

·专家论坛·

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

陈元千¹,周 翠¹,张霞林¹,黄祥光²

(1.中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2.中国石油辽河油田分公司 勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010)

摘要:蒸汽吞吐和蒸汽驱是重质油藏注蒸汽开采的2个重要阶段;经济可采储量和经济极限汽油比,是评价注蒸汽开采的2个重要指标。目前有关重质油藏注蒸汽开采技术可采储量的预测,主要是按照1996和2010年发布的2个国家行业标准提出的注采关系法。该方法是描述累积注汽量与累积产油量的半对数直线关系,其有效应用要依据国家行业标准规定的经济极限油汽比指标中蒸汽吞吐阶段为 0.25 t/m^3 和蒸汽驱阶段为 0.15 t/m^3 ;但国家行业标准规定的经济极限油汽比指标过高,致使预测的技术可采储量明显偏低。为此,提出了先利用产量递减法,比较准确地预测经济可采储量;再利用注采关系法,预测经济极限汽油比;研究并分析了国家行业标准的经济极限油汽比指标的不合理性、技术可采储量预测的不可靠性和总技术可采储量的不准确性。通过辽河油田齐40块蒸汽吞吐开采的实际应用表明,新方法预测的经济可采储量为 $1.573 \times 10^4 \text{ t}$,经济极限汽油比为 $20 \text{ m}^3/\text{t}$,相应的经济极限油汽比为 0.05 t/m^3 ;而由国家行业标准规定的经济极限油汽比预测的蒸汽吞吐技术可采储量为 $1.110 \times 10^4 \text{ t}$,仅相当于到2005年的实际累积产油量为 $1.144 \times 10^4 \text{ t}$ 。

关键词:注蒸汽开采 重质油藏 经济可采储量 经济极限汽油比 预测方法

中图分类号:TE313.8

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)05-0001-06

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

Chen Yuanqian¹, Zhou Cui¹, Zhang Xialin¹, Huang Xiangguang²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin City, Liaoning Province, 124010, China)

Abstract: For heavy oil reservoir, steam huff and puff and steam drive are two important stages of steam flooding recovery. The economically recoverable reserves and economic limit of steam-oil ratio are two important indexes to evaluate steam flooding recovery. Up till now, the injection-production relationship method of the national industry standard published in 1996 and 2010 are the main methods to evaluate recoverable reserves of heavy oil reservoir by steam flooding recovery. This method describes the semi-log linear relationship between the cumulative gas injection rate and the cumulative oil production rate and its effective application largely depends on the economic limit of oil-steam ratio (0.25 t/m^3 for the steam huff and puff, and 0.15 t/m^3 for the steam flooding recovery). However, the economic limit of oil-steam ratio in the national industry standard is rather higher which leads to smaller technically recoverable reserves. The production decline method was firstly used to predict economically recoverable reserves accurately, and then the injection-production relationship method was applied to predict economic limit of steam-oil ratio. At the same time, the irrationality

收稿日期:2015-07-21。

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、教学与评估工作。联系电话:(010)62398212, E-mail:1099690612@qq.com。

of the economic limit of oil-steam ratio, the unreliability of the technical recoverable reserves and the incorrectness of the total technically recoverable reserves of the national industry standard were researched and analyzed. The actual application of Block Qi40 in Liaohe oilfield indicates that the economically recoverable reserves predicted by the method in this paper are $1\ 573 \times 10^4$ t, and the economic limit of steam-oil ratio is $20\ \text{m}^3/\text{t}$ and its corresponding economic limit of oil-steam ratio is $0.05\ \text{t}/\text{m}^3$. However, the technically recoverable reserves predicted by the economic limit of oil-steam ratio according to the national industry standard is $1\ 110 \times 10^4$ t, which equals to the cumulative oil production rate of $1\ 144 \times 10^4$ t in 2005.

Key words: steam flooding recovery; heavy oil reservoir; economically recoverable reserves; economic limit of steam-oil ratio; prediction method

在中国辽河、胜利和新疆等油区利用注蒸汽开采重质油藏已经历了 30 a, 取得了较大成效, 拥有了大量的生产动态数据, 为可采储量的预测提供了良好基础。迄今为止, 中国有关注蒸汽开采重质油藏预测可采储量的方法, 均采用 2 个国家行业标准^[1-2]规定的注采关系法(简称国行标法)。该方法的有效应用, 须先从国行标法中选用统一规定的经济极限油汽比指标: 蒸汽吞吐阶段为 $0.25\ \text{t}/\text{m}^3$, 蒸汽驱阶段为 $0.15\ \text{t}/\text{m}^3$, 再利用注采关系法预测油藏的技术可采储量。国行标法统一规定的经济极限油汽比指标缺少依据, 具有不合理性。利用该经济极限油汽比指标预测的技术可采储量明显偏低。为此, 笔者提出了先利用产量递减法, 比较准确地预测经济可采储量; 再利用注采关系法, 预测经济极限油汽比。国行标法将注蒸汽开采重质油藏预测技术可采储量的方法定名为注采关系法, 笔者认为并不合适, 应将其改名为注蒸汽特征曲线法, 更切合实际。

1 经济可采储量和经济极限油汽比预测方法的引导

1.1 经济可采储量

2005 年提出预测经济可采储量的快速方法^[3], 已经有效地应用于钻加密井^[4]和注聚合物^[5]增加可采储量的预测, 以及页岩气藏井控制可采储量的评价^[6], 并于 2010 年被国家行业标准^[2]列为计算石油可采储量的重要方法。

大量实际资料的应用表明, Arps 指数递减是最为广泛适用的递减类型。对于实施注蒸汽开采的重质油藏, 当油藏产油量的递减符合指数递减(n 为 0)时, 产量递减阶段的产油量与从投产计入的总累积产油量可由如下的直线关系^[3,7-8]表示

$$Q_o = a_c - b_c N_{pt} \quad (1)$$

其中

$$a_c = Q_i + DN_{po} \quad (2)$$

$$b_c = D \quad (3)$$

当 $Q_o = Q_{EL}$ 时, 由式(1)预测经济可采储量的表达式为

$$N_{RE} = \frac{a_c - Q_{EL}}{b_c} \quad (4)$$

当产油量的递减符合陈氏递减(n 为 0.5)时, Q_o 与 N_{pt} 的关系式^[8-9]为

$$Q_o^{0.5} = a_c - b_c N_{pt} \quad (5)$$

其中

$$a_c = Q_i^{0.5} + \frac{0.5D_i N_{po}}{Q_i^{0.5}} \quad (6)$$

$$b_c = \frac{0.5D_i}{Q_i^{0.5}} \quad (7)$$

当 $Q_o = Q_{EL}$ 时, 由式(5)预测经济可采储量的表达式为

$$N_{RE} = \frac{a_c - Q_{EL}^{0.5}}{b_c} \quad (8)$$

当实际生产数据既不符合式(1)的 Arps 指数递减, 又不符合式(5)的陈氏递减时, 则应符合 Arps 双曲线递减。 Q_o 与 N_{pt} 的关系式^[3,7]为

$$Q_o^{1-n} = a_h - b_h N_{pt} \quad (9)$$

其中

$$a_h = Q_i^{1-n} + \frac{D_i(1-n)N_{po}}{Q_i^n} \quad (10)$$

$$b_h = \frac{D_i(1-n)}{Q_i^n} \quad (11)$$

当 $Q_o = Q_{EL}$ 时, 由式(9)预测经济可采储量的表达式为

$$N_{RE} = \frac{a_h - Q_{EL}^{1-n}}{b_h} \quad (12)$$

将经济可采储量除以地质储量得到的经济采收率表达式为

$$E_{RE} = \frac{N_{RE}}{N} \quad (13)$$

预测 3 种递减类型的经济可采储量都涉及到注蒸汽开采的经济极限产油量。据注蒸汽开采的评

价年度投入的总成本与产出的净收入相平衡的基本原理,可得到预测经济极限年产油量的表达式^[10-13]为

$$Q_{EL} = \frac{C_i}{\eta P_o (1 - T_s)} \quad (14)$$

1.2 经济极限汽油比

国行标法^[1,14]规定,人工注水开发的油田可以应用甲、乙、丙和丁型水驱曲线法来预测油田的技术可采储量;而国行标法^[1-2]将甲型水驱曲线法^[15]转用于注蒸汽开采重质油藏技术可采储量的预测,并定名为注采关系法。刘斌^[16-17]又将乙型^[18]和丙型^[19]水驱曲线法转用于注蒸汽开采重质油藏可采储量的预测。为便于方法的对比与应用,将注采关系法的累积注汽量与累积产油量的半对数直线关系称为注蒸汽的 I 型特征曲线,其表达式^[1-2]为

$$\log S_i = A_1 + B_1 N_{pt} \quad (15)$$

由式(15)对时间求导来预测经济极限汽油比,其表达式为

$$\frac{1}{2.303 S_i} \times \frac{dS_i}{dt} = B_1 \frac{dN_{pt}}{dt} \quad (16)$$

其中

$$\frac{dS_i}{dt} = Q_s \quad (17)$$

$$\frac{dN_{pt}}{dt} = Q_o \quad (18)$$

设 $\frac{Q_s}{Q_o} = R_{so}$, 将式(16)整理后得

$$S_i = \frac{R_{so}}{2.303 B_1} \quad (19)$$

将式(19)代入式(15)得到注蒸汽的 II 型特征曲线的表达式为

$$\log R_{so} = A_2 + B_2 N_{pt} \quad (20)$$

其中

$$A_2 = A_1 + \log 2.303 B_1 \quad (21)$$

$$B_2 = B_1 \quad (22)$$

将式(20)整理后得

$$R_{so} = 10^{A_2 + B_2 N_{pt}} \quad (23)$$

当 N_{pt} 为经济可采储量 N_{RE} 时,由式(23)预测的经济极限汽油比的表达式为

$$R_{so}^{EL} = 10^{A_2 + B_2 N_{RE}} \quad (24)$$

由式(4)、式(8)或式(12)预测不同递减类型的经济可采储量后,将其代入式(24),即可得到与其相应的经济极限汽油比。

由于油汽比与汽油比互成倒数关系,故由式(24)可得经济极限油汽比为

$$R_{os}^{EL} = 10^{-(A_2 + B_2 N_{RE})} \quad (25)$$

2 预测可采储量的国行标法

注蒸汽开采重质油藏预测技术可采储量的国行标法^[1-2]是先从国行标中选用统一规定的经济极限油汽比指标,再利用国行标的注采关系法,预测油藏技术可采储量。现对国行标法予以简要的引导。

根据 R_{os} 与 R_{so} 互成倒数的关系,将式(19)整理后得

$$S_i = \frac{1}{2.303 B_1 R_{os}} \quad (26)$$

将式(26)代入式(15)得到总累积产油量与年度油汽比的关系式为

$$N_{pt} = \frac{\log \frac{1}{2.303 B_1 R_{os}} - A_1}{B_1} \quad (27)$$

当 R_{os} 为国行标法中规定的经济极限油汽比 0.25 t/m³ 时,由式(27)可得国行标法预测蒸汽吞吐技术可采储量的关系式为

$$N_{RT}^{hp} = \frac{0.2398 - (A_1 + \log B_1)}{B_1} \quad (28)$$

当 R_{os} 为 0.15 t/m³ 时,由式(27)可得国行标法预测蒸汽驱技术可采储量的关系式为

$$N_{RT}^{sd} = \frac{0.4616 - (A_1 + \log B_1)}{B_1} \quad (29)$$

按国行标法的规定,将式(28)和式(29)预测的结果相加,可以得到所谓的重质油藏的总技术可采储量为

$$N_{RT}^t = N_{RT}^{hp} + N_{RT}^{sd} \quad (30)$$

应当强调指出,应用国行标法预测得到的式(30)的关系式是不正确的,也是不成立的。由式(28)和式(29)预测的经济可采储量,只是在2个不同经济极限油汽比条件下的预测结果,既不能分别规定为蒸汽吞吐开采和蒸汽驱开采的技术可采储量,更不能将其相加得到所谓的总经济可采储量。为了进行经济极限油汽比与经济可采储量的相关分析,将式(27)整理后得

$$R_{os} = 10^{-(A_1 + \log 2.303 B_1 + B_1 N_{pt})} \quad (31)$$

目前尚不清楚国行标法是依据什么标准将 0.25 和 0.15 t/m³ 分别规定为预测蒸汽吞吐和蒸汽驱开采技术可采储量的经济极限油汽比指标;将式(28)和式(29)预测结果相加即为总技术可采储量。总之,国行标法的正确性、可靠性和可利用性令人质疑。

3 应用实例

辽河油田齐40块于1987年6月投入注蒸汽开采试验,含油面积为7.9 km²,地质储量为3 774×10⁴ t,埋深为800 m,有效厚度为30 m,有效孔隙度为26.8%,空气渗透率为256×10⁻³ μm²,地面原油密度为0.968 6 g/cm³,地层原油粘度为2 658 mPa·s,原始地层压力为8.5 MPa,饱和压力为7.2 MPa。由年产油量与生产时间的关系(图1)可以看出,齐40块注蒸汽开采可以划分为3个阶段;即蒸汽吞吐试采阶段(1987—1994年),生产井距由200 m加密到141 m;蒸汽吞吐综合调整阶段(1995—2006年),生产井距加密到100 m;蒸汽驱阶段(2007年—至今),生产井距加密到70 m。由年产油量与总累积产油量的关系(图2)可以看出,在蒸汽吞吐试采和综合调整2个阶段的产量递减期,年产油量与总累积产油量呈较明显的直线下降关系,因此,均符合Arps指数递减类型。根据文献[3-9]提出的预测技术可采储量的方法,预测3个阶段的技术可采储量分别为572×10⁴,1 760×10⁴和3 264×10⁴ t。其中,对蒸汽吞吐综合调整阶段的经济可采储量和经济极限汽油比进

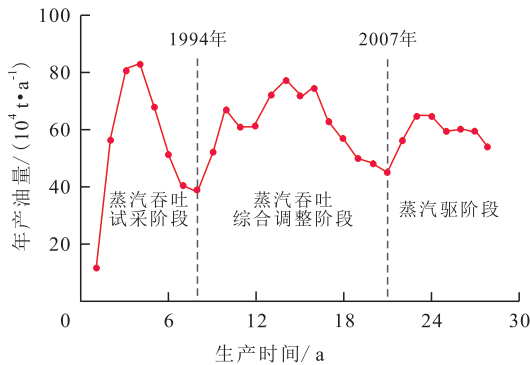


图1 齐40块年产油量与生产时间的关系

Fig.1 Variation of annual oil production with production time in Block Qi40

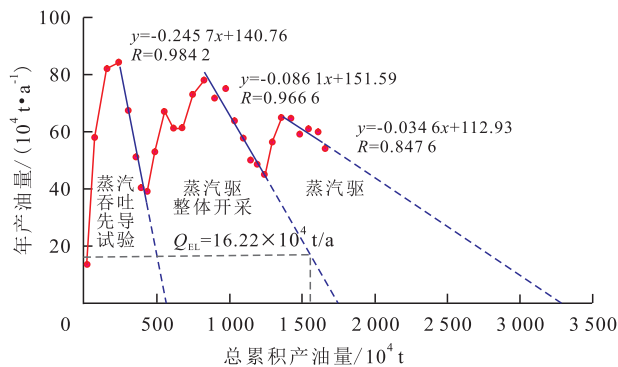


图2 齐40块年产油量与总累积产油量的关系

Fig.2 Relationship between annual oil production and cumulative oil production in Block Qi40

行预测和线性回归,求得该阶段递减直线的截距为151.59,斜率为0.086 1,相关系数为0.966 6。

绘制齐40块I型和II型特征曲线(图3),并对两者的直线进行线性回归,分别求得I型特征曲线直线的截距为2.286 6,斜率为0.000 9,相关系数为0.999 3;II型特征曲线直线的截距为-0.428 1,斜率为0.001 1,相关系数为0.994 2。

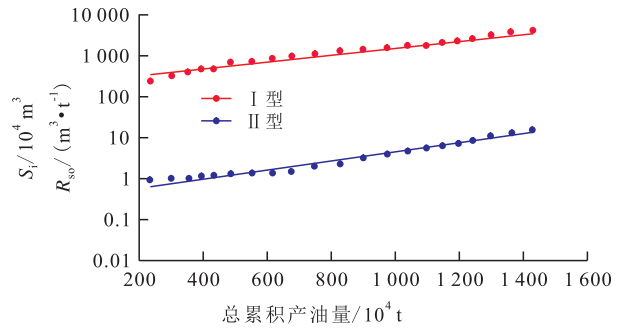


图3 齐40块I型和II型特征曲线

Fig.3 Typical curves I and II of Block Qi40

已知齐40块2006年的生产总成本为32 300×10⁴元;取油价为2 950元/t,原油商品率为0.90,综合税率为0.25。将这些参数代入式(14)得到2006年评价日期评估的经济极限年产油量为16.22×10⁴ t/a。将图2中蒸汽吞吐试采阶段拟合得到的直线截距、斜率和式(14)计算得到的经济极限年产油量代入式(4),得到蒸汽吞吐综合调整阶段预测的经济可采储量为1 573×10⁴ t。将式(4)预测的蒸汽吞吐综合调整阶段经济可采储量和地质储量代入式(13),得到蒸汽吞吐阶段的经济采收率为41.6%;再将图3中年汽油比与总累积产油量半对数直线的截距、斜率和式(4)预测的蒸汽吞吐综合调整阶段经济可采储量代入式(24),得到新方法预测蒸汽吞吐综合调整阶段的经济极限汽油比为20 m³/t,相应的经济极限油汽比为0.05 t/m³;将图3中累积注汽量与总累积产油量半对数直线的截距、斜率代入式(28),得到国行标法的蒸汽吞吐技术可采储量为1 110×10⁴ t,仅相当于到2005年的实际累积产油量1 144×10⁴ t;再将图3中累积注汽量与总累积产油量半对数直线的截距、斜率代入式(29),得到国行标法的蒸汽驱技术可采储量为1 356×10⁴ t。若将图3中累积注汽量与总累积产油量半对数直线的截距和斜率再代入式(31),则得到国行标法预测的油汽比与总累积产油量的关系式为

$$R_{os} = 10^{0.3969 - 0.0009N_{ps}} \quad (32)$$

设定不同的累积产油量,由式(32)计算油汽比进而分析年油汽比与总累积产油量的半对数关系

(图4)。由图4可以看出,随总累积产油量的增加年油气比呈直线下降。也就是说随着经济极限油气比的降低,国行标法预测的技术可采储量增加。由经济极限油气比为0.25和0.15 t/m³预测的技术可采储量分别为1 110×10⁴和1 356×10⁴ t。这只是2个不同经济极限油气比计算的结果,而且后者包括前者。因此,两者既不能说是蒸汽吞吐和蒸汽驱开采阶段的技术可采储量,更不能将其相加得到所谓的总技术可采储量。

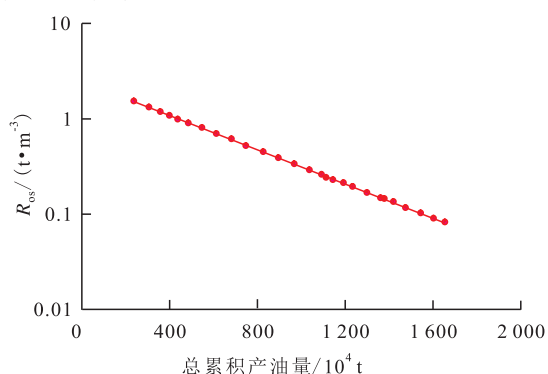


图4 齐40块年油气比与总累积产油量的半对数关系

Fig.4 Semi-log graph of annual oil-steam ratio vs. cumulative oil production

4 结束语

辽河油田齐40块实例应用表明,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新预测方法是正确有效的。利用该方法评价研究区2006年的生产总成本,以及采用其油价、综合税率和原油商品率预测的经济极限年产油量为16.22×10⁴ t/a;根据蒸汽吞吐综合调整阶段的产量递减资料,采用新方法预测的经济可采储量为1 573×10⁴ t,经济极限汽油比为20 m³/t,相应的经济极限油气比为0.05 t/m³。根据国行标法,当经济极限油气比为0.25 t/m³时,预测的技术可采储量为1 110×10⁴ t,比新方法预测的经济可采储量少463×10⁴ t,这显然是不正确的。国行标法规定的经济极限油气比为0.25 t/m³,是新方法预测的经济极限油气比的5倍,预测的技术可采储量明显偏低。根据国行标法规定的经济极限油气比为0.25和0.15 t/m³时,预测的总累积产油量不能分别定义为蒸汽吞吐和蒸汽驱开采阶段的技术可采储量,更不能将其相加得到所谓的总技术可采储量。总之,国行标法规定的经济极限油气比指标,是缺少依据且不合理的,由此预测的结果也是不可靠的。在国行标法中,将S_i定义为累积注汽量的专业术语是不恰当的。如果定名

为形成蒸汽的累积注水量,则更切合实际,相应的汽油比和油气比,可称为拟汽油比和拟油气比。

符号解释:

n ——递减指数; Q_a ——不同生产时间的年产油量,10⁴ t/a; a_c, b_c ——符合Arps指数递减式(1)的直线截距和斜率; N_{pi} ——从投产计入的总累积产油量,10⁴ t; Q_i ——不同产量递减阶段初始的年产油量,10⁴ t/a; D ——年递减率, a⁻¹; N_{pi} ——不同产量递减阶段初始时间的总累积产油量,10⁴ t; Q_{EL} ——新预测方法的经济极限年产油量,10⁴ t/a; N_{RE} ——经济可采储量,10⁴ t; a_c, b_c ——符合陈氏递减式(5)的直线截距和斜率; D_i ——初始递减率; a_h, b_h ——符合Arps双曲线递减式(9)的直线截距和斜率; E_{RE} ——经济采收率,%; N ——地质储量,10⁴ t; C_i ——注蒸汽开采的评价年度投入的年产总成本,10⁴元/a; η ——原油商品率; P_e ——评价年度原油的价格,元/t; T_x ——综合税率; S_i ——累积注汽量,10⁴ m³; A_1, B_1 ——I型特征曲线的直线截距和斜率; t ——注蒸汽开采的生产时间,a; Q_s ——不同生产时间的年注汽量,10⁴ m³/a; R_{wo} ——汽油比,m³/t; A_2, B_2 ——II型特征曲线的直线截距和斜率; R_{os}^{EL} ——经济极限汽油比,m³/t; R_{os}^{EL} ——经济极限油气比,t/m³; R_{os} ——油气比,t/m³; N_{RR}^{hp} ——国行标法预测蒸汽吞吐技术可采储量,10⁴ t; N_{RR}^{sd} ——国行标法预测蒸汽驱技术可采储量,10⁴ t; N_{RR}^t ——国行标法的总技术可采储量,10⁴ t。

参考文献:

- [1] 李平科,岳青山,张侠.SY/T 6193—1996稠油注蒸汽开发可采储量标定方法[S].北京:石油工业出版社,1996.
Li Pingke, Yue Qingshan, Zhang Xia.SY/T 6193-1996 Method for determining the recoverable reserves in heavy crude reservoirs developed by steam injection [S].Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [2] 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.
- [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(为庆祝克拉玛依油田勘探开发50周年而作)[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.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. 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, 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, 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.
- [9] 陈元千. 双曲线递减的简化及确定可采储量的截距法[J]. *天然气工业*, 1994, 14(4): 32-37.
- Chen Yuanqian. Simplification of hyperbolic decline and the intercept method of determining recoverable reserves [J]. *Natural Gas Industry*, 1994, 14(4): 32-37.
- [10] 赵庆飞, 陈元千. 确定油气田经济可采储量的方法[J]. *油气采收率技术*, 2000, 7(4): 39-41.
- Zhao Qingfei, Chen Yuanqian. Method on determining economic recoverable reserves of oil and gas field [J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2000, 7(4): 39-41.
- [11] 陈元千. 油气藏工程实用方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 187-197.
- Chen Yuanqian. Practical method of petroleum reservoir engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 187-197.
- [12] 邴绍献. 油田单井可采储量定量预测模型[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(1): 85-88.
- Bing Shaoxian. Quantitative forecasting model for recoverable reserves of single well [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(1): 85-88.
- [13] 王滨, 赵伟, 计小宇, 等. 基于传递函数模型的油田产油量预测方法[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 77-80.
- Wang Bin, Zhao Wei, Ji Xiaoyu, et al. Oilfield output prediction method based on transfer function model [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 77-80.
- [14] 俞启泰, 谢绪权, 李炎波. SY/T 5367—1998 石油可采储量计算方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- Yu Qitai, Xie Xuquan, Li Yanbo. SY/T 5367—1998 Methods for calculating oil recoverable reserves [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [15] 陈元千. 水驱曲线关系式的推导[J]. *石油学报*, 1985, 6(2): 69-78.
- Chen Yuanqian. Derivation of relationships of water drive curves [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1985, 6(2): 69-78.
- [16] 刘斌. 辽河油田稠油采收率确定方法研究[J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(1): 53-58.
- Liu Bin. Methods for determining heavy oil recovery factors of Liaohe oil field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(1): 53-58.
- [17] 刘斌. 齐40断块蒸汽驱试验效果评价方法研究[J]. *特种油气藏*, 2005, 12(1): 33-35.
- Liu Bin. Assessment methods for steam drive test in Qi40 fault block [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2005, 12(1): 33-35.
- [18] 陈元千. 一个新型水驱曲线关系式的推导及应用[J]. *石油学报*, 1993, 14(2): 65-73.
- Chen Yuanqian. Derivation of a new type of water displacement curve and its application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1993, 14(2): 65-73.
- [19] 陈元千. 对纳扎洛夫确定可采储量经验公式的理论推导及应用[J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(3): 63-68.
- Chen Yuanqian. Application and derivation of Nazalov's empirical formulas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(3): 63-68.

编辑 王星