

文章编号:0253-9993(2013)05-0787-07

下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔隙结构特征

潘磊^{1,2}, 陈桂华³, 徐强³, 肖贤明¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心, 北京 100027)

摘要:应用先进技术与方法,对取自该地区的典型二叠系岩芯样品,进行了系统的地球化学、矿物组成、孔隙度及孔隙结构等方面分析。结果表明,这套二叠系烃源岩孔隙发育,平均孔隙度可达5.37%;纳米级孔隙发育,并以微孔和介孔为主;泥页岩总有机碳含量(TOC)和黏土矿物含量是控制吸附能力和孔隙大小的关键因素。二叠系富有机质泥页岩孔隙度较高,发育大量的纳米级孔隙及具有较大的比表面积,为页岩气储存提供了良好条件。

关键词:下扬子地区;二叠系;页岩气;孔隙结构

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A

Pore structure characteristics of Permian organic-rich shale in Lower Yangtze area

PAN Lei^{1,2}, CHEN Gui-hua³, XU Qiang³, XIAO Xian-ming¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Research Center of CNOOC China Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: In this study, advanced technologies were applied to investigate the geochemistry, mineral compositions, porosity and pore structures of the Permian shale core samples from this area. The results show that the Permian source rocks have an average porosity up to 5.37% and the nanoscale pores are mainly developed as micro- and meso-pores. The total organic carbon (TOC) content and clay mineral content of the shales are key factors to control gas adsorption capacities and pores sizes. The well developed nanopores and large surface area in the Permian organic-rich shale could provide good conditions for shale gas storage.

Key words: Lower Yangtze area; Permian; shale gas; pore structure

下扬子地区的二叠系是南方古生界重要的烃源岩发育层位,分布面积广,在孤峰组、大隆组、龙潭组均含有一定规模的富有机质泥页岩^[1]。据预测,下扬子地区二叠系富有机质泥页岩分布面积达 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度达77~602 m^[2-3]。由于这套地层在下扬子地区埋藏较浅,比较适合页岩气开发^[4],近年来其页岩气资源潜力受到高度重视。前人对下扬子地区二叠系的研究主要侧重于层序地层、沉积环境与常规地球化学等方面^[5-6],对泥页岩储集物性的研究较少,难以对其页岩气资源潜力及工业开发价值进行有效评价。笔者对该区二叠系富有机质泥页岩岩芯样

品,采用低场核磁共振方法测量岩芯样品的总孔隙度,综合运用低压气体吸附共同表征其孔隙结构,结合样品地球化学特征,探讨孔隙结构的主要控制因素。

1 样品及实验方法

本文二叠系12件黑色泥页岩样品取自安徽芜湖地区的两口参数井,全为岩芯样品。样品基础地球化学分析数据见表1。这些样品成熟度较高,Rock-Eval分析 S_2 基本为0。 R_o (油浸镜质组反射率)介于2.32%~2.47%,TOC含量介于1.19%~15.60%。

收稿日期:2013-02-07 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214705);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05008-002-40)

作者简介:潘磊(1987—),男,四川资中人,硕士研究生。Tel:020-85290161, E-mail: panlei672057@126.com。通讯作者:肖贤明(1962—),男,湖南汉寿人,博士生导师。Tel:020-85290176, E-mail: xmxiao@gig.ac.cn

表 1 样品基础地球化学特征

Table 1 Fundamental geochemical characteristics of samples

样品	地层	岩性	TOC 含量/%	R_o /%
PC16	P ₂ d	黑色页岩	12.80	2.36
PC21	P ₂ d	灰黑色页岩	1.19	-
PC45	P ₂ l	灰黑色页岩	4.94	-
PC55	P ₂ l	灰黑色泥岩	2.59	-
PC81	P ₁ g	黑色页岩	15.60	-
PC88	P ₁ g	黑色泥岩	9.12	2.47
QC13	P ₂ d	黑色页岩	9.84	-
QC19	P ₂ d	黑色泥岩	7.23	2.32
QC76	P ₁ g	黑色泥岩	6.29	-
QC86	P ₁ g	黑色页岩	10.70	-
QC88	P ₁ g	黑色泥岩	4.24	-
QC90	P ₁ g	黑色页岩	14.10	2.45

注: R_o 变化范围较小,“-”表示未测定。

样品矿物组成分析使用仪器为 Bruker D8 Advance X-Ray 衍射仪 Cu(单色)。工作电压 4 kV、电流 30 mA、扫描范围 $2\theta=3^\circ\sim 85^\circ$ 、狭缝 1 mm、扫描速度 4 min^{-1} 。根据 Rietveld(1967)提出的半定量原理计算样品中不同矿物组分含量^[7]。

岩芯样品孔隙度测定采用低场核磁共振技术。样品在蒸馏水中真空饱和 8 h,利用纽迈科技 MR Shale NM12(共振频率 11.83 MHz,磁体温度控制在 $31.99\sim 32.01\text{ }^\circ\text{C}$)检测氢核的共振弛豫信号的幅度和速率,反演而得总孔隙度及咽喉孔径分布^[8]。

基于物理吸附性能和毛细管凝聚理论^[9],国际理论与应用化学协会(IUPAC),按孔径大小将多孔物质的孔隙分为:微孔(直径小于 2 nm),介孔(在 $2\sim 50\text{ nm}$),大孔(大于 50 nm)^[10]。

低压气体吸附是研究固体材料孔结构的首选方法^[11],采用 Micromeritics ASAP2020 仪器分析完成。低温低压 N_2 吸附-脱附可测量有效孔径在 $2\sim 100\text{ nm}$,适用于介孔及部分大孔的分析; CO_2 分子作为吸附质,具有分析温度高(273.1 K)、能量强、快速平衡等优点,能够测量有效孔径范围为 $0.35\sim 2\text{ nm}$,更加适用于微孔测量^[10,12-13]。微孔相对于介孔具有更高的吸附能, N_2 分子的相对惰性,难以到达微孔中,但对于介孔测量具有其独特的优越性,故联合两种气体吸附共同表征泥页岩孔隙特征^[11,14]。具体方法如下:称量 $0.5\sim 0.7\text{ g}$ 粉碎至 $250\text{ }\mu\text{m}$ (主要为 $60\sim 120\text{ mesh}$)的样品,在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 真空脱气 8 h,在液氮环境(77.4 K)完成 N_2 等温吸附-脱附分析,相对压力(P/P_0 , P_0 为饱和蒸汽压, $P_0\approx 0.1\text{ MPa}$)为 $0.010\sim 0.998$;采用多点 BET 计算相对压力范围 $0.05\sim 0.20$ 的等效比表面积、BJH 模型计算介孔孔容和平均孔径^[11-13]。真空脱气后进行 4 h 的二次脱气,冰水浴(273.1 K)中完成 CO_2 等温吸附分析,相对压力(P/P_0)为 $1\times 10^{-5}\sim 3.2\times 10^{-2}$;采用单层吸附 Dubinin-Radushkevich(D-R)模型计算微孔等效表面积和微孔孔容(单层吸附能力)^[12-14]。

2 实验结果与讨论

2.1 矿物组分

研究样品中主要矿物为石英,含量为 $8.8\%\sim 71.7\%$,平均 52.6% ;黏土矿物含量多数低于 50% ,平均 32.14% ($11.3\%\sim 57.5\%$),主要为伊利石,部分样品含绿泥石和少量次生蒙脱石;碳酸盐岩(方解石和白云石)含量极低;几乎都含黄铁矿,平均为 4.5% ,其他矿物为少量菱铁矿,详情参见表 2。

表 2 样品矿物组成

Table 2 Mineralogical composition of the sample suite

样品	石英	长石	伊利石	绿泥石	蒙脱石	黏土矿物	白云石	方解石	碳酸盐	黄铁矿	其他	总计
PC16	47.2	18.8	29.5	-	-	29.5	-	2.4	2.4	2.1	-	100
PC21	8.8	-	22.4	10.2	-	32.6	42.9	15.7	58.6	-	-	100
PC45	38.9	17.8	24.7	14.2	-	38.9	4.3	-	4.3	-	-	100
PC55	30.2	19.9	35.2	14.7	-	49.9	-	-	0	-	-	100
PC81	54.4	-	40.6	-	-	40.6	-	-	0	5.0	-	100
PC88	67.4	-	20.9	-	-	20.9	-	-	0	6.6	菱铁矿 5.1	100
QC13	62.2	21.2	11.3	-	-	11.3	-	-	0	5.3	-	100
QC19	41.6	16.2	31.2	-	6.5	37.7	-	-	0	4.4	-	100
QC76	56.0	-	36.5	-	-	36.5	-	-	0	7.5	-	100
QC86	71.7	-	24.6	-	-	24.6	-	-	0	3.7	-	100
QC88	56.2	-	24.1	8.2	-	32.3	3.1	4.2	7.3	4.3	-	100
QC90	32.0	-	28.4	-	8.9	37.3	4.7	17.1	21.8	6.2	菱铁矿 2.7	100

注:“-”表示样品中不含该矿物。

图 1 为二叠系岩芯样品与 Barnett 页岩主要矿物对比^[15],阴影区为二者重合部分,可见研究区矿物组成与美国 Barnett 页岩相似,部分样品具有更高的脆性矿物含量,对人工诱导水力压裂敏感,有利于长期稳定开采。

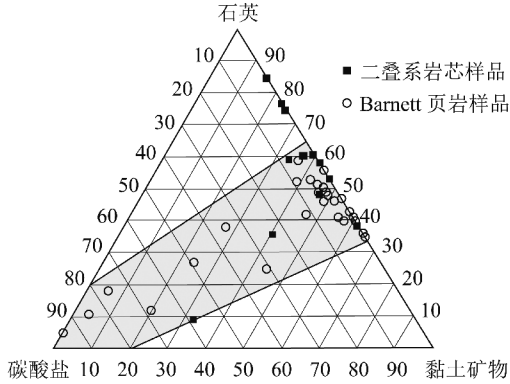


图 1 二叠系岩芯样品与 Barnett 页岩矿物三角对比^[15]
Fig. 1 Mineralogical distribution of quartz, calcite and clay in the Permian core samples and Barnett shale^[15]

2.2 孔隙度

压汞法作为测量传统砂岩储层总孔隙度的常规

方法,用于泥页岩孔隙度测量存在诸多弊端:测量范围为 $7.5 \sim 7.5 \times 10^4$ nm,难以准确测量纳米级孔隙;随着汞压力增大将产生人为裂隙增大宏孔比重;测量结果误差较大;浪费样品并存在汞蒸气泄露的隐患^[16]。低场核磁共振作为测量孔隙特征的一种新方法,具有快速、灵敏、不受地质条件限制等优点,日益引起油气工作者的兴趣和重视^[17]。其原理是将测得的氢核共振信号强度与标样对比并转换成孔隙度:

$$\varphi = \Phi \frac{s}{S} \frac{N_s}{n_s} \times 10^{\frac{1}{20}(R_{G1}-r_{g1})} \times 2^{(R_{G2}-r_{g2})} \quad (1)$$

式中, Φ, φ 分别为定标样与待测样的孔隙度; N_s, n_s 分别为定标样与待测样的累加次数; S, s 分别为定标样与待测样的核磁信号值; R_{G1}, r_{g1} 分别为定标样与待测样的模拟增益; R_{G2}, r_{g2} 分别为定标样与待测样的数字增益。

低场核磁共振测得岩芯样品总孔隙度范围为 1.87% ~ 7.10%, 平均为 5.19%, 详情参见表 3, 重复性相对偏差小于 3.7%, 与北美主要产气页岩岩芯总孔隙度分布相当 (2% ~ 14%, 平均为 4.22% ~ 6.51%)^[18-19]。

表 3 二叠系样品孔隙特征(孔隙度、比表面积及孔体积数据)

Table 3 Pore structure of Permian samples (porosity, surface area and volume data)

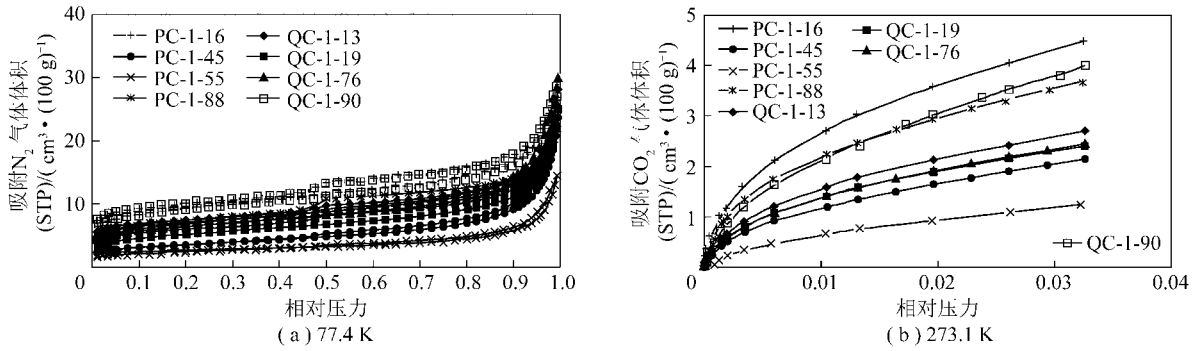
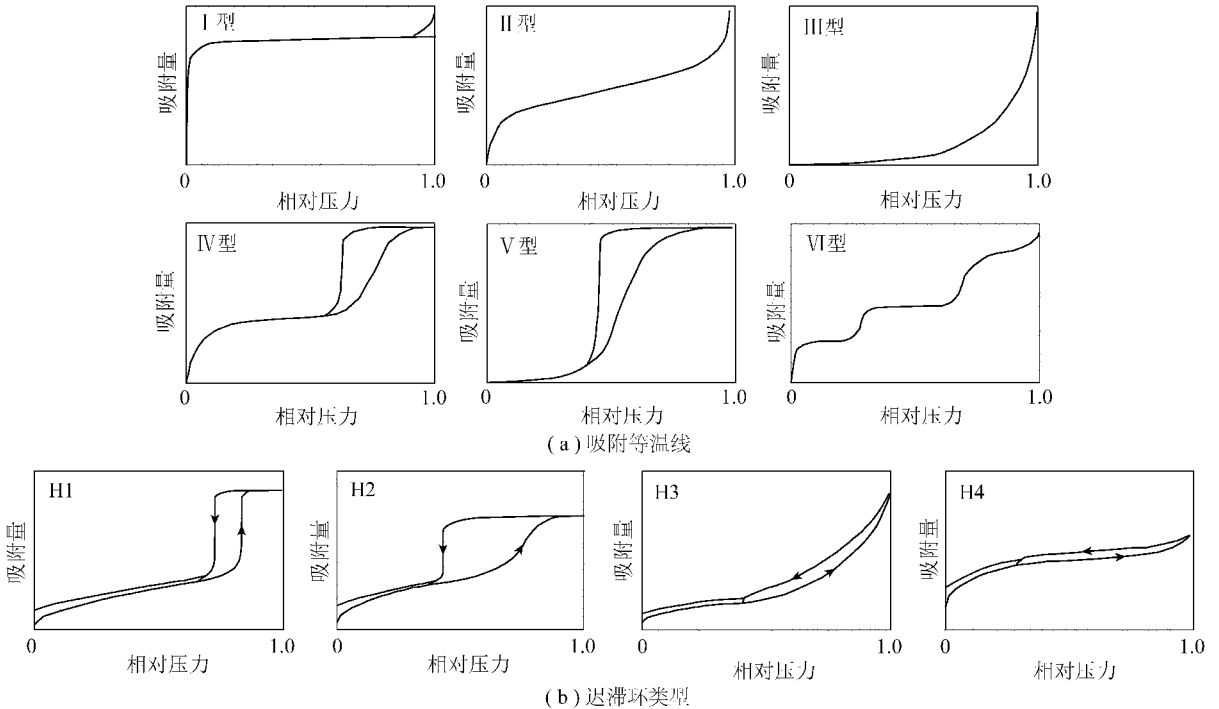
样品编号	TOC/%	孔隙度/%	N ₂ BET 比表面积/(m ² · g ⁻¹)	BJH 平均孔径/nm	N ₂ BJH 介孔孔容/(cm ³ · (100 g) ⁻¹)	CO ₂ 微孔孔容/(cm ³ · (100 g) ⁻¹)	CO ₂ 微孔比表面积/(m ² · g ⁻¹)
PC16	12.80	6.28	32.82	9.44	2.29	1.48	31.78
PC21	1.19		3.12	22.10	0.66	0.29	2.55
PC45	4.94		12.39	15.60	1.73	0.61	16.63
PC55	2.59	4.92	8.58	14.70	1.16	0.30	13.64
PC81	15.60	6.72	28.17	8.61	2.67	1.66	35.69
PC88	9.12	4.86	24.20	8.49	1.96	1.32	23.62
QC13	9.84	1.98	22.65	11.70	1.96	1.08	19.05
QC19	7.23	4.82	18.31	12.30	1.77	1.07	16.08
QC76	6.29	5.93	22.52	12.80	2.25	0.95	16.41
QC86	10.70	5.72	23.75	11.20	1.75	1.25	21.33
QC88	4.24		11.20	15.70	1.33	0.52	12.30
QC90	14.10	7.10	32.03	9.55	3.11	1.65	29.32

2.3 孔隙结构

孔隙结构是指泥页岩中孔隙和咽喉的几何形态、大小、孔径分布及其连通性。国外页岩气研究^[15,19-20]统计表明,北美页岩储层主要是纳米级的微孔及介孔作为储气载体,吸附气量和游离气量约各占 50%,不同的盆地和地层略有差异。

低温低压 N₂ 吸附-脱附等温曲线提供了介孔比表面积、介孔孔容和 BJH 平均孔径等信息。本文研究的样品 N₂ 等温曲线(图 2(a))类似于 IUPAC 定义的 II 型等温吸附线和 H3 型迟滞环类型,兼具 H4 型

特征^[10,21](图 3)。曲线起点低压段 ($P/P_0 = 0.05 \sim 0.30$) 表现为单层吸附,之后为单层与多层吸附过渡段,在 $P/P_0 = 0.45 \sim 0.90$ 内出现迟滞环,高压段没有表现出明显的吸附限制,反映样品孔隙类型主要为圆柱形孔,伴以少量夹缝型孔^[10-11,21]。泥页岩的 CO₂ 吸附等温线(图 2(b))与 Clarkson 等研究煤对 CO₂ 的吸附相似^[14],但是单位质量的吸附量远小于煤。本文二叠系样品纳米级孔隙十分发育,且具有较好的连通性,能为页岩气运移与储存提供空间和路径。

图2 N₂和CO₂吸附-脱附等温线Fig. 2 N₂ and CO₂ adsorption-desorption isotherms图3 IUPAC定义吸附等温线和迟滞环类型^[10,21]Fig. 3 Classification of isotherms and hysteresis loop types defined by IUPAC^[10,21]

研究样品 BJH 介孔孔容为 0.66 ~ 3.11 cm³/100 g, 介孔比表面积为 3.12 ~ 32.82 m²/g; 微孔孔容为 0.29 ~ 1.66 cm³/100 g, 微孔比表面积为 2.55 ~ 35.69 m²/g; 平均孔径范围为 8.61 ~ 22.10 nm (表 3)。这与 Chalmers 等对北美地区主要产气盆地的研究相当, 但平均孔径更大, 可能是分析样品具有更高的热成熟度、纳米级微孔向更大孔径转化的结果。

2.4 样品孔隙结构的控制因素

孔隙度与 TOC 及主要矿物成分之间的关系如图 4 所示, 结果表明: 孔隙度与 TOC 之间存在较强正相关; 孔隙度与石英含量无显著相关性, 但是随黏土矿物含量增加, 泥页岩孔隙度呈现增大趋势。这与陈尚斌等研究成果既有相似又有不同之处^[21]。有机质和黏土矿物都能为孔隙度做贡献, 且前者对纳米级的微

孔和介孔贡献较大。QC13 样品较为特殊, 手标本观察可知其受较强的构造变形, 断面光滑, 孔隙度较小。

N₂ BET 比表面积、BJH 介孔孔容、CO₂ 微孔比表面积和微孔体积与 TOC 的关系如图 5 所示。可见, 他们与 TOC 表现出相似的正线性相关, 且微孔相对于介孔呈现出更强的相关性。介孔沿承了微孔的特性(图 6), 微孔发育的样品介孔同样发育。BET 表面积受 TOC 控制的同时, 还与黏土矿物含量有关: 在 TOC 含量变化较小时, 黏土矿物含量高的样品具有更大的表面积(图 7)。TOC 值越大, BJH 平均孔径越小, 呈对数相关(图 8)。表明有机质能提供的孔径远小于颗粒间的孔隙。

上述结果说明, 丰富的有机质是提供微孔的主要载体, 故微孔又可称作有机质孔^[22]; 介孔在受 TOC

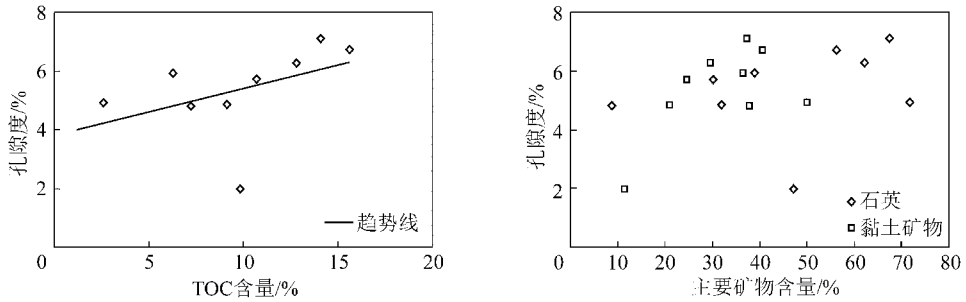


图4 孔隙度与 TOC 含量及主要矿物成分的关系

Fig. 4 Relationship of porosity, TOC content and mineral composition

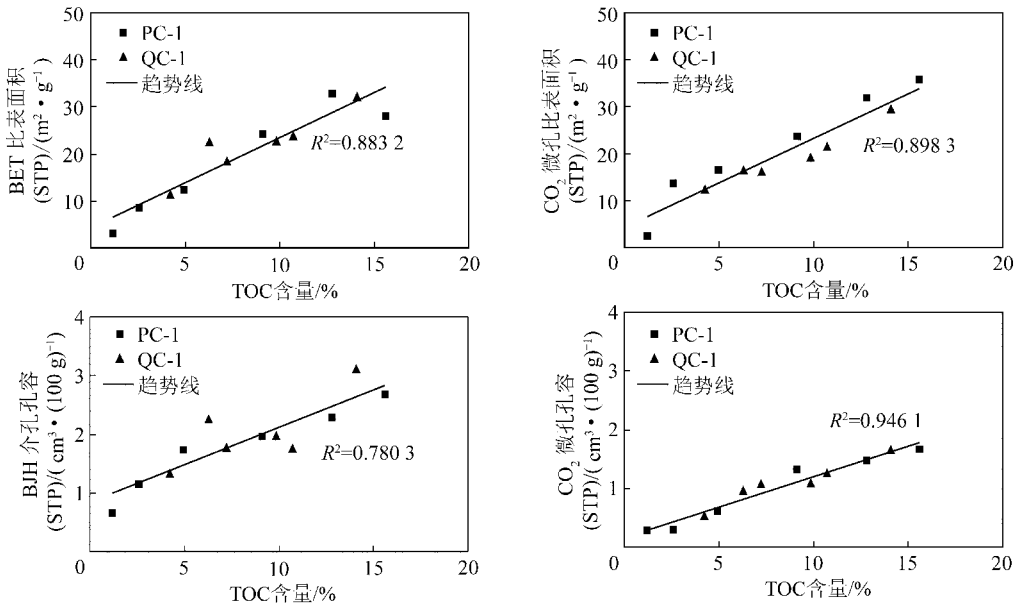


图5 孔结构数据与 TOC 含量关系

Fig. 5 Relationship of pore structure data and TOC content

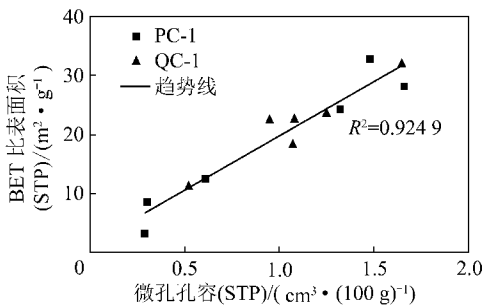


图6 微孔孔容与 BET 比表面积分布

Fig. 6 Micropore volume and BET surface area map

含量的控制,同时还受其他因素的影响,如黏土矿物的含量和相对比例。黏土矿物提供的孔隙较大,主要处于介孔范围内。泥页岩孔隙包括:有机质、矿物颗粒晶内孔隙、晶间孔隙及两者之间的连通孔;次生溶蚀微孔和微裂隙组合^[22-23]。TOC 含量与黏土矿物含量影响的是晶内孔隙,晶间孔隙与连通孔受沉积环境和储层条件的影响。通过与美国页岩气盆地对比,结合下扬子区二叠系埋藏较浅、孔隙发育、吸附气量大

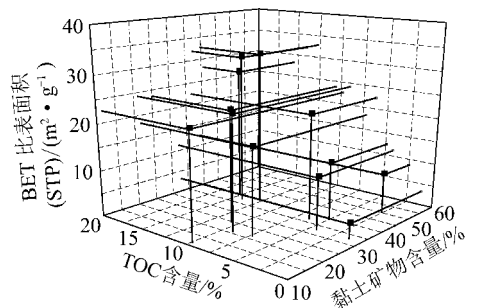


图7 TOC、黏土矿物含量与 N₂ BET 比表面积三维图

Fig. 7 Three-dimensional plots relating TOC and clay mineral content with N₂ BET surface area

等特点,认为这套地层孔隙发育良好,应当具有较好的页岩气前景。

3 结 论

(1) 低场核磁共振技术分析表明,二叠系富有机质泥页岩孔隙发育,孔隙度范围 1.98% ~ 7.10%,平均为 5.37%。

(2) 低温低压 N₂ 吸附-脱附及 CO₂ 吸附分析表

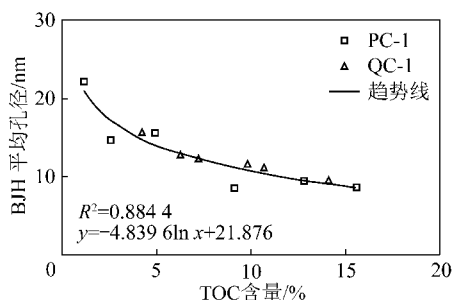


图8 BJH平均孔径与TOC含量的关系

Fig. 8 Relationship of BJH average pore diameter and TOC content

明,二叠系富有机质泥页岩孔隙结构主要以微孔及介孔为主,孔隙形态主要为圆柱状并含少量狭缝型。比表面积、孔容主要受TOC含量控制,呈现较好的线性相关,而黏土矿物含量的影响相对较弱。

(3)二叠系富有机质泥页岩孔隙度、比表面积、主要矿物含量与美国页岩气产区泥页岩相当,应当具有较好的页岩气潜力。

参考文献:

[1] 林小云,刘建,陈志良,等. 中下扬子区海相烃源岩分布与生烃潜力评价[J]. 石油天然气学报,2007,29(3):15-19.
Lin Xiaoyun, Liu Jian, Chen Zhiliang, et al. Marine source rock distribution and hydrocarbon generation potential in middle and lower Yangtze Region [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29 (3): 15-19.

[2] 潘继平,乔德武,李世臻,等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报,2011,30(2-3):337-343.
Pan Jiping, Qiao Dewu, Li Shizhen, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in lower Yangtze area, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (2-3): 337-343.

[3] 郭念发,尤效忠,刘德法. 下扬子区古生界油气地质条件及勘探选区[J]. 石油勘探和开发,1998,25(1):4-9.
Guo Nianfa, You Xiaozhong, Liu Defa. Palaeozoic oil and gas geological conditions and exploration area screening in Lower Yangtze region [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25 (1): 4-9.

[4] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86 (11): 1921-1938.

[5] 杜小弟,黄志诚,陈智娜,等. 下扬子区二叠系层序地层格架[J]. 地层学杂志,1999,23(2):152-160.
Du Xiaodi, Huang Zhicheng, Chen Zhina, et al. Division and correlation of the Permian sequence in Lower Yangtze region [J]. Journal of Stratigraphy, 1999, 23 (2): 152-160.

[6] 吴基文,李东平. 皖南地区二叠纪层序地层研究[J]. 地层学杂志,2001,25(1):18-23.
Wu Jiwen, Li Dongping. Sequence stratigraphic studies of Permian, Wannan area [J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25 (1): 18-23.

[7] Rietveld H M. Line profiles of neutron powder diffraction peaks for structure refinement [J]. Acta Crystallographica, 1967, 22: 151 -

152.

[8] 李海波,朱巨义,郭和坤. 核磁共振 T_2 谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志,2008,25(2):273-280.
Li Haibo, Zhu Juyi, Guo Hekun. Method of NMR T_2 converting to pore radius distribution [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25 (2): 273-280.

[9] Gregg S J, Sing K S W. Adsorption, surface area and porosity [M]. New York: Academic Press, 1982: 303.

[10] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Physical chemistry division commission on colloid and surface chemistry, subcommittee on characterization of porous solids; Recommendations for the characterization of porous solids [J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66 (8): 1739-1758.

[11] Groen J C, Peffer L A, Perez-Ramirez J. Pore size determination in modified micro- and mesoporous materials; Pitfalls and limitations in gas adsorption data analysis [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2003, 60 (17): 1-17.

[12] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 916-927.

[13] Chalmers G R, Bustin R M, Ian P M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96 (6): 1099-1119.

[14] Clarkson C R, Bustin R M. Variation in micropore capacity and size distribution with composition in bituminous coal of the Western Canadian Sedimentary Basin, Implications for coalbed methane potential [J]. Fuel, 1996, 75 (13): 1483-1498.

[15] 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]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4): 475-499.

[16] 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.
Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (3): 419-427.

[17] 李天降,李子丰,赵彦超,等. 核磁共振与压汞法的孔隙结构一致性研究[J]. 天然气工业,2006,26(10):57-59.
Li Tianjiang, Li Zifeng, Zhao Yanchao, et al. Consistency of pore structures between NMR and mercury intrusion method [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (10): 57-59.

[18] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 地质勘探,2010,30(10):7-12.
Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic characteristics and evaluation of the shale gas reservoir [J]. Geological Survey, 2010, 30 (10): 7-12.

[19] 张静平,唐书恒,郭东鑫. 四川盆地古生界筇竹寺组与龙马溪组页岩气勘探选区预测[J]. 地质通报,2011,30(2-3):357-363.
Zhang Jingping, Tang Shuheng, Guo Dongxin. Shale gas favorable

area prediction of the Qiongzhusi Formation and Longmaxi Formation of Lower Palaeozoic in Sichuan Basin, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 357-363.

[20] Montgonyery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.

[21] 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.

Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure

characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438-444.

[22] Slatt R M, O'Brien N. Pore types in the Barnett and Woodford gas shale: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.

[23] Katsube. Shale permeability and pore-structure evolution characteristics [J]. Geological Survey of Canada, Current Research, 2000, E15: 1-9.

《煤炭学报》22 篇优秀论文入选“领跑者 5000——中国精品期刊顶尖学术论文平台 (F5000)”

2012 年 12 月 7 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京召开, 中国科学技术信息研究所公布了“领跑者 5000——中国精品科技期刊顶尖论文 (F5000)”, 《煤炭学报》总共有 22 篇论文入选。

“领跑者 5000——中国精品期刊顶尖学术论文 (F5000)” 是由中国科学技术信息研究所按照一定的评价指标 (主要为被引用次数) 在中国精品科技期刊 2007—2011 年所刊载的论文中遴选的优秀学术论文, 旨在进一步推动我国科技期刊的发展, 提高其整体水平, 更好地宣传和利用我国的优秀学术成果, 起到引领和示范作用。该平台通过与国外大型出版平台链接的方式 (拟利用 WOK 国际检索系统平台, 与 SCI 数据库在同一平台实现文献连接和国际引文索引), 将中国的优秀论文推送出去, 同时也为优秀期刊和论文作者提供一个交流和合作的平台。

序号	论文题目	第 1 作者	年	卷	期	页码
1	我国煤巷锚杆支护技术的新发展	王金华	2007	32	2	113-118
2	高预应力强度支护系统及其在深部巷道中的应用	康红普	2007	32	12	1233-1238
3	保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析	缪协兴	2007	32	6	561-564
4	预应力在锚杆支护中的作用	康红普	2007	32	7	680-685
5	锚索支护传力机制与应力分布的数值模拟	王金华	2008	33	1	1-6
6	卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系	袁 亮	2009	34	1	1-8
7	全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用	康红普	2009	34	9	1153-1159
8	非均匀、随机裂隙展布岩体渗流应力耦合模型	张春会	2009	34	11	1460-1464
9	煤矿乏风的蓄热逆流氧化	郑 斌	2009	34	11	1475-1478
10	煤矿安全监控系统联网技术研究	孙继平	2009	34	11	1546-1549
11	大采高综采煤壁片帮冒顶机理与控制技术	宁 宇	2009	34	1	50-52
12	特厚煤层大采高综放开采支架外载的理论研究	闫少宏	2009	34	5	590-593
13	深部巷道围岩力学特征及其稳定性控制	常聚才	2009	34	7	881-886
14	综合机械化固体充填采煤方法与技术研究	缪协兴	2010	35	1	1-6
15	煤矿安全生产监控与通信技术	孙继平	2010	35	11	1925-1929
16	煤炭的科学开采	钱鸣高	2010	35	4	529-534
17	生态脆弱矿区含 (隔) 水层特征及保水开采分区研究	王双明	2010	35	1	7-14
18	屯兰煤矿“2·22”特别重大瓦斯爆炸事故原因及教训	孙继平	2010	35	1	72-75
19	煤矿物联网特点与关键技术研究	孙继平	2011	36	1	167-171
20	煤矿安全生产理念研究	孙继平	2011	36	2	313-316
21	煤炭开采新理念——科学开采与科学产能	谢和平	2012	37	7	1069-1079
22	三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿	吴立新	2012	37	3	357-365