

文章编号: 0253-2697(2016)11-1410-04 DOI:10.7623/syxb201611009

广义递减模型的建立及应用

陈元千 唐 玮

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:对于已经进入产量递减阶段开发的油气田,产量递减法是预测油气田可采储量、剩余可采储量、产量和递减率的重要方法。基于广义的 Arps 指数递减、双曲递减和调和递减,结合陈氏线性递减模型,建立了广义递减模型。该模型可以用于油气田可采储量、剩余可采储量、产量和递减率的预测。递减因子 m 是判断和区分递减类型的重要参数。当 $m=2$ 时为线性递减;当 $m=1$ 时为指数递减;当 $0 < m < 1$ 时为双曲递减;当 $m=0$ 时为调和递减。通过对五里湾 1 区、东河塘和法哈牛 3 个已开发油田的实际应用表明,所建立的广义递减模型实用有效。

关键词:油气田;广义递减模型;可采储量;剩余可采储量;产量;递减率;预测

中图分类号:TE328 **文献标识码:**A

Establishment and application of generalized decline model

Chen Yuanqian Tang Wei

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: For developed oil and gas fields that have entered the production decline stage, production decline method is an important method to predict recoverable reserves, remaining recoverable reserves, production and decline rate of oil and gas fields. Based on the generalized Arps exponential decline, hyperbolic decline and harmonic decline and combined with the linear decline proposed by Chen, a generalized decline model was established. The model can be used in the prediction of recoverable reserves, remaining recoverable reserves, production and decline rate of oil and gas fields. The decrease factor m is an important parameter to judge and distinguish decline types. When $m=2$, it represents a linear decline; when $m=1$, it represents an exponential decline; when $0 < m < 1$, it represents a hyperbolic decline; when $m=0$, it represents a harmonic decline. The practical application in three developed oil fields such as Wuliwan area 1, Donghetang and Fahaniu indicates that the established generalized model is practical and effective.

Key words: oil and gas field; generalized decline model; recoverable reserves; remaining recoverable reserves; production; decline rate; prediction

引用: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):1410-1413.

Cite: Chen Yuanqian, Tang Wei. Establishment and application of generalized decline model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1410-1413.

油气田的可采储量是制定开发方案的基础,剩余可采储量是决策调整方案的基础,产量是编制中长期开发规划的基础,递减率是判断开发形势的基础。对于已经进入产量递减阶段的油气田,产量递减法是预测上述开发指标的主要方法。Arps^[1,2]基于对产量与时间变化关系的分析和研究,提出了3种经典的递减类型,即指数递减、双曲递减和调和递减。然而,这3种递减类型只适用于投产即进入递减的无峰开发模式。笔者等^[3-14]将 Arps 中的时间 t 改为 $(t-t_0)$ 后,得到了适用于无峰、单峰、双峰和均峰等不同开发模式广义的指数递减、双曲递减和调和递减类型。笔者等^[15]还基于实际产量变化的分析和研究,经推导提出了线

性递减类型,经综合广义的 Arps 3 种递减类型和陈氏的线性递减类型,笔者建立了受递减因子 m 控制的广义递减模型。

1 广义递减模型的建立

1.1 可采储量和剩余可采储量

图 1 为东河塘油田的产量与生产时间的动态曲线。其中 Q_i 为递减初始阶段的产量, Q_p 为目前的产量, Q_{EL} 为经济极限产量,而 t_0 、 t_p 和 t_{EL} 分别为与 3 个产量相应的生产时间。

基于文献[15],综合广义的 Arps 3 种递减类型和陈氏线性递减类型,笔者提出的产量与总累积产量的

第一作者及通信作者:陈元千,男,1933 年 10 月生,1952 年考入清华大学石油工程系,1956 年毕业于北京石油学院钻采系。中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师,长期从事油藏工程、油气田开发和油气储量评估工作。

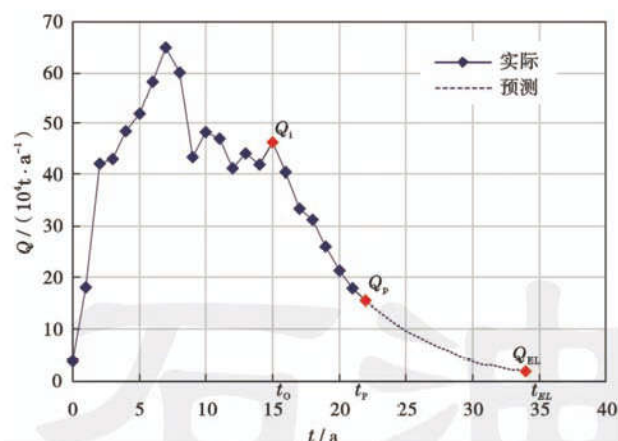


图 1 东河塘油田的产量与生产时间的关系

Fig. 1 Relationship between production and production time of Donghetang oilfield

通式为:

$$Q^m = A - BN_{pi} \quad (1)$$

其中,

$$A = Q_i^m + \frac{mD_i N_{pi0}}{Q_i^{1-m}} \quad (2)$$

$$B = mD_i / Q_i^{1-m} \quad (3)$$

当 $Q = Q_{EL}$ (经济极限年产量) 时, 由式(1)可得经济可采储量的关系式为:

$$N_{RE} = (A - Q_{EL}^m) / B \quad (4)$$

根据国家行业标准^[10]的规定, 当 $Q = 0$ 时, 由式(1)可得技术可采储量的关系式为:

$$N_{RT} = A / B \quad (5)$$

当油气田生产到目前时间 t_p 时, 总累积产量的关系式为:

$$N_{pi_p} = (A - Q_p^m) / B \quad (6)$$

由式(4)减去式(6)得剩余经济可采储量为:

$$N_{KER} = (Q_p^m - Q_{EL}^m) / B \quad (7)$$

由式(5)减去式(6)得剩余技术可采储量为:

$$N_{RTR} = Q_p^m / B \quad (8)$$

应当指出, 上述各式中的 m 为递减因子, 当 $m = 2$ 时可得线性递减的关系式; 当 $m = 1$ 时可得指数递减的关系式; 当 $0 < m < 1$ 时可得双曲递减的关系式。

1.2 产量与时间的关系

基于文献[15], 综合广义的 Arps 3 种递减类型和陈氏线性递减类型, 笔者提出产量与时间的通式为:

$$Q = \frac{Q_i}{[1 + (1-m)D_i(t-t_o)]^{1/(1-m)}} \quad (9)$$

当 $m = 2$ 时, 可得线性递减的关系式为:

$$Q = Q_i[1 - D_i(t - t_o)] \quad (10)$$

当 $m = 1$ 时, 对式(9)可调整为:

$$Q = \frac{Q_i}{\left[\left(1 + \frac{1}{1/z} \right)^{1/z} \right]^{D_i(t-t_o)}} \quad (11)$$

其中,

$$z = (1-m)D_i(t-t_o) \quad (12)$$

当 $m = 1, z = 0, 1/z \rightarrow \infty$ 时, 根据常用序列极限有:

$$\lim_{1/z \rightarrow \infty} \left[\left(1 + \frac{1}{1/z} \right)^{1/z} \right]^{D_i(t-t_o)} = e^{D_i(t-t_o)} \quad (13)$$

将式(13)代入式(11), 可得指数递减的产量与时间的关系式为:

$$Q = Q_i e^{-D_i(t-t_o)} \quad (14)$$

当 $0 < m < 1$ 和 $m = 1 - n$ 时, 由式(9)可得广义双曲递减的产量与时间的关系式为:

$$Q = \frac{Q_i}{[1 + nD_i(t-t_o)]^{1/n}} \quad (15)$$

当 $m = 0$ 时, 由式(9)可得调和递减的产量与时间的关系式为:

$$Q = \frac{Q_i}{1 + D_i(t-t_o)} \quad (16)$$

1.3 递减率与时间的关系

基于文献[15], 综合广义的 Arps 3 种递减类型和陈氏线性递减类型, 笔者提出递减率与时间的通式为:

$$D = \frac{D_i}{1 + (1-m)D_i(t-t_o)} \quad (17)$$

当 $m = 2$ 时, 由式(17)可得到线性递减的关系式为:

$$D = \frac{D_i}{1 - D_i(t-t_o)} \quad (18)$$

当 $m = 1$ 时, 由式(17)可得指数递减的关系式为:

$$D = D_i \quad (19)$$

当 $0 < m < 1$ 时和 $m = 1 - n$ 时, 由式(17)可得双曲递减的关系式为:

$$D = \frac{D_i}{1 + nD_i(t-t_o)} \quad (20)$$

当 $m = 0$ 时, 由式(17)可得调和递减的关系式为:

$$D = \frac{D_i}{1 + D_i(t-t_o)} \quad (21)$$

2 模型参数的确定

在利用广义递减模型, 预测可采储量、剩余可采储量、产量和递减率时, 都会用到递减因子 m 、直线的截距 A 、斜率 B 、递减初始阶段的产量 Q_i 和 t_o 时间的年递减率 D_i 的数值。根据油气田递减阶段的 Q 与 N_{pi} 的相应数据, 首先利用式(1)的线性迭代试差法, 确定线性拟合关系最好时的 m 值, 并由线性回归求得 A 和 B 的数值。然后, 根据式(2)所转换的公式可以确定 Q_i 的数值:

$$Q_i = (A - BN_{pi})^{1/m} \quad (22)$$

当由式(22)确定 Q_i 的数值后,再根据式(3)所转换的公式,就可以确定 D_i 的数值:

$$D_i = BQ_i^{1-m}/m \quad (23)$$

3 应用实例

以五里湾油田 1 区、东河塘油田和法哈牛油田为例,验证广义递减模型应用的可靠性。按照广义递减模型式(1)的关系进行线性迭代试差,得到 3 个油田 Q^m 与 N_{pt} 的最佳直线关系(图 2),有关 3 个油田的目前生产数据,以及由线性迭代试差法求得的递减因子 m 、直线的截距 A 、斜率 B 和相关系数 r 列

于表 1。

由表 1 可以看出,五里湾油田 1 区的 $m=2$,属于线性递减;东河塘油田的 $m=1$,属于指数递减;法哈牛的 $m=0.5$,属于双曲递减。由于缺少 3 个油田评价年经济产量的数据,因此,笔者仅计算了广义递减模型预测的技术可采储量 N_{RT} 、剩余技术可采储量 N_{RTR} 以及 2014 年产量 Q_p 和递减率 D_p 的数值列入表 2。其中注水开发的五里湾油田 1 区,储层属于致密砂岩油藏($K=1.8$ mD 和 $\phi=12.7\%$)。由本文方法预测的技术可采储量为 790×10^4 t,根据油田的地质储量为 $6\,067 \times 10^4$ t,计算得到油田的采收率 E_R 为 13%。

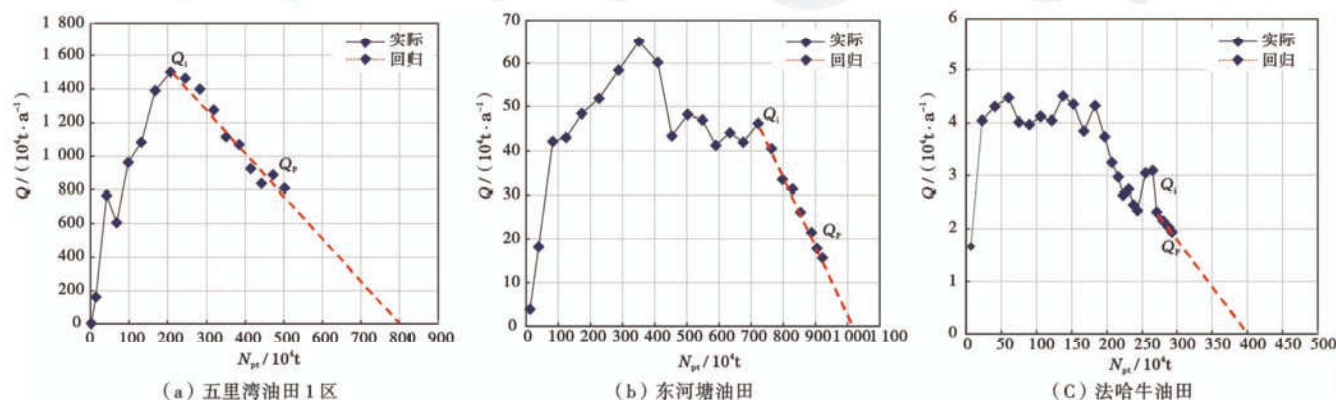


图 2 Q^m 与 N_{pt} 关系

Fig. 2 Relationship between Q^m and N_{pt}

表 1 3 个油田目前的生产数据和线性回归结果

Table 1 Current production data and linear regression results of the three oilfields

油田	t_0/a	t_p/a	$Q_i/(10^4 t \cdot a^{-1})$	$Q_p/(10^4 t \cdot a^{-1})$	$N_{pt_0}/(10^4 t \cdot a^{-1})$	$N_{pt_p}/(10^4 t \cdot a^{-1})$	m	A	B	r
五里湾 1 区	7	16	38.7	28.5	207	502	2.0	2 082.10	2.63	0.9808
东河塘	15	22	46.3	15.6	722	920	1.0	157.66	0.15	0.9975
法哈牛	21	26	5.4	3.8	271	292	0.5	6.92	0.017	0.9867

表 2 油田预测和实际数据对比

Table 2 Comparison of predicted and actual data of the oil fields

油田	$N_{RT}/(10^4 t \cdot a^{-1})$	$N_{RTR}/(10^4 t \cdot a^{-1})$	$Q_p/(10^4 t \cdot a^{-1})$		D_p/a^{-1}	
	由式(5)计算	由式(8)计算	由式(9)计算	实际数据	由式(17)计算	实际数据
五里湾 1 区	790	308	27.4	28.5	0.048	0.044
东河塘	1 022	101	15.7	15.6	0.154	0.124
法哈牛	407	114	3.76	3.8	0.066	0.087

4 结 论

(1) 将广义 Arps 的指数递减、双曲递减、调和递减 3 种类型,与陈氏线性递减类型相结合,建立了广义递减模型。该模型包括:产量与总累积产量关系的通式、产量与时间关系的通式和递减率与时间关系的通式。该模型可以预测油气田的可采储量、剩余可采储量、产量和递减率。经过 3 个油田实际应用的结果表

明,所提供的广义递减模型实用有效。

(2) 广义递减模型的递减因子 m 是判断和区分递减类型的指标: $m=2$ 属于线性递减; $m=1$ 属于指数递减; $0 < m < 1$ 属于双曲递减; $m=0$ 时属于调和递减。

符号注释: Q —投产到 t 时间($t > t_0$)的年产量, 10^4 t/a; Q_i —递减初始阶段的产量, 10^4 t/a; Q_p —目前的年产量, 10^4 t/a; Q_{EL} —经济极限年产量, 10^4 t/a; N_{pt} —

从投产计量到 t 时间的总累积产量, $10^4 t$; N_{pt_0} —从投产计量到 t_0 时间的总累积产量, $10^4 t$; N_{pt_p} —从投产计量到 t_p 时间的总累积产量, $10^4 t$; N_{RE} —经济可采储量, $10^4 t$; N_{RT} —技术可采储量, $10^4 t$; N_{REK} —剩余经济可采储量, $10^4 t$; N_{RTR} —剩余技术可采储量, $10^4 t$; t —从投产计时的生产时间, a ; t_0 —从投产计时到 Q_0 的生产时间, a ; t_p —从投产计时到目前的生产时间, a ; t_{EL} —从投产计时到达到经济极限产量的生产时间, a ; D —年递减率, a^{-1} ; D_0 — t_0 时间的年递减率, a^{-1} ; D_p —目前的年递减率, a^{-1} ; m —递减因子 ($0 \leq m \leq 2$); n —Arps 的递减指数; A —线性迭代试差法求得直线的截距; B —线性迭代试差法求得直线的斜率; r —相关系数; K —渗透率, mD ; ϕ —孔隙度; E_R —采收率。

参 考 文 献

- [1] Arps J J. Analysis of decline curves[R]. SPE 945228, 1945.
- [2] Arps J J. Estimation of primary oil reserves[R]. SPE 627, 1956.
- [3] 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.
- [4] 陈元千, 王小林, 姚尚林, 等. 加密并提高注水开发油田采收率的评价方法[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(6): 705-709.
Chen Yuanqian, Wang Xiaolin, Yao Shanglin, et al. A method for evaluation of EOR of waterflooding oilfield by infill well process [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(6): 705-709.
- [5] 陈元千, 胡丹丹, 赵庆飞, 等. 注聚合物提高采收率幅度的评价方法及应用[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 48-51.
Chen Yuanqian, Hu Dandan, Zhao Qingfei, et al. Evaluation method and its application of enhancing recovery efficiency range of polymer-flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 48-51.
- [6] 陈元千, 李剑, 齐亚东, 等. 页岩气藏地质资源量、可采资源量和井控可采储量的确定方法[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 547-551.
Chen Yuanqian, Li Jian, Qi Yadong, et al. Determination methods of geological resources, recoverable resources and well-controlled recoverable reserves in shale gas reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 547-551.
- [7] 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 and Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 85-89.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 陈元千, 邹存友. 预测油田产量和可采储量模型的典型曲线及其应用[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 749-753.
Chen Yuanqian, Zou Cunyou. Models typical curve and its application for forecasting production and recoverable reserves of oil fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 749-753.
- [12] 陈元千, 郝明强, 李飞. 油气资源量评估方法的对比与评论[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 447-453.
Chen Yuanqian, Hao Mingqiang, Li Fei. Comparison and review of estimating methods of oil and gas resources[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 447-453.
- [13] 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.
- [14] 陈元千, 邹存友. 产量递减阶段储采比变化规律[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 54-57.
Chen Yuanqian, Zou Cunyou. Variation of reserves production ratio in production decline stage[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(1): 54-57.
- [15] 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.

(收稿日期 2016-04-04 改回日期 2016-07-11 编辑 王培玺)