

金融动力学的时空关联与大波动特性

——兼谈中西方金融市场的对比研究*

郑 波[†]

(浙江大学物理系 杭州 310027)

摘 要 文章扼要地评述了金融物理学研究进展,介绍了文章作者在金融动力学时空关联方面的最新研究成果,特别关注中西方金融市场的对比研究.唯象理论研究表明,西方金融市场的价格收益率和波动率的时间关联显示杠杆效应,而中国金融市场则显示反杠杆效应;一种价格收益率和波动率的反馈相互作用可以解释杠杆和反杠杆效应的起源.西方金融市场的个体股票价格的交叉关联呈现标准的行业板块结构,而中国金融市场展示的是一种特殊的板块结构,如“ST 板块”和“蓝筹板块”等.股票价格大波动可分为动力学内部产生的和外部事件诱导的两大类.金融动力学的时间反演不对称性,主要来源于外部事件诱导的大波动.

关键词 金融物理,复杂系统,统计物理,交叉学科

Spatio-temporal correlations and large volatilities in financial dynamics

ZHENG Bo[†]

(Physics Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract We briefly review progress in econophysics, and report our recent results on spatio-temporal correlations and large volatilities in financial dynamics, with special emphasis on comparative studies of the western and Chinese stock markets. Our phenomenological analysis reveals that the return-volatility correlation of western markets shows the leverage effect, while that of the Chinese market exhibits anti-leverage effects; a feedback interaction between returns and volatilities may explain the origin of the leverage and anti-leverage effects. The cross-correlations between individual stocks in western markets display the structure of standard business sectors, while those of the Chinese market show unusual structures like the ST and blue-chip sectors. Large volatilities in financial dynamics may be classified into “exogenous” and “endogenous” events. The breakdown of time-reversal symmetry in financial dynamics is mainly attributed to “exogenous” events.

Keywords econophysics, complex systems, statistical physics, interdiscipline

1 引言

金融市场是高度复杂的动力学系统,金融学家和数学家等不同学科的科技工作者,已经有多年的研究积累.物理学早年也触及金融市场,但金融市场真正引起物理学家的高度关注,始于1995年美国波士顿大学 Stanley 等发表在《Nature》的一篇论文^[1].该论文对股票市场以分钟为单位的高频数据进行分析,首次指出,价格收益率的概率分布既不是高斯分布,也不是 Levy 分布,而是尾部截断的 Levy 分布.论文进一步阐述,价格收益率的概率分布展示

一种动力学标度行为.更深刻地说,金融动力学系统具有时间方向的自相似性,是一种强的记忆效应.研究表明,金融动力学系统的记忆效应来源于价格波动率的长程时间自关联^[2].与此对比,价格收益率的时间自关联甚小,可以忽略.在随后几年的热潮中,人们对金融动力学进行了比较系统的唯象分析,并建立了种种微观模型^[3-7].这些微观模型在不同程度上刻画了金融动力学行为特征,尤其是价格波动

* 国家自然科学基金(批准号:70371069)和浙江省自然科学基金(批准号:Z6090130)资助项目

2009-10-20 收到

[†] Email: zheng@zimp.zju.edu.cn

率的长程时间自关联以及相关的动力学集体行为。

这一新兴的物理学与金融学的交叉领域称为金融物理学。2004年,基于其对金融物理学的杰出贡献,Stanley 被授予玻尔兹曼奖。

为什么这样一个领域称为金融物理学?特别是金融物理学与其他相关学科,如金融数学和计量金融学等,具有哪些共同和差异之处?共同之处是显然的,他们都是关于金融市场的定量理论。差异在于,金融物理学强调的是在微观层次探讨问题,并在研究中大量应用物理学特别是统计物理学中的概念和方法,如多体相互作用、时空长程关联、内部对称性、相和相变、多重分形、随机矩阵理论以及重整化群方法等。确实是物理学家,首次对金融市场大量的以分钟和秒为单位的高频数据进行系统的定量分析和研究,并应用统计平均的方法寻找动力学运动规律。以此为基础,金融物理学中构建的金融市场模型,主流是微观多体模型,试图描述大数目的股民和公司的多方博弈与相互作用及其诱导的集体行为。由于金融动力学系统存在时间长程关联和大涨落,人们也尝试应用重整化群方法,并探讨类相变现象以及种种对称性。

在过去的十余年中,金融物理学家较多研究金融市场的稳态,关注较为普适的统计性质和运动规律。从物理学的观点看,人们已对金融动力学系统的基本性质和显著特征有了一定程度的了解,并触及金融和经济学的若干基本问题,如杠杆效应、板块效应、价格形成机制和金融危机等^[8-14]。应该说,前些年金融物理学疯狂膨胀的阶段已经过去,现在是平静下来探讨重要而实质性问题的恰当时机。笔者认为,金融物理学今后的发展方向是,研究金融市场的弱普适和非普适的动力学性质和运动规律,研究金融动力学的非稳态性质和金融危机的动力学内部机制,强调与金融学和经济学更密切相关的研究课题,探讨构建金融多体模型的较一般思路,开拓和发展与计量金融学的交叉领域。在研究方法上,应当超越常用的统计平均方法,发展时间系列的分解和展开方法,动力学响应理论,复杂网络结构分析以及半经验的和介观的金融模型等。

我们关心什么研究课题呢?除了上述的一般思路外,我们特别关注中西方金融市场的对比研究。本文综述过去几年我们取得的若干研究成果,侧重唯象理论研究,而微观多体模型方面的研究工作将另外行文介绍。本文第二节扼要阐述中西方金融市场的共同特征;第三节和第四节研究中西方金融市场的价格收益率和波动率的时间互关联,以及个体股

票价格的交叉关联方面的普适和非普适运动规律;第五节探讨股票价格大波动和金融危机;第六节是结论和展望。

2 中西方金融市场的对比研究

过去十余年中,人们对西方金融市场进行了较仔细的研究,但对中国金融市场的研究可以说还处在起步阶段。为什么呢?因为西方金融市场已有较长的历史,积累了较多的原始数据,相对地我国金融市场才存在十余年,而且我国在金融物理方面的研究也起步略晚。此外,中西方金融市场的差异重要而微妙,必须对大量数据进行系统和耐心的分析,才能获得有意义的结果。

人们常常相信,我国的社会体制和行政干预会改变金融市场的运动规律。但是,中西方金融市场的若干基本统计性质和运动规律其实大体相同,即具有所谓的普适性。粗略地说,股票价格的运动可以分解为三部分:市场的整体运动、市场的局部运动和准随机运动。市场的整体运动和准随机运动相应的基本性质大体上具有普适性。非普适的运动规律主要支配市场的局部运动。

记股票或大盘指数价格为 $P(t)$, 价格收益率为 $R(t) = \ln P(t + \Delta t) - \ln P(t)$ 。为了方便研究,我们引入归一化的价格收益率

$$r(t) = [R(t) - \langle R(t) \rangle] / \sigma$$

其中 $\langle \dots \rangle$ 代表对时间 t 的统计平均,而 σ 是时间序列 $R(t)$ 的标准偏差。按习惯,价格波动率定义为 $|r(t)|$ 。请注意,当我们对时间 t 平均时,便已经假设动力学系统处于稳态。从物理学的角度看,金融动力学的统计性质便由 $r(t)$ 的概率分布函数 $P(r)$, $r(t)$ 的各种时间关联函数,以及个体股票之间的交叉关联(即“空间”关联)描述。在金融学中, $r(t)$ 的这些统计性质常常会有另一种表达形式。

中西方金融市场的若干基本统计性质具有普适性^[2,14-16],例如:

(1) 价格收益率的概率分布 $P(r)$ 具有“幂次胖尾”的特征,即当 r 较大时

$$P(r) \propto r^{-\mu}, \mu \approx 0.38.$$

这表示概率分布明显偏离高斯分布(见图 1(a))。

(2) 价格收益率 $r(t)$ 的时间自关联很小,可以忽略。也就是说, $r(t)$ 的正负号基本上是随机的,难以预测。

(3) 价格波动率 $|r(t)|$ 具有长程时间自关联,

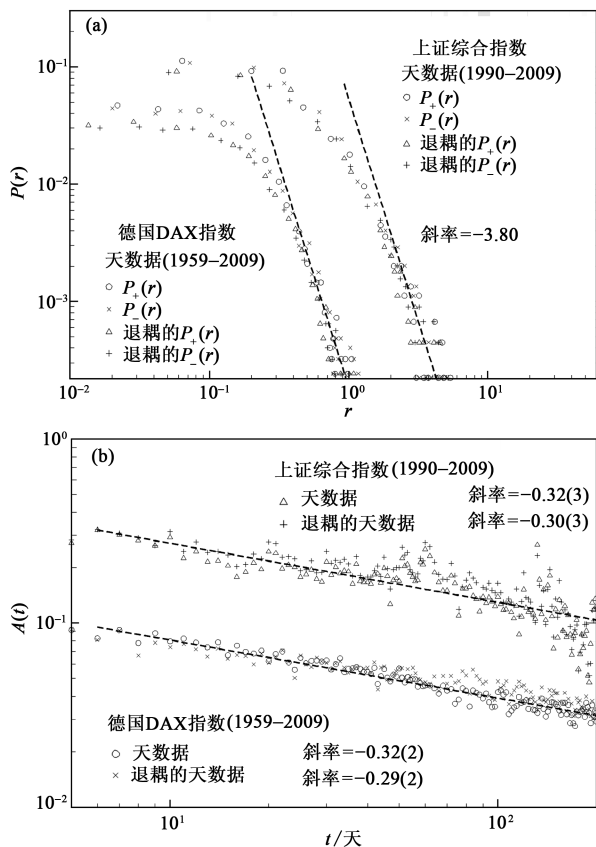


图1 德国DAX指数和中国上证指数的以天为单位的价格收益率的概率分布(a)和价格波动率的时间自关联函数(b). $P_+(r)$ 和 $P_-(r)$ 分别表示正收益率和负收益率的概率分布.应用延迟波动率模型引入退耦相互作用后,结果基本保持不变.曲线的斜率给出指数 μ 和 β 的值

即自关联函数呈幂次行为,

$$A(t) \equiv \langle |r(t)| |r(t+t)| \rangle \propto t^{-\beta}, \beta \approx 0.32.$$

在金融学中,这一性质称为“volatility clustering”,即无论金融市场当前处于动荡($r(t)$ 大)或平稳($r(t)$ 小)状态,这一状态的效应将持续相当长时间,平均可达数月之久(见图1(b)).

(4)价格波动率 $|r(t)|$ 的保持概率 $P_-(t)$ 遵从幂次行为,即

$$P_-(t) \propto t^{-\theta}.$$

中国金融市场的指数 $\theta = 0.84$,略小于德国的 $\theta = 0.87$. $0.5 < \theta < 1$ 表示价格波动率 $|r(t)|$ 具有时间非局域的长程自关联.保持概率的详细描述见参考文献[14,16].

3 杠杆效应与反杠杆效应

金融市场的价格收益率的时间自关联很小,动力学的强记忆效应由价格波动率的长程时间自关联

刻画.十多年来,人们对与此相关的动力学集体行为进行了较为详尽的研究.但是,为了全面掌握金融动力学,特别是价格收益率的运动规律,需要计算更高阶的时间关联函数.当然,越高阶的时间关联越微弱,相应地涨落也越大,需要进行仔细和耐心的分析与研究.不为零的最低阶的与价格收益率相关的时间关联函数 $L(t)$ 是价格收益率和价格波动率的时间互关联函数,即

$$L(t) \equiv [\langle r(t) | r(t+t) |^2 \rangle - L_0] / Z,$$

其中 L_0 和 Z 均为常数, $L_0 = \langle r(t) \rangle \langle |r(t)|^2 \rangle$, $Z = \langle |r(t)|^2 \rangle^2$. $t < 0$ 的情形太复杂,本文只考察 $t > 0$ 情形,即当前时刻的价格收益率如何影响今后一段时间的价格波动率.西方金融市场包括其他较成熟的金融市场均显示 $L(t) < 0$,持续时间至少20天(见图2(a)).在金融学中,这一现象称为杠杆效应[9].如果当前时刻价格上升,今后一段时间的价格波动率将下降,即市场趋于平稳;反之,价格波动率将上升,市场趋于动荡.奇特的是,我们的计算表明,

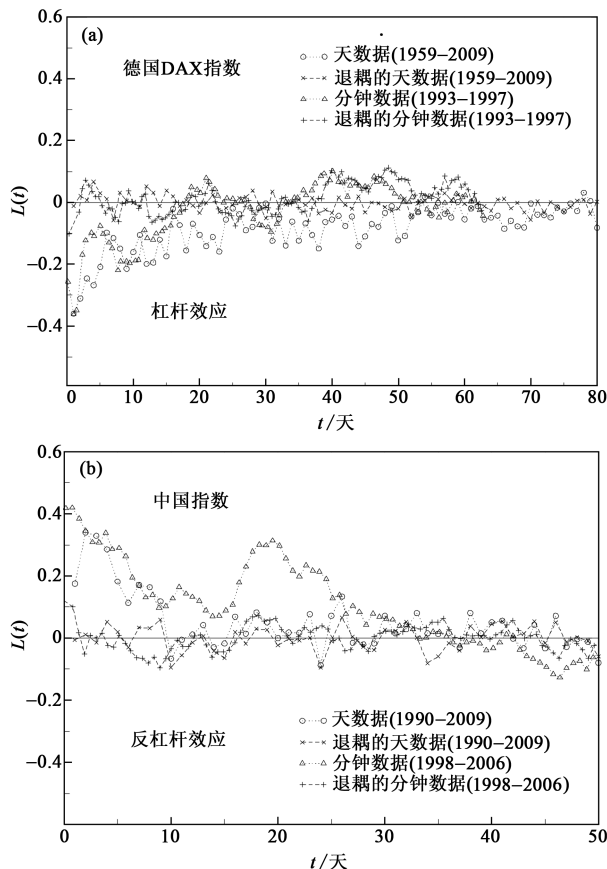


图2 (a)德国DAX指数呈现杠杆效应;(b)中国指数(上证指数和深成指之和)显示反杠杆效应.以天为单位和以分钟为单位的价格收益率给出相同结果.应用延迟波动率模型引入退耦相互作用后,杠杆效应和反杠杆效应被消除

中国金融市场显示 $L(t) > 0$, 持续时间至少 10 天 (见图 2 (b)). 我们把这一现象命名为反杠杆效应^[12,14,15]. 据目前所知, 中国金融市场的反杠杆效应是唯一的.

为什么西方金融市场呈现杠杆效应而中国金融市场呈现反杠杆效应呢? 一种解释是中国金融市场还处于非稳态, 另一种解释是中国的经济体制和社会文化独特, 也可能二者兼有. 其实, 不管是哪种解释, 笔者认为关键是西方股民主体上视金融市场为相对稳定的融资机构, 而中国股民倾向于视金融市场为高风险高回报的投资场所 (俗称要“发大财”). 当西方股票价格上升, 股民看到财富翻了一倍, 放心度假去了, 股市平稳; 反之, 股民感到危机, 较盲目地交易, 股市趋于动荡. 当中国股票价格上升, 股民觉得机会来了, 疯狂交易, 股市走向动荡; 反之, 股民多半会被“套牢”, 等待股票价格反弹, 股市便趋于平稳.

从动力学理论的角度分析, 非零的价格收益率和价格波动率的时间互关联是如何产生的呢? 一种流行的观点是, 由价格收益率的不对称概率分布 (即正收益率和负收益率的概率分布不相同) 和价格波动率的长程时间自关联导致. 这种观点似乎得到一些具有价格收益率不对称概率分布的个体股票数据的支持. 但是, 本文分析的德国 DAX 指数和中国指数都不具有价格收益率的不对称概率分布. 我们在新近的一篇论文中指出^[14], 在唯象理论的层次, 一种价格收益率和波动率的反馈相互作用可以解释杠杆和反杠杆效应. 引入一个延迟波动率模型:

$$r_0(t) = [1 + \sum_{t=1}^{\infty} K(t)r(t-t)]r(t) \quad ,$$

其中 $r(t)$ 是原始的价格收益率, $K(t)$ 代表价格收益率和价格波动率的反馈相互作用, $r_0(t)$ 是新产生的价格收益率. 恰当选取 $K(t)$ 可以产生或消除杠杆或反杠杆效应. 例如, 我们可以取 $r(t)$ 为真实金融市场的价格收益率, 然后用 $K(t)$ 消除其杠杆或反杠杆效应 (见图 2). 这时的反馈相互作用也称退耦相互作用. 这里的关键是, $\sum K(t)r(t-t) \ll 1$, 反馈相互作用仅仅是一种微扰, 它可以消除杠杆或反杠杆效应, 但价格收益率的其他重要统计性质保持不变 (见图 1).

4 个体股票价格的交叉关联

金融市场没有传统意义下的空间概念, 个体股票的交叉关联便是其“空间”关联. 设个体股票的价格收益率为 $r_i(t')$, 股票之间的交叉关联可用矩阵

元 C_{ij} 表示:

$$C_{ij} \equiv \langle r_i(t)r_j(t) \rangle \quad ,$$

便可定义一个对称的关联矩阵 C . 考察关联矩阵 C 的性质, 可以探讨个体股票之间的相互作用. 首先, 矩阵元 C_{ij} 在区间 $[-1, 1]$ 取值, 取值分布 $P(C_{ij})$ 存在一个极大值, 极大值两边近似对称. 矩阵元的平均值 $\overline{C_{ij}}$ 大体决定股票交叉关联的强度. 我们的计算表明^[13], 中国金融市场的交叉关联强度较大, $\overline{C_{ij}} \approx 0.4$, 大约是美国及印度等国的两倍^[8,10,13]. 这一事实与中国股票价格的涨落较大相关.

其次, 通过正交变换, 可以对关联矩阵 C 进行对角化, 求出本征值 λ_a 及对应的本征矢 $u_i(\lambda_a)$. 金融市场的关联矩阵的本征值取值分布, 主体上与完全随机的关联矩阵相同. 差别在于, 前者存在若干个较大的本征值, 可按大小顺序记为 $\lambda_0, \lambda_1, \dots$ ^[8,10,13]. 例如, 中国金融市场的最大本征值 $\lambda_0 > 100$, 而随机矩阵的本征值都小于 2^[13].

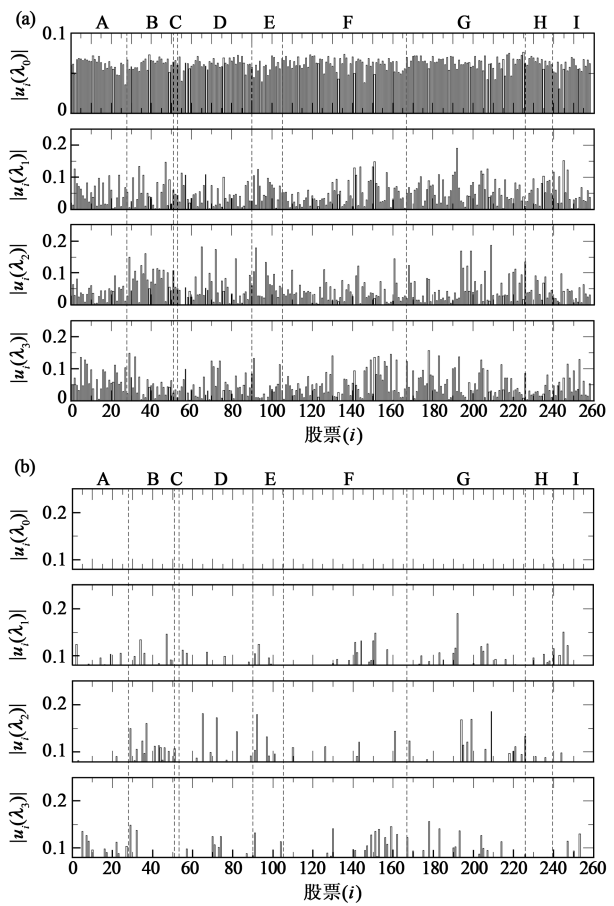


图 3 (a) 中国金融市场关联矩阵的最大的 4 个本征值对应的本征矢的各个分量的绝对值. 股票按市场板块排列, 不同板块用虚线分隔 (A 为金融, B 为信息技术, C 为能源, D 为原材料, E 为日常消费品, F 为非日常消费品, G 为工业, H 为公共事业, I 为医疗卫生); (b) 同 (a), 但只显示 $|u_i(\lambda_a)| > u_c = 0.08$ 的分量

考察较大本征值的本征矢 $u_i(\lambda_0), u_i(\lambda_1)$ 等, 我们发现这些较大本征值对应金融市场的不同相互作用. 最大本征值的本征矢 $u_i(\lambda_0)$ 的各个分量的取值近似相等(见图 3(a)), 其对应的运动模式不妨称之为市场的整体运动, 由个体股票之间的公共相互作用支配. 市场的整体运动对所有金融市场是普适的. 对于美国金融市场, 次大本征值的本征矢 $u_i(\lambda_\alpha)$ ($\alpha=1, 2, \dots$) 的各个分量的取值局域化, 即某一市场板块的股票的分量取值较大, 而其余的取值较小. 这一运动模式不妨称之为市场的局域运动, 由个体股票之间的板块相互作用支配. 对于美国金融市场, 前 10 个次大本征值都能找到对应的市场板块^[8,10].

有趣的是, 对于中国金融市场, 我们找不到次大本征值与标准市场板块的对应. 但是, 次大本征值确实是存在的, 而且本征矢的各个分量的取值涨落相当大(见图 3(a)). 因此, 我们引入阈值 u_c , 考察对某个本征矢哪些分量满足 $u_i(\lambda_\alpha) > u_c$, 这些分量对应的股票便应当组成一个“板块”^[13]. 图 3(b) 给出 $u_c = 0.08$ 的结果. 详细的分析表明, λ_1 对应“ST 板块”, 即亏损或业绩不好的股票; λ_2 对应“蓝筹板块”, 即赢利或业绩好的股票; λ_3 对应“上海房地产板块”, 即在上海注册的房地产公司的股票. 其他次大本征值对应的“板块”目前还没法认定, 需要进一步研究. 换句话说, 中国金融市场传统的市场板块相互作用较弱, 取而代之的是一类特殊的“板块”. “ST 板块”和“蓝筹板块”表示中国股民对上市公司的业绩好坏十分敏感. 而“上海房地产板块”也许说明, 上海的房地产业或上海市在中国国民经济中具有举足轻重的作用. 最后, 构造一类多体相互作用动力学模型, 可以定性地描述中西方金融市场的板块相互作用^[13].

5 股票价格大波动与金融危机

金融危机是世人瞩目的大事件, 物理学家也试图探索其中的玄妙, Sornette 的研究工作较有代表性^[11]. 应用统计物理学中的相变和自相似性等概念, 可以唯象地描述金融危机前后的泡沫现象, 并做出一定预测. 一般说来, 金融危机是金融动力学的非稳态行为, 其运动规律与前两节讨论的稳态行为大不相同. 由于金融危机的事件数目太少, 探讨其统计性质显得十分困难.

我们的思路是, 先考虑股票价格大波动事件, 研究其统计性质, 然后逐步逼近金融危机^[17,18]. 例如,

可取阈值 $\zeta = 2\sigma, 4\sigma, 8\sigma, \dots$, 定义 $|R(t)| > \zeta$ 为价格大波动事件. 当 ζ 足够大时, 便是所谓的金融危机了. 由于价格波动率具有长程时间自关联, 所以当某一时刻出现价格大波动时, 其后一段时间的价格波动率将在较高水平振荡. 引入剩余价格波动率

$$m_{\pm}(t) \equiv [\langle |r(t \pm t)| \rangle_c - \sigma] / m_0, \quad (1)$$

其中 $\langle \dots \rangle_c$ 代表对价格大波动事件的平均, $m_0 = \langle |r(t)| \rangle_c - \sigma$. 我们的研究表明, $m_{\pm}(t)$ 遵从幂次律:

$$m_{\pm}(t) \propto (t + \tau_{\pm})^{-p_{\pm}}, \quad (2)$$

式中 $\tau_{\pm}$ 是正数, $p_{\pm}$ 是刻画价格波动率的动力学弛豫过程的指数. 通过对中国和德国的金融指数仔细分析研究, 我们得到如下结果:

(1) 随着 ζ 增大, 动力学指数 $p_{\pm}$ 也增大. 这表示动力学系统逐步偏离稳态;

(2) 在用分钟作为时间标度时, 金融动力学具有时间反演对称性, 即 $p_+ = p_-$; 但在用天作为时间标度时, 随着 ζ 增大, 金融动力学逐渐失去时间反演对称性, 即 $p_+ \neq p_-$;

(3) 价格大波动可分为动力学内部产生的和外部事件诱导的两大类. 金融动力学的时间反演不对称性, 主要来源于外部事件诱导的大波动;

(4) 中国金融市场与德国金融市场不属同一普适类, 中国的指数 $p_{\pm}$ 较小. 这与中国股票价格涨落较大相关;

在上述唯象理论研究的基础上, 我们也尝试建立微观多体模型, 模拟价格大波动以至金融危机^[17,18].

6 结论与展望

中西方金融市场的若干基本统计性质具有普适性. 例如, 价格收益率 $r(t)$ 的时间自关联很小, 可以忽略; 而价格波动率 $|r(t)|$ 具有长程时间自关联. 但是, 与西方金融市场比较, 中国金融市场呈现相当特殊的价格收益率和波动率的时间互关联, 个体股票价格的交叉关联, 以及股票价格大波动的动力学性质. 中国金融市场的反杠杆效应和独特的板块效应在金融和经济学中具有重要意义, 其微观动力学机制值得进一步探讨. 股票价格大波动和金融危机是当前的焦点研究课题, 需要发展新的研究思路和方法. 从长远来说, 金融学的量化是必由之路. 金融物理学是人们对复杂金融系统从另一角度和另一层次的认识和探索. 从纯物理学的角度看, 金融动力学体系是不可重复而且不断变化的实验, 如何探索其运动规律确实具有相当的挑战性.

参考文献

[1] Mantegna R N, Stanley H E. Nature, 1995, 376: 46; 1996,383 :587

[2] Gopikrishnan P, Plerou V, Amaral L A N *et al.* Phys. Rev. E, 1999,60 : 5305

[3] Lux T, Marchesi M. Nature, 1999, 397 : 498

[4] Cont R, Bouchaud J P. Macroeconomic Dyn. , 2000,4 :170

[5] Eguiluz M, Zimmerann M G. Phys. Rev. Lett. , 2000, 85 : 5659

[6] Zheng B, Qiu T, Ren F. Phys. Rev. E, 2004,69 : 046115

[7] Ren F, Zheng B, Qiu T *et al.* Phys. Rev. E, 2006,74 : 041111

[8] Plerou V, Gopikrishnan P, Rosenow B *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999,83: 1471

[9] Bouchaud J P, Matacz A, Potters M. Phys. Rev. Lett. , 2001, 87 : 228701

[10] Plerou V, Gopikrishnan P, Rosenow B *et al.* Phys. Rev. E, 2002,65 :066126

[11] Sornette D. Phys. Rep. , 2003,378 : 1

[12] Qiu T, Zheng B, Ren F *et al.* Phys. Rev. E, 2006, 73 : 065103(R)

[13] Shen J, Zheng B. Europhys. Lett. , 2009,86 : 48005

[14] Shen J, Zheng B. Europhys. Lett. , 2009,88: 28003

[15] Qiu T, Zheng B, Ren F *et al.* Physica A , 2007, 378 : 387

[16] Ren F, Zheng B, Lin H *et al.* Physica A, 2005,350 : 439

[17] Shen J, Zheng B, Lin H *et al.* Mod. Phys. Lett. B, 2009, 23 :2889

[18] Shen J, Zheng B, Qiu T. Dynamic Relaxation of Large Volatilities in Financial Markets. preprint,2009