

中国南方海相地层牛蹄塘组页岩气“甜点段”识别和优选

吴诗情^{1,2}, 郭建华^{1,2}, 李智宇^{1,2}, 秦明阳^{1,2}, 黄俨然^{1,2,3}, 何昊楠⁴

[1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083; 3. 湖南科技大学 页岩气资源利用湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 4. 中国石油大学(北京) 克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000]

摘要:为了探索中国南方海相地层牛蹄塘组原始储层中页岩气赋存状态,笔者采用了液氮低温吸附/脱附实验和甲烷等温吸附实验等手段,分别表征了页岩对吸附气和游离气的储集能力;同时结合典型井的含气性特点,研究页岩气的赋存机理,识别和优选出了研究区储层的“甜点段”。结果表明,牛蹄塘组发育1~2层富有机质页岩(有机碳含量 $TOC > 2.0\%$),岩性以黑色硅质页岩为主;储层微观主要发育有机质孔(两端开口的圆柱孔),粘土矿物层间孔(四面开口的狭窄平板孔)以及粒间孔和晶间孔(四面开口的锥形平板孔),而最重要的孔隙类型是有机质孔。牛蹄塘组含气性普遍较差,但慈页1井残余气体积分数高达69.7%。理论计算和现场实验结果均表明,牛蹄塘组页岩储层赋存甲烷特征变化随 TOC 发生改变,由于有机质孔的孔径较小(一般仅为几十纳米以下),导致原始储层中赋存吸附气能力较强,而赋存游离气能力较弱。随着有机质质量分数的增加,岩石的弹性模量逐渐降低,但泊松比却逐渐增加。牛蹄塘组“甜点段”具有“甜”和“脆”的特点,即厚度为20~40 m, TOC 含量为4%~8%,石英质量分数超过40%,粘土矿物质量分数30%~40%,碳酸盐岩质量分数低于20%, V_{BH} 在 $(10 \sim 17) \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, V_L 在 $4 \sim 6 \text{ cm}^3/\text{g}$,游离气体积分数超过40%,弹性模量为25~35 GPa,泊松比为0.20~0.25,整体上,牛蹄塘组“甜点段”主要发育在深水陆棚泥质相带,且游离气富集能力强的层段。

关键词:甜点;页岩气;牛蹄塘组;海相地层;中国南方

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Identification and optimization of shale gas “sweet spots” in marine Niutitang Formation, South China

Wu Shiqing^{1,2}, Guo Jianhua^{1,2}, Li Zhiyu^{1,2}, Qin Mingyang^{1,2}, Huang Yanran^{1,2,3}, He Haonan⁴

[1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha, Hunan 410083, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Exploitation, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 4. China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: Low-temperature adsorption/desorption of liquid nitrogen and isothermal adsorption of methane were used to characterize the shale reservoir capacity for adsorbed gas and free gas so as to describe the occurrence of shale gas in the original reservoirs of the Niutitang Formation in southern China. Combined with the gas-bearing properties of typical wells, the occurrence mechanism of the shale gas was studied and the “sweet spots” were identified and optimized in the study area. The results show that 1 to 2 layers of organic-rich shale dominated by black siliceous shale are developed in the Niutitang Formation ($TOC > 2.0\%$). Organic-matter pores (cylindrical pores with both ends open), interlayer pores of clay mineral (narrow parallel-plate pores with four sides open) and intergranular and intercrystalline pores (conical parallel-plate pores with four sides open) are developed with the organic-matter pores being the most important. The Niutitang Formation is generally poor in gas-bearing properties, except for one well (Well Ciye 1) measured with a residual gas volume fraction of as high as 69.7%. Both theoretical calculation and field experiments have shown that the

收稿日期:2019-07-04; 修订日期:2020-07-27。

第一作者简介:吴诗情(1989—),女,博士研究生,非常规油气地质。E-mail:sunshine0827@csu.edu.cn。

通讯作者简介:郭建华(1957—),教授,博士生导师,层序地层学及储层地质学。E-mail:gjh796@csu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41603046);湖南省自然科学基金项目(2017JJ1034,2017GK2233)。

occurrence of methane in Niutitang Formation shale reservoirs vary with *TOC*. Due to the relatively small organic-matter pore size (usually smaller than tens of nanometers), the original reservoirs in the formation store more adsorbed gas than free gas. With the increase of organic matter mass fraction, the elastic modulus of rocks decreases and the Poisson's ratio increases gradually. The “sweet spots” in the Niutitang Formation are characterized by “sweetness” and “brittleness”, i. e. they have greater thickness (20 – 40 m) and high *TOC* values between 4% and 8%, high quartz mass fraction (>40%) and clay mineral mass fraction (30% – 40%), low carbonate rock mass fraction (<20%), a V_{BJH} of $(10 - 17) \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, a V_{L} of $4 - 6 \text{ cm}^3/\text{g}$, a free gas volume fraction of more than 40%, an elasticity modulus of 25 ~ 35 GPa and a Poisson's ratio of 0.20 ~ 0.25. In short, the “sweet spots” in the Niutitang Formation are mainly developed in deep shelf argillaceous facies with high free gas storage capacity.

Key words: shale gas, sweet spot, Niutitang Formation, marine formation, South China

伴随着中国“页岩气革命”的成功,2018年我国页岩气年产量已经超过 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为油气增储上产的新增长点。然而,我国页岩气勘探与开发也面临着新的挑战^[1-2],页岩气工业生产主要集中在四川盆地涪陵、长宁—威远以及昭通等地区五峰组—龙马溪组^[3-4],而四川盆地外仅有少量地区(如湖北宜昌地区^[5]、贵州安场^[6])取得工业突破,要实现“页岩气发展规划(2016—2020年)”提出的2020年 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 年产量的目标任重而道远。牛蹄塘组具有分布面积广、有机质含量高、厚度大、脆性矿物含量高、资源潜力大等优点,是中国南方海相地层的页岩气重要勘探目的层,也是未来页岩气产量大规模提升的关键领域,但是目前牛蹄塘组页岩气勘探效果整体不理想^[1,7-8]。在原始储层中,页岩气主要以吸附态或游离态赋存,其中游离气的含量和体积分数不仅直接影响页岩气井产量,而且是识别“甜点段”的主要参数^[9]。国内学者根据四川盆地海相页岩气勘探实践相继提出“二元富集^[10]”、“三元聚集^[11]”、“源—盖控藏^[12]”、“页岩吸附能力及总含气量变化模式^[13]”以及“四层楼式油气聚集模式^[6]”等聚集理论。页岩气“甜点区”应该具备“甜、脆、好”的特征,笔者前期研究提出南方复杂地质条件区海相页岩气“甜点区”评价参数体系,并进行量化,加以权重。目前针对页岩气原始储层赋存状态和机理研究较少,这制约了整个南方页岩气勘探开发。页岩气勘探和开发离不开储层纵向上“甜点段”的识别与优选,打进“甜点段”是页岩气水平井获得高产的重要保证^[14]。国内文献尚未明确定义“甜点段”,一般将“厚度适中、有机质质量分数高、有机质孔发育较好、含气量高、甲烷体积分数高、游离气体积分数高、脆性矿物质量分数高”的页岩层作为勘探开发有利层段^[15-16]。针对五峰组—龙马溪组页岩气聚集特点,金之钧^[17]等提出“五性一体”(有机质、有机质孔、层理(缝)、硅质含量和压力系数)特征来识别“甜点段”,但

牛蹄塘组具有厚度、纵向特征变化显著、“五性分离”的特点,针对牛蹄塘组“甜点段”的识别和研究较少。本文以中国南方多口页岩气钻井资料为对象,通过液氮低温吸附/脱附实验和甲烷等温吸附实验分别表征储层对吸附气和游离气的储集能力,结合典型井含气性特点,研究原始储层中页岩气赋存机理,分析有机质丰度对岩石力学性质的影响,预测和识别储层“甜点段”,指导未来牛蹄塘组页岩气勘探和开发。

1 区域地质背景

研究区湘西北和四川盆地都属于上扬子地台。早寒武世中国南方泛大陆的解体导致区域沉降加剧,形成了最大海泛面^[18]。牛蹄塘组大规模富有机质页岩形成于低能、安静和缺氧的深水陆棚环境中,富含硅质和炭质,局部发育2~3层石煤,在常德钟家铺等地见大量磷结核(图1)。研究区以保靖—慈

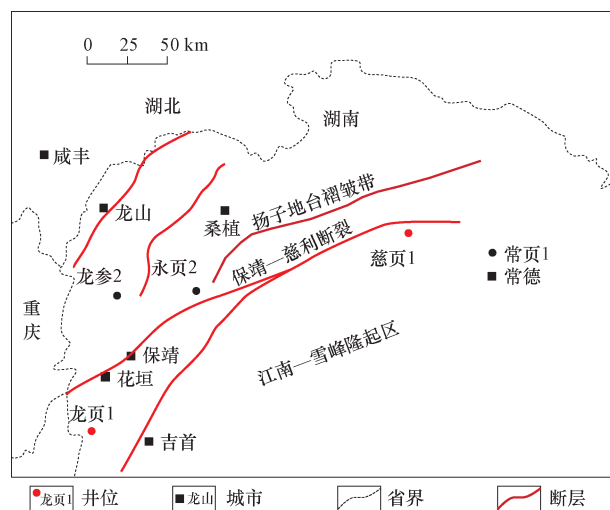


图1 湘西北地区构造位置及井位分布

Fig. 1 Sketch map showing the location of structures and distribution of wells in northwestern Hunan Province

利断裂为界,西北侧属于扬子地台褶皱带,而东南侧属于江南-雪峰隆起区,武陵期-燕山期多期次压扭性构造运动形成了区内 NEE 或 NE 向断裂和褶皱体系,并最终对页岩气的聚集和保存产生重大影响^[19]。

牛蹄塘组黑色页岩向上粒度逐渐变粗,颜色变浅。下部发育黑色炭质页岩、硅质页岩,而上部发育黑色-灰黑色粉砂质页岩。受热液活动影响,牛蹄塘组页岩富含部分微量元素(如 Zn,Cr,As,Se,Ba,P,V 和 U)以

及矿物(如黄铁矿和重晶石),是南方地区重要的多金属矿床富集层(图 2,图 3)。

2 样品与实验

受地表风化影响,露头样品不能真实准确反映页岩有机地球化学和储层特征^[20],本次研究的页岩样品全部为地下岩心(或岩屑)。图 4 所示为本次的主要实验流程。

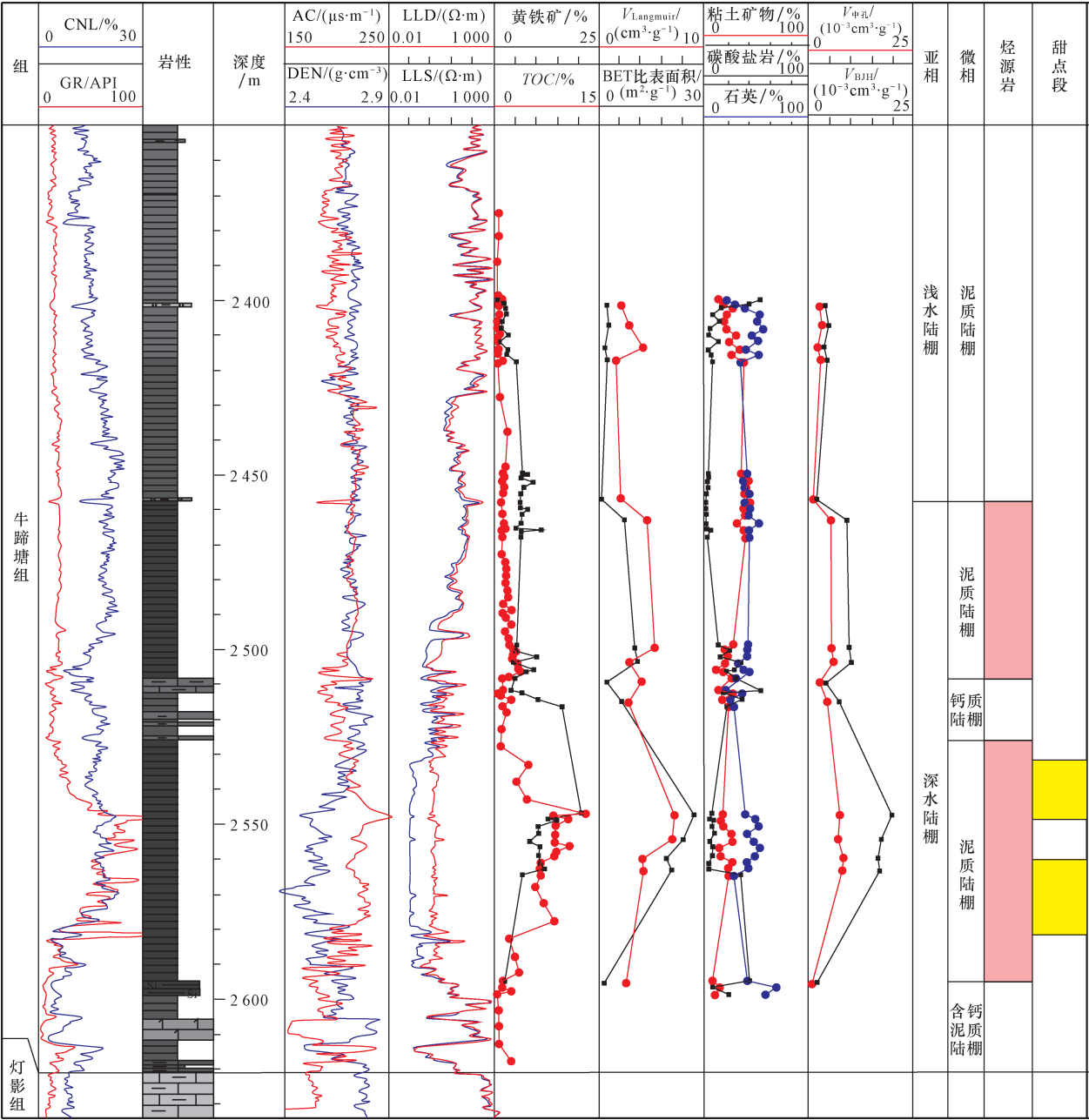


图 2 湘西北地区花页 1 井地层综合柱状图
Fig. 2 Integrated column chart of Well Huaye1 in northwestern Hunan Province

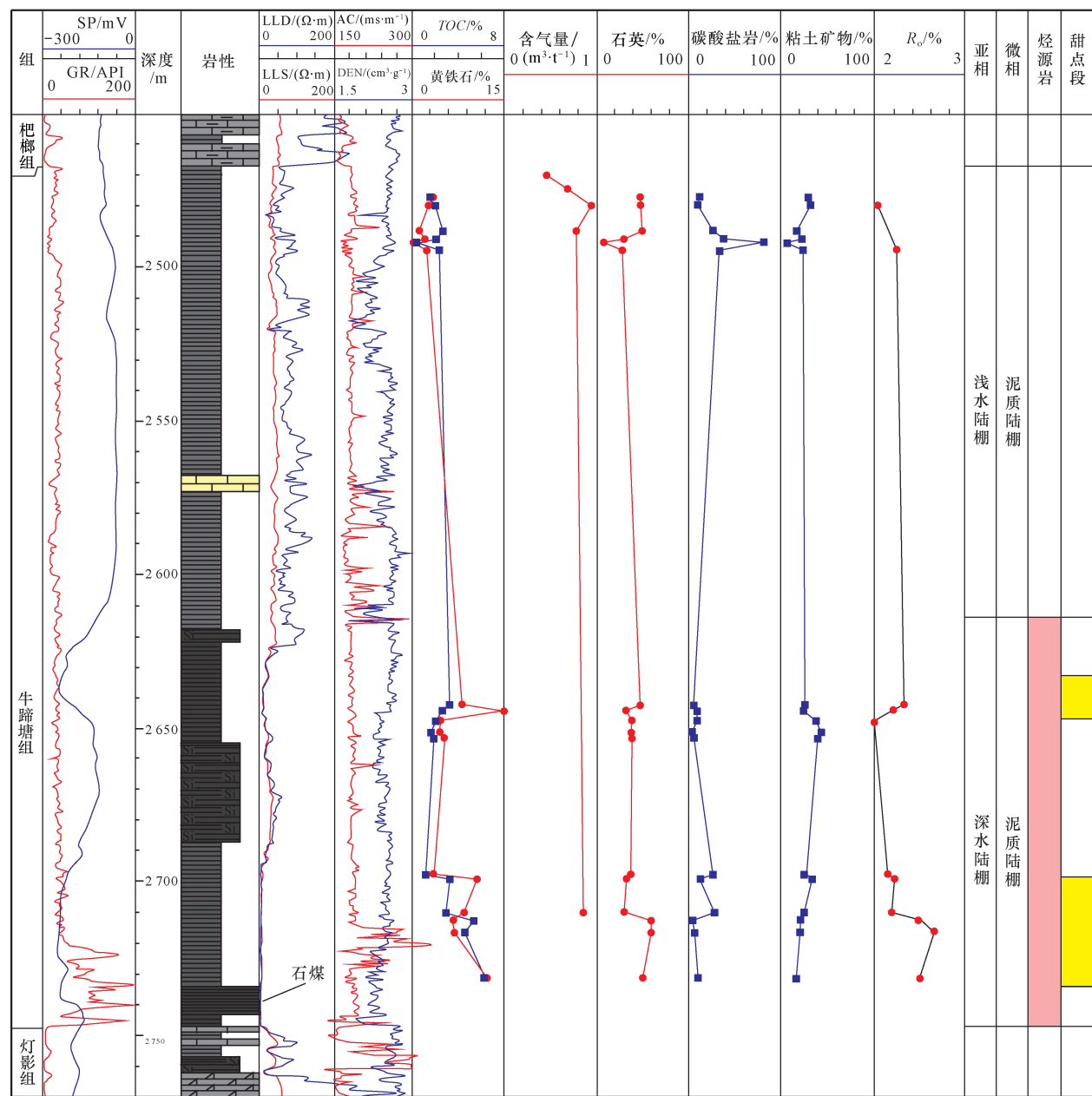


图 3 湘西北地区慈页 1 井综合柱状图

Fig. 3 Integrated column of Well Ciye 1 in northwestern Hunan Province

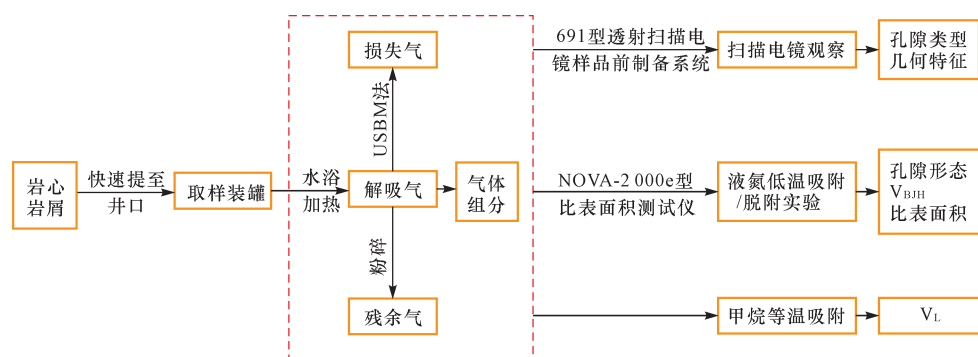


图 4 实验流程

Fig. 4 Experimental workflow

第一,解吸气量在钻井现场通过《页岩含气量测试方法 SY/T 6940—2013》获得,并在室内进一步分析解吸气各组分的体积分数,残余气量通过实验室内粉碎的岩心的含气性获得,而损失气量采用 USBM (United States Bureau of Mines) 方法直接计算。

第二,利用 691 型透射电镜样品前制备系统完成预处理后,采用 FEI Quanta 200F 场发射扫描电子显微镜(分辨率小于 1.2 nm)观察孔隙类型、结构及形态。

第三,在 NOVA-2000e 型比表面积测试仪上,针对平行样品开展低温液氮吸附/脱附实验,依据曲线隆起形状判断孔隙结构特征,并分别依据 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 和 BJH (Barrett-Joyner-Halenda) 模型计算比表面积和孔隙体积。测试的孔径范围 0.35 ~ 500 nm,涉及部分微孔(<2 nm)、中孔(2 ~ 50 nm)和部分大孔(>50 nm)。

第四,在 30℃ 恒温条件下,针对平行样品测试页岩对甲烷吸附能力。实验结果与 Langmuir 方程进行拟合,获得等温吸附曲线,并计算饱和吸附能力。

3 结果

3.1 岩性特征

深水陆棚环境下,发育了 1~2 层高质量烃源岩($TOC > 2.0\%$)。主要岩性为黑色-灰黑色页岩、硅质页岩,并含有水平层理。黄铁矿呈现放射状、块状、层状或似层状。慈页 1 井发育石煤层(一种腐泥煤,发热量超过 800 kcal/kg),呈鳞片状、半明亮,有玻璃光泽。岩层面上可以观察到大量滑动擦痕,并富集大量炭质,具有明显污手现象。光学显微镜下,炭质呈现浸染状、斑点状,且炭质、水云母和粘土矿物等呈现定向排列(图 2,图 3)。

中国南方古生界有机地球化学特征和矿物含量如表 1 所示。湘西北牛蹄塘组页岩的矿物组成以石英和粘土矿物为主,碳酸盐岩、长石和黄铁矿次之。本次以石英+长石+黄铁矿、碳酸盐岩和粘土矿物为三端元制作三角图,牛蹄塘组主要岩性为硅质页岩,类似与北美 Barnett 页岩和焦页 1 井,具有较高的石英/硅质含量(图 5),有利于在水力压裂过程中形成复杂的裂缝^[21]。

3.2 孔隙类型与结构

近年来,依据孔隙尺寸、产状-结构和成因等,国内外学者提出多种页岩孔隙划分方案^[18,26-31]。笔者在电子扫描电镜观察(SEM)的基础上,结合液氮低温

吸附/脱附实验和甲烷等温吸附实验,认为对页岩气勘探和开发最有效孔隙主要是有机质孔(两端开口的圆柱孔)、粘土矿物层间孔(四面开口的狭窄平板孔)以及粒间孔和晶间孔(四面开口的锥形平板孔)等(图 6,表 2)。

3.2.1 有机质孔(两端开口的圆柱孔)

有机质孔(两端开口的圆柱孔)是页岩中最重要的和最常见的孔隙类型。牛蹄塘组页岩中含丰富的有机质,原始沉积时呈层状分布,受后期压实作用和构造作用影响,有机质呈浸染状、块状和填隙状分布于无机矿物颗粒之间,并呈定向排列。热演化过程中,干酪根生烃后消耗有机组分产生球形、椭圆形或者弯月形等孔隙,孔径一般仅几纳米至几十纳米,部分可达 100 ~ 200 nm。有机质体内往往含有上百个有机质孔,而大的有机质孔内含次级有机质孔^[28]。笔者前期研究认为,有机质孔具有较大的比表面积和良好的吸附能力,决定了页岩储层吸附能力强弱,而且提供游离气的赋存空间^[19]。页岩气属于典型的“原地”聚集模式,有机质体以及内部的有机质孔共同构成了最佳的“源-储匹配”关系,形成典型的蜂窝状“微气藏”,且定向排列的有机质体也有利于提升储层横向渗流能力。

3.2.2 四面开口的狭窄平板孔(粘土矿物层间孔)

页岩中粘土矿物质量分数一般在 20% ~ 30%,且伊利石平均质量分数超过 90%。伊利石常呈层状分布,相邻的伊利石矿物层之间发育大量四面开口的狭窄平板型孔隙,孔径一般在 200 nm 左右。粘土矿物层间孔对甲烷具有较好的吸附能力,并提供游离气赋存空间,提高储层储集能力。需要注意的是,粘土矿物层间孔对页岩储集能力的贡献不如有机质孔,而且作为不稳定因素,粘土矿物也有可能在水力压裂过程中损害储层。

3.2.3 四面开口的锥形平板孔(粒间孔与晶间孔)

页岩中富含石英、长石以及黄铁矿等无机矿物,并构成岩石骨架。无机矿物骨架颗粒之间发育大量原生粒间孔和晶间孔,但是在成岩过程中,粘土矿物、有机质在压实作用下会充填至原生孔隙中,且后期碳酸盐岩胶结作用导致原生孔隙进一步损失严重。残留的粒间孔、晶间孔呈四面开口的锥形平板状,对甲烷的吸附能力弱,但可以赋存部分游离态甲烷。脆性矿物提高岩石的整体脆性,有利于在水力压裂过程中产生裂缝。

表 1 中国南方古生界海相页岩参数对比
Table 1 Parameter comparison of the Paleozoic marine shale in South China

层位	井名	深度/m	TOC/%	R _o /%	矿物组成含量/%			来源
					石英	碳酸盐岩	粘土矿物	
五峰组 - 龙马溪组	永页 1	514 ~ 532	0.98 ~ 3.47 (1.98)	2.36 ~ 2.48 (2.40)	37.00 ~ 66.00 (50.30)	4.50	28.00 ~ 40.00 (31.30)	本文
	永页 2	1 508 ~ 1 523	2.21 ~ 3.53 (2.84)	2.01 ~ 2.06 (2.03)	34.60 ~ 62.20 (47.90)	0 ~ 22.70 (6.80)	14.00 ~ 54.20 (26.90)	
	龙参 2	1 897 ~ 1 922	1.00 ~ 5.96 (3.7)	2.24 ~ 2.76 (2.48)	41.20 ~ 62.20 (53.70)	2.30 ~ 9.80 (6.60)	15.20 ~ 35.30 (23.60)	
	桑页 1	1 567 ~ 1 595	0.60 ~ 2.08 (1.56)	2.40 ~ 3.20 (2.80)	—	—	—	[22]
	焦页 1	2 328 ~ 2 415	0.55 ~ 5.89 (2.54)	2.20 ~ 3.13 (2.65)	33.90 ~ 80.30 (48.00)	—	22.60 ~ 51.80 (33.00)	
	长宁	—	1.90 ~ 7.30 (4.00)	2.30 ~ 3.80 (2.5)	25.80 ~ 67.60 (41.10)	0 ~ 43.30 (20.50)	10.30 ~ 52.80 (30.50)	
牛蹄塘组	威 201	1 503 ~ 1 543	2.60 ~ 5.30 (3.20)	1.90 ~ 2.90 (2.50)	16.70 ~ 72.80 (40.00)	9.20 ~ 65.20 (21.80)	—	[23]
	常页 1	1 103 ~ 1 224	0.03 ~ 17.6 (10.10)	2.02 ~ 3.13 (2.60)	26.00 ~ 94.00 (52.30)	0 ~ 85.00 (8.70)	3.00 ~ 48.00 (27.90)	[16,24]
		1 288 ~ 1 344	0.75 ~ 9.89 (8.20)					
	花页 1	2 483 ~ 2 508	1.27 ~ 9.94 (2.4)	2.00 ~ 3.60 (2.80)	21.40 ~ 70.40 (43.00)	6.80 ~ 58.80 (20.40)	8.90 ~ 45.30 (27.70)	本文
		2 526 ~ 2 595	1.16 ~ 13.30 (7.00)					
	慈页 1	2 620 ~ 2 653	1.61 ~ 3.22 (2.28)	1.52 ~ 2.04 (1.76)	27.60 ~ 59.10 (41.60)	3.80 ~ 37.90 (15.30)	16.90 ~ 42.90 (27.20)	本文
		2 690 ~ 2 732	1.18 ~ 6.44 (3.93)					
	威 201	2 652 ~ 2 704	2.00 ~ 3.60 (2.80)	3.20 ~ 3.60 (3.30)	29.00 ~ 72.50 (38.50)	2.10 ~ 15.60 (8.50)	—	[23]
	宜地 2	1 728	0.52 ~ 5.96 (2.05)	2.18 ~ 2.30 (2.26)	5.10 ~ 55.7 (25.57)	6.40 ~ 87.9 (36.97)	2.70 ~ 61.30 (33.30)	
	鄂阳页 1	3 055	4.98 ~ 5.48 (5.20)	2.70	30.20 ~ 50.20 (39.30)	10.90 ~ 29.20 (17.70)	9.50 ~ 25.80 (15.50)	[5]
	1 957	3.20	2.25	46.70	7.80	36.30		

注:括号内为平均值。

3.3 含气性特征

页岩含气性特征是评价是否具有工业价值的重要指标。通常,游离气主要决定页岩气井的产量,而吸附气部分决定了页岩气井的寿命^[1]。由表 3 可见,美国 Barnett 页岩含气量为 4.2 ~ 9.9 m³/t,其中吸附气体积分数仅占 20%。四川盆地焦页 1 井的五峰组 - 龙马溪组含气量(主要成分为甲烷)为 0.44 ~ 5.19 m³/t,平均为 1.97 m³/t,吸附气体积分数 20% ~ 40%^[22]。湘

西北永页 2 井五峰组 - 龙马溪组总含气量 1.0 ~ 3.5 m³/t,其中,解吸气体积分数 33.8% ~ 79.0%,平均为 55.4%;而残余气体积分数是 4.0% ~ 40.5%,平均为 20.4%^[21]。龙参 2 井 1 913 ~ 1 916 m 五峰组 - 龙马溪组页岩总含量是 1.56 ~ 3.04 m³/t,其中,残余气仅为 0.22 ~ 0.31 m³/t。湖北宜昌地区鄂宜页 1 井水井沱组页岩(井深 1 786 ~ 1 872 m)含气量(损失气和解吸气)是 0.58 ~ 5.48 m³/t,平均为 2.05 m³/t,获得较好的工业气流^[5]。

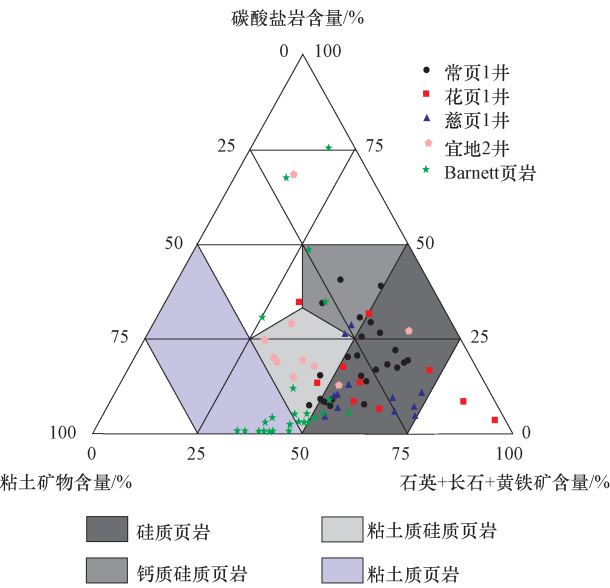


图 5 中国南方海相地层牛蹄塘组富有机质页岩矿物组成
Fig. 5 Mineral composition of organic-rich shale in the Niutitang Formation in South China

受基质孔隙不发育以及保存条件较差等影响,中国南方海相地层牛蹄塘组页岩含气量低,气体组分中甲烷体积分数低,而氮气体积分数高。慈页 1 井是研

究区含气性最好的一口井^[32],总含气量为 0.33~0.95 m³/t,平均为 0.68 m³/t。其中,残余气体积分数是 44.8%~83.5%,平均为 69.7%;而解吸气体积分数只占 8.3%~22.3%,平均为 14.9%。

4 讨论

4.1 储层特征对页岩气赋存状态的影响

不同层系页岩现场实验获得含气性之间的差异反映页岩气原始赋存状态的差异。原始储层中,页岩气主要由吸附气和游离气组成(忽略溶解气);而地表条件下,人工计算和实验获得了损失气、解吸气和残余气这 3 个部分。湘西北地区牛蹄塘组储层致密,吸附能力较强,赋存游离气能力较弱,而赋存吸附气能力较强。在岩心上提至地表过程中,随着温度和压力的降低,游离气部分会逸散变成损失气,大部分会随着解吸实验转化为解吸气,但有少量会留在页岩内形成残余气。在此过程中,页岩中仅有少量的吸附气转变为解吸气和损失气(需要先转变为游离气),大部分仍然滞留在页岩中,形成残余气。

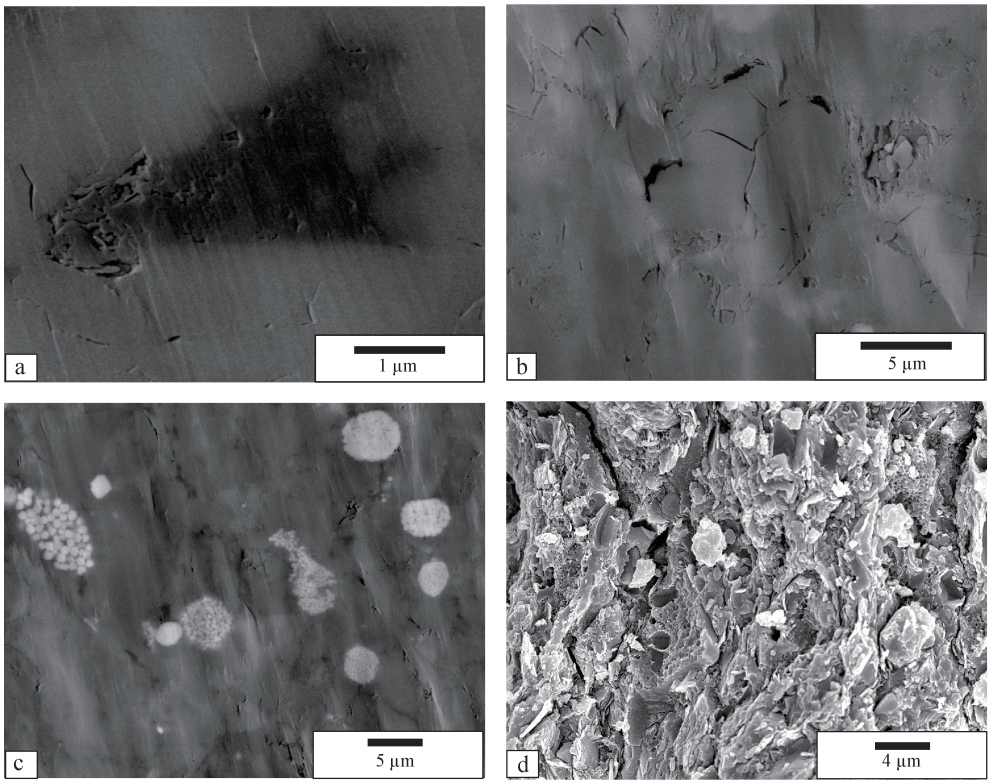


图 6 湘西北地区花页 1 井牛蹄塘组 SEM 下孔隙特征

Fig. 6 SEM images showing the pore characteristics of samples from Well Huaye 1 in the Niutitang Formation, northwestern Hunan Province
a. 埋深 2 468 m, 有机质及其内部孔隙; b. 埋深 2 456 m, 石英及其粒间孔; c. 埋深 2 468 m, 黄铁矿及晶间孔;
d. 埋深 2 548 m, 粘土矿物及层间孔, 自然断面下观察

表 2 湘西北地区花页 1 牛蹄塘组典型样品储层特征

Table 2 Reservoir characteristics of typical samples from Well Huaye 1 in the Niutitang Formation, northwestern Hunan Province

孔隙特征	SEM 观察	TOC/%	BET 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$V_{\text{BJH}} /$ ($10^{-3} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	$V_{\text{L}} /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
以四面开口的锥形平行板孔为主	粒间孔、粘土矿物层间裂缝	<2	<4	<6	<4
规则的两端开口圆筒孔和狭窄的平行板孔	有机质孔、粒间孔、粘土矿物层间裂缝	2~8	4~15	6~20	4~6
狭窄的平行板孔、四面开口锥形板孔和两端开口的锥形管孔	有机质孔、粒间孔、粘土矿物层间裂缝、晶间孔	>8	>15	>20	>6

表 3 中国南方典型的页岩气井以及 Barnett 页岩含气性特征

Table 3 Gas-bearing features of typical shale gas wells in South China and Barnett shale

层位	井号	总含气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	具体特征
Barnett		4.2~9.9	吸附气体积分数 20%
五峰组-龙马溪组	焦页 1	0.44~5.19, 平均 1.97	吸附气体积分数 20%~40%
五峰组-龙马溪组	永页 2	1.0~3.5	解吸气体积分数 33.8%~79.0%, 平均 55.4%; 残余气体积分数 4.0%~40.5%, 平均 20.4%
五峰组-龙马溪组	龙参 2	1.56~3.04	残余气仅 0.22~0.31 m^3/t
水井沱组	宜页 1	0.58~5.48, 平均为 2.05	解吸气和损失气体积分数高, 有工业气流
牛蹄塘组	慈页 1	0.33~0.95, 平均 0.68	残余气体积分数 44.8%~83.5%, 平均 69.7%; 而解吸气体积分数只占 8.3%~22.3%, 平均 14.9%

图 7 所示为有机质孔(两端开口的圆柱形孔)中甲烷赋存模型。吸附态甲烷遵循 Langmuir 理论, 占据约 1 个分子厚度的孔隙体积(吸附态甲烷层典型平均厚度约为 0.7 nm), 对于 100 nm 圆柱形孔隙(以最常见的有机质孔为例), 吸附态甲烷占孔隙体积仅约 4%; 但随着孔隙孔径减小, 吸附态甲烷占孔隙体积的百分数逐步增加^[33]。通过 SEM 观察, 牛蹄塘组有机质孔隙孔径普遍较小, 推测原始储层中吸附态甲烷占孔隙体积超过 50%。

假设储层埋深为 2 500 m, 储层压力约为 25 MPa, 温度约为 95 ℃(参考地面温度为 20 ℃, 大气压力为 0.101 MPa, 地温梯度为 30 ℃/km), 通过甲烷偏差系数图版, 查询甲烷偏差系数取 0.96, 参考下式计算原始天然气体积系数约 0.004 87^[34]。

$$B_{gi} = \frac{p_{sc} Z_i T}{p_i T_{sc}} \tag{1}$$

式中: B_{gi} 为原始天然气体积系数, 无量纲; p_{sc} 为地面标准压力, 0.101 MPa; Z_i 为原始甲烷偏差系数, 无量纲; T 为地层温度, K; p_i 为原始地层压力, MPa; T_{sc} 为地表标准温度, 293.15 K。

深水泥质陆棚微相下牛蹄塘组 V_{BJH} (BJH 体积) 平均约 0.011 cm^3/g , 用天然气体积系数对地下页岩游离

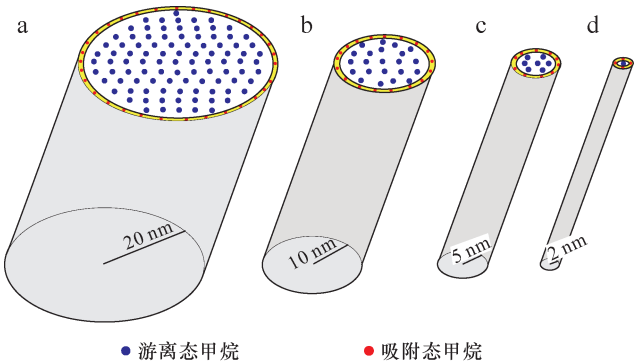


图 7 有机质孔(两端开口的圆柱形孔)中甲烷赋存模型

Fig. 7 Methane occurrence model in organic-matter pores (cylindrical pores with both ends open)

气体积进行换算后, 得出游离气储集能力为 2.258 cm^3/g ; 吸附气储集能力 V_{L} (Langmuir 体积) 平均达 4.57 cm^3/g , 经计算, 吸附气储集能力占页岩总储集能力 66.9% (表 3)。对比之下, 五峰组-龙马溪组 V_{BJH} 平均约 0.016 cm^3/g , 换算后储层对游离气体积储集能力约 3.285 cm^3/g , 而吸附气储集能力约 1.16 cm^3/g ^[35], 吸附气储集能力占储层总储集能力 26.1%。

花页 1 井牛蹄塘组 2 526~2 595 m 有机质平均质量分数约为 7.0%, 有机质约占平均岩石体积分数约

为14.0%,有机质体承担部分上覆地层压力,有机质孔的发育受到抑制,不仅大孔隙发育的较少,而且容易被坍塌转变为小孔隙(图8)。而五峰组-龙马溪组时代较早,经受的压实、胶结等作用相对较弱,且有机质质量分数(一般仅2.0%~6.0%)低于牛蹄塘组,导致有机质孔发育相对较好。Yang等指出^[36],四川盆地南部龙马溪组页岩原始储层中,开放连通的有机质孔赋存78%的甲烷(55%吸附态,23%游离态),而无机质孔仅赋存22%的甲烷(主要是游离气)。中国南方在焦页1井中五峰组-龙马溪组页岩中,孔径为100~300 nm的有机质孔较多,且发育大量顺层的页理(缝),导致页岩储层具有较好的赋存游离气能力^[37]。

4.2 有机质丰度对页岩力学性能的影响

岩石良好的力学性能(高弹性模量和低泊松比)有利于过程中的水力压力施工,进一步形成大量人工网状缝隙。由图9可见,随着TOC的增加,弹性模量逐渐降低,而泊松比却逐渐升高。

当页岩气中含有的有机质质量分数较低,即TOC小于2.0%时,有机质在岩石中体积分数一般小于4.0%,有机质呈浸染状分布,不构成页岩的骨架,此时的弹性模量为30~50 GPa,而泊松比为0.15~0.20,均呈现了较大的随机性和波动性,说明岩石的力学性能受有机质影响较小,主要受脆性的岩石骨架影响。当岩石中有机质质量分数增加时,有机质在岩石中呈层状分布,并具有定向分布特征,页岩中的页理发育的更加充分,塑性的有机质对页岩的力学性能影响逐渐增大,导致页岩弹性模量逐渐降低,而泊松比却逐渐增大。当TOC超过8.0%时,有机质在岩石中成块状、填隙状分布,有机质占岩石的体积分数可达16%以上,成为

岩石骨架的不可忽视的一部分,弹性模量降低至25 GPa左右,而泊松比增至0.25~0.30。

4.3 “甜点段”的识别和优选

中国南方地区五峰组-龙马溪组烃源岩仅厚20~30 m,含气性较好,观音桥段附近(WF2—WF3, LM1—LM4),页岩具有“五性一体”特征,根据现场岩性特征或有机质质量分数直接识别“甜点段”^[17,38],可以有效指导勘探开发过程中的水力压裂。

中国南方牛蹄塘组页岩气勘探鲜有工业气流,推测是储层致密、吸附能力强导致游离气含量低,进而影响开发效果。由图10可见,花页1井中页岩储集能力随有机质质量分数TOC而不断变化,并在TOC达到8%时达到临界点(表2);慈页1井中(实验)残余气体积分分数与花页1井(理论计算)吸附气体分数相一致,花页1井吸附气体积分分数随TOC而变化,并在TOC在4%~8%达到最低^[39]。

以往忽视在整个地层中识别“甜点段”,导致成功压裂之后页岩气井获得较低产量。鉴于牛蹄塘组TOC高(普遍大于2.0%),且进入高成熟—过成熟阶段,生烃潜力已不是关键问题,在良好保存条件前提下,未来勘探应该重点选择TOC含量为4%~8%,游离气储集能力强的层段做为“甜点段”目标。如图2所示,花页1井和常页1井分别优选出2个“甜点段”。可见牛蹄塘组具有“甜”和“脆”特征,即硅质页岩、炭质页岩发育于深水泥质陆棚相,厚度为20~40 m,TOC为4%~8%,而石英质量分数超过40%,粘土矿物质量分数30%~40%,碳酸盐岩质量分数低于20%, V_{BH} 为 $(10 \sim 17) \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, V_L 为 $4 \sim 6 \text{ cm}^3/\text{g}$,游离气体积分分数超过40%,弹性模量为25~35 GPa,泊松比为0.20~0.25(表4)。

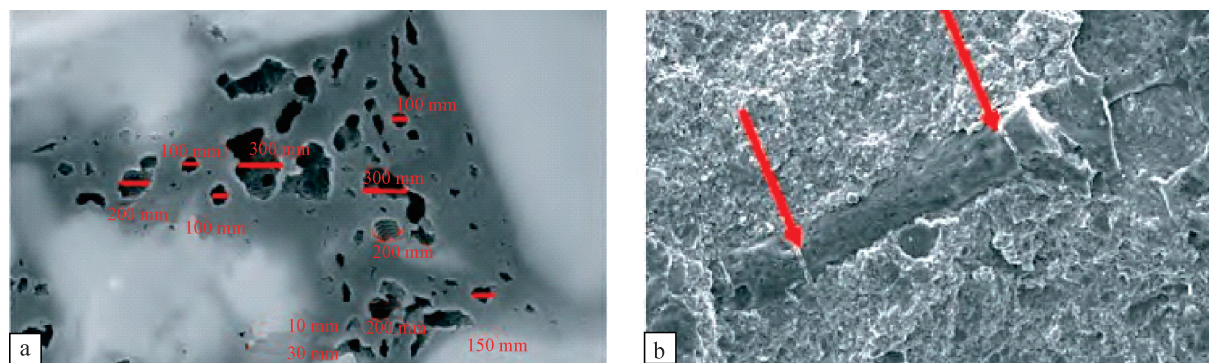


图8 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩有机质孔发育^[37]

Fig. 8 Organic-matter pores in samples from the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin^[37]

a. 有机质孔,焦页1井,埋深2385 m; b. 有机质孔,焦页2井,埋深2570 m

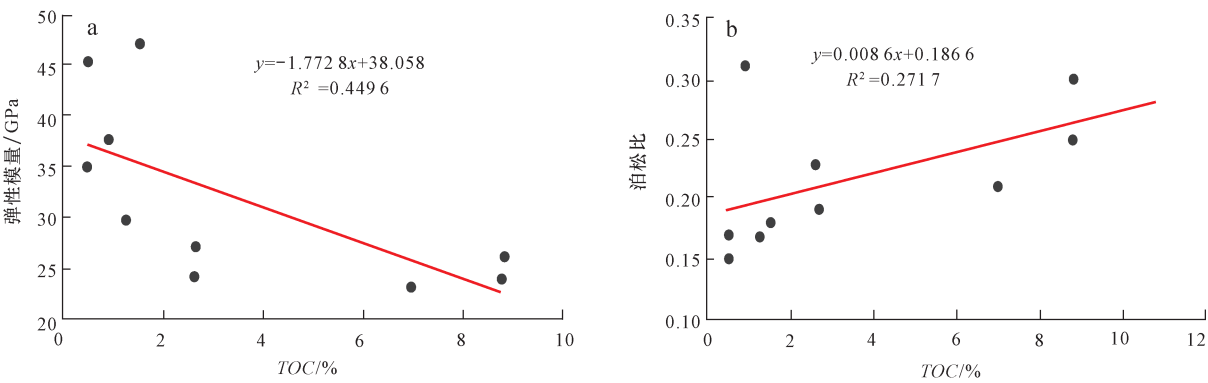


图 9 湘西北地区花页 1 井有机质丰度对岩石力学性能的影响

Fig. 9 Impact of organic matter abundance (TOC) on the mechanical properties of rocks from Well Huaye 1 in northwestern Hunan Province

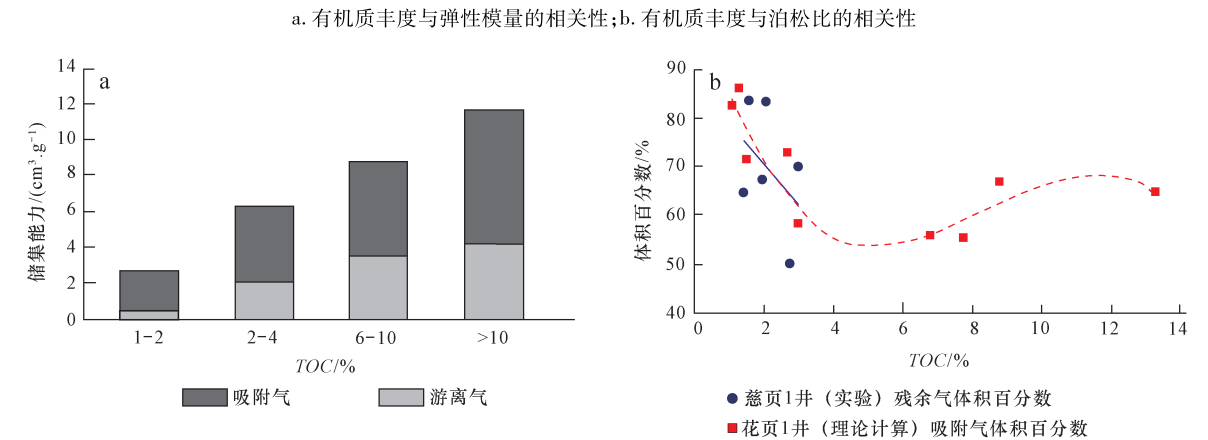


图 10 湘西北牛蹄塘组页岩储层特征

Fig. 10 Shale reservoir characteristics in the Niutitang Formation, northwestern Hunan Province

a. 花页 1 井中页岩储集能力与有机质质量百分数的关系;b. 慈页 1 井残余气(实验)体积分数与花页 1 井吸附气(计算)体积分数特征对比

表 4 中国南方海相地层牛蹄塘组页岩“甜点段”特征

Table 4 Characteristics of “sweet spots” in the Niutitang Formation of marine strata in South China

沉积相	深水泥质陆棚
岩性	硅质页岩、炭质页岩
厚度/m	20~40
TOC/%	4~8
石英含量/%	>40
粘土矿物含量/%	30~40
碳酸盐岩含量/%	<20
$V_{\text{BHH}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$(10 \sim 17) \times 10^{-3}$
$V_{\text{L}}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	4~6
游离气体积分数/%	>40
弹性模量/GPa	25~35
泊松比	0.20~0.25

发育有机质孔(两端开口的圆柱孔),粘土矿物层间孔(四面开口的狭窄平板孔)以及粒间孔与晶间孔(四面开口的锥形平板孔)。

2) 牛蹄塘组页岩储层赋存甲烷特征随 TOC 而变化,由于有机质孔孔径较小(一般仅几至几十纳米),导致原始储层中赋存吸附气能力较强,而赋存游离气能力较弱。

3) 有机质丰度影响页岩的力学性能,随着 TOC 的增加,弹性模量逐渐降低,而泊松比却逐渐升高。

4) 牛蹄塘组“甜点段”具有“甜”和“脆”特征,即厚度为 20~40 m,TOC 含量为 4%~8%,而石英质量分数超过 40%,粘土矿物质量分数 30%~40%,碳酸盐岩质量分数低于 20%, V_{BHH} 在 $(10 \sim 17) \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, V_{L} 在 4~6 cm^3/g ,游离气体积分数超过 40%,弹性模量为 25~35 GPa,泊松比为 0.20~0.25。

参 考 文 献

1) 深水泥质陆棚环境下发育富有机质页岩($TOC > 2.0\%$),岩性以黑色硅质页岩为主,页岩储层微观主要

[1] 邹才能,赵群,董大忠,等. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前

- 景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(12): 1781–1796.
- Zou Caineng, Zhao Qun, Dong Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(12): 1781–1796.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561–574.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 561–574.
- [3] 董大忠, 王玉满, 李新景, 等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19–32.
- Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(1): 19–32.
- [4] 谢军. 长宁: 威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 1–7.
- Xie Jun. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 1–7.
- [5] 陈孝红, 危凯, 张保民, 等. 湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 207–226.
- Chen Xiaohong, Wei Kai, Zhang Baomin, et al. Main geological factors controlling shale gas reservoir in the Cambrian shuijingtu formation in Yichang of Hubei Province as well as its enrichment patterns [J]. *Geology in China*, 2018, 45(2): 207–226.
- [6] 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 1–12.
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Pang Fei, et al. Reservoir-forming pattern of “four-storey” hydrocarbon accumulation in anchang syncline of northern Guizhou Province [J]. *Geology in China*, 2017, 44(1): 1–12.
- [7] 张琳婷, 郭建华, 焦鹏, 等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气藏形成条件与资源潜力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(4): 1163–1173.
- Zhang Linting, Guo Jianhua, Jiao Peng, et al. Accumulation conditions and resource potential of shale gas in lower Cambrian niutitang formation, Northwestern Hunan [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(4): 1163–1173.
- [8] 张琳婷, 郭建华, 焦鹏, 等. 湘西北地区牛蹄塘组页岩气有利地质条件及成藏区带优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1715–1722.
- Zhang Linting, Guo Jianhua, Jiao Peng, et al. Geological conditions and favorable exploration zones of shale gas in niutitang formation at northwest Hunan [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(5): 1715–1722.
- [9] CURTIS, John B. Fractured shale-gas systems [C]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [10] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律: 四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209–1218.
- Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China: understanding from the longmaxi formation shale gas in Sichuan basin and its surrounding area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1209–1218.
- [11] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 1–6.
- Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 1–6.
- [12] 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.
- [13] Hao Fang, Zou Huayao, Lu Yongchao. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(8): 1325–1346.
- [14] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一) [J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689–701.
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 689–701.
- [15] 林拓, 张金川, 李博, 等. 湘西北地区龙马溪组页岩气聚集条件与含气性分析[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 507–510.
- Lin Tuo, Zhang Jinchuan, Li Bo, et al. Accumulation conditions and gas-bearing characteristic analysis of longmaxi shale gas in Northwestern Hunan Province [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(5): 507–510.
- [16] 林拓, 张金川, 李博, 等. 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[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 839–846.
- Lin Tuo, Zhang Jinchuan, Li Bo, et al. Shale gas accumulation conditions and gas-bearing properties of the lower Cambrian niutitang formation in well changye 1, Northwestern Hunan [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(5): 839–846.
- [17] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1–10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-longmaxi formations, southeastern Sichuan basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 1–10.
- [18] 秦明阳, 郭建华, 黄俨然, 等. 四川盆地东缘湘西北地区牛蹄塘组页岩储层特征及影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 922–932.
- Qin Mingyang, Guo Jianhua, Huang Yanran, et al. Characteristics and influencing factors of shale reservoirs in the niutitang formation of Northwestern Hunan Province, and East margin of Sichuan basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 922–932.
- [19] 秦明阳, 郭建华, 黄俨然, 等. 四川盆地外复杂地质条件区海相页岩气“甜点区”优选: 以湘西北地区古生界为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 596–606.
- Qin Mingyang, Guo Jianhua, Huang Yanran, et al. “Sweet spots zone” optimization of marine shale gas in complex geological conditions area out of Sichuan basin: a case of Paleozoic in Northwestern Hunan, China [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(3): 596–606.
- [20] Tan Jingqiang, Weniger P, Krooss B, et al. Shale gas potential of the

- major marine shale formations in the upper Yangtze platform, South China, part II: methane sorption capacity[J]. *Fuel*, 2014, 129: 204 – 218.
- [21] 秦明阳,郭建华,何红生,等. 四川盆地外复杂构造区页岩气地质条件及含气性特征:以湘西北五峰组—龙马溪组为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(8): 1979 – 1990.
- Qin Mingyang, Guo Jianhua, He Hongsheng, et al. Geological conditions and gas-bearing characteristics of shale gas in complex structure area out of Sichuan basin: a case of Wufeng: longmaxi formation in Northwestern Hunan, China[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(8): 1979 – 1990.
- [22] 张晓明,石万忠,徐清海,等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 926 – 939, 953.
- Zhang Xiaoming, Shi Wanzhong, Xu Qinghai, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of shale gas in jiaoshiba area, Sichuan basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 926 – 939, 953.
- [23] 邹才能,杨智,朱如凯,等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979 – 1007.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, et al. Progress in china's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979 – 1007.
- [24] 林拓,张金川,包书景,等. 湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气井位优选及含气性特征:以常页1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 312 – 319.
- Lin Tuo, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. The optimum selecting of shale gas well location and gas content of lower Cambrian, northwest Hunan: A case study of well changye[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 312 – 319.
- [25] Bowker K A. Barnett shale gas production, fort worth basin: issues and discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 523 – 533.
- [26] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1099 – 1119.
- [27] 张慧,李贵红,晋香兰. 南方下古生界页岩中有机质赋存状态及其成因[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(1): 51 – 55.
- Zhang Hui, Li Guihong, Jin Xianglan. Organic matters and their occurrence state in lower Paleozoic shale in South China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(1): 51 – 55.
- [28] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等. 页岩微观孔隙特征及源—储关系:以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 1001 – 1008.
- Hu Zongquan, Du Wei, Peng Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale: A case study from the Wufeng and longmaxi formations in Southeast Sichuan basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 1001 – 1008.
- [29] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071 – 1098.
- [30] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian barnett shale[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 848 – 861.
- [31] Klaver J, Desbois G, Urai J L, et al. BIB-SEM study of the pore space morphology in early mature Posidonia Shale from the Hils area, Germany[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 12 – 25.
- [32] 孟凡洋,陈科,包书景,等. 湘西北复杂构造区下寒武统页岩含气性及主控因素分析:以慈页1井为例[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(5): 29 – 39.
- Meng Fanyang, Chen Ke, Bao Shujing, et al. Gas-bearing property and main controlling factors of Lower Cambrian shale in complex tectonic area of Northwestern Hunan Province: a case of well Ciye 1[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(5): 29 – 39.
- [33] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz Campos M, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]//SPE Unconventional Gas Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [34] 张伦友,张向阳. 天然气储量计算及其参数确定方法[J]. *天然气勘探与开发*, 2004, 27(2): 20 – 23, 2.
- Zhang Lunyou, Zhang Xiangyang. Natural gas reserves calculation and its parameter determination[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2004, 27(2): 20 – 23, 2.
- [35] Wan Yi, Tang Shuheng, Pan Zhejun. Evaluation of the shale gas potential of the lower Silurian longmaxi formation in northwest Hunan Province, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 159 – 175.
- [36] Yang F, Ning Z, Wang Q, et al. ‘Pore structure characteristics of lower Silurian shales in the southern Sichuan Basin, China: Insights to pore development and gas storage mechanism’. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 156: 12 – 24.
- [37] 翟刚毅,王玉芳,包书景,等. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测[J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1057 – 1068.
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Bao Shujing, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China[J]. *Earth Science*, 2017, 42(7): 1057 – 1068.
- [38] 王鹏万,李昌,张磊,等. 五峰组—龙马溪组储层特征及甜点层段评价:以昭通页岩气示范区A井为例[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 2925 – 2935.
- Wang Pengwan, Li Chang, Zhang Lei, et al. Characteristic of the shale gas reservoirs and evaluation of sweet spot in Wufeng-Longmaxi Formation: A case from the A well in Zhaotong shale gas demonstration zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2925 – 2935.
- [39] 秦明阳. 湘西北地质条件复杂区古生界页岩气聚集特征与“甜点”研究[D]. 长沙: 中南大学, 2018: 97 – 98, 121 – 122.
- Qin Mingyang. Paleozoic shale gas accumulation characteristics and “Sweetspots” study in complex geological conditions area in northwestern Hunan[D]. Changsha: Central south university, 2018: 97 – 98, 121 – 122.