

引用格式:龙章亮,温真桃,李辉,等.一种基于灰色关联分析的页岩储层可压性评价方法[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):37-42.

LONG Z L, WEN Z T, LI H, et al. An evaluation method of shale reservoir crushability based on grey correlation analysis[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 37-42.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.006

一种基于灰色关联分析的页岩储层可压性评价方法

龙章亮¹,温真桃²,李辉³,曾贤薇⁴

(1.中国石化西南油气分公司石油工程技术研究院,四川 德阳 618000;2.中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川 成都 610000;3.中国石化西南油气分公司页岩气项目部,重庆 402160;4.四川省煤田地质局一四一地质队,四川 德阳 618000)

摘要:页岩储层的可压性评价是个复杂的系统工程。由于影响储层可压性的参数众多,包括储层基础地质参数(孔隙度、渗透率、含气量、有机碳含量等),工程地质参数(岩石强度、弹性模量、泊松比、地层压力、地应力等)以及工程参数(水平段长、优质储层钻遇率、分段分簇、压裂规模等)多参数影响,且不同气田的主要影响因素不同,复杂工区光是寻找影响产能的主控因素都需要进行多轮先导试验进行分析评价。由于目前国内还没有一个统一、权威的页岩储层可压性评价方法,气田储层可压性评价任务迫在眉睫,因此,提出了一种基于灰色关联分析的页岩气储层可压性分析评价方法。其优点在于可快速地明确影响产量主控敏感参数。参数相关性强,可根据敏感参数预测压后产量,且随后期开发井数量越多预测精度越高。气田可以通过工程工艺优化调整得出的主控敏感参数,达到进一步提高压裂效果的目的。

关键词:页岩气;储层可压性;灰色关联;主控敏感参数;压裂综合指数

中图分类号:TE357

文献标识码:A

An evaluation method of shale reservoir crushability based on grey correlation analysis

LONG Zhangliang¹, WEN Zhentao², LI Hui³, ZENG Xianwei⁴

(1. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Southwest China Oil and Gas Company, Deyang, Sichuan 618000, China; 2. Research Institute of Exploration and Production, Sinopec Southwest China Oil and Gas Company, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Shale Gas Project Department, Sinopec Southwest China Oil and Gas Company, Chongqing 610500, China; 4. 141 geological team, Sichuan Coal Field Bureau, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: The crushability evaluation of shale reservoir is a complex system engineering. But as there are many parameters that affect the reservoir crushability, including the reservoir basic geological parameters, the rock mechanics, the formation pressure, the in-situ stress and the engineering technology, and the main influencing factors of different gas fields are different, multiple round of pilot tests are needed just to find out the main control factors affecting the productivity in complex working areas. Until now, there is no unified and authoritative evaluation method for shale reservoir crushability in China, it is extremely urgent to complete this task. Therefore, a method for shale gas reservoir crushability evaluation based on grey correlation analysis is proposed. This method has the advantages that it can quickly identify the main control sensitive parameters that affect the production. The correlation of the parameters is strong. And the production after fracturing can be predicted according to the sensitive parameters. With the increase of the number of developed wells, the prediction accuracy will be higher. In the gas field, the main control sensitive parameters can be adjusted by the optimization of engineering process, so as to further improve the fracturing effect.

Key words: shale gas, reservoir crushability, grey correlation, main control sensitive parameter, fracturing comprehensive index

YC地区目前还处于勘探评价阶段,区块目的层比较深,龙马溪组优质储层埋深大于3 500 m,属于深层页岩气范畴。区块构造差异很大,南北向斜、中

部背斜及断块区目的层深度差异大,温度压力高(压力系数>1.5,温度>130℃),地层层序复杂(陆海相由上至下18套地层)。陆相地层石英含量高、研磨性

收稿日期:2019-03-18。

第一作者简介:龙章亮(1983—),男,副研究员,从事油气田钻井地质、工程地质方面的研究。通讯地址:四川省德阳市旌阳区龙泉山北路298号中石化西南油气分公司石油工程技术研究院。邮编:618000。E-mail:76415750@qq.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061)。

强,海相地层含燧石和鲕粒灰岩,可钻性差,钻井效率低。复杂构造区深度、产状、小断层预测误差大,水平井轨迹控制难,多口水平井因小断层影响导致穿层,从而丢失压裂段长,多口探井、评价井压裂效果不尽如意。目前,钻井提速和改造提效是两大主要目标,钻井提速可以根据先导试验和工艺参数优化进一步提升,改造提效的需求更为迫切。压裂改造效果的主控因素是什么,工艺参数如何优化才能达到目的,要解决这些问题就需要进行储层可压性评价。

1 YC区块页岩储层产能灰色关联分析

1.1 灰色关联主要思想

灰色关联是定量比较和描述系统各因素之间在发展的过程中,随着空间、时间而相对变化的相关情况。与一般数据分析中常用的两个数据间的对比不同,它将尽可能多的影响因素全部放进系统中,进行了多参数分析比较,确定了若干离散函数对目标函数相对的影响程度^[1]。另外,灰色关联分析是基于灰色关联空间,而并不直接用距离来度量两个参数之间的远近程度。它运用了灰关联序、灰色关联度、灰色关联系数等概念,通过这类概念来刻画不同影响因素之间的接近程度,包括变化方向、大小和速度等,客观地反映了系统内影响因素之间的真实灰关系^[2]。所以,利用灰色关联分析页岩气的储层可压性是一种相对比较有效、客观的数据分析方法。

灰色关联分析数据处理步骤如下:

1) 归一化

由于气田中所要分析的各种参数的量纲各有不同,数量级也各有差异。为了消除这种差异的影响,使数据之间更具有可比性,就需要对原始数据进行处理,从而达到可以进行数据比较的目的。对于数据指标序列来讲,一般的做法都是采用效果测度或极差变换,变换法则就是对于越大越有利的数据采用上限测度,而对于越小越有利的参数采用下限测度^[3]。其中,上限测度处理的计算公式如下:

$$X_{ij}' = \frac{X_{ij}}{X_{j\max}} \quad (1)$$

式中: X_{ij}' 为归一化参数值; X_{ij} 为原始参数值; $X_{j\max}$ 为原始最大参数值。

2) 求差值

计算得到每个参数点的比较序列与参考序列的差值绝对值,计算公式如下:

$$\Delta_{oi}(k) = |X_{oi}(k) - X_i(k)| \quad (2)$$

式中: $\Delta_{oi}(k)$ 为归一化参考值与比较值差值绝对值; $X_{oi}(k)$ 为归一化参数值; $X_i(k)$ 为归一化比较值。

3) 求最大值和最小值

求出所有差值绝对值中的最小值和最大值。

4) 关联系数求取

计算出各参数点子序列与母序列的关联系数,即:

$$L_{oi}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: $L_{oi}(k)$ 为关联系数; Δ_{\min} 为绝对值最小值; Δ_{\max} 为绝对值最大值; $\Delta_{oi}(k)$ 为参数点绝对值; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$ 。

5) 关联度计算

计算出所有参考序列中关联系数的平均值,即:

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n L_{oi}(k) \quad (4)$$

式中: γ_{oi} 为关联度; n 为参考点个数; $L_{oi}(k)$ 为各参考点关联系数。

6) 关联程度

对计算得到的关联度从大到小进行排序,若 $\gamma_{oa} > \gamma_{ob}$,就是表明 X_a 对 X_0 的影响程度大于 X_b 对 X_0 的影响程度;若 $\gamma_{oa} < \gamma_{ob}$,则反之;若 $\gamma_{oa} = \gamma_{ob}$,则说明 X_a 与 X_b 对 X_0 影响程度相当。

1.2 灰色关联参数选择

“可压性”是指储层形成体积压裂复杂裂缝网络,以实现有效增产的可能性或难易程度^[4]。

根据可压性概念,认为页岩可压性主要受压裂改造裂缝的复杂程度、有效改造体积及储层含气性影响。

裂缝复杂程度的主要影响指标:天然裂缝发育程度、脆性矿物及黏土含量、主应力方向、水平应力差异、弹性模量、泊松比、抗张强度、内聚力等。

有效改造体积的主要影响指标:储层埋深、水平段长、分段、分簇、改造规模、施工参数、断裂韧性等。

储层含气性的主要影响指标:优质页岩厚度、孔隙度、含气量、地层压力、有机碳含量、有机质成熟度等。

表1 YC区块35类地质—工程参数灰色关联分类
Table 1 Grey correlation classification of 35 geological and engineering parameters in YC Block

基础地质参数	工程地质参数	工程参数	目标参数
优质页岩埋深	相对方位角	水平段长	无阻流量
①—⑥优质页岩厚度	地层压力	优质储层钻遇长度	
2—3'优质储层厚度	弹性模量	I号峰钻遇长度	
五峰组厚度	泊松比	2—3'优质储层钻遇长度	
观音桥段厚度	抗压强度	五峰组钻遇长度	
岩心裂缝条数	抗张强度	临湘+宝塔组钻遇长度	
孔隙度	脆性指数	分段	
有机碳含量	I型断裂韧性	分簇	
含气量	II型断裂韧性	返排率	
脆性矿物含量	水平应力差	入地液量	
黏土含量	应力差异系数	入地砂量	
		施工排量	
		施工压力	

因此,从裂缝复杂程度、有效改造体积及储层含气性3方面入手,选择了11个基础地质参数、11个工程地质参数和13个工程参数(表1),通过这35类地质—工程与目标参数无阻流量进行灰色关联分析^[9]。

1.3 灰色关联分析结果

根据选择的11个基础地质参数,11个工程地质参数和13个工程参数,将北部向斜区、南部向斜区、背斜区、东部抬升区这4个不同井区的35类地质—工程参数进行数据收集及统计^[6]。

根据灰色关联分析方法,可以得到以下几点认识(图1):

- 1) 产能主要受优质储层钻遇率和优质储层厚度的影响。
- 2) YC区块的压裂规模与无阻流量关联度不强,分段和分簇数量的影响更大(单井总液量为32 240~44 265 m³,总砂量为641~1 523 m³)。

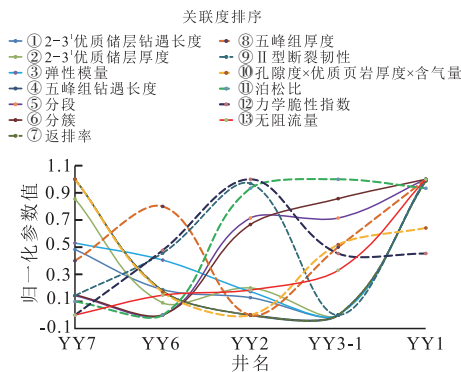


图1 YC区块测试无阻流量与主要敏感参数关联度影响曲线

Fig. 1 Correlation degree influence curve of test unobstructed flow and main sensitive parameters in YC Block

3) 天然裂缝发育程度不是YC背斜区压裂后影响产量的主要敏感因素(背斜区岩心裂缝数量是向斜地区的3倍左右)。

4) YC各井区水平应力差主体大于10 MPa,水平应力差较大(平均15.9 MPa)。即使天然裂缝发育,也很难使得次级裂缝延伸,大规模压裂改造后是否没有形成缝网,而只形成了单一主缝,导致压后产量影响敏感度较低,还需更多数据支持。

2 页岩储层可压性评价

2.1 主要敏感参数分类

根据YC区块测试无阻流量的主要敏感参数关联度及权重分配可以看出(图2、表2),这12类主要敏感参数与测试无阻流量关联度呈明显阶梯状^[7]。2—3'优质储层钻遇长度、2—3'优质储层厚度为第一阶梯,归一化平均关联度>6%;弹性模量、五峰组钻遇长度、分段为第二阶梯,归一化平均关联度>5%;分簇、返排率、五峰组厚度、II型断裂韧性为第三阶

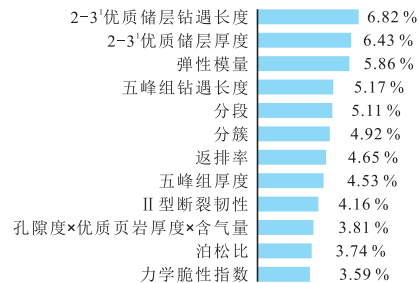


图2 YC区块测试无阻流量与主要敏感参数贡献百分比
Fig. 2 Contributions percentage of test unobstructed flow and main sensitive parameters in YC Block

表2 YC区块测试无阻流量与主要敏感参数分类

Table 2 Classify of test unobstructed flow and main sensitive parameters in YC Block

A类敏感参数	B类敏感参数	C类敏感参数	D类敏感参数
2—3 ¹ 优质储层钻遇长度 2—3 ¹ 优质储层厚度	弹性模量 五峰组钻遇长度 分段	分簇 返排率 五峰组厚度 II型断裂韧性	孔隙度×优质页岩厚度×含气量 泊松比 脆性指数

表3 YC区块测试无阻流量主要敏感参数关联度及权重分配

Table 3 Correlation degree and weight distribution of test unobstructed flow and main sensitive parameters in YC Block

影响参数	YY7	YY6	YY2	YY3-1	YY1	关联顺序	平均关联度
2—3 ¹ 优质储层钻遇长度/m	373.5	194.0	158.0	79.9	688.0	1	0.068 2
2—3 ¹ 优质储层厚度/m	5.93	4.40	4.62	4.22	6.22	2	0.064 3
弹性模量	26.53	25.18	22.67	20.80	31.6	3	0.058 6
五峰组钻遇长度/m	208.5	37	0	0	206	4	0.051 7
分段	17	16	21	21	23	5	0.051 1
分簇	44	41	55	59	62	6	0.049 2
返排率	26.20	36.12	27.50	16.89	14.01	7	0.046 5
五峰组厚度/m	6.9	7.3	6.5	7.0	7.5	8	0.045 3
II型断裂韧性	0.791	0.741	0.659	0.814	0.654	9	0.041 6
孔隙度×优质页岩厚度×含气量	24.75	15.95	14.16	19.65	20.95	10	0.038 1
泊松比	0.265	0.270	0.223	0.220	0.223	11	0.037 4
力学脆性指数	0.441	0.482	0.527	0.480	0.480	12	0.035 9

梯,归一化平均关联度 > 4 %;孔隙度×优质页岩厚度×含气量、泊松比、力学脆性指数为第四阶梯,归一化平均关联度 > 3 %^[8]。

2.2 参数权重分配

根据灰色关联理论,关联度反映了参数间的相关性好坏,将各关联度归一化后可以作为权重进行分配。为了让结果更精确,通过改变分辨系数求取关联系数的平均值,根据关联系数平均值优选了前12个关联度相对较高的参数作为主要敏感参数(表3),将关联度归一化进行权重分配^[9]。

2.3 压裂综合指数

根据35类地质—工程参数与测试无阻流量灰色关联分析获得的12类主要敏感参数权重分配,可得到体积压裂产量预测模型。根据模型计算得到一个大致反映页岩气井体积压裂过后无阻流量的指数,这里将此指数称为压裂综合指数^[10]。

即:压裂综合指数=主要敏感参数权重×归一化主要敏感参数数值

由此计算预测的压裂综合指数与YC页岩气井有较好的相关性,相关系数可达到90%以上,且后期井测试数据越多,计算模型越精确^[11]。

需要注意的是,这里的压裂综合指数与可压性指数有差异。目前国内对于页岩气可压性指数还没有一个统一的定义,通常认为可压性指数是由测井曲线计算得到的反映页岩储层不同井段可压裂性好坏的连续参数,而压裂综合指数是整口井可压性的综合表征^[12],通过现场测试验证其与压裂求产后的无阻流量有良好的相关性($R^2=0.863 9$),见表4、图3。

表4 YC区块各井测试无阻流量与压裂综合指数相关性统计

Table 4 Statistics for correlation of test unobstructed flow and fracturing composite index in YC Block

井号	压裂综合指数	无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
YY7	0.415 1	8.00
YY6	0.306 9	9.90
YY2	0.474 1	10.40
YY3-1	0.474 4	12.28
YY1	0.796 2	21.00

表5 YY1井平台钻井数据统计
Table 5 Drilling data statistics of YY1 well platform

井号	中深/ m	计算无阻流量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	水平段长/ m	I号峰 之上	I号峰	II上半幅—III下半幅	五峰组	临湘组	I _A 类储层 钻遇率/%
YY1-2HF	3 936	23.30	1 560		242	1 121	172	25	72.0
YY1-4HF	3 847	26.45	1 503	74	11	1 160	258		77.0
YY1HF	3 941	19.00	1 502	53	555	688	206		45.8
YY1-1HF	3 997	14.85	1 483	230	191	801	254	7	54.0
YY1-3HF	3 791	8.50	1 238			588	650		47.5

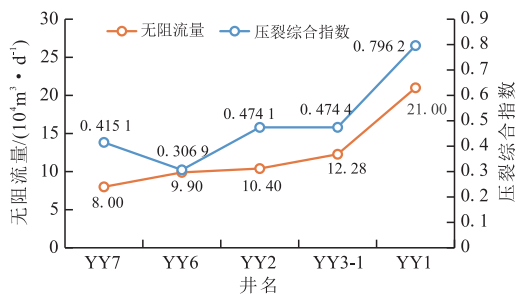


图3 YC区块各井测试无阻流量与压裂综合指数相关性
Fig. 3 Relation between test flow rate and fracturing composite index by testing of wells in YC Block

3 现场验证

根据YY1井平台后面实施的YY1-1HF井、YY1-2HF井、YY1-3HF井和YY1-4HF井的测试情况来看(表5),无阻流量与I类储层(2—3¹层)的钻遇率总体呈正相关关系(图4)。YY1-2HF井和YY1-4HF井I类储层钻遇率在70%以上,测试效果优于YY1HF井,YY1-3HF井轨道位置在五峰组,单井产能相对较低。这就证明了前期灰色关联分析的正确性^[13]。

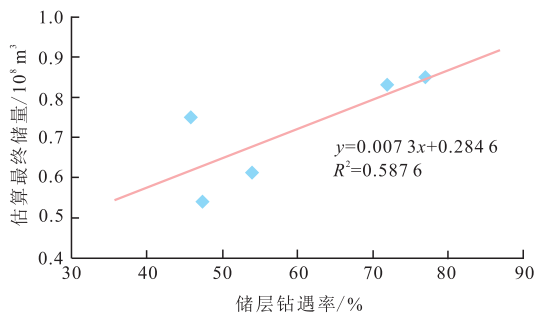


图4 YY1井平台EUR与钻遇率关系
Fig. 4 Relation between EUR and drilling rate of YY1 well platform

4 结论

1) YC地区影响页岩储层可压性的参数众多,根据灰色关联分析,影响程度由大到小分别为龙马溪组优质储层钻遇长度、龙马溪组优质储层厚度、弹性模量、五峰组钻遇长度、压裂分段分簇、返排率、五峰组厚度、II型断裂韧性、孔隙度与优质页岩厚度和含气量的乘积、泊松比以及脆性指数。

2) YC地区压裂规模与无阻流量关联度不强,分段和分簇数量影响更大。

3) 天然裂缝发育程度不是YC背斜区压裂后影响产量的主要敏感因素^[14]。

4) YC地区各井区水平应力差主体大于10 MPa,水平应力差较大,大规模压裂改造后是否只形成了单一主缝,从而导致压后产量影响敏感度较低,还需更多数据支持^[15]。

5) 通过灰色关联分析得到的压裂综合指数是不连续的,它不能反映页岩储层不同井段的可压裂性好坏,是整口井的可压性的综合表征,通过现场测试验证其与压裂求产后的无阻流量有良好的相关性。

参考文献

[1] 王学萌,张继忠,王荣.灰色系统分析及实用计算程序[M].武汉:华中科技大学出版社,2001:8-16.
WANG X M, ZHANG J Z, WANG R. Grey system analysis and practical calculation program[M]. Wuhan: Huazhong University of science and Technology Press, 2001: 8-16.

[2] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987:1-42.
DENG J L. Basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1987: 1-42.

[3] 连承波,钟建华,蔡福龙,等.油田产量影响因素的灰色关联分析[J].天然气地球科学,2006,17(6):851-853.

- LIAN C B, ZHONG J H, CAI F L, et al. Influencing factors analysis of oil field output based on grey correlation analytical method[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(6): 851-853.
- [4] 李颖川. 采油工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2002: 284.
LI Y C. Oil production engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 284.
- [5] 宋毅, 伊向艺, 卢渊, 等. 基于灰色关联分析法的酸压后产能主控因素研究[J]. *石油地质与工程*, 2009, 23(1): 82-84.
SONG Y, YI X Y, LU Y, et al. Study on main factors of off- take potential after gray associative analysis- based acidification and fracturing[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2009, 23(1): 82-84.
- [6] 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 H. Productivity evaluation method based on grey correlation analysis for shale gas horizontal wells in Weiyuan block[J]. *Well Testing*, 2018, 27(4): 73-78.
- [7] 洪亚飞, 王建忠, 孙强, 等. 焦石坝页岩气储层产能影响因素分析[J]. *非常规油气*, 2016, 3(5): 73-78.
HONG Y F. Analysis of the influence factors for shale gas reservoir in Jiaoshiba area[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2016, 3(5): 73-78.
- [8] 马文礼, 李治平, 孙玉平, 等. 基于机器学习的页岩气产能非确定性预测方法研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(6): 101-105.
MA W L, LI Z P, SUN Y P, et al. Non-deterministic shale gas productivity forecast based on machine learning[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2019, 26(6): 101-105.
- [9] 徐小明, 周明, 熊巍, 等. 页岩气产能影响因素分析[J]. *石油化工应用*, 2013, 32(9): 10-13.
XU X M, ZHOU M, XIONG W, et al. Analysis on shale gas production affecting factors[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2013, 32(9): 10-13.
- [10] 王衍, 马俯波, 张海英, 等. 灰色关联分析法在页岩储层评价中的应用——以湖南保靖页岩气区块为例[J]. *非常规油气*, 2017, 4(6): 8-12.
WANG Y, MA F B, ZHANG H Y, et al. Application of grey relational analysis in shale gas reservoir evaluation——Taking shale gas block in Baojing, Hunan as an example[J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2017, 4(6): 8-12.
- [11] 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 Z D, WANG Y B, DONG H, 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.
- [12] 梁榜, 卢文涛, 曾勇, 等. 涪陵焦石坝页岩气初期产能主控因素研究[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2016, 29(5): 1-4.
LIANG B, LU W T, ZENG Y, et al. Main controlling factors for early productivity of shale gas in Fuling Jiaoshiba area[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers*, 2016, 29(5): 1-4.
- [13] 侯腾飞, 张士诚, 马新仿, 等. 涪陵页岩气X井裂缝网络参数对产能的影响[J]. *深圳大学学报*, 2016, 33(4): 409-417.
HOU T F, ZHANG S C, MA X F, et al. Influence of fracture network parameters on productivity of shale gas well X in Fuling block[J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2016, 33(4): 409-417.
- [14] 王娟. 天然裂缝对页岩气储层产能贡献不大[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(3): 119.
WANG J. Natural fracture has little contribution to shale gas reservoir productivity[J]. *Natural gas exploration and development*, 2017, 40(3): 119.
- [15] 李凯, 张浩, 冉超, 等. 考虑应力敏感的页岩气产能预测模型研究——以川东南龙马溪组页岩气储层为例[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(3): 57-61.
LI K, ZHANG H, RAN C, et al. Productivity model of shale gas well with consideration of stress sensitivity: Taking Longmaxi Formation Shale Gas Reservoir in Southeastern Sichuan Basin as an example[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science)*, 2016, 31(3): 57-61.

(编辑 常燕)