

# 基于无标度网络的自组织金融模型研究

任小叶,周佩玲

(中国科学技术大学电子科学与技术系,安徽合肥 230027)

**摘要:**针对CB模型及其改进模型中由于规则网络描述的均质群体结构与真实金融市场中投资者相互作用的异质性相悖,提出基于表征异质投资群体结构的无标度网络的自组织金融模型.通过投资者在交易规则约束下的自组织聚簇行为,模拟金融市场的动态演化过程.模型生成的价格波动序列与实际股指具有相似的演化动力学:价格收益的概率分布具有尖峰胖尾的特征,且它的中心峰值与时间尺度存在幂律关系,这表明价格波动序列的演化是一个自相似过程;易变性具有明显的聚簇行为,说明价格波动序列具有连续的巨幅涨落和长程关联性.这些统计特性与金融市场实证相符,验证了模型的有效性.

**关键词:**无标度网络;逾渗理论;金融市场;自组织建模;Lévy分布

**中图分类号:**N94;O59      **文献标识码:**A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.01.009

**引用格式:** Ren Xiaoye, Zhou Peiling. Study on the self-organized financial model based on scale-free networks[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(1):74-78.  
任小叶,周佩玲. 基于无标度网络的自组织金融模型研究[J]. 中国科学技术大学学报,2014,44(1):74-78.

## Study on the self-organized financial model based on scale-free networks

REN Xiaoye, ZHOU Peiling

(Department of Electronical Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** For a series of grid-based Cont-Bouchaud (CB) models unable to correctly represent the heterogeneity of interactions among investors in the real financial market, an improved evolutionary model constrained by trading rules was proposed based on the percolation theory on scale-free networks. The time series of price fluctuations generated by the model was similar to the stock index in the real financial markets. For instances, the probability distributions of returns showed the sharp peak and fat tail, and their peak values restricted to the time scales obey the power-law behavior, which suggests that the time series of price fluctuations evolves in a self-similarity way. The clustering behavior of volatility shows that there are large fluctuations and long-range correlations in the evolutionary process. These statistical properties of return and volatility empirically are consistent with the real financial markets, indicating the effectiveness of the improved model.

**Key words:** scale-free network; percolation theory; financial market; self-organized model; Lévy distribution

收稿日期:2013-04-28;修回日期:2013-05-10

基金项目:国家自然科学基金(61004102)资助.

作者简介:任小叶,女,1985年生,博士生.研究方向:复杂系统及复杂网络理论,金融市场建模. E-mail: xiaoyer@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:周佩玲,教授. E-mail: plzhou@ustc.edu.cn

## 0 引言

20 世纪 90 年代以来,研究人员开始运用物理方法分析金融高频数据.实证研究发现,股票价格波动的收益明显偏离了正态分布,呈现出尖峰胖尾特征,其绝对值(即易变性)具有聚集波动性和长程关联性<sup>[1-5]</sup>.这些程式化特征表明证券价格的动力学机制不能用随机游走来刻画,建立在理性预期假定基础上的标准金融理论无法正确地反映市场的运行情况.近年来,国内外很多学者致力于股票价格动力学机制的研究,建立了一些相应的金融市场微观结构模型,如 Cont-Bouchaud 模型(CB 模型)、Lux-Marchesi 模型和 LeBaron 模型等<sup>[6-8]</sup>.这些模型分别给出了收益率分布出现尖峰胖尾的可能原因,但是对股票价格的动态机理却没有进行细致的分析.

Wang 等在 CB 模型的基础上提出动态的交易策略和投资群体结构,使得模型更符合实际金融市场<sup>[9]</sup>.杨春霞等进一步考虑 Kahneman 等<sup>[10]</sup>提出的行为经济学中投资者风险边际效应对交易行为的影响,进一步完善 CB 模型<sup>[11]</sup>.由于 CB 模型及改进模型都是基于规则网络的自组织模型,其表征的均质投资群体结构与金融市场中投资者相互作用的异质性相悖,为此本文基于表征异质投资群体结构的无标度网络,建立了更加符合真实金融市场中投资者交互行为的模型.

## 1 金融市场模型

### 1.1 金融市场网络结构

实际的金融市场可以看作具有网络结构特征的复杂系统,节点表示投资群体,边描述投资群体之间的相互作用关系.由于投资群体结构的异质性,即拥有大量资金的投资者(如金融机构)相比其他中小资金的投资者在金融市场中有着更大的影响力,他们的相互作用关系(边)是不均匀的.证券交易市场中,股票之间的价格波动直接反映这种不均匀关系:权重大的股票(如国有企业)相比于权重小的股票(中小型民营企业)对股指涨落的影响更大<sup>[12-13]</sup>.投资群体结构的异质性使得规则网络模型不能够完全反应他们之间的相互作用关系.无标度网络能够表征不同节点之间连接关系的差异性,即具有异质的拓扑结构<sup>[14]</sup>,因此无标度网络能够有效模拟投资群体之间的相互作用关系及金融市场中股票价格波动的演化过程.

不同于基于规则网络的 CB 模型及其改进的模

型对投资群体之间相互作用的均质描述,在当前的模型中使用无标度网络刻画真实金融市场中的投资群体结构的异质性.模型上的节点表示投资者,连边代表投资者之间的联系.投资者以一定的概率进行市场动作,有连接关系的节点且具有相同的市场动作的投资者形成簇.这样能够更加真实地模拟市场中大资金量的投资者对中小投资者之间的影响,形成跟风行为(也即羊群效应).

### 1.2 金融市场动力学规则

在金融市场模型中不考虑单个投资者做出具体决策的过程,认为每一个投资群体内的个体之间存在策略依赖关系,他们追随相同的投资策略,即认为每个簇是拥有相同信息并做出相同投资行为的一个团体.每个投资群体的市场动作(购进、卖出和持有三种状态)分别用一个独立全同的随机变量(1, -1 和 0)表征.每个投资群体的交易量与簇的大小  $S$  成正比,则收益<sup>[6]</sup>:

$$r \propto \sum_{i=1}^N S_i - \sum_{j=1}^M S_j \quad (1)$$

式中,  $S_i$  和  $S_j$  分别表示购进和卖出股份的投资群体的簇的大小.式(1)直观地反映了金融市场中指数的涨落由多空双方之间供求关系的差异决定.对较小的交易概率  $p_i$ ,簇规模的分布就类似于收益率的分布.相反,当交易概率  $p_i$  很大时,由于其买卖的概率相等,收益率又可以看成若干相互独立簇的交易量的代数和.当网络规模趋于无穷,簇的数目也趋于无穷时,根据中心极限定理,收益率呈现高斯分布.

基于无标度网络的金融市场模型的交易规则与文献[11]相似.市场交易概率与供求关系定义为:

$$p_i(t) = p_i(t-1) + l \times r(t-1) + \alpha \quad (2)$$

式中,  $l$  是价格波动的敏感系数;  $\alpha$  表示外界信息披露时对交易概率的影响且是区间  $[-0.005, 0.005]$  内方差为 1 的正态分布随机数.定义市场中的投资者买入概率  $2p_i(t)(1-p_s(t))$ , 卖出概率  $2p_s(t)p_i(t)$ .考虑投资者风险边际效应对交易行为的影响<sup>[10]</sup>,当  $r > 0$  时,  $p_s(t) = 0.5 + d_1 \times r(t-1)$ ; 当  $r < 0$  时,  $p_s(t) = 0.5 + d_2 \times r(t-1)$ .  $d_1$  和  $d_2$  是投资群体的风险规避系数,满足  $d_2 = 2d_1$ .考虑式(1)描述的供求关系与收益率之间的关系,在  $t$  时刻的收益可以定义为:

$$r(t) = \text{sign} \left( \sum_{i=1}^N S_i(t) - \sum_{j=1}^M S_j(t) \right) \sum_{k=1}^{M+N} S_k(t)^\gamma \quad (3)$$

$\gamma < 1$  表示每个簇的交易量对价格的冲击程度.股票

价格的演化可以描述为:

$$p_r(t) = p_r(t-1)e^{\lambda r(t)} \quad (4)$$

$\lambda$  是调节市场流动性的参数.

由于投资者在多空市场环境下投资策略的变化,使得金融市场中投资群体结构也随时间演化.假定模型中的投资群体结构遵循以下规则演化:

(I) 羊群效应使得投资群体会不断增大.假定无标度网络上属于一个簇的投资者会将投资信息传递到与他有联系的簇外的投资者时,其传递概率为:

$$p_d(t) = p_d(\tau-1) + k \times (N_T - N(\tau-1)) \quad (5)$$

式中,  $k$  是调节簇的增长速度的动力学系数,  $N_T$  是限制簇的聚集程度的阈值参数,且  $k$  和  $N_T$  不影响模型的结果<sup>[15]</sup>.  $N(\tau-1)$  是簇演化过程中上一次迭代时刻边界上的个体数.在每个时间步,簇中的投资者通过传递信息把簇外的投资者引进来形成更大的簇,因此  $p_d$  用于表征金融市场中的羊群效应.

(II) 金融市场中博弈行为的竞争合作关系.相连的两个投资群体,如果具有相同的市场行为,他们之间形成合作,新的投资群体保持原先的市场行为;反之,他们之间面临着竞争,投资群体以一定的概率

$$p_m(j) = \frac{|S_\tau^j|}{\sum_{j=1}^s |S_\tau^j|} \quad (6)$$

判定他是否赢得竞争.式(6)中,  $|S_\tau^j|$  是第  $j$  个簇  $\tau$  时刻的规模,  $s$  是所有相邻参与竞争的簇的个数.

(III) 金融市场中投资群体的解散.无标度网络的半径  $L = \sqrt{W}$ , 其中  $W$  为网络的节点个数,簇解散的概率为:

$$p_0 = \frac{\sqrt{|S_\tau^j|}}{L} \quad (7)$$

原属于解散的簇的投资者将离开市场,其位置(节点)将以概率  $p_n$  引入新的投资者且随机赋予一种状

态.具有相同投资行为的投资者再次形成新的簇.

由于投资群体结构演化频率慢于交易频率.在模型中,每当虚拟股市演化 50 步后,再实现一次投资群体结构的动态演化.由于没有人为将占座概率  $p$  (包括  $p_n$  和  $p_d$ ) 控制在  $p_c$ ,  $p$  演化过程中可能达到临界值,所以逾渗簇可能出现,并且影响到价格的变化.

## 2 仿真结果与分析

DMS 配置算法<sup>[16]</sup> 构造得到无标度网络,设初始吸引度为 3,初始节点数目为 4,每一个时间步添加 3 条新连边,网络演化到最大规模的节点总数  $W=10\,000$ .网络度分布近似服从幂指数为 3.4 的无标度分布,与理论计算值 3 相接近.通过计算节点度的二阶矩,得到逾渗临界值  $p_c=0.055\,6$ .基于无标度网络的金融模型的参数设置类似于文献[11]中的经验值:与网络拓扑结构有关的参数  $l=\lambda=1/W$ ,投资群体的风险规避系数  $d_1=0.000\,05$ ,簇增长系数  $k=0.000\,1$ ,阈值参数  $N_T=50$ ,簇的交易量对价格的冲击程度  $\gamma=0.8$ ,信息传递概率  $p_d(0)=0.4$ ,初始值  $a(0)=0.09$ ,  $r(0)=0$ ,  $p_r(0)=1$ .

由于初始网络没有形成聚簇,占座率  $p=p_n$ .基于确定的模型参数,图 1 给出在可调参数  $p_n$  分别为 0.025(小于临界逾渗值)和 0.075(大于临界逾渗值)的情况下模型生成的股票价格波动的演化过程.图 1(a)和(b)表现出不同的演化过程,前者网络中的聚簇特性并不明显,没有出现价格的大幅波动,相当于股市在较为平稳的运行状态下的情形,后者出现了价格的大幅波动,即股市波动(大事件)频频发生.大的引入概率表明更多的投资者进入金融市场,更易于形成投资群体(也就是形成簇).式(7)表明,簇规模增大时簇解散的概率也会增大,即有较多人涌入股市,也有较多的人离开股市,股市进出频率都

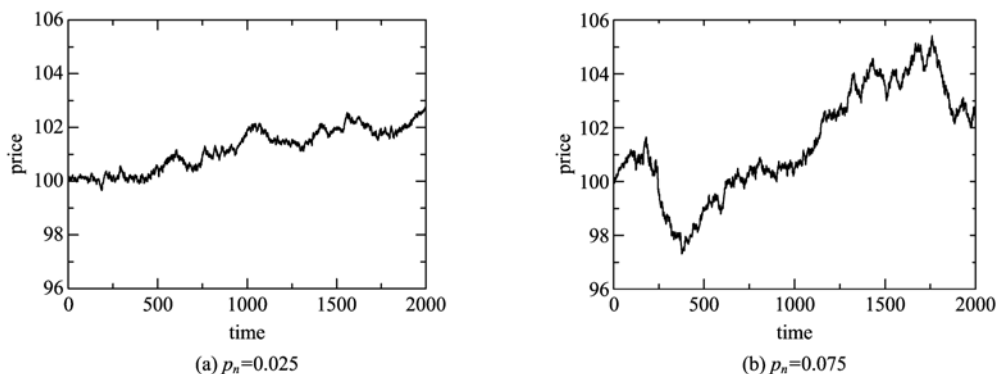


图 1 模型产生的股票价格波动的演化过程

Fig. 1 The evolution of stock price fluctuation

会增大,而股价也会出现大的波动,这些现象与实际观测数据是吻合的.

尽管基于无标度网络的金融模型能够产生多样的股票价格波动,验证模型的有效性的关键是股票价格波动的收益率和易变性的统计特性与实际金融市场实证结果一致. 针对  $p_n=0.025$  时模型产生的股票价格波动的时间序列做详细分析. 首先定义不同时间尺度上的收益:

$$Z(t) = 100 \times (p(t + \tau) - p(t)) \quad (8)$$

式中,  $p(t)$  表示  $t$  时刻的股价,  $\tau$  为时间尺度. 得到在不同时间尺度上的收益分布如图 2 所示. 在较小的时间尺度上,收益分布呈现出尖峰胖尾特征,即中心部分符合 Lévy 分布,尾部服从幂律分布. 这种现象与金融市场中股票价格指数和汇率的收益分布一致. 为了进一步研究不同时间尺度收益率分布的稳定性和对应的归一化尺度,研究收益分布的中心峰值  $P(0, \tau)$  随时间尺度  $\tau$  变化的规律. 因为中心点附近的噪音较少,所以可以很好地作出  $P(0, \tau)$  vs.  $\tau$  的双对数分布图(图 3 所示). 该图可以很好地被一条直线拟合,拟合斜率为  $0.58 \pm 0.02$ . 这个结果很好地吻合了 Lévy 分布,并且与实证研究得到的纳斯达克指数 ( $0.54 \pm 0.02$ )、道琼斯工业平均指数 ( $0.52 \pm 0.02$ )、标准普尔 500 指数 ( $0.56 \pm 0.01$ )、恒生指数 ( $0.61 \pm 0.01$ ) 和上海证券综合指数 ( $0.71 \pm 0.01$ ) 的拟合斜率接近.

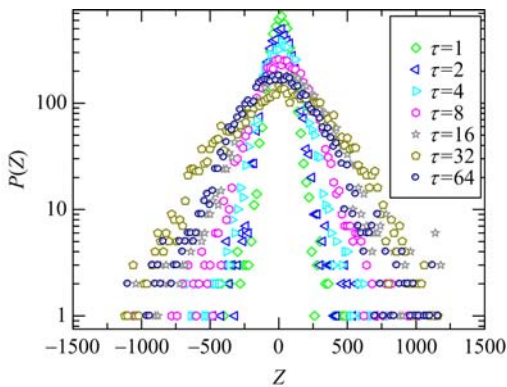


图 2 不同时间尺度上的收益概率密度  
Fig. 2 The Probability distributions of return at different time scale

由于收益分布的中心峰值  $P(0, \tau)$  随时间尺度  $\tau$  的变化满足标度不变性. 根据 Mantegna-Stanley 方法<sup>[1]</sup>, 可得特征指数  $\alpha=1.724$ , 且对不同尺度下的收益分布进行归一化:

$$Z_s \equiv Z / \tau^{1/\alpha} \quad (9)$$

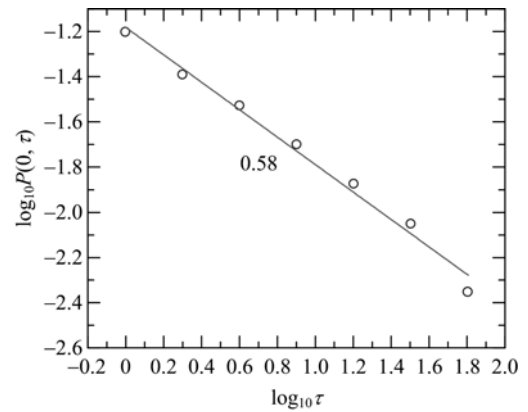


图 3 收益分布的中心峰值  $P(0, \tau)$  随时间尺度  $\tau$  的变化  
Fig. 3 The peak values  $P(0, \tau)$  of probability distribution of return change with time scale  $\tau$

$$P_s(Z_s) = \tau^{1/\alpha} P_\alpha(Z, \tau) = \tau^{1/\alpha} P_\alpha(\tau^{1/\alpha} Z_s, \tau) \quad (10)$$

图 4 表示归一化之后的收益分布,所有的数据都收敛在相同的时间尺度,并且可以用 Lévy 稳定过程刻画,由此说明了不同时间尺度的收益分布具有一定的稳定性.

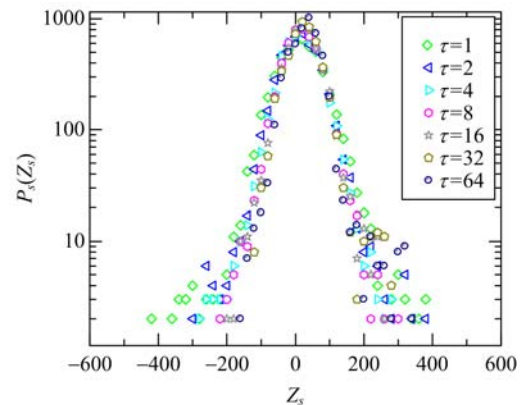


图 4 归一化的收益分布  
Fig. 4 The probability distributions of scaled return

Gopikrishnan 等分析标准普尔 500 的收益自相关函数发现:收益的自相关函数仅仅在几分钟的数量级上具有相关特征,它呈指数衰减并很快衰减到零;易变性(收益波动的幅度,常用收益的绝对值表示)则呈现持续几个月的长程相关特征,它的自相关函数按幂律衰减<sup>[3-4]</sup>. 为了进一步验证模型的有效性,图 5 给出模型产生的股票价格波动的收益(时间尺度  $\tau=1$ )的自相关函数及其易变性的自相关函数. 如图 5(a)所示,收益的自相关函数相比于易变性的自相关函数更快的衰减到零,反过来说易变性表现显著的长程相关特征,因此实验结果从另一个角度验证的模型的有效性.

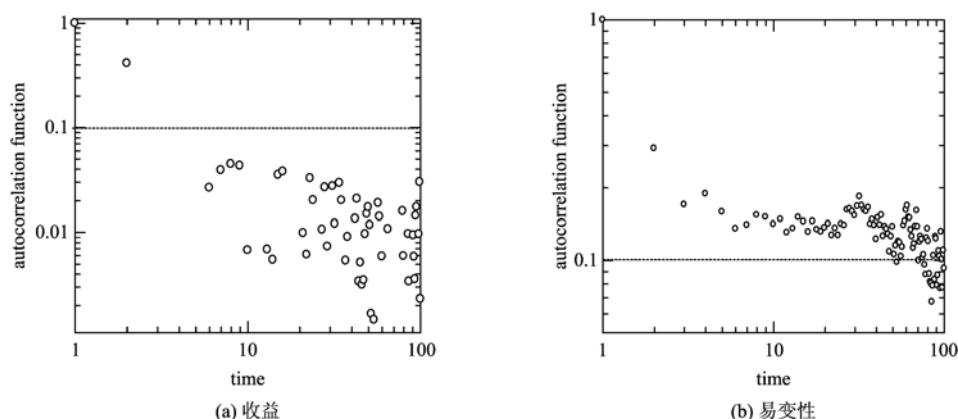


图 5 收益(a)和易变性(b)的自相关函数  
 Fig. 5 The autocorrelation functions of return (a) and volatility (b)

### 3 结论

针对 CB 模型及其改进模型中由于规则网络描述的均质群体结构与真实金融市场中投资者相互作用的异质性相悖,提出基于无标度网络的自组织金融模型. 在交易规则约束下模拟金融市场的动态演化,得到的收益表现出非正态分布和标度不变性,易变性表现出长程相关特征. 这些统计特性与金融市场的实证结果相符合,验证了模型的有效性. 尽管模型很好地再现了金融市场的程式化特征,但是由于金融市场收益分布偏离正态标度特征的原因还不明了,且微观模型对于未来的股票价格波动的预测性并不强,因此基于提出的模型结合趋势波动分析对股票价格波动做出很好的预测将是未来工作的重点.

#### 参考文献(References)

- [ 1 ] Mantegna R N, Stanley H E. Scaling behavior in the dynamics of an economic index[J]. *Nature*, 1995, 376: 46-49.
- [ 2 ] Galluccio S, Caldarelli G, Marsili M, et al. Scaling in currency exchange[J]. *Physica A*, 1997, 245: 423-436.
- [ 3 ] Gopikrishnan P, Plerou V, Nunes Amaral L A, et al. Scaling of the distribution of fluctuations of financial market indices[J]. *Physics Review E*, 1999, 60(5): 5 305-5 316.
- [ 4 ] Liu Y, Gopikrishnan P, Cizeau P, et al. Statistical properties of the volatility of price fluctuations[J]. *Physics Review E*, 1999, 60(2): 1 390-1 400.
- [ 5 ] Wang B H, Hui P M. The distribution and scaling of fluctuations for Hang Seng index in Hong Kong stock market [J]. *European Physics Journal B*, 2001, 20: 573-579.
- [ 6 ] Cont R, Bouchaud J P. Herd behavior and aggregate fluctuations in financial markets [J]. *Macroeconomic Dynamics*, 2000, 4(2): 170-196.
- [ 7 ] Lux T, Marchesi M. Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market[J]. *Nature*, 1999, 397(11): 498-500.
- [ 8 ] LeBaron B. Evolution and time horizons in an agent-based stock market [J]. *Macroeconomic Dynamics*, 2001, 5(2): 225-254.
- [ 9 ] Wang J, Yang C X, Zhou P L, et al. Evolutionary percolation model of stock market with variable agent number[J]. *Physica A*, 2005, 354: 505-517.
- [ 10 ] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-291.
- [ 11 ] 杨春霞, 王杰, 周涛, 等. 基于自组织逾渗的金融市场模型[J]. *科学通报*, 2005, 50(20): 2 309-2 313.
- [ 12 ] ZHOU Yan-bo, CAI Shi-min, ZHOU Pei-ling. Scale-free properties of financial markets [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(8): 880-884.  
周艳波, 蔡世民, 周佩玲. 金融市场的无标度特征研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(8): 880-884.
- [ 13 ] Cai S M, Zhou Y B, Zhou T, et al. Hierarchical organization and disassortative mixing of correlation-based weighted financial networks [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2010, 21(3): 433-441.
- [ 14 ] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286 (5439): 509-512.
- [ 15 ] Cavalcante F S A, Morira A A, Costa U M S, et al. Self-organized percolation growth in regular and disordered lattices[J]. *Physica A*, 2002, 311(3-4): 313-319.
- [ 16 ] Dorogovtsev S N, Mendes J F F, Samukhin A N. Structure of growing networks with preferential linking[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(21): 4 633-4 636.