

基于微流控模型的孔隙尺度剩余油流动状态变化规律研究

王川^{1,2}, 姜汉桥¹, 马梦琪¹, 徐飞¹, 于馥玮¹, 赵玉云¹, 李俊键^{1*}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083

* 通信作者, lijunjian@foxmail.com

收稿日期: 2019-09-02

中国石油大学(北京)优秀青年学者科研基金“致密油储层提高排驱效率微观机制研究(No. 2462019QNXX04)”资助

摘要 水驱是我国常规砂岩油藏最主要的开发方式, 研究微观剩余油流动动态对于指导处于高含水阶段的水驱油藏开发具有重要意义。本文在微观玻璃模型驱替实验的基础上, 建立了微观剩余油特征参数定量表征方法, 以“微观剩余油占据的孔喉数”、“形状因子”、“油—岩石接触比”和“欧拉数”为特征参数, 对微观剩余油进行了分类识别和定量统计, 进而研究了水驱过程中微观剩余油的赋存状态和动态演化特征。在此基础上, 进一步地以不同类型微观剩余油所占据孔隙的“平均孔隙半径”、“平均孔喉比”和“平均配位数”为特征参数, 研究了微观剩余油的流动路径特征。研究结果表明: 孔隙半径是决定簇状剩余油赋存的主控因素, 孔喉比是形成多孔状剩余油的主控因素, 而滴状微观剩余油分布的孔隙半径、孔喉比和配位数都更加宽泛, 柱状和膜状剩余油分布的孔喉比和配位数也均较为宽泛; 在非均质模型中, 非均质性对簇状和多孔状微观剩余油流动动态起着主导作用, 微观剩余油主要存在于孔喉半径较小的低渗区域, 孔喉比和配位数的影响不大, 而其他三类非连续相剩余油均在水驱过程中尤其是高含水阶段形成, 并且多存在与水驱已波及区域, 非均质性对其微观剩余油的流动动态影响较小。

关键词 微流控模型; 微观剩余油; 赋存状态; 流动路径变化特征

Study of the variation of pore-scale residual oil flow based on a microfluidic model

WANG Chuan^{1,2}, JIANG Hanqiao¹, XU Fei¹, YU Fuwei¹, ZHAO Yuyun¹, LI Junjian¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Sinopec International Exploration and Production Corporation, Beijing 100083, China

Abstract Water flooding is the most important development mode of conventional sandstone reservoirs in China. Studying the flow dynamics of the microscopic residual oil is of great significance to guide the development of water flooding reservoirs in the high water cut stage. In this paper, on the basis of flooding experiments conducted on microscopic glass models, a method that uses the parameters including the number of pores occupied by the microscopic residual oil, the Euler number, the contact ratio of oil and rock and shape factor was established to quantify the microscopic remaining oil. The remaining oil was classified into 5 five kinds based on its occupancy characteristics: cluster, multi-porous, columnar, droplet and membranous. Then the identification and quantitative statistics of the microscopic residual oil were carried out, and the occupancy characteristics and dynamic

引用格式: 王川, 姜汉桥, 马梦琪, 徐飞, 于馥玮, 赵玉云, 李俊键. 基于微流控模型的孔隙尺度剩余油流动状态变化规律研究. 石油科学通报, 2020, 03: 376-391

WANG Chuan, JIANG Hanqiao, XU Fei, YU Fuwei, ZHAO Yuyun, LI Junjian. Study of the variation of pore-scale residual oil flow based on a microfluidic model. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 376-391. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.032

variation characteristics of micro residual oil in the process of water flooding were studied. Moreover, the average pore radius, the average pore-throat ratio and the average coordination number of the pores occupied by the residual oil was used to analyze the flow dynamics of the residual oil. The results show that the pore radius is the main controlling factor of the occurrence of the clustered residual oil, and the pore-throat ratio is the main controlling factor for forming porous residual oil, while the pore radius, the pore-throat ratio and the coordination number of the droplet residual oil distribution are widely distributed, and the pore-throat ratio and the coordination number of the columnar and membranous residual oil distribution are also widespread. In the heterogeneous model, inhomogeneity plays a leading role in the flow of the cluster and the multi-porous micro-residual oil, and the micro-residual oil mainly exists in low-permeability areas with small pore throat radius, and the effect of pore-throat ratio and coordination number is not large, while the remaining three types of non-continuous-phase residual oil are formed in the water-drive process, especially the high-water-cut stage, and they are mostly in the area where water flooding has spread, and heterogeneity has little effect on the flow dynamics of this microscopic residual oil. The methods proposed by this paper may also be useful for other researchers in the EOR area.

Keywords microfluidic model; micro remaining oil; occurrence state; oil field development; characteristics of flow path variation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.032

0 引言

水驱是我国油田开发的主要手段。经过多年的水驱开发,我国大多数油田都已经进入特高含水期。提高高含水期的开发效果对水驱油藏进一步提高产油量有着重要意义^[1-2]。为了最大限度的挖潜剩余油,目前已从现场实践与理论研究两方面,对此类油藏开发调整策略进行了研究。现场实践方面,以精细油藏描述、地震参数反演、测井曲线二次解释、水淹层解释等开发地质理论为指导,进行了井网加密、井网完善、调补层、调剖堵水、提液限注等一系列开发调整措施^[3-6];理论研究方面,尤其是在微观剩余油分布研究方面,通过室内物理实验、渗流理论分析等手段,针对中高、特高含水期的静态剩余油类型及其演化规律进行了研究,明确了剩余油在不同开发阶段的特征及其影响因素^[7-8]。

微观可视化模型是研究微观剩余油的主要手段。国内外许多学者借助微观可视化模型实现了对微观剩余油形态、分布情况的观测,进而研究了剩余油的微观动态变化^[9-11]。Chatize等^[12]将研究了颗粒尺寸、颗粒分布情况、宏观及微观非均质性以及孔喉尺寸对微观剩余油的影响,并认为剩余油的数量、形态及分布情况与孔喉结构有关而与孔喉尺寸无关,在此基础上将水驱后的剩余油分为单液滴、双液滴及枝状液滴等三种类型分别讨论了它们所对应的形成机制。Lenormand^[13-14]利用二维模型研究了孔隙尺度下的油水两相渗流规律,认为驱替前缘的油水分布情况与黏滞力与毛管力的相互作用有关,在此基础上讨论了利用相图和统计模型对水驱前缘的不同流动模式进行了划分。Wegner^[15]等根据孔隙尺寸将二维模型上的剩余

油分为两类,受尺寸限制被困住的原油以及驱替不动的原油。国内李俊键^[16-19]等许多学者也针对微观剩余油的赋存状态进行了大量研究,根据微观剩余油拓扑结构等特征将其划分为簇状、多孔状、柱状、滴状和膜状等五类,并研究了其动态演化规律。

虽然针对水驱油藏剩余油赋存状态的研究目前已经有了很大进展,但目前针对微观剩余油分布的研究大部分还处于静态的范畴^[20],针对剩余油在动态条件下的流动规律缺乏深入研究。基于此,本文以微观剩余油分类前期研究成果为基础,以室内物理实验与统计数学为主要研究手段,针对特高含水期油水的流动规律进行研究,并对其流动路径进行分析,进一步完善和发展了现有微观剩余油研究理论。

1 实验与图像分析方法

1.1 实验材料与实验步骤

实验用水为去离子水,实验用油黏度为 4 mPa·s 的 5 号白油。油水界面张力为 63.77 mN/m。微观模型为玻璃材质,包括一块均质模型和两块非均质模型,总的流动区域为 2 cm × 1.5 cm,如图 1。其中弱非均质模型高渗区域与低渗区域孔喉半径比为 3:1,强非均质模型高渗区域与低渗区域孔喉半径比为 8:1。

实验系统包括恒流注射泵,配有徕卡 DF450C 相机的徕卡 M165FC 体视显微镜。在实验开始前,分别用丙醇和去离子水进行反复冲洗,之后按照如下步骤进行驱替实验:

(1)用注射装置向模型中缓慢注入模拟地层水,使模型孔隙中充分饱和模拟水;

(2)用注射装置向饱和完水的模型中缓慢注入一定黏度的模拟油,使模拟油将模型孔隙中的可流动水驱出,直到出口不再有水流出时停止注入,此时模型处于饱和油和束缚水状态;

(3)打开实时的视频采集软件,分别以 $1\ \mu\text{L}/\text{min}$ 的驱替速度,使用微观驱替装置对模型进行水驱;

(4)观察玻璃刻蚀模型中的油水分布,孔隙中的剩余油不再变化时停止水驱。

1.2 图像分析方法

微观剩余油特征参数提取与分类是微观剩余油流动路径研究的基础。本文利用数字图像处理方法建立了微观剩余油特征参数提取与分类方法,如图2。首先,依据玻璃模型、油、水之间的灰度差异对饱和油图像进行骨架与油水分离。再借助得到的骨架图片作为背景,提取驱替过程中的图片的油水部分,接下来

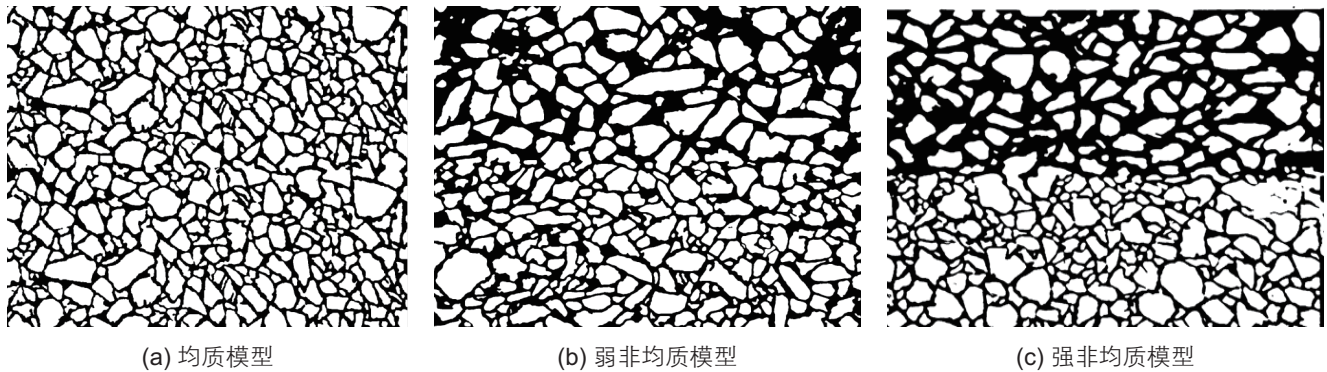


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

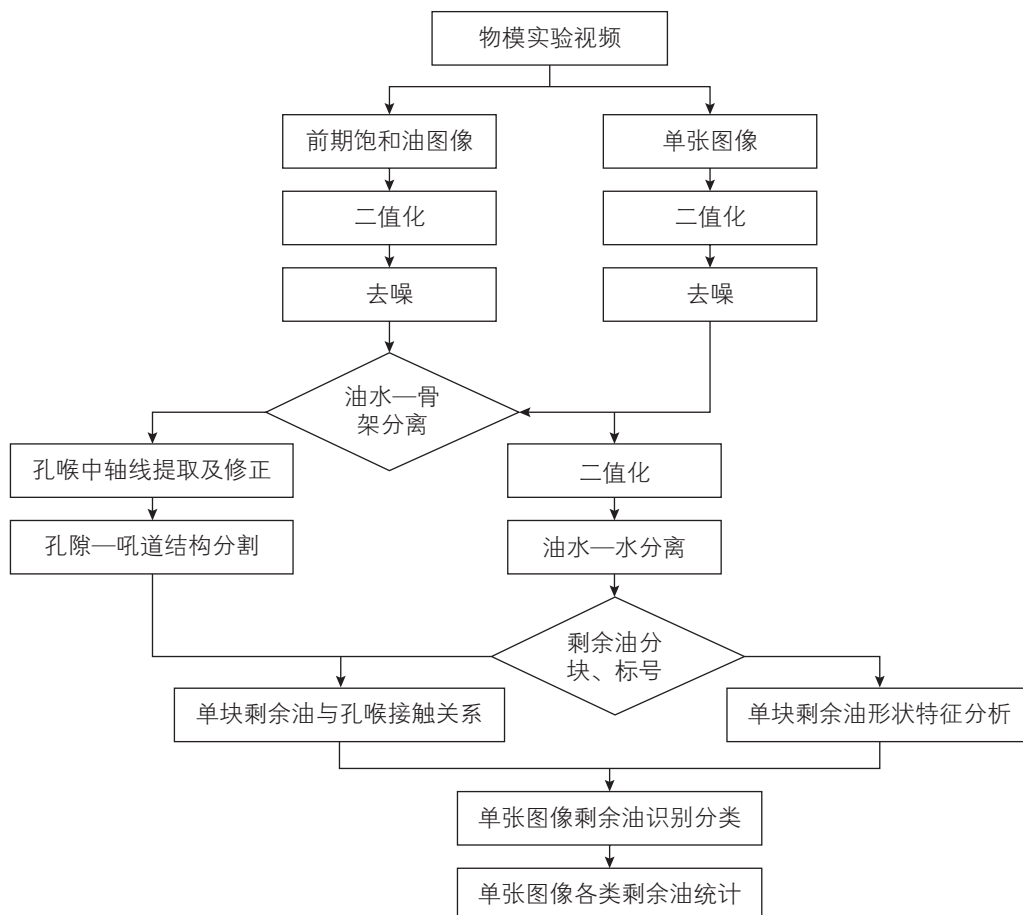


图2 微观剩余油分析技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of micro residual oil analysis

对所提取的油水部分进行第二次二值化处理，实现岩石、油、水的精确分离提取。

在油、水、岩石分离的基础上，以微观剩余油分布区域所对应的孔喉特征参数(孔隙半径、配位数、孔喉比)来表示微观剩余油的流动特征参数，研究了微观剩余油赋存位置，进而分析了微观剩余油的流动特征。首先，采用“边界收缩法”和“最大球法”实现了中轴线的精确提取，用“最大类间距法”和“射线法”实现了孔隙—吼道结构分割，具体处理细节参考文献^[24]。在进行孔喉分离之后，我们可以确定微观

模型中每个孔喉的位置及其所对应的孔喉特征参数，通过油水分类又可以确定每块剩余油的分布区域，将每一类剩余油所在位置与孔喉所在位置进行对比，可以将这一类剩余油所占的孔隙和喉道进行分离，进而确定特定含水饱和度下不同类型剩余油所对应的孔喉特征参数。

通过对剩余油分布的图像进行分析和处理，可以根据微观剩余油流动形态、赋存位置以及油水接触关系。进而依据前期研究^[21-23]所建立的不同类型微观剩余油分类标准(如表 1)，可将微观剩余油分为五类：

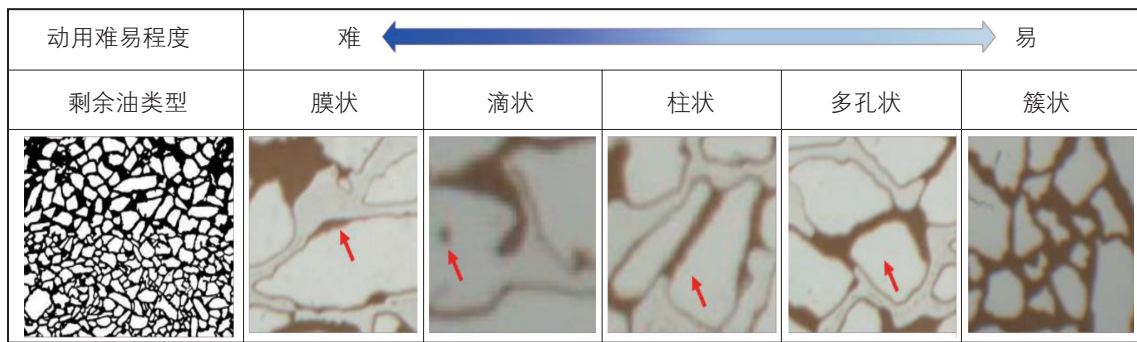


图 3 典型微观剩余油图像

Fig. 3 Typical microscopic image of residual oil

表 1 不同微观剩余油分类标准^[21-23]

Table 1 Different microscopic residual oil classification standards^[21-23]

镜下图像	剩余油类型	所占孔喉数或厚度	形状因子	接触比	欧拉数
	膜状流	厚度 < 孔喉直径的 1/3	$G < 0.048$	$C < 0.5$	$EN > 0$
	滴状流	孔隙、喉道数 ≤ 1	$G < 0.048$	$C = 0$	$EN > 0$
	柱状流	孔隙、喉道数 ≤ 1	$G < 0.048$	$C \geq 0.5$	$EN > 0$
	多孔流	$1 < \text{相连孔隙数} \leq 5$	$G < 0.048$	$C \geq 0.5$	$EN > 0$
	簇状流	相连孔隙数 > 5	$G < 0.048$	$C \geq 0.5$	$EN \leq 0$

簇状、多孔状、柱状、膜状和滴状。其中,几种不同类型剩余油所对应的物理意义分别为:1)簇状流,即分布于多个孔喉的连续相;2)多孔流,分布于1~5个孔喉的非连续相剩余油,存在多个油水界面;3)柱状流,分布于单个通道中的非连续相,存在2个油水界面;4)滴状流,分布于单个孔或喉中,且不与骨架接触只存在一个油水界面的非连续相;5)膜状流,油附着于孔喉壁面,最大厚度小于所在孔喉半径的非连续相。通过对剩余油的分类识别与定量统计,可以明确驱替过程中,不同类型剩余油的含量及其分布情况,为研究水驱后剩余油的提采提供基础。

2 实验结果与讨论

2.1 微观剩余油流动特征表征方法

剩余油流动状态路径特征的研究,特别是特高含水后期非连续相剩余油比例增大的情况下,明确不同流动形态剩余油流动路径以及路径变化对于剩余油的挖潜具有重要意义。本文旨在以微观剩余油所在孔隙的孔喉半径、孔喉比和配位数的动态变化来表征不同类型微观剩余油的流动路径。要实现这一目的,首先需要计算微观模型中所有孔隙的孔喉特征参数。本文通过孔喉中轴线提取和最大球法对微观模型进行了孔喉分割,如图4。在经过孔喉分割后,利用matlab图像分析模块可以直接计算微观模型孔喉半径及孔喉接触关系(配位数、孔喉比)。本文所用三块微观模型特征参数计算结果如图5所示。从图中可以看出,均质模型孔喉半径分布、孔喉比分布和配位数分布均呈单峰分布,孔隙大小较为均匀,而弱非均质模型和强非均质模型的孔喉半径分布、孔喉比分布和配位数分布均呈多峰分布形态,具有不同程度的非均质性。根据计算的孔隙半径分布结果可以发现,弱非均质模型高渗

区与低渗区孔隙半径比约为3:1,而强非均质模型高渗区域低渗区孔隙半径比约为5:1。

在对微观模型孔喉特征参数分析的基础上,利用1.2中介绍的微观剩余油分类方法可对三组驱替实验的微观剩余油结果进行分类。为了分别研究膜状流、滴状流、柱状流、多孔流以及簇状流流动路径变化特征,将图6所示的不同类型微观剩余油进行了分别提取,结果如图所示。

在对不同类型微观剩余油进行分别提取后,结合最初提取的微观模型孔喉分割图像将每一类所有剩余油所在的位置和孔(或喉)所在的位置进行对比,可以确定不同类型微观剩余油在某一时刻所流经的孔隙与喉道,如图8所示。根据图中结果,可以统计特定时刻下特定类型微观剩余油所占据孔隙对应的孔喉特征参数,如图9所示。

2.2 微观剩余油赋存状态

依据2.1中建立的微观剩余油赋存状态定量表征方法,可以对不同驱替阶段微观剩余油的赋存状态进行分析,结果如图10~12所示。从图中可以看出,在水驱早期(含水饱和度小于30%),簇状流和多孔流等连续态微观剩余油是主要的流态,其他非连续相微观剩余油含量极少甚至没有出现。而随着水驱的不断进行,连续相剩余油逐渐向非连续相剩余油转变,柱状流、膜状流和多孔流的比例不断升高,非连续相剩余油逐渐成为高含水期提高采收率的重要研究对象。

在均质模型和两个非均质模型中,簇状剩余油的赋存位置变化规律与所有微观剩余油的整体变化规律高度一致,这也意味着簇状流始终是水驱过程中最重要的剩余油,也是后续提高采收率最重要的研究对象。从水驱结束微观剩余油的赋存状态来看,在均质模型中,簇状剩余油主要分布在孔隙半径为30~130 μm 、孔喉比5~9、配位数2~6的孔隙中;在弱非均质模型

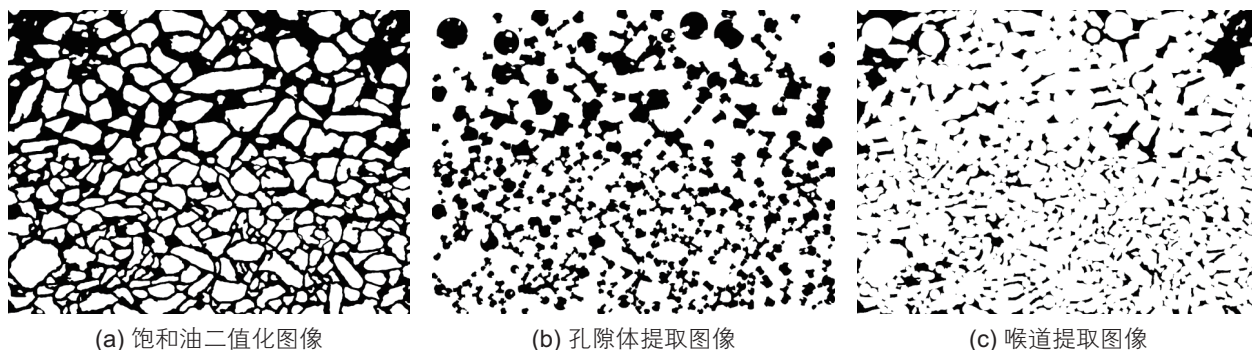


图4 孔喉分离过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pore throat separation process

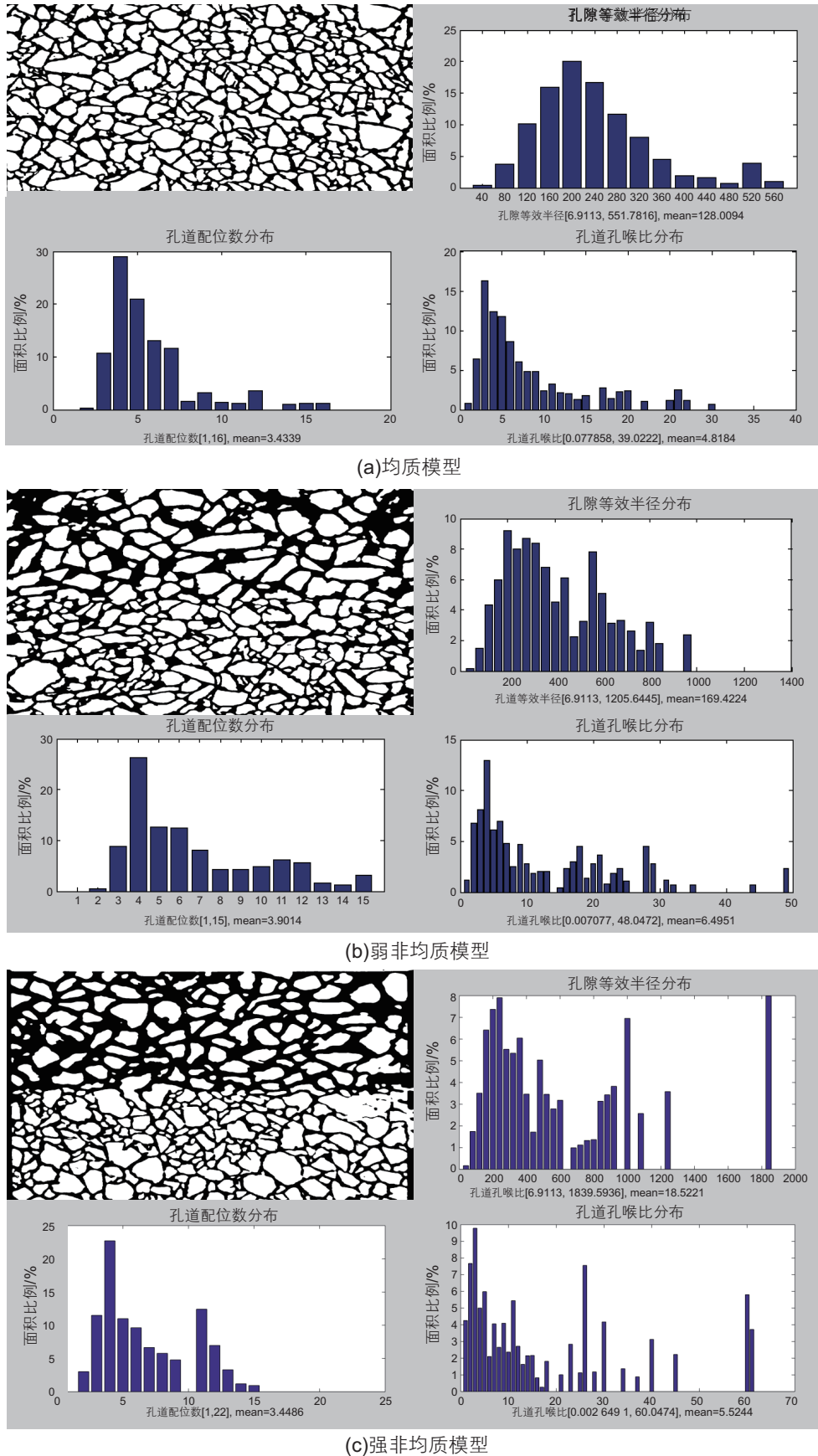


图 5 不同模型孔喉特征参数统计

Fig. 5 Characteristic parameter statistics of pore throat of different models

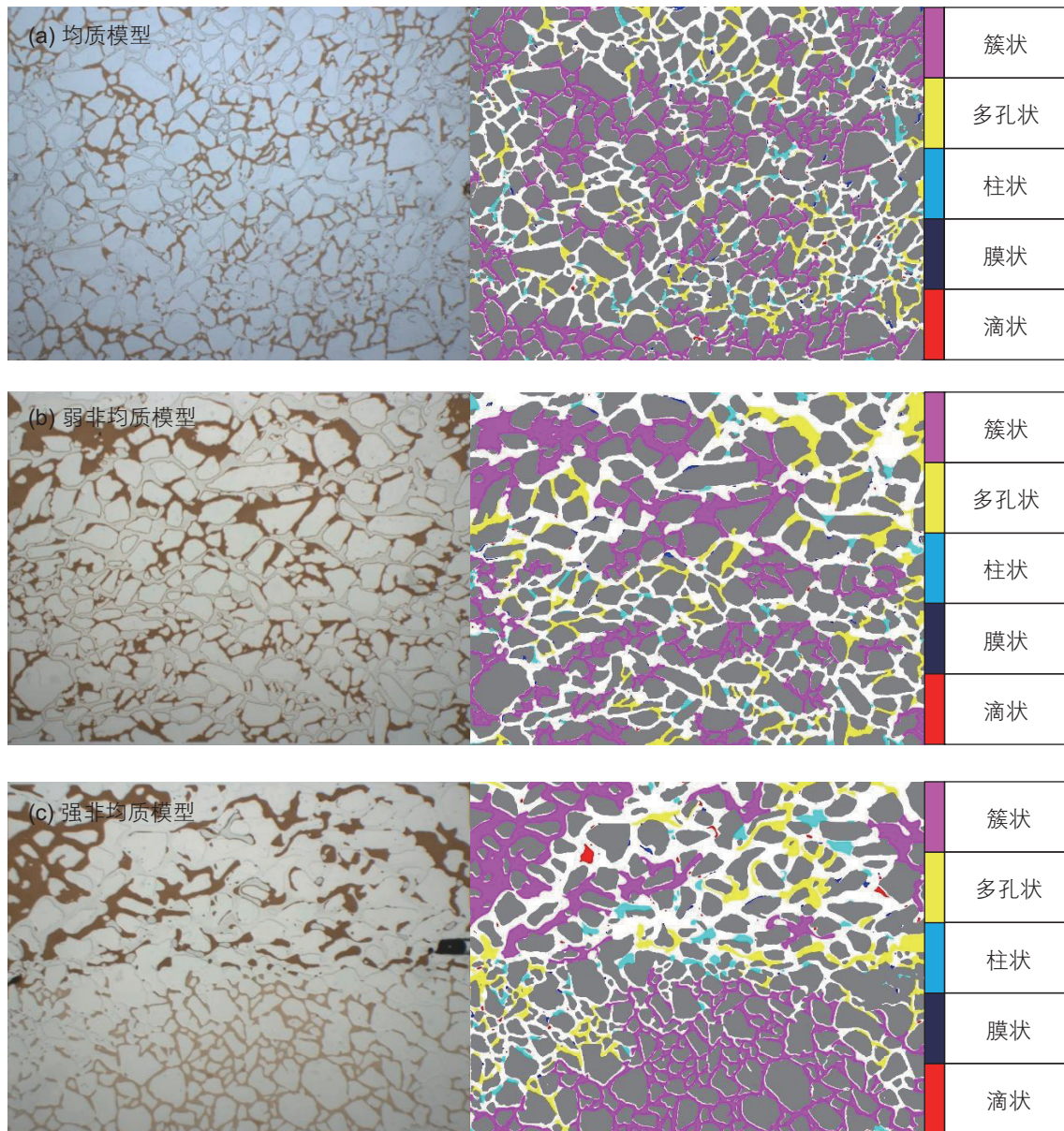


图 6 不同模型驱替结束微观剩余油分布图像及其分类结果

Fig. 6 Microscopic residual oil distribution images and classification results at the end of displacement with different models

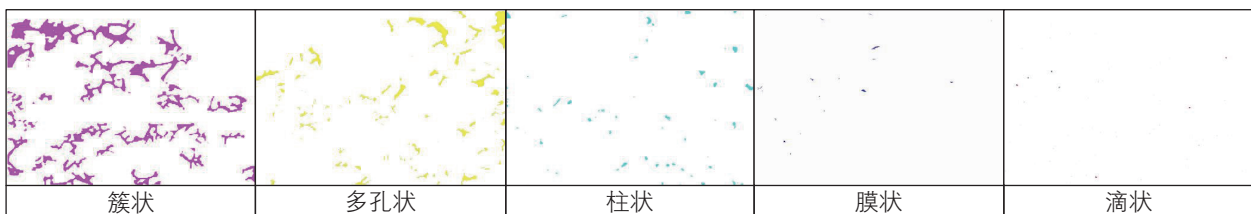


图 7 不同类型微观剩余油所在孔隙的分离 (以弱非均质模型为例)

Fig. 7 Pore separation of different types of microscopic residual oil (weak heterogeneous model as an example)

中，簇状剩余油主要分布在孔喉半径为 $60\ \mu\text{m}$ 、孔喉比 $3\sim 5$ 、配位数 $2\sim 5$ 的孔隙中；在强非均质模型中，簇状剩余油主要分布在孔隙半径约为 $90\ \mu\text{m}$ 、孔喉比

约为 $3\sim 4$ 、配位数约为 $2\sim 3$ 的孔隙中。从上述结果可以看出，簇状剩余油赋存孔隙的特征为：孔隙半径分布相对集中，均为模型中的小孔隙；孔喉比与配位数

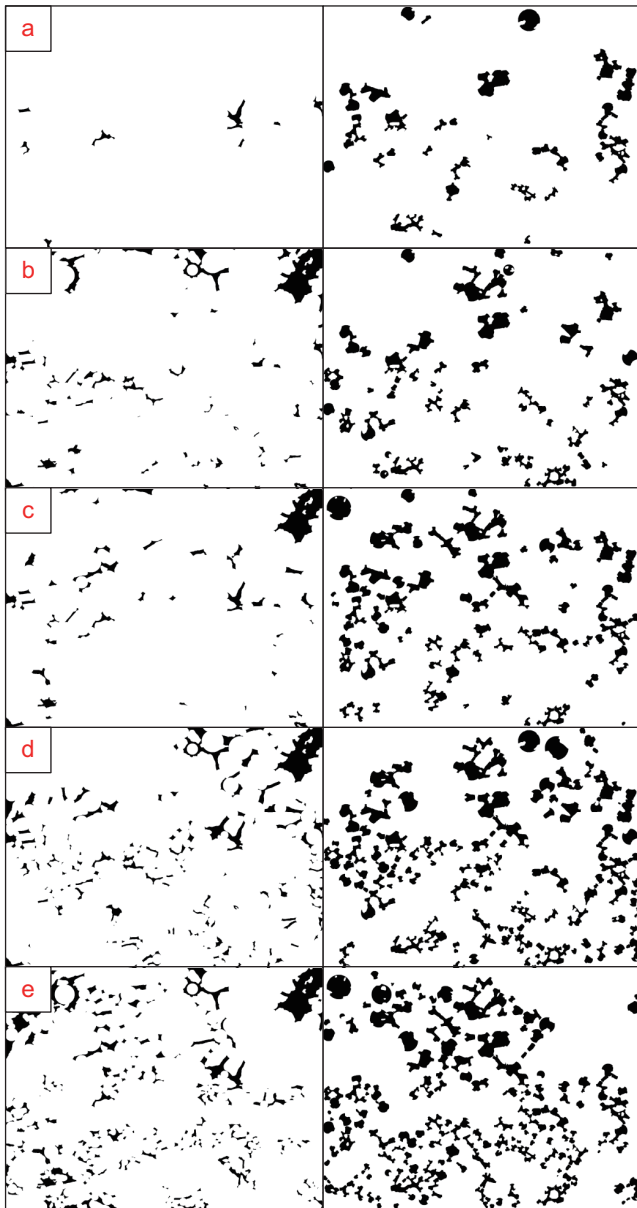


图 8 不同类型微观剩余油所在孔隙的提取：(a) 滴状；(b) 柱状；(c) 膜状；(d) 多孔状；(e) 簇状

Fig. 8 Pore extraction of different types of microscopic residual oil :(a) droplet; (b) columnar; (c) membranous; (d) multi-porous; (e) clusters

分布相对宽泛。对比均质模型与非均质模型的簇状剩余油赋存状态也可以看出，随着非均质程度的提升，簇状剩余油更加集中地分布在低渗区域，它所对应的孔喉分布特征也更加集中。而对于均质模型，簇状剩余油是由其局部微观非均质性造成的，其孔喉分布特征更为宽泛。整体来说，孔隙半径是决定簇状剩余油赋存的主控因素，在均质与非均质模型中，簇状剩余油分布的孔隙半径均较为集中。在均质模型中，对于多孔状剩余油而言，其孔喉比、配位数和孔隙半径分

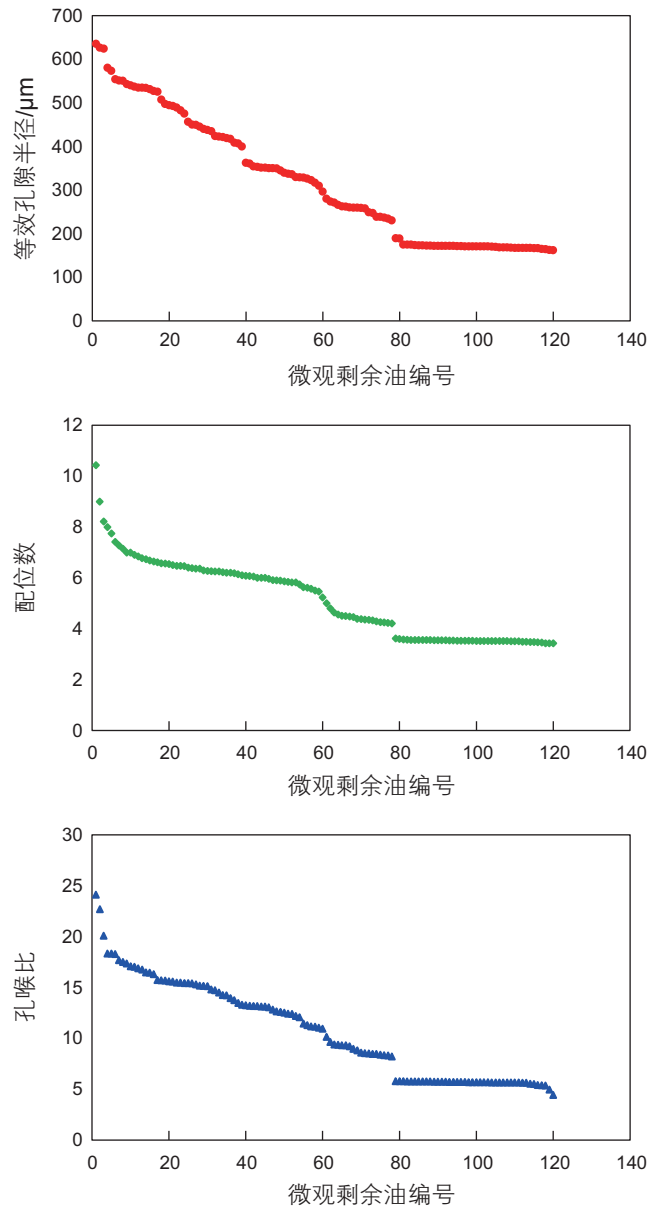
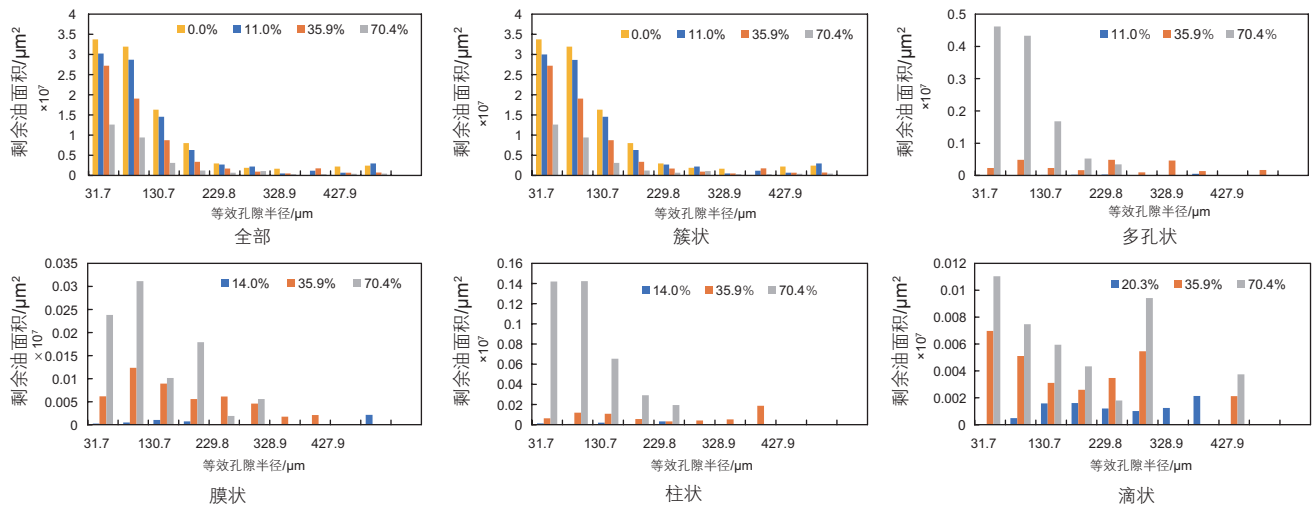


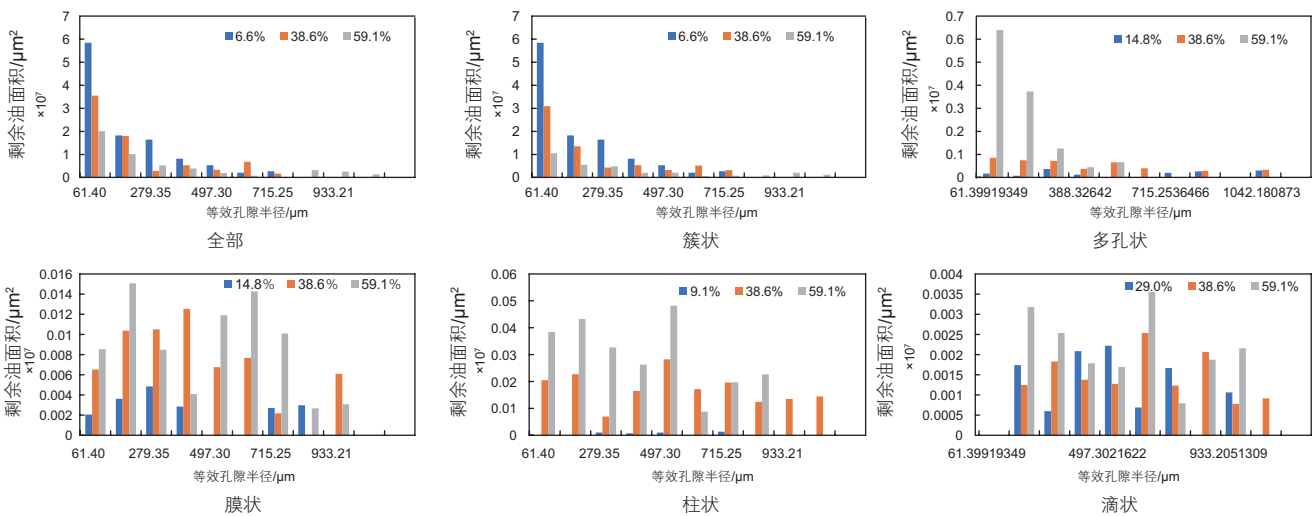
图 9 微观剩余油所在孔隙的特征参数统计
Fig. 9 Characteristic parameter statistics of pores where microscopic residual oil is located

布特征与簇状剩余油的分布特征相近。而在非均质模型中，尤其是强非均质模型中，多孔状剩余油分布的孔隙半径和配位数都变得更加宽泛，但孔喉比的变化规律较为统一，普遍集中于孔喉比较大的孔隙中。这与 Zhao 等的研究结论是一致的，即孔喉比是形成多孔状剩余油的主控因素。

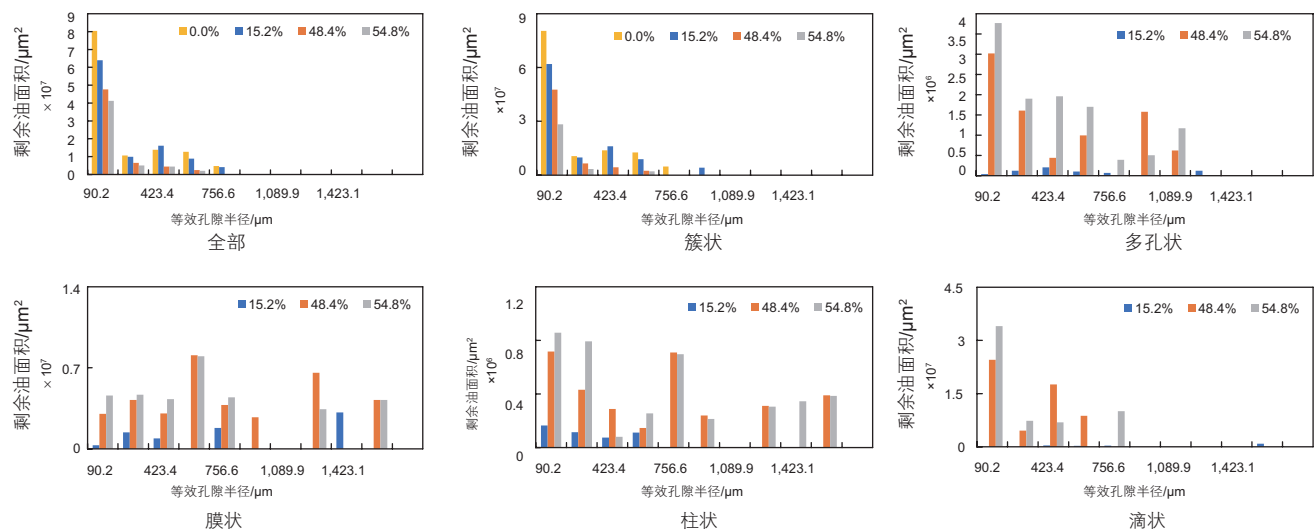
对于其他三种非连续相微观剩余油而言，其分布的孔隙半径、孔喉比和配位数特征与簇状剩余油和多孔状剩余油有着显著差异，这也意味着非连续相微观剩余油的后续动用有着与前两者不同的后续挖潜措施。在这三种微观剩余油中，滴状微观剩余油有着与其他



(a) 均质模型中微观剩余油分布孔隙的孔隙半径统计规律



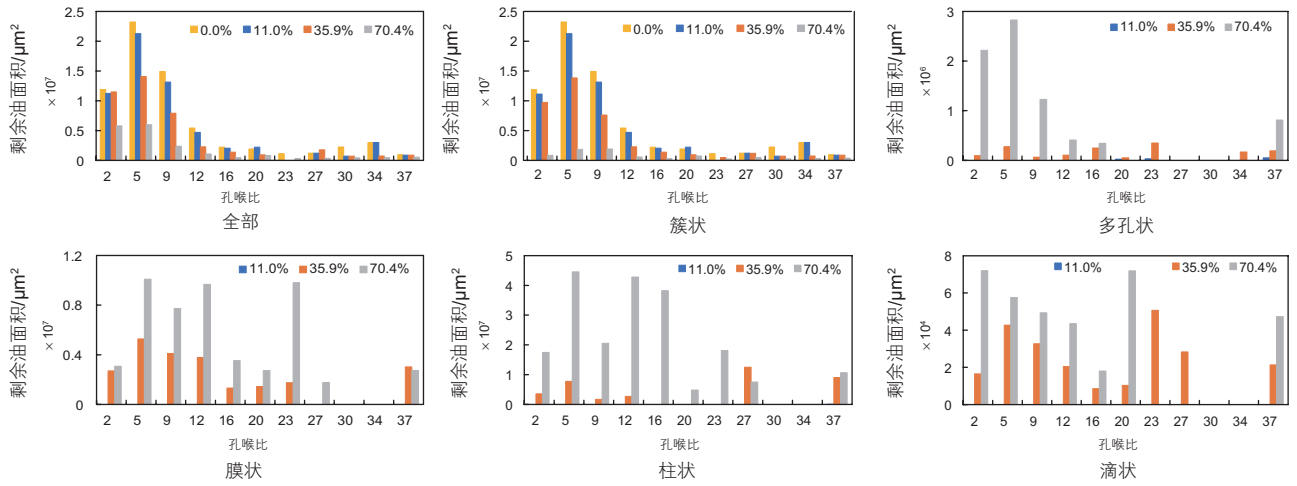
(b) 弱非均质模型中微观剩余油分布孔隙的孔隙半径统计规律



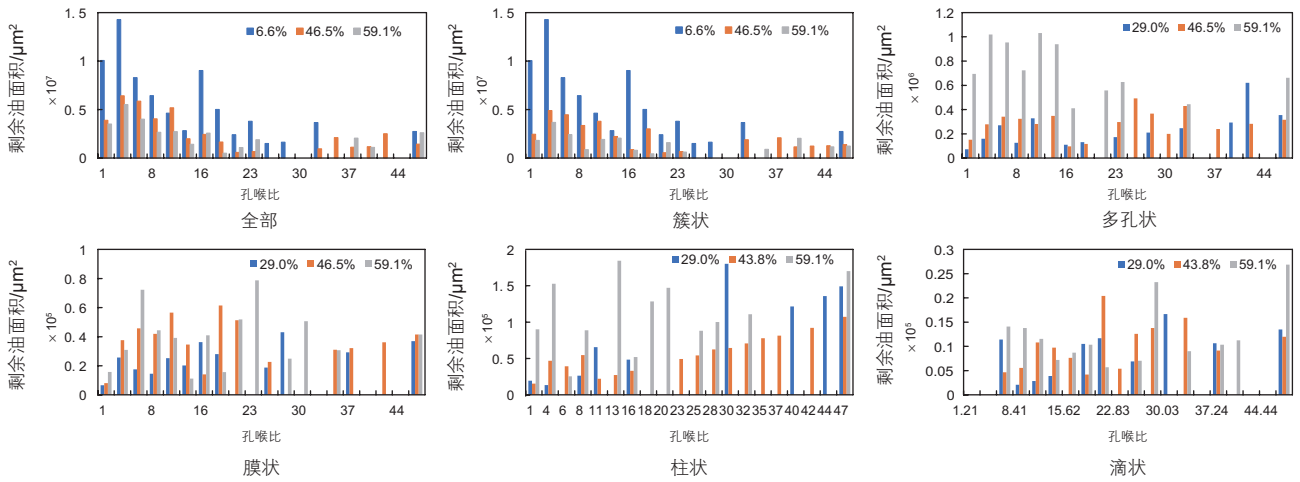
(c) 强非均质模型中微观剩余油分布孔隙的孔隙半径统计规律

图 10 微观剩余油分布孔隙的孔隙半径统计规律(图中图例表示含油饱和度)

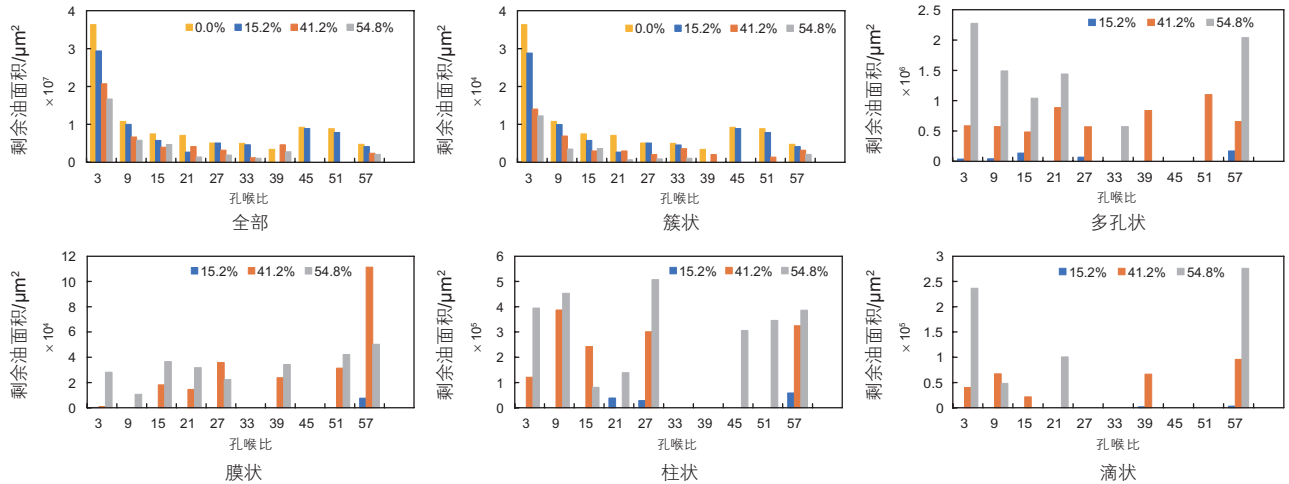
Fig. 10 Statistical law of pore radius of microscopic residual oil distribution pores(The legend indicates the oil saturation)



(a)均质模型中微观剩余油分布孔隙的孔喉比统计规律



(b)弱非均质模型中微观剩余油分布孔隙的孔喉比统计规律



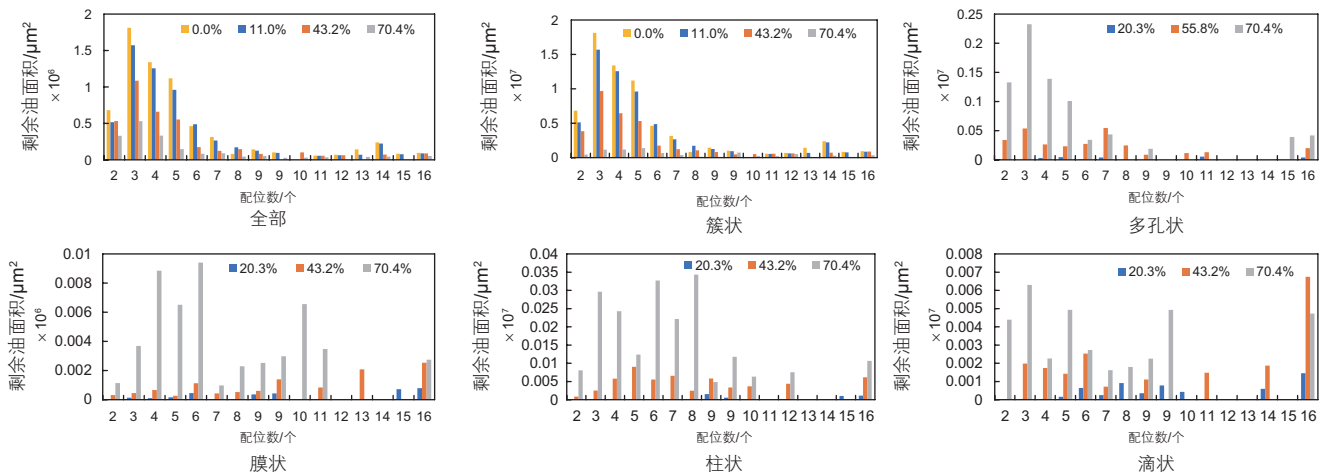
(c)强非均质模型中微观剩余油分布孔隙的孔喉比统计规律

图 11 微观剩余油分布孔隙的孔喉比统计规律 (图中图例表示含油饱和度)

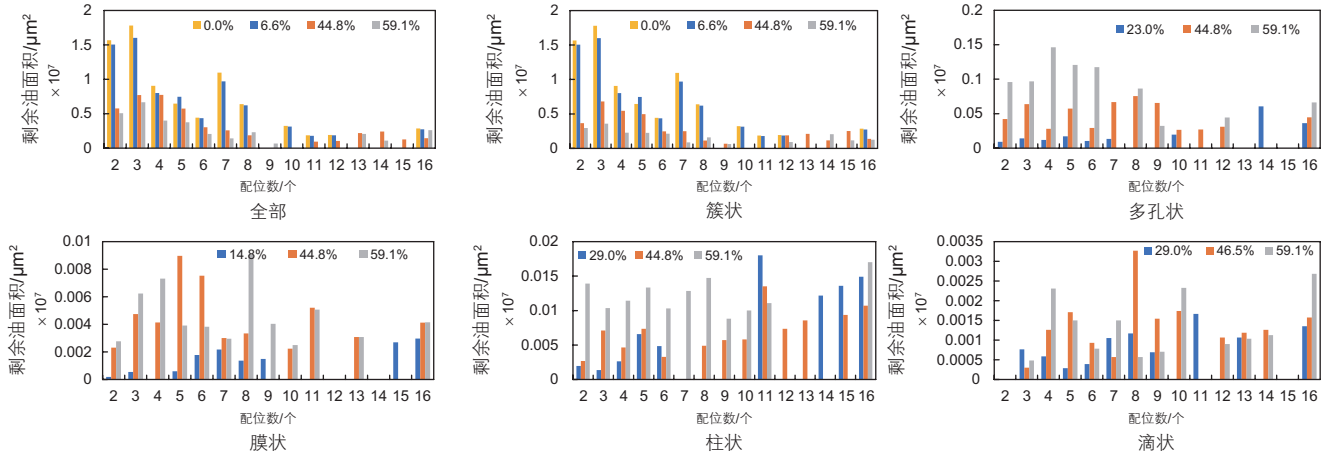
Fig. 11 Statistical law of pore throat ratio of microscopic residual oil distribution pores(The legend indicates the oil saturation)

两者显著不同的赋存特征，即，无论是均质模型还是非均质模型，滴状微观剩余油分布的孔隙半径、孔喉比和配位数都更加宽泛，在不同特征的孔隙中都有分

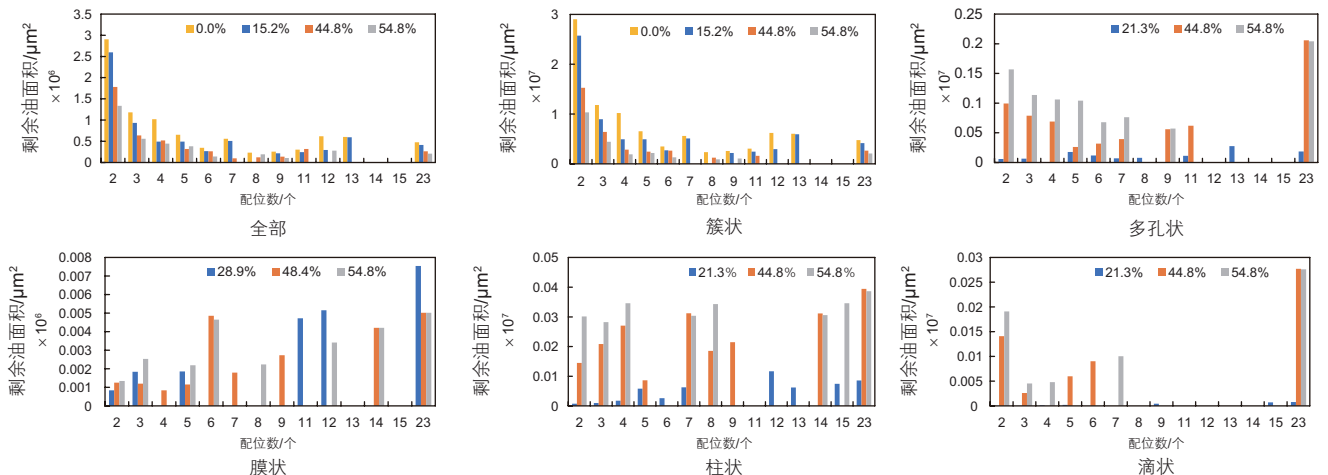
布，且相对含量也较为均匀。这与滴状剩余油的形成和流动特征有关，即滴状剩余油尺寸小于孔隙尺寸，且与孔隙壁面没有接触，它主要存在于水动力学滞留



(a) 均质模型中微观剩余油分布孔隙的配位数统计规律



(b) 弱非均质模型中微观剩余油分布孔隙的配位数统计规律



(c) 强非均质模型中微观剩余油分布孔隙的配位数统计规律

图 12 微观剩余油分布孔隙的配位数统计规律(图中图例表示含油饱和度)

Fig. 12 Statistical law of coordination number of pores in microscopic residual oil distribution(The legend indicates the oil saturation)

区域, 孔喉特征对其影响较小。对于柱状和膜状剩余油而言, 在均质模型和非均质模型中, 两者分布的孔喉比和配位数均较为宽泛。这与其同样占据不足 1 个

孔隙有关, 孔喉比和配位数对其形成影响较小。但膜状剩余油和柱状剩余油分布的孔隙半径较簇状和多孔状剩余油而言, 普遍较大。由其在非均质模型中, 大

孔隙中的柱状和膜状剩余油更多, 这意味着, 膜状和柱状剩余油多为水驱残余油, 滞留在已波及区域。

2.3 微观剩余油流动路径变化特征

依据 2.1 中建立的微观剩余油流动路径定量表征方法可以对均质模型中微观剩余油的流动动态进行分析, 结果如图 13 到 17 所示。之前的研究结果表明^[13], 簇状流是整个渗流过程中, 特别是特高含水后期分布最多的一种流动形态, 同时也是引起相渗曲线非线性, 出现拐点的主要原因, 研究簇状流流动路径特征具有重要意义。图 13(a) 为均质模型中簇状流的流动路径变化特征, 可以看出, 随着含水饱和度的增加, 1) 簇状流分布孔径特征表现为: 平均孔隙半径逐渐减小, 即特高含水后期, 大孔隙里的簇状流被驱替, 簇状流主要集中在小孔隙里; 2) 簇状流分布配位数逐渐减小, 即特高含水后期, 簇状流主要分布在配位数较小的孔隙里; 3) 簇状流分布孔喉比逐渐增大, 即特高含水后期, 簇状流主要分布在孔喉比较大的孔隙里。多孔流是除簇状流外, 另一种占据多个孔隙的连续态微观剩余油。从图 14 中可以看出, 随着含水饱和度的增加, 1) 多孔流分布的平均孔隙半径逐渐减小, 即特高含水后期, 多孔流主要集中在小孔隙里; 2) 多孔流分布的平均配位数逐渐减小, 即特高含水后期, 多孔流主要分布在配位数较小的孔隙里; 3) 多孔流平均孔

喉比整体呈增大的趋势, 最后保持不变, 即特高含水后期, 多孔流主要分布在孔喉比较大的孔隙里。从图 13 和 14 中也可以看出, 随着模型的非均质性逐渐增强, 簇状和多孔状微观剩余油多集中于小孔隙中, 但孔喉比和配位数的变化幅度普遍较小, 趋于平稳。这意味着, 在非均质模型中, 非均质性对簇状和多孔状微观剩余油流动动态起着主导作用, 微观剩余油主要存在于低渗区域, 孔喉比和配位数对其影响较小。

除簇状流和多孔流外, 其他三类微观剩余油均为占据不足一个孔隙的非连续态微观剩余油。图 15 为膜状剩余油的流动动态, 从图中可以看出, 1) 随着含水饱和度的增加, 膜状流分布孔径特征表现为: 平均孔隙半径逐渐增大, 即特高含水后期, 大孔隙里的膜状流不断形成; 2) 膜状流分布的平均配位数曲线呈波动上升状态; 3) 膜状流分布孔喉比曲线呈波动状态。图 16 为柱状剩余油的流动动态, 从图中可以看出, 随着含水饱和度的增加, 柱状流分布孔径特征、配位数和孔喉比均表现为平稳趋势。图 17 为滴状剩余油的流动动态, 从图中可以看出, 滴状流分布的平均孔隙半径、孔喉比和配位数在含水饱和度较高的阶段均呈上升趋势, 这也意味着滴状剩余油在不同大小的孔隙中均可形成, 但最终由于喉道的卡堵作用而被束缚在模型中, 成为残余油。与簇状和多孔状剩余油的变化规律不同, 膜状、滴状和柱状剩余油在非均质模型中的流动动态

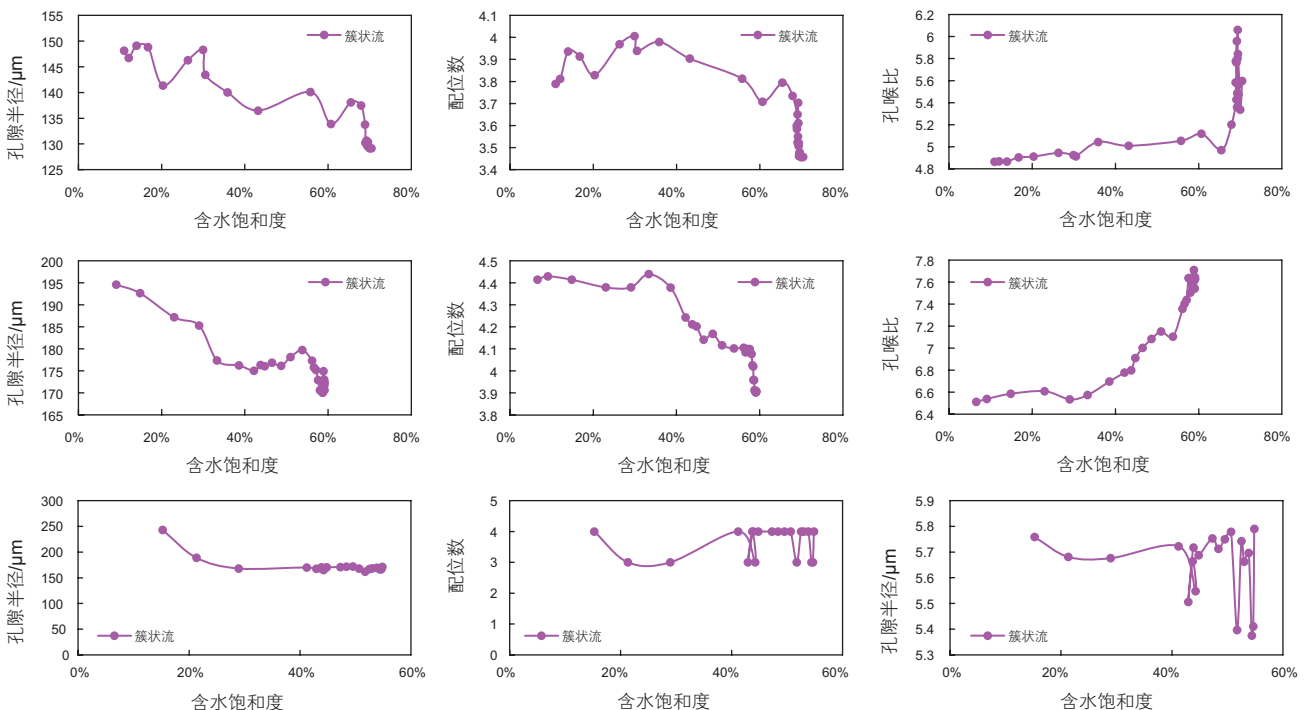


图 13 簇状流流动动态变化
Fig. 13 Flow dynamics changes of cluster flow

与均质模型较为一致，多呈抖动状态，没有明显的规律性。这与三类非连续相剩余油的形成过程有关，即，这三类非连续相剩余油均在水驱过程中尤其是高含水阶段形成，并且多存在与水驱已波及区域，因此，即

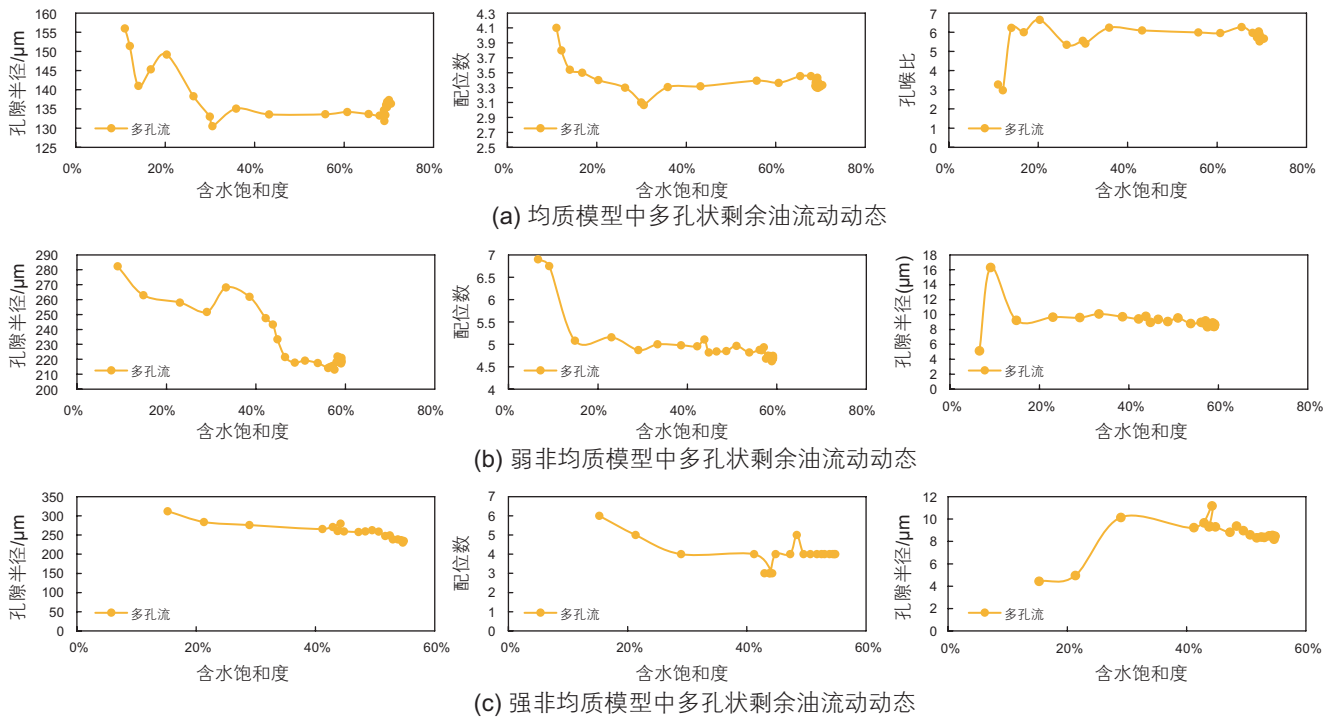


图 14 多孔流流动动态变化

Fig. 14 Flow dynamic changes of porous flow

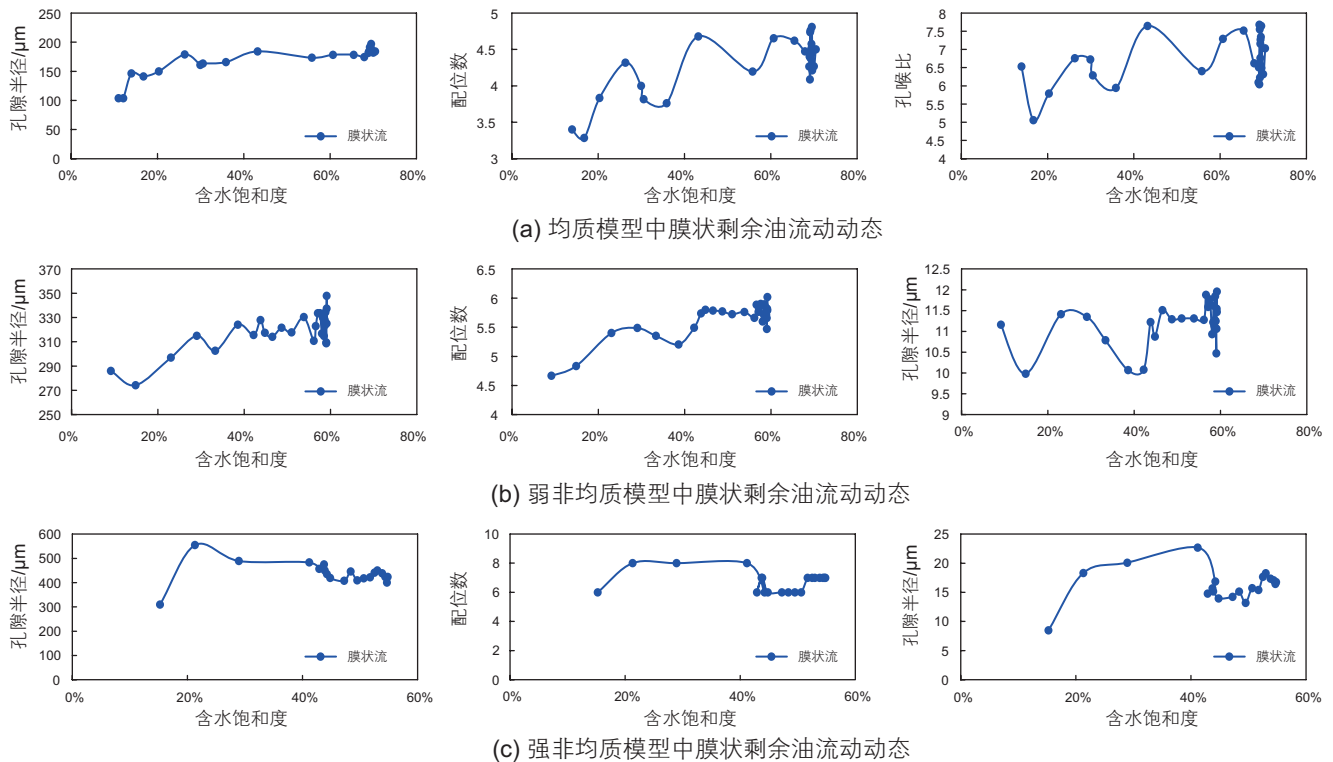


图 15 膜状流流动动态变化

Fig. 15 Flow dynamic changes of membranous flow

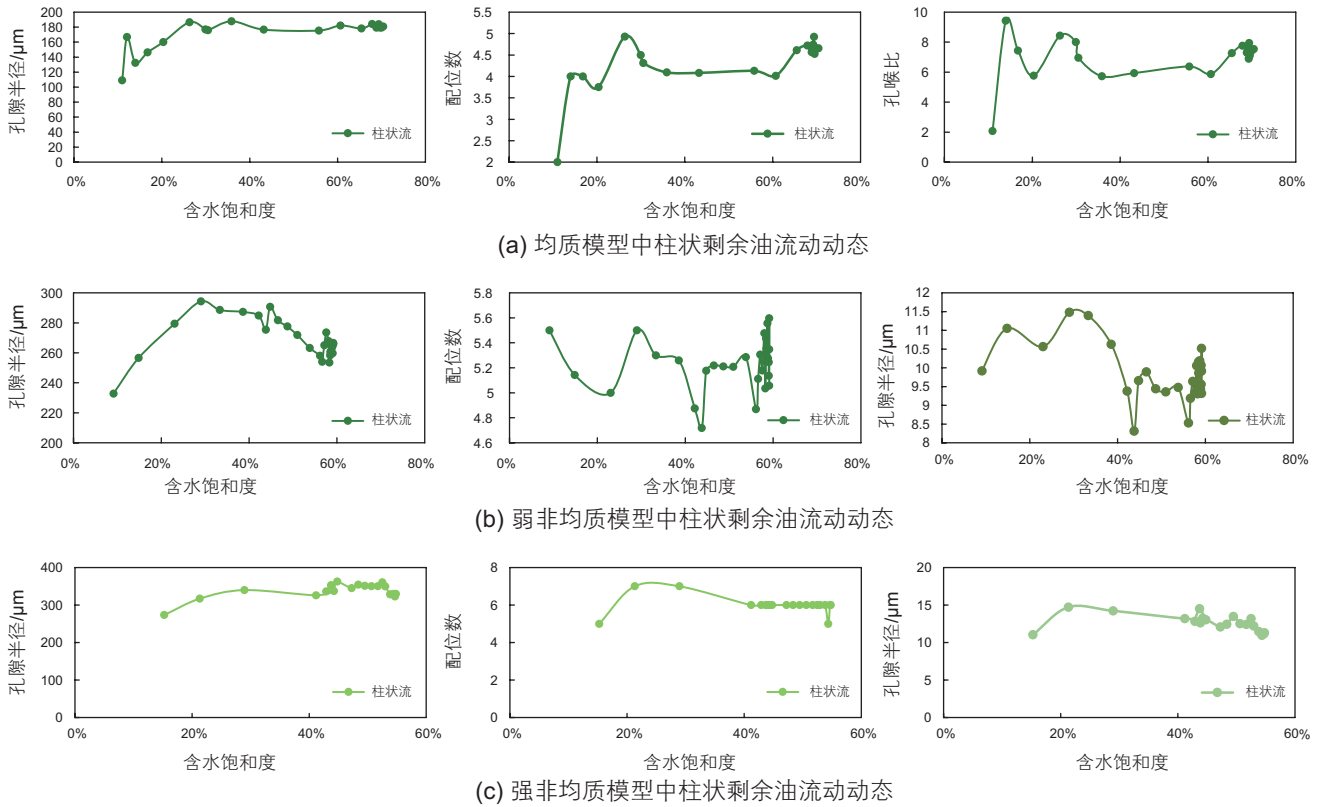


图 16 柱状流流动动态变化

Fig. 16 Flow dynamics changes of columnar flow

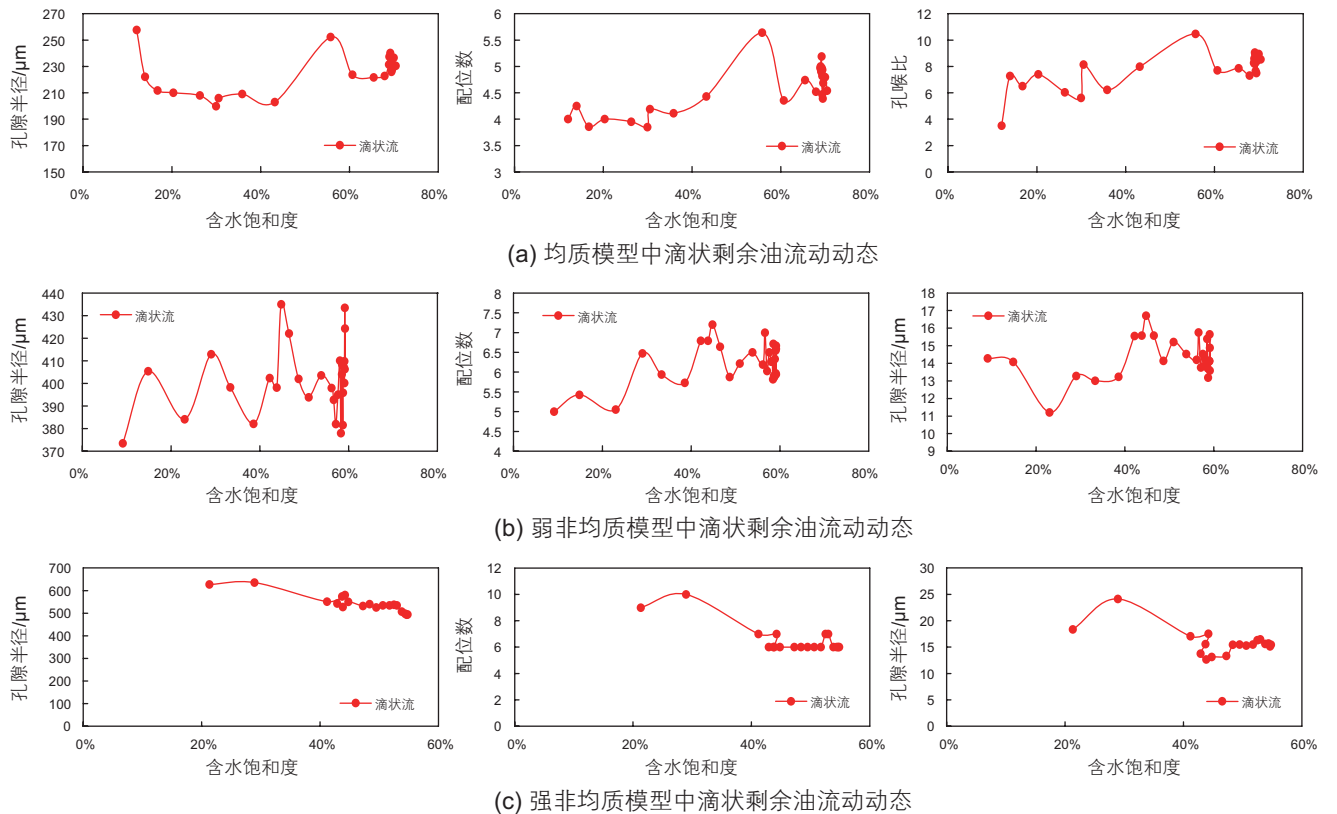


图 17 滴状流流动动态变化

Fig. 17 Flow dynamic changes of droplet flow

使在非均质模型中,这三类微观剩余油也多存在于高渗区域,非均质性对它们的流动动态影响不大。

3 结论

本文基于微流控实验和图像分析技术建立了微观剩余油赋存及流动特征的定量表征方法,并分别研究了均质模型与非均质模型水驱过程中微观剩余油流动规律,主要取得以下认识:

(1)簇状流和多孔流等连续态微观剩余油在水驱早期是主要的流态,其他非连续相微观剩余油含量极少甚至没有出现。而随着水驱的不断进行,连续相剩余油逐渐向非连续相剩余油转变,柱状流、膜状流和多

孔流的比例不断升高,非连续相剩余油逐渐成为高含水期提高采收率的重要研究对象;

(2)孔隙半径是决定簇状剩余油赋存的主控因素,孔喉比是形成多孔状剩余油的主控因素,而滴状微观剩余油分布的孔隙半径、孔喉比和配位数也更加宽泛,柱状和膜状剩余油分布的孔喉比和配位数也均较为宽泛;

(3)在非均质模型中,非均质性对簇状和多孔状微观剩余油流动动态起着主导作用,微观剩余油主要存在于孔喉半径较小的低渗区域,孔喉比和配位数的影响不大,而其他三类非连续相剩余油均在水驱过程中尤其是高含水阶段形成,并且多存在与水驱已波及区域,非均质性对其微观剩余油的流动动态影响较小。

参考文献

- [1] 王玉普,刘义坤,邓庆军. 中国陆相砂岩油田特高含水期开发现状及对策[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(01): 1-9+131. [WANG Y P, LIU Y K, DENG Q J. Current situation and development strategy of the extra high water cut stage of continental facies sandstone oil fields in China[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(01): 1-9+131.]
- [2] 刘玉娟. 注水方式对油田开发的影响[J]. 内江科技, 2005(01): 24-62. [LIU Y J. The effect of water flooding regime on the development of oil field[J]. NEI JIANG KE JI, 2005(01): 24-62.]
- [3] 陈欢庆,石成方,胡海燕,等. 高含水油田精细油藏描述研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(06): 1311-1322. [CHEN Q H, SHI C F, HU H Y. Advances in fine description of reservoir in high water-cut oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(06): 1311-1322.]
- [4] 马小凡. 高含水油田开发效果评价方法及应用研究[J]. 石化技术, 2018, 25(10): 187. [MA X F. Study on Evaluation method and Application of Development effect in High Water cut Oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(10): 187.]
- [5] 马宝鹏. 石油地质工程中高含水期油田注水开发改善措施[J]. 石化技术, 2018, 25(09): 248. [MA B P. Improvement measures of oilfield water injection development in medium and high water cut stage of petroleum geological engineering[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(09): 248.]
- [6] 袁庆峰,庞彦明,杜庆龙,等. 砂岩油田特高含水期开发规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(03): 49-55. [YUAN Q F, PENG Y M, DU Q L, et al. Development laws of the sandstone oilfields at extra-high watercut stage[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(03): 49-55.]
- [7] 闫伟超,孙建孟. 微观剩余油研究现状分析[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(05): 2198-2211. [YAN W C, SUN J M. Analysis of research present situation of microscopic remaining oil[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(05): 2198-2211.]
- [8] 侯健,邱茂鑫,陆努,等. 采用CT技术研究岩心剩余油微观赋存状态[J]. 石油学报, 2020, (2): 319-325. [HOU J, QIU M X, LU N, et al. Characterization of residual oil microdistribution at pore scale using computerized tomography. Acta Petrolei Sinica, 2014, (2), 319-325.]
- [9] 李俊键,苏航,姜汉桥,等. 微流控模型在油气田开发中的应用[J]. 石油科学通报, 2018, 3(03): 284-301. [LI J J, SU H, JIANG H Q, et al. Application of microfluidic models in oil and gas field development[J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(03): 284-301.]
- [10] 杨珂,徐守余. 微观剩余油实验方法研究[J]. 断块油气田, 2009, 16(04): 75-77. [YANG K, XU S Y. Experiment methods of microcosmic remaining oil[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(04): 75-77.]
- [11] 刘同敬,姜宝益,刘睿,等. 多孔介质中示踪剂微观可视化实验研究[J]. 断块油气田, 2013, 20(04): 530-534. [LIU T J, JIANG B Y, LIU R, et al. Experimental study on microcosmic visualization of tracer in porous medium[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(04): 530-534.]
- [12] KARADIMITRIOU N K., HASSANIZADEH S M. A review of micromodels and their use in two-phase flow studies. Vadose Zone Journal, 2012, 11(3), 215-228.
- [13] LENORMAND R., TOUBOUL E., ZARCONI C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189(189), 165-187.
- [14] LENORMAND R. Flow through porous media: Limits of fractal patterns. Proceedings of the Royal Society A, 1989, 423(1864), 159-168.

- [15] WEGNER J, HINCAPIE R E, FÖDISCH H, et al. Novel Visualisation of Chemical EOR Flooding Using a Lab-on-a-Chip Setup Supported by an Extensive Rheological Characterisation. SPE Asia Pacific Enhanced Oil Recovery Conference, 2015.
- [16] 李俊键, 成宝洋, 刘仁静, 等. 基于数字岩心的孔隙尺度砂砾岩水敏微观机理[J]. 石油学报, 2019, 40(05): 594–603. [LI J J, CHENG B Y, LIU R J, et al. Microscopic mechanism of water sensitivity of pore-scale sandy conglomerate based on digital core[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(05): 594–603.]
- [17] 李俊键, 刘洋, 高亚军, 等. 微观孔喉结构非均质性对剩余油分布形态的影响[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(06): 1043–1052. [LI J J, LIU Y, GAO Y J., et al. Effects of microscopic pore structure heterogeneity on the distribution and morphology of remaining oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(06): 1043–1052.]
- [18] 李俊键, 姜汉桥, 周代余, 等. 古油藏低矿化度水驱微观剩余油动用机理实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(05): 104–109. [LI J J, JIANG H Q, ZHOU D Y, et al. Experimental study on the microscopic displacement mechanism of remaining oil by low salinity water flooding in the paleo-oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(05): 104–109.]
- [19] LI J J, JIANG H Q, WANG C, et al. Pore-scale investigation of microscopic remaining oil variation characteristics in water-wet sandstone using CT scanning[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 48: 36–45.
- [20] 马斌玉, 徐守余. 微观剩余油分布研究方法综述[J]. 能源与环保, 2016(11): 142–145+150. [MA B Y, XU S Y. Overview on research methods of microcosmic remaining oil distribution[J]. China Energy and Environmental Protection, 2016(11): 142–145+150.]
- [21] 王川, 姜汉桥, 糜利栋, 等. 孔隙尺度下动态剩余油渗流特征研究方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(5): 74–78. [WANG C, JIANG H Q, MI L D, et al. Researching methods of the flow characteristics of the dynamic remained oils by the pore sizes[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(5): 74–78.]
- [22] 于春磊, 糜利栋, 王川, 等. 水驱油藏特高含水期微观剩余油渗流特征研究[J]. 断块油气田, 2016, 23(5): 592–594. [YU C L, MI L D, WANG C, et al. Percolation characteristics investigation of microscopic remaining oil in water flooding reservoir with ultra-high water cut[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(5): 592–594.]
- [23] Wang C, Jiang H, Liu J, et al. An advanced approach to study the seepage characteristics of dynamic remaining oil in porous media at pore scale[C]. Spe Europec Featured at Eage Conference & Exhibition, 2017.
- [24] Mi L, Jiang H, Pei Y, et al. Microscopic oil and water percolation characteristic investigation of water flood reservoir in ultrahigh water cut period[C]. SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, 2016.

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)