

文章编号:1673-5005(2017)01-0034-08 doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2017. 01. 004

焦石坝五峰组-龙马溪组页岩硅质生物成因的证据及其地质意义

刘江涛^{1,2}, 李永杰^{1,2}, 张元春^{1,2}, 刘双莲^{1,2}, 蔡英杰^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:以页岩露头样品和钻井岩屑样品元素测量结果为依据,结合岩心和薄片观察,分析焦石坝五峰组-龙马溪组页岩的硅质生物成因的证据,并探讨其地质意义。结果表明:焦石坝五峰组-龙马溪组页岩中存在大量的笔石、角石、珊瑚等古生物化石和放射虫微体生物化石;SiO₂含量介于40%~80%,平均达63%;过量硅含量为2.6%~55.31%,其中五峰组和龙马溪组页岩下段过量硅含量较高,平均分别为41.3%和25.5%;Al/(Al+Fe+Mn)值介于0.62~0.87,与纯生物成因硅质岩相近,Al-Fe-Mn三角图上,研究区页岩样品绝大部分落在生物成因区,表明页岩硅质成分属于生物成因;深水陆棚贫氧、缺氧沉积环境有利于页岩有机质的富集和有机孔隙的发育,对于页岩天然裂缝的形成和后期人工压裂都具有重要意义。

关键词:焦石坝;五峰组-龙马溪组;页岩;硅质生物成因;地质意义

中图分类号:P 593 **文献标志码:**A

引用格式:刘江涛,李永杰,张元春,等.焦石坝五峰组-龙马溪组页岩硅质生物成因的证据及其地质意义[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):34-41.

LIU Jiangtao, LI Yongjie, ZHANG Yuanchun, et al. Evidences of biogenic silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area and its geological significance [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):34-41.

Evidences of biogenic silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area and its geological significance

LIU Jiangtao^{1,2}, LI Yongjie^{1,2}, ZHANG Yuanchun^{1,2}, LIU Shuanglian^{1,2}, CAI Yingjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100101, China;
2. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the elemental content of the ground outcrop samples and the drilling cutting samples, combined with the observation of core and thin section, the evidences of biogenic silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area were analyzed, and the geological significance was discussed as well. The results show that there are a lot of paleontological fossils, such as graptolite, oncoceras, coral, and a lot of microfossils, such as radiolarian, in Wufeng-Longmaxi Formation shale. The content of SiO₂ is between 40% and 80%, about 63% on average. The content of the assess SiO₂ is between 2.6% and 55.31%, and the contents in Wufeng Formation and the lower member of Longmaxi Formation shale are higher, which are up to 41.3% and 25.5% on average respectively. The value of Al/(Al+Fe+Mn) is between 0.62 and 0.87, which is close to the value of pure biogenic siliceous rocks. In the triangular Al-Fe-Mn diagram, most of the samples locating in the biogenic silica area indicate the silica of Wufeng-Longmaxi Formation shale is biogenic. High content of biogenic silica indicates deep-water shelf, hypoxic or anaerobic sedimentary environments is beneficial of enrichment of organic material and formation of organic pores, which shows important significance to the formation of natural fracture and the later artificial fracturing.

Keywords:Jiaoshiba area; Wufeng-Longmaxi Formation; shale; biogenic silica; geological significance

收稿日期:2016-07-08

基金项目:中国石化重点科技攻关项目(P13012)

作者简介:刘江涛(1981-),男,高级工程师,博士,研究方向为石油地质学和测录井综合解释。E-mail:ljt0310@163.com。

四川盆地涪陵焦石坝地区的页岩气田引起广泛关注^[1-9]。页岩气藏表现为“原地”成藏模式，具有自生、自储的特点^[10-13]。与北美地区的页岩相比，焦石坝五峰组—龙马溪组页岩储层具有明显的差异性，其中硅质含量高是其最显著特征之一^[3-4]。研究^[14]表明，我国南方多个优质页岩层（如上二叠统龙潭组和下寒武统牛蹄塘组）具有较高的生物成因硅质含量。王淑芳等^[15]研究了四川盆地南部长宁—双河剖面五峰组—龙马溪组页岩露头样品的硅质生物成因，指出硅质生物成因是四川盆地富有机质页岩形成的关键因素之一，对于页岩气勘探开发具有重要意义；郭旭升等^[5]指出，焦石坝地区优质页岩气层段黑色页岩中的石英主要来源可能是由各种浮游生物、底栖生物或细菌等成烃生物的遗骸和残片经各种成岩作用的演化产物。笔者以焦石坝页岩地层钻井岩屑、页岩露头和岩心资料为依据，通过元素地球化学特征分析，研究页岩的硅质成分含量特征及成因，揭示其与页岩储层含气性的关系，并探讨其对页岩气勘探开发的地质意义。

1 区域地质背景

涪陵焦石坝地区的区域构造隶属于川东褶皱带,位于万县复向斜的南部与方斗山背斜带西侧的交汇区域。焦石坝构造为主体平缓、边缘被大耳山西、石门、吊水岩、天台场等断层夹持的断背斜构造,总体为北东向走向^[3,5-6](图1)。研究区自下而上发

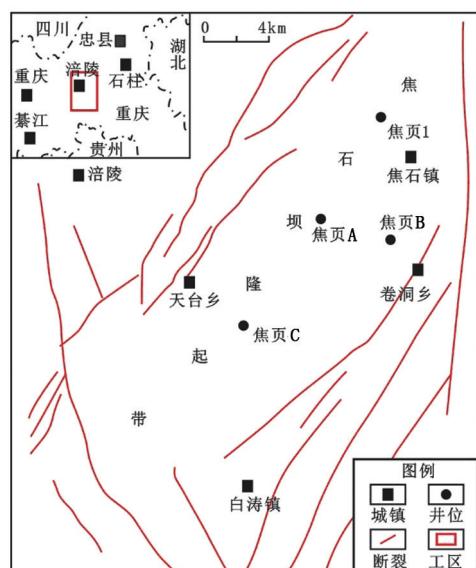


图 1 焦石坝工区位置及五峰组顶断裂纲要

**Fig. 1 Location of Jiaoshiba and fracture outline map
of top boundary of Wufeng Formation**

育了奥陶系至三叠系嘉陵江组。奥陶纪末-志留纪初,在全球性海侵背景下,焦石坝地区总体处于深水陆棚沉积环境,形成了稳定的以黑色页岩为主的细粒碎屑岩沉积。侏罗纪末期,在太平洋板块向扬子板块俯冲产生的南东-北西向挤压应力作用下,焦石坝主体构造形成。

2 页岩硅质生物成因证据

页岩中常含有大量的硅质成分(主要为石英),如美国的 Barnett 页岩,Besa River 页岩及 woodford 页岩等^[15]。硅质成分来源归纳起来主要有3种:①生物或生物化学沉积成因^[16];②化学成因,包括火山喷发成因、超碱性条件下沉积及热水沉积成因^[17-18];③交代(硅化)成因^[19]。由于物质来源、沉积环境及物理化学条件等方面的显著差异,不同成因的硅质成分元素地球化学特征也有所不同。一般生物成因的硅质成分表现为高 SiO_2 、 P_2O_5 、 FeO_3 和低 Al_2O_3 、 TiO_2 、 FeO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 特征;典型的海相火山沉积和海相热水沉积的硅质成分则表现为低 P 高 Ti 特征^[16]。这是利用元素地球化学方法研究硅质岩成因的理论基础。另外,在富含生物成因硅质的页岩岩心截面常常可见丰富的微体生物化石。

2.1 生物化石

由于川东南地区五峰组—龙马溪组页岩地层普遍含笔石,故亦称之为笔石页岩段^[20]。通过对焦石坝页岩岩心和薄片观察,发现在五峰组—龙马溪组页岩中存在大量的古生物化石,主要为各类型笔石、角石、珊瑚,其中笔石种类繁多,包括双笔石、雕笔石和栅笔石等,薄片观察可见放射虫较发育,统计五峰组—龙马溪组页岩下段地层笔石和放射虫含量明显高于龙马溪组页岩上段,放射虫数量 100~1000 个/g 样品,笔石数量 25~200 条/m²,表明五峰组—龙马溪组页岩下段地层可能存在较多的生物成因硅质成分。

2.2 元素组成

在重庆涪陵焦石镇采集了 89 个五峰组—龙马溪组页岩露头样品和 48 个焦页 1 井的钻井岩屑样品，并利用荷兰帕纳科公司生产的 Zetium 型多核 X 射线荧光光谱仪进行了元素含量测量，部分测量结果见表 1。元素测量结果表明，焦石坝五峰组—龙马溪组页岩 SiO_2 含量一般介于 40% ~ 80%，平均为 63%，其中五峰组页岩露头样品 SiO_2 含量平均高达 74%，明显高于其他样品，露头样品 CaO 含量远远低于同地层岩屑样品，这可能与露头样品长期风化导致碳酸盐岩矿物组分流失有关。龙马溪组上段页岩露头样品和龙

马溪组页岩上段岩屑样品 Al_2O_3 含量高于下段岩屑样品, 表明其泥质含量高于后者。

2.2.1 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ 图解

海相页岩是 SiO_2 (碎屑石英和/或生物成因硅)、 Al_2O_3 (黏土)和 CaO (碳酸盐)三种氧化物组分的混合^[15], $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ 三角图(图2)表明, 五

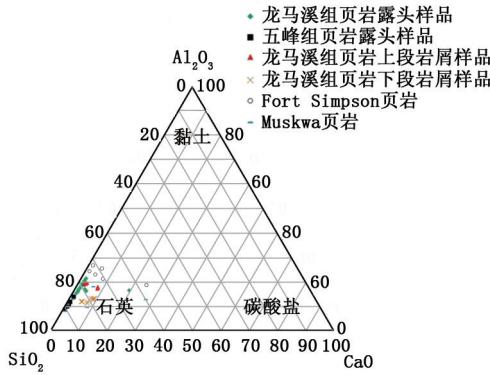


图2 焦石坝页岩 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ 三角图

Fig. 2 Ternary diagram showing of SiO_2 , Al_2O_3 and CaO of shale from Jiaoshiba area

表1 焦石坝五峰—龙马溪组页岩岩屑和露头样品元素测量部分结果

Table 1 Part of experimental results on ground outcrop samples and drilling cutting samples of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Jiaoshiba area

样品类型	样品序号 (或深度/m)	$\text{SiO}_2/$ %	$\text{Al}_2\text{O}_3/$ %	$\text{Fe}_2\text{O}_3/$ %	CaO/ %	MgO/ %	$\text{K}_2\text{O/}$ %	Mn/ ppm	Al/ $(\text{Fe}+\text{Al}+\text{Mn})$	过量硅/ %
龙马溪组 页岩露头 样品	1	67.30	14.41	3.35	0.27	1.15	4.04	65.30	0.76	22.48
	2	61.90	15.94	5.04	0.54	2.18	4.20	124.50	0.70	12.33
	3	63.89	16.90	3.91	0.11	1.63	4.54	67.00	0.77	11.33
	4	62.63	17.80	3.32	0.56	1.44	5.29	104.80	0.80	6.09
五峰组 页岩露 头样品	5	74.58	11.63	2.49	0.09	0.69	2.82	29.80	0.78	38.41
	6	83.83	9.17	1.43	0.09	0.41	2.23	21.00	0.83	55.31
	7	69.37	9.93	9.29	0.12	1.99	2.12	89.70	0.45	38.49
	8	75.85	11.93	2.34	0.15	0.72	2.92	30.70	0.79	38.75
龙马溪组 页岩上段 岩屑样品	2466	59.87	17.36	6.80	0.85	2.69	4.44	683.20	0.66	5.88
	2502	61.90	17.63	6.95	0.61	2.65	4.35	711.40	0.65	7.54
	2572	60.27	17.88	7.01	1.07	2.70	4.48	628.40	0.66	4.66
	2654	60.47	13.47	4.60	2.53	2.15	2.98	490.90	0.69	18.58
龙马溪组 页岩下段 岩屑样品	2804	61.81	13.51	4.80	2.74	1.94	3.56	205.90	0.68	36.08
	2906	57.67	11.19	3.75	4.96	1.76	2.99	207.80	0.69	41.01
	3050	56.21	10.82	3.83	5.45	1.95	2.88	260.00	0.68	31.32
	3134	66.55	11.22	4.44	3.03	1.45	3.17	213.50	0.75	31.66

2.3 过量硅含量

焦石坝地区五峰组和龙马溪组页岩硅质含量明显高于页岩平均含量和美国 Fort Simpson 和 Muskwa 页岩的硅质含量。过量硅含量是指高于正常碎屑沉积环境下的 SiO_2 含量^[15], 其计算公式为: $\text{Si}_{\text{过量}} = \text{Si}_{\text{样品}} - [(\text{Si}/\text{Al})_{\text{背景}} \times \text{Al}_{\text{样品}}]$, $(\text{Si}/\text{Al})_{\text{背景}}$ 采用平均页岩比值 3.11^[23]。利用元素测量结果, 计算焦石坝页岩样品的过量硅含量; 龙马溪组页岩露头样品过量硅含量介

峰组页岩露头样品 SiO_2 含量高于龙马溪组页岩岩屑和露头样品, 也高于美国 Fort Simpson 页岩及 Muskwa 页岩(数据来源于文献[21])。

2.2.2 $\text{Al}-\text{Fe}-\text{Mn}$ 图解

Al 、 Fe 、 Mn 等元素含量对于判断物质来源有重要意义, 其中 Al 的富集主要与陆源物质的介入有关, 而 Fe 、 Mn 的富集主要与热液的参与有关^[22-24]。Adachi 等研究指出纯生物成因的硅质成分 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 的比值接近 0.6, 而纯热水成因的硅质成分 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 的比值接近 0.01, 受热水作用影响后其比值则小于 0.35, 并建立了 $\text{Al}-\text{Fe}-\text{Mn}$ 三角图来判断硅质成因^[23]。从焦石坝地区页岩样品元素测量结果来看(表1), 其 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值介于 0.62 ~ 0.87, 各类样品平均值均在 0.67 以上, 与纯生物成因的硅质成分 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值比较接近, 并且在 $\text{Al}-\text{Fe}-\text{Mn}$ 三角图上(图3, 底图据文献[23]), 焦石坝页岩样品测量值绝大部分落在了生物成因区, 这表明这些页岩样品中的含有较高比例的生物成因硅质成分。

于 2.6% ~ 28.4%, 平均为 14.31%; 五峰组页岩露头样品过量硅含量介于 30.04% ~ 55.31%, 平均为 41.3%; 龙马溪组页岩上段岩屑样品过量硅含量介于 4.09% ~ 18.58%, 平均为 6.88%; 龙马溪组页岩下段岩屑样品过量硅含量介于 19.79% ~ 32.16%, 平均为 25.5%。五峰组露头样品和龙马溪组页岩下段岩屑样品过量硅含量明显高于龙马溪组页岩上段露头样品和龙马溪组页岩上段岩屑样品, 结合五峰组和龙

溪组页岩下段生物化石数量明显多于龙马溪组页岩上段的特点, 认为五峰组和龙马溪组页岩下段的高硅质含量与生物活动有关, 表明了这两段页岩地层含有比例较高的生物成因硅。

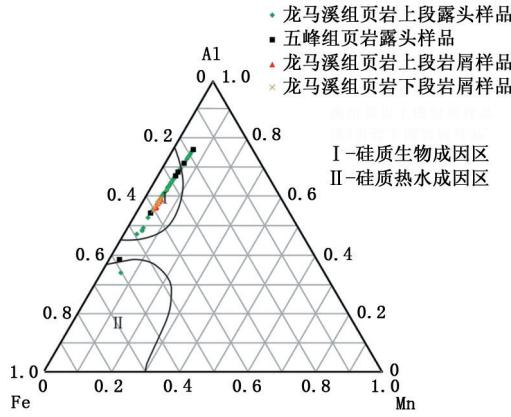


图 3 焦石坝页岩 Al-Fe-Mn 三角图

Fig. 3 Al-Fe-Mn ternary diagram of shale from Jiaoshiba area

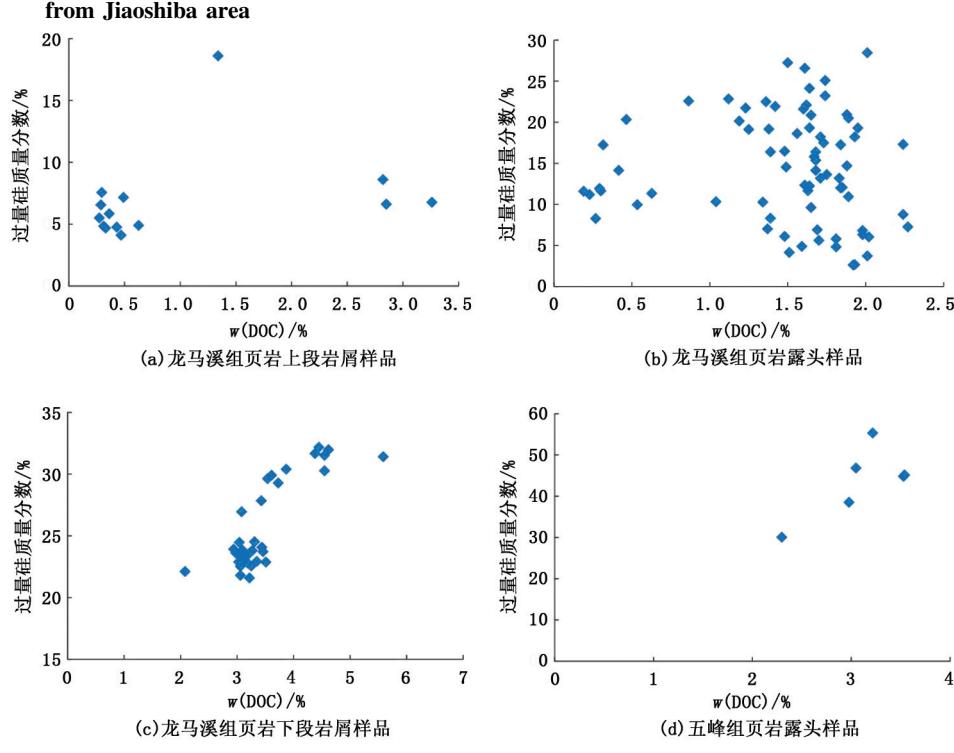


图 4 焦石坝页岩过量硅含量与 TOC 的关系

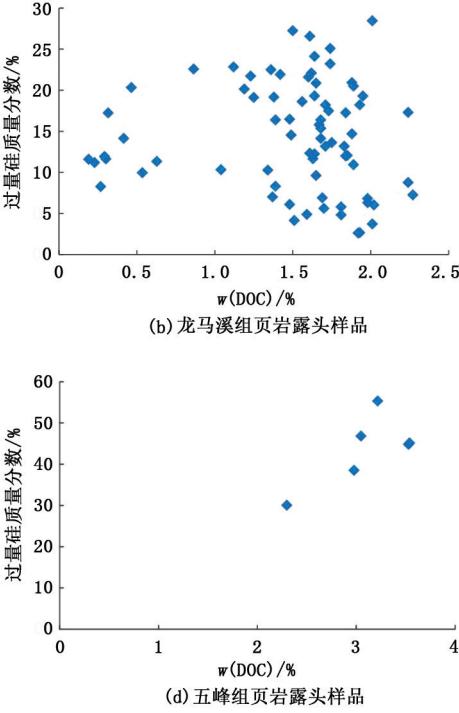
Fig. 4 Relationship of excess SiO_2 and TOC of shale from Jiaoshiba area

有机质对生物成因硅具有保护作用, 可以减缓沉积物中生物成因硅的溶解速率, 是控制生物硅在沉积物中富集的重要因素^[26], 因此, 页岩中高生物成因硅质含量指示了有机质的富集。同时, 由于有机质的富集, 易形成丰富的纳米级有机质孔隙, 这些有机质孔隙具有复杂的内部结构, 孔隙表面粗糙, 内部形态多样(图 5, 据文献[13], 有修改), 大大增加

3 地质意义

3.1 有利于形成富有机质泥页岩地层

沉积物中的生物成因硅与有机质存在密切的关系^[25], 海相页岩中生物成因硅质主要来源于硅藻、放射虫、笔石等各类硅质生物, 而这些生物体的存在又反映了贫氧或厌氧环境下的静水或深水陆棚沉积环境^[21], 其对于生物遗体的保存十分有利, 易形成富有机质泥页岩沉积。从图 4 看出, 龙马溪组页岩上段岩屑样品和龙马溪组页岩露头样品过量硅含量较低, 且大部分样品总有机碳(TOC)小于 2%, 过量硅含量与 TOC 之间相关性较差(图 4(a)); 而五峰组露头样品和龙马溪组页岩下段岩屑样品过量硅含量高, 页岩样品 TOC 一般大于 3%, 过量硅含量与 TOC 之间存在较明显的正相关关系(图 4(b)、(c))。



了比表面积和孔隙体积^[13], 并具有明显的亲油性, 改善了泥页岩存储游离气和吸附气的能力, 有利于页岩气的大量聚集。从焦页 1 井五峰组—龙马溪组岩心的现场解析法含气量测试结果来看, 五峰组页岩总含气量介于 $0.72 \sim 3.29 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $1.89 \text{ m}^3/\text{t}$, 龙马溪组页岩下段总含气量介于 $0.74 \sim 5.11 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $2.2 \text{ m}^3/\text{t}$, 而龙马溪组页岩上段总含气量

介于 $0.44 \sim 1.08 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $0.73 \text{ m}^3/\text{t}$, 这也表明了高含量生物成因硅对于形成富有机质、高含气量

页岩具有十分重要的意义。

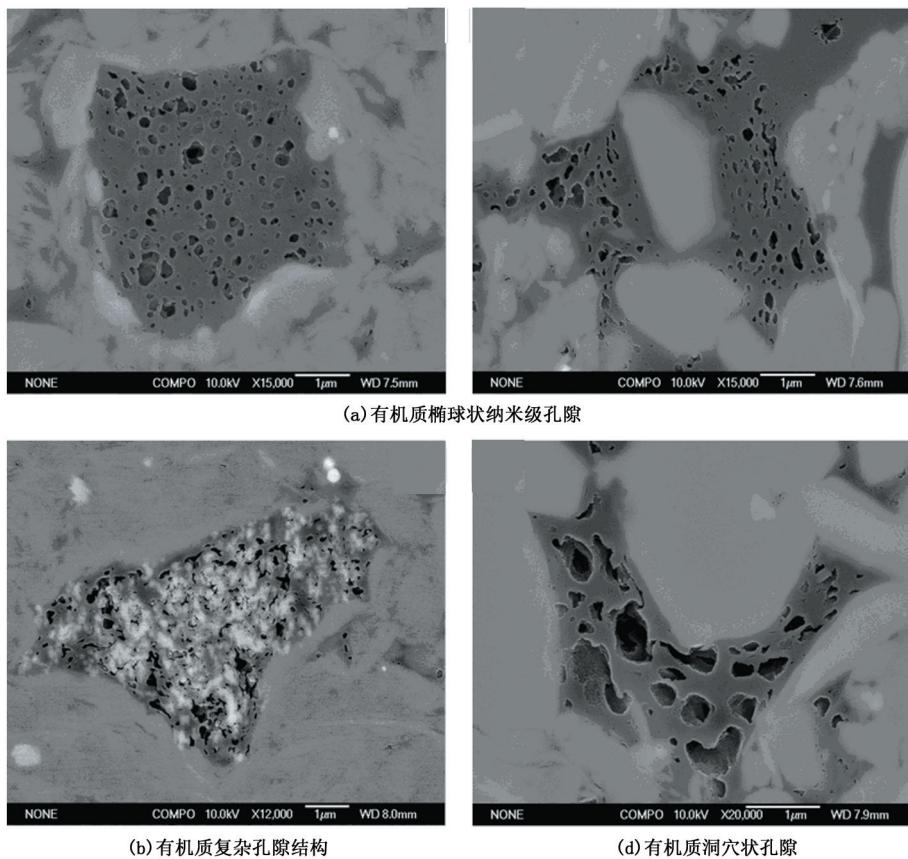


图 5 焦页 1 井五峰组—龙马溪组页岩有机质纳米级孔隙

Fig. 5 Organic matter nanoscale pore of Wufeng-Longmaxi Formation shale of well JY1

3.2 有利于页岩形成天然裂缝和后期压裂改造

泥页岩中发育的天然裂缝对页岩气开发的成败起到关键性的作用, 不仅有利于游离气的富集, 同时还是页岩气渗流运移的主要通道^[5]。焦石坝地区五峰组—龙马溪组富有机质泥页岩沉积后经历了深埋藏—抬升变浅的构造演化过程, 在构造应力及内部地层压力释放等作用下产生了大量的微裂缝(图 6, 据文献[13], 有修改)。元素测量结果表明, 焦石坝五峰组页岩和龙马溪组页岩下段 SiO_2 含量平均高达 74.01% 和 59.9%; X 衍射实验分析表明, 研究区脆性矿物以石英为主, 五峰组—龙马溪组页岩脆性矿物含量为 40% ~ 60%^[27], 这都说明该区五峰组—龙马溪组泥页岩脆性好。泥页岩类应力—应变关系实验证实^[28], 脆性矿物含量低的塑性泥岩在构造应力或异常高孔隙压力作用下, 常常产生晶格错位, 发生塑性变形而不形成裂缝, 即使形成裂缝, 由于泥质含量高, 也常常由于泥质涂抹和充填而使裂缝闭合, 形成无效裂缝。因此, 焦石坝五峰组—

龙马溪组生物成因硅质的大量富集, 可能是构造应力和异常高压作用下目的层泥页岩天然裂缝发育的关键因素。

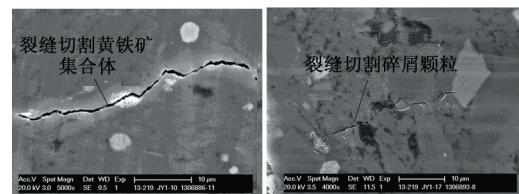


图 6 焦页 1 井龙马溪组页岩岩心微裂缝

Fig. 6 Microfracture in core of Longmaxi Formation shale of well JY1

脆性是影响页岩可压裂性和诱导裂缝形态的重要因素, 脆性越高, 可压裂性越好^[15], 页岩脆性特征已成为页岩气水平井目的层优选、压裂施工的关键参数之一。五峰组—龙马溪组页岩脆性矿物平均含量超过 50%, 高于美国 Barnett 页岩, 且天然裂缝发育, 储层可压性好, 具有形成复杂缝网的有利条件, 有利于后期人工压裂。

4 结 论

(1) 焦石坝五峰组—龙马溪组页岩中存在大量的笔石、焦石、珊瑚等古生物化石,薄片观察可见放射虫较发育;五峰组—龙马溪组页岩下段地层笔石和放射虫含量明显高于龙马溪组页岩上段,表明五峰—龙马溪组一段下部页岩中可能含有较多的生物成因硅质成分。

(2) 五峰组—龙马溪组页岩 SiO_2 含量介于 40% ~ 80%,平均达 63%,高于页岩平均含量;过量硅含量为 2.6% ~ 55.31%,其中五峰组和龙马溪组页岩下段过量硅含量较高,平均分别为 41.3% 和 25.5%; $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值介于 0.62 ~ 0.87,各类样品平均值均在 0.67 以上,与纯生物成因的硅质成分比值接近, $\text{Al}-\text{Fe}-\text{Mn}$ 三角图上,焦石坝页岩样品测量值绝大部分落在了生物成因区,表明了页岩硅质的生物成因。

(3) 页岩硅质生物成因指示了深水陆棚贫氧、缺氧沉积环境,该环境有利于页岩有机质的富集和有机孔隙的发育,为优质页岩气藏的形成提供了物质基础和储集空间;同时,高含量的硅质成分对于页岩天然裂缝的形成和后期页岩开发过程中的人工压裂都具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] GUO Tonglou. Evaluation of highly thermally mature shale-gas reservoirs in complex structural parts of the Sichuan Basin[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(6): 863-873.
- [3] 郭彤楼,张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发,2014,41(1):28-36.
GUO Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41 (1): 28-36.
- [4] 严伟,王建波,刘帅,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组泥页岩储层测井识别[J]. 天然气工业,2014,34(6):30-36.
- [5] 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.
- [6] 郭旭升. 南方海相页岩气“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.
- [7] 张春明,张维生,郭英海. 川东南-黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. 地学前缘,2012,19(1):136-145.
ZHANG Chunming, ZHANG Weisheng, GUO Yinghai. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source rocks of Longmaxi Formation in Southeast Sichuan and Northern Guizhou [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 136-145.
- [8] 黄金亮,邹才能,李建忠,等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1): 69-75.
HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39 (1): 69-75.
- [9] 李延钧,冯媛媛,刘欢,等. 四川盆地湖相页岩气地质特征与资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2013,40(4):423-428.
LI Yanjun, FENG Yuanyuan, LIU Huan, et al. Geological characteristics and resource potential of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 423-428.
- [10] 魏志红,魏祥峰. 页岩不同类型孔隙的含气性差异:以四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 天然气工业,2014,34(6):37-41.
WEI Zhirong, WEI Xiangfeng. Differences in gas storage capacity of different types of pores in shale: a case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 37-41.
- [YAN Wei, WANG Jianbo, LIU Shuai, et al. Logging identification for the Longmaxi mud shale reservoir in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6):30-36.]

- WEI Zhihong, WEI Xiangfeng. Comparison of gas-bearing property between different pore types of shale: a case from the upper Ordovician Wufeng and Longmaxi Fms in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6):37-41.
- [11] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J].石油学报,2011,32(5):775-782.
- CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5):775-782.
- [12] 梁超,姜在兴,杨镱婷,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.
- [13] 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.
- [14] 秦建忠,申宝剑,付小东,等.中国南方海相优质烃源岩超显微有机岩石学与生排烃潜力[J].石油与天然气地质,2010,31(6):826-837.
- QIN Jianzhong, SHEN Baojian, FU Xiaodong, et al. Ultramicroscopic organic petrology and potential of hydrocarbon generation and expulsion of quality marine source rocks in South China [J]. Oil & Gas Geology, 2010,31(6):826-837.
- [15] 王淑芳,邹才能,黄大忠,等.四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(3):476-486.
- WANG Shufang, ZOU Caineng, DONG Dazhong, et al. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan Basin and its significance for shale gas [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014,50(3):476-486.
- [16] 杨建民,王登红,毛景文,等.硅质岩岩石化学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J].岩石矿物学杂志,1999,18(2):108-118.
- YANG Jianmin, WANG Denghong, MAO Jingwen, et al. The petrochemical research method for silicalite and its application to the “Jingtieshan Type” iron deposits [J]. Acta Petrologica et Mineralogical, 1999,18 (2): 108-118.
- [17] BOSTROM K, KRAEMER T, GRATNER S. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni, and Co in Pacific pelagic sediments [J]. Chemical Geology, 1973,11(2):123-148.
- [18] 刘家军,郑明华.热水沉积硅质岩的地球化学[J].四川地质学报,1993,13(2):110-118.
- LIU Jiajun, ZHENG Minghua. Geochemistry of hydrothermal sedimentary silicalite [J]. Acta Geological Sichuan, 1993,13(2):110-118.
- [19] MURRAY R W, BUCHHOLTZ T B M R, GERLACH D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert form the Franciscan complex and monterey group, California: assessing REE sources to fine-grained marine sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991,55(7):1875-1895.
- [20] 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.
- [21] ROSS D J K, BUSTIN R M. Investigating the use of sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of thermally mature organic-rich strata: examples from the Devonian-Mississippian shales, Western Canadian Sedimentary Basin [J]. Chemical Geology, 2009,260(1):1-19.
- [22] BALSTUCK M. Provenance and distribution of Tethyan pelagic and hemipelagic siliceous sediments, Pindos mountains, Greece [J]. Sedimentary Geology, 1982,31 (1):63-88.
- [23] ADACHI M, YAMAMOTO K, SUGISAKI R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986,47(1):125-148.
- [24] YAMAMOTO K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes [J]. Sedimentary Geology, 1987,52(1):65-108.
- [25] 侯立军,刘敏,闫惠敏,等.长江口潮滩沉积物生物硅的分布及其影响因素[J].中国环境科学,2007,27 (5):665-669.

- HOU Lijun, LIU Min, YAN Huimin, et al. Distribution of biogenic silica in tidal flat sediments of Yangtze Estuary and its influence factors [J]. China Environmental Science, 2007, 27(5):665-669.
- [26] 刘升发,刘焱光,于永贵,等. 东海内陆架泥质区沉积物生物硅分布及其影响因素 [J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1):50-58.
- LIU Shengfa, LIU Yanguang, YU Yonggui, et al. Distribution of sedimentary biogenic silica in the muddy area of inner continental shelf of the East China Sea and its influence factors [J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(1):50-58.
- [27] 王志刚. 涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3):425-430.
- WANG Zhigang. Practice and cognition of shale gas horizontal well fracturing stimulation in Jiaoshiba of Fuling area [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3):425-430.
- [28] 付晓飞,宋岩,吕延防,等. 塔里木盆地库车凹陷膏盐质盖层特征与天然气保存[J]. 石油实验地质, 2006, 28(1):25-29.
- FU Xiaofei, SONG Yan, LÜ Yanfang, et al. Rock mechanic characteristics of gypsum cover and conservation function to gas in the Kuche Depression, the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1):25-29.

(编辑 刘为清)