

# 焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义

刘江涛,刘双莲,李永杰,张元春,王志战  
(中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

**摘要:**以焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩露头样品和钻井岩屑样品的氧化物和元素测量结果为依据,研究该区页岩氧化物和元素地球化学特征,结果表明:页岩地层 $\text{SiO}_2$ 含量整体较高,化学蚀变指数(CIA)为55~77,表明页岩形成于温暖、湿润的气候环境。不同样品页岩氧化物和元素组成特征存在较明显差异,导致页岩品质存在巨大差异:龙马溪组页岩上段岩屑样品过量硅含量极低,U/Th小于0.75,属于高能、富氧环境产物,有机质难以保存,页岩品质差;龙马溪组页岩下段岩屑样品过量硅含量为6.6%~12.9%,U/Th为0.75~1.25,属于低能、贫氧环境产物,有机质含量高,脆性较好,页岩品质较好;五峰组页岩露头样品过量硅含量为11%~24%,U/Th为0.76~1.34,属于低能、贫氧—厌氧环境产物,有机质含量高, $\text{SiO}_2$ 含量最高,有利于形成天然裂缝和后期压裂改造,页岩品质最好。

**关键词:**页岩 地球化学特征 沉积环境 五峰组 龙马溪组

中图分类号:TE122.9

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)03-0053-05

## Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshiba area

Liu Jiangtao, Liu Shuanglian, Li Yongjie, Zhang Yuanchun, Wang Zhizhan  
(Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing City, 100101, China)

**Abstract:** Based on the measured element content of outcrop samples and drilling cutting samples of the Ordovician Wufeng Formation shale and Silurian Longmaxi Formation shale, chemical elements and oxide-geochemistry features of the shale in the Jiaoshiba area were researched. The results show that the shale formations have a higher  $\text{SiO}_2$  content overall, and the chemical indexes of alteration (CIA) are between 55 and 77 which indicates the shale developed under a warm-humid climate. The elements characteristics of different shale samples are significantly different, which show a huge difference in the quality of shale. The excess  $\text{SiO}_2$  content of the drilling cutting samples are very low in the upper of Longmaxi shale and the value of U/Th is less than 0.75, which indicates that the shale formed under an energetic and oxygen-enriched environment, and the organic matter is difficult to be saved, so the shale quality is poor. The excess  $\text{SiO}_2$  content of the drilling cutting samples is between 6.6% and 12.9% in the lower of Longmaxi shale and the value of U/Th is between 0.75 and 1.25, which indicates that the shale formed under an oxygen-poor and comparatively calm-water environment, so the quality of shale which is characterized by high organic matter content and good compressibility is good. The excess  $\text{SiO}_2$  content of the outcrop samples of the Wufeng Formation shale is between 11% and 24% and the value of U/Th is between 0.76 and 1.34, which indicates that the shale formed under an oxygen-poor or anaerobic environment. The organic matter content is so high that it is easy for the shale to develop natural fracture or to be fractured. So the shale quality is excellent.

**Key words:** shale; geochemistry characteristics; depositional environment; Wufeng Formation; Longmaxi Formation

收稿日期:2016-02-01。

作者简介:刘江涛(1981—),男,河北邢台人,高级工程师,博士,从事石油地质学、测录井综合解释研究工作。联系电话:(010)84988381, E-mail:ljt0310@163.com。

基金项目:中国石化重点科技攻关项目“页岩地层工程特性测井评价技术研究”(P13012)。

近年来北美页岩气勘探开发取得的巨大成功,掀起了中国页岩气研究和勘探开发的热潮<sup>[1]</sup>,焦石坝地区志留系龙马溪组高产页岩气藏的发现开启了中国页岩气商业化开发的序幕。诸多学者对中国海相页岩地层特别是四川盆地志留系龙马溪组页岩开展了大量的研究工作<sup>[2-12]</sup>,但主要集中于页岩地层的资源评价、成藏规律及储层特性等方面,对于焦石坝地区龙马溪组页岩氧化物和元素组成特征的研究尚没有公开报道。由于页岩沉积机理的絮凝作用,大多数泥质悬浮物并不是以单独颗粒形式沉淀,判断砂砾岩沉积环境的粒度、结构等物性标志不明显,因此无机地球化学标志在其成因类型、沉积环境分析中有重要的作用<sup>[12-13]</sup>。地层元素的相关性和共生组合是元素及其化合物性质在特定的沉积物理和化学条件下的反映,研究元素的共生组合关系可以解释元素分布规律及成因、研究矿物组成特征、判断沉积环境。沉积环境和矿物组成特征的研究对于页岩地层判断其有机质丰度、类型及脆性等方面都具有重要的意义。笔者以实验室氧化物和元素测量数据为基础,对焦石坝地区奥陶系五峰组一志留系龙马溪组页岩地层的氧化物和元素组成特征进行研究,并探讨其地质意义,以期对研究区页岩地层下一步的勘探开发及中国其他区块页岩地层的研究提供借鉴。

## 1 区域地质背景

焦石坝地区位于四川盆地川东南构造区万县复向斜内,为一菱形断背斜构造,主体呈北东向展布(图1)。受北东向和近南北向两组断裂控制,主体变形弱,地层宽缓,地层倾角小,构造内部断裂不

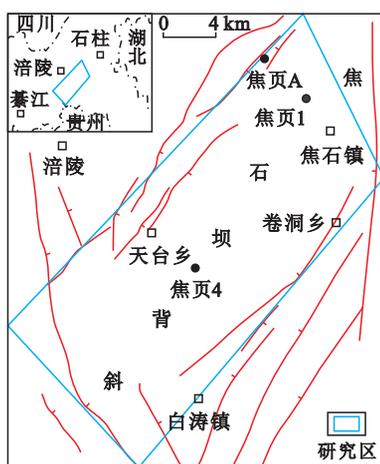


图1 焦石坝地区位置及断裂纲要

Fig.1 Location and outline map of faults in the Jiaoshiba area

发育。研究区自下而上发育奥陶系至三叠系嘉陵江组地层,目的层为奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩下段地层。奥陶纪末期—志留纪初期,发生过2次全球性海侵,研究区总体处于深水陆棚沉积环境,形成了稳定的黑色页岩地层沉积,厚度为80~100 m,并可大范围对比,其中优质页岩地层厚度约为40 m,埋深为2 300~2 500 m。

## 2 样品筛选及处理

在焦石坝背斜构造焦石镇共采集奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩露头样品83块,焦页A井龙马溪组油基泥浆页岩岩屑样品49份。采样时去除岩石表面的松散层,减少了露头样品地表有机物质的污染,保留新鲜的岩石样品;油基泥浆岩屑样品用石油醚溶剂清洗油污并低温烘干处理。将露头 and 岩屑样品研磨至150目,压制成直径为3.5 cm、厚度约为3 mm的饼状样品,利用中国石化石油工程技术研究院测录井实验室引进的荷兰帕纳科公司生产的X射线荧光元素分析仪测定元素含量,重复试验误差小于5%。

## 3 测量结果及地质意义

### 3.1 测量结果

由研究区页岩样品氧化物和元素测量结果(表1)可以看出,该区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩整体SiO<sub>2</sub>含量较高,一般大于55%,平均值为59.9%~74.01%,其中五峰组页岩露头样品SiO<sub>2</sub>含量明显高于其他样品,表明五峰组页岩地层脆性矿物含量高,可压性好;露头样品钙元素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。龙马溪组页岩上段岩屑样品K<sub>2</sub>O和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量高于下段岩屑样品,表明其泥质含量高于后者。

### 3.2 地质意义

#### 3.2.1 化学风化程度

化学风化作用是指岩石和矿物在近地表发生化学变化并产生新矿物的过程。Nesbitt等提出以化学蚀变指数(CIA)对源区的化学风化程度进行判断<sup>[14-15]</sup>。其判断标准为:①50<CIA<65,主要反映寒冷、干燥气候下低等的化学风化程度;②65<CIA<85,反映温暖、湿润条件下中等的化学风化程度;③

表1 焦石坝页岩样品氧化物和元素测量结果及化学蚀变指数(CIA)  
Table1 Measured results of oxide,elements and CIA of shale samples in the Jiaoshiba area

样品类型	样品 序号	深度/ m	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	CaO, %	MgO, %	K <sub>2</sub> O, %	S, %	U/ 10 <sup>-6</sup>	Th/ 10 <sup>-6</sup>	Mn/ 10 <sup>-6</sup>	CIA
龙马溪组露头样品	1		67.30	14.41	3.35	0.27	1.15	4.04	1.12	5.90	18.20	65.30	73.82
	2		61.90	15.94	5.04	0.54	2.18	4.20	1.62	6.30	19.10	124.50	74.45
	3		63.89	16.90	3.91	0.11	1.63	4.54	0.03	9.00	22.30	67.00	76.68
	4		62.63	17.80	3.32	0.56	1.44	5.29	1.02	9.10	22.30	104.80	73.16
五峰组露头样品	5		74.58	11.63	2.49	0.09	0.69	2.82	0.82	15.90	13.60	29.80	78.00
	6		83.83	9.17	1.43	0.09	0.41	2.23	0.04	14.70	11.60	21.00	77.58
	7		69.37	9.93	9.29	0.12	1.99	2.12	0.03	9.30	12.60	89.70	79.63
	8		75.85	11.93	2.34	0.15	0.72	2.92	0.08	12.20	16.20	30.70	77.32
焦页A井龙马溪组 页岩上段岩屑样品	9	2 466	59.87	17.36	6.80	0.85	2.69	4.44	0.11	5.70	19.00	683.20	74.06
	10	2 502	61.90	17.63	6.95	0.61	2.65	4.35	0.06	4.40	20.30	711.40	75.50
	11	2 654	60.47	13.47	4.60	2.53	2.15	2.98	0.37	5.50	13.80	490.90	66.19
焦页A井龙马溪组 页岩下段岩屑样品	12	2 702	54.17	14.66	5.40	4.86	2.66	3.74	1.50	13.60	18.80	348.40	72.65
	13	2 804	61.81	13.51	4.80	2.74	1.94	3.56	1.64	9.30	16.70	205.90	71.22
	14	2 906	57.67	11.19	3.75	4.96	1.76	2.99	1.68	12.00	15.60	207.80	71.27
	15	3 002	60.15	9.57	3.79	4.72	1.63	2.62	1.90	14.20	14.10	252.40	70.84
	16	3 134	66.55	11.22	4.44	3.03	1.45	3.17	1.88	13.80	16.80	213.50	71.69

85<CIA<100,反映炎热、湿润条件下强烈的化学风化程度<sup>[15]</sup>。

根据表1中氧化物测量结果,计算出焦石坝地区页岩样品的CIA值为66.2~79.6,表明页岩沉积时气候温暖、湿润,地层遭遇了中等化学风化,有利于有机质的保存。其中,地表露头样品CIA值偏高,可能由于地表裸露环境导致化学风化程度加剧造成的,但仍处于中等风化程度。

### 3.2.2 硅成因

页岩硅质成分的存在不仅对页岩气储层压裂改造有重要影响,其成因与有机质的形成和保存也有密切联系。页岩中硅质成分来源主要包括碎屑成因、成岩过程中的自生石英和生物成因等3种<sup>[7]</sup>。其中,富含生物成因硅质的页岩常富含有机质,对页岩气勘探开发具有重要意义,硅质含量往往与有机碳含量(TOC)呈正相关关系。通常用过量硅来表示高于正常碎屑沉积环境下SiO<sub>2</sub>的含量。根据表1中氧化物和元素测量结果和参考文献<sup>[16]</sup>的计算方法对焦石坝地区页岩样品中过量硅含量进行计算,结果表明,研究区页岩样品的过量硅含量为0~24%,其中五峰组页岩露头样品过量硅含量较高,为11%~24%,龙马溪组页岩上段岩屑样品过量硅含量极低,龙马溪组页岩下段岩屑样品过量硅含量为6.6%~12.9%,龙马溪组露头样品为0~8%。海相页岩中生物硅质成分主要来自硅藻和放射虫等生物,反映了静水和相对深度的陆棚沉积环境,表明

五峰组—龙马溪组页岩地层下段沉积时期生物活动频繁、生物生产率高,有利于形成富含有机质的页岩,龙马溪组页岩下段岩屑样品和五峰组露头样品的过量硅含量与TOC均具有较好的正相关关系;同时,由于硅质含量高,页岩脆性较好,对页岩气开发过程中的储层压裂改造十分有益。

### 3.2.3 沉积环境

页岩地层有机质含量高低的决定性因素是沉积环境,氧化环境下有机质不易保存,难以形成优质页岩沉积地层,还原环境(贫氧/厌氧环境)有利于有机质的保存和优质页岩地层的形成。应用元素地球化学指标来判断沉积环境是一种常用方法,元素的相关性和共生组合是元素及其化合物性质在特定的沉积物理和化学条件下的反映,研究元素的共生组合关系可以判断沉积环境。Jones等通过全岩样分析,提出U/Th可作为氧化—还原环境的指示剂,其波动对应着海平面的升降:在海退环境中,U/Th小于0.75指示氧化环境;在海进环境中,随着环境还原性的增强,该比值逐渐变大,当U/Th为0.75~1.25时指示贫氧环境,当U/Th大于1.25时为厌氧环境<sup>[17]</sup>。此外,其他元素也可以指示氧化—还原环境的变化,例如,S和V等元素在氧化条件下呈高价易迁移,还原条件下呈低价易沉淀;而Fe,Mn和Cu等元素在氧化条件下呈高价易沉淀,还原环境下易迁移<sup>[18]</sup>。

根据氧化物和元素测量结果(表1),对龙马溪

组页岩岩屑样品的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、U/Th、S、U、Mn等氧化物和元素含量随深度变化的特征进行分析。龙马溪组页岩上段地层(深度小于2 800 m)Mn和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量高,S含量低,U/Th小于0.75,表明其形成于高能、氧化沉积环境,有机质含量低;龙马溪组页岩下段地层(深度大于2 800 m)形成于低能、贫氧、还原沉积环境,有机质丰富,Mn和Fe元素含量相比前者降低,S元素含量升高,是含气页岩地层发育的有利层段。龙马溪组页岩露头样品U/Th为0.19~0.51,平均为0.36,考虑其长期裸露风化,可能导致U元素的流失,其沉积环境存疑;五峰组页岩露头样品U/Th为0.76~1.34,平均为1.07,形成于贫氧—厌氧环境,有机质含量高。

### 3.2.4 页岩品质

页岩地层品质评价是页岩气勘探的核心内容之一,是制定页岩气勘探开发策略的重要依据。氧化物和元素组合特征与页岩地层有机质含量、脆性矿物含量及沉积环境密切相关,因此利用氧化物和元素含量分析可以对页岩地层品质进行初步评价。龙马溪组页岩岩屑样品和五峰组页岩露头样品U/Th值与TOC具有较强的正相关关系;龙马溪组页岩露头样品二者关系较差,可能与U元素流失有关。脆性矿物含量是页岩地层水平井压裂施工的重要依据,脆性矿物主要包括石英、方解石和菱铁矿,脆性矿物含量越高,地层脆性越强,地层可压性越好<sup>[19-20]</sup>。焦石坝地区脆性矿物主要为石英,方解石含量较低,基本不含菱铁矿。

对比主要脆性矿物 $\text{SiO}_2$ 含量与U/Th关系(图2)可以看出,不同样品分布的区域截然不同:五峰组页岩露头样品位于I区,U/Th值高, $\text{SiO}_2$ 含量最高,为70%~80%,表明其有机质含量高,页岩气资源潜

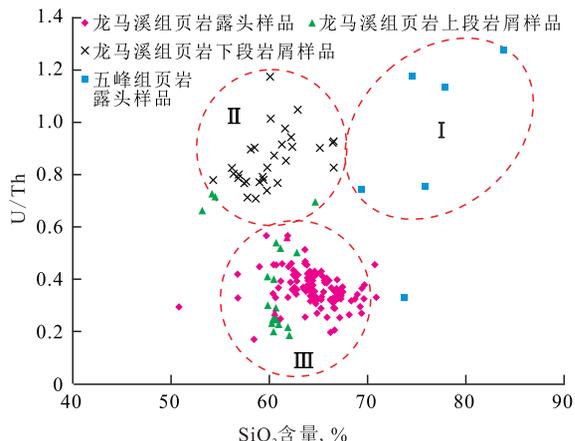


图2 不同样品主要脆性矿物 $\text{SiO}_2$ 含量与U/Th的关系

Fig.2 Relationship between  $\text{SiO}_2$  content and the value of U/Th of different samples

力大。同时,脆性矿物含量高,有利于天然裂缝的形成和后期压裂改造,页岩品质最好;龙马溪组页岩下段岩屑样品位于II区,U/Th值高, $\text{SiO}_2$ 含量较高,表明其有机质含量高,页岩气资源潜力大,脆性矿物含量较高,页岩气开发主要依赖于储层改造,页岩品质较好;龙马溪组页岩上段岩屑样品U/Th位于III区,U/Th值低,有机质含量低,页岩品质较差;龙马溪组页岩露头样品也位于III区,但由于U/Th与TOC关系较差,不能定性判断页岩品质的好坏。

## 4 结论

焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩 $\text{SiO}_2$ 含量整体较高,CIA值为66.2~79.6,表明页岩沉积时气候温暖、湿润,沉积后地层遭遇了中等化学风化。龙马溪组页岩露头样品和龙马溪组页岩上段岩屑样品过量硅含量较低或不含过量硅;龙马溪组页岩下段岩屑样品和五峰组页岩样品含较高的过量硅,表明沉积时期生物活动频繁、生物生产率高,为形成高有机质含量的优质页岩地层创造了物质条件。特征元素氧化还原环境分析表明,龙马溪组页岩上段岩屑样品形成于高能、氧化沉积环境;龙马溪组页岩下段岩屑样品形成于低能、贫氧、还原沉积环境;五峰组露头样品为贫氧—厌氧环境沉积物。五峰组页岩样品脆性矿物含量最高、有机质含量高,页岩品质最好;龙马溪组页岩下段岩屑样品脆性矿物含量较高、有机质含量高,页岩品质较好;龙马溪组页岩上段岩屑样品脆性矿物含量较高,但U/Th较低,有机质含量低,页岩品质较差。

### 参考文献:

- [1] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.  
Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [2] 王社教,王兰生,黄金亮,等.上扬子区志留系页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):45-50.  
Wang Shejiao, Wang Lansheng, Huang Jinliang, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in Silurian of the Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 45-50.
- [3] 聂海宽,张金川,包书景,等.四川盆地及其周缘上奥陶统一志留统页岩气聚集条件[J].石油与天然气地质,2012,33(3):335-345.  
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accu-

- mulation conditions of the Upper Ordovician–Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3):335–345.
- [4] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. *石油学报*, 2010, 31(2): 225–230.
- Pu Boling, Jiang Youlu, Wang Yi, et al. Reservoir-forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 225–230.
- [5] 李海, 白云山, 王保忠, 等. 湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 22–25.
- Li Hai, Bai Yunshan, Wang Baozhong, et al. Preservation conditions research on shale gas in the lower Paleozoic of western Hunan and Hubei area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 22–25.
- [6] 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.
- [7] 王淑芳, 邹才能, 董大忠, 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.
- [8] 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 Jiaoshiiba shale gas field, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28–36.
- [9] 李建青, 高玉巧, 花彩霞, 等. 北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 23–27, 32.
- Li Jianqing, Gao Yuqiao, Hua Caixia, et al. Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: enlightenment from North American exploration experience [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 23–27, 32.
- [10] 蒋天国, 刘胜彪, 孙雄, 等. 滇东北龙马溪组页岩气成藏条件分析[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(6): 23–27.
- Jiang Tianguo, Liu Shengbiao, Sun Xiong, et al. Analysis on shale gas accumulation conditions of Longmaxi Fm in Northeastern Yunnan Province [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(6): 23–27.
- [11] 郭少斌, 赵可英. 鄂尔多斯盆地上古生界泥页岩储层含气性影响因素及储层评价[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(6): 678–683.
- Guo Shaobin, Zhao Keying. Gas-bearing influential factors and estimation of shale reservoirs in Upper Paleozoic, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(6): 678–683.
- [12] 李婧婧. 博格达山北麓二叠系芦草沟组油页岩地球化学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 32–57.
- Li Jingjing. Study on the oil shale geochemistry of Permian Lucaogou formation in the northern Bogda Mountain [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009: 32–57.
- [13] 彭雪峰, 汪立今, 姜丽萍. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(2): 121–128.
- Peng Xuefeng, Wang Lijin, Jiang Liping. Geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin and its environmental implications [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(2): 121–128.
- [14] Nesbitt H W M, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of Lutites [J]. *Nature*, 1982, (299): 715–717.
- [15] Block B, McLennan S M, Hanson G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Norman-Skill Formation) and the Taconian orogeny in New England [J]. *Sedimentology*, 1998, (45): 635–655.
- [16] Holdaway H K, Clayton C J. Preservation of shell microstructure in silicified brachiopods from the Upper Cretaceous Wilmington Sands of Devon [J]. *Geological Magazine*, 1982, (119): 371–382.
- [17] Jones B, Manning A C. Comparison of geochemical in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(2): 111–129.
- [18] 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. *甘肃地质学报*, 2003, 12(2): 55–58.
- Wang Zhengming. Geochemical indicators for diagnosing anoxic sedimentary environment [J]. *Acta Geologica Gansu*, 2003, 12(2): 55–58.
- [19] 张新华, 邹筱春, 赵红艳, 等. 利用X荧光元素录井资料评价页岩脆性的新方法[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(5): 92–95.
- Zhang Xinhua, Zou Xiaochun, Zhao Hongyan, et al. A new method of evaluation shale brittleness using X-ray fluorescence element logging data [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(5): 92–95.
- [20] 苗文培, 姜汉桥, 葛洪魁, 等. 页岩气储层蠕变特性及其对页岩气开发的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 97–100.
- Miao Wenpei, Jiang Hanqiao, Ge Hongkui, et al. Gas shale creep and its influence on the shale gas development [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 97–100.