

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

康家豪^{1,2},王兴志^{1,2},曾德铭^{1,2},黄梓桑^{2,4},朱逸青³,李博³,谢圣阳³,张芮³

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院,四川 成都 610500;2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;
3. 中国石油 西南油气田分公司,四川 成都 610051;4. 成都理工大学博士后流动站,四川 成都 610059)

摘要:湖相页岩各岩相的矿物网络格架通常具有差异性,对页岩原生孔隙与次生孔隙的形成和演化具有重要影响。以四川盆地中部侏罗系大安寨段页岩为研究对象,用取心井LA1井、RA1井和G10井页岩样品,进行全岩X射线衍射(XRD)分析、总有机碳含量(TOC)测定、扫描电镜(SEM)观察和氮气吸附实验,研究了页岩岩石学特征与孔隙结构特征及其演化机制。研究结果表明:①大安寨段页岩划分为低碳介壳灰质粉砂质页岩岩相(OLLS)、中碳介壳灰质粉砂质页岩岩相(OMLS)、中碳介壳灰质黏土质页岩岩相(OMLC)、中碳粉砂质黏土质页岩岩相(OMSC)、高碳粉砂质黏土质页岩岩相(ORSC)、低碳黏土质页岩岩相(OLAS)以及中碳黏土质页岩岩相(OMAS)7种岩相。②页岩的储集空间主要以黏土矿物晶间孔为主,其中OLLS岩相脆性颗粒粒间孔较为发育,孔隙体积和比表面积相对较低。OMAS和OLAS岩相黏土矿物晶间孔最为发育,孔隙体积和比表面积最高。③碎屑矿物与黏土矿物的组成显著影响黏土矿物晶间孔孔径及有机质和黏土矿物的孔隙体积。碎屑矿物含量<25%时,黏土矿物含量较高且孔隙体积较大,页岩总孔隙体积相应较大;碎屑矿物含量≥25%时,有机质孔隙体积较大,但由于TOC变化范围较大,页岩总孔隙体积受有机质和无机矿物共同影响。④矿物-孔隙网络结构演化表明,有机质与矿物组分控制了成岩事件的发生及其强度,导致现今各岩相孔隙结构和孔隙网络结构演化特征具有差异性。

关键词:矿物-孔隙格架;储集空间;岩相;孔隙结构;湖相页岩;大安寨段;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Effects of lithofacies on pore structure characteristics and evolution of lacustrine shales: A case study of the Jurassic Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

KANG Jiahao^{1,2}, WANG Xingzhi^{1,2}, ZENG Deming^{1,2}, HUANG Zisang^{2,4}, ZHU Yiqing³, LI Bo³,
XIE Shengyang³, ZHANG Rui³

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 61001, China; 4. Postdoctoral Research Station of Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Lacustrine shales typically exhibit distinct mineral-pore network frameworks for diverse lithofacies, significantly influencing the formation and evolution of primary and secondary pores in the shales. Based on data from whole-rock analysis by X-ray diffraction (XRD) mineralogy, total organic carbon (TOC) content analysis, scanning electron microscopy (SEM), and N₂ adsorption experiments, we examine shale samples from the Jurassic Da'anzhai Member in cored wells LA1, RA1, and G10 in the central Sichuan Basin. To be specific, we investigate the petrological characteristics of these shale samples, as well as the characteristics and evolutionary mechanisms of their pore structures. The results indicate that the shales in the Da'anzhai Member can be categorized into seven lithofacies types: organic-lean limestone silty shale (OLLS), organic-moderate limestone silty shale (OMLS), organic-moderate limestone clay shale (OMLC), organic-moderate silty clay shale (OMSC), organic-rich silty clay shale (ORSC), organic-lean argillaceous shale (OLAS) and organic-moderate argillaceous shale (OMAS). Reserving spaces in these shales are dominated by intercrystalline pores in

收稿日期:2024-12-14;修回日期:2025-02-10。

第一作者简介:康家豪(1997—),男,博士研究生,沉积地质学和非常规油气地质学。E-mail: kjh1371846074@163.com。

通信作者简介:王兴志(1964—),男,博士、教授,沉积地质学和非常规油气地质学。E-mail: wxzswpi@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42372173);四川省自然科学基金重点项目(2024NSFSC0007);中国石油-西南油气田创新联合体项目(2020CX050101)。

clay minerals. The OLLS exhibits well-developed intergranular pores among brittle grains, characterized by relatively low pore volume and specific surface area. In contrast, the OMAS and OLAS contain the most developed intercrystalline pores in clay minerals, featuring the highest pore volume and specific surface area. The clay-mineral intercrystalline pore diameters and the pore volumes of organic matter and clay minerals are significantly influenced by the compositions of detrital and clay minerals. Shales with a detrital mineral content of less than 25 % manifest a relatively high total pore volume due to the elevated pore volume of high-content clay minerals. For shales with a detrital mineral content of 25 % and above, the *TOC* content varies greatly despite the high pore volume of organic matter. As a result, the total pore volume of these shales is jointly affected by organic matter and inorganic minerals. The evolution of the mineral-pore network frameworks indicates that organic matter and mineral components govern the occurrence and intensity of diagenetic events, leading to diverse evolutionary characteristics of the pore structures and pore network frameworks across various lithofacies at present.

Key words: mineral-pore framework, reservoir space, lithofacies, pore structure, lacustrine shale, Da'anzhai Member, Sichuan Basin

引用格式:康家豪,王兴志,曾德铭,等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 491–509. DOI: 10. 11743/ogg20250211.

KANG Jiahao, WANG Xingzhi, ZENG Deming, et al. Effects of lithofacies on pore structure characteristics and evolution of lacustrine shales: A case study of the Jurassic Da'anzhai Member, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 491–509. DOI: 10. 11743/ogg20250211.

页岩主要由粒径小于 62.5 μm 的黏土级和粉砂级碎屑颗粒组成^[1-2]。其储集空间主要以微米-纳米尺度的孔隙与裂缝系统为主,孔隙结构可以通过孔隙类型、孔隙大小、孔隙形态、孔隙体积以及比表面积等参数来表征^[3-4]。岩相是指一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,可以由在特定沉积环境中形成的矿物组合的岩石学特征(如颜色、颗粒结构、粒径、矿物组分以及有机质丰度等)和沉积构造等来定义^[5-7]。目前,许多学者致力于页岩岩相的分类及其在页岩油气储层评价中的应用,研究工作涵盖四川盆地侏罗系^[8-9]、鄂尔多斯盆地三叠系^[10]、松辽盆地白垩系^[11]和渤海湾盆地古近系^[12]等陆相(泥)页岩层系^[2]。与海相页岩相比,陆相湖盆沉积环境的相变快、导致页岩的岩性与岩相变化迅速,各岩相矿物类型、结构特征和排列组合方式等差异大^[2, 9, 13]。这些差异很大程度影响页岩原生孔隙与次生孔隙的形成与保留^[14],但这一影响机制的研究在海相页岩中更为深入^[15-16],而湖相页岩的研究多侧重于定性揭示岩相与孔隙结构之间的关系,定量的研究偏少。

四川盆地侏罗系自流井组大安寨段页岩是中国具有代表性的湖相页岩^[17-18]。地层沉积于一个淡水碳酸盐岩与细粒沉积岩的混积湖盆。其页岩总有机碳含量(*TOC*)较高(> 1.0 %)、成熟-高成熟、储层物性好,在区域上稳定分布^[19-20]。前人针对大安寨段页岩的孔隙结构特征进行了研究,表征了各种岩相的孔隙结构^[21-24]。大部分学者认为大安寨段页岩的主要孔径一般小于 400 nm,黏土矿物晶间孔在各种岩相中发育程度最高,且认同黏土矿物在页岩孔隙发育中的关键作用^[24-26]。

然而,大部分研究仅考虑了矿物含量(或有机质含量)的影响,未能深入分析各岩相的矿物格架(及其组合方式)对页岩孔隙结构的影响机制,且缺乏定量的研究。

为解决上述问题,本文以四川盆地中部大安寨段页岩为研究对象,在岩相划分基础上,定性-定量结合表征了各岩相的孔隙发育情况、孔隙体积、孔隙比表面积以及孔径分布,定量地探讨了岩相矿物网络格架(包括矿物类型及其组合方式)及其含量与孔隙结构之间的内在联系,最后系统总结了成岩过程中各岩相孔隙网络格架演化的差异。这项研究对于建立湖相页岩沉积学、矿物学和储层质量之间的联系具有重要意义。

1 地质背景

研究区位于四川盆地中部(川中地区),构造位置包括川中隆起中的平缓构造带及川北古中拗陷中的平缓构造带,形态为东西向展布的平缓短轴背斜构造,西宽东窄,倾角 $2^\circ \sim 5^\circ$ ^[21, 27]。受印支运动后期四川盆地周缘造山带逆冲推覆作用的影响,在晚三叠世中、晚期一晚侏罗世,上扬子板块西北缘的被动大陆边缘盆地反转为受挤压构造控制的巨大而宽缓的四川前陆盆地^[28](图 1a)。

早侏罗世大安寨期,川中地区主要发育浅湖和半深湖沉积^[29, 30],主要堆积物为暗色页岩与介壳灰岩,页岩不同程度地含有淡水双壳类生物化石^[29]。根据岩性及电性差异,大安寨段自下而上依次划分为大三亚段、大二亚段(含 a、b 和 c 三个小层)以及大一亚段^[30]

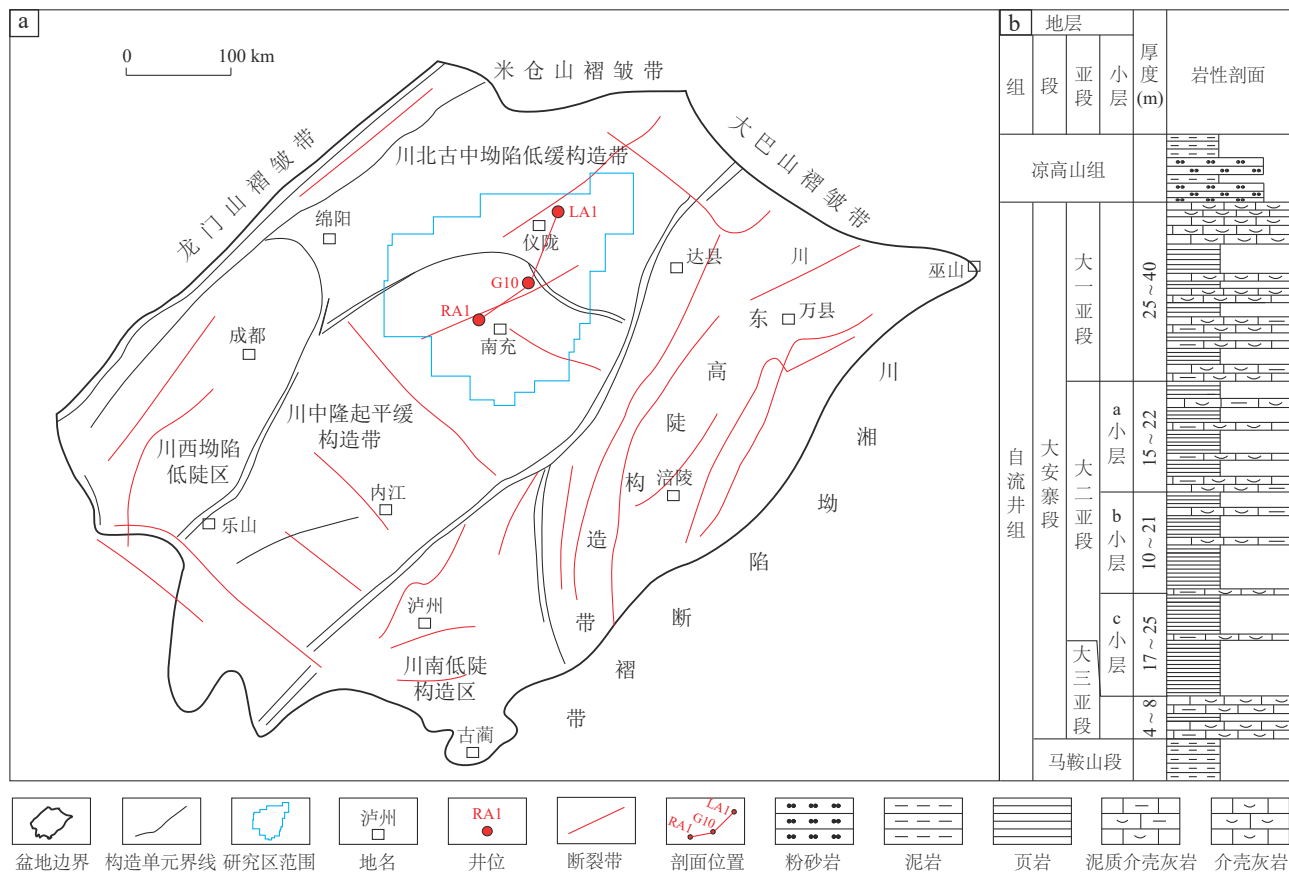


图1 川中地区区域构造位置(a)与大安寨段地层柱状图(b)

Fig. 1 Regional location map of the central Sichuan Basin (a) and the stratigraphic column of the Da'an寨 Member in the region (b)

(图1b)。页岩主要分布于大一亚段中、下部至大二亚段c小层,其具有单层薄、整体厚的特征。页岩有机质类型以Ⅱ型为主,TOC在陆相页岩中较高,普遍高于1.0%,镜质体反射率(R_o)主要介于0.9%~1.6%,处于成熟-过成熟阶段,预示着良好的页岩油气勘探前景^[23, 31]。

2 样品与实验方法

实验选用川中地区3口探井(LA1井、RA1井和G10井)大安寨段共95块页岩样品进行XRD与TOC检测,并对部分样品进行扫描电镜观察。依据矿物组分差异,选取具有代表性的14块页岩样品(含11块LA1井样品和3块RA1井样品)进行氮气吸附实验。氮气吸附实验选取了基质区域的新鲜样本。样品全部选自于1口井是为了排除井间差异对研究结果的影响。样品处理过程如下。

全岩X射线衍射(XRD)分析基于《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X衍射分析方法》(SY/T 5163—2018),使用荷兰PANalytical公司生产的X'pert PRO X

射线衍射仪对样品进行测试。将样品粉碎至200目后,在110℃的条件下干燥至重量不再变化。冷却后的粉末涂抹在载玻片上进行X射线衍射分析。

残余有机碳含量的检测参考了中国国家标准《沉积岩中有机碳的测定》(GB/T 19145—2003)。将测试样品使用浓度为50%的盐酸进行处理,除去样品中的无机碳;然后在 $\geq 800^\circ\text{C}$ 的条件下使用LecoCS-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,用分析仪检测出二氧化碳的量。最后用外标法计算样品中的总有机碳含量(TOC)。

扫描电镜(SEM)观察遵照《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》(SY/T 5162—2014)。首先制备了大小为2 cm×2 cm的块状规则样品并利用砂纸对表面进行粗抛光处理;然后利用氩离子抛光仪进行抛光和喷金;最后在场发射扫描电镜样品台上进行观察。研究使用美国FEI公司生产的FEI Quanta250 FEG型场发射扫描电镜,扫描电压为10 kV,工作距离约为9 mm。

氮气吸附实验参照《气体吸附BET法测定固态物质比表面积》(GB/T 19587—2017)。首先将岩石样品粉碎、筛选,在110℃的条件下烘干一夜;然后进行真空中

脱气。使用 Micromeritics ASAP2020 比表面积分析仪进行测试。将处理后的试样在氮气中进行真空吸附,依据毛细管凝聚现象和体积代换原理,被测样品的孔隙中充满氮气,可以根据相对压力和氮气吸附量的关系绘制等温吸附-脱附曲线。在测试过程中,随着相对压力的变化,氮气在不同孔径的孔隙中充填,相对压力变大,能发生毛细管凝聚的孔径范围也在增大。然后通过 BET 理论和 BJH 算法得出孔隙比表面积和体积。

3 结果

3.1 岩相类型及特征

3.1.1 矿物组分与 TOC

XRD 检测结果表明:大安寨段页岩矿物组分主要为黏土矿物、(陆源)碎屑矿物以及碳酸盐矿物,其平均质量分数分别为 42.24%,33.89%和 19.42%,并含微量黄铁矿(表 1)。碳酸盐矿物与黏土矿物为原生沉积产物。其中,碳酸盐矿物主要为方解石,其平均质量分数为 32.09%,主要以淡水双壳类生物的壳体为其主要赋存形式^[32]。介壳个体大小从微米级到厘米级不等,但多在 1 mm 以上,其整体分布具有非均质性(图 2a,b)。黏土矿物以伊利石与伊-蒙混层为主,为泥级颗粒(粒径 < 3.9 μm),其形态为片状和页片状(图 2c)。(陆源)碎屑矿物主要由陆源碎屑石英与长石构成^[33]。陆源碎屑石英颗粒粒径小(粒径 < 62.5 μm)(图 2d,e);长石主要为斜长石,见两组完全解理,含量较低,质量分

数仅为 3.90%(图 2f)。此外,少部分介壳边缘见交代成因石英,交代位置边缘形状不规则^[33](图 2b)。大安寨段页岩有机质丰度偏低,页岩样品 TOC 为 0.51%~3.16%,平均值为 1.37%(表 1)。

3.1.2 岩相划分方案

有机质丰度、矿物组分以及沉积构造常用于页岩岩相的划分^[8,13,34]。有机质丰度与矿物组分为定量参数,有利于在本次研究与储层参数建立联系,而沉积构造特征则依靠岩心观察与薄片分析,有助于在岩相划分中体现“相”的含义。参考前人岩相划分方案^[8],基于有机质丰度(TOC)与矿物组分含量(图 3a),将大安寨段页岩划分为出 4 大类 7 种岩相。4 大类岩相为介壳灰质粉砂质页岩岩相(LS)、介壳灰质黏土质页岩岩相(LC)、粉砂质黏土质页岩岩相(SC)和黏土质页岩岩相(AS);7 种岩相包括低碳介壳灰质粉砂质页岩岩相(OLLS)、中碳介壳灰质粉砂质页岩岩相(OMLS)、中碳介壳灰质黏土质页岩岩相(OMLC)、中碳粉砂质黏土质页岩岩相(OMSC)、高碳粉砂质黏土质页岩岩相(ORSC)、低碳黏土质页岩岩相(OLAS)以及中碳黏土质页岩岩相(OMAS)(图 3b)。研究还描述了大安寨段页岩的沉积构造特征:主要为灰质介壳纹层[厚度 0.1~1.0 cm,断续状(图 4a₁—a₃)与连续状(图 4b₁—b₃)]、粉砂质纹层(厚度 < 1.0 cm)(图 4c₁—c₃)以及块状构造(图 4d₁—d₃)^[8]。基于此,大安寨段页岩可更准确的划分为(低碳-中碳)断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS 与 OMLS 岩相)、(中碳)纹层状介壳灰质黏土质页岩(OMLC 岩相)、(中碳-高碳)纹层状粉砂质黏土质页岩

表 1 川中地区 LA1 井大安寨段页岩样品实验结果统计

Table 1 Statistics of the experimental results of shale samples from the Da'anzhai Member in well LA1, central Sichuan Basin

样品编号	深度/m	TOC/%	矿物组分含量/%						孔隙比表 面积/(cm ² /g)	孔隙体积/ (cm ³ /g)	岩相
			石英	方解石	白云石	黄铁矿	长石	黏土矿物			
LA1-01	3 499.30	1.75	33.10	34.00	0.80	2.60	1.00	28.50	2.71	0.009 592	OMLS
LA1-02	3 500.00	0.88	22.00	19.00	0	1.80	2.00	55.20	3.77	0.016 280	OLAS
LA1-03	3 503.00	1.78	30.00	33.20	2.00	1.50	1.20	32.10	3.67	0.013 330	OMLC
LA1-04	3 505.02	2.40	24.30	20.90	3.20	1.60	7.00	43.00	3.35	0.012 580	ORSC
LA1-05	3 508.20	1.74	20.20	35.00	0	1.20	1.00	42.60	1.89	0.008 353	OMLC
LA1-06	3 509.20	1.71	24.30	28.70	0	1.00	4.00	42.00	3.39	0.012 370	OMLC
LA1-07	3 510.97	1.62	19.00	31.00	6.00	3.00	3.90	37.10	2.50	0.010 400	OMLC
LA1-09	3 521.10	0.66	27.50	45.00	0	2.00	3.50	22.00	1.32	0.005 092	OLLS
LA1-10	3 526.85	0.51	28.30	46.30	0	0.50	2.20	22.70	1.99	0.006 451	OLLS
LA1-11	3 532.15	1.28	14.00	48.00	1.10	3.10	2.00	31.80	0.73	0.002 514	OMLC
LA1-12	3 535.20	0.70	32.00	40.80	0	0.70	2.20	24.30	1.61	0.006 182	OLLS
LA1-13	3 527.46	1.10	43.10	15.10	0	2.20	4.30	34.50	1.89	0.011 640	OMSC
LA1-14	3 528.40	1.40	32.60	20.20	0	1.30	4.10	41.00	2.93	0.010 687	OMSC
LA1-15	3 532.10	1.21	24.10	19.00	0.10	2.40	1.00	52.40	4.98	0.017 800	OMAS

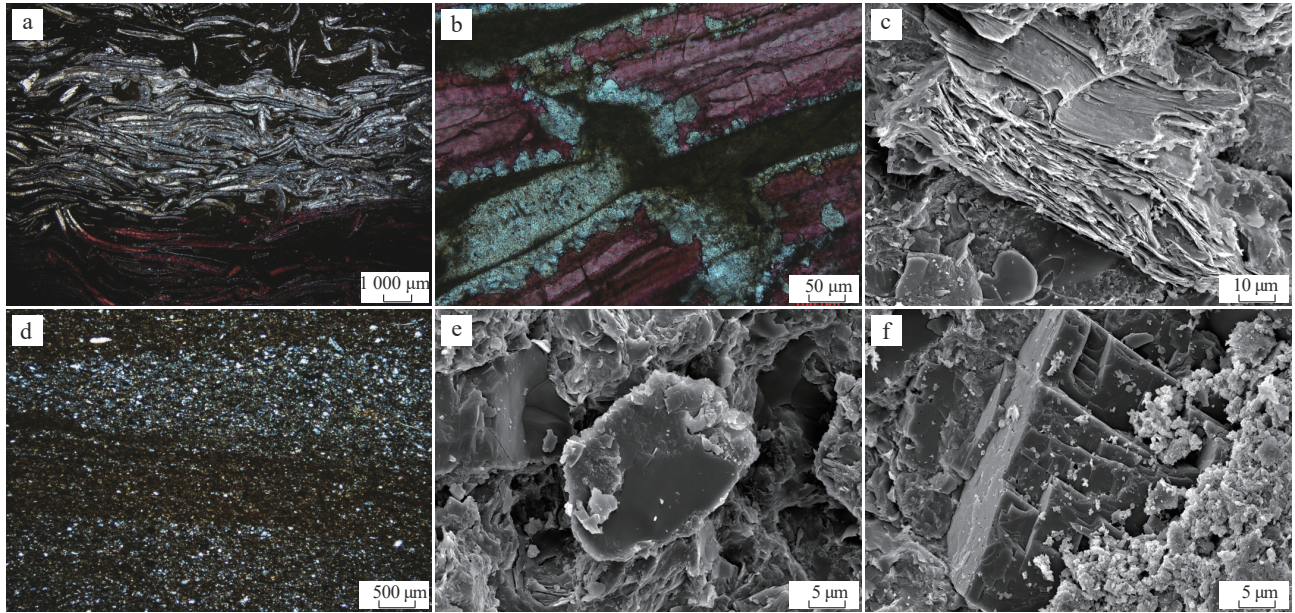


图2 川中地区大安寨段页岩常见无机矿物组分微观特征显微照片

Fig. 2 Micrographs showing the microscopic characteristics of common inorganic mineral components of shale samples from the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a. 介壳顺层排列,埋深2 467.87 m, RA1井,普通薄片; b. 壳体(方解石)边缘被硅质交代,埋深2 446.53 m, RA1井,普通薄片; c. 片状伊利石,埋深2 441.20 m, RA1井, SEM; d. 陆源碎屑矿物,埋深3 487.60 m, LA1井,普通薄片; e. 陆源碎屑石英,埋深2 441.20 m, RA1井, SEM; f. 斜长石见两组完全解理,埋深2 441.20 m, RA1井, SEM

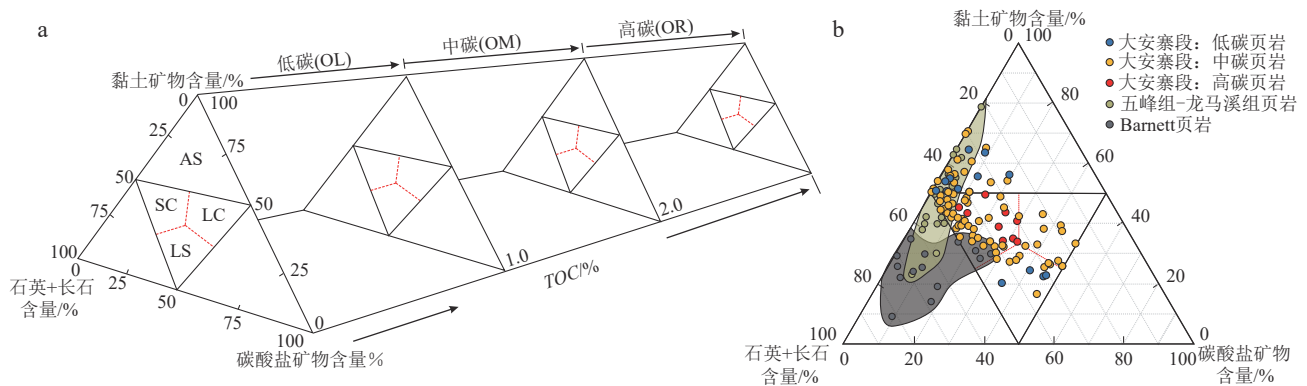
图3 页岩岩相划分方案(a)与大安寨段、五峰组-龙马溪组^[35]和Barnett^[36]页岩岩相划分结果对比(b)

Fig. 3 Lithofacies classification scheme for shales (a) and lithofacies classification results for shales in the Da'anzhai Member, Wufeng-Longmaxi formations^[35], and the Barnett Shale^[36] (b)

(4大类岩相:LS. 介壳灰质粉砂质页岩岩相;LC. 介壳灰质黏土质页岩岩相;SC. 粉砂质黏土质页岩岩相;AS. 黏土质页岩岩相。7种岩相:OLLS. 低碳介壳灰质粉砂质页岩岩相;OMLS. 中碳介壳灰质粉砂质页岩岩相;OMLC. 中碳介壳灰质黏土质页岩岩相;OMSC. 中碳粉砂质黏土质页岩岩相;ORSC. 高碳粉砂质黏土质页岩岩相;OLAS. 低碳黏土质页岩岩相;OMAS. 中碳黏土质页岩岩相。)

(OMSC与ORSC岩相)以及(低碳-中碳)块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)。与全球著名的海相页岩(五峰组-龙马溪组^[35]与Barnett^[36]页岩)相比,由于其相对单一的(陆地)来源和有限的供应,大安寨段的页岩相对缺乏硅质页岩(图3b)。

3.1.3 岩相分布及岩石学特征

1) (低碳-中碳)断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩

(OLLS与OMLS岩相)

OLLS和OMLS岩相主要发育在大一亚段中部与下部(图5)。岩心呈深灰色,岩心表面见断续的0.1~0.5 cm厚的介壳纹层平行层面发育,微观观察到较为破碎的介壳(方解石)与石英等陆源碎屑颗粒的混合沉积,黏土矿物充填于石英粒间。石英含量高,碎屑颗粒分选磨圆差,多为次棱角状,粒径多高于20 μm,整体排列杂乱。该岩相明显形成于浅水高能的沉积环境

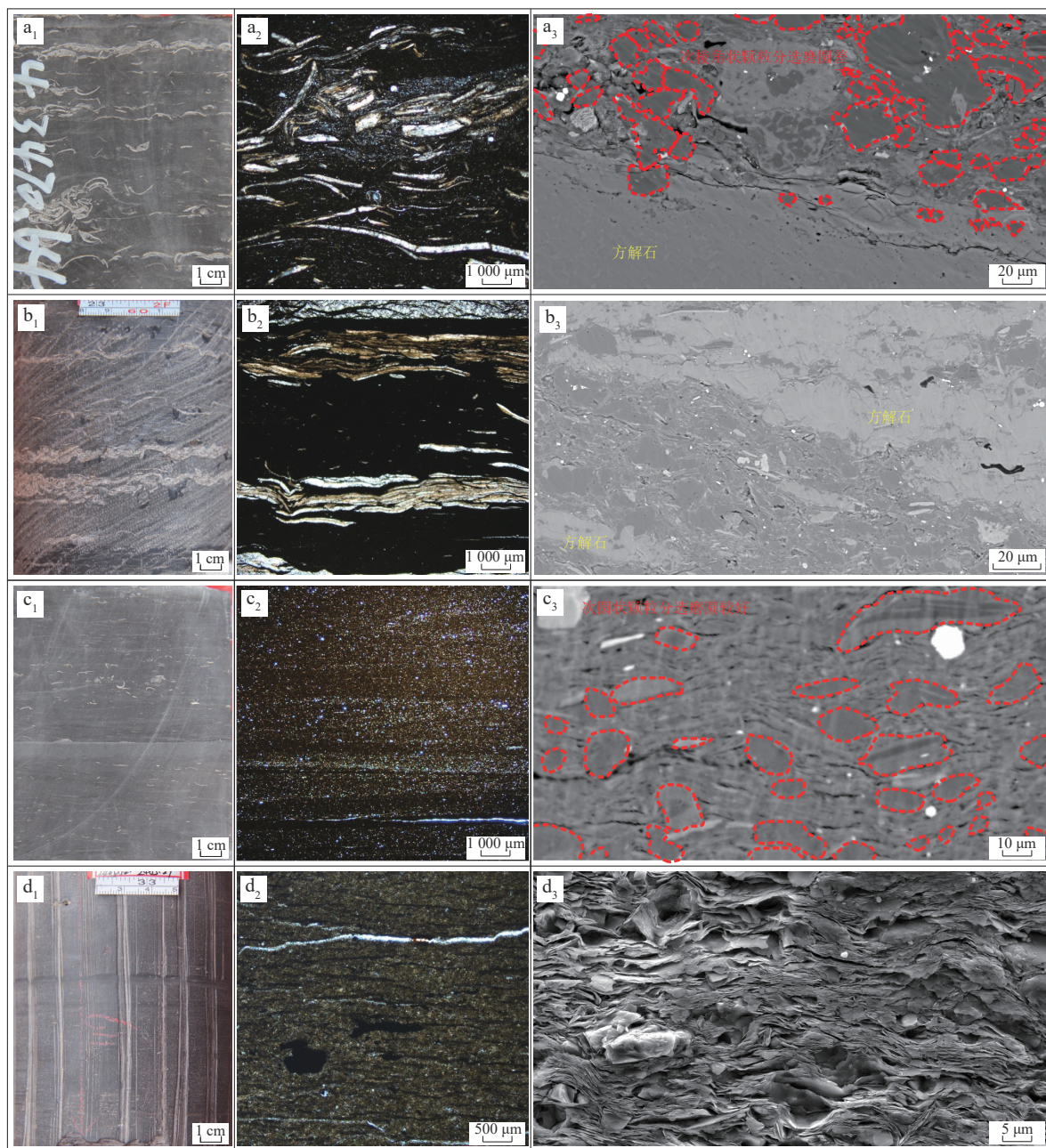


图4 川中地区大安寨段页岩岩相宏观与微观特征显微照片

Fig. 4 Micrographs showing the macroscopic and microscopic characteristics of the varying lithofacies types of shales in the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a₁. 介壳灰质粉砂质页岩见断续状介壳纹层,埋深3 470.64~3 470.79 m,LA1井,岩心;a₂. 介壳与碎屑矿物的混合沉积,埋深3 516.00 m,LA1井,普通薄片;a₃. 次棱角状碎屑颗粒分选磨圆差,埋深3 516.05 m,LA1井,SEM;b₁. 介壳灰质黏土质页岩见连续状介壳纹层,埋深2 449.94~2 450.06 m,RA1井,岩心;b₂. 介壳与泥质界面清晰,埋深3 517.38 m,LA1井,普通薄片;b₃. 介壳化石与碎屑颗粒的顺层排列,埋深3 516.05 m,LA1井,SEM;c₁. 粉砂质黏土质页岩见零星介壳化石,埋深3 523.61~3 523.67 m,LA1井,岩心;c₂. 砂质纹层,埋深3 496.15 m,LA1井,普通薄片;c₃. 次圆状碎屑颗粒分选磨圆较好,埋深2 461.05 m,RA1井,SEM;d₁. 黏土质页岩呈块状,埋深2 485.12~2 485.27 m,RA1井,岩心;d₂. 水平裂缝,埋深2 450.83 m,RA1井,普通薄片;d₃. 片状黏土矿物顺层发育,埋深2 685.35 m,G10井,SEM

(图4a₁—a₃)。

2) (中碳)纹层状介壳灰质黏土质页岩(OMLC岩相)

OMLC岩相主要发育在大二亚段a小层,常与介壳灰岩成互层状发育(图5)。岩心呈深灰色—灰黑色,岩心表面可见连续的0.2~1.0 cm厚的介壳纹层平行层面发

育,微观观察到大量较完整、个体小的介壳呈叠瓦状形成介壳纹层,介壳与泥质为互层状。泥质层中可见介壳化石与碎屑颗粒的顺层排列。碎屑颗粒粒径主要介于10~20 μm。该岩相形成于相对低能沉积环境(图4b₁—b₃)。

3) (中碳—高碳)纹层状粉砂质黏土质页岩(OMSC

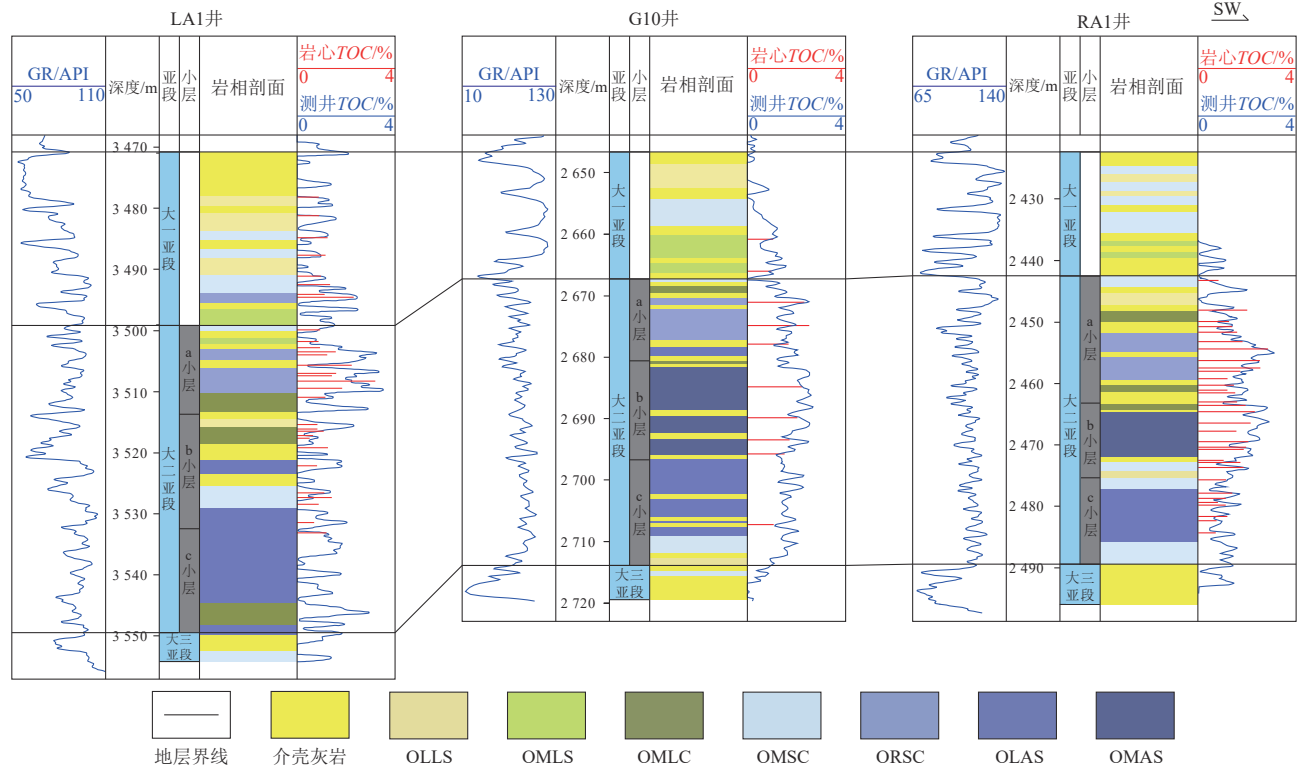


图5 川中地区LA1井、G10井和RA1井大安寨段页岩岩相纵向与横向分布特征连井对比剖面

Fig. 5 Vertical and horizontal distributions of various shale lithofacies in the Da'an寨 Member crossing wells LA1, G10, and RA1, central Sichuan Basin (see Fig. 1 for the well locations and Fig. 3 for lithofacies abbreviations)
(剖面位置见图1a;岩相符号说明见图3。)

与ORSC岩相)

OMSC岩相主要分布在大一亚段;ORSC岩相主要分布于大二亚段a小层(图5)。TOC含量的差异并未反映至岩心尺度,岩心均呈深灰色-灰黑色,见砂质纹层及微量淡水双壳类化石顺层排列,微观观察到砂质纹层,石英+长石含量高于25%,碎屑颗粒分选好且多与黏土矿物顺层发育,粒径主要介于5~20 μm。该大类岩相形成环境总体低能,一定程度接受来自陆源区的碎屑矿物的沉积(图4c₁—c₃)。

4) (低碳-中碳)块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)

OLAS和OMAS岩相主要发育于大二亚段b、c小层,是大安寨段分布最广且累计厚度最大的页岩岩相(图5)。岩心呈灰黑色-黑色,整体呈块状构造,未见介壳化石。微观观察到水平裂缝。脆性矿物颗粒含量低,石英+长石含量低于25%,仅见零星石英颗粒与黏土矿物顺层发育;碎屑石英颗粒粒径一般低于5 μm,片状黏土矿物多呈顺层排列,该岩相为深水沉积环境的产物(图4d₁—d₃)。

3.2 储集空间类型及发育特征

基于前人的页岩储集空间类型分类方案^[37,38],大安寨

段页岩发育有机质孔、粒间孔、粒内孔以及微裂缝(图6)。

3.2.1 有机质孔

有机质孔多发育于固体沥青内部而非干酪根中(图6a—c),固体沥青零星分布于页岩无机矿物间(图6b)。孔隙形态呈不规则状,单孔孔径一般小于100 nm,在二维平面上已经能看出孔隙之间具有较好的连通性,部分有机质孔相互连通形成孔径大于100 nm的有机质孔(图6c)。

3.2.2 粒间孔

粒间孔可基于矿物组分的差异划分为脆性颗粒粒间孔、颗粒边缘孔与黏土矿物晶间孔^[38]。脆性颗粒粒间孔孔径大小主要受控于颗粒,一般为微米级孔隙(图6d)。颗粒边缘孔与黏土矿物晶间孔主要呈狭缝状、其次为三角状,孔径分布不均匀,一般小于100 nm(图6e, f)。黏土矿物晶间孔常出现异常大孔,孔径100~5 000 nm不等(图6f)。

3.2.3 粒内孔

粒内孔主要包括黄铁矿结核内孔与方解石粒内溶

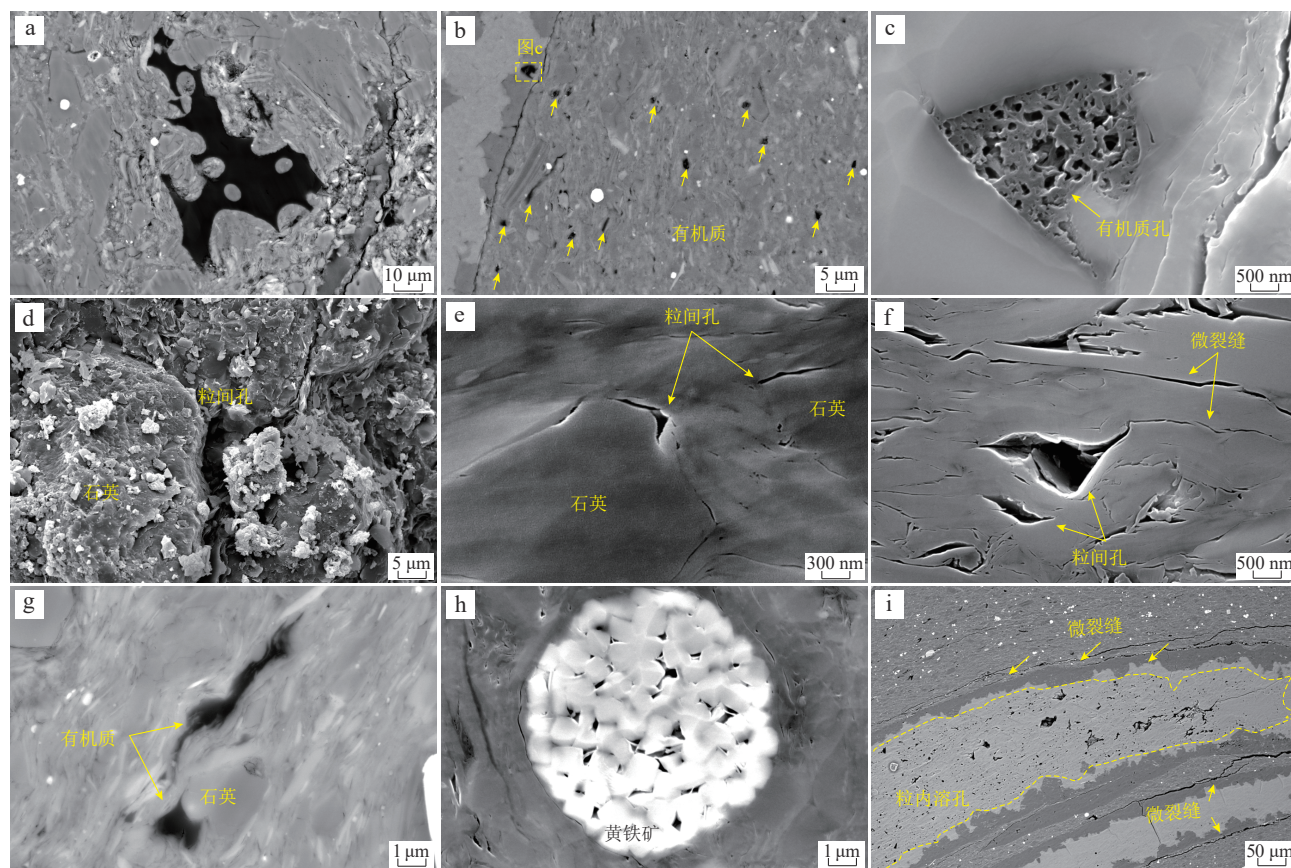


图6 川中地区大安寨段页岩储集空间类型SEM照片

Fig. 6 Scanning electron microscope (SEM) images showing the reserving space types of shales in the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin
a. 有机质未发育有机质孔,埋深3 526.68 m, LA1井; b. 固体沥青分布于黏土矿物内部,埋深3 507.40 m, LA1井; c. 不规则状有机质孔,埋深3 507.40 m, LA1井; d. 石英颗粒发育粒间孔,埋深2 423.70 m, RA1井; e. 颗粒边缘孔呈弯月状,埋深3 494.06 m, LA1井; f. 黏土矿物晶间孔、层间微裂缝,埋深3 515.21 m, LA1井; g. 黏土矿物晶间孔、颗粒边缘孔充填有机质,埋深3 494.06 m, LA1井; h. 黄铁矿结核内孔,埋深3 507.40 m, LA1井; i. 方解石粒内溶孔与介壳边缘缝,埋深2 443.17 m, RA1井

孔。二者存在于黄铁矿结核或颗粒内部,孔隙形态呈不规则多边形,孔径介于10~200 nm,孔隙与外界连通性较差(图6h,i)。

3.2.4 微裂缝

微裂缝主要包括黏土矿物层间微裂缝与介壳边缘缝。黏土矿物层间微裂缝的开度一般低于100 nm,延伸长度一般低于100 μm(图6f)。介壳边缘缝为方解石(介壳)与黏土矿物之间形成的微裂缝,开度一般低于200 nm,延伸长度受控于介壳壳体,一般在100 μm以上(图6i)。微裂缝对油气储集与水平渗流具有重要作用^[39]。

根据扫描电镜观察,脆性颗粒粒间孔在OLLS, OMLS和OMLC岩相中较为发育(图4a₃, b₃)。相较之下,OMSC与ORSC岩相主要发育黏土矿物晶间孔与黏土矿物层间微裂缝,颗粒边缘孔发育程度增加(图4c₃)。OLAS与OMAS岩相主要黏土矿物晶间孔发育

程度最高(图4d₃)。此外,各类页岩基质能够见到大量有机质的分布(图6b),表明潜在有机质孔的普遍发育。

3.3 孔隙结构特征

氮气吸附实验结果表明:大安寨段页岩孔隙比表面积介于0.73~4.98 cm²/g,平均值为2.62 cm²/g;孔隙体积介于0.002 514~0.017 800 m³/g,平均值为0.010 234 m³/g。岩相孔隙比表面积从高到低依次为OMAS, OLAS, ORSC, OMLS, OMLC, OMSC与OLLS岩相;岩相孔隙体积从大到小依次为OMAS, OLAS, ORSC, OMSC, OMLS, OMLC与OLLS岩相(表1)。其中,断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS)样品孔隙体积与孔隙比表面积最小,块状黏土质页岩(OMAS与OLAS岩相)样品孔隙体积与孔隙比表面积最大。

根据氮气吸附实验数据绘制了各页岩岩相氮气吸附-脱附曲线(图7a—d)。结果显示,大安寨段页岩样

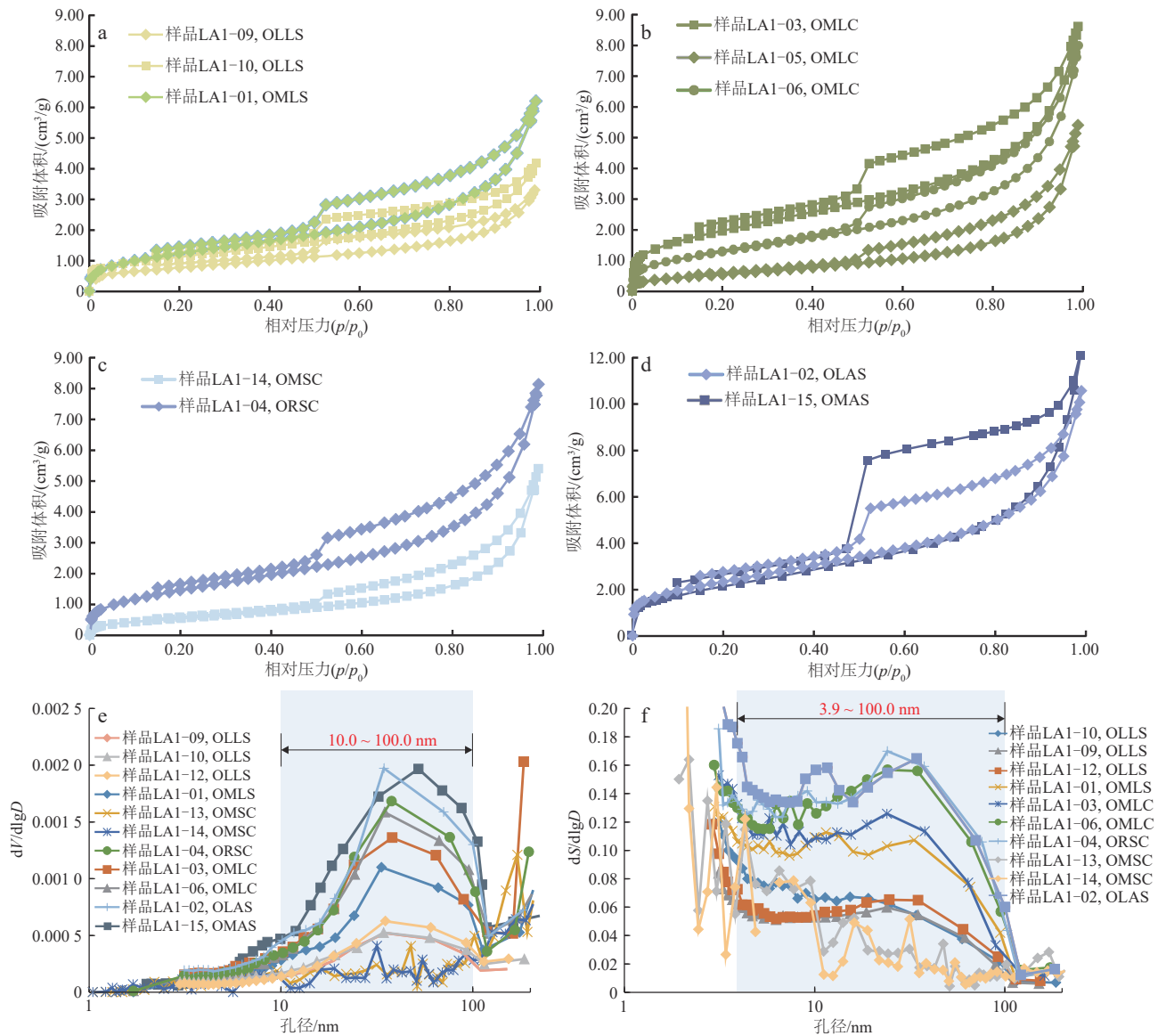


图7 川中地区大安寨段页岩样品氮气吸附-脱附曲线与孔径分布特征

Fig. 7 N_2 adsorption-desorption curves and pore size distributions of shales in the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a. OLLS与OMLS岩相样品吸附-脱附曲线;b. OMLC岩相样品吸附-脱附曲线;c. OMSC与ORSC岩相样品吸附-脱附曲线;d. OLAS与OMAS岩相样品吸附-脱附曲线;e. 页岩孔径分布(基于孔隙体积刻画);f. 页岩孔径分布(基于孔隙比表面积刻画)

(V和S分别为孔隙体积和孔隙比表面积;D为孔径;岩相符号说明见图3。)

品曲线特征符合国际理论与应用化学联合会(IUPAC)新分类的H3-H4型等温线。其吸附曲线在前期相对平缓,然而在相对压力(p/p_0)达到0.8时,曲线急剧上升。与此同时,脱附曲线在相对压力(p/p_0)为0.5处呈现出明显的滞后回环现象。这表明开放的、平行的狭缝状孔隙的普遍存在。并且,块状黏土质页岩(OMAS与OLAS岩相)滞后回环最显著,表明狭缝状孔隙的发育程度可能较高(图7d)。电镜观察到这类孔隙主要为黏土矿物晶间孔。基于孔隙体积与孔隙比表面积差异分别绘制了页岩孔径分布图(图7e,f)。其结果显示,大安寨段页岩孔隙孔径一般低于100.0 nm,各岩相的孔

隙体积与孔隙比表面积分别在孔隙孔径介于10.0 ~ 100.0 nm与3.9 ~ 100.0 nm时表现出较大的差异。

4 讨论

4.1 矿物格架及其组合方式

各岩相的岩石学特征表明,一些岩相[碎屑矿物质量分数 $w(Q+F) < 25\%$, OLAS和OMAS岩相、部分OMLC岩相]的碎屑矿物与黏土矿物形成的矿物格架中,碎屑颗粒粒径小($< 5\ \mu\text{m}$)且颗粒之间难以接触,呈

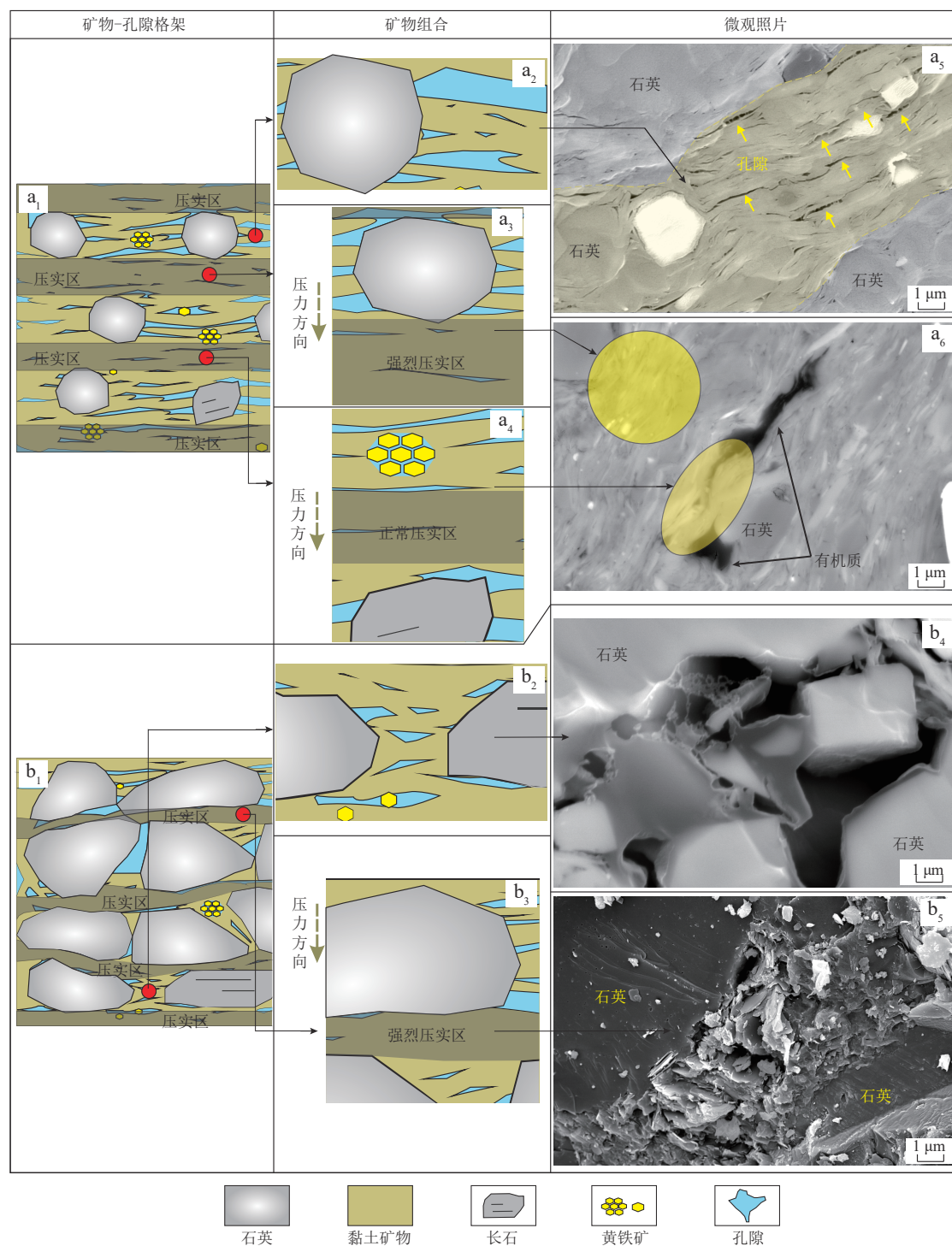


图8 川中地区大安寨段页岩矿物-孔隙网络格架发育特征及其对孔隙发育的影响

Fig. 8 Developmental characteristics of mineral-pore network frameworks and their influence on pore development in shales of the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a_1 . $w(Q+F) < 25\%$ 岩相的矿物-孔隙网络格架; a_2 . 碎屑颗粒与黏土矿物平行排列; a_3 . 黏土矿物位于碎屑颗粒下部; a_4 . 黏土矿物位于碎屑颗粒上部; a_5 . 黏土矿物发育大量片状孔隙, 埋深 2 453.14 m, RA1 井, SEM 照片; a_6 . 孔隙因压实而闭合, 埋深 3 494.06 m, LA1 井, SEM 照片; b_1 . $w(Q+F) \geq 25\%$ 岩相的矿物-孔隙网络格架; b_2 . 黏土矿物充填于碎屑颗粒之间; b_3 . 黏土矿物位于碎屑颗粒下部; b_4 . 颗粒间有机质发育孔隙, 埋深 2 453.14 m, RA1 井, SEM 照片; b_5 . 粒间充填的黏土矿物不发育孔隙, 埋深 2 423.70 m, RA1 井, SEM 照片 ($w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数。)

漂浮状分布于黏土矿物中(图 8 a_1)。这种矿物格架内, 碎屑矿物与黏土矿物之间存在 3 种矿物组合方式: ①

碎屑颗粒与黏土矿物平行排列(图 8 a_2); ②黏土矿物位于碎屑颗粒下部(图 8 a_3); ③黏土矿物位于碎屑颗粒上

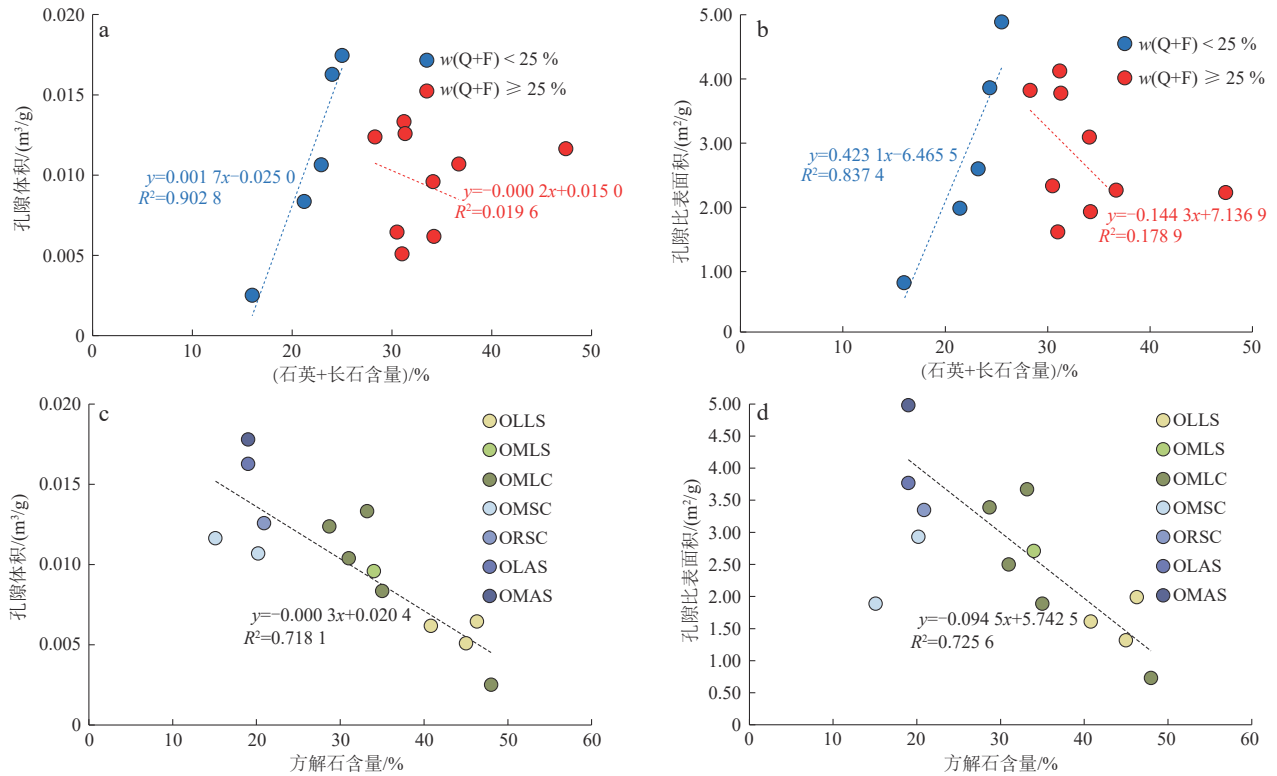


图9 川中地区大安寨段页岩陆源碎屑矿物和碳酸盐矿物对页岩孔隙体积(比表面积)的影响

Fig. 9 Impacts of terrigenous detrital minerals and carbonate minerals on the pore volume (specific surface area) of shales in the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a. 碎屑矿物含量与孔隙体积相关关系; b. 碎屑矿物含量与孔隙比表面积相关关系; c. 方解石含量与孔隙体积相关关系; d. 方解石含量与孔隙比表面积相关关系

($w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数;岩相符号说明见图3。)

部或其周围不存在碎屑颗粒(图8a₄)。

其他岩相(OOLS, OMLS, OMSC和ORSC岩相、部分OMLC岩相)的基质部分可以归纳为第二种矿物格架。其碎屑颗粒含量较高[$w(Q+F) \geq 25\%$],具有更大颗粒粒径($> 10 \mu\text{m}$),部分碎屑颗粒之间为点-线接触关系(图8b₁)。黏土矿物与碎屑颗粒主要存在两种矿物组合方式:①黏土矿物充填于碎屑颗粒粒间(图8b₂);②碎屑颗粒与黏土矿物呈纵向叠置关系(图8b₃)。

4.2 岩相矿物格架对页岩孔隙结构的影响

4.2.1 孔隙发育

第一种矿物网络格架中[$w(Q+F) < 25\%$]:①碎屑颗粒与黏土矿物平行排列时,碎屑颗粒能够在同一微层理面方向上形成欠压实区,可以很大程度的保留黏土矿物晶间孔和层间微裂缝等纳米级孔隙(图8a₂, a₅)。但这种矿物组合对于形成于成岩期的有机质孔隙的作用有限^[15](图8a₆)。②碎屑颗粒在黏土矿物上部时,碎屑颗粒会因上覆地层压力而对下部的黏

土矿物挤压致使黏土矿物相关孔隙的消减与闭合^[40](图8a₃, a₆)。③黏土矿物位于碎屑颗粒上部或其周围不存在碎屑颗粒时,黏土矿物同样会一定程度受到上覆地层的压力(图8a₄)。对于 $w(Q+F) < 25\%$ 的岩相,随着碎屑矿物含量的增加,碎屑颗粒排列由稀疏变密集,第一种矿物组合方式发育程度提高,欠压实区的发育程度随之提高,页岩孔隙体积(比表面积)增大,页岩孔隙发育程度也相应提升(图9a, b)。

第二种矿物网络格架中[$w(Q+F) \geq 25\%$]:碎屑颗粒之间能够形成刚性格架,对于充填于碎屑颗粒粒间的黏土矿物或有机质具有抗压实作用(图8b₂, b₄)。但当碎屑颗粒排列越发紧密时,黏土矿物同样受到相邻碎屑颗粒的挤压作用。另外,当两种矿物呈纵向叠置关系时,黏土矿物直接受到上部颗粒的压实(图8b₃, b₅)。并且随着碎屑颗粒含量上升,碎屑颗粒排列密集程度增加,塑性的黏土矿物遭受挤压的情况更为普遍,使得页岩孔隙体积与孔隙比表面积降低,孔隙发育程度下降(图9a, b)。

介壳(方解石)个体一般较大(粒径 $> 1 \text{ mm}$),远大

于黏土矿物(微米-纳米级),且其分布具有明显的非均质性^[41]。介壳(方解石)难以影响黏土矿物中孔隙的发育(图2a;图4b₂—b₃)。因此,难以将介壳(方解石)与黏土矿物或碎屑矿物一起归结为规律性的、具有同一力学性质的矿物组合。当然,介壳能够见到粒内溶孔,但相关性分析表明,方解石含量与页岩孔隙体积(比表面积)呈显著负相关(图9c,d)。这说明介壳壳内的溶孔发育程度较低,仅在部分介壳内部可见,这与扫描电镜观察结果相符。

4.2.2 孔径分布

根据单一变量原则,研究选择了两组无机矿物组分含量(图10a,b)和有机质丰度(图10c,d)差异较小的样品,用于绘制孔径分布图。

图10a,b表明: $w(Q+F) < 25\%$ 的页岩[块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)]孔径低于90.0 nm时,其孔隙比表面积具有明显差异,即表明有机质孔孔径普遍低于90.0 nm。同理, $w(Q+F) \geq 25\%$ 的页岩[断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS与OMLS岩相)]有

机质孔孔径主要介于3.9~90.0 nm。两类岩相有机质孔孔径分布大致一致,表明刚性矿物格架对有机质孔在成岩期的形成相关,但对其整体孔径分布影响程度偏低。

图10c,d表明: $w(Q+F) < 25\%$ 的页岩(OMLC与OLAS岩相)黏土矿物晶间孔的孔径普遍低于100.0 nm; $w(Q+F) \geq 25\%$ 的页岩(OMLS与OMLC岩相)黏土矿物晶间孔的孔径主要介于8.4~100.0 nm。两类岩相黏土矿物晶间孔的孔径上限均为100.0 nm。但相较之下, $w(Q+F) < 25\%$ 的页岩岩相中,孔径低于8.4 nm的黏土矿物晶间孔明显较发育。以低碳块状黏土质页岩(OLAS岩相)为例,岩相具高黏土矿物含量与低碎屑矿物含量,黏土矿物与碎屑矿物的组合方式多样(平行颗粒、纵向叠置、远离颗粒),页岩中存在多种产状的黏土矿物,受压实程度差异大,这可能造成页岩黏土矿物晶间孔的孔径分布更广。特别需要注意的是,当黏土矿物与碎屑颗粒呈纵向叠置关系或距黏土矿物较远时,在地层压实作用下,这部分黏土矿物晶间孔的孔径在成岩期迅速减小。这可能是黏土矿物形成大量孔径小

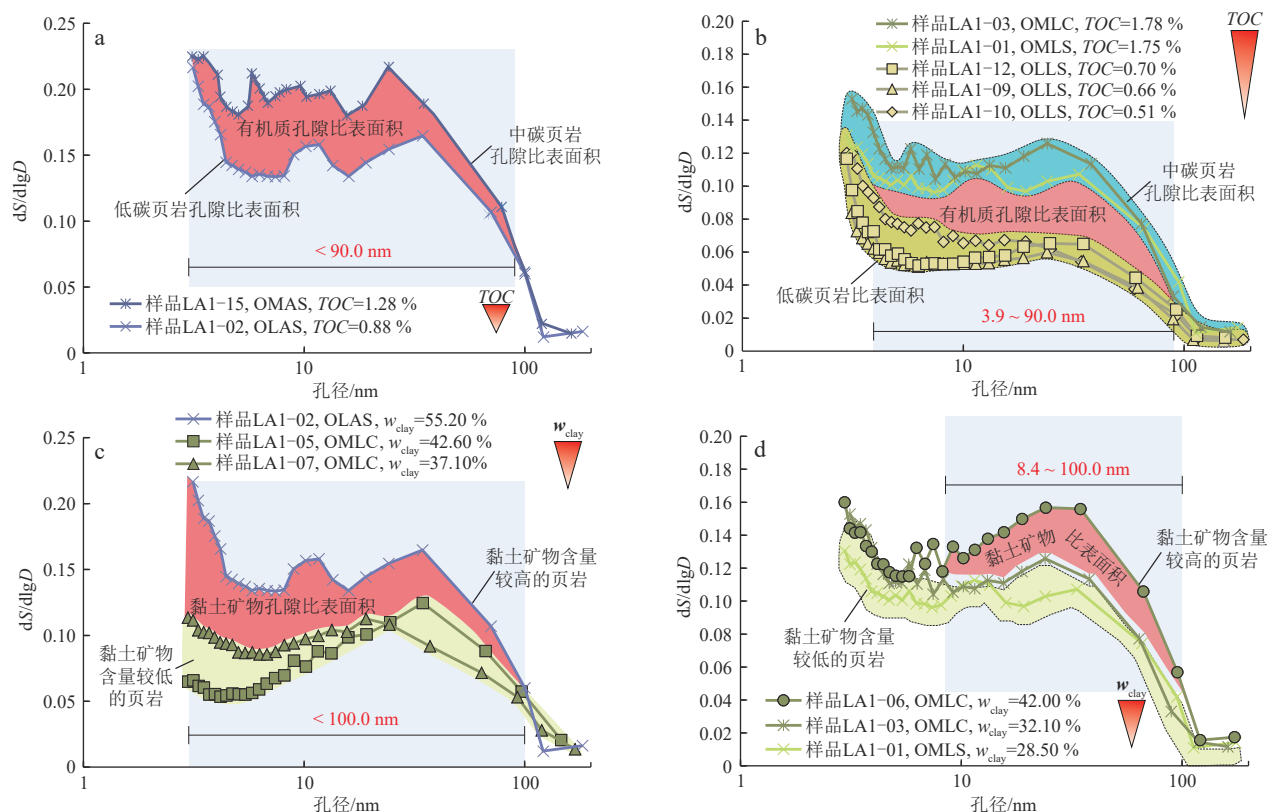


图10 川中地区大安寨段页岩不同岩相有机质孔与黏土矿物晶间孔的孔径分布特征

Fig. 10 Pore size distributions of organic pores and clay-mineral intercrystalline pores across varying shale lithofacies in the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a. 有机质孔, $w(Q+F) < 25\%$; b. 有机质孔, $w(Q+F) \geq 25\%$; c. 黏土矿物晶间孔, $w(Q+F) < 25\%$; d. 黏土矿物晶间孔, $w(Q+F) \geq 25\%$

(S为孔隙比表面积;D为孔径; $w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数; w_{clay} 为黏土矿物含量;岩相符号说明见图3。)

于8.4 nm的黏土矿物晶间孔的原因(图10c)。

4.2.3 矿物与有机质的孔隙体积与孔隙比表面积

氮气吸附实验可以检测页岩的孔隙体积(比表面积),但不能定量表征各类矿物的孔隙体积(比表面积)差异。各类型孔隙均存在于对应矿物组分中^[38]。页岩的孔隙体积(比表面积)等于各类矿物组分的孔隙体积(比表面积)之和。为定量表征页岩各类孔隙的孔隙体积(比表面积),基于XRD, TOC以及氮气吸附数据,通过多元线性回归的方式进行估算。

$w(Q+F) < 25\%$ 的页岩中,脆性颗粒一般不接触(图4c, d),颗粒粒间孔发育程度极低,无机孔隙主要以黏土矿物晶间孔为主。并且,陆相页岩有机质仍具有较大的孔隙比表面积与孔隙体积。基于此建立数学公式(1)与公式(2)并对 $w(Q+F) < 25\%$ 的页岩样品数据进行多元回归分析^[15-16]。回归分析结果见表2。

$$\sum_{i=1}^n (V_{OM} W_{(OM)i} + V_{clay} W_{(clay)i}) = V_i \quad (1)$$

式中: V_{OM} , V_{clay} 以及 V 分别为单位质量页岩有机质、黏土矿物以及页岩的孔隙体积, cm^3/g ; $W_{(OM)}$ 与 $W_{(clay)}$ 分别为TOC与黏土矿物含量, %。

$$\sum_{i=1}^n (S_{OM} W_{(OM)i} + S_{clay} W_{(clay)i}) = S_i \quad (2)$$

式中: S_{OM} , S_{clay} 以及 S 分别为单位质量页岩有机质、黏土矿物以及页岩的孔隙比表面积, cm^2/g 。

$w(Q+F) \geq 25\%$ 的页岩样品颗粒以点接触为主,发育碎屑颗粒粒间孔(图5a—c),颗粒粒间孔隙体积较大,基于此建立数学公式(3)。此外,碎屑颗粒对页岩

总孔隙比表面积贡献极低^[42, 43]。数学公式(2)能够适用于陆相页岩有机质与黏土矿物孔隙比表面积的估算。基于数学公式(2)与公式(3)对 $w(Q+F) \geq 25\%$ 的页岩样品数据进行多元回归分析。回归分析结果见表2。

$$\sum_{i=1}^n (V_{OM} W_{(OM)i} + V_{Q+F} W_{(Q+F)i} + V_{clay} W_{(clay)i}) = V_i \quad (3)$$

式中: V_{Q+F} 为单位质量、碎屑颗粒的孔隙体积, cm^3/g ; $W_{(Q+F)}$ 为碎屑矿物含量, %。

上述回归分析样品估计孔隙体积(比表面积)值与实际值相关性良好,复相关系数(R^2)均大于0.80(图11a, b)。

回归分析结果为: $w(Q+F) < 25\%$ 时,页岩有机质与黏土矿物的孔隙体积(V_{OM} , V_{clay})分别为0.001 916 0 cm^3/g 与0.000 607 0 cm^3/g ;页岩有机质与黏土矿物的孔隙比表面积(S_{OM} , S_{clay})分别为42.363 8 cm^2/g 与15.382 1 cm^2/g 。 $w(Q+F) \geq 25\%$ 时,页岩有机质、陆源碎屑颗粒粒间以及黏土矿物的孔隙体积(V_{Q+F} , V_{clay} , V_{OM})分别为0.002 801, 0.000 109和0.000 140 cm^3/g ;页岩有机质与黏土矿物的孔隙比表面积(S_{OM} , S_{clay})分别为97.719 9 cm^2/g 与1.896 2 cm^2/g 。上述分析结果表明:在矿物组合的影响下, $w(Q+F) < 25\%$ 岩相的黏土矿物孔隙体积和孔隙比表面积明显大于 $w(Q+F) \geq 25\%$ 的岩相; $w(Q+F) < 25\%$ 岩相的有机质孔隙体积和孔隙比表面积小于 $w(Q+F) \geq 25\%$ 的岩相(图11c, d)。当然,由于 $w(Q+F) \geq 25\%$ 岩相中颗粒对有机质孔的抗压实作用,估算的颗粒粒间孔孔隙体积可能会包含部分有机质孔隙体积。

表2 川中地区大安寨段页岩样品数据线性回归分析统计结果

Table 2 Statistical summary for linear regression analysis of data on shale samples from the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

$w(Q+F)/\%$	岩相	样品编号	深度/m	孔隙比表面积/ cm^2/g	孔隙体积/ cm^3/g	估计孔隙比表面积/ cm^2/g		估计孔隙体积/ cm^3/g		
						有机质	黏土矿物	有机质	碎屑矿物	黏土矿物
<25	OLAS	LA1-02	3 500.00	3.77	0.016 280	0.37	3.92	0.001 686	—	0.015 271
	OMAS	LA1-15	3 532.10	4.98	0.017 800	0.51	3.64	0.002 319	—	0.014 179
	OMLC	LA1-05	3 508.20	1.89	0.008 353	0.74	1.98	0.003 334	—	0.007 629
	OMLC	LA1-07	3 510.97	2.50	0.010 400	0.69	1.14	0.003 104	—	0.004 293
	OMLC	LA1-11	3 532.15	0.73	0.002 514	0.54	0.32	0.002 453	—	0.001 078
≥ 25	OLLS	LA1-09	3 521.10	1.32	0.005 092	0.64	0.42	0.001 849	0.003 392	0.003 078
	OLLS	LA1-10	3 526.85	1.99	0.006 451	0.50	0.43	0.001 429	0.003 338	0.003 175
	OLLS	LA1-12	3 535.20	1.61	0.006 182	0.68	0.46	0.001 961	0.003 743	0.003 399
	OMLS	LA1-01	3 499.30	2.71	0.009 592	1.71	0.54	0.004 902	0.003 732	0.003 987
	OMLC	LA1-03	3 503.00	3.67	0.013 330	1.74	0.61	0.004 986	0.003 414	0.004 490
	OMLC	LA1-06	3 509.20	3.39	0.012 370	1.67	0.80	0.004 790	0.003 097	0.005 875
	OMSC	LA1-13	3 527.46	1.89	0.011 640	1.07	0.65	0.003 081	0.005 187	0.004 826
	OMSC	LA1-14	3 528.40	2.93	0.010 687	1.37	0.78	0.003 922	0.004 016	0.005 735
	ORSC	LA1-04	3 505.02	3.35	0.012 580	2.35	0.82	0.006 723	0.003 425	0.006 015

注: $w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数;“—”为无此数据;岩相符号说明见图3。

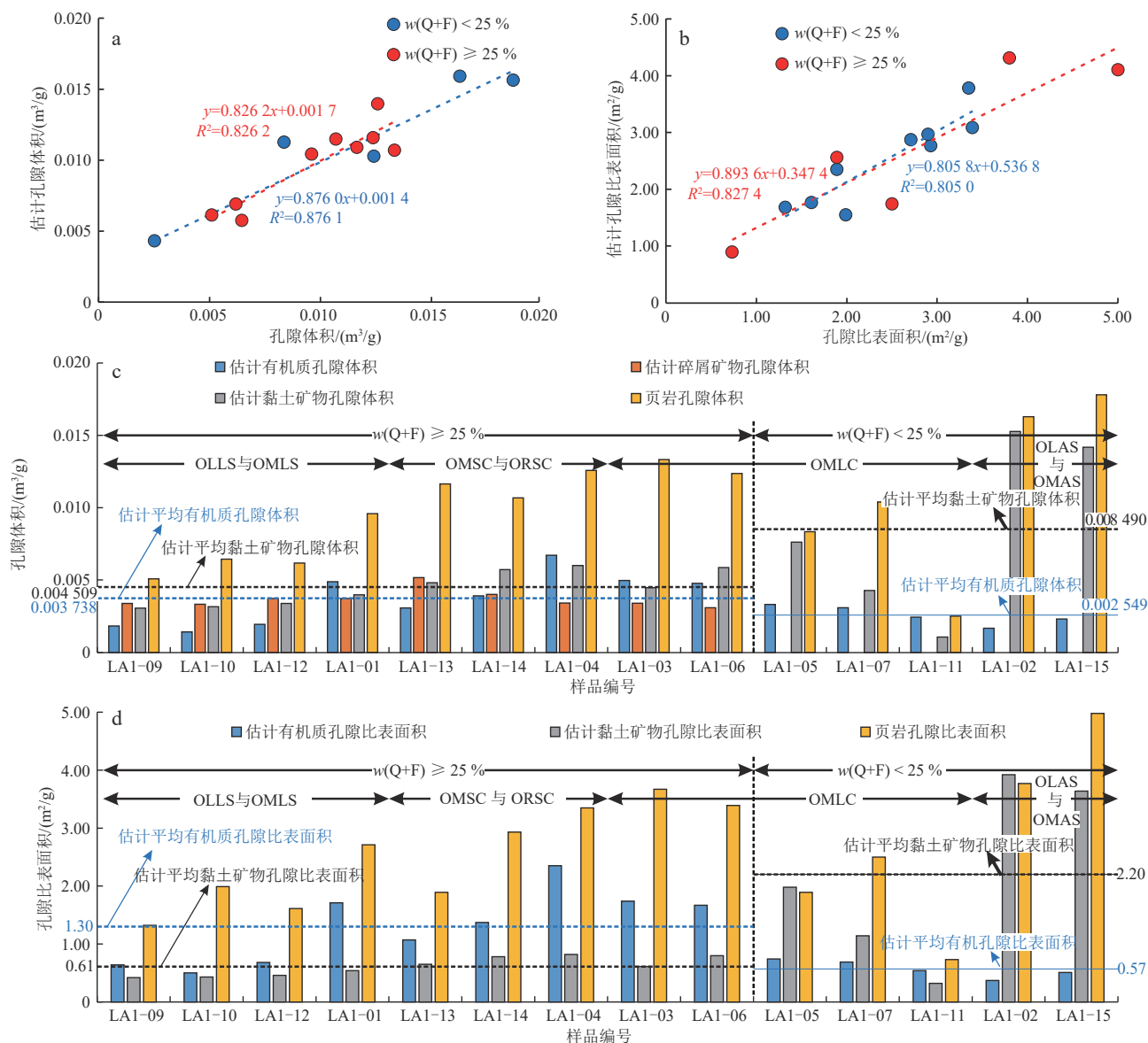


图 11 川中地区大安寨段页岩样品孔隙参数估计值与实际值相关关系

Fig. 11 Correlation diagrams and bar charts showing the estimated and measured pore volumes, as well as estimated and measured specific surface areas of shale samples from the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a. 实际孔隙体积与估计孔隙体积相关关系; b. 实际孔隙比表面积与估计孔隙比表面积相关关系; c. 样品孔隙体积与矿物估计孔隙体积分布柱状图; d. 样品孔隙比表面积与矿物估计孔隙比表面积分布柱状图。

($w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数;岩相符号说明见图3。)

4.3 岩相矿物含量与TOC对页岩孔隙结构的影响

上述分析表明,矿物格架及其组合控制着单位质量黏土矿物与有机质内孔隙的发育密度。在此基础上进一步分析了矿物含量的变化对页岩孔隙体积(比表面积)的影响。

$w(Q+F) < 25\%$ 的岩相具有较大的黏土矿物孔隙体积(比表面积),且这类页岩岩相通常具有较高的黏土矿物含量(超过30%),页岩孔隙体积(比表面积)与黏土矿物含量之间存在显著正相关性(图12a,b)。这

表明了黏土矿物含量对页岩孔隙体积(比表面积)具有显著的控制作用。另一方面, $w(Q+F) < 25\%$ 的岩相具有较低的有机质孔隙体积(比表面积),且其较低的TOC导致有机质孔在页岩孔隙中的占比降低,有机质含量的变化对页岩孔隙体积(比表面积)的影响不显著(图12c,d)。以块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)为例,从孔隙贡献度分析结果来看,这两种岩相的黏土矿物含量在大安寨段页岩中是最高的,黏土晶间孔是其主要孔隙类型,对页岩孔隙体积(比表面积)的贡献度超过80%,因此各岩相中块状黏土质页岩(OLAS与

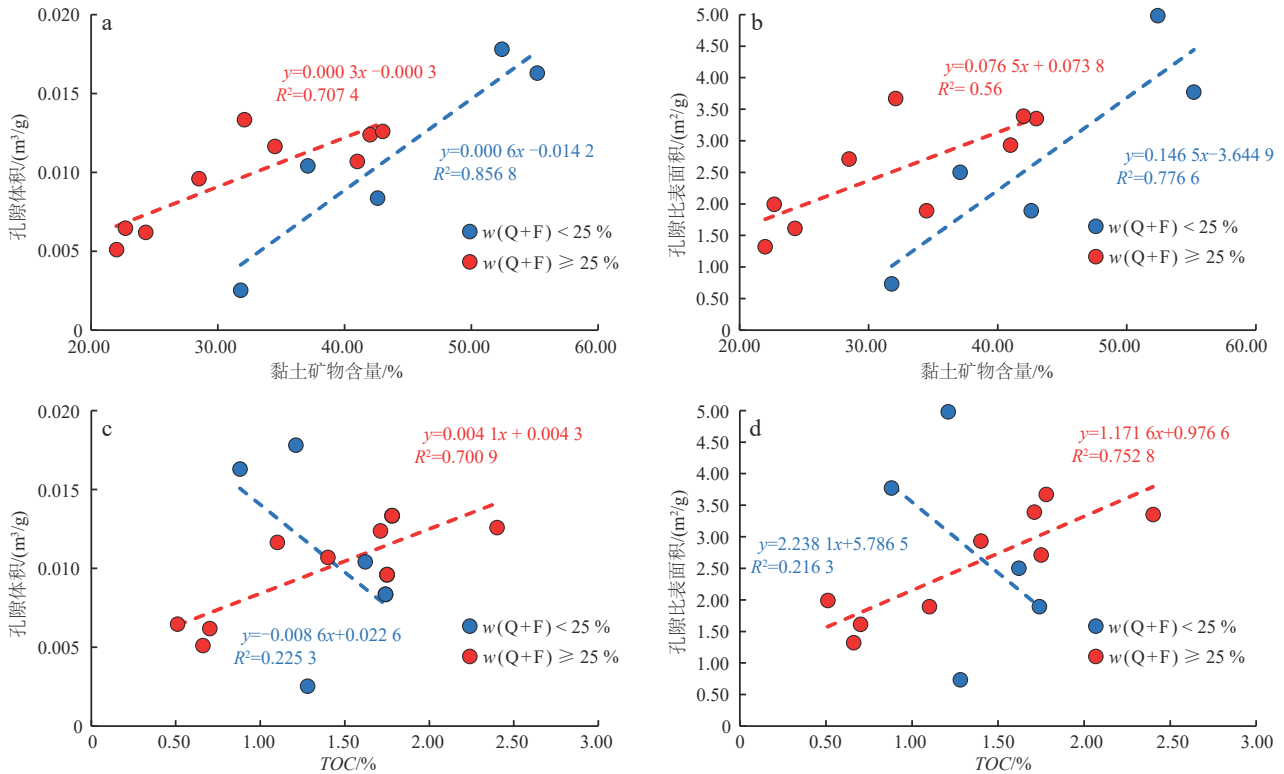


图12 川中地区大安寨段页岩黏土矿物含量及TOC与孔隙体积和孔隙比表面积相关关系

Fig. 12 Relationships of clay mineral content and TOC with pore volume and specific surface area for shales in the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a. 黏土矿物含量与孔隙体积相关关系; b. 黏土矿物含量与孔隙比表面积相关关系; c. TOC与孔隙体积相关关系; d. TOC与孔隙比表面积相关关系 ($w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数。)

OMAS岩相)拥有最高的孔隙体积(比表面积)(表2)。

$w(Q+F) \geq 25\%$ 的岩相中,虽然黏土矿物孔隙体积(比表面积)及其含量均偏低,但TOC变化范围较大。因此,单一有机质或矿物组分难以影响岩相的总孔隙体积(比表面积)。图12显示,页岩孔隙体积(比表面积)与黏土矿物含量和TOC均呈正相关,且TOC与孔隙体积(比表面积)的相关性曲线斜率较大。这表明黏土矿物含量和TOC均能影响页岩孔隙体积(比表面积),且TOC含量变化的影响程度更大。从表2也可看出有机质的孔隙体积贡献度与黏土矿物相近,而有机质的孔隙比表面积贡献度显著高于黏土矿物。此外,碎屑颗粒对于页岩孔隙体积也具有较大贡献(表2)。

4.4 不同岩相孔隙结构的演化

前人研究表明,川中地区大安寨段页岩储层经历了早期和中期成岩阶段,发生了压实、黏土矿物转化、溶蚀、交代和有机质生烃等成岩事件^[44, 45]。不同页岩岩相沉积环境的差异致使页岩矿物组分在相对含量、结构和组合方式上具有显著差异^[46]。这种差异致使不同岩相成岩过程中发生的成岩事件具有一定不

同,并造成了各岩相孔隙网络格架演化特征的差异性^[14]。

早成岩期A亚阶段期间,在快速机械压实作用下,页岩的孔隙急剧减少。断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS与OMLS岩相)沉积于浅水高能环境,距离物源区近,其矿物以石英与破碎状的介壳(方解石)为主,颗粒粒径相对较大、磨圆差,为次棱角状(图4a₃)。黏土矿物在压实作用下极易沿颗粒棱角状边缘挤入颗粒粒间,这既造成刚性颗粒粒间孔的损失,也致使挤入的黏土矿物体积被压缩,孔隙的发育程度降低,页岩孔径、孔隙体积以及比表面积随之减小(图13a₁)。其余岩相(OMLC, OMSC, ORSC, OLAS以及OMAS)依次沉积于更深的水体环境,页岩矿物成分中黏土矿物的占比增加(图4b₃—d₃)。刚性颗粒多沿层理面排列且粒径变小,碎屑颗粒之间的间距较宽。此时,位于碎屑颗粒微层理面方向上的黏土矿物能够保留部分孔隙(图13b₁—d₁)^[15]。当然,块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)的部分黏土矿物远离碎屑矿物或被上覆颗粒压实会导致孔隙缩小和闭合。但由于碎屑颗粒含量偏低,其黏土矿物晶间孔减少程度低于碎屑颗粒含

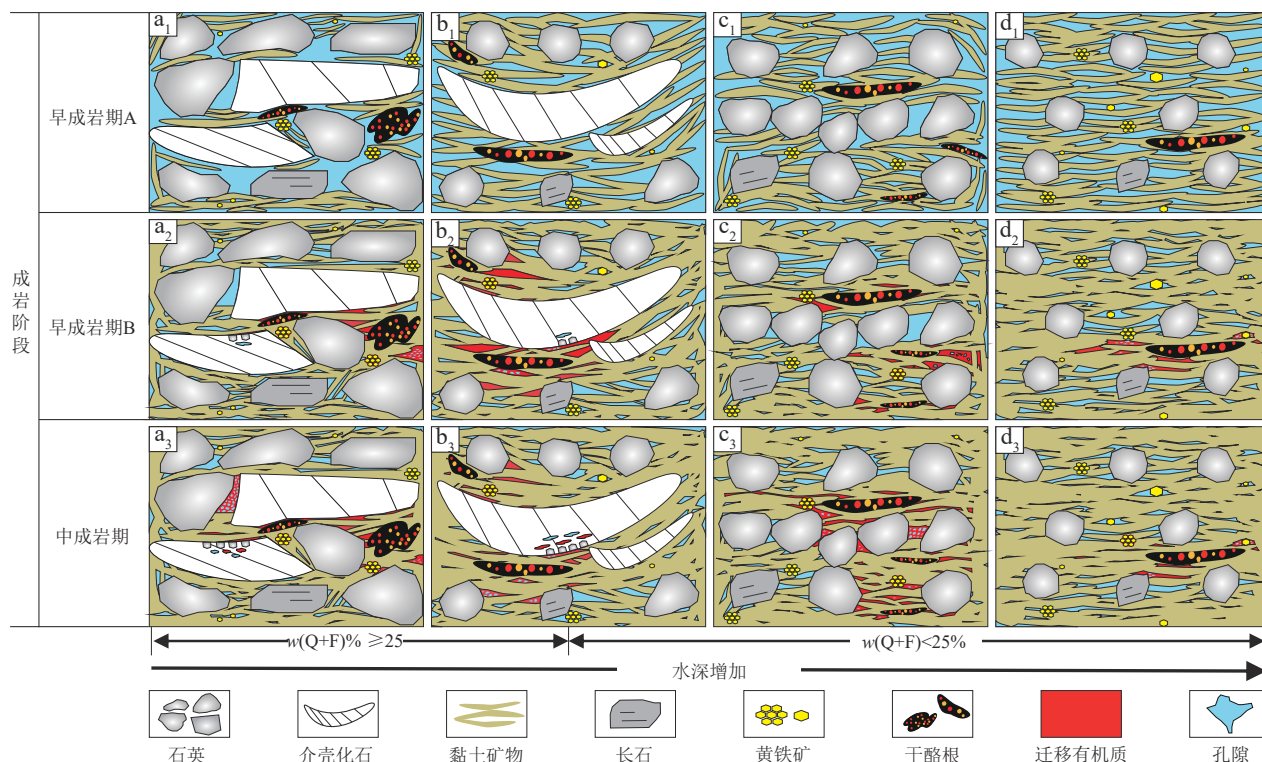


图13 川中地区大安寨段不同页岩相孔隙网络格架演化

Fig. 13 Diagram showing the evolutionary processes of the mineral-pore network frameworks across varying shale lithofacies of the Da'anzhai Member, central Sichuan Basin

a_1 — a_3 , (低碳—中碳)断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS与OMLS岩相); b_1 — b_3 , (中碳)纹层状介壳灰质黏土质页岩(OMLC岩相); c_1 — c_3 , (中碳—高碳)纹层状粉砂质黏土质页岩(OMSC与ORSC岩相); d_1 — d_3 , (低碳—中碳)块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)
($w(Q+F)$ 为碎屑矿物质量分数;岩相符号说明见图3。)

量较高[$w(Q+F) \geq 25\%$](图13d₁)。

在早成岩期B亚阶段至中成岩期间,最重要的成岩事件是烃类的生成,并伴随着地层压实作用与黏土矿物的转化。干酪根附近平行层面方向的黏土矿物晶间孔和脆性矿物颗粒间孔逐渐被可溶有机质充填,并伴随着次生有机质孔隙(主要为固体沥青内部的有机质孔)的生成与消亡。尤其是赋存于黏土矿物中有机质刚形成的有机质孔,在地层压实作用下容易闭合和消亡。断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS与OMLS岩相)的有机质孔主要发育于刚性颗粒粒间的有机质(固体沥青),脆性颗粒形成的刚性格架有利于后期形成的有机质孔的保存(图13a₂, a₃)。对于纹层状粉砂质黏土质页岩(OMSC与ORSC岩相)以及部分纹层状介壳灰质黏土质页岩(OMLC岩相),当碎屑颗粒排列相对密集时,颗粒粒间、边缘以及平行颗粒层面方向的有机质能够保留次生有机质孔隙(图13b₂, b₃, c₂, c₃)。块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)有机质孔隙发育程度较低,主要是由于碎屑颗粒排列稀疏,有机质主要分布于远离颗粒的黏土矿物中(图13d₃)。所

以有机质孔隙保存条件较差,早期形成的有机质孔隙由于压实作用而减小或闭合(图13d₂, d₃)。有机质生烃过程中还会产生有机酸^[47],有机酸如甲酸和乙酸等能够溶蚀介壳(方解石)表面,产生壳内溶孔(图13a₂, a₃, c₂, c₃)。但受控于大安寨段页岩有机质与介壳(方解石)分布的非均质性,大部分介壳不发育溶蚀孔隙^[33, 48]。此外,黏土矿物转化对孔隙的影响主要是通过改变孔隙形态和排出层间水来实现的^[49]。而在大安寨段页岩中黏土矿物转化过程中生成的硅元素还可以与介壳边缘的方解石发生交代作用,产生自形程度较高的交代成因石英^[48](图13a₂, a₃, c₂, c₃)。

5 结论

1) 四川盆地中部大安寨段页岩共划分出7种页岩岩相类型,主要包括(低碳—中碳)断续纹层状介壳灰质粉砂质页岩(OLLS与OMLS岩相)、(中碳)纹层状介壳灰质黏土质页岩(OMLC岩相)、(中碳—高碳)纹层状粉砂质黏土质页岩(OMSC与ORSC岩相)以及(低碳—

中碳)块状黏土质页岩(OLAS与OMAS岩相)。其中,OLLS岩相脆性颗粒间孔较发育,但孔隙体积与孔隙比表面积最小,而OMAS与OLAS岩相主要发育黏土矿物晶间孔,其孔隙体积与孔隙比表面积最大。

2) 根据碎屑矿物相对含量及其接触关系,可以总结出页岩碎屑矿物与黏土矿物形成的两类矿物网络格架。第一种矿物网络格架的碎屑颗粒含量低 [$w(Q+F) < 25\%$, OLAS和OMAS岩相、部分OMLC岩相], 黏土矿物与碎屑颗粒之间存在3种具有同一力学性质的矿物组合(平行顺层排列、纵向叠置、远离颗粒)。第二种矿物网络格架的碎屑颗粒含量较高 [$w(Q+F) \geq 25\%$, OLLS, OMLS, OMSC和ORSC岩相、部分OMLC岩相], 黏土矿物紧密充填于颗粒间或与颗粒形成纵向叠置关系。

3) 碎屑矿物与黏土矿物之间的矿物组合能显著影响黏土矿物晶间孔的孔径分布以及单位质量有机质与黏土矿物的孔隙体积(比表面积)。较大的单位质量黏土矿物孔隙体积(比表面积)与较高的黏土矿物含量致使 $w(Q+F) < 25\%$ 的岩相具有较高的页岩总孔隙体积(比表面积)。 $w(Q+F) \geq 25\%$ 岩相具有较大的单位质量有机质孔隙体积(比表面积)与变化范围较大的TOC, 其页岩总孔隙体积(比表面积)受到有机质、黏土矿物甚至碎屑矿物的共同影响。

4) 不同岩相矿物组分在相对含量、格架和组合方式上的显著差异很大程度影响了成岩事件的发生或发生程度的强弱, 尤其是压实作用与有机质生烃(次生有机质孔隙的形成), 这使得各岩相孔隙网络格架的演化特征表现出差异性。

参 考 文 献

- [1] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [2] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.
- [3] TIWARI P, DEO M, LIN C L, et al. Characterization of oil shale pore structure before and after pyrolysis by using X-ray micro CT [J]. Fuel, 2013, 107: 547-554.
- [4] ROSS D J K, MARC BUSTIN R. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [5] 冯增昭. 沉积相的一些术语定义的评论[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 207-220.
FENG Zengzhao. A review on the definitions of terms of sedimentary facies [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(2): 207-220.
- [6] WANG Yang, CHENG Hongfei, HU Qinrong, et al. Diagenesis and pore evolution for various lithofacies of the Wufeng-Longmaxi shale, southern Sichuan Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 133: 105251.
- [7] ZHANG Luchuan, XIAO Dianshi, LU Shuangfang, et al. Pore development of the Lower Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin and its adjacent areas: Insights from lithofacies identification and organic matter [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 122: 104662.
- [8] 钱计安, 蒋裕强, 罗彤彤, 等. 页岩储层渗吸过程微观孔缝演变特征及影响因素——以四川盆地渝西地区龙马溪组一、二段为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(6): 1336-1348.
QIAN Ji'an, JIANG Yuqiang, LUO Tongtong, et al. Microscopic pore and fracture evolution characteristics and influencing factors during imbibition process of shale reservoirs: A case study of the first section of the first member [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(6): 1336-1348.
- [9] 胡宗全, 刘忠宝, 李倩文, 等. 基于变尺度岩相组合的陆相页岩源-储耦合机理探讨——以四川盆地侏罗系页岩层段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 893-909.
HU Zongquan, LIU Zhongbao, LI Qianwen, et al. Exploring source rock-reservoir coupling mechanisms in lacustrine shales based on varying-scale lithofacies assemblages: A case study of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 893-909.
- [10] 姜龙燕, 钱门辉, 何发岐, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长7页岩油特征及其主控因素[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 941-953.
JIANG Longyan, QIAN Menhui, HE Faqi, et al. Characteristics and main controlling factors of Chang 7 shale oil in Triassic Yanchang Formation, Fuxian area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(5): 941-953.
- [11] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 521-535.
LIU Bo, SUN Jiahui, ZHANG Yongqing, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 521-535.
- [12] 彭君, 孙宇亮, 鹿坤, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组页岩油储层岩石学及微观孔隙结构特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 128-141.
PENG Jun, SUN Ningliang, LU Kun, et al. Shale oil reservoir of the Palaeogene Shahejie Formation in the Dongpu Sag: Petrology and pore microstructural characteristics [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 128-141.

- [13] 康家豪, 王兴志, 谢圣阳, 等. 川中地区侏罗系大安寨段页岩岩相类型及储层特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(4): 53-65.
KANG Jiahao, WANG Xingzhi, XIE Shengyang, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of shales of Jurassic Da'anzhai member in central Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(4): 53-65.
- [14] MILLIKEN K. A compositional classification for grain assemblages in fine-grained sediments and sedimentary rocks[J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84(12): 1185-1199.
- [15] YANG Wei, ZUO Rusi, JIANG Zhenxue, et al. Effect of lithofacies on pore structure and new insights into pore-preserving mechanisms of the over-mature Qiongzhusi marine shales in Lower Cambrian of the southern Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 746-762.
- [16] ZHANG Luchuan, LU Shuangfang, JIANG Shu, et al. Effect of shale lithofacies on pore structure of the Wufeng-Longmaxi shale in southeast Chongqing, China[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(6): 6603-6618.
- [17] 何文渊, 白雪峰, 蒙启安, 等. 四川盆地陆相页岩油成藏地质特征与重大发现[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 885-898.
HE Wenyuan, BAI Xuefeng, MENG Qian, et al. Accumulation geological characteristics and major discoveries of lacustrine shale oil in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(7): 885-898.
- [18] 李楠, 洪海涛, 赵正望, 等. 川东地区侏罗系大安寨段页岩储层特征及发育控制因素[J]. 断块油气田, 2024, 31(2): 187-196.
LI Nan, HONG Haitao, ZHAO Zhengwang, et al. Characteristics and development controlling factors of shale reservoirs of Jurassic Da'anzhai Member in eastern Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(2): 187-196.
- [19] 刘忠宝, 李倩文, 刘光祥, 等. 川北地区大安寨段页岩油气源、储特征及富集层段优选[J]. 地质学报, 2023, 97(10): 3421-3437.
LIU Zhongbao, LI Qianwen, LIU Guangxiang, et al. Source and reservoir characteristics as well as optimization of favorable shale oil and gas enrichment intervals of the Da'anzhai Member in northern Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(10): 3421-3437.
- [20] 杨跃明, 文龙, 王兴志, 等. 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[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 32-42.
YANG Yueming, WEN Long, WANG Xingzhi, et al. Geological characteristics and favorable exploration area selection of shale oil and gas of the Lower Jurassic Da'anzhai Member in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 32-42.
- [21] 丁一, 李智武, 冯逢, 等. 川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积及其致密油勘探意义[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 389-400.
DING Yi, LI Zhiwu, FENG Feng, et al. Mixing of lacustrine siliciclastic-carbonate sediments and its significance for tight oil exploration in the Da'anzhai member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang area, central Sichuan Basin [J]. Geological Review, 2013, 59(2): 389-400.
- [22] 施振生, 赵圣贤, 周天琪, 等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义——以川南地区古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1499-1514.
SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1499-1514.
- [23] 王濡岳, 胡宗全, 赖富强, 等. 川东北地区下侏罗统自流井组大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 366-378.
WANG Ruyue, HU Zongquan, LAI Fuqiang, et al. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 366-378.
- [24] 孔祥晔, 曾溅辉, 罗群, 等. 川中地区大安寨段陆相页岩岩相对孔隙结构的控制作用[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(4): 392-403.
KONG Xiangye, ZENG Jianhui, LUO Qun, et al. Controls of continental shale lithofacies on pore structure of Jurassic Da'anzhai member in central Sichuan basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4): 392-403.
- [25] 洪海涛, 路俊刚, 秦春雨, 等. 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[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 11-21.
HONG Haitao, LU Jungang, QIN Chunyu, et al. Shale oil reservoir characteristics and exploration implication in Da'anzhai Member of Jurassic Ziliujing Formation in central Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(1): 11-21.
- [26] 李倩文, 刘忠宝, 陈斐然, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1127-1140.
LI Qianwen, LIU Zhongbao, CHEN Feiran, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of Jurassic shale in the Sichuan Basin revealed by the Da'anzhai member, Well Y2, Yuanba area [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1127-1140.
- [27] 郑荣才, 郭春利, 梁西文, 等. 四川盆地大安寨段非常规储层的储集空间类型与评价[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 16-29.
ZHENG Rongcai, GUO Chunli, LIANG Xiwen, et al. Characteristics and evaluation of reservoir spaces of shale gas (oil) in Da'anzhai member of Ziliujing Formation in Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(1): 16-29.
- [28] 郑荣才. 四川盆地侏罗统大安寨段高分辨率层序地层学[J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 42-49.
ZHENG Rongcai. High resolution sequence stratigraphy of Da'anzhai Formation, Lower Jurassic in Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 42-49.
- [29] 杜江民, 张小莉, 张帆, 等. 川中龙岗地区下侏罗统大安寨段沉积相分析及有利储集层预测[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 493-502.
DU Jiangmin, ZHANG Xiaoli, ZHANG Fan, et al. Sedimentary

- facies and reservoir prediction of the Lower Jurassic Da'anzhai Member, Longgang area, central Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2015, 17(4): 493-502.
- [30] 张宇, 杜垚, 刘耘, 等. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气基本特征及勘探方向[J]. *中国地质*, 2022, 49(1): 51-65.
ZHANG Yu, DU Yao, LIU Yun, et al. Basic characteristics and exploration direction of lacustrine shale oil and gas in Da'anzhai member of Jurassic in Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 2022, 49(1): 51-65.
- [31] 张少敏, 杨跃明, 洪海涛, 等. 陆相页岩层段储集特征及其油气地质意义——以四川盆地中部大安寨段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(4): 718-730.
ZHANG Shaomin, YANG Yueming, HONG Haitao, et al. Reservoir characteristics and its petroleum significance of Jurassic Da'anzhai shale interval in central Sichuan Basin, SW China [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(4): 718-730.
- [32] 施开兰, 陈芳文, 段卓, 等. 重庆北碚和平水库剖面下侏罗统大安寨段湖相碳酸盐岩岩石类型及沉积环境[J]. *古地理学报*, 2015, 17(2): 198-212.
SHI Kailan, CHEN Fangwen, DUAN Zhuo, et al. Lacustrine carbonate rock types and sedimentary environments of the Lower Jurassic Da'anzhai Member of Heping Reservoir section in Beibei area, Chongqing [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(2): 198-212.
- [33] 王昕尧, 金振奎, 朱毅秀, 等. 四川盆地自流井组陆相页岩石英成因研究[J]. *沉积学报*, 2022, 40(4): 1010-1018.
WANG Xinyao, JIN Zhenkui, ZHU Yixiu, et al. The genesis of quartz in Ziliujing nonmarine shale, Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 1010-1018.
- [34] 李志明, 刘雅慧, 何晋译, 等. 陆相页岩油“甜点”段评价关键参数界限探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1453-1467.
LI Zhiming, LIU Yahui, HE Jinyi, et al. Limits of critical parameters for sweet-spot interval evaluation of lacustrine shale oil [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1453-1467.
- [35] ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. Depositional environment of shale in Wufeng and Longmaxi Formations, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Research*, 2017, 2(3): 209-221.
- [36] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.
- [37] 孙龙德, 王小军, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩纳米孔缝形成机制与页岩油富集特征[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1350-1365.
SUN Longde, WANG Xiaojun, FENG Zihui, et al. Formation mechanisms of nano-scale pores/fissures and shale oil enrichment characteristics for Gulong shale, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1350-1365.
- [38] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [39] MENG Qingfeng, HAO Fang, TIAN Jinqiang. Origins of non-tectonic fractures in shale [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 222: 103825.
- [40] WU Lanyu, LU Yangbo, JIANG Shu, et al. Pore structure characterization of different lithofacies in marine shale: A case study of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 57: 203-215.
- [41] 王昕尧, 金振奎, 郭芪恒, 等. 川东北下侏罗统大安寨段陆相页岩方解石成因[J]. *沉积学报*, 2021, 39(3): 704-712.
WANG Xinyao, JIN Zhenkui, GUO Qiheng, et al. Genesis of calcite in nonmarine shale of the Lower Jurassic Da'anzhai member, northeastern Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 704-712.
- [42] 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 等. 不同页岩及干酪根比表面积和孔隙结构的比较研究[J]. *中国科学(地球科学)*, 2015, 45(2): 139-151.
CAO Taotao, SONG Zhiguang, WANG Sibao, et al. A comparative study of the specific surface area and pore structure of different shales and their kerogens [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 45(2): 139-151.
- [43] XIE Weidong, WANG Meng, DUAN Hongyue. Adsorption characteristics and controlling factors of CH₄ on coal-measure shale, Hedong coalfield [J]. *Minerals*, 2021, 11(1): 63.
- [44] ZHU Yixiu, LI Zezhou, ZENG Lianbo, et al. Diagenesis and its impact on the reservoir quality of continental shales: A case study of the Lower Jurassic Da'anzhai member of the Ziliujing Formation in the Sichuan Basin, China [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 5942370.
- [45] JIANG Daiqin, LI Pingping, ZHENG Mingjun, et al. Impacts of different matrix components on multi-scale pore structure and reservoir capacity: Insights from the Jurassic Da'anzhai member in the Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 1251-1264.
- [46] LI Peng, LIU Zhongbao, NIE Haikuan, et al. Heterogeneity characteristics of lacustrine shale oil reservoir under the control of lithofacies: A case study of the Dongyuemiao member of Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 736544.
- [47] RIMSTIDT J D, CHERMAK J A, SCHREIBER M E. Processes that control mineral and element abundances in shales [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 383-399.
- [48] BAI Bin, DAI Chaocheng, HOU Xiulin, et al. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 1033-1045.
- [49] 李颖莉, 蔡进功. 泥质烃源岩中蒙脱石伊利石化对页岩气赋存的影响[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 352-358.
LI Yingli, CAI Jingong. Effect of smectite illitization on shale gas occurrence in argillaceous source rocks [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2014, 36(3): 352-358.