

混沌理论在地球科学中的应用、问题和前景

Application, Problems and Prospects of Chaos Theory

连长云

(长春地质学院, 博士 长春 130026)

混沌理论是本世纪 60 年代出现的一种新理论, 尽管历史很短, 但其发展速度却令人惊奇。混沌开拓了人们认识复杂现实世界的新思路, 提供了人们了解自然界本来面目的新方法。目前, 混沌理论在各门学科中的研究方兴未艾, 地球科学也不例外。似乎有理由认为, 地球科学是最适宜于应用混沌理论进行研究的领域, 而混沌理论的应用也必将推动地球科学的蓬勃发展。

一、混沌理论

1. 混沌概述

一般人认为, 混沌就是混乱无序, 但这只是它的字面含义。早在中国古代的《庄子》一书中就出现过混(浑)沌这个词。让人意想不到的的是《庄子》应帝王内篇中的最后一篇所提到的混沌竟是一个皇帝的名字。庄子写道“南海之帝为倏, 北海之帝为忽, 中央之帝为浑沌。倏与忽时相与遇于浑沌之地, 浑沌待之甚善。倏与忽谋报浑沌之德, 曰‘人皆有七窍, 以视听食息。此独无有, 尝试凿之’。日凿一窍, 七日而浑沌死”。可见, 即使在当时, 庄子所讲的混沌也不是混乱无序的含义, 而是有某种理性的东西隐寓其中。今日科学的混沌概念, 指的是在一个确定的系统中出现的貌似不规则的运动, 这种运动既不是纯粹的有序, 也非纯粹的无序, 而是一种混沌序。混沌把确定性与随机性的内在联系、有序和无序的相互转化集于一身并神奇地表现出来, 从而把人们的思维带到一个广阔的崭新领域。那么? 混沌是怎么产生的呢? 简单来说, 混沌的产生是由于非线性系统随着控制参数的改变(非线性增强)而逐步演化的结果。当控制参数小于其临界值时, 非线性方程的解稳定, 对应于系统的平衡态或近平衡态, 这时的系统处于无序状态; 当控制参数达到其临界值时, 方程解失稳并发生分叉, 此时系统远离平衡态, 形成新的有序结构即耗散结构; 当控制参数越过临界值并进一步增大时, 系统发生多次分叉

, 由有序状态逐渐进入混沌状态。进入混沌状态的系统具有对初始条件的敏感依赖性, 从而导致其长期行为的不可预测性。

2. 混沌理论体系

自然界中混沌无处不在, 研究混沌现象需要一套科学的理论和方法。那么混沌理论体系如何呢? 笔者于 1994 年(见《科技导报》1994 年第 5 期)提出混沌理论至少应包括三部分, 即非线性动力学、耗散结构理论和分形几何理论。重申这一点不是没有意义的。事实上, 从前述混沌的形成机制看, 耗散结构、分形和混沌是紧密联系在一起。耗散结构的产生是非线性系统向混沌演化过程中特定阶段的产物, 而分形是系统演化过程的内在反映, 系统演化的产物也必然具有分形特征。因此, 将耗散结构理论、分形几何理论纳入混沌理论体系之中是必要的和有意义的。

二、混沌理论在地球科学中的应用

如前所述, 混沌理论研究非线性动力学系统的行为演化特征, 一方面, 系统随着非线性增强, 必然会经历从无序到有序再到混沌序的演化历程; 另一方面也说明, 简单的系统可能具有复杂的性态, 而复杂现象的背后未必不是一组简单的方程。因此, 混沌理论拓宽了人们的视野, 开阔了研究思路。对地球而言, 它是一个开放的复杂的巨系统, 其中包含各种尺度的时空层次结构, 这些结构之间又不断地发生着相互作用, 其整体行为和演化是非线性的, 换句话说, 地球系统中的许多作用和现象都具有自组织、分形和混沌特征, 说明地球演化至今已被永久地锁定在混沌状态, 因此, 应用混沌理论来研究和探索地球系统的奥秘也就是自然而然的了。近年来, 尽管混沌理论在地球科学中的应用相对比较缓慢, 但在下述几方面已经进行了研究, 预计这些研究会更加深入地进行下去并将取得新的进展。

1. 碎裂现象的研究

碎裂作用(fragmentation)是固体地球科学中最基本的一类作用,它包括各种尺度上的破碎,大至地壳上的深大断裂,小至晶粒中的微裂隙。碎裂作用的研究,不仅有助于了解地球演化过程中发生的各类地质作用的本质,而且对实际的找矿工作及工程建设等亦具有重要的指导意义。直接对地球系统中自然的碎裂作用过程进行观测和研究往往是困难的,但通过对碎裂作用产物的研究可以反演碎裂过程,从而获得对地球中这一基本地质作用的深刻认识。所谓碎裂作用产物,包括碎裂以后产生的碎片(颗粒)以及碎裂产物的几何形状和空间分布两方面的含义。众多事实表明,碎裂作用产物具有不规则性(复杂性)与统计自相似性,因此,很多学者利用分形理论对此进行了研究。特科特(D. L. Turcotte)提出了碎裂作用的理想模型,认为具有标度不变性的破碎现象必将导致分形分布。很多碎裂作用产生的碎裂物大小—频率关系的分形特征也佐证了这一点。奥库博(P. G. Okubo)利用覆盖法研究了美国圣·安德烈亚斯(San Andreas)断层系的分形几何特征,较高的分维对应于较复杂的断裂几何;海勒塔(Hirata)研究了日本断层系的分维,结果表明,日本岛弧中部的分维值约为1.5~1.6,且随着离开中心距离的增加而减小。海勒塔的进一步对比研究表明,不同尺度的岩石破裂几何形状的分维有一个大约为1.6的上限,而且不仅仅是岩石,其它材料也如此。这种与尺度及材料无关的分形特性说明了碎裂作用自身的标度不变性与普适性。

碎裂作用的另一个产物的实例是地震活动。地震学中的著名定律即古坦伯格—里希特(Gutenberg—Richter)定律描述了震级大于 m 的地震数目 N 的分布,阿基(AKi)已经证明了地震的频率——震级分布等价于分形分布。特科特的研究表明,通过区域地震活动性的分形关系的外推,可以对未来地震进行合理的预报,但同时要综合考虑其它因素。此外,如果承认每一断层都发生一次特征地震的话,地震活动性的分形分布事实上就意味着断层的分形分布。

我们还可以将碎裂作用进一步推广。现在已认识到,地球科学中或是由于缺少完备的初始资料,或是缺少很好的模型,使得对有关预测一类问题的研究变得非常困难。我们能够得到的往往是许多单变量的时间序列。可以将这种蕴含着丰富动态特性的时间序列看作是地球系统在时间方向上广义碎裂作用的产物。笔者对中国大陆不同时代主要深断裂的分形特征研究表明,由老到新,断裂系统具有升维的特点。帕卡德(Packard)等人提出的利用时间序列重建相空间的思想,不仅可以刻划时间序列的分形特征,而且为基于预测的建模所需的变量选择提供了基础。

2. 自组织现象的研究

所谓自组织,是布鲁塞尔斯(Brussels)学派最初在研究非平衡系统形成耗散结构这样一类时空有序结构时提出来的概念。后来的研究表明,自然界中许多复杂系统在非平衡过程中一定条件下都能够产生这种自发的有序行为,如时间上的周期性、空间上的相干,或两者兼而有之。地球科学中存在大量的时空有序现象或系统,如矿物中的各种环带、变质岩中的分异层理、矿化分带,成矿作用过程中的相干结构、大气对流、蕴震系统等等,传统研究认为这些时空有序结构是外部环境发生周期性变化的结果,而现在应用耗散结构理论对这些现象进行的解释不仅在理论上令人信服,而且得到许多实验资料的支持。

米比内里(Mibinery)和诺耶尔(Noyer)等人通过稳定性理论分析合理地解释了李泽冈环带及一些振荡性(条带状)构造的成因。柳崇健对大气系统的研究表明,大气系统是一个开放的耗散系统,其内部存在着产生正熵的不可逆过程。如果环境没有负熵流入,则由于系统内部自发的增熵过程将使系统不断地趋于无序状态。那么,象台风和气旋这样的有序结构体是怎么形成的呢?唯一的答案就是:环境向系统提供负熵流。当负熵流超过某一阈值时,系统不再服从线性非平衡态回归平衡态的规律而产生宏观的时空有序结构(台风或气旋)。

成矿作用是地球系统中另一类重要的地质作用。目前对成矿作用的研究主要集中在矿质和矿液来源、矿液迁移的动力、成矿元素的迁移方式、成矿物质的沉淀、控矿构造以及成矿作用的物理化学条件等几方面。应用演化或动态的观点研究成矿作用代表了目前一个新的研究方向,认为成矿作用是一个不可逆的非线性过程因而必须采用不可逆过程热力学理论进行研究的观点也已经得到越来越多的人的认可。于崇文对成矿作用与耗散结构的研究表明,成矿作用的时空有序结构即是非线性成矿系统演变为耗散结构的反映。时间上的有序结构即成矿作用的动态演变与时间韵律是耗散结构的多阶段性或相继分支的必然结果;空间上的有序性,即成矿区带,则是耗散结构局域化的产物。可见,耗散结构理论的应用将极大地丰富成矿作用研究内容,对深刻揭示成矿作用本质具有重要意义。

蕴震系统的耗散性及其自组织行为是目前地震工作者积极投入的一个研究领域。研究表明,蕴震系统是一个开放的、远离平衡的非线性耗散系统,该系统行为发展的结果必然导致耗散结构及混沌的出现,地震活动的自组织结构及长期行为的不可预测性充分证明了这一点。目前很多学者对混沌理论在地震预报方面的应用进行了研究。可以认为,混沌理论在地震研究中的应用为深刻了解地震

活动机制及其演化规律,充分认识地震预报的科学意义提供了有益的启示。

3. 演化和预测的研究

演化和预测问题一直是地球科学中的重要研究内容。混沌理论刻画了非线性系统如何演化及其演化历程,为我们提供了研究地球系统演化及预测的全新思路。利用现在能够得到的变量时间序列重建相空间,从而建立模拟系统演化的非线性方程组,可能是研究系统演化历史的有效途径,而在此基础之上的预测则还需在不同尺度和层次上分别进行。目前,有关这方面的探索性研究刚刚开始。应该指出的是,任何有关地球系统演化和预测的有意义结果,都必须依赖区域及全球性的观测和研究才能实现。

三、混沌理论在地球科学研究应用中存在的问题

混沌理论改变了人们的思维方式,从而导致以研究复杂性和定量解释地球系统演化为目的的努力,这方面的努力仍在继续之中,但意识到以下问题并进行深入思考是有意义的。

1. 混沌理论在地球科学中的普适性问题

我们知道,由一套确定的非线性方程组所代表的混沌系统包含较少(有限)的自由度,这样的体系经过分叉演化而最终进入混沌状态,其耗散结构和分形可以看作是这一演化过程的“快照”。但长期以来,地球科学家都感到地球系统似乎是有许多自由度的,因此,布鲁克赫文国家实验室的物理学家P·巴克提出的包含很多自由度的临界状态理论似乎更具有吸引力。实际上,自组织临界状态的演化也具有混沌性质,只不过这种系统的演化在混沌的边缘上进行(也称弱混沌)。因此,将混沌理论与自组织临界状态理论结合起来,相互印证与补充,可能是获得对地球演化过程深刻认识的有效途径。

2. 地球系统中混沌现象的可预测(报)性问题

地球科学家研究地球系统演化的目的,很大一部分源于预测的需要。混沌理论告诉我们,非线性系统的长期行为是不可预测的。洛仑兹在60年代研究大气系统时就作出结论:长期气象预报注定是要失败的。那么,混沌理论是否就意味着不可知论?最新研究表明,几乎任何混沌在一定尺度和一定程度上都是可以预报的,只不过其预报精度和提前时间均受到一定限制。地球由各种尺度的层次系统组成,对这种不同尺度层次系统特征进行预报的期望依赖于平均处理,时空尺度越大,其特征就越平均,预报的可能性就越大。这说明,在给定的时空尺度范围内,确定反映系统本质的整体特征并建立其间的相互关系是合理预测的关键。1991年莫宁在研究

混沌现象的可预报问题时指出,白噪音序列(即指在一个平稳随机序列中,进行频谱分析,如果这一序列是不相关的,则频谱为一常数,这表示能量在各个频率上是均匀分布的)是不可预报的,而高度集中的非均匀分布的线谱具有较好的可预报性。一般的现象是介于二者之间的中间状态,因而具有不同的可预报性和可预报上限。可见,不同的对象,在不同的尺度上具有不同的可预报性和可预报上限,这是地球科学中的一个重要特征。意识到这一点对实际的预测工作是很重要的。

3. 地球系统中混沌现象产生的根源

动力系统中混沌现象产生的根源一般来说有三种:一是初始资料在利亚普诺夫(Lyapunov)不稳定条件下的随机性;二是随机的外强迫;三是相流的内部复杂性。已经证明,地球科学中的许多系统存在着混沌行为。那么这种混沌行为的根源又是什么呢?如果将地球视为与外界环境(例如太阳系)不断进行物质和能量交换的子系统的话(实际上也是如此),则随机的外强迫,即来自太阳系的随机力也许是形成地球混沌性态的主要根源。

4. 混沌模型的可信度问题

缺乏对地球作为一个整体进行的观测及全球性的对比研究,可能是地球科学中现有的混沌模型难以走向成熟的主要问题。混沌系统的格斯塔尔特(Gestalt)现象(即混沌系统的普适性特征无法从其各部分之间的相互作用中导出)说明,要想真正了解地球中某一系统的本质,必须从全球的角度研究该系统的总体特征,而企图通过将系统分解为小系统从而来了解该系统的努力必定是徒劳的。可以说,一旦我们站在全球的高度,建立可信的地球系统混沌模型的目标也就不会太久远了。

四、混沌理论在地球科学中的应用前景

如前所述,混沌理论已经广泛地用于研究地球科学中的各种现象、作用和过程。但就目前来看,存在的问题要比能够回答的问题多得多。这主要是由于地球系统太庞大、太复杂所致,也正因为如此,混沌理论在地球科学中具有广阔的前景。除继续深入研究现有领域之外,混沌理论将在以下几方面发挥积极的作用。

1. 地质作用过程的热动力学研究

大量研究表明,地球是一个复杂的热动力学系统,其热力学特性表明地球是一个与周围环境不断地进行物质和能量交换、并一直维持不可逆演化的开放系统,其动力学特性表明地球又是一个与外界或内部不断地发生相互作用、变化和发展的动态系统。地球系统的这一特征决定了不可逆过程热力学和动力学在地球科学中的地位和前景。因此,进行

地质作用过程的热动力学研究不仅可以揭示地质作用的本質,使地质研究从静态上升到动态、从定性走向定量,而且对突破传统的地质理论、指导实际的地质工作和进行合理预测具有重要的意义。

混沌理论的应用研究正好适应于地球这样的热动力学系统。确定性混沌已经在大气圈动力学研究中得到广泛应用,对天气预报具有重要意义。如果我们能够建立地球系统中描述各类地质作用的动力学方程,那么,我们对地质作用过程或现象的认识必将上升到一个新的高度,并有可能建立相应的预测模型。

2. 分级预测模型的建立

地球科学的重要任务之一即是认识和了解地球及其演化规律,并据此对各种作用、过程和现象作出正确的预测。混沌理论表明,处于两个分支点之间的系统,在相应的时空尺度范围内可以进行一定程度的预测;系统一旦越过分支点,必须在新的时空尺度范围内进行预测,原来尺度范围的预测结论不再可靠。地球系统的层次结构已众所共知,因此,建立不同层次、不同时空尺度的分级预测模型势在必行。如何确定各种地质作用、过程或现象的时空尺度及在该时空尺度下这些作用、过程或现象的总体特征和演化行为将成为今后研究的热点和难点。

3. 地球起源及演化的混沌模型

从混沌的角度研究地球的起源及演化将成为新的长期的主攻方向,这一努力的实现将通过许多重大地学问题的各个击破配合行星演化研究而逐步获得。众所周知,当代人类面临着生存、安全和发展的问题,包括区域性及全球性的自然灾害、全球变化、环境恶化、资源枯竭,特别是水资源危

机、气候预测、海洋开发、空间利用等等,这些问题的解决无一不涉及到对地球系统的认识,而如何深刻地认识地球,找到解决上述问题的途径,已经成为摆在地球科学工作者面前的首要问题。混沌理论提供了认识和研究地球系统的新思维,使得以整体的、系统的和非线性发展的观点刻划地球及其行为演化成为可能。事实上,诸如大气、冰川、水系、地貌、成矿作用、地震以及地磁极的倒转、地幔对流、古生物的大规模灭绝等等重要的地质作用及现象已被部分地证明属于非线性耗散系统及其演化的产物,它们的混沌性态已经或正在被阐明。可以预料,随着地学中一些基础性重大理论和实际问题的逐步解决,宇宙学和天体演化知识的不断积累,天、地、生相互关系的深入认识,关于地球的起源及演化的混沌模型必将被建立,人类将有更充分的能力对付来自自然和源于自身的挑战,尽管这一进程可能十分漫长。

总之,混沌理论在地球科学中的研究和应用正刚刚开始。美国国家航空和宇航管理局地球系统科学委员会在阐述地球系统科学时指出:“我们最大的关心莫过于这个星球的未来以及依赖于它的生命。对太阳系的其它星球的探索已经证实了我们这个世界在它们中间所占的非常特殊的地位:唯一有生物圈的星球;唯一有充裕的氧气和液态水的星球;唯一有板块构造过程不断更新地表结构、使生命所必须的营养物质反复循环的星球。为保护地球以使未来人类得以居住,我们必须对全球过程有一个更深刻的科学认识”。现在是通过探索复杂性的混沌理论来响应这一挑战的时候了。

(责任编辑 蔡德诚)

科技动态

用吸水树脂防止 土地沙漠化

土地沙漠化已成为一个世界性问题,土地一旦变成沙漠,想让它再变成绿洲和良田,代价是非常昂贵的。最好的途径是防患于未然,使土地不要变成沙漠。要防止沙漠化,首先要搞清土地沙漠化的原因。科学家研究后认为,土地变成沙漠有天然因素和人为因素。

天然因素是气候干旱多风和大量疏松的沙质地面等自然条件使土地大量失去水分。所以降雨量在150毫米以下的地区,沙漠化倾向极为强烈。而人为的不合理开垦、放牧、滥砍林木,破坏生态平衡,往往是造成土地沙漠化的主要原因。因此,防止土地沙漠化必须从两方面着手。一是制订法律和规划,保护天然植被,营造人工林带、人工草场、合理利用森林资源和草场资源;二是尽量降低天然因素的影响。降低天然因素影响的方法之一是设法减少土壤中的水分蒸发,防止土地干燥。

在非洲,气候非常干燥,埃及就是一个受沙漠化严

重威胁的地区。埃及从1988年开始,实施一项利用高吸水性树脂的蓄水性能,防止土地沙漠化及绿化沙漠的计划,1990年5月进入实验阶段。但埃及人不掌握吸水性树脂的生产技术,只好请拥有众多吸水性树脂技术专家的日本沙漠开发协会协助。

以淀粉及丙烯酸盐为原料制成的树脂,吸水 and 蓄水量为其本身重量的500~1000倍。这些树脂被制成大小约1~3毫米的颗粒,然后混合在表层的土壤中,由于它有极大的吸水能力,可吸取天然的降水或露珠,在吸水后成为具有很大弹性的凝胶状块,能在土壤中一直保持块状形式。因此成了土壤的极好湿润剂,使细沙土壤不会发生板结现象,也不会形成止水层。

在利用高吸水性树脂防止土地沙漠化时,还可在土壤中埋设一层沙石层,用来防止含有盐分的地下水上升,避免耕地遭受盐害,起到防止土地沙漠化的作用。

目前,日本有十几家生产高吸水性树脂的厂家,生产的树脂已在埃及的一个地区试用。人们把这些树脂混合在一个实验苗圃的土壤中,研究其防止土壤干旱和沙漠化的能力,以准备大面积推广。(本刊记者 刘先曙)