

鄂西建始地区页岩储层特征及含气性研究

仇秀梅¹, 刘亚东², 董学林¹

(1. 湖北省地质实验测试中心, 湖北 武汉 430034; 2. 湖北城市建设职业技术学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 通过对鄂西建始地区页岩储层特征、有机地球化学特征及含气性分析, 初步探讨了含气性的相关影响因素。结果表明, 储层矿物以石英和粘土矿物为主, 孔隙类型主要为有机质孔、矿物溶蚀孔、矿物粒间孔, 岩石孔隙度为0.2%~4.5%, 渗透率平均值为 $0.0810 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属低孔、特低渗储层; 储层具有高有机质丰度、高热演化程度特征, TOC含量平均值为7.63%, R_o 平均值为3.29%, 有机质类型以II型干酪根为主; 现场解析法测得X井大隆组、龙潭组、孤峰组页岩具有较高的含气量, 平均值为 $1.32 \text{ m}^3/\text{t}$, 含气量与有机质丰度、有机质成熟度、孔隙度呈正相关关系, 与粘土矿物含量呈弱的正相关关系。该研究可以为鄂西建始地区页岩气的后续勘探开发提供依据。

关键词: 页岩气; 储层特征; 有机地球化学; 含气性; 相关性; 建始地区

中图分类号: P593; P618.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0365-10

Research on the reservoir characteristics and gas-bearing potential of shale in Jianshi, western Hubei Province

QIU Xiu-mei¹, LIU Ya-dong² and DONG Xue-lin¹

(1. Hubei Geological Research Laboratory, Wuhan 430034, China; 2. Hubei Urban Construction Vocational and Technological College, Wuhan 430205, China)

Abstract: The reservoir features, organic geochemical characteristics and gas-bearing property of the shale from Jianshi area in western Hubei Province were studied, and the factors associated with gas content of the shale were preliminary discussed. Some conclusions have been reached: ① Quartz and clay minerals seem to be the major minerals in the shale, the pores of the reservoir are mainly organic pores, mineral dissolution pores and intergranular pores, and the reservoirs are characterized by low porosity and ultra-low permeability with a rock porosity of 0.2%~4.5% and a permeability of $0.0810 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; ② They are high in organic matter and thermal evolution degree, and have an average TOC content of 7.63% and an average R_o value of 3.29%, with the organic matter belonging mainly to type II; ③ The gas content of the shale is higher with an average of $1.32 \text{ m}^3/\text{t}$, which exhibits a positive correlation with porosity, organic matter abundance and maturity, and a weak positive correlation with the content of clay minerals. The research on shale gas reservoir could provide certain reference for the subsequent shale gas exploration and development of Jianshi in western Hubei Province.

Key words: shale gas; reservoir characteristics; organic geochemistry; gas content; relativity; Jianshi area

Fund support: Technology Program of Department of Natural and Resources of Hubei Province (ETZ2017A01)

收稿日期: 2018-09-10; 接受日期: 2019-03-04; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 湖北省自然资源厅科技项目(ETZ2017A01)

作者简介: 仇秀梅(1987-), 女, 博士, 工程师, 材料科学与工程专业, 从事固废综合利用及环境污染物分析检测工作, E-mail: 303984566@qq.com。

页岩气是自生、自储、自封闭的非常规天然气,其成藏与传统天然气藏不同(戴方尧等, 2017)。美国在页岩气勘探开发领域最早获得了成功,相比而言我国页岩气的开采研究起步较晚,但领先于其他国家(周启伟等, 2016)。页岩气作为一种清洁高效的能源资源,其蕴藏量十分丰富。我国许多盆地中富有机质泥页岩广泛发育,页岩有效厚度较大,且页岩气形成与富集的条件存在一定特殊性,与主要形成于海相富有机质泥页岩层系的北美页岩气(朱彤等, 2012; 周启伟等, 2016)相比,我国页岩气主要吸附与赋存于陆相及海陆过渡相富有机质泥页岩层系中(李玉喜, 2009; 王民等, 2014; 周启伟等, 2016)。

近几年,我国在上扬子地区的四川盆地及其周边地区取得了页岩气勘探的突破(许露露等, 2018)。湖北省西部地区页岩气的研究正逐渐引起广泛关注,陆续开展了目的层为孤峰组(吴勘等, 2012)、牛蹄塘组(罗超等, 2014)、龙马溪组(陈林等, 2017)、大隆组(王秀平等, 2018)的页岩气调查研究。王秀平等(2018)对鄂西鹤峰地区二叠系大隆组黑色页岩进行了岩系特征及成因研究,探明页岩的形成主要受台盆相缺氧还原环境的控制。许露露等(2018)报道鄂西鹤峰大隆组页岩厚度稳定,主要为黑色炭质及炭硅质岩,沉积于水体较深的浅海外陆棚相沉积环境,页岩脆性矿物含量高,有机质成熟度达到过成熟阶段,页岩气潜在资源量达 $1\ 654.8 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。吴勘等(2012)采用场发射扫描电镜观察发现鄂西建始孤峰组页岩孔隙包含 5 大类 9 小类,炭质页岩以有机质孔隙和天然裂缝为主,但未对该区页岩进行详细的有机地球化学特征及含气性评价。

目前关于鄂西地区优质页岩的研究还处于初级阶段。鄂西建始地区毗邻四川盆地,该区富有机质页岩的厚度较大,埋深适中,具有良好的页岩气成藏地质条件。通过分析该区黑色页岩储层特征、有机地球化学特征及含气性,初步探讨页岩含气性的相关影响因素,可为鄂西建始地区页岩气勘探开发提供依据。

1 研究区域地质概况

研究区地处长江三峡以南,北邻大巴山系,属于巫山山系,为中深-深切割的低中山地形,巫山绵延

于鄂渝边境,长江东流横穿而过,悠远的地质演化形成了闻名世界的长江三峡。该区具体位于湖北省恩施州建始县境内,属扬子(华南)板块中北部湘鄂西褶皱断裂带内。在晋宁运动形成的结晶基底基础上,该区历经扬子地块盖层发展和多期构造改造,目前所展现的构造形迹主要是印支期及燕山期的产物,断裂构造主要形成于印支期和燕山期(周向辉, 2016)。

本次研究的目的井 X 井位于花果坪复向斜-中央复背斜过渡带北东段(图 1),早期东西向的龙潭坪背斜由于受后期北东-北北东向构造改造,褶皱西端与北东向褶皱过渡带在目的井西侧呈 S 型展布,总体处于龙潭坪背斜南翼西段。X 井钻探显示自三叠系大冶组三段至二叠系茅口组均有发育,其中二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组富有机质黑色页岩厚度近 120 m,属海陆过渡相页岩^①。

2 实验概况

样品采集于鄂西建始地区 X 井的页岩岩心,涉及三叠系下统大冶组、二叠系上统大隆组、下窑组、龙潭组和二叠系中统孤峰组地层黑色页岩。

采用德国布鲁克公司的 D8-FOCUS 型 X 射线衍射仪分析页岩矿物组成。选用日本日立 SU8010 型超高分辨场发射扫描电镜表征页岩孔隙结构,取新鲜页岩块 70℃ 干燥 2 h,镀金后测试。采用碳硫分析仪和配有油浸物镜及光度计的显微镜对页岩样品进行总有机碳(TOC)含量和镜质组反射率(R_o)测试。采用覆压孔渗测定仪测试样品的渗透率及孔隙度。甲烷等温吸附试验所用仪器为 Rubotherm Isosorp HP Static III 型磁悬浮天平高压气体等温吸附/解吸仪,设定实验温度 30℃。

3 页岩储层储集空间特征

作为优质烃源岩的页岩是否能形成商业性页岩气藏,主要受其吸附能力和储集空间特性(孔隙、裂缝发育程度)的控制(Fang *et al.*, 2013),而矿物成分中的脆性矿物,如石英、方解石等,是控制裂缝发育程度的主要内在因素,直接影响页岩储集空间和渗流通道(陈尚斌等, 2011)。页岩气储层矿物组

① 湖北省地质实验测试中心. 2017. 湖北省自然资源厅科技项目《页岩有机地球化学参数与含气量相关性及其成藏机理研究》项目成果报告.

成、储集空间类型和储物特性对于页岩气资源潜力评价具有重要意义。

3.1 页岩岩石矿物学特征

研究采用全岩 X 射线衍射定性、定量测试了页岩的矿物组成。图 2 为 X 井 34 块不同采样深度页岩的全岩分析结果。由图 2 可知, X 井页岩主要由粘土矿物(伊利石)、石英、钠长石、方解石、白云石、

黄铁矿及少量碳质组成。其中, 大隆组地层厚度 44.07 m, 9 件黑色页岩矿物组成以石英、长石等脆性矿物为主, 总量为 37.5% ~ 94.5%, 平均含量 85.3%, 而粘土矿物含量为 4% ~ 63%, 平均含量为 14.7%, 整体表现为脆性矿物含量远高于粘土矿物含量。龙潭组地层厚度 27.37 m, 7 件页岩粘土矿物含量较高, 平均值为 56.1%, 其次为石英、钠长石等

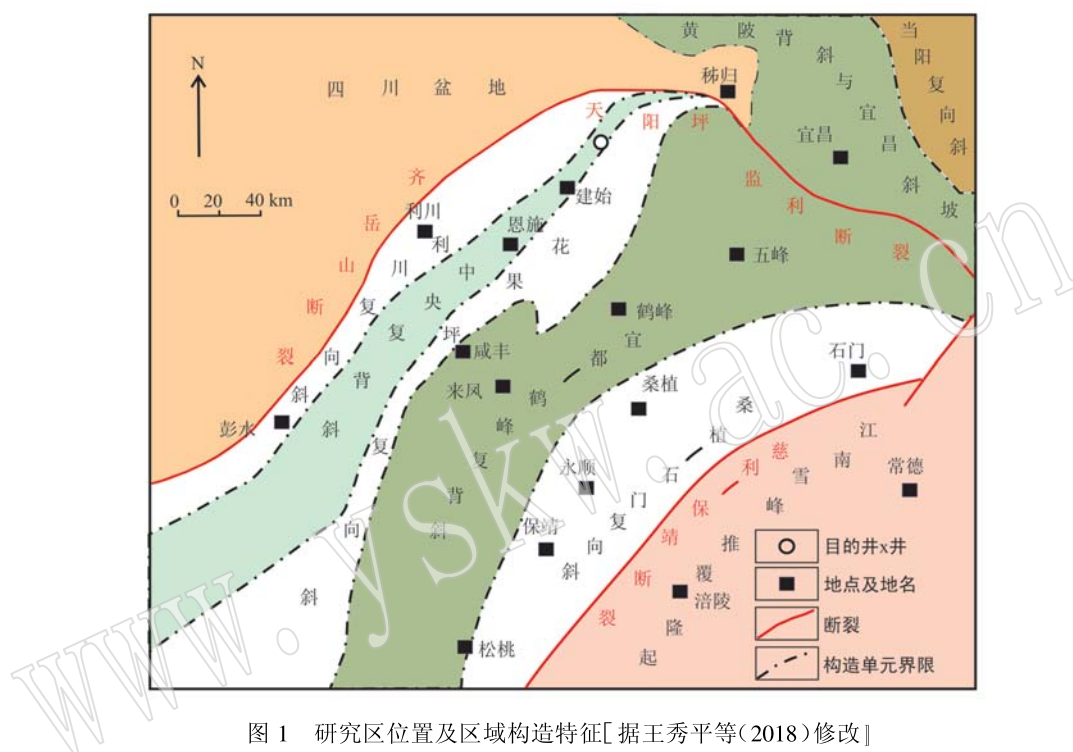


图 1 研究区位置及区域构造特征[据王秀平等(2018)修改]

Fig. 1 Location and regional tectonic characteristics of the study area (modified after Wang Xiuping *et al.*, 2018)

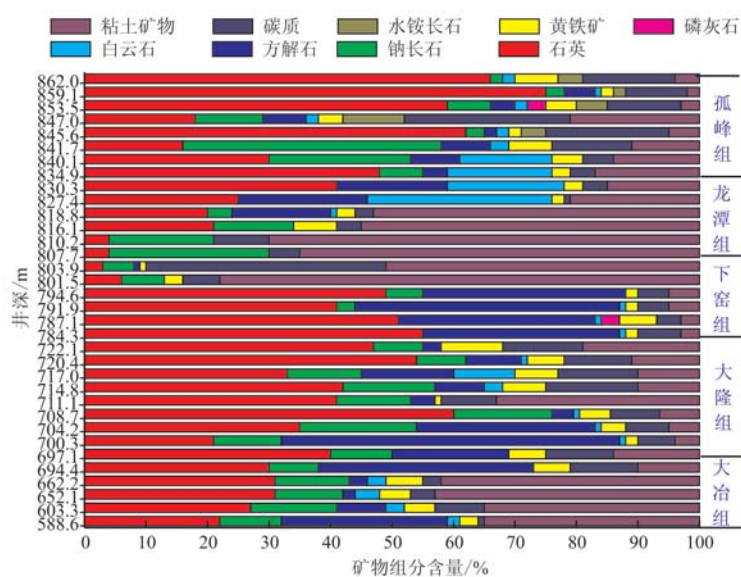


图 2 随 X 井深度变化的页岩矿物组成

Fig. 2 Mineral composition of shale at different depths of well X

脆性矿物。孤峰组黑色页岩厚度达 49.06 m, 表现为石英等脆性矿物含量较高。X 井黑色页岩主要由石英、钠长石等脆性矿物及粘土矿物组成。

3.2 页岩储集空间特征

页岩的孔隙发育程度对页岩气的聚集和产出具有至关重要的作用。页岩主要发育微、纳米级孔隙, 这是与常规储层的一个重要区别(吴松涛等, 2015)。对于页岩孔隙类型的分类方法较多(Slatt *et al.*, 2011; Loucks *et al.*, 2012; 于炳松, 2013; Miliken *et al.*, 2013; 孙超等, 2016; 张顺等, 2016)。Slatt 等(2011)按照成因将页岩中的纳米级孔隙划分为与粘土微结构相关的孔隙、有机质孔隙、粪球粒内部孔隙、化石碎片内部孔隙、颗粒内部孔隙、微通道或微裂缝 6 种类型。Loucks 等(2012)将泥页岩的孔隙分为粒间孔隙、粒内孔隙和有机质孔隙。于炳松(2013)提出页岩气储层孔隙的产状-结构综合分类方法, 将页岩基质孔隙分为粒间孔隙(颗粒间孔隙、晶间孔隙等)、粒内孔隙(黄铁矿晶间孔隙、粘土矿物集合体内部孔隙等)和有机质孔隙。孙超等(2016)和张顺等(2016)从储集空间的成因角度, 将页岩孔隙分为无机成因孔(矿物粒间孔、原生晶间孔、成岩晶间孔和溶蚀孔等)和有机成因孔等。从扫描电镜观察可知, 鄂西 X 井黑色页岩样品中存在大量矿物溶蚀孔、有机质孔和矿物粒间孔, 并有少量矿物晶间孔、粒内孔(图 3)。溶蚀孔隙主要存在于碳酸盐(图 3a)及粘土矿物(图 3b、3e、3f)中, 孔径较小, 孔隙形态不规则, 连通性相对较差; 有机质较发育(图 3c、3d), 孔径在几十到几百纳米, 少量以薄膜形式存在(图 3f); 粒间孔隙主要是矿物颗粒间的残余孔隙, 多形成于粘土矿物粒间或矿物颗粒边界(图 3g); 粒内孔隙分布在黄铁矿(图 3h)、石英(图 3i)等矿物颗粒内, 孔隙连通性差, 不能作为主要储集空间; 观察发现少量黄铁矿晶间孔隙(图 3e), 且多被粘土矿物或有机质填充。SEM 分析表明, 该区页岩储集空间有机质较发育, 矿物主要呈片状、颗粒状分布, 孔隙发育程度较低, 孔隙间连通性差。

3.3 页岩储层物性特征

与常规储层相比, 页岩具有低孔、特低渗致密的物性特征。X 井 25 件页岩密度为 1.98 ~ 2.82 g/cm³, 有效孔隙度为 0.2% ~ 4.5%, 平均孔隙度为 1.19%, 集中分布在小于 2.0% 范围(图 4a)。依据《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》(DZ/T

0254-2014), X 井页岩的孔隙属于低孔范围, 与美国页岩储层的孔隙度 4.22% ~ 6.51% (肖海峰, 2017)相比, 孔隙更加致密、细小, 具有低孔-特低孔特性。页岩渗透率为 $0.0008 \times 10^{-3} \sim 1.1071 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 除样品 X-31 外, 页岩渗透率均小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 4b), 平均渗透率 $0.0810 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 与美国页岩平均渗透率 $0.049 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (肖海峰, 2017)相当。综合上述分析, 认为鄂西建始 X 井页岩层属于低孔、特低渗储层。

4 页岩有机地球化学特征及含气性

4.1 有机质类型

为有效辨别目标层黑色页岩的有机质类型, 笔者采用干酪根显微组分信息评价有机质类型。鄂西 X 井 24 件页岩干酪根镜检结果见表 1。大隆组页岩干酪根显微组分以腐泥组为主, 含量在 5% ~ 88% 之间, 平均值 61.3%, 其次为镜质组、惰质组, 有机质类型以腐质腐泥型(Ⅱ₁型)为主, 含少量腐泥腐殖型(Ⅱ₂型)和腐殖型(Ⅲ型)。下窑组页岩有机质类型主要为腐泥腐殖型(Ⅱ₂型), 含少量腐质腐泥型(Ⅱ₁型)和腐殖型(Ⅲ型)。龙潭组页岩有机质类型主要为腐殖型(Ⅲ型), 孤峰组页岩以腐质腐泥型(Ⅱ₂型)和腐泥腐殖型(Ⅲ型)干酪根为主。因此, 鄂西 X 井页岩有机质类型主要为Ⅱ型干酪根。一般认为, Ⅰ型、Ⅱ型干酪根以生油为主, Ⅲ型干酪根以生气为主, 而美国页岩气盆地的页岩干酪根主要为Ⅰ型和Ⅱ型, 少量Ⅲ型, 但均有数量可观的气生成, 表明干酪根类型并不是决定页岩产气量的关键因素(王祥等, 2010)。

4.2 有机质丰度

总有机碳含量是烃源岩丰度评价的重要指标, 在其他条件相近的前提下, 岩石中原始有机质含量越高, 其生烃能力越强。图 5a 为 X 井不同采样深度页岩 TOC 含量图, 由图可知, 51 件页岩样品 TOC 含量分布在 1.62% ~ 26.93% 之间, 平均值为 7.63%, TOC 含量随井深变化规律不明显, 目的层大隆组、龙潭组、孤峰组页岩的 TOC 含量相对较高。图 5b 显示 TOC 含量小于 2% 的占总样品数的 9.8%, TOC 含量大于 2% 的占总样品数的 90.2%, 样品 TOC 含量集中在 1.0% ~ 13.0% 之间, 反映出鄂西 X 井页岩有机质丰度整体品位较高, 具有形成页岩气的良好物质基础。

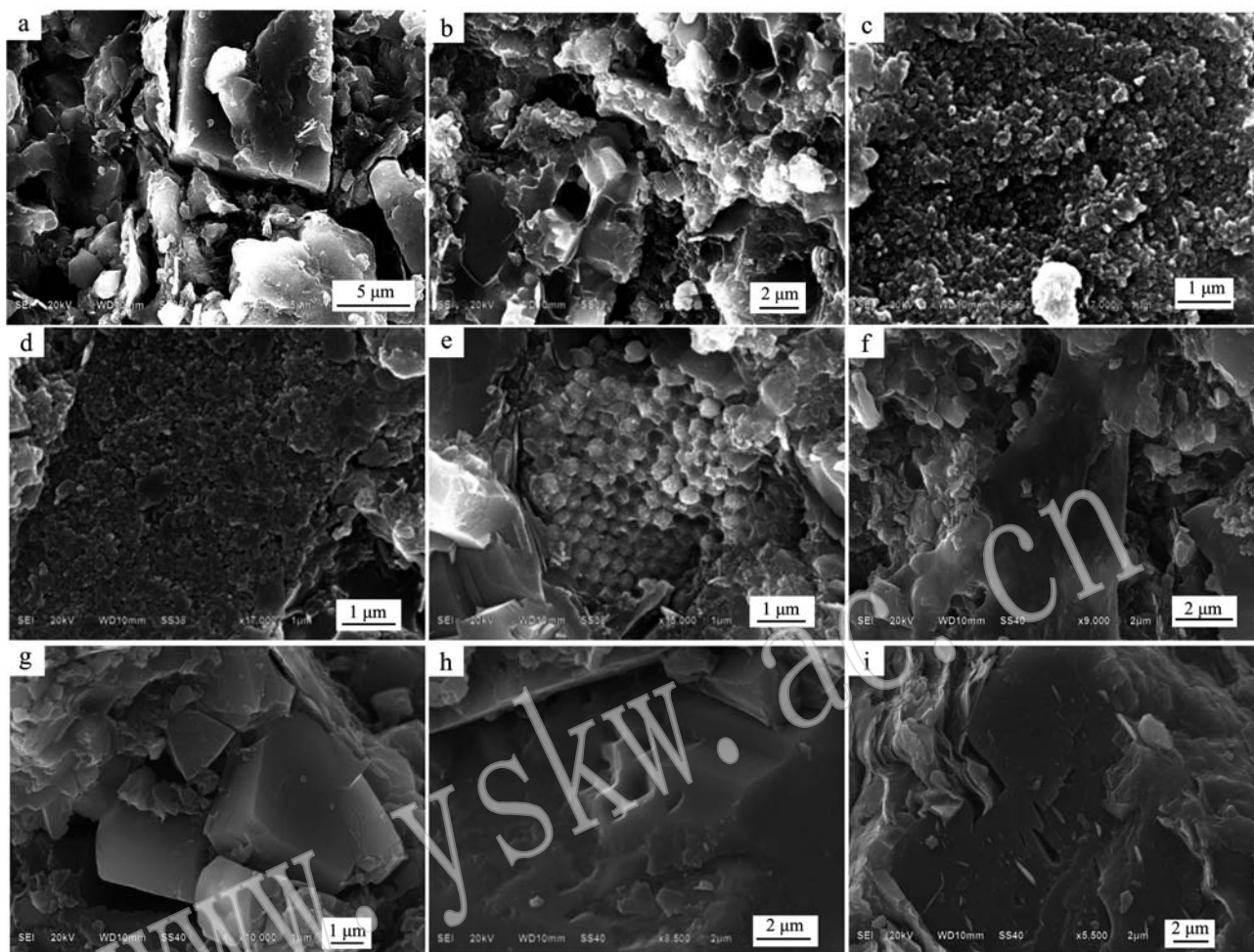


图3 X井页岩孔隙发育特征

Fig. 3 The porosity evolution of shales in well X

a—矿物溶蚀孔隙, 0.239 ~ 2.738 μm ; b—矿物溶蚀孔隙, 0.170 ~ 1.949 μm ; c—有机质孔隙, 0.035 ~ 0.271 μm ; d—有机质孔隙, 0.026 ~ 0.186 μm ; e—矿物溶蚀孔隙, 黄铁矿晶间孔隙, 0.048 ~ 0.415 μm ; f—有机质薄膜, 矿物溶蚀孔隙, 0.103 ~ 1.414 μm ; g—方解石粒间孔隙, 方解石和粘土矿物粒间孔隙, 0.170 ~ 0.600 μm ; h—黄铁矿粒内孔隙, 0.260 ~ 1.380 μm ; i—石英矿物粒内孔隙, 0.160 ~ 2.290 μm
a—denudation pore of mineral, 0.239 ~ 2.738 μm ; b—denudation pore of mineral, 0.170 ~ 1.949 μm ; c—organic pore, 0.035 ~ 0.271 μm ; d—organic pore, 0.026 ~ 0.186 μm ; e—denudation pore of mineral and intercrystalline pore of pyrite, 0.048 ~ 0.415 μm ; f—organic film and denudation pore of mineral, 0.103 ~ 1.414 μm ; g—intergranular pore of calcite, and intergranular pore between calcite and clay minerals, 0.170 ~ 0.600 μm ; h—intragranular pore of pyrite, 0.260 ~ 1.380 μm ; i—intragranular pore of quartz, 0.160 ~ 2.290 μm

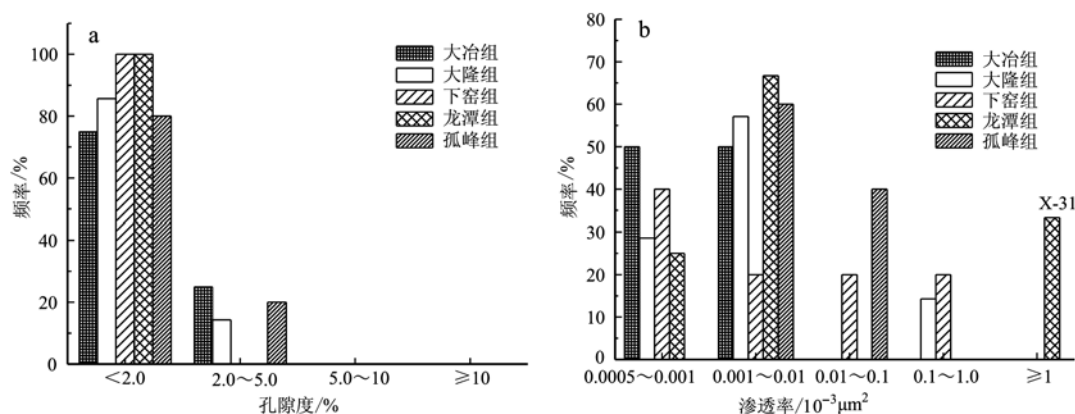


图4 X井页岩孔隙度分布特征(a)和渗透率分布图(b)

Fig. 4 The porosity distribution (a) and permeability distribution (b) of shale from well X

表 1 鄂西 X 井页岩有机质显微组分
Table 1 Organic matter components of shale from well X in western Hubei

样品编号	岩性	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	干酪根类型	地层
X-6	含碳泥岩	10	—	70	20	Ⅲ	大隆组
X-10	含碳泥岩	60	—	32	8	Ⅱ ₂	
X-11	含碳泥岩	85	—	11	4	Ⅱ ₁	
X-13	含碳泥岩	5	—	80	15	Ⅲ	
X-14	含碳泥岩	65	—	25	10	Ⅱ ₂	
X-16	含碳粉砂质泥岩	88	—	8	4	Ⅱ ₁	
X-17	粉砂质泥岩	72	—	21	7	Ⅱ ₁	
X-18	含碳粉砂质泥岩	80	—	14	6	Ⅱ ₁	
X-19	含碳粉砂质泥岩	87	—	8	5	Ⅱ ₁	
X-22	含碳泥岩	65	—	30	5	Ⅱ ₂	下窑组
X-23	含碳泥岩	70	—	25	5	Ⅱ ₁	
X-26	含碳泥岩	40	—	50	10	Ⅲ	
X-28	含碳泥岩	60	—	34	6	Ⅱ ₂	
X-29	含碳泥岩	30	—	58	12	Ⅲ	龙潭组
X-33	含碳泥岩	35	—	55	10	Ⅲ	
X-37	含碳泥岩	30	—	60	10	Ⅲ	
X-40	含碳泥岩	55	—	40	5	Ⅱ ₂	孤峰组
X-42	含碳泥岩	10	—	80	10	Ⅲ	
X-43	含碳泥岩	60	—	35	5	Ⅱ ₂	
X-44	含碳泥岩	82	—	12	6	Ⅱ ₁	
X-46	含碳泥岩	80	—	17	3	Ⅱ ₁	
X-47	粉砂岩	70	—	22	8	Ⅱ ₁	
X-48	粉砂质泥岩	65	—	30	5	Ⅱ ₂	
X-51	含碳含粉砂泥岩	60	—	36	4	Ⅱ ₂	

注：Ⅰ 为腐泥型；Ⅱ₁ 为腐质腐泥型；Ⅱ₂ 为腐泥腐殖型；Ⅲ 为腐殖型。

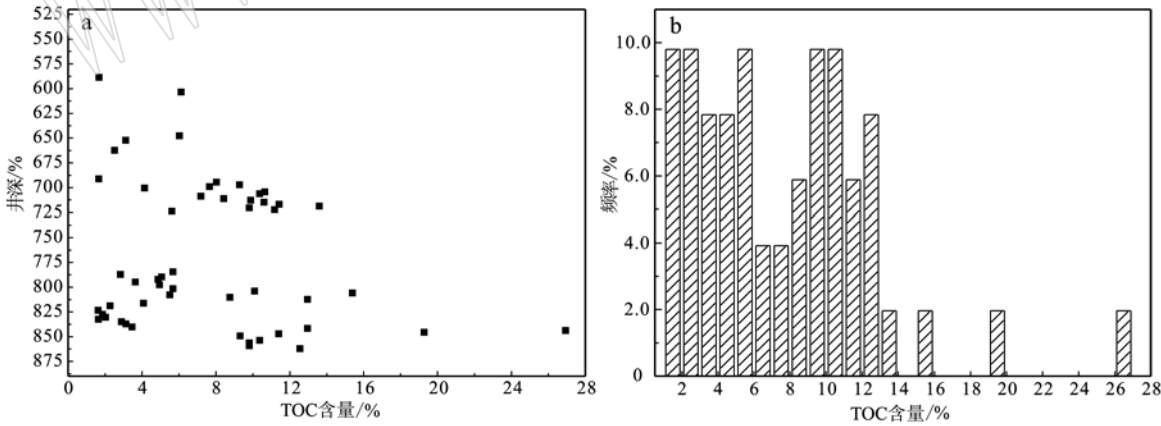


图 5 页岩 TOC 含量随井深变化图(a)和页岩 TOC 含量分布图(b)

Fig. 5 TOC content of shale at various well depths (a) and TOC content distribution of shale (b)

4.3 有机质成熟度

研究采用镜质体反射率(R_o)对 X 井 17 件页岩样品进行有机成熟度分析, R_o 值为 2.61% ~ 3.68%, 平均值为 3.29%, 成熟度分布在 2% ~ 3% 的样品占总数的 21.1%, 分布在 3% ~ 4% 的样品占

总数的 78.9%。依据中国南方黑色页岩成熟阶段划分标准(聂海宽等, 2012), X 井页岩成熟度主体上处于过成熟晚期阶段。图 6 为 X 井页岩镜质体反射率(R_o)随着采样深度的变化, 由图 6 可知, 有机质成熟度与采样深度线性拟合度高, 呈正相关关系, 即镜

质体反射率随采样深度增加而增大,与前人报道规律一致(邹瑜, 2011)。

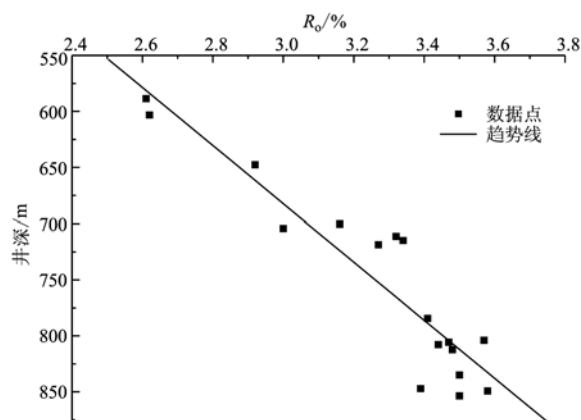


图6 X井不同深度页岩 R_o 值

Fig. 6 The R_o values of shale at different depths of well X

4.4 页岩含气性特征

页岩的含气性是页岩气地质条件评价的重要方面,目前,获取泥页岩含气量的方法有2种,即解析法和测井法(覃小丽等, 2015)。其中解析法是对钻井取出岩心样品直接解析测定含气量,含气量由现场解析气、损失气和残余气3部分组成。研究采用现场解析法,测得X井22件富有机质页岩现场解析气含量为 $0.087 \sim 2.92 \text{ m}^3/\text{t}$,平均值为 $1.09 \text{ m}^3/\text{t}$;残余气含量在 $0.002 \sim 0.26 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,平均值为 $0.071 \text{ m}^3/\text{t}$;总含气量为 $0.09 \sim 3.70 \text{ m}^3/\text{t}$,平均含量为 $1.32 \text{ m}^3/\text{t}$ 。特别是大隆组富有机质页岩,其现场解析含气量为 $0.69 \sim 2.92 \text{ m}^3/\text{t}$,平均值为 $2.21 \text{ m}^3/\text{t}$,总含气量 $0.74 \sim 3.70 \text{ m}^3/\text{t}$,平均值为 $2.71 \text{ m}^3/\text{t}$,均高于美国泥页岩含气量底限($0.5 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{t}$)(张木辰等, 2018),表明其具有很好的勘探开发前景。

5 页岩含气量的相关因素探讨

5.1 页岩总有机碳与含气量关系

有机质含量显著影响着页岩的生烃能力、孔隙空间及吸附能力。在温压条件相同的前提下,高有机质含量页岩可为气体吸附提供更多的孔隙空间、内表面积。国内外实测数据表明,有机质含量直接影响页岩的含气量(徐国盛等, 2013)。Boyer等(2006)发现页岩含气量随其TOC含量增加而增大,认为页岩有机质含量是页岩气成藏最基础的因素。将鄂西X井不同采样深度页岩的TOC含量与不同

采样深度页岩的总含气量进行对比,发现页岩含气量与其有机碳含量的变化趋势基本一致,表明页岩的含气量与TOC含量呈正相关关系(图7)。

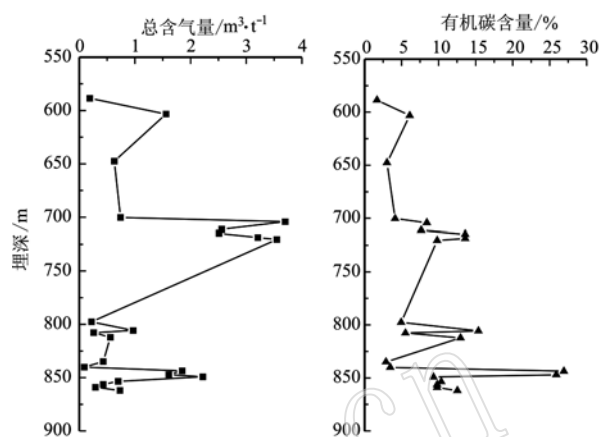


图7 鄂西X井页岩样品含气量与总有机碳含量分布

Fig. 7 The distribution of gas content and TOC content of shale from well X in western Hubei

5.2 有机质成熟度与含气量关系

有机热成熟度是页岩经历最高温度的指示。Zhang等(2012)认为随着页岩热成熟度的增加,页岩有机质芳构化增加,从而导致其吸附能力降低。而另一种观点则认为随着成熟度增加,有机质生烃创造出纳米孔,使得页岩吸附能力增强(Gasparik *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2015; 戴方尧等, 2017)。图8为反映X井页岩有机质成熟度的镜质体反射率(R_o)与总含气量的关系图,由图可知,两者之间呈

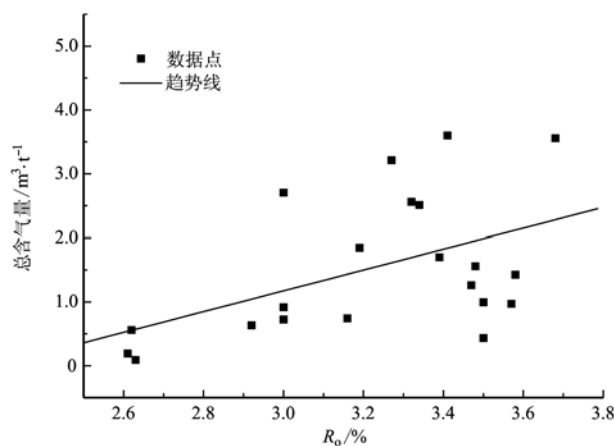


图8 页岩总含气量与有机成熟度的关系

Fig. 8 The relationship between gas content and organic maturity of shale samples

弱的正相关关系,与报道一致(张木辰等, 2018)。有机质成熟度的提高对有机组分纳米孔隙的生成具有促进作用,进而增加了页岩气的储集空间(曾维特等, 2014)。

5.3 页岩矿物组成与含气量关系

页岩的矿物组成作为页岩形成的物质基础,不仅为吸附气的赋存提供了吸附剂,也决定了其内部发育的孔隙空间,为天然气的赋存奠定了基础。鄂西 X 井页岩矿物成分以石英、钠长石等脆性矿物和粘土矿物为主(图 1)。页岩中的脆性矿物富集,有利于微裂缝的产生,影响着页岩气的储存和扩散,而粘土矿物含量对页岩含气量的影响主要表现为伊蒙混层、伊利石对页岩气的吸附能力(曾维特等, 2014)。图 9 显示页岩总含气量与粘土矿物含量呈现弱的正相关性。通常粘土矿物的微孔隙体积和表面积较大,增大页岩对气体的吸附能力,而伊利石化形成的收缩缝、伊利石间的孔隙均可成为有效的页岩气储集空间(曾维特等, 2014)。因此,在一定范围内高粘土矿物含量的页岩,其吸附能力更强,粘土矿物含量与含气量呈现弱的正相关关系。

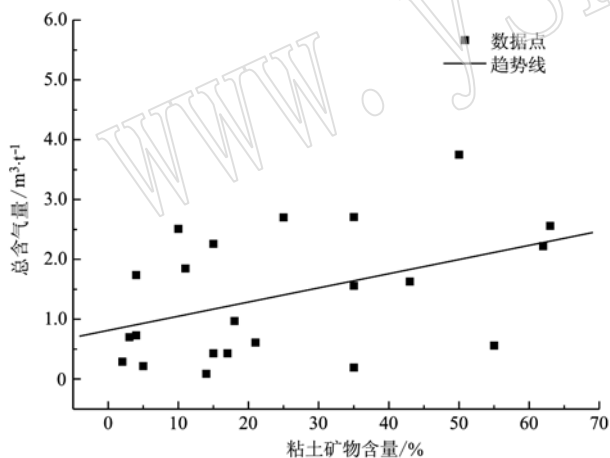


图 9 粘土矿物含量与页岩含气量的关系图

Fig. 9 Diagram of relationship between clay minerals and gas content of shale

5.4 页岩孔隙度与含气量关系

图 10 为鄂西 X 井页岩有效孔隙度与页岩总含气量的关系图,两者在一定程度上呈正相关关系,即页岩含气量随页岩孔隙度的增大而增大。这是由于相对较大的页岩孔隙度,其孔隙内表面较大,有利于吸附气的赋存,也可以为游离气的赋存提供空间。

5.5 压力条件与含气量关系

温度和压力的共同作用影响页岩中气体含量,限制了页岩的最大含气量。通常情况下,随着压力

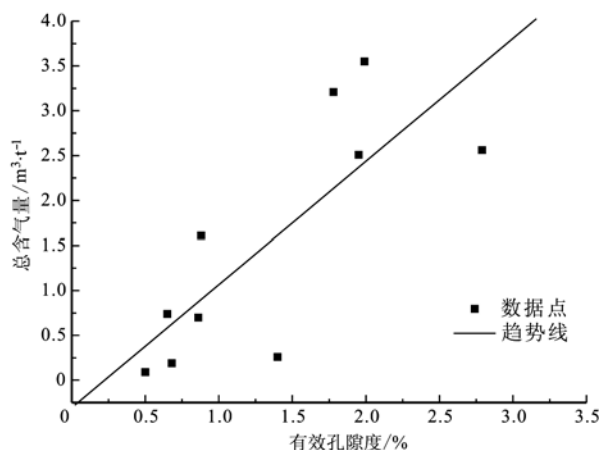


图 10 页岩有效孔隙度与总含气量的相关性

Fig. 10 Diagram of relationship between effective porosity and gas content of shale

的增加,页岩游离气和吸附气含量都逐渐增大。图 11 显示出在温度一定的情况下,页岩吸附气量随着压力的增加而增大,同时发现在相同的温度压力条件下,页岩 TOC 含量越高,其吸附气量越大,页岩的吸附气量和 TOC 含量具有较好的正相关性,但和粘土矿物含量相关性不明显,具有较弱的正相关性。这与前述分析结论一致(图 7、图 9)。

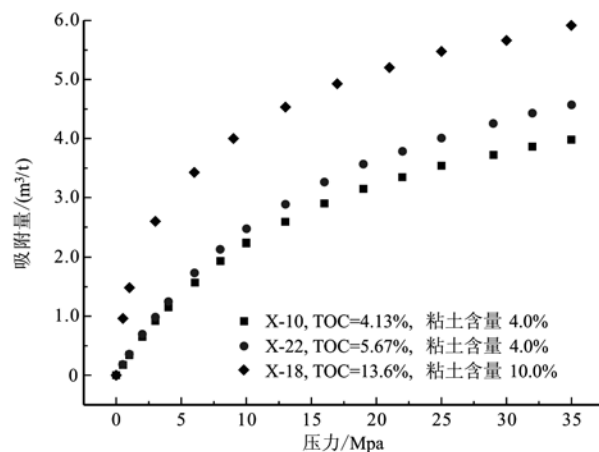


图 11 X 井页岩甲烷等温吸附曲线图

Fig. 11 Isotherms of methane adsorbed in shales of well X

6 结论

(1) 鄂西建始地区 X 井页岩储层以石英、长石等脆性矿物以及伊利石粘土矿物为主。储层孔隙主要发育有机质孔、矿物溶蚀孔、矿物粒间孔以及少量黄铁矿晶间孔,储层具有低孔、特低渗特征。

(2) X 井页岩有机质丰度整体品位较高, TOC

含量大于2%的占总样品数90.2%,具有形成页岩气的良好物质基础,有机质类型主要为Ⅱ型干酪根,处于过成熟晚期阶段。

(3)现场解析法测得建始X井页岩含气量较高,平均值为 $1.32\text{ m}^3/\text{t}$,与页岩TOC含量、有机质成熟度和孔隙度呈正相关关系,与粘土矿物含量呈弱的正相关关系。

致谢 感谢湖北省地质调查院为本研究提供地质背景资料。

References

- Boyer C, Kinschnick J R, Suarez-Rivera R, *et al.* 2006. Exploration of shale gas reservoir[J]. *New Technology of Oilfield*, 18(3): 18~31 (in Chinese).
- Chen Lin, Li Minglong, Wang Minghua, *et al.* 2017. The pore characteristics and its controlling factors of the organic-rich shale in Longmaxi and Dalong Formation from Laifeng-Hefeng area of Enshi[J]. *Resources Environment & Engineering*, 31(2): 165~169(in Chinese).
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, *et al.* 2011. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 32(5): 775~782(in Chinese).
- Dai Fangyao, Hao Fang, Hu Haiyan, *et al.* 2017. Occurrence mechanism and key controlling factors of Wufeng-Longmaxi shale gas, eastern Sichuan basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 42(7): 1 185~1 194(in Chinese).
- Fang H, Zou H and Lu Y. 2013. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China[J]. *AAPG Bulletin*, 97(8): 1 325~1 346.
- Gasparik M, Bertier P, Gensterblum Y, *et al.* 2014. Geological controls on the methane storage capacity in organic-rich shales[J]. *International Journal of Coal Geology*, 123(2): 34~51.
- Hu H, Zhang T, Wiggins-Camacho J D, *et al.* 2015. Experimental investigation of changes in methane adsorption of bitumen-free Woodford Shale with thermal maturation induced by hydrous pyrolysis[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 59: 114~128.
- Li Yuxi. 2009. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China[J]. *Natural Gas Industry*, 29(12): 115~118(in Chinese).
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, *et al.* 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1 071~1 098.
- Luo Chao, Liu Shugen, Sun Wei, *et al.* 2014. Pore structure characterization of black shale in the lower Cambrian Niutitang formation in western Hubei and eastern Chongqing area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38(2): 8~17(in Chinese).
- Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, *et al.* 2013. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania [J]. *AAPG Bulletin*, 97(2): 177~200.
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, *et al.* 2012. Shale gas accumulation conditions of the upper ordovician-lower silurian in Sichuan basin and its periphery[J]. *Oil and Gas Geology*, 33(3): 335~345(in Chinese).
- Qin Xiaoli, Li Rongxi, Wang Xiangzeng, *et al.* 2015. Measuring methods of shale gas content of Shanxi Formation in central and southern ordos basin [J]. *Natural gas geoscience*, 26(10): 1 984~1 991(in Chinese).
- Slatt R M and O'Brien N R. 2011. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. *AAPG bulletin*, 95(12): 2 017~2 030.
- Sun Chao, Yao Suping, Li Jingning, *et al.* 2016. The characterization of shale oil reservoir in Dongying Sag[J]. *Geological Review*, 62(6): 1 499~1 512(in Chinese).
- Wang Min, Shi Lei, Wang Wenguang, *et al.* 2014. Comparative study on geochemical characteristics of shale oil between China and U. S. A [J]. *Lithologic Reservoirs*, 26(3): 67~73(in Chinese).
- Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, *et al.* 2010. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 21(2): 44(in Chinese).
- Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Xiao Zhaohui, *et al.* 2018. Characteristics and preliminary study on genesis of black rock series of Upper Permian Dalong Formation in Hefeng area, Hubei Province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 29(3): 382~396(in Chinese).
- Wu Kan, Ma Qiangfen and Feng Qinglai. 2012. Middle permian pore characteristics and shale gas exploration signification from the Gufeng formation in Jianshi, western Hubei[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(s2): 175~183(in Chinese).
- Wu Songtao, Zou Caineng, Zhu Rukai, *et al.* 2015. Reservoir quality characterization of upper triassic chang 7 shale in ordos basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(11): 1 810~1 823(in Chinese).
- Xiao Haifeng. 2017. The Geological Study on Shale Gas Reservoirs of Longmaxi Formation in East Sichuan Wuling Mountain Area[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Xu Guosheng, Zhang Zhen, Luo Xiaoping, *et al.* 2013. Gas-bearing characteristics and affected factors of Upper Paleozoic shale in depressions of Central Hunan and Southeast Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40(5): 577~587(in Chinese).
- Xu Lulu, Liu Zaoxue, Zhang Yanlin, *et al.* 2018. Shale gas reservoir potential evaluation of Dalong formation in Hefeng of western Hubei province

- [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 25(2): 13~18(in Chinese).
- Yu Bingsong. 2013. Classification and characterization of shale pore system[J]. Earth science frontiers, 20(4): 211~220(in Chinese).
- Zeng Weite, Zhang Jinchuan, Ding Wenlong, *et al.* 2014. The gas content of continental Yanchang shale and its controlling factors: A gas study of Liuping-171 well in ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 25(2): 291~301 (in Chinese).
- Zhang Muchen, Feng Hui, Weng Jichang, *et al.* 2018. Reservoir characteristics and gas-bearing potential of transitional-facies shale, Henan Province[J]. Natural Gas Exploration and Development, 41(2): 37~54(in Chinese).
- Zhang Shun, Liu Huimin, Song Guoqi, *et al.* 2016. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 37(12): 1 495~1 507(in Chinese).
- Zhang T, Ellis G S, Ruppel S C, *et al.* 2012. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems[J]. Organic Geochemistry, 47(6): 120~131.
- Zhou Qiwei, Li Yong, Wang Zhengjiang, *et al.* 2016. Organic geochemical characteristics of shale of Xujiahe Formation in the southern Longmen Mountain foreland basin[J]. Lithologic Reservoirs, 28(6): 45~51(in Chinese).
- Zhou Xianghui. 2016. Tectonic Compound Relations in Yesanguan Area, Western Hubei Province[J]. Low Carbon World, (26): 130~131 (in Chinese).
- Zhu Tong, Bao Shujing and Wang Feng. 2012. Pooling conditions of nonmarine shale gas in the Sichuan Basin and its exploration and development prospect[J]. Natural Gas Industry, 32(9): 16~21(in Chinese).
- Zou Yu. 2011. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Shale Gas from the Fifth Member of the Xujiahe Formation in West Sichuan Depression[D]. China University of Geosciences(Wuhan) (in Chinese).
- Boyer C, Kinschnick J, Suarez-Rivera R, *等.* 2006. 页岩气藏的开采[J]. 油田新技术, 18(3): 18~31.
- 陈林, 李明龙, 王明华, *等.* 2017. 恩施来凤-鹤峰地区龙马溪组与大隆组页岩孔隙特征及其控制因素[J]. 资源环境与工程, 31(2): 165~169.
- 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, *等.* 2011. 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, 32(5): 775~782.
- 戴方尧, 郝芳, 胡海燕, *等.* 2017. 川东焦石坝五峰-龙马溪组页岩气赋存机理及其主控因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 42(7): 1 185~1 194.
- 李玉喜. 2009. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 29(12): 115~118.
- 罗超, 刘树根, 孙玮, *等.* 2014. 鄂西-渝东地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩孔隙结构特征[J]. 东北石油大学学报, 38(2): 8~17.
- 聂海宽, 张金川, 包书景, *等.* 2012. 四川盆地及其周缘上奥陶统-下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 33(3): 335~345.
- 覃小丽, 李荣西, 王香增, *等.* 2015. 鄂尔多斯盆地中南部地区山西组泥页岩含气量测定及方法探讨[J]. 天然气地球科学, 26(10): 1 984~1 991.
- 孙超, 姚素平, 李晋宁, *等.* 2016. 东营凹陷页岩油储层特征[J]. 地质论评, 62(6): 1 497~1 510.
- 王民, 石蕾, 王文广, *等.* 2014. 中美页岩油、致密油发育的地球化学特征对比[J]. 岩性油气藏, 26(3): 67~73.
- 王祥, 刘玉华, 张敏, *等.* 2010. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 21(2): 44.
- 王秀平, 牟传龙, 肖朝晖, *等.* 2018. 湖北鹤峰地区二叠系大隆组黑色岩系特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 29(3): 382~396.
- 吴勘, 马强分, 冯庆来. 2012. 鄂西建始中二叠统孤峰组孔隙特征及页岩气勘探意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 37(s2): 175~183.
- 吴松涛, 邹才能, 朱如凯, *等.* 2015. 鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1 810~1 823.
- 肖海峰. 2017. 川东武陵山地区龙马溪组页岩气成藏地质条件研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 徐国盛, 张震, 罗小平, *等.* 2013. 湘中和湘东南拗陷上古生界泥页岩含气性及其影响因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(5): 577~587.
- 许露露, 刘早学, 张焱林, *等.* 2018. 鄂西鹤峰区块大隆组含页岩气地层潜力评价[J]. 特种油气藏, 25(2): 13~18.
- 于炳松. 2013. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 20(4): 211~220.
- 曾维特, 张金川, 丁文龙, *等.* 2014. 延长组陆相页岩含气量及其主控因素——以鄂尔多斯盆地柳坪171井为例[J]. 天然气地球科学, 25(2): 291~301.
- 张木辰, 冯辉, 瓮纪昌, *等.* 2018. 河南海陆过渡相页岩储集特征及含气性初探[J]. 天然气勘探与开发, 41(2): 37~54.
- 张顺, 刘惠民, 宋国奇, *等.* 2016. 东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素[J]. 石油学报, 37(12): 1 495~1 507.
- 周启伟, 李勇, 汪正江, *等.* 2016. 龙门山前陆盆地南段须家河组页岩有机地球化学特征[J]. 岩性油气藏, 28(6): 45~51.
- 周向辉. 2016. 鄂西野三关地区构造复合关系[J]. 低碳世界, (26): 130~131.
- 朱彤, 包书景, 王烽. 2012. 四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J]. 天然气工业, 32(9): 16~21.
- 邹瑜. 2011. 川西三叠系上统须家河组五段页岩有机地球化学特征及意义[D]. 中国地质大学(武汉).

附中文参考文献