

威远区块页岩气水平井基于灰色关联分析的产能评价方法

肖寒

中国石油集团长城钻探工程有限公司地质研究院 辽宁盘锦 124010

通讯作者:Email:xh123.gwdc@cnpc.com.cn

项目支持:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“四川盆地及周缘页岩气形成富集条件、选区评价技术与应用”(2017ZX05035004)

引用:肖寒. 威远区块页岩气水平井基于灰色关联分析的产能评价方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(4):73-78.

Cite: XIAO Han. Production evaluation method based on grey correlation analysis for shale gas horizontal wells in Weiyuan block [J]. Well Testing, 2018, 27(4):73-78.

摘要 四川威远页岩气区块隶属国家级页岩气示范区,开发潜力大,页岩气水平井产能受多因素控制呈现出差异性,为快速准确开展压后产能评价,实现威远区块页岩气的高效开发,本文依托威远页岩气区块地质、压裂及生产资料,运用灰色关联分析方法明确水平井产能的主控因素,依此建立多元线性回归产能预测模型进行产能评价。研究表明,影响压裂水平井页岩气产能因素主要包括地质因素和工程因素两个方面,地质因素按影响程度大小排序依次为目标甜点钻遇率、含气量、脆性指数等,工程因素则依次为改造长度、加砂强度、加砂量等;产能评价方法综合威远区块地质开发特征和压裂改造效果,无需产能试井资料,仅需目标甜点钻遇率,改造长度和加砂强度三个主控因素作为产能预测模型参数即可快速计算测试产量,计算结果与实际测试产量误差在10%以内,该方法能够快速准确评价产能,为研究区后续水平井优化设计和合理配产提供可靠依据。

关键词 水平井;产能评价;灰色关联法;主控因素;页岩气;测试产量

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.04.012

Production evaluation method based on grey correlation analysis for shale gas horizontal wells in Weiyuan block

XIAO Han

Geology Research Institute of CNPC Greatwall Drilling Company Limited, Panjin, Liaoning 124010, China

Abstract: Weiyuan shale gas block in Sichuan is a national shale gas demonstration area with great development potential. As we all know that the production of shale gas horizontal wells is controlled by many factors. In order to quickly and accurately evaluate the production after fracturing, and to realize the efficient development of shale gas in Weiyuan block. According to the geological, fracturing and production data of the Weiyuan shale gas block, this paper uses the grey correlation analysis method to determine the main controlling factors of horizontal well productivity. In addition, a production prediction model based on multiple linear regression was also established. The research results show that the factors affecting the productivity of shale gas horizontal wells include two aspects of geology and engineering. Geological factors mainly include drilling rate of dessert, gas content, brittleness index, etc. The engineering factors are mainly the length of the stimulation, the sanding strength and the amount of sand. The production evaluation method proposed in this paper comprehensively considers the geological development characteristics and fracturing effect of Weiyuan block. It does not need production and well test data. It only needs three main controlling factors: drilling rate of dessert, stimulation length and sanding strength. Using this main control factor as parameter of the production prediction model can quickly predict the result of test, and the error between the calculated result and the actual test production is within 10%. This proves that the method can quickly and accurately evaluate the production and provides a reliable basis for the optimization design and reasonably distribute production of the horizontal wells in the study area.

Keywords: horizontal well; productivity evaluation; grey correlation method; main controlling factor; shale gas; test production

21 世纪以来,全球范围内引发了一场“页岩气革命”^[1],中国是继美国和加拿大之后世界上第 3 个实现页岩气商业化开发的国家。2012 年 3 月国家发改委、能源局批准成立“长宁—威远区块国家级页岩气示范区”^[2]。自 2014 年 2 月至今,长城钻探工程有限公司在四川长宁—威远国家页岩气示范区完成钻井 42 口,总进尺 20.98×10⁴m,压裂施工共完成 687 段,总液量 126×10⁴m³,总砂量 4.71×10⁴m³,累计页岩气产量已达 10.08×10⁸m³。快速准确开展压后产能评价对实现威远区块页岩气的高效开发具有重要意义。

目前国内对气井产能评价的研究较多,1987 年,陈元千^[3-4]提出一种确定气井无阻流量的简单方法。2004 年,唐俊伟等^[5]提出了气井产能测试新方法—回压等时试井方法,能准确评价低渗气井产能。2010 年,段永刚等^[6]建立了考虑解吸、扩散和渗流的页岩气藏无限导流压裂井产能评价模型。2013 年,邓佳等^[7]建立了考虑应力敏感的页岩气稳态渗流模型,得到产能方程。2014 年,宋洪庆等^[8]建立了适用于多孔介质的页岩气运移数学模型及压裂井三区耦合非线性渗流产能方程。2017 年,张晓涛等^[1]提出了一种新的便于比较页岩气井产能特征的分析方法。还有对常规产能评价方法进行改进复合及针对特定区块的产能评价方法^[9-12]。

威远地区水平井产能受多因素控制,呈现出差异性,产能测试资料较少,采用常规产能评价方法进行产能评价不够准确,没有发现能够快速准确评价威远区块页岩气水平井产能并实际应用的方法。灰色关联分析法^[13-15]是通过分析各因素发

展趋势的相近或相异程度,来描述其关联程度的一种多因素分析方法。国内针对特定区块有相关研究,聂玲等^[16]运用灰色关联法,对鄂尔多斯盆地低渗透气层的压裂井进行影响因素分析。方辉煌等^[17]运用灰色关联分析法与模糊综合评判法对重庆南川地区龙马溪组页岩储层进行评价。张艺钟等^[18]产能多元非线性回归预测涪陵页岩气藏单井的产能。刘虹瑜等^[19]采用灰色关联理论研究了塔中志留系低渗透砂岩储层重复改造效果的影响因素及其影响程度,采用多元回归法建立了产能预测模型。

本文结合前人页岩地质特征及主控因素分析方法,从威远页岩气储层地质参数和水平井工程参数两个方面对影响页岩气水平井产能因素进行灰色关联分析,运用所确定主控因素,建立多元线性回归产能预测模型对威远页岩气区块进行产能预测,实现对研究区水平井产能的快速准确评价,从而指导后续的页岩气开发。

1 威远区块地质概况

威远区块位于四川盆地西南部,四川省内江市威远县、资中县、自贡市荣县境内,区域上地势西北高、东南低;构造属于川中隆起区的川西南低陡褶皱带。

威远区块目的层地层划分见表 1。开发目的层是志留系龙马溪组和奥陶系五峰组。龙马溪组自上而下分为龙二、龙一₂ 和龙一₁ 亚段,依据沉积旋回、岩性组合特征、电性特征、古生物特征及地球化学特征,又将龙一₁ 亚段进一步划分为 4 个小层。

表 1 威远地区目的层地层划分表
Table 1 Stratigraphic division table of the target layer in Weiyuan block

地层			特征	厚度范围 /m
组	段	小层		
龙马溪组	龙二段		灰绿色、浅灰色泥岩,粉砂质泥岩,微含灰质,中高伽玛,少见笔石。	100~250
	龙一 ₂ 亚段		岩性以龙一 ₂ 底部深灰色页岩与下伏龙一 ₁ 灰黑色页岩分界,龙一 ₁ 声波时差明显增大,密度略降低,无铀伽玛低于龙一 ₂ 段。	100~150
		4	伽玛值 140~240 API,有机碳和铀含量略低于 1、3 小层。	6~25
	龙一段	3	黑色碳质、硅质页岩伽玛值 160~250 API、有机碳、铀含量及峰值高于 2 小层低于 1 小层。	3~9
		2	黑色碳质、硅质页岩,伽玛值 170~240 API 有机碳及铀含量低于 1、3 小层。	4~11
		1	黑色碳质、硅质页岩,伽玛 180~400 API,高值可达 400 API,有机碳 4%~7%,铀含量高。伽玛最高值与五峰分界。	1~4
	五峰组		顶灰褐色生物灰岩,薄层,厚度不足 1 m,低伽玛;薄层灰岩之下,在威远区块为灰质含量较重的碳质页岩、硅质页岩。	0.5~15

2 威远页岩气区块产能评价方法及应用

截止 2017 年 9 月,长城威远区块共投产页岩气水平井 42 口,开井 39 口,关井 3 口,日产气 $129.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,历年累积产气 $12.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,2016 年累积产气 $5.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

研究显示,页岩气水平井测试产量与预计单井最终可采储量 (EUR) 正相关,测试产量一定程度上反映了页岩气井的产能,而且测试产量能够规避生产时间不同导致的干扰。因此,本文以测试产量作为单井产能的主要对比指标。

2.1 产能差异现状

目前,威远页岩气区块不同平台,同平台不同井间的测试产量存在着明显差异:相距 1 600 m 的两平台高峰期日产量为 $121 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $61 \times 10^4 \text{ m}^3$,相差 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$,差异较大;最高单井测试产量为 $28.77 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最低单井测试产量为 $3.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且两口井位于同一平台内。不同平台地质特征有所不同,每口井施工情况不同也会导致工程因素不同,地质和工程因素都不同程度影响测试产量。因此,产能表现为受多因素控制,亟需对研究区水平井产能进行评价。

2.2 常规产能评价方法

气井产能评价是气井动态分析、产能预测、气层特征研究的重要手段。常用的页岩气井产能评价方法有二项式及指数式法,改进“一点法”及数值模拟法等各种方法的适用范围见表 2。

威远页岩气区块建产较快,产能试井资料较少,且产能试井成本较高。由表 2 可以看出,常规评价方法需要产能试井资料,不能快速准确评价威远页岩气区块产能。因此,本文从生产角度出发,建立不依托于产能试井资料且能够快速准确评价水平井产能的预测模型。

表 2 常规页岩气井产能评价方法
Table 2 Production evaluation methods for conventional shale gas wells

方法	理论方法	适用范围/应用情况
二项式法	$p_R^2 - p_{wf}^2 = Aq_{sc} + Bq_{sc}^2$ p_R 为地层压力,MPa; p_{wf} 为井底流动压力,MPa; q_{sc} 为标准状况下地面产量, m^3/d ; A 为达西流系数; B 为非达西流系数。	相对成熟、准确和经典
指数法	$q_{sc} = C(p_R^2 - p_{wf}^2)^n$ C 为系数; n 为指数。	形式简单,精度不高,工程上用于估算
改进“一点法”	$q_{AOF} = \frac{2(1-\alpha)q_g}{\sqrt{\alpha^2 + 4(1-\alpha)p_D} - \alpha}$ p_D 为无因次拟压力; q_{AOF} 为无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; q_g 为测试产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; α 为产能系数。	主要用于产能试井中取得较少稳定测试点的气井
数值模拟法	数值模拟软件建立数值模型	准确性较高

2.3 水平井产能主控因素灰色关联分析

为建立产能评价公式,首先运用灰色关联法确定影响水平井产能的主控因素。

根据威远页岩气藏钻完井资料、压裂工艺施工资料及各单井的试采生产数据及压力温度监测数据,选取 25 口井 14 项地质工程参数用于灰色关联分析,包括目标甜点钻遇率、TOC、含气量、脆性指数、有效孔隙度、平均伽马值、龙一₂ 层钻遇率、改造长度、加砂强度、加砂量、最高泵压、砂液比、液量、停泵压力等。各井地质工程参数见表 3。

如前所述,以与产能相关性较好的测试产量为参考序列 $X_0 = (x_0(k), k = 1, 2, \cdots, n)$,目标甜点钻遇率、TOC 等上述 14 项地质工程参数作为比较序列 $X_i(k) = (x_i(k), k = 1, 2, \cdots, n)$ 。其中 i 为比较序列的序号,本文中取值 1, 2, \cdots , 14; k 为序列中样品的

序号,最大值为 n ,本文中 n 取值 25。

为保证不同计量单位,数值大小及变化范围的原始数据的等权性,将参考序列和比较序列数据进行标准化变换。根据公式(1)计算灰色关联系数。

$$r(X_0, X_i) = \frac{1 + |s_0| + |s_i|}{1 + |s_0| + |s_i| + |s_i - s_0|} \quad (1)$$

其中

$$|s_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_0^0(k) + \frac{1}{2}x_0^0(n) \right|$$
$$|s_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_i^0(k) + \frac{1}{2}x_i^0(n) \right|$$
$$|s_i - s_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (x_i^0(k) - x_0^0(k)) + \frac{1}{2}(x_i^0(n) - x_0^0(n)) \right|$$

并将关联系数取平均值得到关联度,定量反映出各序列对参考的关联程度,依此进行排序,确定各比较序列的主次关系,各比较序列关联度和排序见表 4。

从表 4 可以看出,威远页岩气区块地质因素中目标甜点钻遇率对产能的影响最大;工程因素中加砂强度对产能的影响最大。综上,影响研究区页岩

气水平井产能的主控因素为目标甜点钻遇率,改造长度和加砂强度,在后续水平井设计施工过程中需进一步优化加强。

表 3 地质工程参数统计表
Table 3 Statistical table of geological engineering parameters

井号	测试产量 /(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	地质参数								工程参数					
		目标甜点 钻遇率 /%	龙一 ₁ 钻遇率 /%	平均 伽马值 /API	TOC /%	有效 孔隙度 /%	含气量 /(m ³ ·t ⁻¹)	脆性 指数 /%	改造 长度 /m	液量 /m ³	加砂量 /t	加砂强度 /(m ³ ·m ⁻¹)	最高 泵压 /MPa	砂液比 /(t·m ⁻³)	停泵 压力 /MPa
W1-1	3.4	25.6	3.6	150.5	3.9	5.8	4.3	57.9	919.0	22 874.3	796.7	86.7	75.3	0.1	50.7
W1-2	5.3	29.7	35.1	282.8	3.8	4.7	3.5	53.3	1 272.0	29 813.3	1 081.8	85.1	71.8	0.1	45.7
W1-3	3.6	18.8	21.1	163.9	3.3	5.0	3.9	52.6	1 232.0	29 920.5	1 018.3	82.7	74.7	0.1	46.7
W1-4	28.8	94.6	1.7	330.4	5.4	5.3	4.8	67.1	1 565.0	35 862.9	1 332.8	85.2	81.4	0.1	51.9
W1-5	20.0	74.9	17.6	568.6	4.8	3.8	5.7	55.1	1 669.0	36 289.2	1 350.3	80.9	81.3	0.1	53.4
W1-6	20.8	100.0	0.0	243.2	4.3	5.4	2.1	69.8	1 353.0	37 521.0	1 438.9	106.4	80.4	0.1	49.8
W2-1	16.0	71.0	26.3	237.1	3.4	4.6	1.9	60.1	1 195.0	32 628.1	1 271.2	106.4	81.5	0.1	48.6
W2-2	16.3	97.5	0.0	238.5	4.9	6.1	2.2	73.2	1 554.0	33 390.0	1 245.7	80.2	80.9	0.1	57.8
W2-3	25.6	100.0	0.0	172.6	4.3	6.1	2.1	69.8	1 523.0	35 257.2	1 178.8	77.4	81.3	0.0	56.5
W2-4	26.3	87.3	8.8	206.5	5.1	5.7	2.3	57.1	1 520.0	38 430.3	2 233.7	158.9	74.2	0.1	48.2
W2-5	24.8	87.4	3.5	198.2	4.7	6.1	1.8	60.8	1 502.0	37 556.0	2 115.0	150.5	74.5	0.1	49.0
W2-6	30.1	81.4	9.9	165.1	5.8	6.8	2.4	63.9	1 544.0	36 692.8	1 732.0	120.3	78.8	0.0	50.3
W3-1	30.1	100.0	0.0	210.9	5.1	6.4	1.9	57.2	1 600.0	43 131.4	2 700.4	177.3	78.4	0.1	54.9
W3-2	29.5	100.0	0.0	136.3	5.6	7.0	3.1	64.4	1 600.0	33 110.5	1 825.3	134.9	80.4	0.1	54.4
W3-3	8.8	96.1	0.9	183.0	4.8	6.1	5.8	61.8	1 460.0	25 294.2	773.3	60.1	86.7	0.0	58.9
W3-4	20.6	95.5	1.5	174.2	5.0	6.8	4.4	69.0	1 250.0	35 406.7	1 131.5	90.5	85.2	0.0	55.6
W3-5	10.2	97.9	2.1	181.4	3.8	5.5	4.4	56.4	1 330.0	39 620.1	1 061.3	79.8	86.8	0.0	58.5
W3-6	15.2	91.8	8.2	203.1	5.1	6.8	3.4	69.0	1 385.0	35 037.1	1 201.5	86.8	83.3	0.1	56.2
W4-1	3.4	87.3	12.7	172.3	4.3	6.0	5.0	62.5	1 460.0	36 013.9	1 242.7	88.4	83.2	0.1	56.0
W4-2	21.6	98.8	1.2	180.9	5.4	7.2	6.7	61.8	1 405.0	32 060.3	1 423.0	101.3	85.7	0.1	55.6
W4-3	27.9	88.5	11.5	191.7	4.6	6.3	5.8	53.0	1 440.0	19 874.0	1 861.8	129.3	88.5	0.1	56.1
W4-4	13.5	85.2	14.8	176.0	3.9	5.5	4.8	56.4	1 430.0	22 831.8	1 424.8	111.8	88.8	0.1	56.1
W4-5	10.1	71.6	28.4	176.3	4.4	6.2	5.8	68.4	1 320.0	27 042.3	1 273.9	96.3	87.7	0.1	56.9
W4-6	13.9	66.3	17.5	152.7	3.3	5.0	6.9	62.5	1 048.0	17 418.9	977.2	102.0	87.9	0.1	57.7
W5-1	27.6	85.9	8.2	184.3	4.9	6.8	2.0	79.4	1 365.0	43 382.9	1 579.1	115.7	82.9	0.1	59.5

表 4 地质工程参数关联度排序统计表
Table 4 Sorting statistics table of geological engineering parameter correlation degree

地质参数	目标甜点钻遇率 /%	含气量 /(m ³ ·t ⁻¹)	脆性 指数 /%	TOC /%	有效 孔隙度 /%	平均 伽马值 /API	龙一 ₂ 层 钻遇率 /%
关联度	0.614	0.481	0.471	0.456	0.404	0.372	0.242
排序	1	2	3	4	5	6	7
工程参数	加砂强度 /(m ³ ·m ⁻¹)	改造长度 /m	加砂量 /t	最高泵压 /MPa	砂液比 /(t·m ⁻³)	液量 /m ³	停泵压力 /MPa
关联度	0.597	0.516	0.405	0.393	0.328	0.317	0.269
排序	1	2	3	4	5	6	7

2.4 产能评价模型的建立

基于威远页岩气区块主控因素分析结果,建立多元线性回归产能评价模型。

2.4.1 计算权重系数

对关联度进行归一化处理,由公式(2)得到比

较数列的权重系数 W_i ,即

$$W_i = r_{oi} / \sum_{i=1}^m r_{oi} \quad (2)$$

式中: W_i 为第 i 个比较数列的权重; r_{oi} 为第 i 个比较数列与参考数列的关联度; m 为比较序列个数

(文中取 14)。

2.4.2 建立测试产量预测公式

基于关联分析,选取目标甜点钻遇率、改造长度和加砂强度三个影响产能主控因素作为评价参数,采用灰色综合评价法计算产能综合评价指标,即

$$Q_{UG} = \sum_{i=1}^n a_i X_i \tag{3}$$

式中: Q_{UG} 为综合评价指标; X_i 为评价参数; a_i 为评价参数的权重系数。

通过综合评价指标,建立多元线性回归产量综

合预测模型,即

$$Q = 0.119R + 0.005L + 0.122S - 21.465 \tag{4}$$

式中: R 为目标甜点钻遇率,%; L 为改造长度,m; S 为加砂强度, m^3/m 。

该预测模型仅需要三个地质工程参数即可以预测测试产量,能够快速评价未试采新井的产能。

2.5 产能评价模型的应用

根据所得产能预测公式,将 8 口新钻水平井目标甜点钻遇率、改造长度和加砂强度参数代入公式 4,计算测试产量,8 口新钻水平井主控因素参数及计算结果见表 5 和图 1。

表 5 新钻水平井主控因素参数及计算测试产量误差表
Table 5 Parameters of main control factors for new drilling horizontal wells and error table of calculation test production

井号	加砂强度 /($m^3 \cdot m^{-1}$)	改造长度 /m	目标甜点钻遇率 /%	测试产量 /($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	计算产量 /($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	误差 /%
W1	135.0	1 272.0	29.7	4.3	4.6	6.1
W2	134.7	1 300.0	74.8	9.5	10.2	7.2
W3	159.5	1 353.0	100.0	17.8	16.5	7.1
W4	85.3	1 400.0	99.1	8.6	7.8	9.7
W5	123.3	1 330.0	97.9	12.2	11.8	3.4
W6	134.3	1 385.0	94.1	13.2	12.9	2.1
W7	145.0	569.0	90.9	10.0	9.7	3.1
W8	144.4	1 323.0	72.7	10.4	11.2	8.0

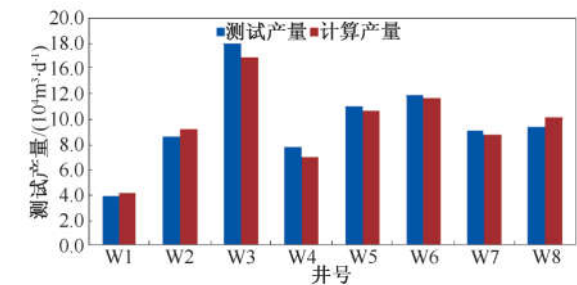


图 1 计算产量与实际产量对比图
Fig.1 Comparison of calculated production and actual production

由表 5 及图 1 可以看出,计算结果与实际测试产量相差 $0.3 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4 m^3/d$,误差为 2.1%~9.7%,均在 10%以内,结果显示模型准确可靠。

3 结论

(1)与常规产能评价相比,本文所建立的产能评价公式计算简单,资料限制更少,能够在没有进行产能测试和试采的情况下第一时间进行预测评价,方便快捷,适用范围更广;同时可以规避产能试井约束,降低成本,更经济可行。

(2)采用灰色关联方法确定了影响威远地区页岩气水平井产能的主控因素为地质因素中的目标甜点钻遇率、工程因素中的改造长度和加砂强度。

为使页岩气水平井产能最大化,需要优化水平巷道设计及压裂施工设计,尽量保持井筒完整性,提高随钻地质导向准确率及压裂改造强度和加砂强度。

(3)该方法有效结合威远页岩气区块地质开发特征,针对性强,准确性高,能够用来预测威远页岩气区块后续新井测试产量,对指导威远地区新井优化设计和合理配产有较大应用价值。

致谢:感谢长城钻探地质研究院各级领导和同事及页岩气项目组所有成员在项目研究及文章撰写上的帮助;感谢国家科技重大专项的资助。

参考文献

[1] 张晓涛,陈满,蒋鑫,等. 页岩气产能评价方法研究[J]. 天然气地球科学,2016,27(3): 549-553.
ZHANG Xiaotao, CHEN Man, JIANG Xin et al. Productivity evaluation method of shale gas well [J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(3): 549-553.
[2] 谢军,赵圣贤,石学文,等.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.
XIE Jun, ZHAO Shengxian, SHI Xuewen et al. Main geological factors controlling high production of horizontal shale gas wells in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017,37(7): 1-12.
[3] 陈元千.确定气井绝对无阻流量的简单方法[J].天然气工业,1987,7(1):26-34.

- CHEN Yuanqian. A simple method for determining absolute open flow rate of gas well [J]. *Natural Gas Industry*, 1987, 7(1): 26-34.
- [4] 廖代勇, 边芳霞, 林平. 气井产能分析的发展研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(2): 100-101.
LIAO Daiyong, BIAN Fangxia, LIN Ping. Deliverability analytical approach of gas well [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(2): 100-101.
- [5] 唐俊伟, 马新华, 焦创赞, 等. 气井产能测试新方法——回压等时试井[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(5): 540-544.
TANG Junwei, MA Xinhua, JIAO Chuangyun *et al.* A new testing method of gas well potential: Backpressure isochronal test [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(5): 540-544.
- [6] 段永刚, 李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析[J]. *天然气工业*, 2010, 30(3): 26-29.
DUAN Yonggang, LI Jianqiu. Transient pressure analysis of infinite conductivity fractured wells for shale gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(3): 26-29.
- [7] 邓佳, 朱维耀, 刘锦霞, 等. 考虑应力敏感性的页岩气产能预测模型[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 456-460.
DENG Jia, ZHU Weiyao, LIU Jinxia *et al.* A new method of predicting gas wells' productivity of fractured horizontal well of low-permeability tight gas reservoir [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 456-460.
- [8] 宋洪庆, 刘启鹏, 于明旭, 等. 页岩气渗流特征及压裂井产能[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(2): 139-144.
SONG hongqing, LIU Qipeng, YU Mingxu *et al.* Characteristics of gas flow and productivity of fractured wells in shale gas sediments [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(2): 139-144.
- [9] 蔡振华, 廖新维. 非常规气藏压裂井产能评价方法[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(4): 96-98.
CAI Zhenhua, LIAO Xinwei. Productivity evaluation of fractured well in unconventional gas reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(4): 96-98.
- [10] 姜宝益, 李治平, 第五鹏祥, 等. 页岩气产能评价方法及模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(25): 58-62.
JIANG Baoyi, LI Zhiping, DIWU Pengxiang *et al.* Shale gas productivity evaluation and model study [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(25): 58-62.
- [11] 刘华, 胡小虎, 王卫红, 等. 页岩气压裂水平井拟稳态阶段产能评价方法研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(2): 76-81.
LIU Hua, HU Xiaohu, WANG Weihong *et al.* Study on productivity evaluation method of fracturing horizontal shale gas well in pseudo-steady state [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2016, 31(2): 76-81.
- [12] 王维旭, 贺满江, 王希友, 等. 筠连区块煤层气产能主控因素分析及综合评价[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(9): 194-200.
WANG Weixu, HE Manjiang, WANG Xiyu *et al.* Analysis on main controlling factors and comprehensive evaluation of coalbed methane production capacity of Junlian block [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(9): 194-200.
- [13] 刘震, 党耀国, 周伟杰, 等. 新型灰色接近关联模型及其拓展[J]. *控制与决策*, 2014, 29(6): 1071-1075.
LIU Zhen, DANG Yaoguo, ZHOU Weijie *et al.* New grey nearness incidence model and its extension [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(6): 1071-1075.
- [14] 陈勇明, 张明. 灰色样条绝对关联度模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(5): 1304-1310.
CHEN Yongming, ZHANG ming. Cubic spline based grey absolute relational grade model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2015, 35(5): 1304-1310.
- [15] 杨文光, 吴云洁, 王建敏, 等. 新型灰色关联分析模型的改进与拓展[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2017, 49(2): 25-30.
YANG Wenguang, WU Yunjie, WANG Jianmin *et al.* Improvement and development of the new model of grey correlation analysis [J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(2): 25-30.
- [16] 聂玲, 周德胜, 郭向东, 等. 利用灰色关联法分析低渗气藏压裂影响因素[J]. *断块油气田*, 2013, 20(1): 133-136.
NIE Ling, ZHOU Desheng, GUO Xiangdong *et al.* Analysis on influencing factors of postfracture response in low permeability gas reservoir with gray correlation method [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(1): 133-136.
- [17] 方辉煌, 汪吉林, 宫云鹏, 等. 基于灰色模糊理论的页岩气储层评价——以重庆南川地区龙马溪组页岩为例[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(5): 76-81.
FANG Huihuang, WANG Jilin, GONG Yunpeng *et al.* Evaluation of shale gas reservoirs based on gray fuzzy theory: a case study from Longmaxi Formation in Nanchuan area, Chongqing [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 28(5): 76-81.
- [18] 张艺钟, 张茂林, 喻高明, 等. 页岩气藏单井产能计算方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(1): 161-164.
ZHANG Yizhong, ZHANG Maolin, YU Gaoming *et al.* Calculating method of the individual well productivity for the shale gas reservoir [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(1): 161-164.
- [19] 刘虹瑜, 杨向同, 袁学芳, 等. 塔中志留系储层重复改造选井和产能预测方法[J]. *油气井测试*, 2018, 27(1): 55-61.
LIU Jiangyu, YANG Xiangtong, YUAN Xuefang *et al.* Method of re-stimulation candidate selection and productivity prediction for Silurian reservoirs in Tazhong area [J]. *Well Testing*, 2018, 27(1): 55-61.

编辑 刘述忍

第一作者简介: 肖寒, 女, 1986年出生, 硕士, 工程师, 2012年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业, 现主要从事威远页岩气开发与地质研究工作。电话: 0427-7301952, 18642756619; Email: xh123.gwde@cnpc.com.cn。通信地址: 辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街76号金兆大厦303室, 邮政编码: 124010。