

地质系统的复杂性——地质科学的基本问题(Ⅱ)

於崇文

(中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074)

摘要:笔者根据其所提出的“地质作用与时空结构是一切地质现象的本质与核心”的自然哲学理念将地质科学的学科体系划分为地球物质的成分与结构、地质作用、地质学场与地质系统的演化等四大基本领域,它与9个重大基础地质问题以及与其相关的基础理论问题相对应(表2)。笔者将其已发表的地质科学的复杂性理论“地质作用的临界过程动力学——地质系统在混沌边缘分形生长”应用于研究9个重大基础地质问题,着重对于其中所包含的主要基础理论问题的实质及其理论与研究方法作较深入而简要的剖析。目的是通过将地质系统的复杂性作为地质科学的基本问题的新视角对古老而常新的地质科学进行再认识,将重大基础地质问题的研究提高到非线性科学和复杂性理论的层次,并实现地质科学向精确科学的跨越,取得突破性进展。

关键词:地质系统;地质学场;广义地质作用动力学;复杂性;自组织临界性;混沌边缘;分形动力学。

中图分类号: P5;P59

文献标识码: A

文章编号: 1000—2383(2003)01—0031—10

作者简介:於崇文(1924—),男,中国科学院院士,教授,博士生导师,现任中国矿物岩石地球化学学会顾问,长期从事理论地球化学、区域地球化学、矿床地球化学、地球化学动力学、成矿作用动力学、地质数学和复杂性科学的教学与研究工作。

1 深层地球动力学

深层地球动力学(deep-level geodynamics)研究地球分层结构中3个层圈边界(岩石圈—软流圈,上地幔—下地幔,下地幔—地核)上的壳下作用过程(subcrustal process)。

研究表明,不同空间标度上的热、质传输构成了地球动力学过程的基础。地球是一个巨大的热引擎。地球内部生成热的一部分转变为使质量移动的功。在这一意义上,能量主要呈热能的形式,而热重力流则是热传输的结果。在各种热能源(放射性衰变、放热反应、重力收缩和摩擦力等)的驱动下,在因温度变化而引起密度改变的过程中,在重力场中所发生的热重力流(thermogravitational flow)支配着地球的演化及其不同时期的结构。通过研究地球内部的热重力流结构即可追溯地球演变的历史。因而热、质传输过程在研究地球动力学与地球的演化中起着决

定性的作用。

1.1 地幔对流

地幔热重力对流(mantle thermogravitational convection)[以下简称“地幔对流”(mantle convection)]是地球演化动力学的主导因素。它通过以下4组深层因素之间的相互作用反映在地球的上层结构上:(1)下地幔中的对流结构以及对流与地球液态外核之间的相互作用;(2)从下地幔边界上升或穿透整个地幔的地幔柱;(3)与以下4方面相互作用的软流圈中的对流:①下地幔对流;②地幔柱;③俯冲带中的下降流;④岩石圈板块的不均匀基底。这些相互作用导致与裂谷、边缘海和局部岩浆结构相联结的局部地幔元胞(底辟);(4)岩石圈的侧向不均一性与分层(构造分层),主要划分为地壳及由软流圈形成的岩石圈地幔。岩石圈的最主要不均匀性表现为具有厚壳(厚达60 km)的大陆,它具有酸性成分和高水平的放射性热产生,并且起着对地幔热和厚岩石圈地幔(在非洲和亚洲大陆之下厚达250~300 km)的热绝缘体作用。由于构造、岩浆和变质作用三者相互联结地发生在地壳、岩石圈上地幔和软流圈三者合

在一起的圈层中,因此 Dobretsov 将这一圈层统称为“构造圈”(tectonosphere).

地幔对流可以分为 2 种模型:第 1 种模型假定从岩石圈地幔(30~100 km)直到核-幔边界的全地幔对流(whole mantle convection);第 2 种模型假定对流分 2 层(上地幔和下地幔)进行,二者边界上并无显著的质量传输.当前的地球物理和地球化学等资料更加支持双层对流模型.

地幔流动的情态受 Pr 数和 Ra 数的影响. Ra 数不仅影响对流元胞的大小及其稳定性,并且还影响流动的情态.当 Ra 数增大时,流动的斑图变复杂.涡旋的流动先转变为具有多面体结构的三维流动,然后失稳,最终变为湍流. Pr 数既影响流动的情态和结构,也影响热重力对流中的热传输.当 $Pr > 15$, Ra 数对于非定态流动起着决定性的作用.

1.1.1 混沌地幔对流(chaotic mantle convection)

地幔中的固态热对流是板块构造、造山运动、地震活动和火山活动的原因.对于深部过程的观察和研究结果表明,地幔对流显然是非定态和不平稳的,然而它究竟是否为“湍流”或混沌则是一个研究的热点课题.根据许多研究工作者的估计,地幔对流的 Ra 数接近 10^7 ,而 Pr 数大于 10^{23} .近年来 Turcotte 等^[1,2]曾经对于从下部加热的流体层在 Pr 数为无穷大的条件下,二维热对流趋于混沌的路径进行了系统的理论研究.研究工作考虑了地幔对流方程的 12, 24 和 40 模展开,结果表明 12 和 40 模展开演化到混沌(“湍流”).这一个问题具有特殊意义,因为模型截断(model truncation)对于 Pr 数极大的热湍流是合理的近似.

1.1.2 硬湍性地幔对流(hard turbulent mantle convection)

Yuen 等^[3]在线性和非线性流变学条件下对于底部加热的热对流进行了二维的数值模拟,通过可视化的手段展示温度、粘滞性和涡旋场(vorticity field)及其与热对流向硬湍流转变的关系.研究指出,地幔岩具有非线性(或非牛顿)幂律流变学的特征.在 Pr 数为无穷大及 Ra 数为 10^7 和 10^8 的条件下,地幔从软湍流向硬湍流转变,成为“硬湍性地幔对流”,或简称“混沌地幔对流”.硬湍性地幔对流主要出现在上地幔.与软湍流向硬湍流的转变相对应,地幔中固态热传输的方式也改变为以地幔对流涡旋的大尺度相干结构为主体和涡旋场中出现的非连续地幔柱、撕裂斑块与底辟以及小尺度分形形状尺度运动.这种混沌地幔对流的各种流动构

造(特别是地幔对流涡旋和地幔柱)的相互作用与竞争具有高度的复杂性,并且影响着板块构造、俯冲带的移动、热点的时-空分布、造山过程、地震和火山作用.

1.2 岩浆孤子与岩浆的起源、运移及侵位或喷发

理论研究和实验模拟指出,古老基底岩石部分熔融时岩浆熔体的萃取和运移的本质是:岩石是一种可渗透的多孔介质.当岩石在高温高压下发生部分熔融时,岩石变为可压缩的基质而发生粘滞状蠕变.熔体通过这种塑性蠕变的、可渗透介质的渗透发生两相流动而从残余固体基质中分离出来.同时,由于可压缩基质变形时体积发生改变,因而使熔体通量的改变能够呈“孔隙度波”(porosity wave)[孤波(solitary wave)]在基质中传播.孤波(孤子)是岩浆熔体萃取和运移的本质特征.在所产生或被注入的熔体多于即时被萃取量的任何地方均可自发地形成孤波(孤子).

“孤子”(soliton)是局域化、大振幅的相干脉冲波.它具有与另一孤子相互作用(例如碰撞)后仍然保持完整性(保持波形、振幅和波速不变),并呈非线性行波(孤波)持续地在空间上作长距离传播,最终形成某种准规则的相干结构的特性.孤子具有宏观的波一粒(波动-粒子)两重性.

大洋火山中心或次大陆地幔之下的地幔部分熔融区是岩浆孤子形成的有利场所.同时岩浆孤波的幕式(episodic)向上传播过程导致岩浆在时间(和空间)上的周期性侵位或喷发.

1.3 岩浆双扩散对流和固结的相互作用动力学

1.3.1 地质系统中双扩散对流的非线性物理学

在多组分岩浆熔体自上而下的固结作用(solidification)过程中热扩散系数和组分扩散系数之间的很大差异使温度和组分浓度产生不同大小的梯度.这种情况产生 2 种结果:(1)发生“双扩散对流”(double-diffusive convection, DDC),它既可以发生于流体介质,也可以发生于多孔介质;(2)生成“糊状层”或“糊状带”(mushy layer or mushy zone).

双扩散对流是由流体的热和成分因扩散系数反差而对密度产生反向效应所驱动的非线性流体动力学过程.双扩散对流是指由于热扩散和物质扩散的双重扩散所引起的流体对流运动.当流体中由于温度梯度而引起的密度梯度和由于浓度梯度而产生的密度梯度方向相反时就将发生双扩散对流.双扩散对流是扩散和对流二者的耦合过程,能更深刻地揭

示由于二者相互作用所衍生的真实过程的复杂性。同时,双扩散对流的支配方程是一种反映复杂非线性动力学的数学模型的原型(prototype),因而对于动力学研究有重要意义。

双扩散对流具有如下的物理学特征:(1)双扩散对流涉及热平流和化学平流2种非线性因素之间的相互作用,具有比单纯热对流更强的非线性;(2)双扩散对流对于时间的依赖性比热对流的内涵更丰富也更为复杂。DDC中的“对称破缺转变”(symmetry-breaking transition)揭示了地幔的动力学过程和岩浆房的演化过程;(3)岩浆系统中的DDC具有无穷大 Pr 数和大值 Le 数的重要特征。 $Pr=\nu/\kappa_T$,即 Pr 是运动粘滞性 ν 和热扩散系数 κ_T 之比。或者说,是动量和涡量(momentum and vorticity)的扩散系数与热扩散系数 κ 之比。 $Le=\kappa_T/\kappa_D$,即 Le 是热扩散系数 κ_T 与化学扩散系数 κ_D 之比;(4)大值 Le 数使DDC产生次临界不稳定性(subcritical instability)。扩散在热对流中仅起稳定化的作用,但是在DDC中却可以使贮存在流体组分内的势能释放出来,并将之转化为运动的驱动力。这种流动虽然对于无穷小的微扰是稳定的,然而仍能使有限大振幅的扰动持续并生长,从而使流体系统出现次临界不稳定性。它和单纯热对流极相似的超临界不稳定性(supercritical instability)截然不同;(5)DDC中的对称破缺转变除了受无穷大 Pr 数和大值 Le 数的支配外,还涉及如对流空间的纵横比(aspect-ratio)、 Ra 数和浮力比(buoyancy ratio) R_ρ (化学浮力与热浮力之比)等控制变量;(6)DDC有2种情态,视温度或成分二者之中何者起稳定化作用而定。如果温度使系统失稳,而成分使系统恢复稳定,则称DDC呈“扩散”情态(diffusive regime)。反之,若化学浮力使系统失稳,而热浮力使系统恢复稳定,则称DDC呈“指状”情态(finger regime),这时系统中的流体呈狭窄的指状作上下运动。

1.3.2 双扩散对流与固结的相互作用动力学 在岩浆房内岩浆的固结与对流强烈耦合,当二者耦合时就将新的非线性引入岩浆系统,从而增强其非线性及其动力学行为的复杂性。因此“双扩散对流与固结的相互作用动力学”(interactive dynamics of double-diffusive convection and solidification)较之单纯的双扩散对流能更真实地揭示岩浆房内岩浆分异演化的动力学规律,其中包括岩浆房的演化动力学、岩浆房的总体带状结构、岩浆系统中的周期性振

荡与嵌套韵律层结构、多孔介质中的双扩散对流、熔体分异中的成分对流、对流与岩浆分凝、糊状层中的“烟囱结构”(chimney structure)和“自疏浚”(self-channelization)等复杂动力学现象和行为。

2 地层沉积过程的时间结构

2.1 非线性时间序列分析

2.1.1 连续参数非平稳马尔科夫过程分析(静态)^[4] 所谓“过程”就是一个物质系统的状态随时间的转移。近年来的研究表明,对于各种地质过程,体系状态的转移(即过程的发展)往往受概率规律的控制和支配,即表征体系状态的变量随时间而作随机的涨落起伏,因此应是一种“随机过程”(stochastic process);并且体系的现时状态又只能继承前一时刻的状态而与其以往的历史无关,因而又是一种对历史“无记忆”的“马尔科夫过程”(Markov process)。这种过程必然具有向前发展和演化的特征。任何一个地质过程的时间参数总是连续的,它的状态空间也是连续的,但是过程的进行往往是不平稳的。这就是说,地质过程往往是“连续参数非平稳马尔科夫过程”。然而我们可以近似地用离散参数平稳马尔科夫过程理论来研究地质过程的演化。

马尔科夫过程适用于时间序列。对真实的地质过程,有时可以直接确定时间序列,有时只能间接地用距离量纲代替时间量纲。但只要空间序列有类似马尔科夫性质的关系存在,仍然可以应用马尔科夫过程的理论进行研究。这种既适用于时间序列、又适用于空间序列的马尔科夫型概率模型统称为“马尔科夫概型”(Markovian scheme)。应用马尔科夫概型研究实际地质过程可以揭示其随机性与结构性的双重属性。

2.1.2 沉积旋回的动力系统分析(动态) 动力系统分析(dynamical system analysis)理论研究非线性动力学系统的时间演化。该理论包含2个主要内容,即线性稳定性(linear stability)理论和非线性分岔(nonlinear bifurcation)理论。非线性动力学方程的线性稳定性分析可以发现产生分岔解的具体条件(控制参量的临界值),但不能确定分岔解的数目及其稳定性与行为(数学表达式)。为此必须进一步研究非线性动力学方程本身。对非线性动力学方程进行分岔分析的任务,首先是要查明在不稳定性临界点附近分岔解的存在性与稳定性,并进而采用精确

或近似的方式确定其表达式(分岔解的行为)。

在超临界区,对于给定的控制参量值,可以同时存在 1 个以上的稳定的分支分岔解,它们可以具有不同的时一空特性。系统究竟选择哪一个分支,一方面取决于不同分支的相对稳定性,另一方面也决定于涨落(扰动)的具体形式。当系统进一步远离平衡时,随着控制参量值的增大,分岔解的稳定性将进一步改变。“稳定性交换原理”指出,在分岔点上分岔解发生稳定性交换。在第 1 分岔点(λ_1)上的第一分岔解在第 2 分岔点(λ_2)上失去稳定性,并将其转移给第二分岔解,依此类推。其结果就导致所谓“二级分岔”(second order bifurcation)和“高级分岔”(higher order bifurcation)现象。二级分岔和高级分岔将“历史”或“记忆”引入了物理学、化学、生物学和地质学。

通过高级分岔,由于多个不同的不稳定涨落分量之间的相互作用,系统可以呈现出复杂的时一空行为。随着高级分岔中各级分支的相继发生,系统中将出现愈益增多的振荡频率,它们与各种不稳定的涨落分量相对应。这些涨落分量的相互作用最终可能导致巨大的涨落,在分岔图上出现混沌区。在混沌区中系统呈确定性随机(determinative randomness),具有异常复杂的内部结构与分数维,并且混沌态的运动轨道对于初始条件十分敏感,其瞬时状态难以预测。

2.2 地层序列的时间分形结构(复杂性研究)

地质过程常在多重标度上展示出时间演化上的复杂斑图(pattern)。地壳上沉积过程所形成的地层剖面是地质历史变迁的真实记录,其中隐含着地质事件的发生、发展和沉积环境变化的丰富信息。运用适当的理论和方法就可以从中发现沉积过程的时间结构。分形几何学可以有效地揭示多重标度上所形成的复杂时一空结构,因而是研究地层学的一种必不可少的理论和方法。

一般说来,空间分形的分析方法也适用于研究时间分形,但二者有一个重要区别。对于空间分形,通常垂直和水平方向的测度单位相同。因此当 2 个轴向以等量重新标度时就呈现自相似性。但是对于时间分形,一个坐标轴是时间,而另一个坐标轴是某种变量,二者单位不同。因此为了使时间序列在不同标度上“看起来”相同,则时间和变量轴必须以不同的量重新标度。因此时间序列呈现“自仿射”(self-affinity)而并非自相似。

时间序列可以是连续的,比如某种变量值的时间变化;也可以是离散的,比如某种事件发生的时间间隔。对于地层剖面这样的真实时序对象,我们既可将它看作地层序列,即顺序沉积而成的连续物理实体(岩石);又可将它视为抽象的时间序列。此外,地层剖面中常有地层缺失,地层序列上也可有某些属性的不均一变异。所有这一切均应在对地层序列作分形分析时分别对待。

时间序列的分形模型是根据“白噪声”(white noise)和“布朗运动”(Brownian motion)推广而来。“分数高斯噪声”(fractional Gaussian noise)及其对应的“分数布朗运动”(fractional Brownian motion)以及 Levy 尘(Levy dust)构成分形时间序列的基本数学模型。连续分形时间序列可用离散分数高斯噪声和分数布朗运动建模,而不连续(事件的)分形时间序列则可用 Levy 尘建模。分数高斯噪声和分数布朗运动具有自仿射性,并具有长程关联或持续性(persistence)而与白噪声及布朗运动相区别。Levy 尘具自相似性,服从“概率的均匀自相似律”(uniformly self-similar law of probability),并以零集的概念而与分数布朗运动相关联。

时间序列是否具有分形结构可以用“自相关”(autocorrelation)、傅里叶分析(Fourier analysis)、“半变异图”(semivariogram)和 rescaled ranges 分析加以鉴别。这些方法也可用以确定时间序列中持续性或反持续性(antipersistence)的存在与否及其大小。

3 广义地质作用动力学

“动力学”一词的原意泛指英文中的“kinetics”(化学动力学)和“dynamics”(动力学)。Kinetics(或 chemical kinetics)研究化学反应的速率和历程(或机制)。所谓“反应历程”(或“反应机制”)就是指反应物分子在变为产物分子的过程中所经历的具体途径与步骤;而“dynamics”则是研究物体在力的作用下宏观运动的速率和机制。

由于目前国内外文献中都将化学动力学和动力学划分为 2 个学科,而在地质科学的实际研究和应用中二者兼而有之,不宜截然分割,因而有必要拟定一个能广泛适用于“地质作用”的“动力学”定义。实际过程都有能量的耗散伴随发生。所谓能量的耗散或功的“丧失”是指过程中有一部分可利用的能(能

作功的能量)转变为不可利用的能,或者说有一部分自由能转变为与熵相联系的能量. 这就是实际的不可逆过程区别于理想的可逆过程的实质所在. 根据不可逆过程热力学,某一体系的单位体积的熵产生率等于与各种不可逆过程相联系的单位体积(或面积)的流(速)和引起这些流(速)的(动)力的乘积之和. 在这些(动)力的作用下,各种不可逆过程才得以自发地进行. 在不可逆过程的进行中,(动)力逐渐消耗,内熵随之增大,当其达到极大值时,过程即行停止. 在一般的不可逆现象中,温度梯度(力)引起热流,从而产生热传导;浓度梯度(力)引起物质流,从而产生扩散;速度梯度(力)引起动量流从而产生粘滞流;化学反应亲和(力)引起化学反应速率,从而产生化学反应. 可见热传导、扩散、粘滞流和化学反应等各种不可逆过程是在相应的各种(动)力的作用下以各种速度自发地进行的. 由此我们可以自然地提出广泛适用于“地质作用”的广义的动力学定义:“在广义(动)力的驱动下各种不可逆过程(包括力学、物理学、化学、生物学、地质学)进行的速率、机制和全过程”. 在这一定义中隐含着:平衡热力学严格说来只能研究地质系统的状态,而非平衡(不可逆)热力学则可提供地质作用过程进行速率的定量估计,与动力学息息相通,因而才能真正研究实际的地质作用过程.

如果将广义地质作用理解为地球物质的运动,则广义地质作用动力学的研究内容涵盖化学运动、

力学运动和磁学运动. 化学运动之中主要包括了化学反应、热核反应和生命物质与环境之间的相互作用. 力学运动之中包括了流体力学、流变学(粘弹性流变学)和固体力学(弹塑性流变学). 流体力学之中包括了物理流体动力学和物理化学流体动力学;而物理流体动力学中包括粘滞流体系统和多孔/裂隙介质中的流体动力学,物理化学流体动力学中包括输运—化学反应耦合过程动力学、界面现象物理化学流体动力学和输运—相变耦合过程动力学. 流变学(粘弹性流变学)中包括粘弹性固体的蠕变流动和力学—反应—输运耦合过程,前者包括地幔对流,而后者则包括埋藏沉积物的化学压实作用、变质作用和沉积盆地的深部区域分隔. 固体力学(弹塑性流变学)中包括岩石圈构造、大陆岩石圈的热—力学演化、造山带构造和构造物理流体动力学. 最后,磁学运动主要是指磁流体动力学,其中包括外核内的对流与固结及核—幔相对旋转所产生的地磁场. 以上各种动力学领域都有不同的广义地质作用过程与之相对应. 我们统之为“广义地质作用动力学”(generalized dynamics of geological processes)(图 1).

4 地质学场的时—空结构

4.1 地质学场的连续介质模型与地质学场的一般研究方法

通常各种地质体的矿物中的原子间距远小于地

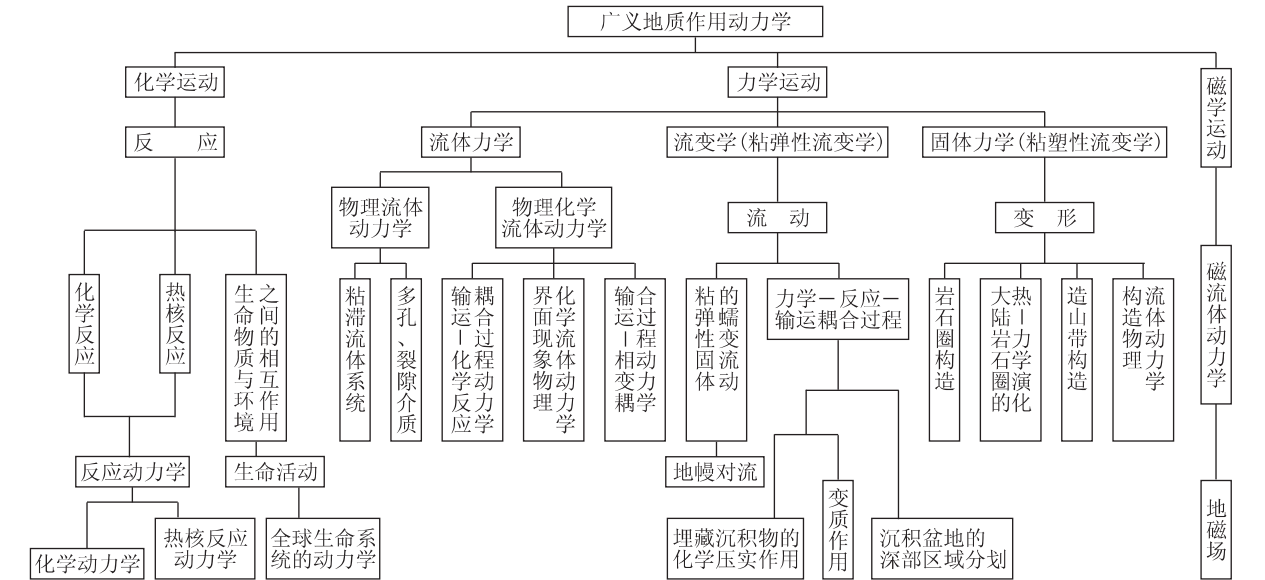


图 1 广义地质作用动力学
Fig. 1 Generalized dynamics of geological processes

质体的尺度,因此可以将地质分布介质(geological distributed media)看作连续介质(continuous medium 或 continuum).它既适用于可变形介质,又适用于液体和气体,因此是地质分布介质的独立模型.连续介质是相对于点质量(point mass)物体的连续阻滞介质(resisting media).连续介质模型不涉及物质分子结构的具体细节,但是要求质点之间的距离必须小于所研究对象的尺度.(1)建立连续介质模型之后就可以确立地质学场,并且用各种理论研究其性质与行为.首先要通过某种统计学方法确立分布函数(distribution function),揭示系统外在性质的时一空分布;(2)然后根据空间描述与物质描述之间的变换关系(transformation between spatial description and material description).可以①研究可变形介质的运动学(kinematics of deformable media),②通过物质导数(material or substantial derivative)研究场量(质量、动量、能量)随时间的变化率—动力学,③用雅可比(Jacobian)及其物质导数研究物质的特定部分在时刻 t 的占位;(3)建立连续介质模型,还可以应用热力学和动力学并且通过场方程和本构方程研究物质(质量、动量和能量)在时一空中的运动规律;(4)最后,可以用概率论中的随机场理论、非线性科学中的时一空斑图理论及复杂性科学中的耗散结构论、协同学和自组织临界性理论等研究地质学场,揭示其时一空结构.

4.2 地质学场的随机场理论(静态)与局域化耗散结构理论(动态)分析^[4]

在本节中为具体起见,我们结合成矿作用的空间展布与空间结构(即成矿区及其空间结构),分别进行随机场的理论分析和局域化耗散结构的理论分析.

4.2.1 成矿区及其空间结构的随机场理论研究(静态分析)

成矿地球化学场具有随机性与结构性(即空间相关)的双重属性.我们应用随机场的理论和方法研究成矿作用的空间展布,展示成矿作用的空间结构.

所谓“随机场理论和方法”具体说来是指法国马特洪(Matheron)于 1962 年所提出的“地质统计学”理论及其所运用的具体方法——克立格法(Kriging).

“地质统计学”是以矿石品位和矿床储量的精确估计为主要目的,以矿化的空间结构(空间相关)为基础,以区域化变量为核心,以变异函数为基本工具,运用随机函数来研究区域化变量空间分布的结

构性与随机性的双重性质的一种数学地质理论与方法.简言之,这一理论的实质就是将随机场的理论用于研究矿化的空间结构.

(1)克立格法(更确切地说,地质统计学)是以空间相关为基础的,将概率论中随机变量之间的“相关”概念和区域化变量的空间变化联系起来,提出“空间相关”的概念和相应的研究方法.这是对于古典概率论在相关概念上的理论上的新发展.空间相关概念来自矿化的空间结构的研究.而克立格法是以空间相关为基础的,因而它是研究成矿作用的空间展布和空间结构的一种合理的、良好的方法.

(2)克立格法采用随机性模型,并以随机函数作为数学工具.理论上,它是以区域化变量值之间的空间相关为依据,从区域化变量的随机变化中发掘其中所蕴藏的规律性变化.因此克立格法能够揭露区域化变量空间分布(成矿作用空间展布)中内在的结构性与随机性的双重性质.这种方法的合理性就在于它从实际出发,从随机变化中发掘出规律性变化.

(3)克立格法在同类方法中之所以具有最高的精度,其原因就在于它对所选取的加权系数提出了较高的要求.克立格法的加权系数的选择考虑了 4 个条件:①待估域的几何特征;②待估域与信息支撑之间的距离;③实测数据空间构形的几何特征;④区域化变量的空间变异的结构特征.因此克立格法和简单平均以及距离(或距离平方)倒数加权移动平均有着本质上的差别.它以最高的精度给出待估值的无偏线性估计量,准确而细致地刻画了元素的空间分布和矿化的空间结构.

4.2.2 成矿区及其空间结构的局域化耗散结构理论研究(动态分析)

我们考察某一矿床的形成过程.当形成矿床的边界条件,比如围岩的某种矿物组合,使一种组分的化学势梯度保持恒定,而允许另一种组分的化学势梯度自由改变;则未受约束组分的化学势将趋于某一定值,而体系处于非平衡定态.但当体系远离平衡时,由于未受约束组分通过体系边界的质量迁移(与相伴的能量输运)所引起的密度涨落使体系变为局部不均匀(空间不均匀性),从而导致耗散结构的产生.但这种耗散结构仅局限于以约束条件为范围的自然边界内,而与均匀介质(组分的浓度在空间各点上保持恒定)内展布于整个体系的耗散结构有所不同.为了区别这 2 种不同的情况,我们将上述现象称为“耗散结构在自然边界内的局域化”,而将这种耗散结构称为“局域化耗散结构”.

使耗散结构局域化的自然边界的自发形成对于成矿地球化学分区的形成与发展具有深远的意义:(1)自然边界正处于区域性的近平衡态与局域性的远离平衡态的分界处.从区域的一侧来看,自然边界接近平衡状态,对应于“热力学分支”,构成某种“屏障”,起着阻尼环境干扰的“缓冲带”的作用,保证和促进了局域化耗散结构的产生,并增强了它们的稳定性;(2)自然边界的形成为在局域内的非线性反馈创造了有利的条件,从而促进和加强了体系内种种不可逆过程的发生和进行,使化学活动组分在局域的有限空间内发生浓集,从而造成局域内外化学组分的浓度差.

局域化耗散结构是发生在局部区域内的空间结构,必须用“涨落的局域理论”对涨落进行局域分析,研究结果阐明了局域化耗散结构形成的原因与机制,并将局域化耗散结构的大小(局域系统的协同长度)与涨落的增长速率及定态的稳定性联系起来.

4.3 场量时空幂律分布的原因及其形成的动力学机制(复杂性研究)^[5]

4.3.1 外在时空分形——自组织临界性的时空指纹 (1)幂律(power law).自然界和人类社会中许多随机变量(噪声)的频率谱(频率分布)服从幂律: $f(x)=cx^{-1}$,如对等式两边取对数则有 $\lg f(x)=c'-\lg x$,即如将 $\lg f$ 对 $\lg x$ 作图(双对数图)则数据点落在一条直线上,其斜率为 -45° ,此种随机变量称为“ $1/f$ ”噪声,并称其频率谱服从“幂律”[亦称“双曲律”(hyperbolic law)或“标度律”(scaling law)].

(2)场量幂律分布的外在表现是分形性(fractality).“分形”具有空间(几何学)和时间(动力学)的双重含义.在几何学的意义上,分形是指不同空间标度的静态空间分形结构(空间上局部与整体的自相似性).分数维可以刻画空间结构的标度不变性.我们用变量在空间上的频率分布揭示场量的空间幂律分布.

在动力学的意义上,分形则是指不同时间标度的动态时间分形结构.分形作为一种动力学过程则是不同时间标度(时间频率)的耦合,它们构成一个特征的谱(功率谱),表明过程的能量是如何作为不同形式的运动而分布的.我们用功率谱密度的时间频率分布揭示场量的时间幂律分布.功率频谱的幂律分布是时间标度不变性在系统能量耗散上的表现.

生存时间的幂律分布导致功率谱的幂律分布,二者是等价的.我们也可以用生存时间的频率分布揭示场量的时间幂律分布.

(3)幂律是自组织临界性的证据.场量时空幂律分布的外在时空分形结构是地质系统自组织临界性的时空指纹.

4.3.2 内在时空分形——分形生长动力学 场量时空幂律分布的内在形成机制揭示了地质作用过程的分形生长动力学机制.研究指出,时空幂律分布的形成揭示了“标度脉动序列”(sequence of scaled pulse)所导致的“叠代增殖”(iterated amplification process)或“反复扩张”过程,其实质就是“分形生长”(fractal growth)或重正化群(renormalization group)的动力学机制.

4.3.3 幂律是自相似性和分形性的无穷源泉 幂律遍在性的根本原因在于:场量对于其时空平均值的随机涨落(噪声)在各种约束下所呈现出的“多重最优化过程”(multiple optimization).这是自然界和人类社会中的最佳选择,是一种普遍规律.

5 地质系统围限效应的强度对系统演化进程的制约^[6]

我们可以将地质系统的演化理解为地质系统不稳定性向正时间方向(即向前)的持续推移.系统不稳定而产生物质运动,比如发生对流.对流的振幅是运动强度的测度,也是表征运动物体整体状态的广义坐标.因此,我们可以将振幅理解为与不稳定性模(instability mode)相伴的自由度.研究表明,相互作用模(interacting mode)的数目并不决定于独立过程(independent process)的数目,而是和环境的几何特征相关联.所谓环境的几何特征就是环境对于系统的侧向围限(lateral confinement).由此得到一个重要的结论:一个系统的演化首先决定于围限效应的强度(strength of confinement effects),就是取决于表征物质运动强度的振幅大小,亦即决定于与不稳定性模数相关联的自由度数.由此可见,系统演化和环境的几何制约之间的关系实质上反映了系统不稳定性与自由度之间的关系.这个关系的完整陈述就是:当控制参量逐渐增大时,一个远离平衡的动力学系统的时空演化,首先决定于围限效应的强度,即究竟是强围限系统(strongly confined system)、

弱围限系统(weakly confined system)还是延展系统(extended system). 在强围限系统中还决定于临界不稳定性, 在弱围限系统中还决定于超临界不稳定性, 在延展系统中还决定于次临界不稳定性. 在次临界不稳定性条件下又决定于究竟是短瞬态混沌还是长瞬态混沌. 对于侧向围限效应所起的作用, 我们可以用无量纲的横纵比来判断. 所谓“横纵比”(aspect ratio)是指地质作用空间水平方向上的长度和宽度与其高度之比. 对于小横纵比(横向比纵向稍短, 近于立方体的空间)的极限, 即“强围限系统”, 空间中可以容纳的对流元胞数很小, 同时因空间侧壁的存在使空间结构“冻结”, 因而地质作用过程主要向时间演化发展. 反之, 对于大横纵比的极限, 即“延展系统”, 则空间中可以容纳许多对流元胞, 形成具有不同波长的空间结构, 出现“斑图竞争与选择”的问题, 因而地质作用过程向时空演化发展. 介于二者之间的横纵比, 即“弱围限系统”, 情况要复杂得多.

在围限效应由强到弱的制约下, 地质系统具有如下的不同演化进程: (1) 强围限地质系统. 体系稳定性: 临界不稳定性, 发生临界 Hopf 分岔. 动力学行为: 地质系统通过串级倍周期分岔(cascade of period-doubling bifurcations)或准周期运动(Ruelle-Takens 途径)走向时间混沌; (2) 弱围限地质系统. 体系稳定性: 超临界不稳定性, 发生超临界 Hopf 分岔. 动力学行为: 地质系统通过广义空间相变量的时间混沌动力学(即“广义相动力学”)向时空混沌转变, 其时空斑图用“一般结构动力学”表述; (3) 延展地质系统. 体系稳定性: 次临界不稳定性, 发生次临界 Hopf 分岔(反转分岔). 动力学行为: 地质系统通过时空阵发混沌(spatio-temporal intermittency)在混沌边缘分形生长, 地质过程具临界性, 地质系统表现标度或幂律行为.

6 地质系统演化过程的分形动力学(崩塌动力学)

6.1 极值动力学(extremal dynamics)^[7]

研究指出, 演化过程是自组织临界过程, 而自组织临界性的实质则是崩塌动力学的分形动力学吸引子.

(1) 系统选择极值位置(extremal site)以启动事件, 系统的演化是一种极值动力学行为. 在

Boettcher 和 Paczuski 的演化模型中, 每一物种的生存依赖于其 M 种特性, 该物种运用这些特性完成各项工作以获得生存. M 较大的物种具有较强的适应能力, 而 M 最小的物种则发生“变异”. 当 $M \rightarrow \infty$ 的极限时, 演化模型具有“串级机制”(cascade mechanism). 它包容了演化过程的全部性状, 其中包括时空关联和间断平衡(punctuated equilibrium).

(2) 系统通过自组织而趋于临界态——自组织临界过程. 设将一个物种用格子上的一个结点位置 r 表示, 而每一个物种的适应性则用单位区间上的一个数 $f(r)$ 表示. 以 $f(r)$ 对时间 s 作图. 经过 s 时间步之后, 在 f 的分布中就会张开一个缺口 $G(s)$, 它是 $0 \leq s' \leq s$ 全部极小随机数 $f_{\min}(s')$ 中的极大值. $G(s)$ 是 s 的阶梯状增长函数, 当其从第一个值跃迁到相邻的较高值时, 二者之间被崩塌 S 所分隔. 缺口随时间 s 的增长服从“缺口方程”(gap equation). 缺口方程确定了系统向自组织临界吸引子趋近的动力学机制. 它体现了自组织临界现象的基本物理学原理. 当崩塌的平均大小发散时, 即当 $\langle S \rangle \rightarrow \infty$, 系统趋于临界态, 同时过程达到平稳态.

(3) 自组织临界性是崩塌动力学的分形动力学吸引子. 研究指出, 将临界态中阵发(崩塌)的更新时间步 s (时间纵坐标) 对其空间定位 r (空间横坐标) 作图时所得的时空活动斑图(space-time activity pattern)反映出 r 依指数 H 而随 s 改变的规律: $r \sim s^H$, 其中指数 H 是临界时空吸引子的分数维 D 之倒数, $H = 1/D$. 对于该演化模型, 在所有空间维中, $H \leq 1/2$, 因此演化过程是一种亚扩散过程(sub-diffusive process). 总体上, 阵发(崩塌)活动在空间和时间上构成时空分形结构. 对于一维空间, 共分数维 $D \approx 2.4$.

在表示阵发(崩塌)活动回返特定位置的累计活动总数对时间 s 的函数图解中, 变化的图形呈现“间断平衡”, 其间保持长期的相对静止, 被间歇性的阵发所间断. 总体上形成“魔鬼台阶”(Devil's staircase). 静止期(period of stasis)的长短具有 $\sim s^{-\tau}$ 的幂律分布. 阵发的回返时间(return time)具有无标度性, 其分布服从另一种幂律: $S(f) \sim f^{-d}$, 其中 $S(f)$ 为功率谱, 指数 d 也是该图中魔鬼台阶跃迁的分数维, 是和崩塌的分数维 D 直接相关的.

综上所述, 演化过程呈现为由崩塌动力学和瞬态弛豫结合而成的“崩塌的分级结构”(hierarchical structure of avalanches), 它是一种自组织临界过

程,其实质则是崩塌动力学的分形动力学吸引子. 临界态的长程时空关联与时一空分形结构是分形动力学吸引子中的截断.

6.2 阈动力学(threshold dynamics)^[8]

研究指出,一个系统要实现自组织临界性必须具备3项基本条件即:(1)相互作用为主导;(2)阈的存在;(3)慢驱动(slowly driven). 所谓相互作用为主导是指系统中许多自由度相互作用,系统的动力学受这些自由度之间的相互作用控制,而并非受个别自由度的内禀动力学支配.

关于“阈”(threshold)的效应,Cafiero等提出“局部刚性”(local rigidity)一词加以描述.“阈”在系统的演化过程中起着3方面的作用:(1)导致时间标度的分离(separation of time scale);(2)在系统的演化中产生一种“局部稳定化效应”(local stabilizing effect),产生了许多静态的亚稳构形(metastable configuration),即通常所谓的“间断平衡”. 时间标度的分离和亚稳定态的出现对于标度不变性的存在具有本质上的重要性;(3)局部阈的存在是系统通过自组织达到临界性的必要(并非充分)条件.

快驱动使系统难以从一个亚稳构形张弛到另一个亚稳构形,以致系统的行为将完全受外部驱动所控制. 慢驱动才能使阈响应(threshold response)从驱动中被解耦(decoupled),并通过串级转变的反复作用(repetitive action of transition cascades)而最后实现自组织临界性.

现在以发生在地壳中的现象来说明自组织临界性中阈动力学和慢驱动的相互关系.“阈响应”往往和固体磨擦的粘-滑不稳定性(stick-slip instability)或者断裂阈(rupture threshold)相伴随,它们是为作用应力增大时断层行为的表征. 阈的存在使系统积累能量、应力和物质直至达到不稳定性阈值. 慢驱动被相邻板块施加在某一给定板块的边缘,或者被深部的下地壳和地幔施加于其底部. 驱动构造的速度(n cm/a)和滑动速度(n m/s)之间出现时间标度的巨大分离. 这里,阈动力学和慢驱动的有机结合,使得地壳的结构化成为自然界中自组织临界性的良好实例.

现在试看一种相反的情况. 设有一种具有阈动力学的系统,它以一种与其响应的典型时间标度相比的较快速率被驱动. 如以地震为例,如果板块被较快地驱动,假定其移动速度并不远小于地壳脆性断裂的破裂前锋的速度,则地壳将随地震而持续发生断裂,以致地震难以分离,并将使地壳产生平均的快速塑性变形流动. 地震的频率一大小幂律分布(Gutenberg-Richter 定律)将消失,地壳物质不呈自组织临界态而形成塑性湍流.

参考文献:

- [1] Turcotte D L, Stewart C A, Huang J. Routes to chaos in the solid earth [A]. In: Yuen D A, ed. Chaotic processes in the geological sciences [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 89—109.
- [2] Turcotte D L. Fractals and chaos in geology and geophysics [M]. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 269—278.
- [3] Yuen D A, Malevsky A V. Strongly chaotic Newtonian and non-newtonian mantle convection [A]. In: Yuen D A, ed. Chaotic processes in the geological sciences [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 71—88.
- [4] 於崇文, 骆庭川, 鲍征宇, 等. 南岭地区区域地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987. 29—51.
YU C W, LUO T C, BAO Z Y, et al. Regional geochemistry of Nanling district [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 29—51.
- [5] West B J, Deering B. The lure of modern science [M]. Singapore: World Scientific, 1995. 1—421.
- [6] Manneville P. From temporal to spatio-temporal chaos [A]. In: Livi R, Nadal J P, Packard N, eds. Complex dynamics [C]. New York: Nova Science Publishers Inc, 1993. 19—30.
- [7] Bak P, Paczuski M. The dynamics of fractals [A]. In: Evertsz C J G, Peitgen H-O, Voss R F, eds. Fractal geometry and analysis [C]. Singapore: World Scientific, 1996. 11—25.
- [8] Sornette D. Critical phenomena in natural sciences [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 1—433.

Complexity of Geosystem: Basic Issues of Geological Science (II)

YU Chong-wen

(*Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The natural philosophical conception that “the geological process and spatio-temporal structure are the essence and crux of geological phenomena” proposed by the author can be used to classify the geological science as four major academic disciplines: the composition and structure of the earth materials, the geological process, the geological field and the evolution of the geosystem. These four major academic disciplines correspond to the nine important basic geological issues and associated complex theoretical problems (Table 2). In this paper, the author applies the complex theory of geological science “the dynamics of the self-organized critical process of geological process—the fractal growth of geosystems at the edge of chaos” proposed by the author himself to the research into the nine important basic geological issues, with an emphasis on the relatively deep and brief analysis of the nature, theory and research method of the major basic theoretical problems. The purpose of the paper is to understand the geological sciences, old and renewed frequently, from the new point of view of the complexity of geosystem considered as the basic problem of geological sciences, to raise the study of basic geological problems to the level of the nonlinear science and the theory of complexity and to complete the transformation of the geological science into a precise science, with an expectation to make a breakthrough in geological process.

Key words: geosystem; geological field; general dynamics of geological process; complexity; self-organized criticality; edge of chaos; fractal dynamics.