

黔西北燕子口地区五峰—龙马溪组页岩气源岩评价

兰叶芳¹, 任传建¹, 黄 喻², 陈 豪¹, 任成明¹

(1. 贵州工程应用技术学院(矿业工程学院), 贵州 毕节 551700; 2. 成都理工大学 管理科学学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 黔西北上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组具有巨大的页岩气资源潜力, 是我国南方页岩气勘探主攻目的层位和地区之一。本文研究了黔西北燕子口地区该套地层横向范围和厚度以及埋藏深度、岩相特征、矿物组成、总有机碳含量、热成熟度、储集空间和物性等页岩气成藏关键特征, 结果表明: 五峰组在燕子口西部的以勒地区厚度可达 20 m, 而龙马溪组自黔中隆起往北厚度逐渐增大, 至四川丁木垭—大坪一线厚度达 250 m 以上; 有效烃源岩主要分布在五峰组—龙马溪组下段, 包括粘土页岩、粉砂质页岩和钙质页岩几种岩相类型, 主要由粘土矿物、石英、碳酸盐矿物组成, 其高岩石脆性指数(47.3%~76.8%)显示良好的可压裂性; 可识别出裂缝、溶蚀孔、粒间孔、晶间孔等储集空间, 其中溶蚀孔隙和裂缝占主导, 储层孔隙度高, 比表面积(13.4~24.9 m²/g)与总有机碳含量之间呈现良好的正相关性; 地球化学分析表明, 富有机质页岩段有机质类型好(I型—II₁型), 具有高有机质丰度(TOC 平均值为 2.56%)和有机质成熟度(R_o 值为 2.5%)。综合研究认为, 燕子口地区以北与川东南古蔺—叙永一线接壤区带为五峰组—龙马溪组页岩气较为有利的勘探潜力区域。

关键词: 五峰—龙马溪组; 页岩气; 烃源岩; 黔西北

中图分类号: P618.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0049-16

The evaluation of shale gas source rocks in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Yanzikou area, northwest Guizhou

LAN Ye-fang¹, REN Chuan-jian¹, HUANG Yu², CHEN Hao¹ and REN Shu-ming¹

(1. School of Mining Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China; 2. College of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation is one of the main targets for shale gas exploration in southern China. In this paper, the authors studied the thickness and burial depth of the black shale in Yanzikou area of northwestern Guizhou and its key features of shale gas accumulation such as lithofacies characteristics, mineral composition, total organic carbon content, thermal maturity, storage space and physical properties. The results are as follows: ① The thickness of the Wufeng Formation can reach 20 m in western Yile area, while that of the Longmaxi Formation gradually increases from Qianzhong uplift northward, and its maximum thickness is over 250 m in Dingmu'ao-Daping area; ② Effective source rocks are mainly distributed in the lower part of Wufeng Formation and Longmaxi Formation, consisting of clay shale, silty shale and calcareous shale. They are mainly composed of clay minerals, quartz and carbonate minerals with high rock brittleness index (47.3%~76.8%), showing good fracturing ability; ③ Fractures, dissolved pores, intergranular pores, and intercrystalline

收稿日期: 2020-08-10; 接受日期: 2020-11-03; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2017]7017, [2016]7050, [2015]7590); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2017]1407); 高层次人才科研启动基金项目(院科合字 G2017006); 贵州省青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]283)

作者简介: 兰叶芳(1984-), 女, 副教授, 博士, 主要从事沉积地质学领域的教学和科研工作, E-mail: wssbdnn@163.com。

pores can be identified by SEM, among which dissolved pores and fractures are the main reservoir space. The reservoir has high porosity and shows a good correlation between the BET (13.4~24.9 m²/g) and the total organic carbon content; ④ Geochemical analysis shows that the organic-rich shale section has good types of organic matter, with high organic carbon content (2.56% on average) and organic matter maturity ($R_o=2.5\%$). According to comprehensive research, the north of Yanzikou area and the Gulin-Xuyong border area in southeastern Sichuan is a fairly favorable exploration potential area for Wufeng-Longmaxi shale gas.

Key words: Wufeng-Longmaxi Formation; shale gas; source rock; northwestern Guizhou

Fund support: Guizhou Province Science and Technology Cooperation Program Project (LH[2017]7017, [2016]7050, [2015]7590); Guizhou Science and Technology Program Project (Qiankehe Foundation [2017]1407); High-level Talent Research Startup Fund Project (G2017006); Guizhou Province Youth Science and Technology Talent Growth Project (KY [2016] 283)

上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组富有机质黑色页岩在黔西北地区广泛发育,页岩气资源潜力巨大(李双建等,2009;Liu *et al.*, 2016)。近年来的油气勘探表明,该套地层是我国南方海相页岩气勘探的主力烃源岩层位之一(张金川等,2008;邱振等,2020),以四川盆地及其周缘为研究重点,在储层特征、成藏基本条件、勘探评价、高产主控因素等方面取得了较大进展(Wang *et al.*, 2008;郭旭升,2014;马永生等,2018;梁峰等,2019)。由于储气的复杂性,烃源岩评价对于页岩气的勘探和开发至关重要(Pan *et al.*, 2015),而对页岩气气藏的评估是一项综合性的工作,依赖于基础地质、地球化学、地球物理和先进的工程技术(Zhai *et al.*, 2019),其中地质和地球化学分析是页岩气源岩评价最基础而又重要的方法(Chen *et al.*, 2011;邹才能等,2013)。目前,页岩气商业勘探开发较为成功的北美地区,已有的研究采用的评价参数主要包括总有机碳含量(TOC)和热成熟度、含气量以及矿物组成、孔隙度、渗透率和地层厚度等定性数据(Rimmer, 2004;Montgomery *et al.*, 2005;Ross and Bustin, 2007;Mastalerz *et al.*, 2018)。国内的研究和勘探开发实践中,这些关键评价指标已成功应用在涪陵气田(方栋梁等,2020)、四川盆地(Chen *et al.*, 2011;Li *et al.*, 2013;Pan *et al.*, 2015)、黔北等地区页岩气勘探的评估和“甜点”预测(Tenger *et al.*, 2006;史树勇等,2019)中。黔西北地区的页岩气勘探主要集中在遵义仁怀-习水地区以及务川-正安-道真一带(郭世钊等,2016),在龙马溪组页岩沉积、有机地球化学、储集性与含气性以及页岩气保存条件等方面均取得了诸多认识(赵磊等,2015;梁兴等,2020),研究程度较高,而毕节地区前期虽然进

行了区域性的页岩气地质资源勘查和地质基础研究,显示其具有页岩气资源潜力,但总体研究程度较低。随着页岩气勘探的不断推进,开展毕节地区页岩气源岩评价,有助于更好指导区内的页岩气勘探。因而,本文以黔西北毕节燕子口地区五峰-龙马溪组页岩为研究对象,通过区域地层厚度和埋深、露头剖面的观测、岩性组成和矿物学特征研究以及总有机碳含量、等效镜质体反射率等有机地球化学参数的获取,分析其源岩性质,欲为进一步评估该地区页岩气潜力提供基础资料和理论支持。

1 区域地质背景

研究区位于贵州西北部,与四川盆地毗邻,构造位置属于扬子板块西南缘的黔北斜坡(图1a)。自奥陶纪以来,黔西北地区经历了多期构造运动,其中奥陶纪末的都匀运动和志留纪末的广西运动控制了本区大型隆坳构造沉积格局,形成了对油气成藏具有重大意义的黔中古隆起(王津义等,2007)。晚奥陶世五峰期-早志留世初期,由于地壳抬升,黔中古陆扩大并与滇东古陆相连,仅黔北为海水淹没,形成了低能、缺氧的局限海环境,在黔中隆起以北的黔北斜坡和武陵坳陷沉积上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组地层(图1b)。五峰组以深水陆棚相黑色碳质泥页岩为主,地层厚度一般为5~8 m,向北略有增厚,而在五峰组沉积末期,赫南特冰期导致海平面大幅下降,沉积了观音桥段浅水陆棚相地层(张鹏,2015);随着黔中隆起的隆升,龙马溪组沉积中心北移,越靠近川南地区,沉积厚度逐渐增大(杨瑞东等,2012),而志留纪浮游植物的繁盛为富有机质黑色泥页岩发育提供了重要的物源条件。

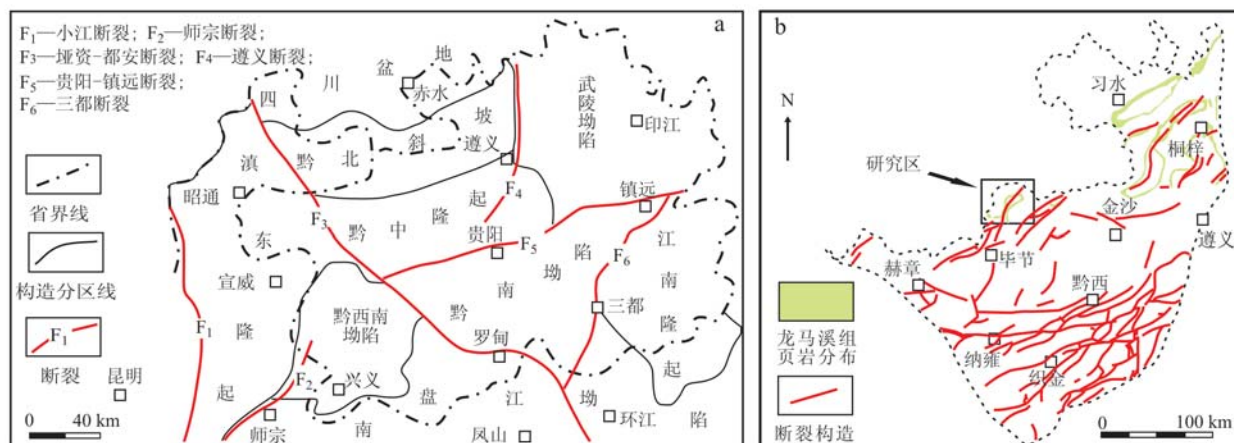


图1 贵州及其周围构造分区(a)和黔西北地区地质简图(b) [据郭世钊等(2016)、Liu等(2016)修改]

Fig. 1 Structural division of Guizhou and its adjacent areas (a) and geological map of northwestern Guizhou (b)
(modified after Guo Shizhao *et al.*, 2016 and Liu *et al.*, 2016)

2 样品和分析测试方法

研究区内目前尚无钻井,因而本文分析样品采集于黔西北燕子口镇的下水野外露头剖面(图2)。该剖面奥陶系-下志留统出露良好,地层界线清晰。五峰组下伏地层为上奥陶统涧草沟组,主要为深灰色薄-中厚层瘤状灰岩、粘土质灰岩;五峰组下部为黑色碳质页岩夹极薄层黄铁矿,富含笔石化石(图3a),其上部则发育80 cm左右的深灰色生物碎屑灰岩(图3b),属介壳相沉积,称之为观音桥段;龙马溪组宏观上由下至上岩石颜色逐渐变浅,碳质逐渐减少,钙质逐渐增多,下部为笔石含量丰富的黑色页岩,圆球状黄铁矿分布其中,微细层理发育(图3c、3d),而中上部则为灰色、灰黄色泥岩、钙质和/或粉砂质泥岩、泥灰岩以及泥质粉砂岩等组成(图3e、3f);龙马溪组上覆地层为下志留统石牛栏组灰色粘土质灰岩、生物碎屑灰岩。样品采集位置和分布情况如图4所示,总体而言五峰组和龙马溪组黑色页岩段采样密集,而其余层段采集相对稀疏。

所进行的分析则包括薄片鉴定、阴极发光分析、扫描电子显微镜分析(含能谱分析)、全岩和粘土矿物X射线衍射分析、残余总有机碳分析、镜质体反射率分析、比表面积和物性分析。薄片鉴定和阴极发光分析在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室进行,其余的各项分析在中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研

究所实验研究中心完成。需要说明的是,镜质体反射率是反映热成熟度的重要指标,但是下古生界页岩中缺乏来源于高等植物的标准镜质组,不存在真正意义上的镜质体(余川,2012),因此本文采用换算的等效镜质体反射率来表征页岩有机质成熟度。刘祖发等(1999)结合天然剖面 and 热模拟实验建立了早古生代类镜质体(或称之为镜状体)反射率(R_{om})与等效镜质体反射率(R_o)之间的换算公式: $R_o = 1.26 R_{om} + 0.21$ ($R_{om} < 0.75\%$), $R_o = 0.28 R_{om} + 1.03$ ($0.75\% < R_{om} < 1.5\%$), $R_o = 0.81 R_{om} + 0.18$ ($R_{om} > 1.5\%$)。使用上述公式,将类镜质体(镜状体)反射率(R_{om})转换为等效镜质体反射率(R_o),以供评估源岩和储层时使用。

3 矿物学特征和岩性组成

五峰组-龙马溪组岩石主要由粘土矿物、石英和碳酸盐矿物组成(表1、图5),其次含有长石、黄铁矿以及菱铁矿和极少量的石膏等矿物。粘土矿物含量为22.6%~50.8%(平均值41%),主要由伊利石和伊/蒙混层组成,绿泥石和高岭石相对少见(表1)。其中,伊利石在粘土矿物中的相对含量为22%~31%,伊/蒙混层为64%~71%,绿泥石3%~6%,石英含量为21%~41%,平均值29%。碳酸盐矿物主要包括方解石和白云石,方解石平均含量16.6%,最小值出现在五峰组页岩段顶部(0.4%),最大值出

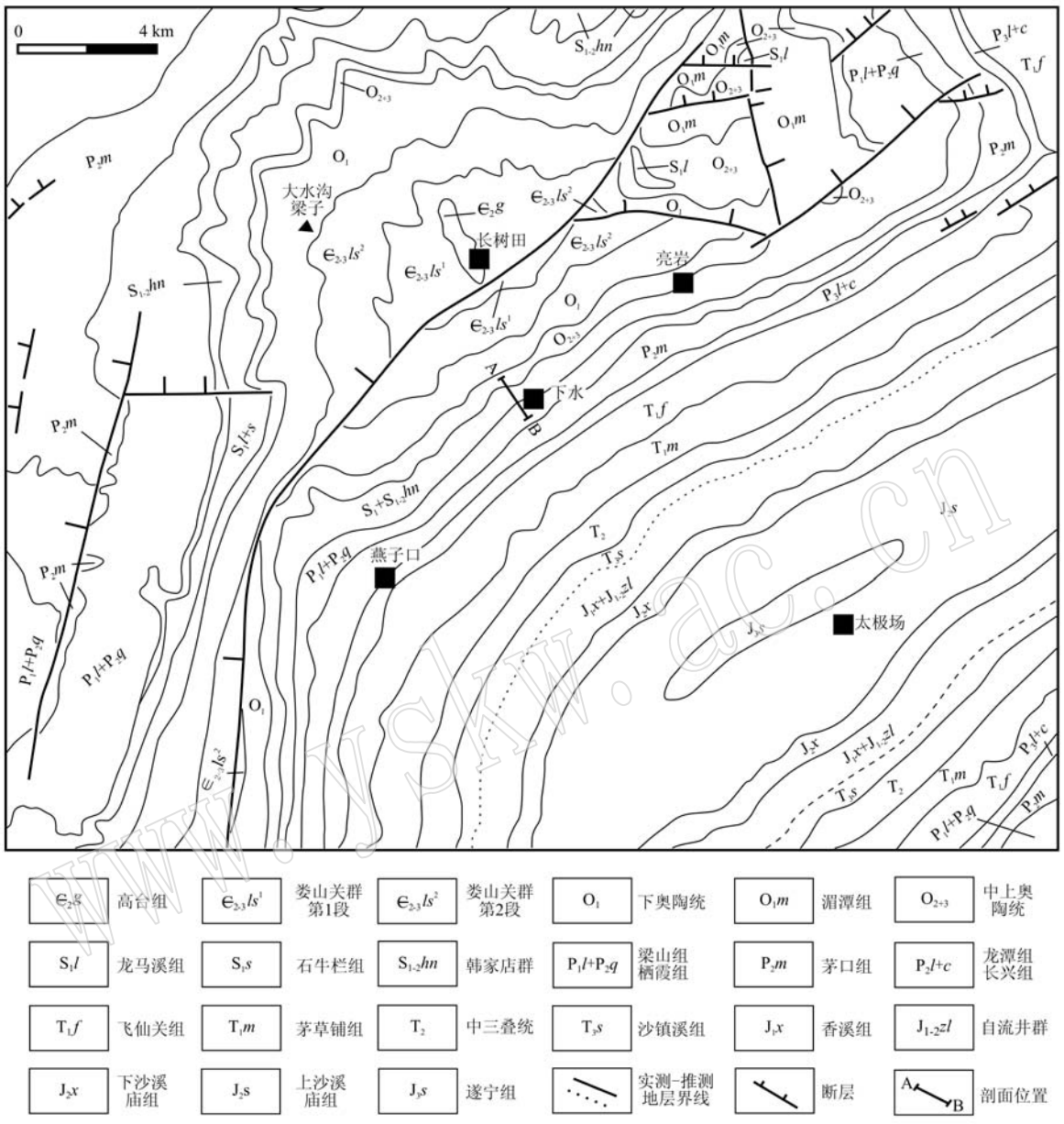


图 2 燕子口地区地质构造简图及下水剖面位置[据贵州 108 地质队(1976)修改绘制^①]
Fig. 2 Regional geological map of Yanzikou area and location of Xiashui section(modified after No. 108 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1976^①)

现在该地层段底部(31.7%);白云石含量为 0.1%~13.3%,平均值 4.7%。除此之外,长石总量(钾长石+斜长石)为 2%~10.7%,平均值 5.3%。总体而言,龙马溪组自下而上具有石英、长石和粘土矿物含量增加、碳酸盐矿物含量降低的总体趋势(图 5)。

页岩中脆性矿物主要包括石英、长石、碳酸盐矿物以及黄铁矿等,其含量高低直接影响到页岩压裂

效果(史树勇等,2019)。脆性指数是评价页岩可压裂性的重要参数,根据陈吉等(2013)总结的南方下古生界页岩脆性指数计算公式:脆性指数=(石英+长石+方解石+白云石)/(石英+长石+方解石+白云石+粘土矿物)×100%,下水剖面五峰-龙马溪组页岩的脆性指数为 47.3%~76.8%,平均值为 57.8%,较高的脆性指数显示优良的压裂性能。

① 贵州 108 地质队. 1976. 毕节幅 G-48-10 1:20 万区域地质测量报告.



图3 下水剖面五峰组-龙马溪组野外宏观特征

Fig. 3 Macroscopic characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation along the Xiashui section

a—五峰组黑色页岩, 页理构造发育; b—五峰组顶部观音桥段生屑灰岩与龙马溪组底部黑色页岩界线; c—龙马溪组黑色页岩有机质含量高, 富含笔石化石和球状黄铁矿结核; d—龙马溪组页岩中笔石含量丰富; e—龙马溪组中部灰色、灰黄色薄层泥页岩和薄-中层泥灰岩; f—龙马溪组中上部地层深灰色泥页岩地层与泥灰岩互层以及灰岩透镜体

a—black shale of Wufeng Formation with well-developed laminated structure; b—the boundary between bioclastic limestone at the top of Wufeng Formation and the black shale at the bottom of Longmaxi Formation; c—Longmaxi Formation black shale having high organic matter content, rich in graptolite fossils and spherical pyrite nodules; d—Longmaxi Formation shale, rich in graptolite; e—gray, grayish yellow thin-layer shale/mudstone and thin- to medium-layer muddy limestone in the middle part of Longmaxi Formation; f—dark gray shale interbedded with muddy limestone and limestone lenses in the middle and upper Longmaxi Formation

通过对露头样品的详细观察, 对薄片以及扫描电镜进行分析, 发现五峰组-龙马溪组发育页岩、泥岩、泥灰岩、粉砂岩等岩石类型。剖面从下至上, 陆源粉砂增加, 岩石颜色变浅。页岩中发育纹层及页

理构造, 高有机质含量层段主要分布在五峰组-龙马溪组下段, 是本文重点研究对象。根据主要矿物组成和混入物的化学成分等可将页岩进一步细分为粘土页岩、粉砂质页岩和钙质页岩。

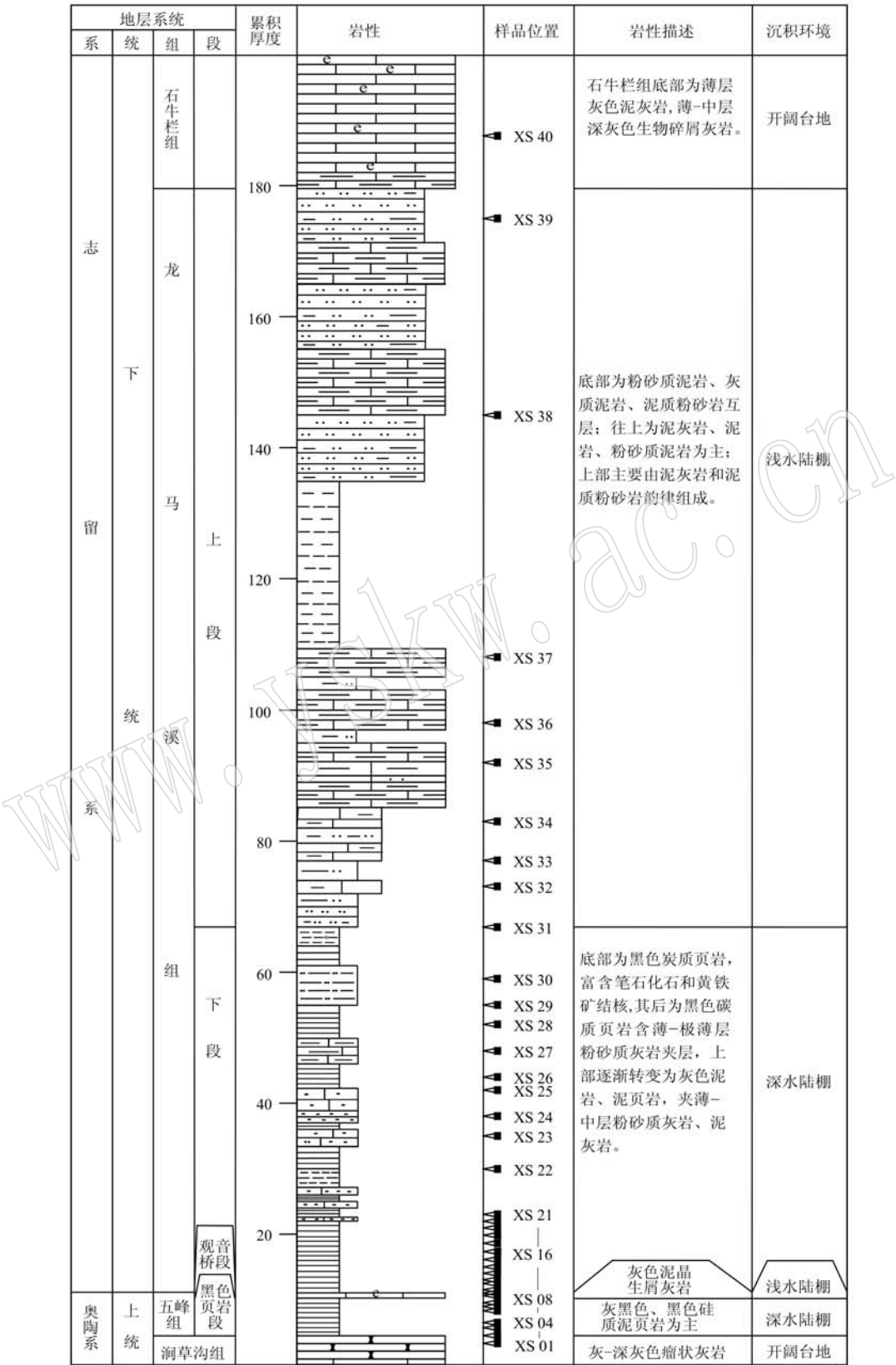


图 4 实测下水剖面五峰-龙马溪组剖面柱状图
Fig. 4 Columnar section of Wufeng-Longmaxi Formation measured in Xiashui

表 1 五峰-龙马溪组全岩和粘土矿物 X 射线衍射 (XRD) 分析结果

Table 1 X-ray diffraction analysis results of whole rocks and clay minerals of Wufeng-Longmaxi Formation

样号	地层	矿物在岩石中的质量分数/%								粘土矿物组分及其相对含量/%				
		粘土矿物	石英	长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	其它	伊/蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	绿/蒙混层
XS04	五峰组	22.6	22.4	7.3	31.7	13.3	0.8	1.3	0.6	65	30		5	
XS07	五峰组	50.4	41.6	4.6	0.4	0.8	0.6	0.6	1.0					
XS10	龙马溪组下段	33.2	34.1	4.2	12.5	9.8	1.0	3.1	2.1	67	29	1	3	
XS12	龙马溪组下段	37.3	26.6	4.2	21.1	6.3	0.6	2.5	1.4	64	31	1	4	
XS14	龙马溪组下段	37.9	24.4	2.6	20.1	10.5	1.3	2.5	0.7	66	29		5	
XS16	龙马溪组下段	38.1	21.1	2.0	29.5	5.3	0.3	2.5	1.2	71	22	1	6	
XS21	龙马溪组下段	44.1	24.0	6.2	20.9	0.5	0.8	2.7	0.8	70	27		3	
XS25	龙马溪组下段	41.7	35.3	7.9	13.0	0.2	0.5	0.5	0.9	68	25		3	4
XS26	龙马溪组下段	50.8	33.6	3.3	8.1	0.6	1.4	1.5	0.7					
XS28	龙马溪组下段	50.3	26.3	10.7	9.1	0.1	1.0	1.6	0.9	68	26		6	

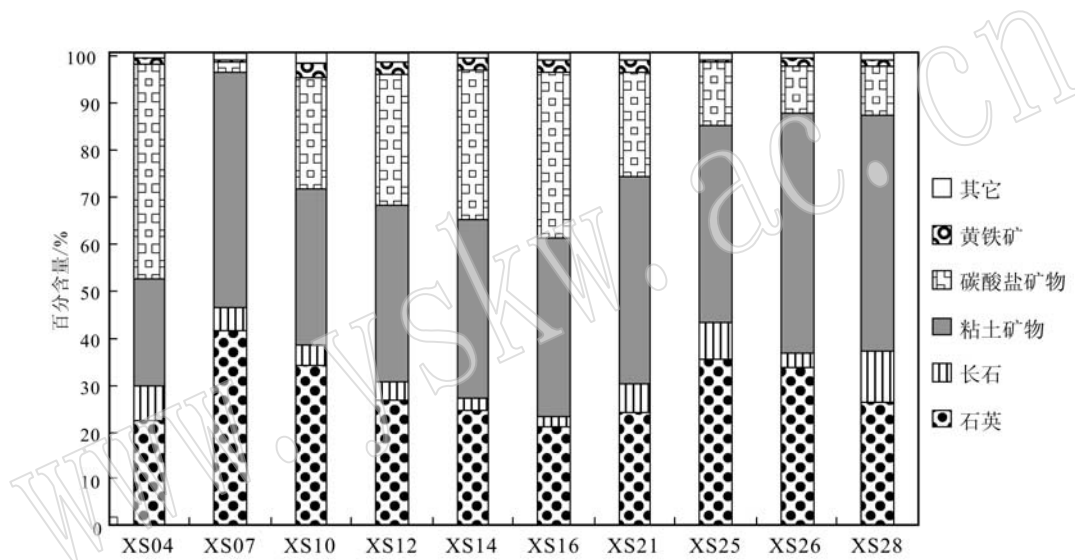


图 5 五峰-龙马溪组全岩矿物组成分布直方图

Fig. 5 Histogram of mineral composition distribution of whole rocks in Wufeng-Longmaxi Formation

粘土页岩因含较多的有机质而呈黑色-灰黑色, 又可称为黑色页岩, 其中粘土矿物占主导, 少量粉砂质陆源石英和长石呈漂浮状分布在粘土矿物间 (图 6a), 黑色页岩中笔石化石保存良好 (图 6b), 并含有黄铁矿 (图 6c)。粘土页岩沉积在深水环境中, 水动力条件较弱, 陆源输入有限。

粉砂质页岩为灰黑色, 层状。浅色纹层主要是石英和长石, 深色纹层主要是富含有机质的粘土矿物, 常含有碳酸盐矿物。碎屑颗粒浮在粘土矿物之间 (图 6d)。

钙质页岩主要发育水平层理, 方解石含量约占 20%~40%。碳酸盐矿物 (方解石和白云石) 显示橘红色的阴极发光, 而粘土矿物和石英不具阴极发光, 陆源长石颗粒为淡蓝色阴极发光特征 (图 6e、6f)。

4 有机地球化学特征

4.1 有机质类型和丰度

前人已对黔西北及邻近地区五峰-龙马溪组有机质类型进行了大量研究。在川东南-黔西北地区, 龙马溪组页岩样品中总有机质的碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}$) 处于 $-31\text{‰} \sim -28\text{‰}$ 区间 (周传祯, 2008; 郑益军, 2017), 从这个角度来看, 有机质类型是 I 型 (腐泥型)。此外, 尽管显微组分之间存在差异, 但其他研究也证明了研究区富有机质页岩的有机质类型以 I 型-II₁ 型为主 (杨瑞东等, 2012; 邢雅文, 2013; 杨光庆, 2013; 张鹏等, 2016)。有机物的来源主要由藻类、浮游动物和真菌组成, 形成了大部分非晶态的有机化学物质。由于奥陶纪-志留纪没有演化出

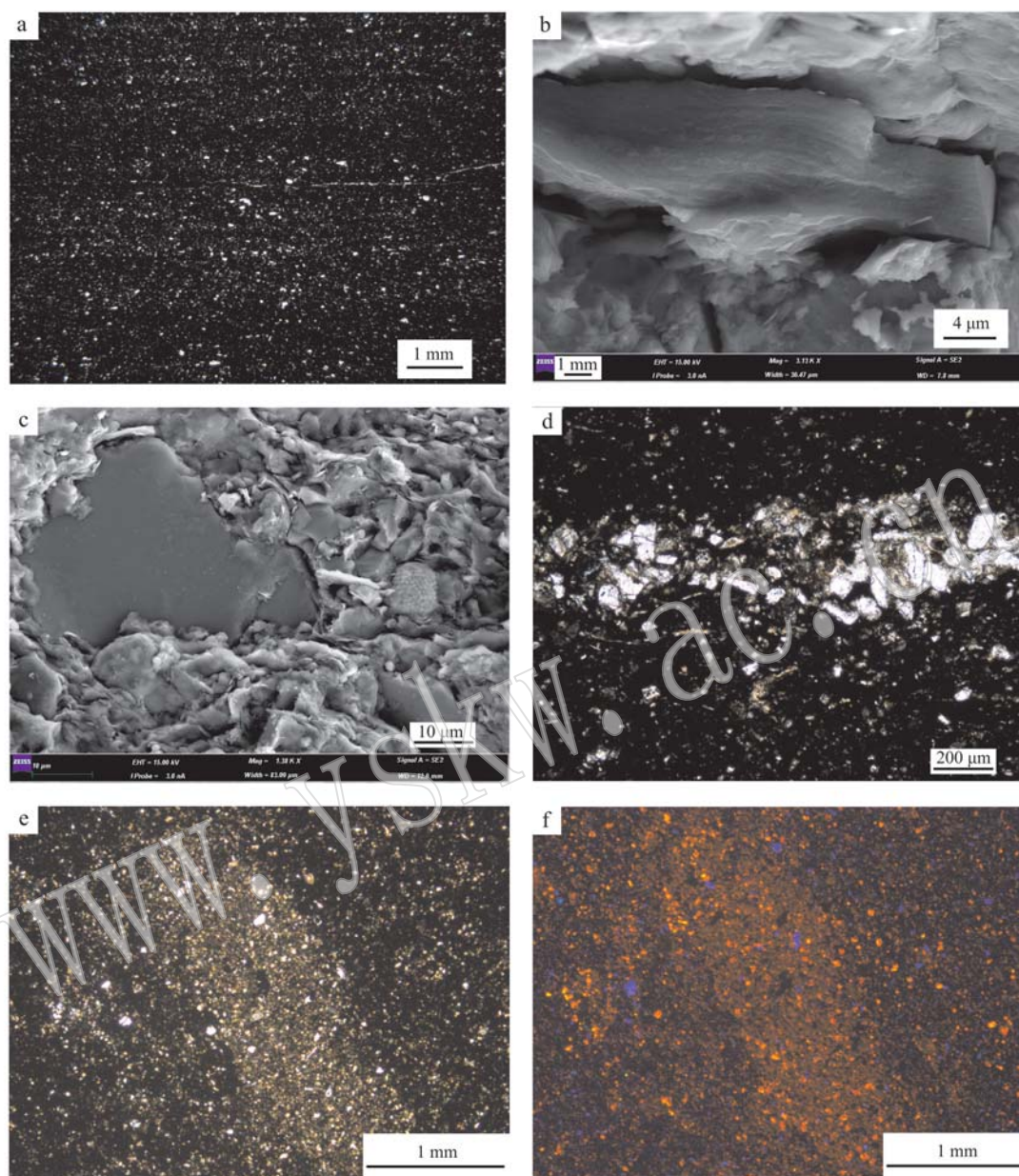


图6 五峰-龙马溪组页岩的微观特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation shale

a—粘土页岩,富含有机质,极少量陆源碎屑矿物呈漂浮状分布,XS10,单偏光;b—条带状有机质(笔石)顺层分布,矿物的组分间隙见断裂缝,笔石内部发育层状结构,XS05,扫描电镜;c—碎屑颗粒分布于粘土矿物中,见霉球状黄铁矿发育,XS10,扫描电镜;d—粉砂质页岩,明亮纹层由陆源石英和长石颗粒组成,暗色纹层为富含有机质的粘土矿物,XS04,单偏光;e—钙质页岩,方解石矿物颜色较浅,粘土矿物中有机质分布,XS12,单偏光;f—为e对应的阴极发光照片,方解石为橘红色阴极发光,粘土矿物和石英等不发光,长石显示淡蓝色阴极发光

a—clay shale, rich in organic matter, with a very small amount of terrigenous detrital minerals in floating distribution, XS10, plainlight; b—banded organic matter (graptolite) distributed along the layer, with mineral interstices and fractures, and layered structure inside the graptolite, XS05, SEM; c—detrital particles distributed in clay minerals, and mold globular pyrite well developed, XS10, SEM; d—silty shale, the bright laminae composed of terrigenous quartz and feldspar particles, and the dark laminae being clay minerals rich in organic matter, XS10, plainlight; e—calcareous shale, calcite minerals lighter in color, and organic matter distributed in clay minerals, XS12, plainlight; f—cathodoluminescence photo corresponding to e, calcite showing orange-red cathodoluminescence, clay minerals and quartz having no cathodoluminescence, and feldspar showing light blue cathodoluminescence

陆地上的高等植物,因此页岩中的有机物主要由浮游生物控制。这也许可以更好地解释有机物主要由Ⅰ型油质干酪根和Ⅱ₁型所主导,具有很强的生烃能力。

有机质丰度是指单位质量岩石内所含有有机质的数量。同等或类似的地质条件下,有机质含量越高,岩石的生烃能力越强。目前常用氯仿沥青“A”、总烃(HC)和生烃潜量(S1+S2)、总有机碳含量(TOC)等反映岩石中的有机质丰度。由于黔西北地区五峰-龙马溪组页岩成熟度高,受生烃和排烃影响,前几个指标难以准确指示其生烃能力(余川, 2012),因而选择能够近似代表岩石原始有机质丰度的 TOC 作为评价烃源岩及其生烃能力的有效指标。

通过实验分析,燕子口下水剖面五峰-龙马溪组

下段 TOC 平均值为 2.56%,显示出较高的有机质丰度(表 2)。根据高成熟地区海相烃源岩有机碳丰度评价标准(戴鸿鸣等, 2008),其烃源岩级别高,具有相对较好的生烃能力。但是,TOC 纵向分布不均,具体表现为五峰组和龙马溪组底部富笔石页岩段 TOC 集中在 2%~5%之间,而龙马溪组由下至上 TOC 呈现出逐渐变小的趋势,由底部的 5.2%(XS10)减小至 0.38%(XS28),与野外观察到的岩石颜色逐渐变浅的特征相吻合。TOC 的这种纵向变化与总有机硫以及干酪根的富集程度相一致(图 7)。总体上,具备良好生烃潜力(TOC 大于 2%)的黑色页岩主要分布在五峰组和龙马溪组下段的中下部地层(图 7),属于好的烃源岩。同处黔北斜坡的习水吼滩剖面以及丁山1井的有机质丰度表现出同样的变化规

表 2 五峰-龙马溪组有机地球化学参数
Table 2 Organic geochemical parameters of Wufeng-Longmaxi Formation

样号	地层	干酪根富集/g	TOC/%	总有机硫/%	$R_{\text{m}}/\%$	$R_{\text{o}}/\%$
XS03	五峰组	0.832 3	3.67	1.13	2.95	2.57
XS04	五峰组	0.614 6	3.61	0.90	3.02	2.63
XS05	五峰组	0.526 3	3.41	0.73	2.85	2.49
XS07	五峰组	0.229 9	2.89	0.04		
XS10	龙马溪组下段	1.403 2	5.20	2.07	3.04	2.64
XS12	龙马溪组下段	0.818 5	3.43	1.26	2.86	2.50
XS14	龙马溪组下段	0.589 5	2.95	1.19	2.95	2.57
XS16	龙马溪组下段	0.543 1	2.33	1.13	2.94	2.56
XS21	龙马溪组下段	0.139 4	1.37	0.90	2.82	2.46
XS25	龙马溪组下段		0.51	0.03		
XS26	龙马溪组下段	0.021 0	0.94	0.02	2.98	2.59
XS28	龙马溪组下段		0.38	0.45		

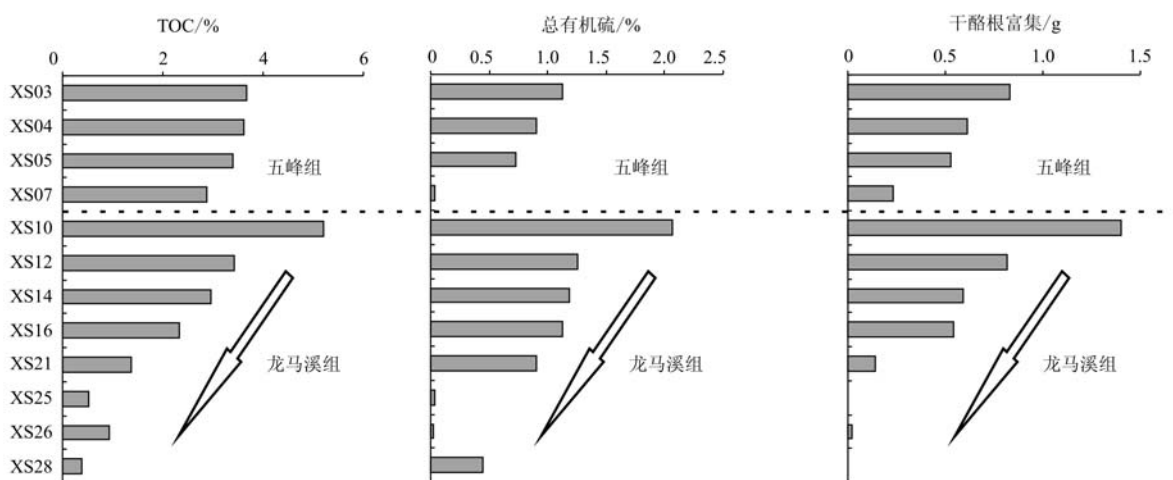


图 7 下水剖面五峰-龙马溪组总有机碳、总有机硫和干酪根富集程度的纵向变化图

Fig. 7 Longitudinal variation of total organic carbon, total organic sulfur and kerogen enrichment of Wufeng-Longmaxi Formation in Xiashui section

律(余川, 2012),而位于黔中地区的习页 1 井和桐页 1 井的高 TOC 也主要集中在龙马溪组下段,如习页 1 井在井深 630~650 m 之间的 TOC 平均值为 3.84%,而在小于 630 米的上部地层其 TOC 均小于 1%(薛志鹏, 2016)。区域上 TOC 的这种纵向变化规律主要是由于龙马溪组早期为低能的强还原环境,而随着海平面的有所下降,龙马溪晚期沉积环境也逐渐趋于氧化(戎嘉余等, 2011)。

4.2 有机质成熟度

研究区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩在沉积后经历了加里东、海西、印支、燕山-喜山运动等多期构造运动的改造,热演化史复杂,页岩热演化程度普遍偏高。分析结果显示,下水剖面五峰组-龙马溪组页岩等效镜质体反射率纵向变化不大,均在 2.5% 左右(表 2),根据中国南方黑色页岩成熟阶段划分标准(聂海宽等,2012),属于过成熟早期的干气阶段(图 8),烃源岩主要产生干气(甲烷)并伴有

少量的凝析气(Chen *et al.*, 2011)。冯常茂等(2008)根据均一法测温和激光拉曼探针技术对黔中隆起及其周缘地区震旦系-志留系含油气流体包裹体研究也表明,该区具明显干气特征,烃类成分以 CH₄ 为主,大量的气体可能主要是由热成熟区的原油二次裂解产生的(Hunt, 1996; Mastalerz *et al.*, 2013),这类似于多产的 Barnett 页岩,其气源也被认为是由石油和沥青的二次裂解形成(Montgomery *et al.*, 2005)。因此,尽管较高的热成熟度,古蔺-叙永一线以南和黔中隆起以北的地区(包含研究区)五峰-龙马溪组页岩仍然具备较大的生烃潜力。

5 储集空间和储层性质

5.1 储集空间类型和特征

薄片和扫描电子显微镜图像(SEM)的分析表明,龙马溪组页岩的储集空间由裂缝、溶蚀孔以及粒

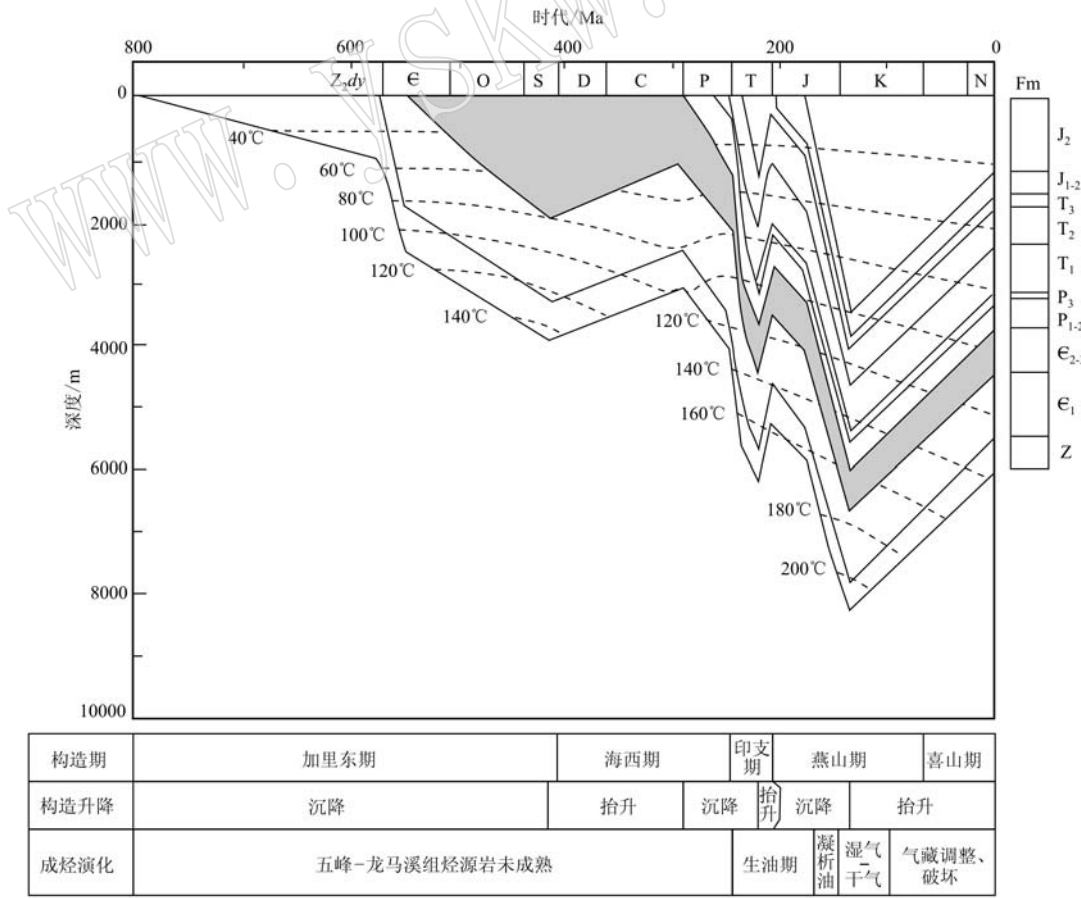


图 8 黔西北地区埋藏-生烃史图(埋藏史据冯常茂等, 2008)
Fig. 8 Burial-hydrocarbon generation history in northwestern Guizhou (burial history after Feng Changmao *et al.*, 2008)

间孔和晶间孔等微米-纳米级孔隙组成。

(1) 裂缝

裂缝是燕子口地区五峰-龙马溪组页岩中常见的储集空间类型,包括层间裂缝、顺层裂缝和斜交层理的裂缝(图9a~9c)。层状裂缝发生在页岩内的软弱界面处,如常发育在粘土层和粉砂质层或钙质层之间。裂缝可能构成页岩气系统中的重要储集空间

和运移路径,对页岩气的产生有重要影响(Gale *et al.*, 2007; Loucks *et al.*, 2012)。

(2) 溶蚀孔

化学不稳定矿物由于后期溶蚀作用而产生的次生溶蚀孔隙是另一重要的储集空间,最为常见的是碳酸盐矿物(尤其是白云石)和长石的溶蚀孔隙(图9d、9e)。

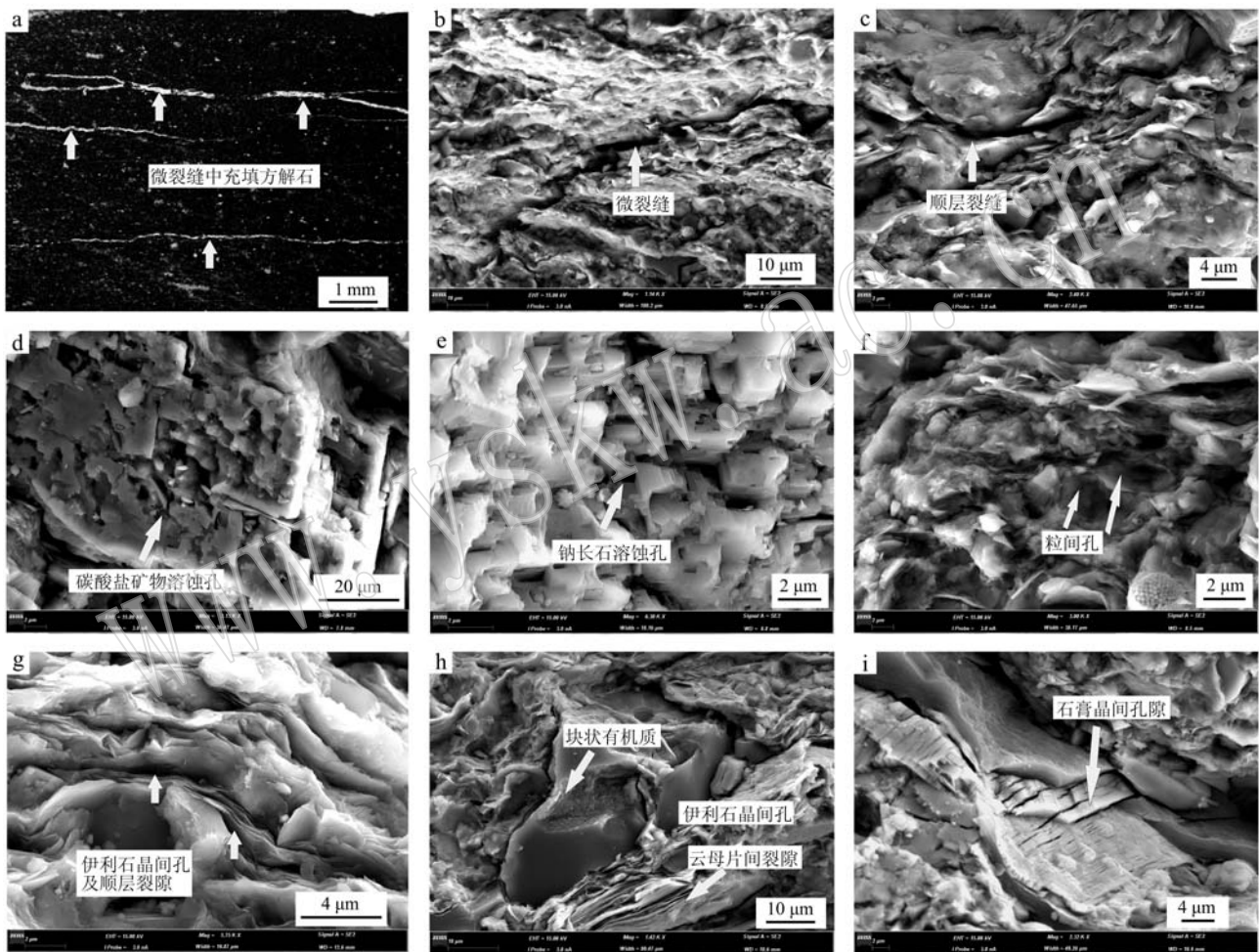


图9 五峰-龙马溪组主要储集空间类型

Fig. 9 The main pore types in Wufeng-Longmaxi Formation

a—黑色页岩中发育的与页理大致平行的微裂缝,裂缝中充填方解石,XS07,普通薄片,单偏光;b—微米级斜交层理方向的微裂缝及层间裂隙,XS04,SEM;c—顺层裂缝发育,XS12,SEM;d—碳酸盐矿物溶蚀严重,溶蚀孔发育,XS05,SEM;e—钠长石及其溶蚀孔,XS16,SEM;f—微纳米级矿物(钾长石、钠长石、石英等)与粘土矿物间发育的粒间微孔隙,XS04,SEM;g—粘土矿物晶间孔隙及顺层裂隙,XS05,SEM;h—块状有机质、云母片间缝隙、伊利石晶间孔隙,XS25,SEM;i—石膏及其晶间孔隙,XS12,SEM

a—micro-fractures developed in black shale that are roughly parallel to the shale, filled with calcite, XS07, plainlight; b—micro-cracks and interlayer fractures in the micron-level oblique bedding direction, XS04, SEM; c—fractures along the layer, XS12, SEM; d—high dissolution of carbonate minerals to form dissolution pores, XS05, SEM; e—albite and its dissolution pores, XS16, SEM; f—intergranular micropores between micro-nano size minerals (potash feldspar, albite, quartz, etc.) and clay minerals, XS04, SEM; g—clay minerals intercrystalline pores and bedding cracks, XS05, SEM; h—massive organic matter, intercrystalline pores of mica and illite, XS25, SEM; i—gypsum and its intercrystalline pores, XS12, SEM

(3) 粒间孔

粒间孔发育在粘土矿物、石英、长石和黄铁矿等矿物之间,也有可能出现在受应力影响的颗粒边缘。这些颗粒之间孔隙的发育有助于改善页岩的储层孔隙度,同时脆性颗粒(石英、长石等)的存在有助于提高页岩在储层发育过程中的破裂潜力。一般情况下,随着埋深加大,压实作用的增强,粒间孔呈现不断减少的趋势,因而观察到的实际上为残留的粒间孔(图 9f)。

(4) 晶间孔

晶间孔隙主要存在于粘土矿物和霉球状黄铁矿等矿物晶体中。在研究区,五峰-龙马溪组页岩中的粘土矿物由伊利石和伊/蒙混层组成(表 1)。在伊利石化过程中,可能会形成直径数微米至数十微米的微孔。粘土矿物中发育的晶间孔隙大小多分布在 2~6 μm 之间(图 9g, 9h)。也有研究认为,黄铁矿中的晶间孔足够大,可以储存气体分子(Slatt and O'Brien, 2011; Loucks *et al.*, 2012),而在此次研究的五峰-龙马溪组页岩中黄铁矿相对丰富,存在一定的晶间孔。同时,在龙马溪组中可见少量的石膏晶间孔隙发育(图 9i)。

5.2 储层性质

五峰-龙马溪组下段页岩孔隙度为 8.04%~16.45%(表 3),显示很高的孔隙度值。但是,由于采集的是露头样品,氧化作用会导致孔渗的增大(Liu *et al.*, 2016),同时部分测试样品沿层开裂比较明显,因而导致测试结果比真实值大大偏高。此外,由不稳定矿物(如长石和方解石)溶解而产生的次生孔隙构成了页岩储层的储集空间的一部分(图 9d, 9e),也增加了页岩的孔隙度。虽然绝对值不可

靠,但仍然可显示该层段页岩具有相对较好的物性。

页岩气主要以吸附态和游离态为主,比表面积是衡量页岩储层吸附能力的重要物理参数。比表面积(BET)是指 1 g 固体所占有的总表面积,比表面积越大吸附能力越强(魏红霞, 2018)。五峰组-龙马溪组下段页岩样品的 BET 平均值为 20.88 m^2/g ,其中五峰组 BET 为 23.6~24.9 m^2/g (平均值为 24.3 m^2/g),龙马溪组下段 BET 为 13.4~22.5 m^2/g (平均值为 19.5 m^2/g),并且五峰组至龙马溪组下段,页岩样品的总比表面积从下至上逐渐减少,显示页岩储层吸附能力逐渐减弱的特征。总体上, BET 与 TOC 及全岩中的碳酸盐矿物含量之间均呈现良好的正相关关系(相关系数分别为 0.76 和 0.90,图 10a、10c),而与粘土矿物含量之间则表现为明显的负相关性(图 10b),显示 TOC 和碳酸盐矿物含量在黑色页岩的 BET 中起决定性作用。已有的研究表明, TOC 对 BET 的控制作用要强于粘土矿物含量对 BET 的影响,通常是页岩中粘土矿物的含量低, TOC 相对较高(Ross and Bustin, 2009; 曹晓萌等, 2014),这与本文研究所得出的 TOC 和粘土矿物含量之间的负相关性一致(图 10d)。实际上, TOC 随着碳酸盐矿物含量尤其是白云石含量的增加而增加(图 10e、10f),因而燕子口地区白云石的发育程度是 TOC 高低和 BET 大小的重要指标。

6 页岩的有效厚度和埋藏深度

页岩的厚度是具有商业开发价值的页岩气积聚的前提。美国的勘探经验表明,在满足总有机碳含量、成熟度和易压裂矿物含量等方面要求的情况下,能够满足页岩气勘探要求的黑色页岩最小厚度大约为 30 m(Zhang *et al.*, 2007; 邹才能等, 2010)。在研究区域中,五峰组页岩整体厚度较小,南北及东部均比较薄,多为 3~10 m,西部相对较厚,多在 10 m 以上,以勒地区厚度可达 20 m;而龙马溪组呈现由北向南逐渐减薄直至尖灭的厚度变化规律,在云南和四川丁木坳-大坪一线厚度在 250 m 以上,向南地层厚度递减,靠近黔中隆起的常家沟-鹦母嘴-清池一线地层尖灭,相应地龙马溪组下部黑色富有机质页岩段也呈现出类似的变化规律(图 11)。富含有机质区域的横向分布在一定程度上与地层的厚度有关,二者均主要在南北方向上变化(Liang *et al.*, 2008)。对于埋藏深度而言,研究区下志留统页岩最

表 3 五峰组-龙马溪组储层性质参数
Table 3 Reservoir properties parameters of Wufeng Formation-Longmaxi Formation

样号	地层	BET/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔隙 度/%	视密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	备注
XS03	五峰组	23.566	9.40	2.48	
XS04	五峰组	24.857	8.04	2.49	
XS05	五峰组	21.210			
XS10	龙马溪组下段	22.114	12.34	2.37	
XS12	龙马溪组下段		10.27	2.45	
XS14	龙马溪组下段	22.531	9.60	2.48	孔隙度测试
XS16	龙马溪组下段	21.778	14.97	2.37	样品沿层开
XS21	龙马溪组下段	17.544	16.45	2.32	裂较明显
XS26	龙马溪组下段	13.435			

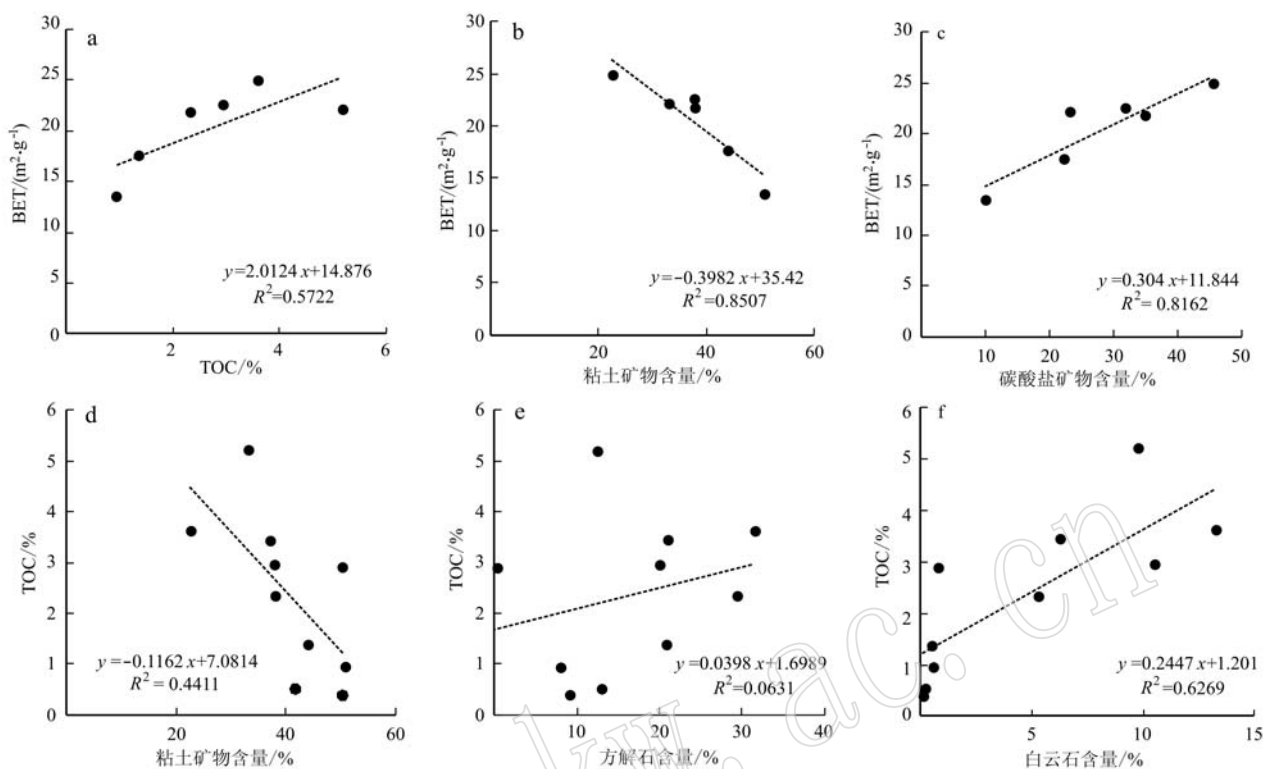
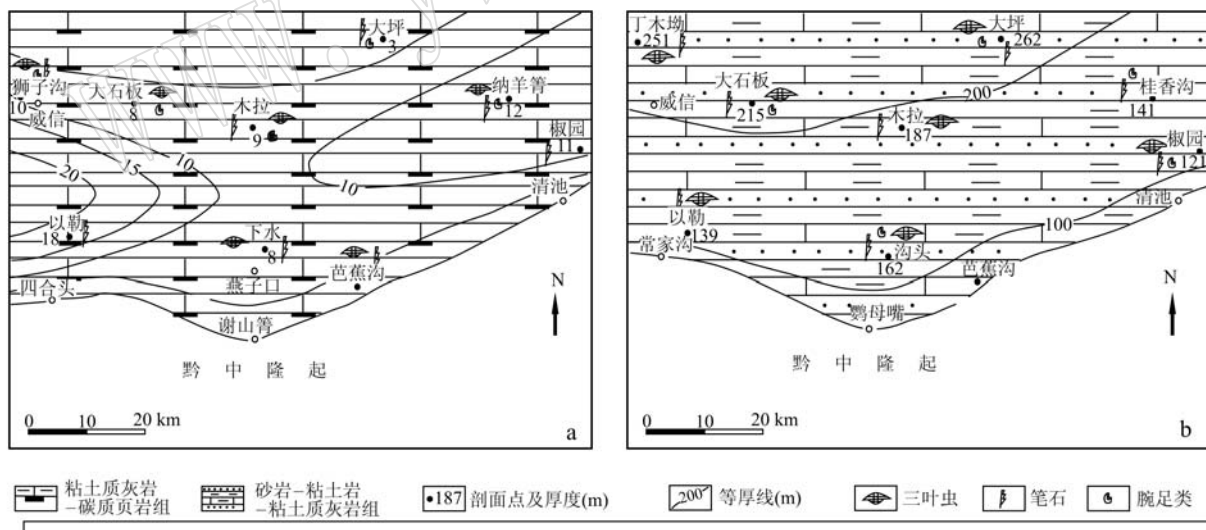


图 10 BET、TOC 与粘土矿物和碳酸盐矿物含量的相关性图解

Fig. 10 Cross plot of BET, TOC, and the content of clay minerals and carbonate minerals

图 11 燕子口地区及其周缘五峰组(a)和龙马溪组(b)地层等厚线图[据贵州省地质局(1979)^①修改]Fig. 11 Stratigraphic contour map of Wufeng Formation (a) and Longmaxi Formation (b) in Yanzikou area and its adjacent areas (modified after Guizhou Bureau of Geology, 1979)^①

大理深小于 4 000 m, 部分在 1 000 m 以下(余川, 2012), 具有相对合适的埋藏深度。因此, 从地层埋

深以及黑色页岩的有效厚度角度而言, 燕子口地区以北与四川接壤的区域更有利于五峰-龙马溪组的

① 贵州省地质局. 1979. 区域地质调查报告(威信幅).

页岩气勘探。

7 结论

黔西北燕子口地区五峰组-龙马溪组下段为富有机质潜力烃源岩层段,有机质类型好(I型-II₁型),TOC高(主分布区间为2%~4%),有机质热演化程度属于过成熟早期的干气阶段(R_o 约为2.5%),仍具备一定的生烃能力。该套地层以溶蚀孔隙和裂缝为主要的储集空间,储层孔隙度高,同时脆性矿物含量高(脆性指数为47.3%~76.8%),有利于人工裂缝的产生和提高岩石压裂性能。结合区域埋藏热史分析和地层的区域展布特征,认为五峰组-龙马溪组页岩气较为有利的勘探潜力区域位于与川东南接壤的燕子口以北地区。

References

- Cao Xiaomeng, Yu Bingsong, Li Xintong, *et al.* 2014. Reservoir characteristics and evaluation on logging of the Lower Cambrian gas shale in southeast Chongqing: A case study of Well Yuke 1 and Well Youke 1 [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2): 233~244 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ji and Xiao Xianming. 2013. Mineral composition and brittles of three sets of Paleozoic organic-rich shales in China South Area [J]. *Journal of China Coal Society*, 38(5): 822~826 (in Chinese with English abstract).
- Chen S B, Zhu Y M, Wang H Y, *et al.* 2011. Shale gas reservoir characterization: A typical case in the southern Sichuan Basin of China [J]. *Energy*, 36(11): 6 609~6 616.
- Dai Hongming, Huang Dong, Liu Xuning, *et al.* 2008. Characteristics and evaluation of marine source rock in southwestern Shunan [J]. *Natural Gas Geoscience*, 19(4): 503~508 (in Chinese with English abstract).
- Fang Dongliang and Meng Zhiyong. 2020. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: A case study of Wufeng-Longmaxi Formations in Fuling area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(1): 37~41 (in Chinese with English abstract).
- Feng Changmao, Niu Xinsheng and Wu Chonglong. 2008. A study of hydrocarbon fluid inclusions in Qianzhong uplift and its adjacent areas [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 121~126 (in Chinese with English abstract).
- Gale J F W, Reed R M and Holder J. 2007. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. *AAPG Bulletin*, 91: 603~622.
- Guo Shizhao, Guo Jianhua, Liu Chensheng, *et al.* 2016. Shale gas accumulation potential of Lower Silurian Longmaxi Formation in northern Guizhou [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(6): 1 973~1 980 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng. 2014. 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*, 88(7): 1 209~1 218 (in Chinese with English abstract).
- Hunt J M. 1996. *Petroleum Geochemistry and Geology* [M]. New York: Freeman and Company, 186.
- Li Shuangjian, Xiao Kaihua, Wo Yujin, *et al.* 2009. Palaeo-environment restoration of Upper Ordovician-Lower Silurian hydrocarbon source rock in Middle-Upper Yangtze area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 450~458 (in Chinese with English abstract).
- Li Y J, Liu H, Zhang L H, *et al.* 2013. Lower limits of evaluation parameters for the Lower Paleozoic Longmaxi shale gas in southern Sichuan Province [J]. *Science China Earth Sciences*, 56(5): 710~717.
- Liang Feng, Zhang Qin, Xiong Xiaolin, *et al.* 2019. Sedimentary evolution model of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi organic-rich shale in the Sichuan Basin and its surrounding area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(4): 847~857 (in Chinese with English abstract).
- Liang D G, Guo T L, Chen J P, *et al.* 2008. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 1): Distribution of four suits of regional marine sourcerocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 13(2): 1~16.
- Liang Xing, Zhang Tingshan, Shu Honglin, *et al.* 2020. Evaluation of shale gas resource potential of Longmaxi Formation in Zhaotong national shale gas demonstration area in the northern Yunnan-Guizhou [J]. *Geology in China*, 47(1): 72~87 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Zhang J C, Tang X, *et al.* 2016. Weathering characteristics of the Lower Paleozoic black shale in northwestern Guizhou Province, south China [J]. *Journal of Earth System Science*, 125(5): 1 061~1 078.
- Liu Zufa, Xiao Xianming, Fu Jiamo, *et al.* 1999. Marine vitrinite reflectance as a maturity indicator of Lower Palaeozoic hydrocarbon source rocks [J]. *Geochimica*, 28(6): 580~588 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu and Zhao Peirong. 2018. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Mastalerz M, Drobnicka A and Stankiewicz A B. 2018. Origin, proper-

- ties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 195: 14~36.
- Mastalerz M, Schimmelmann A, Drobnik A, *et al.* 2013. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. *AAPG bulletin*, 97(10): 1 621~1 643.
- Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, *et al.* 2005. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. *AAPG Bulletin*, 89 (2): 155~175.
- Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, *et al.* 2012. Accumulation system for shale gas from Upper Ordovician to Lower Silurian in Sichuan Basin and surrounding areas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 34 (2): 115~119 (in Chinese with English abstract).
- Pan S Q, Zou C N, Yang Z, *et al.* 2015. Methods for shale gas play assessment: A comparison between Silurian Longmaxi shale and Mississippian Barnett shale[J]. *Journal of Earth Science*, 26(2): 285~294.
- Qiu Zhen, Zou Caineng, Wang Hongyan, *et al.* 2020. Discussion on characteristics and controlling factors of differential enrichment of Wufeng-Longmaxi formations shale gas in South China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(2): 163~175 (in Chinese with English abstract).
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shale, Central Appalachian Basin (USA) [J]. *Chemical Geology*, 206(3~4): 373~391.
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi, *et al.* 2011. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 41 (10): 1 407~1 415 (in Chinese).
- Ross D J K and Bustin R M. 2007. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 55 (1): 51~75.
- Ross D J K and Bustin R M. 2009. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6): 916~927.
- Shi Shuyong, Sun Yu, Guo Huijuan, *et al.* 2019. Geochemistry and thermal evolution of Wufeng-Longmaxi shale and its prospect in the Xishui Area, North Guizhou[J]. *Geochemica*, 48(6): 567~579 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Tenger, Gao C L, Hu K, *et al.* 2006. High-quality source rocks in the lower combination in southeast upper-Yangzi area and their hydrocarbon generating potential[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 28 (4): 359~365.
- Wang Jinyi, Fu Xiaoyue, Pan Wenlei, *et al.* 2007. Research of Lower Palaeozoic cap Formation in the northwest of Guizhou province[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 29 (5): 477~481 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q C, Yan D T and Li S J. 2008. Tectonic-Environmental model of the Lower Silurian high-quality hydrocarbon source rocks from South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(3): 289~297.
- Wei Hongxia. 2018. Reservoir Conditions of Anchang Synclinal in Wuling Area of North Guizhou[D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Xing Yawen. 2013. Gas-bearing Ability Evaluation of Shale in Northwest Guizhou[D]. China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Xue Zhipeng. 2016. Pore Characteristics of the Longmaxi Gas Shale from Northwest Guizhou and Controlling Factors[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yang Guangqing. 2013. Evaluation and Genetic Analysis of the Shale Gas Source Rock in Northwest Region of Guizhou[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Chen Wei and Zhou Ruxian. 2012. Characteristics of organic-rich shale and exploration area of shale gas in Guizhou province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 23 (2): 340~347 (in Chinese with English abstract).
- Yu Chuan. 2012. Analysis on Accumulation Conditions and Resource Potential of Lower Silurian Shale Gas in Southeastern Sichuan[D]. Southwest Petroleum University (in Chinese with English abstract).
- Zhang J C, Xu B, Nei H K, *et al.* 2007. Two essential gas accumulations for natural gas exploration in China[J]. *Natural Gas Industry*, 27 (11): 1~6.
- Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, *et al.* 2008. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 28(2): 151~156 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peng. 2015. The Control Mechanism and Application of Sedimentary Environment for the Shale Gas Accumulation[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peng, Zhang Jinchuan, Liu Hong, *et al.* 2016. Accumulation conditions of shale gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in Guizhou[J]. *Journal of Central South University (Science Technology)*, 47(9): 3 085~3 092 (in Chinese with English abstract).
- Zhai G Y, Chen X L, Xia X H, *et al.* 2019. The dynamic economic evaluation method of shale gas resources[J]. *China Geology*, 2: 211~217.
- Zhao Lei, He Yongzhong, Yang Ping, *et al.* 2015. Characteristics of Lower Palaeozoic hydrocarbon source strata and a primary study of the

- shale gas accumulation in northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 42(6): 1 931~1 943(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yijun. 2017. Geochemical, Petrophysical Properties and Its Effecting Factors of the Wufeng-Longmaxi Shale in Southeastern Margins of the Sichuan Basin[D]. University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chuanyi. 2008. Study on the Quality of Source Rock and Factor of Sedimentary Environment in Lower Assemblage in Chuandongnan-Qianzhong and Nearby Area[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, *et al.* 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641~654(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, *et al.* 2013. Concepts, characteristics, potential and technology of unconventional hydrocarbons: On unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(4): 385~399(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹晓萌, 于炳松, 李心童, 等. 2014. 渝东南下寒武统页岩储层特征及测井评价——以渝科井和西科井为例[J]. *石油学报*, 35(2): 233~244.
- 陈吉, 肖贤明. 2013. 南方古生界3套富有机质页岩矿物组成与脆性分析[J]. *煤炭学报*, 38(5): 822~826.
- 戴鸿鸣, 黄东, 刘旭宁, 等. 2008. 蜀南西南地区海相烃源岩特征与评价[J]. *天然气地球科学*, 19(4): 503~508.
- 方栋梁, 孟志勇. 2020. 页岩气富集高产主控因素分析——以四川盆地涪陵地区五峰组-龙马溪组一段页岩为例[J]. *石油试验地质*, 42(1): 37~41.
- 冯常茂, 牛新生, 吴冲龙. 2008. 黔中隆起及周缘地区下组合含油气流体包裹体研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(2): 121~126.
- 郭世钊, 郭建华, 刘辰生, 等. 2016. 黔北地区志留系下统龙马溪组页岩气成藏潜力[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(6): 1 973~1 980.
- 郭旭升. 2014. 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*, 88(7): 1 209~1 218.
- 李双建, 肖开华, 沃玉进, 等. 2009. 中上扬子地区上奥陶统-下志留统烃源岩发育的古环境恢复[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 450~458.
- 梁峰, 张琴, 熊小林, 等. 2019. 四川盆地及周缘五峰组-龙马溪组富有机质页岩沉积演化模式[J]. *沉积学报*, 37(4): 847~857.
- 梁兴, 张廷山, 舒红林, 等. 2020. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. *中国地质*, 47(1): 72~87.
- 刘祖发, 肖贤明, 傅家谟, 等. 1999. 海相镜质体反射率用作早古生代烃源岩成熟度指标研究[J]. *地球化学*, 28(6): 580~588.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. *石油勘探与开发*, 45(4): 1~14.
- 聂海宽, 包书景, 高波, 等. 2012. 四川盆地及其周缘上奥陶统-下志留统页岩气成藏体系研究[J]. *石油实验地质*, 34(2): 115~119.
- 邱振, 邹才能, 王红岩, 等. 2020. 中国南方五峰组-龙马溪组页岩气差异富集特征与控制因素[J]. *天然气地球科学*, 31(2): 163~175.
- 戎嘉余, 陈旭, 王怿, 等. 2011. 奥陶-志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示[J]. *中国科学:地球科学*, 41(10): 1 407~1 415.
- 史树勇, 孙宇, 郭慧娟, 等. 2019. 黔北习水地区五峰-龙马溪组页岩地球化学与热演化特征及页岩气前景展望[J]. *地球化学*, 48(6): 567~579.
- 王津义, 付孝悦, 潘文蕾, 等. 2007. 黔西北地区下古生界盖层条件研究[J]. *石油实验地质*, 29(5): 477~481.
- 魏红霞. 2018. 黔北武陵山地区安场向斜天然气储集条件[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 邢雅文. 2013. 黔西北地区页岩含气性评价[D]. 中国地质大学(北京).
- 薛志鹏. 2016. 黔西北龙马溪组页岩孔隙特征及影响因素[D]. 中国地质大学(北京).
- 杨光庆. 2013. 黔西北地区页岩气源岩评价及成因分析[D]. 中国地质大学(北京).
- 杨瑞东, 程伟, 周汝贤. 2012. 贵州页岩气源岩特征及页岩气勘探远景分析[J]. *天然气地球科学*, 23(2): 340~347.
- 余川. 2012. 川东南地区下志留统页岩气成藏条件及资源潜力分析[D]. 西南石油大学.
- 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 2008. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. *天然气工业*, 28(2): 151~156.
- 张鹏. 2015. 沉积环境对页岩气发育的控制作用及应用[D]. 中国地质大学(北京).
- 张鹏, 张金川, 刘鸿, 等. 2016. 贵州下志留统龙马溪组页岩气成藏条件分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(9): 3 085~3 092.
- 赵磊, 贺永忠, 杨平, 等. 2015. 黔北下古生界烃源层系特征与页岩气成藏初探[J]. *中国地质*, 42(6): 1 931~1 943.
- 郑益军. 2017. 四川盆地东南缘五峰-龙马溪组页岩地球化学、物性特征及其影响因素[D]. 中国科学院大学.
- 周传祯. 2008. 川东南-黔中及其周边地区烃源岩品质与环境控制因素研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 37(6): 641~654.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 2013. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 40(4): 385~399.