

深层页岩气井产能的主要影响因素

——以四川盆地南部永川区块为例

曹海涛^{1,2,3} 詹国卫¹ 余小群¹ 赵 勇¹

1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院 2. 中国石化西南油气分公司博士后科研工作站

3. 西南石油大学博士后科研流动站

摘 要 影响深层页岩气井产能的地质和工程因素众多,明确主要的影响因素对于深层页岩气的高效开发具有重要的意义。为此,以四川盆地南部永川地区 8 口水平井为样本,采用灰色关联分析法研究地质、钻井、压裂、生产等 4 个方面的 19 个参数与气井产能的关联度,明确了主要的影响因素,并建立了无量纲产能评价指标 (QI) 与无阻流量的关系式,进而针对永川区块南区 and 北区分别提出了提高页岩气单井产能的建议。研究结果表明:①裂缝发育程度、I 类储层钻遇率、水平段长度、埋深、单段液量、加砂强度、压力系数、总有机碳含量和脆性指数等 9 个因素对气井产能起到了主要的控制作用;②所建立的 QI 与气井无阻流量的关系模型,可实现对气井产能的快速评价;③建议在永川区块南区加强钻井的跟踪监测以提高优质储层的钻遇率,在北区则加强对压裂工艺的攻关,提升储层改造的效果以实现气井产能的突破。结论认为,该研究成果对于研究区的井位部署和压裂参数优化具有一定的指导意义。

关键词 深层页岩气 气井 生产能力 影响因素 灰色关联 关联度 永川区块 四川盆地南部

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.S1.020

0 引言

页岩气藏被称为“人工气藏”,气井的产能受到地质与工程诸多参数的影响,而开发深层页岩气藏所面临的情况则更为复杂。目前国内深层页岩气的开发尚处于起步阶段,且可借鉴的经验较少,从国外可借鉴的开发经验则主要来自于 Haynesville 气田;从开发现状来看,页岩储层经压裂改造后,气井的产能有一定突破,但总体偏低且差异较大。Haynesville 页岩气井的实际生产数据表明,气井要获得高产需优选有利地质甜点区,并选用合理的压裂工艺参数和排采措施^[1-5]。随着国内页岩气大开发的推进,研究人员对影响页岩气井产能的因素也做了大量研究。石强等^[6]针对威远页岩气示范区提出了利用测井方法来判识水平井的高产层段,明确指出威远地区页岩气高产层段是下志留统龙马溪组底部的一套中—高伽马值硅质页岩段。谢军等^[7]认为对长宁—威远页岩气示范区的海

相页岩气藏而言,水平井段在优质储层段的钻遇长度是决定气井是否高产的主控因素。此外,学者还对焖井时间^[8]、构造特征^[9]、有效应力^[10]等单一因素对页岩气井产能的影响开展了大量研究,并利用数值模拟方法分析了含气量、兰氏参数、裂缝间距和渗透率等参数对气井产能的影响^[11],可见页岩气井的产能受到多种因素控制,厘清影响页岩气井高产的主要因素并提出气井产能的快速评价方法对于确定深层页岩气的有利开发区及实现页岩气高效开发具有重要意义。为此,笔者以四川盆地南部永川地区 8 口页岩气水平井的资料为基础,采用灰色关联法分析地质、钻井、压裂和生产等 4 个方面的多种参数对气井产能的影响,以期为提高该区新钻页岩气井的产能提供理论支撑。

1 区块概况

永川地区处于重庆市与四川省的交界处,其构

基金项目: 中国石化“十条龙”科技攻关项目“深层页岩气综合评价及开发技术政策”(编号:P18058-1)。

作者简介: 曹海涛,1987 年生,博士;主要从事页岩气开发方面的研究工作。地址:(610041)四川省成都市高新区吉泰路 688 号。电话:(028) 65286384。E-mail: cht198702@126.com

通信作者: 赵勇,1981 年生,副研究员;主要从事页岩气开发方面的研究工作。地址:(610041)四川省成都市高新区吉泰路 688 号。电话:(028) 65286384。E-mail: 3775266@qq.com

造位于川东断褶带的川南帚状构造带上，横跨石盘铺向斜、新店子背斜和方家沟向斜。永川区块产能建设区主要集中在两个向斜区，目的层为上奥陶统五峰组—龙马溪组一段，为一套暗色富有机质泥页岩，埋深介于 3 700 ~ 4 200 m，压力系数介于 1.7 ~ 2.1，

属于超高压气藏。与国内外其他页岩气藏^[1-8]相比，研究区储层总体埋深大，压力系数高（表 1）。现有 8 口水平井的测试产气量介于 $6 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，无阻流量介于 $8 \times 10^4 \sim 26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，单井产能差异较大。

表 1 国内外深层页岩气特征对比表^[12]

区块	构造	埋深 / m	孔隙度	压力系数	TOC	含气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	优质页岩厚度 / m
Haynesville	箱状背斜	3 200 ~ 4 300	6.0% ~ 15.0%	1.60 ~ 2.00	> 3.0%	2.8 ~ 9.4	50.0 ~ 60.0
平桥	背斜	2 500 ~ 4 000	3.2% ~ 3.6%	1.10 ~ 1.30	3.2% ~ 3.8%	4.0 ~ 8.0	31.0 ~ 33.0
威远（中石油）	向斜	3 000 ~ 3 900	8.0% ~ 15.0%	1.60 ~ 1.90	3.0% ~ 5.0%	4.0 ~ 7.5	42.0（平均值）
永川	向斜	3 700 ~ 4 200	2.2% ~ 10.3%	1.70 ~ 2.10	2.8% ~ 5.5%	1.5 ~ 8.3	36.0 ~ 41.5
威荣	向斜	3 550 ~ 3 880	5.6% ~ 6.6%	1.96 ~ 2.06	1.0% ~ 4.0%	7.1	27.5 ~ 38.7

2 产能影响因素分析

页岩气的开发受多种因素影响，同时由于开发初期的评价井井数少，且不同井的地质参数和工程参数都有较大差异，采用单因素回归法分析的结果显示少部分参数与气井产能的相关性好，但大部分参数与气井产能的相关性较差，难以确定影响页岩气井产能的主要因素。而灰色关联分析法是分析系统中因素间关联程度的一种数学方法，对样本数量没有过多要求且计算量较小，对模型规模和运算量控制程度较优，已在页岩储层的评价中取得了较好的应用效果^[13-18]。

2.1 分析方法

影响页岩气井产能的因素主要涵盖地质、钻井、压裂和生产参数等 4 个方面（表 2）。将无阻流量作为参考序列，埋深、压力系数、水平段长度等 19 个参数作为比较序列，采用均值法对参考序列和比较序列进行无量纲化处理，然后由灰色关联分析法计算得到不同分辨系数（取值为 0.2、0.3、0.4、0.5）下各影响因素与气井产能的关联度。通常认为关联度大于 0.4 时，该因素则为主要关联项。如表 3 所示，当分辨系数分别取值为 0.3、0.4、0.5 时，各影响因素与气井产能的关联度均大于 0.4；当分辨系数取值为 0.2 时，仅压力系数、裂缝发育程度、I 类储层钻遇率、总液量、总砂量、单段液量、单段砂量及加砂强度与气井产能的关联度大于 0.4。

通过前述灰色关联分析法仅计算得到了各影响因素与产能之间的关联度，但部分因素之间仍存在一定的相关性，需再对上述因素进行筛选，建立合理的产能预测模型以支撑后续新钻井产能的提高。

表 2 永川区块页岩气井产能影响因素统计表

类型	参 数	范围
地质	埋深 / m	3 700 ~ 4 200
	压力系数	1.7 ~ 2.1
	裂缝发育程度	0.15 ~ 0.48
	含气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	6.4 ~ 7.3
	TOC	2.5% ~ 3.1%
	孔隙度	4.9% ~ 5.6%
	黏土矿物含量	34.7% ~ 37.7%
	脆性指数	57.6% ~ 60.3%
	优质页岩厚度 /m	36.5 ~ 41.5
钻井	水平段长度 /m	1 238 ~ 1 560
	I 类储层钻遇率	2.5% ~ 77%
压裂	总液量 / m^3	37 839 ~ 46 602
	总砂量 / m^3	641 ~ 1 523
	单段液量 / m^3	1 650 ~ 2 220
	单段砂量 / m^3	30.5 ~ 72.5
	段数 / 段	19 ~ 23
	单段长度 /m	65 ~ 74
	加砂强度 / ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	0.4 ~ 1.1
生产	焖井时间 /d	6 ~ 34

2.2 指标及权重的确定

产能预测模型所选参数优先选择分辨系数为 0.2 时关联度大于 0.4 的那部分参数，然后，再结合以下 4 个方面进一步筛选：①储层品质和可压性是评价地质、工程双甜点的重要指标，优选 TOC 和脆性指

表 3 不同分辨系数下各影响因素与气井产能关联度统计表

类型	参数	分辨系数			
		0.5	0.4	0.3	0.2
地质	埋深	0.53	0.48	0.42	0.34
	压力系数	0.59	0.55	0.50	0.43
	裂缝发育程度	0.68	0.64	0.59	0.52
	含气量	0.54	0.5	0.44	0.36
	TOC	0.56	0.51	0.46	0.38
	孔隙度	0.55	0.51	0.45	0.37
	黏土矿物含量	0.53	0.49	0.43	0.37
	脆性指数	0.53	0.49	0.43	0.36
	优质页岩厚度	0.54	0.49	0.44	0.37
钻井	水平段长度	0.54	0.49	0.43	0.36
	I 类储层钻遇率	0.67	0.62	0.56	0.47
压裂	总液量	0.59	0.55	0.50	0.43
	总砂量	0.61	0.57	0.51	0.43
	单段液量	0.61	0.58	0.53	0.47
	单段砂量	0.61	0.57	0.51	0.43
	段数	0.54	0.49	0.43	0.35
	单段长度	0.55	0.51	0.45	0.38
	加砂强度	0.63	0.59	0.53	0.46
生产	焖井时间	0.57	0.52	0.46	0.39

数作为主要影响因素；② 8 口井的水平段长度介于 1 200 ~ 1 500 m，该样本的数值范围小，使得该参数关联度也相对偏小。但水平段长度是开发技术政策中可优化的关键参数，因此将其作为影响气井产能的主要因素；③ 涉及压裂规模的 7 个参数之间存在一定相关性，其中单段液量和加砂强度的关联度最高；④ 埋深与气井初期产能之间存在明显的线性关系，随埋深增大，气井无阻流量呈逐渐降低的趋势（图 1-a）。根据以上分析，确定研究区内气井产能的主要影响因素分别为裂缝发育程度、I 类储层钻遇率、水

平段长度、埋深、单段液量、加砂强度、压力系数、TOC 和脆性指数。

基于主要影响因素与气井产能的关联度，采用加权平均的方法计算各因素相应的权重系数（表 4），基于研究区储层埋藏深的特点，重点分析了储层埋深、I 类储层钻遇率及压力系数对气井产能的影响，总体可看出，对于深层、超压页岩气藏，气井产能随储层埋深的增大会大幅降低，提高 I 类储层钻遇率可显著提升气井产能（图 1）。

表 4 产能影响因素关联度和权重系数统计表

无量纲参数	关联度	权重系数
裂缝发育程度	0.52	0.137
I 类储层钻遇率	0.47	0.125
单段液量	0.47	0.124
加砂强度	0.46	0.120
压力系数	0.43	0.115
TOC	0.38	0.100
脆性指数	0.36	0.094
水平段长度	0.36	0.094
埋深	0.34	-0.089

2.3 产能评价指标

页岩气多段压裂水平井渗流机理复杂，通过渗流方程计算气井产能的难度较大，针对永川区块的地质、工程特征，利用灰色关联法分析结果可以有效评价气井产能。前期测试结果显示南区气井的产能整体优于北区气井的产能，表 5 统计了南、北区典型井的各项影响气井产能的主要因素，由于各主要影响因素量纲不同，因此均采用均值法进行归一化处理，并定义无量纲产能评价指标（ QI ），其表达式为：

$$QI = \sum_{i=1}^n A_i x_i \quad (n=9) \quad (1)$$

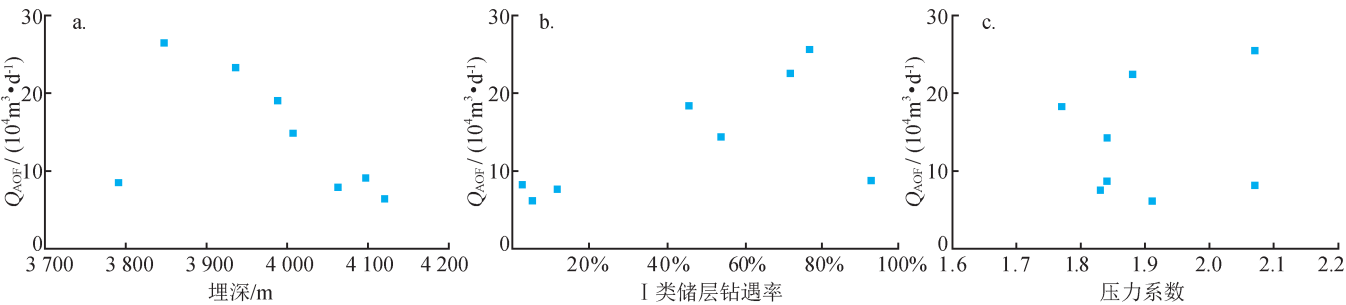


图 1 部分影响因素与无阻流量关系图

表 5 南 / 北区典型井产能评价指标相关参数统计表

分区	井名	无阻流量 ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	裂缝发育程度	I 类储层 钻遇率	单段液量 / m^3	加砂强度 / ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	压力系数	TOC	脆性指数	水平段长度 / m	埋深 / m
南区	A	26.45	0.48	77%	2 219	0.88	2.07	2.8%	57.6%	1 503	3 821
北区	B	9.10	0.15	90%	2 152	0.91	1.84	3.1%	60.3%	1 504	4 097

注：裂缝发育程度通过曲率来进行表征

式中 x_i 表示表 4 中的无量纲参数； A_i 表示各参数对应的权重系数。

根据式（2）得到 8 口井的无量纲产能评价指标（ QI ），建立无阻流量（ Q_{AOF} ）与 QI 的关系曲线（图 2），可以看出 QI 与 Q_{AOF} 的线性关系较好。

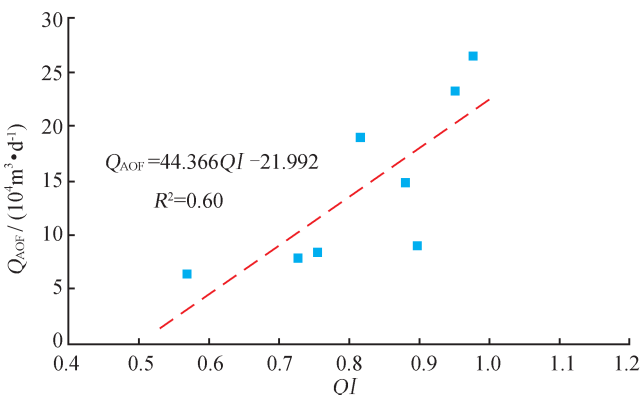


图 2 QI 与 Q_{AOF} 关系图

3 实例应用

前述提出的无量纲产能评价指标可为后续新井产能的快速评价提供新思路，进而指导研究区的井位部署和单井工程参数的优化，从而实现深层页岩气井产能的大幅提升。

永川区块南、北两个向斜区储层的品质虽整体相当，但构造特征存在一定差异，南区为受次级断层分隔的复式向斜，埋深相对较浅，据地震反演和岩心观察，该区域的裂缝相对较发育。总体看来，南区的综合地质条件优于北区，应优先开展产能建设工作。

但是对于南区而言，虽其断层相对发育，但又不利于获得优质储层的高钻遇率，采用前述建立的 QI 与 Q_{AOF} 相关关系式，计算得到南区 A 井的无阻流量为 $24.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，与试气资料计算结果（ $26.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）基本相当，若能提高该井 I 类储层钻遇率，单段液量和加砂强度也会有所提升，产能将有望突破 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。因此，在南区应加强钻井跟踪监测技术的应用以获得优质储层的高钻遇率。

4 结论与建议

1）采用灰色关联法对影响深层页岩气井产能的 19 个因素进行了分析，确定裂缝发育程度、I 类储层钻遇率、水平段长度、埋深、单段液量、加砂强度、压力系数、TOC 和脆性指数等 9 个主要影响因素。

2）基于所提出的无量纲产能评价指标（ QI ），建立了 QI 与气井无阻流量的关系式，两者的相关性较好，可实现气井产能的快速评价。

3）建议在永川区块南区应加强钻井跟踪监测技术以获得优质储层的高钻遇率，在北区则应加强对压裂工艺的攻关，提升储层改造效果以实现气井产能的突破。

参 考 文 献

[1] Chakraborty N, Karpyn ZT, Liu S & Yoon H. Permeability evolution of shale during spontaneous imbibition[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 590-596.

[2] Eom HJ, Hee An S & Chon BH. Evaluation of shale gas reservoirs considering the effect of fracture half-length and fracture spacing in multiple hydraulically fractured horizontal wells[J]. Geosystem Engineering, 2014, 17(5): 264-278.

[3] Fanchi JR, Cooksey MJ, Lehman KM, Smith A, Fanchi AC & Fanchi CJ. Probabilistic decline curve analysis of Barnett, Fayetteville, Haynesville, and Woodford Gas Shales[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 109: 308-311.

[4] 李庆辉, 陈勉, Wang FP, 金衍, 李志猛. 工程因素对页岩气产量的影响——以北美 Haynesville 页岩气藏为例 [J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 54-59.

[5] 房大志, 曾辉, 王宁, 张勇. 从 Haynesville 页岩气开发数据研究高压页岩气高产因素 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 58-62.

[6] 石强, 陈鹏, 王秀芹, 刘凤新. 页岩气水平井高产层段判别方法及其应用——以四川盆地威远页岩气示范区下志留统龙马溪组为例 [J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 60-65.

- [7] 谢军, 赵圣贤, 石学文, 张鉴. 四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素 [J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 1-12.
- [8] 张寅, 李世恩. 涪陵页岩气井焖井时间与产能关系分析 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2017, 30(5): 49-51.
- [9] 胡明, 黄文斌, 李加玉. 构造特征对页岩气井产能的影响——以涪陵页岩气田焦石坝区块为例 [J]. 天然气工业, 2017, 37(8): 31-39.
- [10] 朱维耀, 马东旭. 页岩储层有效应力特征及其对产能的影响 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 845-852.
- [11] 郭艳东, 王卫红, 刘华, 胡小虎. 页岩气多段压裂水平井产能影响因素研究 [J]. 科技通报, 2018, 34(4): 72-78.
- [12] 梁正中, 余天洪. 北美超压富集页岩气研究现状及勘探启示 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 161-166.
- [13] 郭少斌, 黄磊. 页岩气储层含气性影响因素及储层评价——以上扬子古生界页岩气储层为例 [J]. 石油实验地质, 2013, 35(6): 601-606.
- [14] 金之钧, 胡宗全, 高波, 赵建华. 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.
- [15] 张涛, 李相方, 杨立峰, 李靖, 王永辉, 冯东, 等. 关井时机对页岩气井返排率和产能的影响 [J]. 天然气工业, 2017, 37(8): 48-60.
- [16] 刘乃震, 柳明, 张士诚. 页岩气井压后返排规律 [J]. 天然气工业, 2015, 35(3): 50-54.
- [17] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 魏志红, 魏祥峰, 刘珠江. 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.
- [18] 翟刚毅, 王玉芳, 包书景, 郭天旭, 周志, 陈相霖, 等. 我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测 [J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1057-1068.
- (修改回稿日期 2019-05-14 编辑 孔 玲)