

自然地理学中的混沌理论

George P. Malanson, David R. Butler, Stephen J. Walsh

混沌是表述无序中的有序的一个概念：简单确定性系统能产生不可预见的、看起来似乎是些盲目的结果。混沌的概念产生于对非线性动态系统的研究：这类系统代表了大多数自然地理学中的系统。现在系统论作为自然地理学中的理论已被人们广泛接受，但是“非线性”这一概念并非如此。在自然科学中，由于混沌理论愈来愈引起人们的注意，而且在一些表面上似乎是无序的系统中显现出潜在的有序性。因而，有必要对自然地理学中的混沌理论以及地理学家对此的态度进行讨论。

混沌理论在物理学中正得到很大发展（如Harrison和Biswas, 1986），尤其是流体动态物理学。后来在科学研究中记录到了更为典型的混沌现象。Thornes注意到古水文学中混沌理论的潜在重要性。Culling对该理论及其在自然地理学中的含义作了全面细致的、富有启发性的研究。

Tsonis和Elsner（1989）称混沌理论“已被许多学者视为20世纪继相对论和量子力学之后最重要的发现”。Huggett（1988）曾提出在自然地理学地貌学中应用混沌论的适宜性。因为地貌系统中的能量与物质是消耗性的，是非线性动态系统很好的例证。最近，Day（1981）、H-W. Lorenz参考人文地理学，讨论了经济学系统中的混沌现象。

一、混沌的基本原则 混沌理论有三个中心原则。第一，很多单一确定性动态系统，如流体现象、机器运转包括反馈，是很少可以预见的，但是这些系统变化的特性可以通过描述性很好的方程而具体化。

对于从事系统研究的自然地理学家来说，单一确定性系统具有不可预见性的观点是错误的。由于我们所研究的表面上似乎不可预测的系统极其复杂，因而需要一个随机变量来模拟。但，实际上众多系统能够用一组确定性非线性方程来描述。这些方程没有分析结果，从而导致系统状态无法得到解释，也不可预测。随着人们愈来愈依赖功能强大的电子计算机，人们更易忽视这些方程的数字结果中所出现的问题。正是由于我们倾向于认为系统是可以预测的，才导致我们在确定性模型中依赖随机变量，甚至在因果分析中导致建立纯粹的随机模型。地貌学中过去经常用灾变理论来模拟河道情况，但Thornes（1980）指出用混沌理论模拟河道是十分有效的。

第二，一些系统对起始条件很敏感，如系统在其状态的某一时间很小的差异，会导致另一状态的很大差异。

所谓对初始条件很敏感是指：系统任何一部分微小变化会导致未来状态的巨大差异。在大气模型中，这种情况是客观存在的，有人称之为“蝶式效应”（“Butterfly Effect”）。Lorenz（1964）在其一个单纯大气模型中认识到了这种情况。他发现用于描述一个系统的方程组中的几个变量，在某一时刻微小的变化，会导致愈来愈大的差异性结果。而且每个结果在人们看来都是可行的。

第三，由前两者相结合而产生的表面上看是混乱的情况，而实际上是很有序的。而且对这种有序形式的研究揭示了自然规律。

当某个系统中一个或更多方程对初始条件很敏感时，混沌的前两个原则才能同时发生。

看来很多系统是适合这种模型的。绝大多数的数学内容和大部分客观世界都是非线性的。大气、水和块体运动中的紊乱状况丰富了自然地理学内容。确切地说,在其它性质的系统中也存在这种混乱现象,如复杂的生态系统行为。

Culling (1985) 列举过混沌系统三个更确切的方面:(1) 当数据参数达到无限大时,平均相关函数趋于零;(2) 灵敏度依赖初始条件;(3) 轨道没有周期性。

二、混沌的表征 1. 奇特的吸引极 (Strange attractor) 系统状态随时间变化的阶段图可用来描述系统。但是绝大多数阶段图只是对那些能用三维空间概括的简单系统才具有较好的描述作用。如果系统状态能够被三个变量(除时间外)度量,并且这三个变量控制系统动态变化过程,那么用一个轴表示一个变量,就可以用三维空间描述系统的动态表现。

非混沌系统的表现有两个特征类型:其中一类是在系统运动过程中某一点上系统行为停止。摆是角度和速度的函数。在运动过程中的某一点上会停止摆动。在这两个变量的段空间里,摆锤向中心点集中。在自然地理学中,一个准平原或一个顶极森林群落,在理论上可以表示这一过程。另一类典型表现是具有固定循环。系统状态都集中处在循环内,从而被认为是周期性的系统表现。

此概念的延伸可以用主成分分析法分析所得到的突出表现森林组成特征的图表来说明。在主成分分析的二维空间中,可认为系统的动态过程受两个变量控制。当众多地块森林的平均状况都集中到中心点时,表示仅有1/2公顷地块围绕中心点运转。二维有限循环的变化是环形曲面。系统状态在很细小差异的情况下进入环形曲面,环形曲面在同一周期过程中保持连续的分裂。

在段空间中,系统集中的那些点可称之为吸引极。点和有限循环是两类普通的吸引极。它们使系统具有长期的可预测能力。它们代表了对于自然地理学的介绍书籍(如:Scott 1989)中所描述的均衡条件之一类。重要的是拥有这些吸引极的系统对初始条件并不敏感。这就是构成自然地理学绝大多数理论的那类吸引极。

然而,混沌理论告诉我们,还存在另一类可称之为“特殊吸引极”的吸引极。这类系统的第一个范例至今仍然是最好的例子。Lorenz (1963)研究了早期全球气候模型,用一组方程描述了系统行为: $dx/dt = -ax + ay$; $dy/dt = -xz + bx - y$; $dz/dt = -xy - cz$ 。当x、y、z间的关系绘制在三维空间图中时,出现了猫头鹰面具形状的图形。线无限长,但不相交。测得其fractal^{*}维数为2.06。相互很靠近的轨迹线发生偏移,向吸引极不同部位移动,形成不同的系统状态。特殊吸引极的运作不很规范。在有限容量中,单纯确定性系统可拥有长度无限的吸引极,而且它们的维数是fractal而不是整形的。Culling (1985)提出了常见的特殊吸引极,并讨论、分析了它们的维数。尽管吸引极还很难概念化,但是与自然地理学中更常见的显得随机的时间序列相比,吸引极的地理现象表现出一种潜在的有序性,如同一幅美妙的图景。

2. 段空间的维 Packard等(1980)、Froehling等(1981)、Grassberger、Procaccia (1983)和Grassberger(1986)提出了分析由特殊吸引极规定的段空间极限的方法。Tsonis和Elsner (1989)、Rodriguez-Iturbe等(1989)提供了一个可供探索的可能性轨迹例子。Tsonis和Elsner (1989)指出n个一阶微分方程组可以减化为一个n阶非线性微分方程。

* Fractal这个词是曼德布罗特(Mandelbrot)1975年首创的。词源是拉丁语的形容词Fractus,此后又派生出了Fractional(小数的)和Fracture(破碎)等词。就是说,基本上可以认为Fractal是许多碎片聚到一块的状态。然而,这个词还没有准确的定义。译者注。

(数学分析中的倒数方程)。他们指出还能得到一个接近于系统动态过程的、用来表示未知状态空间的点集。采用其中一种方法,可以计算出一个维,称之为Hausdorff-Besicovitch维。它表明估计点集系统所需的变量数下限,理论上限大体是下限的两倍。Tsonis和Elsner(1989)指出:一个极其复杂的时间序列的参数可以减少到7—15个变量,但是仍然无法识别它们。Rodriguez-Iturbe等(1989)估计降水的零时形式(15秒间隔)可以减少到四维。Schaffer(1984)认为生态系统和人类疾病的流行做同样深入的研究是很值得的。在自然地理学其它领域中运用同样的方法也可证明是有效的。Ruelle(1987)提出了一个处理混沌和时间序列的一般措施。Thompson和Stewart(1986)以及Parker和Chua(1989)提供了更多有关分析方法的信息。

三、自然地理学中的混沌 假如自然地理学中的系统是混沌的,那么如何才能研究这些混沌系统呢?

首先,自然地理系统并非用 n 个方程描述的那样简单。然而,这些系统的基本特性经常建立在流体动力学(包括湍流)的基础上。如果这些潜在的过程是混沌的话,我们可以认为景观系统和生态演化也是混沌的。Qerlemans(1981)在冰川中验证了混沌现象,Rodriguez-Iturbe等(1989)在一个简单的雨量器中,在降雨事件的零时性动态过程中发现了混沌的证据。这些研究表明空间维数的增加将提出有意义的挑战。

混沌的理想范例:①生物地理学:森林动态系统。混沌分析要用到森林动态过程的很多因素。即使一个简单的单因素森林动态模型也包括了气候、土壤以及树木间竞争的条件等因素。简单的探索已经表明这些模型对初始空间组合很敏感(Huston等,1988)。对这类模型全面确定性描述大致需要据有现在物种数量两倍的方程数。增长方程包括了种间竞争,因而也包括了每个循环的反馈,故此类系统是非线性的。

模型可以产生众多用来描绘阶段图的数据资料。它可能包括全球变量,如物种多样性、总密度、生物量、所有物种叶面积或某个物种的叶面积。它还包括这些变量的变化率。另一种方法,就是建议用概括群落信息的分类得分来作为定义段空间的对等变量,被证明也是有效的。这些变量不可能非常准确地描述维之间的差别,但是用于区分整集和fractal集也许是足够的。

生物地理学中景观——水平过程是一个非常有趣的研究领域,并且对于用多元模型绘制的森林景观来说,阶段图应该包括半方差分析得到的信息和其它专门的空间资料。

此类模型一年一度的轮回产生的变量值,如果经历几千年,也就是说,远远超出了此类模型的正常运行,那么就会产生一个阶段图。对于森林群落来说,如果模型每年反复一次的产出与其它的相一致,并且如果在三维空间中绘制随时间变化的位置轨迹,那么就能够揭示系统吸引极的类型。这些值会集中在一个固定点上,或者以一个固定有限的周期呈现周期性变化。从理论上讲,他们遵从混沌方式。

②地貌学:多边形土。多边形土的形状凹凸不平可能与混沌过程有关。Vitek和Tarquin(1984)描述了科罗拉多地区多边形石形状的变化。他们推断这种复合形状是由于坡面倾斜和植物生长过程所导致的岩石拉伸的结果。Ray(1983)、Gleason等(1986)先后提出一模型。此模型归纳出多边形土的规律性,是由密度(差)引起的对流单元所导致的。在此过程中,地下冰的波状构造形成了观察到的岩石形态。此后不久,Kellogg和Turcotte(1990)提出地幔的对流元显示出确定的混沌现象(参照Julian1990)。如果地幔的对流元过程是混沌的话,那么在局部地貌特征的尺度上,相似的自然过程也可显示出混沌现象。也许用确定的

混沌过程解释多边形土结构的变化比用相互作用的随机现象解释更为确切。查明基础过程中的混沌现象将是很困难的。然而,在某些领域将会出现一个相关的问题,这些领域内已发生的过程运行可能由于全球性的气候变化而缩短(参看Butler和Malanson1989)。

③数据源:遥感。在景观方面探索混沌的另一领域是遥感和地理信息分析的应用(参照Lovejoy和Schertzer1988)。遥远地感知景观表征、数字立视模型,和其它空间参考数据可用于验证景观过程中的混沌理论假说,或者用于探索混沌理论的证据。Fractal几何方法可用于从人造卫星获得的景观信息。它还可由完全在地理信息系统决定的重要尺度内正在变化的集合单位的主体范围所表示(Nellis和Briggs1989, Lam1990)。Goodchild和Mark(1987)注意到独特的景观特征仅仅发生于那些控制过程函数,或fractal维数恒定不变的空间尺度上。随之发生的是,此景观的空间形式可能在不同空间尺度的分辨率上呈现出差异。

由于数字卫星资料和地理信息系统的可用性,现在能够系统地研究空间尺度对景观形式的作用,并且评价一个景观的组成和结构。不同空间尺度下显示的景观形式(如陆地卫星和SPOT卫星影像的30米、20米、10米象元)与景观的持续再生过程有关。收集的用于验证数字地被分类或遥感数据的数字增强的地面控制信息的类型,能改变传感器系统的空间分辨率和在相应尺度下工作过程的共同后果。除此之外,来自遥感数据的景观形式的可辨性能也受数据信噪比的影响。因此,空间滤波技术可能很有价值。在滤波过程中,使用者定义大小的“核心”通过数据,以增强或减弱敏感的、显著的、或定向的光谱响应的可变性,以及在不同时空尺度下的模式。因为地理现象的拓扑特性在遥感信息里有所反映(DeCola, 1989), fractal分析方法适用于确定空间自相关的尺度(Burrough1986),因而用来表明混沌过程可导致的混沌模式的尺度。

与地质结构相关的景观特征可能是需调查的一个领域。Ford等人(1990)用遥感判别出Mojave沙漠中大量的表层断层,这些断层可表明潜在的地质过程。Walsh(1990)、Butler与Walsh(1990)等人把遥感和地理信息分析结合判别北落基山脉影响雪崩径迹位置的因素。在近来的研究中,空间滤波技术被用于调查重要的形态和模式。遥感的应用依靠的是监测变化空间特征时对动态过程很敏感的光谱响应。譬如,当Walsh等人(1989)把遥感数据和数字立视模型数据结合研究两种不同空间尺度的山地景观模式时,他们也许已利用了fractal分析方法来验证创造景观的过程之间的空间关系(即,更新世冰川的定向运动和空间范围及与环绕在山脉周围的冻土带不连续范围相关的气候地貌因素)。最终,空间数据与系统的动态模型相结合才能确定景观混沌现象的存在和运行(参照:Armstrong1988, Malanson和Armstrong 1990)。

四、结论 Culling(1985)对自然地理学有关混沌理论的探索和解释方面的进展几乎不抱希望。他注意到从地理联系的各种干扰中提取出混沌的难处。在论证混沌存在于人口生态学和人口遗传学时,May(1987)注意到“在不同自然背景下,附加的环境干扰通常将动态过程复杂化,使人口数据难以显示出优美的属性”。Further、Berryman和Millstein(1989)论述道:生态系统尽管包含有混沌理论的种子,即确定的反馈过程与负反馈方面的时间间隔,但生态系统似乎显示不出混沌特性。因为自然选择倾向于最大程度地降低系统混沌的特性。可是,Culling(1985)推断混沌论的研究并非是学院派脱离实际的空想。混沌理论带来的不仅是平衡态的结局(平衡态,可解释为这样一个概念:系统不论初始条件如何,最终将达到同样的状态,譬如地貌系统),而且是可预见、有目的和可控制的结局。

混沌理论对环境科学已产生影响。地理学家们需要明白这句话的含义。摆在地理学家面

山地理论与应用研究的进程 (1973~1989)

及今后的主要任务(二)

——山地研究的应用及今后主要任务

Jack D. Ives, Bruno Messerli

一、山地生态系统的稳定性和不稳定性 山地生态系统稳定性和不稳定性研究贯穿于山地研究的各个方面。因此山地稳定和不稳定性成为1982年9月14~19日在伯尔尼——里德拉尔普(Berne-Riederalp)召开的专题讨论会的主题。人们除了关心世界不同地区山地环境的实际现状外,已意识到需要提出一个潜在问题,就是怎样判断一个特殊的山地生态系统是否稳定?因此与会者首次提出了一些基本问题:我们所说的“稳定”和“不稳定”究竟是什么意思?我们应如何定义它们(以及与之相关的一些术语,如“脆弱”、“易受影响的”、“弹性”及“抵御力”等等)?难道对生态系统的不同状态,如自然状态、农村生存经济状态及系统技术高度发达的状态需要做一相同的解释吗?

当人们争论这些问题时,一个早已被公认的挑战再次出现在人们面前:由于植物学家、地貌学家、气象学家、人文地理学家、人类学家、农业经济学家以及工程师(这里提到的只是少数)对稳定性和不稳定性认识不同,并且在一些实际工作中,用各自不同的方式定义同一术语,因此多学科专题讨论会与会者们怎么能够希望得到一致的结论呢?在解决与山地生态系统利用与管理有关的实际问题中,这次讨论会起到什么作用呢?因此,解决上述的挑战仅仅是迈向确定讨论会作用的一步。

人们同样也在争论这样一个问题:是否确实由于缺少科学的资料、或是资料中错误很多、或是资料不能利用、无法管理而严重阻碍了资源开发政策?假定我们被委托去研究山地生态系统,不仅是为了满足我们理性的好奇心,而且是为了更有效、持续利用山地资源提供基础。这就必须涉及从山地栖息地的保护到资源开发利用的运用范围。

同时,也出现了许多持续至今的重要的伦理问题。众所周知,由于过度使用和滥用“脆弱”这个词,从而使其成为一种倾向。在20世纪70年代早期,环境保护论者夸大其事实,这也许是必要的(尽管这是值得争论的)。这样,每个生态系统变得脆弱了,笼罩着“厄运”和“毁灭”这些词本身也就失去了价值。科学的可靠性这个严重问题依然存在。

20世纪70年代和80年代初期,当科学的注意力日益转向动力学和生态系统运行机制的研究时,过去对生态系统从一个特殊的紊乱状态或从人类的影响中(常常被发现是不良影响)恢复到原状的能力估计不足的情况,变得越来越明显,因而出现了很多问题。从某种意义上来说,由于辩论能为开发者无视科学家的警告提供借口,因此,开这种辩论会是不明智的。另一个极端是:夸大了逼近的环境灾难的事实,可能会妨碍协调开发的良机。这使我们深信在
* * * * *
前的是能否在此理论领域取得进展,能否利用混沌理论更好地理解真实的地理过程。阻碍进展的一大障碍是相位图的结构要求有大量的数据点。在适当的区间和适于问题的时间范围之内获得真实的数据是困难的。不过,随着遥感、电子侦察、计算机模拟逐步成为大众化的工具,将能有大量数据应用于自然地理学中。

王云才 朱登兴 宫新荷译自《Physical Geography》,1990,11(4),杨燕凤校