

川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机质的组构差异及对内部孔隙的控制

陈 诚¹, 管全中^{1*}, 熊昌利², 张 彤², 邓 宾¹, 常 帅¹, 钟智捷¹, 叶玥豪¹, 陈 鑫¹

¹成都理工大学能源学院, 四川 成都

²四川省综合地质调查研究所, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2026年1月4日; 发布日期: 2026年1月15日

摘 要

有机孔是富有机质海相页岩储层中重要储气空间, 控制了页岩气的富集与运移。为探明页岩有机孔的非均质性成因, 基于扫描电镜与激光拉曼联用等技术, 探讨川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机质内部化学结构差异对有机孔发育的控制作用。结果表明: ① 根据有机质赋存状态及其孔隙发育特征, 将有机孔分为三大类: 无定形孔隙、结构型孔隙和生物碎屑孔隙; ② 不同类型有机孔发育具有非均质性, 生物碎屑孔隙面孔率约为4%, 结构型孔隙面孔率约为13%, 无定形孔隙面孔率约为27%, 无定形孔隙发育较好, 有利于页岩气的富集; ③ 不同原始成烃生物形成的有机质的激光拉曼光谱特征具有明显差异, 无定形孔隙RBS平均为 240.6 cm^{-1} , 小于结构型孔隙的平均RBS 249.8 cm^{-1} ; 无定形孔隙的平均D/G (0.8)大于结构型孔隙的平均D/G (0.6); 无定形孔隙的成烃生物是以浮游藻类为主的多细胞藻类, 结构型孔隙的成烃生物是以底栖藻类为主的单细胞藻类; ④ 成烃生物的差异导致有机质的芳构化程度和有序度不同, 有机质芳构化程度高对有机质孔隙的发育起抑制作用, 结合激光拉曼光谱的G-FWHM, D-FWHM, RBS和D/G等参数判断笔石等动物碎屑、底栖藻等单细胞藻类和浮游藻类等多细胞藻类成烃后的有机质芳构化程度依次降低, 有机孔的发育程度依次增高。

关键词

四川盆地, 五峰组 - 龙马溪组, 有机孔, 拉曼光谱, 成烃生物

Control of Pore Characteristics by Structure Differences in Organic Matter within the Wufeng-Longmaxi Shales, Southern Sichuan Basin

*通讯作者。

文章引用: 陈诚, 管全中, 熊昌利, 张彤, 邓宾, 常帅, 钟智捷, 叶玥豪, 陈鑫. 川南地区五峰组-龙马溪组页岩有机质的组构差异及对内部孔隙的控制[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(1): 29-38. DOI: 10.12677/ag.2026.161004

Cheng Chen¹, Quanzhong Guan^{1*}, Changli Xiong², Tong Zhang², Bin Deng¹,
Shuai Chang¹, Zhijie Zhong¹, Yuehao Ye¹, Xin Chen¹

¹College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey, Chengdu Sichuan

Received: December 9, 2025; accepted: January 4, 2026; published: January 15, 2026

Abstract

Organic pores serve as the primary gas storage spaces in organic-rich marine shale reservoirs, controlling the enrichment and migration of shale gas. To investigate the genesis of heterogeneity in shale organic pores, this study employs scanning electron microscopy (SEM) combined with laser Raman spectroscopy (LRS), to explore how differences in chemical structures within organic matter from the Wufeng Formation to Longmaxi Formation shales in the southern Sichuan Basin control the development of organic pores. Results indicate: (1) Based on occurrence states of organic matter and pore development characteristics, organic pores are classified into three categories: amorphous pores, structural pores, and bioclastic pores; (2) The development of different pore types exhibits significant heterogeneity-bioclastic pores show a facial porosity of approximately 4%, structural pores about 13%, while amorphous pores reach 27%. Amorphous pores demonstrate superior development, which favors shale gas enrichment; (3) The laser Raman spectral characteristics of organic matter derived from different source organisms exhibit significant differences. Amorphous pores exhibit lower average Raman band shift (RBS) values (240.6 cm^{-1}) compared to structural pores (249.8 cm^{-1}). The average D/G ratio for amorphous pores (0.8) exceeds that of structural pores (0.6). Hydrocarbon-generating organisms for amorphous pores are primarily multicellular algae dominated by planktonic species, whereas structural pores originate mainly from unicellular benthic algae; (4) Differences in hydrocarbon-generating organisms result in variations in aromatization degree and orderliness of organic matter. Higher aromatization degrees inhibit pore development. Through comprehensive analysis of Raman parameters including G-FWHM, D-FWHM, RBS, and D/G ratios, we determine that graptolites and other animal debris, benthic unicellular algae, and planktonic multicellular algae exhibit progressively decreasing aromatization degrees after hydrocarbon generation, corresponding to increasingly developed organic pores.

Keywords

Sichuan Basin, Wufeng-Longmaxi Shales, Organic Pores, Raman Spectrum, Hydrocarbon Generating Organism

Copyright © 2026 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

四川盆地南部地区(以下简称“川南地区”)五峰组-龙马溪组页岩具有有机质丰度高、高-过成熟等的特征,是我国目前页岩气勘探开发的核心层系之一,探明储量已超 $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。而深层页岩资源约

占 60% 以上, 是未来页岩气增储上产的压舱石[1]。

有机孔是海相页岩气储层的重要储集空间, 对页岩气的富集与运移具有关键控制作用[2]。通过扫描电镜、原子力显微镜和气体吸附等方法对有机孔进行定性或定量分析, 探讨了不同类型有机孔的形成、发育和保存机理, 认为有机孔发育的非均质性受到有机质自身性质(丰度、类型、成熟度)和无机矿物、孔隙压力等多方面的影响[3] [4]。在地质演化过程中有机质孔隙形成与保持的本质在于烃类生成与原地滞留, 成熟烃源岩中所发现的有机孔与干酪根在结构上有一定成因联系, 即有机孔的发育可能与成烃生物的原始结构有关[5]。不同有机组分的生烃潜力和热演化历史差异显著, 使有机质孔隙分布特征非均质性较强, 有机质分子结构的差异是有机孔发育和保存的内因[6]。

传统有机岩石学方法分析有机质的反射率、荧光和形态结构等特征识别不同有机显微组分, 再通过能谱测试分析其成烃生物。但由于五峰组 - 龙马溪组有机质的特殊性, 不同学者对川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机质原始成烃生物的识别划分有所不同, 且无法对有机质分子结构差异进行定量分析进而讨论其对有机孔发育非均质性的控制作用[7]。而激光拉曼光谱技术对碳材料的结构有序状态敏感, 拉曼光谱的不同参数对有机质的分子缺陷和有序程度有良好的指示作用, 可以较好地反应有机质微观上的分子结构的差异, 近年来在油气领域的应用越来越广泛。

因此本研究通过扫描电镜 - 激光拉曼(SEM-Raman)联用观察, 再结合 JMicroVision 软件对有机孔的各项参数进行定量统计分析, 更深入地讨论有机质分子结构的对有机孔发育的控制, 为页岩的有机孔类型、发育特征以及控制因素等研究提供相关理论支撑。

2. 区域地质概况

四川盆地处于上扬子台地, 是一个复合型含油气叠合盆地。华夏与扬子地块在五峰组沉积时期碰撞减缓, 形成了“三隆夹一坳”的古地理格局[8]。川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩是四川盆地及周缘晚奥陶世至早志留世沉积的一套连续的深水陆棚相富有机质硅质或钙质页岩, 地层发育良好, 含大量笔石生物[9]。

威远区块是重要的页岩气田, 五峰组 - 龙马溪组富有机质页岩发育, 威远地区靠近古隆起, 整体呈现斜坡构造。威远区块五峰组 - 龙马溪组结合岩性分析、自然伽马数据和笔石生物特征, 可以将龙马溪组划为龙一段、龙二段, 龙一段划为龙一₁亚段和龙一₂亚段, 龙一₁亚段从下到上有 1、2、3 和 4 小层(图 1)。

3. 样品及方法

3.1. 样品及实验方法

从川南威远采集多块深层五峰组 - 龙一₁亚段页岩岩心样品(图 1(a)), TOC 含量 2.5%~7.0%, 均为富有机质黑色页岩。选取等间隔深层页岩样品平行层理方向进行切割, 并先后对切割的小块进行物理抛光和氩离子抛光。

光镜成像后, 利用酒精棉轻微擦拭抛光表面, 避免油渍等污染物的影响。后续扫描电镜及激光拉曼光谱技术(SEM-Raman)联用测试在中国科学技术大学进行, 通过扫描电镜选取有机质及有机孔发育的区域进行孔隙类型与孔径大小等观察分析, 在此基础上再对不同有机质进行激光拉曼光谱成像分析(图 2(a) & 图 2(b)), 相关测试流程均按照对应的国家标准执行。

SEM-Raman 获取的高分辨率扫描电镜图片(图 2(c)), 利用 JMicroVision 软件提取有机质内部发育的孔隙特征, 主要包括有机质孔隙的孔径、面积、圆度和形状系数等。

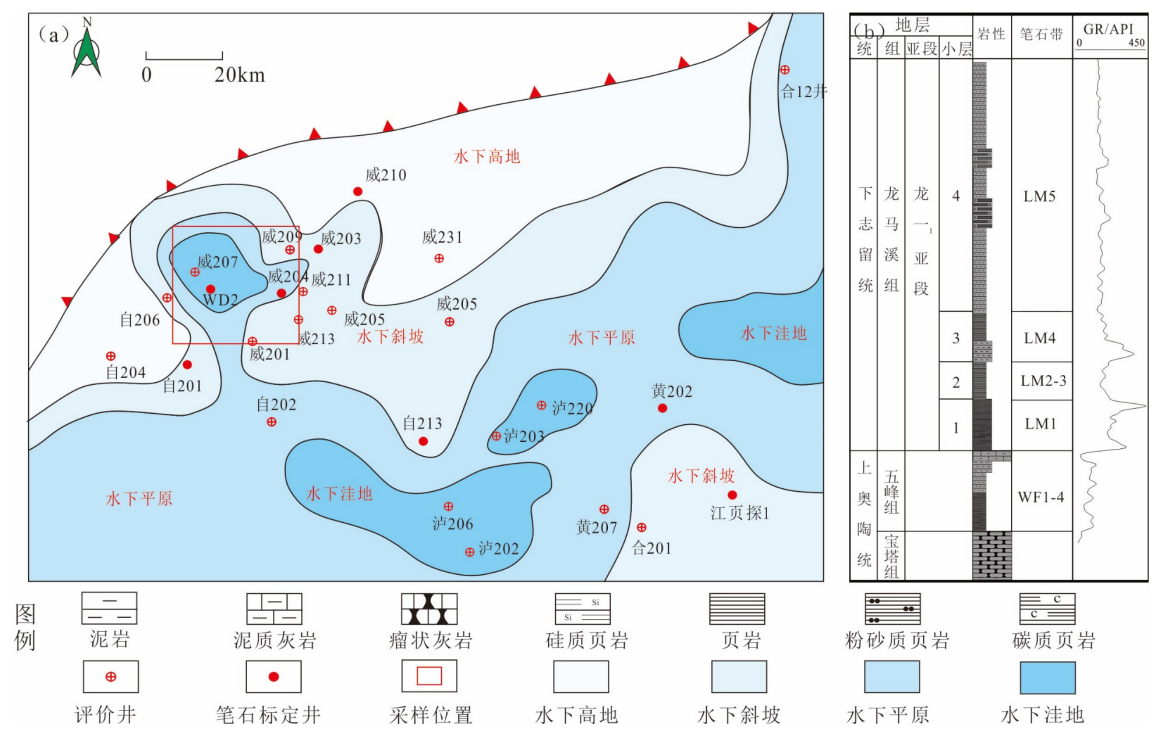


Figure 1. Tectonic setting of the Wufeng-Longmaxi formation in the southern Sichuan area (a) and stratigraphic histogram of a section of the Wufeng-Longmaxi formation (b)
图 1. 川南地区五峰组 - 龙马溪组构造背景(a)及五峰组 - 龙马溪组一段地层柱状图(b)

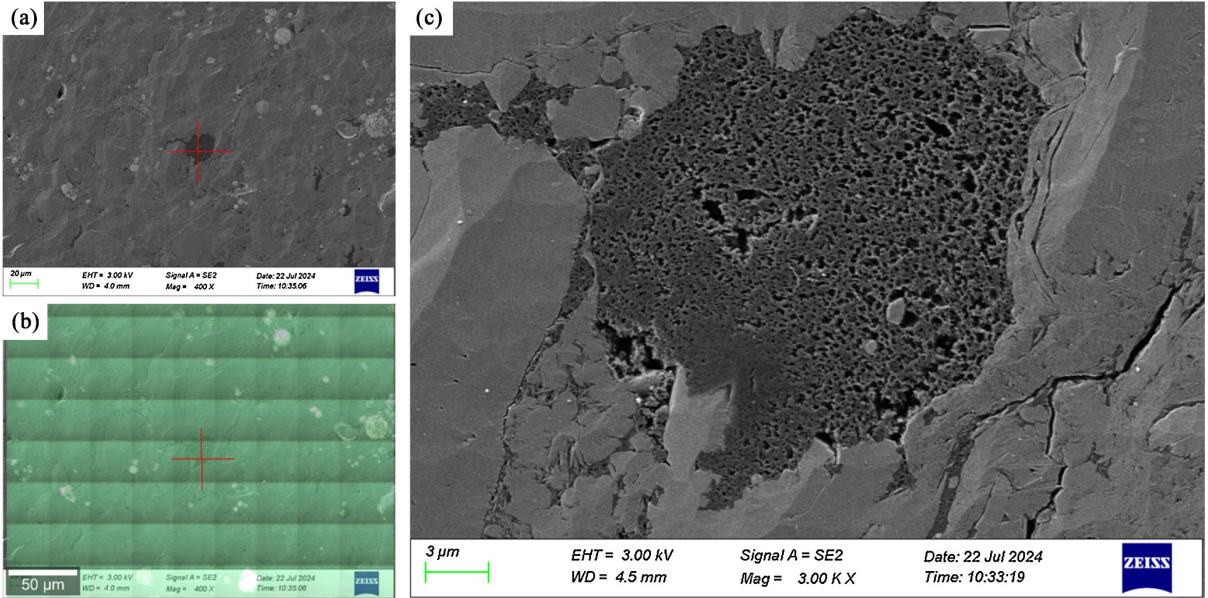


Figure 2. Scanning electron microscope-laser Raman couplings of shales of the Wufeng-Longmaxi formation in the southern Sichuan area
图 2. 川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩扫描电镜 - 激光拉曼联用表征图

3.2. 分析方法

由于拉曼光谱在采集过程中可能受到荧光背景、仪器噪声等因素影响，导致光谱基线漂移，因此使

用 Origin2024 软件进行线性基线校准以去除误差, 利用峰识别工具对光谱中的拉曼峰进行准确识别和标注(图 3)。通过高斯—洛伦兹函数对拉曼峰光谱进行拟合并提取常见的拉曼参数以评估有机质, 包括 G-FWHM: G 峰半高宽, D-FWHM: D 峰半高宽、D-band: D 峰加权平均中心, G-band: G 峰加权平均中心, RBS: 拉曼位移差(G-band 与 D-band 之差), D/G: D 峰和 G 峰强度的比值。

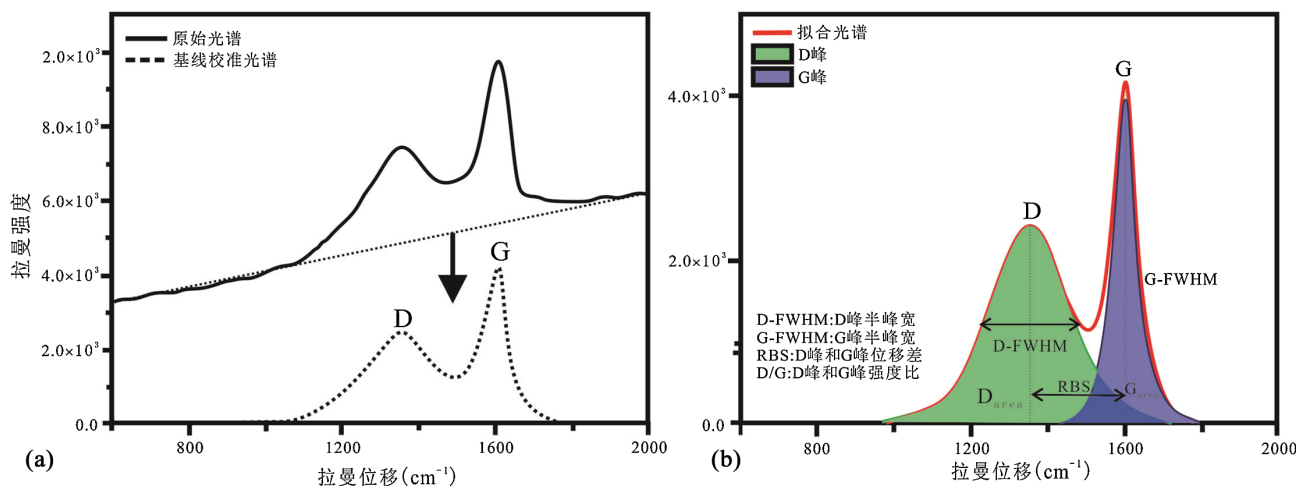


Figure 3. (a) Linear baseline calibration of Raman spectra; (b) Parametric plot of Raman spectra

图 3. (a) 拉曼光谱线性基线校准; (b) 拉曼光谱参数图

4. 结果

4.1. 有机质拉曼光谱特征

五峰组—龙马溪组页岩有机质拉曼光谱图表明: 有机质在约 $1320\sim1350\text{ cm}^{-1}$ 和 $1570\sim1600\text{ cm}^{-1}$ 处各有一个拉曼特征峰, 分别称为 D 峰和 G 峰。D 峰通常较宽, 表示有机质分子结构的无序程度, G 峰通常较窄, 代表有机质分子的芳构化水平[10]。其中 D-band 来源于缺陷诱导的双共振拉曼散射, 与 sp^2 碳结构中的缺陷或无序相关, D-band 越高, 代表有机质分子结构无序程度越高。而 D-FWHM 反映的是有机质分子结构缺陷的分布均匀性或无序程度, D-FWHM 越高, 缺陷类型越复杂或无序程度越高。G-band 代表的是芳构化的碳结构中碳原子的面内振动, 是由碳 sp^2 杂化原子对的拉伸运动产生的, 反映有机质的芳构化程度, G-band 越高, 有机质芳香化程度越高。而 G-FWHM 反映 sp^2 碳结构的有序性和结晶度, 低 G-FWHM 通常代表有机质分子结构结晶度高, 缺陷较少。RBS 对于不同有机质分子结构中芳环的耦合程度有指示作用, RBS 越大, 表明有机质中的芳环耦合程度越高。D/G 反映了有机质结构的无序程度或非芳构化程度, 比值越高, 说明无序结构和缺陷越多, 芳构化程度越低。不同类型有机质的拉曼谱图参数有较大差异, 可以据此划分有机质孔的类型。其中无定形有机质的 D-FWHM 值最大, 平均为 287.2 cm^{-1} ; D/G 值最大, 平均为 0.8; G-FWHM 值最小, 平均为 53.6 cm^{-1} (表 1)。生物碎屑 D-FWHM 值最小, 平均为 187.4 cm^{-1} ; D/G 值最小, 平均为 0.4; G-band 值最大, 平均为 1597.8 cm^{-1} ; RBS 值最大, 平均为 260.7 cm^{-1} 。结构型有机质 D-band 值最小, 平均为 1331.2 cm^{-1} , 其余数据均在另外二者之间。

4.2. 有机孔发育特征

研究区有机孔发育具有强烈的非均质性, 根据有机质赋存状态和原位拉曼光谱特征, 将有机孔分为三大类: 无定形孔隙, 结构型孔隙和生物碎屑孔隙。

Table 1. Average Raman parameters of organic pores in shale of Wufeng-Longmaxi formation in south Sichuan area
表 1. 川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机质平均拉曼参数表

有机质类型	D-band/cm ⁻¹	D-FWHM/cm ⁻¹	G-band/cm ⁻¹	G-FWHM/cm ⁻¹	RBS/cm ⁻¹	D/G	样品量/n
无定形	1336.4 ± 3.2	287.2 ± 22.9	1577.0 ± 6.0	83.2 ± 8.5	240.6 ± 7.1	0.8 ± 0.1	12
结构型	1331.2 ± 7.2	287.1 ± 20.4	1587.2 ± 4.3	73.9 ± 7.9	249.8 ± 8.1	0.6 ± 0.1	6
生物碎屑	1337.2 ± 18.2	187.4 ± 78.5	1597.8 ± 4.8	53.6 ± 5.9	260.7 ± 13.5	0.4 ± 0.1	4

4.2.1. 无定形孔隙

无定形有机质通常赋存在石英、长石和黄铁矿等刚性矿物之间，部分与黏土矿物层形成有机质 - 黏土矿物复合体，内部常发育有自生矿物，如微晶石英、黄铁矿晶体和磷灰石等，这些自生矿物生长往往受限，晶粒小，“漂浮”于有机质之上。有机质整体呈不规则的团块状和长条状，显微组分主要为焦沥青(图 4)。内部发育典型的蜂窝状与气泡状有机孔隙，部分孔隙相互融合形成微米级大孔，整体面孔率约 20%~30% 以上。孔隙长轴方向无定向且孔径不均，在 20~600 nm 范围内均有分布，往往从边界至中心孔径呈现递增趋势。

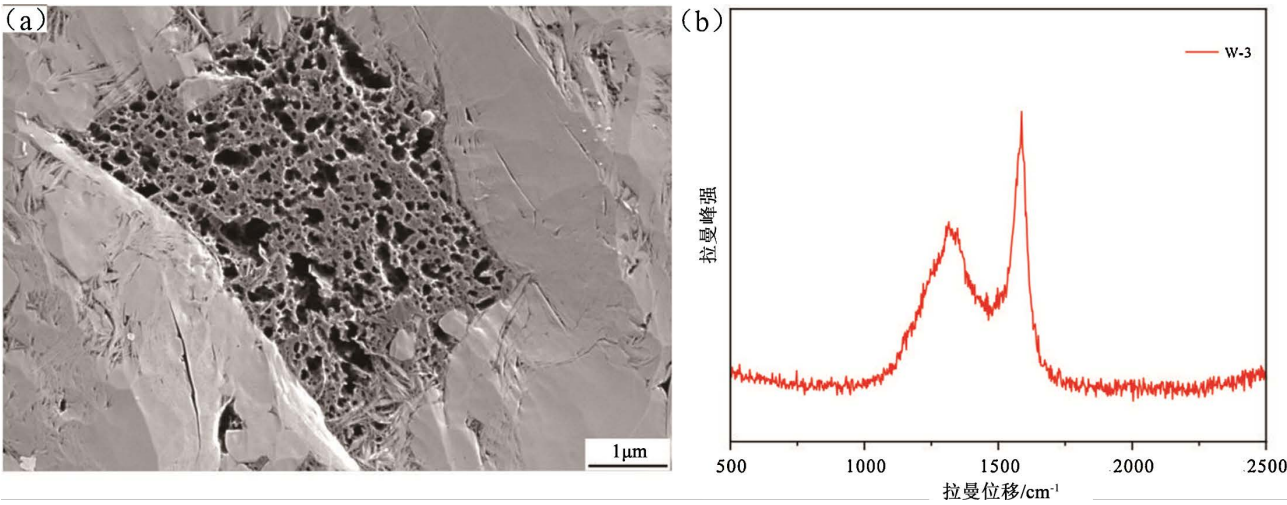


Figure 4. Amorphous pore and Raman spectra from the Wufeng-Longmaxi formation
图 4. 五峰组 - 龙马溪组无定形孔隙及拉曼光谱图

4.2.2. 结构型孔隙

结构型有机质呈团块状或不规则状，有机质周围赋存少量碳酸盐矿物或石英颗粒，表面较干净，极少存在无机矿物，显微组分主要为焦沥青。内部孔隙形态呈圆形或椭圆形，整体呈现蜂窝状，形态基本一致，无定向性，面孔率约 10%~15% 以上(图 5)。有机质孔隙发育相对较小，孔径在 10~200 nm 之间，内部具有一定的连通性，部分在镜下难以分辨形态，边缘光滑。

4.2.3. 生物碎屑孔隙

生物碎屑常保持有较好的轮廓，与接触的矿物边界较为清晰，有机质边界周围几乎没有夹杂自生矿物。有机质的形态多数呈条带状，少数保留团块状(图 6)。生物碎屑孔隙发育较差，少部分发育零星孤立的孔隙，大部分几乎不见孔隙发育，整体面孔率约 5% 及以下。

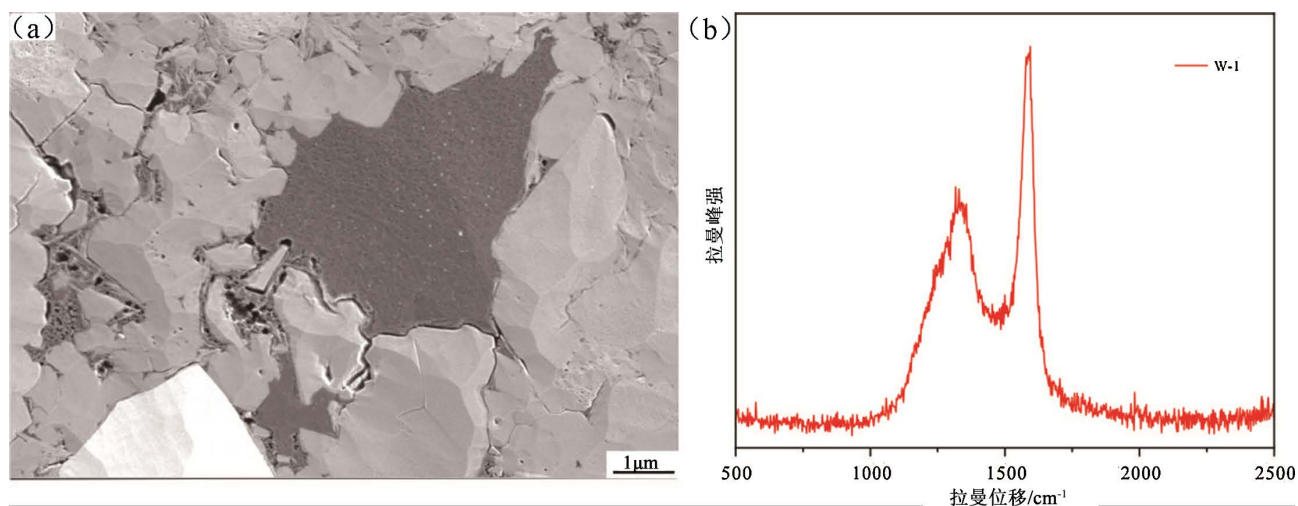


Figure 5. Structural pore and Raman spectra from the Wufeng-Longmaxi formation

图 5. 五峰组 - 龙马溪组结构型孔隙及拉曼光谱图

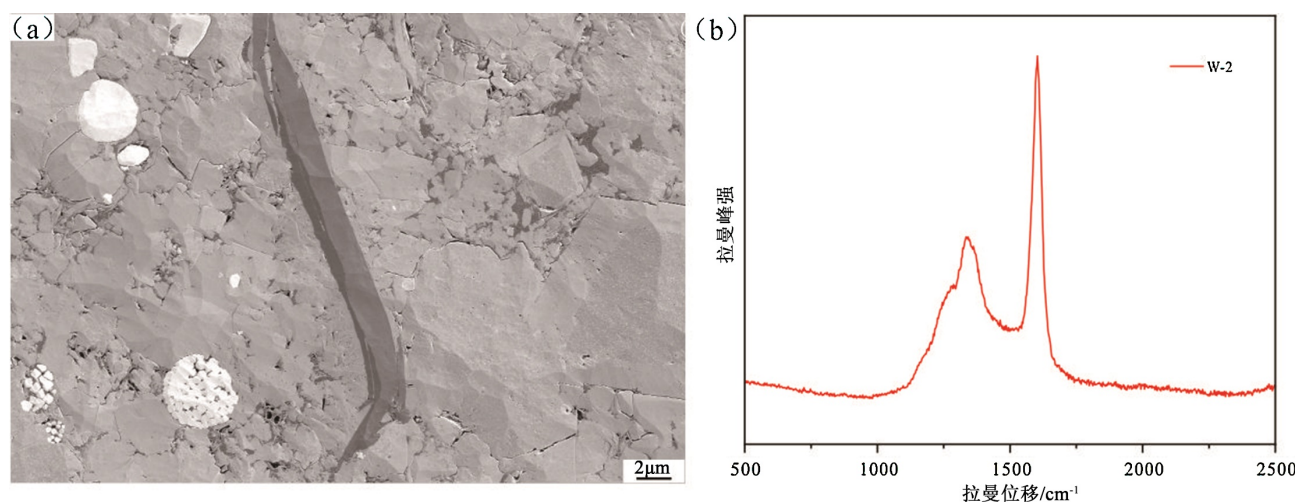


Figure 6. Pore and Raman spectra of bioclastic clasts from the Wufeng-Longmaxi formation

图 6. 五峰组 - 龙马溪组生物碎屑孔隙及拉曼光谱图

5. 讨论

5.1. 有机质原始成烃生物差异

页岩有机质原始母质以及生 - 排烃产物的演化控制着有机孔的发育特征, 不同成烃生物因其生物化学特性差异, 导致有机质在热演化过程中孔隙生成能力显著不同。

生物碎屑孔隙的成烃生物主要为动物碎屑, 其结构和构造明显, 以笔石最为多见, 少见有孔虫、海绵骨针和放射虫, 笔石部分体腔保存, 与周缘碎屑颗粒紧密接触。结构型孔隙和无定形孔隙的成烃生物主要为多细胞藻类如疑源类和浮游藻类等, 和单细胞藻类如底栖藻类。但通过传统的有机岩石学方法和能谱测试并不能将二者很好的识别, 所以结合激光拉曼光谱特征对成烃生物差异进行分析。已有的研究发现, 浮游藻类与底栖藻类的拉曼光谱有显著的差异, 以旺苍鹿波和麻江羊跳地区为例: 底栖藻类与浮游藻类的 RBS 在不同的地区由于有机质成熟度等因素有一定的差异, 但底栖藻类 RBS 通常比浮游藻类大约 10 cm^{-1} (图 7)。底栖藻类的 D/G 比浮游藻类小约 0.2。结合本研究计算的无定形孔隙与结构型孔隙

的相关数据：无定形孔隙 RBS 平均为 240.6 cm^{-1} ，比结构型孔隙的平均 RBS 249.8 cm^{-1} 小约 9.2 cm^{-1} ，无定形孔隙的平均 D/G (0.8) 比结构型孔隙的平均 D/G (0.6) 大约 0.2。可以判断无定形孔隙的成烃生物主要以浮游藻类等多细胞藻类为主，结构型孔隙的成烃生物主要以底栖藻类等单细胞藻类为主。

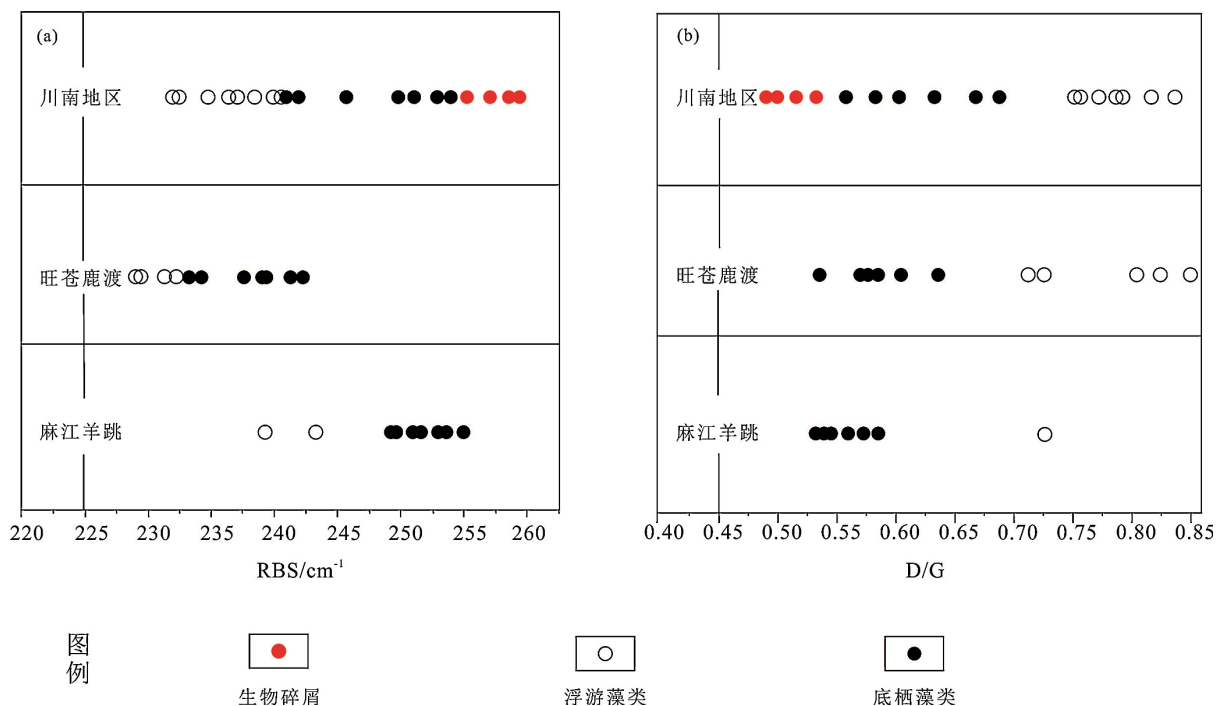


Figure 7. The position and intensity ratio between G peak and D peak of various hydrocarbon-forming organisms
图 7. 不同成烃生物 D 峰与 G 峰位移差和强度比

5.2. 原始成烃生物对有机孔发育的控制

激光拉曼光谱指示着不同的原始成烃生物形成的有机质的分子结构芳构化程度不同。有机质的芳构化作用使有机质中脂肪族结构逐渐消失，芳香基团逐渐增大，且定向性增强。脂肪族结构的消失直接导致页岩生气潜力衰竭，气体充注过程停止，只剩气体消散过程，储层压力系统由超压逐渐衰减至常压乃至欠压状态，严重破坏了有机孔隙的机械保存机制。此外脂肪侧链以及杂原子的脱落会破坏孔隙的化学保存机制，芳香核的增大以及定向排列对有机质孔隙进一步破坏。即有机质的芳构化对有机孔的发育具有破坏作用。

生物碎屑孔隙的 D-FWHM 平均值为 187.4 cm^{-1} ，G-FWHM 平均值为 53.6 cm^{-1} ，D/G 平均值为 0.4 在三者中最低，G-band 平均值为 1597.8 cm^{-1} ，RBS 平均值为 260.7 cm^{-1} ，在三者中最高，代表以笔石类生物为主的动物碎屑成烃后的芳构化程度高，芳香结构有序度高，结构中的杂原子较少，芳香层较大。导致生物碎屑孔隙发育最差，平均面孔率仅约为 4%，整体孔隙的孔径与面积为三者中最小(见表 2)。

结构型孔隙的 D-FWHM 平均值为 287.1 cm^{-1} ，与结构型孔隙接近，高于生物碎屑孔隙 G-FWHM 平均值为 73.9 cm^{-1} ，D/G 平均值为 0.6，G-band 平均值为 1587.2 cm^{-1} ，RBS 平均值为 249.8 cm^{-1} ，都属于三者中居中的位置，代表以底栖藻类为主的成烃生物成烃后芳构化程度和芳香结构有序度为第二。形成的结构型孔隙发育较生物碎屑孔隙更好，差于无定形孔隙，平均面孔率约为 13%，整体孔隙的孔径与面积略好于生物碎屑孔隙，差于无定形孔隙。

无定形孔隙的 G-FWHM 平均值为 83.2 cm^{-1} ，D/G 平均值为 0.8 在三者中最高，G-band 平均值为

1577.0 cm⁻¹, RBS 平均值为 240.6 cm⁻¹, 在三者中最低, 代表以浮游藻类为主的成烃生物成烃后的芳构化程度和芳香结构有序度最低, 无定形孔隙发育较好, 平均面孔率为 27%, 整体孔隙面积与孔径远大于另外两者。

Table 2. Pore characteristics of organic pores in the Wufeng-Longmaxi formation shale, southern Sichuan basin
表 2. 川南地区五峰组 - 龙马溪组页岩有机孔孔隙特征

有机孔类型	样本量/n	孔径/nm	平均面孔率
无定形孔隙	469	155.5 ± 126.8	27%
结构型孔隙	918	27.8 ± 5.1	13%
生物碎屑孔隙	238	23.1 ± 7.9	4%

6. 结论

- 1) 研究区五峰组 - 龙马溪组页岩有机孔发育具有强烈的非均质性, 根据有机质赋存状态及孔隙发育特征, 将有机孔分为三大类: 无定形孔隙, 结构型孔隙和生物碎屑孔隙。
- 2) 生物碎屑孔隙发育较差, 多为零星发育孤立孔隙, 平均面孔率约为 4%, 整体孔隙面积与孔径最小, 结构型孔隙发育程度较好, 内部具有一定的连通性, 平均面孔率约为 13%, 整体孔隙面积与孔径略大于生物碎屑孔隙, 无定形孔隙发育更好, 孔隙连通性好, 平均面孔率约为 27%, 整体孔隙面积与孔径最大。
- 3) 不同原始成烃生物形成的有机质激光拉曼光谱特征具有明显差异, 通过 D 峰与 G 峰的位移差与强度比判断无定形孔隙的成烃生物是以浮游藻类为主的多细胞藻类, 结构型孔隙的成烃生物是以底栖藻类为主的单细胞藻类。
- 4) 成烃生物的差异导致有机质的芳构化程度和有序度不同, 有机质芳构化程度高对有机质孔隙的发育起抑制作用, 结合激光拉曼光谱的 G-FWHM, D-FWHM, RBS 和 D/G 等参数判断笔石等动物碎屑, 底栖藻等单细胞藻类, 浮游藻类等多细胞藻类成烃后的有机质芳构化程度依次降低, 有机孔的发育程度依次增高。

致 谢

本研究得到了中国科学技术大学理化中心杨玉露工程师的大力支持。

基金项目

国家自然科学基金项目(42202192)、四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0811)以及四川省地质调查研究院科研项目“四川省荣经 - 汉源地区五峰组 - 龙马溪组下段笔石相及锰钴矿富集规律研究与应用示范”(SCIGS-CZDXM-2025002)。

参考文献

[1] 蒋前前, 吴娟, 王恒, 等. 川南地区下志留统龙马溪组有机质热演化及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1321-1336.

[2] 聂海宽, 张光荣, 李沛, 等. 页岩有机孔研究现状和展望[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1770-1787.

[3] 廖崇杰, 陈雷, 古志斌, 等. 海相富有机质页岩储集层特征、成因类型和机制: 以川南长宁五峰-龙马溪组为例[J]. 古地理学报, 2025, 27(3): 714-730.

[4] 张廷山, 杨洋, 龚其森, 等. 四川盆地南部早古生代海相页岩微观孔隙特征及发育控制因素[J]. 地质学报, 2014,

- 88(9): 1728-1740.
- [5] 鲍芳, 腾格尔, 仰云峰, 等. 不同成烃生物的拉曼光谱特征[J]. 高校地质学报, 2012, 18(1): 174-179.
 - [6] 张聪, 夏响华, 杨玉茹, 等. 安页 1 井志留系龙马溪组页岩有机质拉曼光谱特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 2019, 38(1): 26-34.
 - [7] 王莹珠, 杨继进. 四川盆地龙马溪组页岩有机质组构非均质性以及对孔隙发育的控制[J]. 地质科学, 2024, 59(5): 1173-1184.
 - [8] 王红岩, 周尚文, 赵群, 等. 川南地区深层页岩气富集特征、勘探开发进展及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1430-1441.
 - [9] 聂海宽, 张金川, 金之钧, 等. 论海相页岩气富集机理——以四川盆地五峰组-龙马溪组为例[J]. 地质学报, 2024, 98(3): 975-991.
 - [10] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 固体有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1228-1241.
 - [11] 肖贤明, 周秦, 程鹏, 等. 高-过成熟海相页岩中矿物-有机质复合体(Moa)的显微激光拉曼光谱特征作为成熟度指标的意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(9): 1228-1241.