第 27 卷　第 5 期
2025 年　10 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27　No. 5
Oct.　2025

文章编号：1671-1505(2025)05-1137-20　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.056

基于有机质孔特征的页岩储集层评价研究：以川南地区五峰组—龙马溪组为例*

唐　晴[1]　梁　超[1,2]　吴　靖[3]　籍士超[1]　谢浩然[1]　赵梓龙[1]

1 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东青岛 266580
2 中国石油大学（华东）深层油气重点实验室，山东青岛 266580
3 山东科技大学地球科学与工程学院，山东青岛 266590

摘　要　有机质孔是页岩气赋存、富集的主要空间，其发育特征对于储集层评价及优选具有重要意义，而目前关于矿物-有机质孔组合类型、特征及非均质性方面的研究较为薄弱。为此，以川南地区五峰组—龙马溪组页岩为研究对象，利用全岩-X 衍射分析、氩离子抛光—扫描电镜、电子探针显微分析、阴极发光、Image J 图像分析等手段，厘清矿物与有机质的赋存关系，刻画矿物-有机质孔组合结构特征，分析不同岩相的矿物-有机质孔组合分布特征，探讨矿物-有机质孔组合的非均质分布对页岩储集层的影响。研究结果表明：(1) 石英、黏土矿物、碳酸盐矿物和黄铁矿与有机质各存在 3 种赋存关系，共识别出 4 类 12 种矿物-有机质孔组合；(2) 矿物-有机质孔组合在不同岩相中的分布表现出差异性，生物硅质页岩以石英-有机质孔组合为主，相对含量为 73.59%；黏土质页岩、长英质-钙质粉砂页岩、钙质页岩和长英质粉砂页岩以黏土矿物-有机质孔组合为主，相对含量分别为 73.45%、55.45%、38.92%、53.66%；钙质粉砂页岩以碳酸盐矿物-有机质孔组合为主，相对含量为 55.01%；(3) 有机质包裹成岩石英和黏土矿物呈流动结构有机质孔的有机质相对含量高、孔径大、成孔率高、孔隙连通性好，是对储集层最有利的 2 类有机质孔；(4) 生物硅质页岩是页岩气的最佳储集层，其中对储集层有利的矿物-有机质孔组合的相对含量高达 33.71%，与其 3.53 m^3/t 的高含气量相吻合。结论认为，矿物-有机质孔组合的分布特征影响页岩的含气性，对储集层有利的矿物-有机质孔组合的相对含量与含气量呈正相关关系，该认识对储集层评价具有重要意义。

关键词　五峰组—龙马溪组　矿物-有机质孔组合　页岩储集层　岩相　非均质性　页岩气富集

第一作者简介　唐晴，女，2000 年生，硕士研究生，研究方向为油气地质学。E-mail：tangqing_sunny@163.com。

通讯作者简介　梁超，男，1986 年生，教授，主要从事细粒沉积学研究。E-mail：liangchao0318@163.com。吴靖，女，1988 年生，教授，主要从事细粒沉积学研究。E-mail：wujing6524982@163.com。

中图分类号：TE122.2+21　　**文献标志码**：A

Evaluation of shale reservoirs based on organic pore characteristics: a case study of the Wufeng and Longmaxi formations in southern Sichuan Basin

TANG Qing[1]　LIANG Chao[1,2]　WU Jing[3]　JI Shichao[1]　XIE Haoran[1]　ZHAO Zilong[1]

1 *School of Geosciences*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Shandong Qingdao* 266580, *China*

* 国家自然科学基金(编号：42172165)、泰山学者计划(编号：TSQN202306208)、山东省高等学校青年创新团队(编号：2022KJ215)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42172165), the Taishan Scholars Program (No. TSQN202306208), and the Youth Innovation Team of Higher Education in Shandong Province, China (No. 2022KJ215)]

收稿日期：2024-11-14　　改回日期：2025-01-17

2 *Key Laboratory of Deep Oil and Gas*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Shandong Qingdao* 266580, *China*
3 *College of Earth Science and Engineering*, *Shandong University of Science and Technology*, *Shandong Qingdao* 266590, *China*

Abstract Organic matter pores serve as the primary spaces for shale gas enrichment and accumulation, and their developmental characteristics are crucial for reservoir evaluation and selection. However, current research on the combinations, characteristics, and heterogeneity of mineral-organic matter pores remains relatively limited. This study focuses on the Longmaxi Formation and Wufeng Formation shales in the southern Sichuan Basin region, employing a suite of techniques including whole-rock X-ray diffraction analysis, argon ion polishing-scanning electron microscopy, electron micro-probe analysis, cathodoluminescence, and Image J image analysis. These methods are used to elucidate the relationships between minerals and organic matter, describe the structural characteristics of mineral-organic matter pore combinations, analyze the distribution patterns of these combinations across different lithofacies, and investigate the impact of their heterogeneous distribution on shale reservoir properties. The results reveal the following key findings: (1) Quartz, clay minerals, carbonate minerals, and pyrite exhibit multiple occurrence relationships with organic matter in shale, and a total of four categories comprising 12 types of mineral-organic matter pore combinations were identified; (2) The distribution of mineral-organic matter pore combinations varies among different lithofacies. Biogenic siliceous shale is predominantly characterized by quartz-organic matter pore combinations, with a relative content of 73.59%. Clay shale, feldspathic-calcareous siltstone, calcareous shale, and feldspathic siltstone are mainly dominated by clay mineral-organic matter pore combinations, with relative contents of 73.45%, 55.45%, 38.92%, and 53.66%, respectively. Calcareous siltstone is primarily characterized by carbonate mineral-organic matter pore combinations, with a relative content of 55.01%; (3) Organic matter encapsulated within quartz and clay minerals exhibits a flow structure, characterized by high organic matter content, large pore size, high porosity, and good pore connectivity. These pore types are the most favorable for reservoir development; (4) Biogenic siliceous shale is identified as the optimal shale gas reservoir, and its high gas content (3.53 m^3/t) aligns closely with the high relative abundance (33.71%) of favorable mineral-organic matter pore combinations. In conclusion, the distribution characteristics of mineral-organic matter pore combinations significantly influence the gas content of shale, and the relative content of favorable pore combinations is positively correlated with gas content. This finding holds substantial implications for the evaluation and selection of shale gas reservoirs.

Key words Wufeng and Longmaxi formations, mineral-organic matter pore combination, shale reservoir, lithofacies, heterogeneity, shale gas enrichment

About the first author TANG Qing, born in 2000, master student, is engaged in petroleum geology research. E-mail: tangqing_sunny@163.com.

About the corresponding authors LIANG Chao, born in 1986, professor, is mainly engaged in fine-grained sedimentology research. E-mail: liangchao0318 @ 163.com. WU Jing, born in 1988, professor, is mainly engaged in fine-grained sedimentology research. E-mail: wujing6524982@163.com.

0 引言

四川盆地页岩气资源潜力巨大，截至 2023 年四川盆地页岩气已探明地质储量达 3.14×10^{12} m^3（姜鹏飞等，2023）。随着页岩气勘探由中浅层向深层、超深层延伸，发现不同层位、不同岩性下页岩储集层发育特征差异较大(Xu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020; 腾格尔等，2021)。有机质孔是海相页岩储集层中主要的孔隙类型，是页岩气富集的一项

关键要素(金之钧等，2016；陈斐然等，2020)，其发育受有机质丰度、孔隙度、矿物类型、应力等多种因素的制约(Wang，2020；Xu *et al.*，2020)，形成演化过程复杂，具有强烈的非均质性。

对孔隙的合理分类是对页岩油气储集性准确评价的重要前提之一，Milliken 等（2013）对阿拉巴契亚盆地 Marcellus 页岩中富集的有机质孔隙进行分类，将其分为复杂孔隙、矿物相关孔隙、海绵状孤立孔隙及等轴孤立孔隙。Sun 等（2024）提出纳米级有机质—黏土复合体是松辽盆地青山口组的主要储集空间，并将其分为条带状、块状、网状及裂缝形 4 种。在四川盆地五峰—龙马溪组，矿物-有机质孔组合的分类较为复杂，例如赵迪斐等(2020）将其划分为莓状黄铁矿微晶间有机孔隙组合、黏土矿物-有机质复合体孔隙组合、黏土矿物-有机质聚合体孔隙组合及笔石有机质孔隙。此外，在川西南筇竹寺组页岩中发现黏土矿物-有机质组合和草莓状黄铁矿-有机质组合，黏土矿物-有机质孔组合多呈狭长三角形，草莓状黄铁矿-有机质孔组合多呈圆球形（王淑芳等，2016；刘忠宝等，2018)。卢龙飞等（2018）在中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩中发现生物成因微晶石英与有机质组合，其内部发育不规则状的有机质孔。陈增裕等（2023）则在长宁地区五峰组—龙马溪组页岩中发现有机质存在于黄铁矿化的生物体腔中，有机质孔呈圆球形。然而，这些矿物-有机质孔组合的具体类型、特征和成藏优劣性尚未明确，这导致对页岩储集层中矿物-有机质孔组合的非均质分布及其意义的认识仍不清楚，影响页岩储集层精细评价及优选。

针对上述关键问题，本研究以川南地区五峰组—龙马溪组页岩储集层为研究对象，运用氩离子抛光—扫描电镜、电子探针显微分析和阴极发光等手段，分析有机质与矿物的赋存关系，明确矿物-有机质孔组合类型及特征。利用 Image J 图像分析软件准确提取孔隙参数，研究不同类型矿物-有机质孔组合富集油气的能力。以此为基础，精细对比不同岩相类型矿物-有机质孔组合分布差异，识别页岩气富集的优势岩相。

1　研究区地质概况

四川盆地位于中国西南部，是一个大型富气叠合盆地(汪泽成等，2002；Guan *et al.*，2021)。在奥陶纪，四川盆地构造和沉积演化发生变动，由被动大陆边缘转为前陆盆地(Zhang *et al.*，2013；李皎等，2015；Liang *et al.*，2016)，受广西运动影响，奥陶纪晚期黔中隆起、川中隆起和雪峰隆起出现，四川盆地由开阔海相逐步转为被古隆起包围的局限海相(Zou *et al.*，2018；Wu *et al.*，2019；Li *et al.*，2021)。

受奥陶纪晚期至志留纪早期大规模的海侵和构造活动的影响(Chen *et al.*，2004)，五峰组—龙马溪组页岩在低能强还原环境中沉积，并发育了川北、川东和川南沉积中心(Zhu *et al.*，2021)(图 1-A)。位于川南沉积中心的五峰组—龙马溪组页岩段是本研究的目标层段(图 1-B)。五峰组主要发育黑色富有机质页岩，其硅质含量高，并含有丰富的笔石、放射虫、海绵骨针等化石(Chen *et al.*，2004；梁超等，2023)。龙马溪组主要发育深灰色—黑色富有机质页岩，下部硅质含量高，向上砂质含量增加，笔石化石减少(聂海宽等，2017；韩豫等，2024)。

2　样品及孔隙分析方法

2.1　样品采集分析

样品来自 Z203 井、W213 井、W214 井、L204 井、L205 井、L212 井、L214 井、L215 井和 N227 井的五峰组—龙马溪组(图 1)。本研究以 L212 井和 L214 井为重点，分析海相页岩孔隙类型、特征及分布情况。

L212 井和 L214 井共采集样品 173 块，样品选取时采取了等距离（1 m）密集采样的方式。普通薄片观察 54 片，氩离子抛光—扫描电镜分析 20 块，全岩-X 衍射和 TOC 分析 173 块。

2.2　孔隙分析方法

为了获得高精度和大视域的孔隙图像，采用氩离子抛光制作、图像采集、孔隙类型及特征分析等研究步骤和方法。氩离子抛光尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm，图像采集选用 Zeiss 双束扫描电镜，放大倍数为 $(0.3\sim500)\times10^3$ 倍。在 500 倍的扫描电镜下，初步观察样品的一般特征，在较大的放大倍率下利用能谱分析、阴极发光等手段测定矿物-有机质组合的分布和大小，然后将样品细分为几个具有代表性的微区（100×100 μm)，每个区域连续采集大量图像。结合有机质、矿物和孔隙的灰度差

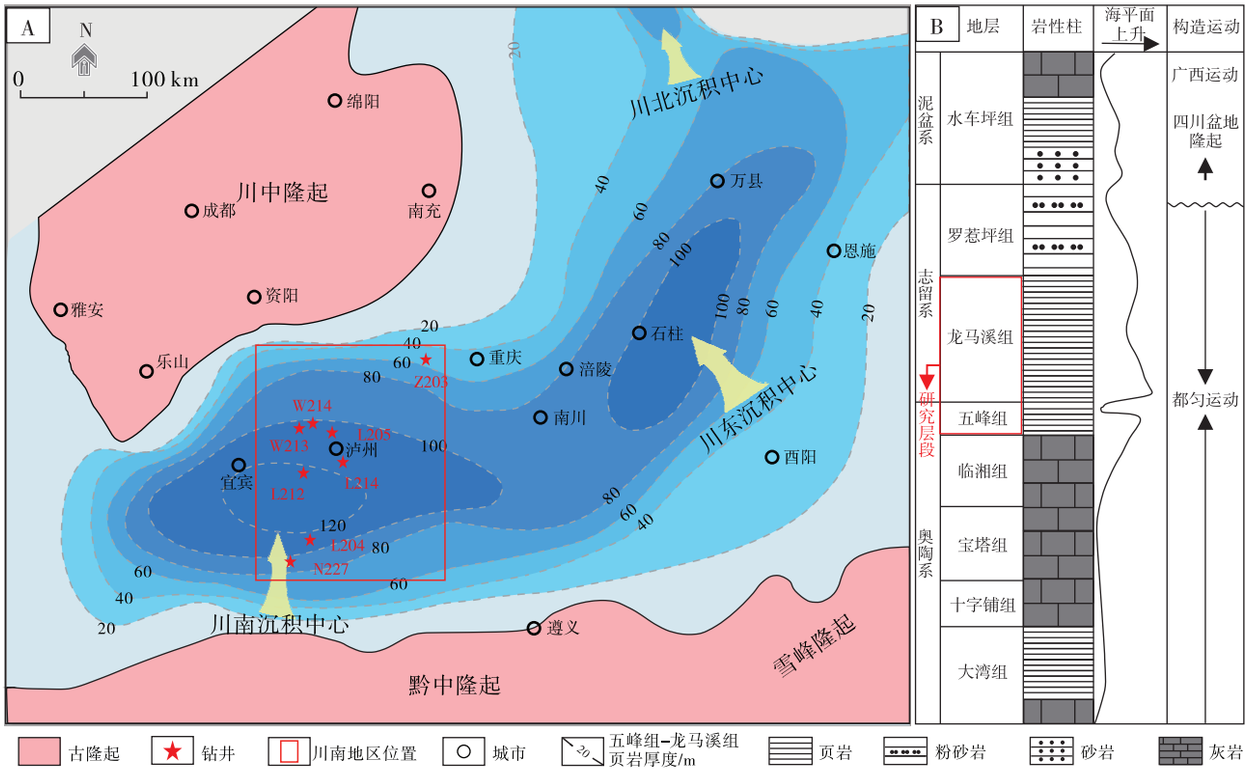


图 1 四川盆地地质构造图（A）及地层柱状图（B）

（据 Chen *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2021; 修改）

Fig. 1 Geological structure map (A) and stratigraphic column (B) of Sichuan Basin

(modified from Chen *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2021)

异，可以利用 Image J 图像分析软件对有机质、有机质孔进行提取。自动识别过程中，采用多次调试的方法选取图像灰度阈值，直至实现最佳效果。对某些软件无法识别的图像区域，需进行人工微调，直至所有的孔隙被识别(图 2)。然后，统计各个区域不同类型矿物-有机质孔组合的数目、大小、面孔率（有机质孔的面积占整个视域面积的百分比）、成孔率（有机质孔的面积占有机质面积的百分比）等参数，并统计不同岩相中不同矿物-有机质孔组合的占比。最后，利用 Excel 软件绘制不同

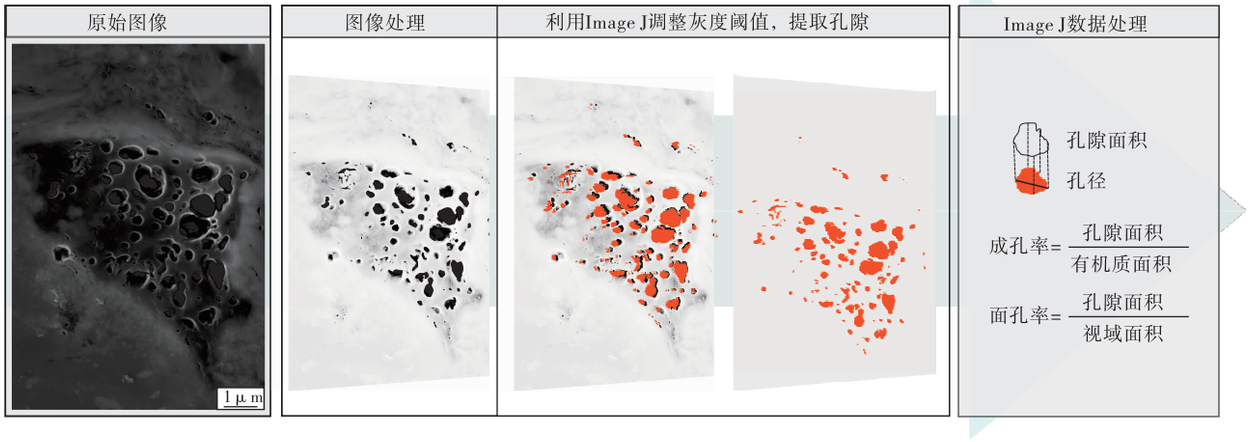


图 2 Image J 提取孔隙流程图

Fig. 2 Image J flow chart of extracting pores

类型矿物-有机质孔组合孔径分布图、不同岩相中不同类型矿物-有机质孔组合组成分布图等。图像识别过程中，孔径是将 SEM 图像中孔隙面积等效为同等圆形的截面积计算出的孔隙直径，也可称为等效圆孔径或等效孔径。由于电镜图像分辨率的限制，孔隙的统计不包括小于 2 nm 的。

3　实验结果

3.1　矿物组分和 TOC

川南地区五峰组—龙马溪组页岩矿物组分以石英、黏土矿物、碳酸盐矿物为主，长石和黄铁矿含量较少。其中，石英含量介于 5.8%~80.8%，平均值为 44.24%；黏土矿物含量介于 6.4%~80.2%，平均值为 31.53%；碳酸盐矿物含量介于 1.6%~71.8%，平均值为 14.1%；长石含量介于 1.1%~15.6%，平均值为 7%；黄铁矿含量介于 1%~16.8%，平均值为 3.34%。有机质含量变化范围较大，介于 0.07%~7.1%，平均值为 2.3%(图 3)。

3.2　孔隙类型及特征

页岩储集层储集物性差，低孔隙度、超低渗透率，储集空间孔径以纳米级至微米级为主（Slatt and O'Brien，2011；Loucks *et al.*，2012；何建华

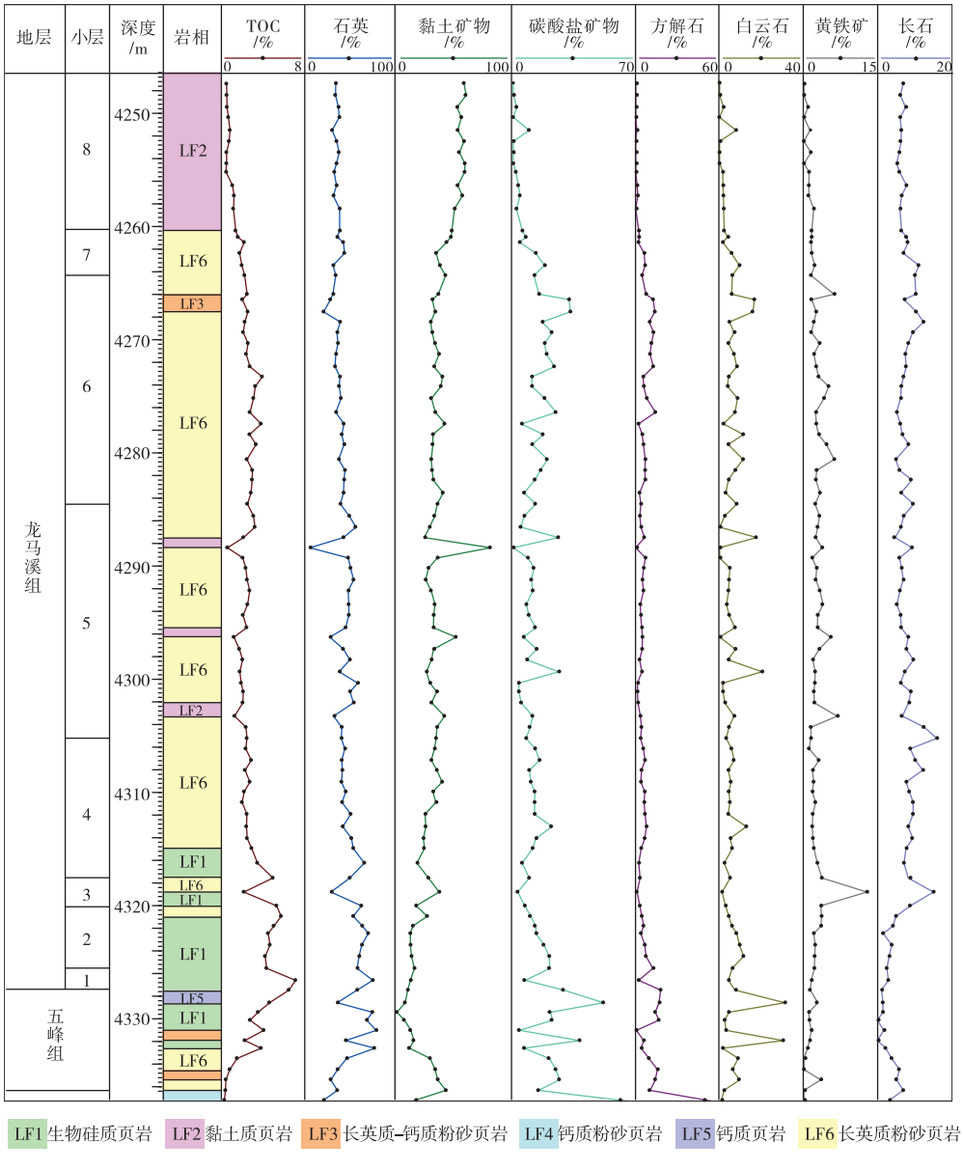


图 3　川南地区五峰组—龙马溪组 L214 井岩相综合柱状图

Fig. 3　Comprehensive lithofacies column of Well L214 in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

等，2014）。川南地区五峰组—龙马溪组主要发育无机孔、有机质孔，前者包括粒内孔和粒间孔，后者包括石英-有机质孔、黏土矿物-有机质孔、碳酸盐矿物-有机质孔和黄铁矿-有机质孔组合。

3.2.1 无机孔

1）粒内孔

一般发育在矿物颗粒内部，主要包括粒内溶蚀孔。粒内溶蚀孔是不稳定矿物发生化学溶蚀形成的，呈弧形、椭圆形，孔径介于 20～1200 nm。其中碳酸盐矿物粒内溶蚀孔最为发育（图 4-A，4-B），其次是长石粒内溶蚀孔（图 4-C），少见石英粒内溶蚀孔。

2）粒间孔

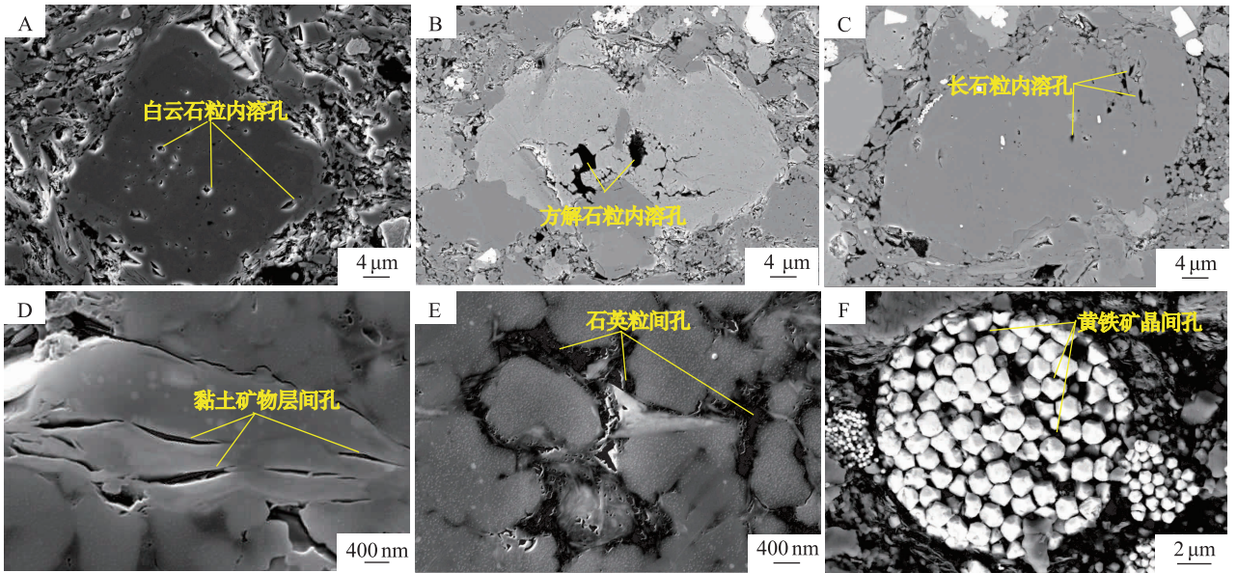
通常发育在矿物颗粒接触处，是矿物颗粒排列堆积、成岩压实后颗粒之间残留的原生孔隙，主要包括黏土矿物层间孔和石英、黄铁矿等刚性矿物颗粒粒间孔。黏土矿物层间孔形成于黏土矿物转化过程中，呈狭缝形、不规则形，孔径介于 8～400 nm（图 4-D）。研究区石英含量丰富，发育大量粒间孔（图 4-E），形态不规则，孔径介于 5～1200 nm。黄铁矿晶间孔多为狭缝形（图 4-F），孔径 4～200 nm。

3.2.2 有机质孔

有机质孔形成于有机质生烃过程中，主要发育在有机质内部，是页岩储集层孔隙的重要组成部分（Curtis *et al.*，2012）。川南地区五峰组—龙马溪组页岩有机质含量高，有机质孔大量发育，多呈圆形、椭圆形、蜂窝状，孔径大多为纳米级，孔隙之间的连通性较好，是主要的储集空间（Chen *et al.*，2017；Zhou *et al.*，2018）。有机质与矿物的赋存关系复杂，有机质孔具有强烈的非均质性。本研究选取石英、黏土矿物、碳酸盐矿物和黄铁矿 4 种矿物，分析其形态、成因及与有机质的接触关系，划分出 12 类矿物-有机质孔组合（表 1）。选取的原则为相对含量高（石英和黏土矿物）、对页岩沉积影响大（碳酸盐矿物）和标志性矿物（黄铁矿）等（吴靖等，2018；管全中，2020）。

1）石英-有机质孔组合

石英-有机质孔组合孔径介于 8～885 nm，平均孔径 63.4 nm，孔径集中分布在 20～50 nm，占比 65%（图 5-A）。通过对石英的形态、粒度和阴极发光特征进行鉴定，识别出碎屑石英、成岩石英和生物石英 3 类石英（王秀平等，2015；赵建华等，2016；Niu *et al.*，2018；Qiu *et al.*，2020；王昕尧



A—白云石粒内溶蚀孔隙，扫描电镜，L204 井，3828.27 m，五峰组；B—方解石粒内溶蚀孔隙被有机质充填，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；C—长石粒内溶蚀孔隙被有机质充填，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；D—黏土矿物层间孔，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；E—石英粒间孔被有机质充填，扫描电镜，L214 井，4330.08 m，五峰组；F—黄铁矿晶间孔，扫描电镜，W214 井，3575.05 m，龙马溪组

图 4 川南地区五峰组—龙马溪组页岩无机孔类型及特征

Fig. 4 Types and characteristics of inorganic pores in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

表 1　川南地区五峰组—龙马溪组页岩有机质孔分类及特征

Table 1　Classification and characteristics of organic pores in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

类别	代号	特征	有机质相对含量/%	有机质孔孔径分布/nm		成孔率/%	面孔率/%	孔隙密度/个·μm^{-2}
石英-有机质孔组合	Q1	有机质充填碎屑石英间孔隙,有机质孔呈蜂窝状	19	11~885 112.0	8~885 63.4	3.50~14.45 6.94	2.02~4.69 3.27	9.11
	Q2	成岩石英被有机质包裹,有机质孔形态多样	58	19~812 136.0		10.43~11.00 10.71	2.19~4.67 3.03	10.48
	Q3	有机质充填硅质生物中央腔室,有机质孔呈蜂窝状、针状	26	8~342 37.0		5.38~12.87 10.01	1.97~3.58 2.87	8.87
黏土矿物-有机质孔组合	Cl1	有机质、成岩石英和黄铁矿共存在黏土矿物层间,有机质孔多呈圆形	40	12~695 71.2	9~1277 88.2	4.23~10.98 9.56	0.57~8.42 3.92	5.57
	Cl2	黏土沿一个或多个方向随有机质迁移,具流动结构,有机质孔呈椭圆形、针状	92	9~353 59.0		2.89~8.26 4.76	0.41~3.77 1.63	5.54
	Cl3	脉状有机质被黏土矿物包裹,有机质孔多呈圆形	42	33~1277 155.8		5.65~16.63 12.08	2.51~6.27 4.05	0.71
碳酸盐矿物-有机质孔组合	Carb1	有机质充填碳酸盐矿物颗粒外围溶蚀孔缝,有机质孔呈蜂窝状、不规则状	10	25~553 56.1	7~576 44.6	6.57~13.93 9.49	0.70~1.55 1.12	0.25
	Carb2	有机质充填碳酸盐矿物颗粒内部溶孔,有机质孔呈蜂窝状	5	7~301 33.7		1.74~6.33 4.03	0.17~1.23 1.04	0.28
	Carb3	脉状有机质接触碳酸盐矿物颗粒,有机质孔呈蜂窝状	15	10~576 54.6		6.30~13.66 9.98	1.87~4.63 3.25	1.37
黄铁矿-有机质孔组合	Py1	有机质充填草莓状黄铁矿晶间孔,有机质孔呈圆形	12	23~386 80.9	11~795 54.7	5.60~10.66 8.13	0.83~1.42 1.15	4.54
	Py2	有机质、成岩石英和黏土矿物充填生物中央腔室,有机质孔呈蜂窝状	37	11~208 33.7		3.80~9.94 7.78	0.86~5.10 2.98	1.92
	Py3	黄铁矿和有机质共同充填在黏土矿物层间,有机质孔多呈圆形	42	12~795 77.6		4.23~10.98 7.61	0.99~5.34 3.42	5.07

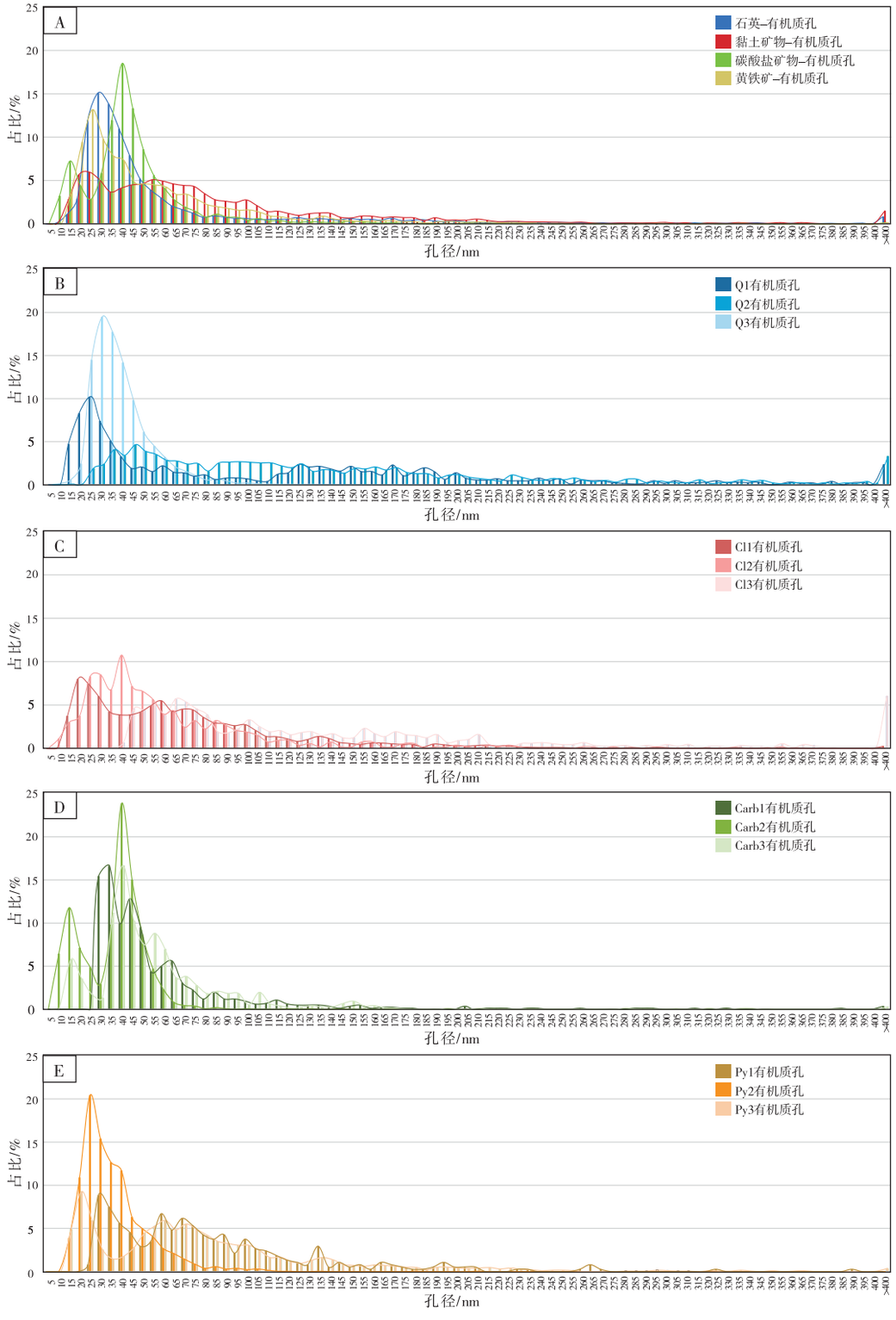
注：$\frac{11\sim885}{112.0}$ 表示：$\frac{\text{最小值}\sim\text{最大值}}{\text{平均值}}$。

等，2022）。

Q1 组合中，碎屑石英形态常呈次圆—次棱角状（图 6-A），颗粒较大，粒径介于 3~30 μm 之间，SEM-CL 图像表现为强发光（图 6-B），阴极发光谱图有 2 个谱峰，主峰在 550~600 nm 处，次峰在 300~320 nm 处（图 6-C）。有机质充填碎屑石英粒间孔隙（图 6-D），有机质孔呈蜂窝状，随机定向（图 6-E），孔径介于 11~885 nm 之间，平均孔径 112.0 nm，孔径集中分布在 11~35 nm，占比 35.8%，有 2.4%的有机质孔径大于 400 nm（图 5-B），成孔率平均 6.94%，面孔率平均 3.27%（表 1）。

Q2 组合中，成岩石英包括黏土矿物转化过程中形成的石英和硅质生物溶解再沉淀形成的石英，呈半自形、自形、球形，粒径 0.1~2 μm，常胶连成片（图 6-A），SEM-CL 图像通常不发光（图 6-B）。有机质包裹成岩石英，有机质孔多呈圆形（图 6-F），孔径介于 19~812 nm 之间，平均孔径 136.0 nm，孔径集中分布在 25~75 nm，占比 32.3%，有 3.3%的孔径大于 400 nm（图 5-B），成孔率平均 10.71%，面孔率平均 3.03%（表 1）。

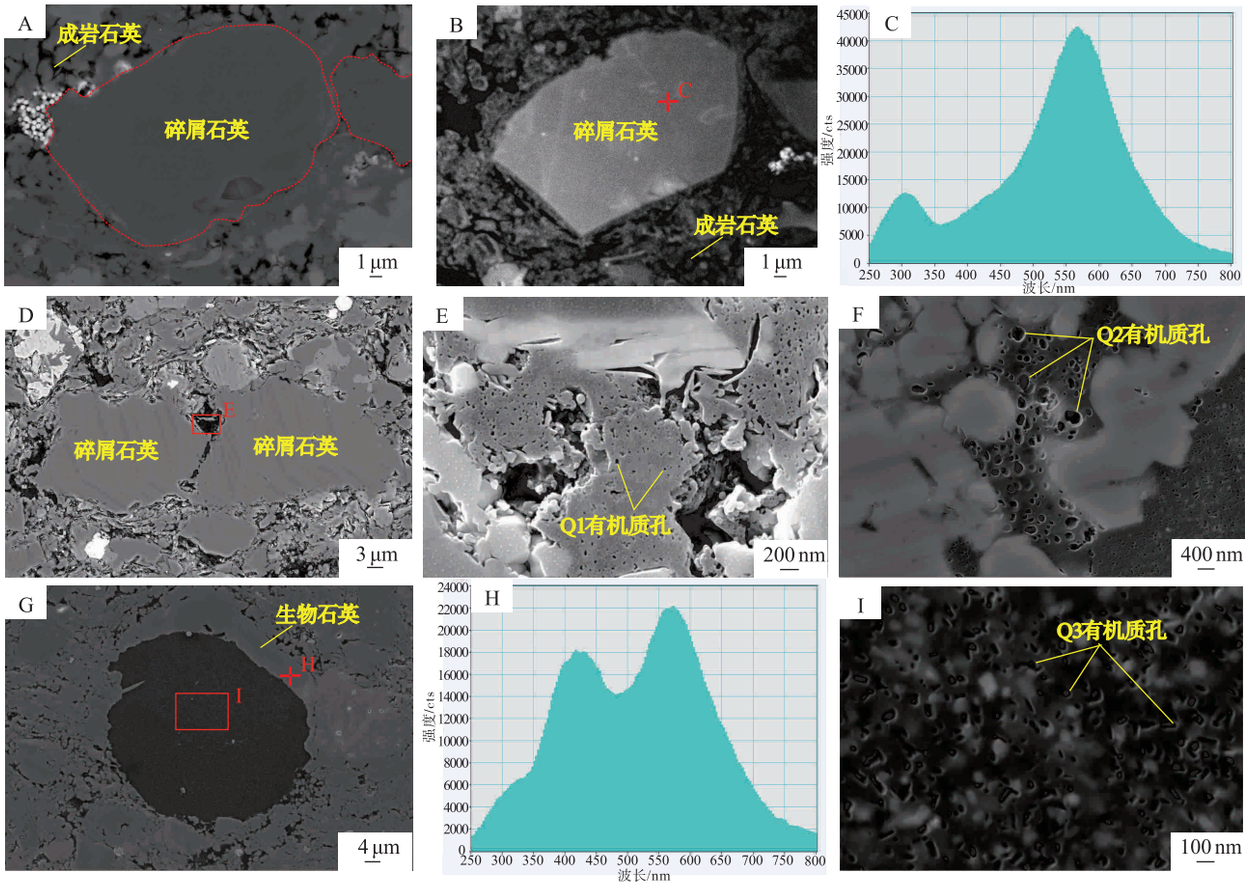
Q3 组合中，生物石英保留硅质生物外形（图 6-G），SEM-CL 图像通常不发光，阴极发光光谱图有 2 个谱峰，主峰在 550~600 nm 处，次峰在 400~450 nm 处（图 6-H）。有机质充填硅质放射虫



A—石英-有机质孔组合、黏土矿物-有机质孔组合、碳酸盐矿物-有机质孔组合、黄铁矿-有机质孔组合孔径分布特征；B—Q1、Q2、Q3 组合有机质孔径分布特征；C—Cl1、Cl2、Cl3 组合有机质孔径分布特征；D—Carb1、Carb2、Carb3 组合有机质孔径分布特征；E—Py1、Py2、Py3 组合有机质孔径分布特征

图 5 川南地区五峰组—龙马溪组页岩有机质孔径分布特征

Fig. 5 Pore size distribution of organic matter in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin



A—碎屑石英和成岩石英特征，扫描电镜，L214 井，4278.07 m，龙马溪组；B—图 A 对应的阴极发光图像；C—图 B 碎屑石英的阴极发光谱图；D—碎屑石英与有机质赋存关系，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；E—图 D 局部放大，Q1 组合有机质孔，扫描电镜；F—Q2 组合有机质孔，扫描电镜，L214 井，4278.07 m，龙马溪组；G—硅质生物，扫描电镜，L212 井，4442.8 m，龙马溪组；H—图 G 生物石英的阴极发光谱图；I—图 G 局部放大，Q3 组合有机质孔，扫描电镜

图 6　川南地区五峰组—龙马溪组页岩石英-有机质孔组合类型及特征

Fig. 6　Quartz-organic matter pore combination types and characteristics in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

和海绵针状体中央腔室，有机质孔呈蜂窝状、针状（图 6-I），孔径介于 8～342 nm 之间，平均孔径 37.0 nm，孔径集中分布在 15～60 nm，占比 92.1%（图 5-B），成孔率平均 10.01%，面孔率平均 2.87%（表 1）。

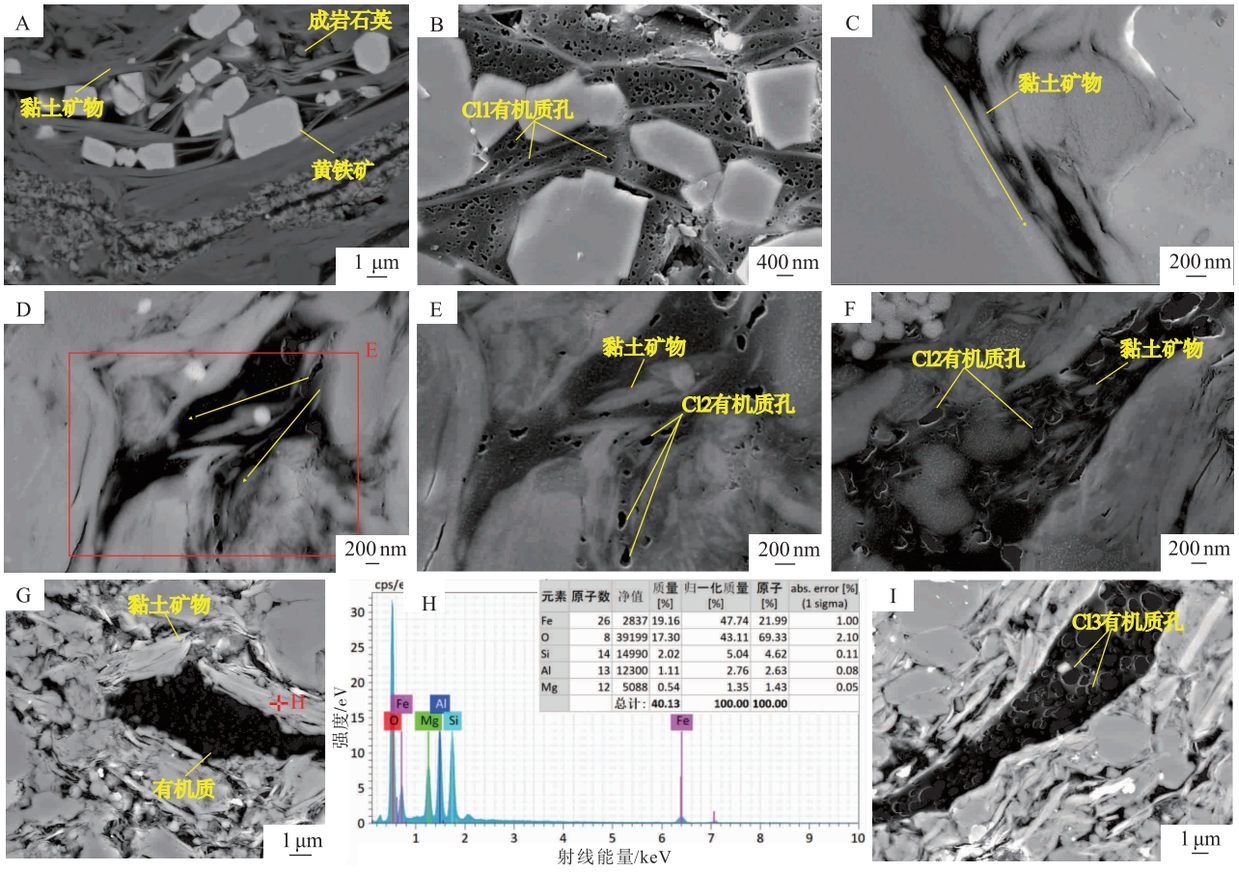
2）黏土矿物-有机质孔组合

黏土矿物-有机质孔组合孔径介于 9～1277 nm 之间，平均孔径 88.2 nm，孔径集中分布在 15～75 nm，占比 56.9%，有 1.55%的有机质孔孔径大于 400 nm（图 5-A）。根据黏土矿物和有机质的接触关系，划分出 Cl1、Cl2、Cl3 共 3 种组合类型，有机质孔显示出不同的特征。

有机质充填在黏土矿物层间，形成 Cl1 组合，成岩石英和黄铁矿等矿物颗粒常与有机质共存于黏土矿物层间（图 7-A）。有机质孔多呈圆形（图 7-B），孔径介于 12～695 nm 之间，平均孔径 71.2 nm，集中分布在 12～35 nm 和 45～80 nm 2 个范围，分别占比 29.6%和 31.5%（图 5-C），成孔率平均 9.56%，面孔率平均 3.92%（表 1）。

Cl2 组合中黏土矿物在一个或多个方向形成不同的流动结构（图 7-C 至 7-F）。有机质孔呈椭圆形、针状（图 7-E，7-F），孔径介于 9～353 nm 之间，平均孔径 59.0 nm，孔径集中分布在 15～55 nm，占比 57.5%（图 5-C），成孔率平均 4.76%，面孔率平均 1.63%（表 1）。

Cl3 组合中黏土矿物包裹有机质，有机质呈脉



A—有机质、成岩石英和黄铁矿共存于黏土矿物层间，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；B—Cl1 组合有机质孔，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；C—黏土矿物沿一个方向迁移，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；D—黏土矿物沿 2 个方向迁移，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；E—图 D 局部放大，Cl2 组合有机质孔，扫描电镜；F—Cl2 组合有机质孔，无序黏土矿物被有机质包裹，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；G—有机质被黏土矿物包裹，扫描电镜，L214 井，4320.5 m，龙马溪组；H—图 G 黏土矿物的能谱分析；I—Cl3 组合有机质孔，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组

图 7 川南地区五峰组—龙马溪组页岩黏土矿物-有机质孔组合类型及特征

Fig. 7 Clay mineral-organic matter pore combination types and characteristics in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

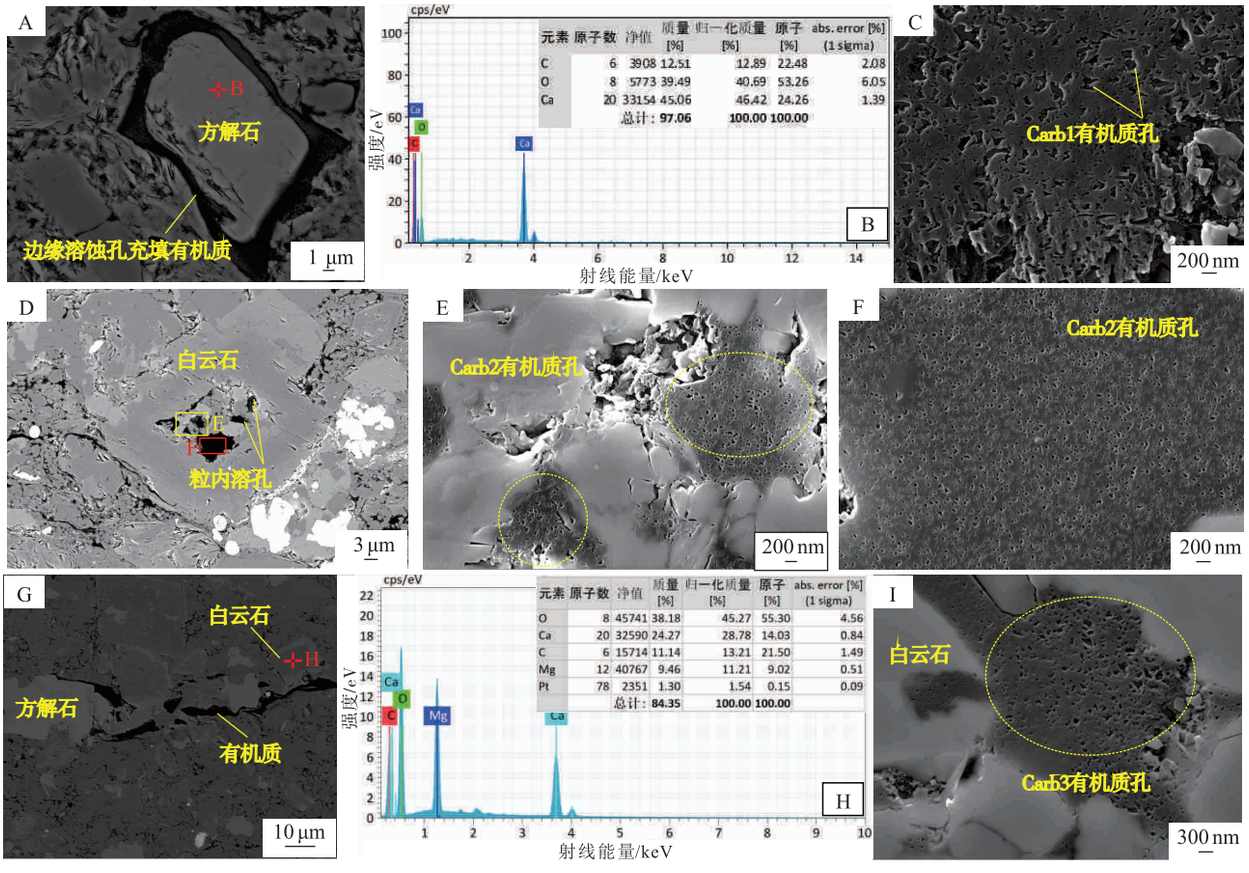
状(图 7-G)。有机质孔多呈圆形(图 7-I)，孔径介于 33~1277 nm 之间，平均孔径 155.8 nm，孔径集中分布在 40~80 nm，占比 37.5%，有 6%的有机质孔孔径大于 400 nm (图 5-C)，成孔率平均 12.08%，面孔率平均 4.05%(表 1)。

3) 碳酸盐矿物-有机质孔组合

碳酸盐矿物-有机质孔组合孔径介于 7~576 nm 之间，平均孔径 44.6 nm，孔径集中分布在 25~55 nm，占比 63.8%(图 5-A)。碳酸盐矿物 (主要指方解石和白云石) 在成岩过程中易被溶蚀形成边缘和粒内溶蚀孔，有机质常充填其中，形成 Carb1、Carb2 组合，也可见碳酸盐矿物颗粒与脉状有机质接触，形成 Carb3 组合。

Carb1 组合中有机质充填碳酸盐矿物颗粒外围溶蚀孔缝(图 8-A)。有机质孔呈蜂窝状、不规则状(图 8-B)，孔径介于 25~553 nm 之间，平均孔径 56.1 nm，孔径集中分布在 25~55 nm，占比 68.8%(图 5-D)，成孔率平均 9.49%，面孔率平均 1.12%(表 1)。

Crab2 组合中有机质充填碳酸盐矿物颗粒内部溶蚀孔(图 8-C)。有机质孔呈蜂窝状(图 8-D，8-E)，孔径介于 7~301 nm 之间，平均孔径 33.7 nm，孔径集中分布在 7~25 nm 和 30~55 nm 2 个范围，分别占比 30.3%和 62.1%(图 5-D)，成孔率平均 4.03%，面孔率平均 1.04%(表 1)。



A—方解石边缘溶蚀孔充填有机质，扫描电镜，L214 井，4420.6 m，龙马溪组；B—图 A 方解石的能谱分析；C—Carb1 组合有机质孔，扫描电镜，L214 井，4278.07 m，龙马溪组；D—白云石粒内溶孔充填有机质，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；E—图 D 局部放大，Carb2 组合有机质孔，扫描电镜；F—图 D 局部放大，Carb2 组合有机质孔，扫描电镜；G—碳酸盐胶结物与脉状有机质接触，扫描电镜，L214 井，4330.08 m，五峰组；H—图 G 白云石的能谱分析；I—Carb3 组合有机质孔，扫描电镜，L212 井，4438.45 m，龙马溪组

图 8　川南地区五峰组—龙马溪组页岩碳酸盐矿物-有机质孔组合类型及特征

Fig. 8　Carbonate mineral-organic matter pore combination types and characteristics in the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

Carb3 组合中碳酸盐矿物颗粒与脉状有机质紧密接触(图 8-F，8-G)。有机质孔多呈蜂窝状(图 8-H)，孔径介于 10~576 nm 之间，平均孔径 54.6 nm，孔径集中分布在 30~60 nm 之间，占比 61.3%(图 5-D)，成孔率平均 9.98%，面孔率平均 3.25%(表 1)。

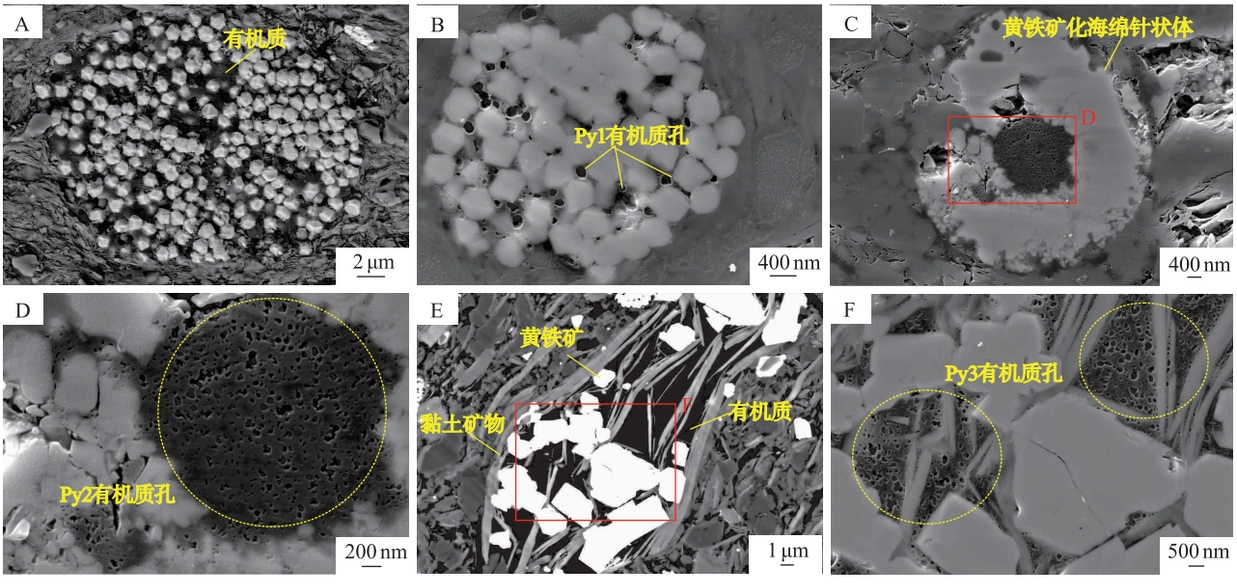
4）黄铁矿-有机质孔组合

黄铁矿-有机质孔组合孔径介于 11~795 nm 之间，平均孔径 54.7 nm，孔径集中分布在 15~60 nm，占比 65.7%(图 5-A)。根据黄铁矿与有机质的赋存关系，可划分出 Py1、Py2 和 Py3 共 3 类组合，不同组合发育有机质孔的特征具有明显差异。

Py1 组合中有机质充填草莓状黄铁矿的晶间孔(图 9-A)。有机质孔多呈圆形(图 9-B)，孔径介于 23~386 nm 之间，平均孔径 80.9 nm，孔径集中分布在 25~45 nm 和 55~80 nm 2 个范围，分别占比 26.5%和 27.3%(图 5-E)，成孔率平均 8.13%，面孔率平均 1.15%(表 1)。

Py2 组合中黄铁矿化的海绵针状体中央腔室充满有机质，黏土矿物和成岩石英常与有机质共存于海绵针状体中央腔室(图 9-C)。有机质孔呈蜂窝状(图 9-D)，孔径介于 11~208 nm 之间，平均孔径 33.7 nm，孔径集中分布在 11~55 nm，占比 90.4%(图 5-E)，成孔率平均 7.78%，面孔率平均 2.98%(表 1)。

Py3 组合中黄铁矿和有机质共同充填黏土矿物



A—草莓状黄铁矿晶间孔充填有机质，扫描电镜，W214 井，3508.16 m，龙马溪组；B—Py1 组合有机质孔，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；C—黄铁矿化的海绵针状体中央腔室充满有机质，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；D—图 C 局部放大，Py2 组合有机质孔，扫描电镜；E—黄铁矿和有机质充填黏土矿物层间，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；F—图 E 局部放大，Py3 组合有机质孔，扫描电镜

图 9 川南地区五峰组—龙马溪组页岩黄铁矿-有机质孔组合类型及特征

Fig. 9 Pyrite-organic matter pore combination types and characteristics in the Wufeng and Longmaxi formations Shales in southern Sichuan Basin

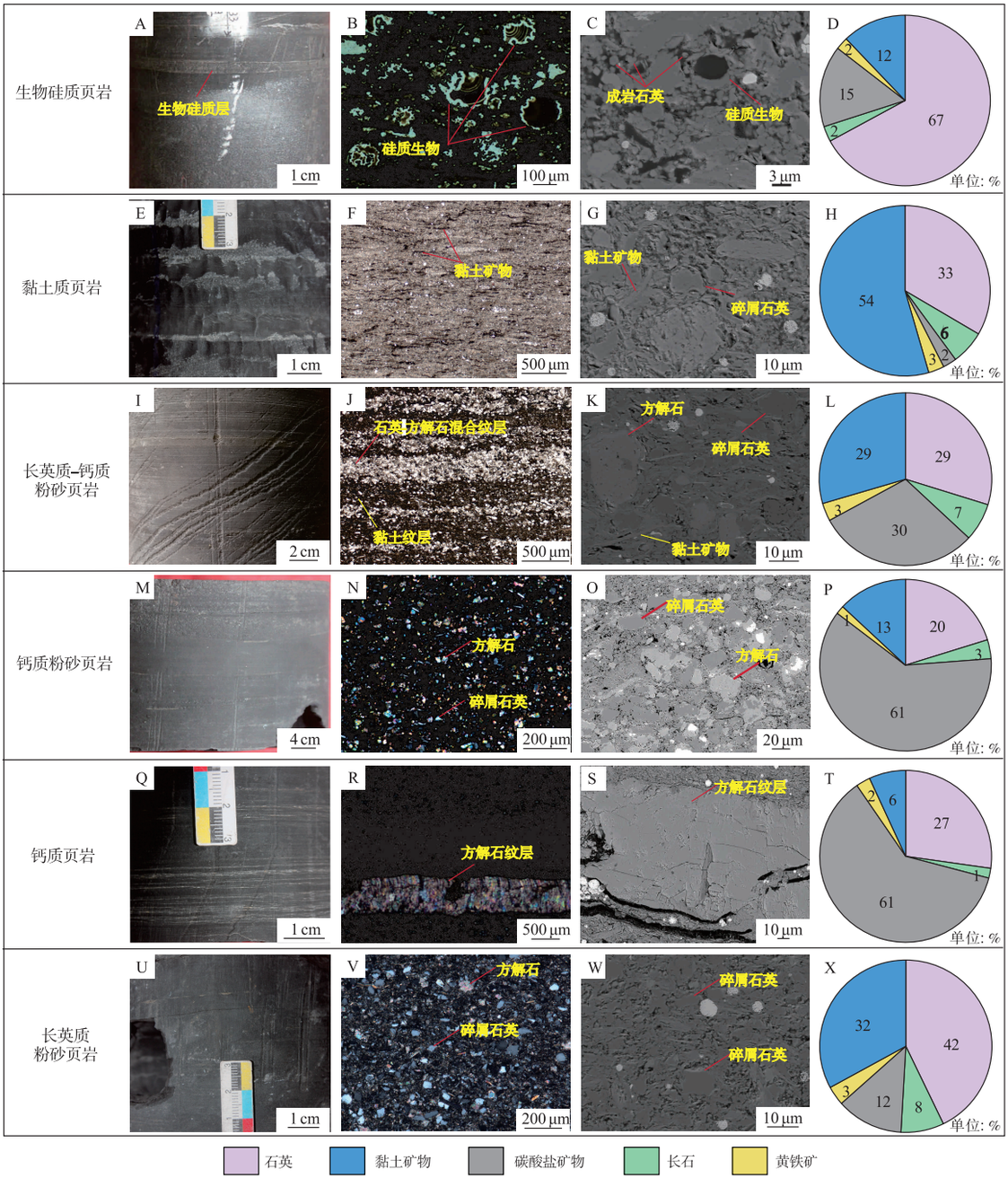
层间(图 9-E)。有机质孔隙多呈圆形(图 9-F)，孔径介于 12~795 nm 之间，平均孔径 77.6 nm，孔径集中分布在 12~25 nm 和 45~80 nm 2 个范围，分别占比 20.1%和 35.1%(图 5-E)，成孔率平均 7.61%，面孔率平均 3.42%(表 1)。

3.3 不同岩相的矿物-有机质孔组合分布特征

3.3.1 岩相类型及特征

通过岩心观察、薄片光差以及扫描电镜分析，根据矿物组成及含量、沉积构造特征，以长英质(长石+石英)、钙质（方解石+白云石）和黏土矿物为三端元进行划分，识别出 6 种主要岩相：生物硅质页岩、黏土质页岩、长英质-钙质粉砂页岩、钙质粉砂页岩、钙质页岩和长英质粉砂页岩(图 10)。

生物硅质页岩岩心呈灰黑色，TOC 含量平均值为 3.96%，层状分布(图 10-A)，厚度一般 0.1~1 cm，少量厚几百微米，上下界面呈突变接触。放射虫、海绵骨针等硅质生物丰富(图 10-B，10-C)，硅质生物的溶解是该岩相硅质的主要来源(刘树根等，2011；Sato *et al.*，2011；Yang *et al.*，2018)，石英含量显著，平均值为 67.1%(图 10-D)。黏土质页岩岩心呈黑色—灰黑色，TOC 含量平均值为 0.9%，成层性微弱(图 10-E)。黏土矿物含量较高(图 10-F，10-G)，平均值为 54.98%(图 10-H)，主要为伊利石。长英质-钙质粉砂页岩岩心呈灰黑色—深灰色(图 10-I)，TOC 平均值为 1.87%，纹层较为发育(图 10-J)，石英-方解石混合纹层（亮纹层）和黏土纹层（暗纹层）交替。长英质矿物和碳酸盐矿物含量大致相当(图 10-K)，均超过 30%，分别为 36%、30%(图 10-L)。钙质粉砂页岩是研究区发育最少的岩相类型，岩心呈灰黑色(图 10-M)，TOC 含量平均值为 0.68%，纹层不发育。碳酸盐矿物含量高(图 10-N，10-O)，平均值为 61.95%(图 10-P)，石英、长石、方解石表现出碎屑外形，颗粒分选较好，磨圆中等，多呈次棱角—次圆状。钙质页岩岩心呈灰黑色(图 10-Q)，TOC 含量平均值为 3.46%，纹层十分发育(图 10-R，10-S)，为顺层分布的亮晶方解石纹层和暗色的黏土纹层组合。碳酸盐矿物含量显著，平均值为 61.35%(图 10-T)，其中亮晶方解石为成岩作用形成（吴安彬等，



A—生物硅质层状分布，岩心照片，W213 井，3742.14 m，龙马溪组；B—硅质生物丰富，单偏光，W214 井，3571.20 m，龙马溪组；C—硅质生物和成岩石英含量丰富，扫描电镜，L212 井，4444.81 m，五峰组；D—矿物平均含量分布特征；E—岩心照片，Z203 井，4056.37 m，龙马溪组；F—黏土矿物含量丰富，单偏光，Z203 井，4056.37 m，龙马溪组；G—黏土矿物含量丰富，扫描电镜，L214 井，4320.6 m，龙马溪组；H—矿物平均含量分布特征；I—岩心照片，W214 井，3566.90 m，龙马溪组；J—发育石英-方解石混合纹层+黏土纹层组合，单偏光，W214 井，3566.98 m，龙马溪组；K—长英质、钙质含量相当，扫描电镜，L212 井，4400.75 m，龙马溪组；L—矿物平均含量分布特征；M—岩心照片，W213 井，3746.6 m，龙马溪组；N—矿物以方解石为主，正交光，L214 井，4327.42 m，龙马溪组；O—石英以碎屑石英为主，L212 井，4444.81 m，五峰组；P—矿物平均含量分布特征；Q—方解石纹层发育，岩心照片，W213 井，3741.35 m，龙马溪组；R—发育亮晶方解石纹层+黏土纹层组合，正交光，L212 井，4442.48 m，龙马溪组；S—方解石纹层，扫描电镜，N227 井，3576.13 m，龙马溪组；T—矿物平均含量分布特征；U—岩心照片，L204 井，3849.8 m，五峰组；V—矿物以碎屑石英为主，正交光，L204 井，3849.77 m，五峰组；W—碎屑石英含量丰富，扫描电镜，L212 井，4432.49 m，龙马溪组；X—矿物平均含量分布特征

图 10　川南地区五峰组—龙马溪组页岩岩相类型及特征

Fig. 10　Shale facies types and characteristics of the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

表 2 川南地区五峰组—龙马溪组页岩不同岩相矿物-有机质孔组合的相对含量和储集层质量

Table 2 Relative contents and reservoir quality of mineral-organic pores in different lithofacies of the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

类别	代号	矿物-有机质孔组合在不同岩相中的相对含量/%						储集层响应
		生物硅质页岩	黏土质页岩	长英质-钙质粉砂页岩	钙质粉砂页岩	钙质页岩	长英质粉砂页岩	
石英-有机质孔组合	Q1	14.00	17.64	22.99	5.80	10.73	20.10	中等
	Q2	31.63	7.14	5.79	6.12	11.24	8.01	好
	Q3	27.96	0.21	1.97	1.33	10.00	3.40	中等
黏土矿物-有机质孔组合	Cl1	10.35	32.52	16.73	5.72	5.71	16.67	中等
	Cl2	2.08	17.86	24.62	9.25	20.33	21.25	好
	Cl3	8.12	23.07	14.10	16.32	12.88	15.74	差
碳酸盐矿物-有机质孔组合	Carb1	0.81	0.98	6.99	33.37	4.42	8.25	中等
	Carb2	2.25	0.52	2.80	3.39	3.54	0.87	差
	Carb3	2.03	/	1.22	18.25	20.19	4.36	差
黄铁矿-有机质孔组合	Py1	0.03	0.04	1.89	0.23	0.64	0.87	中等
	Py2	0.56	/	/	/	/	/	差
	Py3	0.18	0.02	0.90	0.22	0.32	0.48	中等
各岩相有机质孔发育特征		Q2、Q3 组合为主	Cl1、Cl3 组合为主	Q1、Cl2 组合为主	Carb1 组合为主	Cl2、Carb3 组合为主	Q1、Cl2 组合为主	

2022)。长英质粉砂页岩是研究区最为发育的岩相，岩心呈黑色或灰黑色(图 10-U)，TOC 含量平均值为 1.83%，块状发育。长英质矿物含量高，以碎屑石英为主(图 10-V，10-W)，石英平均含量 42.88%(图 10-X)。

3.3.2 矿物-有机质孔组合的差异性分布

不同岩相矿物-有机质孔组合的分布特征显示出较大的差异性 (Wang *et al.*, 2021)。

生物硅质页岩中有机质主要包裹成岩石英或存在于硅质生物中央腔室，Q2、Q3 组合有机质孔相对含量为 31.63%、27.96%。夹带黏土矿物的有机质和被黏土矿物包裹的脉状有机质少见，Cl2、Cl3 组合有机质孔相对含量为 2.08%、8.12%。黄铁矿-有机质组合中，有机质充填黄铁矿化生物体腔最为发育，对应 Py2 组合有机质孔的相对含量为 0.56%(表 2)。

黏土质页岩中有机质主要充填黏土矿物层间或被黏土矿物包裹，Cl1、Cl3 组合有机质孔相对含量为 32.52%、23.06%。有机质包裹成岩石英和有机质充填硅质生物中央腔室少见，Q2、Q3 组合有机质孔相对含量分别为 7.14%、0.21%(表 2)。

长英质-钙质粉砂页岩中有机质主要充填于碎屑石英之间或包裹黏土矿物，Q1、Cl2 组合有机质孔相对含量为 22.99%、24.62%。有机质充填碳酸盐矿物的粒内孔和脉状有机质接触碳酸盐矿物颗粒少见，Carb2、Carb3 组合有机质孔相对含量分别为 2.80%、1.22%(表 2)。

钙质粉砂页岩中有机质主要充填碳酸盐矿物颗粒外围溶蚀孔缝，Carb1 组合有机质孔相对含量为 33.37%。有机质充填碳酸盐矿物粒内溶孔和碎屑石英之间少见，Carb2、Q1 组合有机质孔相对含量分别为 3.39%、5.80%(表 2)。

钙质页岩中有机质主要与碳酸盐矿物颗粒接触或包裹黏土矿物，Carb3、Cl2 组合有机质孔相对含量为 20.19%、20.33%。有机质充填碳酸盐矿物颗粒溶蚀孔少见，Carb1、Carb2 组合有机质孔相对含量分别为 4.42%、3.54%(表 2)。

长英质粉砂页岩中有机质主要存在于碎屑石英之间或包裹黏土矿物，Q1、Cl2 组合有机质孔相对含量为 20.10%、21.26%。有机质充填硅质生物中央腔室少见，Q3 组合有机质孔相对含量为 3.40%(表 2)。

4 讨论

4.1 不同矿物-有机质孔组合的储集层响应

有机质孔对页岩储集层的发育起到了至关重要

的作用（张吉振等，2015；He *et al.*，2017；王濡岳等，2022）。有机质孔之间的有效连通是有机质孔成为页岩气富集的主要储集空间的基本条件，有机质内部孔隙、有机质孔与无机孔缝彼此之间的有效连通均取决于有机质丰度、分布及孔隙发育程度（腾格尔等，2021）。综合分析矿物-有机质孔组合的有机质相对含量、孔径、成孔率等发育特征能够精细预测不同矿物-有机质孔组合的成藏性能。

成岩石英-有机质孔组合比碎屑石英-有机质孔组合的有机质相对含量高得多，平均孔径、成孔率和单位面积孔隙数也更高（表 1），同时大量的成岩石英聚集体构成刚性骨架，具有足够的孔隙空间，运移的有机质充填其中伴生孔隙网络系统（Zhao *et al.*，2017）。孔隙连通性好，孔隙之间几乎毫无阻隔，有的孔隙已连接组成一个更大的孔隙，石英颗粒间残余孔隙和裂缝与有机质孔隙相互连通，能够很好地储存气体，促进气体的短距离运移（管全中，2020）。尽管生物石英的中央腔室中充填有机质，但由于硅质生物的孤立分布，有机质的相对数量受到限制，孔隙连通性差，不利于天然气成藏。因此，成岩石英-有机质孔组合的存在提高了页岩储集层的质量。

黏土矿物-有机质孔组合中有机质的相对含量较高（表 1），Cl2 组合有机质相对含量（92%）>Cl3组合有机质相对含量（42%）>Cl1组合有机质相对含量（40%）。Cl1 和 Cl2 组合中有机质与黏土矿物以复合体的形式存在，对有机质的催化作用强（Cai *et al.*，2007；Kennedy *et al.*，2014；Zhu *et al.*，2018），所以 Cl1、Cl2 组合比 Cl3 组合存在更多的有机质孔。Cl1 组合的有机质-黏土复合体在演化过程中可能受地层压力作用形成两端尖灭的透镜体形状（图 7-A），其中的孔隙不易与外界连通（李晓霞等，2020），导致 Cl1 组合的有机质孔连通性不如 Cl2 组合好。因此，Cl2 组合有机质孔的存在对页岩储集层的质量更有利。

碳酸盐矿物-有机质孔组合中有机质的相对含量较低（表 1），总体降低了页岩储集层质量。然而 Carb1 组合有机质孔能够与碳酸盐矿物外围的溶蚀孔缝形成连续的网络，连通性中等至好，也能够有效成藏，在一定程度上能改善储集层质量（Nie *et al.*，2019；Wu *et al.*，2021）（表 2）。

黄铁矿-有机质组合总量并不丰富，而且通常

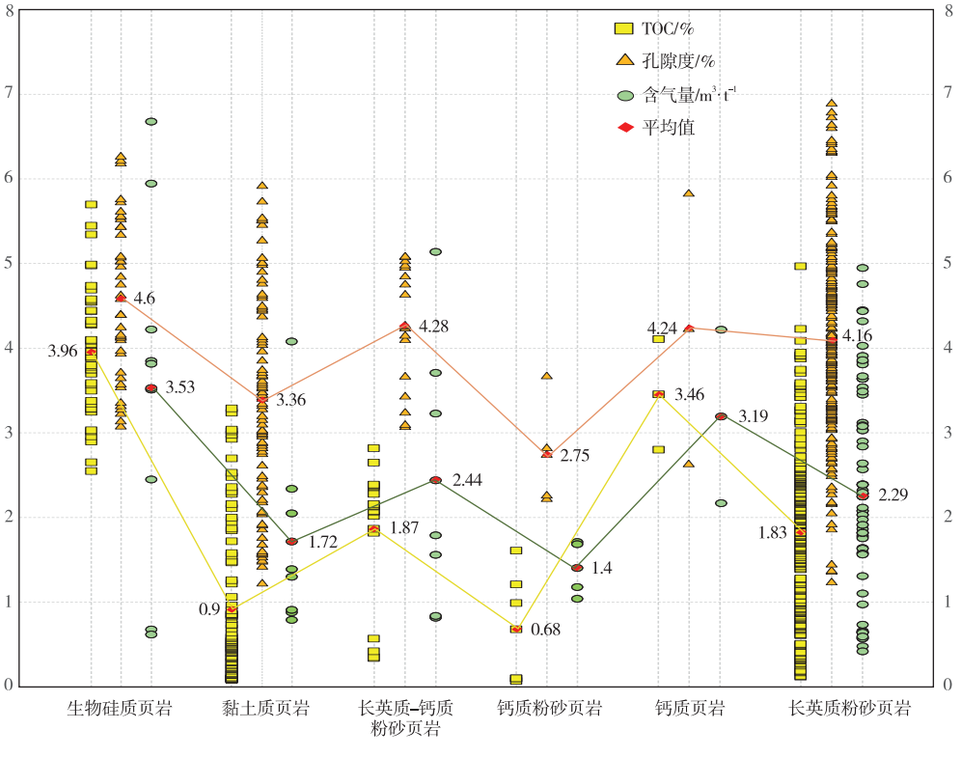


图 11　川南地区五峰组—龙马溪组页岩不同岩相 TOC 含量、孔隙度和含气量

Fig. 11　Different lithofacies TOC content, porosity and gas content of the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

是分散的，所以该类有机质孔不能改善页岩气储集层质量。Py1 组合受草莓状黄铁矿结构的限制，有机质的相对含量较低，但有机质孔发育很好，成孔率较高、孔径较大且孔隙连通性好，在一定程度上能改善储集层质量（曹涛涛等，2018）。

综上分析，Q2 和 Cl2 组合有机质孔的存在能够提高储集层质量，Q1、Q3、Cl1、Carb1、Py1 和 Py3 组合有机质孔的存在不能改善储集层质量，Cl3、Carb2、Carb3 和 Py2 组合有机质孔的存在降低了储集层质量(表 2)。

4.2 基于矿物-有机质孔组合分布的岩相评价

页岩含气量是衡量其是否具有经济开采价值和进行资源评价的关键指标（邹才能等，2010），与生烃能力和储集层性能相关。生烃能力和储集层性能可以通过 TOC 含量、孔隙度 2 项参数来表示（Wu *et al.*，2021），然而前人的研究中发现存在有机质丰度高、总孔隙度高的页岩其含气性却偏低的现象（林伟等，2024），这可能与页岩的有机质含量高但成孔率低、总孔隙度高但对储集层有利的有机质孔含量少密切相关，因此生烃能力和总孔隙度特征并不能准确反映页岩储集性能的优劣。在开展页岩储集层评价时需要在有效划分岩相类型的基础上，精细分析可有效赋存富集页岩气的储集空间发育特征，较大的矿物-有机质孔组合分布差异可导致不同岩相页岩含气量存在明显差异（图 11）。

生物硅质页岩的 TOC 含量最高，平均值为 3.96%，与其他岩相相比，其生烃能力较好。结合平均值为 4.6% 的高孔隙度推断其储集层容量较大，大量 Q2 组合、Cl2 组合有机质孔在其中发育（相对含量为 33.71%），提供了大量的有机质和有利储集空间，平均含气量高达 3.53 m^3/t（图 12），

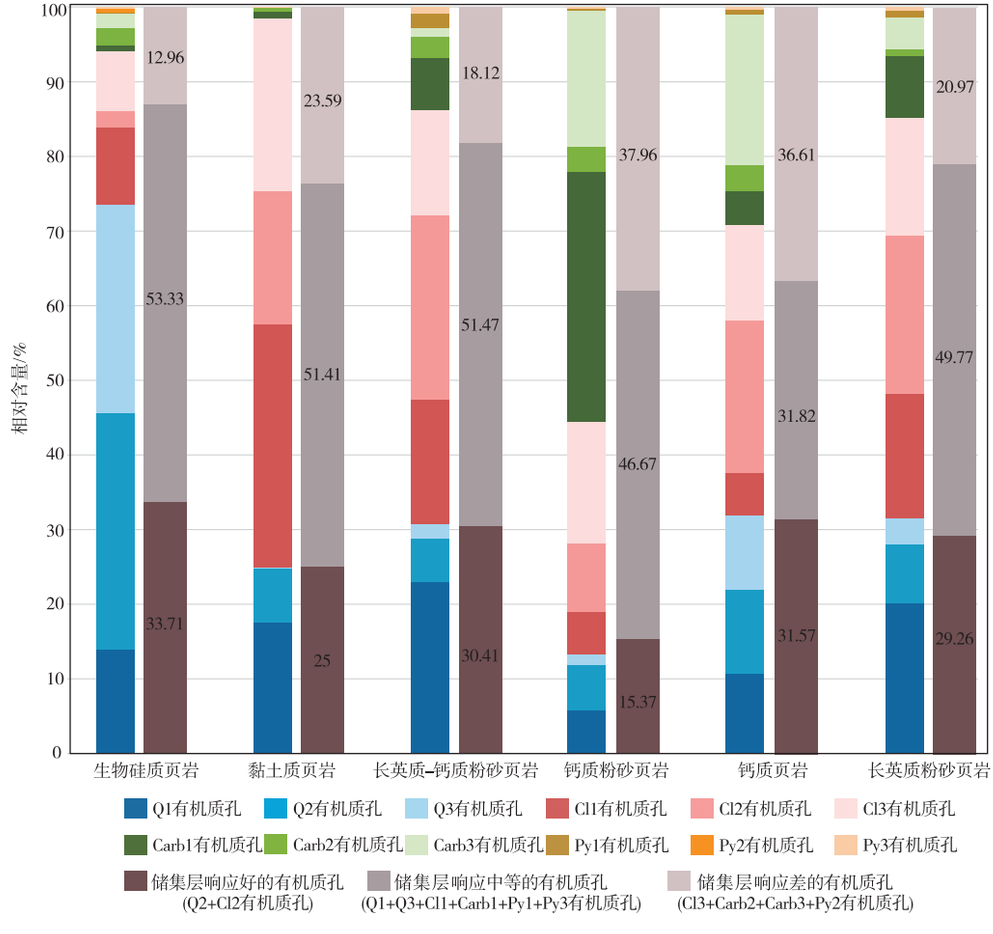


图 12 川南地区五峰组—龙马溪组页岩不同岩相矿物-有机质孔组合的非均质分布特征

Fig. 12 Heterogeneous distribution characteristics of mineral-organic pores in different lithofacies of the Wufeng and Longmaxi formations shales in southern Sichuan Basin

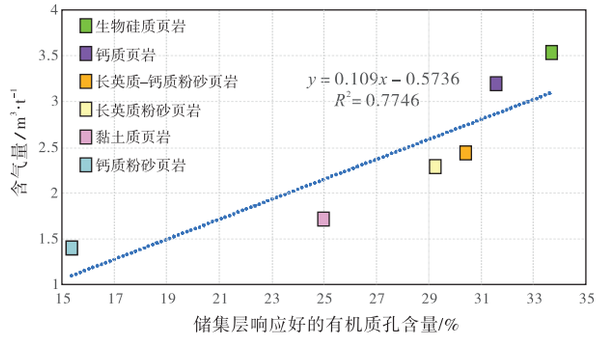


图 13　川南地区五峰组—龙马溪组 6 类岩相中储集层响应好的有机质孔含量和含气量关系

Fig. 13　Relationship between organic matter pore content and gas content in reservoirs with good reservoir response among six lithofacies of the Wufeng and Longmaxi formations in southern Sichuan Basin

因此生物硅质页岩是页岩气的最佳储集层。钙质粉砂页岩发育大量对储集层响应中等的矿物-有机质孔组合（相对含量为 46.67%）和少量对储集层有利的矿物-有机质孔组合（相对含量为 15.37%），从其最低的 TOC 含量、孔隙度和含气量（图 11）可知，其生烃能力和储集层性能相对较差。

总体而言，不同岩相中对储集层有利的矿物-有机质孔组合的相对含量与含气量呈正相关关系（图 12；图 13），这是因为此类矿物-有机质孔组合越发育，有机质成孔率越高、孔隙连通性越好，页岩气赋存富集的有利空间越多。

5　结论

1）川南地区五峰组—龙马溪组页岩发育的有机质孔类型主要包括石英-有机质孔、黏土矿物-有机质孔、碳酸盐矿物-有机质孔和黄铁矿-有机质孔组合。石英、黏土矿物、碳酸盐矿物、黄铁矿与有机质各存在 3 种赋存关系，据此划分出 12 类矿物-有机质孔组合。

2）不同岩相含有的矿物成因及配比不同，导致矿物-有机质孔的分布存在显著差异。生物硅质页岩主要发育 Q2、Q3 组合有机质孔，黏土质页岩主要发育 Cl1、Cl3 组合有机质孔，长英质-钙质粉砂页岩主要发育 Q1、Cl2 组合有机质孔，钙质粉砂页岩主要发育 Carb1 组合有机质孔，钙质页岩主要发育 Carb3、Cl2 组合有机质孔，长英质粉砂页岩主要发育 Q1、Cl2 组合有机质孔。

3）有机质包裹成岩石英和黏土矿物呈流动结构中发育的 Q2、Cl2 组合有机质孔的有机质相对含量高、孔径大、孔隙连通性好，是对储集层最有利的 2 类矿物-有机质孔组合。不同岩相矿物-有机质孔组合的非均质分布影响甜点分布与预测，为页岩储集层岩相评价提供了新视角。

参考文献（References）

曹涛涛，邓模，宋之光，刘光祥，黄俨然，Andrew Stefan Hursthouse. 2018. 黄铁矿对页岩油气富集成藏影响研究. 天然气地球科学，29(3)：404-414.［Cao T T，Deng M，Song Z G，Liu G X，Huang Y R，Hursthouse A S. 2018. Study on the effect of pyrite on the accumulation of shale oil and gas. Natural Gas Geoscience，29(3)：404-414］

陈斐然，魏祥峰，刘珠江，敖明冲，燕继红. 2020. 四川盆地二叠系龙潭组页岩孔隙发育特征及主控因素. 天然气地球科学，31(11)：1593-1602.［Chen F R，Wei X F，Liu Z J，Ao M C，Yan J H. 2020. Pore development characteristics and main controlling factors of the Permian marine-continent transitional shale in the Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience，31(11)：1593-1602］

陈增裕，刘睿，谭秀成，井翠，聂舟，衡德，江定川，文冉，陈雷，唐余锋，唐奎. 2023. 四川盆地南缘长宁地区五峰组—龙马溪组页岩内多源石英对页岩气富集的意义. 古地理学报，25(4)：920-930.［Chen Z Y，Liu R，Tan X C，Jing C，Nie Z，Heng D，Jiang D C，Wen R，Chen L，Tang Y F，Tang K. 2023. Implications of multi-source quartz on shale-gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi shale of Changning area in southern margin of Sichuan Basin，China. Journal of Palaeogeography（Chinese Edition），25(4)：920-930］

管全中. 2020. 四川盆地威远区块五峰—龙马溪组页岩储层精细刻画与甜点预测. 中国石油大学（北京）博士学位论文.［Guan Q Z. 2020. Fine characterization and sweet spot prediction of the Wufeng-Longmaxi Formations in Weiyuan area，Sichuan Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum（Beijing）］

韩豫，操应长，梁超，吴伟，朱逸青，武瑾，赵梓龙，唐晴. 2024. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积环境演化及其对页岩发育的控制. 中国石油大学学报（自然科学版），48(2)：11-23.［Han Y，Cao Y C，Liang C，Wu W，Zhu Y Q，Wu J，Zhao Z L，Tang Q. 2024. Sedimentary environment evolution of Wufeng Formation-Longmaxi Formation and its control on shale deposition in the southern Sichuan Basin. Journal of China University of Petroleum（Edition of Natural Science），48(2)：11-23］

何建华，丁文龙，付景龙，李昂，代鹏. 2014. 页岩微观孔隙成因类型研究. 岩性油气藏，26(5)：30-35.［He J H，Ding W L，Fu J L，Li A，Dai P. 2014. Study on genetic type of micropore in shale reservoir. Lithologic Reservoirs，26(5)：30-35］

姜鹏飞，吴建发，朱逸青，张德宽，吴伟，张芮，吴喆，王青，杨雨然，杨雪，伍秋姿，陈丽清，何一凡，张娟. 2023. 四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区. 石油学报，44(1)：91-109.［Jiang

P F, Wu J F, Zhu Y Q, Zhang D K, Wu W, Zhang R, Wu Z, Wang Q, Yang Y R, Yang X, Wu Q Z, Chen L Q, He Y F, Zhang J. 2023. Enrichment conditions and favorable areas for exploration and development of marine shale gas in Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(1): 91-109]

金之钧,胡宗全,高波,赵建华. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素. 地学前缘,23(1): 1-10. [Jin Z J, Hu Z Q, Gao B, Zhao J H. 2016. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin. Earth Science Frontiers, 23(1): 1-10]

李皎,何登发,梅庆华. 2015. 四川盆地及邻区奥陶纪构造-沉积环境与原型盆地演化. 石油学报,36(4): 427-445. [Li J, He D F, Mei Q H. 2015. Tectonic-depositional environment and proto-type basin evolution of the Ordovician in Sichuan Basin and adjacent areas. Acta Petrolei Sinica, 36(4): 427-445]

李晓霞,谷渊涛,万泉,杨曙光. 2020. 泥页岩中有机质—黏土复合体微结构研究进展. 矿物岩石地球化学通报,39(3): 663-670. [Li X X, Gu Y T, Wan Q, Yang S G. 2020. Research advance on microstructures of the organic-clay composite in mud shale. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 39(3): 663-670]

梁超,刘雨迪,操应长,吴靖,韩豫,谢浩然,籍士超. 2023. 扬子地区奥陶纪—志留纪转折期多事件耦合关系及有机质富集. 中国石油大学学报(自然科学版),47(6): 1-12. [Liang C, Liu Y D, Cao Y C, Wu J, Han Y, Xie H R, Ji S C. 2023. Coupling relationship of multiple events and enrichment of organic matter during Ordovician-Silurian transition period in Yangtze region. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 47(6): 1-12]

林伟,郭伟,张吉振,李明涛. 2024. 川南地区龙马溪组复杂岩相类型页岩储层有机质差异性成孔机制. 天然气地球科学,35(1): 133-148. [Lin W, Guo W, Zhang J Z, Li M T. 2024. Organic matter pore-forming characteristic differences in complex lithofacies types of Longmaxi shales from southern Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 35(1): 133-148]

刘树根,马文辛,LUBA Jansa,黄文明,曾祥亮,张长俊. 2011. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征. 岩石学报,27(8): 2239-2252. [Liu S G, Ma W X, Jansa L, Huang W M, Zeng X L, Zhang C J. 2011. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2239-2252]

刘忠宝,高波,武清钊,王濡岳,聂海宽,张钰莹. 2018. 页岩有机—无机复合型孔隙及其控气作用: 以川西南地区筇竹寺组为例. 海相油气地质,23(4): 42-50. [Liu Z B, Gao B, Wu Q Z, Wang R Y, Nie H K, Zhang Y Y. 2018. Organic-inorganic compound pore system and its gas-controlling significance: a case study of the Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 23(4): 42-50]

卢龙飞,秦建中,申宝剑,腾格尔,刘伟新,张庆珍. 2018. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系. 地学前缘,25(4): 226-236. [Lu L F, Qin J Z, Shen B J, Tenger, Liu W X, Zhang Q Z. 2018. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region and its relationship with shale gas enrichment. Earth Science Frontiers, 25(4): 226-236]

聂海宽,马鑫,余川,叶欣,边瑞康,刘忠宝. 2017. 川东下侏罗统自流井组页岩储层特征及勘探潜力评价. 石油与天然气地质,38(3): 438-447. [Nie H K, Ma X, Yu C, Ye X, Bian R K, Liu Z B. 2017. Shale gas reservoir characteristics and its exploration potential-analysis on the Lower Jurassic shale in the eastern Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 38(3): 438-447]

腾格尔,卢龙飞,俞凌杰,张文涛,潘安阳,申宝剑,王晔,仰云峰,高志伟. 2021. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通性的控制作用. 石油勘探与开发,48(4): 687-699. [Borjigin T, Lu L F, Yu L J, Zhang W T, Pan A Y, Shen B J, Wang Y, Yang Y F, Gao Z W. 2021. Formation, preservation and connectivity control of organic pores in shale. Petroleum Exploration and Development, 48(4): 687-699]

汪泽成,赵文智,彭红雨. 2002. 四川盆地复合含油气系统特征. 石油勘探与开发,29(2): 26-28. [Wang Z C, Zhao W Z, Peng H Y. 2002. Characteristics of multi-source petroleum systems in Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development, 29(2): 26-28]

王濡岳,胡宗全,龙胜祥,杜伟,吴靖,邬忠虎,聂海宽,王鹏威,孙川翔,赵建华. 2022. 四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制. 石油与天然气地质,43(2): 353-364. [Wang R Y, Hu Z Q, Long S X, Du W, Wu J, Wu Z H, Nie H K, Wang P W, Sun C X, Zhao J H. 2022. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 43(2): 353-364]

王淑芳,张子亚,董大忠,王玉满,李新景,胡俊文,黄金亮,管全中. 2016. 四川盆地下寒武统筇竹寺组页岩孔隙特征及物性变差机制探讨. 天然气地球科学,27(9): 1619-1628. [Wang S F, Zhang Z Y, Dong D Z, Wang Y M, Li X J, Hu J W, Huang J L, Guan Q Z. 2016. Microscopic pore structure and reasons making reservoir property weaker of Lower Cambrian Qiongzhusi shale, Sichuan Basin, China. Natural Gas Geoscience, 27(9): 1619-1628]

王昕尧,金振奎,朱毅秀,胡宗全,刘光祥,赵国伟,李硕,史书婷. 2022. 四川盆地自流井组陆相页岩石英成因研究. 沉积学报,40(4): 1010-1018. [Wang X Y, Jin Z K, Zhu Y X, Hu Z Q, Liu G X, Zhao G W, Li S, Shi S T. 2022. The genesis of quartz in Ziliujing nonmarine shale, Sichuan basin. Acta Sedimentologica Sinica, 40(4): 1010-1018]

王秀平,牟传龙,葛祥英,陈小炜,周恳恳,王启宇,梁薇. 2015. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系矿物组分特征及评价. 石油学报,36(2): 150-162. [Wang X P, Mou C L, Ge X Y, Chen X W, Zhou K K, Wang Q Y, Liang W. 2015. Mineral component characteristics and evaluation of black rock series of Longmaxi Formation in Southern Sichuan and its periphery. Acta Petrolei Sinica, 36(2): 150-162]

吴安彬,罗群,代兵,李靖,王士琛,张景坤,安尊鹏,刘冬冬,姜振学.

2022. 海相高演化页岩裂缝方解石脉成因机制及指示意义. 中国石油大学学报(自然科学版),46(3): 25-35. [Wu A B, Luo Q, Dai B, Li J, Wang S C, Zhang J K, An Z P, Liu D D, Jiang Z X. 2022. Genetic mechanism and indicative significance of fracture calcite veins in marine high-evolution shale. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),46(3): 25-35]

吴靖,胡宗全,谢俊,刘忠宝,赵建华. 2018. 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组页岩有机质宏微观赋存机制. 天然气工业,38(8): 23-32. [Wu J, Hu Z Q, Xie J, Liu Z B, Zhao J H. 2018. Macro-micro occurrence mechanism of organic matters in Wufeng-Longmaxi shale in the Sichuan Basin and its peripheral areas. Natural Gas Industry,38(8): 23-32]

张吉振,李贤庆,郭曼,董泽亮,王哲,付庆华,王飞宇. 2015. 川南地区二叠系龙潭组页岩微观孔隙特征及其影响因素. 天然气地球科学,26(8): 1571-1578. [Zhang J Z, Li X Q, Guo M, Dong Z L, Wang Z, Fu Q H, Wang F Y. 2015. Microscopic pore characteristics and its influence factors of the Permian Longtan formation shales in the southern Sichuan basin. Natural Gas Geoscience,26(8): 1571-1578]

赵迪斐,郭英海,Geoff Wang,李冠霖,曾春林,焦伟伟. 2020. 层序地层格架及其对页岩储层发育特征的影响：以四川盆地龙马溪组页岩为例. 沉积学报,38(2): 379-397. [Zhao D F, Guo Y H, Wang G, Li G L, Zeng C L, Jiao W W. 2020. Sequence stratigraphic framework and its influence on the development characteristics of shale reservoirs: taking the Longmaxi formation shale in the Sichuan Basin as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 38(2): 379-397]

赵建华,金之钧,金振奎,温馨,耿一凯,颜彩娜. 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组含气页岩中石英成因研究. 天然气地球科学,27(2): 377-386. [Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Wen X, Geng Y K, Yan C N. 2016. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience,27(2): 377-386]

邹才能,董大忠,王社教,李建忠,李新景,王玉满,李登华,程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发,37(6): 641-653. [Zou C N, Dong D Z, Wang S J, Li J Z, Li X J, Wang Y M, Li D H, Cheng K M. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. Petroleum Exploration and Development,37(6): 641-653]

Cai J G, Bao Y J, Yang S Y, Wang X X, Fan D D, Xu J L, Wang A P. 2007. Research on preservation and enrichment mechanisms of organic matter in muddy sediment and mudstone. Science in China Series D-Earth Sciences,50(5): 765-775.

Chen L, Jiang Z X, Liu K Y, Gao F L. 2017. Quantitative characterization of micropore structure for organic-rich Lower Silurian shale in the Upper Yangtze Platform, South China: implications for shale gas adsorption capacity. Advances in Geo-Energy Research, 1(2): 112-123.

Chen X, Rong J Y, Li Y, Boucot A J. 2004. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 204(3-4): 353-372.

Guan Q Z, Dong D Z, Zhang H L, Sun S S, Zhang S R, Guo W. 2021. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: a case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 48(4): 813-823.

Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, Rai C S. 2012. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity. International Journal of Coal Geology, 103: 26-31.

He Z L, Nie H K, Zhao J H, Liu W X, Bao F, Zhang W T. 2017. Types and origin of nanoscale pores and fractures in Wufeng and Longmaxi shale in Sichuan basin and its periphery. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 17: 6626-6633.

Kennedy M J, Löhr S C, Fraser S A, Baruch E T. 2014. Direct evidence for organic carbon preservation as clay-organic nanocomposites in a Devonian black shale: from deposition to diagenesis. Earth and Planetary Science Letters, 388: 59-70.

Li C, Zhang J P, Li W J, Botting J, Chen Q, Fan J X, Zhang Y D. 2021. Multiple glacio-eustatic cycles and associated environmental changes through the Hirnantian(Late Ordovician) in South China. Global and Planetary Change, 207: 103668.

Li Y F, Zhang T W, Ellis G S, Shao D Y. 2017. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 466: 252-264.

Liang C, Jiang Z X, Cao Y C, Wu M H, Guo L, Zhang C M. 2016. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration: a case study from the lower Silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin. AAPG Bulletin, 100: 773-794.

Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Hammes U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. AAPG Bulletin, 96(6): 1071-1098.

Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, Zhang T W. 2013. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation(Devonian), Pennsylvania. AAPG Bulletin, 97: 177-200

Nie H K, Sun C X, Liu G X, Du W, He Z L. 2019. Dissolution pore types of the Wufeng Formation and the Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, south China: implications for shale gas enrichment. Marine and Petroleum Geology, 101: 243-251.

Niu X, Yan D T, Zhuang X G, Liu Z X, Li B Q, Wei X S, Xu H W, Li D W. 2018. Origin of quartz in the lower Cambrian Niutitang Formation in south Hubei Province, Upper Yangtze platform. Marine and Petroleum Geology, 96: 271-287.

Qiu Z, Liu B, Dong D Z, Lu B, Yawar Z, Chen Z H, Schieber J. 2020. Silica diagenesis in the Lower Paleozoic Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: implications for reservoir properties and paleoproductivity. Marine and Petroleum Geology,

121: 104594.

Sato K, Fujimoto K, Nakata M, Hatta T. 2011. Diffusion-reaction of water molecules in angstrom pores as basic mechanism of biogenic quartz formation. The Journal of Physical Chemistry C, 115: 18131-18135.

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

Sun L D, Wang F L, Bai X F, Feng Z H, Shao H M, Zeng H S, Gao B, Wang Y C. 2024. Discovery of nano organo-clay complex pore-fractures in shale and its scientific significance: a case study of Cretaceous Qingshankou Formation shale, Songliao Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development, 51(4): 813-825.

Wang G C. 2020. Deformation of organic matter and its effect on pores in mud rocks. AAPG Bulletin, 103(1): 21-36.

Wang Y, Cheng H F, Hu Q H, Liu L F, Hao L W. 2021. Diagenesis and pore evolution for various lithofacies of the Wufeng-Longmaxi shale, southern Sichuan Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 133: 105251.

Wu J, Liang C, Hu Z Q, Yang R C, Xie J, Wang R Y, Zhao J H. 2019. Sedimentation mechanisms and enrichment of organic matter in the Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin. Marine and Petroleum Geology, 101: 556-565.

Wu J, Liang C, Yang R C, Xie J. 2021. The significance of organic matter-mineral associations in different lithofacies in the Wufeng and longmaxi shale-gas reservoirs in the Sichuan Basin. Marine and Petroleum Geology, 126: 104866.

Xu H, Zhou W, Zhang R, Liu S M, Zhou Q M. 2019. Characterizations of pore, mineral and petrographic properties of marine shale using multiple techniques and their implications on gas storage capability for Sichuan Longmaxi gas shale field in China. Fuel, 241: 360-371.

Xu S, Hao F, Shu Z G, Zhang A H, Yang F. 2020. Pore structures of different types of shales and shale gas exploration of the Ordovician Wufeng and Silurian Longmaxi successions in the eastern Sichuan Basin, South China. Journal of Asian Earth Sciences, 193: 104271.

Yang X R, Yan D T, Wei X S, Zhang L W, Zhang B, Xu H W, Gong Y, He J. 2018. Different formation mechanism of quartz in siliceous and argillaceous shales: a case study of Longmaxi Formation in South China. Marine and Petroleum Geology, 94: 80-94.

Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, Li S Z, Dong Y P, Liu S F, He D F, Cheng S Y, Lu R K, Yao A P. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. Science China-Earth Sciences, 56(11): 1804-1828.

Zhang L C, Xiao D S, Lu S F, Jiang S, Chen L, Guo T L, Wu L Y. 2020. Pore development of the Lower Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin and its adjacent areas: Insights from lithofacies identification and organic matter. Marine and Petroleum Geology, 122: 104662.

Zhao J H, Jin Z K, Jin Z J, Wen X, Geng Y K. 2017. Origin of authigenic quartz in organic-rich shales of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: implications for pore evolution. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 38: 21-38.

Zhou S W, Ning Y, Wang H Y, Liu H L, Xue H Q. 2018. Investigation of methane adsorption mechanism on Longmaxi shale by combining the micropore filling and monolayer coverage theories. Advances in Geo-Energy Research, 2(3): 269-281.

Zhu X J, Cai J G, Wang G L, Song M S. 2018. Role of organo-clay composites in hydrocarbon generation of shale. International Journal of Coal Geology, 192: 83-90.

Zhu Y Q, Chen G S, Liu Y, Shi X W, Wu W, Luo C, Yang X, Yang Y R, Zou Y H. 2021. Sequence stratigraphy and lithofacies paleogeographic evolution of Katian Stage-Aeronian Stage in southern Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 48(5): 1126-1138.

Zou C N, Qiu Z, Wei H Y, Dong D Z, Lu B. 2018. Euxinia caused the Late Ordovician extinction: evidence from pyrite morphology and pyritic sulfur isotopic composition in the Yangtze area, South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 511: 1-11.

(责任编辑 李新坡)