

甲型水驱曲线和产量递减法在渤海B油田的应用

李超,王雨,李文忠,黄建廷,马栋
(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

摘要:甲型水驱特征曲线和产量递减规律是油藏动态预测的两种重要方法,但两种方法都有其自身的局限性。甲型水驱特征曲线法在动态变化中缺少时间的概念,产量递减法在预测过程中缺少综合含水率这项指标,并且无法预测油田提液后的指标。通过将两种方法综合应用,运用微元法得到定液条件下不同时刻油藏的年产油量、年产水量、自然递减率以及含水上升率等各项动态指标;应用甲型水驱曲线推导出累积液量和累积油量的关系,由此得出不同液量下油藏的各项动态指标,为油田液量优化提供科学依据。该方法应用简单,预测精度高,对油田开发具有重要意义。

关键词:甲型水驱曲线;Arps递减法;微元法;变液量

中图分类号:TE341 **文献标志码:**A

Application of type A water drive curve and production decline method in B Oilfield of Bohai Sea

LI Chao, WANG Yu, LI Wenzhong, HUANG Jianting, MA Dong

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The type A water drive characteristic curve and the production decline law are two important methods for reservoir performance prediction, but both methods have their limitations. The type A water drive characteristic curve method lacks the concept of time in dynamic change, and the production decline method lacks the comprehensive water-cut index in the prediction process and can not predict the index after oil extraction. Through the comprehensive application of the two methods, the micro-element method was used to obtain the annual oil production, annual water production, natural decline rate, and water-cut rise rate of the reservoir at different times under constant liquid conditions. The relationship between cumulative fluid volume and cumulative oil volume was deduced by using type A water drive curve, and various dynamic indexes of the reservoir under different fluid volumes were obtained, which can provide a scientific basis for the optimization of oilfield liquid volume. The method is simple to apply and has high prediction accuracy, which is of great significance to oilfield development.

Key words: type A water drive curve; Arps decline method; microelement method; variable liquid quantity

1 问题的提出和研究背景

动态法是油田进入开发后期后产量预测、上市储量评估以及中长期产量规划的重要方法。Arps于1945年提出产量递减理论,根据递减曲线的本质差别,将其划分为指数递减、双曲递减和调和递减,可以用来进行油气产量的动态预测和油气藏可采储量的计算^[1-3]。该方法虽然可以用来预测产量递减后不同开采年限的采出程度和递减率等指标,但在预测过程中缺少综合含水率这项重要指标^[4-5]。随着开发的进行,自然递减率也在不断变化,常用的指数递减法由于递减率为常数,预测的最终采收率往往比实际值偏低,而双曲递减的 n 值难以确

定^[6-7]。水驱特征曲线是目前矿场常用的一种经验统计方法^[8-12],对于进入中高含水期的油藏可以利用该方法预测有关开发指标,但在动态变化中缺少时间的概念^[13]。

目前国内有许多学者对水驱曲线法和Arps递减曲线法进行了研究,陈元千等^[14]讲述了模型与水驱曲线联解法,综合利用甲型和丙型水驱曲线法,

收稿日期:2021-07-09;改回日期:2021-09-27。

第一作者简介:李超(1983—),硕士,工程师,现主要从事油气田开发地质研究工作。E-mail:lichao2@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“渤海”“双高”油田挖潜关键技术研究(YXKY-2018-TJ-04)。

有效解决了油田开发评价问题;张金庆等^[15-16]论述了相渗曲线与水驱曲线的关系,他认为水驱曲线与产量递减曲线在本质上是统一的,均体现了注水开发的过程;石明杰等^[17]将水驱递减曲线和产量递减经验公式法结合起来预测油田的可采储量,可比较准确地计算出油藏的可采储量和剩余开采年限;姜瑞忠等^[18]将几种水驱曲线和 Arps 递减曲线结合起来,得到了不同时间油田综合含水率和累积产水量、不同含水率下的年产油量、不同年产油量下的累积产水量等动态关系。但是以上规律在其他油田的实际应用中都存在一定问题,并且应用过程比较复杂。本文通过对 Arps 递减方程、水驱特征曲线以及不同液量下累产油的研究,为开发后期的油田产量预测提供参考。

2 变液量产量预测方法和公式推导

渤海B油田构造为发育于黄河口凹陷中央构造脊上的一个复杂断块,地层原油黏度为 3.32 ~ 12.90 mPa·s,属于中轻质原油。油田投产历经产量上升阶段、产量稳产阶段以及递减阶段,综合含水率逐渐上升。目前油田综合含水率 70.4%,产量进入递减期,动用储量采出程度 21.4%。油田进入开发中后期后,自然递减率随着含水率的上升不断变化。本文通过水驱特征曲线推导出定液量条件下递减率与产液量和产油量的关系,根据渤海B油田的黏度特征,选取甲型水驱特征曲线进行预测。当油田综合含水上到一定阶段后,某一具体开发层系的累积产油量(N_p)和累积产水量(W_p)之间存在着下述统计关系:

$$\ln W_p = bN_p + a \quad (1)$$

式(1)对时间 t 求二阶导数,得

$$q_1 - q_0 = \frac{bq_0 d(q_1 - q_0)/dt - (q_1 - q_0)bdq_0/dt}{b^2q_0^2} \quad (2)$$

整理得

$$D = -\frac{dq_0}{q_0 dt} = \frac{b}{q_1} \left[\frac{1}{4} q_1^2 - \left(q_0 - \frac{1}{2} q_1 \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, a 、 b 为甲型水驱特征曲线选定历史数据拟合段的截距和斜率; q_1 为 t 时刻的产液量, $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; q_0 为 t 时刻的产油量, $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; D 为 t 时刻的瞬时递减率; t 为时间, a 。

本文使用微元法将预测过程分成 n 个递减段(见图1),每个递减段的递减率视为恒定,因此每个

递减段可视为指数递减,递减率与产油量存在以下关系:

$$q = q_0 e^{-Dt} \quad (4)$$

根据公式(4)推导出最终累产油与时间的关系式:

$$N_p = N_{pr} + \sum_{t_1}^{t_n} \frac{q_i}{D_i} [1 - e^{-D_i t_i}] \quad (5)$$

根据公式(1)推导出综合含水率关系式:

$$f_w = \frac{be^{bN_p + a}}{1 + be^{bN_p + a}} \quad (6)$$

将式(5)带入式(6),得到综合含水率(f_w)与时间关系式:

$$f_w = \frac{be^{bN_{pr} + b \sum_{t_1}^{t_n} \frac{q_i}{D_i} [1 - e^{-D_i t_i}] + a}}{1 + be^{bN_{pr} + b \sum_{t_1}^{t_n} \frac{q_i}{D_i} [1 - e^{-D_i t_i}] + a}} \quad (7)$$

式中, D_i 为 t_i 时刻的瞬时递减率; q_i 为 t_i 时刻的产油量, $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; t_i 、 t_0 、 t_n 分别为时间、递减初期的时间和含水率为 98% 时的时间; N_{pr} 为递减开始时的累积产油量, 10^4 m^3 。

根据以上公式具体计算方法如下:

(1)根据甲型水驱曲线选取拟合段,拟合水驱特征曲线的参数 a 、 b 。

(2)根据油藏开发动态给定初始递减时间的产液量 q_1 ,初始产油量 q_0 以及初始含水率 f_w ,根据公式

(3)计算 t_0 时刻的递减率 D_0 。

(3)确定时间步长 Δt ,通过公式(3)计算 t_1 时刻的递减率 D_1 ,通过公式(4)确定 t_1 时刻的产油量 q_1 ,以此类推分别计算 t_2, t_3, \dots, t_n 时刻的递减率以及产油量。

(4)拟合历史产油量和含水率,如果拟合情况不好,推算出一个递减指数 n ,把第(3)步中的指数递减公式改成双曲递减或调和递减公式。

(5)根据公式计算预测时间段历年年产油量、综合含水率以及最终采收率等参数。

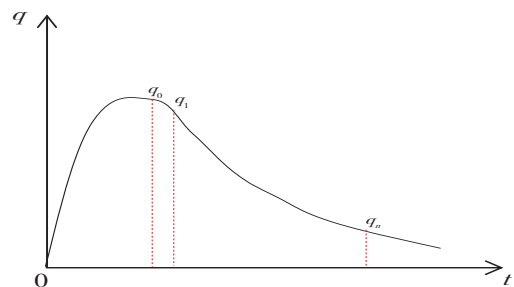


图1 产量预测示意

前文的预测方法只反映了定液量条件下油藏

的自然递减规律。进入开发后期后,为了提高油藏开发效果,提液生产必不可少,产油量会随着产液量的增加而增加,此时产油量的变化规律无法用原有的递减规律来预测。本文应用甲型水驱特征曲线推导出累产液与累产油的关系式^[19],以此求取不同液量下油藏的累产油以及含水率等参数。

甲型水驱曲线累产液量和累产油量的关系为:

$$\ln(L_p - N_p) = bN_p + a \quad (8)$$

泰勒展开后近似为:

$$a + bN_p = \ln L_p - \frac{N_p}{L_p} - \frac{76}{100} \left(\frac{N_p}{L_p} \right)^2 \quad (9)$$

变形后可得

$$N_p = \frac{25}{38} L_p \left[\sqrt{(1 + bL_p)^2 + \frac{76}{25} (\ln L_p - a) - 1 - bL_p} \right] \quad (10)$$

式中, L_p 为 t 时刻的累积产液量, 10^4 m^3 。

根据式(10)可计算提液后对应的产油量,将计算出的产油量 q_o 、产液量 q_l 带入式(3)即可求出提液后对应的瞬时递减率,重复上述计算步骤。

3 矿场应用

渤海B油田A砂体2008—2019年实际生产数据见表1。

表1 B油田A砂体历史数据

年份	年产油/ 10^4 m^3	年产水/ 10^4 m^3	累产油/ 10^4 m^3	累产水/ 10^4 m^3
2008	4.99	0.05	4.99	0.05
2009	7.81	0.34	12.80	0.39
2010	12.87	0.58	25.67	0.97
2011	9.09	4.23	34.76	5.20
2012	5.45	6.33	40.21	11.53
2013	4.05	7.08	44.26	18.61
2014	3.58	7.22	47.84	25.83
2015	4.08	11.81	51.92	37.64
2016	2.74	9.93	54.66	47.57
2017	2.04	8.59	56.70	56.16
2018	1.91	8.46	58.61	64.62
2019	2.43	12.35	61.04	76.97

按照公式(1)回归得到参数 a 、 b 分别为-0.42, 0.08。初始产油量和产液量参考2019年的历史数据,分别取 $2.43 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $14.78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 带入公式(3)后得初始递减率为0.035 5。依次类推,计算每个时间步长的递减率和产油量(时间步长取1 a)。拟合历史产油量和含水率,拟合情况见图2。通过计算,最终可采储量为 $103.20 \times 10^4 \text{ m}^3$, 历年预测产量见图3。

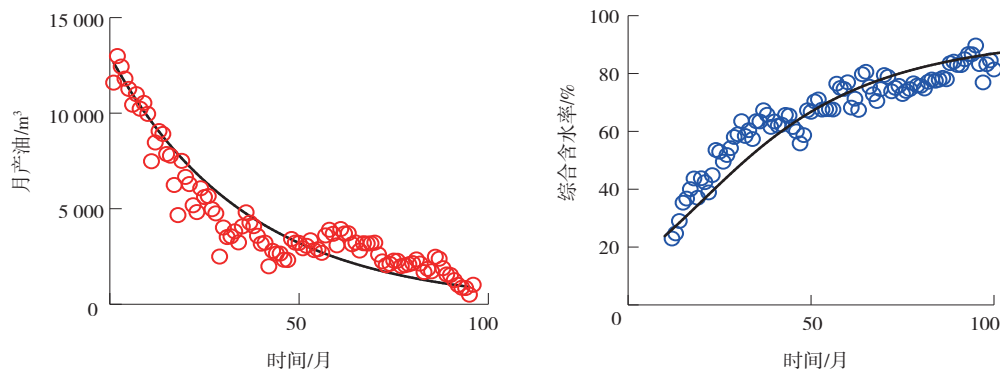


图2 产油量及含水率拟合曲线

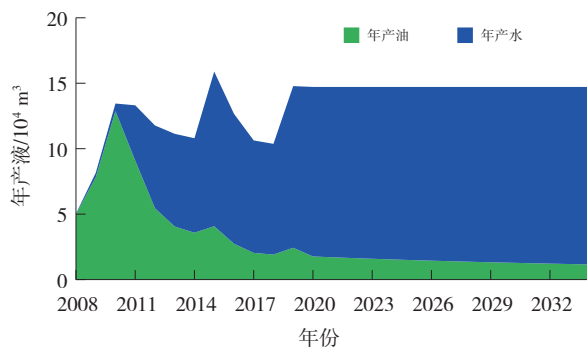


图3 A砂体产量预测曲线

A砂体自然递减率自2020年开始逐渐降低, 2022年含水上升率达到最大,以后逐年降低(见图4)。目前A砂体采出程度为28.5%,综合含水率83.5%,该阶段综合含水高,采油速度低,采出时间长,下步应及时采取措施进行调整。

根据公式(10)计算不同液量下历年产油量和含水率(见图5),随着液量升高,A砂体累产油先增大后减小,当液量为 $620 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,累产油最大(见表2),主要因为随着液量增加,采油速度提高,累产油

逐渐增加,当液量超过620 m³/d时,由于含水上升速度快,油井过早关井,累产油减少,建议下步将A砂体液量调整至620 m³/d。

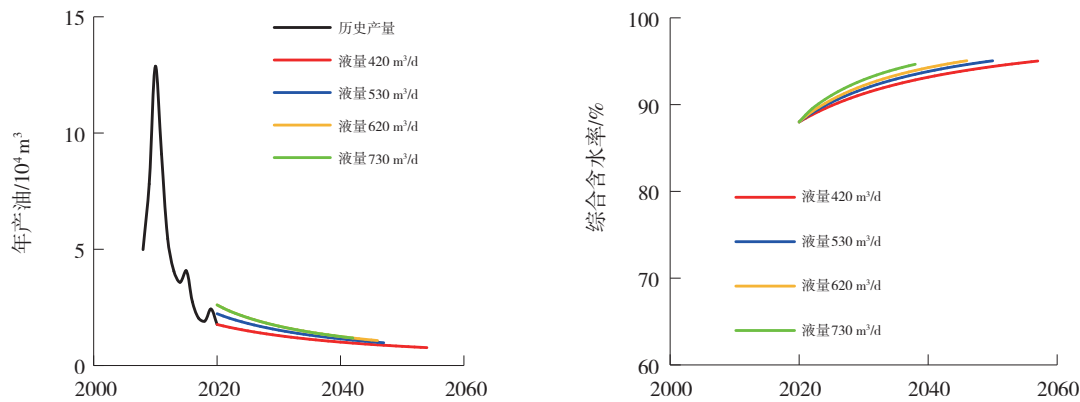


图5 不同液量预测曲线

4 结论

(1)综合应用甲型水驱曲线和 Arps 递减曲线,推导出不同时刻的产油量、含水率、累计产油量、累计产水量和可采储量采出程度等指标;应用微元法计算每个时间段的可采储量。该方法预测精度高,对油田开发具有重要意义。

(2)应用甲型水驱曲线推导出累计液量和累计油量的关系,可以得出不同液量下油藏的各项动态指标,为油田液量优化提供科学依据。

(3)该方法能够快速有效地预测目前井网条件下油田的经济可采储量及经济采收率,与数值模拟法相比,具有更加简便实用的优点。

参考文献:

[1] 周红.产量递减类型的综合判断法[J].新疆石油学院学报,2003,15(1):58-60.

[2] 陈新彬,常毓文,王燕灵,等.低渗透储层产量递减模型的渗流机理及应用[J].石油学报,2011,32(1):113-116.

[3] 俞启泰.水驱油田的驱替特征与递减特征[J].石油勘探与开发,1995,22(1):39-42.

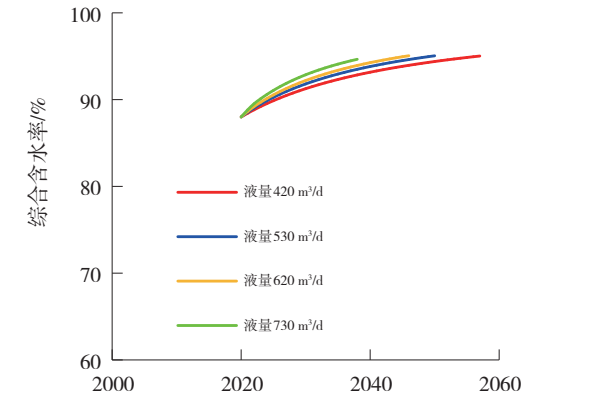
[4] 黄伏生,赵永胜.递减曲线研究应用中的一个问题[J].石油学报,1991,12(4):96-101.

[5] 刘英宪.水驱砂岩油藏理论递减规律计算新方法[J].中国海上油气,2016,28(3):97-100.

[6] 郭大浩,邓英尔,管英柱.单因变量的偏最小二乘法在双曲递减中的应用[J].桂林工学院学报,2004,24(1):107-110.

[7] 谢军,侯康柱,冯璟.用二元回归曲线拟合法和筛选法

表2 不同液量下累产油				
液量/(m ³ ·d ⁻¹)	420	530	620	730
累产油/10 ⁴ m ³	103.20	104.35	105.15	105.10



分析产能递减规律[J].吐哈油气,2005,10(4):342-346.

[8] 孙玉凯,高文君.常用油藏工程方法改进与应用[M].北京:石油工业出版社,2007.

[9] 陈元千,邹存友,张枫.水驱曲线法在油田开发评价中的应用[J].断块油气田,2011,18(6):769-771,779.

[10] 陈元千.水驱曲线关系式的推导[J].石油学报,1985,6(2):69-78.

[11] 张金庆,安桂荣,许家峰,等.广适水驱曲线适应性分析及推广应用[J].中国海上油气,2013,25(6):56-60.

[12] 张金庆.水驱油理论研究及油藏工程方法改进[M].北京:中国石化出版社,2019:39-41.

[13] 姚建.4种水驱特征曲线与 Arps 递减曲线的关系[J].新疆石油地质,2016,37(4):447-451.

[14] 陈元千,赵庆飞.Hubbert 模型与水驱曲线联解法[J].中国海上油气(地质),2001,15(3):194-199.

[15] 张金庆,孙福街.相渗曲线和水驱曲线与水驱储量的关系[J].新疆石油地质,2010,31(6):629-631.

[16] 张金庆,杨仁锋.理论水驱曲线的提出及其与产量递减曲线的关系探讨[J].中国海上油气,2018,30(4):86-92.

[17] 石明杰,仲继东,刘贺涛,等.水驱特征曲线与产量递减曲线在油田开发后期的综合应用[J].大庆石油地质与开发,2004,23(4):26-27.

[18] 姜瑞忠,汪洋,何伟,等.水驱特征曲线和产量递减规律在克拉玛依油田八区的应用[J].新疆石油地质,2014,35(3):337-340.

[19] 李传亮.油藏工程原理[M].北京:石油工业出版社,2011:294-300.

(编辑 谢葵)