

上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件

胡明毅^{1,2}, 邓庆杰^{1,2}, 胡忠贵^{1,2}

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:基于上扬子地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩的野外露头、钻井、岩心等资料,通过显微薄片、扫描电镜及X-衍射、压汞分析、等温吸附等多项实验测试分析,以牛蹄塘组黑色页岩的地层、岩石学、地球化学、地球物理和页岩含气性等为重点,对上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气形成的成藏条件与特征进行了初步探索。研究表明上扬子地区下寒武统牛蹄塘组以浅水-深水陆棚沉积环境控制富有机质页岩的发育,沉积厚度一般在50~300 m;有机碳含量在1.5%以上,有机质成熟度达到高-过成熟阶段;富有机质页岩脆性矿物丰富、粘土矿物演化程度高,以伊利石稳定矿物为主,不含蒙脱石;多种孔隙类型及裂缝发育,可为页岩气的赋存提供良好储集空间;富有机质页岩含气量达到了页岩气商业开发下限2.0 m³/t。综合各种成藏条件,认为资阳-自贡一带、黔北和渝东南-湘鄂西地区为页岩气有利勘探区带。

关键词:富有机质页岩;成藏条件;有利勘探区带;牛蹄塘组;上扬子地区

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Shale gas accumulation conditions of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Upper Yangtze region

Hu Mingyi^{1,2}, Deng Qingjie^{1,2}, Hu Zhonggui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. Faculty of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Based on outcrops, drilling and core data, combining with analysis of thin section, SEM, X-ray diffraction, mercury porosimetry and isothermal adsorption, this paper studied the accumulation conditions and characteristics of shale gas of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Upper Yangtze Region, with focus on the stratigraphic, petrologic, geochemical and geophysical characteristics as well as gas storage capacity. The results show that the distribution of the organic-rich shale of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Upper Yangtze Region is controlled by the shallow to deep water shelf sedimentary environment, where shale thickness generally ranges from 50 to 300 m. The shale has a total organic carbon content over 1.5% and is highly mature to over mature. The organic-rich shale has abundant brittle minerals and the clay minerals with high evolution are dominated by stable minerals such as illite but without any montmorillonite. The various types of pores and fractures provide effective reservoir space for shale gas, and the gas content reaches the lowest commercial development value (2.0 m³/t). Comprehensive analysis of these conditions reveals that the Ziyang-Zigong area, the northern Guizhou, eastsouthern Chongqing and eastern Hubei and Hunan Province are favorable exploration areas.

Key words: organic-rich shale, accumulation condition, favorable exploration area, Niutitang Formation, Upper Yangtze region

2012年,国土资源部针对我国页岩气资源潜力进行了详细调查与评价。成果表明:我国页岩气地质资源潜力为 134×10^{12} m³,其中可采资源潜力约 25×10^{12} m³^①。在南方、华北(包括鄂尔多斯、渤海湾及南华北等盆地)和塔里木地区(包括塔里木、准噶尔等盆地)广泛发育古

生代海相富有机质页岩,是目前我国陆上常规天然气资源量的2~3倍^[1-2]。

对于上扬子地区古生代页岩气,前人已做过较多的探索和研究,如程克明等(2009)^[3]、腾格尔等(2010)^[4]、陈波等(2011)^[5]、张金川等(2011)^[6]、聂

收稿日期:2013-11-20;修订日期:2014-02-20。

第一作者简介:胡明毅(1965—),男,教授,沉积学与层序地层学。E-mail: humingyi65@163.com。

基金项目:中海油股份公司项目(CNOOCRC(LTD)-2010-ZHKY-018);湖北省自然科学基金项目(2011CDB005)。

①国土资源部. 全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选成果报告. 内部资料, 2012。

海宽等(2011)^[7]学者,分别对上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气聚集条件、富有机质页岩发育特征及生烃和资源潜力、页岩气聚集机理等方面进行了初步研究,但研究过程中大多实际数据的获取主要基于地表样品测试资料,对上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件及勘探方向仍不明确。近年来,随着页岩气钻井的大量实施,特别是川南地区钻遇下寒武统的页岩气井取得了较大突破,为页岩气成藏条件研究提供了大量井下数据,研究结果也将更具科学性。本文在引用前人研究成果和实际野外剖面观测的基础上,充分利用井下测试数据,从泥页岩厚度和分布、埋深、泥页岩脆性、总有机碳含量、镜质体反射率等多方面深入分析上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件及优选有利勘探区带,为开展该区页岩气勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

上扬子地区包括西至龙门山断裂系、北达南秦岭断裂南缘、东至雪峰山、南达垭都—紫云—罗甸断裂的广大地区,面积约 $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。上扬子地区寒武系从下到上可划分为牛蹄塘组、明心寺组、金顶山组、清虚洞组、高台组和娄山关群。黔北的牛蹄塘组是下寒武统页岩最发育的组,与川中—川西南地区的筇竹寺组中下部地层、川东南—湘西地区的牛蹄塘组、川东北地区的筇竹寺组以及湘鄂西地区的天柱山组全部地层相当^[5](表1)。

2 富有机质页岩沉积环境

上扬子地区早古生代地层受古构造控制以及海侵影响,在寒武纪早期,形成中国南方古生界最好的烃源岩之一,区域上具有西高东低的沉积格局^[8]。

晋宁运动后初期海侵规模大,沉积水体总体上较为安静,沉积了磷块岩、硅质岩和黑色页岩,代表最大

海泛面。下寒武统牛蹄塘组物源来自西部的康滇古陆和泸定古陆^[9],以陆源碎屑沉积为主。川东—川中早寒武世筇竹寺组为浅水陆棚沉积环境;川西早寒武世早期未形成摩天岭古陆,表现为低能的海槽沉积环境;川北—川东北与秦岭洋相通,深水陆棚区向北开口,为正常水陆棚;川南深水陆棚区向南开口,与华南海相通。湘黔北、鄂西渝东及周缘早寒武世牛蹄塘组富营养物质上升洋流导致浮游微生物非常发育,处于广海陆棚—深水陆棚环境(图1)。

3 富有机质页岩分布特征

牛蹄塘组在龙门山前缘的广元地区、大巴山前缘的南江地区,城口、房县、华蓥山背斜的岳池地区、川东南的秀山、酉阳、凤凰地区,贵州的遵义、瓮安、岑巩、都匀、凯里地区,渝东—鄂西的咸丰、张家界等地区有部分出露;钻井方面,目前仅有女基井、资1井、资2井、林1井、威基井、酉科1井和岑页1井等少数井有揭露。地层中均发育较厚的、连续沉积的黑色页岩层段,甚至在黑色页岩中可见油裂解成气后残留的沥青,如资1井中普遍见含沥青砂质页岩^[10]。

页岩气勘探开发成本受页岩埋深影响较大,根据区内钻井和野外剖面统计,上扬子地区牛蹄塘组厚度一般为50~300 m,底界埋深一般为3~7 km。威远—资阳地区的筇竹寺组厚度较厚,如资5井—资1井—威基井主要发育黑色泥岩,灰色粉砂质泥岩,由古隆起顶部向南部拗陷区增厚,一般在300~500 m,底界埋深一般为4~5 km。龙门山前缘地区该组的厚度为50~200 m,底界埋深为7~8 km。而川东南及周缘地区厚度为50~250 m,受后期构造运动,埋深相对川南较浅,底界埋深为3~4 km。黔北—湘西—鄂西—渝东方向地层厚度有“厚—薄—厚”的趋势,如永和—大坪剖面(图2),总体沉积环境以黑色炭质页岩、深灰色泥岩、粉砂质泥页岩为主的深水陆棚环境,甚至在部分地区底部沉积了一套0.5~12 m的硅质页岩。整体地

表1 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组地层对比

Table 1 Stratigraphic correlation of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze region

统 阶	上扬子地区				
	黔北	川中—川西南	川东南—湘西	川东北	湘鄂西
上覆地层	高台组	陡坡寺组	高台组	陡坡寺组	谭家庙组
龙王庙阶	清虚洞组	龙王庙组	清虚洞组	石龙洞组	石龙洞组
沧浪铺阶	金顶山组	沧浪铺组	金顶山组	天河组/石碑组	天河组/石碑组
下寒武统	明心寺组		明心寺组	仙女洞组	水井沱组
筇竹寺阶		筇竹寺组			
梅树村阶	牛蹄塘组		牛蹄塘组	筇竹寺组	天柱山组
下伏地层	灯影组	灯影组	灯影组	灯影组	灯影组

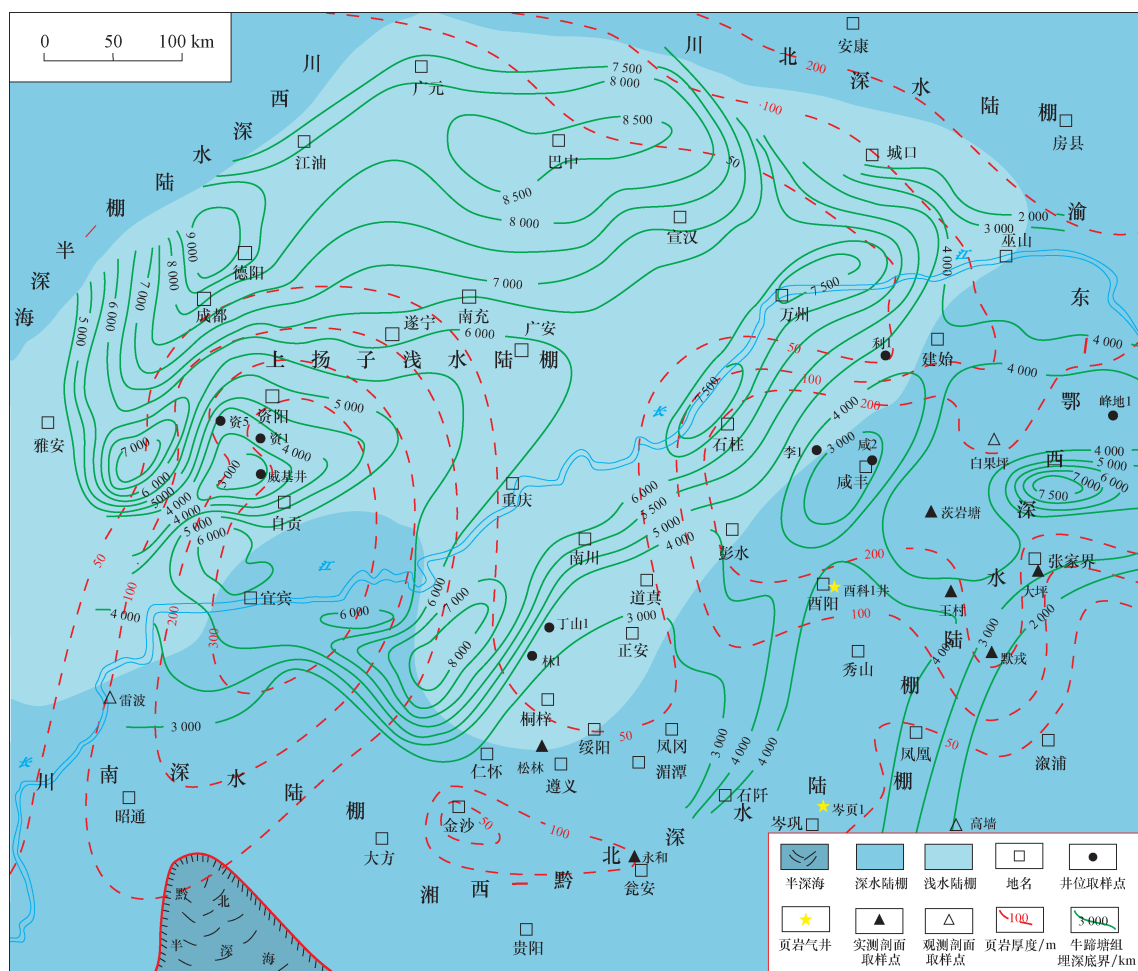


图1 上扬子地区早寒武世早期岩相古地理

Fig. 1 Palaeogeographic map of the early stage of the Early Cambrian in Upper Yangtze region

层一般为50~250 m,底界埋深为3~4 km。区域上,黑色页岩厚度分布基本上与沉积相带展布一致,表明上扬子区早古生代的浅水—深水陆棚沉积环境控制了牛蹄塘组黑色页岩的发育和区域分布。

4 富有机质页岩有机地化特征

4.1 有机碳含量(TOC)

上扬子地区下寒武统黑色页岩的有机质类型主要为I型,少量为II₁型^[11-12]。在区域上,TOC展布特征直接受沉积环境严格控制,TOC高值区反映沉积中心。上扬子地区下寒武统黑色页岩段TOC一般较高,分布范围为0.23%~15.9%,向上随着粉砂质、钙质的增加,TOC值有所降低。在川东南—黔北(珙县—遵义—瓮安—岑巩一带,牛蹄塘组TOC≥1.5%的黑色页岩累计厚度一般在50~150 m)和渝东南—湘鄂西(咸丰—茨岩塘—黔戎一带,筲竹寺组TOC≥1.5%的黑色页岩累计厚度一般为80~200 m)形成两个有机碳高值区。

4.2 热演化程度

黑色页岩有机质成熟度普遍较高,总体达到高—

过成熟阶段^[4]。有机质成熟度在四川盆地内多高于2.5%,过成熟,高值区集中于川东北和川东南—黔北地区;在渝东南区相对较低,多分布于2.01%~3.56%;湘鄂西有机质成熟度多分布于2.11%~3.64%;黔北有机质成熟度多分布于3.4%~3.77%,都已进入生气窗内,对页岩气成藏十分有利(表2)。

5 富有机质页岩储层特征

5.1 矿物组成

页岩中的脆性矿物含量愈高,其在后期压裂过程中愈容易产生裂缝,这有利于页岩气的开采^[13]。

据露头与岩心观察,针对81个样品的岩石X-衍射分析表明(图3),下寒武统牛蹄塘组富有机质黑色页岩中,脆性矿物含量为46.89%~88.54%,平均含量为68.82%;粘土矿物含量为10.60%~42.83%,平均含量为27.50%。脆性矿物中,石英含量最高,可达83.64%,其次为长石含量、碳酸盐岩含量,微含黄铁矿;粘土矿物中,含伊利石35.0%~73.0%、绿泥石8.0%~28.0%、高岭石含量极少,不含蒙脱石。而

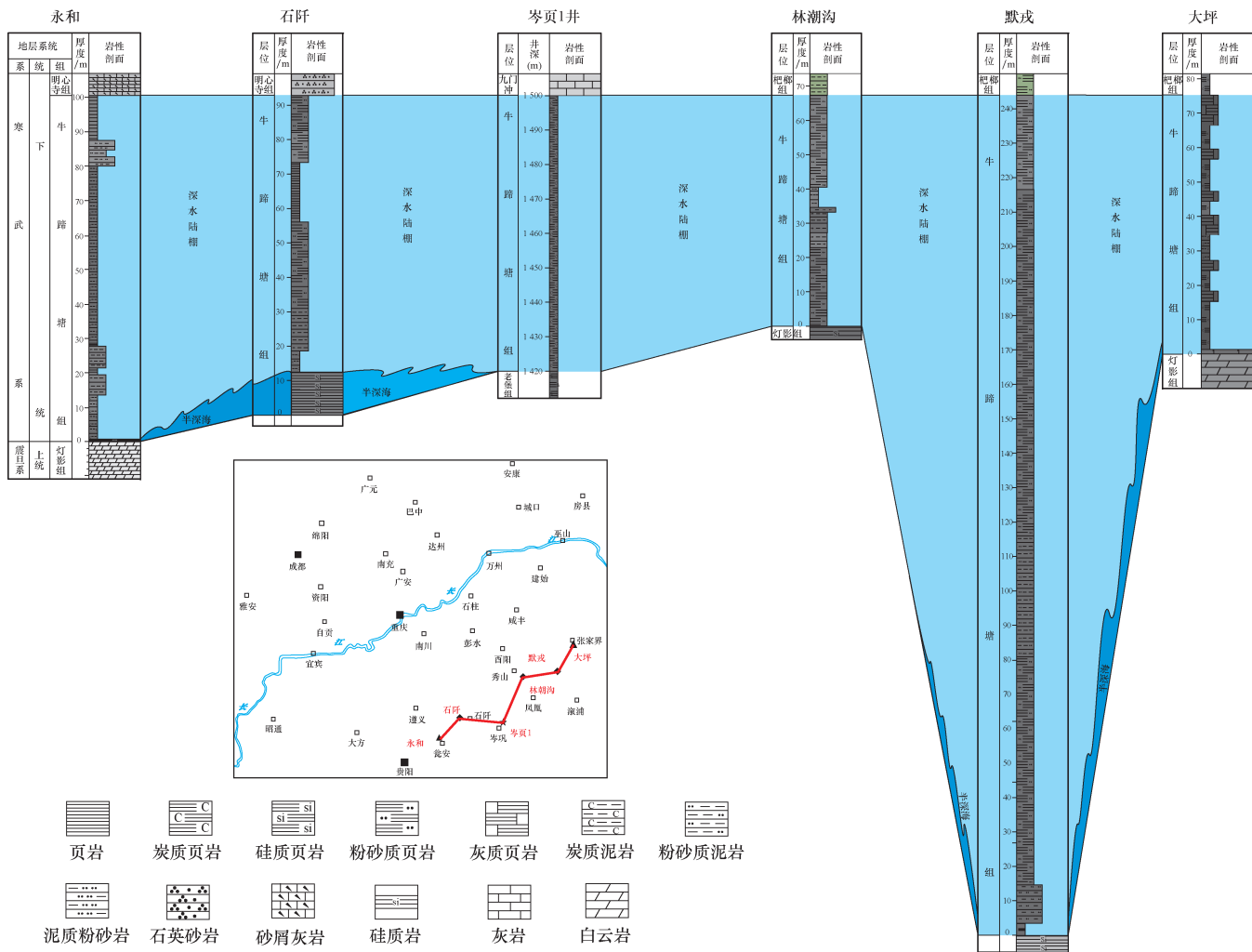


图2 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组永和一大坪地层对比剖面

Fig.2 Stratigraphic correlation of the Lower Cambrian Niutitang Formation on Yonghe-Daping section in the Upper Yangtze region

表2 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩地球化学特征

Table 2 Geochemical characteristics of black shale in the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze region

地区	样品	页岩厚度/m	TOC/%			R_o /%
		$\epsilon_{1q}/\epsilon_{1n}$	$\epsilon_{1q}/\epsilon_{1n}$			$\epsilon_{1q}/\epsilon_{1n}$
			最小值	最大值	平均值	
川东北	12	180 ~ 200	0.51	4.74	2.20	3.11 ~ 3.15
川东	14		1.22	11.07	3.45	
川中	19	20 ~ 100	0.4	4.43	1.69	2.61 ~ 2.85
川西南	22	40 ~ 130	0.67	7.99	2.10	2.56 ~ 3.14
川东南	15	40 ~ 80	0.01	6.48	3.12	3.23 ~ 3.53
黔北	33	50 ~ 100	0.76	15.90	5.04	3.45 ~ 3.77
湘鄂西	32	50 ~ 200	0.23	8.05	3.29	2.11 ~ 3.64
渝东南	24	40 ~ 150	1.02	2.99	1.72	2.01 ~ 3.56

Barnett 页岩脆性矿物含量一般在40%~60%,粘土矿物含量较少^[14]。与之相比,上扬子地区下寒武统黑色页岩的脆性矿物中硅质、碳酸盐岩含量较少,石英含量较高。

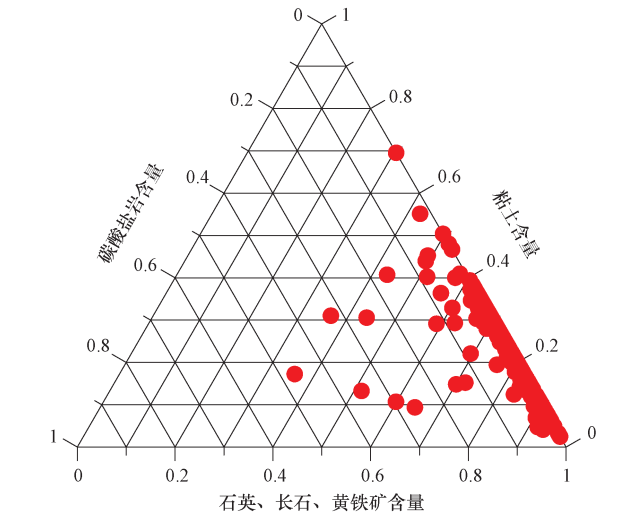


图3 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩矿物组成三角图

Fig.3 Ternary plot map of mineral compositions of shale reservoir in the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze region

矿物组成特征表明,上扬子区牛蹄塘组富有机质页岩脆性矿物含量丰富,粘土矿物演化程度高,以伊利石稳定矿物为主,不含蒙脱石。

5.2 储层空间特征

泥页岩孔隙度极低,渗透率一般小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 尽管如此,但两者也存在一定的正相关性,因此十分有必要开展储层的孔隙度和裂缝评价工作^[15-16]。

下寒武统牛蹄塘组泥页岩容易产生球状风化,且节理发育(图4a,b)。电子显微特征显示,泥页岩中的微孔隙、微裂隙非常发育,微孔隙呈蜂窝状(图4c),一

般分为五种类型:杂基内溶蚀孔隙、溶蚀粒内孔隙、粘土矿物间微孔隙与微缝隙(图4d)、矿物间微孔隙(图4e)、矿物颗粒溶蚀铸模微孔隙。

下寒武统牛蹄塘组发育的大量的细微裂缝(图4f),规模一般在 $10 \sim 40 \mu\text{m}$,甚至可见长孔径 $50 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m}$ 的微裂缝。特别是在有裂缝非常发育的条件下,可以较大提高泥页岩的渗透能力,甚至形成一种非常规油气层——泥页岩裂缝性油气层^[17-18]。如威5井取心段

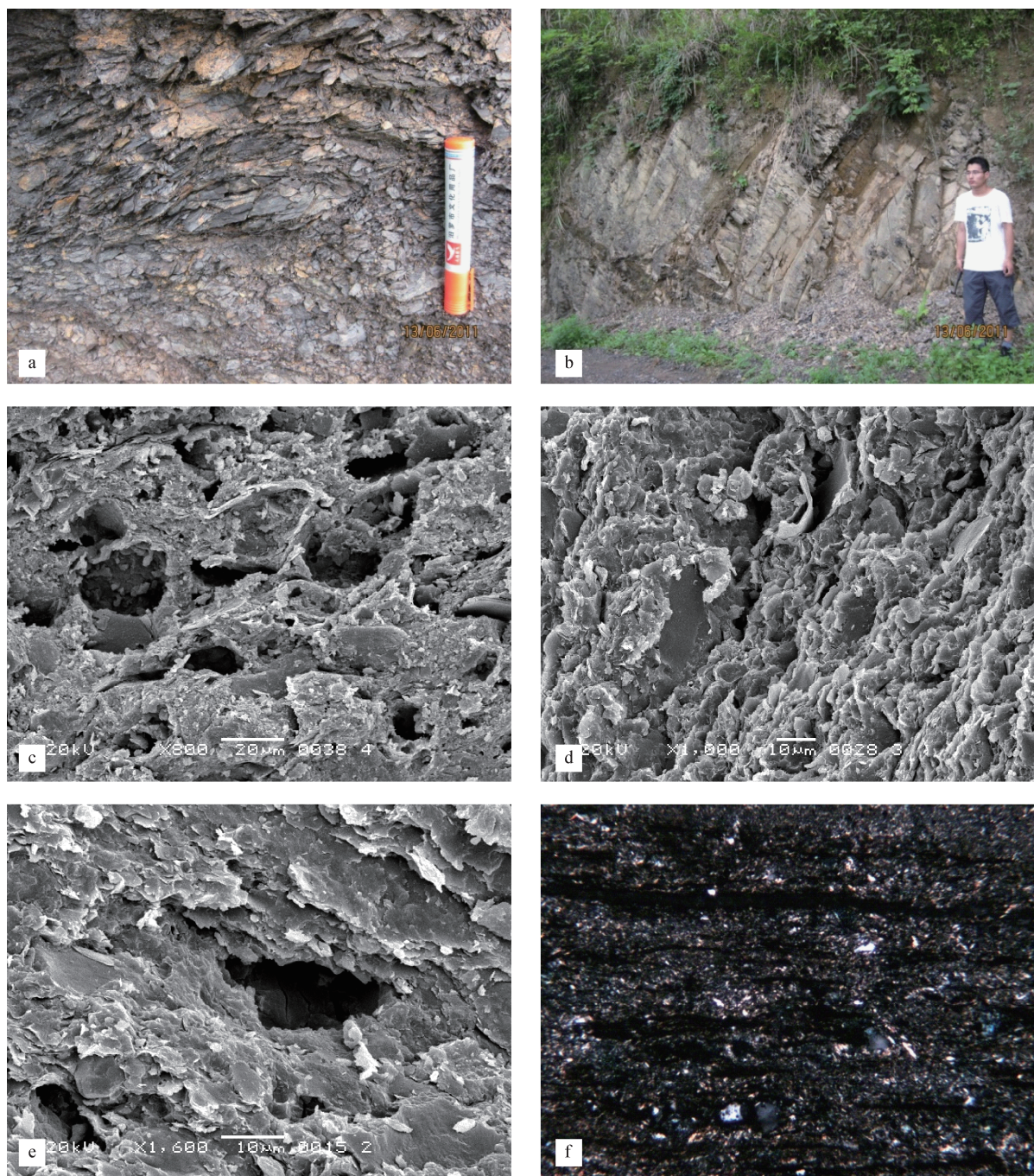


图4 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩储集空间类型

Fig. 4 Reservoir space types of black shale in the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze region

- a. 瓮安永和剖面,牛蹄塘组,黑色炭质页岩,球状风化;b. 瓮安永和剖面,牛蹄塘组,黑色炭质页岩,上部X型节理发育;c. 遵义松林剖面,牛蹄塘组,黑色炭质页岩,次生溶蚀孔隙发育呈蜂巢状分布,孔径 $3 \sim 20 \mu\text{m}$,岩石结构疏松;d. 遵义松林剖面,牛蹄塘组,黑色炭质页岩,片状粘土矿物集合体中夹杂少量粒状石英微粒,可见少量次生溶蚀微孔隙;e. 瓮安永和剖面,牛蹄塘组,黑色炭质页岩,次生微溶孔呈长条状,平行于片状粘土矿物排列方向,孔径 $12 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$;f. 瓮安永和剖面,牛蹄塘组,黑色炭质页岩,微裂缝发育被沥青充填,长边长 0.25 mm

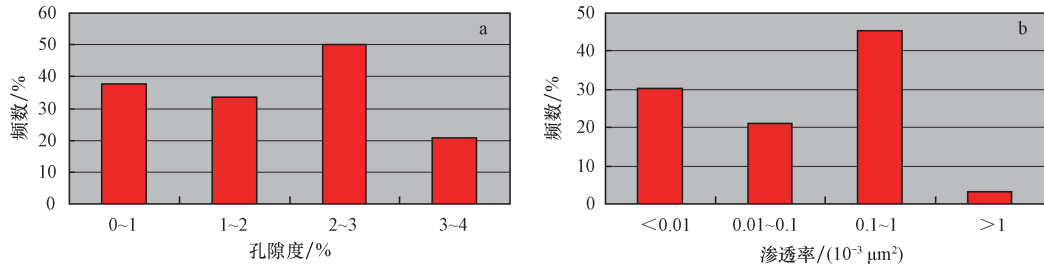


图 5 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩孔隙度和渗透率频率分布
Fig. 5 The frequency histograms for porosity and permeability of black shale in the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze region

(2 783. 20 ~ 2 799. 85 m) 共 7. 455 m, 岩性主要为黑色页岩, 层间裂缝发育, 冒气 309 处, 甚至在 2 795. 00 ~ 2 798. 00 m, 孔、缝率达到 1. 22 % ~ 3. 34 %。

5.3 页岩孔渗特征

研究表明, 评价储集空间关键参数是岩石孔隙度。岩石孔隙度一般与页岩游离气的含量成正比, 而含水饱和度与密度及吸附气含量成反比^[19]。

对研究层段露头 and 岩心所取 34 个样品测试表明, 下寒武统牛蹄塘组黑色页岩孔隙度为 0. 69 % ~ 4. 19 %, 平均为 2. 5 %; 渗透率为 $0. 005 \times 10^{-3} \sim 0. 245 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0. 175 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 5); 岩石密度为 2. 01 ~ 2. 72 g/cm³, 平均为 2. 43 g/cm³; 由于所取样品有不同程度的氧化, 有些值会偏高。从平面上看, 四川盆地的中心区域孔隙度范围在 2 % ~ 3 %, 而在川东南—黔北、鄂西—渝东孔隙度均超过 3 %。说明下寒武统牛蹄塘组页岩基质孔隙、裂缝发育, 具有较好的储、渗条件。

5.4 保存条件及页岩含气量

通常认为页岩气藏不易被摧毁, 对保存条件要求不高, 但最近随着页岩气勘探实践表明, 页岩气含气量及气体组分直接受保存条件控制, 具体有如下几个方面: ①具有良好的碎屑岩盖层保护; ②页岩气藏不能有“通天断层”, 断层虽然有利于页岩气运聚, 但不能有“通天断层”, 否则易逃逸; ③浅层在整体上拥有封闭保存体系。总之, 以上所述“三大因素”并存, 是页岩气有利区优选的必备条件^[20-22]。

由国土资源部油气资源战略研究中心设计钻探的岑页 1 井、西科 1 井, 现场解吸页岩气含气量达到 1. 5 ~ 4. 56 m³/t; 威 5 井下寒武统筇竹寺组页岩气钻井过程中, 在 2 797. 4 ~ 2 797. 6 m 井段, 裸眼测试, 获日产气 $2. 46 \times 10^4 \text{ m}^3$, 酸化后测试获日产气 $1. 35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。除此之外, 高科 1 井、丁山 1 井、渝科 1 井等研究层段也出现气测异常, 可与美国五大页岩气系统相媲美^[23-24]。相对北美页岩气含气量分布范围 (0. 44 ~ 9. 91 m³/t) 和 2. 0 m³/t 的商业开发下限^[25-26], 上扬子

地区牛蹄塘组页岩含气量达到了此标准, 因而亦应具备较好的商业性开发价值。

6 页岩气勘探开发有利区预测

针对页岩气勘探有利区优选需要依据较多因素, 结合我国油气勘探现状及页岩气资源特点, 依据“国土资源部油气资源战略研究中心《页岩气资源潜力评价方法与有利区优选标准》”(2012), 对上扬子地区下寒武统页岩气进行有利区预测 (表 3)。

有利区选区方法: 依据页岩沉积环境、分布特征、有机地化特征、储层特征、保存条件及含气性等多因素叠加、类比, 优选研究区页岩气有利区。具体从泥页岩厚度和分布、埋深、泥页岩脆性、TOC 和 R_o 等 5 个因素进行综合分析, 表明: 1) 黔北、湘鄂西—渝东南地区的下寒武统泥页岩具备厚度较厚 (50 ~ 250 m), 分布广泛, 埋深适中 (< 4 500 m), TOC 较高 (> 2. 0 %), R_o 达到高—过成熟阶段 (> 1. 2 %), 脆性矿物百分含量高 (> 40 %) 的特点, 因此黔北、湘鄂西—渝东南地区是最为有利的勘探区域; 2) 川西资阳—自贡一带, TOC 为 2. 0 % ~ 2. 6 %, R_o 在 2 % ~ 5 %, 生烃强度高 ($75\ 200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$), 沉积厚度大 (150 ~ 360 m), 且岩性主要为脆性含量较高的泥页岩。因此上述两个区域可以作

表 3 上扬子地区页岩气有利区优选参考指标
Table3 Criteria for identification of shale gas play fairway in the Upper Yangtze region

主要参数	变化范围
页岩面积下限	有可能在其中发现目标 (核心) 区的最小面积, 在稳定区或改造区都可能分布。根据地表条件及资源分布等多因素考虑, 面积下限为 200 ~ 500 km ² 。
泥页岩厚度	厚度稳定, 单层厚度 ≥ 10m
TOC	平均不小于 2. 0 %
R_o	I 型干酪根 ≥ 1. 2 %; II 型干酪根 ≥ 0. 7 %; III 型干酪根 ≥ 0. 5 %
埋深	300 ~ 4 500 m
地表条件	地形高差较小, 如平原、丘陵、低山、中山、沙漠等
总含气量	不小于 0. 5 m ³ /t
保存条件	中等—好

- [6] 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.
- [7] 聂海宽,张金川,李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报,2011,32(6):659-666.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Li Yuxi. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 659-666.
- [8] 周明辉,梁秋原. 黔中隆起及其周缘地区“下组合”油气地质特征[J]. 海相油气地质,2006,11(2):17-24.
Zhou Minghui, Liang Qiuyuan. Petroleum geological conditions of lower assemblage in Qianzhong Uplift and peripheral regions[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(2): 17-24.
- [9] 王鹏万,陈子抖,贺训云,等. 黔南坳陷下寒武统页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. 天然气地球科学,2011,22(3):518-523.
Wang Pengwan, Chen Ziliu, He Xunyun, et al. Accumulation of Lower Cambrian Niutitang shale gas and prediction of potential area in Qiannan Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 518-523.
- [10] 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. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 51-58.
- [11] 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 1): distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1-16.
- [12] 聂永生,冷济高,韩建辉,等. 黔东南地区岑巩页岩气区块勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2013,34(2):274-280.
Nie Yongsheng, Leng Jigao, Han Jianhui, et al. Exploration potential of shale gas in Cen'gong block, southeastern Guizhou province[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 274-280.
- [13] 李娟,于炳松,张金川,等. 黔北地区下寒武统黑色页岩储层特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):364-374.
Li Juan, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Reservoir characteristics and their influence factors of the Lower Cambrian dark shale in northern Guizhou[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 364-374.
- [14] Robert G, Stephen C. Mississippian barnett shale: lithofacies and depositional setting of a deepwater shales gas succession in the Fort-Worth Basin, Texas[J]. AAPG, 2007, 91(4): 579-601.
- [15] 胡明毅,邓庆杰,邱小松. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气储层矿物成分特征[J]. 石油与天然气学报,2013,35(5):1-6.
Hu Mingyi, Deng Qingjie, Qiu Xiaosong. Characteristics of mineral composition of shale gas reservoirs of Lower Cambrian Niutitang Formation in the Upper Yangtze Region[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(5): 1-6.
- [16] 郭岭,姜在兴,姜文利. 页岩气储层的形成条件与储层的地质研究内容[J]. 地质通报,2011,30(2-3):385-391.
Guo Ling, Jiang Zaixing, Jiang Wenli. Formation condition of gas bearing shale reservoir and its geological research target[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 385-392.
- [17] 何金先,段毅,张晓丽,等. 渝南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏的生烃条件[J]. 海洋地质前沿,2011,27(7):34-39.
He Jinxian, Duan Yi, Zhang Xiaoli, et al. Hydrocarbon generation conditions of the shale in Niutitang formation of Lower Cambrian, Southern Chongqing and Northern Guizhou[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(7): 34-39.
- [18] 黄文明,刘树根,马文辛,等. 川东南—鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J]. 地质通报,2011,30(2-3):365-371.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan and western Hubei-eastern Chongqing areas, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 364-371.
- [19] 聂海宽,张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算—以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 地质学报,2012,86(2):1-11.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation; a case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 1-11.
- [20] 吴根耀,梁兴,马力. 扬子克拉通继承性构造与新生构造并存的时空发育特征及其对海相油气勘探的指导[J]. 石油实验地质,2009,31(1):1-10.
Wu Genyao, Liang Xing, Ma Li. Time-spatial developing features of co-existed inherited and neogenic structures and their guidance to marine origin oil-gas exploration in the Yangtze craton[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(1): 1-10.
- [21] 沃玉进,汪新伟. 中、上扬子地区地质结构类型与海相层系油气保存意义[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):177-187.
Wo Yujin, Wang Xinwei. Geologic configuration types of the middle-upper Yangtze region and their significance for hydrocarbon preservation in marine strata[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 177-187.
- [22] 汪新伟,沃玉进,周雁,等. 构造作用对油气保存影响的研究进展以上扬子地区为例[J]. 石油实验地质,2011,33(1):34-42.
Wang Xinwei, Wo Yujin, Zhou Yan, et al. Primary discussion on relationship between hydrocarbon preservation and tectonic movement—a case study in upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 34-42.
- [23] 黄文明,刘树根,王国芝,等. 四川盆地地下古生界油气地质条件及气藏特征[J]. 天然气地球科学,2011,22(3):465-473.
Huang Wenming, Liu Shugen, Wang Guozhi, et al. Geological conditions and gas reservoir features in Lower Paleozoic in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 465-473.
- [24] 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.
Xie Chen, Zhang Jinchuan, Li Yuxi, et al. Characteristics and gas content of the Lower Cambrian dark shale in Well Yuke1, Southeast Chongqing[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 11-15.
- [25] 刘洪林,王红岩,刘人和,等. 中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J]. 地质学报,2010,84(9):1374-1377.
Liu Honglin, Wang Hongyan, Liu Renhe, et al. China shale gas resources and prospect potential[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9): 1374-1377.
- [26] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32.
Li Xinjing, Lu Zonggang, Dong Dazhong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 27-32.