

鄂尔多斯盆地致密砂岩流体分布与电性特征分析

高云翔, 郭宇航, 潘保芝, 张丽华, 王婉莹, 李岩, 张鹏济, 王欣茹, 韩锐羿

吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要: 为查明鄂尔多斯盆地致密砂岩储层的导电机理、流体分布特性, 构建精确的饱和度模型, 笔者通过孔隙度渗透率实验、离心法岩石电阻率实验和核磁响应法的岩石物理实验手段对研究区 11 块岩样展开研究。通入氮气对岩石进行孔隙度渗透率实验, 孔隙度范围为 5.21% ~ 11.26%, 渗透率范围为 $(0.1328 \sim 1.2611) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。离心法岩石电阻率实验通过测量不同离心时长下的岩石样本, 得到其岩电参数胶结指数 m (2.053 ~ 3.293) 和饱和度指数 n (0.714 ~ 2.131)。核磁响应法利用岩石中氢核的弛豫时间来揭示储层储集空间特征及流体可动性, 同时通过 T_2 谱可以区分孔隙大小及其比例。结果表明研究区致密砂岩性质相似, 孔隙结构也相似。核磁响应法得到的核磁 T_2 谱值分布较宽, 介于 0.1 ~ 1 000.0 ms, T_2 谱形态表现出双峰形态 (以 10 ms 为界)。根据经验法结合岩样的压汞数据和核磁 T_2 谱特征, 将小孔的 T_2 范围定为 0.01 ~ 5 ms, 大孔为 5 ~ 10 000 ms。结果表明, 大孔中流体的可动性明显高于小孔, 且在离心过程中, 小孔含水量增加。将 T_2 值转换为对应孔径值后, 可动水主要分布在 1 ~ 10 μm 的范围内, 其次是 0.01 ~ 0.1 μm 和 0.1 ~ 1 μm 这两个范围。利用分形维数方法可得导电性与流体分布的关系为大孔内流体分布越多, 分形维数越小, 导电性越大, 流体分布与导电性呈现正相关的趋势。

关键词: 孔隙结构; 流体分布; 核磁共振; 导电性; 鄂尔多斯盆地

Analysis of fluid distribution and electrical characteristics of tight sandstone in Ordos Basin

GAO Yunxiang, GUO Yuhang, PAN Baozhi, ZHANG Lihua, WANG Wanying,
LI Yan, ZHANG Pengji, WANG Xinru, HAN Ruiyi

College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: To investigate the conductivity mechanism and fluid distribution characteristics of tight sandstone reservoirs in the Ordos Basin and to construct an accurate saturation model, this study conducted a series of petrophysical experiments, including porosity-permeability tests, resistivity measurements using the centrifuge method,

收稿日期/Received: 2024-05-11; 修订日期/Revised: 2025-02-22; 出版日期/Published: 2025-08-25

基金项目: 西布探区天然气成藏规律与勘探关键技术-佳县南区致密砂岩评价配套岩石物理实验与数据分析 (3R2230567423)

第一作者: 高云翔 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事地球物理测井等方面研究。E-mail: 2117745083@qq.com

* 通信作者: 郭宇航 (1989—), 男, 教授, 主要从事测井探勘和储层解释方面研究。E-mail: 124563749@qq.com

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

and NMR (nuclear magnetic resonance) response analysis, on 11 rock samples from the study area. Nitrogen gas was used in the porosity-permeability experiments, revealing porosity values ranging from 5.21% to 11.26%, and permeability values ranging from $(0.132\ 8\text{--}1.261\ 1) \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$. The resistivity tests under varying centrifugation durations provided key electrical parameters: the cementation exponent m (ranging from 2.053 to 3.293) and the saturation exponent n (ranging from 0.714 to 2.131). The NMR technique, which leverages the relaxation time of hydrogen nuclei within the rock, was used to characterize reservoir pore structures and fluid mobility. The T_2 spectrum obtained through NMR enabled the distinction of pore sizes and their proportions. Results indicated that the tight sandstones in the study area exhibit similar properties and pore structures. The T_2 spectrum showed a wide distribution (0.1–1 000.0 ms), typically presenting a bimodal pattern with a boundary at 10 ms. Based on empirical methods, mercury intrusion data, and NMR T_2 spectrum characteristics, the T_2 range for small pores was defined as 0.01–5 ms, and for large pores as 5–10 000 ms. The findings show that fluid mobility is significantly higher in large pores than in small ones, and water content in small pores increases during centrifugation. After converting T_2 values into corresponding pore diameters, it was found that movable water is mainly distributed in the 1–10 μm range, followed by 0.01–0.1 μm and 0.1–1 μm ranges. Using the fractal dimension method, a positive correlation was established between fluid distribution and electrical conductivity: greater fluid presence in large pores corresponds to smaller fractal dimensions and higher conductivity.

Keywords: pore structure; fluid distribution; nuclear magnetic resonance; electroconductivity; Ordos Basin

0 引言

致密砂岩储层是当前勘探和开发的热点研究对象^[1]。苏里格地区东部的致密砂岩储层面临着流体分布规律难寻、导电机理复杂、致密砂岩储层无法有效识别、储层参数评价困难以及产能预测不精确等问题,严重增加了该地区的勘探开发难度^[2-7]。且致密背景下气层水层电阻率差异小,测井识别难度大^[8]。因此,正确认识致密砂岩的孔隙类型、合理评价其孔隙结构、明确其孔隙内流体分布规律对于寻找致密砂岩油气勘探中的“甜点区”十分重要^[9-10]。

近年来,众多学者认为研究储层流体的可动性比研究储层物性更能有效地进行储层分类和油气资源评价^[11]。一般常用的方法是核磁共振法,通过不同流体横向弛豫时间的差异,有效识别致密砂岩储层流体性质^[12]。王英伟等^[13]建立了核磁共振 T_2 分布转化为毛细管压力曲线的方法模型,提取了核磁共振测井分类的变量,这些变量主要包括排驱压力、饱和度中值毛细管压力、平均孔喉半径,且与孔喉直径大小和分布有明显关系,基于研究区核磁共振测井资料,运用 K-均值聚类和贝叶斯判别方法建立了储层解释方法。闫健等^[14]将含可动流体的储层划分为3类,并认为其差异主要受渗透率和

饱和度的影响。李进步等^[15]认为致密气藏孔隙的含水饱和度对气体渗流的影响较强,含水饱和度越高,气体渗流越差。夏玉磊等^[16-18]分析了不同孔喉半径对流体赋存特征的影响以及有效渗流最小孔喉半径下限,发现孔径越小,束缚力越大,其中的流体越不容易流动,所以存在一个最小的孔径恰好能满足流体流动的条件。

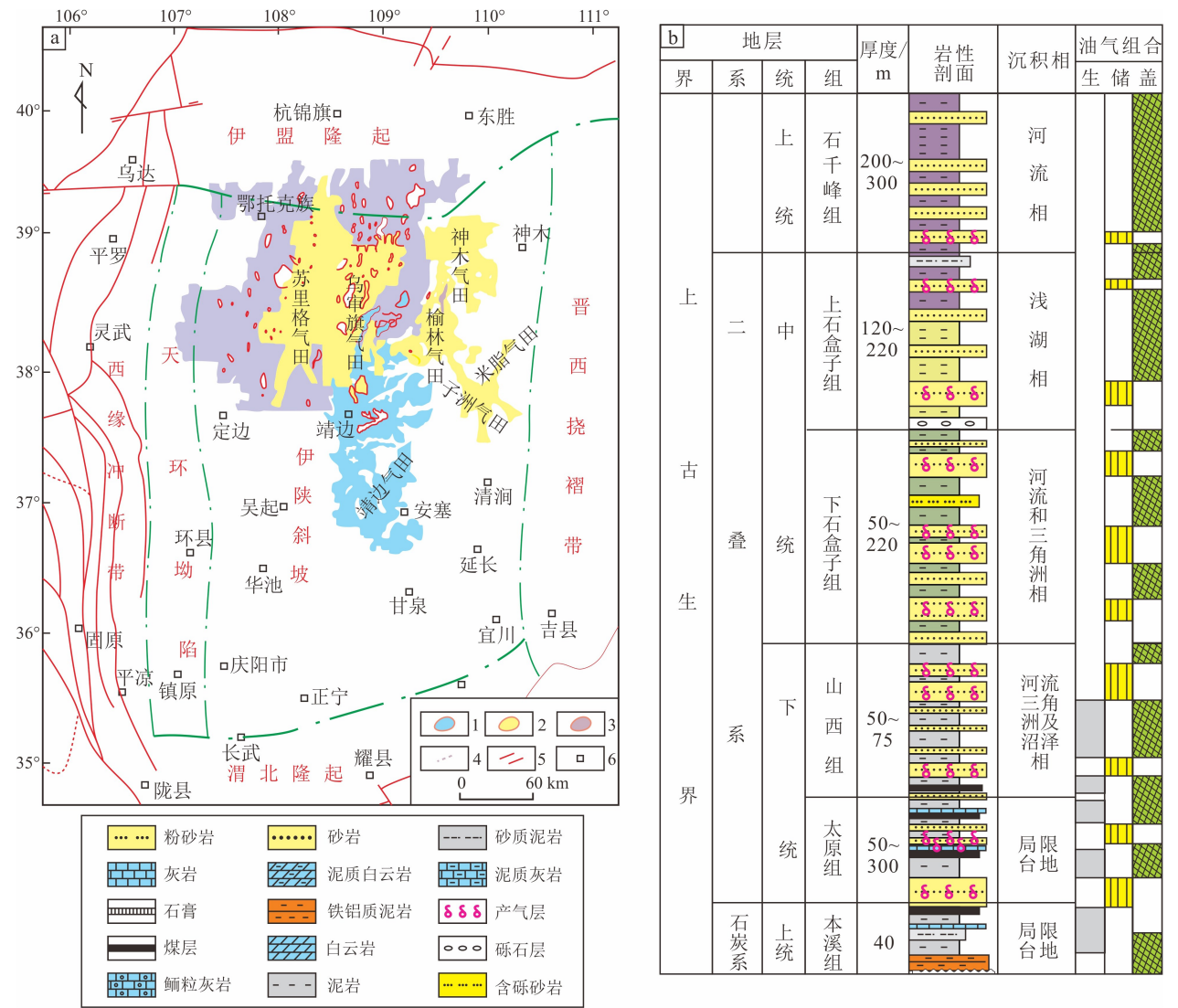
同时,基于离心法岩石电阻率实验和核磁实验结合研究不同含水饱和度的致密砂岩的分形特征,也可以构建与流体之间联系^[19-24]。基于核磁共振 T_2 截止值对应的孔隙半径作为可动流体的下限,将储层流体划分为可动流体和束缚流体,并得到相应的可动流体饱和度和可动流体孔隙度,这些可动流体参数能够有效表征储层流体的可动性。综上,前人对于流体分布的影响因素和流体分布范围划分的标准都不尽相同,但是对于致密砂岩内不同孔径流体的具体分布规律缺少较为针对性的研究。笔者通过对鄂尔多斯盆地神木气田太原组地层的岩石样品进行岩电、核磁、孔渗等实验测试,得到研究区致密砂岩的物性特征,联合核磁和压汞数据表征其流体分布状态和导电机理,建立了分形维数和品质因子的关系、分形维数和电阻率的关系、品质因子和电阻率的关系等,为低孔低渗致密砂岩储层流体分布评价和饱和度建模提供了可靠的依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是中国非常规油气资源勘探和开发的重要地区，盆地内有着丰富的石油和天然气资源。鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通西部变质结晶基底之上多旋回的叠合盆地，东接中部造山带，西临贺兰山、六盘山冲断带，南、北分别隔渭河盆地、河套盆地，与秦岭造山带、阴山—燕山造山带相望。

神木气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东北部和晋西挠褶带。自下而上发育石炭系本溪组，二叠

系太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组地层。笔者主要研究对象为太原组地层，太原组地层以北岔沟砂岩之底为顶界，以庙沟灰岩底为底界，新增储量区北部为三角洲平原亚相，以发育分流河道和泛滥平原为特征；南部为三角洲前缘亚相，以发育水下分流河道和分流间湾沉积为特征，厚度一般为 40 ~ 60 m。依岩性组合可分为两部分，下部以砂岩为主，夹煤层，有时夹生物碎屑灰岩透镜体，厚度 20 ~ 40 m；上部以砂岩、泥岩为主，夹灰岩及煤层，厚度约 45 m，自北向南灰岩厚度增加（图 1）。



据文献 [18] 修改。

图 1 鄂尔多斯盆地地质图
Fig. 1 Geological map of Ordos Basin

2 岩石物理实验

2.1 孔隙度渗透率实验

本次岩石物理实验样品选自 X-2c1 井太原组层段，具体岩石样品基础数据如表 1 所示，11 块

砂岩样品孔隙度范围为 5.21% ~ 11.26%，渗透率范围为 $(0.1328 \sim 1.2611) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。表 1 中束缚水饱和度是基于毛管压力曲线数据得到，束缚水饱和度对应孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙空间。

表 1 太原组岩石样品基本信息
Table 1 Basic information of rock samples in Taiyuan Formation

样品号	岩性	层组	长度/mm	直径/mm	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	RQI	束缚水饱和度
X-1	砂岩	太原组	45.12	25.25	5.21	0.1328	0.1597	0.7000
X-4	砂岩	太原组	41.85	25.21	9.65	0.4676	0.2201	0.4101
X-5	砂岩	太原组	45.12	25.22	9.76	0.6157	0.2512	0.4333
X-6	砂岩	太原组	44.45	25.24	9.75	0.5235	0.2317	0.4601
X-7	砂岩	太原组	41.79	25.19	10.08	0.4847	0.2193	0.4030
X-9	砂岩	太原组	41.06	25.22	11.12	0.7265	0.2556	0.3559
X-11	砂岩	太原组	47.12	25.25	10.88	1.1125	0.3198	0.4162
X-12	砂岩	太原组	45.23	25.30	10.44	1.0861	0.3225	0.4399
X-13	砂岩	太原组	42.50	25.29	8.58	0.6948	0.2846	0.4029
X-14	砂岩	太原组	45.90	25.26	11.26	1.0869	0.3107	0.3425
X-15	砂岩	太原组	43.58	25.28	10.34	1.2611	0.3492	0.3831

图 2 为样品的孔隙度与渗透率交汇图，可以看出孔隙度与渗透率成正相关趋势，由趋势线方程，得到其相关因子 R^2 达到了 0.7688，说明其孔渗关系较好，渗透率与孔隙度的关系为：

$$\text{Perm} = 0.0019\text{Por}^{2.5864} \tag{1}$$

式中：Perm 为渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)，Por 为孔隙度 (%)。通过这个孔渗关系式，可以直接在井中根据孔隙度解释结果，预测渗透率。

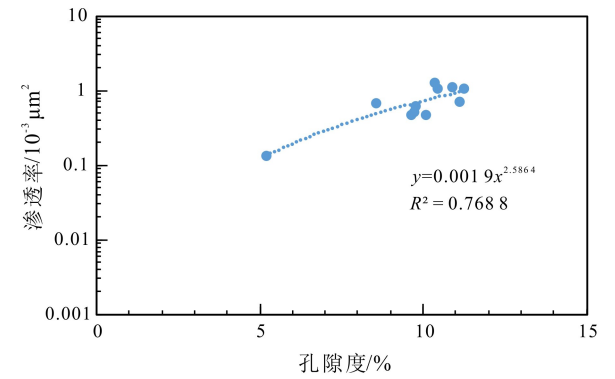


图 2 孔隙度与渗透率交汇图

Fig. 2 Intersection diagram of porosity and permeability

2.2 离心法岩石电阻率实验

离心法岩石电阻率实验是通过对饱水的岩石样本（岩样含水饱和度为 100% 的状态）通过控制岩样不同转速不同时间下离心，来构造不同含水饱和度的数据点。其岩电参数 m（胶结指数）和 n（饱和度指数）值如表 2 所示。这两个参数表征岩石

表 2 太原组岩石样品 m、n 值
Table 2 m and n values of rock samples in Taiyuan Formation

样品号	m	n
X-1	3.293	2.131
X-4	2.216	1.397
X-5	2.236	1.334
X-6	2.277	1.328
X-7	2.178	1.25
X-9	2.053	1.208
X-11	2.111	1.145
X-12	2.150	1.125
X-13	2.416	1.268
X-14	2.111	0.714
X-15	2.108	1.155

石的物性和电性。据表可以发现除了 X-1, 其余样品的 m 和 n 值差别较小, 说明这些样品的物性和电性非常相似。

地层因素指百分百饱和水的纯岩石电阻率 (R_0) 与实验所用的盐水的电阻率 (R_w) 的比值。地层因素 F (无量纲) 和孔隙度、孔隙结构有关。笔者构建的孔隙度与地层因素的模型 (图 3) 中, 除了 X-1 号样品 (红色), 另外 10 块样品 (黑色) 的地层因素与孔隙度的关系趋于一致, 说明其孔隙结构和物性也大致相同。

图 4 是电阻率增大系数 I 与含水饱和度的交汇图。 I 是不同含水饱和度的岩石电阻率与干燥不含水岩样的电阻率的比值。从图 4 中可以看到除了 X-1 号样品 (红色), 其余岩样 (蓝色) 的含水饱和度和电阻率增大系数的相关性比较好, 说明其电性相似程度较高。

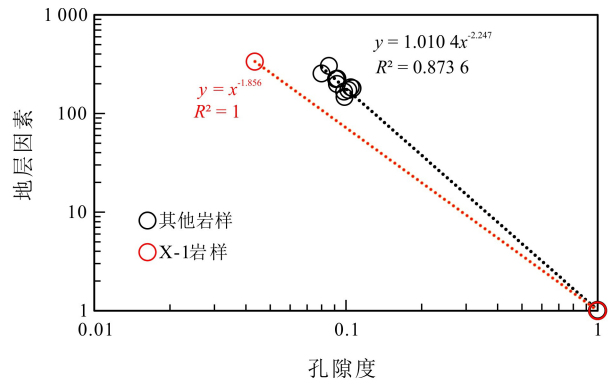


图 3 地层因素与孔隙度的交汇图

Fig. 3 Intersection diagram of stratigraphic factors and porosity

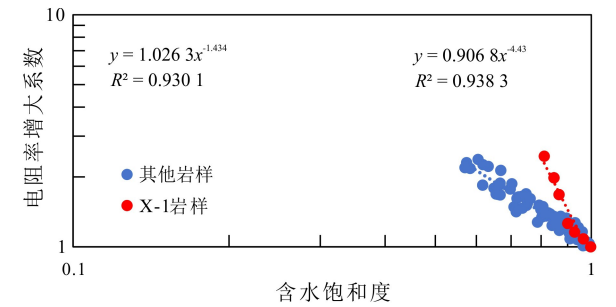


图 4 电阻率增大系数与饱和度的交汇图

Fig. 4 Intersection diagram of resistivity increase coefficients and saturation

3 核磁响应法

核磁响应是氢原子核和磁场相互作用而产生的物理现象。利用核磁共振对致密砂岩孔隙中的氢核进行监测, 得到的横向弛豫信号来自孔隙流体而非岩石骨架。核磁响应法能够检测到岩石样品中所有的孔隙, 其检测参数横向弛豫时间 T_2 谱反映了不同尺寸孔隙的体积分布趋势。一般来说, 横向弛豫时间越大, 孔喉半径越大, 两者之间呈正比关系。核磁响应法主要通过测量岩石中氢核的弛豫时间来揭示储层储集空间特征及流体可动性。因此, 笔者利用横向弛豫时间 T_2 谱可以区分不同大小的孔隙及其比例。

以横向弛豫时间 T_2 为横坐标, 孔隙度分量为纵坐标建立太原组岩石样品在饱和水状态时的核磁曲线 (图 5), 可以看到, 除了 X-1 样品外, 其他样品的曲线形态基本相似, 说明这批岩样的孔隙结构基本一致。

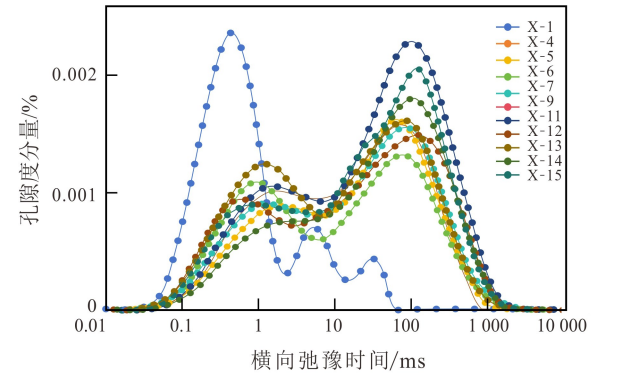


图 5 太原组所有岩石样品的核磁 T_2 谱

Fig. 5 Nuclear magnetic T_2 spectra of all rock samples of Taiyuan Formation

在核磁响应法里有两个重要的参数, 分别为截止值 ($T_{2 \text{ cutoff}}$) 和算术平均值 ($T_{2 \text{ lm}}$)。截止值是划分可动流体和束缚流体 (不可动流体) 临界点的重要参数, 当 T_2 小于 T_2 截止值时, 这部分核磁曲线代表的是孔隙中束缚流体的核磁曲线。同理, 当 T_2 大于 T_2 截止值时, 这部分核磁曲线代表的是孔隙中可动流体的核磁曲线。算术平均值 ($T_{2 \text{ lm}}$) 则是将转换为孔径的参数, 联合实验室实测压汞数据, 即可将每个 T_2 转换为对应的孔径值, 方便我们定位可动流体在孔隙里分布的孔径范围。表 3 为

此 11 个致密砂岩样品的截止值和几何平均值，除了 X-1 号岩样，其余岩样的截止值都在 40 ~ 75 ms 的范围内，说明其性质基本相似，孔隙结构也具有高度相似性。截止值最大值为 74.12 ms，根据截止值的定义，可以发现束缚流体的分布范围整体在 0.01 ~ 75 ms 之间，可动水主要分布在大于 75ms 的部分。由于仪器测量精度的限制，能测量到的最小的值（第一个值）为 0.01 ms。

表 3 太原组实验样品的截止值和算术平均值

Table 3 T_2 cutoff values and arithmetic means of T_2 for experimental samples in Taiyuan Formation

样品号	$T_{2\text{ cutoff}}/\text{ms}$	$T_{2\text{ ln}}/\text{ms}$
X-1	5.36	0.760
X-4	57.66	12.458
X-5	74.12	14.856
X-6	41.87	10.504
X-7	13.36	14.451
X-9	41.87	18.173
X-11	52.61	22.628
X-12	66.12	14.434
X-13	66.12	11.497
X-14	56.54	23.921
X-15	74.12	17.816

图 6 为不同含水饱和度下，X-14 的核磁 T_2 谱，从图中看到，整体上致密砂岩的 T_2 值分布较宽，主要部分介于 0.1 ~ 1 000.0 ms， T_2 谱形态表现出双峰形态（以 10 ms 为界），右峰介于 10.0 ~ 100.0 ms，左峰介于 1.0 ~ 10.0 ms。对比饱和水和离心状态 T_2 谱分布，当 $T_2 > 100.0$ ms 时，孔隙中的可动流体比例明显较高，当 $T_2 < 1.0$ ms 时，对应孔隙中流体基本束缚不动。

核磁曲线随时间比较稳定地向内收缩变小，表明岩样内水的信号稳定减少，正好对应离心过程中含水饱和度的降低。横向弛豫时间一般对应孔径大小，横向弛豫时间越大，对应的孔径尺寸越大。

根据经验法结合该批岩样的压汞数据和核磁曲线特征，笔者将小孔范围定为 0.01 ~ 5 ms，大孔范围内为 5 ~ 10 000 ms，图 6 是 X-14 岩样通过核磁响应法测量得到的不同含水饱和度下的核磁 T_2

谱。从图 6 可以看出，小孔（0.01 ~ 5 ms）里的水信号也是一个总体减少的趋势，这是由于在离心力作用下，孔隙微毛细管里的水受离心力的作用被离出。值得注意的是，在离心过程中，虽然岩石在离心机内处于低温状态以减少蒸发效应的影响，但是由于长时间离心和静制（达到平衡），也会有少量的水分蒸发。

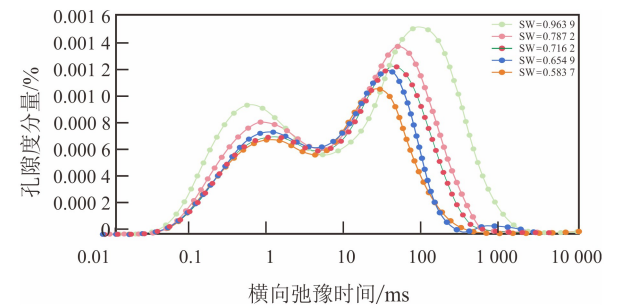


图 6 X-14 核磁 T_2 谱

Fig. 6 Nuclear magnetic T_2 spectra of X-14

表 4 为 X-14 不同含水饱和度状态下大小孔内水含量的变化，其原因为小孔的毛管吸附力比较强，大孔内的水更容易流失，也说明可动流体在大孔范围内分布较多。但是同时也发现离心过程中，小孔存在水信号增强的现象，小孔里的束缚水分为黏土束缚水和微毛细水。

表 4 X-14 不同含水饱和度下大小孔内的含水量分布

Table 4 Water content distributions in large and small pores under different water saturation of X-14

含水饱和度	小孔含水量占比/%	大孔含水量占比/%
1.000 0	25.599 544 7	74.4
0.963 9	35.310 350 9	61.6
0.787 2	30.008 610 9	48.2
0.716 2	26.370 242 7	42.3
0.654 9	27.065 061 7	37.1
0.583 7	25.616 125 2	32.3

4 分形维数识别流体分布

分形几何学是描述复杂的、不规则现象和过程的有力工具，同时也为研究油气储层多孔介质复杂的微观孔隙结构提供了新的思路和方法。从核磁

T_2 谱分布中获取毛管压力信息评价岩石孔隙结构是核磁响应法独特的优势之一。核磁 T_2 谱分布与孔隙结构有直接关系, 因而能获得毛管压力信息。利用核磁 T_2 谱进行储层孔隙分形结构研究, 该方法较常规的岩石孔隙分形结构研究方法具有快速、经济、对岩心无损坏等特点。

致密砂岩拥有很好的分形性质, 前人已经推导出了通过 T_2 和核磁孔隙度累积分量 S_v 求取分形维数的公式^[19] 为:

$$Lg^{S_v} = (3 - D) Lg^{T_2} + (D - 3) Lg^{T_{2max}} \quad (2)$$

式中: S_v 为核磁孔隙度累积孔隙分量 (%), 指的是横向弛豫时间小于 T_2 的孔隙累积体积所占总孔隙体积的百分比。D 为分形维数 Lg^{T_2} (无量纲), T_2 为横向弛豫时间, T_{2MAX} 为最大的 T_2 时间。该式说明如储层岩石孔隙结构具有分形性质则核磁共振资料中的 Lg^{S_v} (无量纲) 与 Lg^{T_2} (无量纲) 应有线性相关关系, 可用图解法或回归分析法加以验证; 如存在线性相关关系, 可根据回归方程的系数计算出孔隙结构分形维数及最大弛豫时间。分形维数在 2 ~ 3 变化, 分形维数为 2 时, 孔隙均匀变化, 分形维数越大储层孔隙结构越复杂, 非均质性越强。

根据回归分析给出的相关系数可说明孔隙分形

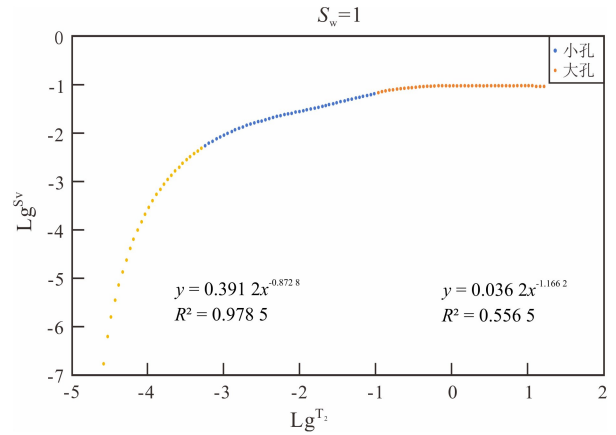


图7 X-14 岩样横向弛豫时间与累积计孔隙度分量的双对数关系

Fig.7 Double logarithmic relationship between transverse relaxation time and cumulative porosity component of X-14

图7 为 X-14 岩样横向弛豫时间 T_2 与核磁孔隙度累积分量 S_v 的双对数关系图, 可以明显看到分为两段 (蓝色和橘色显示)。蓝色表明的是小孔部分, 橘色表明的是大孔部分, 两者存在明显的拐点, 通过这个拐点, 可以看出大小孔之间存在性质的差异性, 这也是笔者区分大小孔边界的依据之一。

表5 为计算得到的 X-14 岩样不同含水饱和度点的分形维数, 可以发现随着含水饱和度的降低, 大孔分形维数稳定变大, 印证了可动流体主要分布在大孔内。小孔的分形维数受到的影响因素过多, 并且可动流体主要存在于大孔内, 因此笔者主要研究大孔部分。

图8 为 X-14 岩样大小孔分形维数与电阻率增大系数的关系图, 可以看出, 随着分形维数增大, 电阻率增大系数也增大, 说明分形维数 D 与电阻率增大系数 I 有明显的正相关性。究其原因, 分形

表5 X-14 岩样不同含水饱和度点的分形维数
Table 5 Fractal dimensions of different water saturation points of X-14

含水饱和度	小孔分形维数	大孔分形维数
$S_w = 1.000\ 0$	2.640 4	2.941 0
$S_w = 0.963\ 9$	2.763 9	2.949 7
$S_w = 0.787\ 2$	2.714 4	2.978 4
$S_w = 0.716\ 2$	2.695 9	2.983 5
$S_w = 0.654\ 9$	2.699 2	2.990 3
$S_w = 0.583\ 7$	2.705 9	2.993 8

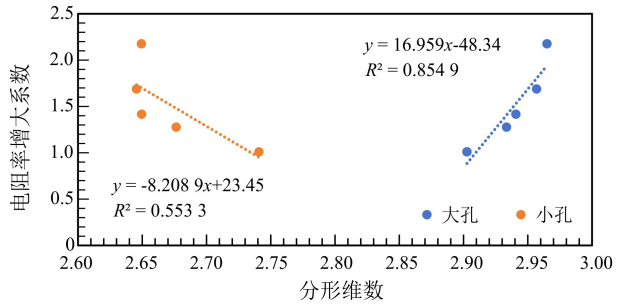


图8 X-14 岩样大小孔分形维数与电阻率增大系数关系图

Fig.8 Relationship diagram between fractal dimensions of large and small pores and resistivity increase coefficients of X-14

维数增大说明含水饱和度在降低，含水饱和度降低导致岩样的电阻率增大，所以电阻率系数也变大。因此分形维数越大，导电性变小。

但是小孔分形维数和电阻率增大系数存在突变点，排除实验误差的原因，合理解释为，离心过程中，大孔的可动水在离心过程中甩到了小孔里，小孔毛细管压力较大或者是黏土对水的吸附作用导致。

图 9 为 X-14 岩样大小孔分形维数与含水饱和度的关系图，可以看到随着分形维数的变大，含水饱和度在降低，两者之间形成一个相反的趋势，呈现负相关性。且小孔的相关因子 R^2 只有 0.229 1，说明小孔的规律性较差，而大孔则恰恰相反，规律性特别好。

由于 X-1 岩样与其他 10 块岩样孔隙结构有明显差异，因此不参与讨论。

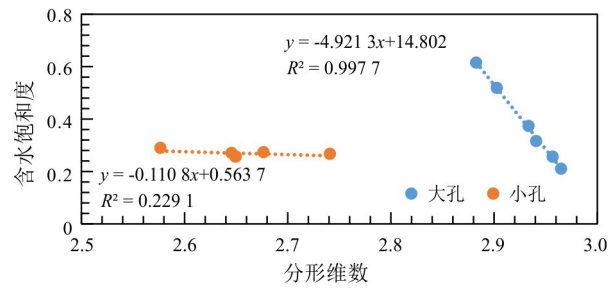


图 9 X-14 岩样大小孔分形维数与含水饱和度关系图

Fig. 9 Relationship diagram between fractal dimensions of large and small pores and water saturation of X-14

表 6 为其他 10 块岩样大小孔不同含水饱和度的分形维数实测数据。由于一号岩样与其他 10 块岩样孔隙结构有明显差异，因此不参与讨论。可以看出与典型的 X-14 号岩样是一个相似的趋势，也证明了这些岩样的结构和导电性质相似。

图 10 为除了 X-1 号岩样和 X-14 号岩样的其余 9 块岩样的分形维数与电阻率增大系数的关系图。可以看到大孔分形维数与电阻率增大系数有明显的线性相关关系，随着分形维数增大，电阻率增大系数也增大，其特征趋势一致，说明该结论并非存在偶然性。同时也说明这批岩样的孔渗关系对导电性的影响较小。

表 6 太原组 10 块样品不同含水饱和度点的分形维数

Table 6 Fractal dimensions of different water saturation points of 10 samples in Taiyuan Formation

样品号	饱和度	大孔 D	小孔 D
X-4	$S_w = 1.000\ 0$	2.923 2	2.576 5
	$S_w = 0.981\ 8$	2.924 6	2.740 8
	$S_w = 0.960\ 4$	2.927 6	2.676 4
X-5	$S_w = 1.000\ 0$	2.913 5	2.598 1
	$S_w = 0.948\ 5$	2.921 5	2.629 0
	$S_w = 0.803\ 6$	2.948 7	2.642 7
	$S_w = 0.724\ 7$	2.961 9	2.632 3
X-6	$S_w = 1.000\ 0$	2.923 2	2.716 3
	$S_w = 0.939\ 5$	2.931 4	2.718 6
	$S_w = 0.660\ 1$	2.978 5	2.750 1
X-7	$S_w = 1.000\ 0$	2.911 9	2.633 5
	$S_w = 0.990\ 7$	2.918 0	2.643 3
	$S_w = 0.895\ 1$	2.928 5	2.659 5
X-9	$S_w = 1.000\ 0$	2.896 8	2.638 2
	$S_w = 0.955\ 1$	2.917 6	2.760 7
	$S_w = 0.917\ 0$	2.919 1	2.757 2
	$S_w = 0.667\ 1$	2.952 8	2.632 0
X-11	$S_w = 1.000\ 0$	2.883 6	2.612 8
	$S_w = 0.944\ 0$	2.904 2	2.740 5
	$S_w = 0.802\ 4$	2.923 6	2.593 5
	$S_w = 0.570\ 4$	2.966 7	2.633 4
X-12	$S_w = 1.000\ 0$	2.904 3	2.716 1
	$S_w = 0.973\ 2$	2.908 3	2.727 5
	$S_w = 0.922\ 5$	2.915 1	2.725 1
	$S_w = 0.860\ 8$	2.926 7	2.695 1
	$S_w = 0.668\ 8$	2.949 6	2.570 5
	$S_w = 0.617\ 7$	2.961 6	2.592 5
X-13	$S_w = 1.000\ 0$	2.921 5	2.673 7
	$S_w = 0.930\ 8$	2.930 0	2.667 1
	$S_w = 0.806\ 2$	2.951 5	2.656 4
	$S_w = 0.748\ 3$	2.961 1	2.685 3
	$S_w = 0.702\ 6$	2.971 1	2.734 6
X-14	$S_w = 1.000\ 0$	2.882 6	2.576 5
	$S_w = 0.963\ 9$	2.902 6	2.740 8
	$S_w = 0.787\ 2$	2.933 4	2.676 4
	$S_w = 0.716\ 2$	2.940 7	2.649 5
	$S_w = 0.654\ 9$	2.956 8	2.645 5
	$S_w = 0.583\ 7$	2.964 9	2.649 3
X-15	$S_w = 1.000\ 0$	2.895 9	2.672 3
	$S_w = 0.947\ 4$	2.910 7	2.738 4
	$S_w = 0.846\ 2$	2.914 8	2.617 1
	$S_w = 0.632\ 6$	2.962 6	2.600 7

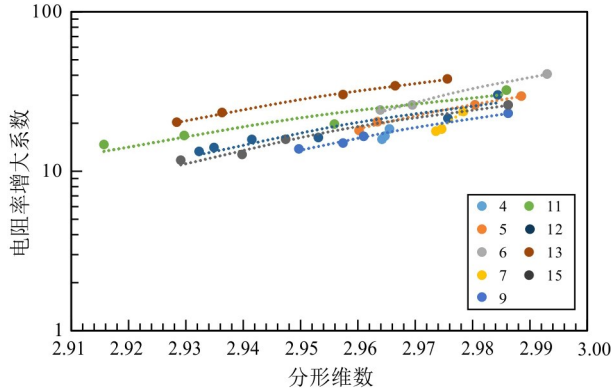


图 10 其他 9 块岩样分形维数与电阻率增大系数的关系图

Fig. 10 Relationship diagram between fractal dimensions and resistivity increase coefficients of other nine rock samples

流动单元的特征常采用储层微观特征参数与宏观特征参数来表征, 微观特征参数如排驱压力 (P_{cd})、中值压力 (P_{50})、分选系数 CS 。宏观特征参数如品质因子 (RQI) 和流动层段指标 (FZI)。品质因子 RQI 可以通过孔隙度和渗透率来计算, 常用来表征储集层的宏观流动单元特征, 表达式为:

$$RQI = \sqrt{\frac{Perm}{Por}} \quad (3)$$

式中: $Perm$ 为渗透率 ($10^{-3} \mu m^2$), Por 为孔隙度 (%)。

图 11 为岩样百分百含水的纯岩石电阻率 (R_0) 与品质因子的关系图。可以看到大小孔的这两个参数的关系都是呈现负相关的趋势。大小孔的整体孔隙结构大部分类似。

图 12 为 10 块岩样饱和时分形维数与 RQI 的关系图, 显示当岩样都饱和时, 分形维数与品质因子呈现负相关的趋势, 其 RQI 越小, 孔渗关系越差, 分形维数越大。结合图 11 可以看出, 大孔 RQI 与 R_0 呈现较小的负相关趋势, 说明孔渗关系越差, R_0 越大, 导电性越小, 所以可以推断分形维数与 R_0 存在一定的相关关系。理论上讲, 分形维数越大, R_0 越大, 导电性越小。

图 13 为 10 块岩样分形维数与 R_0 的关系图,

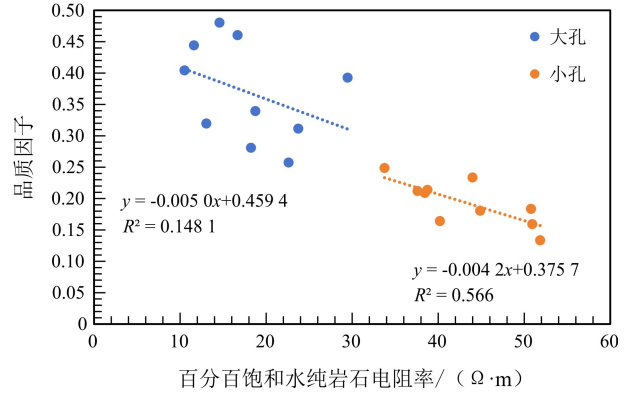


图 11 百分百饱和水纯岩石电阻率和品质因子关系图

Fig. 11 Relationship diagram between resistivity of 100% saturated pure rock and reservoir quality index

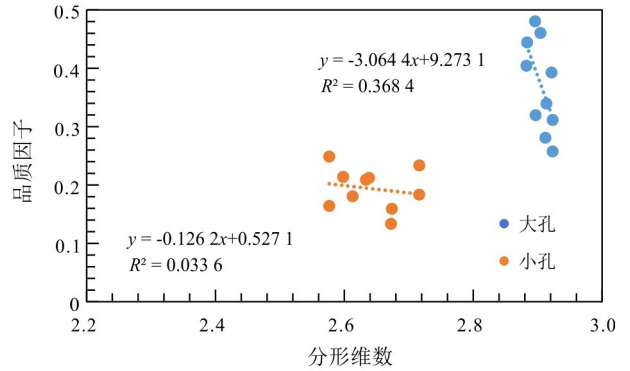


图 12 10 块岩样饱和时分形维数与品质因子的关系图

Fig. 12 Relationship diagram between fractal dimensions and reservoir quality index on saturation time of ten rock samples

当所有岩样都饱和时, 分形维数与 R_0 呈现出正相关的趋势, 分形维数越大, R_0 越大, 说明岩样饱和时, 分形维数越大的时候, 导电性越小。所以笔者认为, 当求得一批岩样的饱和时分形维数, 即可判断其导电性好坏。分形维数越大, 导电性越差。

本文将岩石按电导性和大小孔不同饱和度下核磁曲线的孔隙度累积分量差值的关系分为两类。第一类岩样的特征是小孔的孔隙度累积分量一直减少。第二类岩样特征为小孔减少后有增加的现象。

图 14 为第一类岩样的累积孔隙度分量与电导率差值的关系图, S_r (无量纲) 为孔隙度的累积分

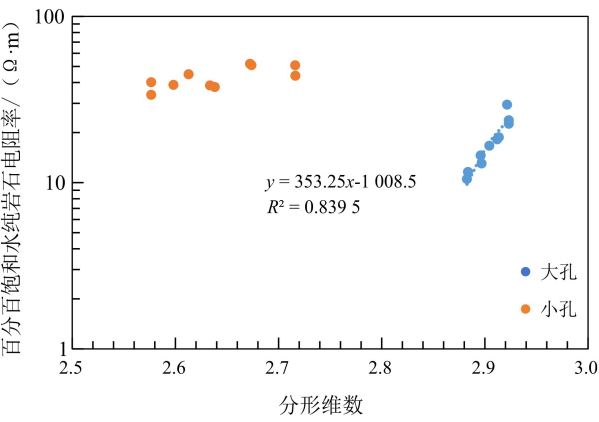


图 13 10 块岩样分形维数与百分百饱和和水纯岩石电阻率的交汇图

Fig. 13 Intersection diagram of fractal dimension of 10 rock samples and resistivity of 100 % saturated pure rock

量，在本文代表的意义是每一次离心后的水的孔隙度分量与上一次的孔隙度分量的差值。 c (S/m) 为百分百含水时岩样的电导率与离心后不同含水饱和度时岩样的电导率的差值。从图中可以看出，每个小孔的孔隙度累积分量都是正值，说明每一次离心，可动水都在减少，表明这 4 块岩样小孔部分的孔隙结构较好，孔隙通道的连通性好。

图 15 为第二类岩样的累积孔隙度分量与电导率差值的关系图。可以看出，孔隙度分量出现负值，说明含水量在增加，一方面是因为大孔隙中的水在较高离心力作用下进入了连接大孔隙的小喉道内，另一方面可能由于黏土矿物对水的吸附作用导致大孔隙内残余水吸附在孔壁表面，与图 8 表征的结果具有一致性。

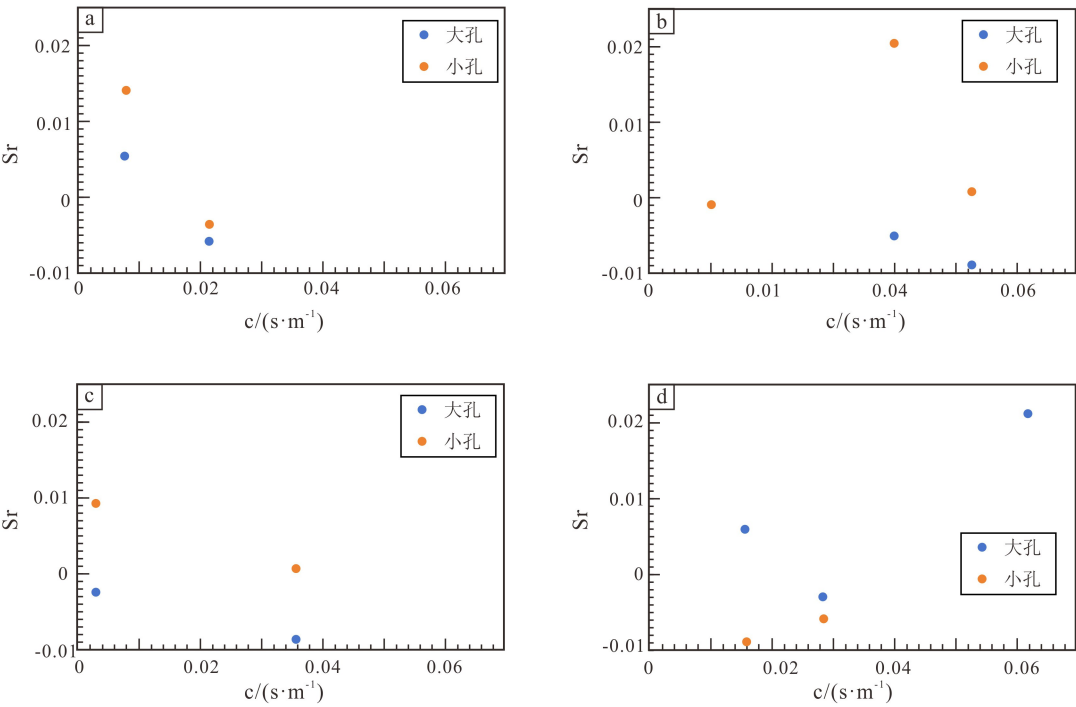


图 14 第一类岩样的累积孔隙度分量与电导率差值的关系图

Fig. 14 Relationship diagram of cumulative porosity component vs. conductivity difference for class I rock samples

图 16 为上述划分的两类岩样在不同孔径范围内可动水的分布图，可以看到 $1 \sim 10 \mu m$ 范围内可动水含量最多，占总可动水的一半以上，第一类岩样在 $0 \sim 0.01 \mu m$ 范围内，可动水含量出现负值，说明这个孔径范围内存在水进入的情况，印证

了前面表 4 的结果：对于小孔部分，随着离心过程中，岩石总体含水饱和度的减小，但其含水量并不是稳定减小的趋势。在 $0.01 \sim 0.1 \mu m$ 和 $0.1 \sim 1 \mu m$ 这两个范围内，两类岩样的可动水含量相差不大。

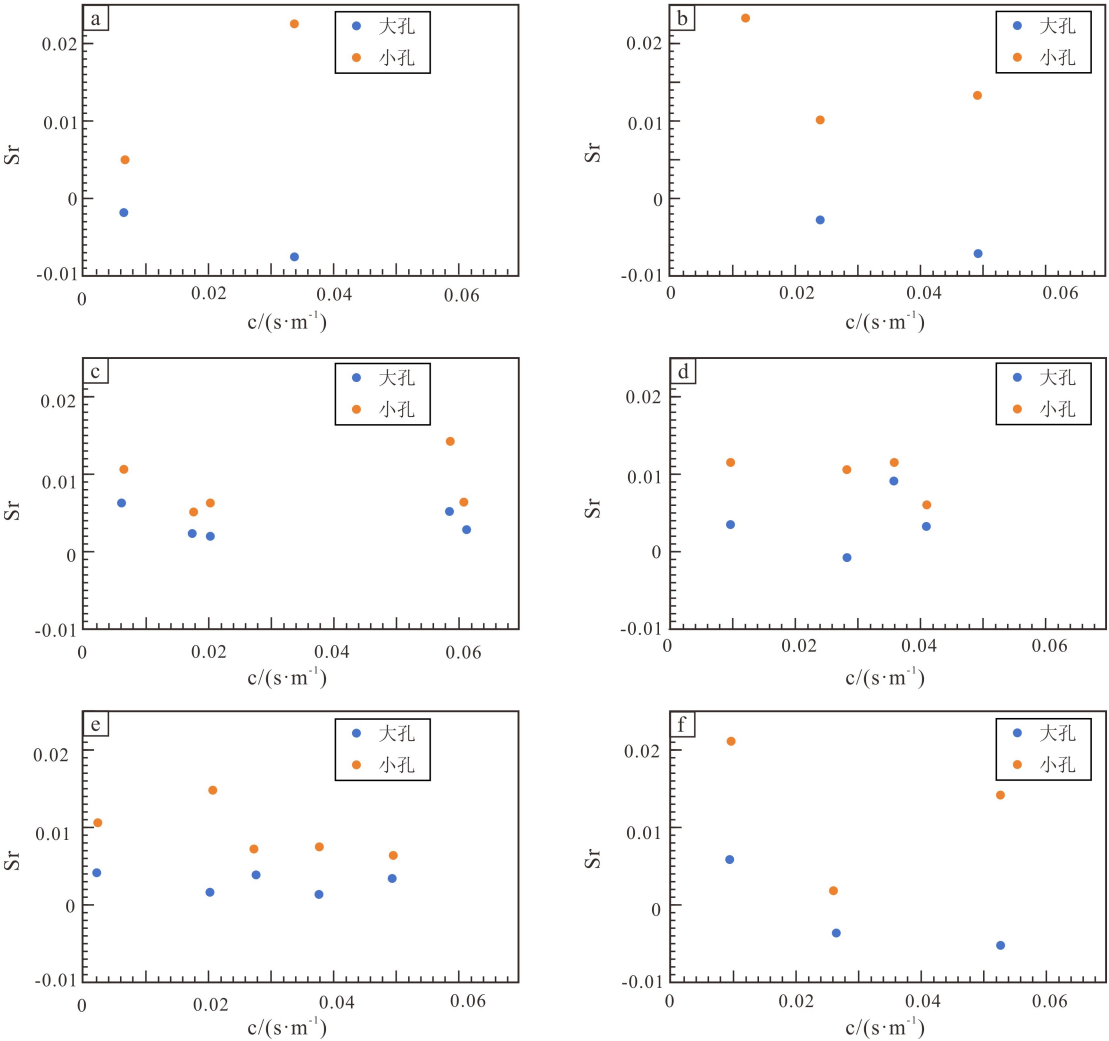


图 15 第二类岩样的累积孔隙度分量与电导率差值的关系图

Fig. 15 Relationship diagram of cumulative porosity component vs. conductivity difference for class II rock samples

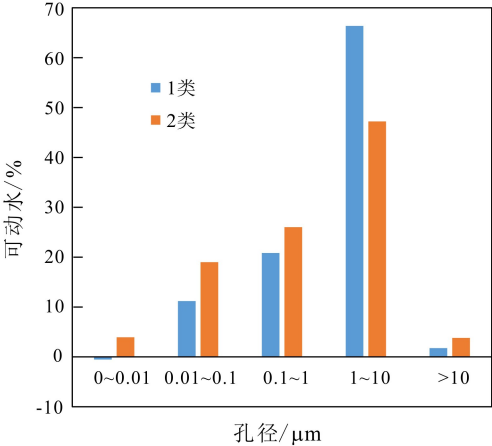


图 16 两类岩石的不同孔径范围内可动水分布

Fig. 16 Dynamic water distribution in different aperture range of two types of rocks

5 结论

(1) 研究区致密砂岩性质相似，孔隙结构也相似。整体上 T_2 值分布较宽，介于 $0.1 \sim 1\,000.0\text{ ms}$ ， T_2 谱形态表现出双峰形态（以 10 ms 为界），右峰介于 $10.0 \sim 100.0\text{ ms}$ ，左峰介于 $1.0 \sim 10.0\text{ ms}$ 。对比饱和水和离心状态 T_2 谱分布，当 $T_2 > 100.0\text{ ms}$ 时，孔隙中的可动流体比例明显较高，当 $T_2 < 1.0\text{ ms}$ 时，对应孔隙中流体基本束缚不动，说明大孔中流体可动性明显高于小孔。

(2) 可动水的分布主要在 $1 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内，其次是 $0.01 \sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.1 \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 这两个范围。在离心过程中，存在着小孔含水量增加的现象。这一方面是因为大孔隙中的水在较高离心力作

用下进入了连接大孔隙的小喉道内,另一方面可能由于黏土矿物对水的吸附作用导致大孔隙内残余水被吸附在小孔孔壁表面。

(3) 大孔的分形维数对应大孔内流体的分布,分形维数越大,孔内流体越少,呈现负相关的关系,也印证含水饱和度的降低。大孔的分形维数与电阻率增大系数呈现正相关的关系,分形维数越大,电阻率增大系数越大,导电性越小。

(4) 流体分布对导电性的影响为大孔内流体分布越多,分形维数越小,导电性越大。流体分布与导电性是正相关的趋势。分形维数也可直接反映致密砂岩的大孔导电性和孔渗关系,分形维数越大,孔渗关系越差,导电性也就越差。

参考文献:

- [1] 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. Current situation and prospect of tight sandstone gas development in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42 (1): 83-92.
- [2] 贾进斗, 何国琦, 李茂松, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及其对古生界天然气的控制 [J]. 高校地质学报, 1997, 3 (2): 144-153.
JIA J D, HE G Q, LI M S, et al. Characteristics of basal structure in Ordos Basin and its control over Paleozoic natural gas [J]. Journal of College Geology, 1997, 3 (2): 144-153.
- [3] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集的控制作用 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (5): 1-5.
ZHAO W Z, HU S Y, WANG Z C, et al. Controlling role of basal fault in Ordos Basin in the Upper Triassic extension formation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30 (5): 1-5.
- [4] 边瑞康, 刘光祥, 刘忠宝, 等. 鄂尔多斯盆地长武—富县地区长73亚段岩性组合特征及页岩油有利区评价 [J]. 世界地质, 2022, 41 (4): 780-792, 814.
BIAN R K, LIU G X, LIU Z B, et al. Characteristics of lithological combination and evaluation of favorable areas for shale oil in the Chang73 sub-sequence of Changwu-Fuxian area, Ordos Basin [J]. World Geology, 2022, 41 (4): 780-792, 814.
- [5] 冯艳伟, 陈勇, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地中部地区马家沟组断裂控制天然气运移方向的流体包裹体证据 [J]. 地球科学, 2021, 46 (10): 3601-3614.
FENG Y W, CHEN Y, ZHAO Z Y, et al. Evidence of fluid inclusion for fracture control in Majiagou Formation in central region of Ordos Basin [J]. Earth Sciences, 2021, 46 (10): 3601-3614.
- [6] 赵家锐, 祝海华, 冯小哲. 鄂尔多斯盆地苏里格地区下石盒子组致密气储层孔隙结构分类及影响因素 [J]. 地质论评, 2020, 66 (增刊1): 112-114.
ZHAO J R, ZHU H H, FENG X Z. Classification and influencing factors of pore structure of Lower Stone Box Formation in Surlige region of Ordos Basin [J]. Geological Review, 2020, 66 (Suppl. 1): 112-114.
- [7] 张瀚澎, 任大忠, 张荣军, 等. 苏里格致密砂岩气藏流体微观分布规律及影响因素 [J]. 矿业科学学报, 2023, 8 (6): 744-757.
ZHANG H P, REN D Z, ZHANG R J, et al. Microscopic distribution law and influencing factors of sulige dense sandstone gas reservoir [J]. Journal of Mining Science, 2023, 8 (6): 744-757.
- [8] 刘洪平, 骆杨, 赵彦超, 等. 致密砂岩气层中成岩相对岩电特征的影响 [J]. 地球科学, 2017, 42 (4): 652-660.
LIU H P, LUO Y, ZHAO Y C, et al. Influence of the relative electrical characteristics of diagenesis in tight sandstone gas strata [J]. Earth Sciences, 2017, 42 (4): 652-660.
- [9] 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 X Z, ZHU H H. Microscopic pore structure and fractal characteristics of the Lower Stone Box Group dense sandstone reservoir in Sulige region of Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38 (3): 147-156.
- [10] 李亚婷, 童长兵, 韩进, 等. 致密砂岩储层可动流体分布特征及主控因素 [J]. 特种油气藏, 2024, 31 (4): 44-53.
LI Y T, TONG C B, HAN J, et al. Distribution characteristics of mobile fluids in tight sandstone reservoirs and controlling factors [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2024, 31 (4): 44-53.
- [11] 庞玉东, 刘元良, 张丽, 等. 鄂尔多斯盆地华池地

- 区长 8 段致密砂岩储层微观孔隙结构及流体可动性 [J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42 (3): 1-10.
- PANG Y D, LIU Y L, ZHANG L, et al. Microscopic pore structure and fluid mobility of 8 long dense sandstone reservoir in Huachi area of Ordos Basin [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2023, 42 (3): 1-10.
- [12] 张筠, 吴见萌, 朱国璋. 致密气核磁共振测井观测模式及气水弛豫分析: 以四川盆地为例 [J]. 天然气工业, 2018, 38 (1): 49-55.
- ZHANG Y, WU J M, ZHU G Z. Dense gas NMR logging observation mode and gas-water relaxation analysis: take Sichuan Basin as an example [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38 (1): 49-55.
- [13] 王英伟, 张超谟, 严伟, 等. 核磁共振测井在致密砂岩气层储层分类评价中的应用 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34 (1): 75-79.
- WANG Y W, ZHANG C M, YAN W, et al. Application of NMR logging in classification evaluation of dense sandstone gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2012, 34 (1): 75-79.
- [14] 闫健, 秦大鹏, 王平平, 等. 鄂尔多斯盆地致密砂岩储层可动流体赋存特征及其影响因素 [J]. 油气地质与采收率, 2020, 27 (6): 47-56.
- YAN J, QIN D P, WANG P P, et al. Characteristics of dynamic fluid occurrence and influencing factors in Ordos Basin [J]. Oil Recovery, 2020, 27 (6): 47-56.
- [15] 李进步, 王继平, 王艳, 等. 致密砂岩储层中气体渗流规律实验研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36 (6): 154-158.
- LI J B, WANG J P, WANG Y, et al. Experimental study on gas seepage law in tight sandstone reservoir [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2017, 36 (6): 154-158.
- [16] 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 throat structure and dynamic fluid distribution characteristics of tight sandstone reservoir: take the reservoir in Box 8 of Shenmu area in eastern Ordos Basin as an example [J]. Geological Science and Technology Bulletin, 2024, 43 (2): 41-51.
- [17] 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. Characteristics of microscopic porous throat distribution and control of dynamic fluid [J]. Petroleum Experimental Geology, 2021, 43 (1): 77-85.
- [18] 韩文学, 麻伟娇, 陶士振, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界灰岩烃源岩生烃潜力评价 [J]. 地球科学, 2018, 43 (2): 599-609.
- HAN W X, MA W J, TAO S Z, et al. Evaluation of hydrocarbon potential of Upper Paleozoic limestone source in Ordos Basin [J]. Earth Science, 2018, 43 (2): 599-609.
- [19] 杨蒙, 王洋, 薛金泉, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区长 2 段低阻油层特征及油气地质意义 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (20): 8487-8495.
- YANG M, WANG Y, XUE J Q, et al. Characteristics of low resistance oil layer and geological significance of oil and gas in Zhidan region of Ordos Basin [J]. Science, Technology and Engineering, 2024, 24 (20): 8487-8495.
- [20] XIAO H, WANG H, NING Y, et al. Study of pore-throat structure in tight triassic sandstone: a case study on the Late Triassic Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin, China [J]. Minerals, 2024, 14(6): 617.
- [21] RUI L H, WEN H H, JIU B, et al. Fractal characteristics and main controlling factors of high-quality tight sandstone reservoirs in the southeastern Ordos Basin [J]. Journal of Earth Science, 2024, 35(2): 631-641.
- [22] JIN D, ZHI L H, JIN L C, et al. Pore structure and fractal characteristics of tight sandstone: a case study for Huagang Formation in the Xihu Sag, East China Sea Basin, China [J]. Energies, 2023, 16 (4): 2013.
- [23] LI A, TIAN W, REN X, et al. Investigations of water saturation and fractal characteristics in tight sandstone gas reservoirs using centrifugation and NMR experiments [J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2021, 26 (4): 405-421.
- [24] ZHANG H, LI G, GUO H, et al. Applications of nuclear magnetic resonance (NMR) logging in tight sandstone reservoir pore structure characterization [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 572.