

重庆及其周缘地区下古生界页岩气资源勘探潜力*

龙鹏宇¹ 张金川¹ 李玉喜² 聂海宽¹ 唐颖¹ 张琴¹ 刘珠江¹

1. 教育部“海相储层演化与油气富集机理”重点实验室·中国地质大学(北京) 2. 国土资源部油气资源战略研究中心

龙鹏宇等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气资源勘探潜力. 天然气工业, 2009, 29(12): 125-129.

摘要 四川盆地经历了从震旦纪到中三叠世的克拉通和晚三叠世到新生代的前陆盆地 2 个构造演化过程, 在克拉通盆地演化阶段主要发育一套巨厚的海相沉积。晚震旦世和中奥陶世开始的 2 次大规模海侵作用, 在深水环境中沉积了寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组 2 套黑色页岩。由于该盆地演化过程中复杂的构造变动, 重庆及其周缘地区的区域构造主要以高幅抬升及强烈挤压为特点, 下古生界埋藏浅、变形严重、破坏强烈, 现今构造形态表现为高陡状褶皱, 形成了与美国东部典型页岩气盆地相似的构造演化特点和地质条件。研究表明, 该区具有页岩气富集的有利地质条件, 是页岩气勘探研究值得关注的重要领域。采用体积法对该区下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气资源量做了初步估算。结果表明: 重庆及其周缘地区筇竹寺组页岩气资源量约为 $7.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 五峰组—龙马溪组页岩气资源量约为 $11.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 显示出该区巨大的页岩气资源勘探潜力。

关键词 重庆及其周缘地区 早古生代 页岩气 地质条件 成藏条件 资源潜力 美国东部盆地 相似性

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.12.036

我国南方地区古生界在演化过程中经历了复杂的构造变动, 具有与美国东部地区典型页岩气盆地相似的地质条件和构造演化特点, 是我国未来页岩气勘探开发的备选领域。为此, 根据四川盆地演化特点和勘探地质条件, 结合最新资料调研分析结果^[1-5], 对四川盆地内及周边地区地表露头(新开公路边壁、采石场、矿坑等)、井下岩心及典型剖面进行野外实地考察, 认为重庆及其周缘地区下古生界下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组黑色页岩具有良好的页岩气富集和有利的勘探条件。

1 重庆及其周缘地区页岩气成藏背景

重庆及其周缘地区位于四川含油气盆地川东高陡构造带和川南中低缓构造带^[6], 包括涪陵—恩施—秀山区块、綦江—遵义区块、泸州—宜宾—毕节等, 总面积为 $11.4365 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1), 研究区位于四川盆地东部有利的天然气富集带上, 具有形成大型页岩气聚集的基本地质条件, 纵向上的下寒武统

筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组 2 套黑色页岩是页岩气勘探的主要目的层位。

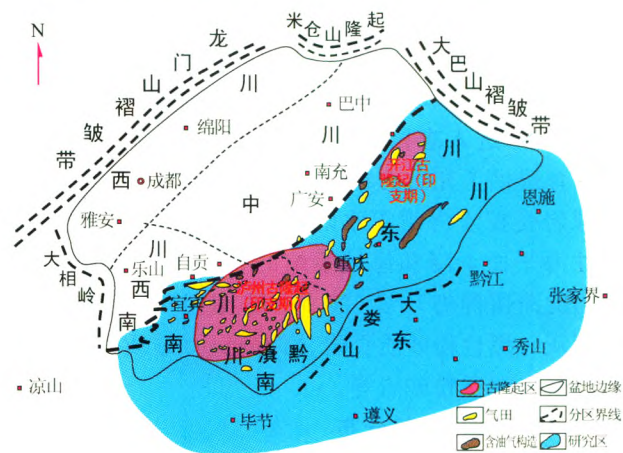


图 1 研究区平面位置示意图

1.1 构造演化

四川盆地是一个特提斯构造域内长期发育、不断演进的古生代—中生代海陆相复杂叠合盆地^[7], 具有早期沉降、晚期隆升, 沉降期长、隆升期短

* 本文受到国家自然科学基金项目(编号: 40672087、40472073)的资助。

作者简介: 龙鹏宇, 1985 年生; 2008 年本科毕业于中国地质大学(北京), 现为中国地质大学(北京)能源学院硕士研究生; 主要从事油气成藏机理和非常规天然气地质研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学能源学院。电话: (010) 82320848。E-mail: longpengyu@163.com

等特点^[8]。从震旦纪以来先后经历了克拉通和前陆盆地两个构造演化阶段,在克拉通盆地演化阶段主要接受了一套巨厚的海相沉积。在早古生代之前构造运动中主要表现为大隆、大拗的地壳升降运动。这种大型隆、拗格局控制形成了分布面积广、沉积厚度大且以海相碳酸盐岩和页岩等为主的古生界构造层,构成了盆地内天然气广泛分布的基础^[9-11]。基于不同阶段的构造运动表现形式具有地区差异性,研究区主要以区域构造高幅抬升及强烈挤压为特点,导致下古生界埋藏浅、变形严重、破坏强烈,现今构造形态表现为高陡状褶皱。

1.2 沉积背景

海相黑色页岩形成于沉积速率较快、地质条件较为封闭、有机质丰富的台地或陆棚环境中,通常与大规模的水进过程相关联。震旦纪—志留纪烃源岩的发育时期与大地构造格局或沉积盆地性质发生重大变革的转换时期对应^[12]。下寒武统下部烃源岩发育在大陆边缘的内陆架盆地和斜坡区,并以滨海沼泽及缺氧停滞的滨浅海沉积环境为主^[12]。在早寒武世早期,海平面快速上升并形成早古生代最大的海侵作用,海侵期间低等植物大量繁殖,为该期烃源岩发育提供了充足的有机质组分,使得在下寒武统筇竹寺组发育了数百米厚的碳质泥岩、页岩及石煤;奥陶纪沉积处于沉积变革时期,相对海平面升降变化大、震荡频繁,形成了碳酸盐岩与泥质岩频繁交替的沉积特点;进入志留纪,浮游植物繁盛,为区内烃源岩发育提供了充足的物源^[13-14]。下志留统龙马溪组烃源岩受控于海湾深水陆棚沉积相体系,主要在全球性海平面下降和海域萎缩的背景上,形成了台内拗陷的滞留静海环境(浅水—陆棚相)^[7],发育了一套深灰—黑色粉砂质页岩、富有机质(碳质)页岩、硅质页岩夹泥质粉砂岩等。

1.3 含气页岩及其分布

筇竹寺组主要为暗色页岩、黑色碳质页岩、黑色粉砂质页岩以及石煤层,页岩分布稳定,大部分地区厚度大于 100 m,其中川南地区页岩厚度为 200~400 m。在川东—鄂西、黔北地区,页岩厚度为 50~300 m。筇竹寺组页岩总有机碳含量高,一般为 0.5%~5%。自上而下,页岩页理逐渐发育,有机质含量逐渐增加,颜色由深灰色变为黑色。至底部,由于有机质富集而形成黑色的“碳质页岩”,有时伴生黄铁矿、菱铁矿结核及锰矿等,具有很强的生烃潜力^[15]。整套页岩普遍含砂质或石英粉砂质,局部可见原油裂解后所残留的沥青质。

五峰组与龙马溪组底部均发育一套黑色页岩,两者厚度不大但连续分布且广泛发育。与筇竹寺组页岩相类似,五峰组—龙马溪组主要岩性为笔石页岩,厚度为 80~200 m。该套页岩也具有自上而下颜色逐渐加深、砂质减少、有机质含量增高的变化特征。页岩中也普遍含砂质、粉砂质,底部多含硅质及黄铁矿富集层。该套地层以产浮游生物笔石为特征,可富集成黑色笔石页岩,局部见放射虫、骨针等硅质生屑,有机质含量普遍较高。

从地表页岩出露情况分析认为,筇竹寺组黑色页岩(图 2)主要分布于川南的宜宾—泸州、川东的达州—垫江—长寿一带和黔北的金沙—江口—松桃一线以南地区,渝东南的秀山、酉阳和湘鄂西的龙山、咸丰等地区也较为发育;五峰组—龙马溪组笔石页岩(图 3)主要发育于盆地边部且相对稳定,在川南的宜宾、泸州、南川、綦江,川东的石柱、涪陵,渝东南的武隆—彭水—黔江,黔东北的道真—德江及鄂西的利川—咸丰—来凤一带发育完整,而在盆地腹部的乐山—龙女寺一线以西北,由于后期构造抬升剥蚀而缺失。以上 2 套黑色页岩热演化程度普遍较高且已被证实为重庆及其周缘地区海相地层的主要气源岩^[16]。



图 2 黔北松桃下寒武统筇竹寺组黑色页岩地表露头照片

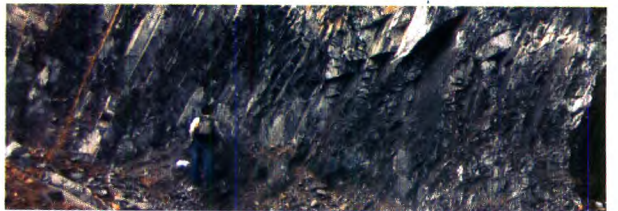


图 3 重庆彭水下志留统龙马溪组黑色页岩地表露头照片

2 页岩气富集的有利地质条件

近年来,很多学者(Cruits^[3]、Martini^[17]、Shiley^[18]、Hill^[19]等)都尝试应用各种参数和方法对页岩气聚集进行地质评价。根据研究区页岩发育特点,结合美国主要产页岩气盆地的页岩气勘探理论

和经验分析,研究认为:总有机碳含量、成熟度、干酪根类型、生烃率和埋深是该区页岩气有利性评价的关键地质参数。

2.1 下寒武统

研究区下寒武统黑色页岩主要发育于川南、黔北及黔东北—湘鄂西一带,均以滨海沼泽及浅水缺氧停滞浅海沉积为主,与最大海泛面对应的低能黑色页岩(包括碳质页岩和硅质页岩)相吻合,为

克拉通基底盆地内的第一套区域性烃源岩(属于腐泥型有机质类型,见表1),现今埋深在2 000~4 000 m之间(图4),总有机碳含量平均为2.74%^[20]。其中,张家界实测总有机碳含量平均为7.7%^[21], R_o 值平均为3.16%,处于高一过成熟阶段^[22]。在野外实测剖面 and 井下岩心观察中均发现了十分发育的裂缝(图5),经对研究区内的老井进行复查(威5、威18等井),已在该套页岩中发现普遍存在的气显异常^[10,23-24]。

表1 我国重庆及其周缘地区下古生界与美国含气页岩段主要地质特征对比表

对比项目	美国			中国	
	阿巴拉契亚	密执安	伊利诺斯	重庆及其周缘地区	
页岩名称	Ohio	Antrim	New Albany	筇竹寺组	五峰—龙马溪组
时代	泥盆纪	泥盆纪	泥盆纪	早寒武世	晚奥陶世—早志留世
气体成因	热解气	生物气	热解气、生物气	热解气、生物气	热解气、生物气
埋深(m)	610~1 524	183~730	183~1 494	2 000~4 000	1 500~4 000
厚度(m)	91~610	49	31~140	35~200	80~180
干酪根类型	混合型	腐泥型	混合型	腐泥型	腐泥型
TOC(%)	0.5~23.0	0.3~24.0	1.0~25.0	2.7	1.0~4.2
R_o (%)	0.4~4.0	0.4~0.6	0.4~0.8	>2.0	1.8~3.8
含气量(m ³ /t)	1.70~2.83	1.13~2.83	1.13~2.64	1.37	1.51
总孔隙度(%)	2.0~11.0	2.0~10.0	5.0~15.0	0.7~12.0	0.8~15.2
渗透率(10 ⁻³ μm ²)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

注:据参考文献[2]、[5]、[25]修编,数据由英制单位换算而得。

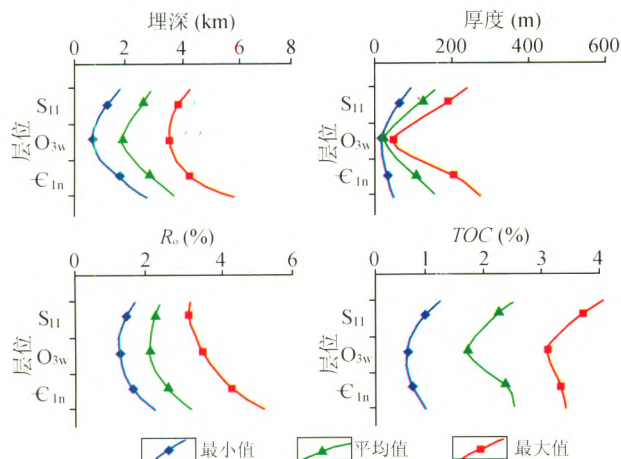


图4 重庆及其周缘地区含气页岩基本地质条件综合图

2.2 上奥陶统一志留统

区内上奥陶统一志留统笔石页岩普遍发育且分布稳定,深灰色、黑色碳质、硅质泥页岩埋深在1 500~4 000 m之间,有机质类型均属腐泥型,残余总有机碳含量平均为2.28%^[20],目前多处于高成熟演化阶段^[22],成熟度平均值均大于1.5%。在最近完钻的探井中(如丁山1井、建深1井龙马溪组),气显示(井涌及气测等)异常在钻井过程中频繁出现^[11,26]。

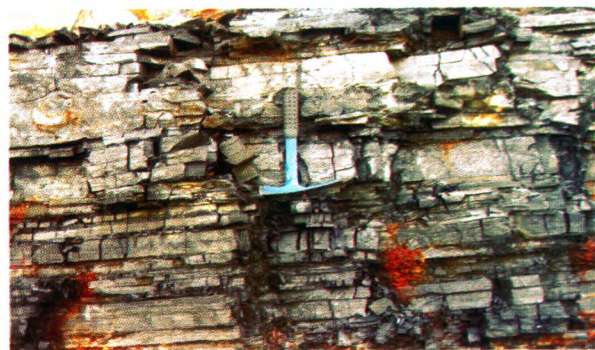


图5 黔北江口筇竹寺组黑色页岩地表露头照片

依据页岩类型和矿物学特征分析表明:该套页岩具有脆性岩石组分^[26],野外实测剖面中可见风化的页岩破碎带(图6),在钻井岩心中也发现了十分发育的高角度微裂缝,指示该区页岩易于发生脆性裂缝。

3 页岩气资源潜力

3.1 页岩气资源量

体积法是一种简单快速的页岩气资源评价方法,也是在勘探开发程度较低区域进行页岩气资源量评价的基本方法。



图6 重庆酉阳龙马溪组黑色页岩地表露头照片

研究区筇竹寺组有效页岩面积约 2.9600×10^4 km^2 , 地表页岩样品测得含气量为 $1.51 \text{ m}^3/\text{t}$ 。结合前文数据并采用体积法可对研究区页岩气资源量进行初步估算。结果表明:重庆及其周缘地区筇竹寺组页岩气资源量约为 $7.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 五峰组—龙马溪组有效页岩面积约 $4.0125 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地表页岩样品测得含气量为 $1.37 \text{ m}^3/\text{t}$, 与美国主要页岩的含气量相当, 采用体积法进行初步计算, 该套页岩气资源量约为 $11.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3.2 页岩气发育有利区

重庆及其周缘地区与美国东部页岩气产出地区(阿巴拉契亚、密执安及伊利诺斯盆地等)具有诸多的地质可比性(包括页岩地质时代、构造变动强度等)^[11, 23-24], 均属于早古生代海相沉积盆地并经历了多期复杂的构造运动, 具备了富集页岩气的有利地质条件。

我国页岩气研究尚处于起步阶段, 区域勘探程度较低, 鉴于可应用资料的局限性, 本次主要选取总有机碳含量、成熟度、厚度及含气量等指标, 采用综合信息叠合法对页岩气发育有利区进行预测。根据美国主要页岩气富集区地质特征的对比分析, 认为该区筇竹寺组、五峰组—龙马溪组2套黑色页岩均具有区域分布广、地层厚度大、总有机碳含量高、成熟度普遍较高、埋藏适中、裂缝发育等特点, 是研究区内富集页岩气的有利层段。平面上, 川南的宜宾和綦江, 川东的达州—垫江—长寿及黔北的习水—赤水一带的筇竹寺组页岩条件优越, 达到了页岩气富集的总有机碳含量、成熟度、有效厚度等指标, 是我国页岩气勘探的有利区域; 五峰组—龙马溪组页岩在川南的宜宾—泸州、渝东南的彭水—黔江、鄂西的利川—咸丰以及黔东北的道真—德江一带条件良好, 同样达到了页岩气富集标准并成为页岩气勘探的有利方向。

4 结论

1) 重庆及其周缘地区与美国东部页岩气产出地区在页岩形成地质条件上具有诸多可比性, 下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组黑色页岩地层区域分布广、厚度大、埋藏适中、总有机质含量高、成熟度高、微裂缝发育, 具有形成页岩气聚集的有利地质条件, 目前已发现多处钻井气显示异常, 是我国页岩气勘探开发可能有所突破的最有利区域之一。

2) 采用体积法对重庆及其周缘地区的筇竹寺组、五峰组—龙马溪组所进行的页岩气资源初步估算表明, 研究区筇竹寺组和五峰组—龙马溪组页岩气资源量分别为 $7.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $11.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3) 在平面上, 川南的宜宾和綦江, 川东的达州—垫江—长寿及黔北的习水—赤水一带的筇竹寺组页岩条件优越, 是研究区内页岩气勘探的有利区域; 五峰组—龙马溪组页岩在川南的宜宾—泸州、渝东南的彭水—黔江、鄂西的利川—咸丰以及黔东北的道真—德江一带页岩气成藏条件良好, 为区内页岩气勘探的有利方向。

致谢:唐玄、边瑞康、汪宗余、张培先、林拓、宋晓薇、姜生玲、朱华、王广源、荆铁亚、尹腾宇等在野外考查和资料收集整理方面完成了部分工作, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] HILL D G, NELSON C R. Reservoir properties of the Upper Cretaceous Lewis Shale, a new natural gas play in the San Juan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1240.
- [3] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bull, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [4] 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.
- [5] WARLICK D. Gas shale and CBM development in North America[J]. Oil and Gas Financial Journal, 2006, 3(11): 1-5.
- [6] 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.
- [7] 刘树根, 徐国盛, 徐国强, 等. 四川盆地天然气成藏动力学初探[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 323-330.

- [8] 沃玉进,肖开华,周雁,等.中国南方海相层系油气成藏组合类型与勘探前景[J].石油与天然气地质,2006,27(1):11-16.
- [9] 汪泽成,赵文智,彭红雨.四川盆地复合含油气系统特征[J].石油勘探与开发,2002,29(2):26-28.
- [10] 魏国齐,刘德来,张林.四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J].天然气地球科学,2005,16(4):437-442.
- [11] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件分析[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.
- [12] 文玲,胡书毅,田海芹.扬子地区寒武系烃源岩研究[J].西北地质,2001,34(2):67-74.
- [13] 李胜荣,高振敏.湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪[J].中国科学:D辑,2000,30(2):169-174.
- [14] 陈旭,肖承协,陈洪治.华南五峰期笔石动物群的分异及缺氧环境[J].古生物学报,1987,26(3):326-344.
- [15] 蔡勋育,韦宝东,赵培荣.南方海相烃源岩特征分析[J].天然气工业,2005,25(3):20-22.
- [16] 马立桥,董庸,屠小龙,等.中国南方海相油气勘探前景[J].石油学报,2007,28(3):1-7.
- [17] MARTINI A M, WALTER L M, KU T C W, et al. Microbial production and modification of gases in sedimentary basins: A geochemical case study from a Devonian shale gas play, Michigan basin [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(8): 1355-1375.
- [18] SHILEY R H, CLUFF R M, DICKERSON D R, et al. Correlation of natural gas content to iron species in the New Albany shale group [J]. Fuel, 1981, 60(8): 732-738.
- [19] HILL D G, NELSON C R. Gas productive fractured shales-an overview and update [J]. Gas TIPS, 2000, 6(2): 4-13.
- [20] 马力,陈焕疆,甘克文,等.中国南方大地构造和海相油气地质:上册[M].北京:地质出版社,2004:1-200.
- [21] 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):360-365.
- [22] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干进展(一):南方四套区域性海相烃源岩的分布[J].海相油气地质,2008,13(3):1-16.
- [23] 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.
- [24] 张金川,薛会,卞昌蓉,等.中国非常规天然气勘探综述[J].天然气工业,2006,26(12):53-56.
- [25] BOWKER K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [26] 李新景,胡素云,程克明.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.

(收稿日期 2009-11-20 编辑 居维清)