

湖北省来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组页岩气地质特征与资源潜力

刘小龙^{1,2}, 牟传龙^{2,3}, 肖朝辉⁴, 王秀平^{2,3}, 郑宇龙^{1,2}, 陈尧⁴

1 山东科技大学地球科学与工程学院; 2 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室;

3 中国地质调查局成都地质调查中心; 4 华电华中清洁能源有限公司

摘要 基于露头剖面、钻井岩心观察及样品实验测试结果,从优质页岩段厚度、有机碳含量、有机质类型、矿物含量以及含气量等方面,对湖北省来凤—咸丰区块上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气地质条件进行系统分析,并通过与四川盆地焦石坝页岩气建产区对比,评价了研究区页岩气资源潜力。结果表明:①研究区两河口向斜五峰组—龙马溪组下部优质页岩段北厚南薄,主体厚度在10m左右。②研究区有机碳含量主体大于2.7%,往北有增加的趋势;有机质类型为Ⅱ₁型;有机质热演化程度高,以生成干气为主。③研究区页岩脆性矿物含量超过60%,大量发育有机质孔和微裂缝;含气量北高南低,北部的来凤1井和龙潭坪剖面含气量超过3.0 m³/t。④与四川盆地焦石坝页岩气田焦页1井相比,虽然来凤—咸丰区块优质页岩段厚度较小,有机碳含量略低,但两者脆性矿物含量、含气量相当,具有一定的页岩气资源潜力。指出两河口向斜北部为有利区。

关键词 页岩气;地质特征;资源潜力;五峰组;龙马溪组;来凤—咸丰区块;湖北省

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

我国南方中上扬子区普遍发育多套海相黑色页岩层系,其中的上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组作为页岩气的主要勘探目的层,受到业界的广泛关注。上扬子区五峰组—龙马溪组广泛发育的厚层页岩,具有硅质含量丰富、有机碳含量高、热演化程度适中、储集物性好等特点^[1-5],在涪陵、长宁、昭通等地区已实现了规模开发。中扬子区五峰组—龙马溪组同样广泛发育富有机质黑色岩系,页岩气勘探潜力大^[6-11]。湖北省来凤—咸丰区块位于中上扬子区页岩气勘探重点区域^[12],为原国土资源部第二轮页岩气招标区块。前人曾对该区块的单井开展过研究^[12-13],但目前还缺乏整体性、系统性的研究。笔者基于露头剖面、钻井岩心资料、实验测试结果,对来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组页岩气地质条件进行系统研究,分析研究区地质要素空间展布特征,在此基础上预测了页岩气有利区分布,并通过与四川盆地焦石坝页岩气建产区对比,浅析研究区页岩气资源潜力,以期为中上扬子区页岩气评价提供依据。

1 地质概况

晚奥陶世—早志留世,受加里东中期都匀运动的影响,上扬子东部发生陆内拗陷,随之快速海侵,使上扬子区东南部形成了较大规模的深水陆棚沉积环境^[10,14-15](图1a),分别发育了川东北、鄂西—渝东和川南等3个沉积中心^[1]。研究区来凤—咸丰区块位于湘鄂西褶皱冲断带,区内主体构造有北东向展布的咸丰背斜和两河口向斜(图1b),其中,两河口向斜西南端延伸出区外,东北端扬起。

区域地质资料显示:来凤—咸丰区块出露震旦系—三叠系,缺失侏罗系以上地层,累计地层厚度约为4600m。受后期抬升剥蚀的影响,五峰组—龙马溪组的露头主要分布在两河口向斜的西北和东南两侧(图1b),地层较为平缓。露头 and 钻井揭示:这套页岩目的层厚度变化不大(50~60m);目的层埋藏较浅,埋深<2500m,地层压力系数为0.95~1.20。目的层的顶板、底板分别为下志留统新滩组、上奥陶统宝塔组,

收稿日期: 2018-04-08; 改回日期: 2019-03-11; 网络出版日期: 2020-04-15

本文受湖北页岩气项目“鄂西地区重点层系页岩气评价及有利区优选”(编号: HBYQ-GC1075)与中国地质调查局项目“乌蒙山区地质矿产综合调查”(编号: DD20160019-25)联合资助

第一作者: 刘小龙, 硕士, 主要从事沉积地质学研究。通信地址: 610081 四川省成都市金牛区一环路北三段2号; E-mail: liuxiaolong199412@126.com

通信作者: 牟传龙, 研究员, 博士生导师, 主要从事沉积地质学及油气地质学研究。通信地址: 610081 四川省成都市金牛区一环路北三段2号; E-mail: cdmchuanlong@163.com

两河口向斜内无大型通天断层发育,保存条件良好。

五峰组—龙马溪组岩性由下部的碳质泥页岩,向上过渡为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和含碳泥页岩(图2)。五峰组—龙马溪组下部的碳质泥页岩

为优质泥页岩段(主体 $\text{TOC} \geq 2.0\%$ ^[16-17]),其厚度一般小于20 m(表1);在位于北部的龙潭坪剖面厚度为18.11 m,向南呈减薄趋势,位于南端的来地2井区厚度仅为4.36 m。

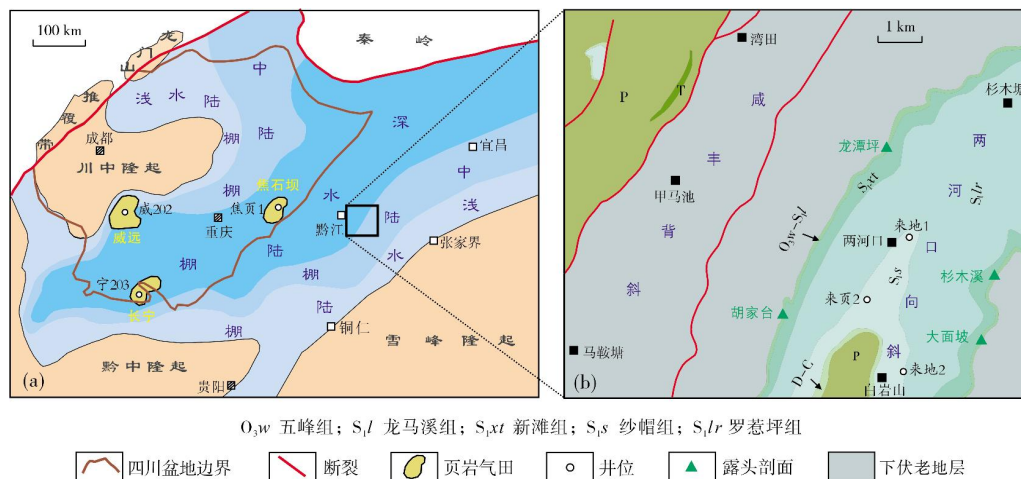


图1 中上扬子区奥陶纪末沉积相分布图(a)与来凤—咸丰区块地质简图(b)

Fig. 1 Sedimentary background at the end of Ordovician in the Middle-Upper Yangtze Region (a) and geological map of Laifeng-Xianfeng block (b)

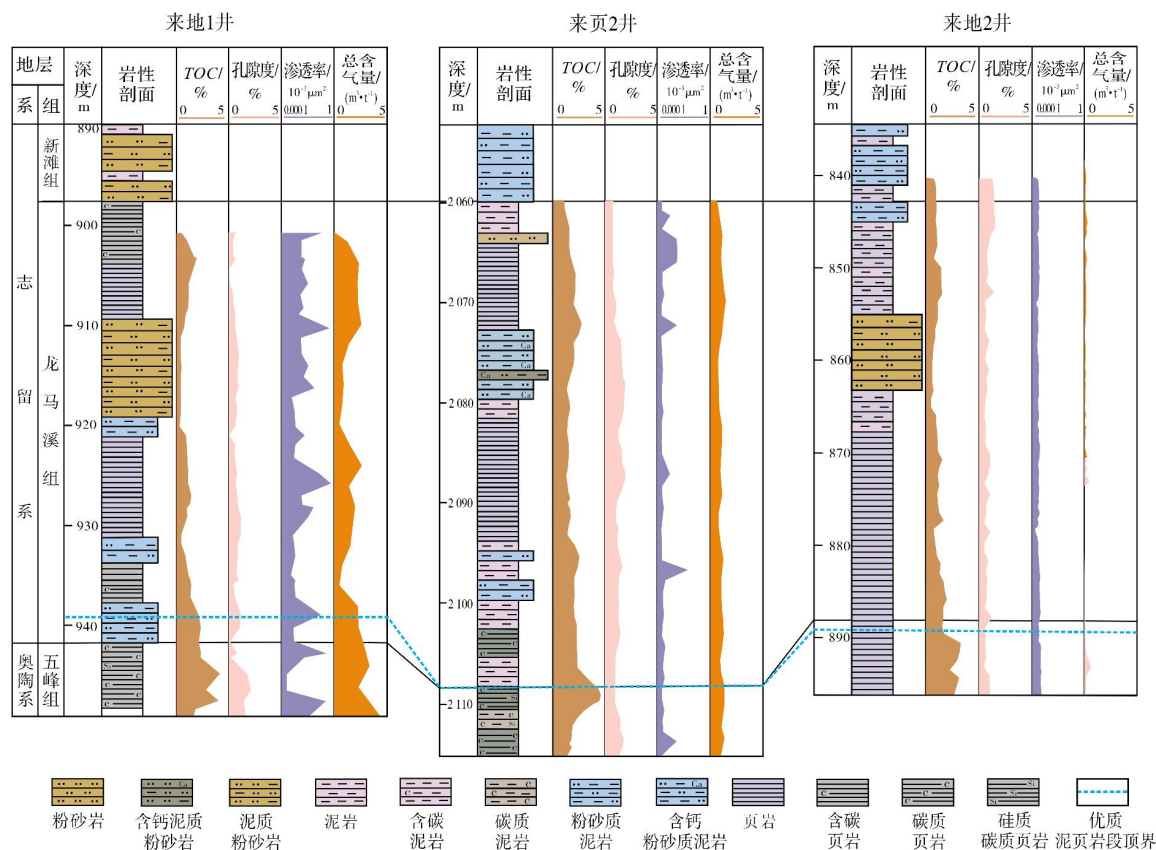


图2 湖北省来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组对比剖面

Fig. 2 Correlation section of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Laifeng-Xianfeng block, Hubei Province

表 1 湖北省来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组优质泥页岩段厚度及有机碳含量

Table 1 Thickness and organic carbon content of high quality shale section of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Laifeng-Xianfeng block, Hubei Province

剖面或钻井	深度范围/m	厚度/m	TOC/%		样品数
			范围值	平均值	
龙潭坪剖面	33.69~51.80	18.11	2.19~6.55	3.29	7
来地 1 井	938.92~947.60	8.68	1.94~4.18	2.70	9
杉木溪剖面	41.79~51.87	10.08	1.79~3.22	2.71	3
来页 2 井	2 108.35~2 115.70	7.35	2.06~5.49	3.09	6
胡家台剖面	50.59~60.64	10.05	1.04~2.22	1.82	3
大面坡剖面	41.11~46.51	5.40	1.36~4.08	2.72	2
来地 2 井	889.49~893.85	4.36	2.22~3.20	2.91	5

注: TOC 数据由中国石油华北油田勘探开发研究院生油实验室测试提供,测试时间为 2013—2016 年。

2 页岩生气潜力

除有机碳含量外,有机质的生烃潜力还与有机质类型密切相关。来凤—咸丰区块优质泥页岩段的黑色页岩样品显微组分特征(表2)表明:干酪根类型主要为Ⅱ₁型,Ⅱ₂型次之,显微组分主要为腐泥组和惰质组,具有一定的生烃潜力。

表 2 湖北省来凤—咸丰区块来地 1 井五峰组—龙马溪组页岩有机质显微组分

Table 2 Organic macerals of shale of Wufeng Formation and Longmaxi Formation of Well Laidi 1 in Laifeng-Xianfeng block, Hubei Province

深度/ m	有机质显微组分/%			类型 指数	干酪根 类型
	腐泥组		惰质组		
	腐泥无定形体	藻类体			
903.29	75	—	25	50	Ⅱ ₁
908.31	72	—	28	44	Ⅱ ₁
912.86	71	—	29	42	Ⅱ ₁
916.30	73	—	27	46	Ⅱ ₁
920.96	74	—	26	48	Ⅱ ₁
924.80	73	—	27	46	Ⅱ ₁
929.07	71	—	29	42	Ⅱ ₁
934.92	69	—	31	38	Ⅱ ₂
938.92	71	—	29	42	Ⅱ ₁
948.27	72	—	28	44	Ⅱ ₁

有机质热演化程度决定了天然气的生成方式和气体的组分构成^[11],它是影响页岩生烃潜力的关键指标^[18-19]。对研究区内页岩镜质组反射率(R_o)的分析(表3)表明:五峰组—龙马溪组 R_o 平均值为 2.80%,处于过成熟阶段,以生成干气为主。需要说明的是:胡家台剖面 R_o 为 2.56%~4.85%,平均值高达 3.31%,是区内热演化程度最高的;该剖面优质页岩段的 TOC 平均值为 1.82%(表1),小于 2%,可能与有机质的高热演化程度有关。

表 3 湖北省来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组 R_o 统计表
Table 3 R_o of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Laifeng-Xianfeng block, Hubei Province

剖面/钻井	R_o /%		样品数
	范围值	平均值	
龙潭坪剖面	2.06~3.05	2.60	8
来地 1 井	2.79~3.32	3.11	11
杉木溪剖面	2.51~2.88	2.71	3
来页 2 井	2.55~3.06	2.85	4
胡家台剖面	2.56~4.85	3.31	14
大面坡剖面	2.03~2.83	2.49	6
来地 2 井	1.47~2.63	1.96	10

3 页岩储集条件

有机碳含量在一定程度上控制着页岩裂缝的发育和页岩的含气量^[11];有机碳含量如果较高,在生烃演化过程中可使微孔增多、微孔隙度增大,从而使页岩吸附气含量增加^[20]。过高的热演化程度也会促进有机质微孔隙、微裂缝的发育^[21-23]。脆性矿物的存在有利于微孔隙、微裂缝的形成^[24-26]。

3.1 矿物组分

以来凤—咸丰区块样品较多的 2 口钻井为例,对五峰组—龙马溪组泥页岩全岩矿物组成的分析(表4)表明:页岩矿物成分以石英和黏土矿物为主,其次为长石、碳酸盐矿物等,其中石英、长石、碳酸盐矿物等脆性矿物的平均含量大于 60%,因此具有较好的压裂条件。

表4 湖北省来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组矿物组成统计表

Table 4 Mineral composition of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Laifeng- Xianfeng block, Hubei Province

井名	矿物组成/ %										样品数
	黏土矿物		石 英		长 石		碳酸盐矿物		其他矿物		
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	
来地 1	17.8~60.2	33.8	15.9~66.0	39.7	3.2~25.1	16.1	1.8~13.7	7.0	1.0~5.1	3.5	42
来地 2	14.7~49.7	33.7	30.0~59.1	38.8	4.1~22.8	13.6	1.2~23.9	9.2	0~10.1	4.7	51

3.2 储集空间

基于扫描电镜观察,来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组黑色页岩的储集空间类型主要包括粒间孔、粒内孔、有机质孔和微裂缝(图3)。

粒间孔 由各种颗粒间的原生孔隙经不完全胶结保留或后期成岩改造产生。研究区内五峰组—龙马溪组黑色页岩中见有黏土矿物凝絮成团后在其内部形成的孔隙(图3a),呈网格状;黄铁矿颗粒之间的孔隙(图3b),可见三角形、多边形和长条形等形态,孔径多为1~5 μm 。

粒内孔 常见于石英等矿物颗粒的内部,孔径为2~5 μm ,通常呈不规则形态(图3c),在成岩过程中产生,连通性较差。

有机质孔 多为纳米级的中孔隙和宏孔隙,常局部富集,具有一定的连通性,可作为吸附气的储集空间。研究区五峰组—龙马溪组黑色页岩样品中,发育大量的有机质孔隙,呈蜂窝状,孔径可达几十到数百纳米,孔隙边缘较清晰(图3d,3e),未见坍塌现象。

微裂缝 页岩储层中发育的微裂缝,在提高渗透性的同时,还有利于页岩气的大量存储^[27]。除岩心见到的共轭节理外,研究区五峰组—龙马溪组微裂

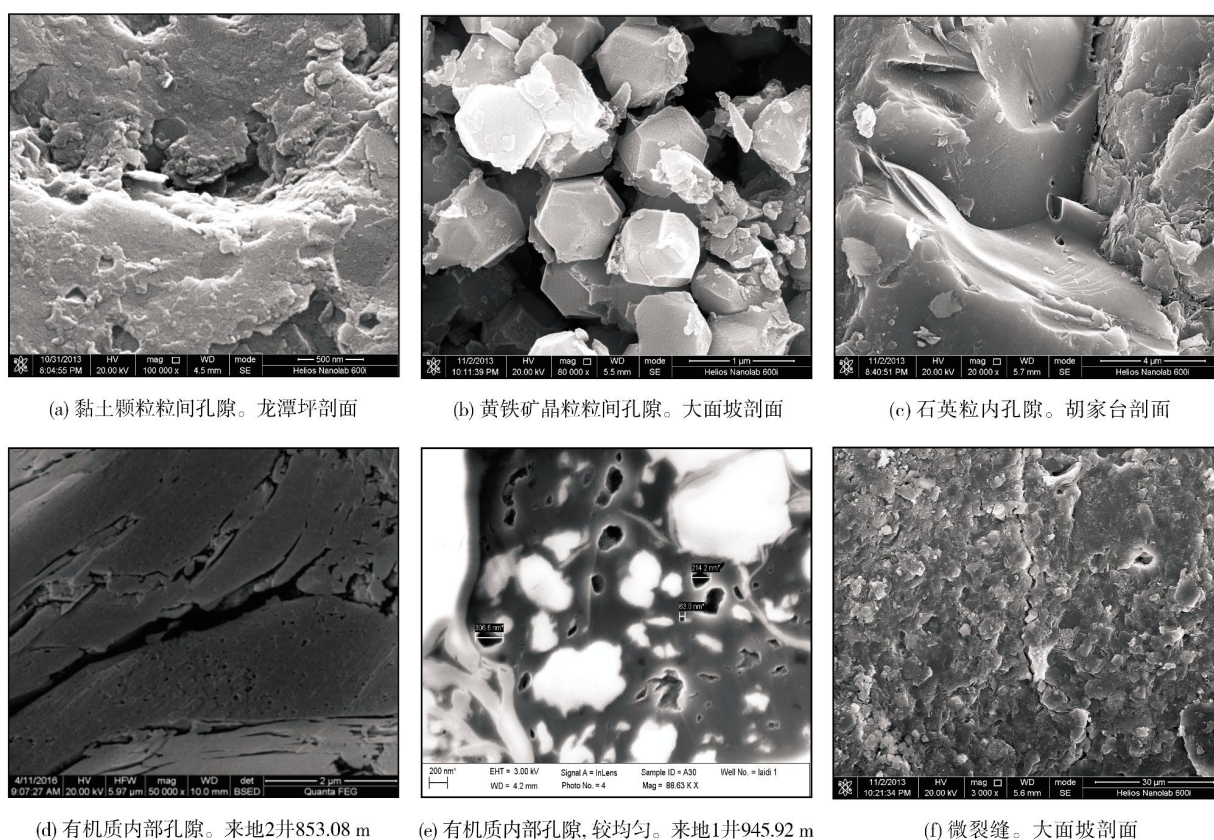


图3 湖北省来凤—咸丰区块五峰组—龙马溪组页岩储集空间显微特征(扫描电镜)

Fig. 3 Micro characteristics of shale reservoir space of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Laifeng- Xianfeng block, Hubei Province (SEM)

(4)焦石坝地区页岩含气量为 $1.7\sim 4.5\text{ m}^3/\text{t}$ ^[33],焦页1井含气量平均为 $2.99\text{ m}^3/\text{t}$,研究区来地1井含气量为 $3.0\text{ m}^3/\text{t}$,两者基本相当,反映出研究区具有一定的页岩气潜力。

表6 来地1井与焦页1井五峰组—龙马溪组优质泥页岩段地质参数对比表

Table 6 Comparison of geological parameters between Well Laidi 1 and Well Jiaoye 1 in the high quality shale section of Wufeng Formation and Longmaxi Formation

钻井	埋深/m	厚度/m	TOC/%		有机质类型	R_o /%		脆性矿物含量/%		含气量/($\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$)	
			范围值	平均值		范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
来地1	938.92~947.60	8.68	1.94~4.18	2.70	II ₁	2.79~3.13	2.95	34.7~80.2	62.6	2.17~3.73	3.00
焦页1	2378~2415	37	1.04~5.51	3.39	I	2.42~3.13	2.79	50.9~80.3	62.4	0.89~5.19	2.99

注:焦页1井数据引自文献[3]。

6 结 语

基于露头剖面、钻井岩心及实验测试结果,从优质页岩段厚度、有机碳含量、有机质类型、矿物含量以及含气量等方面综合评价,认为湖北省来凤—咸丰区块上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组具备较好的页岩气地质条件,两河口向斜北部为有利区。与四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气建产区之一的焦石坝地区开展典型井地质参数对比,表明来凤—咸丰区块具有一定的页岩气资源潜力。研究成果对川中上扬子区页岩气勘探从四川盆地拓展到盆地以外具有一定意义。

参 考 文 献

- [1] 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 8-17.
- [2] 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1-15.
- [3] 郭彤楼. 涪陵页岩气田发现的启示与思考[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 29-43.
- [4] 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.
- [5] 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 等. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J]. 古地理学报, 2014, 16(4): 427-440.
- [6] 刘洪林, 王红岩, 方朝合, 等. 中国南方海相页岩气超压机制及选区指标研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 48-54.
- [7] 石创, 徐思煌, 拜文华, 等. 湖北及周缘五峰组—龙马溪组页岩气资源潜力[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 65-69, 144.
- [8] 刘安, 包汉勇, 李海, 等. 湖北省上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气地质条件分析及有利区带预测[J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2): 126-134.
- [9] 付小东, 秦建中, 腾格尔, 等. 涪源岩矿物组成特征及油气地质意义: 以中上扬子古生界海相优质涪源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 671-684.
- [10] 李艳霞, 林娟华, 龙幼康, 等. 中扬子地区下古生界海相泥页岩含气勘探远景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 349-356.
- [11] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- [12] 姜生玲, 李博, 彭传圣, 等. 来凤咸丰区块LD2井五峰—龙马溪组页岩发育特征及含气性分析[J]. 地质与勘探, 2018, 54(1): 203-210.
- [13] 李博, 魏国庆, 洪克岩, 等. 中国南方盆外复杂构造区页岩气井评价与认识: 以湖北来凤咸丰区块来页1井为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 29-35.
- [14] 朱志军, 陈洪德, 林良彪, 等. 黔北—川东南志留系层序格架下的沉积体系演化特征及有利区带预测[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 243-253.
- [15] 邱小松, 杨波, 胡明毅. 中扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1274-1283.
- [16] 牟传龙, 王启宇, 王秀平, 等. 岩相古地理研究可作为页岩气地质调查之指南[J]. 地质通报, 2016, 35(1): 10-19.
- [17] 李延钧, 刘欢, 张烈辉, 等. 四川盆地南部下古生界龙马溪组页岩气评价指标下限[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2013, 43(7): 1088-1095.
- [18] 韩双彪, 张金川, 李玉喜, 等. 黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气地质调查井位优选[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 182-187.
- [19] 李贤庆, 赵佩, 孙杰, 等. 川南地区下古生界页岩气成藏条件研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 864-869.
- [20] 徐国盛, 徐志星, 段亮, 等. 页岩气研究现状及发展趋势[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 603-610.
- [21] 武景淑, 于炳松, 张金川, 等. 渝东南渝页1井下志留统龙马溪组页岩孔隙特征及其主控因素[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 260-269.
- [22] 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.
- [23] 王飞宇, 关晶, 冯伟平, 等. 过成熟海相页岩孔隙度演化特征和游离气量[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 764-768.
- [24] 姜文斌, 陈永进, 李敏. 页岩气成藏特征研究[J]. 复杂油气藏, 2011, 4(3): 1-5.

- [25] 汪吉林, 刘桂建, 王维忠, 等. 川东南龙马溪组页岩孔裂隙及渗透性特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 772-777.
- [26] 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.
- [27] 仝倩, 朱维耀, 邓佳, 等. 含微裂缝页岩储层渗流模型及压裂井产能[J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 306-313.
- [28] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.
- [29] 张晨晨, 王玉满, 董大忠, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩脆性评价与“甜点层”预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 51-60.
- [30] 张晓明, 石万忠, 徐清海, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 926-939.
- [31] 陈文玲, 周文, 罗平, 等. 四川盆地长芯 1 井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 1073-1086.
- [32] 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.
- [33] 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 等. 中美海相页岩气地质特征对比研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1666-1678.

编辑: 董庸

The geological characteristics and resource potential of shale gas of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Laifeng-Xianfeng block, Hubei Province

LIU Xiaolong, MOU Chuanlong, XIAO Chaohui, WANG Xiuping,
ZHENG Yulong, CHEN Yao

Abstract: Based on outcrops, drilling cores and sample experimental data, the geological conditions of shale gas of the Upper Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in Laifeng-Xianfeng block, Hubei Province, are systematically discussed from the aspects of thickness, organic carbon content, organic matter type, mineral composition and gas content of the high-quality shale section. Compared with Well Jiaoye 1 in Jiaoshiba shale gas field, one of the production areas in Sichuan Basin, the potential of shale gas in Laifeng-Xianfeng block is evaluated. The results show that: (1) The high quality shale section in the lower part of Wufeng Formation-Longmaxi Formation of Lianghekou Syncline in the study area is thick in the north and thin in the south, and most of the thickness is about 10 m. (2) Most of the organic carbon content of shale in the study area is more than 2.7%, which tends to increase towards the north; the organic matter type is II₁; the organic matter has a high degree of thermal evolution, mainly generating dry gas. (3) The shale in the study area contains more than 60% brittle minerals and a large number of organic pores and microfractures; the gas content of shale is higher in the north than in the south, and the gas content of Well Laidi 1 and Longtanping outcrop in the north is more than 3.0 m³/t. (4) Compared with Well Jiaoye 1 of Jiaoshiba shale gas field in Sichuan Basin, although the high-quality shale in Laifeng-Xianfeng block has a smaller thickness and a slightly lower organic carbon content, the brittle minerals and gas content of both are similar, which shows a certain shale gas resource potential in the study area, with the north of Lianghekou syncline as a favorable shale gas area.

Key words: shale gas; geologic characteristics; resource potential; Wufeng Formation; Longmaxi Formation; Laifeng-Xianfeng block; Hubei Province

LIU Xiaolong, First author: MSc, engaged in sedimentary geology. Add: Chengdu Geological Survey Center, No. 2 of North 3rd Section, Yihuan Rd., Jinniu District, Chengdu, Sichuan 610081, China

MOU Chuanlong, Corresponding author: Professor, mainly engaged in sedimentary geology and petroleum geology. Add: Chengdu Geological Survey Center, No. 2 of North 3rd Section, Yihuan Rd., Jinniu District, Chengdu, Sichuan 610081, China