

# 黔中隆起及邻区下寒武统页岩气成藏特殊性分析

张培先

(中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 南京 210011)

**摘要:**黔中隆起及邻区下寒武统牛蹄塘组页岩厚度大、有机碳含量高、热演化程度高、脆性矿物含量高,具备页岩气成藏的基本地质条件,但经过多年页岩气勘探实践,至今未取得实质性突破,主要受页岩气成藏条件的特殊性控制。在系统分析野外剖面以及黄页1井、龙页1井、丁山1井等资料的基础上,重点开展沉积相、页岩分布、有机碳含量、热演化程度等页岩基本地质特征和储集类型、储集物性及页岩含气性等页岩储层特征的研究,认为页岩气成藏条件特殊性主要表现在2个方面:(1)页岩热演化程度的特殊性,生烃、排烃历史复杂,热演化程度高,不利于页岩气的赋存和富集;(2)储层特殊性,热演化史复杂,成岩作用强导致页岩孔隙度较低,尤其有机孔发育少且孔径较小,页岩储集性差。在此基础上,制定了页岩气选区评价参数标准,评价了页岩气富集有利区。初步明确了黔南坳陷黄平地区具有构造相对稳定、页岩埋深适中、有机质热演化程度相对较低、保存条件较好及含气性好等特征,勘探风险程度相对较低,是黔中隆起及邻区页岩气勘探突破的I类有利地区;黔西地区由于成熟度较高,是探索高热演化条件下页岩气藏的II类有利区。

**关键词:**页岩气;成藏特殊性;牛蹄塘组;下寒武统;黔中隆起

**中图分类号:**TE132.2

**文献标识码:**A

## Peculiar accumulation conditions for shale gas in the Lower Cambrian in Qianzhong uplift and its periphery

Zhang Peixian

(Research Institute of Exploration & Development, SINOPEC East China Company, Nanjing, Jiangsu 210011, China)

**Abstract:** The Lower Cambrian Niutitang Formation shale is characterized by large thickness, high organic carbon content, high thermal evolution degree and high brittle mineral content in the Qianzhong uplift and its periphery. It has the basic geological conditions for shale gas accumulation. However, after many years of exploration, the study area has not made a substantial breakthrough, and some peculiar conditions for shale gas accumulation are the main controlling factors. Through the systematic analysis of outcrop sections and the data from wells including Huangye 1, Longye 1 and Dingshan 1, this paper focuses on the study of the basic geological characteristics of shale, including sedimentary facies, shale distribution, organic carbon content, thermal evolution degree, and the shale reservoir characteristics, including reservoir types, reservoir physical properties and gas content. The peculiarities of shale gas accumulation conditions are mainly manifested in two aspects: (1) The particularity of high shale thermal evolution degree, with complex hydrocarbon generation and expulsion history, is not conducive to gas occurrence and enrichment. (2) The particularity of the shale reservoir. Complex thermal evolution and strong diagenesis resulted in low porosity, especially little organic matter pores and small diameter, which made the reservoir property of shale very poor. On this basis, some parameters for shale gas exploration were selected, and some favorable areas for shale gas enrichment were evaluated. The Huangping region in the Qiannan Depression is a type I favorable area of shale gas exploration in the Qianzhong uplift and its periphery, with relatively stable structure, moderate depth, relatively low thermal evolution degree of organic matter, favorable preservation conditions and good gas-bearing capacity. The exploration risk of the Huangping region is relatively low. Because of high maturity, the Qianxi region is a type II favorable area to explore for shale gas reservoirs with high thermal evolution degree.

**Key words:** shale gas; peculiar accumulation conditions; Niutitang Formation; Lower Cambrian; Qianzhong uplift

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2017-01-09。

作者简介: 张培先(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事页岩气勘探研究工作。E-mail: peixianzhang1983@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061); 国土资源部、财政部“贵州黄平页岩气综合利用示范基地建设”项目联合资助。

从中国南方页岩气勘探现状来看,下寒武统页岩气仅在四川盆地内的威远、井研—犍为等地区实现了“点”突破,单井获得 $(2\sim 3)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流。自2009年以来,前人从页岩品质、储层特征、有利区预测等方面对黔中隆起及邻区进行了研究,认为下寒武统牛蹄塘组页岩具有厚度大、有机碳含量高及成熟度高的特点,具备页岩气发育的地质条件,并初步预测黔南、黔北等地区为勘探有利区<sup>[1-4]</sup>。在勘探上多口钻井获得良好气测显示甚至低产气流,然而由于下寒武统页岩经历的构造运动复杂<sup>[5-7]</sup>,页岩热演化程度高<sup>[1-2]</sup>,导致页岩气成藏具有特殊性,而特殊性目前研究较为薄弱,影响了这一地区页岩气勘探进展,是研究区至今未获得商业突破的原因。黔中隆起及邻区下寒武统页岩的地质条件特殊性决定了页岩气成藏特殊性,特别是构造演化对保存条件的影响和高温演化程度双重特殊性是制约勘探突破的关键。根据对页岩沉积环境、岩性组合及成藏评价指标等的研究,系统分析黔中隆起及邻区下寒武统页岩气成藏特殊性,结合构造对保存条件的影响,圈定有利区,以期指导本区页岩气勘探,降低勘探风险。

### 1 地质背景

黔中隆起及邻区是一个呈东西走向的早古生

代隆起带,其演化历史与上扬子地区基本相同,经历了多期构造演化,是一个自郁南运动开始形成水下隆起、都匀运动隆升、合并于广西运动的受多期运动控制的继承性古隆起<sup>[5-7]</sup>,具有“两坳夹一隆”的构造特征,可划分为黔中区(黔中隆起)、黔南区(黔南坳陷)、黔北区(黔北坳陷)三大区(图1)。

根据沉积相及沉积演化,结合页岩露头及钻井揭示,下寒武统牛蹄塘组是全区稳定分布的硅质页岩层系(黔中—黔北区称为牛蹄塘组,黔南区称为九门冲组,属同期异地沉积,本文统称牛蹄塘组),与北美典型页岩层系对比来看<sup>[8-10]</sup>,具有沉积年代老、热演化程度高、成烃生物少、构造复杂的特征,保存条件整体较差。

### 2 页岩基本地质参数特殊性

#### 2.1 沉积相及页岩分布

早寒武世,研究区继承了晚震旦世沉积相的空间展布特点,呈北北东向展布,但其沉积类型及时空分布变化较大,形成了一个复杂、有序的岩石地层序列。通过分析区域露头及黄页1、龙页1、方深1等井岩性组合特征,早寒武世牛蹄塘期发生大规模海侵,全球海平面处于快速上升时期,在主要经历快速海侵、缓慢海退、快速海退3个阶段后,被动大陆边缘盆地沉积的厚层深水陆棚相黑色页岩和

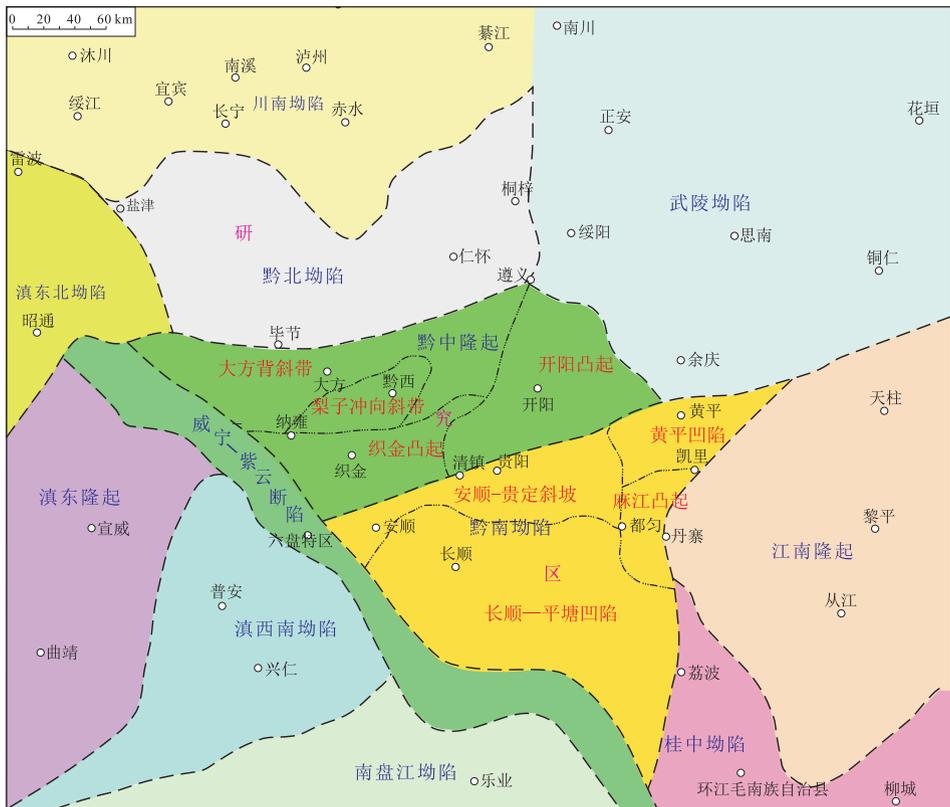


图1 黔中隆起及邻区构造区划

Fig.1 Tectonic units of Qianzhong uplift and its periphery

盆地相深水热液硅质岩覆盖在灯影组台地相白云岩之上(图 2)。

盆地相—深水陆棚相控制下形成的牛蹄塘组黑色页岩厚度大,平面上主要发育泸州海槽和鄂西渝东海槽 2 个沉积中心,暗色页岩厚度为 50~200 m,横向分布稳定,黔中隆起及邻区处于两大海槽之间。黔南区的黄平—岑巩地区位于鄂西渝东海槽南部,暗色页岩厚度 100~150 m,黄页 1、岑页 1 等井钻遇暗色页岩 112 m;黔中—黔北区位于泸州海槽东部,暗色页岩厚 60~120 m,方深 1 井钻遇暗色页岩 90 m,底 1 井钻遇 76 m,较黔南区沉积厚度减薄。牛蹄塘组页岩厚度变化与构造运动形成的古隆起有关,黔中隆起及邻区发育川中—丁山、龙里 2 个水下古隆起,水下古隆起的发育造成深水陆棚

相沉积的暗色页岩厚度大幅度减薄。黔北区北部的丁山地区林 1 井、丁山 1 井钻遇牛蹄塘组暗色页岩分别为 41, 25 m,向北呈减薄趋势,黔南区西南部的龙里地区龙页 1、龙页 2、龙页 3 等井钻遇暗色页岩 5~20 m,进一步证实了水下古隆起的发育对暗色页岩的沉积厚度具有较大影响(图 3)。

### 2.2 有机碳含量

下寒武统牛蹄塘组页岩处于缺氧强还原环境,有利于有机质的保存,不同沉积相带控制了页岩发育层位及横向变化,同时也控制了有机质丰度,暗色页岩有机碳含量一般分布在 1%~10%。黔中隆起及邻区主要形成 2 个高值中心,一个是黔南区的黄平—凯里—岑巩一带,有机碳含量 3%~6%,局部最高可达 10%,黄页 1 井暗色页岩有机碳含量为

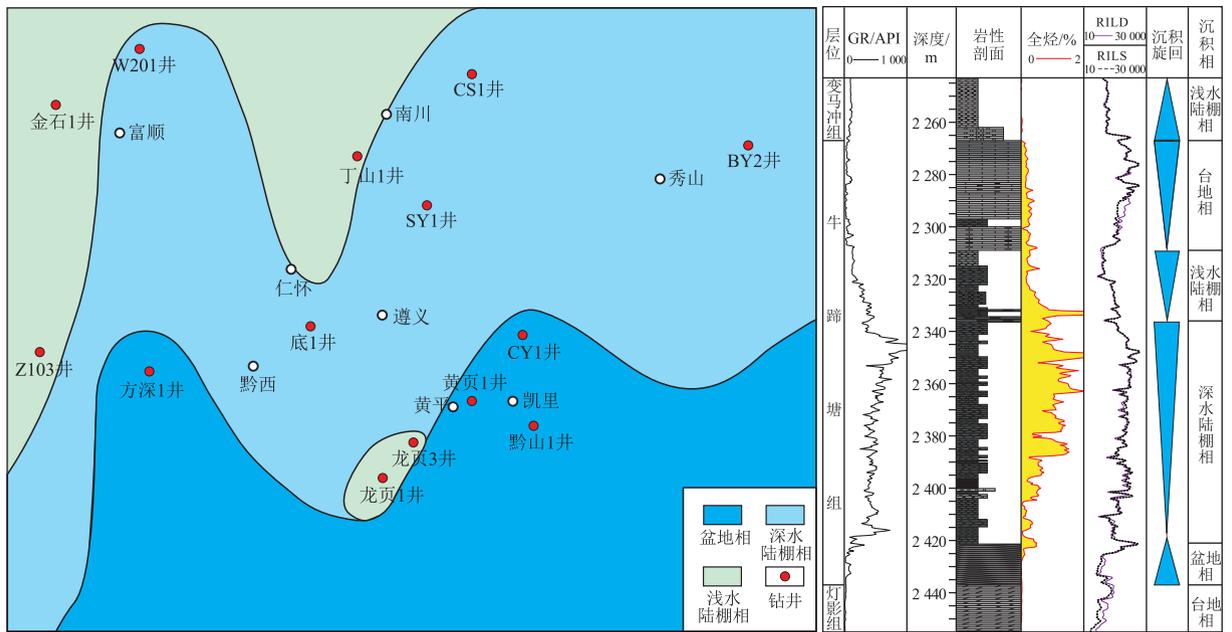


图 2 黔中隆起及邻区牛蹄塘组沉积相(a)及黄页 1 井柱状图(b)

Fig.2 Sedimentary facies of Niutitang Formation (a) and histogram of well Huangye 1 (b) in Qianzhong uplift and its periphery

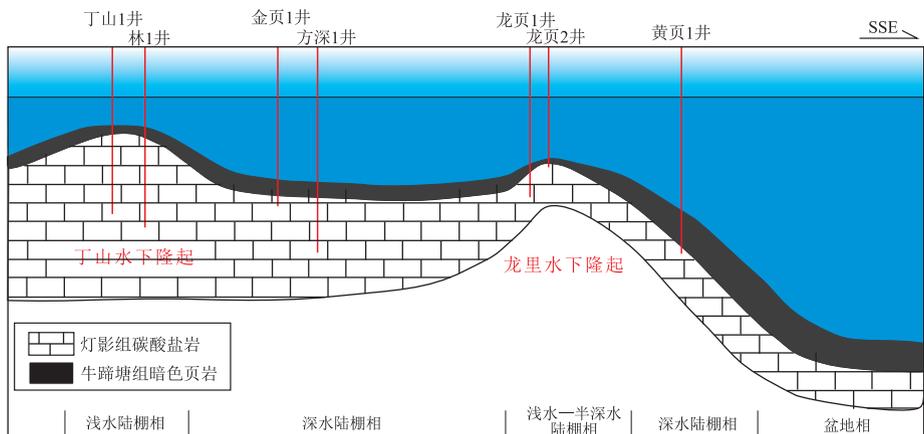


图 3 黔中隆起及邻区下寒武统牛蹄塘组沉积相模式

Fig.3 Sedimentary facies model of Niutitang Formation in Qianzhong uplift and its periphery

1.35%~9.91%,平均6.4%,黔山1井暗色页岩有机碳含量为1.60%~5.86%,平均3.22%,均具有自上而下有机碳含量呈增高趋势,周边露头丹寨等剖面暗色页岩有机碳含量为0.54%~3.43%,平均2.5%(样品受风化影响,有机碳含量值偏低);一个是黔中—黔北区的金沙—遵义一带,有机碳含量2%~4%,方深1井暗色页岩有机碳含量为0.74%~8.02%,平均3.08%。有机碳含量高有利于有机孔隙总量的发育,对页岩气的富集具有重要影响,页岩含气量相对越高。

### 2.3 热演化程度特殊性

研究区牛蹄塘组页岩在沉积相、厚度等条件上与四川盆地内实现勘探突破的地区差异较小,其差异性主要体现在热演化程度上。牛蹄塘组古埋藏深度大,热演化程度高,远高于龙马溪组、龙潭组页岩,局部受二叠纪玄武岩侵入的影响,造成牛蹄塘组热演化程度进一步升高,研究区热演化程度整体呈西高东低的特征。由于下寒武统泥页岩中没有镜质体,采用测量沥青反射率得到等价镜质体反射率,为保证实验结果具有可对比性,由中国石化华东油气分公司实验室统一进行样品测定,测试时选用相对应的标样测试,每测试2小时,重新标样校准,严格按照“SY/T 5124-2012 沉积岩中镜质体反射率测定方法”操作。

牛蹄塘组整体处于过成熟演化阶段,高热演化对页岩生气具有较大影响。勘探实践表明,页岩赋气能力最大的成熟度为2%~3%,成熟度超过3%以后,页岩的赋气能力迅速降低(图4),超过4%时,页岩的赋气能力约为 $1\text{ m}^3/\text{t}$ ,仅为成熟度2%~3%的三分之一至四分之一。从页岩气单井产量来看,黔南区为成熟度相对低值区,黄页1井成熟度为2.1%~3.48%,平均3.16%,直井压裂后日产气 $418\text{ m}^3/\text{d}$ ;黔中区为热演化程度高值区,达4.0%~5.5%,方深1井成熟度高达5.5%,直井压裂后日

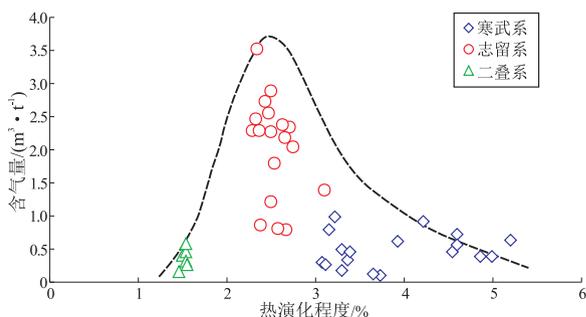


图4 黔中隆起及邻区页岩热演化程度与含气量关系

Fig.4 Relationship between shale thermal evolution and gas content in Qianzhong uplift and its periphery

气小于 $100\text{ m}^3/\text{d}$ ;黔北区普遍为3.5%~4%。过高热演化甚至造成部分井出现“低电阻”现象,“低电阻”页岩含气量小于 $0.1\text{ m}^3/\text{t}$ ,基本不含气,所以寒武系页岩气勘探应遵循“高中找低”的原则,尽量寻找热演化程度较低区。

## 3 页岩储层特殊性

### 3.1 储集类型特殊性

通过氩离子抛光扫描电镜观察,牛蹄塘组页岩储集空间包括有机质孔、矿物质孔和微裂缝等。有机质孔是页岩气赋存的主要储集空间<sup>[11-14]</sup>,有机孔隙发育是页岩气高产的重要因素,而有机质的来源和形态决定了有机质孔的形态和数量<sup>[11]</sup>。牛蹄塘组暗色页岩有机质主要来源于褐藻、红藻、大型蠕虫、虫管生物等藻、菌类生物。龙马溪组暗色页岩有机质主要以红藻、笔石、介形虫等为主,较褐藻、大型蠕虫、虫管生物等更易生成有机质孔<sup>[11-12]</sup>。这是造成牛蹄塘组页岩有机孔隙较龙马溪组有机孔隙差的内因。

牛蹄塘组储集空间的特殊性主要表现在孔隙类型以矿物质孔为主,有机质孔为辅,有机质孔呈线状、串珠状分布,边缘较光滑;志留系龙马溪组页岩孔隙类型以有机质孔为主,矿物质孔为辅,部分有机孔隙呈椭圆形或近圆形,边缘较粗糙。寒武系牛蹄塘组与志留系龙马溪组发现的页岩气藏在储集空间上的明显差异性,成为制约寒武系牛蹄塘组页岩气勘探难以取得较大突破的另一重要因素。

### 3.2 储集物性特殊性

牛蹄塘组时代老,古埋藏深度大、成岩作用强,造成页岩储层致密、物性较差,主要以低孔隙、特低渗、多微孔、小孔径为主要特征,通过对岩心和露头页岩样品开展GRI物性分析,测得页岩孔隙度为1%~3%,渗透率为 $(0.001\sim0.05)\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ,孔径分布范围较广,介于1~200 nm,但以2~10 nm为主,较已经取得勘探突破的志留系页岩孔隙度明显偏低(孔隙度3%~6%),孔径偏小(孔径10~100 nm),这与牛蹄塘组页岩储集空间特殊性具有直接关系。

在中国科学院兰州地化所,利用WYMN-3型高温高压模拟仪开展半开放体系下的热模拟实验,研究成熟度与页岩孔径的关系。半开放体系和封闭体系的区别主要在于,前者当热解产物达到一定压力后,会被收集系统收集,而后者则一直保持全封闭状态,但是两个体系均没有外界参与,在不考虑定量分析热解产物的前提下,两个体系产生的效果是一样的。此外,前者的样品仓比后者(如黄金

管体系)的样品仓大得多,为了能够有效观察热模拟实验后孔隙的变化及完成更多的配套实验,因此采用了半开放体系。

热模拟实验结果表明,在生油气窗范围内(成熟度 0.7%~3.5%),随着热演化程度增加,孔隙体积总体呈增大趋势,下志留统龙马溪组页岩符合此变化规律;成熟度大于 3.5%时,页岩大孔大幅减少,介孔和微孔明显增加,页岩孔隙度大幅减小,下寒武统牛蹄塘组页岩基本处于这一级别(图 5)。

勘探实践亦证实了寒武系页岩孔隙度具有随热演化程度增大而减小的特殊性,与热模拟实验结果相吻合。川中地区金页 1 井牛蹄塘组有机碳含量平均为 2.3%,成熟度为 3.0%,孔隙度为 2.39%;黔南区黄页 1 井牛蹄塘组页岩有机碳含量平均为 6.4%,成熟度平均为 3.16%,孔隙度平均为 1.95%;渝东南地区 CS1 井牛蹄塘组页岩有机碳含量平均为 4.3%,成熟度为 3.8%,孔隙度平均为 1.37%。

### 3.3 页岩含气特殊性

黔中隆起及邻区牛蹄塘组页岩具有普遍含气特征,部分井在钻探过程中槽面可见到微雨状气泡。牛蹄塘组含气页岩顶板为牛蹄塘组致密灰岩、灰质泥岩以及杷榔—变马冲组的厚层泥岩,岩性致密,裂缝发育少,封盖条件良好,底板为硅质岩、灯影组风化壳白云岩,岩心破碎,裂缝发育,封盖性较差,主要依靠牛蹄塘组底部页岩自我封闭聚集成藏。顶底板特殊的封盖性能造成了牛蹄塘组在纵向上表现为“整体含气、局部富气”的特征,以中段富气居多(图 2b),含气页岩厚度一般为 25~100 m。不论是老井方深 1、黔山 1、庄 1 井还是黄页 1、岑页 1、龙页 1 等页岩气显示井均具有此特征,与下志留统龙马溪组页岩下部富气有明显差异性。不同构造单元,先天沉积生烃条件、后期保存条件不同,含气页岩厚度及含气性会有较大差异,甚至不含气。黔南区南部靠近龙里水下隆起的龙页 1 等井由于

沉积相原因造成页岩厚度减薄,生烃能力差,含气量低,龙页 3 井压裂后仅见少量气。

## 4 页岩气富集有利区预测

研究区构造运动较强、热演化程度高,牛蹄塘组页岩气以常压为主,且单井产量较低,仍处于勘探评价与突破阶段。由页岩气成藏特殊性决定,在有利区优选方面应主要考虑热演化程度,优先选择热演化程度相对较低的地区,选择成熟度小于 3.5%的区域,并综合考虑页岩厚度、有机碳含量、孔隙度等因素,力争在“高中找低”和“动中找静”,最大程度地降低勘探风险,力求实现突破。

以北美页岩气评价指标和不同学者对中国南方页岩气成藏条件研究成果为基础<sup>[15-21]</sup>,在深化分析黔中隆起及邻区页岩气成藏特殊性的基础上,制定了研究区选区评价参数标准(表 1),进行页岩气成藏有利区评价。认为黔中隆起黄平地区为下寒武统牛蹄塘组页岩气勘探有利区,黔西地区是探索高演化页岩气勘探有利区(图 6)。

### 4.1 黔南黄平地区

黄平地区下寒武统牛蹄塘组暗色页岩埋深 1 500~3 000 m,厚 100~150 m,有机碳含量为 3%~6%,成熟度为 2%~3.5%(周边为凯里残余古油藏,烃源岩为牛蹄塘组,进一步证明了热演化程度较低),页岩孔隙度为 2%~4%,各项静态评价指标优越;黄平地区页岩气显示活跃,南部虎庄背斜钻探的 2 口老井黔山 1、庄 1 井牛蹄塘组泥页岩均见到良好的气测显示,黔山 1 井共发现 14 层气测异常段,庄 1 井页岩岩心中见明显气泡;中部的黄页 1 井含气页岩厚 84 m,全烃 1%~4.7%,现场实验解吸含气量为 0.5~1.8 m<sup>3</sup>/t,具有自上而下逐渐减小的趋势,气体组分以甲烷为主,平均 85%以上,直井压裂后最高日产气 418 m<sup>3</sup>,由于距离断层过近(300 m),压裂形成的裂缝与断层沟通,造成地层与大气淡水沟通,影响了单井产量;北部的岑页 1 井直井压裂后最高日产气 1 500 m<sup>3</sup>。黄平地区下寒武统牛蹄塘组优越的页岩气评价指标、良好的保存及封闭条件、活跃的气测显示,均表明页岩气成藏条件良好,勘探风险相对较低,是黔中隆起及邻区页岩气勘探突破的 I 类有利地区。

### 4.2 黔西地区

黔西地区由于受到黔中继承性古隆起的影响,变形较弱,构造运动对页岩层破坏性小,页岩埋深 1 500~2 000 m、厚度 60~120 m、有机碳含量为 2%~4%,静态评价指标良好,但由于整个黔中区受二叠

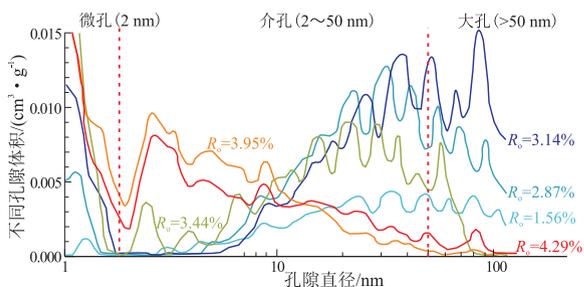


图 5 半开放体系下热模拟实验过程中页岩有机质孔径变化规律

Fig.5 Pore diameter changes of organic matter in shale during thermal simulation in a half open system

表 1 黔中隆起及邻区牛蹄塘组有利区评价参数

Table 1 Evaluation parameters of favorable areas in Niutitang Formation in Qianzhong uplift and its periphery

评价项目	评价指标	有利区		
		黔南黄平地区	黔中黔西地区	
物质基础	沉积相	盆地相、深水陆棚相	盆地相	深水陆棚相
	暗色泥页岩厚度/m	>50	100~150	60~120
	分布面积/km <sup>2</sup>	>200	600	400
	有机质丰度/%	>3	3~6	2~4
保存条件	热演化程度/%	1.5~3.5	2~3.5	3.5~5
	构造样式	背斜、斜坡、向斜核部、断块	背斜、向斜、断块	背斜、斜坡
	地层压力系数	>0.9	0.9~1.05	0.9~1
	距断层距离/m	>500	1 000	1 000
储集空间	埋深/m	1 500~3 500	1 500~3 000	1 500~2 000
	孔隙度/%	>2	2~4	2~4
	热演化程度/%	<3.5	2~3.5	3.5~5
	层理缝	发育	较发育	发育
储层可改造性	微裂缝	发育	较发育	发育
	硅质含量/%	>40	45	44
	黏土含量/%	<30	25	25
	顶底板	封盖条件好,具应力隔挡	顶板好、底板较好	顶板好、底板较好
	脆性指数/%	>50	62	65

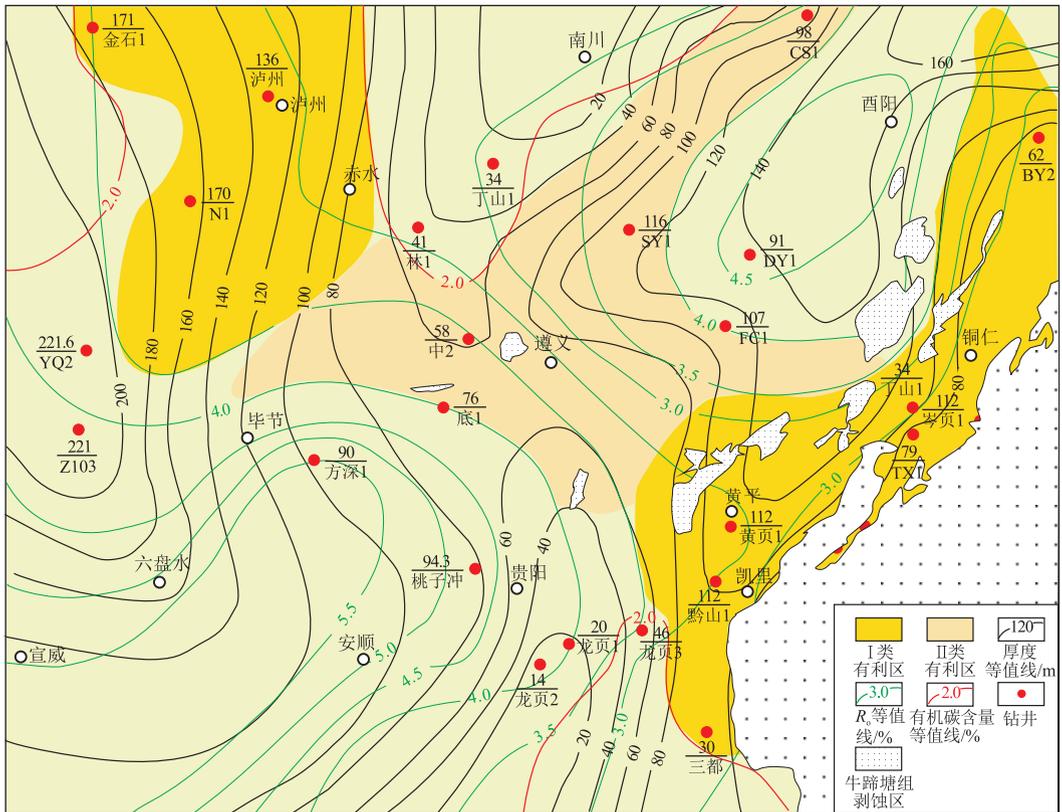


图 6 黔中隆起及邻区牛蹄塘组综合评价

Fig.6 Comprehensive evaluation of Niutitang Formation in Qianzhong uplift and its periphery

纪玄武岩侵入的影响,牛蹄塘组页岩热演化程度整体偏高(成熟度>3.5%,最高达 5.5%),对页岩生气造成较大不利影响,是黔西地区影响页岩气富集的

不利因素之一。方深 1 井牛蹄塘组见 3 m 厚气测异常段,钻探过程中泥浆槽内出现大量微雨状气泡,直井压裂产少量气,表明在热演化程度较高条

件下,泥页岩仍具备一定的生烃能力,黔西地区是探索高热演化条件下页岩气藏的Ⅱ类有利区。另外,黔西北—川南地区位于四川盆地内,埋深较大,但页岩气保存条件较好,也可能是黔中隆起及邻区牛蹄塘组页岩气突破的关键地区。

黔南黄平地区处于雪峰山推覆带前缘,断裂相对复杂,虽有多口钻井揭示了牛蹄塘组具有良好的含气性,但均未实现勘探突破,勘探过程中强化断裂对页岩气保存条件的影响分析,“动中找静”可有效降低勘探风险。处于黔中隆起的黔西地区构造相对稳定但热演化程度较高,造成页岩含气性有所降低,“高中找低”是本区实现勘探突破的关键。

## 5 结论

(1)研究区牛蹄塘组页岩气成藏特殊性主要表现在:经历了多期次的构造运动,页岩热演化程度高的特殊性,导致页岩赋气能力较低;储集条件以无机孔为主的特殊性,导致吸附气含量较低,抗破坏能力较低,在复杂的构造运动下,导致页岩的含气性较差。

(2)由页岩气成藏特殊性决定,在有利区优选方面应主要考虑热演化程度,优先选择成熟度小于 3.5% 的区域,并综合考虑页岩的厚度、有机碳含量、孔隙度等因素,在“高中找低”、“动中找静”,最大程度地降低勘探风险,力求实现突破。

(3)综合分析认为,黄平地区牛蹄塘组页岩厚 100~150 m,有机碳含量介于 3%~6%,成熟度介于 2%~3.5%,含气性较好,是黔中隆起及邻区页岩气勘探突破的Ⅰ类有利地区;黔西地区页岩厚 60~120 m,有机碳含量介于 2%~4%,成熟度介于 3.5%~5.5%,是探索高热演化条件下页岩气藏的Ⅱ类有利区。

## 参考文献:

- [1] 梁兴,张廷山,杨洋,等.滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素[J].天然气工业,2014,34(2):18-26.  
Liang Xing, Zhang Tingshan, Yang Yang, et al. Microscopic pore structure and its controlling factors of overmature shale in the Lower Cambrian Qiongzhusi Fm, northern Yunnan and Guizhou provinces of China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 18-26.
- [2] 杨振恒,李志明,沈宝剑,等.页岩气成藏条件及我国黔南坳陷页岩气勘探前景浅析[J].中国石油勘探,2009,14(3):24-28.  
Yang Zhenheng, Li Zhiming, Shen Baojian, et al. Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in southern Guizhou Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 24-28.
- [3] 腾格尔,秦建中,郑伦举.黔南坳陷海相优质烃源岩的生烃潜力及时空分布[J].地质学报,2008,82(3):366-372.  
Tenger, Qin Jianzhong, Zheng Lunju. Hydrocarbon potential on excellent hydrocarbon source rock in southern Guizhou Depression and its spacial-temporal distribution [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 366-372.
- [4] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等.黔北地区海相页岩气保存条件:以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J].石油与天然气地质,2016,37(1):45-55.  
Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong block, Guizhou Province [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 45-55.
- [5] 陈旭,戎嘉余,周志毅,等.上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升[J].科学通报,2001,46(12):1052-1056.  
Chen Xu, Rong Jiayu, Zhou Zhiyi, et al. The central Guizhou and Yi chang uplifts, Upper Yangtze region, between Ordovician and Silurian [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(18): 1580-1584.
- [6] 汤良杰,郭彤楼,田海芹,等.黔中地区多期构造演化、差异变形与油气保存条件[J].地质学报,2008,82(3):298-307.  
Tang Liangjie, Guo Tonglou, Tian Haiqing, et al. Poly-cycle tectonic evolution, differential deformation and hydrocarbon reservation of central Guizhou and adjacent region [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 298-307.
- [7] 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.  
Deng Xin, Yang Kunguang, Liu Yanliang, et al. Characteristics and tectonic evolution of Qianzhong Uplift [J]. Earth Science, 2010, 17(3): 79-89.
- [8] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [9] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851-1852.
- [10] Mavor M. Barnett shale gas-in-place volume including sorbed and free gas volume: AAPG Southwest Section Meeting, March 1-4 2003, Fort Worth, Texas [C]. Fort Worth, Texas: AAPG, 2003.
- [11] 吴朝东,陈其英,雷家锦.湘西震旦—寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J].岩石学报,1999,15(3):453-462.  
Wu Chaodong, Chen Qiyang, Lei Jiajin. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the Upper Sinian to the Lower Cambrian, southwest of China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3): 453-462.
- [12] 聂海宽,边瑞康,张培先,等.川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响[J].地学前缘,2014,21(4):331-343.  
Nie Haikuan, Bian Ruikang, Zhang Peixian, et al. Micro-types and characteristics of shale reservoir of the Lower Paleozoic in southeast Sichuan Basin, and their effects on the gas content [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 331-343.

- Ordos Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2):170-174.
- [29] 郭凯,曾澹辉,刘涛涛,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组含油气流体活动期次与石油充注史[J].现代地质,2013,27(2):382-388.
- Guo Kai,Zeng Jianhui,Liu Taotao,et al.Hydrocarbon fluid flow stages and oil migration history in Yanchang Formation of Longdong area,Ordos Basin[J].Geoscience,2013,27(2):382-388.
- [30] 邓秀芹,刘新社,李士祥.鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透储层致密史与油藏成藏史[J].石油与天然气地质,2009,30(2):156-161.
- Deng Xiuqin,Liu Xinshe,Li Shixiang.The relationship between compacting history and hydrocarbon accumulating history of the super-low permeability reservoirs in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2):156-161.
- [31] 张厚福,方朝亮,高先志,等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.
- Zhang Houfu,Fang Chaoliang,Gao Xianzhi,et al.Petroleum geoscience[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1999.
- [32] Hindle A D.Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9):1451-1481.
- [33] 姜振学,庞雄奇,曾澹辉,等.油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J].地学前缘,2005,12(4):507-516.
- Jiang Zhenxue,Pang Xiongqi,Zeng Jianhui,et al.Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4):507-516.
- [34] 吴胜和,曾澹辉,林双运,等.层间干扰与油气差异充注[J].石油实验地质,2003,25(3):285-289.
- Wu Shenghe,Zeng Jianhui,Lin Shuangyun,et al.Interlayer interference and differential injection of hydrocarbon into a trap [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3):285-289.
- [35] 姚泾利,段毅,徐丽,等.鄂尔多斯盆地陇东地区中生界古地层压力演化与油气运聚[J].天然气地球科学,2014,25(5):649-656.
- Yao Jingli,Duan Yi,Xu Li,et al.Pressure evolution and oil-gas migration and accumulation in Mesozoic palaeo-strata in Longdong area of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5):649-656.
- [36] 郭凯,曾澹辉,刘涛涛.鄂尔多斯盆地延长组石油充注动力的包裹体热动力学模拟[J].地质科技情报,2015,34(2):152-158.
- Guo Kai,Zeng Jianhui,Liu Taotao.Petroleum inclusion thermodynamic simulation on oil charging pressure of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(2):152-158.

(编辑 徐文明)

(上接第168页)

- [13] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
- Yu Bingsong.Particularity of shale gas reservoir and its evaluation [J].Earth Science Frontiers,2012,19(3):252-258.
- [14] 聂海宽,张金川.页岩气储层类型和特征研究:以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].石油实验地质,2011,33(3):219-225.
- Nie Haikuan,Zhang Jinchuan.Types and characteristics of shale gas reservoir:A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3):219-225.
- [15] 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 from the development of fractured shale gas in North America [J].Petroleum Exploration and Development,2007,34(4):392-400.
- [16] 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.
- [17] 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):109-114.
- Zhang Jinchuan,Jiang Shengling,Tang Xuan,et al.Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J].Natural Gas Industry,2009,29(12):109-114.
- [18] 梁兴,叶熙,张介辉,等.滇黔北下古生界海相页岩气藏赋存条件评价[J].海相油气地质,2011,16(4):11-21.
- Liang Xing,Ye Xi,Zhang Jiehui,et al.Evaluation of preservation conditions of Lower Paleozoic marine shale gas reservoirs in the northern part of Dianqianbei Depression [J].Marine Origin Petroleum Geology,2011,16(4):11-21.
- [19] 聂海宽,金之钧,边瑞康,等.四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集[J].石油学报,2016,37(5):557-571.
- Nie Haikuan,Jin Zhijun,Bian Ruikang,et al.The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery [J].Acta Petrolei Sinica,2016,37(5):557-571.
- [20] 刘超英.页岩气勘探选区评价方法探讨[J].石油实验地质,2013,35(5):564-569.
- Liu Chaoying.Discussion on methods of shale gas exploration evaluation [J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(5):564-569.
- [21] 徐政语,姚根顺,梁兴,等.扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析[J].石油实验地质,2015,37(4):407-417.
- Xu Zhengyu,Yao Genshun,Liang Xing,et al.Shale gas preservation conditions in the Lower Paleozoic, Yangtze block [J]. Petroleum Geology & Experiment,2015,37(4):407-417.

(编辑 韩 彧)