

基于综合权重法的页岩气储量评价方法探讨

张玲, 魏绍蕾, 黄学斌, 李军

(中国石化石油勘探开发研究院 储量评估中心, 北京 100083)

摘要: 针对页岩气地质特征和开采技术的特殊性, 提出一种基于综合权重法的评价方法。通过综合考虑影响页岩气开发效果的各种因素, 构建了页岩气储量综合评价指标体系; 分别利用层次分析法和最大熵值法, 求取主观权重和客观权重系数, 综合主/客观权重的影响确定综合指标权重系数, 结合储量级别与所掌握资料的可靠性分析, 进而确定考虑风险的储量综合评价价值。利用该方法对 7 个页岩气储量区块进行综合评价, 给出储量品质的差异以及储量的升级动用排序。研究表明, 对页岩气储量进行评价时, 应综合考虑影响页岩气地质、开发、经济等多种因素, 并且通过引入风险系数, 确保评估结果更为合理, 可为页岩气储量区块优选提供决策建议。

关键词: 页岩气储量; 主观权重; 客观权重; 风险系数

中图分类号: TE155

文献标识码: A

Shale gas reserve quality evaluation based on a comprehensive weighting method

Zhang Ling, Wei Shaolei, Huang Xuebing, Li Jun

(Reserve Evaluation Center, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: A shale gas reserve quality evaluation approach based on the comprehensive weighting method was proposed according to geological characteristics and special development processes. Some key factors which have great impacts on shale gas production were selected to build an evaluation system. A hierarchical analytical method was used to calculate the subjective weighting factors and a maximum entropy method was used to calculate the objective weighting factors. A comprehensive evaluation model was built based on subjective and objective weighting factors. A development risk factor was determined after analyzing the completion and match with existing reserves data. Grades with or without a risk factor can be provided simultaneously. With the proposed method, the quality of seven shale gas reserves was compared and their development order was determined according to the ranking for undeveloped reserves. The results indicated that many factors including geological, development and economic factors should be taken into consideration for shale gas reserve evaluation. Meanwhile, risk factors should be introduced as an evaluation factor. The evaluation results considering comprehensive relevant factors are reasonable and effective and can provide useful suggestions for future shale gas reserve management.

Key words: shale gas reserves; subjective weighting; objective weighting; risk factor

与常规油气田相比,页岩气储层性质更加复杂,影响页岩气开发的因素更繁多^[1-2]。随着研究的深入,国际主流的油气资源研究机构形成了一系列的标准来评价非常规油气资源;2014年,我国国土资源部针对涪陵页岩气田的开发实践,制定了适合中国页岩气储量评价的技术规范^[3],筛选了影响页岩气储量品质的关键评价指标。页岩气开发研究人员借助生产数据分析、解析模型、数值模型等^[4-7]各种技术手段,分析和总结了影响页岩气开发效果的主要因素,对影响页岩气勘探开发的不确

定性进行了研究^[8-9],并对不同产区的页岩气资源/储量价值进行了测算^[10-11]。鉴于影响页岩气储量品质的因素众多,而单一指标的评价方法不能满足勘探开发实际需要,应该综合考虑各种影响因素,形成相对完备的储量评价指标体系,实现对页岩气储量品质的综合评价。目前,油气储量综合评价的研究方法主要有模糊数学、层次分析、灰色关联和聚类分析等^[12-16]。笔者提出了适合页岩气储量综合评价的指标体系,建立了考虑开发风险系数的页岩气储量综合权重法评价模型,并应用到实际

收稿日期: 2017-05-04; 修订日期: 2017-07-17。

作者简介: 张玲(1962—),女,硕士,教授级高级工程师,从事储量计算评价与管理。E-mail: Zhangling.syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部项目“页岩气储量计算与评价方法研究”(P15110); 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05060)联合资助。

案例分析中。

1 综合权重法的评价方法

页岩气储量的综合评价是一个综合地质特征、开发技术和经济条件等多因素、多属性决策问题。在进行储量综合评价时,既要考虑问题的多属性,又要兼顾问题的不确定性。因此,建议采用考虑风险的多属性评价方法。对于考虑风险的多属性决策问题而言,涉及3个关键点:综合评价指标体系的建立、指标权重的确定和风险系数的确定。

1.1 评价指标的筛选和赋值

假设有 m 个待评价的页岩气储量区块,用向量 BL 表示:

$$BL = \{bl_1, bl_2, bl_3, \dots, bl_{m-1}, bl_m\}$$

待评价页岩气储量区块的属性可以用向量 AT 表示,包含 n 个用来描述储量性质的物理量。 n 个物理量可以是定量的,也可以是定性的:

$$AT = \{at_1, at_2, at_3, \dots, at_{n-1}, at_n\}$$

第 i 个待评价储量区块第 j 项属性的取值为 $v_{i,j}$,则全部待评价储量区块的属性取值构成 $m \times n$ 维的矩阵 V ,即 m 个待评价页岩气储量区块的 n 项指标取值:

	属性 1	属性 2	...	属性 m
区块 1	$v_{1,1}$	$v_{1,2}$...	$v_{1,m}$
⋮	⋮	⋮	⋱	⋮
区块 n	$v_{n,1}$	$v_{n,2}$...	$v_{n,m}$

借鉴北美页岩气开发经验(以储量价值为主导),结合中国石化涪陵页岩气田开发实践(兼顾储量规模),应用行业标准《页岩气资源储量计算与评价技术规范: DZ/T 0254—2014》,总结了四大指标集:储量规模、测试指标、储层物性以及经济评价指标。其中,储量规模包括可采储量和可采储量丰度;测试指标包括试气产量和初始套压,反映了气井产能和地层能量;储层物性主要包括页岩层埋深、孔—渗参数、总有机质含量、热演化程度和脆性矿物含量等;经济指标包括投资回收期、净现值和内部收益率。

不同属性指标的量纲和取值跨度均有不同,采用归一化的方法可将各项指标的取值范围换算至0~1之间。

对于属性取值与储量品质呈正相关的参数,归一化的方法为:

$$r_{i,j} = \frac{v_{i,j} - \min_i^m(v_{i,j})}{\max_i^m(v_{i,j}) - \min_i^m(v_{i,j})}$$

对于属性取值与储量品质呈负相关的参数,归一化的方法为:

$$r_{i,j} = \frac{\max_i^m(v_{i,j}) - v_{i,j}}{\max_i^m(v_{i,j}) - \min_i^m(v_{i,j})}$$

经过归一化处理,得到归一化的决策矩阵 R_{mn} 。

在搜集和整理待评价区块的参数时,如果搜集的资料中缺少参数或经分析参数的取值不合理,需要采用类比法借鉴其他页岩气储量的参数取值,无可类比样本时笔者建议取该项评价指标的最低值。

1.2 指标权重的确定

对于多属性问题来说,多项指标的取值大小共同决定了待评价对象的优劣。当然,各项属性指标对评价目标的影响大小有所不同,这就涉及到属性权重的确定。属性权重的确定方法主要有3种:主观赋权法、客观赋权法和综合赋权法。

1.2.1 主观赋权法(层次分析法)

主观赋权法主要是决策者通过分析所研究问题,总结以往的开发经验,相对合理地确定各项指标属性的权重,在一定程度上保证权重的取值与该属性的重要程度相一致。常用的主观赋权法有层次分析法、调查法、专家打分法和二项系数法等。其中,层次分析法逻辑结构严密,采用两两比较的方式建立评分矩阵,且对评分进行一致性检验,保证评分效果的相对合理。因此,本文采用层次分析法确定各项指标的主观权重。

首先根据上节筛选的指标和评价对象,构建页岩气储量层次分析体系(图1)。该体系包括4个层次结构:第一层为目标层,为对页岩气储量的综合评价和排队优选(A1);第二层为准则层,由4个一级评价指标组成,分别为储量规模(B1)、测试指标(B2)、储层物性指标(B3)和经济指标(B4),其中,准则层中每一个一级指标又包括若干个次级评价指标;第三层为子准则层,包含各项具体的评价指标;第四层为方案层,是待评价的页岩气储量区块。

其次,构建判断矩阵与一致性检验,其中构建判断矩阵是利用层次分析方法确定权重的关键步骤。通过对某一层某一系列的因素进行两两比较,根据一定的比率标度将比较定量化,形成比较判断矩阵;计算判断矩阵的最大特征值和对应的特

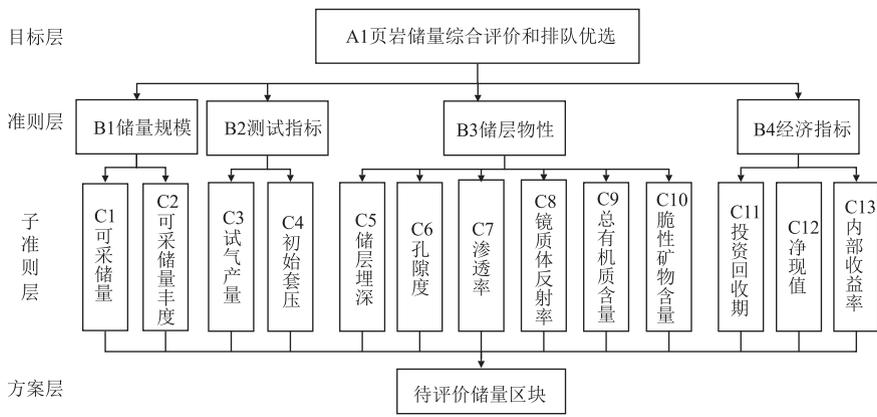


图 1 页岩气储量评价指标体系

Fig.1 System of evaluation factors for shale gas reserves using hierarchy analytical method

征向量,并对特征向量进行归一化处理,得到该层各因素相对于上一层某一因素的相对重要性大小(权重);通过逐级乘以上层因素的权重,即得到某一因素相对于整体目标的权重。以图中 A—B 层为例说明比较判断矩阵的构造,对于目标层 A 来说,基准层 B 各项元素的相对重要性可以用比较判断矩阵 B 表示:

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,bn} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,bn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{bn,1} & b_{bn,2} & \cdots & b_{bn,bn} \end{bmatrix}$$

其中, $b_{i,j}$ 表示指标 B_i 对指标 B_j 的相对重要性,采用 1~9 及其倒数作为比例标度。当 $b_{i,j}$ 取 1, 3, 5, 7, 9 时分别表示 B_i 与 B_j 相比同等重要、比较重要、明显重要、非常重要和极为重要,中间数值 2, 4, 6, 8 和倒数也有类似的含义。但是,进行两两比较赋值时受主观认识的影响较大;同时两两比较的因素要遵循符合“同层次、归一化、同量级”的原则,在一定程度上降低不合理的主观干扰。

利用特征根法可以计算比较判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,对特征向量进行归一化处理,计算各项因素针对上一层某项指标的相对权重:

$$B \bar{W}_{A-B} = \lambda_{\max} \bar{W}_{A-B}$$

$$\bar{W}_{A-B} = \frac{W_{A-B}}{\|W_{A-B}\|_2}$$

其中: λ_{\max} 为最大特征值; W_{A-B} 为最大特征值对应的特征向量; \bar{W}_{A-B} 为归一化的特征向量。

由于页岩气储量评价的复杂性和人为评价的主观性,需要对所构造判断矩阵的合理性进行检验,即一致性检验。首先,计算判断矩阵的一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其次,查找对应级数的判断矩阵的平均随机一致性指标 IR,级数 1~9 分别对应 IR 值 0, 0, 0.58, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45。

最后计算一致性比率 CR:

$$CR = \frac{CI}{IR}$$

当 $CR < 0.1$ 时,表示判断矩阵具有满意的一致性;反之说明判断矩阵赋值不合理,则需要重新对判断矩阵进行赋值。需要说明的是,当判断矩阵的阶数 ≤ 2 时,不需要一致性检验。以 A—B 为例计算判断矩阵的权重计算方法。

判断矩阵 A—B 为相对于目标层 A 来说,准则层 B 的四项指标相对重要性的大小,表现形式为:

A	B1	B2	B3	B4
B1	1	3	7	1/3
B2	1/3	1	3	1/7
B3	1/7	1/3	1	1/9
B4	3	7	9	1

计算得到判断矩阵 A—B 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.099 0$, 对应的特征向量为 $W = [0.390 9, 0.148 4, 0.066 4, 0.906 0]^T$, 进行归一化处理得到该层的权重为:

$$W = [0.258 6, 0.098 0, 0.044 0, 0.599 4]^T$$

进行一致性检验, $CI = 0.033 0$, $IR = 0.90$, $CR = 0.036 7 < 0.1$, 因此判断矩阵具有满意的一致性。

利用上述各个层次各个序列的判断矩阵的权重,计算页岩气储量评价体系各项指标相对于评价目标的权重(表 1)。

表1 页岩气储量综合评价指标体系权重取值

Table 1 Weight values of the evaluation factor system for shale gas reserves using HAP

目标层	准则层		子标准层	
	评价指标	权重	评价指标	权重
B1 储量规模	0.259		C1 可采储量	0.207
			C2 可采储量丰度	0.052
B2 测试指标	0.098		C3 试气产量	0.074
			C4 初始套压	0.025
A1 页岩气储量综合评价和排队优选	0.044		C5 储层埋深	0.005
			C6 孔隙度	0.001
			C7 渗透率	0.002
			C8 镜质体放射率	0.004
			C9 总有机碳含量	0.013
			C10 脆性矿物含量	0.019
			C11 投资回收期	0.066
B4 经济指标	0.599		C12 净现值	0.349
			C13 内部收益率	0.185

1.2.2 客观赋权法

客观赋权法是根据原始数据之间的关系,通过一定的数学方法来确定权重,其判断结果不依赖于人的主观判断,有较强的数学理论依据。主要方法有最大熵值法、主成分分析法、多目标规划法、变异系数法和最大离差法等。本文采用最大熵值法确定各项指标的客观权重。具体步骤如下:

(1) 计算第*i*个待评价目标第*j*项指标的比重:

$$y_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^m r_{i,j}}$$

(2) 计算第*j*项指标的信息熵:

$$e_j = -K \sum_{i=1}^m y_{i,j} \cdot \ln y_{i,j}$$

(3) 计算信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - e_j$$

(4) 第*j*项指标的权重为:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}$$

因此,利用最大熵值法得到客观赋权法的权重系数向量为:

$$W_o = [w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n]$$

式中:*r_{i,j}*表示第*i*个待评价区块的第*j*项参数的取值,单位与第*j*项参数一致,例如第*i*个待评价区块的第*j*项参数为孔隙度,其大小为0.05,无量纲;*y_{i,j}*为第*i*个待评价区块的第*j*项参数在所有评价区块

中所占的比例,无量纲;*e_j*, *d_j*, *w_j*为中间计算值,无量纲;*W_o*为客观加权向量,无量纲。

1.2.3 综合赋权法

理想的指标权重赋值方法应该既能反映评价对象的属性,又能充分考虑决策者的意愿,需要将主观赋权和客观赋权有效地进行整合。常用的方法有两种:乘法集成法和加法集成法。本文采用加法集成法求取综合权重:

$$W_c = \alpha \cdot W_s + (1 - \alpha) \cdot W_o$$

式中:*a*为主观权重系数,无量纲;*W_s*为主观加权向量,无量纲。

1.3 风险系数的确定

按照页岩气区块储量勘探开发程度和地质认识程度的不同,储量又可以进一步分为探明已开发储量、探明未开发储量、控制储量和预测储量。不同等级储量的可靠程度和开发的风险大小有所差异,建议采用分等级的风险系数(表2)。评估人员首先根据储量级别类别确定风险范围,然后根据所提供资料的详实程度、一致性程度,确定每一个待评价区块的风险系数。

1.4 考虑风险的多属性综合评分

对所有待评价储量进行评分排队时,要综合考虑各个属性及相对重要性,本文采用线性加权法计算:

$$P_i = \sum_{j=1}^m w_{ej} \cdot r_{i,j}$$

储量开发风险源于对储量认识的不确定性,在一定程度上反映了即将实施的项目或工程的失败率,考虑风险系数后第*i*个待评价储量的综合评分为:

$$P'_i = (1 - Risk) \cdot P_i$$

式中:*Risk*为风险系数,无量纲。

2 实例应用

笔者利用综合权重方法,对7个页岩气区块储量品质进行排序。对可采储量、测试产量、孔隙度、有机碳含量、脆性矿物含量等10项页岩气指标进行了统计,并计算了投资回收期、净现值和内部收益率等3项经济指标^[17-18]。

表2 不同级别储量的风险系数推荐范围

Table 2 Recommended risk factor range for different grades of reserves

指标	级别			
	预测	控制	探明未开发	探明已开发
可靠程度/%	10	50	80	90
风险系数	0.6~0.9	0.4~0.6	0.2~0.4	0.1~0.2

2.1 参数取值

采用归一化方法,对评价指标参数进行归一化处理(表 3)。某项指标取值越接近于 1,说明该项指标越好;相反,越接近于 0,说明该项指标越差。

利用层次分析法计算得到主观权重 W_s 为:

$$W_s = [0.207 \ 0.052 \ 0.074 \ 0.025 \ 0.005 \ 0.001 \ 0.002 \ 0.004 \ 0.013 \ 0.019 \ 0.066 \ 0.349 \ 0.185]^T$$

利用最大熵值法计算得到客观权重 W_o 为:

$$W_o = [0.070 \ 0.095 \ 0.076 \ 0.076 \ 0.094 \ 0.083 \ 0.074 \ 0.086 \ 0.073 \ 0.089 \ 0.054 \ 0.078 \ 0.051]^T$$

为了综合专家意见和客观数据之间的信息,对主观权重和客观权重进行加权处理得到综合权重,主观权重占比为 0.85,客观权重占比为 0.15,综合权重 W_c 为:

$$W_c = [0.186 \ 0.058 \ 0.074 \ 0.032 \ 0.018 \ 0.014 \ 0.013 \ 0.017 \ 0.022 \ 0.030 \ 0.064 \ 0.308 \ 0.165]^T$$

2.2 综合评分

由于上述待评价区的储量等级、地震勘探详实程度、钻井录井信息、岩心分析和试气试采资料等不同,开发工程方案设计和经济指标测算的合理性也不同,各个储量区块开发动用的风险系数有所差别。综合分析储量的指标参数、权重和风险,分别

计算考虑风险和不考虑风险的综合评价结果(表 4)。通过分析 7 个区块勘探开发资料的完善性和可靠性,论证开发设计方案与未来生产预测的匹配性,以及核实经济评价参数的合理性,并结合区块所处的开发阶段,给出了相对合理的风险系数取值。

表 4 给出了 7 个待评价区块的评分结果。其中,由于区块 1 和区块 2 的储层物性最好,目前已投入开发,认识程度较高,评分结果高;虽然区块 1 的储层物性稍优于区块 2,但是由于区块 2 的储量规模和储量价值都很高,根据综合评价的结果,区块 2 的评分最高。从储量价值方面来看,区块 4 的储量价值要高于区块 3,但是由于区块 4 的整体储层物性较差,测试产量较低,区块 3 的储量品质要优于区块 4;进一步考虑风险系数,由于区块 4 的开发方案与测试产量的匹配性较差,给出的风险系数较高,考虑风险系数后,区块 4 的储量品质进一步下降。对于另外 3 个勘探程度和认识程度更低的储量区块来说,其评分结果都相对较低。但是,由于区块 5 的储量规模和估算的储量价值较高,从评分结果上看仍优于区块 4,对于具有较大规模的页岩气储量来说,仍需要加强勘探开发力度和获取更多测试评价资料,有助于更准确地论证其商业开发价值。

表 3 待评价页岩气区块指标参数归一化

Table 3 Normalized values of evaluation parameters of seven reserves

储量	区块 1	区块 2	区块 3	区块 4	区块 5	区块 6	区块 7
可采储量	0.31	1.00	0.18	0.16	0.88	0.00	0.04
可采储量丰度	0.69	0.67	1.00	0.60	0.85	0.27	0.00
测试产量	1.00	0.89	0.66	0.34	0.07	0.08	0.00
初始油/套管压力	1.00	0.81	0.43	0.57	0.05	0.08	0.00
页岩层埋深	0.86	0.63	0.28	0.00	0.49	0.72	1.00
孔隙度	1.00	0.84	0.35	0.16	0.00	0.39	0.19
渗透率	1.00	1.00	0.00	0.05	0.05	0.60	0.60
总有机碳含量	0.87	0.87	0.06	1.00	0.37	0.91	0.00
镜质体放射率	0.56	0.44	0.11	0.11	0.11	0.00	1.00
脆性矿物含量	0.58	1.00	0.43	0.65	0.00	1.00	0.13
投资回收期	1.00	0.45	0.22	0.26	0.00	0.00	0.00
净现值	0.29	1.00	0.28	0.32	0.59	0.00	0.03
内部收益率	1.00	0.22	0.26	0.32	0.00	0.00	0.00

表 4 待评价页岩气区块评分结果

Table 4 Ranking of seven shale gas reserves

储量	区块 1	区块 2	区块 3	区块 4	区块 5	区块 6	区块 7
风险系数	0.12	0.18	0.45	0.55	0.65	0.70	0.70
未考虑 风险及排序	0.608(2)	0.780(1)	0.323(4)	0.317(5)	0.420(3)	0.095(6)	0.071(7)
考虑 风险及排序	0.535(2)	0.639(1)	0.178(3)	0.143(5)	0.147(4)	0.028(6)	0.021(7)

3 结语

(1)页岩气储量综合评价是一种多层次、多因素的决策问题,需建立多属性的综合评价指标体系,并且合理地分配各项评价指标的权重,建立合理的评价模型,使其评价结果符合页岩气地质、开发的客观规律。

(2)页岩气储量落实程度、开发动用程度取决于储量区块所处的勘探开发阶段、所拥有资料的可靠性和完善性以及测试数据与开发方案的匹配性等诸多因素,储量评价应该通过相关的资料进行分析,合理地确定各类可靠性和风险系数指标,并将其影响引入到综合评价中,使储量评价结果更加合理。

(3)针对页岩气地质条件的特殊性、开发工程的复杂性,系统全面的评价指标体系是综合评价的基础,合理的指标权重系数是综合评价的关键,风险系数的选取是评价结果合理性的保障。

参考文献:

- [1] 郭少斌,黄磊.页岩气储层含气性影响因素及储层评价:以上扬子古生界页岩气储层为例[J].石油实验地质,2013,35(6):601-606.
Guo Shaobin,Huang Lei.Gas-bearing influential factors and evaluation of shale gas reservoir:A case study of Paleozoic shale gas reservoir in Upper Yangtze region[J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(6):601-606.
- [2] 张玲,李军,卢泉杰,等.概率统计法在页岩气储量静态评估中的应用[J].石油实验地质,2016,38(1):141-146.
Zhang Ling,Li Jun,Lu Quanjie,et al.Probabilistic method applied to the static evaluation of shale gas reserves[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(1):141-146.
- [3] 中华人民共和国国土资源部.DZ/T 0254-2014 页岩气资源/储量计算与评价技术规范[S].北京:中国标准出版社,2014.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China.DZ/T 0254-2014 Regulation of shale gas resources/reserves estimation[S].Beijing:Standards Press of China,2014.
- [4] Mallick M,Achalpurkar M P.Factors controlling shale gas production:Geological perspective [C]//Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference.Abu Dhabi,UAE:Society of Petroleum Engineers,2014.
- [5] Wang Hanyi.What factors control shale gas production decline trend:A comprehensive analysis and investigation [C]//SPE/IAEE hydrocarbon economics and evaluation symposium.Houston,Texas,USA:Society of Petroleum Engineers,2016.
- [6] Sun Hao,Chawathe A,Hoteit H,et al.Understanding shale gas production mechanisms through reservoir simulation [C]//SPE/EAGE European unconventional resources conference and exhibition.Vienna,Austria:Society of Petroleum Engineers,2014.
- [7] Glorioso J C,Rattia A J.Unconventional reservoirs:Basic petrophysical concepts for shale gas [C]//SPE/EAGE European

- unconventional resources conference and exhibition.Vienna,Austria:Society of Petroleum Engineers,2012:S280.
- [8] Williams-Kovacs J,Clarkson C R.Using stochastic simulation to quantify risk and uncertainty in shale gas prospecting and development [C]//Canadian unconventional resources conference.Calgary,Alberta,Canada:Society of Petroleum Engineers,2011.
- [9] Yu Wei,Tan Xiaosi,Zuo Lihua,et al.A new probabilistic approach for uncertainty quantification in well performance of shale gas reservoirs [J].SPE Journal,2016,21(6):2038-2048.
- [10] Wright J D.Economic evaluation of shale gas reservoirs [C]//SPE shale gas production conference.Fort Worth,Texas,USA:Society of Petroleum Engineers,2008.
- [11] Gray W M,Hoefer T A,Chiappe A,et al.A probabilistic approach to shale gas economics [C]//Hydrocarbon economics and evaluation symposium.Dallas,Texas,USA:Society of Petroleum Engineers,2007.
- [12] 赵启双.辽河油区难采储量综合评价[D].北京:中国地质大学(北京),2003.
Zhao Qishuang.Integrative evaluation of hard-to-recover reserves in Liaohe oil province [D].Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2003.
- [13] 陈仁保,师俊峰.神经网络系统在稠油区块块先动用排序中的应用 [J].大庆石油地质与开发,2007,26(5):78-80.
Chen Renbao,Shi Junfeng.Application of neural network system to ordering of development sequence for heavy oil blocks [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2007,26(5):78-80.
- [14] 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 Yong'ai,Dong Minggao.Evaluation of undeveloped oil & gas reserves based on multi-attribute decision-making [J].Statistics & Information Forum,2010,25(9):63-68.
- [15] 张为民,薛培华.探明未开发储量的灰色评价方法 [J].石油学报,1999,20(4):29-33.
Zhang Weimin,Xue Peihua.Gray estimate method for the proved non-predicting reserve evaluation [J].Acta Petrolei Sinica,1999,20(4):29-33.
- [16] 郑得文.煤层气资源储量评估方法与理论研究 [D].杭州:浙江大学,2007.
Zheng Dewen.The research on the methods and theories of estimation for coal gas resources and reserves [D].Hangzhou:Zhejiang University,2007.
- [17] 黄学斌,魏萍,郭鸣黎,等.SEC 储量成本指标计算方法探讨 [J].石油实验地质,2014,36(4):506-510.
Huang Xuebin,Wei Ping,Guo Mingli,et al.Discussion of cost index calculation method on SEC reserves [J].Petroleum Geology & Experiment,2014,36(4):506-510.
- [18] 魏萍,张玲,翟中喜,等.SEC 石油储量替代率预测方法探讨 [J].石油实验地质,2013,35(6):702-706.
Wei Ping,Zhang Ling,Zhai Zhongxi,et al.Forecasting methods of SEC reserves replacement rate [J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(6):702-706.