

威廉·布罗克对数量经济学与生态经济学的贡献^{*}

肖忠意

内容提要:当代著名经济学家威廉·布罗克在经济学领域做出了诸多开创性的贡献,极大地推动了当代数量经济学、混沌经济学和生态经济学的发展。布罗克早期从数量经济角度对经济均衡和增长理论进行了深入的研究,使相关理论模型不断完善,从而为宏观经济政策的制定提供了重要的理论基础。布罗克的研究范畴还扩展到了经济学中的非线性问题领域,他在混沌经济学研究方法方面的创新极大地推动了当代混沌经济学理论的发展。近些年,布罗克更是将数量经济学和混沌经济学的研究理论和方法引入到生态经济学研究之中,不断丰富了现有生态经济学文献,其相关研究成果还为生态环境控制的预警先行指标和识别机制的建立做出了巨大的贡献。

关键词:威廉·布罗克 数量经济学 混沌经济学 生态经济学

一、威廉·布罗克生平简介

威廉·布罗克(William A. Brock)是美国著名的数量经济学家和生态经济学家,现任密苏里大学哥伦比亚分校教授、威斯康星大学麦迪逊分校 Vilas 名誉教授。布罗克 1941 年出生于美国。他于 1965 年获密苏里大学哥伦比亚分校数学学士学位,1969 年获加州大学伯克利分校数学博士学位。布罗克于 1969—1971 年任罗切斯特大学助理教授;1972—1975 年任芝加哥大学经济学副教授;1975 年起长期担任威斯康星大学麦迪逊分校经济学教授、讲席教授,2012 年成为该校 Vilas 名誉教授。同时,他于 1974—1977 年任康奈尔大学经济学副教授、教授;1975—1981 年任芝加哥大学经济学教授;2012 年起任密苏里大学哥伦比亚分校教授。布罗克于 1992 年当选为美国艺术与科学研究院院士,1998 年当选为美国国家科学院院士,2004 年被选为美国经济学联合会杰出会员。他曾担任《经济理论期刊》(JET)副主编、《国际经济评论》(IER)副主编、《国际分岔和混沌期刊》(IJBC)副主编、《非线性科学期刊》(JNS)副主编。他的多个研究项目受到美国国家科学基金会(NSF)等机构资助。

布罗克的学术成果非常丰富,曾在《美国经济评论》(AER)、《计量经济学期刊》(Econometrica)、《政治经济学期刊》(JPE)、《金融学期刊》(JF)、《经济理论期刊》(JET)、《货币经济学期刊》(JME)等国际顶尖和权威期刊上发表学术论文 180 余篇,出版专著 6 部,产生了广泛的学术影响。他的研究涉及领域广泛,前期在数量经济学方面取得的丰富成就更为其后来在生态经济学领域的研究奠定了坚实的基础。总的来说,布罗克的研究主要集中在经济均衡增长理论、混沌经济学理论、生态经济学理论等领域,其中许多开创性研究推动了当代经济学的发展。本文将从布罗克的重点研究方向着手对其研究成果进行梳理和归纳。

二、经济均衡增长理论和最优控制系统相关理论

在经济增长理论研究中,最优经济增长路径问题历来是古典经济增长理论的核心议题。布罗克借助自身在数学方面的天赋,将应用数学的方法成功地引入到经济增长理论的研究之中。布罗克与盖尔在《要素扩张过程中的经济最优增长路径》(Brock & Gale, 1969)一文中推导出了两个关键性参数:一个是渐近增长因

^{*} 肖忠意,西南政法大学经济学院,邮政编码:401120,电子邮箱:xiaozhongyi@swupl.edu.cn。感谢匿名审稿人的修改建议,文责自负。

子,另一个是关键折现因子。研究指出,渐近增长因子的大小不取决于效用函数或贴现因子,并且与不考虑消费的单纯资本积累增长因子一致。此外,该项研究的一个重要贡献在于其采用的是离散时间序列而不是连续时间序列方法,这相较前人研究方法有了较大的创新和突破。单部门的最优经济增长模型可以为政府相关职能部门制定稳定的消费政策提供合理的参考,这种最优消费政策是动态经济学中鞍点路径上的最优均衡点,这样的结论在 Cass(1965)和 Koopmans(1966)的研究中得到佐证。在未考虑不确定性因素影响的情况下,这样的估计方法是可行的,但现实问题是,如果在总生产函数模型估计过程中出现了一个即便细微的估计偏差,也可能导致模型分析结果的稳定性受到严峻的挑战。

针对不确定性因素对估计模型的影响,布罗克和米尔曼(Brock & Mirman, 1972)认为,直接将不确定性引入到经济增长理论模型之中将有助于解决一般性经济均衡增长路径研究中普遍存在的问题,而在解决长期经济均衡增长问题时,该项研究采用了与确定性模型类似的效用贴现法进行最优解分析,其所得结论与确定性理论中建立的合理资本积累水平的“黄金定律”基本一致,但是他们引入不确定性的经济增长理论模型在多部门经济均衡增长研究领域的应用仍存在一定的局限性。在上述研究的基础上,布罗克和米尔曼(Brock & Mirman, 1973)进一步利用贴现因子模型分析了不确定性影响下的最优经济增长路径问题,两项理论研究最大的区别在于其是否对未来效用进行贴现处理,结果发现,所得出的最优增长路径的研究结果大相径庭,后一项理论模型的分析结果可以更好地被推广到多部门经济增长模型之中,并提出了更加合理的经济学解释。

基于非竞争环境,布罗克(Brock, 1973)运用了均衡理论对多限制条件约束下的多部门经济增长模型进行了讨论,其研究结果发现,如果企业是静态效益最大化者,而消费者是参与资本积累过程的价格接受者,那么,均衡状态即可以描述为市场中一系列商品消费价格和机器设备等生产资料租金的集合,如此,市场即可以出清。布罗克的这项研究被视为是一个完全预期理论的典型案例,其主要贡献在于将正态分布假设成功应用于经济增长模型的特定解分析中,但是该模型难以适用于单纯消费品市场的分析成为其不足之处。随后,布罗克和沙因克曼(Brock & Scheinkman, 1974)对经济增长均衡的最优控制系统理论也进行了早期的探索,他们的研究合理地解释了资本和人力资本的边际收益递减以及经济增长与期初资本关系密切的原因,这不仅为多部门全局渐近稳定性资本积累的最优控制问题提供了理论基础,而且为深入理解动态经济学研究中的跨期最优积累路径提供了新的思路。此外,布罗克(Brock, 1986a)尝试对不同最优控制理论模型进行比较,并提出了一个比较经济长期均衡结论的思路。他的研究结果刻画了如何应用萨缪尔森类型的“应对原则”(Correspondence Principle)解决一系列的最优控制问题。其中,在特定的哈密尔顿函数结构假设中,依据全局渐进稳定假说(Global Asymptotic Stability Hypothesis)推导所得的最优均衡点可能产生较强的静态比较经济结果。该项研究还证明了萨缪尔森类型的“应对原则”能够较好地用于“均衡—非均衡动态转换”的递归平衡系统研究,这有助于避免在“阿罗—德布鲁—麦肯齐一般均衡模型”(Arrow-Debreu-McKenzie General Equilibrium Theory)中运用“应对原则”时所表现出的局限性。

此外,布罗克和马宗达(Brock & Majumdar, 1978)在不确定性背景下对多部门经济的全局渐进稳定平衡点进行了更加深入的研究,重要的创新之处在于其发现,渐进最优路径可以表现为当期资本量随机分布,且独立于期初资本量,此外,他们还发现马尔科夫过程较好地刻画了不确定性影响下的最优路径。在上述两个条件均满足的情况下,该理论模型可以推导出一个收敛的“高速增长定理”(Turnpike Theorem)。相对于静态经济学而言,动态经济学认为经济的动态变迁的成因,一方面可能是由于外生变量的诱导,另一方面可能是经济系统内各主体的行为变迁诱导产生,换言之,个人、厂商、政府三个主体将会根据自身对非均衡状态的认识而自发地做出一系列反应,这对经济均衡增长会产生重要影响。布罗克和马吉尔(Brock & Majill, 1979)将不确定性与动态经济学的分析观念相结合,将 Bismut(1973)有期限下的随机极值变分问题与布罗克前期关于动态经济学均衡的特征条件进行结合,研究结果发现,在代理人最优化行为动态变迁前提下,将竞争路径引入到确定性连续时间序列会自然地形成一系列非确定性的竞争过程,当该过程满足横截性条件时,经济增长状态可能达到最优。学术界一般认为,动态宏观经济学研究存在两个主要局限性:一是早期研究对企业部门的处理过于简单,通常只考虑了借贷资本,但对权益融资的影响考虑不充足;二是之前的研究多是建立在企业的随机行为假设之上。基于上述问题,布罗克和托洛夫斯基(Brock & Turnovsky,

1981)进一步对前人研究的不足进行了完善。他们对企业部门职能进行了更为细致地划分,通过修正理论模型,不仅推导出在税率、货币政策工具和财政政策工具作用下的资本结构最优均衡路径,而且探索了一种评估政府政策对社会福利效应影响效果的新思路。

近年,布罗克等(Brock et al,2014b)更是就动态经济学中的最优集聚度等问题展开了深入的研究,建立了一个基于空间结构的动态经济增长模型。基于连续空间设定条件,他们结合了用于全局经济分析的单调算子理论和用于区域经济分析的紧算子谱理论的特点,并将其应用于“拉姆齐-费雪最优增长模型”之中,系统地研究了理性预期均衡和社会最优情景下的跨期时空行为。研究发现,对于全局性经济均衡问题而言,社会最优情景下的特定平稳状态需要一个较强的凹性生产函数假设,而理性预期均衡的收敛则需要一个更强的凹性生产函数假设。另外,在区域性经济分析中,结合理性预期均衡理论不难发现,由溢出效应诱发的非均衡状态可以作为集聚效应出现的识别标记。

三、动态混沌经济学理论研究

混沌(非线性)科学是一门研究非线性现象共性的基础学科,几乎涉及自然科学和社会科学的各个领域,且正在改变人们看待现实世界的传统观念。混沌科学的发展激发了人们对确定论与随机论、有序与无序、偶然性与必然性等范畴和概念的重新认识,形成了一种新的自然观,这将深刻地影响人类的思维方式,并对现代科学逻辑体系的重构产生深远的影响。

自20世纪80年代以来,国际学术界出现了大量文献开始关注经济增长问题中的非线性问题,这些以数量方法为基础的研究主要集中在混沌理论和非线性动态理论两个方面(Collet & Eckmann,1980)。一个低维的、简单的、确定性的非线性系统可以形成一个类似于随机过程的复杂行为过程,是一种确定性混沌状态(Deterministic Chaos)的表现形式,即经济系统可被视为一个完全确定的系统。布罗克(Brock,1986b)将混沌科学的研究方法用于检验经济学问题中低维非线性时间序列的存在,并求解得到最大且为正的李雅普诺夫指数,这项研究对于如何解决利用短时间序列分析经济周期中的信息效应最大化问题具有重要的贡献。但是,其研究成果也存在一些局限性,比如其残差检验可能误将短序列中的确定混沌视为随机干扰,从而影响分析结果。不久,布罗克和塞耶斯(Brock & Sayers,1988)进一步提出“经济周期是否具有确定的非线性特征”这一研究课题,他们研究发现,宏观经济数据中的就业率、失业率、工业产值和生铁产量等时间序列均表现为确定的非线性特征。同时,这项研究还发现,将上述时间序列分别进行最优拟合线性分析,并对所得残差项进行去趋势处理,如此所得序列则满足独立同分布特征。无疑,该项研究所得出的结论为推动统计推断方法的创新提供了很好的理论和实践基础。

布罗克和贝克(Brock & Baek,1991)运用关联维数估计和柯尔莫哥洛夫熵估计法分析了美国股市指数的周收益率数据,研究发现,前者的估计结果稳定性不高,而后者检验效果相对较好,进一步分别对检验所得标准误进行分析还发现,检验所得的标准误表现出显著的非对称性特征。其后,布罗克等(Brock et al,1992)提出了一种简单有效地利用自助法进行参数的样本分析的方法,这种方法有助于修正传统模型中存在高估波动率和低估买入信号收益情况下的分析,取得了较好的分析效果。布罗克等(Wu, Sait & Brock,1993)还将格林和萨维特(Green & Savit,1991)设计的随机检验指标进行了标准化处理,经改良的统计推断指标不仅可以更好地检验时间序列的随机性,而且能够非常灵敏地识别时间序列中的确定性效应。布罗克在时间序列的非线性特征的统计推断方面也做出了重要的贡献。布罗克等(Brock & Dechert,1991;Brock et al,1996)指出,传统统计推断方法想要直接根据观测到的时间序列来判断该系统是否为随机系统是十分困难的。为了解决这个难题,他们将动态非线性和混沌理论成果相结合,针对经济系统复杂性,形成了一种新的、有效的检验时间序列非线性结构特征的统计推断结构方法,并以布罗克(Brock)、德克特(Dechert)、沙因克曼(Scheinman)三人的名字命名为BDS检验。对时间序列非线性结构检验时,如果BDS统计量不收敛于正态分布 $N(0,1)$,则可以拒绝原时间序列为独立同分布(*i. i. d.*)的假设。因此,BDS统计量不仅可以用于检验确定性混沌,而且可以作为利用残差检验以估计模型适合度的重要统计指标(Brock et al,1996)。而后,布罗克和德利马(Brock & de Lima,1996)再次针对学术界就非线性时间序列的检验方法选择的问题进行了讨论,该研究从新的BDS检验方法分析效果的视角进行了较为系统的梳理和论述。

布罗克等(Brock et al,1992)认为,从研究方法选择和分析效果来看,相较于有效市场假设的随机游走模型和(G)ARCH 模型而言,利用简化的交易策略分析道琼斯指数收益的效果更加稳健可靠。布罗克(Brock,1993,1996)在结合离散选择理论模型的基础上,进一步提出了将独立同分布线性关系(IID-Linearity)和多维标度线性关系(MDS-Linearity)转换为非线性时间序列进行分析的观点,并将该理论观点引入到资产定价模型中,以此成功地将呈独立同分布线性关系或多维标度线性关系的收益过程转换为非多维标度线性关系的均衡收益过程。布罗克和德利马(Brock & de Lima,1996)进一步对金融市场中大量存在的动态非线性特征进行了详尽的讨论,他们还不断在金融学和经济学研究领域推动复杂经济系统背景下的非线性科学研究的深入。布罗克和霍姆斯(Brock & Hommes,1997)共同提出了一个信念自适应系统(Adaptive Belief System)的理论框架,该信念自适应系统能够分析和识别出一些特异的市場现象,如收益的不可预测性、厚尾特征、投机泡沫和波动集群性等。布罗克和霍姆斯(Brock & Hommes,1998)在之前研究基础上进一步将信念自适应系统的研究延伸到了资产定价问题的研究上,并指出信念自适应系统可当作一个扩展到异质信念的、由最大均值一方差衍生出的标准贴现资产定价模型,在此过程中代理人是有限理性的,而其投资行为依据的是近期市场收益的表现。布罗克(Brock,2000)就混沌经济学发展的重要性以及相关学术前沿进行了系统的综述,指出非线性研究将在复杂系统经济学、有限理性分析和弹性网络回归等领域得到深入发展和有效应用,而这些研究成果对政策制定方面也将产生重要的影响。总体而言,基于计算机技术不断地发展,非线性研究将进一步激发经济学研究对系统相关因素之间动态关系的深入思考。

四、生态经济学理论

生态经济学是综合经济学和生态学理论而形成的一门新兴的综合性学科,主要以生态系统和经济系统的复合系统为研究对象,围绕人类经济活动与自然生态之间交互作用的话题展开研究,其中涉及生态系统结构、功能、规律、平衡、生产力及生态经济效益、生态经济的宏微观管理控制理论和数量分析模型等内容。布罗克通过引入重复博弈、非线性分析、生态系统管理控制模拟等经济学研究方法,使得分析生态经济动态模型的研究变得更加有趣。此外,他对如何建立生态经济系统的预警指标体系也进行了深入探讨。

(一)引入博弈论的生态经济学思考

近年来,国内外学术界在生态经济学领域的研究发展非常迅速。早期一些学者认识到,当多个群体共有—个湖泊的使用权时,要对湖泊的使用形成有效的管理是一件十分困难的事情。基于纳什均衡条件,各个群体的博弈者都会自然地倾向于向湖泊中排放超量污染物,即排放超过最优管理控制水平的污染物,由此可能造成社会福利的下降(Carpenter & Cottingham,1997)。布罗克和德泽乌(Brock & de Zeeuw,2002)的研究进一步丰富了重复博弈理论在生态经济学中的应用研究。他们采用早期研究中设定的湖泊富营养动态变换过程条件(Carpenter, Ludwig & Brock,1999),以湖泊中藻类植物积累造成的含磷量变化为指标,开展了湖泊重复博弈分析。该项研究发现,在一定湖泊面积内,如果增加使用湖泊的博弈者数量,则可能导致贴现因子表现不增反降的现象,而这样的过程对于形成可持续的最优控制路径正好是有利的。如此,在静态环境中表现的负向效应作用则可能在重复博弈过程中发生逆转,产生正向效应。

生态系统中物种间的竞争和博弈是普遍存在的,不同物种在自然界中相互竞争的生存关系实际也是一个动态均衡的博弈过程,而20世纪20年代Lotka-Volterra 种间竞争模型为促进生态系统博弈均衡理论的发展起到了非常好的推动作用。其后,Tilman(1982)、Pacala & Tilman(1994)等一大批学者进一步推动了相关理论的发展,创新性地提出了“基于资源的模型”(Resource-based Model)。该理论模型的中心观点认为资源有限性造成生态系统的均衡状态兼具有排他性特征。该模型主要用于研究物种与生态环境资源之间竞争的演化机制,并可预测物种竞争产生的系列效应。在此基础上,布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas,2002a)以基于资源的模型为研究框架,分别在完全自然状态、私人最优、社会最优三种不同状态下探讨多物种生态系统的经济最优控制管理路径,其研究结果发现,三种不同状态将会产生三种完全不同的经济学结果:在足够广阔的完全自然状态下,以环境资源为基础的物种竞争,将会导致物种相似度提高;如果成本价格因素有足够的驱动力,那么私人最优的经济决策可能导致区域生态系统的物种趋于高度单一化和同质化;而社会最优状态则可能形成一个介于前面二者之间的中间状态,即在区域生态系统物种的种类和种群数

量上都表现明显的差异。他们进一步运用随机离散选择模型分析了物种多样性过程并验证了价格均衡的存在。总的来说,该研究是一项具有典型意义的、接近真实环境的物种竞争博弈试验,未来将进一步应用并延伸到农业与生态系统均衡领域,并对其产生重要的影响。此外,布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2002b)还考察了生态环境管理者与代理人在奈特氏不确定性(Knightian Uncertainty)条件下的合作策略和非合作策略,发现生态系统所表现的非线性反馈机制会导致多个不同的最优路径,并认为公众的外部效应和风险厌恶的预防性行为的影响可能为不同策略结果之间差异提供合理的经济学解释。

随着人们对人类社会经济行为带来的生态环境后果日益关注,生态经济学问题的研究不断深入发展。千年生态系统评估结果(Millennium Ecosystem Assessment)指出,当前生态系统的稳定性在不断下降,与此同时,人类在许多方面的效用也随之不断下降。布罗克和德克特(Brock & Dechert, 2008)对于上述问题进行了深度分析,指出造成这种现象的原因在于:一是全局生态系统中缺乏一个“称职”的职能机构来调控不同国家或地区之间普遍存在的负向溢出效应,造成耦合生态经济系统难以收敛于社会最优路径;二是生态经济系统对外部行为变化所做出的反应是非线性的。他们认为前人的研究在生态系统中各个物种在空间竞争博弈问题领域存在不足,为此,在综合考虑最优控制理论和博弈论的基础上,他们建立了一个跨区域的空间耦合动态生态经济系统模型,使其不仅适用于分析耦合的复杂空间系统,而且可以利用开链结构来识别多维度空间耦合动态系统的状态变迁的门槛。该项研究成果有助于通过对博弈者动态策略的分析实现生态系统最优管理决策的制定。

(二)生态经济控制理论分析

理解一个大的、复杂的生态系统的运转过程,关键就在于深刻地揭示人类行为动态变迁与生态系统模式转换之间的内在关联。生态环境的公共性和环境污染的外部性是导致生态环境污染的两个基本性质,而环境容量是生态环境容忍污染的能力,是一种公共品。现实中我们既不能简单地限制其他人使用,也不能排除由于他人使用所带来的负面效应,这种外部性特征是生态环境这一公共品一个突出的经济学特征。以湖泊等生态系统为例,湖泊一般被视为一个资源开放系统,它不仅可以为灌溉、居民饮用、工业需求、渔业发展提供源源不断的水资源,而且还承载了人类发展、旅游、娱乐等所需的多种服务功能,此外,湖泊的水生态系统还具有降解和转化农业污染排放物的作用。生态恢复能力(Resilience of Ecosystem)是需要依靠生态系统自我调节能力与自适应能力、使遭受破坏的生态系统逐步恢复或向良性循环方向发展的非线性过程。但是,过度排放工农业废水和含磷生活污水无疑会降低湖泊生态功能的发挥,使其自净能力无法分解消化排入的污水和各种营养元素,降低湖泊在其他方面的使用价值,进而可能造成一系列生态环境问题。自适应能力也是生态经济系统正常运行的一个关键机制,事实上,生态环境的自适应能力并非同时兼具转化性和持续性,其更多的是表现为转化性和持续性的相互作用。布罗克和卡彭特(Carpenter & Brock, 2008)指出,虽然当前生态经济学文献存在大量关于生态自适应能力的研究,但至今却尚未形成一个系统的研究框架。为了解决上述问题,他们提出了一个可用于分析各种“生态陷阱”环境中适应或被困的动态自适应能力分析系统,并且在该研究中重点对刚性陷阱和贫困陷阱两个问题进行了深入分析。

基于可持续的生态环境管理理念,布罗克在生态经济控制的识别机制方面进行了早期的尝试。布罗克等(Scheffer, Westley & Brock, 2003)结合社会经济学理论与生态系统自身运行的特征,针对人类经济行为与环境敏感之间难以一体化协调以及偏离最优的系统不利于生态环境质量目标实现等两个问题进行了剖析,并就此提出了建立生态经济分析模型的三原则:一是明晰生态系统对人类行为变迁的动态反馈机制;二是建立可行的生态环境效应测度指标及方法;三是避免利益关联群体的组织结构差异造成的偏差。此外,布罗克等(Peterson, Carpenter & Brock, 2003)通过一个简化的生态经济模型发现,过于理性的生态管理办法往往可能取得适得其反的效果,而导致生态环境的系统性崩溃,该研究客观上为生态系统崩溃识别文献提供了一种新的解释。布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2008)提出了一种无限期跨期递归最优理论,可应用于分析由于状态变量扩散诱导的连续体空间中多点溢出作用的一维稳定状态,并可以进一步被扩展到局部稳定状态识别的分析研究之中。布罗克等(Brock et al, 2010)还尝试从人类渔猎行为和人畜之间的空间竞争两个视角入手,研究人类行为对生态多样性的影响。他们提出,如果地理生态环境异质化程度极低,则生态系统中的排他性竞争会导致仅单一物种存活;反之,如果地理生态环境异质化程度极高,则会形成一

个多物种共生的生态系统。基于此,他们强调政策制定者不可忽视生态系统异质性对于生态经济系统效益最大化的重要影响。

布罗克关于生态环境控制理论中最优化路径等问题研究的学术贡献也十分突出。在自然生态系统中,物种竞争是生态系统中物种之间生存与繁衍的一种方式。物种间竞争的平衡状态对于生态系统的均衡和稳定具有十分重要的作用。早期经典的 Lotca-Volterra 模型为生态经济学研究提供的是一种现象学分析路径,而布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2002b)对传统研究方法进行了延伸和发展,提出了基于资源环境的物种竞争模型,并应用该模型对私人最优和社会最优生态环境管理决策问题进行了系统的比较分析。

现实中生态系统和经济系统二者不停地在时间和空间两个层面演变发展,同时,生态与经济之间的交互作用也在不同时空节点生生不息地进行。布罗克和卡彭特(Carpenter & Brock, 2004)提出了一个重要的关于生态系统管理政策研究的问题,即空间异质条件下的复杂生态系统如何进行动态平衡调整。如果地理环境随机动态变化,人类与生态系统交互将导致存在大量不确定性,或者生态资源管理出现政策偏差,那么复杂的生态环境系统因素会自动地放缓生态系统的自我调整进程,最终会增加生态经济系统不稳定性,提高生态灾难发生概率。他们还指出,未来该领域研究应当更多地考察多个异质代理人共同管理一个兼具随机性与非线性特征的生态系统的经济效益。布罗克和斯塔雷特(Brock & Starrett, 2003)研究了一个具有非稳定特征的正向反馈的动态生态系统最优管理路径。他们发现,在这样一个同时面对农业生产需求与湖泊水质保护双重需求的最优控制问题中,往往存在着与期初磷排放规模相关的多个不同的最优决策点。布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2004)以湖泊中水产养殖生态系统为例研究指出,如果缺乏需求弹性或缩减生态供给,均可能诱导非线性变迁的发生,进而导致生态均衡显著地表现出多重性和滞后性的双重特征。然而,如果生态环境动态变化相对于经济动态变化更加缓慢,那么,在一定时点上则可以通过征收登录费的方式来达到社会最优均衡状态。

此外,布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2010)在充分考虑政策扩散效应影响作用下,创新地提出了一种关于耦合生态经济系统中状态因素之间交互作用的理论研究框架。其中的两个理论假设前提是:(1)区域代理人仅关注自身经济利益就可以形成生态空间模式异质性;(2)所有政策扩散具有明显的外部性特征,其理论观点认为,物种空间格局的形成机制和外生性可能有助于形成一个非收敛的时空结构,从分析框架应用效果来看,该理论框架尤其适用于半干旱生态系统的研究。布罗克等(Brock et al, 2013)建立了一个基于热扩散和识别不同纬度的人类活动干扰的一维非线性能量平衡气候模型,其中设立了“维度-温度”关联函数、区域特殊灾害等具有现实意义的研究假设,研究发现,如果不能通过跨区域进行能量交换,则难以实现全局性系统的帕累托最优。在此情况下,则应当依据跨区热扩散程度进行化石燃料税的征收,并适度降低对贫穷地区的化石燃料税的征收水平。

生态环境控制管理效果的评估是生态经济研究学者关注的另一个重要议题。早期,布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2003)综合经济学、生态学和基因学等研究方法,从经济学视角建立了一个概念性地评估生物多样性价值的方法。这种方法在生态和基因双重约束下,利用贝尔曼均衡估值可以得到一个具有生物多样性特征的均衡生态系统,尽管该系统中物种之间的基因距离可能非常短,但这样的生物多样性的生态系统具有的经济价值更高。布罗克和泽帕帕迪斯(Brock & Xepapadeas, 2005)采用复杂系统的图灵识别机制分析方法(Turing Mechanism Analysis),研究了政策扩散对可再生资源管理的影响,结果发现扩散系统中的时空异质性可能产生扩散诱导非均衡状态,他们认为准确地认识图灵识别机制有利于合理地评估生态政策对于强化或消除生态系统中时空异质性的作用。

近年,布罗克等(Brock et al, 2014a)还针对生态经济政策制定的稳健性进行了探讨,认为稳健的政策制定过程应当更多地依托测度风险敏感度的二次线性高斯模型(LEQG-Linear Quadratic Gaussian Model)和稳健性控制(Robust Control)理论中的 H^∞ 控制模型,并延伸到耦合空间识别的稳健性识别机制之上,而且还可以进一步汲取博弈演化理论中的偏微分方程(PDE-Partial Differential Equation)空间分配系统模型思路。为此,他们提出了一套考虑空间域的稳健政策识别模型,该模型可以通过核密度和模型误差来识别生态经济系统的动态演化状态,并进一步检验其是否存在区域交互作用的最优控制效果。值得一提的是,该理

论模型还可以用于模拟识别生态高危地区出现的调控失效的状态转换。复杂生态系统管理控制理论的主流文献观点认为,提高预警预测能力以及降低环境离散差异与波动应当是生态经济管理的主要策略。客观来讲,生态环境控制政策在初期的2—4年的政策周期中的调控效果可能是显著有效的,但是如果长期持续采用同样的政策,则反而可能得到与预期相反的效果。另外,布罗克等(Carpenter, Brock et al, 2015)还以富营养湖泊、野生动物种群增长、牧区食草种群过度繁殖等三个典型的子生态系统模型为研究对象进行研究发现,以降低环境离散差异与波动率为目标的生态管理策略均增加了生态环境的脆弱性,削弱了生态恢复能力指标的敏感度,最终降低了生态系统的安全性。鉴于此,他们再次强调应当科学地建立生态恢复能力管理和离散差异控制相结合的创新生态管理策略。

(三)生态经济研究数量方法和预警指标建立

既然生态环境与经济之间存在着广泛的相互作用与联系,这就要求我们更加广泛收集各种生态环境监测数据,并建立一系列适用于生态经济研究的分析方法和统计指标,从而形成系统的生态经济学统计研究框架。事实证明,尽量避免复杂的环境转换过程所产生的负面效应尤为重要,而使用建立在理论基础之上的数量方法来计量不停变换的系统性环境问题,是一条分析生态经济效应的有效路径。

人类经济活动所产生的经济收益一部分与工农业活动产生的磷排放密切相关,而过度的磷排放无疑会给环境带来额外的负面影响,降低水资源的质量水平。布罗克在生态经济研究中采用磷排放作为早期预警指标,并对前人研究进行了较为系统而深入的研究和梳理。布罗克等(Carpenter, Brock & Hanson, 1999)以过度磷排放的富营养湖泊为研究对象,解释了状态转化和生态变异对生态环境政策效果的干扰作用,提出了针对不同湖泊磷排放量的适量程度的测度方法,并指出应该重视将磷排放作为预警指标的应用原则:如果生态黄金管理控制政策的目标是最大化经济效应,那么生态环境的管理者就应当将磷排放目标值设定在确定性的湖泊模型估计值水平以下,否则政策效果的滞后性会影响预警指标效果的发挥,导致预警效果失效。由于上述问题的存在,布罗克等(Ludwig, Carpenter & Brock, 2003)在前期关于磷循环研究(Carpenter, Ludwig & Brock, 1999)的基础上,利用二维动力学模型对最优化潜在富营养湖泊的预期净收益贴现效益的磷负荷临界值进行了测度,揭示了生态经济政策中长期忽视的一个磷排放量的动态性问题,即经济参数和生态参数之间的交互作用对于生态经济政策的影响效应:经济贴现率决定了时间周期的长短,反过来又可以影响磷排放量的最大负荷。因此,分析动态磷排放和磷排放密度变化的波动性作用,建立生态经济系统的动态随机模型具有十分重要的作用,该项研究极大地推动了量化生态经济预警机制原则的建立和完善。另外,布罗克等(Brock et al, 2008)指出湖泊中的磷祛除量也可以作为一个预测1—3年内水体富营养化的早期预警先行指标,但是,1—3年的时间对于政策调整来说仍显得太短,因此,为了更好地修正预警湖泊的生态环境风险的效果,他们建议利用连续渐进记录数据来测度条件方差,并以此来提高早期预警先行指标的敏感度。

众所周知,生态系统复建是一个成本高、难度大的系统性工程,而生态系统遭受破坏的起始点的识别往往是在生态灾害实际发生之后,通过“事后分析”才有所了解,如此则难以做到事前防备。所以,如果可以提前识别到生态系统灾害的发生,则可能在生态系统灾害发生前制定早期预警方案,以阻止生态灾害的发生或者最大程度降低生态灾害的负面影响。为此,布罗克所在研究团队进行了革命性的尝试,他们建立了一种结合生态系统恢复能力指标的生态系统门槛快速感应识别法(Quickest Detection),该方法主要基于似然比检验,通过对两种及以上模型的似然比进行比较,从而得出最优化估计结果,借此缩短了估计结果的滞后性,并能有效地避免“过期预警”情况的发生概率。总的来说,该方法可以通过不断更新数据以形成有效的早期预警效果,为决策者提供更加快速的生态环境管理决策意见(Carpenter, Brock & Cole, 2014)。

在早期生态预警指标计量方面,布罗克等一直致力于将方差和标准差等统计推断方法灵活地运用于生态经济的研究之中。布罗克和卡彭特(Carpenter & Brock, 2006)研究了预测复杂生态系统稳定性中稳态转换的问题。他们提出,当特定生态环境指标的方差或标准差出现上升现象或趋势时,则可能预示着生态环境将要进入转换过程,其进一步利用湖泊富营养模型的分析也发现,排除监测噪音因素干扰的影响,湖泊中含磷量的波动变化可以作为早期预测富营养化的重要指标。此外该项研究还发现,基于湖泊含磷量标准差提高的考察结果,可以作为预测未来10年内湖泊富营养化的早期预警先行指标。随后,布罗克等(Biggs, Carpenter & Brock, 2009)对当前采用时间序列进行生态系统预警指标的方法进行了有益的评述,指出当前许

多文献都认为生态环境指标的方差上升和自相关等现象可以作为生态环境变迁的预警指标,但是在政策制定和管理环节却遇到的极大挑战,即大多数预警指标的设计均较难为生态经济政策调整赢得有效时间,这一关键问题极大限制了政策研究应用价值的发挥。他们运用水产渔业模型诠释了复杂生态环境的变换,发现可利用系统参数和指标方法进行预警。该方法虽然能够有效识别,但是从政策应用上来讲却也存在难以克服滞后性干扰的局限性,难以在生态环境状态变换前形成有效的干预效果。鉴于此,他们指出在预警指标的设定上应当更重视的是提升预警阈值的敏感度,以提高预警指标的作用效果。布罗克和卡彭特(Carpenter & Brock, 2010)指出,在复杂的生态系统中,养分、有机物的空间离散程度等均可能会抑制变异率作为生态预警指标的作用的发挥,可能的解释是空间结构的差异可能加剧波动和变异率,因此削弱早期状态转换机制的识别效果。由于上述问题的存在,他们引入傅里叶转换模型,从四种傅里叶空间生态模型入手,包括单物种离散模型、单物种连续时间模型及两种不同的捕食—被捕食系统模型,研究结果发现,运用空间格局的非连续傅里叶转换可以将动态系统转换为空间频率进行分析,以锐化生态预警指标的敏感度,发挥第一时间预警的效果。

一般来讲,在实验室水平上研究生态预警系统多是基于确定的、相对简单的数据模拟生成过程,然后利用这些仿真数据的方差或自相关等统计量构建预警指标,然而真实生态系统情况要远比此复杂得多,真实自然的数据生成过程是不确定的,忽视不确定性是早期预警先行指标构建的一个缺陷,这成为早期预警机制受到挑战的一个重要原因。布罗克的研究在这方面文献不足的补充作用非常突出。布罗克等(Ludwig, Brock & Carpenter, 2005)针对生态环境经济效益分析中长期使用的“成本收益法”存在的缺陷进行了批评,明确指出在涉及不确定性的生态经济长期效应分析中应当十分重视贴现率的选择。虽然,经济学研究中的贴现率设定普遍采用恒指数贴现率,但是他们却认为在生态经济研究中,贴现率的设定应当充分考虑长期贴现过程中的不确定性的影响。基于此,他们在可再生资源、长寿命物种管理和浅水湖富营养三种典型情况下检验了经济不确定性的影响,认为充分考虑不确定性的贴现率将有助于避免或降低人类经济行为对生态环境造成的损害。布罗克等(Carpenter, Brock et al, 2008)认为制度政策的变化对于生态经济系统将产生较大而持续的影响,要想十分准确地预测生态环境的变化是十分困难的,但在实际应用过程中仍然存在一些先行指标可以在一定程度上发挥预警指标的作用。他们运用基于全湖长效试验的食物网模型,筛选出了一系列营养级链预警先行指标,其中包括关键性生态系统指标呈宽域摆动特征、环境扰动后的回报率变换、生态指标方差低频化趋势等,只要诱导环境变化的关键因子对环境的影响相对较慢,那么就能够通过监测具有高频特征的特征环境指标,从而对生态环境变化提供预警参考,并依据预警指示结果进行调整,以实现生态经济环境均衡。但是这种方法的使用也可能存在一些例外的情况,例如,由于处于临界点周围的生态环境转换表现十分缓慢而造成预警指标严重滞后。

此外,如何利用早期预警信号识别自然数据生成过程中不确定性诱导形成的稳态转换也是一个重要的研究方向。为了克服不确定性因素对预警先行指标的干扰,布罗克和卡彭特(Carpenter & Brock, 2011)提出了一种非参数的“漂移—扩散—跳跃”模型(Nonparametric Drift-Diffusion-Jump Model),基于该模型可以形成一个更接近真实情况的数据生成过程,以适应广义模型的要求。其中,漂移项可以测度地区变化率,扩散项可以测度每一个时间步长上的微小冲击,而跳跃项可以测度较大的间歇性冲击,总方差则来源于扩散和跳跃过程的加总。该研究技术尤其适用于采用自动化高频率传感器进行数据采集的生态环境管理部门,并可进一步推动早期预警信号识别体系的建立。但是,他们也指出了该方法的缺陷,主要表现在漂移项的测度难度极大,且估计结果准确性存在一定的问题,在使用时仍应当十分谨慎。除此之外,布罗克和卡彭特(Brock & Carpenter, 2012)还对环境不确定背景下的稳态预警方法进行了探索,提出了一种通过检验生态系统时间序列数据的条件方差和扩散函数,以识别生态环境稳态转换临界点的方法,该仿生方法的优点在于能够区分出数据噪音干扰和实际临界状态的差异,实现了预警生态环境危机的目标。

总体而言,早期生态经济学理论研究和实验基础为早期预警先行指标的运用和推广积累了丰富的经验基础,布罗克等(Dakos, Carpenter & Brock et al, 2012)进一步系统地比较了多种可用于时间序列的快速实现早期预警效果的指标,并比较了不同指标的早期预警效果的差异,最终形成了一个多元化的早期预警指标工具包。此外,预警先行指标对于骤变式生态系统变化的预测也具有十分重要的作用,虽然相关理论成果斐

然,但是在现实中的运用却十分滞后。布罗克等(Kéfi, Guttal & Brock et al,2014)利用渐缓指标(Slowing-down Based Indicator)、补丁指标(Patch Based Indicator)、离散指标(Variability Based Indicator)对生态系统空间结构的骤变式转换进行了识别,并为生态经济相关政策制定提供了一套较为完整可行的技术方案。

五、简评

布罗克作为一位具有夯实的数理基础的经济学家,在数量经济学、混沌经济学和生态经济学等领域的研究展现了出众的才华,对当代经济学的发展无疑具有开创性贡献。这既归功于布罗克本人优秀的数学理论基础和卓越的洞察力,也受益于整个数量经济学和混沌经济学理论在近几十年内的迅猛发展。从理论角度看,布罗克拓宽了经济学的研究范围,对经济学发展的重大贡献在于推动了数量经济学的应用范畴,进一步发展了混沌经济学理论,并综合数量经济学和混沌经济学理论,进一步拓展到生态经济研究,将生态经济学中的早期预警指标体系构建和识别机制演绎得炉火纯青。布罗克接受新芝加哥学派的影响,认为经济领域的研究不应当仅仅局限在静态分析方法上,更应该重视在新古典经济学的框架下引入动态和非线性分析方法,其研究理论在解释更新、更复杂的人类、自然和社会的相互作用时使经济学分析的释力更强,这些研究成果也为今后学术研究解决更为复杂的经济系统问题提供了很好的理论参考和方法借鉴。

近些年来,我国的生态经济研究方兴未艾,逐渐得到了越来越多优秀学者的关注,但现阶段绝大多数的文献均采用传统的范式研究,并且研究成果主要集中在生态经济的事后研究等领域。我们对于早期生态预警的研究尚处在起步阶段,对于生态环境稳态变化的预警机制研究尚有待进一步加强,今后需要研究形成适合中国区域空间结构下的生态预警指标构建和预警机制。因此,我国学者应该从理论、方法、研究选题等多个角度借鉴布罗克在混沌经济学和生态经济学领域的研究成果,致力于用更加准确的真实数据进行量化分析,解决我国在该领域面临的现实问题,以便让我国的数量经济学和生态经济研究迈上一个更高的台阶。

参考文献:

- Biggs, R., S. R. Carpenter & W. A. Brock(2009), "Turning back from the brink: Detecting an impending regime shift in time to avert it", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106(3):826—831.
- Bismut, J. M. (1973), "Conjugate convex functions in optimal stochastic control", *Journal of Mathematical Analysis & Applications* 44(2):384—404.
- Brock, W. A. (1973), "Some results on the uniqueness of steady states in multi-sector models of optimum growth when future utilities are discounted", *International Economic Review* 14(3):535—559.
- Brock, W. A. (1986a), *Models of Economic Dynamics: A Revised Version of Samuelson's Correspondence Principle: Applications of Recent Results on the Asymptotic Stability of Optimal Control to the Problem of Comparing Long-run Equilibria*, Berlin: Springer-Verlag.
- Brock, W. A. (1986b), "Distinguishing random and deterministic systems: Abridged version", *Journal of Economic Theory* 40(1):168—195.
- Brock, W. A. (1993), "Pathways to randomness in the economy: Emergent nonlinearity and chaos in economics and finance", *Estudios Económicos* 8(1):3—55.
- Brock, W. A. (1996), "Asset price behavior in complex environments", *Santa Fe Institute Working Papers* No.1996—04—018.
- Brock, W. A. (2000), "Whither nonlinear?", *Journal of Economic Dynamics & Control* 24(5—7):663—678.
- Brock, W. A. & E. G. Baek(1991), "Some theory of statistical inference for nonlinear science", *Review of Economic Studies* 58(4):697—716.
- Brock, W. A. & S. R. Carpenter(2012), "Early warnings of regime shift when the ecosystem structure is unknown", *Plos One* 7(9):e45586.
- Brock, W. A. & W. D. Dechert(2008), "The polluted ecosystem game", *Indian Growth & Development Review* 1(1):7—31.
- Brock, W. A. & P. J. de Lima(1996), "Nonlinear time series, complexity theory, and finance", In: G. S. Maddala et al(eds), *Handbook of Statistics 14: Finance*, North-Holland.
- Brock, W. A. & A. de Zeeuw(2002), "The repeated lake game", *Economics Letters* 76(1):109—114.
- Brock, W. A. & D. Gale(1969), "Optimal growth under factor augmenting progress", *Journal of Economic Theory* 1(3):229—243.

- Brock, W. A. & C. H. Hommes(1997), “A rational route to randomness”, *Econometrica* 65(5):1059–1095.
- Brock, W. A. & C. H. Hommes(1998), “Heterogeneous beliefs and routes to chaos in a simple asset pricing model”, *Journal of Economic Dynamics & Control* 22(8–9):1235–1274.
- Brock, W. A. & J. P. Magill(1979), “Dynamics under uncertainty”, *Econometrica* 47(4): 843–868.
- Brock, W. A. & M. Majumdar(1978), “Global asymptotic stability results for multisector models of optimal growth under uncertainty when future utilities are discounted”, *Journal of Economic Theory* 18(2):225–243.
- Brock, W. A. & L. Mirman(1972), “Optimal economic growth and uncertainty: The discounted case”, *Journal of Economic Theory* 4(3):479–513.
- Brock, W. A. & L. Mirman(1973), “Optimal economic growth and uncertainty: The no discounting case”, *International Economic Review* 14(3):560–573.
- Brock, W. A. & C. L. Sayers(1998), “Is the business cycle characterized by deterministic chaos?”, *Journal of Monetary Economics* 22(1):71–90.
- Brock, W. A. & J. A. Scheinkman(1974), “Global asymptotic stability of optimal control systems with applications to the theory of economic growth”, *Journal of Economic Theory* 12(1):164–190.
- Brock, W. A. & D. Starrett(2003), “Managing systems with non-convex positive feedback”, *Environmental and Resource Economics* 26(4):575–602.
- Brock, W. A. & S. J. Turnovsky(1981), “The analysis of macroeconomic policies in perfect foresight equilibrium”, *International Economic Review* 22(1):179–209.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2002a), “Optimal ecosystem management when species compete for limiting resource”, *Journal of Environmental Economics & Management* 44(2):189–220.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2002b), “Biodiversity management under uncertainty: Species selection and harvesting rules”, In: P. Dasgupta(eds), *Economic Theory for the Environment: Essays in Honour of Karl-Goran Maler*, Edward Elgar.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2003), “Valuing biodiversity from an economic perspective: A unified economic, ecological, and genetic approach”, *American Economic Review* 93(5): 1597–1614.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2004), “Management of interacting species: Regulation under nonlinearities and hysteresis”, *Resource & Energy Economics* 26(2):137–156.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2005), “Spatial analysis in descriptive models of renewable resource management”, *Swiss Journal of Economics & Statistics* 141(3):331–354.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2008), “Diffusion-induced instability and pattern formation in infinite horizon recursive optimal control”, *Journal of Economic Dynamics & Control* 32(9):2745–2787.
- Brock, W. A. & A. Xepapadeas(2010), “Pattern formation, spatial externalities and regulation in coupled economic-ecological systems”, *Journal of Environmental Economics & Management* 59(2):149–164.
- Brock, W. A., S. R. Carpenter & M. Scheffer(2008), *A Theoretical Framework for Analyzing Social-ecological System: Regime Shifts, Environmental Signals, Uncertainty, and Policy Choice*, Columbia University Press.
- Brock, W. A., A. Kinzig & C. Perrings(2010), “Modeling the economics of biodiversity and environmental heterogeneity”, *Environmental and Resource Economics* 46(1):43–58.
- Brock, W. A., J. Lakonishok & B. Lebaron(1992), “Simple technical trading rules and the stochastic properties of stock returns”, *Journal of Finance* 47(5):1731–1764.
- Brock, W. A., A. Xepapadeas & A. N. Yannacopoulos(2014a), “Robust control and hot spots in spatiotemporal economic systems”, *Dynamic Games & Applications* 4(3):1–33.
- Brock, W. A., A. Xepapadeas & A. N. Yannacopoulos(2014b), “Optimal agglomerations in dynamic economics”, *Journal of Mathematical Economics* 53(8):1–15.
- Brock, W. A. et al(1996), “A test for independence based on the correlation dimension”, *Econometric Reviews* 15(3):197–235.
- Brock, W. A. et al(2013), “Energy balance climate models and general equilibrium optimal mitigation policies”, *Journal of Economic Dynamics & Control* 37(12):2371–2396.
- Carpenter, S. R. & W. A. Brock(2004), “Spatial complexity, resilience, and policy diversity: Fishing on lake-rich landscapes”, *Ecology & Society* 9(1):1759–1763.
- Carpenter, S. R. & W. A. Brock(2006), “Rising variance: A leading indicator of ecological transition”, *Ecology Letters* 9(3):

311—318.

- Carpenter, S. R. & W. A. Brock(2008), “Adaptive capacity and traps”, *Ecology & Society* 13(4):226—232.
- Carpenter, S. R. & W. A. Brock(2010), “Early warnings of regime shifts in spatial dynamics using the discrete Fourier transform”, *Ecosphere* 1(5):1—15.
- Carpenter, S. R. & W. A. Brock(2011), “Early warnings of unknown nonlinear shifts: A nonparametric approach”, *Ecology* 92(12):2196—2201.
- Carpenter, S. R. & K. L. Cottingham(1997), “Resilience and restoration of lakes”, *Ecology & Society* 1(1):413—445.
- Carpenter, S. R. , W. A. Brock & P. C. Hanson(1999), “Ecological and social dynamics in simple models of ecosystem management”, *Conservation Ecology* 3(2):4[Online].
- Carpenter, S. R. , D. Ludwig & W. A. Brock(1999), “Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change”, *Ecological Applications* 9 (3):751—771.
- Carpenter, S. R. , W. A. Brock, J. J. Cole et al(2008), “Leading indicators of trophic cascades”, *Ecology Letters* 11(2): 128—138.
- Carpenter, S. R. , W. A. Brock, J. J. Cole et al(2014), “A new approach for rapid detection of nearby thresholds in ecosystem time series”, *Oikos* 123(3):290—297.
- Carpenter, S. R. , W. A. Brock, C. Folke et al(2015), “Allowing variance may enlarge the safe operating space for exploited ecosystems”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(46):14384—14389.
- Cass, D. (1965), “Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation”, *Review of Economic Studies* 32(3):233—240.
- Collet, P. & J. P. Eckmann(1980), “Properties of continuous maps of the interval to itself”. *Lecture Notes in Physics* 22(6): 331—339.
- Dakos, V. , S. R. Carpenter, W. A. Brock et al(2012), “Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data”, *Plos One* 7(7): e41010.
- Green, M. L. & R. Savit(1991), “Dependent variables in broad band continuous time series”, *Physica D Nonlinear Phenomena* 50(3):521—544.
- Kéfi, S. , V. Guttal, W. A. Brock et al(2014), “Early warning signals of ecological transitions: Methods for spatial patterns”, *Plos One* 9(3): e92097.
- Koopmans, T. C. (1966), *The Econometric Approach to Development Planning: On the Concept of Optimal Economic Growth*, North-Holland.
- Ludwig, D. , W. A. Brock & S. R. Carpenter(2005), “Uncertainty in discount models and environmental accounting”, *Ecology & Society* 10(2):610—611.
- Ludwig, D. , S. R. Carpenter & W. A. Brock(2003), “Optimal phosphorus loading for a potentially eutrophic lake”, *Ecological Applications* 13(4):1135—1152.
- Pacala, S. & D. Tilman(1994), “Limiting similarity in mechanistic and spatial models of plant competition in heterogeneous environments”, *American Naturalist* 143(2):222—257.
- Peterson, G. D. , S. R. Carpenter & W. A. Brock(2003), “Uncertainty and the management of multistate ecosystems: An apparently rational route to collapse”, *Ecology* 86(6): 1403—1411.
- Scheffer, M. , F. Westley & W. A. Brock(2003), “Slow response of societies to new problems: Causes and costs”, *Ecosystems* 6(5):493—502.
- Tilman, D. (1982), *Monographs in Population Biology: Resource Competition and Community Structure*, Princeton University Press.
- Wu, K. , R. Savit & W. A. Brock(1993), “Statistical tests for deterministic effects in broad band time series”, *Physica D Nonlinear Phenomena* 69(1—2):172—188.

(责任编辑:李仁贵)

(校对:刘洪愧)