

生态复杂性研究——综述与展望

张知彬 王祖望[~] 李典谟

(中国科学院动物研究所 北京 100080)

摘要 简要介绍了生态复杂性研究的最新进展与动态,生态复杂性研究的背景及若干重要的概念与方法。生态复杂性指生态系统内不同层次上的结构与功能的多样性,自组织及有序性。生态复杂性研究的显著特征是:它应用复杂学的理论、方法和观点来研究生态与进化问题。其研究方法主要有元胞机法和遗传算法,认为生态系统是一个适应复杂系统,处于混沌的边缘或临界态,内部作用是生态系统复杂化,有序化及自组织的主要推动力。

关键词: 生态复杂性,适应复杂系统,自组织,临界态,混沌的边缘,生态系统。

ECOLOGICAL COMPLEXITY——REVIEW AND PROSPECT

Zhang Zhibin Wang Zuwang Li Dianmo

(Institute of Zoology, Academia Sinica, Beijing, 100080, China)

Abstract The new advance and trend in the ecological complexity studies, its background, methodology and theory are briefly introduced. The ecological complexity is defined as the structure and function diversity, self-organization and the order of an ecosystem. The main characteristic of the ecological complexity studies is that it solves ecological and evolutionary problems with the science of complexity. Its main methods include the cellular automata and genetic algorithm. It takes ecosystem as an adaptive complex system which is suggested to be at the edge of chaos or at the criticality. The inner interaction of an ecosystem is the main driving force for the self-organization, complexity and order in the ecosystem.

Key words: ecological complexity, adaptive complex system, self-organization, criticality, edge of chaos, ecosystem.

生态复杂性(ecological complexity)是生态学研究的重要内容,过去有关生态复杂性研究的热点主要是在群落或生态系统水平上探讨复杂性与稳定性之间的关系。近年来,国际上生态复杂性研究出现了一个新动向,其特点是利用复杂学(science of complexity)的原理和方法来研究进化和生态学问题,研究内容涉及到生态系统内不同层次上的结构和功能。由于复杂学本身也是一门新兴的边缘交叉学科,国内生态学界对它较为陌生,所以本文在介绍生态复杂性研究的同时,也将有重点地介绍一些复杂学的理论。

1 复杂性的概念

以前,有关复杂性(complexity)的定义很多,如熵、信息、结构多样性等。但目前复杂学研究中,复杂

收稿日期:1996-03-20,修改稿收到日期:1997-04-16。

性的概念已比较统一,它是指由许多不同的单元组成,且单元之间有紧密联系的系统所具有的特征和属性。

复杂学是研究自然界中各类系统复杂性的一门科学。它创始于80年代初,以1985年在美国新墨西哥州成立的圣菲研究所(Santa Fe Institute,简称SFI)为标志。SFI是一个松散的研究团体,汇集了一大批物理学家、化学家、生物学家、经济学家和计算机学家及其它学科的研究人员,其中有不少是诺贝尔奖得主或知名专家学者如Gell-Mann等。目前,复杂学研究的热门领域主要有人工智能(artificial intelligence),神经网络(neural network),免疫系统(immune system),人工生命(artificial life),自催化反应(self-catalysis),股票市场(stock market)等。生命起源及生态系统演化也是一个研究热点,本领域知名科学家有Kauffman, Halland, Langton 和 Ray 等人。以SFI为核心的科学家可称作圣菲学派,他们较偏重于从结构和形式上来研究复杂性。另一派的复杂学家则偏重从功能上研究复杂性,其代表人物是布鲁塞尔学派的普里高津(Pri-gogine)。他曾提出耗散结构理论,并因此获诺贝尔奖。

复杂学中的“复杂性”(complexity)一词与通常词义上的杂乱,混乱,混沌等词义不同。它专指复杂系统中的复杂性。按照严格的定义,复杂系统是指由大量相互作用的不同单元组成的自适应系统,而复杂性就是复杂系统的行为,组织特性。复杂系统有时又称作适应复杂系统(adaptive complex system)。我国的一些学者认为复杂系统是一个开放巨系统,而复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性^[1]。概括起来,复杂系统有4个基本特征:(1)组成单元数量庞大;(2)单元之间有大量联系;(3)具有自适应性和进化能力;(4)具有动力学特性。显然,复杂系统的第3个特征表明复杂学在很大程度上吸收了生态和进化的思想,因而复杂学对生态系统的研究具有一定的参考意义。

生态系统是一个典型的复杂系统。例如,从群落或生态系统水平上看,生态系统由大量的物种构成,物种之间存在捕食和被捕食,寄生,互惠共生等复杂的种间关系,这些物种直接或间接地联结在一起,形成一个复杂的生态网络。而生态复杂性就是生态系统结构和功能的多样性,自组织性及有序性,其研究的主要任务是利用复杂学的原理和方法,探讨生态系统复杂化的机理及发展规律,为认识生态系统提供一条新的途径。

2 研究特点

复杂系统与一般常说的动态系统有显著不同,后者组成单元要比复杂系统少得多,并且单元之间的关系是固定不变,非进化和适应的。目前的系统生态学便是以这种动态系统理论为基础的。复杂系统则重视系统内单元或个体的行为,适合处理庞大复杂的系统。单元之间的关系是可以调整的,具有进化,适应及学习能力。所以,以复杂系统为基础的生态复杂性研究与系统生态学又有明显区别。从研究方法上来看,二者也有很大区别。系统生态学主要借助建立微分方程组或系统动态流图,再通过数学分析(如相平面分析)或计算机模拟来研究系统的动力学特性,而生态复杂性的主要研究方法有元胞机法(cellular automato,简称CA法),遗传算法(genetic algorithm,简称GA法),博弈论(game theory)及组合优化法(combinatorial optimization)等,但这些方法又都非常依赖计算机模拟。需要指出的是,尽管复杂系统和常规的动态系统有这些区别,但由于动力学特性均是二者的重要属性,二者又存在许多相同之处。所以,将生态复杂性研究和系统生态学结合起来,从不同的角度和方面来研究生态和进化问题是有益的。

复杂学和混沌理论也是不同的。复杂学是研究复杂系统在一定规则下如何产生宏观有序的组织和行为,而混沌理论恰恰相反,它是研究系统在简单规则下如何产生混沌行为的^[2]。所以,有人又将复杂性研究称作为反混沌(antichaos)理论。由于二者的研究系统都是动力学系统,所以二者又存在一定联系。复杂学家Langton认为,复杂性位于有序和混沌之间的一个狭窄区域,即混沌的边缘(edge of chaos)^[3],复杂系统(包括生态系统)刚好处在这个位置。可见,混沌理论对于复杂生态学研究也是有帮助的。

从哲学的角度看,复杂学基本上属于整体论或活力论的范畴,即整体大于部分之和。它认为,系统内部之间的关系搞清了并不等于系统的行为就自然清楚了。例如,即使某一生态系统内各物种之间的捕食,竞争,寄生,互惠等关系搞清了(甚至包括定量作用),当这些物种放在一起时,整个系统的行为(如多样性和稳定性)却是难以预料的,需要采用整体论的理论和方法重新加以研究。但需要指出的是,复杂学又比较强

调低层水平上个体行为之间的关系对高层水平上宏观行为的重要作用,所以,复杂学又在某种程度上吸收了一些还原论的思想。

3 局部规则

复杂学的一个重要观点是局部规则(local rule)导致系统宏观变化(global change),即有序行为和组织的出现^[4-5]。这个思想可以通过元胞机法来加以说明。元胞机法是指将一个二维平面分隔成相等的许多小方格,每个方格可取“0”或“1”两种状态。方格的状态是变化的,其“0”或“1”状态取决于周围 M 个方格的状态。研究发现,如果 M 很小,系统将固定在某一种有序状态;相反,如 M 太大,系统将处于混沌状态。但在有序和混沌之间,存在一个窄小的区间,在此区间上,系统出现了由“0”或“1”组成的有一定规则和形状的“岛屿”,游荡于周围混沌的“海洋”之中,并周期性地出现。系统出现了自组织(self-organization)。复杂学家 Kauffman 称之为自然产生的有序结构(order for free),又称之为非自然选择式(non-natural Selection)的或非达尔文式(non-darwinism)的。

按照这一观点,生态复杂性研究在考虑生态和进化问题时和过去的一些观点有重要区别。首先,系统生态学研究问题基本上是自上而下的,即将系统划分为若干部分,然后建立各部分之间的关系,研究系统的动态行为。生态复杂性研究则刚好与之相反,主要采取自下而上的方法,即先确定局部规则,然后观察和研究出现的宏观行为特征。有人曾比喻“自上而下”的原则为“计划经济”,“自下而上”的原则为“市场经济”。显然,这两个原则是相辅相成,互为补充的。

过去,人们习惯于用达尔文的自然选择学说来解释一切生命现象,认为什么都是选择和适应的结果。现在复杂学家发现,在没有自然选择的压力下,由于系统内部因素的作用,系统也能出现有序结构。据此,一些复杂生态学家曾推论达尔文式的自然选择作用并不重要,复杂系统的行为变化主要来自内部因素的相互作用,外界环境的变化对系统变化的方向和进程影响较小。后来,这一极端的观点受到批评。目前,大家基本上认为,复杂学的自组织思想对达尔文进化理论是一个重要补充。因此,复杂学对生态和进化问题的研究是非常重要的。

复杂学的这个思想对于重新认识生态系统的多样性和稳定性之间的关系可能会有所帮助。按照以前理论生态学家 May 的观点,生态系统中物种数越多,物种之间联结强度越大,系统越不稳定^[6-7]。从细胞自动机法分析得到的结果来看,物种之间的过多联结同样不利于稳定,但当物种与周围其它物种之间的联结适度时,即使系统中的物种数再多,也能出现有序的稳定结构。这与自然生态系统的实际情况基本吻合,因为虽然成千上万的物种之间都直接或间接的发生着联系,但每个物种与其它物种直接发生的联系数却十分有限。这样,按照复杂学的观点,多样性并不一定导致不稳定性。

4 进化和自适应性

复杂学的另一个重要观点是复杂系统具有进化和自适应性^[4]。复杂系统内单元具有随机突变的特点,并遵循一定法则进行优化组合,优胜劣汰,这样可随时调整单元之间的关系,这个观点可通过 Holland 的遗传算法^[8-10]来加以说明。一个物种携带许多基因,为简单起见,遗传算法用“0”和“1”代表某个基因的“关”和“闭”,这样每个生物个体可用一组由“0”和“1”组成的符号串代表,又称作数码生物(digital organism)。同真实生物一样,这些数码生物可以繁殖,并允许基因突变,交叉组合。若字符串的长度为 N ,则字符串的种类有 2^N 个,它在 N 维空间形成 2^N 个超立方体的顶点,对每一个顶点可定义一个适合度(Fitness),数码生物遵循“优胜劣汰”的进化原则。这样,人为改变适合度(类似模拟环境变化),可在计算机世界内观察数码生物的演化。由于这种遗传算法实际上是在模拟真实的生命系统,所以它对于认识和理解生物进化及生态系统的演变是很有帮助的。

Holland 的遗传算法实际上来源于生物进化和生态学的思想,它对于解决其它领域的复杂问题也具有很大潜力。有一个最有名的复杂难题是“商人旅行难题”(traveling salesman problem,简称 TSP),这个难题是一个商人想到 M 个城市推销商品,需选择一条线路,条件是每个城市只去一次,然后回到初始城市,要求走过的路途最短^[11]。显然,可选择的线路有 $M!$ 个。如果 M 较小,可利用计算机找到最短的旅行路线,方法是逐一计算所有线路的长度,挑出最短的路线。可是,当 M 较大时(如 $M=50$),可选择的路线有 50! 个,

这是一个天文数字,即使采用世界上最快的计算机,需要的时间也要超过宇宙的年龄。也就是说,利用传统的串行或序列计算(sequential calculation)的方法不能解决这类问题,复杂学家从生物世界中得到了启示。因为物种携带的基因数成千上万个,每个基因有“0”和“1”两种状态,这样个体基因组类型数就有 2^M (这里, M 为基因个数)个,同样,当 M 较大时, 2^M 是一个天文数字,也就是说,物种如何适应环境,也是一个TSP难题。自然界中,生物解决这一难题的诀窍是进化和适应。生物能繁殖大量个体,个体的基因通过突变,交叉和组合,适者生存,不适者被淘汰,这样进化形成适合特定环境的物种。可见,生物解决TSP难题的关键在于它具有并行计算(parallel calculation)的能力,大量的个体同时去探索适合某一环境的最佳基因组合,避免了串行计算的缺陷。目前,利用遗传算法的思想研制新一代并行计算机是一个热点,并且在解决许多复杂问题的实践中已初露锋芒。在解决生态复杂性问题,遗传算法的这种并行计算能力也起着关键作用。

5 人工生命系统

人工生命是复杂学研究的重要领域,同时也是生态复杂性研究的坚实阵地,所谓人工生命是指利用CA法,GA方法等制造的一群生活在计算机世界内的“生物”如计算机病毒,数码生物等,它们具有真实生物的主要特征如能够独立生存,繁殖和进化等。复杂生态学家认为,人工生命与真实生命没有本质的区别。的确,在目前制造的众多的人工生命系统中,也出现了许多自然生命系统中发生的现象如疾病暴发和流行,捕食,寄生,互惠等种间关系的产生。人工生命系统的出现,对研究生命起源和生命系统演变具有十分重要的意义。众所周知,自然生态系统是十分庞大的,人们无法操纵它。由于进化和生态过程较为缓慢,人们也无法在较短的有生之年观察到这种变化,只能依赖化石等间接资料推测进化和生态过程。现在不同了,借助人工生命系统,就能够在相对短的时间内观察和研究生命是如何起源和演化的,生态系统是如何自组织的,食物网结构如何形成和发展的,以及动物复杂多样的行为模式和对策的产生和意义等。

Ray根据遗传算法,建立了一个人工生态系统,命名为Tierra^[12~14]。它由一群数码生物组成,数码生物竞争计算机内存和运行时间,类似实际生态系统中的资源和空间。在Ray的Tierra中,复杂的寄生,捕食等关系自然产生了,并观察到了物种多样性具有突然暴发和减少的奇特现象,另一个有名的人工生态系统是Holland的Echo^[4],它也是由一群数码生物组成。在Echo的环境中,有到处出现的各种资源,用符号a, b, c, d等来表示,生物有植物,食植动物和食肉动物,它们之间的关系由各自携带的“进攻”或“防御”符号串所决定,这些符号串可通过“基因突变”或“基因交换”发生改变,所以生物之间的关系是协同进化的。Holland将“以牙还牙”(tit for tat)对策(见后)引入Echo之后,观察到数码生物之间出现了复杂的合作和互惠行为。

6 博弈论和行为对策

由于复杂学比较重视系统内个体的行为适应对系统宏观结构的作用,博弈论在生态复杂性研究中有重要的地位。一个常引用的例子是囚犯难题(prisoner's dilemma)^[16~17]。有两个犯人被抓入狱,警察单独审讯,条件是如果一方告发同伙,同伙保持沉默,可立即获释,并给予奖赏,而同伙蹲狱,并付告发者的赏金;若两人都告发对方,都蹲监狱;若都保持沉默,都可立即获释。是告发,还是沉默?两囚犯遇到了困惑,复杂学家通过大量的计算机模拟和实验,发现该游戏可出现一系列复杂的行为。若游戏只进行一次,也就是两“囚犯”都无信誉(指不了解对方)档案,总是采取告发对策者获胜。若游戏进行多次,“囚犯”们能多次碰面,这种情况下,“囚犯”的信誉档案非常重要,采取“以牙还牙”对策者总能获胜。所谓“以牙还牙”对策,是指一开始采取不告发别人的对策,以后对告发自己也采取告发对策,反之,亦然。Smith首先将博弈论引入到动物行为学研究当中,并提出进化稳定性对策的理论(evolutionary stable strategy,简称ESS理论)。他认为,动物一旦采取某种对策,任何别的对策都无法替代它,从而成为进化稳定对策,但复杂学家Kauffman却认为,进化稳定对策属于过渡有序状态下的一种次优对策(sub-optimal strategy)。由于系统处在混沌的边缘,任何对策都不能稳定下来^[18]。这些研究使人们加深了对于生态系统中的许多社会行为现象如寄生,合作,“奴役”,“掠夺”,格斗等的认识。

7 适合度景观模型

关于物种的适应与进化,Kauffman提出一个 $N-K$ 景观模型($N-K$ landscape model)来加以说明^[16]。假

设某一物种有 N 个基因,物种的适合度既取决于这 N 个基因,又取决于每个基因平均与其它 K 个基因的关联。Kauffman 发现,若 K 值很小,系统处于高度有序状态,只存在一个全局最优点,这时的 ESS 对策很容易接近这一点;若 K 值稍大, N - K 景观十分复杂,有许多局部突起的尖峰,采用 ESS 对策很容易陷入局部最优点上。复杂系统处在混沌的边缘,能摆脱局部最优点,从而跳跃到全局最优点。若 K 值过大,系统处于混沌状态, N - K 景观上有无数突起的尖峰,无论采用何种方法,系统也无法达到全局最优点。Kauffman 根据 N - K 景观模型,对达尔文的渐变进化论提出了疑问^[14]。因为自然界中,物种的基因之间的确存在不少关联,即生物性状往往是由多个基因所控制的。渐变只能使物种陷在局部最优点上,无法到达全局最优点。

如果将多物种的 N - K 模型耦合在一起,这时物种的适合度还要取决于其它物种的适合度。如果生态系统中一个物种的适合度发生变化,将会影响到其它物种的适合度的变化,这些变化反过来又会影响到这个物种的适合度,每个物种都希望将自己的适合度从低谷提高到顶峰,同时又引起其它物种的适合度发生变化,有的升高,有的降低。就好象许多人走在一个橡胶气垫上一样,一举一动都会影响人的升降。一个常举的例子是蛙-蝇效应(frog-fly effect),如果青蛙的舌头变的很粘,利于捕食苍蝇,这时青蛙的合适合度升高了,而苍蝇的适合度就要下降。苍蝇就不得不进化出新的防御办法。设想如果苍蝇进化出具有光滑的体表,苍蝇的适合度升高了,而青蛙的适合度下降了。青蛙为了生存,又必须进化出能捕捉光滑体表的苍蝇。这样捕食者和被捕食之间展开了你追我赶的“军备竞赛”。这一现象又称作红色女王效应(red queen effect),意思是说你要保持目前的地位,就必须一刻不停地努力向上。生态系统中各物种之间就是这种“军备竞赛”式的关系,其适合度景观不断地扭曲变动。按照 Kauffman 的观点,ESS 对策无法使生态系统中相互作用的物种接近最优点。

8 自组织与临界态

临界态(Criticality)是复杂学的一个重要概念,它主要用来解释自然界中的突发事件如地震,股票跌宕起伏及生物灭绝等。Bak 等认为,临界态是自然界中的一个普遍现象,是复杂系统最本质的东西。他通过一个沙堆实验来说明这一概念^[15]。在从一个桌面上逐渐添加沙土,当沙堆长到一定高度后就不再增高。这时再添加少许沙土,就有可能触发沙崩。Bak 等发现,沙崩的强度和频次符合幂指数分布(power law),即大沙崩发生的次数少,小沙崩发生的次数多;沙崩的大小与添加的沙量(扰动)无关,即小的扰动既能引发小沙崩,又能引发大沙崩。Bak 等认为,各类复杂系统通过自组织形成的结构便处于这种临界态。有许多实验数据支持 Bak 等人的观点,例如地震,生物灭绝等就符合幂指数分布。关于生物灭绝,有人曾认为是陨石撞击地球的结果,因为大的撞击事件少,小的撞击事件多,所以导致生物灭绝符合幂指数分布。但是,在 Ray 的人工生态系统 Tierra 中,并没有外界环境的扰动,物种灭绝仍然符合幂指数分布,这说明临界态确实是复杂系统的内在属性。一些复杂学家认为临界态等同于混沌的边缘。

9 生命起源和进化

生态和进化是不可分割的,因此生命起源和进化也是生态复杂性研究的重要内容,关于生命的起源和进化,Eigen 等曾用自催化和超循环概念来解释^[16]。自催化是指产物催化生产自己的化学反应,但尚难解释生物结构的复杂化。现在复杂学家虽然仍接受自催化的作用。但摒弃了传统的假说,即以反应物浓度和化学反应动力学确定新物质的生成,强调大分子生成中“模板”的匹配作用。产物是一种大分子模板,催化前身小分子聚合成大分子物质。Kauffman 最近又提出一个自催化网络(autocatalytic network),他认为当原生池中分子的多样性增加到一定程度时,类似生命的自催化反应就自然产生了,并能在此基础上进一步复杂化^[17]。总体看来,强调模板的作用是复杂学对生命起源和进化研究的进步之处,但目前仍无法圆满解释模板(基因)和结构物质(蛋白质)是如何协同进化的。目前所有的假说均局限在模板(如 RNA)具有自催化功能,但催化功能如何转化到酶或蛋白类物质上的?而这些酶或蛋白又如何被模板所编码的?等等重要过程还是不清楚。也就是说,现有的一些学说仍然将核酸类物质和蛋白类物质的进化割裂开来孤立考虑,这显然是不全面的。

具有自催化功能的模板类的物质(如 RNA)应当是生命起源的早期形式,模板是复杂化的必要条件^[20]。没有模板的引导,复杂的大分子和生命结构是不可能由随机碰撞来合成的。所以,模板的出现一定要

出现的很早,甚至可以说最早。当然,早期的模板也是一个分子短链,它的合成和延长可能要借助酶或蛋白类物质的催化。虽然模板本身也可能有自催化功能,但由于特定分子具有特定的化学性质,从长远来看,催化功能应逐渐由专一性的化学物质来实现。否则,很难想象,DNA和RNA又作模板,又具有各种催化功能。早期的模板一定要具备两种功能:一是作为自身复制的模板,二是作为酶或蛋白类物质的模板。否则,复杂化无法进行和发展。据此认为,从生命起源上看,“蛋”应早于“鸡”。这主要有两方面的原因:一是早期的模板分子链很小,没有酶或蛋白类物质的催化而靠随机碰撞也能生成,二是即使需要酶或蛋白类物质的参与,但这些酶和蛋白类物质是独立生成的,不是由核酸类模板物质编码的,这样二者的进化和发展是独立的,复杂化根本无法进行。所以,这时的“鸡”不是由“蛋”来的。当短链核苷酸模板能够编码和引导具有催化功能的酶或蛋白类物质合成时,这时“蛋”和“鸡”才统一起来,生命的进化才算真正开始。可见,生命起源的问题的实质在于“蛋”和“鸡”的统一。

10 Gaia 假说

Lovelock 的 Gaia 学说也是生态复杂性研究的一个重要内容。Gaia 是地球之神的意思,这个学说认为地球是一个相对独立于环境的,具有自我调控功能的复杂系统^[5,21]。以温度为例,地球的大气温度之所以能稳定在一定范围内是由于存在一系列适应太阳光线强弱的植物。当太阳光线过强时,能够反射阳光的植物群占优势,使地球的温度不致过热,反之,能够吸收阳光的植物群占优势,使地球的温度不致过冷。地球大气的化学成分等也同温度一样受地球生态系统的调控。该学说改变了人们以往的传统观点即地球的变化主要依赖宇宙大环境的变化,认为地球是一个由内部因素相互作用下的复杂巨系统。Gaia 假说与传统的进化论也存在很大分歧。传统的进化论认为,生物的变化是对环境的适应,而 Gaia 假说却强调生物对环境的调控。宇宙历史上许多次大规模的生物灭绝后,由于生物总量的减少及调控能力的减弱,大气的二氧化碳水平上升到一个很高的水平并持续很久。随着生物总量及调控能力的恢复,二氧化碳又恢复到原有水平。这一现象是 Gaia 假说的有利证据。Gaia 假说还正在改变人类寻找外星生命的传统作法。Lovelock 认为,外星生命存在的标志不在于是否有类似地球上的核苷酸或氨基酸,更重要的是星体周围的大气理化指标是否稳定。如果某一星球上具有生命,它一定是一个稳态的自调控系统,其大气理化性质应较稳定,否则,不可能有什么生命。

11 非平衡和非线性

普里高津(Prigogine)在70年代提出有名的耗散结构理论。该理论认为,在封闭的系统中,系统趋向混乱,即系统的熵增加,它符合热力学第二定律;在开放的系统中(包括生态系统),系统远离平衡,在负熵流的作用下,系统出现有序结构,即系统的熵减少^[22-24]。普里高津认为,非线性和非平衡是有序之源。他曾将此理论推广到社会,经济和生命系统中去,但并不十分成功。原因在于“熵”虽然在热力学系统中很成功,在其它领域,仅仅限于概念,没能给出一个统一的量度,缺乏预测能力。至于非线性在有序形成中的作用也未能给予明确的解释。众所周知,在动力系统中,非线性是一个不稳定因素,不利于复杂性的进化和发展。May 通过分析多物种相互作用的模型后发现,由于非线性的存在,物种数越多,联系越多,相互作用越强,系统越不稳定^[6-7]。这说明,复杂系统必须要克服和减弱过强的非线性。事实上,真实生态系统通过各种途径来减弱物种之间的相互作用。例如,避难地可减弱捕食强度,使天敌和猎物系统不致崩溃。此外,生态系统的分隔结构(如功能团),动物之间的等级序位等都有弱化非线性的作用。虽然过强的非线性会导致系统紊乱,但过弱的非线性可能也是不利的,系统会陷入过度有序状态。所以,适度的非线性是复杂系统所需要的,它有可能对应“混沌的边缘”。

12 功率最大和最小化原则

能量是耗散结构存在和进化的基础,没有能量输入,系统会很快崩溃和毁灭。能量是通用“货币”,它是不依赖系统内部的具体结构和联结形式,在研究复杂系统时应占有重要位置。对于相同类型的能流系统,能量作功的能力可以用能量直接比较。但对不同类型和质量的能流系统,直接用能量描述系统的特性是不行的。例如,在生态系统中,不同的营养级水平上单位能量所含的能质(energy quality)是不同的,为此,Odum 提出体现能(embodied energy)的概念,即生产一种类型的能量所需另一种类型能量的多少^[25]。这样,

虽然有些物质的能流较小,但是高能质的,因而含有较高的体现能。体现能对统一不同类型的能或系统有一定积极意义,但缺点是测定不同能之间的转换系数是非常困难的。

早在1922年, Lotka 提出系统普遍有使能流最大化的趋势,这就是有名的功率最大化原则^[26],有人甚至称为热力学第四定律,足见其重要性。所谓功率最大化是指流向有用功的能流速率(即功率)最大。到1946年, Prigogine 和 Wiaume 提出与之貌似相反的观点,即系统能流趋于功率最小化^[27]。后来,这两个观点得到统一。在能量密集时,功率倾向最大化;反之,倾向于最小化。

人类社会的发展既表现了功率最大化,又表现了功率最小化。例如,发达国家和发展中国家相比,能量消耗是很大的,但单位产品的能耗又是很低的。生物的进化也有同样的规律。一般说来,高等动物和低等动物相比,其能耗要大,而运动,代谢效率要高(节能)。所以,功率最大化和最小化原则不单是由于外部能源限制的结果。在所有的动物中,不管其生存的环境相差多大,有一点是共同的,即最大限度地获取资源,并降低各个环节的能耗。可见,最大的获得能量和提高能量转化为有用功的效率是开放的复杂系统追求的目标。为此,作者曾提出序能(order energy, 简称为 Ordergy)的概念^[20],即序能是改变系统有序状态大小的量,它刚好对应能量的概念,即能量是改变系统状态大小的量。系统有序程度越高,有序活动越多,其所需要的有用能量越多。设系统的能量输入为 Q , 每次能量转化效率为 a , 能量转化次数为 m , 则序能 $OE = Q(1 - a^{m+1}) / (1 - a)$ 。若 $m = 1$, $OE = Q(1 + a)$; 若 $m \rightarrow \infty$, $OE = Q / (1 - a)$ 。 $OE > Q$ 并非说能量不守恒了,在每次的能量转换过程中,能量还是守恒的,但若转化为有用功的效率高,且转换次数多,有用功就增加了。在上述公式中, Q 基本上对应于功率最大化原则, a 基本上对应功率最小化原则。所以, Q 和 a 是衡量系统复杂性的两个基本参数, OE 是个综合指标。一般说来, Q 和 a 是正相关的,因为如果系统获得能量的能力强,其能量利用效率也往往很高。这说明,复杂系统的发展方向是获能和节能并举。

在生态系统中,系统的总序能就是通过各物种的能流之和。有用能量用于生物繁殖和增长,系统的净生产力(P)就是序能做功的结果。所以,系统能量转换效率可用 $\beta = P/Q$ 指数粗略代表。这个 β 指数要比 a 指数易得到,因为估计所有物种的能流是非常困难的,而估计总净生产力要相对容易些。在人类社会中,有两类能,即生物能和工业能。国民生产总值(GNP)是这两类能作有用功的度量,同样也可考虑采用 β 指数来描述这类系统的能量转换效率。

目前,从能量和能质的角度来研究生态系统是一个值得注意的研究领域,最近, Kay 等人利用卫星遥感技术,研究陆地上各类生态系统的地表温度变化与系统依守能(exergy, 它也是一种做功的度量)及结构自组织的关系,发现地表温度是衡量生态系统复杂化的一个有效指标,地表温度的降低对应生态系统复杂性的增加,依守能也随之增加^[28~29]。

13 展望

可以说,生态复杂性是目前生态和进化研究的前沿领域之一。它在研究的方法和思路上与系统生态学有明显的不同,有自己的独特性。它涉及的组分是巨大的,整个系统具有自我调整能力。它基本上采取模拟真实生命系统的方法来观察和研究生态和进化问题。这无疑对于人们进一步认识和理解自然界中多种多样的生命现象提供了一个新途径。

与普通的物理系统不同,生命系统的演化是从无序到有序,从简单到复杂,在这一点上,生命系统是反热力学第二定律的。如何对这类系统进行描述?是否存在统一的规律?是许多领域的科学家不断追求和探索的命题。自普里高津在70年代提出耗散结构理论以来已有二十多年,直接将热力学的思想用于生态系统中看来还存在不少问题。一部分的复杂学家沿着这个思路在继续探索,并逐渐吸收了系统生态学中能流和能质的概念,而另一部分的复杂学家着重研究系统的自组织过程和方式,重点是观察信息的流动和复杂化。这两条途径反映了结构与功能的两个不同侧面,对生态系统研究都具有重要的借鉴意义。

在世纪之交,复杂学和生态学的结合将有助于解决生态与进化中一些倍受关注的难题,如动物的行为模式,协同进化,种群暴发与崩溃,多样性与稳定性,生命起源,物种灭绝,全球变化,外星生命等等。但需要指出的是,复杂学在研究生态学时又有一定的局限性,它将真实生物抽象为数码生物,在计算机上按照一定的规则让他们发展演化,这毕竟和真实生态系统有很大距离。特别是对于人工生命系统还存在一定的争

议^[30]。复杂学家坚信,人工生命和真实生命没有本质区别,它们虽然不是由蛋白质和氨基酸类物质所组成的,但它们具备了生命最本质的东西,即能够独立生存,繁殖,扩散和进化。但有些人认为,人工生命是人类大脑活动或意识的产物,可能含有很强的人为因素,所以,一方面不能简单或机械地将人工生命系统的现象或规律照搬到真实生态系统中,但另一方面又要尊重复杂学中合理的和客观的成分,通过对真实生态系统的实际观察,利用复杂学的理论和方法加以抽象分析,对自然生态系统的现象和问题必然会得到一个新的认识,但这种认识还必须回到自然中去,利用实验生态等方法 and 手段加以检验和证实。

从现在的工作来看,目前圣菲学派(结构学派)和布鲁塞尔学派(功能学派)的思想和研究尚未有机地结合起来,作者认为,这种状况应尽快加以改变,二者若一旦结合起来,复杂学的研究将会有重要突破。结构和功能是不可分的,如果能在人工生命系统中观察“熵”或“功率”或“能量”等指标与系统结构复杂化之间的关系,对于寻找描述生态系统的统一量将具有重要的指导意义。

物质流,能量流和信息流是生态系统的三大要素,只有从这3个方面出发,才有可能找到生态系统中最普遍性的东西。所以,今后生态复杂性的研究应紧紧围绕这3个方面,特别要和能量生态学结合起来,因为能量是所有开放系统生存和演化的必要条件,而且它是一种通用“货币”。从能量入手,容易在生态复杂性研究上获得突破。

复杂学是继耗散结构理论,协同论,突变论,信息论,系统论,混沌理论之后出现的新学科,它在我国也是一个新事物。因此,生态复杂性研究在我国自然也很薄弱,尤其对圣菲学派的工作尚不熟悉,至今尚未有一个自己的人工生命系统。考虑到生态复杂性的重要性,希望本文能引起国内同行的注意,积极了解和跟踪国际生态学界这一新动向,不失时机地开展生态复杂性的研究。

参 考 文 献

- 1 戴汝为,沙飞. 复杂性问题的研究综述. 概念研究方法. 自然杂志, 1995, 17(2), 73~78
- 2 Gleick, J. *Chaos, making a new science*, New York, Viking, 1987. 352
- 3 Langton C G. *Artificial Life. Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity*. Vol. 6. Redwood City, Calif. Addison-Wesley, 1989. 212
- 4 Waldrop M M. *Complexity, the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York, Simon and Schuster, 1992. 345
- 5 Lewin R M. *Complexity, Life at the Edge of Chaos*. New York, Macmillan Publishing Company, 1992. 208
- 6 May R M. Will a large complex system be stable? *Nature*, 1972, 238, 413~417
- 7 May R M. *Stability and complexity in Model Ecosystems*. Princeton, Princeton University Publication, 1973. 447
- 8 Holland J H. *Adaption in Natural and Artificial System*. Ann. Arbor, University of Michigan Press, 1975. 173
- 9 Holland J H, Holyoak K J, Nisbett R E, et al. *Induction, Processes of Inference, Learning, and Discovery*. Cambridge, MA, MIT Press, 1986. 286
- 10 Coveney P and Highfield R. *Frontiers of Complexity, the Search for Order in a Chaotic World*. New York, Fawcett Columbia, 1995. 462
- 11 Beardwood J, Halton J H and Hammersley J M. The shortest path through many points. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 1955, 55, 299~327
- 12 Ray T S. Is it alive, or is it GA? In: *Proc. of the 1991 International Conference on Genetic algorithms* (eds. Belew, RK, and L. B. Booker). San Mateo, CA, Morgan Kaufmann, 1991. 527~534
- 13 Ray T S. Population dynamics of digital organism. In: *Artificial Life II Video Proc.* Langton, C. G. ed. Redwood City, Ca, Addison Wesley, 1991
- 14 Ray T S. Evolution ecology and optimization of digital organisms. *Santa Fe Institute Working Paper*, 92-08-042. 1992. 44
- 15 Pagels H. *The Dreams of Reason, the Computer and the Rise of Complexity*. New York, Simon and Schuster, 1988. 286
- 16 Kauffman S A. *At Home in the Universe, the Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. New York, Ox-

- ford University Press, 1995. 405
- 17 Kauffman S A. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press, 1993. 303
- 18 Bak P and Chen K. Self-Organization criticality. *Scientific America*, 1991, 46~54
- 19 Eigen M and R W, Oswatitsh R W *Steps Toward Life: A Perspective on Evolution*. New York: Oxford University Press, 1992. 278
- 20 张知彬. 序能与生命结构. 《能量生态学》, 王祖望主编. 长春, 吉林科学技术出版社, 1991. 308
- 21 Lovelock, J. E. *Gaea*. Oxford: Oxford University Press. 1979, 157
- 22 洪星华, 沈小峰. 普里高津与耗散结构. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982. 407
- 23 尼科里斯 普里高津. 非平衡系统的自组织. 徐锡申等译. 北京: 科学出版社, 1991. 592
- 24 Nicolis G and Prigogine, I. *Exploring Complexity*. New York: Freeman. 1986. 316
- 25 奥德姆, H. T. 系统生态学. 蒋有绪, 徐德应等译. 北京: 科学出版社, 1993. 772
- 26 Lotka A J. Contribution to the energetics of evolution, *Proc. Natl Acad. Sci.*, 1922, 8: 151~154
- 27 Prigogine I and Wiaume J M. Biologie et thermodynamique des phenomeuse irreversibles. *Experimenta*, 1946, 2, 451~453
- 28 Kay J J. *Self-organization in Living System*, PH. D. thesis, Systems Design Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1984. 458
- 29 Kay J J, Schneider E D. Thermodynamics and Measures of Ecosystem Integrity. 159~183. In: *Ecological Indicators*, Vol. 1 (eds. Mckenzie D H, Hyatt D E, McDonald V J). Proc. of the International Symposium on Ecological Indicators, Fort Lauderdale, Florida, Elsevier. 1992. 502
- 30 Horgan J. From complexity to perplexity. *Scientific America*, 1995, 104~109

书 讯

小流域综合治理监测与评估

李忠魁博士根据十几年研究黄土高原综合治理的实践, 结合攻读流域治理博士学位和做博士后研究的科研成果, 通过分析国内外研究现状和小流域的自然、经济和社会条件, 提出了小流域治理的全方位监测项目体系、监测程序及相应的具有很强可操作性的监测方法。根据监测结果, 建立了小流域自然灾害、水土流失、水土保持措施减沙效益, 产业结构优化、种植业收入组成、农林牧业生产潜力等预测、优化分析模型, 研究成果具有较高理论和实践价值。在科学分析小流域治理内涵的基础上, 对小流域治理的生态、经济和社会效益及人口生活质量效应做了定量化评价, 提出并建立了包括生产力、稳定性、持续性和均衡性四类参数的小流域系统评估指示体系和计算方法, 以全新的思路评价小流域治理效益。最后, 应用能量学原理对小流域治理的投入、产出、结构优化等作了系统性、综合性和定量化分析, 其结果为小流域治理规划, 效益评价等提供了可靠保证。

本书的出版(西安地图出版)得到中国博士后科学研究基金的资助, 全书22万多字, 可读性强, 理论与实践相结合, 可供水土保持、区域治理、生态农(林)业等领域研究工作的科研人员、大专院校师生和管理干部参考。

本书印数有限, 欲购从速, 每本定价15.00元, 另加邮费2元。

联系人: 魏明霞

地 址: 陕西省杨陵区中国科学院水土保持研究所

邮 编: 712100