

四川盆地地下古生界五峰组-龙马溪组海相页岩气储层 孔隙分类及特征

胡宗全^{1,2,3}, 王倩茹^{1,2,3}, 申宝剑^{1,2,3}, 冯动军^{1,2,3}, 杜伟^{1,2,3}, 孙川翔^{1,2,3}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要:页岩气储层含有复杂的无机矿物成分和丰富的有机质,又经历了成岩、成油和成气等多期演化,导致孔隙类型多样、成因和形成过程复杂。国际上对页岩气储层的分类研究总体较为系统,国内研究多限于借鉴常规储层进行成因分类,在无机矿物与有机质的相互作用、无机孔与有机质孔的演化和相互转化方面的研究尚不深入,以四川盆地地下古生界五峰组-龙马溪组典型海相页岩气储层为研究实例,以孔隙支撑载体作为孔隙特征描述切入点,分析了无机矿物、有机质以及二者共同支撑的孔隙特征,建立了“支撑载体类型+孔隙部位+孔隙成因”的孔隙分类方案,将孔隙类型划分为无机矿物孔、有机质孔及有机质-无机矿物复合孔,并进一步细分亚类。深化了孔隙演化与转化研究,在无机矿物成岩作用与有机质成油和成气作用耦合的基础上,将海相页岩气储层孔隙演化划分为3个阶段:①沉积期—早成岩期主要发育大量无机矿物孔,以含水为主;②成油期主要发育无机孔和少量原地有机质孔,以含油为主;③成气期主要发育大量迁移有机质孔和少量无机孔,以含气为主。分析了无机矿物孔、原地有机质孔和迁移有机质孔的演化及转化关系,指出优质储层经历的演化序列依次为沉积期的放射虫硅质页岩、成岩期的生物硅与有机质耦合、成油期硅质矿物粒间孔和晶间孔充填液态烃以及成气期硅质矿物晶间孔内充填沥青并发育有机质孔。

关键词:孔隙支撑载体;无机矿物孔;有机质孔;孔隙分类;页岩气储层;五峰组-龙马溪组;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Classification and characteristics of pores in marine shale gas reservoirs in the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

HU Zongquan^{1,2,3}, WANG Qianru^{1,2,3}, SHEN Baojian^{1,2,3}, FENG Dongjun^{1,2,3}, DU Wei^{1,2,3}, SUN Chuanxiang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Shale gas reservoirs contain complex inorganic minerals and abundant organic matter, and have experienced a multistage evolutionary process including diagenesis and hydrocarbon generation. All these lead to the formation of diverse pore types with complex origins and formation processes. Internationally, systematic, in-depth studies on the classification of shale gas reservoirs have been conducted generally. However, in China, the genetic classification of these reservoirs largely relies on the criteria used for conventional reservoirs. Accordingly, there remains a lack of detailed studies on the interactions between inorganic minerals and organic matter, as well as on the evolution of inorganic and organic pores and their potential mutual transformation. In this study, we investigate typical marine shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations within the Sichuan Basin. By characterizing pores based on their props, we analyze the characteristics of pores propped by inorganic minerals, organic matter, and a combination of them, and accordingly propose a pore classification scheme in terms of prop types, pore development locations, and pore origins. Using this scheme, pores in marine shale gas reservoirs are categorized into inorganic, organic, and composite pores, each of which are further subdivided. To deepen the pore evolution and transformation, we integrate

收稿日期:2025-02-15;修回日期:2025-05-06。

第一作者简介:胡宗全(1971—),男,教授级高级工程师,沉积与油气储层、致密与页岩油气地质和勘探。E-mail: huzongquan_syky@sinopec.com。

the diagenetic processes of inorganic minerals with the hydrocarbon generation of organic matter, and thereby the pore evolution in marine shale gas reservoirs can be divided into three distinct stages, namely, the sedimentary to early diagenetic stage, the oil generation stage, and the gas generation stage. The first stage is characterized by the development of abundant inorganic pores, most of which are saturated with water. The oil generation stage features the development of inorganic pores and a small quantity of pores within in situ organic matter (also referred to as in situ organic pores), which are dominated by oil. The gas generation stage is marked by the formation of numerous pores in migrated organic matter and a small number of inorganic pores. Most of the pores formed in this stage contain gas. By analyzing the evolution of inorganic pores, in situ organic pores, and pores in migrated organic matter, along with the transformation among these pore types, we propose that the evolutionary sequence of high-quality reservoirs consists of the formation of radiolarian-rich siliceous shales during the sedimentary stage, the coupling of biogenic silicon and organic matter during the diagenetic stage, the infilling of liquid hydrocarbons into the intergranular and intercrystalline pores of siliceous minerals during the oil generation stage, and finally, the infilling of asphalt into the intercrystalline pores of siliceous minerals and the development of organic pores within the asphalt during the gas generation stage.

Key words: pore prop, inorganic pore, organic pore, pore classification, shale gas reservoir, Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

引用格式:胡宗全,王倩茹,申宝剑,等. 四川盆地下古生界五峰组-龙马溪组海相页岩气储层孔隙分类及特征[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 705-718. DOI: 10. 11743/ogg20250302.

HU Zongquan, WANG Qianru, SHEN Baojian, et al. Classification and characteristics of pores in marine shale gas reservoirs in the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 705-718. DOI: 10. 11743/ogg20250302.

1 研究背景

页岩气储层的典型特征在于无机矿物与有机质的共生组合,无机矿物占页岩质量的主体,而占比较小的有机质既是生烃的母体,也是页岩气储集空间的主要提供者^[1-6]。由于矿物组分复杂且富含有机质,页岩气储层常表现出更为复杂的孔隙类型、特征和演化过程,使得孔隙分类成为页岩储层描述和评价中的重要问题^[7-13]。

目前, Loucks 等提出^[14-17]的页岩储层孔隙划分方案在国际上应用最为广泛,该方案将基质孔隙划分为非有机质孔隙和有机质孔隙2种基本类型。非有机质孔隙受机械压实和化学成岩作用的影响,可分为粒间孔隙和粒内孔隙。粒间孔隙出现在颗粒和晶体之间,而粒内孔隙则出现在颗粒边界内,包括化石和颗粒中的溶蚀孔隙、磷酸盐颗粒内的孔隙、黄铁矿骨架内的晶间孔隙和晶体中的流体包裹体。有机质孔隙与热成熟度有关,不仅在干酪根中形成,也在固体沥青中形成。Loucks 还提出了一个有机质孔隙发育和演化的理想化过程,有机物可以是沉积的(干酪根)或迁移的(固体沥青),在热成熟过程中,干酪根可以转化为固体沥青。这个过程对理解油气储层中有机质的运移、储集和孔隙结构变化具有重要意义。Slatt 等按成因将孔隙划分为有机孔隙、黏土絮凝体间孔隙、粪球粒内孔隙、化石

碎屑内孔隙、颗粒内孔隙和微裂缝等6种^[18]。

中国学者针对四川盆地下古生界五峰组-龙马溪组海相页岩孔隙类型,提出了2种主流的划分方案:①基于孔隙发育位置与岩石基质之间的关系。邹才能等将海相页岩孔隙划分出粒间孔、粒内孔和有机质孔3种类型^[19];于炳松等将页岩气储层孔隙划分为裂缝孔隙和岩石基质孔隙,岩石基质孔隙又进一步分成粒间孔隙、粒内孔隙和有机质孔隙^[20]。②基于孔隙发育成因与岩石基质关系。王玉满等将海相页岩储集空间归纳为基质孔隙和裂缝2大类,并将基质孔隙分为残余原生孔隙、有机质微孔隙、黏土矿物层间微孔隙以及不稳定矿物溶蚀孔^[21];郭旭升等将富有机质泥页岩孔隙划分为有机质孔、晶间孔、粒间孔和溶蚀孔、有机质收缩孔、构造裂缝和页理缝等储集空间类型^[22];胡宗全等将页岩储集空间类型分为有机质孔隙、无机孔隙和微裂缝,无机孔隙进一步分为颗粒相关孔隙、黄铁矿孔隙和黏土矿物孔隙^[23];陈尚斌等将页岩气储层划分为有机质孔、石英碎屑粒内或粒间孔隙,黄铁矿粒内部晶间孔隙、黏土絮状沉淀形成的片粒状结构孔隙和微裂隙^[24]。

目前,在页岩储层孔隙特征及分类方面仍存在较多需要深化研究的问题^[25-32]。比如,传统的孔隙描述方法是以固体矿物支撑结构为主的,对于有机质作为支撑结构、有机质和无机矿物作为复合支撑结构的研究相对不足;需要建立综合考虑孔隙空间分布、成因机

制及储层品质评价的新型孔隙分类方案;在成岩-成烃(成油和成气)的耦合演化过程中,无机矿物孔和有机质孔之间的时-空演化及其转化关系尚不明确,等等。为此,在前人研究和分类的基础上,本文以四川盆地五峰组-龙马溪组为实例,由东向西横穿深水陆棚,分别选取川东南焦石坝地区JY1井、川南永川地区YY1井、威远地区WY1井和WY23-1井等钻井样品,开展海相页岩气储层的孔隙微观特征和成因机制分析,建立孔隙支撑载体、孔隙成因和孔隙特征相结合的孔隙分类方案,并探讨孔隙与其支撑载体耦合关系、油气相态与孔隙演化关联机制以及无机孔与有机质孔转化规律,对于深化海相页岩气储层地质认识、准确评价页岩气富集条件具有重要的理论意义和应用价值。

2 页岩气储层孔隙微观特征

2.1 无机矿物支撑的孔隙

在五峰组-龙马溪组富有机质页岩中,无机矿物颗粒的粒径一般在 $5 \sim 40 \mu\text{m}$,其中硅质矿物构成无机颗粒的主体,支撑的原始粒间孔孔径一般在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ ^[33-34]。由于原始有机质和黏土矿物具有很强的塑性,生成的迁移有机质甚至具有很强的流动性,导致大量的无机孔隙被有机质和黏土矿物充填^[35-36],因此,页岩中很少见到残余的粒间孔,尤其是硅质矿物粒间孔大多被有机质所占据,只有少量未与有机质和黏土矿物接触的小型粒间孔或靠近喉道部位的末端孔隙在局部被保留下来(图1a)。

碳酸盐矿物颗粒具有相对活跃的物理化学性质,内部常发育粒内溶孔,边缘常见收缩缝或应力缝(图1b),大多未被充填,有的被黏土矿物等次生矿物半充填,但很少被有机质充填(图1c)。菱形的碳酸盐矿物晶粒常具有环边结构,外部被胶结成致密环边,内部发育粒内溶孔和溶缝,很少被有机质充填(图1d);有的则具有雾心环边结构,内核相对致密,外部较厚的环边发育溶蚀孔隙,同样很少被有机质充填(图1e)。

沉积期黏土矿物絮凝粒之间发育大量的粒间孔,但绝大部分在随后的压实作用下丧失,只有少部分未被充填而保留下来(图1f)。成岩作用早期,黏土矿物晶片间通常发育大量原生孔隙,但液态烃很难进入这种两端封闭的晶片间孔隙,后期此类孔隙多被黄铁矿和磷灰石等成岩矿物所充填(图1g)。在高演化条件下,黏土矿物也具有一定的脆性,在弯曲变形达到一定程度时被折断而形成黏土矿物粒间孔和晶间孔

(图1h)。黏土矿物重结晶形成针状晶形,可以切断、压溶或刺穿其他矿物,并在多向分布的针状晶簇支撑下形成多边形晶间孔(图1i)。

在有机质含量相对较低的页岩中,黄铁矿晶间没有被迁移有机质充填而残留晶间孔(图1j),而在有机质含量较高的页岩中,黄铁矿晶间孔多被有机质充填。重结晶形成的较大黄铁矿晶粒内部常发育溶孔,大溶孔(孔径 $\geq 300 \text{ nm}$)多被成岩矿物和有机质半充填,而小溶孔(孔径 $< 300 \text{ nm}$)多被成岩矿物全充填(图1k)。在交代其他矿物(如长石)所形成的黄铁矿晶粒中,常见沿矿物解理形成的溶蚀缝和溶孔,与晶粒外连通性较好的大溶孔多被有机质半充填,小溶孔多被成岩矿物全充填(图1l)。

2.2 有机质支撑的孔隙

2.2.1 具生物结构有机质支撑的孔隙

在成烃过程中,原始生物体内部会形成有机质孔隙,而支撑孔隙的有机质常具有残余的成烃生物结构^[37-39]。硅质放射虫在经过压实作用之后外形仍呈球形,指示其抗压实作用能力强,并呈现由内向外的多圈层结构。各圈层间的有机质和硅质矿物含量比例和结构特征存在差异性,在硅质支撑格架内保留较多的有机质,并发育大量孔径可达 100 nm 以上的有机质孔(图2a,b)。笔石碎屑常呈长条状、节段状,其中的有机质孔很小,孔径一般在 50 nm 以下,而相邻沥青中的最大孔径可达 100 nm 以上(图2c)。海绵骨针的外形呈椭球状,指示其抗压实作用能力较差,呈两层结构,外部壳体经常被黄铁矿等次生矿物交代,内部腔体充填有机质和有机质孔,由于黄铁矿强度较差,在外部压实作用、内部压力和有机质塑性的多重影响下壳体常被压开(图2d)。藻类体是主要的成烃生物,由于其生烃能力强,在生烃过程中固体物质损耗大,因此其保留生物原始外形和体积的能力较差,其外形与周边无机矿物的支撑结构相关,内部的黏土矿物排列方式在一定程度上保留了藕节状的生物结构,原始有机质大多转化为沥青,顺着黏土矿物展布方向发育较大的片状有机质孔,其余部位的有机质孔很小(图2e)。此外,五峰组-龙马溪组页岩中还见有多种不明种类的生物,部分有机质内部具有生物体腔孔,被自生矿物充填,在自生矿物支撑格架下保存原地有机质,发育大量孔径较小的有机质孔(图2f)。部分生物体内部被矿物充填,仅在外缘发育有机质,有机质中还有少量呈流线状的黏土矿物,指示有机质流动与黏土矿物塑性流变

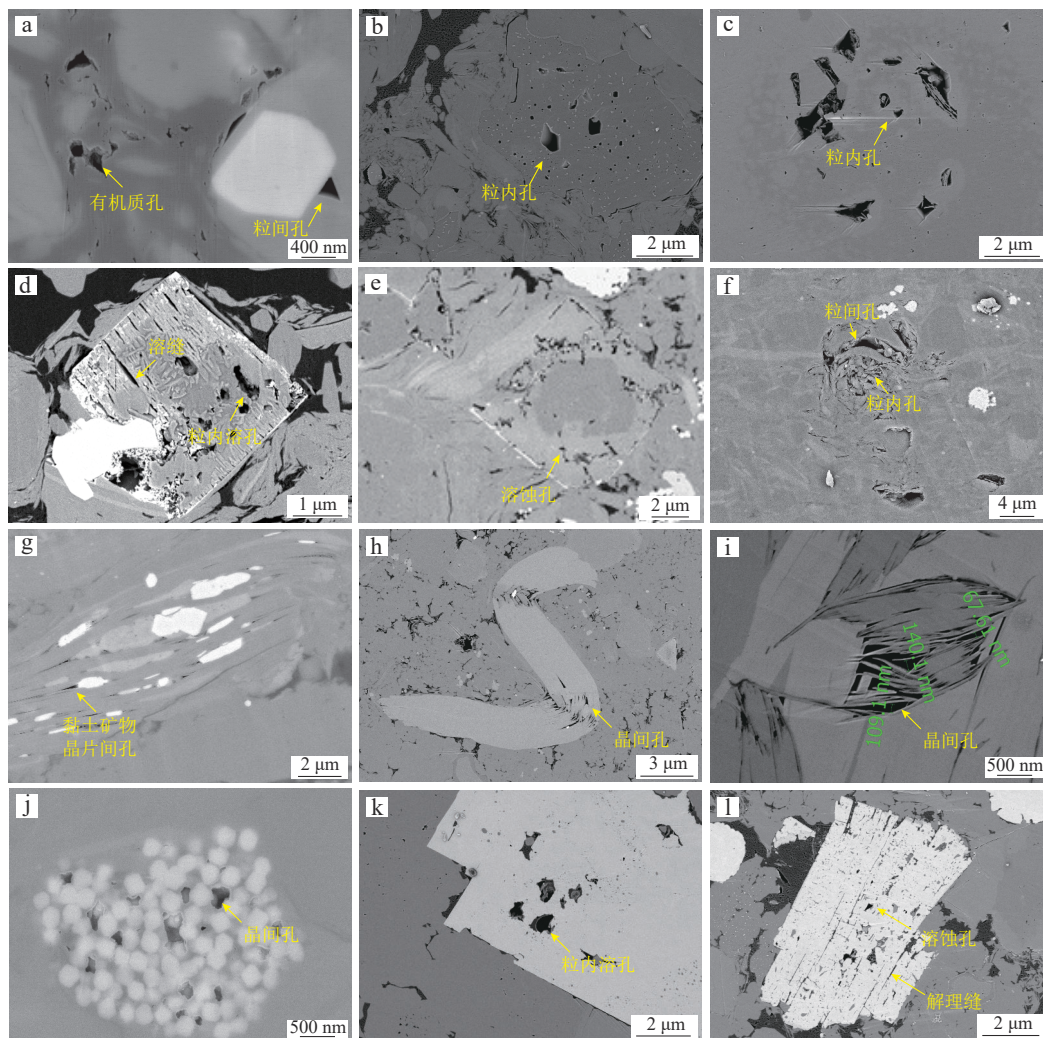


图1 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中无机矿物支撑的孔隙特征扫描电镜照片

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) images showing the characteristics of pores propped by inorganic minerals in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

a. 大部分粒间孔被有机质充填, 迁移有机质难以到达的粒间孔在局部被保留, JY1 井, 埋深 2 346. 50 m; b. 碳酸盐颗粒发育粒内孔, 未被有机质和矿物充填, 见颗粒边缘孔, WY23-1 井, 埋深 3 831. 13 m; c. 碳酸盐颗粒发育粒内孔, 部分被黏土矿物充填, 未充填有机质, JY1 井, 埋深 2 335. 30 m; d. 碳酸盐矿物颗粒表面具有胶结致密环边, 颗粒内部发育粒内溶孔和溶缝, 未被有机质充填, WY1 井, 埋深 3 584. 40 m; e. 碳酸盐矿物具有雾心环边结构, 环边发育溶蚀孔隙, 未被有机质充填, WY1 井, 埋深 3 584. 40 m; f. 黏土矿物絮凝粒发育粒间孔和粒内孔, WY23-1 井, 埋深 3 849. 04 m; g. 黏土矿物晶片间孔先被黄铁矿、后被磷灰石充填, 未见有机质充填, 只在末端残余黏土矿物晶片间孔, JY1 井, 埋深 2 385. 42 m; h. 在应力作用下黏土矿物变形和折断, 折断处形成晶间孔, WY23-1 井, 3 849. 04 m; i. 针状伊利石具有一定的硬度, 可刺穿相邻黏土片, 在其支撑下形成晶间孔, WY23-1 井, 埋深 3 837. 89 m; j. 在有机质不足的情况下, 黄铁矿莓球内部晶间孔未充填有机质, JY1 井, 埋深 2 330. 46 m; k. 晶粒状黄铁矿内部发育粒内溶孔, 部分被矿物和有机质全充填, 部分被有机质半充填, WY23-1 井, 埋深 3 845. 34 m; l. 晶粒状黄铁矿内部发育解理缝和溶孔, 部分被次生矿物充填, 与颗粒外连通性好的被有机质充填, YY1 井, 埋深 3 860. 84 m

同时发生并相互作用(图 2g)。一些生物从外形和结构上已难以识别生物结构, 但内部有机质孔隙发育不均匀, 其分布具有一定的结构性, 指示有机质具有一定的生物组构(图 2h)。部分生物有机质仍保留原始生物形态特征, 与邻近的沥青中发育的大量大孔径有机质孔形成鲜明对比, 这类具生物结构的有机质内部基本不发育有机质孔, 表明其生烃能力较弱, 但在成烃过程中保持形状和体积的能力较强(图 2i)。

2.2.2 无生物结构的沥青有机质孔

页岩中的原始有机质在生烃演化过程中先形成液态烃, 液态烃在无机矿物的格架内进行微纳米尺度的迁移, 最终在无机矿物孔隙中赋存并进一步演化为沥青。这些沥青的外形和内部均没有特定的生物结构, 但发育大量有机质孔^[40-41]。硅质矿物粒间孔和晶间孔的支撑结构最为稳定, 封闭性好, 保存的单个沥青体积

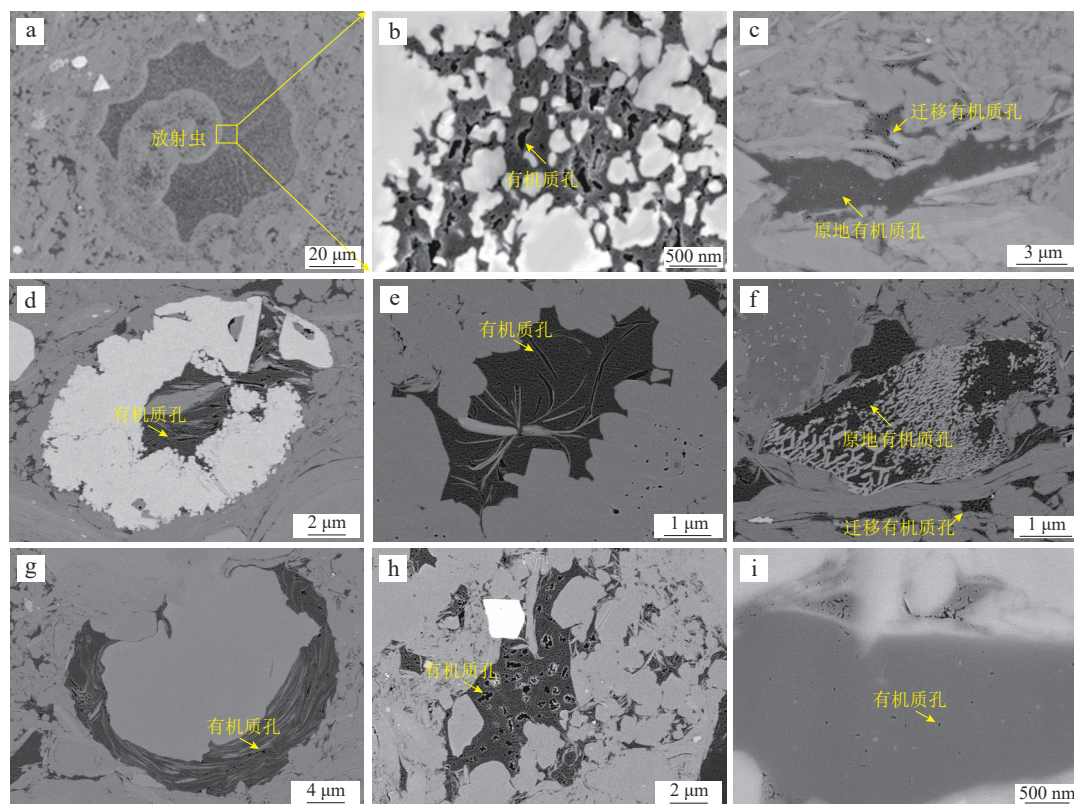


图2 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中具生物结构的有机质孔隙特征扫描电镜照片

Fig. 2 SEM images showing the characteristics of pores in organic matter with biologic structures in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

a. 放射虫呈球形,直径达60~100 μm,内部呈圈层结构,显示有机质与硅质矿物比例的差异,JY1井,埋深2 409.50 m;b. a图中的局部放大,放射虫腔体中具有生物硅支撑的有机质,发育海绵状有机质孔,最大可达500 nm;c. 笔石骨屑呈条带状,其中的有机质孔很小,附近的迁移有机质中的有机质孔则更大、更多,JY1井,埋深2 381.91 m;d. 海绵骨针外形呈椭球状,壳体被黄铁矿交代,壳体裂开,腔体中充填有机质并发育有机质孔,WY23-1井,埋深3 851.26 m;e. 藻类体中心部分残留有藕节状生物结构的黏土矿物,在黏土矿物和有机质边界处发育长条状孔隙,WY23-1井,埋深3 848.53 m;f. 残留生物结构可以确定成烃生物的外形,内部的生物体腔被自生矿物充填,在自生矿物支撑格架下保存原地有机质,发育较多但较小的有机质孔,相邻的迁移有机质孔则更大、更多,WY23-1井,埋深3 851.26 m;g. 球形生物体的直径大于10 μm,外侧腔体中赋存有有机质、黏土矿物和有机质孔,WY23-1井,埋深3 851.26 m;h. 有机质孔隙发育不均匀,指示具有一定的生物结构,WY23-1井,埋深3 832.91 m;i. 不明骨屑,外形具有生物特征,内部有机质孔少而小,JY1井,埋深2 411.05 m

较大,有的沥青长度可达3~5 μm,其中发育的有机质孔多而大,且越靠近沥青的中心越大,最大孔径可达500 nm。有机质孔彼此之间呈枝状交叉或合并相连,且延伸方向具有一致性,体现了在液态烃流动和沥青塑性流变过程中,页岩气流动引起的有机质孔形态变化(图3a)。当无机矿物粒间孔由硅质、黏土和碳酸盐矿物共同支撑时,矿物格架的稳定性较差但具有较好的封闭性。随着无机矿物变形,迁移有机质也随之形变,由于页岩气的迁移能力比液态烃和沥青更强,在迁移方向前端有机质孔最发育(图3b)。当迁移有机质分布于黏土矿物晶片间时,由于黏土矿物具有很强的塑性和封闭性,使得发育的有机质孔个体较大并呈扁平状,这一现象表明黏土矿物格架抵御压实作用的能力较差(图3c)。当迁移有机质位于黄铁矿晶间孔时,

黄铁矿具有较强的抗压实能力,晶间孔的连通性较好,页岩气向外迁移引起有机质孔的球度降低(图3d);同一个岩样内部较小的视域范围内,在硅质矿物晶粒集中的条件下,硅质格架支撑的单个有机质大、有机质孔大,当硅质格架内混有少量黏土矿物时,硅质和黏土矿物共生的格架下单体有机质较小、有机质孔较少(图3e);当硅质和黏土矿物在一侧伴生的条件下,向硅质矿物一侧的有机质体积更大且长/宽比值更小,其中的有机质孔更大更多,而向黏土矿物一侧,赋存的单体有机质较小、形态狭长,其中的有机质孔较少(图3f)。

2.3 有机质和无机矿物共同支撑的孔隙

有机质和无机矿物能各自单独支撑孔隙,在特定的条件下也可以共同支撑孔隙^[42-43]。矿物和有机质之

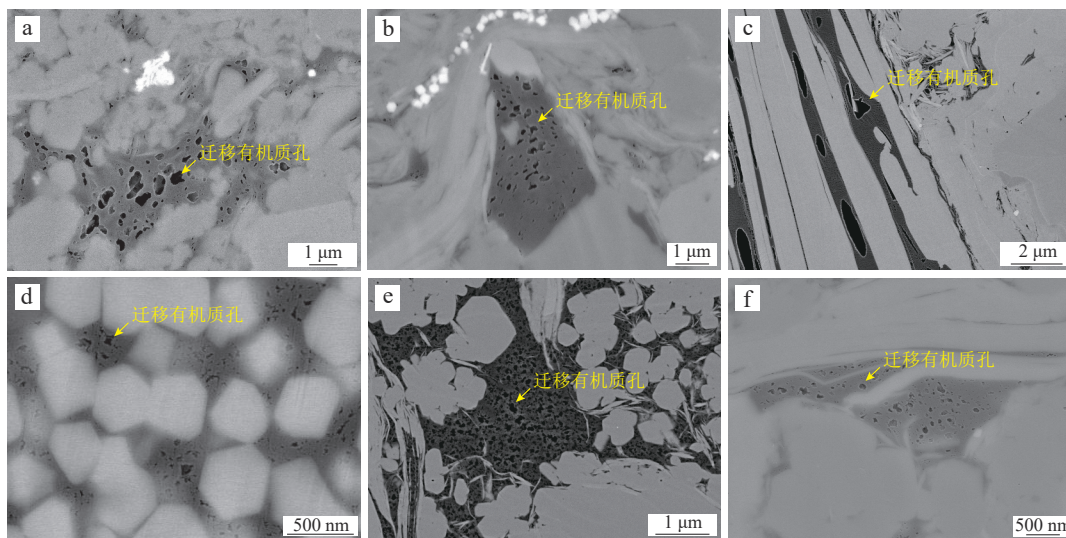


图3 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中没有生物结构的沥青有机质孔隙特征扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images showing the characteristics of organic pores in asphalt without biologic structures in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

a. 在稳定支撑、封闭性好的硅质粒间孔和晶间孔中保存的沥青体积大,迁移有机质孔多而大,越向中心越发育,最大孔径达500 nm,较大的孔隙与其他孔隙交叉、合并和相连,JY1井,埋深2 402.55 m;b. 在非稳定的、封闭性好的复合粒间孔中,随着无机矿物变形,有机质迁移变形,在迁移方向前端有机质孔更发育,JY1井,埋深2 391.95 m;c. 黏土矿物晶片间的迁移有机质和有机质孔,孔径较大指示保存条件好,形态扁平指示黏土矿物的抗压实作用较弱,WY23-1井,埋深3 825.92 m;d. 黄铁矿晶粒间的有机质和有机质孔较多,但孔径较小且球度较差,JY1井,埋深2 411.05 m;e. 在硅质格架下的有机质孔更发育,在硅质和黏土矿物共生的格架下有机质孔更小,YY1井,埋深3 865.32 m;f. 在硅质和黏土矿物伴生条件下,向硅质一侧的有机质体积更大,长/宽比值更小,有机质孔更大更多,JY1井,埋深2 381.91 m

间存在力学薄弱面,常由于应力作用、收缩或膨胀率不同在二者边界处形成边缘孔或缝(图4a)。沉积期,黏土矿物常与成烃生物组成复合体,在局部有机质占主体而黏土矿物较少;成油期,液态烃与黏土矿物薄片一起具有一定的塑性和流动性,黏土矿物薄片的存在有利于有机质的保存;成气期,在黏土矿物晶片的阻隔下,页岩气在黏土矿物晶片与有机质之间富集并引起二者的拆离,形成较大的扁长状有机质孔,黏土矿物晶片的存在有利于形成和保存较大的复合孔隙(图4b)。有的成烃生物复合体经成岩作用转化为有机质和矿物晶粒集合体,在有机质塑性流动过程中,无机矿物颗粒发生旋转,在其周边形成帚状分布的有机质拆离孔(图4c)。当有机质包裹长条形无机矿物晶粒时,生成的页岩气在有机质和无机矿物之间膨胀并形成孔隙,孔隙在无机矿物一侧因刚性支撑而呈平直状,而在有机质一侧由于有机质的塑性而呈圆弧形(图4d)。当集合体内的有机质与矿物晶粒含量相近时,在有矿物晶粒支撑的地方形成多而大的复合孔隙,而在个体较大的有机质内部由于缺乏矿物的联合支撑作用而发育较小的有机质孔隙(图4e)。矿物和有机质集合体有时会有2种以上的自生矿物,如片状黏土矿物和矿物晶粒与有机质的集合体,黏土矿物晶片将矿物晶粒和

有机质分隔成层状集合体,在总体的层状格架内发育矿物晶粒与有机质共同支撑的复合孔隙(图4f)。

3 孔隙分类方案

按照支撑孔隙的固体载体类型,可将孔隙类型分为无机矿物孔、有机质孔和有机质-无机矿物复合孔等3大类(表1)。

无机矿物孔与常规油气储层类似,可借鉴常规油气储层孔隙的分类。根据无机矿物的形成阶段(沉积期和成岩期),可将无机矿物孔进一步分为颗粒相关孔隙和晶粒相关孔隙。颗粒指在沉积过程中就存在的岩石颗粒或者矿物集合体,按照无机孔隙与颗粒的空间关系,可分为粒间孔和粒内孔,并结合颗粒类型进行无机矿物孔命名,如黏土矿物粒间孔和碳酸盐矿物粒内孔等。晶粒主要为成岩作用成因,与之相关的孔隙为晶间孔,并可通过晶体成分进行命名,如黏土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔等。

有机质孔是页岩气储层中不同于常规储层的孔隙类型,指的是支撑孔隙的载体完全为固态有机质的一类孔隙^[44]。页岩中的有机质又分为原地有机质和迁移有机质2个亚类。原地有机质是指位于原始成烃生

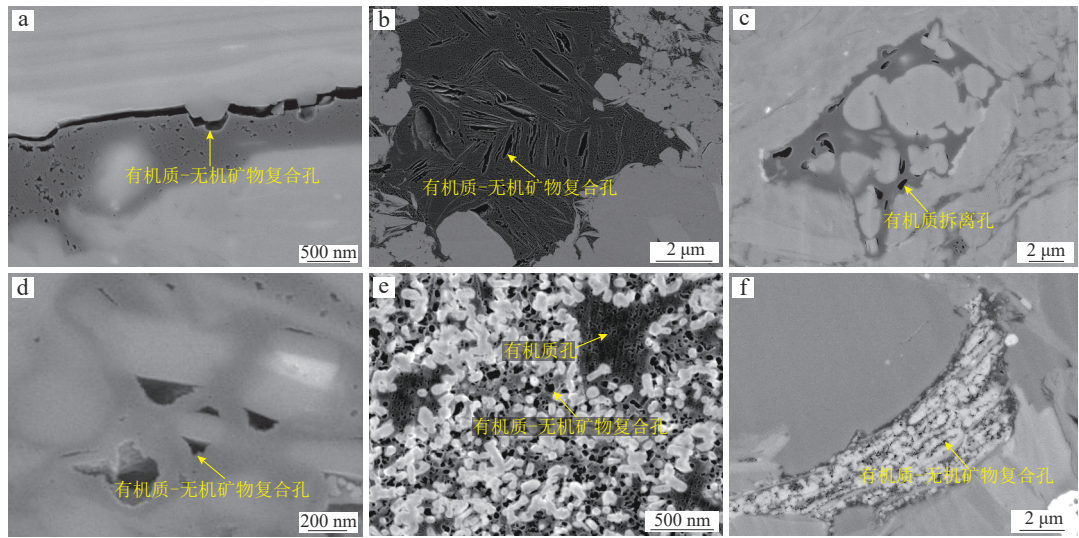


图4 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中无机矿物和有机质共同支撑的孔隙特征扫描电镜照片

Fig. 4 SEM images showing the characteristics of pores jointly propped by inorganic minerals and organic matter in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

a. 在有机质和无机矿物的边缘,由于有机质生烃收缩或应力作用形成的孔或缝,JY1井,埋深2 381.91 m;b. 黏土矿物与有机质复合体,有机质占主体,黏土矿物较少呈薄片状,沉积期为成烃生物与黏土复合体,成油期液态烃与黏土矿物一起具有一定的塑性流动性,成气期在黏土矿物晶片的阻隔下,页岩气在黏土矿物晶片与有机质之间富集并引起二者的拆离,形成较大的、扁长形的有机质孔,WY23-1井,埋深3 827.58 m;c. 成烃生物复合体,在应力作用下,无机矿物颗粒随有机质塑性流动而发生旋转,在其周边形成帚状分布的有机质拆离孔,JY1井,埋深2 397.13 m;d. 有机质包裹无机矿物,由于页岩气的膨胀作用在有机质和无机矿物间形成孔隙,孔隙在无机矿物一侧平直而向有机质一侧呈圆弧形,JY1井,埋深2 381.91 m;e. 有机质与矿物晶粒集合体,在有矿物晶粒支撑的地方复合孔隙较大,个体较大的有机质内部孔隙反而较小,WY23井,埋深3 815.85 m;f. 自生矿物形成过程被黏土矿物晶片所分隔,在黏土矿物构成的总体层状格架内发育矿物晶粒与有机质共同支撑的复合孔隙,JY1井,埋深2 376.05 m

表1 海相页岩孔隙类型及主要特征

Table 1 Pore types and their primary characteristics in marine shales

大类	亚类	支撑载体类型	孔隙成因	形成期	充填物	形状	孔径/nm	数量	有效性
无机矿物孔	粒间孔	各类矿物颗粒	沉积作用	沉积期	沥青	不规则	500~5 000	多	好
	粒内孔	碳酸盐、长石等颗粒	溶蚀作用	生油窗	无、矿物或沥青	椭圆形	20~2 000	少	差
	晶间孔	生物石英晶粒	成岩作用	生油窗	沥青	不规则	300~1 000	多	好
		黏土矿物晶片	成岩作用	生油窗	沥青	板状、多边形	500~30 000	较多	较好
			成岩作用	生气窗	页岩气	不规则	500~2 000	较少	较好
		黄铁矿晶粒	成岩作用	生油窗	沥青	椭圆形	50~500	较少	较好
有机质孔	原地有机质孔	放射虫	生烃作用	生油气窗	页岩气	圆形	30~500	多	好
		海绵骨针	生烃作用	生油气窗	页岩气	椭圆形	20~100	少	较好
		笔石	生烃作用	生油气窗	页岩气	不规则	20~100	较少	较差
		不明骨屑	生烃作用	生油气窗	页岩气	不规则	30~100	少	差
	迁移有机质孔	沥青	生烃作用	生气窗	页岩气	圆形、椭圆形	50~700	多	好
有机质-无机矿物复合孔	有机质-矿物边界		生烃作用	生油气窗	页岩气	长板状	100~50 000	较少	较好
	片状黏土矿物-有机质复合体		生烃+成岩作用	生油气窗-生气窗	页岩气	扁状、不规则	50~800	较多	较好
	粒状矿物-有机质复合体		生烃+成岩作用	生气窗	页岩气	椭圆形、半椭圆形	50~1 000	较多	较好

物体内部的有机质,在经历了一定的生油和生气演化过程之后,继承了部分成烃生物体作为有机质孔的固

体支撑载体,其中发育的有机质孔隙称原地有机质孔隙,进一步以成烃生物的种类进行细分,如笔石有机质

孔。迁移有机质是指经成油作用形成的液态烃经过微米尺度运移,从成烃生物体排出进入无机矿物孔隙被保存下来,在成气期进一步演化为固体沥青,由其支撑的有机质孔称迁移有机质孔,是最常见的有机质孔类型。

有机质-无机矿物复合孔是指支撑孔隙的固体载体为有机质和无机矿物共同组成的孔隙,常见有3种支撑载体类型。①有机质-矿物边界支撑,主要由有机质生烃收缩形成,常以有机质外部边缘缝的形式存在;②片状黏土矿物与有机质复合体支撑,片状黏土矿物-有机质集合体在页岩中较为常见,因为在沉积过程中部分黏土矿物吸附有机质,液态烃在微运移过程中也常与塑性的黏土矿物一起进入无机矿物孔隙中形成复合体,在进一步的成岩和成烃演化中形成此类支撑复合孔;③粒状矿物与有机质复合体支撑,其中常见的粒状矿物有硅质矿物、黄铁矿和磷灰石等,一般与成烃生物或生烃作用相关,当粒状矿物含量不足以独立形成稳定的无机矿物支撑结构,在成岩作用与生烃作用的共同作用下,与有机质共同支撑形成此类复合孔隙。

孔隙命名的总体原则是支撑载体类型+孔隙部位+孔隙成因。例如,在碳酸盐颗粒内、由溶蚀形成的无机矿物孔命名为“碳酸盐颗粒内溶蚀孔”;在黏土矿物晶片间、由成岩作用形成的无机矿物孔隙命名为“黏土矿物晶片间孔”;在笔石内部、由生烃作用形成的有机质孔命名为“笔石原地有机质孔”。

4 讨论

4.1 支撑载体类型特征

在四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中,沉积成因形成的最大无机颗粒粒径均小于 $62\text{ }\mu\text{m}$,属于典型的细粒沉积物^[45-47]。然而,大量生物生活于水体表层,其死亡之后沉降于深水细粒沉积物中并保存下来。在此过程中,生物遗骸的尺寸并不总是受沉积水动力条件限制,生物体颗粒粒径可以大于 $62\text{ }\mu\text{m}$ 。笔石常见于岩心和露头等宏观尺度,最大长度可超过 10 cm ,但在页岩中不是以实体而是以印模的形式存在,因此在显微镜下只能见到很小的薄膜碎片,占岩石总体积的比例较少。显微镜下见到的大量放射虫在优质页岩段的富集程度甚至可达 50% ,呈直径 $60\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 的球形,在其内部可见生物硅和大量含有机质孔的沥青。由于放射虫个体大、含量高,支撑作用强且源-储一体,形成的无机矿物格架最有利于保存有机质和发育

有机质孔。海绵骨针个体较大,其内部体腔孔常通过黄铁矿化或硅化作用形成支撑结构,体腔孔充填沥青并发育部分有机质孔,但其占岩石体积较少;藻类体是主要的成烃生物,由于其有效的生烃能力导致原始生物损耗而占岩石的体积和质量较少。因此,笔石、海绵骨针和藻类体等对有机质孔的贡献明显不及放射虫(图5;表2)。

充填无机矿物孔隙的单个沥青体积并不大,其最大长度在 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,但最大的有机质孔直径约 500 nm ,并且沥青可以占岩石体积的 $5\%\sim 15\%$,足以发育大量的有机质孔。五峰组-龙马溪组中的有机质孔主要由沥青支撑(图5;表2)。

碳酸盐矿物颗粒和碎屑石英颗粒的粒径均可达 $10\text{ }\mu\text{m}$ 级,在页岩中的体积占比分别可达 15% 和 20% ,但这2类颗粒的高含量一般都对应于低总有机质含量(TOC)。因此,这2类颗粒与有机质的宏观源-储配置条件较差,其支撑格架赋存有机质的能力受到限制(图5;表2)。

生物硅、黏土矿物和黄铁矿经常以集合体形式存在,而集合体通常比单个晶体支撑更大的无机孔隙,赋存更多的有机质和有机质孔。此外,集合体内部单个晶体之间还存在晶间孔隙,赋存较少的有机质和有机质孔。生物硅、黏土矿物和黄铁矿在与有机质的成因联系和空间配置关系方面存在差异,与之相关的无机矿物孔在赋存有机质和发育有机质孔的能力和特征方面也不同。①生物硅与有机质存在沉积共生成因和就近配置关系,单个生物硅晶粒呈椭球形,而生物硅集合体呈葡萄串状,含量高、体积大,且定向性不明显,在

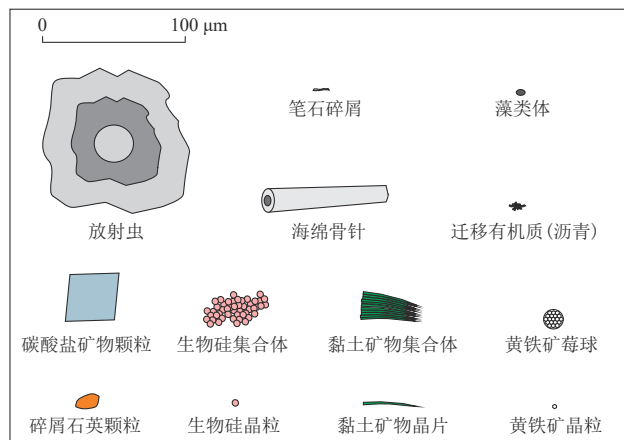


图5 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中有机组分和无机组分特征示意图

Fig. 5 Schematic diagrams showing the organic and inorganic components in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

表2 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中有机组分和无机组分参数特征

Table 2 Parameters characterizing organic and inorganic components in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

孔隙支撑载体		形态	长度/ μm	宽度/ μm	占岩石体积比/%
生物碎屑	放射虫	球形	60.0 ~ 100.0	60.0 ~ 100.0	10 ~ 50
	笔石	长条形	10.0	1.0	1 ~ 5
	海绵骨针	圆柱形	70.0	5.0	1 ~ 3
	藻类体	椭球形	5.0	3.0	1 ~ 5
迁移有机质	沥青	不规则	5.0 ~ 10.0	1.0 ~ 3.0	5 ~ 15
颗粒	碳酸盐矿物颗粒	菱形	10.0 ~ 40.0	10.0 ~ 40.0	5 ~ 15
	碎屑石英颗粒	椭球	10.0 ~ 20.0	3.0 ~ 10.0	0 ~ 20
晶粒及其集合体	生物硅集合体	葡萄状	20.0 ~ 50.0	10.0 ~ 30.0	20 ~ 40
	生物硅晶粒	椭球形	0.3 ~ 1.0	0.2 ~ 0.8	
	黏土矿物集合体	集束状	30.0 ~ 50.0	3.0 ~ 10.0	10 ~ 30
	黏土矿物晶片	板片形	10.0 ~ 50.0	0.1 ~ 0.3	
	黄铁矿集合体	草莓状	5.0 ~ 7.0	5.0 ~ 7.0	0 ~ 5
	黄铁矿晶粒	六面体状	0.2 ~ 0.3	0.2 ~ 0.3	

各个方向上均具有很强的支撑作用,其支撑格架是赋存迁移有机质和发育有机质孔的主体结构(图5;表2)。^②黏土矿物与有机质没有成因联系,而TOC与黏土矿物含量呈负相关关系,在优质页岩段黏土矿物含量明显低于生物硅含量^[48]。单个黏土矿物晶片呈板状或片状,晶片之间少见有机质;黏土矿物集合体呈集束状,其长/宽比值明显大于生物硅集合体。由于黏土矿物具有塑性强、晶片容易聚合等原因,黏土矿物集合体和晶片的支撑作用均较弱,因此,黏土矿物支撑结构不利于有机质赋存和有机质孔发育(图5;表2)。^③黄铁矿与有机质具有一定的成因联系和就近配置关系。黄铁矿集合体呈草莓球状,对无机粒间孔具有较强的支撑作用;单个黄铁矿晶粒呈六面体状,晶粒间发育晶间孔,可以赋存有机质和有机质孔。然而,由于黄铁矿含量很低,且黄铁矿晶粒明显小于生物硅晶粒,晶间充填的有机质较少,有机质孔也偏小,因此其支撑结构对赋存有机质和发育有机质孔的意义相对有限(图5;表2)。

4.2 孔隙类型的形成与演化

从演化角度来看,页岩储层与常规储层存在很大区别。常规储层以成岩作用主导的无机孔演化为主,而页岩储层中既存在成岩作用又存在生烃作用,成岩作用主导无机孔演化,生烃作用主导有机质相态演化和有机质孔形成演化,且成岩作用、成油作用和成气作用具有复杂的关系,主要体现在形成时间序列、物质间的化学反应和物理作用以及空间位置迁移和配置关系等^[49-50]。

综合考虑成岩作用和生烃作用,聚焦页岩储层孔隙演化,本文将页岩的成岩演化阶段划分为沉积-早成岩期、成油期和成气期3个阶段。硅质矿物在沉积-早成岩期即形成生物硅与有机质的共生体,并且保留稳固的球形生物体外形,在成岩过程中形态和体积变化不大;在成油期,发生原地有机质和迁移有机质的转化和分离,当时单个生物体内部的无机孔具有很高的孔隙度,液态烃充填于生物硅粒间孔和晶间孔之中;在成气期,生物硅粒间孔和晶间孔中的液态烃转化为沥青和页岩气,由于支撑格架的稳固性和整体结构的封闭性都很好,有机质孔的发育程度和页岩气的富集程度很高(图6)。

黏土矿物和成烃生物之间没有成因联系和就近配置关系。黏土矿物晶片之间一般少见原地有机质,在沉积期,黏土矿物发育大量饱和水的粒间孔和晶片间孔;在早成岩期,由于黏土矿物塑性变形、脱水,导致绝大部分晶间孔丧失,成岩矿物在晶片间沉淀充填黏土矿物晶片间孔,同时也支撑晶片间孔免于完全闭合;成油期,邻近的液态烃迁移进入与外界相连通的黏土矿物晶片间孔之中;成气期,黏土矿物晶片间的液态烃转化为沥青和页岩气,生气作用和黏土矿物的塑性在黏土矿物晶片形成并保持超压微环境,可见较大的、扁球状的有机质孔(图6)。另外,在高-超高演化条件下,黏土矿物常发生针状伊利石化,针状伊利石晶体与原有晶片延伸方向不同,从而支撑形成新的晶间孔,对提高孔隙度和赋存页岩气有一定的作用。

碳酸盐矿物颗粒(晶粒)常具有较活跃的化学性

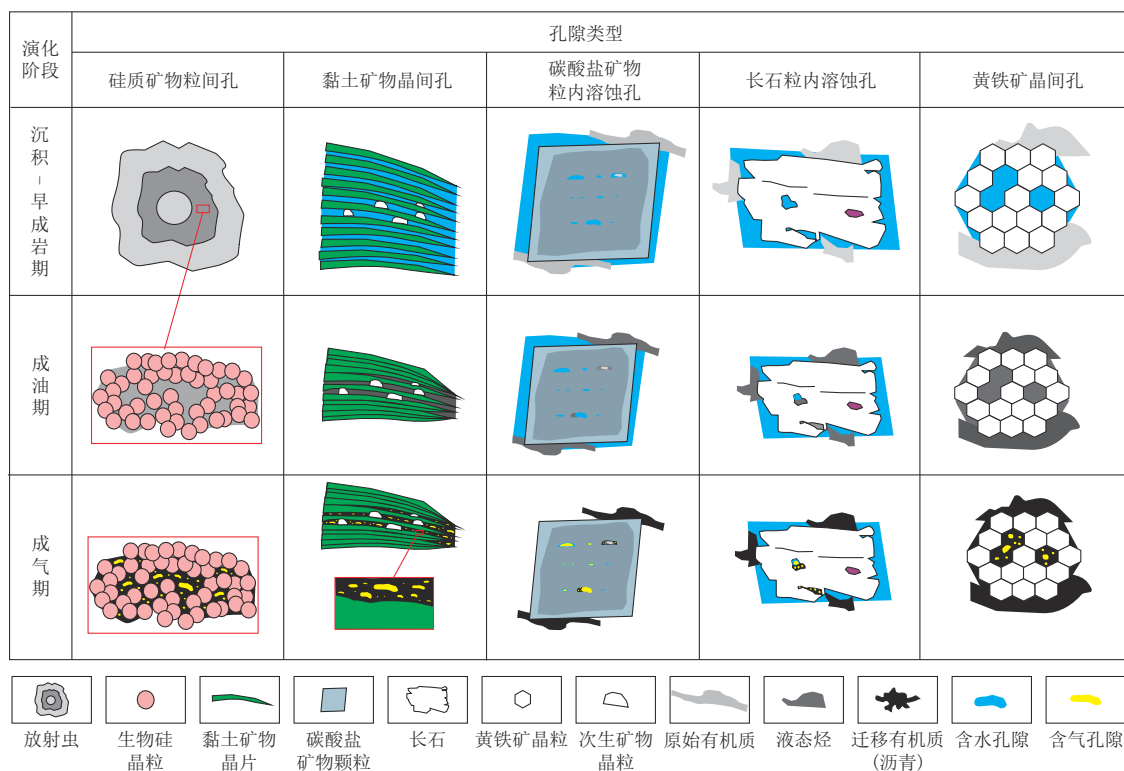


图6 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩中多种无机孔与有机质孔协同演化过程示意图

Fig. 6 Schematic diagrams showing the synergistic evolution processes of multiple types of inorganic and organic pores in shales of the Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin

质。在沉积—早成岩期,颗粒内部常发生溶蚀作用形成粒内孔,随后由于次生矿物胶结作用导致部分粒内孔被次生矿物充填,在颗粒边缘形成致密胶结边,导致粒内孔与外界的连接性变差;成油期,液态烃难以进入大部分粒内孔,仅能进入少量与外界连接性较好的粒内孔;成气期,少量粒内孔中的液态烃转化为沥青和有机质孔,由于天然气的运移能力强于石油,部分未被液态烃充填的粒内孔也有可能对页岩气赋存有一定的意义。长石矿物颗粒的演化过程与碳酸盐矿物颗粒具有相似性,不同点是其颗粒周缘的胶结致密化作用较弱、粒内解理缝更常见,因此长石粒内孔常被液态烃充填,但由于长石在页岩中的含量很低,储集能力有限(图6)。

黄铁矿大多在早成岩期形成,其分布特征与原始有机质具有明显的空间伴生关系。成油期,液态烃侵入黄铁矿粒间孔和晶间孔;成气期,黄铁矿粒间孔和晶间孔中的液态烃转化为沥青和页岩气。黄铁矿与生物硅在支撑结构稳定性和孔隙演化过程方面具有一定的相似性,但其在含量、与有机质的成因联系、有机质赋存和有机质孔发育等方面都明显弱于生物硅(图6)。

在页岩中,成岩作用和生烃作用在微纳米尺度的微小空间内同时发生并相互作用,导致无机孔和有机

质孔在演化过程中相互作用和转化。沉积期,成烃生物被以无机矿物为主的沉积物埋藏并保存下来,成为沉积物的重要组成物质。早成岩期,无机矿物之间发育大量的原生无机孔,成烃生物经表层微生物降解后的残余部分以原始有机质形式被保存下来。由于压实作用、黏土矿物脱水、生物蛋白石硅化(转化为生物硅)、黄铁矿沉淀以及碳酸盐矿物胶结等作用导致无机孔大量减少,是主要的减孔阶段,此时基本不发育有机质孔。随后的生烃作用是页岩演化的关键阶段,主要表现为无机孔与液态烃之间的空间转化及有机质孔的形成。成气期可分为成油期和成气期2个重要阶段。成油期,原始有机质生油导致体积收缩并形成原地有机质孔。成烃生物的生油能力越强,其保存外形和原有体积的能力越弱,从而难以发育大量有机质孔;生油能力弱的成烃生物虽具有较强的保持原有外形和体积的能力,但由于生烃能力差、生烃亏损小,导致内部有机质孔孔径很小,故海相页岩中的原地有机质孔难以成为孔隙的主体。

与此同时,大量液态烃脱离成烃生物母体成为迁移液态烃,并在经历微纳米尺度的短距离迁移之后进入无机孔,从而成为迁移有机质。在成油期,页岩储层与常规石油储层存在显著差异:由于页岩的成油作用

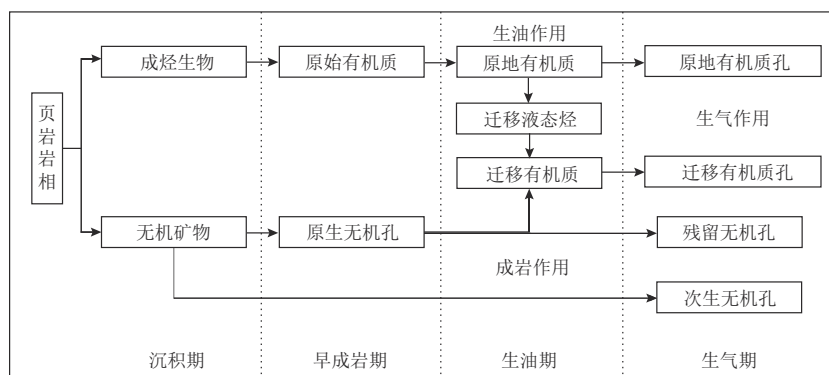


图7 海相页岩气储层生烃-成岩作用和孔隙演化过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing hydrocarbon-generation and diagenetic processes and corresponding pore evolution in marine shale gas reservoirs

发生在本体内部,加上页岩本身的强塑性,液态烃充填无机矿物孔隙效率极高,生油能力强的页岩中颗粒间的孔隙几乎被完全充满,而常规储层中液态烃为外部运移,充注具有很强的选择性,总体分布不均匀(形成油层、干层和水层),而对于页岩来说,无论页岩油还是页岩气,总体含水较低。在成气期,大量的迁移液态烃经裂解形成固态迁移有机质,发育大量迁移有机质孔并富集页岩气;原地有机质也经历生气作用,发育原地有机质孔,但总体发育程度不及迁移有机质孔。此时,由于原地有机质和迁移有机质共同存在于相对稳固的无机矿物骨架内,有机质孔和所含的页岩气得以保存下来(图7)。在先成油、后成气的演化过程中,早期的成油作用使页岩内部抵御压实作用的能力增强,在增加页岩内压的同时赋存了大量的液态烃,使得在成气期既具有很强的生气能力,还因大量有机质孔的形成而具有很强的储气能力,形成良好的源-储时-空配置关系。

5 结论

1) 支撑单个孔隙的固体载体种类控制着孔隙的类型和主要特征,有的孔隙被无机矿物支撑,有的孔隙被有机质支撑,还有的孔隙由无机矿物和有机质共同支撑。据此建立了“支撑载体类型+孔隙部位+孔隙成因”的海相页岩储层孔隙分类方案和命名原则。

2) 有机质孔是赋存页岩气的主要孔隙类型。硅质放射虫个体大、数量多,生物体内硅质矿物和有机质共存,有利于赋存沥青和发育有机质孔;其他生物体受限于尺寸、含量和物理-化学性质等,重要性远不及硅质放射虫。

3) 对于页岩气储层,无机孔主要通过赋存有机质而发挥间接的储集作用。无机矿物的尺寸和数量控制

无机孔的尺寸和数量,相应地控制赋存有机质的能力。生物硅质实现了无机矿物晶间孔与有机质的最佳配置,最有利于赋存有机质和发育有机质孔。碳酸盐矿物含量低,粒内溶孔赋存有机质能力较差,以残余少量较大的粒内溶孔为主;黏土矿物含量较多且颗粒较大,与有机质的配置关系差,残余少量粒间孔,超压条件下晶片间赋存少量发育扁平有机质孔的有机质。

4) 页岩的孔隙演化受沉积、成岩、成油和成气作用及彼此间相互作用的影响。在沉积-早成岩期,孔隙以黏土矿物粒间、晶间孔隙等无机孔为主,以含水为主;成油期,无机孔大量丧失但仍是主要的孔隙类型,部分成烃生物由于生油作用导致体积损耗形成少量原地有机质孔,孔隙主要含油和少量水;成气期,充填于无机孔中的原油转化为沥青,沥青支撑的有机质孔成为孔隙主体,以含气为主。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] MILLIKEN K L, ESCH W L, REED R M, et al. Grain assemblages and strong diagenetic overprinting in siliceous mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8): 1553-1578.
- [3] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):

- 561-574.
- [4] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
- ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [5] 邹才能, 杨智, 董大忠, 等. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1517-1533.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, DONG Dazhong, et al. Formation, distribution and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1517-1533.
- [6] 邹才能, 董大忠, 熊伟, 等. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 309-326.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, XIONG Wei, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 309-326.
- [7] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
- GUO Xusheng, LI Yuping, LIU Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9-16.
- [8] SHI Miao, YU Bingsong, ZHANG Jinchuan, et al. Microstructural characterization of pores in marine shales of the Lower Silurian Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 94: 166-178.
- [9] GAO Zhiye, HU Qinhong. Pore structure and spontaneous imbibition characteristics of marine and continental shales in China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(10): 1941-1961.
- [10] 郭旭升, 腾格尔, 魏祥峰, 等. 四川盆地深层海相页岩气赋存机理与勘探潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(4): 453-468.
- GUO Xusheng, BORJIGIN Tenger, WEI Xiangfeng, et al. Occurrence mechanism and exploration potential of deep marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(4): 453-468.
- [11] 边瑞康, 孙川翔, 聂海宽, 等. 四川盆地东南部五峰组-龙马溪组深层页岩气藏类型、特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1515-1529.
- BIAN Ruikang, SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, et al. Types, characteristics, and exploration targets of deep shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1515-1529.
- [12] 刘洪林, 王怀厂, 李晓波. 泸州地区五峰组-龙马溪组页岩气成藏特征[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(1): 19-26.
- LIU Honglin, WANG Huaichang, LI Xiaobo. Shale gas accumulation characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Luzhou area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(1): 19-26.
- [13] 肖斌, 郭东旭, 冯明飞, 等. 渝东北五峰组-龙马溪组黑色页岩有机质富集主控因素[J]. 断块油气田, 2024, 31(1): 18-25, 49.
- XIAO Bin, GUO Dongxu, FENG Mingfei, et al. Main controlling factors for organic matter enrichment in black shale of Wufeng-Longmaxi Formation in northeast Chongqing[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(1): 18-25, 49.
- [14] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [15] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Preliminary classification of matrix pores in mudrocks[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 2010, 60: 435-441.
- [16] LOUCKS R G, RUPPEL S, REED R M, et al. Origin and classification of pores in mudstones from shale-gas systems[C]// AAPG International Conference and Exhibition, Milan, Italy, October 23-26, 2011. Tulsa: AAPG, 2011: 40855.
- [17] 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.
- [18] SLATT R M, O'BRIEN N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [19] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 中国海相页岩气主要特征及勘探开发主体理论与技术[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 1-13.
- ZOU Caineng, ZHAO Qun, WANG Hongyan, et al. The main characteristics of marine shale gas and the theory & technology of exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 1-13.
- [20] 于炳松. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 211-220.
- YU Bingsong. Classification and characterization of gas shale pore system[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 211-220.
- [21] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
- WANG Yuman, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561.
- [22] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.

- GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan basin and its surrounding area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1209–1218.
- [23] 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 1001–1008.
- HU Zongquan, DU Wei, PENG Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale—A case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in southeast Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 1001–1008.
- [24] 陈尚斌, 秦勇, 王阳, 等. 中上扬子区海相页岩气储层孔隙结构非均质性特征[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(8): 1455–1463.
- CHEN Shangbin, QIN Yong, WANG Yang, et al. Pore structure and heterogeneity of marine shales in the Middle-Upper Yangtze [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(8): 1455–1463.
- [25] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [26] CURTIS M E, AMBROSE R J, SONDERGELD C H, et al. Investigation of the relationship between organic porosity and thermal maturity in the Marcellus shale [C]//North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, the Woodlands, 2011. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-144370-MS.
- [27] MONTGOMERY S L, JARVIE D M, BOWKER K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(2): 155–175.
- [28] SONG Liaosha, CARR T R. The pore structural evolution of the Marcellus and Mahantango shales, Appalachian Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104226.
- [29] WANG Guochang, CARR T R. Methodology of organic-rich shale lithofacies identification and prediction: A case study from Marcellus Shale in the Appalachian basin [J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 49: 151–163.
- [30] WANG Guochang, TIMOTHY R C. Organic-rich Marcellus Shale lithofacies modeling and distribution pattern analysis in the Appalachian Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(12): 2173–2205.
- [31] HU Zongquan, DU Wei, SUN Chuanxiang, et al. Evolution and migration of shale facies and their control on shale gas: A case study from the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its surroundings [J]. *Interpretation*, 2018, 6(4): SN57–SN70.
- [32] 赵仁文, 肖佃师, 卢双舫, 等. 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[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(1): 52–63, 99.
- ZHAO Renwen, XIAO Dianshi, LU Shuangfang, et al. 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 [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(1): 52–63, 99.
- [33] 杜伟, 胡宗全, 刘光祥, 等. 四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 398–404.
- DU Wei, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Lithofacies of upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(3): 398–404.
- [34] 胡宗全, 杜伟, 朱彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1024–1038.
- HU Zongquan, DU Wei, ZHU Tong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and on its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1024–1038.
- [35] HAO Fang, ZOU Huayao, LU Yongchao. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(8): 1325–1346.
- [36] KO L T, ZHANG Tongwei, LOUCKS R G, et al. Boquillas (Eagle Ford) Formation pore evolution results from laboratory heating experiments [C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Denver, 2014. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2014: URTEC-1935124-MS.
- [37] MATHIA E J, BOWEN L, THOMAS K M, et al. Evolution of porosity and pore types in organic-rich, calcareous, Lower Toarcian Posidonia Shale [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 75: 117–139.
- [38] MILLIKEN K L, RUDNICKI M, AWWILLER D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 177–200.
- [39] 韩双彪, 张金川, HORSFIELD B, 等. 页岩气储层孔隙类型及特征研究: 以渝东南下古生界为例[J]. *地学前缘*, 2013, 20(3): 247–253.
- HAN Shuangbiao, ZHANG Jinchuan, HORSFIELD B, et al. Pore types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 247–253.
- [40] BERNARD S, WIRTH R, SCHREIBER A, et al. Formation of nanoporous pyrobitumen residues during maturation of the Barnett Shale (Fort Worth Basin) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 3–11.
- [41] REED R M, LOUCKS R G, KO L T. Scanning electron microscope petrographic differentiation among different types of

- pores associated with organic matter in mudrocks [J]. *GCAAS Journal*, 2020, 9: 17–27.
- [42] 王红岩, 施振生, 孙莎莎. 四川盆地及周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩生物地层及其储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 879–890.
- WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha. Biostratigraphy and reservoir characteristics of the Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shale in the Sichuan Basin and surrounding areas, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 879–890.
- [43] 施振生, 王红岩, 赵圣贤, 等. 川南地区上奥陶统一志留统五峰组—龙马溪组快速海进页岩特征及有机质分布[J]. *古地理学报*, 2023, 25(4): 788–805.
- SHI Zhensheng, WANG Hongyan, ZHAO Shengxian, et al. Rapid transgressive shale characteristics and organic matter distribution of the Upper Ordovician–Lower Silurian Wufeng-Longmaxi formations in southern Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(4): 788–805.
- [44] 吴靖, 胡宗全, 谢俊, 等. 四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组页岩有机质宏观赋存机制[J]. *天然气工业*, 2018, 38(8): 23–32.
- WU Jing, HU Zongquan, XIE Jun, et al. Macro-micro occurrence mechanism of organic matters in Wufeng-Longmaxi shale in the Sichuan Basin and its peripheral areas [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(8): 23–32.
- [45] 卢龙飞, 秦建中, 申宝剑, 等. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组硅质页岩的生物成因证据及其与页岩气富集的关系[J]. *地学前缘*, 2018, 25(4): 226–236.
- LU Longfei, QIN Jianzhong, SHEN Baojian, et al. The origin of biogenic silica in siliceous shale from Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region and its relationship with shale gas enrichment [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 226–236.
- [46] 王超, 张柏桥, 舒志国, 等. 四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组海相页岩岩相类型及储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 485–497.
- WANG Chao, ZHANG Boqiao, SHU Zhiguo, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 485–497.
- [47] 单玄龙, 邢健, 苏思远, 等. 川南长宁地区下古生界五峰组—龙马溪组一段页岩岩相与含气性特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(5): 1323–1337.
- SHAN Xuanlong, XING Jian, SU Siyuan, et al. Shale lithofacies and gas-bearing characteristics of the lower Paleozoic Wufeng Formation-Member 1 of Longmaxi Formation in Changning area, southern Sichuan [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(5): 1323–1337.
- [48] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统一志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 353–364.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 353–364.
- [49] 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.
- [50] 郑和荣, 高波, 彭勇民, 等. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向[J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 645–656.
- ZHENG Herong, GAO Bo, PENG Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2013, 15(5): 645–656.

(编辑 张玉银)