

引用格式:吴小斌,杜支文,强小龙,等.鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩二元孔隙结构及分形特征[J].油气地质与采收率,2024,31(6):45-56.

WU Xiaobin, DU Zhiwen, QIANG Xiaolong, et al. Binary pore structure and fractal characteristics of tight sandstone: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 45-56.

## 鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩 二元孔隙结构及分形特征

吴小斌<sup>1</sup>, 杜支文<sup>2</sup>, 强小龙<sup>2</sup>, 雷甜<sup>2</sup>, 蒋婷婷<sup>2</sup>, 王伟<sup>3</sup>, 朱玉双<sup>4</sup>

(1. 延安大学石油工程与环境工程学院, 陕西延安 716099; 2. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂, 陕西榆林 719000;  
3. 榆林学院化学与化工学院, 陕西榆林 719000; 4. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069)

**摘要:**致密砂岩的孔隙结构特征对致密油藏的勘探和开发具有重要意义。但对不同类型孔隙渗流特征及其影响因素认识不清,制约了对致密砂岩渗流能力和储集能力的认识,并影响了致密油藏有利区的评价和预测。为此,以鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩为例,利用铸体薄片、扫描电镜、核磁共振、分形理论研究了致密砂岩的孔隙结构特征。结果表明:致密砂岩孔隙结构是一个由束缚孔隙和可动孔隙组成的二元孔隙系统,不同类型孔隙的形态特征和连通性不同。束缚孔隙主要由晶间孔组成,孔隙模型为黏土矿物堆积的包络面,孔隙半径小,连通性差,赋存在其中的流体流通性差。该孔隙形状规则,非均质性弱,分形维数低,平均值为1.3063。可动孔隙主要是联合孔隙,形状为刺球状,孔隙半径大,由溶蚀作用形成多个连接通道,因此连通性强。可动孔隙形状不规则,非均质性强,分形维数大,平均值为3.2416。不同类型孔隙对物性的影响也不相同。束缚孔隙对孔隙度贡献平均值为47.7%,可动孔隙对孔隙度贡献平均值为52.3%,两类型孔隙对孔隙度影响相近。但受连通性差异影响,束缚孔隙对渗透率贡献度平均值为0.2%,可动孔隙对渗透率贡献度平均值为99.8%。可动孔隙是影响致密砂岩渗透率的主要因素。利用分形维数可以很好地表征致密砂岩孔隙结构。以组合孔隙为主且位于烃源岩附近的致密砂岩是勘探开发的有利区域。

**关键词:**核磁共振;分形维数;致密砂岩;孔隙结构;鄂尔多斯盆地

文章编号:1009-9603(2024)06-0045-12

DOI:10.13673/j.pgre.202309024

中图分类号:TE122

文献标识码:A

## Binary pore structure and fractal characteristics of tight sandstone: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin

WU Xiaobin<sup>1</sup>, DU Zhiwen<sup>2</sup>, QIANG Xiaolong<sup>2</sup>, LEI Tian<sup>2</sup>, JIANG Tingting<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, ZHU Yushuang<sup>4</sup>

(1. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an City, Shaanxi Province, 716099, China; 2. No.2 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Yulin City, Shaanxi Province, 719000, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Yulin University, Yulin City, Shaanxi Province, 719000, China; 4. Department of Geology, Northwest University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710069, China)

收稿日期:2023-09-17。

作者简介:吴小斌(1976—),男,陕西汉中,副教授,博士,从事油气田开发地质的教学与科研工作。E-mail:wxblcq@163.com。

通信作者:王伟(1988—),男,陕西商南人,讲师,博士。E-mail:283465227@qq.com。

基金项目:国家地区科学基金项目“深水相致密砂岩CO<sub>2</sub>溶蚀机理及其强化封存机制”(42062011)和“异常低压盆地压力场演化对页岩气富集的影响机理研究”(42362023),陕西省教育厅一般项目“榆林地区CCUS地质封存中致密砂岩CO<sub>2</sub>-水-岩反应机理及其对物性影响评价”(22JK0630),陕西省科技厅青年项目“鄂尔多斯盆地低渗透油藏封存CO<sub>2</sub>的储层微观孔隙特征及主控因素研究”(2023-JC-QN-0347)。

**Abstract:** The pore structure characteristics of tight sandstone are of significance for the exploration and development of tight oil reservoirs. However, little attention is paid to the flow characteristics and influencing factors of different types of pores. This restricts the understanding of the flow and storage capacity of tight sandstone and affects the evaluation and prediction of favorable areas for tight oil reservoirs. Therefore, this paper focuses on the tight sandstone in the Chang 7 member of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, and casting thin sections, scanning electron microscopy, nuclear magnetic resonance, and the fractal method are adopted to research the pore structure characteristics of tight sandstone. The results indicate that the pore structure of tight sandstone is a binary pore system composed of bound pores and movable pores. The morphological characteristics and connectivity of different types of pores vary greatly. Bound pores are mainly composed of intergranular pores, and the pore model is the envelope surface of clay accumulation. The pore radius is small, the connectivity is poor, and the fluid flow is poor. The pore features a regular shape, weak heterogeneity, low fractal dimension, and an average value of 1.306 3. The movable pores are mainly combined pores with a spiky-spherical shape. This type of pore has a large radius and multiple connecting channels formed by dissolution, resulting in strong connectivity. The shape of movable pores is irregular, with strong heterogeneity, a large fractal dimension, and an average value of 3.241 6. The influence of different types of pores on physical properties is also different. The average contribution of bound pores to porosity is 47.7%, and that of movable pores to porosity is 52.3%. The two types of pores have similar content but are affected by differences in connectivity. The average contribution of bound pores to permeability is 0.2%, while that of movable pores to permeability is 99.8%. Movable pores are the main factor affecting the permeability of tight sandstone. The fractal dimension can characterize the pore structure of tight sandstone. Sandstone is mainly composed of composite pores and located near the source rocks is a favorable area for exploration and development of tight sandstone.

**Key words:** nuclear magnetic resonance; fractal dimension; tight sandstone; pore structure; Ordos Basin

近年来,随着水力压裂技术的提升,致密砂岩油藏成为了全球油气勘探开发的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。微观孔隙结构是致密砂岩和常规砂岩的主要区别,不仅影响油气的充注和分布,还影响水力压裂的效果和最终采收率<sup>[3-4]</sup>。精确描述和表征孔隙系统对分析致密砂岩油气藏至关重要。

前人对致密砂岩孔隙结构已进行了大量研究,获得了孔隙半径、孔径分布和分选系数等孔喉参数<sup>[5]</sup>。然而,孔隙对流体渗流和孔隙连通性的影响仍不确定。一些研究人员研究得出了不同的结论,认为砂岩大孔隙的分形维数对孔隙结构有明显的影响<sup>[6-7]</sup>。造成这些差异的主要原因是这些研究在分析储层空间分形特征时简化了样品的孔隙模型,忽略了不同类型孔隙结构的几何多样性。因此,分析致密砂岩孔隙流动特征及其影响因素不仅有助于评价致密储层的储集性和连通性,而且可以有效地指导致密砂岩储层有利区的预测。

前人利用高压压汞、恒速压汞、扫描电镜、铸体薄片、核磁共振等技术研究了致密砂岩孔隙结构特征<sup>[8-9]</sup>。其中,核磁共振已成为一种研究多孔介质物理性质和孔隙结构的重要技术。核磁共振可以无损的量化全岩的孔隙分布,提供有关孔隙流动的相关信息<sup>[10]</sup>。核磁共振计算的 $T_2$ 值与孔隙体积和表面积有关,不同形状的孔隙具有不同的孔隙体积及不同的孔隙体积与表面积比值。 $T_2$ 分布可用于研究孔隙结构,并可以结合离心力区分可动孔隙和束缚

孔隙<sup>[11]</sup>。

致密砂岩孔隙结构复杂、非均质性强,使得传统的几何方法很难有效表征其孔隙结构<sup>[12]</sup>。近年来,分形理论被广泛运用于表征多孔介质中复杂的孔隙结构<sup>[13-14]</sup>。分形维数是分形特征的定量表征,在孔隙微观形态特征和宏观物理形状之间建立了桥梁。许多学者已经成功地将分形方法应用于砂岩孔隙结构研究<sup>[15-16]</sup>。孔隙非均质性越强,分形维数越大;孔隙越规则,分形维数越小。分形维数是表征孔隙结构的重要标志<sup>[17]</sup>。

以鄂尔多斯盆地西南部长7段致密砂岩为研究对象,通过铸体薄片、扫描电镜、核磁共振和分形理论,研究了致密砂岩孔隙结构及其分形维数,分析了孔隙形状特征及其非均质性,并量化不同类型的储集空间对物性的贡献,从而为致密砂岩油气藏勘探开发提供理论依据。

## 1 样品选取和实验原理

### 1.1 样品选取

样品取自鄂尔多斯盆地西南部长7段致密砂岩(图1a)。研究区长7段沉积时期发育半深湖-深湖相沉积,生成的油页岩是鄂尔多斯盆地致密油藏的重要烃源岩<sup>[18]</sup>。储层主要由细粒砂岩和泥质砂岩组成(图1b)。长7段油页岩生成的原油运移到临近的致密砂岩中形成致密油藏。

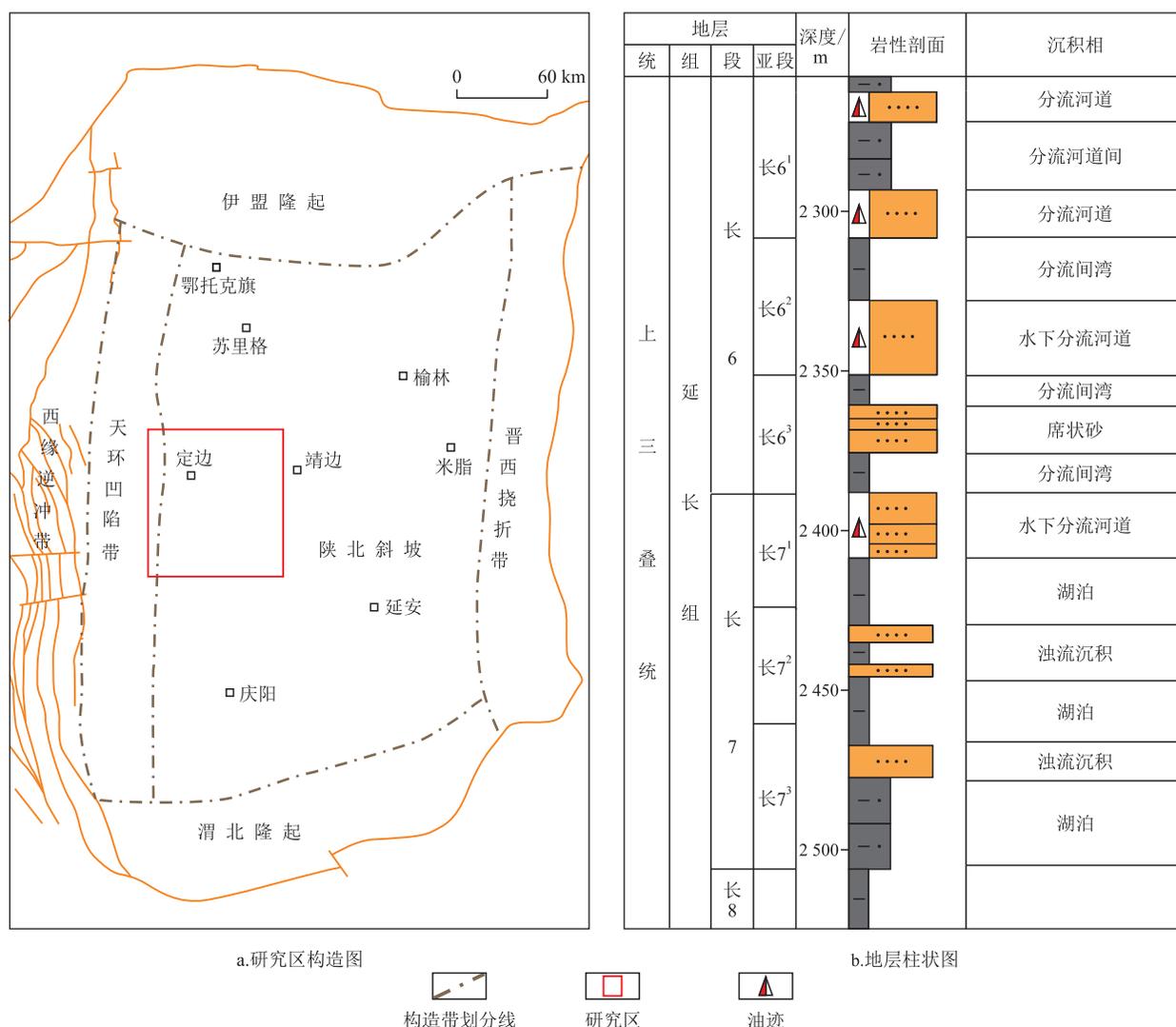


图1 研究区构造图及地层特征(研究区构造图据文献[19]修改,地层柱状图据文献[20]修改)

Fig.1 Geology and lithology features of the study area (Tectonic locations of the study area modified by Reference [19], and comprehensive stratigraphic column modified by Reference [20])

从研究区探井中钻取8个圆柱形岩心(半径为2.5 cm)。测量每个岩心的孔隙度和渗透率,然后将岩心切成3段,分别用于进行铸体薄片、扫描电镜和核磁共振测试。

## 1.2 实验原理

### 1.2.1 铸体薄片

用红色环氧树脂灌注薄片,并用茜素红和亚铁氰化钾溶液染色以鉴定碳酸盐等。研究利用Leica DLC-420显微镜摄像系统拍摄样品镜下岩石学图像,分析岩石学特征和孔隙成因。

### 1.2.2 扫描电镜

对样品新鲜的破裂表面涂金,用场发射扫描电镜FEI Quanta 400 FEG 观察样品的纳米级孔隙结构。并用二次电子成像(SE)、背散射电子成像(BSE)和能量分散光谱(EDS)进行矿物鉴定。扫描电源加速电压为30 kV,分辨率为1.2 nm。

### 1.2.3 核磁共振

利用ReeCore-04仪器测量核磁共振 $T_2$ 谱。核磁共振 $T_2$ 谱可以简化为<sup>[21-22]</sup>:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{F_s}{r} \quad (1)$$

式中: $T_2$ 为横向弛豫时间,ms; $\rho$ 为表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{s}$ ;  $F_s$ 为形状因子,无量纲; $r$ 为孔隙半径, $\mu\text{m}$ 。

圆柱形孔隙的 $F_s$ 为2,球形孔隙的 $F_s$ 为3。假设孔隙为球形, $T_2$ 可以转换为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{3}{r} \quad (2)$$

$T_2$ 谱分布与孔隙分布密切相关。孔隙半径越大, $T_2$ 值越大。

利用高速离心机在最佳离心力下离心样品。将岩心孔隙中的流体分为可动流体和束缚流体。离心后再次对岩心样品进行核磁共振 $T_2$ 谱测试,可

以得到束缚水状态下核磁共振  $T_2$  谱分布。根据前人研究结果, 2.76 MPa 被认为是岩石样品达到束缚水饱和状态的最佳离心力<sup>[10,23]</sup>。

### 1.3 分形原理

如果砂岩中孔隙分布符合分形特征, 则有<sup>[24]</sup>:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (3)$$

式中:  $N(r)$  为半径大于  $r$  的孔隙数, 无量纲;  $D$  为分形维数, 无量纲。

在核磁共振测试中, 样品的总孔隙度表达式为:

$$V_p = \sum_{i=1}^n V_{pi} \quad (4)$$

式中:  $V_p$  为总孔隙度, %;  $n$  为孔隙半径分布中的最大值,  $\mu\text{m}$ ;  $i$  为孔隙半径分布中的某一半径,  $\mu\text{m}$ ;  $V_{pi}$  为第  $i$  个孔隙半径  $r_i$  对应的孔隙度, %。

假设孔隙为球形, 式(3)可以改写为:

$$N_i = \frac{V_{pi}}{\frac{4}{3}\pi r_i^3} = \frac{V_{pi}}{36\pi(\rho T_{2i})^3} \quad (5)$$

式中:  $N_i$  为孔隙半径对应的孔隙个数;  $r_i$  为孔隙半径分布的第  $i$  个值,  $\mu\text{m}$ ;  $T_{2i}$  为  $T_2$  谱分布中的第  $i$  个值, ms。

因此,  $N(r)$  可以表达为:

$$N(r) = \sum_j N_j = \sum_j \frac{V_{pj}}{\frac{4}{3}\pi r_j^3} \quad (6)$$

其中:

$$j=i+1 \quad (7)$$

式中:  $j$  为孔隙半径分布中的  $i+1$  个半径,  $\mu\text{m}$ ;  $r_j$  为孔隙半径分布的第  $j$  个值,  $\mu\text{m}$ ;  $V_{pj}$  为第  $i+1$  个孔隙半径  $r_{i+1}$  对应的孔隙度, %。

式(7)也可以转换为<sup>[25]</sup>:

$$\log \sum_j \frac{V_{pj}}{(T_{2j})^3} + \log \frac{1}{A} = -D \log B - D \log T_{2i} \quad (8)$$

其中:

$$A=36\pi(\rho)^3 \quad (9)$$

$$B=3\rho \quad (10)$$

式中:  $T_{2j}$  为  $T_2$  谱分布中的第  $i+1$  值, ms;  $A$ 、 $B$  均为系数。

因此分形维数表达式为:

$$D = -S \quad (11)$$

式中:  $S$  为  $N(r)$  和  $T_2$  双对数曲线的斜率, 无量纲。

## 2 实验结果

### 2.1 岩石学和物性特征

致密砂岩矿物组成和物性参数如表1所示。长7段致密砂岩以长石岩屑砂岩为主(图2a)。岩石成分主要为长石、石英、黏土矿物(高岭石、绿泥石)和碳酸盐(图2b—2d)。根据成因, 长7段致密砂岩孔隙主要分为粒间孔隙、溶蚀孔隙和晶间孔。粒间孔隙由碎屑颗粒压实和胶结后残留的原生孔隙形成, 呈多边形, 边缘笔直(图2e)。溶蚀孔隙由酸性流体溶蚀长石或岩屑形成, 边缘不规则(图2e)。当溶蚀作用强烈时, 溶蚀孔隙可与周围孔隙连通, 形成形状不规则、半径大的联合孔隙(图2e)。自生黏土矿物填充孔隙形成晶间孔(图2f)。

致密砂岩样品孔隙度为 8.3%~11.5%, 平均值为 10.1%。渗透率为 0.13~0.32 mD, 平均值为 0.23 mD。孔隙度与渗透率之间相关性中等(图3), 表明孔隙对渗透率的贡献有差异。

### 2.2 核磁共振 $T_2$ 谱分布特征

核磁共振  $T_2$  谱是测量孔隙中流体的关键参数。大孔隙半径对应较高的  $T_2$  值, 小孔隙半径对应较小的  $T_2$  值。孔隙中流体含量与信号幅度成比例, 每个  $T_2$  值的信号幅度对应孔隙的体积。因此, 可以通过核磁共振  $T_2$  谱分布表征孔隙分布特征(表1)。

表1 长7段致密砂岩矿物组成和物性参数

Table1 Mineral composition and physical properties of tight sandstone in Chang 7 Member

样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD	矿物质量分数/%			
				石英	长石	黏土矿物	方解石
WJD1	2 162.8	11.5	0.24	38.6	30.3	8	12
WJD2	2 013.7	8.3	0.13	24.2	37.7	16	10
WJD3	2 080.2	11.4	0.28	28.8	37.3	12	5
WJD4	2 130.9	9.6	0.23	22.4	46.0	9	6
WJD5	2 013.9	8.9	0.14	33.0	25.1	13	14
WJD6	2 426.8	10.4	0.28	34.5	42.2	11	5
WJD7	2 286.5	10.5	0.32	21.0	52.5	12	5
WJD8	2 446.7	10.5	0.25	28.9	40.3	9	9

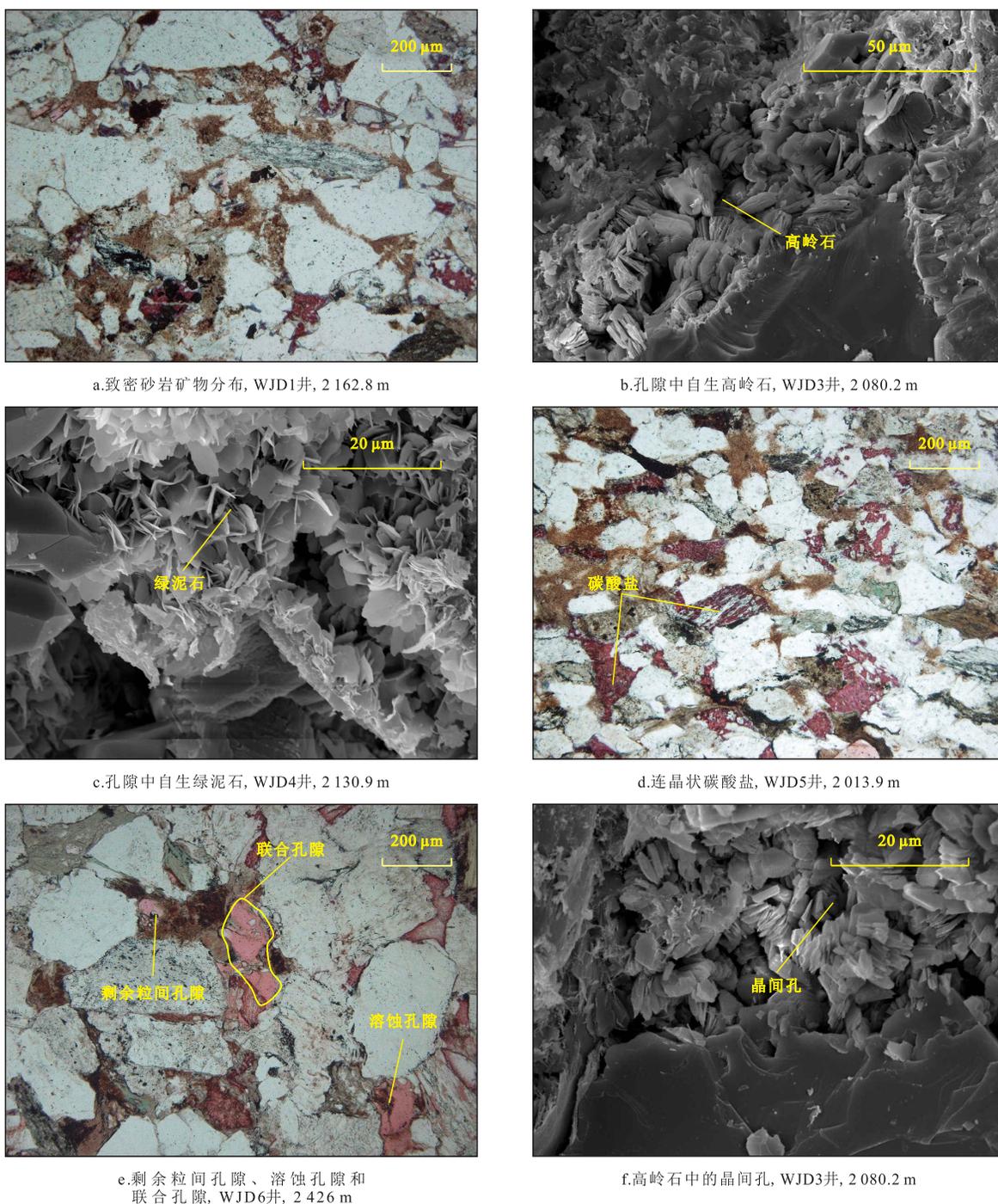


图2 长7段致密砂岩微观特征

Fig.2 Microscopic characteristics of tight sandstone in Chang 7 Member

饱和水岩心和非饱和水岩心的累积孔隙度都随着  $T_2$  值的增加而增加,当非饱和水岩心的累积孔隙度达到最大值时,等于岩心总的束缚孔隙度(图4)。在饱和水岩心的累积孔隙度曲线中,某个特定的  $T_2$  值即为  $T_2$  截止值( $T_{2c}$ )。  $T_{2c}$  用来区分微孔和黏土矿物中的束缚水和大孔中的自由水<sup>[26]</sup>。

核磁共振  $T_{2c}$  值为 3.58 ~ 12.94 ms,平均值为 7.63 ms,表明微孔和毛细管半径较小。样品中核磁共振  $T_2$  谱分布范围相近,表明致密砂岩中孔隙分布

范围相似(图5)。样品  $T_2$  谱分布曲线具有明显差异,表明致密砂岩孔隙分布非均质性强。根据饱和水  $T_2$  值分布可以将样品分为单峰型和双峰型。单峰型表明孔隙分布较集中(图6a);双峰型表明发育小孔隙和大孔隙2种孔隙(图6b)。双峰型  $T_2$  值较小的峰对应小孔隙,  $T_2$  值较大的峰对应大孔隙。无论单峰还是双峰,束缚水主要集中于小孔隙中,大孔隙中基本为可动流体。

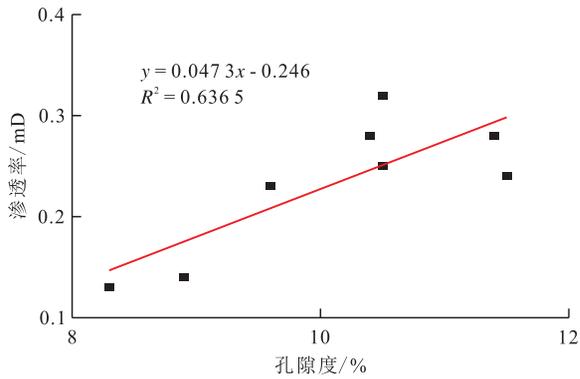


图3 长7段致密砂岩样品孔隙度与渗透率相关性  
Fig.3 Relationship between permeability and porosity in tight sandstone of Chang 7 Member

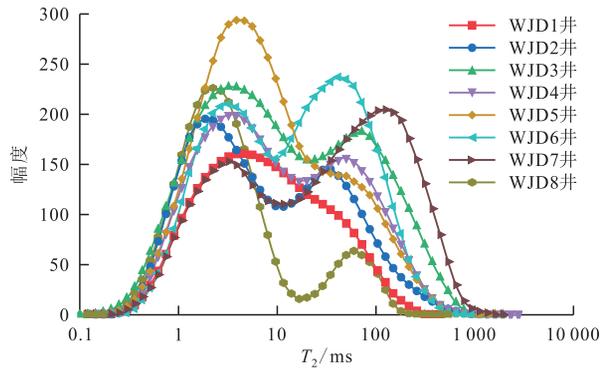
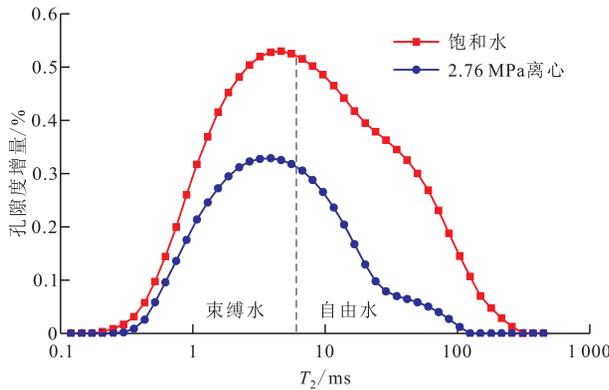
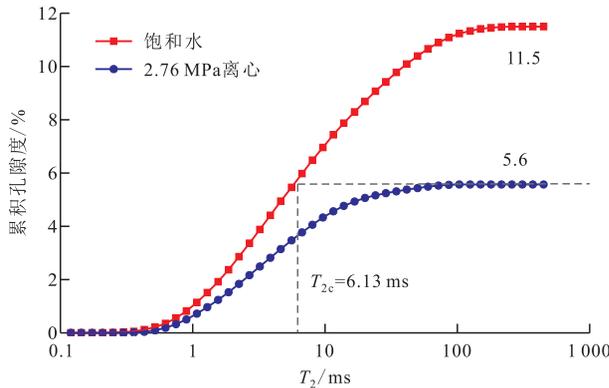


图5 长7段致密砂岩样品 T<sub>2</sub> 值分布  
Fig.5 T<sub>2</sub> value distribution of tight sandstone samples in Chang 7 Member



a.孔隙度增量与T<sub>2</sub>值关系

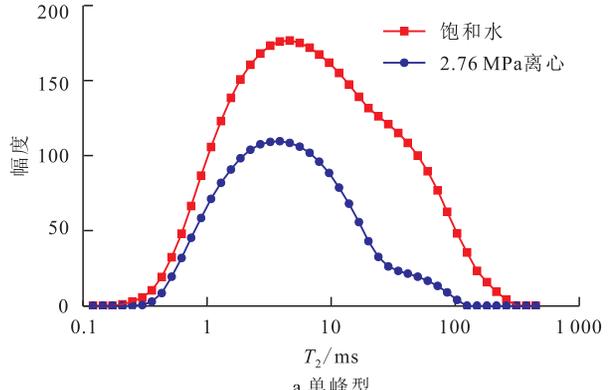


b.累积孔隙度与T<sub>2</sub>值关系

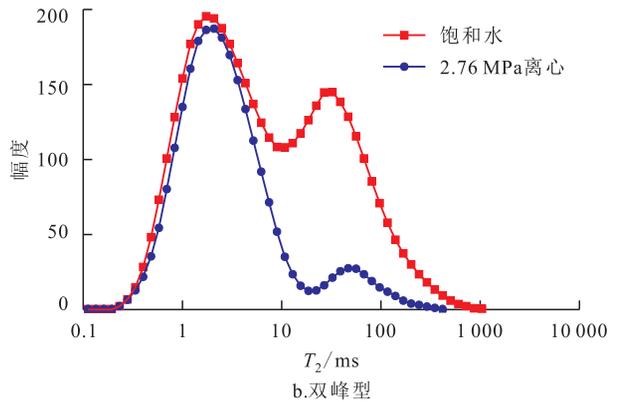
图4 长7段WJD1井核磁共振 T<sub>2</sub> 值与样品孔隙度分布关系  
Fig.4 Relationship between T<sub>2</sub> values of NMR and porosity distribution of samples in Chang 7 Member

### 2.3 分形特征

利用  $\log T_2$  与  $\log N(r)$  的散点图计算致密砂岩孔隙分形维数(图7)。以  $T_{2c}$  为转折点将散点图分成两部分。 $T_2 < T_{2c}$  的散点代表束缚流体所在孔隙,即束缚孔隙; $T_2 > T_{2c}$  的散点代表可动流体所在孔隙,即可动孔隙。束缚孔隙  $D$  值( $D_{束缚}$ )为 1.176~1.490 8,平均值为 1.306 3。可动孔隙  $D$  值( $D_{可动}$ )为 2.873 6~3.706 4,平均值为 3.241 6(表2)。束缚孔隙的分形明显小于可动孔隙,可动孔隙的非均质性强于束缚孔隙。



a.单峰型



b.双峰型

图6 长7段致密砂岩不同类型 T<sub>2</sub> 值分布曲线  
Fig.6 Different types of T<sub>2</sub> distribution curves in tight sandstone in Chang 7 Member

## 3 讨论

### 3.1 孔隙分形维数和形状特征关系

在分形理论中,三维空间形状的分形维数应该为 2~3。在相同的体积下,球体的表面积具有最小值,并且刺球形的比表面/体积大于球体的比表面/体积。进而计算出对应 T<sub>2</sub> 谱的孔隙半径较小,并且计算出  $N(r)$  较大,形成较高的分形维数( $D > 3$ )。因此, $D > 3$  对应的非均质性强的联合孔隙。

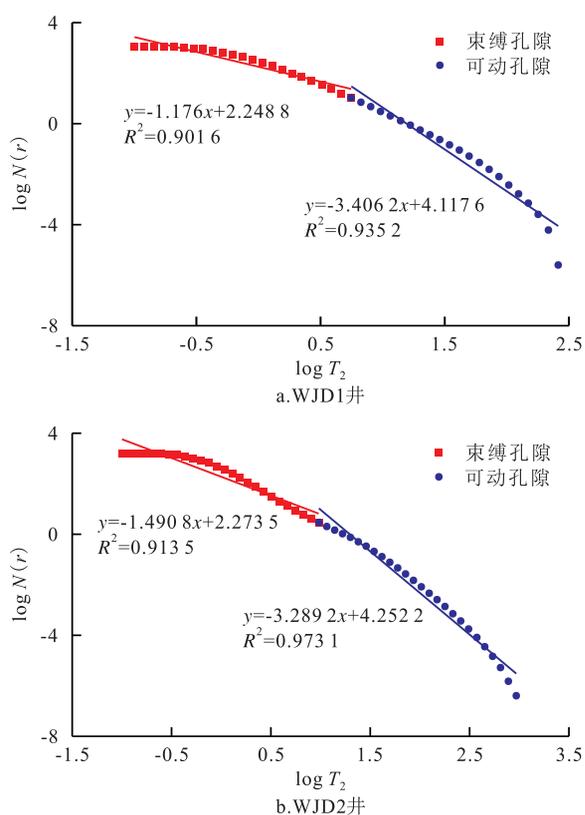


图7 长7段核磁共振  $\log T_2$  与  $\log N(r)$  散点图  
Fig.7 Plots of  $\log T_2$  and  $\log N(r)$  using NMR in Chang 7 Member

根据铸体薄片和SEM分析,发现溶蚀孔隙经常与周围孔隙相连,形成具有不规则表面的联合孔隙(图8a)。联合孔隙半径大,有多个喉道与周围孔隙相连,连通性好,形状为刺球状(图8b)。在相同体积下,刺球状孔隙比表面大于球形,导致较大的分形维数( $D>3$ )<sup>[28]</sup>。当样品溶蚀作用发育,可动孔隙主要为联合孔隙时,分形维数大于3。当可动孔隙主要为剩余粒间孔隙和溶蚀孔隙时,孔隙形状为圆柱状(图8c),分形维数为2~3(WJD2和WJD7样品)。

表2 长7段致密砂岩分形特征参数和物性贡献

Table2 Fractal characteristic parameters and physical property contributions of tight sandstone in Chang 7 Member

样品编号	$T_2$ 截止值( $T_{2c}$ )	$T_2 < T_{2c}$		$T_2 > T_{2c}$		孔隙比例/%		渗透率贡献度/%	
		束缚孔隙分形维数( $D_{束缚}$ )	$R^2$	可动流体分形维数( $D_{可动}$ )	$R^2$	束缚孔隙	可动孔隙	束缚孔隙	可动孔隙
WJD1	6.13	1.176 0	0.901 6	3.406 2	0.935 2	47.5	52.5	0.3	99.7
WJD2	8.83	1.490 8	0.913 5	3.289 2	0.973 1	55.7	44.3	0.3	99.7
WJD3	3.58	1.207 3	0.921 9	2.873 6	0.943 6	30.8	69.2	0.1	99.9
WJD4	6.83	1.314 3	0.903 7	3.206 5	0.961 4	46.9	53.1	0.1	99.9
WJD5	9.84	1.367 9	0.912 4	3.706 4	0.911 0	60.8	39.2	0.4	99.6
WJD6	9.23	1.209 9	0.886 0	3.445 4	0.933 6	42.0	58.0	0.2	99.8
WJD7	12.94	1.429 2	0.929 8	2.888 4	0.942 2	38.3	61.7	0.1	99.9
WJD8	3.62	1.255 0	0.876 5	3.116 7	0.922 9	59.6	40.4	0.3	99.7

束缚孔隙半径小,主要为晶间孔。 $D_{束缚}<2$ 反映孔隙中填充的黏土矿物被包裹的包络面(图8d)<sup>[29-30]</sup>。

致密砂岩孔隙结构由束缚孔隙和可动孔隙组成。可动孔隙主要为刺球状联合孔隙,束缚孔隙主要为晶间孔(黏土矿物堆积包络面)。从可动孔隙到束缚孔隙,分形维数降低,表明孔隙空间的非均质性从微米级降低到纳米级。

### 3.2 束缚类型和可动孔隙对储层物性的影响

根据核磁共振  $T_2$  谱分布的幅度,可以计算出孔隙中束缚孔隙和可动孔隙占比(表2)。束缚孔隙占比为30.8%~60.8%,平均值为47.7%;可动孔隙占比为39.2%~69.2%,平均值为52.3%。长7段致密砂岩2种孔隙的占比在不同样品之间存在差异,整体上束缚孔隙和可动孔隙比例接近。当样品黏土矿物含量高时,束缚孔隙发育,当样品溶蚀作用发育时,可动孔隙发育。

管束模型可用于计算不同孔喉对渗透率的贡献,其表达式为:

$$K_i = \frac{dV_i \cdot r_i^2}{\sum_i (dV_i \cdot r_i^2)} \quad (10)$$

式中: $K_i$ 为第*i*个孔喉半径的渗透率贡献度,无量纲; $V_i$ 为第*i*个孔喉半径对应的体积, $\mu\text{m}^3$ 。

根据2种孔隙类型的分布范围,计算了不同孔隙类型对渗透率的贡献度,如表2所示。束缚孔隙对渗透率的贡献度平均值为0.2%,表明束缚孔隙基本对渗透率没有贡献。可动孔隙对渗透率的贡献度平均值为99.8%,表明可动孔隙是流体流动的主要途径。

### 3.3 孔隙分形维数与储层物性关系

溶蚀孔隙半径大、连通性好、孔隙边缘不规则,赋存在其中的流体易流动,因此可动孔隙分形维数

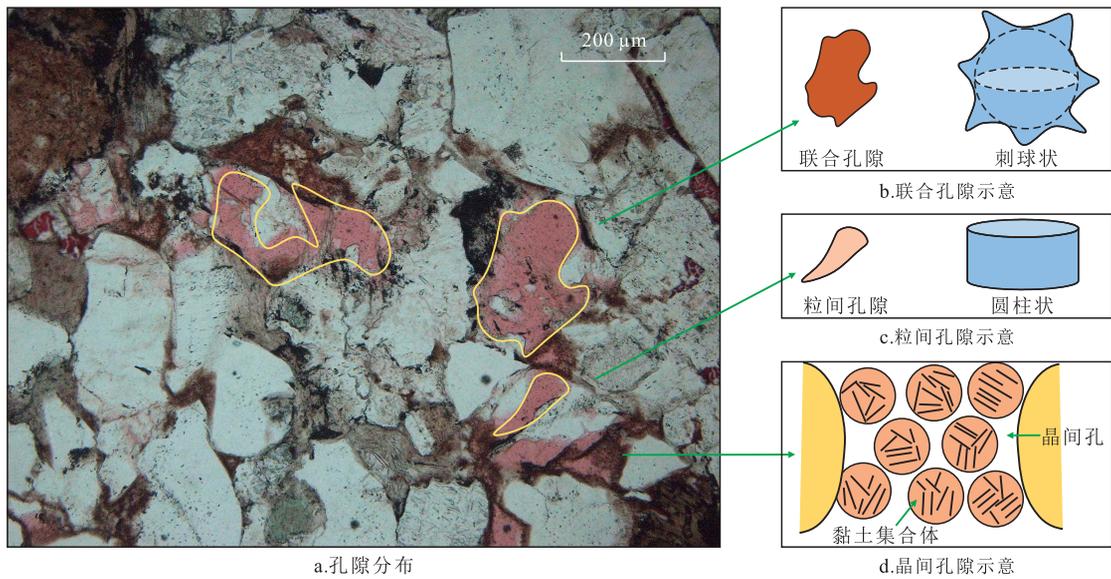


图8 长7段致密砂岩孔隙形状示意

Fig.8 Pore shapes in tight sandstone in Chang 7 Member

大。束缚孔隙形状规则、非均质性弱、分形维数小，受喉道连通性差、毛细管阻力和黏土吸附影响，赋存在其中的流体无法自由流动，形成束缚流体<sup>[31]</sup>。

由物性与 $D_{束缚}$ 、 $D_{可动}$ 关系可以看出， $D_{束缚}$ 与孔隙度呈负相关(图9a)，表明致密砂岩孔喉致密，束缚孔隙主要为晶间孔，束缚孔隙非均质性越强，单位体积堆积黏土越多，堆积表面越复杂。黏土堆积则

降低了致密砂岩孔隙空间。 $D_{可动}$ 与孔隙度不相关(图9b)，表明孔隙空间不受大孔隙非均质性的影响。

$D_{束缚}$ 与渗透率无相关性(图9c)，表明束缚孔隙不影响样品整体的渗透率。 $D_{可动}$ 与渗透率呈负相关(图9d)，表明可动孔隙的非均质性影响了样品中流体流动。 $D_{可动}$ 增加，孔隙形状从规则变为不规则，从

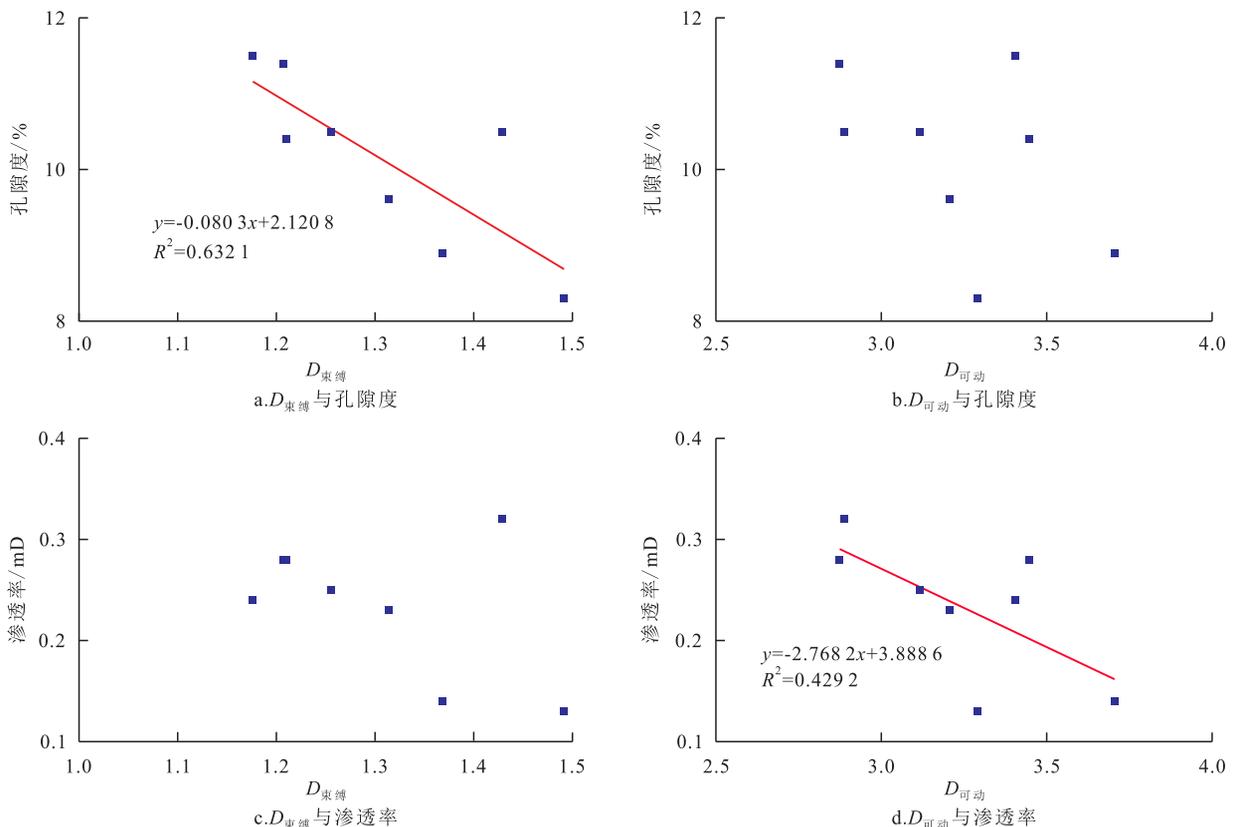


图9 长7段致密砂岩样品分形维数与物性相关性

Fig.9 Relationship between fractal dimensions and physical properties in tight sandstone samples of Chang 7 Member

而降低了样品的渗透率,阻碍了样品中流体的流动。因此束缚孔隙和可动孔隙的非均质性对致密砂岩物性影响不同,束缚孔隙主要影响致密砂岩的储集空间,可动孔隙主要影响致密砂岩的渗透率。

### 3.4 矿物成分对分形维数的影响

致密砂岩孔隙分形维数受成岩作用和矿物组成影响。从 $D_{束缚}$ 、 $D_{可动}$ 与石英含量关系可以看出,石英含量与 $D_{束缚}$ 呈负相关(图10a),相关性中等。石英是致密砂岩的骨架矿物。其含量越高,砂岩抗压实能力越强,粒间孔隙越大,连通性越好,从而降低了样品束缚孔隙的非均质性和复杂程度。石英含量与 $D_{可动}$ 呈正相关(图10b),但相关性比 $D_{束缚}$ 的低,部分样品发育石英二次加大,堵塞了粒间孔隙,增强了孔隙非均质性。

从 $D_{束缚}$ 、 $D_{可动}$ 与长石含量关系可以看出, $D_{束缚}$ 和长石含量不相关(图11a), $D_{可动}$ 与长石含量呈负相关(图11b)。随着长石含量的增加,致密砂岩溶蚀孔隙增多,孔隙连通性变强,改善了岩石的渗透性和孔隙形状,降低了可动孔隙的非均质性。长7段致密砂岩长石以斜长石为主。斜长石具有“中钙边纳”的特征,容易发育内部溶孔。长石粒内溶孔多

呈港湾状或班杂状,孔隙连通较差,在一定程度上增大了 $D_{可动}$ 。因此 $D_{可动}$ 和长石含量相关性中等。

从 $D_{束缚}$ 、 $D_{可动}$ 与黏土矿物含量关系可以看出,黏土矿物含量与 $D_{束缚}$ 呈正相关(图12a)。随着致密砂岩黏土矿物含量的增加,束缚孔隙形状变得复杂、非均质性变强。黏土矿物含量对 $D_{可动}$ 没有影响(图12b)。

从 $D_{束缚}$ 、 $D_{可动}$ 与碳酸盐含量关系可以看出,碳酸盐含量对 $D_{束缚}$ 没有影响(图13a),与 $D_{可动}$ 呈正相关(图13b)。碳酸盐呈连晶状堵塞粒间孔隙和喉道,降低孔隙的连通性。随着致密砂岩碳酸盐含量的增加,增强了可动孔隙形状的不规则性和非均质性。

### 3.5 孔隙结构对油气分布的影响

当致密砂岩黏土矿物发育时(样品WJD2、WJD5、WJD8),黏土矿物占据了孔隙空间,形成大量束缚孔隙,并降低了可动孔隙含量。砂体连通性变差,油气充注前缘不均匀,导致砂体含油饱和度降低。当致密砂岩剩余粒间孔隙和溶蚀孔隙发育时(样品WJD3、WJD7),砂体连通性中等,原油通过几个主要通道运移,含油饱和度中等。当致密砂岩联合孔隙发育时(样品WJD1、WJD4、WJD6、

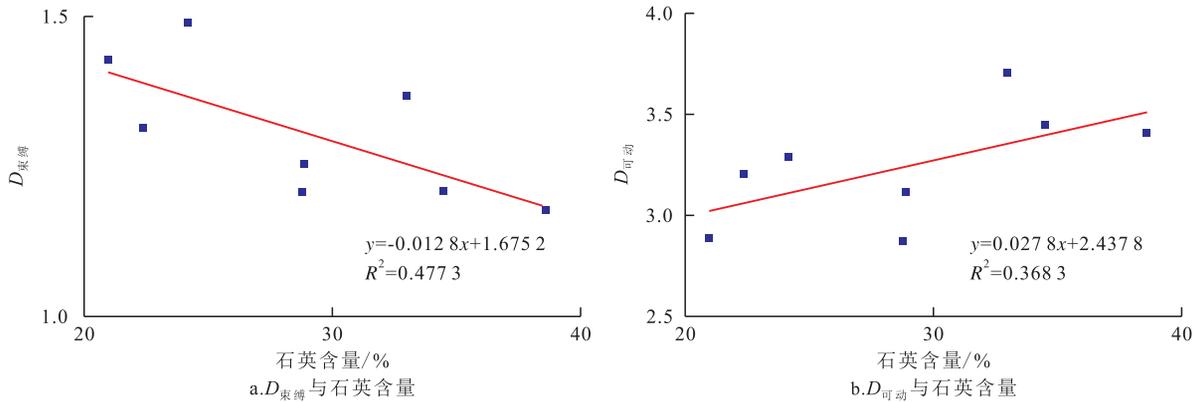


图10 长7段石英含量与分形维数相关性

Fig.10 Relationship between quartz contents and fractal dimensions in Chang 7 Member

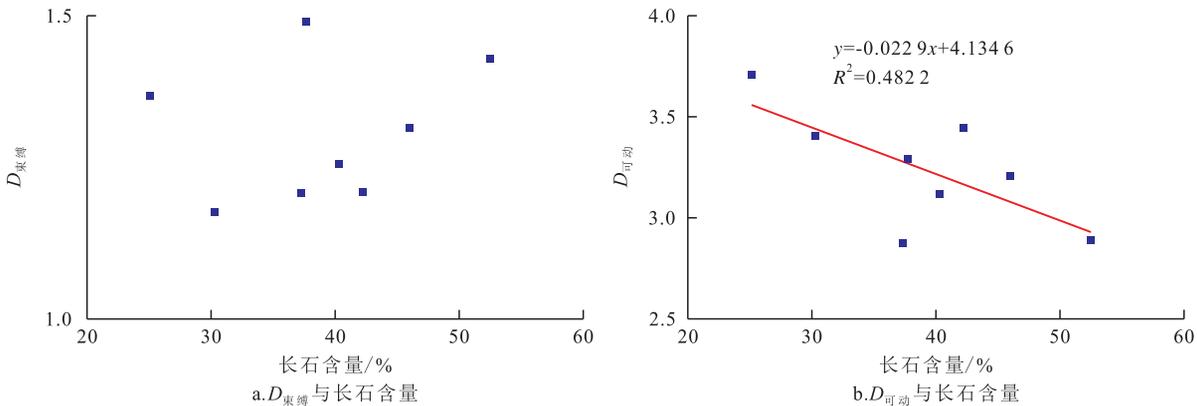


图11 长7段长石含量与分形维数相关性

Fig.11 Relationship between feldspar contents and fractal dimensions in Chang 7 Member

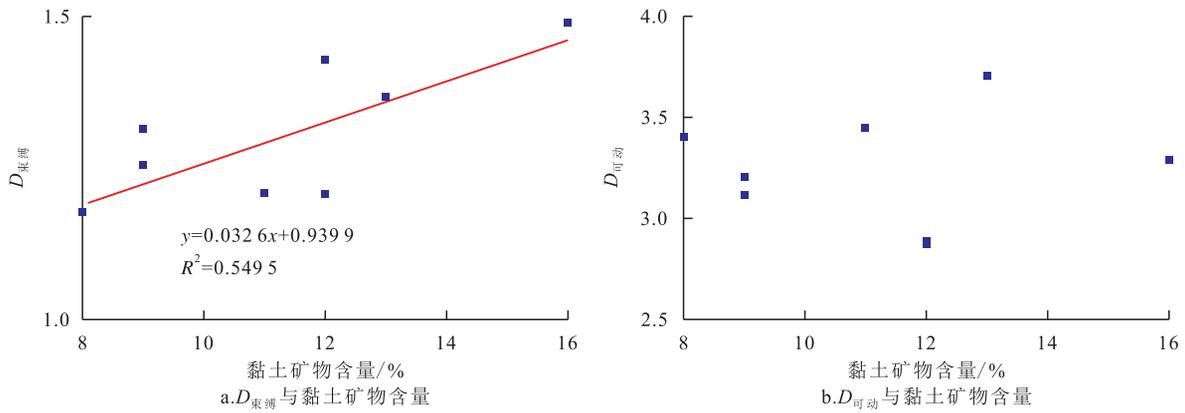


图12 长7段黏土矿物含量与分形维数相关性  
Fig.12 Relationship between clay contents and fractal dimensions in Chang 7 Member

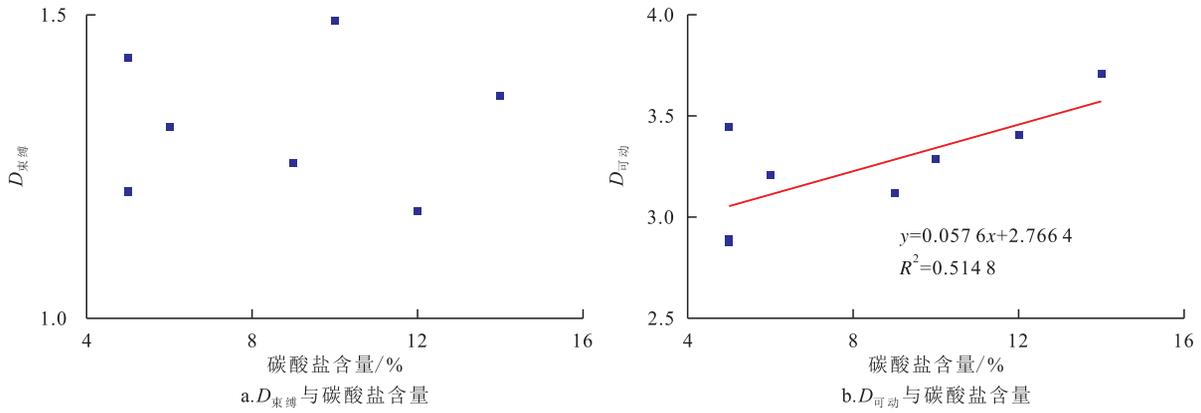


图13 长7段碳酸盐含量与分形维数相关性  
Fig.13 Relationship between carbonate contents and fractal dimensions in Chang 7 Member

WJD8),孔隙连通性好。原油通过多个通道均匀地充注到孔隙空间中,并在致密砂岩的孔隙空间中均匀分布,形成大面积分布的高含油饱和度砂体。

联合孔隙主要是由烃源岩生烃过程中形成的酸溶解岩石颗粒形成,极大提高了致密砂岩的储集性和连通性。因此,靠近烃源岩的砂体是有利的致密砂岩储层。在远离烃源岩的地区,以剩余粒间孔隙和溶蚀孔隙为主的致密砂岩应是致密储层的有效富集区。

### 4 结论

鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩孔隙结构是一个二元孔隙系统,由束缚孔隙和可动孔隙组成。束缚孔隙为晶间孔,连通性差,其分形维数主要反映黏土矿物堆积的包络面,平均值为1.3063。可动孔隙主要为刺球状联合孔隙,该孔隙有多个喉道,连通性好,分形维数平均值为3.2416。可动孔隙非均质性和连通性强于束缚孔隙。

束缚孔隙和可动孔隙在致密砂岩孔隙中比例

相近。可动孔隙对渗透率贡献度平均值为99.8%,其控制着致密砂岩的连通性和油气充注特征。受成岩作用和矿物成分影响,可动孔隙连通性好,形状不规则,非均质性强。束缚孔隙连通性差,形状较规则,非均质性弱。 $D_{束缚}$ 与孔隙度呈负相关, $D_{可动}$ 与渗透率呈负相关。利用分形维数可以很好表征致密砂岩孔隙结构。孔隙类型变化会影响致密油的分布特征。以联合孔隙类型为主的砂岩具有均匀的油气充注过程和较大的油气注入面积,砂体含油饱和度高。因此,靠近烃源岩的砂体是有利的致密砂岩储层。在远离烃源岩的地区,以剩余粒间孔隙为主的致密砂岩是致密油藏的油气富集有利区。

### 参考文献

[1] 赵迪斐,张家明,郭英海,等. 储层精细评价潜在关键关联指标:页岩沉积构造及其量化问题研究评述[J]. 非常规油气, 2023,10(1):11-20.  
ZHAO Difei, ZHANG Jiaming, GUO Yinghai, et al. Potential key correlation index for fine reservoir evaluation: Review on shale sedimentary structure and its quantification[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 11-20.

- [2] 何辉,周永强,龙卫江,等.低-特低渗透储层微观孔喉结构特征及对水驱油特征的影响——以鄂尔多斯盆地渭北油田长3油层组储层为例[J].油气地质与采收率,2021,28(4):23-34.  
HE Hui, ZHOU Yongqiang, LONG Weijiang, et al. Pore throat microstructures of low-ultra-low permeability reservoirs and their influence on water displacement characteristics: Taking the Chang 3 reservoir of Weibei Oilfield in Ordos Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4): 23-34.
- [3] 汪新光,郇金来,彭小东,等.基于数字岩心的致密砂岩储层孔隙结构与渗流机理[J].油气地质与采收率,2022,29(6):22-30.  
WANG Xinguang, HUAN Jinlai, PENG Xiaodong, et al. Flow mechanism and pore structures of tight sandstone based on digital core analysis [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(6): 22-30.
- [4] 刘成川,王勇飞,毕有益.中江气田窄河道致密砂岩气藏高效开发技术[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):345-355.  
LIU Chengchuan, WANG Yongfei, BI Youyi. Efficient development technique of tight sandstone gas reservoir in narrow channel of Zhongjiang Gas Field[J].Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 345-355.
- [5] 曹尚,李树同,党海龙,等.鄂尔多斯盆地东南部长7段页岩孔隙特征及其控制因素[J].新疆石油地质,2022,43(1):11-17.  
CAO Shang, LI Shutong, DANG Hailong, et al. Pore characteristics and controlling factors of Chang 7 Shale in southeastern Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(1): 11-17.
- [6] XIAO Dianshi, JIANG Shu, THUL David, et al. Impacts of clay on pore structure storage and percolation of tight sandstones from the Songliao Basin, China; Implications for genetic classification of tight sandstone reservoirs [J]. Fuel, 2018, 211: 390-404.
- [7] 王伟,许兆林,李维振,等.基于高斯过程回归和高压压汞测定致密砂岩渗透率:以鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩为例[J].地质科技通报,2022,41(4):30-37.  
WANG Wei, XU Zhaolin, LI Weizhen, et al. Determination of permeability in tight sandstone reservoirs using Gaussian process regression and high-pressure porosimetry: A case study of the Member-7 of Yanchang Formation in the Jiyuan area of the Ordos Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 30-37.
- [8] WANG Wei, LI Yahui, CHEN Xiliang. Microscope dynamic characterization of oil charging in tight sandstone using a physical simulation experiment [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 200: 108379.
- [9] 王伟,朱玉双,余彩丽,等.鄂尔多斯盆地致密砂岩储层孔喉分布特征及其差异化成因[J].天然气地球科学,2019,30(10):1439-1450.  
WANG Wei, ZHU Yushuang, YU Caili, et al. Pore size distribution of tight sandstone reservoir and their differential origin in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(10): 1439-1450.
- [10] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Zhuoying, et al. Fractal analysis of tight shaly sandstones using nuclear magnetic resonance measurements [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(2): 175-193.
- [11] 王继超,崔鹏兴,刘双双,等.页岩油储层微观孔隙结构特征及孔隙流体划分[J].油气地质与采收率,2023,30(4):46-54.  
WANG Jichao, CUI Pengxing, LIU Shuangshuang, et al. Microscopic pore structure characteristics and pore fluid division of shale oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 46-54.
- [12] 李爱芬,高子恒,景文龙,等.基于CT扫描的蒸汽驱岩心孔隙结构特征及相渗分析[J].特种油气藏,2023,30(1):79-86.  
LI Aifen, GAO Ziheng, JING Wenlong, et al. Cores pore structure characteristics and relative permeability analysis in steam flooding based on CT scanning [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(1): 79-86.
- [13] 黄开展,刘薇.南川地区龙马溪组海相页岩孔隙特征精细描述及分形特征分析——以胜页1井为例[J].中国海上油气,2022,34(5):64-71.  
HUANG Kaizhan, LIU Wei. Pore structure and fractal characteristics of marine shale in Longmaxi Formation, Nanchuan area: A case study of Well SY-1 [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 64-71.
- [14] 石玉江,蔡文渊,刘国强,等.页岩油储层孔隙流体的全直径岩心二维核磁共振谱特征及评价方法[J].中国石油勘探,2023,28(3):132-144.  
SHI Yujiang, CAI Wenyuan, LIU Guoqiang, et al. Full diameter core 2D NMR characteristics of pore fluid in shale oil reservoir and evaluation method [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 132-144.
- [15] 王伟,宋渊娟,黄静,等.利用高压压汞实验研究致密砂岩孔喉结构分形特征[J].地质科技通报,2021,40(4):22-30,48.  
WANG Wei, SONG Yuanjuan, HUANG Jing, et al. Fractal characteristics of pore-throat structure in tight sandstones using high-pressure mercury intrusion porosimetry [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 22-30, 48.
- [16] 王伟,陈朝兵,许爽,等.鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩不同尺度孔喉分形特征及其控制因素[J].石油实验地质,2022,44(1):33-40.  
WANG Wei, CHEN Zhaobing, XU Shuang, et al. Fractal characteristics and its controlling factors of pore-throat with different scales in tight sandstones of the Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 33-40.
- [17] 吴兵,陈希,田坤,等.考虑微观效应的致密多孔介质分形渗透率模型[J].大庆石油地质与开发,2022,41(1):56-62.  
WU Bing, CHEN Xi, TIAN Kun, et al. A fractal permeability model coupling microscale effect for tight porous media [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(1): 56-62.
- [18] 付锁堂,邓秀芹,庞锦莲.晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析[J].沉积学报,2010,28(6):1081-1089.  
FU Suotang, DENG Xiuqin, PANG Jinlian. Characteristics and

- mechanism of thick sandbody of Yanchang Formation at the Centre of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1 081-1 089.
- [19] YANG Yongtai, LI Wei, MA Long. Tectonic and stratigraphic controls of hydrocarbon systems in the Ordos basin: A multi-cycle cratonic basin in central China[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 29(2): 255-269.
- [20] WU Hao, ZHANG Chunlin, JI Youliang, et al. Pore throat characteristics of tight sandstone of Yanchang Formation in eastern Gansu, Ordos Basin [J]. *Petroleum Research*, 2018, 3(1): 33-43.
- [21] 白振强,王清华,宋文波. 基于核磁共振的天然气驱储集层孔喉动用下限[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(1): 58-63.
- BAI Zhenqiang, WANG Qinghua, SONG Wenbo. Lower limits of pore throat producing in natural gas drive reservoirs based on nuclear magnetic resonance[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(1): 58-63.
- [22] PAPE Hansgeorg, CLAUSER Clauser. Improved interpretation of nuclear magnetic resonance  $T_1$  and  $T_2$  distributions for permeability prediction: simulation of diffusion coupling for a fractal cluster of pores[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2009, 166: 949-968.
- [23] LIN Ran, YU Zhihao, ZHAO Jinzhou, et al. Experimental evaluation of tight sandstones reservoir flow characteristics under  $\text{CO}_2$ -brine-rock multiphase interactions: A case study in the Chang 6 layer, Ordos Basin, China [J]. *Fuel*, 2022, 309: 122167.
- [24] FRIESEN Waldemar, MIKULA Randall. Fractal dimensions of coal particles[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1987, 120(1): 263-271.
- [25] 廖荣峰,汤晶,宋晓波,等. 川西南下三叠统嘉陵江组四—五段孔隙型储层特征及勘探前景[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 60-70.
- LIAO Rongfeng, TANG Jing, SONG Xiaobo, et al. Characteristics and exploration potential of porous reservoirs in 4th to 5th members of Lower Triassic Jialingjiang Formation in southwestern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 60-70.
- [26] DILLINGER Antoine, ESTEBAN Lionel. Experimental evaluation of reservoir quality in Mesozoic formations of the Perth Basin (Western Australia) by using a laboratory low field Nuclear Magnetic Resonance [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2014, 57: 455-469.
- [27] 曾春娜,宾芮,董旭,等. 加强的 Wirtinger 不等式及其几何应用 [J]. *陕西师范大学学报:自然科学版*, 2023, 51(1): 55-59.
- ZENG Chunna, BI Rui, DONG Xu, et al. The strengthened Wirtinger inequality and its geometric applications [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2023, 51(1): 55-59.
- [28] WANG Wei, WANG Ruiyang, WANG Lina, et al. Pore structure and fractal characteristics of tight sandstones based on nuclear magnetic resonance: A case study in the Triassic Yanchang Formation of the Ordos Basin, China [J]. *ACS Omega*, 2023, 8: 16 284-16 297.
- [29] 刘苗苗,付小平,倪楷. 岩相组合特征及其对页岩含气性的影响——以涪陵地区凉高山组为例 [J]. *断块油气田*, 2023, 30(1): 1-8.
- LIU Miaomiao, FU Xiaoping, NI Kai. Characteristics of lithofacies combinations and its influence on shale gas-bearing property: a case study of the Lianggaoshan Formation in Fuling area [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(1): 1-8.
- [30] YANG Quanlin, XUE Junhua, LI Wei, et al. Comprehensive evaluation and interpretation of mercury intrusion porosimetry data of coals based on fractal theory, Tait equation and matrix compressibility [J]. *Fuel*, 2021, 298: 120823.
- [31] SHAO Xinhe, PANG Xiongqi, LI Hui, et al. Fractal analysis of pore network in tight gas sandstones using nmr method: A case study from the Ordos Basin, China [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(10): 10 358-10 368.

编辑 单体珍