

蒋立伟, 刘成林, 董明祥, 邹辰, 焦鹏飞, 刘飞, 李君军, 霍宏亮, 贺昱搏, 王馨佩. 2026. 渝西地区五峰—龙马溪组页岩不同构造部位孔隙结构特征与发育模式. 地质科学, 61(1): 176-190. DOI: 10.12017/dzgx.2026.013. CSTR: 32087.14.dzgx.2026.013.

Jiang Liwei, Liu Chenglin, Dong Mingxiang, Zou Chen, Jiao Pengfei, Liu Fei, Li Junjun, Huo Hongliang, He Yubo, Wang Xinpei. 2026. Pore structure characteristics and development patterns of different structural parts of the Wufeng-Longmaxi formations shale in western Chongqing. *Chinese Journal of Geology*, 61(1): 176-190. DOI: 10.12017/dzgx.2026.013. CSTR: 32087.14.dzgx.2026.013.

渝西地区五峰—龙马溪组页岩不同构造部位 孔隙结构特征与发育模式*

蒋立伟^{1,2,3} 刘成林^{1,2} 董明祥^{1,2} 邹辰³ 焦鹏飞⁴
刘飞³ 李君军³ 霍宏亮^{1,2} 贺昱搏^{1,2} 王馨佩^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;
3. 中国石油浙江油田分公司 杭州 311100; 4. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 渝西地区龙马溪组作为我国南方海相页岩气勘探的重要层系, 其页岩气资源量巨大, 具备广阔的开发前景。但不同构造部位储层特征及产能差异显著, 目前对构造控制下的储层特征分异规律及含气性主控因素的认识仍不够系统和深入。本研究综合运用 TOC、全岩矿物分析、岩心—扫描电镜多尺度观察、气体吸附实验及保压取心含气量测试等方法, 对比分析了大安地区斜坡、向斜等不同构造部位页岩的储层特征与孔隙结构差异, 探讨孔隙结构对含气性的控制作用。研究表明: 1) 向斜区页岩呈“多孔少缝”特征, 有机孔发育程度高, 呈蜂窝状分布, 孔隙连通性较好, 裂缝以成岩裂缝和有机质收缩缝为主, 构造微裂缝发育较少; 斜坡区则裂缝发育且以构造微裂缝为主, 无机孔隙发育且形态沿应力方向变形, 孔隙非均质性显著增强。2) 孔隙结构呈现显著分异, 构造运动控制了不同构造区域内的微孔, 微孔在弱构造变形中更为发达。向斜区页岩有机孔占比高, 储集性能好, 含气量和产量高; 而斜坡区发育大量构造裂缝, 孔隙和成岩裂缝被压实, 孔径减小, 微孔、介孔比表面积略占优势, 储集性能变差。3) 含气性控制机制存在差异: 向斜区页岩含气量主要受介孔孔隙结构调控, 微孔影响较小; 斜坡区则相反, 含气量主要受微孔结构控制。研究成果为渝西地区龙马溪组页岩气勘探靶区优选及明确有利勘探区提供了理论依据。

关键词 渝西地区 龙马溪组 储层特征 孔隙结构 含气性控制

中图分类号: P542, P618.130

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2026)01-176-15

Pore structure characteristics and development patterns of different structural parts of the Wufeng-Longmaxi formations shale in western Chongqing

Jiang Liwei^{1,2,3} Liu Chenglin^{1,2} Dong Mingxiang^{1,2} Zou Chen³ Jiao Pengfei⁴
Liu Fei³ Li Junjun³ Huo Hongliang^{1,2} He Yubo^{1,2} Wang Xinpei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 3. Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Hangzhou 311100;
4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083)

Abstract The Longmaxi Formation in western Chongqing has abundant shale gas resources, but the characteristics

* 基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(编号: 2025ZD1403900)、国家重点研发计划项目(编号: 2021YFA071900)、国家自然科学基金项目(编号: 41872127)和重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(编号: CSTB2024NSCQ-LZX0108)资助
本文作者: 蒋立伟, 男, 1983年生, 博士研究生, 石油、天然气地质与勘探和石油地质学专业。E-mail: 17855665637@163.com
刘成林, 男, 1970年生, 博士, 教授, 地球化学和石油地质学专业。本文通讯作者。E-mail: liuel@cup.edu.cn

收稿日期: 2025-09-01, 修回日期: 2025-11-19

and productivity of shale reservoirs in different structural parts vary significantly, and its understanding is still unclear. This study comprehensively utilized methods such as TOC, whole rock mineral analysis, multi-scale observation of core scanning electron microscopy, gas adsorption experiments, and pressure holding core gas content testing to compare and analyze the reservoir characteristics and pore structure differences of shale in different structural parts such as slopes and synclines in the Da'an area of western Chongqing. The study explored the controlling role of pore structure on gas content and identified favorable exploration areas. The research results indicate that: 1) shale in the synclinal zone is characterized by "porous and few fractures", with a high degree of organic pore development. The fractures are mainly diagenetic fractures and abnormally high-pressure fractures, while structural fractures are not developed; in the slope area, fractures are developed and mainly structural cracks, with weaker development of organic pores. 2) The pore structure shows significant differentiation: the volume of micropores and mesopores in shale in the inclined zone is higher than that in the slope zone, while micropores and mesopores in the anticline zone have a slight advantage over surface area. 3) There are differences in the control mechanisms of gas content: the gas content of shale in the syncline zone is mainly regulated by the mesoporous pore structure, with less influence from micropores; on the contrary, in the slope area, the gas content is mainly controlled by the microporous structure. The research results provide a theoretical basis for the optimal selection and exploration development of shale gas exploration targets in the Longmaxi Formation in western Chongqing.

Keywords Western Chongqing, Longmaxi Formation, Reservoir characteristics, Pore structure, Gas content control

四川盆地南部(川南地区)发育多套富有有机质页岩层系,主要包括上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组及上二叠统龙潭组,页岩气资源丰富(何骁等, 2022; 郭旭升等, 2025)。目前,五峰组—龙马溪组是该区勘探开发的主力层系(李国欣等, 2022; 李哲等, 2025)。渝西地区作为四川盆地页岩气增储上产的关键靶区,其深层勘探有利区面积约1 926 km², I+II类储层地质储量总计约1.02×10¹² m³。目前该区已实现产能突破:大足区块Z2井和Z3井在五峰组—龙马溪组试采期间,分别获得日产气45.67×10⁴ m³和21.3×10⁴ m³的高产工业气流;2022年8月,大安区块D2H井于同一层系再次取得深层页岩气勘探突破(张成林等, 2019; 舒红林等, 2023; 梁兴等, 2024a)。页岩具有低渗透率特征,并发育复杂的微-纳米尺度孔隙网络,其发育程度直接控制气体赋存与解吸行为(徐良伟等, 2022)。渝西五峰组—龙马溪组页岩经历多期构造叠加,变形强度显著。构造样式的空间分异导致孔喉结构与储层物性非均质性,进而引发含气性与产能分区(Shi et al., 2022)。

前人针对盆地内差异构造背景(露头、浅层、中深层)页岩的对比研究表明,构造作用通过多重

机制影响储层,但构造变形对于孔隙结构的改造仍未达成一致的观点(Zhu et al., 2018; Sun et al., 2020; Li et al., 2022; Xiang et al., 2022; 尚福华等, 2023)。尚福华等(2023)认为断裂活动可显著增大总孔容与介孔体积,同时缩减微孔比例,增强储渗性能并促进断裂带吸附气向游离态转化。Zhu et al.(2018)提出脆性变形重塑原本发育的孔隙系统,使微-中孔转化为大孔,导致孔容微增而比表面积不变,认为脆性矿物粒间孔与裂隙发育系主控因素。相反, Xiang et al.(2022)强调构造挤压引发孔隙塌陷与形态畸变,塑性组分(有机质/黏土)压缩致使孔径减小,削弱储气能力,综合表明弱变形区更利于气藏保存,常对应高含气丰度。Li et al.(2022)发现相较于未变形与脆性变形样品,延性变形页岩微孔占比升高,指示构造应力挤压破坏大孔结构。Shi et al.(2023)指出变形区岩心孔容与比表面积同步降低,证实中-大孔对构造响应更为敏感。Liang et al.(2017)讨论了川东南构造变形带龙马溪组页岩孔隙裂隙结构的演化,认为剪应力可以削弱页岩的各向异性,改变不同孔隙类型和含量的百分比。

本研究选取渝西地区临江向斜典型页岩气井资料,综合地化测试、矿物分析、低温N₂/CO₂吸

附实验及扫描电镜(SEM)表征,系统解析向斜斜坡带与核部差异变形条件下的孔隙构型,阐明构造单元—孔隙结构—储层品质的耦合机制,建立分区孔隙发育模型,为深层页岩气勘探决策提供科学依据。

1 地质背景

渝西大安区块位于四川盆地南缘,构造上处于川中平缓带与川南低陡构造带交接部位(图1),呈现隆—坳相间的构造格局(王子萌等,2022)。早印支期伊始,该区持续承受东南侧江南—雪峰

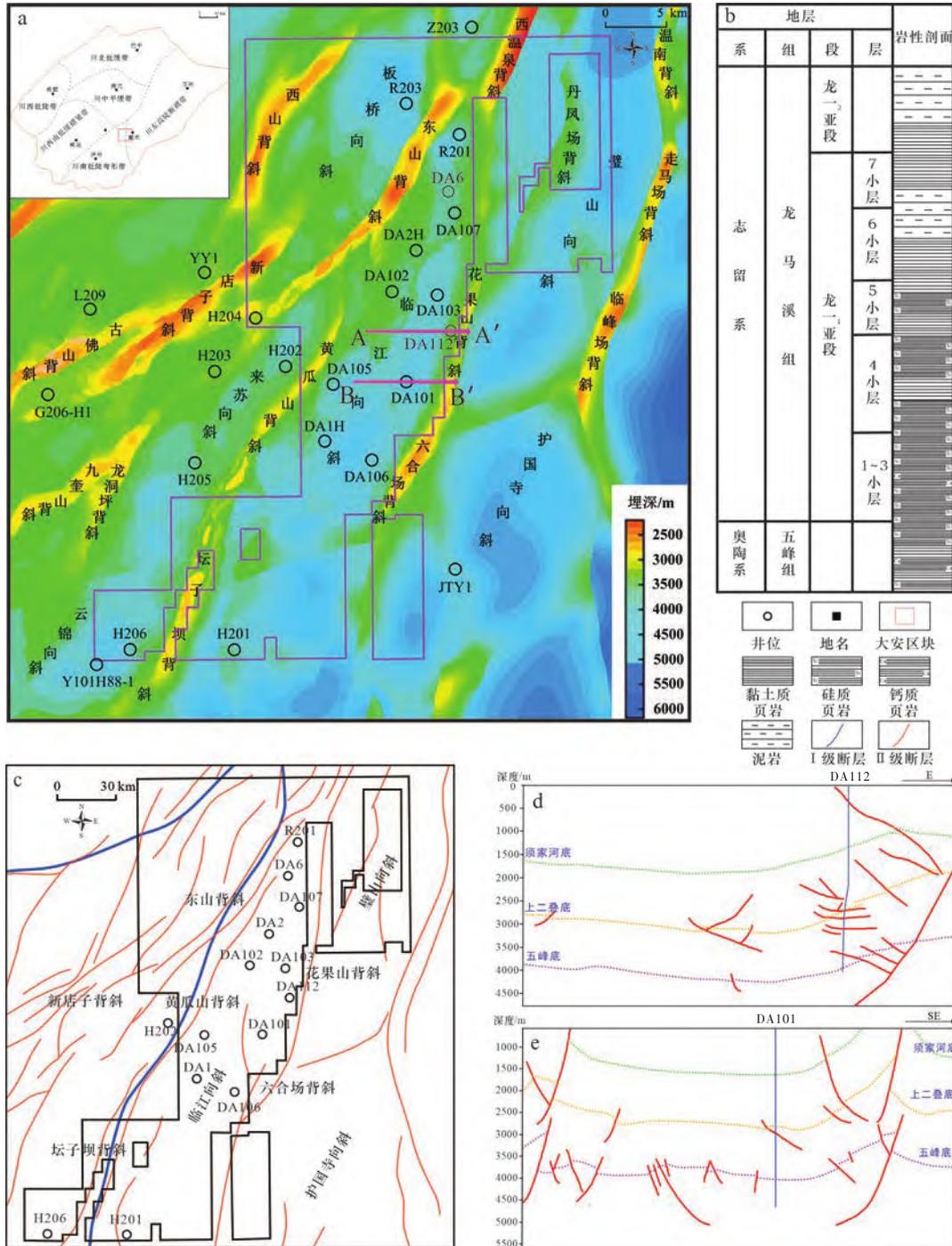


图1 研究区构造纲要图(a)、目的层段地层柱状图(b)、断裂发育(c)和地震剖面解释图(d、e)

Fig. 1 Structural outline of the study area (a), stratigraphic column of the target interval (b), fault development map (c) and seismic profile interpretation (d, e)

加里东造山带与西北向龙门山推覆体系的复合挤压, 叠加川中刚性基底阻挡, 形成NE-SW向构造体系。研究区内发育西山—新店子—龙洞坪、西温泉—东山—黄瓜山—坛子坝、丹凤场—花果山—六合场、临峰场等4个背斜构造带, 板桥—来苏—云锦、临江、广普—护国寺等3个向斜构造带(梁兴等, 2024a, 2024b; 单长安等, 2025)。大安区的“窄陡背斜、宽缓向斜”呈NE-SW向成排成带展布, 以东山背斜—黄瓜山背斜—坛子坝背斜为界, 以东属于张扭走滑应力场, 以西属于压扭走滑应力场。前人通过构造地质精细解释, 识别出大安地区各类断层120条, 其中I级断层不发育, II级断层6条、III级断层16条、IV级断层98条。断裂发育程度总体较低, 以II级及以下断层为主(梁兴等, 2024a)。临江向斜整体面积950 km², 呈NNE走向, 被黄瓜山和花果山构造带所夹持, 构造整体平缓, 呈箱状, 向斜核部五峰组—龙马溪组的产状近水平, 远离I级与II级断裂, 断层基本不发育; 斜坡区靠近II级断裂, 断层较向斜区发育, 构造变形程度较强, 地层产状陡, 且受断裂切割有多套断裂在纵向呈上下叠置, 可见高角度缝发育。

早志留世龙马溪组沉积时期, 研究区处于局限陆表海沉积中心(蒋婵等, 2022)。龙马溪组页岩平面展布广、垂向连续性好、沉积厚度大, 其中五峰组—龙马溪组埋深3 500~4 500 m, 为当前勘探开发主力层系(胡航等, 2025; 刘文平等, 2025)。该套地层采用分级划分方案: 龙马溪组分为龙一段与龙二段; 龙一段细分为龙一₁亚段及龙一₂亚段; 龙一₁亚段自上而下进一步划为7个小层。龙一₁亚段以灰黑色硅质页岩为主, 夹黏土质/钙质页岩, 具高有机质丰度特征(潘妮等, 2022; 梁兴等, 2023)。五峰组—龙一₁₃小层的平均孔隙度大于4%, 平均总有机碳含量(TOC)大于3%, 平均含气量大于3 m³/t, 平均脆性矿物含量大于50%。

2 数据与方法

2.1 样品采集

本次研究选取渝西临江向斜6口深层页岩气探井的岩心样品, 目标层位统一为五峰组—龙一₁₃, 平均垂深大于3 500 m。其中脆性变形样品取自向

斜翼部斜坡区, 受NE-SW向断裂系统强烈改造, 发育显著构造形变; 未变形样品取自向斜核部, 构造活动微弱且保存条件优越, 未观测到明显变形特征。

2.2 实验方法

(1) 地球化学和岩石学分析

矿物成分和TOC分析测试在中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院非常规油气重点实验室完成。矿物组成分析采用RINT-TTR3型X射线衍射仪, 在恒温恒湿条件下(24 °C, 35% RH)依据中国油气行业标准SY/T 5163-2018标准执行。总有机碳(TOC)含量测定使用Leco碳硫分析仪, 于1 000 °C高温环境通入N₂/CO₂混合气体, 遵循国家标准GB/T 19145-2022。

(2) 气体吸附实验

气体吸附实验采用美国Micromeritics公司生产的ASAP2420比表面测定仪。测试遵循《岩石比表面积和孔径分布测定静态吸附容量法》(SY/T 6154-2019)行业标准, 其中低温N₂在-196 °C环境下吸附, 低压CO₂吸附在小于0 °C环境下进行。低温N₂吸附利用BET模型计算比表面积, BJH模型计算孔体积, 低压CO₂吸附利用DFT模型计算孔隙体积。

(3) 扫描电镜二维成像

扫描电镜二维成像(SEM)测试仪器为Helios NanoLab 650双束扫描电镜, 通过将样品打磨抛光, 放入氩离子抛光镀膜仪中进行抛光镀膜处理后, 利用扫描电镜和Mapviewer软件扫描岩心得到二维微观图像, 分析页岩的纳米级颗粒与孔隙形貌、尺度特征及分布规律。本次扫描电镜二维成像实验中程序遵循中国油气行业标准SY/T 5162-2021。

3 结果

3.1 岩石学特征和岩相划分

渝西地区龙马溪组页岩矿物组成呈现稳定特征(表1), 以石英(29.5%~73.3%, 均值54.6%)、黏土矿物(13.1%~36.7%, 均值20.9%)及碳酸盐矿物(方解石为主, 0.5%~33.8%, 均值7.0%)为主体, 长石与黄铁矿含量较低。受沉积环境控制, 矿物组分非均质性显著: 黏土矿物以伊利石(>60%)

为主导, 含少量伊蒙混层与绿泥石。大安区块五峰—龙马溪组有机质丰度突出, 总有机碳含量(TOC) 介于 2.77% ~ 7.88%, 平均值 5.09%, 属典型富有机质页岩。

基于矿物三端元分类原则(图 2), 以长英质矿物(石英+长石)、碳酸盐矿物(方解石+白云石)以及黏土矿物作为三端元, 以矿物含量 50% 为界限进行分类, 将细粒沉积岩分为硅质页岩相、黏土质页岩相、钙质页岩相以及混合质页岩相(武瑾等, 2025)。大安地区全岩矿物数据投图表明: 向斜区五峰—龙马溪组样品集中分布于硅质页岩相区域, 斜坡区样品则主要落入硅质页岩相与混合质页岩相区。

3.2 孔隙—裂缝发育特征

渝西地区龙马溪组页岩储集性能受孔隙—裂

缝系统联合控制, 其空间分异构成储层品质差异的核心要素(王玉满等, 2017)。基于岩心—薄片—扫描电镜(SEM)多尺度孔隙及裂缝图像观察, 渝西地区五峰组—龙马溪组页岩储集空间呈现显著构造分带性。纳米级孔隙在扫描电镜尺度占据主导地位。裂缝系统则表现出多尺度成因差异: 岩心与薄片尺度以构造成因裂缝为主, 而 SEM 尺度以非构造成因裂缝为主, 主要为成岩收缩缝与层理缝。

向斜构造稳定区储集空间特征表现为: 岩心尺度少见构造裂缝, 优势发育未充填层理缝(图 3a~图 3c)。薄片观测显示页理缝与收缩裂缝构成主要渗流通道, 碎屑矿物长轴定向排列。纹层结构具典型二元特征——暗色富有机质纹层厚度变化大, 且横向较为稳定, 亮色矿物纹层厚度较薄(图 3d~

表 1 渝西大安地区深层龙马溪组优质页岩样品基本信息

Table 1 Basic information of high-quality shale samples from the deep Longmaxi Formation in the Da'an area of western Chongqing

样品编号	构造区	井深/m	矿物含量/%						TOC/%
			黏土矿物	石英	长石	方解石	白云石	黄铁矿	
DA-1	斜坡区	4102.05	18.2	51.5	3.4	6.9	14.4	5.6	6.55
DA-2		4103.83	16.5	69.0	4.1	3.0	4.1	3.3	7.88
DA-3		4107.26	20.8	63.0	2.3	2.5	9.3	2.1	4.18
DA-4		4122.25	29.1	49.3	4.7	5.3	6.4	5.2	4.98
DA-5		4124.14	20.0	55.5	2.2	4.7	13.4	4.2	5.58
DA-6		4127.23	18.2	62.1	2.4	6.5	7.1	3.7	5.08
DA-7		4128.79	25.1	57.5	2.9	4.9	6.2	3.4	5.33
DA-8		4132.68	39.7	35.7	6.0	12.2	5.4	1.0	3.80
DA-9		4094.64	36.7	42.2	4.8	1.5	9.1	5.7	2.78
DA-10		4096.36	26.3	41.0	2.4	0.5	26.5	3.3	2.77
DA-11		4097.35	41.4	36.4	7.1	1.7	6.5	6.9	4.7
DA-12		4100.80	20.5	40.5	4.9	5.0	25.3	3.8	5.4
DA-13		4102.22	18.5	64.5	4.3	3.7	5.9	3.1	6.5
DA-14	向斜区	4369.95	15.1	60.2	2.4	7.9	9.7	4.7	6.40
DA-15		4373.45	13.1	72.5	2.1	4.0	5.4	2.9	7.50
DA-16		4374.88	16.7	49.4	2.0	21.7	6.3	3.9	6.89
DA-17		4389.89	31.4	50.0	4.6	4.2	4.8	5.0	4.23
DA-18		4393.3	37.8	47.4	4.5	1.4	2.7	6.2	3.36
DA-19		4394.9	14.0	73.3	2.1	3.3	4.4	2.9	3.12
DA-20		4395.50	14.0	73.2	1.4	2.4	6.2	2.8	4.86
DA-21		4396.2	14.7	51.3	2.1	11.9	10.1	9.9	4.52
DA-22		4397.18	17.3	46.4	4.8	11.7	10.3	9.5	5.11
DA-23		4399.58	16.4	68.9	2.5	3.6	5.5	3.1	5.41
DA-24		3996.21	18.6	47.0	3.8	7.6	19.5	3.5	5

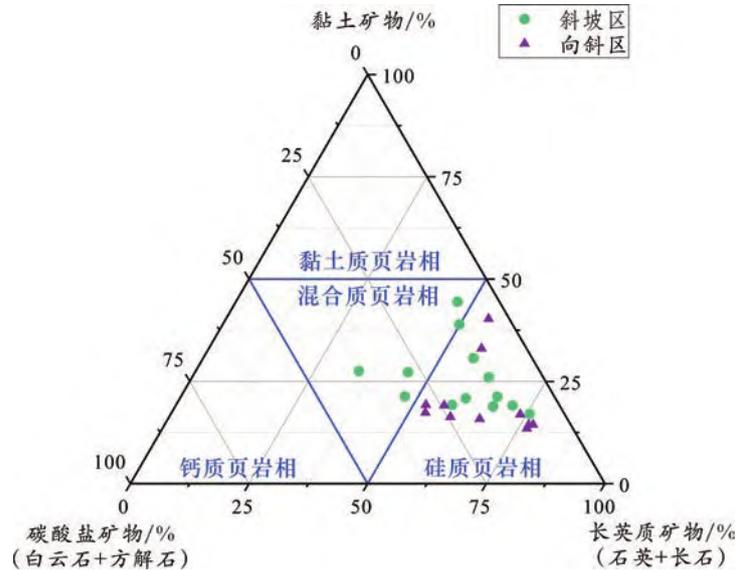


图2 渝西地区页岩岩相三端元划分结果

Fig. 2 Three terminal element division results of shale lithology in western Chongqing region

图3f)。局部可见黄铁矿条带与热液石英脉。

斜坡构造改造带呈现迥异特征：岩心尺度发育多期共轭剪裂缝，多被方解石填充。页岩变形严重，裂缝斜切整块岩心，晚期高角度裂缝切穿早期低角度裂缝现象较为常见(图4a~图4c)。薄片尺度可见部分裂隙贯穿薄片，大多被硅质与钙质矿物充填，纹层特征与向斜区一致，但整体较为致密。

渝西地区龙马溪组页岩孔隙体系存在显著的构造分异特征。按成因可划分为有机孔与无机孔两大类型，其中无机孔隙系统以矿物粒间孔、粒内孔及溶蚀孔为主体。向斜区矿物粒间孔占据主导地位，主要赋存于刚性石英颗粒边界及草莓状黄铁矿晶簇间隙(图3g、图3h)。这类孔隙形态多呈近等轴状，未呈现明显定向排列特征，反映稳定构造环境下原生孔隙系统的完整保存。与之形成鲜明对比的是斜坡区，该区矿物颗粒接触紧密导致粒间孔遭受强烈压实作用，孔隙形态多呈狭长状。更值得注意的是，构造应力作用诱发石英矿物破裂，形成次生粒间孔与微裂隙网络(图4g、图4h)。

有机孔隙系统对构造变形的响应机制尤为敏感(Zhu et al., 2019; Li et al., 2021)。向斜区高有机质丰度背景下，蜂窝状有机孔构成孔隙主体，单体多呈球体—椭球体形态，密集分布于有机质

团块内部(图3i)。斜坡区强烈的构造挤压则导致有机孔发生系统性形变：原始近圆形孔隙沿垂直挤压应力方向拉长为椭圆形，形成优势定向排列结构。空间分析表明，有机质—矿物接触界面附近的孔隙变形程度最为剧烈，而远离界面的有机质内部孔隙仍保持较高圆度(图4i)。这种变形梯度揭示应力传递受矿物刚性边界制约，有机质作为塑性介质通过孔隙形变吸收构造应变能(Shang et al., 2020)。

微裂缝既可作为气体的储集空间，又可作为气体的运移通道，对于提高页岩孔隙度和渗透率具有重要作用。由图5可知，在遭受构造作用影响较大的斜坡区中，其页岩样品发育规模大、数量多、类型多样的微裂缝。图5a可见黏土矿物集合体在构造作用下发生变形、破裂，其破裂方向垂直于黏土矿物的展布方向，此类裂缝可有效沟通有机孔、黏土矿物晶间孔、层间缝等多种类型孔隙，改善储层的连通性。图5b~图5f可见有机质收缩缝、黏土矿物晶间缝、溶蚀缝、粒内缝、粒间缝等多种微裂缝，并可见多条微裂缝相互贯通，切穿视域，这对于提高孔隙的连通性具有显著作用。图5c与图5f中可见典型的构造缝，局部颗粒被切穿，裂缝面呈锯齿状延伸较远，可为气体运移提供有效的渗流通道。此外在向斜区样品中可见少量有机质收缩缝、粒间缝与黏土矿物晶

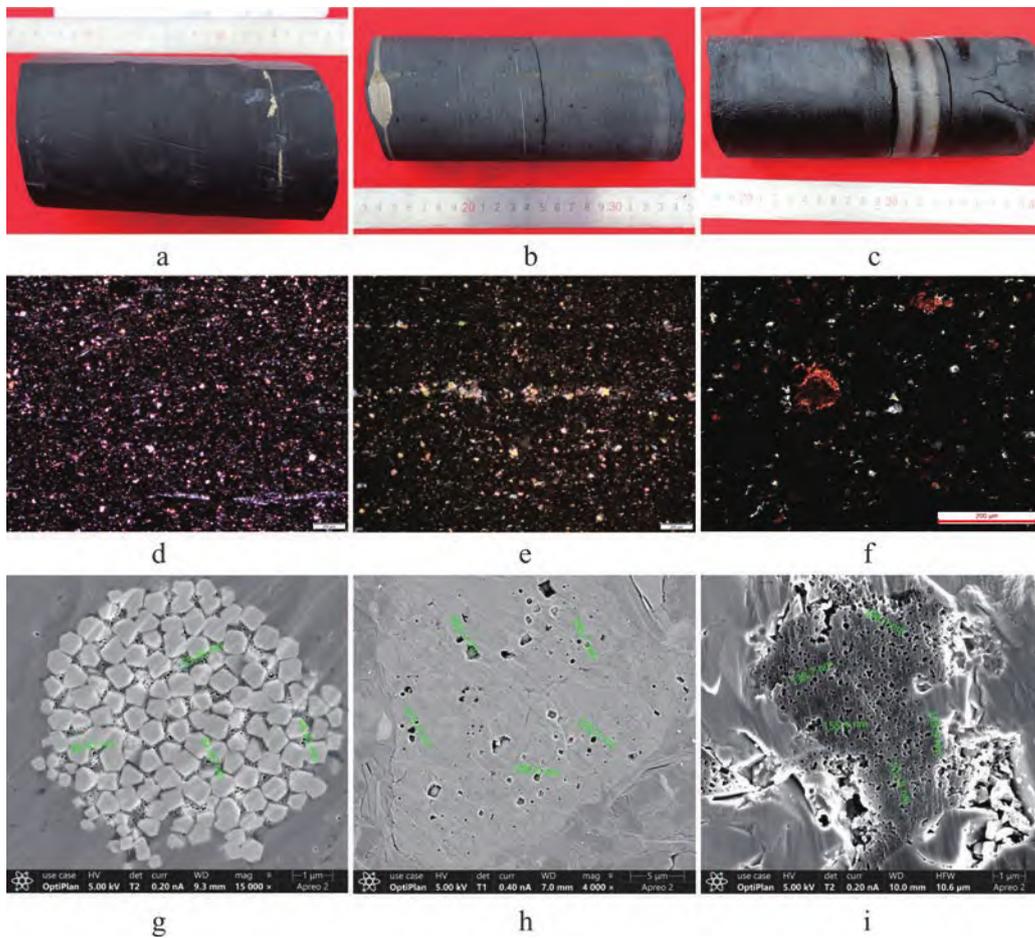


图3 向斜区五峰组—龙马溪组页岩岩心、薄片与扫描电镜照片

Fig. 3 Shale core samples, thin sections, and scanning electron microscopy images of the Wufeng-Longmaxi formations in the syncline area

间缝(图5g、图5h),整体规模较小。

3.3 孔隙分布与孔隙结构特征

(1) 低压氮气吸附/脱附

选取龙马溪组不同构造单元的12个页岩岩心样品进行低压氮气吸附实验。图6a和图6b显示每个样品 N_2 吸附/解吸结果表明,所有样品的 N_2 吸附—解吸曲线总体形状均呈倒“S”形。根据IUPAC标准吸附等温线类型分类,测试的样品与H2、H4型等温线相似,反映孔隙形状多为墨水瓶孔与狭缝孔,脱附曲线回滞环面积较大,表明研究区页岩孔隙结构复杂,形状不规则。

依据IUPAC的分类标准,将页岩孔隙分为微孔(孔径 $<2\text{ nm}$)、介孔(孔径 $2\sim 50\text{ nm}$)和宏孔(孔径 $>50\text{ nm}$) (王馨佩等, 2025)。通过BJH模型解析孔径分布显示:斜坡区与向斜区样品均呈现三峰分布模式,主峰分别位于 3 nm 、 10 nm (介孔域)

与 80 nm (宏孔域)。值得注意的是,双峰强度存在构造分异,斜坡区 3 nm 峰强度较向斜区明显增高(图6c)。定量分析表明,斜坡区样品总孔体积为 $0.0348\sim 0.038\text{ cm}^3/\text{g}$,平均值 $0.03608\text{ cm}^3/\text{g}$ 。向斜区总孔体积为 $0.0238\sim 0.0358\text{ cm}^3/\text{g}$,平均值 $0.03026\text{ cm}^3/\text{g}$ 。表明构造变形导致总孔体积增加,斜坡区样品因脆性破裂作用形成次生孔隙系统(Li et al., 2019; 尚福华等, 2023)。

(2) 低温二氧化碳吸附/脱附

在低温条件下, CO_2 分子能够有效进入更小尺度的孔隙系统中,因此低温 CO_2 吸附实验常用于精确表征页岩微孔结构特征(Hu et al., 2017)。选取龙马溪组不同构造单元的12个页岩岩心样品进行低温二氧化碳吸附实验。所有样品均呈现典型I型等温吸附曲线特征(Brunauer et al., 1940),其特征表现为未饱和和压力段的持续吸附增长(图7a、图7b)。此外部分样品等温吸附曲线较为分散,表

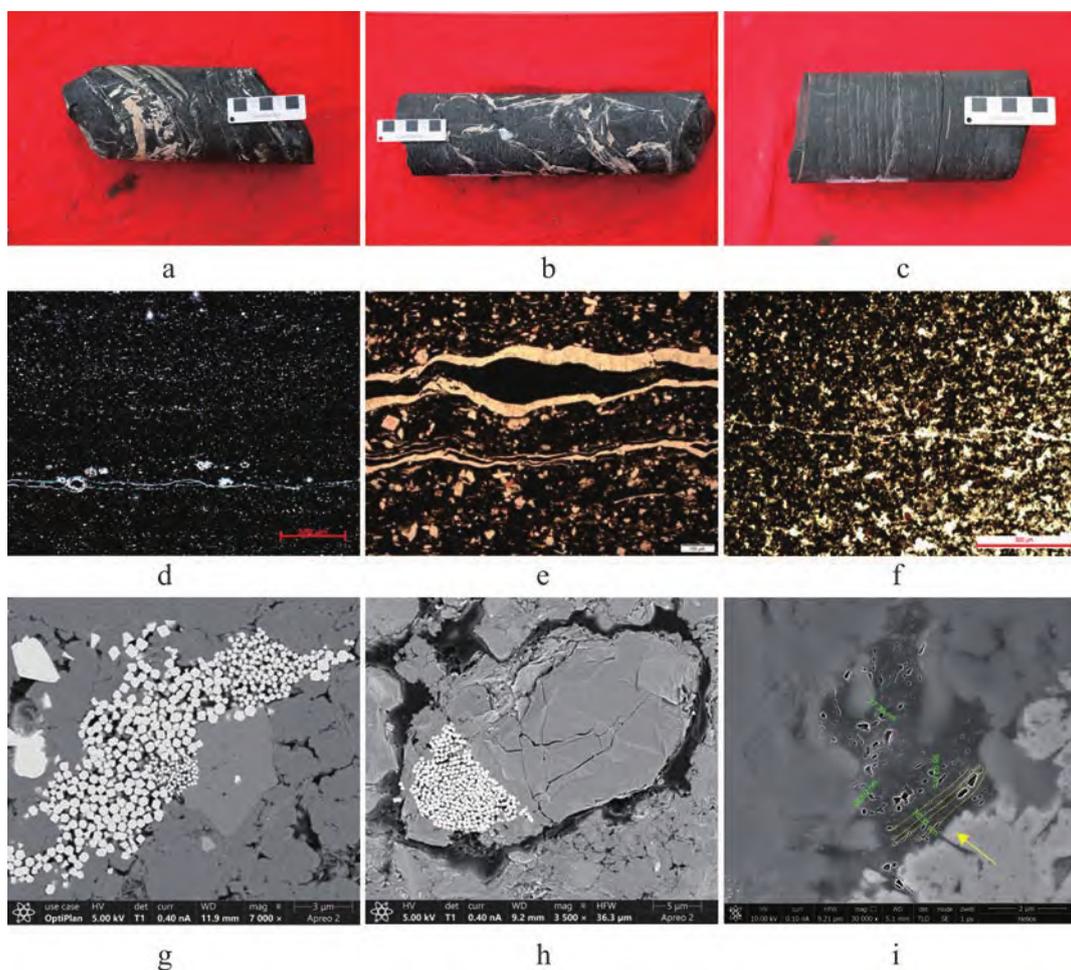


图4 斜坡区五峰组—龙马溪组页岩岩心、薄片与扫描电镜照片

Fig. 4 Shale core, thin section, and scanning electron microscope photos of the Wufeng-Longmaxi formations in the slope area

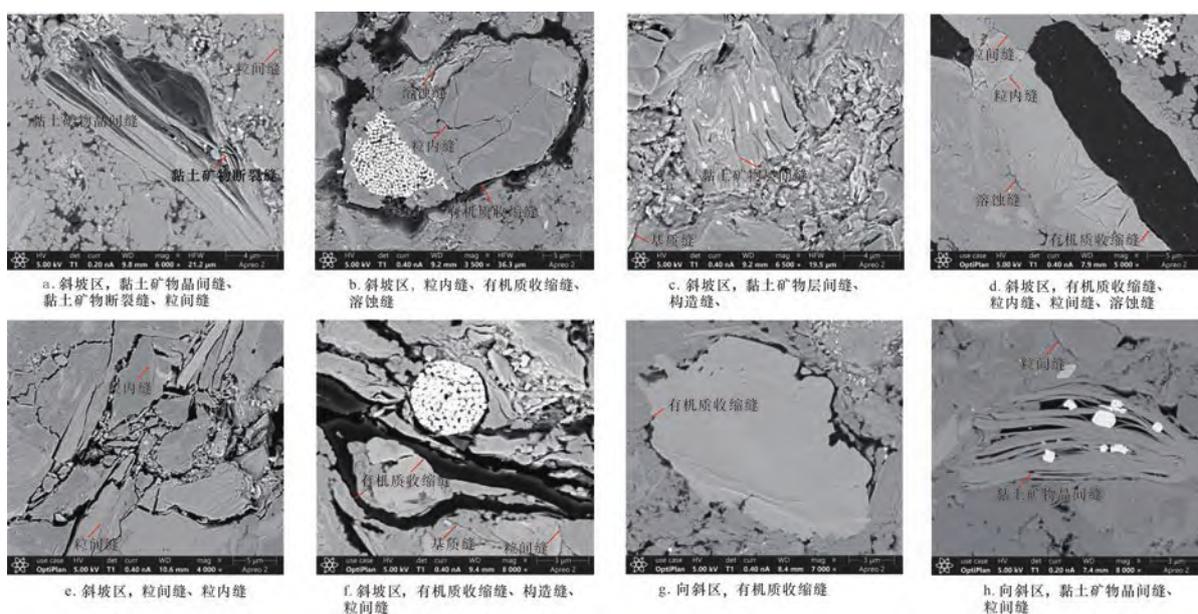


图5 研究区五峰组—龙马溪组页岩扫描电镜下微裂缝特征

Fig. 5 Microfractures characteristics of shale under scanning electron microscope of the Wufeng-Longmaxi formations in the study area

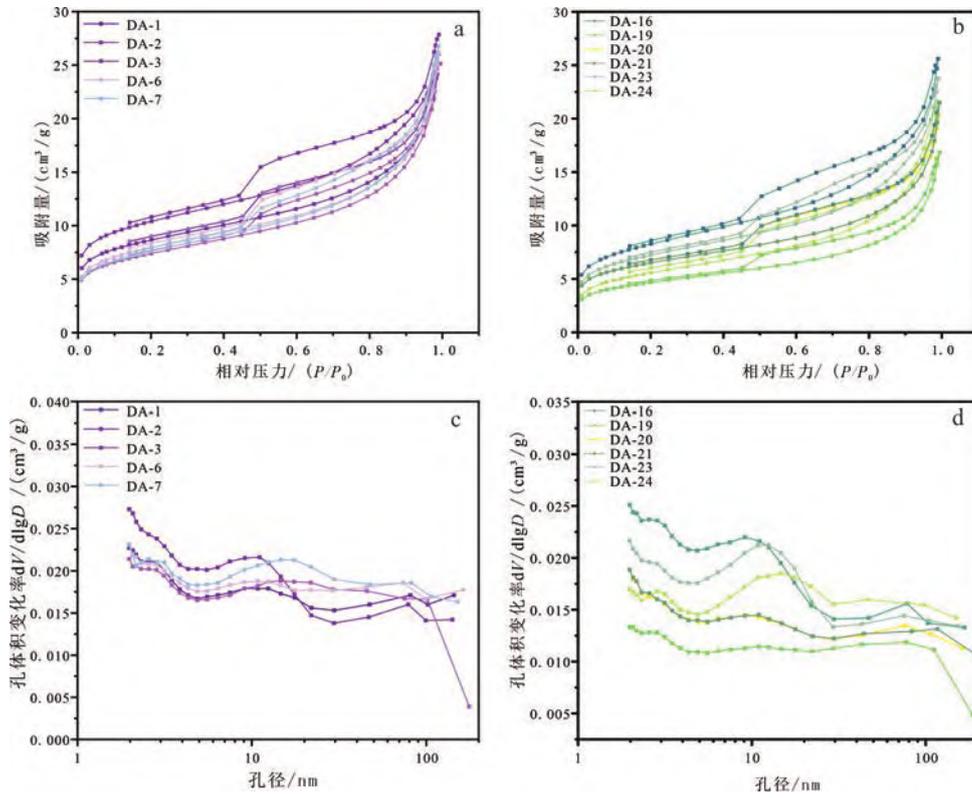


图 6 大安地区龙马溪组页岩 N₂ 吸附特征图

Fig. 6 N₂ adsorption characteristics map of Longmaxi Formation shale in Da'an area

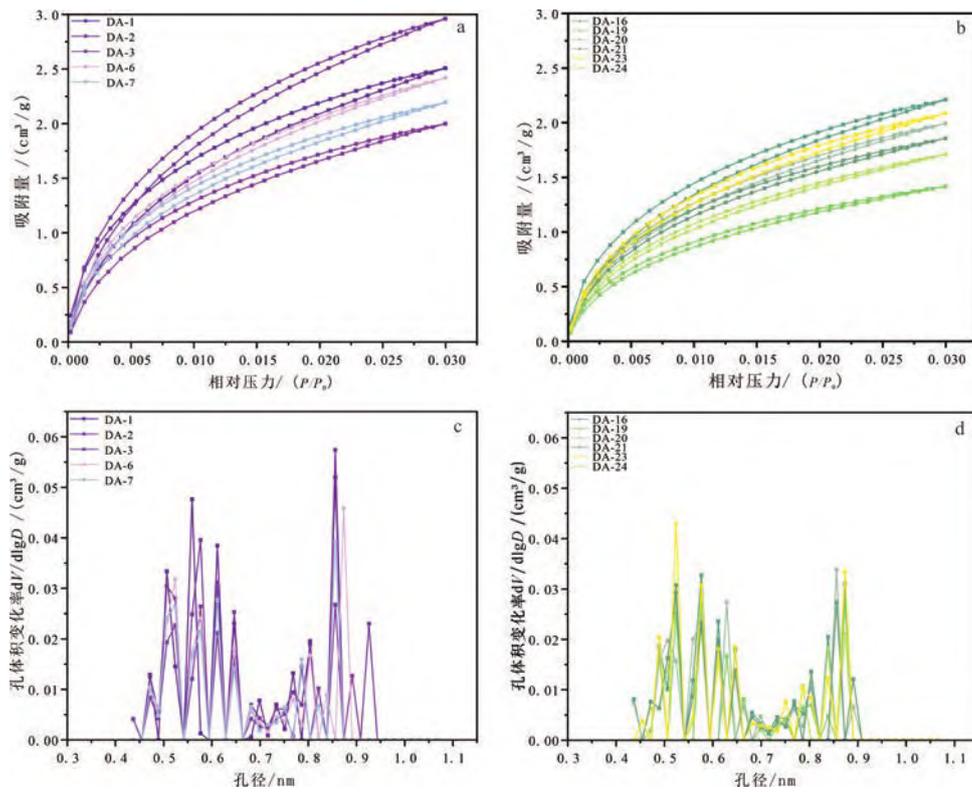


图 7 大安地区龙马溪组页岩 CO₂ 吸附特征图

Fig. 7 CO₂ adsorption characteristics map of Longmaxi Formation shale in Da'an area

明其页岩微孔差异较大，不同样品间非均质性较强(刘若冰等, 2023)。

基于密度泛函理论(DFT)模型的孔径分布解析表明(图7c、图7d)，斜坡区页岩样品与向斜区页岩样品孔径分布基本一致，均呈双峰分布特征，在0.5~0.65 nm和0.8~0.9 nm处都显示出较高的峰值。但峰强度存在显著构造分异，斜坡区整体峰值显著高于向斜区，反映了构造作用对页岩微孔的改造作用。由BJH方程计算得出斜坡区页岩样品总孔体积分布为0.002 85~0.004 28 cm³/g，平均值为0.003 5 cm³/g。向斜区页岩样品总孔体积分布为0.002 11~0.003 13 cm³/g，平均值为0.002 654 cm³/g。整体对比可以发现，斜坡区页岩样品具有相对更大的微孔体积。

4 讨论

4.1 不同构造变形区页岩孔隙结构影响因素

渝西地区龙马溪组页岩孔隙系统的发育受多重地质因素协同控制，前人研究强调总有机碳(TOC)、黏土矿物及脆性矿物含量的关键作用(Wang et al., 2024; 刘文平等, 2025)。本研究通过系统性分析孔体积与总有机碳(TOC)、黏土矿物及石英矿物含量相关性，揭示其控孔机制的构造分异规律(图8)。在向斜构造稳定区，TOC含量与微孔、介孔体积呈现显著正相关($R^2 > 0.7$)，而对宏孔影响微弱。这种差异源于向斜区微介孔系统以有机孔为主体，其发育程度直接受控于有机质丰度，宏孔孔隙类型多为无机孔，导致TOC对其调控作用有限(Jin et al., 2018)。黏土矿物与脆性矿物含量在该区与各类孔隙相关性均较弱($R^2 < 0.5$)，印证了有机质主导的储集模式。

斜坡区则呈现迥异的控孔格局，石英矿物含量与孔隙参数无显著关联，TOC与微孔体积呈正相关($R^2 = 0.611 5$)，但相关性较向斜区减弱。黏土矿物却与介孔体积正相关($R^2 = 0.843$)，与向斜区介孔体积与TOC成正相关形成鲜明对比。二者对介孔与宏孔的控制效应均较为微弱。这种矛盾现象源于构造应力对塑性组分的复合改造：构造挤压首先引发有机孔闭合与黏土矿物层间孔坍塌；当应力超过临界阈值时，黏土矿物发生脆性破裂形成晶间孔与微裂隙；持续挤压作用同时促进基质缝与粒内缝发育。上述次生孔隙有效抵消了有

机孔损失，最终表现为黏土矿物含量与介孔体积的正向响应。值得注意的是，构造作用强度与黏土矿物形变程度呈正反馈机制，导致破裂缝密度随变形增强而显著增长。

基于五峰组—龙马溪组页岩矿物成分与比表面积、平均孔直径的相关性分析(图9)，向斜区与斜坡区比表面积均与TOC含量呈显著正相关($R^2 > 0.8$)，而与黏土及石英矿物含量相关性较弱($R^2 < 0.5$)。这一现象揭示有机质丰度是控制页岩纳米级孔隙发育的核心要素，构造变形虽改变孔隙形态，但未显著削弱有机质主导的比表面积贡献机制。孔径参数的构造响应呈现相似规律：两个构造单元的平均孔径均与TOC呈负相关(向斜区 $R^2 = 0.576$ ；斜坡区 $R^2 = 0.793 7$)，表明有机质富集更倾向于形成微孔主导系统。黏土与石英矿物对孔径分布的调控作用同样有限($R^2 < 0.3$)。

4.2 不同构造部位孔隙发育模式

渝西地区五峰组—龙马溪组页岩含气性呈现显著的构造分异现象。在有机质丰度与热演化程度相近的前提下，储集空间配置与保存条件构成气体富集的主控要素(冯建辉和牟泽辉, 2017)。基于孔隙结构与裂缝属性的对比分析，构建渝西地区临江向斜内不同构造单元的孔隙发育模式(图10)。

向斜区页岩储层展现出优越的储集特征：有机孔系统保持高球度形态，孔径分布范围较广，可见大量小孔径有机孔。刚性矿物粒间孔构成支撑骨架，黏土矿物变形程度微弱，裂缝系统以低密度基质缝为主体，溶蚀作用较弱，溶蚀孔欠发育。

斜坡区则经历系统性地质改造，构造应力导致有机孔形态发生变形，大量有机孔发生闭合。无机孔经历双重演化过程：早期孔隙由于失去高压流体的支撑与保护遭受压缩减量。同时脆性矿物破裂形成次生孔隙网络。黏土矿物呈现复杂褶皱形态，沿层理方向密集发育晶间孔与破裂缝。构造变形也会导致部分粒间孔、微裂隙和微通道相互连通，从而形成了更多的介孔和宏孔，如果这些微裂隙可以与有机孔相连，它们可以为页岩气运输提供良好的通道(Ougier-Simonin et al., 2016; Liu et al., 2020)。构造作用显著改造斜坡区页岩的孔隙结构，微裂隙连通率增加促使储层

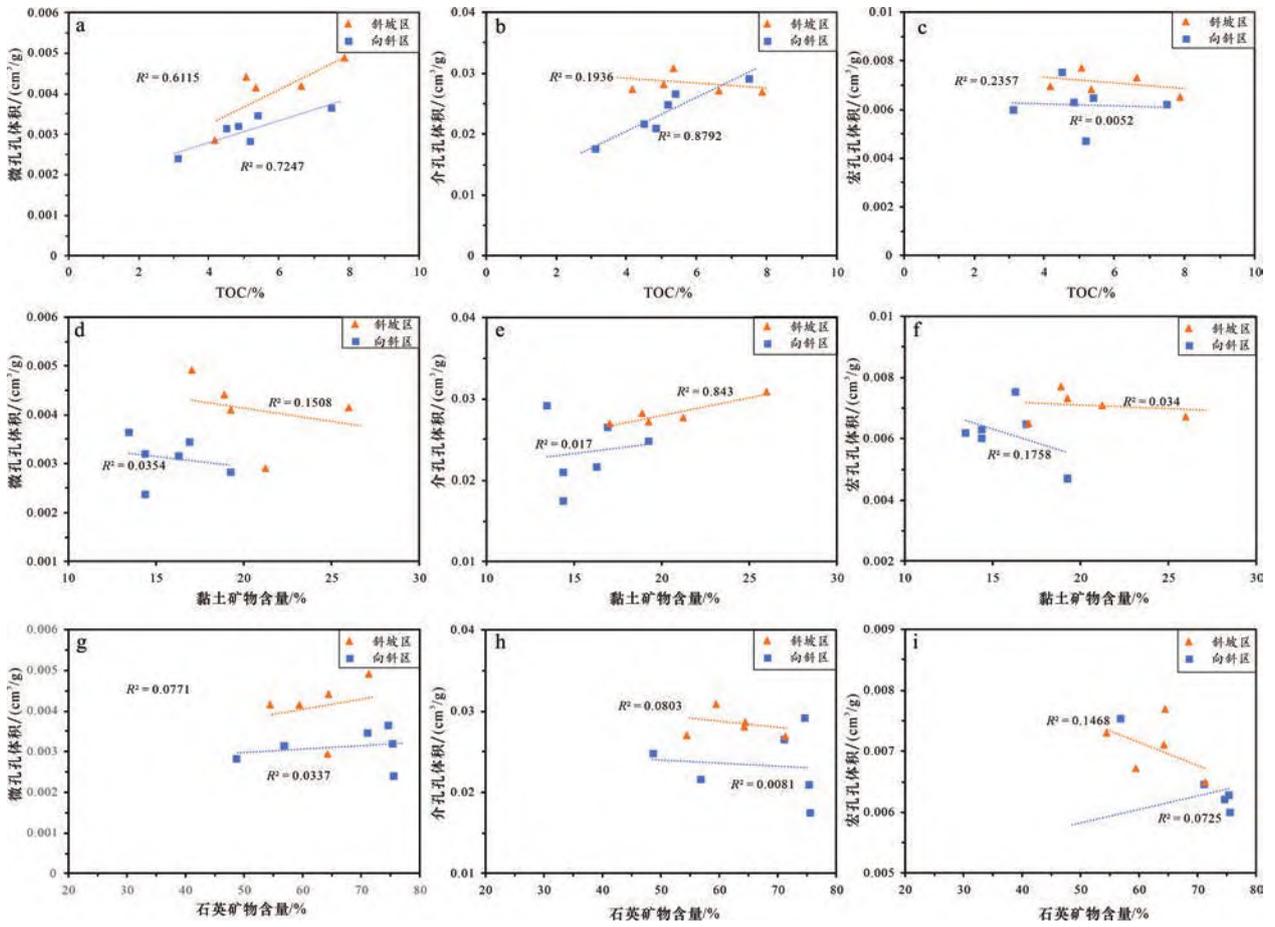


图 8 不同构造单元样品的矿物成分和各类孔体积的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of mineral composition and various pore volumes of samples from different structural units

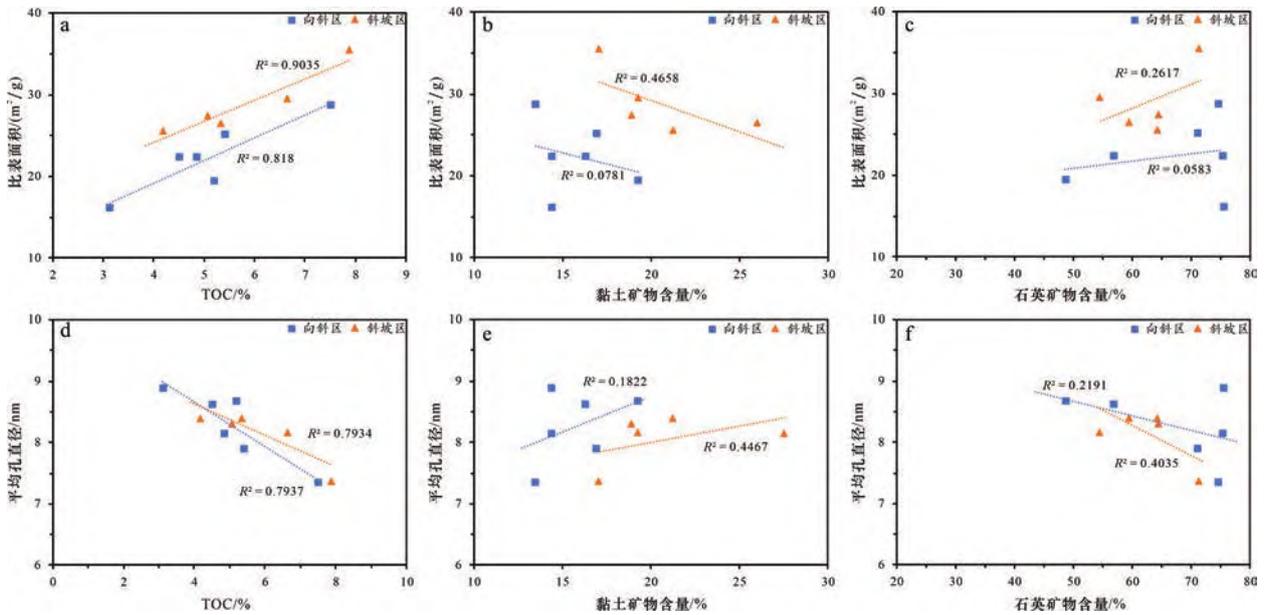


图 9 不同构造单元样品的矿物成分和比表面积、平均孔直径的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of mineral composition, specific surface area, and average pore diameter of samples from different structural units

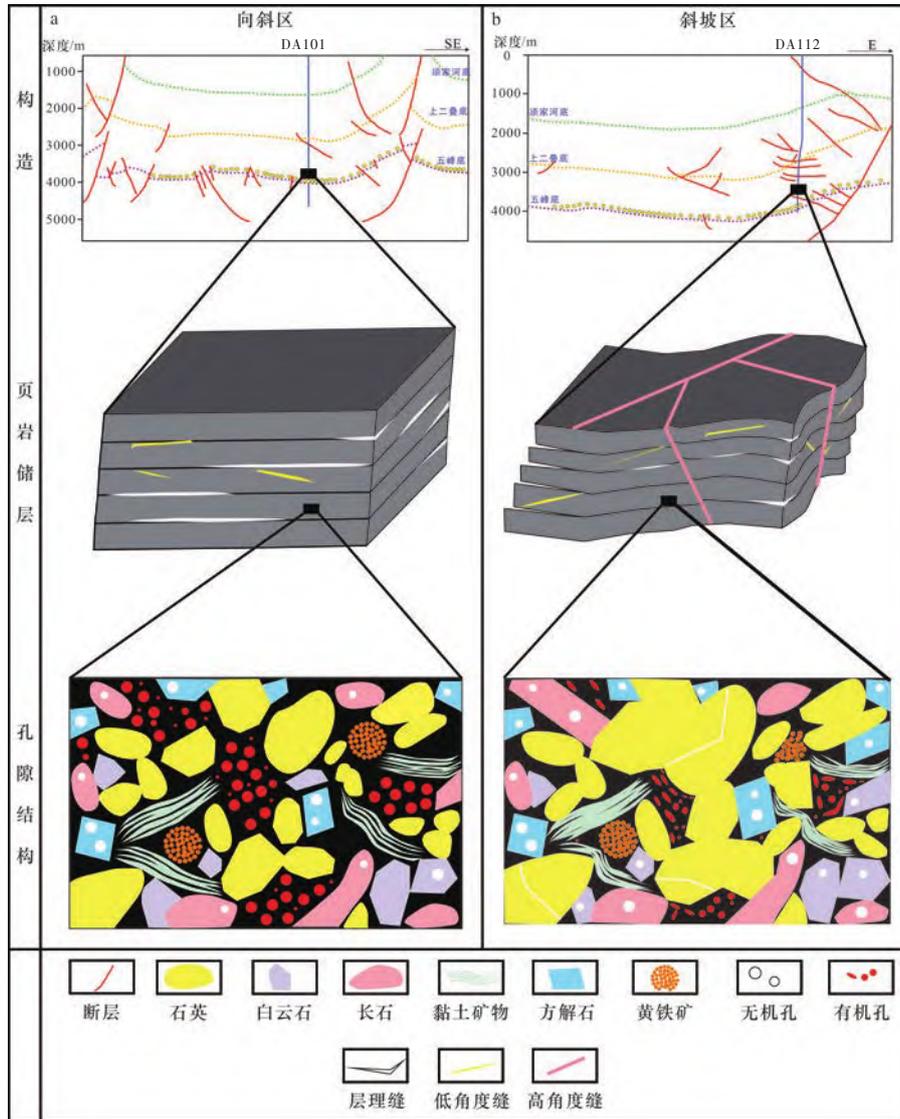


图 10 不同构造部位五峰组—龙马溪组页岩孔隙差异发育模式图

Fig. 10 Differential development pattern of shale pores in different structural parts of Wufeng-Longmaxi formations

渗透性增强，并进一步促进吸附气向游离气转化，但由于断层和裂缝大量发育，地层封闭性大大降低，页岩气沿裂缝网络发生逸散，造成斜坡区域含气性降低(唐洪明等，2024)。

5 结论

(1) 向斜稳定区以原生孔隙—层理缝系统为特征，发育高圆度有机孔与未充填层理缝；斜坡区脆性矿物破裂形成次生孔隙，黏土矿物变形发育定向晶间缝、有机孔沿应力方向拉长变形。低温气体吸附实验证实孔隙结构构造分异：N₂吸附曲线显示斜坡区与向斜区样品均呈现三峰分布模式，主峰分别位于 3 nm、10 nm 与 80 nm。CO₂吸

附曲线呈双峰分布特征，在 0.5 ~ 0.65 nm 和 0.8 ~ 0.9 nm 处都显示出较高的峰值。但峰强度存在显著构造分异，斜坡区整体峰值显著高于向斜区，斜坡区页岩样品具有相对更大的微孔体积和介孔体积。

(2) 向斜稳定区以有机质控孔为主导，TOC 含量与微/介孔体积显著正相关($R^2 > 0.7$)，形成高丰度有机孔网络，宏孔则受刚性矿物间孔控制，黏土及脆性矿物影响微弱($R^2 < 0.5$)；斜坡区受构造应力驱动，TOC 与微孔正相关，有机孔发生闭合；黏土含量与介孔正相关，黏土矿物层间孔坍塌伴生脆性破裂，新生晶间孔及微裂隙有效补偿孔隙损失。跨构造单元共性揭示：比表面积始终

受TOC含量控制($R^2 > 0.8$), 平均孔径与TOC负相关, 证实构造变形虽改变孔隙形态, 但未显著削弱有机质主导的比表面积贡献机制。

渝西地区龙马溪组页岩储集空间呈现显著的构造分区特征: 向斜区以原生有机孔为主导, 呈蜂窝状分布, 刚性矿物粒间孔构成稳定支撑骨架。裂缝以成岩裂缝和有机质收缩缝为主, 形成高低渗储集单元。斜坡区经历构造驱动转型, 黏土矿物晶间孔与脆性矿物破裂缝构成次生孔隙主体, 部分粒间孔、微裂隙和微通道相互连通, 形成孔隙网络, 储层渗透性增强。两类模式揭示“构造强度—孔隙结构”定量响应: 向斜区保存原生孔隙结构, 斜坡区构造运动驱动次生孔隙再生与渗流网络优化, 降低地层封闭性。

参 考 文 献

- 冯建辉, 牟泽辉. 2017. 涪陵焦石坝五峰组—龙马溪组页岩气富集主控因素分析. 中国石油勘探, 22(3): 32-39.
- Feng Jianhui and Mou Zehui. 2017. Main factors controlling the enrichment of shale gas in Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, Fuling shale gas field. *China Petroleum Exploration*, 22(3): 32-39.
- 郭旭升, 王濡岳, 申宝剑等. 2025. 中国页岩气地质特征、资源潜力与发展方向. 石油勘探与开发, 52(1): 15-28.
- Guo Xusheng, Wang Ruyue, Shen Baojian et al. 2025. Geological characteristics, resource potential, and development direction of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 15-28.
- 何 骁, 陈更生, 吴建发等. 2022. 四川盆地南部地区深层页岩气勘探开发新进展与挑战. 天然气工业, 42(8): 24-34.
- He Xiao, Chen Gengsheng, Wu Jianfa et al. 2022. Deep shale gas exploration and development in the southern Sichuan Basin: New progress and challenges. *Natural Gas Industry*, 42(8): 24-34.
- 胡 航, 陈智勇, 张 杰等. 2025. 川南深层页岩气高产井模式探索——以渝西区块H202井区龙马溪组页岩气藏为例. 天然气勘探与开发, 48(2): 81-91.
- Hu Hang, Chen Zhiyong, Zhang Jie et al. 2025. High-production well models for deep shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin: A case study of Longmaxi Formation of H202 well area in Yuxi block. *Natural Gas Exploration and Development*, 48(2): 81-91.
- 蒋 婵, 张海杰, 周亚东等. 2022. 渝西大足区块五峰组—龙马溪组古地貌特征及其对优质页岩发育的影响. 中南大学学报(自然科学版), 53(9): 3628-3640.
- Jiang Chan, Zhang Haijie, Zhou Yadong et al. 2022. Paleogeomorphic characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation and its influence on development of high-quality shale in Dazu area, western Chongqing. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 53(9): 3628-3640.
- 李国欣, 雷征东, 董伟宏等. 2022. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望. 中国石油勘探, 27(1): 1-11.
- Li Guoxin, Lei Zhengdong, Dong Weihong et al. 2022. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC. *China Petroleum Exploration*, 27(1): 1-11.
- 李 哲, 赵 慧, 韩昊天等. 2025. 深层页岩不同沉积微相孔隙结构差异及主控因素——以四川盆地南部自贡地区Z301井五峰组—龙马溪组为例. 天然气地球科学, 36(4): 701-712.
- Li Zhe, Zhao Hui, Han Haotian et al. 2025. Differences in microscopic pore structures and main controlling factors of different sedimentary microfacies of deep shale reservoir: Case study of Wufeng-Longmaxi formations in well Z301 of Zigong area, South Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(4): 701-712.
- 梁 兴, 单长安, 张 磊等. 2023. 中国南方复杂构造区多类型源内成储成藏非常规气勘探开发进展及资源潜力. 石油学报, 44(12): 2179-2199.
- Liang Xing, Shan Chang'an, Zhang Lei et al. 2023. Exploration and development progress and resource potentials of multi-type unconventional gas reservoirs characterized by in-source reservoir and accumulation in complex tectonic areas of southern China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2179-2199.
- 梁 兴, 单长安, 张 磊等. 2024a. 四川盆地渝西地区大安深层页岩气田的勘探发现及成藏条件. 石油学报, 45(3): 477-499.
- Liang Xing, Shan Chang'an, Zhang Lei et al. 2024a. Exploration discovery and accumulation conditions of Da'an deep shale gas field in western Chongqing, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(3): 477-499.
- 梁 兴, 张 磊, 蒋立伟等. 2024b. 四川盆地渝西大安地区灰质源内成储成藏非常规气勘探突破与资源潜力. 中国石油勘探, 29(2): 30-45.
- Liang Xing, Zhang Lei, Jiang Liwei et al. 2024b. Exploration breakthrough and resource potential of limy source rock gas in Da'an area in the western Chongqing, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(2): 30-45.
- 刘若冰, 魏志红, 加奥启等. 2023. 川东南地区五峰—龙马溪组深层超压富有机质页岩孔隙结构分形特征及其地质意义. 地球科学, 48(4): 1496-1516.
- Liu Ruobing, Wei Zhihong, Jia Aoqi et al. 2023. Fractal characteristics of pore structure in deep overpressured organic-rich shale in Wufeng-Longmaxi Formation in Southeast Sichuan and its geological significance. *Earth Science*, 48(4): 1496-1516.
- 刘文平, 李帅智, 刘成林等. 2025. 四川盆地渝西地区北部龙一、二亚段页岩气储层孔隙结构特征及影响因素. 中国科技论文, 20(1): 1-14.
- Liu Wenping, Li Shuaizhi, Liu Chenglin et al. 2025. Pore structure

- characteristics and influencing factors of deep shale gas reservoir in the Longyi 1 subsection of northern part of western Chongqing region, Sichuan Basin. *China Sciencepaper*, 20(1): 1-14.
- 潘妮, 赵迪斐, 魏源等. 2022. 渝西地区龙马溪组深层页岩矿物特征及其储层地质意义. 非常规油气, 9(2): 8-14.
- Pan Ni, Zhao Difei, Wei Yuan et al. 2022. Characteristics of deep shale minerals in Longmaxi Formation in western Chongqing and their reservoir geological significance. *Unconventional Oil & Gas*, 9(2): 8-14.
- 单长安, 李博硕, 梁兴等. 2025. 龙马溪组优质页岩段小层厚度局部波动变化原因探析: 来自渝西大安区滑脱—滑塌构造变形的启示. 地层学杂志. 1-14. 网络首发.
- Shan Chang'an, Li Boshuo, Liang Xing et al. 2025. The cause of local fluctuation of small layer thickness in Wufeng Formation-Longmaxi Formation high-quality shale member: Inspiration from the detachment-s slump structural deformation in Da'an area, western Chongqing. *Journal of Stratigraphy*. 1-14. Published Online.
- 尚福华, 苗科, 朱炎铭等. 2023. 构造变形对于页岩储层孔隙结构的影响——以渝东北龙马溪组为例. 天然气地球科学, 34(7): 1247-1259.
- Shang Fuhua, Miao Ke, Zhu Yanming et al. 2023. Influence of tectonic deformation on pore structure of shale reservoir: A case study of Longmaxi Formation in northeastern Chongqing. *Natural Gas Geoscience*, 34(7): 1247-1259.
- 舒红林, 何方雨, 李季林等. 2023. 四川盆地大安区块五峰组—龙马溪组深层页岩地质特征与勘探有利区. 天然气工业, 43(6): 30-43.
- Shu Honglin, He Fangyu, Li Jilin et al. 2023. Geological characteristics and favorable exploration areas of Wufeng Formation-Longmaxi Formation deep shale in the Da'an block, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 43(6): 30-43.
- 唐洪明, 刘贤, 陈洋等. 2024. 不同构造单元页岩孔隙结构差异及其油气地质意义——以四川盆地泸州地区深层页岩为例. 天然气工业, 44(5): 16-28.
- Tang Hongming, Liu Xian, Chen Yang et al. 2024. Pore structure difference of shale in different structural units and its petroleum geological implications: A case study on deep shale in the Luzhou area, southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 44(5): 16-28.
- 王馨佩, 刘成林, 蒋立伟等. 2025. 渝西大安区五峰组—龙马溪组深层页岩微观孔隙结构与含气性控制因素. 石油与天然气地质, 46(1): 230-245.
- Wang Xinpei, Liu Chenglin, Jiang Liwei et al. 2025. Pore microstructure and its controlling effects on gas content of deep shale reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, Da'an area, western Chongqing. *Oil & Gas Geology*, 46(1): 230-245.
- 王玉满, 王宏坤, 张晨晨等. 2017. 四川盆地南部深层五峰组—龙马溪组裂缝孔隙评价. 石油勘探与开发, 44(4): 531-539.
- Wang Yuman, Wang Hongkun, Zhang Chenchen et al. 2017. Fracture pore evaluation of the Upper Ordovician Wufeng to Lower Silurian Longmaxi Formations in southern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(4): 531-539.
- 王子萌, 蒋裕强, 付永红等. 2022. 基于核磁共振表征渝西地区五峰组—龙一₁亚段页岩储层孔隙结构及非均质性. 地球科学, 47(2): 490-504.
- Wang Zimeng, Jiang Yuqiang, Fu Yonghong et al. 2022. Characterization of pore structure and heterogeneity of shale reservoir from Wufeng Formation-sublayers Long-1₁ in western Chongqing based on nuclear magnetic resonance. *Earth Science*, 47(2): 490-504.
- 武瑾, 曾凡成, 唐晴等. 2025. 川南地区五峰组—龙马溪组页岩相特征及沉积环境演化. 古地理学报. 1-17. 网络首发.
- Wu Jin, Zeng Fancheng, Tang Qing et al. 2025. Lithofacies characteristic and sedimentary environment evolution of the Wufeng-Longmaxi Formation shale in southern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography*. 1-17. Published Online.
- 徐良伟, 杨克基, 鲁文婷等. 2022. 富有机质泥页岩微纳米孔隙系统演化特征及模式研究新进展. 沉积学报, 40(1): 1-21.
- Xu Liangwei, Yang Keji, Lu Wenting et al. 2022. New research progress on organic-rich shale micro-and nanoscale pore system evolution characteristics and models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 1-21.
- 张成林, 张鉴, 李武广等. 2019. 渝西大足区块五峰组—龙马溪组深层页岩储层特征与勘探前景. 天然气地球科学, 30(12): 1794-1804.
- Zhang Chenglin, Zhang Jian, Li Wuguang et al. 2019. Deep shale reservoir characteristics and exploration potential of Wufeng-Longmaxi formations in Dazu area, western Chongqing. *Natural Gas Geoscience*, 30(12): 1794-1804.
- Brunauer S, Deming L S, Deming W E et al. 1940. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62(7): 1723-1732. DOI: 10.1021/ja01864a025.
- Hu H, Hao F, Lin J et al. 2017. Organic matter-hosted pore system in the Wufeng-Longmaxi (O_{3w}-S_{1l}) shale, Jiaoshiha area, eastern Sichuan Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 173: 40-50. DOI: 10.1016/j.coal.2017.02.004.
- Jin Z, Nie H, Liu Q et al. 2018. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery. *Marine and Petroleum Geology*, 97: 78-93. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2018.06.009.
- Li X, Zhu H, Zhang K et al. 2021. Pore characteristics and pore structure deformation evolution of ductile deformed shales in the Wufeng-Longmaxi Formation, southern China. *Marine and Petroleum Geology*, 127: 104992. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2021.104992.
- Li X, Wang J, Li Z et al. 2022. Impact of brittle deformation on pore structure evolution in shale: Samples collected from different fault positions. *Energy & Fuels*, 36(3): 1441-1456. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c03808.

- Li Z, Jiang Z, Liang Z et al. 2019. Pore-structure characterization of tectonically deformed shales: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in western Hunan Province, southern China. *Australian Journal of Earth Sciences*, 66(7): 1075-1084. DOI: 10.1080/08120099.2019.1588168.
- Liang M, Wang Z, Gao L et al. 2017. Evolution of pore structure in gas shale related to structural deformation. *Fuel*, 197: 310-319. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.02.035.
- Liu R, Zheng J, Hao F et al. 2020. Variation in pore systems with tectonic stress in the overthrust Wufeng-Longmaxi shale of the southern Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83: 103617. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103617.
- Ougier-Simonin A, Renard F, Boehm C et al. 2016. Microfracturing and microporosity in shales. *Earth-Science Reviews*, 162: 198-226. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.09.006.
- Shang F, Zhu Y, Gao H et al. 2020. Relationship between tectonism and composition and pore characteristics of shale reservoirs. *Geofluids*, (1): 9426586. DOI: 10.1155/2020/9426586.
- Shi X, Wu W, Shi Y et al. 2022. Influence of multi-period tectonic movement and faults on shale gas enrichment in Luzhou area of Sichuan Basin, China. *Energies*, 15(18): 6846. DOI: 10.3390/en15186846.
- Shi X, Liang Z, Yang Y et al. 2023. Tectonic control on shale pore structure and gas content from the Longmaxi Formation shale in southern Sichuan Basin, China: Insights from fractal analysis and low-pressure gas adsorption. *Processes*, 11(10): 2873. DOI: 10.3390/pr11102873.
- Sun W, Zuo Y, Wang S et al. 2020. Pore structures of shale cores in different tectonic locations in the complex tectonic region: A case study of the Niutitang Formation in northern Guizhou, Southwest China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 80: 103398. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103398.
- Wang Y, Han D, Lin W et al. 2024. Factors controlling differences in morphology and fractal characteristics of organic pores of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China. *Fractal and Fractional*, 8(10): 555. DOI: 10.3390/fractalfract8100555.
- Xiang J, Zhu Y, Wang Y et al. 2022. Effect of faults on shale pore fracture and shale gas preservation: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Northeast Yunnan area. *Energy & Fuels*, 36(15): 8238-8255. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c01834.
- Zhu H, Ju Y, Qi Y et al. 2018. Impact of tectonism on pore type and pore structure evolution in organic-rich shale: Implications for gas storage and migration pathways in naturally deformed rocks. *Fuel*, 228: 272-289. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.137.
- Zhu H, Ju Y, Huang C et al. 2019. Pore structure variations across structural deformation of Silurian Longmaxi shale: An example from the Chuandong thrust-fold belt. *Fuel*, 241: 914-932. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.12.108.