

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.03.014

湘中涟源凹陷下二叠统梁山组页岩气勘探前景

田巍,王强,陈林,苗凤彬,白云山

(中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北 武汉 430205)

摘要:基于涟源凹陷二叠系梁山组泥页岩野外露头、钻井等资料,通过有机地化分析测试、X-衍射分析、扫描电镜观察、等温吸附等实验测试分析,系统研究了梁山组泥页岩的地质及地化特征、矿物组成、孔隙结构及吸附性能等。研究表明,梁山组有效泥页岩单层厚度为6.15~35.18 m;有机质丰度较高,多数大于1%,平均为1.77%;有机质类型主要为I型,岩石热解峰温 $T_{\max}$ (450~533℃)和镜质体反射率(1.51%~1.83%)表明泥页岩属于高成熟阶段富有机质泥页岩。泥页岩矿物组成以石英为主,黏土矿物含量次之,黏土矿物以伊利石为主,有利于改善泥页岩储集性能。孔隙类型多样,有机质孔、粒间孔、粒内孔及微裂缝为页岩气赋存提供空间。页岩吸附气含量达0.65 m³/t,具有一定的气体吸附能力。总体上梁山组泥页岩在涟源凹陷普遍发育且规模较大,特别是向斜区南部是页岩气有利勘探区。

关键词:下二叠统;梁山组;页岩气;勘探前景;涟源凹陷

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)03-0162-11

Exploration Potential of Shale Gas in Lower Permian Liangshan Formation of Lianyuan Depression, Central Hunan

TIAN Wei, WANG Qiang, CHEN Lin, MIAO Fengbin, BAI Yunshan

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: Based on outcrops and drilling data of Lower Permian Liangshan Formation shale in Lianyuan depression, its geological and geochemical characteristics, mineral composition, pore structure as well as gas adsorption capacity have been studied and discussed in this paper through using the organic geochemical test, X-ray diffraction mineral analysis, electron microscopy scanning, and methane isothermal adsorption. The results show that the shale reservoir of Liangshan Formation is 6.15-35.18m thick. The abundance of organic matter is mostly greater than 1%, with an average of 1.77%, and the organic matter type is mainly type I. The temperature of maximum pyrolysis output $T_{\max}$ (450-533℃) and vitrinite reflectance R_o (1.51%-1.83%) indicate that the shale belongs to organic-rich shale in post-mature stage. The shale minerals are dominated by quartz and followed by clay minerals. The clay minerals are mainly illite, which is benefi-

收稿日期:2019-02-11;修回日期:2019-04-12

基金项目:十三五国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”下设子任务“中扬子高演化页岩气赋存机理与富集规律研究”(2016ZX05034001-002),中国地质调查局地质调查项目“中扬子地区古生界页岩气基础地质调查”(NO. DD20160179)

作者简介:田巍(1986-),男,博士,工程师,主要从事含油气盆地构造分析及非常规油气。E-mail:tianweijordan@163.com

cial to improve the shale reservoir performance. With diverse pore types, the organic pores, intergranular pores and micro-cracks provide space for shale gas. The adsorption gas content of shale is $0.65 \text{ m}^3/\text{t}$, and it has a good gas adsorption capacity. In a word, Liangshan Formation shale is generally developed and large in Lianyuan Sag, especially in the south of syncline areas, which are favorable for shale gas exploration.

Keywords: Lower Permian; Liangshan Formation; shale gas; exploration prospect; Lianyuan depression

页岩气为一种重要的非常规能源,近几年来中国加大了对页岩气的勘探开发力度。前期勘探在成藏条件优越的含油气盆地中取得了显著的成果,特别是焦石坝龙马溪组页岩气田的发现,加快了我国页岩气的勘探步伐(郭彤楼等,2014,2016;王志刚,2015)。近两年在南方复杂构造区黔北地区(翟刚毅等,2016;庞飞等,2016)和宜昌地区(陈孝红等,2017,2018)的页岩气勘探相继获得重大突破,开拓了南方油气勘探新领域,其对中国南方页岩气勘探具有重要意义。

湘中地区发育不同类型、多套层系的烃源岩,广泛分布的泥页岩是湘中地区非常规油气勘探的重要领域。目前在湘中地区针对上泥盆统余田桥组、中泥盆统棋梓桥组、下石炭统测水组以及上二叠统龙潭组和大隆组已进行了系统的页岩气基础研究(罗小平等,2012;马若龙,2013;张琳婷等,2014;张成龙等,2014;顾志翔等,2015;李国亮等,2015;苗凤彬等,2016;包书景等,2016);对中泥盆统榴江组、上泥盆统锡矿山组、下石炭统孟公坳组、中二叠统小江边组等新页岩层系的页岩气地质条件也有了初步论述(李国亮等,2014;曹清古等,2015;白云山等,2016;张琳婷等,2018);对于下二叠统梁山组泥页岩特征则尚未讨论。近两年武汉地质调查中心在湘中涟源凹陷的页岩气地质调查中发现梁山组野外地层剖面和钻井岩心的泥页岩厚度大,预示着湘中地区梁山组有一定的页岩气勘探潜力。笔者基于野外地质调查及钻井资料,以梁山组泥页岩的纵横向展布研究为切入点,分别从地质、地化特征,储层特征及含气性等要素综合分析了梁山组页岩气的地质条件,探讨涟源凹陷梁山组的页岩气勘探潜力。

1 地质背景

涟源凹陷位于湘中坳陷北部,整体呈北西西向

展布。涟源凹陷基底为前泥盆系浅变质岩系,盖层为泥盆系至三叠系沉积岩,中泥盆世至早三叠世凹陷内连续沉积,厚度变化不大(田巍等,2019)。涟源凹陷东西分别以凤冠山断裂带和集云断裂带为界,可划分为3个四级构造单元,即东部滑覆叠瓦冲断带、中部断褶带和西部叠瓦逆掩冲断带(朱锐等,2006)(图1)。中部断褶带自东向西由恩口-斗笠山向斜、桥头河向斜、车田江向斜以及青峰向斜组成,向斜呈NE向平行式展布。

涟源凹陷在测水晚期,新的海侵开始,中晚石炭世达到高潮,至早二叠世梁山期、栖霞-小江边期的水体依然较深,处于凹陷阶段,至茅口期升起,海退后部分遭受剥蚀。凹陷期依次发育了潮坪-开阔台地-凹槽台地相向上变深沉积序列,隆升期发育台地-局限台地碳酸盐岩向上变浅序列。梁山期海水较深为浅海陆棚相,形成了泥页岩夹硅质岩的深水陆棚相带。

2 梁山组地质特征

2.1 岩性特征

基于野外露头 and 钻井岩心观测,研究区二叠系梁山组主要为一套灰黑色碳质页岩、夹薄层状硅质岩、硅质灰岩、泥灰岩及少量砂岩、粉砂岩(图2)。页岩中见分散细小的黄铁矿颗粒,水平纹理发育,无高能及浅水标志,含个体较小的腕足与浮游菊石,属海水滞留还原条件下的台盆相-半局限台地相沉积。

2.2 分布特征

梁山组主要分布在涟源凹陷中部宽缓向斜两翼,整合于下伏石炭系马平组之上。基于 $\text{TOC} > 1\%$ 的泥页岩为富有机质泥页岩,通过对涟源凹陷内不同区域野外露头 and 钻井的梁山组富有机质页岩有效厚度的统计发现,梁山组有效泥页岩厚度整体上具有由南向北减薄的趋势。南部梁山组厚度较大,

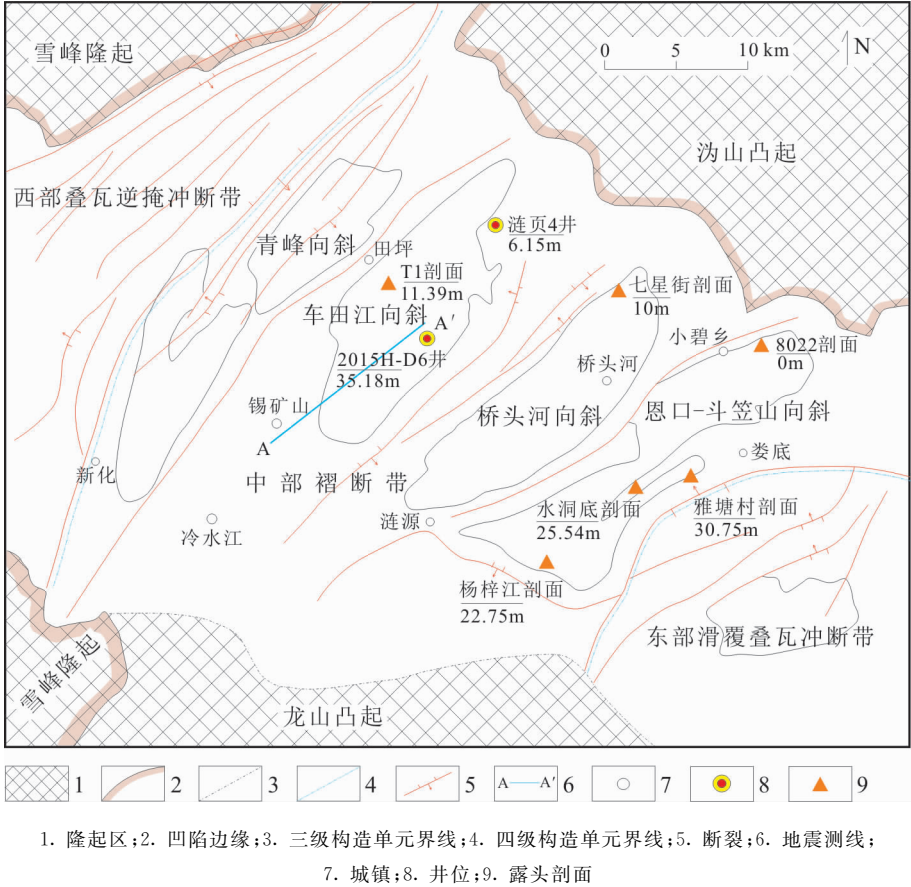
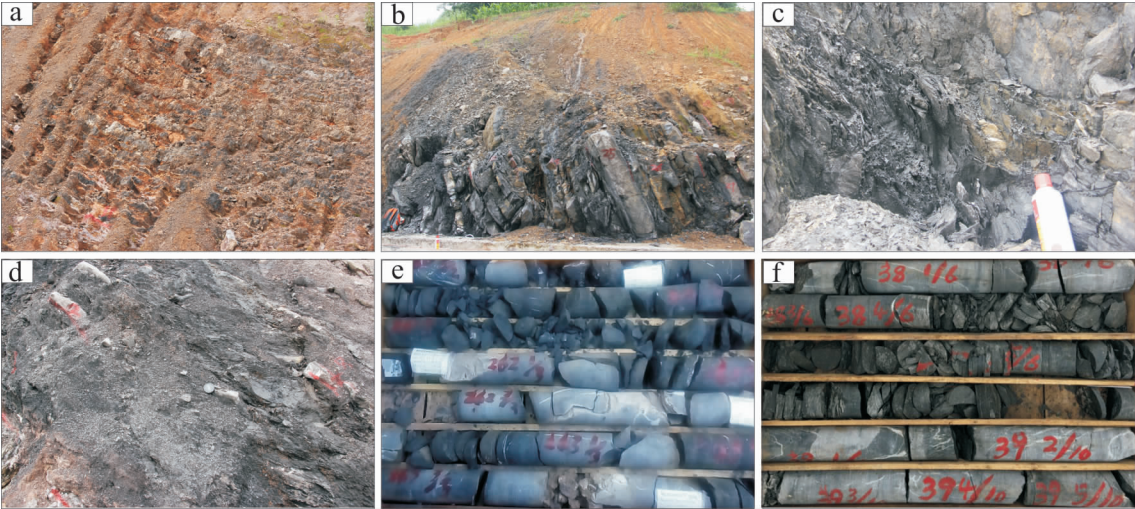


图 1 连源凹陷构造格架及梁山组有效泥页岩厚度分布图

Fig. 1 Structural framework and effective shale thickness of Liangshan Formation in Lianyuan Sag



a. 雅塘村剖面梁山组硅质岩; b. 雅塘村剖面梁山组泥页岩与灰岩互层; c. 雅塘村剖面梁山组泥页岩; d. 小碧乡剖面梁山组泥页岩夹灰岩透镜体; e. 连页 4 井梁山组泥页岩夹灰岩; f. 2015H-D6 井梁山组泥页岩夹泥质灰岩

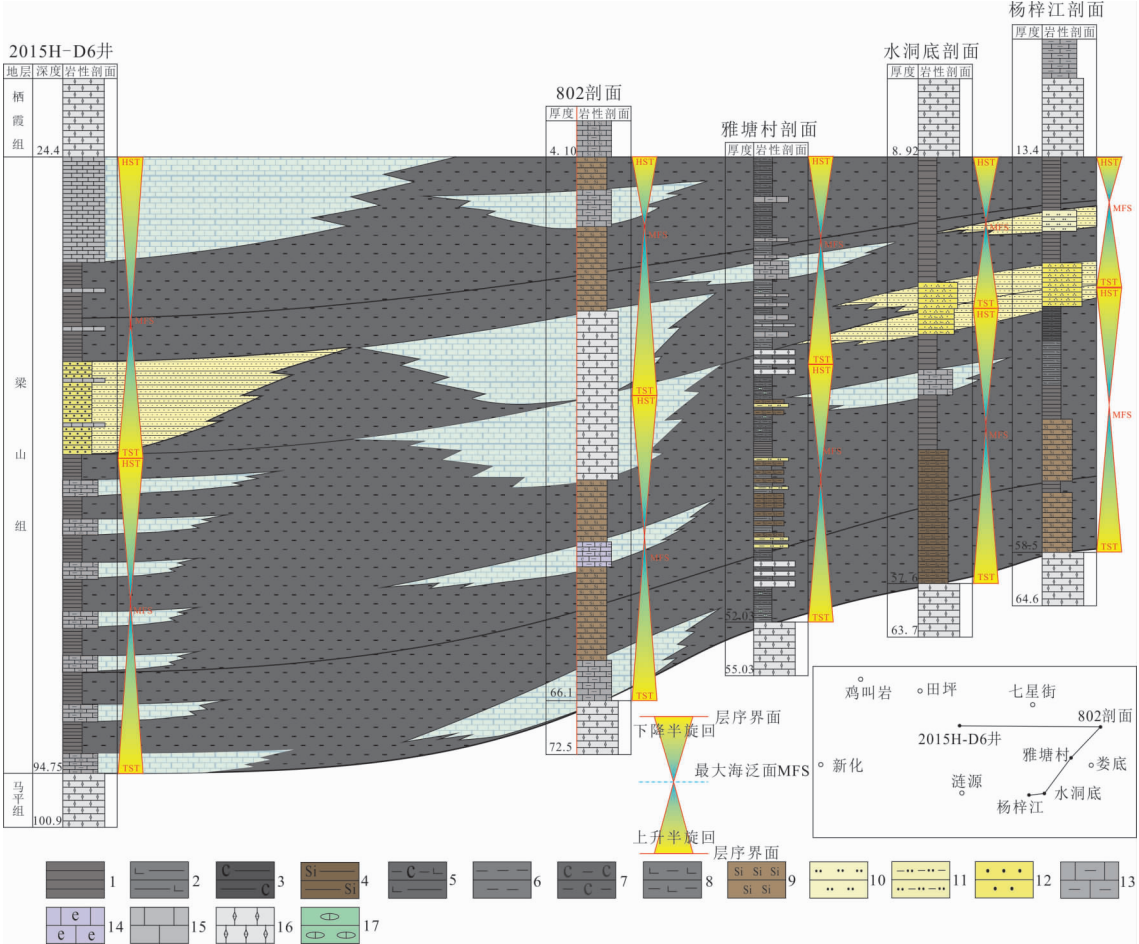
图 2 连源凹陷梁山组野外露头及岩心岩性特征图

Fig. 2 Outcrops and core lithology of Liangshan Formation in Lianyuan Sag

分布在 22.75~35.18 m,主体位于车田江向斜和恩口斗笠山向斜南部;北部梁山组厚度较小,厚度为 6.15~11.39 m(图 1)。

梁山组沉积环境在不同地段有一定的差异,但总体显示浅海陆棚沉积为主,夹滨海碎屑岩沉积。

在涟源凹陷,梁山组与栖霞组可划为一个三级层序。梁山组为浅海陆棚相,构成层序的 TST,其顶部灰黑色碳质页岩构成 SS,栖霞组深灰色厚层状含燧石结核生物泥晶粉晶灰岩、含生物屑粉晶泥晶灰岩,副层序组具进积特征,构成该层序的 HST(图 3)。



1. 页岩;2. 钙质页岩;3. 碳质页岩;4. 硅质页岩;5. 含碳质钙质页岩;6. 泥岩;7. 碳质泥岩;8. 钙质泥岩;9. 硅质岩;
10. 粉砂岩;11. 泥质粉砂岩;12. 细砂岩;13. 泥质灰岩;14. 生屑灰岩;15. 灰岩;16. 泥晶灰岩;17. 灰岩结核

图 3 涟源凹陷 2015H-D6 井—杨梓江剖面梁山组沉积相对比图

Fig. 3 Facies comparing of Liangshan Formation shales in well 2015H-D6 - Yangzijiang section of Lianyuan Sag

3 泥页岩地化特征

3.1 有机质丰度

涟源凹陷梁山组泥页岩有机碳含量数据来源于娄底市雅塘村剖面 16 个露头样品和 2015H-D6 井及涟页 4 井 15 个岩心样品,样品测试在中南矿产资源监督检测中心完成。鉴于地表样品 TOC 在抬升

过程中受风化作用的影响,对其进行适当的恢复校正。根据中南石油局研究院对湖南境内碳酸盐岩烃源岩地表样品与地下样品的反复对比研究,确认碳酸盐岩烃源岩的地表风化校正系数为 1.75,因此本次研究采用该地表风化校正系数。TOC 含量分布在 0.71%~4.66%,平均值为 1.77%。其中, $w(\text{TOC})\% > 1.0\%$ 的占 87.10%, $w(\text{TOC})\% > 2.0\%$ 的占 38.70%(图 4),表明涟源凹陷梁山组泥

页岩属于有机质丰度较高的泥页岩。

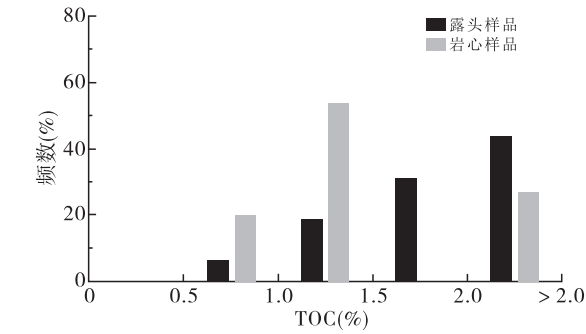


图 4 梁山组泥页岩 TOC 含量频数分布
Fig. 4 Frequency distribution of organic carbon content of Liangshan Formation shales

3.2 有机质成熟度

泥页岩样品干酪根显微组分及类型、镜质体反射率和岩石热解测试在湖南省勘查设计研究院试验检测中心完成。其中干酪根显微组分及类型和镜质体反射率采用德国徕卡 DM4500P 偏光显微镜,岩石热解采用 YQ-VII 油气显示评价仪。

野外剖面及钻井梁山组泥页岩干酪根成熟度 R_o 实测数据统计结果显示(表 1), R_o 值范围为 1.51%~1.83%, 均值为 1.67%, 表明梁山组泥页岩现今热演化程度处于高演化阶段。采用最大热解峰温 (T_{max}) 对有机质成熟度进行佐证, T_{max} 值为 450~533℃, 均值为 483℃, 同样说明了研究区梁山组泥页岩处于高成熟度阶段。

表 1 梁山组泥页岩镜质体反射率及岩石热解表
Tab. 1 Reflectance of vitrinite and rock pyrolysis of Taiyuan Formation shales

样品位置	样号	R_o (%)	T_{max} (℃)	样品位置	样号	R_o (%)	T_{max} (℃)
雅塘村剖面	XZDD-1	1.61	507	雅塘村剖面	XZDD-14		460
	XZDD-2		456		XZDD-15		522
	XZDD-3		482		XZDD-16		450
	XZDD-4	1.73	452	2015H-D6 井	XY5-1-2	1.65	533
	XZDD-5	1.68	478		XY5-1-4	1.75	507
	XZDD-6		456		XY5-1-5	1.83	499
	XZDD-7		460		XY5-1-10	1.69	533
	XZDD-8	1.51	455		XY5-1-13	1.59	443
	XZDD-9	1.54	462		XY5-1-15		506
	XZDD-10	1.54	454		XY5-1-17		532
	XZDD-11		474		XY5-1-18	1.74	533
	XZDD-12		452		XY5-1-21		441
	XZDD-13	1.77	486		XY5-1-23		533

3.3 有机质类型

有机质类型是决定泥质岩产气效率、生产方式及烃源岩评价的重要因素。梁山组样品干酪根镜下鉴定结果见表 2, 主要成分为腐泥组和壳质组, 有少量镜质组和惰性组, 无树脂体。腐泥组在 76%~99%, 壳质组在 0~21%, 惰质组很少, 为 0~1%。其主要有机质类型为 I 型(腐泥型), 具有良好的生油生烃能力。

表 2 梁山组泥页岩干酪根显微组分及类型表
Tab. 2 Elemental composition and type of kerogen of Liangshan Formation shales

样号	显微组分含量(%)				干酪根类型指数	干酪根类型
	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组		
XZDD-2	76	21	3	0	0	84
XZDD-4	93	4	2	1	1	93
XZDD-7	99	0	1	0	0	98
XZDD-8	98	1	1	0	0	98
XZDD-9	88	9	2	1	1	90

4 泥页岩储层特征

4.1 矿物组成

泥页岩样品全岩和黏土矿物 X-衍射定量分析是在湖南省勘查设计研究院试验检测中心完成,采用

荷兰帕纳科 X pert powder 衍射仪。通过对梁山组 10 个泥页岩进行 X-衍射全岩分析显示(表 3、图 5a),石英和黄铁矿矿物含量为 41.38%~85.20%,平均为 64.16%;黏土矿物含量为 9.50%~25.89%,平均为 15.02%;碳酸盐矿物含量分布范围较宽,在 1.78%~43.35%,大部分集中在 10.00%~30.00%。

表 3 梁山组泥页岩 XRD 全岩及黏土矿物成分表
Tab. 3 Whole rock and clay mineral composition XRD analysis data of Liangshan Formation shales

样品位置	样号	黏土矿物相对含量(%)					全岩定量分析(%)					
		高岭石	绿泥石	伊利石	伊/蒙混层	层间比	黏土总量	石英	方解石	白云石	黄铁矿	其他
雅塘村剖面	XZDD-1	8	11	14	6	20	14.39	39.38	42.21	1.14	2.00	0.88
	XZDD-2	12	11	36	40	68	15.26	52.26	14.97	13.27	3.39	0.85
	XZDD-3	16	20	31	32	18	12.31	56.59	27.30	0	2.34	1.46
	XZDD-4	16	6	21	5	8	24.58	46.76	25.39	0.75	0	2.52
	XZDD-5	11	6	6	0	0	25.89	52.20	19.69	0	1.48	0.74
2015H-D6井	XY5-1-1	9	12	37.5	41.5	60	13.92	76.65	5.12	0	2.58	1.73
	XY5-1-3	9.5	10	40.5	40	55	11.25	72.63	11.78	0	2.57	1.77
	XY5-1-8	3.5	3.5	54	39	40	9.50	77.29	10.45	0	1.81	0.95
	XY5-1-14	11	13.5	35.5	40	62.5	12.19	72.54	12.20	0	1.32	1.75
	XY5-1-19	10.5	14	28	2	75	10.96	56.99	26.71	0	0.89	4.45

黏土矿物含量对泥页岩储层孔隙结构、类型和含气性均有影响(CHALMERS G R L, et al., 2007; STRAPOĆ D, et al., 2010)。X 衍射黏土矿物分析表明(图 5b),研究区梁山组泥页岩黏土矿物中伊利石占据主导地位,为 20.00%~34.00%,平均含量为 27.60%。梁山组泥页岩处于高成熟演化阶段,黏土矿物中的高岭石转化为伊/蒙混层和伊利石,在脱水作用下可形成连通性

较好的狭缝状孔隙。同时,页岩气储层中黏土矿物的含量与吸附气量具有一定的关系,其中最主要的是伊利石,伊利石含量高,吸附能力也较高(ROSS D J K, et al., 2009);蒙皂石类含量少有利于后期储层压裂(牛露等,2015;魏建设等,2018)。综合来看,涟源凹陷二叠系梁山组泥页岩黏土矿物含量分布对孔隙条件及页岩气储存能力具有积极的作用。

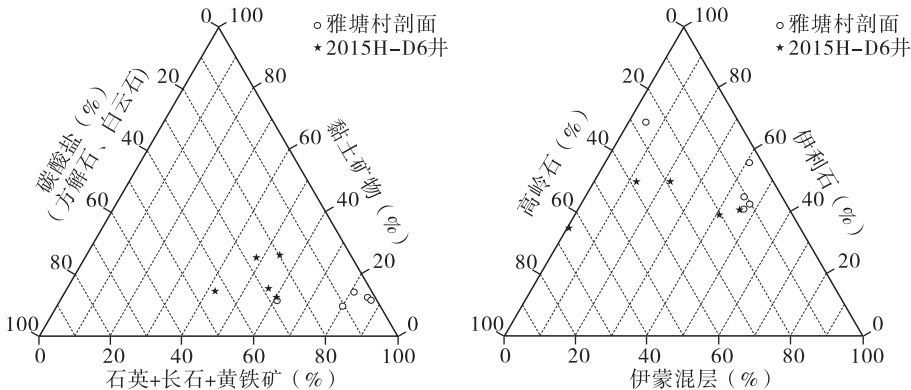


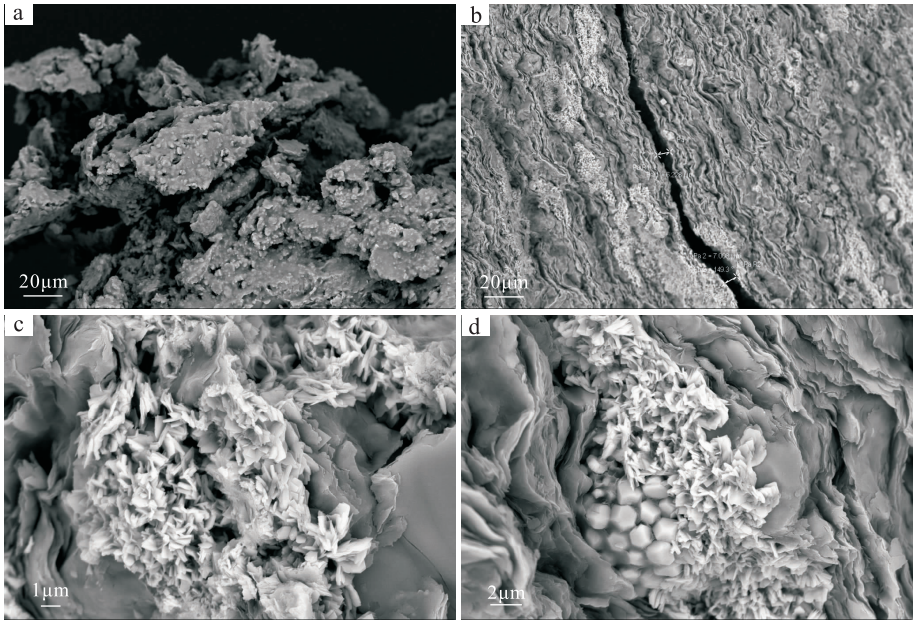
图 5 (a)梁山组泥页岩全岩矿物组成及(b)黏土矿物组成三角图

Fig. 5 (a) Triangular diagram of the whole mineral composition and (b) clay mineral composition of the Liangshan Formation shales

4.2 储层空间类型及物性特征

氩离子抛光-扫描电镜观察在江苏地质矿产设计研究院完成,采用美国 Ilion II 697 型宽束氩离子抛光仪和德国卡尔·蔡司 SIGMA 扫描电镜。梁山组泥页岩样品的扫描电镜观察结果显示,孔隙类型主要为有机质孔、微裂缝、黏土矿物粒间孔和黄铁矿

间粒内孔 4 种类型(图 6)。有机质孔和粒间孔等微孔隙的发育有利于改善储层的连通性(LOUCKS R G, et al., 2012)(图 6a、图 6c、图 6d)。微裂缝较发育,缝宽为 2~40 μm (图 6b),形成于成岩过程中或构造应力作用,微裂缝的存在对于提高泥页岩储层孔隙度以及沟通微孔隙起到重要的作用。



a. 有机质孔;b. 微裂缝;c. 黏土矿物粒间孔;d. 黄铁矿矿物粒内孔

图 6 梁山组泥页岩扫描电镜下孔隙结构类型图

Fig. 6 Pore structure of Liangshan Formation shales from scanning electron microscopy (SEM)

利用 KS-II 型全自动孔渗测定仪对梁山组泥页岩样品进行覆压孔渗测定分析,结果显示页岩孔隙度为 2.06%~4.53%,平均为 3.14%,渗透率为 0.001~0.03 mD,平均为 0.014 mD,说明了其低孔低渗的特点。2015H-D6 井 5 个泥页岩样品的氮气吸附-脱附实验结果显示其 BET 比表面积分布于 15.92~20.34 m^2/g ,平均为 17.54 m^2/g ;单点孔体积为 0.024~0.043 cm^3/g ,平均为 0.031 cm^3/g ;平均孔直径为 5.80~9.76 nm,平均为 7.12 nm。表明样品中微孔隙发育丰富,单位岩石比表面积大,有利于孔隙中气体的吸附(张志平等,2017)。

为表征湘中地区梁山组页岩孔隙结构,利用氮气吸附测试对 6 个泥页岩样品的微孔隙进行分析。由图 7a 可以看出,梁山组泥页岩样品的氮气吸附和脱附曲线整体呈反“S”型,据 IUPAC 吸附等温线分类(SING K S W, et al. 1985),泥页岩样品的吸附

等温线属于 II 类吸附曲线。当相对压力大于 0.40 时,样品的吸附和脱附曲线不重合,形成吸附回线,表明梁山组黑色页岩孔隙形态属狭缝状孔。基于 BJH 理论方程计算梁山组页岩的孔径分布特征,根据 BJH 法脱附曲线(图 7b)显示梁山组泥页岩微观孔隙的孔径分布于 3.40~314.04 nm,其中 70.5% 的孔径分布在 2~50 nm,表明页岩样品中微孔隙以介孔为主。

4.3 储层吸附性

为了解梁山组泥页岩的吸附能力,利用 Langmuir 等温吸附模型对 2015H-D6 井的梁山组 3 个泥页岩进行等温吸附试验。等温吸附实验在江苏地质矿产设计研究院完成,采用美国岩心公司 GAI-100 型高压气体等温吸附仪。实验结果显示,在测试温度 30℃下,等温条件下当压力大于 6 MPa 时,样品的甲烷吸附量趋于平稳基本不再增加,样品最

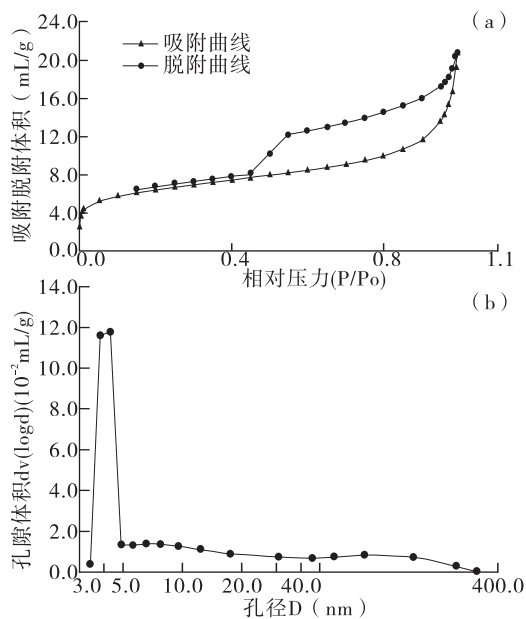


图 7 (a)梁山组泥页岩氮气吸附-脱附曲线和
(b)孔径分布曲线图

Fig. 7 (a)Curve of nitrogen adsorption-desorption and (b) pore size distribution of the shale in Liangshan Formation

大吸附气量为 0.38~0.65 m³/t(图 8)。研究表明,有机碳含量与页岩吸附能力具有正相关关系(CULVER E L, et al., 1996; ROSS D J K, et al., 2006)。李波文等(2017)对海相页岩吸附气量主控因素研究中指出 TOC 能增大页岩比表面积,吸附气量也随之增大。梁山组泥页岩的测试结果也表明了吸附气量与 TOC 具有较好的正相关性。

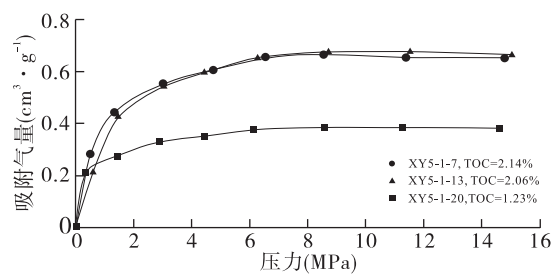


图 8 2015H-D6 井梁山组不同深度泥页岩等温吸附曲线图

Fig. 8 Isothermal adsorption curves of Liangshan formation shale at different depths in well 2015H-D6

5 页岩气勘探潜力

通过初步分析湘中涟源凹陷下二叠统梁山组

页岩气成藏条件,以及对比北美、四川盆地、鄂尔多斯盆地页岩储层特征(表 4),揭示出涟源凹陷下二叠统梁山组泥页岩具有良好的页岩气勘探前景。下二叠统梁山组在研究区向斜区内普遍发育且规模较大,富有机质泥页岩厚度分布在 6.15~35.18 m,在涟源凹陷车田江向斜、恩口-斗笠山向斜南部厚度较大,均大于 20 m,为有利勘探区。有机质丰度较高,87%的样品 TOC 大于 1%,平均为 1.77%;有机质类型为 I 型,R_o值为 1.51%~1.83%,具有较好的生烃潜力。梁山组富有机质暗色泥页岩顶板为栖霞组中厚层状泥晶灰岩,为致密灰岩,厚度大于 100 m;底板主要为马平组厚层状致密泥晶灰岩,厚度大于 300 m,具较好的顶底板条件。梁山组泥页岩含气量相对较低,可能是由于等温吸附测试所采集的梁山组岩心样品顶、底界埋深分别为 24.4 m 和 94.75 m,埋深过浅,后期构造活动易造成气体逸散。而本套泥页岩在区域上埋深一般为 500~1300 m,埋藏深度适中,从而推测该组的含气量应高于等温吸附测试结果。

根据地震资料显示,涟源凹陷内地层保存完整,断裂活动不发育,有利于页岩气保存(图 9)(中国地质调查局油气资源调查中心,2014)。因此,开展湘中涟源凹陷下二叠统梁山组页岩气潜力评价具有现实意义。

6 结论

(1)涟源凹陷下二叠统梁山组沉积环境为台盆相-半局限台地相(浅海陆棚相),发育一套灰黑色碳质页岩、夹薄层状硅质岩、硅质灰岩、泥灰岩及少量砂岩、粉砂岩沉积地层。梁山组富有机质泥页岩分布广泛,有效泥页岩厚度整体上具有由南向北减薄的趋势。

(2)涟源凹陷下二叠统梁山组泥页岩具有高有机碳含量、热演化程度适中、有机质类型稳定等特点,为页岩气生成提供了良好的物质条件。脆性矿物含量高,黏土矿物以伊利石为主。多类型微孔隙和微裂缝发育,为页岩气赋存提供了良好的储集空间。

表 4 湘中地区与北美、四川盆地、鄂尔多斯盆地页岩储层特征对比表

Tab. 4 Correlation table of shale reservoir characteristics among Central Hunan area, North America, Sichuan and Ordos Basin

参数	深度(m)	有效厚度(m)	TOC(%)	R _o (%)	有机质类型	黏土含量(%)	总孔隙度(%)	含气量(m ³ /t)
Barnett	1 980~1 600	31~183	4.5	0.5~2.1	II ₁	20~40	4.5	2.3~6.47
Haynesville	3 350~3 950	61~107	0.5~4.0	1.2~3.0	I、II ₁	20~35	8~15	2.8~9.3
Marcellus	1 220~2 440	18~68	0.4~10.5	0.7~2.5	I、II ₁	34	1.6~7.0	1.7~2.8
长宁-威远龙马溪组	1 500~4 000	33.4~50.6	2.2~5.3	2.03	I、II ₁	26~46.1	2.5~6.0	2.1~4.8
焦石坝五峰-龙马溪组	2 378~2 416	38.0	1.9~5.7	2.2~3.1	I	10~63	2.78~7.08	4.4~8.2
鄂尔多斯山西组	1 000~3 500	10~50	2.9	0.7~2.3	II ₂ 、III	57.5	0.28~11.01/3.98	0.96~2.71
湘中地区梁山组	500~1 300	6.15~35.18	0.71~4.66	1.5~1.8	I	9.50~25.89	2.06~4.53	0.38~0.65

注：表中数据来源于付金华等,2013;王淑芳等,2015;赵文智等,2016;张鉴等,2016。

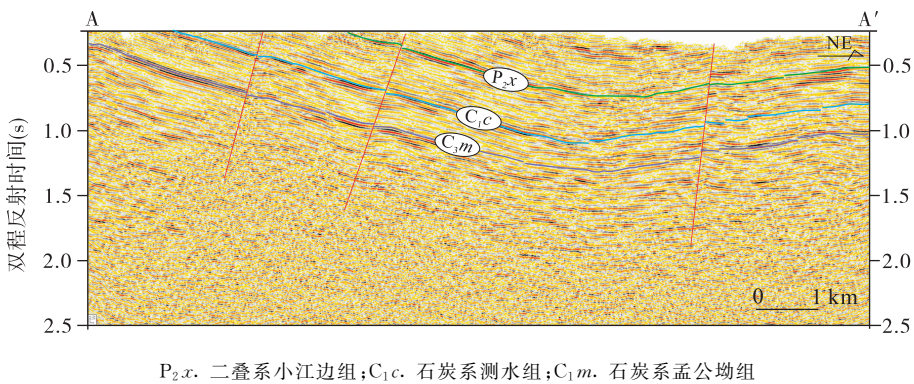


图 9 涟源凹陷车田江向斜地震地质解释剖面图(测线位置见图 1AA')

Fig. 9 Seismic geological interpretation profile of Chetianjiang syncline in Lianyuan Sag

(3)通过对梁山组泥页岩地质地化特征、成藏地质条件等因素的综合分析研究,揭示了涟源凹陷下二叠统梁山组具有良好的页岩气勘探开发潜力,预测涟源凹陷梁山组页岩气有利勘探区主要位于车田江向斜南部、恩口-斗笠山向斜南部等区域。

参考文献(References):

白云山,王强,苗凤彬,等. 湘中涟源凹陷中二叠统小江边组页岩气勘探前景分析[J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2):159-165.

BAI Yunshan, WANG Qiang, MIAO Fengbin, et al. Exploration prospects analysis of shale gas of Middle Permian Xiaojiangbian formation in the Lianyuan depression, Central Hunan Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2016, 32(2):159-165.

包书景,林拓,聂海宽,等. 海陆过渡相页岩气成藏特征初探:以湘中坳陷二叠系为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(1):44-53.

BAO Shujing, LIN Tuo, NIE Haikuan, et al. Preliminary study of the transitional facies shale gas reservoir characteristics: Taking Permian in the Xiangzhong depression as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1):44-53.

曹清古,韦庆亮,肖秋苟,等. 湘中坳陷下石炭统孟公坳段页岩气成藏条件及勘探前景[J]. 海相油气地质, 2015, 20(3):43-49.

CAO Qinggu, WEI Qingliang, XIAO Qiugou, et al. Gas accumulation and exploration prospect of Lower Carboniferous Menggonggao shale in Xiangzhong depression [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2015, 20(3):43-49.

陈孝红,王传尚,刘安,等. 湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气[J]. 中国地质, 2017, 44(1):188-189.

CHEN Xiaohong, WANG Chuanshang, LIU An, et al. The discovery of the shale gas in the Cambrian Shuijingtuo Formation of Yichang area, Hubei Province [J]. Geology in China, 2017, 44(1):188-189.

陈孝红,张保民,张国涛,等. 湖北宜昌地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组获页岩气高产工业气流[J]. 中国地质, 2018, 45(1):199-200.

CHEN Xiaohong, ZHANG Baomin, ZHANG Guotao, et al.

- High shale gas industry flow obtained from the Ordovician Wufeng Formation and the Silurian Longmaxi Formation of Yichang area, Hubei Province [J]. *Geology in China*, 2018, 45(1):199-200.
- 付金华,郭少斌,刘新社,等. 鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. *吉林大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(2):382-389.
- FU Jinhua, GUO Shaobin, LIU Xinshe, et al. Shale gas accumulation condition and exploration potential of the Upper Paleozoic Shanxi Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(2):382-389.
- 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.
- GUO Tonglou. Discovery and characteristics of the Fuling shale gas field and its enlightenment and thinking [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1):29-43.
- 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.
- 顾志翔,彭勇民,何幼斌,等. 湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件[J]. *中国地质*, 2015, 42(1):288-299.
- GU Zhixiang, PENG Yongmin, HE Youbin, et al. Geological Conditions of Permian Sea-land Transitional Facies Shale Gas in the Xiangzhong Depression [J]. *Geology in China*, 2015, 42(1):288-299.
- 李波文,张金川,党伟,等. 海相页岩与海陆过渡相页岩吸附气量主控因素及其差异性[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(11):44-51.
- LI Bowen, ZHANG Jinchuan, DANG Wei, et al. The influence factor of adsorbed gas of marine and transitional facies shale and the difference of influence factor [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(11):44-51.
- 李国亮,王先辉,柏道远,等. 湘中及湘东南地区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(3):133-138.
- LI Guoliang, WANG Xianhui, BO Daoyuan, et al. Potentiality exploration of the Upper Permian Longtan Formation shale gas in central and southeast Hunan province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(3):133-138.
- 李国亮,王先辉,杨俊,等. 湘中及湘东南地区泥盆纪榴江组页岩气成藏条件及前景分析[J]. *国土资源导刊*, 2014, 11(10):65-69.
- LI Guojiang, WANG Xianhui, YANG Jun, et al. Analysis on reservoir-forming conditions and prospects of the Devonian Liujiang Formation shale gas in the central and southeast Hunan province [J]. *Land & Resources Herald*, 2014, 11(10):65-69.
- 罗小平,刘军,徐国盛,等. 湘中坳陷泥盆—石炭系海相泥页岩地球化学特征及等温吸附性能[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2):206-214.
- LUO Xiaoping, LIU Jun, XU Guosheng, et al. Geochemical characteristics and isothermal adsorption properties of the Devonian-Carboniferous marine mud shale in the Xiangzhong depression, Hunan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 2012, 39(2):206-214.
- 马若龙. 湘中、湘东南及湘东北地区泥页岩层系地质特征与页岩气勘探潜力[D]. 成都:成都理工大学, 2013.
- MA Ruolong. The geological characteristics of the argillite formation and potentially for the exploration of the shale gas in central Hunan, southeastern Hunan and north-eastern Hunan [D]. *Chengdu: Chengdu University of Technology*, 2013.
- 苗凤彬,谭慧,王强,等. 湘中涟源凹陷石炭系测水组页岩气保存条件[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(6):90-97.
- MIAO Fengbin, TAN Hui, WANG Qiang, et al. Preservation conditions in shale gas of Carboniferous Ceshui Formation of Lianyuan depression in the middle of Hunan province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(6):90-97.
- 牛露,朱如凯,王莉森,等. 华北地区北部中—上元古界泥页岩储层特征及页岩气资源潜力[J]. *石油学报*, 2015, 36(6):664-672.
- NIU Lu, ZHU Rukai, WANG Lisen, et al. Characteristics and evaluation of the Meso-Neoproterozoic shale gas reservoir in the northern North China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6):664-672.
- 庞飞,包书景,翟刚毅. 武陵山复杂构造区安页1井实现油气重大突破[J]. *科技成果管理与研究*, 2016, (6):49-50.
- PANG Fei, BAO Shujing, ZHAI Gangyi. Breakthrough of the natural gas of well Anye 1 in Wuling mountain complex tectonic zone [J]. *Management and Research on Scientific & Technological Achievements*, 2016, (6):49-50.
- 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.
- WANG Shufang, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. A comparative study of the geological feature of marine shale gas between China and the United State[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(9):1666-1678.
- 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1):1-6.
- WANG Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1):1-6.
- 魏建设,王宝文,乔世海,等. 内蒙古西部额济纳旗希热哈达地区二叠系页岩油(气)地质条件初探[J]. *西北地质*, 2018, 51(3):200-213.
- WEI Jianshe, WANG Baowen, QIAO Shihai, et al. A preliminary study on the geological conditions of the Permi-

- an shale oil (gas) in Xirehada area, western Inner Mongolia [J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51 (3): 200-213.
- 翟刚毅,包书景,庞飞,等. 武陵山复杂构造区古生界海相油气实现重大突破[J]. *地球学报*, 2016, 37(6):657-662.
- ZHAI Gangyi, BAO Shujing, PANG Fei, et al. Break-through of the Natural Gas of Paleozoic Marine Strata in Wuling Mountain Complex Tectonic Zone [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(6):657-662.
- 张成龙,唐书恒,范二平,等. 涟源凹陷龙潭组页岩气储层特征分析[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2014, 36(5):32-36.
- ZHANG Chenglong, TANG Shuheng, FAN Erping, et al. Shale gas reservoir characteristics of Longtan formation in Lianyuan depression [J]. *Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI)*, 2014, 36(5):32-36.
- 张鉴,王兰生,杨跃明,等. 四川盆地海相页岩气选区评价方法建立及应用[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(3):433-441.
- ZHANG Jian, WANG Lansheng, YANG Yueming, et al. The development and application of the evaluation method of marine shale gas in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(3):433-441.
- 张琳婷,郭建华,焦鹏,等. 湘中地区涟源凹陷下石炭统页岩气藏形成条件[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(7):2268-2277.
- ZHANG Linting, GUO Jianhua, JIAO Peng, et al. Accumulation conditions and exploration potential of shale gas of Lower Carboniferous in Lianyuan depression in the middle of Hunan Province [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(7):2268-2277.
- 张琳婷,孟宁宁,冷春鹏. 湘中坳陷上泥盆统锡矿山组页岩气成藏条件及资源量预测[J]. *非常规油气*, 2018, 5(1):6-10.
- ZHANG Lingting, MENG Ningning, LENG Chunpeng. Resources prediction and accumulation conditions of shale gas of Xikuangshan formation of Upper Devonian in middle Hunan Province [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2018, 5(1):6-10.
- 张志平,方光建,曾春林,等. 渝东北下寒武统页岩气储层特征研究[J]. *西北地质*, 2017, 50(4):209-214.
- ZHANG Zhiping, FANG Guangjian, ZENG Chunlin, et al. The research on reservoir characteristics of Lower Cambrian shale gas in northeast Chongqing [J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(4):209-214.
- 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.
- ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4):499-510.
- 朱锐,郭建华,旷理雄,等. 湘中涟源凹陷构造样式与演化史分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(1):236-242.
- ZHU Rui, GUO Jianhua, KUANG Lixiong, et al. Structural style and tectonic evolution of Lianyuan depression [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2006, 37(1):236-242.
- 田巍,彭中勤,白云山,等. 湘中涟源凹陷石炭系测水组页岩气成藏特征及勘探潜力[J]. *地球科学*, 2019, 44(3):939-952.
- TIAN Wei, PENG Zhongqin, BAI Yunshan, et al. Reservoir characteristics and exploration potential of Lower Carboniferous shale gas in Lianyuan Sag, Central Hunan[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3):939-952.
- CHALMERS G R L, BUSTIN R M. On the effects of petrographic composition on coalbed methane sorption[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69(4):288-304.
- CHEN Lin, CHEN Xiaohong, ZHANG Baomin, et al. Provenance and palaeoenvironment of Upper Devonian Shetianqiao Formation mudstones in Shaoyang Sag, Xiangzhong Depression, Central China [J]. *Geological Journal*, 2019, 1-15.
- CULVER E L, MAKUCH M, VERMEULEN E, et al. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin[J]. *Bookbird World of Childrens Books*, 1996, 34(11):32-34.
- LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of por types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6):1071-1098.
- ROSS D J K, BUSTIN R M. Sediment geochemistry of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2006, 54(4):337-365.
- ROSS D J K, BUSTIN R M. 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.
- SING K S W, EVERETT D H, HAUL R, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4):603-619.
- STRAPOČ D, MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, et al. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(11):1713-1740.