

文章编号:0253-9993(2013)05-0864-06

川南地区下古生界页岩气成藏条件研究

李贤庆^{1,2}, 赵佩^{1,2}, 孙杰^{1,2}, 付铜洋^{1,2}, 赖守宁^{1,2}, 田兴旺^{1,2}, 马施民^{1,2}, 王飞宇^{3,4}

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 4. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249)

摘要:从钻井、岩芯样品等分析资料出发,以下寒武统筇竹寺组、下志留统龙马溪组页岩为研究对象,对川南地区下古生界海相页岩气成藏条件进行了研究,指出该区筇竹寺组和龙马溪组页岩主要形成于陆棚沉积相,富有机质页岩厚度大,有机质丰度高(平均 TOC>2%),有机质类型为 I, II₁型,热演化程度处于高—过成熟阶段,页岩中脆性矿物丰富,微米—纳米级孔隙发育,含气量高,有利于页岩气的形成与富集。与成功勘探开发页岩气的北美页岩相比,川南地区下古生界海相页岩具有良好的页岩气成藏条件,认为筇竹寺组、龙马溪组均是该区现实的页岩气勘探目标层,并提出了其页岩气富集有利区。

关键词:页岩气;成藏条件;下古生界;川南地区;富有机质页岩

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A

Study on the accumulation conditions of shale gas from the Lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin

LI Xian-qing^{1,2}, ZHAO Pei^{1,2}, SUN Jie^{1,2}, FU Tong-yang^{1,2}, LAI Shou-ning^{1,2},
TIAN Xing-wang^{1,2}, MA Shi-min^{1,2}, WANG Fei-yu^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 4. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the data from drilling, core samples, etc., taking the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation shales as study target area, authors investigated the accumulation conditions of marine shale gas from the Lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin. The results indicate that the Qiongzhusi Formation and the Longmaxi Formation black shales in this region are mainly formed in shelf sedimentary facies. The study region features great organic-rich shale thickness, high organic abundance(average TOC>2%), Type I and II₁ organic matter, high-over thermal evolution level, rich in brittle mineral, abundant in micro- and nanometer pores, and high gas content, which are in favor of the generation and enrichment of shale gas. Compared with the shales in North America, in which the shale gas has been explored and developed successfully, it is suggested that the Lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin has good accumulation conditions for shale gas. Therefore, the Qiongzhusi and Longmaxi Formations are considered as the practical targets for shale gas exploration, and their favourable areas of shale gas enrichment are also purposed.

Key words: shale gas; accumulation condition; Lower Paleozoic; the south region of Sichuan Basin; organic-rich shale

页岩气是指以吸附态、游离态等方式赋存在泥页岩中的一种非常规天然气,为典型的“自生自

收稿日期:2013-02-09 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214702);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110023110017);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05007-002)

作者简介:李贤庆(1967—),男,浙江富阳人,教授,博士生导师,博士后。Tel:010-62331854-8131, E-mail:Lixq@cumb.edu.cn

储、原地成藏”模式^[1-3]。页岩气主要分布在盆地内厚度较大、富有机质的源岩层中,页岩储层孔隙度低、渗透率极低,具有资源潜力大、开采寿命长等特点^[4-6]。

近年来,随着北美页岩气的快速发展,中国页岩气的研究受到了广泛重视。据初步测算,中国页岩气资源量约为陆上常规气资源量的2~3倍^[7-8]。我国南方古生界发育震旦系、寒武系、志留系等多套海相页岩,具备形成页岩气的基本地质条件。随着四川威远地区在寒武系和志留系页岩中获得商业性气流,四川盆地南部(简称“川南”)地区已成为我国海相页岩气勘探开发有望近期取得突破的重点地区。

笔者拟从钻井、岩芯样品等分析资料出发,对川南地区下寒武统筇竹寺组、下志留统龙马溪组页岩气成藏条件进行研究,并综合分析其页岩气富集有利区,以期为该区下古生界海相页岩气勘探开发提供科学依据。

1 地质概况

四川盆地位于扬子地台西北缘,四周被龙门山、米仓山、大巴山等造山带所围,盆地面积约为18×10⁴ km²(图1)。该盆地划分为6个次一级构造带,包括川东高陡褶皱带、川南低陡褶皱带、川北低平褶皱带、川西低陡褶皱带、川中平缓褶皱带和川西南低陡褶皱带^[9]。研究区位于川西南和川南2个低陡褶皱带。

下古生界海相页岩集中分布在下寒武统筇竹寺组、下奥陶统大湾组和五峰组及下志留统龙马溪组4个层段中,其中筇竹寺组和龙马溪组黑色页岩厚度

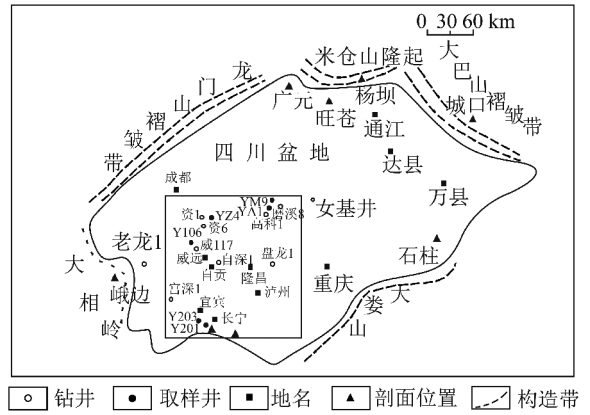


图1 研究区位置与采样点分布

Fig. 1 Location of study area and sampling points

大,分布稳定,而大湾组和五峰组黑色页岩分布局限,厚度较小^[9-10]。勘探实践表明,筇竹寺组和龙马溪组页岩已被证实为四川盆地石炭系、震旦系等大中型气田的重要烃源岩,同时具有形成页岩气藏的潜力^[10-12]。

2 页岩气成藏条件

页岩气藏的形成主要受页岩厚度、有机质丰度、类型、热演化程度、脆性矿物含量、储集层特征、含气性等多因素控制^[1-2,6-8]。据此,对川南地区下古生界的筇竹寺组和龙马溪组页岩气成藏条件进行论述。

2.1 页岩厚度

根据区内钻井统计,下寒武统筇竹寺组页岩呈由北向南逐渐增厚的趋势,厚250~550 m,其中威远—资阳地区筇竹寺组页岩多在200~300 m,长宁地区筇竹寺组页岩可达500 m以上(图2(a))。筇竹寺组

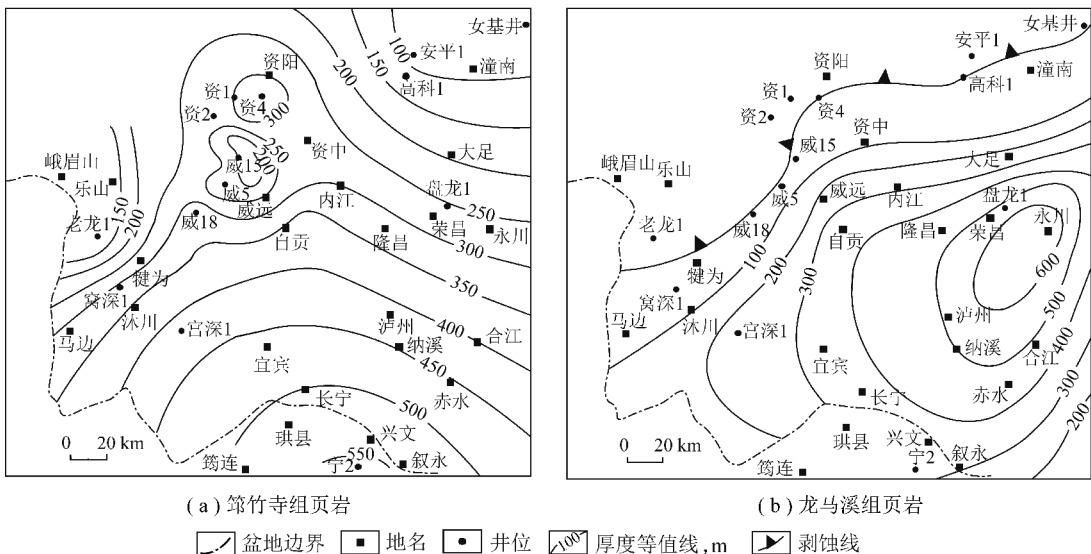


图2 川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩厚度分布

Fig. 2 The thickness distribution of shales from Qiongzhusi and Longmaxi Formations in the south region of Sichuan Basin

黑色页岩厚度分布基本上与地层分布趋势一致,厚 60 ~ 300 m。川南地区筇竹寺组埋深大,一般在 3 000 ~ 5 000 m,其中泸州—赤水地区埋深达 6 000 m,老龙 1 井、威远和叙永—筠连地区埋深在 3 000 m 以浅。区内筇竹寺组是一套相对缺氧的陆棚相沉积,黑色页岩、炭质页岩及深灰色含砂质页岩发育,含有黄铁矿、菱铁矿及磷质结核^[9,13]。

志留系龙马溪组页岩沿乐山—龙女寺古隆起向南、东部逐渐增厚,最厚一般为 400 ~ 600 m,沉积中心位于自贡—隆昌—泸州—永川一带(图 2(b))。龙马溪组也是一套相对缺氧的陆棚相沉积,富含有机质页岩除在威远构造西南部缺失外,其它地区厚 50 ~ 600 m;黑色页岩厚度 20 ~ 260 m,与页岩分布趋势基本一致^[9,13-14]。龙马溪组埋深一般在 2 000 ~ 3 000 m,威远地区埋深较浅(<2 000 m)。龙马溪组岩性主要由深灰—黑色砂质页岩、炭质页岩、笔石页岩夹生物碎屑灰

岩组成,页岩中以产浮游生物笔石为特征^[9,13-14]。

2.2 有机质丰度

有机碳含量(TOC)是评价页岩有机质丰度的主要指标,目前商业性页岩气藏开发的 TOC 下限值一般为 2.0%^[1-2,6],但也有学者认为在热演化程度高的地区可以降至 1.0%^[7-8,15]。

对研究区井下岩芯及露头 115 块样品统计,筇竹寺组页岩 TOC 含量值分布范围为 0.34% ~ 13.84%,平均 2.85%。据井下 36 块岩芯样品统计,TOC 含量 <1% 的样品占 15.2%,TOC 含量为 1% ~ 2% 的样品占 34.7%,TOC 含量为 2% ~ 4% 的样品占 41.3%,TOC 含量为 4% ~ 6% 的样品占 6.5%,这与 89 块露头样品分析结果有所差异(图 3(a))。从井下岩芯剖面样品 TOC 含量值随深度的变化图(图 4(a))来看,筇竹寺组下部页岩有机质丰度较高,TOC 含量多大于 2%,向上随着砂质的增加,TOC 含量有所降低。

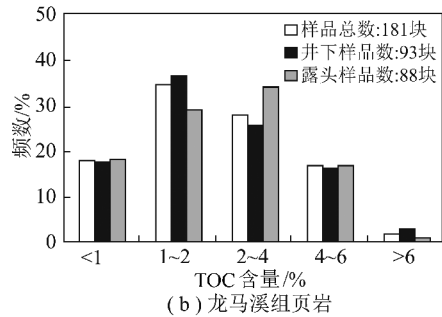
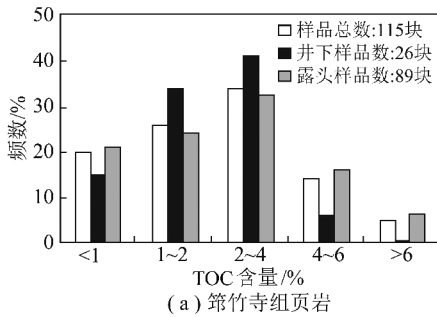


图 3 筇竹寺组和龙马溪组页岩样品有机碳(TOC)含量分布

Fig. 3 Distribution of organic carbon contents(TOC) of shale samples from Qiongzhusi and Longmaxi Formations

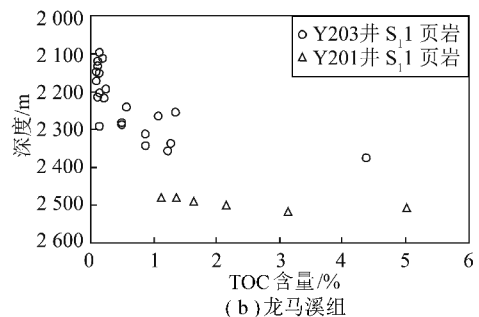
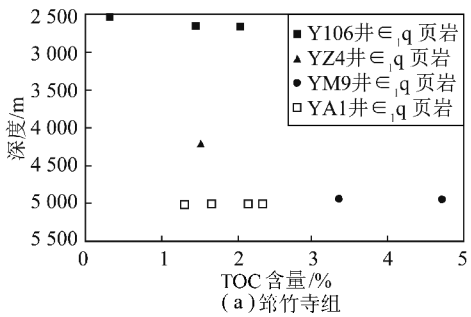


图 4 筇竹寺组和龙马溪组页岩样品有机碳(TOC)含量随深度的变化

Fig. 4 Change of organic carbon contents(TOC) of shale sam-ples from Qiongzhusi and Longmaxi Formations with buried depth

对区内井下岩芯及露头 181 块样品统计,龙马溪组页岩 TOC 含量值分布范围为 0.08% ~ 12.74%,平均 2.37%。据井下 93 块岩芯样品统计,TOC 含量 <1% 的样品占 17.6%,TOC 含量为 1% ~ 2% 的样品占 37.2%,TOC 含量为 2% ~ 4% 的样品占 25.7%,TOC 含量为 4% ~ 6% 的样品占 17.0%,TOC 含量 >6% 的样品占 2.6%,这与 88 块露头样品分析结果类似(图 3(b))。从井下样品 TOC 含量值随深度的变化来

看,龙马溪组下部页岩有机质丰度较高,TOC 含量多大于 1% (图 4(b))。

2.3 有机质类型

有机质类型不仅影响页岩生烃能力,而且也影响页岩含气性^[6-7]。有机岩石学分析表明,川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩样品均富含有机显微组分,以腐泥型和海相镜质组为主(>70%),少量壳质组和惰质组(5% ~ 25%),其母质来源主要为低等水生

物。筇竹寺组页岩样品干酪根镜鉴分析表明,干酪根组分以无定形体、藻类和腐泥体占优势(>80%),干酪根碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-33.4\text{‰} \sim -29.2\text{‰}$,有机质类型属于 I 型和 II₁ 型。龙马溪组页岩样品干酪根组分也以无定形体、藻类和腐泥体为主(>70%),干酪根碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-29.8\text{‰} \sim -26.9\text{‰}$,有机质类型为 I 型和 II₁ 型。

2.4 热演化程度

热演化程度(或成熟度)是确定有机质生成油气的关键指标。从北美页岩气开发实践来看,商业性开发的页岩层系 $R_o = 1.1\% \sim 3.0\%$ [1-2,6]。

对研究区筇竹寺组页岩样品 R_o 实测数据表明:威远地区 12 块井下样品 $R_o = 2.56\% \sim 3.14\%$,资阳地区 3 块井下样品 $R_o = 2.5\% \sim 3.08\%$,泸州地区 5 块井下样品 $R_o = 2.73\% \sim 3.54\%$,宜宾—长宁地区 22 块井下样品 $R_o = 2.21\% \sim 3.86\%$,说明筇竹寺组页岩成熟度已达到过成熟。

区内龙马溪组页岩样品 R_o 测试结果表明:威远地区 10 块井下样品 $R_o = 1.95\% \sim 2.24\%$,隆昌地区 3 块井下样品 $R_o = 2.2\% \sim 2.61\%$,阳高寺地区 4 块井下样品 $R_o = 2.12\% \sim 2.53\%$,宜宾—长宁地区 36 块井下样品 $R_o = 1.94\% \sim 3.10\%$,表明龙马溪组页岩成熟度处于高一过成熟。与北美地区页岩相比,川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩的热演化程度更高,有利于生成干气。

2.5 页岩矿物组成

页岩矿物组成与含量往往会影响到页岩气开采和压裂效果。具备商业开发条件的页岩,石英等脆性矿物含量一般高于 40%,黏土矿物含量小于 30% [2,6,16]。

对川南地区井下 38 个样品的 X-衍射测试结果表明:筇竹寺组页岩中石英等脆性矿物丰富(46.5% ~ 59.6%,平均 57.5%),黏土矿物次之(25.0% ~ 29.1%,平均 27.2%),其组分主要是伊利石、伊—蒙混层,其次是高岭石和绿泥石,不含或微含蒙脱石;龙马溪组页岩中石英等脆性矿物含量也高(34.7% ~ 83.4%,平均 55.1%),黏土矿物含量次之(16.6% ~ 44.9%,平均 34.4%),其黏土矿物主要由伊利石、高岭石、伊—蒙混层和绿泥石组成,也不含或微含蒙脱石。

总的来说,川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩中矿物组成与北美地区页岩比较相似。但是,与北美 Barnett 页岩样品相比,仍有一定的差异,川南地区页岩样品脆性矿物含量变化较大(图 5)。

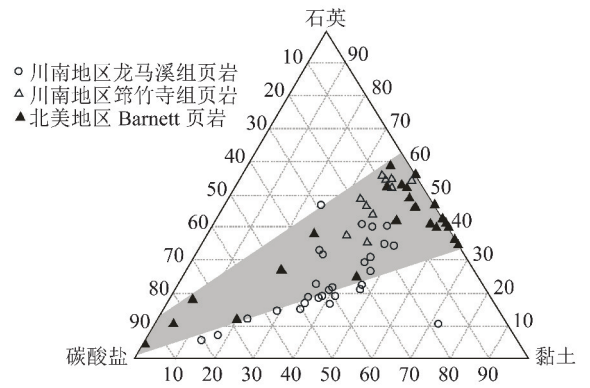


图 5 川南地区与北美地区页岩样品矿物组成比较

Fig. 5 Comparison of mineral compositions of shale samples from South Sichuan and North America

2.6 页岩储集层特征

川南地区下古生界页岩储层为低孔、特低渗储集层。区内储层样品物性分析结果表明:筇竹寺组页岩的孔隙度为 0.45% ~ 8.22%,平均为 3.15%,渗透率为 $(0.001 \sim 0.148) \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均为 $0.039 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;龙马溪组页岩的孔隙度为 1.10% ~ 11.84%,平均为 4.23%,渗透率为 $(0.015 \sim 0.174) \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均为 $0.042 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

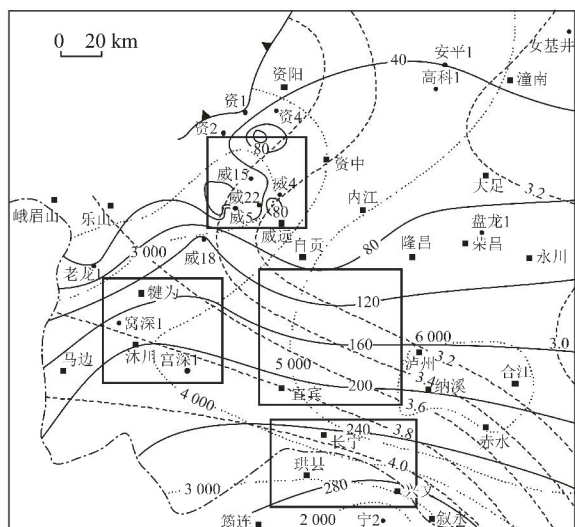
页岩中微孔隙的发育,对提高页岩储气性能具有重要作用[17]。对井下岩芯样品的扫描电镜分析表明,川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩发育多种类型微孔隙,包括粒间孔、粒内孔和有机质孔。研究表明[7,16],筇竹寺组和龙马溪组页岩中发育大量纳米—微米级孔隙;基质孔隙大小一般小于 2 μm ,以 0.1 ~ 1 μm 孔隙为主;有机质孔隙的孔径分布在 10 ~ 650 nm,多为 50 ~ 300 nm,这与北美地区 Barnett 页岩具有相似的特征。

2.7 页岩含气性

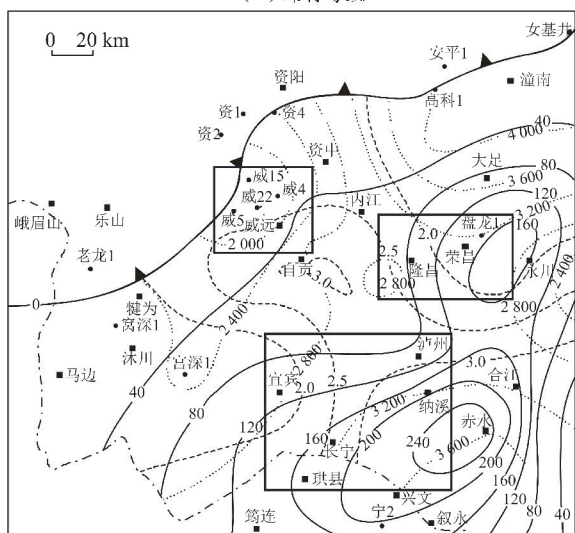
页岩含气量是衡量页岩气富集区是否具有开采价值的重要指标。北美地区商业开发的页岩含气量为 0.44 ~ 9.91 m^3/t ,一般认为商业性页岩气开发的页岩含气量下限为 1.1 m^3/t 。现场测试表明,川南地区筇竹寺组 14 块页岩含气量为 0.43 ~ 5.50 m^3/t ,平均 1.88 m^3/t ;龙马溪组 27 块页岩含气量为 0.30 ~ 5.09 m^3/t ,平均 1.85 m^3/t 。因此,与北美地区页岩含气量相比,川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩均达到了页岩气开发含气量下限,具备商业性开发价值。另外,新钻的先导试验井在筇竹寺组富有机质页岩段中测试,获日产上万方天然气,威 5 井在钻至 2 795 ~ 2 798 m 筇竹寺组页岩层段时发生井喷,中途测试获日产 2.46 $\times 10^4 \text{ m}^3$ 的天然气[7,16]。

3 页岩气富集有利区

通过上述分析,并与成功勘探开发页岩气的北美地区页岩相比,研究认为,川南地区下古生界海相页岩具有良好的页岩气成藏条件,筇竹寺组和龙马溪组均是其现实的页岩气勘探目标层。考虑页岩的厚度、埋深、有机质、储集层特征、含气性、地面条件、工程及经济等多种因素进行综合分析,笔者提出:川南地区筇竹寺组页岩气富集有利区为自贡—宜宾、长宁—珙县、犍为—沐川、威远4个地区(图6(a));龙马溪组页岩气富集有利区为隆昌—荣昌、宜宾—泸州—长宁和威远3个地区。



(a) 筇竹寺组



(b) 龙马溪组

- | | | | |
|------------|-----------|----------|----------|
| 盆地边界 | 地名 | 剥蚀线 | 井位 |
| 页岩厚度等值线, m | 页岩顶界埋深, m | 页岩成熟度, % | 页岩气富集有利区 |

图6 川南地区筇竹寺组和龙马溪组页岩气富集有利区分析

Fig. 6 Analysis of shale gas enrichment area from Qiongzhusi and Longmaxi Formations in the south region of Sichuan Basin

宁、威远3个地区(图6(b))。这些富集有利区将是川南地区页岩气勘探开发取得重要突破的最现实目标区。

4 结 论

(1)川南地区下古生界海相页岩具有良好的页岩气成藏条件,富有机质页岩厚度大(20~300 m),有机质丰度高(平均TOC含量>2%),有机质类型为I, II₁型,热演化程度达高一过成熟($R_o > 1.8\%$),石英等脆性矿物丰富(平均>50%),页岩中发育微米—纳米级孔隙,含气量高(平均>1.8 m³/t),有利于页岩气的形成与富集。

(2)川南地区下古生界海相页岩具有良好的页岩气成藏条件,筇竹寺组和龙马溪组均是其现实的页岩气勘探目标层;提出筇竹寺组页岩气富集有利区为自贡—宜宾、长宁—珙县、犍为—沐川和威远4个地区,龙马溪组页岩气富集有利区为隆昌—荣昌、宜宾—泸州—长宁和威远3个地区。

致谢:本文样品采集、资料收集得到了中国石油勘探开发研究院和中国石油西南油气田分公司有关专家的大力支持和帮助,在此表示谢意!

参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [2] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [3] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业, 2004, 24(7):15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7):15-18.
- [4] 张抗,谭云冬.世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景[J].当代石油石化, 2009, 17(3):9-18.
Zhang Kang, Tan Yundong. The status of world shale gas resources potential and production status as well as development prospect of China's shale gas[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2009, 17(3):9-18.
- [5] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业, 2009, 29(5):1-6.
Yan Cunzhang, Huang Yuzhen, Ge Chunmei, et al. Shale gas: enormous potential of unconventional natural gas resources[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):1-6.
- [6] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会.北美地区页岩气勘探开发新进展[M].北京:石油工业出版社, 2009:1-271.
Editorial Committee of Shale Gas Geology and Exploration and De-

- velopment Practice Series. New progress of shale gas exploration and development in North American [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:1-271.
- [7] 邹才能,董大忠,王社教,等. 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, 2010, 37(6):641-653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6):641-653.
- [8] 董大忠,邹才能,李建忠,等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3):324-336.
Dong Dazhong, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3):324-336.
- [9] 翟光明. 中国石油地质志(卷10)[M]. 北京:石油工业出版社, 1989:1-109.
Zhai Guangming. Petroleum geology of China: Vol. 10[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989:1-109.
- [10] 戴金星,陈践发,钟宁宁,等. 中国大气田及其气源[M]. 北京:科学出版社, 2003:9-194.
Dai Jinxing, Chen Jianfa, Zhong Ningning, et al. Giant gas fields in China and their genesis[M]. Beijing: Science Press, 2003:9-194.
- [11] 程克明,王世谦,董大忠,等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5):40-44.
Cheng Keming, Wang Shiqian, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi formation, the Upper Yangtze region [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5):40-44.
- [12] 朱炎铭,陈尚斌,方俊华,等. 四川地区志留系页岩气成藏的地质背景[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7):1160-1164.
Zhu Yanming, Chen Shangbin, Fang Junhua, et al. The geological background of the Siluric shale-gas reservoiring in Szechwan, China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7):1160-1164.
- [13] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三):南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2):1-19.
Liang Digang, Guo Tonglou, Bian Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern china (part 3):Controlling factors on the sedimentary facies and development of psleoxoic marine sourcerocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2):1-19.
- [14] 郭英海,李壮福,李大华,等. 四川地区早志留世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2004, 6(1):21-30.
Guo Yinghai, Li Zhuangfu, Li Dahua, et al. Lithofacies palaeogeography of the early Silurian in Sichuan area [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1):21-30.
- [15] 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.
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of south China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4):484-491.
- [16] 邹才能,陶士振,侯连华,等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2011:128-164.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011:128-164.
- [17] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79:848-861.