

四川地区志留系页岩气成藏的地质背景

朱炎铭^{1, 2} 陈尚斌^{1, 2} 方俊华^{1, 2} 罗 跃^{1, 2}

(1. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 江苏 徐州 221116)

摘 要: 从构造演化入手, 以四川地区志留系龙马溪组底部的黑色泥岩为研究对象, 探讨其页岩空间分布特征、生烃作用历程及页岩气的成藏过程。研究认为: 四川地区龙马溪组黑色页岩是一套富含有机质的烃源岩, 属 I 型干酪根, 具有厚度大、埋藏适中、有机质成熟度高等有利条件, 为页岩气在该地区的形成和聚集成藏, 并形成大规模的气藏提供可能; 威远、泸州、宜宾和自贡区域龙马溪组页岩气资源潜力很大。

关键词: 四川地区; 页岩气; 成藏; 生烃演化; 构造 - 埋藏史

中图分类号: P618. 3 **文献标志码:** A

The geologic background of the Siluric shale-gas reservoiring in Szechwan, China

ZHU Yan-ming^{1, 2}, CHEN Shang-bin^{1, 2}, FANG Jun-hua^{1, 2}, LUO Yue^{1, 2}

(1. Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process Key Laboratory of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on tectonic evolution, took black mudstone in the bottom of Longmaxi formation as study object to research the spatial distribution characteristics, hydrocarbon generating process and accumulation process of shale. The results show that Longmaxi formation black shale is a hydrocarbon source rock rich in organic matter and kerogen type is I, with large thickness and buried moderate, high organic matter maturity favorable conditions for the shale gas formation in the region and aggregation into a reservoir, and makes the formation of large-scale gas reservoir as possible. The study also suggests that Longmaxi shale gas resource potential is great in Weiyuan, Luzhou, Yibin and Zigong region in Sichuan Basin.

Key words: Szechwan; shale-gas; reservoir forming; hydrocarbon-generation evolution; tectonic-burial history

继煤层气开发获得巨大成功之后, 沉积岩中最为丰富的岩石——页岩也终于得到了其应有的重视。长期以来, 页岩一直被认为是一种盖层或烃源岩, 因此钻井人员在钻井过程中直接穿越页岩层段开采砂岩或碳酸盐岩储层。近年来, 随着社会经济的迅速发展, 能源需求更趋迫切, 地质科学和开发技术等方面得到很大进展, 美国与加拿大的不少公司已把目标对准页岩气领域, 并做了大量的工作。其中, 美国已进入页岩气开发的快速发展阶段, 而加拿大则处于商业开采的起步阶段。2000 年美国页岩气的年产量达

122 亿 m³, 而在 2007 年, 仅 Newark East 页岩气田的年产量就达 217 亿 m³, 美国的页岩气总产量接近 500 亿 m³, 占美国天然气总量的 8% 以上, 而中国同年的天然气产量也仅为 693 亿 m³ 左右^[1-4]。

页岩气是从页(泥)岩层中开采出来的天然气, 是一种重要的非常规天然气资源, 往往分布在盆地内厚度较大、分布广的页岩烃源岩地层中。页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中, 以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。由于大部分产气页岩分布范围广、厚度大且普遍含气, 使得页岩气

并能够长期稳定的产气,因而页岩气开发具有开采寿命长和生产周期长的优点,但页岩气储集层渗透率低、开采难度也较大^[5-6]。

2006 年初,中国石油勘探开发研究院油气资源规划所组织专家展开了页岩气资源调查研究。资料显示,四川盆地的两套页岩(寒武系九老洞组与志留的龙门溪组)地质地化参数与美国五大页岩气盆地相当,初步试气表明,其产能不低於美国五大盆地页岩气的平均日产量。专家认为,上述两个地层的页岩气资源潜力应该在 $(6.8 \sim 8.4) \times 10^{12} \text{ m}^3$,相当于四川盆地的常规天然气资源总量^[7]。此外,调查还表明,我国黑色页岩分布十分广泛,南方、鄂尔多斯、吐哈、茂名、抚顺、准噶尔等地区的页岩和油页岩都富含有机质,均应具有形成页岩气的基础与条件。因此,中国页岩气资源量潜力十分巨大,页岩气一旦突破形成产能,必将对缓解中国油气资源接替的压力产生至关重要的作用。

1 四川盆地地质概况

四川盆地位于扬子准地台西部,北邻秦岭褶皱带,西邻松潘甘孜褶皱带,东南和西南与滇黔川鄂台褶带相邻,盆地基底为扬子旋回固结的产物^[8]。现今的四川盆地在地理上,其地貌特征十分清楚,北为米苍山、大巴山,南为大凉山、娄山,西为龙门山、邓味山,东以七峻山为界,盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

四川盆地是一个中生代复合的沉积盆地,自古生代至新生代经历了多次构造运动,主要经历持续拉伸、裂谷作用、逆冲推覆作用、剪切和块断作用^[9]。

四川盆地隶属于扬子板块,其地层属于中国华南型,区域上地层发育齐全,自前震旦系至第四系均有出露,古生界—新生界沉积层厚度在 6~12 km,其中,志留系现今残余厚度变化在 0~1 200 m。

2 四川地区志留系龙马溪组构造—埋藏历史

四川地区志留系龙马溪组自形成以来经历了多期构造变动,导致龙马溪组页岩发生多次生烃演化,并为页岩气的成藏提供了物质基础。研究表明,四川地区志留系的演化大致可以划分为 5 个构造—埋藏阶段(图 1):

(1) 加里东期。

加里东期为志留系龙马溪组页岩气储层形成阶段,研究表明,志留系原始沉积厚度约 1 250 m^[9],而龙马溪组的埋藏深度主要取决于志留系的沉积厚度,有机质受热温度较低,烃源岩未达生烃门限($R_o < 0.5\%$)。志留纪末(距今约 400 万年),加里东运动

导致区域性的不均一抬升,遭受剥蚀而普遍缺失志留统的沉积。

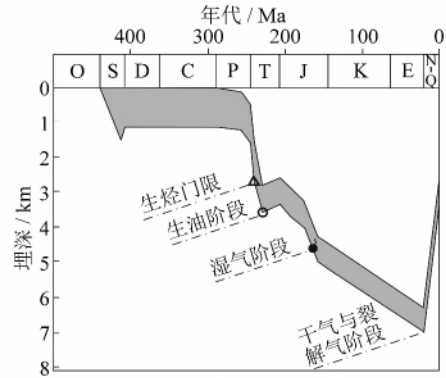


图 1 四川地区志留系构造—埋藏—生烃史
Fig. 1 Structure, burial and hydrocarbon-generation history of Silurian in Sichuan

(2) 海西期。

受加里东运动与泥盆纪末的柳江运动,四川地块整体处于持续抬升阶段,早石炭世中期中国南方地区开始海侵^[8],海平面上升,志留系埋深加大,但该期沉积量小,不足 200 m^[9],而石炭纪末的云南运动又使研究区大部分地区抬升剥蚀,石炭纪沉积剥蚀殆尽,导致本区的石炭系缺失。早二叠世初,研究区开始沉降,经历了早二叠世栖霞期海侵,四川地区及周围形成巨型的碳酸盐岩缓坡。早二叠世末的东吴运动造成云开古陆、川颠古陆相继隆起,本区被抬升剥蚀了数百米。晚二叠世末期到早三叠世又经历了一次海侵、海退,本区二叠系残余沉积厚度大于 1 000 m。

(3) 印支期。

早三叠世,本区接受了厚达 3 000 m 沉积,而中一晚三叠世的印支运动使华南大地全面隆升,基本结束了本区的海相地层发育历史^[9]。随后的早、中侏罗世,本地区发育上千米厚的前陆盆地沉积,龙马溪组被继续深埋,最大埋深可超过 5 000 m。

(4) 燕山期—喜马拉雅早期。

燕山运动对整个南方构造格局进行了褶断改造及大规模隆升剥蚀,但是由于四川盆地处于刚性的川中陆核及陆壳基底以及其构造位置处于太平洋板块及雅鲁藏布江洋壳俯冲影响的“末端”,因此延续了印支—燕山期压性构造环境,形成了上白垩统一古近系拗陷型沉积,志留系继续深埋。到古近纪末,本区龙马溪组的最大埋深可超过 7 000 m。

(5) 喜马拉雅晚期。

四川地区处于总体挤压环境,地壳以收缩为主,改造了燕山期形成的构造格局,整个四川盆地开始较

大规模迅速抬升剥蚀^[10],导致志留系埋藏变浅,不少地区甚至出露地表。

3 龙马溪组页岩气藏特征

3.1 龙马溪组页岩储层特征

页岩气储层多为黑色、高碳的页岩,四川地区志留系的厚度虽然较大,但黑色页岩主要集中在其下部——龙马溪组。研究表明,龙马溪组主要分布在川东南、川东北、鄂西渝东、中扬子区,受局部地质背景的控制,具有一定的沉积分异性,厚度在 20~800 m 之间变化,一般厚 200 m(图 2)。

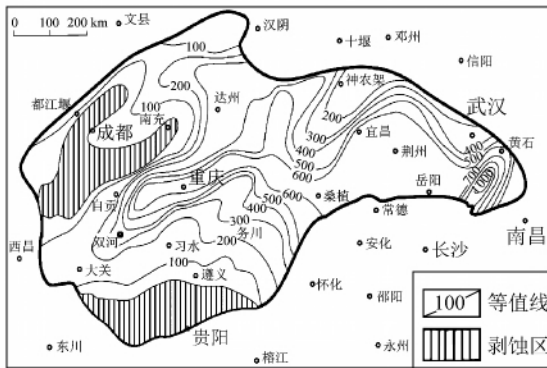


图 2 中、上扬子地区龙马溪组等厚图

Fig. 2 Isopach map of Longmaxi Group in the middle and upper Yangtze Region

3.1.1 龙马溪组岩性与沉积环境

龙马溪组的黑-灰黑色页岩为志留系底部主要烃源岩^[11-12],与下伏上奥陶统呈整合接触。野外露头与钻井资料研究表明,龙马溪组主要具有如下特征:①由黑色、灰黑色及深灰色页岩、砂质页岩组成,向上粉砂质逐渐增多,碳质逐渐减少,颜色也由黑色逐渐变灰,顶部有薄层状或透镜状的灰岩夹层;②整个龙马溪组均含有笔石,下部含非常丰富的笔石化石,向上笔石化石逐渐减少,另外还可见三叶虫、腕足等化石,该组中还普遍见有分散状黄铁矿晶粒;③本组中发育水平层理及断续的水平层理,水平波状层理;④沉积环境为深水陆棚与浅水陆棚为主,深水陆棚中又可进一步划分为:泥质深水陆棚、陆棚边缘滞水盆地、浊流等沉积类型;而浅水陆棚又可进一步划分为:泥质浅水陆棚、砂泥质浅水陆棚、灰质浅水陆棚等沉积类型。

3.1.2 龙马溪组有机岩石学特征

对研究区龙马溪组黑色页岩有机质类型研究表明,四川地区有机质含量为 1.2%~5.6%,平均达 3.1%;而有机质中藻类-无定形组为 58.9%~78.3%,平均为 71.2%;动物有机碎屑组为 7.5%~26.4%,平均值为 15.9%;次生组为 11.2%~14.8%,平均为 12.7%。干酪根碳同位素 $\delta^{13}C$ 测试,其值介于 -2.91%~-2.98%(表 1),有机质类型为 I 型(腐泥型)。

表 1 四川龙马溪组黑色页岩有机质类型

Table 1 Organic types of black shale rocks of Longmaxi formation in Sichuan area

样 品	层 位	有机质总量	藻类-无定形组	动物有机碎屑组	次生组	$\delta^{13}C$	有机质类型
华蓥山	S ₁ l	1.2~3.4(2)	73.6~78.3(2)	7.5~16.2(2)	11.2~14.8(2)	-2.91~-2.97(2)	I
李子垭		2.3	76	11.9	13	-2.96	
长宁	S ₁ l	3.3~4.6(5)	58.9~73.8(5)	13.4~26.4(5)	11.3~13.6(5)	-2.93~-2.98(5)	I
双河		3.3	66.4	19.9	12.5	2.96	

就研究区龙马溪组 70 个样品的有机碳含量测试,发现其有机碳含量变化较大,分布在 0.1%~5.6%之间,平均 1.96%;大于 1%的超过了 70%,而大于 2%者则超过 40%,平均为 3.38%(图 3);更有学者认为,其有机碳含量最高可超过 8.5%^[13]。

研究表明,四川地区现今龙马溪组黑色页岩埋藏深度变化较大,最大埋深超过 5 000 m,而有机质的成熟度(R_o)介于 2.2%~4.0%,已达高-过成熟阶段(图 4)。

3.2 龙马溪组页岩吸附性

页岩是一种特殊的储集岩,呈低孔、特低渗的物性特征,而页岩气主要以吸附或游离态存在于页岩

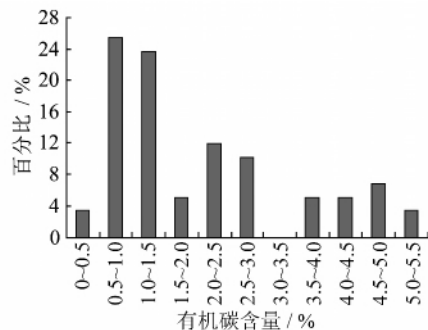


图 3 研究区龙马溪组黑色页岩有机碳含量统计

Fig. 3 Statistical of organic carbon of Longmaxi black shale in research area

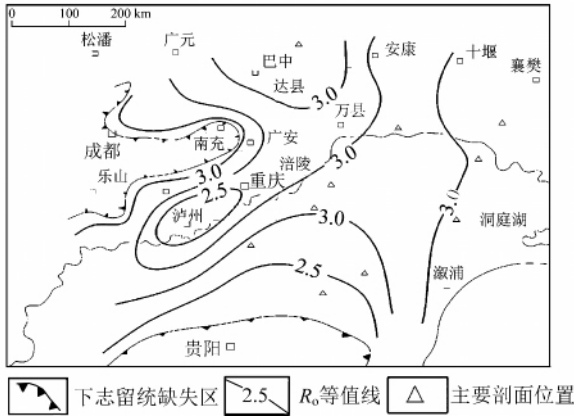


图 4 现今南方龙马溪组成熟度(R_o)等值线

Fig. 4 Contour about organic maturity (R_o) of Longmaxi formation in southern China now

中。张金川等认为,页岩气的成藏至少分为两个阶段^[4]:天然气的生成与吸附阶段和天然气的造隙及排出、储层改造成藏阶段。四川地区的龙马溪组页岩的有机质含量高,对天然气具有一定的吸附能力,等温吸附实验显示,由于有机质含量(TOC)的差异,导致吸附能力明显有别,最高吸附量可达 $1\text{ m}^3/\text{t}$ (图 5)。

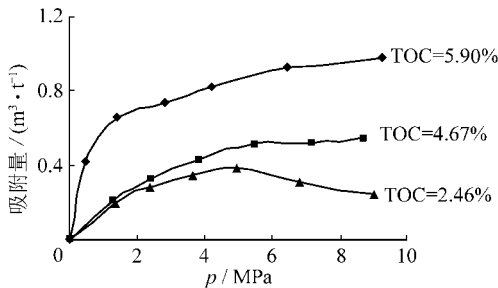


图 5 四川龙马溪组页岩等温吸附曲线

Fig. 5 The isothermal adsorption curves of Longmaxi formation shale in Sichuan

3.3 龙马溪组页岩气成藏初探

在区域构造作用的控制下,四川地区的志留系龙马溪组烃源岩发生了阶段性的成烃演化,为页岩气的成藏提供了物质基础。研究表明,龙马溪组有机质大约在晚二叠世进入生烃门限,一直延续到中三叠世末,主要以生油为主;从晚三叠世到侏罗纪末,主要以生湿气为主,应该是本区龙马溪组页岩气初次成藏阶段;而此后直到古近纪,龙马溪组烃源岩演化进入高-过成熟阶段,主要以生干气与裂解气为主,大量形成的天然气的排除增加了页岩的裂缝,导致吸附气与裂缝游离气共生,是本区页岩气成藏的主要时期(图 4),多数地区埋藏深度适中($1\ 000\sim 3\ 000\text{ m}$),勘探实践也证明其有良好的页岩气显示^[13],特别是川南的泸州地区,龙马溪组厚度大,埋藏适中,更是有

可能取得页岩气突破的重要地区。

4 龙马溪组页岩气勘探开发有利目标区

目前,对我国页岩气资源潜力的系统评价还不多见。据王社教等^[13]对上扬子地区的四川盆地及邻区志留系龙马溪组页岩气资源量估算为 $(4.0\sim 12.4)\times 10^{12}\text{ m}^3$,可见四川地区页岩气资源量很大,研究与勘探开发的意义重大。

我国页岩气勘探区优选评价方面,主要是通过与美国五大开发成功的含气页岩进行地质要素比照分析,初步结论认为,我国页岩气资源分布极为广泛;我国南方海相地层发育区具有优越的页岩气成藏地质条件和丰富的页岩气资源,有望成为我国油气资源的重要战略接替新领域。所以,四川地区最值得首先关注。就近期勘探首选目标的选择上,可以从页岩气成藏的条件机理以及勘探开发等不同角度,对四川地区页岩气成藏的物质基础、地质条件、勘探油气显示以及实验结果等方面有针对性研究。已有部分学者^[4-18]做了大量的研究工作,取得许多成果,但由于不同的研究者对于关键要素的选择分析不尽相同,所以在近期勘探首选目标区上出现了一些分歧。综合研究来看,将四川地区的威远、泸州、宜宾和自贡区域的龙马溪组作为未来勘探开发首选区及层位较为可行,并且随着储层特征研究的深入和开发技术的发展,资源量估算值可能会更大;总之,四川地区,特别是威远、泸州、宜宾和自贡区域龙马溪组页岩气资源潜力很大。

5 结 语

四川地区的志留系龙马溪组黑色页岩是一套富含有机质的烃源岩,属 I 型干酪根,具有厚度大、埋藏适中、有机质成熟度高、有利条件,为页岩气在该地区的形成和聚集成藏,并形成大规模的气藏提供可能。深入研究龙马溪组的页岩气成藏机制,探究页岩储层特征,必将为取得中国页岩气开采的突破奠定良好的基础,同时也对丰富和发展中国的天然气地质理论具有重要意义。

参考文献:

[1] Curtis J B. Fractured shale-gas system [J]. AAPG Bulletin 2002 86 (11): 1 921-1 938.
 [2] Jarvie D M, Hil R J, Rubi E 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] 江怀友, 宋新民, 安晓璇, 等. 世界页岩气资源勘探开发现状与

- 展望 [J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(6): 10-14.
 Jiang Huaiyou, Song Xinmin, An Xiaoxuan, et al. Current state and outlook of exploration and development of the shale gas resources in the world [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(6): 10-14.
- [4] 李新景, 胡素云, 程克明, 等. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
 Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming, et al. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [5] 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. Shale gas accumulation mechanism and distribution [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [6] 江怀友, 宋新民, 安晓璇, 等. 世界页岩气资源与勘探开发技术综述 [J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 26-30.
 Jiang Huaiyou, Song Xinmin, An Xiaoxuan, et al. Overview on shale gas resources and exploration technology in the world [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2(6): 26-30.
- [7] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
 Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Shale gas exploration potential in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [8] 翟光明. 中国石油地质志(卷十)——四川油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 96-109.
 Zhai Guangming. Petroleum geology of China (Vol. 10): Sichuan oil and gas area [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 96-109.
- [9] 高祺瑞, 赵政璋. 中国油气新区勘探(第五卷) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
 Gao Qirui, Zhao Zhengzhang. New area of China oil and gas exploration (Book V) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [10] 李登华, 李建忠, 王社教, 等. 页岩气藏形成条件分析 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 22-26.
 Li Denghua, Li Jianzhong, Wang Shejiao, et al. Conditions of shale gas reservoir formation [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 22-26.
- [11] 腾格尔, 高长林, 胡凯, 等. 上扬子东南缘下组合优质烃源岩发育及生烃潜力 [J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 359-364.
 Ten Geer, Gao Changlin, Hu Kai, et al. High-quality source rocks in the lower combination in Southeast Upper-Yangzi area and their hydrocarbon generating potential [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(4): 359-364.
- [12] 刘若冰, 田景春, 魏志宏, 等. 川东南地区震旦系-志留系下组合有效烃源岩综合研究 [J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 824-828.
 Liu Ruobing, Tian Jingchun, Wei Zhihong, et al. Comprehensive research of effective hydrocarbon source rock of Lower strata from Simian to Silurian system in Southeast area of Sichuan Province [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 824-828.
- [13] 王社教, 王兰生, 黄金亮, 等. 上扬子区志留系页岩气成藏条件 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 45-50.
 Wang Shejiao, Wang Lansheng, Huang Jinliang, et al. Silurian shale gas forming conditions on the Yangtze area [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 45-50.
- [14] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理 [J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
 Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism [J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466.
- [15] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件 [J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
 Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Shale gas reservoir geological conditions of Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [16] 唐嘉贵, 吴月先, 赵金洲, 等. 四川盆地页岩气藏勘探开发与技术探讨 [J]. 钻采工艺, 2008, 31(3): 38-42.
 Tang Jiagui, Wu Yuexian, Zhao Jinzhou, et al. Discussion of shale gas exploration development and technology [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(3): 38-42.
- [17] 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等. 四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 51-58.
 Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, et al. Lower Paleozoic shale gas reservoir formation conditions and exploration prospects in Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 51-58.
- [18] 黄籍中. 四川盆地页岩气与煤层气勘探前景分析 [J]. 岩性油气藏, 2009, 21(2): 116-120.
 Huang Jizhong. Exploration prospect of shale gas and coal-bed methane in Sichuan basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(2): 116-120.