

·学科进展与展望·

复杂网络理论及相关管理复杂性研究的资助进展

刘作仪

(国家自然科学基金委管理科学部, 北京 100085)

[摘要] 本文统计和分析了管理科学部管理科学与工程学科近年来对复杂网络理论及其在管理复杂性研究中的应用的资助情况, 简要概括了这方面的资助取得的进展, 以为该领域的研究者提供参考和启发, 进一步促进管理科学复杂性研究的发展。

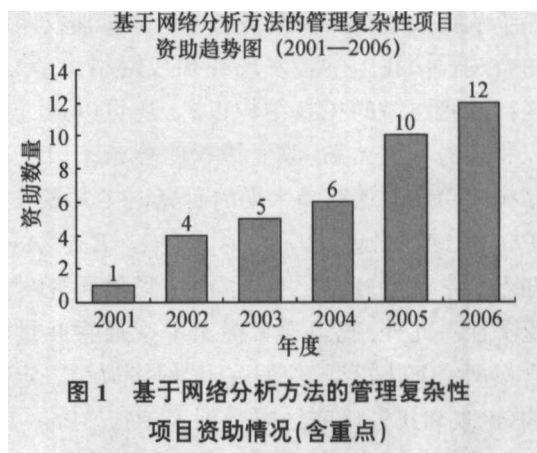
[关键词] 复杂网络, 管理科学

在探索自然界非线性与不确定性本质、揭示复杂系统在宏观上表现出“涌现”现象等方面, 非线性动力学、统计物理学以及离散建模方法一直是经典传统的工具与方法。复杂网络理论的出现为复杂系统的建模与特征描述带来了新的视角。该理论从复杂系统最为基础的“联系”入手, 通过将复杂系统高度抽象成为由节点组成的网络, 从研究网络的拓扑结构和网络动力学入手来探索复杂系统的本质。在国际上, 最早从事复杂网络理论研究的学者主要集中在数学、统计物理学、控制理论等领域, 近年来随着复杂网络应用研究的不断扩展, 管理科学领域的科学家也逐渐加入到这一领域。本文将针对国家自然科学基金委员会管理科学部近年来在复杂性研究领域的项目资助情况, 从理论研究与应用研究两个方面对复杂网络理论及管理复杂性研究的最新进展予以初步归纳总结。

1 复杂网络理论及相关管理复杂性研究的资助情况

复杂网络理论及其应用是国家自然科学基金“复杂性研究专项”资助的一个重要领域。近几年来, 随着这一领域已成为复杂性研究的热点领域, 管理科学与工程学科对其资助呈现出快速增长趋势

(见图1)。从2000—2006年所资助的117项复杂性研究专项项目中, 复杂网络理论研究及其在管理学中的应用研究共38项, 包括2项重点项目和36项面上项目。



从资助项目的研究领域分布来看, 在两项重点项目中, 一项是关于复杂网络动力学的基础理论研究, 另一项是复杂网络理论在城市交通领域的应用研究。在36项面上项目中, 基础理论研究14项, 占38.9%, 主要集中在复杂网络的拓扑结构与动力学、复杂网络统计性质、复杂网络稳定性等领域; 应用研究22项, 占61.1%, 主要分布在金融、城市交通、组织管理、知识传播与扩散、社会经济系统等领域(如表1示)。

表1 基于网络分析方法的管理复杂性资助项目领域分布(2001—2006)

资助领域	复杂网络理论			复杂网络应用						
	网络动力学	统计性质	网络稳定性	交通	金融	组织	物流与供应链	传播与扩散	社会经济系统	其他
资助项数	8	3	3	3	3	2	3	5	2	4

2 复杂网络理论研究进展

复杂网络理论从结构与关系角度研究网络的拓扑性质与涌现机制。从研究内容上来看,复杂网络基础理论研究主要集中在复杂网络拓扑结构特征的描述与度量、复杂网络建模、复杂网络上的动力学机制以及复杂网络的鲁棒性和脆弱性等方面。

2.1 复杂网络建模

在复杂网络模型建构与网络演化机制方面,我国学者针对现有复杂网络的生成与演化主要是基于随机性连接发生,而对确定性连接缺乏考虑的现象,提出了能够更好地描述从规则到随机之间转变的“和谐统一的混合择优模型(HUHPM)”,并在此基础上进一步扩展提出“大统一的混合网络模型(LUHNM)”^[1],由于该模型能反映更普遍的实际网络连接方式的多样性与复杂性,从而具有重要的学术价值。我国学者提出了局域世界网络模型,并将局域世界概念与BBV加权无标度网络结合构造了加权局域世界网络模型,数值仿真结果显示,该模型反映了从指数分布加权网络向幂律分布加权网络过渡的全过程。我国学者发现在加权网络上,除了调整连接改变网络的拓扑结构以外,还可以通过调整边权和边的对应关系、改变边权的分布来改变网络的结构和功能。这些高水平的研究论文大多数发表在 *Physica A*, *J. Modern Phys.*, *Phys. Lett. A* 等国际知名的学术期刊上,引起了网络科学研究学者的广泛关注。此外,我国学者提出了交通吞吐量驱动的含权网络演化模型,他们关于“网络流量决定网络结构”论点和实证研究结果受到了 *Phys. Rev. Lett.* 审稿人的高度评价^[2]。

2.2 复杂网络动力学

复杂网络上的拓扑结构、网络上节点动力学的同步化行为与控制、以及复杂网络传播机制等一直是复杂网络动力学研究的重要内容。在科学基金的资助下,我国学者在网络同步化能力、群集系统中的同步、复杂网络的部分同步、社区网络的同步、具有多连接属性的复杂网络的同步、BTN-WS网络中束晕-混沌的同步与控制、复杂动态网络的多目标分区同步的控制、以及广义同步模型与集团同步等方面进行了大量研究,在国内外重要期刊上发表了近百篇高水平学术论文^[3]。我国学者还将复杂网络理论与非线性动力学理论、控制理论等结合起来,在混沌复杂动态网络的同步与控制、大规模混沌神经网络的复杂动力学行为及其演化规律等方面也取得了部

分研究成果^[4-6]。

2.3 复杂网络的鲁棒性与脆弱性

无标度网络具有典型的“鲁棒但又脆弱性”特征,而现实中的互联网、电力网、航空网等又是很容易受到意外故障和攻击的网络,因此,如何避免病毒攻击而保证网络可靠运转、防止重要网络发生级联故障、阻止流行疾病的快速传播等问题成为复杂网络应用中设计与控制的关键。通过科学基金的资助,我国学者在复杂网络的鲁棒自适应控制方面做出了大量出色的研究工作,论文发表在 *Phys. Letters A*, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I (II)* 等国际重要期刊上,例如李翔博士与陈关荣教授提出了无尺度网络和完全随机网络的虚拟控制原理,发表的研究论文获得2005年IEEE电路与系统协会Guillemin-Cauer奖,这是Guillemin-Cauer奖自1968年设立以来国内学者首次获此殊荣^[7]。在复杂网络可靠性中的级联故障与网络结构之间的关系研究方面,我国学者通过对复杂网络中的物理负载、结构负载与网络抗毁性之间的内在关系展开研究,提出了复杂负载网络中的节点(边)重要度的评估方法,并在无比例网络抗毁性测度方面取得了最新成果^[8]。鉴于目前国内外对网络的出错和遭袭研究还只是立足于探讨网络的稳定性与脆弱性层面上,我国学者提出了“能否以及怎样修复出错和遭袭的复杂网络”的观点,并以航空网为例进行了实证研究,论文发表在 *Phys. Rev. E*, *J. Mod. Phys. B* 等国际期刊上^[9]。

3 复杂网络理论在管理科学中的应用研究

在复杂网络理论研究不断深入的同时,对复杂网络理论的应用研究已开始从计算机控制学科快速扩散到社会经济管理领域。从管理科学与工程学科资助的项目情况来看,复杂网络立论在管理学中的应用研究主要集中在金融市场、交通系统、信息(疾病)传播与扩散、物流与供应链、组织管理、社会经济网络等方面。

3.1 金融市场复杂性

近几年来,随着国家金融政策改革的不断深入,金融市场的研究成为我国管理学者关注的热点,金融复杂性研究成为管理复杂性研究的重要领域。学者们非常重视应用复杂网络理论来研究金融市场的复杂性,他们针对金融数据中的标度性、涨落分布和关联行为进行了实证统计和分析,应用分行布朗运动模型、渗流金融市场模型和争当少数者博弈等各

种金融物理模型模拟和探索金融市场的自组织临界性、变易性和自适应性,从而对导致宏观市场涨落的微观机制进行解释。在金融市场中经纪人之间的自适应竞争行为、财富分配的幂律分布和人群分布的相变现象、以及具有网络结构的争当少数者博弈模型的布尔动力学等方面做出了大量高水平的研究成果,在 *Phys. Rev. E*, *J. Mod. Phys. B*, *European Physical Journal B*, *Physica A* 等国际知名期刊上发表了大量研究论文^[10,11],对于国内把物理学概念和方法应用于金融分析的金融物理学研究作出了积极的贡献。

3.2 交通复杂性

复杂网络的兴起为研究城市交通复杂性问题提供了新的方法和工具。学者们通常将城市交叉路口或小区作为节点、街道作为连边、车辆在边上行驶遇到的阻抗对应于边上的权重,从而将城市交通网络抽象为一个复杂加权网络。他们针对地铁、街道、公共交通等网络展开实证研究,探索交通网络的拓扑特征、动力学过程与拓扑结构之间的相互作用,研究城市交通网络的规模与拓扑结构、生长过程、时空关联性、Hub点分布和网络走势演化特征,交通网络的小世界效应和连接度分布无标度特性及与车辆密度之间的关系,确定不同拓扑结构大城市交通网络的交通承载能力、城市道路交通流的拥堵机制,寻找识别城市交通瓶颈和疏解拥堵的控制策略,相关研究成果发表在 *Mod. Phys. Lett. B*, *European Physics Letter*, *IEEE Transactions on ITS*, *Transportation Research-A* 等国内外重要学术期刊上^[12]。这些研究成果的部分应用表明,利用复杂网络理论来处理大城市交通难题将具有重要的方法论意义。

3.3 信息(知识)传播与扩散

复杂网络的小世界现象与无标度特征为研究信息传播与扩散机制奠定了坚实的理论基础。科学基金率先资助我国学者对网络传播行为开展研究,在网络病毒传播模型构建、网络传播动力学、信息拥塞机制、以及网络传播的临界与相变行为分析等方面取得了一些重要资助成果,在 *Phys. Rev. E*, *Europhysics Letters*, *Dyn. Contin. Dis. Impul. Syst. B* 等国际期刊上发表学术论文多篇^[13]。在知识传播与扩散方面,针对企业知识资源利用、企业间知识的共享与协同化合作问题,将无比例模型的理论方法与网络技术相结合应用到知识管理领域,提出了无比例知识网络概念,在无比例知识网络体系结构、构建知识网络的无比例模型、以及知识网络的基本特

征方面进行了探索性研究,这对于企业知识管理中的知识存储、传播与应用来说具有重要的理论与应用价值^[14]。此外,鉴于小世界网络在信息传递上的最短路径和高效性,也有一些学者开始思考利用复杂网络理论来研究市场营销的技术和方法。

3.4 物流与供应链网络

从图论角度来看,物流网络是由点(物流设施与机构)和线(线路)连接而成的复杂网络系统。为探索物流网络规划与设施选址的新方法,我国学者在现有复杂网络理论和物流网络选址规划研究的基础上,对物流网络的结构复杂性和节点度分布、聚类系数及网络最短具体等物理拓扑特性进行研究,在 *Phys. Rev. E*, *J. Mod. Phys. B*, *Europhysics Letters* 等国际期刊上发表了部分研究成果^[15]。为实现城市内紧急救援物资资源的优化配置,在研究城市危险源扩散规律的基础上,提出应用复杂网络理论分别构建以人为节点的危险源扩散网络模型和以城市为节点的应急物流网络模型,探索城市应急物流网络形成机制、结构和规律^[16]。此外,我国学者还以自组织理论为基础,利用复杂网络的研究方法构建供应链网络系统的图表示方法,分析供应链网络系统的结构、功能与涌现行为,从而将供应链网络系统纳入到复杂网络应用研究中来。

3.5 组织管理

幂律分布是复杂系统宏观涌现行为的典型表现之一,为了探索企业规模幂律分布的形成机制,学者们从产业结构演化的角度,研究由技术进步所导致的规模收益递增和企业之间的相互竞争行为,指出技术进步和收益递增所带来的正反馈效应以及由此带来的先发优势、总需求的多样性、厂商适应性的竞争和增长策略是形成企业规模幂律分布的重要条件。他们借鉴网络研究的思想和方法,建立了厂商-消费者双顶点复杂网络模型,通过模拟仿真实验表明,模型在一个不断增长的市场条件下给出了相当好的幂律分布结果^[17,18]。然而,组织中的复杂网络与现有复杂网络在内涵上有较大的区别,表现在组织网络的节点具有异质性、关系类型的多样性、网络规模的有限性等特征。针对这种情况,有学者提出必须寻找一种适合于组织内部或组织之间复杂网络的新的抽象描述方法及其结构特征指标,并在科学基金的资助下对组织网络的异质性、复杂组织网络的无标度行为、复杂组织网络的演化等方面进行了部分探索性研究^[19]。可以预见,在经济全球化大环境下,随着网络型组织的结构越来越复杂,基于网络

分析方法的组织管理研究将会得到进一步的重视。

3.6 社会经济系统

在社会学领域,网络分析不仅给社会学分析带来新的概念、方法和理论,而且使社会学对社会结构的认识更加清晰,它使现有的社会学从关注范畴或属性分析转化到关注关系和结构上来。由于社会网络分析方法与复杂网络理论存在着节点规模与节点异质性上的差别,并且随着网络研究的快速发展,复杂网络理论在社会学研究中的应用开始受到关注,如社会网络搜索能力模型、熟人网络模型等。在科学基金的资助下,我国学者以社会资本理论为基础,提出了“结合文化传播、创新扩散与社会网络理论来研究分析我国转型时期的农民工非制度性融合问题”的新方法^[20]。

在经济系统领域,我国学者针对人群网络结构中的小世界特征、高聚集性和确定的连接度分布这些基本特征如何影响少数者博弈模型中的动力学演化行为展开了深入研究,他们提出了一少数者博弈模型,并研究其中的敌对人群效应;探讨了雪堆博弈模型合作行为的网络效应,在 *Phys. Rev. E, Europhysics Letters* 上发表了部分研究成果^[21]。我国学者还将复杂网络理论应用到产业组织理论的研究,通过建立产业内企业竞争关系复杂网络模型来探索产业竞争关系,相关论文发表在 *Physica A* 国际期刊上。有理由相信,无论是在社会系统领域,还是在经济系统领域,基于复杂网络分析的方法将会得到更多学者的关注,目前经济物理学的快速发展就是最好的证明。

4 小结

通过对近几年国家自然科学基金所资助项目的进展情况总结,可以看出国内复杂网络理论及相关管理复杂性研究呈现以下特点:

(1) 较之于传统的复杂性理论与方法,如非线性理论、自适应复杂理论与离散建模方法,复杂网络的研究更受学者的关注;

(2) 管理复杂性研究项目资助数量的上升从侧面地反映出我国学者非常重视应用复杂网络理论来研究、解决转型期我国社会经济发展中存在的问题;

(3) 从资助项目发表的文章来看,国内学者在国际知名期刊上发表的大量高水平学术论文说明,我国在该领域的研究与国际前沿基本上是同步的,

并在国际上具有一定的学术地位和影响。

参 考 文 献

- [1] 方锦清. 非线性网络的动力学复杂性研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [2] Wang WX, Wang BH, Hu B et al. General Dynamics of Topology and Traffic on Weighted Technological Networks. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 188702.
- [3] 方锦清. 非线性网络的动力学复杂性. 国家自然科学基金重点项目研究报告, 2006.
- [4] 赵耿. 混沌复杂网络系统的复杂性及其同步研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [5] 罗晓曙. Internet网络和混沌神经网络的复杂动力学行为及其应用研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [6] 陈士华. 无标度与小世界复杂网络的模型及同步研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [7] Li Xiang, Wang Xiao Fan, Chen Guan Rong. Ping a complex dynamical network to its equilibrium. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, 2004, 51(10): 2074—2087.
- [8] 邓宏钟. 复杂负载网络抗毁性研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [9] 蔡勤. 出错和遭受复杂网络的可修复度与稳定度研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [10] 周佩玲. 金融市场中的非正态标度行为研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [11] 汪秉宏. 价格的统计分析与金融市场的经纪人相互作用模型研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [12] 高自友. 城市交通瓶颈处车流复杂特性研究与控制. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [13] 付忠谦. 基于复杂网络的传播行为研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [14] 战洪飞. 面向知识管理的无比例知识网络研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [15] 孙会君. 物流网络结构复杂性及其选址规划研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [16] 赵林度. 城市重大危险源应急物流网络研究. *东南大学学报(哲学社会科学版)*, 2007(1).
- [17] Fan Ying, Li Menghui, Di Zengru. Increasing returns to scale, dynamics of industrial structure and size distribution of firms. *Journal of System Science and System Engineering*, Volume 15, Issue 1, 19—33(2006).
- [18] Wang Dahui, Zhou Li, Di Zengru. Bipartite producer-consumer networks and size distribution of firms. *Physica A*, 2005. 08. 006.
- [19] 崔文田. 网络组织演化机制及其动力学复杂性研究. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.
- [20] 杜海峰, 李树茁等. 基于先验知识与模块性的网络社区结构探测算法. *西安交通大学学报*, 2007(6):
- [21] 郑大昉. 自适应社会经济网络模型. 国家自然科学基金项目研究报告, 2006.

RESEARCH PROGRESS ON COMPLEXITY NETWORK AND IT'S APPLICATION IN THE AREA OF MANAGEMENT SCIENCE

Liu Zuoyi

Abstract After statistical analysis of the projects which focus on complexity network and it's application in the area of management science, funded by the Division of Management Science, NSFC, this paper gives a comprehensive introduction of research progress on complexity network and it's application in the area of management science. The authors hope that this paper can give some reference for the further research in this field.

Key words management science, complexity research

·资料·信息·

科学基金重大项目“对我国主要农田生态系统氮素行为及氮肥高效利用的基础研究”取得突出进展

国家自然科学基金委员会于2002年组织并设立了重大项目“对我国主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究”。该项目由中国科学院南京土壤研究所朱兆良院士和中国农业大学张福锁教授联合主持,经过4年的努力,于2007年9月通过了结题验证。

4年间,项目组开展了系统、深入的研究工作,其重要进展和成果包括:

1. 定量评价了我国华北平原与太湖地区作物(小麦、玉米、水稻)与土壤系统化肥氮的去向与施氮量的关系;揭示了施氮量增加,当季氮吸收率下降以及损失增加的规律;阐明了不同形态氮损失与栽培条件的关系。研究证明两个地区环境来源氮(干湿沉降氮以及灌溉水带入的氮)可达农田自然供氮一半左右;明确了环境来源氮是农田自然供氮和太湖水体氮污染的重要来源;确定了华北地区农田0—1米土层深度中硝态氮的残留量平均已近每公顷200公斤,最高可达每公顷1000公斤。

2. 围绕“产量效应与环境效应相协调”的要求,提出了“区域宏观控制与田块微调相结合”的施氮量推荐原则,并对该原则进行了评价,确定了当前生产条件下的适宜施氮量;建立了以根层氮素调控为理论基础,以土壤硝态氮测试为主要手段的氮素实时监控技术以及相应的控制指标。运用模型计算与地

理信息系统(GIS)整合的方法,建立了基于GIS和经验模型的县域氮素管理系统。

3. 以籽粒产量为标准,筛选获得了氮高效、氮低效水稻、玉米、小麦种质材料共13份,育成氮效率与产量都明显高于当地推广良种的小麦新品种1个。在水稻、小麦、玉米三种作物中分别定位出控制氮效率及根系发育性状相关的主效数量性状位点(QTLs)。在小麦、玉米中发现一些与氮效率QTLs紧密连锁的根系QTLs,从而在遗传学水平上证明了根系性状在这两种作物氮效率中的重要作用。

4. 克隆了水稻、小麦、玉米硝、铵转运蛋白基因,并系统分析了其表达特征,明确了水稻铵转运蛋白基因(AMT1.1)、硝转运蛋白基因(NRT2.1)和根系谷氨酰胺合酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)的活性与氮效率的相关关系。

5. 揭示了在田间全生育期水平氮高效小麦、玉米根系生物学特性及相关生理机制。从生理和分子水平上阐明了水稻“硝促铵”的机制,明确了水稻根表和根际的硝化作用对水稻氮素高效利用起着重要作用。发现氮高效水稻根系硝化能力强是提高氮素吸收效率、促进氮代谢和地上部生长的重要机制。

(摘自基金委简报)