

鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩孔隙类型划分方案及其油气地质意义

王香增¹, 张丽霞¹, 李宗田², 伏海蛟³

[1. 延长石油集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083]

摘要:鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩储层作为一种非常规储集体, 对于其孔隙类型划分, 当前国内尚无针对性的划分方案。为此, 充分调研了国内外页岩储层孔隙类型分类方案, 并从中优选出 Loucks 和于炳松的分类方案, 结合延长组陆相页岩孔隙类型扫描电镜观察结果, 对 Loucks 和于炳松的分类方案适当修改, 提出了针对性更强的延长组陆相页岩孔隙类型划分方案, 以期对延长石油陆相页岩气的发展提供理论支撑。此外, 通过氩离子抛光扫描电镜观察, 分析了延长组陆相页岩储层孔隙类型发育特征, 系统研究了各类孔隙的形成机制、发育规模及油气地质意义。实验结果表明, 延长组陆相页岩中粘土集合体内矿物片间孔隙油气地质意义最大; 其次为黄铁矿晶间孔隙、有机质孔隙、裂缝孔隙和粘土矿物片间孔隙; 再次为刚性颗粒间孔隙及边缘孔; 石英颗粒溶孔孔径小、连通性差, 油气地质意义最小。

关键词:孔隙结构; 孔隙分类方案; 陆相页岩; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Pore type classification scheme for continental Yanchang shale in Ordos Basin and its geological significance

Wang Xiangzeng¹, Zhang Lixia¹, Li Zongtian², Fu Haijiao³

[1. Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China]

Abstract: The continental Yanchang shale reservoirs in Ordos Basin are unconventional reservoirs, for which no specific pore classification scheme is available. Based on an investigation of pore type classifications of both abroad and domestic, we selected two classification schemes suggested by Loucks and Yubingsong and proposed a new classification upon modification of the previous two by combining the actual observation data of samples taken from the Formation. Argon ion milling scanning electron microscope was employed to characterize and systematically probe into pore development (including forming mechanisms, scale and geological bearings) of the reservoirs. The results show that pores in between congregated mineral lamellae contribute most to oil and gas poolings and followed by pyrite intergranular pores, organic pores, microfractures and pores in clay mineral lamellae. Intergranular pores and edge pores of rigid particles are still less meaningful in terms of geological indication. Solution pores among quartz grains are believed to be the least important among all types of pores found in the reservoirs.

Key words: pore structure, classification scheme, continental shale, Ordos Basin

近年来,随着页岩气勘探开发热的兴起,长久以来被认为只能作为烃源岩和盖层的泥页岩,开始以一种全新的姿态进入人们的视野之中。中国南方地区的下寒武统牛蹄塘组、下志留统龙马组等海相页岩地层取得关键突破,已建立一系列页岩气勘探开发示范

区^[1-4]。随着页岩气勘探开发过程的进行,人们发现对页岩储层微观孔隙结构及其分类的研究,无论是广度还是深度都还远远不够,陆相页岩孔隙类型研究更为尤甚^[5]。

陆相页岩作为一种特殊的油气储集类型,具有特

收稿日期:2015-06-24;修订日期:2015-11-09。

第一作者简介:王香增(1968—),男,教授级高级工程师,油气勘探开发。E-mail: sxycpcwxz@126.com。

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2012KTZB03-01-01);国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA064500);国家科技支撑计划项目(2012BAC26B00)。

低孔、特低渗、孔隙结构复杂多样的特征,不同的孔隙类型在页岩气成藏及后期开发过程中油气地质意义明显不同,针对性的划分孔隙类型及油气地质意义研究将对延长石油陆相页岩气发展产生长远影响^[6-7]。当前,海内外学术界对海相页岩孔隙类型的划分方案五花八门,而对于陆相页岩,尤其是鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩的孔隙类型划分方案很少。陆相页岩与海相页岩相比,其沉积环境、构造发育、矿物组成、干酪根类型、有机地化、页岩气赋存富集机理等方面均存在较大差异,陆相页岩孔隙类型研究不能完全照搬海相页岩孔隙研究成果,应借鉴其研究手段,有针对性地开展工作。

1 样品地质背景及实验方法

鄂尔多斯盆地位于我国中部,为稳定的克拉通盆地,地层发育全、变形弱,除边缘地区外,断裂构造和局部隆起都不甚发育。根据现今构造格局,盆地划分为六大构造单元,分别为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环坳陷和西缘逆冲带(图1)。其中,伊陕斜坡面积最大,构造形态简单,为一东高西低的单斜,倾角小于 1° 。本次实验的泥页岩样品均取自伊陕斜坡上三叠统延长组7段(长7段)泥页岩地层。该套泥页岩地层为一套深湖-半深湖湖相页岩沉积,埋深较浅(1 500~1 600 m),厚度约为几米至几十米,分布稳定,具有区域对比性。干酪根类型以 II_1 型为主, I 型为辅,有机碳含量(TOC)高,约为2%。陆相页岩由于地质年代较新,有机质成熟度略低,镜质体反射率(R_0)为0.7%~1.3%,处于成熟生油及伴生气阶段。矿物成分以粘土矿物为主,含量为40%~60%,石英(20%~25%)、长石(10%~20%)、碳酸盐(2%~4.5%)及黄铁矿(1%~14%)等刚性矿物含量相对较少,粘土矿物以伊/蒙混层为主,伊利石、高岭石及绿泥石次之。

扫描电镜实验首先采用 HITACH IM400 型抛光仪对页岩样品进行氩离子抛光操作;然后,将抛光后的样品固定在样品台上,利用 eIGMA 型热场发射扫描电镜开展工作,观察陆相页岩孔隙的形状、大小及分布规律,并分析其孔隙类型、成因特征及油气地质意义。对于不确定的矿物颗粒,可借助能谱分析手段(EDS)计算各元素的精确含量,进而推断矿物成分。

2 延长组陆相页岩孔隙类型划分方案

传统意义上讲,常规砂岩储层及碳酸盐岩储层孔隙类型常被划分为粒间孔与粒内孔两种^[8-9]。由于泥

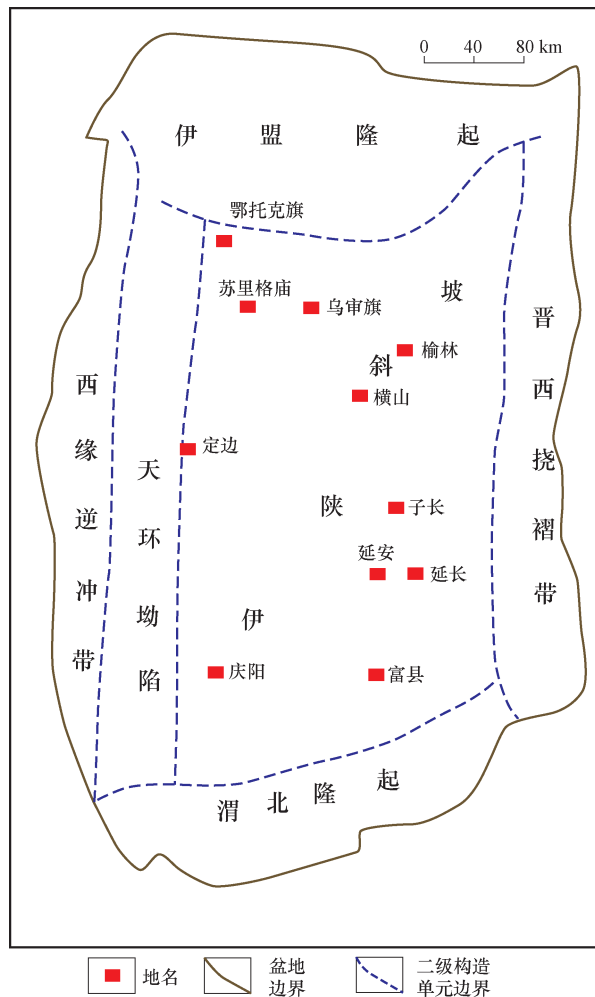


图1 研究区地理位置及构造区划

Fig. 1 Location and tectonic divisions of the study area

页岩储层的特殊存在型式,传统孔隙划分方案根本无法满足要求。泥页岩作为一种致密性储层,其纳米级孔隙成因更加复杂、孔隙类型更加多样^[10]。近年来,国内外专家学者利用氩离子抛光扫描电镜技术在泥页岩储层中识别出了更多的孔隙类型,进一步促进了页岩储层孔隙类型划分方案的发展。

Reed 等(2007)首次将氩离子抛光技术应用到页岩样品中,在页岩有机质中识别出大量的纳米级孔隙^[11]。Loucks 等(2009)通过对 Barnett 页岩储层的研究,将北美海相页岩储层孔隙划分为微米孔(孔径 $>0.75\text{ }\mu\text{m}$)与纳米孔(孔径 $<0.75\text{ }\mu\text{m}$)两类^[12]。Slatt 等(2011)基于 Barnett 与 Woodford 页岩孔隙类型研究,将其划分为粘土絮体间孔隙、有机质孔隙、粪球粒间孔隙、化石碎屑内孔隙、颗粒内孔隙和微裂缝通道^[13]。Loucks 等(2012)进一步深化研究,将泥页岩基质孔隙分为粒间孔隙、粒内孔隙及有机质孔隙^[14]。国内专家针对页岩孔隙类型划分开展了一系列的研究。蒋裕强等(2010)将页岩的储集空间分为基质孔隙与裂缝,基质孔隙分为残余原生孔隙、有机质生烃形成的

微孔隙、粘土矿物伊利石化形成的微裂(孔)隙和不稳定矿物溶蚀形成的溶蚀孔等^[15]。邹才能等(2010)通过四川盆地古生界海相页岩储层的研究,将海相页岩孔隙分为有机质纳米孔、颗粒内纳米孔和有机质中的微裂缝^[16-18]。聂海宽等(2011)将四川盆地及其周缘下古生界页岩孔隙分为有机质孔、矿物质孔以及两者之间的孔隙^[19]。杨峰等(2013)根据页岩孔隙发育位置和发育成因,将其划分为有机质纳米孔、粘土矿物粒间孔、岩石骨架矿物孔、古生物化石孔和微裂缝^[20]。

本文基于 Loucks 与于炳松(2013)的页岩孔隙类型划分方案^[21],通过对延长组陆相页岩孔隙结构观察研究,对陆相页岩中不发育或极少发育的部分孔隙类型加以删减,总结归纳出延长组陆相页岩针对性更强的孔隙类型划分方案(表1)。该方案基本遵循于炳松的“孔隙产状分类+结构类型分类”的划分思路,首先根据孔隙与岩石颗粒之间的位置关系分三级进行孔隙产状分类:第一级为类,可分为基质孔隙与裂缝孔隙两种;第二级为亚类,主要针对基质孔隙开展工作,将其分为粒间孔隙、粒内孔隙及有机质孔隙三类;第三类为微类,亚类粒间孔隙可进一步细化为颗粒间孔、晶间孔隙、矿物片间孔隙及刚性颗粒边缘孔隙,亚类粒内孔隙可进一步细化为黄铁矿晶间孔隙、粘土集合体内矿物片间孔隙及颗粒内孔隙。然后,按孔径 $<2\text{nm}$ 、孔径 $=2\sim 50\text{nm}$ 及孔径 $>50\text{nm}$,将孔隙依次分为微孔隙、中孔隙及大孔隙,以此为依据开展结构分类,将孔隙产状分类与结构类型分类结合起来,既可进行孔隙类型的定性观察与半定量描述,亦可开展定量测定与评价工作。新方案的主要优势在于,它既吸收了前人研究成果中的精华(即“孔隙产状分类+结构类型分类”的分类思路),亦通过对延长组陆相页岩孔隙类型的细致性观察研究,有针对性地筛选陆相页岩中不发育或极少发育的部分孔隙类型,并最终提出兼容性更好的分类方案。

3 延长组陆相页岩各类孔隙油气地质意义

与海相页岩相比,延长组陆相页岩地质年代较新、有机质成熟度较低、粘土矿物较发育及刚性颗粒矿物发育较差,其粒内孔发育程度优于海相页岩,有机质孔与粒间孔发育程度相对较差;裂缝发育程度主要受沉积环境与构造因素影响较大,与海相页岩还是陆相页岩关系不大^[22]。本文通过氩离子抛光扫描电镜实验,对延长组陆相页岩中粒内孔隙、有机质孔隙、裂缝孔隙及粒间孔隙等亚类孔隙类型的形成机制、发育规模及油气地质意义分别展开论述。

3.1 粒内孔隙

粒内孔隙是指发育在颗粒内部的孔隙,这类孔隙多为成岩作用后期改造而形成,原生较少。延长组陆相页岩受沉积环境及成岩条件的影响,其矿物成分以粘土矿物为主,刚性颗粒矿物含量较低,导致粘土集合体内矿物片间孔十分发育,黄铁矿晶间孔与石英颗粒粒内孔等亦比较常见,少见方解石粒内溶孔、长石粒内孔、白云石粒内孔及重晶石粒内孔等。

黄铁矿晶间孔在陆相泥页岩地层中广泛发育(图2a,d),黄铁矿团块有时被强烈溶解,局部充填有机质及矿物雏晶,有机质常与黄铁矿颗粒呈包裹与被包裹的关系,颗粒内中孔与有机质大孔缝广泛发育,孔径可达数十纳米,孔隙连通性较好,有利于页岩气成藏。化学稳定性较差的粘土矿物,在成岩过程中极易转化为伊/蒙混层或伊利石,转化过程中形成大量粘土集合体内矿物片间中孔(图2c),孔径约为 $5\sim 50\text{nm}$,孔隙连通性非常好,为陆相页岩气重要的存储空间及运移通道^[23]。石英颗粒粒内中孔在陆相页岩储层中偶尔发育,孔径约为 $10\sim 100\text{nm}$,孔隙连通性较

表1 鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩孔隙类型划分新方案

Table 1 New classification scheme of pore types for the continental shale of the Yanchang Formation in the Ordos Basin

孔隙产状分类			孔隙结构分类		
类	亚类	微类	微孔隙($<2\text{nm}$)	中孔隙($2\sim 50\text{nm}$)	大孔隙($>50\text{nm}$)
岩石 基质 孔隙	粒 间 孔	颗粒间孔	颗粒间微孔	颗粒间中孔	颗粒间大孔
		晶间孔	晶间微孔	晶间中孔	晶间大孔
		粘土矿物片间孔	粘土矿物片间微孔	粘土矿物片间中孔	粘土矿物片间大孔
		刚性颗粒边缘孔	刚性颗粒边缘微孔	刚性颗粒边缘中孔	刚性颗粒边缘大孔
	粒 内 孔	黄铁矿晶间孔	黄铁矿晶间微孔	黄铁矿晶间中孔	黄铁矿晶间大孔
		粘土集合体内矿物片间孔	粘土集合体内矿物片间微孔	粘土集合体内矿物片间中孔	粘土集合体内矿物片间大孔
		颗粒内孔	颗粒内微孔	颗粒内中孔	颗粒内大孔
	有机质内孔		有机质内微孔	有机质内中孔	有机质内大孔
	裂缝		微裂缝	中裂缝	大裂缝

注:基于 Loucks 与于炳松页岩孔隙类型划分方案基础上修改提出^[21]。

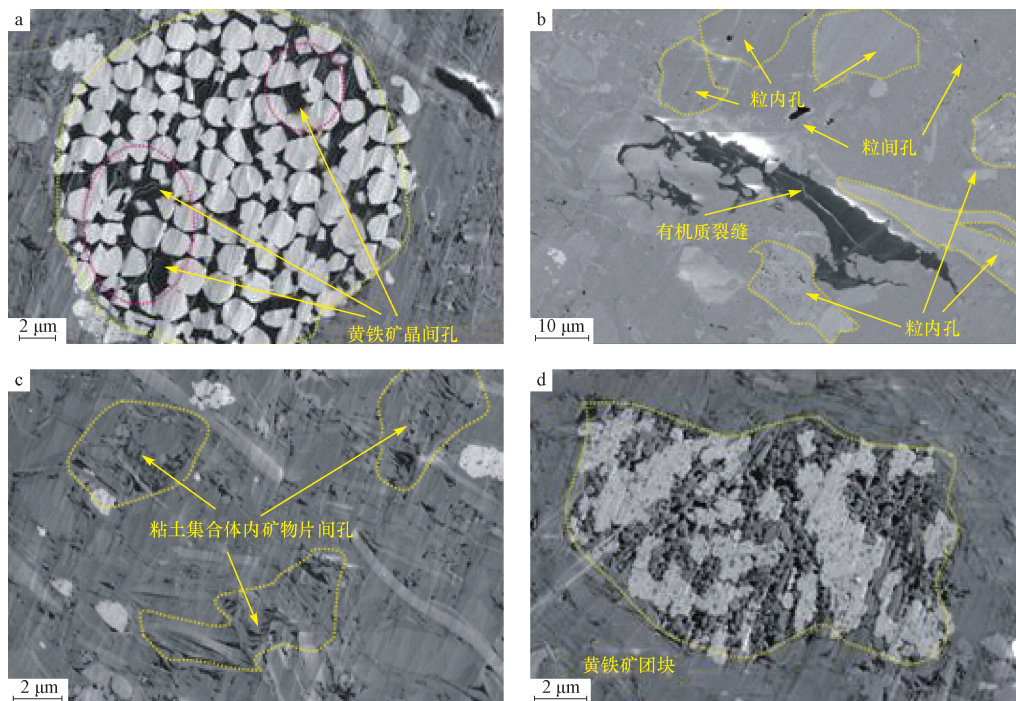


图2 鄂尔多斯盆地延长组陆相泥页岩中发育的粒内孔(SEM)

Fig. 2 Intragranular pores developed in the continental shale of the Yanchang Formation in the Ordos Basin (SEM)

- a. 黄铁矿晶间孔; b. 石英颗粒粒内孔与粒间孔、有机质裂缝伴生发育; c. 粘土集合体内矿物片间孔;
d. 黄铁矿团块中发育大量孔隙

差,对页岩气成藏影响较小(图2b)。

3.2 有机质孔隙

有机质孔隙主要指有机质团块内部或有机质生烃后内部残留的孔隙,其形成、分布及大小与泥页岩中有机质丰度、类型及热成熟度密切相关。当烃源岩达到生烃门限时,有机质开始向烃类物质转化,泥页岩中开始产生生、排烃作用形成的有机质孔隙。当有机质成熟度达到高-过成熟阶段时,其有机质孔数量及孔径大小均大幅提高,其孔径可达到5~200 nm。有机质孔隙一般呈片麻状、凹坑状、椭圆形、多角形及不规则形状等(图3),孔径范围变化较大,约为5~1 500 nm,属于中-大孔范围,不仅发育纳米级有机质孔隙,甚至发育微米级有机质孔隙,常伴生发育黄铁矿晶间孔、粘土矿物片间孔、矿物颗粒孔等孔隙类型,储层物性条件非常好,有机质裂缝缝宽甚至可达100 nm,可为页岩气渗流运移提供通道。

有机质一般存在于刚性颗粒骨架之中,这些刚性颗粒骨架本身具备一定的连通性,有机质团块并非为独立的个体,一般具有较好的连通性。此外,由于有机质对烃类物质存在特殊的吸附性能,这种具有一定孔径与连通性能的储集体必然成为页岩储层中非常重要的一类孔隙。总之,富含大量有机孔并且具备较好连通性的干酪根孔隙网络有利于在页岩储层中形成渗流通道,提高页岩储层的渗透率。

3.3 裂缝

页岩中裂缝大多由粘土矿物脱水或烃类增压等非构造成因形成,在肉眼或普通光学显微镜中不可见,可利用高精度扫描电镜进行观察。石英矿物含量、有机碳含量及页岩层厚度是影响微裂缝发育的主控因素,石英含量高、有机碳含量高、页岩地层薄,均有利于形成裂缝。

延长组陆相页岩地层中裂缝发育程度、缝宽及延伸性均较好(图4)。缝宽分布范围较大,约为10~500 nm,既包括中裂缝,亦包括大裂缝,缝长可达30~200 μm;裂缝大多呈平行-近平行状展布,切割刚性矿物颗粒、黄铁矿团块及粘土矿物集合体,可有效沟通不同的孔隙类型。裂缝既可被黑色有机质完全充填、亦可被局部充填,无论黑色有机质以哪种型式存在,都证明在过去的某个地质时期页岩储层中发生过烃类物质的运移作用。总之,裂缝作为页岩储层的渗流通道,既有利于增加页岩孔隙的连通性,提高气相渗透率,亦有利于增加页岩储层中游离态天然气的聚集与吸附态天然气的解吸。

3.4 粒间孔隙

陆相页岩与海相页岩相比,石英、长石等刚性颗粒矿物含量相对较少,粘土矿物含量相对较多。刚性颗粒矿物常以分散状镶嵌于粘土矿物与有机质中,不太容易形成颗粒支撑,粒间孔隙发育情况较差,主要存在

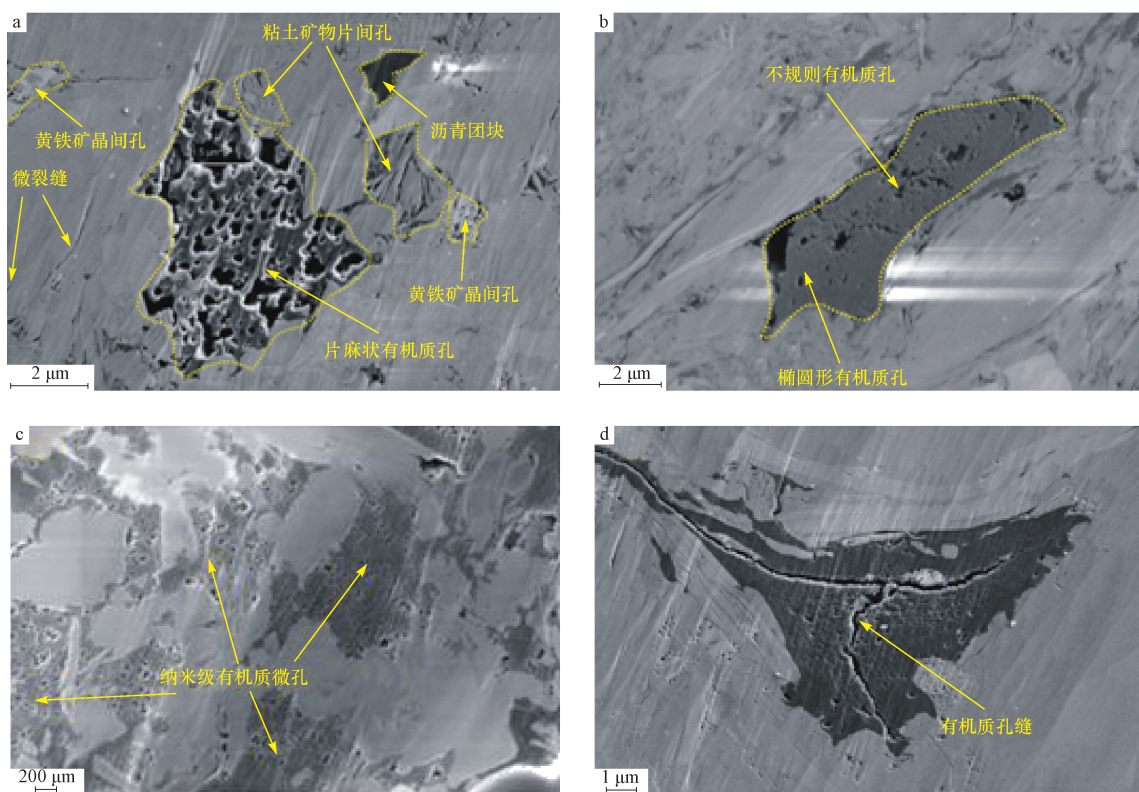


图3 鄂尔多斯盆地延长组陆相泥页岩中发育的有机质孔(SEM)

Fig. 3 Organic pores developed in the continental shale of the Yanchang Formation in the Ordos Basin (SEM)

a. 片麻状有机质孔;b. 不规则有机质孔;c. 纳米级有机质微孔;d. 有机质孔缝

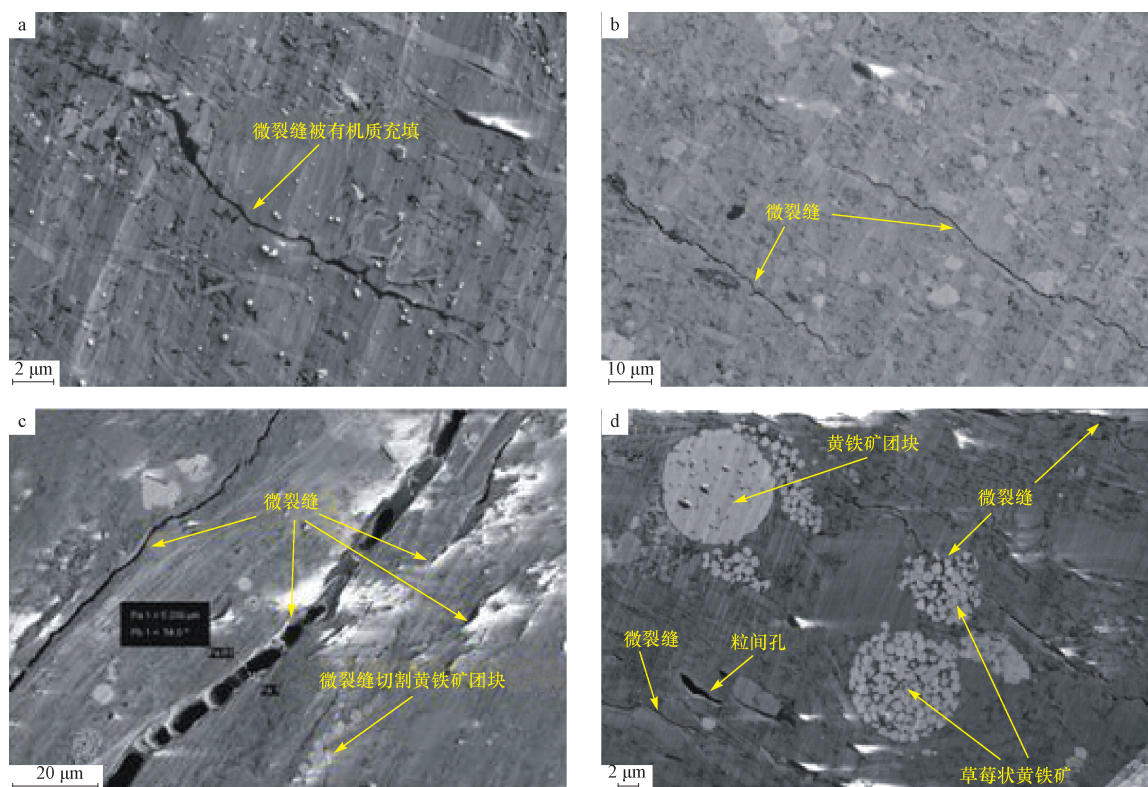


图4 鄂尔多斯盆地延长组陆相泥页岩中发育的微裂缝(SEM)

Fig. 4 Microcosmic fractures developed in the continental shale of the Yanchang Formation in the Ordos Basin (SEM)

a. 微裂缝被有机质完全充填;b. 微裂缝呈平行状展布;
c. 微裂缝切割黄铁矿团块,局部被有机质充填;d. 微裂缝切割黄铁矿团块,与粒间孔伴生发育

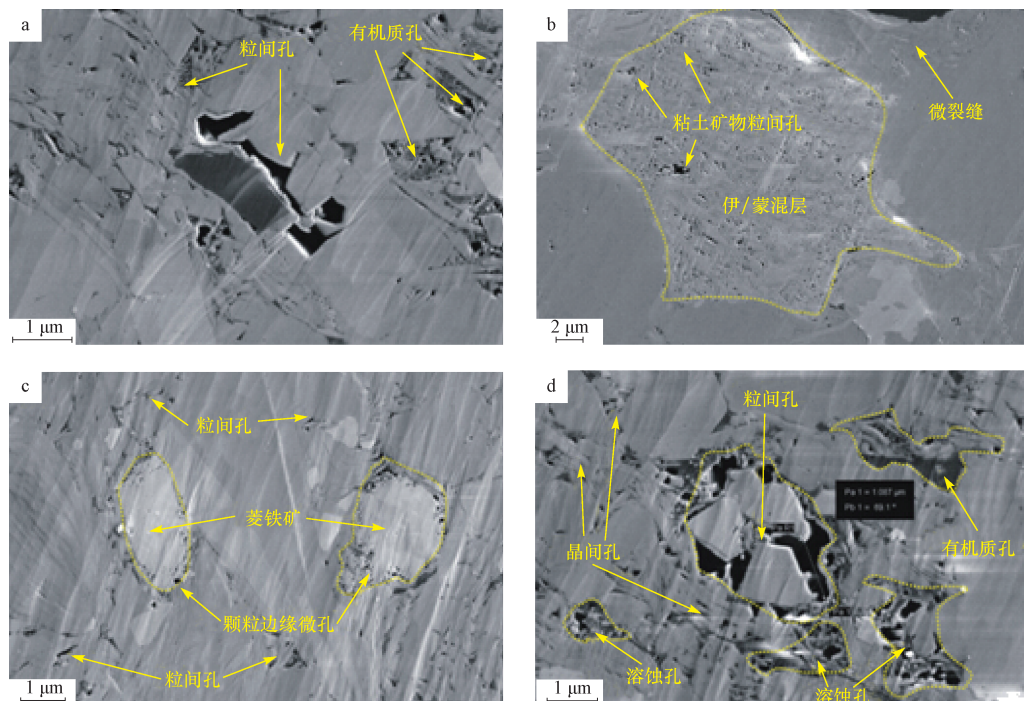


图5 鄂尔多斯盆地延长组陆相泥页岩中发育的粒间孔(SEM)

Fig. 5 Intergranular pores developed in the continental shale of the Yanchang Formation in the Ordos Basin (SEM)

- a. 颗粒间大孔隙与有机质孔伴生发育; b. 粘土矿物粒间孔与微裂缝伴生发育;
c. 菱铁矿颗粒边缘孔与粒间孔伴生发育; d. 粒间孔与有机质孔、晶间孔、溶蚀孔伴生发育

于少量的脆性矿物颗粒或者晶粒之间以及脆性矿物颗粒及粘土矿物之间。粒间孔隙的几何形态受原始孔隙与成岩作用共同控制,受压实与胶结作用的影响,刚性颗粒之间的残余孔隙空间大多呈三角形状展布,部分较大的粘土矿物片之间的残余孔隙空间呈线条状产出,孔隙规模一般较大,孔径可达到微米级。

延长组陆相页岩粒间孔隙发育较少,以粘土矿物片间中孔为主(图5b),颗粒间大孔(图5a,d)、刚性颗粒边缘微-中孔发育一般(图5c)。粘土矿物片间中孔多发育于伊/蒙混层聚集体(絮状)中,内部具纸房子微观构造;而纸房子构造呈开放型,孔隙之间具有一定的连通性,有利于增强气体渗流能力,为烃类物质运移提供微观通道,有利于页岩气成藏。颗粒间大孔局部被有机质团块及自身矿物所充填,晶间孔、溶蚀孔及有机质微孔常伴生发育,可通过能谱分析图去判断元素的含量(图5e)及孔隙类型的存在;该类储层物性条件非常好,但由于发育规模有限,对陆相页岩气成藏影响较小。

4 结论

1) 针对鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩孔隙类型提出了新方案。在孔隙产状分类中,将基质孔隙划分为粒间孔隙、粒内孔隙及有机质孔隙等亚类孔隙。亚类孔隙进一步细化为微类孔隙,亚类粒间孔隙划分为

颗粒间孔、晶间孔隙、矿物片间孔隙及刚性颗粒边缘孔隙,亚类粒内孔划分为黄铁矿晶间孔隙、粘土集合体内矿片间孔隙及颗粒内孔隙。

2) 在孔隙结构类型分类中,按孔径 $<2\text{ nm}$ 、孔径 $=2\sim50\text{ nm}$ 及孔径 $>50\text{ nm}$,将孔隙依次分为微孔隙、中孔隙及大孔隙。采用这种分类方案,一方面可对陆相页岩孔隙类型开展定性-半定量-定量的观察、描述及评价工作;另一方面,对鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩不存在划分方案兼容性问题,针对性更强。

3) 延长组陆相页岩储层中粒内孔隙最为发育,裂缝与有机质孔隙次之,粒间孔隙发育最差。粘土集合体内矿物片间孔含量多、孔径大及连通性好,为延长组陆相页岩储层中最有利储集与渗流空间,油气地质意义最重要;黄铁矿晶间孔与有机质孔缝伴生发育,孔隙连通性好,有利于页岩气成藏。

4) 陆相页岩中有机质孔隙虽发育规模不及海相页岩,但由于其可直接沟通有机质与其他孔隙类型,在陆相页岩储层中油气地质意义不容忽视。裂缝在陆相页岩中无论是缝宽还是延伸长度均较好,既可作为渗流通道,亦可作为存储空间,裂缝中广泛发育的黑色有机质残余已经证明其油气地质意义。粘土矿物片间孔存在纸房子微观构造,包含大量微孔隙,孔隙连通性较好,油气地质意义较好。刚性颗粒边缘孔及粒间孔储层物性条件非常好,但其发育规模较少,油气地质意义一般。石英颗粒溶孔孔径小、连通性差,油气地质意义很小。

参 考 文 献

- [1] 刘树根, 马文辛, 黄文明, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239 – 2251.
Liu Shugen, Ma Wenxin, Huang Wenmin, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239 – 2251.
- [2] 陈波, 皮定成. 中上扬子地区志留系龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2009, (3): 15 – 19.
Chen Bo, Pi Dingchen. Silurian Longmaxi shale gas potential analysis in middle & upper Yangtze region [J]. China Petroleum Exploration, 2009, (3): 15 – 19.
- [3] 胡明毅, 邓庆杰, 胡忠贵. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 272 – 279.
Hu Mingyi, Deng Qingjie, Hu Guizhong. Shale gas accumulation conditions of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Upper Yangtze region [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 272 – 279.
- [4] 卢炳雄, 郑荣才, 文华国, 等. 皖南地区下寒武统页岩气成藏地质条件[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 712 – 719.
Lu Binxiong, Zhen Rongcai, Wen Huaguo, et al. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in southern Anhui province [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 712 – 719.
- [5] 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.
- [6] Leahy-Dios A, Das M, Agarwal A, et al. Modeling of transport phenomena and multicomponent sorption for shale gas and coalbed methane in an unstructured grid simulator[J]. SPE 147353, 2011.
- [7] 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.
- [8] Chaoquet P W, Pray L C. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2): 207 – 244.
- [9] Dutton S P, Loucks R G. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultra deep (200 – 6700 m) burial, Gulf of Mexico Basin, USA [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(8): 1775 – 1787.
- [10] 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): 108 – 120.
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): 108 – 120.
- [11] Reed R M, John A, Katherine G, et al. Nanopores in the Mississippian Barnett Shale: distribution, morphology, and possible genesis [C] // GSA Annual Meeting & Exposition, Denver, Colorado, USA, October 28 – 31, 2007. Denver: The Geological Society of America, 2007.
- [12] 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.
- [13] Slatt E M, O'Neal N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shale: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017 – 2030.
- [14] 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.
- [15] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7 – 12.
Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7 – 12.
- [16] 邹才能, 李建忠, 董大忠, 等. 中国首次在页岩气储集层中发现丰富的纳米级孔隙[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 508 – 509.
Zou Caineng, Li Jianzhong, Dong Dazhong, et al. First discovery of abundant nano pores in shale reservoirs, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 508 – 509.
- [17] 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.
- [18] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173 – 187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(2): 173 – 187.
- [19] 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 & Experiment, 2011, 33(3): 219 – 225.
- [20] 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 – 310.
Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(2): 301 – 310.
- [21] 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.
- [22] Gale J F, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603 – 622.
- [23] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏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 Petrologica Sinica, 2012, 33(2): 249 – 256.

(编辑 李 军)