

压实对页岩有机质孔隙发育控制作用

——以四川盆地东南地区及周缘下古生界为例

陈前¹, 闫相宾¹, 刘超英¹, 魏晓亮², 程喆¹, 秦伟军¹, 洪太元¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257022)

摘要: 有机质孔隙是页岩储层中的重要储集空间, 目前相关研究主要集中在孔隙的成因与描述上, 而对地质条件下有机质孔隙所经历的次生压实改造关注较少。基于扫描电镜、孔隙定量统计和气体吸附技术, 对川东南地区及周缘下古生界黑色页岩有机质孔隙的压实改造特点开展了研究。结果显示, 有机质孔隙的变形与定向性排列为常见现象, 其特征与有机质的赋存状态有关。顺层有机质中孔隙被压实破坏的现象最为普遍, 充填有机质中的孔隙则局部被挤压发生形变, 矿物集合体有机质孔隙的形变则主要与粘土矿物有关。除有机质赋存状态外, 有机质孔隙被压实破坏的影响作用还受控于微观矿物格架的保护、由有机质含量所决定的岩石塑性以及有机质孔隙本身的大小。

关键词: 赋存状态; 挤压形变; 矿物格架; 压实作用; 有机质孔隙; 页岩; 下古生界; 川东南地区

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Controlling effect of compaction upon organic matter pore development in shale: A case study on the Lower Paleozoic in southeastern Sichuan Basin and its periphery

Chen Qian¹, Yan Xiangbin¹, Liu Chaoying¹, Wei Xiaoliang², Cheng Zhe¹, Qin Weijun¹, Hong Taiyuan¹

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257022, China)

Abstract: Pores in organic matter are important storage space for gas or oil in shale. Present researches are focused more on the genesis and description of the pores and less on the secondary compaction that also plays a role in the modification of the pores under diverse geological conditions. This paper studies the modification of the pores under compaction with samples from the Lower Paleozoic black shale of southeastern Sichuan Basin and its periphery being observed with scanning electron microscopy (SEM) and analyzed with quantitative pore statistics and gas adsorption techniques. The results show that the deformation and orientation arrangement of pores commonly seen in the organic matter samples can be related to the actual occurrence of the organic matter; the pores are generally destroyed under compaction when in organic matter along beddings, or squeezed to deform locally when in organic matter serving as fillings in shale or just deformed by clay minerals when in organic matter-mineral aggregates. In addition to the occurrence, the pores are also affected by microscopic mineral framework, rock plasticity determined by organic matter content, and their own size.

Key words: occurrence, compaction and deformation, mineral framework, compaction, organic pore, shale, the Lower Paleozoic, southeastern Sichuan Basin

页岩气是一种新型非常规天然气资源, 近十年来中国在页岩气领域取得了勘探突破与快速发展, 已经在四川盆地等地区形成商业开发。目前, 中国页岩气的储、产量主要来源于埋深小于 3 500 m 的富有机质页岩的贡献, 仍然有大量赋存在 3 500 m 以深的深层

页岩中的页岩气资源等待进一步被发现与探明^[1-2]。随着页岩气工业的快速推进与勘探开发技术的提升, 深层已经成为现实的页岩气资源接替领域, 也是近几年页岩气领域重点的勘探与攻关对象。已有的勘探与研究结果表明, 在四川盆地川东南-川南等页岩气主

收稿日期: 2020-07-16; 修订日期: 2021-12-28。

第一作者简介: 陈前(1990—), 男, 博士、高级工程师, 石油与天然气地质学。E-mail: chenqian_syky@sinopec.com。

通讯作者简介: 闫相宾(1964—), 男, 博士、教授级高级工程师, 石油与天然气地质学。E-mail: yxb1964_syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技开发部项目(P18097, P18055-1)。

要产区,深层富有机质页岩广泛分布,具有良好的成藏基础,但可采产量偏低限制了大规模勘探开发的开展。因此,深层优质页岩储层的发育机理,特别是作为海相页岩中主要储气空间的有机质孔隙的发育特征,是深层页岩储层研究的关键。

前人的研究成果证实,页岩中有机质孔隙与生烃有密切关系^[3-5]。Curtis 等(2012)^[6]在对不同成熟度的 Barnett 页岩研究中发现,当镜质体反射率(R_o)高于 0.9%时有机质中才发育孔隙。Bernard 等(2012)^[7]认为有机质孔隙主要发育在沥青中,为沥青进一步热解后所形成。Nie 等(2018)^[8]通过对比不同成烃生物中有机质孔隙,揭示了原生生物类型对有机质孔隙的影响。后续大量的研究也证实了页岩中有机质孔隙主要受控于有机质的类型和成熟度^[9-12]。因此,近些年对页岩中有机质孔隙的研究重点普遍集中在有机质原生属性影响下孔隙的差异,而对地质条件下有机质孔隙所经历的次生改造研究相对较少。随着高分辨率扫描电镜的广泛应用,页岩中有机质孔隙的非均质性与特殊形状结构,例如变形与定向性排列,已经成为常见的现象^[13-16],部分学者认为这表明即使在较高的成岩作用阶段,非常致密的页岩中的孔隙仍然可以被机械压实作用改造甚至破坏^[16-19]。例如, Wang 等(2020)^[19]进一步揭示了有机质孔隙在受力

作用下会发生不同程度的形变,并从微观孔隙的尺度,建立了概念性的数学模型以量化表征和预测有机质孔隙在挤压应力下的形变大小。虽然有机质孔隙形变的这一现象已经得到初步认可,然而目前的研究仍然缺乏对形变作用的控制因素与作用机理的探讨。随着中国海相页岩气勘探向更深处进军,更高层次的压实作用对有机质孔隙的影响大小与作用机理,已经成为一个不容忽视的问题。

为了查明经过压实改造的有机质孔隙基本特征与主要控制因素,本文通过分析川东南地区及周缘寒武系、奥陶系黑色页岩有机质孔隙相关资料,依靠扫描电镜、孔隙定量统计和气体吸附等技术,对被压实作用改造变形的有机质孔隙展开研究,从地质角度分类描述有机质孔隙的形变特征,初步探讨有机质孔隙形变的主要控制因素与机理,以期为更深层页岩气储层甜点的发育机理与预测提供借鉴。

1 研究区地质背景

川东南地区位于四川盆地东南部,以华蓥山背斜与川中隆起为界,其周缘包括渝东南、黔北以及湘鄂西等地区^[20]。研究区整体位于扬子板块东南部,北部以秦岭为边界,东部靠近雪峰山隆起,南邻黔中隆起(图1)。

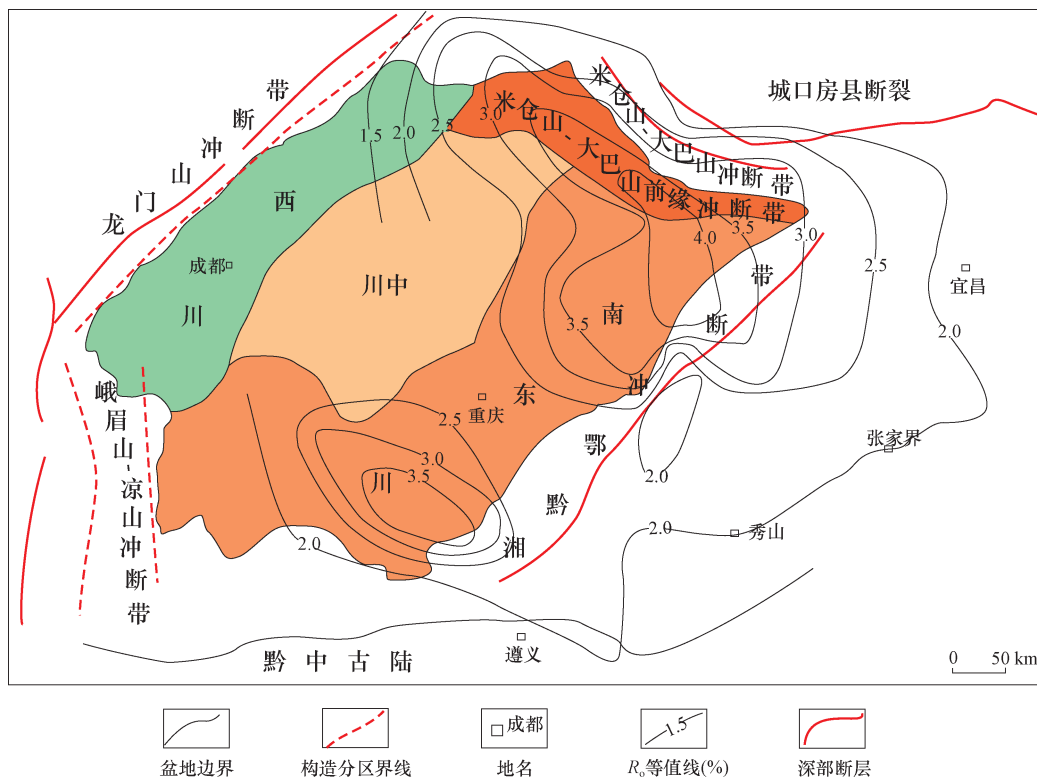


图1 四川盆地及周缘奥陶系-下志留统黑色页岩现今热演化程度分布

Fig. 1 Diagram showing the thermal evolution of the Ordovician-Lower Silurian black shale in the Sichuan Basin and its periphery

作为中国重要的页岩气产区,川东南地区目前已建成涪陵页岩气田,其周缘地区,包括渝东南、黔北和湘鄂西等地区的页岩气勘探工作也取得了一定进展,多口井页岩气显示良好,黔北安场地区已发现了具有商业价值页岩气井——安页1井^[21],湘鄂西地区鄂阳页1HF井钻遇的下寒武统页岩也获得高产气流,湘中地区的下寒武统页岩也被认为具有良好的页岩气勘探潜力^[22]。

川东南及其周缘地区主要发育下寒武统牛蹄塘组 and 上奥陶统—下志留统五峰组—龙马溪组两套富有机质页岩。牛蹄塘组页岩沉积于早寒武世初期,彼时上扬子地区总体处于深水陆棚沉积环境,后期逐渐向浅水陆棚以及潮坪沉积转变^[23-24]。在此沉积背景下,牛蹄塘组底部发育了厚层的富有机质页岩,有机质富集程度由底部向上递减,在平面上整体呈现由北向南增厚的趋势。五峰组—龙马溪组富有机质页岩形成于奥陶纪晚期和志留纪早期。受到川中、黔中以及雪峰山古隆起扩大的影响,晚奥陶世至早志留世研究区内发育缺氧低能的沉积环境^[25],沉积水体由黔中古隆起向北逐渐变深,富有机质页岩的厚度由南向北逐渐增厚。区内五峰组页岩虽然分布广泛,但厚度一般不足20 m,龙马溪组烃源岩厚度较大,在川南和渝东等地区厚度可达600 m。

研究区内的寒武系和志留系主要经历了加里东期,海西期—印支期以及燕山期3期构造变动,在不同地区所经历的构造运动略有差异。川东南地区牛蹄塘组页岩在加里东运动的影响下首先经历了长时间浅埋,随后与五峰组—龙马溪组页岩一起经历了短时间的浅埋,期间牛蹄塘组页岩有机质进入生烃阶段,而五峰组—龙马溪组页岩大多未进入生油门限;志留纪末期,在海西—印支作用影响下两套页岩进入长时间的缓慢隆升阶段;至早二叠世,开始进入持续沉降阶段,最大埋藏深度可分别达到10 000和8 000 m,此阶段也是页岩生烃的主要时期;直至白垩纪中期,地层在燕山作用下开始快速抬升,生烃作用停止。黔北地区牛蹄塘组页岩沉积后进入持续沉降阶段,至志留纪末最大埋深可达4 000 m,随后开始进入较平稳时期,深度变化不大;早二叠世,两套页岩再次快速沉降,在晚三叠世达到生气阶段,并在中间历经了晚三叠世末短暂的小规模抬升,最大埋深可达到6 000~9 000 m;晚侏罗世—早白垩世在燕山作用下开始快速抬升,生烃作用停止^[26]。湘鄂西地区的两套富有机质页岩均经历了持续埋藏和后期快速隆升两个阶段;下寒武统牛蹄塘组页岩沉积后进入持续沉降阶段,在寒武纪末期达到生油高峰,至志留纪末最大埋深达到了6 000 m;随

后牛蹄塘组页岩与五峰组—龙马溪组页岩进入较平稳时期,至二叠纪,两套页岩进入快速沉降阶段,最大埋深可分别达到9 500与6 000 m;中侏罗世,牛蹄塘组页岩于达到过成熟,进入生干气阶段,五峰组—龙马溪组页岩在晚志留世进入生烃阶段,并于早三叠世进入生干气阶段;至晚燕山期,两套页岩快速抬升,生烃作用停止^[27]。总体而言,研究区内下古生界两套页岩的最大埋深普遍超过6 000 m,有机质镜质体反射率大于2.0%,普遍位于过成熟阶段,页岩储层经历了强烈的压实与成岩作用改造。

本文的志留系龙马溪组页岩样品主要选自川东南涪陵地区,现今埋藏深度在2 200~2 800 m,镜质体反射率(R_o)为2.5%~3.0%;寒武系牛蹄塘组页岩样品主要采自鄂西渝东、黔北与湘西北等地区,现今埋藏深度主要介于500~1 500 m,镜质体反射率(R_o)普遍大于3.0%。

2 典型被压实改造的有机质孔隙分布与变形特征

按赋存状态与分布,页岩中的有机质可大致分为顺层有机质、充填有机质与有机质—矿物集合体3种类型,各类型有机质中的孔隙在压实作用下变形特征各有不同。

2.1 顺层有机质

顺层有机质在水平方向上连续分布,通常具有较为完整的形态,普遍被认为是沥青充填层理裂缝所形成(图2)。该类型有机质中的孔隙常常表现出明显的定向性,而排列方向与有机质方向、层理方向相一致(图2a,b),表明在强烈的上覆压力作用下有机质孔隙被整体改造。孔隙形态受有机质所充填的裂缝形态所控制,不规则、宽度变化大或不完全平行于层理裂缝中的有机质,孔隙虽然受到一定程度改造,但仍然较为发育(图2a—c);形态固定、宽度较为稳定裂缝中的有机质,一般遭受较强的压实作用改造,有机质孔发育差,甚至完全闭合,只有少量孔隙残留可见挤压作用的影响(图2d)。与龙马溪组页岩相比,时代更老的牛蹄塘组页岩中顺层有机质中孔隙排布虽然总体仍然呈现一定的定向性,但孔隙形状更加不规则、孔隙大小不一,表明在更强的压实作用下孔隙经历了进一步的改造(图2c)。

2.2 充填有机质

充填有机质为充填于矿物颗粒间隙的有机质颗

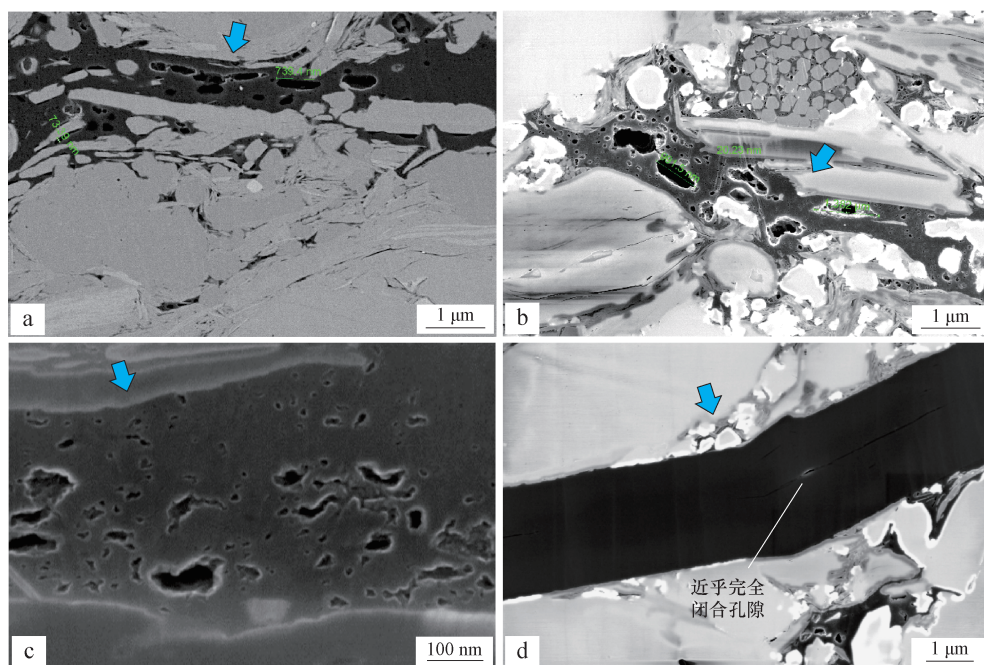


图2 川东南涪陵地区与渝东南地区页岩顺层有机质中孔隙受挤压形变特征(蓝色箭头指示主要挤压方向)

Fig. 2 Compaction and deformation of pores in organic matter along beddings in shales in Fuling area, southeastern

Sichuan Basin and southeastern Chongqing area (the blue arrows indicate the main directions of compaction)

a. 椭圆形孔隙呈定向性排列, J41-5井, 龙马溪组, 埋深2 592.5 m, 扫描电镜照片; b. 椭圆形孔隙呈定向性排列, J11-4井, 龙马溪组, 埋深2 327.2 m, 扫描电镜照片; c. 孔隙形状复杂, 总体呈定向性排列, YK1井, 牛蹄塘组, 埋深36.9 m, 扫描电镜照片; d. 压实作用下近乎完全闭合孔隙, JY41-5井, 龙马溪组, 埋深2 594.0 m, 扫描电镜照片

粒, 本身通常无固定形状。从形状来看, 该类型有机质以填隙物的形式赋存于由四周环绕的刚性矿物所组成的架构中, 在局部与矿物颗粒接触的部位出现挤压形变的现象, 表现出较强的塑性特征。有机质孔隙的形状与排列方式同有机质经挤压变形后的延展方向高度一致, 不同方向的挤压会造成同一有机质内部的孔隙方向出现明显差异(图3a)。在矿物颗粒有明显凸起以及有机质受到局部的强烈挤压时, 可观察到孔隙大小与数量由有机质内部向与矿物接触部位、由直接遭受挤压部位向间接挤压部位减小、减少(图3b—d)。

2.3 有机质-矿物集合体

页岩中以有机质-矿物集合体形式存在的有机质主要与粘土矿物、微晶石英和黄铁矿有关, 前者为塑性矿物, 而后两者基本不具有可压缩性, 因此对有机质孔隙的影响具有明显差异。

赋存于片状粘土之间的有机质孔隙被挤压变形的现象较为常见, 孔隙顺层分布, 呈椭圆、长条或狭缝状, 受压实破坏程度不一(图4a—c)。生物成因的微晶石英是龙马溪组页岩中的常见矿物, 颗粒大小在几百纳米到几微米, 通常以“环绕”或者“镶嵌”的形式与有机质相结合。当有机质内部出现较大的矿物颗粒时,

孔隙呈椭圆形或狭缝状围绕矿物边缘呈定向排列, 而远离矿物的有机质孔隙受影响较小(图4d)。较小的微晶石英颗粒对有机质孔隙的影响不明显, 较大的孔隙依然较为发育, 且各孔隙形状各异, 未表现出明显的定向性(图4e)。黄铁矿通常与有机质以草莓状黄铁矿集合体的形式出现, 有机质作为填充物, 充满黄铁矿晶体间隙。黄铁矿内部有机质中的孔隙通常较小, 形状多为多边形或近圆形, 未见明显的变形和定向性排列(图4f), 表明紧密堆积的黄铁矿很可能保护了有机质孔隙免受压实作用的破坏。

3 有机质孔隙保存的主要控制因素

以往的研究证实, 页岩大部分有机质孔隙的形成与有机质的生烃作用有关, 且孔隙大规模发育于有机质生气阶段^[28-29]。不同类型有机质中的孔隙特征具有明显差异, 即有机质本身的性质对有机质孔隙形成的影响被认为是决定性的。然而, 即使处于同一成熟度的同一类型有机质, 其中孔隙结构也被观察到可能具有较大的不同^[30]。因此, 深入讨论压实-成岩等后生改造作用对有机质孔隙的影响, 有助于进一步理解有机质孔隙非均质性的成因。

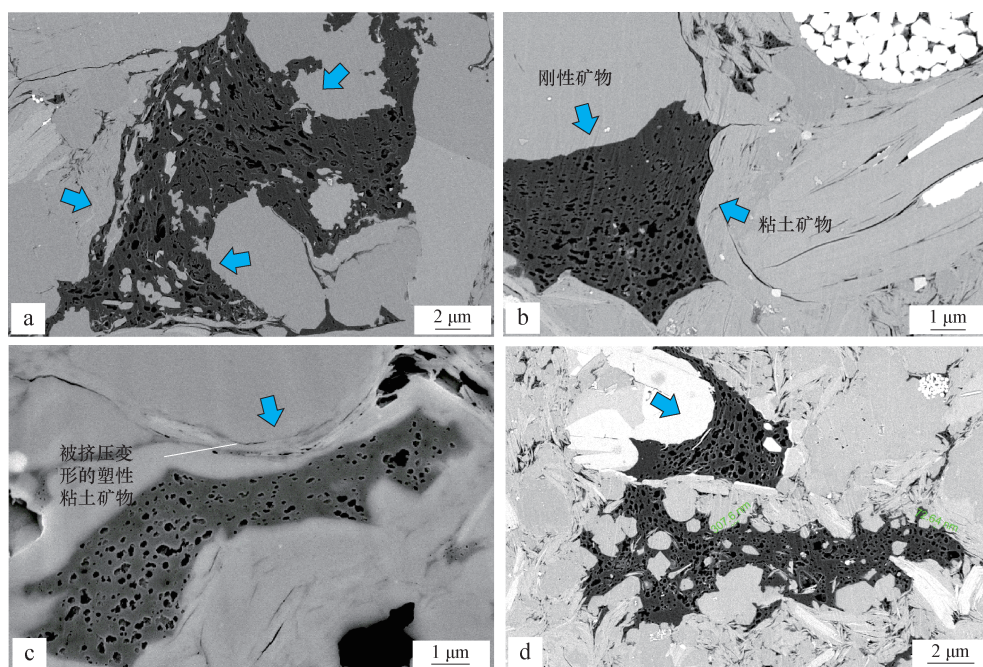


图3 川东南涪陵地区页岩充填有机质中孔隙受挤压变形特征(蓝色箭头指示主要挤压方向)

Fig. 3 Compaction and deformation characteristics of pores in organic matter among minerals in shales in Fuling area, southeastern Sichuan Basin (the blue arrows indicate the main directions of compaction)

a. 有机质中较大的石英颗粒挤压两侧孔隙,J141-5井,龙马溪组,埋深2 592.8 m,扫描电镜照片; b. 充填有机质在局部压实作用下孔隙发生差异性变形,J11-4井,龙马溪组,埋深2 319.9 m,扫描电镜照片; c. 充填有机质在局部压实作用下孔隙发生差异性变形,兴文县麒麟乡剖面,龙马溪组,扫描电镜照片; d. 充填有机质在局部压实作用下孔隙发生差异性变形,J41-5井,龙马溪组,埋深2 591.6 m,扫描电镜照片

扫描电镜的观察与分析表明,页岩中有机质孔隙的形变和定向性排列是一种较为常见的现象,压实作用对有机质孔隙的改造是普遍并且广泛的。对于常规砂岩储层,已经有大量的相关研究揭示了以原生粒间孔隙为主的孔隙系统在压实作用下的变化趋势。然而,作为一种赋存于塑性物质中的次生孔隙,有机质孔隙受压实作用的影响与砂岩有明显不同,并且,有机质生排烃会使这一过程更加复杂化。在压实作用下,有机质孔隙形变与有机质受力大小与方向、刚性矿物的保护、岩石整体的抗压实能力以及有机质孔隙本身的性质有关。通过对孔隙参数和扫描电镜照片的综合分析,进一步认为主控因素具体体现在4个方面:有机质赋存状态、微观矿物格架-骨架、有机质含量和有机质孔隙大小。

3.1 有机质赋存状态

上述3种不同有机质中孔隙特征的对比结果,证实了有机质的赋存状态是影响孔隙保存的重要因素,而这一作用是通过影响有机质的受力方向和受力面积所造成的。以脉状形式赋存于页岩中的顺层有机质受垂直于层理方向的上覆压力挤压,压力作用强、受力面积大,因此孔隙受外力作用变形现象最为常见,且变形现象具有整体性。与填充有机质和有机质-矿物结合

体相比,顺层有机质中孔隙整体发育最差,很大一部分顺层展布的有机质甚至几乎不发育孔隙,表明经受的压实破坏作用最为严重。赋存于矿物间隙的充填有机质受环绕矿物的挤压发生形变,形状通常为无定型。有机质孔隙受力方向多样、受力面积局限,孔隙在不均匀的挤压作用下形成了差异性形变,增大了有机质孔隙的复杂性^[19]。以与无机矿物结合形式存在的有机质中孔隙受压实作用影响的大小取决于矿物的类型,夹杂在顺层分布的塑性矿物如片状粘土之间的有机质,孔隙被压实作用改造的现象较为明显,而与刚性矿物如微晶石英、黄铁矿等结合的有机质,孔隙通常保存完好。

3.2 微观矿物格架-骨架

有机质是一种强塑性物质,相对于其他矿物,对压力的抵抗能力最差,导致矿物对有机质具有不同程度的保护作用,也是直接暴露在压实作用下的有机质孔隙得以保存的前提,如果没有矿物格架的保护,绝大部分有机质将被压实成“均质”无孔形态。根据与有机质的空间分布关系,矿物对有机质孔隙的保护作用机理包括“格架支撑”与“骨架支撑”两种类型,取决于矿物的形成时间以及力学性质。

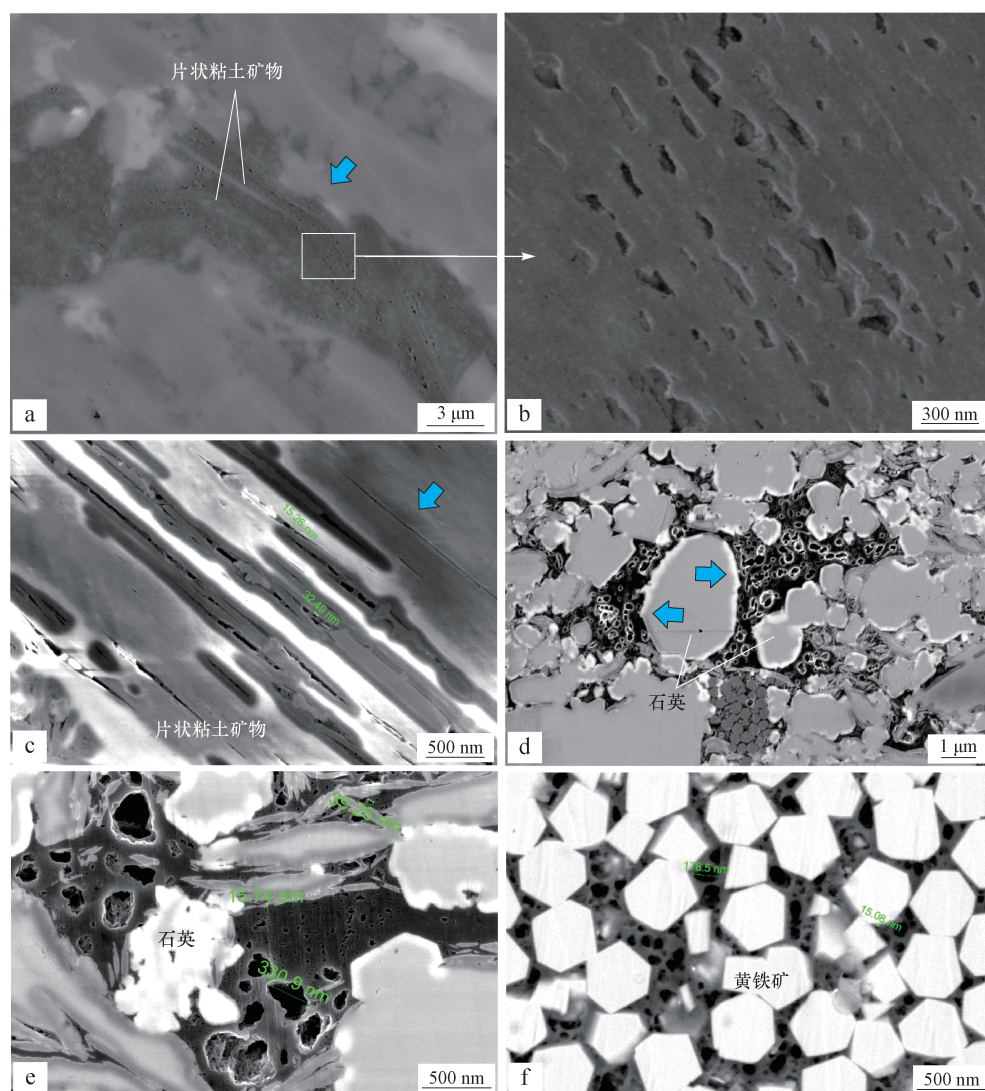


图4 湘鄂西地区与川东南涪陵地区页岩与矿物结合有机质中孔隙被挤压形变特征(蓝色箭头指示主要挤压方向)

Fig.4 Compaction and deformation of pores in organic matter-mineral aggregates in shales from the western Hunan-Hubei area and the Fuling area of southeastern Sichuan Basin (the blue arrows indicate the main directions of compaction)

a. 有机质-粘土集合体中孔隙定向性排列, CY1井, 牛蹄塘组, 埋深1 357.7 m, 扫描电镜照片; b. a图部分区域放大显示有机质孔隙的定向性排列; c. 片状粘土中包含的几乎被完全压实的有机质孔隙, J1井, 龙马溪组, 埋深2 378.4 m, 扫描电镜照片; d. 有机质中较大的石英颗粒挤压两侧孔隙, J1井, 龙马溪组, 埋深2 404.5 m, 扫描电镜照片; e. 微晶石英-粘土形成“格架支撑”保护有机质孔隙, J11-4井, 龙马溪组, 埋深2 325.2 m, 扫描电镜照片; f. 有机质-黄铁矿集合体中有机质孔隙保存较好, J11-4井, 龙马溪组, 埋深2 266.7 m, 扫描电镜照片

页岩中的粘土矿物通常来自于陆源输入或者成岩转化, 具有一定程度的可压缩性, 因此可以充当缓冲物质(图3c, 图5a), 减轻有机质以及孔隙受压实作用的影响。更为重要的是, 片状的粘土矿物在特殊的排列方式下相互支撑形成“格架支撑”, 可以更为有效地使其中的有机质和孔隙免受压实破坏。图5b展示了片状粘土相互支撑形成的“纸屋构造”^[31], 其中的孔隙形状表明其并未遭受过较大的压实作用破坏。

生物成因石英、黄铁矿以及碳酸盐等自生矿物, 通常不具有可压缩性, 颗粒或晶体之间形成的“格架支撑”可为有机质提供空间免受压实作用的影响。例如,

草莓状黄铁矿集合体中, 紧密堆积的黄铁矿晶体相互支撑, 使其中的有机质孔隙得以完好的保存(图5c)。当黄铁矿以填充物的形式包裹进有机质时, 黄铁矿晶体将提高有机质-矿物集合体中的机械强度^[32], 即以“骨架支撑”的形式保护其中的有机质孔隙(图5d)。在四川盆地下古生界海相页岩中, 大量的由放射虫和海绵骨针为主要物质来源的生物成因石英形成于有机质成熟之前形成^[33], 较大的石英颗粒与其他自生矿物形成的矿物格架为有机质生成的沥青等次生可流动烃类组分提供保护空间, 减小了有机质在强烈的压实作用下被挤压破坏的几率^[34-35], 较小的微晶石英与有机

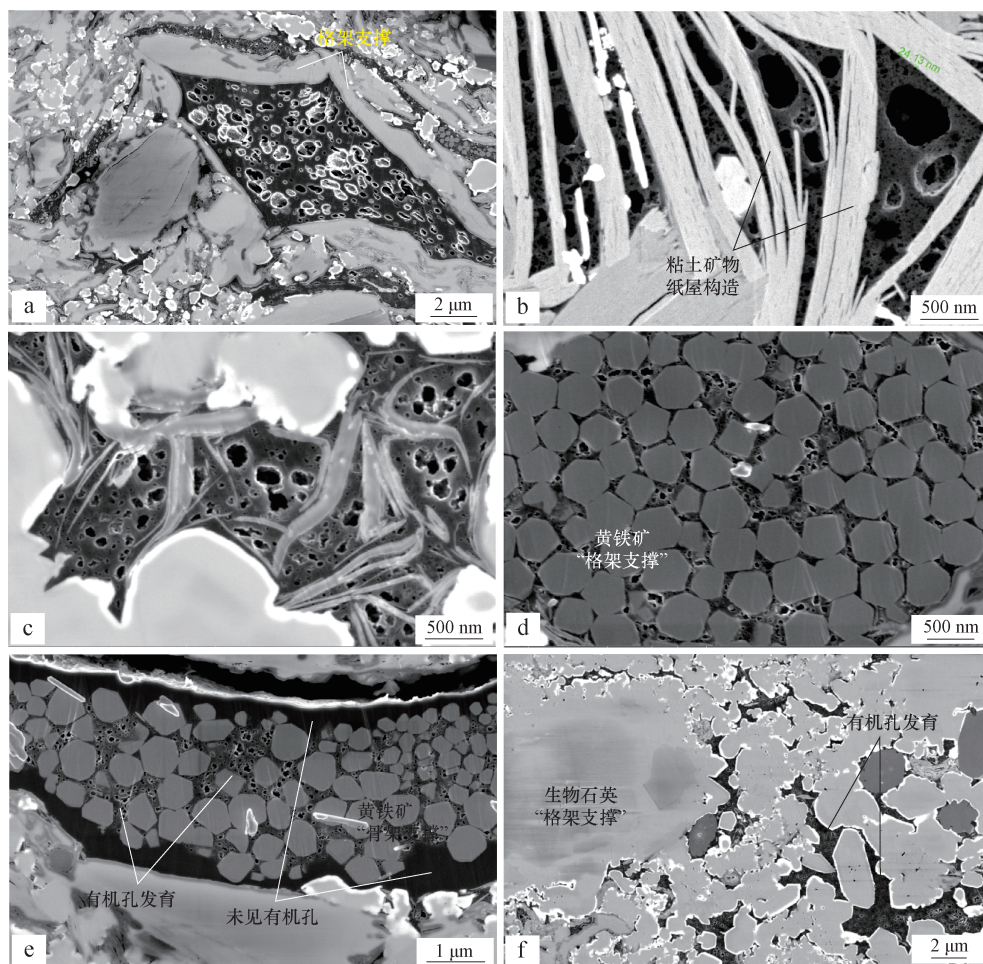


图5 川东南涪陵地区龙马溪组微观矿物格架下有机质孔隙发育特征

Fig. 5 Development of pores in organic matter under micro mineral frameworks in Fuling area, southeastern Sichuan Basin

a. 矿物格架作为缓冲减轻有机质受到的压实作用,J41-5井,埋深2 594.0 m,扫描电镜照片;b. 片状粘土组成“纸房结构”保护有机质孔隙,J1井,埋深2 341.4 m,扫描电镜照片;c. 石英-粘土形成矿物格架保护有机质孔隙,J1井,埋深2 404.5 m,扫描电镜照片;d. 黄铁矿晶体紧密堆积形成“格架支撑”保护有机质孔隙,J41-5井,埋深2 591.6 m,扫描电镜照片;e. 黄铁矿充填有机质形成“骨架支撑”保护有机质孔隙,J41-5井,埋深2 613.3 m,扫描电镜照片;f. 大量自生生物石英组合形成“格架支撑”保护有机质孔隙,J1井,埋深2 411.7 m,扫描电镜照片

质结合,进一步提升了集合体的机械抗压强度。随着沥青进一步裂解,有机质孔隙开始大量形成,早期形成的石英在“格架支撑”与“骨架支撑”的双重作用下进一步保护了有机质孔隙免受压实作用改造或破坏。生物成因石英作为四川盆地地下古生界海相页岩,对高压实作用下页岩中孔隙的发育至关重要^[36],是深层有效页岩储层发育的基础。

3.3 有机质含量

与矿物格架对有机质孔隙的保护作用相反,高的有机质含量会增加岩石的塑性以及可压实性,使孔隙更容易被挤压破坏。Milliken等(2013)^[17]在研究Marcellus页岩时发现,当TOC低于5.5%,孔隙度与TOC呈正相关关系,与有机孔的发育情况相一致;但当TOC高于5.5%时,有机质孔隙的平均孔径减小,孔隙

度随TOC升高而停止增加甚至减小,并且同一口井中高TOC的页岩有机质孔隙整体明显小于具有较低TOC的样品,这些现象揭示了更多的塑性有机质使孔隙在机械压实作用下遭受了更剧烈的破坏。王飞宇等(2013)^[37]在分析四川盆地海相页岩的TOC与孔隙度的相关关系时,也发现了类似的现象,TOC值大于5%后页岩孔隙度随TOC增高增幅有限。

对于四川盆地地下古生界海相页岩,研究已经证实有机质孔隙是页岩中微孔-中孔的主要贡献者,TOC与气体吸附所测得的孔隙(0.38~120 nm)体积和比面积的线性正相关关系是一个普遍的现象,因此,比表面积和孔隙体积常被用来评价有机质孔的总体发育程度。本次研究通过统计了渝东南、黔西北与湘鄂西地区3口井下古生界富有机质页岩TOC与比表面积之间的相关性,发现了与Milliken等(2013)^[17]相同的

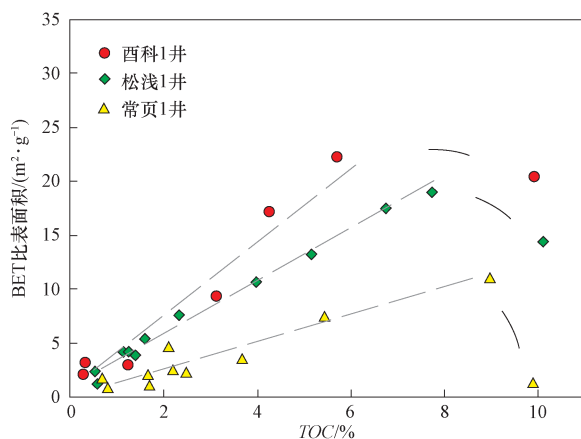


图6 渝东南-黔北地区寒武系牛蹄塘组富有机质页岩
TOC 与比表面积相关关系

Fig. 6 Correlation between TOC and specific surface area of the Cambrian organic-rich shale in southeastern Chongqing-northern Guizhou

现象。当有机质含量低于8%,比表面积与孔隙体积随TOC升高而升高,但当高于8%时,3口井样品的比表面积与孔隙体积出现了降低的趋势(图6),这表明有机质含量的增加对有机质孔隙的影响可能是普遍存在的。

3.4 有机质孔隙大小

在机械压实作用下,油气储层的孔隙被破坏减小,但不同大小的孔隙对压实作用的抵抗能力不同。Kui-la 和 Prasad (2013)^[38] 对不同类型的粘土矿物进行了人工压实实验模拟,证实粘土矿物特别是多孔的蒙脱石在随着上覆压力的增大,孔隙度大幅减小。随着压力进一步增大,残存的大孔隙减小,而小孔隙则基本不受影响,表明压实作用对孔隙的破坏能力具有一定的限度,在较高的压实作用下,小孔隙比大孔隙具有更强的抗压能力。为验证这一认识对塑性的有机质中孔隙是否同样适用,本次研究通过图像处理软件对经受了一定程度压实作用影响的有机质孔隙进行了定量描述(图7),获取了有机质孔隙的大小、方向性和形状性参数。通过统计对比不同大小有机质孔隙的方向性和形状特征,发现在与有机质长轴方向(~53°)、或者垂直于挤压应力的方向(40°~80°)区间范围内,大于100 nm的孔隙频率最高、50~100 nm的孔隙频率次之、小于50 nm的孔隙频率最低,即孔隙越大,其方向性与遭受挤压后的有机质的方向越为一致(图8a)。从形状来看,小于50 nm的孔偏心率更低,而大于50 nm的孔隙偏心率相对更高,表明大孔的形状更倾向于长条形(图8b)。以上结果证实,在同样的压力作用下,有机质中的大孔受挤压应力的影响要大于小孔。

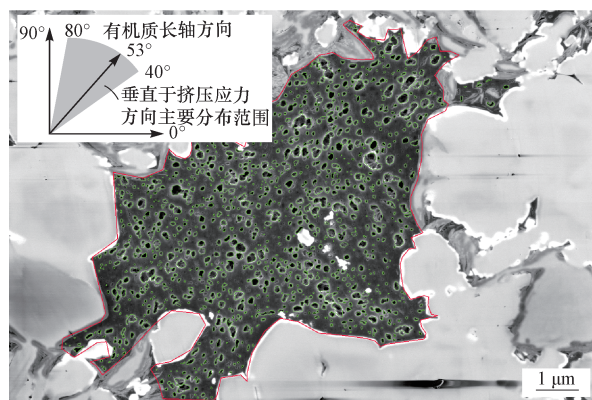


图7 渝东南地区 YK1 井牛蹄塘组页岩有机质孔隙
二维量化描述结果

Fig. 7 Two-dimensional quantitative description of organic matter pores in shale from Well YK1 in the Niutitang Formation, southeastern Chongqing

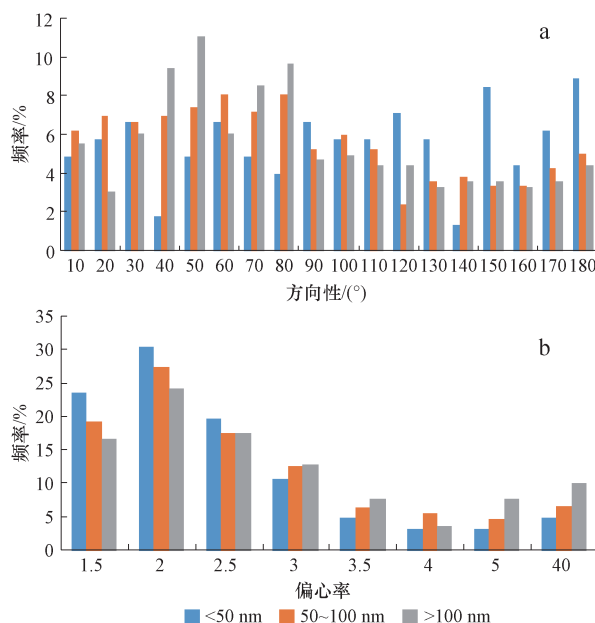


图8 渝东南地区 YK1 井过成熟牛蹄塘组页岩不同大小
有机质孔隙方向性与形状信息统计分布特征

Fig. 8 Orientation and shape of pores of different sizes in the Niutitang Formation shale of over maturity from Well YK1, southeastern Chongqing

- a. 不同大小有机质孔隙方向性频率分布;
b. 不同大小有机质孔隙偏心率频率分布

4 结论

1) 页岩中有机质孔隙的变形与定向性排列是较为普遍的现象。处于不同赋存状态的有机质由于在压实作用下的受力方向和受力面积存在差异,导致了孔隙被改造作用大小不一。其中,顺层有机质受压实作用影响最大,孔隙通常经历了整体性改造;充填有机质

受力不均匀,使孔隙形成差异性形变;与矿物结合的有机质中孔隙受压实作用的影响与矿物类型有关,通常与塑性粘土结合的有机质中孔隙经受的压实改造强度大于与刚性矿物结合的有机质。

2) 压实作用下,微观矿物格架-骨架对有机质孔隙具有较强的保护作用。刚性矿物相互支撑,形成封闭空间,形成“格架支撑”,使其中充填的有机质及孔隙免受挤压作用影响;刚性矿物充填入有机质中,提升了有机质整体的抗压实强度,形成“骨架支撑”,减弱有机质孔隙被压实作用改造的强度。

3) 压实作用对有机质孔隙的影响与有机质含量、有机质孔隙本身大小具有一定关系。当有机质含量超过一定程度,岩石整体的塑性强度加大,有机质孔隙更容易被破坏,主要受有机质微孔隙控制的比表面积等出现减少的趋势;有机质孔隙越大,其方向性与有机质方向(通常为垂直于挤压应力的方向)越一致、形状则越倾向于长条形,证实有机质中的大孔受挤压应力的影响大于小孔。

参 考 文 献

- [1] 何治亮,聂海宽,胡东风,等. 深层页岩气有效开发中的地质问题——以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油学报,2020,41(4):379-391.
He Zhiliang, Nie Haikuan, Hu Dongfeng, et al. Geological problems in the effective development of deep shale gas: A case study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in Sichuan Basin and its periphery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 379-391.
- [2] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China [J]. Journal of China university of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.
- [3] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. AAPG Bulletin, 2012b, 96(4): 665-677.
- [4] Pommer M, Milliken K. Pore types and pore-size distributions across thermal maturity, Eagle Ford Formation, southern Texas [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(9): 1713-1744.
- [5] Schieber J. Common themes in the formation and preservation of intrinsic porosity in shales and mudstones-Illustrated with examples across the Phanerozoic [M]. City, 2010.
- [6] Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, et al. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity [J]. International Journal of Coal Geology, 2012a, 103(23): 26-31.
- [7] 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(23): 3-11.
- [8] Nie Haikuan, Jin Zhijun, Zhang Jinchuan. Characteristics of three organic matter pore types in the Wufeng-Longmaxi Shale of the Sichuan Basin, Southwest China [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7014.
- [9] Wang P, Chen Z, Jin Z, et al. Shale oil and gas resources in organic pores of the Devonian Duvernay Shale, Western Canada Sedimentary Basin based on petroleum system modeling [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 50: 33-42.
- [10] 罗小平, 吴飘, 赵建红, 等. 富有机质泥页岩有机质孔隙研究进展 [J]. 成都理工大学学报(自科版), 2015, 42(1): 50-59.
Luo Xiaoping, Wu Piao, Zhao Jianhong, et al. Study advances on organic pores in organic matter-rich mud shale [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(1): 50-59.
- [11] 曹涛涛, 刘光祥, 曹清古, 等. 有机显微组成对泥页岩有机孔发育的影响——以川东地区海陆过渡相龙潭组泥页岩为例 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 40-53.
Cao Taotao, Liu Guangxiang, Cao Qinggu, et al. Influence of maceral composition on organic pore development in shale: A case study of transitional Longtan Formation shale in eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 40-53.
- [12] 谭静强, 张煜麟, 罗文彬, 等. 富有机质泥页岩微纳米孔隙结构研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(1): 18-29.
Tan Jingqiang, Zhang Yulin, Luo Wenbin, et al. Research progress on microscale and nanoscale pore structures of organic-rich muddy shales [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(1): 18-29.
- [13] Jiao K, Yao S, Liu C, et al. The characterization and quantitative analysis of nanopores in unconventional gas reservoirs utilizing FESEM-FIB and image processing: An example from the lower Silurian Longmaxi Shale, upper Yangtze region, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 128-129(3): 1-11.
- [14] Ma Y, Zhong N, Cheng L, et al. Pore structure of the graptolite-derived OM in the Longmaxi Shale, southeastern Upper Yangtze Region, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 72: 1-11.
- [15] Gai S, Liu H, He S, et al. Shale reservoir characteristics and exploration potential in the target: A case study in the Longmaxi Formation from the southern Sichuan Basin of China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 86-97.
- [16] Sun M, Yu B, Hu Q, et al. Nanoscale pore characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Formation Shale: A case study from Well Yuke #1 in the Southeast of Chongqing, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 154-155: 16-29.
- [17] 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.
- [18] Chen Q, Zhang J, Tang X, et al. Relationship between pore type and pore size of marine shale: An example from the Sinian-Cambrian formation, upper Yangtze region, South China [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 158: 13-28.
- [19] Wang G. Deformation of organic matter and its effect on pores in mud rocks [J]. AAPG Bulletin, 2020, 103: 21-36.

- [20] 赵建华,金之钧,金振奎,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境[J]. 石油学报,2016,37(5):572–586.
Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 572–586.
- [21] 翟刚毅,包书景,庞飞,等. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质,2017,44(1):1–12.
Zhai Gangyi, Bao Shujing, Pang Fei, et al. Petroleum-forming pattern of “four-storey” hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province[J]. Geology in China, 2017, 44(1): 1–12.
- [22] 郑和荣,彭勇民,唐建信,等. 中、上扬子地区常压页岩气勘探前景——以湘中坳陷下寒武统为例[J]. 石油与天然气地质,2019,40(6):1155–1167.
Zheng Herong, Peng Yongmin, Tang Jianxin, et al. Exploration prospect of normal-pressure shale gas in Middle and Upper Yangtze regions: A case study of the Lower Cambrian shale in Xiangzhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1155–1167.
- [23] 罗超,刘树根,孙玮,等. 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[J]. 天然气地球科学,2014,25(3):453–470.
Luo Chao, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Basic characteristics of shale gas in the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze Region: Taking Nangao section in Danzhai as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 453–470.
- [24] 赵建华,金之钧,林畅松,等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. 石油与天然气地质,2019,40(4):701–715.
Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Lin Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 701–715.
- [25] 牟传龙,葛祥英,许效松,等. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J]. 古地理学报,2014,16(4):427–440.
Mou Chuanlong, Ge Xiangying, Xu Xiaosong, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze Region[J]. Journal of palaeogeography, 2014, 16(4): 427–440.
- [26] 冯常茂,牛新生,吴冲龙. 黔中隆起及周缘地区下组合含油气流体包裹体研究[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(2):121–126.
Feng Changmao, Niu Xinsheng, Wu Chonglong. A study of hydrocarbon fluid inclusions in Qianzhong uplift and its adjacent areas[J]. Acta Petrologica et mineralogica, 2008, 27(2): 121–126.
- [27] 沃玉进,周雁,肖开华. 中国南海相层系埋藏史类型与生烃演化模式[J]. 沉积与特提斯地质,2007,27(3):96–102.
Wo Yujin, Zhou Yan, Xiao Kaihua. The burial history and models for hydrocarbon generation and evolution in the marine strata in southern China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(3): 96–102.
- [28] Chen J. Xiao X. M. Evolution of nanoporosity in organic-rich shales during thermal maturation[J]. Fuel, 2014, 129(4): 173–181.
- [29] 胡海燕. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验[J]. 石油学报,2013,34(5):820–825.
Hu Haiyan. Porosity evolution of the organic-rich shale with thermal maturity increasing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 820–825.
- [30] 何陈诚,何生,郭旭升,等. 焦石坝区块五峰组与龙马溪组一段页岩有机孔隙结构差异性[J]. 石油与天然气地质,2018,39(3):472–484.
He Chencheng, He Sheng, Guo Xusheng, et al. Structural differences in organic pores between shales of the Wufeng Formation and of the Longmaxi Formation's first Member, Jiaoshiba Block, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 472–484.
- [31] Slatt R, O'Brien N. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in finegrained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95: 2017–2030.
- [32] 张光荣,聂海宽,唐玄,等. 页岩中黄铁矿类型及其对页岩气富集的影响——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. 石油实验地质,2020,42(3):459–466.
Zhang Guangrong, Nie Haikuan, Tang Xuan, et al. Pyrite type and its effect on shale gas accumulation: A case study of Wufeng-Longmaxi shale in Sichuan Basin and its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 459–466.
- [33] 孙川翔,聂海宽,刘光祥,等. 石英矿物类型及其对页岩气富集开采的控制——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 地球科学,2019,44(11):3690–3704.
Sun Chuanxiang, Nie Haikuan, Liu Guangxiang, et al. Quartz type and its control on shale gas enrichment and production: A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3690–3704.
- [34] Loucks R, Reed R. Scanning-electron-microscope petrographic evidence for distinguishing organic matter pores associated with depositional organic matter versus migrated organic matter in mudrocks[J]. GCAGS Journal, 2014, 3: 51–60.
- [35] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. 天然气工业,2020,40(6):31–41.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Genetic mechanism of high-quality shale reservoirs in the Wufeng–Longmaxi Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6): 31–41.
- [36] Wu S, Yang Z, Zhai X, et al. An experimental study of organic matter, minerals and porosity evolution in shales within high-temperature and high-pressure constraints[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 377–390.
- [37] 王飞宇,关晶,冯伟平,等. 过成熟海相页岩孔隙度演化特征和游离气量[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):764–768.
Wang Feiyu, Guan Jing, Feng Weiping, et al. Evolution of overmature marine shale porosity and implication to the free gas volume[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 764–768.
- [38] Kuila U, Prasad M. Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales[J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(2): 341–362.