

# 黔东南岑巩地区下寒武统黑色页岩孔隙结构特征

王濡岳<sup>1,2,3</sup>, 胡宗全<sup>1,2</sup>, 杨滔<sup>3</sup>, 龚大建<sup>4</sup>, 尹帅<sup>5</sup>, 刘忠宝<sup>1,2</sup>, 高波<sup>1,2</sup>

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;2.页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100083;  
3.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;4.铜仁中能天然气有限公司,贵州 铜仁 554300;  
5.西安石油大学地球科学与工程学院,西安 710065)

**摘要:**利用矿物组分、有机地球化学、氮气吸附、物性及扫描电镜等资料,对黔东南岑巩地区下寒武统牛蹄塘组和变马冲组页岩孔隙结构特征进行了系统研究。牛蹄塘组与变马冲组贫有机质页岩以平板和狭缝形黏土粒间孔为主,平均孔径普遍大于 5 nm;牛蹄塘组富有机质页岩以狭缝形和少量墨水瓶状孔为主,平均孔径普遍小于 3~4 nm,比表面积为贫有机质页岩的 2~3 倍。页岩总孔容与比表面积、黏土含量与平均孔径均为正相关关系,而前二者与后二者均为负相关关系。有利保存条件下页岩具有相对“高孔低渗”特征,峰值孔径较大,有机质孔发育程度较高,孔渗相关性强。不利保存条件下页岩储层致密,孔隙度与峰值孔径较低,裂缝过度发育造成相对“低孔高渗”特征。有机碳含量对孔隙结构具有重要控制作用,与孔容、比表面及孔隙度总体正相关,与平均孔径负相关;过高有机碳含量层段页岩塑性增强,孔径较低,压实作用和不利保存条件等因素使部分狭窄孔喉发生萎缩、坍塌与闭合,导致孔隙度、孔容、比表面和脆性与有机碳含量出现负相关关系。

**关键词:**孔隙结构;保存条件;页岩;牛蹄塘组;变马冲组;下寒武统;上扬子地区

**中图分类号:**TE122.23

**文献标识码:**A

## Pore structure characteristics of the Lower Cambrian black shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area

WANG Ruyue<sup>1,2,3</sup>, HU Zongquan<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>3</sup>, GONG Dajian<sup>4</sup>, YIN Shuai<sup>5</sup>, LIU Zhongbao<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>1,2</sup>

(1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*; 2. *State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China*;  
3. *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*;  
4. *Tongren Sino-Energy Natural Gas Corporation, Tongren, Guizhou 554300, China*;  
5. *School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China*)

**Abstract:** Based on the mineralogy, organic geochemistry, nitrogen adsorption, physical properties and FE-SEM observation, the pore structure characteristics of the Niutitang and Bianmachong marine shales of the Lower Cambrian in the southeastern Guizhou area were systematically analyzed. The dominant pore types of the organic-lean shale with a high clay mineral content in the Niutitang and Bianmachong formations are plate-like and slit-like inter particle pores with average pore sizes commonly greater than 5 nm. However, the organic-rich shale in the Niutitang Formation mainly contains slit-like and ink-bottle-like pores with average pore sizes less than 3–4 nm, and the specific surface area is 2–3 times of that of the organic-lean shale. In addition, the total pore volume and specific surface area have a positive correlation, and there is also a correlation between clay mineral content and average pore size, but the correlations between total pore volume/specific surface area and clay mineral content/average pore size are negative. Under favorable preservation conditions, the shale has a relatively high development level of organic matter pores, greater values of porosity, pore size and peak diameter with a positive correlation between porosity and permeability, which are represented as “high porosity and low permeability”. Under unfavorable preservation conditions, the reservoir parameters have lower values except the permeability, which leads to the overdevelopment of fractures and has the feature of “low porosity and high permeability”. Besides, the TOC content has a significant control on pore structure and generally has a positive correlation with total pore volume, specific surface area and

收稿日期:2018-01-12;修订日期:2019-02-20。

作者简介:王濡岳(1990—),男,博士,工程师,从事非常规油气地质研究。E-mail:wry1990@vip.qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(41872124)、国家科技重大专项(2017ZX05036002-001,2016ZX05034004-003,2017ZX05036004-001)和中国石化科技开发部项目(P15114,P17027-2)联合资助。



porosity and a negative correlation with average pore size. Nevertheless, in the intervals with an excessive TOC content, the decrease and increase of pore size and ductility with increasing TOC coupled with compaction and/or unfavorable preservation will result in the atrophy, collapse and close of narrow pores and throats which leads to the negative correlations between TOC and reservoir parameters.

**Key words:** pore structure; preservation condition; shale; Niutitang Formation; Bianmachong Formation; Lower Cambrian; Upper Yangtze area

页岩油气作为常规油气资源的重要补充与接替领域,已成为全球油气勘探开发的热点。页岩气是生成并储集于富有机质泥页岩层系内,以吸附及游离态为主要赋存方式,一种源、储一体的天然气成藏系统<sup>[1]</sup>。涪陵页岩气田的发现标志着我国页岩气勘探开发实现重大突破<sup>[2]</sup>,对我国非常规油气开发与能源结构优化起到重要引领示范作用。近年来,对页岩储层微观孔隙结构的研究已成为国内外页岩油气勘探开发的重点研究领域,随着研究的不断深入、技术手段的创新,页岩微观孔隙及结构研究取得了丰富的认识<sup>[3-7]</sup>。页岩储层特征受有机质、无机矿物组分及其演化、成岩作用等共同控制,不同地质条件下页岩储层孔隙特征差异明显,非均质性较强。受特殊地质条件影响,我国南方海相页岩气受保存条件制约明显<sup>[8-9]</sup>,但页岩孔隙结构对含气性与保存条件的响应与制约等方面研究有待深化。本文以黔东南岑巩地区下寒武统牛蹄塘组( $\epsilon_1n$ )与变马冲组( $\epsilon_1b$ )页岩为研究对象,对比分析不同矿物组分与不同保存条件下页岩储层孔隙结构特征,以期对我国南方页岩气勘探开发提供参考。

### 1 样品与分析

24 块页岩样品取自研究区内 TX-1 井和 TM-1 井下寒武统牛蹄塘组与变马冲组(图 1),其中变马冲组为一套以陆棚与前三三角洲相为主的海相—过渡相沉积层系,兼具海相、陆相与过渡相页岩层系的部分特征,以灰黑色泥页岩及页岩与细砂—粉砂岩不等厚互层为主,暗色泥页岩单层最大厚度 35.5 m。对 24 块黑色页岩样品进行了一系列相关测试分析,包括总有机碳(TOC)含量、成熟度、矿物组分、场发射扫描电镜(FE-SEM)、物性及孔隙结构等。利用 LECO CS-230 碳硫分析仪进行了 TOC 含量测试,检测依据为《沉积岩中总有机碳的测定:GB/T 19145-2003》;利用 MPV-Ⅲ型显微光度计进行了沥青质反射率( $R_b$ )测定,检测依据为《沉积岩中镜质组反射率测定方法:SY/T 5124-1995》,并利用公式 $R_o = 0.319\ 5 + 0.679\ R_b^{[10]}$ 对等效镜质体反射率( $R_o$ )进行了换算;利用 SmartLab9 型

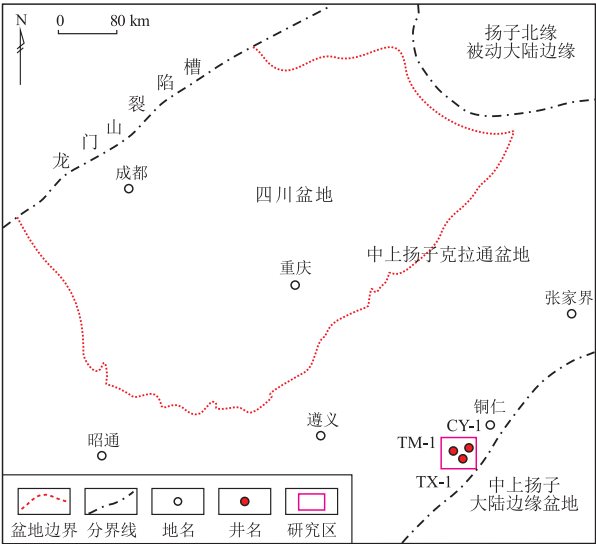


图 1 黔东南岑巩地区及采样井位置  
Fig.1 Location of Cengong block and sampling wells, southeastern Guizhou area

X 射线衍射仪对矿物组分进行了分析,检测依据为《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 衍射分析方法:SY/T5163-2010》;利用 HKC-2 型氮孔隙度测定仪对样品进行了孔隙度与渗透率测试,检测依据为《岩心分析方法:SY/T 5336-2006》;采用 Quadrasorb SI 型比表面积和孔径分析仪对样品进行了氮气吸附实验及孔隙结构参数分析,检测依据为《岩石比表面和孔径分布测定静态氮吸附容量法:SY/T 6154-1995》。

### 2 结果与分析

#### 2.1 TOC、成熟度与矿物组分特征

研究区下寒武统黑色页岩样品 TOC 含量分布在 0.5%~8.2%, $R_o$  介于 2.22%~2.88%,处于过成熟阶段,其中,变马冲组页岩 TOC 含量主要介于 0.5%~1.7%,牛蹄塘组 TOC 含量介于 1.1%~8.2%,主体大于 4%(表 1)。矿物组分方面变马冲组与牛蹄塘组黑色页岩均以石英和黏土矿物为主(表 1)。变马冲组页岩石英含量介于 35.5%~38.4%,均值为 37.2%,黏土矿物含量较高,介于 46.4%~53.5%;牛蹄塘组石英含量较高,介于 27.5%~67.3%,均值为 47.4%,黏土矿物含量介于 8.7%~41.4%,均值为



表 1 黔东南岑巩地区下寒武统页岩 TOC、成熟度与矿物组分参数统计

Table 1 TOC, maturity and mineral composition of the Lower Cambrian shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area

样品 编号	深度/ m	地层	w(TOC)/ %	等效 R <sub>o</sub> /%	石英/ %	黏土/ %	长石/ %	碳酸盐/ %	黄铁矿/ %
TX1	1 451.9	Є <sub>1</sub> b	0.8	2.26	38.4	46.4	10.6	2.2	2.4
TX2	1 512.4	Є <sub>1</sub> b	1.7	2.58	37.6	47.1	8.3	2.6	4.4
TX3	1 709.4	Є <sub>1</sub> b	0.5	2.22	35.5	53.5	5.6		5.4
TX4	1 783.3	Є <sub>1</sub> n	5.5	2.84	52.7	17.9	9.5	7.8	12.1
TX5	1 791.2	Є <sub>1</sub> n	7.6	2.85	65.0	8.7	7.1	8.5	10.7
TX6	1 800.2	Є <sub>1</sub> n	6.0	2.50	55.8	10.2	9.3	12.3	12.4
TX7	1 817.3	Є <sub>1</sub> n	5.1	2.88	45.2	23.5	4.3	8.8	18.2
TM1	1 405.5	Є <sub>1</sub> n	1.1		27.5	33.0	8.5	22.1	8.9
TM2	1 412.6	Є <sub>1</sub> n	1.3		29.1	41.4	8.2	11.9	9.4
TM3	1 416.1	Є <sub>1</sub> n	1.7		35.8	35.2	12.4	4.6	12.0
TM4	1 417.6	Є <sub>1</sub> n	1.7		32.5	37.5	11.4	3.6	15.0
TM5	1 420.8	Є <sub>1</sub> n	1.8	2.29	33.0	30.5	12.7	11.1	12.7
TM6	1 423.4	Є <sub>1</sub> n	2.6		40.5	32.9	12.1	4.0	10.5
TM7	1 428.6	Є <sub>1</sub> n	4.0		39.0	28.9	10.5	12.7	8.9
TM8	1433.8	Є <sub>1</sub> n	4.5		43.2	23.7	10.6	9.0	13.5
TM9	1436.1	Є <sub>1</sub> n	3.9		51.9	25.3	7.1	5.2	10.5
TM10	1 441.6	Є <sub>1</sub> n	5.6		64.0	16.7	4.6	9.6	5.1
TM11	1 446.7	Є <sub>1</sub> n	5.5		58.6	20.4	6.6	6.5	7.9
TM12	1 451.3	Є <sub>1</sub> n	8.2		62.1	14.2	10.2	6.9	6.6
TM13	1 453.7	Є <sub>1</sub> n	7.7		67.3	13.1	7.6	5.2	6.8
TM14	1 457.3	Є <sub>1</sub> n	5.2		51.6	17.7	13.5	8.5	8.7
TM15	1 461.8	Є <sub>1</sub> n	5.6		49.0	17.5	14.4	10.0	9.1
TM16	1 466.8	Є <sub>1</sub> n	4.5		47.5	20.5	14.0	4.5	13.5
TM17	1 469.5	Є <sub>1</sub> n	4.7	2.42	43.3	21.3	11.8	9.6	14.0

23.3%,长石、黄铁矿及碳酸盐均值分别为 9.6%、9.9%和 8.1%。TOC 含量与石英和黏土矿物间具有良好的相关性,表明有机质与石英关系密切,富有机质页岩层段生物来源石英含量较高(图 2)。

2.2 物性特征

页岩物性参数统计显示(表 2),变马冲组页岩孔隙度略高于牛蹄塘组,均值为 3.3%。不同含气性与保存条件下牛蹄塘组孔隙度差异明显,TX-1 井含气量介于 1.0~2.8 m<sup>3</sup>/t,平均为 1.7 m<sup>3</sup>/t,甲烷占比普遍大于 80%;CY-1 井含气量均值为 1.0 m<sup>3</sup>/t,甲烷占 95%以上;TM-1 井含气量小于 0.3 m<sup>3</sup>/t,氮气

占比普遍大于 95%。TX-1 井、CY-1 井和 TM-1 井牛蹄塘组孔隙度随保存条件变差依次降低(图 3,4)。渗透性方面,保存与含气性较好的 TX-1 井变马冲组与牛蹄塘组页岩渗透率较低,普遍小于 2×10<sup>-6</sup> μm<sup>2</sup>,孔渗间具有较好正相关性,孔隙连通性较好;而 CY-1 井与 TM-1 井牛蹄塘组页岩渗透率较高,孔渗相关性较差,连通性较低(图 3)。与 TX-1 井相比,TM-1 井牛蹄塘组中值半径较小,排驱压力较大,储层更致密,孔隙连通性差,裂缝的过度发育可能改善了局部渗透率并导致较弱的孔渗相关性(图 3,4)。

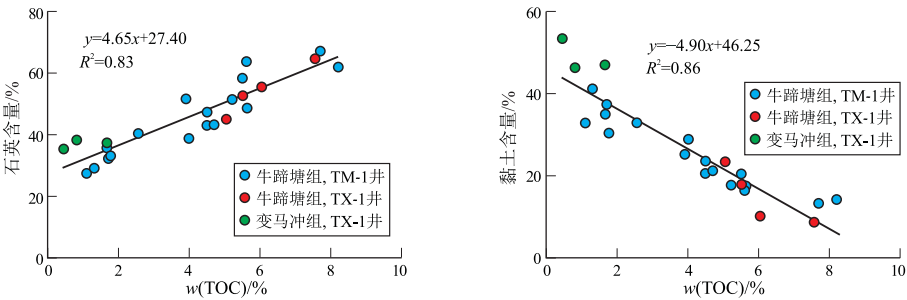


图 2 黔东南岑巩地区下寒武统页岩 TOC 与矿物含量关系

Fig.2 Relationship between TOC and mineral content of the Lower Cambrian shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area



表 2 黔东南岑巩地区页岩储层物性参数统计

Table 2 Statistics of shale reservoir physical parameters in the Cengong block, southeastern Guizhou area

井名	地层	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-6} \mu\text{m}^2$	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	最大孔喉半径/ $\mu\text{m}$	中值半径 $\mu\text{m}$
TX-1	$\epsilon_1 b$	(1.7~3.8)	(1.4~4.3)	(0.8~1.5)	(3.9~6.3)	(0.47~0.94)	(0.12~0.19)
		3.3(6)	2.3(6)	1.2(12)	5.3(12)	0.67(12)	0.14(12)
TX-1	$\epsilon_1 n$	(2.3~3.3)	(0.7~1.8)	(0.8~1.2)	(3.6~5.1)	(0.62~0.94)	(0.15~0.20)
		3.0(7)	1.3(7)	1.0(7)	4.5(7)	0.73(7)	0.17(7)
CY-1	$\epsilon_1 n$	(0.8~4.1)	(4.1~8.4)				
		1.8(10)	5.9(10)				
TM-1	$\epsilon_1 n$	(0.6~2.3)	(1.4~13.7)	(0.7~2.1)	(6.2~38.6)	(0.35~1.03)	(0.02~0.12)
		1.3(29)	4.8(29)	1.1(15)	23.2(15)	0.73(15)	0.05(15)

注:表中数据意义为(最小值~最大值)  
平均值(样品数)。

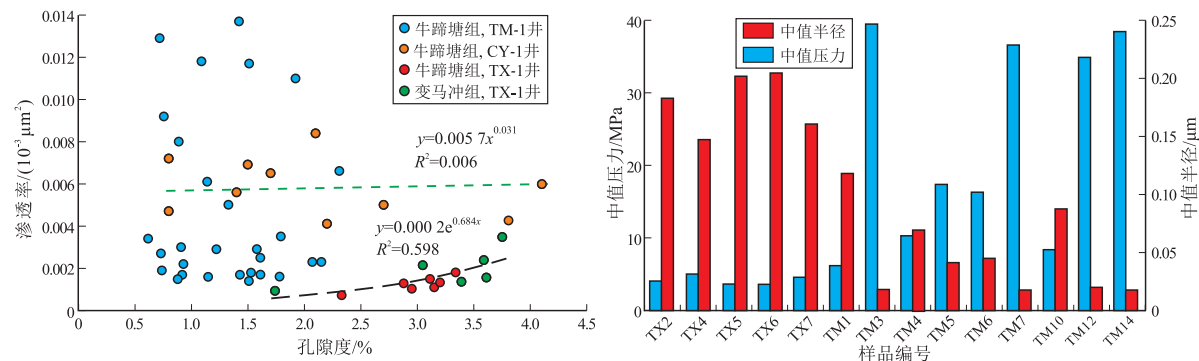


图 3 黔东南岑巩地区不同保存条件下页岩物性参数特征对比

Fig.3 Comparison of reservoir physical parameters with different preservation conditions in the Cengong block, southeastern Guizhou area

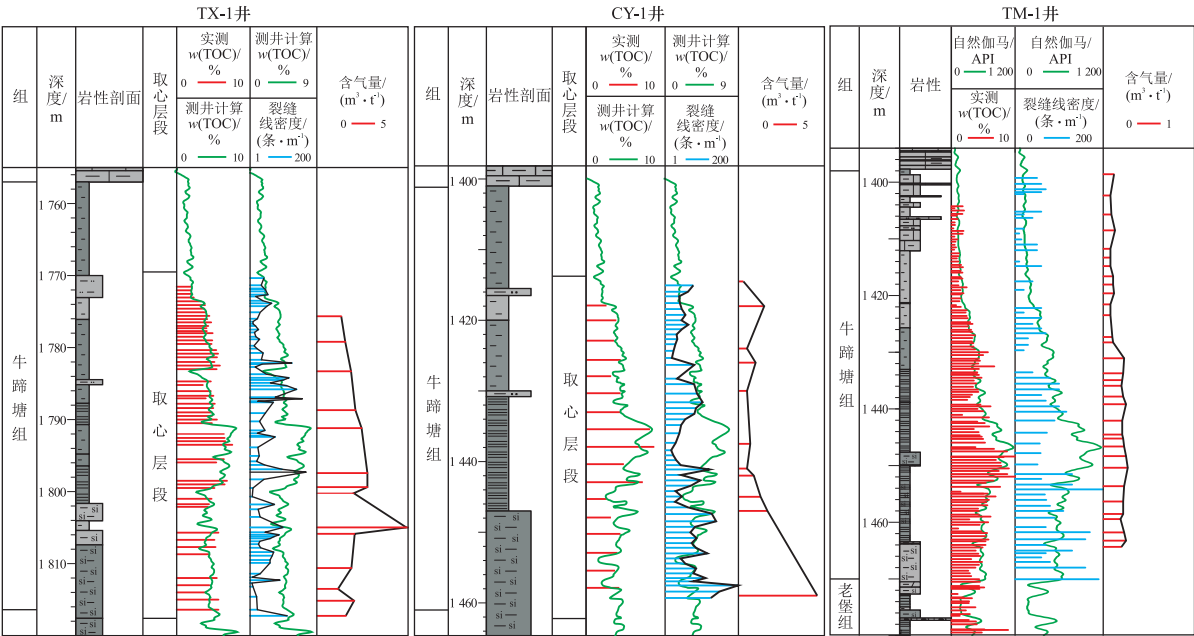


图 4 黔东南岑巩地区牛蹄塘组页岩裂缝与含气量等综合柱状图

Fig.4 Comprehensive columnar sections of fracture and gas content in the Cengong block, southeastern Guizhou area

2.3 孔隙结构特征

氮气吸附曲线形态能够反映吸附剂表面性质、吸附剂与吸附质间相互作用力和孔径分布等信息。

吸附线低相对压力段形态反映吸附剂与吸附质间相互作用力的大小,中等压力段反映单分子层的形成及向多层和毛细凝聚的转化,高相对压力段反映



吸附剂表面有孔或无孔、孔径分布及孔体积的大小。国际理论和应用化学联合会(IUPAC)提出了6类吸附等温线及4类回滞环划分方案及其对应孔隙类型<sup>[11]</sup>。

研究区24块页岩样品氮气吸附回线特征显示,低TOC含量页岩吸附回线形态相似,回滞环较小,曲线形态具有H3和H4型特征,表明高黏土含量页岩以平板状和狭缝形孔隙为主(图5a-b),中低压段吸附量较低,高压段曲线上扬显著,吸附速率增大,至近饱和和蒸气压条件未出现吸附饱和现象,表明页岩中微孔(孔径小于2 nm)数量较低,大孔径中孔(孔径介于2~50 nm)与宏孔(孔径大于50 nm)较发育。

高TOC含量层段页岩低压段吸附速率高,高压段曲线上扬程度略低,吸附总量大,曲线形态主体具有H2和H4型特征,对应狭缝形与墨水瓶状孔,孔径分布以微孔和中孔为主,宏孔数量较低(图5c-f)。刘伟新等<sup>[12]</sup>研究认为,高TOC含量页岩有机质孔隙以墨水瓶状孔为主,随TOC含量与有机质孔数量的增加,“墨水瓶”效应愈加显著,TOC含量与回滞环面积呈良好正相关。良好保存条件下,TX-1井牛蹄塘组页岩吸附回线形态相似,孔隙结构较均一(图5c);而TM-1井牛蹄塘组不同样品吸附回线形态差异显著,回滞环面积变化较大(图5d-f),有机质孔隙发育特征差异显著。

扫描电镜下页岩微观特征显示,变马冲组页岩黏土矿物含量较高,层片状黏土矿物粒间孔发育程度强于有机质孔(图6a),与平板状和狭缝状吸附回线形态相对应(图5a)。与TX-1井相比,TM-1

井牛蹄塘组较致密,挤压、变形程度高,黄铁矿等颗粒与集合体挤压破碎现象明显,形态残缺、不规则(图6b-c)。变马冲组页岩有机质孔隙发育程度较低,牛蹄塘组有机质孔隙孔径更小。保存条件较差的TM-1井牛蹄塘组有机质孔隙发育程度普遍低于TX-1井,有机质与矿物颗粒间普遍发育因有机孔减少和体积收缩产生的狭缝形微裂缝(图6d-f)。

孔径统计结果表明,低TOC含量层段平均孔径较高,表明黏土矿物粒间孔隙孔径较大,发育程度较高(图6a、图7)。TX-1井变马冲组与牛蹄塘组页岩最可几孔径(峰值孔隙孔径)均大于TM-1井牛蹄塘组,与扫描电镜下特征一致(图6b-c),表明TM-1井较TX-1井岩性更为致密,峰值孔径较小;而相同TOC含量层段两口井牛蹄塘组平均孔径较为接近,可能为一定数量较大孔径中孔与宏孔的存在增大了TM-1井牛蹄塘组平均孔径,如有机质与矿物颗粒间的狭缝形孔缝(图6f)及过度发育的微裂缝。

页岩孔隙结构参数间相互关系表明,总孔容与比表面积具有良好正相关性,二者均与平均孔径负相关。与变马冲组页岩相比,牛蹄塘组具有更小的平均孔径,更大的比表面积及孔容(图8a-c)。TOC、石英和黏土矿物含量与比表面、孔容及平均孔径关系上,受TOC与石英含量的正相关性控制,TOC和石英含量与储层孔隙结构参数具有相似的变化规律,即平均孔径与TOC和石英含量负相关,与黏土矿物含量正相关(图8d-f);比表面和总孔容与TOC和石英含量具有大体正相关性,与黏土矿物含量负相关(图8g-l),TOC含量大于2%页岩

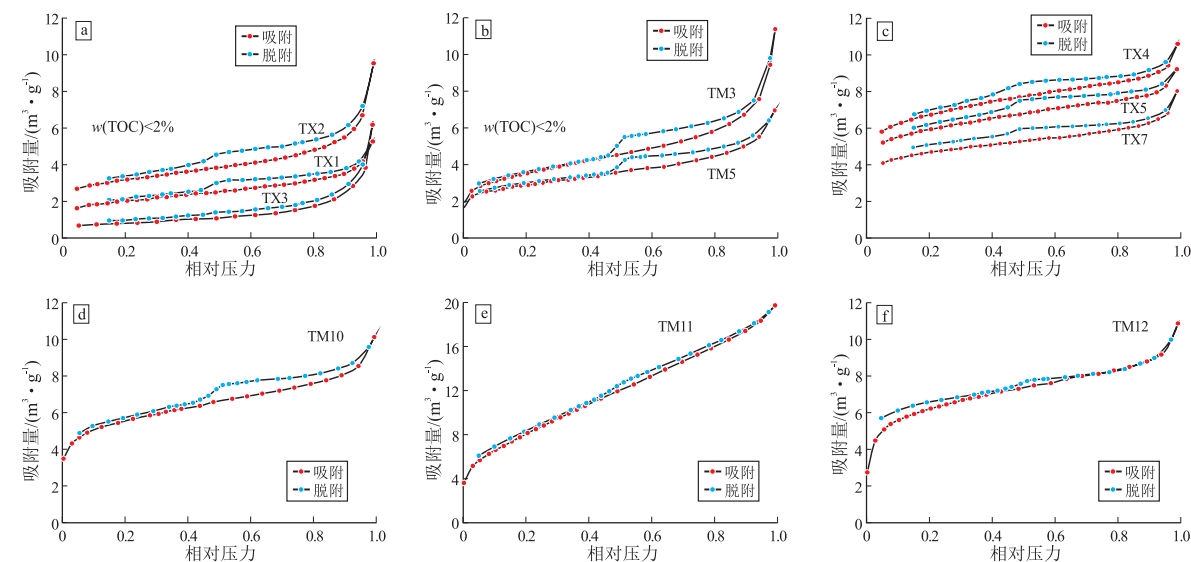


图5 黔东南岑巩地区不同样品页岩氮气吸附回线特征

Fig.5 Nitrogen adsorption-desorption isotherms of the Lower Cambrian shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area



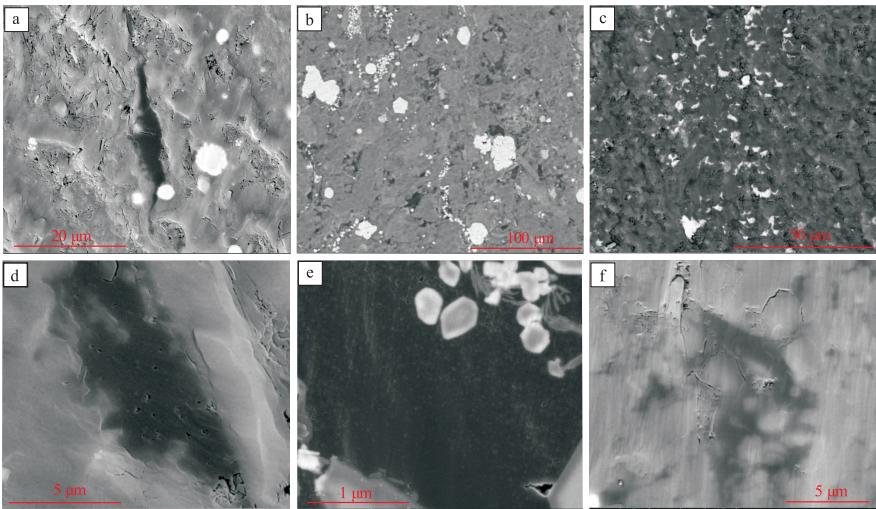


图 6 黔东南岑巩地区下寒武统页岩 FE-SEM 照片

a.变马冲组层片状黏土矿物粒间孔发育程度强于有机质孔,TX-1 井,1 718.3 m;b.牛蹄塘组镜下全貌,黄铁矿等颗粒与集合体形态较完整、规则,TX-1 井,1 800.2 m;c.牛蹄塘组镜下全貌,储层致密,黄铁矿等颗粒与集合体挤压破碎现象明显,TM-1 井,1 445.3 m;d.变马冲组有机质孔隙,TX-1 井,1 544.8 m;e.有机质孔隙,孔径较小,普遍小于 10 nm,TX-1 井,1 800.2 m;f.有机质孔隙发育程度低,有机质及矿物边缘狭缝形孔缝发育,TM-1 井,1 439.2 m

Fig.6 FE-SEM images of the Lower Cambrian shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area

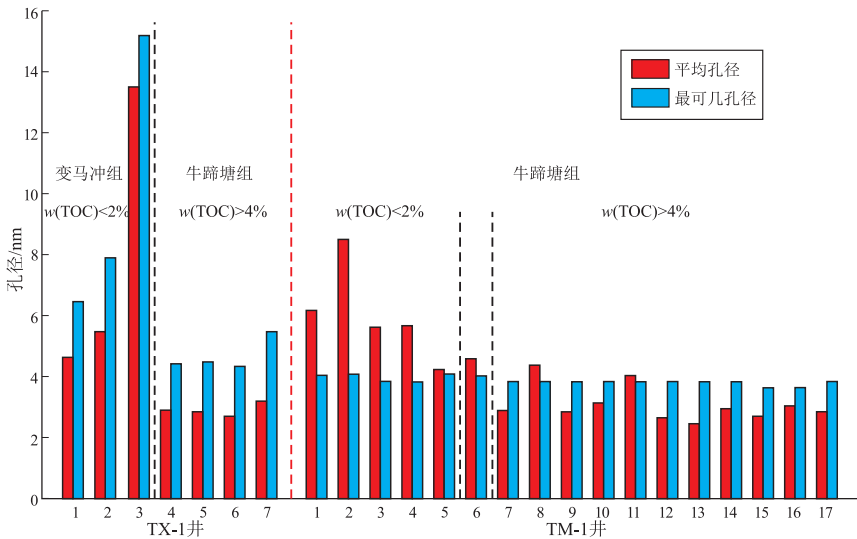


图 7 黔东南岑巩地区页岩孔径特征统计

Fig.7 Statistics of pore size in the Lower Cambrian shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area

平均孔径普遍小于 3~4 nm,比表面普遍大于 20 m<sup>2</sup>/g,为 TOC 含量小于 2% 页岩的 2~3 倍(图 8d,g),表明有机质内部孔径小于 5 nm 的有机孔大量发育,造成平均孔径的降低与比表面和孔容的增加,利于吸附气的赋存。当 TOC 与石英含量过高时,比表面与总孔容出现异常低值现象(图 8g-h,j-k),表明过高的 TOC 含量使页岩塑性增强,压实作用下部分孔隙发生萎缩与闭合。

研究区牛蹄塘组页岩 TOC 含量与孔隙度和岩石力学参数间同样具有分段式关系<sup>[13]</sup>,当 TOC 含量过高时,TOC 含量与孔隙度和弹性模量关系由

正相关变为负相关(图 9)。上述关系表明,TOC 与石英含量对页岩储层孔隙结构具有重要控制作用,TOC 及石英含量与页岩孔隙度、孔容、比表面和脆性具有良好耦合关系,使高 TOC 与高石英含量页岩层段具有地质、工程双甜点特征。焦石坝地区龙马溪组页岩即具有此类特征,加之良好保存条件,使其具有“五性一体”特征<sup>[2,14-15]</sup>。对于过高 TOC 含量页岩层段,TOC 含量与平均孔径的负相关性及其塑性的增加使页岩孔隙结构发生变化,孔隙度、孔容、比表面及脆性均出现降低趋势,不利于游离与吸附气的储集与储层改造。因此,查明控制页岩



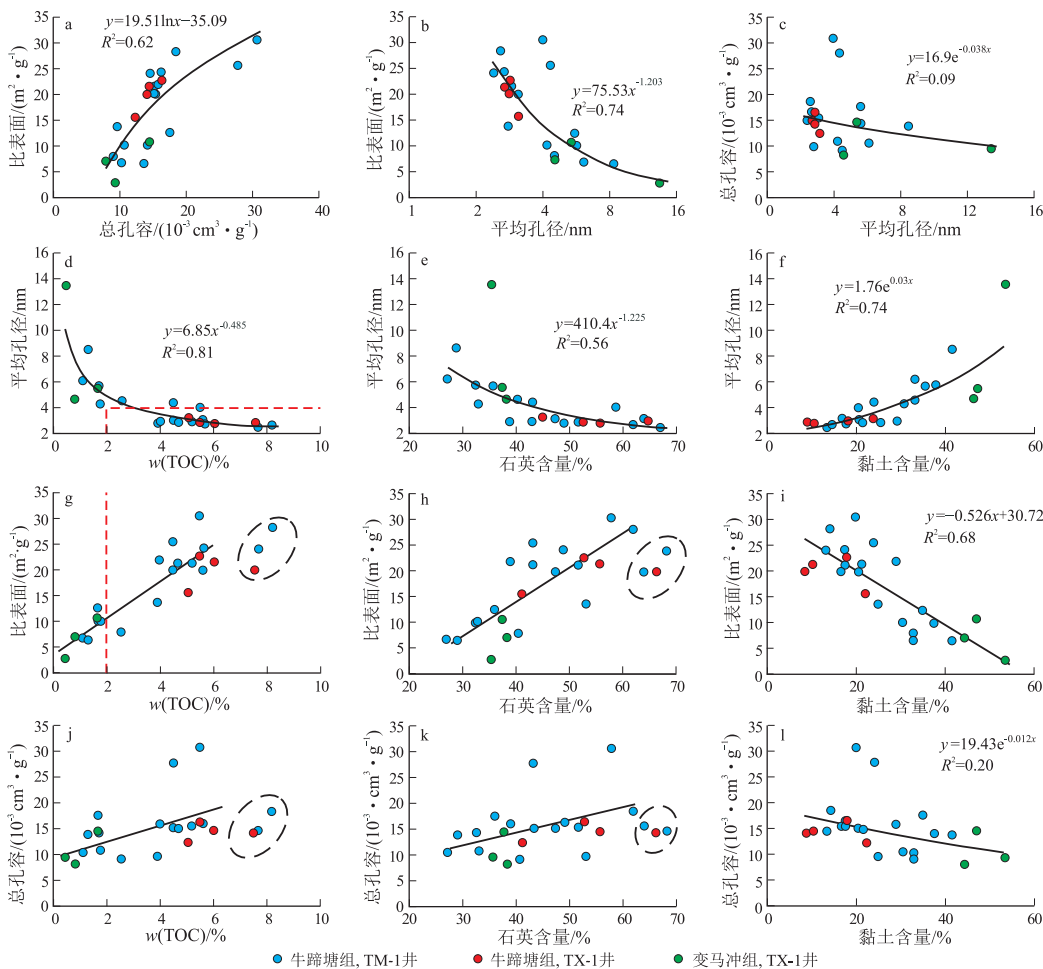


图 8 黔东南岑巩地区页岩 TOC、矿物含量与孔隙结构参数间关系

Fig.8 Correlations among TOC, mineral content and pore structure parameters of shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area

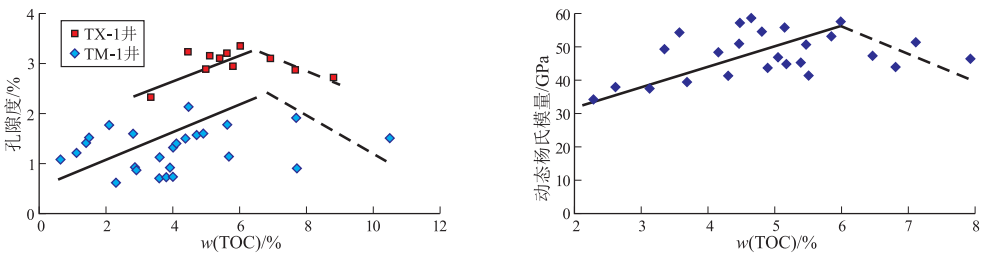


图 9 黔东南岑巩地区牛蹄塘组 TOC 含量与孔隙度和杨氏弹性模量关系  
修改自文献[9,20]。

Fig.9 Correlations among TOC, porosity and Young's modulus of the Niutitang shale in the Cengong block, southeastern Guizhou area

储层孔隙结构的关键参数及其临界值对页岩气勘探开发具有重要意义。

### 3 结论

(1)黔东南岑巩地区下寒武统变马冲组与牛蹄塘组低 TOC 富黏土页岩以平板形和狭缝型黏土粒间孔为主,孔径普遍大于 5 nm;牛蹄塘组富有机质页岩以狭缝形和少量墨水瓶状孔为主,平均孔径

普遍小于 4 nm,比表面为贫有机质页岩的 2~3 倍。页岩总孔容与比表面、黏土含量与平均孔径均为正相关关系,且前二者与后二者均为负相关关系。

(2)不同含气性与保存条件下页岩储层孔隙结构差异明显,有利保存条件下页岩具有相对“高孔低渗”特征,孔隙度与峰值孔径较大,有机质孔发育程度较高,孔渗相关性强;不利保存条件下页岩储层较致密,孔隙度与峰值孔径较低,有机质收



缩缝发育,裂缝的过度发育提高了平均孔径与局部渗透率,造成相对“低孔高渗”特征。

(3)TOC 含量对孔隙结构具有重要控制作用,与孔容、比表面及孔隙度总体正相关,与平均孔径负相关。过高 TOC 含量层段页岩塑性增强,孔径较低,压实作用和(或)不利保存条件等因素使部分狭窄孔喉发生萎缩、坍塌与闭合,导致孔隙度、孔容、比表面、脆性与 TOC 含量出现负相关关系。

致谢:本文编写过程中,得到了铜仁中能天然气有限公司的协助和支持,在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] 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 south-east Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology,2015,36(6):1001-1008.

[2] 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 Formation, southeastern Sichuan Basin[J].Earth Science Frontiers,2016,23(1):1-10.

[3] 于炳松.页岩气储层孔隙分类与表征[J].地学前缘,2013,20(4):211-220.  
YU Bingsong.Classification and characterization of gas shale pore system[J].Earth Science Frontiers,2013,20(4):211-220.

[4] MILLIKEN K L,RUDNICKI M,AWWILLER D N,et al.Organic matter-hosted pore system,Marcellus Formation (Devonian),Pennsylvania[J].AAPG Bulletin,2013,97(2):177-200.

[5] 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.

[6] 姜振学,唐相路,李卓,等.川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J].地学前缘,2016,23(2):126-134.  
JIANG Zhenxue,TANG Xianglu,LI Zhuo,et al.The Whole-aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan Basin[J].Earth Science Frontiers,2016,23(2):126-134.

[7] 朱炎铭,王阳,陈尚斌,等.页岩储层孔隙结构多尺度定性—定量综合表征:以上扬子海相龙马溪组为例[J].地学前缘,2016,23(1):154-163.

ZHU Yanming,WANG Yang,CHEN Shangbin,et al.Qualitative-quantitative multiscale characterization of pore structures in shale reservoirs:a case study of Longmaxi Formation in the Upper Yangtze area[J].Earth Science Frontiers,2016,23(1):154-163.

[8] 魏祥峰,李宇平,魏志红,等.保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制[J].石油实验地质,2017,39(2):147-153.  
WEI Xiangfeng,LI Yuping,WEI Zhihong,et al.Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(2):147-153.

[9] 张培先.黔中隆起及邻区下寒武统页岩气成藏特殊性分析[J].石油实验地质,2017,39(2):162-168.  
ZHANG Peixian.Peculiar accumulation conditions for shale gas in the Lower Cambrian in Qianzhong Uplift and its periphery[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(2):162-168.

[10] 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(3):20-25.  
FENG Guoxiu,CHEN Shengji.Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock[J].Natural Gas Industry,1988,8(3):20-25.

[11] SING K S W.Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984)[J].Pure and Applied Chemistry,1985,57(4):603-619.

[12] 刘伟新,俞俊杰,张文涛,等.川东南龙马溪组页岩微观孔隙结构特征[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(3):127-134.  
LIU Weixin,YU Lingjie,ZHANG Wentao,et al.Micro-pore structure of Longmaxi shale from southeast Sichuan Basin[J].Marine Geology & Quaternary Geology,2016,36(3):127-134.

[13] 王濡岳,胡宗全,聂海宽,等.川东南五峰组—龙马溪组与黔东南牛蹄塘组页岩储层特征对比分析与差异性探讨[J].石油实验地质,2018,40(5):639-649.  
WANG Ruyue,HU Zongquan,NIE Haikuan,et al.Comparative analysis and discussion of shale reservoir characteristics in the Wufeng-Longmaxi and Niutitang formations:a case study of the well JY1 in SE Sichuan Basin and well TX1 in SE Guizhou area[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(5):639-649.

[14] 刘友祥,俞俊杰,张庆珍,等.川东南龙马溪组页岩的矿物组成与微观储集特征研究[J].石油实验地质,2015,37(3):328-333.  
LIU Youxiang,YU Lingjie,ZHANG Qingzhen,et al.Mineral composition and microscopic reservoir features of Longmaxi shales in southeastern Sichuan Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(3):328-333.

[15] 张汉荣,王强,倪楷,等.川东南五峰—龙马溪组页岩储层六性特征及主控因素分析[J].石油实验地质,2016,38(3):320-325.  
ZHANG Hanrong,WANG Qiang,NI Kai,et al.Six characteristics and main controlling factors of shale reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(3):320-325.