

# 基于 PCAS 软件对孔隙结构的定量表征 ——以川北地区广元千佛崖组砂岩为例

郝嘉欣<sup>1</sup>, 向芳<sup>2</sup>, 施紫越<sup>1</sup>, 文耀羚<sup>2</sup>, 赵希<sup>3</sup>, 王建平<sup>3</sup>

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;  
3. 广元石窟研究所, 四川 广元 628000

[摘要] 使用川北地区广元千佛崖组砂岩薄片图像样品, 开展基于孔、裂隙分析系统(PCAS)定量表征孔隙结构的研究, 并探讨如何提升 PCAS 识别孔隙度的精度。研究表明: 使用 PCAS 默认的单阈值分割法, 识别的孔隙与人工圈定的孔隙范围不一致, 并且孔隙度偏高, 为 31.21%。为了提高软件的识别效果, 使用 Adobe Photoshop 对图像进行初步优化, 然后采用多阈值分割法, 根据孔隙的颜色差异设置各阈值的容差, 最终得出孔隙度为 14.18%, 孔隙识别正确且内部结构更加完整, 说明以上操作能够显著提升软件的识别效果。将优化后的孔隙度与默认的单阈值分割法识别的孔隙度、薄片估算的面孔率进行对比, 发现优化后的孔隙度与薄片估算的孔隙度接近, 仅相差 1%~2%, 并且参考邻区储层物性测试所得孔隙度, 可确定该结果具有一定准确性。此外, PCAS 还能快速、准确地提取各种孔隙特征参数, 对于孔隙成因、孔隙评价、赋孔特征、赋气机制、渗流网络等研究具有重要意义。这些结果证实了 PCAS 软件在定量表征孔隙方面的潜力。

[关键词] 千佛崖组; 砂岩孔隙度; 孔、裂隙分析系统; 孔隙特征参数; 软件应用效果

[分类号] P642.25

[文献标志码] A

## Quantitative characterization of pore structure based on PCAS: A case study on Qianfoya sandstone in Guangyuan, Sichuan, China

HAO Jiaxin<sup>1</sup>, XIANG Fang<sup>2</sup>, SHI Ziyue<sup>1</sup>, WEN Yaoling<sup>2</sup>,  
ZHAO Xi<sup>3</sup>, WANG Jianping<sup>3</sup>

1. College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
3. Guangyuan Grottoes Research Institute, Guangyuan 628000, China

**Abstract:** In this study, we analyze thin slices of images of sandstone in the Qianfoya Formation in the

[收稿日期] 2023-08-05。

[基金项目] 广元市科技计划项目(重点研发项目)(22ZDYF0002)。

[第一作者] 郝嘉欣(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 第四纪地质学, E-mail: haojiaxin0208@163.com。

[通信作者] 向芳(1974—), 女, 教授, 研究方向: 沉积岩石学、岩相古地理、第四纪地质学, E-mail: cdxiangfang@126.com。

[引用格式] 郝嘉欣, 向芳, 施紫越, 等, 2024. 基于 PCAS 软件对孔隙结构的定量表征——以川北地区广元千佛崖组砂岩为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(3): 439-448.

Hao J X, Xiang F, Shi Z Y, et al., 2024. Quantitative characterization of pore structure based on PCAS: A case study on Qianfoya sandstone in Guangyuan, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 439-448.

Guangyuan area to quantitatively characterize its pore structure by using pores/particles and cracks analysis system (PCAS), and discuss measures to improve the accuracy of porosity identification by using this software. The results showed that the pores identified by the default single-threshold method of segmentation of PCAS were inconsistent with manually identified pores. The porosity of the sandstone calculated by PCAS was also too high, at 31.21%. To improve the identification of pores by the software, we preliminarily optimized the images in Adobe Photoshop, and then used a multi-threshold method of segmentation to set the tolerance of each threshold according to the difference in color between pores in the image slices. The resulting calculated porosity of sandstone was 14.18%, the pores were correctly identified, and the software was able to accurately represent the internal structure of sandstone. A comparison was made between the porosity after optimization, the porosity identified by the default single-threshold method of segmentation, and the face ratio estimated using the thin slices of images, revealed that the optimized porosity was close to that estimated by using the thin image slices, with a difference of only 1%~2%. And refer to the porosity which was obtained from previous tests on the physical properties of reservoirs in adjacent areas, it can be confirmed that the result has a certain accuracy. Moreover, PCAS was able to quickly and accurately extract various characteristic parameters of the pores. This is important for the study of pore genesis, pore evaluation, pore characteristics, gas injection mechanism and seepage network. These results confirm the potential of using PCAS for the quantitative characterization of pores.

**Key words:** Qianfoya Formation; sandstone porosity; pores/particles and cracks analysis system; pore characteristic parameters; software application effect

孔隙结构是重要的岩石特征指标,直接影响储层的储集特性和渗流性能。砂岩是重要的油气储层,分析其微观孔隙结构,可为评价孔渗条件和油气资源潜力提供重要依据(冯渊等,2015;李易霖等,2016),如何快速、准确识别孔隙是当前众多学者研究的热点。常规识别孔隙结构的方法主要依靠铸体薄片、扫描电镜、压汞法等技术手段,从而获取基本的孔隙数据,然而,砂岩的孔隙结构较为复杂,对大量样品开展研究时,使用常规方法效率较低。因此,引入新的研究手段,实现高效、精准地识别砂岩孔隙,无疑具有重要意义。

目前,表征砂岩孔隙的方法可分为定性和定量 2 种。前者通过观察薄片或电镜图像,来获取孔隙类型、形态特征等定性数据;后者通过使用数理统计法和分析试验法,来获取比表面积、孔径大小及分布情况等定量数据(张盼盼等,2014)。但以分析试验为基础的定量方法,实验成本较高,条件受限时则无法获得理想的结果。图像分析软件能够同时获取岩石微观影像的定性和定量数据,并且具有一定精度保证,是当前技术条件下开展研究较为经济可靠的方法。前人使用 Image J (Yang et al., 2016), JMicroVision (Loucks et

al., 2009), MATLAB (Klaver et al., 2016) 等软件识别孔隙。然而,这些软件无法直接获取形状因子、分形维数、概率熵等孔隙结构特征参数,需进一步通过公式计算得出,其过程繁琐且耗时,无法达到高效快捷的效果。

Liu et al. (2011) 对多孔介质二维图像的信息分析和参数提取方法进行了改进,率先研发出一款基于高分辨率照片的孔、裂隙分析系统软件 PCAS (pores/particles and cracks analysis system, 简称 PCAS), 并广泛运用于孔隙的定量表征中,如 Jiao et al. (2014) 基于南方海相龙马溪组页岩 FIB-SEM 图像,使用 PCAS 软件获取孔隙结构特征参数,并重点讨论了孔径与形状因子间的相关性。前人在使用该软件时,常直接使用界面默认的单阈值分割法处理 SEM 黑白影像,对于彩色图像的适用性,仍有待进一步实验论证。近年来,继元坝地区 X9 井在干佛崖组测试获得工业油气流之后,川东北元坝、川东南涪陵区块中多口井在侏罗系干佛崖组地层钻井中,均显示出具有良好的油气藏资源(蒋裕强等,2010;郭彤楼等,2011),但对于川北地区干佛崖组致密砂岩储层的砂岩微观孔隙结构的研究目前还较少。

基于上述考虑,本次研究选取川北地区广元千佛崖组砂岩为研究对象,利用PCAS软件对样品铸体薄片开展孔隙特征图像学研究,详细讨论识别结果的数据组成、可靠性以及如何提升分析结果的准确性,从而为砂岩孔隙度研究提供一种新的手段和方法。

## 1 实验样品及软件介绍

### 1.1 实验样品及岩石学特征

实验样品使用光学显微镜拍摄图像,低倍镜头分析视域范围更广,结果趋近于真实值,但分辨率较低导致不易识别微小的孔隙结构;高倍镜头分辨率高,便于观察孔隙的微观结构,但囊括的有效信息相对较少。综合考虑,为满足能够定量提取数据的同时,保证所选视域具有代表性,本文采用4倍物镜和10倍目镜拍摄图像,并选取单张典型的岩石薄片图像QFY-1开展孔隙度定量识别工作,另选取2张薄片图像QFY-2,QFY-3进行准确性分析。

通过观察岩心、薄片鉴定分析,确定了研究区实验样品的岩性特征:砂岩类型主要为长石岩屑砂岩,颗粒大小以中—粗粒为主,形状呈次棱角至次圆状,总体上分选中等—好。碎屑颗粒占72%,成分包括石英(33%)、长石(12%)、岩屑(22%)和云母(5%);胶结物以自生黏土、铁质和自生石英为主,面积百分比分别为6%,4%和3%。碎屑颗粒以线状接触为主,颗粒支撑、孔隙式胶结(图1)。

砂岩样品的孔隙(蓝色为孔隙)较为发育,可分为原生孔隙和次生孔隙两大类,其中原生孔隙以残余粒间孔为主,次生孔隙主要为粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔(图1)。铸体薄片镜下目估的总面孔率为15%,其孔隙组成如下:

(1)残余粒间孔:即砂岩经历了机械压实、石英和长石的再生长,或其他胶结作用后,剩余的原生粒间孔残存部分,又称剩余粒间孔,粒间孔内部及颗粒边缘无明显溶蚀现象。样品中主要为孔隙壁生长厚度不均的自生黏土,或沿碎屑石英颗粒的边缘生长自生石英后残余的粒间孔,面孔率为9%。

(2)粒间溶孔:颗粒边缘或残留在粒间孔隙的填隙物被明显溶蚀而形成的孔隙,多呈不规则状、港湾状(牛海青等,2010)。样品中粒间溶孔相对

不发育,主要由长石或岩屑的边缘被溶蚀而成,面孔率为1%。

(3)粒内溶孔:长石或岩屑等颗粒局部溶解而形成的孔隙。样品中大部分碎屑颗粒溶蚀作用不明显,仅部分岩石中有少量长石、岩屑受到不同程度的溶蚀,面孔率为1%。

(4)铸模孔:由长石碎屑、砂岩碎屑强烈溶蚀而成,仅保留颗粒的形状。可以看到图1中圈出的铸模孔中碎屑颗粒被完全溶蚀,仅保留了碎屑颗粒的外形,面孔率为4%。

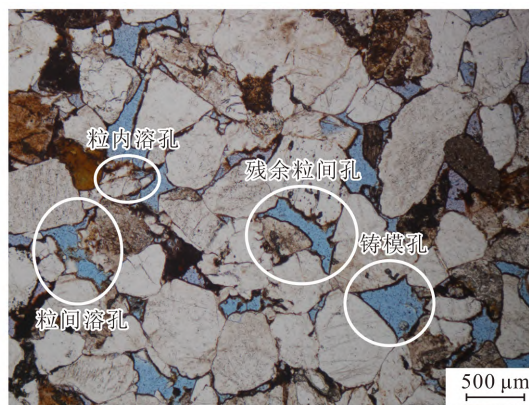


图1 千佛崖组砂岩样品显微特征

Fig. 1 Microscopic characteristics of sandstone samples from Qianfoya Formation

### 1.2 PCAS 识别孔隙原理及参数

传统的图像处理与参数提取方法为网格法(Loucks et al., 2009),易受人为因素影响,结果可靠性较低。Liu et al. (2011)研发的孔隙识别系统(PCAS),能够对高精度图像中一个像素点及以上的图像信息进行精确测量(Liu et al., 2011, 2013),该软件在定量分析微观孔隙上已实现高度智能化和自动化,识别关键在于相关参数的设定,包括阈值(threshold),最小孔隙面积(minimum area)和孔喉封闭半径(element radius)。

(1)阈值设定。阈值分割依据目标和背景特征的不同来分类像素,确立最优阈值,达到分离目标与背景的效果,从而提取出感兴趣区即孔隙区域。分割方法可分为单阈值和多阈值分割法(Liu et al., 2013),单阈值分割法通过选取单个阈值来分割图像,而多阈值分割法由其衍化而来,通过选取多个阈值并确立像素所属类,从而提取出孔隙。

PCAS采用全局阈值法(Prakongkep et al.,

2010),即利用全局信息求出整幅图像的最优分割阈值。该阈值为单个或多个,软件进入界面默认的方法为单阈值分割法,对于色彩单一的 SEM 黑白影像应用效果较好,而彩色图像中色彩差异明显。因此,本文将分别使用单阈值和多阈值分割法识别孔隙,探讨更适用于本研究区彩色图像中孔隙识别的方法。

(2)最小孔隙面积设定。图像本身由一系列正方形像素点组成,孔隙也由这些像素点构成(图 2),当像素点较少时则无法表征孔隙的真实形态,较多时会导致最终的识别结果存在误差。因此,需设置恰当的最小孔隙面积,来删除有干扰的像素点。

(3)孔喉封闭半径设定。孔喉封闭半径的定义为腐蚀结构元素的半径  $r$ ,当孔隙间连接部分的直径小于  $2r$  时,软件基于内部的种子算法(Yu et al., 2010)会将其分割成 2 个独立的区域,即被识别成 2 个孔隙,如图 2 所示。

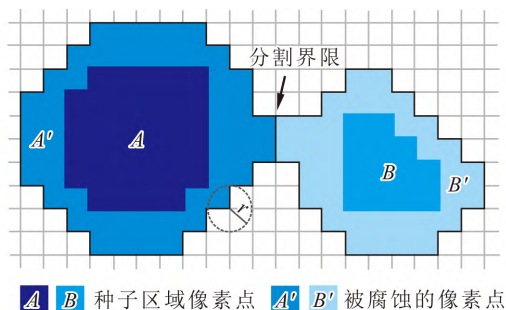


图 2 种子算法分割孔隙(据 PCAS 软件说明书)  
Fig. 2 Pores segmented by the seed algorithm (according to specifications of PCAS software)

## 2 孔隙度定量识别结果

### 2.1 单阈值分割法识别效果

首先,使用软件默认的单阈值分割法,对选定的岩石薄片影像(QFY-1)进行二值化。此处软件根据灰度直方图优选的阈值为 103,再参考软件说明书中“砂岩孔隙识别范例”,设置孔喉封闭半径为 2、最小孔隙面积为 50,从而实现自动分割。若连续孔隙被误分割为间断个体时,使用“图像编辑(Image editor)”面板添加缺失的像素点,以确保孔隙的完整性。完成上述操作后,岩石颗粒被划分为黑色的背景,孔隙则以随机彩色斑块的形式从背景中分割出来。此时识别出的孔隙度偏高,为 31.21%。

为讨论软件的识别效果,分别在原图(图 3-A)和软件默认设置识别效果图(图 3-B)的相同位置圈出孔隙。观察到图 3-B 中表示孔隙的彩色斑块,与原图真实的孔隙区域不重合,孔隙与背景的分界模糊,导致许多真正的孔隙被分割为黑色背景,而背景区域又被误识别成孔隙(图 3-B),这表明软件默认的单阈值分割法不适用于彩色图片。拍摄设备和周围环境会影响图像整体质量,导致部分孔隙的颜色与标准铸体的颜色(蓝色)存在偏差,如图像边缘光线较昏暗的区域中,白色箭头所指示的孔隙颜色多呈现灰色、紫色(图 3-A)。此外,部分孔隙中的铸体充填不均匀,或者孔隙内部存在黑点、黏土膜和残余碎屑颗粒等。上述情况都会干扰最终的识别效果,要实现更为细致、准确的图像分割,设定一个阈值显然不够全面。

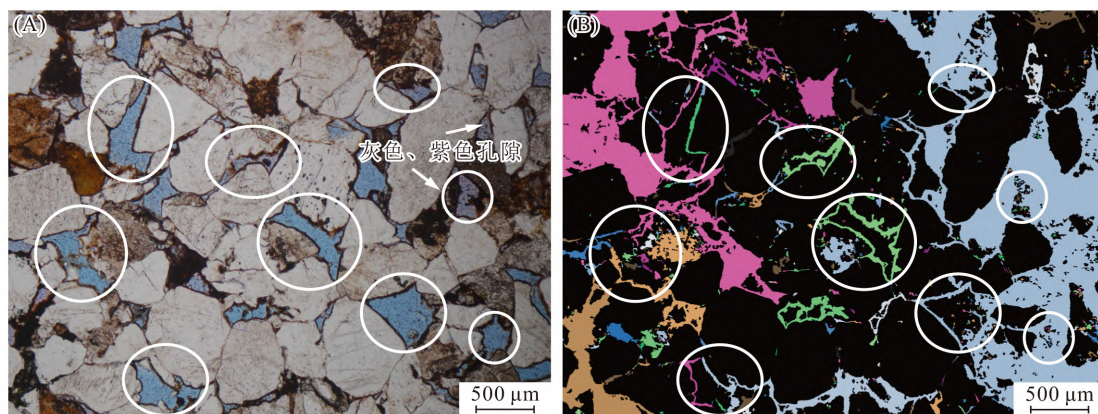


图 3 PCAS 默认设置孔隙识别效果图

Fig. 3 Effect of default settings for pore identification in PCAS

(A)原图(白色箭头指示灰色、紫色孔隙);(B)软件默认设置识别的效果(白色圈内为未识别出的孔隙)

2.2 多阈值分割法识别效果

由于软件选取的单个阈值不具代表性,得出数据的误差较大,所以尝试使用多阈值分割法进行划分,对应软件界面中“使用 RGB 色彩模式分割(use RGB segmentation)”功能,添加具有明显颜色差异处的孔隙色彩作为标准阈值。不同孔隙间颜色是否存在显著差异,能否将对应的阈值添加为条件对象,不能仅依靠操作者肉眼观察来确定,需比较拟选取的代表性阈值与已添加的阈值,观察其 R,G,B 3 个通道的值与已有阈值相差多少,若差值大于容差则可添加为新的分割阈值。

进一步调节其容差 (Tolerance) 值会产生不

同的效果。将所有阈值的容差均设置成 50,得到孔隙度为 24.74%,相对软件默认识别孔隙度有所降低,对比图 3-B 可知,被误判为孔隙的背景区域减少了,提取的孔隙区域边界更加精准(图 4-A),说明多阈值分割法能够提高软件辨识的准确率。然而,图像中出现大量微小像素点(白色圈内),图像右侧边缘处的孔隙和背景未被正确分割开(红色圈内)。因此,再将各阈值的容差调低至 30,此时得到的孔隙度偏小,为 5.01%,可观测到许多孔隙已从背景中分离出来,但由于容差区间设置过小,导致软件未提取出图幅边缘有色调差异的孔隙,而将其误判为背景(黄色圈内),如图 4-B。

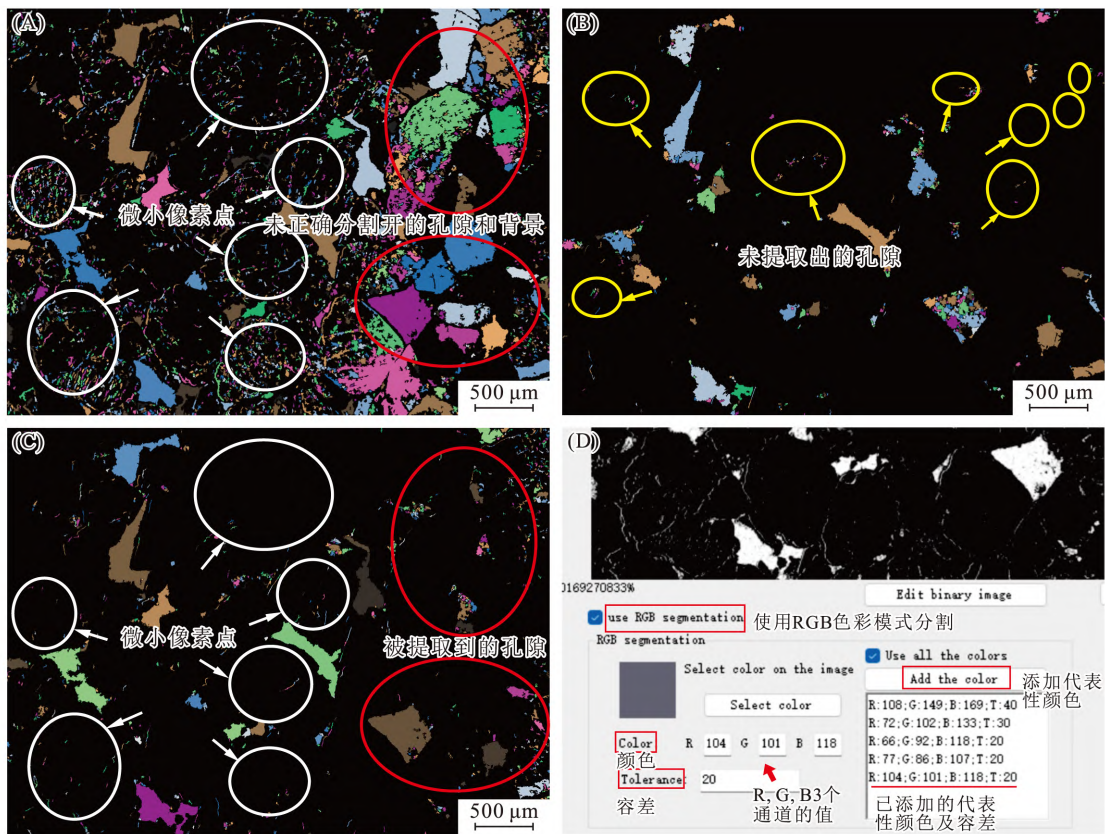


图 4 设置不同容差软件识别效果图

Fig. 4 The effect of setting different values of tolerance on the identification of pores by the software  
 (A) 容差大小为 50 时的效果图(白色圈内有大量微小像素点,红色圈内是未分割开的孔隙和颗粒);  
 (B) 容差为 30 时的效果图(黄色圈内是未提取出的孔隙);  
 (C) 按颜色差异设置容差的效果图(白色圈内仅有少量微小像素点,红色圈内是被提取到的孔隙);  
 (D) 添加的代表性颜色属性表

通过多次实验试错,确定了调节容差的方法,即依据不同的孔隙颜色设定相应容差值,由于每个位置的孔隙颜色在整幅影像中的占比不同,各处阈值的容差需相应作出调整。对于占整幅图像

中颜色比例较高的孔隙色彩,可对其阈值设置较大的容差范围,通常为 40;若选取的孔隙色彩比较少,或与岩石颗粒颜色接近而难以区分,此时则需设置较小的容差,通常为 30,未达到预期效

果则可继续降低至 20, 10, 所添加的代表性颜色属性表如图 4-D。经过此番操作后, 软件得出的孔隙度为 7.25%, 对比设置整体容差为 50 或 30 时的识别效果, 被正确识别出的孔隙数量明显增加(红色圈内), 同时微小像素点的数量相对减少(白色圈内), 如图 4-C 所示, 这表明按颜色差异设置不同容差的方法适用于彩色图像。

### 2.3 最小孔隙面积设置的影响

完成图像分割后, 黑色背景中仍存在许多微小像素点, 在 PCAS 中, 可通过设置最小孔隙面积和孔喉封闭半径, 将小于某一面积(像素值)的

“杂点”从图像中剔除。经过进一步分析发现: 这些像素点既包含微小的孔隙, 又包含误识别为孔隙的背景部分, 它们的存在会改变孔隙度数值。在 PCAS 软件说明书中, 孔喉封闭半径一般设置为 2, 经多次尝试设置不同值后, 发现其对孔隙度影响较微弱, 所以此处不讨论。基于 2.2 节阈值分割后的图像继续进行实验(具体设置的阈值和容差见图 4-D 属性表), 通过调节最小孔隙面积大小, 来分析这些像素点对于整个图幅孔隙度的影响。首先, 设置一系列最小孔隙面积的变化范围(0~100), 并记录下孔隙度发生变化的点(表 1)。

表 1 孔隙度随最小孔隙面积设置的变化情况

Table 1 Changes in porosity with the minimum pore area

最小孔隙面积	0	30	40	50	60	70	80	100
孔隙度/%	8.23	8.21	8.20	8.18	8.16	8.14	8.12	8.10

结果显示, 设置最小孔隙面积为 0 时, 也就是不对图中的微小像素点做任何处理, 识别出的初始孔隙度为 8.23%。当最小孔隙面积分别取 0 和 50 时, 两种条件下的孔隙度差异仅为 0.05%; 最小孔隙面积取 100 时, 与取 0 时的孔隙度相差 0.13%。因此, 无论这些微小像素点是孔隙还是被误识别的背景, 对孔隙度识别效果的影响可忽略不计。当设置最小孔隙面积在 40~80 之间时, 孔隙度的变化幅度最大, 说明此区间内剔除“杂点”效果最明显。综上, 使用说明书中推荐的最小孔隙面积 50 即可, 获取的孔隙特征参数均以取该值时的数据为准, 因此 QFY-1 识别得出的孔隙度仍为 8.18%。

## 3 软件孔隙度识别效果改进

通过 2.2 节和 2.3 节的重复实验, 找到了合适的阈值分割及容差设置方法, 软件的识别效果有了很大提升, 然而在影像中仍能观察到边缘处的孔隙难以被识别。笔者查阅相关文献(张学丰等, 2009), 认为可以运用 Adobe Photoshop 软件调节整体色调、对比度来增强孔隙结构的视觉效果, 对图像进行初步优化, 并使用魔棒工具对质量较差的孔隙进行人工框选、填充颜色。

### 3.1 Photoshop 优化后的识别效果

Photoshop 不仅能针对图幅整体质量进行调整, 还能对局部细节进行修改。然而, 单独使用该

软件完成孔隙度识别工作耗时长, 存在一定局限性, 所以仅作为初步优化图像的工具使用, 需处理的对象包括存在下述情况的图像: ①图像整体色调昏暗, 以致肉眼无法分辨出孔隙; ②位于边缘的孔隙与背景颜色接近, 通过调整容差也难以分割出孔隙; ③孔隙由于未被充填完整, 导致内部颜色分布不均匀。

提升图像整体质量, 可在编辑窗口选择“自动对比度”“自动色调”进行调节。而使用 Photoshop 优化单个孔隙操作一般为: 点击能够代表该孔隙内多数像素点颜色的位置, 调节容差值至移动框与孔隙边缘相匹配, 此时容差范围内的区域均会被选中, 并且不会超出暗色边界。再按快捷键“shift+F5”将所选中的孔隙区域充填为深蓝色, 处理后的效果如图 5-A。类似地, 在 PCAS 中对初步处理后的图像进行识别(位于边缘的孔隙已处理过, 此处添加典型颜色时无需考虑边缘区域)。与图 4-D 的属性表相比, 优化后需添加的代表性颜色(阈值)减少(图 5-B), 对于软件来说在保证原有识别效果的基础上, 处理较少数据能够加快运行速率。最终得出的孔隙度为 14.18%, 可以观察到, 边缘孔隙与背景被更为精准地分割开, 图像中微小像素点数量大幅减少, 孔隙度相对优化前的数据却有所提高(图 5-C), 表明运用 Photoshop 软件对图像进行预处理, 能够进一步提升软件识别效果。

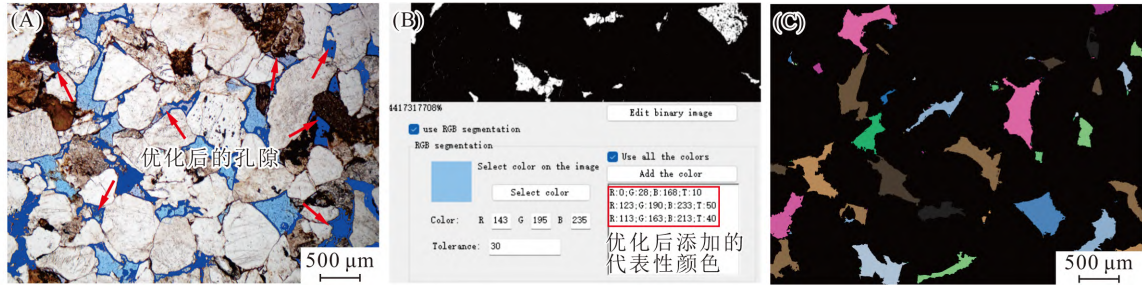


图 5 优化处理后的识别效果图

Fig. 5 Diagram of the effect of identification by PCAS after image optimization

(A) PS 处理后的孔隙效果(红色箭头指示人工框选、填充为深蓝色的孔隙);(B)添加代表性颜色属性表;  
(C)优化后孔隙识别效果

### 3.2 结果准确性分析

为分析优化后 PCAS 自动识别结果是否具有准确性,使用 PCAS 和 Photoshop 对剩余岩石薄片图像进行类似处理,比较优化前、优化后 PCAS 识别的孔隙度与薄片估算面孔率之间的差距(表 2)。

表 2 不同方法识别的孔隙度结果

Table 2 The Porosities obtained by different methods

样品编号	QFY-1	QFY-2	QFY-3
优化前识别孔隙度/%	31.21	34.86	38.63
优化后识别孔隙度/%	14.18	10.80	10.45
薄片估算面孔率/%	15.00	12.00	12.00

由表 2 可知,优化后的孔隙度明显低于优化前偏高的数据,表明对图像进行初步优化,并使用多阈值分割法识别的效果较好。优化后的孔隙度较接近于薄片估算的结果,但整体略微偏低,这是由于薄片估计的实验对象为整张薄片,而软件使用的实验对象为薄片某一视域,人为估算可以综合不同视域孔隙的分布情况进行调整,因此二者获取的数据会存在较小的偏差,一般可控制在 1%~2% 以内。

此外,前人对邻近的巴中地区(直线距离 60 km),开展千佛崖组储层物性测试获取过相应的孔隙参数(杨雯雅,2018;张敏,2019)。该地区千佛崖组砂岩的岩性与本研究区较为一致,但粒度稍有差异,以细中粒为主,而本研究区以中粗粒为主,因此仅以该地区粒度最大的砂岩孔隙度数据(7.19%~7.88%)作为参考,PCAS 识别的孔隙度较之偏大,并介于薄片估算结果与邻区储层物性数据之间,从数值上看较符合实际情况,说明优化后 PCAS 获取的孔隙度具有一定准确性。

### 3.3 技术路线

针对上述各孔隙度识别环节中的重点,将开展基于 PCAS 定量表征孔隙度的技术路线总结如图 6,对于无法实现准确识别孔隙的图像,需按所示流程返回上一级操作,直至大多数孔隙被精准提取为止。

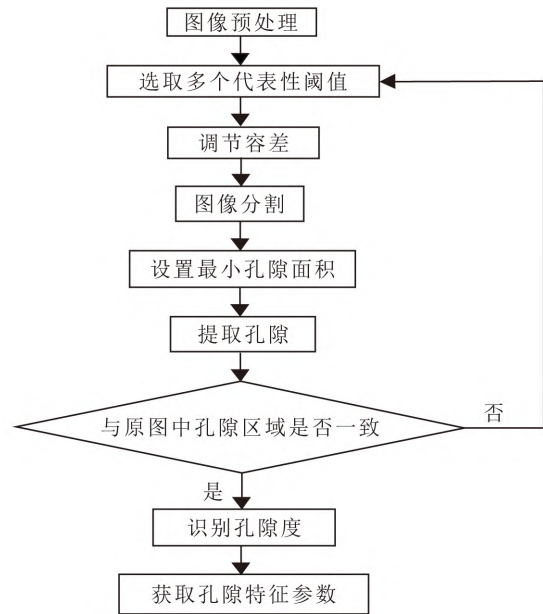


图 6 基于 PCAS 定量表征孔隙度技术路线图

Fig. 6 Roadmap for PCAS-based technology for the quantitative characterization of porosity

技术路线为:首先,使用 Photoshop 对岩石的微观照片进行图像预处理,调节色调以增强岩石薄片图像的直观效果;人工框选、填充位于边缘的孔隙及平面连通性差的孔隙,其结构会更加明显;接着,选取多个代表性阈值并调节相应容差至合适范围,对预处理后的岩石图像进行图像分割,将孔隙与背景分离开;再设置最小孔隙面积,删除微

小像素点,从而得到彩色孔隙斑块和黑色岩石背景;最终点击“统计参数(statistic parameters)”,软件自动获取孔隙度及孔隙特征参数。

### 4 PCAS 软件获取的孔隙数据

PCAS 软件获取的数据类型除孔隙度外,还包括更为丰富的孔隙几何特征参数,一维特征如长度、宽度及周长等,二维特征如平均面积、最大面积等,以及表征孔隙结构特征的相关参数,如概率熵、形状因子(Df)、分形维数(ff)等。通过整理和分析上述参数,可为孔隙成因、孔隙评价、赋孔特征、赋气机制、渗流网络等研究提供有力的数据支撑,也可为储层孔隙的精细建模提供相应参数(赵迪斐等,2018)。

#### 4.1 孔隙特征参数

孔隙结构特征参数常用于定量描述孔隙自身性质。其中,形状因子可以描述二维形体的形态特征,它反映了孔隙的圆润度及粗糙度,形状因子

为 1 时表示圆形,为 0.785 时则表示正方形,其值越小,说明孔隙的边缘越趋于粗糙(Liu et al., 2011; Jiao et al., 2014)。分形维数可量化孔隙结构的复杂程度和非均质性(杨峰等,2014),其值越大,表明孔隙的非均质性越强。概率熵(H)用于描述固定范围内孔隙排列方向的无序性,当 H=0 时,表示孔隙全部按照某一固定方向排列;当 H=1 时,表示视域内孔隙的分布方向完全混乱(Soroushian and Elzafraney, 2005)。

通过 PCAS 内部算法处理后,可以直接获取这些特征参数,各参数为所有斑块的平均值,如表 3 所示。其中,形状因子为 0.413 7,处于较低水平,这表明孔隙边缘结构较为复杂;概率熵为 0.963 4,说明孔隙的定向性较弱,并且发育方向杂乱无章;分形维数达到了 1.138 6,处在较高的水平,说明孔隙具有较为复杂的形态结构。

表 3 基于 PCAS 获取的样品孔隙相关参数

Table 3 Pore-related parameters of samples obtained based on PCAS

总孔数	孔隙度/%	平均孔面积/ $\mu\text{m}^2$	平均长度/ $\mu\text{m}$	平均孔径/ $\mu\text{m}$	形状因子	概率熵	分形维数
85	14.18	12078	143.26	73.48	0.4137	0.9634	1.1386

#### 4.2 孔径分布情况

孔径常用于评价储层的优劣,许多地质勘察工作中都会涉及到讨论孔径的分布情况。按照不同的分类标准,可对孔径的分布特征进行分析,应凤祥等(2002)通过扫描电镜背散射实验分析,将孔隙大小分为 5 级:大孔  $\geq 100 \mu\text{m}$ ,中孔  $50 \sim < 100 \mu\text{m}$ ,小孔  $20 \sim < 50 \mu\text{m}$ ,微细孔  $10 \sim < 20 \mu\text{m}$ ,微孔  $< 10 \mu\text{m}$ 。本研究区图像中的孔隙形状各异,因此孔隙直径使用等效直径,即二

维体系中与孔隙投影面积相等的圆的直径,其计算公式为:

$$E_q = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (1)$$

式中: $E_q$  为二维孔隙等效直径, $\mu\text{m}$ ;S 为孔隙投影面积, $\mu\text{m}^2$ 。

基于孔隙数量对孔径分布情况绘制直方图,结果表明:本次实验样品中的孔隙为微米级,以介于  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  的微细孔为主(图 7-A),然而这和

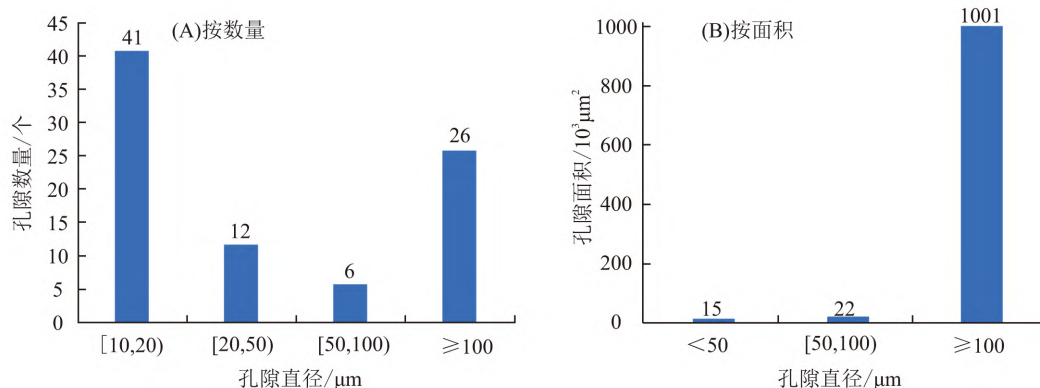


图 7 样品(QFY-1)孔径分布统计直方图

Fig. 7 Statistical diagram of the distribution of apertures of the samples

薄片下观察的情况有部分出入。对于操作者来说,会重点关注孔隙面积占比最高的大孔,由于肉眼难以观察到微孔或微细孔,往往会忽略它们对孔隙度的贡献。因此,为使统计结果更具有说服力,另从孔隙面积的角度进行多维度分析。

基于各孔径范围内总孔隙面积,对孔径分布情况进行统计。结果表明:样品中孔隙面积主体分布在大孔段( $\geq 100 \mu\text{m}$ ),中孔段( $50 \sim < 100 \mu\text{m}$ )而更小孔径段(图7-B)的面积占比较少。结合基于孔隙数量的统计图分析可知:虽然大孔段孔隙数量不及小孔段多,但单个孔隙的面积较大,所以对孔隙度的贡献更大。

## 5 结论

本次研究以川北地区广元千佛崖组砂岩薄片为研究对象,并结合图像预处理软件 Adobe Photoshop,提出基于PCAS软件定量表征孔隙结构的方法,并论述了提升孔隙度识别效果的重点参数及具体操作,探讨软件识别过程中误差的影响,并分析了PCAS获取的孔隙特征参数的意义。本文获得的主要结论如下:

a. 使用PCAS软件默认的单阈值分割法时,孔隙和颗粒未得到很好区分,导致识别的孔隙度偏大,为31.21%。因此,笔者通过选取多个代表性阈值,并设置相应容差的分割方法,提高了软件识别的准确率,此时孔隙度为7.25%。然而图像边缘的孔隙与颗粒仍未分割开,并且存在许多微小像素点。

b. 借助Photoshop中的魔棒工具对图像进行预处理,调节图像整体质量并优化局部孔隙。处理后的孔隙度为14.18%,边缘孔隙被准确识别且微小像素点数量减少,说明使用该软件对图像质量进行初步优化,能够进一步提升孔隙度识别效果。实验证明:使用PCAS软件并结合Photoshop处理、分析图像的方法,能够实现高效获取砂岩孔隙度的目的。

c. 对比优化前后的孔隙度与薄片估算的面孔隙率,并参考邻区前人研究储层物性测试所得孔隙度,发现优化后的孔隙度与薄片估算的孔隙度接近,相差1%~2%,其结果具有一定准确性。据此,针对识别工作各环节中涉及到的重点,设计了基于PCAS软件定量表征孔隙度的一般流程图。

d. PCAS软件可以获取丰富的数据类型;基

本参数如孔隙的长度、宽度和面积等,描述孔隙结构的特征参数包括概率熵、形状因子和分形维数等。对本研究区的孔隙参数进行统计和分析,其特征主要表现为:孔隙具有较为复杂的形态结构,且整体定向性较弱,发育方向杂乱无章;孔隙为微米级,大孔( $\geq 100 \mu\text{m}$ )对孔隙度的贡献更大。这些数据可以广泛应用于孔隙成因、孔隙评价、赋孔特征、赋气机制、渗流网络等方面的研究中。

## [ 参 考 文 献 ]

- 冯渊,杨伟伟,刘一仓,等,2015. 鄂尔多斯盆地镇北油田长8<sub>1</sub>油藏电阻率差异成因[J]. 新疆石油地质, 36(5):526-530.
- Feng Y, Yang W W, Liu Y C, *et al.*, 2015. Analysis on causes of reservoir resistivity differences of Chang 8<sub>1</sub> reservoir in Zhenbei oilfield, Ordos basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 36(5):526-530. (in Chinese)
- 郭彤楼,李宇平,魏志红,2011. 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J]. 天然气地球科学, 22(1): 1-7.
- Guo T L, Li Y P, Wei Z H, 2011. Reservoir-forming conditions of shale gas in Ziliujing Formation of Yuanba area in Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 22(1):1-7. (in Chinese)
- 蒋裕强,漆麟,邓海波,等,2010. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 30(3):22-26.
- Jiang Y Q, Qi L, Deng H B, *et al.*, 2010. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 30(3):22-26. (in Chinese)
- 李易霖,张云峰,丛琳,等,2016. X-CT扫描成像技术在致密砂岩微观孔隙结构表征中的应用——以大安油田扶余油层为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(2):379-387.
- Li Y L, Zhang Y F, Cong L, *et al.*, 2016. Application of X-CT scanning technique in the characterization of micro pore structure of tight sandstone reservoir: An example from Fuyu oil layer in Daan oilfield[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(2):379-387. (in Chinese)
- 牛海青,陈世悦,张鹏,等,2010. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系碎屑岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(2):749-758.
- Niu H Q, Chen S Y, Zhang P, *et al.*, 2010. Diagenesis and porosity evolution of Permian reservoir in Wu-Xia Area, Junggar Basin [J]. Journal of Central South

- University (Science and Technology), 41(2): 749—758. (in Chinese)
- 杨峰, 宁正福, 王庆, 等, 2014. 页岩纳米孔隙分形特征[J]. 天然气地球科学, 25(4): 618—623.
- Yang F, Ning Z F, Wang Q, *et al.*, 2014. Fractal characteristics of nanopore in shales[J]. Natural Gas Geoscience, 25(4): 618—623. (in Chinese)
- 杨雯雅, 2018. 四川盆地巴中地区中侏罗统千佛崖组储层特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学档案馆.
- Yang W Y, 2018. Research on Reservoir Characteristics of Qianfoya Formation of Middle Jurassic in the Bazhong Area, Sichuan Basin[D]. Qingdao: The Archive of China University of Petroleum. (in Chinese)
- 应凤祥, 杨式升, 张敏, 等, 2002. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构[J]. 沉积学报, 20(1): 75—79.
- Ying F X, Yang S S, Zhang M, *et al.*, 2002. Application of laser scanning confocal microscope to the measurement of pore texture in reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(1): 75—79. (in Chinese)
- 张敏, 2019. 四川南江—通江地区侏罗系千佛崖组优质储层主控因素及分布特征[D]. 青岛: 中国石油大学档案馆.
- Zhang M, 2019. The Dominant Factors and Distribution Characteristics of High Quality Reservoirs of Qianfoya Formation of Jurassic in Nanjiang-Tongjiang Area, Sichuan Province [D]. Qingdao: The Archive of China University of Petroleum. (in Chinese)
- 张盼盼, 刘小平, 王雅杰, 等, 2014. 页岩纳米孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 29(11): 1242—1249.
- Zhang P P, Liu X P, Wang Y J, *et al.*, 2014. Research progress in shale nanopore[J]. Advances in Earth Science, 29(11): 1242—1249. (in Chinese)
- 张学丰, 蔡忠贤, 胡文瑄, 等, 2009. 应用 Adobe Photoshop 定量分析岩石结构[J]. 沉积学报, 27(4): 667—673.
- Zhang X F, Cai Z X, Hu W X, *et al.*, 2009. Using Adobe Photoshop to quantify rock textures[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(4): 667—673. (in Chinese)
- 赵迪斐, 郭英海, 朱炎铭, 等, 2018. 龙马溪组页岩黄铁矿微观赋孔特征及地质意义[J]. 沉积学报, 36(5): 864—876.
- Zhao D F, Guo Y H, Zhu Y M, *et al.*, 2018. Micropore characteristics and geological significance of pyrite in shale rocks of Longmaxi Formation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(5): 864—876. (in Chinese)
- Jiao C, Yao S P, Liu C, 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[J]. 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[J]. International Journal of Coal Geology, 158: 78—89.
- Liu C, Shi B, Zhou J, *et al.*, 2011. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement, and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 54(1): 97—106.
- Liu C, Tang C S, Shi B, *et al.*, 2013. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. Computers and Geosciences, 57: 77—80.
- 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 [J]. Journal of Sedimentary Research, 79(12): 848—861.
- Prakongkep N, Suddhiprakarn A, Kheoruenromne I, *et al.*, 2010. SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils [J]. Geoderma, 156(1—2): 20—31.
- Soroushian P, Elzafraney M, 2005. Morphological operations, planar mathematical formulations, and stereological interpretations for automated image analysis of concrete microstructure[J]. Cement & Concrete Composites, 27(7—8): 823—833.
- 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[J]. Marine and Petroleum Geology, 70: 27—45.
- Yu W W, He F, Xi P, 2010. A rapid 3D seed-filling algorithm based on scan slice[J]. Computers & Graphics, 34(4): 449—459.

(责任编辑: 黄维婷)