

基于复杂金融系统视角的计算实验金融: 进展与展望^①

张 维, 武自强, 张永杰, 熊 熊, 冯 绪
(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 金融系统本质上是由大量具有适应性、交互性的个体组成的复杂系统. 计算实验金融学历经 20 余年的发展, 通过“自底向上”的微观建模方法, 探索了复杂金融系统的运行规律与演化特性, 拓展了传统经典金融理论的研究. 本文首先运用文献统计方法, 从总体上回顾了领域内近年的文章发表与引用现状, 然后基于个体复杂演化视角, 从个体学习、种群演化和复杂网络交互三个方面, 总结现有 ACF 领域的发展, 并展望了未来计算实验金融学发展的重要方向.

关键词: 计算实验金融; 适应性; 展望

中图分类号: F830.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2013)06-0085-10

0 引 言

自 20 世纪 50 年代开始, 随着 Markowitz 的投资组合理论、Sharp 的资本资产定价模型、Fama 有效市场假说等一系列经典金融理论的发展, 使得现代金融经济学理论体系逐步完善. 经典理论模型中, 市场均匀信息结构、完全理性个体与无摩擦完美市场等假设得到了广泛的应用. 然而, 在现实金融实践中, 类似长期反转、动态效应、一月效应等种种金融异象, 屡屡对经典金融理论发出挑战, 而为了应对这些挑战, 诸多“新金融”理论应运而生. 例如制度金融学放松了原有的有效市场中“无摩擦”的假设, 研究交易成本和交易制度的演进; 行为金融学则放松了完全理性人的假设, 通过引入个体偏好和心理偏差等因素, 构建了基于有限理性个体的资产定价模型, 对过度反应、羊群效应、股权溢价等金融异象给出了解释.

与许多其他学科发展过程相似, 人类对于真实金融系统本质的科学认知过程也遵循着由浅至深、由简单系统思维逐步向复杂系统思维过渡的趋势. 尽管金融经济学研究不断对经典资产定价

理论进行深化改进, 并逐步扩展到行为金融学、市场微观结构理论等, 但囿于数理建模工具局限和可靠微观数据缺乏的限制, 在解释现实金融系统中的复杂性现象(如: 金融风险事件的扩散、危机的产生等)时依然面临困难和挑战.

正如 Holland^[1] 所说, 金融系统在本质上并不是一个简单系统, 而是由大量具有适应性并相互交互的个体组成的、系统结构具有内生演化性的“复杂系统”. 市场交易个体不仅是有限理性的, 同时还具有自适应和复杂交互的能力, 对于这些特性的描述, 仅运用传统解析建模方法, 将使得数理模型的构建变得异常复杂, 而且很可能最终无法得到可行解. 伴随着计算能力和信息技术的快速发展, 进行计算的单位成本大大降低, 人类具有了前所未有的计算能力, 计算实验方法成为了与“实验”、“实证”和“数理分析”并驾齐驱的“第四种”科学研究手段. 计算实验金融学(agent-based computational finance, ACF) 通过其对于具有自适应性和交互性个体的特征描述, 对金融系统开展“自底向上(bottom-up)”的微观建模, 探索其资产定价的复杂演化动态规律与微观形成机制, 发展

^① 收稿日期: 2012-11-22; 修订日期: 2013-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71131007; 71271144; 71271145); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(PCSIRT 1028); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0626).

作者简介: 张 维(1958—), 男, 天津人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: weiz@tju.edu.cn

了传统的经典金融学理论。

经过近 20 余年的发展,相关 ACF 的研究进展的综述性文章已经屡见不鲜。Tsfatsion^[2] 将 ACE 定义为专门应用于复杂自适应经济系统的有效途径,对 ACE 进行了界定,并就其特征和现有应用领域(特别提出了金融领域)进行了总结^②;张维、刘文财、王志文等^[3] 通过介绍美国圣塔菲研究所的人工股票市场模型,首先将其归纳界定为“计算实验金融”,其后,Tsfatsion^[4] 在 Tsfatsion^[2] 的基础上总结 ACE 模型的优势和劣势,并提出了 6 个最具有潜力的应用方向;Lebaron^[5] 总结 ACF 建模设计过程中各个重要环节,并提出了模型校准的三种方法;马进胜和邱苑华^[6] 对 ACF 研究面临的不足和未来发展进行总结;张维、李根和熊熊等^[7] 和张维、赵帅特和熊熊等^[8] 分别基于资产价格泡沫视角和行为金融视角对计算实验金融的研究进行了综述;汪俊、姚铮和崔璨^[9] 在综述现有 ACF 研究范式的同时,对比介绍了 Swarm、Repast、Netlogo 等不同仿真平台的特点;张维等^[10] 出版了国内首本计算实验金融专著,不仅清晰的梳理国内外 ACF 研究的进展,同时对中国市场的过度波动、认知偏差、投资者适应性问题基于计算实验方法进行了深入研究和探讨;Chen^[11] 通过追溯四种 ACE 源模型,将以往研究中的 agent 依据学习能力划分为不同的类型,并基于此对 ACE 模型未来发展进行了展望;Chen、

Chang 和 Du^[12] 运用文献计量学方法对 ACE 研究进行综述,并提出了应用 ACE 方法辅助传统计量学进行数据分析,特别指出在时间序列数据非常充裕的金融领域,未来具有较大的应用潜力。

如上所述,在以往的文献中许多学者已对 ACF 基于不同视角进行了综述,但基于复杂演化金融系统视角的综述还未有涉及。具有适应性和交互性的演化主体无疑是 ACF 模型构建复杂演化金融系统的核心。因此,本文将从个体演化的三种模式:个体学习、种群演化和复杂网络交互,对以往 ACF 的相关研究文献进行梳理。

1 研究进展

1.1 ACF 发表文章统计分析

本文通过统计 SSCI 和 SCIE 两个数据库^③ 中 ACF 文献数量、被引频次,从一个侧面反映 ACF 的发展现状^④。本文借鉴 Chen 等^[13] 研究方法将其应用于“金融”方向,检索词选择为“agent based”、“multi-agent simulation”、“artificial agent”分别加入“financial”、“stock market”、“bank”、“foreign market”、“derivatives market”、“bond market”和“insurance market”组成多组检索词进行检索。时间选取为 1990-01-01 至 2012-11-14。通过检索总共得到 388 篇文献,总被引频次 3 409 次,年均被引用频次 170.45 次。

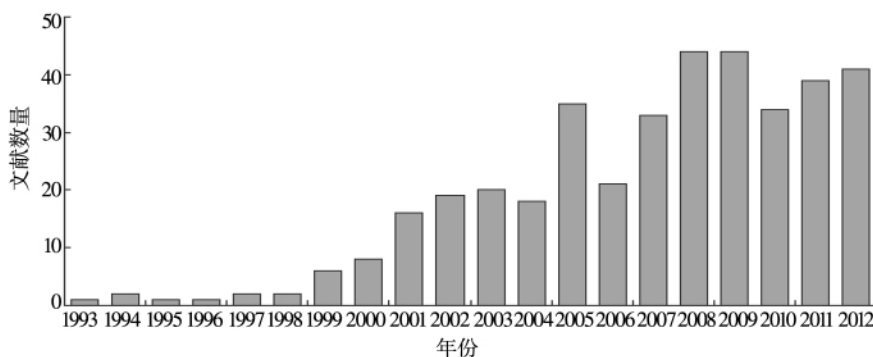


图1 历年 ACF 文献数量统计

Fig. 1 Statistics of ACF literatures over the years

② Tsfatsion^[2,4], Chen^[10,11] 均以 Agent-based Computational Economics(简称 ACE)为综述对象,将 ACF 视为其中一部分进行综述,二者的划分相对不十分清晰,故本部分暂将二者视为一类研究进行总结。

③ 本小节数据来源 web of knowledge 的 SCIE 和 SSCI 数据库统计结果。

④ 本章节的目的在于总体上展示计算实验金融的发展现状,由于检索词和检索数据库的限制,可能会有一些文献的疏漏,但相信 SSCI 和 SCIE 两个重要数据库中的文献已经基本可以囊括领域内的大部分重要研究。

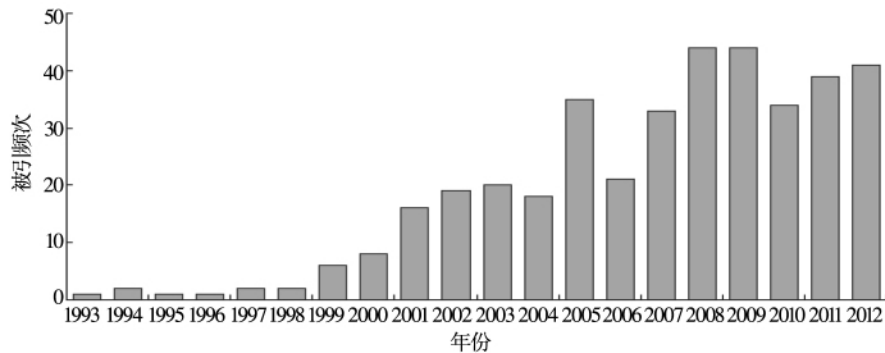


图2 历年 ACF 文献被引频次统计

Fig. 2 Cited statistics of ACF literatures over the years

在被检索的 388 篇文章中,以股票市场为研究对象的文章最多有 165 篇,以银行为对象文章 59 篇,这两部分文章占总检索文章的近 60%,显然股票市场和银行已经成为 ACF 研究的主要对象.从图 1 和图 2 中,可以发现 ACF 相关研究兴起于 20 世纪 90 年代初,在 2000 - 2004 年期间进入平稳发展阶段,进入 2005 年后无论是文章数量还是被引频次均呈现快速发展趋势,标志着越来越多的学者开始关注和参与到 ACF 领域的研究中.这与张维、冯绪和熊熊等^[14]总结的 ACF 在中国发展现状相比,时间恰好提前一年,这也从一个侧面证明了我国 ACF 相关研究的发展是紧随全球发展脚步的.

1.2 代表性模型

在计算实验金融研究发展的 20 余年中,涌现出许多具有代表性的模型,如圣塔菲研究所的 Arthur, Holland 和 LeBaron 等^[15]在 1997 年的 SFI 人工股票市场模型和 Brock 和 Hommes^[16]在 1998 年提出的 BH 模型是早期经典的 agent 个体演化模型. Kirman^[17]基于蚁群模型构造了最早的种群演化计算实验金融模型. Hoffmann、Jager 和 Eijje^[18]以特定复杂交互网络模型来描述金融市场中个体信息传递行为对金融资产定价的影响.学者们利用不同的个体学习演化机制来刻画金融市场中个体的适应性行为,基于复杂演化视角展现金融市场复杂动态规律.下文中将主要从个体学习、种群演化和复杂交互网络三种演化模式,总结 ACF 领域以往的主要研究成果.

1.2.1 个体学习模型

Arthur, Holland 和 LeBaron 等^[15]和 LeBaron、Arthur 和 Palmer^[19]均基于圣塔菲研究所 (Santa

Fe Institute) 的人工股票市场模型重现了丰富的金融系统复杂特性,并提出了关于这些复杂性微观形成机制的科学理论,运用 GA 算法模拟投资者在金融市场的学习行为,通过多期的学习,实现了完全市场的理性预期均衡.在之后的研究中,GA 算法也被作为一种理想的个体学习模式在人工股票市场模型的构建中得到了广泛应用. Bullard 和 Duffy^[20-21]、Noe、Rebello 和 Wang^[22-23]、Ehrentreich^[24]、Zhang 和 Zhang^[25]、刘维妮和韩立岩^[26]、邹琳、马超群和李红权^[27]、马进胜、杨敏和邱苑华^[28]、李红权和邹琳^[29]、Zhang、Li 和 Xiong 等^[30]、张永杰、张维和熊熊^[31]、杨敏和马进胜^[32]等丰富且发展了基于 GA 算法的计算实验金融模型.

Brock 和 Hommes^[16]针对 Holland 的 GA 算法中的“适应度 (fitness)”进行了改进,提出了基于“策略适应函数”的 ABS (adaptive beliefs system) 算法,运用一种近似的方法刻画自我学习的适应性行为.在模型中,agent 根据自己的历史绩效调整各策略的适应函数,进而调整自身投资策略,而金融系统中资产的价格则会表现出混沌、分叉等复杂涌现现象. Gaunersdorfer^[33]、Hommes^[34]、Chiarella 和 He^[35-36]、Brock、Hommes 和 Wagener^[37-38]、Chiarella、Dieci 和 Gardini^[39]、Anufriev 和 Panchenko^[40]以及 Dieci 和 Westerhoff^[41]等都采用了 ABS 算法及其改进算法,对金融系统中的个体适应性行为及其涌现规律,从格式化特征形成机理、个体财富变化的动态规律等方面探索金融系统复杂特征的微观形成机制.

除此之外,Levy、Levy 和 Solomon^[42]在其 LLS 模型中,agent 不关心规则过去的预测精度,而直

接根据最近 10 期的历史收益来更新规则库,强化近期记忆,而剔除远期的规则。同时,与以往模型设计不同的是其开始应用 CRRA 效用函数来构架金融市场中 agent 决策模型。Chiarella 和 He^[43]、Anufriev、Bottazzi 和 Pancotto^[44]、Anufriev 和 Bottazzi^[45,46]、Anufriev^[47]、邹琳、马超群和刘钰等^[48]沿着这一思路,进一步完善了个体依据财富变动调整决策规则的行为刻画,并发展了这类行为对资产定价产生影响的机理。另外,Lewellen 和 Shanken^[49]、Beker 和 Espino^[50]采用贝叶斯学习方式刻画投资者适应性学习的过程,研究适应性学习过程对于资产价格的影响。由于不能自主地产生新的决策规则,而仅能通过调整参数完成适应行为,这类模型中对个体自我学习行为的刻画能力较弱,严格的讲,只能“渐进地”刻画自我学习的适应性行为。

在真实世界中,学习不仅通过自身完成,同时也可以通过向他人学习来实现。Chen 和 Yeh^[51]随后提出了可以同时刻画个体自我学习(自我反省机制)和社会学习(同行压力机制)的 GP(genetic programming) 算法,agent 间可以运用共享规则库的“商学院(business school) ”机制来实现社会交互式学习,这“可能是关于这个问题(社会学习建模) 研究中最好的模型”^[51]。另外,LeBaron^[52]、Chiarella、Gallegati、Leombruni 等^[53]、Yamamoto^[54,55]、Chang^[56]也基于投资者之间的交互与模仿分别构建了不同的社会学习模型,研究社会学习行为对于资产价格的影响,以及学习行为对投资者收益的影响。

1.2.2 种群演化模型

计算实验金融作为交叉学科的研究,不仅仅融合了金融学、复杂系统理论和计算机科学等学科的知识,除此之外,还借用了生态学中的种群概念,将具有同类偏好、先验信念与财富水平的 agent 组成的群体称为一个种群,将金融系统中不同类型的投资者划分为不同种群,每个种群均依据市场交易规则在时刻不停的进行演化。种群演化是连接“微观”个体适应性与“系统集结”涌现特征两个层面的“介观(mesoscopic) ”表现。Kirman^[17]基于蚁群模型构造了最早的种群演化计算实验金融模型,在该模型中 agent 通过随机碰撞

和个体演化,在包含乐观与悲观信念的两个种群间作出选择,从而导致了外汇市场价格由于种群的演化呈现出复杂混沌等特性。Lux 和 Marchesi^[57]假设金融市场中 agent 受到市场情绪的传染转换自身的交易规则,进而使得市场资产价格产生过度波动和波动聚集等宏观涌现。Gauersdorfer、Hommes 和 Wagener^[58]利用基本面投资者和技术面投资者之间的转换重现了金融市场中混沌、分叉、奇异吸引子等复杂现象并提供相应的解释和分析。陈莹、袁建辉、李心丹等^[59]通过协同模拟 agent 间的模仿和市场情绪信号,发现市场羊群行为与资产价格波动之间存在着较强的相关关系。

1.2.3 复杂网络模型

真实金融市场中由个体交互活动演化形成的、具有复杂结构的信息传播网络是造成系统复杂特征的另一个根源。这个方向上研究主要得益于复杂网络理论与方法研究的突破。小世界网络^[60]和无标度网络^[61]的提出为深化研究者对金融系统中网络结构的演化、及其对资产价格的影响提供了有力的工具。而将其应用于真实世界中复杂信息网络和复杂资金网络的刻画也是当前研究的两个主要方向。

Bornholdt、Kaizoji 和 Fujiwara^[62]最早将固定邻居网络结构的自旋模型引入到金融研究中,据此研究了金融系统泡沫与崩溃的形成条件与演化的动态特征。Iori^[63]使用伊辛模型刻画了这种金融系统中“自旋式交互”网络结构的涌现特征。近年来,随着物理学中对伊辛模型处理方法的丰富与发展,Horvath、Kuscsik 和 Gmitra^[64]、陈莹、袁建辉和李心丹等^[59]、Cajueiro^[65]、Laciana 和 Rove-re^[66]等通过改进的伊辛模型,基于固定邻居的网络重现出了更丰富的金融系统复杂演化特征。Hoffmann、Jager 和 Eije^[18]构建了金融市场中个体以环形网络和无标度网络相连接,并传递信息或预期价格,研究发现在环形网络结构中信息扩散形成的价格更接近于真实市场;Tedeschi、Iori 和 Gallegati^[67]研究了市场信息传播网络中,作为重要信息传播者(Guru) 的形成与演化规律。类似地,Krawiecki^[68]、Bakker、Hare 和 Khosravi 等^[69]、Markose、Alentorn 和 Krause^[70]等则基于无标度网

络的信息传播结构进行计算实验建模,并研究了资产价格泡沫形成与崩溃的条件。

Iori, Jafarey 和 Padilla^[71]、Markose, Gian-sante 和 Gatkowski 等^[72]、陈彦锴^[73]等均基于复杂资金网络模型对金融系统脆弱性问题开展研究; Schweitzer、Fagiolo 和 Sornette 等^[74]综述和总结了复杂资金交互网络的金融系统的分析和研究,提出了复杂资金交互网络模型的主要组成部分,并认为其是经济理论范式的一种重要修改和拓展。

2 研究展望

研究者们通过刻画投资者个体的强化学习、种群演化和复杂网络交互等方面的特征,使得 ACF 拓展了传统经典金融学和行为金融学的理论研究,同时反演出种种市场复杂动态特征,又为政策监管部门的风险防范与调控提供了有效工具。计算实验金融虽然在上述诸多方面取得了长足的进展,但其也不是什么金融学研究的“灵丹妙药”,至今为止,其仅是作为传统实验、实证、数理分析研究方法外的另一种有益补充。

与传统研究范式相比,植根于复杂金融系统的 ACF 研究的开展,其目的无非是为更好的揭示真实金融市场中的复杂动态演化特性,如前文所述,学者们已经在以上三个方面取得了一些成果,未来的研究将会如何拓展现有的研究呢?综合考虑已取得的重要成果、设备运算能力发展的状况、实践需求等方面,未来该领域可能的前沿热点和发展趋势有如下三个方面。

2.1 构建大规模自主 agent 的计算实验模型,研究金融系统复杂演化规律

囿于设备运算能力和研究者建模技术的限制,运行在桌面系统上的 ACF 模型中自主性 agent 的数量比较有限,种群的形成和网络的演化特性并不显著;即便是已有种群和网络演化的研究,也常常需要研究者“外生地”、“先验地”设定一些种群的类型和指定复杂网络的类型。由此,尽管计算实验方法在其他动态定价方面取得了一些很好的成果, Egenter、Lux 和 Stauffer^[75]还是根据他们的工作提出:大规模 agent 的系统可能具有与小规模系统显著不同的复杂特征及微观形成机

制。众所周知,真实金融系统中 agent 的数量往往是巨大的,agent 的行为是自主性的,种群与网络结构是内生的,并且在考虑到不同的市场交易制度、法律环境要求、市场参与主体的风险文化特征等因素以后,这些种群和网络结构也可能呈现不同的特征,进而影响定价规律。因此,在设备运算能力不断增长、建模手段日益增强的条件下,将种群和网络内生性演化规律等因素也纳入计算实验金融研究的分析框架将可能是未来研究的重要趋势和热点前沿。

2.2 金融市场中的复杂网络的机制与影响

在互联网时代背景下,股票论坛、财经博客、微博等新型沟通方式的出现与普及使个体间信息交换变得更加快捷,但同时也使股票市场的信息扩散网络结构变得更加复杂。互联网已经给股票市场信息扩散过程带来了根本性变革。另外,随着金融创新的不断深化,各大金融机构之间通过相互持股、借贷等资金联系构建起的复杂资金网络已经变得日益复杂和密切,但与此同时,金融系统的脆弱性也与日俱增。Battiston、Puliga 和 Kaushik 等^[76]以美联储 1.2 万亿救助美国金融机构事件为背景,利用复杂网络分析方法,发现得到救助的 22 家机构均是金融系统中连接度最大且影响最深远金融危机关键节点。

在复杂金融系统中,复杂网络往往并不是单独发挥作用的,它们之间也存在着相互影响。金融市场中的信息与资金之间是密不可分的。因此,如何将复杂信息和资金网络“有机的交织在一起”,将二者纳入同一个分析框架,研究信息扩散与资金交互网络对资产定价的影响将是本领域未来研究的一个重要方向。

2.3 模型校准以及新校准方法的发展与涌现

要建立如此大规模且复杂的计算实验模型,模型的校准显然是一个十分关键的问题。Lebaron^[5]在综述中将 ACF 的模型校准方法归纳为三种,分别是格式化特征检验,真实数据导入和计量模型回归模型参数。但 Lebaron 同时也指出由于模型中包含大量的部件和参数,因此在建模过程中需要格外小心谨慎。其实,目前针对模型校准问题的研究和思考尚未提出非常完善的解决方案,这成为制约领域进一步发展的瓶颈,也是 ACF 领

域目前面临的主要问题之一.这就需要以创新性的校准思想、原理与方法来推动领域走向成熟.

然而,近年来随着金融物理学研究的进一步活跃,使得在数据分析层面更加关注于对数据本质特征的挖掘,而其建立的大量非线性数据处理工具也为计算实验模型的校准提供了一种新的研究思路.例如:基于 Mantegna 和 Stanley^[77]提出的幂律分布特征分析方法,He 和 Li^[78]从多尺度的标度特征视角,用 DAX 30 指数等序列回报率绝对收益率和平方回报率的自相关特征校准模型,为校准研究提供了新的方法与工具. Li、Zhang 和 Zhang 等^[79]通过多尺度标度分析的方法结合中国股市的真实数据,对连续双向拍卖人工股票市场计算实验模型进行了校准研究,更好地捕捉了中国股票市场的本质特征,进一步证明了多尺度标度分析是一种有效的计算实验模型校准方法.

致谢:

本文的完成特别感谢在 2011 年第九届金融系统工程与风险管理国际学术年会讨论中,提出宝贵建议的韩立岩教授,以及在 2011 年 Winter Workshop on Economic Heterogeneous Interacting Agents 讨论中提出宝贵建议的陈树衡教授, Gulyas 教授, Krause 教授, Hawkins 教授,他们的建议对于本文的撰写和完成具有非常重要的作用.另外,感谢天津大学管理与经济学部张维教授课题组的各位老师和同学在本文中做出贡献.

参 考 文 献:

- [1]Holland J. Emergence: From Chaos to Order[M]. Redwood City: Addison-Wesley, 1997.
- [2]Tsfatsion L. Agent-based computational economics: Modeling economies as complex adaptive systems[J]. Information Sciences, 2003, 149(4): 262 - 268.
- [3]张 维,刘文财,王志文,等. 面向资本市场复杂性建模: 基于 Agent 计算实验金融学[J]. 现代财经, 2003, 23(1): 3 - 7.
Zhang Wei, Liu Wencai, Wang Zhiwen, et al. The modeling for the complexity of capital market: Agent-based computational experiment finance[J]. Modern Finance and Economics, 2003, 23(1): 3 - 7. (in Chinese)
- [4]Tsfatsion L. Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory[M]. Handbook of Computational Economics, 2006.
- [5]LeBaron B. Agent-based computational finance[M]. L. Tesfatsion and K. L. Judd eds. Handbook of Computational Economics II, Elsevier, 2006, 1187 - 1233.
- [6]马进胜,邱苑华. 基于主体的计算金融学综述[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2007, 20(2): 15 - 19.
Ma Jinsheng, Qiu Wanhua. Introduction to agent-based computational finance[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2007, 20(2): 15 - 19. (in Chinese)
- [7]张 维,李 根,熊 熊,等. 资产价格泡沫研究综述: 基于行为金融和计算实验方法的视角[J]. 金融研究, 2009, 8(1): 182 - 193.
Zhang Wei, Li Gen, Xiong Xiong, et al. On the asset price bubbles: From the perspective of behavioral finance and agent-based modeling[J]. Journal of Financial Research, 2009, 8(1): 182 - 193. (in Chinese)

3 结束语

综上所述,ACF 在复杂演化金融系统研究领域,针对个体自我学习机制、种群间演化转换、复杂网络交互等方面已经取得一系列重要的理论突破,New Scientist^[80]杂志甚至已经将它作为未来可能永远改变人类生活的 50 大想法之一.但与此同时,正如该领域研究的先驱者之一 Farmer 教授在接受 Nature 杂志采访时所说的那样:领域总体的研究现状是还很不均衡(very uneven),一些问题上已经取得很好的成果与发现,而在另外一些问题上还是空白、或者面临挑战,能够与主流金融经济学媲美的统一理论框架体系尚未形成,还需要不断的发展与探索,才能使其不断成熟和完善^[81].

- [8]张 维,赵帅特,熊 熊,等. 基于计算实验方法的行为金融理论研究综述[J]. 管理评论,2010,22(3): 3-11.
Zhang Wei, Zhao Shuait, Xiong Xiong, et al. A review of researches on behavioral finance theory based on computational experiment method[J]. Management Review, 2010, 22(3): 3-11. (in Chinese)
- [9]汪 俊,姚 铮,崔 璨. 基于 Agent 的金融复杂系统分析与建模方法[J]. 系统工程,2010,28(11): 16-20.
Wang Jun, Yao Zheng, Cui Can. Analysis and modelling of financial complex systems based on agent approach[J]. Systems Engineering, 2010, 28(11): 16-20. (in Chinese)
- [10]张 维,等. 计算实验金融研究[M]. 北京: 科学出版社,2010.
Zhang Wei, et al. Agent-based Computational Finance: An Alternative Way to Understand the Markets[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [11]Chen S H. Varieties of agents in agent-based computational economics: A historical and an interdisciplinary perspective [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2012, 36(1): 1-25.
- [12]Chen S H, Chang C, Du Y. Agent-based economic models and econometrics [J]. Journal of Knowledge Engineering Review, 2012, 27(1): 108-152.
- [13]Chen S H, Yang Y H, Yu W J. A bibliometric study of Agent-based modeling literature on the SSCI database [J]. Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems VI. Agent-Based Social Systems, 2011, 8: 189-198.
- [14]张 维,冯 绪,熊 熊,等. 计算实验金融在中国: 研究现状及未来发展[J]. 系统管理学报,2012,21(6): 756-764.
Zhang Wei, Feng Xu, Xiong Xiong, et al. Agent-based computational finance in China: Its present state and future prospects [J]. Journal of Systems & Management, 2012, 21(6): 756-764. (in Chinese)
- [15]Arthur W B, Holland J H, LeBaron B, et al. Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market [M]. W B Arthur, S N Durlauf and D Lane eds. The Economy as an Evolving Complex System II, Addison-Wesley, 1997.
- [16]Brock W A, Hommes C. Heterogeneous beliefs and routes to chaos in a simple asset pricing model [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 1998, 22(8-9): 1235-1274.
- [17]Kirman A. Ants, rationality and recruitment [J]. Quarterly Journal of Economics, 1993, 108(1): 137-156.
- [18]Hoffmann A O I, Jager W, Eijse J H V. Social simulation of stock markets: Taking it to the next level [J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2007, 10(2): 7.
- [19]LeBaron B, Arthur W B, Palmer R. Time series properties of an artificial stock market [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 1999, 23(9-10): 1487-1516.
- [20]Bullard J, Duffy J. A model of learning and emulation with artificial adaptive agents [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 1998, 22(2): 179-207.
- [21]Bullard J, Duffy J. Using genetic algorithms to model the evolution of heterogeneous beliefs [J]. Computational Economics, 1999, 13(1): 41-60.
- [22]Noe T H, Rebello M J, Wang J. Corporate financing: An artificial agent-based analysis [J]. Journal of Finance, 2003, 58(3): 943-973.
- [23]Noe T H, Rebello M J, Wang J. The evolution of security designs [J]. Journal of Finance, 2006, 61(5): 2103-2135.
- [24]Ehrentreich N. Technical trading in the Santa Fe Institute artificial stock market revisited [J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 2008, 61(4): 599-616.
- [25]Zhang Y, Zhang W. Can irrational investors survive? A social-computing perspective [J]. IEEE Intelligent Systems, 2007, 22(5): 58-64.
- [26]刘维妮,韩立岩. 基于人工股市模型的投资者仿真研究 [J]. 管理学报,2007,4(4): 414-420.
Liu Weini, Han Liyan. Simulation of investors by multi-agent artificial stock market model [J]. Chinese Journal of Management, 2007, 4(4): 414-420. (in Chinese)
- [27]邹 琳,马超群,李红权. 中国股市仿真系统建模及其非线性特征研究 [J]. 系统管理学报,2008,17(4): 385-389.
Zou Lin, Ma Chaoqun, Li Hongquan. Modeling agent-based artificial Chinese stock market and nonlinear characteristic analysis [J]. Journal of Systems & Management, 2008, 17(4): 385-389. (in Chinese)

- [28] 马进胜, 杨 敏, 邱莞华. 基于主体的非均衡人工股市计算模型[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2008, 45(12): 99–104.
Ma Jinsheng, Yang Min, Qiu Wanhua. Agent-based artificial stock market with out-of-equilibrium pricing model[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2008, 45(12): 99–104. (in Chinese)
- [29] 李红权, 邹 琳. 基于 Agent 的投资者情绪对于股市演化行为仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(12): 30–32.
Li Hongquan, Zou Lin. Simulation study on the effect of investor sentiment on stock market evolution through agent based model[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(12): 30–32. (in Chinese)
- [30] Zhang W, Li G, Xiong X, et al. Trader species with different decision strategies and price dynamics in financial markets: An agent-based modeling perspective[J]. International Journal of Information Technology and Decision Making, 2010, 9(2): 327–344.
- [31] 张永杰, 张 维, 熊 熊. 投资策略与投资收益——基于计算实验金融方法的研究[J]. 管理科学学报, 2010, 13(10): 107–118.
Zhang Yongjie, Zhang Wei, Xiong Xiong. Strategies and investment returns: Agent-based computational finance perspective[J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(10): 107–118. (in Chinese)
- [32] 杨 敏, 马进胜. 基于主体的人工股市建模及其实证研究[J]. 管理科学学报, 2010, 13(5): 91–96.
Yang Min, Ma Jinsheng. On agent-based artificial stock market modeling and its application[J]. Journal of Management Sciences in China, 2010, 13(5): 91–96. (in Chinese)
- [33] Gaunersdorfer A. Endogenous fluctuations in a simple asset pricing model with heterogeneous agents[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2000, 24(5–7): 799–831.
- [34] Hommes C. Modeling the stylized facts in finance through simple nonlinear adaptive systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(3): 7221–7228.
- [35] Chiarella C, He X. Heterogeneous beliefs, risk and learning in a simple asset pricing model[J]. Computational Economics, 2002, 19(1): 95–132.
- [36] Chiarella C, He X. Heterogeneous beliefs, risk and learning in a simple asset pricing model with a market maker[J]. Macroeconomic Dynamics, 2003, 7(4): 503–536.
- [37] Brock W A, Hommes C, Wagener F O O. Evolutionary dynamics in markets with many trader types[J]. Journal of Mathematical Economics, 2005, 41(1–2): 7–42.
- [38] Brock W A, Hommes C, Wagener F O O. More hedging instruments may destabilize markets[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2009, 33(11): 1912–1928.
- [39] Chiarella C, Dieci R, Gardini L. Asset price and wealth dynamics in a financial market with heterogeneous agents[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2006, 30(9–10): 1755–1786.
- [40] Anufriev M, Panchenko V. Asset prices, traders' behavior and market design[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2009, 33(5): 1073–1090.
- [41] Dieci R, Westerhoff F. Heterogeneous speculators, endogenous fluctuations and interacting markets: A model of stock prices and exchange rates[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2010, 34(4): 743–764.
- [42] Levy M, Levy H, Solomon S. A microscopic model of the stock market: Cycles, booms, and crashes[J]. Economics Letters, 1994, 45(1): 103–111.
- [43] Chiarella C, He X. Asset price and wealth dynamics under heterogeneous expectations[J]. Quantitative Finance, 2001, 1(5): 509–526.
- [44] Anufriev M, Bottazzi G, Pancotto F. Equilibria, stability and asymptotic dominance in a speculative market with heterogeneous traders[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2006, 30(9–10): 1787–1835.
- [45] Anufriev M, Bottazzi G. Noisy trading in the large market limit[M]. P Mathieu, B Beaufils and O Brandouy eds, Artificial Economics, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag: 2006.
- [46] Anufriev M, Bottazzi G. Market equilibria under procedural rationality[J]. Journal of Mathematical Economics, 2010, 46(6): 1140–1172.
- [47] Anufriev M. Wealth driven competition in a speculative financial market: Examples with maximizing agents[J]. Quantita-

- tive Finance ,2008 ,8(4) : 363 – 380.
- [48] 邹 琳, 马超群, 刘 钰, 等. 基于财富与信息角度的人工股票市场建模及非线性特征形成机理 [J]. 系统工程 , 2010 ,28(10) : 29 – 35.
- Zou Lin , Ma Chaoqun , Liu Yu , et al. Modeling the artificial stock market based on wealth and information and study the formation mechanism of nonlinear characteristic [J]. Systems Engineering ,2010 ,28(10) : 29 – 35. (in Chinese)
- [49] Lewellen J , Shanken J. Learning , asset-pricing tests , and market efficiency [J]. Journal of Finance ,2002 ,57(3) : 1113 – 1145.
- [50] Beker P F , Espino E. The dynamics of efficient asset trading with heterogeneous beliefs [J]. Journal of Economic Theory , 2011 ,146(1) : 189 – 229.
- [51] Chen S H , Yeh C H. Evolving traders and the business school with genetic programming: A new architecture of the agent-based artificial stock market [J]. Journal of Economic Dynamics & Control ,2001 ,25(3 – 4) : 363 – 393.
- [52] LeBaron B. Evolution and time horizons in an Agent-based stock market [J]. Macroeconomic Dynamics ,2001 ,5(2) : 225 – 254.
- [53] Chiarella C , Gallegati M , Leombruni R , et al. Asset price dynamics among heterogeneous interacting agents [J]. Computational Economics ,2003 ,22(2 – 3) : 213 – 223.
- [54] Yamamoto R. Evolution with individual and social learning in an agent-based stock market [C]. Computing in Economics and Finance ,2005.
- [55] Yamamoto R. Volatility clustering and herding agents: Does it matter what they observe? [J]. Journal of Economic Interaction and Coordination ,2011 ,6(1) : 1 – 19.
- [56] Chang S K. A simple asset pricing model with social interactions and heterogeneous beliefs [J]. Journal of Economic Dynamics and Control ,2007 ,31(4) : 1300 – 1325.
- [57] Lux T , Marchesi M. Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market [J]. Nature ,1999 ,397(11) : 498 – 500.
- [58] Gaunersdorfer A , Hommes C , Wagener F O O. Bifurcation routes to volatility clustering under evolutionary learning [J]. Journal of Economic Behavior & Organization ,2008 ,67(1) : 27 – 47.
- [59] 陈 莹, 袁建辉, 李心丹, 等. 基于计算实验的协同羊群行为与市场波动研究 [J]. 管理科学学报 ,2010 ,13(9) : 119 – 128.
- Chen Ying , Yuan Jianhui , Li Xindan , et al. Research on collaborative herding behavior and market volatility: Based on computational experiments [J]. Journal of Management Sciences in China ,2010 ,13(9) : 119 – 128. (in Chinese)
- [60] Watts D J , Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks [J]. Nature ,1998 ,393: 440 – 442.
- [61] Barabasi A L , Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science ,1999 ,286(5439) : 509 – 512.
- [62] Bornholdt S , Kaizoji T , Fujiwara Y . Dynamics of price and trading volume in a spin model of stock markets with heterogeneous agents [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications ,2001 ,316(1 – 4) : 441 – 452.
- [63] Iori G. A microsimulation of traders activity in the stock market: The role of heterogeneity , agents' interactions and trade frictions [J]. Journal of Economic Behavior & Organization ,2002 ,49(2) : 269 – 285.
- [64] Horvath D , Kuscsik Z , Gmitra M. The co-evolutionary dynamics of directed network of spin market agents [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications ,2006 ,369(2) : 780 – 788.
- [65] Cajueiro D O. Enforcing social behavior in an Ising model with complex neighborhoods [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications ,2011 ,390(9) : 1695 – 1703.
- [66] Laciana C E , Rovere S L. Ising-like agent-based technology diffusion model: Adoption patterns vs. seeding strategies [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications ,2011 ,390(6) : 1139 – 1149.
- [67] Tedeschi G , Iori G , Gallegati M. Herding effects in order driven markets: The rise and fall of gurus [J]. Journal of Economic Behavior and Organization ,2012 ,81(1) : 82 – 96.
- [68] Krawiecki A. Microscopic spin model for the stock market with attractor bubbling on scale-free networks [J]. Journal of Economic Interaction and Coordination ,2009 ,4(2) : 213 – 220.
- [69] Bakker L , Hare W , Khosravi H , et al. A social network model of investment behaviour in the stock market [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications ,2010 ,389(6) : 1223 – 1229.

- [70] Markose S, Alentorn A, Krause A. Dynamic learning, herding and guru effects in networks [C]. Economics Discussion Papers, Department of Economics, University of Essex, Colchester, UK, 2004.
- [71] Iori G, Jafarey S, Padilla F. Systemic risk on the interbank market [J]. Journal of Economic Behavior and Organization, 2006, 61(4): 525–542.
- [72] Markose S, Giansante S, Gatkowski M, et al. Too Interconnected To Fail: Financial Contagion and Systemic Risk in Network Model of CDS and Other Credit Enhancement Obligations of US Banks [C]. Economics Discussion Papers 683, University of Essex, Department of Economics, 2010.
- [73] 陈彦锴. 基于无标度网络的信用违约风险传染效应研究 [J]. 统计与决策, 2010, 2: 20–23.
Chen Yankun. Scale-free networks based on the credit default risk of contagion [J]. Statistics & Decision, 2010, 2: 20–23. (in Chinese)
- [74] Schweitzer F, Fagiolo G, Sornette D, et al. Economic networks: The new challenges [J]. Science, 2009, 325(5939): 422–425.
- [75] Egenter E, Lux T, Stauffer D. Finite-size effects in Monte Carlo simulations of two stock market models [J]. Physica A: Statistical and Theoretical Physics, 1999, 268(1–2): 250–256.
- [76] Battiston S, Puliga M, Kaushik R, et al. Debrank: Too central to fail? Financial networks, the fed and systemic risk [J]. Science Report, 2012, 541(2): 1–6.
- [77] Mantegna R N, Stanley H E. Scaling behavior in the dynamics of an economics index [J]. Nature, 1995, 376: 46–49.
- [78] He X, Li Y. Power-law behaviour, heterogeneity, and trend chasing [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2007, 31(10): 3396–3426.
- [79] Li Y, Zhang W, Zhang X, et al. Calibration of the agent-based continuous double auction stock market by scaling analysis [J]. Information Sciences, 2012, available on line.
- [80] Editors. 50 ideas to change science forever [J]. New Scientist, 2010, 208(2782, 2783): 32–40; 32–41.
- [81] Ball P. Culture crash [J]. Nature, 2006, 441(7094): 686–688.

Agent-based computational finance on complex financial system perspective: Progress and prospects

ZHANG Wei, WU Zi-qiang, ZHANG Yong-jie, XIONG Xiong, FENG Xu

College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Financial systems are complex systems which composed by many adaptive interactive agents. During the past 20 years, agent-based computational finance explores the complex operation laws and evolution properties of financial system and expands the traditional classical financial theory through microscopic modeling method of the "bottom-up". In the paper, employing the bibliometric method, we generally reviewed the status of publications on agent-based computational finance. And then, based on the individual complex evolutionary perspective, we summarized the development of three important directions i. e., the individual learning, the species switching and the complex network and prospected the future research.

Key words: agent-based computational finance; adaptive; prospects