

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2018.04.015

黔北凤冈二区块下志留统石牛栏组 储层特征研究

周豪¹,王甘露^{1,2},夏鹏¹,司海瀛¹,王帅¹,罗腾¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025;

2. 贵州省石油学会, 贵阳 550025)

摘要: 黔北凤冈二区块石牛栏组广泛发育台地边缘浅滩相沉积,生物礁灰岩、生物碎屑灰岩为储层发育的有利层段。文章通过扫描电镜、薄片观察、孔渗和压汞实验,发现研究区内储层虽然有孔隙不发育,孔隙度和渗透率较低,孔隙的分选性较差,孔喉较粗等特点,但其构造裂缝较为发育,裂缝孔隙度较高,使其具备有形成裂缝型油气藏的条件;对储层的影响因素和勘探前景进行的分析表明:在黔北地区的石牛栏组裂缝较为发育,构造保存条件和烃源岩层发育较好的地段具备形成天然气藏的条件,且以凤冈残留向斜为石牛栏组储层勘探的有利部位。

关键词: 凤冈二区块;石牛栏组;储层特征;有利部位;黔北地区

中图分类号: P618.13;TE122.25 **文献标识码:** A

栏组储层的评价及勘探开发提供参考。

0 引言

2016年,中国地质调查局在黔北地区正安县安场镇部署的油气参数井——安页1井取得页岩气、油气重大突破性成果。该井首次在南方下志留统石牛栏组获得日产超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产工业气流,开辟了南方油田勘探新区、新层系和新类型^[1]。

目前,石牛栏组储层的研究集中在川东南地区,多数研究认为川东南地区石牛栏组为致密碳酸盐岩储层、储层物性总体较差、成岩演化过程简单、原生孔隙不发育,储层类型以Ⅲ类储层和Ⅳ储层为主^[2-4]。然而,安页1井的勘探成果表明,黔北地区石牛栏组储层具有较大的天然气成藏潜力。本文将通过扫描电镜、薄片观察、孔渗和压汞实验对黔北地区石牛栏组储层特征进行研究,力图为该地区石牛

1 地质概况

1.1 研究区地质构造

黔北凤冈二区块的大部分位于贵州省遵义市凤冈县境内,其在构造单元上地处黔北隆起区中的凤冈南北向构造变形区,先后经历了武陵-雪峰期、南华期、加里东期、海西期、印支期、燕山期和喜山期等七个构造运动时期^[5]。其中,加里东期连续稳定沉积的寒武系、奥陶系和志留系地层为研究区内石牛栏组储层提供了较为良好的基底和盖层。区内构造样式以宽缓向斜和紧闭背斜为特征,属于典型的隔槽式褶皱;近南北向构造发育,构造形迹以褶皱为主,断层相对较少。区内宽缓的向斜构造为油气的保存提供了较为有利的条件。

收稿日期: 2018-04-24; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 贵州省地勘基金项目(编号:[2014]23)资助。

作者简介: 周豪(1991—),男,硕士研究生,非常规天然气勘探开发研究方向。通信地址:贵州省贵阳市花溪区贵州大学西校区,资源与环境工程学院;邮政编码:550025;E-mail:zhouhaodmxj@foxmail.com

通信作者: 王甘露(1963—),男,副教授,学士,主要从事石油天然气地质学、非常规油气勘探地质学教学与研究工作。通信地址:贵州省贵阳市花溪区贵州大学西校区,资源与环境工程学院;邮政编码:550025;E-mail:gzdwxgl@163.com

1.2 研究区沉积特征

黔北凤冈二区块内的石牛栏组岩性主要为灰色中-厚层泥晶灰岩、瘤状泥质灰岩、生物碎屑灰岩互层,部分地区可见介壳灰岩及生物礁灰岩^[6]。其沉积环境主要表现为台缘缓坡模式(沉积相类型有开阔台地相、台地边缘浅滩相和浅水陆棚相),生物礁发育规模较小,多呈点状或串珠状分布,且整体的白云石化作用较弱^[7]。

凤冈二区块石牛栏组储层主要发育在台地边缘浅滩相的生物碎屑灰岩、生物礁灰岩中。由区内石牛栏组剖面(钻井)沉积相横向对比图(图1)可知,研究区的中部和西部主要发育碳酸盐岩开阔海台地相,岩性以泥晶灰岩、泥质灰岩和生物碎屑灰岩为主,厚度向西边变厚;东部主要发育浅水陆棚相沉积,岩性以泥质灰岩、瘤状灰岩为主,沉积厚度自西向东先减小后变大;东南部主要发育台地边缘浅滩相,岩性以生物礁灰岩、生物碎屑灰岩、泥质灰岩为主,向东边变厚。

2 储层特征

2.1 岩性特征

通过野外剖面、钻孔岩芯岩性和岩石薄片观察结果表明,凤冈二区块内石牛栏组主要岩性有泥岩、泥质灰岩、泥晶灰岩、瘤状灰岩、生物碎屑灰岩和生物礁灰岩等类型。石牛栏组其上部发育有泥质灰岩、泥晶灰岩,泥质条带较为发育,为低能沉积环境的产物;中部主要发育有生物碎屑灰岩、生物礁灰岩等,多呈厚层状,生物化石以蜂巢珊瑚、链状珊瑚和海百合茎为主,属于台地边缘浅滩相沉积环境;中下部发育有瘤状灰岩,含少量的生物碎屑,为低能的浅水陆棚沉积环境。

石牛栏组中部岩段是储层发育的有利部位。

2.2 储层物性特征

凤冈地区石牛栏组的整体物性比较差,孔隙度和渗透率都非常低,属于低孔低渗储层。根据永风3井石牛栏组储层孔隙度和渗透率的实验分析结果(表1)可知,石牛栏组的孔隙度为0.68%~1.63%,平均值为1.18%;渗透率0.000577~0.00390 mD,平均值为0.002771 mD。其孔隙度大于1%的样品总共有四个,占总量的57.14%;66.7%的样品渗透率在0.001~0.005 mD之间。以上表明,石牛栏储层属于低孔渗储层,储层的物性条件不好。

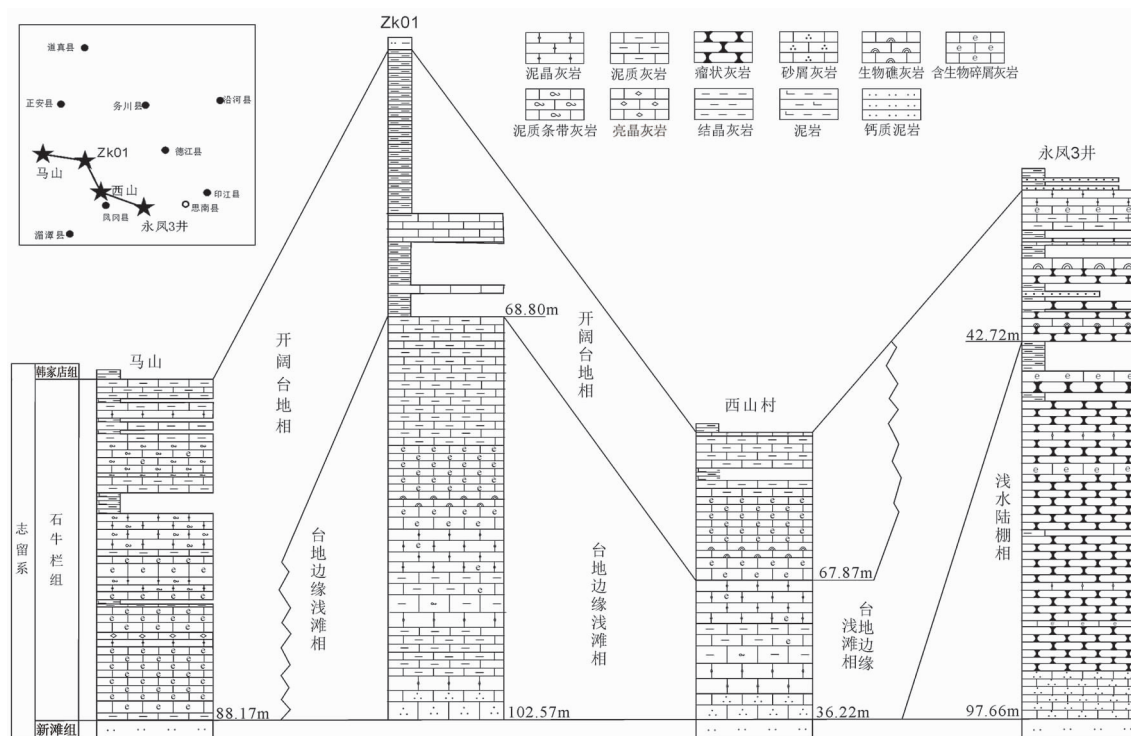


图1 研究区石牛栏组剖面(钻井)沉积相横向对比图

Fig.1 Horizontal comparison of the sedimentary facies in the section of Shiniulan Formation in the study area

表 1 永凤 3 井石牛栏组孔隙度和渗透率

Table 1 Porosity and permeability of Shiniulan Formation in Yongfeng Well 3

样品编号	层位	井深/m	岩性	岩石密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙度/%	气体渗透率/mD
YF3 # 651	S1sh	1829.68	结晶灰岩	2.64	0.79	0.00456
YF3 # 654	S1sh	1831.68	生物礁灰岩	2.64	1.35	—
YF3 # 668	S1sh	1844.04	生物礁灰岩	2.71	0.68	0.000577
YF3 # 678	S1sh	1851.29	生物礁灰岩	2.63	1.53	0.00390
YF3 # 704	S1sh	1878.47	亮晶灰岩	2.62	0.93	0.00178
YF3 # 712	S1sh	1885.94	生物碎屑岩	2.63	1.37	0.00231
YF3 # 760	S1sh	1936.60	瘤状灰岩	2.63	1.63	0.00350

一般来说,在碳酸盐岩储层中,储层的孔隙度和渗透率在低渗储层中相关性较小,在中高渗储层中相关性较大^[8]。由凤冈地区石牛栏组储层孔隙度与渗透率的关系图(图 2)可知,样品的孔隙度和渗透率表现出一定的正相关性,即样品的渗透率随着孔隙度的增加而增加。其表明凤冈地区石牛栏组储层表现出孔隙度和渗透率之间较高的正相关性与孔隙结构的类型有关,储层的主要储集空间为裂缝-沿裂缝溶蚀孔,在低渗透率的条件下,裂缝的发育以及沿裂缝发育的溶蚀孔洞,都增加了储层的孔隙度,并改善了储层的渗透率,从而使储层的孔隙度和渗透率表现出了一定的正相关性。

2.3 储层储集空间类型

根据岩石薄片观察,结合野外露头 and 钻井岩芯观察,石牛栏组储层的储渗空间类型较少(表 2),主要为裂缝、粒间溶孔和沿裂缝溶蚀孔洞。

(1)裂缝特征

研究区内石牛栏组裂缝发育,主要有成岩裂缝和构造裂缝两种类型。成岩裂缝以压实压溶作用形成的缝合线为主,主要特点为平行于层理,环绕砾石或生物碎屑,不切穿层理或碎屑颗粒,少部分为同生期形成的裂缝,为细小的短波浪线。该类裂缝多被泥质充填,或者被方解石充填,对油气的储集意义不大。构造裂缝属形成于构造应力作用下产生的岩石

裂缝。石牛栏组中的构造裂缝(图 3),为其储层发育提供了有利的条件。石牛栏组发育有三期的构造裂缝。第Ⅰ期构造裂缝被岩溶作用形成的缝合线所切割,裂缝的形状不规则,受到后期缝线和构造作用的改造。第Ⅱ期构造裂缝为高角度裂缝,裂缝的形态较为规则,延伸较远,部分可见到呈“X”型的裂缝,裂缝切穿早期形成的缝合线或生物碎屑,部分层段可见到未被方解石充填的裂缝,该类构造裂缝是研究区内大量发育的裂缝类型,是石牛栏组储层主要的储集空间。第Ⅲ期构造裂缝为以水平或垂直方向为特征,裂缝较为宽大,延伸较远,多被颗粒较大的亮晶方解石所充填,沿方解石脉可见到不连续分布的孔洞,孔洞内部未被充填,具备一定的储集性能。

表 2 凤冈二区块石牛栏组储层储集空间类型及特征

Table 2 Types and characteristics of reservoir space in the Shiniulan formation in Fenggang block II

类	亚类	特征
裂缝	构造缝	因构造作用形成的裂缝,发育有多期,多被方解石充填,可见少量半充填或未被充填,缝壁不规则,或呈串珠状溶孔
	成岩缝	因成岩作用形成的裂缝,包括与层理平行的缝合线、与缝合线相关的裂缝以及成岩作用缝,多被泥质充填
孔隙	粒间溶孔	颗粒之间胶结物或基质经反复溶蚀而成的,连通性较好
	沿缝溶蚀孔洞	在裂缝发育或者是在部分充填的基础上,经过后期的溶蚀作用,形成的沿着裂缝发育的溶蚀孔洞
	剩余粒间孔	基质及胶结物不发育或含量极少时,颗粒支撑保留下来的原生孔隙空间,连通性较好,泥质充填

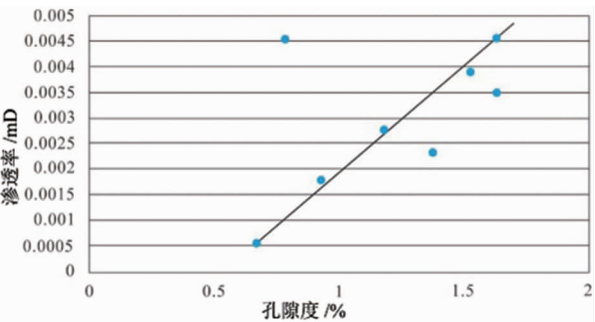


图 2 石牛栏组碳酸盐岩孔渗关系图

Fig. 2 Permeability map of carbonate rock in Shiniulan Formation

裂缝孔隙体积与岩石外观体积的比值(体积分数),即裂缝孔隙度。对永凤 3 井石牛栏组岩芯的裂缝进行观察,并根据经验计算出裂缝孔隙度如表 3 所述。储层的裂缝孔隙度在 0.21%~0.53%之间,平均裂缝孔隙度 0.34%,储层的裂缝发育情况较好。石牛栏组生物碎屑灰岩中的裂缝不十分发育,泥晶灰岩和瘤状灰岩等有效裂缝较为发育,在一定程度上改善了地层渗透率方面对油气储集和运移都具有重要的意义。

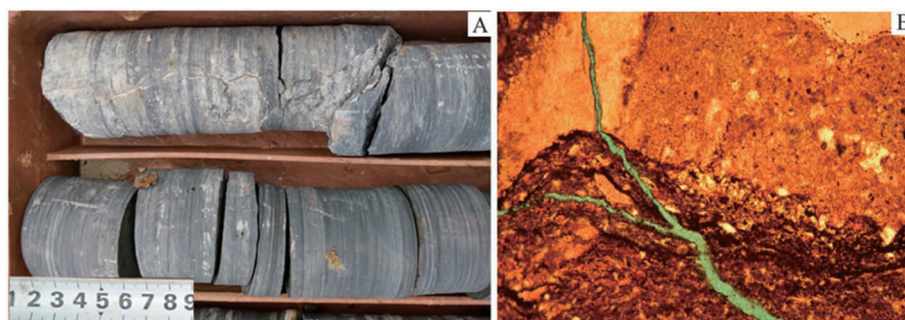


图 3 永凤 3 井石牛栏组有效裂缝宏观和微观照片

Fig. 3 Macro and microscopic photographs of effective fractures in Shiniulan Formation of Yongfeng well 3

A. 石牛栏组未被充填裂缝; B. 铸体薄片中的裂缝, 单偏光, $\times 15$

表 3 永凤 3 井石牛栏组部分层段裂缝孔隙度

Table 3 Fracture Porosity in Some Sections of Shiniulan Formation in Yongfeng

井段/m	岩性	厚度/m	裂缝体积/ 10^{-5} m^3	岩芯体积/ 10^{-5} m^3	裂缝孔隙度/%
1812.46—1812.76	泥晶灰岩	0.12	0.09	33.912	0.25
1813.85—1813.94	泥晶灰岩	0.09	0.12	25.434	0.46
1814.14—1814.26	泥晶灰岩	0.12	0.09	33.912	0.26
1814.48—1814.59	泥晶灰岩	0.11	0.07	31.086	0.21
1814.75—1814.95	泥晶灰岩	0.2	0.15	56.52	0.26
1818.96—1819.04	泥质灰岩	0.08	0.05	22.608	0.24
1824.47—1824.52	瘤状灰岩	0.05	0.07	14.13	0.53
1830.44—1830.50	瘤状灰岩	0.06	0.06	16.956	0.35
1837.59—1837.59	瘤状灰岩	0.06	0.05	16.956	0.29
1838.96—1839.16	瘤状灰岩	0.2	0.21	56.52	0.38
1839.49—1839.68	瘤状灰岩	0.19	0.17	53.694	0.32
1840.24—1840.84	瘤状灰岩	0.06	0.05	16.956	0.30
1841.24—1841.26	瘤状灰岩	0.02	0.03	5.652	0.52

(2) 孔隙特征

研究区内的孔隙以沿方解石脉形成的溶蚀孔洞或粒间溶孔(图 4)为主,原生孔隙在经过一系列的成岩作用之后,大部分都被充填,残留的孔隙类型以次生孔隙为主。该类孔隙是在原生孔隙的基础上,通过对基质或胶结物直接溶蚀后形成的粒间溶孔,孔隙的孔径和喉径较大。通过观察永凤 3 井石牛栏组岩性可以发现,沿方解石脉可见到较小的孔隙,但孔隙的连通性较差,部分层段可见到溶蚀方解石后形成的溶孔,以及被泥质充填的海百合生物碎屑灰岩中的剩余粒间孔。

对永凤 3 井石牛栏组生物碎屑灰岩进行压汞实验,得到压汞曲线和孔喉半径分布直方图(图 5)。从压汞曲线可知,进汞曲线呈倾斜状,反映了各种大小的孔喉占比都很相近,分布分散,分选性差。进汞曲线有明显的向下倾斜的趋势,歪度较粗。从孔喉半径分布直方图中可以发现,样品的中值喉道半径

在 $1.00 \mu\text{m}$ — $2.50 \mu\text{m}$ 之间,孔喉分布较为均匀,分选性较差。

2.4 储层发育的影响因素

本次研究工作中在研究区块内的野外剖面、钻井岩芯、岩石薄片的观察中并未见到沥青充填物,因此早期油气的充注对储层的影响情况不明。

研究区内对储层发育的主要影响因素有:

(1) 沉积相对石牛栏储层发育的控制。海平面的升降变化不仅影响储层发育的展布范围,而且对成岩作用有一定的影响,控制着储层成岩作用的进行。研究区内石牛栏组储层主要发育在台地边缘浅滩相的生物礁灰岩、生物碎屑灰岩中,该类沉积环境在研究区内广泛分布,具形成大规模连续气藏的可能性。

(2) 裂缝发育对石牛栏储层物性的影响。研究区内裂缝较为发育,且以构造裂缝为主,有效裂缝较发育,既能作为油气运移的通道,也可以作为油气的

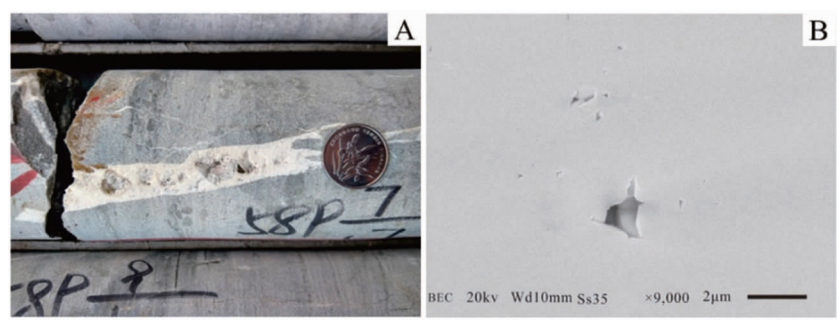


图 4 永凤 3 井石牛栏组孔隙宏观及微观照片

Fig. 4 Macro and micro photo of pores in Shiniulan Formation of Yongfeng well 3
A. 石牛栏组沿裂缝发育的溶蚀孔洞;
B. 描电镜下粒间溶孔, $0.067\mu\text{m}$ — $1.103\mu\text{m}$, 背散射, $\times 9000$

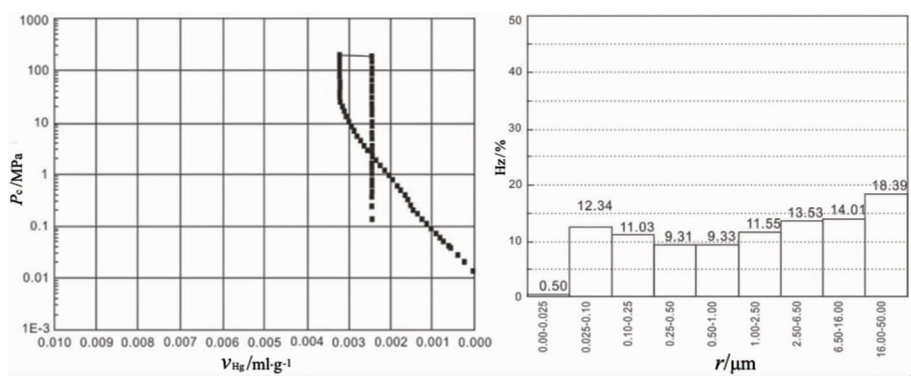


图 5 压汞法毛管压力曲线及孔喉半径分布直方图

Fig. 5 Hg pressure capillary pressure curve and histogram of pore throat radius distribution

储集空间。部分构造裂缝被方解石所充填,但沿构造裂缝发育的溶蚀孔洞,进一步增加了储层的孔隙度,改善了储层的储集性能。

(3)成岩作用对储层发育的控制。研究区内石牛栏组未见有白云岩产出,仅在少量薄片中可以见到呈菱形的白云石,白云石化作用较弱,对储层的改造效果不明显。研究区内主要发育的成岩作用有压溶作用、破裂作用、胶结作用和充填作用。石牛栏组储层的溶蚀孔洞和构造裂缝主要是由压溶作用和破裂作用形成的,对储层孔隙度和渗透率的改善具有重要的意义。

3 石牛栏组天然气勘探前景

综合研究区内石牛栏组储层的发育情况,以及

邻近区块石牛栏组的勘探进展,结果表明:石牛栏组所含天然气主要来自于龙马溪组^[9]。可以认为石牛栏组的储层虽然物性条件比较差、孔隙度和渗透率较低,但在裂缝较为发育的地区,仍然具有形成较大规模天然气藏的可能。宽缓的向斜构造是石牛栏组储层发育的有利构造区,就整个研究区的褶皱和断裂发育条件来看,凤冈残留向斜的地质构造条件最好,是天然气勘探的优先部位,煎茶溪向斜次之。

石牛栏组含气性的好坏直接受到下伏龙马溪组烃源岩层发育好坏的影响。再者,安页 1 井的勘探实践表明,石牛栏组为高压、裂缝性气藏^[10],因此在地应力较为集中的地区,较有利于裂缝的发育,有利于石牛栏组储层的发育。因此,可以认为在研究区或邻近区块中,在龙马溪组烃源岩层发育较好、地应力较为集中、区域构造保存条件较好的地区,石牛栏组仍然具有形成天然气藏的潜力,具备一定的勘探前景。

4 结论

(1) 黔北地区石牛栏组台地边缘浅滩相的生物碎屑灰岩和生物礁灰岩广泛发育, 该层位也是石牛栏组储层发育的部位。

(2) 黔北地区石牛栏组物性较差、孔隙度、渗透率较低; 孔隙不发育, 主要为粒间溶孔等次生孔隙, 多数被充填。但其裂缝比较发育, 储集空间以构造裂缝为主, 裂缝孔隙度平均 0.33%, 属裂缝型油气藏。

(3) 黔北地区石牛栏组储层的发育主要受沉积相、裂缝、成岩作用以及烃源岩层的影响, 今后的勘探方向应该向寻找龙马溪组烃源岩层发育较好, 地应力较为集中, 储层裂缝发育, 构造保存条件较好的部位进行; 凤冈残留向斜是较为有利的部位, 但需要重点考虑龙马溪组烃源岩层厚度的问题。

致谢: 感谢贵州省永泰能源页岩气公司提供的资料和帮助; 另外, 牟雨亮、刘瑞奎、高泽远、金宗伟等参加了野外工作。

参考文献:

- [1] 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 1-12.
- [2] 汪建辉. 川东南地区石牛栏组沉积相及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [3] 孟宪武. 川西二叠系沉积储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [4] 周大志. 川东南地区石牛栏组层序地层、沉积相及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [5] 李俊良, 谢瑞永, 游君君, 等. 贵州黔北地区页岩气成藏条件与勘探前景[J]. 中国矿业, 2012, 21(2): 55-59.
- [6] 梁子锐, 张新, 李伟松, 等. 赤水—綦江地区志留系石牛栏组台缘相带的认识及其油气勘探前景[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(12): 137-138.
- [7] 王正和, 谭钦银, 何利, 等. 川东南—黔北志留系石牛栏组沉积与层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 499-507.
- [8] 胡科先, 王晓华. 各类储层孔隙度与渗透率关系研究[J]. 石油化工应用, 2014, 33(11): 40-42.
- [9] 黄文明, 刘树根, 王国芝, 等. 四川盆地地下古生界油气地质条件及气藏特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 465-476.
- [10] 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+795.

Study on Reservoir Characteristics of the Lower Silurian Shiniulan Formation in Fenggang Block Ⅱ in the Northern Guizhou Province

ZHOU Hao¹, WANG Ganlu^{1,2}, XIA Peng¹, SI Haiying¹, WANG Shuai¹, LUO Teng¹

(1. Resource and Environment Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Petroleum Institute, Guiyang 550025, China)

Abstract: The Shiniulan Formation in the Fenggang Block Ⅱ in the north Guizhou province are extensively developed shoal facies sediments at the edge of the platform. The biothermal limestone and bioclastic limestone are favorable for the development of reservoir. Scanning electron microscopy analysis, thin-film observation, porosity and mercury injection experiments show that although pores in the study area are not developed and the porosity and permeability low, the pore separation poor, and the pore throat coarse, the structural fractures are relatively developed and the fractural porosity is relatively high. Therefore, condition of fracture type oil and gas reservoir exists in the Shiniulan formation. In addition there is better condition for structure preservation and hydrocarbon source bed developed here. The Fenggang residual syncline is the favorable structure to locate reservoir.

Key Words: Fenggang block Ⅱ; Shiniulan formation; reservoir characteristics; favorable location; the north Guizhou province