

火山岩气藏未动用储量评价优选及开发技术界限研究

刘刚

中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712

通讯作者: Email: lgldhm@petrochina.com.cn

项目支持: 大庆油田有限责任公司科研项目“大庆油田‘十四五’滚动及‘十五五’天然气开发战略研究”(202121KF04)

引用: 刘刚. 火山岩气藏未动用储量评价优选及开发技术界限研究[J]. 油气井测试, 2024, 33(5): 73-78.

Cite: LIU Gang. Evaluation and optimization of untapped reserves and development technical limits in volcanic gas reservoirs [J]. Well Testing, 2024, 33(5): 73-78.

摘要 为了合理确定火山岩气藏未动用储量区块开发动用次序, 给出相应的开发技术政策等问题, 采用层次分析方法对未开发储量区块进行了优选排队, 确定了 12 个典型区块的开发动用次序; 采用蒙特卡洛法重新估算了典型区块的地质储量, 评价后地质储量分险在 23%~35% 之间, 储量分险较高; 结合人工智能辅助评价技术对典型区块开展了敏感性分析、自动历史拟合、最优化方法以及不确定分析等研究, 给出一种新的开发指标预测方法和界限研究; 应用盈亏平衡原理, 给出了火山岩气藏未开发储量区块的动用技术界限, 单井初期经济极限产量 $1.92 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 经济极限井控地质储量 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 经济极限有效厚度 11.05 m。为类似火山岩气藏未开发储量评价与开发提供参考依据。

关键词 火山岩气藏; 动用储量; 技术界限; 人工智能; 层次分析; 地质储量; 蒙特卡洛法

中图分类号: TE371

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.05.012

Evaluation and optimization of untapped reserves and development technical limits in volcanic gas reservoirs

LIU Gang

Exploration and Development Research Institute of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China

Abstract: To determine the optimal sequence for the development of untapped reserve blocks in volcanic gas reservoirs and to propose appropriate development policies, an analytic hierarchy process (AHP) was employed to prioritize undeveloped reserve blocks, and the development sequence for 12 typical blocks was identified. By using the Monte Carlo method, the geological reserves of these typical blocks were re-estimated, revealing a reserve risk ranging from 23% to 35%, and showing a high reserve uncertainty. Combining artificial intelligence-assisted evaluation techniques, a series of studies, including sensitivity analysis, automatic history matching, optimization methods, and uncertainty analysis, were performed on these blocks, which provide a novel approach for forecasting development indicators and studying technical limits. By applying the break-even principle, the technical development limits for untapped reserve blocks in volcanic gas reservoirs were defined, with an initial economic production rate per well of $19\,200 \text{ m}^3/\text{day}$, an economic ultimate well-controlled geological reserves of 157 million m^3 , and an economic effective thickness of 11.05 m. This research provides a reference for evaluating and developing untapped reserves in similar volcanic gas reservoirs.

Keywords: volcanic gas reservoir; tapped reserves; technical limits; artificial intelligence; analytic hierarchy process; geological reserves; Monte Carlo method

国内很多学者通过使用层次分析法、改进的层次分析法及 AHP 与其它方法相结合对气藏的开发方案优化、产能的影响因素分析以及未动用储量选区等工作做了大量的研究。如侯科锋等^[1]为落实苏里格气田强非均质致密砂岩气藏的储量规模和动用程度, 提出“单井控制面积法”评价已开发储量和剩余未开发储量。方文超^[2]应用层次分析法对

油气田开发优化方法进行了研究。魏千盛等^[3]将 AHP 与模糊数学相结合评价气井产能影响因素, 得到了各因素对气井产能的影响权重。耿彤等^[4]在深入分析水平井产量影响因素, 选择了 16 个与潜力相关的指标, 采用隶属度函数建立了水平井模糊分析方法。陆亚秋等^[5]利用 AHP 和均方差法确定指标的权重, 建立了页岩气开发选区评价方法。徐庆

岩等^[6]针对断块的油田群经济顺序优化问题,运用层次分析法建立指标体系实现投产的优化排序。马旭等^[7]采用改进的 AHP 与熵权法和逼近于理想解排序法相结合,建立了基于改进的 AHP-熵权法和 TOPSIS 的火山岩气藏开发方案优选模型。夏静等^[8]从产能、能量保持程度等方面进行分析研究,考虑采收率、地层压力、油气比等指标,提出了凝析气田开发效果定量评价方法。李武广等^[9]采用层次分析法来确定多指标的权重进行评价。

针对于项目风险评价方法等研究,国内学者通过应用蒙特卡洛不确定分析方法开展项目的经济分险评估,建立了风险评估模型等。张明泉等^[10]分析影响油气项目经济评价风险因素,运用蒙特卡洛法对经济评价中的风险进行定量分析,提高风险评估的科学性。徐佳琼等^[11]应用蒙特卡洛法成功地进行了气田开发方案经济评价的风险分析,解决了天然气开发济评价中一系列因随机变化对投资效果的综合影响问题。刘清志等^[12]应用蒙特卡洛不确定分析方法评价油气可采储量。

针对大庆油田火山岩气藏未开发储量的情况结合国内学者的研究成果,考虑动、静态参数等指标,采用分类评价的思路,优选效益开发储量优先动用、评价储量的风险及落实开发技术政策和指标预测等,以提高储量动用程度的开发对策。

1 建立未开发储量动用次序

层位分析法或者改进的层次分析方法可以较好的评价各气田区块的经济动用顺序以及开发方案等优选的问题。

1.1 方法简介

应用层次分析等方法求取权重的计算方法:首先根据多因素分析确定主要的开发参数,并进行量化建立判断矩阵,求出判断矩阵每一列的和;其次对判断矩阵每一列元素进行归一化处理;最后计算判断矩阵每一行的平均值,进而求出权值向量。由以下公式可求出最大特征值:

$$A\omega = \lambda_{\max} \omega \cdots \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdots \quad (2)$$

$$\lambda_i = A_i \omega_i / \omega_i \cdots \quad (3)$$

式中: A 为判断矩阵; ω 为特征向量; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值。

一致性检验的计算:按照公式(4)~(5)计算 CI

和 CR ,若 n 阶判断矩阵 A 满足一致性,最大特征值等于 n 。

一致性判断公式:
$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

随机一致性比率:
$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

式中: CI 为一致性指标; RI 为随机指标; CR 为检验数。其中 RI 可以通过下表确定(见表 1)。

表 1 RI 取值表

Table 1 Relationship of RI value and matrix order										
阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

当 $CR < 0.1$ 时,表示判断矩阵一致性检验较好;当 $CR > 0.1$ 时,需要调整矩阵赋值,不断重复上述计算步骤满足判断矩阵的一致性检验。

计算层次总排序系数:根据指标层各个指标的系数与准则层系数加权综合得到指标层相对于目标层的权重。根据一致性原则,按照公式(6)计算总一致性检测,如果总一致性检测数小于 0.1,则该判断矩阵和层次总排序一致性的检验效果较好。

$$\begin{cases} CI = \sum_{i=1}^n \omega_i CI_i \\ RI = \sum_{i=1}^n \omega_i RI_i \\ CR = \frac{CI}{RI} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_i 为准则层对目标层的的权重; CI_i 为目标层对准则层的一致性指标; RI_i 为随机一致性指标。

1.2 研究思路

气藏动静参数确定:根据火山岩气藏多个典型未动用储量区块的动静态参数,建立了多个区块不同参数对累计产量的多因素分析评价,对气井累计产量评价结果表明:气藏压力、试气产量、有效厚度及孔隙度影响较大,其它参数影响较小。针对未动用储量 12 个评价单元,按照多因素分析评价结果,构建判断矩阵(见表 2)。

表 2 判断矩阵表

Table 2 Judgment matrix table					
项目	有效厚度/m	压力/MPa	孔隙度/%	试气产量/ 10^4 m^3	ω (算术平均)
有效厚度/m	0.12	0.13	0.13	0.09	0.12
压力/MPa	0.47	0.53	0.5	0.57	0.52
孔隙度/%	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06
试气产量/ 10^4 m^3	0.35	0.27	0.31	0.28	0.3
合计					1

主要影响参数权重计算:收集 12 个典型区块的孔、渗、试气产量、压力等参数,对各参数进行分析对比,按照各区块孔、渗、试气产量、压力等参数相对大小关系,综合确定量化系数,建立孔、渗、试气产量、压力等参数 12 阶评价矩阵,并开展一致性检

验,如果一致性检测没有达到要求,需要重新评价各区块的评价矩阵,重新开始一致性检验直到满足一致性检验要求(见表 3)。按照评价有效厚度的方法,建立评价矩阵,分别通过计算出孔隙度、压力以及试气产量等权重,计算综合评价系数(见表 4)。

表 3 有效厚度权重计算表
Table 3 Effective thickness weight calculation table

有效厚度	A 区块	B 区块	C 区块	D 区块	E 区块	F 区块	G 区块	H 区块	I 区块	J 区块	K 区块	L 区块
A 区块	1	1/4	1/7	1/3	1/2	1/7	1/5	1/6	1/5	1/3	1/2	5/4
B 区块	4	1	1/5	2	3	1/5	1/3	1/4	1/3	2	3	5
C 区块	7	5	1	5	6	1	4	3	4	5	6	8
D 区块	3	1/2	1/5	1	2	1/5	1/3	1/4	1/3	1	2	4
E 区块	2	1/3	1/6	1/2	1	1/6	1/4	1/5	1/4	1/2	1/2	3
F 区块	7	5	1	5	6	1	4	3	4	5	6	8
G 区块	5	3	1/4	3	4	1/4	1	1/2	1	3	4	6
H 区块	6	4	1/3	4	5	1/3	2	1	2	4	5	7
I 区块	5	3	1/4	3	4	1/4	1	1/2	1	3	4	7
J 区块	3	1/2	1/5	1	2	1/5	1/3	1/4	1/3	1	2	5
K 区块	2	1/3	1/6	1/2	2	1/6	1/4	1/5	1/4	1/2	1	3
L 区块	4/5	1/5	1/8	1/4	1/3	1/8	1/6	1/7	1/7	1/5	1/3	1

表 4 综合评价系数计算表
Table 4 Calculation table of comprehensive evaluation coefficient

项目	权重系数	A 区块	B 区块	C 区块	D 区块	E 区块	F 区块	G 区块	H 区块	I 区块	J 区块	K 区块	L 区块
有效厚度/m	0.117	0.051	0.035	0.193	0.062	0.193	0.091	0.124	0.046	0.032	0.096	0.019	0.016
压力/MPa	0.518	0.202	0.202	0.069	0.069	0.025	0.069	0.069	0.025	0.025	0.025	0.025	0.132
孔隙度/%	0.061	0.020	0.013	0.226	0.051	0.051	0.119	0.119	0.119	0.051	0.013	0.051	0.019
试气产量/10 ⁴ m ³	0.304	0.022	0.022	0.217	0.024	0.024	0.111	0.052	0.111	0.052	0.024	0.052	0.111
综合评价系数		0.118	0.116	0.138	0.053	0.046	0.087	0.073	0.059	0.035	0.032	0.034	0.104
排队		2	3	1	8	9	5	6	7	10	12	11	4

在各参数通过一致性检验后,根据指标层与方案层的分析结果,建立 4×12 综合评价矩阵,得出综合评价系数并通过一致性校验,对综合评价系数进行排队,系数较高表明该区块较好,可以优先进行开发;反之则推迟开发。从评价结果可以看出 C 区块、A 区块评分较高,可以考虑优先开发。

2 未动用储量分风险评估模型的建立

评价影响地质储量各参数的分布类型,应用蒙特卡洛法建立未动用储量风险评估模型。

2.1 风险变量模拟方法

通过对油田大量的实际统计资料分析、验证,按照随机数产生方法,根据方程 $F(x_n) = r_n$, 求出 x_n 和 r_n 的关系式: $x_n = f(r_n)$, 常用的特殊分布的风险变量模拟有以下三种。

(1)服从均匀分布风险变量的模拟方法
分布函数为:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{当 } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{当 } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{当 } x > b \end{cases} \tag{7}$$

模拟关系式为:
$$x_n = a + (b - a) \cdot r_n \tag{8}$$

式中: a 、 b 分别为区间最小值与最大值。

(2)服从正态分布风险变量的模拟方法
如设 r_1 、 r_2 是两个独立的在 $(0,1)$ 之间随机变量,得到一对服从标准正态分布的随机变量 x_1 和 x_2 :

$$\begin{aligned} x_1 &= \sqrt{-2\ln r_1} \cdot \cos(2\pi r_2) \\ x_2 &= \sqrt{-2\ln r_1} \cdot \sin(2\pi r_2) \end{aligned} \tag{9}$$

对于一般的正态分布密度函数 $N(\mu, \pi^2)$ 的抽样,其抽样结果可表示为:

$$Y = \mu + \sigma \cdot X \tag{10}$$

式中： μ 为数学期望； σ 为标准差。

(3)服从三角分布风险变量的模拟方法
分布函数为：

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{当 } x < a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & \text{当 } a \leq x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(c-a)} & \text{当 } c \leq x \leq b \\ 1 & \text{当 } x > b \end{cases}$$

(11)

式中： a 、 b 、 c 分别为最低、最高、最可能的估计值。

模拟关系式如下：

$$x_n = \begin{cases} a + \sqrt{r_n(b-a)(c-a)} & \text{当 } 0 < r_n < \frac{c-a}{b-a} \\ b - \sqrt{(1-r_n)(b-a)(c-a)} & \text{当 } \frac{c-a}{b-a} < r_n < 1 \end{cases}$$

(12)

2.2 储量风险评估的建立与计算实例

计算天然气地质储量 G 的公式可以表示为：

$$G = 0.01Ah\phi(1 - S_{wi})/B_{gi}$$

(13)

式中： G 为天然气地质储量， 10^8 m^3 ； A 为含气面积， km^2 ； h 为平均有效厚度， m ； ϕ 为有效孔隙度， $\%$ ； S_{wi} 为原始含水饱和度， $\%$ ； B_{gi} 为天然气体积系数。

在储量评价过程中，计算地质储量往往采用容积法，计算的各类参数采用确定值，然而随着岩心数据、测井数据等资料的增加，可以较为合理的确定出各个参数的分布范围，而非某一个确定值。

根据各区块岩芯、测井数据，利用多方法判别参数分布类型，结果表明：有效厚度、含气面积以正态分布、三角分布和为主，孔、渗、饱等参数以正态分布为主。

以蒙特卡洛法为基础，利用 VBA 编程建立主体风险评估模型，同时建立不同测算次数下储量评价，快速直观的评价出储量随测算的变化规律，实现了定量评价未动用区块地质储量大小。以 A4 区块为例进行测算，运行模型 3 000 次，最终评价储量为 $67.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ （见图 1）。

应用蒙特卡洛算法进行各区块的储量风险评价，评价后认为地质储量风险为 23% ~ 35%（见表 5）。

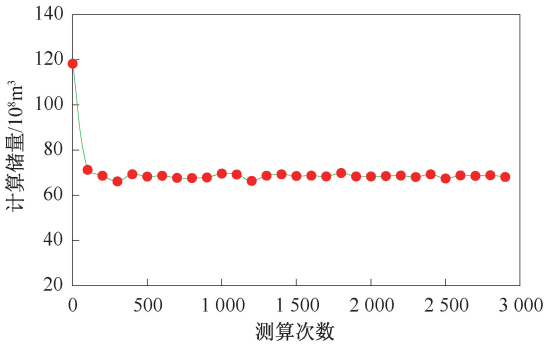


图 1 不同测算次数蒙特卡洛法计算地质储量
Fig. 1 Calculation of geological reserve by Monte Carlo Method with different calculation times

表 5 储量计算表
Table 5 Reserve calculation table

区块	层位	蒙特卡洛计算 储量/(10 ⁸ m ³)	减少原 储量/%
A1 区块	营一	91.67	30
A2 区块	营三	35.27	25
A3 区块	营三	34.32	26
A4 区块	营一	67.47	23
A5 区块	营三	72.76	27
A6 区块	营三	10.39	33
A7 区块	沙四二	43.42	35

3 建立未动用储量开发指标预测方法

CMOST 是数值模拟软件 CMG 中进行敏感性分析、历史拟合、方案优化及不确定性分析软件，它可以自动创建、提交运行和分析作业，大大提高模拟效率，而且能够在寻求最敏感性参数、最小历史拟合误差、最大产油量或不确定性分布范围的时候，充分考虑输入不同参数之间的相互影响，其得到的结果相对于传统的单因素研究方法而言，往往是全局最优的，而不是局部最优。但是，当每次改变气藏参数或动态参数后，一般需要重新将模型提交给模拟器进行运算，然后分析新的计算结果，这需要占用大量的时间。代理模型就是作为解决上述问题的一个可行的方法而出现的。所谓代理模型，是指在不降低精度的情况下创建的一个计算量小，计算周期短，但计算结果与数值模拟结果相近的高精度数学模型。它可以替代原有的数值模拟模型，能够在输入变量参数后，快速地得到计算结果。所以它实际是一个“模型的模型”，是快速揭示数值模拟结果变化规律的一种有效途径。

根据火山岩气藏 DS17 井区块储层物性参数孔隙度、净毛比、渗透率、构造等，建立基础地质数值模型；根据火山岩气水相对渗透率曲线建立岩石流

体模型;根据井的生产动态数据、井轨迹、射孔数据等建立井模型及垂直管流模型。考虑到火山岩气井均需要压裂的实际情况,根据裂缝和模型裂缝导流能力等效的原则,建立水力压裂模型模型。

3.1 多因素敏感性分析

针对常规拟合井口压力误差较大,选取影响压力主要参数,调试参数波动区间,运行多方案回归代理模型,形成多因素飓风图,分析表明原始地层压力和有效厚度为主要影响因素,从基础模型模拟结果看,初始压力及有效厚度对井口压力的拟合影响高达 85% 及 10%。

3.2 自动历史拟合

明确压力主控因素基础上,优选拉丁代理优化算法,参数化后运行自动历史拟合方案 220 个,拟合较好的总体误差控制 10% 以内。自动历史拟合获得较好的压力拟合曲线,确定合理参数值:渗透率 0.06 mD;孔隙度 0.11;单层有效厚度为 1.81 m;压力为 25.5 MPa;水垂比为 0.206。

3.3 最优化运算

在最优历史拟合的数据流的基础上,以初期配产和井底流压作为可变变量,以现金流作为目标变量进行优化求解,通过最优化算法确定最佳产量预测方案,有效避免了人工预测模型的不合理性。开展最优化模拟共运行方案 22 个,得到日产量及累产最优化结果:最优化日产量为 $2.27 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,累产量为 $0.5585 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.4 不确定性分析

优化参数设置进行不确定性分析,建立累产与各参数间数学模型,根据概率密度分布得出储量最佳分布范围,从而确定未动用储量的开发技术界限。概率密度最可能出现的范围在 $P_{30} \sim P_{55}$ 之内。从而确定各参数分布范围:累积产量 $0.5 \sim 0.7 \times 10^8 \text{ m}^3$;渗透率 0.06~0.08 mD;孔隙度 0.10~0.13 之间;有效厚度 16~27 m。

4 动用技术界限

单井最低累计产气量:在单井生命期间内能够回收钻完井投资、地面工程投资、操作成本、弃置成本及相关税费的原则,计算单井最低累计产气量,公式如下:

$$EUR_{\min g} = \frac{10^{-4} \cdot C_d \cdot H + I_c + C_{ab} + T \cdot C_{fg}}{10 [R_g \cdot (P_g - T_{axg} - C_{vg}) + R_o \cdot (P_o - T_{axo}) / GOR]}$$

(14)

式中: $EUR_{\min g}$ 为最低累计产气, 10^8 m^3 ; H 为钻井进尺, m; C_d 为单位开发井工程投资, 元/m; C_{ab} 为单井弃置成本, 10^4 元; I_c 为单井必要的地面工程投资, 10^4 元; C_{fg} 为单井气固定成本, 10^4 元/a; C_{vg} 为单位商品气可变成本, 元/ 10^3 m^3 ; P_o 、 P_g 为油价、气价, 元/t, 元/ 10^3 m^3 ; R_o 、 R_g 为油、气商品率; T_{axo} 、 T_{axg} 为油、气税费, 元/t、元/ 10^3 m^3 ; T 为单井寿命期, a; GOR 为气油比, $10^3 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

单井最低初期稳定气产量 q_{eig} : 利用气井产量递减规律, 拟合采出单井最低累计产气量 $EUR_{\min g}$ 所需的单井最低初期稳定气产量, 公式如下:

$$q_{eig} = \frac{10^4 \cdot EUR_{\min g} \cdot d_g}{D_a \cdot [1 + (n - 1) \cdot d_g - (1 - d_g)^{T-n+1}]}$$

(15)

式中: q_{eig} 为单井最低初期稳定产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; D_a 为单井每年生产天数, d; n 为单井稳产期, a; d_g 为气产量年递减率。

单井最低经济有效厚度 (h_{eg}): 根据单井最低累计产气和气采收率反推对应的单井控制地质储量, 进而反推单井的最低经济气层有效度, 公式如下:

$$h_{eg} = \frac{100 \cdot EUR_{\min g} \cdot B_{gi}}{E_{gR} \cdot A_g \cdot \phi \cdot S_{gi}}$$

(16)

式中: h_{eg} 为气井最低经济有效厚度, m; E_{gR} 为气经济采收率, %; A_g 为单井控制的泄气面积, km^2 ; ϕ 为有效孔隙度, %; S_{gi} 为原始含气饱和度, %; B_{gi} 为原始天然气体积系数。

利用气井产量递减规律, 拟合采出单井最低累计产气量所需单井最低初期稳定产量。评价结果: 单井初期经济极限日产气 $1.92 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均经济极限井控地质储量 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均单井经济极限有效厚度 11.05 m (见表 6)。

表 6 开发技术参数计算表
Table 6 Development technology policy calculation table

区块	气价/ (元 · m ⁻³)	经济 极限厚度/ m	经济极限 日产气量/ (10 ⁴ m ³)	经济极限井控 地质储量/ (10 ⁸ m ³)
区块 1	1.5	7.62	1.69	1.25
区块 2	1.5	14.71	1.82	1.83
区块 3	1.5	11.33	1.90	1.31
区块 4	1.5	11.74	1.99	1.53
区块 5	1.5	9.85	2.21	1.91
平均		11.05	1.92	1.57

5 结论

(1)应用层次分析方法对火山岩气藏未开发储量典型区块进行了优选开发排序,为火山岩气藏的合理开发决策提供依据。

(2)应用蒙特卡洛算法结合 VBA 编程技术,实现了各区块地质储量风险的评价,实现了由定性评价到定量评价的转化。

(3)建立了基于人工智能辅助评价技术及盈亏平衡原理的未动用储量评价技术方法,为未开发储量动用技术界限及开发指标预测方法提供了新思路。

致谢:感谢大庆油田勘探开发研究院川渝开发研究室对本文研究提供的支持。

参考文献

- [1] 侯科锋,李进步,张吉,等. 苏里格致密砂岩气藏未动用储量评价及开发对策[J]. 岩性油气藏,2020,32(4):115-125.
HOU Kefeng, LI Jinbu, ZHANG Ji, et al. Evaluation and development countermeasures of undeveloped reserves in Sulige tight sand-stone gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(4): 115-125.
- [2] 方文超. 基于层次分析法的油气田开发优化决策方法[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(6): 37-42.
FANG Wenchao. Optimization decision methods of oil/gas field developments based on analytic hierarchy process[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(6): 37-42.
- [3] 魏千盛,阳生国,李桢禄,等. 基于 AHP 和模糊数学方法的气井产能影响因素评价[J]. 当代化工, 2021, 50(7): 1640-1643.
WEI Qiansheng, YANG Shengguo, LI Zhenlu, et al. Evaluation on the influence factors of gas well productivity based on AHP and fuzzy mathematics[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(7): 1640-1643.
- [4] 耿彤,王凤清,文自力,等. 用模糊层次分析法进行水平井增产潜力综合评价[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(增刊1): 45-47.
GENG Tong, WANG Fengqing, WEN Zili, et al. Comprehensive evaluation of production increment potential for horizontal well via analysis method of fuzzy hierarchy[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(Suppl. 1): 45-47.
- [5] 陆亚秋,王进,曹梦茜. 基于改进的层次分析法的页岩气开发选区评价方法[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(2): 70-77.
LU Yaqiu, WANG Jin, CAO Mengqian. Evaluation method of shale gas development area selection based on improved analytic hierarchy process[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 70-77.
- [6] 徐庆岩,雷诚,袁新涛,等. 基于层次分析法的海外断块

油田群经济高效动用顺序优化[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(4): 60-62.

XU Qing yan, LEI Cheng, YUAN Xintao, et al. Optimizing economic and efficient development sequence of overseas faulted-block oil field groups based on analytic hierarchy process [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2019, 12(4): 60-62.

- [7] 马旭,杨双春,李秉繁,等. 基于改进 AHP-熵权法和 TOPSIS 的火山岩气藏开发方案优选[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(3): 325-330.

MA Xu, YANG Shuangchun, LI Bingfan, et al. Optimization of volcanic gas reservoir development program based on the improved AHP-Entropy weight method and TOPSIS [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(3): 325-330.

- [8] 夏静,谢伟,黄召庭,等. 基于改进模糊层次分析法的凝析气田开发效果评价[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2022, 42(6): 36-44.

XIA Jing, XIE Wei, HUANG Zhaoting, et al. Application of improved fuzzy analytic hierarchy process to evaluate the development effect of condensate gas field [J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2022, 42(6): 36-44.

- [9] 李武广,邵先杰,康园园,等. 层次分析法在油田开发目标管理中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2010, 33(3): 70-73.

LI Wugang, SHAO Xianjie, KANG Yuanyuan, et al. Application of AHP to MB of oil field development [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2010, 33(3): 70-73.

- [10] 张明泉,钟雄. 蒙特卡洛模拟在油田开发经济评价风险中的应用[J]. 西南石油大学学报(社会科学版), 2012, 14(4): 6-10.

ZHANG Mingquan, ZHONG Xiong. Application of Monte Carlo simulation to economic evaluation of oil and gas development [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Social Sciences Edition), 2012, 14(4): 6-10.

- [11] 徐佳琼,李光耀. 气田开发方案经济评价的风险分析[J]. 天然气工业, 1990, 10(6): 35-38.

XU Jiaqiong, LI Guangyao. Risk analysis of economic evaluation of gas field development plans [J]. Natural Gas Industry, 1990, 10(6): 35-38.

- [12] 刘清志,马二领. 用 EXCEL 实现油气可采储量估算的蒙特卡洛模拟分析[J]. 技术经济, 2009, 28(9): 63-65.

LIU Qingzhi, MA Erling. Monte Carlo simulation on estimation of recoverable reserve of oil and gas by Excel [J]. Technology Economic, 2009, 28(9): 63-65.

编辑 吴志力

第一作者简介:刘刚,男,1979 年出生,高工,2007 年毕业于大庆石油学院油气田开发专业,主要从事气藏工程及储量评价等工作。电话:13836985736;Email:lg1chm@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区科学路 13 号大庆油田勘探开发研究院川渝开发研究室,邮政编码:163712。