

用系统动力学方法研究油藏管理

范智慧, 李 阳

(中国石油化工股份有限公司, 北京 100728)

摘要:油藏管理是实现油田高效开发的重要途径, 是一项系统工程。该文引入系统工程中的系统动力学方法研究油藏管理, 将油藏管理视为一个系统, 开展系统分析和系统结构研究, 指出油藏管理系统由油藏资源、生产(管理)、技术(管理)、组织管理等 4 个分系统组成。选取油藏资源与生产管理分系统为研究重点, 对其相互作用机理进行研究, 并在此基础上构建生产—资源复合系统的系统动力学仿真模型, 并以 SL 等油田的实际数据和资料进行仿真实验, 分析采收率、年勘探开发总投资、新增探明地质储量、年原油产量、储采平衡率等油藏管理关键指标之间的关系, 就如何确定合理的原油产量和储量目标、提升油藏管理水平, 提出了“合理原油产量目标是关键、优化勘探开发投资比例和聚焦提高采收率”的相关建议。

关键词:油藏管理; 系统工程; 系统动力学; 仿真研究

中图分类号: TE11

文献标识码: A

Reservoir management using system dynamics method

Fan Zhihui, Li Yang

(SINOPEC, Beijing 100728, China)

Abstract: Reservoir management is an important way to improve the development efficiency of an oil field. Reservoir management is also considered as system engineering. This paper introduces a method of system dynamics in system engineering of reservoir management. Regarding reservoir management as a system, system analysis and system structure research were carried out. The reservoir management system was divided into four subsystems, as reservoir resources, production, technology, and management organization. This paper focused on the interaction mechanism of the reservoir resources and production subsystems. A system dynamics simulation model of production resource system was established. Actual data collected from the SL oil field were input into the simulation model to study the relationship between recovery, investment of exploration and development, new found proven geological reserves, production, and a balanced ratio of reserve-production. Recommendations on how to improve reservoir management, determine reasonable oil production and reserves were brought forward. Reasonable crude oil production target is a key factor, the proportion of investment and development should be optimized, and oil recovery must be focused on.

Key words: reservoir management; system engineering; system dynamics; simulation research

20 世纪 70 年代油藏管理概念首次被提出, 油藏管理以多专业协作为核心, 作为提高综合效益的一种途径不断得以发展和完善。国内外各大石油公司在广泛采用新勘探开发和信息技术的同时, 也积极变革内部管理模式, 通过油藏管理提高老油田经济可采储量^[1-4]。许多学者对油藏管理内涵也做了界定, 其中具有代表性的 Thakur^[5], 将油藏管理定义为正确运用各种技术以求达到获利最大和经济采收率最高的目的。Satter 等^[6]把油藏视为自然资源, 油藏管理通过各种手段进行认识并开发, 以获得最大经济效益。Woods 等^[7]认为油藏管

理是油藏开发和策略不断优化的动态过程。杜志敏等^[8]认为, 油藏经营管理即有效地利用各种类型的资源, 制定和实施油藏经营策略, 寻求最佳方案, 把经营管理策略和油田开发技术紧密结合, 实现油田开发的工程优化和经济优化。从各位学者对油藏管理的界定来看, 油藏管理研究的核心问题是决策优化。尽管各位学者对要达到的目标和采用的途径论述不一, 但是这些决策过程都体现出多目标和多影响因素的特征。

从油藏管理实践看, 系统工程中的分析工具和技术已被普遍引入到油田开发工程以及管理决策

中,如灰色模型、运筹学、AHP 模型等系统工程方法,但主要是解决具体工程技术问题,而没有从系统思想及方法论角度整体研究油藏管理。本文运用系统思想将油藏管理作为一个整体系统进行剖析,提出油藏管理系统概念,将系统论中的动力学研究方法应用于油藏管理数值模拟研究。

1 油藏管理系统分析

1.1 油藏管理系统概念的提出

油藏管理是一项复杂的系统性工程,其表现为:一是油藏管理涉及专业众多,包括勘探、开发、工程(采油及地面)、经济等学科和专业,这些专业互相提供着信息,也相互存在制约;二是对油藏资源认识的模糊性,特别是地质认识往往是建立在概率论基础上的大概率事件;三是油藏管理受其所处社会、政治、经济、地理、人文环境影响较大。可以看出,油藏管理决策是非线性复杂的决策过程。综合国内外学者研究成果,结合油藏管理实践提出油藏管理系统的概念如下:油藏管理系统是将油藏视为一种资源资产,通过充分认识油藏特征和规律,高效整合各种人、财、物资源,对油藏进行科学决策和管理,从而实现经济可采储量最大化、资源资产保值增值的资源—技术—经济复合系统。

1.2 油藏管理系统的结构解析

在油藏管理系统概念的基础上,构建油藏管理系统,由人工系统和自然系统组成。人工系统包括组织管理分系统、生产(管理)分系统、技术(管理)分系统;自然系统为油藏资源分系统(图1)。

组织管理、生产管理和技术管理分系统之间存在着信息、量交换以及控制关系。人工系统对自然系统的控制由生产管理分系统及技术管理分系统实现,这2个分系统与油藏资源分系统直接相互作用,组织管理分系统主要通过这2个分系统对油藏

资源分系统发挥间接作用。

油藏资源组成的油藏资源分系统是一个自然系统,是人工系统改造控制的对象,对油藏资源分系统的高效控制是油藏管理系统的目标。从生产实践看,生产管理分系统直接作用于油藏资源分系统,其关系最为直接,也最为紧密,2个分系统之间存在着复杂的作用与反作用,以及大量信息交互。因此,本文重点研究生产管理分系统与油藏资源分系统的相互作用机制,结合油藏管理实践情况建立生产—油藏复合系统(图1中椭圆虚线框所示)的动力学仿真模型。

2 油藏管理系统动力学研究方法

2.1 系统动力学概述

系统动力学是美国麻省理工大学史隆管理学院 Forrester 于 1950 年代综合了系统论、控制论、伺服机械学、信息论、决策论以及电脑模拟所发展出来的,是一种研究复杂系统中反馈行为的仿真方法^[9],从系统的整体性功能出发,对系统内部结构进行分析,并研究相关影响因素,将定量模拟与定性分析相结合,在信息非完备条件下对复杂系统问题进行数值分析和求解^[10]。

系统动力学模型模拟按照系统论观点,实质上是结构—功能模拟,其数学规范表达式^[11-12]如下:

$$\dot{L} = TR$$

$$\begin{pmatrix} R \\ A \end{pmatrix} = W \begin{pmatrix} L \\ A \end{pmatrix}$$

式中: L 为状态向量; R 为速率向量; A 为辅助变量向量; \dot{L} 为纯速率向量; T 为转移矩阵; W 为关系矩阵。通常 \dot{L} 是各速率向量 R 的组合, T 为变系数或常值阵; W 为变系数阵,它反映变量 L 与 R 之间以及 A 本身在同一时刻的非线性关系。

由于油藏管理具备系统动力学研究对象的基本特征——抉择性、自律性和非线性,因此将系统动力学应用在油藏管理研究领域是理论上可行的。油藏管理决策本质上是人对自然资源的开发决策问题,其复杂性体现在开发过程涉及大量信息的获取处理,而决策目标通常也是多元化的,在某个时点必须对主要矛盾进行优先解决和处理,由此可见油藏管理具有抉择性。油藏管理过程是在多种学科协作条件下由多个阶段组成,从原始资料的获取,到油藏地质认识的形成、开发策略的确定、开发工作量的实施,这个过程循环往复,是不同学科协

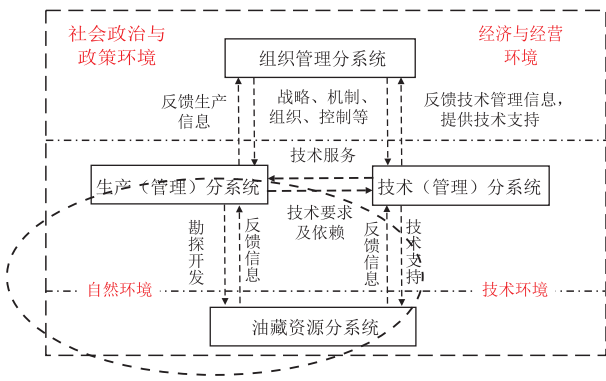


图1 油藏管理系统结构示意图

Fig.1 Structure of reservoir management system

同不断改进开发手段和策略的多环节长期过程,因此油藏管理具有自律性。此外,由于油藏管理资源对象地质信息的不确定性,任何一项开发决策的实施及效果体现都有一定周期,因此油藏管理问题也是非线性问题。

2.2 油藏管理系统的反馈关系

油藏管理系统中存在大量复杂的反馈关系,生产管理油藏资源复合系统内部要素反馈关系结构如图 2 所示。与一般系统一样,油藏管理系统也存在 2 种反馈形式:一种是负反馈,油藏管理系统的输出对输入起到反向作用,使输出与目标期望值缩小,油藏管理系统趋于稳定;另一种是正反馈,油藏管理系统的输出对输入起到正向作用,使输出与目标期望值增大,具有一定的控制放大作用。在油藏管理系统中,对负反馈的研究是油藏管理系统控制的核心问题。

2.2.1 生产管理分系统内部因果关系分析

生产管理过程是对油藏管理系统的目标和功能实现具有直接作用效果的重要管理环节,涉及众多的资源、技术和管理要素。生产管理分系统诸要素因果反馈关系以“勘探开发总投资—新增原油产能—原油产出量—储采平衡率—年勘探开发总投资”的基本生产过程为核心,油气开发投资形成油气资产和固定资产,年新增原油产能也相应增加,同时年新增产能经过延迟,以一定的产能贡献

率形成当年新增原油产量,新增原油产量计入年原油产出量,而年原油产出量的变化影响储采平衡率,储采平衡率与勘探投资比例的增长共同影响勘探综合投资决策,在勘探开发总投资额度总量相对固定的情况下,勘探投资的变化将会经过一定的延迟影响开发投资额度,这样就形成了生产管理过程的基本因果反馈回路,形成整体稳定的负反馈回路,具有系统自稳定性。

2.2.2 油藏资源分系统内部因果关系分析

油藏资源分系统首先是一个自然系统,客观存在于地下,是油藏管理者进行评价、预测、开发的对象。通过各种技术手段,油藏客体的真实被不断揭示,因此油藏资源分系统在事实上属于实体—概念复合系统。

选取储采比、综合递减率、自然递减率、采收率等参数表征油藏资源分系统,主要理由如下:自然递减率是描述油藏开发规律的重要指标,一方面它反映了油藏开发阶段,比如可以通过自然递减率间接判断油藏含水的阶段,也可以判断采油速度合理性;另一方面自然递减率是计算油藏产能的必备参数。地层压力反映的是油藏能力状况,可以较综合地反映油藏的生产情况,其变化反映的是油藏能量的变化,油藏能量则直接影响原油产出量,油藏能量变化受到井网、注采比等多因素的影响。采收率指标更加综合,其很大程度上反映的是油藏地质特

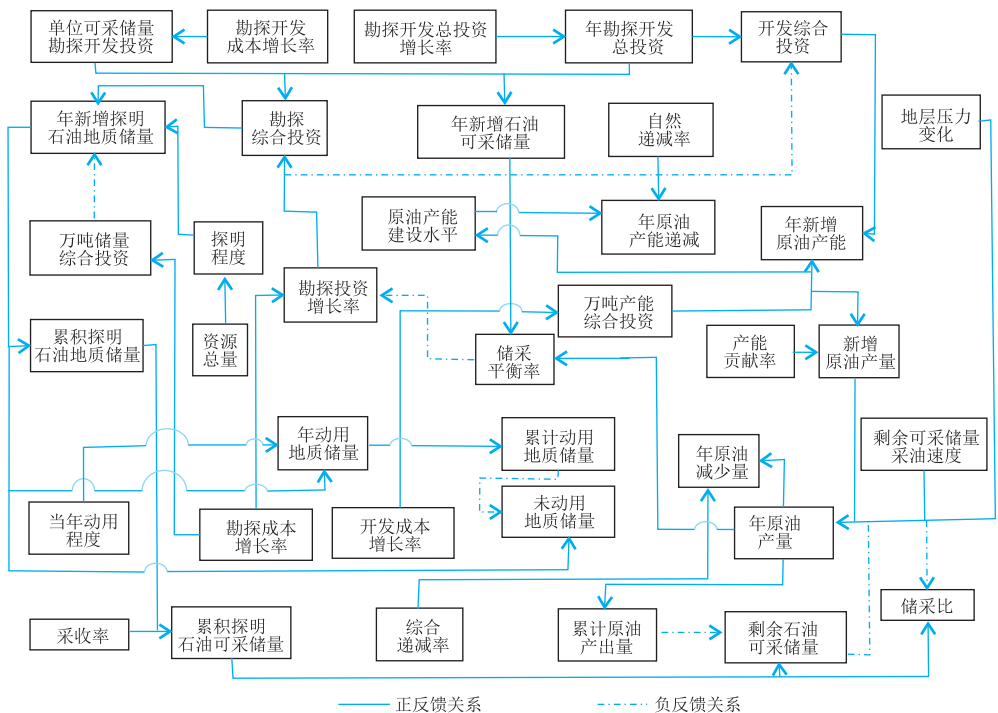


图 2 生产管理分系统—油藏资源分系统之间因果反馈关系

Fig.2 Relationship between production management and reservoir resource subsystems

征,比如整装砂岩油藏通常比低渗透断块油藏有着更高的采收率,但采收率也不完全决定于先天因素,还受开发技术、开发政策、开发管理等其他因素影响。所选取指标一方面反映了油藏的自然特征,另一方面是油藏资源分系统内部复杂结构功能的外显。

对油藏资源分系统的反馈回路进行梳理,其大反馈回路是负反馈,加大投入通常总是能够深化油藏认识,使油藏评价的不确定性减小,系统目标得以不断实现。同时,也存在局部正反馈,正反馈将导致系统的不稳定,这些局部的正反馈并不改变油藏资源分系统作为整体负反馈回路的性质,但是体现了油藏资源分系统的复杂性。

2.2.3 油藏资源—生产管理分系统联合回路分析

油藏资源—生产管理分系统联合回路是人与自然结合的复合系统,油藏管理通过实施各种措施对油藏施加影响,油藏资源分系统表征参数随之改变。

系统动力学构建的回路分析技术可以较有效地解决一些复杂因果问题,比如确定勘探开发投资合理比例的问题。假定总投资额一定,增加勘探投

资比例,则新增储量增加,剩余可采储量也相应增加,开发生产根据某一合理的采油速度,基于总剩余储量扩大开发投资比例进行产建,原油产出量也将一定延迟后得到增加,原油产量的增加将使储采平衡率呈现下降趋势。储采平衡率的下降与单位发现成本的增加使油藏管理者决策确定新的勘探投资增长的比率,从而勘探投资的占比相应调整。从长远发展的角度出发,必须认识到这样一个回路:要减少储采平衡率,可能暂时需要降低给定总投资中开发投资的比例,经过一段时间后(系统延迟)新增储量增加,原油产能和原油产量都得到提高。这个回路是无限循环的,勘探开发投资比例变化具有一定周期性,总体上为负反馈回路,通过调整勘探开发投入的比例实现油藏高效开发是油藏管理的重要内容。

3 生产—油藏分系统仿真模型

对油藏资源和生产管理分系统内部要素之间的因果反馈关系进行剖析,构画反馈关系模型,形成生产—油藏分系统的动力学仿真流图(图3)。

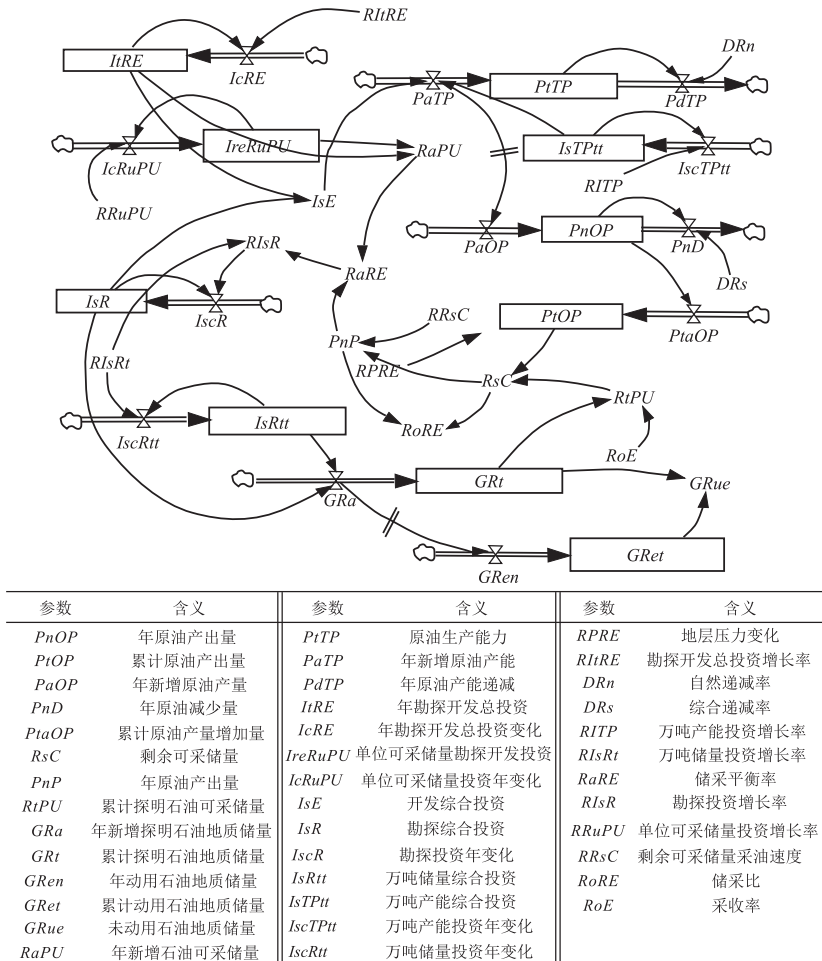


图3 生产—油藏系统的仿真流图

Fig.3 Flow chart of production-reservoir system

图 3 是生产—油藏复合系统的系统结构和动态特征的直观形象表示,构画了 2 个分系统内部结构以及分系统因素之间的关系及相互作用机制。

基于以上动力学仿真模型进行数值模拟,改变生产管理—油藏资源复合系统的关键参数,包括年新增探明石油地质储量、剩余可采储量、采收率、原油产出量、储采平衡率、自然递减率和原油产能建设水平等,系统功能得以定量化表征,从而可以对油藏管理系统进行定量化趋势预测。

4 油藏管理系统的动力学仿真分析

4.1 系统动力学仿真软件

可以进行系统动力学模拟的软件主要有 VENSIM、STELLA 和 Model Maker 等。本文主要使用 VENSIM 进行仿真实验,通过图形化界面以 DYNAMO 语言编程,构建各因素间的关系,表征系统功能。

4.2 仿真模型有效性检验

新增探明地质储量、原油产出量、储采平衡率是油藏管理重要的评测指标,以这 3 个变量作为仿真模型研究和校验的切入点,可以较全面从技术角度评价油藏管理的绩效。以 SL 油田为实例进行动力学仿真模型的模拟运算,模拟与实际数据差异分析见表 1。

从表 1 中可以看到,年新增探明地质储量、年原油产出量、储采平衡率 3 个因素误差控制在 5.0% 以内,数据拟合程度较好,模型通过有效性检验,所建模型比较可靠。由各因素构建的复合系统模型可以模拟油藏管理系统结构功能,符合油藏管理的实际情况,可以用于仿真实验。

油田的油藏类型是多样的,还需要验证所建系统动力学模型是否能够有效模拟不同类型油藏。

选择断块油田 DX 和整装油田 GD,为便于参照,继续考察新增探明地质储量、年原油产出量、储采平衡率 3 个决策变量,将 1996—2008 年 DX 和 GD 油田的实际数据输入模型,经过多次拟合,数据结果整理为表 2 和表 3。系统模拟的误差控制在 5.0% 以内,这表明运用系统动力学方法建立的模拟模型适用于不同油藏类型。

4.3 仿真模型的灵敏度分析

利用该模型可以进行单因素变化分析,以调整单因素年勘探开发总投资为例,以年原油产出量、新增探明地质储量、储采平衡率 3 个参数作为输入变量,结果如表 4 所示。

由表 4 的模拟结果可知,新增探明地质储量、年原油产出量与储采平衡率与年勘探开发总投资都是正相关关系,3 个变量随着勘探开发总投资的增加而增长,其中新增探明地质储量最灵敏,年原油产出量和储采平衡率其次。储采平衡率是前 2 个指标共同作用的结果,也就是其决定于储量发现、产能建设和原油生产,因此变化幅度较小。

设定不同的采收率预期目标,保持其他参数不变,用该仿真模型进行模拟,输出年原油产出量、自然递减率、储采平衡率的变化,结果如表 5 所示。

由表 5 的模拟结果可以看出,自然递减率与采收率之间具有负相关性,年原油产出量与储采平衡率与采收率之间都是正相关性。在不同的采收率预期下,3 个变量需要的变化幅度不同,对灵敏度绝对值大小进行排序,依次是自然递减率变化量、年原油产出量、储采平衡率。

5 结论与建议

将油藏资源分系统作为实体—概念复合系统,

表 1 SL 油田 1996—2008 年油藏勘探开发变量模拟对比

Table 1 Comparison of reservoir exploration and development variables in SL oilfield from 1996 to 2008

年份	年原油产量/ 10^4t			新增探明地质储量/ $(10^4\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$			储采平衡率/%		
	实际	模拟	相对误差/%	实际	模拟	相对误差/%	实际	模拟	相对误差/%
1996	2 912	2 955	1.50	10 396	10 290	-1.00	82.0	81.3	-0.90
1997	2 801	2 878	2.70	11 710	11 593	-1.00	102.9	100.8	-2.00
1998	2 713	2 775	2.30	10 430	10 135	-2.80	102.1	104.5	2.40
1999	2 665	2 664	0.00	10 418	10 569	1.40	125.7	126.1	0.30
2000	2 676	2 641	-1.30	10 669	10 735	0.60	101.1	101.8	0.70
2001	2 668	2 798	4.90	11 354	11 859	4.40	103.8	105.3	1.40
2002	2 682	2 599	-3.10	11 885	11 579	-2.60	103.5	103.1	-0.40
2003	2 666	2 582	-3.20	12 315	12 106	-1.70	104.2	104.2	0.00
2004	2 674	2 602	-2.70	11 144	11 025	-1.10	105.8	106.0	0.20
2005	2 695	2 599	-3.60	10 621	10 521	-0.90	161.8	155.7	-3.80
2006	2 742	2 732	-0.40	10 339	10 542	2.00	119.6	116.1	-2.90
2007	2 770	2 695	-2.70	10 677	10 442	-2.20	104.0	105.4	1.30
2008	2 774	2 702	-2.60	10 408	10 346	-0.60	104.0	103.0	-1.00

表2 整装油田GD 1996-2008年油藏勘探开发变量模拟对比

Table 2 Comparison of reservoir exploration and development variables in GD oilfield from 1996 to 2008

年份	年原油产量/ 10^4t			新增探明地质储量/ $(10^4\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$			储采平衡率/%		
	实际	模拟	相对误差/%	实际	模拟	相对误差/%	实际	模拟	相对误差/%
1996	391	384	-1.80	70	67	-4.30	94.6	98.2	3.80
1997	361	376	4.20	261	256	-1.90	116.5	111.3	-4.50
1998	348	334	-4.00	36	37	2.80	30.5	31.9	4.60
1999	348	360	3.40	0	0	0.00	81.0	85.3	5.30
2000	355	347	-2.30	174	176	1.10	147.3	143.6	-2.50
2001	358	347	-3.10	343	356	3.80	100.0	96.7	-3.30
2002	354	342	-3.40	207	216	4.30	116.8	121.9	4.40
2003	351	367	4.60	0	0	0.00	87.7	86.9	-0.90
2004	352	369	4.80	628	622	-1.00	129.4	129.9	0.40
2005	355	351	-1.10	872	830	-4.80	73.7	70.6	-4.20
2006	354	341	-3.70	55	53	-3.60	100	97.1	-2.90
2007	340	349	2.60	0	0	0.00	97.6	94.2	-3.50
2008	331	316	-4.50	240	231	-3.80	100.3	96.3	-4.00

表3 断块油田DX 1996-2008年油藏勘探开发变量模拟对比

Table 3 Comparison of reservoir exploration and development variables in DX oilfield from 1996 to 2008

年份	年原油产量/ 10^4t			新增探明地质储量/ $(10^4\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$			储采平衡率/%		
	实际	模拟	相对误差/%	实际	模拟	相对误差/%	实际	模拟	相对误差/%
1996	238	230	-3.40	371	365	-1.60	94.6	98.2	3.80
1997	226	234	3.50	315	304	-3.50	116.5	114.9	-1.40
1998	216	208	-3.70	645	662	2.60	30.5	30.1	-1.30
1999	217	227	4.60	0	0	0.00	81.0	83.6	3.20
2000	217	208	-4.10	443	424	-4.30	147.3	149.8	1.70
2001	216	208	-3.70	620	608	-1.90	100.0	104.3	4.30
2002	216	214	-0.90	385	369	-4.20	116.8	120.4	3.10
2003	216	223	3.20	327	315	-3.70	87.7	89.4	1.90
2004	203	211	3.90	230	236	2.60	129.4	130.9	1.20
2005	197	192	-2.50	167	163	-2.40	73.7	76.2	3.40
2006	193	185	-4.10	87	85	-2.30	100.0	104.6	4.60
2007	189	180	-4.80	61	63	3.30	97.6	97.5	-0.10
2008	184	181	-1.60	233	242	3.90	100.3	100.7	0.40

表4 年勘探开发总投资对其他关键变量的灵敏度分析

Table 4 Sensitivity analysis of total investment in exploration and development to other key variables

项目	变化比率								
	%								
年勘探开发总投资变化量	-10.00	-8.00	-5.00	-2.00	2.00	5.00	8.00	10.00	
新增探明地质储量变化量	-4.83	-3.88	-2.46	-1.17	1.28	2.60	4.33	5.48	
年原油产出量变化量	-3.22	-2.52	-1.64	-0.80	0.91	1.71	2.55	3.12	
储采平衡率变化量	-0.81	-0.75	-0.40	-0.22	0.24	0.57	0.91	1.16	

表5 采收率对其他关键变量的灵敏度分析

Table 5 Sensitivity analysis of recovery to other key variables

项目	变化比率								
	%								
采收率变化量	-10	-8	-5	-2	2	5	8	10	
自然递减率变化量	16.82	12.10	7.44	2.70	-2.00	-6.70	-10.22	-16.10	
年原油产出量变化量	-9.01	-7.04	-4.59	-2.17	2.46	4.64	7.49	9.17	
储采平衡率变化量	-2.87	-2.11	-1.21	-0.65	0.61	1.24	2.07	2.81	

在进行生产管理—油藏资源分系统整体反馈回路描述时考虑油藏的渗流特征参数,适应不同油藏类型不同开发阶段的特征,为油藏管理模拟预测提供了一种可靠、实用的方法。基于本文以上动力学模拟研究,对油藏管理提出 3 个建议:

(1)合理原油产量目标是关键。从系统动力学角度分析,原油产量不仅仅影响当期收入和利润,实际上对油藏管理未来发展也具有深远影响,因此油藏管理首先要从实际环境出发,建立油藏管理新模式,在此基础上确定合理的原油产出量目标,实现油藏管理的可持续发展。

(2)优化勘探开发投资比例。油田应该在控制并降低发现成本的基础上,加大勘探综合投资力度。也就是说,即使在当前低油价下,总投资保持一定情况下,要保证油藏勘探工作量和效果来维持油田的可持续发展。如以 SL 油田为例,其应维持年新增探明地质储量 1 亿吨左右。

(3)聚焦提高采收率。系统动力学模型的灵敏度分析已经指出,采收率与原油产出量、储采平衡率和自然递减率都密切相关,通过加大投资力度、增加年原油产量、提高储采平衡率、加强现场技术管理减缓自然递减,对采收率提高具有非常重要的意义,这也是实现油田可持续发展的重要基础。

从系统的整体性出发,采用复杂系统的研究方法,分析其结构,构建其功能模拟,把油藏管理系统的功能视为其内部因素结构化的结果,再充分考虑系统外部社会、资源、经济等因素的制约和影响,全面研究油藏管理,这样构建起来的研究方法体系,可为油藏管理研究提供新的方法,也为石油工业发展和油田企业管理提供新的借鉴。

参考文献:

[1] 计秉玉,董焕忠,万军.油藏管理工程:一门亟待建立和发展的学科[J].大庆石油地质与开发,1998,17(3):43-45.
Ji Bingyu, Dong Huanzhong, Wan Jun. Reservoir management engineering: A subject demanding urgent buildup and development[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1998, 17(3):43-45.

- [2] 刘鹏程,王晓冬,邓宏文.现代油藏经营管理[J].特种油气藏,2003,10(4):90-93.
Liu Pengcheng, Wang Xiaodong, Deng Hongwen. Modern reservoir management and administration[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(4):90-93.
- [3] 羊明香,李宏伟,赵玉萍,等.石油储量价值评估在油藏管理中的应用[J].断块油气田,2009,16(3):90-92.
Yang Mingxiang, Li Hongwei, Zhao Yuping, et al. Application of reserves value estimating in reservoir management[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(3):90-92.
- [4] 聂建英,左信,胡意茹.现代控制理论在闭环油藏管理中的应用[J].特种油气藏,2014,21(4):7-12.
Nie Jianying, Zuo Xin, Hu Yiru. Summary on application of modern control theory in closed loop reservoir management[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4):7-12.
- [5] Thakur G C. Reservoir management: A synergistic approach: SPE 20138 [R]. [S.I.]: SPE, 1990.
- [6] Satter A, Varnon J E, Hoang M T. Reservoir management: Technical perspective[C]//Proceedings of the 21st Annual Convention Proceedings, Beijing, China. Tulsa: AAPG, 1992.
- [7] 美国石油工程师学会.现代油藏管理[M].赵业卫,崔士斌,译.北京:石油工业出版社,2001.
American Society of Petroleum Engineers. Modern reservoir management[M]. Zhao Yewei, Cui Shibin, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [8] 杜志敏,谢丹,任宝生.现代油藏经营管理[J].西南石油学院学报,2002,24(1):1-4.
Du Zhimin, Xie Dan, Ren Baosheng. Modern reservoir management[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(1):1-4.
- [9] 谭跃进.系统工程原理[M].长沙:国防科技大学出版社,1999.
Tan Yuejin. Principle of system engineering[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999.
- [10] 黎志成,胡斌,傅小华,等.管理系统定性模拟的理论与应用[M].北京:科学出版社,2005.
Li Zhicheng, Hu Bin, Fu Xiaohua, et al. Theory and application of qualitative simulation in management system[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [11] 王其藩.高级系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1995.
Wang Qifan. Advanced system dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [12] 汪应洛.系统工程[M].3版.北京:机械工业出版社,2005.
Wang Yingluo, Yuan Zhiping. Systems engineering[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2005.

(编辑 徐文明)