

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0090-06

多参数判别流动单元的方法探讨

姚合法^{1,2} 林承焰³ 靳秀菊⁴ 申本科² 张治国⁵ 何善斌⁵

(1. 中国地质大学博士后流动站 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 北京 100083;
3. 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061; 4. 中原油田勘探开发科学研究院 河南濮阳 457001;
5. 长庆油田采油二厂 甘肃庆阳 745100)

摘要 多参数识别是流动单元研究的发展方向, 判别参数选择是多参数识别流动单元的关键。以鄂尔多斯盆地 L37 井区延安组 Y₉ 段河流相储层为例, 应用 SPSS 统计分析软件, 通过对表征储层的六项属性参数判别流动单元的能力及参数之间的相关性分析, 选取粒度中值、孔隙度、流动层分层指数三项参数作为 L37 井区流动单元判别参数, 建立了流动单元判别函数, 研究了储层非均质特征。研究表明, 本区的河流相储层可以划分为为、、、四类流动单元, 分别分布在曲流砂坝、决口扇和砂坝顶部、天然堤微相中, 层内非均质性表现为夹心型、均变型、均质型三种类型。针对不同的储层非均质性, 油田开发生产中应采取不同的开发对策。

关键词 流动单元 判别函数 方法 多参数 流动分层指数 粒度中值 延安组

第一作者简介 姚合法 男 1967 年出生 高级工程师 博士 储层沉积学

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

流动单元 (Flow Units), 又称水力单元 (Hydraulic Units), 是指影响流体流动的岩相和岩石物理性质在内部相似的垂向上和横向上连续的储集岩体^[1]。因此, 作为一种着眼于建立孔喉规模非均质模型的新方法, 这种方法把地质和工程方法有机地结合起来, 为认识油藏的非均质性提供了有效的手段。

本文通过对储层的沉积、物性、渗流等属性参数的判别分析, 建立了 L37 井区流动单元划分模型, 研究了河流相储层流动单元及储层非均质性特征, 为油田开发提供依据。

1 流动单元主要研究方法及存在问题

自 1984 年流动单元的概念提出以来, 很多学者应用这一方法开展了储层表征或储层评价研究。不同学者根据自己对这一方法的理解并结合各自研究工区的地质特点, 提出不同的流动单元研究方法。归纳起来, 主要有以下六类: (1) 微观孔隙结构法: 包括孔隙几何形状分析法 (即 R_{35} 法)^[2] 和流动分层指数 (FZI) 法两种方法; (2) 物性特征综合法^{[3][4]}; (3) 生产动态资料法^[5]; (4) 沉积、成岩、构造作用综合法; (5) 沉积学方法; (6) 岩石组构描述法。其中, 孔隙几何形状分析法、FZI 法、物性特征综合法是以定量研究为主的方法, 也是目前应用最多的研究方法。

理论上讲, FZI 是把结构和矿物地质特征、孔喉特征结合起来判定孔隙几何相的一个参数, 实际上 FZI 是由孔隙度、渗透率两个参数决定, 根据 FZI 划分流动单元可能导致高孔高渗储层与低孔低渗储层归为同一类流动单元的错误结论。而且目前利用测井资料解释渗透率的精度普遍不高。因此, 单纯用 FZI 一个参数划分流动单元的方法欠妥。

物性特征综合法是首先将储层进行沉积分层, 在沉积分层的基础上, 再按存储系数、渗流系数、净毛比等参数用聚类分析或交会图的方法划分为四类流动单元, 即: 流动单元 E、流动单元 G、流动单元 F、流动单元 P。但是, 由于沉积分层本身是一种定性研究, 主观性和人为因素较大。另外, 这种方法加入了流动单元垂向厚度因素, 如果处理不好, 就会混淆渗流能力与渗流系数的差别, 导致厚度较大而渗流能力较差的流动单元和厚度较小而渗流能力较强的流动单元可能在平面上归为同一类流动单元。

彭仕宓等认为, 控制流动单元形成的因素主要有沉积相、储集层岩石物理特征、成岩作用以及微观孔隙结构等, 表征流动单元的参数应尽可能地反映上述主要地质因素, 提出了反映沉积相的粒度中值 (M_d) 和泥质含量, 反映储集层物性的孔隙度和渗透率, 反映储集层微观孔隙结构及渗流特征的最大孔喉半径

收稿日期: 2005-01-21; 收修改稿日期: 2005-08-15

和流动层指数等多参数识别流动单元的方法, 并利用上述六项参数进行了高尚堡油田流动单元的研究^[6]。由于储层属性参数之间具有一定的关联性, 根据判别函数分析的原理, 判别参数之间应尽可能独立, 因此, 在建立判别函数之前应当首先进行判别参数的关联性和判别能力分析, 否则将影响判别的数量。

2 L37井区多参数识别流动单元方法

L37井区位于鄂尔多斯盆地西部陕北斜坡上, 中生界侏罗系延安组延 9 段 Y_9^1 、 Y_9^2 砂组是主要含油层系。延 9 段为曲流河沉积, 包括曲流砂坝、砂坝顶部、决口扇、天然堤、泛滥平原等微相, 砂岩单层厚度 2~30 m, 层内和平面非均质性较强, 因此, 开展流动单元和储层的层内非均质和平面非均质性研究, 对油藏数值模拟研究和油田开发具有重要意义。

根据判别函数分析原理, 可以通过建立判别函数, 定量识别流动单元的类型。

$$R = \sum b_i \cdot X_i + b_0 \quad (1)$$

式中: R —判别函数, 无量纲; X_i —判别参数, 即表征流动单元的储层属性参数, 如泥质含量等; b_i —某一属性参数的判别系数; b_0 —常量系数;

因此, 多参数流动单元识别的关键是判别参数的选择和判别系数的计算。

2.1 判别参数的求取

储层属性参数包括泥质含量、粒度中值、孔隙度、渗透率、 FZI 、 R_{35} 等, 可以根据岩心分析和测井资料求取, 其中 FZI 和 R_{35} 的计算方程分别为

(1) 流动层指数

$$FZI = \frac{RQI}{\phi_z} = \frac{0.0314}{\sqrt{H_c}} \quad (2)$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (3)$$

$$\phi_z = \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (4)$$

RQI —油藏品质指数, 或储层质量系数

ϕ_z —孔隙体积与颗粒体积

H_c —结构性能常数, 是孔隙曲度、形状系数和比表面积平方的乘积。

(2) R_{35} 值: 为压汞曲线上进汞达 35% 时的孔喉半径, 在有岩芯样品压汞分析的情况下, 可以直接采用压汞曲线求得 R_{35} 值。在没有压汞曲线的情况下, 可采用 W in land 方程计算。

$$\log R_{35} = 0.732 + 0.588 \log K - 0.864 \log \phi \quad (5)$$

2.2 判别函数方程的建立

根据 Fisher 准则, 若要使判别函数 (R) 能区分流动单元类别最好, 就要使不同流动单元的判别函数 R 的均值之差最大而同一流动单元的判别函数 (R) 离差平方和最小, 由此原理可以求得判别系数 b_i 和常数向量 b_0 。建立判别函数方程的过程, 即求取判别系数 b_i 和常数向量 b_0 , 是通过将样本数据 (已知数据) 的分析完成的, 可以利用 SPSS 社会统计软件包 (Statistical Product and service Solutions for Social Sciences) 实现^[7]。具体步骤包括:

(1) 提取样本数据

根据 L37 井区延 9 段储层的产液能力、物性、沉积微相等方面的综合分析, 将本区试油层和生产层分为 类、类、类、类流动单元, 其中, 类流动单元产液能力强, 物性好, 砂体厚度大, 一般为砂坝底部沉积; 类次之, 类、类产液能力差, 一般为干层。以试油层和生产层的 6 项属性参数和类型参数作为样本, 进行判别参数之间的相关性和初次判别分析, 优选判别参数。

(2) 判别参数之间的相关性分析

对样本数据的相关性分析结果表明, 本区储层的泥质含量与粒度中值、渗透率与 FZI 渗透率与 R_{35} 、 FZI 与 R_{35} 等参数之间具有很高的关联性, 相关系数在 0.9 以上 (表 1)。根据判别分析原理, 关联性很高的参数不能同时参与判别, 需要简化判别参数。

表 1 L37 井区储层属性参数之间的相关性

Table 1 Correlation between parameters in the area of Well L37

相关系数	V_{sh}	M_d	孔隙度	渗透率	FZI	R_{35}
V_{sh}	1.00	-0.96	-0.64	-0.18	-0.37	-0.16
M_d		1.00	0.56	0.21	0.36	0.19
孔隙度			1.00	0.65	0.86	0.61
渗透率				1.00	0.93	0.99
FZI					1.00	0.90
R_{35}						1.00

(3) 判别参数的判别能力分析和判别参数的确定: 组内结构系数 (又称组内相关系数), 反映判别函数与判别参数的紧密联系程度, 即储层参数判别流动单元的能力, 判别函数与参数的相关性越大, 表明该参数的判别能力越强, 反之亦然。判别结果显示, 粒度中值、孔隙度、 FZI 值与判别函数具有较强的正相关关系, 泥质含量与判别函数为负相关关系, 而 R_{35} 、

渗透率与判别函数的相关性较小 (表 2), 即 R_{35} 、渗透率判别流动单元类型的能力较弱。因此, 选择粒度中值、孔隙度、 FZI 三项参数作为流动单元的判别参数比较合理。

储层属性参数对于流动单元的判别能力以及参数之间的相关性主要受研究区的地质特点 (控制储层的主要地质因素) 和储层参数的计算方法影响, 如本区泥质含量与粒度中值均由自然伽马值求取, 因而二者具有较强的相关性。四性关系研究表明, 研究区储层主要受沉积作用的控制, 因此渗透率与 R_{35} 、 FZI 等参数之间的相关性较强。对于不同的地区和层系, 影响储层的地质因素不同, 储层参数的计算模型不同, 流动单元的判别参数各不相同。

表 2 判别参数结构系数

Table 2 Structure matrix of discrimination parameters

Function	M_d	V_{sh}	孔隙度	FZI	渗透率	R_{35}
1	0.849	-0.838	0.454	0.375	0.221	0.186

(4) 判别系数的确定

将试油层和生产层的粒度中值、孔隙度、 FZI 三项属性参数和类型参数作为样本, 重新进行判别分析, 得到三个判别方程, 其鉴别能力分别为 95.9% (function1)、3.4% (function2) 和 0.7% (function3), 因此选用 function1 作为本区流动单元的判别模型, 表达式为

$$Y = 54.915 \times M_d - 79.720 \times \phi + 8.224 \times FZI - 8.909 \quad (5)$$

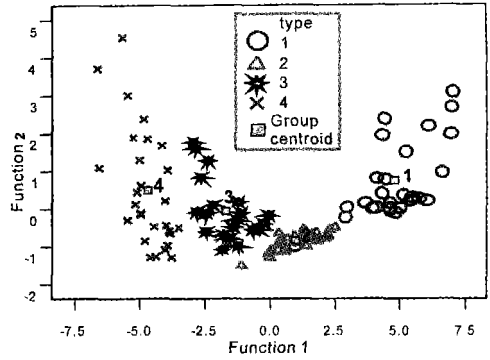
因此, L37 井区延安组储层流动单元的判别参数 X_i 分别为 M_d 、 ϕ 、 FZI , 判别系数 b_i 分别为 54.915、-79.720、8.224, 常量系数 b_0 为 -8.909。

2.3 判别结果分析及判别准则的确定

分组的矩心 (group centroid) 描述在每一类流动单元的中心位置, 如果两类流动单元位置相近, 则说明判别效果较差, 正判率不高; 反之, 则说明判别效果好。从分组的矩心图可以看出, 根据方程 function1 判别的四类流动单元的矩心位置和判别函数值分布 (图 1) 合理, 判别效果良好, 其对 I 类、II 类、III 类、IV 类样本数据的正判率分别为 92.6%、97.3%、93% 和 100% (表 3)。

由图 1 可以看出, 各类流动单元的判别准则为: I 类流动单元判别函数值 (R) > 3.0; II 类在 3.0~0; III 类为 0~-3.0; IV 类 < -3.0。据此可以根据判别

函数的数值大小判别流动单元类型。



注: 1, 2, 3, 4 分别代表 I、II、III、IV 类流动单元

图 1 流动单元分组矩心位置图

Fig 1 Group centroid of discriminant function of flow units

表 3 样品判别结果

Table 3 Classification results of samples

样本	判别结果		Total
	I	II	
25	2		27
样本数	36	1	37
	1	19	20
		28	28
92.6	7.4		100
正判率 (%)	97.3	2.7	100
	5.0	95.0	100
		100.0	100

3 储层的非均质性及其对流体分布的控制作用

3.1 L37 井区储层非均质性特征

根据判别函数方程分别计算了研究区的 43 口井的判别函数值, 进行了单井精细划分。流动单元的平面分布是根据单井流动单元划分结果, 通过井间对比和预测进行的。井间预测可通过井间内插、确定性建模、随机建模等方法实现。

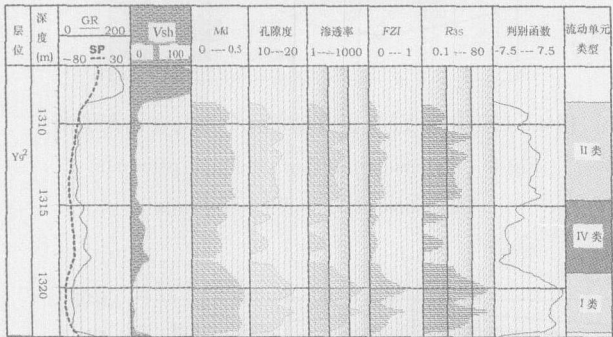
由表 4 可以看出, 不同流动单元储层质量不同, I 类为好储层; II 类为较好储层; III 类为中等储层; IV 类为差储层。因此, 可以根据流动单元的垂向和平面展布特征, 进行储层非均质性表征和评价, 指导油田开发生产。

L37 井区延 9 段储层层内非均质性表现为三种类型: (1) 夹心型: 上部和下部分别为 I 类—II 类流动单元, 中间为 III 类流动单元, 构成流体上下运动的屏障, 非均质较强。如 L37-09 等井的 Y_0^2 砂组, 渗透率级差 (J_k) 为 65.44, 变异系数 (K_v) 为 0.61, 突进系

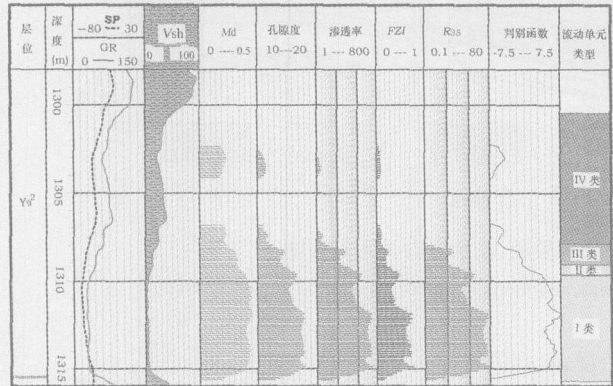
表 4 L37井区流动单元属性特征

Table 4 The characters of flow units in the area of Well L37

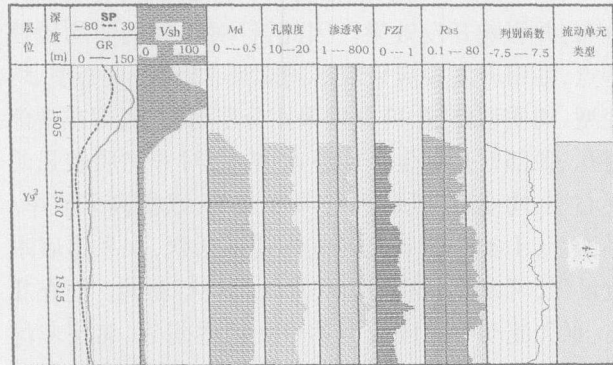
类别					
属性参数中值	V_{sh}	4.29	9.54	14.98	22.13
	M_d	0.43	0.36	0.30	0.24
	ϕ	16.07	14.94	13.23	12.31
	K	130.99	39.92	9.72	4.76
	FZI	0.42	0.28	0.16	0.12
判别函数	矩心	4.79	0.98	-1.68	-4.72
	范围	> 3.0	3.0~0	0~-3.0	< -3.0



(1) 夹心型 (L37-09井 Y_2^1)



(2) 递变型 (L37-7井 Y_2^1)



(3) 均质型 (L37-30井 Y_2^1)

图 2 L37井区延 9 段层内非均质类型

Fig 2 The type of intrastratal heterogeneity of Y_9 formation in Well L37 area

数 (T_k) 为 2.38 (2) 递变型: 底部 类流动单元, 向上

递变为 类—类—类流动单元, 非均质性最强, 如 L37-7 等井 Y_2^1 砂组渗透率级差、变异系数、突进系数分别为 166、1.23、6.72 (3) 均质型: 主要由一种类型的流动单元组成, 非均质性比较弱。如 L37-30 等井 Y_2^1 砂组, 渗透率级差 (J_k) 为 9.87, 变异系数 (K_v) 为 0.69, 突进系数 T_k 为 4.2 (图 2)。

平面上, 类流动单元分布于河道凸岸一侧的曲流砂坝内侧, 其外侧为 类、类流动单元, 分布于砂坝顶部和决口扇微相, 类流动单元分布在天然堤微相内 (图 3)。

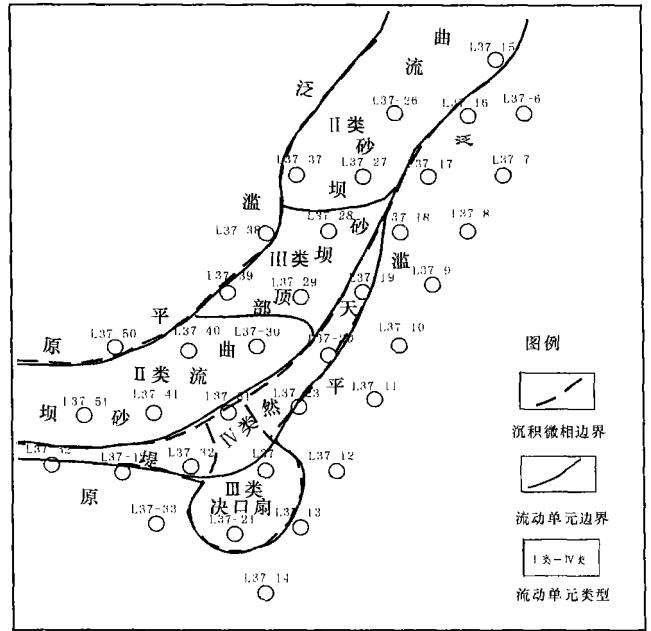


图 3 L37井区 Y_9^1 流动单元与沉积微相分布图

Fig 3 Distribution of flow units and sedimentary micro facies in section of Y_9^1 in Well L37 area

3.2 储层非均质性对流体运移和分布的控制作用

里 37 井区延 9 段是受构造背景控制的岩性—构造油藏, 油层主要分布在 类、类流动单元内, 并出现圈闭低部位含油, 而较高部位不含油现象。如, Y_1^1 亚段油层分布在 L37-26 (类) 流动单元内, 而其上倾部位的 L37-28 (类) 和 L37-30 (类) 流动单元不含油; Y_2^1 亚段 L37-29—L37-27 井区为 类流动单元, 含油, 而构造较高部位的 L37-28—L37-15 井区、L37-14 等井区为 类、类流动单元, 不含油 (图 3 图 4 图 5)。

这是由于储层非均质性的存在, 在油气二次运移的过程中, 当油气由较好储层向较差储层运移时, 毛细管阻力增大, 如果油气运移的动力不足, 油气就难

以将储层中的水排出,油水分布维持相对平衡,因此,出现圈闭低部位含油、高部位不含油甚至含水的现象。由此可见, L37井区油水分布的主控因素不是简单的构造加岩性,而是受油气二次运移路径上储层的非均质性和运移动力的控制。

3.3 储层非均质性对开发效果的影响

根据油藏数值模拟和动态分析, L37井区 Y_2 油藏边底水非常活跃,油田投入开发后,在油水边界附近油井见到边底水而含水,西部的 L37-27-L37-32井区储层主要为 I 类流动单元,储层渗透性和连通性好,非均质性弱,底水锥进速度非常快,油井含水很快上升至 95% 以上,油井压力持续稳定。而东部的 L37-7-L37-03井区储层主要属于 II 类流动单元或流动单元边界,注水效果较差,油井压力降低快,反映储层非均质性强、井间连通性差、能量不足等问题。

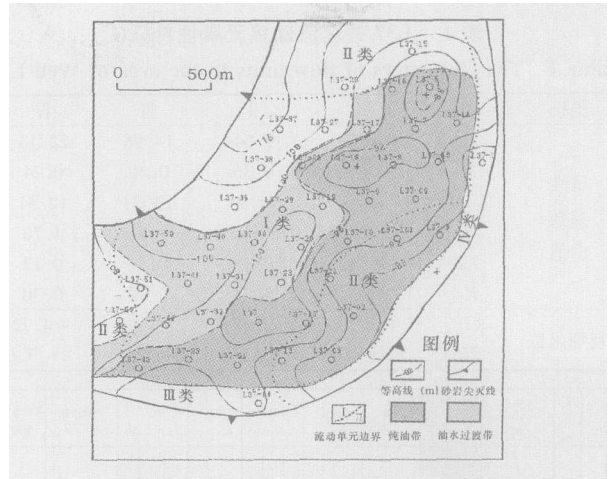


图 4 L37井区 Y_2 亚段流动单元分布与含油范围图

Fig 4 Distribution of flow units and petroleum in section of Y_2 in Well L37 area

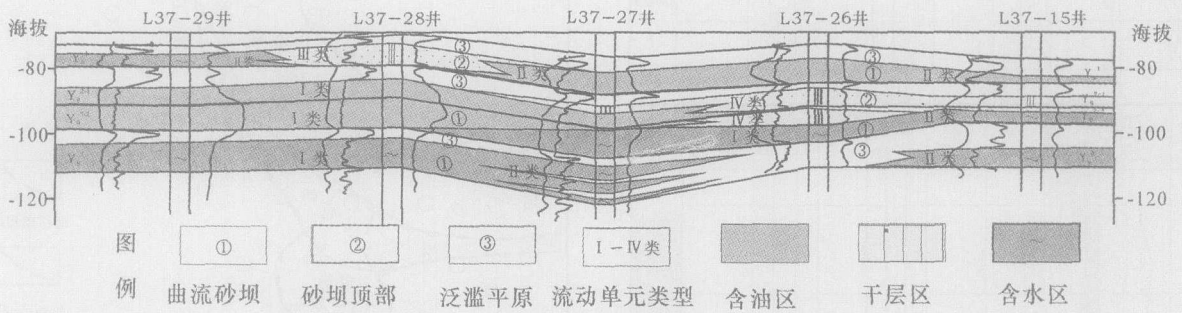


图 5 L37井区延 9段油藏储层非均质与沉积微相、油水分布关系剖面图

Fig 5 Relationship between heterogeneities of reservoirs, sedimentary micro facies and liquid types

4 结论与建议

(1) 多参数识别是流动单元研究的发展方向 and 趋势,其中,参数选择是关键。因此,建立判别函数之前应该进行属性参数之间的相关性分析以及判别参数的判别能力评价。

(2) SPSS 社会统计学软件提供了参数的判别能力、参数之间的相关性分析、判别函数方程建立、判别效果分析等方法,是流动单元定量化研究的有效工具之一。

(3) L37 井区粒度中值、孔隙度、流动层指数三项储层属性参数之间相关性较小,判别能力强,是本地流动单元判别的有效参数。不同地区由于地质特点、资料现状、参数求取方法不同,判别参数也会有所不同。

(4) 不同流动单元储层质量不同,可以根据流动单元的垂向和平面展布特征,进行储层非均质性表征

和评价。

(5) 储层非均质性控制 L37井区油气的运移和分布,并影响开发效果。因此,针对不同的非均质性特点,油田开发中应采取不同对策,如对于夹心型、均变型、均质型储层,应分别采用分层射孔、底部或中部射孔、顶部射孔等生产或注水方式,对非均质较强的夹心型、均变型储层,进行深度调剖,以提高采收率。平面上, I 类流动单元区流体运动活跃,如果边底水能量强,可以充分利用边底水能量进行驱油。而在 II 类、 III 类流动单元区或流动单元边界附近,储层非均质性强,宜采用加密注采井网的方法提高采收率。

参考文献 (References)

- 1 Heam C L, Ebanks Jr W J and Ranganath V. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog Draw field Wyoming JPT, 1984 1335~ 1344
- 2 Martin A J Schmon S T, Harm an D J. Characterization of petrophysical flow units in carbonate reservoirs AAPG Bulletin, 1997, 81(6):

- 734~759
- 3 Guanganing T, Ogbert D O, and Hatzignatiou D G. Use of flow units as a tool for reservoir description: A case study. SPE Formation Evaluation, 1995, 10: 122~128
 - 4 吴胜和, 王仲林. 陆相储层流动单元研究的新思路. 沉积学报, 1999, 17(2): 252~256 [Wu Shenghe Wang Zhonglin. A new method of non-marine reservoir flow unit study. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 252~256]
 - 5 Canas J A, Malik E A. Characterization of flow units in sandstone reservoirs: La Cira Field, Colombia, South America. Proceedings of the Permian Basin Oil Gas Recovery Conference. SPE, Richardson, TX, USA, 1994. 886~892
 - 6 彭仕宓, 尹志军, 常学军, 等. 陆相储集层流动单元定量研究新方法. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 68~70 [Peng Shimiyi Yin Zhijun Chang Xuejun, et al. A new quantitative method to study flow unit of non-marine reservoir. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 68~70]
 - 7 李志辉, 罗平, 洪楠, 等. SPSS for Windows 统计分析教程 (第 2 版). 北京: 电子工业出版社, 2005 [Li Zhihui Luo Ping Hong Nan, et al. Tutorial of SPSS for windows. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2005]

Study on Multi-parameters Discrimination Method for Flow Units

YAO He-fa^{1,2} LIN Cheng-yan³ JIN Xi-jun⁴
SHEN Ben-ke² ZHANG Zhiguo⁵ HE Shan-bin⁵

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083

2 Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083;

3 China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257064;

4. Institute of Petroleum Exploration and Development in Zhongyuan Oilfield, Puyang, Henan 457001;

5 Second Oil Production Factory in Changqing Oil Field, Qingyang, Gansu 7451000)

Abstract Selecting discretion parameter is the key of multi-parameters to identify flow units. Taking reservoir of fluvial facies in the area of Well L37 in Ordos basin as an example, utilizing SPSS statistical analysis software, through analyzing the discretions and their connection between six parameters of reservoirs, the discretion function of flow units has been established, the characters of flow units and heterogeneities of reservoirs have been investigated. There are four types of flow units and three kinds of intrastratal heterogeneities, the flow units of , , , distributes in sedimentary microfacies of point bar, crevasse, natural levee. Different measures should be adopted according to the characters of reservoir heterogeneities.

Key words flow units, discriminator function, multi-parameters, heterogeneities, flow-zone indicator, median grain diameter, Yan'an Formation