

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.525



基于 Ar-SEM 及 PCAS 页岩孔隙结构定量表征

闫高原^{1,2}, 韦重韬^{1,2*}, 宋 昱^{1,2}, 张军建^{1,2}, 杨 浩^{1,2}

1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116

2. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221116

摘要: 页岩孔隙特征是页岩储层研究的重要内容。基于沁水盆地 S-1 井太原组、山西组页岩样品, 利用氩离子抛光扫描电镜 (argon ion polishing scanning electron microscope, Ar-SEM) 对孔隙形态特征进行分析, 并运用孔裂隙特征分析系统软件 (pores and cracks analysis system, PCAS) 对 Ar-SEM 照片中孔隙进行定量表征。结果显示样品孔隙以有机质孔、粒间孔、粒内孔为主, 孔径多集中在 $<100\text{ nm}$, 占比 $72.70\% \sim 82.13\%$, 其中介孔占比 $39.76\% \sim 45.48\%$ 。随深度的增加孔隙结构越来越复杂, 且越深的层位, 随孔隙面积的增大其结构复杂程度增加的越缓慢。孔隙结构复杂程度在 $R_{o,\max}=2$ 附近存在拐点, 高成熟阶段, 随成熟度的增加孔隙结构复杂程度越来越低, 且孔隙面积越大其结构复杂程度越低; 过成熟阶段, 随成熟度的增加孔隙结构复杂程度越来越高, 且孔隙面积越大其结构复杂程度越高。

关键词: 沁水盆地; 石炭—二叠纪; 孔隙结构特征; 形状因子; 分形维数; 概率熵; 资源地质学。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2018)05-1602-09

收稿日期: 2017-09-21

Quantitative Characterization of Shale Pore Structure Based on Ar-SEM and PCAS

Yan Gaoyuan^{1,2}, Wei Chongtao^{1,2*}, Song Yu^{1,2}, Zhang Junjian^{1,2}, Yang Hao^{1,2}

1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

2. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Shale pore characteristics are important part of shale reservoir research. Based on the shale samples from Taiyuan Formation and Shanxi Formation in the S-1 well of Qinshui basin, the morphology of the pores was analyzed by argon ion polishing scanning electron microscope (Ar-SEM), and the pores of the Ar-SEM micrographs were quantitatively characterized by pores and cracks analysis system (PCAS). The results show that the pore types of the samples are mainly organic matter pores, intergranular pores, and intragranular pores. The pore sizes are mostly less than 100 nm , accounting for $72.70\% - 82.13\%$, and the mesopore ratios are $39.76\% - 45.48\%$, which is favorable for pore connectivity and gas migration. The pore structure becomes increasingly more complex with the increase of depth; but the deeper the layer, the more slowly the structural complexity increases with the increase of pore area. There is an inflection point in the vicinity of $R_{o,\max}=2$ for the pore structure complexity. In the high maturity stage, the complexity of the pore structure gets increasingly lower with the increase of the maturity, and the structure complexity is lower as the pore area is larger; in the over mature stage, pore structure is increasingly more complex with the increase of maturity, and the larger the pore area, the greater the structural complexity.

Key words: Qinshui basin; Carboniferous-Permian; pore structure characteristics; form factor; fractal dimension; probability entropy; resource geology.

基金项目: 国家“十三五”重大专项 (No.2016ZX05044002-003); 山西煤炭基础科学与技术重点项目 (No.MQ2014); 江苏省研究生科技创新计划项目 (No.KYLX16_0551)。

作者简介: 闫高原 (1988—), 男, 博士, 主要从事煤地质、非常规油气地质研究工作。E-mail: ygygmt@163.com

*** 通讯作者:** 韦重韬, E-mail: weight@163.com

引用格式: 闫高原, 韦重韬, 宋昱, 等, 2018. 基于 Ar-SEM 及 PCAS 页岩孔隙结构定量表征. 地球科学, 43(5): 1602-1610.

页岩储层具有低孔、低渗的储集特征,其孔裂隙结构不仅影响孔隙中气体的赋存状态,而且也极大地影响到孔隙与气液分子间的相互作用(Curtis, 2002; Javadpour *et al.*, 2007; Gensterblum *et al.*, 2015; Mendhe *et al.*, 2017),正确认识页岩的孔隙结构,是研究页岩储层孔隙性、空间结构、渗流特征和页岩气可采性的重要基础,也是页岩有效储层评价的重要依据。

随着技术的发展,多种定性、定量的技术手段用于描述孔隙结构特征,如聚焦离子束扫描电镜(focused ion beam scanning electron microscopy, FIB-SEM)、宽离子束扫描电镜(broad ion beam scanning electron microscopy, BIB-SEM)、氩离子抛光扫描电镜(argon ion scanning electron microscopy, Ar-SEM)、透射电子显微镜(transmission electron microscopy, TEM)、原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)用于定性和半定量的孔隙特征描述(Curtis *et al.*, 2012; Loucks and Reed, 2014; 吴松涛等, 2015; 张林晔等, 2015; Sun *et al.*, 2016; 杨永飞等, 2016; 王朋飞等, 2017),其优点是能够较为直观地反映矿物成分的晶形特征及孔隙结构类型,既能观察 μm 级的微裂缝,又能观察 nm 级的微孔隙,其缺点是不能定量表征孔隙结构特征。高压压汞(high pressure mercury injection, MICP)、低温 N_2 和 CO_2 吸附、小角中子散射等用于孔隙的定量描述(Clarkson *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016),其优点是能够定量表征孔径分布特征、孔体积、比表面积、孔隙度等参数,缺点是不能直观反映孔隙结构类型以及孔隙发育位置与矿物之间的关系。

鉴于此,人们开始探索借助外部软件对高分辨率扫描电镜中的孔隙进行定量表征。熊承仁等(2007)以土工试验和计算机图像处理为基础,探讨了利用 SEM 照片获得土的孔隙结构参数的方法; Sezer *et al.* (2008)在研究硫酸盐对硬化水泥浆的破坏时,利用 Qwin 软件对高分辨率 SEM 照片中的孔隙进行定量分析; Loucks *et al.* (2009)基于页岩 Ar-SEM 照片,利用 JMicrovision 软件对孔隙轮廓进行圈定,然后测量孔径、面积等参数; Klaver *et al.* (2016)基于宽离子束扫描电镜(BIB-SEM)获取高分辨率显微照片,并利用 MATLAB 对照片中的孔隙进行定量统计; Yang *et al.* (2016)基于 FE-SEM 照片,利用 Image J 软件对孔隙进行定量表征,获得了视孔隙度和视有机质孔隙度等参数。

Liu *et al.* (2011)开发了一款基于高分辨率照片孔裂隙分析系统软件(PCAS)。Jiao *et al.* (2014)利用南方海相龙马溪组页岩 FIB-SEM 照片,将 PCAS 应用于页岩孔隙的定量表征,获得了孔隙数量、孔径分布和孔隙度等常用参数,以及孔隙形状因子、分形维数和概率熵等结构参数,并讨论了孔径与形状因子之间的关系。

以上述技术为支持,人们研究了 TOC 、 $R_{o,\max}$ 、矿物成分等对孔隙结构的影响,如 Straup *et al.* (2010)认为 TOC 与微孔体积有积极的关系,同时当 $R_o > 1.15$ 时, TOC 与粘土矿物共同贡献微孔体积; Chalmers and Bustin (2007)认为随成熟度的增加伊利石含量增高,中孔体积也随之增大。同时,分形理论也大量用于描述孔隙的结构特征,研究表明,分形维数与孔体积、比表面积均具有较好的相关性(Bu *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016)。

有机质成熟度对有机质孔体积、有机质孔径分布特征有着重要影响(Curtis *et al.*, 2012; Modica and Lapierre, 2012)。大量研究表明,有机质孔多因二次生烃引起,且在较低的成熟度时(一般 $< 0.9\%$)有机质孔不发育,只有在相对较高的成熟度时有机质孔才大量出现(Loucks *et al.*, 2009; Bernard *et al.*, 2012; Curtis *et al.*, 2012)。Sun *et al.* (2016)对过成熟度($R_o > 2.7\%$)的重庆牛蹄塘组页岩进行研究,通过分析成熟度与单位有机质孔隙体积之间的关系,发现在过成熟阶段,页岩有机质孔隙随成熟度的增加程度呈先增加后减少的趋势。

本次研究选取沁水盆地煤系非常规气共探共采 S-1 井太原组和山西组的 7 个页岩样品,利用 Ar-SEM 对孔隙形貌特征进行初步了解,并借助 PCAS 软件对 SEM 照片中的孔隙进行了定量表征,在此基础上,讨论埋深、 $R_{o,\max}$ 等地质因素对孔径、长宽比、形状因子、分形维数、概率熵的影响,为太原组、山西组页岩评价及后期共探共采理论研究提供依据。

1 样品及实验

1.1 实验样品

沁水盆地位于山西省东南部,盆地构造较为简单,整体为大型复向斜,构造相对稳定(秦勇等, 1999, 2008; 韦重韬等, 2005; 邵龙义等, 2006; 王保玉等, 2015)。采样井 S-1 井位于沁水盆地中部东缘(图 1a),为山西煤系非常规气共探共采示范井,

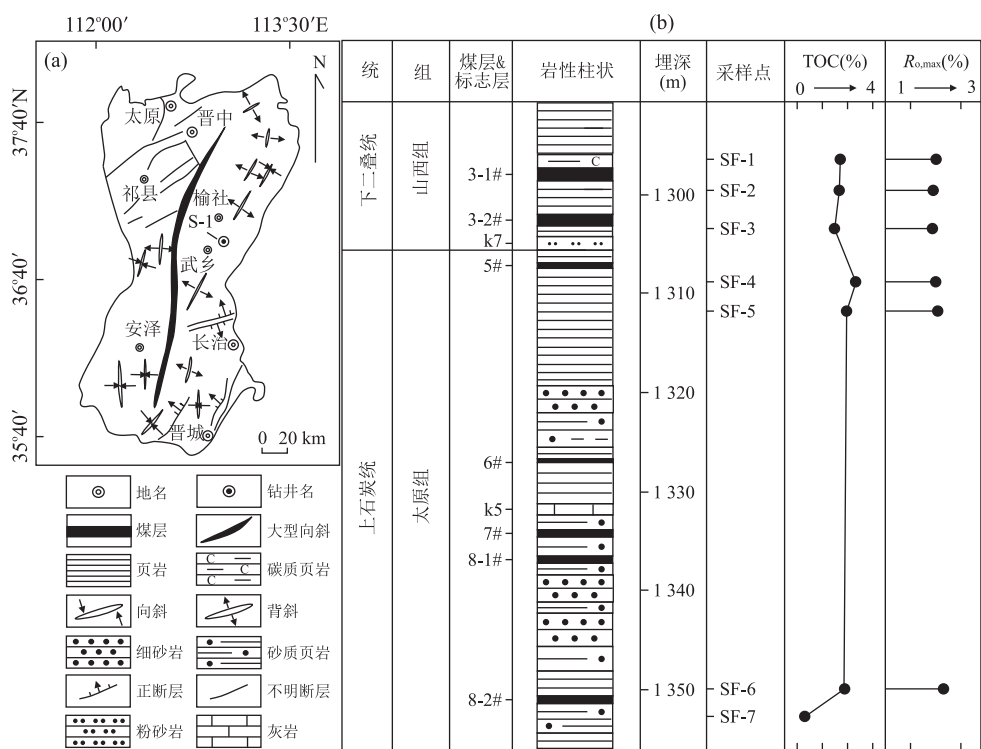


图 1 研究区钻井位置、岩性柱状及采样位置
Fig.1 Columnar drilling and sampling locations of the study area

完钻井深 1 480.04 m,完钻层位为上石炭统本溪组顶部,太原—山西组总厚 126.67 m,岩性主要为煤、页岩、砂纸页岩、碳质页岩、粉砂岩、细砂岩及少量灰岩,自上而下采取样品 7 个(图 1c).样品干酪根类型为 III 型;TOC 为 0.80%~2.82%,平均值为 2.12%,具有较高的有机质含量,为大量生气提供充分的物质基础; $R_{o,max}$ 为 1.87%~2.31%,平均值为 2.05%(其中 SF-7 有机质含量较少,未能得到测试数据),处于高一过成熟阶段(图 1b).

1.2 测试方法

笔者对样品的有机地化特征进行了分析,在此基础上利用 Ar-SEM 对样品的形貌特征进行观察,并利用 PCAS 软件对其进行定量表征.

FE-SEM 实验选取小块样品,经氦离子抛光处理后,采用 Quanta 250 扫描电子显微镜进行测试分析,在中国石油大学(北京)完成,所拍 FE-SEM 照片,利用 PCAS 软件对孔隙进行定量分析,PCAS 软件是由 Liu *et al.* (2011)研发的用于识别高分辨率 SEM 照片中微孔隙结构的专业软件,目前已成功应用于粘土矿物微裂隙和富有机质页岩微孔隙的定量判识(Liu *et al.*, 2013; Jiao *et al.*, 2014).

1.3 数据获取

PCAS 基于全局阈值法,先将高分辨率图像进

行二值化,以区分孔隙与基质,为减少人为误差,采用多次独立阈值取平均值的方法对孔隙进行分析,此种方法可将页岩孔隙几何因素的识别误差控制在 2%左右(Liu *et al.*, 2013; Jiao *et al.*, 2014).利用此软件可以得到孔的数量、面积、周长、长、宽、分形维数以及孔隙形状因子等参数,其中长宽和延伸方向使用 Feret 直径(Sezer *et al.*, 2008)来定义,实际面积(S_t)和实际周长(C_t)可以根据像素面积(s)和像素周长(c)利用式(1)和式(2)计算得到, R 为照片像素.

$$S_t = s/R^2, \tag{1}$$

$$C_t = c/R. \tag{2}$$

形状因子(ff)反映孔隙边缘的粗糙程度,最大值为 1(圆),0.785(正方形)(Liu *et al.*, 2011, 2013; Jiao *et al.*, 2014),值越小表明孔隙边缘越粗糙,结构越复杂.其计算式如下:

$$ff = 4\pi s/c^2. \tag{3}$$

概率熵(H)来量化孔隙的定向性,其定义为:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \log_a P_i, \tag{4}$$

其中: P_i 为孔隙在一定方向角的概率,概率熵取值 0~1,当 $H=0$ 时,所有孔隙发育均在同一方向上,当 $H=1$ 时,孔隙发育方向随机分布(Soroushian

and Elzafraney, 2005).

分形维数用于描述参数在一定范围内的变化程度(Liu *et al.*, 2011, 2013; Jiao *et al.*, 2014),即数据的非均质性,值越大相关参数的非均质性越强,反之非均质性越弱.其定义为:

$$\log(c) = Df/2 \cdot \log(s) + c_1,$$

45

将式(3)带入式(5)可得:

$$\log(ff) = (1 - Df)\log(s) - 2c_1 + \log(4\pi),$$

46

式(6)可转化为:

$$ff = a \cdot s^{1-Df},$$

47

其中: c_1 为常数; $a = 4\pi \cdot 10^{-2c_1}$; Df 为分形维数,通常为 1~2.从式(7)中可以看出,随着孔隙面积的

增大,形状因子逐渐减小,即孔隙面积越大孔隙结构越复杂.

2 测试结果

2.1 孔隙形态特征

页岩孔隙分为有机质孔、无机质孔、微裂隙 3 种,其中无机质孔分为粒间孔和粒内孔(Loucks *et al.*, 2009, 2012).根据扫描电镜观察,页岩孔隙比较发育,以有机孔、粒间孔为主,同时还发育少量粒内孔(图 2).孔径多 < 1 μm , 部分孔径能达到 10 μm 级(图21).有机质孔多呈圆形、椭圆形,直径

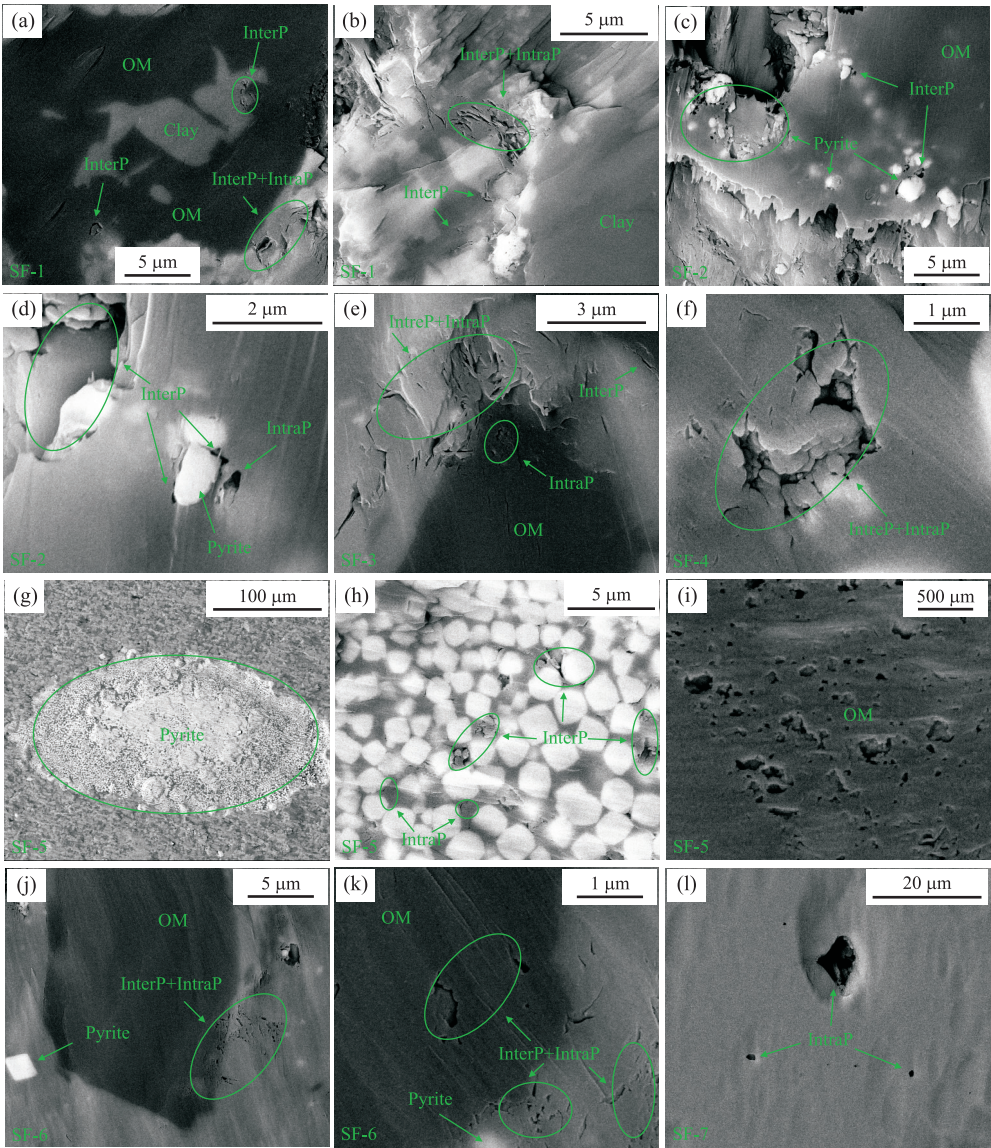


图 2 黑色页岩中的孔隙形态特征

Fig.2 Morphology characteristics of pores in black shale
OM,有机质;InterP,粒间孔;IntraP,粒内孔;Clay,粘土;Pyrite,黄铁矿

表 1 基于 PCAS 获取的孔隙相关参数
Table 1 Parameters of pores obtained by PCAS

参数	SF-1	SF-2	SF-3	SF-4	SF-5	SF-6	SF-7
总孔数	696	442	432	325	367	337	491
孔隙度(%)	3.88	3.76	2.37	1.34	2.09	2.29	4.25
最大孔面积(μm^2)	0.42	1.38	0.75	0.33	1.21	1.46	2.39
平均孔面积(μm^2)	0.017	0.026	0.017	0.013	0.018	0.021	0.024
平均周长(nm)	608.79	704.64	628.01	523.46	597.04	658.84	687.69
形状因子	0.45	0.41	0.41	0.43	0.41	0.37	0.36
最大孔长(nm)	2 238.84	2 167.59	4 202.38	1 271.35	2 585.43	2 232.72	3 397.72
平均孔长(nm)	223.73	243.25	233.68	173.25	189.41	201.79	217.71
最大孔径(nm)	684.33	1 458.67	523.65	742.33	772.48	1 342.65	1 712.91
平均孔径(nm)	85.59	89.98	78.54	81.88	84.60	94.67	87.80
概率熵	0.85	0.81	0.8	0.73	0.77	0.73	0.76
分形维数	1.19	1.19	1.18	1.12	1.18	1.12	1.14

在 0.04~1 μm (图 2a, 2e, 2i, 2k), 孔壁边缘较为光滑, 多为因大量气体生成的气胀孔, 也有一部分是因有机质演化过程中产生大量有机酸, 导致溶蚀作用所产生的溶蚀孔; 无机孔以粒间孔为主, 主要发育在粘土矿物层间及粘土矿物与黄铁矿的接触面上, 多呈平板形, 延伸方向与接触面平行(图 2b, 2e), 也有一些呈圆形、椭圆形(图 2c, 2d, 2f), 同时含有少量粒内孔(图 2j, 2k)及孔壁边缘相对光滑的溶蚀孔(图 2i); 样品中黄铁矿较为发育, 反映出当时还原性的沉积环境, 其中 SF-5 中最为发育, 见宽约 130 μm 、长约 300 μm 的椭圆形黄铁矿群(图 2g), 黄铁矿晶形发育较好, 与粘土矿物胶结, 胶结面多有粒间孔形成(图 2h).

2.2 孔隙结构定量表征

基于 PCAS 软件对扫描电镜照片进行分析, 每个样品选取相同放大倍数的照片 10 张, 放大倍数为 50 000 倍, 经换算每个像素点大小为 5.83 nm, 在 PCAS 软件中最小元素识别半径为 23.32 nm, 即本次研究中能够识别的最小孔径为 23.32 nm, 处理过程如图 3 所示, 首先借助 Photoshop 或 Coreldraw 等软件对原照片(样品 SF-1)进行基础处理(图 3a), 然后运用 PCAS 对照片进行二值化(图 3b), 最后对二值化图像进行去噪处理并分割孔隙, 得到最终图像(图中颜色为随机生成, 用于区分不同大小的孔隙)(图 3c).

不同样品的相关参数如表 1 所示, 其中总孔数为 10 张照片的总和, 其他参数均为平均值或最大值. 形状因子为 0.34~0.45, 处于较低水平, 表明孔隙边缘结构较为复杂, 概率熵为 0.73~0.85, 处于一个较弱的定向性, 表明孔隙发育方向杂乱无章, 分形维数为 1.12~1.19, 处在一个较高水平, 表明孔隙的

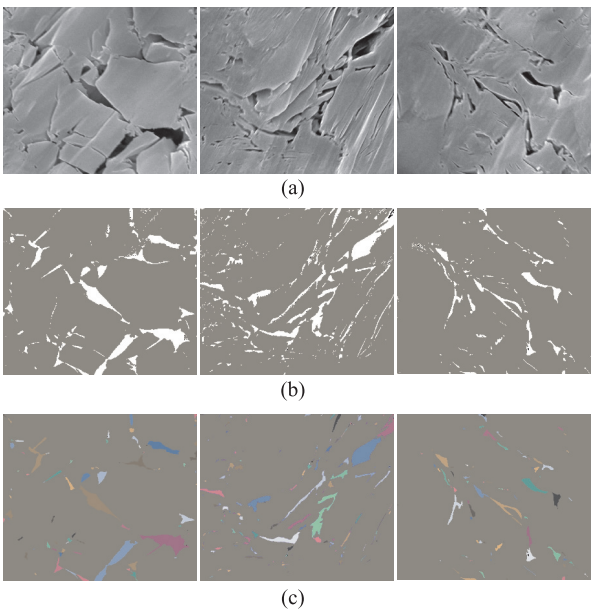


图 3 基于 PCAS 软件的孔隙分析结果
Fig.3 Results of pore analysis by PCAS

形态结构较为复杂.

3 讨论

根据不同的孔径范围对各样品的孔隙分布进行统计, 发现孔径主要集中在 100 nm 以下(图 4a), 所占比例为 72.70%~82.13%, 平均为 79.19%(图 4b), 其中 0~50 nm 的孔隙数量占 39.76%~45.48%, 平均为 41.39%, 由于所能识别的最小孔径为 23.32 nm, 所以根据国际纯化学和应用化学联合会(IUAPC)孔隙分类方法(2~50 nm 为介孔), 这部分孔隙均为介孔, 介孔的大量发育对孔隙的连通性至关重要, 有利于气体的运移. 孔隙结构复杂程

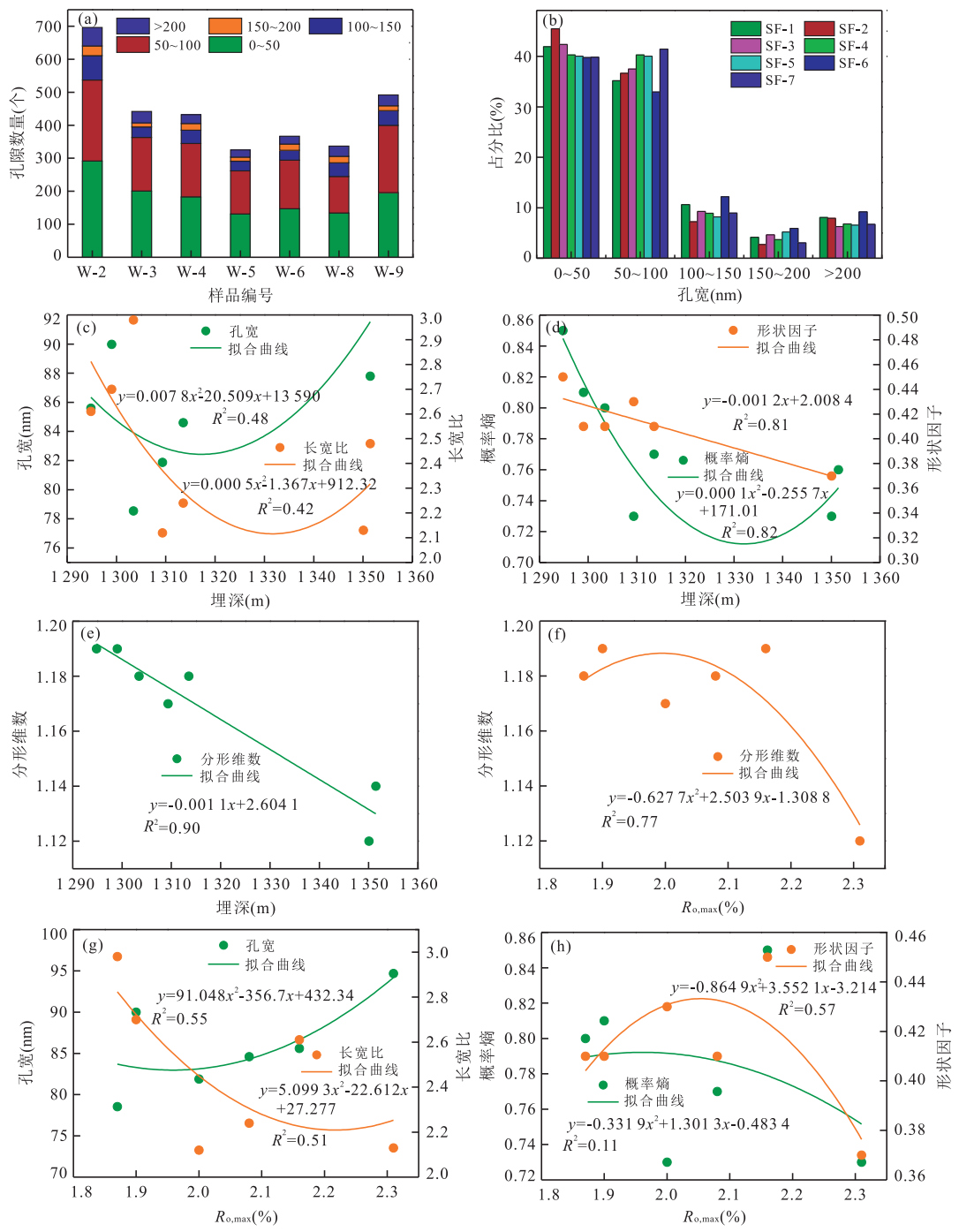


图 4 埋深、 $R_{o,max}$ 对各孔隙参数的影响

Fig.4 Effects of depth and $R_{o,max}$ on the pore parameters

度,前人多用基于氮气吸附曲线的分形维数进行表征,其影响因素也多从 TOC、矿物含量进行讨论(陈燕燕等,2015;付常青等,2016; Yang *et al.*, 2016), Jiao *et al.*(2014)利用 PCAS 获取孔隙的形状因子,并讨论其与孔径的关系,发现二者呈负指数关系,但相关性较弱.为更好地分析影响孔隙复杂程度的地质因素,从埋深和 $R_{o,max}$ 的角度对孔径、长宽比、形状因子、分形维数、概率熵等参数进行讨论,发现孔

径、长宽比与埋深均呈现出先减小后增大的趋势,但相关性较弱(图 4c).形状因子随埋深的增大而减小,概率熵随埋深的增大先减小后增大(图 4d),表明随深度的增加孔隙结构越来越复杂,孔隙发育的方向性随埋深的增大存在拐点,约在 1 330 m 附近, $\leq 1\ 330\text{ m}$ 随深度增加方向性越来越好, $> 1\ 330\text{ m}$ 随深度增加方向性越来越弱.分形维数随埋深的增大而减小(图 4e),表明孔隙各结构参数的非均质性

随深度增加也逐渐减小,孔隙结构参数趋于收敛,同时根据式(7)可知,越深的层位,随孔隙面积的增大孔隙结构复杂程度增加的越缓慢。

陈燕燕等(2015)对 New Albany 页岩($R_{o,max}$ 为 0.35~1.41)孔隙结构特征进行研究,发现分形维数与 $R_{o,max}$ 呈先增大后减小的趋势,拐点出现在 $R_{o,max}$ 为 0.9% 附近。本次研究样品成熟度较高($R_{o,max}$ 为 1.87%~2.31%),其分形维数随 $R_{o,max}$ 的增大先增大后减小(图 4f),拐点出现在 $R_{o,max}=2$ 附近,也即是由高成熟向过成熟过渡的过程中出现了拐点,表明在高成熟阶段,当成熟度增加时,孔隙面积越大孔隙结构复杂程度越低;在过成熟阶段,当成熟度增加时,孔隙面积越大孔隙结构复杂程度越大。随 $R_{o,max}$ 的增加孔径越来越大,长宽比越来越小(图 4g),表明随着热演化程度的增高,孔隙越来越趋于“圆”形。概率熵与 $R_{o,max}$ 的关系较弱,形状因子随 $R_{o,max}$ 的增大呈先增大后减小的趋势,拐点依然出现在 $R_{o,max}=2$ 附近(图 4h),表明在高成熟阶段,随成熟度的增加孔隙结构复杂程度越来越小;在过成熟阶段,随着成熟度的增加孔隙结构复杂程度越来越大。

4 结论

(1)孔隙比较发育,以有机质孔、粒间孔、粒内孔为主,有机质孔、粒内孔多呈圆形或椭圆形,粒间孔多呈平板型,孔径主要集中在 100 nm 以下,所占比例为 72.70%~82.13%,其中介孔占比为 39.76%~45.48%,介孔的大量发育对孔隙的连通性至关重要,有利于气体的运移。

(2)随深度的增加孔隙结构越来越复杂,且越深的层位,随孔隙的增大,孔隙结构复杂程度增加的越缓慢;孔隙发育的方向性随埋深的增大存在拐点,约在 1 330 m 附近, $\leq 1 330$ m 随深度增加方向性越来越好, $> 1 330$ m 随深度增加方向性越来越弱。

(3)孔隙结构复杂程度在 $R_{o,max}=2$ 附近存在拐点,在高成熟阶段,随成熟度的增加孔隙结构复杂程度越来越低,且孔隙面积越大其结构复杂程度越低;在过成熟阶段,随成熟度的增加孔隙结构复杂程度越来越高,且孔隙面积越大其结构复杂程度越大。

致谢:感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改建议和意见!

References

Bernard, S., Wirth, R., Schreiber, A., et al., 2012. Formation

of Nanoporous Pyrobitumen Residues during Maturation of the Barnett Shale (Fort Worth Basin). *International Journal of Coal Geology*, 103(23): 3–11.

Bu, H. L., Ju, Y. W., Tan, J. Q., et al., 2015. Fractal Characteristics of Pores in Non-Marine Shales from the Huainan Coalfield, Eastern China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24: 166–177.

Chalmers, G. R. L., Bustin, R. M., 2007. The Organic Matter Distribution and Methane Capacity of the Lower Cretaceous Strata of Northeastern British Columbia, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 70(1–3): 223–239. doi:10.1016/j.coal.2006.05.001

Chen, Y. Y., Zou, C. N., Mastalerz, M., et al., 2015. Porosity and Fractal Characteristics of Shale across a Maturation Gradient. *Natural Gas Geoscience*, 26(9): 1646–1656 (in Chinese with English abstract).

Clarkson, C. R., Solano, N., Bustin, R. M., et al., 2013. Pore Structure Characterization of North American Shale Gas Reservoirs Using USANS/SANS, Gas Adsorption, and Mercury Intrusion. *Fuel*, 103(1): 606–616.

Curtis, J. B., 2002. Fractured Shale Gas System. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1921–1938.

Curtis, M. E., Cardott, B. J., Sondergeld, C. H., et al., 2012. Development of Organic Porosity in the Woodford Shale with Increasing Thermal Maturity. *International Journal of Coal Geology*, 103(23): 26–31.

Fu, C. Q., Zhu, Y. M., Chen, S. B., 2016. Pore Structure and Fractal Features of Hetang Formation Shale in Western Zhejiang. *Journal of China University of Mining & Technology*, 45(1): 77–86 (in Chinese with English abstract).

Gensterblum, Y., Ghanizadeh, A., Cuss, R. J., et al., 2015. Gas Transport and Storage Capacity in Shale Gas Reservoirs—A Review. Part A: Transport Processes. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 12: 87–122.

Javadpour, F., Fisher, D., Unsworth, M., 2007. Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 46(10): 55–61.

Jiao, K., Yao, S. P., Liu, C., et al., 2014. The Characterization and Quantitative Analysis of Nanopores in Unconventional Gas Reservoirs Utilizing FESEM-FIB and Image Processing: An Example from the Lower Silurian Longmaxi Shale, Upper Yangtze Region, China. *International Journal of Coal Geology*, 128–129: 1–11.

Klaver, J., Desbois, G., Littke, R., et al., 2016. BIB-SEM Pore Characterization of Mature and Post Mature Posidonia Shale Samples from the Hils Area, Germany. *International Journal of Coal Geology*, 158: 78–89.

Liu, C., Shi, B., Zhou, J., et al., 2011. Quantification and Char-

- acterization of Microporosity by Image Processing, Geometric Measurement and Statistical Methods: Application on SEM Images of Clay Materials, *Applied Clay Science*, 54 (1): 97—106. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.07.022>
- Liu, C., Tang, C. S., Shi, B., et al., 2013. Automatic Quantification of Crack Patterns by Image Processing. *Computers & Geosciences*, 57(4): 77—80.
- Loucks, R. G., Reed, R. M., 2014. Scanning-Electron-Microscope Petrographic Evidence for Distinguishing Organic Matter Pores Associated with Depositional Organic Matter versus Migrated Organic Matter in Mudrocks. *GCAGS*, 10(3): 51—60.
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2009. Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, 79 (12): 848—861.
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2012. Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-Related Mudrock Pores. *AAPG Bulletin*, 96 (6): 1071—1098. <https://doi.org/10.1306/08171111061>
- Mendhe, V. A., Mishra, S., Khangar, R. G., et al., 2017. Organo-Petrographic and Pore Facets of Permian Shale Beds of Jharia Basin with Implications to Shale Gas Reservoir. *Journal of Earth Science*, 28(5): 897—916.
- Modica, C. J., Lapierre, S. G., 2012. Estimation of Kerogen Porosity in Source Rocks as a Function of Thermal Transformation: Example from the Mowry Shale in the Powder River Basin of Wyoming. *AAPG Bulletin*, 96(1): 87—108. <https://doi.org/10.1306/04111110201>
- Qin, Y., Jiang, B., Wang, J. Y., et al., 2008. Coupling Control of Tectonic Dynamical Conditions to Coalbed Methane Reservoir Formation in the Qinshui Basin, Shanxi, China. *Acta Geologica Sinica*, 82(10): 1355—1362 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Zhang, D. M., Fu, X. H., et al., 1999. A Discussion on Correlation of Modern Tectonic Stress Field to Physical Properties of Coal Reservoirs in Central and Southern Qinshui Basin. *Geological Review*, 45(6): 576—583 (in Chinese with English abstract).
- Sezer, G. I., Ramyar, K., Karasu, B., et al., 2008. Image Analysis of Sulfate Attack on Hardened Cement Paste. *Materials and Design*, (29): 224—231. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.006>
- Shao, L. Y., Xiao, Z. H., He, Z. P., et al., 2006. Palaeogeography and Coal Accumulation for Measures of the Carboniferous-Permian in Qinshui Basin, Southeastern Shanxi Province. *Journal of Palaeogeography*, 8(1): 43—52 (in Chinese with English abstract).
- Soroushian, P., Elzafraney, M., 2005. Morphological Operations, Planar Mathematical Formulations, and Stereological Interpretations for Automated Image Analysis of Concrete Microstructure. *Cement and Concrete Composites*, 27(7—8): 823—833. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.008>
- Strapoć, D., Mastalerz, M., Schimmelmann, A., et al., 2010. Geochemical Constraints on the Origin and Volume of Gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), Eastern Illinois Basin. *AAPG Bulletin*, 94 (11): 1713—1740. <https://doi.org/10.1306/06301009197>
- Sun, M. D., Yu, B. S., Hu, Q. H., et al., 2016. Nanoscale Pore Characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Formation Shale: A Case Study from Well Yuke #1 in the Southeast of Chongqing, China. *International Journal of Coal Geology*, 154—155(5): 16—29.
- Wang, B. Y., Hu, B., Bai, J. P., et al., 2015. Coal-Accumulating Environments of the Upper Carboniferous-Lower Permian Taiyuan Formation in Southeastern Qinshui Basin, Shanxi Province. *Journal of Palaeogeography*, 17 (5): 677—688 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. F., Jiang, Z. X., Li, Z., et al., 2017. Micro-Nano Pore Structure Characteristics in the Lower Cambrian Niutitang Shale, Northeast Chongqing. *Earth Science*, 42(7): 1147—1156 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.093>
- Wang, Y., Zhu, Y. M., Wang, H. Y., et al., 2015. Nanoscale Pore Morphology and Distribution of Lacustrine Shale Reservoirs: Examples from the Upper Triassic Yan-chang Formation, Ordos Basin. *Journal of Energy Chemistry*, 24 (4): 512—519.
- Wei, C. T., Qin, Y., Man, L., 2005. Numerical Simulation Research on the Overpressure History of Upper Main Coal Seam in Central-South Qinshui Basin. *Natural Gas Industry*, 25(1): 81—84, 10 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. T., Zou, C. N., Zhu, R. K., et al., 2015. Reservoir Quality Characterization of Upper Triassic Chang 7 Shale in Ordos Basin. *Earth Science*, 40 (11): 1810—1823 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, C. R., Tang, H. M., Liu, B. C., et al., 2007. Using SEM Photos to Gain the Pore Structure Parameters of Soil Samples. *Earth Science*, 32(3): 415—419 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R., He, S., Yi, Q. H., et al., 2016. Nano-Scale Pore Structure and Fractal Dimension of Organic-Rich

- Wufeng-Longmaxi Shale from Jiaoshiba Area, Sichuan Basin: Investigations Using FE-SEM, Gas Adsorption and Helium Pycnometry. *Marine and Petroleum Geology*, 70: 27–45.
- Yang, Y.F., Wang, C.C., Yao, J., et al., 2016. A New Method for Microscopic Pore Structure Analysis in Shale Matrix. *Earth Science*, 41(6): 1067–1073 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.088>
- Zhang, L.Y., Li, J.Y., Li, Z., et al., 2015. Development Characteristics and Formation Mechanism of Intra-Organic Reservoir Space in Lacustrine Shales. *Earth Science*, 40(11): 1824–1833 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Liu, C.L., Zhu, Y.M., et al., 2015. The Characterization of a Marine Shale Gas Reservoir in the Lower Silurian Longmaxi Formation of the Northeastern Yunnan Province, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 321–335.
- 附中文参考文献**
- 陈燕燕, 邹才能, Mastalerz, M., 等, 2015. 页岩微观孔隙演化及分形特征研究. *天然气地球科学*, 26(9): 1646–1656.
- 付常青, 朱炎铭, 陈尚斌, 2016. 浙西荷塘组页岩孔隙结构及分形特征研究. *中国矿业大学学报*, 45(1): 77–86.
- 秦勇, 姜波, 王继尧, 等, 2008. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应. *地质学报*, 82(10): 1355–1362.
- 秦勇, 张德民, 傅雪海, 等, 1999. 山西沁水盆地中、南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨. *地质论评*, 45(6): 576–583.
- 邵龙义, 肖正辉, 何志平, 等, 2006. 晋东南沁水盆地石炭二叠纪含煤岩系古地理及聚煤作用研究. *古地理学报*, 8(1): 43–52.
- 王保玉, 胡斌, 白建平, 等, 2015. 山西沁水盆地东南部上石炭统一二叠统太原组聚煤环境. *古地理学报*, 17(5): 677–688.
- 王朋飞, 姜振学, 李卓, 等, 2017. 渝东北下寒武统牛蹄塘组页岩微纳米孔隙结构特征. *地球科学*, 42(7): 1147–1156.
- 韦重韬, 秦勇, 满磊, 2005. 沁水盆地中南部上主煤层超压史数值模拟研究. *天然气工业*, 25(1): 81–84, 10.
- 吴松涛, 邹才能, 朱如凯, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能. *地球科学*, 40(11): 1810–1823.
- 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛, 等, 2007. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数. *地球科学*, 32(3): 415–419.
- 杨永飞, 王晨晨, 姚军, 等, 2016. 页岩基质微观孔隙结构分析新方法. *地球科学*, 41(6): 1067–1073.
- 张林晔, 李钜源, 李政, 等, 2015. 湖相页岩有机储集空间发育特点与成因机制. *地球科学*, 40(11): 1824–1833.