

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

秦明阳^{1,2}, 郭建华¹, 黄俨然^{1,3}, 焦鹏¹, 郑振华², 卿艳彬², 吴诗情^{1,3}

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南省煤炭地质勘查院, 湖南 长沙 410014;

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)

摘要:四川盆地东缘湘西北地区牛蹄塘组具有分布广、厚度大、埋藏适中、有机质丰度高以及热演化程度高等特点,资源前景广阔,是近年来南方页岩气勘探重点。文章以该区参数井——花页1井为研究对象,通过岩心、岩屑观察,采用薄片鉴定、X-衍射矿物分析、物性测试、扫描电镜、低温氮气吸/脱附实验等系统手段,研究储层特征,综合分析储层的影响因素。在深水陆棚相,牛蹄塘组发育黑色炭质页岩、硅质页岩,以富含炭质、硅质及黄铁矿,低黏土矿物(伊利石为主)含量为特征,页岩属特低孔、特低渗类型储层。SEM和低温氮气吸/脱附实验表明,储层主要发育圆筒孔(有机质孔)、狭窄平行板孔(黏土矿物层间孔)、四面开口的锥形管孔(黏土矿物粒间孔)以及锥形平板孔(微裂缝);中孔(2~50 nm)提供了平均60.3%的BJH体积。多种因素共同影响微观孔隙发育:深水泥质陆棚控制了孔隙发育物质基础;丰富TOC促进有机质孔(尤其是大孔)发育;矿物组成及含量控制了孔隙发育类型及程度;有机质热演化作用促进有机质孔、微裂缝发育。

关键词:页岩;储层;牛蹄塘组;湘西北地区;四川盆地

中图分类号:TE112.1

文献标识码:A

Characteristics and influencing factors of shale reservoirs in the Niutitang Formation of northwestern Hunan Province, and east margin of Sichuan Basin

Qin Mingyang^{1,2}, Guo Jianhua¹, Huang Yanran^{1,3}, Jiao Peng¹, Zheng Zhenhua², Qing Yanbin², Wu Shiqing^{1,3}

(1. School of Geosciences and Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. The Coal Geological Exploration Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: The Niutitang Formation in northwestern Hunan Province, eastern margin of Sichuan Basin is regarded as having great potential and one of the major shale gas exploration targets with its wide distribution, large thickness, favorable burial depth, high content of organic matter, high maturity and etc., in south China. A parameter well, the Huaye-1, in the Formation of the area, was chosen to be studied with systematic means including observation of thin sections, XRD mineral analyses, physical property tests, SEM imaging and low-temperature N₂ adsorption/desorption experiments with core and drilling cutting samples, to probe into the characteristics and influencing factors of the reservoirs. The deep shelf facies of the Niutitang Formation developed dark carbonaceous shale and siliceous shale rich in carbonaceous and siliceous material, as well as pyrite, but lean in clay minerals (mainly illites). The shale reservoirs are of ultra-low porosity and permeability. The SEM images and low-temperature N₂ adsorption/desorption experiments show that the reservoirs contain mostly cylindrical pores (organic pores), narrow parallel-plate pores (clay mineral interlayer pores), tapered tube pores with openings around (intergranular pores among clay minerals) and tapered plate pores (micro-crack). The mesopores (sized between 2 to 50 nm) contribute an average of 60.3% of BJH volume. The development of the micropores is found to be affected by multiple factors: the deep-water muddy continental shelf provided the material basis for the

收稿日期:2017-05-04;修订日期:2017-08-13。

第一作者简介:秦明阳(1988—),男,工程师,油气地质。E-mail:747558817@qq.com。

通讯作者简介:郭建华(1957—),男,教授、博士生导师,沉积学与石油地质研究。E-mail:gh796@cus.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41603046);湖南省科学技术厅软科学计划项目(2014ZK3043);湖南省国土资源厅软科学研究项目(2014-01);湖南科技大学页岩气资源利用湖南省重点实验室开放基金资助项目(E21642)。

pores, the high content of *TOC* facilitated the growth of organic pores (especially organic macropores), the composition and content of minerals dominated the types and amounts of the pores, and the thermal evolution of organic matter promoted the development of organic pores and micro-cracks.

Key words: shale, reservoir, Niutitang Formation, northwestern Hunan province, Sichuan Basin

页岩气是一种新型清洁、高效非常规天然气资源, 2012 年被列为独立矿种, 成为非常规天然气勘探重要新领域。四川盆地东缘湘西北牛蹄塘组页岩具有区域分布广、厚度大、埋藏适中、有机质丰度高、热演化程度高以及资源前景广阔等特点, 成为近年来南方页岩气勘探重点^[1-3], 桑植-石门复向斜为勘探远景区^[4-6]。2012 年湘西北地区针对牛蹄塘组设置桑植、永顺、保靖、龙山和花垣等 5 个区块, 页岩气地质评价尤其是储层评价成为勘探突破关键, 受到国内学者重视。

南方页岩气勘探已在四川盆地涪陵等地志留系龙马溪组率先实现工业生产, 而寒武系牛蹄塘组勘探成果却乏善可述。周庆华等认为花垣区块牛蹄塘组硅质含量高、碳酸盐含量低、粘土矿物以伊利石为主, 储层具有低孔-超低渗等特征^[7-8]。林拓、Gareth 等认为牛蹄塘组储层中、小孔及裂缝发育, 且中孔、微孔提供了大部分孔隙体积和比表面积^[9-12]。

与砂岩相比, 页岩储层孔径更加细小, 几何形态、分布、成因及控制因素更加复杂^[13-15], 前人从不同角度分析各种因素对储层各类孔隙发育的影响。梁峰等提出湘西北牛蹄塘组页岩孔隙受有机碳含量(*TOC*)、粘土矿物和黄铁矿等影响, 页岩较强吸附能力主要受 *TOC* 控制^[16]。唐书恒等从 *TOC*、矿物成分、成熟度等因素分析下古生界页岩微观孔隙发育的控制因素^[10-11, 17]; 张世万等从沉积、成岩、异常压力、构造等角度分析储层孔隙-微裂缝发育主控因素^[18-21]。前人关于有机质对微观孔隙的影响已基本获得共识, 但关于无机矿物以及有机质成熟度对孔隙的影响、不同尺寸孔隙对孔隙体积的贡献等还存在一定分歧^[22-26], 张琴等指出需要加强微观孔隙发育控制因素定量研究^[27]。

1 地质背景

湘西北主体隶属于扬子地台与江南地轴结合部位的武陵褶断带内, 以保靖-慈利断裂为界与江南地轴相隔。早寒武世初期, 区域构造沉降加剧, 相对海平面迅速升高, 加之受到全球大洋缺氧事件影响, 发育了深水陆棚相, 以低能、缺氧、还原环境为主, 最有利于富有机质页岩发育, 沉积了大范围黑色岩系, 底部发育 1 ~

3 层石煤。武陵期—燕山期多期次构造运动, 形成了如今 NNE 或 NE 走向为主的复向斜构造格局。

花页 1 井是位于桑植-石门复向斜西南缘的一口重要参数井(图 1), 牛蹄塘组页岩地质特征可作为区域典型代表, 研究花页 1 井牛蹄塘组超低孔、超低渗、微观超复杂储层孔隙特征, 多角度分析储层发育影响因素, 对未来页岩气勘探突破乃至生产开发具有重要理论和现实意义。

2 样品与实验

为了避免地表风化对储层影响, 加强储层各参数对比分析, 实验样品来自花页 1 井 2 375 ~ 2 618 m 井段牛蹄塘组岩心、岩屑。有机地球化学样品按照 2 m 间隔系统取岩心及岩屑, 而岩石学、储层物性、储层微观结构观察及渗流等实验样品按照 3 m 间隔系统取岩心。此外, 在烃源岩特征好的层段, 适当加大采样密度。

本文采用光学显微镜、SEM 与氩离子抛光样品下场发射扫描电镜观察及能谱分析等直接观察法与 X-衍射、压力脉冲渗透率测试等间接测试法相结合, 研究湘西北牛蹄塘组储层微观孔隙特征。首先将岩心样品在 691 型透射电镜样品前制备系统进行离子束抛光、

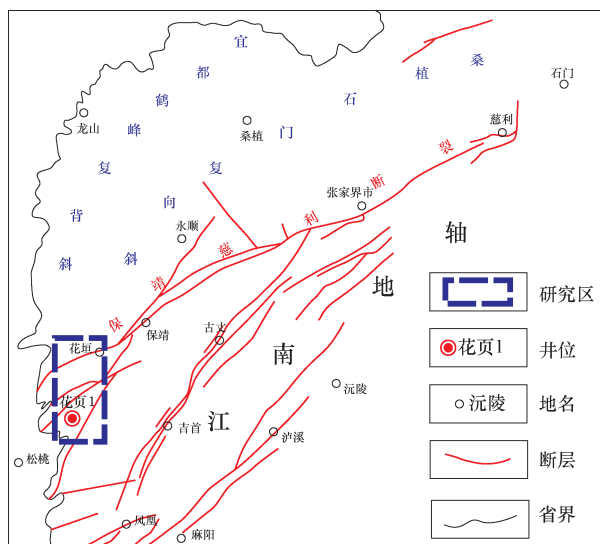


图 1 湘西北地区区域位置

Fig. 1 Location of northwestern Hunan province

离子溅射喷镀铂金导电膜预处理后,利用 FEI Quanta 200F 场发射扫描电子显微镜(分辨率小于 1.2 nm)观察孔隙结构。其次,选择上述平行样品分别进行孔隙度、渗透率测试,分析页岩孔隙特征。渗透率采用 PDP-200 型压力脉冲超低渗透率仪测试,测试范围 $(0.000\ 01\sim0.1)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;低温液氮吸附/脱附采用 NOVA-2 000e 比表面积和孔隙度吸附仪,比表面积分析范围大于 $0.001\ \text{m}^2/\text{g}$,孔径范围 $0.35\sim500\ \text{nm}$,涉及部分微孔($<2\ \text{nm}$)、中孔($2\sim50\ \text{nm}$)和部分大孔($>50\ \text{nm}$)。在测试前将页岩样品进行烘干处理,完成后将样品置于液氮中,调节仪器的不同试验压力,分别测出页岩对氮气的吸附量,绘制吸附等温线。

根据滞后环形状确定孔隙形状,按 BET、BJH 等模型计算比表面积和孔隙体积。

3 结果与讨论

3.1 岩性特征

牛蹄塘组下部为深水陆棚相,发育两段不连续富有机质页岩($\text{TOC}>2\%$)(图 2,图 3a),岩性为黑色炭质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩等,炭质含量为 $2\%\sim15\%$,硅质含量 $40\%\sim60\%$,黄铁矿含量为 $5\%\sim17\%$,局部见重晶石、磷结核。上部为半深水陆棚,发

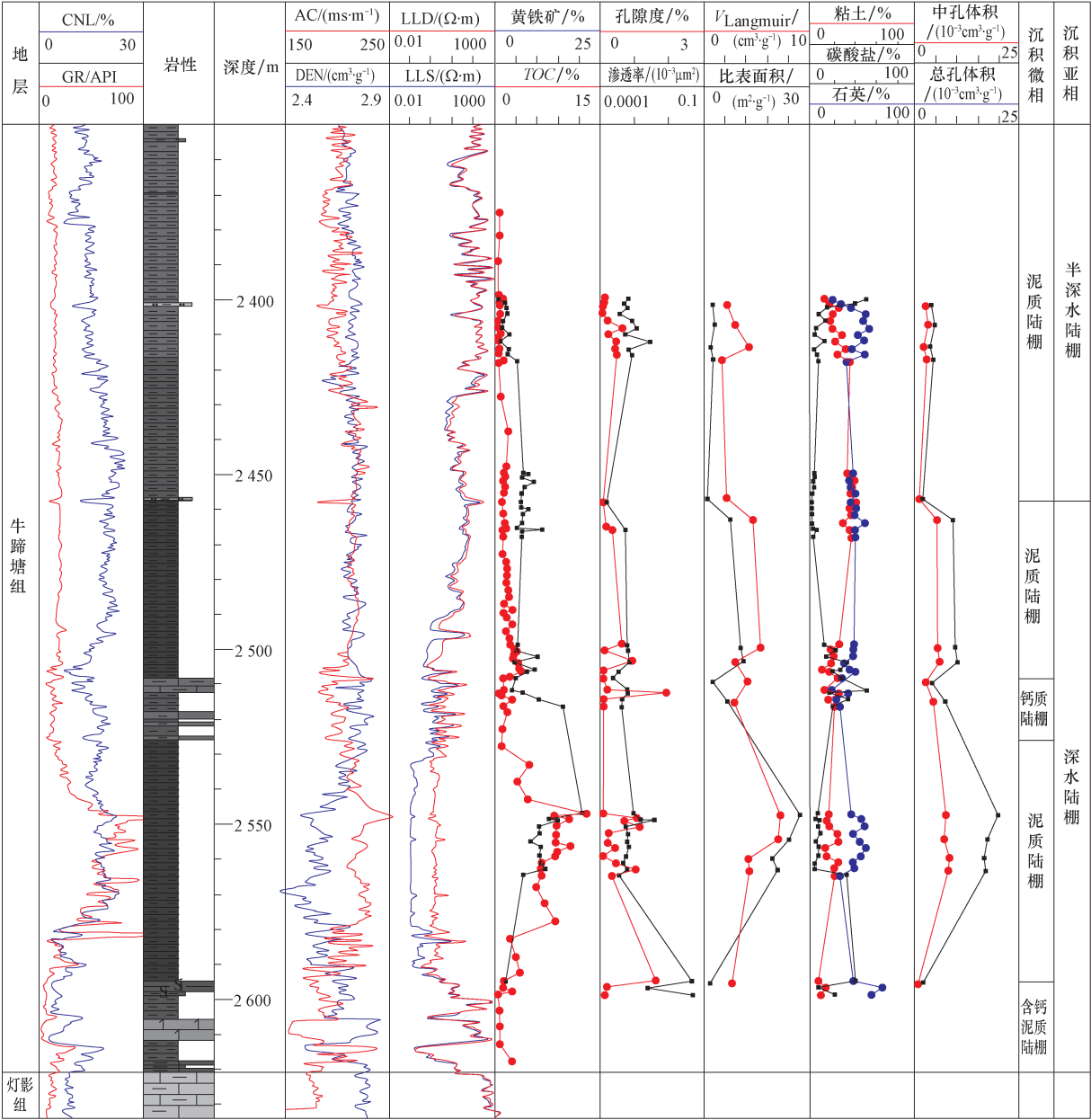


图 2 湘西北地区花页 1 井牛蹄塘组储层特征

Fig. 2 Characteristics of shale reservoirs of the Niutitang Formation in Well Huaye-1 in northwestern Hunan province

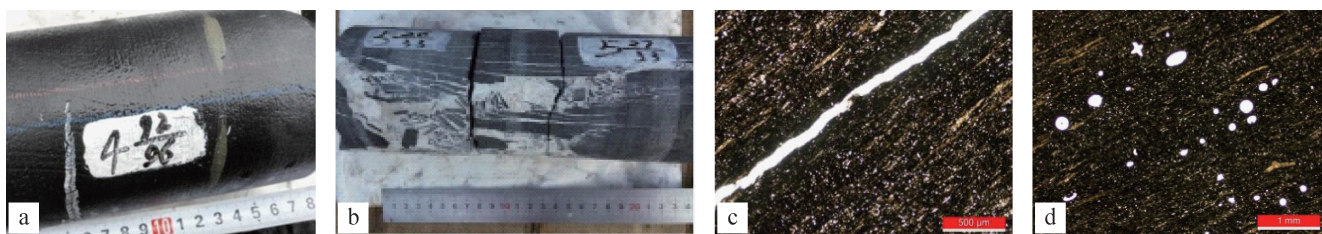


图3 湘西北地区花页1井岩心及显微镜下照片

Fig.3 Core and microscopic photograph of Well Huaye 1 in northwestern Hunan province

a. 埋深2 564.30 m,黑色炭质页岩,含条带状黄铁矿、方解石脉;b. 埋深2 599.02 m,高角度裂缝(>70°)及破碎角砾,裂缝宽2~4 cm,充填方解石脉;c. 埋深2 450.89 m,含炭含粉砂页岩,泥质呈显微鳞片状,炭质呈浸染状,发育0.05 mm宽微裂缝;d. 埋深2 455.56 m,含化石含炭粉砂页岩,泥质呈显微鳞片状,炭质呈浸染状、条带状,化石呈圆形、椭圆形、纺锤形等

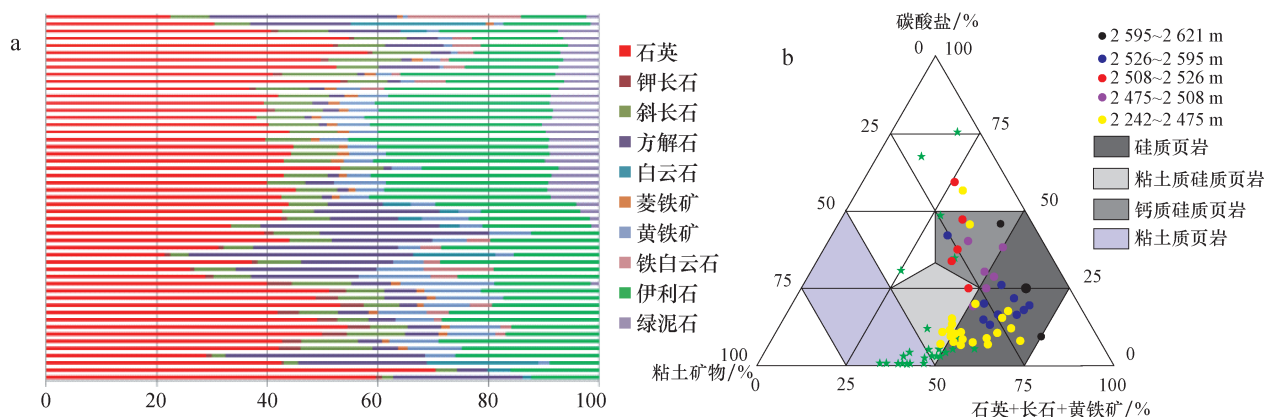


图4 湘西北地区花页1井矿物组成特征

Fig.4 Composition of minerals of shale samples from well Huaye-1 in northwestern Hunan province

a. 岩石矿物组成条形图;b. 岩石矿物组成三角图

育深灰色粉砂质页岩、页岩($TOC < 2\%$)。岩石致密坚硬,光学显微镜下泥质呈鳞片状,炭质呈浸染状、条带状。岩石局部发育高角度裂缝及碎裂角砾,充填或半充填方解石脉(图3b—d)。

3.2 物性特征

3.2.1 矿物组成

矿物成分组成是储层评价的主要内容之一。根据51块岩心XRD矿物分析,矿物成分与北美Barnett页岩类似^[28]以石英、长石为主,粘土矿物、碳酸盐次之,大部分含有黄铁矿等。石英含量为21.4%~70.4%,平均为43.0%;长石含量为2.9%~16.9%,平均为8.9%;碳酸盐含量为6.8%~58.8%,平均为20.4%;粘土矿物含量为8.9%~45.3%,平均为27.7%;黄铁矿含量为0~17.0%,平均为5.7%。粘土矿物以伊利石为主,平均为86.9%,含少量绿泥石和伊/蒙混层。矿物成分与北美Barnett页岩类似^[28],将石英+长石+黄铁矿、碳酸盐以及粘土矿物含量做三角图,牛蹄塘组页岩主要为硅质页岩和粘土质硅质页岩(图4)。

总体上,牛蹄塘组页岩硅质含量高,脆性好,而粘

土矿物含量低,有利于水力压裂形成复杂网状缝,大幅提高页岩储层性能。

3.2.2 孔隙度和渗透率

孔隙度和渗透率仍然是页岩储层研究中最重要参数。埋藏较深的页岩渗透率低,富含有机质页岩的渗透率介于 $(0.000\ 000\ 1 \sim 0.01) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。花页1井36块样品孔隙度为0.008 4%~1.944 9%,平均为0.449%;渗透率剔除2个异常值, $(0.000\ 159\ 1 \sim 0.004\ 011\ 8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.000\ 860\ 75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与常页1井等^[9]测试结果类似,属于特低孔、特低渗类型(表1)。

3.3 储集空间特征

有关页岩孔隙体系或成因类型的划分方案诸多,目前尚无统一方案^[29-34]。目前普遍立足于岩石组成及其经受的地质作用,将页岩孔隙成因类型划分为无机质孔、有机质孔及微裂缝等三大类。

3.3.1 无机质孔

无机质孔产生于微米级无机矿物颗粒内部及之

表 1 湘西北地区花页 1 井压力脉冲法孔隙度及渗透率
Table 1 Porosity and permeability measured with transient pulse method for shale samples
from Well Huaye-1 in northwestern Hunan province

深度/m	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	深度/m	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	深度/m	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
2 400.05	0.170 2	0.000 690 0	2 466.08	0.390 3	0.000 539 7	2 548.90	0.694 4	0.004 011 8
2 401.20	0.125 7	0.000 534 8	2 498.86	0.703 7	0.000 666 4	2 550.70	1.174 8	0.000 587 6
2 402.25	0.074 2	0.000 644 3	2 500.36	0.158 7	0.000 686 5	2 552.80	0.285 5	0.000 668 2
2 404.18	0.008 4	0.000 373 2	2 503.80	0.967 2	0.000 754 2	2 555.09	0.225 4	0.000 662 6
2 406.12	0.239 0	0.000 882 0	2 506.35	0.063 7	0.000 362 3	2 556.55	0.431 7	0.000 728 0
2 408.23	0.688 2	0.001 195 2	2 508.30	0.058 0	0.000 263 0	2 559.16	0.024 8	0.000 600 8
2 410.10	0.246 0	0.000 542 3	2 511.83	0.266 2	0.000 626 7	2 561.38	0.508 0	0.000 476 9
2 412.06	0.538 5	0.003 038 0	2 512.53	1.944 9	0.000 656 1	2 563.00	1.051 2	0.000 637 7
2 414.38	0.460 0	0.000 701 3	2 514.40	0.036 3	0.000 475 7	2 564.68	0.358 8	0.000 376 5
2 415.73	0.526 0	0.000 859 7	2 516.43	0.090 7	0.000 444 8	2 595.03	1.666 0	0.045 405 7
2 458.04	0.090 4	0.000 159 1	2 547.10	0.123 0	0.000 994 9	2 596.85	0.220 5	0.002 460 1
2 465.88	0.251 5	0.000 570 0	2 548.70	1.124 7	0.001 395 1	2 598.90	0.178 6	0.047 303 4

间,包括矿物粒间孔、粒内孔、黄铁矿晶间孔以及少量碳酸盐溶蚀孔和化石孔等。孔隙相对较大,纳米-微米级,连通性好。

1) 粒间孔多见于矿物颗粒之间(图 5a),是由沉积作用或后期成岩改造作用等多种因素而形成,孔隙形态多样,通常连通性较好,为甲烷分子提供良好的渗流通道。

2) 粒内孔主要发育于颗粒内部(图 5b),尤其是伊利石矿物层间颗粒内部最发育(图 5l),孔径一般小于 200 nm,可能是由于蒙脱石等不稳定矿物在埋藏过程中转化为稳定的伊利石或其他矿物形成的。粒内孔可以提供气体储集空间,也可与粒间孔一起构成孔隙网络,提高页岩渗流能力。

3) 晶间孔在牛蹄塘组黄铁矿普遍发育,微球粒、霉簇状晶体之间形成晶间孔,孔径 20~500 nm,内部具有一定连通性(图 5c)。石英、长石及方解石等矿物也发育晶间孔(图 5d,e)。

4) 牛蹄塘组有机质在过成熟热演化过程中形成酸性物质溶蚀不稳定的碳酸盐矿物形成了溶蚀孔(图 5f),由于碳酸盐矿物含量较少,溶蚀孔整体发育较差。

5) 化石孔多呈圆形、椭圆形、纺锤形,保存较完整,化石骨架和体腔内发育有孔隙,且孔径较大,多微米级,连通性较好,可以成为气体赋存空间和运移通道(图 3d)。当化石孔被石英、方解石等充填,将失去上述能力。

3.3.2 有机质孔

有机质孔是有机质热演化过程中,干酪根生烃消耗有机组分产生的孔隙或者生烃消耗水分而产生的收缩孔,孔隙一般为纳米级,多 5~300 nm,属于中孔-大孔,镜下呈近球形、椭圆形、弯月形等(图 5g,h,j)。

有机质常与无机矿物以吸附、包裹或充填形式出现,有利于有机质孔发育,且与无机质孔形成一定连通性,为气体运移提供了微观渗流通道。前人认为有机质孔比无机质孔对赋存页岩气更重要^[23,35]。

3.3.3 微裂缝

微裂隙是在成岩、构造应力等作用下形成的开放型裂隙,裂隙宽度从几纳米至几十微米。微裂缝不仅提供了储集空间,而且沟通了无机质孔、有机质孔,极大提高储层渗流能力(图 5i,k)。

3.4 孔喉分布特征

低温氮气吸/脱附实验表征了页岩孔隙结构,IUPAC 推荐将低温氮气吸/脱附曲线划分四类,分别代表了开放的圆柱状或平板形孔隙形态、一端封闭的圆柱状或平板形孔隙形态以及墨水瓶形缩颈孔隙形态,页岩储层中实际孔隙形态远比上述孔隙形态复杂^[11,16]。

氮气吸/脱附曲线整体呈反 S 型,与典型谐式多层吸附曲线形态类似。吸/脱附曲线呈现出分离特征,说明页岩存在大量中孔和大孔,造成毛细凝聚现象,并且在平衡压力达到饱和蒸汽压时未饱和吸附。根据不同样品曲线形态上差别,将花页 1 井牛蹄塘组吸/脱附曲线分为 3 类(图 6;表 2),结合 SEM 观察,页岩孔隙以纳米级圆筒孔和平行板孔等开放型孔隙为主。圆筒孔或锥形管孔主要为有机质孔与粒间孔,平行板孔和锥形平板孔与粘土矿物层间粒内孔或微裂缝有关。

采用 BJH 模型计算页岩孔隙体积,不含微孔体积,中孔所占 BJH 体积较大,为 39.6%~74.2%,平均为 60.3%,大孔所占 BJH 体积次之,为 25.8%~60.4%,平均为 39.7%。

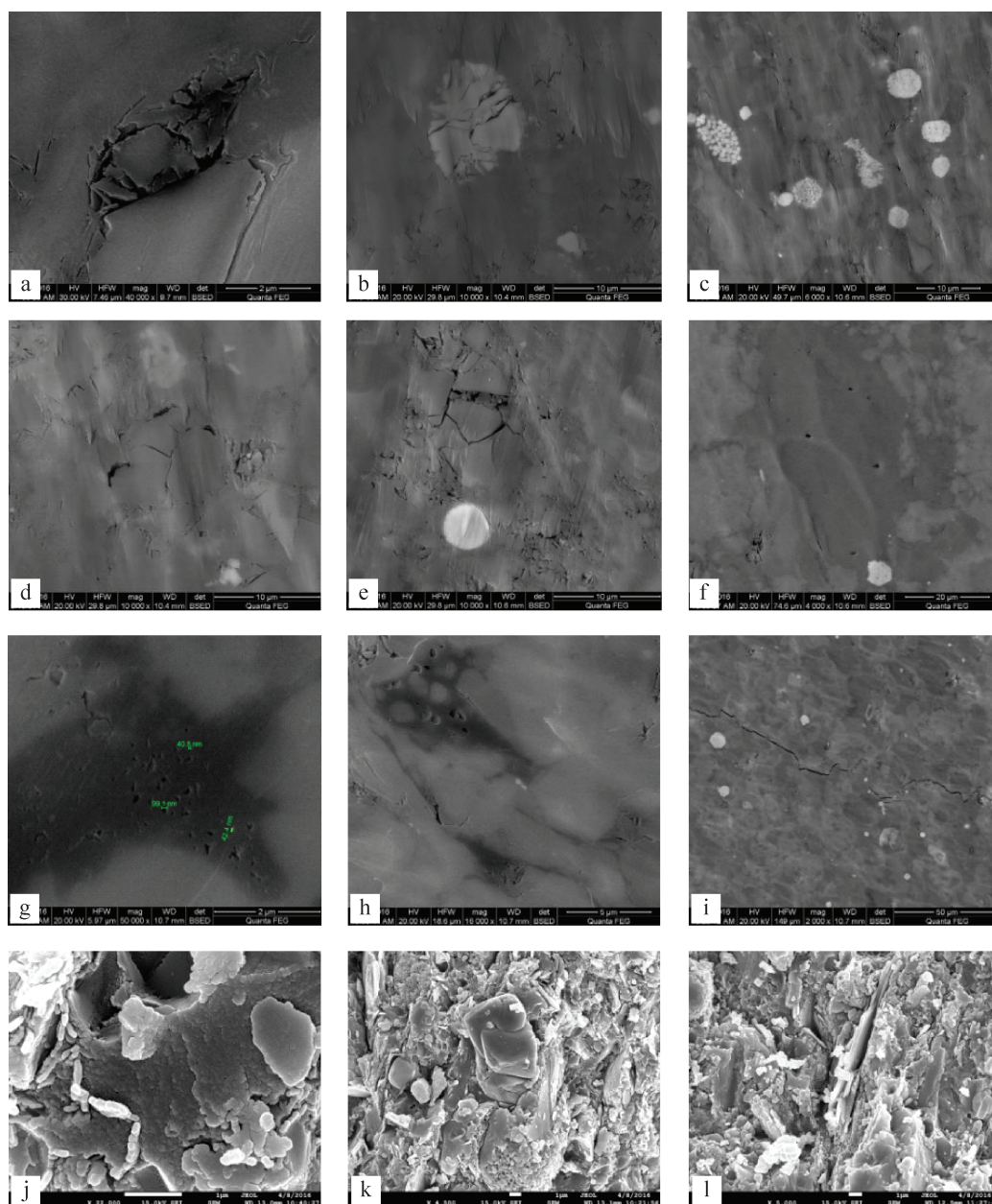


图5 湘西北地区花页1井镜下孔隙特征

Fig. 5 Microscopic pore features of shale samples from well Huaye-1, northwestern Hunan province

a. 埋深2 450.89 m, 粒间孔; b. 埋深2 456.04 m, 粒内孔; c. 埋深2 499.25 m, 黄铁矿晶间孔; d. 埋深2 456.04 m, 晶间孔; e. 埋深2 467.95 m, 晶间孔; f. 埋深2 515.5 m, 碳酸盐溶蚀孔; g. 埋深2 463.0 m, 有机质沥青球粒孔; h. 埋深2 510.23 m, 有机质沥青球粒孔、气孔; i. 埋深2 510.23 m, 微裂缝; j. 埋深2 547.77 m, 有机质内部沥青球粒孔; k. 埋深2 547.77 m, 黄铁矿铸模孔、顺层裂缝; l. 埋深2 558.17 m, 片状矿物片间缝隙(a—i 为抛光面, j 和 k 为自然断面)

3.5 储层影响因素

页岩气属于典型“原地”成藏模式, 主要以游离态富集在页岩裂缝与孔隙中以及吸附态存在干酪根或粘土颗粒表面^[35]。牛蹄塘组具有岩石致密、低孔隙度、低渗透率、高比表面积等特征, 结合前人研究成果, 认为页岩储层微观孔隙是多方面因素共同影响的综合体, 沉积相、矿物成分、TOC、有机质演化程度等对微观孔隙发育起了控制作用。

3.5.1 深水泥质陆棚控制孔隙发育物质基础

深水(泥质)陆棚相发育大量有机质、硅质、粘土矿物和黄铁矿, 构成了孔隙发育物质基础, 发育丰富各类孔隙, 如有机质孔, 粘土矿物粒间孔以及黄铁矿晶间孔等, 导致BJH 体积超过 $10.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$, 同时, 硅质含量高也有利于微裂缝发育。而半深水陆棚相中, 由于有机质、黄铁矿、粘土矿物含量较低, 硅质含量高, 总体上各类孔隙发育较差, BJH 体积小于 $3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ (表3)。

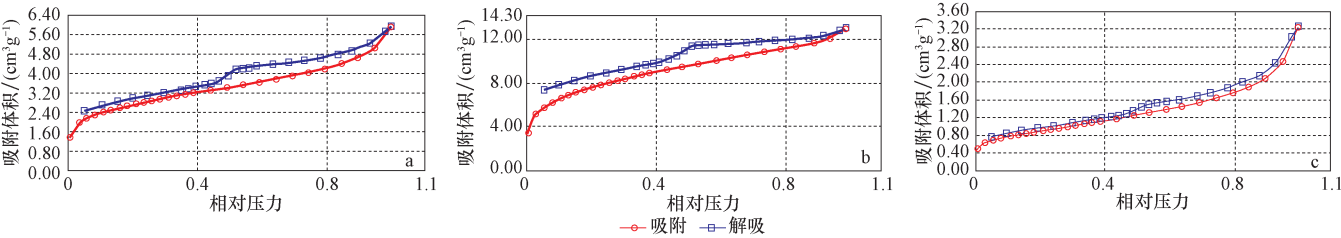


图 6 湘西北地区页岩样品典型吸/脱附及孔径分布曲线

Fig. 6 Typical adsorption/desorption curves and pore size distribution of shale samples from northwestern Hunan province

a. A 类, 2 499.79 m; b. B 类, 2 547.77 m; c. C 类, 2 407.23 m

表 2 湘西北地区页岩样品氮气吸/脱附特征

Table 2 Characteristics of nitrogen adsorption/desorption of shale samples from northwestern Hunan Province

类型	曲线特征	孔隙特征	SEM	TOC/ %	BET 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 体积/ ($10^{-3} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
A 类	相对压力大于 0.6 时,吸/脱附曲线分离较大,在相对压力为 0.4~0.6 时,脱附曲线出现明显拐点;相对压力小于 0.4 时,吸/脱附曲线近乎重合	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
B 类	吸/脱附曲线始终出现分离特征	狭窄的平行板孔、四面开口锥形平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	>8	>15	>20
C 类	脱附曲线拐点不明显,吸/脱附曲线近平行,分离较小	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

表 3 湘西北地区花页 1 井牛蹄塘组不同沉积微相储层差异统计

Table 3 Statistical characteristics of disparities between reservoirs of different sedimentary microfacies in the Niuditang Formation in Well Huaye-1, northwestern Hunan province

沉积相	孔隙类型	TOC/%	泥质/%	硅质/%	钙质/%	黄铁矿/%	BET 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 体积/ ($10^{-3} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
半深水陆棚	粒间孔	<1.0	<30	>40	<20	<3	<2.0	<3.0
深水陆棚	钙质 粒间孔、晶间孔、粒内孔、溶蚀孔	1.0~2.0	<25	<30	>40	<4	2~7	3~7
	含钙质泥质 有机质孔、粒间孔、晶间孔	1.0~2.0	25~30	30~45	20~40	4~8	7~10	7~10
	泥质 有机质孔、粒间孔、粒内孔、晶间孔	>2.0	>30	>45	<20	8~17	>10	>10

3.5.2 丰富 TOC 促进有机质孔发育

早成岩阶段,有机质被挤压赋存于石英等刚性颗粒格架内,进入中成岩阶段,有机质热演化形成内部大量互相连通的纳米级孔隙,如气孔、沥青球粒孔等,对储层孔隙有重要贡献。BJH 体积、渗透率随 TOC 含量增加而增大(图 7a,图 8a)。

TOC 小于 2.0%,有机质呈分散状、浸染状,BJH 体积较小,有机质孔以中孔最发育,对 BJH 体积贡献 54%~74%(平均为 66%),而大孔对 BJH 体积贡献次之。TOC 大于 2.0%,有机质呈凝块状、填隙状、条带状,有机质孔数量及孔径均随有机质体增大而增大,尤其是有机质中心附近,有机质孔孔径较大,可

达 100 nm 左右(图 6g,h),导致 BJH 体积大,虽然中孔发育好,绝对量有所增加,但对 BJH 体积贡献下降至 40%~51%(平均为 45%),而大孔相对更发育,对 BJH 体积贡献增大至 49%~60%(平均为 55%)(图 9)。

3.5.3 矿物组成及含量控制孔隙发育类型及程度

牛蹄塘组矿物主要是石英、粘土矿物(伊利石为主)、黄铁矿及碳酸盐,张琴认为硅质页岩有机孔和矿物粒间孔较发育^[27]。

1) 石英

深水泥质陆棚中,牛蹄塘组石英含量在 45%~60%,但 BJH 体积与石英无相关性(图 7b),这是因为

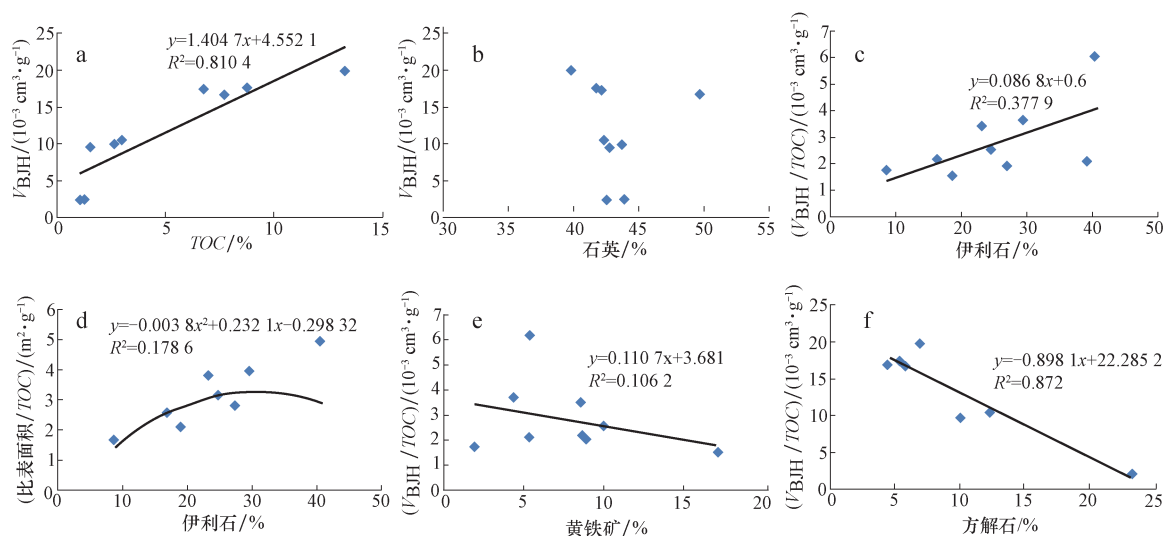


图7 深水泥质陆棚相中不同矿物对BJH体积的影响

Fig. 7 Analyses of effects of different minerals in deep water muddy shelf facies upon BJH volume

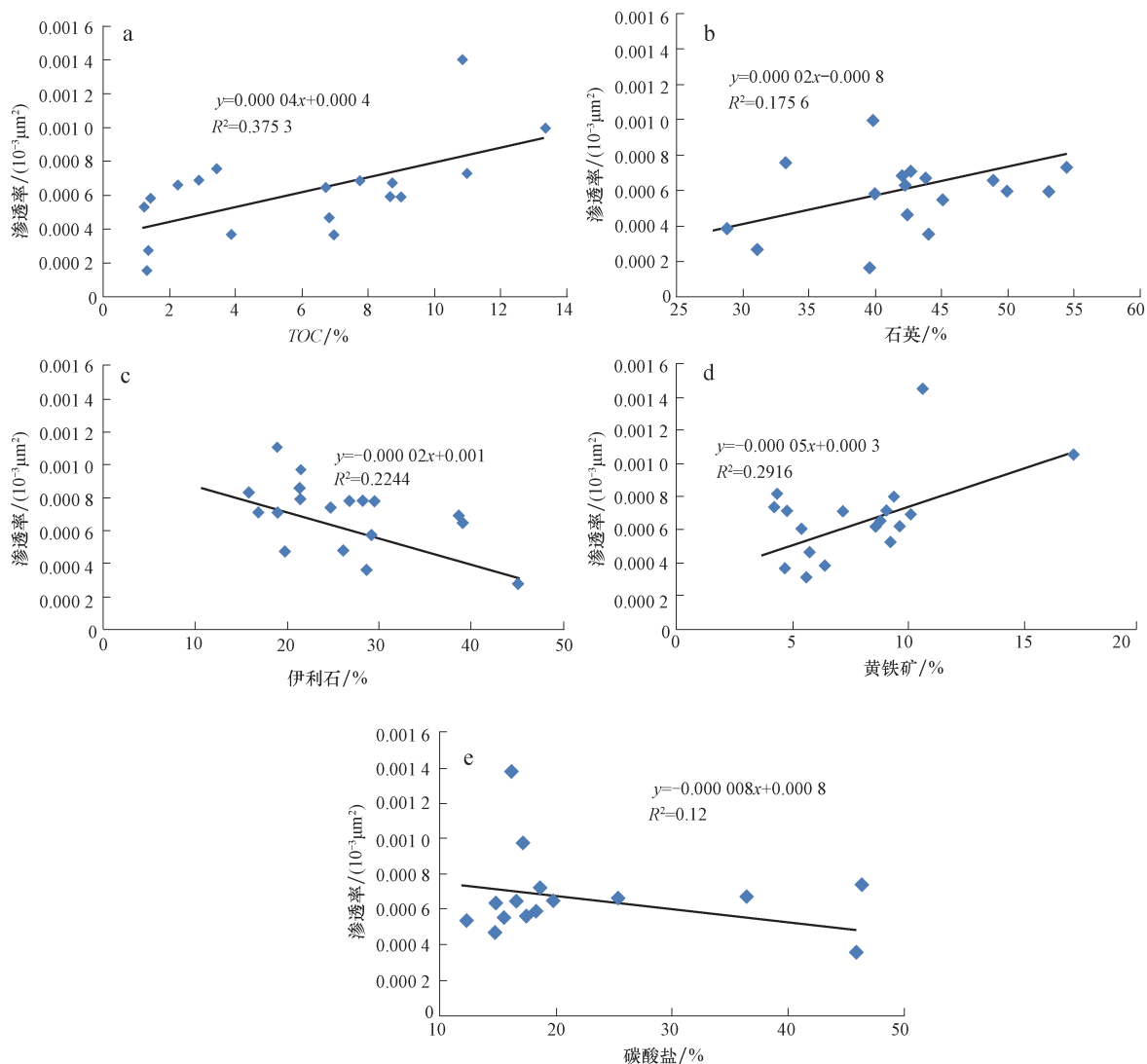


图8 深水泥质陆棚相渗透率与矿物成分相关性

Fig. 8 Correlation of permeability and mineral types in deep water muddy shelf facies

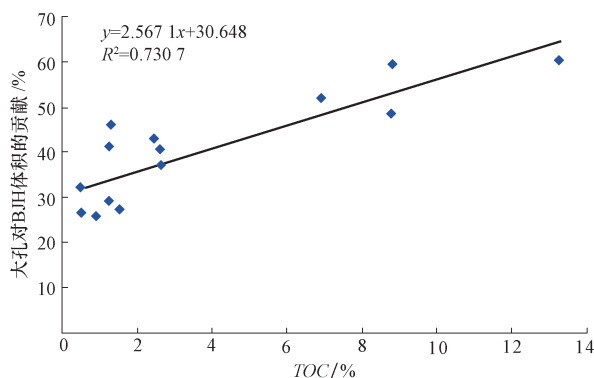


图9 湘西北地区页岩中大孔隙对 BJH 体积的贡献与 TOC 含量的关系

Fig.9 Contribution of macro pores to BJH volume and its correlation to TOC of shale samples from northwestern Hunan province

压实过程中刚性石英颗粒形成粒间纳米级空间格架,被进一步充填塑性有机质、粘土矿物及胶结物等,导致石英颗粒间孔隙损失严重,与渗透率相关性较差。黄磊等认为石英含量增加时,岩石脆性也增加,受到应力时容易发育孔隙及微裂缝,提高储层渗流能力(图8b)^[17]。

2) 粘土矿物

粘土矿物中伊利石颗粒较大,形成纳米-微米级粒间孔和层间孔。伊利石含量与 BJH 体积呈负相关关系,但伊利石含量与有机质含量也呈负相关关系。通过消除 TOC 含量影响, BJH 体积、比表面积与伊利石呈弱正相关性(图7c,d),随着伊利石含量增加, BJH 体积、比表面积增大。但粘土矿物增多,容易堵塞渗流通道,导致储层渗流能力降低(图8b)。

3) 黄铁矿

牛蹄塘组黄铁矿丰富,最高可达17%,在 SEM 下观察到纳米级黄铁矿呈微球粒、霉簇状,颗粒间形成了大量晶间孔, BJH 体积、渗透性随黄铁矿增加而增大。但是黄铁矿与 TOC 含量也呈正相关关系,因此,进一步消除 TOC 影响,发现相反结论,即 BJH 体积与黄铁矿呈负相关关系(图7e,图8d),这说明了随着 TOC、黄铁矿增加, BJH 体积增加主要是由 TOC 贡献,而非黄铁矿。

4) 碳酸盐

碳酸盐具有很强化学胶结作用,抑制纳米-微米级孔隙及微裂缝发育^[16-17]。 BJH 体积与碳酸盐含量呈显著负相关,即随着碳酸盐含量增加, BJH 体积显著减小(图7f)。虽然溶蚀作用导致碳酸盐形成溶蚀孔,但总体上溶蚀孔不发育,对 BJH 体积贡献较小。碳酸盐胶结作用大于溶蚀作用,抑制孔隙发育,降低储层渗流能力(图8e)。

3.5.4 有机质热演化作用促进有机质孔、微裂缝发育

有机质热演化作用对储层孔隙的影响较为复杂, Curist 认为镜质体反射率(R_o)小于0.9%页岩很少发育有机质孔,程鹏等认为随着 R_o 增加到3.5%,孔隙随热演化程度增加而增加,随后微孔呈下降趋势,而中孔仍然缓慢上升^[36-38]。

花垣区块牛蹄塘组晚成岩阶段,有机质进入高成熟-过成熟期,有机质热演化发生脱氢、生气活动,形成有机质内部纳米级孔隙,有机质孔对 BJH 体积贡献超过50%,此外,有机质过成熟度阶段,生烃强度大,微裂缝发育好,更有利于气体储集和渗流^[39-41]。

4 结论

1) 深水泥质陆棚相下,牛蹄塘组主要发育硅质页岩、炭质页岩,炭质含量为2%~15%、硅质含量为45%~60%、黄铁矿含量4%~17%,粘土矿物以伊利石为主,整体含量低。储层致密,孔隙度平均仅0.449%、渗透率平均为 $0.000\ 860\ 75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2) 牛蹄塘组发育大量纳米级无机质孔、有机质孔和少量微米级微裂隙等,以有机质孔最发育。储层孔隙主要发育了圆筒孔(有机质孔)、狭窄平行板孔(粘土矿物层间孔)、四面开口的锥形管孔(粘土矿物粒间孔)以及锥形平板孔(微裂缝)。储层孔径范围较广,中孔平均贡献39.6%~74.2%(平均为60.3%)的 BJH 体积,大孔次之。

3) 深水泥质陆棚最有利于发育各类孔隙;石英、粘土矿物及 TOC 等控制了各类孔隙的发育类型和程度,粘土矿物、碳酸盐降低储层渗流能力;有机质热演化作用促进有机质孔、微裂缝发育。

参 考 文 献

- [1] 胡明毅,邓庆杰,胡忠贵.上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件[J].石油与天然气地质,2014,35(2):272-280.
Hu Mingyi, Deng Qingjie, Hu Zhonggui. Shale gas accumulation conditions of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Upper Yangtze region[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 272-280.
- [2] 黄俨然,杨荣丰,肖正辉,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气含气性影响因素分析[J].岩性油气藏,2015,27(4):11-16.
Huang Yanran, Yang Rongfeng, Xiao Zhenghui, et al. Influencing factors of shale gas-bearing property of Lower Cambrian Niutitang Formation in northwestern Hunan [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(4): 11-16.
- [3] 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 condi-

- tions of shale gas in Lower Cambrian Niutitang Formation, northwestern Hunan[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 586–594.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 肖正辉,宁博文,杨荣丰,等. 多层次模糊数学法在湘西北页岩气有利区块优选中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(3): 33–37.
- Xiao Zhenghui, Ning Bowen, Yang Rongfeng, et al. Application of multi-layered fuzzy mathematics in selecting the favorable areas of shale gas in northwestern Hunan[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(3): 33–37.
- [7] 周庆华,宋宁,王成章,等. 湖南花垣页岩气区块地质评价与勘探展望[J]. 天然气地质科学, 2014, 25(1): 130–140.
- Zhou Qinghua, Song Ning, Wang Chengzhang, et al. Geological evaluation and exploration prospect of Huayuan shale gas block in Hunan Province[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 130–140.
- [8] 冷济高,韩建辉,李飞,等. 湘西北地区花垣页岩气区块勘探潜力[J]. 天然气地质科学, 2014, 25(4): 624–631.
- Leng Jigao, Han Jianhui, Li Fei, et al. Exploration potential of shale gas in Huayuan block, northwest Hunan province[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 624–631.
- [9] 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(6): 839–846.
- Lin Tuo, Zhang Jinchuan, Li Bo, et al. Shale gas accumulate conditions and gas-bearing properties of Lower Cambrian Niutitang Formation in Well Changye 1, northwestern Hunan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 839–846.
- [10] 唐书恒,范二平,张松航,等. 湘西北下古生界海相页岩储层特征与含气性分析[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 135–146.
- Tang Shuheng, Fan Erping, Hang Songhang, et al. Reservoir characteristics and gas bearing capacity of the Lower Palaeozoic marine shales in Northwestern Hunan[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 135–146.
- [11] 薛冰,张金川,唐玄,等. 黔西北龙马溪组页岩微观孔隙结构及储气特征[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 138–149, 173.
- Xue Bing, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Characteristics of microscopic pore and gas accumulation on shale in Longmaxi Formation, northwest Guizhou[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 138–149, 173.
- [12] Gareth R. Chalmers, R. Marc Bustin, Ian M. Power. 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.
- [13] 祝海华,钟大康,张亚雄,等. 川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 65–76.
- Zhu Haihua, Zhong Dakang, Zhang Yaxiong et al. Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 65–76.
- [14] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438–444.
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438–444.
- [15] 黄金亮,董大忠,李建忠,等. 陆相页岩储层特征及其影响因素: 以四川盆地上三叠统须家河组页岩为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 158–166.
- Huang Jinliang, Dong Dazhong, Li Jianzhong, et al. An example from Triassic Xujiahe Formation shale, Reservoir characteristics and its influence on continental shale Sichuan Basin. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 158–166.
- [16] 梁峰,朱炎铭,马超,等. 湘西北地区牛蹄塘组页岩气储层沉积展布及储集特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2284–2292.
- Liang Feng, Zhu Yanming, Ma Chao, et al. Sedimentary distribution and reservoir characteristics of shale gas reservoir of Niutitang Formation in Northwestern Hunan[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2284–2292.
- [17] 黄磊,申维. 页岩气储层孔隙发育特征及主控因素分析—以扬子地区龙马溪组为例[J]. 地学前缘, 2015, 27(1): 374–385.
- Huang Lei, Shen Wei. Characteristics and controlling factors of the formation of pores of a shale gas reservoir: A case study from Longmaxi Formation of the Upper Yangtze region, China. [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 27(1): 374–385.
- [18] 张士万,孟志勇,郭战峰,等. 涪陵地区龙马溪组页岩储层特征及其发育主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 16–24.
- Zhang Shiwan, Meng Zhiyong, Guo Zhanfeng, et al. Characteristics and major controlling factors of shale reservoirs in the Longmaxi Formation, Fuling area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 16–24.
- [19] 孔令明,万茂霞,严玉霞,等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩储层成岩作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1547–1555.
- Kong Lingming, Wan Maoxia, Yan Yuxia, et al. Reservoir diagenesis research of Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1547–1555.
- [20] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 832–845, 877.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing northern-

- Guizhou area[J]. *Acta Petrolci Sinica*, 2016, 37(7): 832–845, 877.
- [21] 王玉满,董大忠,杨桦,等. 川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(6): 1348–1356.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Longmaxi Shale, southern Sichuan, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(6): 1348–1356.
- [22] 郭秋麟,陈晓明,宋焕琪,等. 泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 439–449.
Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Song Huanqi, et al. Evolution and Models of Shale Porosity During Burial Process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 439–449.
- [23] 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.
- [24] 郭旭升,李宇平,刘若冰,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 9–16.
Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micropore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 9–16.
- [25] 何建华,丁文龙,付景龙,等. 页岩微观孔隙成因类型研究[J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(5): 30–35.
He Jianhua, Ding Wenlong, Fu Jinglong, et al. Study on genetic type of micropore in shale reservoir[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(5): 30–35.
- [26] 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.
- [27] 张琴,刘畅,梅啸寒,等. 页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 36(4): 666–674.
Zhang Qin, Liu Chang, Mei Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 36(4): 666–674.
- [28] Jarvie D M, Hill R J, Rubble T E, et al. Unconventional shale-gas systems; The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic; Shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475–499.
- [29] 张慧,焦淑静,庞起发,等. 中国南方早古生代页岩有机质的扫描电镜研究[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 675–680.
Zhang Hui, Jiao Shujing, Pang Qifa, et al. SEM observation of organic matters in the Eopaleozoic shale in South China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 675–680.
- [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] 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 porestructures in shale reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 301–311.
- [32] Roger M. Slatt and Neal R. O'Brien. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales; Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2017–2030.
- [33] Mark E. Curtis, Brian J. Cardott, Carl H, et al. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103(6): 26–31.
- [34] 杨峰,宁正福,孔德涛,等. 高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 450–455.
Yang Feng, Ning Zhengfu, Kong Detao, et al. Pore structure of shales from high pressure mercury injection and nitrogen adsorption method[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 450–455.
- [35] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [36] 程鹏,肖贤明. 很高成熟度富有机质页岩的含气性问题[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 737–741.
Cheng Peng, Xiao Xianming. Gas content of organic-rich shales with very high maturities[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 737–741.
- [37] Tongwei Zhang, Geoffrey S. Ellis, Stephen C. Ruppel, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 47: 120–131.
- [38] 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.
- [39] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665–677.
- [40] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale; Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579–601.
- [41] 王哲,李贤庆,周宝刚等. 川南地区下古生界页岩气储层微观孔隙结构表征及其对含气性的影响[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(9): 2287–2297.
Wang Zhe, Li Xianqing, Zhou Baogang, et al. Characterization of microscopic pore structure and its influence on gas content of shale gas reservoirs from the Lower Paleozoic in southern Sichuan Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(9): 2287–2297.