

介壳-黏土混积页岩孔隙结构及影响因素： 以川北龙岗地区大安寨段为例^{*}

辛佳艳¹ 祝海华¹ 王明磊² 张本健³
吴忠宝² 汪莉彬² 秦春雨³ 李育聪³

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

摘 要 为研究川北龙岗地区侏罗系大安寨段页岩油储集层孔隙结构特征, 基于有机碳分析、场发射扫描电镜、XRD 全岩、氮气吸附及核磁共振实验, 对大安寨段页岩孔隙特征及控制因素进行了系统分析。结果表明: (1) 大安寨段页岩油储集层孔隙类型以黏土晶间孔为主, 其次方解石晶间孔、石英晶间孔, 少量有机质孔隙、黄铁矿晶间孔。(2) 黏土含量控制了页岩的孔体积和比表面积, 有机质含量对孔隙影响小。(3) 方解石晶间孔主要贡献大孔隙, 但数量少、体积小。微观上主要见于生物介壳内部, 介壳边缘致密无孔, 沥青充填程度低, 连通性较差。方解石晶间孔发育程度受控于介壳的重结晶作用, 大介壳更易重结晶形成晶间孔隙。(4) 自生石英晶间孔分布于介壳边缘, 孔隙连通性优于方解石晶间孔, 形成早于有机质生烃阶段, 常被烃类充注, 对有效储集空间贡献大。自生石英孔隙的发育受控于介壳硅质交代程度, 大介壳更易被交代形成石英晶间孔隙。(5) 黏土和介壳的混积作用导致储集空间呈现明显的“二元”结构: 富黏土位置以高比表面积、小孔径、良好吸附性的孔隙为主; 而富介壳区域则以低比表面积、大孔径但连通性受限的孔隙为主。

关键词 孔隙结构 氮气吸附 核磁共振 页岩油 大安寨段 四川盆地

第一作者简介 辛佳艳, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为储集层地质学。E-mail: 2308413183@qq.com。

通讯作者简介 祝海华, 男, 1987 年生, 硕士生导师, 主要从事油气储集层评价研究。E-mail: zhhswwp@163.com。

中图分类号: P588.22; TE122 文献标志码: A

Pore structure and influencing factors of shell-clay mixed shale: a case study from the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

XIN Jiayan¹ ZHU Haihua¹ WANG Minglei² ZHANG Benjian³
WU Zhongbao² WANG Libin² QIN Chunyu³ LI Yucong³

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

^{*} 国家自然科学基金项目 (编号: 42202176) 和中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目 (编号: 2020CX050103) 联合资助。
[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42202176), and the PetroChina-Southwest Petroleum University Innovation Consortium Science and Technology Cooperation Project (No. 2020CX050103)]

收稿日期: 2025-07-14 改回日期: 2025-10-20

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, China

Abstract To investigate the pore structure characteristics of the shale oil reservoir in the Jurassic Da'anzhai Member in Longgang area, northern Sichuan Basin, a systematic analysis of pore features and their controlling factors in the Da'anzhai shale was conducted using organic carbon analysis, field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), X-ray diffraction (XRD), nitrogen adsorption, and nuclear magnetic resonance (NMR) experiments. The results indicate that: (1) The pore types in the Da'anzhai shale oil reservoir are dominated by clay mineral intercrystalline pores, followed by calcite intercrystalline pores, quartz intercrystalline pores, with minor organic matter pores and pyrite intercrystalline pores. (2) Clay content controls the pore volume and specific surface area of the shale, while organic matter content has minimal influence on porosity. (3) Calcite intercrystalline pores primarily contribute to larger pores but are limited in number and volume. Microscopically, these pores are mainly found within biogenic shells, with the shell edges being dense and non-porous. The low degree of asphalt filling and poor connectivity are notable. The development of calcite intercrystalline pores is controlled by shell recrystallization, with larger shells being more prone to recrystallization and forming intercrystalline porosity. (4) Authigenic quartz intercrystalline pores are distributed along shell edges, exhibiting better connectivity than calcite intercrystalline pores. These pores formed earlier than the hydrocarbon generation stage of organic matter and are often filled with hydrocarbons, contributing significantly to effective storage space. Their development is controlled by the degree of silicification of shells, with larger shells more susceptible to replacement, forming quartz intercrystalline pores. (5) The mixing of clay and shells results in a distinct "binary" structure in the reservoir space: clay-rich areas are characterized by pores with high specific surface area, small pore size, and good adsorption capacity, while shell-rich areas are dominated by pores with low specific surface area, large pore size, but limited connectivity.

Key words pore structure, nitrogen adsorption, nuclear magnetic resonance, shale oil, Da'anzhai member, Sichuan Basin

About the first author XIN Jiayan, born in 1998, is a master degree candidate. Her main research direction is reservoir geology. E-mail: 2308413183@qq.com.

About the corresponding author ZHU Haihua, born in 1987, a master supervisor, is mainly engaged in research on oil and gas reservoir evaluation. E-mail: zhhsupu@163.com.

0 引言

孔隙结构不仅控制着页岩油的赋存状态与运移能力，也是有利层段优选的关键依据，因此成为页岩油储集层研究的核心内容之一（胡宗全等，2015；He *et al.*, 2017）。中国中—新生代陆相湖盆广泛发育，其中的页岩油储集层普遍呈现岩性复杂、非均质性强、孔隙类型多样等特征，导致其储渗性能在不同地区和岩性中存在显著差异。例如，在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷，芦草沟组中发育的砂屑云岩与粉砂质岩屑砂岩显示出更高的孔隙度与渗透率，优于相邻的泥页岩段（王剑等，2021；魏兆胜等，2024），这主要得益于溶蚀作用对夹层物

性的改善；而在松辽盆地青一段，泥页岩的纳米级孔隙则较砂质夹层更为发育，这与强压实导致夹层致密化有关（孙龙德等，2023）。上述差异反映出储集层岩性、沉积背景与不同类型成岩矿物演化在不同盆地中的耦合机制，这对页岩油“甜点”层段识别具有重要意义。

四川盆地侏罗系自流井组大安寨段是中国陆相页岩油勘探的重要目标层系之一，具有典型的生物-陆源混积特征与复杂孔隙结构，因而成为研究湖相页岩孔隙类型及其主控因素的重要实例。前期研究普遍显示黏土孔隙是大安寨段页岩的主要孔隙类型，其次为介壳方解石、自生石英晶间孔，少量

有机质孔等 (Wang *et al.*, 2021; 杨跃明等, 2023; Li *et al.*, 2025)。关于孔隙发育的控制因素则存在不同认识, 表现为: (1) 不同组分对孔隙的影响认识不同: 一般认为页岩孔隙发育主要受控于黏土含量 (李倩文等, 2022; 祝海华等, 2022; Fang *et al.*, 2024; 洪海涛等, 2024), 有机质孔发育程度低, 对页岩总体孔隙影响很小 (Wang *et al.*, 2021; 熊钰等, 2024), 但也有研究认为当石英长石含量大于 25% 时, 骨架支撑导致有机质孔对页岩孔隙有明显贡献 (康家豪等, 2025)。(2) 不同类型孔隙储渗能力差异不清: 介壳是大安寨页岩重要的结构组分, 普遍发育, 其方解石晶间孔隙、交代状石英晶间孔的孔径明显大于黏土晶间孔隙, 是大孔主要贡献者 (祝海华等, 2022), 但近年来大安寨段页岩油水平井的压裂效果较差, 这类大孔隙连通性和有效性差异有待分析。

针对上述问题, 本研究以川北龙岗地区大安寨段岩心资料为基础, 基于薄片、TOC、XRD、扫描电镜、氮气吸附及核磁共振实验, 开展大安寨段页岩孔隙特征及影响因素分析, 重点讨论: (1) 大安

寨段不同组分与页岩孔隙发育关系; (2) 方解石、石英晶间孔等重要孔隙类型的微观产状、连通性、控制因素; (3) 生物-陆源碎屑的混积作用对微观孔隙的影响。

1 地质背景

本次研究的样品来自于川北龙岗地区, 构造上属于川北低平构造区 (图 1)。在三叠纪晚期, 受印支运动影响, 四川盆地由海相环境转变为陆相环境 (汪泽成等, 2002; 文龙等, 2025)。盆内自流井组自下而上为珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段和大安寨段。其中, 大安寨段形成于自流井组沉积时期的最强湖侵阶段, 发育 1 套泥质介壳灰岩和深灰色—黑色泥页岩 (金涛等, 2022)。大安寨段自下而上可分为 3 个亚段, 大一亚段为泥灰岩与介壳灰岩, 大二亚段为黑色页岩夹介壳灰岩, 大三亚段为泥灰岩夹薄层页岩。其中大二亚段以富含有机质页岩为主, 是四川盆地大安寨段主要烃源岩 (图 1)。

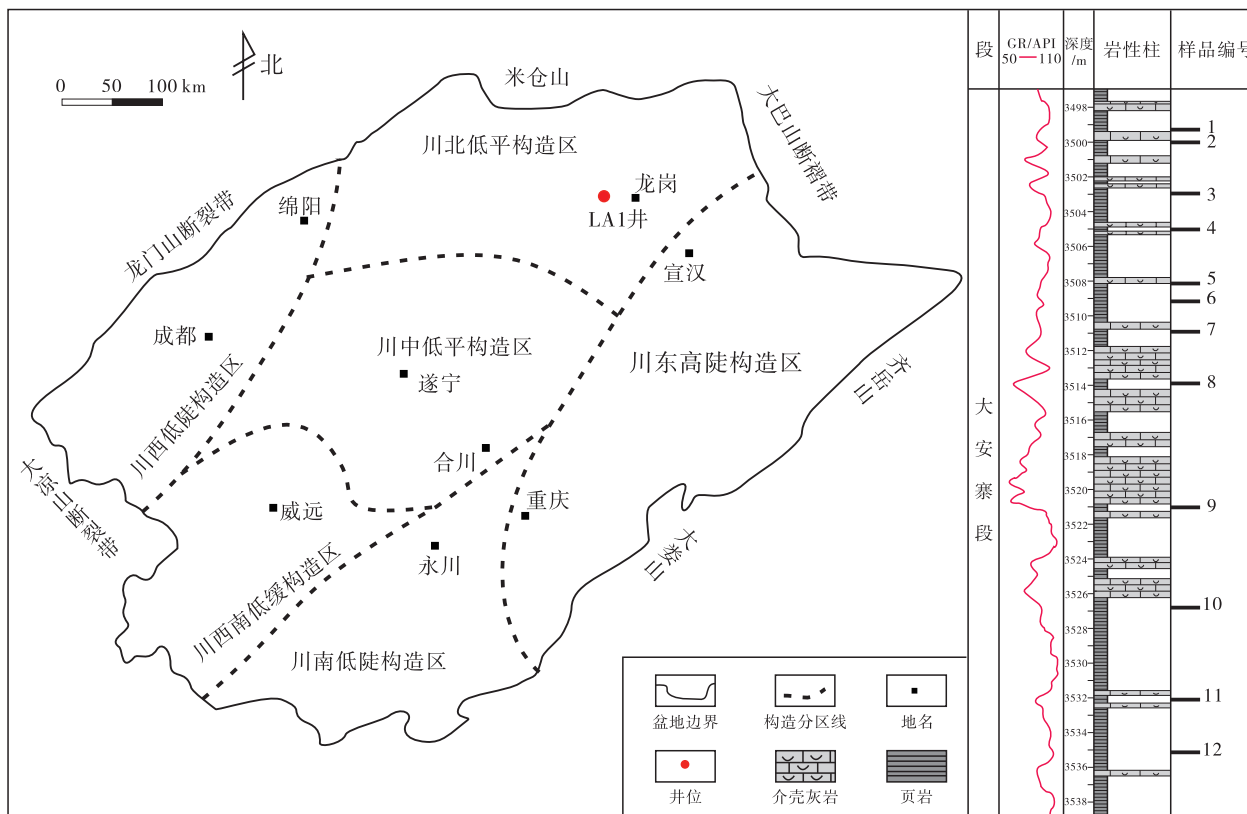


图 1 川北龙岗地区 LA1 井位置、大安寨段岩性取样位置 (四川盆地构造分区图据孙莎莎等, 2021)

Fig. 1 Location of the studied Well LA1 and distribution of shale samples from the Da'anzhai member in Well LA1 in Longgang area, northern Sichuan Basin (Structural zoning map of Sichuan Basin is after Sun *et al.*, 2021)

2 样品与实验方法

本次研究选取了川北龙岗地区 LA1 井大安寨段大二亚段的 12 个样品（深度 3499.3 m 到 3536.1 m）（图 1），分别开展氮气吸附、XRD 全岩、TOC 分析以及扫描电镜观察。（1）氮气吸附实验：使用 Micromeritics ASAP2020 比表面积分析仪进行测试，根据相对压力和液氮吸附量的关系绘制吸附—脱附等温曲线。根据 BET（Brunauer—Emmett—Teller）二常数公式，在相对压力约为 0.05~0.35 范围内作 BET 直线图，得到样品的总比表面积。采用 BJH（Barrett—Joyner—Halenda）方法对氮气吸附等温线的脱附分支进行计算，得到样品的 2 nm 以上孔隙的孔径分布。（2）核磁共振：为表征更大孔隙（100 nm 以上）的发育特征，选取不同介壳含量的样品开展核磁共振测试。测试仪器为新西兰 Magritek 公司开发的低场核磁共振岩心分析仪 NMR Rock Core Analyzer。测试温度 35 ℃，工作频率 2 MHz。（3）全岩矿物分析：利用荷兰 PANalytical 公司的 X'pert PRO X 射线衍射仪对样品粉末进行 XRD 全岩测试获取矿物含量，将样品粉碎后筛选至 320 目内，然后将粉末倒入酒精擦拭后的平整载玻片的凹槽内，清理多余粉末后进行 X 射线衍射分析。（4）残余有机碳含量（TOC）：将测试样品使用浓度为 50% 盐酸进行处理，除去样品中的无机碳。然后在大于 800 ℃ 的条件下使用

Leco CS-400 型碳硫分析仪测定。样品中的有机碳在高温氧气流中燃烧，检测二氧化碳产量，最后用外标法计算样品中的总有机碳含量。（5）扫描电镜观察及图像分析：制备 2 cm×2 cm 的块状规则样品，粗抛光后利用三离子束切割仪进行抛光，喷金处理后进行场发射扫描电镜观察，仪器型号为 FEI Quanta250 FEG 型扫描电镜。利用 ImageJ 软件提取电镜照片中的孔隙图像，并计算获取孔隙二维等效孔径等相关参数。

3 结果

3.1 矿物组分及岩石类型

本次研究 12 个样品的 TOC 含量为 0.51%~2.40%，平均 1.42%（表 1），平均 R_o 为 1.25%，处于生油—生气窗。XRD 全岩分析显示矿物类型以石英、方解石以及黏土矿物为主，少量长石、白云石和黄铁矿，其中黏土矿物 19.2%~71.6%，平均 52.0%，多为片状伊利石；石英含量 12.0%~39.1%，平均 25.4%；方解石为 0.0%~65.4%，平均为 19.8%，薄片多呈介壳产出。长石和黄铁矿平均含量低，分别为 2.2% 和 0.3%。

根据矿物类型、含量以及产状可以识别出多种岩石类型（图 2），大安寨段主要发育黏土质页岩，混合质页岩以及介壳灰岩 3 类岩性（图 2），其中介壳灰岩方解石含量大于 50%，含不同程度的黏土

表 1 川北龙岗地区大安寨段样品孔隙结构参数、TOC 及 XRD 全岩矿物组分

Table 1 Pore structure parameters, TOC, and mineral composition of studied samples from the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

样品编号	BET 比表面 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	BJH 孔体积/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$			TOC/%	XRD 矿物组分/ $\omega\%$						岩石 类型
		总孔体积	介孔	宏孔		石英	方解石	白云石	黄铁矿	斜长石	黏土矿物	
1	4.557	0.009	0.006	0.003	1.75	32.1	6.2	0.0	0.0	4.5	57.3	I
2	8.377	0.016	0.008	0.008	0.88	23.5	4.4	0.0	0.5	0.0	71.6	I
3	7.108	0.013	0.008	0.005	1.78	25.2	6.0	0.0	0.0	3.0	65.8	I
4	5.408	0.013	0.008	0.005	2.40	28.9	1.0	0.0	0.5	4.1	65.6	I
5	2.104	0.008	0.006	0.003	1.74	39.1	9.1	3.4	0.0	4.3	44.1	II
6	4.801	0.012	0.008	0.004	1.71	29.3	3.5	0.0	0.0	2.0	65.2	I
7	4.851	0.012	0.008	0.004	1.62	32.5	12.0	0.0	1.7	1.0	52.8	I
8	6.368	0.014	0.008	0.006	2.03	31.6	0.0	0.0	0.3	0.9	67.2	I
9	2.744	0.005	0.004	0.001	0.66	15.4	45.5	0.0	0.0	0.9	38.3	II
10	4.012	0.006	0.004	0.002	0.51	17.9	35.4	0.0	0.3	2.3	44.1	II
11	1.064	0.003	0.002	0.001	1.28	12.0	65.4	0.8	0.6	2.0	19.2	III
12	3.721	0.006	0.004	0.002	0.70	17.0	49.1	0.0	0.0	1.0	32.9	II

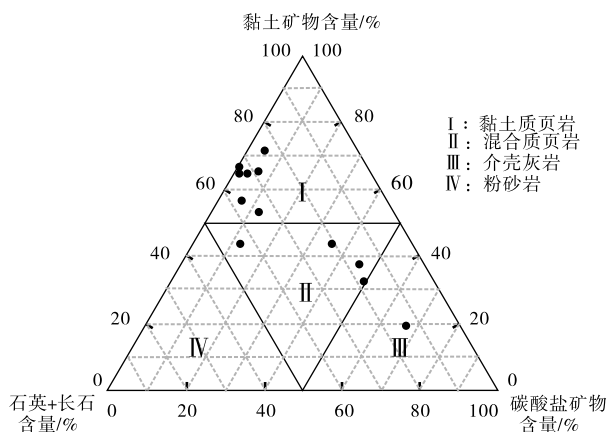


图 2 川北龙岗地区大安寨段样品岩石类型三端元图
(分类方案据祝海华等, 2022)

Fig. 2 Ternary diagram of rock types of samples from the Da'an-zhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin (classification scheme according to Zhu *et al.*, 2022)

矿物(图 3-A, 3-B)。混合质页岩中黏土、方解石、石英+长石含量均未超过 50%, 介壳呈纹层状或分散状分布(图 3-C 至 3-F), 黏土质页岩主要以黏土矿物为主, 含量大于 50%, 含少量介壳(图 3-G, 3-H)。纵向上, 介壳纹层往往与页岩呈不等厚互层, 形成典型的介壳-黏土混积特征。

3.2 孔隙类型及特征

大安寨段页岩常见孔隙类型包括有机孔, 黏土晶间孔, 方解石、石英以及黄铁矿晶间孔。主要孔隙类型特征如下:

1) 有机质孔隙主要发育于固体沥青中(图 4-A), 呈蜂窝状, 未见变形特征, 反映孔隙形成时页岩已经固结, 后期也没有经历强烈构造改造或压实变形, 干酪根少见孔隙(图 4-B), 二维电镜图像分析显示有机孔孔径小, 等效孔径峰值分布于 50~99 nm (图 5)。

2) 黏土矿物晶间孔隙最为发育, 主要分布于片状伊利石之间或刚性颗粒边缘(图 4-C), 多呈片状或不规则状, 长宽比大, 等效孔径 5~550 nm, 峰值 50~99 nm (图 5)。

3) 方解石晶间孔隙分布于生物介壳的内部(图 4-D, 4-E, 4-G), 介壳边缘一般不发育, 其形成与生物介壳重结晶或溶解再沉淀有关(祝海华等, 2022)。方解石晶间孔呈多边形状, 孔径大, 大部分大于 400 nm (图 5)。一般未见沥青充

填, 反映孔隙连通性差, 但当方解石发育解理缝时, 解理缝可以沟通部分晶间孔隙(图 4-G), 导致沥青局部充填。不同大小介壳孔隙有差异, 大介壳方解石晶间孔隙明显更发育。

4) 石英晶间孔隙多见于自生石英晶体间, 这些自生石英一般呈交代状分布介壳边缘(图 4-F, 4-G), 孔径较大, 一般大于 200 nm (图 5)。与方解石晶间孔不同, 石英晶间孔隙通常被沥青半充填或完全充填(图 4-F, 4-G), 说明石英晶间孔连通性好, 且出现时间早于烃类运移。石英晶间孔分布与介壳大小也有密切关系, 一般大介壳被硅质交代更为普遍, 晶间孔隙也更发育。

3.3 低温氮气吸附—解吸等温线

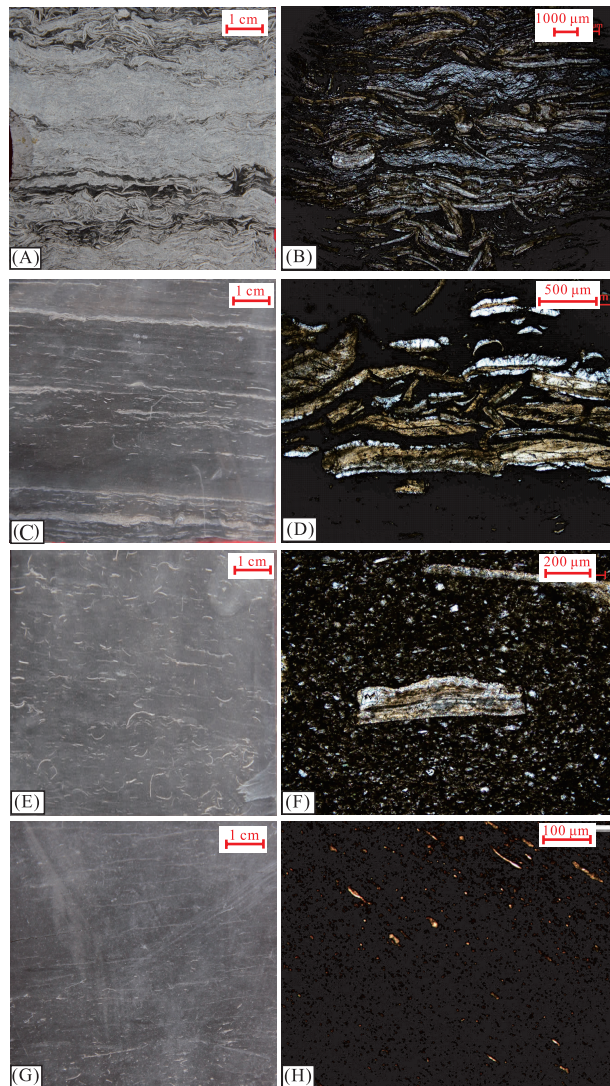
氮气吸附法适用于表征纳米级孔隙(主要为 2~100 nm)的发育特征。不同岩石类型样品吸附能力差异较大, 黏土质页岩、混合质页岩、介壳灰岩吸附量依次减小。12 个样品的 N_2 吸附—脱附曲线与 IUPAC (国际纯粹与应用化学联合会) 提出的 IV 型等温曲线相似(图 6), 但在相对压力最高点处未见到明显平台段, 表明样品中仍存在更大的宏孔而未被氮气充填(仰云峰等, 2021)。在相对压力 (P/P_0) 为 0.45 附近, 介孔发育引起吸附—脱附曲线之间发生迟滞现象, 根据行业标准 (GB/T 21650.3-2011) (Sing, 1985), 迟滞环形态介于 H3 与 H4 型之间, 表明样品中的孔隙形态可能为狭缝状孔。

3.4 BET 比表面积和 BJH 孔体积

利用 BET 方程计算的孔隙比表面积见表 1, 12 个样品的 BET 比表面积分布于 1.064~8.377 m^2/g , 平均 4.593 m^2/g , 不同类型岩性比表面差异较大, 黏土质页岩 BET 比表面积最大, 分布于 1.064~8.377 m^2/g 之间, 平均 4.593 m^2/g , 其次为混合质页岩比表面平均 3.145 m^2/g , 介壳灰岩比表面积最小, 仅 1.064 m^2/g (图 7)。

利用 BJH 法可以获取样品孔体积和孔径分布。结果显示 BJH 孔体积为 0.003~0.016 cm^3/g , 平均 0.0097 cm^3/g , 其中黏土质页岩 BJH 孔体积最大, 平均 0.0127 cm^3/g , 其次为混合质页岩 0.0063 cm^3/g , 介壳灰岩孔体积最小, 仅 0.003 cm^3/g (图 7)。

孔径-孔体积增量 (dv/dw) 可以展示不同孔径孔隙的集中程度或数量, 而孔径—孔体积微分分



A—介壳灰岩，含泥质，3532.35 m；B—泥质介壳灰岩，正交光，3532.30 m，样品 11；C—介壳质页岩，介壳呈纹层状分布，2526.86 m；D—介壳质页岩，介壳平行排列呈纹层状，正交光，2526.91 m，样品 10；E—混合质页岩，3511.05 m；F—混合质页岩，正交光，3510.98 m，样品 7；G—黏土质页岩，3500.56 m；H—黏土质页岩，正交光，3500.03 m，样品 2

图 3 川北龙岗地区 LA1 井大安寨段典型岩石类型的岩心及薄片照片

Fig. 3 Core and thin section photomicrographs for typical rock types of the Da'anzhai member of Well LA1 in Longgang area, northern Sichuan Basin

布 $dv/d(\log(w))$ 曲线则主要展示不同孔隙的孔体积分布。图 8 显示黏土质页岩孔隙发育程度高于混合质页岩，介壳灰岩孔隙最少。在 dv/dw 坐标系中，黏土质页岩和混合质页岩 10 nm 以下的孔隙最为集中，大于 10 nm 之后，曲线区域平缓，孔隙

出现概率或孔隙数量降低。而在 $dv/d(\log(w))$ 坐标系中，10~50 nm 孔隙对孔体积贡献最大，峰值在 40 nm 左右，主要原因是单个大孔隙的孔体积往往数倍于小孔隙，因此数量较少的大孔隙仍可以贡献大量孔隙体积。

3.5 核磁共振

氮气吸附主要表征孔径 100 nm 以下孔隙特征，为了解更大孔隙 (>100 nm) 的发育特征，选取黏土质页岩、混合质页岩和介壳灰岩 3 个典型样品开展核磁共振分析，获取饱和水孔径分布 T_2 谱曲线 (图 9)。黏土质页岩样品 T_2 曲线为单峰型，以小孔隙为主，孔隙度较高，为 5.07%；混合质页岩 T_2 曲线表现为不对称双峰，主峰仍为小孔隙，孔隙度 3.46%，代表大孔隙的次级峰比例较黏土质页岩样品有所增加。介壳灰岩样品 T_2 曲线为双峰型，主峰值明显变小，孔隙度也仅 0.54%，但介壳灰岩样品的大孔体积要大于黏土质页岩和混合质页岩。

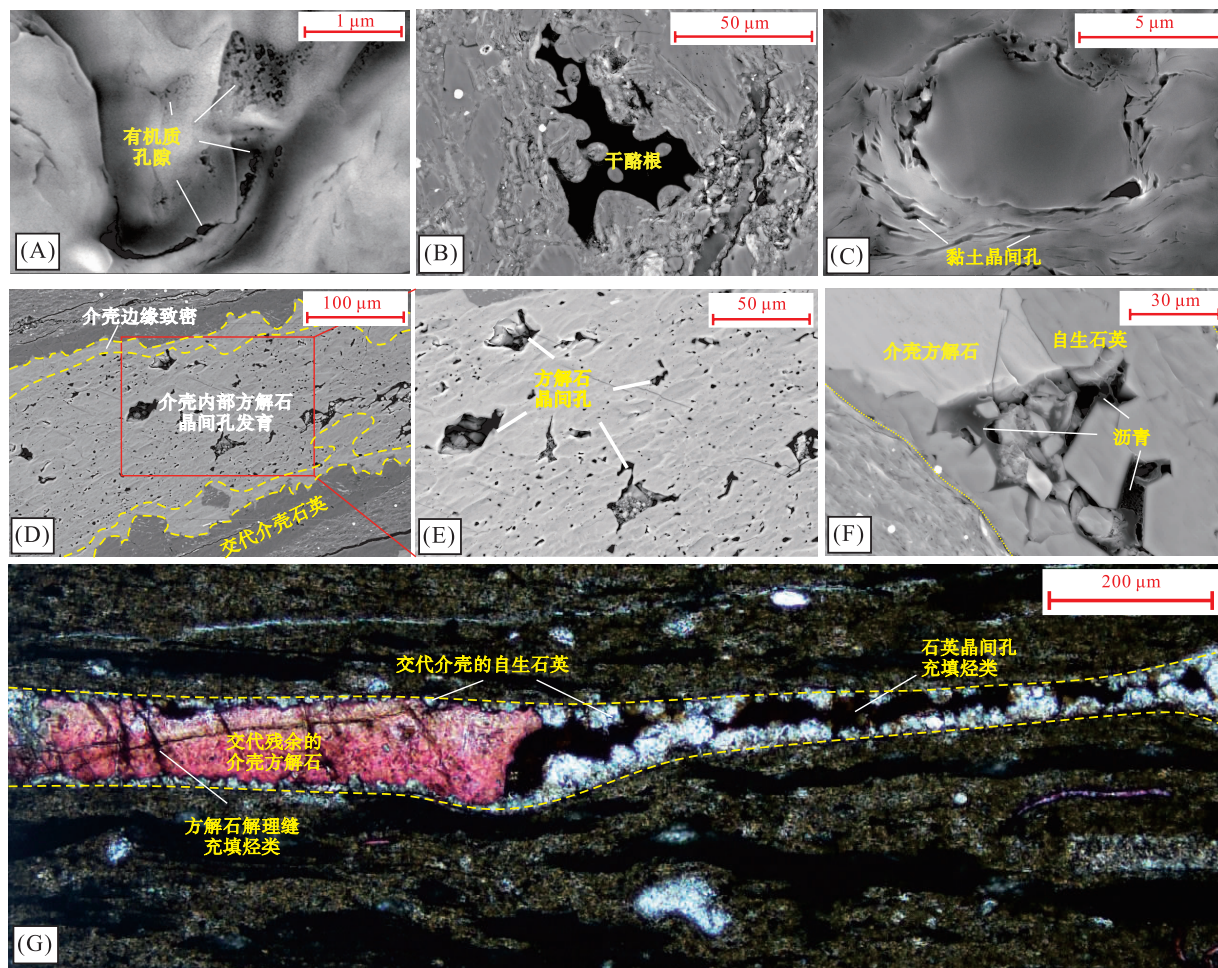
4 讨论

4.1 有机质丰度对大安寨段页岩孔隙结构的影响

有机质孔一般被认为是页岩油气储集层的重要孔隙类型 (Medek and Weishauptová, 2000; 陈尚斌等, 2012; Kuila and Prasad, 2013; 罗超等, 2014)，有机质在热成熟过程中通过生烃反应形成大量纳米级有机孔隙，显著增加比表面积和储集能力 (Loucks *et al.*, 2009)。为系统地讨论有机质丰度与页岩孔隙结构的关系，本次研究收集整理了其他区块典型页岩气和页岩油储集层数据进行对比 (图 10)。

图 10-A 和 10-C 显示典型的页岩气储集层，如志留系龙马溪组、寒武系筇竹寺组以及二叠系大隆组页岩的孔体积、比表面积与 TOC 均呈较好的正相关性。而图 10-B 和图 10-D 则显示，典型的页岩油储集层中，只有有机质含量非常高的长 7 段页岩的孔体积、比表面积与有机质呈一定的正相关，其他盆地页岩油储集层及本次研究的大安寨段页岩均没有展示明显的相关性。

热演化程度是造成这种差异的主要原因。有机质孔随着热演化程度增加而逐渐增加，在高成熟阶



A—固体沥青内部发育的有机质孔隙, 形态不规则, 呈蜂窝状, 3508.21 m, 样品 5; B—干酪根, 内部孔隙不发育, 2526.91 m, 样品 10; C—片状黏土矿物晶间孔, 3513.95 m, 样品 8; D—介壳方解石晶间孔隙, 分布于介壳内部, 介壳边缘被石英交代, 3532.30 m, 样品 11; E—方解石晶间孔, 局部放大, 这类孔隙中未充填烃类, 3532.30 m, 样品 11; F—交代介壳边缘的自生石英, 发育石英晶间孔, 并充填沥青, 3499.43 m, 样品 1; G—介壳被石英部分交代, 左侧介壳完全溶解, 自生石英沿着介壳边缘部分充填, 残余孔隙中充填烃类, 介壳右侧石英只交代介壳边缘, 介壳保存较完整, 方解石解理中充填沥青, 3499.43 m, 样品 1

图 4 川北龙岗地区大安寨段样品孔隙典型扫描电镜照片

Fig. 4 Scanning Electron Microscope photos of typical pores in studied samples from the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

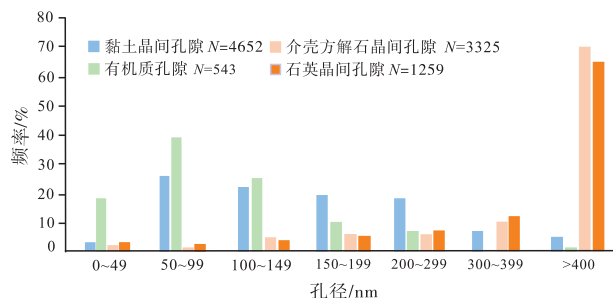


图 5 川北龙岗地区大安寨段样品不同类型孔隙孔径分布统计图 (数据来源于扫描电镜二维图像分析)

Fig. 5 Statistics of pore size distribution of different types of pores in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin (data from 2D images analysis by SEM)

段 ($R_0 = 1.2\% \sim 2.0\%$), 有机质发生芳构化和缩合反应, 释放烃类并形成连通性良好的蜂窝状孔隙系统 (Jarvie *et al.*, 2007), 之后随着 R_0 超过 3.0% 进入过成熟阶段时, 部分有机孔隙会被石墨化或被次生矿物充填, 导致孔隙体积减小。大部分的页岩气储集层目前都处于有机孔发育的高峰期, 因此有机质含量与孔隙结构相关性要明显好于页岩油储集层。而页岩油储集层一般处于大量生油阶段, 生成的油被干酪根吸附, 而且液态烃体积膨胀效应远小于气体, 不足以提供形成和维持显著孔隙空间所需的驱动力, 所以该阶段有机孔发育程度并不高。

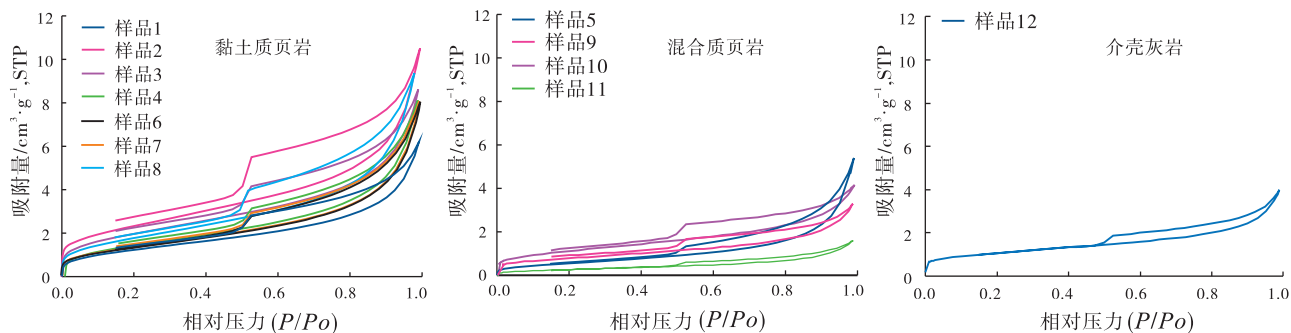


图 6 川北龙岗地区大安寨段不同岩相样品低温氮气吸附-脱附曲线

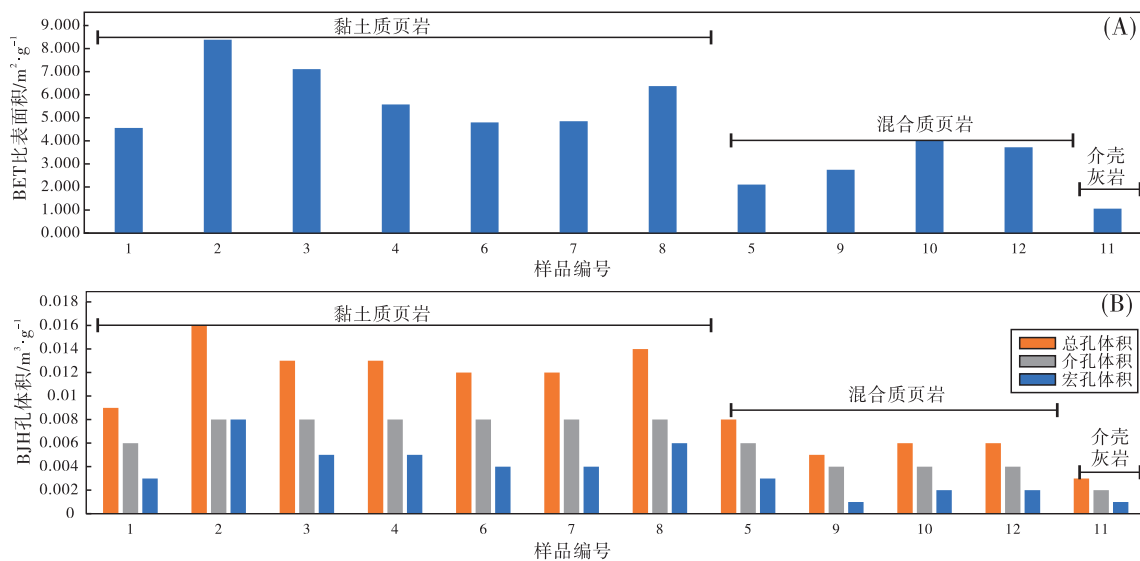
Fig. 6 Low-pressure N_2 adsorption-desorption isotherms of studied samples in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

图 7 川北龙岗地区大安寨段页岩油储集层 BET 比表面 (A) 以及 BJH 孔体积统计图 (B)

Fig. 7 BET specific surface area distribution (A) and BJH pore volume distribution (B) of shale samples from the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

4.2 黏土矿物组分对孔隙结构的影响

电镜观察显示黏土矿物、石英以及介壳方解石中均发育孔隙，但不同类型组分对孔体积和比表面积的影响存在差异：黏土和方解石与孔体积和比表面相关性最好（图 11-A，11-B，11-D，11-E），石英较差（图 11-C，11-F）。

黏土矿物与氮气吸附获取的 BET 比表面积与 BJH 孔体积具有明显的正相关性（图 11-A，11-D），说明大安寨段页岩的储集空间主要由黏土晶间孔隙贡献，该认识与前人一致。大安寨段发育大量片状伊利石矿物（杨跃明等，2023），理论上伊利石的比表面积为 $50 \sim 200 \text{ m}^2/\text{g}$ ，高于方解石和石英，因此黏土质页岩的孔体积和吸附能力明显高于

混合质页岩和介壳灰岩，前者核磁共振 T_2 谱呈小孔单峰，孔隙体积也明显高于后 2 种（图 9）。

前人认为脆性碎屑矿物可能对黏土孔隙有支撑保护作用（康家豪等，2025）。但从本次研究样品来看，黏土含量与比表面、孔体积呈线性关系，说明不管页岩中石英、长石等脆性骨架颗粒含量高低，单位黏土发育的孔隙差异小，骨架矿物的支撑作用有限。

4.3 方解石晶间孔隙发育规律

介壳中方解石晶间孔隙孔径大（一般大于 100 nm ），超出氮气吸附表征范围（一般表征 $0.35 \sim 100 \text{ nm}$ 孔隙），因此样品中方解石含量越高，BET 比表面积与 BJH 孔体积越小（图 11-B，11-

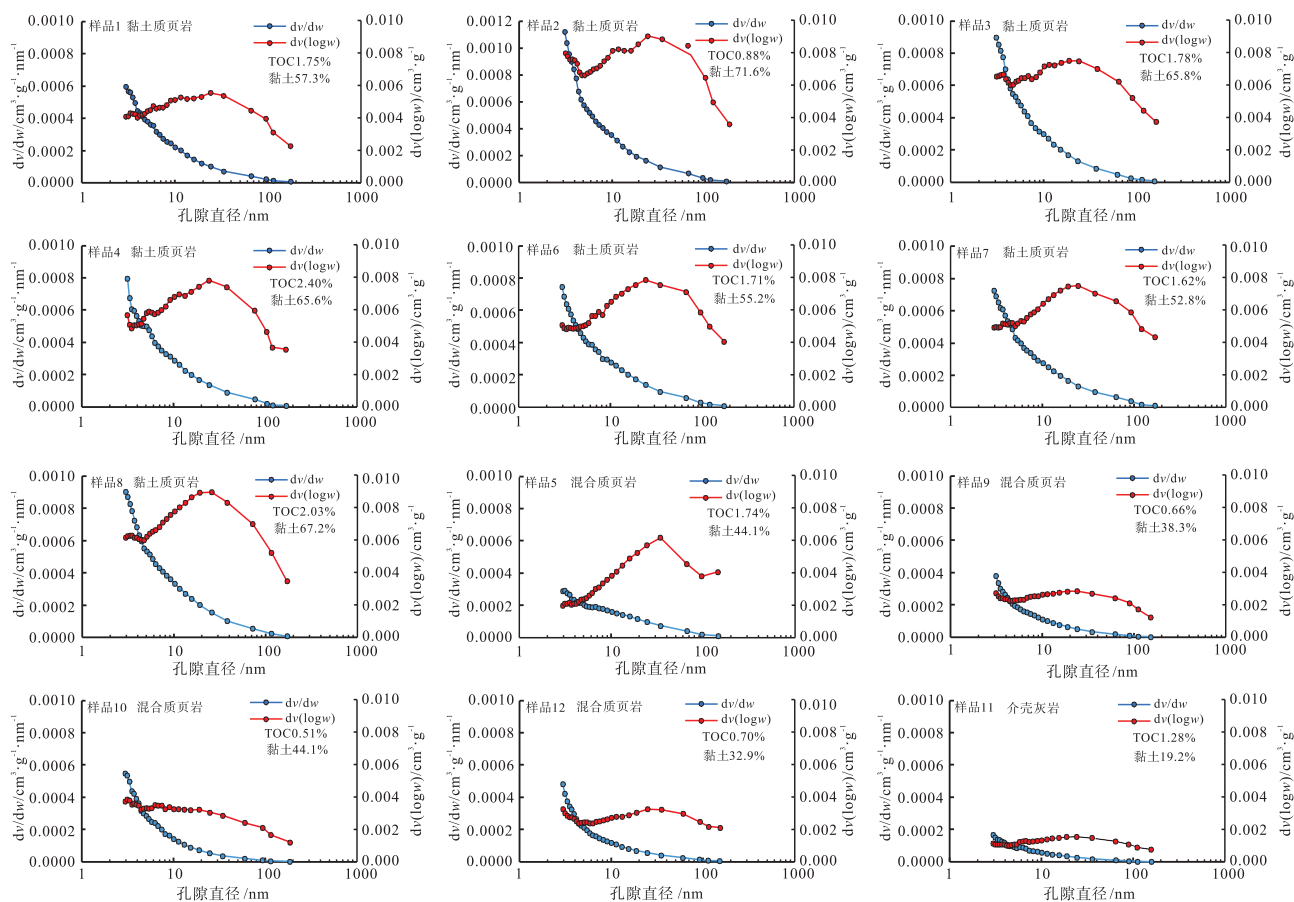
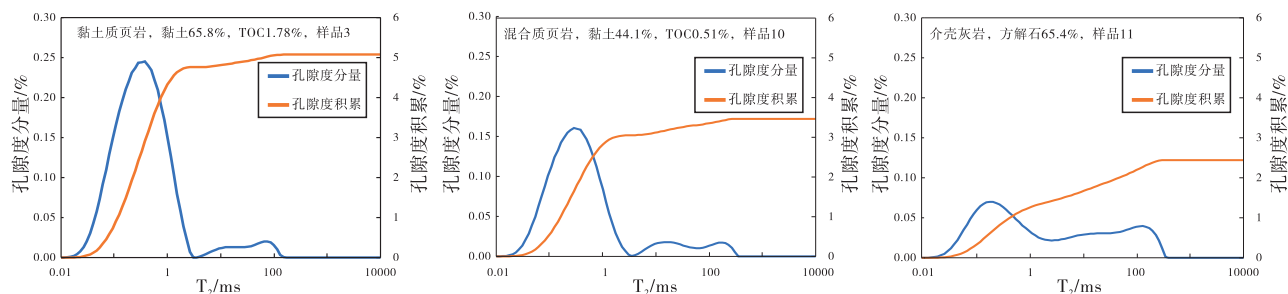


图 8 川北龙岗地区大安寨段样品基于氮气吸附分支曲线的 BJH 孔体积随孔径变化曲线

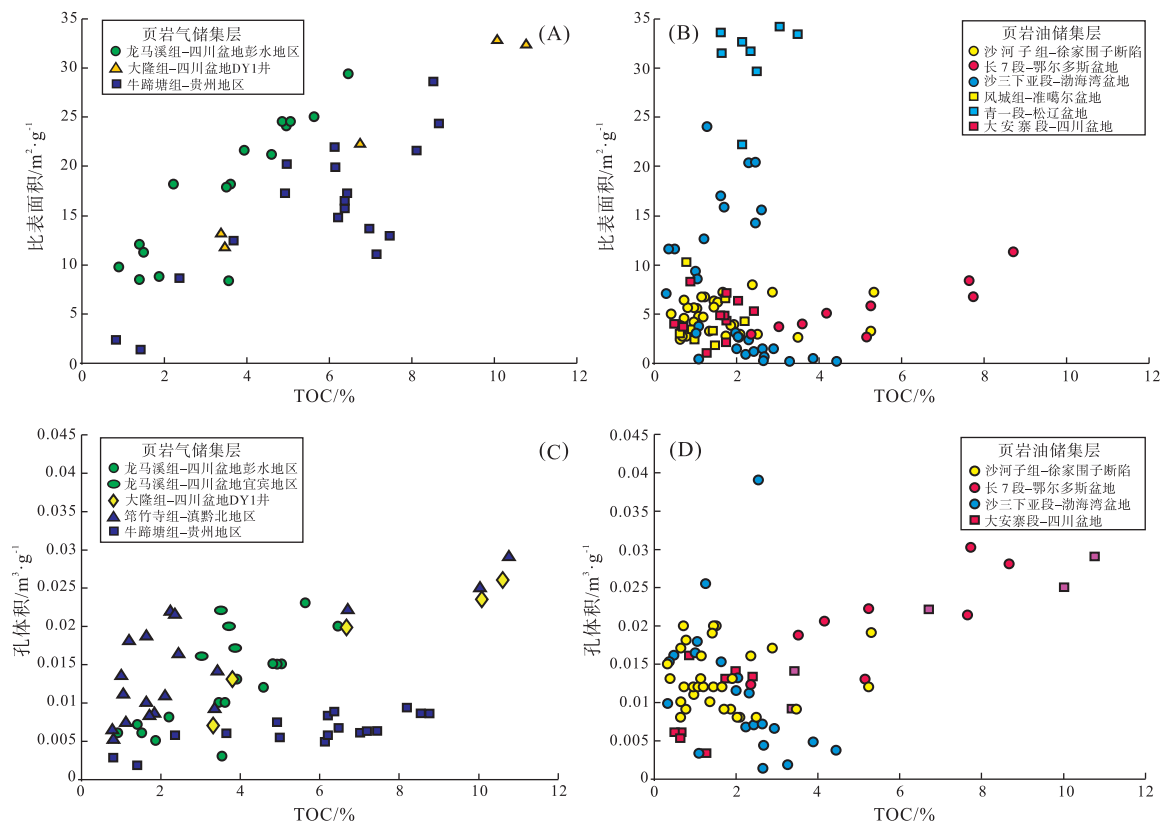
Fig. 8 Pore volume distribution with pore size derived from N_2 adsorption branch for isotherms of studied samples using BJH model in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin图 9 川北龙岗地区大安寨段典型样品离心前后核磁共振 T_2 谱分布Fig. 9 Nuclear magnetic resonance T_2 spectrum distribution of typical samples before and after centrifugation in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

E)。核磁共振 T_2 谱则显示随着介壳含量增加, 大孔隙的比例增加, 同样说明方解石晶间孔是页岩大孔隙的主要贡献者。

电镜观察显示大介壳方解石晶间孔更为发育。本次研究样品介壳厚度与面孔率关系统计结果显示介壳厚度大于 $80\ \mu\text{m}$ 时晶间孔较发育(图 12-A, 12-B)。微观分布位置上, 方解石晶间孔多分布于

介壳的中部, 介壳边缘一般晶体致密无孔, 主要原因与介壳的重结晶程度有关。

介壳方解石的重结晶具有尺寸效应, 即大介壳内部核心区域距离外部孔隙水界面远, 离子/流体扩散路径长, 导致内部流体交换速率慢, 原始矿物(如文石)溶解产生的离子不能及时扩散出去, 容易在局部达到过饱和, 从而促进介壳中部沉淀较粗



数据来源：滇黔北地区筇竹寺组，据梁兴等，2014；四川盆地 DY1 井大隆组，据李波文等，2017；四川盆地宜宾地区龙马溪组，据许心怡，2018；渤海湾盆地沙三下亚段，据郭坤章，2018；鄂尔多斯盆地长 7 段，据何梦卿，2018；松辽盆地青一段，据 He *et al.*, 2022；四川盆地彭水地区龙马溪组、徐家围子断陷沙河子组，据赵仁文等，2023；准噶尔盆地风城组，据李嘉蕊等，2023；贵州地区牛蹄塘组，据 Zhang *et al.*, 2024；四川盆地 DY1 井大隆组，据叶玥豪等，2024

图 10 川北龙岗地区大安寨段典型页岩 TOC 与比表面积及孔体积关系对比

Fig. 10 Relationship between TOC and specific surface area and pore volume of typical shale in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

方解石晶体并形成晶间孔隙 (Bathurst, 1972; Walter, 1985; Maliva and Siever, 1988)。小介壳由于体积小，溶解离子易与孔隙水交换，溶解和沉淀过程在整个壳体上相对均匀、快速地进行，倾向于完全溶解或仅发生轻微的同成分重结晶，晶体优化而不改变矿物相 (Bathurst, 1972)，不易形成新生粗大方解石晶体以及伴生的晶间孔隙，这也可以解释离子交换较快的大介壳边缘通常不发育晶间孔隙。

由于介壳致密边缘的屏蔽作用，导致介壳方解石内部晶间孔隙连通性较差，如果没有解理或裂缝沟通时，方解石晶间孔隙一般没有烃类充填。

4.4 石英晶间孔隙发育规律

XRD 全岩获取的石英含量与孔体积和比表面积关系较差，主要有 3 方面原因：(1) 与方解石晶间孔相似，自生石英晶间孔隙孔径大，多为宏孔

(>100 nm)，超出氮气吸附测量范围；(2) 石英晶间孔隙往往被沥青充填 (图 4-G)，在电镜中可识别，但气体吸附不易测量；(3) XRD 全岩获取的石英含量包含了碎屑石英和自生石英，碎屑石英不发育晶间孔隙。

硅质对介壳交代作用一般先出现于介壳边缘，同时伴随介壳溶解，自生石英沿着介壳边缘向内部生长，形成石英晶间孔以及未被完全交代充填的溶解残余孔隙 (图 4-G)。统计显示大介壳更易被硅质交代，随着介壳厚度增加，硅质交代面积逐渐增加 (图 12-C)。

强子同等 (1981) 根据被交代介壳具有片状或交错构造层的微晶/隐晶无铁方解石、硅质不交代亮晶方解石胶结物等特征认为硅质交代是早成岩期酸性环境产物。本次电镜观察显示石英晶间孔隙

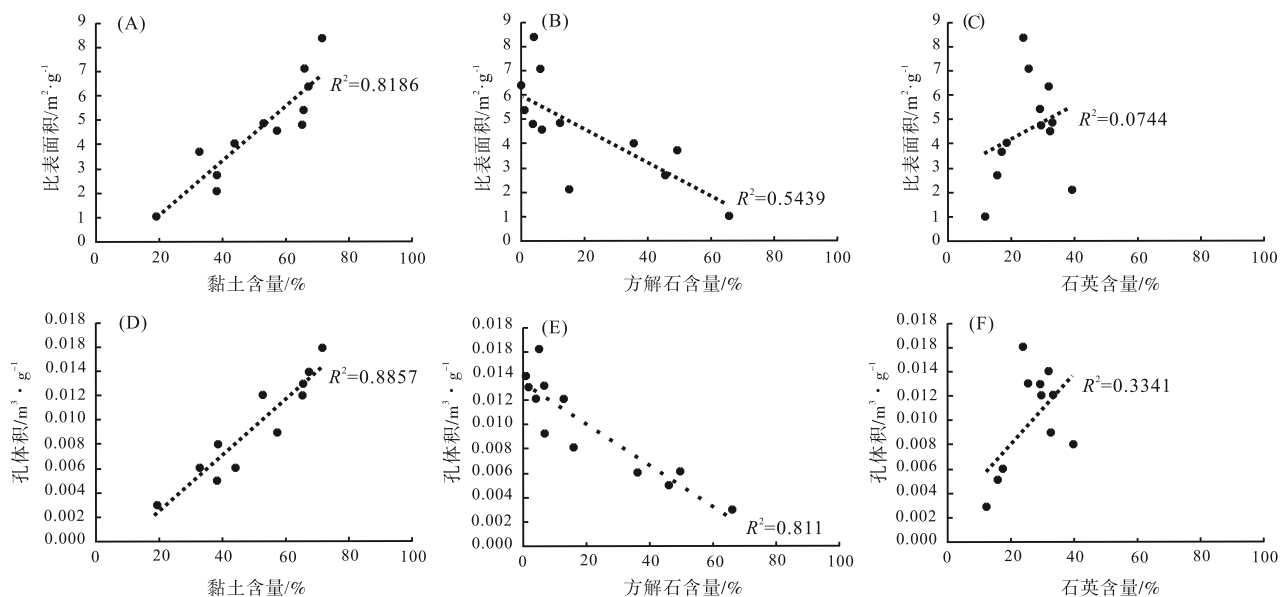
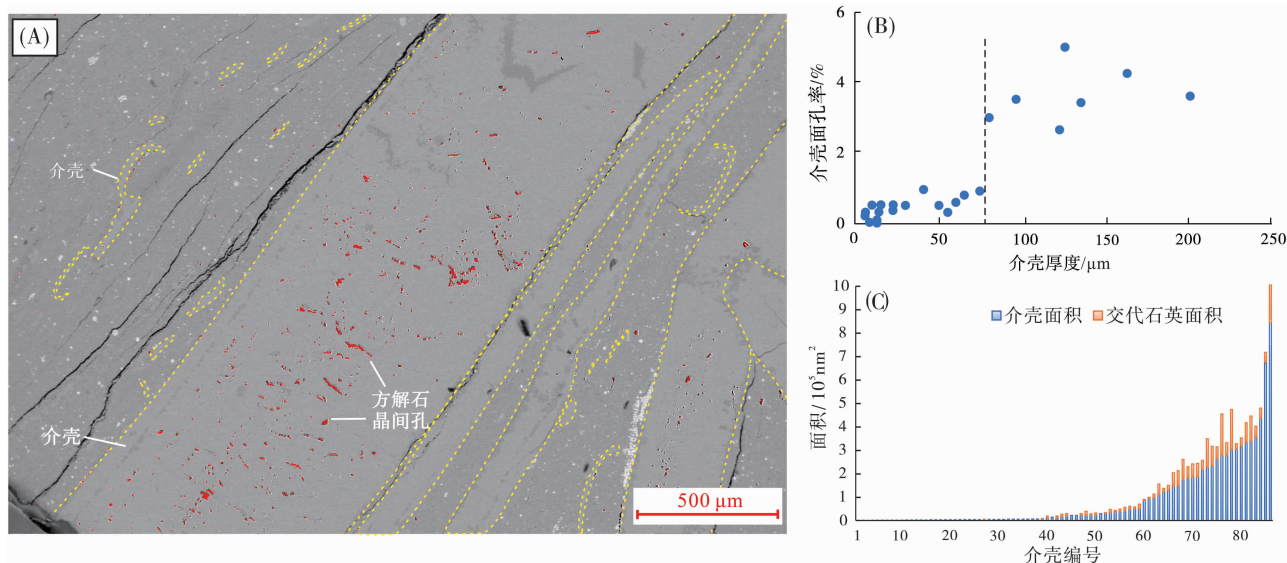


图 11 川北龙岗地区大安寨段样品氮气吸附比表面积、孔体积与黏土、方解石及石英矿物含量关系散点图

Fig. 11 Scatter plots of surface area, pore volume versus clay, calcite and quartz mineral composition in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin



A—介壳发育镜下特征；B—介壳厚度与介壳面孔率散点图；C—不同介壳被硅质交代部分面积统计图

图 12 川北龙岗地区大安寨段不同厚度介壳孔隙发育差异

Fig. 12 Differences in pore development of shells with varying thickness in the Da'anzhai member in Longgang area, northern Sichuan Basin

中普遍充填沥青，也说明石英晶间孔隙的出现阶段至少早于有机质生烃。石英晶间孔隙较好的连通性，使得其对页岩有效储集空间的贡献可能大于方解石晶间孔。

4.5 黏土介壳混积作用对储集空间的影响

综上所述，大安寨段页岩储集层的核心特色

正是源于这种黏土-介壳的混积作用导致储集层储集空间呈现明显的“二元”结构：富黏土位置以高比表面积、小孔径、良好吸附性的孔隙为主；而富介壳区域则以低比表面积、大孔径但连通性受限的孔隙为主。这种结构意味着页岩油储集层具备较强的吸附能力和一定的游离相储集潜力，但后者是否有烃类充注以及能否有效动用高

度依赖于微裂缝系统的发育程度及其对孤立介壳晶间孔隙的沟通作用。

近期研究已经显示在构造改造区, 微裂缝的发育可以明显促进烃类在大安寨段介壳纹层或夹层的中运移 (Li *et al.*, 2025)。在构造稳定区, 烃类主要赋存于吸附能力较强的页岩黏土晶间孔隙中, 很难进入孤立的介壳方解石晶间孔, 加大安寨段页岩黏土含量较高, 水平井压裂的效果往往较差。因此针对黏土-介壳混积形成的“二元”孔隙结构, 对大安寨段页岩油有利区或甜点层段的优选可以从2个方面考虑: (1) 构造改造区, 以微裂缝发育程度为关键指标, 寻找页灰互层甜点段, 烃类经过运移进入方解石晶间孔, 孔隙渗流条件较好; (2) 构造稳定区, 以气油比/原油黏度/ R_0 为关键指标, 寻找烃类含量高且流动性较好的富有机质页岩层段。

5 结论

1) 川北龙岗地区自流井组大安寨段页岩主要矿物类型以黏土矿物、石英、方解石为主, 含少量白云石、长石以及黄铁矿。储集层孔隙类型以黏土晶间孔为主, 其次为方解石晶间孔, 少量石英和黄铁矿晶间孔、有机质孔隙。黏土矿物含量控制大安寨段页岩孔体积和比表面积, 有机质含量对孔隙影响小。

2) 介壳方解石晶间孔主要贡献大孔隙 (一般大于 100 nm), 但孔隙数量少、体积小。微观分布上, 介壳边缘致密无孔, 晶间孔隙分布于介壳内部, 连通性较差。方解石晶间孔发育程度受控于介壳的重结晶作用, 大介壳更易重结晶形成晶间孔隙。

3) 自生石英晶间孔分布于介壳边缘, 孔隙连通性优于方解石晶间孔, 形成早于大量生烃阶段, 常被烃类充注, 对有效储集空间贡献大。自生石英孔隙的发育受控于介壳硅质交代程度, 大介壳更易被交代形成石英晶间孔隙。

4) 黏土和介壳的混积作用导致储集层储集空间呈现明显的“二元”结构: 富黏土位置以高比表面积、小孔径、良好吸附性的孔隙为主; 而富介壳区域则以低比表面积、大孔径但连通性受限的孔隙为主, 针对这种孔隙结构, 选取选层时应考虑微裂缝影响。

参考文献 (References)

- 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 刘洪林, 魏伟, 方俊华. 2012. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义. 煤炭学报, 37(3): 438-444. [Chen S B, Zhu Y M, Wang H Y, Liu H L, Wei W, Fang J H. 2012. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin. Journal of China Coal Society, 37(3): 438-444]
- 郭坤章. 2018. 东濮凹陷沙三下亚段泥页岩中孔孔隙结构及影响因素. 中国石油大学 (北京) 硕士学位论文. [Guo K Z. 2018. Characteristics and controls on the Mesopore structure of the shales in the Lower Part of Shahejie Formation in the Dongpu Depression. Masteral dissertation of China University of Petroleum (Beijing)]
- 何梦卿. 2018. 鄂尔多斯长7页岩油微纳米级孔隙系统参数定量表征. 西安石油大学硕士学位论文. [He M Q. 2018. Quantitative characterization of micro-nanoscale pore system of Chang 7 shale oil in Ordos Basin. Masteral dissertation of Xi'an Shiyou University]
- 洪海涛, 路俊刚, 秦春雨, 张少敏, 张芮, 周易鑫, 肖正录, 周红飞, 韩璐媛. 2024. 川中侏罗系自流井组大安寨段页岩油储层特征及其勘探启示. 石油实验地质, 46(1): 11-21. [Hong H T, Lu J G, Qin C Y, Zhang S M, Zhang R, Zhou Y X, Xiao Z L, Zhou H F, Han L Y. 2024. Shale oil reservoir characteristics and exploration implication in Da'anzhai Member of Jurassic Ziliujing Formation in central Sichuan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 46(1): 11-21]
- 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 赵建华. 2015. 页岩微观孔隙特征及源-储关系: 以川东南地区五峰组-龙马溪组为例. 石油与天然气地质, 36(6): 1001-1008. [Hu Z Q, Du W, Peng Y M, Zhao J H. 2015. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale: a case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 36(6): 1001-1008]
- 金涛, 张文济, 白蓉, 李世临, 张芮, 贾敏. 2022. 四川盆地东部地区下侏罗统自流井组页岩储层特征. 天然气勘探与开发, 45(1): 87-97. [Jin T, Zhang W J, Bai R, Li S L, Zhang R, Jia M. 2022. Characteristics on shale reservoirs of Lower Jurassic Ziliujing Formation, eastern Sichuan Basin. Natural Gas Exploration and Development, 45(1): 87-97]
- 康家豪, 王兴志, 曾德铭, 黄梓桑, 朱逸青, 李博, 谢圣阳, 张芮. 2025. 岩相对于湖相页岩孔隙结构特征及孔隙演化的控制机理: 以四川盆地中部侏罗系大安寨段为例. 石油与天然气地质, 46(2): 491-509. [Kang J H, Wang X Z, Zeng D M, Huang Z S, Zhu Y Q, Li B, Xie S Y, Zhang R. 2025. Effects of lithofacies on pore structure characteristics and evolution of lacustrine shales: a case study of the Jurassic Da'anzhai Member, central Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 46(2): 491-509]
- 李波文, 张金川, 党伟, 杨超, 赵倩茹, 张木辰, 冷济高. 2017. 海相页岩与海陆过渡相页岩吸附气量主控因素及其差异性. 科学技术与工程, 17(11): 44-51. [Li B W, Zhang J C, Dang W, Yang C, Zhao Q R, Zhang M C, Leng J G. 2017. The influence factor of adsorbed gas of marine and transitional facies shale and the difference

- of influence factor. *Science Technology and Engineering*, 17(11): 44–51]
- 李嘉蕊, 杨智, 王兆云, 唐勇, 张洪, 蒋文琦, 王小妮, 魏琪钊. 2023. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系凤城组页岩油赋存定量表征及其主控因素. *石油实验地质*, 45(4): 681–692. [Li J R, Yang Z, Wang Z Y, Tang Y, Zhang H, Jiang W Q, Wang X N, Wei Q Z. 2023. Quantitative characterization and main controlling factors of shale oil occurrence in Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(4): 681–692]
- 李倩文, 刘忠宝, 陈斐然, 刘光祥, 张殿伟, 李鹏, 王鹏威. 2022. 四川盆地侏罗系页岩层系岩相类型及储集特征: 以元坝地区 Y2 井大安寨段为例. *石油与天然气地质*, 43(5): 1127–1140. [Li Q W, Liu Z B, Chen F R, Liu G X, Zhang D W, Li P, Wang P W. 2022. Lithofacies types and reservoir characteristics of Jurassic shale in the Sichuan Basin revealed by the Da'anzhai Member, Well Y2, Yuanba area. *Oil & Gas Geology*, 43(5): 1127–1140]
- 梁兴, 张廷山, 杨洋, 张朝, 龚齐森, 叶熙, 张介辉. 2014. 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素. *天然气工业*, 34(2): 18–26. [Liang X, Zhang T S, Yang Y, Zhang Z, Gong Q S, Ye X, Zhang J H. 2014. Microscopic pore structure and its controlling factors of overmature shale in the Lower Cambrian Qiongzhusi Fm, northern Yunnan and Guizhou Provinces of China. *Natural Gas Industry*, 34(2): 18–26]
- 罗超, 刘树根, 孙玮, 冉波, 雍自权, 杨迪, 张旋, 王世玉, 叶玥豪, 邓宾. 2014. 上扬子区下寒武统牛蹄塘组页岩气基本特征研究: 以贵州丹寨南皋剖面为例. *天然气地球科学*, 25(3): 453–470. [Luo C, Liu S G, Sun W, Ran B, Yong Z Q, Yang D, Zhang X, Wang S Y, Ye Y H, Deng B. 2014. Basic characteristics of shale gas in the lower Cambrian niutitang formation in the Upper Yangtze Region: taking Nangao section in Danzhai as an example. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 453–470]
- 强子同, 杨植江, 王建民, 杨宝善, 王敏英. 1981. 大安寨石灰岩的成岩作用与成岩圈闭. *地球化学*, 10(3): 232–241, 318. [Qiang Z T, Yang Z J, Wang J M, Yang B S, Wang M Y. 1981. Diagenesis and diagenetic trap of da'anzhai limestone. *Geochimica*, 10(3): 232–241, 318]
- 孙龙德, 王小军, 冯子辉, 邵红梅, 曾花森, 高波, 江航. 2023. 松辽盆地古龙页岩纳米孔缝形成机制与页岩油富集特征. *石油与天然气地质*, 44(6): 1350–1365. [Sun L D, Wang X J, Feng Z H, Shao H M, Zeng H S, Gao B, Jiang H. 2023. Formation mechanisms of nano-scale pores/fissures and shale oil enrichment characteristics for Gulong shale, Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(6): 1350–1365]
- 孙莎莎, 董大忠, 李育聪, 王红岩, 施振生, 黄世伟, 昌燕, 拜文华. 2021. 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段陆相页岩油气地质特征及成藏控制因素. *石油与天然气地质*, 42(1): 124–135. [Sun S S, Dong D Z, Li Y C, Wang H Y, Shi Z S, Huang S W, Chang Y, Bai W H. 2021. Geological characteristics and controlling factors of hydrocarbon accumulation in terrestrial shale in the Da'anzhai Member of the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 124–135]
- 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]
- 王剑, 周路, 靳军, 刘金, 陈俊, 蒋欢, 张宝真. 2021. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层孔隙结构、烃类赋存及其与可动性关系. *石油实验地质*, 43(6): 941–948. [Wang J, Zhou L, Jin J, Liu J, Chen J, Jiang H, Zhang B Z. 2021. Pore structure, hydrocarbon occurrence and their relationship with shale oil production in Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6): 941–948]
- 魏兆胜, 覃建华, 李映艳, 李晓, 侯昊东, 赵明珠, 杨威. 2024. 混积页岩油储层成岩相特征及其成储意义: 以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例. *中国石油勘探*, 29(6): 99–115. [Wei Z S, Qin J H, Li Y Y, Li X, Hou H D, Zhao M Z, Yang W. 2024. Diagenetic facies of diamictic shale oil reservoir and its significance on reservoir formation: a case study of Lucaogou Formation in Jimsar Sag. *China Petroleum Exploration*, 29(6): 99–115]
- 文龙, 罗冰, 杨文杰, 陈骁, 张本健, 许强, 李明隆, 肖笛, 乔占峰, 谭秀成. 2025. 四川盆地中二叠统茅口组构造—岩相古地理特征及有利储集区带分布. *古地理学报*, 27(4): 1044–1063. [Wen L, Luo B, Yang W J, Chen X, Zhang B J, Xu Q, Li M L, Xiao D, Qiao Z F, Tan X C. 2025. Tectonic-lithofacies Palaeogeographic characteristics and distribution of favorable reservoir zones of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin, China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(4): 1044–1063]
- 熊钰, 郭美娟, 王羚鸿, 吴道铭, 陈美华, 李明秋, 邓波, 张芮, 路俊刚, 曾德铭. 2024. 四川盆地侏罗系大安寨段页岩油特征及可动性评价. *石油学报*, 45(5): 817–843. [Xiong Y, Guo M J, Wang L H, Wu D M, Chen M H, Li M Q, Deng B, Zhang R, Lu J G, Zeng D M. 2024. Characteristics and movability evaluation of shale oil in Jurassic Da'anzhai Member, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(5): 817–843]
- 许心怡. 2018. 四川宜宾龙马溪组页岩多组分气体吸附特性研究. 中国石油大学(北京)硕士学位论文. [Xu X Y. 2018. Research on adsorption characteristics of multicomponent shale gas of Longmaxi Formation in Yinin Region, Sichuan Province. Masteral dissertation of China University of Petroleum(Beijing)]
- 杨跃明, 文龙, 王兴志, 洪海涛, 祝海华, 熊钰, 李明秋, 路俊刚, 曾德铭, 杨巍. 2023. 四川盆地侏罗统大安寨段页岩油气地质特征及勘探有利区优选. *天然气工业*, 43(4): 32–42. [Yang Y M, Wen L, Wang X Z, Hong H T, Zhu H H, Xiong Y, Li M Q, Lu J G, Zeng D M, Yang W. 2023. Geological characteristics and favorable exploration area selection of shale oil and gas of the Lower Jurassic Da'anzhai Member in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 43(4): 32–42]
- 仰云峰, 腾格尔, 朱地, 张家政, 曹高辉, 张焕旭, 申宝剑. 2021. 川渝地区龙马溪组页岩孔隙结构演化研究. *地球化学*, 50(4): 415–428. [Yang Y F, Borjigin T, Zhu D, Zhang J Z, Cao G H, Zhang H

- X, Shen B J. 2021. Investigation of the evolution of pore structure of Longmaxi Shale in South China. *Geochimica*, 50(4): 415–428]
- 叶玥豪, 陈伟, 汪华, 宋金民, 明盈, 戴鑫, 李智武, 孙豪飞, 马小刚, 刘婷婷, 唐辉, 刘树根. 2024. 四川盆地上二叠统大隆组页岩储层特征及其控制因素. *石油与天然气地质*, 45(4): 979–991. [Ye Y H, Chen W, Wang H, Song J M, Ming Y, Dai X, Li Z W, Sun H F, Ma X G, Liu T T, Tang H, Liu S G. 2024. Characteristics and determinants of shale reservoirs in the Upper Permian Dalong Formation, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 979–991]
- 赵仁文, 肖佃师, 卢双舫, 周能武. 2023. 高一过成熟陆相断陷盆地页岩与海相页岩储层特征对比: 以徐家围子断陷沙河子组和四川盆地龙马溪组为例. *油气藏评价与开发*, 13(1): 52–63, 99. [Zhao R W, Xiao D S, Lu S F, Zhou N W. 2023. Comparison of reservoir characteristics between continental shale from faulted basin and marine shale under high-over mature stage: taking Shahezi Formation in Xujiaweizi faulted basin and Longmaxi Formation in Sichuan Basin as an example. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 13(1): 52–63, 99]
- 祝海华, 陈琳, 曹正林, 王明磊, 洪海涛, 李育聪, 张芮, 张少敏, 朱光仪, 曾旭, 杨巍. 2022. 川中地区侏罗系自流井组大安寨段黑色页岩孔隙微观特征及主控因素. *石油与天然气地质*, 43(5): 1115–1126. [Zhu H H, Chen L, Cao Z L, Wang M L, Hong H T, Li Y C, Zhang R, Zhang S M, Zhu G Y, Zeng X, Yang W. 2022. Microscopic pore characteristics and controlling factors of black shale in the Da'anzhai Member of Jurassic Ziliujing Formation, central Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(5): 1115–1126]
- Bathurst R G C. 1972. Carbonate Sediments and Their Diagenesis (2nd ed.). *Developments in Sedimentology*. Elsevier: 12.
- Fang R, Jiang Y Q, Luo Y, Wang Z L, Jiang C, Li S, Qi L, Yan X Y. 2024. Hydrocarbon geological characteristics and factors controlling hydrocarbon accumulation of Jurassic da'anzhai continental shale. *Minerals*, 14: 11.
- He W Y, Wang M, Wang X, Meng Q A, Wu Y, Lin T F, Li J B, Zhang J Y. 2022. Pore structure characteristics and affecting factors of shale in the first member of the qingshankou formation in the gulong sag, Songliao Basin. *ACS Omega*, 7: 35755–35773.
- 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.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91: 475–499.
- Kuila U, Prasad M. 2013. Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales. *Geophysical Prospecting*, 61: 341–362.
- Li Z P, Zhu H H, Wang M L, Zhang B J, Zhou Y D, Hong H T, Li Y C, Wang X Z. 2025. The tectonic control on shale oil migration and accumulation of the Lower Jurassic daanzhai member of the Ziliujing Formation, Sichuan Basin, China. *Energies*, 18: 1004.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Jarvie D M. 2009. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 848–861.
- Maliva R G, Siever R. 1988. Mechanism and controls of silicification of fossils in limestones. *The Journal of Geology*, 96(4): 387–398.
- Medek J, Weishauptová Z. 2000. The microporous phase of carbonaceous substances and its fractal dimension. *Fuel*, 79: 1621–1626.
- Sing K S W. 1985. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 57: 603–619.
- Walter L M. 1985. Relative reactivity of skeletal carbonates during dissolution: implications for diagenesis. In: Schneidermann N, Harris P M (eds). *Carbonate Cements*. SEPM Special Publication, 36: 3–16.
- Wang P W, Liu Z B, Chen X, Feng D J, Wang R Y, Peng Z Y. 2021. Impact of coexisting clay minerals and organic matter on pore growth in the Lower Jurassic Da'anzhai lacustrine shale reservoir in the Northeast Sichuan Basin, West China. *Interpretation*, 9: T373–T384.
- Zhang D Q, Chen Y, Ji S Y, He Q B, Wang Y S, Lin R Q, Shi F L, Feng X, Du W. 2024. Analyses of the characteristics and main controlling factors of shale pores in the Niutitang Formation in the Guizhou region. *Natural Gas Industry B*, 11: 394–404.

(责任编辑 李新坡)