

黔北地区下古生界页岩有机质孔隙结构特征及三维重构

范青青^{1,2,3}, 刘达东^{1,2,3*}, 许名扬^{1,2}, 蒋欣怡^{1,2}, 陈祎^{3,4}, 冯霞^{3,4}, 杜威^{3,4}, 刘冀蓬^{1,2}, 唐梓俊^{1,2}, 赵帅^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

3 自然资源部复杂构造区非常规天然气评价与开发重点实验室, 贵阳 550004

4 贵州省油气勘查开发工程研究院, 贵阳 550004

* 通信作者, liudd@cup.edu.cn

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-04-03

国家自然科学基金(42472185)、贵州省地勘基金项目(52000024P0048BH10174M)和中国石油大学(北京)青年拔尖人才项目(2462021BJRC010)联合资助

摘要 页岩的孔隙作为页岩气的主要储集空间, 其结构特征直接决定了气体的赋存状态、富集程度及渗流机制。然而页岩气储层中有机孔的结构十分复杂, 非均质性强裂, 制约了储层的精细评价和动态开发。为明确我国南方下古生界页岩储层有机孔的三维结构特征, 本文以黔北地区寒武系牛蹄塘组和志留系龙马溪组两套富有机质页岩为研究对象, 针对这两套热成熟度差异显著的页岩层系, 本研究综合运用有机质提取、低温氮气吸附以及聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)三维重构技术, 系统表征了两套页岩有机孔的微观结构特征, 并且基于氮气吸附和FIB数据, 分别利用FHH和盒子计数模型评估了不同尺度下有机孔的孔隙结构复杂程度。研究结果表明, 中等热成熟度的龙马溪组页岩(等效镜质体反射率 $R_o=2.1\% \sim 2.8\%$)有机孔十分发育, 孔隙形态以气泡状、海绵状团簇为主, 孔径主要介于 200~450 nm, 具有较高的比表面积(133.9~159.5 m²/g)和孔体积; 与之相比, 过成熟的牛蹄塘组页岩($R_o=3.0\% \sim 3.8\%$)有机孔的孔径较小($r=10 \sim 140$ nm), 其形态多呈不规则状或狭缝状, 比表面积(30.9~31.4 m²/g)和孔体积较低。三维孔隙网络建模显示, 在龙马溪组页岩中, 有机孔孤立分布, 连通性差, 大孔($r>140$ nm)贡献了总孔隙体积的 70%。牛蹄塘组页岩由于热演化程度较高, 有机质发生缩聚形成微裂缝, 提高了大孔($r>150$ nm)之间的连通性; 而小孔呈孤立分布, 孔隙之间的连通性差, 小孔贡献了总孔隙体积的 64%。另外, 两套页岩的有机孔分形表征显示, 牛蹄塘组页岩的大孔具有更高的分形维数($D_2 = 2.37 \sim 2.78$), 表明其孔隙结构更为复杂; 而龙马溪组页岩有机孔的形态相对规则, 这主要受有机质热演化程度控制。该研究不仅为不同热成熟度页岩的三维孔隙结构演化机制提供了系统认识, 还为黔北地区页岩气储层评价和渗流开发提供了理论依据。

关键词 页岩气储层; 有机孔; 孔隙结构; 孔径分布; 非均质性; 机器学习

中图分类号: P618.13; TE121

引用格式: 范青青, 刘达东, 许名扬, 蒋欣怡, 陈祎, 冯霞, 杜威, 刘冀蓬, 唐梓俊, 赵帅. 黔北地区下古生界页岩有机质孔隙结构特征及三维重构[J]. 石油科学通报, 2025, 10(02): 361–377
FAN Qingqing, LIU Dadong, XU Mingyang, JIANG Xinyi, CHEN Yi, FENG Xia, DU Wei, LIU Jipeng, TANG Zijun, ZHAO Shuai. Structure characteristics and three-dimensional reconstruction of organic matter pores in Lower Paleozoic shales of the northern Guizhou Province, Southwestern China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(02): 361–377. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.011

Structure characteristics and three-dimensional reconstruction of organic matter pores in Lower Paleozoic shales of the northern Guizhou Province, Southwestern China

FAN Qingqing^{1,2,3}, LIU Dadong^{1,2,3}, XU Mingyang^{1,2}, JIANG Xinyi^{1,2}, CHEN Yi^{3,4}, FENG Xia^{3,4}, DU Wei^{3,4}, LIU Jipeng^{1,2}, TANG Zijun^{1,2}, ZHAO Shuai^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Evaluation and Development in Complex Tectonic Areas, Ministry of Natural Resources, Guizhou 550004, China

4 Guizhou Institute of Petroleum Exploration and Development Engineering, Guizhou 550004, China

Received: 2025-01-20; Revised: 2025-04-03

Abstract Shale pores serve as the primary reservoir space for shale gas, whose structural characteristics directly determine the gas occurrence state, enrichment degree, and flow mechanisms. However, the complex structure and strong heterogeneity of organic pores in shale gas reservoirs significantly constrain precise reservoir evaluation and dynamic development. To clarify the three-dimensional structural characteristics of organic pores in the Lower Paleozoic shale reservoirs in South China, this study focuses on two organic-rich shale successions in the northern Guizhou: The Lower Cambrian Niutitang Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation shales, which exhibit significantly different thermal maturities. An integrated approach was employed, combining organic matter extraction, low-temperature nitrogen adsorption, and focused ion beam-scanning electron microscopy (FIB-SEM) three-dimensional reconstruction techniques to systematically characterize the microstructure of organic pores in these two shale successions. Based on nitrogen adsorption and FIB data, the Frenkel-Halsey-Hill (FHH) and box-counting models were respectively applied to evaluate the complexity of organic matter pore structures across different scales. The results show that the moderately mature Longmaxi Formation shale (equivalent vitrinite reflectance $R_o=2.1\% \sim 2.8\%$) contains well-developed organic pores, predominantly exhibiting bubble-like and sponge-like cluster morphologies with pore sizes (r) mainly ranging from 200 nm to 450 nm, along with high specific surface area (133.9~159.5 m²/g) and substantial pore volume. In contrast, the overmature Niutitang Formation shale ($R_o=3.0\% \sim 3.8\%$) contains smaller organic pores ($r=10 \sim 140$ nm) with irregular or slit-shaped geometries, showing lower specific surface area (30.9~31.4 m²/g) and reduced pore volume. Three-dimensional pore network modeling further reveals distinct connectivity patterns between these two shale successions. In the Longmaxi Formation shale, organic pores are primarily isolated with poor connectivity, and large pores ($r>140$ nm) contribute approximately 70% of the total pore volume. The Niutitang Formation shale, however, shows enhanced connectivity among large pores ($r>150$ nm) through thermal-induced microfractures formed during organic matter condensation, while small pores ($r<150$ nm) remain largely isolated yet account for 64% of the total pore volume. Fractal dimension analysis highlights additional structural differences. The Niutitang Formation shale exhibits higher fractal dimensions for large organic matter pores ($D_2=2.37 \sim 2.78$), indicating greater structural complexity, whereas the organic pores of the Longmaxi Formation shale display relatively regular geometries with lower fractal dimensions. These variations are mainly controlled by differences in thermal maturity. Our study provides systematic understanding of three-dimensional pore structure evolution in shales with different thermal maturities, and offers theoretical foundations for shale gas reservoir evaluation and development strategies in northern Guizhou.

Keywords shale gas reservoir; organic matter pores; pore structure; pore size distribution; heterogeneity; machine learning

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.011

0 引言

随着对非常规油气资源勘探开发力度的不断加大,页岩气在全球能源结构中占据越来越重要的地位。页岩中的孔隙是页岩气的主要赋存和储集空间,其结构形态、体积大小以及分布范围是决定页岩气赋存状态、

富集程度以及渗流作用的关键^[1-2]。页岩气主要以吸附态和游离态赋存在微纳米级的孔隙空间中,其孔隙类型包括矿物粒间孔、粒内孔、有机孔和微裂缝等^[1]。对Barbett、Marcellus和龙马溪组等典型富有机质海相页岩的微观孔隙结构研究表明,有机质孔隙是页岩层系中最主要的孔隙类型^[3-4]。有机孔的孔径大小主要分

布在 5~750 nm 之间, 有机孔的发育不仅提高页岩的储集和吸附能力, 还通过与无机孔相互联通为页岩气的解吸和渗流提供了有效运移通道^[5]。然而, 有机孔的发育受有机质类型、热演化程度、孔隙压力、成岩作用以及无机矿物等多种因素制约^[6], 导致其孔隙大小非均质性显著, 形态结构复杂, 往往具有形态多样、连通性差、孔径分布范围广等特点^[6-7]。前人通过扫描电镜、高压压汞和氮气吸附等技术对页岩有机孔的微观孔隙结构开展了大量研究^[8-10], 但多局限于孔隙形态的二维观察和量化。此外, 通过对页岩孔隙开展三维的结构表征能够高效、直观和定量识别孔隙的连通性、立体形态和空间分布特征, 有助于页岩储层的含气性和渗流能力评价。目前, 页岩的三维孔隙结构表征技术主要为 X 射线显微断层扫描(CT)和聚焦离子束-扫描电镜(FIB-SEM)技术。CT 技术受分辨率的影响, 无法精细表征纳米尺度的孔隙, 在构建页岩有机孔的三维形态特征方面仍然存在局限^[11]。而随着 FIB-SEM 技术的迅速发展, 该技术在微米至纳米尺度上能够直观展示孔隙的三维形态、空间分布及连通性^[12]。利用三维重构技术, 能够有效的获取孔隙的体积大小、比表面积、配位数等参数。同时, 三维图像下的孔隙拓扑结构具有良好的分形特征, 通过对三维孔隙进行分形表征可为孔隙空间的复杂程度、非均质性和渗透性进行定量评价, 为深入了解页岩孔隙结构以及地质和工程条件评价提供了可靠手段^[11-12]。

四川盆地东南缘的黔北复杂构造区下古生界广泛发育两套富有机质海相页岩, 即: 寒武系牛蹄塘组($R_o=3.0\% \sim 3.8\%$)和志留系龙马溪组($R_o=2.1\% \sim 2.8\%$)。目前, 该地区的龙马溪组页岩已投入商业开发, 而牛蹄塘组页岩尚未实现勘探突破, 其内部强非均质性的孔隙结构是制约该层系勘探开发的重要因素。前人对这两套页岩的整体孔隙结构特征开展了广泛研究^[13-16], 但对其有机孔的三维孔隙形态、孔隙体积大小、连通性以及差异性尚缺乏系统表征和对比。为此, 本文以黔北地区牛蹄塘组和龙马溪组页岩为研究对象, 通过有机质提取和低温氮气吸附表征了两套页岩的有机孔孔隙形态, 并基于 FIB-SEM 技术对有机孔开展多尺度三维重构, 定量表征有机孔的三维孔隙形态、体积大小、空间分布以及连通性, 以期为页岩气储层评价和资源量估算提供科学依据。

1 地质背景

黔北地区在构造区划分上隶属于上扬子板块东南

缘, 地处贵州省北部, 位于贵阳—麻江—镇远一线以北, 属于湘鄂西构造带与川东南构造带之间的武陵褶皱带^[17-19]。该地区自新元古代以来受多期构造事件的叠加改造, 尤其受印支运动和燕山运动的强烈构造挤压, 致使该地区褶皱、断裂十分发育。褶皱整体上以 NE—NNE 向展布, 主要表现为隔槽式褶皱结构, 具有向斜狭窄紧闭、背斜宽阔舒缓的特征(图 1a)。新生代以来的喜山运动进一步叠加改造, 形成了现今的构造格局^[20-21]。

黔北地区广泛发育寒武系牛蹄塘组和志留系龙马溪组两套富有机质海相页岩(图 1b), 其中牛蹄塘组页岩有机碳含量(TOC)为 2.5%~12.7%, 平均值为 5.2%, 其富有机质层段(TOC>2%)厚度较大, 约 40~100 m。该层系在黔北整个地区均有沉积, 岩性主要为硅质页岩。相比之下, 龙马溪组页岩的有机碳含量较低, 主体介于 2.8 wt.%~5.6 wt.%, 平均值为 4.2 wt.%, 其富有机质层段厚度较薄, 约为 20~30 m。受后期构造挤压的影响, 研究区的大部分地层被抬升剥蚀, 志留系仅局限分布在残余向斜内(图 1a), 岩性主要为硅质页岩和混合质页岩。

2 实验样品与方法原理

2.1 样品基本特征

本次研究的 4 块样品分别取自黔北地区 RX-1 井的龙马溪组和 SY-1 井的牛蹄塘组页岩(图 1a)。为了方便对比, 分别选取了 TOC 含量和矿物组分相近(图 2)的两套页岩样品开展研究。其中, 牛蹄塘组页岩样品 SY-1-1 和 SY-1-2 的成熟度分别为 3.57% 和 3.65%, TOC 含量分别为 5.13 wt.% 和 2.12 wt.%, 孔隙度分别为 3.15% 和 3.88%; 龙马溪组页岩样品 RX-1-1 和 RX-1-2 的成熟度分别为 2.41% 和 2.58%, TOC 含量为 5.02 wt.% 和 2.41 wt.%, 孔隙度分别为 5.21% 和 4.61%。RX-1-1 和 SY-1-1 岩石类型为硅质页岩, 黏土矿物含量较低, 介于 17%~19%; RX-1-2 和 SY-1-2 则为黏土质混合页岩, 黏土矿物含量介于 41%~47%。两套页岩样品的有机质热成熟度差异显著, 龙马溪组页岩样品处于过成熟阶段早期, 牛蹄塘组页岩则为过成熟阶段中—晚期。本次研究选取的硅质页岩和黏土质混合页岩样品的矿物组分、TOC 含量和孔隙度与这两种岩性的平均值相近, 以确保这些样品能够代表黔北地区两套页岩的基本特征。同时, 每块样品被均匀分割成 3 份, 以用于开展不同的实验分析测试。

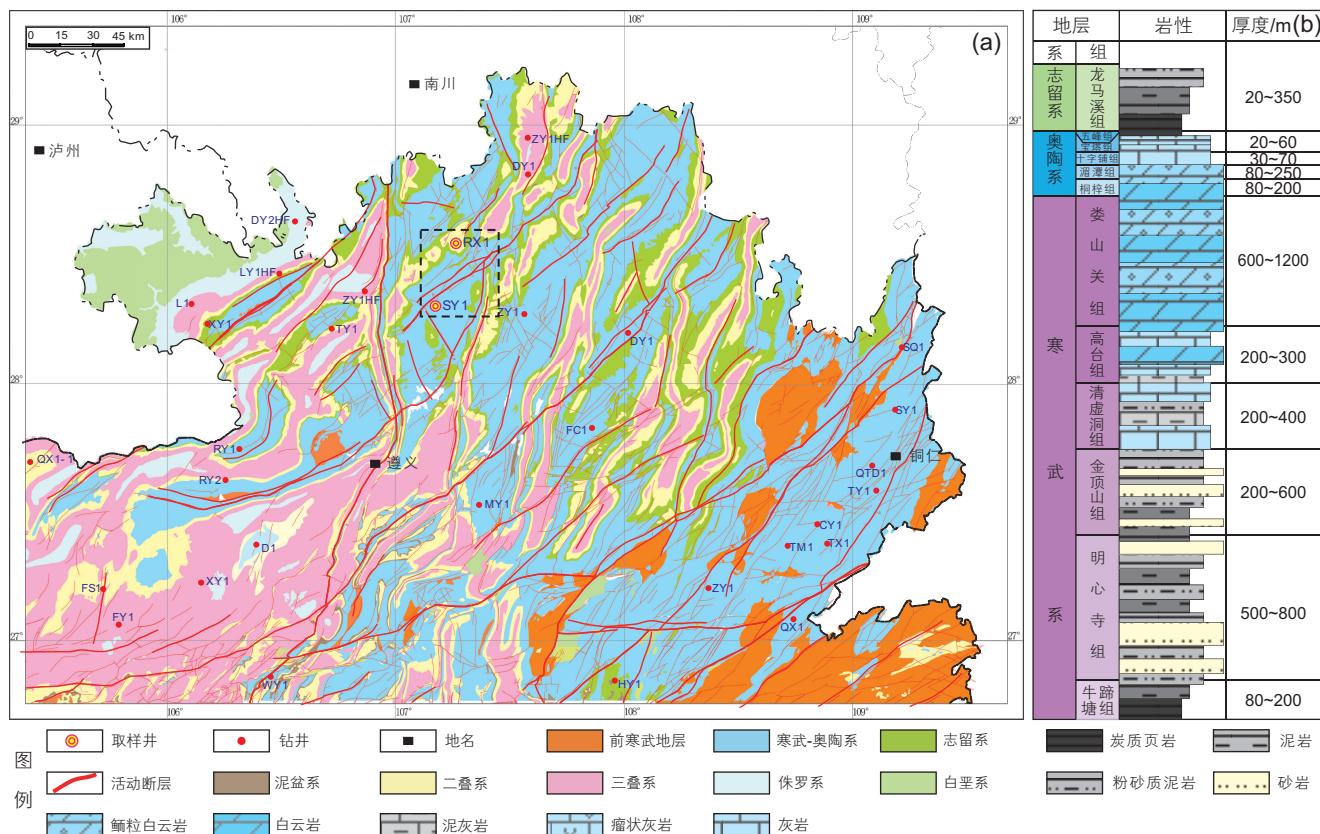


图 1 黔北地区区域地质概况图(a)和区域地层柱状图(b)

Fig. 1 Geological overview map (a) and stratigraphic column (b) of the Northern Guizhou region

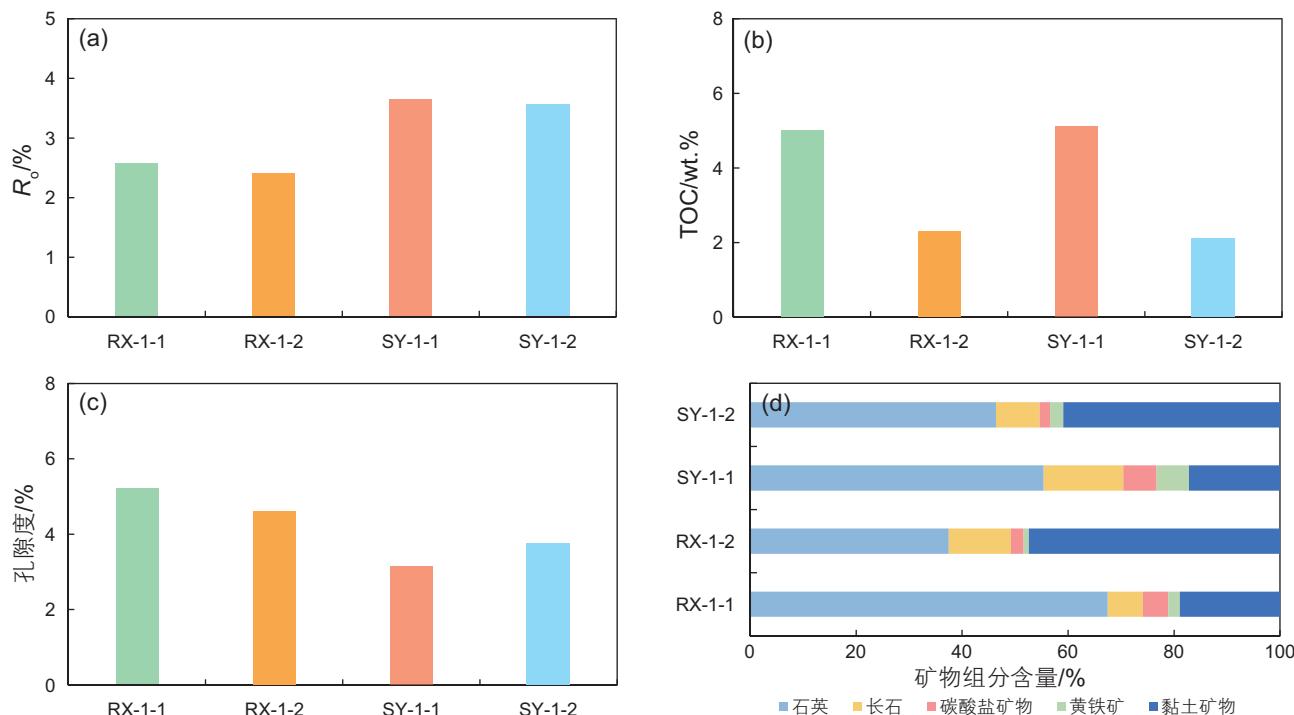


图 2 样品成熟度(a)、有机碳含量(b)、孔隙度(c)和矿物组分含量(d)柱状图

Fig. 2 Bar chart illustrating the maturity (a), organic carbon content (b), porosity (c), and mineral composition (d) of the samples

2.2 低温氮气吸附和FIB-SEM实验方法

将页岩基质样品粉碎至100~200目,通过酸化处理提取有机质。然后,将基质样品与提取后的有机质粉末置于在110℃条件下进行真空脱气48 h,以除去样品中多余水分及杂质气体。所有样品的粉末重量均控制在5.0±0.2 g范围内。脱气之后,将样品移入分析室,在ASAP2460比表面积测试仪上进行低温氮气吸附测试,实验过程中使用高纯液氮(纯度>99.99%;温度77.3 K)测定样品的吸附气量和脱附气量。

FIB-SEM实验则是先将样品切成0.5×1×1 cm³的长方体,用砂纸磨平和抛光处理,并利用氩离子进行细抛光处理后固定到工作台上。使用Helios 650型聚焦离子束扫描电镜对样品进行表面扫描和离子束切割。在背散射模式下选定有机质富集的区域,将工作台旋转52°并完成电子束和离子束的对焦。利用30 kV的离子束将目标区域的两侧以及前侧切除形成凹槽,随后以功率较低的离子束对目标区域进行细切和精抛光。抛光完成之后,调整离子束(30 kV、7 nA)和电子束(1 kV、500 pA)的参数,对目标区域进行离子束逐层切割。每层切割厚度约为10 nm,每切割一层便用电子束采集图像,连续采集500次以上。该实验的纵向分辨率为10 nm,平面分辨率为5 nm。

图像采集结束之后,首先使用ImageJ软件对每张FIB-SEM图像进行预处理,消除离子束切割过程中的垂直不均一性和采集成像过程中产生的噪点。此外,利用Adobe Photoshop CC软件中的图像增强过滤器(背景平衡、降噪和孔隙边界锐化)来提高孔隙分割的质量。图像预处理完成后,使用FEI Avizo 2020软件中的灰度值模块对图像进行阈值分割,提取每张照片的有机质孔隙并对其进行渲染,建立有机孔的三维可视化模型。最后,定量计算渲染体的体积、表面积、等效半径、形状因子和配位数等参数。详细的FIB-SEM实验原理、操作流程及图像处理与建模可参考文献^[22~23]。

2.3 分形理论

分形维数常用作为评价孔隙结构非均质性的参数,分形维数越大,非均质性越强^[24~27]。对于获取的FIB-SEM三维孔隙重构图像,本次研究对分形维数D值的计算通过盒计数法来确定^[28~29]。首先,将二值化图像有机孔标记为1,有机质标记为0,后将图像分成不同大小的立方体网格(盒子),对于每个尺度r,计算填充了孔隙的盒子数量N(r)。通过多次改变盒子大小,

记录对应的N(r)数据,得到N(r)与r的关系。根据有机质孔的孔径r和分形维数D的关系,可以得到孔径大于r的孔隙数量N(r)的表达式如下:

$$N(r) = \int_r^{r_{\max}} f(r) dr = c_1 r^{-D} \quad (1)$$

式中, r_{max}为最大孔径; c₁为分形因子; f(r)为r的密度函数。根据上述公式,通过积分孔隙体积可以得到孔径小于r的N(r)个数量的孔隙累计体积v(r),表达式如下^[29]:

$$v(r) = \int_{r_{\min}}^r f(r) c_2 r^3 dr = -\frac{D c_1 c_2}{3-D} (r^{3-D} - r_{\min}^{3-D}) \quad (2)$$

式中, r_{min}为最小孔径; c₂为比例常数。孔径r的累计孔隙体积分数表达式如下:

$$\frac{v(r)}{V_t} = \frac{-\frac{D c_1 c_2}{3-D} (r^{3-D} - r_{\min}^{3-D})}{-\frac{D c_1 c_2}{3-D} (r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D})} = \frac{r^{3-D} - r_{\min}^{3-D}}{r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}} \quad (3)$$

式中, V_t为有机孔的总孔隙体积。当r_{min} ≪ r_{max}时,公式(3)可进一步简化为:

$$\log\left(\frac{v(r)}{V_t}\right) = (3-D) \log\left(r / r_{\max}\right) \quad (4)$$

式中, 3-D代表log(v(r)/V_t)和log(r/r_{max})的直线斜率。

同时,采用Frenkel-Halsey-Hill (FHH)模型,通过低温氮气吸附计算分形维数,具体表达式(5)如下^[30~31]:

$$\ln V = C + (D-3) \ln \left[\ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \right] \quad (5)$$

式中, P为平衡压力,单位为MPa; V为平衡压力P下的吸附体积; P₀为饱和蒸汽压力,单位为MPa; C为常数; D为氮气吸附的分形维数。

3 结果与讨论

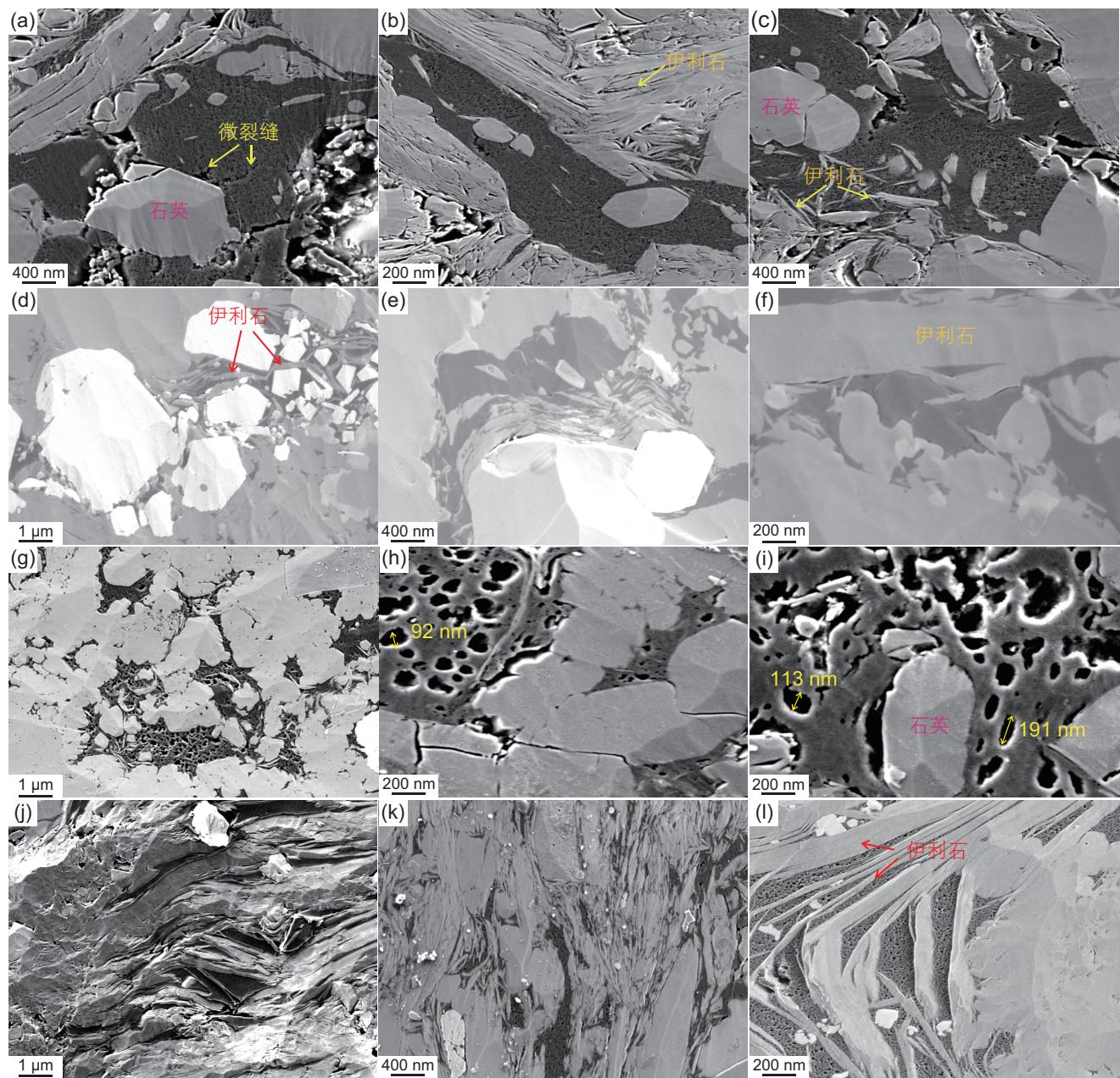
3.1 有机孔形态特征

有机孔是页岩气储层中十分重要的孔隙类型,热演化程度是影响有机孔发育的重要因素^[8]。SEM镜下观察显示,页岩中的有机质通常以团块状、填隙状、互裹状和条带状产出,或者充填在矿物粒间孔以及黏土矿物层间缝形成有机-黏土复合体(图3)。赋存在矿物粒间孔的有机质形态以团块状和填隙状为主(图3b、g、h),有机-黏土复合体的有机质形态则以条带状和互裹状产出(图3d、e、k、l)。通过SEM镜

下观察和FIB-SEM三维重构表明,黏土质混合页岩中的有机-黏土复合体是主要的有机质赋存形态,其中牛蹄塘组页岩有机-黏土复合体中的有机质贡献占50.9%,龙马溪组有机-黏土复合体的贡献占59.1%;而在硅质页岩中,由于黏土矿物含量减少,有机-黏土复合体占比降低,牛蹄塘组有机-黏土复合体贡献占33.1%,龙马溪组有机-黏土复合体贡献占42.6%。

同时,对比两套页岩的有机孔隙形态发现,牛

蹄塘组页岩有机质内的孔隙形态不一,呈不规则多边形、长条形(图3a、b)和细小蜂窝状孔隙团簇(图3c),有机孔主体孔径分布范围从几纳米到几十纳米不等。此外,有机质团块内部以及与矿物颗粒接触边缘发育有微裂缝(图3a),裂缝宽度可达几十纳米,这可能是热演化程度过高导致沥青发生缩聚作用,体积缩小而产生的缝隙。龙马溪组页岩有机孔十分发育,孔隙轮廓清晰,其形态主要为椭圆形、圆形和海绵状、气泡



(a~c) SY-1-1, 1692.3 m, 粒间孔隙充填有机质, 牛蹄塘组; (d~f) SY-1-2, 1676.1 m, 有机质-黏土复合体, 牛蹄塘组; (g~i) RX-1-1, 755.8 m, 粒间孔隙充填有机质, 龙马溪组; (j~l) RX-1-2, 750.2 m, 有机质-黏土复合体, 龙马溪组

图3 牛蹄塘组和龙马溪组页岩有机孔扫描电镜照片

Fig. 3 Scanning electron microscope images of organic pores in Shales from the Niutitang Formation and the Longmaxi Formation

状孔隙团簇(图3g、h、i),孔径大小不一,几十到几百纳米不等,有机质内部裂隙少见,在相同放大倍数下观察可见其孔径明显大于牛蹄塘组。此外,牛蹄塘组页岩中有机-黏土复合体中有机孔欠发育,局部可见黏土矿物层间缝(图3d)以及有机质与黏土矿物之间的微裂隙(图3f)。而龙马溪组页岩中的有机-黏土复合体在镜下可观察到大量的蜂窝状有机孔团簇(图3l)。

低温氮气吸附分析结果如图4所示,整体上两套页岩基质和提取有机质样品均表现出反“S”的IV型的吸附-脱附曲线特征。在牛蹄塘组页岩样品中,提取有机质和基质样品的吸附-脱附曲线形态相似,吸附与脱附曲线几乎平行,回滞环狭长细小。根据IUPAC提出的回滞环划分方案^[32],提取有机质的回滞环形态接近H3、H4型,表明牛蹄塘组页岩的有机孔形态主要以狭缝状和平行板状为主。相比之下,龙马溪组的页岩基质以及提取有机质样品则具有相对宽大的回滞环,其形态接近H2、H4型,对应的孔隙形态主要为墨水瓶状和狭缝状,这一结果与SEM镜下的观

察结果一致。

氮气吸附-脱附曲线特征能够很好的反应页岩基质和有机质孔隙形态特征,根据(IUPAC)提出的分类方式^[32],将页岩孔隙划分为微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)和宏孔(>50 nm)。如图4所示,4个样品在相对低压段($P/P_0 < 0.3$)的初始阶段吸附气量均大于0,且随着相对压力的增加而缓慢增加,表明两套页岩均发育微孔;当相对压力 $P/P_0 > 0.8$ 时,吸附气量迅速增加,接近饱和蒸气压时未达到饱和吸附,气体发生了凝聚作用,表明页岩中存在一定量的宏孔(图4)。此外,基于BET模型计算可知,牛蹄塘组页岩基质和提取有机质样品的比表面积分别介于4.5~5.7 m²/g和30.9~31.4 m²/g;而龙马溪组页岩的比表面积明显更高,其页岩基质比表面积介于21.9~30.7 m²/g,提取有机质比表面积介于133.9~159.5 m²/g。

通过SEM镜下观察和液氮吸附对比可知,龙马溪组页岩的有机孔孔径大,孔隙形态呈气泡状、海绵状的孔隙团簇,孔隙发育密集,并且孔隙表面十分粗糙

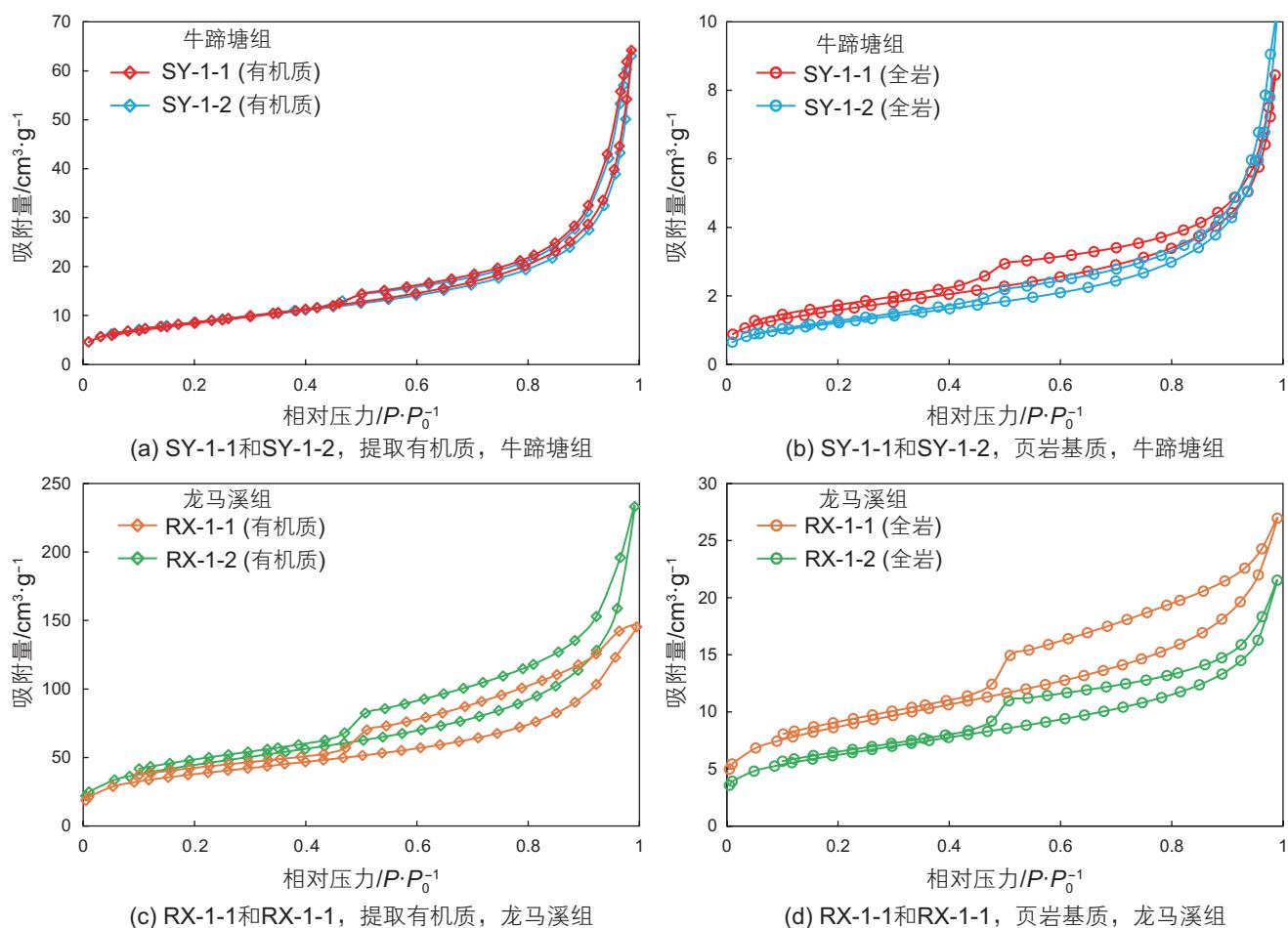


图4 页岩基质和提取有机质氮气吸附-脱附曲线特征

Fig. 4 Characteristics of nitrogen adsorption-desorption isotherms for shale matrix and extracted organic matter

(图 3g、h、i、l)，有助于页岩气吸附。而牛蹄塘页岩由于热演化程度高，有机质的杂链化合物减少且易发生缩聚，其孔隙壁趋向于光滑^[6,33]，导致有机孔的孔体积和吸附能力降低。

3.2 有机孔三维重构及定量表征

FIB-SEM 技术能够自动切片和成像，通过数字岩心处理软件可实现三维可视化建模，以获取孔径大小、体积、孔隙连通性和形状因子等参数^[34-35]。在图像前处理阶段，首先对原始图像进行裁切对齐和去除窗帘效应处理。借助 Avizo 软件，使用随机森林分类这一机器学习工具，对 FIB-SEM 图像中的有机孔目标结构进行精准分割和提取，生成二值化掩模。随后，利用 SurfaceGen 模块将分割结果转换为 STL 格式的三维表面网格，通过调节平滑参数，以优化模型表面细节并减少噪声。接着使用 Material Statistics 模块对分割后的结构进行体积、比表面积以及孔隙率等参数的定量计算。同时，利用 Volume Rendering 技术调整色彩映射和透明度，实现多相结构的三维可视化。最后，通过正交切片叠加方法验证分割精度，导出模型和统计数据以供仿真或跨平台分析，整个过程中始终平衡细节保留与噪声抑制，以确保重构结果的可靠性。

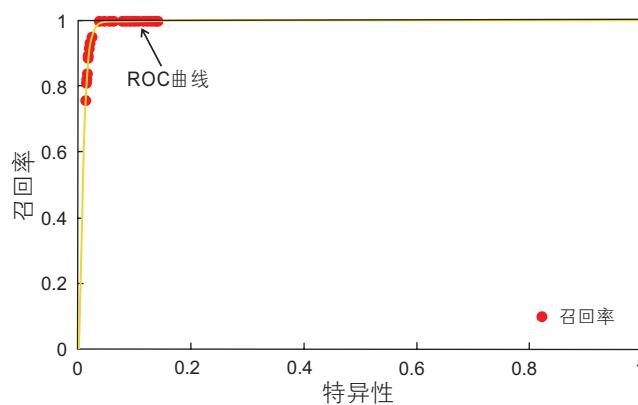
基于上述技术处理方法，进一步对图像分割模型进行训练，评估分类模型的性能，并绘制 ROC(Receiver Operating Characteristic) 曲线(图 5a)，该曲线反映了分类器在不同阈值下的表现，曲线的走势表示了灵敏度(召回率)和特异性(假正率)之间的权衡。曲线越靠近左上角，表示模型性能越优，曲线下方的面积(AUC)越接近 1，则模型表现越好。本研究结果如图 5 所示，采用随机森林分类模型算法所得的 ROC 曲线十

分靠近左上角，说明样品分类具有高度可靠性。在可靠性验证过程中，4 个样品的可靠性均达到 95% 以上(图 5b)，进一步证实了该模型在分割有机孔分布特征方面的可靠性。

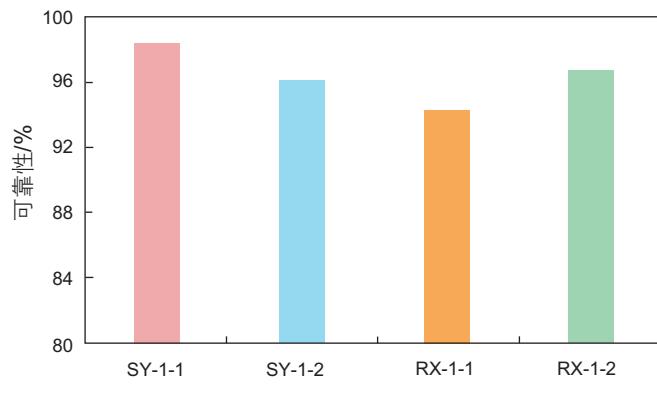
经可靠性验证之后，4 块页岩样品 FIB-SEM 三维模型如图 6 所示，在牛蹄塘组页岩样品中，SY-1-1 的有机孔十分发育，孔隙数量高达 30 000 个，孔隙形态不规则，有机孔的孔隙度为 1.04%。对该样品的孔径大小统计可知，有机孔的孔径分布范围较广(图 6a)，主体集中在 10~140 nm，孔隙体积占比高达 71.5%。孔隙表面积分布与孔隙体积相似，10~140 nm 孔径的有机孔贡献了大部分的表面积(图 7a)。SY-1-2 页岩样品的 TOC 含量较低，有机质较为分散，因而有机孔的数量明显较少，约为 10 000 个，对应的孔隙度为 0.06%。该样品的孔径分布显示出明显的双峰特征，分别位于 10~60 nm 和 190~350 nm 区间，对应的孔隙体积占比分别为 45.3% 和 35.3%。尤其是 190~350 nm 区间的孔隙，其表面积占比高达 48.2%(图 7b)。

在龙马溪组页岩的两个样品中，RX-1-1 的有机孔的三维孔隙形态呈球形、椭球形(图 6c)，整体孔隙数量较多(约 25 000 个)，且孔隙之间相对孤立。RX-1-1 样品的有机孔隙度为 2.43%，孔径大小集中在 200~400 nm，占总孔隙体积的 49.2%，孔隙表面积分布也与孔体积相似(图 7c)。RX-1-2 样品的有机孔孔隙形态以椭球状、不规则状为主，有机质团块相对分散，有机孔数量约 20 000 多个。该样品的有机孔隙度为 1.67%，孔径主要集中在 200~450 nm，孔隙体积占比为 47.4%，表面积占比为 28.1%(图 7d)。

另外，基于 Avizo 软件建立了 4 个样品有机孔的三维孔隙—喉道骨架结构模型(球棍模型)，模型中



(a) 随机森林模型训练样本召回率和特异性分析



(b) 基于随机森林模型分类可靠性评价

图 5 页岩有机孔三维重构可靠性评价

Fig. 5 Reliability assessment of 3D reconstruction of shale organic pores

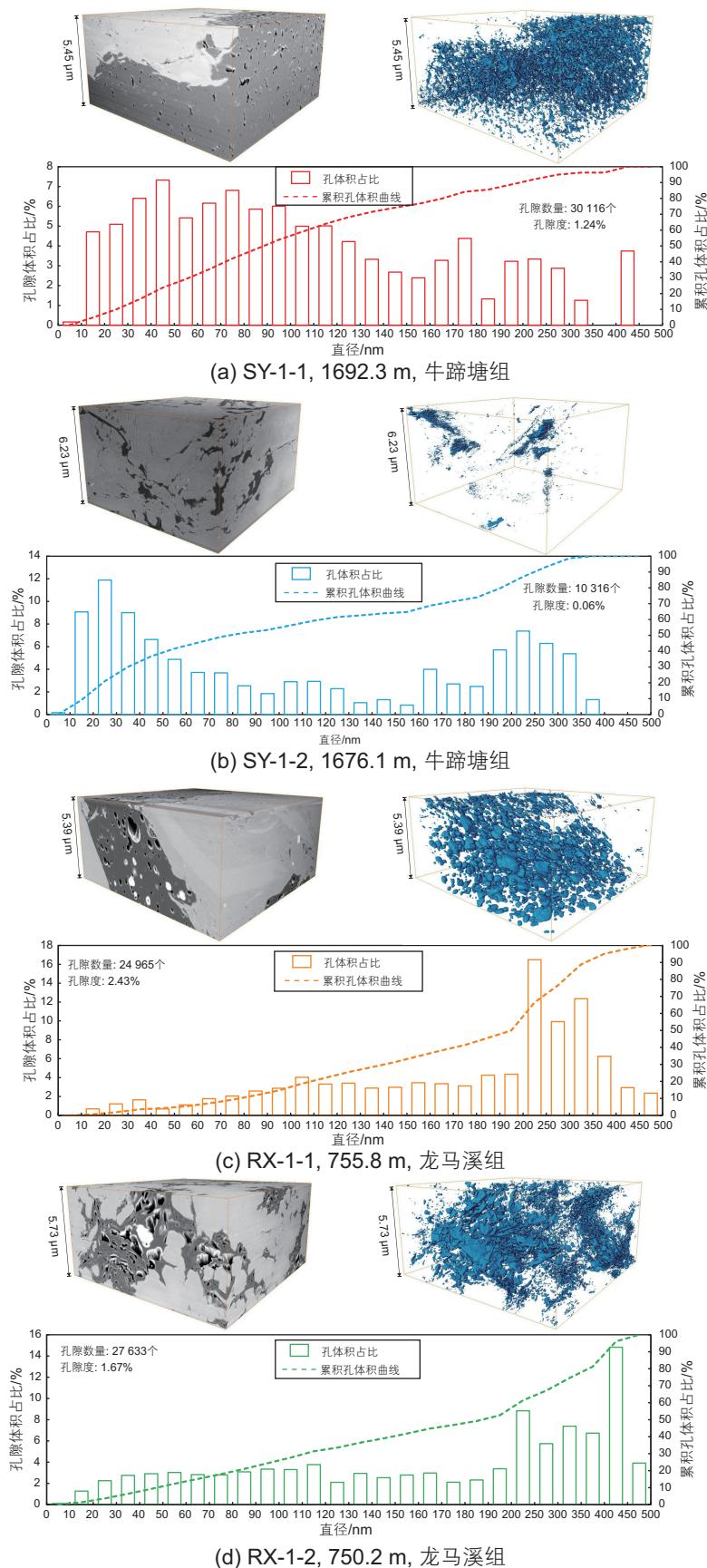


图 6 有机孔的三维模型和不同孔径下的孔体积分布直方图

Fig. 6 Three-dimensional model of organic pores and histograms of pore volume distribution for different pore sizes

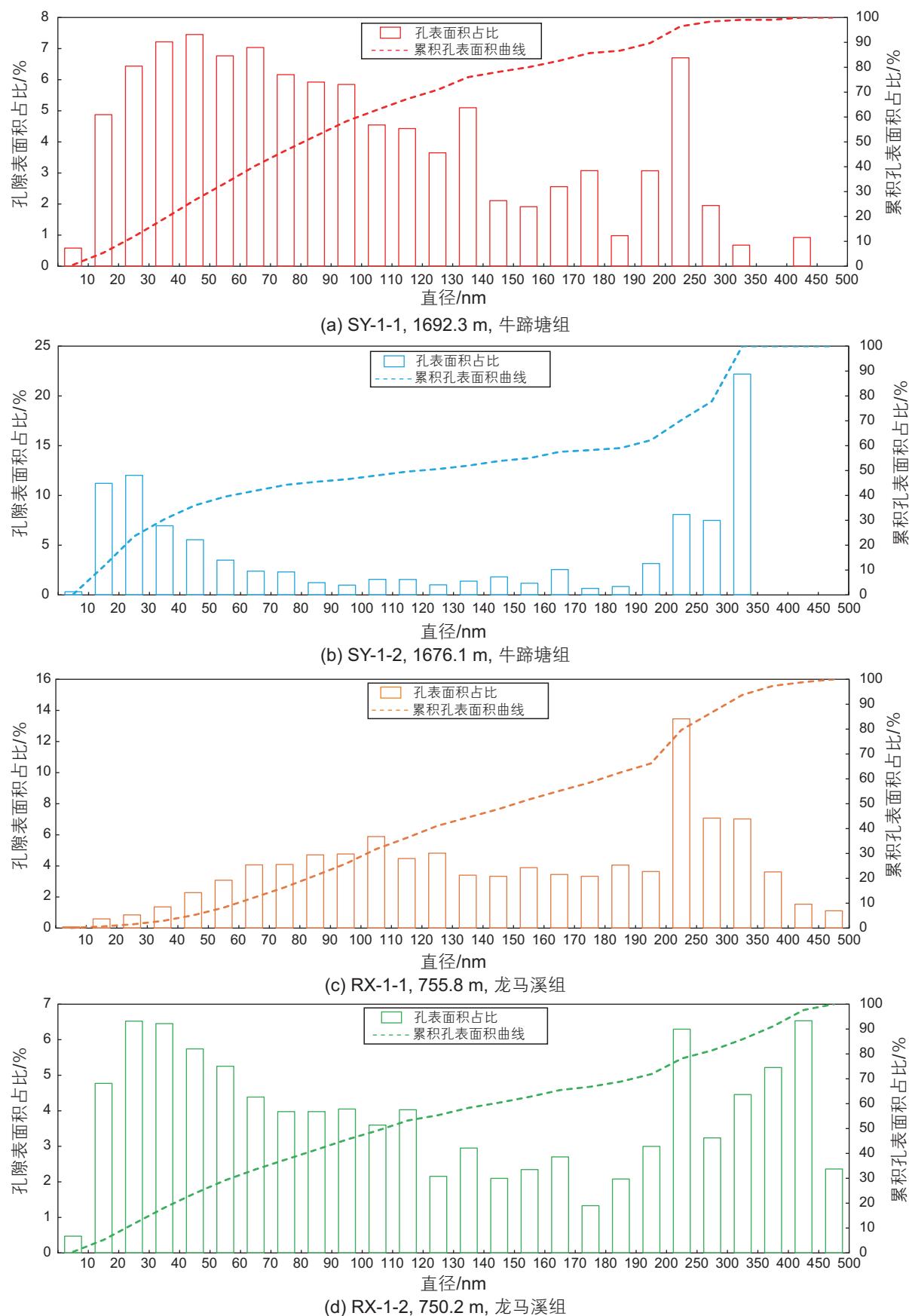
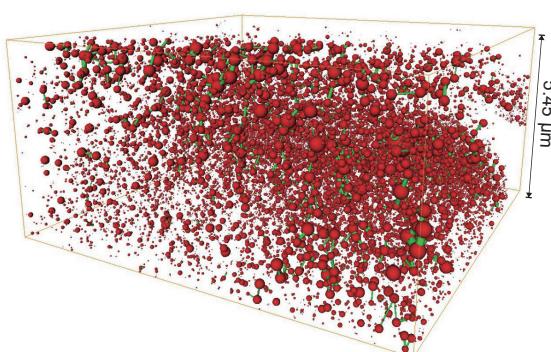


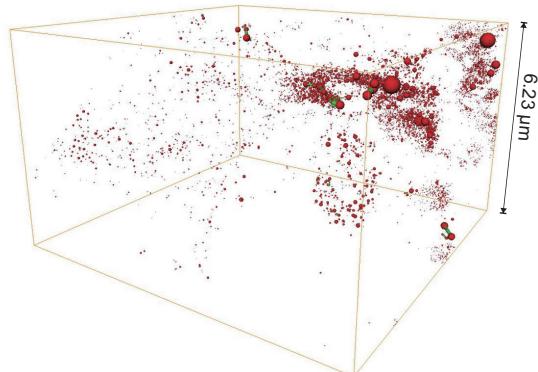
图 7 有机孔表面积分布直方图

Fig. 7 Histogram of surface area distribution of organic pores

的红色球体表示孔隙，其体积大小与实际的孔隙体积相等，绿色圆柱表示两个孔隙之间的喉道(图 8 和图 9)。牛蹄塘组页岩的棍模型和喉道参数如图 8，SY-1-1 样品的模型显示(图 8a)，相互毗邻的大孔隙之间喉道较为发育，而小孔隙则相对孤立，喉道欠发育。该样品的喉道半径、长度和累计体积如图 8b 所示，喉道数量较多(约 5000 条)，其半径主要集中分布在 6~100 nm，平均值为 37.8 nm；喉道长度分布范围较广，最长可达 465 nm，平均长度为 47.1 nm，孔隙的配位数平均值 1.4。另外，累计喉道体积曲线随着喉道半径的增加而呈对数趋势增长(图 8b)，表明细长喉道对整体喉道体积的贡献大，而宽短喉道对喉道体积的贡献相对较小，这进一步指示有机孔的渗流能力主要受这类细长的喉道控制。SY-1-2 样品的三维模型如图 8c 所示，由于有机质分散且有机孔欠发育，孔隙相对分散孤立，孔隙之间连通性差，喉道欠发育。该样品的喉道半径介于 6~380 nm，平均值为 38.5 nm，喉道长度介于 6~300 nm，平均长度为 55.1 nm，孔隙的配位数平均值 0.8。



(a) SY-1-1, 三维孔喉模型



(c) SY-1-2, 三维孔喉模型

龙马溪组页岩的球棍模型及喉道参数见图 9。两个样品的有机孔均较为发育，其等效体积球体半径(图 9a、c)明显大于牛蹄塘组。RX-1-1 样品的有机孔孔径大，喉道粗，其喉道半径主要集中在 9~150 nm，平均值为 66.2 nm；喉道长达 667 nm，平均喉道长度为 79.6 nm；9~100 nm 的细长喉道对喉道体积的贡献较小，以大喉道(半径>100 nm)贡献为主；整体的有机孔的配位数平均值为 0.7。在 RX-1-2 样品中，大孔隙之间连通性较好，喉道相对发育，而小孔的连通性较差。该样品整体喉道半径主要介于 6~120 nm，平均值为 40.5 nm；喉道长度介于 7~571 nm，平均长度为 43.2 nm，整体的孔隙配位数相对较高，平均值为 1.4。此外(图 9d)，该样品的累计喉道体积在 6~350 nm 区间内呈线性增加，细小喉道(半径<100 nm)对渗流能力的贡献较小，大喉道(半径>100 nm)的贡献显著。

3.3 有机孔分形特征及复杂程度

页岩有机孔的表面微观形态和空间结构对页岩气的赋存和渗流具有重要的影响。通过提取有机质的氮

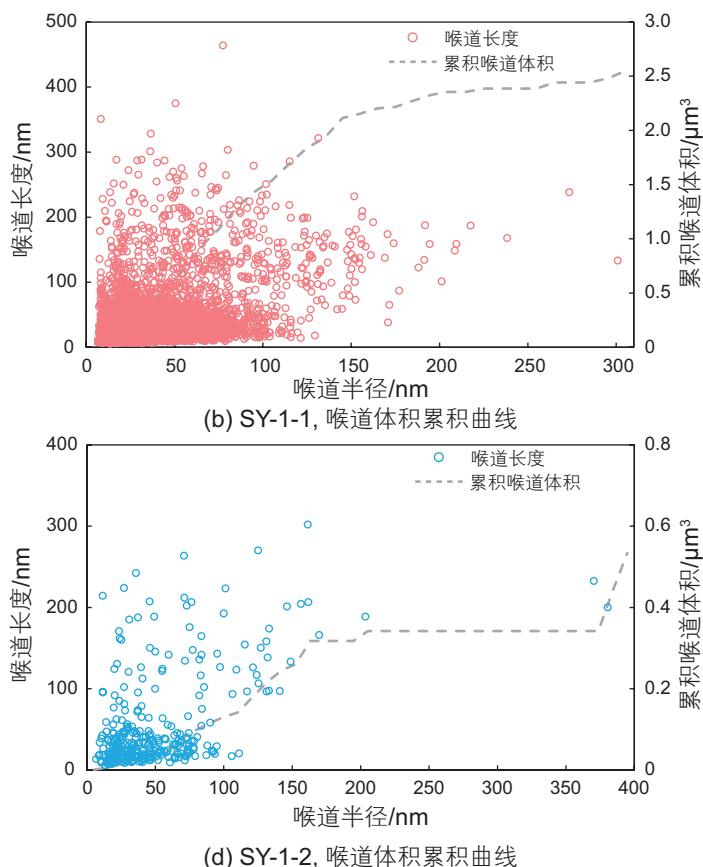


图 8 牛蹄塘组页岩有机孔的三维孔隙—喉道骨架结构及喉道体积分布

Fig. 8 Three-dimensional pore-throat framework structure and throat volume distribution of organic pores in the Niutitang Formation shale

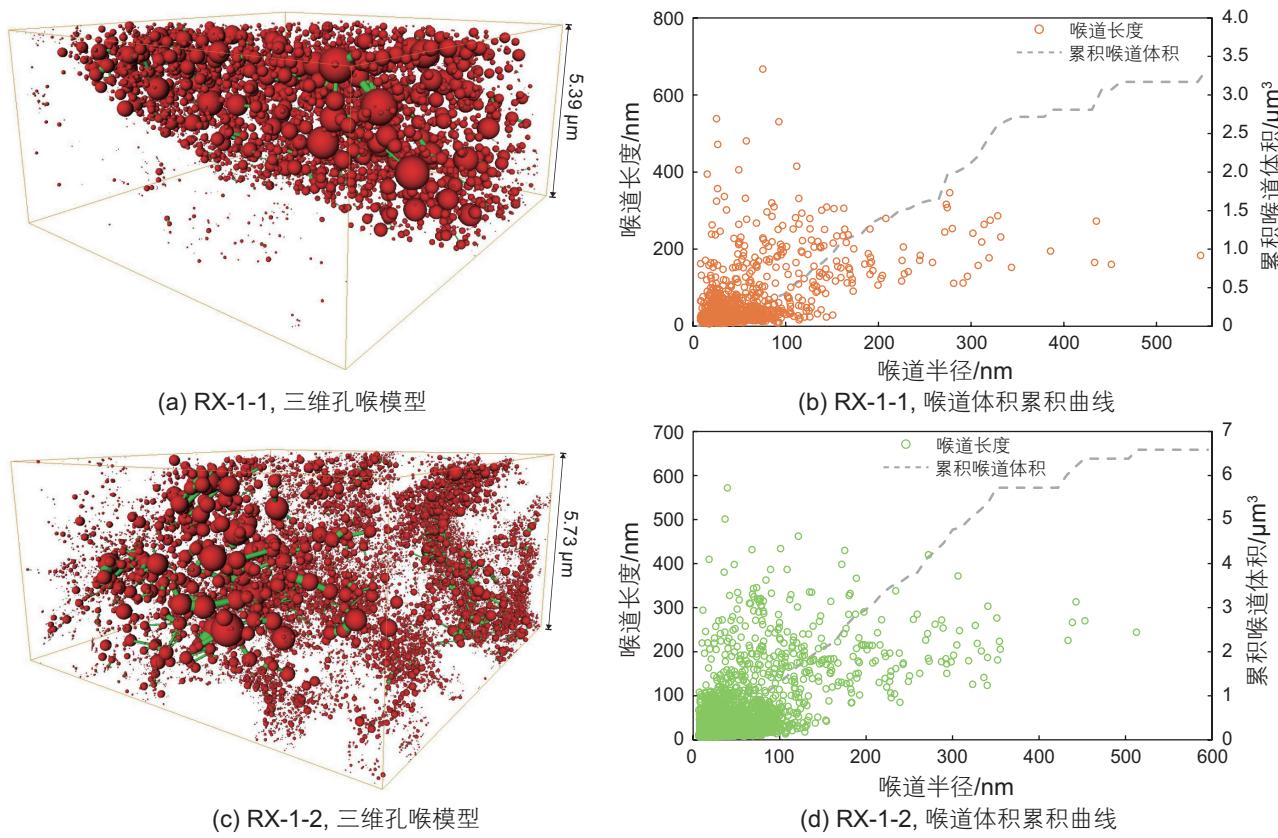


图 9 龙马溪组页岩有机孔的三维孔隙—喉道骨架结构及喉道体积分布

Fig. 9 Three-dimensional pore-throat framework structure and throat volume distribution of organic pores in the Longmaxi Formation shale

气吸附分析以及有机孔的三维结构建模可知, 龙马溪组页岩的有机孔在孔径大小、比表面积和孔体积方面均显著高于牛蹄塘组。基于氮气吸附数据, 利用FHH模型对两套页岩有机孔的分形维数 D 进行了计算, 结果显示龙马溪组的有机孔分形维数高于牛蹄塘组(见图 10), 表明在孔径约 1.7~150.0 nm 范围内, 龙马溪组的有机孔结构复杂程度更高。

尽管本次研究的样本数量有限, 但结合前人研究表明, 在龙马溪组和牛蹄塘组这两套页岩中, 有机孔的复杂程度差异主要受控于有机质的热演化程度^[6]。相较于热演化程度高的页岩, 低熟页岩的有机孔更为发育, 其微观结构形态更复杂^[15, 35], 这一认识与本次研究结果一致。

为进一步系统表征页岩孔隙结构特征以及在三维尺度下的复杂程度, 本次研究采用盒计数法对两套页岩的有机孔进行了三维重构分形表征。根据前述的分形维数计算方法, 计算了牛蹄塘组和龙马溪组的三维孔隙分形维数。结果如图 11 所示, 4 个样品的分形曲线均有明显的拐点, 且在孔径接近拐点时, 曲线呈现非线性变化特征, 这可能受岩心孔隙结构的尺度效应

的影响。页岩孔隙结构具有明显的多尺度特征, 孔径大小跨越微米至纳米级, 其分布呈现出多层次性, 导致不同尺度下孔隙复杂程度呈现出显著差异。因此, 通过三维重构计算得到的分形维数在不同孔径范围之间表现出非线性变化特征。

为区分不同尺度下孔隙复杂程度的差异, 本次研究分别以 140 nm 和 150 nm 为平均分界点, 将牛蹄塘组和龙马溪组两套页岩的有机孔划分为小孔与大孔。在两个尺度区间内, 孔隙体积与孔径的双对数曲线均表现出良好的相关性(相关系数 $R^2 > 0.9147$)。小孔段和大孔段的分形维数(D_1 和 D_2)可能反映了这两个尺度区间内孔隙结构的非均质性。一般而言, 在三维空间中, 分形维数介于 2~3 之间表示孔隙结构较为复杂, 数值越接近 3, 复杂程度越高^[29, 35]。在本次研究中, 牛蹄塘组页岩的分形维数 D_2 显著大于龙马溪组, 且硅质页岩相的 D_2 大于黏土质混合岩相(见图 11), 表明硅质页岩中大孔的孔隙结构更为复杂。相较之下, D_1 分形维数普遍较小, 部分样品的 D_1 值甚至低于 2, 这可能与对小孔隙的计数不足有关。一方面是由于 FIB-SEM 的层切割(厚度为 10 nm)造成孔隙的缺失, 导致小孔

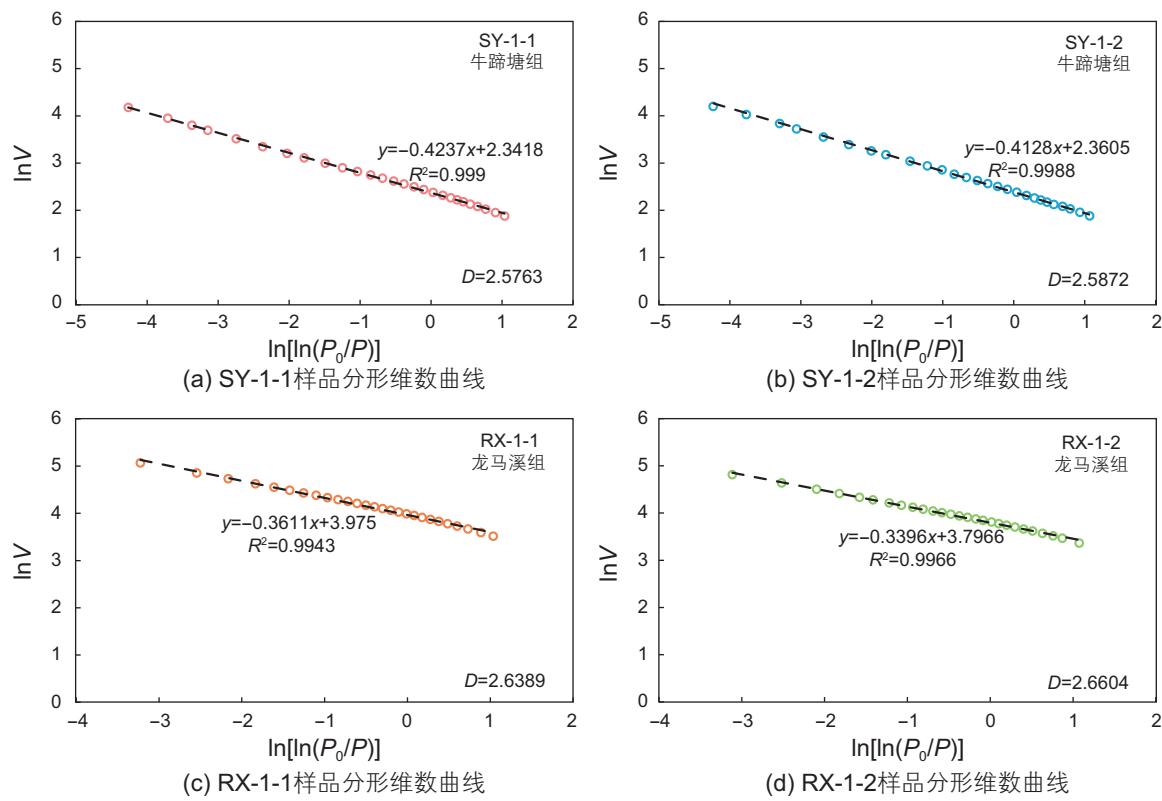


图 10 提取有机质样品的氮气吸附分形特征

Fig. 10 Fractal characteristics of nitrogen adsorption in extracted organic matter samples

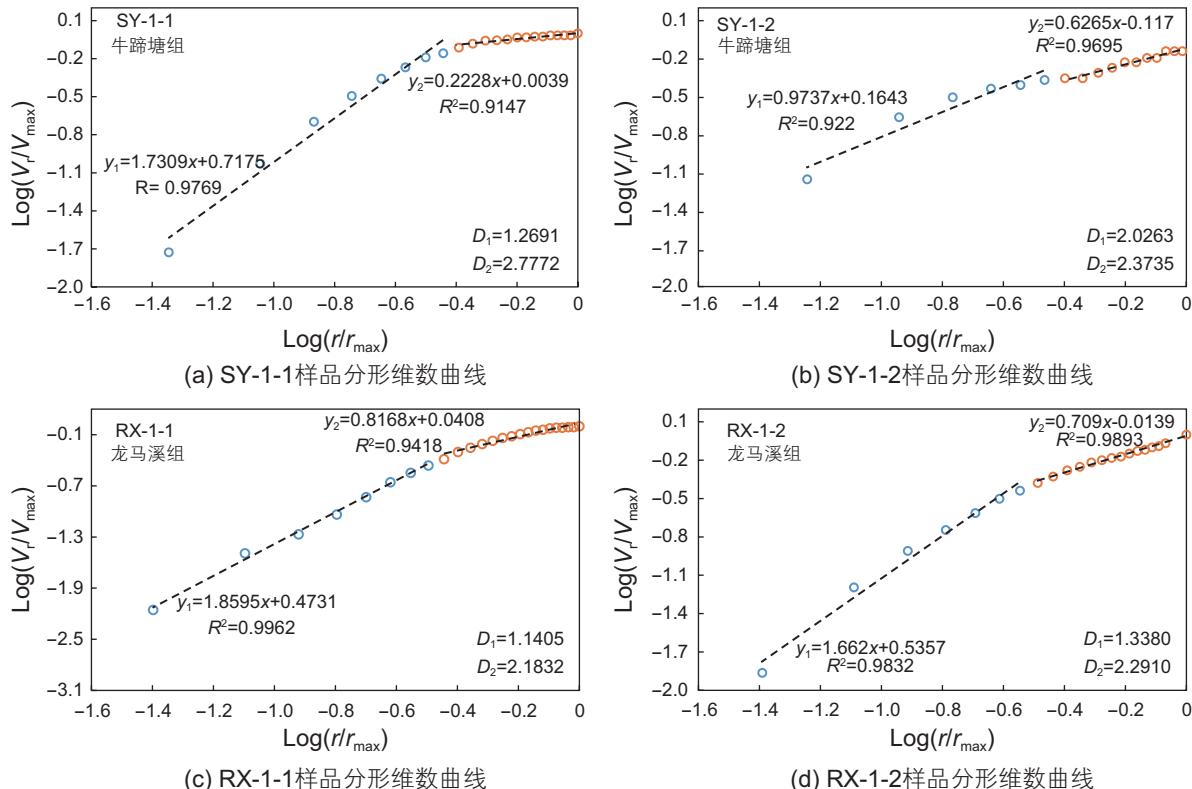


图 11 基于 FIB-SEM 的有机孔隙结构分形特征

Fig. 11 Fractal characteristics of organic pore structures based on FIB-SEM analysis

隙的理论计数不足；另一方面则可能是有机质与孔隙在灰度图像中难以区分，造成孔隙重构时存在遗漏。

不过，基于氮气吸附数据的FHH模型恰好弥补了这一不足，该模型能够有效表征150 nm以下孔隙的复杂结构。因此，结合三维重构与氮气吸附两种实验方法所构建的分形模型，可实现对多尺度有机孔孔隙结构的复杂程度进行耦合表征。但需指出的是，本研究由于样本数量有限，有机孔结构复杂程度的多尺度表征仍需进一步探讨与验证。

3.4 有机孔三维重构及定量表征

在孔隙尺度划分的基础上，对比分析了牛蹄塘组与龙马溪组页岩有机孔的小孔与大孔的差异。结果如图12所示，牛蹄塘组页岩中小孔的形状因子(图12a)明显高于大孔，表明小孔形态规则，更接近椭球状，而大孔的形态趋向于不规则状和狭缝状。龙马溪组页岩的大孔与小孔的形状因子均显著大于牛蹄塘组，表明龙马溪组的有机孔整体以椭球状或球状为主，这与扫描电镜(SEM)观察的孔隙形态特征一致。进一步对不同尺度有机孔的配位数进行统计(图12b)发现，牛蹄塘组页岩中大孔的配位数较高，表现出较好的连通性，而小孔配位数偏低，连通性差。相比之下，龙马溪组页岩的有机孔整体配位数较少，孔隙连通性差。

结合小孔的复杂程度与连通性特征进行对比分析发现，两套海相页岩的小孔复杂程度均较高，但其复杂程度与连通性之间并无明显相关关系。大多数有机孔在生烃成孔过程中彼此孤立，并未显著连通，其结构复杂程度主要体现在增加孔隙的比表面积，对页岩气吸附能力贡献明显。然而，牛蹄塘组页岩中大孔表现出孔隙复杂程度与连通性同步提升的现象，这一差异可能是有机质的热演化程度差异所致。牛蹄塘组页岩处于过成熟阶段，有机质易发生剧烈缩聚作用，在塑性压实过程中产生了大量细微裂缝，这些微裂缝串联了邻近孔隙，形成了裂缝-孔隙组合结构，增加了孔隙结构复杂程度的同时提高了大孔之间连通性^[6]。而龙马溪组页岩热演化程度相对较低，有机质未发生显著缩聚，有机质内部收缩缝欠发育，因此结构复杂程度低、连通性差。另外，在牛蹄塘组页岩有机孔中，小孔贡献了大部分的孔体积(64%)和外表面积(76%)(图12c、d)，而大孔的贡献相对较小。尽管小孔的孔体积显著高于大孔，但是小孔之间相互孤立，配位数少，连通性差。龙马溪组页岩中有机孔体积贡献主要来自于大孔(70%)(图12c)，孔表面积贡献两者相当(图12d)，大孔配位数多于小孔，且喉道半径较粗，因此大孔之间的连通性相对较好。

综上所述，有机质的热演化程度显著控制了页岩

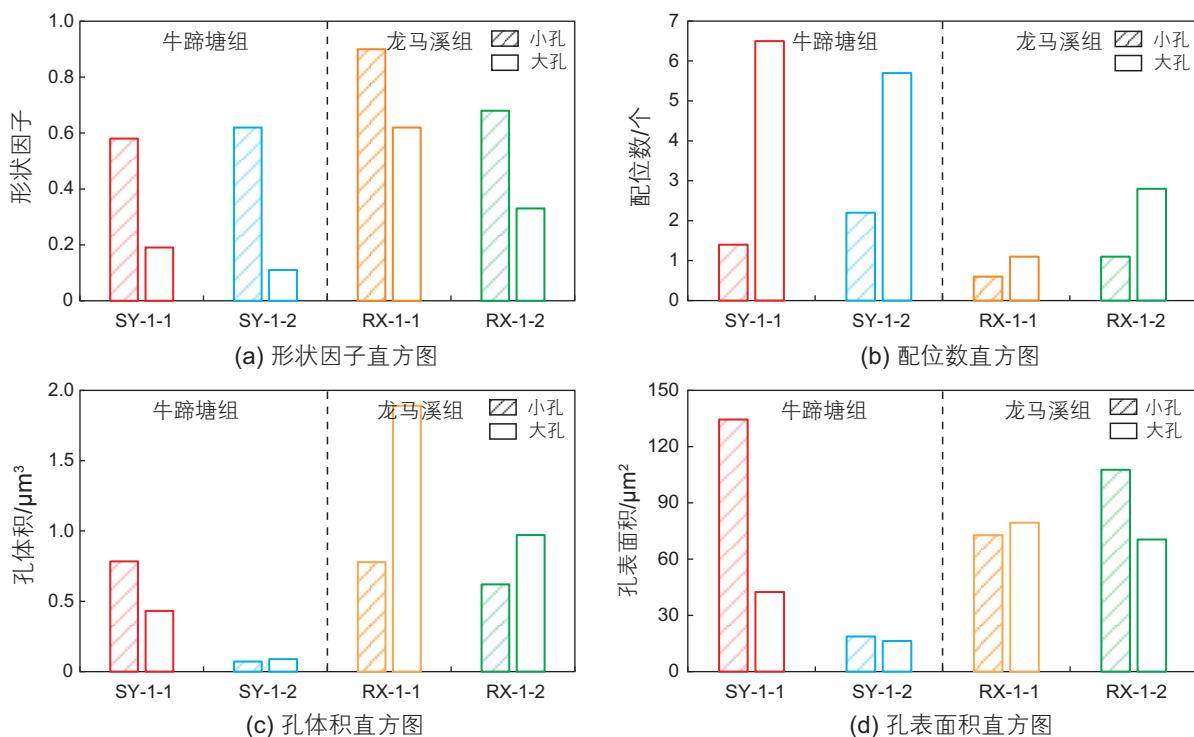


图 12 有机孔的形状因子、配位数、体积和表面积统计直方图

Fig. 12 Statistical histograms of shape factor, coordination number, volume, and surface area of organic pores

有机孔结构复杂程度及其孔隙之间的连通性。牛蹄塘组页岩由于成熟度过高, 有机质强烈缩聚与塑性压实产生裂缝-孔隙组合结构, 显著增加了大孔的复杂程度与连通性; 而小孔则更多地受到有机质热演化阶段限制, 结构复杂且分布孤立, 连通性较差。这一结果揭示了页岩储层孔隙结构演化的内在机制, 为深入理解页岩气赋存与渗流机制提供了科学依据。不过需要指出的是, 本研究中所取样品数量较少, 且区域内样品的矿物组成、热演化史及成岩作用过程可能存在差异, 以上因素可能导致所获结论具有一定的不确定性, 后续有望增加样品数量, 并深入探讨区域内部矿物岩石学特征、热演化程度和成岩作用的差异, 以验证和进一步完善本次研究的成果与认识。

4 结论

1) 黔北地区龙马溪组页岩有机孔十分发育, 其有机孔的孔隙形态主要呈气泡状、海绵状, 孔径大小主

要介于 200~450 nm, 比表面积较高($133.9\sim159.5\text{ m}^2/\text{g}$); 而牛蹄塘组页岩有机孔呈不规则状、狭缝状和细小蜂窝状, 孔径较小($10\sim140\text{ nm}$), 比表面积低($30.9\sim31.4\text{ m}^2/\text{g}$)。

2) 有机质热演化程度是控制孔隙结构差异的重要原因, 牛蹄塘组页岩由于成熟度高, 有机质缩聚导致孔隙壁光滑、体积收缩, 形成微裂缝串联大孔, 连通性较好; 而龙马溪组页岩的成熟度相对较低, 发育海绵状、气泡状孔隙团簇, 但孔隙之间较为孤立, 连通性受限。

3) 基于三维孔隙模型, 利用分形理论将有机孔划分为大孔和小孔。其中, 龙马溪组页岩的大孔($r>140\text{ nm}$)占页岩孔体积的 70%, 大孔的配位数多, 喉道半径粗, 连通性好; 而小孔($r<140\text{ nm}$)之间彼此孤立, 喉道不发育, 连通性差。在牛蹄塘组页岩中, 小孔($r<150\text{ nm}$)对孔体积的贡献显著(64%), 但配位数少, 孤立分布, 连通性差; 而大孔($r>150\text{ nm}$)的孔体积占比低, 配位数多, 连通性好。

参考文献

- [1] 陈尚斌, 秦勇, 王阳, 等. 中上扬子区海相页岩气储层孔隙结构非均质性特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(08): 1455~1463. [CHEN S B, QIN Y, WANG Y, et al. Pore structure and heterogeneity of marine shales in the Middle-Upper Yangtze [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(08): 1455~1463.]
- [2] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J]. 石油科学通报, 2023, 8(06): 695~706. [JIA C Z, JIANG L, ZHAO W. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(06): 695~706.]
- [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: 848~861.
- [4] 高之业, 范毓鹏, 胡钦红, 等. 川南地区龙马溪组页岩有机质孔隙差异化发育特征及其对储集空间的影响[J]. 石油科学通报, 2020, 5(01): 1~16. [GAO Z Y, FAN Y P, HU Q H, et al. Differential development characteristics of organic matter pores and their impact on reservoir space of Longmaxi Formation shale from the south Sichuan Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(01): 1~16.]
- [5] LI Z, LIU D, CAI Y, et al. Multi-scale quantitative characterization of 3-D pore-fracture networks in bituminous and anthracite coals using FIB-SEM tomography and X-ray μ -CT[J]. Fuel, 2017, 209: 43~53.
- [6] 腾格尔, 卢龙飞, 俞凌杰, 等. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通性的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(04): 687~699. [TENG G E, LU L F, YU L J, et al. Formation, preservation and connectivity control of organic pores in shale[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(04): 687~699.]
- [7] 张宇航, 陈尚斌, 张瑛堃, 等. 基于热模拟实验的页岩孔隙连通性与形状系数演化研究及其地质意义[J]. 地质学报, 2023, 97(08): 2702~2714. [ZHANG Y H, CHEN S B, ZHANG Y K, et al. Study on evolution of shale pore connectivity and shape factor based on thermal simulation experiments and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(08): 2702~2714.]
- [8] 仰云峰, 鲍芳, 腾格尔, 等. 四川盆地不同成熟度下志留统龙马溪组页岩有机孔特征[J]. 石油实验地质, 2020, 42(03): 387~397. [YANG Y F, BAO F, TENG G E, et al. Characteristics of organic matter-hosted pores in Lower Silurian Longmaxi shale with different maturities, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(03): 387~397.]
- [9] 杨熙雅, 刘成林, 刘文平, 等. 四川盆地富顺-永川地区龙马溪组页岩有机孔特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(06): 1321~1333. [YANG X Y, LIU C L, L W P, et al. Characteristics of and factors influencing organic pores in the Lower Silurian Longmaxi Formation, Fushun-Yongchuan Area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(06): 1321~1333.]
- [10] 刘若冰, 魏志红, 加奥启, 等. 川东南地区五峰-龙马溪组深层超压富有机质页岩孔隙结构分形特征及其地质意义[J]. 地球科学, 2023, 48(04): 1496~1516. [LIU R B, WEI Z H, JIA A Q, et al. Fractal characteristics of pore structure in deep overpressured

- organic-rich shale in Wufeng-Longmaxi Formation in Southeast Sichuan and its geological significance[J]. *Earth Science*, 48(04): 1496–1516.]
- [11] 马勇, 钟宁宁, 程礼军, 等. 渝东南两套富有机质页岩的孔隙结构特征——来自 FIB-SEM 的新启示[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(01): 109–116. [MA Y, ZHONG N N, CHENG L J, et al. Pore structure of two organic-rich shales in southeastern Chongqing Area: Insight from focused ion beam scanning electron microscope (FIB-SEM) [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(01): 109–116.]
- [12] GOU Q, XU S, HAO F, et al. Full-scale pores and micro-fractures characterization using FE-SEM, gas adsorption, nano-CT and micro-CT: A case study of the Silurian Longmaxi Formation shale in the Fuling Area, Sichuan Basin, China[J]. *Fuel*, 2019, 253: 167–179.
- [13] 李贤庆, 王哲, 郭曼, 等. 黔北地区下古生界页岩气储层孔隙结构特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(06): 1172–1183. [LI X Q, WANG Z, GUO M, et al. Pore structure characteristics of the Lower Paleozoic formation shale gas reservoir in northern Guizhou [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(06): 1172–1183.]
- [14] 王濡岳, 龚大建, 冷济高, 等. 黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层发育特征: 以岑巩区块为例[J]. *地学前缘*, 2017, 24(06): 286–299. [WANG R Y, GONG D J, LENG Q G, et al. Developmental characteristics of the Lower Cambrian Niutitang shale reservoir in Northern Guizhou area: A case study in the Cengong block[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(06): 286–299.]
- [15] 唐玄, 郑逢赞, 梁国栋, 等. 黔北寒武系牛蹄塘组页岩孔隙分形表征[J]. *地学前缘*, 2023, 30(03): 110–123. [TANG X, ZHEN P Z, LAING G D, et al. Fractal characterization of pore structure shale in northern Guizhou, southwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(03): 110–123.]
- [16] 李一鸣, 刘达东, 冯霞, 等. 黔北地区五峰组—龙马溪组海相页岩储层非均质性特征及其控制因素[J]. *中国地质*, 2024, 51(03): 780–798. [LI Y M, LIU D D, FENG X, et al. Heterogeneity characteristics and its controlling factors of marine shale reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Formation in the Northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 2024, 51(03): 780–798.]
- [17] 刘达东, 赵帅, 田辉, 等. 雪峰隆起西缘下寒武统牛蹄塘组斜坡相海相页岩有机质富集机制[J]. *石油科学通报*, 2024, 9(06): 853–865. [LIU D D, ZHAO S, TIAN H, et al. Enrichment mechanisms of organic matter in the marine slope facies shales from the Niutitang Formation in the western Xuefeng Uplift[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(06): 853–865.]
- [18] 刘达东, 田辉, 范青青, 等. 黔北地区复杂构造区下古生界页岩气成藏地质条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2025, 45(02): 51–62. [LIU D D, TIAN H, FAN Q Q, et al. Geologic conditions and exploration prospects of the lower Paleozoic shale gas reservoirs in the northern Guizhou complex structural area, SW China[J]. *Natural Gas Industry*, 2025, 45(2): 51–62.]
- [19] 连梦利, 刘达东, 林瑞钦, 等. 黔北地区五峰组—龙马溪组页岩沉积环境及有机质富集机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(09): 3756–3772. [LIAN M L, LIU D D, LIN R Q, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of Wufeng—Longmaxi shale in the northern Guizhou area[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3756–3772.]
- [20] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(07): 1035–1053. [SHU L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(07): 1035–1053.]
- [21] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553–1582. [ZHANG G W, GUO A L, WANG Y J, et al. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 56: 1804–1828.]
- [22] 马勇, 钟宁宁, 黄小艳, 等. 聚集离子束扫描电镜(FIB-SEM)在页岩纳米级孔隙结构研究中的应用[J]. *电子显微学报*, 2014, 33(03): 251–256. [MA Y, ZHONG N N, HUANG X Y, et al. The application of focused ion beam scanning electron microscope (FIB-SEM) to the nanometer-sized pores in shales[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2014, 33(03): 251–256.]
- [23] HEMES S, DESBOIS G, URAI J L, et al. Multi-scale characterization of porosity in Boom Clay (HADES-level, Mol, Belgium) using a combination of X-ray μ -CT, 2D BIB-SEM and FIB-SEM tomography[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015, 208: 1–20.
- [24] MANDELBROT B B, WHEELER J A. The Fractal Geometry of Nature[J]. *American Journal of Physics*, 1983, 51(03): 286–287.
- [25] LI Q, LIU D, CAI Y, et al. Scale-span pore structure heterogeneity of high volatile bituminous coal and anthracite by FIB-SEM and X-ray μ -CT[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 81: 103443.
- [26] REICH M H, SNOOK I K, WAGENFELD H K. A fractal interpretation of the effect of drying on the pore structure of Victorian brown coal[J]. *Fuel*, 1992, 71, 669–672.
- [27] FAN Y, LIU K, YU L, et al. Assessment of multi-scale pore structures and pore connectivity domains of marine shales by fractal dimensions and correlation lengths[J]. *Fuel*, 2022, 330: 125463. MANDELBROT B B, PASSOJA D E, PAULLAY A J. Fractal character of fracture surfaces of metals[J]. *Nature*, 1984, 308(5961): 721–722.
- [28] ZHANG Q, DONG Y, TONG S. Pore-type-dependent fractal features of shales and implications on permeability[J]. *FRACTAL AND FRACTIONAL*, 2023, 7(11): 803.
- [29] XIE S, CHENG Q, LING Q, et al. Fractal and multifractal analysis of carbonate pore-scale digital images of petroleum reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(2), 476–485.

- [30] PFEIFER P, OBERT M, COLE M. Fractal BET and FHH theories of adsorption: a comparative study[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1989, 423(1864), 169–188.
- [31] IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), Physical chemistry division commission on colloid and surface chemistry, subcommittee on characterization of porous solids. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739–1758.
- [32] 薛子鑫, 姜振学, 郝绵柱, 等. 川南深层页岩有机质石墨化对储层孔隙的控制作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(09): 3532–3544. [Controlling effect of organic matter graphitization on reservoir pore structure in deep shale reservoirs, southern Sichuan[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(09): 3532–3544.]
- [33] HOLZER L, MUENCH B, WEGMANN M, et al. FIB-Nanotomography of particulate systems – Part I: Particle shape and topology of interfaces[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(08): 2577–2585.
- [34] 王晓琦, 金旭, 李建明, 等. 聚焦离子束扫描电镜在石油地质研究中的综合应用[J]. 电子显微学报, 2019, 38(03): 303–319. [WANG X Q, J X, LI J M, et al. FIB-SEM applications in petroleum geology research[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2019, 38(03): 303–319.]
- [35] NING S, XIA P, HAO F, TIAN J, et al. Pore fractal characteristics between marine and marine–continental transitional black shales: A case study of Niutitang Formation and Longtan Formation[J]. Fractal and Fractional, 2018, 8(5), 288.

(编辑 付娟娟)

第一作者: 范青青 (1993年—), 博士研究生, 从事盆地流体地球化学研究, 251769486@qq.com。

通信作者: 刘达东 (1987年—), 博士, 副研究员, 从事非常规油气地质评价研究, liudd@cup.edu.cn。