

黔西北下寒武统牛蹄塘组 页岩气成藏条件与有利勘探区预测

吕艳南^{1,2}, 张金川¹, 张鹏¹, 黄宇琪¹, 尉菲菲¹, 邓恩德¹

(1 中国地质大学(北京)页岩气勘查与评价国土资源部重点实验室)

(2 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室)

摘要 以野外露头调查、老井复查和岩心样品测试等为基础,通过现场解吸实验和等温吸附模拟的含气性分析,认为黔西北下寒武统牛蹄塘组岩性主要为深水陆棚黑色碳质页岩和浅水陆棚粉砂质页岩,其中富有机质页岩段为牛蹄塘组底部的碳质页岩。页岩沉积厚度大(大于39m)、分布稳定。有机质类型主要为I型干酪根,有机碳含量较高(富有机质页岩段平均大于5%),有机质热演化程度处于高—过成熟阶段;页岩储层中微裂缝、微孔隙发育,具较好的孔隙度(平均5.14%)和渗透率($0.0114 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),含气量大(平均 $1.3 \text{ m}^3/\text{t}$),具有良好的气资源潜力。预测金沙—息烽以及仁怀两个地区为页岩气勘探有利区。

关键词 寒武系;牛蹄塘组;页岩气;成藏条件;勘探潜力;贵州西北部

中图分类号: TE122.3¹; TE132.2

文献标识码: A

随着北美页岩气勘探开发的快速发展,中国页岩气资源的战略地位越来越受到重视^[1-4]。目前,我国页岩气开始进入规模化开发的初期阶段,除四川盆地志留统龙马溪组页岩的突破之外,其他地区海相地层的页岩气尚未形成工业产能。

在贵州地区,发育有多套含气页岩层系,厚度大、分布广,具有形成大规模页岩气资源的基础地质条件^[5-11],其中下古生界海相富有机质的页岩集中分布在黔西北地区。

黔西北地区属于油气空白区,页岩气勘探的可用资料较少,且由于区内构造的多旋回性,造成了富有机质页岩段发育的地质条件较为复杂,其中含气页岩发育的地质特征、含气量以及页岩气富集规律尚不明确。本文利用野外露头调查、老井复查和分析测试等方法,结合最新页岩气井勘探成果资料及含气量现场解吸数据,进行了黔西北下寒武统牛蹄塘组页岩气形成与富集条件的研究,并优选出具有页岩气勘探潜力的有利区,这对上扬子区下寒武统海相页岩气的勘探可能具有一定的指导意义。

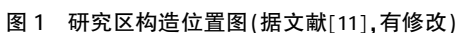
1 研究区地质背景

黔西北地区在大地构造上属于上扬子板块,主体包括黔中隆起和滇黔北部拗陷,面积约40 000 km² (图1)。其中,黔中隆起是在上扬子板块中的一个东西向展布的早古生代隆起带,位于贵州中西部赫章、大方、织金、修文、开阳一带,其南部和北部紧邻黔南拗陷和滇黔北部拗陷,东北部接武陵拗陷,西南部被垭都—紫云断裂所走滑错断^[9] (图1)。黔西北地区褶皱和断层比较发育,主要以北北东及北东方向的褶皱、压性断层、以及与它们有成因联系的扭性断层和张性断层为主,这些构造对研究区的沉积起到了一定的控制作用。在早寒武世牛蹄塘早期,随着海平面的上升,沉积水体较深,主要为深水陆棚沉积环境,由于在缺氧环境下,并受陆源的影响,沉积了一套灰黑色—黑色含粉砂—粉砂质碳质泥岩、页岩;随着牛蹄塘后期相对海平面的逐渐下降,在牛蹄塘组的上部沉积了一套粉砂质页岩、含钙粉砂质页岩和灰绿色粉砂质页岩。

收稿日期: 2014-06-08; 改回日期: 2014-09-03

本文受国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室项目(编号:MRE201201)、“海洋油气资源与环境地质战略研究与国际合作”公益性行业科研专项项目(编号:201211086-09)、国家自然科学基金项目“页岩气聚集机理和成藏条件研究”(编号:41272167)与全国油气资源战略选区调查与评价专项“全国页岩气资源战略调查先导试验区—黔北地区页岩发育规律、含气性及储集能力研究”(编号:2009GYXQ15-03-01)资助

吕艳南: 1989年生,硕士研究生。主要从事页岩油气勘探研究工作。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路29号 中国地质大学能源学院; E-mail: lvyannan@126.com



2.1 泥页岩厚度与分布特征

0 20 40km

省界 工区界线 厚度等值线 厚度(m) 厚度(m) 浅水陆棚 深水陆棚 丁山高地

10 20 30 40 50 60

25 21

太深 仁贞1

图2 黔西北下寒武统牛蹄塘组黑色富有机质页岩展布图

本次研究在露头观察、剖面测量和钻井资料分析的基础上,选取了一条北西—南东向剖面进行地层对比(图3)。从图上可以看出:纵向上,由于震旦纪末期大规模快速海侵,导致了牛蹄塘组底部的深水陆棚相富有机质页岩直接覆盖在灯影组白云岩之上,随着海平面的下降,岩性以浅水陆棚相的粉砂质泥页岩为主,呈现逆粒序、颜色向上变

浅、碳质含量降低的特征;平面上,研究区内牛蹄塘组富有机质页岩在方深1井附近的厚度相对较薄,向东南部逐渐变厚,在开阳县茅坡附近沉积厚度最大,最厚可达69.3 m;金沙县境内的仁页2井揭示了牛蹄塘组底部的富有机质页岩为黑色碳质页岩,厚度为41.1 m,具备页岩气商业开采厚度(>30 m)的条件^[11]。

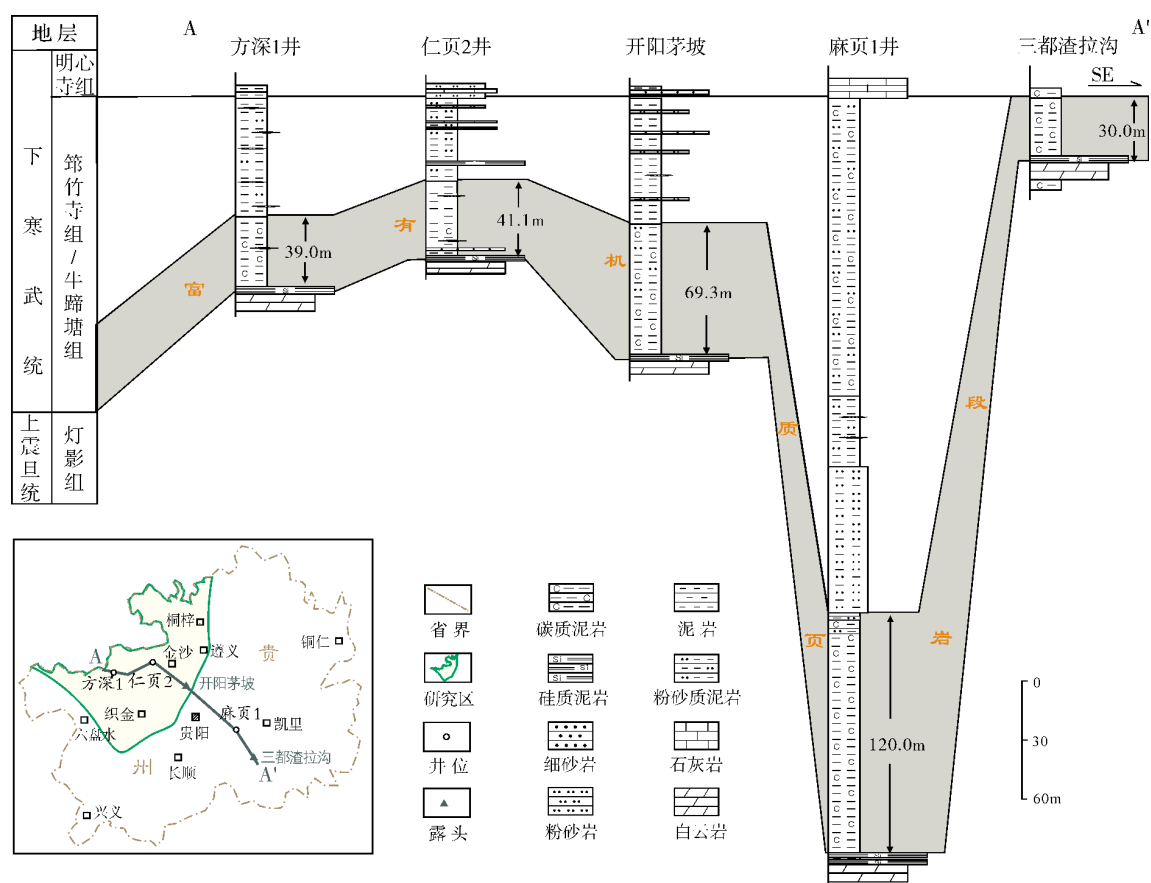


图3 贵州省下寒武统牛蹄塘组黑色富有机质页岩地层柱状对比图

2.2 有机地球化学特征

据北美页岩气勘探的经验,生气泥页岩的主要有机质类型是I型和II型干酪根^[12]。有机碳含量不仅对泥页岩的生烃能力、裂缝的发育程度和吸附能力等起到控制作用,而且在一定程度上对富有机质泥页岩的含气量也起到了控制作用^[13-14]。

据研究区周边14个露头剖面点和钻井岩心的有机质类型测试分析,表明牛蹄塘组干酪根的显微组分主要为腐泥组和沥青组,缺乏镜质组、惰质组和壳质组,有机质类型主要为I型;有机碳含量普

遍大于1%,多数分布在2%~6%(图4a),其中,10个采样地点的有机碳含量大于4%,这说明了牛蹄塘组页岩具有较强的生烃潜力。纵向上,据仁页1井48块牛蹄塘组页岩样品的测试结果(图4b),有机碳含量分布在0.25%~10.8%,平均值为4.68%,其中在牛蹄塘组底部(埋深1323~1347 m)的TOC值都大于4%,说明该段地层是页岩气勘探的有利层段。平面上,高有机碳含量(大于6%)的区域主要位于富有机质页岩的沉积中心,即黔西—金沙—息烽地区,呈现以高值点为核心、向四周呈环状逐渐降低的特征(图5)。

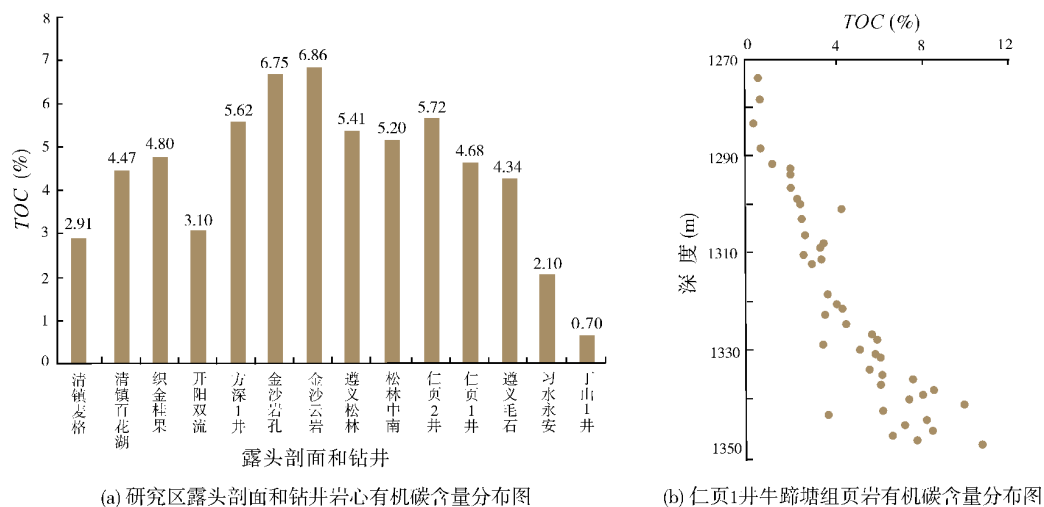


图4 黔西北下寒武统牛蹄塘组实测样品有机碳含量分布图

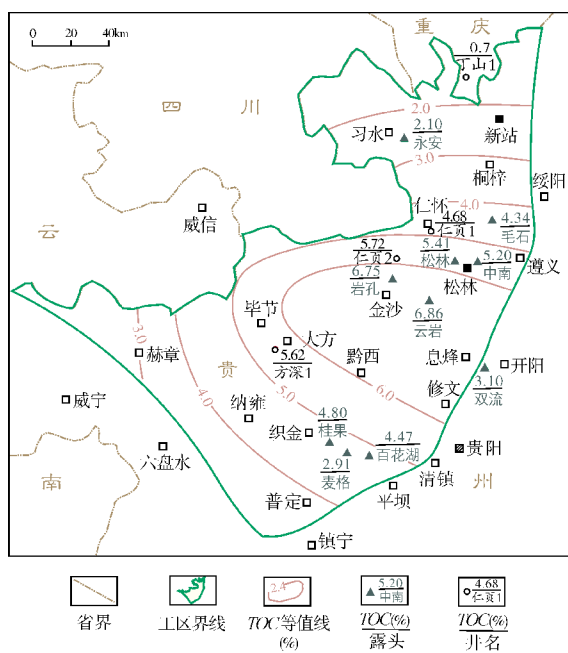


图5 黔西北下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩有机碳含量等值线图

热演化程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的 R_o 在1.1%~3.0%的范围^[15]。本文对研究区牛蹄塘组页岩取样进行 R_o 测试,其中,仁页1井10块岩心样品的成熟度在3.16%~4.26%之间,仁页2井的10块样品在2.01%~3.11%之间,遵义地区3块露头样品的成熟度为4.2%~4.23%,织金、清镇和习水地区的41块露头样品的成熟度则在2.57~4.3%之间,这些测

试数据说明了下寒武统牛蹄塘组页岩的成熟度已达到过成熟。但美国的页岩气勘探实践表明,美国产气区的页岩成熟度普遍大于1.3%^[16-17],甚至在阿巴拉契亚盆地的西弗吉尼亚州南部,页岩的成熟度最高达4%^[18],因此,在页岩高成熟度(大于2%)的条件下仍能发生页岩气的聚集。

2.3 泥页岩储层特征

2.3.1 矿物组成

页岩气储层的矿物成分往往会影响页岩的含气量和压裂效果^[19-20]。在北美商业开发中,页岩储层的石英等碎屑矿物含量一般高于40%,而黏土矿物的含量则小于30%。本文通过对仁页1井岩心的岩石矿物分析发现,牛蹄塘组页岩储层的碎屑矿物含量在50%~69%的范围,平均61%;黏土矿物含量在15%~40%之间,平均31%,自生脆性矿物(方解石平均占4%,白云石平均占2%,黄铁矿平均约占3%)含量为5%~16%,平均9%(图6)。

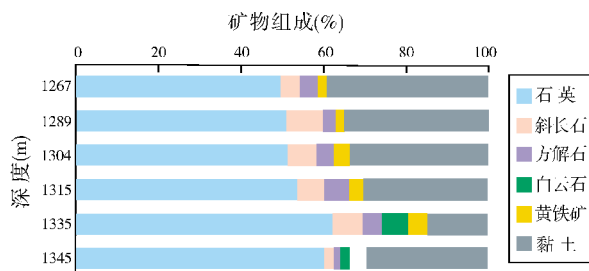


图6 黔西北仁页1井牛蹄塘组页岩矿物组成随深度变化图

根据仁页1井的岩心分析测试资料,所得的牛蹄塘组页岩自生脆性矿物含量、黏土矿物含量与有机碳含量的相关关系(图7),从图中可以看出自生脆性矿物含量和有机碳含量呈正相关(图7a),而黏土矿物含量与有机碳含量呈负相关(图7b),这反映了有机质含量是控制黄铁矿形成的基本因素,而黏土矿物含量高则不利于有机质的富集。这是因为海相中自生脆性矿物(尤其是黄铁矿)的形成往往与强还原环境对应,硫酸盐以有机质为还原剂在缺氧环境下被还原成 H_2S ,最终与活性铁反应形成黄铁矿而保存于沉积物中;黏土矿物一方面是有机质的吸附剂,对烃源岩中有机质的富集程度起重要作用,另一方面黏土矿物也是有机质向烃转化过程中的催化剂,对于研究区的热演化程度处于过成熟阶段的牛蹄塘组页岩来说,黏土矿物的催化作用使得有机质被大量转化,使其吸附作用不明显,更多地表现为催化作用。

总体而言,研究区的牛蹄塘组页岩储层的脆性矿物含量较高,而黏土矿物含量相对较低,具有较好的页岩气压裂条件,有利于页岩气后期的压裂开发。

2.3.2 储集物性

孔隙度和渗透率是泥页岩储层最重要的储集物性参数,孔隙是页岩气重要的储存空间,孔隙度是确定游离气含量的关键参数^[21]。根据18个野外露头样品的测试结果,牛蹄塘组页岩储层孔隙度分布区间为0.70%~12.9%,平均5.14%;渗透率分布区间为 $(0.0031\sim0.0185)\times10^{-3}\mu m^2$,平均为 $0.0114\times10^{-3}\mu m^2$,这

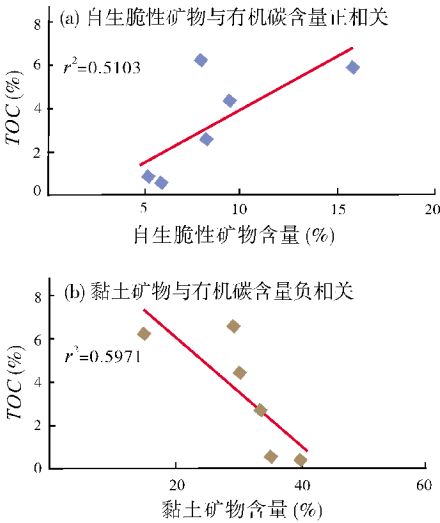
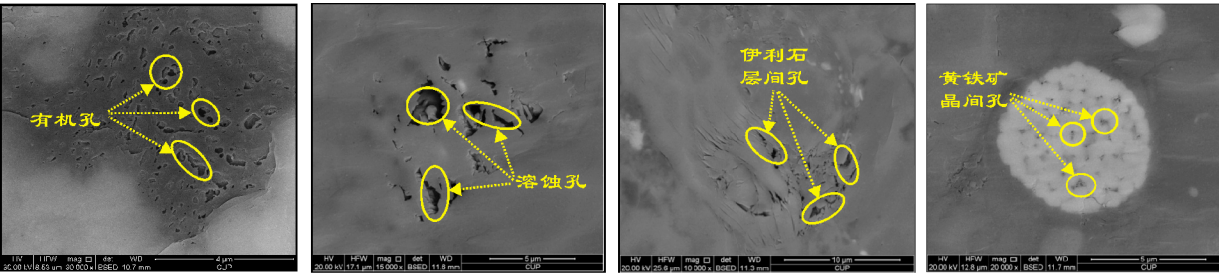


图7 黔西北仁页1井牛蹄塘组页岩矿物、有机碳含量相关图

里的孔隙度相对于美国五大页岩气盆地的含气页岩孔隙度(3%~14%)而言,属于中等。

另外,通过对岩石样品的扫描电镜分析,可以看出牛蹄塘组泥页岩的微裂缝、微孔隙较为发育。孔隙类型主要有粒间孔、粒内孔、溶蚀孔、晶间孔和有机孔(图8)。通过比表面分析发现,仁页1井牛蹄塘组页岩的BET比表面积为 $3.34\sim20.01 m^2/g$,平均值为 $10.59 m^2/g$,平均孔直径在 $10.02\sim60.04 nm$ 之间,平均值为 $31.77 nm$;仁页2井的牛蹄塘组页岩的BET比表面积为 $0.74\sim7.07 m^2/g$,平均值为 $2.62 m^2/g$,平均孔直径在 $3.2\sim14.6 nm$ 之间,平均值为 $7.57 nm$ (表1)。



(a) 有机孔。遵义松林露头 (b) 溶蚀孔。仁页1井1304m (c) 伊利石层间孔。仁页1井1335m (d) 黄铁矿晶间孔。仁页1井1304m

图8 黔西北下寒武统牛蹄塘组页岩微观孔隙发育特征

表1 黔西北牛蹄塘组页岩孔隙参数特征

井名	有效孔隙度 (%)		渗透率 ($\times10^{-3}\mu m^2$)		BET 比表面 (m^2/g)		BJH 总孔积 (ml/g)		平均孔直径 (nm)	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
仁页1井	0.80~2.30	1.64	0.0038~0.0069	0.0047	3.34~20.01	10.59	0.0033~0.0156	0.0076	10.02~60.04	31.77
仁页2井	1.13~2.54	1.80	0.0010~0.0039	0.0017	0.74~7.07	2.62	0.0024~0.0128	0.0043	3.20~14.60	7.57

2.4 泥页岩含气性

页岩含气量及其变化规律是页岩气资源量评价的主要内容,它们从根本上影响着页岩气的可采性^[22],而页岩的有机质丰度、热演化程度、孔隙度、厚度等是含气量高低的主控因素^[23]。页岩的含气量主要包括游离气含量和吸附气含量,本文采用了等温吸附模拟和现场解吸实验来进行黔西北地区下寒武统牛蹄塘组泥页岩的含气性研究。

2.4.1 等温吸附模拟

易同生等^[24]通过对仁页1井5块样品的等温吸附模拟(图9)计算得出,仁页1井牛蹄塘组页岩(30℃)等温饱和吸附气量在0.64~7.17 m³/t之间,平均为3.05 m³/t;Langmuir压力在1.04~2.48 MPa之间,平均为1.98 MPa,反映了在地下的压力条件下牛蹄塘组富有机质页岩能够吸附较多的页岩气。通过对不同样品的等温吸附模拟发现,TOC是控制吸附气量的主要因素,而且牛蹄塘组黑色页岩吸附气量和TOC之间存在良好的线性关系,可以建立TOC与吸附气量($Q_{\text{吸}}$)的关系模型,即: $Q_{\text{吸}} = 0.818 \times \text{TOC} \times 100 + 0.069$ 。

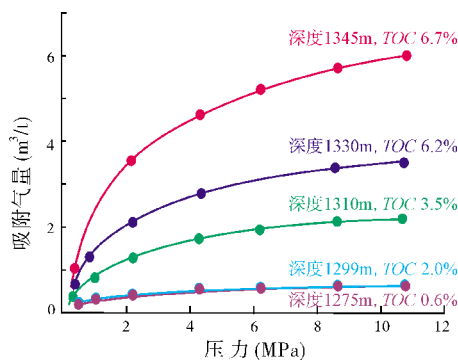


图9 黔西北仁页1井牛蹄塘组黑色页岩段等温吸附曲线
(据文献[24],略有修改)

2.4.2 现场解吸实验

通过对研究区各调查井进行现场解吸实验,发现在牛蹄塘组的中下部富有机质页岩段具有较高的含气量。例如,仁页2井42块样品的现场解吸实验表明,随着埋深的增加,解吸气体积总体趋势逐渐增加(图10),至埋深921.6m时达到峰值308 ml,含气量为0.154 m³/t;其中,解吸气量较高的集中段为845.4~921.6m,927.6m深度以下的解吸气量逐渐减少。由于

页岩储层具有较强的非均质性,大量的页岩气在现场无法完全解吸释放,完整的解吸过程通常需持续数周至数月,结合室内脱气计算的残余气量可以达到现场解吸气量的2~17倍^[24]。因此,考虑到装罐时间较长、损失气量较多、解吸实验未完全完成等原因,结合参考已有的解吸曲线作比较,推测研究区牛蹄塘组页岩含气量应在0.2~2.5 m³/t之间,平均为1.3 m³/t。

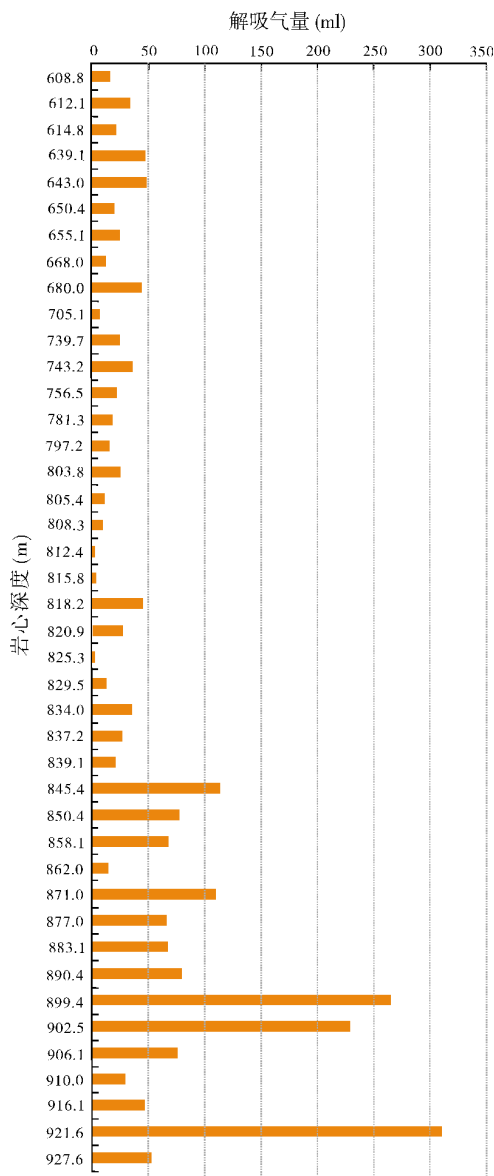


图10 黔西北仁页2井岩心解吸气量变化趋势图

3 有利区预测与资源潜力分析

针对目前我国页岩气勘探开发的实际情况,张

金川等^[25]在大量野外露头调查、基础研究、实验测试分析及评价的基础上,从泥页岩厚度、有机质丰度、热成熟度、埋深、总含气量、地表条件及保存条件等方面提出了页岩气有利区的优选标准,认为海相页岩发育层位稳定且单层厚度不小于10m、有机碳含量平均不小于1.5%、热成熟度大于1.2%、总含气量不小于0.5m³/t、埋深在300~4500m、地形高差较小、且具有中等—好的保存条件的区域是页岩气分布有利区。本文根据黔西北地区牛蹄塘组页岩形成的地质背景、页岩气的成藏条件及目前的资料现状,采用综合信息叠合法,利用地层厚度、有机碳含量、有机质热演化程度等参考指标,优选了金沙—息烽以及仁怀两个页岩气发育有利区(图11)。

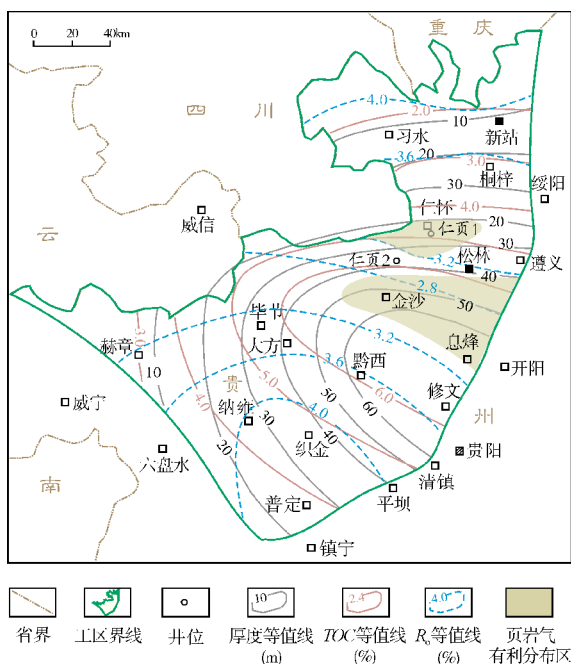


图11 黔西北下寒武统牛蹄塘组页岩气有利区分布图

(1)金沙—息烽有利区:该区为深水陆棚相沉积环境,沉积了一套以黑色碳质页岩和灰黑色粉砂质页岩为主的深水碎屑岩,厚约40~60m,埋深在1 000~3 000 m;有机碳含量普遍高于5%,具有良好的生烃潜力;页岩的有机质成熟度主体分布在2.8%~3.2%之间,处于过成熟中晚期阶段;地貌以中低山为主,含气量平均1.3m³/t;具备一定的保存条件,有利于页岩气的成藏。

(2)仁怀有利区:该区为深水—浅水陆棚相沉积区,富有机质泥页岩厚度约20~40m,埋深在1500~4500m;有机碳含量较高,普遍高于4%;成熟度主体分

布在3.2%~3.6%之间,处于过成熟晚期阶段,虽然生气能力弱,但高有机碳含量在适当条件下仍可保存大量天然气;保存条件好,有较好的页岩气勘探潜力。

4 结 论

(1)黔西北地区牛蹄塘组底部的富有机质页岩主要形成于深水陆棚相沉积环境,在黔西—修文一带厚度可达60m,岩性以碳质页岩为主,分布稳定、面积广。

(2)牛蹄塘组底部富有机质页岩段有机质类型以I型为主,有机碳含量多大于2%,且越接近牛蹄塘组底部,有机碳含量就越高;热成熟度分布在2.01%~4.56%之间,处于高一过成熟阶段;石英、长石含量为20.4%~72.4%,平均51.2%,黏土矿物含量平均41.9%,脆性矿物含量高;微孔隙、微裂缝发育,具有良好的页岩气形成与富集条件。

(3)根据页岩气有利区的优选标准,综合牛蹄塘组富有机质页岩厚度、有机碳含量、热演化程度、埋深和含气量等指标,采用综合信息叠合法优选出了金沙—息烽地区和仁怀地区这两个页岩气勘探有利区。

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.
- [2] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报,2010,31(4): 689-694.
- [3] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业,2009,29(5): 11-16.
- [4] 安晓璇,黄文辉,刘思宇,等. 页岩气资源分布、开发现状及展望[J]. 资源与产业,2010,12(2): 103-109.
- [5] 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):288-299,308.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 何金先,段毅,李晓丽,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.
- [9] 邓新,杨坤光,刘彦良,等. 黔中隆起性质及其构造演化[J]. 地学前缘,2010,17(3):79-89.
- [10] 王阳,陈洁,胡琳,等. 沉积环境对页岩气储层的控制作用——以中下扬子区下寒武统筇竹寺组为例[J]. 煤炭学报,2013,38(5):845-850.
- [11] 田海芹,郭彤彬,胡东风,等. 黔中隆起及其周缘地区海相下

- 组合与油气勘探前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(4):509-518.
- [12] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [13] 宫美林, 丁文龙, 皮冬冬, 等. 鄂尔多斯盆地东南部下寺湾一云岩区二叠系山西组页岩气形成条件[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(3):1-10.
- [14] 龙鹏宇, 张金川, 李玉喜, 等. 重庆及其周缘地区下古生界页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2009, 29(12):125-129.
- [15] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1):69-75.
- [16] Martineau D F. History of the Newark East Field and the Barnett shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):399-403.
- [17] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bendarch Fort Worth basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):405-436.
- [18] Milici R C, Swezey C S. Assessment of Appalachian Basin oil and gas resources: Devonian Shale-Middle and Upper Paleozoic total petroleum system [M/OL]. Denver: USGS Information Services, 2006 [2008-09-18]. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1237/index.html>.
- [19] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5):775-782.
- [20] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25 (6):597-604.
- [21] 单衍胜, 张金川, 李晓光, 等. 辽河盆地东部凸起太原组页岩气聚集条件及有利区预测[J]. 大庆石油学院院报, 2012, 36(1):1-7.
- [22] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3):308-317.
- [23] 谢忱, 张金川, 李玉喜, 等. 渝东南渝科1井下寒武统富有机质页岩发育特征与含气量[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1):11-15.
- [24] 易同生, 赵霞. 贵州下寒武统牛蹄塘组页岩储层特征及其分布规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(8):8-14.
- [25] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2) :184-191.

编辑:黄革萍

Gas Accumulation Conditions of Lower Cambrian Niutitang Shale and Prediction of Potential Zones in Northwestern Guizhou

Lü Yunnan, Zhang Jinchuan, Zhang Peng, Huang Yuqi, Yu Feifei, Deng Ende

Abstract: The Lower Cambrian Niutitang shale is wide and stably distributed in northwestern Guizhou. It consists of deep-water shelf carbonaceous shale and shallow-water shelf silty shale with large sedimentary thickness(>39m), in which the black carbonaceous shale at the bottom of Niutitang Formation is organic-rich. Organic geochemical analysis shows that it is characterized by predominant Type-I kerogen, high TOC values (TOC >5% in the organic-rich black shale) and high mature to overmature organic matter in thermal evolution. Microfractures and micropores are developed in the shale reservoirs, which are of relatively high porosity(mean 5.14%) and permeability(mean $0.0114 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$). The high content of gas(1.3m³/t in average) means a good potential of shale gas resources. It is predicted that Jinsha-Xifeng and Renhuai areas are potential for shale gas prospecting.

Key words: Niutitang Fm.; Shale gas; Preservation condition; Gas Accumulation condition; Northwestern Guizhou

Lü Yunnan; Master degree in progress at China University of Geology (Beijing). Add: 29 Xueyuan Rd., Beijing, 100083, China