

致密砂岩储层多尺寸孔喉结构对可动流体分布的影响

——以鄂尔多斯盆地北部锦 58 井区下石盒子组为例

鲍磊^{1,2}, 侯加根^{1,2*}, 刘钰铭^{1,2*}, 张占杨³, 陈齐^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 郑州 450006

* 通信作者, jghou63@hotmail.com; liuym@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2025-03-07

国家自然科学基金项目“盆缘过渡带坡度-流量双重控制下的辫状河成因机制与砂体构型模式”(42472205)、国家自然科学基金项目“陆相混合沉积不同岩性组合的差异成岩演化与孔隙发育机理”(42172154)联合资助

摘要 针对鄂尔多斯盆地锦 58 井区开发过程中存在的高含水、气水同出等问题, 开展基于致密砂岩储层孔喉尺寸划分结果评价不同储层因素对可动流体的影响, 有助于从微观角度明确气体分布规律。以下石盒子组 10 个典型致密砂岩样品为例, 采用铸体薄片观察、扫描电镜观测、X 射线衍射分析、高压压汞及核磁共振实验, 利用多重分形理论及核磁共振参数转化孔喉分布方法, 评价储层参数对不同尺寸孔喉内部可动流体分布的影响。研究表明, 根据压汞曲线形态及参数可以将孔隙结构划分为 3 种类型: I 类样品孔喉尺寸分布曲线呈双峰状, 物性和孔喉连通性较好; II 类样品孔隙孔喉尺寸分布曲线呈单峰状, 孔喉以中孔为主, 分选较好, 受限于孔喉尺寸, 储层物性差于 I 类样品。III 类样品孔喉尺寸分布曲线小孔为主峰, 大孔为次峰, 其物性非均质性最强。据孔喉尺寸及分形特征曲线转折点可以将储层孔喉划分为大孔(0.1~1 μm)、中孔(0.01~0.1 μm)和小孔(0.001~0.01 μm)。可动流体主要大孔和中孔内部, 其中大孔含量对可动流体的含量起决定性作用, 而中孔在占比较高的情况下具有一定的储气潜力, 小孔含量则对可动流体分布影响不大。脆性矿物的含量主要影响大孔内部的可动流体含量, 而黏土矿物的含量对不同尺寸孔喉内部的可动流体含量均产生不利影响。不同尺寸孔喉所贡献的孔隙度与可动流体含量成正相关, 但受限于储层连通性的影响, 随着孔喉尺寸的降低, 其相关性逐渐下降, 而渗透率则控制着不同孔喉尺寸内部的可动流体分布。孔喉结构参数中, 较高的分形维数对储层整体及不同尺寸孔喉内的可动流体分布均有不利影响。而受限于不同孔喉尺寸对物性的贡献, 最大进汞饱和度参数仅可用于表征大孔内部的可动流体分布。

关键词 鄂尔多斯盆地; 致密砂岩; 孔喉结构; 可动流体; 核磁共振

中图分类号: P618.13; TE122

引用格式: 鲍磊, 侯加根, 刘钰铭, 张占杨, 陈齐. 致密砂岩储层多尺寸孔喉结构对可动流体分布的影响——以鄂尔多斯盆地北部锦 58 井区下石盒子组为例[J]. 石油科学通报, 2025, 10(02): 342–360

BAO Lei, HOU Jiagen, LIU Yuming, ZHANG Zhanyang, CHEN Qi. The impact of multi-scale pore-throat structures on movable fluid distribution in tight sandstone reservoirs: A case study of the Lower Shihezi Formation in the J58 well area, Northern Ordos Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(02): 342–360. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.009

The impact of multi-scale pore-throat structures on movable fluid distribution in tight sandstone reservoirs: A case study of the Lower Shihezi Formation in the J58 well area, Northern Ordos Basin

BAO Lei^{1,2}, HOU Jiagen^{1,2}, LIU Yuming^{1,2}, ZHANG Zhanyang³, CHEN Qi^{1,2}

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

2 College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 Exploration and Development Research Institute, North China Company of SINOPEC, Zhengzhou 450006, China

Received: 2024-10-08; Revised: 2025-03-07

Abstract In response to issues such as high water cuts and simultaneous gas-water production during the development of the J58 well block in the Ordos Basin, this study evaluates the influence of various reservoir factors on movable fluids based on pore-throat size classification in tight sandstone reservoirs. This helps to clarify the gas distribution pattern from a microscopic perspective. Taking 10 typical tight sandstone cores from the Shihezi Formation as examples, casting thin section observation, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), high-pressure mercury intrusion (HPMI), and nuclear magnetic resonance (NMR) experiments were conducted. Using multifractal theory and NMR parameter-based pore-throat distribution transformation methods, the impact of reservoir parameters on the distribution of movable fluids within pore throats of different sizes was assessed. The results show that based on the shape and parameters of mercury intrusion curves, the pore structure can be divided into three types. Type I shows a bimodal distribution of pore-throat sizes, with good physical properties and connectivity; Type II shows a unimodal distribution dominated by medium-sized pores, with good sorting, but due to limited pore-throat size, their physical properties are inferior to Type I; Type III have a pore-throat size distribution dominated by nanopores as the main peak and mesopores as the secondary peak, with the strongest heterogeneity in physical properties. According to the turning points in pore-throat size and fractal characteristic curves, the pore throats can be classified into mesopores (0.1~1 μm), micropores (0.01~0.1 μm), and nanopores (0.001~0.01 μm). Movable fluids are mainly found within mesopores and micropores, where the mesopores content plays a decisive role in the volume of movable fluids, while micropores, when in relatively high proportion, also have certain gas storage potential. Nanopores, however, have little impact on movable fluid distribution. The content of brittle minerals mainly affects the amount of movable fluid in mesopores, whereas clay mineral content has a negative impact on movable fluid content across all pore-throat sizes. The porosity contributed by different pore-throat sizes is positively correlated with movable fluid content; however, this correlation decreases as pore-throat size decreases due to the influence of reservoir connectivity. Permeability controls the distribution of movable fluids within pore throats of different sizes. Among pore-throat structure parameters, a higher fractal dimension negatively affects the distribution of movable fluids both overall and within pore-throats of different sizes. Owing to the limitations imposed by differing contributions of pore-throat sizes to reservoir properties, the maximum mercury saturation parameter can only be used to characterize the distribution of movable fluids within mesopores.

Keywords Ordos Basin; tight sandstone; pore-throat structure; movable fluid; NMR

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.009

0 引言

致密砂岩气藏是世界上目前最主要的天然气来源之一，也是我国非常规油气资源开发的重中之重^[1-2]。鄂尔多斯盆地聚集形成多个大型致密气藏，蕴含了丰富的天然气资源，是未来我国天然气增储上产的重点目标^[3]。目前，致密砂岩气藏孔喉结构是研究的方向之一，致密砂岩的孔喉即为孔隙和喉道的大小、分布、几何形态、连通关系及其相互配置，开展孔喉结构研究有助于气藏的开发。致密砂岩复杂的孔喉结

构导致了气藏内部不同储层位置的物性及含气性具有较大差异，这增大了致密砂岩气藏的开发难度^[4-5]。研究表明，储层参数评价难以适用于孔喉结构复杂的致密砂岩气藏，而可动流体参数评价更能反映储层内部可动用孔喉体积的分布特征，且更适合表征储层质量和气藏开发潜力^[6-8]。因此，开展基于可动流体参数分析的储层定量评价，可以为致密砂岩气藏开发提供新思路。

致密砂岩储层孔喉结构的主流评价方法包括铸体薄片、扫描电镜、压汞法、核磁共振等^[9-12]，但是单

一的实验方法不能准确表征致密砂岩储层的孔喉结构特征^[13-14], 因此需要多种实验方法相结合开展致密砂岩孔喉结构研究, 明确不同因素对储层内部可动流体分布的影响。目前, 针对可动流体的研究主要围绕孔喉结构进行开展, 主要包括孔喉演化过程或成岩作用对孔喉结构的影响等^[15-17]。而针对孔喉结构则主要利用分形维数结合多种实验进行表征, 如高压压汞、恒速压汞及核磁共振实验^[18-20], 但学者们多倾向于将储层的孔喉视为一个整体, 且对多因素对不同尺寸孔喉内部的可动流体分布的影响研究相对较少^[8, 16, 21]。研究表明, 复杂的孔喉结构致使致密砂岩储层具有较强的非均质性, 因此其内部的可动流体赋存特征较为复杂。除此之外, 致密砂岩可动流体分布影响因素众多, 主要包括成岩矿物含量、储层物性、孔喉结构参数等^[7, 22-25]。一般认为, 致密砂岩储层孔喉尺寸越大, 可动流体饱和度越高^[26-27], 但是对于不同尺寸孔喉内部的可动流体的影响因素研究有限。不同孔喉尺寸内部可动流体所受影响因素不同, 将不同级次孔喉内部的可动流体作为整体开展分析导致从本质忽略了不同级次孔喉对储集空间中流体可动性及流动能力的影响。因此, 有必要采用多种实验结合划分孔喉级次并分析多种因素对不同孔喉尺寸内部的可动流体的影响。

至 2024 年底东胜气田累计产气 $45 \times 10^8 \text{ m}^3$, 投产井 468 口, 采出程度 5.67%, 整体采出程度较低。其中鄂尔多斯盆地东胜气田锦 58 井区 223 口水平井单井日产水量大于 20 m^3 占比高达 52.5%, 日产气量大于 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 占比为 35.2%。低产气量往往伴随着高产水, 此类井占比 32.3%, 因此该地区存在含气饱和度差异大及产水量高等问题, 亟需从微观角度开展孔喉结构及可动流体分布研究。本文以该区下石盒子组为研究对象, 利用铸体薄片、扫描电镜、X 射线衍射、高压压汞以及核磁共振等实验, 综合刻画储层孔喉结构, 划分孔喉级次, 着重分析多种因素对不同尺寸孔喉内部的可动流体分布的影响, 为致密砂岩气藏勘探和开发提供理论依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地为中国最主要的含油气盆地之一, 依据其盆地演化过程及现今构造展布特征, 可划分为 6 个构造单元^[28]。锦 58 井为鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区, 构造上位于鄂尔多斯盆地一级构造单元伊陕斜坡南部(图 1a), 整体构造特征表现为北东—南西向的

平缓单斜, 面积约 980 km^2 , 其中下石盒子组为主要含气储层(图 1b)。下石盒子组物源方向为东北向, 其沉积相为砾质辫状河^[29], 主力含气砂体为复合心滩, 储层埋深介于 2900~3300 m。

2 实验方法及理论方法

2.1 实验方法及样品

本次研究选取了锦 58 井区下石盒子组 10 个样品, 深度分布为 2993.14~3216.09 m(表 1)。首先将 10 块柱状样品(长度为 50 mm, 直径为 25 mm)截取 5 mm 制备铸体薄片用于镜下观察。随后截取 5 mm 样品开展 X-ray 衍射实验, 测定样品矿物组成和各种黏土矿物种类的定量数据, 实验方法和程序执行国家标准 SY/T5163-2018。剩余样品清洗烘干后, 利用中国石油大学(北京)国家重点实验室的 CMS-300 型储层孔隙度和渗透率测试仪器开展物性测试, 分别采用氦膨胀法和动压法测量孔隙度和渗透率, 物性测试方法具有高精度、非破坏性以及适用范围广等优点。物性测试结果表明, 孔隙度主要为 2.12%~14.55%, 平均为 9.09%; 渗透率主要为 $0.75 \sim 7.84 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $4.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。X 射线衍射结果表明, 样品石英含量平均为 60.46%, 其中, 6 号样品石英含量为 70.9%, 明显高于其他样品。长石含量为 11.2%~21.2%, 以斜长石为主。碳酸盐矿物主要为方解石, 不同样品方解石含量差异较大, 范围为 4%~13.9%, 平均含量为 8.37%, 其中 8 号样品碳酸盐矿物含量最高。

在物性测试及 X 射线衍射实验的基础上依次开展核磁共振及高压压汞实验。首先, 将抽真空的样品置于矿化度为 80 g/L 的 KCl 溶液 7 天至样品饱和水(与锦 58 井区地层水矿化度一致), 开展饱和水核磁共振实验, 后对样品进行高速离心(离心力为 4 MPa), 先前的研究表明, 在 4 MPa 的离心压力下, 致密砂岩会失去几乎所有的可动水^[24, 30]。将可动流体完全排出后开展样品离心后的核磁共振实验, 核磁共振实验标准为《岩样核磁共振参数实验室测量规范》(SY/T6490-2014)。为保证样品实验结果的一致性, 完成核磁共振实验后利用原样开展高压压汞测试。高压压汞实验采用 9510-IV 型压汞仪进行测量, 实验环境温度为 20 °C, 湿度 50%, 仪器进汞压力设定范围为 0.012~116.667 MPa, 对应的转换孔径范围为 0.0063~63 μm 。

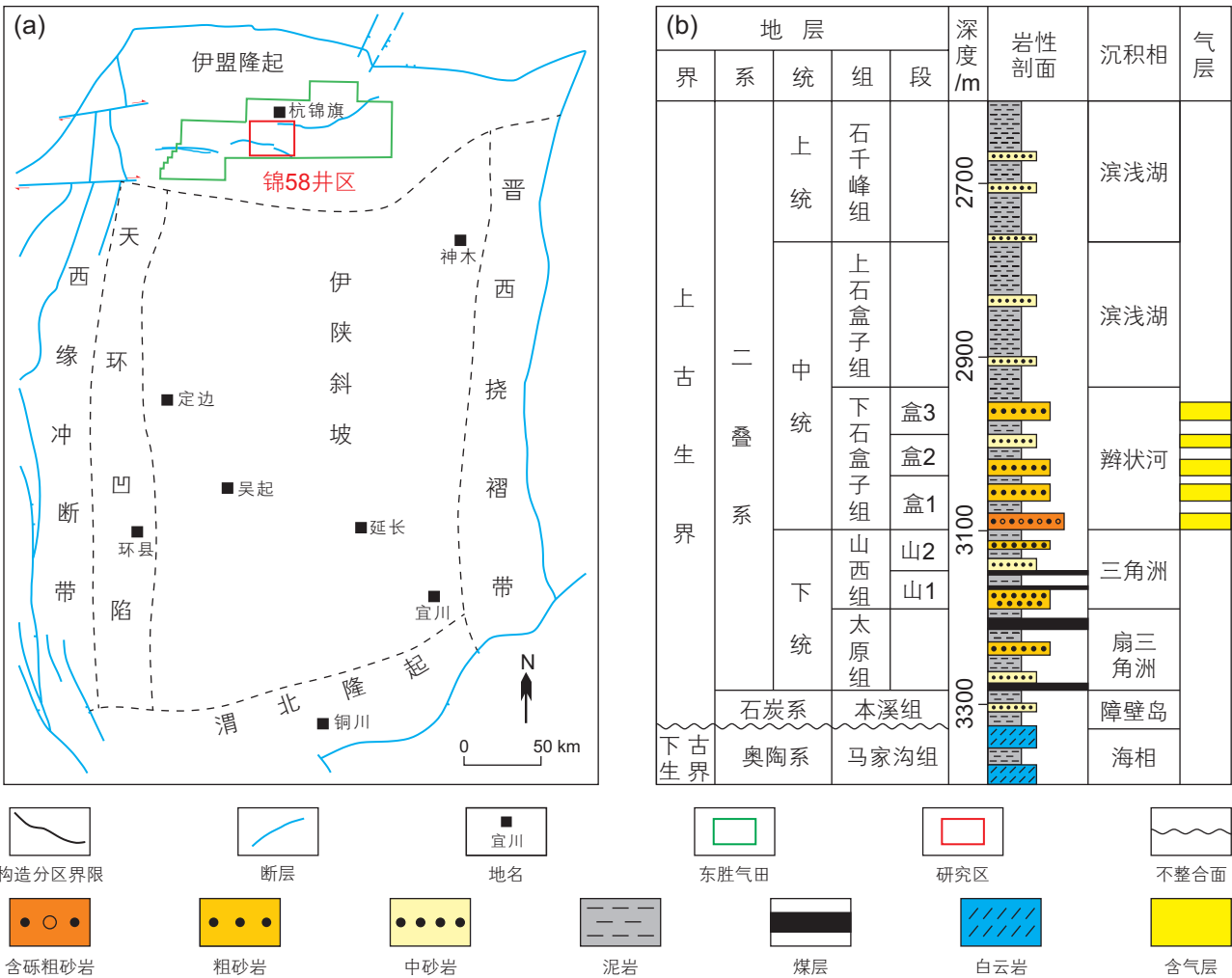


图 1 研究区构造位置(a)及地层综合柱状图(b)
Fig. 1 Tectonic location (a) and comprehensive stratigraphic histogram (b) of the study area

表 1 下石盒子组致密砂岩物性及矿物组成特征
Table 1 Physical properties and mineral composition characteristics of the tight sandstone of the Lower Shihezi Formation

样品 编号	深度 /m	层位	孔隙度 /%	渗透率 /mD	X衍射测试 /%							
					石英	长石	方解石	黏土 矿物	伊利石	绿泥石	高岭石	伊/蒙 混层
J-1	3137.81	盒二段	3.21	1.98	56.7	12.7	4.0	26.6	19.0	43.0	16.0	22.0
J-2	3104.09	盒三段	3.72	2.94	52.0	14.0	13.0	21.0	32.0	51.0	5.0	12.0
J-3	2993.14	盒一段	2.12	0.75	54.1	12.3	10.0	23.6	25.0	49.0	10.0	16.0
J-4	3022.75	盒一段	13.39	7.84	58.8	12.1	9.6	19.5	2.0	45.0	43.0	10.0
J-5	3157.00	盒一段	7.79	2.16	66.0	11.2	7.5	15.3	8.0	31.0	54.0	7.0
J-6	3049.91	盒三段	14.56	8.62	70.9	12.4	6.3	10.4	7.0	33.0	45.0	15.0
J-7	3216.09	盒二段	12.09	5.65	57.9	21.2	2.6	18.3	2.0	39.0	44.0	15.0
J-8	3200.80	盒一段	10.19	2.98	58.3	13.6	13.9	14.2	5.0	50.0	32.0	13.0
J-9	3049.81	盒三段	9.25	3.64	62.7	11.8	8.8	16.7	33.0	44.0	14.0	9.0
J-10	3050.68	盒三段	14.55	7.34	67.2	12.7	8.0	12.1	19.0	45.0	27.0	9.0
平均值	3108.21		9.09	4.39	60.5	13.4	8.4	17.8	15.2	43.0	29.0	12.8

2.2 理论方法

2.2.1 分形理论

致密砂岩孔喉结构局部放大后,其形态和复杂程度与储层整体具有相似性,即自相似性,因此可以利用分形理论进行储层孔喉结构定量表征。分形维数越大,储层非均质越强^[31-32]。在高压压汞实验中,不同的毛管压力对应着汞可以进入的孔喉尺寸,因此随着压力的增加,可表征的孔喉逐渐增多。因此,可以运用高压压汞实验对所得到的实验样品数据进行分形特征研究,定量表征研究区下石盒子组致密砂岩储层孔喉非均质性对不同尺寸孔喉内部可动流体的影响。根据分形几何原理,将半径大于 r 的孔喉数计为 N 。孔喉数 N 与孔喉半径 r 之间的相关关系可以表示为:

$$N(>r) = \int_r^{r_{\max}} F(r) dr = ar^{-D} \quad (1)$$

式中, r 为孔喉半径, $r_{\max}$ 为最大孔喉半径,单位为 μm ; a 为常数, D 为分形维数。由于岩石孔隙空间是由一系列毛管束组成^[33],因此可采用Brooks-Corey模型^[34],则孔隙半径小于 r 的累积体积百分数 V 可以表示为:

$$V = \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{3-D} \quad (2)$$

对公式(2)两边取对数可得:

$$\log V = \log(1 - S_{\text{Hg}}) = (3-D) \log r - (3-D) \log r_{\max} \quad (3)$$

式中, S_{Hg} 为汞饱和度,单位为%。在双对数坐标系中, $\log(1 - S_{\text{Hg}})$ 与 $\log r$ 在不同的取值范围内均为线性相关关系,因此利用多段拟合求取参数 $3-D$,并最终

得到不同孔喉尺寸范围的分形维数 D 。

2.2.2 核磁共振弛豫时间转化孔隙半径方法

利用磁场对氢原子自生磁场的影响,核磁共振技术被广泛应用于测定岩石孔隙结构的有关信息,这是由于氢核弛豫信号的幅度与储层内部的流体含量有关^[35]。高压压汞实验是评价孔喉结构的另一重要手段,但该方法对于小尺寸孔喉的精确测量能力有限,不能反映小于最大进汞压力对应的孔隙所连通的孔隙信息。核磁共振实验很好的弥补了高压压汞实验的缺点,因此在对同一样品分别开展两种测试,可以精确描述其孔喉结构。在均匀的磁场中,流体弛豫时间的和局部磁场梯度下氢原子的扩散弛豫时间对总横向弛豫时间的影响可以忽略不计,因此总横向弛豫时间 T_2 与可近似等于孔隙表面弛豫时间,即 T_2 仅与孔隙空间的大小和形状有关^[36],则 T_2 与孔隙比表面积(S/V)的关系可近似的表示为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \cdot \frac{S}{V} = \rho \cdot \frac{F}{r} \quad (4)$$

式中, ρ 为表面弛豫速率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S 为孔隙表面积, μm^2 ; V 为孔隙体积, μm^3 ; F 为孔隙形状因子(对于圆柱形孔隙, $F=2$)。统计结果表明,横向弛豫时间 T_2 分布与孔喉半径之间呈幂函数关系^[37]:

$$T_2 = \frac{r^n}{\rho \cdot F} \quad (5)$$

式中, n 为幂指数, ρ 和 F 可视为常数,因此对于公式(5),定义

$$C = \frac{1}{\rho \cdot F} \quad (6)$$

由公式(5)和(6)可得则 T_2 与 r 的关系可表示为:

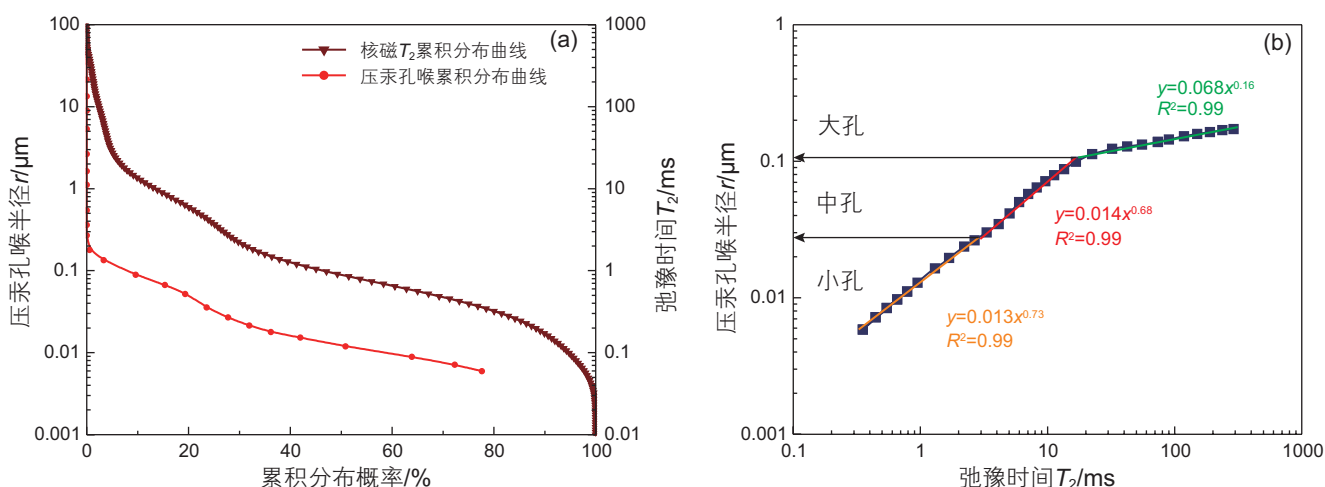


图2 样品5核磁共振 T_2 谱与孔隙半径转换(a)及参数 C 和 n 的获取方法(b)

Fig. 2 Conversion between NMR T_2 and pore radius of sample 5 (a) and method for obtaining parameters C and n (b)

$$r = CT_2^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

式中, C 为转换系数。据公式(7)进行曲线拟合可以获得 C 和 n 的值, 由此可得到样品的孔喉半径的转换公式。

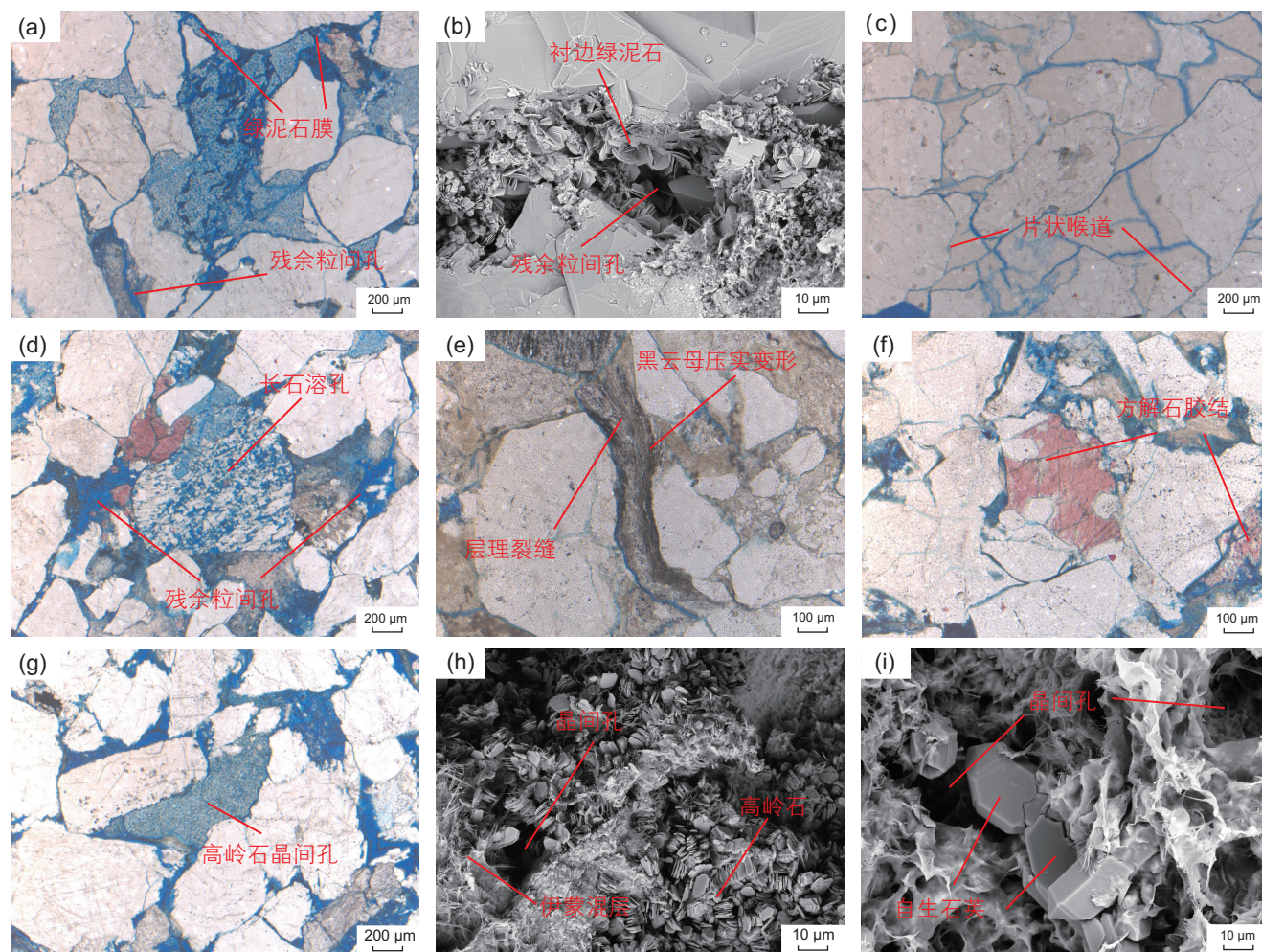
在求取转换系数 C 和 n 的值时, 分孔喉尺寸求取结果可以获得更好的转换效果, 实际求取的方法如下: 首先, 以累积分布概率作为横坐标, 分别将横向弛豫时间 $T_2(i)$ 和压汞实验获得的孔喉半径 r 作为纵坐标绘制双 Y 轴坐标系进行投点; 其次在 $S_{T_2(i)} < S_{Hg(i)}$ 的范围内, 针对不同累积分布概率获取与其对应的横向弛豫时间和孔喉半径(图 2a); 随后将得到横向弛豫时间 $T_2(i)$ 与孔喉半径 r 在双对数坐标系上进行投点(图 2b)。最后通过分段拟合可得到不同孔喉尺寸下进汞压力与横向弛豫时间的转换关系, 进而可将 T_2 谱转换为孔喉

半径的分布曲线。

3 实验结果和讨论

3.1 孔喉类型

锦 58 井区发育多种孔隙类型, 其中残余粒间孔连通性最好, 对物性的贡献最大, 其次为溶蚀孔和晶间孔, 微裂缝仅在局部可见(图 3)。残余粒间孔分布于脆性矿物颗粒之间, 孔径较大, 其形态为不规则多边形, 残余粒间孔周边多见以颗粒包膜或孔隙衬边形式存在的绿泥石(图 3a, b), 部分样品受压实作用较强则形成管束状或片状喉道(图 3c)。锦 58 井区储层内部长石的含量仅次于石英含量, 长石易受溶蚀形成溶蚀孔, 因此溶蚀孔也较为发育, 是最主要的孔喉类型, 但其孔隙形态不规则, 连通性相对较差(图 3d)。少



(a) 残余粒间孔, 石英边缘发育绿泥石薄膜, J-6; (b) 残余粒间孔发育衬边绿泥石, J-5; (c) 片状喉道发育, J-2; (d) 长石溶孔及残余粒间孔, J-4; (e) 黑云母压实变形, 发育层理裂缝, J-1; (f) 含铁方解石充填残余粒间孔, J-7; (g) 高岭石充填残余粒间孔, 内部发育晶间孔, J-8; (h) 伊/蒙混层及高岭石间发育的晶间孔, J-10; (i) 晶间孔及自生石英, J-9

图 3 下石盒子组典型致密砂岩样品的孔喉及黏土矿物特征

Fig. 3 Pore-throat and clay mineral characteristics of typical tight sandstone samples of the Lower Shihezi Formation

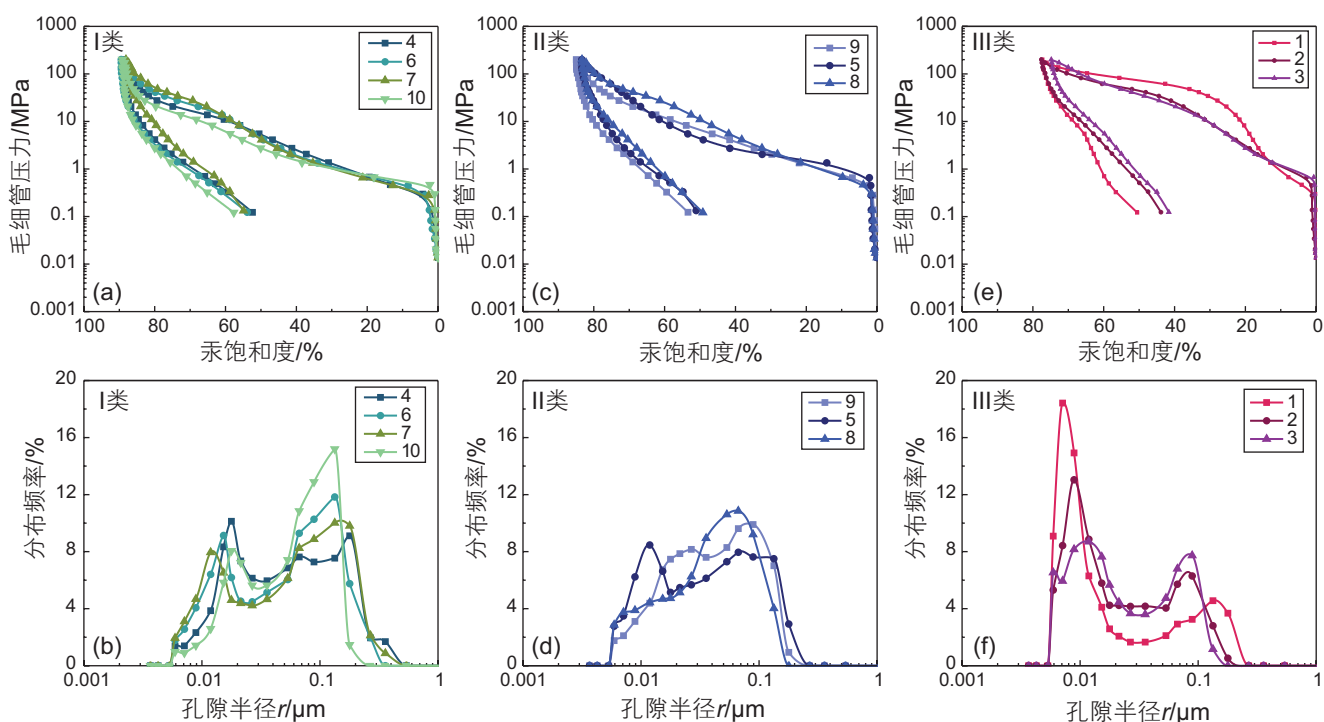


图 4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同孔喉结构样品孔喉分布特征曲线

Fig. 4 Characteristic curves of pore-throat distribution in Hangjinqi Area, Ordos Basin

量样品内部可见云母碎屑,以黑云母为主,常受压实作用发生变形产生层理缝(图 3e)。颗粒间多发育碳酸岩胶结,方解石的充填使部分残余粒间孔连通性变差(图 3f)。晶间孔主要为黏土矿物颗粒之间形成的孔隙(图 3g, h),孔隙半径小,对流体的束缚作用强,局部黏土矿物内部可见自生石英发育(图 3i),此类孔喉连通性差。

3.2 孔喉结构特征

基于高压压汞实验得到的毛管压力曲线及孔喉分布曲线形态,锦 58 井区的孔喉结构可以划分为 3 种类型(表 2)。I 类样品毛管压力曲线在 0.5~1.5 MPa 和 10~100 MPa 具有双水平段特征(图 4a),孔喉分布频率为双峰(图 4b),分别分布于 0.004~0.02 μm 和 0.05~0.2 μm ,其中右峰面积大峰值高,表明储层孔喉分布以大孔及中孔为主;平均排驱压力最低,为 0.213 MPa(表 2),中值孔喉半径为 0.187 μm ,为 3 类样品中的最高值,表明储层连通性及物性好,流体容易充注孔隙;平均分选系数和退汞效率分别为 2.48 和 38.47%,表明储层分选性较好。

II 类样品毛管压力曲线呈现平滑下降的趋势,仅在 0.1~1 μm 存在水平段(图 4c),其孔喉分布频率分布于 0.006~0.2 μm (图 4d)。II 类样品平均分选系数为

2.33,略低于 I 类样品,分选性较好,但平均中值孔喉半径 0.114 μm ,表明孔喉偏小,受限与孔喉尺寸,平均排驱压力为 0.468 MPa,平均最大进汞饱和度低于 I 类样品,为 82.88%。需要注意的是,II 类样品中,5 号样品的孔喉分布频率在 0.01 μm 处存在一个分布高峰,这是由于样品 5 的分选较差,其分选系数为 2.57,为 II 类样品中最高,孔喉尺寸分布不均匀,导致存在两个主峰,但其主体部分与其他二类样品分布一致。

III 类样品毛管压力曲线在 1~100 MPa 具有较大起伏(图 4e),孔喉分布曲线同样为双峰分布,但是以左侧小孔为主峰(图 4f)。该类样品排驱压力最高,为 0.473 MPa,分选系数最大,为 2.65,表明孔喉连通性和分选性差,储层孔隙结构最为复杂。该类样品最大进汞饱和度和退汞效率为 3 类样品中的最低值,分别为 76.59% 和 34.16%,这是由于该类样品发育较多微喉道,在进汞和退汞过程中,需要克服较大的毛管压力。

3.3 分形特征

从 3 类典型样品的高压压汞毛管压力曲线转换结果可以看出,分形特征曲线呈现出三段式(图 5),这表明样品的孔喉结构存在多重分形特征。各段的分布范围与前文划分的孔喉尺寸分布区间也具有良好的对

表 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区孔喉结构特征参数

Table 2 Characteristic parameters of pore-throat structure in Hangjinqi Area, Ordos Basin

类型	样品 编号	高压压汞测试			核磁共振测试				
		排驱压力 /MPa	中值孔喉 半径/ μm	分选系数	最大进汞 饱和度/%	退汞效率/%	可动流体 孔隙度/%	可动流体 饱和度/%	束缚水 饱和度/%
I	J-4	0.138	0.138	2.48	88.95	41.09	3.83	28.56	71.44
	J-6	0.281	0.165	2.58	89.45	39.78	6.24	42.82	57.18
	J-7	0.138	0.175	2.76	88.13	37.72	2.84	23.48	76.52
	J-10	0.297	0.269	2.11	89.10	35.29	5.97	39.99	60.01
	平均值	0.213	0.187	2.48	88.90	38.47	4.72	33.71	66.29
II	J-9	0.451	0.109	2.23	83.94	34.13	3.10	33.74	66.26
	J-5	0.297	0.067	2.57	82.33	35.95	2.43	31.13	68.87
	J-8	0.655	0.167	2.21	82.38	36.73	3.40	33.37	66.63
	平均值	0.468	0.114	2.33	82.88	35.60	2.98	32.74	67.26
III	J-1	0.297	0.010	2.85	77.35	34.61	0.42	13.05	86.95
	J-2	0.451	0.017	2.57	77.61	33.50	1.18	31.71	68.29
	J-3	0.673	0.020	2.55	74.80	34.36	0.33	15.40	84.60
	平均值	0.473	0.015	2.65	76.59	34.16	0.64	20.05	79.95

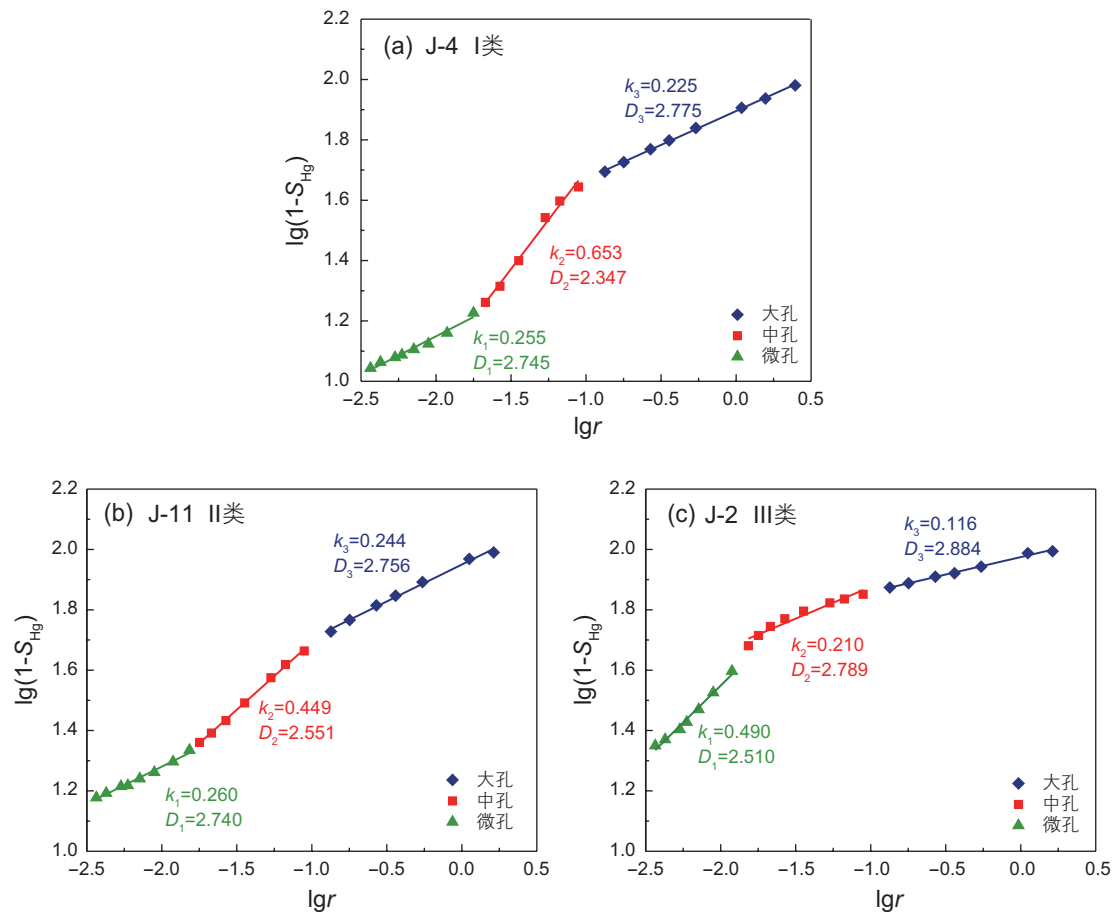


图 5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 3 类典型样品分形特征曲线

Fig. 5 Fractal characteristic curves of three typical samples in Hangjinqi Area, Ordos Basin

应关系, 因此可以分别求取不同孔喉尺寸所对应的分形维数 D_n (表 3), 并利用公式 $K_i = \frac{dS_i \cdot r_i^2}{\sum_i (dS_i \cdot r_i^2)}$ (dS_i 是对应孔喉半径下的频率增量) 计算不同尺寸孔喉空间所贡献的渗透率 K_n 。结合核磁共振曲线转换结果分别统计 3 类孔喉所占的孔隙度 ϕ_n , 根据各孔隙空间的孔隙度加权平均得到整个孔隙空间的总分形维数为:

$$D = \frac{D_1\phi_1 + D_2\phi_2 + \dots + D_n\phi_n}{\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_n}$$

(8)

式中, D 为储层总分形维数, D_n 为不同孔喉尺寸所对应的分形维数, ϕ_n 为不同尺寸孔喉贡献的孔隙度。

综合储层不同尺寸孔喉分形维数及其对物性的贡献可以看出(表 3), 大孔的分形维数最高, 平均值为 2.793, 其对物性的贡献也为最大, 孔隙度和渗透率贡献分别为 1.487% 和 2.996×10^{-3} mD, 表明储层储集能力和连通性主要受大尺寸孔喉控制。中孔的分形维数的分布范围为 2.348~2.882, 中孔的平均分形维数最低, 仅为 2.595, 其对物性的贡献仅次于大孔, 表明中孔非均质性较弱, 有相对均匀和规则的孔隙分布, 但对物性的影响弱于大尺寸孔喉。小孔的平均分形维数为 2.646, 介于中孔与大孔之间, 受限于孔喉尺寸, 对孔隙度和渗透率的贡献均为最低。各样品的总分形维数分布于 2.467~2.898, 平均值为 2.682, 其中 I 类、II 类和 III 类样品的平均总分形维数分别为 2.641, 2.617 和 2.802, 表明 II 类样品的非均质性弱于 I 类及 III 类, 表明 II 类孔喉分布较为集中, 这一点在孔喉尺寸上可以得到证明。

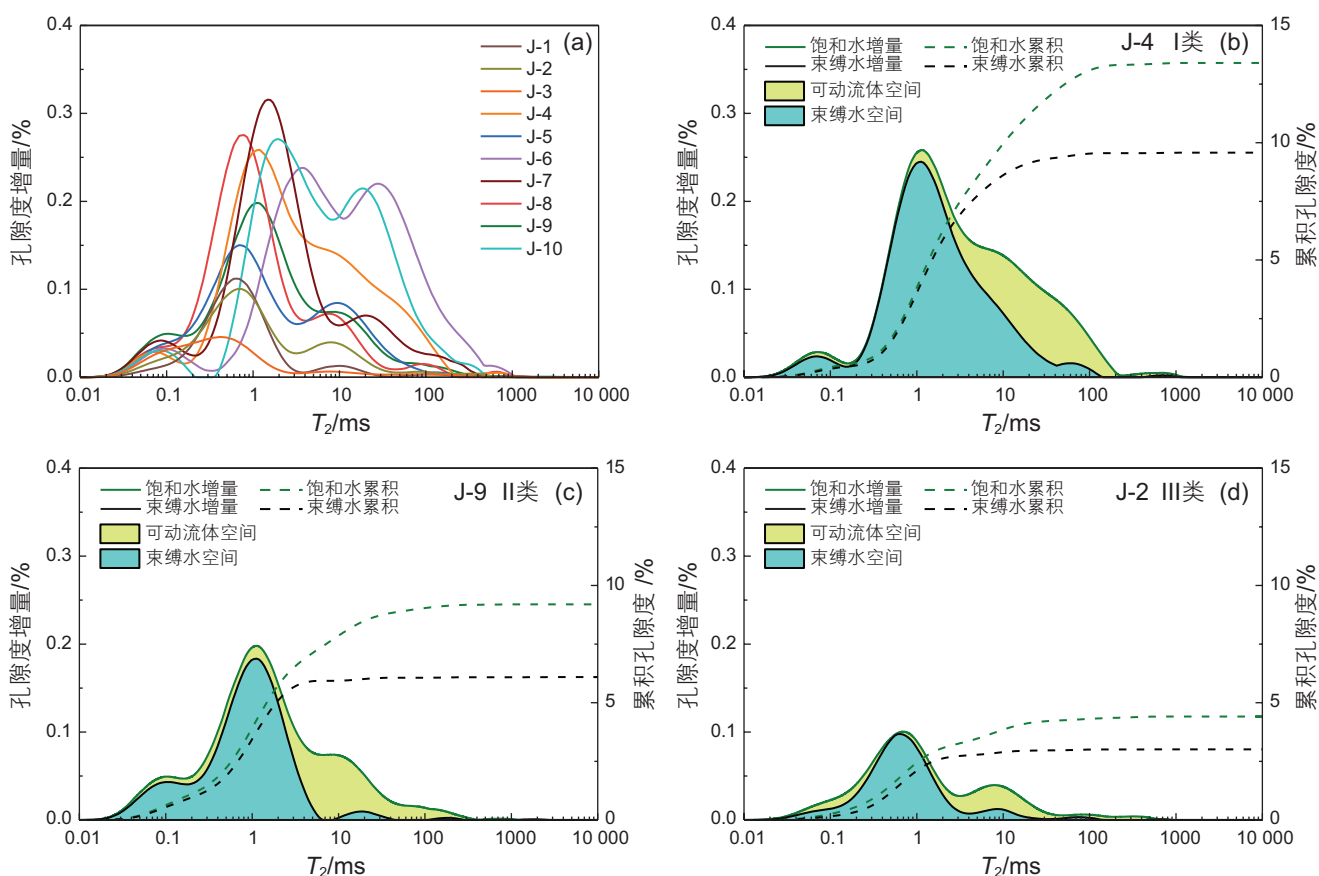
3.4 可动流体的分布特征

核磁共振实验通过识别水分子中氢原子信号来推测水分子的分布, 因此可以利用该原理探测饱和水样品内部的流体分布, 因此相比于高压压汞实验, 可以探测全尺寸孔喉的分布特征^[34]。利用核磁共振实验可以得到各样品在饱和水和束缚水状态下的 T_2 谱孔隙度增量分布曲线以及可动流体参数统计结果。杭锦旗地区下石盒子组饱和水样品的 T_2 值主要分布范围为 0.1~1000 ms(图 6)。其中 4 号样品的 T_2 谱为单峰, 分布最广, 为 0.2~200 ms, 其余样品的 T_2 谱曲线为双峰, 包括一个峰值较高的主峰及一个较弱的次峰, 3 号样品分布最低, 为 0.1~2 ms, 其增量幅度仅为 0.05%, 7 号样品峰值最高, 对应孔隙度增量为 0.34%。

样品在离心过程中被排出的流体为可动流体, 不可被排出的为束缚流体, 因此可以采用计算样品离心前后核磁共振 T_2 谱曲线面积的方法来求取可动流体及束缚流体所占据的孔隙度, 而可动流体所占据的孔隙体积与总孔隙体积的比值即为可动流体饱和度。计算结果表明(表 2), 锦 58 井区样品的可动流体孔隙度介于 0.33%~6.24% 之间, 其中 I 类样品的平均可动流体孔隙度最大, 为 4.72%, II 类样品次之, 平均可动流体孔隙度为 2.98%, III 类样品最差, 仅为 0.64%, 表明储集空间逐渐减小。可动流体饱和度 I 类、II 类和 III 类样品分别为 33.71%, 32.74% 和 20.05%, 表明储层物性及储集能力逐渐变差, 储层非均质性逐渐增强;

表 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同尺寸孔喉分形维数及其相应的孔隙度和渗透率
Table 3 Fractal dimensions of pore throats of different sizes and their corresponding porosity and permeability in Hangjinqi Area, Ordos Basin

样品编号	大孔			中孔			小孔			D
	D_1	$\phi_1/\%$	K_1/mD	D_2	$\phi_2/\%$	K_2/mD	D_3	$\phi_3/\%$	K_3/mD	
J-1	2.933	0.234	1.566	2.882	0.132	0.418	2.780	0.054	0.004	2.898
J-2	2.884	0.227	1.189	2.790	0.670	1.755	2.510	0.285	0.005	2.740
J-3	2.865	0.088	0.110	2.739	0.174	0.638	2.717	0.066	0.004	2.768
J-4	2.775	2.451	6.732	2.348	1.184	1.112	2.745	0.191	0.003	2.642
J-5	2.794	1.054	1.351	2.708	1.119	0.806	2.602	0.251	0.005	2.735
J-6	2.748	3.559	6.753	2.531	2.365	1.868	2.590	0.313	0.006	2.658
J-7	2.753	2.051	4.776	2.660	0.376	0.866	2.584	0.413	0.014	2.716
J-8	2.770	0.696	0.878	2.361	2.445	2.102	2.660	0.260	0.007	2.467
J-9	2.755	1.254	1.749	2.551	1.614	1.893	2.740	0.255	0.005	2.648
J-10	2.655	3.259	4.859	2.382	2.122	2.480	2.529	0.438	0.010	2.546
平均值	2.793	1.487	2.996	2.595	1.220	1.394	2.646	0.252	0.006	2.682

图6 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区核磁共振 T_2 谱分布特征Fig. 6 Distribution characteristics of NMR T_2 spectrum in Hangjinqi Area, Ordos Basin

不可动流体为吸附于黏土矿物及微孔喉表面的流体, 此类流体束缚于矿物颗粒表面无法流动。I类、II类和III类样品的束缚水饱和度分别为66.29%, 67.26%和79.95%, 整体上表明孔喉结构越复杂, 束缚流体含量越高。

利用前文核磁孔喉分布转换方法将核磁共振实验结果进行计算, 对比转换结果及原始孔喉分布特征(图7), 可以看出分孔喉尺寸转换效果较好, 与高压压汞所得的孔喉分布吻合度较高。在此基础上, 结合3种样品的孔喉分布特征, 将样品孔喉尺寸划分为3种类型, 分别为小孔(0.001~0.01 μm)、中孔(0.01~0.1 μm)和大孔(0.1~1 μm)。结合样品的不同孔喉半径区间分布概率可以看出, 3类样品大孔含量逐渐降低, 其中1号样品的小孔占比最高, 为52.3%。

杭锦旗地区锦58井区下石盒子组不同类型的致密砂岩样品的可动流体参数差异较大, 其分布具有较强的非均质性。结合核磁 T_2 时间谱的转换方法及孔喉尺寸划分结果, 可以得到不同尺寸孔喉内的可动流体孔隙度(ϕ_n)及饱和度(S_n)。I类样品大孔内部可动流体孔隙度最高, 平均为2.83%, 对应平均可动流体饱和度

为20.52%, 其可动流体参数均随孔喉尺寸降低逐渐减小。II类样品则以中孔内部的平均可动流体孔隙度最高, 为1.73%, 对应对可动流体饱和度贡献最大, 为18.60%。III类样品流体可动性最差, 不同孔喉尺寸内部的平均可动流体孔隙度及饱和度均为3类样品中的最低值(表4)。

4 不同孔喉尺寸内部可动流体分布的影响因素

4.1 矿物含量

不同的矿物组分对可动流体的分布有着较强的控制作用, 整体上看, 石英与长石的含量越高, 储层可动流体孔隙度及饱和度也就越大(图8a)。这是由于脆性矿物颗粒不易受岩石静压影响, 其抗压特性有利于保留粒间孔隙, 间接有利于可动流体的储存。而不同尺寸孔喉内部的可动流体孔隙度与脆性矿物含量的相关性呈现出不同的特征, 随着孔喉尺寸的减小, 石英和长石对孔喉内部的可动流体的控制减弱, 仅大孔可动流体饱和度与石英和长石的含量具有较好的正相关性(图8b), 这表明脆性矿物的发育仅有助于大尺寸

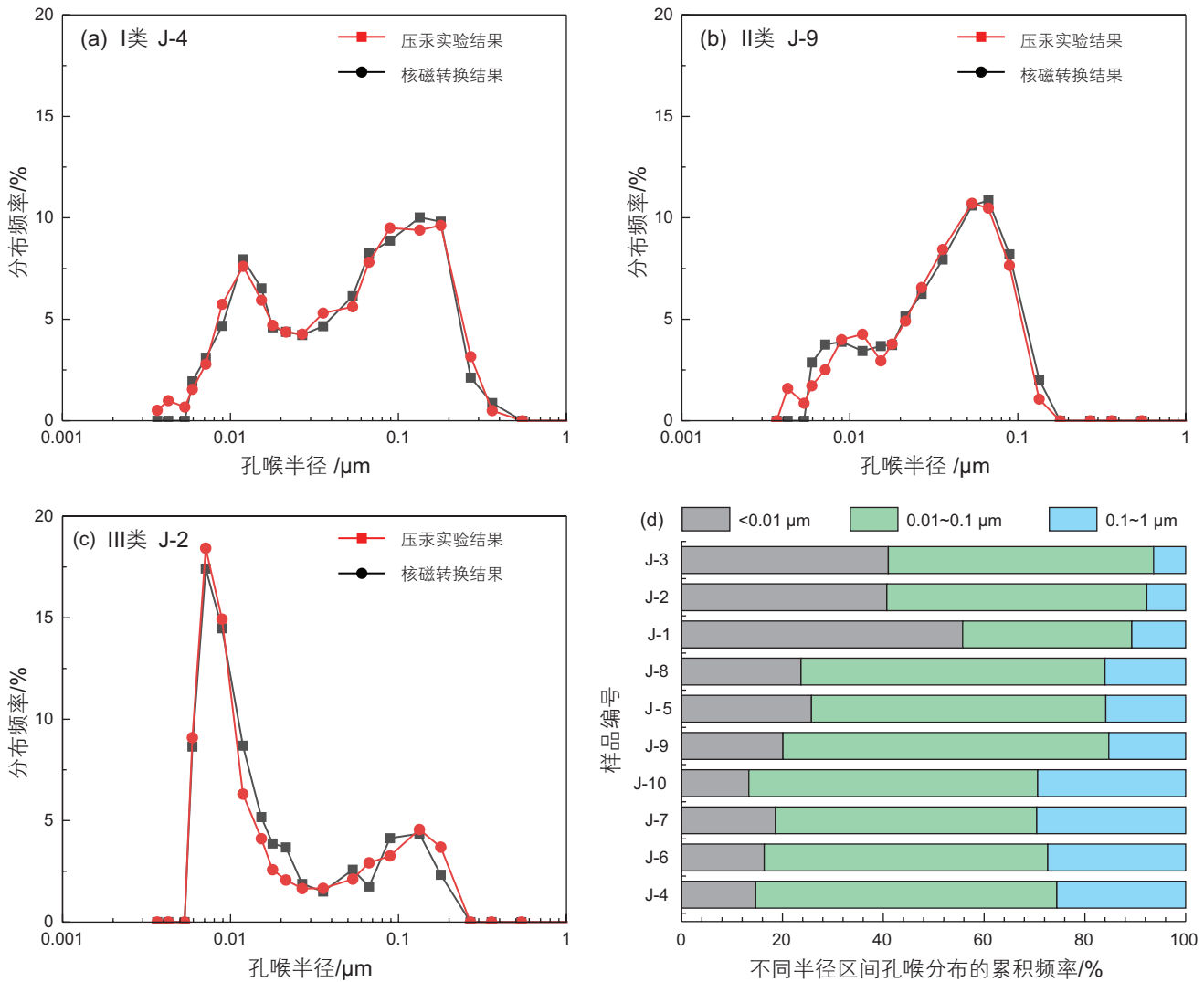


图 7 转换前后孔喉分布曲线对比图及不同半径区间孔喉累积频率分布
Fig. 7 Comparison of pore-throat distribution curves before and after conversion and cumulative frequency distribution of pore-throat in different radius intervals

表 4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同尺寸孔喉内部可动流体孔隙度及饱和度

Table 4 Porosity and saturation of movable fluid in pore-throat of different sizes in Hangjinqi, Ordos Basin

类型	样品编号	大孔		中孔		小孔	
		$\phi_1/\%$	$S_1/\%$	$\phi_2/\%$	$S_2/\%$	$\phi_3/\%$	$S_3/\%$
I	J-4	2.45	18.30	1.18	8.84	0.19	1.43
	J-6	3.56	24.44	2.36	16.24	0.31	2.15
	J-7	2.05	16.96	0.38	3.11	0.41	3.42
	J-10	3.26	22.40	2.12	14.58	0.44	3.01
	平均值	2.83	20.52	1.51	10.69	0.34	2.50
II	J-9	1.25	13.55	1.61	17.44	0.25	2.75
	J-5	1.05	13.54	1.12	14.37	0.25	3.22
	J-8	0.70	6.83	2.45	23.99	0.26	2.55
	平均值	1.00	11.31	1.73	18.60	0.25	2.84
III	J-1	0.23	7.27	0.13	4.11	0.05	1.67
	J-2	0.23	6.09	0.67	17.97	0.28	2.65
	J-3	0.09	4.13	0.17	8.17	0.07	3.11
	平均值	0.18	5.83	0.33	10.08	0.13	2.47

孔喉的保留。中孔和小孔多为溶蚀孔和晶间孔,孔隙多为单向连通,在离心过程中连通的部分孔喉多发育于大孔连接处,因此脆性矿物含量对中孔和小孔的可动流体参数影响较小,相关性较差(图 8c~d)。除此之外,中孔占比普遍较高,平均占比为 55%,而纳米孔含量占比逐渐增加,二者内部的可动流体含量受限于其连通性,连通孔喉比例较低,因此相关性较差。

黏土矿物内部的微孔及形态隙增大了储层的比表面积,吸附能力强,限制了流体的可动性,导致束缚流体增加。黏土矿物的含量越高,样品内部的可动流体含量越低,即可动流体孔隙度及饱和度越低(图 8e)。在不同孔喉尺寸内部,可动流体的分布同样受限于黏土矿物含量。需要注意的是,黏土矿物对中小孔内部可动流体孔隙度的影响大于对大孔可动流体孔隙

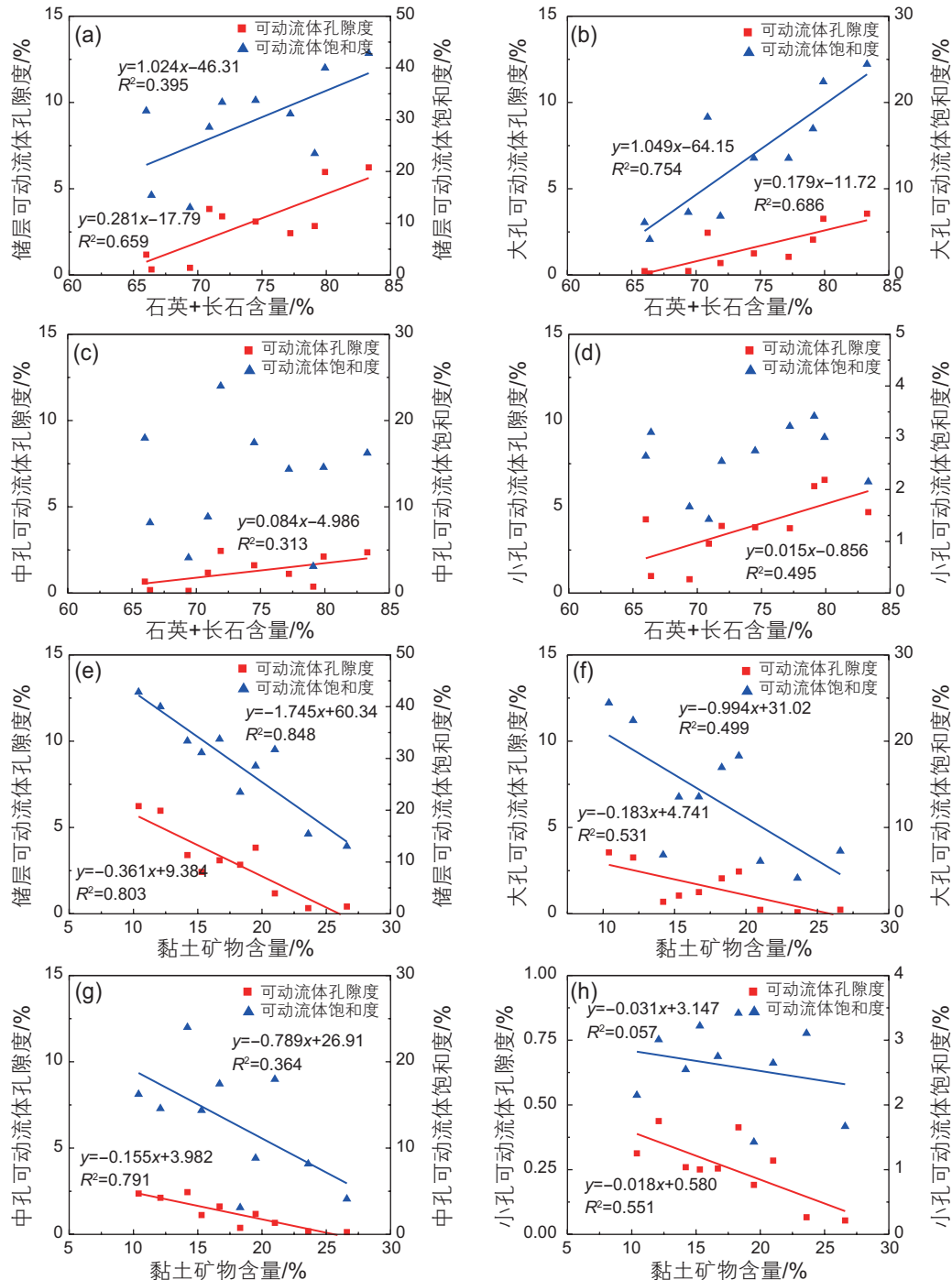


图 8 不同尺寸孔喉内部可动流体孔隙度及饱和度与样品矿物组成的关系

Fig. 8 Relationship between sample mineral composition and porosity and saturation of movable fluid in pore-throat of different sizes

度的影响,相关性分别为 0.531、0.791 和 0.551,这说明中小孔喉受限于尺寸影响更易被黏土矿物堵塞形成死孔隙,因此在中小孔隙存在更多的不可动流体(图 8f-h)。而可动流体饱和度随着孔喉尺寸的变小受黏土矿物的影响逐渐减弱,大中小孔喉与其相关性分别为 0.499, 0.364 和 0.057。这表明大孔更容易受到黏土矿物的影响,使其比表面积的增大,束缚流体增加。而

中小尺寸内部流体流动主要因为无法克服毛细压力而形成束缚流体,因此受黏土矿物含量的影响不显著。

4.2 物性参数

一般认为,物性越好,储层内部流体可动性越强。实验结果表明,样品整体可动流体参数与孔隙度的相关性均较高,分别为 0.879 与 0.512(图 9a),这论证了

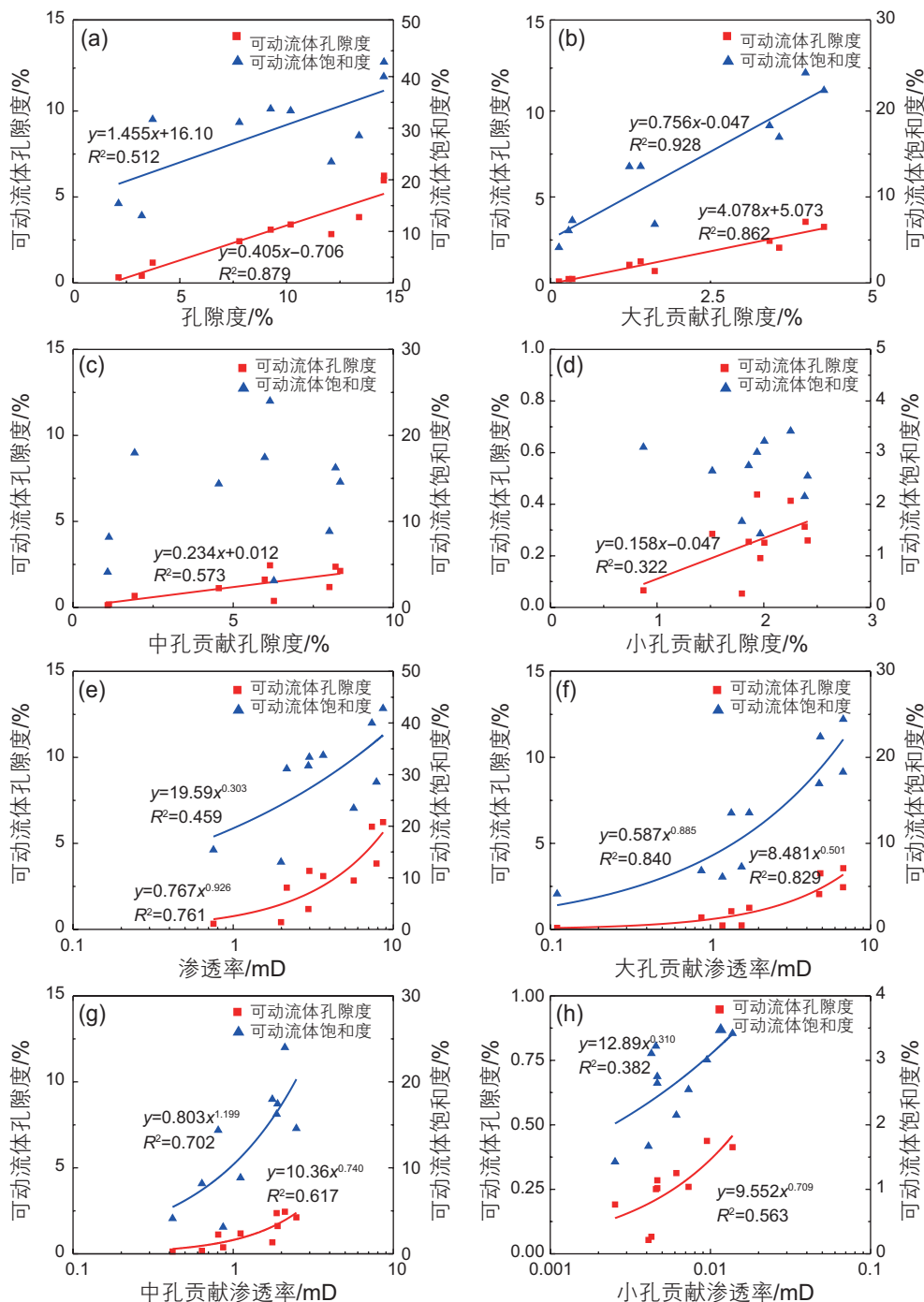


图 9 不同尺寸孔喉内部可动流体孔隙度及饱和度与样品物性的关系

Fig. 9 Relationship between sample physical properties and porosity and saturation of movable fluid in pore-throat of different sizes

上述观点。不同尺寸孔喉内部的可动流体参数则与孔隙度则呈现出不同的相关性特征(图 9b~d),其中大孔内部的可动流体参数受孔隙度影响最为明显,这说明在大尺寸孔喉内部,较高的孔隙度一定程度上连通性好,因此存在较多的可动流体,但这一结论不适用于中小尺寸孔喉,相关性分析结果表明,可动流体占据的孔隙度与中小尺寸孔喉所贡献的孔隙度的相关性分别为 0.573 与 0.322,而可动流体饱和度则无相关性,表明在中小尺寸孔喉中,孔隙度的大小对可动流体的表征适用性较低,这是由于受限于孔喉尺寸,孔喉多为死孔喉或连通所需要的驱替压力高,其内部易形成束缚流体,从而往往连通较为困难,虽然中小尺寸孔喉可以贡献一定比例的孔隙度,但连通孔喉占比低、连通范围小,因此,在中小尺寸孔喉内部,可动流体参数与该尺寸孔喉所贡献的孔隙度相关性较差。这也说明在表征可动流体参数时,孔隙度仅适用于大尺寸孔喉,而随着孔喉尺寸的减小,孔隙度的可靠性逐渐降低。

渗透率可以反映储层的连通性,因此在表征可动流体参数时相对于渗透率更具有参考性,整体上可动流体参数与渗透率具有较好的正相关性(图 9e),即储层渗透率越大,储层内部的连通孔喉增加,可动流体含量增多。相较于孔隙度,可动流体参数与不同孔喉尺寸所贡献的渗透率均具有较好的相关性(图 9f~h),但是需要明确的是,随着孔喉尺寸的下降,渗透率对可动流体参数的影响程度逐渐降低,表明孔喉尺寸的降低,其对可动流体的束缚性逐渐增强,这导致了渗透率对可动流体含量的影响逐渐减弱,但相对于孔隙度,渗透率更适合于中小尺寸孔喉内部的可动流体的表征。

4.3 孔喉结构

孔喉结构的非均质性可以通过分形维数进行定量表征,孔喉结构的复杂程度与分形维数的大小呈正相关关系。因此,可以利用分形维数来分析孔喉结构对可动流体参数的影响,为明确分形特征与可动流体参数之间的关系,本文首先分段求取不同尺寸孔喉的分形维数,后利用公式(8)求取储层整体的分形维数。整体上看,储层内部的可动流体孔隙度与饱和度均受到分形维数的影响,即分形维数越大,可动流体含量越低(图 10a),而不同尺寸孔喉内部可动流体孔隙度与分形维数的关系也呈现出相同的特征(图 10b~d)。分形维数越大,储层孔喉分布越分散,孔喉表面越不规则,对孔喉结构的非均质性影响越大,即分选越差,孔喉

的连通性也越差,因此导致束缚流体增加,可动流体含量降低。需要注意的是,在中小尺寸孔喉内部的可动流体饱和度则与分形维数相关性较低,这是由于在分形维数较大的情况下,孔喉尺寸非均质性强,中小尺寸孔喉内部的可动流体孔隙度则与其整体孔隙度比例失衡,因此导致可动流体饱和度往往相关性较差。

最大进汞饱和度反映了储层内部孔喉的可进入性。较高的最大进汞饱和度通常表明样品有更多的连通孔隙,能够容纳更多的汞进入。储层整体上最大进汞饱和度越大,可动流体含量越高(图 10e)。但在孔喉尺寸划分的结果上看,最大进汞饱和度对大孔内部的可动流体的影响较为明显,这是由于大尺寸孔喉贡献了绝大部分的孔隙度和渗透率,因此有利于可动流体的储存(图 10f)。而中小尺寸孔喉的物性贡献占比远低于大尺寸孔喉,仅局部连通的孔喉在压汞中被充注,因此与汞饱和度相关性同样较差,导致其内部的可动流体参数与最大进汞饱和度相关性较小(图 10g, h)。

孔喉类型显著影响着储层内部可动流体分布,依据锦 58 井区样品的类型划分结果及箱状图可以看出(图 11a, b),可动流体参数随着孔喉结构组合变差而逐渐降低,其中 I 类孔喉结构最有利于可动流体的赋存,而 II 类孔喉结构具有作为含气储层的潜力,III 类孔喉结构最差。需要明确的是, I 类与 II 类样品的可动流体饱和度差别较小,这是由于 I 类样品中 4 号和 7 号样品的可动流体孔隙度较低,降低了整体平均值。除此之外,4 号和 7 号样品的石英含量对比其他 I 类样品较低,且孔隙多以溶蚀孔隙为主,溶蚀作用也导致了其黏土矿物含量高于 6 号及 10 号样品,其束缚水的含量增加,因此 I 类样品整体的平均可动流体饱和度较低,这也侧面说明了在表征可动流体分布时,可动流体孔隙度要优于可动流体饱和度。

不同尺寸孔喉对储层储集空间贡献的差异较大,受限于不同孔喉尺寸的发育比例,不同尺寸的孔喉组合类型同样决定着可动流体分布的上限。不同尺寸孔喉内部可动流体参数统计结果可以看出(图 11c, d),随着孔喉结构逐渐变差,大孔内部的可动流体含量逐渐降低,而小孔内部的可动流体几乎无变化,这表明在不同的孔喉占比组成中,大孔的含量对可动流体的含量呈决定性作用,而小孔的影响则几乎可以忽略不计。除此之外,中孔在 3 种孔喉组合类型中占比较为稳定,平均占比 55%,同时在前两种孔喉结构类型中其内部的可动流体孔隙度分布较为稳定,其中值分别为 1.60% 和 1.62%。因此,在中孔大规模发育的情况下,可动流体的含量同样可以达到较高水平。

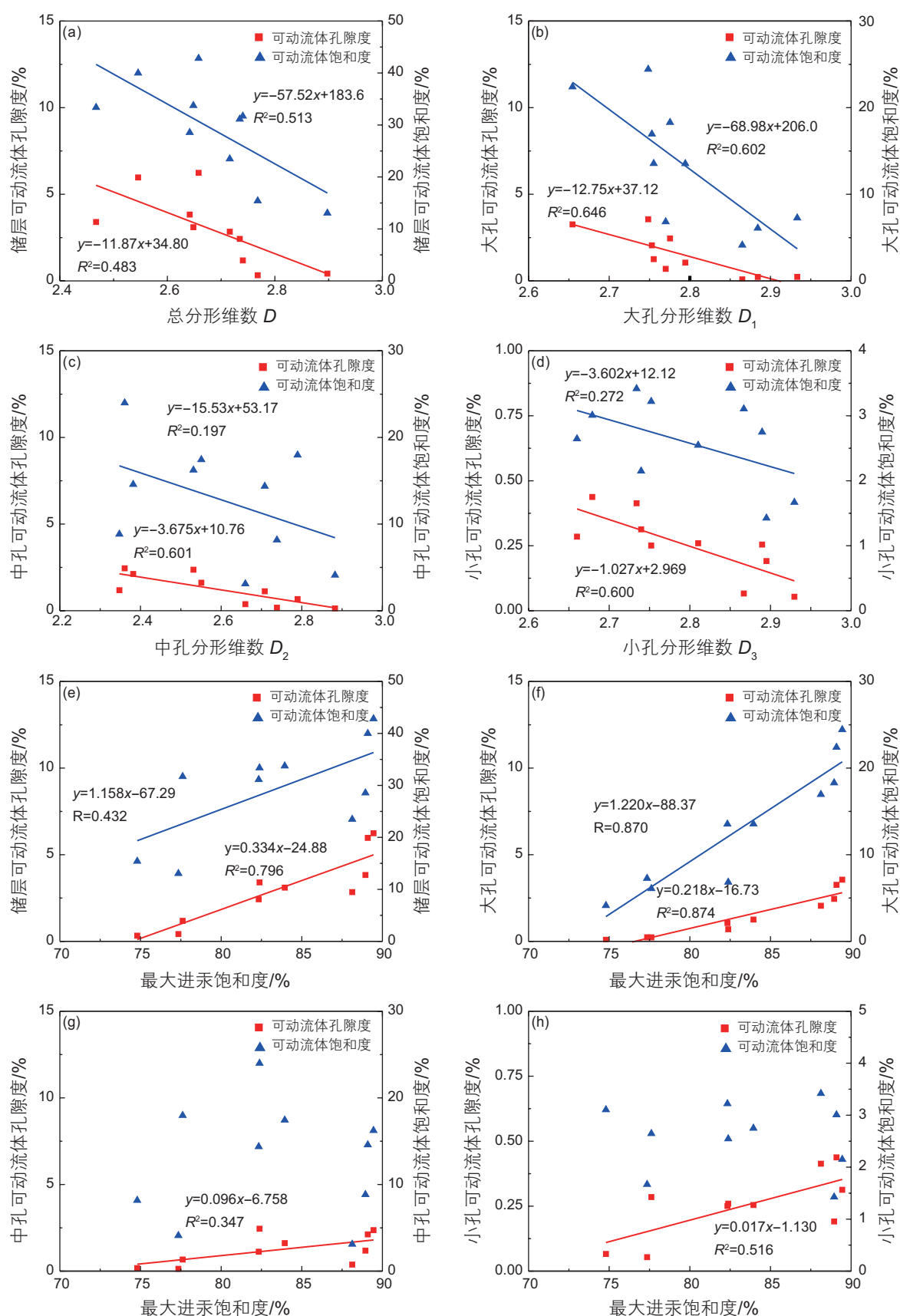


图 10 不同尺寸孔喉内部可动流体孔隙度及饱和度与分形维数和最大进汞饱和度的关系

Fig. 10 Relationship between the porosity and saturation of movable fluid in pore-throat of different sizes and the fractal dimension and maximum mercury injection saturation

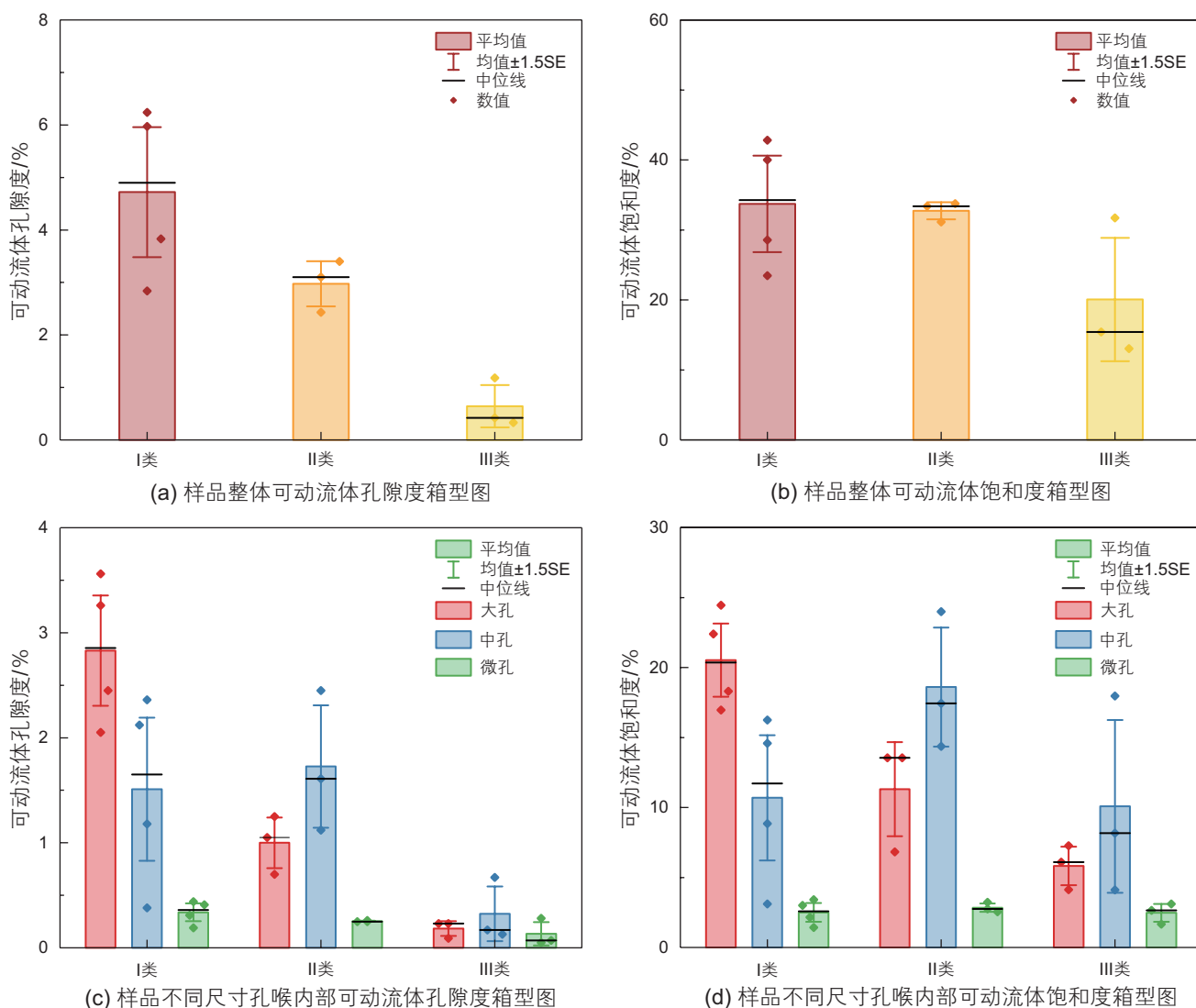


图 11 不同孔喉类型及孔喉尺寸内部可动流体参数分布箱型图

Fig. 11 Box plot of movable fluid parameter distribution of different pore-throat types and pore-throat sizes

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区锦 58 井区下石盒子组致密储层孔隙类型主要为残余粒间孔、粒内溶蚀孔及晶间孔。根据 10 个样品的压汞曲线形态及参数可以将孔隙结构划分为 3 种类型：I 类样品孔喉尺寸分布曲线呈双峰状，其中大孔为主峰。物性和孔喉连通性较好；II 类样品孔隙孔喉尺寸分布曲线呈单峰状，孔喉以中孔为主，分选较好，受限于孔喉尺寸，储层物性差于 I 类样品。III 类样品孔喉尺寸分布曲线以小孔为主峰，大孔为次峰，其物性非均质性最强，物性最差。

2) 根据孔喉尺寸及分形曲线结构将孔喉尺寸划分为 3 种类型，分别为 $0.001\sim 0.01\ \mu\text{m}$ 的小孔、 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 的中孔以及 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 的大孔。其中，可动流体

主要分布于大孔中，大孔的占比对可动流体含量起决定性的影响中孔占比最高，在大规模砂体分布的情况下，具有储存可动流体的潜力。小孔内部的可动流体含量则变化不大。整体上看，随着孔喉尺寸的减小，可动流体的含量逐渐降低。

3) 锦 58 井区不同尺寸孔喉内部的可动流体的影响因素差异较大。其中大孔内部的可动流体受石英和长石的含量影响较强，但随着孔喉尺寸的减小，脆性矿物对可动流体的影响逐渐减小。较高的黏土矿物含量不利于 3 类孔喉尺寸内部的可动流体分布。孔隙度主要影响大孔内部的可动流体分布，而渗透率则对 3 类孔喉尺寸内部的可动流体含量起决定性作用。储层整体及不同尺寸孔喉内部的可动流体孔隙度及饱和度均随着分形维数的增加而减少，较大的最大进汞饱和度仅有利于大孔内部的可动流体分布。

参考文献

- [1] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257–264. [DAI J X, NI Y Y, WU X Q. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257–264.]
- [2] 李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 607–615. [LI J Z, GUO B C, ZHENG M, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607–615.]
- [3] 康毅力, 罗平亚. 中国致密砂岩气藏勘探开发关键工程技术现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 239–245. [KANG Y L, LUO P Y. Current status and prospect of key techniques for exploration and production of tight sandstone gas reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 239–245.]
- [4] 贾爱林, 位云生, 郭智, 等. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 83–92. [JIA A L, WEI Y S, GUO Z, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83–92.]
- [5] 卢晨刚, 张遂安, 毛潇潇, 等. 致密砂岩微观孔隙非均质性定量表征及储层意义——以鄂尔多斯盆地X地区山西组为例[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 556–561. [LU C G, ZHANG S A, MAO X X, et al. Quantitative characterization of microscopic pore heterogeneity in tight sandstones and its reservoir significance: A case study of the Shanxi Formation in X area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 556–561.]
- [6] 石桓山, 胡望水, 李涛, 等. 致密砂岩储层孔隙结构特征对可动流体赋存的影响: 以鄂尔多斯盆地庆城地区长7段为例[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 62–74. [SHI H S, HU W S, LI T, et al. Pore throat structure characteristics of tight sandstone reservoirs and their influence on movable fluid occurrence: Taking the Chang-7 Member of Qingcheng area of Ordos Basin as an example[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 62–74.]
- [7] 李咪, 郭英海, 杨亦浩, 等. 黏土矿物和孔喉特征对致密砂岩可动流体分布的影响——以鄂尔多斯盆地东部山西组储层为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(9): 1627–1640. [LI M, GUO Y H, YANG Y H, et al. Effects of clay minerals and pore-throat characteristics on the movable fluid of tight sandstones: A case study of the Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(9): 1627–1640.]
- [8] 夏玉磊, 兰建平, 姚伟. 致密砂岩储层微观孔喉结构及可动流体分布特征: 以鄂尔多斯盆地东部神木地区盒8段储层为例[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 41–51. [XIA Y L, LAN J P, YAO W. Micropore structure and movable fluid distribution characteristics of tight sandstone reservoirs: Taking the He 8 reservoir in the Shenmu area of the eastern Ordos Basin as an example [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 41–51.]
- [9] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔喉结构[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 961–970. [XIAO D S, LU D F, LU Z Y, et al. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 961–970.]
- [10] 邹敏, 夏东领, 庞雯, 等. 致密砂岩储层微观孔喉结构表征方法及其应用——以鄂尔多斯盆地红河地区长8层为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(2): 46–53. [ZOU M, XIA D L, PANG W, et al. Characterization method of micropore-throat structure of tight sandstone reservoir and its application: taking Chang 8 reservoir of Honghe area, southern Ordos Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2019, 34(2): 46–53.]
- [11] 吴海科, 曹凯, 赵方方. 低渗透沉积岩可动流体饱和度核磁共振实验[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(3): 457–463. [WU H K, CAO K, ZHAO F F. NMR experimental study of movable fluid saturation in low permeability sedimentary rocks[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(3): 457–463.]
- [12] SU Y, ZHA M, JIANG L, et al. Pore structure and fluid distribution of tight sandstone by the combined use of SEM, MICP and X-ray micro-CT[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109241.
- [13] FENG D H, LIU C L, FENG X L, et al. Movable fluid evaluation of tight sandstone reservoirs in lacustrine delta front setting: Occurrence characteristics, multiple control factors, and prediction model[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 155: 106393.
- [14] 何云, 王瑞飞, 张占杨, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组致密砂岩储层孔隙结构及可动流体特征[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 94–102. [HE Y, WANG R F, ZHANG Z Y, et al. Pore structure and movable fluid characteristics of tight sandstone reservoirs in the Lower Shihezi Formation in the Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 94–102.]
- [15] 邵鑫笛, 宋岩, 姜振学, 等. 成岩演化对陆相致密砂岩储层可动性差异的控制机理及演化模式——以松辽盆地北部下白垩统扶余油层为例[J]. 石油科学通报, 2025, 10(1): 16–34. [SHAO X D, SONG Y, JIANG Z X, et al. The control mechanism and evolution model of diagenesis evolution on the mobility difference of continental tight sandstone reservoirs: Taking Fuyu oil layer of Lower

- Cretaceous in the northern Songliao Basin as an example[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2025, 10(1): 16–34.]
- [16] 康小斌, 闫钰琦, 屈亚宁, 等. 致密砂岩储层孔喉结构特征及流体可动性影响因素[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(5): 79–88. [KANG X B, YAN Y Q, QU Y N, et al. Pore-throat structure characteristics and influencing factors for fluid mobility of tight sandstone reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(5): 79–88.]
- [17] 钟红利, 陈礼华, 张凤奇, 等. 致密砂岩孔隙演化及其对含油饱和度的影响——以鄂尔多斯盆地甘泉地区三叠系延长组长 6—长 8 段储层为例[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(6): 1145–1156. [ZHONG H L, CHEN L H, ZHANG F Q, et al. Pore evolution in tight sandstone and its impact on oil saturation: A case study of Chang 6 to Chang 8 reservoirs in Triassic Yan chang Formation, Gan quan area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(6): 1145–1156.]
- [18] 刘鹏, 彭斌, 于瑞江, 等. 基于核磁共振流体分布孔隙精细划分的致密油藏流体可动性特征研究[J]. *地球物理学进展*, 2025, 40(1): 294–303. [LIU P, PENG B, YU R J, et al. Research on the characteristics of fluid mobility of the tight reservoir with the NMR fluid distribution pore classification method[J]. *Progress in Geophysics*, 2025, 40(1): 294–303.]
- [19] 王剑超, 余瑜, 林良彪, 等. 川西坳陷须家河组四段致密砂岩储层可动流体饱和度影响因素[J]. *矿物岩石*, 2023, 43(2): 95–107. [WANG J C, YU Y, LIN L B, et al. Influencing Factors of Mobile Fluid Saturation in the Tight Sandstone Reservoir in the 4th Member of Xujiahe Formation(T₃x⁴), Western Sichuan Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2023, 43(2): 95–107.]
- [20] 董鑫旭, 孟祥振, 蒲仁海. 基于致密砂岩储层孔喉系统分形理论划分的可动流体赋存特征认识[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 78–90. [DONG X X, MENG X Z, PU R H. Occurrence characteristics of movable fluids based on the division of pore throat system in tight gas reservoir by fractal theory[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 78–90.]
- [21] 陈儒贤, 侯加根. 高尚堡油田高 3102 断块沙三 2+3 亚段中低渗透储层可动流体赋存特征及其影响因素[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(6): 174–186. [CHEN R X, HOU J G. Occurrence characteristic sand influencing factors of movable fluid in the medium-and-low-permeability reservoirs of the Es₃²⁺³ submember of the Go3102 fault block in the Goshangpu Oil field[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 174–186.]
- [22] 钟红利, 张凤奇, 赵振宇, 等. 致密砂岩储层微观孔喉分布特征及对可动流体的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(1): 77–85. [ZHONG H L, ZHANG F Q, ZHAO Z Y, et al. Micro-scale pore-throat distributions in tight sandstone reservoirs and its constrain to movable fluid[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(1): 77–85.]
- [23] WANG R, SHI W, XIE X, et al. Clay mineral content, type, and their effects on pore throat structure and reservoir properties: Insight from the Permian tight sandstones in the Hangjinqi area, north Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 115: 104281.
- [24] ZANG Q, LIU C, AWAN R S, et al. Occurrence characteristics of the movable fluid in heterogeneous sandstone reservoir based on fractal analysis of NMR data: A case study of the Chang 7 Member of Ansai Block, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 214: 110499.
- [25] ZHAO S, FU Q, FU J, et al. Effect of authigenic clay minerals and carbonate cements on quality of tight sandstone reservoirs: Insight from Triassic tight sandstones in the Huaqing area, Ordos Basin, Northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 229: 105099.
- [26] 代全齐, 罗群, 张晨, 等. 基于核磁共振新参数的致密油砂岩储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地延长组 7 段为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 887–897. [DAI Q Q, LUO Q, ZHANG C, et al. Pore structure characteristics of tight-oil sandstone reservoir based on a new parameter measured by NMR experiment: A case study of seventh Member in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 887–897.]
- [27] 李爱芬, 任晓霞, 王桂娟, 等. 核磁共振研究致密砂岩孔隙结构的方法及应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(6): 92–98. [LI A F, REN X X, WANG G J, et al. Characterization of pore structure of low permeability reservoirs using a nuclear magnetic resonance method[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2015, 39(6): 92–98.]
- [28] XU Q, SHI W, XIE X, et al. Inversion and propagation of the Late Paleozoic Porjianghaizi fault (North Ordos Basin, China): Controls on sedimentation and gas accumulations[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 91: 706–722.
- [29] 朱宗良, 李文厚, 李克永, 等. 杭锦旗地区上古生界层序及沉积体系发育特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(6): 1050–1054. [ZHU Z L, LI W H, LI K Y, et al. The characteristic of sequence stratigraphy and sedimentary systems of Taiyuan-Xiashihezi Formation in Hangjinyi area[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2010, 40(6): 1050–1054.]
- [30] JIANG F, ZHANG C, WANG K, et al. Characteristics of micropores, pore throats, and movable fluids in the tight sandstone oil reservoirs of the Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(12): 2835–2859.
- [31] 黄金亮, 董大忠, 李建忠, 等. 陆相页岩储层孔隙分形特征——以四川盆地三叠系须家河组为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(9): 1611–1618+708. [HUANG J L, DONG D Z, LI J Z, et al. Reservoir fractal characteristics of continental shale: An example from Triassic Xujiahe Formation shale, Sichuan Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9): 1611–1618+708.]
- [32] 贺伟, 钟孚勋, 贺承祖, 等. 储层岩石孔隙的分形结构研究和应用[J]. *天然气工业*, 2000, (2): 67–70. [HE W, ZHONG F X, HE C Z, et al. Fractal texture research on the pores in reservoir rocks and its application[J]. *Natural Gas Industry*, 2000, (2): 67–70.]
- [33] 何琰, 吴念胜. 确定孔隙结构分形维数的新方法[J]. *石油实验地质*, 1999, (4): 372–375. [HE Y, WU N S. A new method for

- determining fractal dimension of pore structure [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1999, (4): 372–375.]
- [34] 张全培, 吴文瑞, 刘丽萍, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组超低渗透储层孔隙结构及其分形特征[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3): 20–31. [ZHANG Q P, WU W R, LIU L P, et al. Pore structure and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation in Zhenbei area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3): 20–31.]
- [35] 宁传祥, 姜振学, 高之业, 等. 用核磁共振和高压压汞定量评价储层孔隙连通性——以沾化凹陷沙三下亚段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(3): 578–585. [NING C X, JIANG Z X, GAO Z Y, et al. Quantitative evaluation of pore connectivity with nuclear magnetic resonance and high pressure mercury injection: A case study of the lower section of Es₃ in Zhanhua sag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(3): 578–585.]
- [36] BROWNSTEIN K R, TARR C E. Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells[J]. *Physics Review A*, 1979, 19(6): 2446–2453.
- [37] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 核磁共振 T_2 分布评价岩石孔径分布的改进方法[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 373–378. [HE Y D, MAO Z Q, XIAO L Z, et al. An improved method of using NMR T_2 distribution to evaluate pore size distribution[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(2): 373–378.]

(编辑 付娟娟)

第一作者: 鲍磊 (1996 年—), 博士研究生, 主要从事致密砂岩含气性等方面研究, leibao502@gmail.com。

通信作者: 侯加根 (1963 年—), 博士, 教授, 主要从事油气田开发地质方面研究, jghou63@hotmail.com。

刘钰铭 (1983 年—), 博士, 教授, 主要从事油气田开发地质、油气地质大数据与人工智能技术等方面的研究, liuym@cup.edu.cn。