

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

王超¹,张柏桥¹,舒志国²,陆永潮³,陆亚秋¹,包汉勇¹,李争¹,刘超¹

[1. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院,湖北武汉 430223; 2. 中国石化江汉油田分公司,湖北潜江 433124;
3. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉 430074]

摘要:页岩岩相划分及其储层品质研究是页岩气勘探开发地质评价的基础性研究工作。以钻井资料为基础,综合利用全岩X-衍射、镜下薄片等资料建立了海相页岩岩相划分方案,并结合总有机碳含量、孔隙结构、孔渗特征、纹层特征和含气性等地质测试资料,对五峰组-龙马溪组一段不同页岩岩相的储层品质进行系统分析。涪陵地区五峰组-龙马溪组一段发育3大类页岩岩相,其中主要岩相有5亚类,即粘土质硅质页岩、含钙粘土质硅质页岩、硅质粘土页岩、粘土质硅质混合页岩和含钙粘土质硅质混合页岩。不同岩相储层品质具有较大差异,硅质类页岩具有高TOC、高孔隙度和高含气性等特征,为优质页岩岩相。沉积地质背景在控制页岩岩相发育的同时,进一步影响了页岩储层品质发育特征。五峰组和龙马溪组一段下部硅质页岩沉积期,频繁的火山活动为浮游生物爆发提供了大量富营养物质,并形成贫氧和厌氧环境,有利于有机质保存,发育富碳硅质页岩;龙马溪组一段中部和上部发育的混合类页岩和粘土类页岩分别受底流和陆源碎屑物质供给影响,沉积环境渐变为富氧环境,有机质保存条件变差,总有机碳含量较低,含气性降低。

关键词:岩相;储层品质;页岩;龙马溪组;涪陵地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Lithofacies types and reservoir characteristics of marine shales of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling area, the Sichuan Basin

Wang Chao¹, Zhang Boqiao¹, Shu Zhiguo², Lu Yongchao³, Lu Yaqiu¹, Bao Hanyong¹, Li Zheng¹, Liu Chao¹

[1. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430223, China;
2. Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Qianjiang, Hubei 433124, China; 3. Faculty of Earth Resource,
China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: Lithofacies identification and reservoir characteristics study of shale are fundamental to the geological evaluation of shale gas exploration and development. Based on the drilling data, X ray diffraction and thin section analysis, we proposed a scheme for lithofacies classification of marine shale. Then, we systematically analyzed the reservoir quality of varying shale lithofacies from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, based on geochemical test results such as the total organic carbon (TOC) content, pore structure, porosity-permeability properties, lamina features, gas-charging properties, etc. The stratigraphic member developed three categories of shale lithofacies in the Fuling area, which can be subdivided into five major lithofacies (argillaceous-siliceous shale, dolomitic-argillaceous-siliceous shale, siliceous-clay shale, mixed argillaceous-siliceous shale, and mixed dolomitic-argillaceous-siliceous shale). There is a significant difference in reservoir characteristics between various lithofacies: the siliceous shale is a high-quality lithofacies with high TOC, high porosity and high gas content. The sedimentary setting determines reservoir quality development, while also controlling the shale lithofacies development. During the sedimentation of siliceous shale in the lower Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, frequent volcanic activities provided abundant nutrients for plankton outburst, and induced an oxygen-poor and anaerobic environment which is conducive to the preservation of organic matter and the development of organic carbon-rich

收稿日期:2017-07-07;修订日期:2018-02-16。

第一作者简介:王超(1987—),男,博士,非常规油气资源评价。E-mail: wangchao0502@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060);国家自然科学基金青年科学基金项目(41702149);中国博士后科学基金面上项目(2017M622559)。

siliceous shale. The mixed shale and argillaceous shale developed in the middle and upper part of the first member are affected by bottom current and terrigenous debris supply respectively, which led to an oxygen-rich depositional environment, deteriorating the preservation condition of organic matters, thus lower content of *TOC* and less gas generation.

Key words: lithofacies, reservoir quality, shale, Longmaxi Formation, Fuling area, Sichuan Basin

近几年,北美页岩气勘探开发的成功实例掀起了一场全球范围的页岩气革命风潮。2009年以来,中国也开展了大规模页岩气勘探开发工作,先后在重庆涪陵焦石坝地区、四川威远和长宁地区取得了海相页岩气勘探的重大商业性突破^[1-4],并建成了中国最大的页岩气田——涪陵页岩气田。

以往认为特定沉积环境下的页岩较为均一,但随页岩气勘探开发和细粒沉积学研究的不断深入,页岩非均质性特征已被广泛认同^[5-6],并指出页岩是由富含有机质的不同岩相组成^[7]。所谓岩相,是指一定沉积环境中形成的岩石类型及其组合,既包含了岩石类型、颜色、结构和构造等宏观信息,也包含了无机矿物与有机组成等微观信息^[8-12]。国内外学者对于页岩岩相划分开展了一系列研究工作,划分方案也由早期的单因素划分,逐渐扩展到现阶段的多因素划分。

四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩作为我国页岩气勘探开发的重要层系受到国内外学者广泛关注。前人对这套地层的研究主要集中于构造背景、沉积环境、有机地化、孔隙结构和资源潜力等方面^[2,13-18],岩相划分方面虽开展了一些研究,但仍缺乏统一划分标准^[19-22]。而岩相精细划分对于评价页岩开发潜力具有重要指导意义,北美页岩气商业性开发认识到不同岩相的矿物组分、含气性和可压性等方面的差异,决定了岩相开发潜力不同。因此,岩相划分作为页岩气勘探开发的基础性研究内容,对于发掘黑色页岩沉积环境和过程,找寻页岩气勘探甜点均具有重要的理论与生产意义。

考虑以上问题,笔者针对四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段(龙一段)富有机质黑色页岩,在岩心观察描述的基础上,利用全岩X射线衍射和薄片鉴定等资料,应用岩矿三端元法和岩相分级命名方法建立了海相页岩岩相划分方案,并综合*TOC*、含气性和物性特征等分析测试数据,以岩相为分析单元,剖析不同岩相的储层品质差异性特征,进而为页岩气勘探开发的选区选层提供地质依据。

1 地质概况

四川盆地西至龙门山,东抵齐岳山,北邻米仓山—

大巴山,南至大凉山—娄山,是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合型盆地。四川盆地以华蓥山和龙泉山两个背斜带为界,亦可划分为川东南斜坡高陡构造区(包括川东高陡褶皱带和川南低陡褶皱带)、川西坳陷低陡构造区和川中隆起低缓构造区(图1a)^[22]。涪陵页岩气田位于川东高陡褶皱带万县复向斜,构造整体呈北东向展布。研究区边界发育北东向石门、吊水岩、天台场和山窝断层,北北东向大耳山西断层及北西向乌江断层等多期断裂系统(图1b)。研究区自震旦纪以来受多期构造作用影响,具有早期沉降、晚期隆升的特点,发育晚震旦世至三叠纪地层,研究层段上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组含气页岩段厚度介于83~100 m,为深水陆棚沉积,平面展布稳定。

2 海相页岩岩相划分方案

受资料条件和表征方法的制约,目前细粒沉积学中页岩岩相如何划分和表征尚没有统一标准和方法。早期页岩岩相划分多以颜色、矿物成分、粒度大小和沉积构造(纹层发育特征)作为分类参数^[7,12],例如梁超等(2012)用矿物成分将四川盆地五峰组—龙马溪组页岩划分为5类岩相(炭质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩、钙质页岩和普通页岩)^[23]。但随页岩气地质认识不断深化,单一矿物含量(粘土矿物、石英)、古生物类型/丰度、含有物、有机质类型/丰度、特殊矿物等指标也常作为分类参数应用于岩相划分方案中^[14,20-22],例如 Loucks 和 Ruppel(2007)基于矿物成分、古生物和沉积构造对北美 Barnett 页岩划分为纹层状硅质泥岩、纹层状含粘土灰质泥岩和骨架状泥质灰岩^[8],而 Abouelresh 和 Slatt(2012)分别从结核类型和沉积环境角度将 Barnett 页岩岩相进一步细分^[10]。

尽管现阶段页岩岩相划分标准尚未统一,但笔者认为合理的岩相划分既需考虑页岩岩石学和沉积环境等地质因素,同时也应结合生产开发认识。在晚奥陶世和早志留世两次大规模海侵背景下,五峰组与龙马溪组下部富有机质黑色页岩页理发育,在研究区广泛分布^[14]。通过以硅质矿物(石英+长石)、碳酸盐岩矿物(方解石+白云石)和粘土矿物三矿物法为基础,可划分为硅质类页岩、钙质类页岩、粘土类页岩和混合类

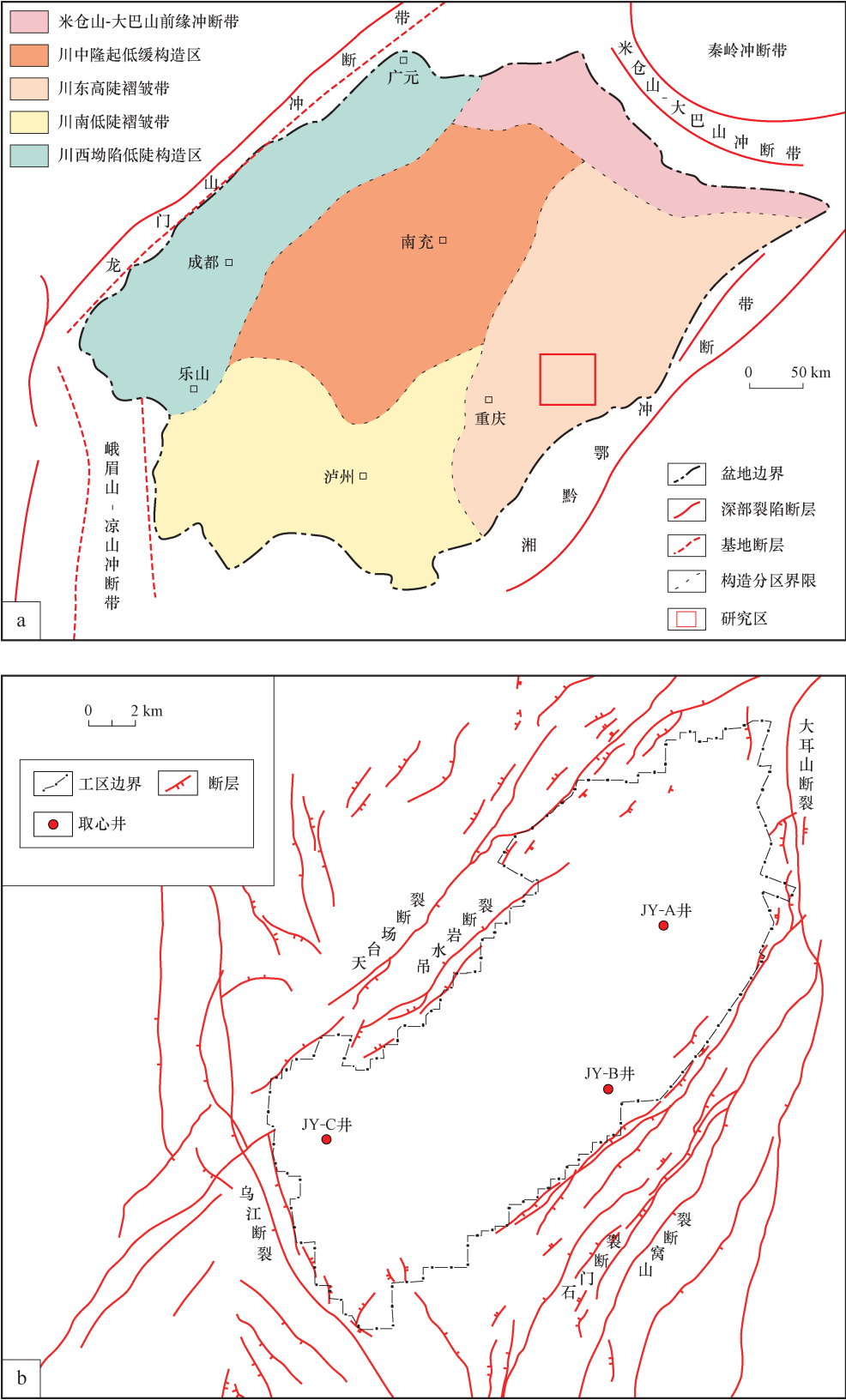


图 1 四川盆地涪陵地区区域地质背景(a)及取心井位置(b)^[22] (修改)
Fig. 1 Regional geological setting and location of coring wells in the Fuling area, Sichuan Basin^[22] (modified)

页岩四大类,并将三端元含量的 10%、25%、50%和 75% 为分界,以单组分、双组分和三组分为命名层级(表 1), 将页岩岩相进一步细分为 31 种亚类(表 2;图 2),该页岩岩相划分方案可有效指导涪陵页岩气田生产开发。

表 1 页岩分级命名方案

Table 1 Shale classification and nomenclature scheme

组分种类	组分含量	命名
单组分	$10\% \leq X < 25\%$	含 X 页岩
单组分	$25\% \leq X < 50\%$	X 质页岩
单组分	$X > 75\%$	X 页岩
双组分	$25\% \leq X, Y < 50\%$	X 质 Y 质混合页岩
三组分	$25\% \leq X, Y, Z < 50\%$	混合页岩

3 五峰组 – 龙马溪组富有机质海相页岩岩相特征

以涪陵页岩气田三口取心井为例(图 1b),对五峰组 – 龙一段富有机质页岩系统采样分析(采样间距为 0.9 ~ 1.2 m)可知,研究区海相页岩以硅质类页岩、混合类页岩和粘土类页岩为主,共发育 14 种岩相亚类,

表 2 涪陵地区海相页岩岩相类型划分方案

Table 2 Marine shale lithofacies classification scheme in the Fuling area

岩相类型		岩石矿物组分质量分数/%				研究区发育程度
类	亚类	简码	硅质 (石英 + 长石)	碳酸盐岩 (方解石 + 白云石)	粘土矿物	
硅质类页岩	硅质岩	S-1	>75	0 ~ 25	0 ~ 25	偶见岩相
	钙质硅质页岩	S-2	50 ~ 75	25 ~ 50	0 ~ 10	未发育
	含钙含粘土硅质页岩	S-3	50 ~ 75	10 ~ 25	10 ~ 25	偶见岩相
	粘土质硅质页岩	S-4	50 ~ 75	0 ~ 10	25 ~ 50	主要岩相
	含钙硅质页岩	S-5	65 ~ 75	15 ~ 25	0 ~ 10	未发育
	含粘土硅质页岩	S-6	65 ~ 75	0 ~ 10	15 ~ 25	次要岩相
	含粘土钙质硅质页岩	S-7	50 ~ 65	25 ~ 40	10 ~ 25	未发育
	含钙粘土质硅质页岩	S-8	50 ~ 65	10 ~ 25	25 ~ 40	主要岩相
钙质类页岩	碳酸盐岩	C-1	0 ~ 25	>75	0 ~ 25	未发育
	硅质钙质页岩	C-2	25 ~ 50	50 ~ 75	0 ~ 10	未发育
	含硅含粘土钙质页岩	C-3	10 ~ 25	50 ~ 75	10 ~ 25	未发育
	粘土质钙质页岩	C-4	0 ~ 10	50 ~ 75	25 ~ 50	未发育
	含硅钙质页岩	C-5	15 ~ 25	65 ~ 75	0 ~ 10	未发育
	含粘土钙质页岩	C-6	0 ~ 10	65 ~ 75	15 ~ 25	未发育
	含粘土硅质钙质页岩	C-7	25 ~ 40	50 ~ 65	10 ~ 25	偶见岩相
	含硅粘土质钙质页岩	C-8	10 ~ 25	50 ~ 65	25 ~ 40	偶见岩相
粘土类页岩	粘土岩	CM-1	0 ~ 25	0 ~ 25	>75	未发育
	硅质粘土页岩	CM-2	25 ~ 50	0 ~ 10	50 ~ 75	主要岩相
	含钙含硅粘土页岩	CM-3	10 ~ 25	10 ~ 25	50 ~ 75	未发育
	钙质粘土页岩	CM-4	0 ~ 10	25 ~ 50	50 ~ 75	未发育
	含硅粘土页岩	CM-5	15 ~ 25	0 ~ 10	65 ~ 75	偶见岩相
	含钙粘土页岩	CM-6	0 ~ 10	15 ~ 25	65 ~ 75	未发育
	含钙硅质粘土页岩	CM-7	25 ~ 40	10 ~ 25	50 ~ 65	次要岩相
	含硅钙质粘土页岩	CM-8	10 ~ 25	25 ~ 40	50 ~ 65	未发育
混合类页岩	钙质硅质混合页岩	M-1	40 ~ 50	40 ~ 50	0 ~ 10	未发育
	粘土质硅质混合页岩	M-2	40 ~ 50	0 ~ 10	40 ~ 50	主要岩相
	钙质粘土质混合页岩	M-3	0 ~ 10	40 ~ 50	40 ~ 50	未发育
	含粘土钙质硅质混合页岩	M-4	25 ~ 50	25 ~ 50	10 ~ 25	偶见岩相
	含钙粘土质硅质混合页岩	M-5	25 ~ 50	10 ~ 25	25 ~ 50	主要岩相
	含硅钙质粘土质混合页岩	M-6	10 ~ 25	25 ~ 50	25 ~ 50	未发育
	混合页岩	M-7	25 ~ 50	25 ~ 50	25 ~ 50	次要岩相

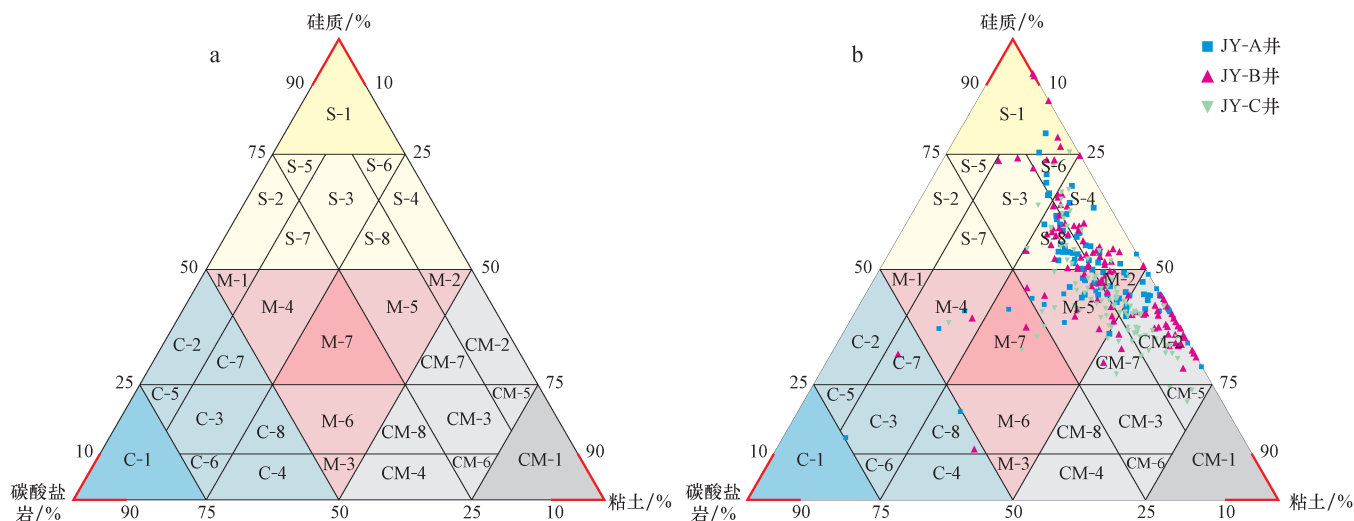


图2 页岩岩相划分及涪陵地区五峰组-龙马溪组一段页岩岩相类型

Fig. 2 Ternary diagram showing shale lithofacies types of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, Fuling area

其中主要岩相5类(占比88.70%),分别为粘土质硅质页岩(S-4),含钙粘土质硅质页岩(S-8),粘土质硅质混合页岩(M-2),含钙粘土质硅质混合页岩(M-5)和硅质粘土页岩(CM-2);次要岩相3类(占比7.19%),分别为含粘土硅质页岩(S-6),含钙硅质粘土页岩(CM-7)和混合页岩(M-7);偶见岩相6类(占比4.11%)(图3)。

3.1 粘土质硅质页岩(S-4)

该岩相主要发育于五峰组和龙一段中下部,在五峰组呈薄层状。其中硅质矿物含量在49.3%~65.0%,平均值为55.8%,其中石英含量在29.0%~60.9%,粘土矿物含量24.1%~43.5%,平均值为33%,碳酸盐矿物含量1.4%~9.6%,平均值为7.2%(表3)。该岩相在岩心上呈深黑色,页理缝非常发育(图4a),可见大量

笔石杂乱分布(图5a);镜下观察可见矿物成分多为石英及长石,偶见纹层发育,纹层宽度在0.02~0.04 mm(图5b)。

3.2 含钙粘土质硅质页岩(S-8)

该岩相主要发育于龙一段中下部,多呈块状。石英+长石含量在47.1%~61.2%,平均值为52.5%,粘土矿物含量在24.3%~36.9%,平均值为30.1%,碳酸盐岩矿物含量在9.5%~19.4%,平均值为12.3%(表3)。该岩相在岩心上表现为深黑色-黑色,页理缝非常发育,偶见薄层黄铁矿条带(图4b),可见笔石发育(图5c)。薄片观察显示,石英及长石呈次棱-次圆状,边缘被粘土、炭质等轻微交代、侵染,砂质纹层较发育,纹层宽度多在0.02~0.20 mm(图5d)。相较于粘土质硅质页岩,其碳酸盐岩矿物有所增加。

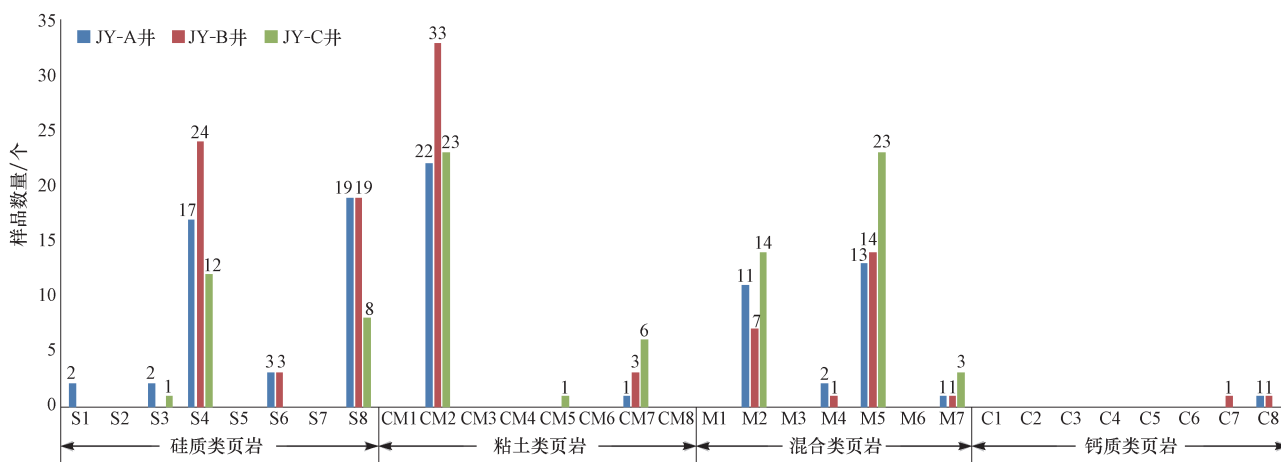


图3 涪陵地区五峰组-龙马溪组一段岩相占比分布直方图

Fig. 3 Histogram showing the lithofacies composition of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, Fuling area

表 3 涪陵地区主要岩相矿物组分统计
Table 3 Mineral composition statistics of major shale lithofacies in the Fuling area

岩相类型		样品数量/个	硅质矿物含量/%			碳酸盐岩矿物含量/%			粘土矿物含量/%	
类	亚类		石英	长石	总量	方解石	白云石	总量		
硅质类页岩	粘土质硅质页岩	S-4	54	29.0 ~ 60.9	2.0 ~ 19.3	49.3 ~ 65.0	0 ~ 7.1	0 ~ 26.5	1.4 ~ 9.6	24.1 ~ 43.5
				45.0	8.3	55.8	3.1	5.4	7.2	33.0
	含钙粘土质硅质页岩	S-8	46	31.4 ~ 55.9	4.9 ~ 15.4	47.1 ~ 61.2	2.4 ~ 9.7	8.3 ~ 18.1	9.5 ~ 19.4	24.3 ~ 36.9
				43.3	8.7	52.5	5.5	6.6	12.3	30.1
混合类页岩	粘土质硅质混合页岩	M-2	31	25.7 ~ 43.1	4.5 ~ 13.8	39.9 ~ 48.5	0.7 ~ 9.8	0 ~ 30.6	3.4 ~ 9.7	38.2 ~ 49.0
				35.6	8.0	44.0	3.9	6.1	7.7	44.3
	含钙粘土质硅质混合页岩	M-5	50	26.6 ~ 59.5	3.4 ~ 12.3	35.3 ~ 48.0	1.2 ~ 9.5	0.9 ~ 18.5	9.7 ~ 23.6	28.5 ~ 48.7
				35.5	7.6	42.1	4.1	7.8	14.1	40.2
粘土类页岩	硅质粘土页岩	CM-2	78	20.0 ~ 47.6	3.3 ~ 14.2	28.0 ~ 48.2	0 ~ 8.7	0 ~ 9.7	0 ~ 9.7	45.1 ~ 67.6
				32.2	6.1	37.8	1.2	2.5	3.2	56.4

注:数据格式为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

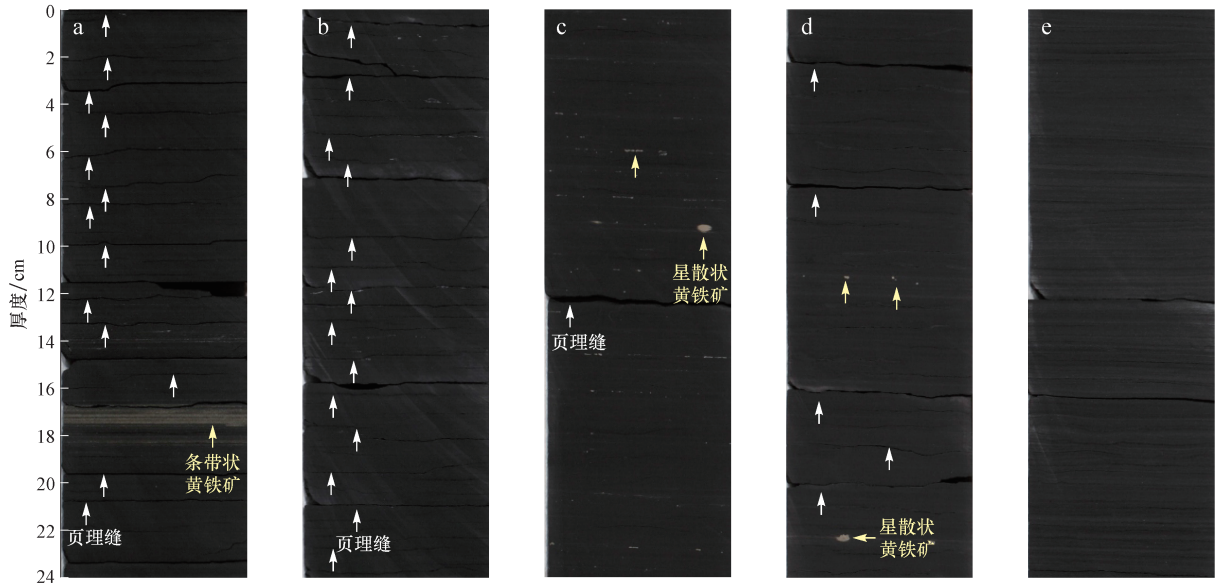


图 4 涪陵地区五峰组-龙马溪组一段海相页岩主要岩相岩心照片

Fig. 4 Core pictures of the major shale lithofacies of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, Fuling area

a. 粘土质硅质页岩,发育条带状黄铁矿,JY-A井,埋深2 351.12~2 351.36 m;b. 含钙粘土质硅质页岩,JY-A井,埋深2 340.06~2 340.30 m;c. 粘土质硅质混合页岩,JY-A井,埋深2 300.10~2 300.34 m;d. 含钙粘土质硅质混合页岩,JY-A井,埋深2 306.04~2 306.28 m;e. 硅质粘土页岩,JY-A井,埋深2 285.17~2 285.41 m

3.3 粘土质硅质混合页岩(M-2)

该岩相主要发育于龙一段中部,其硅质矿物含量为39.9%~48.5%,平均值为44.0%,粘土矿物含量在38.2%~49.0%,平均值为44.3%,碳酸盐岩矿物含量在3.4%~9.7%,平均值为7.7%(表3)。岩心观察可见该岩相呈黑色,页理缝不发育,沿层发育有大量星散状黄铁矿(图4c);镜下表现为粉砂质纹层较发育,粘土被炭质侵染,沿长轴定向分布,纹层宽度约为0.01~0.14 mm,纹层发育密度为10条/cm(图5f)。

3.4 含钙粘土质硅质混合页岩(M-5)

该岩相主要发育于龙一段中部,以薄层状夹于含钙粘土质硅质页岩之中。其硅质矿物含量在35.3%~48.0%,平均值为42.1%,粘土矿物含量在28.5%~48.7%,平均值为40.2%,碳酸盐岩矿物含量在9.7%~23.6%,平均值为14.1%(表3)。岩心观察方面,该岩相为灰黑色,页理不发育,可见星散状黄铁矿发育(图4d);镜下薄片显示,片状矿物呈定向性排列且具纹层构造,纹层宽度约为0.01~0.42 mm,纹层发育密度为16条/cm,少量纹层呈断续状分布(图5e)。

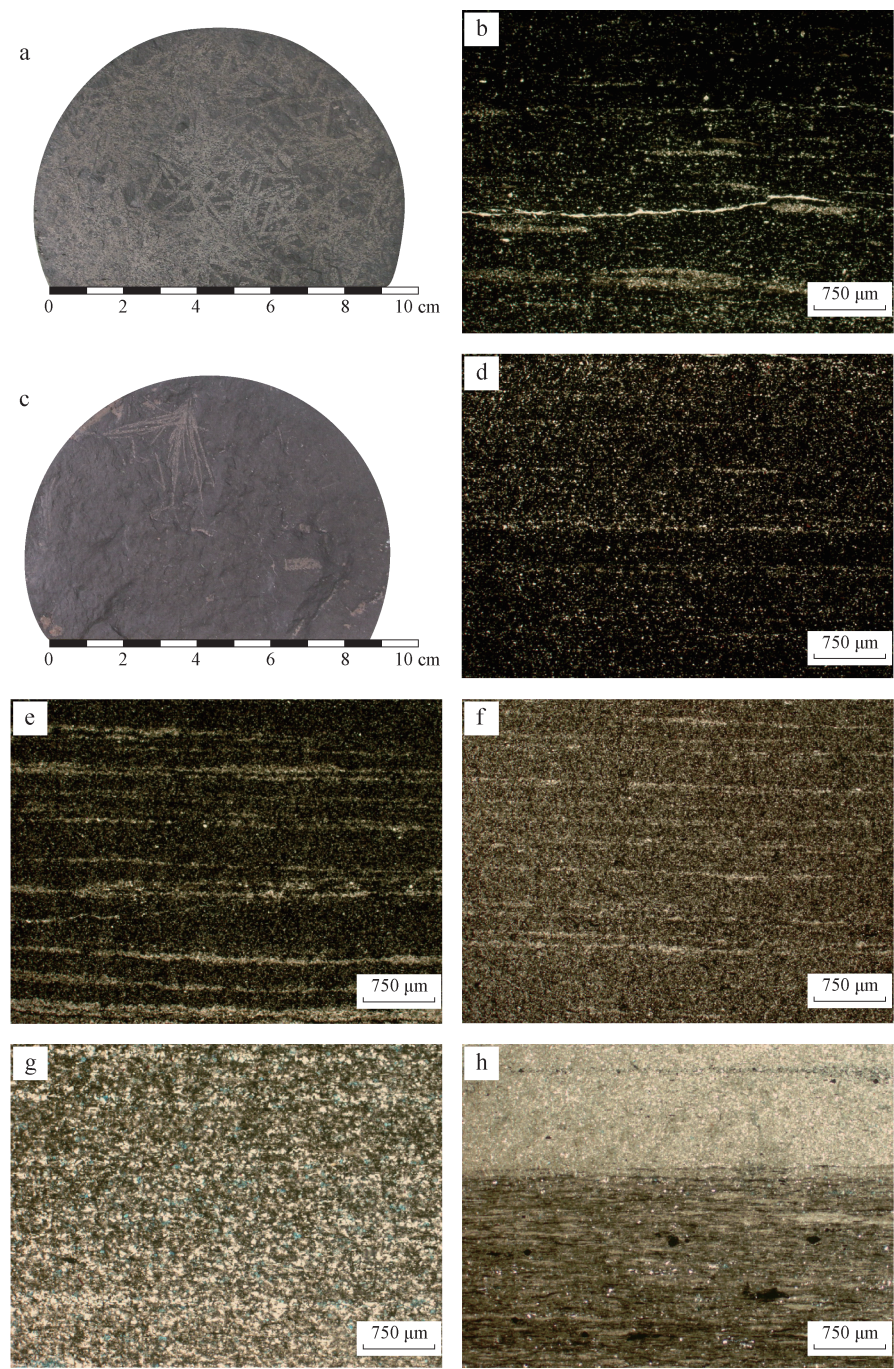


图 5 涪陵地区五峰组 – 龙马溪组一段海相页岩主要岩相岩心及镜下特征

Fig. 5 Photographs of major cores and thin sections of marine shale of the Wufeng Formation Longmaxi Formation's first member in the Fuling area

a. 粘土质硅质页岩, 笔石非常发育, 呈非定向性, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 360. 80 m; b. 粘土质硅质页岩, 透镜状纹层; JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 361. 39 m; c. 含钙粘土质硅质页岩, 可见笔石发育, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 343. 00 m; d. 含钙粘土质硅质页岩, 石英及长石呈次棱 – 次圆状, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 341. 30 m; e. 含钙粘土质硅质混合页岩, 纹层发育, 宽度约 0. 01 ~ 0. 42 mm, 纹层密度为 16 条/cm, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 303. 93 m; f. 粘土质硅质混合页岩, 成分以石英和长石为主, 具纹层构造, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 300. 00 m; g. 硅质粘土页岩, 粘土含量达 51%, 被炭质轻微侵染, 纹层构造不明显, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 294. 95 m; h. 硅质粘土页岩, 粘土含量达 87%, 见侵蚀面, 泥内碎屑顺层分布, JY – A 井, 龙马溪组, 埋深 2 276. 59 m

3.5 硅质粘土页岩 (CM – 2)

该岩相主要发育于龙一段顶部, 粘土矿物含量在 45. 1% ~ 67. 6%, 平均值 56. 4%, 硅质矿物含量在 28. 0% ~ 48. 2%, 平均值为 37. 8%, 碳酸盐岩矿物含量平均值为 3. 2% (表 3)。岩心观察可见, 该岩相呈灰

黑色,发育大套粉砂质条带(图4e);镜下观察可见,粘土矿物含量超过50.0%,被炭质轻微侵染(图5g),粗颗粒石英与细颗粒石英相混,粘土和少量粉砂形成泥内碎屑(图5h),呈长条状顺层分布。

3.6 页岩岩相垂向演化特征

页岩在沉积过程中受盆地结构、水体分层、水体化学、沉积物供给、气候变化、构造以及全球-区域海平面变化等多因素综合控制,不同类型的岩相反映了不同的沉积环境。五峰组至龙一段下部发育以粘土质硅质页岩(S-4)和含钙粘土质硅质页岩(S-8)为主的硅质页岩岩相,偶见薄层状粘土质硅质混合页岩(M-2)和含钙粘土质硅质混合页岩(M-5)。该段岩相可见大量笔石发育,且条带状黄铁矿和断续状砂质纹层的发育指示了沉积期相对安静的深水还原环境。在龙一段中部,岩相由硅质类页岩渐变为以粘土质硅质混合页岩(M-2)和含钙粘土质硅质混合页岩(M-5)互层沉积的混合类页岩岩相,粘土矿物含量略有增加,有机质含量和硅质含量相对减少,并可见沿层分布的星散状黄铁矿和较为发育的粉砂质纹层,反映出沉积环境由早期强还原环境渐变为弱还原环境。龙一段顶部发

育块状硅质粘土页岩,粘土矿物含量进一步升高,岩心可见粉砂质条带呈递变层理发育,反映其陆源碎屑供给增强,沉积环境由弱还原环境向氧化环境过渡。

4 不同岩相储层品质发育特征

4.1 总有机碳含量(TOC)

不同岩相总有机碳含量差异较大。结合涪陵页岩气田勘探开发生产经验,依次以1%、2%、3%和4%为标准点,将总有机碳含量划分为贫碳(<1%),低碳(1%~2%),中碳(2%~3%),高碳(3%~4%)和富碳(>4%)五类。根据测试数据可知,五峰组至龙一段总有机碳含量以大于1%为主,其中以粘土质硅质页岩(S-4)和含钙粘土质硅质页岩(S-8)为主的硅质页岩其总有机碳含量最高,最高可达5.65%,平均值约为2.6%,主要为富碳和高碳,分别占比84.09%和85.95%;混合类页岩总有机碳含量有所降低,平均值为1.99%,主要为中碳和低碳,部分可见高碳和富碳;以硅质粘土页岩(CM-2)为主的粘土页岩总有机碳含量最低,平均值仅为1.05%,且绝大部分属于贫碳(图6)。

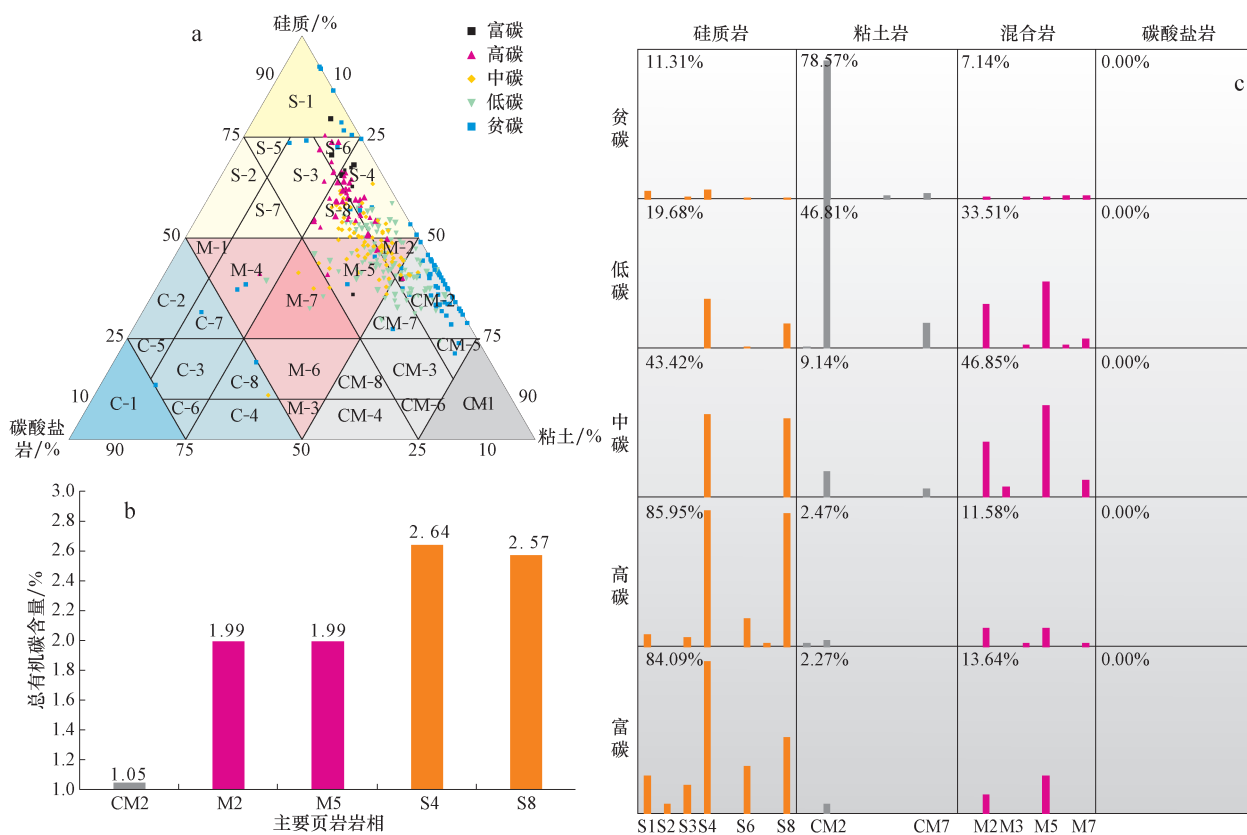


图6 涪陵地区不同岩相总有机碳含量对比综合图

Fig. 6 Comparison of TOC in different lithofacies in Fuling area

a. 不同岩相总有机碳含量分布; b. 主要岩相总有机碳含量分布直方图; c. 不同岩相总有机碳含量占比综合图

4.2 孔隙结构及孔渗特征

孔隙结构是页岩储层孔隙性、渗流性和有效性评价的重要依据。页岩有机质中的大量纳米级孔隙和粘土矿物晶层中的无机孔隙,均可增加页岩孔隙比表面积,有利于页岩气赋存和吸附^[18]。根据研究区扫描电镜和氩离子抛光扫描电镜等观测结果可知,粘土质硅质页岩内部有机质孔隙非常发育(图7a,b),少见粒内孔和粒间孔等无机孔隙,且有机质孔隙以圆形和椭圆形为主,孔隙尺度从纳米级到微米级,连通性好,孔隙度平均值为3.77%(图8a),渗透率平均值为 $1.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;含钙粘土质硅质混合页岩孔隙类型多样,普遍发育有机质孔隙和无机孔隙(图7c)。其中有有机质孔孔径较小,无机孔隙主要为粘土矿物晶间孔和碎屑颗粒原生粒间孔(图7d),孔隙度平均值为3.39%,渗透率为 $2.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图8b);硅质粘土页岩内部孔隙结构以粘土矿物粒间孔为主(图7e),有机质孔隙欠发育(图7f),孔隙度为3.05%,渗透率为 $2.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4.3 纹层发育程度

纹层是指沉积物或沉积岩中可分辨的最小或最薄原始沉积层,是页岩常见的沉积构造^[24]。页岩纹层发育差异性特征会对页岩储层的储集性、含气性和可压性等方面产生重要影响。借助薄片鉴定、扫描电镜等

对不同岩相的纹层发育特征研究揭示,受沉积成因机制影响,粘土质硅质混合页岩和含钙粘土质硅质混合页岩为主的混合类页岩纹层发育密度最大,可达9.25条/cm,纹层横向连续性好(图5e,f);硅质粘土页岩纹层发育密度最低,为6.11条/cm,但纹层单层宽度较大,且纹层呈断续状,反映出陆源碎屑物质供给能力增强;粘土质硅质页岩和含钙粘土质硅质页岩为主的硅质类页岩纹层发育密度介于两者之间,平均值为7.04条/cm,纹层呈连续状(图8c)。

4.4 含气性

页岩含气性是衡量其是否具有经济开采价值和进行资源评估的关键指标,目前北美商业开发页岩气层含气量普遍大于 $1.1 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[25]。测试数据揭示,不同岩相含气量同其孔隙度具有较高一致性。粘土质硅质页岩和含钙粘土质硅质页岩其孔隙类型以有机质孔隙为主,且孔隙度相对较高,含气量相对较高,平均为 $1.61 \text{ m}^3/\text{t}$ (图8d);而粘土质硅质混合页岩和含钙粘土质硅质混合页岩的孔隙类型为有机孔和无机孔共生,但因总有机碳含量相对较低,含气性相对较低,为 $1.16 \text{ m}^3/\text{t}$;硅质粘土页岩含气量最低,仅为 $0.66 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

4.5 优势岩相发育段

优势页岩岩相判别是衡量页岩是否具有经济开采价值和进行资源评估的关键指标^[25]。目前结合中国

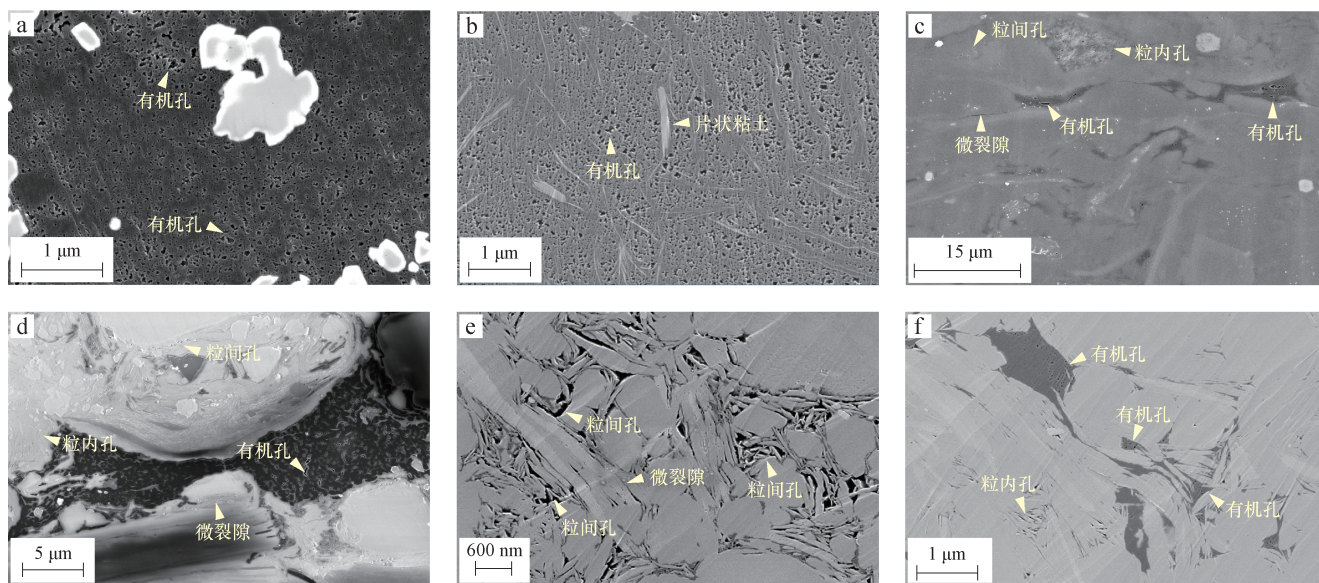


图7 涪陵地区主要岩相孔隙发育特征

Fig. 7 Pore characteristics of main lithofacies in the Fuling area

a. 粘土质硅质页岩,有机孔发育,JY-A井,龙马溪组,埋深2 358.06 m;b. 粘土质硅质页岩,有机孔发育,JY-C井,龙马溪组,埋深3 143.50 m;c. 含钙粘土质硅质混合页岩,有机质内部有机孔发育,可见微裂隙、粒间孔、粒内孔,JY-A井,龙马溪组,埋深2 306.17 m;d. 含钙粘土质硅质混合页岩,有机孔发育,可见微裂隙、粒间孔及粒内孔,JY-A井,龙马溪组,埋深2 315.85 m;e. 硅质粘土页岩,粒间孔及微裂隙较发育,JY-C井,龙马溪组,埋深3 028.10 m;f. 硅质粘土页岩,有机孔欠发育,见粒内孔,JY-C井,龙马溪组,埋深3 059.50 m

首个大型页岩气田—涪陵页岩气开发现状,笔者综合矿物成分、有机碳含量、孔隙度、渗透率、含气性和纹层发育特征等指标,对五峰组—龙一段主要岩相储层品质特征进行综合评价。从表 4 中可知,以粘土质硅质页岩和含钙粘土硅质页岩为主的硅质页岩具有高 TOC、高孔隙度、高含气性的特征,为最有利海相页岩气勘探目标,而混合页岩和粘土页岩因其有机碳含量、孔隙度和纹层发育密度较低等特征,其含气量相对较

低,为次有利海相页岩气勘探目标。

5 不同岩相储层品质差异性成因机理

5.1 硅质类页岩岩相

硅质类页岩岩相主要分布于五峰组和龙一段下部,整体呈富硅与富碳特征,孔隙结构以有机质孔隙为主。该类岩相主要是由生物沉积作用形成。五峰组末

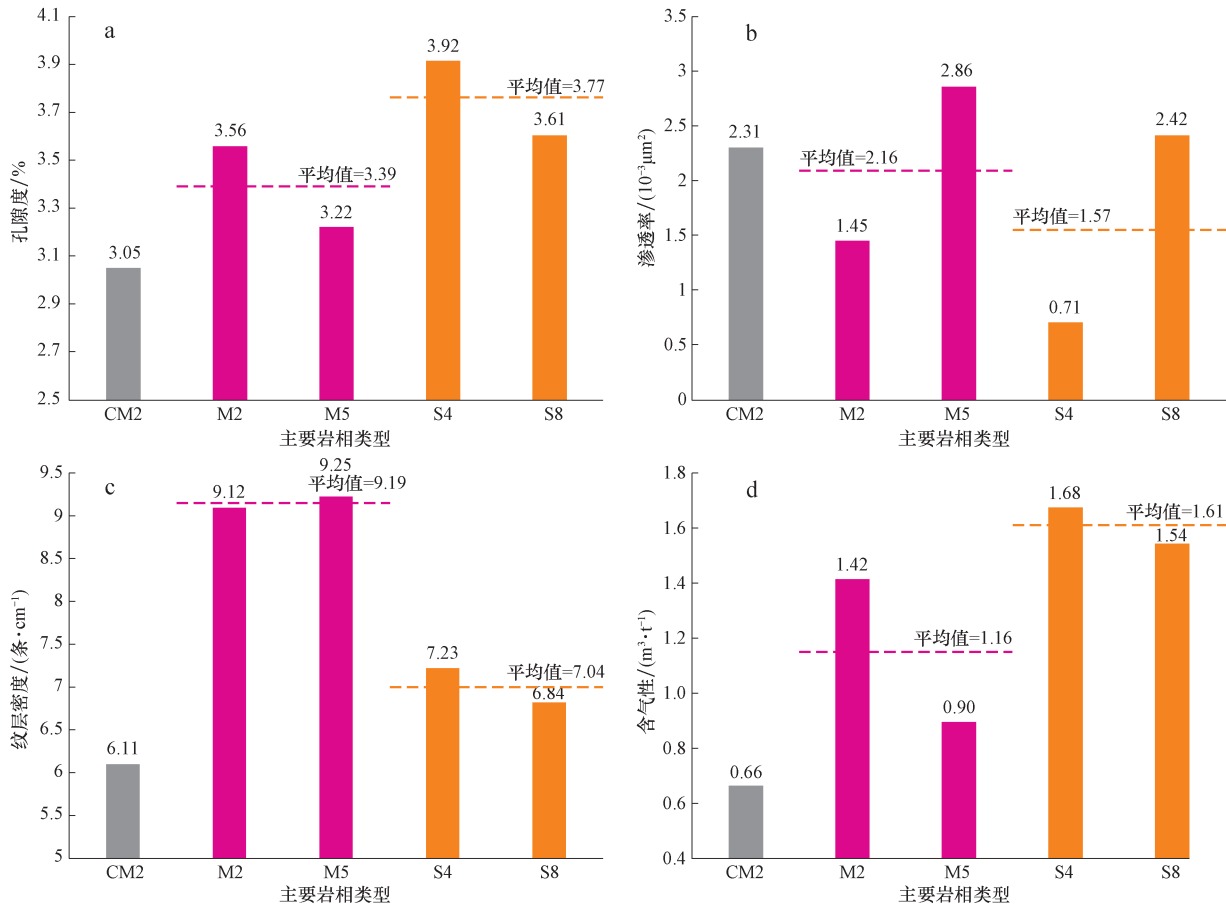


图 8 涪陵地区五峰组—龙马溪组一段主要岩相储层特征

Fig. 8 Reservoir characteristics of the main lithofacies from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, Fuling area

表 4 涪陵地区五峰组—龙马溪组一段海相页岩主要岩相储层特征综合对比

Table 4 Comprehensive comparison of reservoir characteristics of the main marine shale lithofacies from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member, Fuling area

岩相类型	TOC/%	纹层发育密度/ (条·cm ⁻¹)	纹层 连续性	孔隙度/%	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	含气性/ (m ³ ·t ⁻¹)
硅质页岩	富碳—中碳	中	连续状	高	低	高
粘土质硅质页岩	2.64	7.23	连续状	3.92	0.71	1.68
含钙粘土质硅质页岩	2.57	6.84	连续状	3.61	2.42	1.54
混合页岩	中碳—低碳	高	连续状	中	中	中
粘土质硅质混合页岩	1.99	9.12	连续状	3.56	1.45	1.42
含钙粘土质硅质混合页岩	1.99	9.25	连续状	3.22	2.86	0.90
粘土页岩	贫碳	低	断续状	低	高	低
硅质粘土页岩	1.05	6.11	断续状	3.05	2.31	0.66

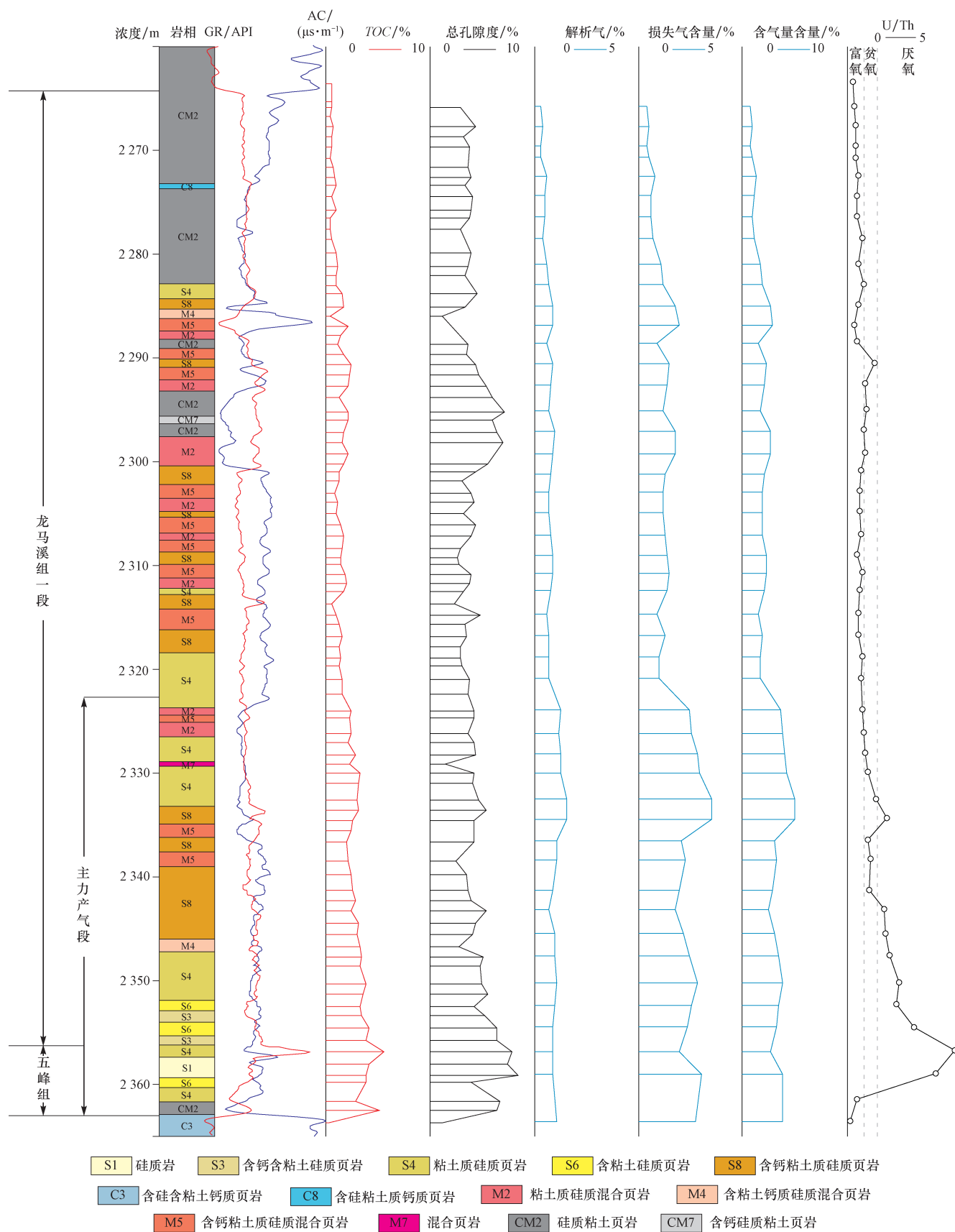


图9 涪陵地区五峰组-龙马溪组一段海相页岩储层及沉积环境综合柱状图

Fig. 9 A composite column of marine shale reservoir and sedimentary environment of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation's first member in the Fuling area

期爆发了多期火山活动^[26],火山活动一方面为浮游生物爆发提供了大量富营养物质,同时火山喷发导致气候环境突变为厌氧环境,利于有机质保存。从对古海洋氧化还原环境敏感的U和Th微量元素分析可知^[27],硅质页岩发育段氧化还原环境以贫氧、厌氧环境为主(图9),这为浮游生物的有机残骸同粘土矿物通过生物化学作用结合成“海洋雪”沉积至海底^[28],形成富硅和富碳的硅质页岩提供了有利的氧化还原条件。此外,该类岩相有机质发育形成的大量有机质孔隙成为页岩气有利的赋存场所,使硅质类页岩具有高有机碳与高含气性特征。

5.2 混合类页岩岩相

混合类页岩岩相呈薄互层状分布于龙一段中部,其粉砂质纹层发育密度高,纹层宽度较小,平均为0.05~0.2 mm,纹层呈连续状分布,岩心观察可见局部发育变角度层理,氧化还原条件揭示该岩相发育段主要以富氧环境为主,并受底流沉积事件影响。由于该时期贫氧/厌氧环境受到破坏,加之底流沉积相对较快的沉积速率^[22],使得混合类页岩中的有机质保存较硅质类页岩有所变差,混合类页岩具有相对较低的总有机碳含量、孔隙度和含气性。

5.3 粘土类页岩岩相

以硅质粘土页岩为主的粘土类页岩岩相呈厚层状分布于龙一段上部,具有较高的粘土含量,岩心薄片可见局部下切侵蚀不整合面,纹层发育密度相较于混合类页岩有所减少,但纹层宽度较大,平均为0.1~0.56 mm,反映出该类岩相受陆源碎屑物质供给影响较强。陆源物质供给增强及富氧环境,既不利于有机质保存,同时欠发育的有机质孔隙也不能为页岩气提供有效的赋存空间,使粘土类页岩总有机碳含量、含气性相较于硅质类页岩和混合类页岩变差。

6 结论

1) 四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组一段海相页岩岩相发育有3大类,其中主要岩相5亚类,分别为粘土质硅质页岩(S-4)、含钙粘土质硅质页岩(S-8)、硅质粘土页岩(CM-2)、粘土质硅质混合页岩(M-2)和含钙粘土质硅质混合页岩(M-5)。

2) 以粘土质硅质页岩和含钙粘土质硅质页岩为主的硅质页岩具有高TOC、高孔隙度、高含气性等特征,为最优页岩岩相;以硅质粘土页岩为代表的粘土

页岩其总有机碳含量、孔隙度和含气性均为最低,非页岩气勘探开发有效岩相,而以粘土质硅质混合页岩和含钙粘土质硅质混合页岩为主的混合页岩介于两者之间。

3) 不同岩相由于不同的沉积地质背景,决定了页岩储层品质具有较大差异。硅质类页岩主要发育于贫氧和厌氧环境,有机质保存条件较好,有机质孔隙发育,利于页岩气赋存;混合类页岩和粘土类页岩多发育于富氧沉积环境,纹层发育密度和纹层宽度较大,反映出底流事件和陆源碎屑物质供给增强,由于富氧和相对较快的沉积速率,使得有机质保存条件较差,有机质孔隙相对欠发育,含气量较低。

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] 郭彤楼,刘若冰. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示-以四川盆地东部盆缘JY1井为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 643-651.
Guo Tonglou, Liu Ruobing. Implications from marine shale gas exploration breakthrough in complicated structural area at high thermal stage: Taking Longmaxi Formation in well JY1 as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 643-651.
- [3] 郭旭升,胡东风,文治东,等. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素-以焦石坝地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 893-901.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 893-901.
- [4] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 317-326.
Guo Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 317-326.
- [5] Chen L, Lu Y, Jiang S, et al. Heterogeneity of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in the southeast Sichuan Basin of China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 232-246.
- [6] Xiong F, Jiang Z, Tang X, et al. Characteristics and origin of the heterogeneity of the Lower Silurian Longmaxi marine shale in southeastern Chongqing, SW China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27, Part 3: 1389-1399.
- [7] Hickey J J, Henk B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 437-443.

- [8] 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.
- [9] Ross D J K, Marc Bustin R. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [10] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [11] 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.
- [12] Wang G, Carr T R. Marcellus Shale Lithofacies Prediction by Multi-class Neural Network Classification in the Appalachian Basin[J]. Mathematical Geosciences, 2012, 44(8): 975-1004.
- [13] 丁文龙, 李超, 李春燕, 等. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 212-220.
- Ding Wenlong, Li Chao, Li Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 212-220.
- [14] 王玉满, 董大忠, 李新景, 等. 四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组层序与沉积特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(3): 12-21.
- Wang Yuman, Dong Dazhong, Li Xinjing, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary characteristics of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(3): 12-21.
- [15] 朱志军, 陈洪德. 川东南地区早志留世晚期沉积特征及沉积模式分析[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 64-76.
- Zhu Zhijun, Chen Hongde. An analysis of sedimentary characteristics and model of Silurian Xiaohaba Formation in southeastern Sichuan Province[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 64-76.
- [16] 高键, 何生, 易积正. 焦石坝页岩气田中高密度甲烷包裹体的发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 472-480.
- Gao Jian, He Sheng, Yi Jizheng. Discovery of high density methane inclusions in Jiaoshiba shale gas field and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 472-480.
- [17] 陈尚斌, 夏筱红, 秦勇, 等. 川南富集区龙马溪组页岩气储层孔隙结构分类[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 760-765.
- Chen Shangbin, Xia Xiaohong, Qin Yong, et al. Classification of pore structures in shale gas reservoir at the Longmaxi Formation in the south of Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 760-765.
- [18] 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.
- [19] 董春梅, 马存飞, 林承焰, 等. 一种泥页岩层系岩相划分方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 1-7.
- Dong Chunmei, Ma Cunfei, Lin Chengyan, et al. A method of classification of shale set[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 1-7.
- [20] 冉波, 刘树根, 孙玮, 等. 四川盆地及周缘下古生界五峰组-龙马溪组页岩岩相分类[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 96-107.
- Ran Bo, Liu Shugen, Sun Wei, et al. Lithofacies classification of shales of the Lower Paleozoic Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 96-107.
- [21] 王玉满, 王淑芳, 董大忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 119-133.
- Wang Yuman, Wang Shufang, Dong Dazhong, et al. Lithofacies characterization of Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 119-133.
- [22] 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.
- [23] 梁超, 姜在兴, 杨懿婷, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698.
- Liang Chao, Jiang Zaixing, Yang Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691-698.
- [24] 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(1): 43-48.
- Wang Guanmin, Zhong Jianhua. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2004, 23(1): 43-48.
- [25] 吴蓝宇, 胡东风, 陆永潮, 等. 四川盆地涪陵气田五峰组-龙马溪组页岩优势岩相[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 189-197.
- Wu Lanyu, Hu Dongfeng, Lu Yongchao, et al. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 189-197.
- [26] 胡艳华, 孙卫东, 丁兴, 等. 奥陶纪-志留纪边界附近火山活动记录: 来华南周缘钾质斑脱岩的信息[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3298-3308.
- Hu Yanhua, Sun Weidong, Ding Xing, et al. Volcanic event at the Ordovician-Silurian boundary: The message from K-bentonite of Yangtze Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3298-3308.
- [27] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91-99.
- Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. Redox Sensitive Trace Elements as Paleoenvironments Proxies[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91-99.
- [28] Alldredge A L, Silver M W. Characteristics, dynamics and significance of marine snow[J]. Progress in Oceanography, 1998, 20(1): 41-82.