



移动阅读

俞雨溪,王宗秀,程明,等.页岩微观结构灰度图像的标准化方法[J].煤炭学报,2019,44(7):2178-2187. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0792

YU Yuxi, WANG Zongxiu, CHENG Ming, et al. A method of gray-level image standardization for shale microscopic structure characterization[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2178-2187. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0792

## 页岩微观结构灰度图像的标准化方法

俞雨溪<sup>1,2,3</sup>, 王宗秀<sup>1,2,3</sup>, 程明<sup>4</sup>, 尹锦涛<sup>5</sup>

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质科学院 页岩油气调查评价重点实验室, 北京 100081; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 5. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075)

**摘要:**采用灰度图像分析方法获取页岩孔隙结构参数是目前页岩微观结构表征的一种重要手段。在扫描成像过程中,往往需要根据样品自身特点调节亮度、对比度等参数以达到较好的成像效果,这会导致不同视域、不同样品的图像灰度分布特征发生变化,从而导致识别孔隙的灰度阈值产生差异。为了实现统一标准识别页岩孔隙,研究以SEM图像为例,由图像灰度分布影响因素分析入手,在提取一系列标志参考物灰度的基础上,通过合成灰度累计概率分布建立了待校正图像的代表性灰度分布,在此基础上确定了待标准图像与标准图像合成灰度累计概率分布之间的映射关系,采用图像灰度直方图匹配算法实现了图像标准化。研究表明,页岩中的孔隙、有机质、自生石英、黄铁矿等4种组分组合后可覆盖整个图像灰度分布,是有效的标志参考物组合。利用该标志物组合所合成灰度累计概率分布作为不同图像间的对比参数进行标准化,可以消除组分含量差异对灰度分布的影响,达到校正对比度和亮度等扫描参数设置差异对图像灰度的影响。经验证,该方法对采用不同拍摄参数的图像均具有较好的应用效果,经过标准化处理后的图像能够实现同一灰度阈值自动识别页岩孔隙和有机质等地质元素,提高了图像提取孔隙结构参数的可对比性,为页岩微观图像孔隙结构定量分析提供了可靠基础。

**关键词:**页岩;孔隙结构;灰度;标准化;图像分析

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)07-2178-10

## A method of gray-level image standardization for shale microscopic structure characterization

YU Yuxi<sup>1,2,3</sup>, WANG Zongxiu<sup>1,2,3</sup>, CHENG Ming<sup>4</sup>, YIN Jintao<sup>5</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Key Lab of Shale Oil and Gas Geological Survey, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Gray-level image analysis is important in shale pore structure characterization. To obtain good imaging result, it is necessary to adjust the brightness and contrast for the different fields of view or different samples when capturing the image. This will bring difference in gray-level distribution, which directly results in the variation of threshold

收稿日期:2018-06-15 修回日期:2019-06-14 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41802178);中国地质科学院基本科研业务费资助项目(JYWF20181201);中国地质调查局地质调查基金资助项目(DD20160183)

作者简介:俞雨溪(1987—),女,浙江绍兴人,博士后。E-mail:yuyuxi718@126.com

value for pores. To solve this problem, the SEM image was taken as an example to analyze the factors that can influence the grey level of image. The grey level distribution of the uncorrected image is represented by the integrated cumulative probability distribution of the references, which are based on the density probability distribution extracted from the pyrites, authigenic quartz, organic matter and pore in shale. By establishing relations with the standardized image, the correction can be realized based on the theory of gray level histogram specification. The results show that the grey-level distributions of the marker assemblage can cover the whole grey-level range of the image. Due to the adoption of the marker assemblage, the influence of the shale compositions on the grey level of the image can be eliminated and the discrepancies in the grey level of image induced by different scanning parameters of brightness and contrast can be corrected. The effect of image standardization was verified and it can be applied to images scanned under different situations. The results show that the proposed standardization method can improve the automatic identification of pore and organic matter by using the same threshold value, which will lay a solid foundation for microscopic image analysis and provide comparable and reliable data for the quantitative characterization of shale pore structure.

**Key words:** shale; pore structure; grey level; standardization; image analysis

近年来,页岩油气勘探开发领域突飞猛进,业界开始将页岩视为储集层开展相关基础研究,大大促进了页岩微观结构表征分析技术的发展<sup>[1-3]</sup>。图像分析技术能够直观、快速地对页岩内部微小储集空间和结构进行精细刻画,测试手段多样,包括扫描电镜成像、CT 扫描成像、核磁共振成像等<sup>[4-6]</sup>。这些方法具有不同的成像原理和测试精度,其成像结果均可以灰度数字图像形式呈现<sup>[7]</sup>,灰度值分布范围从 0 到 255,白色为 255,黑色为 0。通过设定灰度阈值范围即可对图像中的孔隙进行识别<sup>[8]</sup>,进而提取孔径、孔隙面积/体积等结构参数、利用统计学方法获取面孔率、孔径分布等定量信息<sup>[9]</sup>。为了更加方便、快捷的提取图像中的孔隙结构参数,前人开发了大量图像分析软件和算法<sup>[10-13]</sup>,这些技术能够实现自动提取图像中的孔隙结构参数,但前提是对孔隙所对应的灰度阈值范围进行设定<sup>[14-15]</sup>。可见,孔隙灰度阈值范围的选取对图像提取孔隙结构参数结果具有重要影响,是图像定量分析页岩孔隙结构的关键。

在常规储层研究中,前人常以实测孔隙度作为图像孔隙度灰度阈值的选取或验证标准<sup>[16]</sup>,但该方法并不适用于页岩样品:首先,页岩具有更强的微观非均质性<sup>[17]</sup>,与大样量测试获得的实测孔隙度相比,即使是通过大量统计获得的图像孔隙度值代表性也有限<sup>[18]</sup>;其次,由于页岩连通性较差<sup>[8]</sup>,二维图像孔隙度与实测孔隙度的可对比性较差。鉴于页岩样品的以上特点,在进行页岩微观图像孔隙结构研究时,目前只能依靠人为主观判断来识别孔隙<sup>[19-21]</sup>。图像孔隙度等由图像提取的孔隙结构参数虽不宜作为定量表征储层物性结构的参数,但与其他实测物性结构参数相比,图像参数以其直观性能够从孔隙类型、物质组构等角度为页岩孔隙结构研究提供重要指示,是分

析页岩孔隙发育特征和影响因素中必要的补充数据<sup>[8]</sup>。

为了获得最佳成像效果,针对不同视域或样品往往需要采用不同亮度、对比度等参数进行扫描拍摄,这对图像灰度分布特征会造成影响,致使同一孔隙在不同拍摄条件下具有不同的灰度阈值。因此,在识别图像孔隙和提取孔隙结构参数之前,应对灰度图像进行标准化处理,去除因成像参数差异所带来的影响,从而实现采用统一孔隙阈值标准识别不同图像中的孔隙,保证不同样品、不同视域中孔隙结构参数统计结果具有可对比性。目前,针对页岩孔隙结构图像分析中的标准化方法研究较少,对于不同样品、不同视域中的孔隙需要反复依靠人为观测来确定孔隙界限及其灰度阈值<sup>[19-21]</sup>。这一操作不仅工作量巨大,而且由于主观识别标准易波动、不固定,大大增加了图像孔隙结构观测统计结果的误差。

笔者以 FE-SEM 场发射扫描电镜二维灰度图像为例,通过分析影响图像灰度分布特征的影响因素,针对页岩自身特点选择标准矿物和校正参数,应用数学分析方法对使用不同成像参数拍摄的图像灰度进行了标准化处理,建立了适用于页岩样品的二维灰度图像标准化方法,实现了用统一灰度阈值识别微观扫描图像中的页岩孔隙,最大程度减低了人为因素对图像孔隙结构参数观测统计结果的影响。

## 1 样品和测试方法

测试用样品来自鄂尔多斯盆地三叠系延长组张家滩陆相页岩(1,2,3号)以及下古生界山西组海陆过渡相页岩(4,5号)、湘西北地区下寒武统牛蹄塘组海相页岩(6,7号)。岩样断口截面用 600 目砂纸打磨后用 Leica em tic3x 氩离子抛光仪进行大面积抛

光。为了防止镀金/碳堵塞样品中微小孔隙以及影响元素能谱分析结果,直接对未镀膜的离子抛光页岩样品直接观测。观测用扫描电镜为蔡司 Merlin 场发射扫描电镜,采用分辨率较高的次级电子模式,观测电压 5 kV。为了提高微观图像统计参数的代表性,采用 Atlas 软件进行电镜图像自动扫描和拼接,获得长约 1 mm(垂直层理方向)、宽约 0.1 mm(平行层理方向)的样品图像面积,图像分辨率精度为 5 nm。样品的其他成像参数设置见表 1。

表 1 观测样品及其成像参数设置信息

Table 1 Information of the samples and the corresponding scanning parameters

样号	层位	沉积环境	亮度/%	对比度/%
1 号			49.6	33.7
2 号	延长组	陆相	50.2	32.7
3 号			50.9	30.4
4 号	山西组	海陆过渡相	49.9	22.0
5 号			50.3	29.7
6 号	本溪组	海相	50.2	28.2
7 号			50.1	28.3

本次研究使用 Image-pro Plus 图像分析软件提取二维图像中的面孔率和孔径等孔隙结构参数,使用 Matlab 软件程序获取图像像素灰度值和灰度分布曲线。考虑到图像放大倍数对孔隙识别结果的影响<sup>[14]</sup>,研究中在相同放大倍数下对二维图像进行孔隙识别以及参数提取和对比。

为了验证图像参数准确性,研究中还对每个页岩样品的平行样进行了氮孔隙度测试(仪器型号 Smart-pro 2.0)和总有机碳(TOC 含量)含量测试。

## 2 图像标准化校正方法

### 2.1 标准化原理

图像灰度标准化是图形学研究中重要的方面,广泛应用于人脸识别和图像分割等算法研究的图像预处理中<sup>[22-23]</sup>。其中图像灰度直方图匹配是最基本也是应用最广泛的图像标准化算法<sup>[24]</sup>。

图像灰度直方图匹配的基本依据是,在统计学上,待标准化的原始图像应与标准图像具有相同或相似的灰度值分布特征。由于标准图像的灰度分布是已知的,可以建立一个原始图像的灰度映射关系,通过该映射关系对原始图像中的灰度值进行转换,可以得到一个与标准灰度分布一致的图像,这一过程被成为图像灰度直方图匹配,其中灰度映射关系的求取是直方图匹配的关键。

在图像像素和灰度为连续的情况下,假设  $p_o(w)$  和  $p_s(t)$  分别为原始图像和标准图像中灰度值的概率密度函数,其中  $w$  和  $t$  为灰度值。那么使得原始图像和标准图像灰度直方图匹配,则满足:

$$T(r) = \int_0^r p_o(w) dw = \int_0^r p_s(t) dt = G(z) \quad (1)$$

其中,  $T(r)$  为原始图像灰度值的概率分布函数;  $G(z)$  为标准图像灰度值的概率分布函数。由此,可以得到在连续灰度情况下,直方图匹配所需的映射关系:

$$z = G^{-1}(T(r)) \quad (2)$$

在 SEM 等真实灰度图像中,灰度值一般为分布在  $[0, 255]$  上的离散整数。在这种情况下,概率分布函数  $p_o(w)$  和  $p_s(t)$  等价于原始图像和标准图像的概率函数  $p_o(r_i)$  和  $p_s(z_j)$ , 即

$$T(r_k) = \sum_{i=0}^k p_o(r_i) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n}, k = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1 \quad (3)$$

$$G(z_q) = \sum_{j=0}^q p_s(z_j), q = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1 \quad (4)$$

其中,  $n$  为图像中像素点的总个数;  $n_i$  为灰度值小于或等于  $r_i$  的像素点的个数;  $L$  为图像中灰度值的个数。由式(3)和式(4)可以获得映射关系:

$$z_q = G^{-1}(T(r_k)) \quad (5)$$

在离散情况下,可以利用下式进一步求取映射关系  $\langle r_k, z_q \rangle$ :

$$z_q = \{z_q : |T(r_k) - G(z_q)| = \min \forall k = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1\} \quad (q \in [0, 255]) \quad (6)$$

### 2.2 标准化参数的建立

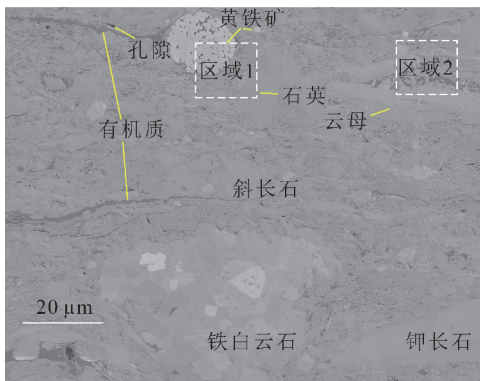
#### 2.2.1 灰度分布影响因素

研究中分析对象为灰度值范围在 0~255 的灰度图像,对应颜色从黑到白。图像灰度一方面受观测点自身物质密度控制,一般观测点物质原子序数越低,成像灰度值越低<sup>[25]</sup>。如图 1 所示,页岩中孔隙密度值最低,接近黑色,其次为有机质,一般呈黑灰色。在矿物中,黏土类矿物密度整体较小呈灰色,含铁时灰度值偏大,石英、长石颗粒呈灰色或浅灰色,碳酸盐类矿物密度较高呈亮灰色,黄铁矿等高密度矿物密度最大、灰度最高呈亮白色。图 1(b) 为页岩中不同组分的灰度值的概率分布曲线,其中孔隙、有机质和黄铁矿的灰度分布特征区间差异明显,而石英、长石、黏土、碳酸盐矿物等组分对应的灰度概率分布存在较大的重合区间。

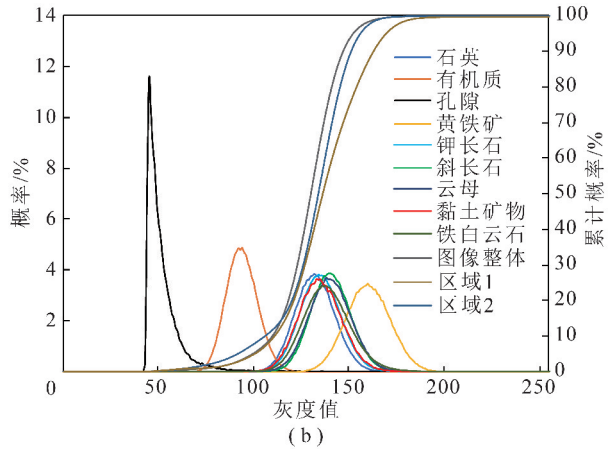
图 1(b) 中展示了图 1(a) 中 SEM 图像以及该图像中区域 1 和区域 2 中的灰度累计概率分布,其中区域 1 和区域 2 分别对应于图像中黄铁矿含量高和有

机质含量高的区域。由图可知,区域1的灰度累计频率在较高灰度值区间(120~255)会明显低于整体图像;而区域2则在较低灰度值区间内(0~120)具有

明显高于整体图像的灰度累计概率。这表明,成像视域中不同组分的相对含量对图像整体的灰度累计概率分布具有控制作用。



(a)



(b)

图1 页岩 SEM 图像中不同组分、不同区域的灰度分布特征(3号样品)

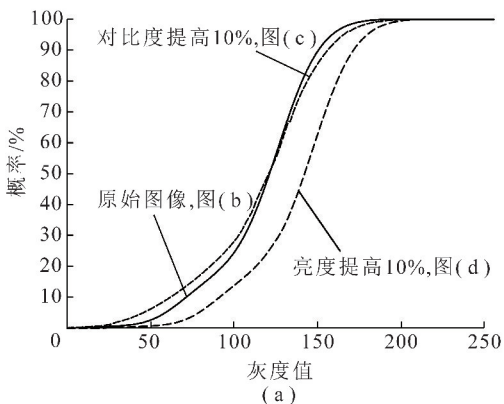
Fig. 1 SEM image of shale and its grey-level distribution for different compositions and different areas of image (No. 3 Sample)

图像灰度分布除了受样品自身形貌和视域中物质组成控制外,拍摄参数对图像灰度分布特征也具有显著影响。图2展示了1号样品相同区域采用不同拍摄参数获得的图像的累计概率分布图。分析可知,亮度和对比度的变化会造成图像灰度分布发生较大的变化,如提高对比度可使图像的灰度分布范围伸展,而提高亮度会使该分布向灰度值增大的方向偏移。在实际成像过程中,对比度和亮度会根据样品实际情况同时进行调节,从而造成灰度分布更加复杂的变化,从而造成在不同 SEM 图像中无法采用统一的阈值进行孔隙和有机质等组分的识别。

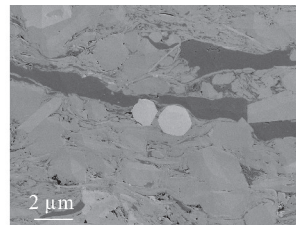
### 2.2.2 标志参考物选取

由上述分析,不同视域图像灰度分布特征不同,

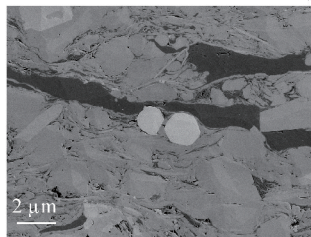
不能直接对整体图像的灰度分布进行标准化,可以借助标志物拾取,通过提取每幅图像的代表性灰度分布特征、建立与标准图像的转换关系并应用于整体,从而“由点及面”实现对图像整体灰度分布的标准化校正。为了达到上述目的,笔者采用在 SEM 图像中选取标志物,将标志物的灰度分布作为图像的代表性灰度分布。标志参考物应具有以下4方面的特征:①标志物在页岩样品中广泛发育,具有形成大数据集潜力;②标志物在图像中边界清晰、大小合适,无需借助其他手段(如EDS)就可方便识取;③标志物的结构组成均匀,在图像中具有一致的灰度分布特征;④不同类型标志物组合后所具有的灰度分布范围应能覆盖原图的整个灰度分布范围。



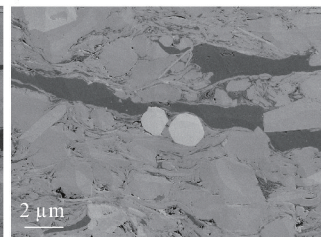
(a)



(b)



(c)



(d)

图2 对比度和亮度对图像灰度累计概率分布的影响(1号样)

Fig. 2 Effects of brightness and contrast on grey-level cumulative probability distribution (No. 1 Sample)

根据以上原则,研究中选取黄铁矿、自生石英(具有明显晶型)、有机质(不含孔缝)和孔隙作为标志参考物。研究中在选择有机质参考物时主要针对页岩中惰质组的丝质体,一方面丝质体主要来源于植物茎秆、根、枝的木质部,镜下多呈条带状顺层分布,在扫描电镜下易于识别<sup>[26]</sup>;另一方面,惰质组分一般有机质孔不发育<sup>[27]</sup>,有利于图像灰度的提取。

研究中使用 ImageJ 软件对其图像进行拾取,图 3

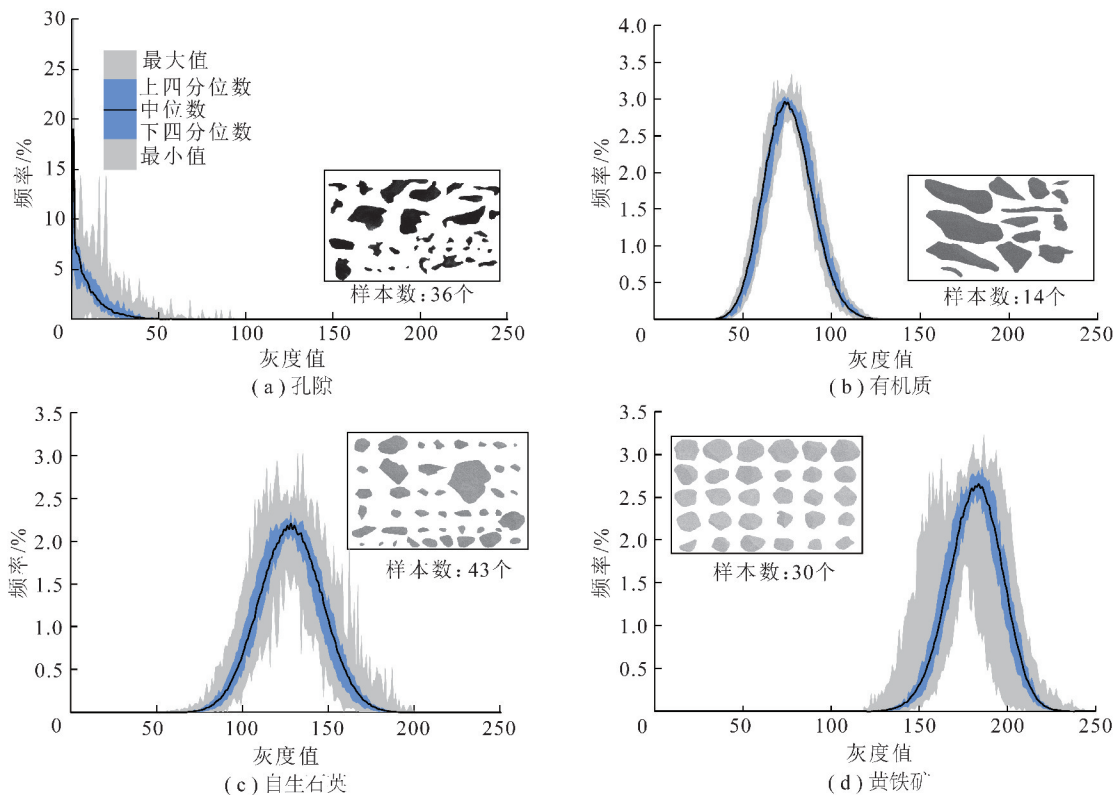


图 3 标志参考物的选取及其概率分布(1 号样)

Fig. 3 Grey-level density probability distribution of the extracted markers (No. 1 Sample)

### 2.3 标准化流程

在上述研究基础上,建立了图像灰度标准化流程(图 4),具体过程如下:

(1) 标准参考物灰度数组生成。在原始图像  $R$  (待标准化图像) 和标准图像  $Z$  中,提取如图 3 所示的标志参考物图像  $R_{py}, R_{qu}, R_{or}, R_{po}, Z_{py}, Z_{qu}, Z_{or}, Z_{po}$ , 其中,下标  $py, qu, or, po$  分别代表了黄铁矿、石英、有机质和孔隙。为了保证数据具有代表性,在每种标志物中至少选取了 10 个标志物样本和 1 000 000 个样本像素点来组成标志参考物的集成图像(图 3 中矩形区域)。随后将标志物集成图像进行数字化处理,分别建立灰度数组。数据中的元素的结构为:  $[x, y, I]$ , 分别为像素的横、纵坐标和灰度值。

(2) 标准参考物图像累计概率分布计算。在标准参考物图像的灰度数组基础上,去除背景色(本文选择灰度值为 255 的背景色),将  $[0, 255]$  区间的灰

度值平均划分为 256 个单元分别统计对应灰度值的像素点个数,并生成对应的概率直方图。分别将原始图像和标准图像中统计获得的  $p_{py}, p_{qu}, p_{or}, p_{po}$  按照对应灰度值进行线性相加,在归一化处理(笔者选择相加值除以 4 进行归一化),形成合成概率分布  $p_r$  和  $p_z$ ,进而计算获得能够表征原始图像  $R$  和标准图像  $Z$  灰度分布特征的合成累计概率分布  $T(r)$  和  $G(z)$ 。

(3) 映射表求取和灰度调整。以  $T(r)$  和  $G(z)$  为基础,按照式(6)对原始图像和标准图像的转换关系进行计算,获得  $\langle r, z \rangle$  映射表。将该映射表应用于原始图像的灰度数组,调整其原始灰度值  $r$  至所需灰度值  $z$ ,得到标准化后的图像  $R'$ 。

## 3 结果和讨论

### 3.1 标准化结果及其验证

研究中以 1 号样品为标准图像,对 2~7 号共 6

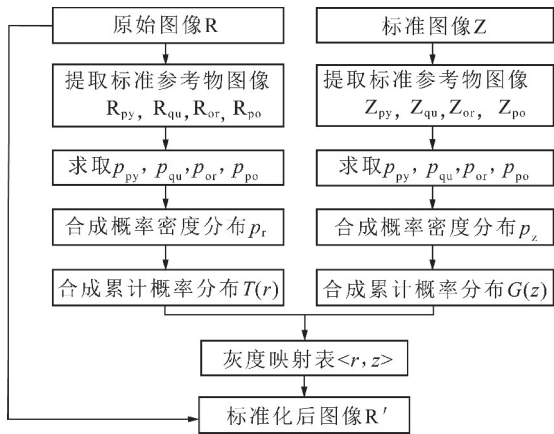


图 4 SEM 灰度图像标准化流程

Fig. 4 Flow chart for the SEM gray-level image standardization. 个样品的大拼图像的灰度分布进行了校正。此外,为了检验该方法的标准化效果,在 1 号样品原始图像(图 2(b))基础上,将对对比度提高 10% 生成待标准图像(图 2(c)),将亮度提高 10% 生成待标准图像(图 2(d))。采用上述校正方法统计计算了标准图像与待标准图像共 9 条合成累计概率曲线(图 5(a))。

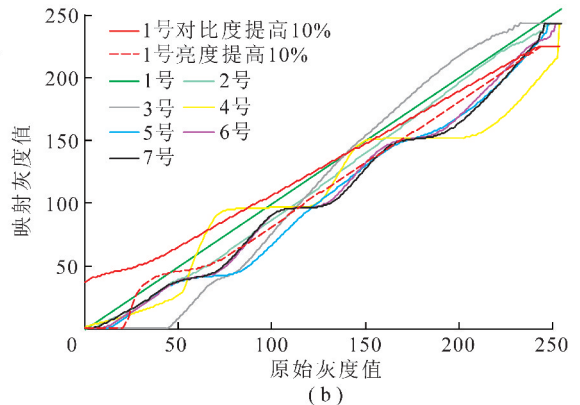
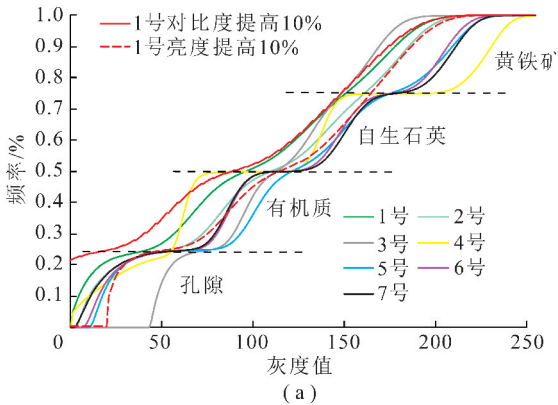


图 5 待标准图像和标准图像的合成累计概率分布(a)及其灰度映射关系(b)

Fig. 5 Integrated grey-level cumulative probability distribution and the relationship between the grey value before and after standardization

### 3.2 应用实例及其效果分析

经过该方法校正后,可以对每个样品中的孔隙和有机质进行识别并计算含量百分比,同时能够快速提取孔径分布、面孔率等孔隙结构基本参数。

通过大量图像比对,在 1 号样品标准图像中,确定孔隙度和有机质的识别阈值分别为 43 和 89,即孔隙的灰度区间为 0 ~ 43,有机质的灰度区间为 44 ~ 89。图 8 为 6 号样校正前后的图像对比。明显的,校正前采用标准阈值只能识别部分孔隙,识别出的孔隙轮廓与实际孔隙发育情况相差较大;而校正后的图像采用标准阈值即可自动识别全部孔隙,包括孔径在几个纳米的微小孔隙,识别出的孔隙数量与校正前

由图 5 分析可知,合成的累计概率分布图普遍具有 4 个阶梯状分布的特征,分别对应孔隙、有机质、自生石英和黄铁矿的主要灰度值分布区域;相同的累计概率值在不同的图像中对应的灰度值差异较大,以累计概率 25% (孔隙截止值) 为例,不同样品所对应的灰度值分布在 10 ~ 80,表明未标准化之前不同样品的孔隙识别标准差异较大。图 5(b) 是利用合成累计概率分布计算得到的映射关系,其中横坐标是图像的原灰度值,纵坐标是标准化后对应的映射灰度值,利用该映射关系即可获取标准化后的灰度图像。校正后的图像累计概率分布如图 6 所示。与校正前相比,标准化后的灰度分布曲线形态朝着标准灰度分布曲线特征变化,使得不同样品的累计灰度分布曲线整体相似性明显增强。图 7 为在 1 号样标准图像基础上,对对比度、亮度分别提高 10% 的两幅图像经过校正之后的累计频率分布图。与原始标准图像的累计频率分布对比可知,经过标准化后的两幅图像灰度分布特征与标准图像的吻合度很高,表明在统计学上该方法具有很好的标准化效果。

相比增加约 1 倍,局部面孔率从校正前的 9.1% 提高到 13.7%。直观对比发现,标准化后的孔隙识别效果明显优于校正前,能够实现统一阈值识别不同样品图像孔隙的要求。

笔者采用上述阈值对待标准化图像进行了孔隙和有机质的识别,面孔率和有机质含量百分比统计结果见表 2。结果显示,标准化后面孔率统计结果分布在 0.47% ~ 2.00%,与氦气测孔隙度结果具有一定对应关系(图 9(a));图像有机质含量统计结果分布在 3.87% ~ 14.70%,与实测总有机碳含量 TOC 含量也具有较好的对应关系(图 9(b))。

为了更好的展示标准化对统计结果的影响,对比

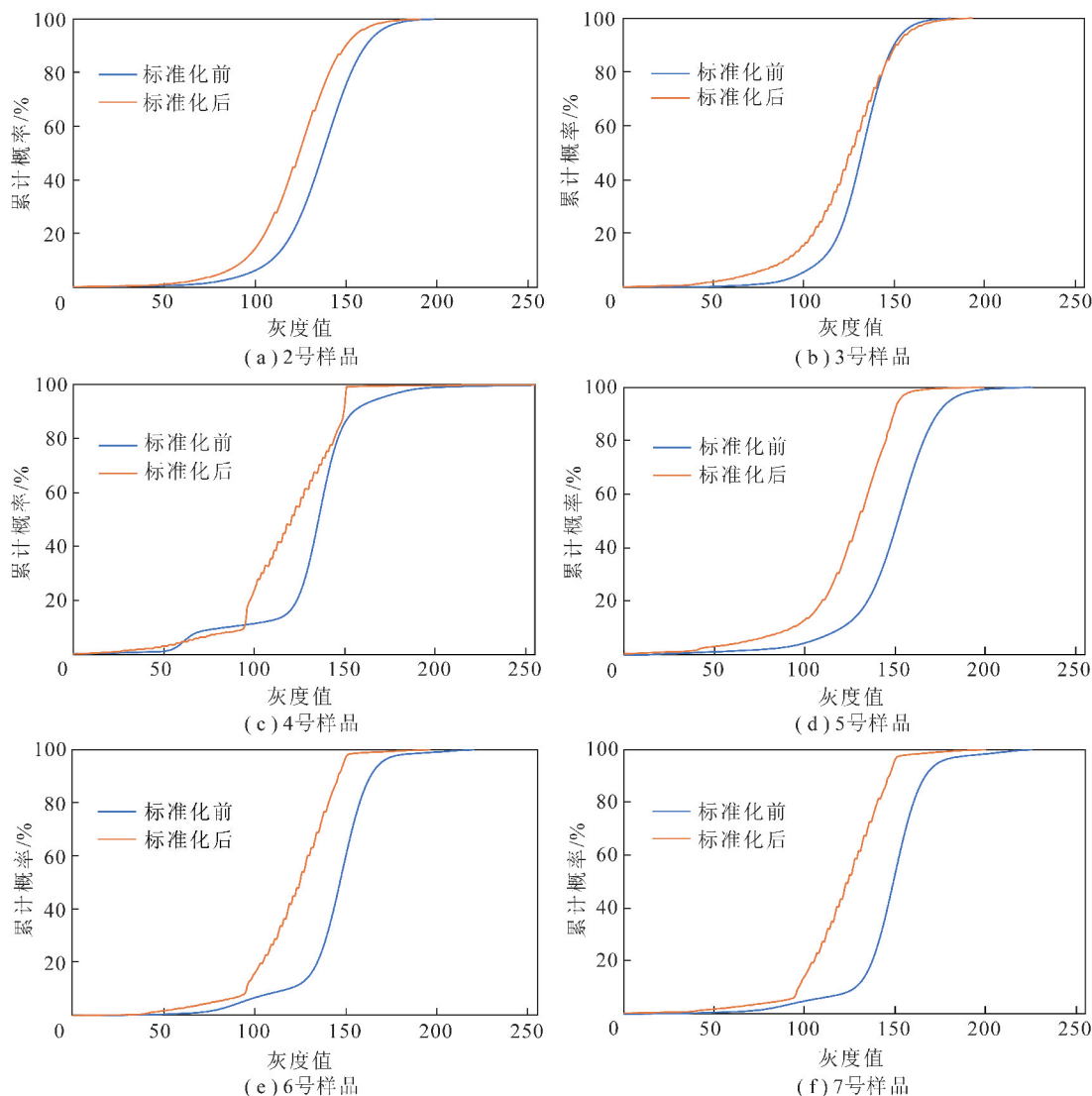


图6 图像标准化前后的合成累计概率分布

Fig. 6 Grey-level cumulative probability distribution before and after standardization

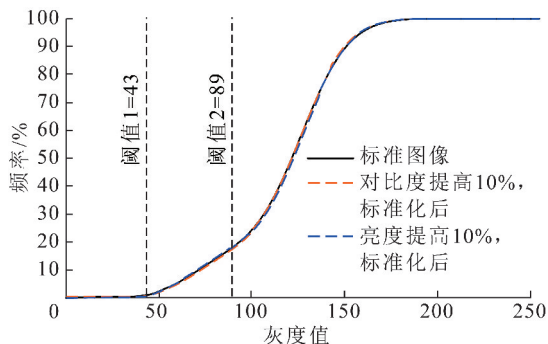


图7 1号样品不同拍摄参数图像校正后的灰度累计概率分布

Fig. 7 Grey-level cumulative probability distribution after standardization for images of No. 1 Sample under different scanning parameters

了同一样品在不同拍摄参数条件下采用标准阈值识别孔隙和有机质的定量结果(表2)。1号样标准图像对比度提高10%后,采用标准阈值识别获得的面孔率和有机质含量与原标准图像统计结果相比误差

显著,尤其是对孔隙的识别效果较差;1号样标准图像亮度提高10%后,采用标准阈值计算获得的面孔率和有机质含量相对误差近50%,能够识别的孔隙和有机质含量减少近一半。对上述两幅图像标准化后,由标准阈值识别获得的面孔率和有机质含量参数相对误差可降低至5%以下。综上所述,该校正方法可以实现不同拍摄条件、不同样品图像的标准,保证统一标准阈值自动识别所有孔隙和有机质等图像元素,提高了相关孔隙结构参数和地质参数的统计效率和数据质量。

### 3.3 适用性分析

前人研究显示,不同页岩样品间矿物组成、有机质含量和孔隙发育程度均存在差异性,这种差异在不同沉积环境间的页岩中尤其突出<sup>[28]</sup>。在SEM灰度图像中,不同组分所具有灰度分布特征存在差异(图1),这也使得原始图像的灰度分布特征不仅受到了

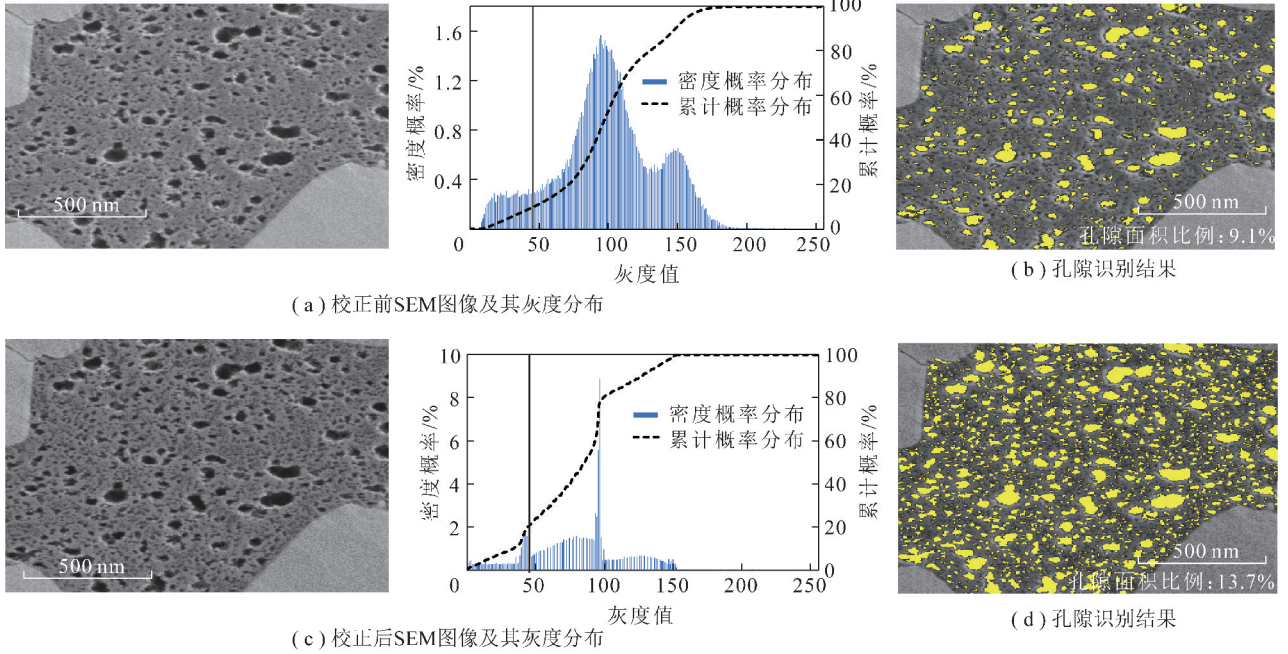


图 8 标准化前后图像孔隙识别效果(6 号样)

Fig. 8 SEM image before and after standardization and the corresponding pore identification results(No. 6 Sample)

表 2 不同样品、不同拍摄参数图像标准化后面孔率和有机质含量统计结果

Table 2 Plane porosity and organic matter content calculated based on standardized images of samples and images scanned under different conditions

图像		孔隙		有机质	
		面积比例/%	相对误差/%	面积比例/%	相对误差/%
1 号样标准图像		1.26	—	14.70	—
1 号图像对比度提高 10%	标准化前	3.95	213.23	14.05	4.41
	标准化后	1.20	4.76	14.65	0.31
1 号图像亮度提高 10%	标准化前	0.66	47.64	8.07	45.09
	标准化后	1.22	3.46	14.92	1.50
2 号样	标准化后	0.47	—	6.86	—
3 号样	标准化后	1.09	—	8.37	—
4 号样	标准化后	1.55	—	6.31	—
5 号样	标准化后	2.00	—	6.78	—
6 号样	标准化后	0.79	—	5.68	—
7 号样	标准化后	0.81	—	3.87	—

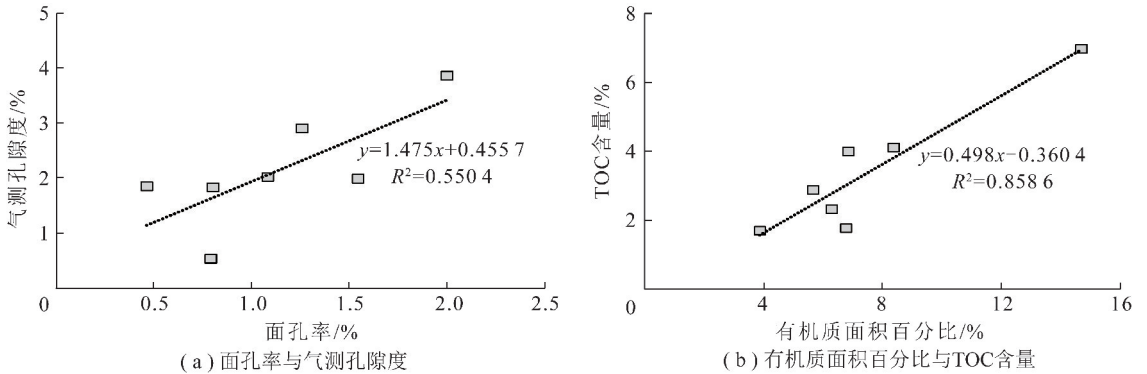


图 9 图像统计参数与实测参数对比

Fig. 9 SEM image before and after standardization and the correspond



亮度和对比度等拍摄参数的影响,还受控于岩石组分的相对含量。因此,采用原始图像的灰度累计概率分布作为对比参数进行标准化是不可取的。笔者利用标志物组所组成的合成灰度累计概率分布作为不同图像间的对比参数进行标准化,从而消除了组分含量差异对灰度分布的影响,实现了校正对比度和亮度等拍摄参数的目的。

由此可见,影响本方法适用性的关键因素不是岩样内各组分的相对含量,而是标志物特征。其中,不同沉积环境页岩样品中标志物原子序数的差异是最主要的方面。笔者选取的标志物包括自生石英、黄铁矿、孔隙和有机质,其中自生石英和黄铁矿属于物质组成相对简单的自生矿物,孔隙对应真空空间,这3类标志物在不同沉积环境页岩中的差异性较小。然而,海陆过渡相页岩以陆源有机质为主,海相、陆相页岩中有机质则主要来源于藻类等微生物<sup>[28]</sup>。不同类型的有机质其组成和结构不同,这有可能会造成图像灰度差异。因此,在提取有机质灰度时,应尽量选择同类型有机质组分对标,如本文选用的丝质体。此外,有机质内部结构也会随热演化程度发生变化<sup>[29]</sup>。研究中所采用的页岩样品成熟度跨度范围较大:鄂尔多斯盆地陆相页岩处于生油窗,海陆过渡相页岩处于生气窗,而湘西北下寒武海相页岩成熟度最高。根据本次样品的实际应用效果,成熟度对有机质图像灰度的影响并不明显。无疑,在沉积环境和热演化程度相似的页岩样品中应用该标准化方法的效果会更好。

## 4 结 论

(1)除页岩样品自身组成特征和形貌特征外,图像亮度、对比度等成像参数对图像灰度分布具有重要影响,这会造成页岩孔隙识别阈值的变化,从而妨碍了自动化、快速提取孔隙结构参数,因此很有必要对具有不同成像参数的灰度图像进行标准化处理。

(2)黄铁矿、自生石英、有机质和孔隙在页岩中分布广泛且镜下易于识别,其灰度分布特征具有较高一致性和稳定性,组合后能够覆盖整个图像灰度分布范围,可以作为图像灰度校正的标志参考物。

(3)待校正图像的代表性灰度分布可以通过提取一定数量标志参考物的灰度分布并合成灰度累计概率分布曲线获得。通过建立其与标准图像代表性灰度分布的映射关系,采用图像灰度直方图匹配算法即可实现图像标准化。标准化处理后的灰度图像可以实现同一阈值识别页岩孔隙、有机质等地质元素,减少了因主观观测所造成的误差,增强了图像提取孔隙结构参数的可对比性和可靠性。在陆相、海陆过渡

相和海相页岩样品中均具有较好的应用效果,与其他实测参数结果具有较好的匹配性。

## 参考文献(References):

- [1] SONDERGELD C H, AMBROSE R J, RAI C S, et al. Microstructural studies of gas shales [A]. Society of petroleum engineers [C]. 2010.
- [2] 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(1): 606-616.
- [3] HINAI A A, REZAEI R, ESTEBAN L, et al. Comparisons of pore size distribution: A case from the Western Australian gas shale formations [J]. Journal of Unconventional Oil & Gas Resources, 2014, 8: 1-13.
- [4] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全. 利用核磁共振成像技术研究煤层气渗流规律 [J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(S1): 423-427.  
TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan. Seepage law research of coal bed methane using nuclear magnetic resonance imaging technique [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2004, 34(S1): 423-427.
- [5] 黄家国, 许开明, 郭少斌, 等. 基于 SEM、NMR 和 X-CT 的页岩储层孔隙结构综合研究 [J]. 现代地质, 2015, 29(1): 198-205.  
HUANG Jianguo, XU Kaiming, GUO Shaobin, et al. Comprehensive study on pore structures of shale reservoirs based on SEM, NMR and X-CT [J]. Geoscience, 2015, 29(1): 198-205.
- [6] 陈静, 吴伟, 王娟, 等. 南华北盆地偃龙地区二叠系泥页岩微观孔隙特征及其影响因素分析 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(6): 829-836.  
CHEN JING, WU Wei, WANG Juan, et al. Microscopic pore characteristics and influence factors analysis of shales in Permian, Yanlong area, Southern North China Basin [J]. Journal of GeoMechanics, 2017, 23(6): 829-836.
- [7] SILIN L. High resolution imaging for gas shales [A]. Unconventional Gas Project Review Meeting Denver, CO April 06 [C]. 2010.
- [8] 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.
- [9] LIU Y, ZHU Y. Comparison of pore characteristics in the coal and shale reservoirs of Taiyuan Formation, Qinshui Basin, China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(3): 330-338.
- [10] 吴小强, 滕奇志, 王钟, 等. 泥页岩组构自动图像分析方法的研究 [A]. 中国自动化学会、中国仪器仪表学会西南三省一市 2000 年学术年会 [C]. 2000.
- [11] 徐祖新, 郭少斌. 基于氩离子抛光-SEM 和 ImageJ 软件的页岩储层孔隙结构分析——以中扬子地区陡山沱组为例 [J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(4): 45-51, 8.  
XU Zuxin, GUO Shaobin. Analysis of the pore structure of shale gas reservoirs based on argon-ion milling SEM and ImageJ [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(4): 45-51, 8.
- [12] 焦堃, 姚素平, 吴浩, 等. 页岩气储层孔隙系统表征方法研究进展 [J]. 高校地质学报, 2014, 20(1): 151-161.

- JIAO Kun, YAO Suping, WU Hao, et al. Advances in characterization of pore system of gas shales [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(1): 151-161.
- [13] 杨永飞, 王晨晨, 姚军, 等. 页岩基质微观孔隙结构分析新方法 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2016, 41(6): 1067-1073.
- YANG Yongfei, WANG Chenchen, YAO Jun, et al. A new method for microscopic pore structure analysis in shale matrix [J]. Earth Science, 2016, 41(6): 1067-1073.
- [14] HOUBEN M E, DESBOIS G, URAI J L. A comparative study of representative 2D microstructures in Shaly and Sandy facies of Opalinus Clay (MONT Terri, Switzerland) inferred from BIB-SEM and MIP methods [J]. Marine & Petroleum Geology, 2014, 49(1): 143-161.
- [15] 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 Lihua, et al. Pore segmentation methods based on gray scale of scanning electron microscopy images [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(6): 595-602.
- [16] 徐日庆, 邓祎文, 徐波, 等. 基于 SEM 图像的软土三维孔隙率计算及影响因素分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1497-1502.
- XU Riqing, DENG Yiwen, XU Bo, et al. Calculation of three-dimensional porosity of soft soil based on SEM image [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1497-1502.
- [17] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [18] 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, 17: 82-97.
- [19] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97-106.
- [20] 陈强. 基于高分辨率成像技术的页岩孔隙结构表征 [D]. 成都: 西南石油大学, 2014: 47-60.
- [21] 孙寅森, 郭少斌. 基于图像分析技术的页岩微观孔隙特征定性及定量表征 [J]. 地球科学进展, 2016, 31(7): 751-763.
- SUN Yinsen, GUO Shaobin. Qualitative and quantitative characterization of shale microscopic pore characteristics based on image analysis technology [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(7): 751-763.
- [22] 郑永凯, 张凌, 董守斌. 图像灰度分布标准化算法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(10): 1218-1221.
- ZHENG Yongkai, ZHANG Ling, DONG Shoubin. Algorithm on greyscale distribution normalization of face image [J]. Mini-Micro System, 2002, 23(10): 1218-1221.
- [23] 邵平, 杨路明, 黄海滨. 基于积分图像的灰度分布标准化快速算法 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(3): 277-279.
- SHAO Ping, YANG Luming, HUANG Haibin. Rapid algorithm of grayscale distribution normalization based on integral image [J]. Application Research of Computers, 2007, 24(3): 277-279.
- [24] GONAZLEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 1-976.
- [25] 周尚文, 薛华庆, 郭伟. 基于扫描电镜和 X 射线能谱的页岩矿物分析方法 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 27-33.
- ZHOU Shangwen, XUE Huaqing, GUO Wei. A mineral analysis method for shale based on SEM and X-ray EDS [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 27-33.
- [26] 焦淑静, 张慧, 薛东川, 等. 泥页岩有机显微组分的扫描电镜形貌特征及识别方法 [J]. 电子显微学报, 2018, 37(2): 137-144.
- JIAO Shujing, ZHANG Hui, XUE Dongchuan, et al. Morphological structure and identify method of organic macerals of shale with SEM [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2018, 37(2): 137-144.
- [27] YANG C, ZHANG J, HAN S, et al. Classification and the developmental regularity of organic-associated pores (OAP) through a comparative study of marine, transitional, and terrestrial shales in China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36: 358-368.
- [28] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理, 地质特征及资源潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [29] KINGHORN R R F, RAHMAN M. Specific gravity as a kerogen type and maturation indicator with special reference to amorphous kerogens [J]. Journal of Petroleum Geology, 1983, 6(2): 179-194.