

王羽, 金婵, 汪丽华, 等. 基于 SEM 图像灰度水平的页岩孔隙分割方法研究[J]. 岩矿测试, 2016, 35(6): 595 - 602.

WANG Yu, JIN Chan, WANG Li-hua, et al. Pore Segmentation Methods Based on Gray Scale of Scanning Electron Microscopy Images [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(6): 595 - 602. [DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 - 2131/td. 2016. 06. 005]

★ 基于 SEM 图像灰度水平的页岩孔隙分割方法研究

王羽^{1,2}, 金婵^{1,2}, 汪丽华^{1,2*}, 王建强^{1,2}, 姜政^{1,2}, 王彦飞³

(1. 中国科学院微观界面物理与探测重点实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院上海应用物理研究所上海光源, 上海 201204;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 微观孔隙结构是研究页岩气吸附运移机制和建立地质模型的基础, 氩离子抛光 - 扫描电子显微镜 (SEM) 技术是开展此项研究的主要实验方法, 但已有的研究大多是关注页岩孔隙分类, 较少从定量角度表征其特征。为开展页岩微观孔隙结构定量研究, 提高孔隙分割质量, 本研究分别利用边缘检测分割法、流域分割法、手动和自动阈值分割法对页岩无机孔和有机孔二次电子图像进行分割实验, 对比不同方法的分割效果。结果表明, 通过选取合适的分割阈值, 基于 SEM 图像的手动阈值分割法能够表征 1 nm 以上的孔隙, 准确地识别有机质与脆性矿物边缘、孔隙与有机质边缘, 使得页岩孔隙提取结果趋近于真实, 能更有效地对页岩孔隙结构进行定量分析。

关键词: 富有机质页岩; SEM 图像; 孔隙分割; 阈值法

中图分类号: P619. 227; P575. 2 **文献标识码:** A

微观孔隙结构是研究页岩气吸附运移机制和建立地质模型的基础^[1-2]。氩离子抛光 - 扫描电子显微镜 (Ar Ion Milling - SEM) 技术, 聚焦离子束扫描电子显微镜 (FIB - SEM) 技术和 X 射线断层扫描 (X - CT) 技术是当前页岩微观孔隙结构研究的主要测试技术, 不仅能够直观地定性反映页岩的孔隙类型、大小和形状, 同时结合相关软件能够定量提取孔隙结构参数 (孔径分布、孔隙度、配位数、连通率等), 实现页岩微纳米级孔隙结构的定性描述与定量分析相结合^[3-8]。采用上述方法进行页岩孔隙结构定量分析的前提均涉及合理的图像分割, 如何提高孔隙识别效率是进行页岩孔隙结构图像分析和岩石物理参数提取的关键。目前边缘检测分割法、流域分割法和阈值分割法是岩石孔隙提取最常用的方法。刘娜等^[9]提出基于形态重构的流域分割法, 能

够对岩石颗粒图像进行较好分割; Houben 等^[10]分别利用不同图像分割方法, 对 Opalinus 黏土岩进行孔隙分割实验, 得出阈值法与边缘检测法相结合是进行孔隙分割的有效手段; Ji 等^[11]采用 Otsu 阈值算法对 Majella 灰岩 CT 图像进行分割, 实现了该灰岩宏孔隙与微孔隙的定量描述。与上述分割对象相比较, 页岩孔隙类型众多, 形态复杂, 且其边缘有一定范围, 不同图像分割方法的提取结果可能存在较大误差, 有必要针对不同分割方法提取页岩孔隙的有效性展开研究。

高分辨 SEM 二次电子图像可以清楚显示页岩孔隙、无机矿物基质和有机质的灰度差异^[10]。利用图像处理技术可将灰度值相对低的孔隙从 SEM 图像中分割出来, 即能够精确识别页岩有效孔隙并提取其特征参数。因此, 本文分别采用边缘检测分割法、流域分割法、手动和自动阈值分割法对页岩

收稿日期: 2016 - 05 - 23; 修回日期: 2016 - 08 - 19; 接受日期: 2016 - 08 - 30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) “页岩三维成像实验技术和数据获取技术” (XDB10020102); 国家杰出青年科学基金资助项目 (41325016)

作者简介: 王羽, 助理研究员, 从事同步辐射技术在地质地震领域的应用研究。E-mail: yuwang@sinap.ac.cn。

通讯作者: 汪丽华, 副研究员, 从事同步辐射技术在地质考古领域的应用研究。E-mail: lhwang@sinap.ac.cn。

SEM 二次电子图像中的无机孔和有机孔开展孔隙识别实验,对比不同方法的分割效果,探究适用于页岩孔隙识别的最佳方法,以期页岩二维与三维孔喉结构重建提供数据参考。

1 实验部分

1.1 样品采集与处理

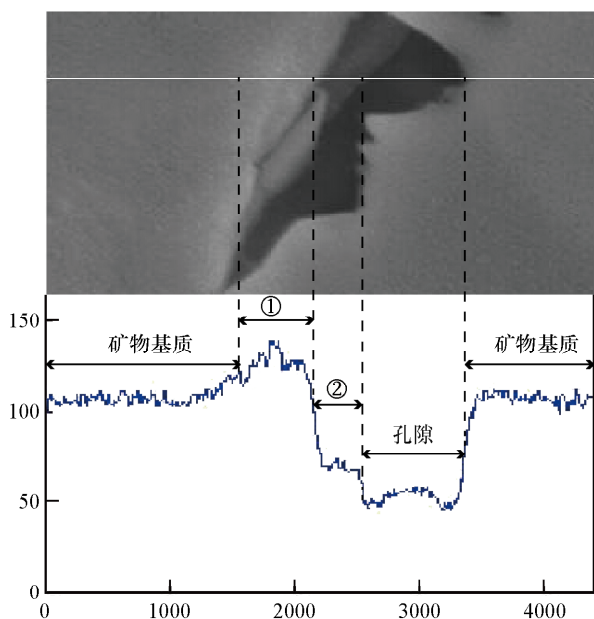
页岩样品采自四川盆地中部石柱县打风坳剖面志留系龙马溪组,X 射线衍射实验表明其主要矿物包含石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿和黏土矿物。取页岩薄片样品进行初步机械抛光与进一步氩离子抛光获得高质量表面后,应用 SEM 技术发现无机孔和有机孔两种最主要的孔隙类型。无机孔发育在矿物基质中,孔径从数百纳米至数微米,形状复杂多样;有机孔主要发育在有机质内部,呈片麻状或蜂窝状。

1.2 孔隙识别原理

二次电子图像不仅与样品形貌相关,还与样品组成元素的原子序数关系密切,能够清楚地显示孔隙与矿物基质在灰度值上的差异(图1)。灰度值分布图表明黑色凹陷区域为孔隙,由于电子聚集效应,其边缘通常较为明亮。

1.3 孔隙分割方法

原始二次电子图像经过裁剪后,首先进行背景灰度扣除和平滑,以消除图像亮度不均匀性和噪声;



①—电子聚集造成的明亮边缘;②—形貌起伏所造成的假孔隙。

图1 基于SEM图像的孔隙识别

Fig. 1 Pore identification using secondary SEM image

不同的图像分割方法在 VC++ 开发环境下使用面向对象的方法进行开发。

1.3.1 边缘检测分割方法

边缘检测分割方法是利用一阶和二阶偏导数识别图像中的不连续点(梯度方法)^[12],其定义如下:

$$G(x, y) = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T$$

其中 $f(x, y)$ 为灰度图像。本方法主要用以标识矿物颗粒或孔隙的边缘。本文采用 sobel 算子能够加强中心像素上下左右 4 个方向像素的权重,图像边缘亮度较大,并能抑制孤立噪声。

1.3.2 流域分割方法

基于拓扑理论的流域分割方法(分水岭分割方法)对灰度敏感,分割得到的孔隙边界定位准确且连续闭合。其中心思想是将图像视为地质学中的拓扑地貌,图像中每点像素的灰度值表示该点的海拔高度,每一个局部极小值及其影响区域称为集水盆,而集水盆的边界视为分水岭。流域分割方法的迭代标注计算过程分为排序和淹没两步,最终得到输入图像的集水盆图像,集水盆之间的边界点即为分水岭^[13]。具体到页岩二次电子 SEM 图像中,可将孔隙边界看作分水岭。进行孔隙分割时,先利用 sobel 算子将原始图像转化成梯度图像,把梯度图像作为输入图像,以获取孔隙的边缘信息。

1.3.3 阈值分割方法

阈值分割方法是基于图像中要提取的目标与背景灰度的差异性,依据像素的灰度值进行孔隙的提取^[14],该算法一般描述为 $T = T[x, y, f(x, y), g(x, y)]$,其中 $f(x, y)$ 代表像素点 (x, y) 处的灰度值, $g(x, y)$ 代表该点邻域的某种局部性质。在页岩孔隙分割中,假若页岩 SEM 图像像素的灰度 T 分布范围 0(黑色)~255(白色),根据视觉判断确定一个临界灰度值 T_p ,当像素的灰度值小于 T_p 时,确定为孔隙,反之则确定为矿物基质。

2 结果与讨论

2.1 不同方法孔隙分割效果

分别采用边缘检测分割法、流域分割法、自动阈值分割法和手动阈值分割法对页岩气储集空间无机孔和有机孔二次电子扫描图像进行孔隙分割实验,实验对比结果如图 2 和图 3 所示。

图 2a 为页岩无机粒间孔的 SEM 二次电子图像,边缘检测法能够识别无机孔隙,但是受形貌起伏

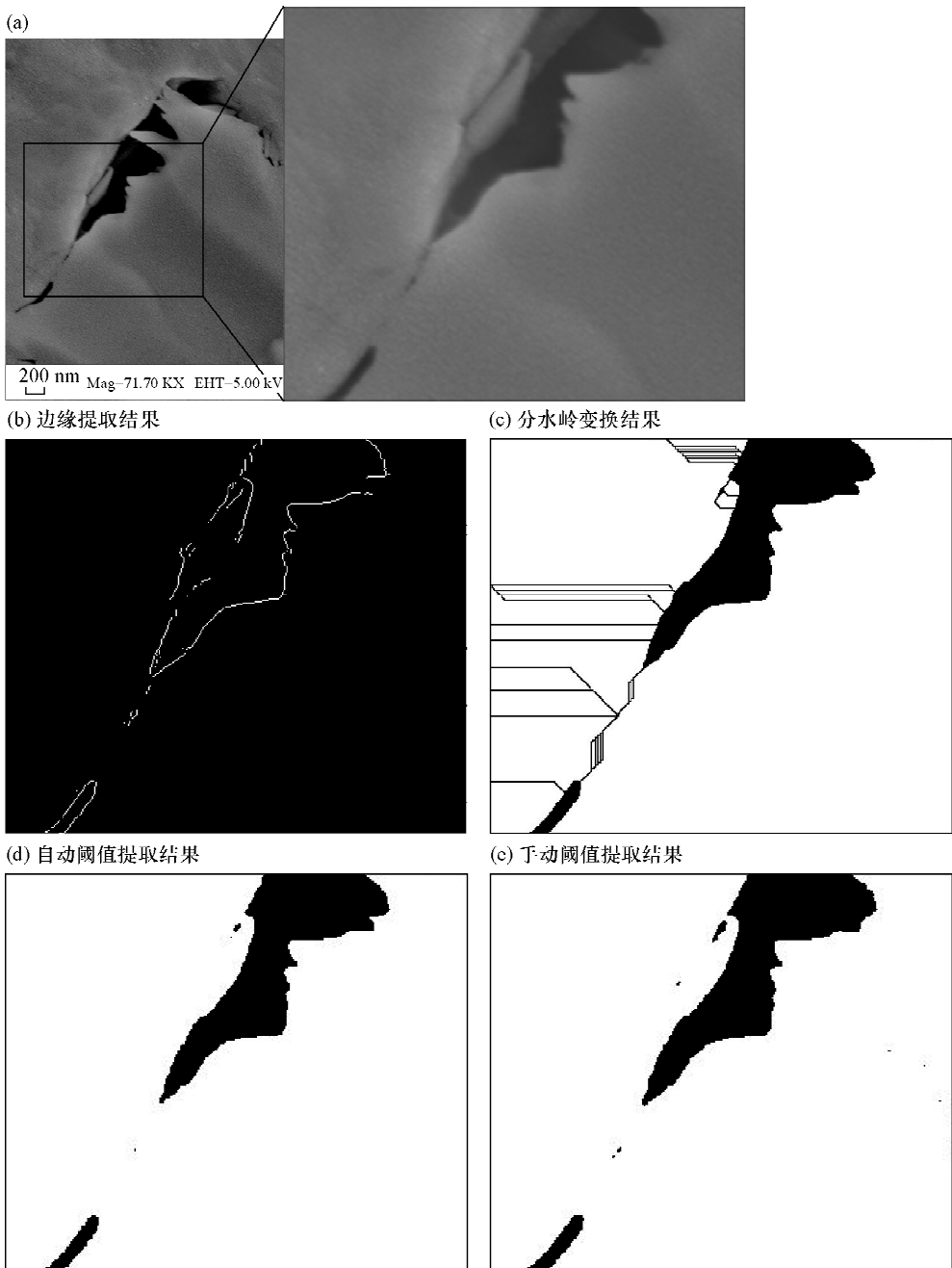


图2 无机孔的不同孔隙分割方法效果对比图

Fig.2 Comparisons of mineral matrix pore segmentation effects with different segmentation methods

影响,误差较大(图2b)。流域分割法能够有效地识别大孔,但是忽视了狭缝和孤立的小孔(图2c)。阈值法能够较为精确地识别大多数无机孔隙,但是相较而言,自动阈值法边缘信息不明确(图2d,e)。

图3a为页岩有机孔的SEM二次电子图像,边缘检测分割法(图3b)和流域分割法(图3c)均能够识别有机质与孔隙,然而边缘检测分割法受孔隙形貌起伏影响,造成较大误差。流域分割法虽然定位相对准确,但是边缘信息不明确。相较而言,阈值分

割法对灰度十分敏感,能在一定程度上改善边缘检测分割法和流域分割法中丢失微弱边缘的缺点(图3d,e),适用于进行页岩孔隙提取。自动阈值分割法操作便捷,但是其结果精度不足以满足孔隙定量分析的需求。手动阈值分割法通过自主选择合理的分割阈值,能够使结果趋近于真实的孔隙度。

2.2 阈值分割法在页岩孔隙分割中的应用示例

作为一种典型的多相致密储层,页岩中发育有多种不同类型的孔隙,如黏土矿物层间孔、粒间孔、

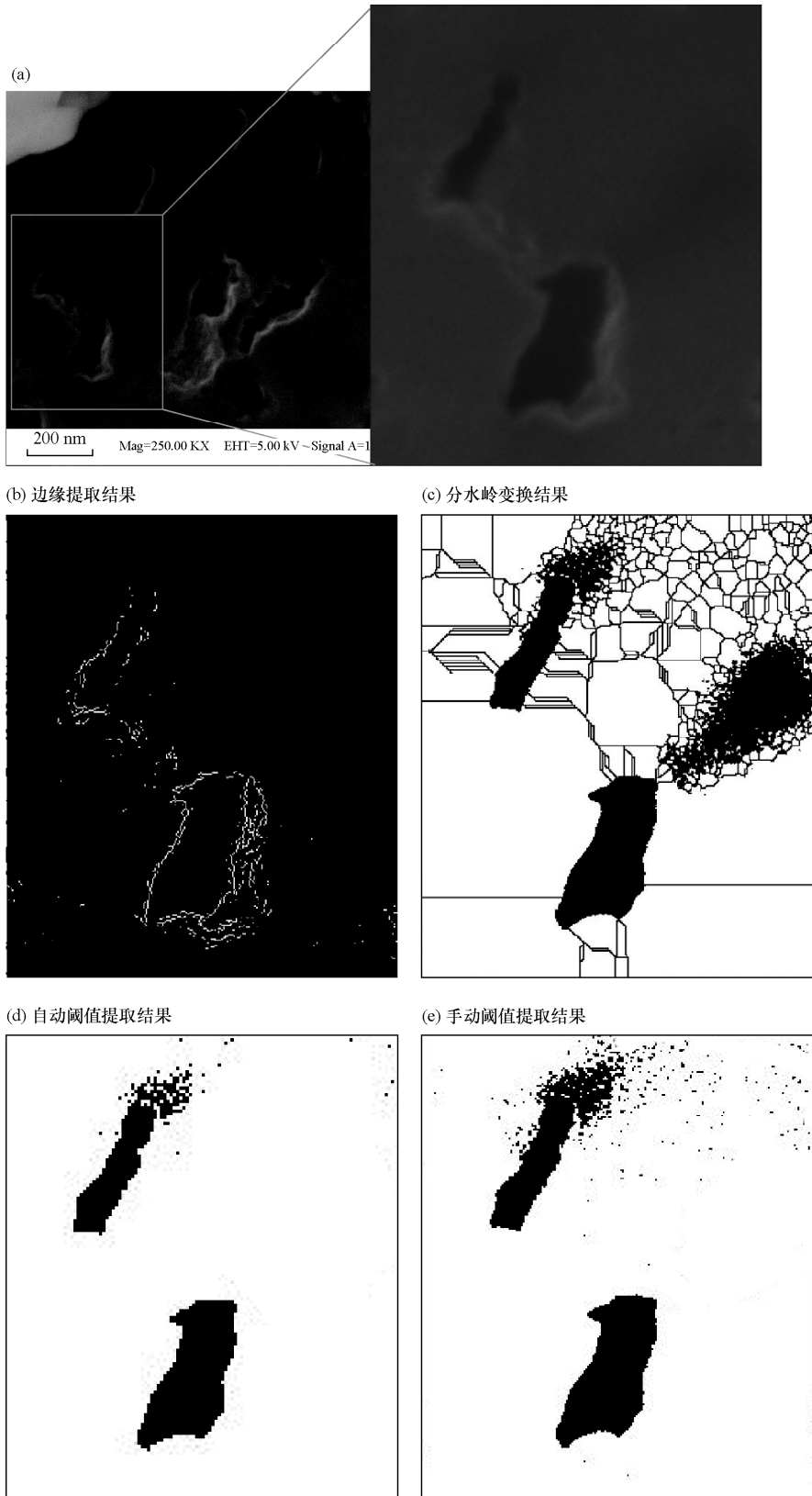


图3 有机孔的不同孔隙分割方法效果对比图

Fig. 3 Comparisons of organic matter pore segmentation effects with different segmentation methods

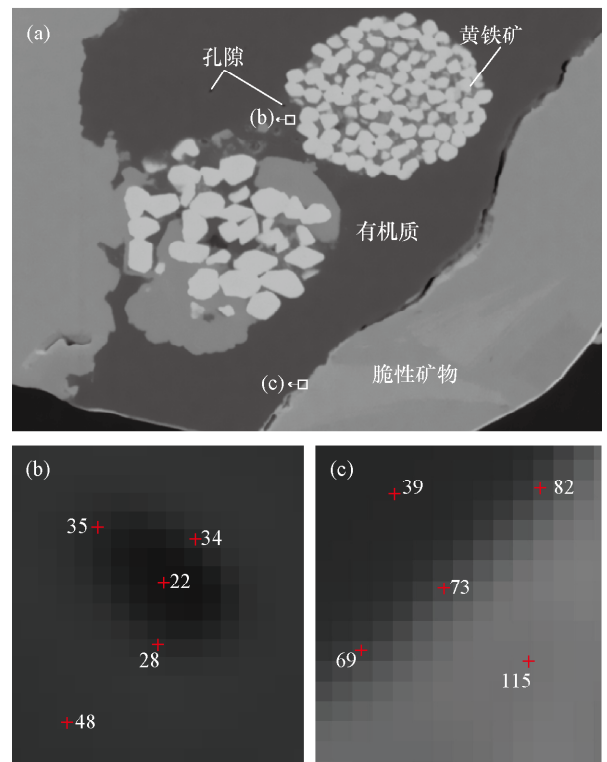
溶蚀孔、晶间孔和有机孔等^[15-16]。页岩气储层性能的优劣在很大程度上取决于微纳孔隙的大小、分布、形貌和连通性等。利用手动阈值分割法对页岩中普遍发育的孔隙结构进行孔隙提取,分割阈值根据统计学原理,利用高分辨扫描电子图像获取。

图4a是页岩微观结构的高分辨二次电子图像,根据灰度差异可以清楚地区分黄铁矿、脆性矿物、有机质和孔隙四大类组分。将图像放大至2500倍,可清晰地观测到边界阈值出现梯度变化,利用Matlab中的imtool工具依次读取两种不同组分的边界阈值300组,该组数据的平均值视为分割阈值。如图4b和c所示,分别展示了有机质与孔隙、有机质与脆性矿物的边界。阈值读取结果表明有机孔的阈值范围为22~27,有机质的阈值范围为48~53,从有机孔过渡到有机质,阈值呈现出梯度上升,其范围基本涵盖28~49,依据统计学原理计算将32视为有机孔与有机质的分割阈值(图4b)。同理,图4c中根据阈值统计计算结果,可将71视为有机质与无机矿物基质的分割阈值。

图5为应用手动阈值分割法对页岩不同类型孔隙进行孔隙提取的结果,其中黑色区域部分代表孔隙。对粒间孔、层间孔、解理孔、溶蚀孔和微裂缝等无机孔而言,当分割阈值在合理范围微小变动时,分割结果相近,对孔隙定量分析结果影响较小。以图5e所示的微裂缝为例,当分割阈值分别设为25、30与35时,面孔率计算结果依次为7.5%、8.2%与8.5%,差异较小。有机孔与有机质灰度相似,分割阈值的微弱变动对分割结果影响相对大,根据不同分割阈值进行孔隙定量分析时会产生较大误差。图5g是有机孔孔隙分割结果,结合形貌学特征,该分割阈值设为18,面孔率计算结果为25%。但是当分割阈值分别设为20和25时,面孔率计算结果分别为27.6%与29.3%,波动较大。上述结果表明,应用手动阈值分割法能够对页岩不同类型孔隙结构进行有效的孔隙提取,其中合理选择分割阈值是孔隙提取的关键。

2.3 手动阈值法对CT断层扫描定量分析页岩孔隙的启示

手动阈值法能够准确地识别有机质与脆性矿物边缘、孔隙与有机质边缘,更加适合页岩孔隙提取。基于SEM图像的手动阈值分割法不仅能够有效地对页岩孔隙结构进行定量分析,亦可为CT图像的



(a)页岩微观结构的二次电子图像;(b)有机质与孔隙的阈值边界;(c)有机质与脆性矿物的阈值边界。(b)和(c)中红色十字和白色数字分别表示像素点位置及该像素点的阈值。

图4 页岩孔隙分割中分割阈值的获取方法示例

Fig. 4 Images showing threshold value acquisition method in shale pore segmentations

孔隙分割提供参考。

CT无损扫描技术被广泛应用于岩石孔隙结构研究。随着测试技术的改进,CT图像质量虽然有了一定提高,但是生成高质量的纳米级CT图像依然存在难点,使得微纳级孔隙的精确提取十分困难。作为典型的非常规致密多相储层,页岩孔隙三维结构的量化分析一直是研究的重点与难点。国内外研究者对页岩三维孔隙结构的研究多采用FIB-SEM和CT无损扫描技术,前者主要基于SEM图像进行孔隙和不同矿物的分割,后者则基于X射线切片进行图像分割,两者的灰度深浅均与样品组成元素的原子序数线性相关。因此,可通过SEM图像确定不同组分的分割阈值,并计算分割阈值的比例关系,进而以该比例关系为参考,对页岩CT扫描图像进行孔隙提取,以获取更为准确的定量结果,为页岩气储量评估和渗流模拟提供基础数据支持。

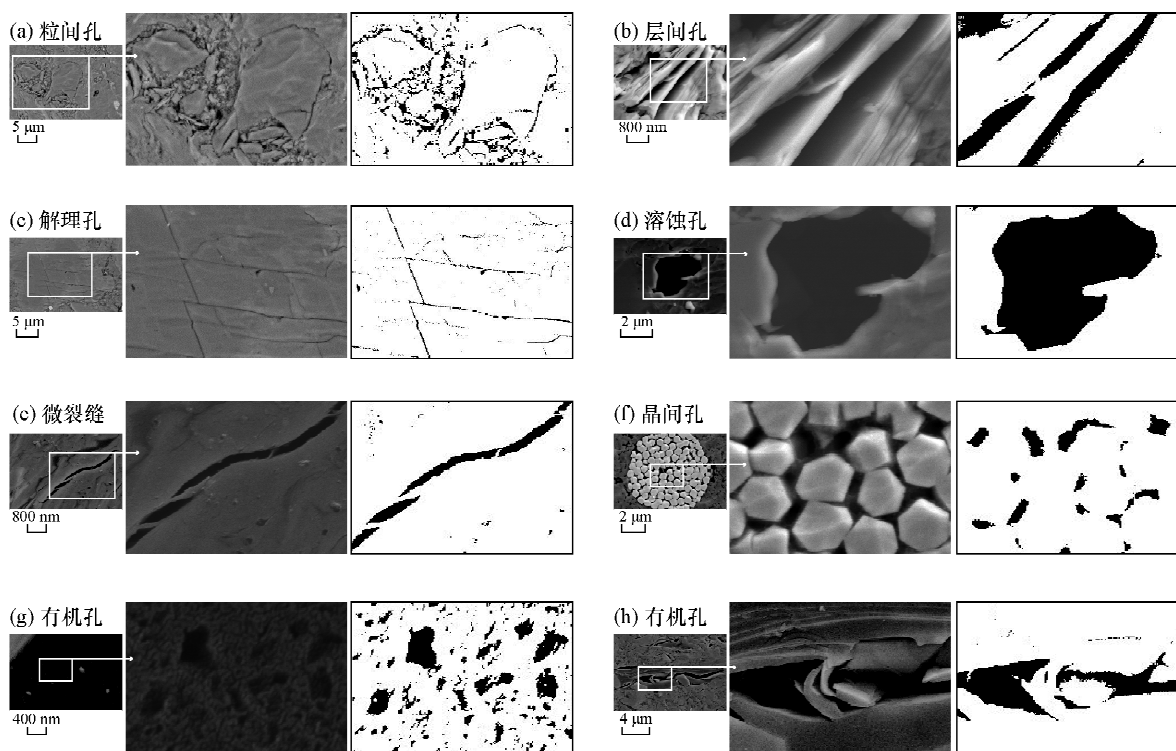


图5 手动阈值分割法对页岩不同类型孔隙进行孔隙提取的结果

Fig. 5 Comparisons of organic matter pore segmentation effects developing in shale with different segmentation methods

3 结论

本研究分别利用边缘检测分割法、流域分割法和手动或自动阈值分割法进行页岩孔隙结构提取实验,结果表明手动阈值分割法通过自主选择合理的分割阈值,能够有效区分无机孔、矿物、有机质和有机孔,使得页岩孔隙提取结果趋近于真实,为页岩微观孔隙结构的定量化研究提供了新的思路与参考。同时,基于扫描电子图像获取的分割阈值比例亦可为CT图像的孔隙分割提供参考。依据统计学原理确定分割阈值的方法操作简单,但是分割阈值的微弱变动对孔隙分割影响大,尤其是有机孔。因而采取阈值法进行孔隙分割时还须充分考虑孔隙的真实空间形态,合理选择分割阈值。

4 参考文献

- [1] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报,2011,27(6): 1857-1864.
Zou C N, Zhu R K, Bai B, et al. First Discovery of Nanopore Throat in Oil and Gas Reservoir in China and Its Scientific Value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (6): 1857-1864.

- [2] Clarkson C R, Jensen J L, Blasingame T A. Reservoir Engineering for Unconventional Gas Reservoirs: What Do We Have to Consider? [C]//SPE Paper145080 Presented at the Society of Petroleum Engineers North American Unconventional Gas Conference and Exhibition. Woodlands, Texas, 2011.
- [3] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79 (12): 848-861.
- [4] Klaver J, Desbois G, Littke R, et al. BIB-SEM Characterization of Pore Space Morphology and Distribution in Postmature to Overmature Samples from the Haynesville and Bossier Shales [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 451-466.
- [5] 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九老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.
- [6] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al.

- Microstructural Investigation of Gas Shales in Two and Three Dimensions Using Nanometer-scale Resolution Imaging[J]. AAPG Bulletin,2012,96(4):665-677.
- [7] Dewers T A, Heath J, Ewy R, et al. Three-dimensional Pore Networks and Transport Properties of a Shale Gas Formation Determined from Focused Ion Beam Serial Imaging[J]. International Journal of Oil Gas and Coal Technology,2012,5(2-3):229-248.
- [8] Wang Y, Pu J, Wang L H, et al. Characterization of Typical 3D Pore Networks of Jiulaodong Formation Shale Using Nano-transmission X-ray Microscopy [J]. Fuel, 2016,170:84-91.
- [9] 刘娜,郭连军,赵楠楠. 基于形态重构的分水岭岩石图像分割方法[J]. 辽宁科技大学学报,2010,33(5):495-498.
- Liu N, Guo L J, Zhao N N. Segmentation Algorithm of Rock Image with Morphological Reconstruction [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning,2010,33(5):495-498.
- [10] Houben M E, Desbois G, Urai J L. Pore Morphology and Distribution in the Shaly Facies of Opalinus Clay (Mont Terri, Switzerland): Insights from Representative 2D BIB-SEM Investigations on mm to nm Scale[J]. Applied Clay Science,2013,71:82-97.
- [11] Ji Y T, Hall S A, Baud P, et al. Characterization of Pore Structure and Strain Localization in Majella Limestone by X-ray Computed Tomography and Digital Image Correlation[J]. Geophysical Journal International,2015,200(2):699-717.
- [12] 何斌,马天予,王运坚等编著. Visual C++数字图像处理(第二版)[M]. 北京:人民邮电出版社,2002:394-398.
- He B, Ma T Y, Wang Y J, et al. Visual C Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Posts & Telecom Press,2002:394-398.
- [13] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2005.
- [14] Nikhil R P, Sankar K P. A Review on Image Segmentation Techniques [J]. The Journal of the Pattern Recognition Society,1993,26(9):1277-1294.
- [15] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of Pore Types for Matrix-related Mud Pores [J]. AAPG Bulletin,2012,96(6):1071-1098.
- [16] 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 the Gas Shale Pore System[J]. Earth Science Frontiers,2013,20(4):211-220.

Pore Segmentation Methods Based on Gray Scale of Scanning Electron Microscopy Images

WANG Yu^{1,2}, JIN Chan^{1,2}, WANG Li-hua^{1,2*}, WANG Jian-qiang^{1,2}, JIANG Zheng^{1,2}, WANG Yan-fei³

(1. Key Laboratory of Interfacial Physics and Technology, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Highlights:

- Pore segmentation was performed based on gray scale of SEM images.
- Segmentation results were comparatively analyzed using edge detection, watershed, auto and manual thresholding methods.
- The manual thresholding method was more suitable for shale pore segmentation.

Abstract: Microscopic pore structures of shale are the basis for investigating the adsorption and migration mechanism of shale gas and building a geological model. Ar ion milling combined with Scanning Electron Microscopy (SEM) is the main technique for analyzing microscopic pore structures of shale. However, previous research focused mainly on pore classification and lacked insufficient studies on the quantitative characteristics of pore structures. In order to conduct quantitative research on pore structures and improve the quality of pore segmentation, edge detection, watershed, auto and manual thresholding methods were used in this study to perform segmentation of mineral

matrix pore and organic matter pore based on SEM images. By comparing results obtained from all of these methods, the conclusion drawn was that the manual thresholding method could reflect pores with diameters larger than 1 nm and identify the organic matter, pores and brittle minerals accurately by selecting a suitable segmentation thresholding value, guaranteeing the analysis to be closer to the true states. The proposed method provides a more effective method for quantitative analyses of shale pore structures.

Key words: organic rich shale; SEM image; pore segmentation; threshold method

