文章编号：1006－544X（2006）04－0481－05

鄂尔多斯盆地靖安油田储层流动单元的分类方法

管英柱[1]，王允诚[1]，李 斌[2]，杨 波[3]

（1. 成都理工大学 油气藏地质与开发工程国家重点实验室，成都 610059；
2. 中国科学院 广州地球化学研究所，广州 510640；3. 成都地质矿产研究所，成都 610082）

摘 要：流动单元是在侧向上和垂向上连续的具有相同的影响流体流动特征参数的储层单元，是油田开发地质学中的重要研究内容. 以靖安油田上三叠统延长组河流三角洲储层为例，在建立地质模型基础上，对8个表征流动单元的特征变量进行主成分分析共同度的降维处理，优选出砂厚、渗透率、变异系数、突进系数作为研究对象，对工区样品进行聚类分析，并引入动态参数γ，对储层进行综合评判，评价了流动单元的平面分布. 认为对流动单元的研究要综合考虑高分辨率层序地层学、沉积地质学、构造地质学和生产动态等资料.

关键词：流动单元；沉积相；高分辨率层序地层学；分类

中图分类号：P618.130.21；TE122.21 **文献标志码**：A

储层流动单元的概念由美国地质学家C. L. Hearn等（1984）提出[1]，定义为横向上和垂向上连续的具有相似的渗透率、孔隙度和层理特征的储集带. 近几年来，这一概念已被国内外的许多学者接受[2－4]. 但总的来看，对流动单元的研究尚处于探索阶段，目前国内的学者从研究方法及应用的角度提出了自己的看法. 研究表明，储层流动单元的研究对于油气田开发，特别是二次采油和三次采油具有较大的实际意义[5].

1 研究思路

据国内外地质工作者对流动单元的研究，尤其是陆相储层的研究成果分析[6,7]，结合科研生产实践，认为对流动单元的研究可从两个方面着手：一方面要确定流动单元的空间形态，即储集体的规模，考虑到储层高非均质地质特征，采用层序地层学、沉积学和构造学等多学科理论和方法，建立三角洲相储集层流动单元的概念模型；另一方面，要了解流动单元的内部特征，可以对储层进行取样，分析其孔喉结构和流体性质，利用试油试采和动态资料，动静结合，建立流动单元评价模型. 在此基础上，以计算机技术和数学地质为手段，对所研究的流动单元进行分类评价，揭示流动单元空间分布规律，为油田开发、提高采收率提供科学依据.

据以上研究思路，以鄂尔多斯盆地靖安油田上三叠统长6油层组储层研究为基础，探讨陆相储层流动单元的划分和研究方法.

2 地质模型的建立

2.1 靖安油田地质概况

靖安油田位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部，东跨杨米涧和安塞油田杏河区，西跨吴旗油田东半区. 从区域构造上看，本区为一平缓的西倾单斜，地层倾角小于1°，坡降6～8 m/km，其上发育多排轴向近东西或北东－南西向的鼻状构造带. 长6砂岩组储层的岩石类型较为单一，主要为一套中—细粒砂岩及少量粉砂岩. 区域研究表明，长6层属三角洲前缘沉积，受物源与古地理环境的影响，储层砂体走向近于北东－南西向，平面上呈朵状展布，局部地区近于南北向. 储层物性以中－低孔隙度为主，平均孔隙度为12.43%；渗

收稿日期：2005－11－25

基金项目：国家“973”项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律”(2003CB214606)

作者简介：管英柱（1972－），男，博士研究生，油气田开发专业.

透率较低，平均为 $2.28 \times 10^{-3}\ \mu m^2$，局部由于强溶蚀出现中高渗储层，非均质性强.

2.2 高分辨率层序地层学分析

高分辨率层序地层学研究是建立等时地层格架的主要方法. 综合应用岩心、测井和地震等信息，运用如岩心层序地层分析、测井层序地层分析、多测井约束反演层序地层分析等研究手段，建立靖安油田含油层段的高分辨率等时地层格架[8]. 本文主要根据层序地层旋回对比对靖安地区长 6 油层组划分出短期、中期、长期的基准面旋回，认为该区由 3 个长期旋回层序（LSC1、LSC2 和 LSC3）构成，包括 5 个中期旋回层序（MSC1、MSC2、MSC3、MSC4、MSC5），分别对应长 6_3、长 6_2^2、长 6_2^1、长 6_1^2、长 6_1^1 五个油层（图 1）. 其中，长 6_2^1 时期是志丹三角洲的高速生长推进期，三角洲砂体不仅分布面积广，连片性好，而且往南延伸愈加明显. 油田开发生产实践也说明，长 6_2^1 为靖安油田的主力油层.

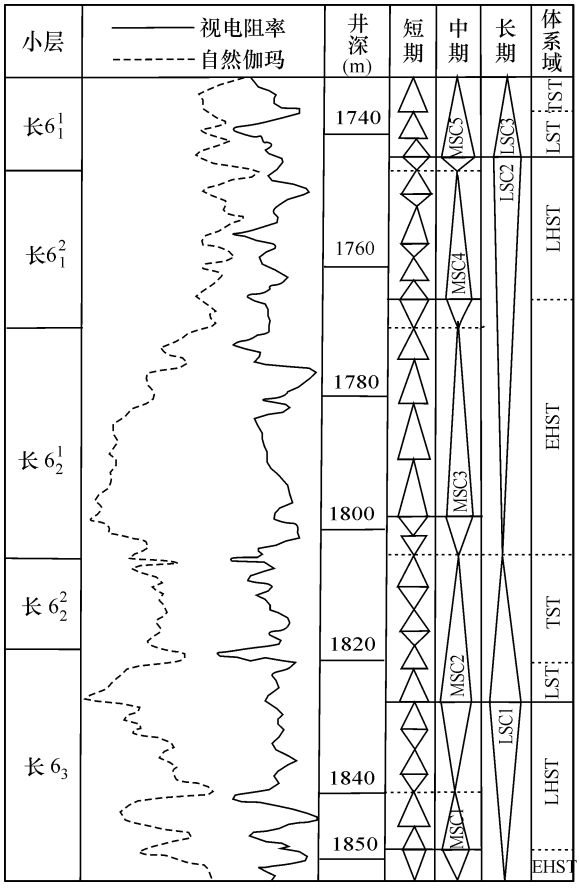


图 1 靖安地区 W24 井长 6 油层高分辨率层序地层综合柱状图

Fig. 1 Synthesis histogram of high resolution sequence stratum of Chang 6 Group, W24 well, Jing'an area

2.3 沉积环境分析

在高分辨率等时地层构架基础上，可对各储层沉积环境进行分析. 研究区储层沉积微相主要是水下分支河道、河口坝和席状砂沉积，它们构成了含油层段的骨架砂体（①、②），而分流间湾和堤岸沉积的细粒物质（粉砂及粘土（③））则形成了含油层段的非均质性，也成为划分流动单元的有效边界（图 2）.

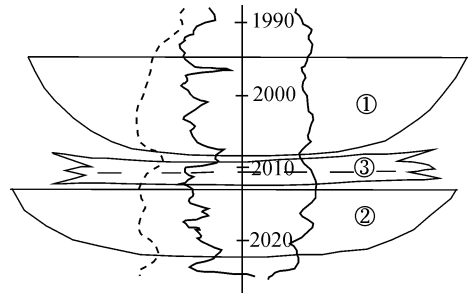


图 2 T23 井砂体连通性分析图

Fig. 2 Analysis of sandbodies connection of T23 well

2.4 成岩作用分析

成岩作用影响本区储层发育. 主要成岩作用有压实、胶结、溶蚀等类型. 随着埋藏深度的增加，区内砂岩遭受压实作用，主要表现为骨架颗粒之间排列方式进行调节，颗粒发生位移，颗粒之间呈现线接触，少量凹凸接触. 一些刚性颗粒嵌入云母碎屑中. 压实作用使砂岩变得致密，砂岩孔隙体积减少. 本区胶结作用强，主要类型有粘土矿物胶结、沸石胶结、碳酸盐胶结、钠长石胶结和石英胶结. 随着胶结物的形成，胶结作用不断增强，压实作用的影响被抑制并逐步减弱. 粘土矿物含量高易堵塞喉道，形成低渗透率；后期的溶蚀作用，特别是长石、浊沸石强溶蚀区，使本区储层的孔隙得到了很大的改善，形成了良好的连通性[9]. 本区溶蚀作用相对微弱，但溶蚀现象普遍存在. 东部志靖、安塞地区溶蚀孔隙相对比较发育，特别是五里湾、侯市、杏河、王窑一带的三角洲前缘水下分流河道、河口坝部位，由于邻近生油区酸性水活跃，浊沸石大部分或全部被溶蚀，溶孔可达 1.6% ~ 6.7%，次生孔隙平均 5.6% ~ 9.2%，岩石孔隙达 11.3% ~ 15.4%，渗透率平均为 $2.44 \times 10^{-3}\ \mu m^2$，储层物性比较好，目前已在上述地区获得了相当可观的原油地质储量.

2.5 构造作用

构造作用直接影响储层的连通性，通过生产

动态资料和岩性资料对构造作用的影响进行分析. 在大陆沟以北地区，发育一条 NE－SW 向构造裂缝带（图 3），T8－9、T8－11、T8－14 位于裂缝带，平均渗透率为 $12\times10^{-3}\ \mu m^2$，形成高渗区；S6、T8－13、T8－24、T8－21、T8－7 位于裂缝带外邻近区，平均渗透率为 $2\times10^{-3}\ \mu m^2$. 生产资料表明，高渗区油井尽管产量较高，但多为高产水井，而邻区的油井产水量相对较低. 表明构造作用对储层的影响是比较明显的.

综上所述，本区储层流动单元主要类型受储层沉积环境、成岩作用、裂缝发育带等影响.

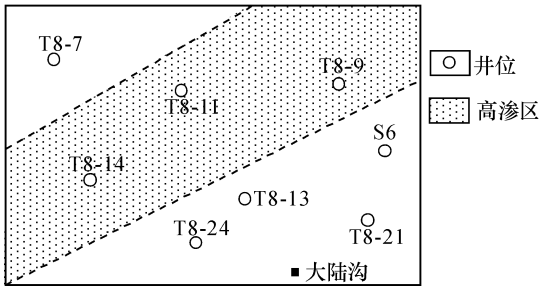


图 3　靖安油田 T8 井组高渗区分析

Fig. 3　Analysis of high permeability block of T8 well group, Jing′an oilfield

3　流动单元数学模型的建立

3.1　流动单元的划分原则

在上述地质背景研究的基础上，可从单井相分析入手，作出连井相剖面和沉积微相平面图，根据砂泥岩界面确定砂体，结合构造作用在平面上的表现和沉积相分布，纵向上划分各层的流动单元大小. 再根据对储层内流动单元的储渗等特征参数的分析，选出能反映各流动单元储渗能力的特征参数，据其表征流动单元特征的差异程度和决定流动单元储渗能力所做的贡献大小，通过综合评判确定各特征参数的权系数. 然后以此为据在平面上建立起划分流动单元的数学模型.

3.2　表征流动单元的特征参数的确定

对流动单元评价最主要的是建立整个评价不同流动单元的参数模型. 重要的环节是选择代表性岩性和岩石物理性质相似性的特征参数[10]，根据鄂尔多斯盆地低孔、低渗的特点，经过分析对比，初步选定了砂层厚度(h)、净毛厚度比(m)、孔隙度(Φ)、渗透率(K)、地层厚度(H)、产能系数(k_h)，并且考虑到该区储层的强非均质性，增加了 2 个反映储层非均质的参数(变异系数 K_v 和突进系数 T)，共 8 个特征参数作为研究对象. 其中

$$K_v = K_{max}/K,\quad T = \delta/\overline{K}.$$

式中：K_{max} 为砂层最大渗透率；$\overline{K}$ 为砂层渗透率的平均值；δ 为砂层渗透率的标准差.

由于表征流动单元的参数众多，以 8 个特征变量作为研究对象比较复杂，加上各参数本身相互间存在一定的重迭性，因此应对特征变量进行降维处理. 经对其进行主成分分析（表 1），共同度（Communality）从 0 至 1，值越大，表明因子影响越大. 从表 1 可看出，地层厚与孔隙度的共同度最小. 从对各变量的相关性分析中（表 2）可以看出：产能系数与渗透率、净毛厚度与砂厚的相关性比较高，达到了 $R=0.904$ 和 $R=0.938$. 最后，对变量进行综合性的选择，使新选出的特征变量既能最大代表原有变量的信息，又没有重迭. 因此，通过以上分析后，最终优选了砂厚、渗透率、变异系数、突进系数 4 个特征参数作为研究对象.

表 1　储层特征变量主成分分析共同度

Table 1　Reservoir character variable communalities of principal analysis

变量	地层厚	孔隙度	突进系数	变异系数	净毛厚	渗透率	产能系数	砂厚
共同度	0.318	0.354	0.606	0.676	0.874	0.895	0.926	0.946

表 2　储层特征变量样本相关系数

Table 2　Reservoir character variable correlation coefficient of samples

相关性	地层厚	净毛厚	孔隙度	渗透率	变异系数	突进系数	产能系数	砂厚
地层厚	1.000							
净毛厚	0.075	1.000						
孔隙度	−0.033	−0.154	1.000					
渗透率	0.225	0.087	0.178	1.000				
变异系数	0.059	−0.227	−0.007	−0.051	1.000			
突进系数	−0.007	−0.012	−0.035	−0.022	0.320	1.000		
产能系数	0.345	0.378	0.058	0.904	−0.047	−0.007	1.000	
砂　厚	0.398	0.938	−0.148	0.163	−0.171	−0.012	0.474	1.000

3.3　流动单元数学模型的建立

为了对流动单元进行定量分类，在统计研究的基础上采取以下的流动单元分类方法. 首先应用聚类分析方法对已知样本进行分类，然后应用判别分析法对已分类样品进行研究，建立表征不同流动单元的综合判别方程，再完成油藏范围内所有样品的流动单元自动判别归类.

从工区 101 个样品中提取 57 个样品进行聚类

分析，以距离系数 $D = 4.996$ 为标准将其分为 A、B、C、D 四类. 对分类样品进行判别分析，提取不同流动单元的特征变量，结果如表 3 所示.

表 3 储层流动单元参数

Table 3 Data of characteristics of flow unit

类型	砂厚/m	渗透率/$10^{-3}\mu m^2$	变异系数	突进系数
A 类	>16	>2.2	<0.3	<2.6
B 类	12~16	1.6~2.2	0.3~0.4	2.6~3.0
C 类	8~12	1~1.6	0.4~0.5	3.0~3.3
D 类	<8	<1	>0.5	>3.3

在上述特征参数确定的基础上，为了能较全面的反映各流动单元的储渗能力，还必须考虑流体特征以及压力的影响. 因此，笔者引入了动态特征参数. 它是一个代表着流动单元中流体压力、含油、含水、温度等因素的特征参数，在油田开发中对流动单元有很大的影响. 本次研究由于受现有工区资料配套所限，在此使用一个综合考虑其动态特征的数量化参数 γ 来表示. 经反复评判，确定了对 γ 赋值的原则：储层含油气时 $\gamma = 1$；储层含油水时 $\gamma = 0.5$；储层为干层时 $\gamma = 0$；储层含水时 $\gamma = -0.5$. 据以上原则，对长 6 储层各井给出了对应的 γ 值. 综合评判就是对影响一个对象的多个因素加以综合评价，得出一个总体评判指标，是储层分析评价中非常有效的一种方式，可以做为储层分类的依据. 通过综合评判程序，得出储层流动单元的综合评价指标（*SFES*）与渗透率（K）、砂厚（h）、变异系数（K_v）、突进系数（T）和动态特征参数（γ）的相关关系式为：

$$SFES = 0.113h + 0.842K - 0.0231T + 0.303K_v - 0.333 + \gamma.$$

3.4 流动单元分类

在以上基础上，以工区内主力层长 6_2^1 层为例进行流动单元划分与评价. 流动单元类型控制了剩余油分布的规律[11]，对于开发过程中的生产决策有着实际的意义. 据综合评价指标（*SFES*）相关关系式对工区内 101 口井样本点进行计算，据各井的计算结果完成判别归类. 表 4 列出部分井的具体值和分类情况.

3.5 储层流动单元的评价与平面分布

A 类：$SFES \geqslant 3.61$，该类流动单元以中高孔渗结构为特征，渗透率主要分布范围为（2.2~6）$\times 10^{-3}\mu m^2$；变异系数多小于 0.34，突进系数小于 2.6，表明非均质性较弱. 储层多为水下分支河道砂体和河口坝微相. 生产资料显示，该区储层的生产井产水量大，从而进一步证明了砂层的高渗特征. 储层物性相对较好.

表 4 工区内部分井点样本评价指标（*SFES*）数据和分类储层流动单元参数

Table 4 Data and class of portion well in work area

井号	*SFES* 值	类别	井号	*SFES* 值	类别
天 103	1.720	D	XP15	4.127	A
XP4	3.093	B	ZJ17	4.223	A
天 157	3.989	A	ZJ8	4.137	A
XP5	1.938	C	J1	3.993	A
柳 105	1.998	C	ZJ1	2.222	C
XP9	3.294	B	XP13	4.131	A
杨 7	1.736	D	ZJ22	1.923	C
杨 6	12.115	A	陕 122	2.171	C
XP20	3.054	B	DP6	2.332	C
ZJ9	1.348	D	XP12	1.841	C
ZJ3	8.305	A	DP1	2.094	C
J8	3.945	A	靖 6	1.785	D
XP3	2.508	C			

B 类：$3.61 > SFES \geqslant 2.8$，该类流动单元的渗透率主要分布范围为（1.7~2.4）$\times 10^{-3}\mu m^2$；变异系数分布于 0.21~0.41，突进系数分布于 2.4~3.1，显示非均质性. 储层分布于水下分支河道、河口坝和席状砂微相中. 生产资料显示，该储层是靖安地区主要产油层，含水饱和度低，是勘探和开发的最有利层位. 储层物性中等.

C 类：$2.8 > SFES \geqslant 1.8$，该类流动单元的渗透率主要分布范围为（1~2）$\times 10^{-3}\mu m^2$；变异系数分布于 0.3~0.54，突进系数分布于 2.87~3.34，非均质性较强. 储层主要分布于席状砂、远砂坝和堤岸沉积微相中. 储层物性较差.

D 类：$1.8 > SFES$，该类流动单元的渗透率多小于 $1.4 \times 10^{-3}\mu m^2$；变异系数多大于 0.54，突进系数多大于 3.3，非均质最强. 储层主要分布于分流间湾和湖湾微相中. 物性最差.

综合以上分析，作出单井和连井的流动单元剖面图，将其投影到平面，可以作出流动单元的平面分布图，图 4 为靖安油田主产层长 6_{21} 流动单元平面分布图，从图中看到一类流动单元较集中，分布于 XP3－ZJ17－杨 9 井一线；二类流动单元分布较分散，面积较大，是目前的生产和开发的重点有利区块；三类流动单元呈条带状分布，是目前及今后重点开发研究区；四类流动单元主要分布于区块北部. 该图的分析评价与实际研究较为相近，为

靖安油田扩边潜力开发提供了理论依据.

4　结　论

鄂尔多斯盆地陆相储层非均质性较强，孔渗在纵横向变化快，流动单元的分布较复杂，对特征变量的选取应更多的考虑地质因素；从科研和实践入手，提出一套陆相流动单元的研究思路和方法. 认为应从高分辨率层序地层学、沉积学和构造作用并结合动态资料等角度对流动单元进行划分；对于动态特征参数（γ）需进一步结合生产动态资料和地下流体渗流力学进行研究，它是储层流动单元的一个重要特征参数.

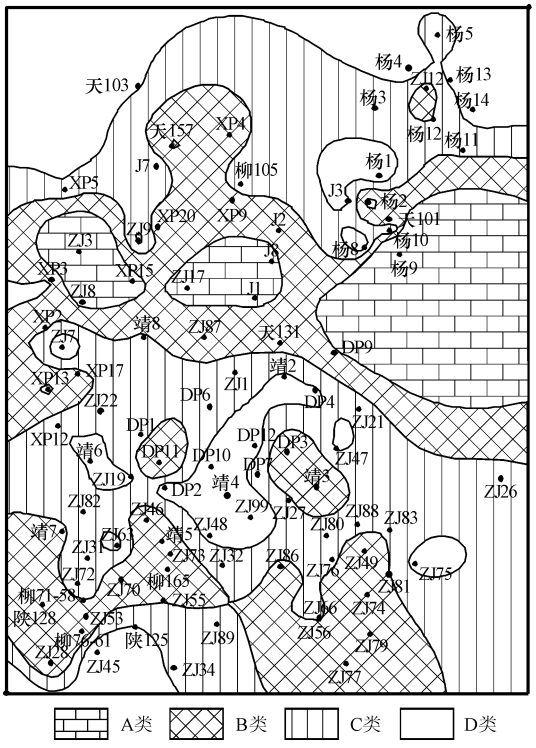


图 4　靖安油田东北一区块长 6_2^1 流动单元平面分布图

Fig. 4　Flow units distribution of Chang 6_2^1 in northeast area, Jing′an oilfield

参考文献：

[1] HEAN C J, EBANKS W, RAGANATHAN V. Geological factors influencing reservoir performance of Hartog Draw Field. Wyoming [J]. Journal of Petrolourn Technology, 1984, 36 (11): 1335 – 1344.

[2] 吕晓光,严伟林,杨根锁,等. 储层岩石物理相划分方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发,1997,16(3):18 – 21.

[3] 吕晓光,赵永胜,史晓波,等. 储层流动单元的概念及研究方法评述[J]. 世界石油工业,1998,5(3):38 – 43.

[4] 金佩强，杨克远. 国外流动单元描述与划分 [J]. 大庆石油地质与开发，1998，17 (4)：49 – 51.

[5] 刘吉余. 流动单元研究进展 [J]. 地球科学进展，2000，5 (3)：303 – 305.

[6] 吴胜和，王仲林. 陆相储层流动单元研究的新思路 [J]. 沉积学报，1999，17 (2)：252 – 257.

[7] 李凤娟，刘立，闫建萍，等. 碎屑岩储层流动单元研究的新进展 [J]. 世界地质，2001，20 (1)：13 – 16.

[8] 杜春艳,郑荣才. 陕北长 6 油层组短期基准面旋回与储层非均质性的关系[J]. 成都理工学院学报,1999,26(1):17 – 22.

[9] 柳益群,李文厚. 陕甘宁盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化[J]. 沉积学,1996,14(3):87 – 95.

[10] 李凤娟，刘立，闫建萍，等. 碎屑岩储层流动单元研究的新进展 [J]. 世界地质，2001，20 (1)：13 – 16.

[11] 窦之林. 储层流动单元研究 [M]. 北京：石油工业出版社，2000：97 – 105.

Classification of Jing′an oilfield reservoir flow unit in Ordos Basin

GUAN Ying-zhu[1], WANG Yun-cheng[1], LI Bin[2], YANG Bo[3]

(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*; 2. *Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*; 3. *Chengdu Institute of Geology Mineral Resources, Chengdu* 610084, *China*)

Abstract: A flow unit is defined as a volume of reservoir rock that is continuous laterally and vertically and has similar averages of those rock properties affecting fluid flow, an importance research in oil exploitation. According to the data from the river delta reservoir of Yanchang Formation of the upper Triassic group of Jing′an oilfield, in Ordos Basin and the geologic model, 8 variables of character description of flow unit are handled with lower dimension of communality of principal component analysis. The sand thickness, permeability, coefficient of variation and coefficient of dart are selected preferentially as reseach objects and cluster analysis as samples in region of interest. At the same time, dynamic parameter γ, reservoir and horizontal distribution of flow unit are introduced and evaluated. The conclusion is that reseach about flow unit must be good resolution sequence stratigraphy, sedimentology and tectonics and production data of oilfield. The research works for the oilfield development management and the improvement of oil and gas recovery.

Key words: flow unit; sedimentary facies; high resolution sequence stratigraphy; classification