

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2019.03.03

引用格式: 李斌,崔春兰,张跃恒,等. 湖南省保靖地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件分析[J]. 中国地质调查,2019,6(3): 22-28.

湖南省保靖地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件分析

李斌¹, 崔春兰¹, 张跃恒¹, 胡博文¹, 罗群²

(1. 神华地质勘查有限责任公司, 北京 100022; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 为评价湖南省保靖地区寒武系牛蹄塘组页岩气勘探潜力,利用野外地质调查及页岩气井勘探成果资料,结合钻井岩芯样品测试结果,研究了保靖地区牛蹄塘组页岩储层发育特征及其分布规律。保靖下寒武统牛蹄塘组发育被动大陆边缘浅海深水碎屑岩陆棚相黑色碳质页岩、深灰色泥岩、深灰色钙质粉砂岩。该页岩层系分布稳定,厚度较大(90 m),有机质丰度较高(1.48%~3.49%),为I型干酪根,成熟度较高(3.90%~4.86%),处于过成熟阶段;脆性矿物含量较高(38.4%~50.5%),具较好的破裂潜力;成岩作用较深,黏土矿物以伊利石和伊蒙混层为主;页岩孔隙度中等(0.50%~4.24%),渗透率极低($0.0005 \times 10^{-3} \sim 0.0146 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。储集空间有晶体矿物晶面溶蚀孔、矿物边缘溶蚀孔、有机质溶蚀孔、黄铁矿晶间孔、成岩作用解理缝和构造裂缝。综合分析认为,湖南省保靖地区下寒武统牛蹄塘组具有较好的页岩气成藏地质条件,裂缝发育区可促进页岩气聚集,在保靖县东部昂洞—泽碧一带可以加大勘探力度。

关键词: 页岩气; 牛蹄塘组; 成藏条件; 沉积环境; 储集空间; 湖南保靖

中图分类号: P618.13; TE132.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2019)03-0022-07

0 引言

近年来,针对扬子地区牛蹄塘组和龙马溪组开展了页岩气勘探研究工作,在四川盆地及周缘威远—长宁、富顺—永川、涪陵焦石坝地区的龙马溪组页岩取得重大发现,相继建成页岩气先导试验区 and 产能示范区,进行工业化开采^[1-3]。而下寒武统牛蹄塘组页岩分布面积广、厚度大^[4],四川盆地周缘陆续在多口探井发现页岩气显示或低产气流,但无工业化开采的前景。近期,中国地质调查局在湖北宜昌古隆起斜坡带鄂宜页1井调查中取得了重大发现,该井初步显示具有 $6.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量 $12.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产页岩气流。这一发现,重新引起了人们对四川盆地周缘牛蹄塘组的重视。神华

地质勘查有限责任公司从2013年开始在湖南保靖地区进行页岩气勘探,开展了专项区域地质调查和页岩气探井工作,针对牛蹄塘组实施了一口探井(保页2井),获得了阶段性研究成果。本文应用探井与野外地质调查资料,分析研究区页岩气成藏地质条件,以期为进一步页岩气勘探提供理论依据。

1 区域地质概况

湖南省保靖地区页岩气区块大地构造位置处于中扬子地区的东南部,主体位于湘鄂西隔槽式冲断褶皱带内的桑植—石门复向斜内^[5],东南以保靖—慈利断裂带与雪峰隆起相接,西北以齐岳山断裂带与渝东隔挡式褶皱带相隔,北部延伸至大巴山断裂前黄陵背斜与宜昌背斜处,南部抵达滇黔桂交

收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-06-16。

基金项目: 国家自然科学基金“致密油储层理缝启闭与石油充注(项目批准号: 41672118)”项目资助。

第一作者简介: 李斌(1970—),男,高级工程师,主要从事页岩气地质学研究。Email: libin9600@sohu.com。

通信作者简介: 罗群(1963—),男,教授,主要从事非常规油气成藏与资源评价、盆地构造分析与油气成藏机理研究。

Email: luogun2002@263.net。

界区(图1)。湖南保靖页岩气区块主体为由3个NNE向的向斜和背斜组成的复合结构,背斜区出露寒武系娄山关组—奥陶系宝塔组,剥蚀严重,地形平缓,向斜区出露志留系—三叠系,地形崎岖,地层

倾角较大。研究区东南部发育由多条NNE—NE向逆冲断层组成的保靖—慈利断裂带,断裂带经历了多期次活动,造成东南部出现多个地堑,地堑内地层平缓。

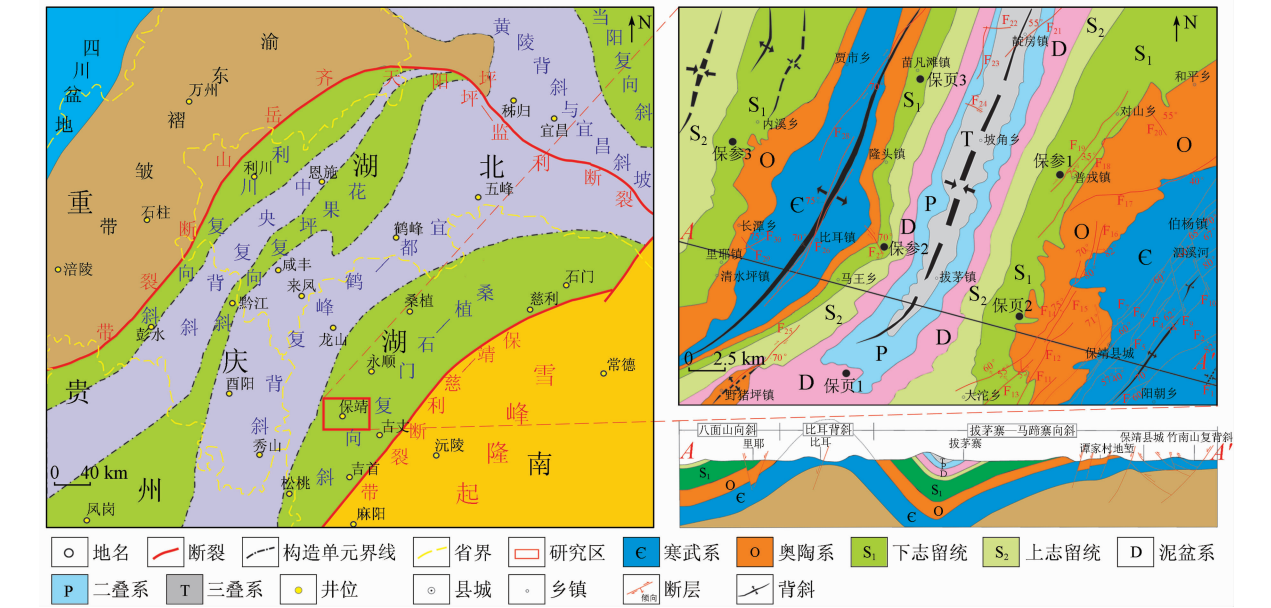


图1 湖南保靖地区区域地质图

Fig.1 Regional geological map of Baojing County in Hunan Province

湘鄂西隔槽式冲断褶皱带位于扬子板块与华夏板块两大地质单元结合部的中扬子地区,经历了晋宁运动、加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动等多期构造运动,形成现今的复杂山区地形^[6-8]。晋宁运动以后,研究区作为扬子板块的组成部分,基底基本固结,并开始接受盖层沉积^[9]。南华纪时,Rodinia 超大陆裂解,扬子板块沿东南缘与华夏板块裂离,并接受沉积^[10]。震旦纪南沱冰期后,中扬子东南部大陆拉张加剧,华南海盆形成,冰川消融,海平面上升,发生海侵,湘鄂西地区发展为成熟的被动大陆边缘浅海陆棚环境,沉积了广泛分布的震旦系碳酸盐岩和黑色页岩^[8,11]。寒武纪早期,华南海盆持续扩张,海平面快速上升,湘鄂西地区海水底部流通不畅,形成了还原环境,沉积了下寒武统牛蹄塘组厚层黑色碳质页岩,为页岩气的生成提供了物质基础^[6-7,12]。

2 地层分布特征与沉积相分布

2.1 地层分布特征

据保页2井钻井地质研究,湘西北保靖地区牛

蹄塘组沉积厚度为90 m,与下伏地层留茶坡组硅质岩及上覆石牌组碎屑岩均为整合接触(图2)。

牛蹄塘组下部总体为黑色碳质泥岩,致密块状构造,裂缝不发育,沿层面发育脉状、透镜状、条带状、粉末圈层状、晶簇状黄铁矿,从下向上,黄铁矿比例增加。

牛蹄塘组中部为深灰色钙质粉砂岩夹黑色碳质泥岩。裂缝不发育,层面可见黄铁矿及方解石脉状条带,黄铁矿比例较下伏地层明显减小。粉砂岩颗粒以碳屑、黄铁矿及方解石晶体为主,钙泥质胶结。钙质胶结物、黄铁矿粉末分布不均匀会在粉砂岩中形成多个纹层条带,条带呈灰白色,滴酸气泡明显。

牛蹄塘组中上部为黑色碳质泥岩与深灰色含钙粉砂岩互层。钙质含量不均匀分布会在粉砂岩中形成灰白色水平纹层。粉砂岩颗粒以碳屑、方解石晶体为主,钙泥质胶结,裂缝不发育,断面处见黄铁矿颗粒。黑色碳质泥岩为致密块状构造,裂缝不发育,顺层面可见黄铁矿脉体、黄铁矿结合体,局部夹钙质粉砂岩。

牛蹄塘组顶部为深灰色钙质粉砂岩,致密块状

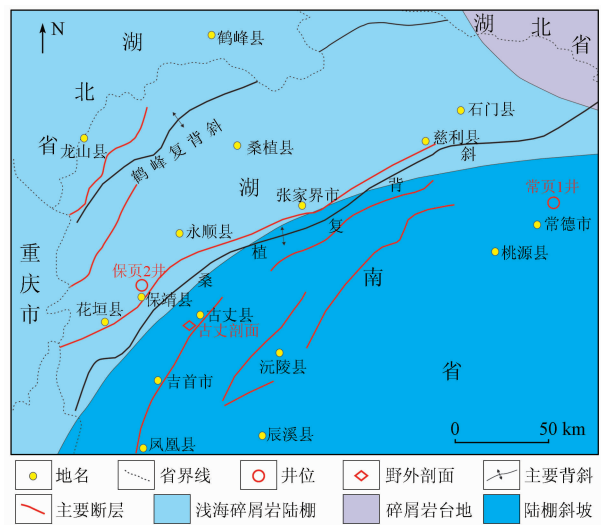


图3 湘西地区沉积相展布^[14]

Fig.3 Sedimentary facies map of West Hunan^[14]

3 页岩气成藏地质条件分析

3.1 有机地化特征

多数盆地研究表明,页岩气的含量与有机质丰度具有良好的正相关关系。保页2井地球化学测试表明,寒武系牛蹄塘组有机质丰度为0.43%~1.82%(表1),从下向上有机质丰度逐渐降低。古丈野外实测剖面中寒武系牛蹄塘组有机质丰度为1.98%~8.99%,常页1井寒武系牛蹄塘组有机质丰度为2.0%~17.6%^[14]。平面上从西北向东南有机质丰度增高。受沉积环境控制,斜坡区的有机质含量明显高于浅海碎屑岩陆棚区,总体上都有较好的生烃能力。

表1 保页2井牛蹄塘组有机质丰度

Tab.1 Organic abundance of Niutitang Formation in Baoye 2 well

顶深/m	底深/m	总有机碳含量/%
2 948.35	2 948.51	0.77
2 952.89	2 953.07	1.02
2 958.57	2 958.72	0.71
2 962.49	2 962.67	0.43
2 970.31	2 970.51	1.38
2 985.31	2 985.49	1.53
2 992.51	2 992.69	1.82
2 996.02	2 996.20	1.10
3 001.94	3 002.11	1.47
3 005.63	3 005.82	1.38
3 012.35	3 012.53	1.30
3 018.93	3 019.11	1.31
3 022.86	3 023.02	1.14
3 026.63	3 026.79	1.20

泥页岩中干酪根成熟度不仅可以用来预测烃

源岩的生烃潜能,还能影响页岩中吸附在有机物质表面的页岩气产量,是页岩气成藏的重要因素之一。从目前美国勘探开发情况看,对于热成因的页岩气藏,页岩的高成熟度(>2.0%)有利于页岩气的生成^[14]。保页2井中实测牛蹄塘组成熟度为3.17%~5.02%,平均为4.92%,处于过成熟阶段,从上向下镜质体反射率(R_o)值逐渐增大(表2)。在古丈野外实测剖面中测得牛蹄塘组有机质成熟度为3.48%~4.96%,平均为4.41%。常页1井中测得牛蹄塘组成熟度为2.0%~4.5%,平均为3.92%。总体上,碎屑岩陆棚区和陆棚斜坡区牛蹄塘组页岩热演化程度均较高。根据邻区热演化史和生烃史研究^[14],牛蹄塘组页岩在侏罗纪经历生气高峰,之后进入晚期干气阶段,具备形成页岩气藏的成熟度条件。

表2 保页2井牛蹄塘组有机质成熟度

Tab.2 Organic matter maturity of Niutitang Formation in Baoye 2 well

顶深/m	底深/m	R_o /%
2 032.63	2 032.79	3.17
2 946.24	2 946.40	4.95
2 955.58	2 955.74	4.91
2 970.31	2 970.51	5.02
2 981.02	2 981.21	4.96
2 992.51	2 992.69	4.85
3 005.63	3 005.82	4.91
3 012.35	3 012.53	4.90
3 018.93	3 019.11	4.83
3 026.63	3 026.79	4.96

3.2 地层厚度与埋深

有机质页岩的厚度是页岩气成藏富集的基本条件。据国内外研究报道^[15-16],有机质页岩厚度超过30 m才具有页岩气开发的商业价值。保页2井寒武系牛蹄塘组厚度为90 m,古丈野外实测剖面为80 m,慈利南坪剖面牛蹄塘组厚度为426 m,常页1井牛蹄塘组厚度为500 m。从西北向东南,从碎屑岩陆棚区到陆棚斜坡区,牛蹄塘组厚度增加。

寒武系牛蹄塘组在中上扬子地区全区分布,但由于后期的强烈构造运动在湘鄂西形成了隔槽式褶皱带,向斜区剥蚀较少,背斜区剥蚀较多。湖南保靖地区马蹄寨向斜中心埋深2 800~7 253 m,背斜区埋深1 800~2 411 m。保页2井布置在马蹄寨向斜的东南翼,开孔层位为志留系龙马溪组,完钻井深3 275 m,牛蹄塘组埋深3 000 m。湖南保靖地区的埋深范围适宜于页岩气的封存。

3.3 储层岩矿特征

据保页2井探井岩芯及野外地质剖面测试可

知,湖南保靖寒武系牛蹄塘组脆性矿物含量较高(38.4%~50.5%),从上向下脆性矿物的含量有增加的趋势。其脆性矿物的成分主要为石英(72.4%~83.5%)、钾长石(13.4%~23.5%)、黄铁矿(3.4%~7.5%)、斜长石(0.4%~0.8%),方解石含量较少(0.04%~0.08%)。黏土矿物以伊利石(57%~66%)、绿泥石(16%~23%)和伊蒙混层(5%~10%)为主,说明湖南保靖寒武系牛蹄塘组已经历了晚成岩作用阶段,其原生孔隙较少,次生孔隙增多。

3.4 储层物性

物性测试分析可知:页岩孔隙度中等(0.50%~4.24%),从上向下有增加的趋势;渗透率极低

($0.0005 \times 10^{-3} \sim 0.0146 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),从上向下也有增加的趋势,满足页岩气开发的下限($1.0 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$)^[17]。

3.5 储集空间特征

湖南保靖地区寒武系牛蹄塘组中主要发育溶蚀孔、基质晶间孔、有机质孔、微裂缝4种储集空间类型。

溶蚀孔指泥页岩中碎屑颗粒内部、矿物晶体表面及其边缘由于溶蚀作用形成的次生孔隙。溶蚀孔隙可以进一步分为矿物边缘溶蚀孔(图4(a))和矿物晶面溶蚀孔(图4(b))。扫描电镜下观察到矿物晶面溶蚀孔隙呈不规则似椭圆状,长轴直径0.2~0.8 μm;矿物边缘溶蚀孔多呈缝隙状或三角形孔隙-缝隙状,宽0.01~0.1 μm,长5~10 μm。

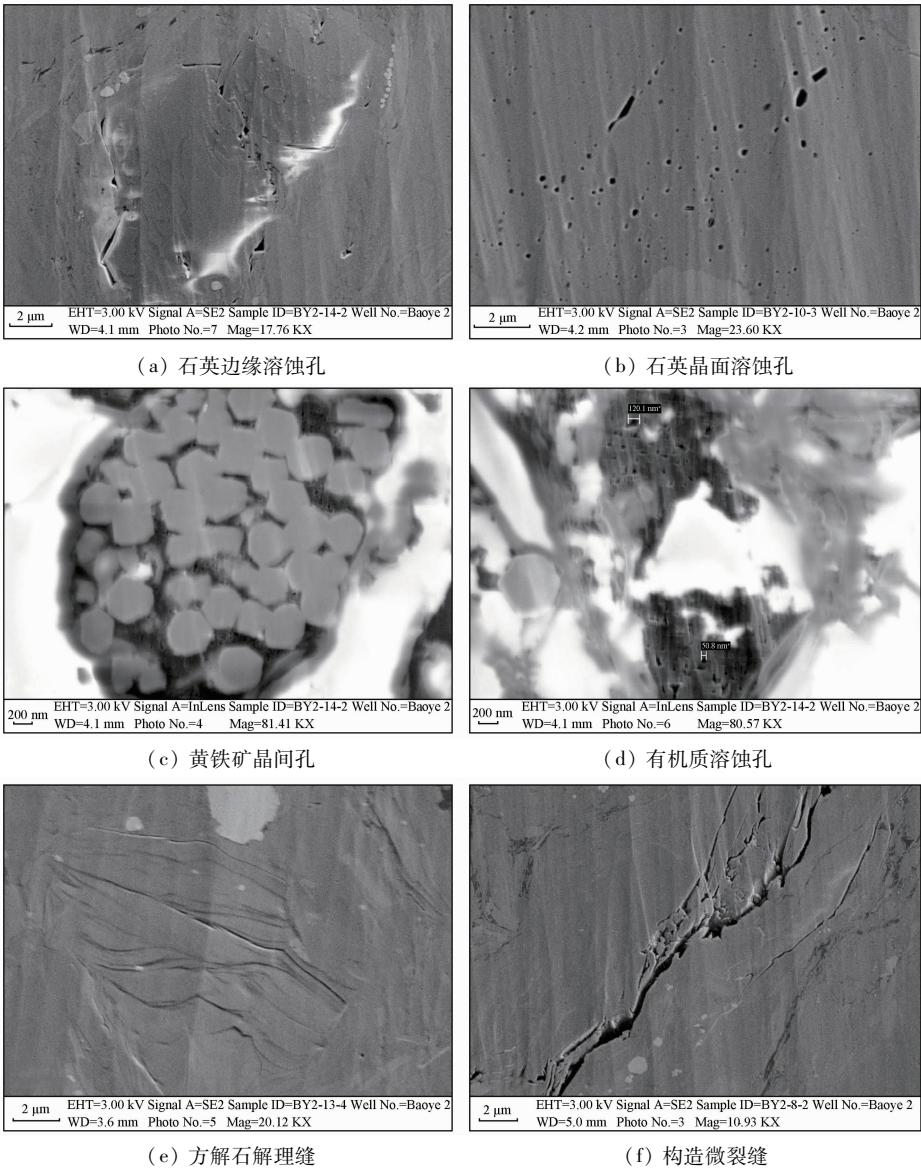


图4 保页2井牛蹄塘组页岩存储空间类型

Fig.4 Shale reservoir space type of Niutitang Formation in Baoye 2 well

基质晶间孔主要有黏土矿物层间孔或矿物晶体间孔隙(以黄铁矿为主)2类,研究区多见矿物晶体间孔隙(图4(c))。牛蹄塘组黑色泥页岩中黄铁矿极其发育,电镜下多呈草莓状集合体出现,晶粒间存在大量孔隙,直径为0.1~0.3 μm,储集能力较强,其连通性较好,是重要的页岩气储集空间。

有机质孔指有机质内部原生孔隙或有机质生烃后内部残余的次生孔隙或溶蚀孔隙。湖南保靖地区牛蹄塘组有机质在成岩矿物间主要呈浸染状分布,局部呈条带状或呈云层状,形成的原生孔隙一般较大,直径0.1~0.5 μm。由于成岩作用较深,酸性物质的溶蚀作用强烈,常在有机质内部形成筛状孔隙(图4(d)),直径0.01~0.08 μm。有机质孔隙发育较多,且储集能力较强,也是重要的页岩气储集空间。

微裂缝按其成因可分为成岩缝和构造缝。成岩缝是在成岩过程中形成的岩屑颗粒、矿物晶体、黏土矿物、有机质等内部或边缘形成的微裂缝。研究区发现方解石重结晶形成的解理缝,宽0.01 μm,长12 μm(图4(e))^[13],该种裂缝连通性较好,储集空间较大,但研究区发育较少。构造缝是因构造作用形成的裂缝,一般定向性排列,且规模较大,常以多组相关裂缝共生排列存在。构造性裂缝是页岩储层中最重要的一类储集空间,也是页岩气运移的渗流通道(图4(f)),但研究区构造型裂缝发育仅存在于某一段岩层中,且裂缝的密度较小。

3.6 含气性特征

湖南保靖地区保页2井牛蹄塘组中零星发现页岩气显示,气测值很低,但等温吸附测试分析可知,在温度30℃、压力10 MPa下,实验显示吸附气量为3.02~4.68 m³/t。页岩的吸附量与压力、总有机碳含量(Total Organic Carbon, TOC)呈线性关系,显示页岩具有较强的吸附能力(图5,图6)。常页1井牛蹄塘组中实测含气量为0.5~2.1 m³/t,达到页岩气开发的潜能。常页1井牛蹄塘组岩芯中有机碳含量略高于保页1井,但储层中裂缝的发育密度远大于保页1井裂缝的发育密度,是页岩气能够富集的根本原因。湖南保靖地区裂缝发育区为下一步的勘探方向。经区域地质综合分析,位于保靖—慈利断裂带附近的保靖县东部昂洞—泽碧一带,夹于多条断层之间,微小断裂发育,协调性裂缝极其发育,埋深1 900~2 000 m,可能为页岩气富集区,应加大勘探力度。

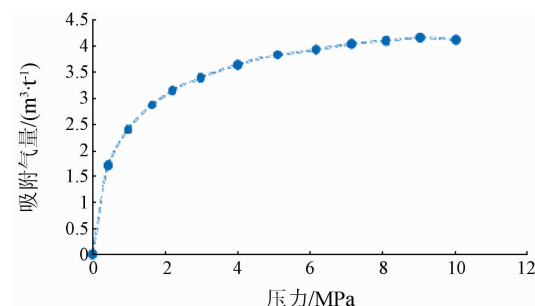


图5 页岩的吸附气量与压力的关系
Fig.5 Relationship between adsorption gas and pressure in shale

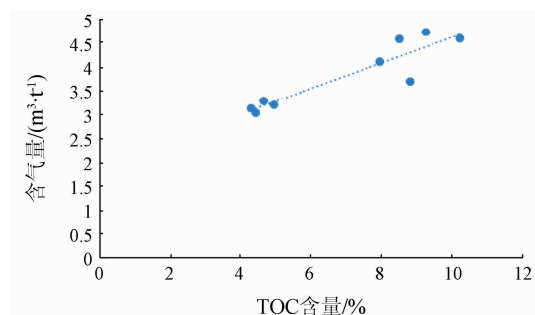


图6 页岩的吸附气量与TOC含量的关系
Fig.6 Relationship between adsorption gas and TOC in shale

4 结论

- (1) 湖南保靖下寒武统牛蹄塘组形成于被动大陆边缘浅海碎屑岩陆棚沉积环境,发育厚层黑色碳质泥页岩,为页岩气的生成提供了物质条件。
- (2) 湖南省保靖地区下寒武统牛蹄塘组分布稳定,有机质丰度较高(1.48%~3.49%),成熟度较高(3.90%~4.86%),脆性矿物含量较高,具备页岩气生成的基本条件。
- (3) 湖南保靖地区下寒武统牛蹄塘组页岩气最重要的储集空间为溶蚀孔隙、黄铁矿晶间孔隙、有机质孔隙和微裂缝4种类型。
- (4) 构造型裂缝不仅是重要的储集空间,也是孔隙连通的重要途径。裂缝发育区具有页岩气勘探前景,是下一步的勘探方向,应加大勘探力度。

参考文献:

- [1] 栾锡武. 中国页岩气开发的实质性突破[J]. 中国地质调查, 2016,3(1):7-13.
- [2] 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.

- [3] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 225 – 230.
- [4] 李国亮, 柏道远, 王先辉, 等. 湘西北地区寒武系牛蹄塘组页岩气资源前景[J]. 中国地质调查, 2015, 2(1): 31 – 39.
- [5] 李斌. 湖南保靖地区龙马溪组页岩气成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2016, 23(5): 12 – 16.
- [6] 李斌, 胡博文, 石小虎, 等. 湘西地区志留纪沉积体系及典型前陆盆地的形成模式研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 167 – 176.
- [7] 李斌, 罗群, 胡博文, 等. 湘西地区叠加型前陆盆地沉积环境演化模式研究[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(6): 81 – 90.
- [8] 刘新民, 付宜兴, 郭战峰, 等. 中扬子区南华纪以来盆地演化与油气响应特征[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2): 160 – 165, 171.
- [9] 汪正江, 谢渊, 杨平, 等. 雪峰山西侧震旦纪—早古生代海相盆地演化与油气地质条件[J]. 地质通报, 2012, 31(11): 1795 – 1811.
- [10] 王剑, 段太忠, 谢渊, 等. 扬子地块东南缘大地构造演化及其油气地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(11): 1739 – 1749.
- [11] 王必金, 包汉勇, 郭战峰, 等. 湘鄂西区寒武系层序划分及其对油气勘探的意义[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 372 – 377.
- [12] 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526 – 532.
- [13] 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.
- [14] 周庆华, 宋宁, 王成章, 等. 湖南常德地区牛蹄塘组页岩特征及含气性[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 301 – 311.
- [15] 张廷山, 彭志, 杨巍, 等. 美国页岩油研究对我国的启示[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 1 – 10.
- [16] 朱彤, 曹艳, 张快. 美国典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. 石油实验地质, 2014, 36(6): 718 – 724.
- [17] 刘江涛, 刘双莲, 李永杰, 等. 焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 53 – 57.

Analysis of shale gas accumulation conditions in Niutitang Formation of Lower Cambrian in Baojing area of Hunan Province

LI Bin¹, CUI Chunlan¹, ZHANG Yueheng¹, HU Bowen¹, LUO Qun²

(1. Shenhua Geological Exploration Co., Ltd., Beijing 100022, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: In order to evaluate the exploration potential of shale gas in Cambrian Niutitang Formation in Baojing area of Hunan Province, using the data of field geological survey and gas well exploration results, combined with drilling core sample test results, the authors studied the reservoir characteristics and distribution of Niutitang Formation in Baojing area of Hunan Province. The black shale, dark grey mudstone and dark grey calcareous siltstone of passive continental margin deepwater shelf was deposited at Lower Cambrian Niutitang Formation in Baojing area of Hunan Province. The shale layer was stable in distribution, large in thickness (90 m), high in organic matter (1.48% ~ 3.49%) with I type kerogen, high in maturity (3.90% ~ 4.86%) at over mature stage. The content of brittle minerals in reservoir was high (38.4% ~ 50.5%), and it had better fracture potential. Diagenesis was deeper and clay minerals were mainly illite and illite mixed layers. The shale porosity was medium (0.50% ~ 4.24%), and the permeability was very low ($(0.0005 \sim 0.0146) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$). The reservoir spaces included crystal faces corrosion pores of crystal minerals, mineral marginal dissolution pores, organic matter dissolution pores, pyrite intergranular pores, cleavage joints by diagenesis and structural fractures. Through comprehensive analysis, the authors believed that Niutitang Formation in Baojing area of Hunan Province has good geological condition of shale gas and the fracture developed area can promote shale gas accumulation, so exploration efforts in Angdong – Zebi area in eastern Baojing County should be increased.

Key words: shale gas; Niutitang Formation; accumulation condition; depositional environment; reservoir space; Baojing County of Hunan Province

(责任编辑: 常艳)