

地质系统的复杂性——地质科学的基本问题(I)

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(2002)05-0509-11

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。

我国古代的地质知识虽然发轫于公元前3~5世纪的春秋战国时代, 然而我国的现代地质科学则晚至18世纪中期才从西方引进。但自1840年的鸦片战争以后, 由于帝国主义的侵略和满清政府的腐败以及军阀混战, 地质学和其他学科一样, 没有得到应有的发展。19世纪中叶至20世纪初期, 西方许多国家的地质学者先后来我国旅行并进行地质考察, 为我国的地质调查和研究作了客观上的准备。此后, 到抗日战争之前才奠定了我国地质科学的基础。1949年全国解放到文化大革命之前, 由于国家经济建设和社会发展对矿产、能源和水资源等方面的迫切需求, 促进了全国范围的地质调查工作, 使我国的地质科学获得了有史以来空前规模的大发展。20世纪70年代以来随着文化大革命的结束和改革开放的实施, 通过国际学术交流, 我国地学界的地质学术观念发生了迅速而重大的改变, 迎来了我国地球科学发展的新时期。

总体说来, 在基础地质方面, 已经完成全国1/20万的地质填图和1/100万及1/300万各种专业图件的编制, 出版了地层和古生物2个系列的专著。在构造地质方面, 有李四光的地质力学理论和黄汲清的多旋回综合构造理论。在应用地质方面, 石油地质学、煤地质学和矿床地质学方面的发展提高了沉积学、古地理学和区域成矿规律的研究水平。水文、工程地质、物探、化探和遥感及地理信息系统等技术的应用在国民经济的发展中也发挥了良好的作用。

总之, 我国解放以来地质科学的应用为国家的经济建设和社会进步做出了重大贡献。在应用基础的研究方面也有长足的进展。然而其基础研究的现状在现代自然科学基础和高新技术的层次上还落后于世界科学技术的前进步伐。笔者认为自然科学的研究程度由浅入深可以分为以下4个层次:(1)将观察所得的经验事实进行总结;(2)将基本现象进行归纳和演绎, 并形成唯象理论(phenomenology);(3)上升到具有普适性(universality)和包容性(comprehensiveness)的基础理论和方法论;(4)抽象为数学的形式体系(formalism)和哲学思维, 审视目前国内外的

收稿日期: 2002-05-15

基金项目: 国家自然科学基金“九五”重点资助项目(No. 49633120); 国土资源部“十五”资助项目(No. 20010302)

地质研究大多是在第二层次上.许多研究成果在观察的经验事实方面较前人工作可能有所补充或更新,然而在基础理论和方法论上缺乏创新,大体上在同一水平上重复,本质上还是徘徊于必然王国之中.因此无论是国际还是国内地学界所面临的迫切任务就是要努力将地学的研究水平从第二层次提升到第三层次,实现从必然王国到自由王国的飞跃.

现代认识论的一个重要观点认为物质、生命、心智、大脑和人类社会都是演化的复杂系统.地球是人类居住、生活和繁衍的场所,农业、能源、矿产和水资源、生态环境、自然灾害、人口与健康以及人类与生命等都和地球的形成与演化息息相关.固体地球系统总体上是远离平衡、时空延展的演化复杂巨系统.大量现象指出,它具有复杂性和自组织临界性的内禀基本属性.“固体地球系统的复杂性与自组织临界性”既是我国经济增长、社会进步和地学发展的重大科学问题,又是带根本性的基础理论问题.

20 世纪自然科学的发展趋势是由极小(粒子物理学)→极大(宇宙学)→极复杂(复杂性科学).“非线性”和“复杂性”是当今世界科学的重要前沿领域之一.“复杂性”比“非线性”具有更广泛和深刻的内涵.现在国际上对于复杂性的科学研究大多集中于数学理论的物理内涵及其在物理、化学、生物、生命、人脑和社会系统等方面的应用,较少研究地质系统,并且主要涉及地震现象、地壳断裂构造和地幔对流以及海洋与大气环流动力学等少数领域,工作比较零散.然而“复杂性”研究具有科学发展的时代特点,是具有前瞻性和探索创新性的基础研究.复杂系统研究要求重组科学的现有固定分野,实现跨越不同学科的大整合,从而促进多学科的交叉和融合,并且已经引起认知过程和方法论的深刻变革,推动认知科学的重大发展.对地质系统的复杂性研究将是 21 世纪地学发展中居于战略地位的生长点之一,可以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,实现地质科学向精确科学的跨越,取得突破性进展.

1 地质现象的本质与核心及地质科学的基本问题

笔者将数学、化学、物理学和复杂性科学与地质

科学相结合,半个多世纪以来长期探索地质现象的本质和地质科学的基本问题,得出结论:地质作用与时空结构是地质现象的本质与核心.地质科学的基本问题是地质系统的复杂性.

1.1 地质现象的本质与核心——地质作用与时空结构^[1]

地质作用是地球物质的运动,它既不能脱离时间,又不能超越空间.地质工作实践指出,地质作用的时间演化具有一定的规律性,即“时间结构”;地质作用的空间展布也有一定的规律性,即“空间结构”.地质作用与时空结构三位一体,相互耦合,不可分割;而地质作用(即地球物质的运动)则是第一性的.

地质作用与四维时空的紧密交织构成了地质作用与时空结构,反映了地质事件的发生与运行机制及其时空定位.地质作用与时空结构是一切地质现象的本质与核心.

1.2 地质科学的基本问题——地质系统的复杂性^[2]

地质系统至少具有 7 种基本属性,即:(1)多组成的耦合和相互作用;(2)开放和耗散;(3)非平衡;(4)过程的不可逆性及其多重耦合与相互作用;(5)非线性;(6)随机涨落;(7)物质结构连续与离散的两重性.

总之,地质系统总体上是远离平衡、时空延展的复杂耗散系统.地球物质多组成和多种广义地质学(地质学、地球物理学和地球化学)过程各自之间和相互之间的非线性相互作用在时间和空间多重标度上持续叠加引发自组织过程所涌现的地质系统整体性状、结构与动力学行为的复杂性和自组织临界性是地质科学的基本问题.

“复杂系统”是由大量不同而且强相互作用(即非线性相互作用)的组成单元构成的系统.复杂系统必须兼备多组成单元、单元不同而且单元之间发生强相互作用这 3 个条件.由此我们可以认为,“复杂性”是指“远离平衡的巨大耗散系统中由于组成单元之间局部的非线性相互作用而自发地涌现出的系统总体性状、结构与动力学行为”(图 1).这里,“涌现”(emerge)是指由系统局部的相互作用所产生的系统总体的特征,不同于子系统(或局部组成单元)的原有性质.这就是“复杂性”的本质.由此还可以引出一个结论:系统的复杂性是自组织的结果.正是由于系统整体的自组织才使系统“涌现”出新的性状、结构与动力学行为.

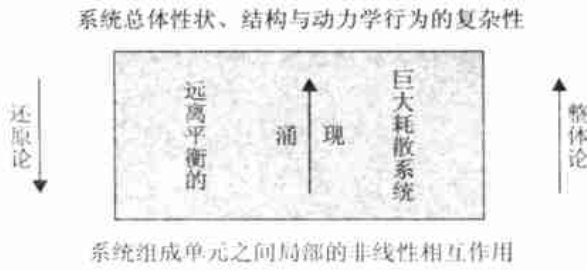


图1 “复杂性”的图解

Fig.1 Diagram of "complexity"

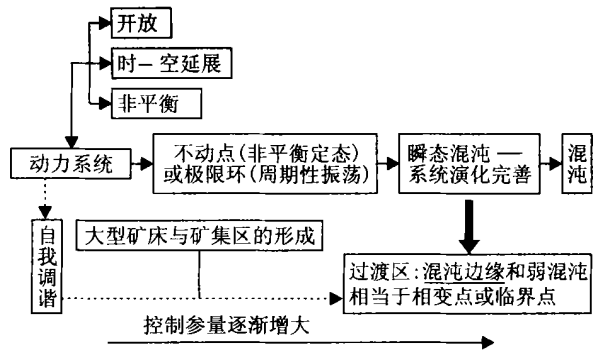


图3 “混沌边缘”的图解

Fig.3 Diagram of "edge of chaos"

2 地质科学的复杂性理论^[3]

笔者对复杂性科学中的自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌四大理论和研究领域作系统和深入剖析后得出结论,认为以上四者是对自然界中开放、远离平衡、相互作用的巨大耗散动力学系统的时空演化这个统一事物的本质的面面观.将四者的相互关系与地质系统相结合,得出如下结论:

地质系统是自然界中的一种异常复杂的开放、远离平衡、相互作用的巨大耗散动力学系统.它具有自组织临界性的内禀基本属性.它的时空行为服从地质作用的自组织临界过程动力学.地质系统位于有序和混沌之间的过渡时空域,即混沌边缘.其中系统呈规则和混沌运动并存和混合的弱混沌动力学状态,并且地质系统在混沌边缘分形生长.我们将上述命题演绎和整合成一种广泛适用于地质系统的地质科学的复杂性理论,并称之为“地质作用的自组织临界过程动力学——地质系统在混沌边缘分形生长”.其主要内容为^[3]:(1)自组织临界性(图2)、瞬态混沌、混沌边缘(图3)和弱混沌;(2)多组分的相干与协同及时一空斑图与化学波的形成;(3)演化过程的分形动力学;(4)混沌、时间混沌与时一空混沌;(5)作用的时一空结构;(6)分形生长动力学;(7)自孤子和复杂性之源;(8)有限大小标度理论;(9)复杂性研

表1 地质科学研究的几个基本点及其相应的命题

Table 1 Some crucial points of geological research and corresponding propositions

基本点	命题	地质科学复杂性理论的内涵
地质现象的本质与核心	地质作用与时一空结构	1. 自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌
地质科学的基本问题	地质系统的复杂性	2. 多组分的相干与协同及时空斑图与化学波的形成
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	3. 演化过程的分形动力学 4. 混沌、时间混沌与时一空混沌 5. 作用的时一空结构 6. 分形生长动力学 7. 自孤子和复杂性之源 8. 有限大小标度理论 9. 复杂性研究的方法论

究的方法论.现在将第1,2节归纳成表1.

3 复杂性研究的方法论

复杂性和自组织临界性是系统整体的性质,必须采用整体论(holism)的方法论进行研究,而不能采用还原论(reductionism),通过对最基本组成单元(分子或原子)孤立地进行分别研究而认识系统整体的特征.系统的“整体性”(wholeness)是指系统的“自主性”(autonomy),即系统的存在与其行为的相对独立性.整体论研究系统的集体性质与行为(collective properties and behaviors),也就是对系统作整体研究.总之,以整体论为主导,还原论作辅助,宏观与微观处理相结合和互补才是研究复杂性的较全面和完整的方法论.

地质系统复杂性与自组织临界性研究的方法论^[2]总体上包括认知过程、广义地质学(地质学、地球物理学、地球化学)研究、理论分析、实验与模拟.理论分析中包括整体论与还原论,实验与模拟中包括动力学实验与模拟及计算实验与模拟,整体论中

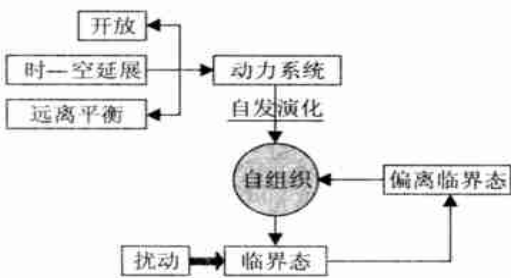


图2 “自组织临界性”的图解

Fig.2 Diagram of "self-organized criticality"

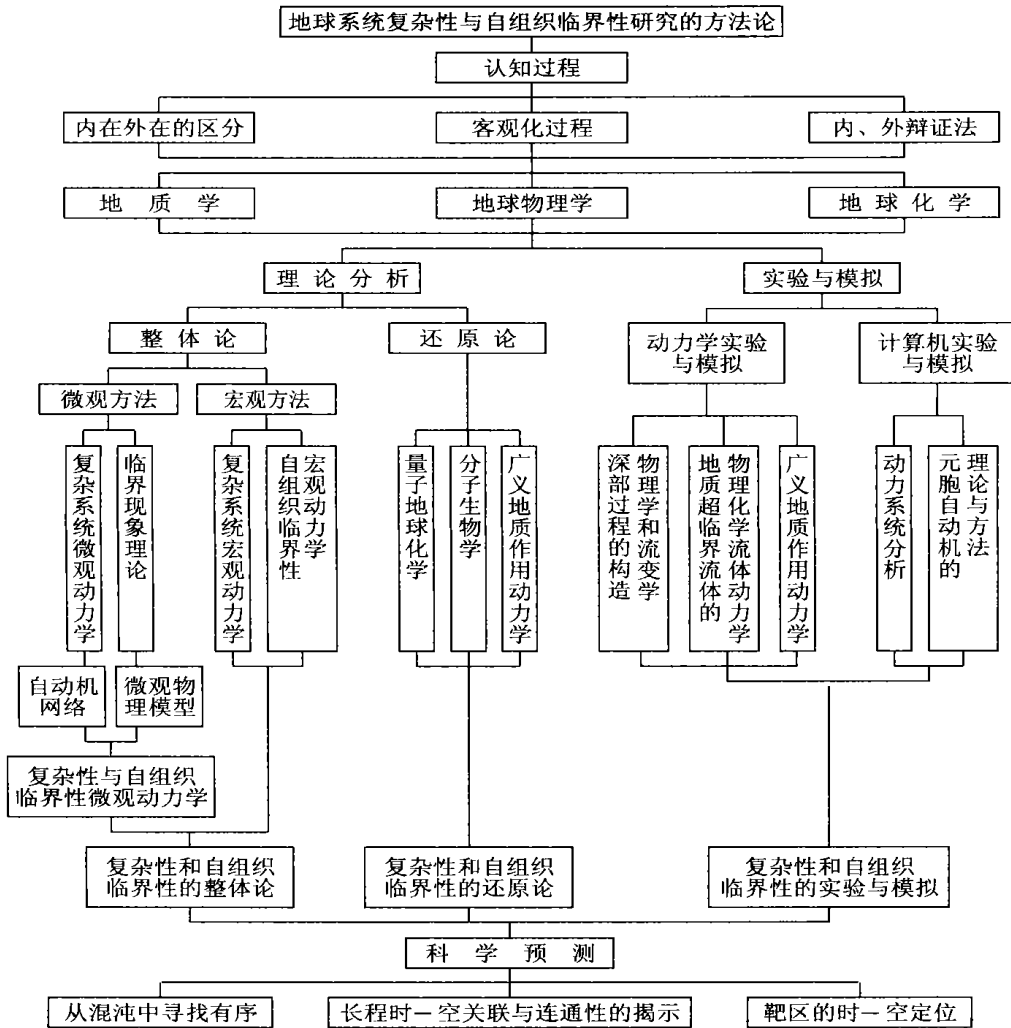


图 4 地球系统的复杂性与自组织临界性研究的方法论^[2]

Fig. 4 Methodology of research on complexity and self-organized criticality of the geosystem^[2]

包括宏观动力学与微观动力学, 详见图 4, 5.

4 地质系统的复杂性

我们根据地质现象的本质与核心——地质作用与时空结构, 建立一种具有普适性与包容性的理论框架, 将地质科学的学科体系划分为四大基本领域, 作为其一级结构, 它与重大基础地质问题及基础理论问题相对应(表 2).

5 地球物质成分的复杂性与多样性

5.1 核合成理论与地球物质的原始多组分性

迄今为止, 能最全面地解释化学元素的起源和

丰度的理论是“核合成理论”(theory of nucleosynthesis)^[4]. 这种理论以星体内部通过“热核反应”(thermonuclear reactions)而合成化学元素的概念为基础, 将化学元素的起源和天体的演化联系起来. 按照现代的宇宙化学知识, 在初始的膨胀宇宙之中, 宇宙物质的密度在很大范围内变化, 呈现为巨大的旋涡气云. 当星际介质的气云中一旦出现引力不稳定性(gravitational instability)就开始形成星球. 随着“引力坍缩”(gravitational collapse)的发生, 能量被释放, 从而气云的温度升高, 密度也增大. 然而温度和密度增大的结果是使星球内部的压力随之增大, 因而使不稳定的坍缩逐渐停止. 当温度增大至足够高时就引发热核反应. 热核反应发生在星球的核部, 反应所释放的能量从星球表面向星际空间辐射. 多次

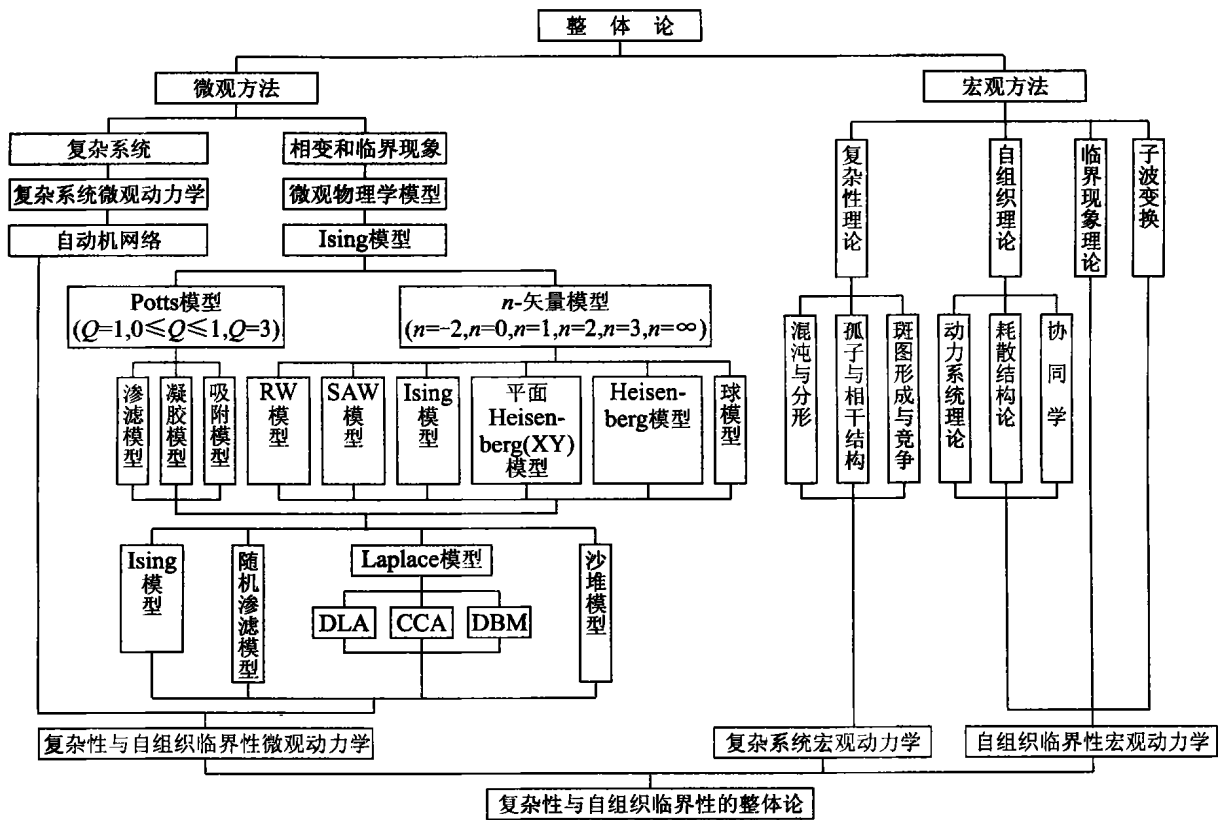


图5 复杂性与自组织临界性的整体论^[2]

Fig.5 Holism for complexity and self-organized criticality^[2]

引力坍缩释放能量、升高温度并相继发生多次热核反应,从而使天体演化经历了内核收缩、升温、热核反应和化学元素合成的若干阶段。

从氢燃烧历经氦燃烧、碳燃烧和氧燃烧及硅燃烧等阶段直至达到形成铁族元素的平衡燃烧阶段,每一后继燃烧阶段所释放的能量都低于先行阶段,其中氢燃烧所释放的能量数倍于其余各阶段之总和。因此氢燃烧是天体演化过程中经历时间最长的过程,称之为“主星序阶段”,大多数星球均处于这一稳定阶段。除重元素之外,包括铁族及其以前的元素均合成于主星序阶段。铁族元素的原子核形成于天体演化的最后阶段。质量数大于铁族元素的“重元素”的原子核必须通过3种“中子俘获反应”才能得以形成,完成重元素的产生。Li、Be、B等轻元素则是因宇宙射线轰击而在星际空间中呈散裂核尘的结果。

5.2 化学元素的自组织与元素的“岩石圈丰度”

按照 Haken 的协同学 (synergetics)^[5] 的原理,通过改变外界的控制参量,可以使一个远离平衡的开放系统自发地产生宏观标度上的有序和结构。这个命题已成为“自组织”的范式。如果进一步改变外界的控制参量,则将引起系统发生多级的宏观转变,

形成新的空间结构。如果系统的行为依赖于时间,则随着外界控制参量的增大,系统将由非平衡定态依次向周期、准周期甚至混沌运动转变。

然而,自然界中还存在另一大类自组织过程,它们具有完全不同的动力学机制,而不属于这一种范式。这是指多组分相互耦合的特定情形。假设某系统中有若干部分(若干子系统,比如若干同种组分的原子或分子),它们被驱动至远离平衡,但仍停留在静止状态。现在令它们耦合在一起。人们自然会认为整个系统的状态将会保持静止。然而情况恰恰相反。将系统耦合在一起可以使它们的行为发生质的转变,使其转变为一种宏观上的有序状态。例如,在保持每一个原子的转化率不变的条件下,增加激光原子的数目达到一定的数量时,突然之间就会实现激光的发光条件。在生物的发育和生长过程中,同种组分的分子数稳定地增大。例如粘菌由单细胞聚集而成,然而在聚集之后又发生分化;在人脑的胚胎发育阶段,在其中的一个区域产生脑细胞,然后又扩散到另一个区域,在该区域内它们聚集在一起而形成神经网络。

总之,同种组分的分子或原子数增加和 multifractal

表 2 地质科学的基本领域及其相应的重大基础地质问题与基础理论问题

Table 2 Fundamental disciplinary areas of geological science and corresponding basic geological and theoretical problems

地质科学的基本领域	重大基础地质问题	基础理论问题
地球物质的成分与结构	地球物质成分的复杂性与多样性	1. 核合成理论与地球物质的原始多组分性 2. 化学元素的自组织与元素的“岩石圈丰度” 3. 量子地球化学与化学元素的共生组合
	地球物质结构的复杂性与多样性	1. 扩散限定反应 2. 扩散限定聚结 3. 地质体结构(矿床分带)与矿物结构(环带构造)
地 质 作 用	地壳的变形	1. 碎裂作用的分形理论与混沌地质构造 2. 地壳变形的分形性 3. 岩石圈结构化的自组织临界性 4. 大规模大陆岩石圈变形 5. 造山运动的驱动机制
	深层地球动力学	1. 地幔对流 2. 岩浆孤子与岩浆的起源、运移及侵位或喷发 3. 岩浆双扩散对流和固结的相互作用动力学及岩浆房的演化 (1)地质系统中双扩散对流的非线性物理学 (2)镁铁质与长英质岩浆房中的双扩散对流 (3)对流与固结的相互作用动力学
	地层沉积过程的时间结构	1. 非线性时间序列分析 (1)连续参数非平稳马尔科夫过程分析(静态) (2)沉积旋回的动力系统分析(动态) 2. 地层序列的时间分形结构(复杂性研究)
	广义地质作用动力学	1. 地质流体力学 2. 固结作用的流体力学 3. 水岩相互作用的化学动力学 4. 反应—运输耦合过程动力学 5. 断裂—多孔介质中的化学反应——复杂流动动力学 (1)渗流交代作用动力学 (2)侵位渗流作用动力学 6. 流变—反应耦合过程动力学(变质、成岩作用动力学) 7. 断裂作用动力学 8. 构造物理流体动力学(热致与流体驱动的水力断裂)
地质学场	地质学场的时—空结构	1. 地质学场的连续介质模型与地质学场的一般理论与方法 2. 地质学场的随机场理论与局域化耗散结构理论分析 3. 场量时—空幂律分布的原因及其形成的动力学机制
地质系统的演化	地质系统的演化进程	1. 地质系统围限效应的强度对系统演化进程的制约·地质系统自发地向混沌边缘演化
	地质事件历史演化的拟周期性	2. 地质系统演化过程的分形动力学、极值动力学和阈动力学

(原)子的耦合,其主要效应是使耦合系统的整体产生不稳定性,它驱使系统进入一个新的行为模式,并转变到一种新的有序状态,使耦合系统发生自组织。当然必须着重指出,系统的远离平衡和涨落的发生对于整个过程是至关重要、必不可少的。耗散结构论的一个重要结论是“非平衡是有序之源”,“通过涨落达到有序”。在远离平衡的条件下,涨落将触发系统从原始稳态向一种新的有序状态转变。将这一规律应用于地球化学则可得出推论:同种化学元素的原子数增加与多原子的耦合将导致化学元素的自组织和元素的“岩石圈丰度”。

5.3 量子地球化学与化学元素的共生组合

自 20 世纪 50 年代以来,矿物晶体结构分析所取得的成就和物质分子—原子结构中化学键研究的进展促进了晶体化学的迅速发展。此后晶体场理论的提出大大促进了过渡金属元素地球化学的发展。20 世纪 60,70 年代以来量子化学和固体量子物理学又进一步使晶体化学和晶体场理论向深层次发展,并于 70 年代在矿物学、晶体化学和量子物理学三者的结合点上又诞生了“量子地球化学”(quantum geochemistry)^[6]这一新的学科。量子地球化学应用量子力学理论研究地球物质的结构物理学(structural physics)[或称“立体物理学”(stereo-

physics)]与结构化学(structural chemistry)[或称“立体化学”(stereochemistry)].具体地说,“量子地球化学”应用量子力学理论和谱学实验方法研究矿物的晶体结构及其稳定性,矿物物理及矿物化学,化学元素的地球化学分布,相平衡和化学元素的分配,熔体和溶液中元素物种的形成及其稳定性,晶体结构随温度、压力和成分的改变,矿物能量学,矿物的谱学性质以及计算机实验.量子地球化学的核心问题是用量子力学理论和各种谱学方法研究矿物中的化学键(键长、键角)或“电子结构”.量子地球化学和地球化学相结合是研究化学元素共生组合的有力手段.

6 地球物质结构的复杂性与多样性

当自然系统被外部约束驱动至远离平衡时,系统失稳并发生对称破缺,从而导致宏观标度上相干时一空结构(时一空斑图)的自发形成、选择(竞争)与稳定性.这是当前复杂性研究中最富挑战性的问题之一.研究时一空结构或斑图的形成应该从其普遍性着手.现在,动力系统发生自组织的观念正处在科学重新概念化(recapitalization of science)的重要日程上.流体动力系统和非线性化学中的反应-扩散系统都是发生自组织的重要动力学系统.尽管许多真实的地质作用都是流体动力学和反应-扩散非线性化学的耦合过程,但是一般而言,后者与前者相比,进行的速率相对较慢,因此反应-扩散作用在众多作用耦合的全过程中往往起着限定的作用.尤其是无序介质(特别是断裂、多孔岩石)中的扩散限定反应(diffusion-limited reaction)[亦称“扩散控制反应”(diffusion-controlled reaction)]和扩散限定聚结(diffusion-limited coalescence)对于研究地球物质结构的复杂性与多样性具有普遍和基本的意义.发生在断裂-多孔岩石(无序介质)中的扩散是“异常扩散”(占有概率恰为临界占有概率).扩散限定反应和扩散限定聚结是近年来对反应-扩散模型和分形生长研究的深化和发展.

反应-扩散方程以化学反应作为局部非线性动力学,而以扩散作用作为耦合动力学.反应-扩散系统可以看作是很大数目相同的局部动力学系统——化学振荡的振子(极限环振子)的系统,它们之间通过扩散作用而在空间上相互耦合.因此反应-扩散系统是一种场,即“扩散耦合的极限环振子场”(diffusion-coupled field of similar limit cycle oscillators).

6.1 扩散限定反应

扩散限定反应过程是输运(扩散)时间远大于反应时间的作用过程.扩散限定反应的化学动力学主要由反应物的输运性质(扩散,特别是异常扩散)所控制和决定.扩散限定反应研究反应-扩散系统中物种粒子的异常扩散及其浓度的局部涨落所导致的物种圈闭(trapping)、单一物种的湮灭(annihilation)和聚结(coalescence)、双物种的分离(segregation)以及反应-扩散前锋(reaction-diffusion front)的发展对于物质结构的复杂性与多样性所起的作用及其所产生的影响.

6.2 扩散限定聚结

扩散限定聚结发生在单一物种的情况下,其整个过程由扩散、出生(birth)、输入(input)和聚结等动力学机制所构成.它展示了非平衡系统中的自临界有序(self-critical ordering)、化学动力学相转变和化学波(由于稳定相入侵非稳定相所生成的波),揭示了异常化学动力学的许多重要特征.扩散-限定聚结过程用“粒间分布函数”(interparticle distribution function)进行研究,并且通过“多点密度关联函数”(multiple-point density correlation function)和粒子相互作用的速率揭示扩散粒子的路径,以表征聚结的非平衡微观时空结构.

6.3 地质体结构(矿床分带)与矿物结构(环带构造)

6.3.1 地质体的结构(以矿床分带为例) 以反应-扩散方程为原型,应用“扩散耦合的极限环振子场”的多体理论(many-body theory)^[7]研究成矿分带,获得结论:振荡反应-扩散系统中因化学波的时一空同步化(spatio-temporal synchronization of chemical waves)传播而形成自起步点向外、沿径向扩张的同心球状目标斑图. $r < R(t)$ ($R(t)$ 为特征半径)的区域已被同步化到起步点,其中的振荡频率高于 $r > R(t)$ 的区域.同步化的区域呈球状,并以沿径向增长的常速扩张.在同步化球体内,化学波自起步点向外呈同心球状传播.关于矿床分带的进一步分析见参考文献[8].

6.3.2 矿物的结构(以矿物环带构造的振荡分带为例)

关于矿物环带构造的振荡分带(oscillatory zoning)的形成机制有2种认识:(1)强调局部生长动力学(local growth dynamics),认为它是一种晶粒内的自组织(intragranular self-organization)现象,并且是一种“自主振荡”(autonomous oscillation),和环境条件的周期性变化或波动并无直接关系.研究表

明矿物的振荡分带遵循“扩散和生长耦合过程动力学”(coupled diffusion and growth dynamics), 具有“自催化表面附着的化学动力学”(autocatalytic surface attachment kinetics), 并且通过“表面成分—调制的反馈”(surface composition-mediated feedback) 展示振荡分带^[9]. 研究表明某些交代振荡分带属 Hopf 分岔(即极限环振荡)现象, 另外一些交代振荡分带是分形生长的结果. 但是能否将其推广到其他振荡分带现象则尚需对具体情况作严格论证; (2) 强调大规模过程(large-scale process), 认为矿物振荡分带是矿物生长环境条件振荡变化的直接反映. 热液流体的产生是受大规模热传输控制的连续过程, 而热液流体的排放则常为不连续的脉动过程. 从而热液流动具有长期平静和短期间歇性、高流速和高通量的特征. 同时, 流体流速的改变能使晶体生长位置上流体的成分发生涨落, 影响生长中晶体的成分变化.

7 地壳的变形

7.1 碎裂作用的分形理论与混沌地质构造

7.1.1 碎裂作用的分形理论 地球物质常沿介质中先已存在的不同标度的薄弱带或薄弱面发生破裂. 研究发现碎块大小的累积频率分布可以用幂律分布(power law distribution)来近似. 碎块大小的幂律分布表明碎裂作用具有标度律. 我们可以将这种“碎裂作用的标度律”(scaling law of fragmentation) 称之为“碎裂作用的分形理论”(fractal theory of fragmentation). 自然界中的分形性(fractality) 是自组织临界过程的结果, 因此断裂的发生具有“崩塌动力学”(dynamics of avalanches) 的特征.

实验观察发现岩石的最终破裂是岩石中初始的显微裂缝(microcrack)的聚合经由微裂隙(microfissure)群集等一系列分级过程所导致的结果. 由此可以建立岩石碎裂作用的“重正化群模型”(renormalization group (RNG) model of rock fragmentation). RNG 方法是以“分级”(hierarchy)和“标度不变性”(scale invariance)概念为基础的, 而这二者恰是分形理论的基本思想.

7.1.2 混沌地质构造(chaotic tectonics) Turcotte 等^[10] 研究指出, 在已存断层面上发生位移是脆性上部地壳发生变形的机制. 用滑块模型(slider-block model)对断层相互作用中因增速减弱摩擦

(velocity-weakening friction)而产生的粘滑行为(stick-slip behavior)进行元胞自动机(cellular automata)的计算机实验, 表明其经历倍周期分岔(period-doubling bifurcation)而趋于混沌.

滑块模型是地质构造变形的低维类比. 然而在自然界中, 许多无穷维系统的渐近行为是低维的. 业已证明, 具有无穷维相空间的偏微分方程组能归宿于低维吸引子. 这一规律对于耗散系统尤为特征. 由此可以推论: 地质构造具有混沌行为.

7.2 地壳变形的分形性

7.2.1 地震和断层中的分形碎裂作用 地震活动是在广泛标度上断层之间复杂相互作用的结果. 研究发现地震的大小—频率分布具有 Gutenberg-Richter 关系, 即

$$\lg N = -bm + a,$$

式中: N 是在特定地区中每单位时间内发生规模大于 m 的地震次数; b 值一般在 0.9 ± 0.1 的范围内. 研究指出, 地震发生频率与破坏面积 A 之间具有如下的分形(幂律)关系(Aki, 1981):

$$N = CA^{-D/2},$$

式中的分数维 $D = 1.8 \sim 2.0$. 上述分形关系几乎普遍适用于区域性地震活动. 因为地震活动并无特征的长度标度, 因而是自相似的, 而具有自相似特征的唯一统计分布是幂律分布. 通常人们普遍认为特定的断层与特征的地震相伴发生, 因而地震的分形分布意味着断层的大小—频率分布也具有分形关系. 野外研究指出其分数维 D 约为 1.6.

7.2.2 脆性断裂的分形网络和塑性剪切带 Herrmann 等^[11] 研究指出, 上部地壳处于中等大小的流体静压之下, 岩石呈脆性状态, 并形成分形断裂网络. 当地壳处于较高流体静压(深约 20 km)之下时, 岩石变形由脆性转向延性, 呈塑性状态, 并产生局域化的塑性剪切带, 亦可形成分形网络. 脆性和塑性情况下, 变形或碎块大小的分布均服从幂律, 表现为分形结构以及断层中断层泥中颗粒大小的幂律分布与剪切带中多重分形的应变速率分布.

7.3 岩石圈结构化的自组织临界性

7.3.1 大陆地壳的自组织临界态 地震、断层和碎块大小—频率分布的分形性是自组织临界过程动力学的结果, 表明大陆地壳呈自组织临界状态. 地震活动的广泛分布常被作为证明地壳呈现自组织临界性的典型事例. 岩石圈板块的相对运动将能量(应变)连续地输入地壳, 然后在适当的条件下能量又通过

以分形分布的规律发生地震的方式离散、间歇地耗散。这种大震及其随后的余震表现形式恰恰就是自组织临界性特有的崩塌动力学行为特征。

7.3.2 岩石圈结构化的自组织临界性 Sornette 等^[12]提出“地壳的结构化”(structuration of the Earth crust)可以视为一种自组织临界现象,并于翌年进一步对板块构造中岩石圈结构化(structuration of the lithosphere in plate tectonics)的自组织临界性的基本物理学和地质学机制作出解释^[13]。为此他们提出了一种场论,但这种场论并非由本构关系或微观流变学和力学定律演绎而来,而是用类似于 Landau 的二阶临界相变理论由对称性和守恒定律而得到的,因此亦可称之为“岩石圈中自组织临界性的场论”(field theory of SOC in the lithosphere)。

为建立这一场论,首先必须选定适当的场参量或序参量(order parameter)作为控制参量(control parameter)。他们选择标量函数 $\sigma(S, \epsilon)$ 作为控制参量,其中 S 表示应力张量, ϵ 表示应变张量。 $\sigma(S, \epsilon)$ 起着通常相转变中温度的作用。当 $\sigma(S, \epsilon)$ 达到对应于地壳中“破裂准则”(rupture criterion)的某阈值 K 时则将发生断层,从而释放部分应力。考虑到大陆板块上活动断层具有复杂的模式并且遍布全球,因此有理由认为 $\sigma(S, \epsilon)$ 是在地壳中取一平均值,而这一平均值必然是在阈值 K 的附近,既不能过高又不能过低。局域的有效应力和应变张量通常围绕这一平均值涨落,有些条件下,板块各处都有可能发生断层。这一推断和近年来发现大规模的板内变形具有长程关联的观察相符,而且也为岩石圈的实验室模型和地壳上断层模式中断层的分形分布所证实。因此可以合理地将 $\sigma(S, \epsilon) = K$ 这一条件解释为自组织临界点的标志。

建立地壳 SOC 场论,其次就要分析岩石圈力学对建模的约束条件:(1)长期惯性力和其他作用力相比甚小,可以忽略不计。大陆板块保持力学平衡;(2)板内变形主要和大陆之间的碰撞有关(Zoback 等)。板块的边界条件对岩石圈的自组织起控制作用;(3)岩石圈的流变学十分复杂,但是它有一个特征的屈服应力(yield stress),高于此值则整个岩石圈发生破裂(Kusznir, Park),而低于此值则发生弹性和塑性过程而使地壳发生变形;(4)上部地壳中发生的总体破裂包含各种标度的断层分级(hierarchy of faults)。这就是断层的分形分布或断层分布的标度律。这意味着大标度的断层分布要用场参量的长程关联描

述,而小标度的断层分布则和噪声源的存在有关。

建立岩石圈中 SOC 场论的基本问题是要论述大陆板块内总体守恒律的存在性。Sornette 等认为这一点可以下列 2 方面的事实作为佐证:(1)大陆板块呈力学平衡,并且断层广泛分布于全球,因此大陆板块所处的状态相当于地壳几乎到处遵循破裂准则,这和板块内几乎到处可见活动断层的事实相一致。几乎到处遵循破裂准则的应力场实际上就是板块动力学的吸引子;(2)板块变形的各种不同的组成(扩张和压缩、剪切以及旋转)运动学上彼此兼容。上述 2 个条件可以结合成为类似扩散守恒方程的形式:

$$\partial \sigma / \partial t = \nabla^2 g. \quad (1)$$

这是一般形式的扩散方程,其中 $g(\epsilon)$ 是 ϵ 的复杂非线性函数。利用这一方程和序参量的张量特征所施加的对称性,他们提出了一个广义的非线性张量扩散方程以控制板块运动时应变张量场的时-空演化:

$$\partial \epsilon_{ij} / \partial t = -\partial_k T_{ijk} + \eta_{ij}(x, t). \quad (2)$$

式中: ϵ_{ij} 为涨落应变张量的 ij 分量,而 T_{ijk} 则代表涨落应变张量的“通量”之三阶张量。符号 ∂_k 表示 $\partial / \partial x_k$, 方程(2)是和扩散过程的一般结构(方程(1))相容的最简单的运动方程。其左边的 $\partial \epsilon_{ij} / \partial t$ 项是方程(1)左边的展开。这里已经利用了流变学方程将 σ 表示为 ϵ_{ij} 的函数。方程(2)右边的 $\partial_k T_{ijk}$ 项就是(1)式中 $\nabla^2 g$ 项的张量推广。根据场论,利用对称性可知应变通量张量 T_{ijk} 只可能是:①场张量 ϵ_{ij} ;②平衡张量 $\langle S \rangle_{ij}$;③空间导数 ∂_k 的函数。将 T_{ijk}^L 的表达式(从略)代入方程(2)后即得通常(然而不是张量)的线性扩散方程。但这里还必须加上非线性校正 T_{ijk}^{NL} (其表达式从略),以仿拟与断层和地震等灾变性应力弛豫事件相关的非线性行为。换言之,方程(2)的非线性部分是用来表示上部地壳中破裂的阈值性质。式(2)中的 η 表示作用于系统的“噪声”。式(1)并未考虑此项。这里是将噪声看作应变场的涨落之源。它包括地壳的局部不均一性(其中有成分、断层、厚度、与下伏层的耦合等),以及其他板块对边界所施加变形的涨落 ∂P , 并用随机张量场 η 表示这种噪声。当板块处于自组织临界态时, $\langle \eta(x, t) \rangle = 0$ 。但当超出岩石圈 SOC 场论的标度之外时则噪声不再守恒,局部涨落在时间和空间上将无关联。

根据支配方程(2)与扩散作用相类似的结构可以推论地壳的动力学之力学平衡具有应变涨落的长程时-空关联的特征,而这一点恰恰就是 SOC 的标

记,并且是和总体守恒方程的存在密切相关的.这意味着应变的局部涨落通过广义的扩散过程获得了弛豫,并逐渐渗入邻域.从这一意义上说,岩石圈的结构化是开放系统中的耗散输运问题,而其实质则是一种崩塌动力学吸引子,即地壳内的弹性能量呈间歇阵发的崩塌式释放,直至回到新的自组织临界态.

笔者进一步指出,应变张量的时-空关联函数定义了一组临界指数,其中包括:①动力学指数 z ,它支配着应变涨落随时间的空间扩散;②场指数,它描述了应变随标度变化的重正化;③空间异向性指数,它控制着应变扩散的空间异向性.广义非线性张量扩散方程的解要求确定这些临界指数,然而这一问题尚未完全解决,有待进一步研究.

7.4 大规模大陆岩石圈变形

England^[14]指出,板块理论不能恰当地解释大陆岩石圈的大规模变形.在板块的大洋部分,地震活动的变形发生在数十 km 宽的带内,然而大陆变形发生在数百到数千 km 的带内.他认为这种变形型式上的差异可能要归因于大陆岩石圈的较大浮力和较小强度,于是放弃了刚性板块的概念,并且将大陆岩石圈视为具有非牛顿流变学特性的粘性薄席(viscous sheet),根据其幂律蠕变(power law creep)行为和浮力增大导致大规模走滑运动,研究大规模大陆岩石圈变形的驱动力与动力学机制,获得了如下的主要结果:

(1)大陆岩石圈变形的粘性薄席模型提供了描述大陆碰撞带内变形本性的框架,并据以预测了地壳厚度分布和偏应力.在粘性席具有非牛顿流变学并且能够支撑约 300×10^5 Pa 偏应力的条件下,上述预测与根据印度-亚洲碰撞带所推断的结果相一致;(2)粘性席模型考虑了变形中所产生的地壳厚度反差.增厚地壳区所施加的浮力在大陆岩石圈的变形中起重要的作用,特别是它将板块碰撞所产生的应力传递到大陆内部;(3)大陆碰撞带内变形的一般顺序为:开始时,上浮地壳 2 个区的会聚在板块边界附近主要发生压缩变形和地壳增厚.当碰撞持续进行时,则地壳增厚、浮力增大使周围区域发生变形.最厚地壳区发生净延伸,并且在其外围发生走滑运动,以容纳因碰撞而产生的大部分应变;(4)大陆碰撞抵抗板块运动的巨大阻力意味着大规模造山运动需要对于数十百万年或数千 km 板块会聚所需要的持续驱动力;(5)岩石圈的不均匀脆性层对于作用于其上的巨大作用力的响应有待进一步研究.

7.5 造山运动的驱动机制

Turcotte^[15]对于造山运动的驱动机制进行研究,获得了如下的主要结果:(1)他用大陆岩石圈的地壳增厚(Airy 地壳均衡说)(Airy isostasy)和减薄(热致地壳均衡说)(thermal isostasy)对于大陆地形进行了讨论,并且推导出所形成的水平应力场,认为岩石圈的减薄可以导致显著的水平应力;(2)板块起着应力导引(stress guide)的作用.板块内部缺乏变形表明板块能够在地质学的时间标度上将弹性应力作长距离的传递.导致造山运动水平应力主要作用于岩石圈板块的边部;(3)大陆裂谷发展而形成的中央扩展中心对于其相邻岩石圈产生水平压应力.热隆起的大陆减薄地壳可望产生弹性偏应力,并导致地壳延展而生成地垒和地堑构造;(4)巨大造山带常与大陆碰撞相伴,相邻洋脊和(或)大陆裂谷驱动 2 个大陆碰撞,在造山带内导致偏张应力,并且在相邻岩石圈中产生偏压应力.总之,板块构造提供了理解造山运动的一般框架.现在人们对于造山运动的基本驱动机制虽然有了一定的了解,然而许多实际观察和理论研究工作尚有待进行.

参考文献:

- [1] 於崇文. 揭示地质现象的本质与核心——地质作用与时-空结构[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 2-12.
YU C W. Revealing the essence and crux of geological phenomena — geological processes and spatio-temporal structures [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 2-12.
- [2] 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J]. 地学前缘, 1998, 5(3, 4): 159-182, 347-368.
YU C W. The complexity and self-organized criticality of the solid Earth system [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3, 4): 159-182, 347-368.
- [3] 於崇文. 地质作用的自组织临界过程动力学——地质系统在混沌边缘分形生长(上、下)[J]. 地学前缘, 2000, 7(1, 2): 13-42, 555-586.
YU C W. Dynamics of self-organized critical processes of geological processes — fractal growth of geosystems at the edge of chaos [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1, 2): 13-42, 555-586.
- [4] Clayton D D. Principles of stellar evolution and nucleosynthesis [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1968. 1-612.
- [5] Haken H. Advanced synergetics: instability hierarchies of self-organizing systems and devices [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 1-356.

- [6] Tossell J A, Vaughan D J. Theoretical geochemistry: applications of quantum mechanics in the Earth and mineral sciences [M]. Oxford: Oxford University Press, 1992. 1—510.
- [7] Kuramoto Y. Chemical oscillations, waves and turbulence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 1—156.
- [8] 於崇文, 蒋耀淞, 肖正域. 热液成矿分带的溶解—沉淀波结构[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(5): 540—550.
- YU C W, JIANG Y S, XIAO Z Y. Dissolution/precipitation wave structure of hydrothermal ore zoning[J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(5): 540—550.
- [9] Ortoleva P J. Geochemical self-organization [M]. Oxford: Oxford University Press, 1994. 1—411.
- [10] 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.
- [11] Herrmann H J, Poliakov A N B, Tzschichholz F. The deformation of rocks; fractals everywhere [A]. In: Evertsz C J G, Peitgen H-O, Voss R F, eds. Fractal geometry and analysis [C]. Singapore: World Scientific, 1996. 417—424.
- [12] Sornette A, Sornette D. Self-organized criticality and earthquakes [J]. Europhys Lett, 1989, 9: 197—202.
- [13] Sornette D, Davy P, Sornette A. Structuration of the lithosphere in plate tectonics as a self-organized critical phenomenon [J]. J Geophys Res, 1990, 95 (B11): 17353—17361.
- [14] England P. Some numerical investigations of large scale continental deformation [A]. In: Hsu K J, ed. Mountain building processes [C]. London, New York: Academic Press, 1983. 129—139.
- [15] Turcotte D L. Driving mechanisms of mountain building [A]. In: Hsu K J, ed. Mountain building processes [C]. London, New York: Academic Press, 1983. 141—146.

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

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). 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 processes; complexity; self-organized criticality; edge of chaos; fractal dynamics.