

城市人地系统的协调发展与系统模式识别*

Compatible Development of Urban Human-Geoenvironment System and Model Identification

谭卓英

王思敬**

吴恒***

Tan Zhuoying

Wang Sijing

Wu Heng

(广西大学资源与环境学院 南宁市西乡塘路 10号 530004)

(College of Resources & Environment, Guangxi University,

10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要 基于耗散结构理论,对城市人地系统的特征及协调发展的机制进行了分析,认为城市可持续发展的最佳值域是城市经济、地质环境与资金技术间的交互域;提出系统熵的概念及系统熵的数学表达,扩展了熵流理论,建立了城市系统协调发展的拓扑关系和城市系统识别模式。

关键词 城市 可持续发展 系统熵 模式识别

中图法分类号 F 290

Abstract The characteristics and compatible development mechanism of urban human-geoenvironment system are analysed based on the disperse structure theory. The optimum field for urban sustainable development is the mutual intercourse field of urban economy, geoenvironment and its capital-technologies. The system entropy concept and its math express are brought forward. The Tuopu relationships and its identification model as well as its extended entropy are established.

Key words urban, sustainable development, system entropy, model identification

1 城市人地系统的特征

城市系统是一个特殊的区域发展系统。表现在:

- (1) 城市具有一定的地域空间和发展轨迹,是一种典型的地球村落或社区单元,具有特定的政治、经济和文化特征,是自然、经济及社会的有机整体;
- (2) 城市区域的国土面积小于通常的以地区、国家及省的行政区域或以自然流域及气候分异等划分的区域面积,地貌单元简单;
- (3) 在较小的自然土地面积上集聚了地球相当大一部分的人口,人口高度集中;
- (4) 城市是工程经济活动最为强烈的区域。在城市区域集中了大部分的工业、商业、服务业及新兴产业,在人地关系中最活跃的因素是土地的工程利用和地下水开采,并由此而形成不同于原生地质环境的次生地质环境。
- (5) 城市系统对环境的影响最大。伴随着城市工程经

济活动的发生和发展,城市化进程不断深入,城市经济在国民经济中的比重越来越大,环境副产也越来越多。由于量大且集中排放,造成对环境的巨大影响。这种影响最终通过全球物理气候系统和全球生物化学循环进一步影响全球环境,形成对人类发展的制约。

城市系统是一个开放复杂巨系统,具有整体性、层次性、开放性和时空动态性的特点。在城市复杂巨系统中,自然系统是基础,社会系统是发展的目标。其中,经济子系统是社会人文发展的前提和依托,在人文子系统中,一个国家或地区的政治、文化、宗教及传统习俗都将影响到经济子系统的发展,对经济子系统的发展模式、结构及规模具有控制力,而经济子系统既依赖于自然子系统提供的各种资源,又通过经济活动中资源的开发利用形成对自然系统的影响即环境压力;城市系统的发展过程是自然生态系统的演替和城市有组织的社会、经济及文化活动的相互耦合过程。现代区域发展研究表明^[1],区域发展的过程可用 Logistic 曲线来描述。

城市系统是一个耗散结构的系统。非平衡自组织理论-耗散结构理论(普利高津,1967)认为^[2],一个

1999-12-21收稿

* 中国科学院生态与环境项目资助

** 中国科学院地质研究所,北京,100029(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)

*** 广西大学土木工程学院,南宁,530004(College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

系统形成耗散结构的条件是：(1) 开放系统。热力学第二定律揭示，对于一个孤立系统而言，熵随时间增大，熵达到极大值，系统达到最无序的平衡态，不会出现耗散结构。对于开放系统而言，在开放条件下，系统的熵由 dS 和 dS 组成，热力学第二定律只要求熵产生非负， $dS > 0$ ，然而，对外界给系统不断注入的熵流则没有确定的要求， dS 可大于、等于或小于 0。在 dS 小于 0 的情况下，只要该负熵流足够强，它除了抵消系统内部的熵增 dS 外，还能使系统的总熵 dS 减少，从而使系统进入相对有序的状态。显然，对于开放系统来说，系统通过自发的对称性破缺从无序进入有序的耗散结构状态，与热力学第二定律是一致的。但是，如果外界注入系统的是正熵流，系统不仅不能形成有序的耗散结构，反而会更趋混乱。可见，对于开放系统，只有当其与外界存在物质、能量和信息的交换时，系统才可能走向有序。(2) 远离平衡态。开放系统是形成耗散结构的必要条件，但非充分条件。耗散结构理论从许多物理、化学及生物的研究表明，系统在平衡态和近平衡态（线性区）时，总是趋于无序。所以，出现耗散结构的另一重要条件是外界必须驱动开放系统超出非平衡线性区，达到远离平衡态的区域。(3) 突变现状。耗散结构总是通过某种突变过程出现的，即伴随着临界值或阈值的存在。(4) 正反馈。正反馈是一种自我复制、自我放大的机制。热力学分支的失稳为产生耗散结构提供了条件，而正反馈不仅造成热力学分支的失稳，还是“序”产生的重要因素。(5) 非线性。产生稳定的耗散结构分支在热力学分支失稳的基础上，使系统重新稳定到新的耗散结构分支上的是非线性项完成的^[2]。在社会生态系统中，这个非线性项正是饱和项。普利高津指出：对于远离其平衡态的开放的复杂巨系统，在一定的控制条件下，由于系统内部非线性的相互作用，通过涨落可以形成稳定有序的结构^[3]。即系统有可能通过与外界的能量与物质交换，形成一定的新的有序结构。这一理论在解释开放的热力学系统的演化规律时取得了巨大的成功，但它是否也适用于社会经济系统？

普利高津学派及其后来者经过长期探索和应用，认为耗散结构这一自然科学理论同样适用于社会系统^[2]。地球表层系统的进化研究也说明，地球表层、自然地理系统、生态系统和社会系统有着发生学上的联系，是同源的，是耗散结构^[4,5]。城市是一个社会系统，它同样是一种耗散结构，符合系统形成耗散结构的条件。主要表现在：(1) 城市系统是一个开放的复杂巨系统。它包含人口、基础设施、经济、市政管理等各种子系统，是非常复杂的系统。从它与外界环境的关

系来看，开放亦是城市系统的重要特征。城市发展需要从环境获取原料，城市生产的产品也不断向外输出。城市就是在不断地输入原材料等资源和输出产品的过程中，促使工业发展和经济繁荣。没有这种交换，就没有城市的发展。城市的开放性表现为城市系统与社会环境及自然环境的交流。一方面，城市系统维持人群的生存，需要从自然界吸取空气、水、阳光及其他必需的养分。同时，向自然界排放各种废物。另一方面，城市要发展，也需要不断与外界社会环境进行物质、能量和信息的交换，需不断从外界引进人才、技术、资金，进行各种经济、社会与文化交流。从城市形成和发展的历史来看，城市是商品交换扩大化的结果，商贸业在城市发展中有着极其重要的作用。从前面的分析可知，一个开放系统既可以从外界获得负熵流，也可以获得正熵流。正熵流不仅不会使系统形成耗散结构，相反，会加速系统无序化的进程。这里，需要输入给系统的是使系统由低级向高级、由无序向有序进化的负熵流，使系统内部的总熵流消抵和降低，加快系统自组织的进程；如何在开放系统的条件下，引进负熵流，过滤正熵流，是控制系统开放的关键。(2) 远离平衡态的城市系统才能发展。在耗散结构理论中，平衡态是指孤立系统保持相当长时间以后形成的一种静止状态，整个系统呈现出均匀、单一的特点，是混乱无序的状态。这与社会经济系统中的平衡概念是不同的^[2]。如生态平衡，指的是形成生态循环各个物种之间一种有确定比例的分布。这种分布虽不随时间变化，但各种生物之间有确定的空间分布，并依靠与外界环境的联系来维持这种平衡，形成一种稳定有序的结构。经济平衡也一样，经济发展有一定比例，收支合理，各部门生产比例适当，与环境协调，且该比例基本不随时间变化。这样的平衡具有状态分布不变的特点，在物理学上称为稳定态。显然，在孤立系统中的稳定态必然是混乱无序的平衡态，而开放系统则不同，它通过与外界物质、能量及信息的交换，可以形成稳定有序的结构。达到稳定有序状态是社会系统演化的目的，要达到此种稳定状态，就必须打破僵死的平衡，打破无序使系统处于远离平衡的非平衡态。(3) 城市系统内部存在着复杂的非线性作用。城市系统和其他物质、生态及社会系统一样，各要素之间存在着复杂的非线性作用。各要素之间不是简单的线性依赖关系，而是既存在正反馈的倍增效应，也存在着限制增长的饱和效应，即负反馈。在城市系统中，如人口与企业及产品之间存在正反馈，而与资源及环境之间存在着负反馈。这说明，系统内复杂的非线性作用与正、负熵流一样，既可以产生协同效应，使系

统形成良性循环,推动城市向有序化发展;也可能产生消极效应,相互牵制,形成恶性循环,甚至导致原来的有序结构消失,使系统后退到混乱无序的平衡态。如果系统中各子系统之间互相配合,协同作用,系统将在原来的结构和功能上进化,进入更高级有序的状态;相反,若各子系统彼此不协调,互相牵制,就会产生副作用;此时,即使引进负熵流,也不可能消化吸收,因为各种作用可能相互抵消,达不到协同进步。(4)城市系统也存在涨落。城市系统同其它系统一样,也是由许多子系统组成的,子系统又由许多要素或参量组成,而参量存在涨落,它决定子系统的状态是不断改变的。因此,整个系统的状态也随着发生改变。这也就是说,系统的涨落必然存在。但涨落在不同情况下,所起的作用不同。在城市系统处于稳定态时,涨落的作用是微不足道的;当系统处于临界点时,涨落所起的作用非常重要。这时,系统在临界点附近可能形成不同类型的耗散结构和有序状态。在临界点附近,系统通过涨落一般会产生层次飞跃,城市得到迅速发展。通常,显著的涨落与自然及社会环境的突变有关,如自然灾害、战争及国家的发展规划及政策、社会稳定性以及地区与国际环境,对城市发展速度、方向乃至规模都有影响。

2 城市系统的协调有序循环是城市可持续发展的重要机制

由上面的分析可知,城市系统是一个开放的耗散结构,要使城市社会系统与自然系统协调发展,则(1)需要不断从系统外界引入负的熵流,实现系统总的熵减;负熵流是使系统趋于稳定有序和层次跃迁的催化剂。(2)系统内部各子系统之间及子系统各要素之间的非线性作用应产生协同效应。由于城市内部的非线性作用以及系统与外界之间有充分的物质、能量和信息的交换,城市系统处于非平衡状态,实际上是处于一个较远离平衡的状态。城市系统远离平衡态,体现为促进城市内各种流动的“力”,如人口密度不均、三次产业结构不合理、城市功能区布局不完善、资源欠缺、环境问题突出等,与人口流、生产流和消费流之间的关系是非线性的。城市是一个多重结构体,包含有人口结构、三次产业的经济结构、生产和消费的能源结构、各种资源结构(如水、土地利用及各种原材料等);有工业区、商业服务区、居住区及公园休闲区等不同的功能区,物质、能量及信息无时不在这些结构中流通。显然,城市的发展是一种远离平衡的稳定有序结构,它要依靠外界的物质、能量和信息的输入来维持其有序的稳定状态。而要维持城市

的协调可持续发展,就必须使城市发展系统与资源环境及技术经济之间保持负熵流的流动。

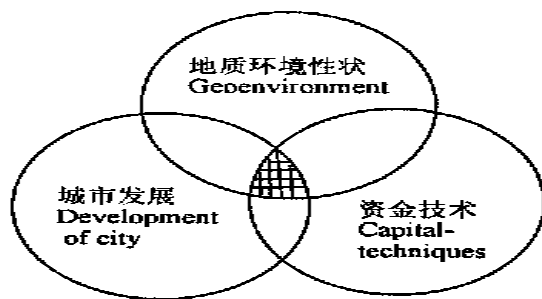


图 1 城市可持续发展的最佳值域

Fig. 1 The optimum field of urban sustainable development

城市地质环境系统是城市可持续发展分析的基础,城市发展中工程经济活动与地质环境相互作用的关系是人-地系统中最基本的关系,技术与资金是可持续发展的重要保证。在城市发展过程中,一方面,人类向地质环境索取地质资源(物质与能量)和生存空间,并通过各种生产及消费活动扰动地质环境;索取各种资源量的大小与扰动的程度,与经济实力及技术手段有关。另一方面,地质环境的性状决定城市自然生态系统的基本特征,对城市形态及其发展存在制约,并在一定状态下,对城市发展产生负反馈;人类克服这种制约的能力又受技术和资金限制。先进的技术和雄厚的资金不仅可以使地质环境对人类工程经济活动的限制减到最低,而且可以将生产和消费活动对环境的影响缩到最小。资金与技术在一程度上能提高人类对地质环境的适应能力,缩小对环境的影响,改善发展的质量。然而,技术受人类认识发展水平的限制,资金受经济的制约,因此,在一定时期,城市发展的规模、水平和速度必须与当时的技术和资金相适应。城市发展、地质环境的性状、资金与技术三者叠加的交汇部位是城市发展与地质环境系统相互作用的最佳值域(图 1)。这一值域是动态的,与城市发展方式、索取的多少、资金的雄厚程度、技术的先进程度等有关。

3 城市人-地系统模式识别

从以上的分析可知,在城市系统中,城市发展与地质环境及技术资金之间的协调发展,是系统可持续发展的前提。根据图 1,假设城市发展、地质环境及技术资金三者的状态参量为 $S_i (i=1, 2, 3)$, 其间的影响系数为 $a_{ij} (i, j=1, 2, 3)$, 则系统相互作用的拓扑关系如图 2。对于这样的城市系统,是否稳定有序,能否与自然协调、可持续发展? 需要建立一个判别的标

准以辨识系统的状态

本世纪以来,对远离平衡态、自组织和具有反馈特征的复杂开放巨系统的研究,涌现了各种系统理论(如新老“三论”)学派。其中,除普利高津的布鲁塞尔学派外,美国麻省理工学院(MIT)的系统动力学学派(Forrester, Jay W., 1956)研究的对象也是处于远离平衡的非线性状态的开放系统。它认为系统内部单元之间相互作用形成一定的结构,并按照一定的规律发展演化^[6]。但系统动力学着重研究同一结构下系统的动力学行为和不同结构之间的进化,较少涉及系统从无序到有序的演化过程。按照系统动力学的观点,在系统内部,存在一个或几个灵敏参量或变量,它们对外界的扰动与内部的涨落反应十分敏感和强烈。它强调了系统中敏感性因素的作用。后来,德国斯图加特大学的哈肯学派(Haken, H. 1978),提出的协同论,亦与自组织理论同源,认为系统的演化存在两种相反的趋势,可能从混沌无序的状态演化成稳定有序的结构,也可能从有序结构变为无序状态或再变迁为新的有序结构。维持稳定有序的结构必须要求一个系统与外界有能量及物质交换,必须位于远离平衡态,并要求系统内部各单元之间存在着非线性的相互作用。在协同论中,把引起系统巨变的因素称为涨落,在一个系统中必然存在许多引起涨落的参量,一旦系统处于临界状态,涨落可能引起很大反响。这种反响最初是在系统小范围内出现,最后涉及整个系统,使系统由有序变为无序或由旧的结构变为新的结构^[7]。但协同学研究的主要是新旧结构的演化即系统的非平衡相变。强调的是系统结构的作用。

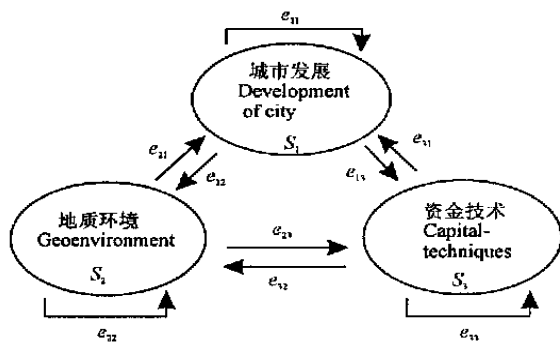


图 2 城市系统相互作用的拓扑关系

Fig. 2 The Tuopu diagram of an urban system

显然,从以上系统学观点来辨识系统有其内在的统一性。从定性的角度,需要确定(1)系统结构间的合理性即协同性;(2)系统结构间物质、能量和信息流通的规律;(3)系统与外界环境间的协同关系。由此,需要判断输入-输出熵流的极性,只有负熵流有利于系统的稳定有序和层次跃迁。如城市产业结构的

调整,加工链长短的伸缩,技术资金及人才的引进与输出,原材料或成品的流通等都伴随着物质、能量和信息的流通。若是促进系统各子系统的协调有序发展,使系统整体结构优化和功能增强,则向系统输入的就是负熵流;相反,则是正熵流。总之,外界对系统的输入或系统内子系统甲向子系统乙的输入,能促进城市社会经济与资源环境的协调平衡发展,则是负熵流。从定量的角度,需计算耗散结构系统总熵的变化。但是,从热力学的角度来解释社会经济系统的演化规律,受系统复杂性及不确定性的影响而存在一定的困难。首先,熵函数的波尔兹曼公式是从气体膨胀与气体混合过程中,由热力学第二定律推导出来的,是统计概念的热力学函数^[8]。从热力学的角度计算城市系统的构型数或微观状态数(m)十分困难。其次,根据定位排列即可别粒子的假设来确定系统的微观状态数。这意味着等同看待粒子所占用的空间,忽视了粒子间(双原子分子或多原子固体)的交叉或叠置影响,把粒子作为孤立的要素;实际上,也同等地看待了粒子间的非线性作用。再有,在量子统计理论中,将粒子的定位排列扩展到了非定位排列,其构型数的确定是以物理学中能级的划分为基础的。但是,城市系统中的各要素并不是彼此孤立地在系统中作排列组合,而是有着有机的联系。不仅如此,各要素对子系统及系统结构、功能的影响程度也是不同的,即不同的要素在系统中有不同的作用和地位(权重)。因此,各要素在决定系统状态中的作用不同。而对于决定社会系统稳定有序和层次跃迁的能量轨道的认识还存在很大的局限性。可见,波尔兹曼统计熵函数不能直接应用于社会系统。目前,尽管有人在概念上拓展了热力学统计熵的外延,提出了广义熵(Extensive Entropy)的概念^[9,10],但无定量算法。实际上,广义熵最先源于控制论(Vanna, 19)和信息论(C. E. Shannon, 1948),用于描述任何一种物质运动方式的无序度,它的对立面就是负熵或信息量,是系统组织结构复杂度或有序度的表示。因此,广义熵可以理解为一事物运动状态或存在状态的不确定性的度量,可用于描述非分子热运动的其它任何物质运动方式、系统或任何事物的无序度。显然,广义熵的概念比热力学熵的概念要广,热力学熵寓于广义熵之中。

在对系统的状态及态势判断时,广义熵确是实用可靠的。如何确定广义熵?根据上述分析,不难发现,系统的状态是由系统中诸要素的非线性作用决定的,特别是其中的敏感性要素。这些要素就像系统的粒子一样,决定系统的微观状态数或构型数。利用熵函数的波尔兹曼公式^[8],系统熵 S 为:

$$S = k \ln m, \quad (1)$$

式中: k 为波尔兹曼常数; m 为系统的构型数或微观状态数。其中, 系统的构型数可参照量子统计学的有关方法确定

若系统由状态 1 变为状态 2, 在两种状态下的构型数分别为 m_1 和 m_2 , 则熵由 S_1 变为 S_2 , 则系统的熵变即熵的流动为 ΔS ,

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln \frac{m_2}{m_1}. \quad (2)$$

对于城市系统而言, 假设系统中所考察的因子数(包括利导因子和限制因子)为 N , 限制因子或敏感性因素的数目为 N_0 , 则决定系统有序状态的构型数由 N_0 在 N 中的排列组合确定。即:

$$m = \frac{C_N^{N_0} N!}{N_0! (N - N_0)!}. \quad (3)$$

又设系统内部产生的熵即系统直接产生的熵为 S_d , 由系统外输入的熵即系统间接产生的熵为 S , 则系统的总熵 S 为:

$$S = S_d + S. \quad (4)$$

于是, 熵的变化即熵流为:

$$dS = dS_d + dS. \quad (5)$$

由图 2 的拓扑关系得系统熵流方程为:

$$\begin{cases} S_1 = S_{d1} + e_{11} S_1 + e_{21} S_2 + e_{31} S_3, \\ S_2 = S_{d2} + e_{12} S_1 + e_{22} S_2 + e_{32} S_3, \\ S_3 = S_{d3} + e_{13} S_1 + e_{23} S_2 + e_{33} S_3, \end{cases} \quad (6)$$

以上的矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{d1} \\ S_{d2} \\ S_{d3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

即:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (I - E)^{-1} \begin{pmatrix} S_{d1} \\ S_{d2} \\ S_{d3} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

其中, E 是系统熵的传递系数矩阵, 反应系统间熵的流通, 由系统间物质、能量及信息的流通决定。在 e_{ij} 中, 当 $i = j$ 时, 表示子系统内部熵流的传递系数; 当 i

$\neq j$ 时, 则表示子系统间的熵流传递系数。传递系数矩阵用下式表示:

$$E = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{pmatrix}.$$

由此, 可建立系统稳定有序状态及态势的识别准则如下:

(1) 当系统总熵流 S 处于低势位时, 系统是稳定的; 当 $dS < 0$ 时, 系统的态势是趋于稳定和有序的, 系统的发展是可持续的。

(2) 当外界或系统间的熵流为负时, 则是使系统趋于稳定的流即负熵流, 是鼓励引入的项; 当熵流为非负, 即 $dS > 0$ 时, 则为促使系统熵增的项, 将使系统趋于混乱无序, 是应设法避免的。

参考文献

- 1 曹利军. 区域可持续发展轨迹及其度量. 中国人口·资源与环境, 1998, 8 (2): 46~49.
- 2 沈小峰, 胡岗, 姜璐. 耗散结构论. 上海: 上海人民出版社, 1987.
- 3 湛垦华, 沈小峰等. 普利高津与耗散结构理论. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982.
- 4 浦汉昕. 可持续发展与地球表层进化. 中国人口·资源与环境, 1994, (4).
- 5 仪垂祥, 史培军. 熵产生和自然灾害. 北京师范大学学报(自然科学版), 1994, 30 (2): 276~280.
- 6 Forrester Jay W. Urban Dynamics. Cambridge, Mass. The MIT Press, 1969.
- 7 Haken H. Synergetics—An Introduction. New York: Springer-Verlag, 1978.
- 8 尚仰震. 热力学系统熵. 成都: 四川科学技术出版社, 1988.
- 9 王立身. 耗散结构理论向何处去——广义进化与负熵. 北京: 人民出版社, 1989.
- 10 吕鸣伦, 刘卫国. 区域可持续发展的理论探讨. 地理研究, 1998, 17 (2): 131~137.

(责任编辑: 蒋汉明)