

# Reviews on Evaluation and Prediction of Low Permeability Reservoirs' Development Index after Infilling Well Pattern

Baojiang Duan<sup>1</sup>, Wei Xiong<sup>1,2</sup>, Shusheng Gao<sup>1,2</sup>, Rui Shen<sup>1,2</sup>, Zhihui Yang<sup>3</sup>, Huan Zhang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Science, Langfang

<sup>2</sup>Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang

<sup>3</sup>Research Institute of North China Oilfield Exploration and Development, Renqiu

Email: duanbaojiang9913@126.com

Received: Apr. 17th, 2012; revised: Apr. 29th, 2012; accepted: May 10th, 2012

**Abstract:** In recent years, the proportion of low permeability reservoirs development is becoming larger and larger in the oil and gas exploration field of our country. Water flooding is the most important way for low permeability reservoirs' effective development. In order to improve the effect of the water flooding development, a lot of low permeability reservoirs are infilled well pattern to enhance oil recovery. This paper deals with the study of effect evaluation of low permeability reservoir by infilling well pattern. The main content is divided into two sections: 1) In order to achieve the best results of oilfield development, different infilling pattern are designed, and then the best program is selected according to the principle of well pattern thickening; 2) After thickening the well pattern, according to the selection principle of oil field development effect evaluation index, an oilfield development indexes system is filtered, and then assess on the impact of development, finally, the oilfield development can be evaluated by predicting the main development index.

**Keywords:** Low Permeability; Well Pattern Infilling; Development Index; Evaluation; Predict

## 低渗透油藏井网加密调整后开发指标评价及预测综述

段宝江<sup>1</sup>, 熊伟<sup>1,2</sup>, 高树生<sup>1,2</sup>, 沈瑞<sup>1,2</sup>, 杨智慧<sup>3</sup>, 张焕<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊

<sup>2</sup>中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊

<sup>3</sup>华北油田勘探开发研究院, 任丘

Email: duanbaojiang9913@126.com

收稿日期: 2012年4月17日; 修回日期: 2012年4月29日; 录用日期: 2012年5月10日

**摘要:**近年来低渗透油藏在我国油田开发中所占的比重越来越大,注水是低渗透油藏有效开发的最重要手段,为了改善注水后期开发效果,很多低渗透油藏采用井网加密调整的手段来达到注水提高原油采收率的目的。本论文主要针对有关低渗透油藏井网加密调整后注水开发效果评价的相关文献进行调研分析。内容主要包括两部分:1)根据井网加密原则针对低渗透油藏设计不同的加密方式,并选择最佳方案,以使油藏开发效果达到最佳;2)低渗透油藏井网加密调整后,根据油藏开发效果评价指标筛选原则,筛选出油藏开发指标评价体系,进而对油藏开发效果进行评价,最终达到对当前注水开发油田的主要开发指标进行预测的目的。

**关键词:**低渗透油藏;井网加密;开发指标;评价;预测

### 1. 引言

低渗透油田的开发在国内外已有悠久的历史,比

如,美国早在1871年就发现了世界著名的勃莱德福低渗透砂岩大油田(油田平均渗透率为 $5\sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ );

我国于 1907 年陆上钻成第一口油井——延长油田 1 号井，它的产层是特低渗透层，其空气渗透率只有  $0.2\sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。随着油田开采历史的延伸和技术的进步，低渗透油田在油气开采中的权重逐年增加。在我国，截至到 2010 年累计探明低/特低渗透原油储量 80.3 亿吨，未动用储量 32.7 亿吨，占比高达 41%。虽然新增储量中，低渗透储量所占比例逐年增加，但由于低渗透层和低渗透油田地质条件极其复杂，开采难度相对较大，因此，低渗透油田的有效开发已是国内外油田面临的一个普遍问题。目前对低渗透油田的开发，其措施主要集中在压裂酸化、注水二次采油、注空气、MEOR 等采油方法和井网加密调整等措施。在这里，本文将着重对低渗透油藏的井网加密和开发效果评价有关的文章进行调研分析。

## 2. 研究现状及发展趋势

在井网加密技术研究方面，关键技术是给出水驱采收率与井网密度关系式。最常用的是前苏联的谢嘉乔夫公式，但该公式未考虑注水方式对采收率的影响，实际计算过程中会产生较大的误差<sup>[2]</sup>。这是因为油层中的油砂体不是连续分布的，因此，在一定井网密度条件下，注水方式不同，油井与水井的多向连通程度也不同，即不同的注水方式将直接影响到井网的水驱控制程度。齐与峰先生提出了水驱控制程度与井网密度、注采井数比关系式，进而又给出了水驱采收率与水驱控制程度关系式，计算精度得到提高<sup>[3]</sup>。该公式在计算低渗透油田采收率时仍然存在问题，主要是由于低渗透油田存在启动压力梯度，且油层渗透率越低启动压力梯度越大，一定井网密度下，部分储层虽然已经水驱控制，但并不能有效动用<sup>[4-6]</sup>，因此，计算低渗透油层采收率时应该考虑启动压力梯度的影响。

在确定合理加密方式研究方面，主要是应用油藏数值模拟方法，计算不同加密方式对开发效果的影响。在数值模拟研究方面，油藏数值模拟软件已基本形成了一整套能处理各种类型油、气藏和各种不同开采方式的软件系列，如 ECLIPSE、CMG 等。这些软件前后处理方便，可视化程度高。

在开发指标预测研究方面，各国各油田都进行了不同程度的研究。前苏联在 20 世纪 40~50 年代就对注水开发指标作了深入研究，并与美国油田开发的主要指标进行对比，提出了适合本国油田开发的指标的

变化范围<sup>[7-11]</sup>。而我国在 20 世纪 50 年代才开始对常规水驱开发油田进行了研究。1978 年我国学者童宪章将水驱规律曲线介绍到我国并得到广泛的应用<sup>[12]</sup>。这些指标的变化情况对油田开发有着重要的指导意义。油田开发指标的预测方法有经验公式法、水动力学方法、物质平衡法、油藏数值模拟方法、通用预测方法等等<sup>[13]</sup>。其中在产量递减预测方面，Arps 递减曲线由于简单易行，操作方便，在我国得到了广泛的应用。对于 Arps 递减方程，国内外许多学者进行多年的研究，获得了一些重要的研究成果，计秉玉运用渗流理论进行了证明<sup>[14]</sup>；王俊魁给出了 3 种递减类型的判断与初始递减率的判定方法<sup>[15]</sup>；裴连君确定了 Arps 曲线与甲型水驱规律曲线的相关性<sup>[16]</sup>；张虎俊也提出了相应的分析方法<sup>[17]</sup>。仅关于双曲递减曲线的描述和预测，根据俞启泰先生的统计和归纳，就可分为 11 大类、52 种单独方法<sup>[18]</sup>。

## 3. 井网加密

### 3.1. 井网加密的作用分析

低渗透油田由于其复杂的地质条件，给开采带来很大的难度。那么这些低渗透油田、含水老油田经过井网加密后，可以带来什么样的效果，井网加密调整在提高原油采收率方面起到哪些作用？很多学者在这方面做出了研究。

目前井网加密是低渗透油田、含水老油田在不能维持稳定产量或产量下降的情况下采取的有效措施。就针对井网加密调整的必要性，殷代印、张强<sup>[19]</sup>作了深入研究。他们研究发现原井网对砂体控制程度差，未建立有效驱动体系，压力传导能力低，油水井生产能力低，采油速度及预测采收率低。而在井网加密后，新老油井具有较高产能，地层压力上升，采油速度提高，自然递减减缓，水驱采收率提高即井网控制储量增加、水驱控制程度增加、水驱有效动用程度增加等优点。同样，胡玉伟<sup>[20]</sup>在其论文中，对井网加密后其产生效果作了阐述。在文章中，提出了五点分析：1) 井网加密能提高水驱控制程度；2) 井网加密能提高最终采收率；3) 井网加密能增加有效驱动压差；4) 井网加密能提高采油速度；5) 井网加密能降低注水压力，减缓套管损坏。

从以上作者对井网加密作用的阐述来看，井网加

密调整效果归纳起来有以下三个方面：一是增加可采储量、提高采收率；二是增加生产能力、提高采油速度；三是降低含水、改善油田开发效果。

### 3.2. 井网加密的部署原则

井网加密调整是已开发油田一项重大调整措施。通过井网加密调整可以从根本上改善水驱控制程度，缩小井距，提高压力梯度使低渗透率油层充分动起来，从而可以较大幅度地改善油田开发效果，提高采收率和采油速度或弥补产量递减。

尽管井网加密调整对油田产量的提升有较大作用，但是也不是越密越好，它遵循一定的原则，以便达到最佳效果。针对加密调整井网的部署原则，1992年于洪文、郑兴范<sup>[21]</sup>在大庆油田北部地区二次井网加密调整研究中提出了四点“充分控制难采储层，减少平面和层间矛盾，强化注采系统，协调新老井关系的均匀布井”。2000年周锡生、李艳华、徐启等<sup>[22]</sup>针对低渗透油藏井网加密的原则进行了阐述。通过对外围低渗透油藏加密井网的分析，确定了井网加密应遵循的原则：一是降低储层渗流阻力，建立有效驱动体系；二是对于裂缝性油藏需要通过井网加密与调整注采系统相结合，最终达到实现线状注水的目的。因不同区块储层渗透性、储量丰度、原始井网、注水方式和采出程度都存在较大差异，能否加密，采用何种方式加密，应由以下具体情况确定。根据这种原则，文章列举了块层间矛盾突出的区、块，剩余油高的区块等六种情况，并进行加密方式分析。2006年王伟、蒲辉、殷代印、高潘青<sup>[23]</sup>通过对大庆外围油田扶、杨储层分析，验证了井网加密应遵循以上原则。2009年胡玉伟<sup>[24]</sup>在其学位论文中认为总的调整原则是以经济效益为中心，通过以加密调整为核心的综合调整，完善注采关系，改变渗流方向，扩大波及系数，提高水驱控制程度和采收率，以达到提高区块开发效果，增加可采储量的目的。2010年王利民<sup>[25]</sup>在其文章中写到井网加密技术界限。他利用水驱控制程度与井距的关系式和采收率与井距的关系式，结合经济评价，确定朝阳沟油田合理井网密度和合理井距。

井网问题一直是油田开发中的一个重要问题，特别是油田注水开发的井网系统。在井网加密后，能否保持油层能量持续稳定生产是石油企业最为关心的问题。通过对井网加密原则的调研，本文认为合理的

井网加密应该满足以下原则：一是有较高的水驱控制程度；二是适应差油层的渗流特点，达到一定的采油速度；三是保证有一定的单井控制储量；四是有较高的经济效益。

### 3.3. 井网加密的方式

井网加密调整是已开发油田一项重大调整措施，可以从根本上或较大幅度地改善油田开发效果，大幅度提高采收率和采油速度或弥补产量递减。那么如何对已开发的油田进行加密就显得至关重要。针对这方面，笔者作了以下调研。

2000年周锡生、李艳华、徐启<sup>[26]</sup>在研究低渗透油藏合理井网加密方式时，谈到以下五种典型情况下应采取的加密方式：1) 常规砂岩油藏首选均匀加密油井；2) 井排方向与裂缝走向成 $11.5^\circ$ ，井网选用油井排加密油井；3) 井排方向与裂缝走向夹角为 $22.5^\circ$ ，井网采取不均匀加密油水井；4) 井排方向与裂缝走向为 $45^\circ$ 井网加密方式必须满足3个条件：一是加密后必须继续实现线状注水；二是井排间因裂缝与基质的渗透性级差大，加密主要目的是缩小排距，降低渗流阻力；三是充分利用裂缝性油藏吸水能力强的特点，使高含水井得以利用，为此，根据加密的排距和井距及注水方式的不同，可以设计不同的加密方式。2008年6月张蕾<sup>[27]</sup>通过对外围杏西、龙26、宋芳屯试验区、祝三试验区、永乐油田肇212和芳908小井眼区等加密方案研究，在应用原有萨葡油层成熟技术基础上，针对外围中高含水区剩余油主要受注水方式控制的实际，研究了6种加密方式(如图1所示)：1) 高含水反九点注水井网采用油井间加密油井转线状注水的调整方式；2) 五点注水井网采用井网中心加密转线状注水的调整方式；3) 七点注水井网采用在油、水井排间加密，转不规则反九点注水的调整方式；4) 中低含水区块采用井网中心加密，初期采用反九点法注水，再转五点或线状注水的调整方式；5) 反九点注水小井眼区采用井网中心加密油水井，老注水井转抽方式；6) 断层两侧采用加密油井不规则注水的调整方式。2010年覃建华、周锡生、唐春荣等<sup>[28]</sup>针对克拉玛依油田砾岩油藏主要存在3种井网形式：反九点井网、反七点(四点)井网、油水井直线正对井网，综合研究认为，有正方形井网采用对角线中点加密油井、老井网角井转注、形成新的反九点注水井网3种井网加密方式(如图2所示)。

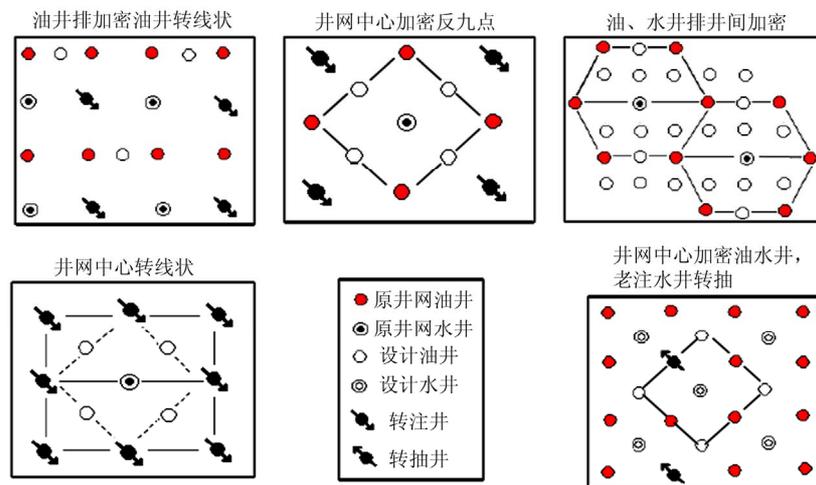


Figure 1. The modes of well pattern thickening In SaPu oil layer of the outer-ring oil field  
图 1. 外围油田萨葡油层井网加密方式图

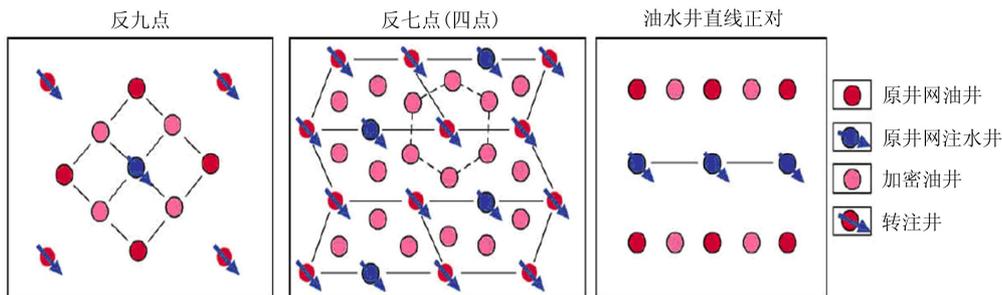


Figure 2. Three modes of well pattern infilling in Karamay conglomerate reservoir  
图 2. 克拉玛依油田砾岩油藏三种井网加密方式

通过对众多作者文章的调研，笔者发现井网加密方式有很多种，如反九点注水井网采用油井间加密油井转线状注水、井网选用油井排加密油井、正方形井网采用对角线中点加密油井等等。根据这些情况，笔者认为井网加密方式并没有某种一成不变的方法。要想达到最佳效果，还得具体情况具体分析。当然上面所列的加密方式也不是不可用，其实完全可以对这些加密方式结合自身油田的实际情况，将其进行稍稍地改变，便可以物尽其用。

#### 4. 井网加密后油田开发指标的确定及其评价

为了准确的评价低渗透油田井网加密调整后的开发效果，选出具有全面性和独立性的指标评价体系，是油田开发必不可少的一个环节。低渗透油田开发涉及到很多的专业和学科，反映低渗透油田开发效果的指标很多。为了更加准确认识低渗透油田井网加

密调整后的开发规律、开发状况，需要系统的提出一套评价指标和评价标准，建立评价体系，有效的判别其开发效果和开发状况，以便于找出这个阶段制约油田开发效果的主要因素，为下一步进行有针对性的开发调整提供依据，这对提高低渗透油田的开发水平，具有重要的意义。

2004年宋子齐、赵磊、王瑞飞等<sup>[29]</sup>针对辽河油区不同类型注水开发油藏的地质特征、开发特点和评价指标分析，利用灰色系统理论，建立了油藏水驱开发效果的综合评价参数和指标，对不同类型油田的开发效果进行了综合评价，对不同开发效果的水驱开发油田提出了开发调整建议，为该区油田开发决策和改善油田开发效果提供了依据。冯其红、吕爱民、于红军等<sup>[30]</sup>针对目前利用流管法建立水驱效果评价理论曲线存在的问题，建立了一套新的评价水驱开发效果的典型曲线。首先，根据相关经验公式确定区块的水驱采收率；再利用童氏校正水驱曲线，建立起含水率与

采出程度的关系(如图 3 所示),在此基础上推导出了存水率随采出程度的变化关系式;最后建立了含水率采出程度和存水率采出程度的典型曲线(如图 4 所示)。根据区块实际的含水率采出程度和存水率采出程度曲线与典型曲线的位置关系,就可以评价区块目前的水驱开发效果。实例应用结果表明,该方法简单可行。2006 年孙伟<sup>[31]</sup>针对能够反映注水开发油田水驱开发状况和开发效果的 12 项开发指标进行了定义解释,并介绍其计算方法。最后根据《油田开发水平分级》行业标准、矿场统计结果、中国石油《油田开发管理纲要》、胜利油田的红旗采油厂评比规定、中国石油注水开发油田“高效开发评价体系”、理论计算结果等标准总结出来了一套适合自己的油田开发指标评价标准。2008 年郭印龙、郭恩常、杨永利等<sup>[32]</sup>以魏岗油田为例,相渗曲线为基础,推导出含水率与采出程

度、含水上升率与含水率、存水率与采出程度及自然递减与含水率四条理论关系曲线(如图 5 所示),将实际曲线同比例地绘制在理论曲线上,从图中可以看出实际的曲线随开采进程逐步接近理论曲线,说明改油田的水驱开发效果较好。2010 年罗二辉、王晓冬、王继强等<sup>[33]</sup>运用灰色模糊理论,针对水驱采收率,水驱储量控制程度,注采对应率,油层动用程度,剩余可采储量采油速度,阶段存水率,水驱指数,含水上升率和自然递减率等 9 个指标进行综合评价。采用灰色关联分析法确定各个指标的权重系数,应用模糊综合评判法对开发效果进行综合评价,从而克服了当前普遍采用的简单的进行综合评价的局限性,既可方便的看出各指标因素的影响大小,指导进一步挖潜,又有利于横向对比,针对不同区块采取不同措施方案。

通过了解众多作者在这一方面的研究,笔者对

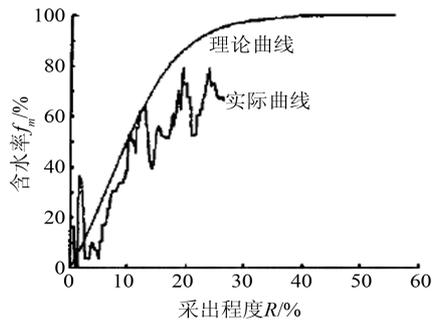


Figure 3. The rating curve of recovery percent and water content  
图 3. 含水率与采出程度评价曲线

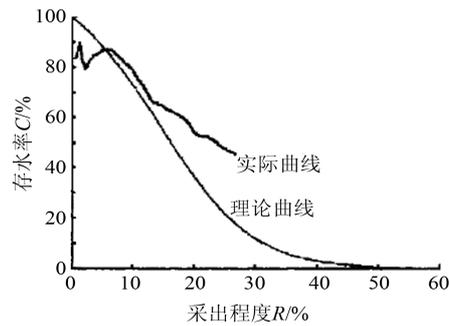


Figure 4. The rating curve of recovery percent and water storage rate  
图 4. 存水率与采出程度评价曲线

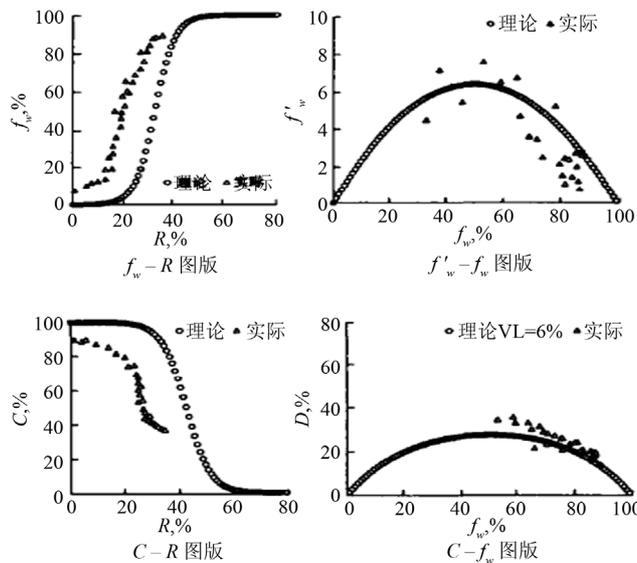


Figure 5. The comparison of theoretical and practical curve  
图 5. 理论曲线与实际曲线的对比

加密后油田开发效果评价有了些想法。笔者认为可以在研究油田产液量、含水率、产油量、开井率等开发指标变化规律的基础上,结合油田的开发状况,运用逻辑分析、矿场统计、灰色关联分析等各种方法,来确定油田开发评价的主要指标,研究各项开发指标的计算方法及界限标准,建立开发评价指标体系,进一步评价油田开发状况、开发效果,为老油田的调整提供科学的决策依据。

## 5. 油田开发指标的预测

油田开发指标预测是油田开发规划设计中首要的、必不可少的环节。预测精度的高低直接影响到规划方案的可信度,对指导油田开发将产生重要的影响。为此,笔者认为根据油田实际资料进行统计分析,在对诸多区块进行曲线拟合对比分析的基础上,得出一种适用于水驱油田开发的年度开发指标预测方法,为油田开发规划方案的编制提供技术保障,才是关键。

经过多年努力,诸多学者在油田开发指标预测上取得不少经验。1998年俞启泰<sup>[34]</sup>首次将 weibull、Gomperts、Logistic 等 3 种增长曲线用于油田开发指标的计算与预测,并提出了一种预测油田开发指标的新型的增长曲线,推导了相应的计算公式,根据研究发现了一个重要的关系,即油田产量达到最大值时对应的累积产量与最大可采储量的比值恒等于 0.5。王俊魁<sup>[35]</sup>将产量衰减曲线与水驱特征曲线结合起来应用,给出了一套较为完整的油田开发指标经验预测方法,既解决了衰减曲线预测中缺少含水率的问题,又解决了水驱特征曲线预测中缺少时间的问题,同时还可以用来预测油田剩余开采年限与油田废弃时的采油速度。陈元千<sup>[36]</sup>将威布尔预测模型和丙型水驱曲线相结合,提出了可以预测水驱油田各项开发指标的方法。这些指标包括:油田的含水率、产油量、产水量和产液量,以及累积产量、可采储量、剩余可采储量、储采比和水驱波及体积系数。纳扎洛夫水驱曲线法和 Logistic 预测模型都是油藏工程中重要的预测方法,但是纳扎洛夫水驱曲线只能预测当油田进入中、高含水期累积液油比和累积产液量之间的关系,而 Logistic 预测模型则只能预测油田累积产油量与时间的变化关系。1999年孙建平、徐学品、杨凤波、谢云龙<sup>[37]</sup>将两者有机结合,提出了一种预测水驱油田开发指标的综合模型。该模型对油田开发全过程的含水率、产

油量、产水量、产液量、累积产油量及累积产液量可以进行预测,实际应用表明:预测结果可靠,精度满足生产要求。乙型水驱特征曲线法是油藏工程中重要的预测方法,但它只能预测累积产水量和累积产油量之间的关系,却不能预测开发指标与开发时间的关系。指数递减预测模型法虽能很好地预测油田产油量随开发时间的变化特征,但却不能预测油田的含水率、产水量、产液量及累积产水量和累积产液量。2008年刘义坤、毕永斌、隋新光<sup>[38]</sup>将乙型水驱特征曲线与指数递减预测模型相结合,提出了一种预测水驱油田进入递减阶段含水率、产油量、产水量、产液量以及相应累积产量和可采储量的联解法,并针对油田进入递减阶段含水率的变化特点对乙型水驱特征曲线预测法进行了改进(如图 6 所示)。该方法克服了乙型水驱特征曲线和指数递减预测模型在动态预测中各自存在的缺点,并提高了含水率预测的精度,为油田进入递减阶段开发指标的预测提供了较好的预测方法。2010年白晓虎、姜汉桥、王硕亮、叶银珠、陈民锋<sup>[39]</sup>研究油田开发动态指标多步预测模型对江苏陈堡油田老井月度产油量的时间序列进行了多步预测,在峰谷处相对误差较大,而峰谷之间预测较好(如图 7 所示)。实例计算表明,该模型具有较强的自适应能力和良好的多步预测效果,能够准确而快速地短期预测油田开发动态指标值。在油藏工程中,为了克服产量预测模型缺少含水率和水驱特征曲线及缺少时间的问题,将产量预测模型公式与水驱特征曲线方程进行联解,建立含水率与开发时间的函数关系,从而预测水驱油田的产油量、产水量、产液量、含水率及相应的累计产量与可采储量。这既保持了这 2 种方法原有的预测功能,又克服了两者的不足。然而,目前的联解模型均是单一类型的产量预测模型与单一类型的水驱特征曲线的联解,在适用范围上有一定的局限性。2011年田鸿照、彭彩珍、于雪琳、刘建升<sup>[40]</sup>将 II 类广义数学模型和 Z 型(张金庆)广义水驱特征曲线进行联解,建立了一种预测水驱油田开发指标随油田开发时间变化的综合预测法,克服了水驱曲线缺少时间特征和预测模型缺少含水率的缺陷,建立了可以预测油田在不同开发时间的产量、累计产量和含水率,以及可采储量的综合预测模型。该方法比现有的联解法具有使用范围广,预测精度高的优点,适用于不同类型油藏的开发指标预测。

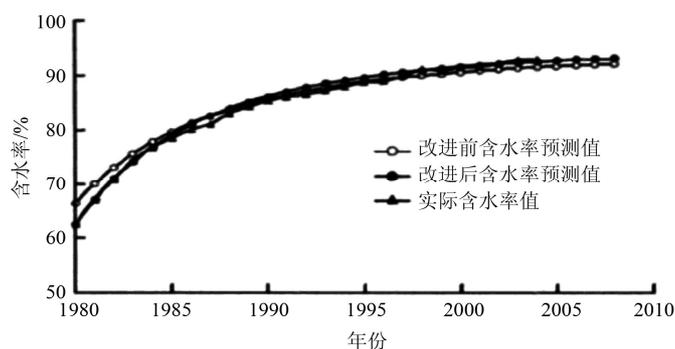


Figure 6. The comparison of actual value and water content before and after improvement  
图 6. 改进前及改进后含水率与实际值对比

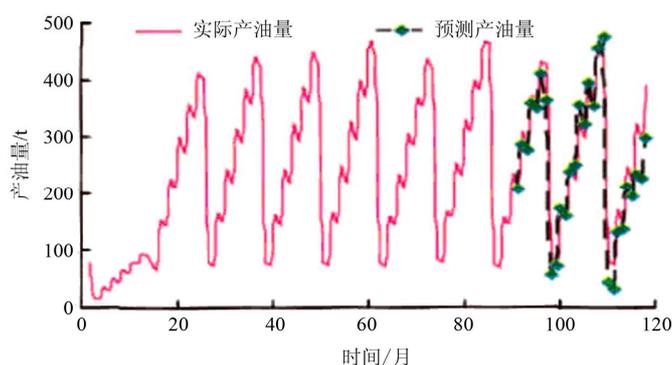


Figure 7. The curve of oil production models  
图 7. 产油量模型曲线

目前国内外预测开发指标的方法很多,比较常用的方法有数值模拟法、递减曲线法和水驱特征曲线法等。虽然预测开发指标的方法较多,但是这些方法都有其自己的局限性。通过对指标预测方法相关文献的调研,笔者发现如果将这些预测方法彼此来弥补对方的不足,倒不失为一种解决问题的好方法。如水驱特征曲线法只能预测累积产水量和累积产油量之间的关系,却不能预测开发指标与开发时间的关系;递减预测模型法虽能很好地预测油田产油量随开发时间的变化特征,但却不能预测油田的含水率、产水量、产液量及累积产水量和累积产液量。若将两者结合起来,就可以克服各自的缺点,从而更加完善。王俊魁应用其论文中得方法,对小井距4个井层以及喇嘛甸油田纯油区中块、萨尔图油田中区西部、南二、三区葡一组油层和杏北过渡带开发后期的主要开发指标进行了预测,预测实践表明,将产量衰减曲线与水驱特征曲线结合起来应用,可以弥补各自的不足,为油田开发后期动态指标的预测提供有效的方法,以指导油田的合理开发。同样田鸿照以大庆油田的南二三开

发区葡I组为例,将油田开发指标预测中的II类广义数学模型与Z型水驱特征曲线进行联解,克服了水驱曲线缺少时间特征和预测模型缺少含水率的缺陷,建立了可以预测油田在不同开发时间的产量、累计产量和含水率,以及可采储量的综合预测模型。实例计算表明,预测值与实际值符合程度较好,验证了该方法的实用性与有效性。

## 6. 结语

1) 根据井网加密部署原则,设计油田井网最佳的加密方案,从而达到较大幅度地改善油田开发效果,大幅度提高采收率和采油速度或弥补产量递减的目的。

2) 通过逻辑分析以及数值模拟等方法对低渗透油田井网加密后的开发指标进行筛选,确定开发指标,开发效果综合评价体系,完善了低渗透油田井网加密后开发效果评价的数学依据。

3) 递减曲线法和水驱特征曲线法都是预测油田开发指标常用方法,但都有各自的局限,将两者有机

结合,从而达到一种比较完善的预测方法。

## 参考文献 (References)

- [1] 李娜, 乔文龙, 曹菁. 国内外低渗透油田研究与开发技术[J]. 新疆油田公司勘探开发研究院科技信息中心, 2001: 3-5.
- [2] 于成龙, 李慧敏, 赵敏, 罗池辉. 水驱油田井网加密合理井数的计算方法研究[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 111-113.
- [3] 李莉. 窄条带砂体随机模拟井网优化布置开发[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 22-23.
- [4] 周锡生等. 低渗透油藏合理井网密度确定方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2000 19(5): 20-22.
- [5] 李忠平等. 低孔低渗油藏合理井网密度确定方法[J]. 河南石油, 2001, 15(4): 19-20.
- [6] 张盛宗. 合理选择注采井网的动态研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1994, 13(2): 29-30.
- [7] G. W. Voneiff, et al. A new approach to large-scale infill evaluations applied to the ozona (CANYON) gas sands. 1996, Article ID SPE35203.
- [8] G. Coskuner, et al. Optimizing field development through infill drilling coupled with surface network a case study of low permeability gas reservoir. 1996, Article ID SPE36705.
- [9] J. D. Y. Lopes, et al. An integrated reservoir study to improve field performance. 1998, Article ID SPE39843.
- [10] H. Harstad, et al. Potential for infill drilling in a naturally fractured tight gas sandstone reservoir. 1998, Article ID SPE39911.
- [11] R. Hans-Henrik, et al. Cost-effective development of qatar's Al Shaheen field through continuous drilling optimization. 1999, Article ID SPE57573.
- [12] 童宪章. 油井和油藏动态分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981: 56-60.
- [13] 计秉玉. 油田开发指标预测方法综述[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(2): 19-33.
- [14] 计秉玉. 产量递减方程的渗流理论基础[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 86-91.
- [15] 王俊魁, 万军, 高树棠. 油气藏工程方法研究与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 9-10.
- [16] 裴连君, 王仲林. Arps 递减曲线与甲型水驱曲线的相关性及参数计算[J]. 石油勘探与开发, 1996, 26(3): 62-65.
- [17] 张虎俊, 刘世平. 油气藏产量双曲线递减方程求解的新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 1997, 16(4): 33-36.
- [18] 俞启泰, 阵素珍, 李文兴. 水驱油田的 Arps 递减规律[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(2): 150-153.
- [19] 殷代印, 张强. 朝阳沟油田朝 55 区块井网加密研究[J]. 断块油气田, 2009, 16(2): 70-72.
- [20] 胡玉伟. 榆树林油田东 16 井区开发效果评价及井网加密调整研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
- [21] 周锡生, 李艳华, 徐启. 低渗透油藏井网合理加密方式研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 20-23.
- [22] 王伟, 蒲辉, 殷代印, 高潘青. 低渗透油田井网合理加密方式探讨[J]. 小型油气藏, 2006, 11(2): 33-34.
- [23] 胡玉伟. 榆树林油田东 16 井区开发效果评价及井网加密调整研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
- [24] 王利民. 朝阳沟低渗透油田井网加密方法研究[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(4): 8-10.
- [25] 于洪文, 郑兴范. 大庆油田北部地区二次井网加密调整研究[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(4): 52-60.
- [26] 周锡生, 李艳华, 徐启. 低渗透油藏井网合理加密方式研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 20-23.
- [27] 张蕾. 大庆外围低渗透油田综合调整措施研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
- [28] 覃建华, 周锡生, 唐春荣, 金春海, 李敏, 屈怀林, 祖琳·克拉玛依. 砾岩油藏高含水区块井网加密潜力[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(3): 269-272.
- [29] 宋子齐, 赵磊, 王瑞飞, 陈荣环, 康立明, 白振强. 一种水驱开发效果评价方法在辽河油田的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(3): 17-22.
- [30] 冯其红, 吕爱民, 于红军, 马瑞国. 一种用于水驱开发效果评价的新方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 58-60.
- [31] 孙伟. 特高含水期油田开发评价体系及方法研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2006.
- [32] 郭印龙, 郭恩常, 杨永利, 曾俊, 刘京军, 金丽琼. 一种新的水驱开发效果评价体系[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(5): 67-68.
- [33] 罗二辉, 王晓冬, 王继强, 王建. 基于灰色模糊理论的水驱开发效果综合评价[J]. 新疆石油天然气, 2010, 6(2): 30-34.
- [34] 俞启泰. b' 型增长曲线预测油田开发指标方法[J]. 断块油气田, 1998, 6(2): 21-24.
- [35] 王俊魁. 油田开发指标经验预测方法[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(4): 321-324.
- [36] 陈元千. 水驱油田开发指标的预测方法[J]. 断块油气田, 1998, 5(3): 29-33.
- [37] 孙建平, 徐学品, 杨凤波, 谢云龙. 油田开发指标预测的一种综合模型[J]. 河南石油, 1999, 13(2): 12-14.
- [38] 刘义坤, 毕永斌, 隋新光. 高含水后期油田开发指标预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(1): 58-60.
- [39] 白晓虎, 姜汉桥, 王硕亮, 叶银珠, 陈民锋. 油田开发动态指标多步预测模型研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 345-347.
- [40] 田鸿照, 彭彩珍, 于雪琳, 刘建升. 水驱油田开发指标的综合预测法[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 238-240.