

耗散结构与生态系统*

程 宏

(土化系)

提 要

耗散结构理论从广义热力学的概念出发,论证了开放系统与外界环境进行物质和能量交换产生负熵流的数学形式,解释了非平衡系统通过自组织过程产生新的有序结构的条件。本文介绍并应用这一理论简单讨论了生态系统的某些问题;生态系统与热力学系统类比,生态系统的涨落与自组织,生态系统的有序过程,生态平衡,以及生态系统熵与信息。

耗散结构理论(Dissipative Structure Theory)是以比利时著名物理学家普里高津(I. Prigogine)为代表的布鲁塞尔学派于1969年提出的。该理论从广义热力学的概念出发,论证了开放系统与外界环境进行物质和能量交换产生负熵流(Negative Entropy Flow)的数学形式,解释了非平衡系统通过自组织(Self-organization)过程产生新的有序结构的条件,并以数学分支点理论描述了演化的一般模式。本文试图应用耗散结构理论的思想初步探讨生态系统的某些问题。

一、耗散结构理论

(一) 理论来源

作为微观世界和现实世界之间桥梁的统计力学有两个主要分支:平衡的与非平衡的。在平衡统计力学的研究中,吉布斯理论(Gibbs' Formalism)已将来自微观的哈密顿原理(Hamiltonian Principle)完美地应用于所有宏观系统的平衡特性。相比之下,非平衡统计力学就显得不够完善,以往的任何定理都无法准确地用来解释在宏观系统中观察到的大量非平衡现象^[1,2]。多年来,普里高津等一直致力于这一研究领域。

人们一般认为,倘若系统原来处于一种混乱无序的状态,不可能在非平衡条件下形成稳定有序的结构。而在现实世界中,却有大量事实证明这是可能的——天体演化,太阳系形成,生命起源,生物圈进化。对此,早在1943年奥地利著名理论物理学家埃尔温·薛定谔(Erwin Schrodinger)曾应用热力学和量子力学理论解释生命的本质,他把从环境中引进的“有序”称为“负熵”,并把玻尔兹曼方程式改写为:

* 本文承蒙庞雄飞、薛德榕教授审阅并提出修改意见,在此表示感谢。

$$\text{负熵} = K \log (1/D) \dots\dots\dots (1)$$

然而，由于当时他缺少严密的理论推导或科学的实验论证，因此关于负熵的说法，遭到了物理学界的怀疑和反对〔7〕。

普里高津以气体化学反作用为实验手段，进行了多年研究。1945年，他提出熵流的概念，将热力学第二定律推广到开放系统〔13〕：

$$dS = deS + diS \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi = \frac{deS}{dt} = T^{-1} \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

$$P = \frac{diS}{dt} = T^{-1} \frac{dQ'}{dt} \geq 0 \dots\dots\dots (4)$$

在实验中，他发现“不平衡是有序之源”，并以此作为布鲁塞尔学派研究的出发点〔18〕。1969年，他系统地提出耗散结构理论。普里高津认为：一个远离平衡的开放系统，在外界条件变化达到某一特定阈值时，系统通过不断地与外界环境交换能量和物质，其要素自动产生一种自组织现象，形成一种互相协同的作用，从而可能从原来的无序状态转变为一种时间、空间或功能的有序结构。这种非平衡态下的新的有序结构，称为耗散结构。

耗散结构理论的建立，使热力学第二定律有了更加完整的解释，揭示了物理学和生物学系统中的自组织问题，对研究现实世界各种进化过程奠定了理论基础。七十年代以来，耗散结构理论和哈肯（Haken）学派的协同学（Synergetics）被广泛地移植到其它非物理学科，逐步形成了非平衡系统理论。

（二）耗散结构的特点

第一，耗散结构发生在远离平衡状态的开放系统中，它要靠外界不断提供能量或物质才能维持（开放性）；

第二，只有当控制参数达到一定阈值时，才能突然出现（突变性）；

第三，它具有时空结构，对称性低于达到阈值前的状态（低对称性）。

第四，耗散结构虽然是旧状态不稳定的产物，但它一旦产生，就具有相当的稳定性，不被任何小的扰动所破坏（高稳定性）。

这四个特点中，第一个最为重要，这也是耗散结构理论的本质所在，因为另外三个特点与平衡状态的情形是基本一致的。

二、应用耗散结构理论研究生态问题

虽然耗散结构理论是建立在大量物理学、化学实验基础之上，属于物理化学的理论范畴，但是由于自然界的客观事物及其运动存在着惊人的相似性，因此在揭示这些事物及其运动的原理、定律或方法上也存在着某种意义的同构现象。这样，在某一特殊学科中发现的客观规律可以抽象提炼为一般的原理或规律而为其它学科应用。非平衡热力学的理论如耗散结构理论，同样可以应用于生态学的研究，因为生态系统与热力学系统在

很多方面十分相似。耗散结构理论在生态系统研究中的应用,将会进一步完善生态系统的理论。

本节试图从“生态系统与热力学系统类比”、“生态系统的涨落与自组织”、“生态系统的有序过程”、“生态平衡”以及“生态系统熵与信息”几个方面进行粗浅的讨论。

(一) 生态系统与热力学系统类比

生态系统是一个开放的多层次的非平衡系统,尽管它与热力学系统在很多方面是千差万别的,但是它们却在运动形式等方面有明显的相似性(表1)。生态系统是一个远比热力学系统复杂的大系统,仅从系统层次来看——小至基因大到整个生物圈——就可见其复杂程度。表1所列只是这两个系统的个别特征。更深入的研究表明它们的某些数学模型也具有相似的形式^[12]。

(二) 生态系统的涨落与自组织

涨落是一个物理学术语,意思通常指某些量在其平均值或大概率值附近的振动。在生态系统的无序状态下,系统的局部单元存在着某种微小的涨落,由于其数量巨大,所以总体涨落的幅度并不大(相互抵消作用),因而也不能破坏宏观的状态。但是当外界条件(例如:种群密度、种间相互作用、食物链营养级间的量比关系等)达到某一极限时,其系统内的涨落就会被“放大”,使系统状态发生改变。涨落现象对于自组织过程之所以重要,就在于它在一定条件下会破坏原有状态,使原有状态出现某种对称破缺(Symmetry Breaking),以便形成新的有序状态。这个过程就是耗散结构理论的基本思想之一。

实际上,正象普里高津等曾指出的^{[13][14]},耗散结构在热力学理论中的发展,不过是七十多年前洛特卡(Lotka)理论的再发现。洛特卡在1910年研究自动催化作用时,以及沃尔泰拉(Volterra)在1926年研究亚德里亚海鱼类捕食寄生关系时分别发现了Lotka-volterra模型。这个模型在生态系统中描述了种群间相互作用通过涨落形成自组织的过程。它表述为:

两个种群相互作用时:

$$dN_1/dt = a_1 N_1 - b_1 N_1 N_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$dN_2/dt = -a_2 N_2 + b_2 N_1 N_2 \dots\dots\dots (6)$$

按照现代控制论的观点,这个模型表示了一个自动反馈调节过程。可见,负反馈对生态系统的自组织、对生态平衡有着十分重要的意义。曼福里德·埃根(Manfred Eigen)应用耗散结构理论研究了达尔文的自然选择系统,并得出了精确的数学型式^[12],对此恕不赘述。

表1 生态系统与热力学系统的相似性比较

系统 类比项目	热力学系统	生态系统
运 动	分子运动	个体运动
扩 散	分子扩散	种群散布
密 度	分子密度	种群密度
涨 落	涨 落	种群变动
相互作用	碰 撞	竞 争
熵	分子运动无序性度量	系统无序性度量
耗散结构特征	互相密合行为	自 组 织

(三) 生态系统的有序过程

生态系统的有序过程不仅受到系统内部自动反馈的调节,而且越来越多地受到人为因素有意或无意的影响。幸好耗散结构理论给出了关于开放系统熵的一般模型(公式2),使我们能够用简炼的语言讨论这一问题。公式2也可以用图来表示(图1):

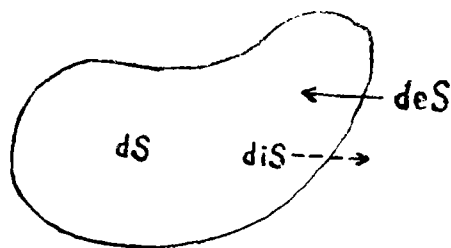


图1 开放系统的熵流(deS)和熵产生(diS)

生态系统熵的总变化取决于熵流和熵产生。由热力学第二定律可知,熵产生永远是正的($diS \geq 0$)。因此,生态系统的有序程度实际上取决于熵流的性质与数量。熵流在数值上可正可负可为零。

如果满足: $deS < 0$ (7)

且 $|deS| > diS$ (8)

则 $dS = deS + diS < 0$ (9)

这时生态系统的总熵(S)逐渐减小,系统由无序趋向有序。若系统形成有序之后。

满足: $deS = -diS$ (10)

则 $dS = 0$ (11)

系统可维持一个低熵的非平衡稳定有序结构。因此,负熵流对于开放系统形成耗散结构是充分必要条件。

生态系统最重要的负熵流是太阳能,它使得生命有机体经历同化过程——新陈代谢,避免了向惰性平衡态的衰退,进而向顶极群落演化。然而,工业污染、滥施农药、乱砍乱伐、阻塞鱼道等等,却是人类输入生态系统的正熵流,这是生态系统有序的最大威胁。

(四) 生态平衡

国内现今大量生态学文献中,对“生态平衡”有各种不同的解释^{〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕}。但是归纳起来大致有三层意义:

1. 系统的稳定性高(即结构、功能、数量或变化等方面的稳定),趋向顶极演替。
2. 输入等于输出。
3. 系统组分生成等于消耗。

戈尔(N. S. Goel)等人在研究生态系统的多样性与稳定性之间关系时,对稳定性也从三个层次加以概括^{〔10〕}:

1. 地文稳定性——任一特殊地理区域的稳定性;
2. 区域和全球种群数量的稳定性;
3. 濒临灭绝的稀有种群个体数量的稳定性。

这些表述既从不同角度揭示了生态系统平衡的特殊性又彼此互相紧密联系。在前面的三个表述中,第三条强调系统物质平衡,第二条强调系统能量平衡,而第一条强调系

统有序性（这恰好是客观世界的三大基本要素：物质、能量和信息！）在生态系统中，物质和能量平衡与否可以从系统信息中反映出来。因此，生态平衡问题可以通过研究生态系统的有序性来解决。

维纳（N. Wiener）认为，“信息量的概念非常自然地隶属于统计力学的一个古典概念——熵。正如一个系统中的信息量是它的组织化程度的度量，一个系统的熵就是它的无组织程度的度量；这一个正好是那一个的负数。”〔8〕有了这个关系，我们就可以应用耗散结构理论的开放系统熵讨论生态平衡了。

假设生态系统形成有序结构时称为演替顶极（Climax），此时生态系统的熵达到最小，即 $S_c = 0$ ；而当生态系统完全无序时称为原始生境（Original Biotope），此时生态系统的熵趋向极大，即 $S_o \rightarrow \infty$ 。这样在无序和有序之间一定还存在过渡状态。根据系统熵现值（S）和系统熵变率（ dS/dt ），可将生态系统的有序程度定义如表2，S与 dS/dt 的关系可表示为：

$$S' = S (1 + dS/dt) \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{即, } \frac{dS}{dt} = \frac{S' - S}{S} \dots\dots\dots (13)$$

式中的 S' 为系统熵未来值。

表中 $P \rightarrow c$ 表示生态系统趋向演替顶极的过渡状态， $P \rightarrow o$ 表示趋向原始生境的过渡状态。无疑，大多数生态系统都是处于 $P \rightarrow c$ 或 $P \rightarrow o$ 状态。至于，如何确定生态平衡与否，可应用数值分类或排序方法依照系统状态参量（S和 dS/dt ）进行分级估定。

（五）生态系统熵与信息

上节我们曾提及熵与信息的关系，现在的问题是用什么手段度量生态系统的熵或信息，即熵或信息的具体生态学意义是什么。

按照信息论的观点，系统的熵定义为〔1〕：

$$H(P_1, P_2, \dots, P_n) = - \sum_{i=1}^n P_i \log p_i \dots\dots\dots (14)$$

将公式（1）与（14）进行对比是很有意义的。六十年代以来，在关于多样性和稳定性之间关系研究也出现了“文献爆炸”〔1〕，其中不少学者都使用了这个公式作为生态多样性的测度〔8〕。

当 n_i 为对每一个种的重要值， N 为总的重要值， P_i 为每一个种可能重要性（ $P_i = n_i/N$ ）时，公式（14）就成为一般多样性指标了〔8〕：

表2 生态系统的有序程度及状态

参量 状态	S	ds/dt
P_c	$S_c = 0$	0
$P \rightarrow c$	$0 < S \rightarrow c < S_o$	≤ 0
$P \rightarrow o$	$0 < S \rightarrow o < S_o$	≥ 0
P_o	$S_o \rightarrow \infty$	> 0

$$H = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \log \left(\frac{n_i}{N} \right) \dots\dots\dots (15)$$

从抽象的数学意义来看,熵和信息是等价的,这不仅对确定生态系统的有序性有直接意义,而且对研究系统中的信息传递也给我们提供了一个有力的工具。

参 考 文 献

- [1] 小林龙一著、何文杰译:《运筹学概论》,201—207,国防工业出版社,1985年。
- [2] 牛文元:《农业自然条件分析》,280,农业出版社,1981年。
- [3] 皮洛(Pielou, E.C.)著,卢泽愚译:《数学生态学引论》,237—247,科学出版社,1978年。
- [4] 沃尔特(Walter, H.)著:《世界植被》,1,科学出版社,1984年。
- [5] 武吉华、张绅:《植物地理学》,273,人民教育出版社,1979年。
- [6] 侯学煜:《生态学与大农业发展》,31,安徽科学技术出版社,1984年。
- [7] 埃尔温·薛定谔(Schrodinger, E.):《生命是什么?》,81,上海人民出版社,1973年。
- [8] 维纳(Wiener, N.)著,郝季仁译:《控制论》,11,科学出版社,1985年。
- [9] 奥德姆(Odum, E.P.)著,孙儒泳等译:《生态学基础》,37—81,147,人民教育出版社,1981年。
- [10] Goel, N.S. and so on: Nonlinear Models of Interacting
- [11] Nicolis, G., and Prigogine, I.: Self-organization in Nonequilibrium System, John Wiley & Sons, Inc., 1977. Population, Academic Press, U.S.A., 1971.
- [12] Reichl, L.E.: A Modern Course In Statistical Physics, Univ. of Texas Press, Austin, 1980, 621—55.
- [13] Rita, G.L. and George, L.T.: Encyclopedia of Physics, Addison-Wesley Publishing Com. Inc, 1982, 1029—34.
- [14] Stuart, A.R.: Advances in Chemical Physics, Vol.38, 1978, 221—450.

ON THE DISSIPATIVE STRUCTURE IN ECOSYSTEM

Cheng Hong

(Department of Soil & Agrochemistry)

ABSTRACT

In this paper the dissipative structure theory, which is an accomplishment up to date in modern chemistry-physics, is introduced and applied to discussing some topics in ecosystem.

There can occur spontaneously a self-organization phenomenon in an open system under far-from-equilibrium conditions by exchanging energy and material with outside world, and there will be a synergy among all subsystems, then the system becomes more orderly than the old states. Such organized situations have been named dissipative structures by I. Prigogine.

Many of the ideas of nonlinear chemistry and nonequilibrium thermodynamics can be applied to population dynamics and ecological systems because, much like these systems, individuals continually interact and are changed by their interactions, thus causing dynamical evolution of the population.

Moreover, the fluctuation and self-organization, the ordering process, the ecological equilibrium, and the entropy and information in ecosystem are simply discussed.