基于Agent的计算经济学发展前沿:文献综述

范如国 叶菁 杜靖文*

摘要: 现实日益复杂的经济问题,使得传统经济学的研究方法感到力不从心,计算机仿真方法开始弥补传统经济学研究的不足;基于 Agent 的计算经济学已成为经济学的一个重要分支。本文从五个方面阐述了当前 ACE 的发展前沿和主要研究领域,包括主体学习过程 and 行为规范演变的研究、复杂经济网络的形成和特征研究、组织及特定市场的研究、ACE 模型的现实市场检验与算法优化研究以及在政策制定方面的研究,这些领域也是当代经济学研究的核心。文献表明,ACE 理论最吸引人的地方是它通过对异质性微观主体行为的分析来研究经济系统的演化过程及其宏观“涌现”特征,它很好地揭示了微观与宏观经济之间的矛盾;ACE 方法可以应用于几乎所有经济现象的分析,其对经济学研究的影响不仅表现为研究工具的革新,更带来了经济学思维方式和研究范式的深刻变革。

关键词: Agent 计算经济学 复杂系统 发展前沿

一、引言

传统经济学的研究方法主要是观察、分析、比较和检验,并主要考虑具有完全理性、同质性的主体。20世纪中期以来,随着演化理论、博弈论、优化理论等数学工具的引入,经济学在取得巨大发展的同时,也越来越面临传统研究方法上巨大局限的挑战。日趋复杂的经济,使传统研究方法力不从心。人们发现,经济系统本质上是一个由大量主体(Agent)组成的复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)^①,研究复杂适应系统的有效途径是计算机模拟,而不是传统的数理分析和计量检验,这促使分布式仿真研究的应运而生,计算机仿真方法开始弥补传统经济学研究的不足,基于 Agent 的计算经济学(Agent - Based Computational Economics, ACE)在这种背景下开始形成、发展起来(Charlotte, 2004)。

ACE 是从经济系统的基本构造元素——微观主体(Agent)出发,让大量自适应的 Agent 通过互动“自下而上”地生成一个人工经济系统,并通过仿真来建立多主体(Multi - Agent)之间相互交流的统计模型,最后利用人工经济系统中的涌现属性来揭示现实中的经济规律,目的是为了更好地理解经济系统的自组织性、经济系统的演化性和宏观 - 微观的关联性(Arifovic and Karaivanov, 2010)。ACE 模型的核心在于通过观察微观主体的交互作用,来研究这些作用所产生的宏观“涌现”现象,这种“自下而上”的机制可以很好地解决由传统经济学理论所造成的微观分析与宏观分析之间的矛盾。它让经济学家在一定条件下可以像自然科学家那样,以可重复实验的方式来研究经济问题(Lane, 1993)。

经过 20 多年的发展,ACE 已经成为经济学的一个重要分支。连《Nature》杂志在 2009 年也刊载了一篇关于 ACE 是否将成为主流经济学研究方法的文章。ACE 对经济学研究的影响不仅仅表现为研究工具的革新,更是带来了经济学思维方式和研究范式的深刻变革。今天,在澳大利亚、美国、英国、瑞士、加拿大等国家

* 范如国,武汉大学经济与管理学院,邮政编码:430072,电子信箱:rgfanchina@yahoo.com.cn;叶菁,武汉大学经济与管理学院,邮政编码:430072,电子信箱:lynyye521@hotmail.com;杜靖文,武汉大学经济与管理学院,邮政编码:430072。

本文感谢国家自然科学基金“基于异质性主体行为的产业集群低碳演化模型及其仿真研究”(项目编号:71271159)和武汉大学“海外人文社会科学研究动态追踪计划”项目(2011)的研究资助。

①复杂适应系统理论把系统的成员看作是具有目的性与主动性的主体(agent),认为主体之间以及与环境的作用,是系统发展和进化的基本动因(Holland and John, 1991)。

的许多大学已设有专门的 ACE 研究中心。

本文在这里将对近年来国内外基于 Agent 的计算经济学的主要研究前沿进行分析。这一方面可以使我们了解经济学理论研究的发展动向与前沿领域,另一方面对于我们重新审视和评价现有经济学的研究方法具有很好的意义。

一、关于经济主体学习过程和行为规范演变的研究

传统经济学理论的分析主要采用数理模型方法,且只考虑完全理性、同质性的行为主体。不同于传统经济学中的设定,ACE 中的微观主体具有有限理性、学习能力、归纳能力和自适应能力(Arthur,1994),它们的交互行为如同实际交易者一样(Holland and John,1991)。所谓自适应能力是指主体在与环境和其他主体的交互中,能够“学习”或“积累经验”,并且根据学习到的经验改变自身的结构和行为方式。ACE 模型通过结合主体学习能力来进行模拟与分析,利用经济系统中各主体行为的差异性对不同经济问题进行研究(Tesfatsion,2002),这使得 ACE 模型具有了现实经济世界中有价值的细节信息,可以还原经济系统复杂多变、丰富多彩的特性。Marimon(1989)首次将主体的自适应能力引入研究中,他在 Kiyotaki 等人建立的理性预期货币模型环境下,研究了代理人如何学习、协调彼此的行为。近几年来,ACE 模型对于主体的研究与过去相比更加深入、全面,认为主体的优化以及预测能力都是有限的,并把关于主体的假定运用到具体的股票市场、学习机制等问题的分析之中。如 Bak 等(1997)用一个主要由噪音交易者的简单模型来解释股市价格波动,研究通过改变市场中这两种交易者的数量,以及改变交易者的基本定义来对市场精选模拟,发现价格波动也许仅仅是由于交易者互相之间的模仿造成的,这一研究充分揭示了主体行为对价格变动的深刻影响。Boswijk(2007)首次将异质有限理性主体的模型与股市真实数据结合,模型中每个主体对于股市价格偏离基准的持久性都有不同的期望。在主体学习能力方面,Anufriou(2011)针对委托与代理模型,研究了不同学习机制是否会影响最佳委托代理合同的取得。结果表明,在委托代理环境下,社会学习机制要优于个人学习机制。这一结果对我们进行学习机制的设计有很好的启示。Constanza 和 Friederike(2011)则用一个具有模仿学习能力的代理人模型来更好地解释社会中相互作用的结构与合作行为的出现之间的关系。研究发现,一种由合作者在中心而非合作者趋近于边缘的社会结构会出现。

此外,ACE 模型关于主体学习能力的研究在经济博弈论中也开始显现出优势。2000 年之前,很少有利用 ACE 模型研究经济中的博弈行为,自 2001 年经济学期刊《Games and Economic Behavior》出版人工智能专刊后,十年内该期刊有 40 多篇文章利用主体学习能力、异质性等特点来研究经济行为中的博弈论问题,这已成为经济博弈研究新的微观视角和研究热点。基于 agent 的复杂网络演化博弈,也成为演化博弈研究的前沿问题。

二、基于复杂网络模型的经济系统研究

传统经济学将个体看作为独立的决策者,仅仅受价格的影响,往往忽略了个体的学习、适应、创新等互动行为。现实中主体之间往往有交互关系,大量经济主体相互作用、彼此博弈,构成一个复杂网络。最初的 Agent 模型由元胞自动机^①来实现,有 Schelling(1971)率先在社会科学上应用的代理人模型,以及由 Epstein 和 Axtell(1996)发展而成的复杂人工社会模型,即糖域模型(Sugarscape),该模型可以很好地研究贸易往来、市场机制等经济现象。不过,早期的研究是基于均匀网格等常规网络结构来讨论的,它们忽略了网络结构的复杂性特征和主体交互作用产生的复杂性行为。Watts 和 Strogatz(1998)提出“小世界网络”(Small world networks)模型,Barabási 和 Albert(1999)等发现在复杂网络中存在着“无标度”(Scale free)现象,这两个发现极大地拓展了 ACE 的研究。近几年,基于复杂网络的 ACE 模型开始发展起来,使得 ACE 关于经济系统的研究更加符合实际。

最新的研究进展是,ACE 方法通过依托复杂网络拓扑结构,来研究异质性主体之间互相影响、连接关系和博弈行为的复杂性及其“涌现”特征,如货币的涌现、新技术的推广。在经济网络的形成、性质、效率等方面也有许多新的发现,这是以往的研究无法实现的。针对 Arthur 提出的少数人博弈模型,Michael(2006)

^①元胞自动机(Cellular Automaton),又叫细胞自动机,是一种在离散的时空动力系统内,利用简单编码与模仿细胞繁殖机制的非数值算法分析模式。

第一个将发展的少数人博弈模型与“小世界网络”相结合来进行研究,发现小世界架构使模型内的协调更有效率。鲜于波和梅琳(2010)利用 ACE 的方法分析在小世界网络及异质性主体能够通过社区选择互动对象的情况下技术标准的竞争与扩散问题,发现主体预期及主体的异质性对标准扩散过程中的锁定和先发优势都有影响。Mauro 和 Richiardi(2011)以及 Gabriele 等(2012)建立了一个以订单驱动的市场模型来分析“羊群效应”(Herding Effects)在市场网络结构形成与财富分配中的作用。通过模拟,他们发现当模仿大量存在时,由交易引起个人的财富分布呈现“胖尾分布”(Heavy-tail),这与市场的实际表现相符合。Domenico 等(2010)则建立了一个由家庭、公司与银行组成的信贷网络模型来模拟金融市场中金融加速器的出现,他们发现,内在的伙伴挑选过程会影响信贷网络结构度分布的偏态和峰值,使得大公司与银行破产的风险提高。基于这个模型,Galina(2011)等建立了一个由 141 个国家中 7 938 个银行机构组成的全球银行网络,来探究经济衰退与危机对银行网络的影响,发现经济衰退对银行网络的形成有不良影响,影响程度随着国家、银行的不同而不同。他们发现,2008 年 9 月的次贷危机对全球银行网络的形成有着非常不良的影响,特别是对于那些从前不受衰退影响的大银行来说。

三、ACE 模型的现实市场检验与算法优化研究

由于 ACE 模型在对于选择参数以及整个学习算法上均是基于建模者本身的判断力,同时,大多数模型均已不受完全理性的约束,所以一直以来针对 ACE 最多的讨论均是关于其可靠性和准确性,因此,对 ACE 模型结果的可行性的检验和优化也是 ACE 研究的一个重要方向。文献研究表明,这一工作主要通过两种方法完成:一是与实证研究方法相结合;二是对模型本身进行评估与优化。

(一) ACE 模型的现实市场检验

对 ACE 模型在现实市场中进行检验也是 ACE 的一个研究前沿,如在金融市场、劳动力市场、电力市场上的检验与分析。它主要通过两个方面来实现:一是利用已有的数据或是特别调查得到的数据;二是结合实验室实验。在利用数据方面,由于近年来市场的透明度越来越高,如 2002 年纽约证券交易所启用了—个开放系统,同年纳斯达克也引入了相似的交易系统,这些变化都让金融市场的—数据易于取得,针对金融市场的—股市价格、特殊商品汇率、期权交易价格、—外汇汇率等的研究越来越多。Boswijk(2007)利用 1871—2003 年每年度的美国股票交易价格结合异质性有限理性代理人模型来研究—股票价格波动。Yuan 和 Chen(2006)通过创建—个金融市场多代理人模型来检验他们引入的—动态风险规避指数是否能够引起—资产价格的波动。他们将—该指数应用到了—Santa Fe 市场模型中,取得了相似的结果。Bart 等(2010)建造了—个由—基本面分析者与—技术分析者组成的模型,以对传统的—GARCH 模型在—期权市场方面的应用进行—优化,并利用从—欧洲期货交易所得到的—为期—一年的 DAX 指数对该模型进行—检验。与—结合数据相比,结合—实验室实验的研究范围有—很大的不同。Pingle 和 Tesfatsion(2001)对—劳动力市场的—不完全劳动—合同进行了—研究。结果表明,在—长期来看,人们—均会选择—合作,而—长期的结果在—真人实验中表现—得并不明显。Hyungna 和 Mount(2011)基于—电力拍卖—市场进行了—两组实验,第一—组由—四个—电脑模拟的—代理人和—两个—实验者组成,第二—组全由—模拟的—代理人组成。实验—中,考虑了—无长期—合同、—永久—长期—合同以及—可更新的—长期—合同—三种情况。实验—结果表明,在—这个—电力—拍卖—市场中,—代理人可以—很好地—模拟—实验者的—行为,同时,—代理人也能够—发现—市场中—许多—不同—寻常的—情况。这对—传统—拍卖—理论的有效性—是一个—很好的—检验。

(二) 针对 ACE 模型的算法评估与优化研究

ACE 是通过仿真的途径,而不是用数学的和解析的方法来分析复杂经济行为,因此,算法(Algorithm)对 ACE 来说是相当重要的—个内容。在—模型中,ACE 主—体的—各种—行为—均是由—不同的—智能—算法—来实现,但由于—现代—经济—环境—变化—很快,有关—ACE 的—仿真—模型—的—复杂—程度—也—随之—不断—提高,相应的—算法—也—需要—作出—改进。近—几年—来,研究—者—不仅—对—各种—可行—的—算法—进行—比较—分析,而且—也—在—优化—现有—的—算法—以—使其—更加—适合—经验—数据—方面—做出了—新的—研究。例如,Anufriev 等(2011)在—遗传—算法—的—基础—上—引入—了—个体—进化—算法—来—进行—主体—学习—机制—的—建立,从而—让—模型—更加—适合—近年—来—市场—透明—度—提高—的—这一—现象。根据—这个—算法,各—主体—基于—自身—的—实际—经济—指标—与—以前—的—决策—结果—来—选择—策略,具有—学习—能力—的—代理人—增加—了—市场—的—资源—分配—效率。Wouter(2010)等—则—专门—致—力—于—对—各种—模型—算法—的—研究,从—2010—年—开始,《Journal of Economic Dynamics and Control》连续—刊—载—他们—的—研究—文章。他们—比较—了—Krusell 和—Smith(1998)提出—的—一个—不—完全—市场—模型—的—几—种—算法,发现—那些—采用—了—大—范围—个—体—数据—的—解—法—往—往—具有—较—低—的—精度,而在—整个—精度—检测—中—所有—方法—均—不能—得到—满意

的结果。他建议经济学家在研究各种模型时应当注意对算法的选择,同时尽可能地尝试多种算法,当采用不同算法解决同一个模型时,结果相同才是最令人信服的。这一结论对于如何科学地进行 ACE 分析,有着重要的理论启示和方法论指导。

除了对算法的优化外,也有研究通过对现有模型行为机制的改变来对模型进行评价和优化。Eshel 等(1998)曾提出:当模型中的各个个体均与最靠近的邻居进行囚徒博弈并模仿邻居的行为时,合作将占据优势。Mengel(2009)通过分析相互影响结构中的囚徒困境模型,发现 Eshel 等人的结论并不是十分正确,从而进一步完善了 Eshel 的研究模型。

四、基于各类市场的 ACE 模型研究

针对各种市场自组织能力的研究也是当前 ACE 最为活跃的部分之一,如金融、劳动力、电力、供应链与物流、批发和零售等市场。随着主体特性以及交互性研究的深入,模型中市场的交易者的种类与行为也更加复杂及多样化。自从 20 世纪 90 年代以来,该领域涌现了大量的经典模型与影响深远的研究方法,最近几年表现得更为突出,如对金融市场、碳排放交易市场、技术市场的研究。

一直以来,针对金融市场的研究都是该领域的研究热点。如 Domenico(2010) 等用信贷网络模型来模拟金融加速器; Mauro 和 Richiardi(2011) 等建立的市场模型来分析“羊群效应”; Huang 等(2010) 使用了一个异质性主体模型来模拟三种金融危机并推测引起危机的潜在因素,发现市场投资者的最大化利益行为准则会使市场产生价格波动,有时还会引起金融危机,这也证明了以往相关研究结论的正确性。与早期研究相比,近几年的研究除了模型整体的复杂度有所提高外,研究人员也逐渐开始瞄准一些新兴市场。如张江(2006) 通过人工经济仿真(Artificial Economy Model, AEM) 模型分析了组织在市场中的涌现和动态演化现象,模型结果表明只要在简单的市场规则下,市场就可能因为单个企业“自下而上”的作用从而涌现出各种组织,同时不断产生出组织行程与分裂的动态演化过程。此外,施永仁(2006) 把 ACE 模型应用于供应链管理网络研究,从企业间的动态协调入手,研究供应链网络协调机制的宏观“涌现”及其复杂网络特征。Wang 等(2008) 将 ACE 模型应用到电子商务市场中,根据电子商务的特点来分析供应链伙伴是如何结成暂时联盟以应对顾客需求与库存的快速变化。通过实验,他们发现在现代供应链系统中,与竞争者和伙伴进行合作比单纯追求个体效益最大化更易获得成功。Kan 等(2010) 则用多代理人模型对日本的新型无碳排放电力交易市场进行仿真研究,经过 1 500 次仿真表明,在严格的碳排放标准下,尽管无碳排放电力市场的价格要高于传统市场,需求者还是会尽量选择新型电力市场。和关于碳排放交易市场研究的其他方法相比,ACE 方法更加系统、全面,结论的合理性和可靠性更强。

五、在政策制定方面的应用研究

在制定政策方面,ACE 虽无法被直接用于制定政策,但是 ACE 模型能有效模拟、分析异质主体间的交互行为以及由此产生的宏观经济动态,为制定政策提供依据和微观基础。在该研究方向,较为经典的模型是 1996 年美国 Sandia 国家实验室开发的一个基于主体的微观分析模型(Agent-based microeconomic simulation model, ASPEN)。该模型最初是用来模拟一个由公司、住户与政府组成的简单市场经济,后来扩展到引入银行主体、联邦储备主体、房地产主体和资本品生产主体,模型被应用于对美国宏观经济与过度经济进行仿真。1999 年扩展后的 ASPEN 两国模型用于分析国际贸易对国民经济的影响,到 2000 年,ASPEN-EE 模型用来分析电力系统的行为及其对其他国民经济基本结构的影响等,都取得了很好的效果。

财政政策一直以来都是这个方向研究的热点。2008 年《Journal of Economic Behaviour & Organization》出版了一期 ACE 在政策方面应用的特刊,十篇文章中有六篇是关于各项财政政策的。例如 Neugart(2008) 建立了一个多部门的代理人模型来评估一项针对劳动市场的政策,通过模拟,发现这种政策虽然可以提高参与培训者的就业率,但是却减少了未参与到项目中的失业人员的就业率。在农业政策方面,Happe 等(2008) 用他们提出的一个农业政策模型,探讨农业结构的转换与地区政策变化之间的关系,发现结构的调整很大程度上取决于其最初的结构而非政策。在工业政策以及市场设计方面,2002 年,Argonne 实验室开发了 EMCAS(Electricity Market Complex Adaptive System) 系统,该系统首先被用来对美国伊利诺斯州与中西部的能源市场进行仿真(Thomas and Michael, 2002),此后该模型开始为一些欧洲与亚洲的客户服务。Leigh 和 Kendrick(2007) 等则针对批发电力市场的设计建立了一个开放的 ACE 模型——AMES 批发电力市场测试平台,他

们用该模型对批发电力市场进行了模拟。在科技创新方面,Rosewell 和 Gibbon(2008) 制定了一个关于曼城地区的创新网络模型,该模型通过代理人之间的链接来表示创新关系,通过他们的行为和链接(如模仿、交易),创新可以得到扩散。模型的背景取自 1 500 家企业的量化数据。这个模型可被用来协助政策制定者制定提高经济系统创新能力的政策,为政策制定者提供了一个更为明晰的市场系统以及针对当地经济增长的方案。

针对其他政策方面的研究,Marco 等(2008) 通过集中考虑劳务市场、商品市场、信用市场以及证券市场来模拟一个真实的财政与货币经济,实验结果表明,基于输出而制定的货币政策有助于使通货膨胀保持在一个稳定且较为低的水平,同时货币政策对福利也有好的影响。Marco 等人的研究是一个名为 Eurace 项目的一部分(Silvano et al., 2010),该项目的核心是搭建一个关于欧洲政策制定的仿真平台。Eurace 的特别之处在于它囊括了现实世界中许多市场和各种不同的经济机制,它能提供一个与现实更为相近的环境从而为决策者提供帮助。

我国国家自然科学基金委管理学部曾于 2008 年 5 月召开关于“经济计算与政策模拟”的学术研讨会,这说明,基于 Agent 模型针对政策方面的模拟得到了中国学者的高度关注。

不过,针对政策制定的 ACE 模型往往只能给出定性分析而不能像传统的宏观模型那样给出定量分析,这使得 ACE 在政策制定上的应用有很大的局限性。这就要求模型制定者提高自身能力来为政策的形成、控制以及评估提供更好的模型。

六、结束语

从上面的分析中,我们可以发现,ACE 理论最吸引人的地方是它能研究经济系统的演化过程及其宏观特征“涌现”,它很好地揭示了微观与宏观经济之间的矛盾。当前,ACE 研究主要集中在主体学习过程和行为规范演变的研究、复杂经济网络的形成和特征研究、组织及特定市场的研究、ACE 模型的现实市场检验与算法优化研究,以及在政策制定方面的应用研究几个方面,这些都是当代经济学研究的主要核心。在我国,关于 ACE 的研究仍然处于起步阶段,对 ACE 方法还不够重视,相关成果也不多。因此,积极介绍 ACE 这一新方法,了解国际发展前沿非常重要,同时,在模型参数和算法选择上要注意结合我国经济系统的特点进行仿真研究,而不是照搬国外的模型。随着计算机科学的快速发展以及跨学科交流的开展,相信越来越多的经济学家将会学习、利用 ACE 来进行分析研究。

参考文献:

1. 施永仁 2006 《基于 Agent 的计算经济学及其在供应网络中的应用》,《复杂系统与复杂性科学》第 6 期。
2. 鲜于波、梅琳 2010 《互联网社区与 Agent 预期对标准扩散的影响研究》,《管理工程学》第 2 期。
3. 张江 2006 《基于 Agent 的计算经济学建模方法及其关键技术研究》,北京交通大学博士论文。
4. Anufriev M., P. Valentyn A. Jasmina and L. John. 2011. “Efficiency of Continuous Double Auctions under Individual Evolutionary Learning with Full or Limited Information.” CeNDEF Working Papers 10-01, Universiteit van Amsterdam.
5. Arifovic J., and A. Karaivanov. 2010. “Learning by Doing vs. Learning from Others in a Principal-agent Model.” *Journal of Economic Dynamics & Control* 34(10): 1967-1992.
6. Arthur W. 1994. “Inductive Reasoning and Bounded Rationality.” *The American Economic Review* 84(2): 406-411.
7. Bak P., M. Paczuski and M. Shubik. 1997. “Price Variations in a Stock Market with Many Agents.” *Physica A* 246: 430-453.
8. Barabási A. L. and R. Albert. 1999. “Emergence of Scaling in Random Networks.” *Science* 286: 509-512.
9. Bart F., Lehnert Thorsten Zwinkels and C. J. Remco. 2010. “Behavioral Heterogeneity in the Option Market.” *Journal of Economic Dynamics & Control* 34: 2273-2287.
10. Boswijk H. P. 2007. “Behavioral Heterogeneity in Stock Prices.” *Journal of Economic Dynamics & Control* 31: 1938-1970.
11. Charlotte B. 2004. “Agent-Based Computational Economics - An Introduction.” web. cenet. org. cn/upfile/68882. pdf.
12. Constanza F. and M. Friederike. 2011. “Cooperation through Imitation and Exclusion in Networks.” *Journal of Economic Dynamics & Control* 35(5): 641-658.
13. Domenico D. G., Gallegati Mauro, Greenwald Bruce, Russo Alberto, Stiglitz and E. Joseph. 2010. “The Financial Accelerator in an Evolving Credit Network.” *Journal of Economic Dynamics & Control* 34(9): 1627-1650.
14. Epstein J. M., and R. Axtell. 1996. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up*. New York: The Brookings Institute Press and MIT Press.
15. Eshel J., L. Samuelson, and S. A. Altruists. 1998. “Egoists and Hooligans in a Local Interaction Model.” *American Economic Review* 88: 157-179.
16. Gabriele T., J. Giulia, and G. Mauro. 2012. “Herding Effects in Order Driven Markets: The Rise and Fall Gurus.” *Journal of Economic Behavior & Organization* 81(1): 82-96.
17. Galina H. 2011. “Bank Relationships, Business Cycles, and Financial Crises.” NBER Working Paper 17356.

18. Happe K., A. Balmann K., Kellermann and C. Sahrbacher. 2008. "Does Structure Matter? The Impact of Switching the Agricultural Policy Regime on Farm Structures." *Journal of Economic Behavior & Organization* 67(2): 431 – 444.
19. Holland J. H. and H. M. John. 1991. "Artificial Adaptive Agents in Economic Theory." *The American Economic Review* 81(2): 365 – 370.
20. Huang W. H., H. H. Zheng, and W. M. Chia. 2010. "Financial Crises and Interacting Heterogeneous Agents." *Journal of Economics Dynamics & Control* 32(6): 1105 – 1122.
21. Hyungna O. H., and T. D. Mount. 2011. "Using Software Agents to Supplement Tests Conducted by Human Subjects." *Computational Methods in Economic Dynamics*, 13: 29 – 56.
22. Kan S., Y. Hiromi, and Y. Kenji. 2010. "Evaluation of CO2 Free Electricity Trading Market in Japan by Multi – agent Simulations." *Energy Policy* 38(7): 3309 – 3319.
23. Krusell P. and A. Smith. 1998, "Income and Wealth Heterogeneity in the Macroeconomy." *Journal of Political Economy* 106(5): 867 – 896.
24. Lane D. 1993. "Artificial Worlds and Economics." *Journal of Evolutionary Economics* 3(2): 89 – 107.
25. Leigh T., and D. Kendrick. 2007. "Dynamic Testing of Wholesale Power Market Designs: An Open – source Agent – based Framework." *Computational Economics* 30(3): 291 – 327.
26. Marco R., A. Tegli, and S. Cincotti. 2008. "Integrating Real and Financial Markets in an Agent – based Economic Model: An Application to Monetary Policy Design." *Computational Economics* 32(1): 147 – 162.
27. Marimon R. 1989. "Money as a Medium of Exchange in Economy with Artificially Intelligent Agents." *Journal of Economics and Control* 14: 329 – 373.
28. Mauro G., and M. G. Richiardi. 2011. "Agent Based Models in Economics and Complexity." In *Complex Systems in Finance and Econometrics*. Springer – Verlag New York Inc. 30 – 53.
29. Mengel F. 2009. "Conformism and Cooperation in a Local Interaction Model." *Journal of Evolutionary Economics* 19: 397 – 415.
30. Michael K. 2006. "Evolutionary Minority Games with Small – world Interactions." *Physica A* 365: 521 – 528.
31. Neugart M. 2008. "Labor Market Policy Evaluation with ACE." *Journal of Economic Behavior & Organization* 67: 418 – 430.
32. Peter B. K. H., C. H. Hommes, and S. Manzan. 2007. "Behavioral Heterogeneity in Stock Prices." *Journal of Economic Dynamics & Control* 31: 1938 – 1970.
33. Pingle M., and L. Tesfatsion. 2011. "Non – Employment Benefits and the Evolution of Worker – employer Cooperation: Experiments with Real and Computational Agents." ISU Economic Report No. 55.
34. Rosewell B., and C. Gibbon. 2008. "Innovation, Trade and Connectivity." Available at <http://www.manchester-review.org.uk/projects/view/?id=719>.
35. Schelling T. C. 1971. "Dynamic Models of Segregation." *Journal of Mathematical Sociology* 1: 143 – 186.
36. Silvano C., Roberto Marco, Tegli, and Andrea. 2010. "Credit Money and Macroeconomic Instability in the Agent – based Model and Simulator Eurace." Available at <http://www.economics-ejournal.org/economics/journalarticles/2010-26>.
37. Tesfatsion L. 2002. "Agent – Based Computational Economics." *Artificial Life* 8(1): 55 – 82.
38. Thomas V., and N. Michael. 2002. "Simulating the Behavior of Electricity Markets with an Agent – based Methodology: The Electric Market Complex Adaptive Systems(EMCAS) Model." EMCAS USAEE. Conference Paper.
39. Wang M. H., J. M. Liu, H. Q. Wang, W. K. Cheung, and X. F. Xie. 2008. "On – demand E – supply Chain Integration: A Multi – agent Constraint – based Approach." *Expert Systems with Applications* 34(4): 2683 – 2692.
40. Watts D. J., and S. H. Strogatz. 1998. "Collective dynamics of 'small world' networks." *Nature*, 393: 440 – 442.
41. Wouter J. D. H. 2010. "Comparison of Solutions to the Incomplete Markets Model with Aggregate Uncertainty." *Journal of Economic Dynamics & Control* 34: 4 – 27.
42. Yuan B. S., and K. Chen. 2006. "Impact of Investor's Varying Risk Aversion on the Dynamics of Asset Price Fluctuation." *Journal of Economic Interaction and Coordination* 1: 189 – 214.

Frontier Development of Agent – based Computational Economics: A Survey

Fan Ruguo, Ye Jing and Du Jingwen

(Economics and Management School of Wuhan University)

Abstract: Traditional economics research method can't match it's demand faced with more and more complex economy problems, the computer simulation method to make up the insufficiency of traditional economics; Agent – based computational economics (ACE) has become a branch of Economics. This paper analyses five frontier development research areas of ACE. It includes different agent learn and adaptive characteristics, interactive complex network models, tests and optimizations of ACE models, modeling of different markets and policy making, these areas is the core of contemporary economics. The survey show that the most attractive characteristics of ACE is it can analyses economy evolutionary process and its macro – "emergency" character by research heterogeneous agents behavior. It reveals the contradiction between the micro and macro economy, and almost each area of economics can use ACE. ACE has put influence on deep innovation not only of economics research but also thinking way of economics and research paradigm.

Key Words: Agent; Computational Economics; Complex System; Frontier Development

JEL Classification: B41, C63, C92, P49, Z00

(责任编辑: 孙永平)