

川东南五峰 - 龙马溪组页岩储层孔隙结构特征及影响因素

韩月卿¹, 姜志远², 冯国奇³, 韩文彪⁴

¹中国石化石油勘探开发研究院, 北京

²中国石化中原油田分公司物探研究院, 河南 濮阳

³中国石化中原油田分公司勘探开发研究院, 河南 濮阳

⁴中国石化油田部, 北京

收稿日期: 2022年2月28日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年3月29日

摘要

微观孔隙结构特征及孔隙结构的影响因素研究对川东南地区页岩储层评价具有非常重要的意义。本文基于低温氮气吸附实验, 针对研究区目的层段页岩储层的微观孔隙结构特征开展研究, 并分析其差异性。研究表明: 川东南五峰 - 龙马溪组页岩储层的孔隙结构主要以微孔和中孔为主, 孔隙形态主要表现为细颈广体的墨水瓶孔、四周开放的平行板状孔和不透气的封闭性孔, 且微孔和中孔是比表面积和孔体积的主要贡献者, 是页岩气聚集的主要空间。基于孔体积和比表面积与TOC含量和矿物成分的关系图分析发现, TOC和矿物成分是影响储层微观孔隙结构特征的重要因素, 其中比表面积和孔体积与TOC含量和脆性矿物呈正相关, 与黏土矿物呈负相关。

关键词

川东南, 页岩储层, 氮气吸附, 孔隙结构

Pore Structure Classification and Influence Factors of Shale Reservoir of Wufeng-Longmaxi Formation in Southeast Sichuan

Yueqing Han¹, Zhiyuan Jiang², Guoqi Feng³, Wenbiao Han¹

¹Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing

²Institute of Geophysical Exploration, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang Henan

³Exploration and Development Research Institute of Sinopec, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang Henan

⁴Department of Oil-Field, SINOPEC, Beijing

文章引用: 韩月卿, 姜志远, 冯国奇, 韩文彪. 川东南五峰-龙马溪组页岩储层孔隙结构特征及影响因素[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 298-309. DOI: 10.12677/ag.2022.123031

Abstract

The study of microporous structure characteristics and influencing factors of pore structure is of great significance for the evaluation of shale reservoirs in southeast Sichuan. Based on the low-temperature nitrogen adsorption experiment, the microscopic pore structure characteristics of shale reservoirs in the target strata section of the study area were studied and their differences were analyzed. The results show that the pore structure of the shale reservoir of Wufeng-Longmaxi Formation in southeast Sichuan is mainly microporous and medium pores, and the pore morphology is mainly manifested as ink bottle holes with fine necks and wide bodies, parallel plate pores and impermeable closed pores around them, and micropores and medium pores are the main contributors to the specific surface area and pore volume, and are the main space for shale gas aggregation. Based on the graph analysis of pore volume and specific surface area with TOC content and mineral composition, it is found that TOC and mineral composition are important factors affecting the microporous structure characteristics of reservoirs, of which specific surface area and pore volume are positively correlated with TOC content and brittle minerals, and negatively correlated with clay minerals.

Keywords

Southeast Sichuan, Shale Reservoir, Nitrogen Adsorption, Pore Structure

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

川东南五峰-龙马溪组属于海相沉积环境,岩性以碳质页岩、钙质页岩、硅质页岩等为主。研究区地层分布广,沉积厚度大,资源丰富、地质条件优越,是今后很长时间内中国页岩气勘探开发的重点。同时国内学者采用多种技术手段开展了五峰-龙马溪组黑色页岩针对性的理论研究与实践工作,如薄片、扫面电镜、氩离子-抛光扫描电镜、CT扫描等直接法和高压压汞法、低温氮气吸附法和核磁共振法等间接法表征泥页岩储层孔隙结构特征,这些方法获得的孔隙范围各有差异,取得了一系列重要认识。

但是由于研究区页岩孔隙结构复杂,孔隙类型多样,地层中既含有微米级别的裂缝,又发育着大量的纳米孔隙。页岩中丰富的纳米-微米孔隙及其表面积构成了页岩气赋存的主要空间,影响孔隙中游离气和吸附气含量及其流动能力。因此,研究页岩储层孔隙结构对页岩气资源评价和成藏机理研究有着非常重要的意义。本文在详细研究中扬子地区泥页岩的构造沉积特征、岩相特征、有机地化特征、矿物成分组成等基本地质特征的基础上,基于低温氮气吸附实验,进一步探索不同页岩样品的成分组成及纳米级孔隙结构差异的影响因素。

2. 区域地质背景

中、上扬子地区整体经历了多旋回构造运动,尤其是印支期后的强烈改造在中、上扬子及周缘形成了构造展布各异、变形强度与期次明显不同的多个褶皱-冲断带。四川盆地周缘主要包括四个构造带[1],分别为: I) 龙门山前陆褶皱-冲断带; II) 米仓山-南大巴山褶皱-冲断带; III) 川东-鄂西-雪峰山基底拆离带; IV) 川南-黔中-黔南褶皱-冲断带(图 1)。

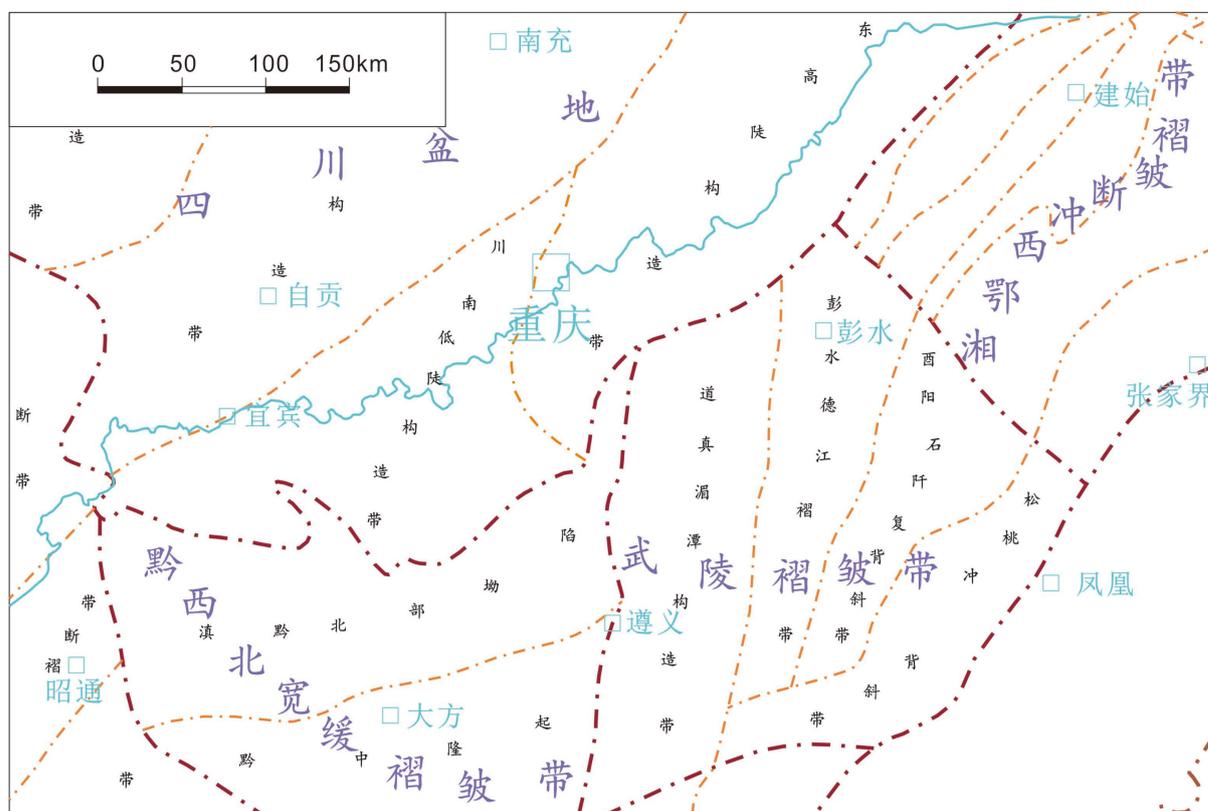


Figure 1. Geographical map of southeast Sichuan and sampling points
图 1. 川东南地区及采样点地理位置图

本次研究区位于四川盆地东南缘的川东南构造带与武陵褶皱带之间，构造形态以 NE 向复向斜和复背斜相间分布为主[2]。三组相对紧闭的背斜带夹三组核部宽缓而翼部相对陡立的向斜带，呈 NNE 向展布。同时在背斜构造发育一系列 NNE 向或近 NW 向断裂构造，是受 NWW 向、SEE 向压应力条件下的产物。南川 - 彭水区块东、西横跨中、上扬子地台，即中扬子地块湘鄂西褶皱带和上扬子地块四川盆地东南缘(局部)两个不同的二级构造单元。这两个二级构造单元主要经历了加里东造陆运动、印支运动、燕山旋回和喜山旋回的盆地叠加改造，最终形成了现今构造格局。

3. 页岩储层特征

3.1. 页岩展布特征

川东南地区在晚奥陶 - 志留纪时期经历了一个缓慢海进、海退的沉积旋回，由盆内向盆缘，整套地层沉积速率增大，厚度也随之增大[3]。如焦页 1 井志留系厚 986.3 m，隆页 1 井志留系厚 1017.5 m，彭页 1 井志留系厚 1391 m (图 2)。五峰 - 龙马溪组厚度在不同地区，亦有较大变化，如图所示，彭页 1 井钻遇五峰 - 龙马溪组 405 m，隆页 1 井钻遇五峰 - 龙马溪组 220 m，焦页 1 井钻遇五峰 - 龙马溪组 228.3 m。

页岩是页岩气生成和储集的重要物质基础，其中优质页岩的厚度大小是页岩气资源潜力评价的重要影响因素[4]。川东南地区五峰 - 龙马溪组下部含气泥页岩段主要发育五种岩石类型，自下而上分别为灰黑色富碳含粘土硅质页岩、灰黑色高碳粘土质硅质页岩、灰黑色低碳粘土质粉砂页岩、灰黑色低/中碳粉砂质粘土页岩和灰黑色(低碳)粉砂质粘土页岩。页岩有机质均发育较好，黄铁矿较为发育，发育水平纹层，表明彭水地区五峰 - 龙马溪组主要为安静、还原的深水沉积特征。

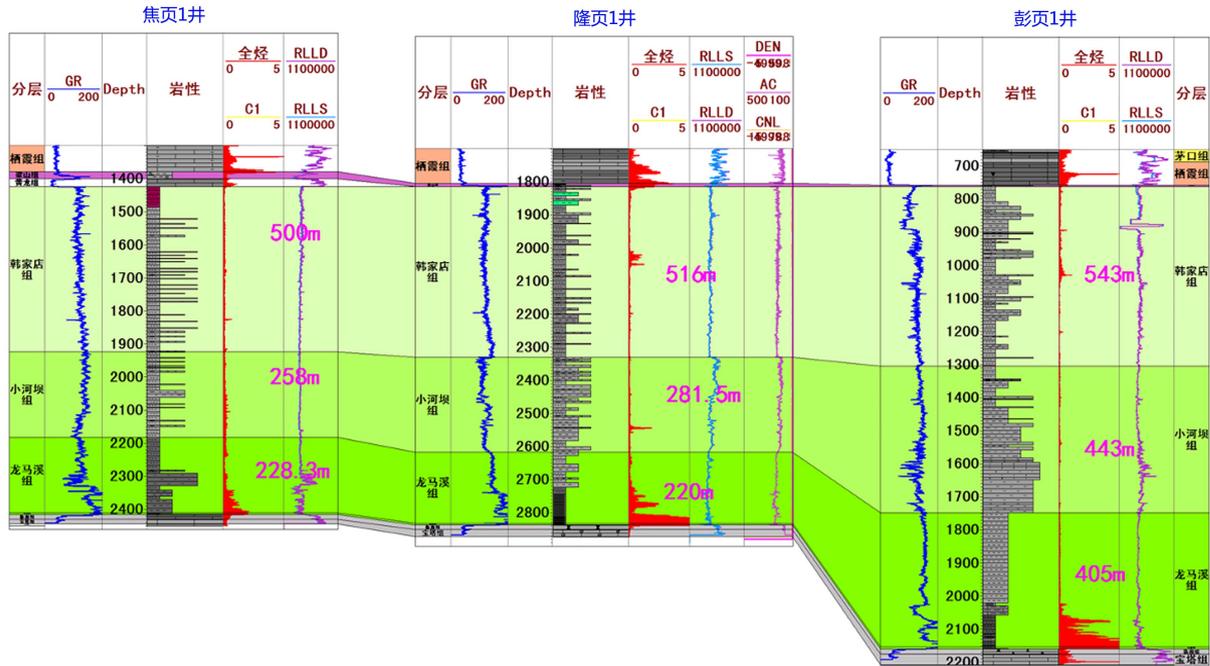
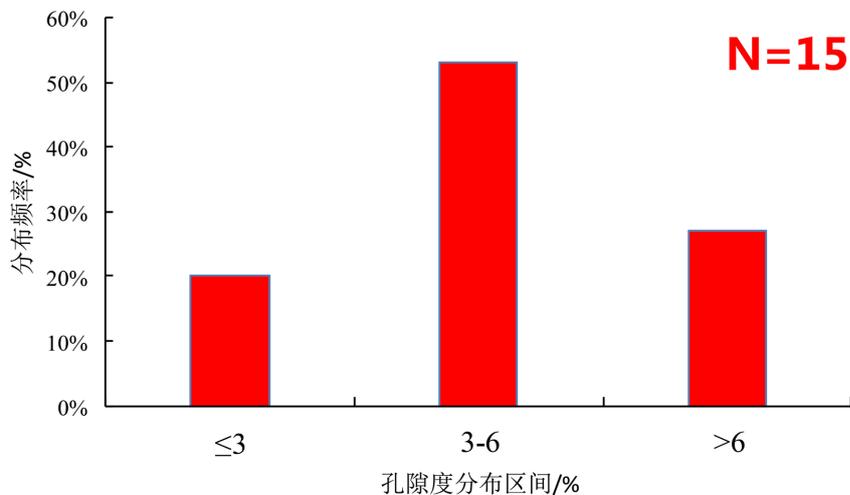


Figure 2. Comparison chart of the formation of Jiao page 1 well—Long page 1 well—Peng page 1 well
图 2. 焦页 1 井 - 隆页 1 井 - 彭页 1 井地层对比图

3.2. 储层物性特征

由于研究区目的层段沉积时代老，古埋藏深度大、成岩作用强，造成泥页岩储层致密、物性较差，主要以低孔隙、特低渗、多微孔、小孔径为主要特征[5]。为了更好地反映研究区页岩储层的性质，针对川东南地区 15 块取心样品进行孔隙度和渗透率分析(图 3)，认为研究区孔隙度、渗透率具有很好的相关性，研究区页岩样品有效孔隙度主要介于 2.62%~7.12%，平均为 4.729%；渗透率主要介于 $0.0094 \times 10^{-3} \sim 0.0868 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.0312 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度 > 6%，占 70%以上，渗透率 > $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占 80%以上，为典型的非常规储层；根据孔隙度和渗透率参数的划分标准，能够形成有效页岩气藏的有效孔隙度和渗透率值得下限分别为 1%和 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，在此基础上，分析研究区样品的物性特征可以发现研究区泥页岩储层是典型的低孔低渗型储集层，具备形成页岩气成藏的条件[6] [7]。



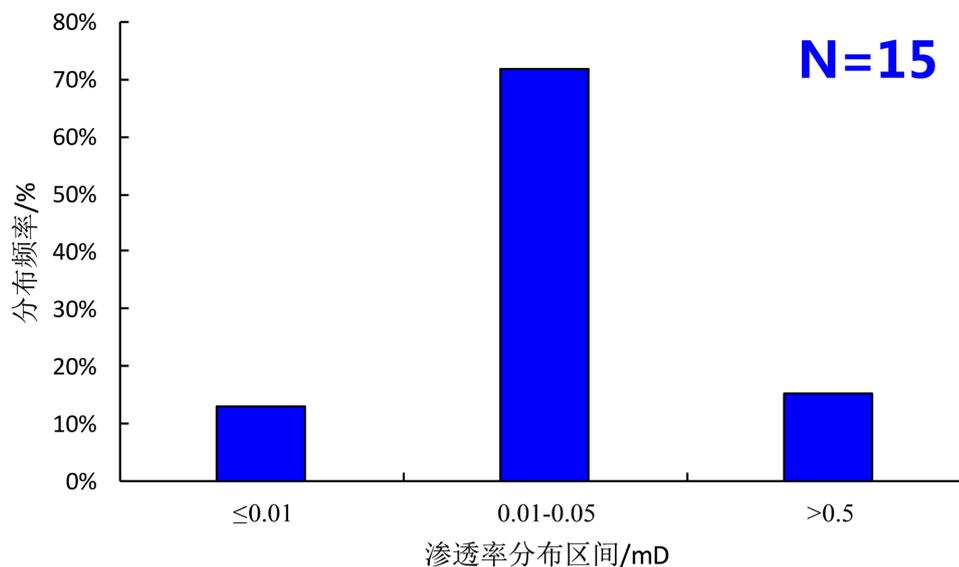


Figure 3. Porosity and permeability distribution of shale samples from Wufeng-Longmaxi formation in northeast Sichuan
图 3. 川东北地区五峰 - 龙马溪组页岩样品孔隙度和渗透率分布图

3.3. 矿物组成特征

利用 X-衍射全岩分析实验得出的页岩样品矿物成分组成图(图 4)。结果显示, 样品中石英的相对含量较高, 主要在 41.4%~87.6%之间, 除石英矿物外, 粘土矿物和长石的含量最多, 分别为 0.9%~16.1%和 29.5%~42.1%。川东南地区五峰 - 龙马溪组泥页岩储层矿物成分非均质性较为明显, 且矿物组分类型较为复杂, 不同目的层段的差异性较为明显, 这主要与研究区的目的层段经历的不同海相沉积环境有关。实际应用中其矿物组成与含量变化较大。若石英等脆性矿物含量高、膨胀性粘土矿物含量较少则利于后期压裂改造和裂缝的形成。

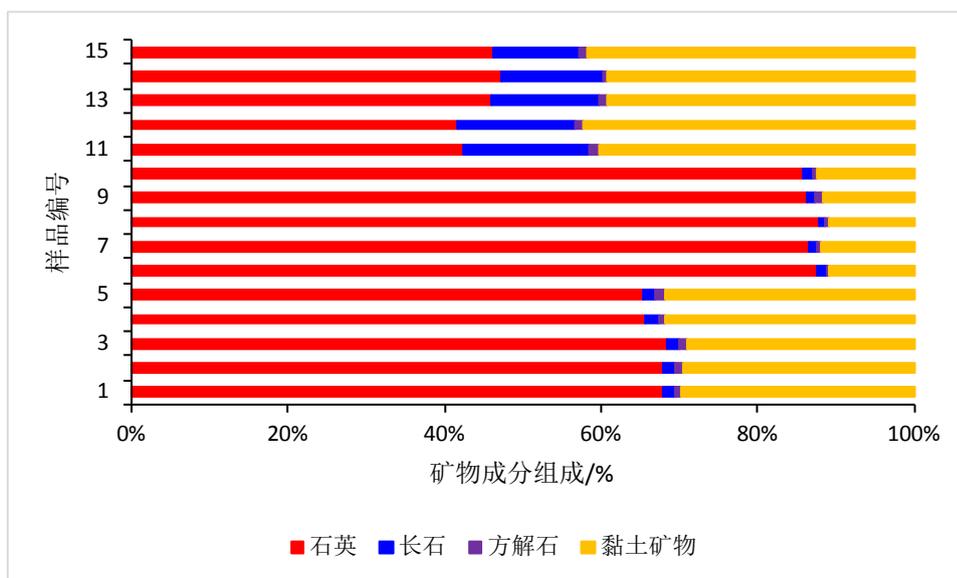


Figure 4. Mineral composition map of Wufeng-Longmaxi formation in northeast Sichuan
图 4. 川东北地区五峰 - 龙马溪组页岩矿物组成图

4. 页岩地化特征

4.1. 有机质丰度

川东南地区晚奥陶世五峰组及早志留世龙马溪组下段沉积期为海侵沉积体系域下滞留盆地相沉积，后期滞留盆地相逐步转化为浅海陆棚相和滨浅海相，先前的强还原环境随之向弱氧化-还原环境和氧化环境过渡，有机质丰度由下往上逐渐降低的变化反映了这一点[8]。优质烃源岩主要发育于五峰组-龙马溪组下部层段，有机质丰度较高，有机碳含量普遍大于2%。图5为川东南地区五峰-龙马溪组页岩样品所测得的TOC含量分布图。测定结果显示，TOC的范围为2.83%~6.59%，平均值为4.145%。表明五峰-龙马溪组整体上TOC值相对较高，均大于2%，是页岩气“甜点”的标准，具有页岩气勘探开发的潜力。

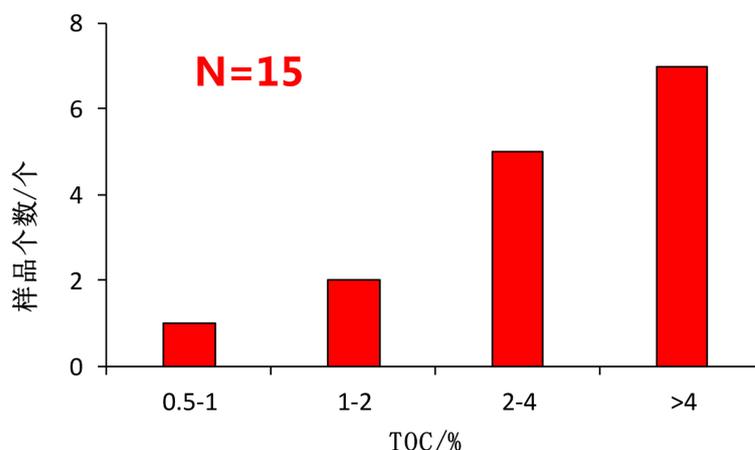


Figure 5. Distribution of TOC content in shale of Wufeng-Longmaxi formation in southeast Sichuan

图5. 川东南五峰-龙马溪组页岩TOC含量分布图

4.2. 有机质类型

研究区泥页岩中有机质类型是衡量有机质生烃能力的重要参数，研究区有机质演化过程中可以产生的大量天然气，其目的层段五峰-龙马溪组泥页岩有机质类型绝大多数属于腐泥型(I型)和腐殖-腐泥型(II1型)，这主要是由于研究区干酪根类型不同，所形成的有机质孔隙的大小和数量差异较大(表1)。由于研究区海相泥页岩处于高-过成熟阶段，因此要判断研究区五峰-龙马溪组泥页岩有机质干酪根类型，最有效的手段是根据干酪根显微组分镜下鉴定和干酪根稳定同位素能反映原始母质特征[9]。

由于川东南地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组源岩热演化程度较高，通过源岩氢指数与Tmax的关系很难判断其有机质类型[10]。表1为五峰-龙马溪组页岩气参数并源岩干酪根显微组分鉴定结果表，通过对研究区内五峰-龙马溪组岩心样品进行显微组分鉴定页岩样品腐泥组含量介于78.92%~98.92%之间，平均为94.91%，动物有机碎屑体含量介于1.26%~21.09%之间，平均为4.604%，1号~11号惰质组含量介于0%~3.02%之间，平均为0.92%，无壳质组、镜质组，类型系数介于88.94~99.41之间，平均96.595，为I型干酪根。而12号~15号样品腐泥组无定形含量介于68%~72%之间，平均为69%，惰质组含量介于28%~34%之间，平均为31%，为III型干酪根。干酪根显微组分鉴定结果表明总体上，川东南地区五峰-龙马溪组页岩的有机质类型主要以I型-III型为主，属腐泥型和腐殖-腐泥型干酪根。

Table 1. Wufeng-Longmaxi Formation shale gas parameter Kerogen microcomponent identification results table
表 1. 五峰 - 龙马溪组页岩气参数井源岩干酪根显微组分鉴定结果表

样品编号	腐泥组%			壳质组%	动物有机碎屑体	惰质组%	类型指数	类型
	无定形	藻质体	合计	孢粉体				
1	/	/	94.93	/	3.02	3.02	92.43	I
2	/	/	95.64	/	1.98	1.98	96.24	I
3	/	/	96.98	/	2.96	0	97.58	I
4	/	/	94.96	/	4.62	0	97.69	I
5	/	/	96.21	/	4.19	0	97.91	I
6	/	/	94.08	/	4.55	2.27	93.18	I
7	/	/	92.53	/	6.48	0	96.76	I
8	/	/	78.92	/	21.09	0	88.94	I
9	/	/	95.63	/	3.52	0.89	96.48	I
10	/	/	96.15	/	3.91	0	98.07	I
11	/	/	98.92	/	1.26	1.94	99.41	I
12	69	/	96.59	/	3.69	32	98.14	II ₁
13	68	/	97.89	/	1.79	31	99.09	II ₁
14	66	/	98.52	/	2.21	34	98.92	II ₁
15	72	/	95.69	/	3.79	28	98.08	II ₁

4.3. 有机质成熟度

前人研究表明,我国南方海相页岩主要有地层年代久远、地层埋深较高等特点,且研究区有机质热演化程度较高,干酪根以腐泥型和腐殖-腐泥型为主[11]。有机质主要表现为海洋浮游生物和菌藻类低等生物,缺乏高等植物来源的镜质体。同时,采用等效沥青反射率转换为等效镜质体反射率的方法是评价烃源岩热成熟度的有效指标。图6为研究区目的层段五峰-龙马溪组泥页岩有机质成熟度分析直方图。通过分析直方图发现,研究区的Ro值介于2.83%~5.69%,平均值为4.085%,为高-过多成熟阶段。实验结果显示,Ro主体大于3%,最高达5.69%,根据海相烃源岩热演化阶段划分标准(表2),研究区目的层在地质历史时期经历了较高的热演化程度,正处于热演化生干气阶段。

Table 2. Criteria for classifying the thermal evolutionary stages of marine source rocks
表 2. 海相烃源岩热演化阶段划分标准

演化阶段	成熟	高成熟	过成熟		
			早期	中期	晚期
Ro/%	0.6~1.0	1.0~1.35	1.35~2.0	2.0~3.0	>3.0
油气形成阶段	成熟阶段		凝析油, 湿气阶段		干气阶段

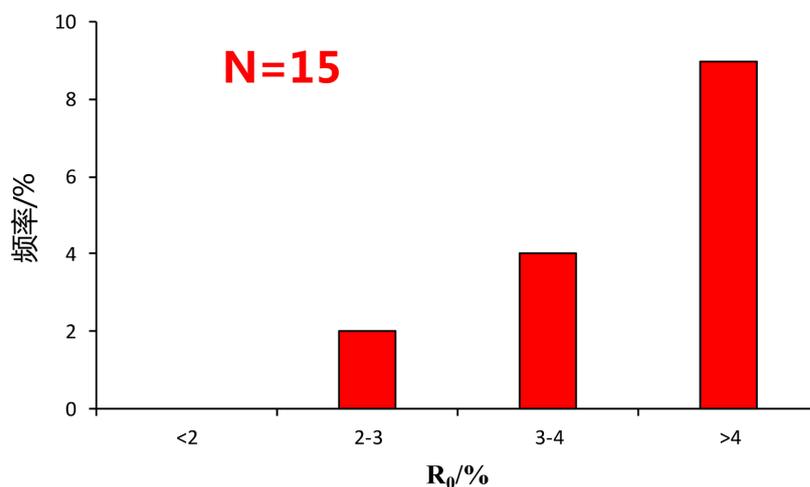


Figure 6. Ro distribution of shale samples from Wufeng-Longmaxi formation in south-east Sichuan

图 6. 川东南地区五峰 - 龙马溪组页岩样品 Ro 分布图

5. 储集空间特征

5.1. 孔隙结构特征

为进一步刻画研究区页岩的孔隙结构特征，本文选择低温氮气吸附实验，以高纯度氮气作为吸附介质，在临界温度 -195.8°C 条件下，测定不同相对压力下的泥页岩样品氮气吸附量，得到的氮气吸附 - 脱附曲线，用于刻画孔隙的孔径和比表面积[12]。实验前选取工区 3 块典型高成熟页岩样品，在 150°C 下真空脱气 12 h，以脱去孔隙表面吸附的空气和水分，然后通过实验分别得到不同粒径页岩样品的氮气吸附和脱附曲线，分析样品的孔隙类型及特征。

图 7 为样品 A、B、C 基于低温氮气吸附实验测得的吸附 - 脱附曲线。实验结果表明不同粒径样品所刻画的回滞环形态略有差别，且所有样品的回滞环吸附和脱附过程并不完全重合但整体上形状相似，呈反“S”型。且随着相对压力的逐渐减小，所刻画的回滞环形态差异也逐渐增大，同时对对应吸附分支曲线越陡，吸附量越大，说明被包裹的样品孔隙随着样品碾碎而逐渐暴露，越来越多的大孔隙能与颗粒表面有效沟通，而被氮气充填[13]。在相对压力较小时(0~0.4)，样品 A、B、C 的吸附 - 脱附曲线均呈稳定上升的形态，而在相对压力约为 0.4~0.5 范围内吸附和脱附曲线出现一个较大的拐点。根据 IUPAC 建立的回滞环分类标准，页岩样品 A 主要以细颈广体的墨水瓶孔为主，代表页岩样品中微孔的含量较多；样品 B 代表四周开放的平行板状孔，代表页岩样品中中孔的含量较多；样品 C 主要为不透气的封闭性孔，与样品 A 相似，表明页岩样品中微孔的含量较多，表明样品 A 与样品 C 的样品有机质含量相对较高。

表 3 为基于低温氮气吸附实验测得的样品 A、B、C 的比表面积和微孔、中孔和宏孔的特征。利用 BET 模型和 DFT 模型对样品进行计算，可以获得比表面积和孔体积[14]。从表中分析可以发现微孔和介孔是页岩储层孔体积分布的主体。样品 A 和样品 C 为细颈广体的墨水瓶孔和不透气的封闭性孔，表明页岩样品中微孔的含量较多，在总孔体积的占比明显较大，同时比表面积也随微孔的增大而增大，表明比表面积和总孔体积受页岩样品中微孔的影响较大。样品 B 为四周开放的平行板状孔，代表页岩样品中中孔的含量较多，进一步分析可知 BET 比表面积和 DFT 总孔孔体积呈较好正相关性，即随比表面积增大孔体积逐渐增大，因此研究区目的层段中发育着大量的微孔和介孔，又发育着一定量的宏孔，且微孔是页岩储层中的重要储集空间，对页岩气的赋存具有重要的影响。

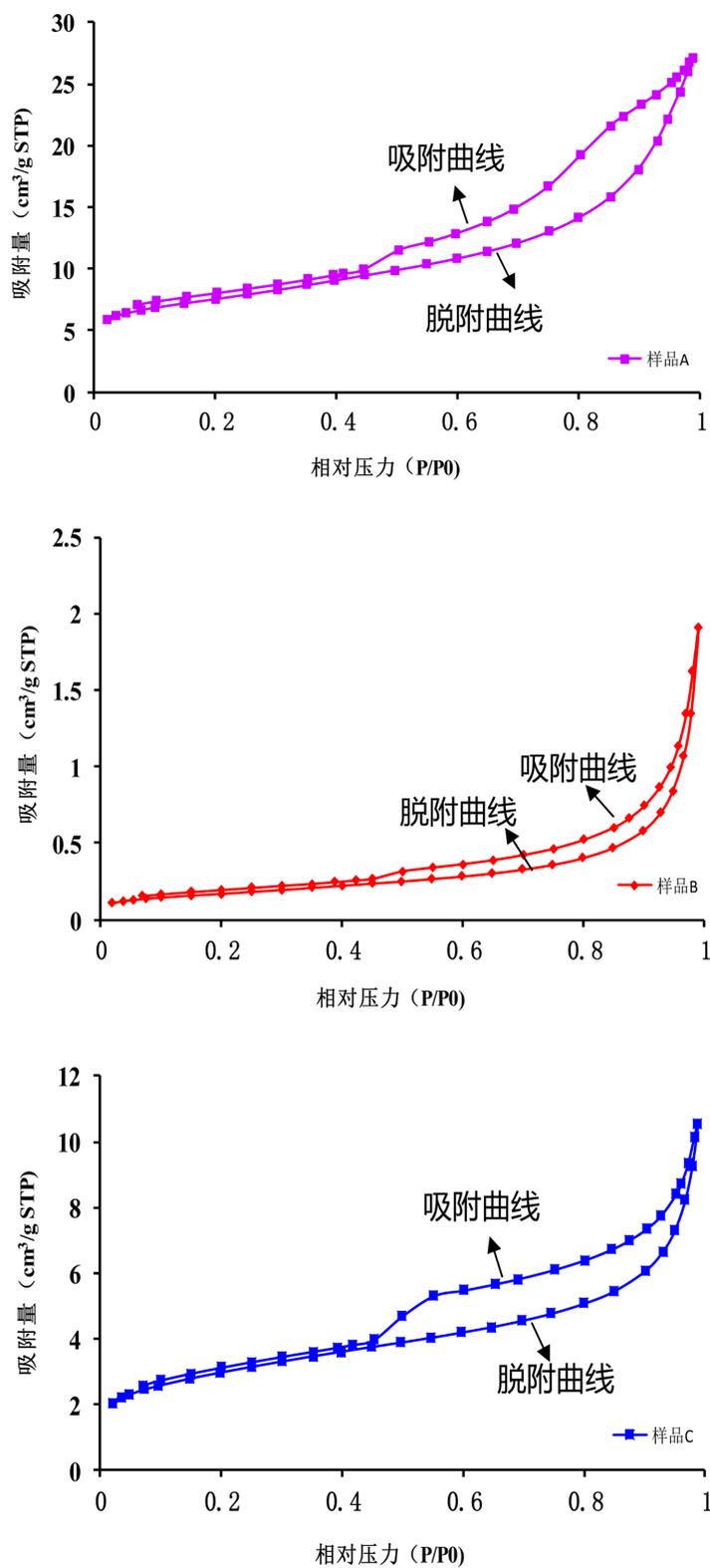


Figure 7. Characteristic diagram of adsorption-desorption distribution curve of sample A, B and C

图 7. 样品 A、B、C 吸附 - 脱附分布曲线特征图

Table 3. Calculation results of shale sample specific surface area and pore size distribution experiment
表 3. 页岩样品比表面积和孔径分布实验计算结果

代表样品	编号	BET 比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	DFT 孔体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	微孔体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	中孔体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	宏孔体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
A	1	16.42	0.0153	0.008	0.0043	0.003
	2	17.01	0.0168	0.0091	0.0072	0.0005
	3	16.74	0.0125	0.0076	0.0045	0.0004
	4	17.41	0.0144	0.0078	0.0062	0.0004
	5	18.49	0.0179	0.009	0.0087	0.0002
B	6	7.62	0.0054	0.0024	0.0025	0.006
	7	8.14	0.0062	0.002	0.0027	0.0017
	8	7.22	0.0038	0.0012	0.0024	0.0006
	9	9.68	0.0084	0.0027	0.004	0.0017
	10	8.6	0.0065	0.002	0.0027	0.0017
C	11	13.98	0.0123	0.0075	0.0043	0.0005
	12	12.1	0.0118	0.0062	0.0048	0.0008
	13	12.16	0.0166	0.0085	0.0078	0.0003
	14	12.73	0.0136	0.0079	0.0055	0.0002
	15	11.86	0.0125	0.0076	0.0045	0.0004

5.2. 孔隙差异分析

图 8 为基于低温氮气吸附实验获得的样品比表面积和孔体积与 TOC 含量呈的关系图。实验结果表明不同样品孔体积与 TOC 含量呈正相关关系，同时不同样品的比表面积随 TOC 含量的增加而增加，表明页岩有机质含量越高，在有机质生烃过程中就会产生更多的有机质孔，随着页岩热演化程度增加，内部的有机质化学成分和结构改变，进而发生碳化，有机质碳化会造成微观孔隙结构的变化，进而造成其孔隙体积及比表面积的增大[15]。表明有机质含量(TOC)是在一定程度上控制泥页岩储层微米 - 纳米级孔隙体积大小及其比表面积，并且控制着微孔和介孔的发育。

矿物成分组成是影响储层孔隙发育的又一重要因素，对微观孔隙的发育起着重要作用。图 9 表明低温氮气吸附实验测得不同尺度样品的孔隙结构与脆性矿物(以石英为主)和黏土矿物关系图。结果显示川东南地区五峰 - 龙马溪组页岩样品的孔体积与脆性矿物(以石英为主)成良好的正相关关系，与黏土矿物则呈负相关关系；同时比表面积与脆性矿物呈正相关，与黏土矿物呈负相关。这主要是由于研究区页岩样品已达到成熟演化阶段，有机质在大量生烃过程中经常会出现有机酸伴生，而随着泥页岩脆性矿物含量的不断增多，样品中的长石、方解石、白云石等脆性矿物则更加容易被溶解，进一步生成次生溶蚀孔隙，这些次生溶蚀孔比较小，多属于微孔和中孔，从而导致储层中泥页岩的孔体积及比表面积也随之增大。而地层中的黏土矿物到了成岩作用晚期阶段，随着含量的增加，地层中蒙脱石的转化也开始逐渐增多，导致其孔体积及比表面积也随之减少[16]。另外，泥页岩中黏土矿区含量较高的孔隙更为集中，矿物间粒度较小，胶结作用复杂，遇水易膨胀堵塞孔隙并容易受黏土矿物结晶作用影响，进而导致其孔体积和比表面积降低。

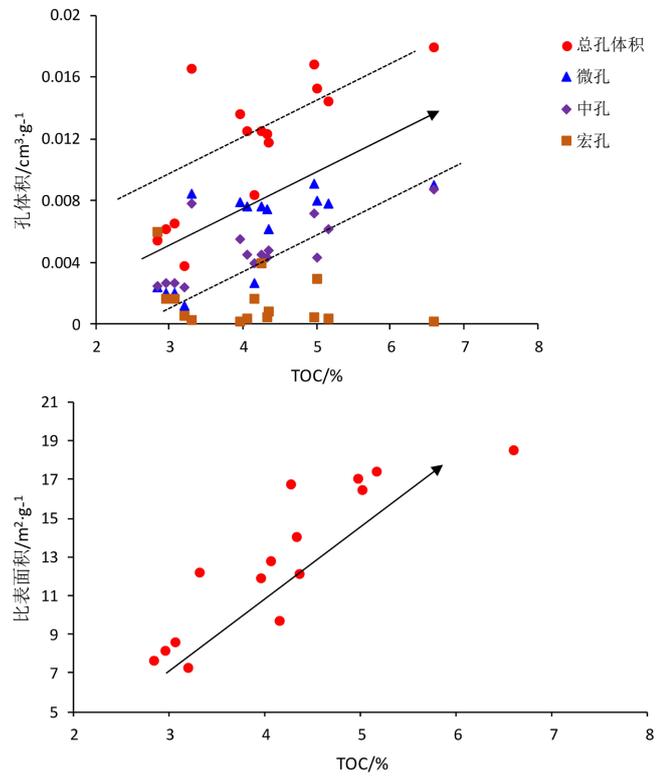


Figure 8. Relationship between pore volume, specific surface area and TOC content of shale samples
图 8. 页岩样品孔体积、比表面积与 TOC 含量的关系图

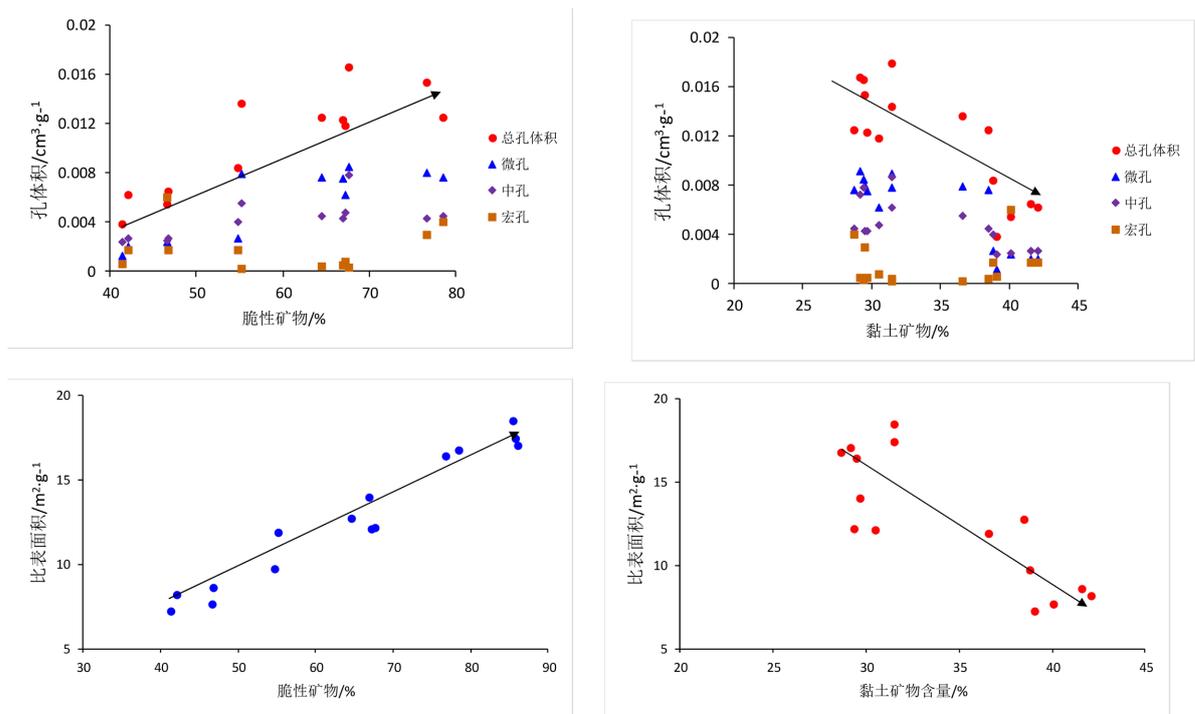


Figure 9. Mineral content and pore structure parameters of shale samples
图 9. 页岩样品矿物含量与孔隙结构参数图

6. 结论

1) 研究区具有优质的页岩层段, 由盆内向盆缘, 整套地层沉积速率增大, 厚度也随之增大。造成泥页岩储层致密、物性较差, 主要以低孔隙、特低渗、多微孔、小孔径为主要特征。

2) 研究区整体上 TOC 值相对较高, 有机质类型以 I 型 - II 型为主, 属腐泥型和腐殖 - 腐泥型干酪根。Ro 主体大于 3%, 最高达 5.69%, 表明研究区经历了较高的热演化程度, 正处于热演化生干气阶段。

3) 低温氮气吸附实验结果表明, 研究区储层发育大量微孔和介孔, 又发育一定量宏孔, 且微孔是页岩储层中的重要储集空间, 对页岩气的赋存具有重要的影响。

4) TOC 含量和矿物成分是影响储层孔隙发育的重要因素, 对微观孔隙的发育起着重要作用。其中比表面积和孔体积与 TOC 含量和脆性矿物呈正相关, 与黏土矿物呈负相关。

参考文献

- [1] 武瑾, 梁峰, 吝文, 等. 渝东北地区龙马溪组页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 成都理工大学学报(自科版), 2016, 43(3): 308-319.
- [2] 曾少军, 杨来, 曾凯超. 中国页岩气开发现状、问题及对策[J]. 中国人口资源与环境, 2013, 23(3): 33-38.
- [3] 据宜文, 姜波, 王桂梁, 等. 层滑构造煤岩体微观特征及其应力应变分析[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 50-62.
- [4] 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.
- [5] 曾溅辉, 孙占强, 徐田武, 等. 大巴山前陆冲断带古水动力演化阶段及其对油气藏形成和保存的影响[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1093-1101.
- [6] 毛玲玲, 唐本锋, 朱正杰, 等. 重庆城口地区下寒武统黑色岩系有机地球化学特征及成因意义[J]. 矿物岩石, 2015, 35(3): 89-100.
- [7] 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.
- [8] 武景淑, 于炳松, 张金川, 等. 渝东南渝页 1 井下志留统龙马溪组页岩孔隙特征及其主控因素[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 260-269.
- [9] 马新华, 杨雨, 文龙, 罗冰. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 1-13.
- [10] 冯国奇, 李吉君, 刘洁文, 等. 泌阳凹陷页岩油富集及可动性探讨[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1236-1246.
- [11] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 876-884.
- [12] 李勃, 陈方文, 肖佃师, 等. 颗粒粒径对低温氮吸附实验的影响——以五峰组 - 龙马溪组海相含气页岩为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 395-404.
- [13] 李传明, 薛海涛, 王民等. 脱气温度和样品粒径对致密砂岩低温氮气吸附实验结果的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(2): 308-316.
- [14] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
- [15] 姜振学, 唐相路, 李卓, 等. 川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 126-134.
- [16] 朱炎铭, 王阳, 陈尚斌, 等. 页岩储层孔隙结构多尺度定性 - 定量综合表征: 以上扬子海相龙马溪组为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 154-163.