

# 川东地区龙潭组/吴家坪组泥页岩微观孔隙差异特征及影响因素

高雯璐<sup>1,2</sup>, 周文<sup>1,2</sup>, 徐浩<sup>2</sup>, 曹茜<sup>2</sup>, 刘瑞崑<sup>1,2</sup>, 李飞雨<sup>1,2</sup>, 蒲飞龙<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>成都理工大学能源学院, 四川 成都

<sup>2</sup>成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月26日; 录用日期: 2022年12月1日; 发布日期: 2022年12月14日

## 摘要

为明确四川盆地东部龙潭组/吴家坪组微观孔隙结构特征差异及发育主控因素, 本文以川东南地区龙潭组和川东北地区吴家坪组泥页岩为研究对象, 联合应用图像分析方法与流体注入技术对泥页岩孔隙主要类型及微观孔隙结构特征进行定性表征和定量分析, 并结合沉积相差异对孔隙发育特征及影响因素进行分析, 结果表明: ① 川东南龙潭组处于滨岸沼泽相, 有机质主要为镜质组III型干酪根, 富含黏土矿物, 有机质孔不发育, 主要孔隙类型为平板状、狭缝状黏土矿物粒内孔, 以介孔和宏孔为主; ② 川东北吴家坪组处于深水陆棚相, 有机质主要为腐泥组II型干酪根, 矿物组分以石英等脆性矿物为主, 有机孔发育, 主要孔隙类型为细瓶颈和墨水瓶状有机质孔, 以介孔为主; ③ 龙潭组泥页岩主要受黏土矿物含量影响, 孔隙比表面积、比孔容与黏土矿物含量正相关; 吴家坪组泥页岩孔隙发育主要受TOC含量影响, 孔隙比表面积、比孔容与TOC含量正相关。

## 关键词

四川盆地, 龙潭组/吴家坪组, 沉积相, 孔隙结构, 差异分析

## Microscopic Pore Difference Characteristics and Influencing Factors of Mud Shale of Longtan Formation/Wujiaping Formation in Eastern Sichuan

Wenlu Gao<sup>1,2</sup>, Wen Zhou<sup>1,2</sup>, Hao Xu<sup>2</sup>, Qian Cao<sup>2</sup>, Ruiyin Liu<sup>1,2</sup>, Feiyu Li<sup>1,2</sup>, Feilong Pu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

文章引用: 高雯璐, 周文, 徐浩, 曹茜, 刘瑞崑, 李飞雨, 蒲飞龙. 川东地区龙潭组/吴家坪组泥页岩微观孔隙差异特征及影响因素[J]. 石油天然气学报, 2022, 44(4): 317-329. DOI: 10.12677/jogt.2022.444043

## Abstract

In order to clarify the differences in microscopic pore structure characteristics and the main controlling factors of the development of Longtan formation/Wujiaping formation in the eastern Sichuan Basin, this paper takes the mud shale of Longtan formation in Southeast Sichuan and Wujiaping formation in Northeast Sichuan as the research objects, and uses image analysis methods and fluid injection technology to qualitatively characterize and quantitatively analyze the main types of pores and microscopic pore structure characteristics of mud shale. Combined with the difference of sedimentary facies, the pore development characteristics and influencing factors are analyzed. The results show that: ① Longtan formation in Southeast Sichuan is located in the shore swamp facies. The organic matter is mainly vitrinite and type III kerogen, rich in clay minerals. The organic matter pores are not developed. The main pore types are flat and slit clay mineral intergranular pores, mainly mesopores and macropores; ② Wujiaping formation in Northeastern Sichuan is located in deep-water continental shelf facies. The organic matter is mainly type II kerogen of sapropel formation. The mineral components are mainly quartz and other brittle minerals. The organic pores are developed. The main pore types are fine bottleneck and ink bottle shaped organic pores, mainly mesopores; ③ The mud shale of Longtan Formation is mainly affected by the content of clay minerals, and the pore specific surface area and pore volume are positively correlated with the content of clay minerals; The pore development of Wujiaping formation mud shale is mainly affected by TOC, and the pore specific surface area and specific pore volume are positively correlated with TOC.

## Keywords

Sichuan Basin, Longtan Formation/Wujiaping Formation, Sedimentary Facies, Pore Structure, Difference Analysis

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. 引言

四川盆地是我国页岩气资源勘探开发的重点区域[1] [2], 二叠系烃源岩作为四川盆地重要气源岩, 具有巨大的勘探开发潜力, 预估资源量可达  $2.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$  [3] [4] [5]。二叠系龙潭组/吴家坪组页岩厚度稳定, 演化程度高, 含气性良好, 是未来四川盆地页岩气资源勘探开发的重要层系[6]。

泥页岩中微孔隙系统发育, 储层的孔隙结构是影响储层储集性能和页岩气开采的主要因素。目前, 已有学者针对二叠系泥页岩储层特征及孔隙发育影响因素等方面进行大量研究[7] [8] [9]。部分学者认为, 泥页岩中的孔隙发育主要受沉积构造演化和自身物质组成内外两方面因素共同影响[10] [11] [12]。作为同期异相沉积的一套地层, 沉积环境不同导致海陆过渡相龙潭组与海相吴家坪组泥页岩在有机质和矿物组成等方面具有显著差异特征[13] [14] [15], 从而对孔隙的发育产生影响[16] [17] [18]。二叠系龙潭组/吴家坪组泥页岩沉积环境多变[19], 有机质类型多样, 矿物组成复杂, 孔隙发育影响因素众多, 二者间的微观孔隙差异特征及孔隙发育主控因素尚需进一步探究。

本文选取川东南龙潭组及川东北吴家坪组泥页岩样品, 开展有机碳测定、X-射线衍射、干酪根显微

组分测试等基础测试,并通过氩离子抛光及场发射扫描电子显微镜观察、低温液氮吸附实验,对四川盆地龙潭组/吴家坪组泥页岩的主要孔隙类型和孔隙形态、体积等结构特征进行研究。结合沉积环境、有机地球化学与岩石矿物组分差异,分析二叠系龙潭组/吴家坪组泥页岩孔隙发育差异特征及主要影响因素,从而为评价其页岩气勘探潜力奠定良好的基础。

## 2. 地质概况

受加里东运动影响,四川盆地整体表现为“西南高,北东低”,“两台一凹”的古地理格局[20] [21]。晚二叠世,受东吴运动的影响,整个上扬子地区特别是四川盆地,在不同的地区展现出同期异相的沉积特征,龙潭组和吴家坪组分为南、北两相区[22] [23],川南地区整体上海陆过渡相沉积,称龙潭组;川北地区为海相沉积,称吴家坪组。在地形与海平面变化的约束下,龙潭组/吴家坪组沉积相带自南西至北东向依次表现为河流三角洲-滨岸-沼泽-潮坪-泻湖-浅水陆棚-深水陆棚-开阔台地-盆地相,呈弧形带状展布[24] [25] (图 1)。川东南研究区龙潭组主要为滨岸-沼泽相沉积,岩性以灰黑色-黑色泥页岩、泥质粉砂岩,粉砂岩为主,发育大量煤层(图 2(a));川东北研究区吴家坪组主要为深水陆棚相沉积,岩性以泥质灰岩、灰质泥岩、硅质页岩为主,灰质含量高,二叠系沉积初期,受峨眉山玄武岩喷发影响,在下段发育大量玄武岩(图 2(b))。



Figure 1. Sedimentary model map of Sichuan Basin (modified from document [26])

图 1. 四川盆地沉积模式图(修改自文献[26])

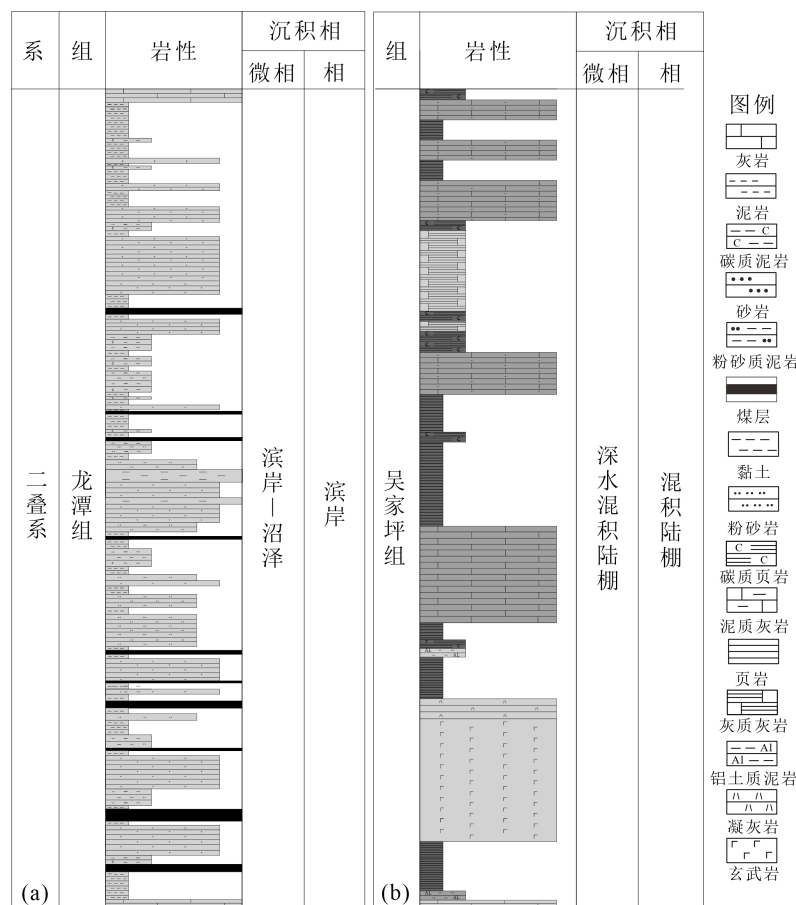


Figure 2. Lithologic histogram of Longtan formation (a) and Wujiaping formation (b) in the study area  
图 2. 研究区龙潭组(a)和吴家坪组(b)岩性柱状图

### 3. 样品及实验

#### 3.1. 样品基本特征

本次研究选取四川盆地川东南地区龙潭组 A 井及川东北地区吴家坪组 B 井泥页岩样品(图 1)。龙潭组泥页岩有机质来源主要为高等植物,干酪根类型主要为 III 类,显微组分以镜质组组分为主,样品 TOC 介于 0.05%~13.20%,平均 2.91%,镜质体反射率  $R_o$  介于 1.8%~2.2%;吴家坪组泥页岩有机质来源主要为藻类、底栖生物,干酪根类型主要为 II 类,显微组分以腐泥组组分为主,样品 TOC 介于 4.90%~14.73%,平均 8.59%,镜质体反射率  $R_o$  介于 2.6~3.8% (表 1)。龙潭组矿物组分以黏土矿物(66%)为主,黏土组分较复杂,主要以伊/蒙混层为主(60.2%),同时含高岭石(21.2%)和绿泥石(17.8%);吴家坪组矿物组分以石英(40%)等硅质矿物和碳酸盐岩矿物(35%)为主,黏土矿物含量较少,组分主要为伊利石(97.5%) (表 2)。

Table 1. Characteristics of organic matter in Longtan formation and Wujiaping formation

表 1. 龙潭组和吴家坪组样品有机质特征

层位	TOC (%)	$R_o$ (%)	干酪根类型	显微组分类型
龙潭组	0.05~13.20	1.8~2.2	III 类	镜质组为主
吴家坪组	4.90~14.73	2.6~3.8	II 类	腐泥组为主



**Table 2.** Mineral composition characteristics of Longtan formation and Wujiaping formation samples  
**表 2.** 龙潭组和吴家坪组样品矿物组成特征

层位	编号	矿物组成(%)				黏土组成(%)			
		硅质矿物	碳酸盐岩矿物	黏土矿物	其他	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层
龙潭组	A-1	18.0	0	75.0	7.0	0	4.0	4.0	92.0
	A-2	20.0	9.0	66.0	5.0	0	6.0	10.0	84.0
	A-3	14.0	0	75.0	11.0	3.0	30.0	20.0	47.0
	A-4	25.0	3.0	63.0	9.0	1.0	42.0	30.0	27.0
	A-5	15.0	0	56.0	29.0	1.0	35.0	30.0	34.0
	A-6	33.0	1.0	62.0	4.0	0	10.0	13.0	77.0
吴家坪组	B-1	40.0	46.5	8.7	5.0	100.0	/	0	0
	B-2	38.0	54.6	5.2	2.0	99.0	/	1.0	0
	B-3	54.0	34.7	5.6	6.0	99.0	/	1.0	0
	B-4	34.0	43.5	15.6	8.0	96.0	/	4.0	0
	B-5	45.0	20.1	27.4	8.0	94.0	/	6.0	0
	B-6	65.0	13.3	14.4	8.0	97.0	/	3.0	0

### 3.2. 主要实验与研究方法

由于泥页岩的孔隙主要为微纳米孔隙，常规储层的孔隙研究方法难以准确测试和表征，目前国内外学者已经建立了图像分析与流体注入等技术的联合应用，对含气泥页岩孔隙结构进行全面表征[27] [28] [29]。本次研究开展场发射扫描电子显微镜观察与低温液氮吸附实验，实验结果分别使用 image J 软件处理和 BJH 模型拟合，与从定性和定量的角度对龙潭组/吴家坪组泥页岩孔隙特征进行相对全面表征。

扫描电镜技术广泛用于泥页岩的微观结构、孔隙表征等研究，在泥页岩储层评价中，可通过扫描电镜图像直观展现泥页岩微观孔隙的大小、形态、连通性等结构特征，以及定义不同的孔隙类型[30]。结合 image J 等图像处理软件，可分别统计得到各类孔隙面孔率与数量占比等参数[31] [32]。研究使用场发射扫描电镜仪器为 Zeiss-Merlin，分辨率 0.8 nm，最大放大倍数 200 万倍，测试加速电压 0.02 kV~30 kV。在进行扫描电镜观察之前先对泥页岩样品进行氩离子抛光处理，可得到平整的泥页岩表面，从而更准确的进行纳米级孔隙细节研究。本次研究首先在不同倍数下观察各类孔隙及矿物特征，随后将放大倍数增大至 20,000~40,000 倍，结合 image J 图像处理软件，将大观察倍数下足量拍摄的扫描电镜图像进行拼接得到龙潭组/吴家坪组页岩样品的大视域网格划分图后利用不同颜色标定不同孔隙种类：以红色代表有机孔，绿色代表粒内孔，蓝色代表粒间孔，再统计得到各类孔隙面孔率与数量占比等参数。

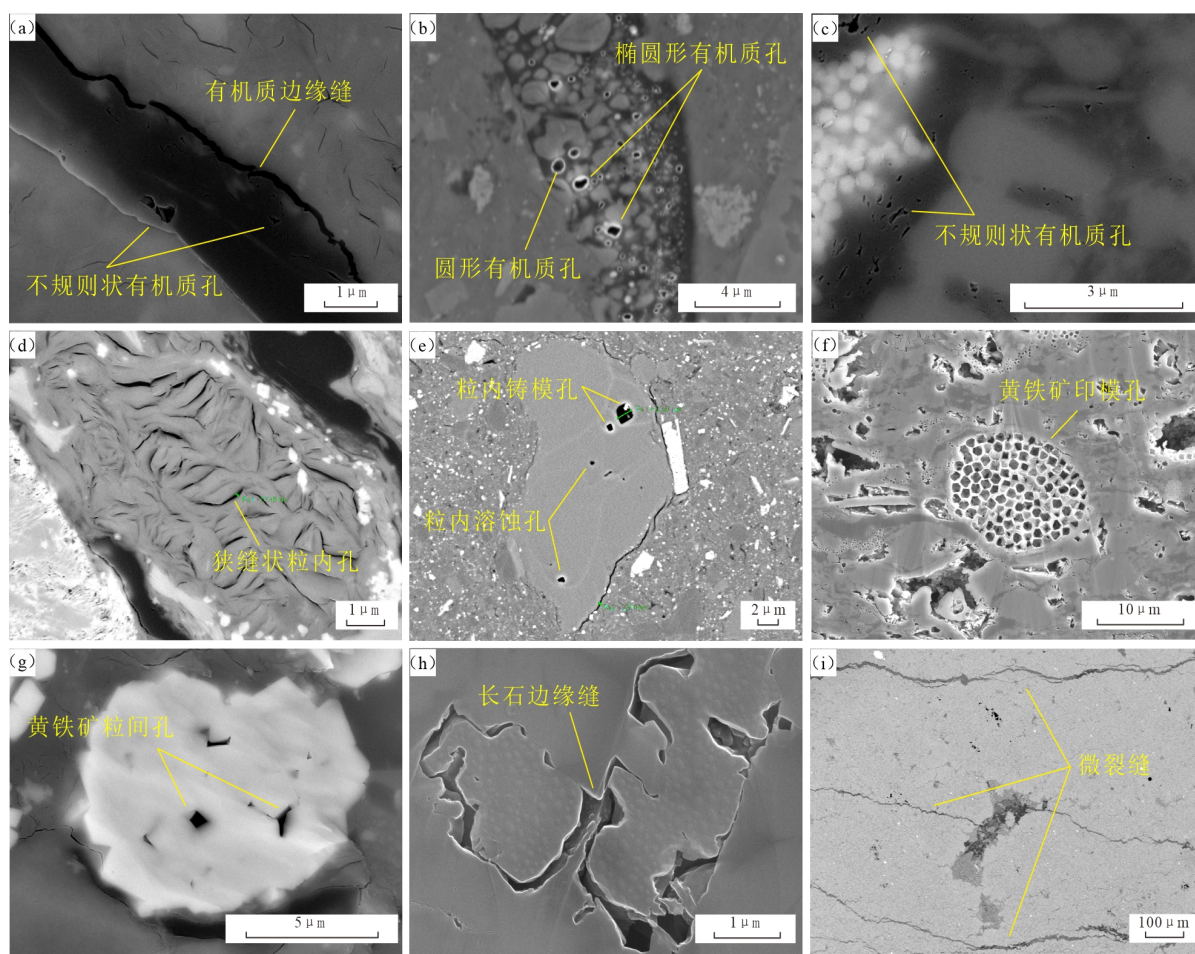
低温液氮等温吸附法，可在表征孔结构时得到泥页岩储层微观结构的统计信息和总体特征，对泥页岩储层孔隙结构参数进行表征与分析，对孔隙形态进行分类[33]。本次研究中，低温氮气吸附-脱附测试采用美国麦克公司生产的 ASAP2020 全自动比表面积及微孔/介孔分析仪，该仪器孔径测量范围为 0.35

nm~500 nm, 实验条件为: 低温-195.8℃, 压力为 97.3 kPa~127 kPa, 粉末大小为 60~80 目。吸附/解吸结果利用 BJH 模型拟合, 以“吸附回线”特征判别孔隙形态。

## 4. 结果

### 4.1. 龙潭组/吴家坪组泥页岩主要孔隙类型

基于样品的扫描电镜图像, 按照 Loucks 等人(2012)提出的泥页岩基质孔隙分类方法[34]进行观察及分类。发现龙潭组泥页岩有机质孔发育较差, 仅在部分有机质中发育少量不规则状有机质孔及有机质边缘缝; 黏土矿物孔发育, 主要以片状及狭缝状粒内孔为主; 粒间孔主要发育在草莓状黄铁矿晶粒间; 微裂缝较发育, 裂缝为方解石充填。吴家坪组泥页岩有机质孔大量发育, 形状多为圆形、椭圆形和不规则状; 无机孔主要发育粒内溶蚀孔和印模孔, 同时发育石英及长石边缘溶蚀缝(图 3)。

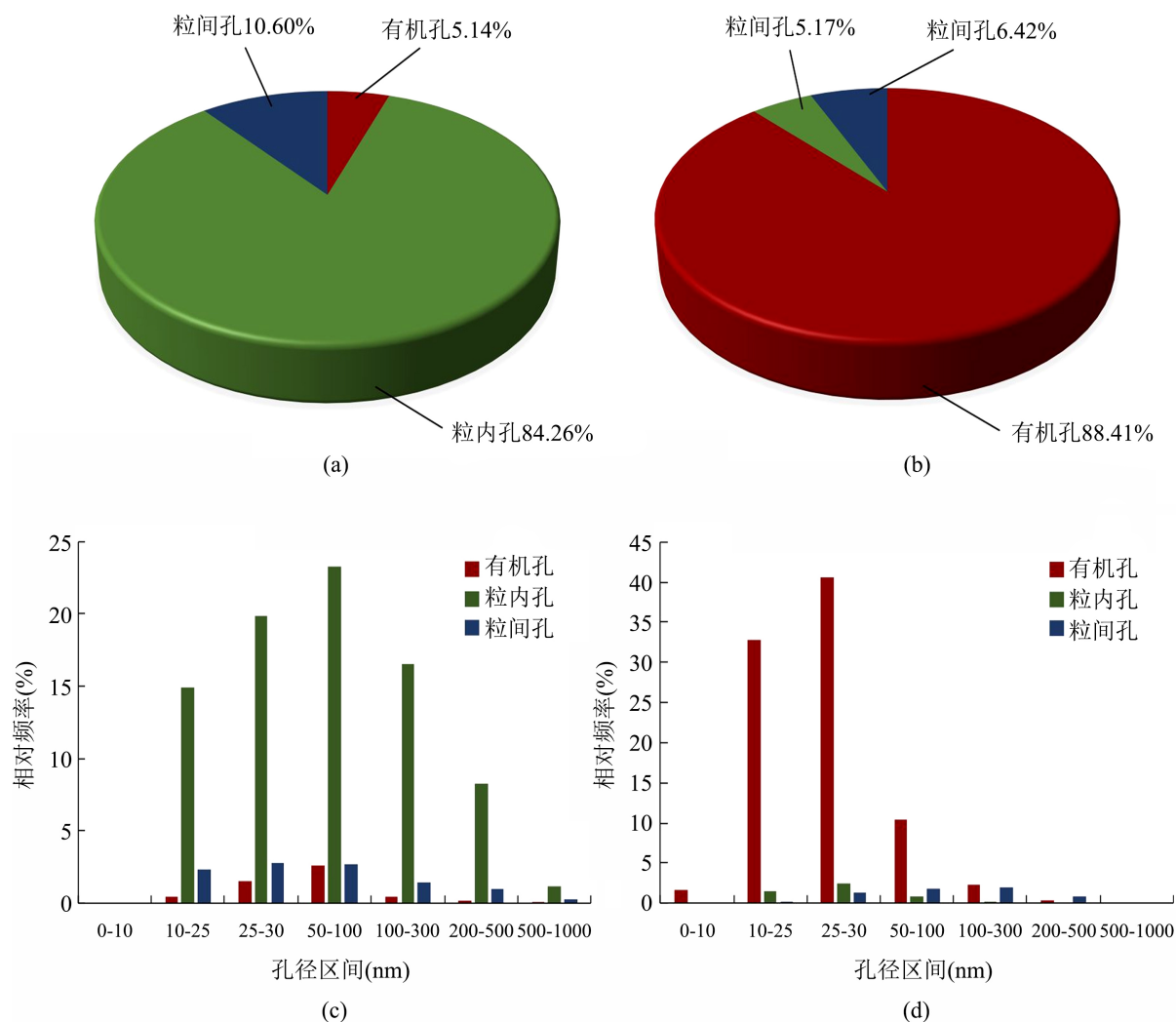


(a) 条带状有机质发育不规则状有机质孔及有机质边缘缝, A 井, 龙潭组, 1730.35 m; (b) 絮状有机质发育圆形、椭圆形有机质孔, B 井, 吴家坪组, 4599.3 m; (c) 絮状有机质发育不规则状有机质孔, B 井, 吴家坪组, 4592.5 m; (d) 狭缝状伊蒙混层层间孔, A 井, 龙潭组, 1752.95 m; (e) 次棱角状石英内发育少量溶蚀孔、印模孔, 矿物边缘缝, B 井, 吴家坪组, 4592.5 m; (f) 黏土矿物内发育草莓状黄铁矿印模孔, B 井, 吴家坪组, 4553.3 m; (g) 草莓状黄铁矿发育晶间孔, A 井, 龙潭组, 1718.25 m; (h) 长石边缘溶蚀缝, B 井, 吴家坪组, 4572.6 m; (i) 微裂缝充填方解石, A 井, 龙潭组, 1689.38 m。

**Figure 3.** Microscopic pore electron microscopic images of Longtan formation (a) and Wujiaping formation (b) in the study area  
**图 3.** 研究区龙潭组(a)和吴家坪组(b)微观孔隙电镜图像

## 4.2. 龙潭组/吴家坪组泥页岩孔隙结构参数

在 image J 处理所得扫描电镜图像基础上,分别统计龙潭组和吴家坪组泥页岩样品中不同类型孔隙的孔隙数量、面孔率等参数。结果显示,龙潭组泥页岩样品中粒内孔占总孔隙的主要部分,占比达 84.26% (图 4(a)),孔径集中分布在 10 nm~500 nm (图 4(c));吴家坪组泥页岩样品中有机孔占总孔隙的主要部分,占比为 88.41% (图 4(b)),孔径集中分布在 10 nm~100 nm (图 4(d))。



**Figure 4.** Porosity ratio and pore size distribution of Longtan formation (a), (c) and Wujiaping formation (b), (d)  
**图 4.** 龙潭组(a)、(c)和吴家坪组(b)、(d)孔隙占比与孔径分布图

根据 De Boer 及 IUPAC 的孔隙类型分类方法,可由“脱附回线”的形态特征判识泥页岩孔隙结构特征[35] [36],龙潭组/吴家坪组泥页岩低温液氮吸附/脱附曲线表明,龙潭组泥页岩孔隙形态主要为四周开放的平行板状、狭缝状孔(图 5(a));吴家坪组泥页岩孔隙形态主要为细颈瓶状和墨水瓶状(图 5(b))。

从各孔径段孔体积的比例可以分析孔隙的发育及分布状况,按照国际理论与应用化学协会(IUPAC)基于孔径大小的孔隙分类方法[37],结合图像分析法与吸附曲线统计结果,发现龙潭组孔隙主要为介孔和宏孔,以直径 50 nm~100 nm 的介孔为主,直径 10 nm~50 nm 的介孔和直径 100 nm~200 nm 的宏孔次

之(图 4(c)、图 6(a)); 吴家坪组孔隙直径整体小于龙潭组, 主要以直径 10 nm~50 nm 的介孔为主(图 4(d)、图 6(b))。

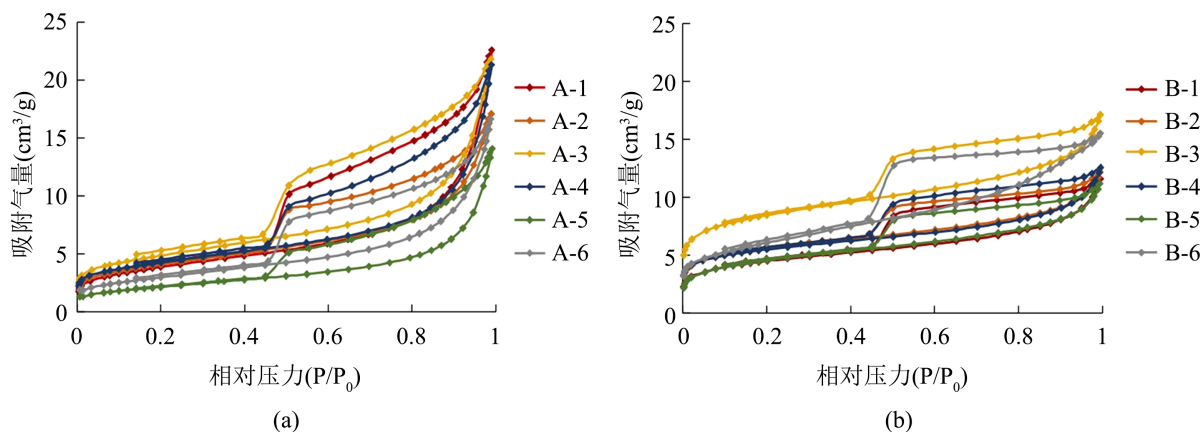


Figure 5. Nitrogen adsorption/desorption curve of Longtan formation (a) and Wujiaping formation (b)

图 5. 龙潭组(a)和吴家坪组(b)氮气吸附/脱附曲线

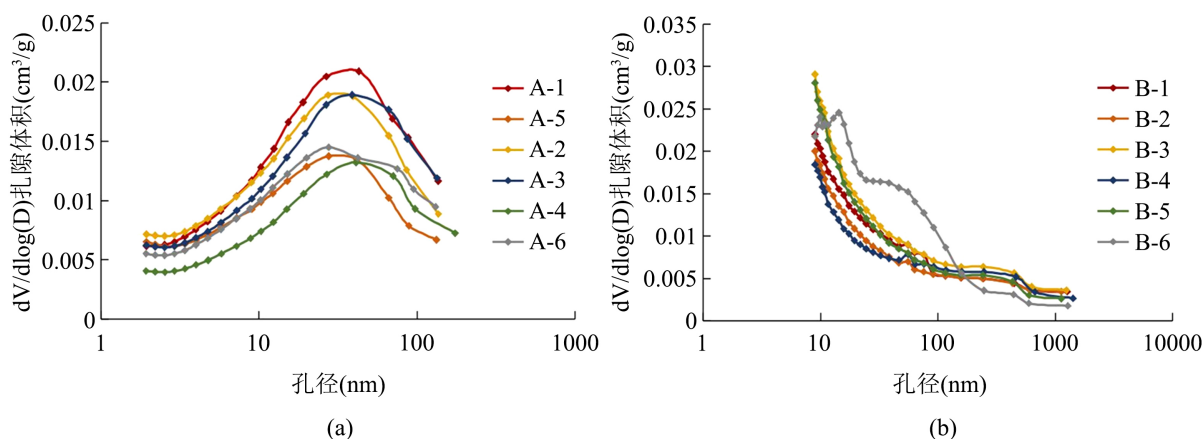


Figure 6. Pore size distribution curve of Longtan formation (a) and Wujiaping formation (b)

图 6. 龙潭组(a)和吴家坪组(b)孔径分布曲线图

## 5. 讨论

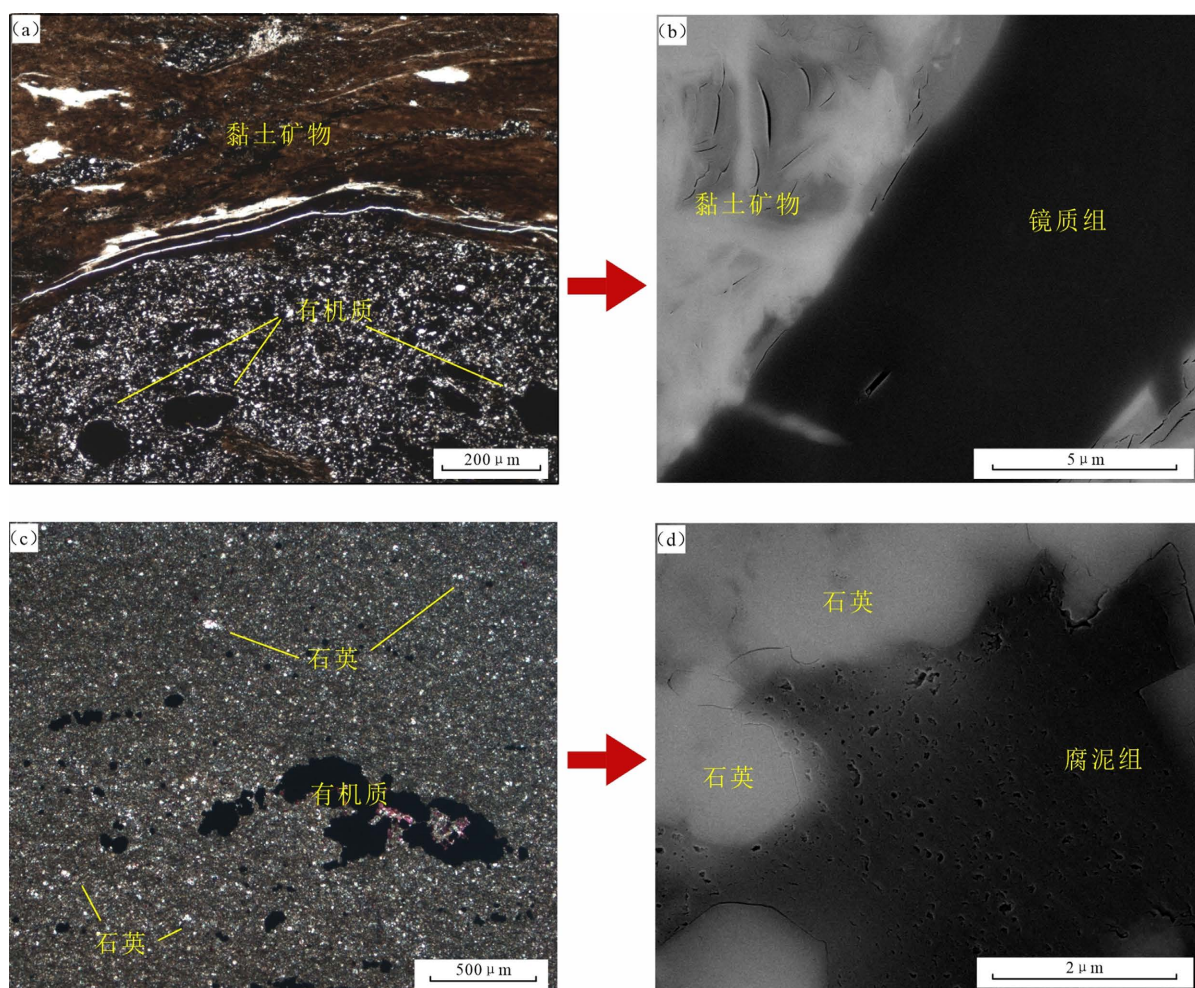
四川盆地龙潭组/吴家坪组沉积相自南西向北东呈现由海陆过渡相向海相的过渡, 川东地区自川东南像川东北依次发育滨岸-沼泽相到深水陆棚相[23] [25]。结合本次研究与前人研究成果, 川东南滨岸-沼泽相龙潭组有机质以陆源高等植物输入为主, 发育镜质组为主的 III 型有机质; 川东北深水陆棚相吴家坪组有机质来源以水生生物为主, 发育腐泥组为主的 II 型有机质[15]。川东南龙潭组靠近盆地西南部康滇古陆物源区, 富含大量黏土矿物[13]。随水动力向海方向迁移至川东北吴家坪组, 黏土矿物含量降低, 深水环境发育大量生物成因石英[36]与碳酸盐矿物。本文分别从有机质和矿物组成两方面, 分析龙潭组/吴家坪组泥页岩微观孔隙的发育特征及影响因素。

### 5.1. 有机质对孔隙发育的影响

本次研究所涉及的龙潭组/吴家坪组泥页岩有机质都处于高-过成熟度阶段, 前人研究发现, 在高-

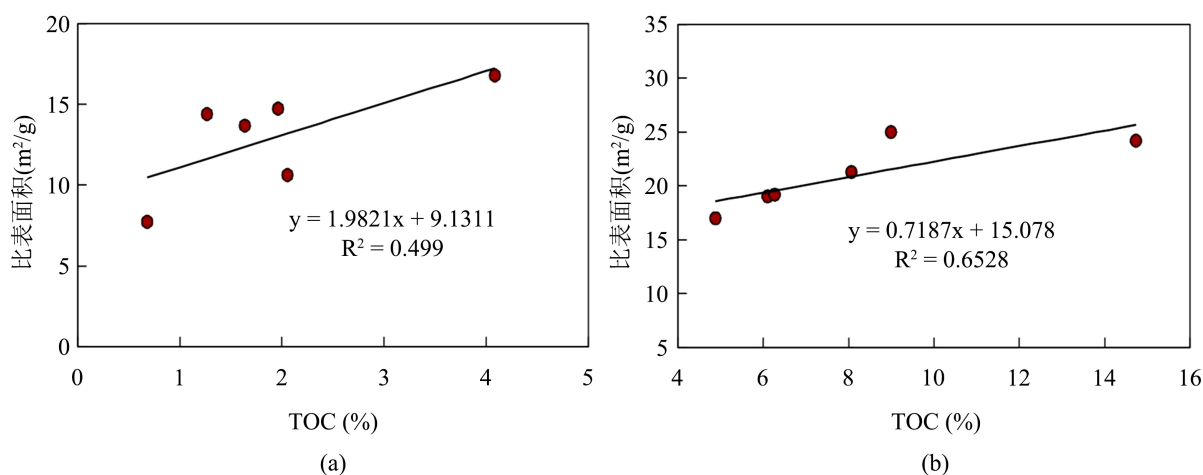


过成熟条件下,有机质类型及干酪根组分对有机孔的发育具有重要影响。由于腐泥组 I、II 型干酪根具有较好的生烃能力,大量生成的烃类随演化程度增大二次裂解成气,导致有机质内孔隙空间快速膨胀,从而形成大量有机质孔[18],而镜质组 III 型干酪根生气能力较差,有机质内部孔隙相对欠发育[7]。本次研究结果与前人一致,川东北吴家坪组泥页岩以腐泥组为主的 II 型有机质孔数量多,孔径小(图 7(c),图 7(d)),而龙潭组干酪根主要为 III 型,有机质致密,与吴家坪组相比有机质孔发育情况较差,见少量有机质边缘缝发育(图 7(a),图 7(b))。



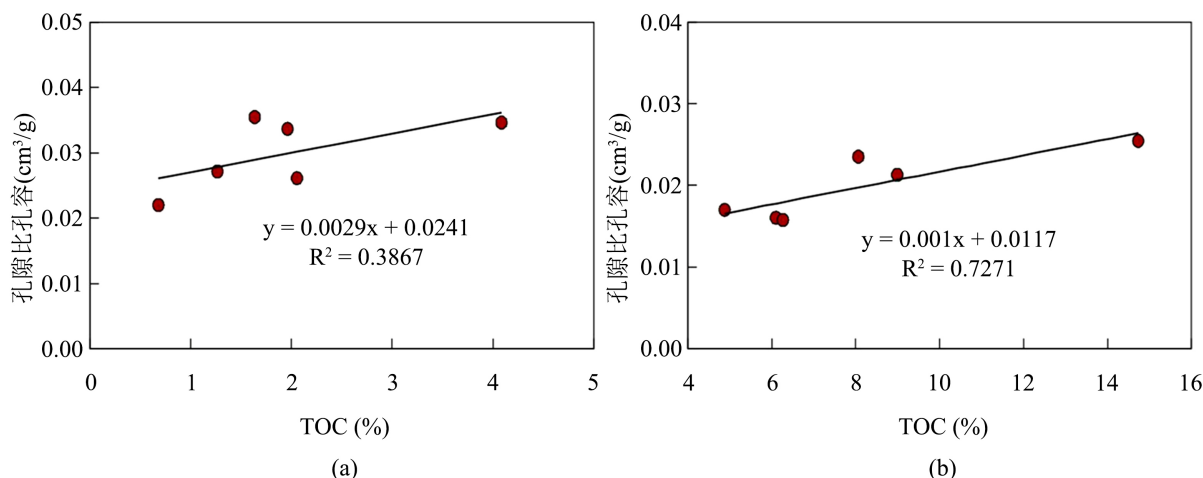
**Figure 7.** Development characteristics of organic matter pores in Longtan formation (a, b) and Wujiaping formation (c, d)  
**图 7.** 龙潭组(a、b)和吴家坪组(c、d)有机质孔发育特征

除有机质类型外,有机质含量也对有机质孔的发育具有重要影响。已有学者通过研究海相泥页岩孔隙结构特征,发现随着 TOC 含量增加,有机质孔隙大量增加,孔隙比表面积、比孔容均与 TOC 含量呈正相关关系[37]。本次研究基于龙潭组海陆过渡相和吴家坪组海相泥页岩,分别建立孔隙比表面积、比孔容与 TOC 含量间相关关系(图 8、图 9)。发现龙潭组泥页岩孔隙比表面积、比孔容与 TOC 含量呈较弱的正相关关系,与龙潭组相比,吴家坪组泥页岩孔隙比表面积、比孔容与 TOC 含量则呈现出较强的正相关关系。分析原因为与龙潭组泥页岩相比,吴家坪组泥页岩有机质孔在总孔隙中占比更大,有机质孔为主要孔隙类型,因而受 TOC 含量的影响更大。



**Figure 8.** Correlation between pore specific surface area and TOC of mud shale in Longtan formation (a) and Wujiaping formation (b)

**图 8.** 龙潭组(a)和吴家坪组(b)泥页岩孔隙比表面积与 TOC 的相关关系



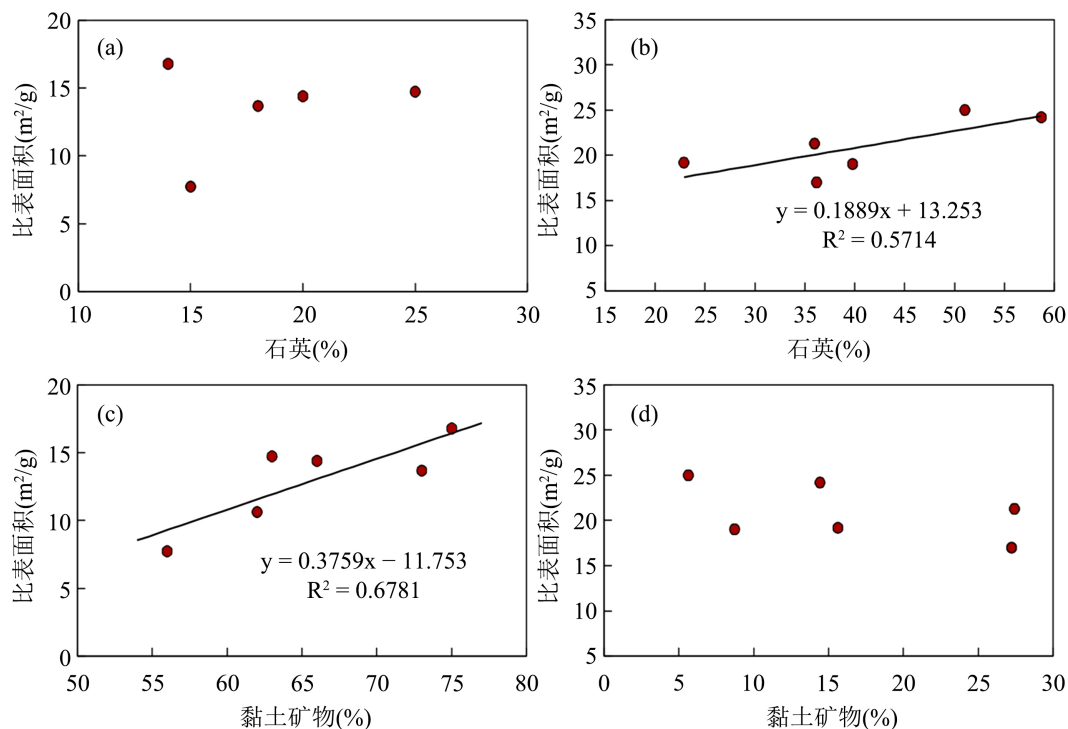
**Figure 9.** Correlation between specific pore volume and TOC of mud shale in Longtan formation (a) and Wujiaping formation (b)

**图 9.** 龙潭组(a)和吴家坪组(b)泥页岩孔隙比孔容与 TOC 的相关关系

## 5.2. 矿物组成对孔隙发育的影响

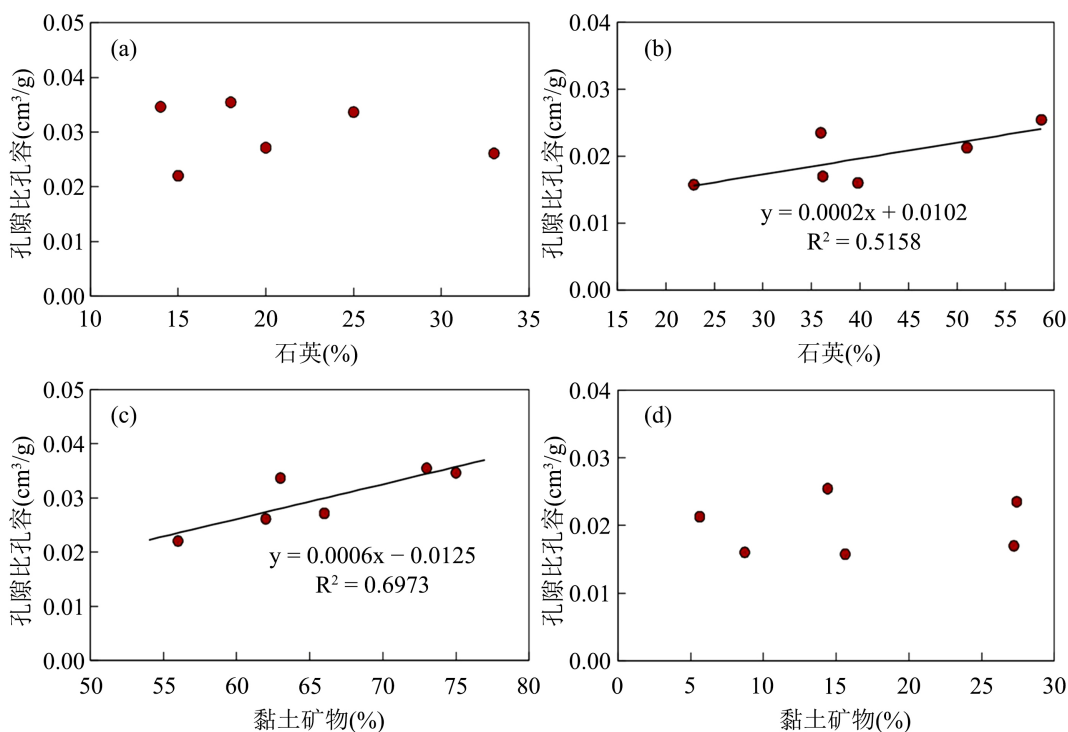
黏土矿物和石英等脆性矿物对孔隙的发育和保存具有重要作用[17]。龙潭组泥页岩矿物中大量存在的伊/蒙混层为和高岭石有利于黏土矿物孔的发育[7]，黏土矿物粒内孔为龙潭组泥页岩的主要孔隙类型。建立龙潭组泥页岩孔隙比表面积、比孔容与黏土矿物含量、石英含量的关系(图 10(a)、图 10(c)、图 11(a)、图 11(c))，结果显示孔隙比表面积、比孔容与黏土矿物含量呈较强的正相关，与石英等脆性矿物含量无明显相关性，说明黏土矿物含量为龙潭组泥页岩孔隙结构的主要影响因素。吴家坪组泥页岩矿物组分则以石英等脆性矿物为主，黏土含量低，导致吴家坪组泥页岩黏土矿物孔发育较差，以有机质孔的发育为主。建立吴家坪组泥页岩孔隙比表面积、比孔容与黏土矿物含量、石英含量的关系(图 10(b)、图 10(d)、图 11(b)、图 11(d))，结果显示孔隙比表面积、比孔容与黏土矿物无明显相关性，与石英等脆性矿物含量则呈现正相关，分析原因为石英等脆性矿物的强抗压实能力有助于支撑有机质，有利于有机质孔的保存[7]，因而在以有机孔为主的吴家坪组泥页岩中对孔隙发育的贡献仅次于 TOC 含量。





**Figure 10.** Correlation between specific surface area and mineral content of mud shale in Longtan formation (a), (c) and Wujiaping formation (b), (d)

**图 10.** 龙潭组(a)、(c)和吴家坪组(b)、(d)泥页岩比表面积与矿物含量的相关关系



**Figure 11.** Correlation between specific pore volume and mineral content of mud shale in Longtan formation (a), (c) and Wujiaping formation (b), (d)

**图 11.** 龙潭组(a)、(c)和吴家坪组(b)、(d)泥页岩比孔容与矿物含量的相关关系

## 6. 结论

1) 沉积环境的不同导致龙潭组/吴家坪组泥页岩有机质以及矿物组分具有显著差异, 进而影响孔隙特征差异性。川东南龙潭组滨岸沼泽相泥页岩, 有机质主要为镜质组 III 型干酪根, 矿物组分以黏土矿物为主, 有机质孔不发育, 主要孔隙类型为平板状、狭缝状黏土矿物粒内孔, 以介孔和宏孔为主。

2) 川东北吴家坪组深水陆棚相泥页岩, 有机质主要为腐泥组 II 型干酪根, 矿物组分以石英等脆性矿物为主, 有机孔发育, 主要孔隙类型为细瓶颈和墨水瓶状有机质孔, 以介孔为主。

3) 黏土矿物含量为龙潭组孔隙发育的主要控制因素, 孔隙比表面积、比孔容与黏土矿物含量正相关; TOC 含量为吴家坪组泥页岩孔隙发育的主要控制因素, 孔隙比表面、比孔容与 TOC 含量正相关。

## 参考文献

- [1] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 张金川, 史淼, 王东升, 等. 中国页岩气勘探领域和发展方向[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 69-80.
- [3] 郭旭升, 胡东风, 刘若冰, 魏祥峰, 魏富彬. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 11-18.
- [4] 刘光祥, 金之钧, 邓模, 等. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 481-487.
- [5] 杨跃明, 张少敏, 金涛, 等. 川南地区二叠系龙潭组页岩储层特征及勘探潜力[J]. 岩性油气藏, 2022, 35(1): 1-11.
- [6] 赵培荣, 高波, 郭战峰, 魏志红. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 335-344.
- [7] 李进, 王学军, 周凯, 等. 海陆过渡相超深层页岩储层特征——以川东北普光气田 Y4 井上二叠统龙潭组下段为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 71-84.
- [8] 赵可英, 郭少斌. 海陆过渡相页岩气储层孔隙特征及主控因素分析——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 141-149.
- [9] 何焱, 唐玄, 单衍胜, 等. 四川盆地及其周缘典型地区龙潭组页岩岩相划分对比及特征[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 174-190.
- [10] 曹茜, 温真桃, 徐浩, 戚明辉, 王兴志. 川南 D 区龙马溪组页岩有机质孔隙发育特征及影响因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 599-609.
- [11] 郑珊珊, 刘洛夫, 汪洋, 等. 川南地区五峰组-龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 55-65.
- [12] 何建华, 丁文龙, 付景龙, 李昂, 代鹏. 页岩微观孔隙成因类型研究[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(5): 30-35.
- [13] 罗忠, 邵龙义, 姚光华, 等. 滇东黔西上二叠统含煤岩系泥岩粘土矿物组成及环境意义[J]. 古地理学报, 2008, 10(3): 297-304.
- [14] 蔡光银, 蒋裕强, 李星涛, 等. 海陆过渡相与海相富有机质页岩储层特征差异[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 1030-1042.
- [15] 朱扬明, 顾圣喙, 李颖, 等. 四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 35-44.
- [16] 曹涛涛, 刘光祥, 曹清古, 邓模. 有机显微组成对泥页岩有机孔发育的影响——以川东地区海陆过渡相龙潭组泥页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 40-53.
- [17] 张吉振, 李贤庆, 郭曼, 等. 川南地区二叠系龙潭组页岩微观孔隙特征及其影响因素[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1571-1578.
- [18] 陈斐然, 魏祥峰, 刘珠江, 敖明冲, 燕继红. 四川盆地二叠系龙潭组页岩孔隙发育特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1593-1602.
- [19] 肖威, 张兵, 姚永君, 等. 川东二叠系龙潭组页岩岩相特征与沉积环境[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 152-162.
- [20] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组-茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 8-15.

- [21] 刘树根, 文龙, 宋金民, 等. 四川盆地中二叠统构造-沉积分异与油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(4): 385-413.
- [22] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 陈建平, 赵喆. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三)南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 1-19.
- [23] 黄大瑞, 蔡忠贤, 朱扬明. 川东北龙潭(吴家坪)组沉积相与烃源岩发育[J]. 海洋石油, 2007, 27(3): 57-63.
- [24] 王秀平, 王启宇, 安显银. 川南地区二叠系沉积环境及其演化特征——以四川古蔺芭蕉村剖面为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(3): 398-412.
- [25] 赵宗举, 周慧, 陈轩, 等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(S2): 35-51.
- [26] 陈聪. 四川盆地晚二叠世吴家坪组层序岩相古地理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2022.
- [27] Gareth, R., Chalmers, R., Bustin, M. and Power, I.M. (2012) 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. *AAPG Bulletin*, **96**, 1099-1119. <https://doi.org/10.1306/10171111052>
- [28] Curtis, M.E., Ambrose, R.J. and Sondergeld, C.H. (2010) Structural Characterization of Gas Shales on the Micro- and Nano-Scales. *Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*, Calgary, 19-21 October 2010. <https://doi.org/10.2118/137693-MS>
- [29] 焦堃, 姚素平, 吴浩, 李苗春, 汤中一. 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.
- [30] 孙文峰, 李玮, 董智煜, 等. 页岩孔隙结构表征方法新探索[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(2): 125-130.
- [31] 田华, 张水昌, 柳少波, 张洪. 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.
- [32] 郭娟, 赵迪斐, 梁孝柏, 等. 页岩纳米孔隙的结构量化表征——以川东南地区五峰组为例[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(5): 113-121.
- [33] 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.
- [34] Loucks, R.G., Reed, R.M., Ruppel, S.C. and Hammes, U. (2012) Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-Related Mudrock Pores. *AAPG Bulletin*, **96**, 1071-1098. <https://doi.org/10.1306/081711111061>
- [35] De Boer, J.H., Lippens, B.C., Linsen, B.G., et al. (1966) The Curve of Multimolecular N<sub>2</sub>-Adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, **21**, 405-414. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(66\)90006-7](https://doi.org/10.1016/0095-8522(66)90006-7)
- [36] Sing, K.S.W. (1985) Reporting Physisortion Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*, **57**, 603-619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- [37] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.