

海上油田滚动开发生态储量评价新方法与实践

陈晓明

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:泄油指数法作为矿场动态储量评估的经验方法具有一定的实践优势,但目前缺乏有关该方法的系统性研究。首先从概念上区分了泄油指数与采油指数的差异,其次从解析解入手,基于量纲分析推导得到无量纲泄油指数的表达式。公式表明:无量纲泄油指数倒数与自然递减率倒数为线性关系,其中角系数可直接反映动态储量的规模,当储层导压系数确定时,角系数越小,动态储量越大。依据线性关系可绘制理论评估图版,根据实际点在图版上的投影趋势判断储量动用情况及变化趋势,图版法的评估结果得到了数值模拟的验证。矿场实例分析表明,该方法能够充分考虑油井各阶段生产特征,有效减少由于拟稳态数据段选取不准确带来的评估误差,其结果更加可靠,具有进步意义。

关键词:滚动开发;动态储量;泄油指数;量纲分析法;评估图版

中图分类号:TE331 文献标志码:A

New methods and practices for dynamic reserve evaluation in rolling development of offshore oilfields

CHEN Xiaoming

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The oil drainage index method has certain practical advantages as an empirical method for dynamic reserve assessment at mine sites, but there is a lack of systematic studies on this method. Firstly, the difference between the oil drainage index and the oil recovery index is distinguished conceptually. Then, the expression of the dimensionless oil drainage index is derived from the analytical solution based on the dimensional analysis. The equation shows that the inverse of the dimensionless oil drainage index is linearly related to the inverse of the natural decreasing rate, where the angular coefficient can directly reflect the scale of dynamic reserves, and when the reservoir pressure conductivity is determined, the smaller the angular coefficient, the larger the dynamic reserves. Based on the linear relationship, the theoretical evaluation plate can be drawn, and the reserve utilization and change trend can be judged according to the projection trend of the actual points on the plate, and the evaluation results of the plate method are verified by numerical simulation. Field application shows that the method can fully consider the production characteristics of each stage of the well, and effectively reduce the evaluation errors caused by the inaccurate selection of the pseudo-steady-state data, and its results are more reliable and have progressive significance.

Key words: rolling development; dynamic reserves; drainage index; dimension analysis; analytical plate

油气田动态储量评估是海上油田滚动开发的一个重要环节,目标区域的动态储量规模直接影响着油田开发策略的制定^[1-2]。国内外学者对动态储量的计算方法进行了广泛深入的研究,具体方法涉及物质平衡^[3]、压降反演^[4]和递减分析^[5-9]等,应用范围涵盖常规油气田^[10-13]、非常规油气田^[14-20]、陆地油田和海上油田^[21-23]。蔡振华等^[24]针对致密砂岩气井缺乏合适的产能评价指标问题提出了IC指数,并定性分析了影响IC指数曲线形态的主要因素,但其在IC指数定义过程中直接采用井底流压,

并没有进行拟压力转换,这会导致拟稳定阶段的IC指数仍存在一定的波动;雷源等^[25]从矿场角度提出了表征海上油田储层泄油能力的物理量 D_r 指数,并

收稿日期:2021-10-13;改回日期:2021-12-10。

作者简介:陈晓明(1990—),硕士,工程师,主要从事油藏工程方面的研究工作。E-mail: chenxm33@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058);中海石油(中国)有限公司重大科研项目“渤海‘双高’油田挖潜技术研究”(编号:YXKY-2018-TJ-04)部分研究成果。

详细阐述了借助 D_r 指数反求动态储量的过程, 但该方法求解精度受限于拟稳态数据的选取, 在矿场应用过程中存在一定困扰。针对以上问题, 本文将修正的 IC 指数和 D_r 指数统一定义为泄油指数, 并对基于泄油指数评估油气藏生产能力的方法进行系统研究。

1 泄油指数

1.1 泄油指数定义

基于参考文献[24]、[25]研究成果, 定义油气藏泄油指数为: 油(气)井一定生产时间内的累积产油(气)量与井底流压(拟压力)下降量的比值。采油指数反映的是油气井的瞬时产油或产气能力, 是一种瞬时指标, 与采油指数不同, 泄油指数是一种累积指标, 反映的是单位能量波动下的储层泄油水平。为统一表达方式, 泄油指数的符号表示仍沿用 D_r , 那么油藏泄油指数可表示为:

$$D_r = \frac{N_{po, t_{i+n}} - N_{po, t_i}}{P_{wf, t_i} - P_{wf, t_{i+n}}} \quad (1)$$

$$D_r = \frac{\int_{t_1}^{t_2} q(t) dt}{\frac{1.842\mu B}{Kh} \left\{ \frac{0.173\pi K}{A\phi\mu C_1} \int_{t_1}^{t_2} q(t) dt + \frac{1}{2} [q(t_2) - q(t_1)] \ln \frac{4A}{\gamma C_A R_w^2 e^{-2S}} \right\}} \quad (3)$$

式中, K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为储层厚度, m ; t 为油井生产时间, d ; $q(t)$ 为 t 时刻油井的日产量, m^3 ; μ 为原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; B 为原油体积系数, 无量纲; ϕ 为孔隙度, 无量纲; C_1 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; C_A 为形状因子, 无量纲; A 为泄油面积, m^2 ; R_w 为井筒半径, m ; S 为井筒表皮, 无量纲; γ 为欧拉常数, $\gamma=1.781$ 。

在不同时期开发技术政策的影响下, 海上油田的采油速度常常会有所调整, 自然递减率也会随之改变。参考文献[23]忽略了这种自然递减率随开发时间的变化, 导致了不同生产阶段的动态储量评估结果存在差异。为保证泄油指数法求解动态储量结果的一致性, 本文提出分阶段分析的思路, 即假设某一特定生产时间段内递减率是恒定不变的, 探索不同生产阶段递减率之间是否满足某种特定的内在联系, 以此评判各阶段基于泄油指数评估得到的动态储量的可靠性。

为探索自然递减率的变化规律, 对式(3)中的产量表达式进行变换, 根据 Arps^[5] 的统计结果, 假

式中, N_{po, t_i} 、 $N_{po, t_{i+n}}$ 分别为 t_i 和 t_{i+n} 时刻的累积产油量, m^3 ; P_{wf, t_i} 、 $P_{wf, t_{i+n}}$ 分别为 t_i 和 t_{i+n} 时刻的井底流压, MPa ; t 为时间, d 。

为保证气藏 IC 指数的稳定性, 对 IC 指数的定义稍作修正, 用拟压力代替井底流压, 因此气藏泄油指数可表示为:

$$D_r = \frac{N_{pg, t_{i+n}} - N_{pg, t_i}}{m_{wf, t_i} - m_{wf, t_{i+n}}} \quad (2)$$

式中, N_{pg, t_i} 、 $N_{pg, t_{i+n}}$ 分别为 t_i 和 t_{i+n} 时刻的累积产气量, m^3 ; m_{wf, t_i} 、 $m_{wf, t_{i+n}}$ 分别为 t_i 和 t_{i+n} 时刻的井底拟压力, $\text{MPa}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; t 为时间, d 。

1.2 无量纲泄油指数

文献[25]以单井数值模拟为研究基础, 得出了影响泄油指数的关键因素为: 储层产状、油井产量和数据噪音, 并推导了任意形状封闭边界、任意产量递减形式拟稳态条件下的泄油指数解析式, 将累积产油量换为积分形式, 泄油指数表达式可简化如下:

定进入拟稳态后油井产量满足指数递减形式, 表达式为:

$$q(t) = q_0 e^{-D_1 t} \quad (4)$$

式中, q_0 为油井初始产量, m^3/d ; D_1 为自然递减率, $1/\text{d}$ 。

联立式(3)、(4), 并简化得

$$D_r = \frac{1}{\frac{1.842\mu B}{Kh} \left[\frac{0.173\pi K}{A\phi\mu C_1} - \frac{D_1}{2} \ln \frac{4A}{\gamma C_A R_w^2 e^{-2S}} \right]} \quad (5)$$

对上式右侧进行量纲分析, 可对量纲泄油指数进行无量纲化:

$$DD_r = \frac{1.842\mu B D_1}{Kh} D_r \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 无量纲泄油指数表达式为:

$$DD_r = \frac{1}{\frac{0.173\pi\eta}{D_1 A} - \frac{1}{2} \ln \frac{4A}{1.781 C_A R_w^2 e^{-2S}}} \quad (7)$$

式中, η 为地层导压系数, 表达式为 $\eta = \frac{K}{\phi\mu C_i}$ 。

紧接着对式(7)取倒数变换, 可得

$$\frac{1}{DD_r} = a \frac{1}{D_i} + b \quad (8)$$

式中, $a = \frac{0.173\pi\eta}{A}$, $b = -\frac{1}{2} \ln \frac{4A}{1.781C_A R_w^2 e^{-2S}}$ 。

从式(8)可以看出, $1/DD_r$ 与 $1/D_i$ 呈现线性相关关系, 其中角系数 a 与泄油面积(动态储量)成反比, 截距 b 与泄油面积(动态储量)成反相关, 因此截距 b 与角系数 a 成正相关。将不同储层条件下的 $1/DD_r$ 随 $1/D_i$ 的变化关系绘制到坐标系中, 会呈现互不相交的直线簇图版, 图版中的每根直线都映射着相应大小的动态储量。

2 动态储量评估

2.1 理论图版法

根据式(6)可绘制不同储层条件下的无量纲泄油指数 DD_r 随自然递减率 D_i 的理论变化图版, 在此假设井筒半径 $R_w=0.1$ m, 表皮系数 $S=5$, 选取导压系数 η 分别为 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 m^2/s , 选取泄油半径 R_e 分别为 250, 350, 450, 550, 750 m, 绘制理论图版如图1和图2。当地层导压系数和泄油半径(动态储量)同时确定时, 理论曲线为一条与横轴相交的直线; 当地层导压系数确定时, 随着泄油半径(动态储量)的增加, 理论曲线呈现顺时针偏转的趋势(如图1); 当泄油半径(动态储量)确定时, 随着地层导压系数的增加, 理论曲线呈现逆时针偏转的趋势(如图2)。

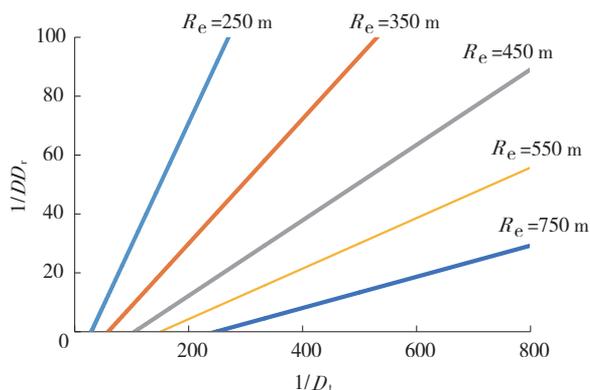


图1 不同泄油半径条件下的 DD_r 理论图版 ($\eta=0.15 \text{ m}^2/\text{s}$)

借助上述分析, 可将油气井不同生产阶段的泄油指数和递减率投影至理论图版, 根据投影点的趋势评估动态储量大小: 油井投产初期, 储层供给半径逐渐扩大, 井底流压下降较快, 这个阶段计算得

到的泄油指数与理论值会存在较大差异, 加上储层非均质的影响, 油井产量递减情况也不能反映出整体地层导压能力, 该阶段数据会处于离散状态; 油井生产稳定后, 压力波已到达泄油边界, 储层压力变化进入拟稳定状态, 油井响应能够反映储层整体情况, 该阶段泄油指数与自然递减率会逐渐呈现理论图版中的线性关系, 根据该线性关系即可确定动态储量值。

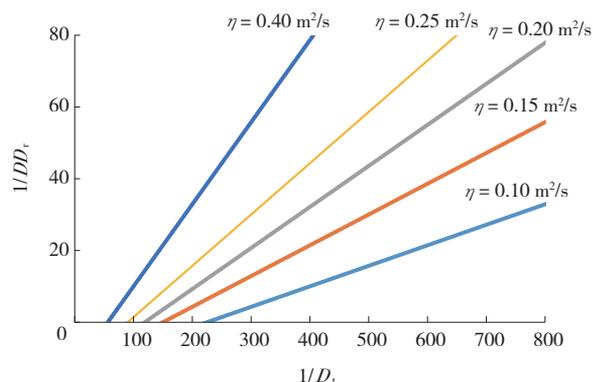


图2 不同导压系数条件下的 DD_r 理论图版 ($R_e=550$ m)

2.2 数值模拟验证

为验证评估方法是否准确, 文章借助数值模拟手段进行检验。储层参数设定如下: 渗透率 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 油层厚度 13.3 m, 孔隙度 0.168, 综合压缩系数 $1.4 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, 地层原油黏度 $1.57 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 原油体积系数 1.1, 束缚水饱和度 0.32; 储层泄油边界设置为圆形, 半径为 500 m; 数值模型网格剖分采取 PEBI 混合网格(见图3); 油井 S1 生产制度如下: 初期产能 $200 \text{ m}^3/\text{d}$, 按照日递减率 0.5%, 0.4%, 0.3%, 0.2% 分别设定 4 个生产阶段(符合矿场生产过程中产量递减逐渐降低的趋势), 引入数据噪声 2%^[25], 每个阶段生产时间为 30 d(见图4)。

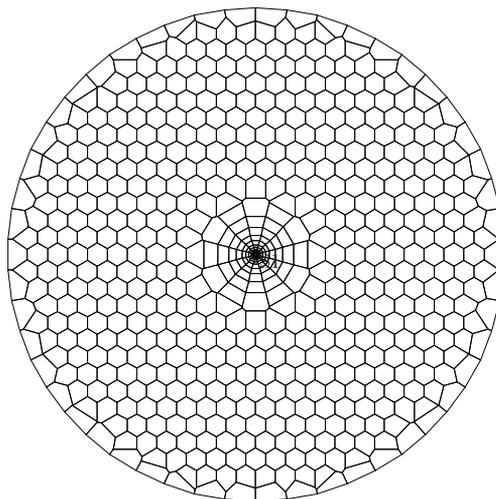


图3 储层网格剖分模型

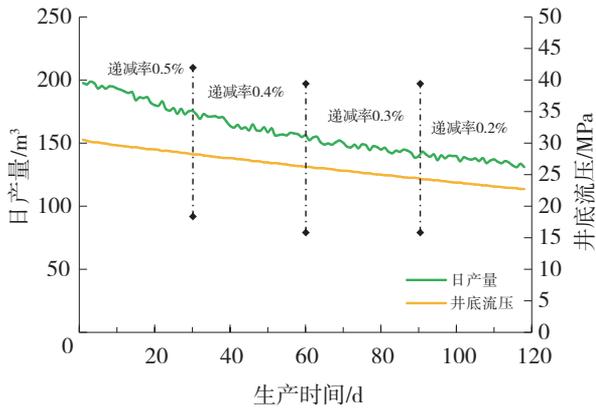


图4 S1井生产动态曲线

根据文献[25]提出的数据预处理方法和泄油指数求解步骤,对S1井的4个生产阶段进行拟合分析,计算得出每个阶段对应的递减率和泄油指数值,各参数计算结果见表1。

表1 各生产阶段参数计算结果

生产阶段	D_i	$D_i/(m^3 \cdot MPa^{-1})$	DD_i	$1/D_i$	$1/DD_i$
1	0.51%	2 538	0.034	196	30
2	0.38%	2 451	0.024	263	41
3	0.29%	2 332	0.018	345	57
4	0.22%	2 257	0.013	455	77

根据油藏参数可计算出储层导压系数为0.27 m²/s,在此选取泄油半径 R_e 分别为 350, 400, 450, 500, 550 m (对应储量 N_0 分别为 (50, 64, 81, 99, 120) × 10⁴ m³) 制作理论图版如图5。根据表1,将动态分析结果投影到理论图版,随着生产时间的延长,实际投影点在图版呈现由右上到左下的分布趋势,可以看出实际投影点与动态储量 99 × 10⁴ m³ 的理论曲线基本重合,其对应的泄油半径为 500 m,与数

值模拟设定值完全一致,验证了本文方法的可靠性。

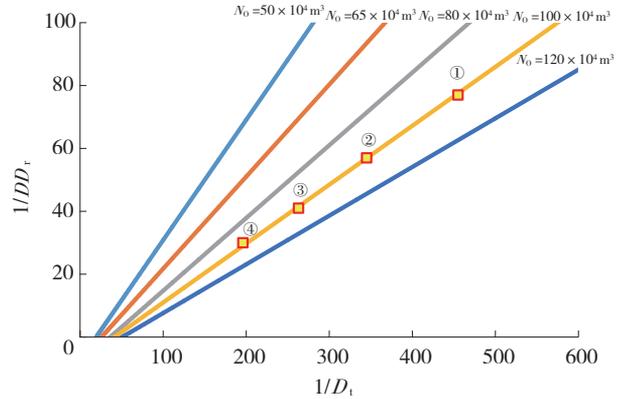


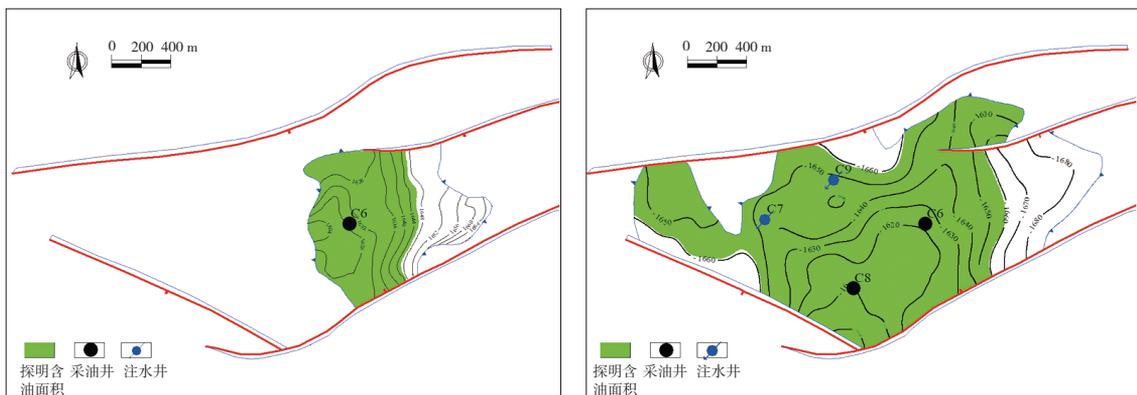
图5 数值模拟结果与理论图版投影关系 ($\eta=0.27 \text{ m}^2/\text{s}$)

3 矿场实例应用

渤海湾南部海域油田以河流相沉积为主,断裂系统复杂,储层变化快,多采用滚动模式开发,优先开发优质砂体。采用本文方法分别对BZ油田群和KL油田群滚动开发过程中的潜力砂体进行评估,取得较好效果。

3.1 BZ油田群

BZ34油田1657砂体发育于新近系明化镇组下段,为高孔、中高渗储层,流体黏度较低。受地震资料品质限制,砂描边界较为保守,开发方案仅设计一口C6井滚动开发(见图6a)。对C6井进行动态分析,储层参数及各生产阶段评估结果见表2和表3。从理论图版投影结果(见图7、图8)可以看出:选取的6个生产阶段,其中有4个阶段趋于收敛,且与动态储量 300 × 10⁴ m³ 的理论直线重合程度较高;整体来看,实际投影点由离散趋于集中,证实了生产趋于稳定,因此评估该区域动态储量为 300 × 10⁴ m³。



a.方案阶段认识

b.目前开发认识

图6 1657砂体含油面积示意

根据投产后的动态储量认识,在1657砂体西侧部署了1口开发评价井,评价井实施后钻遇油层8.0 m,证明储量落实,随后又在该砂体增加2口调整井

以完善注采井网(见图6b)。截至目前,该砂体共部署开发井4口(2注2采),新增探明原油地质储量 $230 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计增油 $59 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

表2 C6井静态参数数据

参数	$K/10^{-3} \mu\text{m}^2$	h/m	$\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	r_w/m	$C_i/10^{-4} \text{MPa}^{-1}$	S_{wc}	ϕ	S
取值	650	10	5	0.10	14	0.42	0.23	5

表3 C6井动态参数评估结果

分析阶段	D_t	$D_t/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1})$	DD_f	$1/D_t$	$1/DD_f$
1	0.18%	4 901	0.014	550	72
2	0.28%	11 549	0.050	360	20
3	0.19%	6 801	0.020	530	50
4	0.35%	11 457	0.063	286	16
5	0.61%	20 916	0.200	163	5
6	0.22%	11 105	0.038	450	26

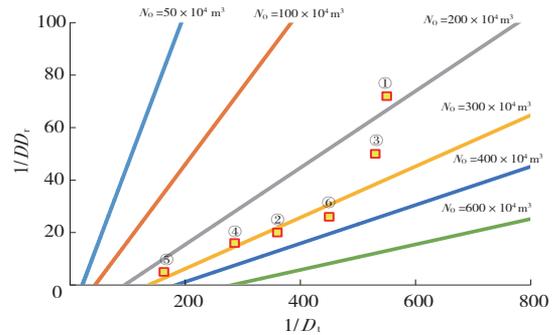


图8 C6井动态储量阶段评估理论图版投影图
($\eta = 0.41 \text{ m}^2/\text{s}$)

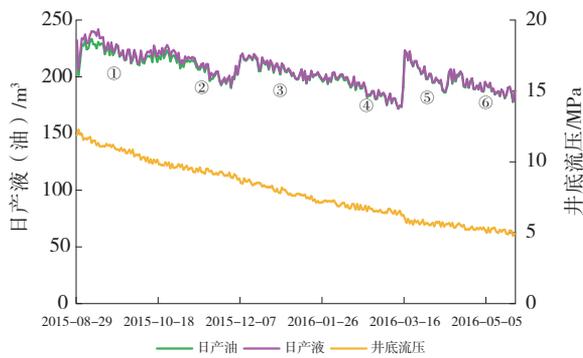


图7 BZ油田群C06井生产动态曲线

3.2 KL油田群

1483砂体为KL-3油田的主力砂体,开发方案早期通过储层构型研究将该砂体一分为二,其中西侧砂体储层存在变薄风险。开发方案仅在东侧砂体设计开发井5口,平均井距300 m左右(见图9a),其中A18井投产后生产形势良好,鉴于该井位置靠西,可通过其动态响应评估西侧砂体的储量落实程度,选取了投产初期4个生产阶段进行评估,日产油递减率分别为0.16%,0.30%,0.12%,0.23%,动态储量评估结果见图10、图11。

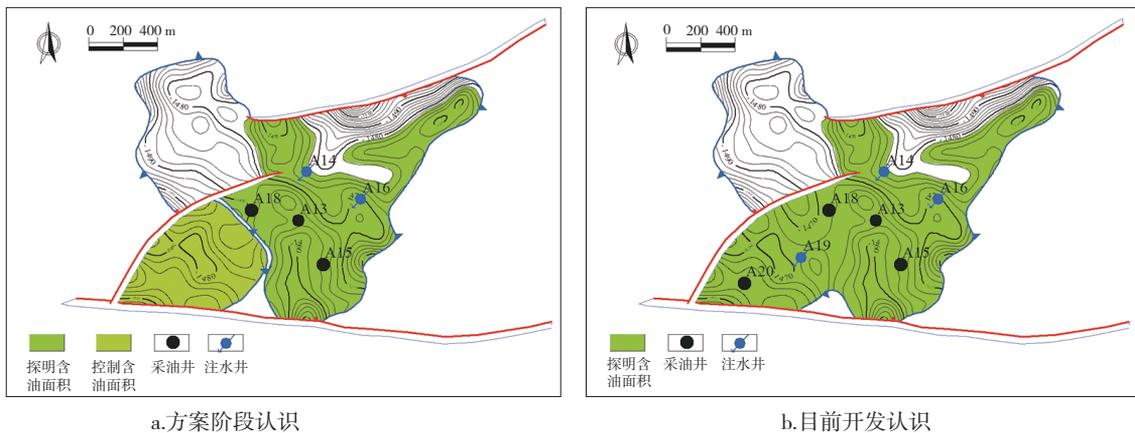


图9 1483砂体含油面积示意

由于A18井东侧存在水平井A13,存在一定的井间干扰,本次评估结果可作为定性参考。根据理论图版投影结果,投影点与动态储量 $61 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的理

论直线重合程度较高,考虑A18井东侧井控储量有限,因此认为西侧2号砂体和东侧1号砂体连通的可能性较大,且储层落实程度较高。

结合动静态资料,在西侧砂体部署了两口调整井,两口井钻后平均油层厚度 5.5 m,且随钻测压资料显示该区域平均压降为 0.8 MPa,验证了 1483 砂体是整体连通的(见图 9b)。该砂体的滚动开发实践表明,在存在一定井间干扰的情况下,本文方法所评估出来的动态储量依然具有较高的置信度。

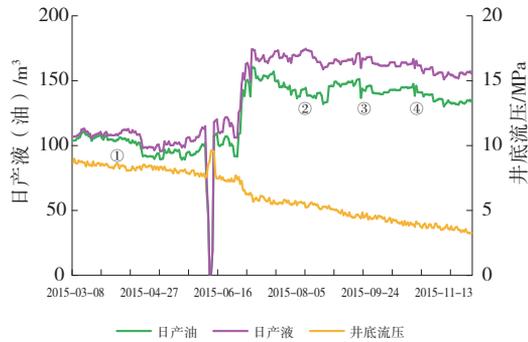


图 10 KL 油田群 A18 井生产动态曲线

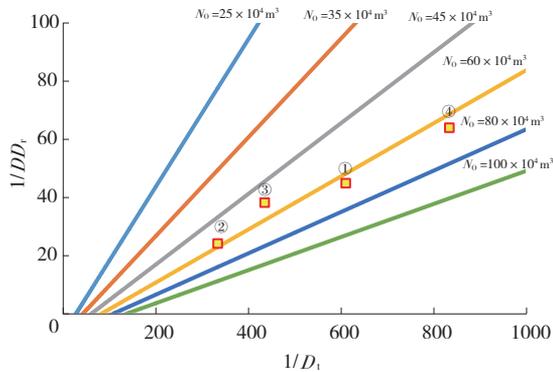


图 11 A18 井动态储量阶段评估理论图版投影图
($\eta = 0.74 \text{ m}^2/\text{s}$)

该方法适用于衰竭开发、未见水生产阶段评估单井动用地质储量,这也是它的局限性,其优势在于采用常规的静态和动态资料估算相对独立井区或者断块单井动用地质储量,为储量计算提供支持。

4 结论与建议

(1)在 IC 指数和 D_r 指数研究、修正的基础上,规范了泄油指数的定义,并与采油指数进行了概念上的区分。

(2)基于量纲分析,对泄油指数进行无量纲化,并得到无量纲泄油指数倒数与自然递减率倒数的线性关系,根据该线性关系可制作动态储量评估图版;动态储量评估图版能够综合油气井各生产阶段的动态信息,将不同阶段泄油指数和自然递减率的变化规律考虑在内,有效规避了因生产不稳定或数据选取不准确带来的误差。

(3)基于数值模拟结果论证了泄油指数法的准

确性,泄油指数法的基本思想是压力瞬态分析,因此适用于衰竭开发或未见水阶段动态储量评估,其优势在于将传统的曲线图版拟合过程简化为直线图版拟合,大幅提高了评估效率,是对传统方法的补充和完善。

(4)该方法作为一种新的动态分析手段运用于渤海南部海域油田,已指导了多个潜力砂体的滚动开发,具有重要推广意义。

参考文献:

- [1] 张立侠,郭春秋,蒋豪,等.物质平衡-拟压力近似条件法确定气藏储量[J].石油学报,2019,40(3):337-349.
- [2] Q/HS 2105-2017.海上中高渗透率水驱砂岩油藏开发水平分级[S].北京:石油工业出版社,2018.
- [3] 刘英宪,陈晓明.储量动用程度对理论水驱递减规律的影响分析[J].中国海上油气,2019,31(6):106-110.
- [4] ILK D, ANDERSON D M, STOTTS W J, et al. Production data analysis—challenges, pitfalls, diagnostics [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2010, 13 (3) : 528-552.
- [5] ARPS J J. Analysis of decline curves [J]. Transaction of the AIME, 1945, 60(1):228-247.
- [6] FETKOVICH M J. Decline curve analysis using type curves [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32 (6):1065-1077.
- [7] BLASINGAME T A, MCCRAY T L, LEE W J. Decline curve analysis for variable pressure drop/variable flowrate systems [C]//The SPE Gas Technology Symposium, Houston:SPE,1991:SPE-21513-MS.
- [8] MCCRAY T L. Reservoir analysis using production decline data and adjusted time [D]. College Station: Texas A & M University. College Station. 1990.
- [9] 李勇,李保柱,胡永乐.现代产量递减分析在凝析气田动态分析中的应用[J].天然气地球科学,2009,20(2):304-308.
- [10] 孙贺东,毛小平,康博.矩形气藏的产量递减规律及动态预测方法[J].天然气工业,2011,31(7):40-42.
- [11] 孙贺东.具有补给的气藏物质平衡方程及动态预测[J].石油学报,2011,32(4):683-686.
- [12] 王晓冬,胡永乐,丁一萍.水平井生产数据分析模型[J].石油勘探与开发,2010,37(1):99-103.
- [13] 田冷,王猛,申智强,等.考虑水侵影响的礁滩气藏动态储量预测模型[J].断块油气田,2017,24(1):26-30.
- [14] 李熙喆,刘晓华,苏云河,等.中国大型气田井均动态储量与初始无阻流量定量关系的建立与应用[J].石油勘探与开发,2018,45(6):1020-1025.

- [5] 陈晓微. 利用物质平衡方程校正注采比计算公式[J]. 广东石油化工学院学报, 2017, 27(1):23-25, 36.
- [6] 苍丹, 张金宇. 注采不均衡原因分析及调整对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(23):89-92.
- [7] 张继成, 王潇悦. 水驱油田合理注采规模的影响因素[J]. 当代化工, 2015, 44(7):1527-1530.
- [8] 吴琼, 王广辉, 王玉英. 低渗透油藏高注采比原因分析[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(2):54-58, 66.
- [9] 邵长新, 王艳忠, 操应长. 确定有效储层物性下限的两种新方法及应用——以东营凹陷古近系深部碎屑岩储层为例[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2):414-416.
- [10] 王艳忠, 操应长, 宋国奇, 等. 试油资料在渤南洼陷深部碎屑岩有效储层评价中的应用[J]. 石油学报, 2008, 29(5):701-706, 710.
- [11] 方正. 朝阳沟油田储层吸水特征研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- [12] 刘振峰. 致密砂岩油气藏储层建模技术方案及其应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2):815-823.
- [13] 徐德龙, 李涛, 黄宝华, 等. 利用交会图法识别国外M油田岩性与流体类型的研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3):1123-1132.
- [14] 严申斌, 李少华, 邓恒. 相控储层建模在胜南油田的应用[J]. 断块油气田, 2008, 15(1):16-17, 60.
- [15] 胡望水, 张宇焜, 牛世忠, 等. 相控储层地质建模研究[J]. 特种油气藏, 2010, 17(5):37-39.
- [16] 聂玲玲, 张占女, 童凯军, 等. 裂缝性潜山油藏地质建模与数值模拟一体化研究[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(1):131-138.
- [17] 曹勋臣, 喻高明, 邓亚, 等. 基于地层压力恢复时间的注采比数值模拟优化方法——以肯基亚克某亏空油藏为例[J]. 断块油气田, 2016, 23(2):193-196.
- [18] 范姝. 注采压力系统及合理注采比研究的一种方法[J]. 断块油气田, 2009, 16(5):72-74.

(编辑 谢 葵)

(上接第43页)

- [15] 王娟, 郭平, 王芳, 等. 物质平衡法计算缝洞型凝析气藏动态储量[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4):75-77.
- [16] 罗瑞兰, 雷群, 范继武, 等. 低渗透致密气藏压裂气井动态储量预测新方法——以苏里格气田为例[J]. 天然气工业, 2010, 30(7):28-31.
- [17] 郭奇, 李祯, 陈开远, 等. 多因素影响下低渗透气藏动态储量计算新方法[J]. 断块油气田, 2016, 23(5):595-598.
- [18] 赖令彬, 潘婷婷, 胡文瑞, 等. 欠饱和页岩气藏物质平衡方程及储量计算方法[J]. 特种油气藏, 2014, 21(5):95-98.
- [19] 姜宝益, 李治平, 巨亚锋, 等. 修正的产量不稳定法预测页岩气动态储量[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(2):66-69.
- [20] 杜华明, 宁正福, 苏朋辉. 考虑多组分吸附的页岩气储量计算方法[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2):141-145.
- [21] 张宏友, 王月杰, 马奎前, 等. 应用永久式井下压力计压降曲线计算油藏动态储量[J]. 油气井测试, 2010, 19(3):31-32.
- [22] 张凤喜, 陈明, 王庆勇, 等. 海上凝析气井动态储量计算方法[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(1):54-56.
- [23] 阳晓燕, 雷源, 马栋, 等. 一种动态储量计算新方法在渤海油田的应用[J]. 断块油气田, 2019, 26(3):329-332.
- [24] 蔡振华, 胡云亭, 杨彩红, 等. 致密砂岩气井产能评价指标及曲线特征[J]. 特种油气藏, 2014, 21(6):97-100.
- [25] 雷源, 陈晓明, 常会江, 等. 基于 D_r 指数的动态储量计算新方法[J]. 断块油气田, 2018, 25(5):608-611.

(编辑 谢 葵)