

引用格式:王祚琛,刘慧卿,孙治国,等.多层合采油藏层间非均质性表征研究[J].油气地质与采收率,2024,31(3):42-53.
WANG Zuochen, LIU Huiqing, SUN Zhiguo, et al. Study on characterization of interlayer heterogeneity in commingling production reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(3): 42-53.

多层合采油藏层间非均质性表征研究

王祚琛¹,刘慧卿¹,孙治国²,王月杰^{1,3},骆晨¹,潘越¹

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司纯梁采油厂,山东滨州 256504; 3. 中海石油(中国)有限公司蓬勃作业公司,天津 300459)

摘要:大井段多层合采开发往往面临严重的层间干扰问题,准确描述层间非均质性是解决层间干扰问题的关键。洛伦兹方法是描述层间非均质性最常用的手段,但在开发领域适用性尚不明确。针对这一问题,运用数值模拟方法及油藏工程理论开展洛伦兹方法开发适用性研究。研究发现:洛伦兹方法表征非均质性与开发效果相关性不强,仅在局部敏感区间内对开发效果产生剧烈影响;同时,当洛伦兹系数相等时,曲线形状对开发效果也有影响,但传统方法无法有效表征。因此,对洛伦兹方法进行了修正,并对修正方法开展了物理模拟实验及油田数据验证。实验结果表明:修正后大大扩展了洛伦兹系数的敏感区间,使得水驱开发效果与洛伦兹系数之间的相关性显著增强。实例应用表明:修正前后,KL-A区洛伦兹系数与采收率相关系数从0.48增至0.87,KL-B区相关系数从0.74增至0.87,可见层间非均质性与开发指标的相关性显著增强。

关键词:多层合采;层间非均质性;洛伦兹方法;渤海KL油田;开发指标

文章编号:1009-9603(2024)03-0042-12

DOI:10.13673/j.pgre.202304011

中图分类号:TE32

文献标识码:A

Study on characterization of interlayer heterogeneity in commingling production reservoirs

WANG Zuochen¹, LIU Huiqing¹, SUN Zhiguo², WANG Yuejie^{1,3}, LUO Chen¹, PAN Yue¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Chunliang Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Binzhou City, Shandong Province, 256504, China; 3. Pengbo Operating Company, CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin City, 300459, China)

Abstract: Accurate characterization of interlayer heterogeneity is the key to solving the problem of severe interlayer disturbances caused by large well sections in commingling production reservoir. The numerical applicability of the Lorenz method in development field is investigated by experiments and reservoir engineering theories because it is the most commonly employed method for describing interlayer heterogeneity, but its applicability remains uncertain. The study reveals that the Lorenz method's characterization of the heterogeneity has a weak correlation with development effects, exerting significant influence on development effects only within a localized sensitive range. Additionally, curve shape also affects development effects when Lorenz coefficients are equal, but traditional methods are ineffective in capturing this phenomenon. Consequently, a modification to the Lorenz method is introduced, followed by physical simulation experiments and validation with oilfield data. Experimental results demonstrate that the modification significantly broadens the sensitive ranges of Lorenz coefficients, leading to a substantial enhancement in the correlation between waterflooding development effects and Lorenz coefficients. Example applications show that the correlation coefficient

收稿日期:2023-04-11。

作者简介:王祚琛(1997—),男,山东博兴人,在读博士研究生,从事油气田开发领域研究工作。E-mail: 2022310138@student.cup.edu.cn。

通信作者:刘慧卿(1966—),男,河南台前人,教授,博士。E-mail: liuhq@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“难采稠油多元热复合开发机理与关键技术基础研究”(U20B6003),中国石油大学(北京)科研基金项目“泡沫强化咸水层CO₂封存机理研究”(2462022BJRC003)。

between the Lorenz coefficients after the modification and recovery factors increases from 0.48 to 0.87 in the KL-A area and from 0.74 to 0.87 in the KL-B area. This highlights a significant enhancement in the correlation between interlayer heterogeneity and development indicators.

Key words: commingling production; interlayer heterogeneity; Lorentz method; Bohai KL Oilfield; development indicator

多层砂岩轻质油藏大量分布于中国渤海湾盆地,海上油田受空间及效益限制,常采取大井距大井段多层合采方式开发^[1-3]。但该类油藏储层连通性差,层间非均质性强,随着开发的不断进行,大井段多层合采开发方式已暴露出层间驱替不均衡、层间干扰等问题^[4]。准确、细致表征层间非均质性是研究层间干扰问题的基础。但传统的储层突进系数、储层变异系数等表征储层非均质性的参数主要用于储层平面非均质性的表征,且截止目前对油藏非均质性的研究主要集中在层内而非层间,对水驱波及效率、剩余油富集区的研究重点也集中在平面尺度^[5-7],对于储层层间非均质性的研究很少且集中于层系划分及储层隔夹层的相关研究^[8],缺乏层间非均质性表征参数研究。

洛伦兹方法是目前表征多层油藏层间非均质性最常用的方法,其借鉴了经济学用于表征贫富差距的基尼系数,可以提供洛伦兹系数(非均质特征数)及直观的图像曲线。学者们开展了大量关于洛伦兹方法的研究。严科等基于储层非均质性表征参数较少的痛点问题,提出了量化表征多层油藏储层非均质性的非均质程度系数^[9]。李潮流等参照气象学的集中函数,提出了类似于洛伦兹系数的碎屑岩储集层非均质系数,并将中国陆相碎屑岩储集层非均质程度以0.15和0.5为端点值分为三等^[10]。邵先杰提出了渗透率参差系数并给出了详细的计算过程以评价储层非均质性,效果良好^[11]。王敬等应用洛伦兹曲线评价储层非均质性后,通过反解洛伦兹曲线确定油藏渗透率分布^[12-13]。刘超等将计算得出的洛伦兹系数作为e负次幂的指数进行变换后应用,提升了洛伦兹系数在石油工程领域的适用性^[14]。梁爽等基于洛伦兹方法,提出地层系数变异程度并将此参数应用于大庆油田^[15]。王庆等利用洛伦兹方法分析产液剖面和吸水剖面的不均匀程度,评价了国内典型油田纵向动用程度^[16]。苏雪迎将洛伦兹方法应用于三元复合驱吸水剖面研究^[17]。李祯等依据单井洛伦兹系数评价油井流动非均质性,运用数值模拟和机器学习方法建立表征指标,评价高含水油藏的开发效果^[18]。蔡晖等利用洛伦兹方法评价了多层油藏层间压力系数^[19]。张润雪等研究了储层可压系数与洛伦兹系数的相关关系,评价了非均质超稠油油藏的可压性^[20]。沈旭东等

在洛伦兹方法评价储层非均质程度后,利用机器学习方法建立了采油高耗水层识别方法^[21]。

综上,洛伦兹方法作为一种描述储层非均质性的方法在地质领域被提出,并经常作为一项油藏非均质参数在开发领域应用,但是洛伦兹系数作为开发领域参数的适用性有待研究。此外,在使用洛伦兹方法对储层进行评价的过程中,洛伦兹曲线的形状因素对油田开发效果的影响有待进一步研究。基于上述问题,针对洛伦兹系数作为储层非均质性指标应用于开发领域的合理性及洛伦兹曲线形状对油田开发效果的影响开展了研究。利用数值模拟方法、油藏工程理论分析了洛伦兹方法所得参数不完全适用于开发领域的原因,并提出了一种适用于油气田开发领域评价储层非均质性的修正洛伦兹方法;利用物理模拟实验及油田数据,对新方法及传统洛伦兹方法进行了对比,验证所提出新方法的合理性。

1 洛伦兹方法适用性评价

1.1 洛伦兹系数

洛伦兹系数是将各层岩样据渗流能力降序排列后,各层岩样渗流能力贡献值曲线与完全均质曲线所围面积和完全均质曲线与完全非均质曲线所围面积的比值,因此洛伦兹系数值均在0到1之间。现阶段各层渗流能力主要通过地层系数表征,即渗透率与有效厚度的乘积,具体公式如下:

$$L_c = \frac{S_{ADCA}}{S_{ABCA}} = \frac{\left| \int_0^1 y dx - 0.5 \right|}{0.5} = \left| 2 \int_0^1 y dx - 1 \right| \quad (1)$$

对于实际测量各层岩样样本数量有限的情况下,样本点横纵坐标分别为:

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\sum_{i=1}^M h_i} \quad (2)$$

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^m K_i h_i}{\sum_{i=1}^M K_i h_i} \quad (3)$$

对于实际测量有限个数的洛伦兹系数表达式

可写为加和形式,即:

$$L_c = \frac{\sum_{m=1}^M (y_{m-1} + y_m) \times \frac{x_m}{2} - 0.5}{0.5} \quad y_0 = 0 \quad (4)$$

由(2)一(4)式可知,按照降序排列后,储层非均质性越强,高渗透层渗流能力贡献值越大,样本点 y_1 越接近 $(x_1, 1)$ 。因此,储层非均质性越强,洛伦兹系数亦越接近1;反之,储层越均质,各点对应坐

标越接近对角线,洛伦兹系数越接近0。洛伦兹系数可以较好地定量表征储层非均质性。

1.2 洛伦兹系数与开发指标的适配性

结合渤海湾盆地某油田工区的地质、流体、动态资料,开展储层非均质性数值模拟研究,由于小层厚度差异通常较小,而渗透率的差异可以达到几个数量级,为了研究的直观、方便,建立10层等厚模型,模型参数见表1。

表1 数值模型参数

Table1 Numerical model parameter

参数	数值	参数	数值
模型顶深/m	2 400	模型活动网格块	50×50×20
模型井距/m	350	注入压力/MPa	17
平均渗透率/mD	100 ~ 150	小层厚度/m	1 ~ 1.5
原油黏度/(mPa·s)	2.5	初始含油饱和度/%	60
有效储层孔隙度	0.25 ~ 0.3	经济极限含水率/%	98

基于以上参数建立数值模拟模型,开展海上油田常规采油速度下,不同洛伦兹系数储层采收率的差异研究。为更直观体现采收率指标变化,定义无因次采收率为:

$$\partial_i^* = \frac{\partial_i - \partial_{L_{cmin}}}{\partial_{L_{cmax}} - \partial_{L_{cmin}}} \quad (5)$$

为直观体现洛伦兹系数变化对应储层采收率的变化幅度,反映采收率与洛伦兹系数的对应关系,定义洛伦兹系数敏感度系数为:

$$F_{\partial_i^*} = \frac{|\partial_i^* - \partial_j^*|}{|L_{ci} - L_{cj}|} = \frac{|\Delta \partial^*|}{|\Delta L_c|} \quad (6)$$

根据现有储层非均质洛伦兹系数评价标准($L_c < 0.2$ 为均质, $L_c = 0.2 \sim 0.3$ 为弱非均质, $L_c = 0.3 \sim 0.4$ 为中非均质, $L_c = 0.4 \sim 0.5$ 为较强非均质, $L_c > 0.5$ 为强非均质),设计储层洛伦兹系数分别为0.01,0.14,0.39,0.49,0.6,0.7,0.75,0.79,0.81和0.89的多层理想模型进行数值模拟。模拟中采油速度分别为1.5%,2.5%和3.5%,最终洛伦兹系数与无因次采收率关系如图1所示,为直观体现洛伦兹系数各个区间对储层采收率的影响,绘制洛伦兹系数各区间敏感度系数(图2)。

由图1可知,采油速度的差异对各储层采收率影响不显著,储层整体平均渗透率相近且各层等厚条件下,使用洛伦兹系数表达层间非均质性时,无因次采收率与洛伦兹系数的关系呈抛物线状,随着洛伦兹系数的增大,采收率前期下降趋势平缓,后期下降迅速。当 L_c 小于0.4时无因次采收率对洛伦兹系数的敏感程度很低,洛伦兹系数从0扩大到0.4,即储层绝对均质变为较强非均质时,无因次采

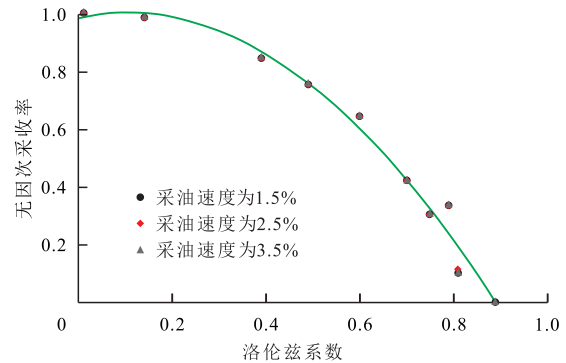


图1 洛伦兹系数与无因次采收率关系曲线

Fig.1 Relationship between Lorenz coefficient and dimensionless recovery factor

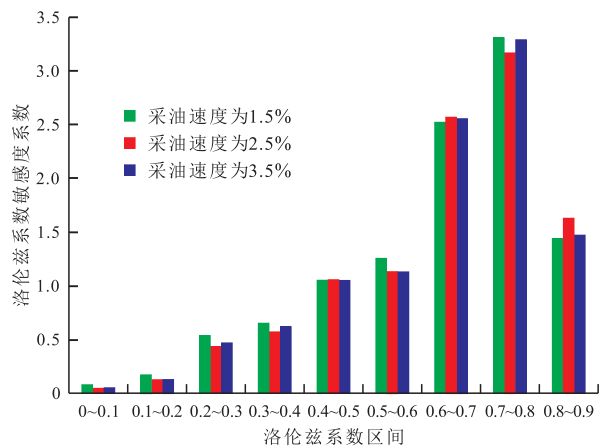


图2 洛伦兹系数各区间敏感度系数

Fig.2 Sensitivity coefficients of each interval of Lorenz coefficient

收率仅下降不足0.2;而当 L_c 大于0.4时,相同区间长度内储层无因次采收率降低了近0.8。

由图2可以看出,储层开发效果对洛伦兹系数最为敏感区间为0.6~0.8,当 $L_c \in [0.6, 0.7]$ 时,采收

率对洛伦兹系数的敏感程度是 $L_c \in [0.4, 0.6]$ 时的2.5倍,是 $L_c \in [0, 0.4]$ 时的10倍,同时当 L_c 进一步增大至0.7~0.8区间时,洛伦兹系数敏感程度又扩大为 $L_c \in [0.6, 0.7]$ 时的1.4倍。

随着新发现油藏储层物性的不断劣化,层间非均质性的不断增强,使用仅在局部区间表现出过高敏感性的洛伦兹系数评价储层非均质性,主要存在以下问题:①在洛伦兹系数低于0.6或高于0.8时,储层非均质性的变化对采收率的影响很小,导致洛伦兹系数与采收率不相关。②在洛伦兹系数为0.6~0.8,尤其是0.7~0.8时,采收率对洛伦兹系数过于敏感,渗透率测量误差可能对采收率的预测及开发方案的制订产生影响。③受计算方法影响,洛伦兹系数的最大值无法达到1,致使其表征非均质性的上限不确定,准确性进一步下降。传统的洛伦兹系数在针对现阶段使用大井段多层合采方式开发的强非均质性油藏时很难适应,因此急需一种新方法表征储层非均质性。

1.3 洛伦兹曲线形态对储层非均质性评价影响

首先仿照储层平面上的突进系数定义储层层间渗流能力突进系数,计算公式为:

$$T_{v,k} = \frac{K_{vmax} h_{vmax}}{K_v h_v} \quad (7)$$

除了利用洛伦兹系数表征储层非均质性外,理论模型的洛伦兹曲线形态在不同情况下也会存在

差异。当洛伦兹系数相同,而储层层间渗流能力突进系数存在差异时,洛伦兹曲线形态不同(图3a)。通常在对各层按渗流能力顺序排序后,渗流能力相近,小层渗流能力差值较为接近时,储层洛伦兹曲线为沿图版对角线方向对称的形态,当渗流能力突进系数越高,即高渗透层渗流能力贡献度越大,且厚度越小时,洛伦兹曲线波峰下移,如图3a中曲线①所示;当渗流能力突进系数越小,即渗透率低值层且厚度较大时,洛伦兹曲线波峰上移,如图3a中曲线②所示。

若洛伦兹系数较大,则形态必接近等腰三角形,波峰位置的区别很小;而洛伦兹系数小于0.2时,储层较为均质,采收率均较高,曲线形态带来的差异很小。因此,为保证结论可靠性,选取洛伦兹系数为0.39的理论模型进行数值模拟实验。3组模型的洛伦兹曲线如图3b—3d所示。图3b为通常储层孔渗条件呈正态分布情况下洛伦兹曲线形态,当储层渗流能力突进系数很大时,储层厚度贡献率不变条件下高渗透层的渗流能力贡献率显著增强,呈图3c形态,反之呈图3d形态,模型各层渗透率如表2所示。

对3组模型分别开展采油速度为1.5%,2.5%,3.5%的对比实验,由图4可知,洛伦兹系数相近时,曲线形态的差异会对模型的采收率造成一定的影

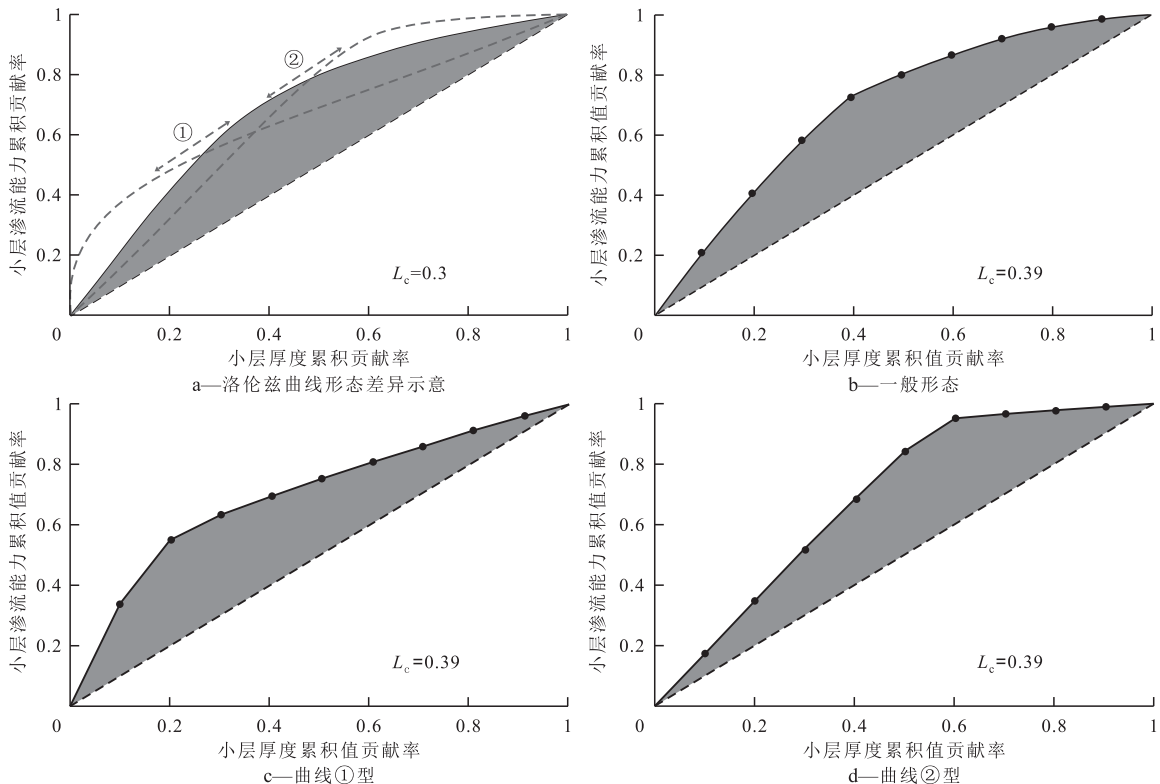


图3 不同洛伦兹曲线形态说明

Fig.3 Explanation of different shapes of Lorenz curves

表2 3组模型的物性统计
Table2 Property of three types of models mD

层位	渗透率		
	一般形态	曲线①型	曲线②型
第1层	250	400	212.5
第2层	225	250	207.5
第3层	200	100	202.5
第4层	165	70	197.5
第5层	85	67.5	192.5
第6层	75	65	130
第7层	60	62.5	15.5
第8层	45	60	14.5
第9层	30	57.5	13.5
第10层	20	55	12.5

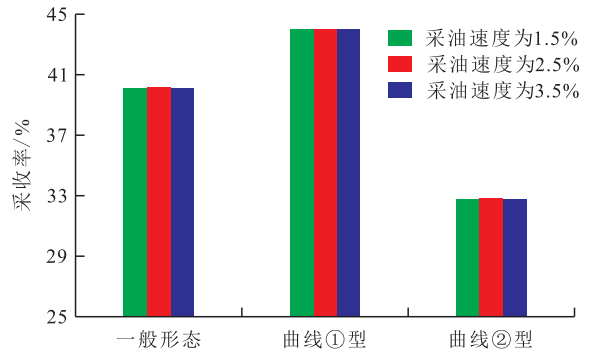


图4 $L_c=0.39$ 时不同形态曲线采收率
Fig.4 Recovery factors of different shape curves when $L_c = 0.39$

响。当 L_c 为0.39时,在3种采油速度下洛伦兹曲线为一般形态的非均质储层模型采收率为39.85%,曲线①型达到43.6%,曲线②型仅为32.65%。

通过观察整个生产过程以及废弃时各层含油饱和度的分布情况(图5)发现:虽然洛伦兹系数相近,但曲线①型层间非均质性主要由底部2个超高渗透层造成,这2小层的动用程度也最高(图5a),而

模型其余8个小层渗透率虽相对较低,但仍具备一定渗流能力,进入高含水期采用强化排驱提液量生产后,这些层位得到了有效动用(图5d),故采收率较高。而曲线②型层间非均质性主要由于4个低渗透层的存在,通过废弃时含油饱和度场可以看出,该模型产量贡献均来自6个较高渗透层(图5b),4个特低渗透层所占厚度比例很高但几乎没有得到有效动用(图5e),故采收率低。而一般形态对应的高渗透层及低渗透层废弃时的平均动用程度均介于曲线①,②型储层对应的高、低渗透层之间(图5c,5f),故采收率也介于两者之间。

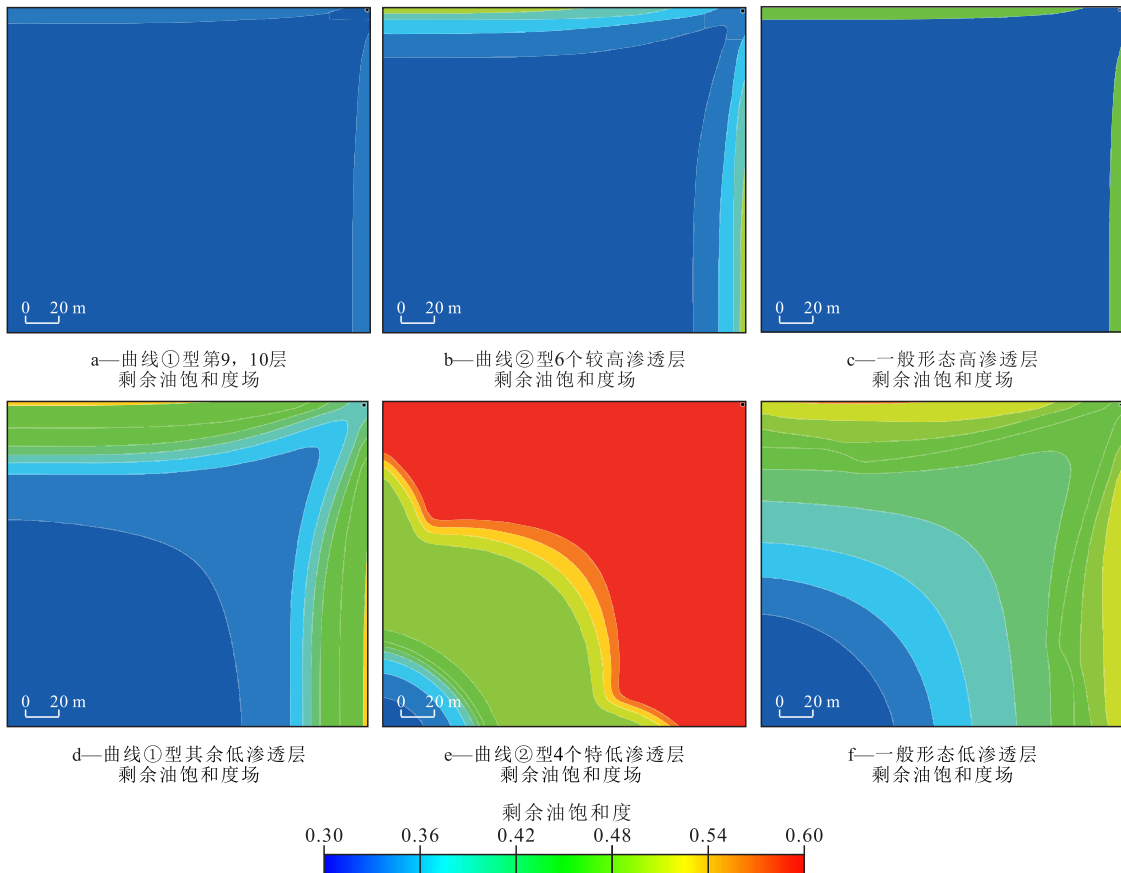


图5 3种曲线对应储层废弃时高渗透层、低渗透层含油饱和度场

Fig.5 Three curves corresponding to oil saturation fields of high-permeability and low-permeability layers of abandoned reservoir

综上,洛伦兹曲线形态对采收率的影响虽没有洛伦兹系数影响那么显著,但相同渗透率条件下,模型未达到严重非均质程度($L_c \leq 0.5$)时,曲线①型对应采收率高,一般形态对应采收率次之,曲线②型对应采收率最低;即洛伦兹系数小于0.5时,同渗透率、同洛伦兹系数条件下,储层层间渗流能力突进系数越大,对应采收率越高;反之,渗流能力突进系数越小,对应采收率越低。

2 修正洛伦兹方法提出及开发领域适用性

2.1 修正洛伦兹系数

利用加入修正项的方式对油井产能公式进行修正是油藏工程中常用的方法。比如在使用SAGD开发油砂的过程中及对油井近井渗流的达西公式表征过程中,常在产能公式中加入2/3次方项或3/4次方项对产能公式进行修正以更加精准地预测油井的产能。

油井产能公式修正具体原因为:①油藏为非完全饱和油藏时水的流动对原油有一定的阻碍作用,即幂值修正的加入是为了消除相渗的影响。②考虑重力影响或多方向驱动力的共同作用时,除沿主方向的压力差外其余力及分量会产生阻碍渗流的

影响,因此需要对产能公式进行修正。

除了以上2方面原因,如图6所示,高渗透层流线明显更密集,这与一般认识一致,高渗透层有着更高的产液量。高渗透层流线整体分布较均匀,流线由注采井连线向两侧缓慢抽稀,而低渗透层流线集中分布在注采井连线两侧,这说明低渗透层注入井主要在主流通道向生产井供液,而高渗透层波及范围较大,整层都向生产井供液。但观察模型高含水期高渗透层、低渗透层含油饱和度场及流线上的含油饱和度(图7),可以看出低渗透层流线所经区域含油饱和度较高,含水率低,而高渗透层在高含水期由于整体水淹,仅在边部流线较稀疏的区域有部分流线可以驱油。因此高渗透层与低渗透层的产油量比值远小于产液量比值。

根据油藏工程理论^[22],活塞驱替时油井产量公式为:

$$Q = Av = Au\phi\Delta S = A \frac{K^0}{a + be^{cx}} \dot{\lambda}_r \frac{\Delta p}{L} = \frac{\Delta p}{\frac{L}{A} \frac{1}{K^0} \frac{1}{\dot{\lambda}_r}} = \frac{\Delta p}{R} \tag{8}$$

其对应渗流阻力公式为:

$$R = \frac{L}{A} \frac{1}{K^0} \left[\frac{x_D}{\lambda_{rw}} + \frac{1 - x_D}{\lambda_{ro}} \right] = \frac{L}{AK^0\lambda_{rw}} [M_0 - (M_0 - 1)x_D] \tag{9}$$

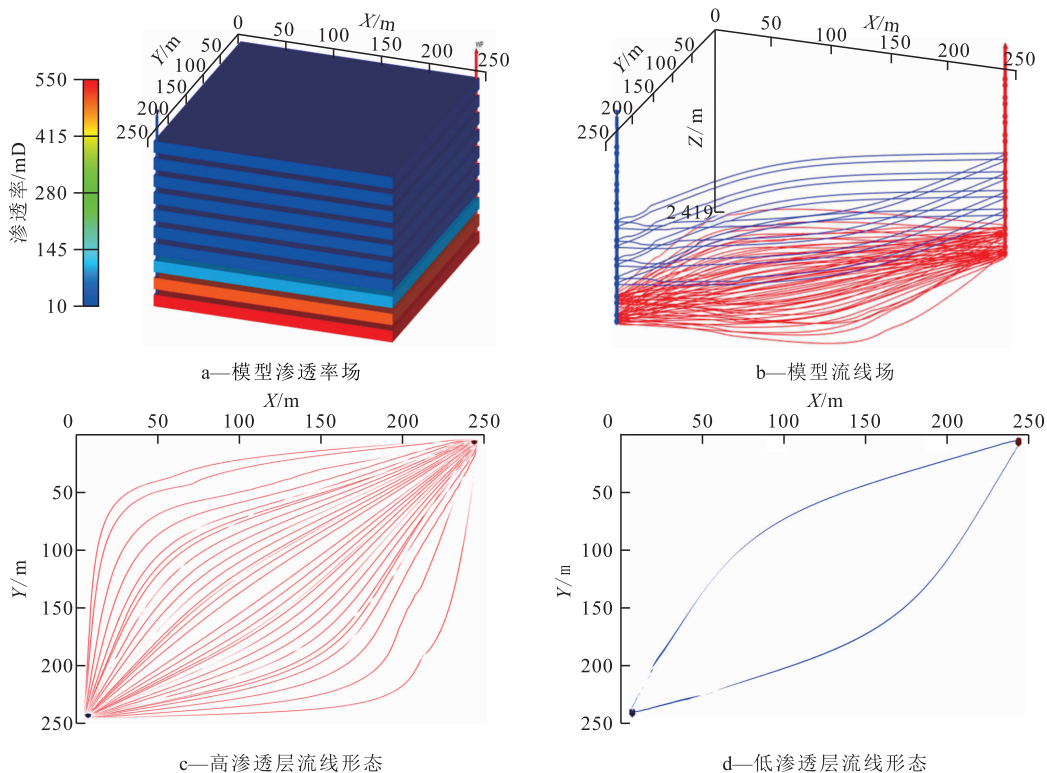


图6 $L_c=0.6$ 理论模型流线分布
Fig.6 Distribution of theoretical streamline model when $L_c = 0.6$

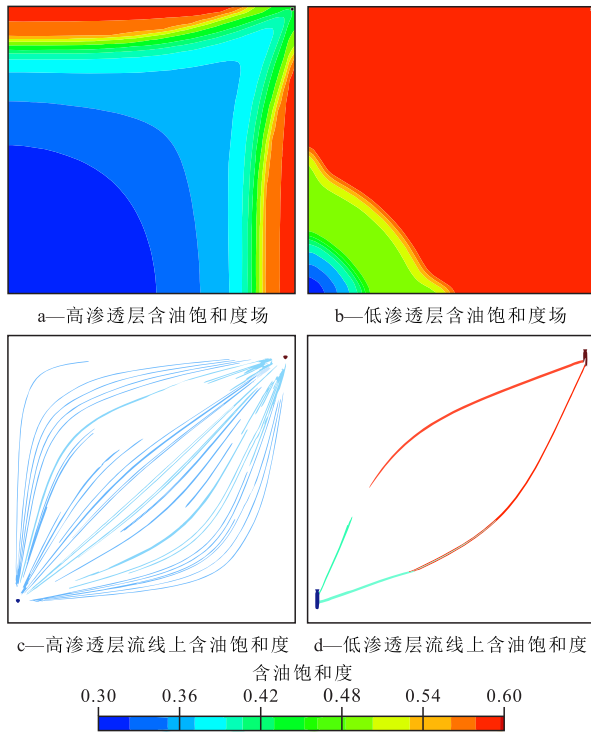


图7 $L_c=0.6$ 理论模型含油饱和度场及流线上含油饱和度
Fig.7 Oil saturation fields and streamline oil saturation of theoretical model when $L_c=0.6$

活塞驱替是假设在油藏水驱过程中,油水前缘处存在明确界面且驱后储层为残余油饱和度的理想状态,实际油藏生产过程中驱替前缘存在油水两相区,为更复杂的非活塞驱替,对驱替两相区及纯油区的压力梯度表征如下:

$$\Delta p_{wo} = \frac{\mu_o Q}{AK^0} \int_0^{x_f} \frac{1}{K_{ro}(S_w) + \mu_r K_{rw}(S_w)} dx \quad (10)$$

$$\Delta p_o = \frac{\mu_o Q}{AK^0 K_{rocw}} (L - x_f) \quad (11)$$

$$\Delta p = \Delta p_{wo} + \Delta p_o \quad (12)$$

基于(10)~(12)式,继续利用油藏工程含水率曲线对驱替前缘位置进行表征,得到前缘含水率公式为:

$$x_s = F(S_w) \int_0^t Q dt \quad (13)$$

在此基础上经推导后,不考虑渗透率时变性条件下,非活塞驱替的渗流阻力公式可大致写为:

$$R = \frac{\mu_o L}{AK^0 K_{rocw}} F(S_{wf}) \quad (14)$$

本文不对非活塞驱替的详细公式及推导过程进行讨论,但通过(9)和(14)式可以看出, R 与 L 呈正相关关系。结合流线图,由于高渗透层边部流线 L 远大于注采井连线流线 L (若注采井连线处 L 近似为 $\sqrt{2}a$ ($\sqrt{2}$ 倍井距),则边部流线 L 近似为 $2a$ (2倍井距)),因此高渗透层整体虽渗流阻力更小,但其

边部产油区域为同层位渗流阻力较大区域,这进一步导致了高渗透层产油量贡献率的降低。

综上所述,小层产油量与渗透率不能近似为线性相关,该现象在洛伦兹系数小于0.5且储层层间渗流能力突进系数较大时更为明显。这是由于流量越是集中于高渗透层,高渗透层水淹越早越严重,高渗透层产油量与产液量差距越大。因此,对于个别超高渗透层过于敏感是洛伦兹系数难以对应储层开发效果的主要原因。

针对前文讨论的问题,本文拟采用对小层渗流能力数值进行乘幂处理的方法对洛伦兹曲线进行修正,分别对比1/2,2/3及3/4次方后,发现2/3次方修正效果最好,修正后有限层油藏洛伦兹曲线坐标分别为:

$$x_m^* = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\sum_{i=1}^M h_i} \quad (15)$$

$$y_m^* = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt[3]{K_i^2}}{\sum_{i=1}^M \sqrt[3]{K_i^2}} \quad (16)$$

则洛伦兹系数的表达式变为:

$$L_c^* = \frac{\sum_{m=1}^M (y_{m-1}^* + y_m^*) \times \frac{x_m^*}{2} - 0.5}{0.5} y_0^* = 0 \quad (17)$$

研究发现,洛伦兹系数最大值受到高渗透极值层层厚的影响,洛伦兹系数所能达到的最大值为:

$$L_{Cmax} = 1 - \frac{h_{kmax}}{h_{total}} \quad (18)$$

因此在对洛伦兹系数进行如上修正后,继续消除高渗透极值层层厚影响,最终洛伦兹系数表达式为:

$$L_c^* = \frac{\sum_{m=1}^M (y_{m-1}^* + y_m^*) \times \frac{x_m^*}{2} - 0.5}{0.5 \times L_{Cmax}} y_0^* = 0 \quad (19)$$

2.2 修正洛伦兹系数与开发指标适配性

洛伦兹系数经修正后,重新绘制修正洛伦兹系数与无因次采收率关系曲线(图8),并重新统计了各个区间的修正洛伦兹系数敏感度系数(图9)。可以看出,修正洛伦兹系数与无因次采收率由原来的抛物线关系变为线性递减关系。修正洛伦兹系数取值在0~1的大部分区间对应的敏感度系数均较为接近,除了修正洛伦兹系数小于0.1和大于0.9外,修正洛伦兹系数敏感度系数在各个取值区间均为1~2,其中当修正洛伦兹系数为0.2~0.4与0.7~0.8时,修正洛伦兹系数敏感度系数约为1.5,当修正

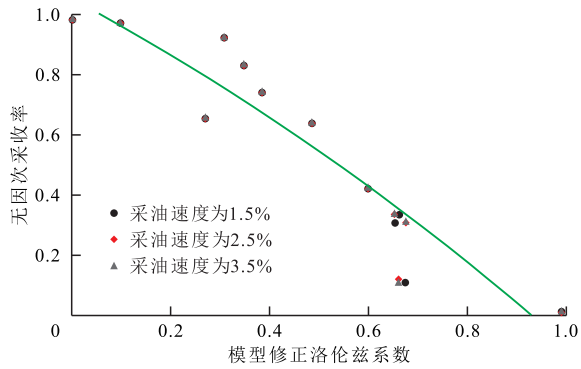


图8 修正洛伦兹系数与无因次采收率关系曲线

Fig.8 Relationship between modified Lorenz coefficient and dimensionless recovery factor

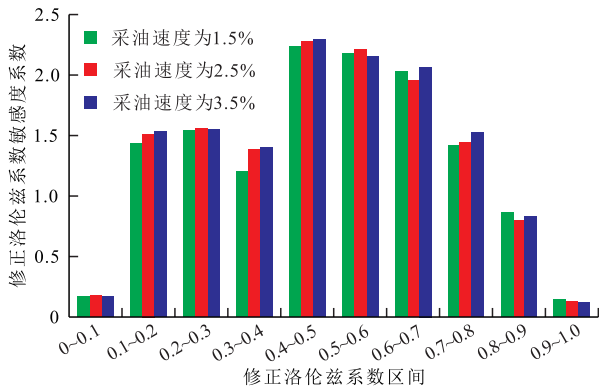


图9 修正洛伦兹系数各区间敏感度系数

Fig.9 Sensitivity coefficients of each interval of modified Lorenz coefficient

洛伦兹系数为0.4~0.7时,敏感度系数约为2。在0.1~0.9区间范围内,洛伦兹系数敏感度系数均较高,可以较好地反映储层非均质程度及对开发效果的影响。洛伦兹系数修正前后,敏感区间长度从0.3增加到0.7,扩大了2.3倍,很好地解决了洛伦兹系数仅在局部区间内表现出极高敏感性的问题。

另一方面,洛伦兹系数经过修正后,在 L_c 小于0.5时,不同洛伦兹曲线形态对最终采收率的影响得到了解决。对渗透率乘 $2/3$ 次幂后,渗透率高值会

减小更多,这降低了洛伦兹系数对特高渗透层的敏感程度,同时使特低渗透层对储层非均质性的影响得到表征。前文研究中洛伦兹系数均为0.39的3个储层修正后洛伦兹系数分别为0.317,0.279,0.357,较好地反映了3条曲线表征储层非均质性的差异及其带来的开发效果差异。对洛伦兹系数的修正,极大降低了洛伦兹曲线形态对储层层间非均质性表征准确性的影响。

修正洛伦兹系数在定性对储层非均质性分级基础上,可进一步按 $[0, 0.1)$, $[0.1, 0.25)$, $[0.25, 0.4)$, $[0.4, 0.55)$, $[0.55, 0.7)$, $[0.7, 0.9)$, $[0.9, 1]$ 将储层分别划分为无层间干扰、弱层间干扰、较弱层间干扰、中等层间干扰、较强层间干扰、强层间干扰及低渗透未动用储层。

3 修正洛伦兹方法实验

为对前述研究所得到的结论及修正洛伦兹系数合理性进行验证,开展了三维物理模拟研究,具体物理模型如图10,驱替实验流程如图11。

由图10可见,模型设置多个井位以保证充分、均匀地饱和油及饱和水;黑色测点可以测量饱和度从而生成饱和度矢量场。为保证实验参数的合理,利用相似准则对实验数据和油田数据进行对应换算(表3)。

共进行了6组驱替实验,一组使用相同的填砂配比和胶结剂的均质储层模拟各小层物性相同、纵向完全均质条件的储层,以确定采收率上限;一组采用实验油井仅在第一层射孔的方式,模拟低渗透层完全不渗透的极端情况,以确定实验采收率下限。2组实验确定采收率上限值为50.3%,下限值为10.1%。之后进行4组对比实验,结果如图12和图13所示:由于物理模拟采用的是5层等厚模型,洛伦

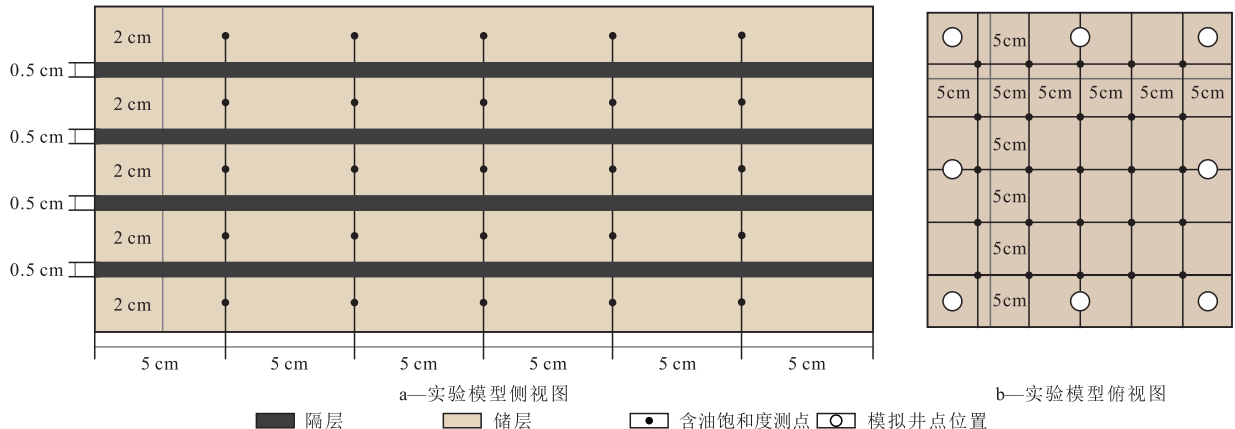


图10 物理模型示意

Fig.10 Physical model

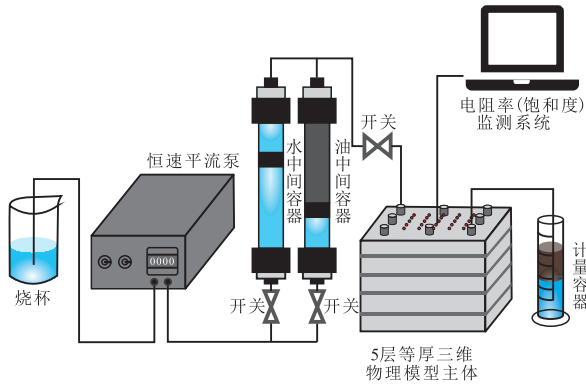


图11 驱替实验流程

Fig.11 Displacement experiment procedure

表3 实验和油田数据对照

Table3 Comparison of experimental and oilfield data

数据类型	孔隙度	渗透率	小层厚度	水黏度/(mPa·s)	油黏度/(mPa·s)	井距	注入量
油田	约为25%	平均约为200 mD	集中于2 m左右	0.5	5	350 m	200 ~ 1 000 m ³ /d
实验	约为25%	平均约为1 500 mD	2 cm	1	5	40 cm	3 mL/min

4 修正洛伦兹方法在实际工区的应用

为验证修正洛伦兹系数的可靠性,使用中国渤海湾地区大井段合采开发区块(KL-A区和KL-B区)生产井的实际生产数据进行对比验证。计算实际工区采收率时,使用童宪章院士提出的甲型水驱曲线预测方法^[23]。该方法利用累积产水量与累积产油量在半对数坐标系中的对应关系,即:

$$\lg W_p = a_1 + b_1 N_p \quad (20)$$

在此基础上两边对时间微分,推导后以98%为极限含水率,得到:

$$N_{pmax} = \frac{1}{b_1} [\lg 49 - a_1 - \lg (2.303b_1)] = \frac{1}{b_1} (\lg \frac{21.28}{b_1} - a_1) \quad (21)$$

单井控制储量根据井距、有效厚度、孔隙度、含油饱和度等信息利用容积法进行计算。求得各单井最大可采储量及单井控制储量后作比,算出各单井采收率并进行无因次化。由于甲型水驱曲线预测方法仅适用于含水率稳定上升的开发中后期油藏,因此对生产时间较短及近期出现含水率急剧波动的井数据进行剔除,最终分别选取了KL-A区的8口及KL-B区的8口生产井数据分别绘制散点图。

由图14和图15可知,两区生产井修正洛伦兹系数与采收率相关性更强。KL-A区修正洛伦兹系数与无因次采收率的线性相关系数达到0.87,而修

兹系数均为0~0.8,当洛伦兹系数低于0.6时,实验所得无因次采收率在0.8以上平缓下降;当洛伦兹系数高于0.6时,实验所得无因次采收率在0.2的小区间内,从0.8剧烈下降至0。因此,传统洛伦兹系数很难直观、精确表征储层非均质程度与开发效果的关系。而修正洛伦兹系数与实验所得无因次采收率呈较为明显的负相关线性关系,无因次采收率随修正洛伦兹系数变化在(0.15,0.9)区间内呈线性下降。修正洛伦兹系数敏感区间长度从0.2增加至0.75,可以更直观地反映出储层非均质性对开发效果带来的影响。

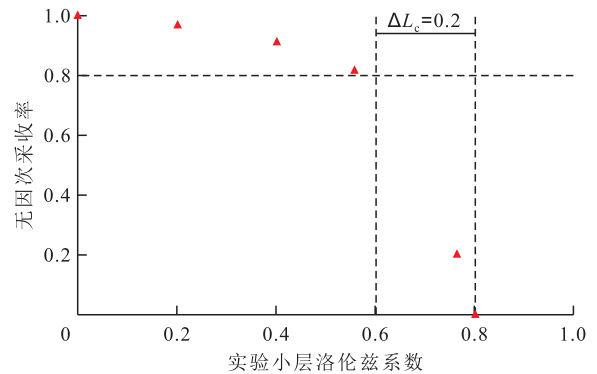


图12 洛伦兹系数与无因次采收率关系

Fig.12 Relationship between dimensionless recovery factor of experiment and Lorenz coefficient

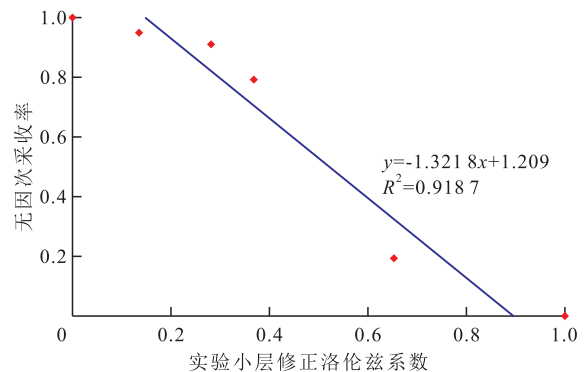


图13 修正洛伦兹系数与无因次采收率关系

Fig.13 Relationship between dimensionless recovery factor of experiment and modified Lorenz coefficient

正前洛伦兹系数各个数据点杂乱分布在图版上,采收率与非均质程度不存在相关关系;KL-B区修正洛伦兹系数与无因次采收率的线性相关系数超过

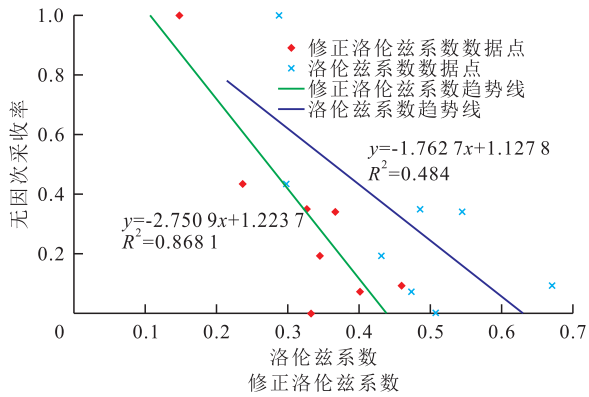


图 14 KL-A 区修正前后洛伦兹系数与无因次采收率关系
Fig.14 Relationship between dimensionless recovery factor, Lorenz coefficient and modified Lorenz coefficient of KL-A area

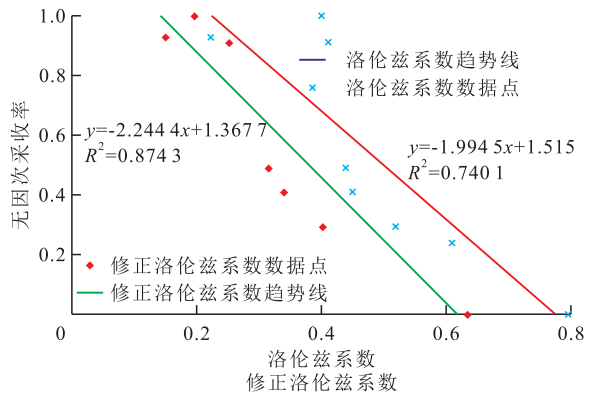


图 15 KL-B 区修正前后洛伦兹系数与无因次采收率关系
Fig.15 Relationship between dimensionless recovery factor, Lorenz coefficient and modified Lorenz coefficient of KL-B area

0.87, 而修正前仅为 0.74, 相关关系明显增强。综上所述, 使用修正洛伦兹系数评价储层非均质性在开发领域有着更好的适用性。这对大井段多层合采油藏开发策略的制定及开发层系的划分意义重大。

5 结论

利用数值模拟实验及油藏工程理论分析了传统洛伦兹方法存在的不足, 认为储层采收率对洛伦兹系数的敏感区间较短且在敏感区间内敏感度系数过高。同时洛伦兹系数表征储层非均质性的准确性还会受到洛伦兹曲线形态的影响, 即使洛伦兹系数相同, 但当洛伦兹曲线形态差异较大时所对应的储层采收率仍会存在较大差异。

因此, 对洛伦兹方法进行了修正, 并采用物理模拟实验及油田数据对修正方法的合理性进行了验证, 认为修正后的洛伦兹系数与储层采收率呈显著负相关关系, 可以更好地表征储层非均质性对开发效果的影响。

符号解释

- A ——储层横截面积, m^2 ;
- a, b, c ——系数, 其中 $a + b = 1$;
- a_1 ——与岩石、流体性质有关的常数;
- b_1 ——与地质条件、井网布置、油田管理措施有关或与水驱动态储量有关的常数;
- $e^{c_{\text{va}}}$ ——时变渗透率储层渗透率随注入体积倍数变化表达式;
- $F(S_{\text{wf}})$ ——关于含水率前缘导数的函数, m ;
- $F(S_w)$ ——关于含水饱和度导数的函数, m ;
- F_{∂_i} ——洛伦兹系数敏感度系数;
- h_i ——第 i 个样本点的有效厚度值, m ;
- h_{kmax} ——最高渗层所对应厚度, m ;
- h_{total} ——储层总厚度, m ;
- h_{vmax} ——最高渗流能力小层厚度, m ;
- \bar{h}_v ——小层平均厚度, m ;
- i ——模型序号;
- K^0 ——储层渗透率, mD ;
- K_i ——第 i 个样本点的渗透率, mD ;
- K_{rocv} ——束缚水条件下油的相对渗透率, mD ;
- K_{ro} ——油相相对渗透率;
- K_{rw} ——水相相对渗透率;
- K_{vmax} ——最高渗流能力小层渗透率, mD ;
- \bar{K}_v ——小层平均渗透率, mD ;
- L ——渗流距离, m ;
- L_c ——样本点构成曲线的洛伦兹系数;
- L_c^* ——修正坐标后的洛伦兹系数;
- L_{ci}, L_{cj} ——第 i, j 组模型洛伦兹系数;
- L_{Cmax} ——有限储层洛伦兹系数极大值;
- ΔL_c ——两小层洛伦兹系数的差值;
- m ——样品序号;
- M ——岩样总数, 个;
- M_0 ——流度比;
- N_p ——目标油藏累积产油量, m^3 ;
- N_{pmax} ——单井预测可采储量, m^3 ;
- Δp ——压力梯度, MPa ;
- Δp_o ——纯油区分压, MPa ;
- Δp_{wo} ——油水两相区分压, MPa ;
- Q ——日产液量, m^3/d ;
- R ——渗流阻力, MPa/m^3 ;
- S_{ABCA} ——完全非均质曲线与完全均质曲线所围成的面积;
- S_{ADCA} ——样本点组成曲线与完全均质曲线所围成的面积;
- S_w ——含水饱和度, %;
- ΔS ——含水饱和度差值, %;
- t ——注入时间(注入体积倍数);
- T_{vk} ——储层层间渗流能力突进系数;
- u ——真实渗流速度, m/d ;

v ——渗流速度, m/d;
 W_p ——目标油藏累积产水量, m^3 ;
 x_D ——无因次驱替前缘位置;
 x_f ——油水两相区前缘位置, m;
 x_m ——第 m 个样本点对应的 x 坐标;
 x_m^* ——修正洛伦兹曲线横坐标;
 x_{S_w} ——含水饱和度为 S_w 区域位置, m;
 y_m ——第 m 个样本点对应的 y 坐标;
 y_m^* ——第 m 个样本点对应修正洛伦兹曲线纵坐标;
 $\partial_{L_{\max}}$ ——各对照组中洛伦兹系数最大值对照模型对应采收率, %;
 $\partial_{L_{\min}}$ ——各对照组中洛伦兹系数最小值对照模型对应采收率, %;
 ∂_i ——第 i 组模型对应采收率, %;
 $\partial_i^*, \partial_j^*$ ——第 i, j 组模型对应无因次采收率;
 $\Delta\theta^*$ ——两组模型无因次采收率差值;
 λ_r ——活塞驱替下储层内的相对流度;
 λ_w ——水的流度, $m^3 \cdot s/kg$;
 λ_o ——油的流度, $m^3 \cdot s/kg$;
 μ_o ——油黏度, mPa·s;
 μ_r ——油水黏度比;
 ϕ ——孔隙度。

参考文献

- [1] 蔡晖, 郭书豪, 程林松, 等. 渤海稀油油田多层合采层间干扰室内实验研究[J]. 高校地质学报, 2021, 27(5): 587-592.
 CAI Hui, GUO Shuhao, CHENG Linsong, et al. Experimental study on interlayer interference of multilayer joint development in the Bohai rare oilfield [J]. Journal of Geological Universities, 2021, 27(5): 587-592.
- [2] 郑金定, 张章, 石洪福, 等. 薄互层油藏定向井产量预测方法研究——以渤海 L 油田为例[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(6): 62-66.
 ZHENG Jinding, ZHANG Zhang, SHI Hongfu, et al. Study on production prediction method for thin interbedded reservoir directional wells: taking the L oilfield in the Bohai Sea as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(6): 62-66.
- [3] 李凡, 曹卫东, 孙玉华, 等. 爆燃压裂技术在海上油田定向井多层合采中的应用[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 285-288.
 LI Fan, CAO Weidong, SUN Yuhua, et al. Application of deflagration fracturing technology to multi-layer combined production in offshore directional wells [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(2): 285-288.
- [4] 王晨辉. 海上轻质油藏多层合采层间干扰机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
 WANG Chenhui. Research on interlayer interference mechanism of multilayer joint development of offshore light oil reservoirs [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [5] 卢祥国, 高建崇, 何欣, 等. 层内非均质储层内部窜流规律实验研究——以大庆喇嘛甸油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(5): 118-125.
 LU Xiangguo, GAO Jianchong, HE Xin, et al. Experimental study of internal channeling law of intra-layer heterogeneous reservoir: A case study of Lamadian Oilfield in Daqing [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 118-125.
- [6] 尚墨翰, 赵向原, 曾大乾, 等. 深层海相碳酸盐岩储层非均质性研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 32-49.
 SHANG Mohan, ZHAO Xiangyuan, ZENG Daqian, et al. Research progress on heterogeneity of deep marine carbonate reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 32-49.
- [7] 夏冬冬, 伍岳, 夏冬冬, 等. 鄂尔多斯盆地南缘红河油田长 8 致密油藏非均质性表征方法[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 704-712.
 XIA Dongdong, WU Yue, XIA Dongdong, et al. Characterization method of heterogeneity for Chang 8 tight reservoir in Honghe oil field, southern margin of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(4): 704-712.
- [8] 陈朝兵, 付玲, 南凡驰, 等. 基于不同砂体结构的宏观非均质性评价方法——以鄂尔多斯盆地合水地区长 8 油层组为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 242-249.
 CHEN Zhaobing, FU Ling, NAN Fanchi, et al. Macro-heterogeneity evaluation based on different sand body structures: a case study of Chang 8 reservoir group in Heshui area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 242-249.
- [9] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 870-874, 879.
 YAN Ke, YANG Shaochun, REN Huaiqiang. Quantitative characterization of reservoir macroscopic heterogeneity [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 870-874, 879.
- [10] 李潮流, 周灿灿. 碎屑岩储集层内非均质性测井定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 595-599.
 LI Chaoliu, ZHOU Cancan. Quantitative evaluation method of intra-layer heterogeneity of clastic reservoirs based on logging data [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 595-599.
- [11] 邵先杰. 储层渗透率非均质性表征新参数——渗透率参差系数计算方法及意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 397-399, 404.
 SHAO Xianjie. New parameters for characterizing heterogeneity of reservoir permeability: calculation method and significance of permeability coefficient variation coefficient [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(4): 397-399, 404.
- [12] 王敬, 刘慧卿, 刘松原, 等. 非均质底水油藏水平井水淹规律研究[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 970-974.
 WANG Jing, LIU Huiqing, LIU Songyuan, et al. Study on water flooding law of horizontal wells in heterogeneous bottom water reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 970-974.
- [13] 王增林, 王敬, 刘慧卿, 等. 非均质油藏开发规律研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(5): 63-66, 115.
 WANG Zenglin, WANG Jing, LIU Huiqing, et al. Study on de-

- velopment law of heterogeneous reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(5): 63-66, 115.
- [14] 刘超, 马奎前, 李红英, 等. 基于洛伦兹曲线法定量表征储层非均质性方法的改进与应用[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(2): 36-38, 43.
- LIU Chao, MA Kuiqian, LI Hongying, et al. Improvement and application of quantitative characterization method for reservoir heterogeneity based on Lorenz curve [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(2): 36-38, 43.
- [15] 梁爽, 刘义坤, 金璐, 等. 喇萨杏油田储层非均质性表征新参数——地层系数变异程度[J]. *数学的实践与认识*, 2017, 47(2): 136-141.
- LIANG Shuang, LIU Yikun, JIN Lu, et al. New parameter for characterizing heterogeneity of Lasaxing oilfield reservoirs: variation degree of formation coefficient [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2017, 47(2): 136-141.
- [16] 王庆, 刘慧卿, 殷方好. 洛伦兹曲线在油藏产液、吸水剖面研究中的应用[J]. *特种油气藏*, 2010, 17(1): 71-74, 124.
- WANG Qing, LIU Huiqing, YIN Fanghao. Application of Lorenz curve in research on oil production and water absorption profile of reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2010, 17(1): 71-74, 124.
- [17] 苏雪迎. 洛伦兹曲线在三元复合驱吸水剖面评价中的应用[J]. *中外能源*, 2021, 26(7): 46-51.
- SU Xueying. Application of Lorenz curve in evaluation of water absorption profile of ternary composite drive [J]. *Sino-Global Energy*, 2021, 26(7): 46-51.
- [18] 李祯, 郭奇, 庄天琳, 等. 高含水期油藏油井开发效果评价[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(2): 85-93.
- LI Zhen, GUO Qi, ZHUANG Tianlin, et al. Evaluation of oil well development effect in high water cut period [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(2): 85-93.
- [19] 蔡晖, 石洪福. 多层油藏层间压力变异系数评价方法研究与应用[J]. *天然气与石油*, 2022, 40(3): 75-79.
- CAI Hui, SHI Hongfu. Study and application of evaluation method for inter-layer pressure variation coefficient of multi-layer reservoirs [J]. *Natural Gas and Oil*, 2022, 40(3): 75-79.
- [20] 张润雪, 林伯韬. 非均质超稠油疏松砂岩储层可压性评价[J]. *新疆石油天然气*, 2023, 19(1): 57-64.
- ZHANG Runxue, LIN Botao. Evaluation of compressibility of heterogeneous ultra-heavy oil loose sandstone reservoirs [J]. *Xinjiang Oil and Gas*, 2023, 19(1): 57-64.
- [21] 沈旭东, 刘慧卿, 张郁哲, 等. 基于机器学习的二次采油高耗水层识别方法研究[J]. *钻采工艺*, 2022, 45(4): 74-80.
- SHEN Xudong, LIU Huiqing, ZHANG Yuzhe, et al. Research on identification method of high water consumption layer for secondary oil recovery based on machine learning [J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(4): 74-80.
- [22] 刘慧卿. 高等油藏工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- LIU Huiqing. *Advanced reservoir engineering* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [23] 刘慧卿, 李俊键, 姜汉桥. 油藏工程原理与方法[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2019.
- LIU Huiqing, LI Junjian, JIANG Hanqiao. *Principles and methods of reservoir engineering* [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2019.

编辑 林璐