

文章编号: 0253-2697(2008)06-0870-05

储层宏观非均质性定量表征研究

严科 杨少春 任怀强

(中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘要: 针对当前储层宏观非均质性定量表征参数计算数值无界、表征角度各异、表征方法定量化程度不高等问题,提出了基于储层物性参数累积分布特征的宏观非均质定量表征新参数。通过对任意一组空间分布相对均匀的渗透率数据降序排列,计算出渗透率贡献百分数及其对应的序数百分数,并在直角坐标系中绘制出渗透率累积分布曲线。通过倒数坐标变换,将不同形态的渗透率累积分布曲线转换成斜率为0~1的直线,将直线斜率值定义为储层非均质程度系数。该值与储层非均质程度成反比。应用结果表明,非均质程度系数可应用于各种级次储层宏观非均质程度的定量评价。

关键词: 宏观非均质性; 定量评价; 渗透率; 累积分布曲线; 非均质程度系数; 非均质级次

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir

YAN Ke YANG Shaochun REN Huaiqiang

(College of Geor Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: There are some defects in the existing evaluation systems of macroscopic heterogeneity such as its unbounded parameters, fussy characterization and low degree of quantification. Based on the cumulative distribution of reservoir property, a new parameter named as coefficient of heterogeneity degree was proposed to quantitatively characterize the macroscopic heterogeneity degree. The homogeneous spatial distribution of a group of permeability data was arranged in descending order. The percentage of permeability contribution and the corresponding ordinal number were obtained and used to draw the cumulative distribution curve of permeability in Cartesian coordinate system. By means of coordinate conversion and regression, the different forms of cumulative distribution curves were converted into straight lines with bounded slope value from 0 to 1. The slope value was defined as coefficient of heterogeneity degree. The slope value is inverse proportion to the heterogeneity degree of reservoir. The coefficient of heterogeneity degree is favorable for the quantitative evaluation of macroscopic heterogeneity degree in different heterogeneity hierarchy.

Key words: macroscopic heterogeneity; quantitative evaluation; permeability; cumulative distribution curve; coefficient of heterogeneity degree; heterogeneity hierarchy

1 当前储层宏观非均质性定量表征存在的问题

近年来,储层宏观非均质性表征研究通过与沉积学、层序地层学、地质统计学、模糊数学等学科的结合取得了一些进展^[1-12],但目前比较成熟并得到广泛应用的方法是以裘亦楠的非均质分类方案为基础,从层内、平面以及层间3个方面进行的储层宏观非均质性表征^[13-15]。层内非均质性是指一个单砂体规模内垂向上的储层性质变化,目前主要通过计算渗透率变异系数、渗透率突进系数、渗透率级差等参数来定量表征。

但在实际应用中,由于上述参数存在计算数据无界、表征角度各异等问题,难以在统一标准下刻画非均质程度。平面非均质性是指一个储层砂体的几何形态、规模、连续性,以及砂体内孔隙度、渗透率的空间变化所引起的非均质性,主要通过编制孔隙度、渗透率等储层物性参数的平面等值线图来表征其平面变化,目前还无法实现平面非均质程度的定量表征。层间非均质性是对一套砂泥岩间互的含油层系的总体研究,属层系规模的储层描述,主要通过描述各砂层间渗透率等物性参数的差异来间接反映层间非均质性,目前还没有能够直接反映层系及砂层组级别的储层非均质程度量化指标。

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目(2007年)资助。

作者简介: 严科,男,1973年7月生,2000年毕业于石油大学(华东),现为中国石油大学(华东)博士研究生,主要从事油藏地质研究。

E-mail: yankeslof@sina.com

当前定量表征储层非均质性的参数主要包括渗透率变异系数 V_k 、渗透率突进系数 T_k 及级差 J_k 。这些参数都是基于油田开发实际情况, 从不同的角度和侧重点对储层的非均质性进行表征。但从几种参数的算法上看, 由于其计算数值的分布在理论上都是无界的, 不便于开展非均质程度的定量评价。目前采取的做法是将计算数值分成若干类, 从而将非均质程度分为不同级别。由于分类方案主观性强, 用不同的分类方案对非均质程度评价会产生不同的结果。

各参数在具体应用中也都存在表征盲点。其中, 渗透率变异系数用于度量砂体内纵向渗透率值相对于其平均值的变化程度, 是目前应用最广泛的非均质表征参数。但对于 2 个渗透率变化幅度近似而渗透率均值差别较大的砂体, 渗透率均值小的砂体所计算出的渗透率变异系数总是更大。即渗透率变异系数在算法

上受渗透率均值影响较大, 相对忽略了对非均质程度的考虑[图 1(a)]。渗透率突进系数表示砂层中最大渗透率与砂层平均渗透率的比值, 由于参数计算中忽略了渗透率变化过程, 对于非均质程度不同的储层, 也可能得到相同的突进系数计算结果[图 1(b)]。渗透率级差表示砂层内最大渗透率与最小渗透率的比值, 该参数强调渗透率最大值和最小值之间的绝对差异, 而忽略了渗透率极大值、极小值之间的变化过程, 由此导致级差的大小并不能反映储层的非均质程度。对于厚度不同的储层, 即使计算出相同的级差, 对于油藏开发的实际影响可能是截然不同的[图 1(c)]。总体上看, 上述非均质表征参数对于储层非均质性的表征角度不同, 其应用侧重点也不同, 但对于储层宏观非均质程度的定量刻画能力都相对较弱。

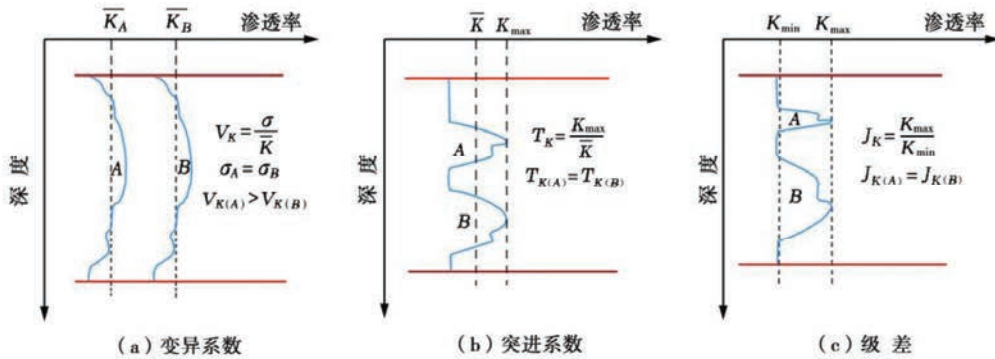


图 1 储层宏观非均质定量表征参数缺陷

Fig. 1 The defects of the current macroscopic heterogeneity parameters

2 储层宏观非均质定量表征新参数

在储层物性参数累积分布特征研究的基础上, 提出了一种新的储层宏观非均质性定量表征参数。以任意一组空间分布相对均匀的渗透率数据为例, 将数据降序排列后, 分别计算出渗透率贡献率及其对应的序数百分数, 在直角坐标系中绘制出渗透率累积分布曲线(图 2)。对于理想化的极端均质的储层, 渗透率累积分布曲线为一条直线 AC , 表明储层中每一点渗透率值相等; 对于一个非均质性极端严重的储层, 渗透率累积分布曲线为另一条直线 BC , 表明储层中渗透率差异极大。通常情况下, 渗透率累积分布曲线介于直线 AC 和 BC 之间, 为呈现上凸形态的一条曲线 L 。

将图 2 中渗透率贡献率及其对应的序数百分数分别进行倒数变换, 并在直角坐标下作图, 可以将不同形态的渗透率累积分布曲线转换成斜率不同的直线(图 3)。其中, 极端均质储层的斜率为 1.0, 极端非均

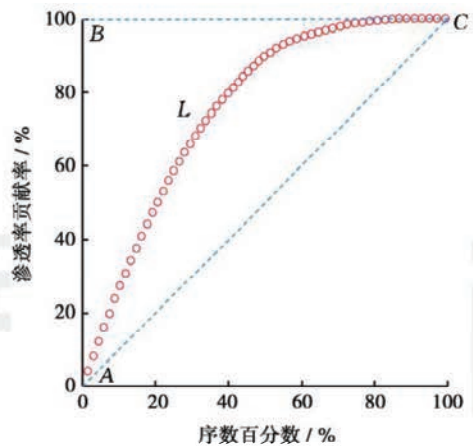


图 2 渗透率累积分布曲线

Fig. 2 Cumulative distribution curve of permeability

质储层的斜率为 0, 常规非均质储层的斜率则为 0~1。将 0~1 斜率值定义为储层非均质程度系数 K , 以此定量表征储层宏观非均质程度。该斜率值与储层非均质程度成反比。

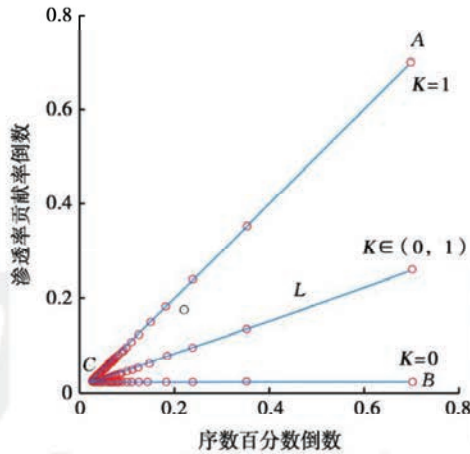


图3 非均质程度系数分布

Fig.3 Distribution of heterogeneity degree coefficient

3 储层宏观非均质定量表征新方法

3.1 层系规模储层非均质定量表征

以宁海油田为例,该油田位于东营凹陷北部,是在

古鼻状构造背景下被一组帚状断层切割所形成的断块油田。其主要含油层系为沙二段,共发育7个砂层组,60个小层,属辫状河—辫状河三角洲沉积体系。其中,1—4砂组为河流相正韵律沉积,5—7砂组为三角洲前缘反韵律沉积。储层物性较好,总体上属于中高孔、中高渗储层,非均质性严重。

宁海油田在开发过程中,以河流相沉积为主的1—4砂组和以三角洲相沉积为主的5—7砂组被分别组合为独立的开发层系。开发20多年以来对于层系规模储层非均质程度缺乏有效的衡量方法。引入非均质程度系数的计算方法,能够计算出每一砂层组以及每一套开发层系的非均质程度系数,可直观评价砂组及层系规模的储层非均质程度。由表1可见,1—4开发层系非均质程度系数为0.5293,而5—7开发层系非均质程度系数为0.4317,1—4开发层系非均质程度明显低于5—7开发层系;2砂组储层非均质性最弱,其次为6砂组,7砂组非均质性最强。

表1 宁海油田沙二段1—7砂组层间非均质定量表征

Table 1 Quantitative characterization of interlayer heterogeneity from 1st to 7th sand sets in the second member of Shahejie Formation in Ninghai Oilfield

砂层组	小层	渗透率均值/ (10 ⁻³ μm ²)	非均质程度系数		砂层组	小层	渗透率均值/ (10 ⁻³ μm ²)	非均质程度系数		
			砂层组	层系				砂层组	层系	
1	1 ¹	277.32	0.5952		5	5 ¹	3 610.97	0.6766		
	1 ²	2493.69				5 ²	4 595.39			
	1 ³	2488.21				5 ³	5 422.18			
	1 ⁴	922.69				5 ⁴	5 917.90			
	1 ⁵	2388.23				5 ⁵	2 188.29			
	1 ⁶	1439.86				6 ¹	3 933.44			0.7787
	1 ⁷	2789.35				6 ²	3 914.41			
	1 ⁸	3284.87				6 ³	3 309.63			
	1 ⁹	2467.87				6 ⁴	3 414.79			
	1 ¹⁰	2033.54				6 ⁵	1 314.33			
2	2 ¹	4328.78	0.7954		6 ⁶	2 525.99	0.4317			
	2 ²	5305.56			6 ⁷	3 410.02				
	2 ³	5472.73			6 ⁸	3 423.78				
	2 ⁴	4866.08			7 ¹	3 037.45				
	2 ⁵	3433.37			7 ²	2 851.51				
	2 ⁶	3767.66			7 ³	3 808.11				
3	3 ¹	1031.00	0.7446		7 ⁴	2 880.49	0.4686			
	3 ²	3160.11			7 ⁵	1 888.96				
	3 ³	5796.37			7 ⁶	1 991.79				
	3 ⁴	5763.73			7 ⁷	1 036.99				
	3 ⁵	4824.17			7 ⁸	1 866.34				
	3 ⁶	5899.00			7 ⁹	2 525.09				
	3 ⁷	5303.96			7 ¹⁰	1 649.95				
4	4 ¹	3351.13	0.7477		7 ¹¹	573.26				
	4 ²	2998.44			7 ¹²	25.70				
	4 ³	2838.94			7 ¹³	11.20				
	4 ⁴	3455.50			7 ¹⁴	652.62				
	4 ⁵	2483.72								
	4 ⁶	2964.61								
	4 ⁷	2769.33								
	4 ⁸	2284.36								
	4 ⁹	1783.67								
	4 ¹⁰	1731.59								

3.2 单砂体规模储层非均质定量表征

以宁海油田沙二段 5 砂组内发育的单砂体为例, 该砂组属三角洲前缘沉积, 纵向上可分为 5 个小层(单砂体), 是由辫状河三角洲不断进积所形成, 每一期砂体在岩性、物性、电性、沉积韵律等方面都具有各自的

特征。利用该油田取心井 T62-47 井的测井解释渗透率资料, 分别绘制出 5 砂组各砂体渗透率累积分布曲线, 从而计算出单砂体规模的非均质程度系数(图 4)。通过对比各砂体非均质程度系数的大小, 能够直观地对储层非均质程度进行定量评价。其中, 5³ 层非均质

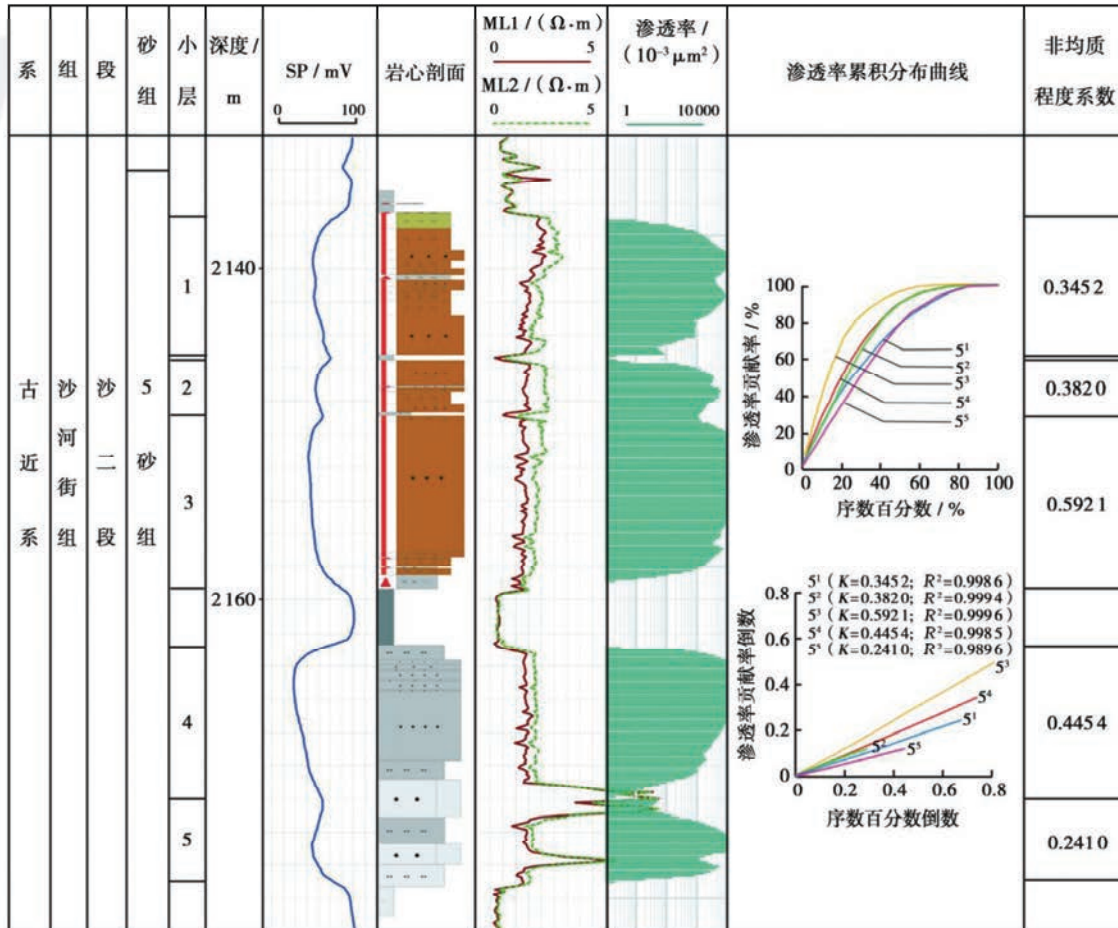


图 4 宁海油田沙二段 5 砂组层内非均质定量表征(T62-47 井)

Fig. 4 Quantitative characterization of the inlayer heterogeneity of the 5th sand sets in the second member of Shahejie Formation in Ninghai Oilfield (Well T62-47)

程度系数最大(0.5921), 说明该砂体非均质程度较低, 5⁵ 层非均质程度系数最小(0.2410), 说明该砂体非均质程度最高。

3.3 砂体平面非均质定量表征

砂体平面非均质定量表征可通过研究砂体平面分布范围内各井点储层物性参数的累积分布特征来实现。以宁海油田沙二段 1¹⁰ 层和 5² 层为例, 利用砂体平面各井点渗透率数据, 分别绘制出渗透率累积分布曲线, 并计算出平面非均质程度系数(图 5)。目前广泛采用的渗透率等值线图虽然能够直观展示平面非均质变化特点, 但难以定量说明砂体平面非均质程度。平面非均质程度系数的引入较好地解决了这一问题。计算表明, 宁海油田沙二段 1¹⁰、5² 小层平面非均质程

度系数分别为 0.1730 和 0.3181, 反映 5² 层平面非均质程度要低于 1¹⁰ 层。

4 结 论

(1) 储层非均质程度系数是一种基于储层物性参数累积分布特征研究的非均质表征新参数, 具有计算数据有界、表征目标清晰等特点, 实现了储层宏观非均质程度在统一标准下的定量表征。

(2) 储层非均质程度系数的引入进一步完善了当前储层非均质表征参数体系及表征方法, 在一定程度上改变了长期存在的层间及平面非均质表征中缺乏定量评价指标的局面, 可应用于各种级次储层宏观非均质程度的定量评价。

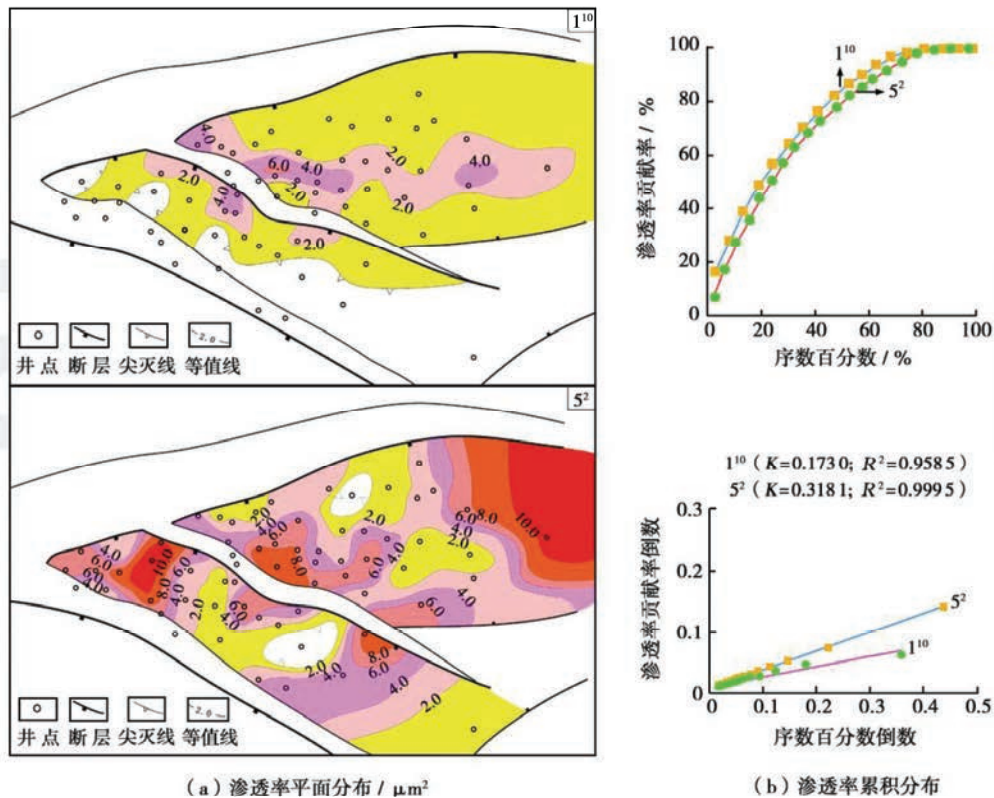


图5 宁海油田沙二段 1^{10} 、 5^2 层平面非均质定量表征

Fig. 5 Quantitative characterization of the plane heterogeneity of 1^{10} and 5^2 layers in the second member of Shahejie Formation in Ninghai Oilfield

参考文献

- [1] 戴启德, 黄玉杰. 油田开发地质学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1999: 291-300.
Dai Qide, Huang Yujie. Oilfield development geology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1999: 291-300.
- [2] 彭仕宓, 史彦尧, 韩涛, 等. 油田高含水期窜流通道定量描述方法[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 79-84.
Peng Shimi, Shi Yanyao, Han Tao, et al. A quantitative description method for channeling path of reservoirs during high water cut period[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 79-84.
- [3] 岳大力, 林承焰, 吴胜和, 等. 储层非均质定量表征方法在礁灰岩油田开发中的应用[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 75-79.
Yue Dali, Lin Chengyan, Wu Shenghe, et al. Application of quantitative method for characterizing reservoir heterogeneity to the development of reef limestone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 75-79.
- [4] 尹太举, 张昌民, 李中超, 等. 濮城油田沙三中层序格架内储层非均质性研究[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 74-78.
Yin Taiju, Zhang Changmin, Li Zhongchao, et al. Reservoir heterogeneity analysis in the base level frame of Pucheng Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(5): 74-78.
- [5] 刘建民, 徐守余. 河流相储层沉积模式及对剩余油分布的控制[J]. 石油学报, 2003, 24(1): 58-62.
Liu Jianmin, Xu Shouyu. Reservoir sedimentary model of fluvial facies and its control to remaining oil distribution[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(1): 58-62.
- [6] 靳松, 朱筱敏, 钟大康. 基准面旋回对储层宏观非均质性的控制——以胡状集油田沙三中 ϵ_8 油层组为例[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2005, 20(3): 48-52.
Jin Song, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang. Controls of base level cycles on the macroscopic heterogeneity of reservoir: Taking the sixth to the eighth unit in the middle of Es3 of Huzhuangji Oilfield as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Edition of Natural Science, 2005, 20(3): 48-52.
- [7] 何琰, 殷军, 吴念胜. 储层非均质性描述的地质统计学方法[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(3): 13-15.
He Yan, Yin Jun, Wu Niansheng. Geological statistics of reservoir heterogeneity description[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(3): 13-15.
- [8] 张希明, 王恕一. 塔里木盆地北部三叠系辫状三角洲砂体储层非均质性研究——以阿克库勒-达里亚地区为例[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 201-208.
Zhang Ximing, Wang Shuyi. A study on the heterogeneity of sand body reservoirs in Triassic braided delta, northern Tarim Basin: Exemplified by Akekule Daliya region[J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(3): 201-208.
- [9] 焦养泉, 李思田, 李祯, 等. 碎屑岩储层物性非均质性的层次结构[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(2): 89-92.
Jiao Yangquan, Li Sitian, Li Zhen, et al. Heterogeneity of porosity and permeability in clastic rock reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(2): 89-92.

(下转第 879 页)

- recovery by application of vibror energy to waterflooded sandstones [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1998, 19(3/4): 191-200.
- [2] 孙仁远, 成国祥, 陈建文, 等. 人工振动增产理论与实验研究[J]. *石油钻采工艺*, 2003, 25(6): 78-80.
Sun Renyuan, Cheng Guoxiang, Chen Jianwen, et al. Theoretical and experimental studies on artificial vibrating oil production [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2003, 25(6): 78-80.
- [3] 何易. 物理法采油中的振动频率与地质条件的关系研究[J]. *石油机械*, 2003, 31(9): 9-11.
He Yi. Relationship between vibration frequency and geologic condition in oil production by physical methods [J]. *China Petroleum Machinery*, 2003, 31(9): 9-11.
- [4] 何义中, 贺振华, 张人雄. 弹性波提高原油采收率机理研究[J]. *物探化探计算技术*, 2002, 24(3): 209-214.
He Yizhong, He Zhenhua, Zhang Renxiong. The mechanisms studies of the elasticity wave for improving oil recovery [J]. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 24(3): 209-214.
- [5] 张荣军, 蒲春生, 董正远. 振动条件下地层流体渗流的数学模型[J]. *石油学报*, 2004, 25(5): 80-83.
Zhang Rongjun, Pu Chunsheng, Dong Zhengyuan. Mathematical model for fluid filtration in formation under the condition of vibration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(5): 80-83.
- [6] 翟云芳. 渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 8-12.
Zhai Yunfang. *Mechanics of porous media flow* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 8-12.
- [7] Morton K W, Mayers D F. 偏微分方程数值解[M]. 李治平, 门大力, 许现民, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 45-78.
Morton K W, Mayers D F. *Numerical solution of partial differential equations* [M]. Translated by Li Zhiping, Men Dali, Xu Xiemin. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 45-78.
- [8] 陆全康, 赵蕙芬. 数学物理方法(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 5-49.
Lu Quankang, Zhao Huifen. *Method of mathematical physics (Part 2)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 5-49.

(收稿日期 2008-01-19 改回日期 2008-04-23 编辑 黄小娟)

(上接第 874 页)

- [10] 杨少春, 杨兆林, 胡红波. 熵权非均质综合指数算法及其应用[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(1): 18-21.
Yang Shaochun, Yang Zhaolin, Hu Hongbo. An algorithm of heterogeneous synthetic index with entropy weight [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2004, 28(1): 18-21.
- [11] 杨少春. 储层非均质性定量研究的新方法[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2000, 24(1): 53-56.
Yang Shaochun. A new method for quantitatively studying reservoir heterogeneity [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2000, 24(1): 53-56.
- [12] 张兴平, 衣英杰, 夏冰, 等. 利用多种参数定量评价储层间非均质性——以尚店油口为例[J]. *油气地质与采收率*, 2004, 11(1): 56-57.
Zhang Xingping, Yi Yingjie, Xia Bing, et al. Application of multiple parameters to evaluating reservoir interlayer heterogeneity quantitatively: Taking Shangdian Oilfield as example [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2004, 11(1): 56-57.
- [13] 谢俊, 张金亮. 法 21 断块储层非均质性研究[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2003, 22(3): 10-13.
Xie Jun, Zhang Jinliang. Research on the reservoir heterogeneity in Fa21 block [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Edition of Natural Science*, 2003, 22(3): 10-13.
- [14] 尹志军, 鲁国永, 邹翔, 等. 陆相储层非均质性及其对油藏采收率的影响——以冀东高尚堡和胜利永安镇油藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(1): 106-110.
Yin Zhijun, Lu Guoyong, Zou Xiang, et al. Heterogeneity of non-marine reservoirs and its influences on recovery factor: Take Gaoshangpu and Yonganzhen oil reservoirs in Jidong and Shengli oilfields as examples [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(1): 106-110.
- [15] 刘克奇, 田海芹, 王正蕾, 等. 卫城 81 断块沙四段沉积微相与储层非均质性[J]. *西南石油学院学报*, 2005, 27(1): 1-4.
Liu Keqi, Tian Haiqin, Wang Zhenglei, et al. The sedimentary microfacies and reservoir heterogeneity in the fourth member of Shahejie formation of fault block 81 in Weicheng Oilfield [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2005, 27(1): 1-4.

(收稿日期 2008-01-18 改回日期 2008-04-15 编辑 黄小娟)