

文章编号: 1001-6112(2010)04-0397-03

# 储层渗透率非均质性表征新参数

## ——渗透率参差系数计算方法及意义

邵先杰

(燕山大学 石油工程系, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**非均质性是储集层客观存在的特征,非均质性影响油气分布、油田产量、最终采收率以及经济效益。如何有效地表征储层的非均质性,一直是地质学家探讨的问题。目前能够表征储层非均质性的参数很多,但每一种方法都有其优缺点。在长期的科研实践中,提出了储层非均质性的表征新参数——渗透率参差系数,该参数能够比较全面、真实、准确地表征储层的非均质程度。计算方法简便,可对比性强,评价标准容易建立,计算精度不受样品数量多少的影响,实际应用中取得了比较好的效果。

**关键词:**渗透率参差系数;渗透率;非均质性;储层

**中图分类号:**TE122.23

**文献标识码:**A

## A NEW CHARACTERIZED PARAMETER FOR THE PERMEABILITY HETEROGENEITY OF THE RESERVOIR: CALCULATION METHOD OF PERMEABILITY DIVERSITY COEFFICIENT AND ITS SIGNIFICANCE

Shao Xianjie

(Petroleum Engineering Department of Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** The heterogeneity is objective character of reservoir and influences hydrocarbon occurrence, oil production, ultimate recovery factor and economic behavior. How to effectually characterize heterogeneity of the reservoir is a problem researched by geologists all the time. There are lots of characterized parameters for the heterogeneity of the reservoir. But every parameter involves advantage and shortcoming. In the long-term experience of scientific research process, a new parameter to characterize the reservoir heterogeneity is proposed, which is permeability diversity coefficient. The heterogeneity degree of the reservoir can be characterized completely, truly and accurately by this parameter. Calculation method of this parameter is simple and convenient. The comparability is good, the criteria can be easily established and the computational accuracy is not influenced by sample numbers. In the practical application it acquires preferable effects.

**Key words:** permeability diversity coefficient; permeability; heterogeneity; reservoir

油层非均质性是影响油田产量、最终采收率以及经济效益的重要参数<sup>[1-2]</sup>,如何能够全面、有效、科学、定量地表征储层非均质性是地质学家和石油工程师探索的一个重要问题。储层非均质性是储层沉积、成岩等地质过程综合作用的结果<sup>[3-5]</sup>。目前能够表征储层非均质性的参数很多,但每一种方法都有其优缺点。在长期的储层研究过程中,经过大量的理论探索与实践,提出了储层表征的新参数——渗透率参差系数,该参数能够比较真实、准

确地表征储层的非均质程度。

### 1 表征参数及方法综述

目前国内外表征储层非均质性的参数很多,常用的有突进系数、渗透率变异系数、级差、变差函数等参数<sup>[6-8]</sup>,另外还有从其它行业引进来的参数,如基尼系数等。

渗透率突进系数表征的是一定井段内渗透率最大值与其平均值的比值,即:

收稿日期:2009-12-21;修订日期:2010-06-08。

作者简介:邵先杰(1964—),男,博士,副教授,主要从事油藏描述、油田开发和软件研制等科研与教学工作。E-mail:shaoxianjie@tom.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB219604)和国家重大专项项目(2009ZX05038)联合资助。

$$T_k = \frac{K_{\max}}{\bar{K}} \quad (1)$$

式中： $T_k$  为渗透率突进系数； $K_{\max}$  为渗透率最大值； $\bar{K}$  为渗透率平均值。

其值变化范围  $1 \sim \infty$ ，越大越非均质，方法简单明了，但其数值变化范围大，可对比性差。

渗透率级差表征的是一定井段内渗透率最大值与最小值之比，数值变化范围  $1 \sim \infty$ ，同样是数值越小越均质，越大越非均质，这种方法只考虑了最大值与最小值，忽略了中间数值对储层非均质性的影响，不全面，同时也存在数值变化大，可对比性差的问题。

渗透率变异系数是一个数理统计的概念<sup>[8]</sup>，用于度量统计的若干数值相对于其平均值的分散程度。即：

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 / (n-1)}}{\bar{K}} \quad (2)$$

式中： $\sigma$  为变异系数； $K_i$  为第  $i$  个样品的渗透率值； $n$  为样品数。

其意义反映的是样品偏离整体平均值的程度。数值变化范围  $0 \sim \infty$ ，数值越大越非均质。该参数是一个重要的表征量，国内外常用它来计算数据中的变化特征，其数值变化范围大，只有下限没有上限，可比性差，分类标准不容易确定。

近几年变差函数也常用来描述储层平面的非均质性，变差函数是指区域变化量在某一方向 2 点处增量方差之半，变差函数的某些特征反映了储层参数的空间变化特征。变差函数描述平面非均质性具有整体性，比较全面，但需要数据多，井点分布要相对均匀，否则代表性差，另外，无法反映纵向非均质性。

基尼系数最早是用来评价国民收入分配的差异程度，它是根据洛伦茨曲线计算得到的<sup>[9]</sup>，后来被地质学家引用到储层渗透率非均质表征方面，也能够比较全面地反映出一组数据的均匀程度。该方法计算过程比较繁琐，并且当数据点比较少，拟合出的曲线也存在较大的误差。为此，在洛伦茨曲线基础上，提出了表征渗透率非均质性的新参数——渗透率参差系数，该参数计算简便，物理意义更明确。

## 2 参差系数的计算方法及意义

渗透率参差系数表征的是各样品渗透率值偏离完全均值线的平均值，下面详细介绍其计算方法

及意义。

将连续逐点解释的渗透率值或渗透率样品测试值从小到大排成一序列，设有  $n$  块样品，并分别从 1 到  $n$  编号。横坐标  $x$  轴为样品百分数，即样品的序号与样品总数的百分比。纵坐标  $y$  轴为样品渗透率累积百分数，即样品的渗透率累积值与所有样品渗透率总和之比。这样散点图中由  $n$  个点组成(图 1)，其中第  $m$  个点的坐标  $(x_m, y_m)$  为：

$$\begin{cases} x_m = \frac{m}{n} \times 100 \\ y_m = \frac{\sum_{i=1}^m K_i}{\sum_{i=1}^n K_i} \times 100 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x_m$  为第  $m$  个点的横坐标； $y_m$  为第  $m$  个点的纵坐标； $m$  为第  $m$  个样品。

图中对角线 OB 为完全均质线，如果样品是完全均质的，即当样品的渗透率值全部相等时，数据点全部落在 OB 线上<sup>[10]</sup>，在该线上任何一点都满足  $y=x$ ，即样品百分数等于渗透率百分数。OAB 线为完全非均质线，如果全部样品中只有一个样品有渗透率值，其它全部为零时，数据点会落在 OAB 线上。

渗透率参差系数( $Ck$ )的定义为各样品的渗透率累积百分数偏离“完全均质线”(OB 线)的相对值的平均值(图 1)。即：

$$Ck = (Ck_1 + Ck_2 + \dots + Ck_m + \dots + Ck_{n-1}) / (n-1) \quad (4)$$

$$Ck_m = \Delta k_m / x_m; \Delta k_m = x_m - y_m$$

式中： $Ck$  为渗透率参差系数； $Ck_m$  为第  $m$  个样品点偏

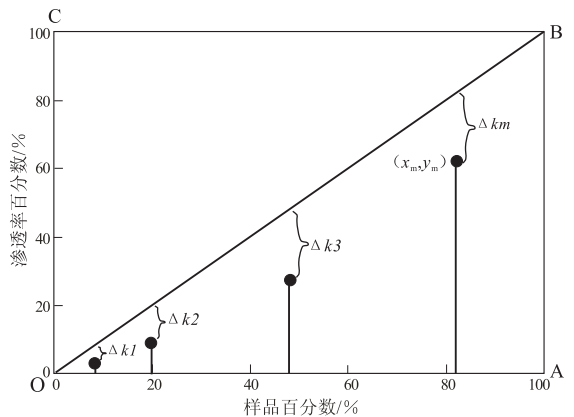


图 1 渗透率参差系数计算示意

Fig. 1 Diagram of permeability heterogeneity calculated by permeability diversity coefficient

离完全均质线的相对大小;  $\Delta k_m$  为第  $m$  个样品点偏离完全均质线的值。

因为  $Ck_n=0$ , 所以只累加到  $Ck_{n-1}$ 。

$Ck$  是介于  $0\sim 1$  之间的小数。 $Ck=0$ , 表明是均质的, 样品点的渗透率值全部相等;  $Ck=1$ , 表明是完全非均质。

该参数具有以下优点: 1) 可对比性强, 容易划分标准; 2) 不受样品点的数量限制, 样品点多可以计算, 少也可以计算; 3) 计算简便, 在电子表格中可以计算, 也可以编程计算。

根据对大量实际资料的应用总结, 依据渗透率参差系数大小可以把储层的非均质程度划分为 4 个级别:  $Ck \leq 0.4$  为均质;  $0.4 < Ck < 0.6$  为较均质;  $0.6 \leq Ck < 0.8$  为非均质;  $Ck \geq 0.8$  为极度非均质。

### 3 应用实例分析

利用江苏陈堡油田  $E_1 f_3^{1-14}$  小层数据为例(表 1), 计算结果: 24 个渗透率样品的均值  $178.85 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 变异系数 1.22, 级差 706.21, 突进系数 5.88, 基尼系数 0.57, 渗透率参差系数 0.69, 属非均质类型储层。

利用上述方法, 对陈堡油田全区 18 个层的渗透率数据分别计算了各层的变异系数( $\sigma$ )、参差系数( $Ck$ )和基尼系数( $G(k)$ )。根据计算结果分析,  $Ck$  与变异系数  $\sigma$  之间存在很好的线性关系(图 2):

$$Ck = 0.5317\sigma + 0.0424$$

$$r = 0.849 \tag{5}$$

式中:  $r$  为相关系数。

而基尼系数  $G(k)$  与变异系数的相关性见图 3, 其关系式如下:

表 1 江苏陈堡油田  $E_1 f_3^{1-14}$  层孔隙度、渗透率数据

Table 1 Porosity and permeability data for  $E_1 f_3^{1-14}$  formation of Chenbao Oilfield in Jiangsu Province

序号	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	序号	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	29.8	287.41	13	19.5	2.35
2	29.8	291.86	14	21.6	6.31
3	30.1	335.68	15	25.1	31.69
4	30.4	384.79	16	27.4	94.02
5	29.9	306.97	17	27.9	121.91
6	28.7	177.57	18	28.0	127.49
7	27.4	39.64	19	27.9	120.19
8	26.2	53.12	20	27.8	113.32
9	24.8	28.27	21	27.7	110.10
10	20.5	3.75	22	27.7	111.45
11	18.6	1.49	23	28.5	156.04
12	29.7	280.75	24	32.5	1 052.26

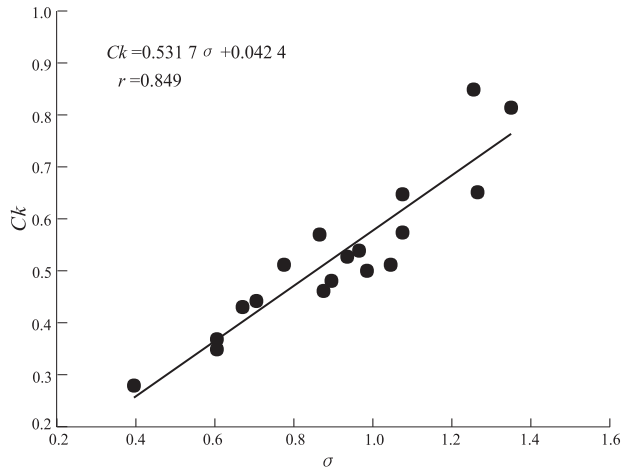


图 2 参差系数( $Ck$ )与变异系数( $\sigma$ )散点

Fig. 2 Scatter diagram of diversity coefficient ( $Ck$ ) and variation coefficient ( $\sigma$ )

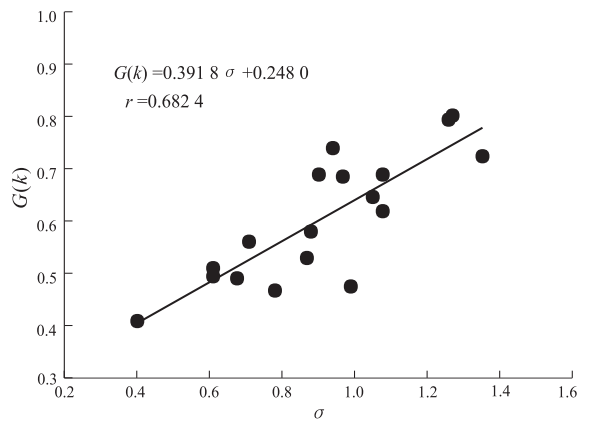


图 3 基尼系数( $G(k)$ )与变异系数( $\sigma$ )散点

Fig. 3 Scatter diagram of Gini coefficient ( $G(k)$ ) and variation coefficient ( $\sigma$ )

$$G(k) = 0.3918\sigma + 0.2480$$

$$r = 0.6824 \tag{6}$$

由图 2, 3 及式(5), (6)可见, 参差系数与变异系数的相关性好于基尼系数与变异系数的相关性, 说明利用参差系数的大小描述储层非均质性的方法是可行的, 物理意义也是明确的。

### 4 结论

1) 渗透率参差系数的首次提出, 丰富了油藏非均质性的表征方法。

2) 渗透率参差系数可以直观、方便地评价储层的非均质性, 可对比性强。同时也可以应用到其它参数的非均质研究方面。

3) 在油田的实际应用中取得了良好效果。

Sedimentary Geology, 2001,140(1-2):143-175.

[26] CAI CHUNFANG, XIE ZENGYE, WORDEN R H, et al. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation East Sichuan Basin, China: towards prediction of fatal H<sub>2</sub>S concentrations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(10):1265-1279.

[27] MARTIN M C, DAVID A C, SIMON H B, et al. Thermochemical sulphate reduction (TSR): experimental determination of reaction kinetics and implications of the observed reaction rates for petroleum reservoirs [J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(4):393-404.

[28] 岳长涛, 李术元, 丁康乐, 等. 碳酸盐岩系 TSR 系统中铁的硫化物生成模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(4):743-749.

[29] 蔡春芳, 李宏涛. 沉积盆地热化学硫酸盐还原作用评述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(10):1100-1105.

[30] ZHANG SHUICHANG, ZHU GUANGYU, LIANG YINGBO, et al. Geochemical characteristics of the Zhalanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1717-1730.

[31] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H<sub>2</sub>S 天然气 TSR 成因的同位素证据[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(11):1037-1045.

[32] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北飞仙关组高含 H<sub>2</sub>S 气藏特征与 TSR 对烃类的消耗作用[J]. 沉积学报, 2006, 24

(2):300-307.

[33] 杜春国, 郝芳, 邹华耀, 等. 热化学硫酸盐还原作用对碳酸盐岩气藏的化学改造: 以川东北地区长兴组—飞仙关组气藏为例[J]. 地质学报, 2007, 81(1):119-125.

[34] MOUGIN P, VAR V L, BARITEAU A, et al. Thermodynamic of thermochemical sulphate reduction [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 58(3-4):413-427.

[35] 岳长涛, 李术元, 丁康乐, 等. 甲烷和固态硫酸钙的热化学还原反应模拟实验初步研究[J]. 地球化学, 2003, 32(6):601-605.

[36] 岳长涛, 李术元, 丁康乐, 等. 影响天然气保存的 TSR 反应体系模拟实验研究[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(1):48-53.

[37] 代金友, 陈安定, 何顺利. 模拟硫化氢生成的热化学还原反应实验研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):200-202.

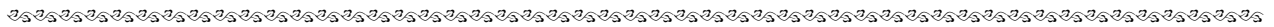
[38] 谢增业, 李志生, 王春怡, 等. 硫化氢生成模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):192-195.

[39] 于林平, 潘长春, 刘金钟, 等. 氧化作用对气态烃组成和碳同位素组成的影响[J]. 地球化学, 2005, 34(3):269-276.

[40] PAN CHANGCHUN, YU LINPING, LIU JINZHONG, et al. Chemical and carbon isotopic fractionations of gaseous hydrocarbons during abiogenic oxidation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(1-2):70-89.

[41] ZHANG TONGWEI, GEOFFREY S E, WANG KANGSHI, et al. Effect of hydrocarbon type on thermochemical sulfate reduction [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(6):897-910.

(编辑 黄娟)



(上接第 399 页)

参考文献:

[1] CHOI K, JACKSON M D, HAMPSON G, et al. Impact of heterogeneity on flow in fluvial-deltaic reservoirs: Implications for the giant ACG field, South Caspian Basin[J]. Society of Petroleum Engineers, 2007:3214-3229.

[2] 石磊, 匡建超, 曾剑毅, 等. 川西新场气田沙溪庙组致密碎屑岩储层单井产能评价与预测[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4):338-342.

[3] 于翠玲, 林承焰. 储层非均质性研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(4):15-18.

[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):75-83.

[5] 陈刚, 王正, 陈清华. 陈堡油田陈 2 断块阜宁组阜三段储层非均质性研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(2):20-23

[6] SENOCAK D, PENNELL S P, GIBSON C E, et al. Effective use of heterogeneity measures in the evaluation of a mature CO<sub>2</sub> flood[J]. SPE73803, 2008:1325-1333.

[7] ROY B, ANNO P, GURCH M. Imaging oil-sand reservoir heterogeneities using wide-angle prestack seismic inversion[J]. Leading Edge, 2008, 27(9): 1192-1201.

[8] KWON S I, SUNG W M, HUH D G, et al. Characterization of reservoir heterogeneity using inverse model equipped with parallel genetic algorithm[J]. Energy Sources, 2007, 29(9): 823-838.

[9] 李潮流, 周灿灿. 碎屑岩储集层层内非均质性测井定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5):595-599.

[10] 康晓东, 刘德华, 蒋明焯, 等. 洛伦茨曲线在油藏工程中的应用[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(1):65-67.

(编辑 黄娟)