

页岩气储层微观储集空间研究现状及展望

张琴^{1,2}, 刘畅³, 梅啸寒¹, 乔李井宇¹

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011]

摘要:从页岩气微观储层研究历程入手,总结页岩气微观储集空间的研究现状及进展,并探讨研究的不足和缺陷,提出科学展望,以期完善页岩气微观储层分类体系和理论。页岩气微观储集空间研究经历了随机观察和探索阶段及概念体系建立和实际应用阶段。页岩气微观储集空间分类方案繁多,代表性方案主要有基于孔隙尺寸、基于孔隙产状-结构和基于孔隙成因三大综合分类,各种分类标准和术语尚不统一。页岩微观储层孔隙演化研究逐步趋于定量化,微观孔隙发育控制因素复杂,沉积环境、构造背景、岩性及矿物组分控制了微观孔隙的类型及发育程度,有机碳含量(*TOC*)和干酪根类型影响有机质孔的发育,成岩演化直接控制着不同类型微观孔隙的发育和演化。针对页岩气微观储层研究现状,提出应进一步完善页岩气微观孔隙分类标准及划分方案,形成科学、客观、全面、系统的页岩气微观储层分类评价体系,加强微观孔隙发育控制因素定量研究,定量分析各种控制因素与各类孔隙的相关性,并不断改善测试手段,提高测量范围和精度,使页岩气微观储集空间直观、准确、全方位地展现和表征出来。

关键词:微观储集空间;孔隙类型;孔隙演化;页岩气储层

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space

Zhang Qin^{1,2}, Liu Chang³, Mei Xiaohan¹, Qiaoli Jingyu¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. China United Coalbed Methane Corporation Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: Beginning with a review of the history of research on microscopic shale reservoir space, this paper presents the status and prospect of research on microscopic reservoir space of shale gas reservoirs in an attempt to improve the classification system and theory of microscopic pores of shale gas reservoirs. The study of the microscopic shale reservoir space can be divided into a random observation and exploratory stage in the earlier period and a stage of the establishment of conceptual system and its application in the recent period. There are lots of methods for classifying microscopic pores of shale reservoir, among which there are three most typical comprehensive classification schemes, namely pore size-based, pore occurrence-structure-based and pore origin-based schemes. However, there are no unified standards and terminologies for their classification. The study of the evolution of microscopic shale reservoirs is becoming more quantitative. The controlling factors for the development of microscopic pores are complex. The sedimentary environment, structural background, lithology and mineral components control the types of primary pores and the degree of their development. The total organic carbon (*TOC*) and the types of kerogen influence the development of pores within organic matters. The diagenetic stages directly control the development and evolution of different microscopic pores. In light of the status of study of microscopic shale gas reservoirs, a propose is brought forward here to further improve the classification standard of microscopic pores, so as to establish a scientific, objective, comprehensive and systematic microscopic reservoir classification and evaluation system. A quantitative study of the controlling factors needs to be strengthened to define the correlation of controlling factors and different microscopic pores. In addition, testing methods must be improved progressively for further enlarging the scope and enhancing the precision of measurement, realizing direct, accurate and stereo display of the microscopic pore space of shale reservoirs.

Key words: microscopic reservoir space, types of pores, pore evolution, shale gas reservoir

收稿日期:2015-04-20; 修订日期:2015-06-20。

第一作者简介:张琴(1973—),女,博士、副教授,沉积学、层序地层学及储层地质学。E-mail: zhangqin@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41302081);教育部留学回国启动基金项目(ZX20140267);中国石油大学(北京)校基金项目(KYJT2012-01-29)。

北美地区页岩气的勘探处在世界前列,现已圈定页岩气潜力盆地 50 余个,并步入了页岩气开发快速发展阶段^[1-3]。我国在四川盆地、鄂尔多斯盆地、中下扬子地区、松辽盆地等地区的页岩气勘探也取得了重大突破^[4]。国内外勘探实例均展现了页岩气的巨大潜力和发展空间。页岩气勘探开发在国内外的迅速发展,极大地促进了页岩气微观储层相关方面的研究,最显著的进展主要表现在对页岩微观孔隙结构的研究,已从微米级扩展到纳米级^[5-7]。越来越多的实例和数据证实在页岩内部存在众多的微米级、纳米级微孔隙^[8-11],它们构成了页岩气储层中最重要的储集空间,对天然气的储存和渗流起到了至关重要的作用^[12-13]。与常规储集层相比,页岩储层的孔隙直径更加细小,几何形态、分布、成因及控制因素更加复杂^[14]。受实验技术条件的限制,在页岩微观储层特征和发育机制等方面还存在许多科学难题尚未解决。本文拟从页岩微观储层研究历程入手,综述前人相关研究成果,介绍典型的页岩微观储层分类方案,分析页岩气微观孔隙演化规律及其控制因素,总结不足并提出相应科学展望,以期完善页岩气微观储层分类体系,丰富页岩储层地质理论,对页岩气的勘探开发及微观储层评价提供科学依据。

1 页岩气储层微观储集空间研究阶段性明显

纵观国内外学者对页岩储层的研究成果,大致可以将页岩微观储层研究划分为两个阶段,即 20 世纪以前的随机观察和探索阶段以及 20 世纪后的概念体系建立和实际应用阶段^[15-19](图 1)。

1.1 随机观察和探索阶段

1971 年,O'Brien 和 Bennett 等^[20-21]首次发现,在

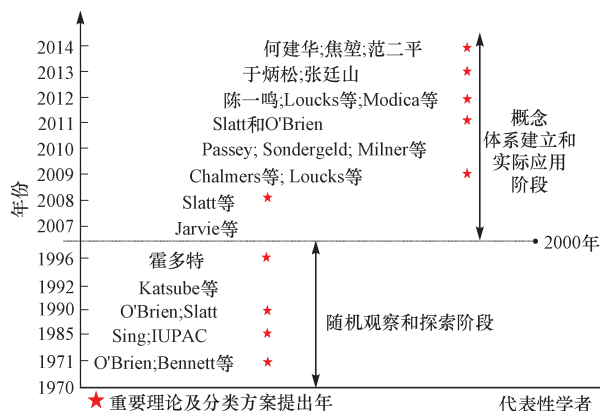


图 1 页岩气微观储层研究进展

Fig. 1 Progress of microscopic research on shale gas reservoir

絮状粘土矿物集合体中,片状的粘土矿物通过边缘和面、边缘和边缘、面和面之间的定向接触形成一种所谓的“纸房构造”(card-house),以此概念的提出为代表,将非常规页岩储层的研究重心引入微观层面。

1990 年,O'Brien 和 Slatt 又报道了一些古代具微层理构造的页岩中絮状粘土矿物集合体的实例^[22]。虽无法解释这些开放孔隙是如何在经过长期的埋藏和成岩作用后仍被保存下来的,但是这种絮状粘土矿物集合体中的“纸房构造”或开放孔隙提供了大于甲烷分子的 3.8 nm 直径的空间。因此,页岩中絮状粘土之间的粒间孔隙被认为是泥页岩中最初发现的储集空间。

1992 年,Katsube 等^[23]指出在 4 400 ~ 5 600 m 的深埋藏条件下,页岩中的孔隙直径约为 2.7 ~ 11.55 nm,大于 25 nm 的孔隙很少,之后针对页岩储层孔隙类型方面的研究相对较少。

1.2 概念体系建立和实际应用阶段

2007 年,Jarvie 等^[24]发现页岩中有机质生烃可以形成孔隙,如果页岩有机质含量为 7%,其中 35% 发生转化,则会为岩石提供 4.9% 的孔隙空间。

2009 年,Singh 等首次提出页岩微观储层“纳米级孔隙”的概念^[25]。从此,针对页岩储层相关概念体系的建立和较为系统的分类研究宣告开始。同年,Chalmers 等^[26]建议采用国际理论和应用化学协会(IUPAC)标准,即根据孔隙的绝对大小作为参数标准,将页岩储层孔隙分为宏孔隙(> 50 nm)、中孔隙(2 ~ 50 nm)和微孔隙(< 2 nm)。此种分类方案虽然可以定量描述孔隙,但是不能较为贴切地反应孔隙的形态特征。同年,Loucks 等^[5]最早描述了 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩中的有机质孔及其孔隙网络,验证了页岩中绝大多数纳米级孔隙发育在有机质颗粒中。

2010 年,Passey 等^[27]发现,页岩储层 50% 以上的储集空间来自于纳米级的有机质孔。此后,有机质孔的重要性被广泛关注。同年,Sondergeld 将页岩孔隙分为有机质孔、黄铁矿粒间孔、生物化石孔、矿物间孔以及微裂缝等,并认为绝大多数的微孔隙发育在有机质中,其余的孔隙发育与矿物性质密切相关^[28]。同年,Milner 等研究北美不同层系的页岩,提出了发育基质晶间孔、有机质孔和粒间孔 3 种类型。

2011 年,Slatt 和 O'Brien 运用氩离子抛光扫描电镜分析方法对 Barnett 和 Woodford 页岩中微孔隙进行了成因研究,首次建立了孔隙在有机质中的三维形态模型,提出页岩中孔隙类型包括粘土絮体间孔隙、有

机质孔隙、粪球粒内孔隙、化石碎屑内孔隙、颗粒内孔隙、微裂缝通道孔隙^[15]。同年,邹才能等^[6]利用扫描电镜与 Nano-CT 技术首次在中国四川盆地古生界页岩中发现了纳米级孔隙新类型,打破了国内油气储层分为宏观孔隙和微观孔隙的 2 分观点。

2012 年,陈一鸣综合了 Passey、Sondergeld 和 Slatt 的观点,将页岩储层孔隙类型划分为有机质孔隙、粒间孔、矿物质孔、化石孔及微裂缝 5 类,确定了有机质孔隙是主要的孔隙类型,并提出每种孔隙类型都可再细分为原生孔隙和次生孔隙^[29]。同年,Loucks 等提出了一个泥页岩储层基质孔隙三端元分类方案,即把基质孔隙分成 3 种基本类型,即粒间孔隙、粒内孔隙和有机质孔隙^[1],前两种孔隙类型与矿物基质有关,第三种类型与有机质有关,奠定了目前主流的页岩孔隙分类依据。此外,Modica 和 Lappierre^[30]用动态模型展示了有机孔隙发展变化的过

程,认为泥页岩中随着埋藏的加深,矿物质孔隙不断减少,而纳米级有机质孔隙逐渐增加。

2013 年,于炳松结合了 Chalmers, Slatt 和 Loucks 的观点,提出了页岩气储层孔隙产状—结构综合分类方案^[17],成为目前最具代表性的分类体系,被广大学者引用(图 2)。同年,朱如凯等^[4]对泥页岩储层微观孔喉结构展开了系列表征研究,初步建立了孔喉表征技术实验方法、参数与流程,并根据孔喉成因与分布位置,将微孔划分为原生微孔与次生微孔,原生微孔又划分为粒间微孔与晶间微孔,次生微孔分为粒内微孔、粒间溶蚀微孔及微裂缝。

2014 年,何建华等在借鉴 Slatt 等的基础上做了比较系统完整的基于孔隙成因类型的页岩储层分类方案^[31],具有广泛的借鉴意义(图 2)。同年,焦堃等根据孔隙连通性把孔隙划分为开孔和闭孔,开孔进一步划分为盲孔和通孔^[18],但这种分类方案并未被广泛借鉴。

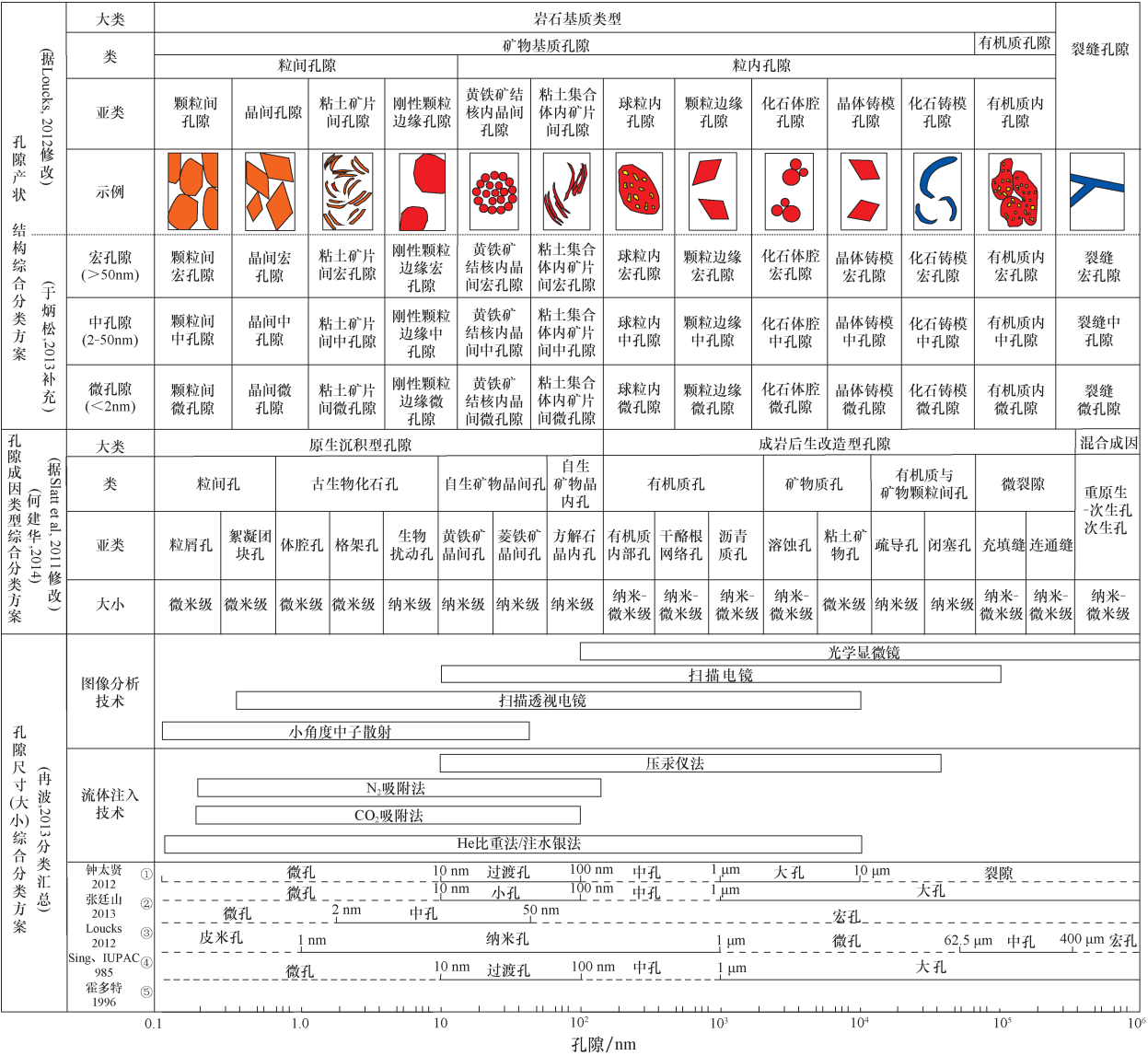


图 2 几种代表性的页岩储集空间分类方案

Fig. 2 Typical classification schemes for shale gas reservoir

2 页岩气储层微观储集空间分类方案繁多

纵观页岩微观储层孔隙研究进展,国内外针对页岩孔隙的划分依据及标准繁多,还尚未达成统一的认识。总体来看,具有代表性的页岩微观储层孔隙分类方案主要分为以下三种类别(图2):①基于孔隙尺寸(大小)的综合分类方案;②基于孔隙产状—结构的综合分类方案;③基于孔隙成因类型的综合分类方案。裂缝由于分类方式及研究较为分散,故单独列出。

2.1 基于孔隙尺寸(大小)的综合分类

由于页岩具有多微孔、孔径小的特点,造成孔径分布的测量十分困难。因此,在充分考虑研究手段的测量范围的基础上,随着流体注入技术的革新及成像技术分辨率精度的提高,针对页岩储层孔隙绝对大小的分类被广泛采用,现今应用的最具代表性的分类方案主要包括钟太贤等^[32]、张廷山等^[33]、Sing 和 IUPAC^[34]、Loucks 等^[1]提出的分类标准(图2)。上述基于孔隙大小的分类方案中,应用最广泛的是 Sing 和 IUPAC 提出的分类标准。从图2可以看出,前人对孔径的划分标准不一、概念术语混乱。如同样是微孔,不同学者提出的划分标准不同,不能统一孔径大小分布范围及类别,造成后人研究中不能有效参考及对比。

2.2 基于孔隙产状—结构的综合分类

利用光学显微镜、(氩离子抛光)扫描电镜、Nano-CT 等微区观察技术对页岩中孔隙进行观察,获取图像并加以分析,可以直观分析页岩中孔隙大小、形状及赋存位置,在孔隙形态学上具有优势,是定性分析储层特征的先进技术,因而基于孔隙产状(赋存位置)的分类也是目前主流的分类方案。Loucks 等^[1]提出的泥页岩储层基质孔隙三端元分类方案是基于产状的、目前较为完整的、应用广泛的孔隙分类体系,广大学者是在此基础上进一步研究,借鉴或提出适合不同地区的分类方案,核心思想均为基于孔隙赋存位置,将孔隙类型分为粒间孔、粒内孔和有机质孔三类,裂缝孔隙单独分析(图2)。具体分成三级:首先根据产状分为岩石基质孔隙和裂缝孔隙两大类;然后将岩石基质孔隙分为粒内孔隙和粒间孔隙。由于有机质孔隙在页岩储集空间研究中独特的重要性,结合目前国际上的分类趋势,把发育在有机质内的粒内孔隙独立分为一类,即有机质孔隙;第三级再将粒间孔隙和粒内孔隙根据发育孔隙的颗粒属性及与颗粒之间的关系进一步细分,把粒间孔隙分为颗粒间孔隙、晶间孔隙、粘土矿片间孔隙以

及刚性颗粒边缘孔隙;把粒内孔隙分为黄铁矿集合体内晶间孔隙、球粒内孔隙、粘土矿物集合体内孔隙和铸模孔隙。此后,于炳松^[17]对该方案进行了补充,结合 IUPAC 的分类标准(宏孔隙 $> 50\text{ nm}$ 、中孔隙 $2 \sim 50\text{ nm}$ 和微孔隙 $< 2\text{ nm}$),进一步做了定量描述,最终形成了页岩气储层孔隙产状—结构综合分类方案,以孔隙产状+孔隙结构的方式进行命名,是该方案的一大创新点。

2.3 基于孔隙成因类型的综合分类

何建华等^[31]在综合前人页岩储层成因机制及分类研究的基础上,结合孔隙产状,提出了页岩孔隙成因类型综合分类方案,具有广泛的借鉴意义(图2)。首先以孔隙成因机制为主要依据,将页岩孔隙分为原生沉积型、成岩后生改造型及混合成因型3个大类;再依据孔隙赋存位置进行次一级分类,将原生沉积型孔隙分为粒间孔、古生物化石孔、自生矿物晶间孔以及自生矿物晶内孔,把有机质孔、矿物质孔、有机质与矿物颗粒间孔及微裂缝归为成岩后生改造型孔隙,而原生一次生型孔及重次生孔属于混合成因;最后再根据不同颗粒类型的特殊性加以细分。此种孔隙分类方案突出了孔隙成因的重要性,确定主次依据,既利于孔隙类型的确定,也利于孔隙特征的描述,且简单可行。孔隙成因很大程度上决定了页岩的吸附性能,对后期页岩气的资源评价及制定开发方案尤为重要。

2.4 典型的裂缝分类方案

裂缝单独列出是由于其不受单个基质颗粒的控制。总结前人研究发现,裂缝的研究较为分散,比较典型的划分方式有以下三种(表1):①杨峰等^[16]主要依据裂缝发育位置与周围基质的关系分为层间缝、骨架矿物相关缝、粘土矿物相关缝以及有机质相关缝,再按发育于粒间或粒内进一步细分;②郭旭升等^[35]和蒲泊伶等^[36]按成因与类别对裂缝分类,依次分为构造裂缝、成岩收缩缝、层面滑移缝、溶蚀缝以及有机质演化的异常压裂缝;③聂海宽和张金川^[37]依据裂缝宽度及长度划分裂缝类别,分类中体现了微型裂缝的特点,众多学者也广泛认为页岩储层中发育大量的微裂缝。

3 页岩气储层微观孔隙演化研究逐步趋于量化

页岩中的不同类型孔隙随着成岩演化的进行也在不断发生变化。邹才能等^[38]根据页岩成岩物理模拟实验及纳米级孔喉定量分析等研究,提出中国湖相富有机质页岩(I型干酪根)中宏孔隙($> 50\text{ nm}$)、中孔

表1 页岩气储层中几种典型裂缝分类方案
Table 1 Typical fracture classification schemes for shale gas reservoir

分类依据	类型	代表学者
产状类别	层间缝	杨峰等,2013
	骨架矿物粒间缝	
	粘土矿物粒间缝	
	骨架矿物粒内缝	
	粘土矿物粒内缝	
成因类别	有机质边缘缝	郭旭升等,2014; 蒲泊伶等,2014
	有机质内裂缝	
	构造裂缝	
	成岩收缩缝	
	层面滑移缝	
尺寸类别	溶蚀缝	聂海宽等,2011
	有机质演化异常压裂缝	
	巨型裂缝(宽度>1 mm;长度>10 m)	
	大型裂缝(宽度毫米级;长度1~10 m)	
	中型裂缝(宽度0.1~1 mm; 长度0.1~1 m)	
尺寸类别	小型裂缝(宽度0.01~0.1 mm; 长度0.01~0.1 m)	聂海宽等,2011
	微型裂缝(宽度<0.01 mm; 长度<0.01 mm)	

隙(2~50 nm)和微孔隙(<2 nm)的比孔容随温度增加呈现出不同的变化趋势,即宏孔隙的比孔容随温度和压力增加先增加后降低,中孔隙和微孔隙的比孔容先降低后增加。

何建华等^[31]提出页岩经历的不同成岩作用对页岩孔隙演化的影响是不同的(图3)。早成岩阶段,机械压实和化学压固作用使原生粒间孔和粒内孔大幅减少。郭秋麟等^[39]认为当埋深大于3 000 m时,孔隙度会不足8%,原生孔隙只剩下1%~2%。到达中成岩阶段,有机质成熟,有机酸同粘土矿物脱水形成的酸性水使碳酸盐岩和长石等易溶矿物产生溶孔。晚成岩阶段,孔隙小,渗透能力差,流体交换不畅,溶蚀作用大大受到限制,但随着油气的不断生成,有机质生烃后由于

体积缩小及生气时体积膨胀而造成有机质孔大量发育并产生微裂缝。Montgomery 等^[40]的实验研究表明,当处于生干气阶段(晚成岩阶段)时,镜质体反射率(R_o)平均为2.71%,有机质分解产生的孔隙对页岩孔隙度的贡献是巨大的。Loucks 等^[5]研究 Barnett 页岩发现,有机质孔在低成熟页岩中几乎不发育,而在高成熟样品中十分发育。纵贯成岩阶段始终,粘土矿物都不同程度地发生转化及脱水作用,随着埋藏增加,具有很大比表面积的蒙脱石含量将逐渐降低并逐渐变为伊/蒙混层,进而转化为伊利石带,在此过程中,粘土矿物的微孔隙比表面积和孔体积将会大大降低,形成大量粘土矿物层间孔和成岩收缩缝。

国外众多学者均肯定了随着 R_o 增大,有机质孔隙度呈增大的趋势(图3),但是,有机质孔与 R_o 之间的定量对应关系尚待进一步研究^[41]。Mastalerz^[2]提出了不同孔径大小的微孔同热演化之间的关系(图3)。初始压实阶段,宏孔隙和中孔隙减少,微孔隙呈增加趋势。 R_o 为0.5%时,初次破裂作用使得宏孔隙和中孔隙增加,而微孔隙开始减少。 R_o 达到1.0%时,石油充注和胶结作用导致三种孔隙的孔隙度均快速降低。当 R_o 大于1.4%时,二次破裂作用造成三种孔隙孔隙度开始增大。

4 页岩气储层微观孔隙发育控制因素复杂

不同地区、不同地质条件下的泥页岩微观孔隙发育类型不同^[7]。页岩气微观孔隙的发育及其演化,不是受单一的条件控制,而是多方面因素影响的综合体^[33,42]。研究发现,页岩气微观孔隙发育控制因素复杂多变,沉积环境、构造背景、岩性及矿物组分、有机碳含量(TOC)和干酪根类型、成岩演化或有机质演化程度(R_o)等因素,均不同程度地对微观孔隙的发育起控制作用,各种孔隙类型发育机制复杂。

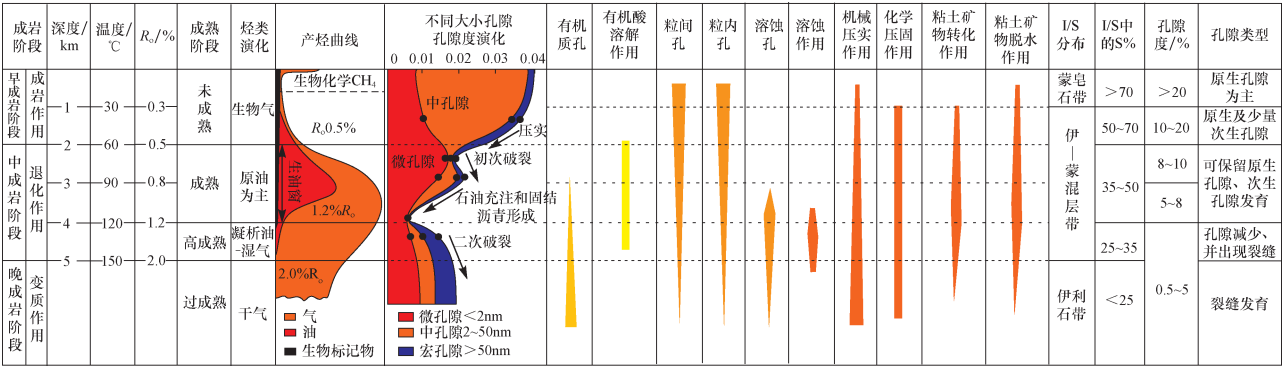


图3 页岩气微观储层孔隙演化及成岩演化特征简图^[2,31]

Fig. 3 Diagram of pore and diagenesis evolution characteristics of shale gas reservoirs^[2,31]

4.1 沉积环境、构造背景控制了微观孔隙发育的物质基础

古地理格局、沉积环境和母岩区类型控制着页岩的岩相和物质组成。Loucks 和 Ruppel^[43] 对美国 Barnett 页岩研究,提出了页岩形成的构造沉积模式。页岩中发现大量的非原地底栖的古生物化石碎片,认为这些古生物是由碎屑流、等深流等密度流体异地搬运到深海环境的,或是在静水环境下缓慢悬浮沉积的。同时页岩中球形黄铁矿的发育,表明了页岩发育于风暴浪基面及最小含氧面以下的厌氧还原环境。因此,综合认为 Barnett 页岩沉积于稳定的深海静水还原环境。构造环境稳定,古生物化石丰富,有机质含量高,各种矿物类型均较为发育,构成了页岩气储层孔隙形成的物质基础,导致页岩形成各种不同岩相(硅质页岩、钙质页岩、粉砂质页岩等)及发育不同类型的微小孔隙(如黄铁矿粒间孔)。因此,沉积环境和构造背景共同决定了页岩岩相、矿物组合等微观孔隙发育的物质基础。

4.2 岩性及矿物组分控制了孔隙类型及发育程度

岩性与矿物成分及含量的变化会影响页岩的岩石力学性质和孔隙结构,在一定程度上会减小或增大页岩的储集空间^[35]。页岩岩石类型主要包括钙质页岩、硅质页岩、云质页岩、粉砂质页岩、炭质页岩以及泥质页岩 6 种类型,不同岩性会导致页岩发育不同种类的孔隙空间,如硅质页岩及钙质页岩有机孔和矿物粒间孔较发育,泥质页岩较易发育粒内孔。页岩中的矿物组成主要包括脆性矿物、粘土矿物和有机质。脆性矿物含量是影响页岩基质孔隙度和微裂缝发育程度、含气性及压裂改造方式的重要因素^[36,37]。国内外不论是海相、海陆过渡相还是陆相页岩,其脆性矿物含量都比较高,达到 40% 以上,适合后期开发压裂改造。脆性矿物富集的页岩更易产生裂缝,同时增加抗机械压实能力,有利于原生孔隙的保存。碳酸盐等脆性矿物发生溶蚀作用时,还可发育较多次生孔隙。此外,莓状黄铁矿的增加也有助于页岩中孔隙的增加^[32-33]。脆性矿物含量与各级别孔隙一般呈现一定的正相关关系。但是,不同地区也会出现不同情况,同地质条件和成岩作用有关,如碳酸盐矿物发生胶结、重结晶作用,会充填孔隙及微裂缝造成储集空间被破坏^[31,33]。因此,方解石和白云石对页岩微孔隙发育的影响和贡献还需要进一步研究。

粘土矿物的种类和含量也影响微孔隙的类型及吸附气的多寡。Bustin 认为页岩储层中粘土矿物具有较高的微孔隙体积和较大的比表面积^[44]。但不同粘土

矿物晶层及孔隙结构不同,孔比表面积也存在很大的差别,如蒙脱石具有的孔比表面积明显高于其他类型的粘土矿物^[45],晶内微孔隙的结构和大小也存在差别。同时,随成岩阶段不同,粘土矿物会发生相互转化及脱水作用,产生层间微孔隙。粘土矿物质量分数与各级别孔隙一般呈一定的负相关关系,原因在于细粒的粘土矿物充填孔隙,堵塞孔喉,减少孔隙空间。脆性矿物与粘土矿物的相对含量与页岩微观储集空间的发育相关性定量研究仍需要进一步加强。

4.3 有机碳含量(TOC)和干酪根类型影响有机质孔的发育和比表面积

TOC 对页岩储层孔隙具有重要的贡献作用^[24],并且有机质颗粒三维排列特征对页岩的渗透性具有重要影响^[5]。Curtis 等国外学者对美国 5 大页岩气盆地有机碳含量统计表明,TOC 值一般为 0.5% ~ 4%,少数可以达到 25%,如果有机质少、呈分散状将导致页岩几乎无渗透能力^[40]。陈尚斌等研究川南龙马溪组页岩发现,TOC 与孔隙体积和孔隙比表面积间呈现较为显著的正线性关系^[8]。赵佩等研究川南下古生界海相页岩发现,微孔孔容、介孔孔容、宏孔孔容及孔隙度与 TOC 呈明显的正相关关系^[46]。这是由于有机质具有高微孔率和比表面积,有机质含量和页岩气的吸附能力呈正相关关系^[24,26],是影响页岩纳米孔隙体积、比表面积、孔隙度的主要因素。同时,有机碳含量也是影响裂缝发育的重要因素。阿巴拉契亚盆地的钻井表明,滑脱及其相关的伸展和收缩裂缝在 TOC 高的黑色页岩中更发育。此外,高 TOC 不仅有利于有机质孔的发育,其生烃产生的有机酸在一定程度上也有利于次生溶孔的发育。

Behar 和 Vandenbroucke 发现页岩中 5 ~ 50 nm 的孔隙尺寸取决于干酪根类型^[47]。干酪根由偏腐泥混合型到腐泥型,页岩的孔隙度和比表面积均减小。张廷山等^[33]研究四川盆地南部早古生代海相页岩发现,Ⅱ型干酪根页岩中的微观孔隙的比表面积和孔体积好于Ⅰ型干酪根页岩。其原因可能是Ⅱ型干酪根来源于较高等的浮游生物,其内部结构大且复杂,所形成的Ⅱ型干酪根含有多环芳香烃及杂原子官能团,造成微观孔隙通常比Ⅱ型干酪根大,进而影响了页岩的比表面积、孔体积等。

4.4 有机质演化影响不同类型孔隙的演化趋势

成岩演化或有机质演化程度(R_o)对页岩微观储层孔隙的影响较为复杂,并不是单纯的正相关或者负相关关系^[33]。原因在于演化程度综合影响了有机质产状及粘土矿物的种类,不同学者选取不同的有机质

演化程度(R_o)区间进行研究,会造成不同的相关性 & 变化趋势。但总体来说,随着演化程度增加,页岩储层的总孔隙度最终会呈现下降趋势^[11]。吴建国等^[10]研究鄂尔多斯盆地渭北地区页岩纳米孔隙时发现,随着 R_o (0.6%~1.6%)增大,大孔含量呈现出一种上升—极高值—缓慢下降的非线性趋势;中小孔正好与大孔相反,呈现出一种下降—极低值—缓慢上升的趋势;微孔含量随 R_o 整体呈现出升高的趋势(图4),当 R_o 大于1.6%时的变化并未做进一步探讨。程鹏等^[48]对富有机质页岩进行了纳米孔隙结构热模拟实验发现,当热演化程度介于0.7%~3.5%时,孔隙与演化程度有着明显的正相关关系。随后,微孔呈下降趋势,而中孔仍然缓慢上升(图4)。Curtis等^[41]选取Woodford页岩中具有不同有机质热演化 R_o (0.51%~6.36%)的样品进行观察,发现 R_o 低于0.9%的样品中很少发现有机质微孔,而随着 R_o 增加到2.0%,有机质微孔逐渐增多,大于2.0%之后有机质微孔反而变少(图4)。可以看出,前人对各类孔隙随 R_o 的变化还需要进一步加强量化研究。

5 页岩气储层微观孔隙研究展望

针对上述页岩气储层微观储集空间划分、微观孔隙演化及其控制因素等方面存在的不足或缺陷,提出以下三个方面的页岩气储层微观孔隙研究展望。

5.1 加强微观孔隙分类标准及划分方案的研究

前述页岩微观孔隙类型划分标准不一,孔隙类型及命名术语纷乱,急需统一孔径划分标准,提出一个较为全面、系统的孔隙划分方案。笔者认为,页岩微观储层孔隙类型划分应具有高度的概括性、科学性及实用性,应遵循以下3个方面的原则:①科学、客观性原则。微观储层孔隙分类标准要科学、客观地反映页岩微观储层最新的研究进展,要全面地反映前人提出的各类微观孔隙划分结果。确定的分类依据及标准要主次分

明,如先将储集空间分为孔隙与裂缝两部分,然后进一步根据次级分类依据进行细分;②全面、系统性原则。兼顾孔隙大小、产状、成因等因素,精选微观孔隙结构表征参数,全面、系统地揭示和表征孔隙的发育特征;③简单、适用性原则。在系统分类的基础上,划分标准既要全面还要简单,并适用于不同的地区,为不同地区页岩气的微观储层评价及宏观勘探开发提供科学依据;④继承、创新性原则。划分标准和术语既要继承常规碎屑岩储集空间的分类,同时要有适合微观储集空间表征的创新性标准和术语。

5.2 加强微观孔隙发育控制因素和孔隙演化定量评价研究

深入研究页岩气微观储集空间随脆性矿物(如石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿等)种类及含量、粘土矿物(如蒙脱石、伊蒙混层、伊利石、高岭石、绿泥石)种类及含量、有机质类型(干酪根类型)和TOC、 R_o 的不同而发生的变化规律,分析各类孔隙发育的主控因素,探讨各类微观孔隙与主控因素之间的相关性。并进一步通过实验模拟不同物质组成、有机质类型和TOC及 R_o 相对较低的岩样在高温高压演化过程中,各种微观孔隙结构的演变规律,定量分析各种控制因素与各类微观孔隙之间的相关性。

5.3 改善测试手段,提高测量精度和范围

目前国内外研究页岩气微观储层孔隙结构的方法主要包括图像分析技术、非流体注入技术和流体注入技术3种类型^[18]。这些方法技术能够详细表征页岩储层中孔隙的大小、形态、结构及孔径分布等特征,但有些方法仍然存在其局限性。如Nano-CT技术是目前最前沿的分析技术,可以无损分析、连续扫描及三维重构页岩孔隙的连续变化^[49-51],但Nano-CT所测得样品非常细小,不足以代表整个岩石的孔隙分布,不能很好地反映页岩强烈的各向异性。因此,目前仍然需要进一步完善各类测试手段和方法,提高测量精度和范围,使页岩微观储集空间能够直观地、形象地、全方位地展现和表征出来^[51]。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Mastalerz M, Schimmelmann A, Drobnik A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(10): 1621-1643.
- [3] Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, et al. Organic matter-hosted

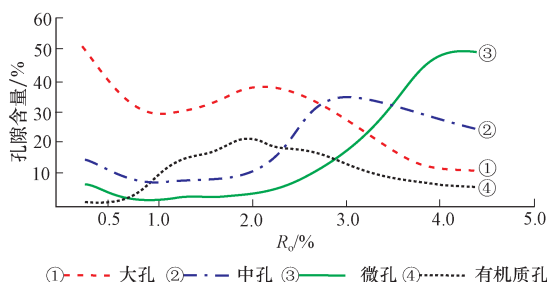


图4 不同类型孔隙含量随 R_o 变化关系示意图^[10,41,48]

Fig. 4 Sketch map of relationship between vitrinite reflectance (R_o) and content of different type of pores^[10,41,48]

- pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 177–200.
- [4] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 615–623.
Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research advances of micro-structure in unconventional tight oil and reservoirs [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 615–623.
 - [5] 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.
 - [6] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857–1864.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857–1864.
 - [7] 杨超, 张金川, 李婉君, 等. 辽河坳陷沙三、沙四段泥页岩微观孔隙特征及其成藏意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 286–294.
Yang Chao, Zhang Jinchuan, Li wanjun, et al. Microscopic pore characteristics of Sha-3 and Sha-4 shale and their accumulation significance in Liaohde Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 286–294.
 - [8] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438–444.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438–444.
 - [9] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 708–716.
Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 708–716.
 - [10] 吴建国, 刘大猛, 姚艳斌. 鄂尔多斯盆地渭北地区页岩纳米孔隙发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 542–550.
Wu Jianguo, Liu Dameng, Yao Yanbin. Characteristics and controlling factors of nanopores in shales in Weibei, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 542–550.
 - [11] 梁兴, 张廷山, 杨洋, 等. 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 18–26.
Liang Xing, Zhang Tingshan, Yang Yang, et al. Microscopic pore structure and its controlling factors of overmature shale in the Lower Cambrian Qiongzhusi Fm, northern Yunnan and Guizhou provinces of China [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 18–26.
 - [12] 周德华, 焦方正, 郭旭升, 等. 川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 450–454.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geological features of the Lower Jurassic shale gas play in Fuling area, the southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 450–454.
 - [13] 刘伟, 余谦, 闫剑飞, 等. 上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 346–352.
Liu Wei, Yu Qian, Yan Jianfei, et al. Characteristics of organic-rich mudstone reservoirs in the Silurian Longmaxi Formation in Upper Yangtze region [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 346–352.
 - [14] Zhang Q, Zhu X M, Steel R J, et al. Variation and mechanisms of clastic reservoir quality in the Paleogene Shahejie Formation of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Science, 2014, 11(2): 200–210.
 - [15] 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.
 - [16] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301–311.
Yang Feng, Ning Zhengfu, Huchangpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(2): 301–311.
 - [17] 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.
 - [18] 焦堃, 姚素平, 吴浩, 等. 页岩气储层孔隙系统表征方法研究进展[J]. 高校地质学报, 2014, 20(1): 151–161.
Jiao Kun, Yao Suping, Wuhao, et al. Advances in characterization of pore system of gas shales [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(1): 151–161.
 - [19] Jarvie D M. Unconventional Shale resource plays: shale-gas and shale-oil opportunities [C]. USA: Fort Worth Business Press, 2008: 10–12.
 - [20] O'Brien N R. Fabric of kaolinite and illite floccules [J]. Clays and Clay Minerals, 1971, 19(6): 353–359.
 - [21] Bennett R H, O'Brien N R, Hulbert M H. Determinants of clay and shale microfabric signatures: Processes and mechanisms [M] // Micro-structure of Fine-Grained Sediments: From mud to shale. New York: Springer-Verlag, 1991, 5–32.
 - [22] O'Brien N R, Slatt R M. Argillaceous rock atlas [M]. New York: Springer-Verlag, 1990, 133–137.
 - [23] Katsube T J. Statistical analysis of pore-size distribution data of tight shales from the Scotian Shelf [M]. Canada: Geological Survey of Canada, 1992: 65–372.
 - [24] 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.
 - [25] Singh P, Slatt R, Borges G, et al. Reservoir characterization of unconventional gas shale reservoirs: Example from the Barnett Shale, Texas, USA [J]. Oklahoma City Geological Society, 2009, 60(1): 15–31.
 - [26] Chalmers G, Bustin R M, Powers I. A pore by any other name would be as small: The importance of meso- and microporosity in shale gas capacity [C]. Denver: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2009, 7–10.
 - [27] Passey Q R, Bohacs K M, Esch W L, et al. From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir-geologic and petrophysical characterization of unconventional shale-gas reservoirs [C]. SPE, 2010.
 - [28] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales [C]. SPE, 2010.
 - [29] 陈一鸣, 魏秀丽, 徐欢. 北美页岩气储层孔隙类型研究的启示[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(4): 19–22.
Chen Yiming, Wei Xiuli, Xu Huan. Suggestions from the research of pore types of shale gas reservoir in North America [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(4): 19–22.
 - [30] Modica C J, Lapierre S G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: Example from the Mowry Shale in the Powder River Basin of Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 87–108.

- [31] 何建华,丁文龙,付景龙,等. 页岩微观孔隙成因类型研究[J]. 岩性油气藏,2014,26(5):30-35.
He Jianhua, Ding Wenlong, Fu Jinglong, et al. Study on genetic type of micropore in shale reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(5):30-35.
- [32] 钟太贤. 中国南方海相页岩孔隙结构特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(9):1-4.
Zhong Taixian. Characteristics of pore structure of marine shales in South China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9):1-4.
- [33] 张廷山,杨洋,龚其森,等. 四川盆地南部早古生代海相页岩微观孔隙特征及发育控制因素[J]. 地质学报,2014,88(9):1728-1740.
Zhang Tingshan, Yang Yang, Gong Qisen, et al. Characteristics and Mechanisms of the Micro-pores in the Early Palaeozoic Marine Shale, Southern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9):1728-1740.
- [34] Sing K S. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4):603-619.
- [35] 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.
- [36] 蒲泊伶,董大忠,吴松涛,等. 川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(4):19-25.
Pu Boling, Dong Dazhong, Wu Songtao, et al. Microscopic space types of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4):19-25.
- [37] 聂海宽,张金川. 页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质,2011,33(3):219-225.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3):219-225.
- [38] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):14-26.
- [39] 郭秋麟,陈晓明,宋焕琪,等. 泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. 天然气地球科学,2013,24(3):439-449.
Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Song Huanqi, et al. Evolution and Models of Shale Porosity During Burial Process[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3):439-449.
- [40] 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.
- [41] 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, 2012, 96(4):665-677.
- [42] Valenza J J, Drenzek N, Marques F, et al. Geochemical controls on shale microstructure[J]. Geology, 2013, 41(5):611-614.
- [43] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):579-601.
- [44] Bustin R M, Bustin A M, Cui A, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics[C]. SPE, 2008.
- [45] 吉利明,邱军利,夏燕青,等. 常见粘土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. 石油学报,2012,33(2):249-256.
Ji Liming, Qiu Junli, Xia Yanqing, et al. Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2):249-256.
- [46] 赵佩,李贤庆,田兴旺,等. 川南地区龙马溪组页岩气储层微孔隙结构特征[J]. 天然气地球科学,2014,25(6):947-956.
Zhao Pei, Li Xianqing, Tian Xingwang, et al. Study on micropore structure characteristics of Longmaxi Formation shale gas reservoirs in the Southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6):947-956.
- [47] Behar F, Vandenbroucke M. Chemical modelling of kerogens[J]. Organic Geochemistry, 1987, 11(1):15-24.
- [48] 程鹏,肖贤明. 很高成熟度富有机质页岩的含气性问题[J]. 煤炭学报,2013,38(5):737-741.
Cheng Peng, Xiao Xianming. Gas content of organic-rich shales with very high maturities[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5):737-741.
- [49] 白斌,朱如凯,吴松涛,等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔喉结构[J]. 石油勘探与开发,2013,40(3):329-333.
Bai Bin, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Multi-scale method of Nano (Micro)-CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3):329-333.
- [50] 李光,罗守华,顾宁. Nano CT 成像进展[J]. 科学通报,2013,58(7):501-509.
Li Guang, Luo Shouhua, Gu Ning. Research progress of Nano CT imaging[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(7):501-509.
- [51] 李军,路菁,李争,等. 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):266-271.
Li Jun, Lu Jing, Li Zheng, et al. 'Four-pore' modeling and its quantitative logging description of shale gas reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):266-271.

(编辑 张亚雄)