

文章编号:1673-5005(2010)01-00012-06

# 基于油藏开发生态的储层四维模型的建立

严科<sup>1,2</sup>, 杨少春<sup>3</sup>, 任怀强<sup>3</sup>

(1. 胜利油田 博士后科研工作站, 山东 东营 257002; 2. 胜利油田 胜利采油厂, 山东 东营 257051;  
3. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**以注水开发40多年的胜坨油田一区沙二<sup>1</sup>层为例,综合不同时期地质、测井及开发生态资料,通过划分动态井网单元,连续追踪油藏井网布局变迁及开发生态变化,定量表征储层所经受的水驱程度,利用多元线性回归分析拟合储层参数随水驱程度的数学演化模型,并计算出开发不同阶段的储层参数,建立基于油藏开发生态的储层四维模型。研究表明:储层参数演化数学模型能够根据开发生态将油藏开发初始时期储层参数统一到开发后的任意时期,有效扩充各个时期地质建模数据点的数量和分布范围;基于油藏开发生态的储层四维模型不仅能够直观和定量地表征储层参数在历史时期的空间展布规律,还可通过油藏开发趋势分析对未来储层参数分布状态进行预测。

**关键词:**储层参数; 动态井网单元; 水驱程度; 数学演化模型; 四维模型; 胜坨油田

**中图分类号:**TE 122.2      **文献标志码:**A

## Building of 4D reservoir model based on development performance

YAN Ke<sup>1,2</sup>, YANG Shao-chun<sup>3</sup>, REN Huai-qiang<sup>3</sup>

(1. *Postdoctoral Scientific Research Workstation of Shengli Oilfield, Dongying 257002, China;*

*2. Shengli Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Dongying 257051, China;*

*3. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)*

**Abstract:** Taking the 1<sup>1</sup> layer of second member of Shahejie formation in Shengtuo Oilfield exploited by waterflood for more than 40 years as an example, a mathematical evolutionary model of reservoir properties correlated with reservoir performance was achieved by delimiting the dynamic well pattern unit, tracing the well pattern and development performance, characterizing the water drive degree quantitatively and using the multivariate regression analysis. The reservoir properties in different phase were figured out, and a 4D reservoir model was set up based on reservoir development performance. The results show that the reservoir properties value in initial development stage can be transformed to arbitrary stage by mathematical evolutionary model. The quantity and distribution range of modeling data in different development stage can be enlarged efficiently. Not only could the 4D reservoir model based on development performance characterize the past and present spatial distribution of the reservoir properties visually and quantitatively, but also forecast the future reservoir properties by using development trend analysis.

**Key words:** reservoir property; dynamic well pattern unit; water drive degree; mathematical evolutionary model; 4D model; Shengtuo Oilfield

储层四维模型的研究目前总体上处于探索阶段。其中,储层参数变化规律主要是利用岩心驱替试验研究不同注入倍数下储层参数变化情况,或利用不同开发阶段完钻井的取心资料、测井解释参数开展参数变化规律研究<sup>[1-5]</sup>。储层四维建模目前主要有两种方法。一是应用注水开发前后的岩心分析

资料建立不同时期储层参数的测井解释模型,分别求取基础井网和加密井网的储层参数,通过随机模拟分别建立起注水开发前后的储层参数三维模型,以此达到建立储层四维地质模型的目的<sup>[6]</sup>。由于该方法无法将不同时期的储层参数统一到同一个时期,在建立各个时期储层三维模型时往往存在建模

收稿日期:2009-07-18

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金项目(2007年)

作者简介:严科(1973-),男(汉族),四川南部人,工程师,博士,主要从事油藏地质研究。

数据点缺乏的问题,并且无法实现对储层参数变化规律的预测。二是应用神经网络算法将不同时期、不同空间位置的储层参数拟合合成随时间变化的四维动态模型<sup>[7-8]</sup>。该方法强调了储层参数与开发时间的相关性,而在一个具体的油藏开发过程中,受储层和开发非均质性的影响,在经历了相同的开发时间后,储层中不同位置的水驱程度通常存在较大差异,储层参数变化幅度取决于局部水驱程度及开发流体动力地质作用强度<sup>[9]</sup>,同开发时间并不存在必然的联系。笔者以储层参数随水驱程度演化规律研究为基础,提出基于油藏开发动态的储层四维模型研究方法。

## 1 研究思路和方法

目前还没有将四维空间内物体特征直接图形化的技术,通常的做法是平行第四维做切片,通过反映三维物体在四维轴上的变化来间接反映物体在四维空间内的特征。

深度开发油藏开采年限长,大多经历了若干次井网调整,测井资料丰富,并且积累了大量的开发动态资料,有条件充分利用其多期测井资料以及与之相关的开发动态数据,在油藏开发动态分析的基础上,建立储层参数随水驱程度演化的数学模型,并据此计算出开发任意时期的储层参数值,从而建立不同时期储层三维地质模型以及预测模型。

### 1.1 储层参数演化规律

利用层次分析法<sup>[10]</sup>,非均质储层可被细分为若干个相对均质的地质体(流动单元),不同流动单元储层参数随水驱程度的演化规律不同。如图1所

示,对于一个理想化的具有2种流动单元的储层而言, $T_1$ 期注采井网能够取得初始状态下储层参数值, $T_2$ 期完善井网能够取得一定水驱程度下的储层

#### 1.1.1 动态井网单元的划分

为定量表征储层中某一区域所经历的水驱程度,特引入动态井网单元的概念。动态井网单元是指以任一调整井为中心,之前老井作为边界所划分的地质体,以此作为基本单元研究储层参数变化与水驱程度的关系。如图2(a)所示, $T_1$ 期开发井完钻后,通过测井解释可获得初始状态下储层参数。图2(b)中, $T_2$ 期开发井完钻后,以 $T_2$ 期开发井为中心, $T_1$ 期开发井为边界,可划分出5个动态井网单元。任取其中W22井网单元为例,W22井完钻时期储层参数可直接由该井点测井解释结果获得,W22井在初始状态储层参数可由 $T_1$ 时期各井点储层参数通过插值算法获得,通过定量表征W22井在 $T_1$ — $T_2$ 时期内所经历的水驱程度,就可获得一组储层参数随水驱程度的演化数据。按照同样的方法,图2(c)中以 $T_3$ 期开发井为中心, $T_1$ 、 $T_2$ 期开发井为边界,可划分出4个动态井网单元。以W31井网单元为例,W31井完钻时期储层参数可直接由该井点测井解释结果获得,W31井在初始状态储层参数可由 $T_1$ 时期各井点储层参数通过插值算法获得,通过定量表征W31井在 $T_1$ — $T_3$ 时期内所经历的水驱程度,就可获得另一组储层参数随水驱程度的演化数据。图2中动态井网单元的划分能够获得2种流动单元的9组储层参数随水驱程度的动态演化数据。

#### 1.1.2 水驱程度的定量表征方法

在油藏实际开发过程中,某一井点的水驱程度受到多种因素影响,目前还没有成熟的定量表征方法。笔者尝试应用油藏开发动态分析思路,从构造位置、注采关系布局以及实际注采强度等方面对水驱程度进行定量表征<sup>[11]</sup>。

在任一个动态井网单元内,后期调整井相对于前期开发井的构造位置可被划分为高点、平行、低部位3种,在相同井网布局 and 实际注采强度下,构造高点的水驱程度最低,而构造低部位的水驱程度最高。

动态井网单元内注采关系布局可按照后期调整井与前期开发井的相对位置及注采关系类型分为对子井、主流线、分流线、只采不注、只注不采、未动用等6类。其中:对子井指后期调整井与前期开发井位置相近,此种类型注采关系布局在相同条件下所

图1 非均质储层叠合井网示意图

Fig. 1 Sketch map of superimposed well pattern in heterogeneous reservoir

示,对于一个理想化的具有2种流动单元的储层而言, $T_1$ 期注采井网能够取得初始状态下储层参数值, $T_2$ 期完善井网能够取得一定水驱程度下的储层

经受的水驱程度最高;主流线及分流线指后期调整井位于前期开发井所形成的注采主流线或分流线上,所经受的水驱程度较高;只采不注及只注不采均

代表动态井网单元内未形成完善的注采关系,水驱程度相对较低;未动用指后期调整井所处的动态井网单元仍处于初始状态,水驱程度为0。

图2 储层参数演化研究中动态井网单元的划分

Fig. 2 Delimiting of dynamic well pattern unit in research of reservoir properties evolution

构造位置及注采关系布局均代表了动态井网单元内后期调整井位置所经受水驱程度的潜在可能性。应用模糊数学理论对上述水驱程度影响因素进行了综合评价,采用专家赋值的方法,将注采关系布局和构造位置对水驱程度的影响赋予相应的权重系数,并对不同评价标志分别赋予相应的隶属度,引入井网指数来综合反映动态井网单元内后期调整井所处位置经受水驱程度的潜在可能性(表1)。井网指数越大,在相同的实际注采强度下储层所经受的水驱程度越高。

表1 动态井网单元内井网指数隶属度

Table 1 Subordinate degree of well pattern index in dynamic well pattern unit

影响因素	评价标志	隶属度	权重系数
注采关系布局	对子井	1.0	0.6
	主流线	0.8	
	分流线	0.5	
	只采不注	0.4	
	只注不采	0.2	
	未动用	0	
构造位置	低部位	1.0	0.4
	平行	0.5	
	高点	0	

动态井网单元内后期调整井所经受的水驱程度同时受到实际注采强度的影响。借鉴当前油藏开发动态分析中注采强度的表征方法,采用累积水油比和累积注采比2个参数定量表征动态井网单元内实际注采强度。

1.1.3 储层参数数学演化模型

通过定量表征动态井网单元内的水驱程度,可得到如下多个储层参数随水驱程度的动态演化数据组:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4). \tag{1}$$

对上述数据组进行多元线性回归分析,可建立储层参数随水驱程度的数学演化模型,即

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5. \tag{2}$$

式中,y为后期储层参数;x<sub>1</sub>为初始储层参数;x<sub>2</sub>为动态井网单元内累积水油比;x<sub>3</sub>为动态井网单元内累积注采比;x<sub>4</sub>为动态井网单元井网指数;a<sub>1</sub>,a<sub>2</sub>,a<sub>3</sub>,a<sub>4</sub>,a<sub>5</sub>均为常数。

1.2 储层四维建模方法

利用储层参数随水驱程度的数学演化模型,加载完钻时期储层参数以及在此之后经历的水驱程度参数,即可计算出开发一定时期之后的储层参数值,并可预测储层参数未来的变化趋势。

以图2所示的油藏模型为例,以T<sub>1</sub>期开发井为中心划分动态井网单元,定量表征其开发至T<sub>2</sub>期与T<sub>3</sub>期所经受的水驱程度,利用储层参数数学演化模型,可分别计算出T<sub>1</sub>期开发井在T<sub>2</sub>期、T<sub>3</sub>期的储层参数。根据T<sub>3</sub>期油藏开发趋势对未来某阶段开发动态进行预测,定量表征T<sub>1</sub>期开发井至未来某时期经受的水驱程度,可预测出T<sub>1</sub>期开发井在未来某时期的储层参数。

以T<sub>2</sub>期开发井为中心划分动态井网单元,定量表征其开发至T<sub>3</sub>期所经受的水驱程度,可计算出T<sub>2</sub>期开发井在T<sub>3</sub>期时的储层参数,也可通过开发动态预测,定量表征T<sub>2</sub>期开发井至未来某时期所经受的水驱程度,从而预测出T<sub>2</sub>期开发井在未来某时期的储层参数。

T<sub>3</sub>期开发井不仅可用于T<sub>3</sub>期的地质建模,以T<sub>3</sub>期开发井为中心划分动态井网单元,定量表征其开发至T<sub>3</sub>期后某一阶段所经受的水驱程度,可计算出T<sub>3</sub>期开发井在未来某时期的储层参数,用于储层预测模型的建立。

利用上述方法,可将油藏中各时期开发井的储层参数统一到投入开发以后的任一时期,利用地质建模技术,建立不同时期的储层三维地质模型,可在给定油藏未来预期开发动态数据的基础上对储层参数及剩余油分布进行预测。

## 2 应用实例

### 2.1 研究区地质概况

胜坨油田一区沙二段油藏位于胜坨油田西部的坨庄构造高点,属背斜构造油藏。该油藏 1964 年 6 月投产,1966 年 7 月实施注水开发,开发 40 多年来先后经历了 6 次井网调整。根据井网调整的实施情况以及油藏开发特点可将油藏开发划分为 4 个阶段:开发初期(1964 年 6 月—1971 年 3 月),阶段末综合含水率 37%,采出程度 2.6%;中低含水期(1971 年 4 月—1979 年 2 月),阶段末综合含水率 73.5%,采出程度 7.5%;高含水期(1979 年 3 月—1987 年 12 月),阶段末综合含水率 88.5%,采出程度 14.1%;特高含水期(1988 年 1 月—),目前综合含水率 94.59%,采出程度 33.8%。

应用储层层次分析法将胜坨油田一区沙二段 1<sup>1</sup> 层细分为 1<sup>11</sup> 和 1<sup>12</sup> 两个沉积时间单元,在此基础上利用密井网测井资料建立了储层构造模型。通过开展沉积微相和成岩相研究,将 1<sup>11</sup>, 1<sup>12</sup> 砂体进一步划分为 4 类流动单元(图 3)。其中, A 类流动单元储层物性最好, B 类流动单元储层物性次之, C 类流动单元储层物性中等, D 类流动单元储层物性较差。

图 3 胜坨油田一区沙二 1<sup>1</sup> 层流动单元模型

Fig. 3 Flow unit model in interest region

### 2.2 储层参数数学演化模型

利用测井解释成果可获得研究区各期开发井完钻时的储层参数值,按照储层参数演化研究中动态井网单元划分方法,以不同时期调整井为中心划分动态井网单元,定量表征各期动态井网单元内水驱程度,可得到不同流动单元储层参数随水驱程度的动态演化数据组,利用多元线性回归方法,建立了不

同流动单元储层参数随水驱程度的数学演化模型(表 2)。

表 2 胜坨油田一区沙二 1<sup>1</sup> 层储层参数数学演化模型

Table 2 Mathematical evolutionary model of reservoir properties correlated with reservoir performance in interest region

流动单元	储层参数数学演化模型
A	$k = 0.951k_{初} - 2.23x_2 - 3.11x_3 - 0.6x_4 - 3.8$
	$\varphi = 0.853\varphi_{初} + 0.165x_2 + 0.298x_3 + 1.79x_4 + 8.23$
	$V_{sh} = 0.312V_{sh初} + 0.106x_2 + 0.0181x_3 + 0.77x_4 + 4.89$
	$S_o = 0.596S_{o初} - 0.063x_2 - 0.646x_3 - 5.69x_4 + 10.7$
B	$k = 0.940k_{初} - 2.49x_2 - 3.71x_3 - 0.8x_4 - 14.6$
	$\varphi = 0.772\varphi_{初} + 0.155x_2 + 0.272x_3 + 1.63x_4 + 5.58$
	$V_{sh} = 0.397V_{sh初} + 0.121x_2 + 0.0299x_3 + 0.91x_4 + 5.95$
	$S_o = 0.622S_{o初} - 0.045x_2 - 0.553x_3 - 4.48x_4 + 14.5$
C	$k = 0.900k_{初} + 3.74x_2 + 0.929x_3 + 210x_4 + 73.3$
	$\varphi = 0.716\varphi_{初} + 0.0709x_2 + 0.00757x_3 + 1.03x_4 + 8.06$
	$V_{sh} = 0.949V_{sh初} - 0.0179x_2 - 0.0215x_3 - 1.51x_4 - 0.356$
	$S_o = 0.790S_{o初} - 0.371x_2 - 0.0387x_3 - 5.25x_4 + 9.07$
D	$k = 0.786k_{初} + 9.86x_2 + 13.4x_3 + 114x_4 + 332$
	$\varphi = 1.24\varphi_{初} + 0.100x_2 + 0.160x_3 + 1.38x_4 - 7.75$
	$V_{sh} = 1.08V_{sh初} - 0.0285x_2 - 0.0643x_3 - 1.02x_4 - 0.586$
	$S_o = 1.08S_{o初} - 0.137x_2 - 0.277x_3 - 1.27x_4 - 3.08$

注:  $k_{初}$ ,  $k$  分别为初始状态和开发后的储层渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $\varphi_{初}$ ,  $\varphi$  分别为初始状态和开发后的储层孔隙度, %;  $V_{sh初}$ ,  $V_{sh}$  分别为初始状态和开发后的储层泥质含量, %;  $S_{o初}$ ,  $S_o$  分别为初始状态和开发后的储层含油饱和度, %。

### 2.3 储层四维地质模型

应用研究区储层参数数学演化模型,按照储层参数计算过程的动态井网单元划分方法分别以基础井网及各期调整井网为中心划分动态井网单元,逐井加载完钻时期储层参数及其在开发初期、高含水期、特高含水期的水驱程度参数。定量计算出各个时期储层中各井点的宏观参数值,应用地质建模软件 Gocad 建立了研究区在开发初期、高含水期和特高含水期期末的储层参数模型,并以 2007 年油藏开发趋势为基准,预测了 2008 年储层水驱程度,在此基础上建立了储层参数预测模型(图 4)。利用 2008 年研究区 2 口新钻井的测井解释资料和 3 口老井的剩余油饱和度动态监测资料对预测模型的精度进行了综合分析。结果表明:孔隙度的平均绝对误差小于 1.4%,平均相对误差小于 7.3%;渗透率平均相对误差小于 35.3%;泥质含量绝对误差小于 0.9%;含油饱和度绝对误差小于 1.8%。总体上看,预测模型与油藏开发实际符合程度较高,能够有效指导油藏的开发调整。

图4 胜坨油田一区沙二<sup>1</sup>层储层四维模型

Fig. 4 4-D model of reservoir properties based on development performance in interest region

### 3 结 论

(1) 利用储层参数随水驱程度演化的数学模型,能够将初始时期储层参数统一到开发后的任意时期,有效扩充各时期地质建模数据点的数量和分布范围,提高地质建模质量。

(2) 基于油藏开发动态的储层四维模型,不仅能够直观和定量表征储层参数在历史上任意时期以及开发现状下的空间展布规律,还可通过开发趋势分析对未来储层参数分布状态进行预测,为油田开发和调整提供可靠依据。

(3) 储层四维模型研究始终贯穿着对油藏井网布局及开发动态的跟踪分析,模型精度取决于对不同开发阶段地质、测井及开发动态资料综合分析的准确程度。

#### 参考文献:

- [1] 李阳. 陆相断陷湖盆油藏流场宏观参数变化规律及动态模型[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 65-68.  
LI Yang. Variation rule of macro parameters and dynamic model of oil reservoirs in continental faulted basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 65-68.
- [2] 尤启东, 周方喜, 张建良, 等. 高含盐油藏水驱储层参数变化机理及规律研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 79-82.  
YOU Qi-dong, ZHOU Fang-xi, ZHANG Jian-liang, et al. Law and mechanism of parameters change in saliferous reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(2): 79-82.
- [3] 岳大力, 吴胜和, 程会明, 等. 基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 21-27.  
YUE Da-li, WU Sheng-he, CHENG Hui-ming, et al. Numerical reservoir simulation and remaining oil distribution patterns based on 3D reservoir architecture model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(2): 21-27.
- [4] 束青林, 张本华, 徐守余. 孤岛油田河道砂储集层油藏动态模型及剩余油研究[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 64-67.  
SHU Qing-lin, ZHANG Ben-hua, XU Shou-yu. Dynamic

- model and remaining oil distribution of fluvial reservoir in Gudao Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(3): 64-67.
- [5] 孙焕泉,孙国,吴素英,等. 储集层参数动态地质模型的建立——以胜坨油田二区沙二段 $1^2$ 层为例[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增刊): 89-91.  
SUN Huan-quan, SUN Guo, WU Su-ying, et al. Dynamic geology model establishment of reservoir parameters: taking  $1^2$  layer, segment 2 of Shahejie formation, Shengtuo Oilfield, as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(sup): 89-91.
- [6] 彭仕宓,尹志军,李海燕. 建立储层四维地质模型的新尝试——以冀东高尚堡沙三段储层模型的建立为例[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 662-665.  
PENG Shi-mi, YIN Zhi-jun, LI Hai-yan. A new trial to build a 4-dimensional reservoir model—a case study of the reservoir model of member 3 of the Shahejie formation in eastern Hebei Province[J]. *Geological Review*, 2004, 50(6): 662-665.
- [7] 徐守余,王艳红. 利用神经网络建立储层宏观参数动态模型——以胜坨油田二区为例[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 10-12.  
XU Shou-yu, WANG Yan-hong. Dynamic model of reservoir macro-parameters built by neural network—taking the second block of Shengtuo Oilfield as an example[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(6): 10-12.
- [8] 张继春,彭仕宓,穆立华,等. 流动单元四维动态演化仿真模型研究[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 69-73.  
ZHANG Ji-chun, PENG Shi-mi, MU Li-hua, et al. Four-dimensional dynamic simulation models for flow unit[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(1): 69-73.
- [9] 宋万超,孙焕泉,孙国,等. 油藏开发流体动力地质作用——以胜坨油田二区为例[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 52-55.  
SONG Wan-chao, SUN Huan-quan, SUN Guo, et al. Oilfield development dynamical geologic process of development liquid-taking Shengtuo Oilfield as an example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3): 52-55.
- [10] 赵翰卿. 对储层流动单元研究的认识与建议[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 8-10.  
ZHAO Han-qin. Recognition and advice on the study of reservoir flow unit[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(3): 8-10.
- [11] 严科,杨少春. 单层剩余油的算法及应用[J]. 高校地质学报, 2007, 13(1): 112-116.  
YAN Ke, YANG Shao-chun. The algorithm and application of remaining oil distribution in single layer[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 112-116.

(编辑 徐会永)

(上接第11页)

- [10] 李国蓉. 碳酸盐岩中缝合线的形成机制及其储集意义讨论[J]. 矿物岩石, 1997, 17(2): 49-54.  
LI Guo-rong. Discussion on the genetic mechanism of stylolite in carbonate rocks and their significance for storage[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1997, 17(2): 49-54.
- [11] 杨宁,吕修祥,陈海涛. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油气成藏特征[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 1-5.  
YANG Ning, LÜ Xiu-xiang, CHEN Hai-tao. Study on the hydrocarbon reservoir forming characteristics of the Ordovician carbonate rock in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2008, 23(3): 1-5.
- [12] 阎相宾. 塔河油田下奥陶统古岩溶作用及储层特征[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(4): 23-25.  
YAN Xiang-bin. Paleokarst and reservoir characteristics of lower Ordovician in Tahe Oilfield[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2002, 24(4): 23-25.

(编辑 徐会永)