

皖南地区古生界页岩孔隙特征及影响因素

张明扬^{1,2}, 李贤庆^{1,2}, 王哲^{1,2}, 董泽亮^{1,2},
郭曼^{1,2}, 牛海岩^{1,2}, 郭俊枫²

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了评估下扬子皖南地区古生界页岩气储层性质, 应用扫描电子显微镜、高压压汞法、N₂和CO₂气体吸附法, 对皖南地区古生界页岩孔隙特征和孔隙结构进行研究, 并探讨页岩孔隙发育的主要影响因素。结果表明, 皖南地区古生界页岩孔隙度和渗透率低, 页岩样品中常见粒间孔、凝絮孔、溶蚀孔、基质晶间孔和有机质孔, 并且发育微米-纳米级孔隙。古生界页岩孔隙中50%以上为微孔和介孔; 孔隙结构主要为圆柱孔、狭缝型孔和混合型孔, 平均孔径范围为4.17~12.06 nm。页岩孔容和比表面积随着有机碳(TOC)含量的增大而增大; 页岩孔隙度随着有机质成熟度(R_o)的增大而减小; 页岩孔容随着黏土矿物含量的增加而增大, 随着脆性矿物含量的增加而减小。

关键词: 页岩气储层; 孔隙特征; 孔隙结构; 影响因素; 古生界页岩; 皖南地区

中图分类号: TE122.2; P168.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2016)01-0172-09

Pore Characteristics and the Controlling Factor of the Paleozoic Shale in the South Anhui

ZHANG Ming-yang^{1,2}, LI Xian-qing^{1,2}, WANG Zhe^{1,2}, DONG Ze-liang^{1,2},
GUO Man^{1,2}, NIU Hai-yan^{1,2}, GUO Jun-feng²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to assess the property of the Paleozoic shale gas reservoir in the south Anhui of Yangtze region, based on the scanning electron microscopy, high pressure mercury-injection, N₂ and CO₂ gas adsorption methods, the pore characteristics and structures of shale samples from the Paleozoic shales in the South Anhui were studied, and the controlling factors of pores development were discussed. The results show that the porosity and permeability of shale samples are low, and the microscopic pores mainly include inter-grain pores, floe pores, dissolution pores, matrix intergranular pores and organic pores, and the micro-nano scale pores are well developed in these shales. The main pore types in the Paleozoic shales are micropores and mesopores, which account for over 50%. The pore structure of shale is dominated by the parallel-plate pore, cylinder pore and mixed pore, and the average size is about 4.17–12.06 nm. The pore volume and specific surface area increase with the increasing of total organic carbon content (TOC). The porosity of shale reduces as the vitrinite reflectance (R_o) increases. The pore volume increases with the increasing of clay mineral content, but decreases with the increasing of brittle mineral content.

收稿日期: 2015-03-30; 改回日期: 2015-10-30; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB214702); 国家自然科学基金项目(41572125); 国土资源部公益性行业科研专项基金项目(201311022); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110023110017)。

作者简介: 张明扬, 男, 硕士研究生, 1988年出生, 地质工程专业, 从事页岩气地质、地球化学方面的研究工作。

Email: 389123155@qq.com。

通信作者: 李贤庆, 男, 教授, 博士生导师, 1967年出生, 矿产普查与勘探专业, 从事煤油气地质、有机地球化学和有机岩石学等方面的教学与科研工作。Email: lixq@cumt.edu.cn。

Key words: shale gas reservoir; pore characteristic; pore structure; controlling factor; Paleozoic shale; south Anhui

0 引言

页岩气储层不同于常规天然气储层，通常以吸附态赋存于黏土矿物颗粒和有机质表面，以游离态赋存于页岩孔裂隙中，因而页岩孔隙特征研究对于页岩气赋存富集具有重要的影响^[1-3]。皖南地区古生界富有机质黑色页岩厚度大、成熟度较高，具备较好的页岩气成藏条件，近年来其页岩气资源潜力受到重视，前人对皖南地区古生界页岩的研究工作主要侧重于页岩沉积环境、地球化学特征、页岩气成藏条件与资源潜力方面的研究^[4-8]，针对皖南地区古生界页岩孔隙特征和孔隙结构的研究较少，研究程度低。开展皖南地区页岩孔隙特征研究有助于：(1)研究该区古生界页岩孔隙类型，了解页岩气赋存的主要空间；(2)分析皖南古生界页岩孔隙发育的主要影响因素。本文将综合运用扫描电子显微镜、高压压汞法、N₂和CO₂气体吸附法等多种实验方法，对皖南地区古生界页岩样品孔隙特征和孔隙结构进行研究，分析古生界页岩孔隙发育的主要影响因素，以期皖南地区古生界页岩气储层有效评价提供依据。

1 样品与实验方法

皖南地区位于下扬子地块西南部，经历了多期次的构造运动，主要包括印支—燕山早期的强烈挤压改造和燕山—喜马拉雅期的拉张改造^[9]。该区古生界广泛发育沉积海相和海陆交互相地层，如图1所示^[4]。本文研究样品均采自皖南地区新鲜露头剖面，采样点分布见图1，岩性为黑色页岩、碳质页岩、硅质页岩和灰质页岩。

皖南地区古生界页岩样品矿物成分主要为石英、黏土和长石(表1)，其中二叠系、奥陶系—志留系和寒武系页岩中石英含量分别为48.6%~61.8%(平均55.2%)、33.2%~53.7%(平均40.7%)和62.9%~89.2%(平均72.5%)，黏土矿物含量分别为37.3%~43.1%(平均40.2%)、33.8%~57.6%(平均49.5%)和10.8%~35.9%(平均23.2%)，长石含量各为0.9%~6.4%(平均3.7%)、5.8%~9.8%(平均7.4%)和0~2.2%(平均0.8%)。该区90%以上古生界页岩样品有机碳(TOC)含量大于1.5%，表明页岩样品的

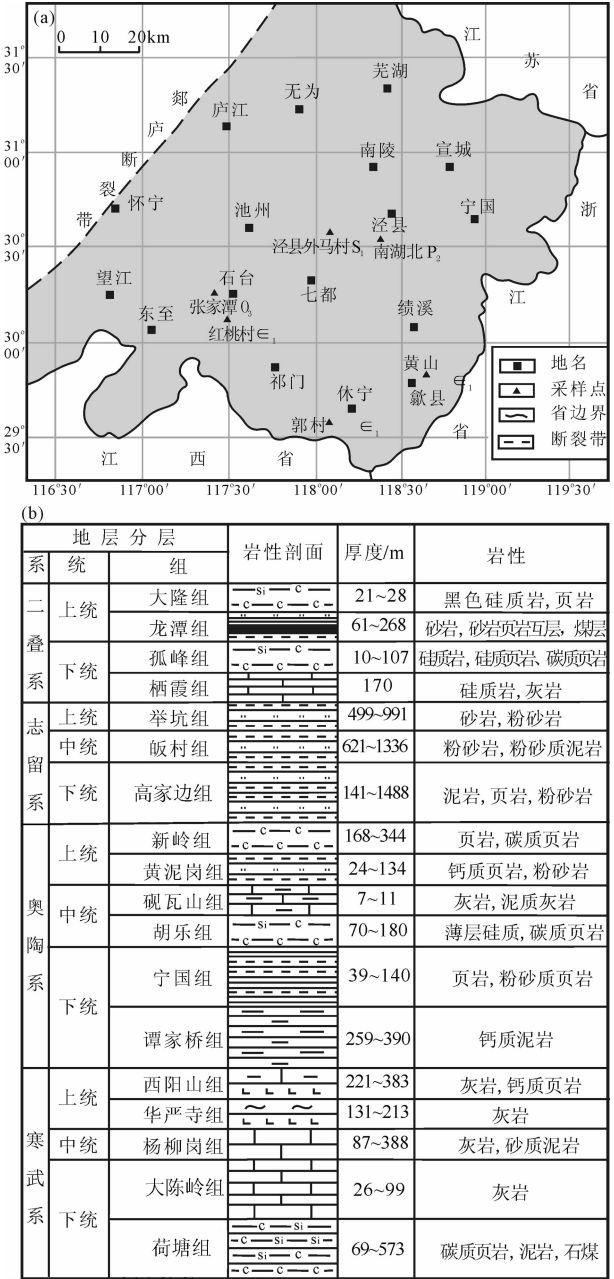


图1 皖南地区采样点分布(a)与古生界地层柱状图(b)
Fig.1 Distribution of samples and stratigraphic column of the Paleozoic in the south Anhui

有机质丰度较高；古生界页岩热演化程度普遍较高，样品R_o大多超过2.0%，处于过成熟阶段。

选取皖南地区古生界富有机质页岩样品，进行扫描电子显微镜、高压压汞、N₂和CO₂吸附实验分析。扫描电镜使用仪器为VEFALSH扫描电子显微镜，采用离子溅射仪(SCD500)镀金，按照

表 1 皖南地区古生界页岩地球化学特征和矿物成分含量

样品号	剖面	层位	TOC/%	R _o /%	全岩矿物组成含量/%					脆性矿物 含量/%
					黏土	石英	长石	碳酸盐	其它	
DL-01	南湖北	P ₂ d	6.98	2.33	43.1	48.6	6.4	1.8	0.1	55.0
LT-01	南湖北	P ₂ d	4.54	2.57	37.3	61.8	0.9	微	微	74.9
XX-01	外马村	S ₁ x	1.04	2.77	57.6	35.3	6.5	0.6	0.6	41.6
XX-04	外马村	S ₁ x	1.43	2.14	57.2	33.2	5.8	3.8	微	52.7
WF-02	石台张家潭	O ₃ w	1.84	1.86	33.8	53.7	9.8	2.7	微	68.1
HT-03	歙县雄村	ε ₁ ht	13.00	2.98	20.6	71.8	微	微	7.6	71.8
HT-04	歙县雄村	ε ₁ ht	18.10	2.50	23.7	65.2	2.2	微	8.9	67.4
HT-08	歙县金川乡	ε ₁ ht	1.93	2.10	24.9	73.5	1.6	微	微	75.1
HT-09	歙县金川乡	ε ₁ ht	3.06	2.55	35.9	62.9	微	1.2	微	62.9
HT-13	郭村	ε ₁ ht	6.32	3.16	10.8	89.2	微	微	微	89.2

注：P₂d 为二叠系大隆组，S₁x 为志留系霞乡组，O₃w 为奥陶系五峰组，ε₁ht 为寒武系荷塘组；R_o 为等效镜质体反射率值；“微”表示含量小于 0.1%；脆性矿物 = 石英 + 长石 + 方解石 + 白云石。

SY/T5162-1997 标准进行扫描电镜观察分析。高压压汞实验分析仪器为 PoreMaster GT60 压汞仪，页岩样品在 110 ℃ 下烘干，在低压下抽真空，将液态汞注入样品。气体吸附实验采用的仪器为 NOVA 4200e 比表面及孔隙分析仪，样品在 150 ℃ 条件下烘干，用 N₂ 或 CO₂ 为吸附质气体，测定页岩样品的吸附量。

2 实验结果与讨论

2.1 孔隙度和渗透率特征

岩石孔隙是页岩气赋存的主要空间，孔隙度是确定游离气含量的关键参数，对页岩的含气量和可采储量评价至关重要^[10]。图 2 为皖南地区古生界页岩样品的孔隙度分布柱状图，表 2 则是皖南地区古生界页岩孔隙度和渗透率特征及与北美 Barnett 页岩的比较。总体上看，皖南地区古生界

页岩样品的孔隙度和渗透率均较低。由图 2 和表 2 可以看出，皖南地区二叠系页岩孔隙度范围在 1.78% ~ 8.79% 之间，平均 5.29%；奥陶系—志留系页岩孔隙度范围为 4.25%

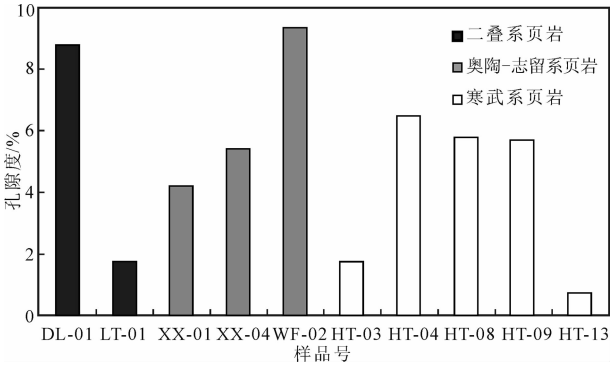


图 2 皖南地区古生界页岩样品的孔隙度分布柱状图
Fig. 2 The porosity histogram of the Paleozoic shale samples in the south Anhui

表 2 皖南地区古生界页岩孔隙度和渗透率特征及与北美地区页岩比较

古生界页岩	孔隙度/%	渗透率/mD	数据来源
皖南地区二叠系页岩	2.16-9.29/5.73	0.01-1.01/0.04	本次研究
皖南地区二叠系页岩	0.37-5.29	0.04	黄保家等, 2013 ^[4]
下扬子地区二叠系页岩	1.98-7.10/5.37	—	潘磊等, 2013 ^[8]
皖南地区奥陶系—志留系页岩	4.25-9.33/6.33	0.01-1.23/0.74	本次研究
皖南地区高家边组页岩	0.90-3.34	0.75	黄保家等, 2013 ^[4]
皖南地区寒武系页岩	0.76-6.48/4.09	0.01-1.03/0.05	本次研究
宣城地区荷塘组页岩	>3.0	>1.02	唐显春等, 2011 ^[11]
皖南地区荷塘组页岩	0.03-0.95/0.49	0.32-0.90/0.65	黄晓伟, 2014 ^[12]
北美地区 Barnett 页岩	4.0-5.0/4.3	0.01	Jarvie 等, 2007 ^[13]
北美地区 Woodford 页岩	3.0-9.0	—	Jarvie 等, 2007 ^[13]

注：表中数据格式为“最小值-最大值/平均值”；渗透率单位 1 mD = 10⁻³ μm²。

~9.33%，平均 6.33%；寒武系页岩孔隙度范围为 0.76% ~6.48%，平均 4.09%。对比来看，寒武系页岩孔隙度最高，奥陶系—志留系页岩孔隙度次之，二叠系页岩孔隙度最低。

皖南地区二叠系页岩渗透率介于 0.01 ~ 1.01 mD($1\text{ mD} = 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$)之间，平均 0.04 mD；奥陶系—志留系页岩渗透率介于 0.01 ~ 1.23 mD 之间，平均 0.74 mD；寒武系页岩渗透率较低，介于 0.01 ~ 1.03 mD 之间，平均 0.05 mD。与北美地区页岩相比，皖南地区古生界页岩渗透率高于北美页岩，其中奥陶系—志留系页岩渗透率高于寒武系页岩，二叠系页岩渗透率最低。

2.2 孔隙类型特征

扫描电镜观察表明，皖南地区古生界页岩样品中存在多种微观孔隙类型。LOUCKS 等人^[14]在研究页岩储层时提出了一套孔隙分类方案，将页岩孔隙划分为粒间孔、粒内孔和有机质孔。结合 LOUCKS 等人的分类方案，本文把皖南地区古生界页岩孔隙分为无机孔和有机质孔两类。

2.2.1 无机孔

无机孔包括粒间孔和粒内孔。粒间孔是指在成岩过程中，石英、方解石和长石等脆性矿物之间、岩屑颗粒之间以及矿物颗粒与岩屑颗粒之间相互支撑和叠置，从而形成的形态复杂的孔隙。扫描电镜下观察显示，皖南地区古生界页岩样品的粒间孔主要包括：(1)黄铁矿矿物颗粒之间的孔隙(图 3(a))，粒间孔直径小于 5 μm ，以 0.1 ~ 2 μm 孔隙为主；(2)黏土矿物以不同方向排列而形成的网格状或条带状的凝絮孔(图 3(b))，凝絮孔大小变化较大，孔径从纳米级至数微米级，孔径以大于 2 μm 为主；(3)基质晶间孔(图 3(c))，最常见的为片状黏土矿物形成的层间孔和黄铁矿颗粒晶间孔，孔径小于 500 nm，这些孔具有孔径小、数量多、吸附性较强的特点；(4)长石与方解石之间的孔隙(图 3(d))，孔径一般在 500 nm 至 1.5 μm 之间。粒内孔是指矿物颗粒内的孔隙，主要是石英、方解石和白云石等易溶矿物的溶蚀作用而产生的孔隙。溶蚀孔的形状不规则，成群发育，

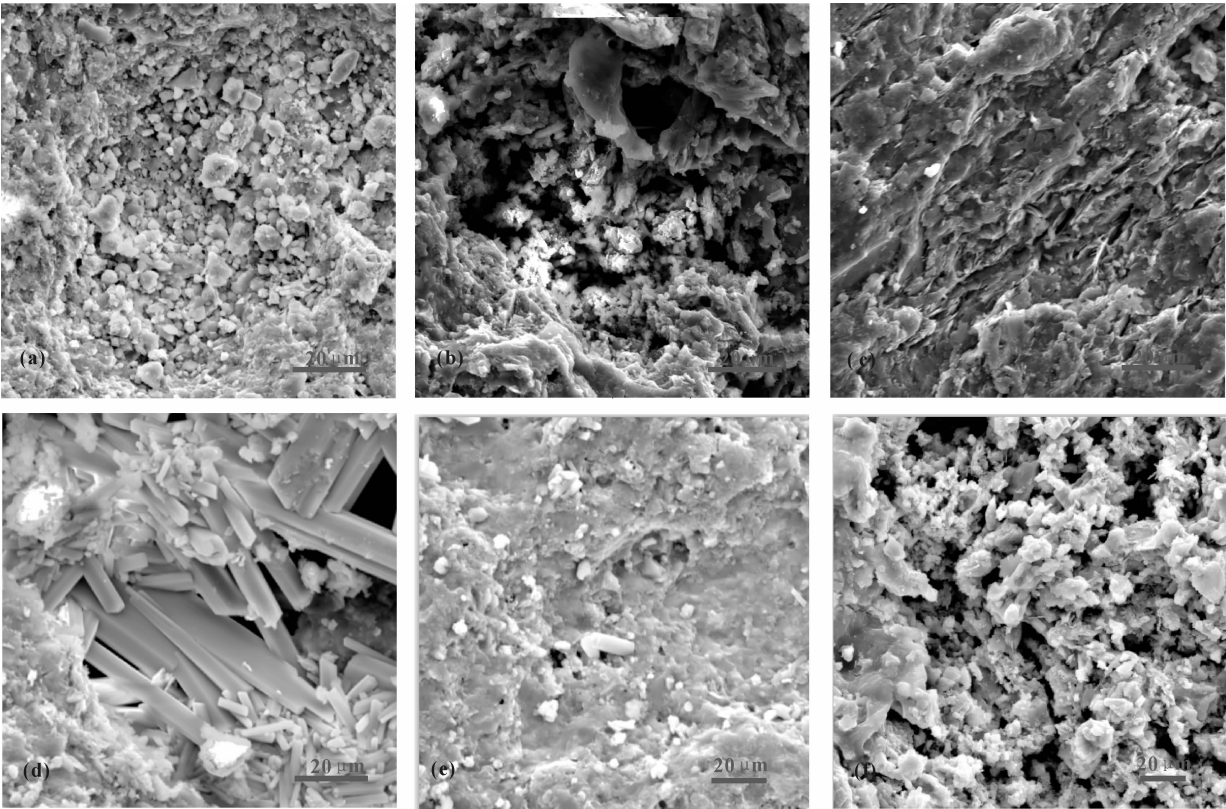


图3 皖南地区古生界样品中无机孔的扫描电镜图像

Fig. 3 SEM images of inorganic pores of the Paleozoic samples in the south Anhui

(a) 黄铁矿粒间孔，DL-04，二叠系大隆组碳质泥岩；(b) 凝絮孔，HT-09，寒武系荷塘组硅质页岩；(c) 基质晶间孔，WF-01，奥陶系五峰组黑色硅质页岩；(d) 粒间孔，LT-01，二叠系龙潭组硅质页岩；(e) 矿物溶蚀孔，LT-01，二叠系龙潭组硅质泥岩；(f) 长石溶蚀孔，NG-03，奥陶系宁国组黑色硅质页岩

其特点是孔隙壁呈曲线；溶蚀孔孔径小于 1 μm ，主要集中在 50 ~ 500 nm 之间(图 3(e)和(f))，为吸附气提供重要的赋存场所。

2.2.2 有机质孔

页岩有机质孔主要包括有机质化石孔和有机质生烃孔。有机质化石孔是页岩中有机化石物质在成岩过程中，随着温度和压力不断变化，由化石物质体内软组织腐烂溶蚀后而产生的孔隙。北美地区 Barnett 页岩和 Woodford 页岩存在有大量与生物化石有关的孔隙，笔者在皖南地区古生界页岩样品中观察到较多的硅藻化石孔(图 4)，据叶玥豪等^[15]研究，硅藻化石孔起源于前寒武纪，这种孔隙的特点是外壳坚硬，内部有机质经腐烂形成许多有规则的小圆孔，且连通性好。有机质生烃孔是伴随着有机质热演化和生烃过程产生的，常呈不规则状、气泡状或椭圆形。有机质孔的大小、形态和分布情况，通常与页岩有机质丰度、类型、热演化程度有关。一般来说，热演化程度

越高，有机质生烃孔越多。皖南地区古生界页岩样品富含有机质($\text{TOC} > 1.5\%$)，热演化程度处于过成熟阶段($R_o > 2.0\%$)，因此皖南地区古生界页岩存在较多有机质孔(图 4)，扫描电镜下观察也证实了这一点。

2.3 孔隙结构特征

孔隙结构是指页岩中孔隙的形态、大小、孔径分布及连通性。国际纯化学和应用化学协会(IUPAC)推荐的孔隙孔径为：微孔(孔径 $< 2\text{ nm}$)、介孔(孔径 $= 2 \sim 50\text{ nm}$)和宏孔(孔径 $> 50\text{ nm}$)。针对 3 种不同孔隙选取相应方法中最优结果孔段进行分析：微孔采用 CO_2 气体吸附法，介孔采用 N_2 气体吸附法，宏孔采用高压压汞法。

皖南地区古生界页岩各样品 N_2 吸附曲线在形态上各不相同，但总体上呈 S 型(图 5(a))，类似于 IUPAC 定义的 II 型吸附线和 H_3 回滞环型，兼具 H_4 型特征^[16]。曲线在低压段($P/P_0 = 0.05 \sim 0.35$)为单层吸附，吸附量增加较缓慢；在中压段(P/P_0

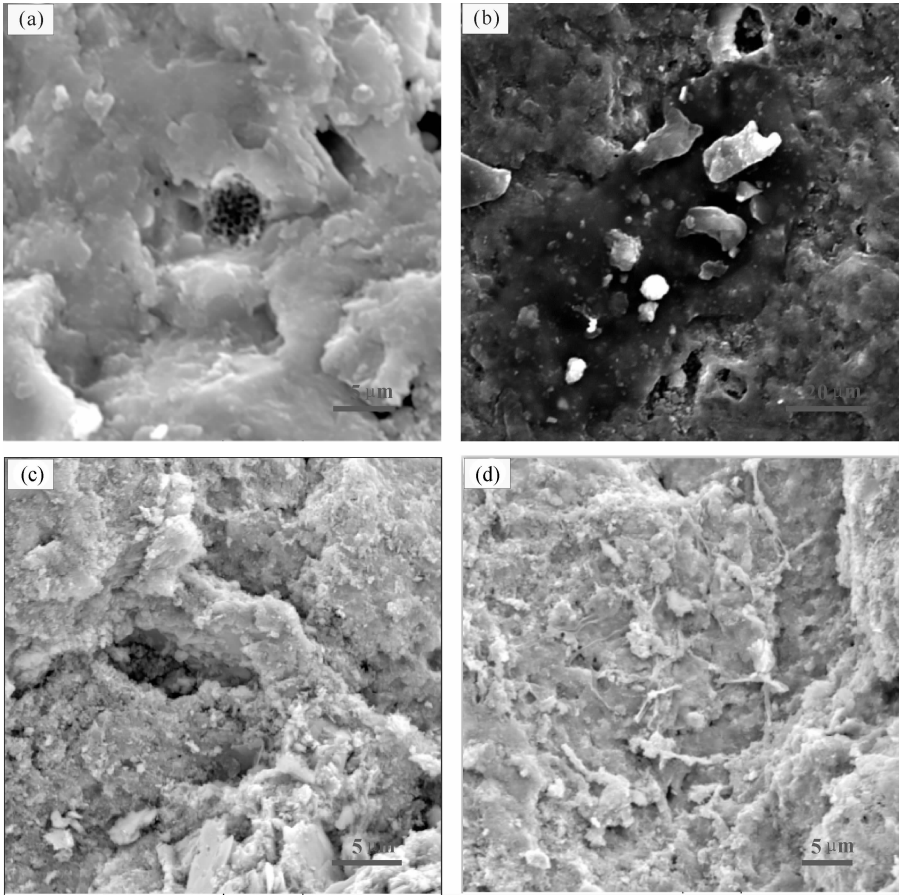


图 4 皖南地区古生界样品中有机质孔的扫描电镜图像

Fig. 4 SEM images of organic pores of the Paleozoic samples in the south Anhui

(a) 硅藻化石孔，HT-09，寒武系荷塘组硅质页岩；(b) 有机质生烃孔，LT-01，二叠系龙潭组硅质页岩；(c) 生物体腔孔，WF-02，奥陶系五峰组碳质页岩；(d) 格架孔，HT-13，寒武系荷塘组碳质泥岩

= 0.35 ~ 0.80) 为多分子层吸附, 吸附量增加较快, 且出现回滞环; 在高压段 ($P/P_0 = 0.80 \sim 0.90$) 吸附量急剧增加, 反映出该区古生界页岩孔隙结构类型主要为圆柱孔、狭缝型孔和混合型孔结构。

皖南地区古生界三套层系页岩样品 N_2 吸附曲线存在一定的差异: 二叠系页岩样品回滞环线具有 H_3 和 H_4 型特征, 表明孔隙结构不规整, 包括平板狭缝、裂缝和楔形结构, 且存在大量的介孔和微孔; 奥陶系—志留系页岩样品回滞环线较统一, 为 H_3 型回线; 寒武系页岩样品回滞环线兼具 H_3 和 H_4 型特征, 但 HT-04 样品在相对压力 0.2 处吸-脱附曲线不闭合, 说明存在较多微孔(图 5(a))。

皖南地区古生界页岩样品 CO_2 吸附曲线(图 5(b))主要表现为微孔吸附, 吸附量整体增加不大, 随着相对压力的增大逐渐接近饱和, 类似于 IUPAC 定义的 I 型吸附曲线, 反映页岩中微孔填充现象, 接近饱和的气体吸附量等于微孔的体积。

研究表明, 皖南地区古生界页岩样品中微孔和介孔的孔容与比表面积所占比例均较高(图 6), 均占到 50% 以上, 构成了页岩气赋存的主体。二叠系页岩微孔和介孔的孔容、比表面积分别占 51%、92%; 奥陶系—志留系页岩微孔和介孔的孔容、比表面积分别占 67%、80%; 寒武系页岩微孔和介孔的孔容、比表面积各占 58%、86%。对比而言, 微孔孔容为寒武系页岩 > 二叠系页岩 > 奥陶系—志留系页岩, 介孔孔容为二叠系页岩 > 奥陶系—志留系页岩 > 寒武系页岩。究其原因, 微孔主要由有机质孔贡献, 皖南地区寒武系页岩有机碳含量较二叠系页岩和奥陶系—志留系页岩要高, 故寒武系页岩微孔孔容最大。扫描电镜观察证实, 该区古生界页岩存在相当数量的溶蚀孔, 溶蚀孔是介孔的主要贡献者, 而溶蚀孔的发育与碳酸盐、长石、石英等矿物含量相关, 从而造成二叠系页岩介孔孔容最大。

皖南地区古生界页岩样品平均孔径范围为

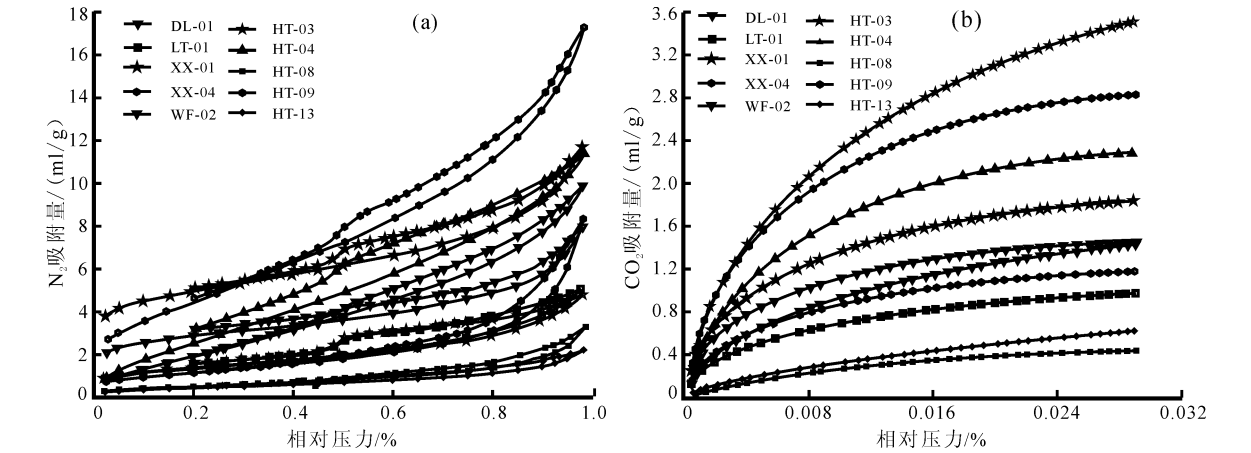


图 5 皖南地区古生界页岩样品的 N_2 和 CO_2 吸附-脱附等温线
Fig. 5 N_2 and CO_2 adsorption-desorption isotherms from the Paleozoic shale samples in the south Anhui

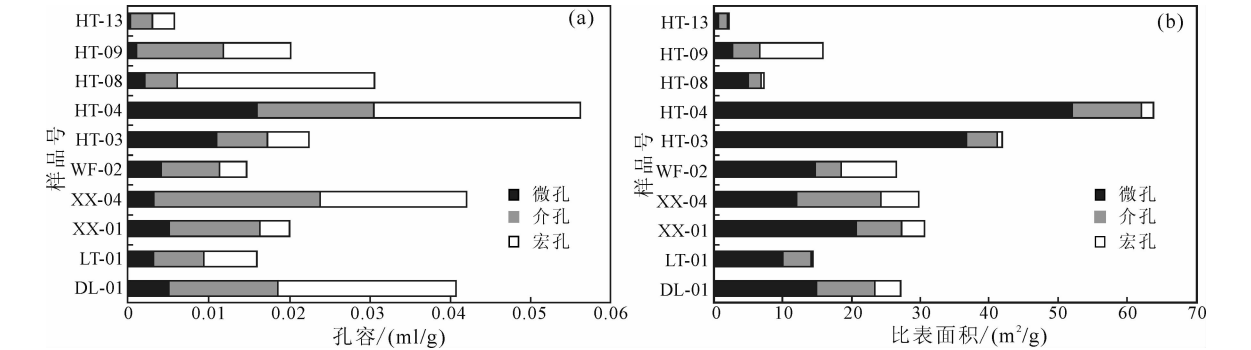


图 6 皖南地区古生界页岩微孔、介孔、宏孔孔容和比表面积分布
Fig. 6 Distribution of pore volume and surface area of micro-, meso- and macro-pores of the Paleozoic shales in the south Anhui

4.17 ~ 12.06 nm, 这与 CHALMERS 等^[17] 针对北美地区主要产气页岩的分析结果处在同一个数量级范围, 但其平均孔径较大, 可能是由于皖南地区古生界页岩热演化程度高(达过成熟阶段)、页岩中纳米级孔向更大孔径孔转化的结果。

对微孔、介孔、宏孔以及总孔分别作了孔容与比表面积的相关性分析(图 7), 分析结果表明,

皖南地区古生界页岩中微孔、介孔的孔容与比面积相关性较好, 说明没有微裂隙的影响, 主要反映纳米级孔隙信息, 而宏孔孔容与比表面积相关性差。

2.4 页岩孔隙发育的影响因素

页岩孔隙发育受地质条件的控制, 主要受页岩有机质、无机成分和热演化程度的影响, 具体

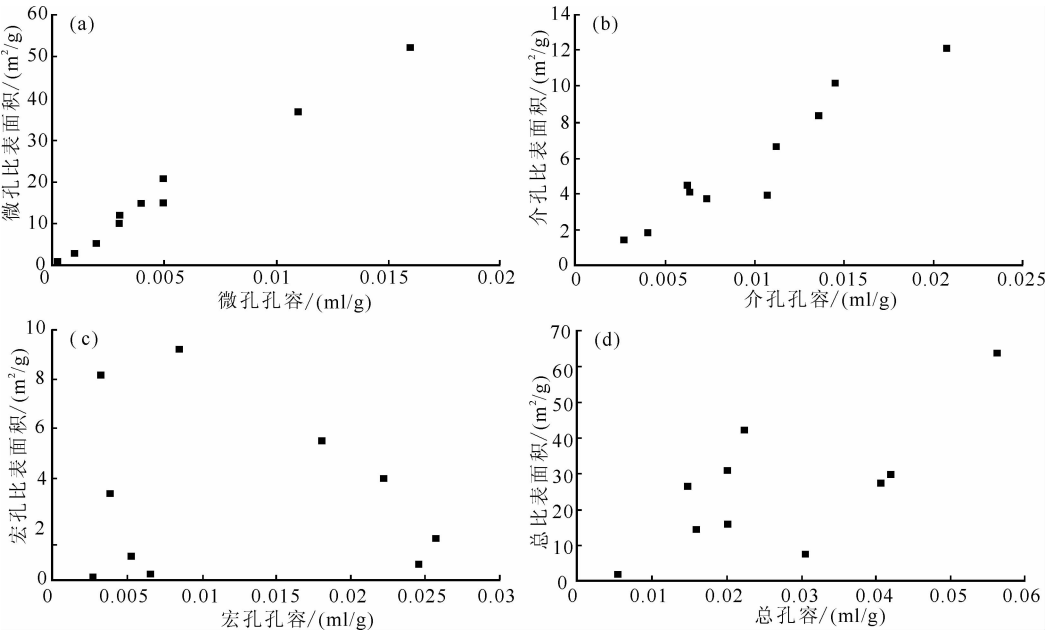


图 7 皖南地区古生界页岩孔容与比表面积的相关性

Fig. 7 Relationship between pore volume and surface area of the Paleozoic shale in the south Anhui

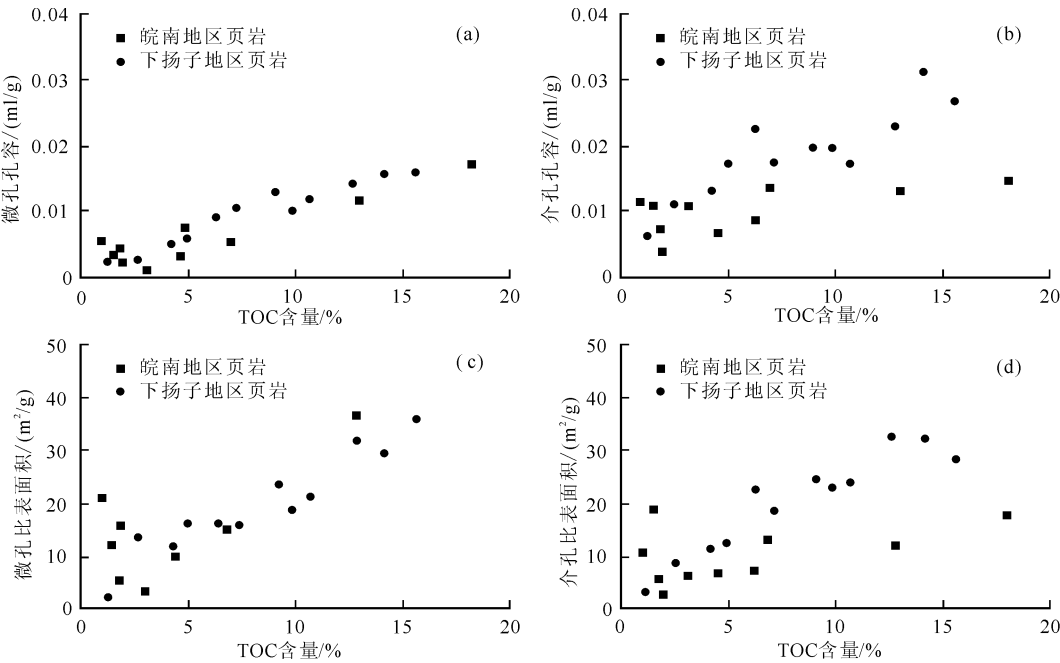


图 8 页岩不同类型孔的孔容与比表面积与 TOC 含量关系

(皖南地区古生界页岩样品数据来自本次研究, 下扬子地区页岩数据引自文献[8])

Fig. 8 Relationship among pore volume, surface area of different type pores and TOC content

表现在有机碳 (TOC) 含量、矿物成分含量和成熟度 (R_o) 等因素。研究页岩孔隙发育的影响因素, 对于皖南地区古生界页岩气储层有效评价与可采性研究具有重要意义。

2.4.1 有机碳 (TOC) 含量的影响

有机碳 (TOC) 含量是影响页岩孔隙的主要因素之一。页岩中有机质生烃, 有利于孔隙的形成。有机质孔是在有机质生烃过程中形成的, 随着热演化程度升高而逐渐增多。每损失 35% 的有机质就会形成 4.9% 的净有效储集空间^[13,18]。页岩不同类型孔的孔容、比表面积与 TOC 含量的相关性 (图 8) 表明, 皖南地区古生界页岩微孔和介孔孔容、比表面积与 TOC 含量呈现明显的相关关系, 这与田华等^[19]、陈尚斌等^[20] 指出的页岩有机质含量是控制微孔、介孔发育的主要因素的认识一致。

2.4.2 成熟度 (R_o) 的影响

皖南地区古生界页岩样品成熟度高, 达到了过成熟阶段, 且古生界页岩孔隙度低。由图 9 可以看出, 随着成熟度 (R_o) 的增大, 页岩孔隙度逐渐降低, 这是由于在沉积成岩过程中, 随着埋深加大, 温度、压力的升高, 页岩中孔隙体积逐渐减小, 其中各类孔隙也随之发生相应的变化, 造成孔隙度不断降低。但皖南地区古生界页岩的总孔容、总比表面积与成熟度 (R_o) 相关性较差, 可能还受页岩矿物成分、含水量等的影响。

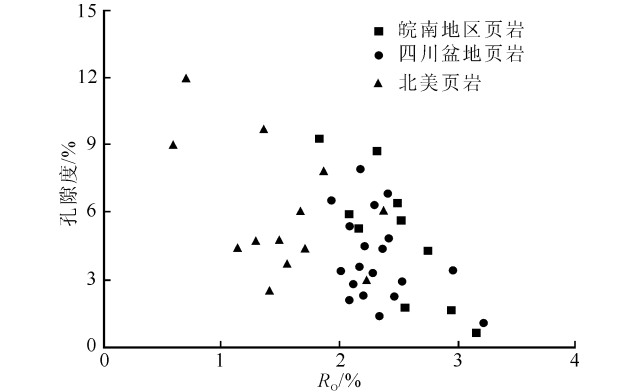


图 9 页岩样品的孔隙度随成熟度 (R_o) 变化 (皖南地区古生界页岩样品数据来自本次研究, 四川盆地和北美页岩样品数据引自文献[21])

Fig. 9 The change of porosity with maturity (R_o) in the shale samples

2.4.3 矿物成分含量的影响

皖南地区古生界页岩黏土矿物主要成分为伊利石、高岭石、绿泥石和伊蒙混层, 不含蒙脱石。图 10(a) 和 (b) 为皖南地区古生界页岩微孔、介孔孔容与黏土矿物含量的关系图, 两者之间呈现一定的正相关关系, 但在微孔孔容与黏土矿物含量的关系图中, 出现了两个异常点 (图 10(a) 样品 HT-03 和 HT-04), 其原因可能是由于这两个样品的 TOC 含量异常高。而上述研究表明, 有机质丰度越大, 微孔孔容也越大。皖南地区古生界页岩

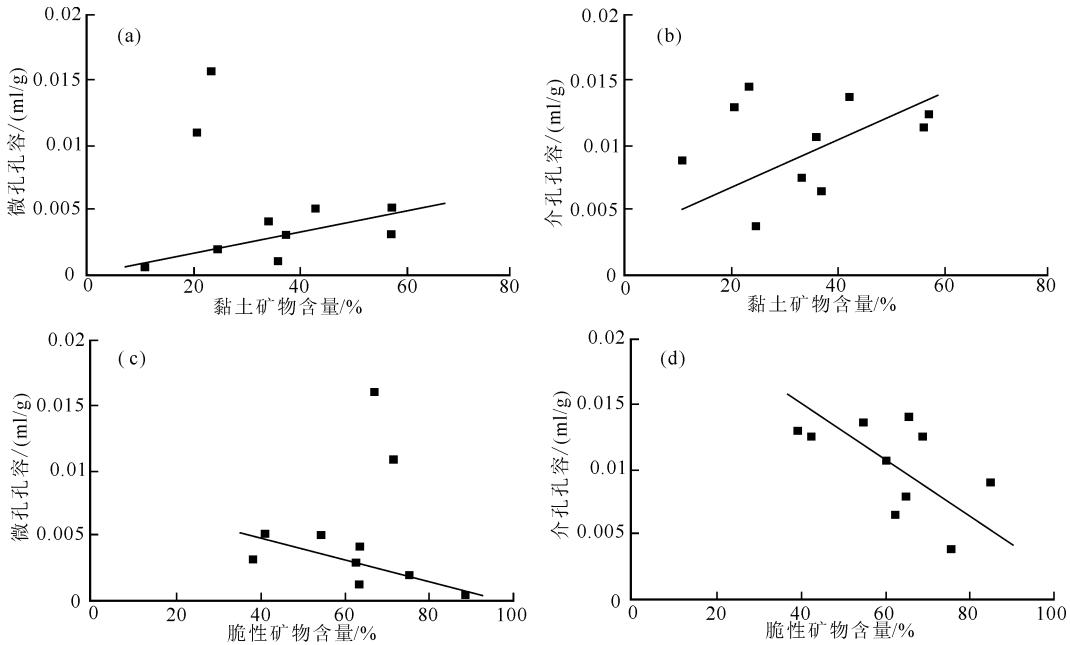


图 10 皖南地区古生界页岩孔容与矿物含量的关系

Fig. 10 Relationship between pore volume and mineral content of the Paleozoic shale in the south Anhui

中脆性矿物含量丰富,且含量高,石英等脆性矿物含量占到40%以上。皖南地区古生界页岩微孔、介孔孔容与脆性矿物含量呈较明显的负相关性(图10(c)和(d))。古生界页岩中的石英、长石、方解石等矿物,容易压裂形成孔裂隙,也可在有机质生烃过程中与有机酸结合形成较多溶蚀孔。皖南地区历经多期次构造活动,形成的溶蚀孔会演化成更大孔径的孔隙,在扫描电镜下也可观察这一点,其孔隙直径可大于50 nm(属于宏孔范畴)。

3 结 论

(1)皖南地区古生界页岩孔隙度和渗透率都较低,但比较而言,寒武系页岩孔隙度最高,奥陶系—志留系页岩孔隙度次之,二叠系页岩孔隙度最低;奥陶系—志留系页岩渗透率最高,寒武系页岩渗透率次之,二叠系页岩渗透率最低。

(2)皖南地区古生界页岩样品存在多种类型微观孔隙,常见粒间孔、凝絮孔、溶蚀孔、基质晶间孔、硅藻化石孔和有机质孔,且皖南地区古生界页岩发育微米—纳米级孔隙,为页岩气赋存富集提供了主要储集空间。

(3)皖南地区古生界页岩中纳米级孔隙以微孔和介孔为主,微孔和介孔的孔容和比表面积比例均较高(占到50%以上),构成了页岩气赋存的主体;孔隙结构主要为圆柱孔、狭缝型孔和混合型孔,平均孔径范围为4.17~12.06 nm。

(4)页岩有机碳(TOC)含量、成熟度(R_o)、矿物成分含量是皖南地区古生界页岩孔隙发育的主要影响因素,页岩孔容和比表面积随着有机碳(TOC)含量的增大而增大;页岩孔隙度随着有机质成熟度(R_o)的增大而减小;页岩孔容随着黏土矿物含量的增加而增大,随着脆性矿物含量的增加而减小。

参考文献:

- [1] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [2] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15–18.
- [3] 李贤庆,赵佩,孙杰,等.川南地区下古生界页岩气成藏条件研究[J].煤炭学报,2013,38(5):864–869.
- [4] 黄保家,施荣富,赵幸滨,等.下扬子皖南地区古生界页岩气形成条件及勘探潜力评价[J].煤炭学报,2013,38(5):

877–882.

- [5] 陈平,张敏强,许永哲,等.下扬子巢湖—泾县地区上二叠统大隆组泥页岩储层特征[J].岩石学报,2013,29(8):2925–2935.
- [6] 张敏强,陆永潮.下扬子西部地区泥页岩特征及气源条件评价[J].中国海上油气,2013,25(2):9–17.
- [7] 吴浩,姚素平,焦堃,等.下扬子区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J].煤炭学报,2013,38(5):870–876.
- [8] 潘磊,陈桂华,徐强,等.下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔隙结构特征[J].煤炭学报,2013,38(5):787–793.
- [9] 朱光,徐嘉伟,刘国生,等.下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制[J].中国区域地质,1999,18(1):73–79.
- [10] 王飞宇,关晶,冯伟平,等.过成熟海相页岩孔隙度演化特征和游离气量[J].石油勘探与开发,2013,40(6):764–768.
- [11] 唐显春,曾辉,张培先,等.宣城地区荷塘组页岩含气性浅析[J].油气藏评价与开发,2011,1(1):78–84.
- [12] 黄晓伟.下扬子皖南地区下寒武统荷塘组页岩气地质特征及含气性分析[D].北京:中国地质大学(北京),2014:39–40.
- [13] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2007, 91(4): 475–499.
- [14] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 2012, 96(6): 1071–1098.
- [15] 叶玥豪,刘树根,孙玮,等.上扬子地区上震旦统一志留统黑色页岩微孔隙特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(6):575–582.
- [16] 辛勤,罗孟飞.催化研究方法[M].北京:科学出版社,2012:10–43.
- [17] CHALMERS G R L, BUSTIN R M. Lower Cretaceous gas shales in northeastern British Columbia, Part II: Evaluation of regional potential gas resource [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2008, 56(1): 22–61.
- [18] 曾祥亮,刘树根,黄文明,等.四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国Fort Worth盆地石炭系Barnett组页岩地质特征对比[J].地质通报,2011,31(2):372–384.
- [19] 田华,张水昌,柳少波,等.压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J].石油学报,2012,33(3):419–427.
- [20] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J].煤炭学报,2012,37(3):438–444.
- [21] 赵佩,李贤庆,田兴旺,等.川南地区龙马溪组页岩气储层微孔隙结构特征[J].天然气地球科学,2014,25(6):947–956.