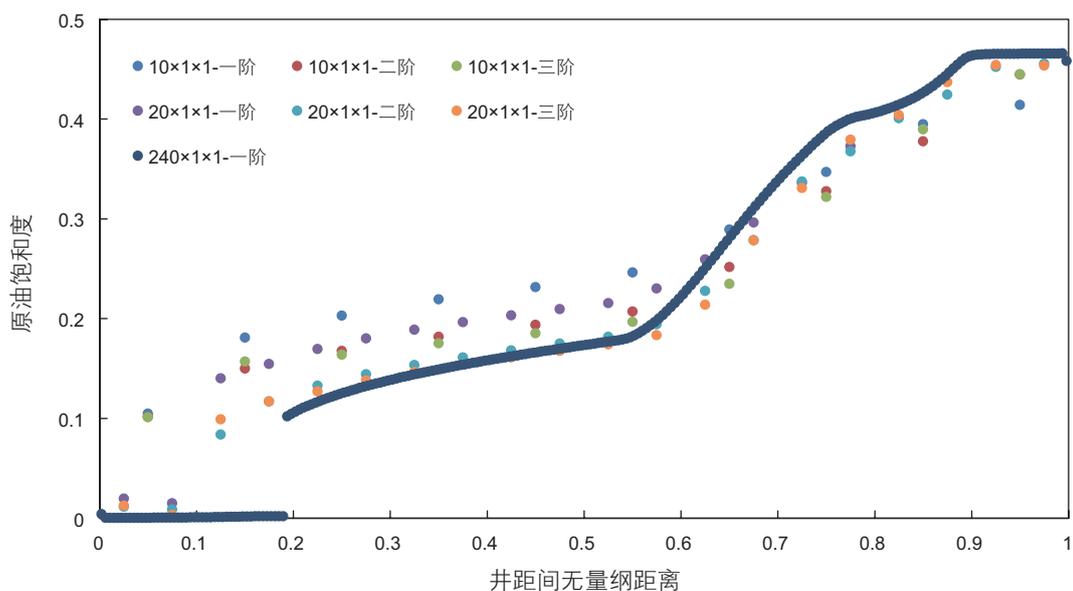


图 12 使用不同格式及不同网格数下的一维 ASP 模拟的原油饱和度分布 (0.735 d)

Fig. 12 Oil saturation distribution in one-dimensional ASP model by using different numerical schemes and different number of grid blocks (0.735 days)

3.3 高阶格式二维化学驱模拟

对二维模型使用不同阶格式进行模拟运算，其模型参数与章节 2.2 中二维模型一致，模拟结果油藏采收率见图 13，从图 13 中可以看出二维油藏模拟中，

高阶格式模拟运算情况下，其油藏采收率精度更接近于细网格精度，如 $10 \times 10 \times 1$ 三阶格式运算油藏采收率为 60.59%，这与细网格 $30 \times 30 \times 1$ 一阶格式运算油藏采收率 60.53% 几乎相等，这证实了在二维模型中高阶格式一样可以改善化学驱精度，实现低网格数目高精

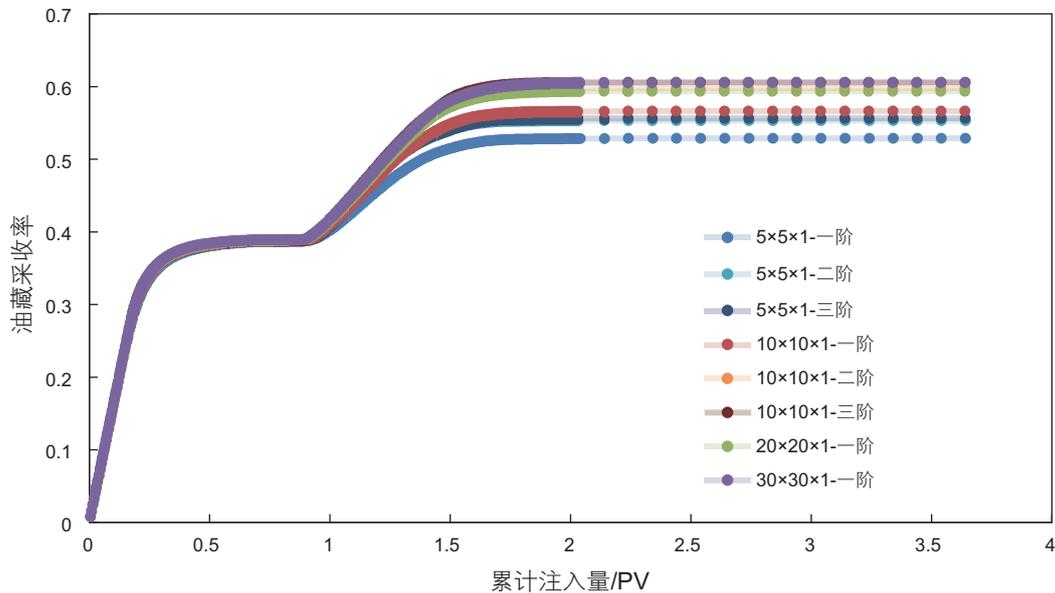


图 13 使用不同格式及不同网格数下的二维 ASP 模拟采收过程

Fig. 13 Simulated two-dimensional ASP recovery process using different difference schemes and different number of grid blocks

度的目的。

取驱替时间为 7.35 天时, 不同网格尺寸配合不同阶格式模拟的表面活性剂体积分数分布情况如图 14 所示, 高阶格式表面活性剂精度要高一阶格式模拟精度, 网格越细, 表面活性剂精度越高。存在高阶粗网格精度与细网格精度相当的临界粗网格数, 如 $10 \times 10 \times 1$ 三阶格式粗网格表面活性剂精度可以代表 $30 \times 30 \times 1$ 一阶格式细网格表面活性剂精度。

3.4 高阶格式三维矿场尺度化学驱模拟

建立矿场尺度多井组化学驱油藏数值模拟模型。模拟区块长 200 m, 宽 200 m, 厚度 10 m。模型纵向分 4 层, 第 1 层在 x 、 y 、 z 方向的渗透率分别为 236 mD、236 mD、23.6 mD, 第 2 到第 4 层的渗透率分别为第 1 层渗透率的 0.8、0.6、0.4 倍。地层压力为 20.7 MPa。该区块采用 4 个 5 点井网进行开发, 包括 4 口注入井和 9 口生产井。注入井采用定流量控制, 分三个阶段。第一阶段为水驱, 注入量为 $141.4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、累计注入 0.679 PV。第二阶段为注入化学段塞(段塞含有体积分数为 0.02 的表面活性剂、质量分数为 0.15 的聚合物及浓度为 $5.11 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 的碳酸钠), 注入量为 $14.9 \text{ m}^3/\text{d}$ 、累计注入 0.3 PV。第三阶段为(注入液主要成分包括浓度为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 氯化钠及浓度为 $0.04 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 氯化镁), 注入量为 $14.9 \text{ m}^3/\text{d}$ 、累计注入 1.05 PV。以上 3 个阶段的总注入

液量为 2.0368 PV。生产井则采用井底压力控制生产 (6.89 MPa)。该区块的地层流体属性与岩石物性与章节 2.1 中的案例一致。分别使用 $11 \times 11 \times 4$ 、 $21 \times 21 \times 4$ 、 $41 \times 41 \times 4$ 三组由粗到细的网格来模拟三元复合驱过程。各井的位置分布如图 15(以 $41 \times 41 \times 4$ 网格为例) 所示。对 $11 \times 11 \times 4$ 、 $21 \times 21 \times 4$ 网格模型分别采用一阶、二阶、三阶高阶格式进行数值模拟。而细网格模型 $41 \times 41 \times 4$ 则采用一阶格式, 模拟采用化学驱模拟器 UTCHEM。

该矿场尺度化学驱模型采用不同网格及不同格式进行模拟得到的采收率结果如图 16 所示, 与一维、二维的模拟类似, 当采用不同格式进行矿场尺度模型模拟时, 粗网格配合高阶格式的运算精度可与细网格配合低阶格式的运算精度相当, 例如 $21 \times 21 \times 4$ 网格配合三阶格式的采收率为 56.45% 与 $41 \times 41 \times 4$ 网格配合一阶格式的采收率为 56.51% 一致。

为探究采收过程差异原因, 选用模拟时间为 143 d 时, 不同格式下油藏的第 1 层的表面活性剂体积分数分布如图 17 所示。原油饱和度的分布如图 18 所示。 $21 \times 21 \times 4$ 网格配合三阶格式与 $41 \times 41 \times 4$ 网格在采收率、表面活性剂分布及原油饱和度分布精度一致。即高阶格式下粗网格模拟的表面活性剂体积分数分布与低阶格式细网格相当。其他属性如原油饱和度分布也一致。这证明了矿场尺度下, 高阶格式可以有效提高粗网格的模拟精度。

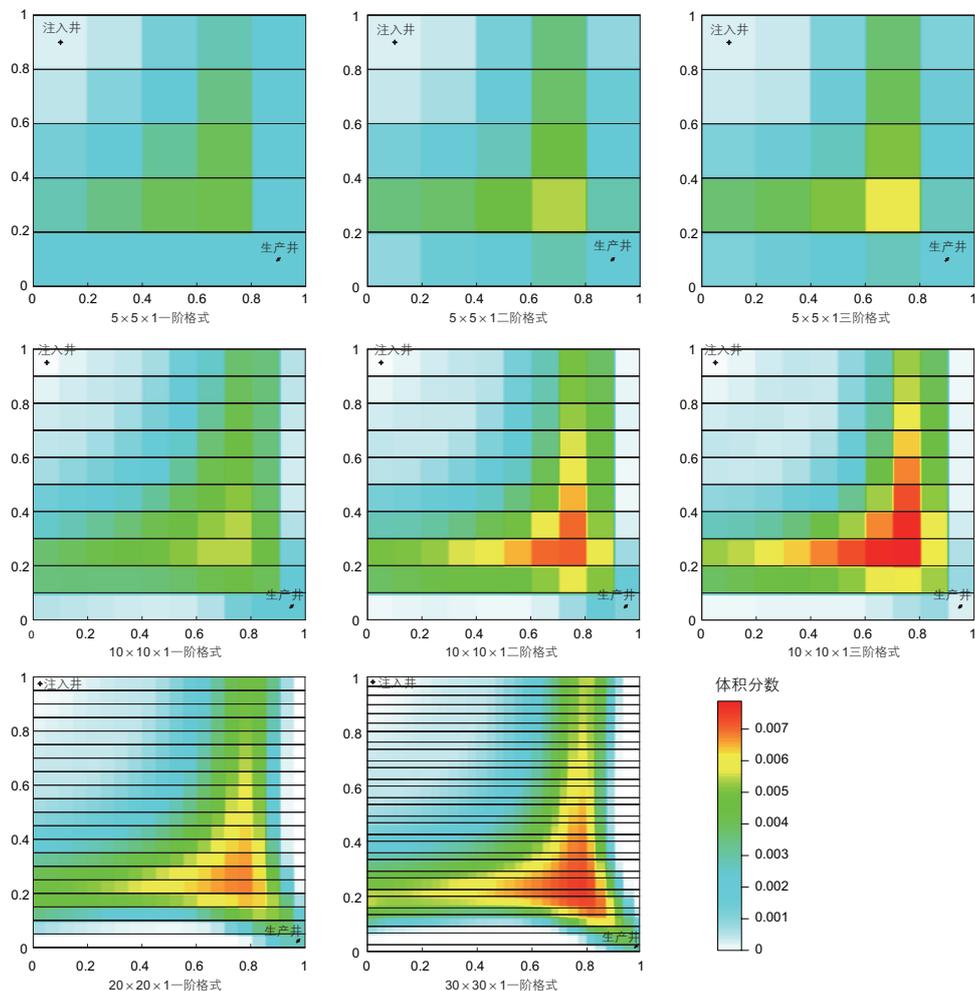


图 14 使用不同格式及不同网格数下二维 ASP 模拟的表面活性剂体积分数的分布 (7.35 d)

Fig. 14 Surfactant volume fraction distribution in two-dimensional ASP flooding under different difference schemes and different number of grid blocks (7.35 days)

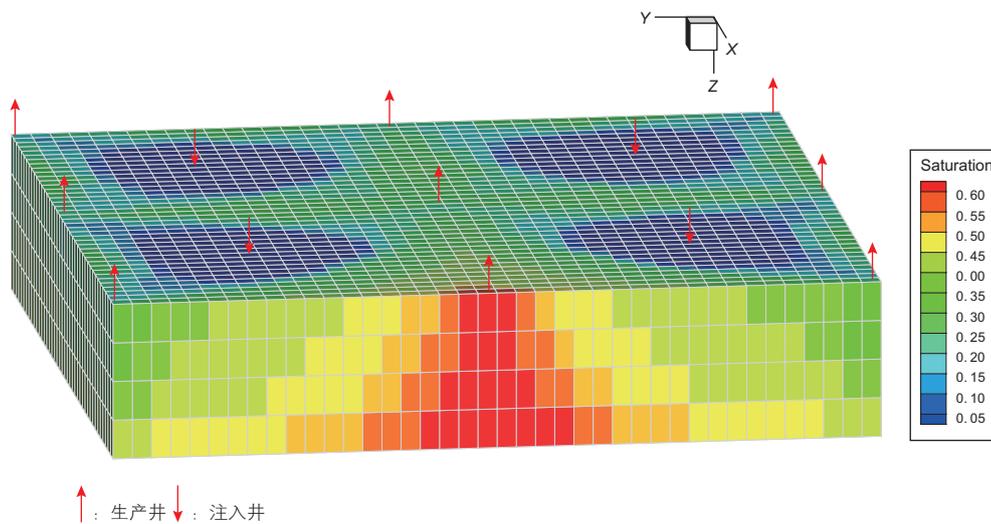


图 15 矿场尺度多井组三元复合驱模型中 4 口注入井和 9 口生产井的井位分布及 $41 \times 41 \times 4$ 网格模型中驱替时刻为 343 d 时的原油饱和度分布 (上箭头代表生产井, 下箭头代表注入井)

Fig. 15 Well locations including four injection wells and nine production wells in multi-well group filed-scale ASP model and distribution of oil saturation at the time of 343 days in $41 \times 41 \times 4$ grid model

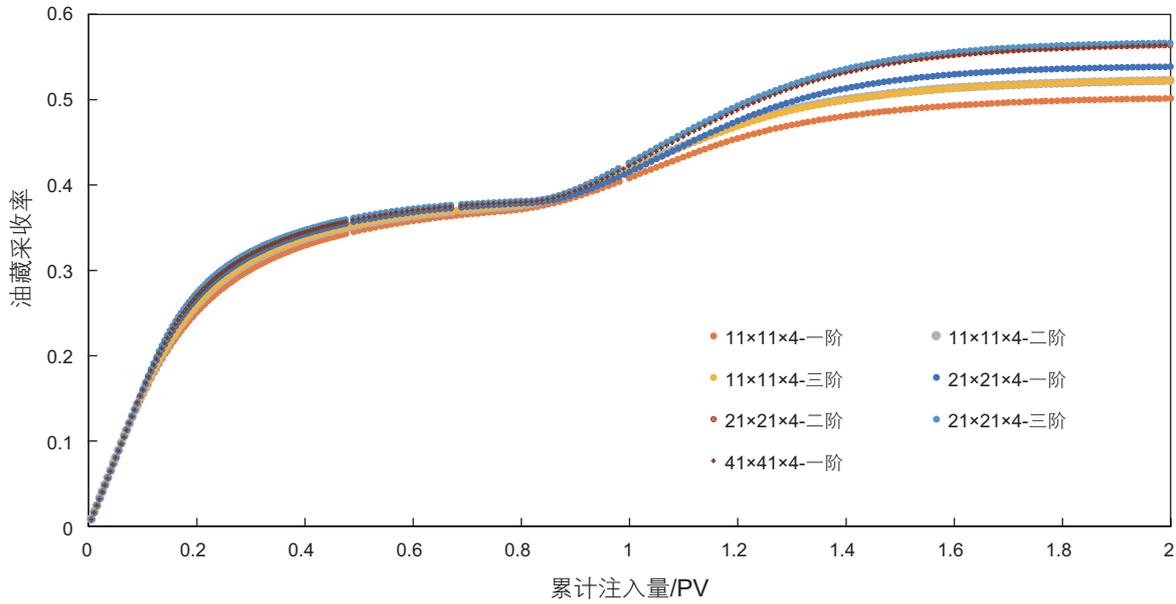


图 16 使用不同格式及不同网格数的三维矿场尺度模型的采收过程

Fig. 16 The recovery process of three-dimensional filed-scale model using different difference schemes and different number of grid blocks

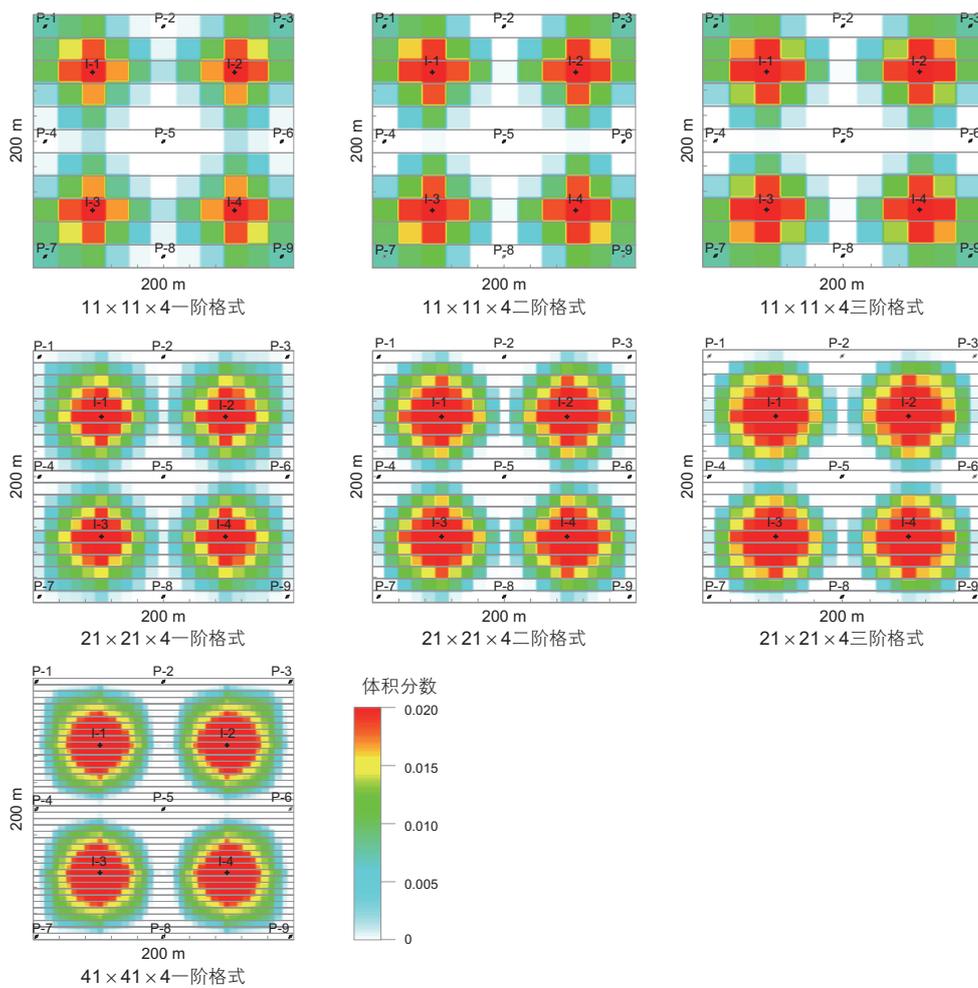


图 17 使用不同格式及不同网格数下三维矿场尺度模型的表面活性剂体积分数分布(143 d, 图中P代表生产井, I代表注入井)

Fig. 17 The volume fraction distribution of surfactant in three-dimensional filed-scale model using different difference schemes and different grid numbers (143 days, P represents a production well and I represents a injection well)

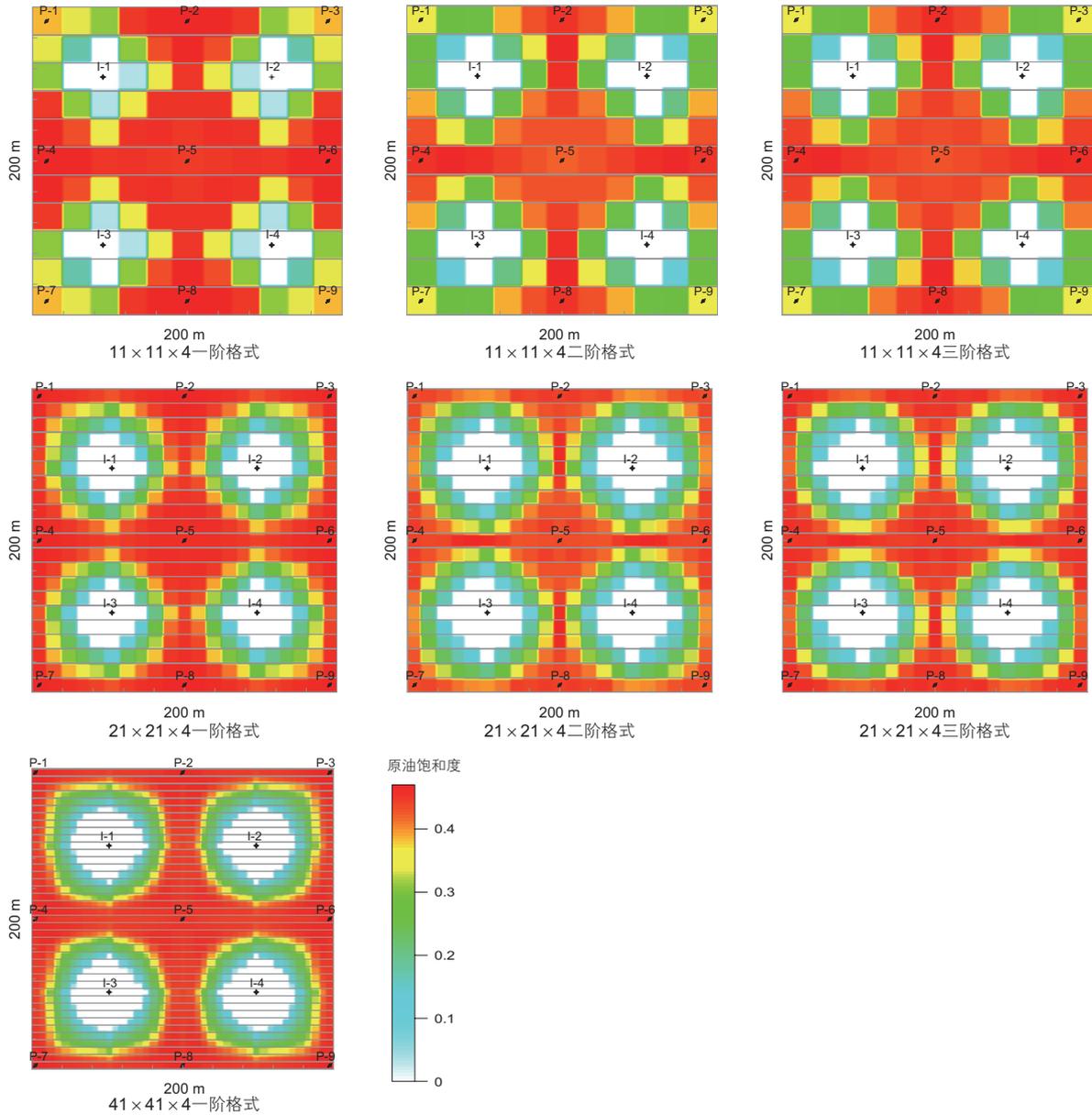


图 18 使用不同格式及不同网格数下三维矿场尺度模型的原油饱和度分布图(143 d, 图中P代表生产井, I代表注入井)
 Fig. 18 The distribution of oil saturation using different difference schemes and different grid numbers for 3D filed-scale model (143 days, P represents a production well and I represents a injection well)

4 计算成本对比

在此对使用不同网格尺寸及不同格式的 2.1 中一维模型模拟运算 CPU 运行时间进行了统计和对比(图 19)。章节 3.2 已证明一维 ASP 模型使用 20 个网格配合三阶格式与使用 240 个网格配合一阶格式的运算精度基本类似。从图 19 中发现一维 ASP 模拟使用 20 个网格和三阶格式的 CPU 占用时间为 5.32 秒, 而同等精度的使用 240 个网格和一阶格式的 CPU 占用时间为

269.8 秒。所以在本例当中, 在运算精度相同的条件下, 运用粗网格三阶格式模拟占用的 CPU 时间仅为细网格一阶格式 CPU 时间的 2%。前者极大缩短了模型的运算时间、降低了计算成本, 并且粗网格模拟由于网格数低, 占用计算机内存小, 同样减轻了计算机的硬件配置要求。这都提高了化学驱油藏数值模拟效率。

在二维模型中, 高格式也能得到相同的效果(图 20)。使用 $10 \times 10 \times 1$ 网格配合三阶格式占用的 CPU 时间为 46.5 秒, 而同等精度的 $30 \times 30 \times 1$ 网格配合一阶格式所占用 CPU 时间则为 2676 秒。本例中, 细网格

一阶格式模拟所占用的CPU时间为粗网格三阶格式的57.5倍，网格数是粗网格模拟的9倍。高阶格式具有非常明显的优势。

三维矿场尺度模型由于其区块尺寸大，网格数量更多，往往需要更高的模拟运行时间。在本文中三

维矿场尺度多井组化学驱模型被离散为 $11 \times 11 \times 4$ 、 $21 \times 21 \times 4$ 、 $41 \times 41 \times 4$ 三组不同的网格，并采用不同的格式进行模拟。但CPU运行时间有十分大的差异，如图21所示。章节3.4中已证明在三维矿场尺度模型油藏数值模拟中， $21 \times 21 \times 4$ 网格配合三阶格式

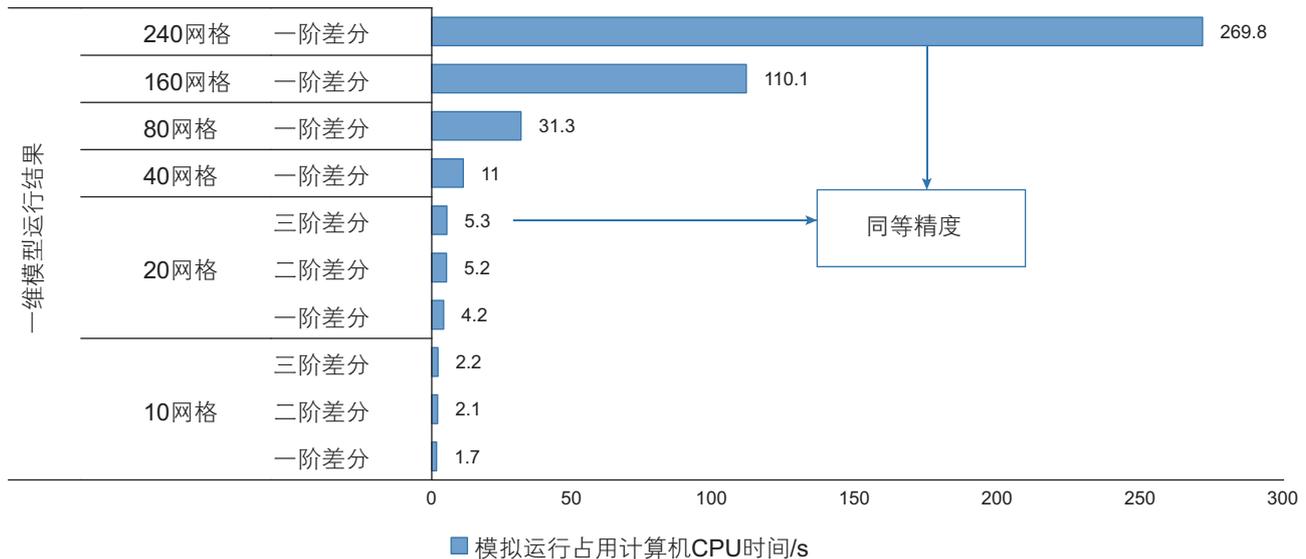


图19 使用不同网格数配合不同格式下的一维ASP模型模拟占用的CPU时间对比，此处分别标注了同一模型同等模拟精度，但网格数和格式不同的模拟算例，及其相应的计算成本的差别

Fig. 19 The CPU run time comparison for one-dimensional model using different grid numbers and different differential schemes, with simulations having the same model, and using different grid numbers and numerical schemes, but of similar accuracies marked, which corresponds to different CPU runtime

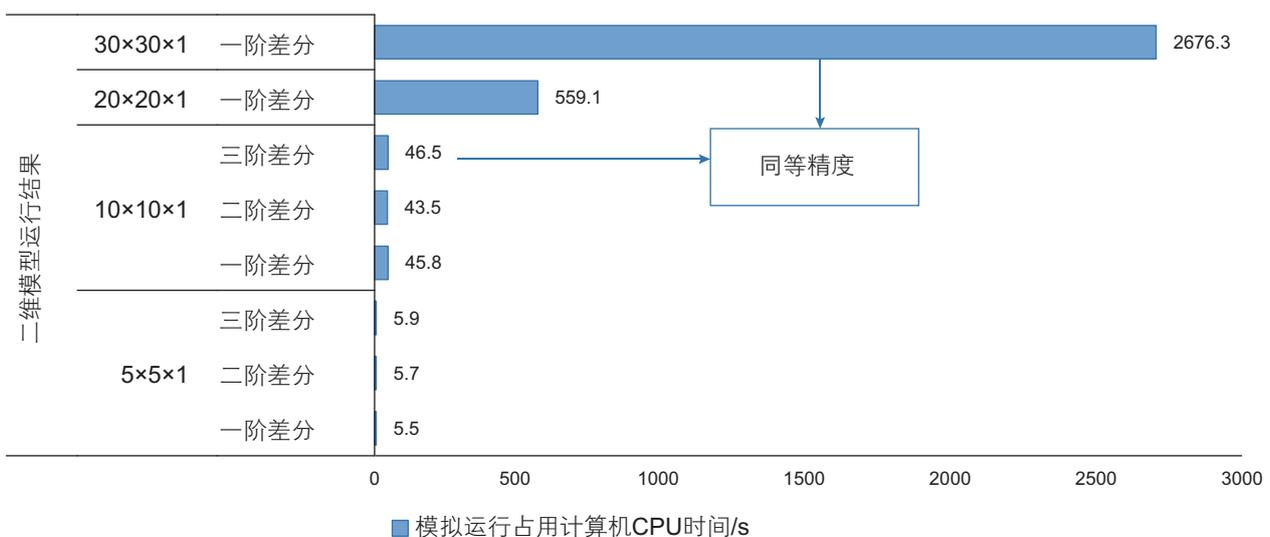


图20 使用不同网格数及不同格式下的二维ASP模型模拟占用的CPU时间对比，此处分别标注了同一模型同等模拟精度，但网格数和格式不同的模拟算例，及其相应的计算成本的差别

Fig. 20 The CPU run time comparison for two-dimensional models using different grid numbers and different differential schemes, with simulations having the same model, and using different grid numbers and numerical schemes, but of similar accuracies marked, which corresponds to different CPU runtime

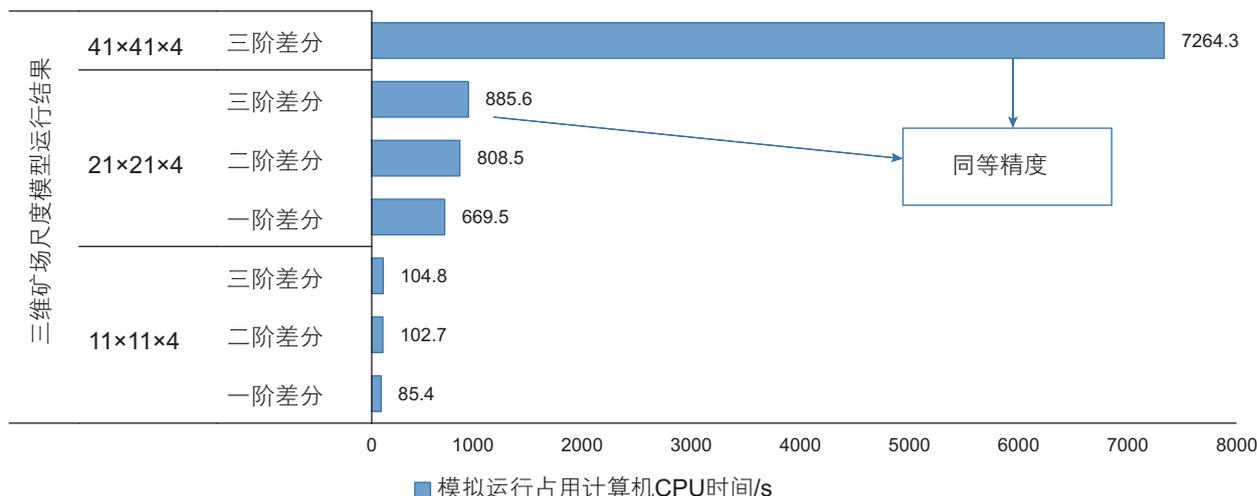


图 21 使用不同网格数和不同格式下的三维矿场尺度模型模拟占用的 CPU 时间对比，此处分别标注了同一模型同等模拟精度，但网格数和格式不同的模拟算例，及其相应的计算成本的差别

Fig. 21 The Comparison of CPU time simulated by 3D filed-scale model with different grid numbers and difference schemes, with simulations having the same model, and using different grid numbers and numerical schemes, but of similar accuracies marked, which corresponds to different CPU runtime

与 $41 \times 41 \times 4$ 配合一阶格式具有等同精度，此例中粗网格 ($21 \times 21 \times 4$) 配合高阶格式 CPU 占用时间为 885.6 秒，而细网格 ($41 \times 41 \times 4$) 配合一阶格式 CPU 占用时间高达 7264.3 秒，在同等模拟精度条件下，粗网格配合高阶格式数值模拟占用计算机 CPU 运行时间更少，计算机运行成本更低，在高精度化学驱油藏数值模拟中显现出了极大的优势。

5 结论

(1) 通过不同网格尺寸下一维、二维化学驱 ASP 模拟，我们发现 ASP 三元复合驱模拟精度对于网格尺寸具有高度敏感，且在同样网格尺寸下 ASP 模拟的精度远低于水驱模拟精度。

(2) 化学驱模拟中，当使用大尺寸网格时，组分和化学剂浓度 (特别是表面活性剂浓度) 出现过度的“人工稀释”现象。这一数值假象造成了模拟中精度的降低，即粗网格情况下驱油效率的下降。

(3) 采用基于 TVD 原理的高阶 (二阶 TVD、三阶 ENO) 格式进行离散后的化学驱数值模拟，其精度有很大的提升。这为大型矿场尺度化学驱油藏数值模拟提供了有效的提高精度并且降低计算成本的方法。

(4) 在一维、二维、三维模型中分别测试了不同网格尺寸配合不同格式模型的 CPU 运行时间，无论哪种模型都充分显示了粗网格配合高阶格式较细网格配合低阶格式所占用的计算机 CPU 时间更少，计算精度更高。

参考文献

[1] 韩大匡. 油藏数值模拟基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 2-9. [HAN D K. Fundamentals of numerical reservoir simulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 2-9.]

[2] 刘皖露, 马德胜, 王强, 等. 化学驱数值模拟技术 [J]. 大庆石油学院学报, 2012, 36(3): 72-78. [LIU W L, MA D S, WANG Q, et al. Numerical simulation for chemical flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2012, 36 (3): 72-78.]

[3] 李建芳, 袁士义, 宋杰, 等. 化学驱驱替前缘动态追踪数值模拟研究 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(B11): 55-58. [LI J F, YUAN S Y, SONG J, et al. Reservoir simulation of chemical flooding by dynamically tracking displacement fronts [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31 (B11): 55-58.]

[4] 袁士义. 注化学剂驱油数值模拟 (应用部分) [J]. 石油学报, 1989, 10(3): 68-76. [YUAN S Y. Note Chemical agent flooding numerical simulation (application part) [J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10 (3): 68-76.]

[5] SWEBY P K. High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws [J]. SIAM journal on numerical analysis,

- 1984, 21(5): 995–1011.
- [6] HARTEN A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws[J]. *Journal of computational physics*, 1983, 49(3): 357–393.
- [7] MALLISON B T, GERRITSEN M G, JESSEN K, et al. High order upwind schemes for two-phase, multicomponent flow[J]. *SPE Journal*, 2005, 10(03): 297–311.
- [8] JESSEN K, GERRITSEN M G, MALLISON B T. High-resolution prediction of enhanced condensate recovery processes[J]. *SPE Journal*, 2008, 13(02): 257–266.
- [9] NISSEN A, ZHU Z, KOVSCEK A, et al. Upscaling kinetics for field-scale in-situ-combustion simulation[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2015, 18(02): 158–170.
- [10] KOYASSAN VEEDU F, DELSHAD M, POPE G A. Scaleup methodology for chemical flooding[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [11] CHRISTENSEN J R, DARCHE G, DECHELETTE B, et al. Applications of dynamic gridding to thermal simulations[C]//SPE international thermal operations and heavy oil symposium and western regional meeting. Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [12] DELSHAD M, ASAKAWA K, POPE G A, et al. Simulations of chemical and microbial enhanced oil recovery methods[C]//SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [13] CHRISTIE M A, MANSFIELD M, KING P R, et al. A renormalisation-based upscaling technique for WAG floods in heterogeneous reservoirs[C]//SPE Reservoir Simulation Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1995.
- [14] HEARN C L. Simulation of stratified waterflooding by pseudo relative permeability curves[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1971, 23(07): 805–813.
- [15] STONE H L. Rigorous Black Oil Pseudo Functions[C]//SPE Symposium on Reservoir Simulation. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- [16] CHEN Z, HUAN G, MA Y. Computational methods for multiphase flows in porous media[C]. *Computational Science and Engineering Series*, Vol. 2, SIAM, Philadelphia, 2006.
- [17] CHEN Z, MA Y, CHEN G. A sequential numerical chemical compositional simulator[J]. *Transport in Porous Media*, 2007, 68: 389–411.

High resolution chemically enhanced oil recovery simulation using higher order differential schemes

ZHU Zhouyuan^{1,4}, LI Minghui², LEI Zhengdong³, CHEN Zhangxing^{1,4}

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 The Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

4 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The accuracy of reservoir simulation depends on the grid block sizes: the smaller the grid sizes, the higher the modeling accuracy, and also the closer towards the converged result. Using large sized grid blocks is often associated with severe numerical diffusion. Chemical flood is a complex Enhanced Oil Recovery (EOR) process. Due to its complex mechanisms (the emulsion phase behavior as an example), chemical EOR often requires very small grid blocks to achieve accurate simulation results. In this work, we explore the possibility of using higher order numerical schemes to improve the accuracy of chemical EOR simulations. First, we conduct a comprehensive review of the three major methods for improving the reservoir simulation accuracy, including the upscaling method, adaptive mesh refinement and the use of higher order schemes. Considering the particular problem of chemical flooding, we choose the use of a higher order scheme as our approach to solve this accuracy improvement problem. Furthermore, we tested the one-dimensional and two-dimensional Alkaline Surfactant Polymer (ASP) flood simulation problems. We found the simulation accuracy highly dependent on the grid block sizes used. In order to obtain close to convergent results, chemical EOR requires much smaller grid blocks than normal water flood simulations. In one-dimensional chemical EOR modeling, the larger the grids, the more artificial averaging we observe for key physical properties such as surfactant concentrations, which ultimately lead to less recovery. Finally, by using second and third order numerical schemes, we have found great enhancement in modeling accuracy when simulating one-dimensional and two-dimensional ASP flooding. Using a coarse grid and higher order schemes may get the similar level of accuracy as fine grid simulation. Higher order schemes serve as powerful solution to reducing numerical viscosity, increasing accuracy, reducing the required number of grid blocks and

computational time. This method shall also assist the implementation of fast and accurate field scale chemical EOR simulations, history matching, and optimizations.

Keywords reservoir simulation; chemical flooding; simulation accuracy; higher order differential scheme; numerical simulation efficiency

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.02.021

(编辑 马桂霞)