

·油气采收率·

注水开发油田加密调整效果的评价方法

陈元千¹, 吕恒宇¹, 傅礼兵¹, 常迎梅²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 中国大多数砂岩油田, 为了实现高产稳产和提高采收率的目的, 均采用注水开发方案。然而, 随着油井见水和含水率的增加, 多数油田已进入产量递减阶段。为了减缓递减、改善开发现状和提高采收率, 多数油田普遍进行了井网加密和层系调整工作。众所周知, 油田的可采储量和剩余可采储量是制定开发方案和编制调整方案的基础。目前, 中国油田的可采储量和剩余可采储量是聘请国际评估公司进行评估的, 使用方法是 Arps 于 1945 年提出的经典产量递减法, 而且主要是指指数递减法。为此, 基于广义的 Arps 递减形式, 对于注水开发油田, 提出了评价油田加密调整前后可采储量、剩余可采储量、储采比和递减率的方法。实例应用结果表明, 马岭油田经过加密调整, 油田的技术可采储量和经济可采储量分别提高了 409.1×10^4 和 412.8×10^4 t。

关键词: 油田 注水开发 加密调整 可采储量 评价方法

中图分类号: TE313.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)06-0060-05

Evaluation method of infilling adjustment effect for waterflooding development oilfields

Chen Yuanqian¹, Lü Hengyu¹, Fu Libing¹, Chang Yingmei²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: In order to achieve high and stable production and improve oil recovery, waterflooding plan is used in the most sandstone oilfields of China. However, most oilfields have entered the production decline stage with water breakthrough and water cut increasing. In order to slow down the decline and improve the development status and the oil recovery, well pattern infilling and interlayer adjustment were carried out. It is well known that the recoverable reserves and remaining recoverable reserves of oilfields are the basis of development programs and adjustment programs. At present, the recoverable reserves and the remaining recoverable reserves of Chinese oilfields are evaluated by international assessment company. The method used is the classical production decline method proposed by Arps in 1945, and mainly based on the exponential decreasing method. Based on the generalized Arps decline form, a method was proposed to evaluate the recoverable reserves, remaining recoverable reserves, reserves production ratio (RPR) and decline rate before and after the infilling adjustment of the oilfield. The practice application indicates that the technical recoverable reserves and economical recoverable reserves have been increased by 409.1×10^4 and 412.8×10^4 t respectively after infilling adjustment in Maling Oilfield.

Key words: oilfield; waterflooding development; infilling adjustment; recoverable reserves; evaluation method

油田的可采储量和剩余可采储量是制定开发方案和编制调整方案的基础。目前使用的评价方法有产量递减法、水驱曲线法和预测模型法。中国三大国有石油上市公司, 每年花费重金聘请国际评

估公司, 对所辖油田的可采储量和剩余可采储量进行评估, 使用的主要是 Arps 的变异指数递减法^[1]。产量递减法不受油藏类型、储集类型、驱动类型和开发方式的限制, 只要进入递减阶段, 即可有效应

收稿日期: 2017-07-04。

作者简介: 陈元千(1933—), 男, 河南兰考人, 教授级高级工程师, 从事油气藏工程、油气田开发和油气储量评价方面的科研工作。联系电话: 15910321810, E-mail: fulibing@petrochina.com.cn。

用。Arps的产量递减法^[2-3]于20世纪80年代引入到中国可采储量的标定工作。中国的有关专家学者对产量递减法发表了许多文章^[4-15],极大地推动了该方法的应用。为此,笔者基于广义的Arps递减形式,对于注水开发油田,提出了评价油田加密调整前后可采储量、剩余可采储量、储采比和递减率的方法。

1 评价方法的建立

对于注水开发油田,其经历过1次加密调整前后的产量变化曲线如图1所示,该曲线划分为未调整期和调整期。在未调整期和调整期的产量递减阶段,生产到*t*时间的总累积产量可表示为

$$N_{pt} = N_{pt_0} + \int_{t_0}^t Q dt \quad (1)$$

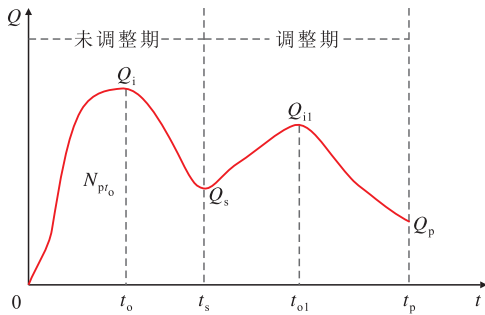


图1 加密调整油田产量变化示意

Fig.1 Schematic diagram of production rate change of infilling adjustment oilfield

下面对指数、双曲线和调和递减3种类型的评价方法分别予以介绍。

1.1 指数递减法

指数递减又称为半对数递减或常百分数递减(递减率为常数),笔者提出的广义Arps指数递减表达式^[4-5]为

$$Q = Q_i e^{-D(t-t_0)} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),积分后得

$$N_{pt} = N_{pt_0} + \frac{Q_i}{D} [1 - e^{-D(t-t_0)}] \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),整理后可得

$$N_{pt} = N_{pt_0} + \frac{Q_i - Q}{D} \quad (4)$$

令

$$A_e = N_{pt_0} + \frac{Q_i}{D} \quad (5)$$

$$B_e = \frac{1}{D} \quad (6)$$

则式(4)变为

$$N_{pt} = A_e - B_e Q \quad (7)$$

由式(7)可以看出,指数递减的 N_{pt} 与 Q 呈下降的直线关系,而且直线的斜率与递减率成反比。根据SY/T 5367—2010^[14]的规定,当 $Q=0$ 时,由式(7)得技术可采储量的计算式为

$$N_{RT} = A_e \quad (8)$$

由式(8)可知,指数递减的直线截距等于技术可采储量。当 $Q=Q_{EL}$ 时,由式(7)得经济可采储量的计算式为

$$N_{RE} = A_e - B_e Q_{EL} \quad (9)$$

若油田调整期开始时的产量为 Q_s ,此时总累积产量的计算式为

$$N_{pt_s} = A_e - B_e Q_s \quad (10)$$

将式(8)和式(9)分别与式(10)相减,可得调整期开始时剩余技术可采储量和剩余经济可采储量,其计算式分别为

$$N_{RTR} = B_e Q_s \quad (11)$$

$$N_{RER} = B_e (Q_s - Q_{EL}) \quad (12)$$

将式(11)和式(12)分别除以 Q_s ,得到调整期开始时的技术储采比和经济储采比公式为

$$\omega_T = B_e \quad (13)$$

$$\omega_E = B_e \left(1 - \frac{Q_{EL}}{Q_s}\right) \quad (14)$$

由式(7)对时间求导,可得到指数递减的递减率为

$$D = -\frac{dQ}{Q dt} = \frac{1}{B_e} \quad (15)$$

由式(15)可以看出,指数递减的递减率为常数。

1.2 双曲线递减法

笔者提出的广义Arps双曲线递减表达式^[4-5]为

$$Q = \frac{Q_i}{[1 + (1-m)D_i(t-t_0)]^{1-m}} \quad (16)$$

将式(16)代入式(1),积分后可得

$$N_{pt} = N_{pt_0} + \frac{Q_i}{mD_i} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + (1-m)D_i(t-t_0)} \right]^{1-m} \right\} \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)得

$$N_{pt} = N_{pt_0} + \frac{Q_i}{mD_i} \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_i} \right)^m \right] \quad (18)$$

令

$$A_h = N_{pt_0} + \frac{Q_i}{mD_i} \quad (19)$$

$$B_h = \frac{Q_i^{1-m}}{mD_i} \quad (20)$$

则式(18)变为

$$N_{pr} = A_h - B_h Q^m \quad (21)$$

由式(21)可以看出,双曲线递减的 N_{pr} 与 Q^m 呈下降的直线关系。根据SY/T 5367—2010^[14]的规定,当 $Q=0$ 时,由式(21)得技术可采储量的计算式为

$$N_{RT} = A_h \quad (22)$$

由式(22)可以看出,双曲线递减的直线截距等于技术可采储量。当 $Q=Q_{EL}$ 时,由式(21)得经济可采储量的计算式为

$$N_{RE} = A_h - B_h Q_{EL}^m \quad (23)$$

若调整期开始时的产量为 Q_s ,由式(21)可得在 t_s 时的总累积产量为

$$N_{pr_s} = A_h - B_h Q_s^m \quad (24)$$

将式(22)和式(23)分别与式(24)相减,可得到调整期开始时的剩余技术可采储量和剩余经济可采储量,其计算式分别为

$$N_{RTR} = B_h Q_s^m \quad (25)$$

$$N_{RER} = B_h (Q_s^m - Q_{EL}^m) \quad (26)$$

将式(25)和式(26)分别除以 Q_s ,可得调整期开始时的技术储采比和经济储采比为

$$\omega_T = \frac{B_h}{Q_s^{1-m}} \quad (27)$$

$$\omega_E = \frac{B_e}{Q_s^{1-m}} \left[1 - \left(\frac{Q_{EL}}{Q_s} \right)^m \right] \quad (28)$$

由式(21)对时间求导,可得到双曲线递减的递减率为

$$D = -\frac{dQ}{Qdt} = \frac{Q^{1-m}}{mB_h} \quad (29)$$

由式(29)可以看出,双曲线递减的递减率随 Q^{1-m} 的下降而减小。

1.3 调和递减法

笔者提出的广义 Arps 调和递减表达式^[4-5]为

$$Q = \frac{Q_i}{1 + D_i(t - t_o)} \quad (30)$$

将式(30)代入式(1),积分后可得

$$N_{pr} = N_{pr_o} + \frac{Q_i}{D_i} \ln \frac{Q_i}{Q} \quad (31)$$

令

$$A_m = N_{pr_o} + \frac{Q_i}{D_i} \ln Q_i \quad (32)$$

$$B_m = \frac{Q_i}{D_i} \quad (33)$$

则式(31)变为

$$N_{pr} = A_m - B_m \ln Q \quad (34)$$

由式(34)可以看出,调和递减的 N_{pr} 与 $\ln Q$ 呈下降的直线关系。当 $Q=1$, $\ln Q=0$ 时,由式(34)得

技术可采储量的计算式为

$$N_{RT} = A_m \quad (35)$$

由式(35)可以看出,调和递减的直线截距等于技术可采储量。

根据式(34),得到 t_s 时间的总累积产量与产量的关系式为

$$N_{pr_s} = A_m - B_m \ln Q_s \quad (36)$$

将式(35)与式(36)相减,可得剩余技术可采储量的计算式为

$$N_{RTR} = B_m \ln Q_s \quad (37)$$

将式(37)除以 Q_s ,可得调整期开始时的技术储采比计算式为

$$\omega_T = \frac{B_m \ln Q_s}{Q_s} \quad (38)$$

由式(34)对时间求导,可得调和递减的递减率为

$$D = -\frac{dQ}{Qdt} = \frac{D_i Q}{Q_i} \quad (39)$$

由式(39)可以看出,调和递减的递减率与 Q 成正比。

1.4 经济极限产量的确定方法

油田的经济极限产量与成本、油价和税率有关,根据年度投入与产出平衡原理,经济极限产量的计算式^[12-13]为

$$Q_{EL} = \frac{C_1 + C_2}{\eta(P_o + P_g R_{go})(1 - T_x)} \quad (40)$$

2 应用举例

由马岭油田从1980年至2004年的产量变化曲线(图2)发现:该油田的开发过程可划分为未调整期和调整期2个阶段。马岭油田从1991年开始经历了长达9 a的开发调整,油田产量总体呈上升趋势。未调整期和调整期有关基本数据如表1所示。

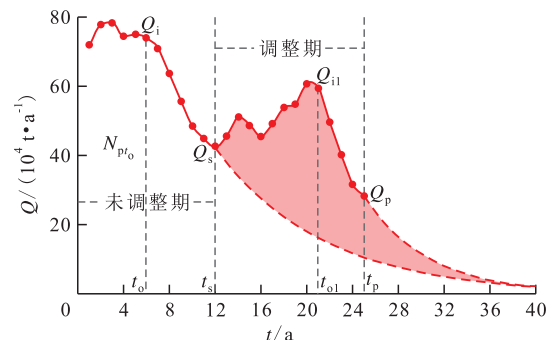


图2 马岭油田产量变化曲线

Fig.2 Curves of production rate change of Maling Oilfield

表1 马岭油田未调整期和调整期基础数据
Table1 Basic data at unadjusted stage and adjusted stage in Maling Oilfield

期别	$Q_s/(10^4 t \cdot a^{-1})$	t_s/a	$Q_p/(10^4 t \cdot a^{-1})$	t_p/a
未调整期	42	12		
调整期			28	25

根据图2中的产量数据及式(7),绘制 N_{pt} 与 Q 的关系图(图3)。由图3可以看出,未调整期和调整期的产量递减数据点均呈现很好的直线关系,这表明2个产量递减阶段都符合指数递减。经线性回归后,2个直线段的截距(A_c)、斜率(B_c)和相关系数(r)列于表2。

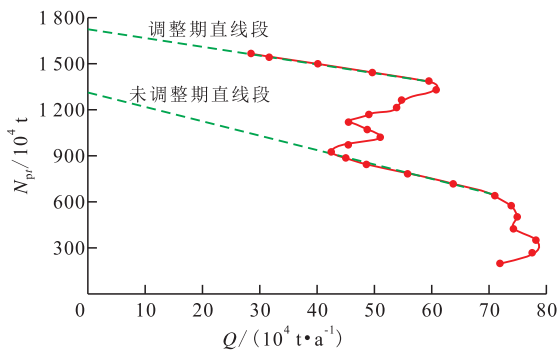


图3 马岭油田的 N_{pt} 与 Q 的关系

Fig.3 Relationship between N_{pt} and Q of Maling Oilfield

表2 马岭油田2个递减阶段的线性回归结果
Table2 Results of linear regression in two decline stages in Maling Oilfield

期别	A_c	B_c	r
未调整期	1 311.8	9.439 2	0.994
调整期	1 720.9	5.658 5	0.997

根据表(2),可知未调整期和调整期的 A_c 和 B_c ,通过图2可确定 t_s , Q_s , t_p 和 Q_p ,在假定马岭油田的经济极限产量为 $1 \times 10^4 t/a$ 的条件下,由式(8)和式(9)及式(11)一式(15),预测得到 N_{RT} , N_{RE} , N_{RTR} , N_{RER} , ω_T , ω_E 和 D (表3)。由表3可见,加密调整的效果是比较明显的, N_{RT} 和 N_{RE} 分别增加了 409.1×10^4 和 $412.8 \times 10^4 t$,而 D 上升了 $7.1\%/a$ 。

表3 不同调整期的评价结果
Table3 Evaluation results in different stages

期别	$N_{RT}/10^4 t$	$N_{RE}/10^4 t$	$N_{RTR}/10^4 t$	$N_{RER}/10^4 t$	ω_T/a	ω_E/a	$D/(\% \cdot a^{-1})$
未调整期	1 311.8	1 302.4	396.4	387.0	9.44	9.21	10.6
调整期	1 720.9	1 715.2	158.4	152.8	5.66	5.46	17.7

将未调整期的 Q_s , t_s 和 D 代入式(2),得到未调整期递减阶段预测产量与时间的关系式为

$$Q = 42e^{-0.106(t-12)} \quad (43)$$

将调整期的 Q_p , t_p 和 D 代入式(2),得到调整

期递减阶段预测产量与时间的关系式为

$$Q = 28e^{-0.177(t-25)} \quad (44)$$

将式(43)和式(44)的预测结果分别绘于图2上,图中红色填充部分的面积即为调整后增加的可采储量。

3 结束语

中国于20世纪60年代至90年代投入的大量注水开发油田,目前多数已进入高井网密度、高采出程度和高含水率阶段,而且多数油田进行过一次或多次的井网加密、层系细分和注采系统的调整等工作。应当指出,对经过加密调整的油田进行可采储量和剩余可采储量的评价,是一项非常重要的经常性工作。目前中国三大国有石油上市公司,每年聘请国际评估公司,对所辖油田的可采储量和剩余可采储量进行评估,所使用的方法主要是 Arps 的变异指数递减法。在笔者提出的广义 Arps 递减的基础上,经过推导得到评价油田可采储量、剩余可采储量、储采比和递减率的方法。通过马岭油田的应用表明,笔者新建方法是实用有效的。

符号解释:

N_{pt} —— t 时间的总累积产量, $10^4 t$; N_{pt_0} —— t_0 时间的总累积产量, $10^4 t$; t_0 —— 未调整期产量峰值的时间, a ; t —— 从投产开始计时的时间, a ; Q —— 年产量, $10^4 t/a$; Q_t —— t_0 时间的产量, $10^4 t/a$; t_s —— 调整期开始的时间, a ; Q_s —— t_s 时间的产量, $10^4 t/a$; t_{01} —— 调整期产量为峰值的时间, a ; Q_{01} —— 调整期峰值的产量, $10^4 t/a$; t_p —— 调整期目前生产的时间, a ; Q_p —— t_p 时间的产量, $10^4 t/a$; D —— t ($t > t_0$) 时间的递减率, $1/a$; A_c , B_c —— 指数递减直线的截距和斜率; N_{RT} —— 技术可采储量, $10^4 t$; Q_{EL} —— 经济极限产量, $10^4 t/a$; N_{RE} —— 经济可采储量, $10^4 t$; N_{pt_s} —— t_s 时间总累积产量, $10^4 t$; N_{RTR} —— 剩余技术可采储量, $10^4 t$; N_{RER} —— 剩余经济可采储量, $10^4 t$; ω_T —— 技术储采比, a ; ω_E —— 经济储采比, a ; m —— 递减因子,指数递减时其值为1,双曲线递减时其值为(0,1),调和递减时其值为0; D_i —— t_0 时间的初始递减率, $1/a$; A_h , B_h —— 双曲线递减直线的截距和斜率; A_m , B_m —— 调和递减直线的截距和斜率; C_1 —— 评价年度的直接生产成本, 10^4 元/ a ; C_2 —— 评价年度的间接生产成本, 10^4 元/ a ; η —— 产量的商品率, f ; P_o —— 评价年度的原油价格, 元/ t ; P_g —— 评价年度的天然气价格, 元/ m^3 ; R_{go} —— 评价年度的平均气油比, m^3/t ; T_x —— 综合税率, f ; r —— 相关系数, f 。

参考文献:

- [1] 陈元千.油气藏工程实践[M].北京:石油工业出版社,2005:95-102.
Chen Yuanqian.The practice of petroleum reservoir engineering [M].Beijing:Petroleum Industry Press,2005:95-102.
- [2] Arps J J.Analysis of decline curve[J].Trans. AIME, 1945, 160: 228-247.
- [3] Arps J J.Estimation of primary oil reserves [J].Trans. AIME, 1956,207:182-186.
- [4] 陈元千,周翠.线性递减类型的建立、对比与应用[J].石油学报,2015,36(8):983-987.
Chen Yuanqian, Zhou Cui.Establishment, comparison and application of the linear decline type[J].Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (8):983-987.
- [5] 陈元千,唐玮.广义递减模型的建立及应用[J].石油学报, 2016,37(11):1 410-1 413.
Chen Yuanqian, Tang Wei.Establishment and application of generalized decline model [J].Acta Petrolei Sinica, 2016, 37 (11) : 1 410-1 413.
- [6] 陈元千.预测油气田可采储量和剩余可采储量的快速方法[J].新疆石油地质,2005,26(5):544-548.
Chen Yuanqian.Method for quickly forecasting recoverable reserves and remaining recoverable reserves in oil and gas fields[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(5) :544-548.
- [7] 陈元千,李剑,雷占祥,等.产量递减阶段开发指标的预测方法[J].新疆石油地质,2013,34(5):545-547.
Chen Yuanqian, Li Jian, Lei Zhanxiang, et al.Methods for forecasting development index in production decline stage [J].Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5) :545-547.
- [8] 陈元千,王孝金,程继蓉,等.适用于海外合作开发油田预测可采储量、产量和储采比的方法[J].中国海上油气,2011,23(6): 380-383.
Chen Yuanqian, Wang Xiaojin, Cheng Jirong, et al.Methods to predict production rate, recoverable reserves and reserve-production ratio for overseas joint-operation oilfields [J].China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(6) : 380-383.
- [9] 陈元千,李剑,李云波,等.利用典型曲线拟合的递减常数预测油气藏的可采储量[J].中国海上油气,2015,27(5):49-54.
Chen Yuanqian, Li Jian, Li Yunbo, et al.Using decline constants from matching type curve to predict recoverable reserves of oil and gas reservoirs [J].China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(5) : 49-54.
- [10] 陈元千,郝明强.Arps递减微分方程的推导及应用[J].断块油气田,2014,21(1):57-58.
Chen Yuanqian, Hao Mingqiang.Derivation and application of Arps decline differential equation [J].Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1) :57-58.
- [11] 陈元千.确定递减类型的新方法[J].石油学报,1990,11(1): 74-79.
Chen Yuanqian.A new method of identify the type decline curve [J].Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(1) :74-79.
- [12] 陈元千,周翠,张霞林,等.重质油藏注蒸汽开采预测经济可采储量和经济极限汽油比的方法——兼评国家行业标准的预测方法[J].油气地质与采收率,2015,22(5):1-6.
Chen Yuanqian, Zhou Cui, Zhang Xialin, et al.Methods for predicting economically recoverable reserves and economic limit of steam-oil ratio of heavy oil reservoir by steam flooding recovery: Comment on the prediction methods of the national industry standard [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (5) :1-6.
- [13] 陈元千,周游,李秀峦,等.利用SAGD开采技术预测重质油藏可采储量新方法[J].特种油气藏,2015,22(6):85-89.
Chen Yuanqian, Zhou You, Li Xiuluan, et al.A new method of using SAGD exploitation technique to predict the recoverable reserves of heavy oil reservoir [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6) :85-89.
- [14] 侯建锋,李军诗,纪淑红,等.SY/T 5367—2010石油可采储量计算方法[S].北京:石油工业出版社,2010.
Hou Jianfeng, Li Junshi, Ji Shuhong, et al.SY/T 5367-2010 The estimated methods of oil recoverable reserves [S].Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [15] 陈元千,李剑.中国新版《石油可采储量计算方法》标准中存在的主要问题及建议[J].油气地质与采收率,2014,21(5):8-13.
Chen Yuanqian, Li Jian.Reviews on problems and recommendations for new edition standard of *The estimated methods of oil recoverable reserves* in China [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5) :8-13.

编辑 常迎梅