

戚明辉, 李君军, 曹茜. 基于扫描电镜和 JMicroVision 图像分析软件的泥页岩孔隙结构表征研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(3): 260 – 269.

QI Ming – hui, LI Jun – jun, CAO Qian. The Pore Structure Characterization of Shale Based on Scanning Electron Microscopy and JMicroVision[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(3): 260 – 269. 【DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 – 2131/td. 201901160008】

基于扫描电镜和 JMicroVision 图像分析软件的泥页岩孔隙结构表征研究

戚明辉^{1,2,3}, 李君军⁴, 曹茜^{1,2,3}

- (1. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610091;
- 2. 四川省科源工程技术测试中心, 四川 成都 610091;
- 3. 自然资源部复杂构造区页岩气勘探开发工程技术创新中心, 四川 成都 610091;
- 4. 中石油浙江油田分公司, 浙江 杭州 310023)

摘要: 孔隙发育特征是泥页岩储集能力评价的关键参数之一。扫描电镜观察法已普遍用于描述泥页岩的孔隙发育特征,但是目前文献中对泥页岩微孔隙类型划分比较混乱,孔隙结构特征参数的表征以定性描述为主,缺乏定量表征手段。本文选取了 18 个泥页岩样品为研究对象,通过氩离子抛光和高分辨率扫描电子显微镜图像观察,基于孔隙发育形态、位置及成因,对样品中不同孔隙进行类型划分;结合 JMicroVision 图像分析软件,应用泥页岩微孔隙描述技术和孔隙尺度分类统计技术,统计不同类型孔隙发育数量、孔径大小、面孔率、形状系数、概率熵等参数,对其分布特征进行评价。研究表明,晶(粒)间孔隙和有机孔隙比较发育,其次为晶(粒)内孔和晶间隙。不同类型孔隙其孔径分布以纳米级为主,不同类型孔隙分布较无序,其概率熵主要分布在 0.5 ~ 0.7 之间,对应的形状系数分布差异也较大。有机质孔隙的形状系数主要分布在 0.6 ~ 0.7 范围内,形状分布以椭圆形或近似圆形为主,晶(粒)间孔隙和晶(粒)内孔隙的形状系数主要分布在 0.3 ~ 0.7,分析晶(粒)间孔隙和晶(粒)内孔隙形状系数分布特征主要是受原始孔隙形态、压实作用和溶蚀作用的影响。研究认为,SEM 与 JMicroVision 相结合是定量研究不同类型微孔发育特征的有效手段,为研究微孔的形成和演化奠定了基础。

关键词: 孔隙类型划分; 孔隙结构表征; 扫描电镜观察; JMicroVision; 泥页岩
要点:

- (1) 采用氩离子抛光和高分辨率扫描电镜,对泥页岩微孔隙发育特征进行观察。
- (2) 基于发育形态、位置及成因,微孔隙被划分为有机孔隙、基质孔隙和微裂缝。
- (3) 结合 JMicroVision 图像分析软件,定量分析评价孔隙结构特征参数分布特征。

中图分类号: P575. 2; P588. 22 **文献标识码:** A

泥页岩作为一种特殊的油气储层,具有低孔、特低渗以及孔隙结构复杂多样的特征^[1-2]。孔隙作为泥页岩中油气的储存空间,不同类型孔隙对储存的油气产能贡献不同^[3-6]。泥页岩孔隙分布特征等方面的研究是进行页岩气资源勘探开发的基础,针对

如何准确表征和评价泥页岩孔隙特征也是目前研究的热点^[7-10]。近年来,国内外很多学者采用图像处理软件(如 ImageJ、JMicroVision 等软件)对扫描电镜图像进行二值化处理进而对泥页岩孔隙特征进行评价。王羽等^[8]对比分析了边缘检测分割法、流域分

收稿日期: 2019 – 01 – 16; 修回日期: 2019 – 03 – 18; 接受日期: 2019 – 04 – 09
基金项目: 四川省科技厅科技支撑计划项目(2017GFW0175); 省院省校合作项目(2018JZ0003)
作者简介: 戚明辉, 硕士, 工程师, 主要从事非常规油气储层评价研究。E – mail: 158891057@ qq. com。

割法、手动和自动阈值分割法对扫描电镜二次电子图像中的不同类型孔隙的分割效果;Keller 等^[11]基于 ImageJ 软件对北美 Opalinus 页岩孔隙图像进行了二值化处理,进而观察图像中的孔隙;张磊磊等^[12]通过 CorelDraw 软件对扫描电镜观察图像中各类型孔隙进行识别,用不同颜色加以圈定、区分和分析,得出所分析样品的孔隙类型及其相应的面孔率数据;白明岗等^[13]利用场发射扫描电镜和 PerGeos 数字岩石处理系统,对上扬子地区盆地外围龙马溪组富有机质页岩储集空间类型和有机质微纳米孔隙结构及发育特征进行了研究。这些研究主要是针对微孔隙发育个数及孔径大小进行评价,针对孔隙的形状系数、概率熵等形态特征参数并没有进行详细研究^[11-17]。不同类型孔隙,其形态特征差异较大,对应的形态参数分布特征在指示孔隙演化方面具有一定的指示意义^[18]。

基于上述分析,本文主要采用氩离子抛光和场发射扫描电镜对陆相泥页岩微观孔隙分布特征进行研究,同时结合 JMicroVision 图像处理软件对不同类型孔隙发育数目、孔径、面孔率及不同形态特征等参数进行表征,为研究微孔隙的成因及演化奠定基础。

1 实验部分

1.1 实验样品

本研究中选取的 18 个样品,对应地层岩性多为深灰色、黑(灰)色泥页岩夹暗色炭(铁)质泥岩,分别对其进行岩石热解分析、有机碳含量测试、全岩+黏土矿物 X 射线衍射分析、氩离子抛光处理以及扫描电镜观察。测试结果(表 1)表明,研究样品富含腐泥型-混合型干酪根,干酪根类型主要为 II 1 型,总有机碳(TOC)含量平均约 2.8%,镜质体反射率(R_o)主要分布在 1.3% 左右。通过 X 射线衍射全岩分析对矿物成分进行分析,矿物成分以黏土矿物为主,平均含量高达 41%,石英平均含量为 25%,长石平均含量为 17%,含有少量碳酸盐岩和黄铁矿,此外黏土矿物以伊利石为主,伊-蒙混层、绿泥石及高岭石次之。

1.2 实验方法

本次实验采用美国 GATAN685 型抛光仪对实验样品进行氩离子抛光操作,首先从样品垂直层理各切下大小合适的薄片,选取其中一面进行粗抛光处理,再用热熔胶将其粘于铜质抛光器上,分别按照粒径 600 目、800 目、1500 目、2000 目、5000 目的超薄金刚砂纸进行研磨并清理,抛光面平整度达标的样品即可从铜质抛光器上取下,放入烘箱保持 90℃ 烘干;然后

用导电胶将其粘附于样品片上,放入氩离子抛光仪器中进行抛光处理。样品制备完成后对其进行喷金处理增强导电性,再使用导电胶将其固定在样品台上,利用场发射环境扫描电子显微镜(Quanta250 FEG)观察泥页岩样品中微孔隙的发育位置及形状大小,该高分辨率扫描电镜由美国 FEI 公司制造,具有高真空、低真空和 ESEMTM 环境真空三种真空模式,可对各种样品(导电样品、不导电样品,特别是对含水、含油的样品等)进行形貌观察和分析,根据得到的表面像和成分像对样品进行结构和成分表征。结合能谱分析仪(INCAx-max20)对样品不同矿物组分进行微区成分分析,对其孔隙类型进行划分。

表 1 泥页岩样品的基本特性

Table 1 Characteristics of the selected shale samples										
样品 编号	TOC (%)	R_o (%)	有机质 类型	矿物含量(%)						
				石英	长石	碳酸盐	黏土矿物	黄铁矿	其他	
1	3.576	1.21	II 1	20	15	6	44	8	7	
2	4.337	1.96	II 1	24	12	3	49	9	3	
3	2.045	1.16	II 1	25	24	13	31	4	3	
4	6.435	2.29	II 1	20	12	3	56	5	4	
5	5.892	1.21	II 1	21	17	3	48	3	8	
6	5.198	1.26	II 1	20	22	6	45	6	1	
7	2.740	1.38	II 1	51	0	4	37	6	2	
8	2.697	3.27	I	5	8	44	43	0	0	
9	0.784	1.10	I	30	10	20	40	0	0	
10	3.199	1.11	II 1	24	14	5	51	4	2	
11	2.541	1.18	II 1	24	30	2	38	2	4	
12	3.496	1.08	I	30	12	3	53	2	0	
13	6.531	1.16	II 1	26	25	0	45	2	2	
14	6.811	2.85	II 1	27	35	0	32	6	0	
15	6.009	3.11	I	23	25	5	41	6	0	
16	1.398	1.01	I	36	16	38	23	2	3	
17	1.096	0.99	I	27	18	7	39	5	4	
18	2.240	0.97	I	27	26	12	27	6	2	

JMicroVision 图像分析软件是当前主流图像分析软件之一,包含了大部分常见的图像处理操作,具有高效的可视化系统和创新功能,可用于手动或自动量化和测量高清晰度图像的组件,获取某一特定区域对应的统计学特征参数,实现了将图像分析技术与定量表征技术相结合。本次研究过程中,利用 JMicroVision 图像分析软件对 SEM 图像进行分析时,首先划定工作区域,即根据所有描述对象的形状对其进行轮廓进行勾画,设定比例尺等一系列参考值,然后通过选择合适的灰度阈值,将所描述的孔隙从图像背景中分离出来,针对不同类型孔隙也可以采用不同颜色进行标记,进而提取不同类型孔隙的几何参数,包括孔隙个数、等效圆直径、宽度、周长、面积等参数。

2 结果与讨论

2.1 测试样品微孔隙扫描电镜表征结果

泥页岩中孔隙成因复杂,不同类型孔隙具有明显的差异性,划分方案多样^[19-31]。本文采用氩离子抛光和扫描电镜在×1000至×40000多种放大倍数下对18个样品储集空间进行详细观察和描述,研究了储层孔隙类型及其特征(图1)。结果表明泥页岩储层中孔隙类型多样,形态各异,基于Loucks(2012)和Cao等(2015)的泥页岩储层孔隙类型划分方案^[21,23-24],根据不同类型孔隙发育成因对其进行分类,划分为无机孔隙、有机质孔隙和微裂缝三大类。

无机孔隙划分为原生孔隙和次生孔隙两类,其中原生孔隙包括:晶(粒)内孔、晶(粒)间孔和晶间隙,次生孔隙包括:晶(粒)内溶孔和晶(粒)间溶孔。有机质孔隙划分为有机质热成因孔(包括:出油孔、出气孔和气孔群)以及收缩孔(缝)(表2),微裂缝主要为构造缝,其发育主要与岩石脆性、地层压力及成岩作用有关^[25]。

2.2 微孔隙发育特征参数的选取

使用JMicroVision图像分析功能软件对不同类型孔隙分布特征进行表征时,选取当量圆直径来表征孔隙大小^[32],狭长型不规则孔隙的当量圆直径可

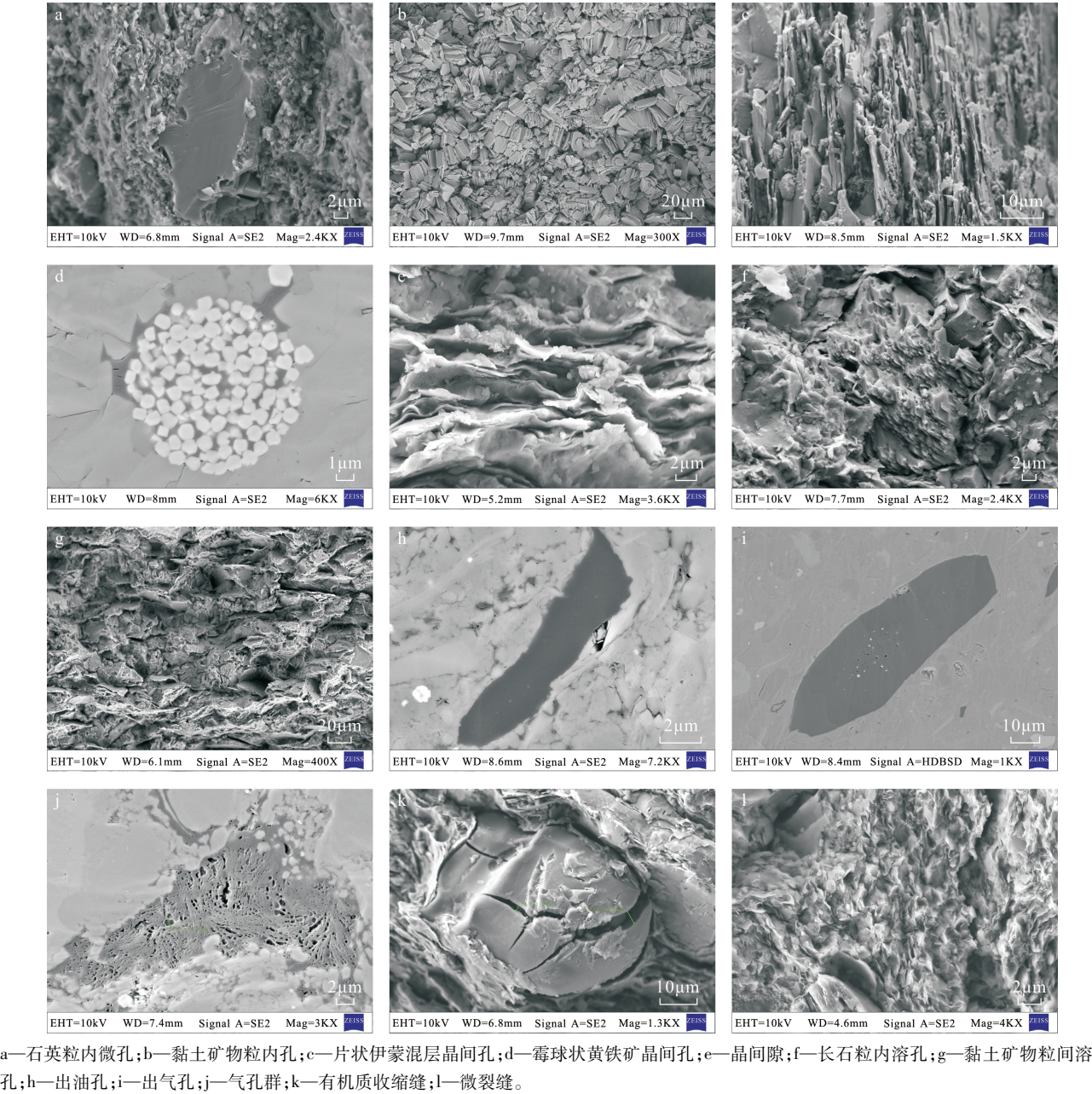


图1 泥页岩储层孔隙特征描述照片

Fig.1 Characteristics of pores in shale gas reservoir

表 2 泥页岩储层孔隙分类

Table 2 Characteristics of pore classification of shale gas reservoir

孔隙类型			成因机制	分布特征
无机孔隙	原生孔隙	晶(粒)内孔 (图 1-a,b)	矿物成岩作用过程中保留下来的微孔隙	常见于黏土矿物颗粒、石英、长石等晶体内,形状不规则
无机孔隙	原生孔隙	晶(粒)间孔 (图 1-c,d)	矿物颗粒沉积或再生长过程中保留下来微孔隙	常见于黏土矿物颗粒及黄铁矿等晶体间
无机孔隙	原生孔隙	晶间隙 (图 1-e)	矿物(尤其是黏土矿物)成岩转化过程中形成的间隙	发育于矿物晶体层间或颗粒边缘,多呈片状分布
无机孔隙	次生孔隙	晶(粒)内溶孔(图 1-f), 晶(粒)间溶孔(图 1-g)	不稳定矿物因发生溶蚀作用而形成	常见于黏土矿物、长石等晶体内(间),性状不规则
有机质孔	有机质热成因孔	出油孔(图 1-h), 出气孔(图 1-i), 气孔群(图 1-j)	有机质不同演化阶段生烃、排烃过程中,油气聚积形成	出油孔、出气孔偶见于热演化程度较低的有机质中,气孔群常见于热演化程度较高的有机质中,呈分散的不规则分布
有机质孔	收缩孔(缝)(图 1-k)		有机质热演化(失水)过程中收缩形成	有机质与矿物结合边缘或内部
微裂缝	构造缝(图 1-l)		由局部构造作用所形成,主要与矿物的成岩作用、岩石脆性、地层压力以及构造活动(如断裂、褶皱等)相关	呈高角度裂缝切层发育

表示为 $D=4A/L=4\times(a\times b)/2\times(a+b)=2a\times b/(a+b)$,其中 a 、 b 分别为孔隙长度和宽度;定义面孔率为扫描电镜图片上的孔隙面积与该图片总面积的百分比。在不同样品 SEM 观察图像中(同一放大倍数: $\times 16000$),利用 JMicroVision 软件分别测量每张扫描电镜图片上不同孔隙的面积和整个图片上样品区域的总面积,将两值相比,求出不同孔隙的面孔率值;选取形状系数来研究不同孔隙的形态分布特征,形状系数 F 为:

$$F=4\times\pi\times S/C^2$$

式中: S 为孔隙横截面的面积, C 为孔隙横截面的周长。姚军等(2010)^[33] 提出孔隙截面形状与孔隙形状系数之间的关系,据此,根据孔隙的形状系数可以近似确定孔隙实际形状;此外引入概率熵 H 来描述孔隙的整体定向分布情况,概率熵的定义(C. E. Shannon)为:

$$H=-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

式中: P_i 表示某种信号出现的概率, n 表示信号的种类。

在计算孔隙的概率熵时, P_i 为微孔隙排列方向(Orientation)在某一方位区间呈现的概率,微孔隙单元体的排列方向为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$,以 10° 为单位等分, $n=18$ 。当 $H=0$ 时,说明所有微观孔隙排列方向均在同一方位;当 $H=1$ 时,说明微孔隙完全随机排列。即 H 越大,孔隙排列越混乱。

2.3 微孔隙形态参数分布特征分析

通过对 18 个样品所有类型孔隙不同参数分布特征进行研究,发现不同类型孔隙在孔径、面孔率、

形状系数及概率熵等特征参数的分布上都存在一定的差异。

统计不同类型孔隙发育比例可知,晶(粒)间孔和有机孔较为发育,分别占总孔隙数量的 32.5% 和 26.4%;其次为晶(粒)内孔和晶间隙,分别占总孔隙数量的 18.2% 和 12.6%;晶(粒)内溶孔和晶(粒)间溶孔不发育,分别占总孔隙数量的 5.7% 和 4.6%(图 2)。

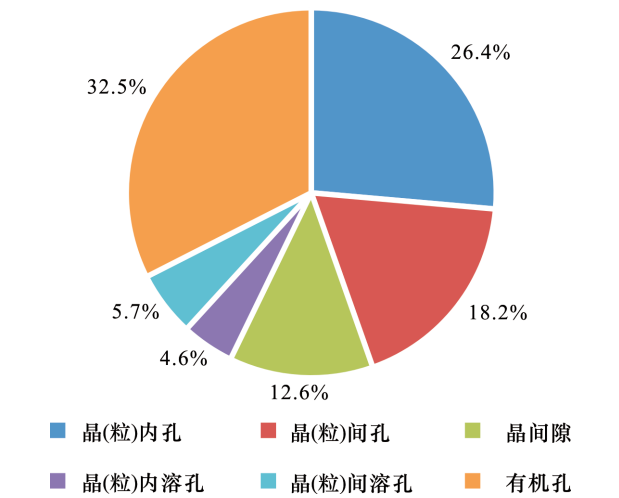


图 2 不同类型孔隙发育比例分布频率
Fig. 2 Distribution frequency diagram of different pores

同一放大倍数下($\times 8000$)不同类型孔隙其面孔率分布差异较大,晶(粒)间孔隙、晶间隙的平均面孔率均较大,可达 4.23%、3.89%,是页岩油气的主要储集空间。所有孔隙其孔径分布从 10nm ~ 10 μ m

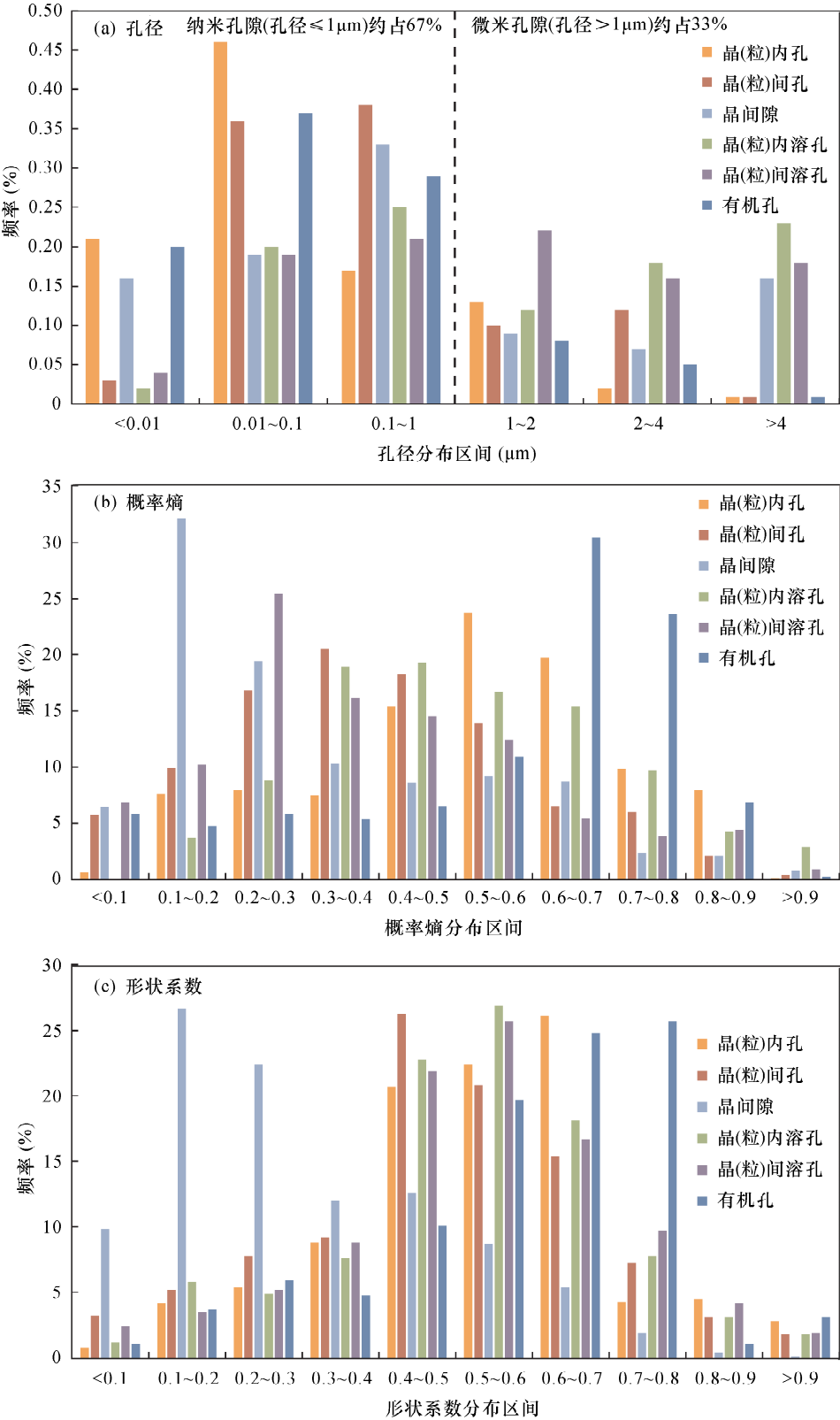


图 3 不同类型孔隙的 (a) 孔径、(b) 概率熵、(c) 形状系数分布频率
Fig. 3 Distribution frequency diagrams of (a) pore diameters, (b) probability entropy, (c) shape factor of different pores

大小不等,以纳米级孔隙($\leq 1\mu\text{m}$)为主。晶(粒)内孔隙孔径平均约 128nm;晶(粒)间孔隙孔径发育范围较广,平均孔径约 786nm。有机孔隙的尺度则相对较小,其平均孔径约为 565nm,大部分有机质孔隙分布在 100nm 左右。此外,少量的晶(粒)内溶孔和晶(粒)间溶孔其孔径分布范围较广,从几纳米至几微米均有分布(图 3a);晶(粒)内孔和有机孔隙分布较无序,其概率熵主要分布在 0.5~0.7 之间,晶(粒)间孔及晶间隙的概率熵主要分布在 0.2~0.48 之间(图 3b)。不同类型孔隙其形状系数分布差异也较大,有机质孔隙的形状系数主要分布在 0.6~0.7 范围内,晶(粒)间孔隙和晶(粒)内孔隙的形状系数主要分布在 0.3~0.7 之间,晶间隙形状系数主要分布在 0.2~0.4 之间(图 3c)。

2.4 微孔隙形态发育特征影响因素分析

本次研究中使用了孔隙发育数量、孔径大小、面孔率、概率熵以及形状系数来定量统计微孔隙的分布特征,这次参数的统计结果对孔隙演化方面的研究具有一定的意义。统计不同测试样品中黏土矿物含量与晶(粒)间孔隙发育数量关系图(图 4)可知,随着黏土矿物含量的增加,晶间隙发育数量呈增大趋势。分析认为由于测试样品黏土矿物相对含量较高,伊利石、伊蒙混层等黏土矿物几何体间为晶(粒)间孔隙的发育提供了一定的场所,对其发育起积极促进作用。晶(粒)内孔隙孔径普遍较小,分析原因是由于受压实成岩作用以及有机质热演化程度的共同影响造成的,也见部分较大颗粒的黏土矿物间孔隙孔径可达微米级。统计不同样品中有机质孔隙形状系数与有机质成熟度之间的关系(图 5),结合扫描电镜镜下观察,当测试样品的有机质成熟度 R_o 较小时,发育的有机孔隙多呈椭圆形或近似圆形分布,随着有机质成熟度 R_o 值增大,呈圆孔状或椭圆状分布的有机孔隙数量增多,可观察到多个有机质孔隙相互连通合并成一个孔隙,见部分有机质热演化过程中收缩形成收缩孔(缝),对应孔隙横截面呈狭长型,即有机质孔隙形状系数变化较大。

3 结论

通过扫描电镜对泥页岩测试样品中微孔隙发育特征进行观察,结合图像分析软件(JMicroVision),对不同类型孔隙发育数量、孔径、面孔率、形状系数及概率熵等参数进行统计分析。可知测试样品泥页岩中发育有无机孔隙、有机质孔隙和微裂缝三大类微孔隙,晶(粒)间孔隙和有机孔隙最为发育,孔径

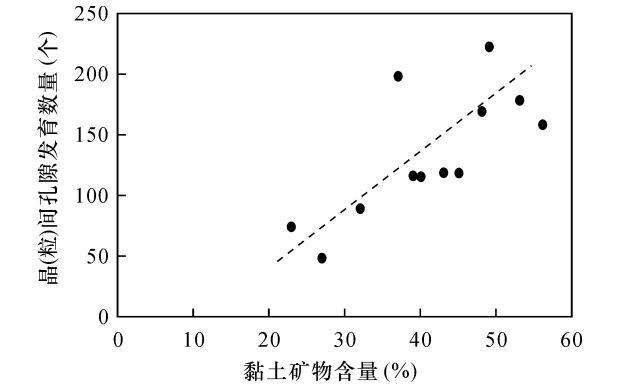


图 4 晶(粒)间孔隙发育数量与黏土矿物相对含量关系
Fig. 4 Relationship between the number of inter - crystal (particle) pores and the content of clay

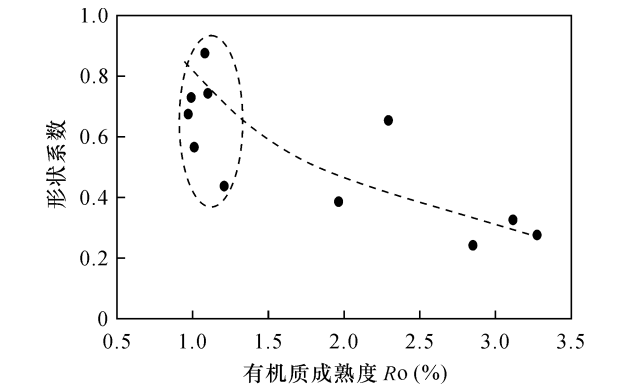


图 5 有机质孔隙形状系数与有机质成熟度关系
Fig. 5 Relationship between pore shape coefficient of organic matter and R_o

分布以纳米级为主,不同类型孔隙的概率熵和形状系数分布差异较大。分析不同类型孔隙形态发育特征影响因素可知,测试样品中黏土矿物的分布为晶(粒)间孔隙的发育提供了一定的场所,在一定程度上对晶(粒)间孔隙的发育起积极促进作用,晶(粒)间孔隙和晶(粒)内孔隙发育主要受原始孔隙形态及压实作用和溶蚀作用的影响,有机质孔隙的发育则主要与有机质热演化程度 R_o 有关。这项工作为定量表征泥页岩孔隙发育特征奠定了基础。

4 参考文献

[1] Mastalerz M, Schimmelmann A, Drobnia A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(10): 1621 - 1643.

[2] 王香增, 张金川, 曹金丹, 等. 陆相页岩气资源评价初探: 以延长直罗—下寺湾区中生界长 7 段为例 [J].

- 地学前缘,2012,19(2):192-197.
- Wang X Z, Zhang J C, Cao J Z, et al. A preliminary discussion on evaluation of continental shale gas resources: A case study of Chang 7 of Mesozoic Yanchang Formation in Zhiluo—Xiasiwang of Yanchang[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 192-197.
- [3] 吴松涛,朱如凯,崔京钢,等. 鄂尔多斯盆地长7湖相泥页岩孔隙演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 167-176.
- Wu S T, Zhu R K, Cui J G, et al. Characteristics of lacustrine shale porosity evolution, Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 167-176.
- [4] 李晋宁. 泥页岩储层孔隙结构表征和连通方式研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Li J N. Study on Pore Structure Characteristics and Connectivity of Shale Reservoir [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [5] 苑丹丹,卢双舫,陈方文,等. 渝东南地区彭页1井泥页岩微观孔隙结构特征[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1): 49-53.
- Yuan D D, Lu S F, Chen F W, et al. Shale microscopic pore structure characterization in Well Pengye1 of Southeast Chongqing[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2016, 23(1): 49-53.
- [6] 杨峰,宁正福,胡昌篷,等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301-311.
- Yang F, Ning Z F, Hu C P, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301-311.
- [7] 王玉满,董大忠,杨桦,等. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(6): 1348-1356.
- Wang Y M, Dong D Z, Yang H, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Longmaxi Shale, Southern Sichuan, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57: 313-322.
- [8] 王羽,金婵,汪丽华,等. 应用氩离子抛光-扫描电镜方法研究四川老九洞组页岩微观孔隙特征[J]. 岩矿测试, 2015, 34(3): 278-285.
- Wang Y, Jin C, Wang L H, et al. Characterization of pore structures of Jiulaodong Formation shale in the Sichuan Basin by SEM with Ar-ion milling [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(3): 278-285.
- [9] 俞雨溪,罗晓容,雷裕红,等. 陆相页岩孔隙结构特征研究——以鄂尔多斯盆地延长组页岩为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 716-726.
- Yu Y X, Luo X R, Lei Y H, et al. Characterization of lacustrine shale pore structure: An example from the Upper-Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 716-726.
- [10] 张林晔,李钲源,李政,等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
- Zhang L Y, Li J Y, Li Z, et al. Advance in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.
- [11] Keller L M, Schuetz P, Erni R, et al. Characterization of multi-scale microstructural features in Opalinus clay [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2012, 170(4): 84-90.
- [12] 张磊磊,陆正元,王军,等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙三下亚段页岩油层段微观孔隙结构[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 80-86.
- Zhang L L, Lu Z Y, Wang J, et al. Microscopic pore structure of shale oil reservoirs in the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 80-86.
- [13] 白名岗,夏响华,张聪,等. 场发射扫描电镜及PerGeos系统在安页1井龙马溪组页岩有机质孔隙研究中的联合应用[J]. 岩矿测试, 2018, 37(3): 225-234.
- Bai M G, Xia X H, Zhang C, et al. Study on shale organic porosity in the Longmaxi Formation, AnYe-1 Well using field emission-scanning electron microscopy and PerGeos system [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(3): 225-234.
- [14] Jin L X, Mathur R, Rother G, et al. Evolution of porosity and geochemistry in Marcellus Formation black shale during weathering [J]. Chemical Geology, 2013, 256(2): 50-63.
- [15] Chen Q, Zhang J, Tang X, et al. Relationship between pore type and pore size of marine shale: An example from the Sinian—Cambrian Formation, Upper Yangtze region, South China [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 158: 13-28.
- [16] 庞河清,曾焱,刘成川,等. 基于氮气吸附-核磁共振-氩离子抛光场发射扫描电镜研究川西须五段泥质岩储层孔隙结构[J]. 岩矿测试, 2017, 36(1): 66-74.
- Pang H Q, Zeng Y, Liu C C, et al. Investigation of pore structure of a argillaceous rocks reservoir in the 5th member of Xujiahe Formation in Western Sichuan, using NAM, NMR and AIP-FESEM [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(1): 66-74.
- [17] 帅琴,黄瑞成,高强,等. 页岩气实验测试技术现状与

- 研究进展[J]. 岩矿测试,2012,31(6):931-938.
- Shuai Q, Huang R C, Gao Q, et al. Research development of analytical techniques for shale gas [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(6): 931-938.
- [18] 焦堃. 煤和泥页岩纳米孔隙的成因、演化机制与定量表征[D]. 南京:南京大学,2014.
- Jiao K. The Characterization, Genesis and Evolution of Nanopores in Coals[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [19] 蒋祺, 康志宏, 黄文辉, 等. 富含有机质泥页岩孔隙结构与储集空间类型分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(9): 908-913.
- Jiang Q, Kang Z H, Huang W H, et al. Analysis of the organic-rich shale pore structure of reservoir space[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(9): 908-913.
- [20] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.
- Nie H K, Zhang J C. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 219-225.
- [21] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrockpores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [22] 于炳松. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 211-220.
- Yu B S. Classification and characterization of gas shale pore system[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 211-220.
- [23] 曹茜, 周文, 陈文玲, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长7段陆相页岩气地层孔隙类型、尺度及成因分析[J]. 矿物岩石, 2015, 35(2): 90-97.
- Cao Q, Zhou W, Chen W L, et al. Analysis of pore types, sizes and genesis in continental shale gas reservoir of Chang 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Mineral Petrology, 2015, 35(2): 90-97.
- [24] Cao Q, Zhou W, Deng H, et al. Classification and controlling factors of organic pores in continental shale gas reservoirs based on laboratory experimental results[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 1381-1388.
- [25] 王香增, 范柏江, 张丽霞, 等. 陆相页岩气的储集空间特征及赋存过程——以鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长7段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 651-658.
- Wang X Z, Fan B J, Zhang L X, et al. Reservoir space characteristics and charging process of Lacustrine shale gas—A case study of the Chang 7 member in Yanchang Block in Shanbei slope of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 651-658.
- [26] 于炳松. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 211-220.
- Yu B S. Classification and characterization of gas shale pore system[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 211-220.
- [27] 张盼盼, 刘小平, 王雅杰, 等. 页岩纳米孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1242-1249.
- Zhang P P, Liu X P, Wang Y J, et al. Research progress in shale nanopores [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1242-1249.
- [28] 焦淑静, 张慧, 薛东川, 等. 泥页岩孔隙类型、形态特征及成因研究[J]. 电子显微学报, 2015, 34(5): 422-427.
- Jiao S J, Zhang H, Xue D C, et al. Study on morphological characteristics of micropores and microcracks in shale [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2015, 34(5): 422-427.
- [29] 伍岳, 樊太亮, 蒋恕, 等. 海相页岩储层微观孔隙体系表征技术及分类方案[J]. 地质科技情报, 2014, 33(4): 92-97.
- Wu Y, Fan T L, Jiang S, et al. Characterizing techniques and classification methods for microscope pore system in marine shale reservoir [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(4): 92-97.
- [30] Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. Fuel, 2013, 103: 606-616.
- [31] 耳闯, 赵靖舟, 王芮, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩孔隙特征及发育机制[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1202-1214.
- Er C, Zhao J Z, Wang R, et al. Characteristics and occurrence mechanism of organic-rich shale in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1202-1214.
- [32] Pommer M, Milliken K. Pore types and pore-size distributions across thermal maturity, Eagle Ford Formation, Southern Texas [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(9): 1713-1744.
- [33] 姚军, 赵秀才. 数字岩心及孔隙级渗流模拟理论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 125-128.
- Yao J, Zhao X C. Digital Core and Pore Level Percolation Simulation Theory [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 125-128.

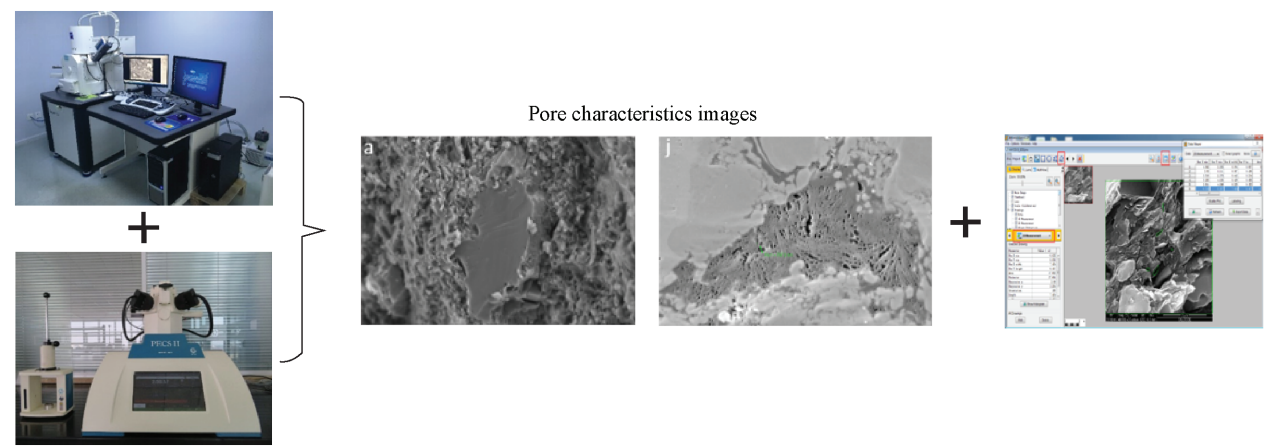
The Pore Structure Characterization of Shale Based on Scanning Electron Microscopy and JMicroVision

QI Ming - hui^{1,2,3}, LI Jun - jun⁴, CAO Qian^{1,2,3}

- (1. Shale Gas Evaluation and Exploitation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610091, China;
- 2. Sichuan Keyuan Testing Center of Engineering Technology, Chengdu 610091, China;
- 3. Technical Innovation Center for Shale Gas Exploration and Development in Complex Structural Areas, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610091, China;
- 4. Zhejiang Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Hangzhou 310023, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The characteristics of shale pore by using Ar - ion milling and Scanning Electron Microscopy were observed.
- (2) The pores based on the morphology, development location and genesis were classified.
- (3) Combined with JMicroVision, the distribution characteristics of pores parameters in shale were quantitatively analyzed.



ABSTRACT

BACKGROUND: The pore characteristics of shale are one of the key parameters for evaluation of the shale reservoir capacity. Scanning Electron Microscopy (SEM) has been widely used to describe the pore characteristics of shale. However, the classification of micro – pore types in mud shale reservoirs in the literature was relatively diverse, and the quantitative characterization of pore based on SEM was relatively lacking.

OBJECTIVES: To classify the pore types and quantitatively characterize these pores in shale.

METHODS: 18 shale samples were selected as the research object in this study. Based on the form, position and origin of pores observed by argon ion polishing and Scanning Electron Microscopy, the types of different pores in the sample were classified. By using JMicroVision image analysis software, the pore characteristics including the number of pore types, pore size, face rate, shape coefficient, probability entropy and other parameters were quantitatively described.

RESULTS: The inter – crystal (particle) pores and organic pores were the most developed, followed by intra – crystal (particle) pores and crystal gap inter – crystal (particle) pores. The sizes of pore were mainly nanometer. The probabilistic entropy of intra – crystal (particle) pores and organic pores were mainly distributed between 0.5 and 0.7, with a different shape coefficient distribution. The shape coefficients of organic pores were mainly distributed between 0.6 and 0.7, and their shape were mainly oval or nearly circular. The shape coefficient of intra – crystal (particle) pores and inter – crystal (particle) pores were mainly between 0.3 and 0.7, which were mainly affected by the original pore morphology, compaction and dissolution.

CONCLUSIONS: The combination of SEM and JMicroVision is an effective means to quantitatively study the development characteristics of different types of micropores. This work has laid a foundation for the study of the genesis and evolution of micropores.

KEY WORDS: division of pore; characterization of pore structure; Scanning Electron Microscopy; JMicroVision; shale