

新熊彼特主义视角下基于主体的计算经济学研究^{*}

李律成 Petra Ahrweiler 熊航

内容提要:相对于主要采用均衡模型和优化方法的主流经济学,基于主体的计算经济学(Agent-Based Computational Economics, ACE)具有能够联系微观机理与宏观现象的优点,在新熊彼特领域有着广泛的应用。本文介绍了 ACE 的基本概念框架并比较了几种主流仿真平台,从微观(企业及组织机构知识流管理、企业创新内生影响因素)、中观(供应链协调优化、产业集群形成与演化)、宏观(区域及国家创新系统中的创新扩散、创新政策仿真)三个层面对相关研究进行梳理与综述,分析了 ACE 的应用前景与发展趋势。

关键词:基于主体的计算经济学 创新 新熊彼特主义

一、引言

20 世纪初,奥地利经济学家熊彼特在其著作《经济发展理论》中率先提出“创新”的概念,认为创新是生产要素与生产条件的重新组合,强调了企业家的作用,并且将其描绘成创新者、模仿者互相竞争的过程,为创新经济学奠定了基石。以熊彼特创新理论为基础,结合演化经济学、复杂性学科等领域展开的一系列有关创新及经济增长的研究(典型成果包括 Perez, 1983; Freeman & Soete, 1997; Freeman & Louca, 2001; Perez, 2002),一般被称为新熊彼特主义(Neo-Schumpeterian)。新熊彼特主义继承和发展了熊彼特的创新理论,更加重视量变到质变、非均衡的分析方法,突出强调技术与创新是经济增长的内生因素(颜鹏飞、汤正仁, 2009; 徐承红, 2012)。其内容涵盖技术创新与制度创新等不同领域,比较注重技术变革与推广、制度安排与政策对推动经济发展的意义。新熊彼特主义同时将创新起源、创新过程与创新方式等研究内容摆在更加重要的位置(贾理群等, 1995),具体包括微观层面的企业(机构)创新、中观层面的产业创新以及宏观层面下创新对经济的影响(Castellaci et al., 2005)。从本质上讲,创新活动无论是在微观、中观还是宏观层面,它们都不是连续的线性谱系,而是存在于相互作用的关系网络之中,并通过一定的交互规则驱动经济的演化发展。

从新熊彼特主义的研究方法和理论视角看,主流经济学使用的计量模型和数理模型等数学方法显然存在很大的局限性。首先,新熊彼特主义强调创新过程中个体间的互动是创新能否实现的关键性因素,而主流数学模型则必须对研究对象及其行为进行很强的假设以使其简化(刘晓光、刘晓峰, 2003)。这些假设往往抽象掉了研究对象之间相互作用的部分,使得模型结果的推导、验证和估计必然存在一定的片面性。其次,新熊彼特主义研究的核心是微观创新行为如何促进经济系统中观层面的产业发展与宏观层面的经济增长,而主流数学建模往往对微观行为进行了过度简化,因此会存在宏观经济现象缺乏微观基础解释的问题。最后,分析政策对技术创新及经济增长的影响、构建国家创新政策体系是新熊彼特主义的重点研究内容之一,而主流数学模型很难将政策制定者感兴趣的决策变量融入(Zhang & Vorobeychik, 2016),这也是主流经济学使用数学方法研究问题难以规避的缺陷。

针对主流数学方法的缺陷,计算机仿真技术逐渐进入经济学家的视野,基于主体的计算经济学(Agent-Based Computational Economics, ACE)便是其与经济学结合的重要成果之一,它使用基于主体建模(Agent-

^{*} 李律成,武汉理工大学管理学院,邮政编码:430070,电子邮箱:lilvcheng@126.com; Petra Ahrweiler, 欧洲技术创新评估研究院(德国); 熊航,瑞士联邦理工大学。感谢匿名审稿人的修改意见,文责自负。

Based Modelling, ABM)的仿真方法,建立系统中微观个体的交互规则以模拟经济行为及宏观系统运行,已经被广泛应用于经济学各领域。从历史脉络看,Axtell(2000)是最早的 ACE 理论构建者和实践者之一,他认为 ABM 能够说明模型的动态属性并测试结果与参数、假设的相关性,可较为系统地探索数学方程解决不了的问题。另一位 ACE 的积极倡导者 Tesfatsion(2002)认为 ACE 中主体(Agent)之间的互相作用是驱动经济过程的动力,经济体的状态由独立主体的内部属性共同决定,这些动力特点对提高经济学及社会学建模过程的透明度及清晰度有重要意义。Farmer & Foley(2009)则明确提出 ABM 将成为研究复杂经济系统的一种有效方法。Dosi et al(2010)使用基于主体建模的分析框架将传统凯恩斯理论与熊彼特理论进行了桥接,具体研究了宏观经济特性与公共政策对经济的影响。总体而言,相对于主要采用均衡模型和优化方法的主流经济学,ACE 有以下几点优势:第一,ACE 可以将微观个体的交互与宏观经济现象联系起来,从微观到宏观对经济系统进行分析与解释。第二,ACE 能够解决前者需要权衡模型准确性与理论需求的问题,并侧重于定性发展与模式成形(Pyka & Fagiolo, 2007)。第三,ACE 还能够直观地反映政策决策变量对宏观经济体的影响。

由上可知,ACE 对主流经济学的研究方法起到了良好的补充作用,有利于扩展经济学研究的范式与视角。同时,ACE 与新熊彼特主义更加强调宏观经济与微观经济关联分析的特点高度契合,为其应用与发展提供了有力支持,并已取得了颇为丰硕的研究成果。鉴于此,本文将介绍 ACE 的基本概念框架及技术实现平台,从新熊彼特主义视角出发对相关研究进行梳理并展望 ACE 的发展前景,期望进一步唤起我国经济学与其他社会科学研究者对 ACE 及计算性研究方法的关注。

二、ACE 的基本概念框架及仿真平台

(一)ACE 的基本概念框架

1. 基于主体的模型组成。数学建模是现代经济学的基本分析方法,其基本程序是,在设定经济主体基本行为规则的基础上,利用行为者及相关经济变量之间的特定关系,构造一个合理的优化系统,从而得到一个均衡的经济结果。主流经济学建模的基本思路是合理的,但是也应该看到,为了得到一个均衡的经济结果,在建模时需要对主体的行为进行多方面的约束和简化,导致许多模型的解释力不够,在实践中的适应性不强。ABM 这种灵活性更高的建模方法为解决上述问题提供了一条有效途径,它能够对现实进行更为准确的建模,特别是能够充分地模拟行为主体之间的互动以及环境对行为主体的反馈。基于主体的模型(Agent-based model)包括三个基本组成元素:主体(Agent)、环境(Environment)、行为规则(Behavioral rules)。

主体是 ABM 所模拟系统中实施行为和互动的行动者。不同于均衡模型中将主体假设为完全理性的收益最大化者,基于主体模型中的 agent 更加接近真实世界中的行为主体。Maes(1995)认为自主性的 agents 是为了达到其设计目标,在复杂动态环境中感知并自主行动的计算系统。Wooldrige & Jennings(1995)提出 agent 应该具有自主性(autonomy)、社会性(social ability)、反应性(reactivity)与主动性(pro-activeness),其中自主性表示 agent 不受外部干扰自主控制其行为,社会性表示 agent 能够相互交流,反应性表示 agent 可以对环境的变化做出改变,主动性表示 agent 根据一定的目标向导采取行动。Wooldrige & Jennings(1995)对 agent 做出的概念解释被行业内学者所广泛认同。此后,又有许多学者对 agent 的内涵进行了补充及完善,如 Franklin & Graesser(1996)认为自主性的 agent 位于环境之中,随着时间的推移能够感知环境并开展行动,以实现其计划并影响对未来的感知。Gilbert(2007)则将 agent 描述为具有察觉力(perception)、执行力(performance)、记忆力(memory)、策略性(policy)的个体,即 agent 能够察觉环境,按照一定的规则进行活动,并能够记录其状态与行动。在一个仿真模型之中,可以有不同类别的主体,但在构造 agent 时,都应该将这些特性考虑在内,有针对性地设计其结构。

环境(environment)可以认为是主体行动和交互的场所,包括经济、社会、地理环境等。具体而言,其可以仅仅为主体提供特定的活动空间(如“交通模型”^①),也可以有自身的属性而与主体发生交互(如“狼吃羊模型”^②),还可以划分不同性质的片区进行统计分析(如“EI Farol 酒馆模型”^③)。随着技术的发展,地理信息系统(Geography Information System, GIS)也被应用于多主体模型,其可以构造接近真实世界的仿真环境,使得仿真更具信服力。在 Beer(1995)看来,主体和环境应该理解为两个耦合的动态系统,它们的相互作

用导致了主体行为,两者之间的适应性可以通过约束耦合主体环境系统的满意度来表征。Gouaich & Michel(2005)认为环境在多主体系统中起着核心作用,自治性的主体只有部署在环境之中才能存在。Gilbert(2007)认为环境为主体之间的交互提供了通道,其可以包括许多被动的物体,如“路上的障碍物”、“能源资源”等,环境与主体一样能够进行设计,且其能够监测主体并暂时存储相关的交互信息,同时他指出在现实世界中,虽然环境的影响非常重要,但容易被研究者所忽视。其实各类经济数学模型的区别大都体现在对环境的设定上,但为了模型的简化,目前经济学模型中的环境相对比较简单,且主体与环境之间的交互性比较差。

主体的行为规则包括主体自身的活动规则以及不同主体之间的交互规则。其中,主体自身的行为代表其自主性,而主体之间的交互则代表其社会性。主体的行为是反映现实世界中微观交互的重点内容,其设计规则具有较大的灵活性。Wooldridge et al(2000)提出了用来设计多主体系统的 Gaia 方法,其具体包含三个模型:主体模型(Agent Model)、服务模型(Services Model)、相识模型(Acquaintance Model)。其中,主体模型是用来定义不同主体的类型,服务模型是用来识别主体角色所需的主要服务,主体的每一个行动都对应一个服务,且必须确定服务的输入、输出、前置条件和后置条件,相识模型则是用来定义不同类型主体之间的连接,即信息传输路径,其有助于确保系统松散耦合。Gilbert & Terna(2000)构建了“环境—规则—主体”体系(Environment-Rules-Agents Scheme),将环境、主体及相关数据保持在不同的概念层级,建议主体通过环境进行交互,如此可以简化模型代码。Garcia(2005)认为主体的规则设计需要基于现有理论假设及经验数据,但其过于复杂则不利于理解模型。

基于上述三个基本元素,构建 ABM 的一般过程如下:首先,观察与研究现实世界中的微观个体及其行为,包括个体类型、个体自身的行动、个体之间的交互、个体自身的状态属性以及个体所处的环境,明晰其逻辑关系并进行抽象与概括(张永安、田钢,2008)。然后,对其进行提炼并建模,以现实世界为依据对模型中的主体类型、主体结构及状态、主体行为规则和交互规则、环境进行定义及描述。最后,选择合适的技术实现平台及算法进行编程,完成仿真模型的建立。

2. 模型的核实、校准与验证。当模型设计完成后,建模者还需要进行核实(verification)、校准(calibration)与验证(validation)以保证模型的正确性(validity)和合理性(legitimacy)。在完成模型编程的初始阶段,存在一些程序上的漏洞与缺陷无法避免,这时就需要对模型进行“核实”以查漏补缺。Gilbert(2007)提出可以使用优化代码、计入输出结果、观测仿真、添加说明与调试开关、使用单元测试、使用已知情景测试、极值测试等方法对模型进行核实。其中,计入输出结果与极值法是较为常用的两种方法。“计入输出结果”指的是将程序运行的中间变量也输出显示以观测每个步骤的正确性,如果出现错误,便能轻易划定其范围。“极值法”是指将部分参数调至最大或最小值,以检查输出结果是否合理,这种方法易于观测且操作简单。“校准”是根据现实情况设定模型的相关参数,从而改善模型与实验数据的一致性,最小化仿真结果与现实数据的差别(Xiang et al,2005;Janssen & Baggio,2016),使其达到能够用于模拟目标系统的状态。Venkatraman et al(2017)将模型校准总结为识别参数配置以最优化解释观测事实的过程。“验证”则用于检测模型是否能够模拟真实世界的系统。Gilbert(2007)认为 ABM 的验证应包括灵敏性检验与对比实证数据两个方面。Windrum et al(2007)表示关注定性或定量现象、微观或宏观现象、瞬时或长期影响决定了“验证”的数据类型,同时指出在验证之前进行灵敏度分析具有重要意义。Anand et al(2016)则从过程视角分析了模型的验证,认为 ABM 的验证包括知识验证(本体验证)、过程验证与系统验证。值得一提的是,许多研究并未清晰地区分“校准”与“验证”,本文强调,“校准”是使用部分现实数据对模型的参数进行初始设置,使模型能够启动运行,而“验证”则是在模型运行一段时间后对仿真结果与真实世界的对比。

(二) ACE 仿真平台及比较

目前基于主体建模的主流平台包括 NetLogo、Swarm、Mason、RePast 等。NetLogo 仿真平台由美国西北大学于 1999 年建立,随后由 MIT 传媒研究室对其进行开发,它易于掌握且能够进行 Java 扩展(Sklar,2007)。Swarm 由圣塔菲研究所开发,其进行系统仿真的基本单位是“蜂群”(Swarm),即一个集合的主体执行计划,支持分层建模,主体可以包含其他“蜂群”的嵌套结构(Minar et al,1996)。Mason 是单过程离散事件的仿真平台与可视化工具包,使用 Java 语言编写,其特别强调“群”模拟(高达数百万的主体),由乔治梅森大学计算科学系与复杂社会研究中心共同建立(Luke et al,2004)。RePast 则由芝加哥大学社会科学计算

研究中心创建,其提供了一个创建、运行、显示与收集数据的主体仿真库,包含了多种可视化数据的图表类型(Collier,2001)。

许多研究将不同的多主体仿真平台进行了比较(Robertson,2005; Railsback et al,2006; Castle & Crooks,2006; Gilbert,2007; Nikolai & Madey,2009; Kravari & Bassiliades,2015)。综合来看,NetLogo 具有安装简易、维护性良好、可以进行3D可视化等优点,但不能进行极端复杂的建模,适用于短期范式、主体局部互动、网格环境的模型,可以用于社会与自然科学、行程安排与计划、自然资源与环境等领域。Swarm 能够提供完整的工具集,有着清晰的概念基础与灵巧的设计,允许图形接口与模型分离,且能够集成地理信息系统,但安装非常复杂且从社会团体得到的帮助较少,适用于复杂的模型,能够较好地应用于自然资源环境、科学仿真等领域。Mason 拥有运行速度快的优势,能够用于计算密集、逻辑复杂、长时间工作的模型,但文件分类性一般,适合用于研究社会复杂性、人工智能学习、抽象模型、物理建模及自然科学等领域。RePast 最大的优点是能够良好地支持并实施地理信息系统功能并有着较好的稳健性,但存在部分设计不合理的缺点,同时要求应用者有较好的编程水平,适用于地理信息系统、生物和社会研究等领域。本文结合不同学者的观点,将四种主流 ACE 仿真平台的特点及适用领域进行了归纳,见表1。总体而言,上述各个平台都特点鲜明,在分析不同的经济学问题时各具优势并有着广泛的应用。

表1 ACE 仿真平台比较

	优点	缺点	适用领域
NetLogo	简单易学、3D可视化	不适用于极端复杂的模型	社会与自然科学、行程计划安排、自然资源环境等
Swarm	完整的工具集、设计灵巧、能够集成GIS	安装复杂、从社会团体得到的帮助较少	自然资源环境、科学仿真等
Mason	运行速度快、可进行复杂的逻辑运算	文件分类性一般	社会复杂性、人工智能学习、抽象模型、物理建模及自然科学等
RePast	支持集成GIS、稳健性好	对编程水平要求较高、部分设计不合理	地理信息系统、生物和社会研究等

资料来源:根据相关文献整理。

三、新熊彼特主义视角下 ACE 的应用

在新熊彼特主义中,创新是许多不同层面行为主体复杂交互的一种“涌现”现象,因此许多问题使用主流经济学中常用的数学方法难以解决。相比而言,ACE最大的特点就是很好地联系了微观个体交互机理与宏观现象,其在新熊彼特领域得到了深刻体现。在ACE中,主体能够代表创新经济体系中的异质性个体,如创新者、模仿者等。主体之间的交互规则能很好地模拟生产条件、制度等外在因素作用下主体之间进行的复杂非线性交互,从而揭示宏观现象与微观行为的互动规律。因此,ACE能够广泛应用于新熊彼特领域并覆盖创新体系中不同层面的研究。从微观层面看,其可以将创新系统中的企业、组织机构作为研究对象,对其内部管理决策进行仿真。从中观层面看,其可以从供应链及产业集群入手,分析协调供应链成员、优化资源配置等问题,探究产业集群的形成与演化机制。从宏观层面看,其可以仿真区域及国家创新系统的运行,从而给利益相关者及政策制定者提出政策建议。本文针对不同层面(微观、中观及宏观)的研究进行分类综述,但由于新熊彼特主义下的创新往往具有跨层次的特点,许多模型将不同层面的行为主体有机结合起来,所以部分研究涉及多个层次,这也正体现了基于主体建模自下而上的研究特点。

(一)微观层面——企业、组织机构

新熊彼特主义认为技术和创新是经济增长的内生因素。企业是经济系统中进行技术创新的基本单位,而技术创新的本质是知识的重新组合,所以企业知识流的有效管理直接决定其创新产出。同时,模块化设计、风险管理、财务管理、企业组织设计等其他因素也会影响企业的创新效率。ACE能够针对企业及相关组织机构进行研究。

1. 企业(组织机构)内部知识流管理研究。为了更好地理解企业知识动力及知识分布情况,Nissen &

Levitt(2004)建立了基于知识动力的多主体模型,提出知识在大多数企业中分布不均匀,并根据多维表述知识流的新兴理论,将企业的知识流动力标准化。通过动力模型,作者能够在具体实施过程设计与技术干涉之前进行仿真实验及可视化分析。Chira et al(2006)认为具有异质性技能的个体合作对于企业的拓展非常关键,同时强调了知识在分布式设计环境下的重要性,其使用多主体系统旨在提高数据、信息、知识价值链的管理效率以满足设计、组织及运营目标。为了构建企业内部知识管理系统,Grundspenkis(2007)使用多主体框架建立了概念模型;用智能企业内存概念支持知识管理过程,讨论了智能组织的知识管理系统,并认为使用多主体框架研究智能知识管理系统具有很大的潜力。针对企业员工之间的知识共享行为,Wang et al(2009)在假设组织干预会影响可识别性、收益及成本的基础上,建立了多主体模型,研究结果显示知识共享是员工行为与组织干预的交互结果。

2. 企业创新内生影响因素研究。模块化生产与管理对于提高企业创新效率有着重要的意义,Chen & Chie(2007)使用 ABM 研究了模块化在企业产品创新中的重要性,结果表明消费者与企业都能在新产品设计的模块化结构中受益,但同时指出模块化意味着企业更高的成本与更差的活动性。在企业风险管理方面,Wu et al(2010)从企业家团队的角度使用多主体建模的方法研究技术创新风险决策问题,比较了团队决策与传统个人决策的区别,并使用中国某汽车公司作为案例进行了验证。关于地理位置对企业绩效所产生的影响,Behdani et al(2010a)使用 ABM 模拟了异常情况下多厂企业在不同地理位置分布时的动态行为及决策分析,对集中及分散机制进行了比较,评估了不同行为对系统整体绩效的影响。在企业财务管理方面,Cao & Chen(2012)基于跟随企业现金流的思路,使用 ABM 分析了企业财务危机的形成原因与过程,模型包括四种主体:企业、产品、银行与环境,对企业的不同生命周期(创立、成长、成熟与衰退)分别进行了仿真分析,仿真结果与实际情况具有一致性,说明 ABM 是了解企业财务困境的有效工具。企业会在一定条件下做出变革以求发展,Ayhan et al(2015)构建了基于多主体的企业变革管理模型以应对制造业企业的变化,模型最大的优势是其自动化监测与管理系统可以协同系统中的每个子部分。作者使用该模型进行了灵敏度分析以识别影响企业变革的关键因素。针对企业组织设计方面,Seck & Barjis(2015)认为企业的组织设计与工程方法(DEMO)是基于过程向导的概念,通常在离散事件中实施并有利于表达复杂组织的本质及社会性,适合使用 ABM 进行仿真分析。

(二)中观层面——供应链、产业集群

尽管近年来出现很多优化方法用于研究供应链与产业集群,但大多数方法都难以反映供应链与产业集群的动态性、复杂性和不确定性,而运用 ACE 对其开展研究却取得了良好的成效。

1. 供应链协调优化研究。供应链网络系统具有复杂性与内在分散化的特点,Gjerdrum et al(2001)认为供应链网络的目标是降低运行成本并保持客户订单在一个较高的水平,使用多主体仿真模型控制一个需求驱动的供应链网络系统,探索订货点、订货数量、交货时间等参数对系统的影响,以期优化系统的部分决策行为。此外,供应链还具有动态环境及离散分配的特性,Kaihara(2003)使用供应链多主体模型说明了虚拟市场概念的适用性,并证实了根据经济学原理的决策框架可以使供应链管理中的资源分配更加高效。对于供应链中成员协商与最优化配置的问题,Xue et al(2005)构建了基于多主体系统的建筑供应链协调框架,整合供应链中的组织与多属性协商模型,在该框架下运行一个虚拟的建筑项目并解释了多主体框架用于建筑协商的可行性。Akanle & Zhang(2008)使用多主体框架以优化供应链的配置,解决一段时间内客户的需求。在该框架中,供应链中的主体通过迭代机制协调并交互各自的客户订单,从而达到最优组合。优化后的资源组将被进一步细化,以识别未来的链结构。针对供应链中存在的风险,Zarandi et al(2008)使用 ABM 研究了在模糊环境下供应链管理中的牛鞭效应(bullwhip effect),在模糊时间序列模型中添加了遗传算法模块以获取基础值,同时添加反向传播神经网络去除结果的模糊性。Giannakis & Louis(2011)认为供应链的复杂性及存在于需求和供应资源中的固有风险是影响供应链绩效的主要因素,为此构建了供应链风险管理的多主体模型,模型中实时适应性与学习能力的算法可以使供应链中合作伙伴更加有效地应对信息不对称,以减小供应链管理中战术与操作层面的风险。在破坏性情况出现时,能够提供整改策略并为供应链管理构建一个综合决策框架。针对供应链中各级企业的决策存在复杂的交互作用,Behdani et al(2010b)构建了制造业供应链多主体模型用于分析不同条件下企业的绩效,模拟了工厂、部门及外部实体的相互作用,并对某化学

产业供应链进行了实证研究,结果显示模型可以用来识别和改善供应链企业绩效的关键驱动因素。

2. 产业集群形成与演化研究。新熊彼特主义对地区的集体学习、创业环境、产业集群尤为关注(Asheim et al,2006)。Zhang(2003)提出了一个具有明确定义的“Nelson-Winter”模型用以研究美国硅谷产业集群的形成,其强调高新产业集群的特点是企业家精神的聚集,并构建多主体模型对有利于高科技经济的政策进行仿真研究。产业区是基于异质性演化网络的复杂生产系统,区内企业具有不同的社会行为,Boero et al(2004)建立了多主体仿真模型,对产业区企业行为的认知过程进行模拟,测试了以自我为中心与以社会为中心的两种行为,仿真结果显示,更倾向于社会行为的产业区企业在宏观上有着更高效的技术适应路径。为了研究产业区内企业的关系,Squazzoni & Boero(2002)构建了产业区多主体仿真模型,使用不同的“地方制度工程”实验选项探究特定的支持机构如何表现出宏观的集体活动,如技术的研究与转让、改进企业的技术适应性等。为了探究产业区的创新过程及机理,Albino et al(2006)使用 ABM 研究了如何改进产业区创新以提高其竞争力,研究显示,当新的学习过程与传统学习过程相结合时,产业区表现良好,产业区应该通过“引进”来改善其创新战略,允许发展新知识与传统知识的重组。不同的产业结构特点会影响企业认知,Biggiero & Sevi(2009)整合了产业结构与 agent 的认知特征,使用基于主体建模的方法构建了组织间认知生产系统模型(CIOPS)用于研究企业在产业中的欺骗行为,研究结果显示,随着产业的增长,欺骗行为的负面影响也随之增加,此外,当主体拥有相同的结构和认知特征时,欺骗等级没有相关差异。

(三)宏观层面——区域及国家创新系统

新熊彼特主义者 Freeman(1987)在研究日本技术政策和经济绩效时提出了国家创新系统的概念,他强调政策体系对技术创新及经济系统的推动作用及重要意义。随后,Cooke(1992)对国家创新系统进行了延展,提出区域创新系统的概念,其更加突出空间与地理维度的特征。区域及国家创新系统由企业、大学、科研院所、政府和其他机构组成,是不同主体相互作用以进行技术转移与扩散的创新网络系统,并能够体现创新与地理空间的关联。ACE 不仅能够拓展地理信息系统以模拟真实的地理环境,对创新成果的扩散规律进行研究,同时能够设置相关政策变量,在政府实施政策前探究其对经济系统的影响,为区域和国家创新系统的协调运行提供理论依据。

1. 创新扩散研究。基于 ACE 对真实地理环境的可模拟性,已有许多学者将其用于研究不同国家及区域的技术扩散。在农业技术领域,Berger(2001)使用智利某农业区域的实证数据,建立了基于空间的多主体元胞自动机创新扩散仿真模型,使用网络阈值作为约束条件,其可以反映经验累积效应与观察同行经验,结果显示 ABM 可以帮助更好地理解创新与资源利用过程。在环境技术领域,Schwarz & Ernst(2009)以德国南部真实地理区域为模拟环境,构建了基于主体的水资源节约创新扩散模型。模型中的主体代表家庭,其在选择接受创新时有慎重或简单两种决策规则。模型使用调查问卷数据进行校准,仿真结果表明,即使没有促销策略,节水创新技术也会扩散。在能源技术领域,Faber et al(2010)针对荷兰微型热电联产技术与传统冷凝式锅炉技术之间的竞争,使用多主体模型研究了新技术的扩散。作者根据市场特点、技术参数与政策措施对模型进行校正,发现燃料价格对新技术的扩散有着重要影响。McCoy & Lyons(2014)使用基于主体的创新扩散阈值模型用于模拟电动车在爱尔兰家庭的使用情况,以调查数据的形式来了解全国的代表性及异质性群体并用其校正模型,研究结果表明,首先采取行动的群体对整体扩散水平至关重要。Palmer et al(2015)设计了 ABM 用于研究光伏系统在意大利的扩散情况,模型将投资回收期、环境影响、家庭收入以及个体之间的交互作用作为影响因素,以 2006—2011 年间的实际数据对模型进行校准,仿真结果显示,在新上网电价方案出台之后,意大利光伏安装量已经超过了初始快速增长阶段。

2. 创新政策仿真研究。能够进行政策仿真实验是 ACE 相对于主流经济学研究方法的一大优势。作为最早一批使用 ABM 对创新领域展开研究的学者,Gilbert et al(2001)建立了可以用于政策仿真的知识动力创新网络多主体模型(SKIN model),模型中的主体代表企业、政策制定者、研究实验室等,每个主体都有一组知识基因“Kene”用来表示不同技术领域、专业分工及技术水平,通过特定的知识组合象征系统创新的焦点,即“创新假说”(Innovation Hypothesis)。主体可以有自我发展、模仿以及两者相结合三种创新策略,并根据资金存量水平与创新成功的记录来决定其进行渐进型创新或激进型创新,主体在模拟的市场中不断改变策略力求取得创新的成功,研究结果显示,该模型能够复制私人手机通信技术与生物技术两类创新网络的

定性特征。以 SKIN model 为基础,Paier et al(2017)以奥地利生物技术创新系统为研究对象,基于知识的概念构建模型。不同于以专利数据表示知识的传统方法,作者使用公司数据用以初始化与校正模型,建立特定行业的适度函数,分析了不同资助计划的效果。Gagliardi et al(2014)则以意大利政府关于 Puglia 农村地区发展方案(2007—2013)的政策文件为依据,使用 ABM 评估了转换创新政策对相关参与者及系统的影响,相关政策包括促进有机、无转基因食品及新的食品安全规章与控制措施,仿真结果显示,更加积极地执行相关政策将使经济活动的重点转向大型企业,而小企业则被边缘化。不同类型政策之间的倾斜与权衡是政策制定者常常需要考虑的问题,Blom et al(2013)使用 ABM 研究了挪威创新政策与国防工业政策之间的权衡,使用不同的政策情景进行仿真,研究结果显示,挪威政策制定者关注一个纯的政策(国际竞争力或国防安全目标)比混合战略更有帕累托效率,且在欧盟新的自由化制度下,这种权衡将更加明显。由于文化政治的差异,不同国家的创新系统有着各自的特点,所以创新政策的制定与实施也应该有针对性。Kwon & Motohashi(2017)建立了可模拟日本及美国国家创新系统的多主体模型,仿真结果显示,日本受益于客户需求变化迅速与渐进型创新至关重要的产业,而美国则受益于激进型创新的产业。他们认为日本没有必要模仿美国创新系统中的自由市场主导机制,而是需要加强对技术源动态伙伴关系的重视并提高内部研发能力。

在西方发达国家,ACE 的应用已经不仅仅停留在学术研究阶段,许多以多主体仿真为技术核心的高层项目已经启动并展开。美国是最早应用 ABM 模拟国家经济系统及政策情景的国家,1996 年,Sandia 国家实验室(Sandia National Laboratories)建立了 ASPEN 模型,其被广泛应用于美国国家经济体的仿真及政策建议(Basu et al, 1998)。欧洲也同样重视 ABM 对于国家及欧盟层面的政策仿真,如 EURACE 就是专门针对欧洲经济体系进行多主体仿真并为利益相关者提供政策建议的大型项目(Deissenberg et al, 2008)。Dawid et al(2008)设计的多主体宏观经济模型就是 EURACE 的一部分,该模型拥有独特的地理维度及不同技术类型的异质性工人,用以研究促进工人整体技术水平的各类型政策,结果表明在各个地区平均投入资金能够有更大的长期产出。爱尔兰曾经以创新带动经济发展闻名全球,近年来,政府为了复苏经济、增加就业机会,重新将创新摆在国家战略层面的重要位置。2010 年,由爱尔兰政府及欧盟共同资助的项目“智能经济的创新政策仿真”(Innovation Policy Simulation for the Smart Economy, IPSE)正式启动,该项目主要面向政府,由著名的都柏林大学(University College Dublin)牵头,项目以 Gilbert et al(2001)建立的 SKIN model 为基本平台,增加了创业企业(Start-ups)、企业家(Entrepreneurs)、科技中介(S&T Intermediaries)等元素,构建爱尔兰国家创新网络仿真模型。该项目基于爱尔兰的大学、企业、技术研究中心、专利等真实数据,能够对爱尔兰国家创新系统进行仿真分析,主要包括国家的重点研究领域、应用研究与基础研究的 R&D 经费投入比重、科技中介对国家创新系统的影响等问题,以期在政府实施创新政策前,进行不同情景的政策仿真,从而为其提供参考与建议。

四、展望及启示

基于主体的计算经济学发展至今已经 20 余年,其从微观机理观测宏观现象的研究思路与新熊彼特主义非常契合,有着广阔的应用前景与巨大的发展潜力。尤其是从美国的 ASPEN、欧盟的 EURACE、爱尔兰的 IPSE 等国家级大型仿真项目的全面开展可以看出,ACE 已经通过了概念验证阶段(Dawid et al, 2014),正在步入实践应用领域。ACE 未来应用的重要领域及发展趋势是将理论与现实大数据相结合,对区域及国家层面的政策进行“预先实验”,从而为政策制定者提供决策依据。

但机遇与挑战并存,目前 ACE 也存在许多尚待完善之处。许多行业内的学者都发表了对 ACE 发展趋势的看法。Gencer & Ozel(2012)提出 ACE 的进一步发展需要计算科学领域与经济学领域专家的密切合作,未来发展的方向是激励 agent 交互它们的偏好。Klügl & Bazzan(2012)认为如果想进一步进行全球规模的多主体仿真,需要大量的现实数据与具有不同映射的仿真模型,而如何保证匿名性、模型的验证以及如何处理大量的数据与不同模型的组合是解决问题的关键。由此可见,收集大量数据的新技术亟须被开发。同时,他们也希望能够制定一个从目标生成到结果输出的仿真范式,使 ABM 在方法论方面得到改进。Teshatsion(2016)表示 ACE 对研究者了解现实世界起到了很好的补充作用,但模型的实证验证、如何更加科学地陈述实验报告、展现长时段应用的附加价值、探索模型的线谱等内容都需要进一步完善。此外,许多不同

机制的基于主体建模都使用了社会影响(social influence)或者同伴效应(peer effects)等概念,它是对行为主体间互动所产生影响的一种表述,但其缺乏清晰的理论界定(Xiong et al, 2016),同时,从微观到宏观层面社会影响在不同类型市场中的表现也值得深入研究(Kiesling, 2012)。具体到创新及新熊彼特领域,基于主体的模型需要更详尽地学习创新与需求的合作演化并耦合创新与劳动力市场发展的产业动力,加强重视“校正”与“历史友好性”对模型的意义(Dawid, 2006; Dawid et al, 2014)。综合众多学者的观点,本文认为 ACE 要想得到更大的发展,现阶段需要着重从两个方面努力。首先,逐渐建立 ABM 从设计、开发、描述到使用等各个环节的操作规范,以此降低上述各个环节中的主观性和不确定性,使得建模仿真行为更加规范化,也有利于增强仿真的透明性、可重复性和可比较性。其次,仿真模型往往对个体行为进行模拟,但对此进行较为严谨的校准和验证却经常受到微观实证数据的掣肘,因此需要加强对主体行为数据及社会大数据(Bello-Orgaz et al, 2016)的搜集与应用。

目前我国许多研究机构与学者也陆续开展了创新领域基于主体计算经济学的研究与应用,涉及创新扩散、供应链、创新网络等相关领域,但相比欧美发达国家,还处于初级阶段。我国研究中存在的主要问题是模型“校准”与“验证”的重要性还认识不足,许多国内的研究还停留在使用模型解释机理与现象阶段,在建立模型后并未使用大量准确的现实数据对模型进行校正,使得模型不具备“说服力”与“预测性”。正因如此,我国尚未开展区域乃至国家层面的 ACE 政策仿真项目。近年来,国内学术界开始对 ACE 的应用加大了重视。2008年5月,主题为“经济计算与政策模拟”的学术研讨会在北京召开,中国科学院的相关研究人员强调了我国计算机政策模拟领域与发达国家的差距以及对其发展的重要性^④。2014年11月,中国社科院数量经济与技术经济研究所主办了“海峡两岸经济学与政策模拟研究学术研讨会”,两岸多所知名高校及相关人员就“经济学进展及交叉”和“政策模拟与应用”等主题展开深入讨论,推动了两岸当代经济学的发展^⑤。在2016国家自然科学基金管理学科重点资助领域中,就有多个主题涉及基于主体的计算经济学。例如,“个体和群体选择行为的实验研究及复杂性分析”主题强调了对计算实验及群体选择涌现特征的研究,“经济新常态下的国家金属资源安全管理及政策研究”主题明确指出需要开发国家级的决策支持与政策仿真平台,为国家制定相关政策提供理论和决策依据^⑥。我国应该学习欧美国家的思路,加强组建经济学与计算机科学的交叉研究团队,重视大数据对模型的校正作用,使得 ACE 能够更真实地反映现实系统,以期对相关机构、部门提供科学可行的决策、政策建议。

注:

- ① U. Wilensky & N. Payette (1998), “NetLogo Traffic 2 Lanes model”, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Traffic2Lanes>.
- ② U. Wilensky(1997), “NetLogo Wolf Sheep Predation model”, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/WolfSheepPredation>.
- ③ W. Rand & U. Wilensky(2007), “NetLogo EIFarol model”, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/EIFarol>.
- ④ http://www.most.gov.cn/kjbgz/200806/t20080606_62289.htm.
- ⑤ http://iqte.cass.cn/dtbd/201412/t20141209_1790900.shtml.
- ⑥ <http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2016xmzn/05/07.html>.

参考文献:

贾理群 刘旭 汪应洛, 1995:《新熊彼特主义学派关于技术创新理论的研究进展》,《中国科技论坛》第5期。
 刘晓光 刘晓峰, 2003:《计算经济学研究新进展—基于 Agent 的计算经济学透视》,《经济学动态》第11期。
 熊彼特, [1912]1990:《经济发展理论》中译本,商务印书馆。
 徐承红, 2012:《新熊彼特主义区域经济理论研究进展》,《经济学动态》第7期。
 颜鹏飞 汤正仁, 2009:《新熊彼特理论述评》,《当代财经》第7期。
 张永安 田钢, 2008:《多主体仿真模型的主体行为规则设计研究》,《软科学》第3期。
 Akanle, O. M. & D. Z. Zhang(2008), “Agent-based model for optimising supply-chain configurations”, *International Journal of Production Economics* 115(2):444-460.
 Albino, V. et al(2006), “Innovation in industrial districts: An agent-based simulation model”, *International Journal of Production Economics* 104(1):30-45.
 Anand, N. et al(2016), “Validation of an agent based model using a participatory simulation gaming approach: The case of city logis-

- tics”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 71:489–499.
- Asheim, B. et al(2006), “The rise of the cluster concept in regional analysis and policy”, in: B. Asheim et al(eds), *Clusters and Regional Development: Critical Reflections and Explorations*, Routledge.
- Axtell, R. (2000), “Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences”, Center on Social and Economic Dynamics Working Paper, No. 17.
- Ayhan, M. B. et al(2015), “A multi-agent based approach for change management in manufacturing enterprises”, *Journal of Intelligent Manufacturing* 26(5):975–988.
- Basu, N. et al(1998), “ASPEN: Amicrosimulation model of the economy”, *Computational Economics* 12(3): 223–241.
- Beer, R. D. (1995), “A dynamical systems perspective on agent-environment interaction”, *Artificial Intelligence* 72(1–2): 173–215.
- Behdani, B. et al(2010a), “Decentralized vs. centralized management of abnormal situations in a multi-plant enterprise using an agent-based approach”, *Computer Aided Chemical Engineering* 28:1219–1224.
- Behdani, B. et al(2010b), “Performance analysis of a multi-plant specialty chemical manufacturing enterprise using an agent-based model”, *Computers & Chemical Engineering* 34(5):793–801.
- Bello-Orgaz, G. et al(2016), “Social big data: Recent achievements and new challenges”, *Information Fusion* 28: 45–59.
- Berger, T. (2001), “Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis”, *Agricultural Economics* 25(2–3):245–260.
- Biggiaro, L. & E. Sevi(2009), “Opportunism by cheating and its effects on industry profitability: The CIOPS model”, *Computational and Mathematical Organization Theory* 15(3):191–236.
- Blom, M. et al(2013), “The trade-off between innovation and defense industrial policy: A simulation model analysis of the Norwegian defense industry”, *Technological Forecasting and Social Change* 80(8):1579–1592.
- Boero, R. et al(2004), “Micro behavioural attitudes and macro technological adaptation in industrial districts: An agent-based prototype”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 7(2).
- Cao, Y. & X. H. Chen(2012), “An agent-based simulation model of enterprises financial distress for the enterprise of different life cycle stage”, *Simulation Modelling Practice and Theory* 20(1):70–88.
- Castellaci, F. et al(2005), “Advances and challenges in innovation studies”, *Journal of Economic Issues* 39(1): 91–121.
- Castle, C. J. E. & A. T. Crooks(2006), “Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations”, UCL Working Papers Series, Paper 110.
- Chen, S. H. & B. T. Chie(2007), “Agent-based simulation of product innovation: Modularity, complexity and diversity”, Agent 2007 Conference on Complex Interaction and Social Emergence.
- Chira, O. et al(2006), “An agent-based approach to knowledge management in distributed design”, *Journal of Intelligent Manufacturing* 17(6):737–750.
- Collier, N. (2001), “RePast: An extensible framework for agent simulation”, The University of Chicago’s Social Science Research Computing Working Paper.
- Cooke, P. (1992), “Regional innovation systems: Competitive regulation in the new Europe”, *Geoforum* 23(3):365–382.
- Dawid, H. (2006), “Agent-based models of innovation and technological change”, *Handbook of Computational Economics 2*: 1235–1272.
- Dawid, H. et al(2008), “Skills, innovation, and growth: An agent-based policy analysis”, *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 228(2–3):251–275.
- Dawid, H. et al(2014), “Agent-based macroeconomic modeling and policy analysis: The Eurace@Unibi model”, Bielefeld Working Papers in Economics and Management.
- Deissenberg, C. et al(2008), “EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy”, *Applied Mathematics and Computation* 204(2):541–552.
- Dosi, G. et al(2010), “Schumpeter meeting Keynes: A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles”, *Journal of Economic Dynamics and Control* 34(9):1748–1767.
- Faber, A. et al(2010), “Exploring domestic micro-cogeneration in the Netherlands: An agent-based demand model for technology diffusion”, *Energy Policy* 38(6):2763–2775.
- Farmer, J. D. & D. Foley(2009), “The economy needs agent-based modelling”, *Nature* 460(7256):685–686.

- Franklin, S. & A. Graesser(1996), "Is it an agent, or just a program? A taxonomy for autonomous agents", in: J. P. Mülle et al(eds), *Intelligent Agents III: Agent Theories Architectures & Languages*, Springer.
- Freeman, C. (1987), *Technology Policy and Economic Performance*, Pinter Publishers.
- Freeman, C. & L. Soete(1997), *The Economics of Industrial Innovation*, Routledge.
- Freeman, C. & F. Louca(2001), *As Time Goes by: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*, Oxford University Press.
- Gagliardi, D. et al(2014), "Evaluation and design of innovation policies in the agro-food sector: An application of multilevel self-regulating agents", *Technological Forecasting and Social Change* 85:40—57.
- Garcia, R. (2005), "Uses of agent-based modeling in innovation/new product development research", *Journal of Product Innovation Management* 22(5):380—398.
- Gencer, M. & B. Ozel(2012), "Agent-based modeling of economic systems: The EURACE project experience", Proceedings of the ECOMOD 2010 Economic Modeling Conference.
- Giannakis, M. & M. Louis(2011), "A multi-agent based framework for supply chain risk management", *Journal of Purchasing and Supply Management* 17(1):23—31.
- Gilbert, N. (2007), *Agent-based Models*, Sage.
- Gilbert, N. et al(2001), "Innovation networks: A simulation approach", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(3).
- Gilbert, N. & P. Terna(2000), "How to build and use agent-based models in social science", *Mind & Society* 1(1): 57—72.
- Gjerdrum, J. et al(2001), "A combined optimization and agent-based approach to supply chain modelling and performance assessment", *Production Planning & Control* 12(1):81—88.
- Gouaich, A. & F. Michel(2005), "Towards a unified view of the environment(s) within multi-agent systems", *Informatica* 29(4):423—432.
- Grundspenkis, J. (2007), "Agent based approach for organization and personal knowledge modelling: Knowledge management perspective", *Journal of Intelligent Manufacturing* 18(4):451—457.
- Janssen, M. A. & J. A. Baggio(2016), "Using agent-based models to compare behavioral theories on experimental data: Application for irrigation games", *Journal of Environmental Psychology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2016.04.018>.
- Kaihara, T. (2003), "Multi-agent based supply chain modelling with dynamic environment", *International Journal of Production Economics* 85(2):263—269.
- Kiesling, E. et al(2012), "Agent-based simulation of innovation diffusion: A review", *Central European Journal of Operations Research* 20(2):183—230.
- Klügl, F. & A. L. C. Bazzan(2012), "Agent-based modeling and simulation", *AI Magazine* 33(3):29—40.
- Kravari, K. & N. Bassiliades(2015), "A survey of agent platforms", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18(1).
- Kwon, S. & K. Motohashi(2017), "How institutional arrangements in the national innovation system affect industrial competitiveness: A study of Japan and the US with multi-agentsimulation", *Technological Forecasting and Social Change* 115:221—235.
- Luke, S. et al(2004), "Mason: A new multi-agent simulation toolkit", Proceedings of the 2004 Swarmfest Workshop.
- Maes, P. (1995), "Artificial life meets entertainment: Lifelike autonomous agents", *Communications of the ACM* 38(11):108—114.
- McCoy, D. & S. Lyons(2014), "Consumer preferences and the influence of networks in electric vehicle diffusion: An agent-based microsimulation in Ireland", *Energy Research & Social Science* 3:89—101.
- Minar, N. et al(1996), "The swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations", SFI Working Paper.
- Nikolai, C. & G. Madey(2009), "Tools of the trade: A survey of various agent based modeling platforms", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12(2).
- Nissen, M. E. & R. E. Levitt(2004), "Agent-based modeling of knowledge dynamics", *Knowledge Management Research & Practice* 2(3):169—183.
- Paier, M. et al(2017), "Knowledge creation and research policy in science-based industries: An empirical agent-based model", in: B. Vermeulen & M. Paier(eds), *Innovation Networks for Regional Development: Concepts, Case Studies, and Agent-Based Models*, Springer.
- Palmer, J. et al(2015), "Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agent-based simulation",

- Technological Forecasting and Social Change* 99:106—131.
- Perez, C. (1983), “Structural change and assimilation of new technologies in the economic and social systems”, *Futures* 15(5): 357—375.
- Perez, C. (2002), *Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*, Edward Elgar.
- Pyka, A. & G. Fagiolo(2007), “Agent-based modelling: A methodology for neo-Schumpeterian economics”, in: H. Hanusch & A. Pyka(eds), *Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*, Edward Elgar.
- Railsback, S. F. et al(2006), “Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations”, *Simulation* 82 (9):609—623.
- Robertson, D. A. (2005), “Agent-based modeling toolkits NetLogo, RePast, and Swarm”, *Academy of Management Learning & Education* 4(4):525—527.
- Schwarz, N. & A. Ernst(2009), “Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations: An empirical approach”, *Technological Forecasting and Social Change* 76(4):497—511.
- Seck, M. & J. Barjis(2015), “An agent based approach for simulating DEMO enterprise models”, *Procedia Computer Science* 61:246—253.
- Sklar, E. (2007), “Netlogo, A multi-agent simulation environment”, *Artificial Life* 13(3):303—311.
- Squazzoni, F. & R. Boero(2002), “Economic performance, inter-firm relations and local institutional engineering in a computational prototype of industrial districts”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5(1).
- Tesfatsion, L. (2002), “Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up”, *Artificial Life* 8 (1):55—82.
- Tesfatsion, L. (2016), “Economic systems as constructively rational games: Oh, the places we could go!”, Economics Presentations, Posters and Proceedings.
- Venkatramanan, S. et al(2017), “Using data-driven agent-based models for forecasting emerging infectious diseases”, *Epidemics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epidem.2017.02.010>.
- Wang, J. et al(2009), “An application of agent-based simulation to knowledge sharing”, *Decision Support Systems* 46(2):532—541.
- Windrum, P. et al(2007), “Empirical validation of agent-based models: Alternatives and prospects”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 10(2).
- Wooldridge, M. & N. R. Jennings(1995), “Intelligent agents: Theory and practice”, *Knowledge Engineering Review* 10(2): 115—152.
- Wooldridge, M. et al(2000), “The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design”, *Autonomous Agents and Multi-agent Systems* 3(3):285—312.
- Wu, D. D. et al(2010), “Modeling technological innovation risks of an entrepreneurial team using system dynamics: An agent-based perspective”, *Technological Forecasting and Social Change* 77(6):857—869.
- Xiang, X. R. et al(2005), “Verification and validation of agent-based scientific simulation models”, Agent-Directed Simulation Conference.
- Xiong, H. et al(2016), “Peer effects in the diffusion of innovations: Theory and simulation”, *Journal of Behavioral and Experimental Economics* 63:1—13.
- Xue, X. L. et al(2005), “An agent-based framework for supply chain coordination in construction”, *Automation in Construction* 14(3):413—430.
- Zarandi, M. H. F. et al(2008), “A fuzzy agent-based model for reduction of bullwhip effect in supply chain systems”, *Expert Systems with Applications* 34(3):1680—1691.
- Zhang, H. F. & Y. Vorobeychik(2016), “Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: A critical review”, arXiv, <https://arxiv.org/abs/1608.08517>.
- Zhang, J. F. (2003), “Growing Silicon Valley on a landscape: An agent-based approach to high-tech industrial clusters”, *Journal of Evolutionary Economics* 13(5):529—548.

(责任编辑:刘新波)

(校对:刘洪愧)