

黔北武陵褶皱区安场向斜页岩气储层特征分析

李 龙*, 陈显举, 彭安钰, 李刚权

贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 遵义

收稿日期: 2022年2月10日; 录用日期: 2022年3月1日; 发布日期: 2022年3月7日

摘 要

综合地质、岩心、测井等多种资料, 从岩性、电性、物性、地化特征、可压裂性分析等方面对黔北武陵褶皱区安场向斜页岩气储层特性进行了分析。结果显示研究区龙马溪组一段 - 五峰组黑色深水陆棚相碳质页岩矿物组成以石英、粘土矿物、长石、碳酸盐岩、黄铁矿为主, 具有高自然伽马、高铀、低密度、高声波时差、中高电阻率典型页岩气储层测井特征, 有机质丰富, 以腐泥型干酪根(I型)为主, 岩心有机碳含量以 $\geq 4.0\%$ 为主, 平均孔隙度以 $\geq 3.0\%$ 为主, 进入过成熟中期演化阶段, 以生成干气为主, 脆性矿物含量高, 可压裂性较好, 整体表现出“薄而富”特征。综合认为安场向斜龙一段 - 五峰组页岩气储层具有较好的页岩气资源勘探开发潜力。

关键词

页岩气, 储层特征, 龙马溪 - 五峰组, 安场向斜, 黔北

Analysis of Shale Gas Reservoir Characteristics of Anchang Syncline in Wuling Fold Area of Northern Guizhou

Long Li*, Xianju Chen, Anyu Peng, Gangquan Li

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

Received: Feb. 10th, 2022; accepted: Mar. 1st, 2022; published: Mar. 7th, 2022

Abstract

The characteristics of Anchang syncline shale gas reservoir in Wuling fold area of Northern Guizhou are analyzed from the aspects of lithology, electrical property, physical property, geochemical characteristics and fracturing analysis by combining geological, core, logging and other data. The

*第一作者。

results show that the black deep-water continental shelf carbonaceous shale in the first member of Longmaxi formation and Wufeng formation in the study area is mainly composed of quartz, clay minerals, feldspar, carbonate rock and pyrite. It has the logging characteristics of typical shale gas reservoirs with high natural gamma, high uranium, low density, high acoustic time difference, medium and high resistivity. It is rich in organic matter, mainly sapropel kerogen (type I), the organic carbon content of the core is mainly $\geq 4.0\%$, and the average porosity is mainly $\geq 3.0\%$. It has entered the medium-term evolution stage of over maturity, mainly generating dry gas. It has high content of brittle minerals and good fracturing performance, showing the characteristics of "thin and rich" as a whole. It is comprehensively considered that the shale gas reservoir of Longyi member Wufeng Formation of Anchang syncline has good exploration and development potential of shale gas resources.

Keywords

Shale Gas, Reservoir Characteristics, Longmaxi-Wufeng Formation, Anchang Syncline, Northern Guizhou

Copyright © 2022 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

近年来,随着国内页岩气勘探开发理论攻关、工程实践的逐步突破及深入,四川盆地涪陵、长宁、威远、永川、泸州等地掀起了针对龙马溪-五峰组深水陆棚相有机页岩的商业化开发高潮[1] [2] [3] [4]。黔北地区毗邻四川盆地南部,与四川盆地南部页岩气探区具有较为类似的地质背景,黔北正安地区安场向斜目前为黔北页岩气勘探开发的热点区域。

安场向斜区域构造属于中上扬子地台黔北武陵拗陷隔槽式褶皱带,为一被断层复杂化的向斜构造,属于典型的“窄陡型”向斜,区块位于涪陵气田南侧。安场向斜内整体呈现长轴长、短轴短的特征,其轴线为南西-北东向走向,总体表现为南缓北陡,北部收敛、紧闭;东翼陡峻西翼较缓的特征。向斜核部龙马溪组页岩埋深介于2500~3000 m,保存条件良好[5]。地层自向斜核部向两端抬升,总体向斜的核部和东西两翼逆断层发育,断裂集中发育在寒武系、奥陶系地层中,仅有2条断层切穿含气目的层段,未与大气连通。五峰-龙马溪组富有机质页岩发育、有机质类型好、热演化程度适中,含气页岩顶底板致密、封盖性能好,有效阻止了气体逸散,向斜翼部逆断层封挡,具备良好的页岩气、油气富集成藏条件[5] [6] [7]。前期学者已经对区域上的地质成藏条件、储层特征等进行了邻区对比和有利区带预测[8] [9] [10] [11] [12],整体上偏于宏观,对目的层段的地质及工程甜点分析相对不足,对当前工区的地应力特征亦缺少分析。随着研究区勘探的逐步深入,地质、测井、岩心、地化分析等资料更加丰富,在前人研究的基础上,从储层测井特征、地化、物性、可压裂性、现今地应力场特征等多方面对区内龙马溪组-五峰组页岩气储层进行了细致评价,明确了研究区 S_1l^2 、 S_1l^1 小层是页岩气勘探开发的地质及工程双甜点,为后期水平井部署提供了合理化建议及下一步的勘探开发指明了方向。

2. 目的层测井特征

研究区页岩气勘探目的层为五峰组-龙马溪组(O_3w-S_1l),主要为一套黑色、灰黑色碳质页岩。根据电性、岩相、有机碳含量(TOC)等资料综合考虑将龙马溪组划为两段,上部龙二段以泥质页岩为主,厚度

较大,自然伽马(GR)低,密度高,对应 S_{11}^5 小层,下部龙一段以碳质页岩为主,高 GR,高铀,低密度,中-高声波时差、中-低补偿中子、中-高电阻率,自上而下划分为 $S_{11}^4 \sim S_{11}^1$ 四个小层。

龙一段 S_{11}^1 小层以黑色碳质页岩为主,GR 极高 > 280 API,有机碳含量高,密度低值; S_{11}^2 小层黑色碳质页岩为主,GR 高 > 150 API,密度向下部地层呈持续降低的趋势; S_{11}^3 小层碳质页岩为主,GR 高 > 180 API,有机碳含量较高,密度低值; S_{11}^4 小层主要泥质页岩及碳质页岩为主,GR 极高 > 230 API,KTH 由高变低,有机碳含量显著高于 S_{11}^5 ,低于 S_{11}^1 、 S_{11}^2 、 S_{11}^3 ,密度较 S_{11}^5 显著降低。

五峰组岩性为黑色碳质泥岩,顶部发育观音桥段 0.2~0.4 m 灰色泥质灰岩夹层,下部宝塔组岩性为灰色灰岩,岩性组合特征差异明显。顶部观音桥段地层表现为低 GR,密度高尖、声波时差低尖;下部为宝塔组致密灰岩,GR 在界面点突变,整体 GR 值低,在区域上具有较强的可对比性(图 1)。

研究区五峰组-龙马溪组整体钻厚 37~47 m,特征上基本对应了焦页 1 井①~⑧小层(钻厚 77.6 m),主力气层段五峰组+龙一段(钻厚 17~24 m)对应焦页 1 井①~⑥小层(钻厚 47.8 m) [13]。与涪陵页岩气田相比,研究区目的层段、主力气层段厚度较薄。

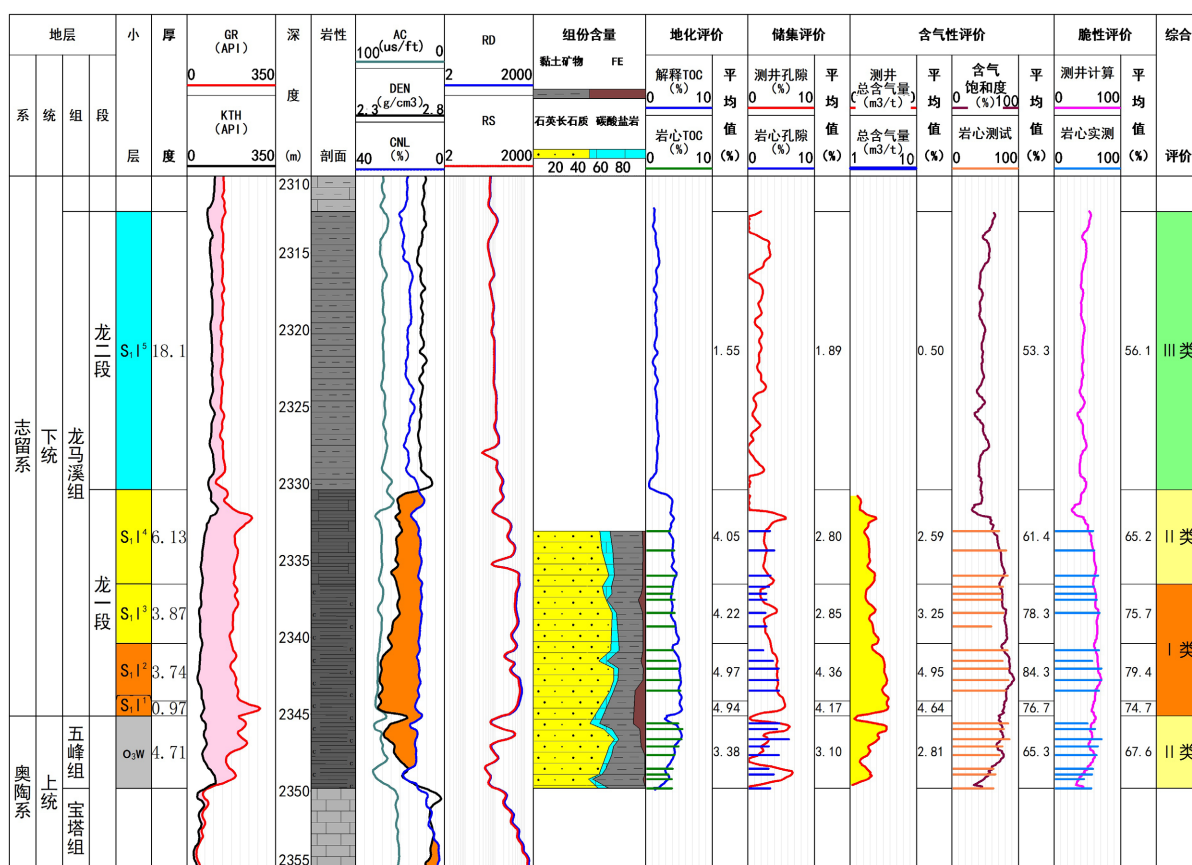


Figure 1. Comprehensive evaluation of well Anye X-6 Wufeng formation Longmaxi formation

图 1. 安页 X-6 井五峰组-龙马溪组综合评价图

3. 地化特征

研究区五峰组-龙一段为深水陆棚沉积环境,龙二段为浅水陆棚沉积环境[5] [13]。志留纪时期,研究区主体处于浅海沉积环境,生物以水生生物为主,具有大量的浮游生物和菌藻类,尤以笔石占绝对优势,局部有放射虫和硅质海绵骨针,有机质类型以腐泥型干酪根为主。安页 X2 井龙马溪组干酪根镜检

分析结果显示有机质以腐泥无定形体为主, 含少量底栖藻无定形体, 有机质类型指数为 92.5 和 92.8, 均为 I 型干酪根(图 2), 个别样品为 II₁ 型[9] [10]。焦页 1 井干酪根以藻类体和棉絮状腐泥无定型体为主, 有机质类型指数为 92.84~100, 为 I 型干酪根。

安页 X2、X3 井五峰组 - 龙马溪组分别测定了 6 块和 8 块样品沥青质反射率, 经换算镜质体反射率 (Ro) 分别为 2.87% 和 2.91%, 表明五峰组 - 龙马溪组页岩进入过成熟中期演化阶段, 以生干气为主。焦页 1 井 9 块岩心 Ro 为 2.2%~3.13%, 处于过成熟演化阶段, 以生干气为主[14]。

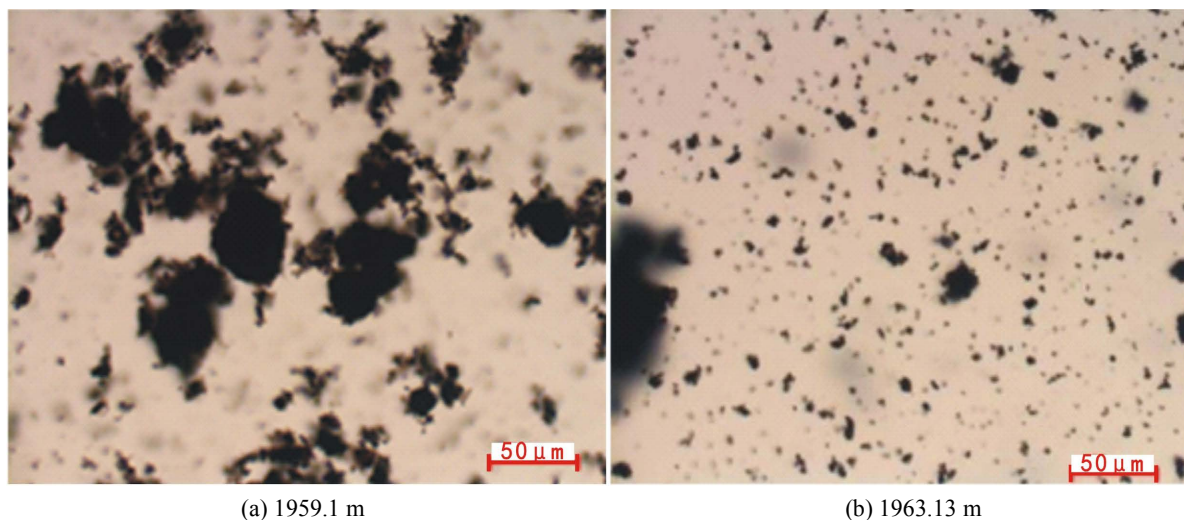


Figure 2. Analysis photo of kerogen macerals in well Anye X2
图 2. 安页 X2 井干酪根显微组分分析照片

安页 X-6 井目的层段(五峰组 - 龙一段)有机碳最小为 3.42%, 最大 5.39%, 平均为 4.36% (图 1)。区内 5 口井 79 块岩心 TOC 含量为 0.34%~5.96%, 平均 3.70%, 自下而上总体呈先增大后减小的趋势。纵向上 S₁² 小层有机质丰度最高, 平均 TOC 含量为 5.04%; 五峰组、S₁¹、S₁³ 和 S₁⁴ 小层平均 TOC 含量分别 3.88%、4.94%、4.03% 和 3.25%。从直方图可以看出, TOC 以 ≥4% 为主, 约占总样品数的 54%; 其次是 2%~4%, 约占总样品数的 28% (图 3)。焦页 1 井龙一段 - 五峰组岩心有机碳含量 0.55%~5.89%, 平均 3.08%。

对比发现, 研究区有机质类型、成熟度与涪陵页岩气田类似, 有机碳含量略高, TOC ≥ 3% 的连续储层段厚度薄, 以安页 X-6 井为例, 该井五峰组 - 龙一段厚度 15 m, 明显低于焦页 1 井①~⑤小层的约 38 m, 整体特征表现为“薄而富”。

4. 物性特征

扫描电镜分析显示正安向斜龙马溪 - 五峰组页岩储集空间主要为有机质孔、粒间孔、粒内孔、次生溶蚀孔和微裂缝等, 其中有机质孔主要为纳米孔, 平面上常为似蜂窝状的不规则椭圆形, 是对储集空间贡献最大[9] [15]。根据五峰 - 龙马溪组 6 口取心井物性样品分析统计结果表明, 孔隙度整体介于 1.08%~5.76%, 平均孔隙度为 3.46%, 主要分布在 2%~4%, 占比 68.18% (图 3)。焦页 1 井龙一段 - 五峰组 180 块岩心孔隙度介于 1.17%~7.98%, 平均 4.61%, 孔隙度普遍 ≥ 4%, 研究区孔隙度相比偏低。

经过岩心孔隙度标定, 测井解释正安区块上龙一段 - 五峰组平均孔隙度为 3.21%。正安区块纵向上龙一段孔隙度整体相当, 五峰组呈现上低下高的趋势, 其中五峰 - 龙一段孔隙度介于 2.64%~3.61% 之间, 均值 3.17%, 总体来看, 位于向斜东南翼部安页 X5 井、西翼的 X2 井孔隙度略低, 中 - 北区近向斜核部的安页 X3、X4、X-6 井孔隙度略高(图 4)。

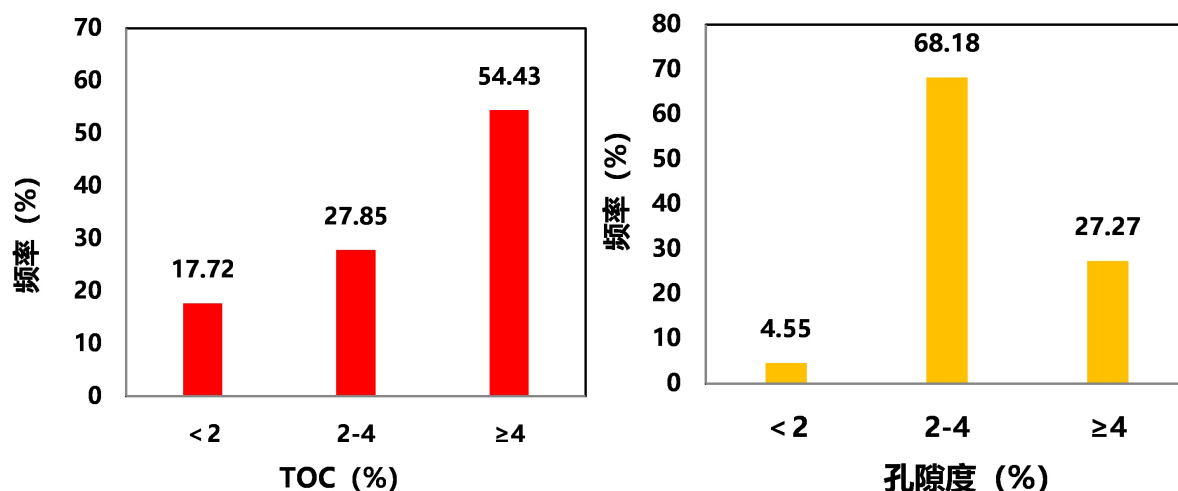


Figure 3. Measured TOC and porosity histogram of Longmaxi formation I and Wufeng formation of Anchang syncline
图 3. 安场向斜龙马溪组一段 - 五峰组实测 TOC、孔隙度频率分布图

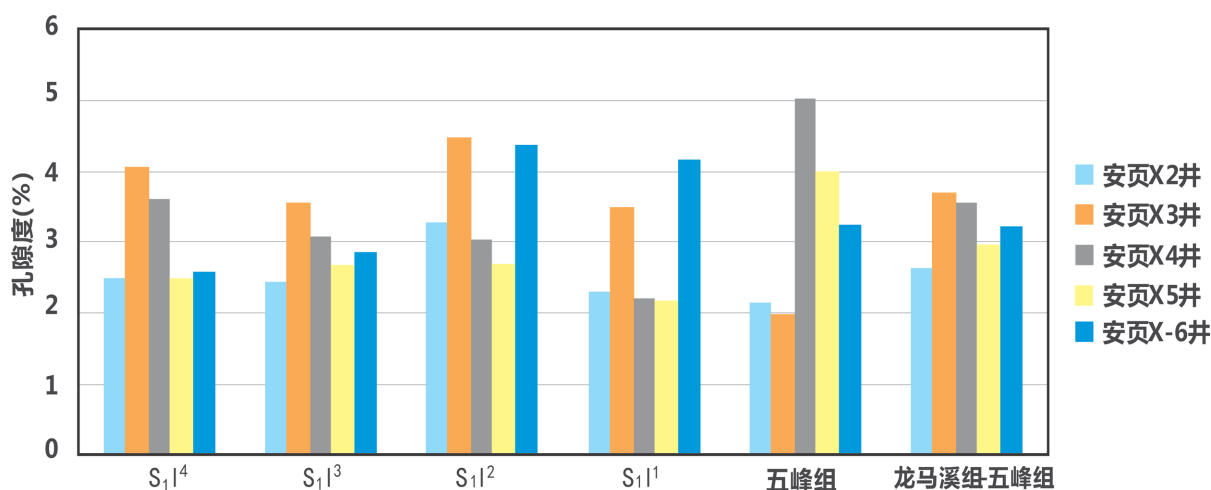


Figure 4. Histogram of logging interpretation porosity of Longmaxi-Wufeng formation in Anchang syncline
图 4. 安场向斜龙马溪 - 五峰组测井解释孔隙度分小层统计直方图

5. 含气性特征

研究区 5 口井五峰 - 龙一段进行了取心及现场解吸气量测定。含气页岩段解吸气量主要分布在 0.7~3.1 m³/t 之间, 平均为 1.54 m³/t, 以安页 X1 井为例, 该井五峰 - 龙马溪组岩心浸水试验, 现场解析含气量最高 2.36 m³/t, 总含气量高达 6.49 m³/t [10]。现场解释气量整体上略弱于涪陵焦石坝页岩气田。

五峰组 - 龙一段碳质页岩实测总体含气饱和度较高, 含气饱和度主要分布于 50%~80% 区间内, 占总样品数的 75%。以安页 X-6 井为例, 该井含气页岩段岩心实测含气饱和度 62%~86.2%, 平均 74.9%。

6. 可压性分析

安页 X2 井 12 块全岩 X 衍射和 8 块粘土 X 衍射实验数据显示研究区五峰 - 龙马溪组页岩矿物主要包含了石英、粘土矿物、长石、碳酸盐岩、黄铁矿等。安页 X3 井的全岩 X 衍射实验数据分析, 硅质矿物(石英 + 长石)含量 45.5%~76.4%, 平均 63.2%, 五峰组相对较低。粘土矿物含量介于 17.1%~45.8%, 平均为 27.3%, 五峰组较高, 粘土矿物中主要为伊蒙混层其次为伊利石、绿泥石。

研究区龙马溪组硅质矿物含量纵向上具有自上向下逐渐增高,至五峰组降低回落的特征。 $S_1^1 \sim S_1^2$ 小层脆性矿物含量 64.1%~72.1%,平面展布稳定,页岩脆性条件优越,与邻区涪陵常压区脆性矿物含量相当。

7. 应力场特征

研究区现今最大主应力方向为南东东-北西西向,最大主应力方向与向斜走向近于垂直。以安页 X-6 井为例,电成像测井显示该井石牛栏组和新滩组井眼崩落现象明显,通过统计其井眼崩落方位为近南北向,与之垂直的方向即为最大主应力方向,方向为 $105^\circ \pm 5^\circ$ 。石牛栏组和宝塔组诱导缝明显发育,其走向方向为最大主应力方向,方向为 $100^\circ \pm 10^\circ$ 。测量井段内诱导缝和井眼崩落方向基本一致,最大主应力方向为南东东-北西西向,角度为 105° 左右(图 5)。

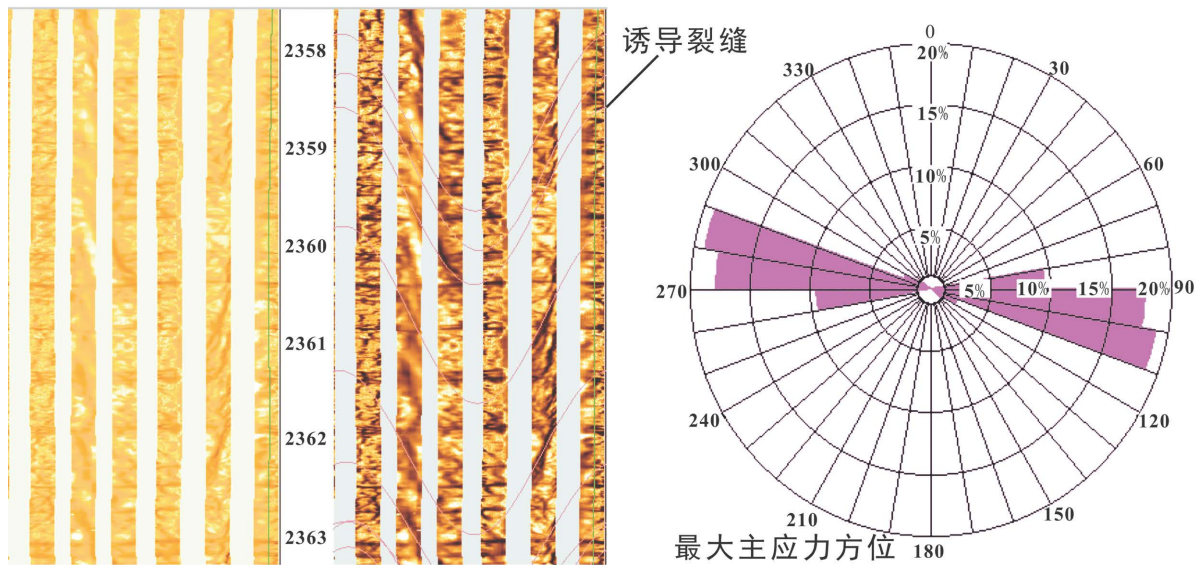


Figure 5. Electrical imaging identification diagram of induced fracture and rose diagram of maximum principal stress direction in Baota formation of well Anye X-6

图 5. 安页 X-6 井宝塔组诱导缝电成像识别图及最大主应力方向玫瑰图

安页 X2 井、X3 井、X4 井、X5 井地应力大小测试结果显示,研究区内最小水平主应力为 36.8~63.1 Mpa,平均值为 50.0 Mpa;最大水平主应力为 45.8~80.8 Mpa,平均值为 65.2 Mpa。水平地应力差异系数在 0.25~0.36 之间,趋向斜核部应力差有增大的趋势,不利于形成复杂裂缝或复杂缝网。

Table 1. *In-situ* stress test results of shale in Wufeng and Longmaxi formation of Anchang syncline

表 1. 安场向斜五峰组-龙马溪组页岩地应力大小测试结果表

井号	井深均值(m)	最大水平主应力(MPa)	最小水平主应力(MPa)	应力差(MPa)	差异系数%
安页 X2 井	1966.41	45.84	36.82	9.02	24.5
安页 X3 井	2477.43	64.96	47.95	17.01	35.47
安页 X3 井	2486.07	71.39	55.82	15.57	27.89
安页 X4 井	2998.37	73.73	55.08	18.65	33.86
安页 X4 井	2998.96	80.84	63.08	17.76	28.15
安页 X5 井	2275.65	54.66	41.07	13.59	33.09
平均		65.2	50.0	15.3	30.49

8. 结论

1) 对比分析表明, 研究区龙一段 - 五峰组页岩气储层有机质类型、演化程度与涪陵页岩气田类似, TOC 以 $\geq 4\%$ 为主, 略高于涪陵地区, 含气量与孔隙度略低, 整体“薄而富”, 具备较好开发潜力。

2) 研究区龙一段 S_1I^2 与 S_1I^1 小层页岩气储层品质最优, 具备了地质及工程的双“甜点”特征。后期水平井可设计穿行在 S_1I^2 小层下部, 利于提高水平井产量, 同时页岩高伽马特征便于水平井跟踪、井轨迹控制。

3) 研究区向斜核部页岩气储层品质好于翼部, 但往核部地页岩现今地应力差有增大趋势, 不利于复杂缝网形成, 在后续水平井压裂改造时须根据实际地质工程条件进行压裂参数的优选调整, 促使储层体积改造达到最优效果。

基金项目

贵州省地勘基金项目(GZMC-ZG20192014-4)。

参考文献

- [1] 张素荣, 董大忠, 廖群山, 等. 四川盆地南部深层海相页岩气地质特征及资源前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(9): 35-45.
- [2] 董大忠, 施振生, 管全中, 等. 四川盆地五峰组 - 龙马溪组页岩气勘探进展、挑战与前景[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 67-76.
- [3] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 481-491.
- [4] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组 - 龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 193-201.
- [5] 雷子慧, 赵安坤, 余谦, 等. 贵州北部安场向斜下志留统龙马溪组页岩气保存条件[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 121-127.
- [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.
- [7] 郭世钊, 郭建华, 刘辰生, 等. 黔北地区志留系下统龙马溪组页岩气成藏潜力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 1973-1980.
- [8] 刘治成, 李红俊, 张喜, 等. 川南 - 黔北地区下志留统龙马溪组沉积相展布及演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(3): 436-445.
- [9] 张福, 黄艺, 戴岑璞, 等. 黔北地区五峰组 - 龙马溪组页岩储层特征分析[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(3): 94-101.
- [10] 谷阳, 徐晟, 徐佳佳, 等. 黔北地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 断块油气田, 2021, 28(1): 33-39.
- [11] 何永忠, 向坤鹏, 安亚运, 等. 黔北正安地区五峰组 - 龙马溪组页岩气地质特征及有利区预测[J]. 中国地质调查, 2020, 7(3): 21-29.
- [12] 赵瞻, 李嵘, 冯伟明, 等. 滇黔北地区五峰组 - 龙马溪组页岩气富集条件及有利区预测[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 26-34.
- [13] 魏祥峰, 刘珠江, 王强, 等. 川东南丁山与焦石坝地区五峰组 - 龙马溪组页岩气富集条件差异分析与思考[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(8): 1041-1051.
- [14] 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): 926-953.
- [15] 魏红霞. 黔北武陵山地区安场向斜天然气储集条件[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2018.