

黔东南地区岑巩页岩气区块勘探潜力

聂永生¹, 冷济高², 韩建辉³, 孙利¹, 沈贵春⁴

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 中国国储能源化工集团股份有限公司, 北京 100107;

3. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 4. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810007)

摘要:上扬子地台页岩气资源丰富,特别是下寒武统牛蹄塘组勘探潜力巨大。岑巩页岩气区块位于上扬子地台牛蹄塘组主要页岩气富集区,其页岩气勘探潜力亟待深入和准确评价。运用地层对比、储层分析和烃源岩地球化学分析等手段,结合前人研究成果,对岑巩页岩气区块的构造、储层和烃源岩特征进行了系统研究。通过上述研究,厘定了研究区牛蹄塘组地层的分布范围、储层物性、烃源岩厚度等参数及其分布特征,结合岑页1井含气量测试结果,进一步计算了该区块的资源量。结果表明,岑巩页岩气区块牛蹄塘组有机质类型主要为I型和II₁型;烃源岩有机质含量高,平均为3.38%;计算镜质体反射率平均为3.56%,达到成熟晚期阶段;储层具有低孔-超低渗、高比表面积特征;区块的可采资源量达 $71.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可认为,岑巩页岩气区块具备了较好的烃源岩、储层、埋藏条件,可采资源量大,可以选择该区块的民和、羊桥和大坪等有利地区进行下一步的勘探和评价工作。

关键词:地质特征;页岩气;牛蹄塘组;岑巩区块;黔东南地区;上扬子地台

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Exploration potential of shale gas in Cen'gong block, southeastern Guizhou province

Nie Yongsheng¹, Leng Jigao², Han Jianhui³, Sun Li¹, Shen Chungui⁴

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu, University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. China Energy Reserve Corporation, Beijing 100107, China; 3. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Qinghai Institute of Environment Geological Survey, Xining, Qinghai 810007, China)

Abstract: The shale gas resources are rich in the Upper Yangtze platform, especially the Lower Cambrian Niutitang Formation. Cen'gong shale gas block is located within the Niutitang shale gas play on the Upper Yangtze platform. This paper systematically studied the structure, source rocks and reservoirs characteristics of the Niutitang Formation in Cen'gong block through stratigraphic correlation, laboratory test of reservoir rock sample and geochemical analysis of source rock samples and in combination with previous study results. The distribution of Niutitang Formation, reservoir physical property and thickness of source rocks were mapped. Further more, the resource volume of shale gas was calculated by using the gas content data obtained from testing in well Cenye 1 that the following results were obtained. The organic matters of the Niutitang Formation are mainly of type I and type II₁. The average organic matter content of the source rock is as high as 3.38%. The average R_o is calculated to be 3.56%, which reflects the source rock has entered high maturation stage. The reservoirs are characterized by low porosity-ultralow permeability and large specific surface area. The recoverable resource volume of shale gas is estimated at 7.19 billion cubic meters. The Minhe, Yangqiao and Daping areas of the Cen'gong block can be selected as favorable shale gas play fairways for further exploration and evaluation.

Key words: geological characteristics, shale gas, Niutitang Formation, Cen'gong block, southeastern Guizhou province, Upper Yangtze platform

页岩气作为一种非常规天然气逐渐走入人们的视野。特别是受美国页岩气成功开发的影响,近年来,我国也开始将页岩气列为勘探开发范畴,并且已启动了两轮页岩气矿权招标。目前虽处于探索实践阶段,但对于 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的页岩气可采资源量,学者专家们仍然充满期待^[1-6]。

上扬子及滇黔桂区是我国主要的页岩气分布区之一,其中岑巩-松桃页岩气区块是我国2011—2015年页岩气发展规划中19个富集勘探开发区之一,其页岩气可采资源量超过 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7-10]。岑巩页岩气区块的主要目的层为下寒武统牛蹄塘组,下志留统龙马溪组在本区缺失。前人对于黔北(包括周缘的川东南、

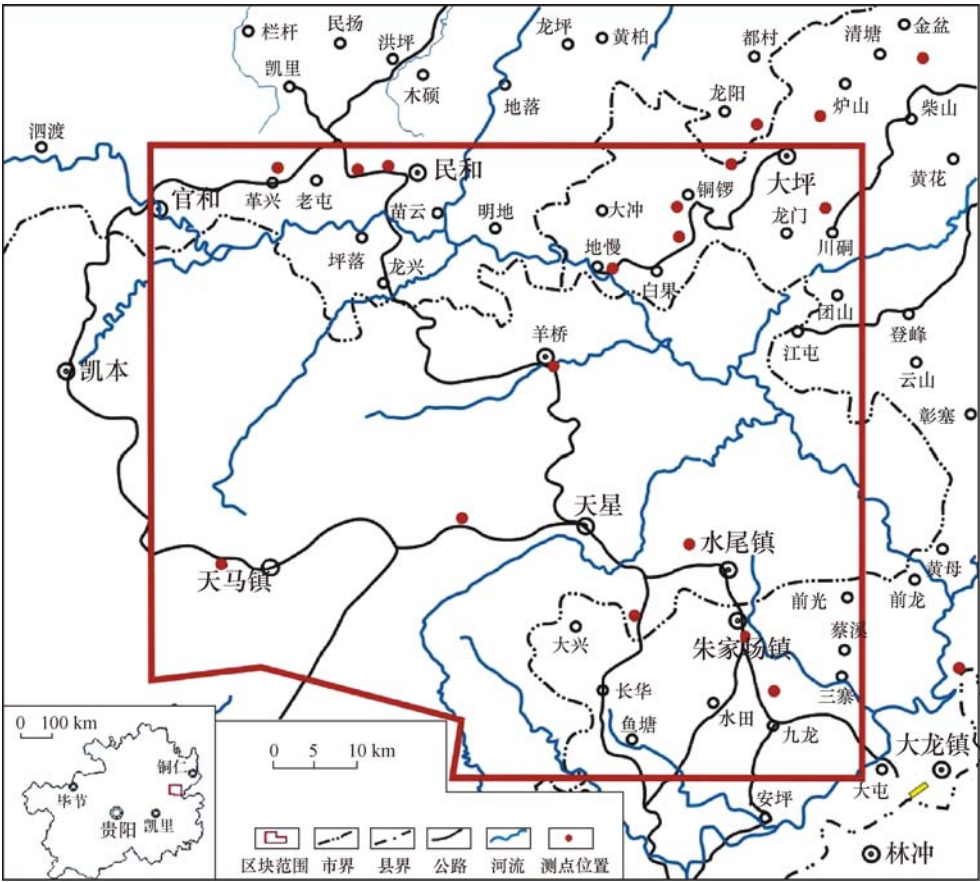


图1 黔东南地区岑巩页岩气区块地理位置

Fig. 1 Location of Cen'gong shale gas block in southeastern Guizhou Province

湘西北等地区)牛蹄塘组页岩气储层特征、沉积特征、地球化学特征及成藏条件等方面进行了较这详细的论述^[11-15]。随着龙马溪组勘探的相继突破(宁201-H1井、威201-H1井、阳101-H2井等),而牛蹄塘组页岩气勘探成果则乏善可陈,有学者对牛蹄塘组页岩气的勘探前景提出的质疑,概括起来主要两点:①牛蹄塘组层位较老,而美国最早页岩气产层为晚泥盆世;②有机质成熟度过高, R_o 普遍超过2.5%,资源量潜力有限。本文针对岑巩区块牛蹄塘组页岩气成藏条件,结合前期失利井分析,对比美国主要页岩气成藏地质特征,以期阐明岑巩页岩气富集区的勘探潜力。

1 地质概况

岑巩页岩气区块位于贵州省东部,黔东南州东北隅,北起铜仁碧江区的官和、民和、大坪,南至玉屏的大龙镇、洪家湾,西起岑巩县的凯本、天马镇,东至大坪的川洞、朱家场的蔡溪(图1)。属扬子区与江南区的过渡地区。从沉积环境上看,下寒武纪时期为江南页岩盆地的台地边缘斜坡深水陆棚沉积,区块由南东向北西水体逐渐变浅^[16-17]。

区块位于贵阳复杂构造变形区。整体上看,该区褶

皱、断裂构造非常发育,主要为北东向或北北东向展布,南北向、东西向和北西向褶皱、断裂也有发育^[18-19]。出露地层有南华系、南沱组、震旦系、寒武系的牛蹄塘组、九门冲组、变马冲组、杷榔组、清虚洞组、高台组、娄山关群及下奥陶统的部分地层和第四系(图2)。

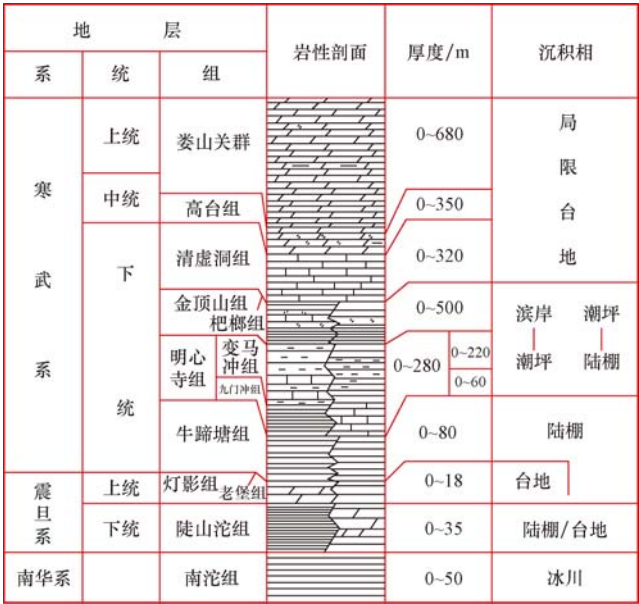


图2 岑巩区块地层综合柱状图

Fig. 2 Columnar section of Cen'gong block

目前关于下寒武统的划分方案较多,其中牛蹄塘组在川西对应九老洞组,滇东对应为筇竹寺组,扬子与江南过渡带称为九门冲组(其中包括明心寺组下部),这里牛蹄塘组是指筇竹寺组(九门冲组、九老洞组)中下部,下伏老堡组,上覆九门冲组,其中九门冲组特指灰岩层段。

2 牛蹄塘组地质特征

2.1 分布特征

从平面上看,牛蹄塘组总体厚度呈现环状分布。其中在四川盆地的西北斜坡带上,厚度大部分超过150 m;在湘鄂西褶皱带上,最大厚度处超过500 m;彭水—黔江—鹤峰—五峰区域以及西阳—桑植区域厚度普遍大于200 m。另外,在川南的泸州、威信及黔中一带,牛蹄塘组厚度也超过100 m。但在湄潭、遵义以北、习水以东及洪江—剑河—三都一线南部,牛蹄塘组厚度普遍小于50 m^[20-21]。

地层对比研究表明,在招标区块周边开阳、瓮安、余庆、麻江、及石阡一带,牛蹄塘组厚度一般可达40~160 m。其中瓮安、玉华等地层厚度最薄,约40 m,代表了黔中古隆起的水下地形高部位。地层厚度由该地区向周缘显著增大,如麻江基东159 m,金沙钻孔113 m,开阳茅坡133 m。但在三都、剑河、铜仁一线东侧,雪峰山隆起西缘,地层厚度急剧减薄,洪江一带完全剥蚀。

纵向上看,牛蹄塘组沉积稳定,标志层九门冲组岩性主要为灰黑色钙质泥岩、下伏震旦系灯影组为硅质粉砂岩,富有机质层段主要集中在牛蹄塘组下部,由粉砂质碳质页岩、粉砂质含碳页岩及碳质页岩组成,厚度可达60~100 m。

2.2 矿物组成

区块及周缘地区露头、钻孔的岩样分析数据统计表明,牛蹄塘组石英、长石等碎屑矿物含量为46%~78%,平均为62%;自生脆性矿物含量为0~8.8%,平均为4.4%(其中黄铁矿平均约占5.3%);粘土矿物含量为17%~47%,平均为38%(图3),其中粘土矿物主要以伊利石为主,含量超过95%,其他见少量绿泥石和高岭土(图4)。

从周边的固体矿产井ZK211、ZK605、ZK807及ZK408井连续采样分析结果看,牛蹄塘组碎屑矿物含量为65.9%,粘土矿物为19.7%,自生脆性矿物为14.4%,与宏观观察结果比较接近。差异可能主要是由于钻孔数据岩组成分分布相对集中,而地表样品采样则相对分散,以及地表样品也受一定的表生风化影

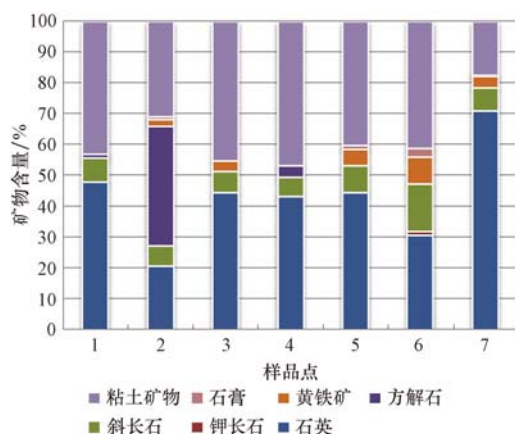


图3 牛蹄塘组黑色页岩岩石矿物组分

Fig. 3 Mineral components of black shale in the Niutitang Formation

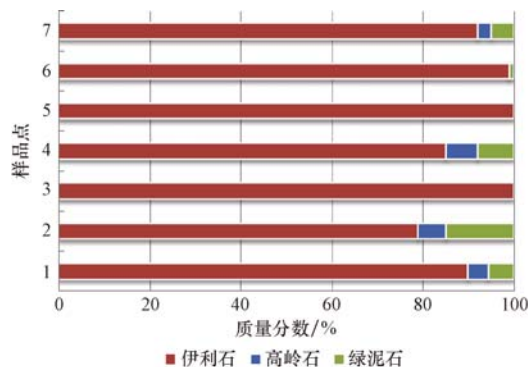


图4 牛蹄塘组粘土矿物组分

Fig. 4 Components of clay minerals in the Niutitang Formation

响等造成的。

从矿物X-射线衍射分析结果看,牛蹄塘组脆性系数介于31%~70%,平均为46.7%。但总体上看,招标区块牛蹄塘组硅质含量高,具有较好的脆性,压裂过程中易于造成剪切破坏,形成复杂网状缝,利于大幅度提高裂缝的体积。

2.3 储层特征

综合已有的研究成果,下寒武统牛蹄塘组含气页岩常规物性普遍较差,总体具有低孔-超低渗、高比表面积特征,具有较好的页岩气储集潜力。

据黔北地区页岩气最新研究成果,下寒武统牛蹄塘组页岩孔隙度为1.7%~25.6%,平均渗透率为 $0.2207 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其相邻地层的白云岩,含硅碳质孔隙度为0.55%~4.22%,渗透率非常低,平均小于 $0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,较页岩气物性差,可能对页岩气具有一定的封闭性。

从牛蹄塘组孔隙微观结构看,页岩具有储集空间类型多样,储集空间直径较小且连通性较差的特征,主要包括孔隙和裂缝。孔隙包括矿物颗粒间(晶间)微

孔隙(骨架颗粒间原生微孔、自生矿物晶间微孔、粘土伊利石贯通层间微缝)、矿物颗粒溶蚀微孔隙、基质溶蚀孔隙、有机质生烃形成的微孔隙等。其中矿物颗粒间、尤其是粘土矿物层间微孔缝占主体,孔隙连通性普遍较差,导致前述测得渗透率很低。牛蹄塘组页岩层段普遍发育微细孔隙,孔喉半径狭窄。粒间微孔、有机质内微孔是纳米级孔隙的主体,孔隙多为孤立微孔,连通性差,岩石渗透率极低。页岩气开采过程中压裂改造对储层沟通具有积极作用。

3 牛蹄塘组地球化学特征

3.1 有机质类型

随着演化程度的增高,在总的趋势上壳质组的含量明显减少,而惰性组和镜质组的相对百分含量有所增加。对于高成熟度烃源岩,其干酪根有机显微组分对于有机质类型判别带来较大困难,因此这里主要利用饱和烃色谱对有机质类型进行分析。

对岑巩区块周边7个牛蹄塘组样品进行了饱和烃色谱分析(图5)。从分析结果看,烃源岩饱和烃主要分布在 C_{16} — C_{28} ,大部分样品呈现出前高单峰型特征,主峰碳位于 C_{17} 和 C_{19} ,少量样品呈现前高双峰型特征,只有一个样品呈现后高单峰型特征;测试的7个样品饱和烃含量介于10%~66%,平均为40%,而饱/芳比均大于3,介于3.3~12.2,非烃+沥青质含量平均为48.2%; C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 甾烷的分布模式有4个样品呈不对称“V”字型($C_{27} > C_{29} > C_{28}$),2个样品呈现对称“V”字型,所有样品均检测到一定数量的伽马蜡烷。另外

测得牛蹄塘组干酪根碳同位素($\delta^{13}C$)值介于-34.7‰~-28.6‰,油型气特征明显。

牛蹄塘组各样品正烷烃气相色谱大多为前高单峰型特征,初步可以确定牛蹄塘组有机质主要来自水生低等生物贡献;饱和烃含量介于40%~60%、饱/芳比大于3均说明有机质类型呈现I型特征,非烃+沥青质含量较高,超过40%则说明有机质类型具有II₁型特征;高 C_{27} 甾烷含量及高伽马蜡烷值则表明有机质主要来自海相水生生物贡献;干酪根碳同位素值一般小于-29‰,表现为腐泥型气特征。

另外从生物发展史来看,高等植物及花草树木等维管植物出现在泥盆纪以后。由此可见,牛蹄塘组有机质类型主要为I型和II₁,样品的生物来源主要为低等水生生物,为咸水环境的水生生物贡献,并经历了较高的热演化阶段。

3.2 有机质丰度

有机质丰度指标主要包括有机碳含量和氯仿沥青“A”含量。由于我国海相地层发育时代早、经历的构造运动多、埋深较大,目前的残留氯仿沥青“A”含量普遍很低,介于0.003%~0.104%(表1),不能准确反映我国海相页岩的生烃能力,故主要采用有机碳含量对海相页岩进行评价。

黑色页岩中的有机质颗粒有多种形态,如不规则细粒状、长条状和尘点状,有时有机质颗粒中可见许多极小的黄铁矿散布。岑巩地区下寒武统牛蹄塘组页岩有机碳含量在1.78%~7.03%,平均为3.38%(表1)。但由于分析均为露头样品,受到不同程度的氧化

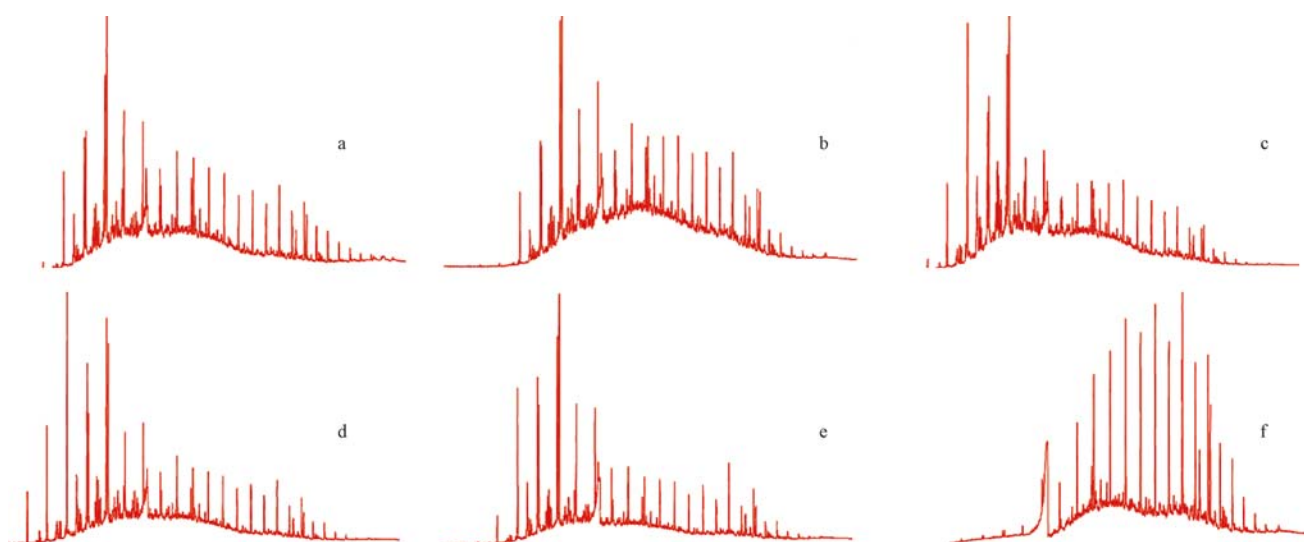


图5 岑巩页岩气区块周缘下寒武统牛蹄塘组黑色页岩饱和烃色谱

Fig. 5 Gas chromatograms of saturated hydrocarbons of black shale in the Lower Cambrian Niutitang Formation in Cen'gong block and its periphery area

- a. 松桃芭蕉坪,变马冲组,深灰色页岩;b. 松桃太平营,九门冲组,深灰色页岩;c. 松浅1井,九门冲组,深灰色页岩;
d. 江口坝黄,牛蹄塘组,灰黑色页岩;e. 江口坝黄,牛蹄塘组,灰黑色页岩;f. 江口的桃映,牛蹄塘组,灰黑色页岩

表1 岑巩区块周缘牛蹄塘组野外露头页岩样品地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of shale samples from outcrops of the Niutitang Formation in Cen'gong block and its periphery area

样品编号	样品来源	层位	岩性	TOC/%	总硫含量/%	R_o /%	氯仿沥青“A”含量/%
1	牛蹄塘组	牛蹄塘组	深灰色页岩	1.09	0.05	3.504	0.006
2	牛蹄塘组	牛蹄塘组	灰黑色页岩	0.65	3.35	3.534	0.002
3	松桃太平营	牛蹄塘组	灰黑色泥页岩	2.95	2.26	3.537	0.068
4	松浅1井	牛蹄塘组	深灰色页岩	1.78	0.04	3.534	0.003
5	江口坝黄	牛蹄塘组	灰黑色页岩	3.53	3.18	3.547	0.104
6	江口坝黄	牛蹄塘组	灰黑色页岩	6.64	7.83	3.558	0.066
7	江口桃映	牛蹄塘组	灰黑色页岩	7.03	2.31	3.769	0.013

导致有机碳含量降低,因此,地下页岩的有机碳含量要比地表测得的大些。

3.3 成熟度

岑巩区块下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩经历了复杂的多期次热史变化,成熟度普遍较高,都达到了成熟晚期阶段。对研究区周边牛蹄塘组露头的7个样品进行了分析,测得固体沥青反射率为4.83%~5.23%,根据Jacob^[22]镜质组反射率与沥青反射率关系,计算镜质体反射率 R_o 介于3.5%~3.8%,平均为3.56%。勘探实践表明,美国页岩气产区的页岩成熟度普遍大于1.3%,在阿巴拉起亚盆地的西弗吉尼亚州南部最高可达4.0%,且只有在成熟度较高的区域才有页岩气的产出^[23-26]。因此,页岩的高成熟度(>2%)不是制约页岩气聚集的主要因素,相反,成熟度越高越有利于页岩气的生产。

4 资源潜力分析

4.1 含气量

页岩含气量是指每吨页岩所含的天然气总量。含气量可分解为吸附、游离及较小的溶解含气量,其大小直接影响着页岩气藏的经济可采价值。根据岑页1井现场解吸获得的实验数据,牛蹄塘组含气页岩段1455.45~1463.62 m岩心段现场解吸量+损失气量最大,可达1.165 m³/t,总体而言,该区内下寒武统牛蹄塘组黑色页岩含气量在0.5~2.5 m³/t。从实钻情况看,牛蹄塘组泥页岩中见到6次气测异常,厚度达37 m,其中全烃值最大为1.8%,后效显示明显。

4.2 资源量

页岩气发育条件及富集机理的特殊性,决定了相应资源评价方法和参数取值的特殊性。目前对于页岩气资源潜力评价的方法主要有体积法、类比法、统计分析法、成因法和综合法,其中体积法比较适用于我国现

阶段页岩气资源量计算。采用全国页岩气资源战略调查推荐的页岩气资源评价方法——概率体积法,对岑巩地区下寒武统牛蹄塘组进行资源量计算。

根据体积法计算资源量的公式,其中直接参与计算的参数主要包括有效面积、有效厚度、岩石密度、总含气量、压缩因子和可采系数。岑巩区块露头和钻井资料都比较少,不同概率下页岩面积根据有机碳相关关系计算进行取值;页岩有效厚度则根据相对面积占有法求得;页岩气的总含气量主要参考岑页1井现场解吸数据和实验室破碎所得分析数据进行合理取值;可采系数则主要根据天然气勘探可采经验值进行赋值。通过计算,岑巩页岩气区块地质资源量为866.71×10⁸ m³,可采资源量为71.94×10⁸ m³。

4.3 有利区预测

页岩气藏是典型的自生自储型气藏,因此,评价页岩储层除与常规储层有相同的岩石学、物性等储层基本特征外,还应考虑页岩气藏形成的含气性及能否被开采等要件。为此,结合美国页岩气勘探成功经验,结合区块内资料的实际情况,筛选出6个关键地质因素对页岩储层有利区勘探方向进行预测:有机质丰度、热演化程度、页岩层厚度、页岩埋深、保存条件与地表地形条件。由于有机质类型、矿物组成和含气量、储层条件等在招标区块内变化不大,在页岩气勘探程度空白区内,对以上数据也很难进行系统求取,这里在有利区预测方面未作考虑。

根据页岩气藏有利区预测方法,对区块内目的层牛蹄塘组进行评价,综合页岩厚度、埋深、有机碳、热成熟度、地形地貌等作出相应的综合评价图(图6)。

牛蹄塘组页岩气勘探有利区带可划分为3个级别,其中Ⅰ类有利区分布在民和、羊桥和大坪地区,西起民和坪落、东至大坪、南起羊桥、北止地慢,呈环带状分布在古隆起区,面积为119.62 km²;Ⅱ类有利区紧邻Ⅰ类有利区南侧,呈环带分布,东止水尾镇北,面积109.15 km²;Ⅲ类有利区面积最大,主要分布在天马镇、天星和朱家场一线,面积381.66 km²。

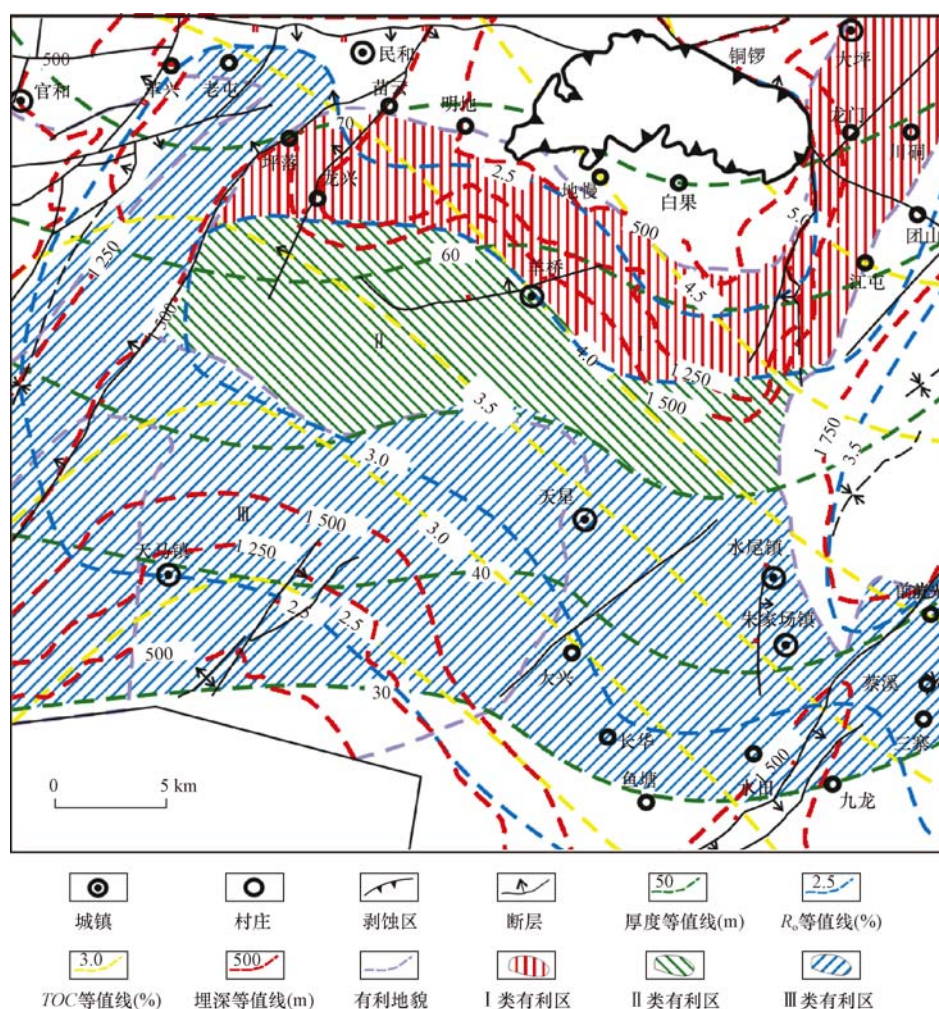


图6 岑巩页岩气区块页岩气有利区预测

Fig. 6 Prediction of favorable shale gas play fairways in Cen'gong block

5 结论

1) 岑巩页岩气区块目的层较厚,但孔喉半径狭窄,普遍发育微细孔隙;页岩层硅质含量高,具有较好的脆性,有利于后期储层压裂改造。

2) 牛蹄塘组饱和和烃色谱表现为前高单峰特征、样品检测到伽马蜡烷伽,说明烃源岩有机质类型主要为I型和II₁型,有机质丰度较好(平均为3.38%),成熟度高(平均 R_o 达3.56%)。

3) 岑页1井现场测试牛蹄塘组含气量可达 $1.165 \text{ m}^3/\text{t}$,概率体积法计算页岩气可采资源量 $71.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,I类有利区主要分布在区块中上部的民和、羊桥和大坪地区。

参考文献

- [1] 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. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6):

136-140.

- [2] 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. Reservoir mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7):15-18.
- [3] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):1-6.
Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation type and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12):1-6.
- [4] 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇.我国富含有机质页岩发育特点与页岩气战略选区[J].天然气工业,2009,29(12):115-118.
Li Yuxi, Nie Haikuan, Long Pengyu. Development characteristics of organic rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12):115-118.
- [5] 张大伟.加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J].石油与天然气地质,2010,31(2):135-139,150.
Zhang Dawei. Strategic concepts of accelerating the survey, exploration and exploitation of shale gas resources in China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2):135-139,150.
- [6] 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.
- [7] 李世臻, 乔德武, 冯志刚, 等. 世界页岩气勘探发现现状及对中国的启示 [J]. *地质通报*, 2010, 29(6): 918–924.
- Li Shizheng, Qiao Dewu, Feng Zhigang, et al. The state of worldwide shale gas exploration and its suggestion for China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6): 918–924.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions of from the development of fractured shale gas in North America [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 392–400.
- [11] 魏全超, 朱冬梅, 黄文明. 川东南下寒武统牛蹄塘组烃源岩特征及有效性分析 [J]. *四川地质学报*, 2012, 32(1): 69–73.
- Wei Quanchao, Zhu Dongmei, Huang Wenming. Characteristics and validity analysis of hydrocarbon source rock in the lower Cambrian Niutitang formation in Southeast Sichuan [J]. *Acta Geological Sichuan*, 2012, 32(1): 69–73.
- [12] 何金先, 段毅, 张晓丽, 等. 贵州地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩地质特征及其油气资源意义 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(3): 37–42.
- He Jinxian, Duan Yi, Zhang Xiaoli, et al. Geological characteristics of its oil and gas resources significance in the lower Cambrian Niutitang formation in Guizhou area [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2011, 26(3): 37–42.
- [13] 杨剑, 易发成. 贵州—湖南黑色岩系的有机碳和有机硫特征及成因意义 [J]. *地质科学*, 2005, 40(4): 457–463.
- Yang Jian, Yi Facheng. Genesis and organic carbon/sulphur characteristics of the lower Cambrian black shale series in Guizhou-Hunan [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(4): 457–463.
- [14] 杨剑, 易发成, 钱壮志. 黔北黑色岩系干酪根特征与碳同位素指示意义 [J]. *矿物岩石*, 2005, 25(1): 99–103.
- Yang Jian, Yi Facheng, Qian Zhuangzhi. Characteristics of lower Cambrian black shale series' kerogen and their carbon isotope implications in Northern Guizhou Province [J]. *Mineral Petrology*, 2005, 25(1): 99–103.
- [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] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理 [J]. *古地理学报*, 2001, 3(1): 1–14.
- Feng Zhenzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies Palaeogeography of the Cambrian in South China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(1): 1–14.
- [17] 马永生, 陈洪德, 王国力, 等. 中国南方层序地层与古地理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Ma Yongsheng, Cheng Hongde, Wang Guoli, et al. Sequence stratigraphy and paleogeography in South China [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [18] 滇黔桂石油地质志编写组. 中国石油地质志——滇黔桂油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- The petroleum geology group of Dianqiangui. *Petroleum geology of China—oil and gas area of Dianqiangui* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [19] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- Geology and mineral bureau of Guizhou province. *Regional geology of Guizhou province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [20] 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新进展 (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(2): 1–16.
- Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part I): distribution of four suits of regional marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2008, 13(2): 1–16.
- [21] 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 288–299.
- Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the lower Paleozoic of the upper Yangtze region, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 288–299.
- [22] Jacob H. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas [J]. *Erdol and Kohle*, 1985, 38(3): 365.
- [23] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(2): 155–175.
- [24] Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 551–578.
- [25] Milan K. Database gathers Europe shale data [J]. *AAPG Explorer*, 2009, 30(11): 10.
- [26] 《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 “Series of book on the geology and exploratory development of shale gas”. *Recent progresses of shale gas development in the North America* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 1–271.