

基于 DFA 的我国股票市场标度特性研究

都国雄^{1,2}, 宁宣熙¹, 胡永生³

(1 南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 210016)

(2 南京工业职业技术学院, 江苏 南京 210016)

(3 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

[摘要] 将消除趋势波动分析法(DFA)应用于我国沪深两市不同时间标度收盘指数的对数收益率序列, 全面分析了我国股市的标度特性. 发现标度指数随着考察时间的长短, 即数据个数的不同而不同, 但从长期来看, 两市波动都存在持久性特征, 而且收益率的绝对值序列和平方的持久性更明显; 在相同时间范围内, 不同时间标度序列的标度指数相差不大, 存在标度不变性; 小标度时间序列存在多重分形特征. 这些结果说明我国股票市场存在复杂的非线性动力学特性.

[关键词] 经济物理学, 股票市场, 标度特性, 持久性, 标度指数, 消除趋势波动分析法(DFA)

[中图分类号] O59 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2007)03-0048-06

Researches on Scaling Properties of Chinese Stock Markets With DFA

Du Guoxiong^{1,2}, Ning Xuanxi¹, Hu Yongsheng³

(1. School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Nanjing Institute of Industry and Technology, Nanjing 210016, China)

(3. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract By applying the detrended fluctuation analysis(DFA), the logarithmic return series of Chinese stock markets was studied and their scaling properties were analyzed. It is found out that the scaling exponents change with the period and there is persistence. The scaling exponents don't vary obviously with the scaling, so the scale invariance exists. The short scaling time series have multifractal properties. These results illustrate that the Chinese stock markets are the complicated non-linear dynamic systems.

Key words econophysics, stock market, scaling property, persistence, scaling exponent, DFA method

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 人们逐渐认识到金融市场具有复杂的非线性动力学特性, 物理学家开始将物理学的理论和方法应用于研究金融时间序列, 如将统计力学应用于股市特征和收益率的概率密度函数(PDF)特性的研究^[1-5], 将相变理论应用于股市突变(the stock crash)时微观结构的分析^[6], 将量子力学和规范场理论应用于远离均衡状态的资产价格建模^[7], 将混沌(chaos)和分形(fractal)理论应用于股市收益率标度特性的研究^[8-9], 将随机矩阵理论(random matrix theory, RMT)应用于不同股票之间的相关性研究^[10-11], 等等. 各种研究表明, 金融时间序列, 如美国标准普尔 500 指数^[12-14]、美国道·琼斯工业指数^[15]、香港恒生指数^[16], 以及其它股市指数变化序列^[8-9, 17], 甚至外汇交换率变化序列^[18-20], 都具有长程相关性(long-range correlations), 或标度不变性(scale invariance). 标度不变性在数学上可表示为 $f(\lambda r) = \lambda^m f(r)$, 即标度 r 改变 λ 倍后, 新函数是原函数的 λ^m 倍(λ 和 m 都是常数), 函数具有自相似性或标度不变性. λ^m 被称为标度因子. 满足这一性质的简单函数是幂函数 $f(r) \sim r^m$, 因此幂函数具有标度不变性, 或称标度变换下的不变性.

英国水利科学家赫斯特于 1951 年提出的重标度极差分析法(rescaled range analysis, 简称 R/S 法)是

收稿日期: 2006-08-20 修回日期: 2006-11-30

基金项目: 江苏省高校自然科学基金指导性计划(05KJD140087)资助项目.

作者简介: 都国雄(1964-), 博士研究生, 副教授, 主要从事理论物理学在股市特性中的应用的教学与研究. E-mail: dugx@njnu.edu.cn

研究时间序列长程相关性的方法之一. 但当序列包含短期记忆或序列非平稳时, R/S法将产生误差.

1994年, Peng C K 等物理学家和生物学家在研究脱氧核糖核酸 (DNA) 内部分子链的相关性时, 提出了消除趋势波动分析法 (the detrended fluctuation analysis 简称 DFA)^[21]. 这是一种标度分析方法, 用于定量分析非平稳 (nonstationary) 时间序列的长程相关性, 或称长程幂律相关性 (long-range power-law correlations). 由于它对时间序列的要求远低于 R/S法对时间序列的要求, 不需要考察序列是否存在短程相关, 是否存在异质性等, 因此, 国内外许多学者将这一技术应用于股市价格波动^[22-23]、汇率波动^[18-20]等的特性研究, 已经成为研究股市波动特性的重要方法之一.

1 消除趋势波动分析法 (DFA)

1.1 DFA 的计算过程

DFA 的计算过程分为五步^[19 21-23].

第一步: 根据时间序列 $\{x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 生成累积离差序列 $\{y(k)\}$:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (x_i - \langle x \rangle), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

其中 $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, 是序列 $\{x_i\}$ 的平均值.

第二步: 将序列 $\{y(k)\}$ 分成 $N_s \equiv \text{int}(N/s)$ 个连续且不重叠的子区间 $y(j)$ ($j = 1, 2, \dots, N_s$), 其中 s 为每个子区间 y 的长度. 由于 N 并不一定是 s 的整数倍, 为了不使末端信息被丢失, 可从序列 $\{y(k)\}$ 末端开始往回重复分割一次, 这样共得到 $2N_s$ 个长度为 s 的子区间.

第三步: 在每个子区间 $y(j)$ ($j = 1, 2, \dots, 2N_s$) 内, 用最小二乘法回归拟合趋势 $P_j^m(k)$:

$$P_j^m(k) = b_{j0} + b_{j1}k + \dots + b_{j(m-1)}k^{m-1} + b_{jm}k^m, \quad m = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

其中, m 称为回归趋势阶数. 根据 m 的不同取值, 如 $m = 1, m = 2, \dots$, 可以将该分析法分别记为 DFA 1, DFA 2, \dots .

计算各子区间消除趋势后的累积离差序列 $y_j(k) = y(k) - P_j^m(k)$, 并分别对这 $2N_s$ 个子区间计算方差:

$$F^2(j, s) = \langle y_j^2(i) \rangle = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[(j-1)s + i] - P_j^m(i)\}^2, \quad j = 1, 2, \dots, N_s, \quad (3)$$

和

$$F^2(j, s) = \langle y_j^2(i) \rangle = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[N - (j - N_s)s + i] - P_j^m(i)\}^2, \quad j = N_s + 1, \dots, 2N_s. \quad (4)$$

第四步: 对所有子区间的方差取平均值, 再计算方根得到 DFA 波动函数 $F(s)$:

$$F(s) = \left[\frac{1}{2N_s} \sum_{j=1}^{2N_s} F^2(j, s) \right]^{1/2}. \quad (5)$$

第五步: 对不同 s ($[N/4] > s \geq m+2$), 重复第二步到第四步, 计算相应的 $F(s)$. 若 $F(s)$ 与 s 的双对数曲线存在线性关系:

$$\log F(s) = \log C + \alpha \log s \quad (6)$$

则存在幂律 (power law) 形式的波动:

$$F(s) = Cs^\alpha. \quad (7)$$

对 (6) 式采用最小二乘线性回归可求出直线斜率 α 即 DFA 的标度指数 (the scaling exponent).

1.2 标度指数 α 的含义

标度指数 α 是判定序列特性的一个重要指标.

当 $\alpha = 1/2$ 时, 时间序列中不存在任何相关, 即时间序列是随机的.

当 $\alpha \neq 1/2$ 时, 时间序列存在长程相关, 时间序列的每一个观测值都带着与它之前所发生的所有事件的“记忆”; $0 < \alpha < 1/2$ 时间序列具有反持久性的长程幂律相关, 反持久性行为的强度随 α 的减小而增强; $1/2 < \alpha < 1$ 时间序列具有持久性的长程幂律相关, 持久性行为的强度随 α 的增大而增强. 当 $\alpha > 1$

时, 时间序列具有持久性的长程相关, 但不是幂律相关.

2 实证研究

我国自 1990 年和 1991 年分别在上海和深圳建立证券市场以来, 经历了 1993 年的 $T + 0$ 交收制度和 1995 年的 $T + 1$ 交收制度, 1996 年 12 月 16 日起实行了 10% 涨跌停板制度. 为了去除这些因素对股市的影响, 本文选取 1998 年开始的上证综指 (SH I) 和深证成指 (SZ I) 在不同时间标度的收盘指数序列作为研究样本, 分为 3 个样本, 1998 年 5 月 4 日 ~ 2005 年 6 月 1 日 (7 年) 为样本一, 1998 年 5 月 4 日 ~ 2002 年 4 月 15 日 (4 年) 为样本二, 2002 年 11 月 18 日 ~ 2005 年 6 月 1 日 (2 年半) 为样本三, 其中历时 7 年的每分钟数据序列有 40 多万个数据.

设收盘指数的时间序列为 $\{P_{\Delta t}(t)\}$, 其中 Δt 为时间标度, 也即记录数据的时间间隔, 如 1 m in, 5 m in, 10 m in, ..., 1 d 等等. 定义对数收益率序列为 $\{r_{\Delta t}(t)\}$, $r(t) = \log P(t) - \log P(t - \Delta t)$.

本文主要对 $\{r(t)\}$ 进行 DFA 回归分析 (程序都用 Matlab 编写).

2.1 不同时间标度序列的标度指数研究

我们选取 3 个样本作为研究对象, 计算对应于 DFA1 的 α 值. 计算结果如表 1 所示.

表 1 不同时间标度 DFA1 的 α 值
Table 1 The α value of DFA1 of different time scales

上证综指								
时间范围	时间标度	d	60 m in	40 m in	20 m in	10 m in	5 m in	1 m in
1998. 5. 4~ 2005. 6. 1 (样本一)	数据个数	1 690	6 701	11 473	20 103	40 207	80 415	402 533
	α 值	0. 555 4	0. 554 3	0. 562 2	0. 552 2	0. 550 4	0. 549 1	0. 517 3
1998. 5. 4~ 2002. 4. 15 (样本二)	数据个数	951	368 5	552 7	11 055	22 111	44 223	221 117
	α 值	0. 555 6	0. 551 8	0. 552 0	0. 548 7	0. 545 6	0. 543 4	0. 543 6
2002. 11. 18~ 2005. 6. 1 (样本三)	数据个数	596	2 432	3 648	7 296	14 592	29 184	145 920
	α 值	0. 483 2	0. 486 6	0. 485 9	0. 487 2	0. 485 3	0. 485 0	0. 486 3
深证成指								
时间范围	时间标度	d	60 m in	40 m in	20 m in	10 m in	5 m in	1 m in
1998. 5. 4~ 2005. 6. 1 (样本一)	数据个数	1 691	6 704	10 056	20 112	40 512	81 024	405 071
	α 值	0. 555 0	0. 562 5	0. 561 0	0. 560 2	0. 556 5	0. 555 6	0. 555 2
1998. 5. 4~ 2002. 4. 15 (样本二)	数据个数	952	3 688	5 532	11 064	22 416	44 832	224 160
	α 值	0. 553 8	0. 538 5	0. 537 8	0. 536 7	0. 533 9	0. 532 7	0. 532 6
2002. 11. 18~ 2005. 6. 1 (样本三)	数据个数	596	2 372	3 558	7 116	14 232	29 184	145 920
	α 值	0. 497 4	0. 497 4	0. 494 7	0. 496 0	0. 493 4	0. 495 6	0. 496 6

由表 1 我们可以发现:

(1) 从任意一系列的数据来看, 同一时间标度数据序列的 α 值随样本的不同而不同, 说明 α 值随时间范围, 即数据个数的变化而变化; 样本一和样本二的 α 值大于 0. 5 但样本三的 α 值略小于 0. 5 说明从长时间来看, 两市收盘指数的对数收益率序列具有持久性幂律相关特性. 这与文献 [22] 的研究结果正好相反.

我们在上述静态 DFA 计算的基础上, 进一步分析了动态变化的情况. 以上证综指 1998 年 5 月 4 日 ~ 2005 年 6 月 1 日每 40 m in 数据序列为例 (数据总量 11 473 个), α 值 ($m = 1$) 随数据量变化曲线如图 1 所示 (从 1 000 个数据算起, 步长为 500 个数据). 当数据个数为 6 000 (1 000 d) 和 8 000 (1 333 d) 左右时, α 值最大, 约为 0. 575

由此可以发现, 标度指数 α 值确实随着数据个数的变化而变化. 当然, 也不难证明选取的时间范围不同, 所得到的标度指数值也不同. 据此可以说明为什么文献 [22] 所得结果与本文不相同. 因为所选取的时间段不同, 所选取的数据个数也不同. 但总的来说, 上证综指的持久性要比深证成指的持久性强一些. 各文献在这一点上的研究结果是一致的.

(2) 从任意一行的数据来看, 无论是上证综指, 还是深证成指, 在相同时间范围内, 不同时间标度 (从 1 d 到 1 m in) 数据序列的 α 值相差不大, 对于样本一和样本二, 一般随着时间标度的增大而略微变大, 在误差范围内可以认为相同. 由此可以认为, 两市收盘指数对数收益率序列具有标度不变性, 且标度不变范围达到 3 个数量级 (1 m in 至 1 d).

(3) 当对小标度数据序列进行 DFA 分析时, 发现其回归曲线具有明显的偏折现象, 即呈现多重分形特征^[17]. 图 2 是上证综指 40m in 数据序列的回归图. 此时, 必须分段进行 DFA 分析, 其结果分别为 0.511 7 和 0.562 5 对于更小标度的数据序列, 回归曲线的偏折数更多, 如每分钟数据序列的回归曲线有二次偏折, 即有 3 个标度指数, 多重分形特征更明显.

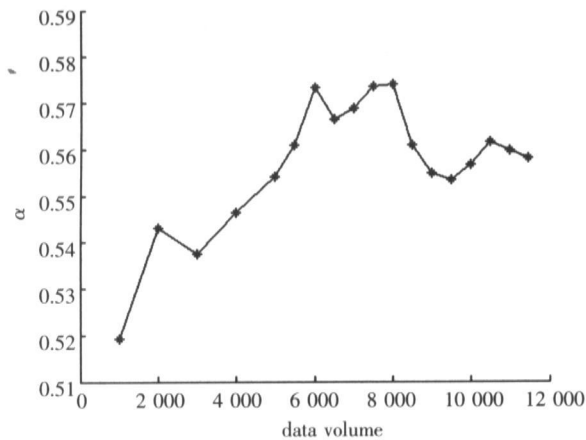


图 1 α 值随数据量的变化曲线
Fig.1 The changing of α with the data volume

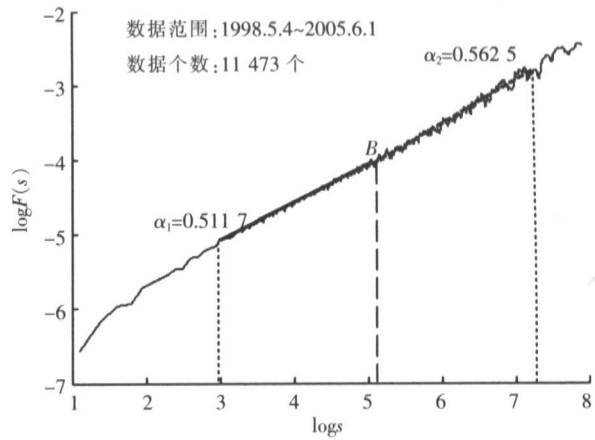


图 2 上证综指 40 min 数据序列的 DFA1 回归图
Fig.2 The regression of DFA1 of 40 min' series of SHI

2.2 不同趋势阶数 (m) 的标度指数研究

对于不同趋势阶数 ($m = 1, 2, 3, 4$) 的 DFA 分析, 两市的计算结果分别如表 2 和表 3 所示. 由表 2 和表 3 可知:

(1) 对于同一标度的对数收益率序列, 标度指数 α 并不随着 m 的增大而单调增大, 而是随着 m 的增大, 一般具有先增后降的规律. 样本一的最大值一般出现在 $m = 1$ 或 $m = 3$ 时, 样本二的最大值绝大多数出现在 $m = 2$ 时, 而样本三的最大值一般出现在 $m = 3$ 或 $m = 4$ 时 (当 $m = 5$ 时, 拟合曲线在左端一般都出现偏差, 所以没有列出结果). 至于为什么对于不同的时间标度, 最大标度指数 $\alpha_{m \max}$ 出现在不同的 m 处, 在理论上还无法解释. 但可以肯定的是, 标度较大的序列出现 $\alpha_{m \max}$ 时的 m 值一般不会比标度较小的序列出现 $\alpha_{m \max}$ 时的 m 值小. 即随着标度的增大, 最大标度指数 $\alpha_{m \max}$ 出现在较大 m 值处.

(2) 若将各时间标度序列中的最大值作为其标度指数, 即如表 4 所示 (以样本一和样本二为例), 则可以明显发现, $\alpha_{m \max}$ 随着标度的增大而增大. 说明时间标度越大, 序列的持久性越明显.

表 2 上证综指不同趋势阶数的 α 值

Table 2 The α value of SHI with different m

时间标度	d	60 m in	40 m in	20 m in	10 m in	5 m in	1 m in
时间范围	1998. 5. 4~ 2005. 6. 1(样本一)						
数据个数	1 690	6 701	11 473	20 103	40 207	80 415	402 533
趋势阶数 (m)	1	0.555 4	0.554 3	0.562 2	0.552 2	0.550 4	0.549 1
	2	0.557 1	0.554 9	0.558 1	0.552 0	0.549 3	0.547 8
	3	0.563 5	0.557 4	0.568 3	0.554 1	0.550 4	0.548 7
	4	0.547 8	0.540 2	0.560 3*	0.532 2	0.529 0*	0.527 6*
时间范围	1998. 5. 4~ 2002. 4. 15(样本二)						
数据个数	951	3 685	5 527	11 055	22 111	44 223	221 117
趋势阶数 (m)	1	0.555 6	0.551 8	0.552 0	0.548 7	0.545 6	0.543 4
	2	0.563 2	0.555 9	0.555 9	0.552 0	0.547 3	0.544 7
	3	0.559 9	0.547 0	0.548 5	0.543 8	0.537 5	0.535 0
	4	0.553 0	0.533 4	0.535 7	0.527 9	0.519 0*	0.515 5*
时间范围	2002. 11. 18~ 2005. 6. 1(样本三)						
数据个数	596	2 432	3 648	7 296	14 592	29 184	145 920
趋势阶数 (m)	1	0.483 2	0.486 6	0.485 9	0.487 2	0.485 3	0.485 0
	2	0.490 8	0.466 4	0.467 0	0.468 2	0.466 4	0.466 2
	3	0.530 4	0.484 6	0.485 5	0.485 3	0.482 3	0.481 7
	4	0.568 0	0.513 2	0.512 8	0.509 9	0.500 3*	0.497 8*

注: 标有“*”的数据表示拟合曲线在左端出现较大偏差, 文献 [23] 提出了修正方法; 下划线表明该数据在各阶中最大.

表 3 深证成指不同趋势阶数的 α 值
Table 3 The α value of SZI with different m

时间标度	d	60 m in	40 m in	20 m in	10 m in	5 m in	1 m in
时间范围	1998. 5. 4~ 2005. 6. 1(样本一)						
数据个数	1 691	6 704	10 056	20 112	40 512	81 024	405 071
趋势阶数 (m)	1	0. 555 0	<u>0. 562 5</u>	<u>0. 561 0</u>	<u>0. 560 2</u>	<u>0. 556 5</u>	<u>0. 555 2</u>
	2	0. 559 6	0. 542 8	0. 541 8	0. 540 3	0. 537 8	0. 536 4
	3	<u>0. 570 1</u>	0. 546 2	0. 544 3	0. 542 6	0. 540 6	0. 539 4
	4	0. 562 3	0. 530 6	0. 527 4 [*]	0. 521 3 [*]	0. 521 5 [*]	0. 520 8 [*]
时间范围	1998. 5. 4~ 2002. 4. 15(样本二)						
数据个数	952	3 688	5 532	11 064	22 416	44 832	224 160
趋势阶数 (m)	1	0. 553 8	0. 538 5	0. 537 8	0. 536 7	0. 533 9	0. 532 7
	2	0. 570 1	<u>0. 544 5</u>	<u>0. 544 3</u>	<u>0. 541 4</u>	<u>0. 540 7</u>	<u>0. 539 0</u>
	3	<u>0. 570 6</u>	0. 540 2	0. 539 4	0. 536 1	0. 536 4	0. 534 7
	4	0. 564 9	0. 535 4	0. 535 5	0. 527 3 [*]	0. 526 2 [*]	0. 524 1 [*]
时间范围	2002. 11. 18~ 2005. 6. 1(样本三)						
数据个数	596	2 372	3 558	7 116	14 232	29 184	145 920
趋势阶数 (m)	1	0. 497 4	0. 497 4	0. 494 7	0. 496 0	0. 493 4	0. 495 6
	2	0. 498 6	0. 495 8	0. 492 4	0. 493 0	0. 489 6	0. 490 6
	3	0. 518 1	0. 515 9	0. 513 0	0. 512 0	<u>0. 507 1</u>	<u>0. 502 8</u>
	4	<u>0. 553 2</u>	<u>0. 535 8</u>	<u>0. 531 3</u>	<u>0. 528 4</u>	0. 516 4 [*]	0. 511 6 [*]

注: 标有“*”的数据表示拟合曲线在左端出现较大偏差, 文献[23]提出了修正方法; 下划线表明该数据在各阶中最大.

表 4 各时间标度序列 α_{max} 比较
Table 4 The comparison of α_{max} with different time scale series

时间标度	d	60 m in	40 m in	20 m in	10 m in	5 m in	1 m in
时间范围	1998. 5. 4~ 2005. 6. 1(样本一)						
最大 α 值	0. 563 5	0. 557 4	0. 568 3	0. 554 1	0. 550 4	0. 549 1	0. 517 3
时间范围	1998. 5. 4~ 2002. 4. 15(样本二)						
最大 α 值	0. 563 2	0. 555 9	0. 555 9	0. 552 0	0. 547 3	0. 544 7	0. 544 8
时间范围	1998. 5. 4~ 2005. 6. 1(样本一)						
最大 α 值	0. 570 1	0. 562 5	0. 561 0	0. 560 2	0. 556 5	0. 555 6	0. 555 2
时间范围	1998. 5. 4~ 2002. 4. 15(样本二)						
最大 α 值	0. 570 6	0. 544 5	0. 544 3	0. 541 4	0. 540 7	0. 539 0	0. 538 5

2.3 对数收益率的绝对值序列和平方值序列的 DFA1 研究

由上可知, 两市收盘指数的对数收益率序列具有持久性幂律相关特性, 下面我们仅以样本一为例, 分析对数收益率的绝对值序列和平方值序列 DFA1 回归情况, 结果如表 5 所示. 由此, 可以得出结论:

表 5 对数收益率绝对值序列及平方值序列的 DFA1 分析结果

Table 5 The results of DFA1 of series with absolute return and square return

时间标度	d	60 m in	40 m in	20 m in	10 m in	5 m in	1 m in
时间范围	1998. 5. 4~ 2005. 6. 1(样本一)						
数据个数	1 690	6 701	11 473	20 103	40 207	80 415	402 533
收益率绝对值 DFA1 α 值	0. 816 4	0. 862 5	0. 888 8	0. 906 2	0. 920 0	0. 952 5	0. 942 6
收益率平方值 DFA1 α 值	0. 733 1	0. 715 4	0. 680 9	0. 690 2	0. 671 5	0. 672 0	0. 659 3
数据个数	1 691	6 704	10 056	20 112	40 512	81 024	405 071
收益率绝对值 DFA1 α 值	0. 828 0	0. 891 5	0. 899 8	0. 921 4	0. 944 6	0. 974 1	0. 984 4
收益率平方值 DFA1 α 值	0. 759 9	0. 742 1	0. 723 5	0. 714 9	0. 797 1	0. 808 7	0. 722 1

- (1) 对数收益率绝对值序列和平方值序列的 DFA1 标度指数都远大于 0. 5 说明两序列都具有极明显的持久性幂律特性. 这与文献[16]中不同股指的研究结果相似, 与其中标准普尔 500 指数的研究结果相同.
- (2) 对数收益率绝对值序列的标度指数明显大于平方值序列的标度指数, 说明前者的持久性特征更强.
- (3) 随着标度的增大, 对数收益率绝对值序列 DFA1 的标度指数逐渐减小, 这与对数收益率序列 DFA1

标度指数的变化规律正好相反. 而对数收益率平方值序列的标度指数没有明显地随标度变化的规律.

3 结论

通过对上证综指和深证成指不同时间范围和不同时间标度收盘指数序列的 DFA 研究, 我们发现:

(1) 从长时间来看, 我国股市波动具有持久性特征, 但这种特征会随着时间范围的不同而变化; 收益率的绝对值序列和平方值序列具有明显的持久性特征.

(2) 我国股市波动具有标度不变性, 不变性范围达到 3 个数量级; 对于小标度时间序列, 具有明显的多重分形特征, 其详细特征要根据多重分形理论来研究.

(3) 标度指数随着趋势阶数的变化而变化, 对于不同时间标度, 最大标度指数 α_{max} 出现在不同的 m 值处; 一般地, 随着标度的增大, 最大标度指数 α_{max} 出现在较大 m 值处; α_{max} 随着标度的增大而增大, 说明时间标度越大, 序列的持久性越明显.

[参考文献]

- [1] Plerou Vasiliki, Gopikrishnan P, Nunes Amaral L A, et al. Scaling of the distribution of price fluctuations of individual companies [J]. Physical Review E, 1999, 60(6): 6 519-6 529.
- [2] Gopikrishnan Parameswaran, Plerou Vasiliki, Gabaix Xavier, et al. Statistical properties of share volume traded in financial markets [J]. Physical Review E, 2000, 62(4): R4493-R4496.
- [3] Stanley H E, Gopikrishnan P, Plerou V, et al. Quantifying fluctuations in economic systems by adapting methods of statistical physics [J]. Physica A, 2000(287): 339-361.
- [4] [法]简·菲利普·鲍查德, [比]马克·波特. 金融风险理论——从统计物理到风险管理[M]. 周为群, 译. 北京: 经济科学出版社, 2002.
- [5] Dragulescu Adrian A, Yakovenko Victor M. Probability distribution of returns in the Heston model with stochastic volatility [J]. Quantitative Finance, 2002, 2: 443-453.
- [6] Somette Didier, Johansen Anders. Large financial crashes [J]. Physica A, 1997(245): 411-422.
- [7] 卡里尔·伊林斯基 (Kirill Ilinski). 金融物理学[M]. 殷剑峰, 李彦, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] Johannes A Skjeltorp. Scaling in the Norwegian stock market [J]. Physica A, 2000(283): 486-528.
- [9] Ho Ding-shun, Lee Chung-kung, Wang Cheng-cai, et al. Scaling characteristics in the Taiwan stock market [J]. Physica A, 2004(332): 448-460.
- [10] Plerou Vasiliki, Gopikrishnan P, Rosenow Bernd, et al. Econophysics financial time series from a statistical physics point of view [J]. Physica A, 2000(279): 443-456.
- [11] Plerou Vasiliki, Gopikrishnan P, Rosenow Bernd, et al. Random matrix approach to cross correlations in financial data [J]. Physical Review E, 2002, 65(6): 066126-1-066126-18.
- [12] Liu Yanhui, Cizeau Pierre, Meyer Martin, et al. Correlations in economic time series [J]. Physica A, 1997(245): 437-440.
- [13] Kullmann L, Toyli J, Kertesz J, et al. Characteristic times in stock market indices [J]. Physica A, 1999(269): 98-110.
- [14] Mantegna R N, Stanley H E. Scaling behavior in the dynamics of an economic index [J]. Nature, 1995, 376(6): 46-49.
- [15] Pilar Garca-Carles. Empirical evidence of long range correlations in stock returns [J]. Physica A, 2000(287): 396-404.
- [16] Sun Xia, Chen Huiping, Wu Ziqin, et al. Multifractal analysis of Hang Seng index in Hong Kong stock market [J]. Physica A, 2001(291): 553-562.
- [17] Rogerio L Costa, Vasconcelos G L. Long-range correlations and nonstationarity in the Brazilian stock market [J]. Physica A, 2003(329): 231-248.
- [18] Gallicci S, Caldarelli G, Marsili M, et al. Scaling in currency exchange [J]. Physica A, 1997(245): 423-436.
- [19] Ausloos M. Statistical physics in foreign exchange currency and stock markets [J]. Physica A, 2000(285): 48-65.
- [20] Munandy S V, Lin S C, Munagan R. Inhomogeneous scaling behaviors in Malaysian foreign currency exchange rates [J]. Physica A, 2001(301): 407-428.
- [21] Peng C K, Buldyrev S V, Harlin S, et al. Mosaic organization of DNA nucleotides [J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1 685-1 689.
- [22] 胡雪明, 宋学峰, 王新宇. 沪深股市的 DFA 实证分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 583-586.
- [23] Kantelhardt Jan W, Eva Koscielny-Bunde, Rego Henrique H A, et al. Detecting long range correlations with detrended fluctuation analysis [J]. Physica A, 2001(295): 441-454.

[责任编辑: 丁 蓉]