

文章编号: 0253-2697(2014)05-839-08 DOI: 10.7623/syxb201405003

## 湘西北常页 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩气 聚集条件及含气特征

林 拓<sup>1,2</sup> 张金川<sup>1,2</sup> 李 博<sup>1</sup> 杨升宇<sup>1,2</sup> 何 伟<sup>1,2</sup> 唐 玄<sup>1,2</sup> 马良荣<sup>3</sup> 裴松伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2. 页岩气勘查与评价国土资源部重点实验室 北京 100083;  
3. 中国华电工程(集团)有限公司 北京 100035)

**摘要:**为评价湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气聚集条件及含气性,优选并实施钻探了湖南省第一口以牛蹄塘组为目的层段的页岩气参数井——常页 1 井,累计揭示了牛蹄塘组黑色页岩层系真厚度 674.5 m,是目前中国单井钻遇的最大厚度黑色页岩层系。通过岩心样品有机地球化学、岩石矿物学、储层物性等实验分析,认为常页 1 井牛蹄塘组黑色页岩具有有机碳含量高(平均为 3.9%)、成熟度适中(等效  $R_o$  平均为 2.6%)、脆性矿物含量高(石英含量平均为 50.1%)、黏土矿物含量低(平均为 32.4%)、低孔低渗(孔隙度、渗透率平均分别为 1.7%、 $1.32 \times 10^{-3}$  mD)、中小孔及裂缝发育的特征,具有良好的页岩气聚集条件。岩心现场解析实验和等温吸附实验都显示出常页 1 井具有良好的含气性,且整体上海气量随深度的增大而增加,其中井段 1100~1250 m 的黑色页岩段平均有机碳含量高达 10.1%,现场解析总含气量为 0.5~2.1 m<sup>3</sup>/t,等温吸附含气量为 3.7~6.4 m<sup>3</sup>/t,是该井页岩气发育最有利的深度,显示出以常页 1 井为代表的湘西北牛蹄塘组具有良好的页岩气勘探开发潜力,鉴于其沉积厚度巨大,应优先对牛蹄塘组中下部黑色页岩进行勘探开发。

**关键词:**页岩气;常页 1 井;湘西北;牛蹄塘组;含气性

**中图分类号:**TE122.14

**文献标识码:**A

## Shale gas accumulation conditions and gas-bearing properties of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Well Changye 1, northwestern Hunan

Lin Tuo<sup>1,2</sup> Zhang Jinchuan<sup>1,2</sup> Li Bo<sup>1</sup> Yang Shengyu<sup>1,2</sup>  
He Wei<sup>1,2</sup> Tang Xuan<sup>1,2</sup> Ma Liangrong<sup>3</sup> Pei Songwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration & Evaluation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China;  
3. China Huadian Engineering Co. Ltd., Beijing 100035, China)

**Abstract:** This study evaluates shale gas accumulation conditions and gas-bearing properties of the Lower Cambrian Niutitang Formation in northwestern Hunan, China. An optimal parameter well of shale gas in the Niutitang Formation, Changye 1, was selected and drilled for the first time in Hunan Province. Collectively, it revealed the presence of dark shale series in the Niutitang Formation up to 674.5 m (true thickness), i. e., the thickest black shale series encountered during single-well drilling in China up to now. Core sampling and experimental analysis regarding organic geochemistry, rock mineralogy and reservoir properties show that the black shale of Niutitang Formation features high organic carbon content (average TOC content, 3.9%), moderate organic maturity (equivalent  $R_o$ , 2.6%), high brittle mineral content (quartz content, 50.1%), low clay mineral content (average clay content, 32.4%), poor porosity (1.7%) and permeability ( $1.32 \times 10^{-3}$  mD), and well-developed meso-/micropores and faults, which provide good conditions for shale gas accumulation in Well Changye 1. The well on-site desorption and isothermal adsorption tests show that the black shale of Niutitang Formation has good gas-bearing properties, with gas content generally increasing with depth. In Well Changye 1, the depth interval most favorable for shale gas accumulation is 1100-1250 m, as indicated by the average TOC content up to 10.1% and the gas contents of 0.5-2.1 (well on-site desorption) and 3.7-6.4 m<sup>3</sup>/t (isothermal adsorption). The Niutitang Formation in northwestern Hunan, as represented by Well Changye 1, has good prospect for shale gas exploration. Considering its huge sedimentary thickness, the black shale of Niutitang Formation in the middle-lower part should be given priority for exploration.

**Key words:** shale gas; Well Changye 1; northwestern Hunan; Lower Cambrian; gas-bearing properties

**基金项目:**国家重大科技专项(2009GYXQ)和国家自然科学基金项目(No. 41102088)资助。

**第一作者:**林 拓,男,1984年5月生,2007年毕业于中国地质大学(北京)石油工程专业,现为中国地质大学(北京)能源学院博士研究生,主要从事页岩气地质及资源评价研究工作。Email:everdeer@163.com

**通信作者:**张金川,男,1964年11月生,1986年毕业于成都地质学院,现为中国地质大学(北京)能源学院教授、博士生导师,主要从事油气成藏及油气(非常规油气)资源评价工作。Email:zhangjc@cugb.edu.cn

四川盆地及其周缘地区具有良好的页岩气形成地质条件和资源潜力<sup>[1-5]</sup>,但与四川盆地相邻且同属于上扬子板块的湘西北地区页岩气研究程度还很低。该区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩发育广泛、沉积厚度大、有机质丰度高<sup>[6-10]</sup>,被视为中国南方地区牛蹄塘组页岩气能够获得突破的重点区域。为此,在野外地质调查基础上,优选并实施钻探了湖南省第一口以牛蹄塘组为目的层段的页岩气参数井——常页1井,通过密集采样、测试分析、现场解析等方法,系统研究了该井牛蹄塘组黑色页岩含气量相关指标,定量分析了牛蹄塘组页岩气聚集条件及剖面

含气特征,为评价该区页岩气资源潜力提供了重要的参数依据。

## 1 区域地质背景

湘西北地区与四川盆地同属上扬子板块,从震旦纪到早古生代主要表现为克拉通海相盆地,沉积了系列海相层系<sup>[11-12]</sup>。三叠纪开始由于区域构造演化,盆地发生构造反转,发育了系列逆冲推覆构造和类前陆盆地,后再经侏罗纪和喜马拉雅期2期改造,形成现今以NNE或NE走向为主的褶皱和断裂体系<sup>[13]</sup>,地形上多表现为峰峦重叠、沟谷幽深(图1)。

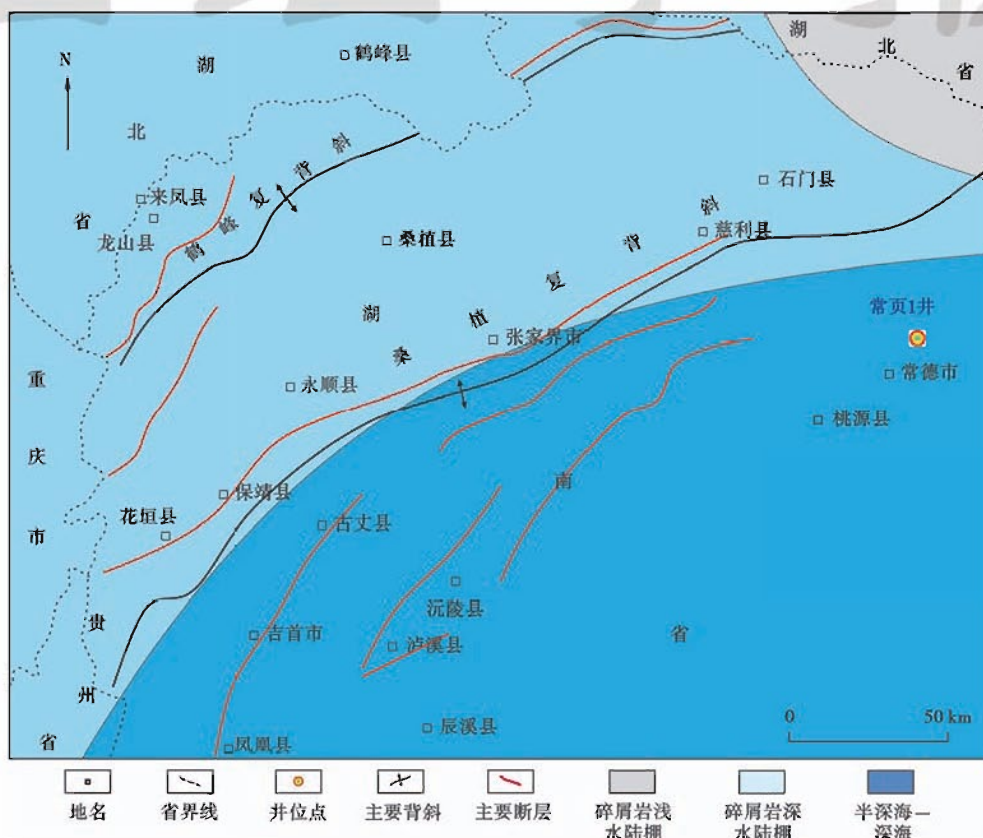


图1 湘西北地区地质背景及常页1井位置

Fig. 1 Regional geological background and location of Well Changye 1 in northwestern Hunan

湘西北地区早古生代沉积的海相地层中,下寒武统牛蹄塘组以黑色页岩、碳质页岩、黑色硅质页岩为主,属碎屑岩深水陆棚或半深海—深海沉积,分布广泛、埋深较大、沉积厚度大,是上扬子板块一套主力生烃层系<sup>[14-16]</sup>。

## 2 样品采集及实验测试

为深入研究湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气资源潜力,通过野外地质调查,优选区域古地理环境为半深海—深海,地形平缓、地表无大型断裂发育的太阳山背斜西翼实施钻探常页1井。

该井在表层揭开17.5 m第四系坡积物后,进入中

寒武统探溪组(主要岩性为灰色薄层状细晶白云岩,间夹少量黑灰色条带状泥质灰岩),并于300.2 m进入下寒武统清虚洞组(主要岩性为深灰色薄层状泥灰岩、黑灰色条带状泥质灰岩)。535.5 m进入牛蹄塘组,在上部钻穿钙质页岩、碳质页岩互层后,于684.8 m钻遇细晶灰岩,并于742 m开始钻遇以黑色页岩、碳质页岩、硅质页岩为主的牛蹄塘组中、下部,1344.1 m钻穿该组底层,完钻于1377.7 m的震旦系硅质岩。常页1井累计揭示了牛蹄塘组黑色页岩层系真厚度674.5 m,是目前中国单井钻遇的最大厚度黑色页岩层系。

为了分析常页1井牛蹄塘组黑色页岩层系(535.5~

1344.1 m) 聚气条件及含气特征, 在该黑色页岩层段按深度平均取了 30 个样品, 参照国际上比较通用的技术指标<sup>[17]</sup>, 分别进行了有机碳含量、有机质成熟度、矿

物成分、储集物性、孔径与比表面积的分析测试、以及等温吸附、现场解析等实验, 根据研究的需要, 不同的测试项目会适当增减样品数量(表 1)。

表 1 常页 1 井牛蹄塘组黑色页岩主要实验测试项目结果

Table 1 Results of major test items for the black shale of Niutitang Formation in Well Changye 1

深度/ m	TOC/ %	$R_o$ / %	石英/ %	黏土矿物/ %	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3}$ mD	总孔体积/ ( $10^{-3}$ ml·g <sup>-1</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	孔直径/ nm	等温吸附/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )
513.1	0.36	—	39	29			8.05	2.12	13.09	0.82
537.7	0.26	1.76	37	34						
548.9	0.32	1.68	52	25			6.21	6.12	4.54	1.23
563.0	3.86	2.13	16	8						
579.0	2.48	—	45	25			3.88	2.19	6.94	2.08
752.0	3.68	—	62	21			4.77	3.58	5.62	2.38
772.0	1.01	1.56	39	20						
794.5	0.22	—	34	40	1.5	0.01	4.26	1.36	11.46	
803.9	0.03	—								
822.0	1.40	—	40	48						
840.0	0.66	—	47	41			4.85	1.70	11.12	0.54
866.5	1.31	—	43	43						
887.5	2.67	—	60	26			3.31	2.50	5.89	
903.0	1.77	—	45	40						
926.0	2.19	0.97	44	40	1.6		3.97	2.18	7.79	0.64
956.0	1.10	—	42	40						
977.0	1.47	—	47	36	1.6	3.7	2.34	2.07	5.62	
995.0	1.16	—	45	39						
1017.6	1.66	2.02	51	32	1.2	—	6.61	4.82	5.42	0.69
1043.5	1.93	—	57	30						
1068.2	2.32	—	65	29						
1085.5	2.16	—	47	40			3.68	1.90	8.80	
1118.0	5.45	—	58	34	1.7	1.5	11.60	7.35	6.49	3.73
1130.0	17.60	—								
1166.0	8.98	2.20	72	12			16.10	10.88	5.72	5.84
1203.9	12.40	2.09	32	34						
1230.6	8.17	3.07	78	10			7.12	4.24	6.63	
1258.7	6.12	3.13	26	6	1.8	0.01	2.34	1.22	6.91	3.87
1287.9	2.62	2.98	91	5			1.83	1.07	6.46	
1320.4	9.89	1.73	50	19			1.49	1.22	5.47	6.48
1334.1	0.75	—	94	3	1.2	—	1.30	0.80	5.83	0.82
1344.0	1.69	1.68	84	8			2.54	1.26	7.51	0.87

注:表中 TOC 为部分数据;“—”表示测不出结果;空白表示未测。

### 3 页岩气聚集条件

#### 3.1 有机碳含量

目前研究成果认为,页岩吸附气量与有机碳含量呈正相关关系<sup>[18-20]</sup>。地层剖面上有机碳含量的变化,一定程度上反映了页岩含气量的变化。对常页 1 井牛蹄塘组巨厚的黑色页岩层段进行了密集取样(约 1 m 间隔采 1 个样),采用碳硫测定仪测试了 584 个实验样品。实验分析表明,牛蹄塘组黑色页岩层系 TOC 为 0.03%~17.60%(最大值对应深度为 1130.0 m),平均为 3.9%。

剖面上有机碳含量总体上随深度的增加而增加,在 1100 m 处开始增加显著。1103~1224 m 层段有机

碳平均含量为 10.1%,1288~1344 m 有机碳平均含量为 8.2%,远远大于页岩气工业开发的下限。与美国及邻区海相页岩相比较,均显示出极为良好的生烃物质基础(表 2)。

#### 3.2 有机质成熟度

采用有机显微组分法测试 30 个样品的沥青反射率( $R_o$ ),并根据丰国秀的经验公式( $R_o = 0.6569R_{eq} + 0.3364$ )换算成等效镜质体反射率( $R_{eq}$ 等效)<sup>[24]</sup>。测试发现,有一半以上的样品有机质已碳化,不能形成形态有机质,无法测出成熟度。有机碳含量最高的 1103~1224 m 井段样品有机质成熟度( $R_{eq}$ 等效)分布范围为 2.02%~3.13%,平均为 2.6%,与区域露头样品(成熟度为 2.10%~3.24%,平均 2.8%)测试结果吻合。

表2 常页1井黑色页岩和国内外不同盆地产气页岩生烃参数对比

Table 2 Comparison of hydrocarbon-generating parameters between the black shale of Well Changye 1 and other gas-generating shales in different basins

盆地/地区/钻井	阿巴拉契亚	密执安	伊利诺斯	黔西北	渝东南	常页1井
地层	上泥盆统	上泥盆统	上泥盆统	下寒武统	下寒武统	下寒武统
沉积环境	海相深水	海相深水	海相深水	深水陆棚	深水陆棚	深海一半深海
厚度/m	9~31	21~37	6~37	20~80	30~130	674.5
有机碳含量/%	0.5~23	0.3~24	1~25	0.50~6.96/3.5	0.16~9.62/3.4	0.03~17.60/3.9
镜质体反射率/%	0.4~4.0	0.4~0.6	0.4~1.3	2.3~3.62/2.7	1.60~3.55/2.7	2.02~3.13/2.6
孔隙度/%	2~11	2~10	5~15		0.4~2.7/1.5	1.2~1.9/1.6

注:表中数据根据文献[20-23]汇编;"/"之后为平均值。

对比美国主要页岩气产区,其海相页岩成熟度在0.4%~4.0%,尤其是阿巴拉契亚盆地上泥盆统页岩成熟度普遍大于1.3%,最高可达4.0%。黔西北地区、渝东南地区牛蹄塘组黑色页岩平均有机质成熟度均为2.7%,和常页1井相当。Milici、Pollastro甚至认为,只有在成熟度较高的区域才有页岩气的产出<sup>[21,25]</sup>。鉴于中国南方下古生界海相页岩成熟度普遍较高的情况,常页1井成熟度相对比较适中。

### 3.3 矿物组成

采用X-射线衍射分析方法测定了不同深度19块样品的矿物成分。样品中的矿物成分以石英含量最高,为32%~78%,平均含量为50.1%;黏土矿物总量为10%~48%,平均含量为32.4%;钾长石含量少,平均含量为1.1%;斜长石平均含量为5.4%,方解石平均含量为2.1%,白云石平均含量为3.3%,黄铁矿平均含量为4.7%,部分样品含菱铁矿。

石英含量总体上随深度的增加而增加,岩性也逐渐从黑色页岩、碳质页岩过渡为牛蹄塘组底部的硅质页岩和震旦系的硅质岩。较高硅质含量的页岩储层能够在构造运动中产生更多的天然裂缝,这些微裂缝有助于页岩气的赋存<sup>[26-28]</sup>。页岩气的有效开采得益于能够对页岩储层实施有效改造,而改造的条件是页岩中要含有足够的脆性矿物,从而更容易产生诱导裂缝<sup>[29,30]</sup>。从国内外成功的页岩气开采经验看,脆性矿物含量一般都大于40%。常页1井黑色页岩段脆性矿物含量平均达到55.4%,最高达80.2%,其中以石英含量为最高,尤其是1100m以下井段的石英含量增加明显,显示出了储层良好的可改造性。

### 3.4 储集物性

采用氦孔隙度测量仪和脉冲衰减法渗透率仪测定了7个样品的孔隙度和渗透率。常页1井有效孔隙度为1.2%~1.9%,平均为1.6%,均在5%以下。渗透率为 $(0.01\sim 3.75)\times 10^{-3}$  mD,平均为 $1.32\times 10^{-3}$  mD,孔隙度与渗透率都很低。相对来说,在井段1056.3~1258.7m的黑色页岩、碳质页岩段,孔隙度

相对较大,但也不超过2.0%。

### 3.5 孔隙特征

采用压汞和比表面联合测定19个样品的孔隙结构。实验表明,常页1井牛蹄塘组页岩的微孔体积为 $(0.02\sim 0.91)\times 10^{-3}$  mL/g,平均为 $0.3\times 10^{-3}$  mL/g;中孔体积为 $(1.03\sim 15.19)\times 10^{-3}$  mL/g,平均为 $4.2\times 10^{-3}$  mL/g;宏孔体积为 $(0.01\sim 1.60)\times 10^{-3}$  mL/g,平均为 $0.5\times 10^{-3}$  mL/g;总孔体积为 $(1.3\sim 16.1)\times 10^{-3}$  mL/g,平均为 $5.1\times 10^{-3}$  mL/g;BET比表面积为 $(0.80\sim 10.88)$  m<sup>2</sup>/g,平均为3.1 m<sup>2</sup>/g;孔隙直径为4.54~13.09 nm,平均为7.2 nm。其中,井段1100~1250 m是该井总孔体积和比表面积最高的层段。

相比而言,美国东部主要页岩气产出盆地页岩同样致密。页岩气产量高低与页岩内部孔隙发育程度和特征直接相关,其中纳米级微小孔隙能够增大页岩比表面积,进而吸附更多的甲烷气体<sup>[22,23,31-33]</sup>。常页1井黑色页岩内部孔隙中,小于50 nm的微孔、中孔对总孔体积的贡献最大,平均约为总孔体积的88.2%,最高可达99.6%(图2)。其孔隙直径平均为

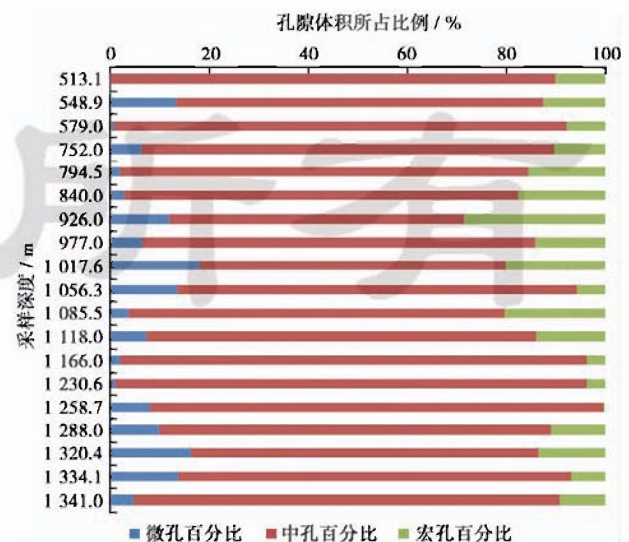


图2 常页1井牛蹄塘组页岩孔隙体积比例分布

Fig. 2 Distribution of pore volume ratios for the black shale of Niutitang Formation in Well Changye 1

7.2 nm, 相似孔隙度的情况下, 这种以中小孔隙为主的特点使其拥有更大的比表面积, 为吸附更多的甲烷气体创造了有利条件, 从而能够赋存更多的吸附气。

### 3.6 裂缝发育

裂缝对储层的改造有重要作用<sup>[22,34]</sup>。常页 1 井下

寒武统牛蹄塘组黑色页岩岩心破碎, 尤其在该井的中下部, 岩心破碎最为严重[图 3(a)], 且裂缝发育, 包含张性缝、剪性缝和挤压性缝等多种类型裂缝[图 3(b)]。极度发育的构造裂缝说明该井牛蹄塘组黑色页岩受构造改造较大, 有利于形成游离气赋存的天然裂缝。

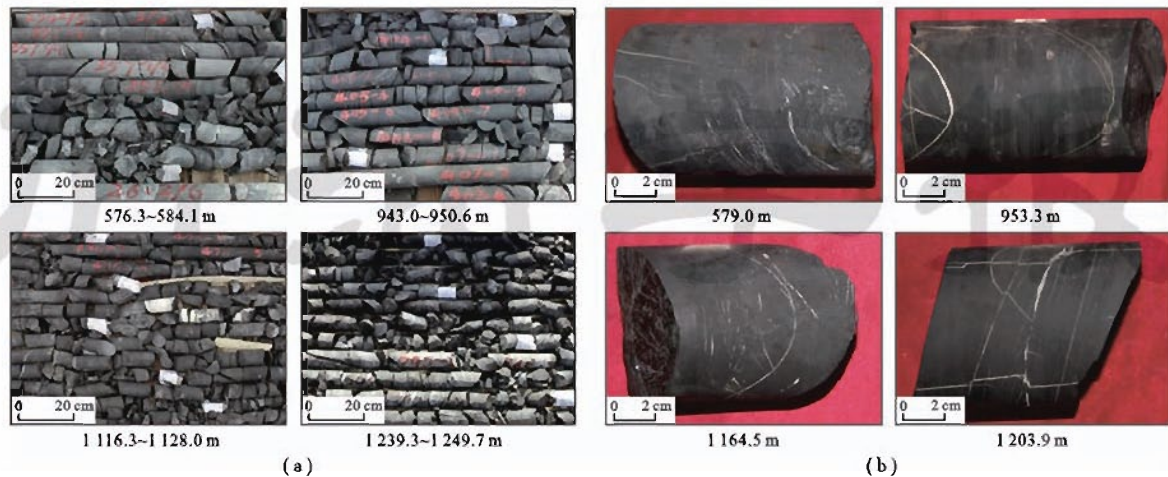


图 3 常页 1 井页岩岩心及裂缝照片

Fig. 3 Photograph of drilling core and fractures of shale in Well Changye 1

## 4 页岩含气特征

### 4.1 现场解析含气量

研究中共对 63 块样品进行现场解析实验, 其中部分样品在实验过程未解吸出气体。根据解吸气、残余气含量的测定结果, 通过非线性回归法计算出损失气量, 从而得到总含气量(表 3)。运用非线性方程回归计算损失气量是目前较为准确的方法, 能够最大限度减小游离气逸失而引起的误差<sup>[35]</sup>。

按照页岩气勘探开发标准, 页岩气的含气量下限

为  $0.5 \text{ m}^3/\text{t}$  时, 才具有工业开发价值<sup>[36]</sup>。埋深较浅时(小于 950 m), 常页 1 井普遍含气量较低, 部分样品在实验过程未解吸出气体, 不具有开发价值; 随着深度的增加含气量逐渐增高, 埋深 956~989 m 的黑色页岩段是含气量相对较高的层段, 厚度为 33 m, 含气量达到  $0.5 \sim 0.63 \text{ m}^3/\text{t}$ , 初步预测本段已达到工业开发下限; 埋深 1067~1250 m 的黑色页岩、碳质页岩段是整口井含气量最高的层段, 厚度达到了 183 m, 含气量达到  $0.5 \sim 2.1 \text{ m}^3/\text{t}$ , 具有良好的开发价值。

表 3 常页 1 井现场解析含气量测试结果

Table 3 Gas content from well site desorption test of Well Changye 1

深度/ m	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	深度/ m	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	深度/ m	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	深度/ m	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	深度/ m	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	深度/ m	含气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )
563	—	766	0.12	840	0.04	915	0.20	1025	0.39	1126	0.38
565	—	772	0.06	848	0.19	926	0.07	1035	0.08	1151	2.10
568	—	782	0.24	852	0.13	936	0.13	1044	0.38	1156	1.62
575	0.18	788	0.09	867	0.11	956	0.63	1056	0.26	1165	0.06
579	0.09	794	0.16	876	0.17	962	0.57	1068	0.19	1166	2.09
587	—	803	0.17	881	0.28	977	0.51	1077	0.09	1204	0.98
589	—	811	0.13	888	0.09	989	0.51	1086	0.25	1231	0.97
680	0.07	822	0.06	896	0.36	1002	0.38	1094	0.49	1237	0.68
752	0.20	828	0.05	903	0.21	1018	0.17	1104	0.27	1259	0.28

### 4.2 等温吸附含气量

为评价黑色页岩吸附气体的能力, 选取 14 块样品进行等温吸附实验, 共测定 8 个平衡压力点, 分别为 0

MPa、0.35 MPa、1.07 MPa、2.25 MPa、4.31 MPa、6.24 MPa、8.72 MPa、11.13 MPa, 每一个压力点达到平衡的时间约 12 h, 然后再增压到下一个压力点。将结果

与 Langmuir 方程式拟合后形成等温吸附曲线,并计算饱和和吸附气量。结果表明,样品饱和和吸附气量为  $0.69 \sim 7.61 \text{ m}^3/\text{t}$ , 平均为  $2.79 \text{ m}^3/\text{t}$ (表 2); Langmuir 压力常数为  $1.04 \sim 3.29 \text{ MPa}$ , 平均为  $2.19 \text{ MPa}$ 。14 个样品中饱和吸附量都在  $0.5 \text{ m}^3/\text{t}$  以上, 其中达到  $3 \text{ m}^3/\text{t}$  以上的有 6 个, 其中  $1056 \sim 1320 \text{ m}$  井段样品等温吸附气量为  $3.7 \sim 6.4 \text{ m}^3/\text{t}$ , 对甲烷的吸附能力最大。

#### 4.3 最有利含气层段

常页 1 井页岩气发育最有利井深为  $1100 \sim 1250 \text{ m}$ , 该层段黑色页岩有机碳含量很高, 成熟度适中, 微孔、中孔、宏孔体积以及总孔体积、比表面积均为全井段最大, 且石英含量相对较高, 有利于储层压裂, 黏土矿物含量适中, 现场解析含气量及等温吸附实验测试含气量也都为全井段最大, 是常页 1 井页岩气发育的最有利层段(图 4)。

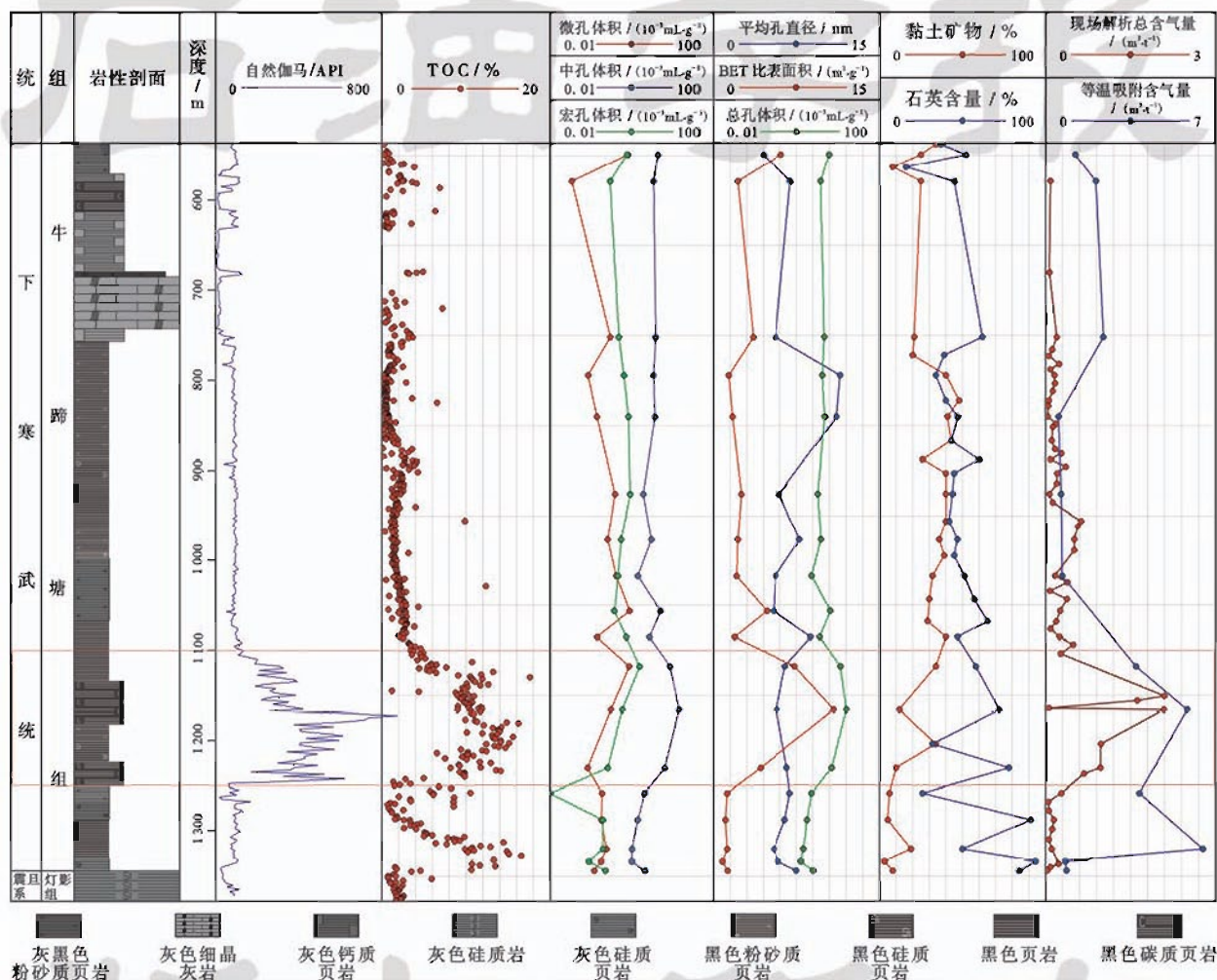


图 4 常页 1 井牛蹄塘组黑色页岩层系含气特征综合分析

Fig. 4 Comprehensive analysis of gas-bearing characteristics for the black shale of Niutitang Formation in Well Changye 1

## 5 结论

(1) 常页 1 井累计揭示了牛蹄塘组黑色页岩层系真厚度  $674.5 \text{ m}$ , 是目前中国单井钻遇的最大厚度黑色页岩层系。

(2) 该井牛蹄塘组黑色页岩具有厚度大( $674.5 \text{ m}$ )、有机碳含量高(平均为  $3.9\%$ )、成熟度适中(等效  $R_o$  平均为  $2.6\%$ )、脆性矿物含量高(石英含量平均为  $50.1\%$ )、黏土矿物含量低(平均为  $32.4\%$ )、低孔低渗(孔隙度、渗透率平均分别为  $1.7\%$ 、 $1.32 \times 10^{-3} \text{ mD}$ )、中

小孔及裂缝发育的特征, 具有良好的页岩气聚集条件。

(3) 常页 1 井牛蹄塘组具有良好的含气性, 整体上含气量随深度的增大而增加, 其中井段  $1100 \sim 1250 \text{ m}$  的黑色页岩段平均有机碳含量高达  $10.1\%$ , 现场解析总含气量为  $0.5 \sim 2.1 \text{ m}^3/\text{t}$ , 等温吸附含气量为  $3.7 \sim 6.4 \text{ m}^3/\text{t}$ , 是该井页岩气发育最有利的深度。

(4) 下寒武统牛蹄塘组海相页岩在湘西北地区分布广泛、沉积稳定, 常页 1 井牛蹄塘组良好的页岩气勘探潜力, 也进一步证实了湘西北地区具有良好的页岩气资源前景和勘探价值。

## 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] 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.  
Chen Shangbin,Zhu Yanming,Wang Hongyan,et al.Research status and trends of shale gas in China[J].Acta Petrolei Sinica,2010,31(4):689-694.
- [3] 李建忠,郑民,张国生,等.中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J].石油学报,2012(增刊1):89-98.  
Li Jianzhong,Zheng Min,Zhang Guosheng,et al.Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China[J].Acta Petrolei Sinica,2012(S1):89-98.
- [4] 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.
- [5] 董大忠,邹才能,杨桦,等.中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J].石油学报,2012,33(增刊1):107-114.  
Dong Dazhong,Zou Caineng,Yang Hua,et al.Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(S1):107-114.
- [6] 赵宗举,冯加良,陈学时,等.湖南慈利灯影组古油藏的发现及意义[J].石油与天然气地质,2001,22(2):114-118.  
Zhao Zongju,Feng Jialiang,Chen Xueshi,et al.Discovery of Dengying formation fossil pool in Cili,Hunan and its significance[J].Oil & Gas Geology,2001,22(2):114-118.
- [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):959-967.  
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):959-967.
- [8] 王阳,朱炎铭,陈尚斌,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气形成条件分析[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):586-594.  
Wang Yang,Zhu Yanming,Chen Shangbin,et al.Formation conditions of shale gas in Lower Cambrian Niutitang formation,northwestern Hunan[J].Journal of China University of Mining & Technology,2013,42(4):586-594.
- [9] 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.
- [10] 肖正辉,杨崇非,冯涛,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件及其勘探潜力分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2012,27(1):50-54.  
Xiao Zhenghui,Yang Rongfeng,Feng Tao,et al.Reservoir-forming conditions and exploration potential of shale gas in Lower Cambrian Niutitang Formation,northwestern Hunan[J].Journal of Hunan University of Science and Technology:Natural Science Edition,2012,27(1):50-54.
- [11] 马力,陈焕疆,甘克文,等.中国南方大地构造和海相油气地质[M].地质出版社,2004.  
Ma Li,Chen Huanjiang,Gan Kewen,et al.Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in southern China[M].Beijing:Geological Publishing House,2004.
- [12] 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.  
Ma Liqiao,Dong Yong,Tu Xiaolong,et al.Petroleum prospect of marine sequences in South China[J].Acta Petrolei Sinica,2007,28(3):1-7.
- [13] 湖南省地质矿产局.湖南省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province.Regional geology of Hunan province[M].Beijing:Geological Publishing House,1988.
- [14] 王鸿祯.中国古地理图集[M].北京:地质出版社,1985.  
Wang Hongzhen,Atlas of the palaeogeography of China[M].Beijing:Cartographic Pressing House,1985.
- [15] 郭成贤,朱忠德,靳涛,等.湘西北杨家坪寒武纪事件沉积[J].石油与天然气地质,1999(1):41-47.  
Guo Chengxian,Zhu Zhongde,Jin Tao,et al.Event sediments of Cambrian in Yangjiaping,northwest Hunan[J].Oil & Gas Geology,1999(1):41-47.
- [16] 赵宗举,朱琰,王根海,等.叠合盆地油气系统研究方法——以中国南方中、古生界为例[J].石油学报,2002,23(1):11-18.  
Zhao Zongju,Zhu Yan,Wang Genhai,et al.The studying method of petroleum system in superposition basin-as an example by analyzing Mesozoic and Paleozoic in southern China[J].Acta Petrolei Sinica,2002,23(1):11-18.
- [17] 吴庆红,李晓波,刘洪林,等.页岩气测井解释和岩心测试技术——以四川盆地页岩气勘探开发为例[J].石油学报,2011,32(3):484-488.  
Wu Qinghong,Li Xiaobo,Liu Honglin,et al.Log interpretations and the application of core testing technology in the shale gas;taking the exploration and development of the Sichuan Basin as an example[J].Acta Petrolei Sinica,2011,32(3):484-488.
- [18] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin; issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [19] Jarvic D M, Hill R J, Pollastro R M, et al. Evaluation of unconventional natural gas prospects, the Barnett shale fractured shale gas model; European Association of International Organic Geochemists Meeting, Poland, September 8-12, 2003 [C]. Poland: Krakow, 2003.
- [20] Schmoker J W. Determination of organic matter content of Appa-

- lachian Devonian shales from gamma-ray logs[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7): 1285-1298.
- [21] 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]. USGS, Published 2006, Version 1.0. Available online only.
- [22] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [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] 丰国秀, 陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J]. 天然气工业, 1988, 8(2): 20-25.  
Feng Guoxiu, Chen Shengji. Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock[J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(2): 20-25.
- [25] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth Basin, Texas[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.
- [26] 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.  
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the southern margin of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 775-782.
- [27] 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.
- [28] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.  
Wang Yuman, Dong Dazhong, Li Jianzhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, Southern Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561.
- [29] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523-527.  
Yuan Junliang, Deng Jingen, Zhang Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527.
- [30] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报, 2012, 33(S1): 149-158.  
Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 149-158.
- [31] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 419-427.  
Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Determination of organic rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419-427.
- [32] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 249-256.  
Ji Liming, Qiu Junli, Xia Yanqing, et al. Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 249-256.
- [33] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301-311.  
Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301-311.
- [34] Horsfield B, Schulz H M. Shale gas exploration and exploitation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 31: 1-2.
- [35] 唐颖, 张金川, 刘珠江, 等. 解吸法测量页岩含气量及其方法的改进[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 108-112.  
Tang Ying, Zhang Jinchuan, Liu Zhujiang, et al. Use and improvement of the desorption method in shale gas content tests[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 108-112.
- [36] 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.  
Zhang Jinchuan, Lin Lanmei, Li Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: probability volume method[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.

(收稿日期 2014-04-06 改回日期 2014-07-23 责任编辑 张怡)