

# 城市化：相变与自组织临界性

陈彦光

(北京大学地理科学研究中心, 北京 100871)

**摘要：**城市化的本质是一种自组织临界相变过程，在时间和空间上分别联系着自组织临界性（SOC）和空间复杂性。城市化过程作为 SOC 有 3 个方面的标志：时间方向的  $1/f$  涨落、空间方面的分形结构和等级方式的  $Z_{pf}$  定律，其共性是无标度性。分形中心地景观和位序 - 规模分布分别是城市化自组织临界过程在空间和等级两个领域的实证判据。在城市化的临界相变过程中，城市体系通常演化为无标度网络，而位序 - 规模法则乃是空间领域的无标度性在等级领域的结构性“投影”。基于 SOC 思想研究城市化过程有助于理解自组织城市网络的复杂空间动力学，从而为发展城市演化的模拟实验方法提供理论思路。

**关 键 词：**自组织城市网络； $1/f$  涨落；分形； $Z_{pf}$  定律；位序 - 规模法则；中心地；无标度性；空间复杂性

**中图分类号：**F291.1；O184 **文章编号：**1000-0585(2004)03-0301-11

城市化过程实质上是一种自组织过程，城市演化、人口的城乡迁移都受到某种自组织规律的支配<sup>[1,2]</sup>。2000 年，以色列学者 Portugali 系统地总结了“自组织城市（self-organized city）”思想，有关思想受到德国著名科学家、协同学的创始人 Haken 的高度赞赏<sup>[3]</sup>。我们知道，开放系统的自组织演化到一定阶段必然发生某种相变，而临界相变是系统结构复杂化的特殊历程。在相变阶段，系统规律往往从“幕后”走向“前台”，新的模型和结构在此过程中突然出现<sup>[4]</sup>。近年来，城市化的相变思想逐渐引人注目，地理学者分别从不同的角度开展数学建模和计算机模拟分析<sup>[5,6]</sup>。城市系统的自组织临界性（self-organized criticality, SOC）涉及到空间复杂性问题，而“复杂性”乃是 21 世纪学术界共同关心的科学主题<sup>[4,7]</sup>。西方学者在城市的自组织过程、空间复杂性等领域开展了众多激动人心的研究工作，学术成果纷纷出现<sup>[3,8~10]</sup>。纵观西方地理界的 SOC 和空间复杂性研究，主要方法都是基于计算机模拟。计算机模拟本质上是一种实验程式，这种模拟实验具有很高的实用价值，它可以弥补地理研究“不可实验性”的先天不足。因此，城市系统演化（包括自组织与相变）的非线性模拟研究是国际城市地理学的热门课题和前沿方法。但是，模拟并不能帮助我们在概念这一更高层次上理解系统的行为规律<sup>[11]</sup>。因此，数学建模、理论分析以至经验性的定性探讨就能各显优长。

本文是一种概括性的理论探讨，旨在分析城市化过程的 SOC 标志和空间复杂性特征。文章逐步论证城市化与自组织、相变、自组织临界性、空间复杂性等思想、概念及其相互关系，依次提出城市化作为自组织临界过程的逻辑判据、实证判据和类比判据，并探讨自

收稿日期：2003-11-13；修订日期：2004-02-13

基金项目：美国 Urban China Research Network Small Grant Program 资助课题；国家自然科学基金重点资助项目 (40335051)

作者简介：陈彦光（1965-），河南罗山人，副教授。主要从事地理分形和地理系统的空间复杂性研究。

组织网络 (self-organized network) 与城市等级体系的联系机理。文章的主线和突破点在于自组织城市网络的标度不变性, 整个论述将围绕城市系统的无标度分布逐步展开。

# 1 城市化、自组织与相变

从系统论的观点来看, 城市化过程本质上是一种自组织临界相变过程。相变 (phase transition) 的原义是物态由于分子层次上的重新组织而发生的宏观变化。在系统科学中, 相变被引申为自组织过程中的某种状态的转变, 具体说来, 就是系统在演化过程中由于微观层次的重新组织而形成的宏观层次的状态变化。讨论相变, 自然涉及到自组织概念。自组织 (self-organization) 一词的原义是: 给系统注入能量, 系统参数可以自发地达到某个临界值, 从而形成一种新的状态, 出现新的秩序和模型。最简单的实例是水 ( $H_2O$ ) 的三态变化。对液态水注入正能量 (加热), 温度达到  $100^{\circ}C$  变为气态; 或者注入负能量 (冷却), 温度降到  $0^{\circ}C$  变为固态。这种状态的转变就是相变, 水分子在受/释热变化过程中就会发生自组织。今天, 自组织的定义更为一般化了。当系统演化无需外界的特定干扰、仅依靠系统内部各要素的相互协调便能达到某种目标时, 我们就说系统是自组织的。

城市是复杂的自组织空间系统<sup>[1,10]</sup>, 因为只要给城市物质、能量和信息流, 它们就可以自发形成一定的结构和秩序。城市化过程是农村人口向城市人口的复杂转化过程<sup>[12]</sup>。如果将城市人口视为一种状态, 农村人口视为另一种状态, 则农村人口向城市人口的转变过程可被视为一种相变<sup>[5]</sup>, 更长尺度的人口城市化的演变则是一种自组织过程, 这种自组织是以社会、经济的不断发展为能量输入。

可以看出, 相变过程在空间尺度上涉及到微观和宏观两个层次: 微观层次的个体行为与宏观层次的状态变化。那么自组织与相变又是什么关系呢? 其实, 在时间尺度上, 相变是自组织进程中的临界转变过程, 相变的历程较之自组织似乎要短很多。所以, 在时间方面, 相变的尺度小于自组织的尺度。但在空间方面, 相变更多地体现在宏观层面, 而自组织则主要表现于微观层面 (表 1)。给液体水注入能量之后, 水分子便可能开始了自组织过程, 但此时并没有发生相变; 当温度上升到临界数值附近的时候, 相变才开始进行, 直到水体全部蒸发为止。在特定情况下, 受热水体会形成所谓 Bénard 元胞——这是自发形成的空间秩序, 与外力没有任何关系, 自组织的要义就在于此。人口城市化在本质上与此类似, 当然演化过程要复杂得多。城市化过程中的空间秩序便是中心地景观, 这是地理学意义的 Bénard 元胞<sup>[1,3]</sup>。事实上, Allen 及其合作者借助耗散结构理论模拟生成了静态的 Christaller-Lösch 中心地空间图式, 其中正是利用了 Bénard 实验提示的自组织思想<sup>[1,13]</sup>。在过去 20 年里, 西方学术界借助 Prigogine 的耗散结构理论<sup>[14]</sup>和 Haken 的协同学方法<sup>[15]</sup>研究城市的自组织过程, 为地理学家认识城市变化提供了全新的视角。Prigogine 和 Haken 都曾直接参与了自组织城市及其复杂性的研究工作<sup>[16,17]</sup>, 为城市地理学的理论进步发挥了

表 1 自组织与相变的时空位置

Tab. 1 The location of self-organization and phase transition in spatio-temporal scales

空间/时间	空间尺度		
	尺度	微观	宏观
时间尺度	小尺度	相变	
	大尺度	自组织	

由 Bénard 所做的一个实验结果。用两块平行的玻璃板做成容器, 盛水之后, 在底部加热, 水体由于温差发生对流。当温度达到某个临界值, 水面突然出现六边形花样, 这是一种非外力强制的有序结构, 其形态类似中心地景观, 故地理学家由此联想到 Christaller-Lösch 中心地理论的自组织机制。

重要的推动作用<sup>[18]</sup>。近年来,随着分形、混沌等复杂城市研究的崛起,自组织城市领域更显得生机盎然。

## 2 城市 SOC 及其地理标志

现在我们关心的是:城市化作为自组织过程具有哪些标志和特性。系统自组织进程中最重要的事情就是临界相变,即当系统参数达到某个临界值(如水的温度上升到 100 或者下降到 0 左右),这个时候系统是最为复杂的。西方学者如 S. T. Kauffman、C. Langton、P. Bak 等对复杂系统的临界相变过程进行了大量研究,有许多重要发现,也提出了一系列相关的理论和模型<sup>[4,19,20]</sup>,这些理论和模型对我们研究城市化过程具有重要启发意义。美国学者 Langton 将物态的相变过程与系统变化的有关性质或现象进行了如下类比<sup>[4]</sup>:

固体 “相变” 液体  
秩序 “复杂(性)” 混沌  
过于稳定 “生命/智能” 过于喧闹

.....

在上述类比系列中,我们自然想到添加如下类比:农村 “城市化” 城市。

研究发现,系统中最为重要的事情和最奇异的现象既不出现于过于稳定的有序状态,也不出现于过于喧闹的混沌状态,而是出现于混沌与秩序交接的边缘“地带”,“混沌的边缘”概念应运而生。所谓混沌的边缘(the edge of chaos),是指复杂系统的自组织演化过程中,各种因素既不会静止于某一状态(有序),也不会动荡到瓦解的地步(混沌),而是处于两种极端状态的交变位置——需要特别说明的是,混沌的边缘未必意味着相变结束后系统进入混沌状态或者达到常规意义的有序状态。中国古人所谓的“过犹不及”、“物极必反”即寓此意:寻求“中和”,是自组织系统永恒的目标。“混沌的边缘”其实也就是“秩序的边缘”,系统的复杂特征似乎距离混沌更为接近一些,故“混沌的边缘”一词较之“秩序的边缘”更为贴切一些——城市化过程的复杂形态距离城市状态较之农村状态更为接近,这一点在我们今后的研究中将会具有启示意义。

与混沌的边缘紧密联系的是自组织临界性(SOC)概念,这个概念由丹麦学者 Bak 提出<sup>[20]</sup>。SOC 对应于弱混沌状态,可谓与混沌的边缘“同出而异名”。它刻画的也是系统在自组织演化达到某个临界状态出现的复杂图式,这种复杂图式正是发生在混沌的边缘地带。Bak 指出,SOC 通常有 4 种标志:大灾变事件、 $1/f$  噪声、分形结构和 Zpf 定律<sup>[20]</sup>。但对于人文地理系统而言,通常只有后面三个标志表现出来(表 2)。 $1/f$  噪声(noise)又称  $1/f$  涨落(fluctuation),主要出现于时间过程,由频率( $f$ ) - 功率谱( $P$ )关系定义如下<sup>[21,22]</sup>:

$$P(f) \sim f^{-\beta}, \quad (1)$$

式中  $\beta$  为功率谱指数。当  $\beta = 1$  时,上式化为  $P(f) \sim 1/f$ ,人们将功率谱指数为 1 的系统信号变化过程称为  $1/f$  涨落。实际上,现实中满足  $0 < \beta < 2$  的时间序列都可被笼统地视为  $1/f$  噪声<sup>[20]</sup>。分形结构出现于空间分布,分形维数由尺度( $r$ ) - 测度( $N$ )关系定义<sup>[23,24]</sup>:

$$N(r) \sim r^{-D}, \quad (2)$$

式中  $D$  为分维。至于 Zpf 定律,城市地理工作者都十分熟悉,由位序( $r$ ) - 规模( $S$ )关系表示<sup>[12]</sup>:

$$S(r) \sim r^{-q}, \quad (3)$$

式中幂指数  $q$  具有分维性质,故有人称之为 Zpf 维数。以中国城市为例,借助 1949 ~ 2000 年城市人口比重的时间序列,通过 Fourier 变换,由式(1)可以计算出功率谱指数为  $\beta = 1.583$ (测定系数  $R^2 = 0.888$ );根据中国城市的空间分布规律可以计算出关联维<sup>[25]</sup>  $D = 1.396$ (测定系数  $R^2 = 0.999$ );利用中国城市 2000 年的非农业人口数据可以计算出 Zpf 维数为  $q = 0.792$ (测定系数  $R^2 = 0.991$ ,全部城市统计了 664 个,标度区内的城市取 511 个),参见表

2. 讨论这些参数的意义不是本文的主题。我们感兴趣的是:上述三个表达式都是关于标度的幂律形式。SOC 概念的要义在于无标度性质:复杂的动力系统可以自发地演化到某种临界状态,在这种状态下系统的时空动力学不具备特征时间尺度和特征空间尺度,从而表现出具有各种尺度的幂律分布和时空关联。临界状态又可被细分为亚临界状态、临界状态和超临界状态,1/ f 涨落和分形结构分别是 SOC 在时间过程和空间分布中的“指纹”。不过,对于自组织城市而言,Zipf 定律的重要性绝不亚于 1/ f 涨落和分形结构,因为位序 - 规模分布是城市系统时空关联的复杂性“签名”(图 1)。

表 2 自组织临界性的三种标志及其与分维的关系等

Tab. 2 Three marks of SOC and the relations between the indices of SOC and fractal dimension					
领域	复杂标志	定义方法	模型表达	与分维的关系	实例:中国
时间	1/ f 噪声	频(率) - 谱关系	$P(f) \sim f^{-\gamma}$	$\gamma = 5 - 2D$	$\gamma = 1.583$
空间	分形	尺度 - 测度关系	$N(r) \sim r^{-D}$	$D = -\ln N(r) / \ln r$	$D = 1.396$
等级	Zipf 定律	位序 - 规模关系	$S(r) \sim r^{-q}$	$q = 1/D = D_p / D_f$	$q = 0.792$

说明:时间、空间和等级对应的 D 都表示分维,但其数理意义不同。

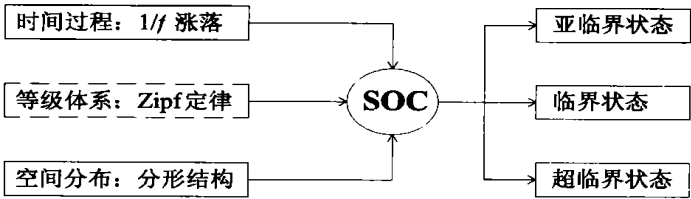


图 1 SOC 的三种状态与三个标志

Fig. 1 Three states and marks of SOC

实际上,功率谱指数和 Zipf 维数都与某种分维有关<sup>[21,22]</sup>。对于一维的时间序列,分维与功率谱指数的关系为  $\gamma = 5 - 2D$ ,由此可以算出中国城市化水平的分维为  $D = (5 - 1.583) / 2 = 1.709$ ;对于位序 - 规模分布,其 Zipf 指数实则分维的倒数,即有  $D = 1 / q = 1.262$ 。进一步的研究表明,q 值是城市体系人口分布和空间结构的广义维数之比,即有  $q = D_p / D_f$ <sup>[26]</sup>。各种临界标志与分维的关系暗示分形在研究城市化的自组织临界过程具有统率性质和关键意义。

3 城市化过程中的空间复杂性

从自组织的角度来看,城市化过程本质上是一个复杂性问题<sup>[3]</sup>。在“农村人口 - 城市人口”的复杂转换过程中,宏观与微观、有序与混沌、稳定与动荡、复杂与简单等矛盾运动及其对立统一过程造就了深刻而又美妙的地理模型。城市化自组织临界过程的空间复杂化在地理系统中形成了两个方面的实证判据:一是空间上的中心地景观,二是等级上的位序 - 规模分布;前者意味着分形结构,后者联系着 Zipf 定律。我们后面将会看到,中心地等级体系与城市位序 - 规模分布其实是一个问题的两个方面:中心地模式推广到随机领域便是无标度网络(scale-free network),空间上的无标度性导致了等级上的递阶(cascade)分布,递阶式等级结构反过来作用于无标度网络的自组织过程。

研究发现,对于过于稳定的有序状态,系统结构一般比较简单;对于过于喧闹的混沌状态,系统结构也并非真正的复杂。复杂性出现于从有序到混沌转换的边缘地带,SOC 则是

从自组织的角度对时空结构复杂性的理解和阐释<sup>[20]</sup>。郝柏林院士曾经指出：“复杂性介于随机和有序之间，是随机背景上无规地组合起来的某种结构和（秩）序。”<sup>[17]</sup>然而，对于城市系统，我们反过来理解也能成立：城市和城市体系乃是有序背景（如三角点阵格局）上的随机结构（现实中的城市系统形态）<sup>[27]</sup>。这种有序与无序矛盾运动的空间模型就是中心地分形。标准中心地模型的织构（texture）可以借助确定性分形几何方法构造出来<sup>[28]</sup>，其结构（structure）则可以利用 Koch 雪花等分形模型进行“拟合”（图 2）<sup>[27]</sup>。中心地的镶嵌式正六边形结构不仅与 B énard 元胞具有相似的几何形态，也具有相似的自组织动力学——中心地晶态结构的非晶化过程可以借助耗散结构理论的有关思想模拟生成<sup>[29]</sup>。中心地模型是从随机分布的城市体系中提炼出来的有序结构，而中心地非晶化模拟则是将理想状态的有序结构还原为具有现实意义的地理景观。在城市化的演化模拟过程中，有序结构似乎是从某种隐藏的地方突然显现出来的，这种“突现（emergence，或译作“涌现”）”行为<sup>[30]</sup>和对称破缺机制正是复杂性科学关心的重要问题之一<sup>[7]</sup>。

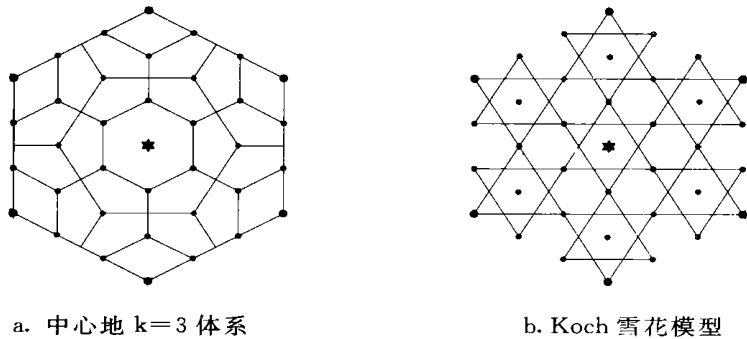


图 2 中心地与分形景观的等价变换  
(这里分形构造只示意前三步，城市等级到第四级)

Fig. 2 Central place network and the Koch snowflake model of cities with fractality  
(a. Central place model; b. Koch snowflake model)

城市地理系统空间复杂性的另一个重要判据就是位序 - 规模法则，在数学上则体现为 Zpf 定律。我们知道，Zpf 定律即方程式 (3) 是 SOC 的一个标志，其实它也是地理系统空间复杂性的典型规律。城市位序 - 规模分布本质上是一种突现：它是一种宏观现象，不见存于微观层次的个体水平。但是，这种宏观现象却是区域中众多的个体城市通过自组织过程形成、自下而上演化出来的。对于任何一个区域，城市位序 - 规模分布不是从来就有的；但当城市系统进化到某种临界状态，这种宏观规律却好像是从某个地方突然“冒”了出来——这就是突现的要义：整体大于部分之和，个体的相互作用在整体层面形成新的图式；而一旦形成，又会变得非常稳定<sup>[30]</sup>。Madden 曾经研究了 1790 ~ 1950 年 10 年一次城市位序 - 规模分布，发现各年的城市规模分布近乎以同样的斜率平行地随时间而推移<sup>[12, 31]</sup>。美国城市规模分布近年似乎有些微妙的变化——有临界状态进入超临界状态迹象，但在较大的时空尺度上其分布依然保持原状（图 3）。

临界状态的城市变化十分复杂，但宏观规律却相当稳定，形成规则也比较简单——一组几何级数式的标度定律就足以刻画城市规模分布的递阶过程。假定将系统自上而下划分为

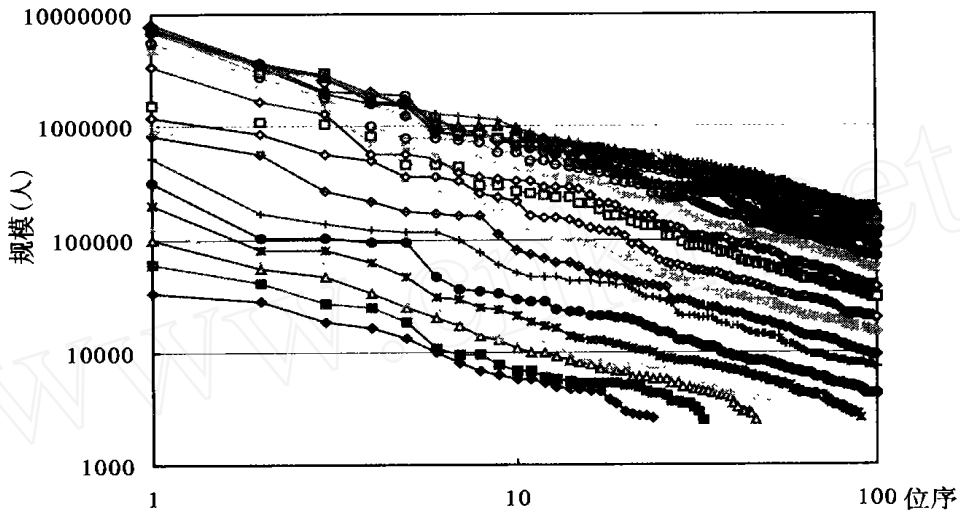


图 3 美国城市位序 - 规模的稳定分布 (1790 ~ 2000)

Fig. 3 The rank-size distribution of cities in the US urban system: 1790 ~ 2000.  
(原始数据来源: 美国人口普查资料网站, <http://www.census.gov/population>)

$M$  个等级,城市等级体系(包括中心地)可以简单地表示如下指数函数式标度模型

$$N_m = N_1 r_n^{m-1} \tag{4}$$

$$P_m = P_1 r_p^{1-m} \tag{5}$$

$$A_m = A_1 r_a^{1-m} \tag{6}$$

式中  $m = 1, 2, \dots, M$  为等级,  $N_m$  为第  $m$  级的城市数目,  $P_m$  为第  $m$  级的城市平均人口规模,  $A_m$  为第  $m$  级的平均城区面积(对于中心地,则为市场区面积),参数  $N_1$ 、 $P_1$ 、 $A_1$  是  $m = 1$  时城市数目、规模和面积,  $r_n = N_{m+1}/N_m$  为数目比,  $r_p = P_{m-1}/P_m$  为规模比,  $r_a = A_{m-1}/A_m$  为面积比。从上面的指数式标度定律出发可以推导出一组幂律(power law),包括三参数 Zipf 模型

$$P(r) = C(r - )^{-d_z} \tag{7}$$

和异速生长定律

$$A_m = P_m^b \tag{8}$$

式中  $C$ 、 $d_z$ 、 $b$  为参数,其中  $d_z = \ln r_p / \ln r_n = 1/D$ ,  $b = \ln r_a / \ln r_p$ 。这里  $D$  为城市规模分布的分维。可以看出,式(7)正是式(3)的精确表达形式,当微调参数  $0$  时,式(7)便返回到式(3)。上述数学过程揭示了如下问题或规律:其一,城市等级体系和中心地网络可以用相同的标度定律进行刻画,这正印证了理论地理学家的一个猜想:空间网络与等级体系是一个问题的两个方面<sup>[24]</sup>。其二,表征分形的幂律图式可以从指数式标度定律推导出来,这意味着复杂的分形结构可以通过递归方式从简单的规则中衍生出来。其三,城市规律的表现似乎有一定的尺度限制:当尺度太大或者太小时,标度不变规则就会失效<sup>[20]</sup>——宏观规律的有效区域便是所谓无标度区。上述模型变换过程从逻辑上证实了无标度区的存在,中国城市规模分布则从经验上证实了标度局限性质(图 4)。其四,城市规模没有特征尺度,因而城市没有典型规模,当然也就谈不上“最佳城市规模”问题。

第四个方面的问题具有重要的现实意义。城市等级体系的标度定律实际上标示了一种

能量分布法则,而级联结构中能量规模不存在任何典型的尺度<sup>[20]</sup>。能量分布法则在城市地理中的一个重要启示就是城市无所谓最佳规模:“这种幂律图式(power-law pattern)的含义在于:对于美国或者其它任何一个地方的城市而言都不存在典型的规模(‘typical’ size),最大城市的出现也没有特定历史或者地理缘由。正如我们业已看到的那样,城市的生长是在大型不稳定性中寻求发展平衡的一种临界过程。”<sup>[32]</sup>我们知道,分形的一个基本含义就是无标度,即没有特征尺度。既然城市化是一种 SOC 过程,城市规模分布是空间复杂化的结果,在理论上就不可能找到所谓最优城市规模——“寻求最佳城市规模是不可能的”,这理当是城市地理学中的又一个“不可能定律”。但是,虽然没有一般意义的最佳城市规模,但区域城市体系却有一个最佳城市规模分布:城市规模分布的维数( $D = \ln r_n / \ln r_p$ )不能太大,太大意味着城市规模的等级差别较小,从而城市体系的经济产出较小,用地浪费;另一方面,分维也不宜太小,太小表明等级差别过大,从而城市体系物质、能源耗费较大,环境压力沉重。在城市经济产出、土地利用和物、能消耗方面必然有一个良好的分布(理论上  $D = 1$  较好),其数值可用位序 - 规模分布坐标图的斜率表征(在图 4 中,2000 年中国城市规模分布的参数为  $D = 1/q = 1.262$ )。这种推论的现实意义就是:我们在实践中既不能片面地强调发展大城市,也不能不讲实际地强调发展小城镇<sup>[12,33]</sup>。基于自组织的思想发展城市和城市体系才是城市建设方针的科学基础。

中心地模型随机化以后,可以用三角点阵模型模拟:现实中的城市体系可以“拟合”为有规三角晶格上的无规分布<sup>[27]</sup>。进一步的研究发现,这种分布具有无标度性质:城市的无标度分布则导致了交通网络的无标度性,形成城市 - 交通一体化的区域无标度网络。无标度网络是自组织网络中的复杂一类,连接的不均匀分布是其主要特征<sup>[34]</sup>。西方学者基于美国高速公路网络分析认为道路网络是随机网络(random network)而不是无标度网络<sup>[35]</sup>。然而,作者研究发现:其一,从等级结构或者节点的连接数目来看,一些区域的道路交通网络可能服从 Poisson 分布,属于随机网络类型;但是,如果从空间结构考察,则无论铁路抑或公路都是无标度网络,具有幂律分布特征,至少在双对数坐标图上有无标度区存在。其二,在等级结构或者节点连接数目方面,如果考虑中下级城市,并且引入网络线路的流量权重,则交通网络也不存在特征尺度,属于无标度网络。根据城市引力思想,网络权重必然与城市规模形成比例关系。这就可以从空间上揭示等级意义的位序 - 规模分布:网络的幂次分布意味着城市能量的幂次分布,能量的分布在城市人口方面反映出来便是 Zipf 定律刻画的位序 - 规模分布。

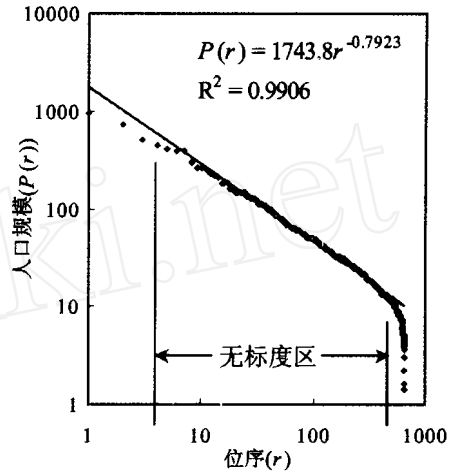


图 4 中国城市的位序 - 规模分布(2000)

Fig. 4 The rank-size distributions of the cities of China in 2000 (人口规模采用《中国城市年鉴》2000 年的城市非农业人口)

“不可能定律”在科学研究中具有非常重要的价值,它们能够使我们少走弯路,避免毫无意义的浪费。例如“能量是不可能消灭的”、“永动机是不可能制造的”、“长期天气预报是不可能的”以及诸如此类。在城市地理学中,“城市化水平是不可能客观度量的”、“城市似乎是不可规划的”等等亦属抑或近似此类。

在自组织网络中,随机网络的连接概率为指数分布——随机网络因此也叫指数网络,而无标度网络的连接概率则是幂指数分布<sup>[34]</sup>。然而,对于城市体系而言,反映秩序的幂律分布如方程式(7)、(8)却可以从表征随机的指数分布式(5)~(7)推导出来<sup>[36]</sup>,有序与无序的对立统一性质在这里竟然以一种优美的数理关系统一起来了(表3)。其实,分形的基本性质就是无标度性,无标度网络在一定时空条件下就会发育成分形系统。城市的分形结构就像是为在有序与无序之间寻求一种平衡而突现的复杂性态<sup>[37]</sup>。可以认为,无标度是自组织网络的一种结构特征,分形则是无标度网络达到临界状态的奇异结构。从自组织到无标度,从无标度到分形,城市地理系统渐次演进到临界状态。城市化过程的临界性质,将是理论地理学领域非常深刻而且引人入胜的研究方向。

表3 城市地理系统有序与无序的对立统一

Tab. 3 The unity of opposites between order and chaos of urban systems

空间类型	领域	空间	对应的矛盾体	
狭义地理空间	空间	实空间	粒子性	波动性
	时间	相空间	随机性	趋势性
广义地理空间	等级	序空间	阶梯性	平滑性
	时空	地理空间	无序性(混沌)	有序性(秩序)

说明:本文的地理空间有狭义与广义之分,前者为“实空间”,即通常理解的地理空间,后者包括时间意义的“相空间”和等级意义的“序空间”,为地理数学意义的空间。作者对此将有专文论述。

最后将刻画城市体系的标度定律即式(4)~(6)与描述水系的 Horton-Strahler 定律<sup>[38]</sup>以及刻画地震的 Gutenberg-Richter 定律<sup>[39]</sup>进行比较具有重要的启发意义。中心地与水系的相似性规律,西方学者早有探讨<sup>[40]</sup>,本文在其基础上进行了更为系统的总结。不难看出,人文地理系统的标度定律与刻画水系的数学模型完全同构,与反映地震能量级联过程的 Gutenberg-Richter 定律的数学方程也毫无二致(表4)。通过比较可以明确无误地看到,城市规模分布的确是一种能量分布<sup>[32]</sup>。我们现在明白,Horton-Strahler 的水系构成是 SOC 的潜在解释对象,而 Gutenberg-Richter 定律描述的地震能量分布则是一种最为干净利落的 SOC 过程<sup>[20]</sup>。既然城市体系和中心地的标度定律与水系、地震完全同构,则我们就有充分的逻辑证据可以判定:中心地景观和位序-规模分布是一种 SOC 现象,从而可以借助空间复杂性的有关理论和方法进行深入探讨。

表4 中心地体系与水系以及地震的有关标度定律的比较

Tab. 4 Comparison of the scaling laws of river and urban systems with G-R laws on earthquake

类型	人文领域		自然领域	
	城市体系	中心地体系	河流网络	地震能量
名称	Beckmann-Davis	Christaller-Woldenberg	Horton-Strahler	Gutenberg-Richter
第一定律	$N_m = N_1 r_d^{1-m}$	$N_m = N_1 r_l^{1-m}$	$N_m = N_1 r_b^{1-m}$	$G_m = G_1 r_e^{1-m}$
第二定律	$P_m = P_1 r_p^{m-1}$	$P_m = P_1 r_p^{m-1}$	$L_m = L_1 r_l^{m-1}$	$E_m = E_1 r_e^{m-1}$
第三定律	$A_m = A_1 r_a^{m-1}$	$S_m = S_1 r_s^{m-1}$	$A_m = A_1 r_a^{m-1}$	$Z_m = Z_1 r_z^{m-1}$

说明:1. 表中的序号是基于自下而上的表示。2. 在关于水系的 Horton-Strahler 定律中, $N_m$ 为第  $m$  级河流的枝分数目, $L_m$ 为第  $m$  级河流的平均长度, $A_m$ 为第  $m$  级河流的平均流域面积;至于比率, $r_b = N_m / N_{m+1}$ , $r_l = L_{m+1} / L_m$ , $r_a = A_{m+1} / A_m$ 。3. 在关于地震的 Gutenberg-Richter 定律中, $G_m$ 为第  $m$  级地震的频数, $E_m$ 为第  $m$  级地震的平均能量, $Z_m$ 为相应级别地震引起的平均断裂规模;至于比率, $r_g = G_m / G_{m+1}$ , $r_e = E_{m+1} / E_m$ , $r_z = Z_{m+1} / Z_m$ 。4. 中心地与城市体系的标度定律基本一样,只有第三定律的侧重有所不同:城市体系以建成区  $A$  为测度,中心地体系以市场区面积  $S$  为测度——等价地,也可以中心地之间的距离为测度。



## 4 结束语

城市的自组织演化及其空间复杂性模拟在西方地理界早就是学术前沿问题<sup>[41]</sup>,有人甚至将复杂思想视为地理学的新的范式(paradigm)<sup>[42]</sup>。SOC思想是城市化研究的新视角,自组织城市研究已经为我们提供了许多有益的启示:我们再也不会为探讨所谓的“最佳城市规模”绞尽脑汁,也不必为“优先发展大城市”抑或“重点发展小城镇”而长久纷争——问题的焦点在于合理的城市规模分布,而不是各个城市的规模或者大、中、小城市问题……。对于本文而言,最主要的理论突破在于:将城市演化的自组织临界性归结为无标度性,即复杂的城市系统表现为递阶结构而没有特征规模和尺度<sup>[36]</sup>。无标度性暗示了城市演化的对称破缺与重建,有关问题将是今后理论探讨的方向之一。

自组织城市化过程研究主要有两种方法,一是数学模型解析,二是计算机模拟实验。前者倚重后现代数学工具(如分形几何学、混沌数学),后者的基础则是仿生数系列。复杂系统的演化过程本质上是一种计算过程——生物进化、生命演化和生理变化其实都是计算-求解过程<sup>[43]</sup>,不过,大自然造就的生物计算过程似乎要比人类发明的各种计算方法聪明而且有效得多。借助仿生科学理论模拟城市化具有良好的发展前景,毕竟城市十分类似巨大的生命体<sup>[4]</sup>。然而,模拟实验方法有其自身无法克服的缺陷,必须将数学理论与计算机模拟方法融会贯通。借助数学模型解析和模拟实验分析,我们可望揭示自组织城市网络无标度性的深刻本质,而有关成果必将能为现实中的城市系统优化管理提供理论指导。

致谢:感谢美国 Lewis Mumford 比较城市与区域研究中心主任 John R. Logan 教授的信任和提供的资助;同时感谢美国北 Illinois 大学地理系的王法辉(Fahui Wang)博士,整个研究得以顺利开展与他提供的各种信息和文献资料有直接关系;最后感谢审稿人提出的修正意见,中肯的意见和建议对本文的改进及今后的研究都具有重要的启发作用。

## 参考文献:

- [1] Allen P M. Cities and Regions as Self-Organizing Systems: Models of Complexity. Amsterdam: Gordon and Breach Science Pub., 1997.
- [2] 王放,李后强.非线性人口学导论.成都:四川大学出版社,1995.93~114.
- [3] Portugali J. Self-Organization and the City. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [4] Waldrop M. 陈玲译.复杂:诞生于秩序和混沌边缘的科学.北京:生活读书新知三联书店,1998.310~328.
- [5] Sanders L, Pumain D, Mathian H, et al. SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24(2): 287~305.
- [6] Andersson C, Rasmussen S, White R. Urban settlement transitions. Environment and Planning B: Planning and Design, 2002, 29: 841~865.
- [7] 郝柏林.复杂性的刻画与“复杂性科学”.科学,1999,51(3):3~8.
- [8] Leeuw S, McGlade J (Eds.). Time, Process and Structured Transformation in Archaeology. London and New York: Routledge, 1997.
- [9] Bertuglia C S, Bianchi G, Mela A (Eds.). The City and Its Sciences. Heidelberg: Physica-Verlag, 1998.
- [10] Wilson A G. Complex Spatial Systems: The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis. Singapore: Pearson Education Asia Pte Ltd., 2000.
- [11] Bossomaier T, Green D. 陈禹,等译.沙地上的图案:计算机、复杂和生命.南昌:江西教育出版社,1999.11.
- [12] 周一星.城市地理学.北京:商务印书馆,1999.
- [13] Allen P M. Self-organization in the urban system. In: Schieve W C, Allen P M (Eds.). Self-Organization and Dissipative Struc-

- tures: Applications in the Physical and Social Sciences. Austin: University of Texas Press, 1982. 142 ~ 146.
- [14] Haken H. 凌复华译. 协同学——大自然构成的奥秘. 上海: 上海译文出版社, 2001.
- [15] Prigogine I, Stengers I. 曾庆宏, 沈小峰译. 从混沌到有序——人与自然的新对话. 上海: 上海译文出版社, 1987.
- [16] Prigogine I, Allen P M. The challenge of complexity. In: Schieve W C, Allen P M (Eds.). Self-Organization and Dissipative Structures: Applications in the Physical and Social Sciences. Austin: University of Texas Press, 1982. 28.
- [17] Haken H. A synergetic approach to the self-organization of cities and settlements. Environment and Planning B: Planning and Design, 1995, 22(1): 35 ~ 46.
- [18] 陈彦光, 靳军. 地理学基础理论研究的方法变革及其发展前景. 干旱区地理, 2003, 26(2): 97 ~ 102.
- [19] Kauffman S. At Home in the Universe: the Search for Laws of Self-Organization and Complexity. New York: Oxford University Press, 1995.
- [20] Bak P. 李炜, 蔡勳译. 大自然如何工作——有关自组织临界性的科学. 武汉: 华中师范大学出版社, 2001.
- [21] Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988.
- [22] Peitgen H O, Saupe D (Eds). The Science of Fractal Images. New York: Springer-Verlag, 1988.
- [23] Mandelbrot B B. 陈守吉, 凌复华译. 大自然的分形几何学. 上海: 上海远东出版社, 1998.
- [24] Batty M, Longley P A. Fractal Cities: A Geometry of Form and Function. London: Academic Press, 1994.
- [25] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法. 地理研究, 1999, 18(2): 171 ~ 178.
- [26] 陈彦光, 周一星. 城市等级体系的多重  $Z_{pf}$  维数及其地理空间意义. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(6): 823 ~ 830.
- [27] 陈彦光. 城市体系 Koch 雪花模型的实证研究——中心地  $K_s$  体系中的分形与分维. 经济地理, 1998, 18(4): 33 ~ 37.
- [28] Arlinghaus S. Fractals take a central place. Geografiska Annaler, 1985, 67B, 2: 83 ~ 88.
- [29] Allen P M, Sanglier M. A dynamic model of growth in a central place system. Geographical Analysis, 1979, 11: 156 ~ 272.
- [30] Holland J H. 陈禹, 等译. 涌现——从混沌到有序. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
- [31] Madden C H. On some indications of stability in the growth of cities in the United States. Economic Development and Culture Change, 1956, 4: 236 ~ 252.
- [32] Buchanan M. Ubiquity: Why the World is Simpler than We Think. London: Weidenfeld & Nicolson, 2000.
- [33] 周一星. 人文地理研究能为制订国家政策作贡献——以城市发展方针研究为例. 人文地理, 2001, 16(1): 1 ~ 5 \ 39.
- [34] Barabási A-L. Linked: The New Science of Network. Massachusetts: Persus Publishing, 2002.
- [35] Barabási A-L, Bonabeau E. Scale-free networks. Scientific American, 2003, 288(5): 50 ~ 59.
- [36] 陈彦光. 城市人口-城区面积异速生长模型的理论基础、推广形式及其实证分析. 华中师范大学学报(自然科学版), 2002, 36(3): 375 ~ 380.
- [37] White R, Engelen G. Urban systems dynamics and cellular automata: fractal structures between order and chaos. Chaos, Solitons & Fractals, 1994, 4(4): 563 ~ 583.
- [38] Rodríguez-Iturbe I, Rinaldo A. Fractal River Basins: Chance and Self-Organization (Paperback Edition). New York: Cambridge University Press, 2001.
- [39] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics (2nd). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [40] Woldenberg M J, Berry B J L. Rivers and central places: analogous systems? Journal of Regional Science, 1967, 7: 129 ~ 139.
- [41] White R, Engelen G. Cellular dynamics and GIS: modeling spatial complexity. Geographical Systems, 1993, 1: 237 ~ 253.
- [42] Richards A. Complexity in physical geography. Geography, 2002, 87(2): 99 ~ 107.
- [43] 刘继生, 陈彦光. 基于 GIS 的细胞自动机模型与人地关系的复杂性研究——关于人地关系研究的技术模式探讨. 地理研究, 2002, 21(2): 155 ~ 162.

## Urbanization as phase transition and self-organized critical process

CHEN Yan-guang

(Department of Geography, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract :** This paper discusses the property and marks of urbanization as a self-organizing process, which can be thought of as a kind of phase transition from a rural to an urban settlement system. Several empirical observations including fractal structure and rank-size distribution can be used to identify the self-organized criticality (SOC) of urbanization dynamics. Fractal structure such as central place landscapes in spatial field and the rank-size distribution associated with Zipf's law in hierarchical field always 'emerge' while urban systems in a region approach to the self-organized critical state of urbanism. The central place hierarchy can be characterized with a set of scaling laws as follows:  $N_m = N_1 r_n^{m-1}$ ,  $P_m = P_1 r_m^{1-m}$ ,  $A_m = A_1 r_a^{1-m}$ . From these exponential scaling laws, we can derive the power laws such as the three-parameter Zipf law,  $P(r) = C(r - )^{-d}$ , and the law of allometric growth,  $A_m = P_m^b$ . The exponential distribution indicates random process, while the power law implies some order in complex systems, but we find the unity of opposites between order and chaos of urban systems through the derivation of power laws from the exponential-type scaling laws. Moreover, this means that the spatial network of central places and the hierarchical structure of city-size distribution reach the same goal by different routes. This in fact corroborates the viewpoint that both the urban hierarchy and spatial network represent the different sides of the same coin.

The self-organized networks of cities usually become scale-free because of the dynamics of urbanization. The map of the urban network patterns in hierarchical field is just the rank-size distribution, which appears in the larger picture, not at the level of an individual city. Once the distribution forms, it will become very stable over a long period of time. The formation of the scale-free network of cities associated with the rank-size distribution is an information-rich evolution, which can be simulated using cellular automata (CA) models, cellular space (CS) model, multi-agent system (MAS), and so on. Simulation as an experimental tool may be very useful for us to research spatial complication proceeding from urbanization dynamics. However, the simulation based on computer graphics doesn't help us conceptually in understanding the rules of behavior of urban systems at the higher level. As a complement, post-modern mathematical theory esp. fractal geometry, chaos mathematics, renormalization group, etc., will play a significant role in the studies of self-organizing urbanization.

**Key words :** urban system; self-organizing city; self-organized network;  $1/f$  noise; fractal; Zipf's law; central places; spatial complexity