

涪陵页岩气储层产气性评价方法

廖勇¹, 谭判¹, 石文睿^{2,3}, 冯爱国¹, 何浩然¹

(1. 中石化江汉石油工程有限公司测录井公司, 湖北潜江 433123; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500; 3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500)

摘要: 为了准确评价页岩气储层的产气性, 基于涪陵页岩气产气测试资料分析, 优选出影响页岩气储层产气性的关键参数, 将其分为页岩气产气影响因子 GPF 和储层评价指数 LEI 两类, 建立了以评价参数赋分标准为约束条件的页岩气储层 GPF-LEI 产气性评价方法。涪陵页岩气田的应用结果表明: 页岩气储层产气性评价类别越好, 测试的无阻流量越高; 利用该方法预测的页岩气储层无阻流量与实际测试结果基本吻合, 相对误差为 15.5%。研究表明, 利用该方法评价的页岩气储层产气性类别与无阻流量具有较好的相关性, 为评价页岩气储层产气性提供了一种新方法。

关键词: 页岩气; 产气性; 产气影响因子; 储层评价指数; 评价方法; 涪陵页岩气田

中图分类号: TE32⁺8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2018)05-0069-07

An Evaluation Method for Gas Production Property for Shale Gas Reservoirs in the Fuling Area

LIAO Yong¹, TAN Pan¹, SHI Wenrui^{2,3}, FENG Aiguo¹, HE Haoran¹

(1. Logging Company, Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Qianjiang, Hubei, 433123, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the gas production property of shale gas reservoirs, the key parameters affecting the gas production in shale gas reservoir were selected based on the analysis of the gas production test data of the Fuling Shale Gas Field, and further divided into both the shale gas production factor GPF and the reservoir evaluation index LEI. They formed the basis by which the GPF-LEI gas production property evaluation method for shale gas reservoir was established by taking the evaluation parameter scoring standard as the constraint condition. The site verification in the Fuling Shale Gas Field showed that the better the kind of gas production evaluation category, the higher the open flow capacity. The open flow capacity of shale gas reservoir predicted by this method basically matches with actual test results, and the relative error is 15.5%. Research results indicated that the gas production category of shale gas reservoir evaluated by this method had a good correlation with open flow capacity, and provided a new method for evaluating the gas production property in shale gas reservoirs.

Key words: shale gas; gas production property; gas production influence factor; reservoir evaluation index; evaluation method; Fuling Shale Gas Field

页岩气是指赋存于页岩及其夹层中、以吸附和游离状态为主要存在方式的烃类气体^[1-4]。由于页岩气储层具有特低孔低渗、非均质性强等特点^[5-6], 造成了测录井评价结果与实际页岩气储层产气性有差异。金之钧等人^[7]研究了川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素, 指出页岩气具有“五性一体”双甜点特征; 郭彤楼等人^[8]对焦石坝

收稿日期: 2018-03-23; **改回日期:** 2018-07-12。

作者简介: 廖勇(1969—), 男, 湖北武汉人, 1991年毕业于江汉石油学院电子工程专业, 2013年获中国石油大学(北京)石油工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事测录井技术研究。E-mail: liaoy.osjh@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号: 2016ZX05038-006)和中国石化集团科技攻关项目“涪陵页岩气双优储层耦合规律研究及应用”(编号: JP17033)部分研究内容。

地区页岩气富集高产模式进行了研究;梁兴等人^[9]进行了中国南方复杂山地页岩气选区评价指标体系研究,提出了页岩气评价十大指标;徐兵祥等人^[10]根据储层含气量、页岩气渗流机理和储层压裂改造特征等建立了产量预测模型。综上所述,国内外学者在页岩气高产富集模式、评价指标和产能预测等方面进行了深入的研究,对页岩储层自身品质认识较深,但对影响页岩气产气性地质条件的分析较少,且缺少评价页岩气储层产气性的方法,因此有必要建立基于页岩气储层自身品质和其他地质因素影响的页岩气储层产气性评价方法。

笔者以测录井资料为基础,通过研究测试结果与试验数据,分析了页岩气储层的测录井参数和其他地质因素对页岩气储层产气性的影响,优选评价参数,建立了以评价参数赋分标准为约束的页岩气储层产气性评价方法,并对涪陵地区页岩气储层的产气性进行了评价。

1 评价思路

涪陵页岩气田所处构造隶属于川东褶皱带,位于万县复向斜南部与方斗山背斜带西侧的交汇区域^[11]。研究区在晚奥陶世五峰组—早志留世龙马溪组时期主要为浅海陆棚沉积,先后沉积了2套比较稳定的、富有机质的页岩。

深入分析涪陵焦石坝地区40余口页岩气井产气剖面认为,同一构造上页岩气储层的产气性具有一定规律,主要表现为受储层自身品质和地质条件的双重控制。为此,结合前人对页岩气产气评价参数的研究成果^[12],优选出产气性评价参数,建立产气性评价参数赋分标准,运用灰度关联理论确定各参数权重。将影响页岩气储层产气性的测录井评价参数归为页岩气储层评价指数LEI类,将影响页岩气储层产气性的其他地质因素归为页岩气产气影响因子GPF类,分别计算页岩气产气影响因子GPF和页岩气储层评价指数LEI分值,建立评价图版,进行各层段产气性评价。

2 评价方法

结合页岩气储层甜点评价的研究成果^[13-15]和页岩气储层产气测试分析结果,优选出涪陵页岩气储层产气性评价参数,并将其分为页岩气储层评价参数和页岩气产气影响评价参数2类。

2.1 页岩气储层评价参数

在常规油气藏储层评价参数密度、补偿中子、孔隙度及泥质含量的基础上,引入了总有机碳含量和生物成因硅质含量作为页岩气储层评价参数。

密度反映地层总孔隙度的大小,由于有机质密度较小,密度反映明显。补偿中子反映地层含氢量,因此对含气页岩储层具有较强的敏感性。泥质含量影响页岩气储层的储集特性,同时影响测井各项解释参数;孔隙度主要反映页岩储层孔隙的大小,同时间接反映储层的孔隙特征和渗透能力。总有机碳含量作为有机质丰度评价的重要指标,能够衡量烃源岩的生烃强度和生烃量,是评价页岩气储层的关键参数。生物成因硅质含量与页岩微观孔隙和页岩气产量存在着较好的相关性,生物成因硅质对硅质页岩的形成有明显贡献,而且生物来源硅对硅质页岩孔隙的发育和岩石的压裂性质有重要影响,由于存在这样的耦合关系,生物成因硅质含量成为页岩气储层评价的一个重要参数。因此,选取密度、中子、孔隙度、泥质含量、总有机碳含量及生物成因硅质含量作为页岩气储层评价参数。

2.2 页岩气产气影响评价参数

研究发现,页岩气储层产气性影响因素主要包括页岩气储层岩性非均质性、烃对比系数、地层压力系数、储层埋深和脆性指数。

2.2.1 储层岩性非均质性

储层非均质性主要包括岩性和物性2个方面,研究发现,储层岩性非均质性对页岩气储层产气性的影响主要表现为页岩储层的纵向非均质性越强,储层的压裂改造效果越差,影响页岩气纵向渗流。因此,引入能反映储层岩性变化的去铀自然伽马的标准差作为储层岩性非均质性系数,表示页岩气储层每段去铀自然伽马偏离均值的程度,评价储层岩性的非均质性。其计算公式为:

$$\sigma_{KTh} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [q(KTh)_i - q(KTh)_a]^2} \quad (1)$$

式中: σ_{KTh} 为去铀自然伽马的标准差,API;N为自由度; $q(KTh)_i$ 为第*i*个去铀自然伽马值,API; $q(KTh)_a$ 为去铀自然伽马值的算术数平均值,API。

2.2.2 烃对比系数

烃对比系数为目的层全烃或甲烷异常显示值与

非目的层段基值的比^[16],能准确反映地层含烃量的变化,同时间接反映储层压力的高低。

2.2.3 地层压力系数

页岩气井单井产能与地层压力系数存在明显的强正相关关系^[17](见图 1),同时地层压力系数在一定程度上能够反映页岩气的保存条件,压力系数越高,储层保存页岩气的条件越好。储层压力系数越高,越有利于储层微裂缝发育,也越有利于储层压裂改造。

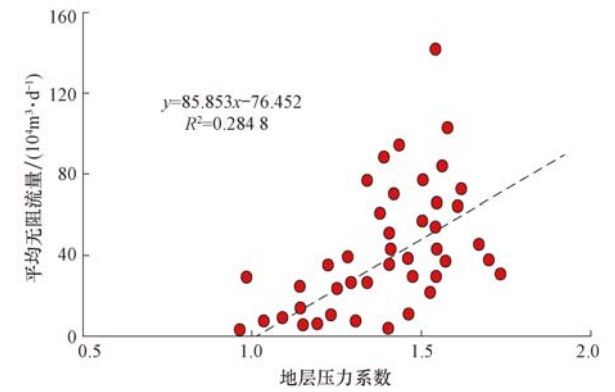


图 1 地层压力系数与无阻流量的关系

Fig. 1 Relationship between formation pressure coefficient and open flow capacity

2.2.4 储层埋藏深度

页岩储层埋藏深度(简称埋深)与储层评价参数有着密切的关系,直接影响页岩气的聚集和生产。埋深增加,上覆岩层压力增大,页岩裂隙闭合,渗透率降低,产气量降低^[18]。

2.2.5 脆性指数

实践表明,页岩储层的脆性指数对储层压裂改

造至关重要。当其他条件相同、脆性指数不同时,人工裂缝形态不同,可见脆性指数直接影响储层压裂改造的效果,间接影响储层的产气性(见图 2)。

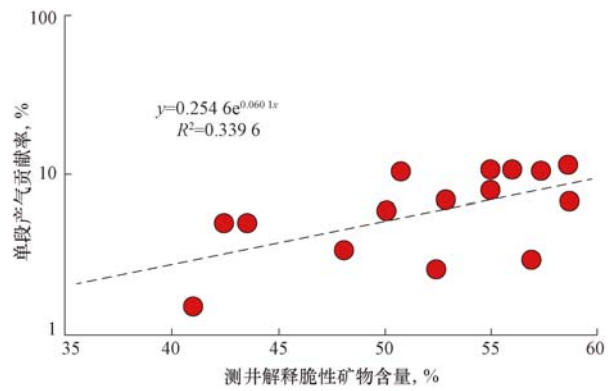


图 2 脆性矿物含量与产气贡献率的关系

Fig. 2 Relationship between the content of brittle minerals and gas production contribution rate

脆性指数计算公式为：

$$I_{br} = \frac{V_{Si} + V_C}{V_{Si} + V_C + V_{Th}} \times 100\%$$
 (2)

式中： I_{br} 为储层脆性指数； V_{Si} 为储层长英质矿物含量； V_C 为储层碳酸盐岩矿物含量； V_{Th} 为储层黏土矿物含量。

2.3 建立页岩气储层产气性评价赋分标准

根据研究区内页岩气储层划分标准,将页岩气产气影响因子 GPF 和页岩气储层评价指数 LEI 按照 0~1 的范围等分为 4 个赋分区间。将影响页岩气产气的参数和页岩气储层评价参数与分段产气剖测试结果相结合进行数理统计后,确定了页岩气产气影响因子和页岩气储层评价指数的赋分标准(见表 1 和表 2)。

表 1 页岩气产气影响因子 GPF 赋分标准

Table 1 The parameters assignment criterion of shale gas production influence factor GPF

分值区间	岩性非均质性系数	烃对比系数, %	地层压力系数	储层埋深/m	脆性指数, %
(1.00~0.75]	≤8	≥10	≥1.5	≤2 800	≥60
(0.75~0.50]	(8~15]	(10~5]	(1.5~1.2]	(2 800~3 500]	(60~40]
(0.50~0.25]	(15~30]	(5~3]	(1.2~1.0]	(3 500~4 500]	(40~30]
(0.25~0)	>30	<3	<1.0	>4 500	<30

表 2 页岩气储层评价指数 LEI 赋分标准

Table 2 The parameters assignment criterion of shale gas reservoir evaluation index LEI

分值区间	密度/(g·cm ⁻³)	总有机碳含量, %	孔隙度, %	补偿中子, %	泥质含量, %	生物成因硅质含量, %
(1.00~0.75]	≤2.50	≥4	≥5	≤12	≤40	≥30
(0.75~0.5]	(2.50~2.60]	(4~2]	(5.0~3.5]	(12~15]	(40~45]	(30~15]
(0.50~0.25]	(2.60~2.68]	(2~1]	(3.5~2.5]	(15~18]	(45~50]	(15~5]
(0.25~0)	>2.68	<1	<2.5	>18	>50	<5

2.4 建立评价图版

2.4.1 确定页岩气产气影响因子 GPF 及页岩气储层评价指数 LEI 分值

页岩气产气影响因子 GPF 分值是根据储层产气性评价参数赋分标准,分别对岩性非均质性系数、烃对比系数、地层压力系数、储层埋深和脆性指数赋以分值,然后将各参数分值乘以权重后求和,得到产气影响因子 GPF 分值。

页岩气储层评价指数 LEI 分值是根据储层产气性评价参数赋分标准,分别赋以密度、总有机碳含量、孔隙度、补偿中子、泥质含量和生物成因硅质含量分值,然后将各参数分值乘以权重后求和,得到页岩气储层评价指数 LEI 分值。

参数对应权重计算方法是采用灰色关联度^[19]对各个参数进行科学赋值,从而确定参数权重。具体计算方法为:

1) 确定所有 m 个评价层段组 and 所有 n 个评价参数,组成一个 $m \times n$ 的关联矩阵 E 。

2) 对原始数据矩阵进行初值化变换或进行均值化变换。确定每列中最大序列值为 1,其他序列值与最大序列值相除变为小于 1 的数值;然后将极

性不一致的数据转化为极性一致的数据,再计算评价对象下的比较序列与参考序列之间的差序列及其极值。各因素的关联度计算公式为:

$$r_j = \frac{1}{m} \sum \frac{k_{\min} + 0.5k_{\max}}{\Delta k + 0.5k_{\max}} \quad (3)$$

式中: r_j 为第 j 个参数的关联度; m 为评价层段数; k_{\min} 为两极最小差; k_{\max} 为两极最大差; Δk 为绝对差。

3) 对关联度进行归一化处理,得权重集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。其中 a_j 的计算公式为:

$$a_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^n r_j} \quad (4)$$

式中: a_i 为第 j 个参数的权重。

根据涪陵页岩气田实际获得的页岩气地质数据,选取 6 段页岩气层段,获取相关参数(见表 3 和表 4)。按照上述方法求得页岩气产气影响因子 GPF 的评价参数岩性非均质性系数、烃对比系数、地层压力系数、储层埋深和脆性指数的权重依次为 0.172, 0.212, 0.212, 0.198 和 0.206;页岩气储层评价指数 LEI 的评价参数密度、总有机碳含量、孔隙度、补偿中子、泥质含量和生物成因硅质含量的权重依次为 0.165, 0.164, 0.174, 0.164, 0.169 和 0.164。

表 3 页岩气储层产气影响因子 GPF 参数统计结果

Table 3 Parametric statistics of shale gas production influence factor GPF

层段	产气量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	岩性非均质性系数	烃对比系数, %	地层压力系数	储层埋深/m	脆性指数, %
1	34 900	6.2	8.0	1.55	2 420.00	75.0
2	59 800	9.2	14.5	1.45	2 550.00	60.2
3	3 309	20.5	5.6	1.22	2 850.00	69.1
4	16 687	14.3	18.8	1.42	2 630.00	70.4
5	146 355	7.4	14.8	1.45	2 468.00	66.3
6	1 042	20.7	8.5	1.35	4 005.00	69.8

表 4 页岩气储层评价指数 LEI 参数统计结果

Table 4 Parametric statistics of shale gas reservoir evaluation index LEI

层段	产气量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	补偿中子, %	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	泥质含量, %	生物成因硅质含量, %	总有机碳含量, %
1	34 900	14.7	2.60	30.0	33.4	3.2
2	59 800	10.9	2.54	41.8	45.7	4.0
3	3 309	15.4	2.60	32.1	32.5	3.2
4	16 687	11.6	2.57	31.5	60.6	4.8
5	146 355	10.5	2.46	35.7	59.3	5.2
6	1 042	14.8	2.59	31.2	35.4	3.5

2.4.2 建立 GPF-LEI 评价图版

根据涪陵地区页岩气储层评价分类赋分标准,将页岩气储层产气性类别划分为4个类别区间:I类为优质页岩气储层,区间值为GPF、LEI分值均大于等于0.75,该类层段压裂试气有望获得相对较高的工业气流;II类为中等页岩气储层,区间值为GPF、LEI分值均大于等于0.50、且小于0.75,该类层段压裂试气有望获得中等产量;III类为低等页岩气储层,区间值为GPF、LEI分值均大于等于0.25、且小于0.50,该类层段压裂试气能够获得低产量;IV类为非有效页岩气储层,区间值为GPF、LEI分值均小于等于0.25,该类层段基本无产能。按照上述原则绘制得到GPF-LEI评价图版(见图3)。图中,红色圆点表示I类产气层段;黄色三角形点表示较好的II类产气层段,紫色的三角形点表示中等的II类产气层段,绿色三角形点表示较差的II类产气层段;黑色菱形点为III类产气层段。

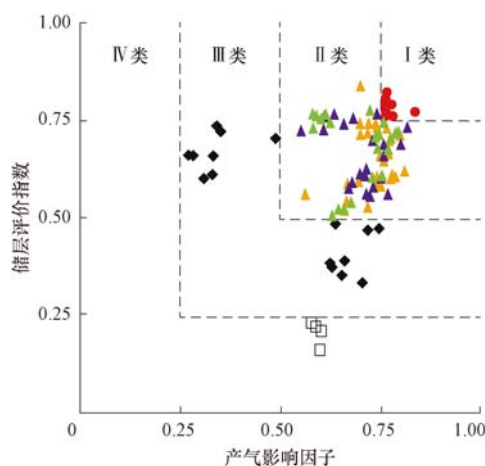


图3 页岩气储层产气性评价图版

Fig. 3 Segmental gas production evaluation of shale gas reservoir

3 应用效果分析

采用上述页岩气储层产气性评价方法对涪陵页岩气焦石坝地区73段页岩气层段进行产气性评价,将评价结果与产气剖面试气成果进行对比分析,分析结果表明,页岩气储层产气性评价类别越好,无阻流量越高。

产气剖面统计结果表明,I类产气层段无阻流量为 $(2.52 \sim 6.09) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均 $3.51 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,

产气量高且较稳定;II类产气层段无阻流量为 $(0.21 \sim 3.55) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均 $1.06 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,产气量分布范围大且波动频繁;III类产气层段无阻流量在 $(0 \sim 0.25) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均 $0.21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,产气量低且基本稳定(见图4)。

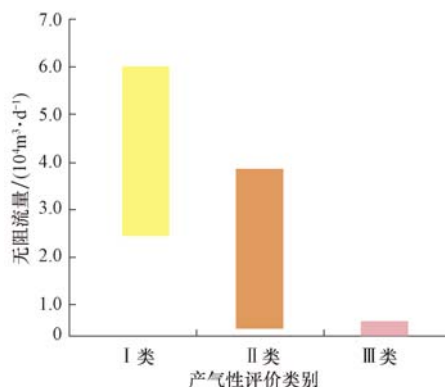


图4 产气性评价类别与无阻流量区间分布统计结果

Fig. 4 The interval distribution statistics for gas production property categories and open flow capacity

A井是涪陵页岩气田二期产能建设区平桥区块部署的一口生产井,水平段在龙马溪组一五峰组页岩储层穿行1523.00 m。该井水平段评价参数特征为:密度 $2.53 \sim 2.72 \text{ g}/\text{cm}^3$,总有机碳含量 $2.21\% \sim 4.61\%$,孔隙度 $2.5\% \sim 5.5\%$,补偿中子 $10.1\% \sim 19.7\%$,泥质含量 $7.6\% \sim 31.7\%$,生物成因硅质含量 $10.5\% \sim 81.3\%$,岩性非均质性系数 $7.9 \sim 21.9$,烃对比系数 $3.2 \sim 16.2$,地层压力系数 $1.40 \sim 1.45$,储层埋深 $2797.40 \sim 2999.60 \text{ m}$,脆性指数 $66.2\% \sim 91.8\%$ 。该井分18段压裂,按照该方法评价各段的产气性(见图5)。其中,1个层段的产气性评价为I类,16个层段的产气性评价为II类,1个层段的产气性评价为III类。按照产气平均无阻流量,预测该井试气测试无阻流量为 $21.47 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,单井测试无阻流量 $18.59 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相对误差为 15.5% ,该井页岩气储层产气性评价结果与测试无阻流量基本吻合,达到了评价效果。

4 结论与建议

1) 综合考虑页岩气储层自身物性与其他地质因素,通过优选评价参数和确定评价标准,建立了一种页岩气储层产气性评价方法。

2) 采用GPF-LEI综合评价涪陵页岩气储层的产气性时,首先优选页岩气产气影响因子GPF、页

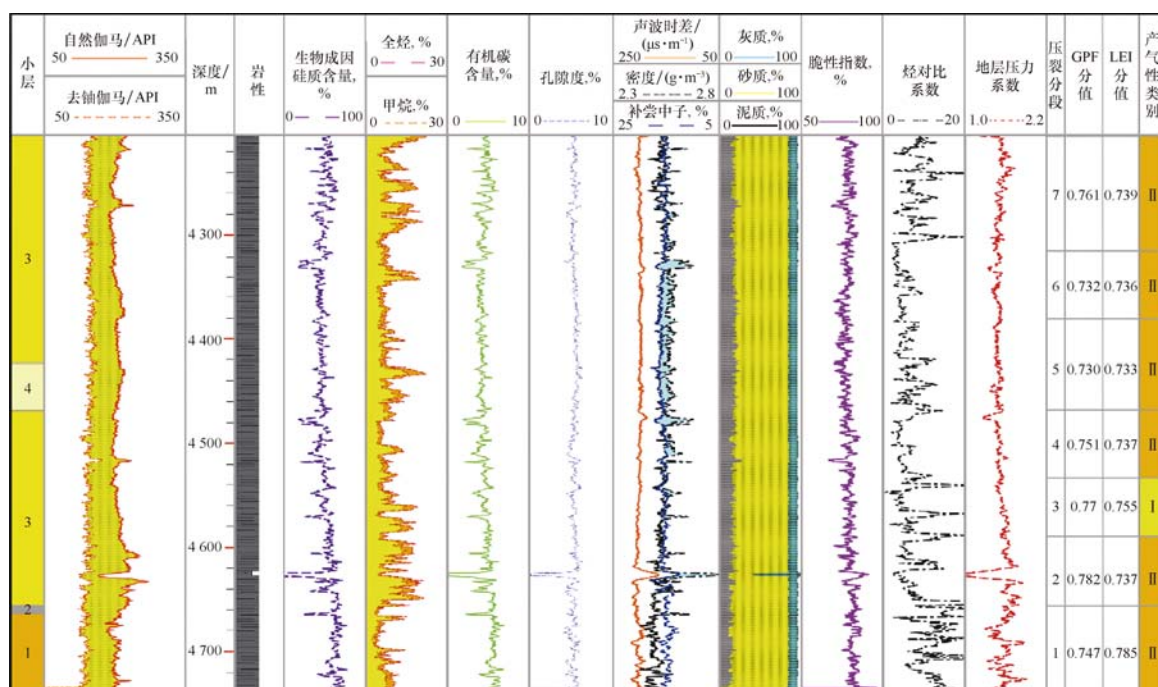


图5 涪陵页岩气田A井储层产气性评价结果

Fig. 5 Segmental gas production property evaluation results of pay zone of Well A in Fuling Shale Gas Field

岩气储层评价指数 LEI 具体参数并建立赋分标准, 然后利用交汇图版法评价页岩气储层的产气性。

3) 以往研究主要针对地质条件相对稳定的涪陵页岩气区, 随着涪陵页岩气勘探开发区域不断扩展, 储层评价结果与产气性具有差异的层段越来越多, 需要对地质与工程条件更加复杂区域相关问题进行深入研究。

4) 建议进一步开展与页岩气储层产气性相关的压裂工程参数拓展研究。

参考文献

References

- [1] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 308-317.
LI Yuxi, QIAO Dewu, JIANG Wenli, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 308-317.
- [2] 庞伟. 页岩气井吸附气产出贡献率确定方法[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 86-92.
PANG Wei. A method for determining the contribution of adsorption gas to the production of shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 86-92.
- [3] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoir mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 张建阔. 页岩表面甲烷气吸附机理及影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 101-106.
ZHANG Jiankuo. The mechanism and influencing factors of methane adsorption on shale surfaces[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 101-106.
- [5] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [6] 陈勉, 葛洪魁, 赵金洲, 等. 页岩油气高效开发的关键基础理论与挑战[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 7-14.
CHEN Mian, GE Hongkui, ZHAO Jinzhou, et al. The key fundamentals for the efficient exploitation of shale oil and gas and its related challenges[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(5): 7-14.
- [7] 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 Formations, Southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [8] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
GOU Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba Shale Gas Field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28-36.
- [9] 梁兴, 王高成, 徐政语, 等. 中国南方海相复杂山地页岩气储层

- 甜点综合评价技术:以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 33-42.
- LIANG Xing, WANG Gaocheng, XU Zhengyu, et al. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, south China: a case study from Zhaotong national shale gas demonstration zone[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 33-42.
- [10] 徐兵祥, 李相方, HAGHIGHI Manouchehr, 等. 页岩气产量数据分析方法及产能预测[J]. 中国石油大学学报, 2013, 37(3): 119-125.
- XU Bingxiang, LI Xiangfang, HAGHIGHI Manouchehr, et al. Production data analysis and productivity forecast of shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(3): 119-125.
- [11] 李湘涛, 石文睿, 郭美瑜, 等. 涪陵页岩气田焦石坝区海相页岩气层特征研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(11): 11-15.
- LI Xiangtao, SHI Wenrui, GUO Meiyu, et al. Characteristics of marine shale gas reservoirs in Jiaoshiba Area of Fuling Shale Gas Field[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(11): 11-15.
- [12] 李继庆, 梁榜, 曾勇, 等. 产气剖面井资料在涪陵焦石坝页岩气田开发的应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(11): 75-81.
- LI Jiqing, LIANG Bang, ZENG Yong, et al. The application of gas-production profile logging data in the development of Jiaoshiba Shale Gas Field in Fuling Area[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(11): 75-81.
- [13] 杨恒林, 乔磊, 田中兰. 页岩气储层工程地质力学一体化技术进展与探讨[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 25-31.
- YANG Henglin, QIAO Lei, TIAN Zhonglan. Advances in shale gas reservoir engineering and geomechanics integration technology and relevant discussions[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 25-31.
- [14] 黄进, 吴雷泽, 游园, 等. 涪陵页岩气水平井工程甜点评价与应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 16-20.
- HUANG Jin, WU Leize, YOU Yuan, et al. The evaluation and application of engineering sweet spots in a horizontal well in the Fuling Shale Gas Reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 16-20.
- [15] 蒋廷学, 卞晓冰. 页岩气储层评价新技术: 甜度评价方法[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 1-6.
- JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing. The novel technology of shale gas play evaluation: sweetness calculation method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 1-6.
- [16] SHI Wenrui, ZHANG Chong, YUAN Shaoyang, et al. A crossplot for mud logging interpretation of unconventional oil and gas and its application[J]. The Open Petroleum Engineering Journal, 2015, 8(supplement 1: M2): 265-271.
- [17] 李双建, 袁玉松, 孙炜, 等. 四川盆地志留系页岩气超压形成与破坏机理及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(5): 924-931.
- LI Shuangjian, YUAN Yusong, SUN Wei, et al. The formation and destruction mechanism of shale gas overpressure and its main controlling factors in Silurian of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 924-931.
- [18] 雍海燕, 黄茜, 王善善, 等. 重庆地区页岩气资源及储层评价内容[J]. 江汉石油职工大学学报, 2015, 28(6): 1-4.
- YONG Haiyan, HUANG Xi, WANG Shanshan, et al. Shale gas resource and reservoir assessment content in Chongqing Area[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2015, 28(6): 1-4.
- [19] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 53-62.
- DENG Julong. Grey theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002: 53-62.

[编辑 滕春鸣]