

# 分形维数在复杂碳酸盐岩储集空间类型分析中的应用

——以靖西地区马家沟组中组合为例

杨小明<sup>1,2</sup>, 寇小攀<sup>1,2</sup>, 陈 阵<sup>1,2</sup>, 赵太平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安

<sup>2</sup>低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安

Email: yangxm\_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021年8月6日; 录用日期: 2021年8月30日; 发布日期: 2021年9月6日

## 摘 要

碳酸盐岩储集空间类型评价对于碳酸盐岩储层勘探开发具有重要指导作用。靖西地区马家沟组中组合碳酸盐岩储层储集空间可划分为溶蚀孔(洞)、晶间孔和裂缝三种类型。三类储集空间类型的毛管压力曲线形态具有明显的类别区分特征。计算了25块岩心样品毛管压力曲线的分形维数,发现分形维数对三类储层具有明显的可区分性。由于毛管压力曲线和核磁共振测井资料均反映储层微观孔隙结构特征,但工区核磁共振测井资料相对较少,而电成像测井资料丰富,因此,从电成像测井资料中提取视孔隙度谱,并把视孔隙度谱转化为类似核磁共振 $T_2$ 谱特征曲线,采用计算核磁共振 $T_2$ 谱分形维数的方法,计算电成像资料的分形维数,并把这一分形维数用于靖西地区马家沟组中组合碳酸盐岩储集空间类型的划分。应用效果表明,利用电成像资料获得的分形维数,可以作为储集空间类型划分的重要参数。

## 关键词

碳酸盐岩储层, 分形维数, 储集空间类型, 成像测井, 靖西地区

# The Application of Fractal Dimension in Analysis of Complex Carbonate Reservoir Space Type

——A Case of the Middle Array of Majiagou Formation of Jingxi Area

Xiaoming Yang<sup>1,2</sup>, Xiaopan Kou<sup>1,2</sup>, Zhen Chen<sup>1,2</sup>, Taiping Zhao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Exploration and Development Institute of Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an Shaanxi

文章引用: 杨小明, 寇小攀, 陈阵, 赵太平. 分形维数在复杂碳酸盐岩储集空间类型分析中的应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(9): 1131-1140. DOI: 10.12677/ag.2021.119109

## Abstract

The evaluation of carbonate reservoir space type plays an important role in the exploration and development of carbonate reservoir. The reservoir space of carbonate reservoirs in the middle array of Majiagou formation in Jingxi area can be divided into three types: dissolved pores (caves), intercrystalline pores and fractures. The capillary pressure curves of the three types of reservoir space have obvious characteristics of classification. The fractal dimension of capillary pressure curves of 25 core samples is calculated, and it is found that the fractal dimension can distinguish three types of reservoirs. Because the capillary pressure curve and NMR logging data both reflect the microscopic pore structure characteristics of the reservoir, but the NMR logging data in the working area are relatively few, and the electrical imaging logging data are abundant, therefore, the apparent porosity spectrum is extracted from electrical imaging logging data and converted into similar NMR  $T_2$  spectrum characteristic curve. The fractal dimension of electrical imaging data is calculated by calculating the fractal dimension of NMR  $T_2$  spectrum, the fractal dimension is applied to the classification of the carbonate reservoir space types in the middle array of Majiagou formation in the Jingxi area. The application results show that the fractal dimension obtained from electrical imaging data can be used as an important parameter for the classification of reservoir space.

## Keywords

Carbonate Reservoir, Fractal Dimension, Reservoir Space Type, Imaging Logging, Jingxi Area

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

碳酸盐岩储层储集空间类型评价对于其勘探开发具有重要指导作用。与碎屑岩相比,碳酸盐岩储层一般具有基质孔隙、溶蚀孔洞、裂缝等多种储集空间类型,次生变化明显,非均质性强[1]。对于如何评价碳酸盐岩储层类型,前人做了不少工作,高楚桥提出由岩石导电效率区分碳酸盐岩储层类型的原理和方法,推导了岩石导电效率与岩石中孔洞大小、裂缝宽度以及导电效率与孔洞大小、喉道直径之间的关系式[2]。傅海成等通过对具有孔隙、裂缝、溶洞复杂孔隙空间结构的碳酸盐岩储层测井响应特征的研究,建立了针对塔里木盆地碳酸盐岩储层储集空间的测井识别方法[3][4]。胡瑞波通过对歧口凹陷沙一下段湖相碳酸盐岩储层不同岩性测井响应特征的分析,提出了利用测井响应特征及岩性敏感系数交会图法快速识别岩性的方法[5]。刘宇航认为综合微观定量数据与宏观定性资料、囊括地质与岩石物理内涵、兼顾储层静态与油藏动态的多层次分类方法是复杂碳酸盐岩储集岩分类的最有效途径[6]。赵军应用聚类分析方法对储层进行分类[7]。何传亮采用沉积微相-储集空间类型定性识别与流动层带指数定量划分相结合的方法进行流动单元划分[8]。丁晓琪分层次、多尺度对该储集空间进行了储集空间表征[9]。这些都是以定性为主的划分方法,极少有储层类型的定量划分方案。

研究表明,如果储层岩石孔隙结构具有分形特征,则可以利用核磁共振资料计算出孔隙结构分形维数[10][11]。但工区核磁共振测井资料有限,而电阻率成像测井资料丰富,且电成像测井资料比常规测井资料信息量更大,分辨率更高。根据电成像测井具有高分辨率和高井眼覆盖率的特点,利用电成像测井资料结合阿尔奇公式,将电成像电阻率图像转换成孔隙度图像,并在一定深度窗长内对孔隙度进行频率统计分析,计算出孔隙度谱曲线,并利用孔隙度谱计算分形维数,利用该分形维数进行碳酸盐岩储层类型划分。

## 2. 靖西地区储集空间类型

靖西地区位于鄂尔多斯盆地靖边气田西侧,盆地奥陶系马家沟组自上而下被分为上、中、下三个含气组合,上组合马五<sub>1</sub>-马五<sub>4</sub>属于风化壳岩溶型储层,孔隙类型以溶模孔为主;中组合马五<sub>5</sub>-马五<sub>10</sub>和下组合马四段都属于白云岩型岩性储层,孔隙类型主要为晶间孔与晶间溶孔[12]。盆地纵向上有多个产气层系,奥陶系马家沟组五段是重要的产气层之一。

中组合马五<sub>6</sub>、马五<sub>7</sub>段是中组合沉积环境中最复杂的层段,岩石类型复杂,储层结构多样,沉积微相多变。以蒸发岩、泥-粉晶白云岩为主,常有含膏质结构伴生,从储集空间类型上,马五<sub>6</sub>、马五<sub>7</sub>可分为溶孔(洞)型、晶间孔型和裂缝-晶间孔型三种类型。

溶孔(洞)在马家沟组中组合白云岩储层少量发育,它们是由有机/无机的酸液溶蚀所形成的,由于所受后期成岩作用的改造程度不同,溶孔或溶洞的储集性能差异较大。部分溶蚀孔隙被白云石渗流粉砂或巨晶白云石充填而失去了储集能力,部分溶孔或溶洞经过后期的方解石胶结、白云石粉砂/石英充填或半充填而降低了储集性能,仅少部分溶孔未被充填而较完整地保存下来。

晶间孔是鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中组合白云岩储层的重要储集空间,它由白云石化作用和重结晶作用而形成,主要发育在泥粉晶白云岩、粉晶白云岩、粉-细晶白云岩与细晶白云岩等四类白云岩中,且大多数存在于自形程度较高的白云石晶体之间,少量发育在白云石自形晶与他形晶之间。自形晶之间的晶间孔边界平直,孔隙外观常呈现为一个不规则的多边形;而晶间微孔仅少量出现,在泥粉晶白云岩的泥晶颗粒之间可见。

构造缝和溶蚀缝在研究区马家沟组中组合白云岩储层中局部发育,其中大部分被充填,仅有少部分构成了有效的储集空间。发育在中组合白云岩储层的裂缝以构造缝为主,其次为溶蚀缝,也含少量压溶构造缝。

## 3. 储集空间的毛管压力曲线特征

毛细管压力曲线反映储层孔隙结构特征,储层孔隙结构是储层储集空间类型的根本特征[13]。碳酸盐岩储层孔隙结构是影响孔隙连通性的主要因素,毛管压力曲线形态反映孔隙喉道分选性和喉道大小。利用毛管压力资料可以求取储层的各种微观参数,包括排驱压力、中值压力、中值半径、分选系数、变异系数核磁最大汞饱和度等。

储层的微观参数与储层储集空间类型存在一定关系。根据研究区 25 块压汞样品毛管压力资料,以毛管压力曲线形态和排驱压力为基础,参考其他特征参数,可将该区毛管压力曲线分为 3 类(图 1),每一类毛管压力曲线分别对应一类储集空间储层类型,其储集空间特征参数见表 1。

1) 溶孔(洞)型储层:该类储层孔隙度一般在 5.0%~13.7%之间,平均 7.7%,渗透率在  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 18.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间,平均  $5.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层毛管压力曲线有较长的平台,排驱压力小于 0.59 MPa,中值压力小于 2.7 MPa,中值半径大于 0.27  $\mu\text{m}$ ,分选系数 0.44~3.67,变异系数 0.139~0.43,最大汞饱和度 49.27%~92.49%。表明储层喉道较大,孔喉分选不好,储层物性较好。

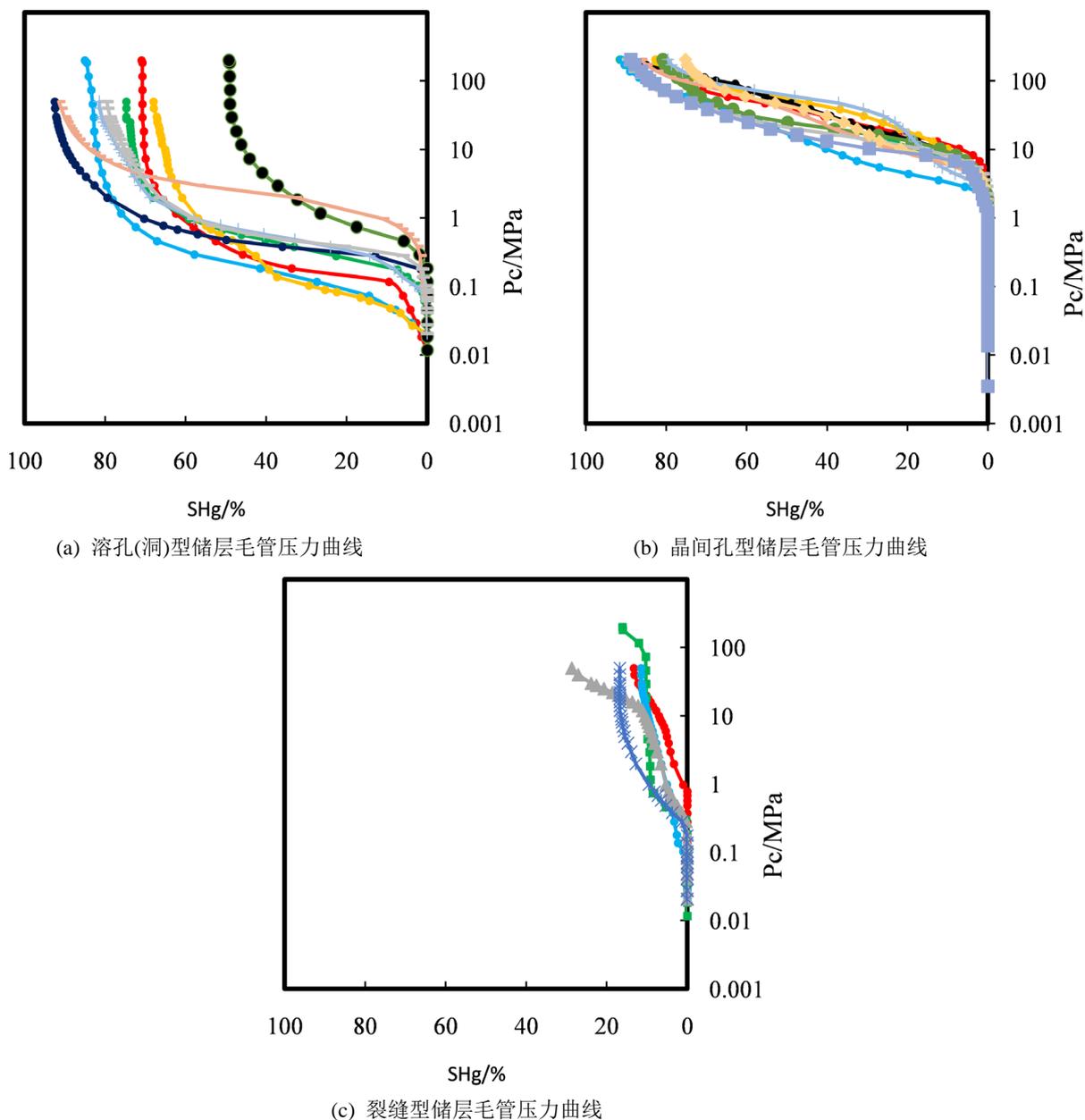


Figure 1. Characteristics of capillary pressure curves of different reservoir space types

图 1. 不同储集空间类型毛管压力曲线特征

2) 晶间孔型储层: 该类储层孔隙度一般在 1.1%~3.6%之间, 平均 1.9%, 渗透率在  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 平均  $0.045 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层的毛管压力曲线有较短的平台, 排驱压力 1.5~2.28 MPa, 中值压力 17.2~61.96 MPa, 中值半径 0.01~0.04  $\mu\text{m}$ , 分选系数 1.13~1.83, 变异系数 7.26~10.65, 最大汞饱和度 75.21%~91.56%。表明储层喉道较小, 但孔喉分选较好, 储层物性好。

3) 裂缝型储层: 该类储层孔隙度一般在 0.9%~2.2%之间, 平均 1.4%, 渗透率在  $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 平均  $0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层的毛管压力曲线无平台, 排驱压力 0.13~4.75 MPa, 分选系数 1.12~1.77, 变异系数 0.08~0.13, 最大汞饱和度 13.3%~28.66%。表明储层孔喉分选较好, 储层物性较差。

**Table 1.** Characteristic parameter of reservoir space  
**表 1.** 储层储集空间特征参数

序号	井名	深度	类型	孔隙度 (%)	渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	排驱压力 (MPa)	中值压力 (MPa)	中值半径 ( $\mu\text{m}$ )	分选系数	变异系数	最大汞饱和度 (%)	分形维数
1	靳 8	3662.46	溶孔	13.75	18.33	0.022	0.459	1.941	0.440	0.430	70.73	2.71
2	靳 9	3612.22	溶孔	8.80	6.58	0.129	0.655	1.123	2.723	0.271	74.72	2.62
3	桃 62	3627.37	溶孔	7.08		0.061	0.239	3.077	1.936	0.191	85.03	2.75
4	桃 62	3621.2	溶孔	2.42		0.170			2.612	0.204	49.27	2.88
5	靳 10	3613.42	溶孔	6.00	3.90	0.033	0.522	1.409	3.675	0.386	67.99	2.84
6	靳 10	3618.16	溶孔	5.00	1.04	0.120	0.747	0.984	2.525	0.251	81.40	2.71
7	桃 84	3270.44	溶孔	8.70	2.96	0.590	2.699	0.272	1.570	0.139	91.47	2.59
8	桃 84	3298.33	溶孔	10.9	4.95	0.208	0.481	1.529	1.989	0.212	92.49	2.53
9	桃 85	3311.07	溶孔	6.70	2.42	0.262	0.698	1.053	2.432	0.237	79.53	2.72
10	靳 2	3591.88	溶孔	1.65	0.02	2.267	38.091	0.019	1.665	10.652	86.35	2.58
11	靳 2	3589.72	溶孔	1.89	0.02	1.854	21.200	0.035	1.226	8.730	89.51	2.47
12	靳 2	3591.57	溶孔	1.78	0.04	1.507	43.884	0.017	1.472	9.839	75.21	2.64
13	靳 2	3587.9	晶间孔	1.57	0.12	2.261	41.576	0.018	1.136	7.263	80.81	2.59
14	靳 2	3574.75	晶间孔	1.37	0.01	1.189	24.999	0.029	1.417	8.864	91.56	2.50
15	莲 119	3985.89	晶间孔	2.50	0.03	1.506	17.227	0.043	1.830	12.418	91.34	2.51
16	桃 58	3692.9	晶间孔	1.12	0.06	2.263	54.642	0.014	1.405	7.803	82.76	2.60
17	桃 58	3689.4	晶间孔	1.18	0.05	1.851	49.429	0.015	1.658	9.192	88.90	2.63
18	靳 3	3618.11	晶间孔	3.57	0.05	2.273	24.871	0.030	1.202	7.381	80.94	2.58
19	桃 92	3518.14	晶间孔	2.43	0.03	2.262	61.965	0.012	1.757	10.287	79.63	2.67
20	桃 58	3686.1	晶间孔	1.88	0.07	1.505	17.634	0.042	1.327	8.782	88.80	2.52
21	靳 12	3633.12	裂缝	1.50	0.89	4.753			1.119	0.081	13.32	2.96
22	桃 62	3623.01	裂缝	2.15		0.133			1.754	0.133	16.16	2.98
23	靳 9	3613.64	裂缝	0.90	0.43	0.462			1.774	0.133	16.82	2.97
24	莲 113	3970.88	裂缝	1.00	0.81	0.884			1.372	0.101	28.66	2.95
25	桃 111	3357.00	裂缝									2.98

#### 4. 储集空间的分形维数特征

若储层孔径分布符合分形结构, 则储层毛管压力曲线的分形几何公式为[10]:

$$S_v = \left[ \frac{P_c}{P_{c \min}} \right]^{D-3} \quad (1)$$

对式(1)两边取对数，得到

$$\lg S_v = (D-3)\lg P_c + (3-D)\lg P_{c\min} \quad (2)$$

式中， $P_{c\min}$  为储层中最大孔径  $r_{\max}$  相应的毛管压力，即排驱压力，MPa； $S_v$  为毛管压力  $P_c$  时储层中润湿相所占的孔隙体积分，%； $D$  为孔隙分形维数。式(2)说明，如储层岩石孔隙结构具有分形性质，则压汞资料的  $\lg(S_v)$  与  $\lg(P_c)$  具有线性相关关系，可用图解法或回归分析法加以验证，根据回归分析给出的相关系数可说明孔隙分形结构的符合程度。

针对工区的毛管压力曲线，分别计算每个岩石样品的分形维数，结果如图 2 和表 1。从表 1 中可以看出，溶孔(洞)型储层的分形维数介于 2.53~2.88 之间，平均 2.71；晶间孔储层的分形维数介于 2.47~2.67 之间，平均 2.57；裂缝储层的分形维数介于 2.95~2.98 之间，平均 2.97，三类储集空间的分形维数存在明显的差异性。

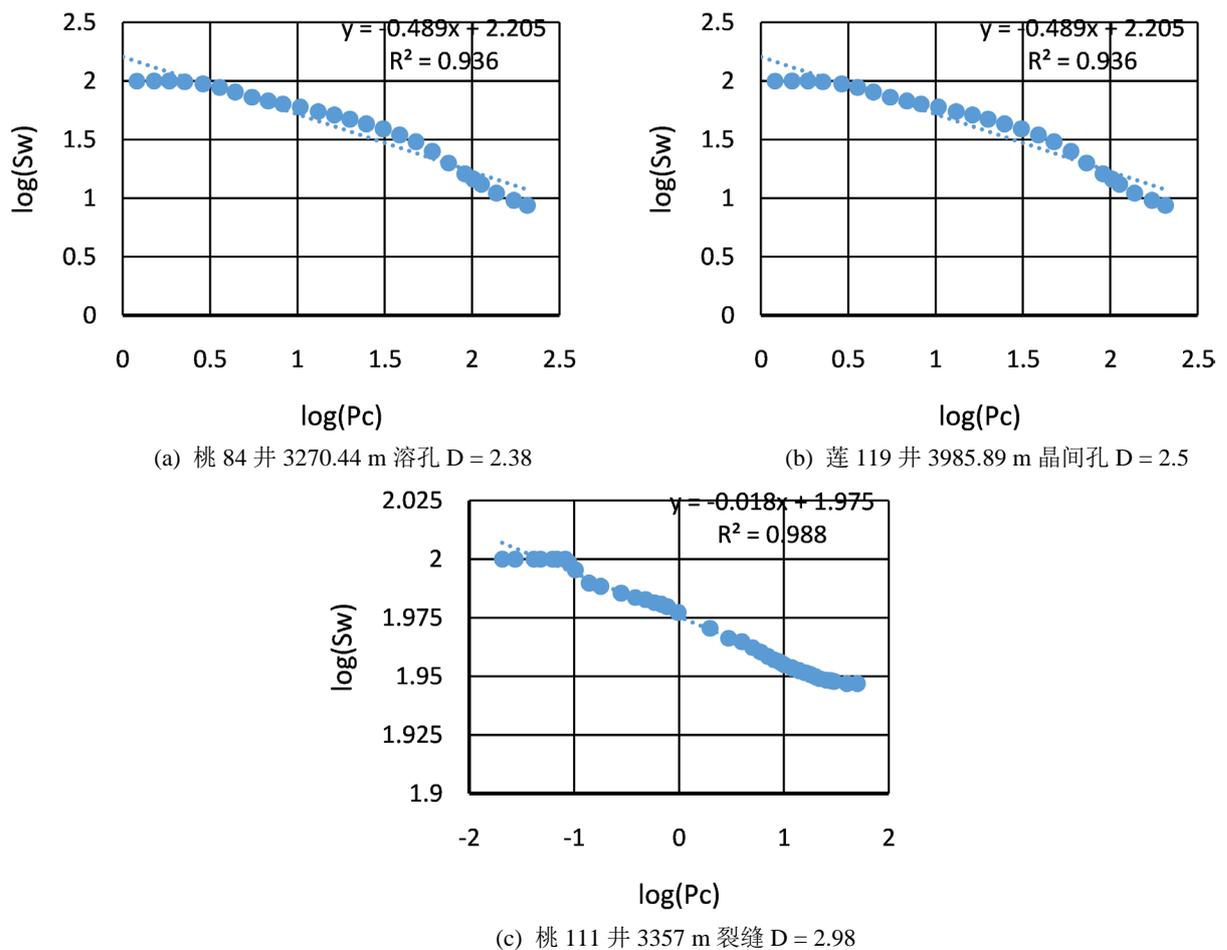


Figure 2. Fractal characteristics of capillary pressure curves of different reservoir space types

图 2. 不同储集空间类型毛管压力曲线的分形特征

在所有测井资料中，能够反映孔隙结构的测井资料是核磁共振测井，核磁共振  $T_2$  谱分布与实验室毛管压力曲线之间具有相关性，二者均在一定程度上反映了岩石的孔隙结构，其中毛管压力曲线上最大孔径  $r_{\max}$  对应的毛管压力  $P_{c\min}$  与核磁共振  $T_2$  谱上最大孔径  $r_{\max}$  对应的  $T_{2\max}$  对应。因此可得到核磁共振  $T_2$  谱的分形几何公式：

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

式中,  $S_v$  为横向弛豫时间小于  $T_2$  的孔隙累积体积所占总孔隙体积的百分比, %;  $T_{2\max}$  为储层中最大孔径  $r_{\max}$  对应的  $T_2$  谱, ms;  $D$  为孔隙分形维数。式(3)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  $\lg(S_v)$  与  $\lg(T_2)$  具有线性相关关系, 可根据回归方程的系数计算出孔隙结构分形维数。

由于工区核磁共振测井资料少, 资料采集质量差, 不能很好地反映储层特征, 但工区成像测井资料丰富, 因此将核磁孔隙度分形维数计算方法应用到电成像孔隙度谱中, 利用电成像测井资料研究工区分形维数特征。依据阿尔奇公式可以建立冲洗带地层孔隙度与电阻率之间的关系, 实现将井壁微电阻率图转变成孔隙度图, 选取合适的窗长进行频率统计, 即可生成电成像测井孔隙度谱[14]。电成像测井孔隙度谱分析技术利用了电成像测井具有高分辨率的优点, 通过对孔隙大小分布的定量表征, 很好地解决了储集空间非均质的评价问题, 这一特点使得它与核磁共振  $T_2$  谱和毛管压力曲线反算的孔隙分布图十分相似[15]。将电成像某一深度孔隙度频率分布谱进行反向累加并求取对数, 依据公式(3)可以获得成像数据表征的分形结构曲线。为了方便表示, 电成像分形维数  $D = 10 + D'$  ( $D' = -7.7623$ )。由于部分井之间电性差异巨大, 按截止值划分储层类型误差较大, 故进行归一化处理后采用截止值进行分类, 其标准为:

溶孔型:  $<0.55 (T_{\max} - T_{\min})$

晶间孔型:  $0.55 (T_{\max} - T_{\min}) < 0.8 (T_{\max} - T_{\min})$

裂缝型:  $\geq 0.8 (T_{\max} - T_{\min})$

其中  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$  为整井分形维数有效值的最大、最小值。

## 5. 应用效果及分析

基于上述方法, 利用电成像孔隙度谱结合分形维数对溶孔型、晶间孔型、裂缝型 3 类储层进行分类, 分类效果良好, 能够有效地解决中下组合储集空间分类问题。图 3、图 4 和图 5 分别为 3 类储层的测井解释成果图。图中第十四道为储层分类, 包括溶孔型、晶间孔型和裂缝型。电成像成果图第一道为深度道, 第二道为电成像图, 第三道为孔隙度谱, 第四道为电阻率谱。

电成像测井孔隙度谱有三个特征: 1) 当地层发育单一尺度的孔隙时, 孔隙度谱呈现孤立的单峰谱形态; 当地层发育有双重甚至多重尺度的孔隙时, 孔隙度谱呈现双峰谱或者多峰谱甚至无明显谱峰形态。2) 孔隙度谱中分布靠左的部分是由较小孔隙贡献的, 如晶间孔; 与之相反分布靠右的部分是由较大孔隙贡献的, 如溶孔。3) 频率越大的孔隙代表地层中这一尺度的孔隙占比越高。

溶孔型储层的电成像显示为杂乱斑状结构, 孔隙度谱在孔隙度轴上的横向跨度大, 表明不同尺度的孔隙均有发育, 通常无明显谱峰或多峰, 位置较靠后, 分布范围较宽(图 3)。晶间孔型储层的电成像显示为块状或层状结构, 孔隙度谱为单峰, 位置靠前, 分布范围窄(图 4)。裂缝型储层的电成像显示为亮块状、线状、斑状结构交替出现, 孔隙度谱显示为单峰, 位置多靠前, 分布范围较窄(图 5)。

从图 3~5 可以看到分形维数的分类结果与电成像测井反映的储集空间类型是一致的。

## 6. 结论

通过对靖西地区马家沟组中组合碳酸盐岩储集空间类型特征分析得到如下结论:

1) 靖西地区马家沟组中组合碳酸盐岩储层储集空间可划分为溶孔(洞)、晶间孔和裂缝三种类型, 三类储集空间类型的毛管压力曲线形态具有明显的区分特征, 通过 25 块岩心样品毛管压力曲线的分形维数的计算分析, 三类储层的分形维数分布区间明显不同, 可以依据储层孔隙结构的分形维数对储集空间类别进行划分。

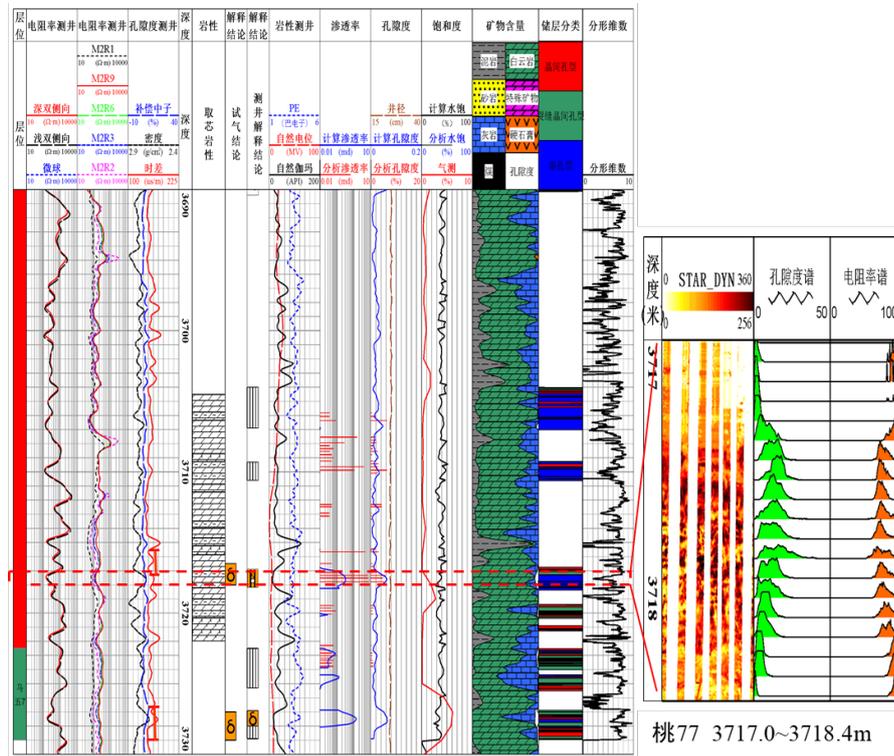


Figure 3. Examples of well logging classification of dissolved pore reservoirs  
图 3. 溶孔型储层储集空间测井分类实例

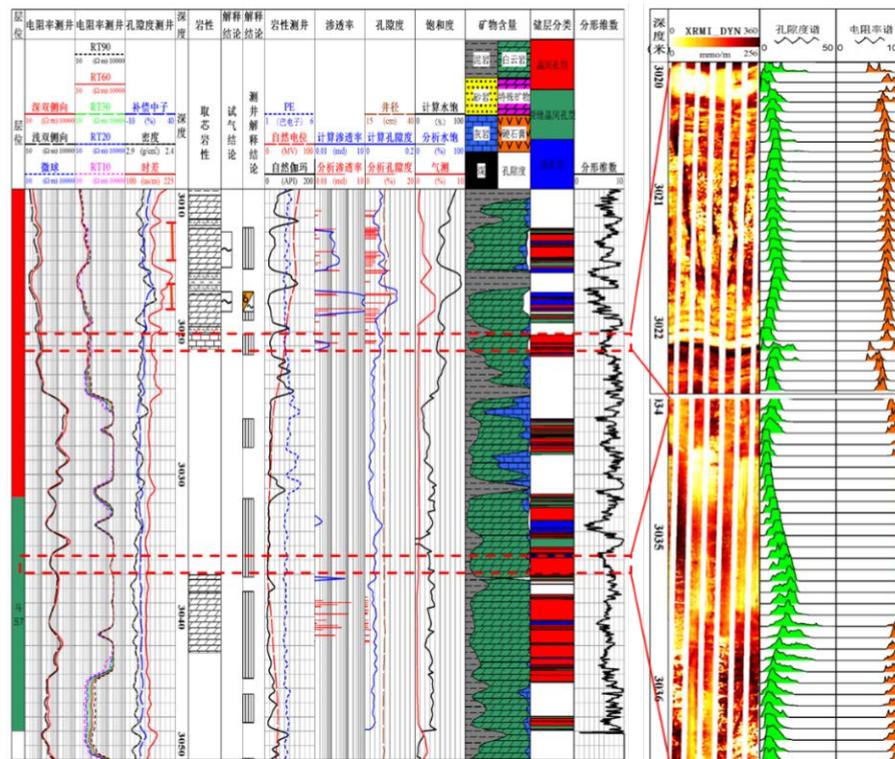


Figure 4. Examples of well logging classification of intercrystalline pore reservoirs  
图 4. 晶间孔型储集空间测井分类实例

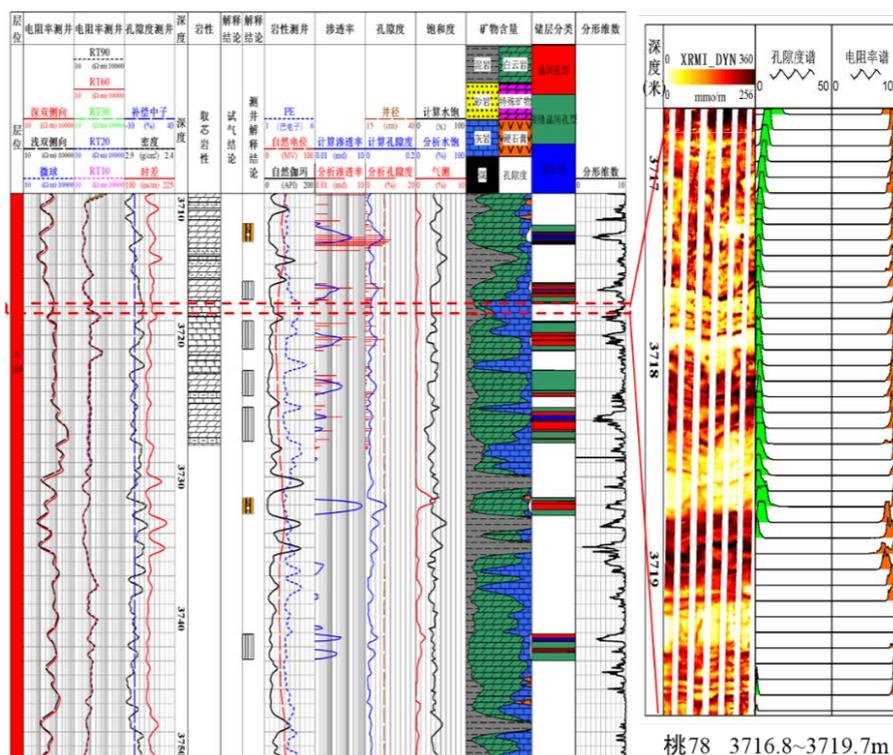


Figure 5. Examples of well logging classification of fracture-intercrystalline pore reservoirs  
图 5. 裂缝 - 晶间孔型储集空间测井分类实例

2) 采用类似于核磁共振  $T_2$  谱特征曲线的分形维数计算方法, 从电成像测井资料孔隙度谱中计算储层储集空间的分形维数, 该分形维数能够区分靖西地区马家沟组中组合碳酸盐岩储集空间类型, 是储集空间类型划分的重要参数。

## 基金项目

中国石油股份公司重大科技专项(2016E-0503)。

## 参考文献

- [1] 王立恩, 姜复东. 碳酸盐岩储层非均质性定量表征方法[J]. 天然气技术, 2009, 3(1): 27-29.
- [2] 高楚桥, 谭廷栋. 用岩石导电效率识别碳酸盐岩储层类型[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 32-36.
- [3] 张秀荣, 赵冬梅, 胡国山, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层类型测井分析[J]. 石油物探, 2005, 44(3): 240-246.
- [4] 傅海成, 张承森, 赵良孝, 等. 塔里木盆地轮南奥陶系碳酸盐岩储层类型测井识别方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(5): 38-42.
- [5] 胡瑞波, 常静春, 张文胜, 等. 歧口凹陷湖相碳酸盐岩储层岩性识别及储集类型研究[J]. 测井技术, 2012, 36(2): 179-187.
- [6] 刘航宇, 田中元, 郭睿, 等. 复杂碳酸盐岩储层岩石分类方法研究现状与展望[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2057-2064.
- [7] 赵军, 刘彦斌, 王菲菲, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层类型识别与分类预测[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 584-591.
- [8] 何传亮, 康建云, 王辛, 等. 基于沉积微相 - 储集空间类型的储集层流动单元划分——以彭州气田雷口坡组碳酸盐岩储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 435-443.
- [9] 丁晓琪, 刘鑫, 祁壮壮, 等. 碳酸盐岩孔洞型储层分层次储集空间表征——以鄂尔多斯盆地大牛地中奥陶统马家沟组马五<sub>7</sub>为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 689-696.

- [10] 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(江汉石油学院学报), 2007, 29(4): 80-86.
- [11] 陈振标, 张超谟, 张占松, 等. 利用 NMR  $T_2$  谱分布研究储层岩石孔隙分形结构[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 105-110.
- [12] 于洲, 孙六一, 吴兴宁, 等. 鄂尔多斯盆地靖西地区马家沟组中组合储层特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2012, 17(4): 49-56.
- [13] 陈杰, 周改英, 赵喜亮, 等. 储层岩石孔隙结构特征研究方法综述[J]. 特种油气藏, 2005, 12(4): 11-14.
- [14] Newberry, B.M., Grace, L.M. and Stief, D.D. (1996) Analysis of Carbonate Dual Porosity System from Borehole Electrical Images. *Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, Midland, March 1996.  
<https://doi.org/10.2118/35158-MS>
- [15] 左程吉, 王祝文, 向旻, 等. 基于电成像测井孔隙度分析技术的火山岩孔隙径向非均质性研究[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 449-454.