

# 页岩气水平井产能预测方法及应用

## ——以四川盆地威远区块为例

陈雪<sup>1</sup>, 蔡默仑<sup>2</sup>, 周昕<sup>1</sup>

1. 中国石油川庆钻探工程公司页岩气项目经理部 四川成都 610000
2. 中国石油川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院 四川成都 610000

通讯作者: Email: 290737437@qq.com

引用: 陈雪, 蔡默仑, 周昕. 页岩气水平井产能预测方法及应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(2): 68-72.

Cite: CHEN Xue, CAI Molun, ZHOU Xin. Productivity prediction method for horizontal wells in shale gas horizontal well in Weiyuan block of the Sichuan Basin[J]. Well Testing, 2023, 32(2): 68-72.

**摘要** 四川盆地威远区块国家级页岩气示范区开发效果显著, 但单井产量差异较大, 影响产量的地质、工程因素数量多, 因素间内在联系尚无定量表征, 且各因素与产量间存在不严格的数学关系。为指导井位部署论证, 顺利开展压裂前水平井地质评价, 实现目的层的有效压裂改造, 以威远页岩气 61 口典型水平井为例, 利用灰色关联法筛选出水平井产能的 6 个主控因素, 包括: 压裂段长、优质箱体钻遇段长、含气量、龙一<sub>1</sub> 小层厚度、加砂强度、总射孔数, 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预测模型。实例选取区块内 W1 平台、W2 平台共计 6 口水平井计算预测产量, 预测产量与实际测试产量的相对误差率为 0.32%~18.25%, 平均 8.1%, 表明该产能预测模型准确可靠, 可满足威远页岩气产量评价的实际生产需求。

**关键词** 威远区块; 页岩气; 水平井; 产能评价; 灰色关联法; 多元线性回归; 预测模型; 工程因素

**中图分类号**: TE353      **文献标识码**: B      **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.02.013

## Productivity prediction method for horizontal wells in shale gas horizontal well in Weiyuan block of the Sichuan Basin

CHEN Xue<sup>1</sup>, CAI Molun<sup>2</sup>, ZHOU Xin<sup>1</sup>

1. Shale Gas Exploration and Development Department CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan 610000, China
2. Geological Exploration and Development Reserrch Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu, Sichuan 610000, China

**Abstract:** Weiyuan shale gas block in Sichuan, belongs to Weiyuan-Changning national shale gas demonstration area, has obtained favorable development effect, but the production of single well varies greatly. There are many geological and engineering factors that affect the output, and the internal relationship between the factors has not been quantitatively characterized, and there is not strict mathematical relationship between the factors and the output. In order to guide the well location deployment demonstration, carry out the geological evaluation of the horizontal well before fracturing, and achieve the effective fracturing of the target stratum, the six main controlling factors for the productivity of horizontal wells are screened by using the grey correlation method based on the data of 61 horizontal wells in Weiyuan shale gas block, including: the length of fracturing section, the length of dessert drilling section, the gas content, the thickness of the first layer of Longmaxi-1 Formation, the proppant injection intensity, and the total number of perforations. Based on the analysis results of main controlling factors in Weiyuan shale gas block, a multiple linear regression productivity prediction model is established. Six horizontal wells on W1 platform and W2 platform in the block are selected to calculate the predicted production. The error rate between the predicted production and the actual test production is 0.32%~18.25%, with an average of 8.1%. The productivity prediction model is accurate and reliable, and can meet the actual production demand of Weiyuan shale gas production evaluation.

**Keywords:** Weiyuan block; shale gas; horizontal well; productivity evaluation; grey correlation method; multiple linear regression; the prediction model; engineering factors

中国页岩气勘探开发正处于快速发展阶段,四川盆地威远区块隶属国家级页岩气示范区,页岩气资源潜力巨大,开发前景广阔。产能预测是实现页岩气藏经济效益开发的关键问题,是确定合理开发决策的重要前提<sup>[1-2]</sup>。目前国内外学者对页岩气井产能评价的研究较多,谭泉麒<sup>[3]</sup>在调研了国内外大量相关文献的基础上,分析研究了页岩气的储存、运移和产出机理,建立了页岩气开采的物理模型,该模型通过给定井况、工程参数的方式展开产能预测。王忠东<sup>[4]</sup>等着重研究了 W 地区井眼轨迹对产能的影响,并利用神经网络方法以及数理统计方法对其产能进行预测。邓佳等<sup>[5]</sup>根据页岩气储层中气体的成藏机制及流动机理,建立了考虑解吸、扩散及渗流综合作用的页岩气稳态流动模型,在不同边界条件下对控制方程进行求解,得到页岩气储层的压力分布及产能方程,在此基础上建立了考虑应力敏感性的产能方程。谢军等<sup>[6]</sup>从分析长宁—威远国家级页岩气示范区目的层下志留统龙马溪组的沉积背景入手,结合区内三维地震资料、取心井地质及测井资料,开展水平井小层划分与对比,筛选影响页岩气井产能的储层关键参数,进行储层分类综合评价。本文以威远示范区已投产的 61 口典型水平井资料为基础,基于地质评价新认识和工程技术新进展,分析页岩气的富集规律,对实现高产的关键地质工程因素进行灰色关联分析,筛选出水平井产能的主控因素,对威远页岩气区块进行产能预测,为地质评价及压裂方案设计提供可靠依据,指导后续页岩气井的开发投产<sup>[7-9]</sup>。

表 1 威远页岩气井地质工程参数统计表

Table 1 Statistical table of geological engineering parameters of Wei yuan shale gas Wells										
井号		W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W-6	W-7	W-8	…… W-61
地质参数	测试产量/(10 <sup>4</sup> ·m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	16.33	16.38	20.48	20.55	21.04	21.78	21.86	24.72	5.71
	龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup> 厚度/m	3.0	3.5	4.7	4.3	6.6	5.3	5.2	4.3	3.0
	有机碳含量/%	4.5	4.5	4.4	4.4	4.5	5.5	5	4.1	3.9
	吸附气含量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.7	2.5	1.6	1.2
	游离气含量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	4.4	3.8	4.6	4.7	5.1	4.1	2.9	3.2	4.9
	总含气量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	5.8	5.2	5.9	6	6.4	5.8	5.4	4.8	6.1
	破裂压力/MPa	97.3	65.2	85.7	73.2	65.7	88.7	90	80.5	83.7
	脆性指数(含碳酸盐)/%	70	69.5	64.7	71.8	72.3	62.4	64.2	68.1	81.8
	箱体钻遇长度/m	1 574.9	1 453.5	1 438.2	1 212	1 625.4	1 296	1 600	1 601.4	1 066.8
	改造段长度/m	1 567.4	1 464.0	1 662.0	1 561.0	1 163.0	1 837.0	1 290.0	2 022.0	1 533.0
工程参数	总砂量/t	2 668.6	2 526.4	2 524.98	3 289	2 165.9	3 780.44	2 113.44	3 215.73	2 634.28
	总液量/m <sup>3</sup>	44 728.02	38 660.6	43 594.6	43 917.04	43 099.4	54 842.96	37 096.5	57 667.3	38 695.83
	平均停泵压力/MPa	53.28	37.62	53.33	47.98	56.5	56.97	56.16	48.9	63.3
	加砂强度/(t·m <sup>-1</sup> )	1.7	1.73	1.52	2.11	1.86	2.06	1.64	1.59	1.72
	用液强度/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )	28.54	26.41	26.23	28.13	37.06	29.85	28.76	28.52	25.24
	陶粒占比/%	68.68	68.02	67.26	57.84	65.4	58.02	67.92	65.62	56.72
	孔数/(孔/m)	1 225.6	1 056	1 176	948.8	1 056	1 140	1 152	1 520	1 136

# 1 威远区块页岩气水平井产能评价方法

在水平井产能影响因素灰色关联分析的基础上,建立了多元线性回归产能预测模型。

## 1.1 水平井产能影响因素灰色关联分析

目前威远区块页岩气水平井单井产量差异较大,影响产量的地质、工程因素数量多,因素间内在联系尚无定量表征,且各因素与产量间存在不严格的数学关系<sup>[10]</sup>。针对页岩气藏水平井的以上数据特点,采用灰色关联法可在不需要产能试井资料的情况下,保证选取参与储量预测的参数合理性、准确性,且计算过程较为简便。

### (1)母、子序列的选取

研究表明,页岩气水平井测试产量与单井 EUR 成正相关,在一定程度上反映了页岩气井的产能,同时选取测试产量作为母序列能够排除由生产时间不同导致的干扰,其母序列表示为

$$\{X_i(0)\} \quad i = 1, 2, 3, \cdots, n \quad (1)$$

式中:X<sub>i</sub>(0)为本次选取的第 i 口井的实际测试产量,10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;n 为总井数 61。

威远页岩气井的开发效果受钻井情况、地质条件以及压裂效果等综合影响,参考威远区块十余年的实际勘探开发经验及前期的产能主控因素分析成果,依据规律性、目标性的原则选取 61 口井 16 项地质工程因素用于灰色关联度分析,包括龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层厚度、有机碳含量、总含气量、改造段长度、总砂量、总孔数等,各井地质工程参数见表 1。

其中依据独立性原则,非独立、相关性大的同类指标间内部排序,仅保留与测试产量灰色关联度最大者。子序列表示为

$\{X_i(j)\}, i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$  (2)

式中: $X_i(j)$ 为本次选取的第*i*口井的第*j*个参数;*n*为总井数 61;*m*为参数个数 16。

本次储量预测参数选取的初始数据矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} X_1(0) & X_1(1) & \cdots & X_1(m) \\ X_2(0) & X_2(1) & \cdots & X_2(m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n(0) & X_n(1) & \cdots & X_n(m) \end{bmatrix}$$
 (3)

(2)序列量化处理

参与计算的 16 个地质、工程参数数值及预测产量的单位及值域变化范围均不相同且差别较大,需要在求灰色关联度前对原始数据进行预处理<sup>[11]</sup>。通过如下公式处理可消除母、子序列量纲间的差异并归一化

$\{X'_i(0)\} = \left\{ \frac{X_i(0) - \min X_i(0)}{\max X_i(0) - \min X_i(0)} \right\}$  (4)

$\{X'_i(j)\} = \left\{ \frac{X_i(j) - \min X_i(j)}{\max X_i(j) - \min X_i(j)} \right\}$  (5)

$i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$

式中: $X'_i(0)$ 为第*i*口井的无量纲归一化预测产量, $X'_i(j)$ 为第*i*口井的第*j*个无量纲归一化参数

(3)灰色关联度求取

过大的绝对差值极大值会减弱灰色关联系数间的差异性,因此通常取分辨系数 0.5 加入灰色关联系数公式计算<sup>[12]</sup>。灰色关联度求取公式为

$\xi_{j,0} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(j,0) + \rho \Delta_{\max}}$  (6)

$\Delta_i(j,0) = |X'_i(j) - X'_i(0)|$  (7)

$\Delta_{\max} = \max_i \max_j |X'_i(j) - X'_i(0)|$  (8)

$\Delta_{\min} = \min_i \min_j |X'_i(j) - X'_i(0)|$  (9)

式中: $\xi_{j,0}$ 为灰色关联度; $\Delta_{\max}$ 为无量纲归一化后 61 口井第*j*个参数与预测产量绝对差值的极大值; $\Delta_{\min}$ 为无量纲归一化后 61 口井第*j*个参数与预测产量绝对差值的极小值; $\rho$ 为分辨系数。

取得 61 口井第*j*个参数与预测产量间关联系数后,其平均值  $\gamma_{i,0}$  即为第*j*个参数与预测产量间的灰色关联度,其值越接近 1 则表明对预测产量的影响越大:

$\gamma_{i,0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{j,0}$  (10)

(4)灰色关联度排序

利用式(10)计算 16 个地质工程参数与测试产量之间的关联度和权重,并依次进行排序,确定各比较序列的主次关系,结果如表 2、表 3 所示。根据 16 个参数的权重大小及排名分别筛选出 6 个页岩气水平井产能主控因素,包括 3 个地质因素:龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层厚度、龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>底以上 4 m 箱体钻遇长度、总含气量;3 个工程因素:改造段长度、加砂强度和总孔数。

表 2 威远页岩气井地质因素与测试产量灰色关联度统计表

Table 2 Statistical table of grey correlation degree between geological factors and testing production of Weiyuan Shale Gas Well

地质参数	厚度/ m	箱体钻遇长度/ m	总含气量/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	吸附气含量/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	破裂压力/ MPa	游离气含量/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	脆性指数/ %	有机碳含量/ %
关联度	0.93	0.92	0.9	0.89	0.8	0.76	0.76	0.73
排序	1	2	3	4	6	7	8	9

表 3 威远页岩气井工程因素与测试产量灰色关联度统计表

Table 3 Statistical table of grey correlation degree between engineering factors and testing production of Weiyuan Shale Gas Well

工程参数	改造段长度/ m	加砂强度/ (t·m <sup>-1</sup> )	总孔数/ t	总砂量	平均停泵压力/ MPa	陶粒占比/ %	总液量/ m <sup>3</sup>	用液强度/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )
关联度	0.88	0.76	0.75	0.74	0.7	0.69	0.65	0.65
排序	1	2	3	4	6	7	8	9

1.2 多元线性回归产能预测模型建立

基于上述灰色关联法主控因素分析,选取龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>小层厚度、龙一<sub>1</sub><sup>1</sup>底以上 4 m 箱体钻遇长度、总含气量、改造段长度、总孔数和加砂强度六个地质工程产能主控因素作为评价参数,建立多元线性回

归模型

$Q = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon$  (11)

式中: $Q$ 测试产量,10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d; $X$ 为评价参数; $\beta$ 为权重系数; $\varepsilon$ 为残差的平方和。

换成矩阵模式,则有

$$Q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ \cdots \\ q_m \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_n^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ 1 & x_1^m & x_2^m & \cdots & x_n^m \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdots \\ \beta_m \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \cdots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix} \tag{12}$$

即

$$Q = X\beta + \varepsilon \tag{13}$$

根据最小二乘法,得到  $\beta'$  的解

$$\beta' = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{14}$$

选取威远区块 40 口生产井数据参与模型拟合,建立威远区块龙马溪组基于地质工程分析的多元线性回归产量预测模型,即

$$Q = 0.012\ 1L + 0.011L_4 + 2.458\ 1T + 5.984\ 8h + 0.002\ 3N + 1.509\ 3S - 60.947\ 5 \tag{15}$$

式中: $L$  为压裂改造段长,m; $L_4$  为龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 优质箱体钻遇长度,m; $T$  为含气量,m<sup>3</sup>/t; $h$  为龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层厚度,m; $N$  为总射孔孔数; $S$  为加砂强度,t/m。

方程各回归参数代表的自变量如表 4 所示,统计量  $t$  值为回归系数与其标准误差的比值,其多元线性回归参数为:残差平方和 775.93,回归平方和 867.17,回归标准差 4.85, $P$  值  $2.91\times10^{-13}$ ,相关系数 0.87,表明回归方程的参数求取满足显著性检验要求。

表 4 威远页岩气井产能预测多元线性回归系数表

Table 4 Multiple linear regression coefficient table for productivity prediction of Weiyuan shale gas well

自变量	回归系数	$t$ 值
压裂段长/m	0.012 1	2.59
龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup> 4 m 箱体钻遇长度/m	0.011 0	5.90
总含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	2.458 1	1.53
龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup> 厚度/m	5.984 8	7.55
总孔数/ $N$	0.002 3	0.45
加砂强度/(t·m <sup>-1</sup> )	1.509 3	0.49

表 5 威远页岩气井产能预测模型应用统计表

Table 5 Application Statistics of Weiyuan Shale Gas Well Productivity Prediction Model

平台	井号	压裂段长/m	龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup> 4 m 箱体钻遇长度/m	总含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	龙一 <sub>1</sub> <sup>1</sup> 小层厚度/m	总孔数	加砂强度/(t·m <sup>-1</sup> )	测试产量/(10 <sup>4</sup> ·m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	预测测试产量/(10 <sup>4</sup> ·m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产量差值/(10 <sup>4</sup> ·m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	相对误差/%
W1	W1-1	1 667	1 700	5.9	5	1 416	1.47	23.51	27.80	4.29	18.25
	W1-2	1 656	1 700	5.9	5	1 232	1.53	27.71	27.35	0.36	1.30
	W1-3	1 657	1 700	5.9	5	1 232	1.65	31.86	27.53	4.33	13.59
	W1-4	1 657	1 700	5.9	5	1 232	1.69	31.07	27.59	3.48	11.20
	平均							114.15	110.27	3.88	3.40
W2	W2-1	1 740	1 554	6	3	1 401	1.81	15.79	15.84	0.05	0.32
	W2-2	1 630	1 160	5.6	3.1	1 434	1.83	10.36	9.91	0.45	4.34
	平均							26.15	25.74	0.41	1.55

应用预测公式预测的测试产量与实际测试值进行了相关性分析(图 1),结果相关性较高。

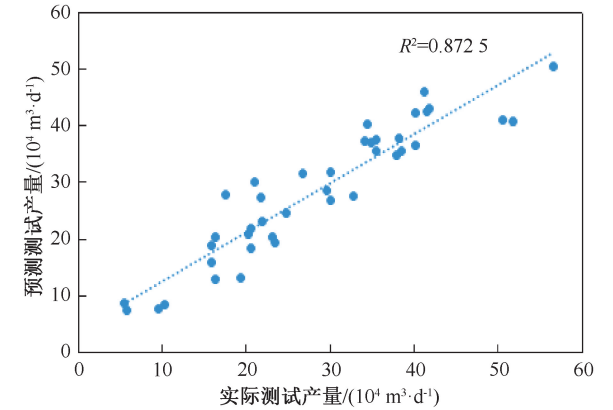


图 1 威远页岩气井预测产量与实际测试产量对比图

Fig. 1 Comparison of predicted test production and actual test production of Weiyuan gas well

## 2 产能预测模型的应用

为验证威远区块页岩气水平井产能预测模型的准确性和有效性,另选取区块内 W1 平台、W2 平台共计 6 口水平井计算预测产量,并将其与实际测试产量进行对比,结果如表 5 所示。

从表 5 可知,6 口水平井产量预测结果与实际测试产量比较接近,产量差值范围  $(0.05\sim4.3)\times10^4\text{ m}^3$ ,平均  $2.1\times10^4\text{ m}^3$ ,相对误差率在  $0.32\%\sim18.25\%$ ,平均 8.1%,表明该产能预测模型准确可靠,可满足威远页岩气产量评价的实际生产需求。



### 3 结论

(1)采用灰色关联法确定影响威远页岩气水平井产能的6个主控因素。包括3个地质参数:龙一<sub>1</sub><sup>1</sup> 小层厚度、优质箱体钻遇长度、含气量;3个工程参数:压裂改造段长、加砂强度以及总射孔数。

(2)页岩气水平井能否获得高产由地质因素和工程因素共同决定。地质参数关联度普遍大于工程参数。

(3)基于灰色关联法建立的威远页岩气水平井产能预测模型可快速预测气井产量,且该公式预测结果与实际测试产量相对误差低,预测效果较好,对新井井位部署论证、工程优化设计有较大的指导意义。

**致谢:**感谢川庆钻探页岩气项目经理部、地质勘探开发研究院各级领导和同事在项目研究及文章撰写上提供的帮助。

#### 参考文献

- [1] 邹才能,杨智,何东博,等.常规-非常规天然气理论、技术及前景[J].石油勘探与开发,2018,45(4):575-587.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 575-587.
- [2] 张小涛,陈满,蒋鑫,等.页岩气井产能评价方法研究[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.
- [3] 谭泉麒.长宁-威远页岩气井合理生产参数级产能影响因素研究[D].西南石油大学,2015.
- [4] 王忠东,王业博,董红,等.页岩气水平井产量主控因素分析及产能预测[J].测井技术,2017,41(5):577-582.  
WANG Zhongdong, WANG Yebo, DONG Hong, et al. Production main control factors analysis and productivity prediction for shale gas of horizontal well[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 577-582.
- [5] 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):456-460,638.  
DENG Jia, ZHU Weiyao, LIU Jinxia, et al. Productivity prediction model of shale gas considering stress sensitivity[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 456-460, 638.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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 & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 161-164.
- [9] 李志强,赵金洲,胡永全,等.页岩气压裂水平井产能模拟与布缝模式[J].大庆石油地质与开发,2015,34(5):162-165.  
LI Zhiqiang, ZHAO Jinzhou, HU Yongquan, et al. Productivity simulation and fracture arrangement simulation schemes for shale-gas fractured horizontal well[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(5): 162-165.
- [10] 杨文光,吴云洁,王建敏.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):24-29.  
YANG Wenguang, WU Yunjie, WANG Jianmin. Improvement and development of the new model of grey correlation analysis[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 24-29.
- [11] 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]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(5): 76-81.
- [12] 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.  
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.

编辑 刘振庆

**第一作者简介:**陈雪,女,1989年出生,工程师,硕士,2014年毕业于西南石油大学矿物学、岩石学、矿床学专业,现主要从事综合地质研究工作。电话:028-86018429,15928589005,Email:290737437@qq.com。通信地址:四川成都中国石油川庆钻探工程有限公司页岩气勘探开发项目部,邮政编码:610000。