

微观剩余油赋存状态的矿物学机制探讨 ——以鄂尔多斯盆地中部中-低渗砂岩储层为例

王哲麟 师永民[†] 潘懋 汪贺 马子麟

北京大学地球与空间科学学院, 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: sym@pku.edu.cn

摘要 针对现阶段微观剩余油研究中可视化精度低、微观剩余油与矿物之间的依存关系不明确以及形态分类描述不完善等问题, 利用岩芯观察、铸体薄片分析、X射线衍射分析等手段, 以场发射环境扫描电子显微镜(FE-SEM)图像为基础资料, 联合能谱(EDS)分析资料, 研究鄂尔多斯盆地中部长2油层组和长9油层组的微观剩余油分布规律, 并探讨剩余油赋存状态的矿物学机制。结果表明, 微观剩余油的赋存状态由孔隙的大小和形态以及与孔隙相接触的边缘矿物的性质共同决定, 不同类型孔隙对剩余油的赋存能力取决于孔隙边缘矿物的形态、表面粗糙程度、比重和润湿性等物理化学性质。据此, 可将微观剩余油分为残留油团、半自由油岛、半自由油雾、半自由微油团和束缚油5个类型。

关键词 微观剩余油; 赋存状态; 矿物学机制; 环境扫描电子显微镜; 能谱分析; 形状因子

Mineralogical Mechanism of Micro-Remaining Oil Occurrence: An Example Study of Middle-Low Permeability Sandstone Reservoir of Ordos Basin

WANG Zhelin, SHI Yongmin[†], PAN Mao, WANG He, MA Zilin

School of Earth and Space Sciences, Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871;

[†] Corresponding author, E-mail: sym@pku.edu.cn

Abstract In order to figure out the existing problems of low visualization accuracy in the research of micro-residual oil and clarify its morphological characteristics, this study discussed the distribution of residual oil occurrence state and its relationship with minerals. We conducted an integrated approach of core observation, casting film, X-ray diffraction (X-RD), field emission environmental scanning electron microscope (FE-SEM) and energy-dispersive spectrometry (EDS) analysis on middle-low permeability sandstone reservoir in the 9th member of Yanan Formation and 2nd member of Yanchang Formation from Ordos Basin, China. The result shows that different pore structure forms have different storage capacity for remaining oil, it depends on the properties of matrix minerals corresponding to the pore, including mineral morphology, surface roughness, specific gravity, wettability, etc, which can be classified into five types: residual oil block mess, semi-free oil blob, semi-free oil island, semi-free oil mist and irreducible oil.

Key words micro-residual oil; occurrence state; mineralogical mechanism; environmental scanning electron microscope; energy spectrum analysis; shape factor

剩余油的微观赋存状态、赋存量以及控制因素是富含水期油田开发与调整的重要研究内容, 也是提高采收率的核心科学问题。从孔隙到岩石, 再到区带, 可将剩余油研究分为微规模、小规模、大规

模和宏规模^[1]。岩石孔隙结构是微规模地质体剩余油富集的场所, 随着孔隙结构表征技术的精度和维度不断提高, 对微观剩余油的可视化研究已实现从二维空间传统光学技术到三维空间无损检测技术的

转变^[2-7], 相应的物理实验技术以荧光薄片^[8]、玻璃蚀刻仿真模型^[9]、CT扫描^[10-14]、激光共聚焦^[15]、扫描电子显微镜及核磁共振成像^[16]为主。

环境扫描电子显微镜能反映孔隙结构润湿性的非均质分布情况, 解释矿物组分、尺寸和分布等因素对流体物理化学行为的影响^[17], 广泛应用于岩石微观结构、矿物成分、孔隙类型及矿物形貌学研究中。朱如凯等^[18]利用扫描电子显微镜, 在鄂尔多斯盆地三叠系长6段致密砂岩孔隙中观察到石油以4种状态赋存: 呈圆球状或短柱状发育于粒间孔内; 呈薄膜状均匀地覆盖于颗粒表面; 粘结于裂缝两壁。宁方兴等^[19]在扫描电子显微镜下观察到页岩油在晶间孔中以游离、溶解和吸附3种状态赋存。

油田进入开发中后期时, 剩余油多集中于水驱未波及的微-纳米孔隙喉道簇或晶间孔和微裂缝中。这类孔喉非均质性强, 体系复杂, 大小不一, 孔隙矿物边缘润湿性不明确。利用传统的光学技术、CT扫描技术和激光共聚焦技术, 无法同时获得储集空间的大小和类型、剩余油形态特征和分布规律以及孔隙边缘矿物的性质, 且成像分辨率有限, 无法对微-纳米孔喉进行精细的表征, 从而无法全面地认识赋存在微-纳米孔喉中的剩余油。

本文针对上述问题, 以场发射环境扫描电子显微镜的高分辨率图像资料为基础, 联合能谱分析资料, 探讨微观剩余油的赋存状态及其矿物学机制。

1 样品来源与基本特征

1.1 样品来源

研究区位于鄂尔多斯盆地中部, 属于陕北斜坡近东西向的鼻状构造部位(图1)。样品采自密闭取芯的Y检井和T检井, 现场荧光测试显示含油性较好(图2)。Y检井的主力产层为侏罗系延安组9段(延9油层组), 为一套中渗中-细砂岩, 孔隙度为16.2%~22.1%, 渗透率为 $41.68 \times 10^{-3} \sim 1671 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。T检井的主力产层为三叠系延长组2段(长2油层组), 孔隙度为6.3%~18.9%, 渗透率为 $0.067 \times 10^{-3} \sim 76.56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为一套中-低渗储层。两个层段为区块内共同开发的层系, 均进入高含水阶段。

1.2 矿物组成

岩石薄片鉴定及全岩和黏土矿物的X射线衍射分析结果表明, 鄂尔多斯盆地中部延9油层组与长2油层组矿物组成基本上一致, 主要为石英、钾长

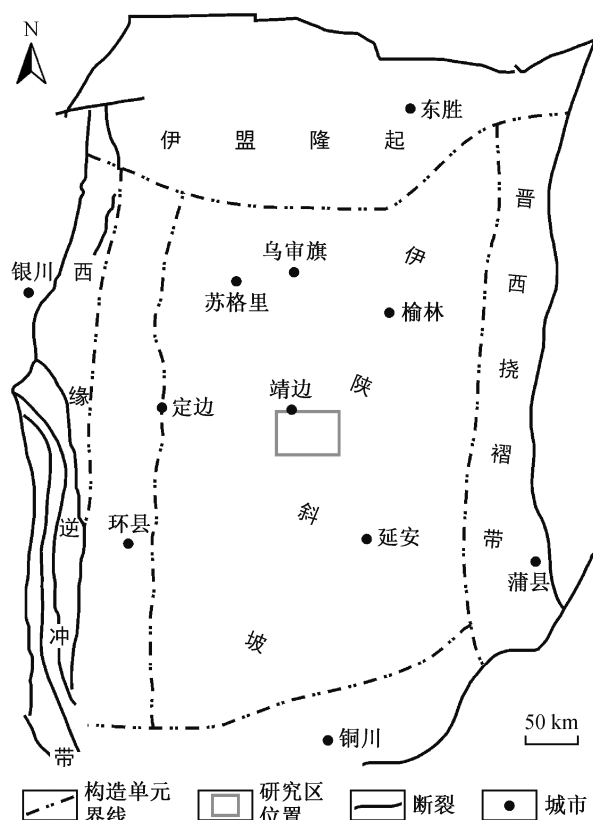


图1 研究区位置图(据文献[20]修改)

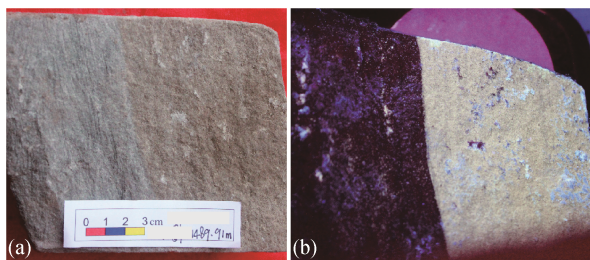
Fig. 1 Location of research area (modified from Ref. [20])

石、斜长石和黏土矿物, 含少量的方解石、黄铁矿(图3(a))和菱铁矿等, 不同矿物的含量在两套储层中略有差异。两套储层中均发育绿泥石(图3(b))、伊蒙混层(图3(c))和伊利石(图3(d))这3种黏土矿物, 区别在于长2油层组以绿泥石(平均含量为9.1%)为主, 不含高岭石, 而延9油层组广泛发育高岭石(平均含量为3.6%)(图3(e)), 含少量绿泥石。

大量的石英及长石族矿物导致溶蚀和破裂现象广泛发育。晶间微孔与微裂缝的类型主要包括长石溶蚀孔(图3(f)和(i))、黏土矿物晶间微孔(图3(g))和岩屑溶蚀孔(图3(j)), 偶见石英晶内孔(图3(h))和矿物微裂缝(图3(k))。

1.3 孔隙形态定量表征

利用软件Image J, 对19个样品的场发射环境扫描电子显微镜(Field Emission Environmental Scanning Electron Microscope, FE-SEM)图像进行二值化处理, 得到由0和1表示的黑白图像。在此基础上提取孔隙边缘, 统计每个孔隙单元的参数, 包括面积、周长、面孔率、形状因子和圆度等^[21-23]。



(a) 自然光照射; (b) 紫外光照射

图2 长2段典型样品照片

Fig. 2 Typical sample images of Chang-2 Formation

形状因子 G_C 是用来表征孔隙形态与理想圆形接近程度的参数^[24-25], 用下式计算:

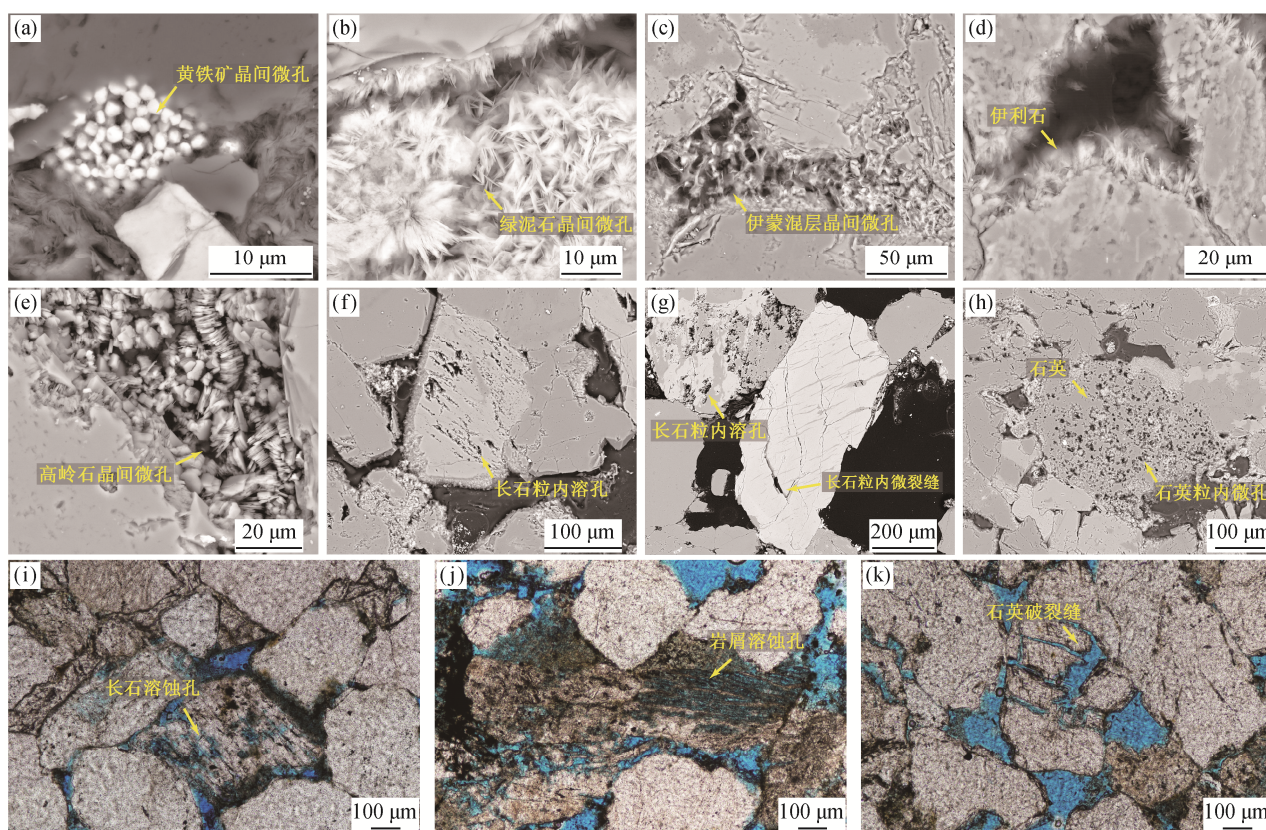
$$G_C = 4\pi \cdot A / P^2,$$

式中, A 为孔隙横截面面积, P 为相应的孔隙横截面周长。 G_C 值分布在 0~1 之间, 越接近 0, 孔隙形态越细长; 越接近 1, 孔隙形态越趋于圆形。

孔隙形态特征与其边缘的矿物类型关系密切。

对于面积相同的孔隙, 当其边缘为黏土矿物时, 孔隙截面的周长最大; 当其边缘为骨架矿物时, 孔隙截面的周长最小。因此, 可以用形状因子来表征同尺寸级别孔隙的周缘复杂程度(复杂程度越高, 形状因子越小)。依据孔隙形态与形状因子之间的关系, 将孔隙形态划分为狭长状($G_C=0\sim0.3$)、类椭圆状($G_C=0.3\sim0.6$)和类圆状($G_C=0.6\sim1$)(表1)。

狭长状的孔隙多为粒间孔, 周缘形态较复杂, 周长不均且均值较大。在截面积相同的情况下, 孔隙周长变小时, 孔隙形态表现为颗粒之间的狭缝。类椭圆状孔隙的周长较均一, 孔隙最大视直径与最小视直径尺寸相当。类圆状孔隙的周长均值较小, 孔隙边缘平滑, 矿物组成单一, 表现为长石粒内孔和黏土矿物晶间孔。长2油层组的形状因子均值(0.412)大于延9油层组(0.330)(表1), 表明研究区孔隙的形态整体上呈类椭圆状。对于尺寸级别相同的孔隙, 长2油层组多发育黏土矿物, 与扫描电子



(a) 样品 T525, 1489.30 m, 草莓状黄铁矿晶间微孔; (b) 样品 T323, 1473.46 m, 玫瑰花状绿泥石; (c) 样品 T548, 1491.80 m, 蜂窝状伊蒙混层黏土矿物; (d) 样品 T436, 1482.33 m, 丝絮状伊利石; (e) 样品 Y26, 1134.66 m, 书页状高岭石; (f) 样品 T541, 1491.04 m, 长石粒内溶孔; (g) 样品 Y245, 1138.73 m, 长石粒内溶孔和微裂缝; (h) 样品 T441, 1482.83 m, 石英粒内微孔; (i) 样品 Y157, 1133.49 m, 长石粒内溶孔; (j) 样品 Y26, 1134.66 m, 岩屑内溶蚀孔隙; (k) 样品 Y163, 1128.01 m, 石英破裂缝

图3 样品微孔发育特征及矿物组成

Fig. 3 Microscopic pore characteristics and mineral composition of samples

表 1 研究区样品深度及孔隙形态特征参数

Table 1 Sample depth and morphological characteristic parameter of study area

样品编号	深度/m	孔隙面积/ μm²	孔隙数量	孔隙面积 均值/μm²	面孔率 均值/%	孔隙周长 均值/μm	形状因子 均值	圆度均值	孔隙面积贡献率/%			各类孔隙的周长均值/μm		
									狭长状	类椭圆状	类圆状	狭长孔隙	类椭圆孔	类圆孔
T323-1	1473.46	1121091	4829	232.16	9.36	39.10	0.459	0.694	65.24	23.06	11.70	425.54	100.83	16.35
T323-2	1473.46	1378891	5273	261.50	12.35	38.33	0.412	0.494	63.56	26.99	9.46	431.54	102.29	15.42
T436	1482.33	1207692	4437	272.19	8.69	51.69	0.444	0.693	61.08	25.08	13.84	395.55	99.83	20.07
T441	1482.83	1454631	6523	223.00	10.40	37.59	0.431	0.727	64.10	21.54	14.36	363.84	92.36	18.01
T460	1484.77	400475	10827	36.99	11.18	14.15	0.309	0.458	78.71	14.91	6.38	160.06	28.43	4.80
T525-1	1489.30	514593	18923	27.19	11.61	17.58	0.341	0.741	44.91	25.32	29.77	128.22	38.54	9.49
T525-2	1489.30	1246993	12309	101.31	9.13	33.50	0.335	0.741	32.03	33.07	34.90	232.27	82.11	19.32
T529	1489.70	1545674	20252	76.32	13.94	29.76	0.486	0.515	47.71	24.14	28.16	211.15	64.19	15.30
T541-1	1491.04	148061	5257	28.17	8.74	15.89	0.468	0.503	53.35	30.41	16.24	125.91	36.97	6.70
T541-2	1491.04	1003389	4243	236.48	9.54	43.58	0.424	0.499	64.45	25.50	10.06	368.44	99.10	15.48
T548	1491.80	1332996	7466	178.54	10.16	32.82	0.417	0.521	60.53	24.52	14.95	360.21	91.19	15.98
长 2 油层组均值														
Y116-1	1128.01	2005538	3459	579.80	13.50	64.78	0.349	0.482	82.70	11.73	5.57	645.51	88.04	18.73
Y116-2	1128.01	1871797	3563	525.34	15.66	48.86	0.350	0.486	90.73	4.66	4.61	572.28	68.26	16.41
Y128	1130.43	1721328	5090	338.18	12.44	56.80	0.325	0.467	81.22	9.68	9.10	470.31	79.40	18.56
Y157	1130.49	1494071	3890	384.08	11.51	52.43	0.323	0.501	79.52	14.08	6.40	545.02	78.05	16.52
Y229-1	1137.13	2097300	7281	288.05	14.81	40.73	0.295	0.744	76.92	13.48	9.60	474.99	77.82	17.06
Y229-2	1137.13	502310	8638	58.15	14.92	19.61	0.299	0.513	81.94	7.19	10.86	227.95	32.32	8.35
Y245	1138.73	2180577	6910	315.57	16.48	44.84	0.348	0.497	79.80	12.23	7.97	477.30	77.50	16.46
Y328	1143.96	1951609	5585	349.44	14.33	49.81	0.349	0.482	82.89	8.46	8.66	493.23	76.78	18.05
延 9 油层组均值														
		—	—	354.83	14.21	47.23	0.330	0.522	81.97	10.19	7.84	488.32	72.27	16.27

说明: 样品编号中“T”代表 T 检井, “Y”代表 Y 检井, “-1”、“-2”代表同一深度的不同采样点。

显微镜图像特征以及 X 射线衍射分析结果一致。

两个油层组的孔隙均以狭长状为主,类椭圆状次之,类圆状最少,样品的形状因子和圆度均值接近,呈现整体上一致、局部有差异的孔隙形态。长 2 油层组面孔率为 8.69%~13.94%,均值为 10.46%;延 9 油层组样品面孔率较大,在 11.51%~16.48%之间,均值为 14.21%(表 1)。从图 4 可以看出,长 2 油层组狭长状孔隙的孔面积贡献率均值(57.79%)低于延 9 油层组(81.97%),类椭圆状孔隙的孔面积贡献率均值(24.96%)高于延 9 油层组(10.19%)。

2 微观剩余油赋存特征

2.1 技术原理与鉴定方法

场发射环境扫描电子显微镜是检测储层含油性的重要手段^[26],可在低真空条件下分析导电和不导电的样品,联合能谱(energy-dispersive spectrometry, EDS)分析,可以得到微观剩余油的成分信息和赋存量。本次 FE-SEM 实验在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,使用 FEI Quanta 650 高分辨率多用途场发射扫描电子显微镜,该仪器在真空环境中的分辨率可达到 1.4 nm。

图 5(a)显示剩余油呈团块状分布在高岭石晶间微孔中,少量呈浸染状吸附在矿物表面。将扫描电镜图像做灰度阈值划分,结果显示剩余油(图 5(d))灰度值介于储层矿物(图 5(b))与孔隙(图 5(c))之间,目测具有油脂光泽,含油面积百分比可通过剩余油灰度值区域占总视阈面积的比例计算。

含油样品能谱测试结果以含 3 种基本元素(C, N 和 O)为特征。微观剩余油赋存位置不同,能谱测试结果不同。从图 6 和表 2 可以看出不同赋存位置剩余油中 C 原子百分含量的差异,黏土矿物微孔中残留的微小油团(点 1)明显高于黏土矿物与孔隙接触边缘(点 2)和离孔隙较远的部位(点 3),因此碳元素含量可在一定程度上代表剩余油的赋存量。

2.2 形态特征与分布规律

微观剩余油的形态特征与其储集空间的形态和大小紧密相关。目前,学术界尚未形成统一的孔隙分类方案,多数学者趋向于在成因分析的基础上进行量化的孔隙分级评价^[27]。在考虑流体流动特征以及流体赋存状态的基础上,结合国际纯粹与应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)的孔隙分类评价标准,本文采用孔隙尺寸分级评价方案:纳米微孔,直径小于

1 nm; 纳米中孔,直径为 2~50 nm; 纳米大孔,直径为 50~100 nm; 亚微米孔,直径为 0.1~1 μm; 微米小孔,直径为 1~10 μm; 微米中孔,直径为 10~62.5 μm; 微米大孔,直径为 62.5 μm~1 mm; 毫米孔,直径大于 1 mm。

依据储集空间的大小、类型以及剩余油的形态学特征,将剩余油分为残留油团、半自由油岛、半自由油雾、半自由微油团和束缚油 5 种类型。

微米中孔中多见残留油团,因不在优势运移通道而沉淀于孔隙中央(图 7 中点 1 和 5)或颗粒间的狭长状孔隙中(图 7 中点 4),形态与其储集空间基本上一致,以团块状和链状为主。

半自由状态剩余油多赋存在黏土矿物微孔和粒内溶孔等微米至纳米级别的孔隙中,按形态特征分为半自由油岛和半自由微油团(图 7 中点 6 和 11)。半自由油岛分布在纳米大孔及颗粒间的缝隙中(图 7 中点 2),多与孔隙边缘黏土矿物或骨架颗粒相连(图 7 中点 7 和 8),或与半自由微油团连通成油网。

半自由油雾(图 7 中点 15 和 16)赋存在连通性好的孔隙喉道簇中,在油田开发后期的高含水阶段,水驱后残余油被充分浸泡,以溶解烃的形式呈淡雾状堆积在水洗波及区域的骨架矿物颗粒附近,或被比重较大的矿物微晶拦截,形成淡雾状剩余油。离矿物表面越近,油雾的自由程度越低。当与矿物表面完全接触时,过渡为束缚态,成滴状吸附在矿物颗粒表面(图 7 中点 10, 14 和 17)。

束缚油多呈浸染状赋存在比表面积较大的黏土矿物表面(图 7 中点 9),或形成孔表薄膜,吸附在晶形较好的矿物颗粒周缘(图 7 中点 3, 12 和 13)。其赋存状态与矿物表面物理化学性质关系密切,一般不贡献工业产能,只有改变润湿性才能进一步驱替。

从总体上看,进入高含水期的剩余油在微观孔隙结构中主要以非连续相分布,应根据不同类型微观剩余油的形成机理及赋存特征采取相应的策略来提高采收率。对于整体上呈自由态和半自由态的油团、油岛及油雾,需要对砂体叠置关系进行细化的研究,在提高井网适配程度的基础上进行分区差异调控,对高渗层段进行封堵,以便削弱由储层非均质性带来的注采程度不均衡现象,提高自由态和半自由态剩余油的水洗波及程度,实现局部的高效挖潜。束缚态的剩余油多赋存于界面性质不同的矿物颗粒表面,储层中黏土矿物的含量以及注入水的矿化度和离子组成都对采收率有显著的影响,可通过

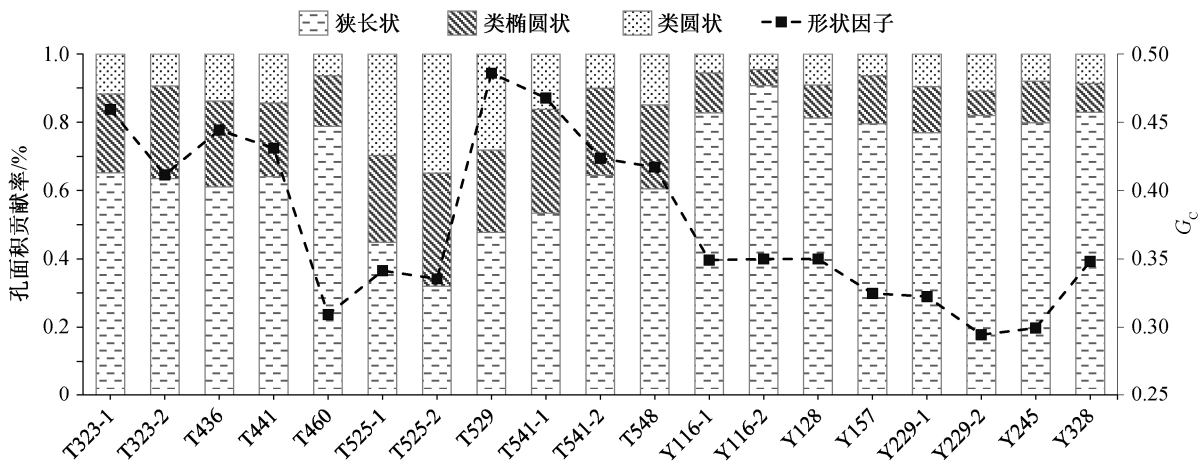
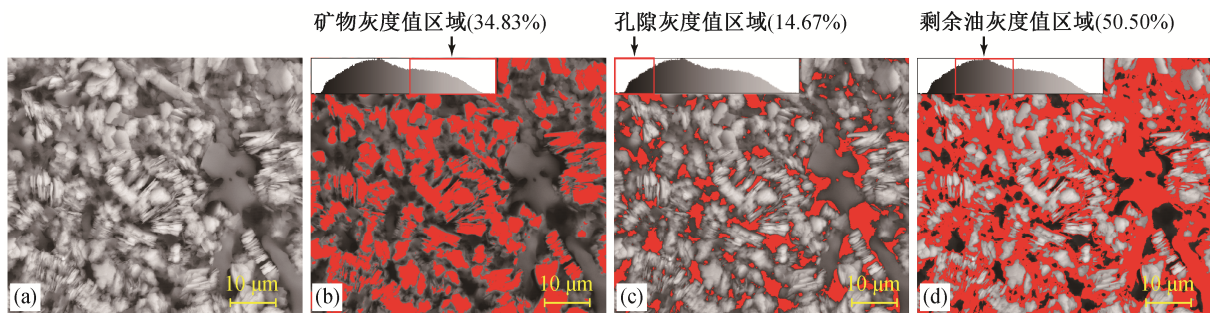
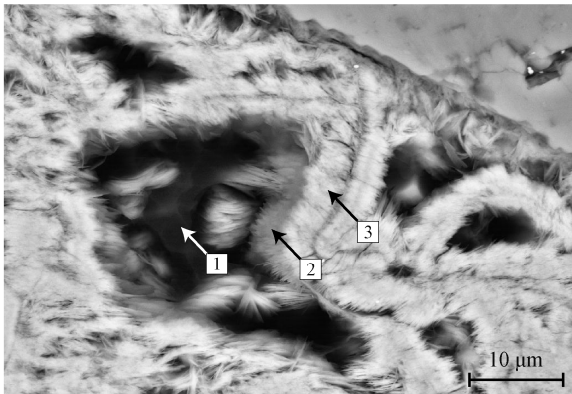


图 4 样品形状因子与不同形态孔隙孔面积贡献率分布的对应关系
Fig. 4 Relationships between the shape factor and pore area contribution rate



(a) 原始图片; (b)~(d)中红色区域分别代表高岭石、孔隙和剩余油
图 5 储层矿物、孔隙、剩余油灰度值区域示意图
Fig. 5 Schematic diagram of gray value area of reservoir minerals, pores and remaining oil



1. 团块状剩余油; 2. 黏土矿物边缘浸染状剩余油; 3. 黏土矿物
图 6 微观剩余油在场发射环境扫描电镜下的鉴定特征
Fig. 6 Identification characteristics of micro-residual oil under FE-SEM

溶解黏土表面有机物、多组分离子交换以及注入低矿化度水等方式来提高储层的亲水性^[28], 从而提高亲油岩芯的驱替效率。

表 2 不同位置剩余油能谱数据

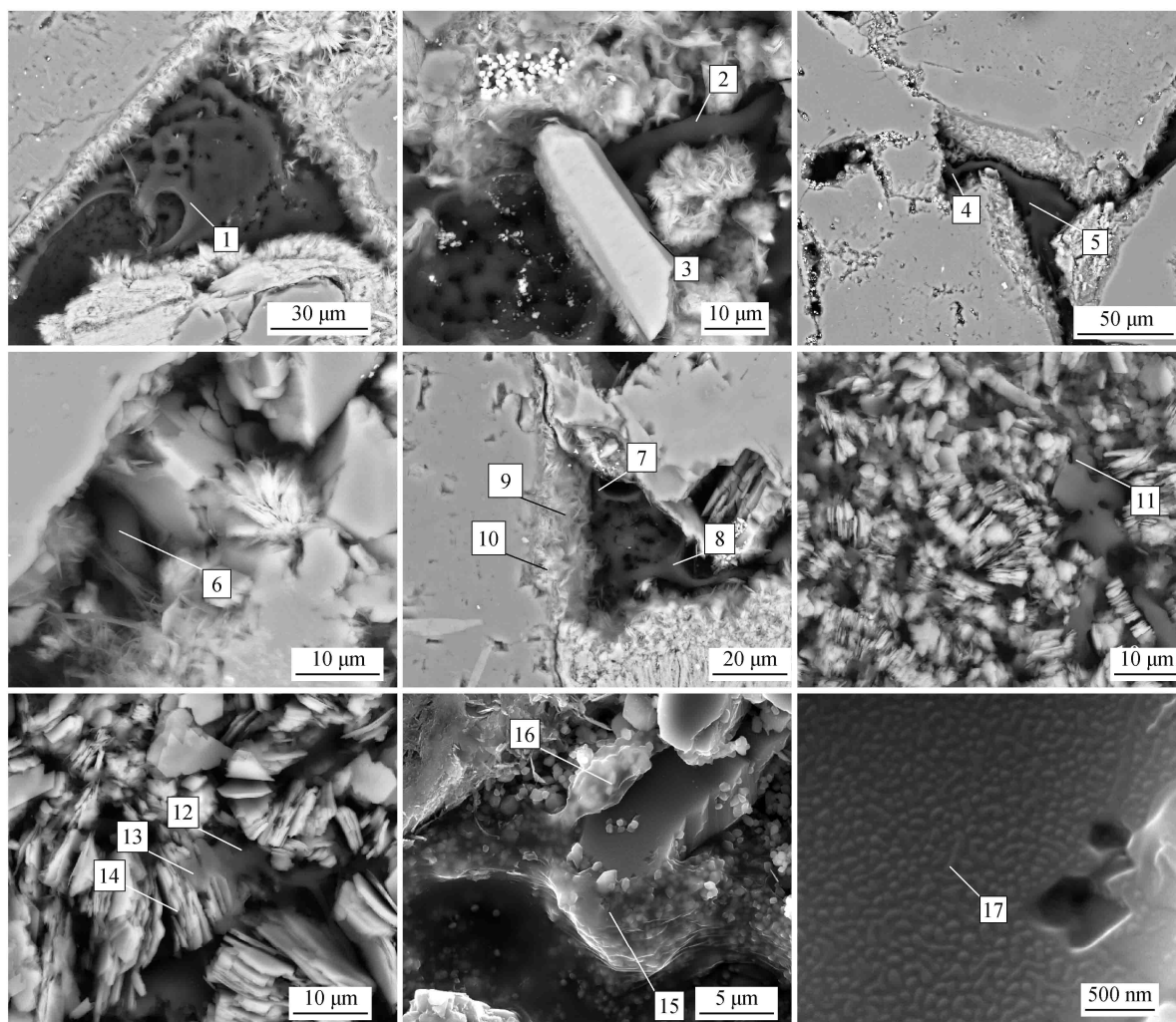
Table 2 EDS data of residual oil at different locations

元素	原子含量/%			元素	原子含量/%		
	点 1	点 2	点 3		点 1	点 2	点 3
Fe	1.12	12.08	8	Mg	0.45	1.61	5
Si	0.90	2.98	9	O	22.76	34.41	61
Al	0.72	2.75	8	C	74.05	46.18	9

2.3 微观剩余油能谱分布特征

在形态划分的基础上, 对 5 类微观剩余油的 C 原子含量(%)进行统计分析, 结果如见 8。不同类型剩余油能谱数据分布呈现明显的双峰态, 约 50%样品的 C 原子含量落在 A 峰内, 主要包含 3 种剩余油类型(残留油团、半自由油岛和半自由微油团)和少量束缚油膜, 约 30%样品的 C 原子含量落在 B 峰内, 包含半自由油雾和束缚油的 3 种类型。

不同形态的微观剩余油碳原子含量不同。从图



1. 样品 T323-4, 1473.46 m, 沉淀在微米中孔中央的残留油团; 2. 样品 T441-12, 1482.83 m, 狭长状孔隙中的半自由油岛; 3. 样品 T441-12, 1482.83 m, 碳氟磷灰石表面附着的浸染状油膜; 4. 样品 T541-18, 1491.04 m, 颗粒间狭长状孔隙中的半自由油岛; 5. 样品 T541-18, 1491.04 m, 残留油团; 6. 样品 T436-15, 1482.33 m, 赋存在绿泥石与石英颗粒间的半自由微油团; 7. 样品 T548-16, 1491.08 m, 连接黏土矿物与长石颗粒的半自由油岛; 8. 样品 T548-16, 1491.08 m, 与长石颗粒相连的半自由油岛; 9. 样品 T458-16, 1491.80 m, 绿泥石表面的浸染状束缚油; 10. 样品 T458-16, 1491.80 m, 绿泥石表面束缚油滴; 11. 样品 Y116-4, 1128.01 m, 高岭石晶间微孔内的半自由微油团; 12. 样品 Y157-1, 1133.49 m, 半自由微油团赋存在高岭石晶间的亚微米孔中; 13. 样品 Y157-1, 1133.49 m, 高岭石颗粒表面附着的浸染状油膜; 14. 样品 Y157-1, 1133.49 m, 高岭石表面的束缚油滴; 15. 样品 T460-18, 1148.77 m, 半自由油雾; 16. 样品 T460-18, 1148.77 m, 长石微晶附近的半自由油雾; 17. 样品 T460-23, 1484.77 m, 长石表面的束缚油滴

图 7 微观剩余油 FE-SEM 图像

Fig. 7 FE-SEM images of micro-remain oil

8 可以看出, 随着碳原子含量增加, 微观剩余油从束缚态过渡为自由态, 可动用程度逐渐增强。其中, 残留油团的 C 原子含量分布范围最大, 为 51.18%~87.27%, 油团的自由程度随储集空间的减小而降低, 逐渐转变成半自由态。束缚油中油滴的 C 原子含量分布范围最小, 在 17.74%~18.55% 之间。因此, 碳原子含量可以在一定程度上代表残留流体的可动用程度, 对微观剩余油的形态有良好的响应。值得注意的是, 由于受水驱波及而溶解, 半自由油雾油

团中 C 原子含量较低, 其可动用程度不符合上述规律。

3 微观剩余油赋存规律的矿物学机制探讨

不同矿物对剩余油的赋存能力不同, 孔隙对应的母质矿物不同, 会引发孔隙润湿性的差异, 而润湿性的差异对油气运聚及开发均会产生重要的影响^[29]。原生粒间孔、晶间微孔以及微裂缝的广泛

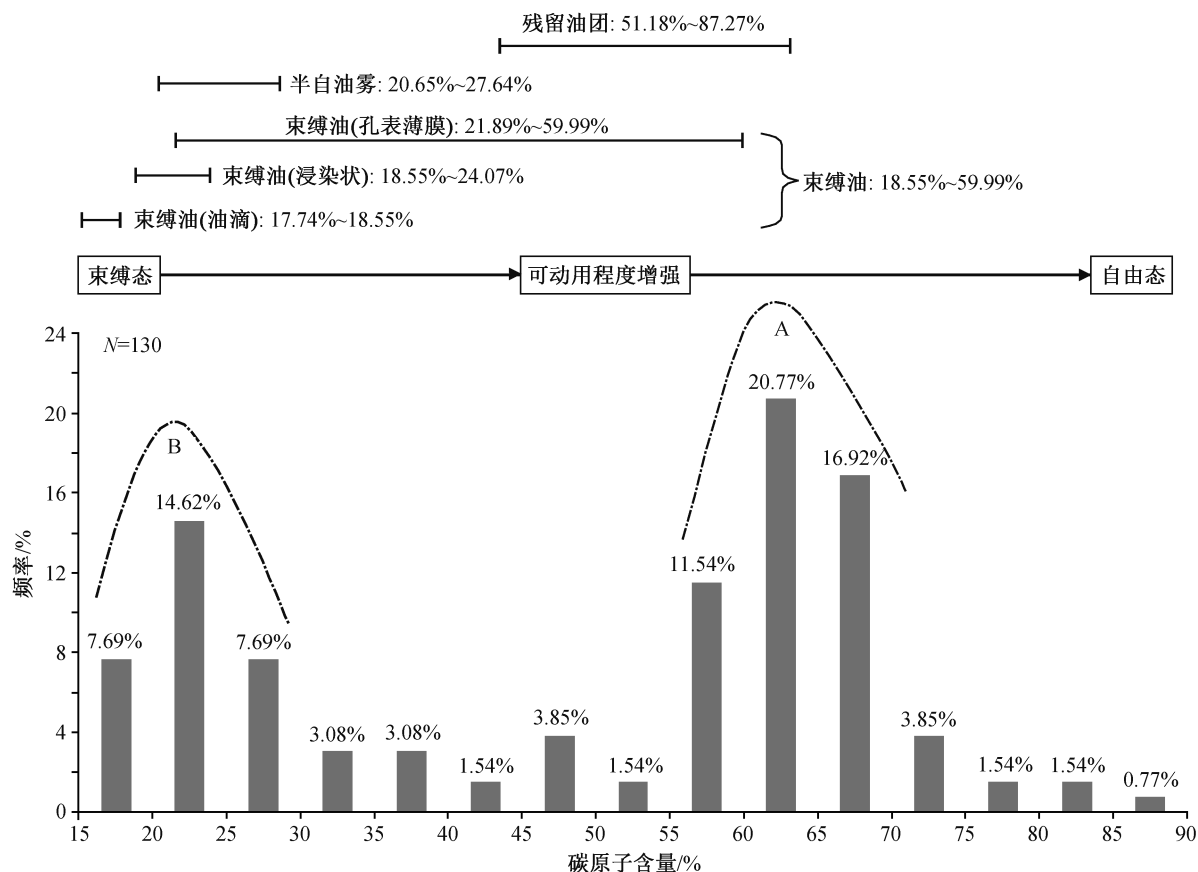


图 8 微观剩余油碳原子含量百分比频率分布直方图

Fig. 8 Frequency distribution histogram of carbon content percentage of micro remaining oil

发育为微观剩余油的赋存提供良好的储集空间, 孔隙边缘矿物组合不同, 与之相对应的孔隙就具有不同的形态、表面粗糙程度、比重以及润湿性等物理化学性质, 因此, 不同矿物边缘类型的孔隙中赋存的微观剩余油类型是由边缘矿物的种类和孔隙的形态特征共同决定的。

依据矿物边缘的类型, 本文将研究区的孔隙划分为黏土矿物包围型(图 9(a))、骨架矿物包围型(图 9(b))和组合包围型(图 9(c)和(d))3 个类型。横截面积相同时, 黏土包围型孔隙的周缘相对复杂, 形状因子最小, 骨架包围型孔隙的形状因子最大, 组合包围型孔隙居中。

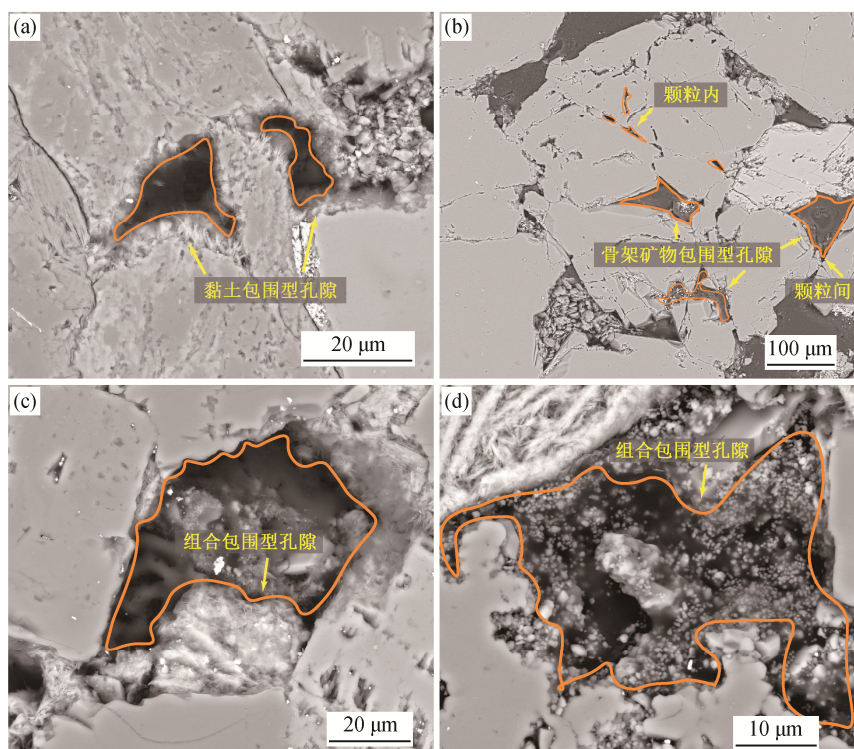
3.1 黏土矿物包围型孔隙

矿物形态是黏土矿物包围型孔隙控制剩余油赋存形式和赋存量的主导因素, 可用比表面积来评价黏土矿物包围型孔隙对剩余油的赋存能力。比表面积大的黏土矿物与孔隙接触充分, 孔隙多为狭长状且周缘复杂, 形状因子较小, 与剩余油的接触面积大, 因此对剩余油的束缚能力较强。黏土矿物含量

越高的储层, 孔表束缚剩余油的能力越强, 其中玫瑰花瓣状绿泥石和蜂窝状伊蒙混层黏土矿物对剩余油的束缚能最强, 絮状绿泥石和书页状高岭的束缚能力相对较弱。研究区储层中黏土矿物组合类型多样, 长 2 油层组多见微米中孔-大孔, 边缘矿物类型以绿泥石和伊利石为主, 剩余油多以浸染状束缚在黏土矿物表面, 或在孔周缘形成孔表薄膜, 少数形成残留油团, 沉淀在孔隙中心; 延 9 油层组以高岭石晶间微孔和晶内微孔为主, 孔隙尺度在纳米级别, 剩余油以半自由微团块形式赋存。

3.2 骨架矿物包围型孔隙

骨架包围型孔隙多为颗粒间的微米中孔-大孔, 形态呈类椭圆状, 局部可见颗粒内的溶蚀孔(类圆状)和破裂缝(狭缝状)。矿物边缘的表面粗糙程度是控制骨架矿物(如石英和长石)包围型孔隙剩余油赋存量的主要因素, 粗糙程度越高, 越容易形成油湿孔表, 束缚的剩余油也越多, 如沿解理方向产生溶蚀破裂的长石表面易聚集束缚油滴(图 7 中点 17)。延 9 油层组的微米中孔-大孔以骨架包围型孔隙为



(a) 样品 T436-4, 1482.33 m, 黏土(伊利石)包围型孔隙; (b) 样品 Y116-14, 1128.01 m, 颗粒内部与颗粒之间的骨架矿物包围型孔隙; (c) 样品 T525-13, 1489.30 m, 钠长石与绿泥石组合包围型孔隙; (d) 样品 T460-15, 1484.77 m, 组合包围型孔隙, 填隙物为微晶石英

图9 基于边缘矿物类型的孔隙类型划分

Fig. 9 Classification of pore types based on pore edge minerals

主, 赋存的剩余油类型以残留油团为主, 赋存量取决于孔隙的尺寸。长2油层组此类孔隙较少, 粒内溶孔居多, 剩余油呈束缚油滴状残留在颗粒表面。

3.3 组合包围型孔隙

组合包围形成的孔隙形态多样, 具有上述两种孔隙的共同特征, 孔隙尺度集中在微米中孔-大孔级别。这类孔隙对剩余油的赋存量一方面取决于孔隙周缘黏土矿物的含量, 黏土矿物越多, 剩余油赋存量越高; 另一方面取决于孔隙中填隙物的类型, 剩余油赋存能力随填隙物的比重增大而增大, 如淡雾状剩余油多见于微晶长石(图7中点15)和微晶石英(图9(d))附近。这类孔隙在两个主力层段均发育, 延9油层组的组合类型较为单一, 以骨架矿物和高岭石组合包围为主; 长2油层组的组合类型多样, 以伊利石组合包围和绿泥石组合包围为主, 骨架矿物颗粒与黏土矿物之间有残留的半自由油岛。

4 结论

1) 场发射环境扫描电子显微镜联合能谱分析是研究微观剩余油与储层矿物接触关系的有效手

段。剩余油的FE-SEM图像以较高的灰度值及具有油脂光泽为特征, 能谱测试结果以含C、N和O为特征, C原子含量是判定是否为剩余油的关键指标。

2) 微观剩余油的赋存状态由孔隙大小、形态以及孔隙接触的矿物性质共同决定, 可分为残留油团、半自由油岛、半自由油雾、半自由微油团和束缚油5种类型, 在油田的进一步开发过程中, 应根据不同类型微观剩余油的形成机理及赋存特征, 采取相应的策略来提高采收率。

3) 鄂尔多斯盆地中部两个主力层段的孔隙均以狭长状为主, 类椭圆状次之, 类圆状最少, 形状因子和圆度均值接近, 孔隙形态整体上一致, 但局部有差异, 延9油层组以骨架矿物包围型孔隙为主, 长2油层组以黏土矿物包围型孔隙为主。

4) 对于横截面积相同的孔隙, 黏土包围型孔隙周缘复杂, 形状因子最小, 对剩余油的束缚能力比另外两种孔隙类型强。其中, 玫瑰花瓣状绿泥石以及蜂窝状伊蒙混层黏土矿物对剩余油的束缚能力最强, 絮状绿泥石和书页状高岭对剩余油的束缚能力较弱。

参考文献

- [1] 俞启泰. 关于剩余油研究的探讨. 石油勘探与开发, 1997, 24(2): 46–50
- [2] Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Ziyuan, et al. A review on pore structure characterization in tight sandstones. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 436–457
- [3] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 21–30
- [4] 赵习, 刘波, 郭荣涛, 等. 储层表征技术及应用进展. 石油实验地质, 2017, 39(2): 287–294
- [5] Clarkson C R, Wood J, Burgis S, et al. Nanopore-structure analysis and permeability predictions for a tight gas siltstone reservoir by use of low-pressure adsorption and mercury-intrusion techniques. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2012, 15(6): 648–661
- [6] Clarkson C R, Jensen J L, Pedersen P K, et al. Innovative methods for flow-unit and pore-structure analyses in a tight siltstone and shale gas reservoir. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(2): 355–374
- [7] 闫伟超, 孙建孟. 微观剩余油研究现状分析. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2198–2211
- [8] 白振强, 吴胜和, 付志国. 大庆油田聚合物驱后微观剩余油分布规律. 石油学报, 2013, 34(5): 924–931
- [9] 余义常, 徐怀民, 高兴军, 等. 海相碎屑岩储层不同尺度微观剩余油分布及赋存状态——以哈得逊油田东河砂岩为例. 石油学报, 2018, 39(12): 1397–1409
- [10] 王明磊, 张遂安, 张福东, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 段致密油微观赋存形式定量研究. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 757–762
- [11] 侯健, 邱茂鑫, 陆努, 等. 采用CT技术研究岩芯剩余油微观赋存状态. 石油学报, 2014, 35(2): 319–325
- [12] 于滕龙. 基于CT扫描的微观剩余油量化表征[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017
- [13] 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. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1043–1052
- [14] 张琦. 基于数字岩芯的砂岩油藏微观剩余油研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016
- [15] 孙先达, 索丽敏, 张民志, 等. 激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区储层分析研究中的新进展. 岩石学报, 2005, 21(5): 1479–1488
- [16] 葛丽珍, 陈丹馨, 杨庆红. 利用核磁共振成像技术研究河流相非均质储层剩余油分布. 中国海上油气, 2014, 26(2): 51–54
- [17] Combes R, Robin M, Blavier G, et al. Visualization of imbibition in porous media by environmental scanning electron microscopy: application to reservoir rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1998, 20(3/4): 133–139
- [18] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展. 古地理学报, 2013, 15(5): 615–623
- [19] 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 等. 济阳坳陷页岩油富集主控因素. 石油学报, 2015, 36(8): 905–914
- [20] 明红霞, 孙卫, 张龙龙, 等. 致密砂岩气藏孔隙结构对物性及可动流体赋存特征的影响——以苏里格气田东部和东南部盒 8 段储层为例. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4556–4567
- [21] 庞姗, 梅启亮, 张洪军, 等. 基于岩石铸体切片与恒速压汞测试的储层孔隙分布表征及差异机制剖析——以鄂尔多斯盆地某区块延长组长 2 段为例. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 907–914
- [22] 涂新斌, 王思敬. 图像分析的颗粒形状参数描述. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 659–662
- [23] Li Zhentao, Liu Dameng, Cai Yidong, et al. Adsorption pore structure and its fractal characteristics of coals by N₂ adsorption/desorption and FESEM image analyses. *Fuel*, 2019, 257: 116031
- [24] 许林, 张巍, 梁小龙, 等. 岩土介质孔隙结构参数灰色关联度分析. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(6): 1105–1113
- [25] 徐加祥, 杨立峰, 丁云宏, 等. 基于四参数随机生长模型的页岩储层应力敏感分析. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1341–1348
- [26] 白斌, 吴松涛, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储层微观孔喉结构表征新技术及意义. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 78–86
- [27] 吴松涛, 朱如凯, 李勋, 等. 致密储层孔隙结构表征技术有效性评价与应用. 地学前缘, 2018, 25(2): 191–203
- [28] Al-Saedi H, Flori R. 砂岩储集层低矿化度水驱提高采收率机理及黏土对采收率的影响. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 869–873
- [29] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向. 石油学报, 2016, 37(11): 1323–1336