

黔北地区石牛栏组气藏特征分析与开发展望

李刚权, 李 龙, 吴 松*, 彭安钰

贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 贵阳

Email: *1711913985@qq.com

收稿日期: 2021年4月15日; 录用日期: 2021年5月13日; 发布日期: 2021年5月20日

摘 要

下志留统石牛栏组地层在川东南-黔北地区广泛发育, 已在黔北地区多口井钻遇良好气显示。进一步分析石牛栏组气藏特征, 可为区域石牛栏组天然气开发利用提供指导。通过对石牛栏组地层岩心观察、薄片分析鉴定结合黔北地区已钻井的钻井、测井、录井以及实验分析测试资料对石牛栏组岩性特征、地球化学特征、物性特征及含气性特征进行分析总结。结果表明: 石牛栏组主要储层发育在其下段泥灰岩互层中; 储层中泥页岩虽然具有一定的有机质, 但含量低; 储层孔隙度在1.2%~2.7%之间, 平均2.1%, 渗透率平均为0.002毫达西, 属特低孔、特低渗储层, 孔隙度与渗透率呈现弱正相关关系; 石牛栏组气测显示活跃, 但相对于新滩组和龙马溪组含气性地球物理响应无明显异常, 或因含气地层纵向不稳定、厚度薄, 平面连通性差所导致; 综合分析认为研究区石牛栏组气藏与页岩气成藏特征有明显差别, 含气性可能与裂缝的发育程度有关。建议在后期勘探开发中加强石牛栏气层成藏类型和主控因素研究, 找到裂缝、孔洞发育区域并采取常规油气方式进行尝试开发, 进一步评价石牛栏组气藏开发潜力。

关键词

黔北地区, 石牛栏组, 气藏特征, 含气性

Gas Reservoir Characteristics Analysis and Development Prospects of Shiniulan Formation in Northern Guizhou Area

Gangquan Li, Long Li, Song Wu*, Anyu Peng

Guizhou Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Email: *1711913985@qq.com

Received: Apr. 15th, 2021; accepted: May 13th, 2021; published: May 20th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 李刚权, 李龙, 吴松, 彭安钰. 黔北地区石牛栏组气藏特征分析与开发展望[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(5): 635-645. DOI: 10.12677/ag.2021.115059

Abstract

The Lower Silurian Shiniulan Formation is widely developed in the southeastern Sichuan-Northern Guizhou area, and good gas indication has been seen during the drilling of many wells in the northern Guizhou area. Further analysis of the gas reservoir characteristics of the Shiniulan Formation can provide guidance for the development and utilization of the natural gas of the Shiniulan Formation in the region. Based on core observation, thin section analysis and identification of Shiniulan Formation, combined with drilling, logging, logging and experimental data, the lithology, geochemistry, physical property and gas-bearing characteristics of Shiniulan Formation are analyzed and summarized. The results show that the main reservoirs of the Shiniulan Formation are developed in the marl interbeds in the lower section; the shale in the reservoirs has a certain amount of organic matter, but the content is low; the porosity of the reservoirs is between 1.2% and 2.7%, with an average 2.1%, with an average permeability of 0.002 millidarcy, belonging to ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoirs. The porosity and permeability show a weak positive correlation; the gas survey of the Shiniulan Formation shows that it is active, but it is relatively active compared to the Xintan Formation and the Xintan Formation. There is no obvious abnormality in the gas-bearing geophysical response of the Longmaxi Formation, or the gas-bearing strata are longitudinally unstable, thin, and poor in plane connectivity; comprehensive analysis suggests that the gas reservoirs of the Shiniulan Formation in the study area have the characteristics of shale gas accumulation. The obvious difference is that the gas content may be related to the degree of fracture development. It is recommended to strengthen the study of the accumulation type and main controlling factors of the Shiniulan gas reservoir in the later exploration and development, find the cracks and cavities developed areas, and adopt conventional oil and gas methods for trial development, and further evaluate the development potential of the gas reservoir of the Shiniulan Formation.

Keywords

Northern of Guizhou Area, Shiniulan Formation, Gas Reservoir Characteristics, Gas-Bearing Properties

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

页岩气是主体上以吸附和游离状态同时赋存于具有生烃能力泥岩及页岩等地层中的天然气聚集，具有自生自储、吸附成藏、隐蔽聚集等特点[1]。从1821年美国第一口页岩气井钻成至今，页岩气发展大致可分为初始阶段、认识创新与技术突破阶段、水平钻井与水力压裂技术推广阶段及全球化发展阶段[2]。据美国能源信息署(EIA)的数据，2020年世界页岩气总产量为 $7688 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中美国页岩气产量为 $7330 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从2009年中国第一口页岩气井渝页1井钻探见到良好气显示，到威201井在上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组海相页岩中获得工业油气流，中国页岩气蓬勃发展，2020年页岩气量达到了 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，目前已经基本掌握3500米以浅的页岩气勘探开发地质评价、钻完井、储层改造和排采等配套工艺技术。借鉴北美的页岩气勘探开发经验，我国以海相页岩地层为重点勘探目标先后在四川盆地内长宁、威远、

涪陵等地区开展页岩气勘探开发,取得了突破性进展[3][4][5][6],实现了工业化生产。

在以五峰-龙马溪组为主要页岩气勘探目标的同时,其上覆地层石牛栏组有关的沉积地质和气藏特征的认识也不断深入。邓小杰[7]通过黔北地区剖面滩相灰岩的微相特征展开分析,认为石牛栏组沉积于辽阔的缓坡型碳酸盐岩台地区沉积环境,为后生动物点礁生长提供了理想的生态位。王萍等[8]通过野外地质调查及室内分析化验分析认为在石牛栏组中上段发育生物礁,受海平面升降、海水温度及构造运动的影响造成石牛栏组生物礁差异分布。安页1井首次在石牛栏组地层发现油气新层系,测试获得 $10.22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流[9],展现石牛栏组良好的勘探潜力。开始以岩心为分析对象开展天然气沉积环境及成因机制等沉积与气藏特征的研究,张鹏等[10]通过对松坎组形成条件及特征等方面研究得出石牛栏组地层由于其特殊性致使泥岩与灰岩的有机碳含量不高,但是生成的天然气由于频繁互层灰岩的遮挡而有效聚集,裂缝发育的地方或形成高产。张金川等[11]通过同位素地球化学特征、气源对比、干燥系数等方面的研究分析,认为石牛栏组气藏天然气主要来源于本层泥页岩热裂解生成。本文在前人的研究基础上,以近期在黔北地区以石牛栏组和五峰-龙马溪组为主要目的层的勘探评价中,通过对区域钻井、综合录井、电测等资料的综合研究,对石牛栏组储层特征、含气性特征展开分析,为该区域未来石牛栏组气藏勘探开发利用提供依据和参考。

2. 区域地质概况

黔北地区经多期次构造运动,燕山期构造旋回叠加改造,形成以北东-北北东向为主的褶皱。印支期以来的构造运动致使区内大面积抬升,加里东期相对稳定的扬子克拉通沉积、沉降,沉积了一套以碳酸盐岩及碎屑岩为主的海相地层[9][12]。石牛栏组地层沉积环境主要为碳酸盐浅海陆棚到生物滩及建隆起的发展过程[13]。受海平面影响,石牛栏组地层具有明显的两分性,分为上下两段(见图1),石牛栏组下段受龙马溪组晚期海平面急剧下降的影响,整个研究区主要为浅海陆棚环境,且陆源碎屑物质充足,总体沉积了一套泥质灰岩、砂质灰岩、砂质泥岩等,岩性上多为薄层;随着海平面的缓慢上升,陆源碎屑物质的影响逐渐减弱,研究区从混合沉积区逐步变成正常的海洋沉积区,生物开始繁盛,珊瑚、有孔虫等开始大量繁殖,生物碎屑滩坝开始慢慢沉积下来[14];随着生物碎屑滩的逐渐堆积,地形开始逐渐变高,形成了一个海底隆起,加之海洋环境完全适合珊瑚礁的大量繁殖,下段主要沉积一套泥灰岩互层,厚度约200 m;上段沉积一套块状灰岩互层,厚度约150 m,纵向上呈现泥岩、灰岩不等厚互层特征,结合区内测井资料,石牛栏组沉积微相进一步细分,纵向上整体表现为由浅水陆棚-斜坡-浅水陆棚过渡。

3. 储层特征

3.1. 岩性特征

通过钻井岩心及薄片观察,发现石牛栏组岩石类型多样,主要有泥岩、泥灰岩和灰岩。灰岩主要发育在石牛栏组上段,呈厚层块状,单层厚度约5~30 m,成份主要为方解石,含量约占75%~95%,泥质含量约5%~8%,泥晶结构。性硬、脆,滴稀盐酸反应有声响,反应后溶液清澈。层理发育较差,局部发育高角度裂缝和方解石脉(图2(a))。泥灰岩多呈泥晶形式混在泥质中,部分呈细小粒状。见少量泥质残留及少量石英及黄铁矿呈细小黑色粒状零散分布在岩石中(图2(b))。灰色泥岩及质灰岩主要发育在石牛栏组下段,成分以方解石为主,含量约占50%~56%,泥质约占26%~34%,泥晶结构。下段岩心显示薄互层关系明显(图2(c)),单层厚度0.2~5 m,未见明显裂缝。泥岩类主要位于石牛栏组下段,厚度较大,几米到几十米不等,矿物成为主要为石英,次为方解石和黏土矿物,镜下可见脉状—透镜状—条纹状产出(图2(d))。

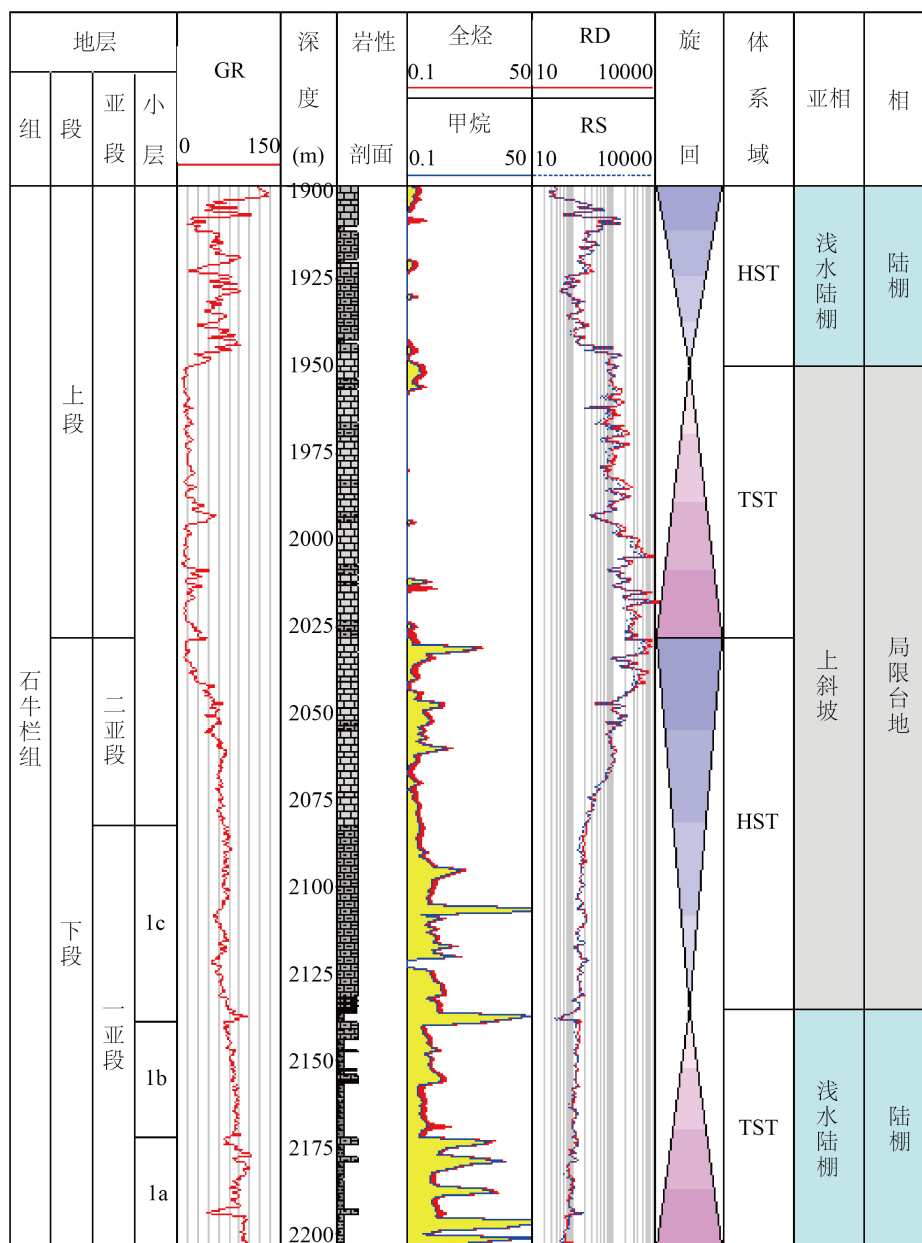
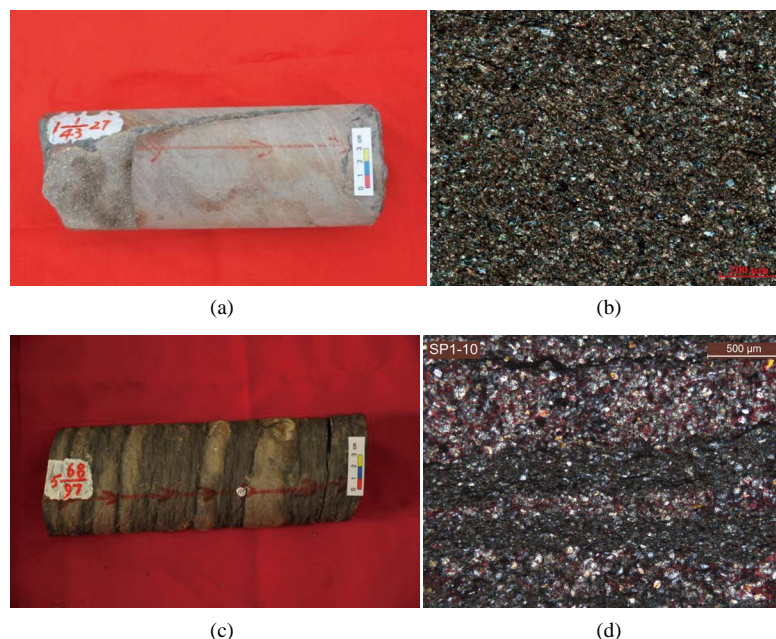


Figure 1. Comprehensive histogram of sedimentary strata of Shiniulan Formation in northern Guizhou (AY1 well)

图 1. 黔北地区石牛栏组沉积地层综合柱状图(AY1 井)

3.2. 地化特征

根据研究区石牛栏组前期研究，有研究人员认为石牛栏组天然气主要来源于下部龙马溪组地层，与上端灰岩及韩家店地层为盖层，形成常规的油气生储盖组合成藏特征[9]。有学者研究认为石牛栏组(松坎组)天然气的成藏类型与五峰-龙马溪页岩气藏类似，认为松坎组中的天然气主要为该层位泥页岩有机母质热裂解所产生的页岩气[10]。通过对正安区块钻井岩心分析化验测试结果，石牛栏组有机碳含量 0.06%~0.42%，平均 0.2%；区内测井解释有机碳含量 0.1%~1.3%，平均 0.85%。实验数据与测井解释均小于新滩组，而龙马溪组页岩有机碳含量比较高，平均 4.5% (图 3)。



(a) 浅灰色灰岩：石牛栏组上段，见高角度裂缝；(b) 泥质泥晶灰岩：晶粒粒径主要在 0.01 mm~0.03 mm 之间，石英颗粒大小在 0.02 mm~0.05 mm 之间；(c) 深灰色灰质泥岩：石牛栏组下段；(d) 钙质泥岩：见透镜状 - 层纹 - 条纹状，剖面样品，普通薄片

Figure 2. Photographs of typical cores and thin sections of the Shiniulan Formation in the study area

图 2. 研究区石牛栏组典型岩心、薄片照片

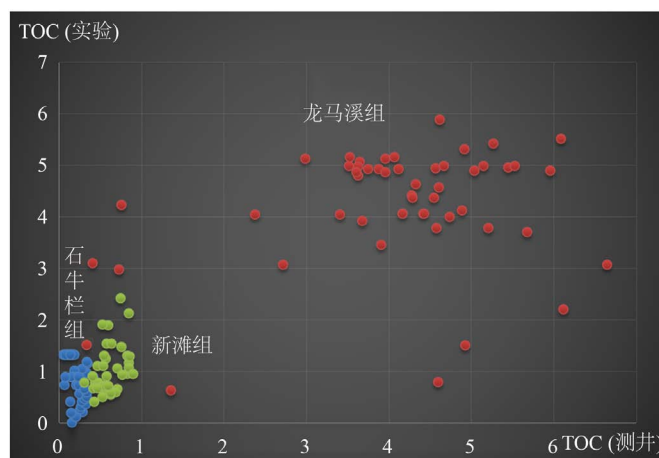


Figure 3. Convergence diagram of organic carbon content in different strata in the study area (experiment-log interpretation)

图 3. 研究区不同地层有机碳含量交会图(实验 - 测井解释)

氯仿沥青含量是用氯仿抽提出来的沥青物质，由饱和烃、芳香烃、胶质、沥青质组成，氯仿沥青的含量愈高，说明有机物质向油气转化的程度愈高[15] [16]。石牛栏组的氯仿沥青含量 0.009%~0.058%，平均 0.022%，低于区域龙马溪组的 0.067%。石牛栏组下段主要是泥灰岩互层，通过对泥岩和灰岩岩心样本数据对比，表明泥岩的有机碳含量和氯仿沥青含量均约大于灰岩，如果石牛栏组气藏类似于自生自储的页岩气藏，则主要含气层位应该是在泥岩地层中(图 4)。

通过对石牛栏组有机地球化学特征分析，有机碳含量极低，氯仿沥青含量等参数都低于五峰 - 龙马

溪组。有机地球化学反应的特征与区域沉积特征吻合，石牛栏组为一套灰色、深灰色泥岩、灰岩互层，颜色较浅，反应了弱还原的浅海沉积环境。地层中虽然具有一定的有机质，具有一定生烃能力，但由于有机质含量低，转化成油气量少，储量丰度不高，不具有像五峰-龙马溪组的勘探开发潜力。

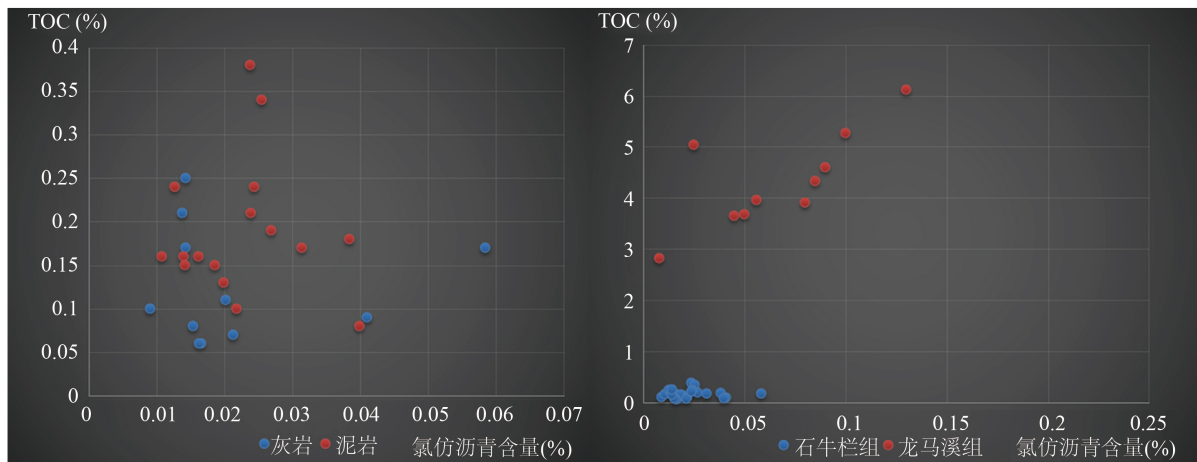


Figure 4. Intersection diagram of organic carbon content and chloroform asphalt content in the study area
图 4. 研究区有机碳含量与氯仿沥青含量交会图

3.3. 物性特征

通过黔北地区石牛栏组露头剖面 64 个样品孔隙度、渗透率数据统计(图 5 左)，所测试的石牛栏组下段样品，除个别样品外，均表现出了特低孔低渗特征，大部分样品为低孔特低渗。通过对样品的孔隙度均值-渗透率均值关系发现，孔隙度与渗透率呈现弱正相关关系，研究区泥灰岩孔隙度均值-渗透率均值最大，泥岩次之，灰岩最低。

根据钻井取心实验测试数据，参考黔北地区已钻井测井综合解释，统计发现(图 5 右)，石牛栏组上段孔隙度 0.7%~2.1%，平均 1.1%，下段储层物性相对较好，孔隙度范围为 1%~3.9%，平均孔隙度 1.9%。石牛栏组孔隙度 1.2%~2.7%，平均 2.1%。渗透率平均 0.002 毫达西，属于特低孔、特低渗储层，整体储层物性较差。

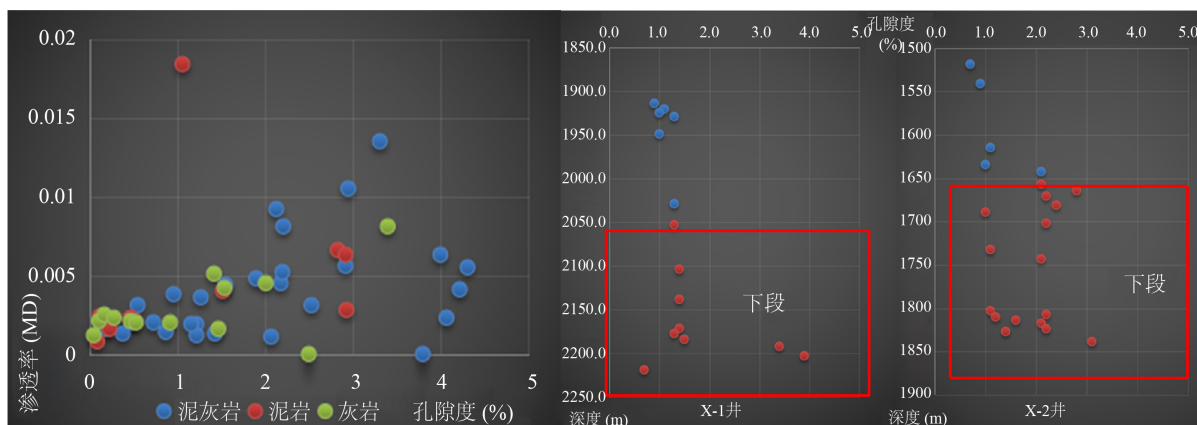


Figure 5. Physical property map of the lower part of the Shiniulan Formation in the study area
图 5. 研究区石牛栏组下段物性特征图

4. 含气性特征

石牛栏组岩心浸水试验可见多处见连续的针尖状气泡逸出，气泡升至水面破裂无声响。龙马溪组岩心见线状气泡快速冒出，间断见喷泉状、串珠状气泡逸出，并伴有“嘶嘶”声响，出气处密集分布于整个岩心表面。石牛栏组局部几处有气泡逸出，通过观察发现，气泡逸出点的岩性泥岩和灰岩都有，并没有规律性。而龙马溪组页岩气泡基本覆盖整个岩心表面，并伴有响声，证实龙马溪组含气均匀、饱满。石牛栏组可能微裂缝发育的地方，有气泡逸出，但无声响，含气饱和度差(图 6)。

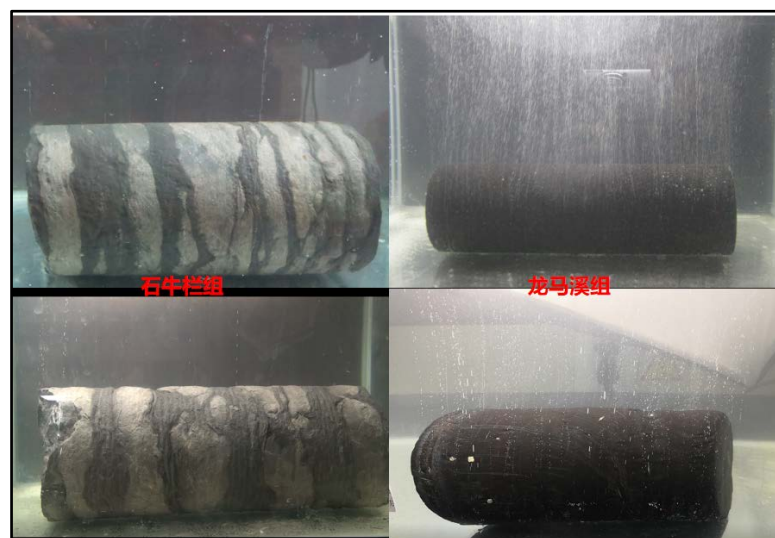


Figure 6. Comparison of core immersion tests between the Shiniulan Formation and Longmaxi Formation

图 6. 石牛栏组与龙马溪组岩心浸水试验对比图

按照 SY/T6940-2013 中华人民共和国石油天然气标准，对石牛栏组岩心进行了含气性检测。结果表明石牛栏组含气量 $0.11\sim 0.8\text{ m}^3/\text{t}$ ，平均总含气量为 $0.45\text{ m}^3/\text{t}$ 。与新滩组检测结果 $0.45\text{ m}^3/\text{t}$ 大致相当，远低于龙马溪组的 $4.1\text{ m}^3/\text{t}$ (图 7)。

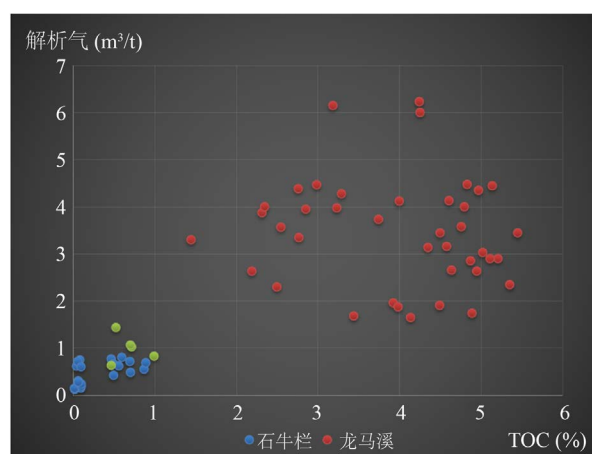


Figure 7. Intersection diagram of total analytical gas content and TOC in different strata in the study area

图 7. 研究区不同地层解析气总含量与 TOC 交会图

石牛栏组有机地球化学特征和含气性分析表明, 各项参数纵向上都低于新滩组和龙马溪组。与中国陆上页岩气有利层段/区确定条件与下限标准对比, 上述参数均达不到下限标准要求。而在实钻过程中, 与龙马溪组页岩不同, 石牛栏组气测显示活跃, 甚至出现溢流等现象, 点火火焰高度达 10 m 以上, 因此认为该套气藏不属于页岩气藏。

当储层中含有天然气时, 测井曲线常表现为声波时差(AC)变大, 补偿中子(CNL)、密度测井(DEN)值会变小, 电阻率出现相对高值的特征。特别是声波和补偿中子, 在气层发育时, 两条曲线会出现“周波跳跃”和“挖掘效应”两种现象[17]。通过对研究区石牛栏组分上段、下段结合测井资料再细分为 sh1、sh2、sh3 三个段与新滩组和龙马溪组测井声波时差与各泥质含量、含气性之间的关系统计(图 8)发现: 从上至下地层泥质含量逐渐增加, 声波时差也逐渐增大, 但是整个石牛栏组都保持相对的一致性, 而在进入新滩组和龙马溪组后, 变得比较异常, 时差跨度较大, 除本身地层原因影响外, 地层含气也是重要因素之一。特别是龙马溪组, 出现了约 5 m 的疑似“周波跳跃”现象。

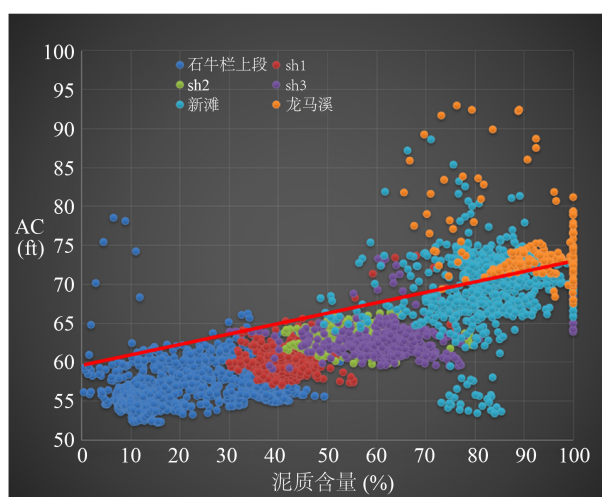


Figure 8. Intersection diagram of time difference and shale content of different formation waves in the study area

图 8. 研究区不同地层波时差与泥质含量交会图

补偿中子也会对气层出现响应异常, 出现“挖掘效应”。与饱含淡水的地层相比, 地层含有天然气时, 一部分孔隙空间的水被气代替, 不仅含氢指数减小, 而且还会造成岩石对快中子的减速能力减小, 即天然气使孔隙度中含氢指数减小并对快中子的减速能力比淡水小, 相等于挖掘了一定体积的骨架, 生成了一个负的含氢指数附加值, 这一效应称为挖掘效应[17]。通过 AC/CNL 交会图、AC/DEN 交会图(图 9)可以看到, 与龙马溪组地层相比, 石牛栏组地层未发生明显异常, 证实该段地层含气性较差, 或是由于含气地层纵向不稳定、厚度薄, 平面连通性差所导致。

利用声波时差-补偿中子对气层的相反异常响应特征, 组合两条曲线, 曲线包罗面积越大, 电阻率有增大趋势时, 地层含气量越好。通过对比, 石牛栏组下段局部地层有包罗面积, 但是电阻率增大不明显, 纵向上 sh3 相对较好, 与气测显示吻合; 而龙马溪组的包罗面积非常明显, 电阻明显变高(图 10)。

正安地区部署了一口在从 sh1 穿行至 sh3 的大角度斜井, 进行石牛栏组下段地层含气性评价。在 1200 m 长度的穿行过程中, 遇到了约 20 m 共 3 层的气测异常显示, 同样发生了溢流和点火成功的情况。但气测异常层薄, 综合测井解释结论也很差, 该井通过压裂改造后, 试气产量也比较低, 达不到工业开采价值。

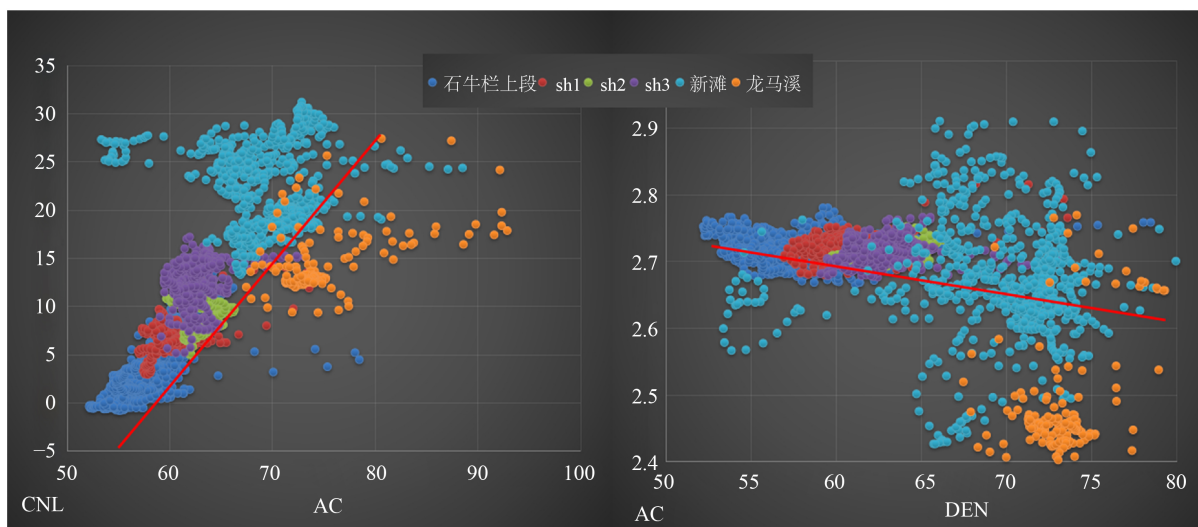


Figure 9. Intersection diagram of CNL/AC and DEN/AC of different strata in the study area
图 9. 研究区不同地层 CNL/AC、DEN/AC 交会图

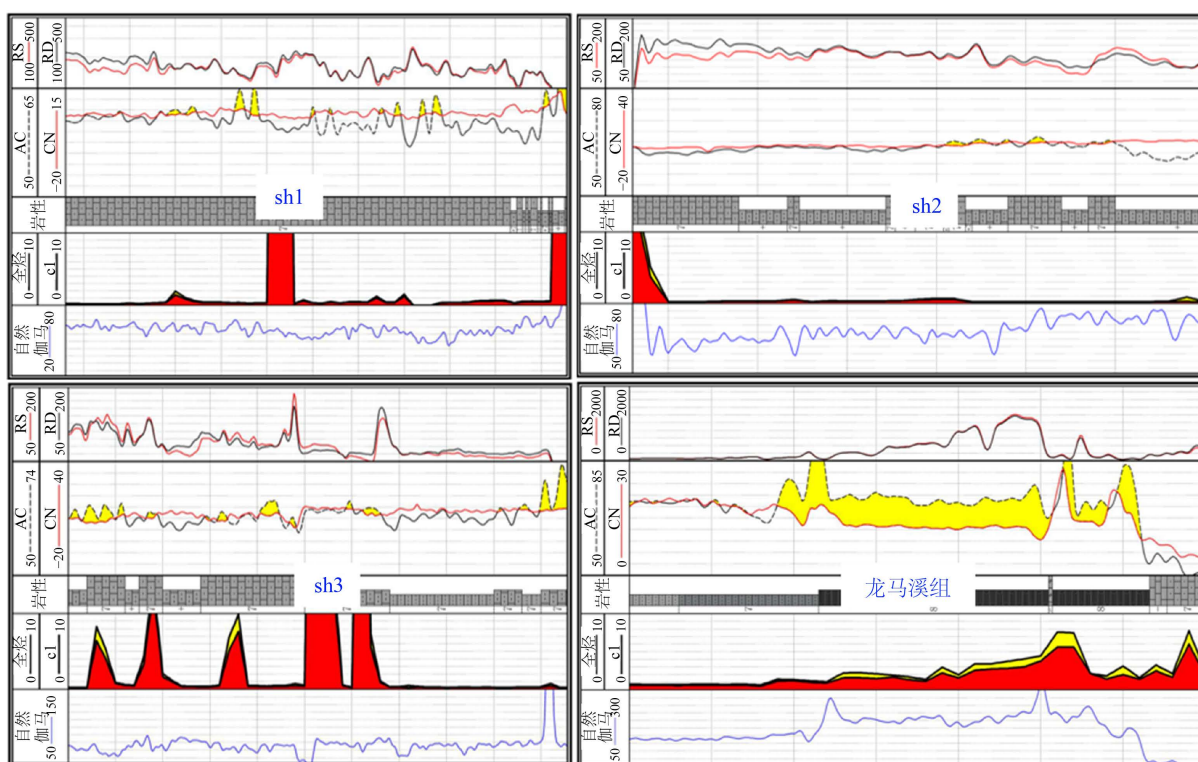


Figure 10. Electrical survey feature map of Shiniulan and Longmaxi formations in well X in the study area
图 10. 研究区 X 井石牛栏与龙马溪地层电测特征图

5. 开展展望

通过对石牛栏组基本地质情况、有机地球化学特征、物性特征以及含气性试验和综合测井响应特征分析表明石牛栏组的含气性较差，但是证实了该套地层含气，并且钻探过程中有高压显示，初期具有一定的地层能量。因此对黔北地区石牛栏组气藏的开发利用，笔者认为必须首先弄清其成藏类型和主控因

素, 从以上资料分析该套地层属于致密性的孔隙-裂缝性气藏类型, 要进行勘探开发利用, 就必须找到裂缝、孔洞发育区域, 并尝试采取常规油气方式进行开发, 可能会具有一定工业开采价值。目前对裂缝预测的手段尚不成熟, 因此笔者建议在对龙马溪组的勘探开发工程中, 在石牛栏组气测异常区, 可以利用五峰-龙马溪组层系的井位, 做一些类似于注采尝试, 进行能量补充, 评价开发潜力。

6. 结论

1) 通过岩心观察、薄片分析鉴定结合测井、录井资料分析表明石牛栏组主要储层发育在其下段泥灰岩互层中, 储层孔隙度在 1.2%~2.7% 之间, 平均 2.1%, 渗透率平均为 0.002 毫达西, 属特低孔、特低渗储层, 孔隙度与渗透率呈现弱正相关关系。

2) 基于钻探现场及有机地球化学特征证实石牛栏组具有一定的生烃能力, 但是达不到工业开采对气藏的下限要求。石牛栏组在钻遇过程中遇到溢流、全烃显示高等气层活跃的特征, 但是地层能量并不持续。

3) 测井曲线响应证实该套地层含气性很差, 与新滩组、五峰-龙马溪组含气性差异明显, 气层纵向、横向分布不连续, 平面连通性差, 气测显示活跃的地层可能是裂缝气, 但是区域大的高角度裂缝发育较少, 导致大斜井钻遇的气层厚度与直井相当。

4) 通过从钻井、储层、气藏特征, 地球物理响应等综合分析研究, 认为石牛栏组气藏特征不同于页岩气藏, 为致密性裂缝性气藏, 要进行效益开发, 加强石牛栏气层成藏类型和主控因素研究, 深入裂缝刻画技术、开发工艺的研究, 进一步评价石牛栏组气藏开发潜力。

基金项目

贵州省地勘基金项目: 黔北地区石牛栏组下段沉积环境研究及有利储集相带分析(GZMC-ZG20192014-4)。

参考文献

- [1] 张金川, 汪宗余, 聂海宽. 页岩气及其勘探研究意义[J]. 现代地质, 2008(4): 640-646.
- [2] 王淑玲, 吴西顺, 张炜, 等. 全球页岩油气勘探开发进展及发展趋势[J]. 中国矿业, 2016, 25(2): 7-11+15.
- [3] 魏力民, 王岩, 张天操, 等. 页岩气富集与高产主控因素——以川南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 700-704.
- [4] 张介辉, 徐云俊, 邹辰, 等. 浅层页岩气成藏地质条件分析——以昭通国家级页岩气示范区麟凤向斜为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(S1): 36-44.
- [5] 王志刚. 涪陵大型海相页岩气田成藏条件及高效勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(3): 370-382.
- [6] 杨跃明, 陈玉龙, 刘燊阳, 等. 四川盆地及其周缘页岩气勘探开发现状、潜力与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 42-58.
- [7] 邓小杰, 王冠, 黄勇, 等. 黔北桐梓狮溪志留纪埃隆晚期石牛栏段的生物滩相[J]. 贵州地质, 2016, 33(3): 192-198.
- [8] 王萍, 谭先锋, 陈浩, 等. 早志留世埃隆期上扬子海洋生物礁发育过程及制约机制——以渝南-黔北地区石牛栏组为例[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 623-640.
- [9] 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等. 武陵山复杂构造区古生界海相油气实现重大突破[J]. 地球学报, 2016, 37(6): 657-662+795.
- [10] 张鹏, 张金川, 雷怀玉, 等. 黔北安页 1 井区松坎组沉积环境及其对页岩气成藏的影响[J]. 资源与产业, 2018, 20(3): 34-41.
- [11] 张金川, 雷怀玉, 张福, 等. 黔北地区安页 1 井下志留统松坎组天然气成因[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 419-428.
- [12] 梅廉夫, 戴少武, 沈传波, 等. 中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J]. 地质科技情报, 2008(4): 1-7+14.

-
- [13] 张福, 黄艺, 蓝宝锋, 等. 正安地区五峰组-龙马溪组页岩储层特征及控制因素[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 49-56.
- [14] 安倩, 朱志军, 贾永斌, 等. 黔北石门坎早志留世石牛栏组碳、氧同位素特征及意义[J]. 地层学杂志, 2014, 38(3): 363-370.
- [15] B. P. 蒂索, D. H. 韦尔特, 熊寿生, 等. 原油的组成、分类及地质因素对原油组成的影响[J]. 石油地质实验, 1978(4): 50-116.
- [16] 廖泽文. 沥青质地球化学行为研究及其在石油勘探开发中的应用前景[D]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2001.
- [17] 丁次乾. 矿场地球物理[M]. 北京: 石油大学出版社, 1992: 88-97+138-153.