

# 复杂系统科学研究进展\*

狄增如 陈晓松<sup>†</sup>

(北京师范大学系统科学学院, 100875, 北京)

**摘要** 在还原论思想方法的指导下, 20 世纪科学的发展取得了巨大成功, 在宇宙的产生与演化、微观物质结构与基本相互作用等方面都获得了比较深刻的科学认识. 进入 21 世纪, 宏观世界复杂系统涌现性问题已成为各学科领域的重要学术挑战, 系统科学将成为未来科学探索的重要领域. 复杂系统科学发展的研究表明: 纷繁多样的复杂现象背后, 存在着普适且简单的规律; 探索各类系统的结构、环境与功能的普适关系, 以及演化与调控的一般规律, 并在系统范式的基础上形成科学认识, 是系统科学研究的重要任务. 基础理论、生命系统、气候变化、社会经济、智能技术等领域的最新研究成果均能说明, 超越还原论, 在系统科学思想方法的指导下探索复杂性, 不仅可加深对具体系统的科学认识, 还能揭示各领域复杂现象背后的普适性规律.

**关键词** 系统科学; 复杂性; 还原论; 复杂系统

**中图分类号** N94

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022178

## 0 引言

1905 年被称为“爱因斯坦元年”, 自此之后, 量子力学和相对论的飞速发展, 极大地加深了人类对自然的科学认识. 从宇宙的起源与演化, 到微观物质结构与相互作用, 在宇观和微观的时空尺度上, 人们对自然都有了深刻的理解, 充分展现了人类智慧的光辉.

这些科学成就的取得, 很大程度上依赖于还原论的科学研究方法. 还原论是现代科学研究的基本方法论. 当人们希望了解研究对象的性质和规律时, 通常采用分析法, 先将对象拆分, 再还原为更加基础的部分或单元, 通过了解每部分的结构属性, 再试图由部分出发, 综合推演整体属性. 还原论适应和推动了 20 世纪科学研究的发展. 对物质结构的认识、生命奥秘的理解都经历了一个类似的过程, 从分子到原子, 再到更细微的基本粒子, 以及从个体、组织器官、细胞到 DNA. 除了以物理与生物为代表的自然科学领域外, 还原论的巨大成功还深刻影响了人们看待世界、解决问题的思维方式.

当人们科学认识的触角逐渐集中于宏观层次时, 还原论的局限性在许多复杂系统中越来越明显, 例如生命起源、大脑认知与意识产生, 生态系统的结构与功能等. 与人类生活息息相关的时空尺度广泛存在

着复杂系统, 其最突出的特点是系统的复杂性与多样性. 人们越来越深刻地认识到: 对于系统基本结构单元性质和规律的了解, 并不能让人们全面地理解系统的行为. 例如: 仅仅基于细胞的知识, 人们不可能理解组织器官的功能, 因为生命的整体并不只是生命物质的简单组合, 而大脑的学习与认知功能也一定不是通过神经元层次的知识就能够理解的; 类似的还有鸟群飞行、蜂群智慧、计算机网络、人类社会等. 1972 年, 著名物理学家、诺贝尔物理学奖获得者 Anderson 指出: “将万事万物还原成简单的基本规律的能力, 并不蕴含着从这些规律重建宇宙的能力……当面对尺度与复杂性的双重困难时, 重建论的假设就崩溃了. 其结果是, 大量基本粒子的复杂聚集体的行为, 并不能依据少数粒子的性质做简单的外推就能得到理解. 取而代之的是, 在每一复杂性的发展层次之中呈现了全新的性质, 从而我认为要理解这些新行为所需要做的研究, 就其基础性而言, 与其他相比也毫不逊色.”<sup>[1]</sup> 进入 21 世纪以来, 正如郭雷院士所指出的, “当今科学技术的发展前沿已经在时空多尺度多层次上, 广泛进入研究复杂性与调控复杂系统的时代”<sup>[2]</sup>. 复杂系统科学已成为学术研究的主战场, 它关注复杂系统的演化行为和涌现性质, 并致力于挖掘其中所存在的、

\* 国家自然科学基金重点资助项目(71731002, 12135003)

作者简介: 狄增如(1962—), 男, 博士, 教授, 博导, 国际系统与控制科学院院士. 研究方向: 复杂系统、复杂网络. E-mail: zdi@bnu.edu.cn

<sup>†</sup> 通信作者: 陈晓松(1962—), 男, 博士, 教授, 博导, 国家杰出青年科学基金项目获得者. 研究方向: 统计物理学、复杂系统. E-mail:

chenxs@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-11

具有共性的基本规律,在方法论上,则要求人们从还原论走向系统论<sup>[1]</sup>。

国际上,很早就有学者就意识到了复杂性研究在未来学术发展中的意义。Weaver 把科学问题分成 3 类: 1) 简单性问题,如单摆; 2) 非组织的复杂性问题,如理想气体; 3) 有组织的复杂性问题。他指出:“19—20 世纪人们分别解决了简单问题和非组织的复杂问题,而接下来的 50 年,人们需要面对的科学挑战是有组织的复杂性问题。”<sup>[4]</sup>Weaver 的这一论断近年来已经得到了印证。系统科学与复杂性研究已成为 21 世纪基础科学发展的一个重要方向<sup>[5]</sup>。《Science》在 1999 年曾出版专辑,阐述了复杂性研究对众多学科的可能影响<sup>[6]</sup>; 2009 年,《Science》又以“复杂系统与网络(Complex systems and networks)”为主题,出版专辑 1 期,其中特别强调了“复杂系统的结构与功能关系”,指出:“从网络结构的层面,理解生命、生态、社会、经济等复杂系统的性质,应该是未来复杂性研究的重要方向。”<sup>[7]</sup>2021 年的诺贝尔物理学奖与经济学奖分别颁发给为理解复杂系统做出贡献的 3 位科学家<sup>[8]</sup>与主张“因果关系分析的方法论”的 2 位科学家,这表明:复杂系统科学领域的研究已经获得了学术界的重视并取得了一定的成果;通过具体系统的研究来发展复杂系统的基本理论任重道远。

北京师范大学(以下简称“北师大”)是国内较早进入系统科学学科建设领域的单位之一。自 20 世纪 80 年代初开始,北师大先后有 4 名教师师从比利时布鲁塞尔学派创始人、诺贝尔化学奖获得者普里戈金教授,均获得博士学位。方福康教授等将耗散结构理论引入中国学术界,成立了由物理、数学、化学、天文、哲学等领域的教授所组成的非平衡系统研究所;在钱学森院士的鼎力支持下,北师大于 1985 年创建了系统理论本科专业,并开始了系统科学学科的建设。经过近 40 年的发展,北师大以复杂系统基本理论创新为核心目标,结合学科优势,发挥交叉学科的作用和特点,在气候变化、认知神经科学与教育、社会经济、生物生态、多主体系统与群体智能等领域开展研究,取得了初步的学术成果。作为学校“双一流”建设的重要组成部分,为中国系统科学学科建设做出了突出贡献,在国际学术领域也具有良好的声誉和广泛影响。值得一提的是,《北京师范大学学报(自然科学版)》始终支持系统科学学科的发展和建设,先后报道了本学科的许多重要研究工作。本文综述了北师大系统科学近 5 年的学术进展,介绍典型成果,同时展

示我们发展系统科学的基本思路。

## 1 刻画复杂系统宏观涌现的本征微观态方法

20 世纪 80 年代初,钱学森院士提出了系统科学体系的框架,在这个体系中,系统科学作为在系统论基础上发展起来的新兴学科,被认为是与数学、自然科学、社会科学等相并列的一个基础学科门类,它是从整体与局部的关系角度来研究客观实际的。而创建系统学<sup>[1]</sup>、发展系统科学基础理论则成为钱老继“两弹一星”之后的主要学术目标。创建系统学的科学目标在于揭示各种系统的共性,以及在演化过程中所遵循的共同规律,并进而为系统科学在科学技术、生物、经济、社会等领域的应用提供理论依据。越来越多的科学研究成果,特别是获得 2021 年诺贝尔物理学奖的研究成果表明,看似毫不相关的复杂体系,可以用同样的概念或性质去刻画,存在着普适的基本规律。但是钱老所创建的系统学,其学术夙愿的实现仍然任重道远。

挖掘各领域复杂系统集体行为的涌现机制,是系统科学基本理论的核心问题。传统中的统计物理学是基于系统的哈密顿量(能量)和统计分布,研究大量个体所组成系统的集体行为;相变与临界现象作为系统最显著的集体行为,其理论研究以序参量作为出发点。当前,人们迫切需要研究更一般的、处于非平衡态的复杂系统,涉及气候、生命、生态、社会、金融等自然和社会领域,这些系统的集体行为及其相变临界现象与人类密切相关。例如,地球作为一个典型的自适应复杂系统,2008 年, Lenton 等在《美国科学院院刊》上发文指出,“地球复杂系统可能存在 15 个潜在的临界要素”; 2019 年,他们又在《Nature》发文,进一步指出亚马孙雨林、北极海冰、大西洋环流、北方森林、澳大利亚珊瑚礁、格陵兰冰原、永久冻土、西南极冰原、东南极冰原等这 9 个临界要素已经接近或处于临界点,可能引起地球系统的巨变,需要人类给予特别关注。

对于微观的细胞生命系统,当细胞内特定的分子聚集在一起时发生相分离,会引起细胞性质与功能的改变。相分离已成为当前生命科学研究的一个热点。对于复杂系统,分析系统的临界因素是否接近或处于临界点,以及不同临界因素之间是否存在关联,是当前复杂系统研究中的重大科学问题;对于广泛、开放且处于非平衡态的复杂系统,研究者们缺乏它们的哈密顿量、统计分布、序参量;随着科技的发展,研究者

们可获取复杂系统的试验与观测数据越来越多;如何由这些数据出发,研究复杂系统的集体行为、相变与临界现象,成为当前一项非常紧迫的任务.针对该问题,北师大陈晓松教授与合作者最近提出了一个解决方案<sup>[9-10]</sup>,即从吉布斯所提出的统计系综出发,基于复杂系统个体的观测或模拟数据,构建复杂系统的微观态和统计系综.以描述系统微观态的高维矢量作为列,系统个体的演化序列作为行,可以得到归一化的统计系综矩阵 $A$ .利用奇异值分解方法,统计系综矩阵可分解为

$$A = \sum_{i=1}^r \sigma_i U_i \otimes V_i,$$

式中: $U_i$ 是本征微观态; $V_i$ 为该本征微观态的时间演化; $\otimes$ 表示克罗内克积; $\sigma_i$ 为第 $i$ 个本征值.

$\sigma_i$ 表示在系综中的概率,满足归一化条件

$$\sum_{i=1}^r \sigma_i^2 = 1.$$

系统的集体行为由具有较大 $\sigma_i$ 的本征微观态描述.若某个本征值 $\sigma_i$ 的热力学极限由0变为有限,类似于有限比例玻色气体处于最低能级时,系统发生玻色-爱因斯坦凝聚.此时统计系综发生本征微观态 $U_i$ 的凝聚,预示着复杂系统发生了相变,相变的序参量由 $\sigma_i$ 表示,涌现的新相由 $U_i$ 描述.

陈晓松教授团队将本征微观态方法成功地应用于二维伊辛模型、地球表面温度、中国股票价格等3类不同的复杂系统,揭示了这些系统的集体行为以及相变与临界现象,证实了该理论框架可用于一般平衡和非平衡系统<sup>[10]</sup>;研究团队将本征微观态方法成功地应用于经典的Vicsek模型,为模型中相变的存在和类型划分提出了新的理论结果<sup>[11]</sup>.

生命系统中的集体行为,是复杂系统涌现性的典型表现.这些集体行为的背后存在怎样的普遍规律,以及生命系统从无序到集体运动的转变是否作为一种相变,如果是,这种相变是否连续等,这些都是当前科学家们非常好奇且想回答的问题.Vicsek模型作为生命系统集体运动的一个简单模型,其粒子处于噪声环境下:噪声较强时,粒子随机运动,系统呈现无序;噪声较弱时,粒子运动方向趋于一致,涌现出集体运动.Vicsek等人认为这是一种连续相变.但受到后续研究者的质疑,认为他们看到的连续相变是有限尺度效应所导致的,实际应该是不连续相变.相变研究的关键量是序参量,集体运动涉及速度和密度.仅将平均速度作为序参量来研究是缺乏依据的,也没有获得有

限尺度标度性的支持,结果不能作为定论.

研究团队将本征微观态方法应用于Vicsek模型后发现:1)随着噪声减弱,首先发生密度相关本征微观态的凝聚,且为不连续相变;2)噪声进一步减弱,发生群体运动相关的本征微观态凝聚,为连续相变,不同Vicsek模型与系统密度的临界指数相同,属于同一个普适类.研究成果为原有学术争论给出了新的答案:确立生命系统集体行为的转变是相变,而且存在密度的不连续和群体运动的连续这2类相变;不同连续相变属于相同的普适类.该成果进一步展示了本征微观态方法对研究非平衡相变的可行性,表明本征微观态方法开辟了研究复杂系统集体行为的一条新途径;提供了可以研究复杂系统相变与临界现象的理论框架,为各类复杂系统非平衡相变的研究打开了通道<sup>[11]</sup>.

## 2 复杂物理系统的结构与功能

复杂系统普遍存在于自然界与人类社会中,其中的热力学系统、凝聚态、活性物质、气候系统等复杂物理系统,一直是研究者们开展学术研究的重要领域,也是发展系统科学理论的重要基础.在引言中已提到,获得2021年诺贝尔物理学奖的3位科学家中:1)美籍日裔科学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)与德国科学家克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)一直从事气候变化研究,他们对“地球气候的物理建模,量化可变性并可靠地预测全球变暖”做出了突出贡献;2)意大利科学家乔治·帕里西(Giorgio Parisi)则通过对玻璃系统的研究,发现了无序和涨落在复杂系统中的普遍意义<sup>[8]</sup>.

这2类复杂物理系统也是北师大系统科学学院目前以及未来所开展的重要研究领域.大气是一个典型的复杂系统,正如2021年诺贝尔物理学奖获得者所揭示的那样,统计物理学、复杂网络等复杂系统研究概念与方法、大气系统的规律认识是普适理论与实际系统紧密结合的典型领域.系统科学学院近期的若干研究成果也很好说明了这一点.

大气系统不同高度层次的时空结构具有显著的差异化特征.一般而言,大气结构的复杂性主要受到来自于地球表面各种驱动要素的影响,大气层越贴近地面,这种影响作用越强.如何科学、量化地刻画这一定性认识,对于大气、地球系统以及复杂系统科学都具有非常重要的意义.陈晓松教授研究团队以统计物理渗流相变理论为基础,通过对大气温度场的结构展开分析,对不同位势高度下大气结构的复杂度进行了量化.该研究发现,渗流模拟过程中,最大团簇尺寸会在某一占据概率下发生急剧的不连续跳变,

跳跃间隙几乎不受尺度效应影响。这表明:当考虑温度涨落的渗流特征时,具有代表性的 2 个团簇集团分别于南北半球独立生长并蔓延开来,直至二者融合,且融合后系统中再无其他的大尺寸团簇集团;在发生渗流的瞬间,2 个代表性团簇集团的构型具有很重要的意义,其边界形状很大程度上能够反映系统的复杂度特征;通过计算边界形状的分型维数来表征复杂度。该工作实现了对大气结构复杂度的刻画,很好地体现了渗流、分形等复杂系统研究方法与概念对刻画大气系统的意义<sup>[12]</sup>。

利用复杂网络方法研究气候变化也获得了成果。全球气候变化一直是人们十分关注的重大科学问题,它可能会导致全球各地极端天气频发。极端天气的成因与大气运动模式密切相关,已有研究发现全球气候变化会使大气运动模式发生改变,例如近 2 年备受关注的热带环流改变。然而,热带环流到底是增强还是减弱,学术界还存在很大的争议,热带环流所带来的影响也尚不清楚。通过分析不同区间极端天气的同步关系,一定程度上可反映包括热带环流在内大气运动模式的强度,对不同区域的极端天气预测也至关重要。2021 年,陈晓松教授团队完成了 1 篇探究热带环流减弱的论文,题目是《Network-synchronization analysis reveals the weakening tropical circulations》,发表在《Geophysical Research Letters》上<sup>[13]</sup>。文章通过再分析数据,构建了极端位势高度的同步网络;研究了该网络的时间演化,进一步证实热带环流正在减弱;定性分析了不同热带区域的同步强度受全球气候变化的影响。

该研究中,研究者们基于全球 10 512 个观测格点、位势为 50 kPa 的高度分别建立了正、反 2 种不同类型的同步网络,并发现了它们不一样的特征:正同步网络主要分布在热带地区,有向度分布是  $E \rightarrow W$ ;反同步网络主要分布在南北半球的中纬度地区,有向度分布是  $W \rightarrow E$ ;正同步网络边的距离分布呈幂律(power-law)衰减,该同步关系主要是由热带环流造成的,而反同步网络边的距离分布在 3 000 km 处有 1 个峰值,恰好与 Rossby 波的半波长相一致。通过研究基于 1970—2019 年 50 kPa 位势高度的数据,发现了同步网络结构变化与非洲以及大西洋的环流减弱效应之间的关系。利用气候网络方法,研究团队还通过构建一系列基于全球近地地表大气温度场的动力和物理气候网络,指出了该有向加权气候网络中的一些隐藏特征可作为 ISMR 长期有效的预测因子,进而提出了新的季风降雨量的预测方法<sup>[14]</sup>。该方法可以利用前 1 年的数据预测未来 1 年的印度夏季季风的降雨

量,预测值和观测值的 Pearson 相关系数可达到 0.54。这一新方法的预测技巧,无论是在时间尺度还是精度上都远优于传统的气候预测模式。此外,研究还发现:在全球变暖效应的作用下,西南大西洋、印度洋西部和北亚太地区之间的跨赤道遥相关被加强;进而影响了整个气候网络,并对印度的降水产生了重大影响。主要大气环流模式链的强关联性还有利于提高预测降雨量的技巧。

除了前述的几项具体成果外,研究小组多年来一直从事统计物理与复杂系统的研究,特别关注地球系统的大尺度及全球性气候现象,已完成了复杂网络与气候变化的一系列交叉研究。Parisi 教授所开展的有关玻璃态的研究,也是系统科学学院武振伟老师的主要研究方向。玻璃形成液体的动力学行为,一直是物理、化学、生物和材料科学等诸多领域研究的热点问题之一。除了玻璃材料在工程应用方面的潜在价值以外,还由于玻璃形成液体的转变过程实际上是一个与相变相关的基础科学问题。截至目前,人们并没有很好的理论框架和范式用来解释或描述玻璃形成液体,以及玻璃态物质中的许多异常行为。玻璃形成液体具有诸多简单液体所不具备的动力学特征,如系统的非指数性弛豫行为和结构弛豫时间的强温度关联性,其微观机制一直没有得到深入认识。Wu 等<sup>[15]</sup>在 2018 年完成了关于深过冷液体中反常输运现象与原子层面微观机制的研究,揭示了奇异的输运行为与某种特定的原子结构之间的直接关联,它们本身特征的动力学与其周围的介质相互作用、相互影响,造就了其特殊的输运方式。这一研究结果既提示人们要尝试从多空间尺度,以及具有非局域性质的结构序参量上理解和研究复杂液体的动力学行为,也为研究金属玻璃所展现出的优良力学性质提供了新的思路和认识角度。该成果已发表在《Nature Communications》上。

机器学习和人工智能技术的发展,也为人们认识复杂系统性质提供了新的思路。在液体玻璃化转变过程中,Stokes-Einstein(SE)关系的失效是典型动力学行为之一,其背后的物理机制一直是凝聚态和非平衡统计领域近些年研究的热门课题。揭示微观原子结构特征对宏观过程的影响,是学者们努力的方向。2020 年,武振伟团队利用 SVM 方法构建高维参数模型,通过监督大量玻璃态样品原子结构的机器学习,获得了一个可以识别类固原子结构(glass-like)的训练模型,该模型在不依赖于经验参数的前提下,可考察金属玻璃形成液体中 SE 关系失效所对应的原子结构特征。研究还发现,在 SE 关系失效转变温度附近,液体内部由类固原子所组成的非连通团簇的总数目

急剧减少,这表明在金属过冷液体中,SE关系失效与体系温度降低所伴随的原子结构变化密切相关.机器学习所使用的原子类型判别方法,不依赖于先验的结构序参量,因此具有一定的普适性和可扩展性<sup>[6]</sup>.

### 3 生命现象复杂性研究

生物系统和现象毫无疑问是复杂系统最典型的领域和表现.在还原论研究范式的指导下,经典的生物学研究侧重于从分子水平上理解和解释生物学现象,特别是随着DNA分子和中心法则的发现,分子生物学在过去的50年里得到了长足发展;生物学家显然可能已经达到了这种方法的极限.尽管作了最大努力,科学家们仍然不能精确预测细胞凋亡、癌症等的发生发展;虽然科学家可以测量神经细胞的相互作用,但是仍然不能完全理解意识的产生,更长时间尺度上有生物的发育过程、生命的演化过程等;在宏观层面,生态系统和人类社会面临着同样的挑战.为了能够科学地理解并预测生命现象,人们需要从复杂系统科学的角度展开探索.因为生命现象是多个成分相互调控,各个层次相互作用而产生的,表现了突出的复杂系统涌现性行为.

迁移、扩散等动态输运过程,是各类复杂系统的典型表现,对于系统结构与功能的维持和演化十分重要.生物大分子在细胞内的扩散是生命活动的重要基础,在代谢、信号传导、分化以及物质运输等方面起到关键作用.同时,扩散也反映了细胞内的拥挤程度、亚细胞结构等微环境特征,并提供了探索细胞内物理性质的有效途径.因此,细胞内的扩散动力学长期受到物理、生物、化学等领域的广泛关注.北师大系统科学学院李辉教授长期开展生物复杂系统的动力学研究,通过发展活细胞单分子动态成像技术以及定量分析方法,研究从分子、细胞到组织跨尺度的复杂动力学行为,探究物理特性与生物功能、医学健康的关系,取得了一系列成果.

值得注意的是,在过去30多年的实验测量与相关研究中,人们主要借助二维成像等方法来测量细胞内生物分子的扩散特征,并基于一个十分重要的假设——细胞内的扩散为三维各向同性.然而,该假设的真实性及生物大分子在细胞内的三维扩散动力学并不清楚,缺乏直接的实验测量结果.李辉教授与中国科学院物理研究所(以下简称“中科院物理所”)开展合作研究,在发展实验观测技术的基础上,首次通过实验发现了细胞内的准二维扩散现象.他们发现了贴壁细胞中量子点的扩散主要发生在 $xOy$ 平面上,其 $z$ 方向的扩散速度与空间范围显著小于 $x$ 与 $y$ 方

向,即呈现出准二维扩散的特征;通过细致对比研究,发现了准二维扩散是贴壁细胞内生物大分子的稳定运输模式.该工作还证明了细胞内的扩散并非各向同性,生物大分子更倾向于在 $xOy$ 平面内运动;从细胞内的扩散动力学出发,该工作加深了当前对于细胞迁移机制的理解<sup>[17]</sup>.该成果于2020年发表后,英国物理学会的《Physics World》以《Quantum dots track two-dimensional diffusion in cells》为题报道了这项工作.

囊泡输运是细胞内物质、能量和信息交换的主要途径,也是细胞多种生理功能实现和调控的物理基础.由于细胞内部是活性的非平衡系统,造就了细胞内输运行为的复杂性.然而,过去针对细胞内输运的研究主要借助于二维成像技术,一直缺乏对于细胞内真实的三维输运动力学及其调控机制的深入了解.李辉教授与中科院物理所等团队合作,基于前期搭建的三维单颗粒荧光追踪成像平台,研究了细胞内囊泡输运的三维时空动力学特征与调控机制.研究发现:细胞内囊泡输运随着测量时间尺度表现出不同的动力学特征,即 $<0.1$  s时为三维受限运动, $>0.1$  s时,转变为 $xOy$ 方向的准二维运动;在细胞内空间分布方面,囊泡的横向运动( $x$ 、 $y$ 方向)表现出明显的空间异质性,细胞外周比细胞核周边的运动更快;囊泡的轴向运动( $z$ 方向)则在整个细胞内较为匀质.研究还揭示了囊泡输运动力学的细胞骨架调控机制.这一研究工作,揭示了细胞内囊泡三维输运动力学的时空特性,并且阐明了热涨落、活性驱动,以及不同细胞骨架对囊泡输运动力学的协同调控机制,有助于深入理解囊泡输运的生物功能与病毒在细胞中的转运机制<sup>[18]</sup>.

介观层次的细胞扩散与转移是许多生命、健康问题的重要基础,肿瘤转移更是导致癌症等疾病相关死亡的主要原因.李辉团队在关注细胞内扩散现象的基础上,开展了细胞转移的研究.为了将肿瘤细胞转移到身体其他部位,必须突破肿瘤外侧包裹的一层保护性屏障——基底膜(basement membrane, BM).BM是一层由蛋白和多糖构成的纤维状细胞外基质,广泛存在于各种组织或器官的外侧,起到维持组织形态、分隔不同组织的功能.肿瘤的外侧也同样有一层BM,一旦肿瘤细胞恶变,这层膜结构会被细胞突破,并开始侵袭转移.BM结构的完整性成为临床上判断肿瘤是否发生恶变、转移的关键依据之一.然而,由于BM厚度 $<1$   $\mu\text{m}$ ,且与肿瘤细胞紧密连接,导致试验体系十分复杂,借助传统测量手段难以在原位表征肿瘤外侧BM的物理特性.长期以来无法了解其对肿瘤侵袭扩散的影响机制.

李辉教授与美国麻省理工学院、加州大学圣地亚

哥分校团队合作,首次揭示了 BM 的非线性硬化效应及其对肿瘤侵袭的约束作用.为了研究 BM,研究团队提出一种原位测量 BM 物理特性的新型便捷方法,在此基础上,通过 BM 的应力应变动态过程直接确定它的弹性与渗透性.研究发现:BM 尽管表现出类似气球的弹性,但是其物理特性截然不同;BM 随着膨胀不会变软,反而发生了显著的非线性硬化效应;随着 BM 的膨胀,施加的压力需要不断增大,这种应变硬化特性在物理上可以约束肿瘤的增殖以及侵袭行为.这一研究成果发表在美国科学院院刊<sup>[19]</sup>.美国科学促进会 EurekAlert、麻省理工学院 MIT News,以及美国 ScienceDaily 等科学新闻网站以《Membrane around tumors may be key to preventing metastasis》为题进行了报道、转载,评价该工作开创了一条预防肿瘤转移的新途径.

2022 年,李辉教授团队研究了上皮间质转化(epithelial to mesenchymal transition, EMT)促进肿瘤转移的新机制.EMT 是一种能够显著增强细胞迁移运动能力的生物过程,即细胞失去了上皮特征,并转化为具有间充质表型的细胞;EMT 不仅关系到胚胎发育、伤口愈合等重要生命过程,而且严重影响了肿瘤的发展和转移;在这一过程中,细胞与基底的黏附是决定细胞迁移的主要物理因素之一;细胞黏附的主要构成是整合素,其作为桥梁,直接连接了细胞外基质和细胞内骨架;整合素在细胞膜上的运动,决定了细胞黏着斑的动态组装和解聚,进而影响了细胞迁移.然而,由于缺乏活细胞表面整合素的单分子荧光标记与跟踪成像技术,人们对整合素的动力学特征以及细胞黏附如何影响 EMT 促进细胞迁移的机制并不清楚.

近期,李辉教授与中科院物理所、北京大学口腔医院团队共同合作,通过发展活细胞表面整合素的单分子荧光标记技术,定量研究了 EMT 过程中整合素扩散的时空动力学特征.研究发现:在 EMT 细胞中的整合素扩散显著增强,表现为扩散速度增加、固定比例减少;整合素动力学的空间特征由对称分布转变为非对称的极性分布,细胞前端的整合素扩散更强;整合素扩散行为的改变是由于 EMT 使微管骨架在细胞内发生了重构,更多的微管分布于细胞边缘和板状伪足处;它们通过提高黏着斑的周转速度增强整合素的扩散,并导致了细胞前后差异的空间极性.这一从分子动力学到细胞迁移行为的跨尺度研究,有助于进一步理解细胞作为一个基本生物复杂系统的涌现机制.该工作以《Diffusion behaviours of integrins in single cells altered by epithelial to mesenchymal transition》为题发表在 2022 年的《Small》上,并被选为封底文字<sup>[20]</sup>.

## 4 社会经济系统中的规律挖掘

进入 21 世纪以来,科技进步、社会经济发展对人类提出了巨大的挑战.信息网络技术的创新和全球化进程的深化,使信息交互在速度、强度、广度等各方面获得了前所未有的强化,极大地改变了人们生存的世界;许多现象和问题都展现出全局性、系统性和复杂性,特别是 2008 年的全球金融危机,充分展示了系统性风险的特点,日益凸显出利用系统科学思想和方法来展开认识社会经济系统规律的必要性和紧迫性.同时,信息技术所催生的大数据时代,人们认识社会经济复杂系统的性质与规律,进而为提炼复杂系统科学的一般概念、方法和理论提供了基础.国内外学术界早已关注基于复杂性的社会经济系统研究;经济系统与网络,人类社会-生态系统的可持续发展,技术革新-社会发展的相互制衡一直是复杂系统科学研究的重要主题,也是北师大系统科学学院的重要研究方向.

通过大数据分析、复杂系统建模和网络分析揭示社会经济系统基本规律,在关注人类出行行为<sup>[21]</sup>、城市演化<sup>[22]</sup>等工作的基础上,北师大系统科学学院通过研判大数据,揭示科学研究中的基本规律也作为一个重要的方向<sup>[23]</sup>,并取得了一系列有价值的结果.

科学学是一个新近兴起的重要交叉学科.个体科学家在整个研究生涯内的研究活动受到了研究者的日益关注,这对于理解科学家个体的创造活动以及集体的知识发现都有重要意义,近期陆续有相关研究成果登载在《自然》和《科学》等杂志上.科学研究兴趣的演进是科学研究的基本驱动力,体现为科学家在其研究生涯内在不同话题间的转换.社会学家以往一直是通过定性分析来研究科学家在话题转换中的表现,随着科研数据的不断累积,对这一问题的定量分析已经逐步变得可行.最近的研究表明:对比科学家研究生涯的初期和末期,他们的研究话题存在显著的差别,但是研究兴趣在科学家们整个研究生涯范围内是如何连续变动的,迄今还没有人开展这一课题的研究.

如何界定单个科学家涉足的研究话题?科学家在不同的研究话题间是如何转换的?科学家转换话题对于提升自己的影响力利弊如何衡量?长期来看,科学家的话题转换又有着怎样的趋势?为了回答这些问题,系统科学学院曾安副教授团队与波士顿大学密切合作,基于物理学与计算机学科的已发论文数据,构建了单个科学家所发表论文的共引网;通过社团划分来界定他所涉足的不同话题.曾安及其合作者经过研究发现:在过去近百年的时间里,一位科学

家可以从事的话题数量是非常稳定的,一般也就是3~5个;过去的科学家在其职业生涯早期都是比较专注的,而当今科学工作者都倾向同时开展几个话题的研究,如果一位科学家在职业生涯早期频繁转换话题,他的产出量会比较低;反过来,如果后期更多地转换话题则会带来更多的产出量;在整个生涯内,科学家话题转换的频率和平均引用率都是呈负相关关系,他们还提出了一个基于随机行走并体现研究者拓展和深挖行为的模型,很好地再现了实证发现的主要结果<sup>[24]</sup>。

这一研究工作中所提出的刻画话题的方法具有原创性:不仅能够揭示物理学和计算机科学中科学研究兴趣的迁移,由于方法的普适性,它也适用于理解其他任何学科中科学家的选题行为;还可以用来理解科学家合作的形成机制与合作模式演化的规律;其分析框架也可以运用于科研基金的评价中,挖掘基金项目的实际研究方向,并为基金评估提供指导;指出了频繁转换话题在科研生涯早期的不利影响,因此在科技政策制定方面,可以考虑为出色的青年学者提供追加项目资助,或使用长期考核机制。

团队合作是当今科学研究中的一个典型特征,已有实证研究指出:单篇文章的作者团队规模一直呈现增长态势;团队规模分布已从指数转变为幂律形式,而团队规模与团队开展创新性研究的欲望、能力有着密切关系。虽然人们对于科研团队规模的演化和影响有了较深的认识,但是对于科研团队的内在组成结构及其对科学研究的影响还鲜有讨论。科研团队的组成是多样化的,可以是从来没有合作过的学者一起组成,也可能是互相熟悉的科学家再次合作。这些不同情况带来了复杂的团队内在结构。厘清这些结构如何影响团队的创新能力,将为科技政策的制定提供重要的依据。

2021年,曾安副教授团队联合以色列巴伊兰大学 Shlomo Havlin 教授共同撰文,揭示了新团队在原创性研究和多学科影响力上的关键作用<sup>[25]</sup>。该研究通过分析团队成员的发文历史数据,提出了一种基于网络的团队新旧程度量化指标,发现:新团队发表的论文在原创性和多学科影响力方面比旧团队更有优势,且这种效应在大规模团队中更加明显;相比于团队成员之间的新合作关系,团队中新成员比例能更好地对应团队在原创性和多学科影响力方面的表现;讨论了团队成员所处的科研生涯阶段与团队创造力之间的关系。该研究不仅在理论上揭示了团队创造力的又一重要关联指标,并在实践上对科学家建立高效的合作关系具有指导意义;论文作为《Nature Human Behaviour》

的封面文章被报道后,受到学术界广泛关注,《Nature》正刊发表了评述;作为管理学部的10项成果之一,入选国家自然科学基金委近5年重要科研成果选编。

2008年的全球性金融危机不仅是世界经济系统的危机,也是古典经济学理论的危机,它促使学术工作者从系统复杂性的角度重构经济学。北师大系统科学学院在长期从事社会经济系统研究积淀的背景下,以系统科学思想与方法为基础,在重构经济学的学术方向上进行了不懈努力,并取得了阶段性成果。王有贵教授团队在这一方向上的工作颇具代表性。

从系统的视角深刻思考系统存量与流量之间的关联,探究从微观到宏观的整合,审视实体经济与虚拟货币经济之间的耦合,是重构经济学的重要线路。从这一研究思路出发,王有贵教授的新经济学研究小组取得了一系列阶段性成果。2017年,研究团队在《Economic Modelling》发表了题为《The impact of the liquidity coverage ratio on money creation: a stock-flow based dynamic approach》的研究论文<sup>[26]</sup>,这成为团队多年来潜心攻关的破冰之举。在该研究中:1)作者反驳了银行在可贷资金市场中扮演金融中介的传统观点,提出了银行在宏观上是信贷创造主体的新观点,并基于存量流量的动力学方法分析了银行体系的信贷创造过程,发现了在此过程中债务和货币的孪生特性;2)通过考察银行在受到流动性监管要求时,其创造的信贷总量如何依赖经济情形的变化而改变,并给出了各种经济情景所对应的货币乘数表达式,改变了过去对货币乘数一成不变的认知方式;3)为理解货币量与债务量的生成机制建立了坚实的理论基础,开启了理解货币乘数如何被决定的新范式,并为分析银行监管的宏观经济后果提供了新的渠道和思路,以及提升监管效率的途径和手段,进而为开展和推出后续的系列研究工作提供了良好开端。

自2008年金融危机之后,为防范流动性和违约风险对银行的负面冲击,更为苛刻的银行监管措施逐渐在银行体系落实并执行,这对于整个银行业的运行都产生了深远的影响,但理论界对其缺乏科学认识。在已有工作基础上,王有贵教授团队对强化银行监管的巴塞尔Ⅲ协议进行了细致分析。他们聚焦于体现强化银行监管的巴塞尔Ⅲ协议对货币供给的影响,基于银行作为信贷创造主体的事实,以及银行资产负债表中准备金、政府债券和银行资本保持不变的假定,利用存量流量的动力学方法分析了银行体系的货币创造过程;推导出了在不同监管条例起作用时各自所对应的货币供给和货币乘数的表达式。研究结果表明:随着基础货币量的增加,货币乘数不再是一个常

数,而是呈递减函数的关系;货币乘数表达式不再是一成不变的,而是因监管条例不同而不同;在银行同时受到多个监管条例约束时,决定实际货币供给量的是监管最紧的那个约束;到底哪个监管最紧取决于经济景气状态与银行资产负债表的具体结构.这一研究为理解货币乘数的决定因素提供了一种全新的框架,可以解释货币乘数陡降现象,并为分析银行监管的宏观经济后果提供了新的渠道和思路,特别是对于改善现有货币政策有效性方面给出了独特的理论依据和对应手段<sup>[27]</sup>.

在这一研究线路下,对于债务的作用也获得了新的认识.近年来频发的金融危机引起了人们对于债务在宏观经济中所起作用的高度关注.经济学界的一个共同认知:债务的过度扩张为未来可能发生的金融危机埋下伏笔,正如 2008 年爆发的全球金融危机那样.商业银行作为信贷中创造行为的主要执行主体和重要支撑者,通过寻求利润投资,不仅发生了债务,同时也向经济中注入了大量的货币.在宏观经济系统中,过量的信贷供给可能导致泡沫的形成;当金融泡沫积累到一定程度并濒临破灭时,信贷方对经济未来的信心陡降,于是疯狂地抛售资产以求尽可能减少自己的损失,这种系统性的恐慌行为可能会将经济带入危机的深渊.由此可见,正确地理解债务问题,是理解经济危机产生机制的前提,也是应对危机时适时、准确地提出补救政策措施的先决条件.

王有贵教授研究团队对于货币、债务与总需求关系的理解不同于传统的货币数量关系,他们基于支出的融资来源,发现了货币与债务影响总支出的不同渠道.研究发现:货币与债务均衡时的总收入可表达为货币流通、私人债务流通与总信贷扩张这 3 部分流量;私人债务可通过流通与扩张渠道作用到总需求,而公共债务仅在扩张时会对总需求产生正向影响.该发现为理解当前宏观经济所面临的困境提供了全新的视角,并为提出有效解决这些难题的政策主张开拓了新的思路.2021 年,《Finance Research Letters》以《The role of debt in aggregate demand》为题报道了该研究成果<sup>[28]</sup>.

2022 年,《Finance Research Letters》报道了王有贵教授团队题为《The business cycles driven by loan defaults via credit creation: an agent-based perspective》的研究成果<sup>[29]</sup>.该研究采用复杂系统自底向上的研究方法,提出了一个由家庭、企业、商业银行,以及央行组成的多主体模型,旨在向人们展示通过信贷创造驱动的贷款违约商业周期模式;揭示了一些关键变量的周期模式,并明确了其背后的潜在机制;在模拟数据上

构建了一个 SVAR 模型,脉冲响应结果为可能的因果链提供了一些启示.该工作有助于解释银行资本的顺周期性以及货币政策的银行资本渠道,并有助于制定保持金融稳定的逆周期政策.在这一工作中,研发团队开发了一个简化却抓住根本的模型,以提供信贷和商业周期共存的微观基础,银行系统的信贷创造是核心;在模型中,信贷扩张促进了经济繁荣,也带来了企业的破产;破产企业的违约贷款对银行股本造成损害,进而导致信贷收缩;由此产生的衰退过滤掉了一些“坏”公司,引进“新”公司,新公司的进入带来了经济的复苏;这种因果环路形成了一个周期性模式,为了演示这些环路背后的复杂过程,并揭示其背后的因果关系,作者采用了复杂性科学新近发展起来的多主体建模技术,还利用校准后的 SVAR 模型进行了进一步分析.

重构经济学的研究,体现了系统科学思想和方法对科学认识经济、金融系统复杂性的重要作用.同时,相关成果的取得,也进一步表明,存量-流量的关联、从微观到宏观的逻辑演绎、虚实系统的多层耦合等,也可能是人们思考和认识其他领域复杂系统的重要切入点.

## 5 认知行为与群体智能

2021 年诺贝尔物理学奖、生理学或医学奖分别颁发给从事复杂物理系统和神经离子通道的研究者,这为开展神经科学与复杂系统结合的新兴前沿学科交叉研究带来了机遇.毫无疑问,大脑神经系统是典型的复杂系统,涉及分子、神经元、神经网络、神经系统以及个体行为等多个跨尺度层级.不从系统的角度研究神经系统,人们就不可能了解大脑的奥秘.通过系统建模,运用计算神经科学方法来探究大脑的奥秘,一直是北师大系统科学学院的重要研究方向;通过与北师大脑与认知国家重点实验室密切合作,取得了一系列研究成果.最新的成果是 2022 年发表在《Progress in Neurobiology》上,题为《A theory of geometry representations for spatial navigation》的研究论文<sup>[30]</sup>.该研究由系统科学学院斯白露教授与复旦大学和东京大学团队合作完成.该研究提出了联合编码理论阐明从几何感知到认知地图构建,解释了一系列生物学实验发现的细胞类型,预测了一种新的细胞——几何细胞,阐明了如何通过刻画复杂环境空间布局快速形成高层次的认知地图编码.

日常生活中,人们通常能够长时间在复杂的动态场景中穿梭自如.空间认知赋予了人和动物理解物理世界最基本的能力,通过融合各种不确定信息来形

成认知地图,编码空间位置、语义概念,并建立编码之间的联系.尽管大脑的多个区域以不同的方式编码了空间几何信息,例如环境边界,但是目前尚未形成统一的理论,不足以解释大脑高效编码空间环境的计算机制.研究团队针对大脑编码环境空间布局的神经机制,提出了一种联合编码理论来阐明从几何感知到认知地图构建,该理论统一描述了一系列生物学实验所发现的细胞类型,包括边界向量细胞(boundary vector cells)、边界细胞(border cells)、环状细胞(annulus cell),以及靶心细胞(bulls-eye cells)等.受到鼻后皮层(postrhinal cortex)中发现的、以自我和非自我为中心的信息整合的启发,该理论以相似的编码方式预测了一种新的细胞类型——几何细胞.几何细胞编码是局部空间以环境中心为参考点的几何布局,与动物在局部空间内的位置无关.该理论解释了大脑通过刻画复杂环境空间布局快速形成高层次认知地图的神经计算机制.这一研究在机器人仿真平台上验证了利用预测的几何细胞编码,可以快速构建稀疏的半米制拓扑认知地图,为理解空间认知的神经机制和发展受大脑启发的自主智能系统提供了新思路.

与大脑认知的科学认识相平行,集群行为和智能一直是系统科学学科既有智能科学需求,又有突出系统科学特点的重要研究领域;集群行为研究可为人类社会生产实践提供有益启示.针对鱼类个体在游动过程中如何与周围环境,以及同伴发生交互从而产生集群行为是长期以来的研究热点,系统科学学院韩战钢教授团队与法国图卢兹大学 Guy Theraulaz 教授合作并完成了关于生物集群行为的研究<sup>[31]</sup>.这一研究:提出了一种新的结合行为分析与计算模型的鱼类个体注意力交互模拟机制;揭示了鱼群中的个体如何产生游动、捕食等集群行为的内在机制.同时,研究工作还可以为智能系统和人工多主体系统的协同提供解决思路,如在未来可越来越多地应用于搜索和救援行动、环境和野生动物监测的无人机群操控协作.该成果于2017年被生物类 Top 期刊《Plos Computational Biology》发表,并作为期刊官网头条新闻予以报道,法国科学院官网也对这一研究给予了重点推介.

自然界中许多生物基于自组织行为涌现,表现出丰富的集群运动,而基于集群机器人控制实现高效且可靠的集群行为是一项具有挑战性的课题.首先,实现多机器人系统分布式控制需要复杂的算法控制、高精度的传感器和足够的驱动;其次,现有的集群模型都基本受到 Vicsek 模型的影响,强烈地依赖于对齐规则,而对齐规则要求个体需要邻居的方向信息,这提高了对每个个体感知能力的要求;此外,对齐规则

的强依赖性会导致群体在宏观上涌现行为的单一性.因此,实现多机器人自组织行为涌现是目前复杂系统控制的一大难题.

韩战钢教授团队与美国西北大学团队合作完成了一项探究基于位置控制算法的集群机器人实验研究<sup>[32]</sup>.该研究基于弹性模型,利用机器人个体之间位置信息实现了多个机器人自组织旋转、一致性运动等群体行为控制;利用仿真,给出了群体运动在参数空间上的状态转换模式;首次分析了群体机器人实验中作为真实世界分散控制算法的 AE 模型的功能和局限性;发现该算法会产生对齐状态的小幅持续振荡,这与其边际稳定性有关;通过比较预测和测量,计算出机器人速度和角速度的实验噪声分布,结果表明它们符合高斯分布;通过对该噪声进行建模仿真,并与实验进行比较,得到其为自组织动力学的预期速度和鲁棒性提供了良好的预测.

## 6 结语

独特的、具有明显系统观和整体观的东方文化,明确的系统科学学科体系,使复杂系统科学在我国具备了独特发展的基础和优势;发展复杂系统科学已经成为我国科技发展的重要领域.国务院2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》([http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm))多次论述了系统和交叉学科,明确指出“复杂系统、灾变形成及其预测控制是面向国家重大战略需求的基础研究”,要求“重点研究工程、自然和社会经济复杂系统中微观机制与宏观现象之间的关系,复杂系统中结构形成的机制和演变规律、结构与系统行为的关系,以及复杂系统运动规律,系统突变及其调控等;研究复杂系统不同尺度行为间的相关性,发展复杂系统的理论与方法等”.2004年,中科院在基础研究的“中长期规划”中,将复杂系统确定为14个重点研究的领域之一.

系统观已经成为我国制定“十四五”规划,并思考中长期发展的基本原则.在科学基金的系统性改革与发展中,国家自然科学基金委员会主任李静海院士特别重视科学范式的变革,他认为,科学研究内容、方法和范畴的根本性变革是新一轮科学范式变革的本质内涵<sup>[33]</sup>.李院士及其团队在《国家科学评论》发表题为《变革科学范式,应对全球挑战》的文章指出:“研究内容从平衡静态过渡到动态结构,由局部现象拓展到系统行为;研究方法由定性分析转向定量预测,从单一学科到学科交叉,从数据处理到人工智能;研究范畴由学科分割到综合集成,从传统理论走向复

杂科学,从注重细节到多尺度关联,从多层次的分科知识发展到探索普适规律.而在解决全球性重大实践挑战的同时,发展共性普适的理论和知识,应成为科学共同体的重要使命和责任.”<sup>[34]</sup>

## 7 参考文献

- [1] ANDERSON P W. More is different; broken symmetry and nature of hierarchical structure of science[J]. *Science*, 1972, 177: 393
- [2] 郭雷. 系统学是什么[J]. *系统科学与数学*, 2016, 36(3): 291
- [3] 钱学森. 创建系统学: 新世纪版 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007
- [4] WEAVER W. Science and complexity[J]. *American Scientist*, 1948, 36: 536
- [5] 戴汝为. 复杂巨系统学: 一门21世纪的科学[J]. *自然杂志*, 1997(4): 187
- [6] GALLAGHER R, APPENZELLER T. Special issue on complex systems[J]. *Science*, 1999, 284(5411): 79
- [7] JASNY B R, ZAHN L M, MARSHALL E. Special issue on complex systems and networks[J]. *Science*, 2009, 325(5939): 405
- [8] 陈晓松, 樊京芳. 复杂性科学的机遇: 2021年诺贝尔物理学奖解读[J]. *物理*, 2022, 55(1): 1
- [9] HU G K, LIU T, LIU M X, et al. Condensation of eigen microstate in statistical ensemble and phase transition[J]. *Science China(Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2019, 62(9): 45
- [10] YU S, HU G K, ZHANG Y W, et al. Eigen microstates and their evolutions in complex systems[J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2021, 73(6): 1
- [11] LI X, XUE T T, SUN Y, et al. Discontinuous and continuous transitions of collective behavior in living systems[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(12): 178
- [12] SUN Y, MENG J, YAO QING, et al. Percolation analysis of the atmospheric structure[J]. *Physical Review E*, 2021, 104(6): 4139
- [13] GENG Z J, ZHANG Y W, LU B, et al. Network-synchronization analysis reveals the weakening tropical circulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(11): 1
- [14] FAN J F, MENG J, LUDESCHER J, et al. Network-based approach and climate change benefits for forecasting the amount of Indian Monsoon Rainfall[EB/OL]. arXiv (2020-04-14)[2022-05-05]. <https://arxiv.org/pdf/2004.06628.pdf>
- [15] WU Z W, KOB W, WANG W H, et al. Stretched and compressed exponentials in the relaxation dynamics of a metallic glass-forming melt[EB/OL]. (2018-12-17)[2022-05-05]. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-07759-w>
- [16] WU Z W, LI R Z. Revisiting the breakdown of Stokes-Einstein relation in glass-forming liquids with machine learning[EB/OL]. (2020-03-25)[2022-05-05]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11433-020-1539-4>
- [17] JIANG C, LI B, DOU S X, et al. Quasi-two-dimensional diffusion in adherent cells revealed by three-dimensional single quantum dot tracking[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(7): 130
- [18] JIANG C, YANG M C, LI W, et al. Spatiotemporal three-dimensional transport dynamics of endocytic cargos and their physical regulations in cells[J]. *iScience*, 2022, 25(5): 1
- [19] LI H, ZHENG Y, HAN Y L, et al. Nonlinear elasticity of biological basement Membrane revealed by rapid inflation and deflation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(11): 1
- [20] YUAN J W, ZHANG Y N, LIU Y R, et al. Diffusion behaviours of integrins in single cells altered by epithelial to mesenchymal transition[EB/OL]. (2021-12-18)[2022-05-05]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sml.202106498>
- [21] YAN X Y, WANG W X, GAO Z Y, et al. Universal model of individual and population mobility on diverse spatial scales[EB/OL]. (2017-11-21)[2022-05-05]. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-01892-8>
- [22] LI R Q, DONG L, ZHANG J, et al. Simple spatial scaling rules behind complex cities[EB/OL]. (2017-11-28)[2022-05-05]. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-01882-w>
- [23] ZENG A, SHEN Z S, ZHOU J L, et al. The science of science: from the perspective of complex systems[J]. *Physics Reports: a Review Section of Physics Letters (Section C)*, 2017, 714/5: 1
- [24] ZENG A, SHEN Z S, ZHOU J L, et al. Increasing trend of scientists to switch between topics[EB/OL]. (2019-07-31)[2022-05-05]. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-11401-8>
- [25] ZENG A, FAN Y, DI Z R, et al. Fresh teams are associated with original and multidisciplinary research[EB/OL]. (2021-04-09)[2022-05-05]. <https://www.nature.com/articles/s41562-021-01084-x>
- [26] LI B Y, XIONG W T, CHEN L J, et al. The impact of the liquidity coverage ratio on money creation: a stock-flow based dynamic approach[J]. *Economic Modelling*, 2017, 67: 193
- [27] XIONG W T, WANG Y G. The impact of basel III on money creation: a synthetic theoretical analysis[J].

- Economics, 2018, 41: 1
- [28] XING X Y, XIONG W T, GUO J Z, et al. The role of debt in aggregate demand[EB/OL]. (2021-06-01) [2022-05-05]. <https://ideas.repec.org/a/eee/finlet/v39y2021ics1544612320305456.html>
- [29] YU M, FENG Z J, WANG Y G. The business cycles driven by loan defaults via credit creation: an agent-based perspective[EB/OL]. (2022-04-01) [2022-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S154461232201404>
- [30] ZENG T P, SI B L, FENG J F. A theory of geometry representations for spatial navigation[EB/OL]. (2022-01-17) [2022-05-05]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301008222000144>
- [31] JIANG L, GIUGGIOLI L, PERNA A, et al. Identifying influential neighbors in animal flocking[J]. *PLoS Computational Biology*, 2017, 13(11): 1
- [32] ZHENG Y T, HUEPE C, HAN Z G. Experimental capabilities and limitations of a position-based control algorithm for swarm robotics[J]. *Adaptive Behavior*, 2022, 30(1): 19
- [33] 李静海. 中国科学技术发展应重视的几个问题[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(10): 1119
- [34] LI J H, HUANG W L. Paradigm shift in science with tackling global challenges[J]. *National Science Review*, 2019, 6(6): 1091

## Complex systems science: recent advances

DI Zengru CHEN Xiaosong

( School of Systems Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China )

**Abstract** With the methodology of reductionism, science and technology have achieved great success in the 20th century. The origin and evolution of the universe, fundamental elements and their basic interactions have all obtained deep scientific understanding. Since the beginning of the 21st century, emergent properties of various complex systems in the macroscopic world pose an important academic challenge in almost all disciplines. The systems science has become an important field of scientific exploration. Development of complex systems science shows that there are universal and simple laws behind complex phenomena. Exploring universal relationship between structure, environment and function of various systems, investigating general laws of evolution and regulation, are important tasks in complex systems science. In this paper, the latest research results in basic theory, living systems, climate change, social economy, intelligent technology, are introduced. These results show that exploring complexity under the methodology of systems science not only deepens the scientific understanding of specific systems, but also helps to reveal universal laws behind complex phenomena in different fields.

**Keywords** systems science; complexity; reductionism; complex systems

【责任编辑: 陆有忠】