

人地非线性相关作用的探讨

刘继生 陈 涛

(东北师范大学地理系, 长春 130024)

提 要 从自组织系统思想出发, 提出了人地关系的基本特性(非决定性、不对称性和非线性), 通过逻辑斯蒂方程的数学变换, 分析了人地非线性相关作用的混沌特征, 进而讨论了人地关系的分形(多分维)性质。基于混沌过程与分形结构的因果关系, 指出: 地球表层系统中的人文分形景观乃是人地非线性关系的混沌作用所致。

关键词 人地关系 地理系统 非线性 混沌 分维

1 引 言

人地关系是人文地理学研究的中心课题, 也是整个地理学研究的核心问题之一。早在 19 世纪, 德国著名地理学家李特尔(K. Ritter)在其《地学通论》著作中就已指出: “自然的一切现象和形态对人类的关系”乃是地理学的中心原理。他的这一论断曾因被视为地理环境决定论的滥觞而一度遭到非议。地理环境决定论的根本失误在于把复杂的人地非线性关系“线性”化了。早期的许多地理学者总是企图在自然环境和人文现象这两个集合之间找出要素的映射关系, 即发现一种人文现象(果), 便想在自然环境中找到其“原象”(因)。但是, 人地之间并非简单的单射关系, 所以他们的理论很难自圆其说。

人类社会是一个自组织系统, “自组织”意味着人类社会系统的运行是可以自我协调的, 不可能由地理环境完全决定。因而企图在环境因素与人类行为之间建立简单的因果对应关系必然失败。然而, 人地关系却是客观存在的, 并且这种关系是不对称的, 即环境可以没有人类而发展, 而人类却不可能脱离环境而存在。哈肯(H. Haken)的协同学原理表明, 任何一个系统, 其控制变量只能来自环境, 系统与外界的物质流、能量流和信息流(通称“流”)决定着控制变量的大小。就整个人类社会而言, 其环境就是地理环境, 它与人类社会系统的关系可从耗散结构论得到启示。普里高津(I. Prigogine)指出, 系统的熵的改变(ds)由两部分组成:

$$ds = dis + des \quad (1-1)$$

式中 dis 为系统内部不可逆过程产生的熵变; des 为系统与外界(环境)交换物质、能量和信息引起的熵变。由于 $dis \geq 0$, 故只有满足

$$des > dis \quad (1-2)$$

即当系统从环境获取的负熵大于系统内部因素引起的熵增时, 才能避免系统陷入无序状态而死亡。

可见, 地理环境是人类存在和社会发展的基础, 负熵流的大小控制着人类社会的演化。由于地球表层是一个准封闭系统, 它与宇宙环境只有能量交流, 而太阳输给地球的能量接近于一个常数 I_0 , 从而形成以下的约束条件

$$\int des \leq g(I_0) \quad (1-3)$$

即人类社会从环境吸取的负熵流总量有一定限度, 如果人类的索取超过其阈值, 就会导致环境支持系统的崩溃, 乃至人类文明的毁灭。因此, 人类必须寻求与环境之间的综合协调。因此, 研究人地相关作用不仅能够促使自然—人文二元合一, 而且具有深刻的实践意义。人类社会与地理环境之间的相关作用过程是复杂的非线性过程, 这个过程存在着某种混沌(chaos)机制, 从而导致地球表层的许多人文分形(fractal)结构。下面运用混沌理论和分形思想^[1]对人地非线性相关作用做进一步的探讨。

2 人地相关作用的混沌特征

2.1 地理系统的一般模式

地理系统可以简单地定义为由相互作用的各个地理要素所构成的综合体。一个地理系统(如城市系统)可以采用不同的数学方法进行描述。不妨象贝塔兰菲(L. Von Bertalanffy)描述一般系统那样, 选取一组联立方程式进行表达^[2]。令 Q_i 表示要素 P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的某个测度, 对于有限数目的要素, 当处于极简单的情况下, 有如下形式:

$$\left. \begin{aligned} dQ_1/dt &= f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ dQ_2/dt &= f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ dQ_n/dt &= f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{aligned} \right\} \quad \text{会系} \quad (2-1)$$

式(2-1)表明, 任何一个 Q_i 的变化都是从 Q_1 到 Q_n 之间所有 Q_j 的函数; 反之, 任何一个 Q_j 的变化都会引起别的 Q_i 的变化($j \neq i, j = 1, 2, \dots, n$), 从而使整个系统发生变化。

令 $n = 1$, 即系统只有一种类型的元素, 则式(2-1)简化为

$$dQ/dt = f(Q) \quad (2-2)$$

上式展开为泰勒(Taylor)级数

$$dQ/dt = a_1 Q + a_{11} Q^2 + \dots \quad (2-3)$$

当 Q 很小时, 可以只考虑级数的第一项, 此时有

$$dQ/dt = a_1 Q \quad (2-4)$$

上式的解为

$$Q = Q_0 e^{a_1 t} \quad (2-5)$$

显然, Q_0 是 Q 在 $t = 0$ 时的量。上式表明, 系统在没有约束条件的情况下会呈指数形式增长, 式(2-5)实为指数增长曲线。但是, 任何地理系统都不会没有极限的增长, 正如恩格斯(Engels)所说: “大自然绝不会让一棵树长得刺破了天”。为此考虑式(2-3)的前两项, 则有

$$dQ/dt = a_1 Q + a_{11} Q^2 \quad (2-6)$$

这是一个简单的非线性微分方程, 后面将会看到它的解是逻辑斯蒂(Logistic)曲线, 这就表明系统在有约束的情况下, 其增长是有极限的。对于人类社会而言, 这种约束主要来自自然环境的生态限定。在系统的生成初期, 由于变量很小, 方程的非线性项可以忽略不计, 这时可以将其增长近似地看成指数形式。但当系统发育到一定程度, 变量较大时, 非线性关系就表现出来。由于方程组(2-1)在地理系统中具有普遍意义, 例如它可用于描述城市体

系^[3,4],故从其引申出来的非线性方程在地理系统分析中也具有一般性。下面以人口增长为例分析人地非线性相关作用的动力学特征。

2.2 人地相关作用的逻辑斯蒂映射

对于一般地理系统的某个变量的增长,可以用复利公式进行描述,即有简单的迭代方程

$$Q_{n+1} = (1 + r) Q_n \tag{2-7}$$

这是方程(2-4)的差分形式, Q_n 为第 n 代某要素的变量值; Q_{n+1} 为第 $n+1$ 代的变量值; $r = (Q_{n+1} - Q_n)/Q_n$ 为增长率。利用泰勒级数关系 $e^r \approx 1 + r$, 有

$$Q_{n+1} = Q_n e^r = Q_0 e^{nr} \tag{2-8}$$

显然,上式与式(2-5)等价。由于实际增长的生态限定,可在式(2-7)中加上反映地理环境约束的非线性项 bQ_n^2 , 并令 $\mu = 1 + r$, 则有

$$Q_{n+1} = \mu Q_n - bQ_n^2 \tag{2-9}$$

再令 $x = bQ/\mu$, 作变量代换, 可得

$$X_{n+1} = \mu X_n (1 - X_n) \tag{2-10}$$

这便是著名的逻辑斯蒂映射。梅(L. May)的生态模型便是这种形式。当参数 μ 选取适当 ($2 < \mu < 3$) 时, 这种映射会逐渐趋向于一个稳定的点(图1), 即所谓不动点(fixed point)。将方程(2-10)还原为式(2-6)型的微分形式, 即得

$$dx/dt = (\mu - 1)x - \mu x^2 \tag{2-11}$$

这是柏努利(Bernoulli)式微分方程, 其解是大家熟知的逻辑斯蒂曲线(图2)

$$x = [(\mu - 1)/\mu] / [1 + ((\mu - 1)/\mu x_0 - 1) \exp(1 - \mu)t] \tag{2-12}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x \rightarrow 1 - 1/\mu$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x = 1 - 1/\mu$, 可见 $x = 1 - 1/\mu$ 为迭代方程(2-10)的不动点。

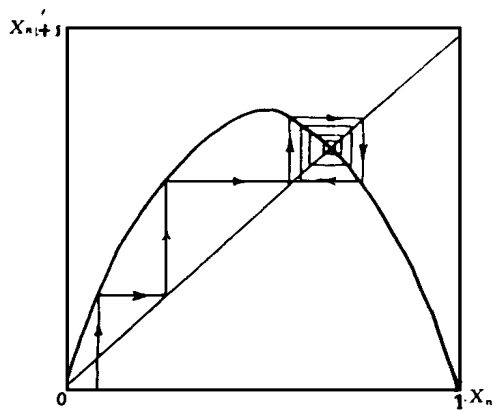


图1 趋于不动点的逻辑斯蒂映射(2<μ<3)

Fig. 1 A logistic map trending towards a fixed point (2<μ<3)

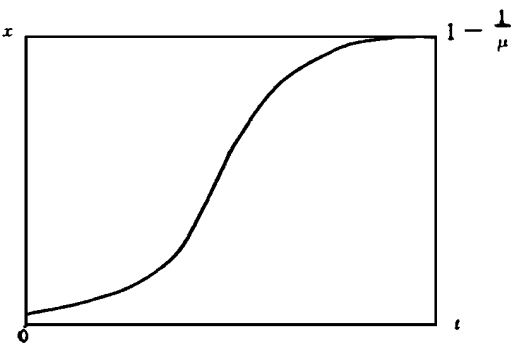


图2 逻辑斯蒂曲线

Fig. 2 Logistic curve

逻辑斯蒂曲线又叫生长曲线, 地理系统中各种要素的增长都具有此曲线的特性, 人口的增长过程最有代表意义。19 世纪人们用式(2-7)描述人口增长, 马尔萨斯(R. Malthus)强调, 人口的这种增长在现实中是不能成立的, 它终将受到环境要素(资源、粮食等)的限制。

但马尔萨斯仍用方程(2- 7) 描述人口的增长。维赫斯特(Verhulst) 改用方程(2- 10) 反映人口的增长, 更为符合实际。不仅人口, 一个国家的粮食单产、工业品年产量等, 其增长都呈 S 曲线型。回想式(1- 3) 表明的环境约束, 不难理解, 人类社会系统任何要素的发展都受自然环境的制约, 人口的增长受到自然的限制最能说明问题。

2.3 人地相关作用的动力学分析

式(2- 10) 虽然是最基本的、只有一个自由度的映射, 却能很好地反映人类社会系统与地理环境之间的相关作用, 参数 μ 的大小反映人地关系的强弱。在人口增长过程中, μ 的大小与人口增长率成正比(线性正相关), 增长率的大小与人地关系的协调程度有一定关系。在一般地理系统中, μ 具有更深刻的内涵。研究表明, 随着 μ 取值的变化, 该模型表现出多种性态^[5]:

- (1) 在 $0 \leq \mu < 1$ 时, X_n 单调减少, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $X_n \rightarrow 0$, $X = 0$ 是一个贫乏的不动点;
- (2) 在 $1 \leq \mu < 2$ 时, X_n 单调增加, 最后趋向另一不动点 $1 - 1/\mu$, 即 $n \rightarrow \infty$ 时, $X_n \rightarrow 1 - 1/\mu$;
- (3) 在 $2 \leq \mu < 3$ 时, X_n 以振荡衰减的趋势渐近于 $1 - 1/\mu$ (图 1);
- (4) 在 $3 \leq \mu < 1 + \sqrt{6} (= 3.449)$ 时, X_n 出现分岔(bifurcation), 进入周期 2 状态, 即在两个值之间来回跳动;
- (5) 随着 μ 的递增, X_n 出现 4 周期 ($\mu = 3.449$), 8 周期 ($\mu = 3.544$), 16 周期 ($\mu = 3.564$), ..., 2^n 周期状态, 这种周期倍增并非没有止境, 当 $\mu = 3.569\ 945\ 672\dots$ 时, X_n 具有一切的周期点, 即进入混沌状态。

费根鲍姆(M. J. Feigenbaum) 发现^[6], 系统 x_n 进入混沌是有规律的, 横轴分岔间距按 $\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} [(\mu_n - \mu_{n-1}) / (\mu_{n+1} - \mu_n)] \approx 4.6692$ 呈渐近等比数列衰减, 纵轴分岔宽度以 $Q = \lim_{n \rightarrow \infty} d_n / d_{n-1} \approx 2.5029$ 衰减(图 3)。系统的混沌过程为何呈 $\delta = 4.6692$ 的规律尚待研究, 但人们已经知道, 混沌是确定型系统表现出的内在随机性。

线性系统不会出现混沌, 混沌的动力学根源是非线性。人类社会与地理环境的相关作用过程, 是复杂的非线性过程。逻辑斯蒂方程可视为人地系统的极端简化形式, 透过这个“窗口”可以观察人地关系的某些法则。当控制参数 μ 太小时, 系统会逐渐消亡; 当 μ 太大时, 系统会进入混沌状态; 只有当 μ 取适当的值, 系统才会渐趋稳定。这就要求人与环境的相关作用必须保持一定的强度, 唯其如此, 才能维持人与环境的协调。进入混沌也许并不可怕, 问题在于人类目前无法控制混沌; 现实中又正因为人类无法控制混沌, 在复杂的地理系统中混沌过程常常出现。因此, 研究人地关系的混沌原理就成为必要。

系统的混沌过程常常产生奇异吸引子(strange attractor)。所谓吸引子是指在 $t \rightarrow \infty$ 时,

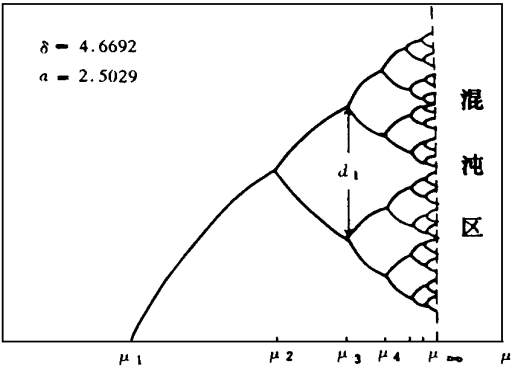


图 3 逻辑斯蒂映射的倍周期分岔示意图
Fig. 3 Period-doubling bifurcation of logistic map

系统在相图上的轨道被吸入的极限集合。最简单的吸引子是不动点,在式(2-10)中,当 $X_n = 1 - 1/\mu$ 时, $X_{n+1} = X_n$, 故 $1 - 1/\mu$ 为其不动点。吸引子的产生与折叠有关,在图1中每进行一次映射,区间 $[0, 1]$ 就被折叠一次,在 $X_n = 1 - 1/\mu$ 时,满足 $f(X_n) = X_n$, 这时折线被吸进一个固定的点而不再运动,表现在逻辑斯蒂曲线上则是 $1 - 1/\mu$ 成为曲线的一条渐近线,系统在此趋于稳定状态,输入与输出平衡。可见不动点作为吸引子的结果是导致系统进入稳定态。不动点实则零维的平庸吸引子。另有一类吸引子,其运动轨道没有周期性,并且对初始条件很敏感,人们将这类吸引子称为奇异吸引子。奇异吸引子具有精细的层次结构,即分形结构,其维数为分数维(fractal dimension)。第一个奇异吸引子是洛伦兹(E. N. Lorenz)在研究全球气候模型时发现的,它的相图看似猫头鹰的面孔,分维为2.06。这种美丽的图式激起了地理学者的无限遐想,许多地理学家正在寻找地理系统中的奇异吸引子。气候在某种意义上是人地关系的中介,既然气候系统中存在奇异吸引子,而人地相关作用过程又是非线性过程,可以想见,在人地相关作用系统中肯定有奇异吸引子的存在。由于吸引子刻画的是系统行为的长远目标,寻找奇异吸引子对于研究人地相关作用的协调机制具有重要意义。

奇异吸引子的分形结构暗示了混沌与分维的关系,混沌过程常导致分形结构。实际上,人地相关作用和过程自身便具有某种分形性质。

3 人地相关作用的分维性质

3.1 人地相关作用与多分维

混沌是自组织系统在时间标度上的变化模式,而分形则是空间标度上的组织模式,二者存在某种意义上的因果关系。讨论人地关系的分维性质有助于理解地理系统的动力学机制。人类参与的地理过程可表示为如下响应形式^[7]:

$$y = mf(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3-1)$$

式中 m 表示人类活动的强度; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为一组自然投入要素; y 表示输出。求导可得

$$\frac{dy}{y} = \frac{dm}{m} + \sum_{i=1}^n \delta_i \frac{dx_i}{x_i} \quad (3-2)$$

式中 $\delta_i = (\partial y / \partial x_i)(x_i / y)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 实为弹性公式

$$\delta_i = |d \ln y / d \ln x_i| \quad (3-3)$$

上式是分维的微分形式,可见 δ_i 具有分维意义。可以证明, δ_i 与多分形(multifractals)奇异性指数有关^[7], 因此人类参与的地理过程具有多分维性,从而人地相关作用过程也具有多分维性质。

分维性质从另一个角度反映了人地关系的非线性特征。式(3-2)显示,在人类活动过程中,各种自然要素的投入与地理系统的输出形成一种秩序,这便是自相似的分形序。通过研究分维数,不仅可以获得地理系统的许多信息,从而预测其变化趋势,而且这种研究在理论上有助于理解地理系统中众多的人文分形景观的形成。

3.2 混沌过程与分形结构

地球表面看起来破碎无规,实则充满了分形构造。所谓分形,系指由与整体以某种方式相似的各个部分构成的一类形体,分形的基本特征是自相似性(self-similarity)^[8]。地理世界实则是一个分形世界,从山脉、水系到城市、交通网络、人口分布,在某种意义上都具有分

形性质^[9]。分形是大自然的优化结构, 因此研究分形结构关系到人类如何合理地利用地理空间问题。那么, 人文地理现象的分形序是如何形成的呢?

首先自然地理系统的混沌过程创生了大量的自然分形景观(如山脉、水系), 自然地理背景的分形构造影响了人类活动的空间图式, 例如地表形态的分形结构肯定以某种方式规定着“流”的路径, 从而导致人类活动的空间秩序。另一方面, 人地相关作用的非线性机制导致混沌过程, 这种过程又具有分维性质, 分维性质的混沌过程必然诱发出分形性质的空间结构。不仅如此, 人文地理过程也具有分维性质, 例如在一个城市体系中, 城镇之间的比速增长便表现出分数维性^[9]。所以, 人文地理系统的分形结构与三个层次的因素有关: 第一个层次是自然过程和自然结构; 第二个层次是人地相关作用; 第三个层次是系统内部要素的相关作用。自然过程和自然结构的影响通过人地相关作用体现出来, 而要素的相关作用则以人地相关作用为运动背景。

人地关系的多分维性质暗示了这种相关作用的复杂性, 同时也暗示了人地相关作用过程中奇异吸引子的多样性。地理系统的分形大多是多分形, 如城市、城市体系、人口分布等。人文地理现象的多分形与人地关系的多分维性的严格关系尚待进一步探讨。

混沌与分形是两门殊途同归的理论, 它们共同构成了非线性科学的前沿领域。运用混沌思想和分形理论研究人地相关作用的动力学机制, 可以揭示人文地理现象中分形体的自组织形成与演化。哈肯指出, 混沌是信息之源, 因此, 混沌也是有序之源。系统的整体效应依赖于非线性, 非线性又导致了复杂性, 正是非线性的作用形成了具有整体效应的地理系统。地理系统从无序到有序, 再到混沌, 完成了系统演化的正、反、合三段论式的辩证过程, 当它进入到有序与无序合一的混沌过程时, 也就创生了充满活力的分形构造。

4 结语

综上所述, 本文要点可归纳如下:

第一, 人地关系是一种非线性关系, 其非线性特征反映在人地相关作用模式(如逻辑斯蒂方程、有人类参与的地理过程模型等)上, 非线性是地理环境的非决定性和人地作用的不对称性的动力学根源。

第二, 人地相关作用过程是一种混沌过程, 这种过程具有多分维性质, 正是这种分数维的混沌过程创造了丰富多采的人文分形景观。

第三, 人地相关作用的混沌特征和分形性质暗示着地球表层复杂巨系统中隐藏着一些简单的自然法则, 揭示这些法则不仅有助于我们发展地理科学理论, 而且必将支持我们对地理系统进行调控, 以至设计优化的分形结构, 从而有效地利用日渐拥挤的人类生存空间。

参 考 文 献

1 Gleick J. Chaos: Making a New Science. Viking Penguin Inc., New York, 1988.

2 Bertalanffy L. General System Theory: Foundation, Development, and Applications, George Braziller Inc. , 1968.

3 陈涛, 刘继生. 长春地区城镇相关作用的分维分析. 经济地理, 1996, **16**(1): 95~ 100.

4 刘继生, 陈涛. 东北地区城市体系空间结构的分形研究. 地理科学, 1995, **15**(2): 136~ 143.

5 高安秀树著(沈步明等译). 分数维. 北京: 地震出版社, 1989. 80~ 81.

6 Feigenbaum M J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. J. Statistical Physics, 1978, **19**(1): 25 ~ 53.

7 陈嵘, 刘斌. 地理过程中弹性系数的分形研究. 分形理论及其应用. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1993. 447~ 449.

8 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman, San Francisco, 1982.

9 陈涛, 刘继生. 城市体系分形特征的初步研究. 人文地理, 1994, **9**(1): 25~ 30.

A PRELIMINARY STUDY ON THE NON-LINEAR
INTERACTION BETWEEN MAN AND LAND

Liu Jisheng Chen Tao

(*Department of Geography, Northeast Normal University, Changchun 130024*)

ABSTRACT

The studies on man-land relationship will not only contribute to unifying geographical theory by getting rid of dualism, but also are great practical value to solving problems on environment, resources, population, and so on. Being based upon the idea of systematic self-organization, the papar advances a new point of view of man-land relationship with non-determinity. The non-linear interaction between man and land is analysed dynamically by means of logistic map which can reflect relationship between a system and its environment. After discussing the chaotic course in the interaction, the authors point out the multifractal nature of man-land relationship. The conclusion is that fractal structure is a good structure of nautre, and chaotic course often leads to this kind of strue- ture. The chaotic course is the very cause which results in human fractal landscape on the surface of the earth.

Key Words: Man-land relationship, Geographical system, Non-linearity, Chaos, Fractal dimension

(收稿日期: 1995- 03- 01; 改回日期: 1996- 05- 16)