

未开发油气储量不确定性潜力评价方法

凡玉梅

中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 保有未开发储量一般都经过多轮次筛选评价, 品位低, 储层非均质性严重, 整体动用技术配套性差, 因而采用传统确定性参数评价筛选整体潜力存在一定的局限性。为此, 研究构建了一套未开发储量不确定性潜力评价方法, 针对油藏非均质局部“甜点”潜力, 通过建立不同技术条件下单井控制可采储量与油藏参数的模型, 计算不同技术、经济条件下单井控制可采储量的“甜点”界限, 输入相关油藏参数的概率分布, 计算得到目标油藏可动用概率。该概率反映了储量动用的难易程度, 量化描述了储量动用的风险和动用规模。应用该方法对中国石化探明未开发储量进行评价, 在油价每桶 40~70 美元条件下, 筛选可动用潜力 $(4\ 300\sim 5\ 900)\times 10^4$ t。通过现场应用表明, 该方法能为未开发储量评价筛选提供新的借鉴。

关键词: 未开发储量; 不确定方法; 油气潜力评价; 油田开发

中图分类号: TE32

文献标识码: A

Evaluation method for uncertain potential of undeveloped reserves

FAN Yumei

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Retained undeveloped reserves are generally low-grade and undergone multiple rounds of screening and evaluation. The reservoir is highly heterogeneous and the overall production technology is poorly matched. Therefore, the use of traditional deterministic parameters to evaluate and screen the overall potential has limitations and a set of evaluation method for the uncertain potential of undeveloped reserves has been constructed. In the view of local “sweet spot” potential of heterogeneous oil reservoirs, a model for controlling recoverable reserves and reservoir parameters in a single well under different technical conditions was established to calculate the “sweet spot” limit of single-well-controlled recoverable reserves under different technical and economic conditions, input the probability distribution of relevant reservoir parameters, and calculate the recoverable probability of target reservoir. The probability reflected the difficulty of reserve production, and quantitatively described the risk and scale of reserves production. The method was applied to evaluate the proved undeveloped reserves of SINOPEC. Under the oil price of 40–70 \$/BBL, the exploitable potential was screened as $(4\ 300\sim 5\ 900)\times 10^4$ t. Field application showed that this method can provide a new reference for the evaluation and screening of undeveloped reserves.

Key words: undeveloped reserves; uncertainty method; evaluation for hydrocarbon potential; oil field exploration

“十一五”以来, 保有探明未开发储量规模大^[1], 其中探明 5 年以上仍未动用储量占到 90% 以上。制约未开发储量动用的主要因素为开发技术不配套^[2-3], 占比近 30%, 这部分储量具有深层、低渗、层薄等特点; 应用确定性的唯一参数, 采用传统潜力筛选方法评价, 属于开发技术不配套储量, 整块无法有效动用^[4-6]。实际上, 由于储层非均质性特点, 地质参数不是唯一确定值^[7-8], 存在局部非均质“甜点”, 确定性参数评价方法可能会忽略

这种类型的潜力^[9]。本文针对这部分整块开发技术不配套、但存在局部“甜点”潜力的储量, 研究提出了一种不确定性潜力评价方法, 并应用于中国石化探明未开发储量评价筛选中, 取得了一定的效果。

1 评价技术思路与技术流程

1.1 技术思路

油藏非均质性局部“甜点”必须满足目前开发

技术适应性,同时满足经济性,才能有效动用^[10-11]。单井控制经济可采储量是评价油藏能否经济有效开发的重要指标,因此围绕这个指标,从3个方面优化了不确定性潜力评价方法:一是采用概率分布表达地质参数的非均质性,代替了传统的确定性参数评价;二是通过数值模拟建立目标油藏单井控制可采储量和油藏参数的模型,计算单井控制可采储量逆累积概率曲线,并结合应用经济界限法计算可采储量的“甜点”值;三是应用可动用概率反映储量动用的难易程度和规模大小,定量化描述风险和动用规模。

1.2 技术流程

根据不确定性评价方法技术思路,以油藏数值模拟和蒙特卡洛模拟为手段,辅以正交设计试验优化,计算不同条件下未开发储量可动用概率。潜力评价技术流程如下(图1):

(1)构建目标区油藏参数合理的概率分布模型:应用统计法、类比法等,构建目标油藏参数概率分布,根据其在空间分布的非均质性,由高到低选取10%档位的高估值,90%档位的低估值,基于对数正态概率分布模型建立。

(2)建立不同技术条件下目标油藏单控可采与油藏参数的表征模型:应用油藏数值模拟方法,建立与目标油藏特征一致的具有一定代表性的概念模型,计算给定压力以及极限日产油量下的累积产油量,即弹性开发的单井控制可采储量,改变开发方式、开发技术,得到不同开发方式、技术条件下的单井控制可采储量和油藏参数的多元回归表征模型。

(3)建立目标油藏有效动用判别指标的概率分布模型:基于步骤(2)建立的单井控制可采储量和油藏参数的表征模型,使用步骤(1)油藏参数的

概率分布,采用蒙特卡洛方法计算目标油藏单井控制可采储量的累积概率分布模型。

(4)计算目标油藏不同技术条件、经济可行的“甜点”界限:根据目标油藏对应的投资、成本等经济数据,应用盈亏平衡方法,计算单井控制可采储量的经济界限。

(5)计算目标油藏不同政策界限下未开发储量的可动用比例:读取不同技术条件、不同油价下单井控制可采储量界限值对应的累积概率值,作为目标油藏不同技术经济政策界限下未开发储量的可动用比例。

(6)计算目标油藏可动用潜力规模:地质储量乘以可动用比例,得到目标油藏不同政策界限下可动用储量的概率分布。利用该概率分布的P10值、P50值和P90值作为目标油藏在此种政策界限下动用潜力的高估值、最可能估值和低估值规模;同时可计算该概率分布的P10/P90值,该数值越大,说明得到的潜力规模不确定越大,风险越高。

2 评价方法应用实例

2.1 区块概况

某区块Y为深层、低丰度、特低渗透油藏,2012年上报探明储量 $3\ 000 \times 10^4$ t。该区块平均油藏埋深3 500 m,平均渗透率 $4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均有效厚度9 m,压力系数1.42,储量丰度 40×10^4 t/km²,平均单井产能只有2.8 t/d。由于物性差、产能低,整体动用没有经济效益。但该区块储层非均质性严重,变异系数达到0.75,局部仍然存在可动用“甜点”储量。

2.2 模型建立和关键参数确定

区块Y现有9口钻井数据,基于对数正态概率分布模型,建立各油藏参数概率分布^[12](图2);应用数值模拟技术构建Y区块油藏模型,根据区块地质参数特点,匹配了4种压裂方法^[13-14];通过单因素及多因素分析,明确了影响单井控制可采储量的10个关键参数,并确定了参数对储量的影响程度;应用正交试验设计^[15],回归建立了不同井型、不同压裂方式、不同开发方式下单井控制储量的9种典型表征模型[下文列出了5种,见公式(1)~(5)],并应用实际资料进行合理化验证。在天然能量开发方式下,压力系数、含油饱和度、渗透率、孔隙度、有效厚度等是影响单控储量的主要因素;在注水开发方式下,注采压差是最主要的影响因素,其次为半缝长等,集中度影响程度更大(表1)。

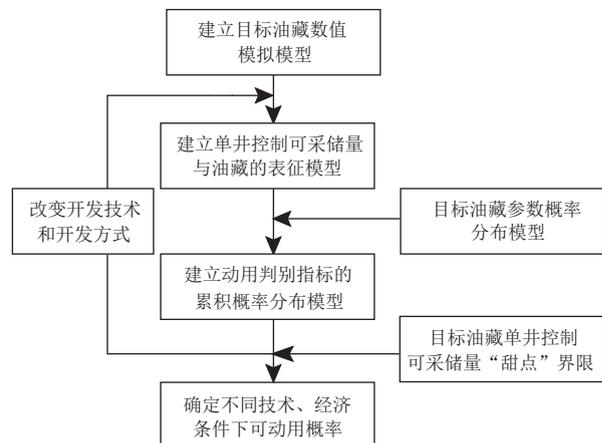


图1 未开发储量不确定性潜力评价方法技术流程

Fig.1 Technical process of uncertainty evaluation method for undeveloped reserves

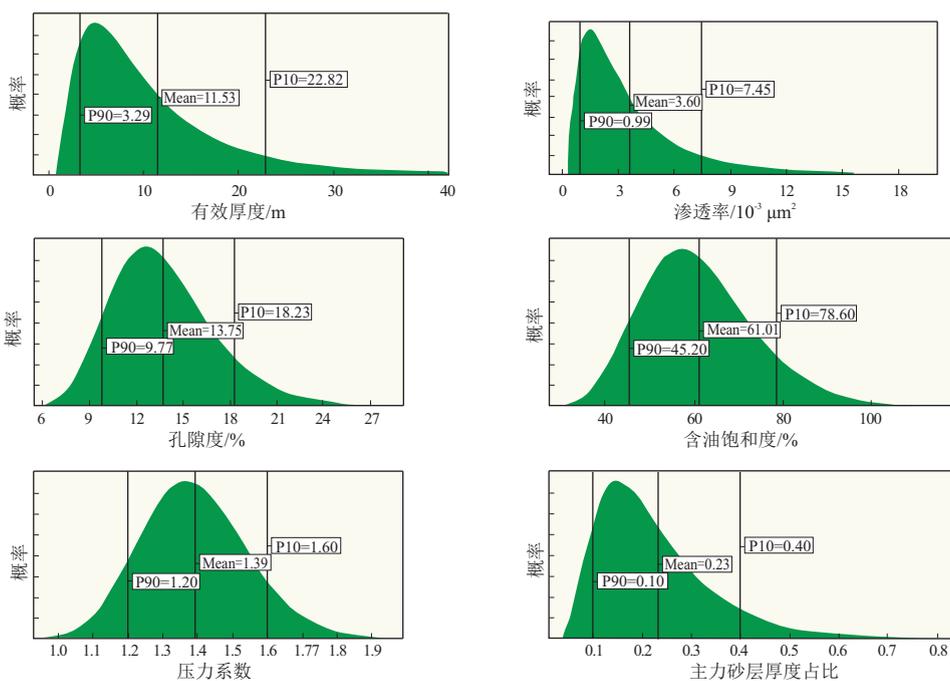


图 2 Y 区块油藏参数概率分布

Fig.2 Probability distribution of reservoir parameters of Y block

表 1 Y 区块油藏单控储量与各参数的影响权重

Table 1 Influence weight of each parameter and single-controlled reserves in Y block

井型	开发技术	开发方式	油藏参数权重							开发参数权重		
			压力系数	渗透率	孔隙度	油层厚度	集中度	原油黏度	含油饱和度	半缝长	水平段长度	注采压差
直井	不压裂	天然能量	0.799	0.844	0.776	0.892	0.110	0.060	0.813			
	常规压裂	天然能量	0.573	0.866	0.670	0.508	0.037	0.106	0.740	0.016		
	体积压裂	天然能量	0.789	0.847	0.829	0.912	0.540	0.062	0.882	0.820		
水平井	多段压裂	天然能量	0.854	0.897	0.867	0.931	0.860	0.090	0.890	0.280	0.310	
	体积压裂	天然能量	0.864	0.906	0.863	0.944	0.760	0.104	0.907	0.680	0.720	
直井	常规压裂	注水开发		0.839	0.613	0.614	0.129	0.520	0.694	0.768		0.828
	体积压裂	注水开发		0.907	0.663	0.876	0.230	0.300	0.782	0.835		0.844
水平井	多段压裂	注水开发		0.928	0.656	0.908	0.670	0.250	0.883	0.320	0.190	0.750
	体积压裂	注水开发		0.925	0.767	0.891	0.660	0.320	0.894	0.497	0.260	0.632

典型的单井控制储量表征模型如下:

直井不压裂弹性开发:

$$N=0.021(K^{1.587}h^{0.468}S_0^{0.62}P_i^{3.03}\varphi^{0.635}\mu^{-0.009}F^{0.921}) \quad (1)$$

直井常规压裂弹性开发:

$$N=0.015(K^{0.924}h^{0.648}S_0^{1.057}P_i^{1.781}\varphi^{0.823}\mu^{-0.145}F^{0.921}R^{0.563}) \quad (2)$$

直井体积压裂弹性开发:

$$N=0.204(K^{0.600}h^{0.724}S_0^{1.193}P_i^{1.670}\varphi^{0.917}\mu^{-0.005}F^{0.080}R^{0.154}) \quad (3)$$

水平井多段压裂弹性开发:

$$N=0.001(K^{0.785}h^{0.019}S_0^{0.896}P_i^{2.464}\varphi^{0.829}\mu^{-0.006}F^{1.271}R^{0.616}H^{0.886}) \quad (4)$$

水平井体积压裂弹性开发:

$$N=0.001(K^{0.600}h^{0.100}S_0^{0.910}P_i^{2.499}\varphi^{0.856}\mu^{-0.016}F^{0.573}R^{0.612}H^{0.846}) \quad (5)$$

式中: N 为单井控制储量, 10^4 t; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为油层厚度, m; S_0 为含油饱和度, %; Φ 为孔隙度, %; P_i 为压力系数; μ 为原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; F 为集中度(主力层厚度占总有效厚度比例), %; R 为压裂半缝长, m; H 为水平井水平段长度, m。

2.3 建立关键指标累积概率分布模型

通过表征模型和油藏参数的概率分布,建立 Y 区块油藏有效动用判别指标的概率分布模型^[16-17],在直井不压裂情形下,单井控制可采储量为 1.25×10^4 t 时,累积概率为 10%(图 3)。

2.4 可动用概率确定

应用盈亏平衡原理计算单井经济可采储量的

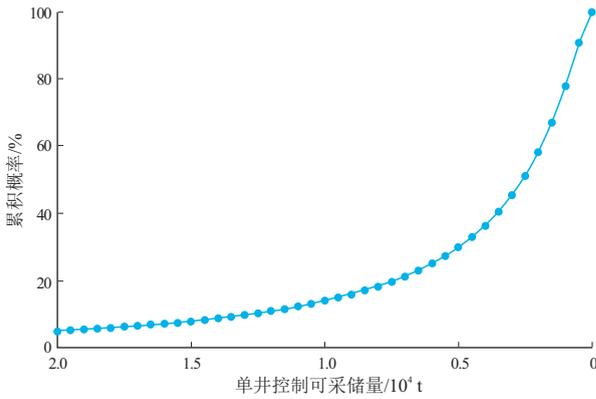


图 3 Y 区块油藏单井控制可采储量累积概率曲线
Fig.3 Probability distribution of single-well-controlled recoverable reserves in Y block

“甜点”界限值^[18],在油价 50 \$/bbl 条件下,单井投资人民币 1 154×10⁴元,折现率 8%,操作成本人民币 875 元/t,采用水平井体积压裂,计算单井控制经济可采储量的界限值为 1.71×10⁴ t(图 4a)。读取 50 \$/bbl 单井控制经济可采储量界限值对应的累积概率值 41%,即为该条件下 Y 区块未开发

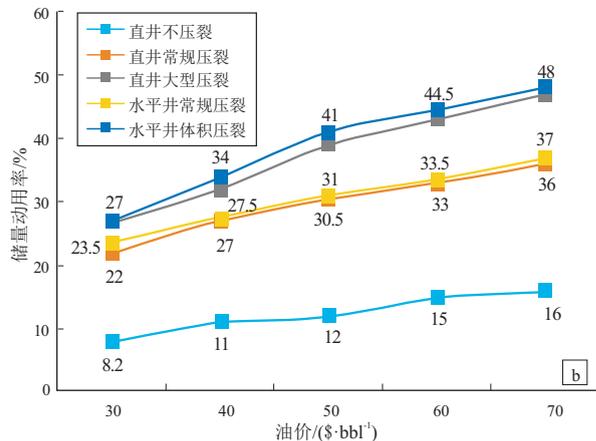
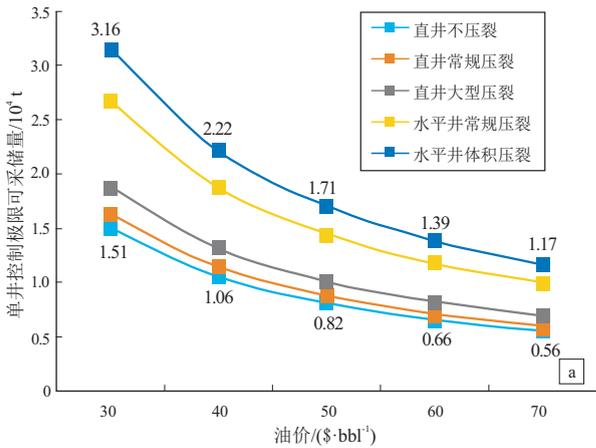


图 4 不同油价下 Y 区块单井控制界限可采储量(a)和储量动用率(b)

Fig.4 Single-well-controlled limit recoverable reserves (a) and reserve utilization rate (b) under different oil prices, Y block

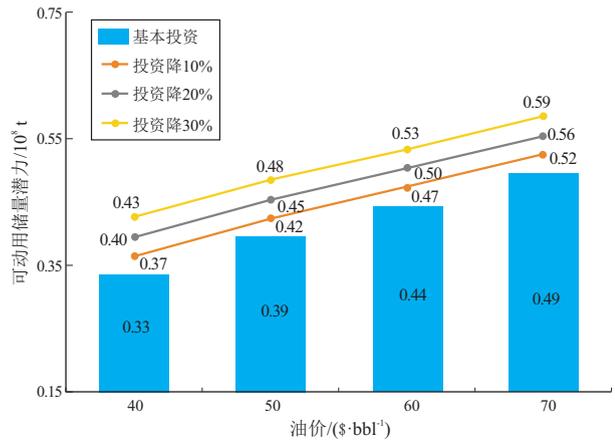


图 5 中国石化探明未开发储量在不同油价条件下可动用储量

Fig.5 Available reserves of proven undeveloped reserves of SINOPEC under different oil prices

储量的可动用比例(图 4b)。

2018—2020 年 Y 区块经过评价筛选,分三期滚动实施,截至 2020 年底已规划动用储量 1 155×10⁴ t,平均单井产能提高到 7.8 t/d,平衡油价下降到 40 \$/bbl。区块储量动用率 38.5%,与不确定性方法评价计算的储量可动用率基本一致。

3 未开发储量潜力评价

应用不确定性评价方法^[19]筛选中国石化探明未开发储量,新增可动用潜力 13 个,在油价 40 \$/bbl 条件下,降低投资 30%,增加可动用储量 4 300×10⁴ t;在油价 70 \$/bbl 条件下,降低投资 30%,增加可动用储量 5 900×10⁴ t(图 5)。潜力区块可动用概率分布在 9%~43.5%,平均 23.4%,反映了未开发储量的动用难度较大。

4 认识与结论

(1) 针对油藏非均质“甜点”潜力,以单井控制经济可采储量为重要衡量指标,构建了未开发储量不确定性潜力评价方法,采用可动用概率值,定量描述储量可动用风险和规模。

(2) 经过评价中国石化探明未开发储量,在油价 40~70 \$/bbl 条件下,降本 30%,增加可动用潜力储量(4 300~5 900)×10⁴ t。

(3) 不确定性潜力评价方法认识到不同条件下的局部潜力,包括地质非均质性潜力、不同技术条件潜力以及降本增效的潜力,为提高中国石化未开发储量动用率,盘活存量资产,对于推动油公司新动用储量高质量发展具有重要意义。

致谢:中国石化集团公司高级专家凡哲元在本

文成文过程中给予了很多的指导,石油勘探开发研究院苏映宏、李军等给本研究提供了很大帮助,特此致谢!

参考文献:

- [1] 张晨朔,韩征,冯志刚,等.油气矿产资源储量分类新国标修订对比分析[J].中国矿业,2021,30(10):46-51.
ZHANG Chenshuo, HAN Zheng, FENG Zhigang, et al. Comparison analysis of the revision for the new national standard on classifications for petroleum resources and reserves[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 46-51.
- [2] 程立华,郭智,孟德伟,等.鄂尔多斯盆地低渗透—致密气藏储量分类及开发对策[J].天然气工业,2020,40(3):65-73.
CHENG Lihua, GUO Zhi, MENG Dewei, et al. Reserves grading classification and development countermeasures for low-permeability tight gas reservoirs in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 65-73.
- [3] SPE/AAPG/WPC/SPEE 2018—Petroleum resources management system (PRMS) [S]. 2018.
- [4] 边海光,田作基,童晓光,等.伊拉克哈法亚油田可采储量增长因素和潜力分析[J].新疆石油地质,2014,35(4):486-490.
BIAN Haiguang, TIAN Zuoji, TONG Xiaoguang, et al. Analysis of the influencing factors of reserves growth and the potential of Halfayah oilfield in Iraq[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4): 486-490.
- [5] 赵磊,胡菁菁,孙作兴,等.欧洲地区主要含油气盆地资源潜力评价[J].地学前缘,2014,21(3):82-90.
ZHAO Zhe, HU Jingjing, SUN Zuoxing, et al. Resource potential assessment of main European oil-and-gas-bearing basins [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 82-90.
- [6] 王国亭,贾爱林,闫海军,等.苏里格致密砂岩气田潜力储层特征及可动用性评价[J].石油与天然气地质,2017,38(5):896-904.
WANG Guoting, JIA Ailin, YAN Haijun, et al. Characteristics and recoverability evaluation on the potential reservoir in Sulige tight sandstone gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 896-904.
- [7] 覃利娟.概率法在油气储量不确定性分析中的应用[J].断块油气田,2019,26(6):723-727.
QIN Lijuan. Application of probability method to uncertainty analysis of oil and gas reserves [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(6): 723-727.
- [8] 胡允栋.基于不确定性分析的油气储量分类与评估方法[D].北京:中国地质大学(北京),2007:25-67.
HU Yundong. Oil and gas reserve classification and estimation on the basis of uncertainty analysis [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007: 25-67.
- [9] 罗娜,王丽娟,何东博.中石油天然气未开发储量分类评价及潜力分析[J].中国能源,2019,41(3):45-47.
LU Na, WANG Lijuan, HE Dongbo. Classified evaluation and potential analysis of CNPC natural gas undeveloped reserves [J]. Energy of China, 2019, 41(3): 45-47.
- [10] 陈平中,刘志森,雷光,等.油田经济可采储量评价系统研究及应用[J].石油天然气学报,2005,27(2):224-226.
CHEN Pingzhong, LIU Zhisen, LEI Guang, et al. An evaluation system of oilfield economic reserves and its application [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(2): 224-226.
- [11] 程紫燕,蒋龙,杜玉山,等.快速综合评价未动用储量经济有效动用可行性的方法:107301483A [P]. 2021-10-27.
CHENG Ziyang, JIANG Long, DU Yushan, et al. A method for rapid and comprehensive evaluation of economic and effective production feasibility of undeveloped reserves: 107301483A [P]. 2021-10-27.
- [12] 黄学斌,李军,闫相宾,等.圈闭资源量参数概率分布及有效性检验[J].石油与天然气地质,2014,35(4):577-584.
HUANG Xuebin, LI Jun, YAN Xiangbin, et al. Probability distribution of parameters for trap resources assessment and its validation [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 577-584.
- [13] 熊健,刘峻杰,吴俊,等.致密储层压裂缝扩展规律与可压裂性评价[J].天然气地球科学,2021,32(10):1581-1591.
XIONG Jian, LIU Junjie, WU Jun, et al. Fracture propagation law and fracability evaluation of the tight reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1581-1591.
- [14] 赵振峰,李楷,赵鹏云,等.鄂尔多斯盆地页岩油体积压裂技术实践与发展建议[J].石油钻探技术,2021,49(4):85-91.
ZHAO Zhenfeng, LI Kai, ZHAO Pengyun, et al. Practice and development suggestions for volumetric fracturing technology for shale oil in the Ordos Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 85-91.
- [15] 胡伟,杨胜来,张洁,等.基于正交试验方法的注气影响因素优化分析[J].断块油气田,2014,21(6):750-754.
HU Wei, YANG Shenglai, ZHANG Jie, et al. Optimization analysis on factors affecting hydrocarbon gas injection based on orthogonal experiment [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(6): 750-754.
- [16] 刘永爱,董鸣皋.基于多属性决策的未动用油气储量评价方法研究[J].统计与信息论坛,2010,25(9):63-68.
LIU Yongai, DONG Minggao. Evaluation of undeveloped oil & gas reserves based on multi-attribute decision-making [J]. Statistics & Information Forum, 2010, 25(9): 63-68.
- [17] 刘艳,高有瑞.已探明未开发石油储量评价的模糊数学方法[J].石油勘探与开发,1993,20(1):105-109.
LIU Yan, GAO Yourui. Fuzzy set theory used in the evaluation of undeveloped proved reserve [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 105-109.
- [18] 刘斌,任芳祥,易维容.探明未动用储量经济评价方法探讨[J].中国石油勘探,2003,8(4):67-70.
LIU Bin, REN Fangxiang, YI Weirong. Discussion on the methods of economic evaluation for undeveloped OOP [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(4): 67-70.
- [19] 高杰,陶小林.基于不确定方法的项目方案优选研究[J].数学的实践与认识,2015,45(17):72-77.
GAO Jie, TAO Xiaolin. Research On project alternatives selection based on uncertainty method [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(17): 72-77.