

油气藏最小商业储量规模计算方法

张中华¹,周继涛²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司,北京 100728)

摘要:结合油气藏勘探开发实践,对油气藏最小商业储量规模的含义及界定方法进行了较全面的诠释,解释了油气藏最小商业可采储量、最小商业探明储量及最小商业资源量等不同的内涵。通过对不同区域油藏开发规律和产量变化模式的研究,结合投入、产出分析原理,建立了基于油气藏开发概念设计计算最小商业储量规模的通用方法。方法原理主要通过构建油气藏开发概念设计参数与现金流入、流出参数模型的关系,推导了油气藏储量规模与净现值线性关系模型,从理论上揭示了普遍意义上油气藏最小商业储量规模在不同经济条件下的变化特征。该方法可直接应用油气藏勘探开发经济参数、储量品位参数及开发概念方案参数快速评价不同界定条件下的最小商业储量规模,从而为不同油气区勘探项目经济效益排序、探明储量动用潜力目标排序以及油田开发油气藏评价项目和新区产能建设目标论证提供高效技术支持。

关键词:现金流模型;最小商业储量;开发概念方案设计;油气藏开发

中图分类号:TE32

文献标识码:A

Calculation of the minimum commercial reserves of petroleum reservoirs

Zhang Zhonghua¹, Zhou Jitao²(1. *Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;**2. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China)*

Abstract: Based on reservoir exploration and development practices, this paper defines the minimum commercial reserves of petroleum reservoirs and explains the specific connotations of the minimum commercial recoverable reserves, the minimum business proved reserves and the minimum business resources of reservoirs. By studying the development regularities and production change patterns of reservoirs in different regions and in combination with the principles of input-output analysis, a universal method was presented for calculating the minimum commercial reserves based on the reservoir development conceptual design. The relationship among reservoir development concept design parameters and cash inflow and outflow parameter models was established first and then used to build a linear correlation model of reservoir reserves to net present value. For a given reservoir, this model theoretically revealed the characteristics of variation of the minimum commercial reserves under different economic conditions. The method can rapidly evaluate the minimum commercial reserves under different boundary conditions by directly using the economic parameters of reservoir exploration and development, the parameters of reserves grade and the parameters of the development concept plan. Therefore, it can provide efficient technical supports to the economic benefits ranking of exploration projects in different oil fields, the ranking of potential targets of producing proven reserves, and the demonstration of reservoir evaluation projects during oilfield development and production capacity building goals in new blocks.

Key words: cash flow model, minimum commercial reserves, design of development concept, reservoir development

在油气勘探开发决策过程中,基于不同决策需求,油气藏最小商业储量规模可归为最小商业资源量、最小商业探明储量和最小经济可采储量3类。对同一区块(或目标),计算出一个需求的最小商业储量规模后,其余两个最小商业储量规模可以用转化率、采收率折算求得。现已发表的文章^[1-3]对这方面的描述相对单一,一

般统称最小商业储量规模,具体计算中这一概念的内涵就是最小探明储量。为统一普遍性名称,本文所使用的最小商业储量规模概念亦指最小商业探明储量规模。

油气藏最小商业储量规模是一个重要的决策因素。现有技术中,油气藏最小商业储量规模计算主要有三大类方法:第一类通过设计具体油气藏的开发概念方案,

以此建立现金流模型,通过迭代试算法求取数值;第二类基于现金流原理,用单一产量递减率模型简化开发概念方案设计,推导建立最小商业储量规模计算模型;第三类直接通过简化方法(如油价、储量成本参数)测算储量价值,根据投入、产出原理简化测算储量规模。第一类方法实质为现金流模型在勘探开发生产中的具体应用。由于不同储量目标需要建立不同的具体模型,工作量巨大,难以根据已知参数快速实现多储量目标评价计算;第二类方法^[4-7]具有一定理论基础,将产量模型简单归结为递减率表述模型,难以表述真实方案信息,计算结果不够准确和实用;第三类方法^[6]基本没有考虑到开发方案设计,对投资测算过于简化,难以满足储量评价要求。为适应勘探开发项目快速评价决策需求,本文从油气藏最小商业储量规模与开发概念设计关联分析入手,通过理论推导,建立了解析求解方法,实现了油气藏最小商业储量规模的快速计算与评价。

1 最小商业储量规模影响因素

最小商业储量规模定义为既定技术经济条件下油气藏应具有的经济可开发最小储量规模,无论勘探开发决策需求是最小商业探明储量、最小经济可采储量还是最小商业资源量^[8-11],其核心方法是分析目标投入与产出平衡点,方法上可分为动态法和静态法两种。计算原理上,最小商业储量规模计算等同于油气区块现金流模型中净现值为零时的储量规模值,它作为判断现有储量目标(或区块)是否具有开发价值的主要手段,主要用于油气勘探项目评价、探明未开发储量评价、油藏评价和新区产能建设项目评价中。

根据投入、产出项目构成分析,油气藏储量品位、经济条件和储量开发概念方案设计是影响其最小商业储量规模的三大因素^[12-14]。

1) 油气藏品位:主要包括储量丰度、油气密度、流体性质和储量埋深等,主要反映储量先天条件,也是决定最小商业储量规模的关键因素。在相同经济条件下,品位优质的储量最小商业储量规模小,反之则反。

2) 经济条件:主要包括油价、钻井成本和油气开采成本等,用于测算现金流入与流出,反映了经济环境对最小商业储量规模的影响。同一目标油气藏区块在不同经济条件下,具有不同的最小商业储量规模。

3) 开发概念设计:主要包括产量变化模式、产能建设规模预测和工作量预测等。根据现金流法原理,方案钻井、进尺等工作量对投资测算产生影响。开发概念设计中,产量预测模型对评价结果的影响最为重要。

对一个特定的评价目标,因油藏类型和储量参数等因素,技术合理的开发概念设计模型^[15-17]具有唯一

性,也是最小商业储量规模计算的核心,而此概念方案设计往往具有更多变数,不同模型设计方案产生不同的计算结果。因此,油气藏开发概念方案设计对储量规模具有重要意义。

2 开发概念方案模型

油气藏开发概念设计取决于储量本身的特性。尽管方案设计阶段涉及诸多关联参数,如油气藏类型、单井产能、单井可采储量和产量模型等,但这些参数的最终目的是建立合理的开发概念设计模型,而现金流评价模型仅与工作量及产量预测指标直接关联。勘探目标区块最小商业储量规模评价中,勘探提供的资料至少包括含油气面积、油气藏类型和地质储量或利用采收率折算的可采储量,它们是开发概念方案设计的基础。

开发概念方案设计包括工作量设计和产量设计两部分。其中,工作量设计主要测算新钻井工作量、进尺及投资,产量设计是建立评价期(T)内分年度产量(Q)。产量方案设计的关键参数是采油速度、新建产能和逐年产量贡献率。由于勘探目标资料所限,产量贡献率模型可采取建立分地区不同类型油藏产量模式方式来完成。在没有更详尽资料支持的条件下,该类产量贡献率模型在开发概念设计中更具可操作性。通过对中石化重点地区已开发油藏的统计,建立了几个分地区原油产量贡献率模型(图1),可作为分地区油气藏开发概念设计的参考。

以中石化东部XX油藏为例,含油气面积 $S=0.7\text{ km}^2$,渗透率 $K=80\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,预测探明储量 $N=100\times 10^4\text{ t}$ (采收率25%,对应预测可采储量 $25\times 10^4\text{ t}$),油藏类型为中-高渗断块油藏,油藏埋深3 200 m。同地区新区产能建设区块类比,探明储量采油速度(v)取1.5%,一次开发井网密度(f)取14口/ km^2 。依据井网密度法测算,方案设计新钻井数为 $S\times f=10$ 口;最高年产能 $V\times N=1.5\times 10^4\text{ t}$;钻井进尺32 km。依据图1中东濮凹陷某断块油藏产量贡献率即可设计评价期分年度的产量模型。概念方案主要数据见表1。

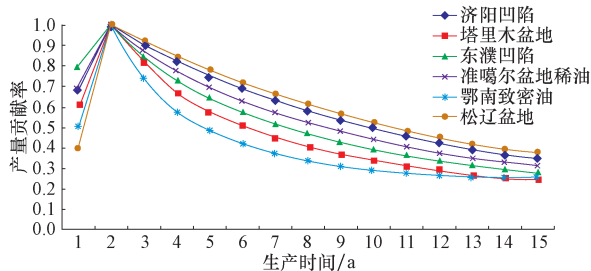


图1 中石化主要油区产量贡献率模型

Fig. 1 Oil production contribution rate model for the main oil fields of SINOPEC

表1 中石化东部XX区块开发概念设计主要指标

Table 1 Key indices for development concept design in one of SINOPEC's eastern blocks

时间/a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
生产井数/口	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
产量贡献率	0.80	1.00	0.85	0.73	0.65	0.57	0.51	0.47	0.43	0.39	0.36	0.33	0.31	0.29	0.28
年产量/(10 ⁴ t)	1.20	1.50	1.27	1.10	0.97	0.86	0.77	0.70	0.64	0.59	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42

3 计算方法

3.1 方法原理

现金流原理的实质是依据投入、产出原理在开发概念方案基础上进行效益综合分析。其具体过程是应用评价期分年度现金流入、现金流出及行业基准收益率,进行效益指标测算。其中,测算指标包括净现值、收益率和回收期等。将现金流原理应用于油气项目中,以油气藏的模拟开发方案为基础,测算流出项和流入项指标。其中,流入项主要为分年度油气产量的销售收入,它与产量模型相关;流入项包括分年度开发钻井和地面建设投资及成本,它与钻进工作量及油气开采单位成本水平相关。基于上述原理,可以构建如公式(1)所示的现金流模型。

$$NPV = \sum_{t=1}^T [(C_t - C_0)(1 + i_c)^{-t}] \quad (1)$$

式中: C_t ——第 t 年现金流入,万元;

C_0 ——第 t 年现金流出,万元;

i_c ——基准收益率,小数;

t ——时间序列数,取值1,2,⋯,T;

T ——项目评价期时间,a;

NPV ——净现值,万元。

基于吨油成本法^[15-16],假定评价目标油气藏地质储量、采油/气速度、无因次产量贡献率、钻井投资、单位产量销售价格、单位产量税金及单位产量操作成本为已知,则现金流入和现金流出可表述为公式(2)和公式(3)。

$$C_t^i = Nvr_t(P - R) \quad (2)$$

$$C_0^i = I_t + Nvr_t C_{or} \quad (3)$$

式中: C_t^i ——第 t 年现金流入,万元;

N ——油气藏地质储量,10⁴t;

v ——油气藏采油/气速度,小数;

r_t ——无因次产量贡献率,小数;

P ——油气销售价格,元/t(元/m³);

R ——单位产量税金,元/t(元/m³);

C_0^i ——第 t 年现金流入,万元;

I_t ——第 t 年钻井投资,万元;

C_{or} ——单位产量操作成本,元/t(元/m³)。

将公式(2)和公式(3)代入公式(1)可推导出油气藏储量规模与净现值关系模型的表达式(4)。

$$NPV = Nv \sum_{t=1}^T [(P - R - C_{or})r_t(1 + i_c)^{-t}] - \sum_{t=1}^T [I_t(1 + i_c)^{-t}] \quad (4)$$

油气藏区块评价中,钻井投资只发生在评价期的第1年,其后年份投资为0。因此,上述钻井投资 I_t 可以简化为 I_1 (评价期内第1年的钻井投资)。从而公式(4)可简化如下:

$$NPV = Nv(P - R - C_{or}) \sum_{t=1}^T [r_t(1 + i_c)^{-t}] - \frac{I_1}{(1 + i_c)} \quad (5)$$

为使关系模型进一步简化,以便于之后的油气藏储量最小商业储量规模计算,本文定义了用于简化关系模型的计算参数 C_1 和 C_2 。

$$C_1 = v(P - R - C_{or}) \sum_{t=1}^T [r_t(1 + i_c)^{-t}] \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{I_1}{(1 + i_c)} \quad (7)$$

在确定 C_1 的计算中,需要确定参数油价(P)、吨油税金(R)、行业基准收益率(i_c)、采油/气速度(v),无因次产量贡献率(r)及经济评价期(T)。这些基本参数由开发概念方案设计和经济指标确定。在确定 C_2 的计算中,仅涉及方案投资和行业基准收益率。以上基础参数在油气藏开发概念方案确定条件下均为已知确定参数。因此,油气藏模拟开发方案设计完成后, C_2 则为常数, C_1 与方案参数及油价相关。

基于上述分析,公式(5)表征的油气藏储量规模与净现值关系模型简化表述如下:

$$NPV = C_1 N - C_2 \quad (8)$$

根据油气藏最小商业储量规模的定义,净现值(NPV)为0对应的油气储藏规模的值即为最小商业储量规模值,见公式(9)。

$$N_{\min} = \frac{C_2}{C_1} \quad (9)$$

式中: $N_{\min}$ ——油气藏最小商业储量规模值,10⁴t。

3.2 变化特征

公式(8)所述净现值与储量规模的线性关系可用

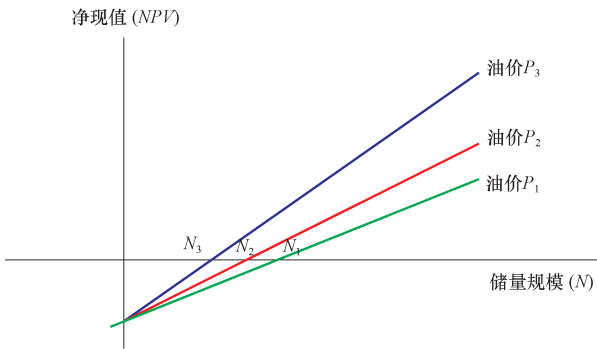


图 2 探明储量与净现值关系
Fig. 2 Relationship between proved reserves
and net present value

图 2 表示。即在一个油价 (P) 进行评价时,固定油气藏区块只有一条固定斜线与横轴相交,其交点对应储量即为最小商业储量规模,可用公式(9)计算。公式(9)中 C_1 代表直线斜率, C_2 代表与纵轴截距。

油气藏开发概念方案设计完成后, C_2 则为常数, C_1 与方案参数及油价相关。图 2 反映了固定油气藏在不同油价条件下的最小商业储量规模变化值。

在具体项目评价时,油气藏最小商业储量规模值与最小经济储量规模值^[17-21]的界定有所差别。计算油气藏最小商业储量规模值时,需要油气藏前期勘探投入作投资沉没处理, I_1 取开发概念方案投资;计算油气藏最小经济储量规模值时,需要考虑勘探前期的全部投资, I_1 取油气藏勘探总投入加开发概念方案投资。

3.3 计算流程

最小商业储量规模计算分 4 个步骤(图 3)。

第一步:构建油气藏开发概念方案。根据评价区块地质参数,如含油气面积、油藏类型和储层渗透率等,设计新钻井数、单井产能、采油速度及油气藏评价期产量预测等。在评价目标区块地质参数不全时,可

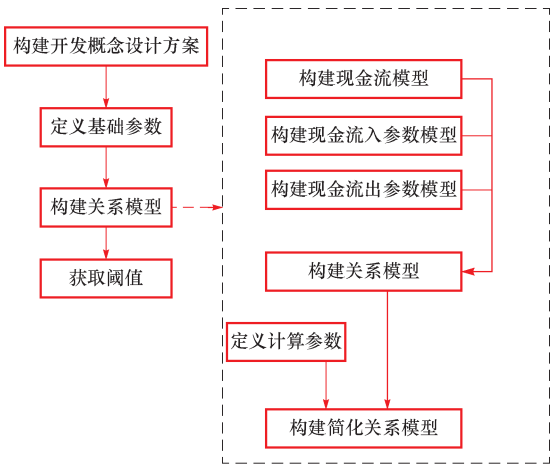


图 3 油气藏最小商业储量规模计算流程
Fig. 3 Calculation flow chart of the minimum commercial
reserves of reservoirs

参照图 1 选取无因次产量系数。
第二步:定义基础参数。这些参数包括油价、吨油开采成本、吨油税金、单井钻井投资和单井地面投资等。
第三步:构建储量规模净现值模型。基于基础参数及无因次产量系数,应用公式(5)和公式(6)计算常数 C_1 和 C_2 。
第四步:应用公式(9)计算既定条件下的最小商业储量规模。

4 应用案例

以中石化东部油区 5 个油藏区块为例,进行最小商业储量规模计算。根据矿场资料,应用类比法建立了 5 个油气藏区块的基础数据(表 2)。

根据不同区块所在地区新区产能建设区块资料统计,确定不同区块合理采油速度及井网密度设计投资及产能方案(表 3)。

评价区块属于断块油藏,产量贡献率模型可借用表 1 中对应于 XX 区块的无因次产量贡献率模型。将产量贡献率模型代入公式(6)进行测算,可得出产量贡献率折现求和值为 3.83, P 按 80 美元/桶,折算吨油价格 3 620 元, R 取油价 2%,扣税油价为 3 549 元/t,则 5 个油气藏区块对应常数 C_1 的表达式如下:

$$C_1 = 3.83v(3\,549 - C_{or}) \tag{10}$$

将表 2 和表 3 的相关数据代入公式(7)和公式(10)求取系数 C_1 和 C_2 ,应用公式(9)求得油气藏区块最小商业储量规模,结果见表 4。

表 2 油气藏区块基础参数						
Table 2 Basic parameters of reservoir blocks						
区块	含油面积/ km ²	油藏埋深/m	采收率/%	单井钻井投资/ 万元	单井地面投资/ 万元	吨油操作成本/ 元·t ⁻¹
区块 1	2.3	2 800	20	784	115	1 240
区块 2	2.6	3 200	23	960	115	1 084
区块 3	1.8	3 400	18	1 050	115	1 246
区块 4	1.5	3 300	25	1 005	115	997
区块 5	1.2	2 900	20	841	115	1 183

表 3 油气藏区块开发概念设计参数					
Table 3 Development concept design parameters of reservoir blocks					
区块	井网密度/ (口·km ⁻²)	新钻井数/口	单位钻井成本/ (元·m ⁻¹)	开发投资/ 万元	采油速度/%
区块 1	12	28	2 800	24 812	1.8
区块 2	11	29	3 000	30 745	1.8
区块 3	10	18	3 100	20 970	1.5
区块 4	12	18	3 050	20 160	1.7
区块 5	12	14	2 900	13 766	1.6

表4 油气藏区块最小商业储量规模计算结果

Table 4 Calculation results of the minimum commercial reserves of reservoir blocks

区块	评价油价(P)/ (元·t ⁻¹)	扣税油价 ($P - R$)/ (元·t ⁻¹)	单位操作 成本(C_{or})/ (元·t ⁻¹)	开发投资(I_1)/ 万元	采油速度 (v)/%	C_1	C_2	最小商业 储量规模/ (10 ⁴ t)	最小商业可 采储量规模/ (10 ⁴ t)
区块1	3 621	3 549	1 240	24 812	1.4	124	21 576	174	34.8
区块2	3 621	3 549	1 084	30 745	1.5	142	26 735	189	43.5
区块3	3 621	3 549	1 246	20 970	1.5	132	18 235	138	25.0
区块4	3 621	3 549	997	20 160	1.6	156	17 530	112	28.0
区块5	3 621	3 549	1 183	13 766	1.5	136	11 971	88	17.6

5 结论

1) 本文所述方法以项目现金流评价原理为基础,结合油气藏开发概念模型设计,分析影响最小商业储量规模的关键参数,建立了解析求解方法。方法具有通用性,适合勘探项目的目标评价排序及探明未开发储量效益评价等方面。

2) 文中提供了中石化不同油区无因次产量模式图版供参考。但实际操作中,为科学评价油气藏区块最小商业储量规模,开发概念模型设计应与同地区地质研究人员结合而定。针对同一油气藏区块,不同设计人员设计的方案预测模型可能有所不同,导致计算结果有所差异,需要设立不同地质参数体系下开发概念设计方案编制标准。

参 考 文 献

- [1] 郭少斌,朱建伟,杜旭东. 应用灰色系统理论对一棵树地区构造圈闭评价[J]. 石油与天然气地质,1995,16(1):76-80.
Guo Shaobin, Zhu Jianwei, Du Xudong. Evaluation of structure-traped oil and gas in Yikeshu region by grey system theory [J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(1): 76-80.
- [2] 刘伯土,朱允辉,高晓歌. 圈闭定量评价——三因素综合排队法[J]. 石油与天然气地质,2000,21(4):366-369.
Liu Botu, Zhu Yunhui, Gao Xiaoge. Trap quantitive assessment: method of three factor synthetic queuing [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 366-369.
- [3] 薛冰. 用模糊数学方法对海安凹陷南部局部构造含油气性的评价[J]. 石油与天然气地质,1992,13(4):423-430.
Xue Bing. Evaluation of hydrocarbon potential in local structures of Halan derpersion: an application example of fuzzy mathematicl method [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(4): 423-430.
- [4] 陈蟒蛟. 圈闭评价法在吐鲁番坳陷油气勘探中的应用[J]. 石油与天然气地质,1992,13(2):191-200.
Chen Mangjiao. Application of trap assessment to hydrocarbon prospecting in Turpan depression [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(2): 191-200.
- [5] 刘金连,张建宁. 高成熟探区圈闭经济评价系统及其应用[J]. 石

油与天然气地质,2011,32(2):280-286.

- Liu Jinlian, Zhang Jianning. Economic evaluation system for traps in a highly-explored area and its application [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 280-286.
- [6] 干卫星. 最小经济资源勘探规模研究 [J]. 中国西部油气地质, 2006, (2): 62-68.
Gan Weixing. Study of minimum economic exploration scale [J]. West China Petroleum Geosciences, 2006, (2): 67-68.
- [7] 张宇,白鹤仙,邱阳,等. 油气经济可采储量评估方法 [J]. 新疆石油地质,2006,27(1):31-34
Zhang Yu, Bai Hexian, Qiu Yang, et al. Study on estimation methods for hydrocarbon economic recoverable reserves [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 31-34.
- [8] 穆献中,赵国杰,魏后凯. 油气储量管理和效益评价方法研究——以吉林油田为例 [J]. 资源科学, 2003, 25(5): 49-52.
Mu Xianzhong, Zhao Guojie, Wei Houkai. Management and economic evaluation method fo oil & gas reserves—the case of Jilin oil filed [J]. Resources Science, 2003, 25(5): 49-52.
- [9] 穆献中,邓攀. 油气效益储量评价方法研究 [J]. 国际石油经济, 2003, (3): 31-36.
Mu Xianzhong, Deng Pan. Benefit of oil and gas reserves evaluation method research [J]. International Petroleum Economics, 2003, (3): 31-36.
- [10] 罗东坤. 天然气储量最低经济规模评估方法 [J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 131-133.
Luo Dongkun, Evaluation method of minimum economic resource for gas exploration [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 131-133.
- [11] 罗东坤,俞云柯. 油气资源经济评价模型 [J]. 石油学报, 2002, 23(6): 12-15.
Luo Dongkun, Yu Yunke. Study on an model for oil and gas resource economic evaluation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 12-15.
- [12] 刘晓冬,宋旭. 现金流量法在油气储量经济评价中的应用 [J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 142-144.
Liu Xiaodong, Song Xu. Applicaton of cash flow method in oil & gas reserves economic assessment: taking the block Zhao40 as an example [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 142-144.
- [13] 李继成,罗海龙. 一种关于油气储量经济评价的新方法——最小经济储量法 [J]. 吐哈油气, 1999, 4(1): 45-48.
Li Jicheng, Luo Hailong. A new method of reserve's economic evaluation: minimum economic reserve method [J]. Tuha Oil & Gas,

- 1999,4(1):45-48.
- [14] 张礼貌,杨凤波. 海外勘探项目最小经济储量规模盈亏平衡模型研究[J]. 中外能源,2011,(10):55-60.
- Zhang Limao, Yang Fengbo. The break-even model study of the minimum economic reserves size for overseas oil & gas exploration projects [J]. Sino-Global Energy, 2011, (10): 55-60.
- [15] 郭元岭,王学军,高磊. 最小经济规模石油地质储量确定方法[J]. 大庆石油地质与开发,2002,(1):57-59.
- Guo Yuanling, Wang Xuejun, Gao Lei. Method for petroleum geologic reserve of minimum economic size [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, (1): 57-59.
- [16] 李玉喜. 圈闭的经济评价与平均单井日产量和油田最小规模的关系[J]. 国际石油经济,2003,(5):34-35.
- Li Yuxi. The relationship of trap economic evaluation and the average single well production and oil field between the minimum size [J]. International Petroleum Economics, 2003, (5): 34-35.
- [17] 张树林,黄耀琴. 用盈亏平衡法建立最小经济储量规模模型[J]. 地质科技情报,2003,(2):72-78.
- Zhang Shulin, Huang Yaoqin. Least economic of reserves model based on break even method [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, (2): 72-78.
- [18] 王雅春,卢双舫,庞雄奇. 油气资源经济评价指标体系[J]. 油气田地面工程,2005,24(5):32-35.
- Wang Yachun, Lu Shuangfang, Pang Xiongqi. Oil and gas resources economic evaluation index system [J]. Oil-gasfield Surface Engineering, 2005, 24(5): 32-35.
- [19] 许进进,任玉林,凡哲元,等. 油价和成本对证实储量的影响[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):646-649.
- Xu Jinjin, Ren Yulin, Fan Zheyuan, et al. Impacts of oil prices and operation costs on proved reserves reporting [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 646-649.
- [20] 李洁梅,谭学群,许华明,等. 概率法储量计算在 CLFS 项目中的应用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(6):944-950.
- Li Jiemei, Tan Xuequn, Xu Huaming, et al. Application of probabilistic method in reserve calculation for the CLFS oilfield project [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 944-950.
- [21] 刘波涛,尹虎,王新海,等. 修正岩石压缩系数的页岩气藏物质平衡方程及储量计算[J]. 石油与天然气地质,2013,34(4):471-474.
- Liu Botao, Yin Hu, Wang Xinhai, et al. Material balance equation with revised rock compressibility for shale gas reserve calculation [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 471-474.

(编辑 李 军)

(上接第 147 页)

- [15] 熊伟,雷群,刘先贵,等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发,2009,36(2):232-236.
- Xiong Wei, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232-236.
- [16] 杨正明,于荣泽,苏致新,等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发,2010,37(1):94-98.
- Yang Zhengming, Yu Rongze, Su Zhixin, et al. Numerical simulation of the nonlinear flow in ultra-low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 94-98.
- [17] 同济大学数学教研室. 高等数学[M]. 北京:高等教育出版社,1993:190-200.
- Mathematical Teaching and Research Section of Tongji University. Advanced mathematics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 190-200.
- [18] 宫清顺,寿建峰,姜忠朋,等. 准噶尔盆地乌尔禾油田三叠系百口泉组储层敏感性评价[J]. 石油与天然气地质,2012,33(2):307-313.
- Gong Qingshun, Shou Jianfeng, Jiang Zhongpeng, et al. Reservoir sensitivity evaluation of the Triassic Baikouquan Formation in Wuerhe oilfield, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 307-313.
- [19] 廖纪佳,唐洪明,朱筱敏,等. 特低渗透砂岩储层水敏实验及损害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第8油层为例[J]. 石油与天然气地质,2012,33(2):321-328.
- Liao Jijia, Tang Hongming, Zhu Xiaomin, et al. Water sensitivity experiment and damage mechanism of sandstone reservoirs with ultra-low permeability: a case study of the eighth oil layer in the Yanchang Formation of Xifeng oilfield, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 321-328.
- [20] 刘峰,王裕亮,陈小凡,等. 考虑应力敏感性的低渗透油藏油井产能分析[J]. 石油与天然气地质,2013,34(1):124-128.
- Liu Feng, Wang Yuliang, Chen Xiaofan, et al. Analysis on oil well productivity of low-permeability reservoirs with stress-sensitivity being taken into considerations [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 124-128.
- [21] 钱德富,殷代印. 确定区块合理注采井数比、合理注采比的数学模型及应用[J]. 大庆石油地质与开发,1994,13(4):37-41.
- Qian Defu, Yin Daiyin. Mathematical model of determining reasonable injection-production well ratio and injection-production ratio [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1994, 13(4): 37-41.

(编辑 张亚雄)