

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

张全培¹,吴文瑞²,刘丽萍³,杨红梅⁴,王联国⁵,解宇航⁶,朱玉双¹

(1.西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系,陕西西安710069; 2.中国石油长庆油田分公司第五采油厂,陕西西安710200; 3.中国石油长庆油田分公司第七采油厂,陕西西安710200; 4.中国石油长庆油田分公司第二采油厂,甘肃庆阳745100; 5.中国石油长庆油田分公司第十一采油厂,甘肃庆阳745000; 6.中国石油华北油田分公司勘探开发研究院,河北任丘062550)

摘要:选取鄂尔多斯盆地镇北地区延长组7块超低渗透岩心样品,分别开展铸体薄片、扫描电镜、X衍射、高压压汞和核磁共振等实验,明确了超低渗透储层孔喉分布特征、孔隙类型、矿物组成及其含量;运用分形理论研究了储层孔喉分形特征,系统分析了分形维数与储层物性、孔隙结构参数和矿物成分及其含量之间的关系。结果表明:研究区储层孔隙类型主要为残余粒间孔、溶蚀孔和晶间孔。储层矿物成分以石英和长石为主,黏土矿物中绿泥石含量最高。根据毛管压力曲线形态和排驱压力可将储层孔隙结构分为Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类3种类型,其储集性能和渗流能力依次变差,孔隙结构非均质性逐渐增强。高压压汞所得的孔喉大小分布具有多重分形特征,依据分形特征曲线存在的明显转折点,将孔隙空间分为大孔、中孔和微孔,微孔相对于大孔和中孔而言孔隙分布较为均匀和规则,对应分形维数最小。核磁共振技术可以更全面地表征储层的孔隙空间, $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ 段孔喉分布不具有分形特征, $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ 段可动流体孔隙空间和有效孔隙符合分形结构,对应的分形维数均反映相互连通孔隙的复杂程度。储层孔喉分形维数与孔隙度和渗透率之间具有较好的负相关性,与孔隙结构参数之间也存在较好的相关关系,储层的矿物组成及其含量是决定分形维数大小的内在因素,进而影响储层质量和孔隙结构特征。

关键词:孔隙结构;分形理论;超低渗透储层;高压压汞;核磁共振

中图分类号:TE122.2*3

文献标识码:A

Pore structure and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation in Zhenbei area, Ordos Basin

ZHANG Quanpei¹, WU Wenrui², LIU Liping³, YANG Hongmei⁴, WANG Lianguo⁵, XIE Yuhang⁶, ZHU Yushuang¹

(1.State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710069, China; 2.No.5 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an City, Shaanxi Province, 710200, China; 3.No.7 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an City, Shaanxi Province, 710200, China; 4.No.2 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Qingyang City, Gansu Province, 745100, China; 5.No.11 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Qingyang City, Gansu Province, 745000, China; 6.Research Institute of Huabei Oilfield Branch, PetroChina, Renqiu City, Hebei Province, 062550, China)

Abstract: Seven ultra-low permeability core samples of Yanchang Formation in Zhenbei area, Ordos Basin are selected to carry out casting thin section, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction, high pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance (NMR) experiments, respectively. The characteristics of pore throat distribution, pore type, mineral composition and its content of ultra-low permeability reservoirs are clarified. The fractal theory is used to study the

收稿日期:2019-11-21。

作者简介:张全培(1995—),男,陕西商洛人,在读博士研究生,从事油气田地质与开发方面的研究。E-mail:846863720@qq.com。

通信作者:朱玉双(1968—),女,黑龙江大庆人,教授,博导。E-mail:642617295@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“深水相高杂基对致密砂岩微观孔喉结构及渗流能力影响评价”(41802140),“十三五”国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地致密油资源潜力、甜点预测与关键技术应用”(2016ZX05046)。

fractal characteristics of reservoir pore throat, and the relationships between the fractal dimension and the reservoir physical properties, pore structure parameters as well as mineral composition and its content are systematically analyzed. The results show that the reservoir pore types are mainly residual intergranular pores, dissolution pores and intercrystalline pores. The mineral composition of the reservoir is dominated by quartz and feldspar, and the content of chlorite in clay mineral is the highest. According to the morphology of capillary pressure curve and displacement pressure, the reservoir pore structure can be divided into three types: Type I, Type II and Type III. The corresponding reservoir performance and percolation capacity become worse in turn, and the heterogeneity of pore structure gradually increases. The pore throat size distribution obtained by high pressure mercury injection has multi-fractal features. There are two obvious turning points in the fractal feature curve, which divides the pore space into macropores, mesopores and micropores. Compared with macropores and mesopores, the pore size distribution of micropores is relatively uniform and regular, and the corresponding fractal dimension is the smallest. NMR can provide a better characterization of the reservoir pore space. The pore throat distribution of the $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ section does not have fractal features. The movable fluid pore space and effective pore of the $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ section conform to the fractal structure, and the corresponding fractal dimension reflects the complexity of interconnected pores. The fractal dimension of reservoir pore throat has a good negative correlation with porosity and permeability, and also has a good correlation with pore structure parameters. The mineral composition and its content of reservoir are the internal factors that determine the size of fractal dimension, and then affect the reservoir quality and pore structure characteristics.

Key words: pore structure; fractal theory; ultra-low permeability reservoir; high pressure mercury injection; NMR

储层的孔隙结构及非均质性直接影响其储集性能和渗流能力,决定着油气藏的产能分布及开发效果^[1]。超低渗透储层空气渗透率为0.3~1 mD^[2],具有孔喉细小、非均质性强和渗流机理复杂等特点,因此,很难精确表征超低渗透储层的孔喉分布特征和非均质性。孔隙结构是储层质量评价和油气资源评估的重要参数,主要包括孔喉的形状、大小、分布及其连通性等拓扑参数和几何特征^[3-4]。各种成像技术和测试方法均有一定的局限性^[4],需要多种方法相互结合才能够全面表征储层的孔隙结构特征。分形理论被广泛应用于描述孔隙结构复杂的储层,分形维数可以定量表征储层孔隙结构的复杂程度和非均质性^[5-6],是连接储层微观孔隙结构和宏观表现的重要桥梁^[7]。因此,研究超低渗透储层的孔隙结构和分形特征及他们之间的内在联系,对评价储层质量和提高油田采收率具有重要的作用。

分形理论可以被用来描述自然界中不规则物体的结构特征^[6,8-9]。总结前人的研究成果,计算多孔岩石的分形维数可以归纳为3种方法:①盒维数法^[10-11]。该方法主要是通过二维尺度上铸体薄片、扫描电镜和三维尺度上微纳米CT图像等观察得到的复杂孔隙网络而推导出分形维数,需要足够的观察视野和范围,因此精度较低。②Frenkel-Halsey-Hill模型^[12-13]。该方法是基于低温氮气吸附来得到分形维数,受限于氮气吸附探测的孔喉分布范围。③Brooks-Corey模型^[14-15]。该方法假设孔隙为二维和三维尺度上的毛管束模型而推导出相应的分形

维数^[11],由于高压压汞探测所得的孔喉范围较广且精度较高,因此应用较为广泛。然而,前人研究很少涉及核磁共振孔隙空间的分形特征及各方法分形维数之间的对比,缺少系统分析孔喉分形维数与储层孔隙结构之间的内在联系及其相互影响关系。为此,笔者利用来自鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长8段超低渗透储层不同井的7块岩心样品,开展铸体薄片、扫描电镜、X衍射、高压压汞和核磁共振等实验,综合分析研究区超低渗透储层矿物组成、孔隙类型和孔喉分布特征;在高压压汞和核磁共振实验原理基础上,应用分形理论分析超低渗透储层的孔喉分形特征,并厘定储层孔隙结构的分形维数与储层物性、孔隙结构参数和矿物组成及其含量之间的关系,为超低渗透储层的质量评价和勘探开发提供理论地质依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国华北克拉通盆地的西部,是长期叠加演化形成的中生代沉积盆地,上三叠统延长组是盆地重要的低—超低渗透砂岩储层发育层位^[16-17]。镇北地区位于鄂尔多斯盆地西南部,区域构造位于天环拗陷内,东与伊陕斜坡相接。研究区延长组长8段顶面为平缓西倾的单斜构造,地层倾角较小、厚度稳定,其上发育多条近东西向鼻状构造带^[18]。研究区长8段自上向下划分为长8₁和长8₂两个亚段,平均厚度为40~50 m。镇北地区长8段属于西南物源沉积体系,为辫状河三角洲前

缘亚相沉积,主要发育水下分流河道和分流间湾微相。储层岩石类型以灰色、浅灰色中—细粒岩屑长石砂岩为主,岩屑主要为火成岩岩屑和变质岩岩屑,成分成熟度中等偏低,结构成熟度中等。

2 实验方法与分形理论

2.1 样品及实验方法

将7块岩样钻取成直径为2.5 cm、长度为3.5 cm的样品塞,放入酒精和苯的混合溶液中除去样品中残留油,并在50℃下烘干24 h,对样品进行常规孔隙度和渗透率测定。当样品被重新烘干后,将样品塞抽真空饱和矿化度为20 000 mg/L的NaCl溶液至少24 h。核磁共振实验在Magnet-2000型岩心分析仪和PC-1型离心机上完成,采用CPMG自旋回波的方法,对饱和水和离心后的样品塞进行核磁共振 T_2 谱测试。主要测试参数为:共振频率为2.38 MHz,回波个数为4 096,扫描次数为256,等待时间为6 000 ms,回波间隔为0.2 ms,离心力为300 psi(约为2.07 MPa)。

将样品塞切割成长度为2.5 cm及剩余样品2部分,进行高压压汞和其他测试实验。高压压汞实验采用AutoPoreIV-9520型全自动压汞仪,将样品塞放入封闭的膨胀仪中抽真空进行测试,仪器工作压力为0~206.7 MPa,接触角为140°,表面张力为480 mN/m,可测量的最小孔喉半径约为3.6 nm。使用LEICA DMRXHC型多功能偏光显微镜和FEI Quanta400 FEG型环境扫描电子显微镜分别进行铸体薄片和扫描电镜测试,采用Dmax-2500 X射线衍射仪测试样品的黏土矿物成分和含量。

2.2 分形理论基础

2.2.1 高压压汞求取分形维数

分形理论由法国数学家MANDELBROT于1975年首次提出^[8],被用来描述自然界中复杂物体的结构特征^[8-9],目前被广泛应用于储层裂缝预测、孔隙结构和非均质性等研究领域^[6,19-22]。分形最主要的特征是自相似性,一个自相似物体被认为在不同尺度下具有相似的结构特征^[5,23],可以用来表征微米尺度孔隙结构的复杂程度,具有分形特征的物体可以用分形维数 D_f 或 D 来表示。多孔岩石的分形维数通常为2~3^[13,19,21],分形维数越接近于2,储层均质性越强,越接近于3,储层孔隙结构复杂程度越高。根据分形的基本原理,即物体数目与测量尺度间存在幂律规则,则具有相同孔隙半径的数量 N 与孔隙半径 r 之间的关系^[9]为:

$$N(r) = ar^{-D} \quad (1)$$

考虑Brooks-Corey模型,假设岩石孔隙空间是由一系列毛管束组成^[24]。因此,孔隙半径小于 r 的累积体积百分数^[23-25]可以表示为:

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

对(2)式两边取对数可得:

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

通过(3)式可以看出,如果储层的孔隙大小分布满足分形理论,则在双对数坐标系中, $\log(1 - S_{Hg})$ 和 $\log r$ 间存在线性关系,通过拟合出直线的斜率 H ,可用 $D = 3 - H$ 来求取毛管压力曲线的分形维数。

2.2.2 核磁共振求取分形维数

与高压压汞实验原理不同,核磁共振实验不存在非润湿相驱替润湿相的过程,而是在低频磁场中测量岩石孔隙中氢核的自旋信号^[26-27],得到饱和水及离心后的核磁共振 T_2 谱曲线。根据核磁共振的原理可知,较大孔隙中的自由流体具有缓慢的弛豫特征,对应较大的横向弛豫时间,而较小孔隙内的流体在孔隙表面具有较小的横向弛豫时间^[28]。假设孔隙为毛细管模型,由孔隙半径不同的长圆柱体组成,横向弛豫时间可以表示为:

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

假设表面弛豫率为常数,那么 T_2 与 r 成正比,即:

$$r = 2\rho T_2 \quad (5)$$

将(5)式代入(2)式可得:

$$V(c) = \left(\frac{T_2}{T_{2\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

对(6)式两边取对数可得:

$$\log V(c) = (3 - D) \log T_2 - (3 - D) \log T_{2\max} \quad (7)$$

在双对数坐标系下, $\log V(c)$ 和 $\log T_2$ 之间存在线性关系,可用拟合直线的斜率 H 求取核磁共振 T_2 谱的分形维数。

3 储层孔隙结构及其分形特征

3.1 物性特征与孔隙类型

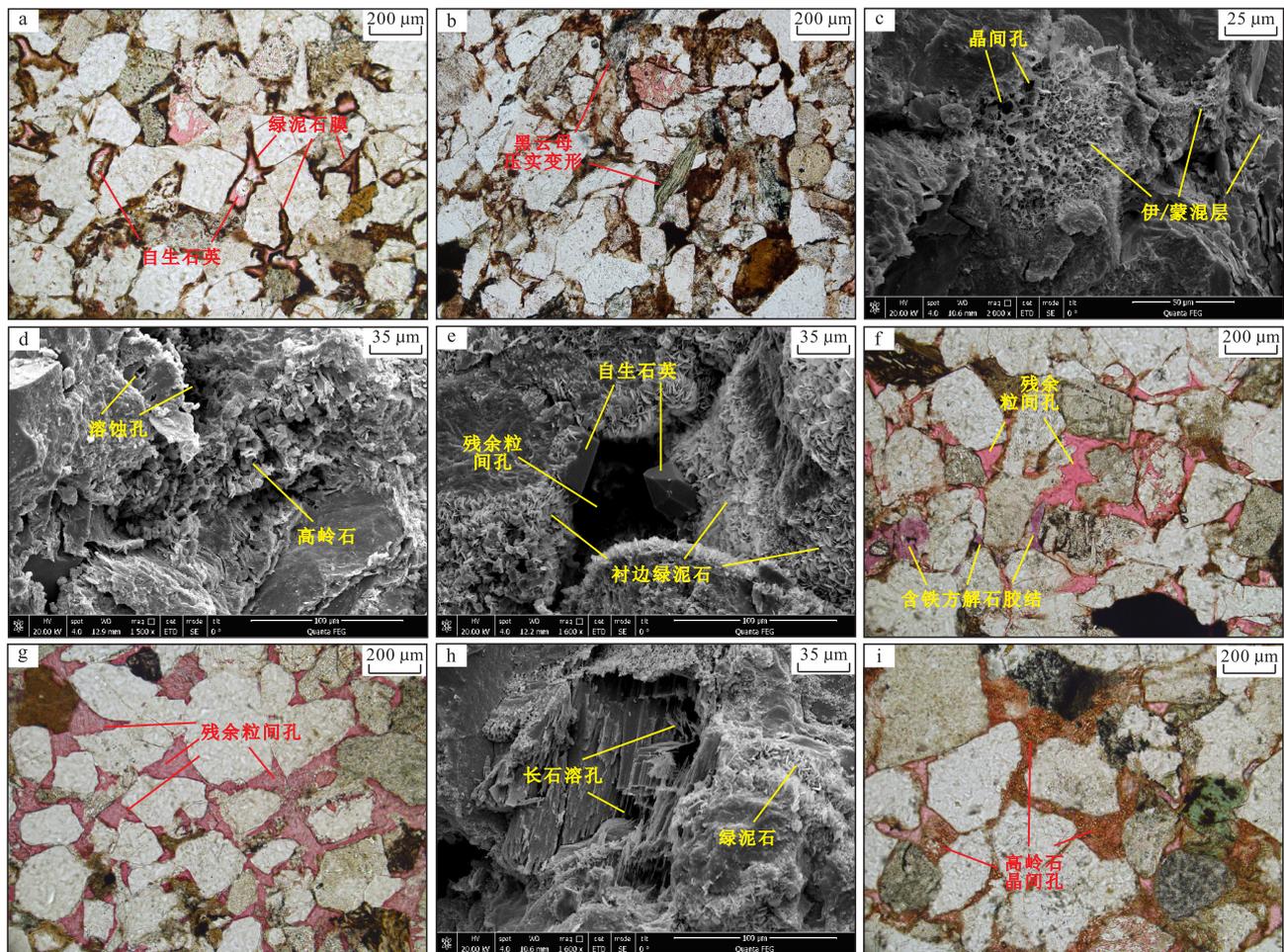
根据鄂尔多斯盆地镇北地区长8段储层样品的孔隙度和渗透率测试结果(表1),孔隙度主要为4.89%~13.79%,平均为10.21%;渗透率主要为0.084~0.901 mD,平均为0.527 mD,属于典型的低孔

表1 鄂尔多斯盆地镇北地区长8储层样品特征
Table1 Sample characteristics of Chang8 Formation in Zhenbei area, Ordos Basin

样品编号	井号	深度 (m)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	铸体薄片测试 (%)				X 衍射测试 (%)				
					石英	长石	岩屑	填隙物	总含量	绿泥石	伊利石	伊/蒙混层	高岭石
Z-2	Z308-786	2 311.28	10.14	0.503	36.0	29.5	24	10.5	2.17	42.89	30.59	12.67	13.85
Z-4	M141	2 516.81	10.02	0.389	39.5	20.5	23	17	4.47	64.02	15.82	20.16	0
Z-5	Z338	2 444.49	13.79	0.901	35.5	23.5	27	14	3.22	39.22	18.08	18.55	24.15
Z-6	Z322-54	2 349.02	11.93	0.725	36.5	29.5	22	12	4.57	55.76	21.55	14.22	8.47
Z-7	Z276-80	2 367.88	10.10	0.580	35.0	26.5	23.5	15	3.59	62.25	20.97	16.78	0
Z-8	Z514	2 413.94	10.63	0.506	41.0	26.5	22	10.5	4.25	64.27	17.96	14.39	3.38
Z-21	Z308-786	2 329.35	4.89	0.084	30.0	27.0	22	21	5.52	63.78	18.65	17.57	0
平均值		2 390.40	10.21	0.527	36.2	26.1	23.4	14.3	3.97	56.03	20.52	16.33	7.12

超低渗透储层。根据铸体薄片观察结果(图1),研究区石英含量平均为36.2%,其中发育少量自生石英充填孔隙,减少原生孔隙空间(图1a,1e);长石含

量平均为26.1%,以斜长石为主;岩屑含量平均为23.4%,含有大量的云母碎屑,以黑云母为主,常受压实作用而发生变形(图1b),堵塞孔隙;填隙物含



a—残余粒间孔被自生石英充填,发育绿泥石薄膜,Z-2;b—黑云母充填孔隙,受压实发生变形,Z-4;c—毛发状/蜂窝状伊/蒙混层充填孔隙,形成黏土晶间孔,Z-4;d—溶蚀孔内发育高岭石,Z-6;e—残余粒间孔周围发育衬边绿泥石和自生石英,Z-8;f—含铁方解石充填残余粒间孔,Z-21;g—残余粒间孔发育,Z-5;h—长石溶孔发育,Z-2;i—高岭石发育充填孔隙,形成黏土晶间孔,Z-5

图1 鄂尔多斯盆地镇北地区孔隙类型和矿物成分特征

Fig.1 Characteristics of pore types and mineral composition in Zhenbei area, Ordos Basin

量平均为14.3%。根据扫描电镜和X衍射结果,黏土矿物以绿泥石为主,其次为伊利石和伊/蒙混层,高岭石含量最少,其平均相对含量分别为56.03%,20.52%,16.33%和7.12%。其中绿泥石在镜下主要以颗粒包膜或孔隙衬边形式存在(图1a,1e,1h),伊利石和伊/蒙混层呈毛发状/蜂窝状充填于粒间孔隙中(图1c),溶蚀孔内发育少量高岭石(图1d,1i),碳酸盐胶结物以含铁方解石为主(图1f),平均含量约为4.7%。

根据铸体薄片和扫描电镜观察结果,研究区储层孔隙类型主要为残余粒间孔、溶蚀孔和晶间孔。残余粒间孔主要是由于储层压实作用和胶结作用后所保留下来的原生孔隙,孔隙形态呈不规则的三角形和多边形,孔隙半径大于50 μm(图1e—1g),孔喉连通性较好。溶蚀孔主要是由长石和杂基等易溶矿物在酸性溶液作用下形成的次生孔隙(图1d,1h),孔隙形态复杂,是研究区主要的孔隙类型,对改善储层质量具有重要作用。晶间孔主要为粒间

碳酸盐胶结物和自生石英及绿泥石、伊利石等黏土矿物形成的微孔,孔隙半径通常小于10 μm(图1c,1i),孔喉连通性较差,对储层物性的影响较小。

3.2 孔隙结构特征

通过对高压压汞所得的进汞和退汞曲线以及孔喉半径分布特征进行分析(图2),根据毛管压力曲线形态和排驱压力特征将7块岩心样品分为3种类型(表2)。I类样品包括Z-2,Z-5和Z-6,具有长中间平缓段的毛管压力曲线特征(图2a),孔喉分布频率以单峰状为主(图2b),峰值主要为0.8~1.2 μm,表明储层孔喉分布较为集中,具有较大的孔隙;平均排驱压力和中值孔喉半径分别为0.248 MPa和0.291 μm,表明储层物性较好,油气充注孔隙较容易;平均分选系数和退汞效率分别为2.05和35.92%,表明储层分选性和孔喉连通性较好,非均质性较弱。

II类样品包括Z-4,Z-7和Z-8,毛管压力曲线在0.5~2和20~25 MPa具有较短的双水平段特征(图

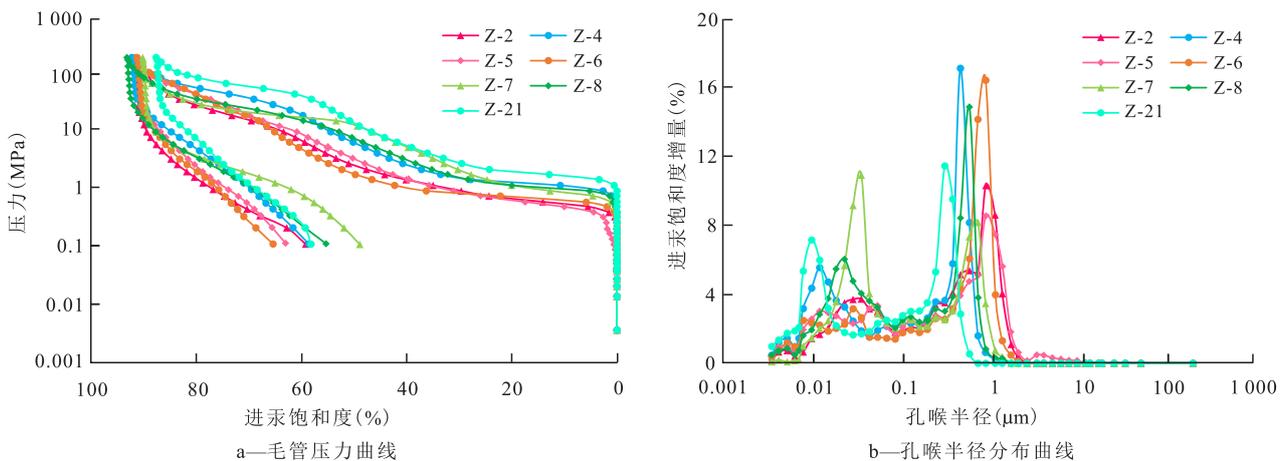


图2 鄂尔多斯盆地镇北地区孔喉分布特征曲线

Fig.2 Characteristic curves of pore throat distribution in Zhenbei area, Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地镇北地区孔隙结构特征参数

Table2 Characteristic parameters of pore structure in Zhenbei area, Ordos Basin

样品编号	分类	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 (%)	T _{2cutoff} (ms)
Z-2	I	0.338	0.273	2.09	91.77	35.46	3.85	37.97	62.03	6.69
Z-5	I	0.072	0.210	1.86	91.33	33.96	7.50	54.33	45.67	8.03
Z-6	I	0.335	0.391	2.19	91.34	38.35	5.82	48.75	51.25	3.04
平均值		0.248	0.291	2.05	91.48	35.92	5.72	47.02	52.98	5.92
Z-4	II	0.511	0.110	2.06	92.31	36.51	4.19	41.83	58.17	2.92
Z-7	II	0.508	0.054	2.10	90.25	45.79	4.73	46.80	53.20	2.58
Z-8	II	0.507	0.092	2.22	93.25	40.65	4.71	44.30	55.70	4.64
平均值		0.509	0.085	2.13	91.94	40.98	4.54	44.31	55.69	3.38
Z-21	III	1.195	0.050	2.25	87.70	33.63	1.16	23.70	76.30	1.60

2a),小孔隙发育且对应较高的进汞量,表明该类样品较小喉道与孔隙连通性较好,因此具有较高的退汞效率,平均退汞效率为40.98%。孔喉半径分布曲线以“双峰状”为主(图2b),左峰峰值主要为0.01~0.04 μm,右峰峰值为0.4~1 μm,峰值随着渗透率的增加而右移。平均排驱压力为0.509 MPa,平均中值孔喉半径和分选系数分别为0.085 μm和2.13,表明孔喉偏小,分选性较I类样品差,孔隙结构较为复杂。I类和II类样品具有相似的最大进汞饱和度,平均值分别为91.48%和91.94%,表明2类样品具有相似的可连通孔隙空间,差别在于II类样品具有较多的小孔隙和较少的与其相连通的大孔隙。

III类样品包括Z-21,毛管压力曲线特征和孔喉分布曲线与II类样品相似。但是该类样品排驱压力高,孔喉连通性和分选性差,储层孔隙结构最为复杂。由于发育较多细、微喉道,在进汞和退汞过程中,难以克服较大的毛管压力,导致最大进汞饱和度和退汞效率较低。高压压汞探测的孔喉半径分布相对较宽,主要为0.036~10 μm,大于10 μm的孔喉较少,与铸体薄片观察结果相悖,这主要是由于高压压汞的“孔隙屏蔽效应”^[4],将较大的孔隙空间叠加在喉道上而造成的。

3.3 可动流体特征

根据核磁共振实验可以得到各样品在100%饱和盐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(表2)。从各样品饱和盐水 T_2 谱分布(图3a)可以看出, T_2 值主要为0.3~1 000 ms,除了样品Z-5,其余样品均呈双峰状分布,具有一个较高的左峰和相对较低的右峰,表明小孔隙占据了较多的孔隙空间。这与高压压汞孔喉分布特征存在差异,主要是由于岩石润湿性而存在大量的薄膜束缚水^[26],且核磁共振可以反映整个样品

的孔隙空间,可探测更小的孔隙空间。

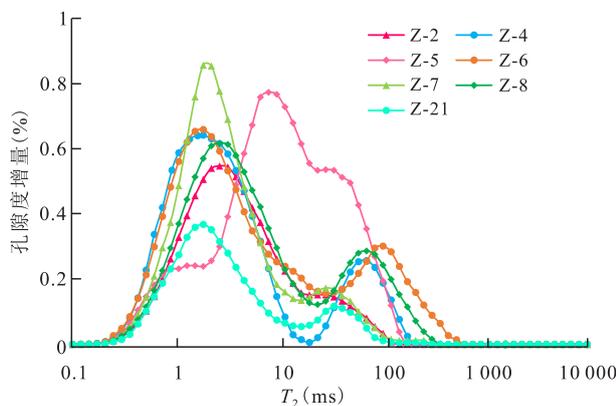
做束缚水 T_2 谱孔隙度累积曲线达到最大值时的水平线,与饱和盐水 T_2 谱孔隙度累积曲线的交点对应的 T_2 值称为 $T_{2cutoff}$, $T_{2cutoff}$ 值主要为1.60~8.03 ms,平均为4.21 ms,该值将孔隙流体分为可动流体和不可动流体^[5](图3b)。可动流体为饱和样品在离心力下可被排出的部分,I类、II类和III类样品的可动流体饱和度分别为47.02%,44.31%和23.7%,对应储集性能和渗流能力依次变弱,孔隙结构非均质性变强;不可动流体主要包括在离心力下不能克服较小喉道的毛管力而滞留在孔隙中的毛管束缚水和在较大孔隙表面或黏土矿物表面因电化学束缚而形成的薄膜束缚水2部分,I类、II类和III类样品的束缚水饱和度分别为52.98%,55.69%和76.3%,表明超低渗透储层具有复杂的孔隙结构和强非均质性。

3.4 分形特征

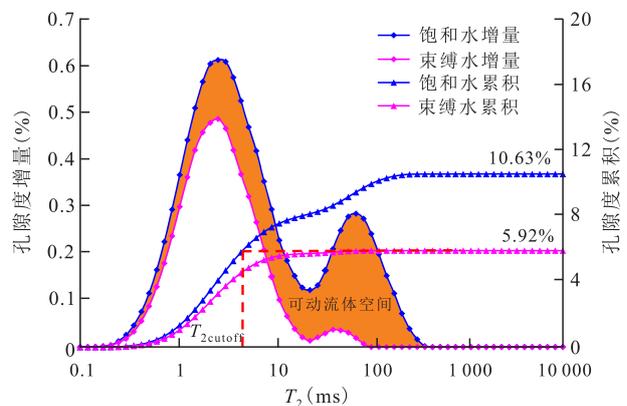
3.4.1 高压压汞测试

根据高压压汞毛管压力曲线,绘制各样品的 $\log(1-S_{Hg})$ 和 $\log r$ 的关系散点图。从典型样品Z-8的分形特征曲线(图4a)可以看出, $\log(1-S_{Hg})-\log r$ 的关系曲线不是一条直线,而是存在明显的2个转折点 T_1 和 T_2 ,这2个转折点与样品的孔隙大小分布曲线峰值之间存在较好的对应关系(图4b),可将样品孔隙空间分为大孔、中孔和微孔,对应的分形维数分别为 D_{P-1} , D_{P-2} 和 D_{P-3} (表3),表明超低渗透储层孔隙结构具有多重分形特征。分别统计大孔、中孔和微孔所占的孔隙度 ϕ_1 , ϕ_2 和 ϕ_3 ,以及相应孔隙空间的渗透率贡献值 K_1 , K_2 和 K_3 ,并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^[7]为:

$$D_p = \frac{D_{P-1}\phi_1 + D_{P-2}\phi_2 + D_{P-3}\phi_3}{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3} \quad (8)$$



a—饱和盐水 T_2 谱孔隙度增量分布曲线



b—样品Z-8的 T_2 谱孔隙度增量和累积分布曲线

图3 鄂尔多斯盆地镇北地区核磁共振 T_2 谱分布特征

Fig.3 NMR T_2 distribution characteristics of samples in Zhenbei area, Ordos Basin

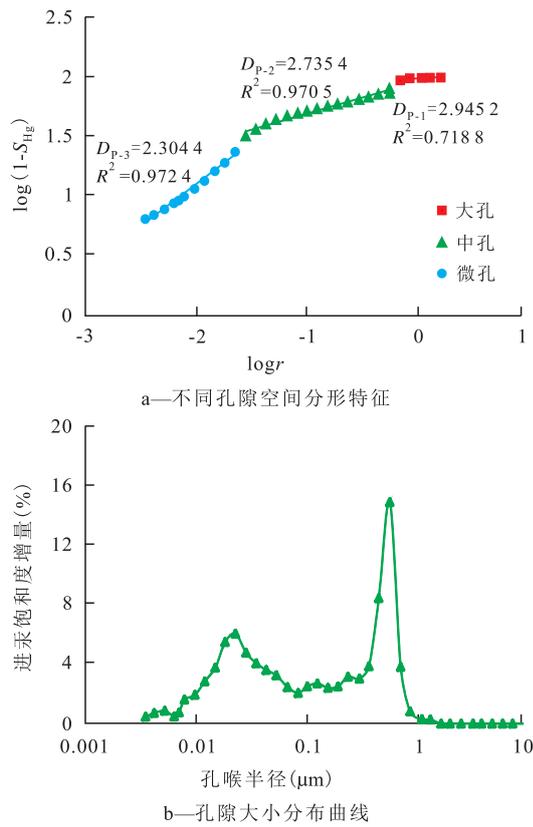


图4 鄂尔多斯盆地镇北地区样品Z-8分形特征曲线
Fig.4 Fractal characteristic curves of Sample Z-8 in Zhenbei area, Ordos Basin

表3 鄂尔多斯盆地镇北地区高压压汞得到的分形维数及其相应的孔隙度和渗透率
Table3 Fractal dimensions obtained by high pressure mercury injection and their corresponding porosity and permeability in Zhenbei area, Ordos Basin

样品编号	大 孔				中 孔				微 孔				D_p
	D_{p-1}	R^2	$\phi_1(\%)$	$K_1(\text{mD})$	D_{p-2}	R^2	$\phi_2(\%)$	$K_2(\text{mD})$	D_{p-3}	R^2	$\phi_3(\%)$	$K_3(\text{mD})$	
Z-2	2.745 3	0.826 6	2.69	0.411 203	2.727 0	0.991 8	5.00	0.091 647	2.486 5	0.975 3	2.45	0.000 151	2.673 7
Z-4	2.914 1	0.817 2	1.87	0.185 320	2.769 4	0.968 2	6.33	0.203 603	2.147 0	0.975 5	1.82	0.000 078	2.683 5
Z-5	2.815 5	0.870 6	2.05	0.694 130	2.606 0	0.986 6	10.07	0.206 780	2.214 5	0.988 4	1.68	0.000 090	2.589 5
Z-6	2.833 7	0.732 5	0.76	0.480 675	2.745 0	0.959 1	8.49	0.244 180	2.432 6	0.988 0	2.68	0.000 145	2.680 6
Z-7	2.930 3	0.824 9	1.51	0.381 234	2.803 3	0.988 6	5.47	0.198 244	2.363 9	0.877 4	3.12	0.000 522	2.687 1
Z-8	2.945 2	0.718 8	0.59	0.372 973	2.735 4	0.970 5	7.21	0.132 774	2.304 4	0.972 4	2.83	0.000 253	2.632 5
Z-21	2.950 3	0.777 7	0.72	0.070 039	2.780 3	0.976 4	3.03	0.013 936	2.415 5	0.954 0	1.14	0.000 025	2.720 3
平均值	2.876 3	0.795 5	1.46	0.370 796	2.738 1	0.977 31	6.51	0.155 881	2.337 8	0.961 6	2.25	0.000 181	2.666 7

物质的转移,且探测孔隙空间的盐水相较于汞来说为润湿相。由于 $T_{2\text{cutoff}}$ 值将孔隙流体分为渗流孔对应的可动水和吸附孔对应的束缚水^[7,28],可将其作为转折点,因此各样品的 $\log V(c)$ 和 $\log T_2$ 散点关系曲线可被划分为2段(图5a),即 $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ 段和 $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ 段,对应的分形维数称为 D_{N-1} 和 D_{N-2} 。各样品的核磁共振分形维数如表4所示, $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ 段的分形维数为 $-1.286 7 \sim 0.921 6$,该段分形维数不在 $2 \sim 3$,表明 $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ 段孔隙空间不具有分形特征。 $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ 段的分形维数为 $2.761 0 \sim 2.928 3$,平均值为 $2.877 0$, R^2 值

从表3可以看出,各段分形维数为 $2 \sim 3$,且具有较高的相关系数, R^2 值均大于 0.7 。大孔的分形维数最高,为 $2.745 3 \sim 2.950 3$,平均值为 $2.876 3$,大孔所占的孔隙空间最小,平均为 1.46% ,但是大孔的渗透率贡献值最大,平均为 $0.370 796 \text{ mD}$,表明岩心渗透率主要由占比较小的大喉道控制。中孔的分形维数为 $2.606 0 \sim 2.803 3$,平均值为 $2.738 1$,中孔所占的孔隙空间最大,平均值为 6.51% ,表明岩心孔隙空间主要由较大喉道及其相互连通的大孔隙控制。微孔的分形维数最低,为 $2.147 0 \sim 2.486 5$,平均值为 $2.337 8$,渗透率贡献值最小。大孔的分形维数比中孔和微孔的分形维数大,表明较大孔隙具有较强的非均质性且孔隙大小不规则,分布较为离散,微孔具有相对均匀和规则的孔隙分布。各样品的总分形维数为 $2.589 5 \sim 2.720 3$,平均值为 $2.666 7$,其中 I 类、II 类和 III 类样品的平均总分形维数分别为 $2.647 9$, $2.667 7$ 和 $2.720 3$,表明 III 类样品相较于 I 类和 II 类样品孔隙结构更为复杂。

3.4.2 核磁共振测试

核磁共振分形维数反映的是整个孔隙空间的复杂程度,其分形维数的计算方法和结果与高压压汞不同,这主要是因为核磁共振在测试过程中没有

平均为 $0.892 8$,表明可动流体赋存的孔隙空间具有分形特征,且具有较强的非均质性和复杂程度。然而 $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ 段仍存在少量的束缚水,影响该段孔隙空间的分形特征。可动流体赋存的真正孔隙空间为图3b中的橙色部分,该部分孔隙空间为饱和流体与束缚流体 T_2 谱曲线的差值,这部分孔隙可以被认为相互连通的有效孔隙^[23],根据(7)式可以得到有效孔隙的分形维数 D_{N-e} (图5b,表4)。 D_{N-e} 为 $2.223 2 \sim 2.729 3$,平均值为 $2.482 0$, R^2 值平均为 $0.860 3$ 。

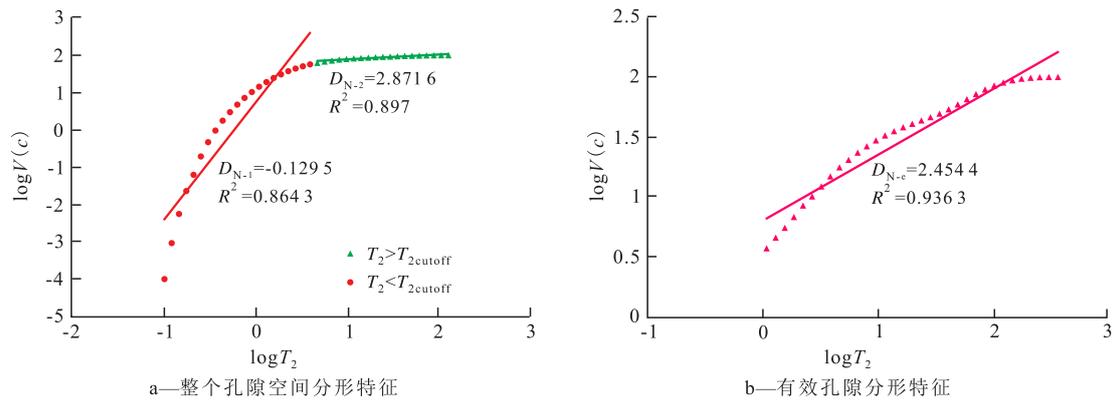


图5 鄂尔多斯盆地镇北地区样品Z-8的核磁共振分形特征曲线

Fig.5 Pore fractal characteristic curves of NMR Sample Z-8 in Zhenbei area, Ordos Basin

表4 鄂尔多斯盆地镇北地区核磁共振的分形维数统计
Table4 Statistics of fractal dimension of NMR in Zhenbei area, Ordos Basin

样品 编号	$T_2 < T_{2cutoff}$ 段		$T_2 > T_{2cutoff}$ 段		有效孔隙段	
	D_{N-1}	R^2	D_{N-2}	R^2	D_{N-e}	R^2
Z-2	0.310 2	0.835 5	2.902 2	0.943 9	2.397 1	0.924 2
Z-4	-0.220 8	0.882 4	2.901 1	0.898 7	2.540 3	0.862 2
Z-5	0.921 6	0.860 0	2.761 0	0.933 5	2.223 2	0.974 3
Z-6	-0.011 2	0.867 7	2.878 7	0.968 4	2.344 0	0.763 8
Z-7	-0.682 1	0.900 6	2.896 4	0.804 2	2.685 5	0.738 5
Z-8	-0.129 5	0.864 3	2.871 6	0.897 0	2.454 4	0.936 3
Z-21	-1.286 7	0.913 7	2.928 3	0.804 0	2.729 3	0.823 1
平均值	-0.156 9	0.874 9	2.877 0	0.892 8	2.482 0	0.860 3

4 讨论

4.1 分形维数与孔隙度和渗透率之间的关系

高压压汞孔隙结构的总分形维数 D_p 与孔隙度

和渗透率之间存在较好的负相关性(图6),分形维数越大,储层孔隙结构越复杂,储层的孔隙度和渗透率越低。 D_{p-1} , D_{p-2} 和 D_{p-3} 与相应孔的孔隙度和渗透率之间存在明显的分异特征,孔隙空间占比较小的大孔具有较高的渗透率且存在 $D_{p-1} > D_{p-2} > D_{p-3}$ 的关

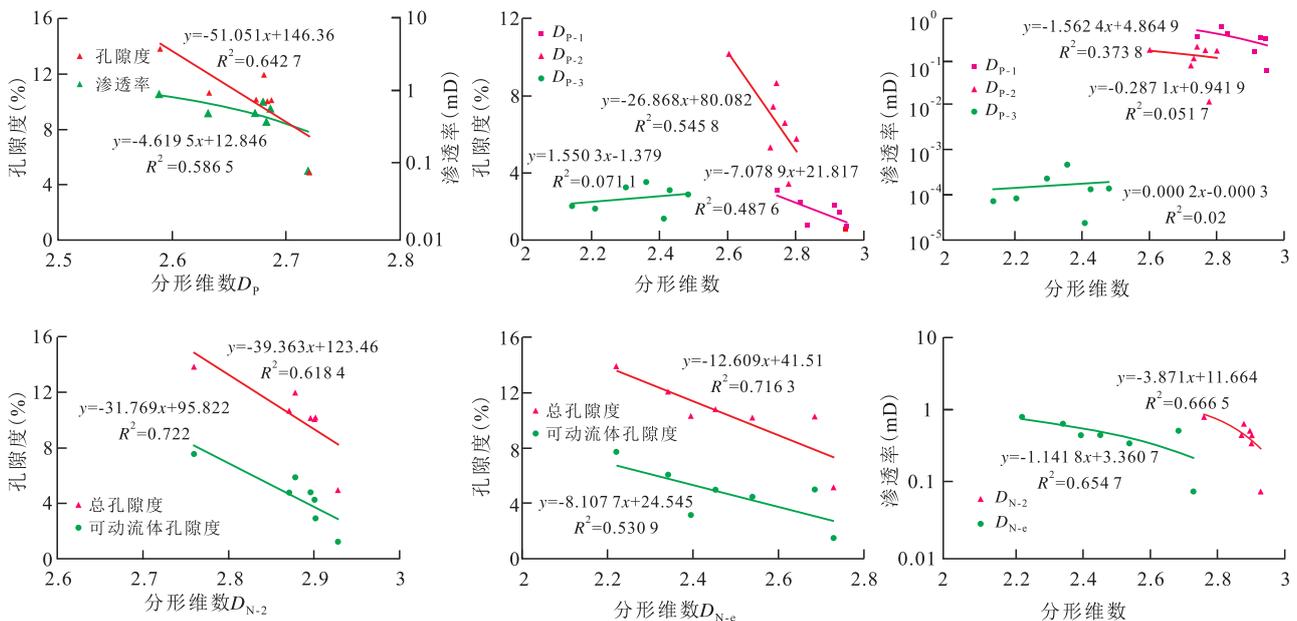


图6 鄂尔多斯盆地镇北地区分形维数与孔隙度和渗透率之间的关系

Fig.6 Relationships between fractal dimension and porosity and permeability in Zhenbei area, Ordos Basin

系。 D_{p-1} 和 D_{p-2} 与孔隙度存在较好的负相关性,而 D_{p-3} 与孔隙度之间不存在相关关系,这也说明了储层的孔隙空间主要是由大孔和中孔贡献,对储层孔隙结构的复杂程度有较大的影响。渗透率仅与 D_{p-1} 存在较弱的负相关性,与 D_{p-2} 和 D_{p-3} 无相关关系,表明大喉道及其相连通的孔隙是渗透率的主要贡献者。

D_{N-2} 和 D_{N-e} 与孔隙度和渗透率之间均具有较好的负相关性, D_{N-e} 与总孔隙度的相关关系较 D_{N-2} 好,而 D_{N-2} 与可动流体孔隙度和渗透率之间的相关关系较 D_{N-e} 好,表明相互连通的较大孔隙是控制储层物性的关键。以上分析表明,无论是整个孔隙结构的分形特征还是不同孔隙大小分布下的分形特征,其分形维数越大,储层的孔隙空间越复杂,对储层渗流能力和储集空间的影响越大。

4.2 分形维数与孔隙结构参数之间的关系

分形维数可以定量表征孔隙结构的复杂性与非均质性,为探讨分形特征与孔隙结构参数之间的关系,绘制了各分形维数与中值孔喉半径、分选系数、最大进汞饱和度、退汞效率以及束缚水饱和度之间的散点关系图(图7)。中值孔喉半径与 D_{p-1} 和 D_{p-2} 之间存在较好的负相关性,与 D_{p-3} 和 D_p 之间相关性较差,表明中值孔喉半径越大,分形维数越小,这主要是由于储层孔喉分布越集中,孔隙表面越规则,对孔隙结构非均质性影响越小^[20,29]。分选系数与 D_{p-2} 和 D_p 之间有较好的正相关性,表明储层分形维数越大,储层孔隙结构越复杂,分选程度越差。最大进汞饱和度仅与 D_p 之间有较好的负相关性,表明储层储集空间随分形维数增大而减小。退汞效率和束缚水饱和度均反映了储层的连通性,退汞效率仅与 D_p 之间存在负相关性,束缚水饱和度与 D_{N-e} 和 D_{N-2} 之间均存在较好的正相关性,表明分形维数越大,储层孔隙结构越复杂,连通性越差,退汞效率越低,束缚水饱和度越大。

4.3 分形维数与矿物成分之间的关系

D_{p-1} 和 D_p 与石英含量之间有一定的正相关性(图8),表明 D_{p-1} 和 D_p 随着石英含量增大而增大,这主要是因为储层中石英含量与粒间孔的形成有关,石英含量越高,储层粒间孔越发育,较大孔隙空间的复杂程度越大。 D_{p-3} , D_p 和 D_{N-2} 与长石含量有较好的正相关关系,表明 D_{p-3} , D_p 和 D_{N-2} 与长石溶孔的复杂程度有关,储层长石含量越高,越有利于溶蚀孔的发育和黏土矿物的形成,储层孔隙结构的复杂程度越高。黏土矿物中仅绿泥石相对含量与分形维数 D_{N-2} , D_{N-e} 和 D_{p-1} 之间存在较好的相关性,这主要

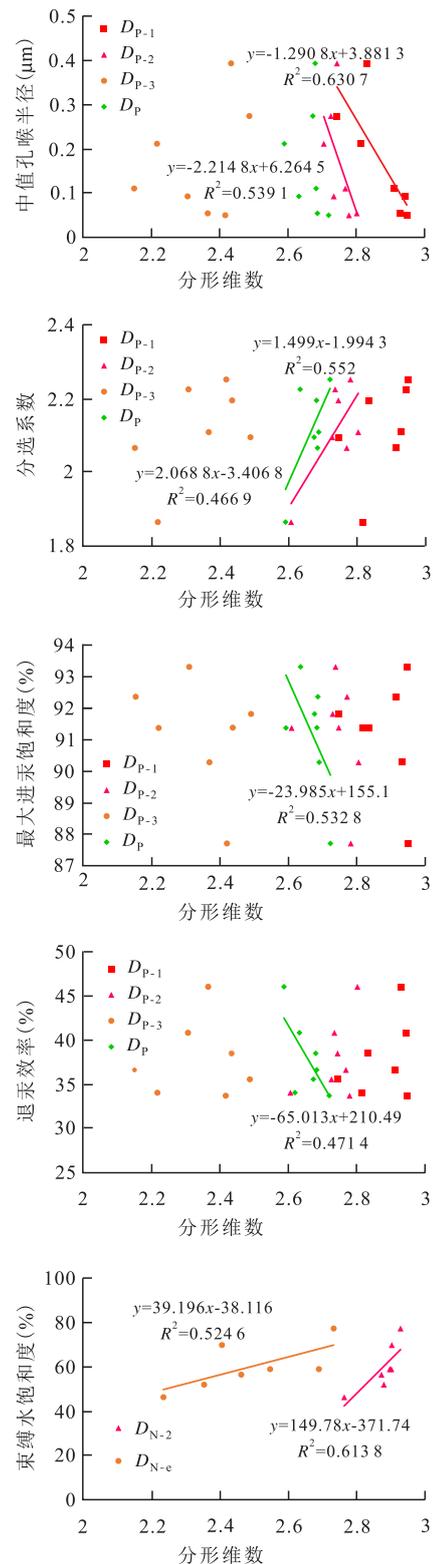


图7 鄂尔多斯盆地镇北地区分形维数与孔隙结构参数之间的关系

Fig.7 Relationship between fractal dimension and pore structure parameters in Zhenbei area, Ordos Basin

是因为在较大孔隙和相互连通的孔隙中黏土矿物含量越高,其表面粗糙程度和非均质性越强,导致孔隙大小分布越不规则,孔隙结构越复杂。因此,

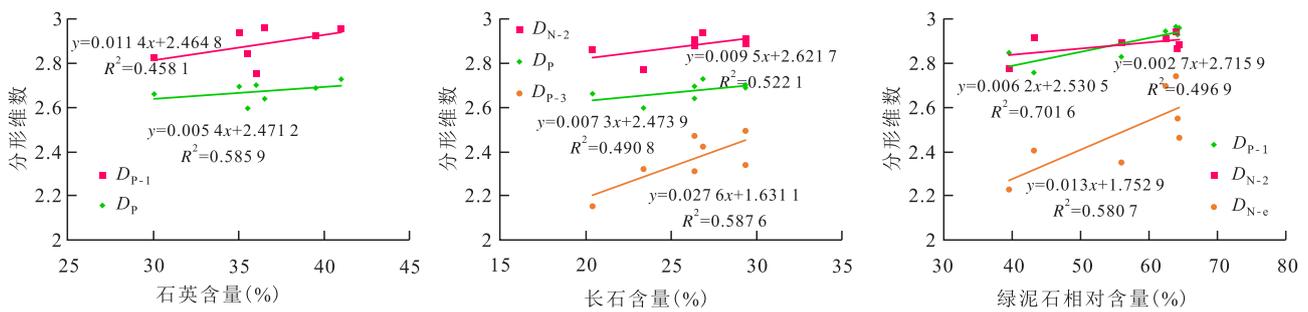


图8 鄂尔多斯盆地镇北地区分形维数与矿物成分之间的关系

Fig.8 Relationship between fractal dimension and mineral composition in Zhenbei area, Ordos Basin

矿物成分的类型及其相对含量对孔隙结构的分形特征有重要的影响。

4.4 各分形维数之间的关系

不同的实验方法其原理及分形维数计算方法不同,表征的孔隙大小分布范围和分形维数也存在差异。高压压汞反映的是储层相互连通的孔喉分布空间,表征的孔喉分布范围为0.036~10 μm,其分形维数分布范围为2.589 5~2.720 3;而核磁共振探测的是整个孔隙空间,DN-e和DN-2反映的是储层有效

孔隙和可动流体空间的复杂程度,相应的分形维数分布范围分别为2.223 2~2.729 3和2.761~2.928 3。表明不同尺度的孔隙空间其分形维数不同,表征的孔隙空间尺度越大,分形维数的分布范围越广。DN-e, DN-2和Dp之间具有较好的正相关性(图9),DN-2与Dp之间的相关性较好,R²值为0.857 3,这主要是由于DN-e, DN-2和Dp均反映储层相互连通孔隙的复杂程度。

分形维数的大小与储层孔隙结构非均质性一

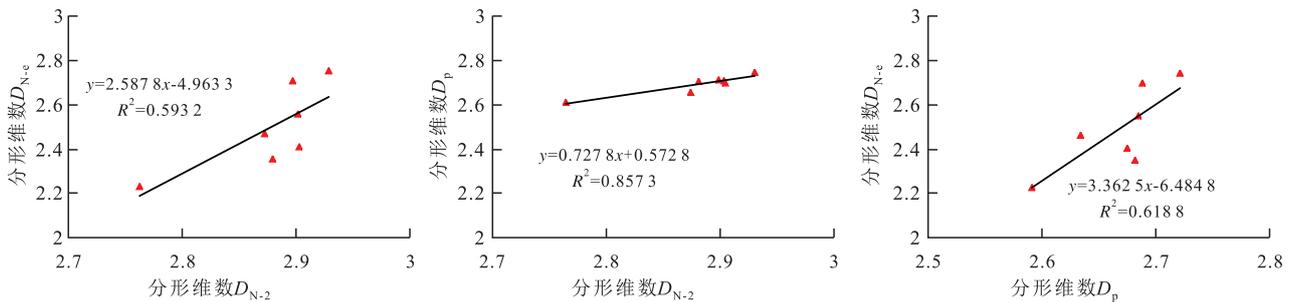


图9 鄂尔多斯盆地镇北地区各分形维数之间的相关关系

Fig.9 Correlations of fractal dimensions in Zhenbei area, Ordos Basin

致,即分形维数越大,储层孔隙结构越复杂,非均质性越强。储层的矿物组成及其含量是决定分形维数大小的内在因素,进而影响了储层微观孔隙结构的分形特征,最终影响了储层的质量和宏观表现。然而,储层的沉积环境和成岩作用决定了矿物成分的类型及其相对含量^[1,30]。因此,在今后的工作中,应开展不同沉积环境和成岩作用下的储层孔喉分形特征研究,探讨沉积环境和成岩作用对孔隙结构及其分形特征的影响,进一步应用储层的孔喉分形特征来预测有利的超低渗透油气甜点区。

5 结论

镇北地区超低渗透储层孔隙类型主要为残余粒间孔、溶蚀孔和晶间孔。储层矿物成分以石英和长石为主,平均含量分别为36.2%和26.1%,发育少

量自生石英和变形的云母。储层黏土矿物以绿泥石为主,平均相对含量为56.03%。

根据毛管压力曲线形态和排驱压力可将储层孔隙结构分为3类:Ⅰ类样品孔喉分布呈单峰状,孔喉分布较为集中,且分选性和孔喉连通性较好;Ⅱ类样品孔隙大小分布呈双峰状,较小孔隙发育,孔隙结构较为复杂;Ⅲ类样品孔隙结构非均质性最强,对应孔喉分形维数最大。

高压压汞和核磁共振所得的孔隙结构及其分形特征不同。高压压汞所得的孔隙结构具有多重分形特征,存在明显转折点,将样品孔隙空间分为大孔、中孔和微孔,对应的分形维数具有 $D_{p-1} > D_{p-2} > D_{p-3}$ 的关系;根据各孔隙空间的孔隙度加权平均得到整个孔隙结构的总分形维数 D_p 为2.589 5~2.720 3,平均值为2.666 7。核磁共振所得的可动流体孔隙空间和有效孔隙均具有分形特征,相应分形

维数 D_{N-2} 和 D_{N-e} 均反映相互连通孔隙的复杂程度,且与 D_p 之间存在较好的相关性。

D_p, D_{p-1}, D_{N-2} 和 D_{N-e} 与孔隙度和渗透率之间具有明显的负相关性;微孔发育相对于大孔和中孔较为均匀,因而 D_{p-3} 与储层孔隙度和渗透率及孔隙结构参数之间没有明显的相关性;石英含量与粒间孔的形成有关,对 D_p 和 D_{p-1} 有较大的影响; D_{p-3}, D_p 和 D_{N-2} 与长石溶孔的复杂程度有关;黏土矿物中仅绿泥石含量与 D_{N-2}, D_{N-e} 和 D_{p-1} 之间存在较好的正相关性。储层的矿物组成及其含量是决定分形维数大小的内在因素,进而影响储层质量和孔隙结构特征。

符号解释

$N(r)$ ——半径为 r 的孔隙数量; r ——孔隙半径, μm ;
 a ——分形系数; D ——分形维数; $V(c)$ ——对于高压压汞而言,表示孔隙半径小于 r 的累积体积百分数,%;对于核磁共振而言,表示弛豫时间小于 T_2 的累积体积百分数,%;
 S_{Hg} ——累积进汞饱和度,%; T_2 ——横向弛豫时间, ms;
 ρ ——表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; S ——孔隙空间表面积, μm^2 ;
 V ——孔隙空间体积, μm^3 ; c ——孔隙形状因子,对圆柱体孔隙, $c=2$; D_p ——总分形维数; $D_{p-1}, D_{p-2}, D_{p-3}$ ——大孔、中孔和微孔对应的分形维数; $D_{N-1}, D_{N-2}, D_{N-e}$ —— $T_2 < T_{2\text{cutoff}}$ 段束缚流体、 $T_2 > T_{2\text{cutoff}}$ 段可动流体和有效孔隙的分形维数; ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ——大孔、中孔和微孔所占的孔隙度,%; K_1, K_2, K_3 ——大孔、中孔和微孔的渗透率贡献值, mD。

参考文献

[1] 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[J].油气地质与采收率,2019,26(5):21-30.
WANG He, SHI Yongmin, XU Dawei, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 21-30.

[2] 杨华,梁晓伟,牛小兵,等.陆相致密油形成地质条件及富集主控因素——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(1):12-20.
YANG Hua, LIANG Xiaowei, NIU Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: A case of Chang7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 12-20.

[3] WU Yuqi, TAHMASEBI Pejman, LIN Chengyan, et al. A comprehensive study on geometric, topological and fractal characterizations of pore systems in low-permeability reservoirs based on SEM, MICP, NMR, and X-ray CT experiments [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 103: 12-28.

[4] 田伟,刘慧卿,何顺利,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层岩石微观孔隙结构表征[J].油气地质与采收率,2019,26(4):24-32.
TIAN Wei, LIU Huiqing, HE Shunli, et al. Characterization of mi-

croscopic pore structure of tight oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimusaer Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(4): 24-32.

[5] LAI Jin, WANG Guiwen, WANG Ziyuan, et al. A review on pore structure characterization in tight sandstones [J]. Earth Science Reviews, 2018, 177: 436-457.

[6] 吴浩,刘锐娥,纪友亮,等.致密气储层孔喉分形特征及其与渗流的关系——以鄂尔多斯盆地地下石盒子组盒8段为例[J].沉积学报,2017,35(1):151-162.
WU Hao, LIU Rui'e, JI Youlian, et al. Fractal characteristics of pore-throat of tight gas reservoirs and its relation with percolation: A case from He8 Member of the Permian Xiashihezi Formation in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(1): 151-162.

[7] LI Peng, ZHENG Min, BI He, et al. Pore throat structure and fractal characteristics of tight oil sandstone: A case study in the Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 665-674.

[8] MANDELBROT Benoit B. On the geometry of homogeneous turbulence with stress on the fractal dimension of the iso-surfaces of scalars [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 72(3): 401-416.

[9] MANDELBROT Benoit B, PASSOJA Dann E, PAULLAY Alvin J, et al. Fractal character of fracture surfaces of metals [J]. Nature, 1984, 308: 721-722.

[10] HANSEN J P, SKJELTORP A T. Fractal pore space and rock permeability implications [J]. Physical Review B, 1988, 38(4): 2635-2638.

[11] HEISTER Katja. The measurement of the specific surface area of soils by gas and polar liquid adsorption methods—limitations and potentials [J]. Geoderma, 2014, 216: 75-87.

[12] 闫建平,何旭,耿斌,等.基于分形理论的低渗透砂岩储层孔隙结构评价方法[J].测井技术,2017,41(3):345-352,377.
YAN Jianping, HE Xu, GENG Bin, et al. Models based on fractal theory to assess pore structure of low permeability sand reservoirs [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(3): 345-352, 377.

[13] 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):1611-1618,1708.
HUANG Jinliang, DONG Dazhong, LI Jianzhong, 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, 1708.

[14] BROOKS Royal. Hydraulic properties of porous media [D]. Colorado: Colorado State University, 1964.

[15] LI Kewen. Analytical derivation of Brooks-Corey type capillary pressure models using fractal geometry and evaluation of rock heterogeneity [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 73: 20-26.

[16] 曾联波,高春宇,漆家福,等.鄂尔多斯盆地陇东地区特低渗透砂岩储层裂缝分布规律及其渗流作用[J].中国科学: D辑 地球科学,2008,38(增刊1):41-47.
ZENG Lianbo, GAO Chunyu, QI Jiafu, et al. Fracture distribution and seepage of ultra-low permeability sandstone reservoirs in

- Longdong area, Ordos Basin[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2008, 38(Supplement1): 41-47.
- [17] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-180.
- ZENG Lianbo, LI Zhongxing, SHI Cheng'en, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-180.
- [18] 李明. 鄂尔多斯盆地镇北油田M区长 8_1 储层特征及油藏富集规律研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- LI Ming. Study on reservoir characteristics and accumulation rules of Chang 8_1 in M area of Zhenbei oilfield, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [19] 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, 20(2): 67-70.
- HE Wei, ZHONG Fuxun, HE Chengzu, et al. Fractal texture research on the pores in reservoir rocks and its application[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(2): 67-70.
- [20] 沈金松, 张宸恺. 应用分形理论研究鄂尔多斯ZJ油田长6段储层孔隙结构的非均质性[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(6): 19-23, 28.
- SHEN Jinsong, ZHANG Chenkai. Study on the heterogeneity of the pore structure of Chang6 reservoir in ZJ oilfield, Ordos Basin using fractal theory[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(6): 19-23, 28.
- [21] 纪发华, 张一伟. 分形几何学在储层非均质性描述中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(5): 161-168.
- JI Fahua, ZHANG Yiwei. Application of fractal geometry in description of heterogeneity[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1994, 18(5): 161-168.
- [22] 刘丽丽, 赵中平, 李亮, 等. 变尺度分形技术在裂缝预测和储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 31-37.
- LIU Lili, ZHAO Zhongping, LI Liang, et al. Application of the variable scale fractal technique in fracture prediction and reservoir evaluation[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 31-37.
- [23] ZHANG Zeyu, WELLER Andreas. Fractal dimension of pore-space geometry of an Eocene sandstone formation[J]. Geophysics, 2014, 79(6): D377-D387.
- [24] 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, 21(4): 372-375, 301.
- HE Yan, WU Niansheng. A new method for determining fractal dimension of pore structure[J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(4): 372-375, 301.
- [25] 冯小哲, 祝海华. 鄂尔多斯盆地苏里格地区下石盒子组致密砂岩储层微观孔隙结构及分形特征[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 147-156.
- FENG Xiaozhe, ZHU Haihua. Micro-pore structure and fractal characteristics of the Xiashihezi Formation tight sandstone reservoirs in Sulige area, Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 147-156.
- [26] 张超谟, 陈振标, 张占松, 等. 基于核磁共振 T_2 谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 80-86.
- ZHANG Chaomo, CHEN Zhenbiao, ZHANG Zhansong, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T_2 distribution[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80-86.
- [27] 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 Chuanxiang, JIANG Zhenxue, GAO Zhiye, et al. Quantitative evaluation of pore connectivity with nuclear magnetic resonance and high pressure mercury injection: A case study of the lower section of Es_3 in Zhanhua sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 578-585.
- [28] 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 Dianshi, LU Shuangfang, LU Zhengyuan, 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.
- [29] 梁利喜, 熊健, 刘向君. 川南地区龙马溪组页岩孔隙结构的分形特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2015, 42(6): 700-708.
- LIANG Lixi, XIONG Jian, LIU Xiangjun. Fractal characteristics of pore structure of longmaxi formation shale in south of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2015, 42(6): 700-708.
- [30] 李文厚, 刘溪, 张倩, 等. 鄂尔多斯盆地中晚三叠世延长期沉积演化[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2019, 49(4): 605-621.
- LI Wenhou, LIU Xi, ZHANG Qian, et al. Deposition evolution of Middle-Late Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2019, 49(4): 605-621.

编辑 经雅丽