

# 地球系统科学——挑战和机会

贾复陶祖莱

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码100080)

**提要** 本文简介了近年来国际上兴起的地球系统科学。地球系统科学是应人类面临的基本生存环境危机——全球变化的严重挑战而兴起。它把地球看作由相互作用着的各组元(如大气圈、土壤-岩石圈、生物圈、水圈等)组成的统一系统, 研究这些组元及相互作用是如何进行和如何演化的, 以及系统对于外部作用变化及人类活动是如何响应的, 从而提高人类对于自身赖以生存的地球环境在未来, 特别是未来数十年至100年时间尺度上变化趋势的预言能力。地球系统科学将是20世纪末、21世纪人类最宏大的科学事业之一, 广大力学工作者应该而且能够在其中作出自己应有的贡献。

**关键词** 地球系统科学; 气候; 生物圈; 全球变化

## 1 全球性的挑战——地球系统科学的背景

“向自然索取”, “征服大自然”, 这曾经是农业文明时代人们的美好憧憬, 曾经是工业化浪潮的原动力, 也曾经是几个世纪以来人们向科学进军的旗帜。然而, 这面壮丽的大旗背后隐藏着一个先验的假设: 大自然是宽容无度的, 而人是“万物之灵”, 故“万物皆备于我”。今天, 正是这个以“索取”和“征服”为特征的工业文明进程的本身, 揭示了这个先验性假定的虚假, 并迫使人类面临一系列严峻的挑战。譬如:

• **人口爆炸**。人类利用科学技术打破了自身高出生率和高死亡率的平衡, 人口剧增。产业革命以来, 300年中, 世界人口从5亿增至50亿。为了获取必要的食物和水, 为了改善生活, 人类必然在更大的广度和深度上干扰地球系统自然稳定的势态, 造成一连串问题。

• **土地沙漠化**。为获取食物, 耕地面积在300年间从4亿公顷扩展至15亿公顷, 耕地和牧场占陆地面积的30%以上。而另一方面森林面积急剧减小: 5000年前约为76亿公顷, 1860年为55亿公顷, 1975年减至26亿公顷, 1986年为23亿公顷, 目前森林正以1100万公顷/年的速度从地球上消失。其直接结果是土地沙漠化。目前沙漠面积已占陆地总面积的10%, 还有43%的土地正面临沙漠化的威胁。

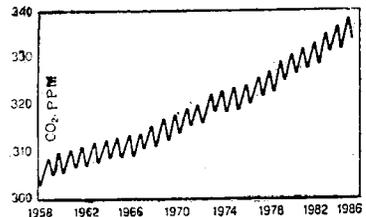


图1 大气中CO<sub>2</sub>的增加

• **温室效应。**化石燃料的燃烧，森林的破坏及其它工业活动，使得大气的化学成分发生了明显的变化。图1是全球大气中CO<sub>2</sub>浓度的变化。连续30年的测量表明，大气中CO<sub>2</sub>的含量以每年0.4%的速率递增，按现有的绝大多数气候模型估计，在不太远的将来这可能使全球平均温度上升2℃，这样的温度变化可以和最近一次冰期以来18000年间的温度变化相比拟。而湖泊中花粉和海底浮游生物骨骼沉积物的考察表明，全球范围的这样的温度变化，必将导致全球陆地植被类型和海洋生物物种分布的显著改变，而这又必然反过来影响全球气候。应该指出，除了CO<sub>2</sub>以外，导致温室效应的痕量气体还有甲烷、氟氯烃、N<sub>2</sub>O等。它们在大气中的含量虽微，但增温效应强（如氟氯烃浓度仅为CO<sub>2</sub>的百万分之一，增温作用却为CO<sub>2</sub>的1/4；CH<sub>4</sub>浓度仅为CO<sub>2</sub>的0.5%，增温作用却为CO<sub>2</sub>的1/3），增长率高（如CH<sub>4</sub>年增长率为1.0%，而CO<sub>2</sub>年增长率为0.4%），作用时间长（如N<sub>2</sub>O增温作用虽然只有CO<sub>2</sub>的1/12，但它在大气中的寿命为CO<sub>2</sub>的7—10倍），因而引起的效应相当可观（大致与CO<sub>2</sub>相当）。这些气体含量的增加，亦起因于人类的工业和农业生产活动。

• **臭氧屏蔽的破坏。**分布于同温层中的臭氧吸收了太阳光中99%的对地球生物圈有极大伤害作用的高能紫外线。测量表明，1978—1987年，全球臭氧浓度平均降低了3.4%—3.6%；1985年更在南极上空观测到了臭氧空洞。有证据表明，造成臭氧屏蔽破坏的主要原因是人类活动排放到大气中的氟氯烃的光化学反应。而臭氧屏蔽的破坏，必将对地球生命系统和人类生态环境造成灾难性的影响。

• **生态环境的破坏。**人口爆炸和人类活动以直接或间接的形式，从多方面破坏了地球的生态系统。其标志就是生物物种正以几小时一种的速率从地球上消失，许多种生物已濒临灭绝。物种分布改变以及具体物种的灭绝对人类的影响究竟如何虽然还不十分清楚，但作为一种标志，它表明：地球作为人类生命活动的场所，其可居性正面临着越来越严重的问题。

等等，等等。

显然，“索取”和“征服”虽然大大提高了人类的物质文明，但付出的代价却是严重地破坏了人类赖以生存的地球环境，而反过来威胁自身的生存。而且，如果人类不从根本上改变自身的观念，如果人类的生活和生产方式不作重大的变革，而听任自产业革命以来的物质文明的发展进程继续下去的话，那么，若世界经济以年增4%计，则100年后，人类活动对地球环境的冲击将是今天的50倍，那将使人类处于十分可悲的境地。因为，地球是我们迄今仅知的具有维持生命所必须的丰富的氧和液态水的星球。

面临这一严峻的挑战，首要的问题是人类观念的改变，即摘掉自欺欺“人”的“万物之灵”的桂冠，作为地球系统的一个有机的组元而置身于其中，老老实实在地承认人类自身的命运，决定于地球系统整体的运动。由此出发，调整人和地球自然环境的关系，变“征服”为“协调”。从蒙昧时代、农业文明时代、工业文明时代到今天和未来的信息时代(姑名之)，人和自然的关系也经历了服从→征服→协调的演变。如果说古人不得不臣服于自然是由于对自然的无知，而工业化浪潮中对自然的“征服”以人们对自然的各个局部的运动规律的认识为先导，那么，今天和未来人类同自然的协调，必定要以人类对于自己所置身的地球系统的整体的变化规律的认识为前提。地球系统作为一个整体的演化规律，系统中各组元相互作用过程的规律，尤其是人类活动对系统各组元，各组元相互作用过程，以及整个地球系统的影响，等等，这些问题的研究和解决，正是地球系统科学的使命。

## 2 地球系统科学与传统地学

2.1 地球系统科学是传统地学发展的必然 人类对地球的开发、利用、探索研究活动由来已久。地理学、地质学、气象学、海洋学、生态学都有悠久的历史。然而迄今对地球的研究,多是针对地球的某一组成部分分门别类地进行的(如大气、海洋、地貌、生态等),形成了各种专门学科,以及带有各自门类特色的传统研究方法及知识体系。仅仅是在十数年前,科学家才普遍认识到必须而且也可能如实地把地球作为一个由相互作用着的各个组元或子系统——主要是地核、地幔、土壤-岩石圈、大气圈、水圈、生物圈(包括人类社会)——组成的统一系统即地球系统来研究。只有如此才能真正深化对地球的研究,也只有如此才能回答一些人类所面临的一系列地球系统行为的紧迫环境问题。这样一种眼界和观念性的转变,标志着从传统地学观念向地球系统科学的转变。这种转变的实现有两重背景。一是地球科学各分支深入发展的必然,例如近数十年大气科学的发展,就愈益意识并介入海气相互作用、陆气相互作用、大气痕量气体的化学过程及气候效应等;从海洋学角度,同样海气相互作用、冰川及冰盖变迁、与陆地及大气的淡水交换等的重要性及相应的研究工作受到日益增加的重视等。另一方面,近30年来空间技术的突飞猛进开扩了人类的眼界,大大提高了人类认识地球的能力,这是向地球系统科学概念转变的另一重要背景。表1列出了20世纪地球科学发展的重大事件。从这张表我们既可看到地球科学从传统地学脱胎的印迹,又可以体察到20世纪最后十数年的今天正处于地球科学发生飞跃和突破的前夕。而地球系统科学将正是这个突破口。当然地球系统科学并不能代替传统地学各学科自身的发展,相反要求它们能更深入精确地研究和提供地球系统各组元自身的规律性知识。然而,从研究对象、研究方法、要解决的问题诸方面看,地球系统科学与传统地学相比毕竟具有许多全新的特色,具有更高的层次,是本世纪末和下一世纪最受人们重视的新兴科学之一。

表 1 20世纪地球科学发展大事记

1905	穿越大西洋无线电传输发现电离层的存在	1971	用月球岩石年龄测定证实地球-月球系统的年龄为45亿年
1906	根据放射性确定地球年龄	1972	发射 LANDSAT-1 卫星观测地球陆地
1915	大陆漂移假设及证据,但无机制	70年代	认识到催化循环对平流层臭氧的破坏
1920	冰河期的 Milankovitch 理论	1977	发现在大洋扩展中心中存在厌氧生物
1930	关于臭氧层的第一个综合理论	1978	发射 SEASAT 及 Nimbus-7 进行海洋大气观测
1948	数值天气预报开始	1981	从空间研究地球极光
1957	国际地球物理年 (IGY) 开始,空间时代开始	1983	通过 VLBI 直接测量大陆漂移
1958	“探测器 1 号”发现 Van Alfen 辐射带	80年代	积极研究南极臭氧洞
1958	开始大气二氧化碳的长期监测	1986	由国际科学联合会支持开始国际地球生物圈计划 (IGBP)
1959	发表北大西洋海底的精确地形图	1995	开始地球系统科学的观测计划
1960	获第一幅地球的卫星照片		
60年代	认识岩石板块结构及大陆漂移机制		

2.2 地球系统科学的内涵及方法学特点 如上所述,地球系统系指由地核、地幔、土壤-岩石圈、水圈、气圈、生物圈等构成的统一整体。作为对于外部太阳辐射能及地核原始热及放射性能量输入及变化的响应,以及地球系统各组元(或称子系统)间相互作用的结果,地球系统处于永恒不断的变化、演化之中。地球系统科学的目标就是要深刻认识这些相互作用及外部作用对系统行为的影响,特别重要的是要回答人类活动对系统的扰动效应及预言数十至百年尺度上这个系统的变化。

从系统的观点研究地球，意味着与传统地学的研究方法学上的重大差别。地球系统科学不刻意追求对某个组元的细节了解（当然当对系统具有重大影响时它们也是重要的），而是追求达到对于地球这个系统用大量状态变量进行均衡的刻画，通过对各组元自身过程及组元

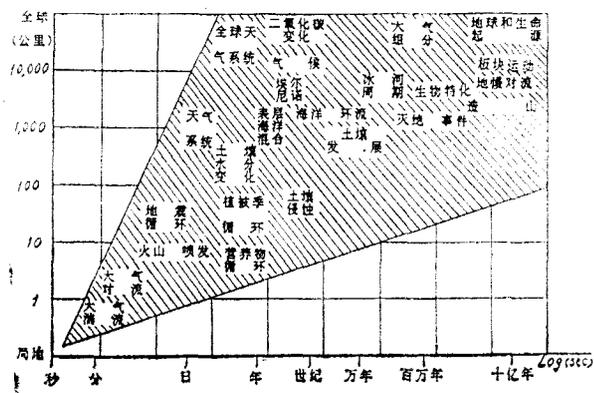


图 2 地球系统典型事件的时空尺度

间相互作用关系的认识，把握状态变量的动力变化（即作为时间函数定量描述）从而达到预言地球这个动力系统行为的最终目的。

不过，地球系统的变化在极大的时间-空间尺度范围内进行。包括从秒-厘米量级的分子扩散、输运事件到  $10^{16}$  秒-全球尺度的板块运动。图 2 表示了地球系统各重大过程的时空尺度示意关系。当然处理一切尺度过程的系统理论，今天还不可能建立起来（不仅有数学

的计算实践上的困难，更有对客观过程及相互作用认识不足的困难），因此地球系统科学的一个显著方法学特点就是按时间尺度（而非按组元作对象）划分及研究整个系统。在实际着手时，势必对系统进行简化，即只考虑特定尺度上的过程且只选择适当规模的状态变量，也以回答特定问题作为现实目标。把更长的尺度过程作为给定背景，将更短尺度的过程以统计和的形式把它对系统的贡献包括进来。当然重要困难之一是不同尺度过程间的强耦合作用。例如火山喷发是以天计，其成因与板块运动相当，而其气候学效应则以年计。

2.3 地球系统科学的主题及研究步骤 从当前人类面临的全球变化严重挑战角度看，最具有紧迫性的是 10—100 年尺度的过程。在这个尺度上地球系统由物理气候子系统与生物地球化学循环组成，而地球生物系统是问题的核心。图 3 表示了这种认识。围绕  $10^1—10^2$  年尺度建立地球系统的动力系统框架，发展与提高预言能力，特别是预言人类活动对系统扰动的效应，构成了当前地球系统科学研究的主题。

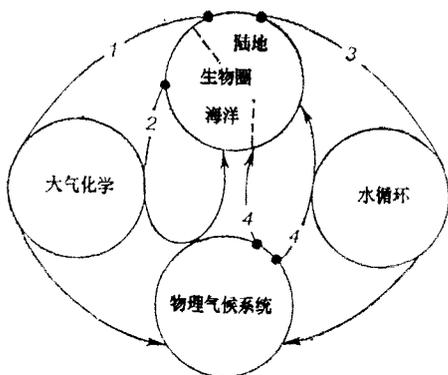


图 3 地球系统的简单模型

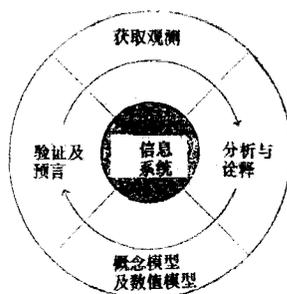


图 4 地球系统科学的究途路径，四个步骤循环联结，并运用全球信息系统

地球系统科学的基本研究步骤由 4 部分构成：①现象的观测和数据的积累；②对观测数据进行分析 and 解释，从物理的、化学的和生物学的规律出发，建立有关地球过程的定量关系；

③在①和②的基础上建立概念模型和数学(数值)模型;④验证模型,并用它进行预测。应该指出,这些步骤并非循序渐进,而是由某种循环构成,如图4所示。比如说,概念模型的建立来源于观测,而且由此建立的数学模型要通过进一步的观测来验证。但是,观测本身,从观测哪些状态变量,到观测系统的配置,都需要以一定的概念模型为指导。

还应当指出,上述4个步骤并非地球系统科学所独有。地球系统方法学的特点在于其全球性和复杂性。

首先是全球性的系统的观测,包括应用空间技术进行全球整体规模的观测,和全球范围的、系统的原位(in situ)观测,这是整个地球系统科学的基础。不同于其它学科,(i)地球系统科学的观测特别强调全球范围的系统性、统一性(测量方法、过程和数据采集等的规范化)和同步调协性;(ii)地球系统科学的研究必须要有一个高容量、高效能、面向全球的信息系统。

其次是从各学科已有的规律和对基元过程研究的结果出发,对观测到的数据进行分析,提出合理的假设,以识别观测数据中所包含的可能的图式(pattern)。进而弄清所获得的图式背后的内在的过程(物理的、化学的或生物学的),获得关于过程的定量的规律性的认识。从图式上升为过程,这是地球系统科学研究中十分重要的一步。

第三是建立模型,这是地球系统科学的核心。因为,地球系统科学的根本问题是:地球是怎样工作的?是怎样演化的?其未来的状况如何?这些问题只有当人们能够把所观测到的结果纳入一个概念的框架,并由此出发能进行模拟和预测的时候,才有可能回答。从观测数据、过程分析到建立模型,这是关键的一步。这里的模型包括全球系统模型和子系统模型,且有概念模型和数值(数学)模型两类,前者是基础。

第四是模型的验证。一个合理的地球系统模型必须首先经得住古气候研究的检验。它是我们唯一具备的大时空尺度的地球系统行为的真实记录,也正因此,10<sup>3</sup>—10<sup>6</sup>年尺度成为地球系统科学研究的又一主题。

最后是借助于通过了验证的模型,预测地球系统的未来(10—10<sup>2</sup>年的尺度),这是人类协调自身和地球自然环境的依据。

总之,地球系统科学是传统地球科学发展的必然,它有其自己特定的目标和内涵,并形成了一套与其目标、内涵相适应的方法学体系。地球系统科学的发展不仅需要数学、力学、物理学、化学、生物学、传统地学以及多种技术科学的综合,而且要求全球范围内科学家和政府的合作。这是地球系统科学的又一特色。

### 3 两个时间尺度范围内的主要课题

如上所述,地球系统科学的研究当前集中于10—10<sup>2</sup>年和10<sup>3</sup>—10<sup>6</sup>年两个时间尺度的过程上,而以前者为主。下面介绍相应于这两个时间尺度的两个地球系统概念模型,以及有关的主要课题。

3.1 10<sup>3</sup>—10<sup>6</sup>年尺度范围内的主要课题 重视研究这个尺度上地球系统变化的原因,除了是因为不同尺度过程的耦合作用以外,最主要的目的是希望搞清地球这个系统实际上(而非概念或图式上)是如何工作的。在漫长的历史长河中,地球经历了丰富多彩的变化,包括大陆位置,生物类别、种群量及分布,冰雪覆盖,气候等。其踪迹都实际地保留在陆地及海洋,湖泊沉积物,化石,冰核中。它们提供了唯一有关地球的长时间序列的多种信息。特

别是全球尺度气候变化频率、极值等至关重要的信息。这些信息是任何自今日开始的 努力都无法获得的。既然在客观上地球系统的工作机制在过去与今后都是一样的，那么把  $10^3$ — $10^6$  年尺度上地球各种变化的因果关系搞清，重构包括古气候、古生物等的历史环境，就成为建立现代地球系统科学的重要基础和检验标准之一。

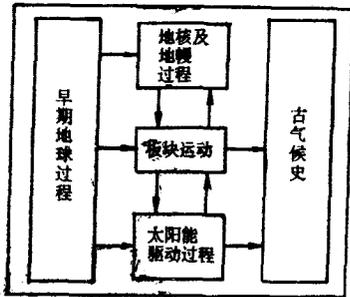


图 5  $10^3$ — $10^6$  年尺度范围内地球系统的概念模型

这个尺度范围地球的变化，同时受太阳辐射能量和地核能量所驱动，整个地球系统可以看作是由地核-地幔过程、板块动力学过程和太阳驱动过程三个子系统所构成。图 5 给出了这个时间尺度上地球系统的概念模型。早期地球过程和古气候的变迁可以作为建立和检验这个模型的线索和依据。而需要重点研究的课题，可以简略地归纳于下：

①早期地球史。包括地球的形成，地核与地幔的发展，大气圈、水圈及生物圈的形成。早期历史的产物对以后的演化有重要的影响。

②地核与地幔。包括地核内金属电磁流体的“发电机”过程产生地磁场的机制（及相关的地磁极反转现象），地核对地幔的传热及力矩作用，地幔热对流及相关的地幔流变性质等。

③板块动力学。包括岩石板块的运动与变形，大陆漂移，地震，火山活动等。

④太阳辐射能驱动的岩石侵蚀，风化，地貌变化，土壤形成发展等。

⑤古气候研究。通过沉积物同位素比率测定，矿物分布，花粉，浮游生物及特殊气体的分布信息，结合上述各项研究工作，进行古气候重构。其中地球绕日轨道的周期性变化（以数千年为尺度）与周期性出现的地球冰河期有很强的关联——Milankovitch 效应。仍需推延到 18000 年以前最后一次冰河极盛期以前进行研究，搞清其机制，这对建立地球系统图式框架有重要意义。

3.2  $10$ — $10^2$  年时间尺度上的主要问题  $10$ — $100$  年是人类活动和地球环境系统相互作用的特征时间。研究这个时间尺度上的地球系统的行为，除学科理论上的价值以外，其巨大的实践意义在于解决一些紧迫的问题，为实现从“征服”到“协调”的转变提供理论指导。

图 6 是这个时间尺度上地球系统的简化模型，其特点是把人类活动的影响看作一个能动的要素而从自然环境中独立出来，自然地球环境系统则由物理气候子系统和生物地球化学循环子系统构成，而以古气候变化为线索和检验模型的依据。图 7 则比图 6 更细致些。

物理气候子系统主要研究全球的大气、海洋、冰雪等物理过程及其对全球气候的影响。当前急需研究的课题主要有：

- ①气候（特别是温度、降水、海面风应力等）与大气中痕量气体浓度变化的关系；
- ②海洋环流对大气作用的响应，以及海洋环流的变化对表面温度分布的影响；
- ③海洋吸热效应对温室效应的影响；
- ④气候与海冰和云量变化的关系；
- ⑤陆地植被与气候之间的相互作用；等等。

显然，这些问题的解决有赖于大气物理-动力学、海洋动力学、陆地表面水分能量平

衡、平流层动力学等方面的进展。

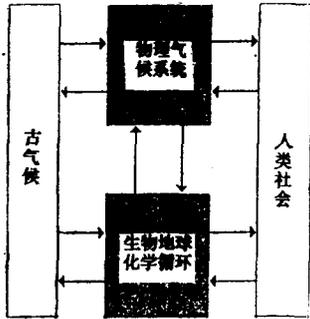


图 6 10—100年时间尺度上地球系统简化模型

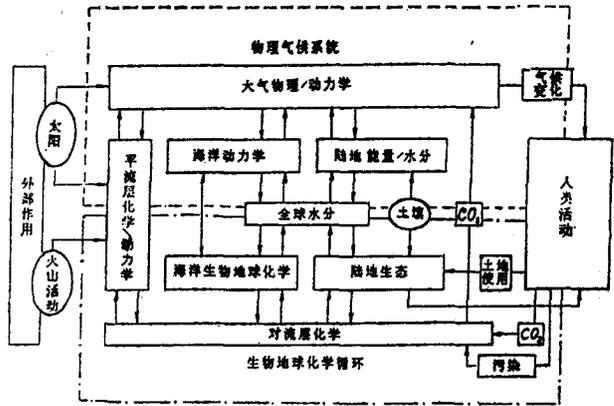


图 7 10—100年时间尺度上地球系统概念模型

生物地球化学循环则主要是研究一些对生物来说至关重要的物质（如碳、氮、硫、磷等）在全球范围内的“流动”，以及这种“流动”对生活于其中的生命体的影响。当前这个子系统的研究课题主要是：

- ①主要生物地球化学循环的现状；
- ②在未有类活动干扰以前生物地球化学循环系统的状况；
- ③生物地球化学循环未来可能的状态及后果；等等。

下面进一步介绍物理气候系统和生物地球化学循环这两方面研究的现状。

#### 4 物理气候子系统过程研究现状

物理气候子系统的研究主要涉及大气物理-动力学过程、海洋动力学过程、陆地水分能量平衡、平流层动力学过程和全球水循环过程这五个方面。这里，全球水循环过程是物理气候系统与生物地球化学循环子系统的联结点之一（参见图3），姑置于此一并论述。

4.1 大气物理-动力学过程 大气物理-动力学过程在气温、降水、风、云等现象中起着决定性作用，并在全球范围内输运水、气溶胶及化学物质。同时，它也是地球生命支持系统的重要组成部分，对人类的活动有直接的影响。正因为如此，人类的正式天气预报业务已有100年的历史。近10年来，由于空间技术的运用，大型计算机的发展和大气环流动力学模型（GCM）的建立，全球性天气预报已成为常规，预报质量也大大提高。可以说大气物理-动力学是物理气候系统中研究最为深入、成熟的一部分。但即使如此，仍不足以满足地球系统科学对大气过程研究的需要。因为：

①GCM模型基本方程组固有的非线性导致的计算不稳定性——“人为天气”限制了预测的时间尺度，长期天气预报的极限大约为2星期。这远不能满足气候研究（10—100年）的需要。

②在现有的大气动力学模型中，海-气界面和地-气界面的过程都是以边界条件的形式给出的，没有计及它们之间的相互作用。这对于短时间尺度过程固然不失为一种良好的近似，但在中等时间尺度上就必须计及它们之间的耦合作用。这里有许多基本问题需要深入研究，如系统的辐射平衡和陆地水分能量平衡（决定地面温度）的影响，海洋环流引起的能量运输

的作用，海洋巨大的热容量造成的“记忆”效应，等等。

③大气物理过程中还有许多重要的环节机制不清楚。比如说，云和气溶胶对大气过程影响十分重要，辐射平衡不只与云量有关，而且和云的位置、形态有密切关系，高空云可使地面变暖，而低空云则由于反射作用使地面变冷。据估计，若全球范围内低空云净增加百分之几，则其作用将抵消CO<sub>2</sub>倍增引起的温室效应而有余，由此可见云的重要性。但我们目前甚至还没有建立一个对云的类型、形状、大小进行统计描述的形态学的概念体系。

总之，现有的大气物理-动力学为研究物理气候系统中的大气过程提供了良好的基础，在GCM模型的基础上发展物理气候子系统模型亦不失为一条可探索的途径，但对于认识地球系统科学层次上的大气物理-动力学过程来说，更为重要的是大气-海洋、大气-陆地（包括陆地生态系统）等界面过程的基本规律，以及大气内部一些重要过程（如云的动力学过程）机制的研究。

4.2 海洋动力学过程 海洋动力学过程是物理气候子系统的一个重要组成部分。对地球系统科学来说，应该予以特别重视的是：

①海洋表层的储热功能和海洋环流相结合对物理气候过程的影响。海水在太阳辐射和大气动力过程的作用下，在全球范围内进行着复杂的三维非定常运动，从而形成全球范围的物质和能量的输运。人们对于海洋环流的认识远不如大气环流深入，近年来随着探测技术和计算机技术的进步，大规模观测计划的实施，海洋环流动力学的研究有了很大进展，但主要限于水平环流结构。对于深海与表层之间的垂向流动（“通风”）则知之甚少。而恰恰是这种垂向流动对物理气候过程有重要意义。因为，由于大气中温室效应气体含量增高而造成的余热，有可能大量储存于热容量极大的海水表层，而时间尺度恰好为10—100年的深海-表层垂向环流却恰好进行热交换，这有可能大大缓解温室效应。而要对此进行精确的预计，必需对海洋环流尤其是垂向流动的规律以及温度、含盐量分布（垂向分布）作深入的研究。

②海冰的分布和动力学过程。海冰分布的年际变化，特别是南极大陆和冰层区域的情况，对于全球气候过程有重要意义。因为，（i）它大大提高了太阳辐射的反射率；（ii）在海冰增长期形成的低温高盐水，展布于全球形成深层水，它对海洋环流有影响；（iii）海冰破坏了含有丰富营养的表层水的环境，对海洋生态系统有影响。目前我们对海冰的分布和运动知之甚微。

总之，对物理气候子系统来说，海洋动力学的当务之急是：以深海-表层垂向流动和海冰运动为主要目标，发展新的测试技术，系统地开展大规模的观测，了解其基元过程，逐步建立合理可靠的海洋动力学模型。

4.3 陆地水分和能量平衡 太阳辐射给地面以热能，而地面又通过大气湍流对流、红外辐射、土壤蒸发、植被蒸腾等过程向大气传输热能，在地表附近这两种热能输运趋于平衡。这种平衡是影响大气环流、地表温度分布和降雨过程的一个重要因素，因而对物理气候过程是有意义的。显然，地表能量平衡受诸如风速、温度剖面、云量等大气变量的控制，但地面植被情况也起着重要作用，这不仅因为植被蒸腾本身就是地表能量平衡过程的一个动力学要素，而且因为植被的存在改变了土壤的蒸发，也改变了地面的粗糙度和反照率，这些因素还将施反作用于大气过程。

此外，研究表明，降雨、海陆表面温差及季风等过程对陆地表面的湿度（有效水分的含

量)很敏感。在植被茂密的地区,植物根部附近有足够的水可供植物使用,这时借助于植物叶的呼吸和光合作用的控制,可维持一个稳定的地表温度。但当土壤水分不足,低于某一临界值时,则地表蒸发过程与近期降雨行为、毛细作用及水气在土壤孔隙里的扩散有关,问题就复杂了。

不难看出,对于陆地表面水分能量平衡来说,关键因素是地表植被的分布,包括种群量、种类、叶的蒸腾过程等等;而叶的蒸腾规律又和植物体内的生理流动——蒸腾流有密切关系。所以,实际上地表水分能量平衡过程亦可看作物理气候子系统和生物地球化学循环的一个结合环节。

4.4 平流层动力学过程 平流层主要通过臭氧和气溶胶吸收太阳能而加热,两极与赤道加热情形不同,因而形成平流层环流。这种环流对于大气中一些至关重要的组分(如臭氧)的分布起着重要的作用,与光化学过程有密切关系,处理方法也和对流层不同。目前研究大气物理-动力学过程时大多把平流层作为边界条件来处理,而对物理气候系统过程的研究来说,应当与平流层环流耦合。

4.5 全球水循环 全球水循环在地球系统中居于重要的位置,它是物理气候子系统和生物地球化学循环的重要联结点,对二者起着调节作用,这种作用几乎无处不在。

尽管水文学作为传统地球科学的一个分支具有悠久的历史,对于时空域中小尺度过程也积累了不少资料,但人们对于水(包括汽、固、液三相)在各种过程中的运动基本规律,全球尺度的水循环及其对于地球系统的作用等等的认识却是惊人的贫乏和模糊。因此,就地球系统科学而言,水循环的研究还刚刚拉开帷幕。

从全球观点出发,人们把地球水分划分为五大水库(如图8所示),即海洋、极冰及冰川、地下水、大气中水分和生物水。全球水循环的研究一方面要求人们弄清楚每个水库中水的运动规律及其和相关的地球过程的关系(比如,海洋中水的运动涉及热存储、热盐运输、海冰、溶液化学及化学物质运输、营养物质运输、海洋生态系统、沉积等地球过程,十分复杂),另一方面又要了

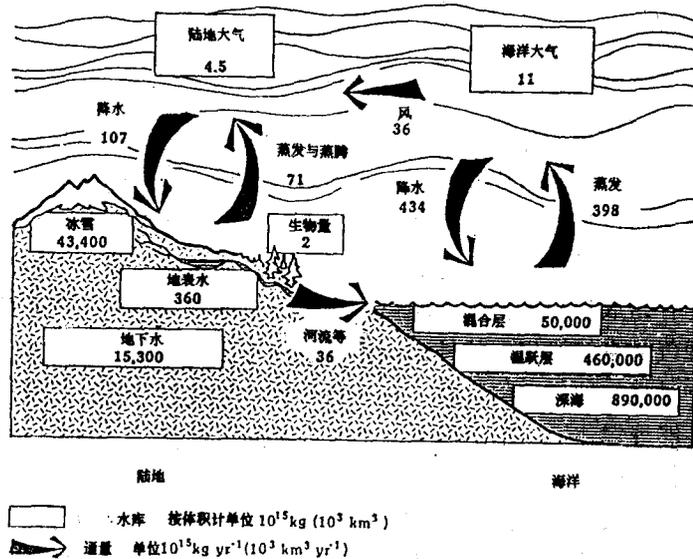


图8 全球水分分布概要

解各水库之间水的运输。显然,全球水循环研究是十分复杂的。而当前最紧迫的问题是有关全球水循环的资料极端贫乏,而且可靠性很差。例如,全球地下水量的数据不可靠性达2—4倍,表面水及冰的储量的数据可信度略高一些,但仍不足以以此为依据进行定量分析。另一方面,水循环的形式多样,很多过程机制不清楚,很普通的云的形成过程和降雨过程的定量规律就不清楚;生态系统中的水循环过程就更为复杂了,因此,当前地球系统科学中水循环的

主要课题是:

- ①全球主要淡水水库的分布、容量、特性的观测,及动力学规律的研究;
- ②全球主要水库之间的流通量的观测,以及流通机制(主要是蒸发、凝结、降雨、河流、冰川流动、融化、冻结等过程)的研究;
- ③水循环与生物地球化学过程的耦合作用的研究;
- ④以上述研究为基础,在适当的时间尺度上建立水循环模型,对上述主要水库中水的容量、分布、化学组分等进行预测,并预言气候变化和人类活动对通量的影响。

## 5 生物地球化学循环

生命体存在于其间的所谓生物圈(biosphere)作为地球系统的一个组成部分的思想最早由奥地利地质学家 Suess 于1875年提出,后为俄国化学家 Vernadsky 所发展。不过,只是在最近,人们才认识到地球上分布着的这层有生命的“薄膜”是如何由全球尺度的所谓“生物地球化学循环”所支持的。这种情形可从图9中看出一点端倪。人所共知,动物的生命活动离不开水、食物(死了的或活着的生物体)和大气中的氧,食物氧化产生 $\text{CO}_2$ 并提供动物活动、生长和生殖所必需的能量。然而,在机体生命过程中,除了水和 $\text{CO}_2$ 外,还循环着氮、

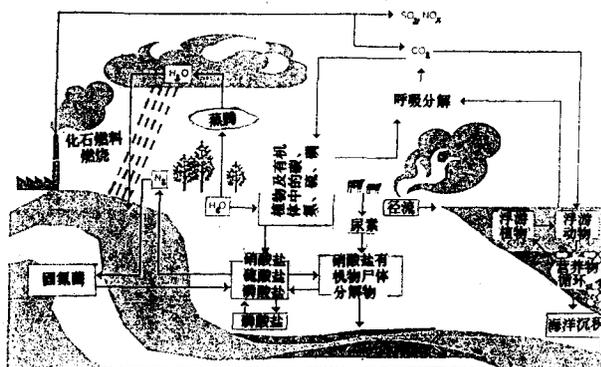


图9 生物地球化学循环,一些重要元素(碳、氮、硫、磷等)在地球系统中的运动对于维持生命系统至为关键

磷、硫等十数种基本元素,这些元素不仅对该生物的生命活动十分重要,而且还要求它们在中以一定的比例存在,否则将成为生态发展的限制因素。比如,氮的供给限制了海洋生物生命过程的速率,水的多少决定了沙漠生物群的规模,而氮或硫对于土壤、湖泊或近岸海域中生物种群的发展都起着控制作用。显然,无论是在海洋里,还是在陆地上,生物种群的物种组成和每一物种的增长速率,由当地可资应用的营养物的供给所决定,同时又受当地物理气候系统所规定的外部条件(诸如光照、温度、 $\text{CO}_2$ 浓度等)的影响。这些生物地球化学过程和地球上的物理、化学和生物学等过程相结合构成了地球系统科学的核心。假若地球能够继续作为生物的居所,那么它必须能够在适当的时候、适当的地方并以适当的形式和浓度持续地提供生物所必需的元素和其它物质。生命系统通过自身的生化途径加工所摄取的营养物的效率是很高的,这提示我们,营养物循环的模型可以由为数不多的一组状态变量和有关生态系统的一般特征相结合而构成。这种模型的可行性是地球系统科学的一个假说,是在10—100年的尺度上预测全球变化所必需的。

与生物地球化学循环密切相关的是全世界范围内各生态系统中生物数量(包括物种数目和每一物种生物的数量)的改变。虽然这种改变并不是什么新鲜的事,但这种改变由于人类的活动而正在加速。如果我们想要维持我们所仅知的唯一的地球环境,我们必须首先弄明白自然界生物的多样性对维持这一环境的全球平衡的作用。此外,我们还必须确定,为了保持地球的可居性(对人类来说),自然生态系统和人为生态系统的结构和功能允许改变到什么样

的程度。以上两方面相结合，就是生物地球化学循环的涵义之所在。

生物地球化学循环由海洋生物地球化学过程、陆地生态系统、对流层化学过程和平流层化学过程 4 部分组成。

### 5.1 海洋生物地球化学过程 海洋生物地球化学过程的根本特点在于：

①巨大的容量。海洋不仅是一个热库（对物理气候系统起作用）；也是一个巨大的营养库（对生物系统来说），比如海洋和海洋生物所含的碳占全球非沉积碳的90%以上；而且对高能生物来说，还是一个巨大的食物库（海洋初等生物的产率很高）。因此，在全球生物、化学过程的进程中起着举足轻重的作用。

②巨大的输运能力。海洋环流和海洋的巨大容量相结合对地球系统的物理、化学、生物学涨落起着很强的缓和和调控作用。比如，逐年增加的人为排放到大气中的  $\text{CO}_2$ ，据信有一半以上为海洋所吸收。而且，由于  $\text{CO}_2$  的饱和浓度依赖于温度，故热带海域释放  $\text{CO}_2$ ，而中高纬度海域吸收  $\text{CO}_2$ ，从而大大增强了地球系统对  $\text{CO}_2$  的自然调控能力。不仅如此，海水自深海到表层的垂向运动和混合，把深海的丰富的碳和其它营养物质输送到表层，为海洋生物提供了生存的条件。

③海洋生态系统的根本特色是时间和空间上的巨大的可变性。海洋生物分布和生长速率的不均匀性发生于从秒到数十年、从毫米到数千公里的全部时间、空间尺度上。海洋生态系统的这种不均匀性起源于海洋的物理过程。浮游生物是海洋生物的基本食品，它是随水而运动的，因而它的垂向分布和水平分布决定于海洋环流。不仅如此，营养物的供给和光照条件也取决于海洋的物理过程。所以，海洋生物产率的研究必须把海洋动力学过程和生物过程结合起来。

由此可见，海洋生物地球化学过程是和海洋的动力学过程耦合在一起的。

对于地球系统科学来说，海洋生物地球化学过程研究的当务之急是在全世界范围内确定初等生物生产、固氮、去氮、气态硫的发放以及死亡机体上发生的物理化学过程的速率，并建立它们之间的联系。通过在有限区域的深入研究，一旦建立了这些联系，就可以建立模型。这种模型和一些关键性的全球测量的结果相结合，就有可能把局部的模型外推于全球。

5.2 陆地生态系统 局部性的生态研究已有很久的历史，也积累了许多资料。但层次较低，不能满足地球系统科学的需要，必须开辟新的途径。原则上讲，陆地和淡水生物圈在地球系统里的作用，可以通过对生物圈和大气化学系统之间元素流通起控制作用的物理过程和生物学过程的研究而认识。这种研究必须从富有生机的热带雨林区扩展到沙漠和极区的极端气候条件。

在最高的概念层次上，我们的目标是建立一个模型，通过它把植被类型和种群量，以及与此相关的动物和微生物种群量的平衡状态的演化用下列变量的函数来表达。这些变量是：气候变量（温度、降雨量、太阳辐射等），大气  $\text{CO}_2$  及固定氮的通量，存在于土壤和植物中的营养储备以及地形、地貌类型等。同时，也希望通过模型化能够描述由自然循环或者各种扰动（包括人类活动）引起的非平衡分布造成的物理学的、化学的和生物学的后果。但是，我们现有的知识，远不能实现这一目标。因此不得不退而求其次，希望通过若干平行的但目标有限的途径，逐渐地接近我们的目标。目前有三种做法。

①选择一个相对而言未经扰动的、在气候和土壤类型上具有一定自然梯度（比如说具有

不同纬度和不同高度)的生态系统,对其特征的变化进行系统的考察。这种方法不可能得到营养循环或大气 CO<sub>2</sub> 变化对植物生长的动力学过程的影响等结论。

② 对于一个经过很大扰动的局部的生态系统进行周密的研究,尤其要扰动本身及其对整体的生物地球化学过程的冲击进行详尽的原位观测。

③ 了解生态系统结构和功能的多样性的作用。

三种方法都需要建立相应的模型,而通过现场测量进行验证。

5.3 对流层化学过程 大气对流层里的一些痕量气体,如 CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFM<sub>5</sub> (氟氯烃)等,是生物地球化学循环里的关键要素。它们和气溶胶一起,对太阳能和陆地反射的运输起着重要作用,即通常所说的“温室效应”,对物理气候过程有重大影响。因此是当前地球系统科学研究的重点。

对流层化学过程的范围和复杂性可以用图10来说明。以 CH<sub>4</sub> 为例,它在平流层中滞留时间约为 10 年,观测表明,近年来 CH<sub>4</sub> 以年增 1% 的速率增加。造成这一增长的原因可能有二:

(i) 来源于人类的农业活动,排放入大气的 CH<sub>4</sub> 增多; (ii) 大气中 OH 浓度降低,因而与 CH<sub>4</sub> 反应而消去 CH<sub>4</sub> 的量减少。OH 的浓度与 CO 有很大关系,CO 增多 OH 将减少。而 CO 的源流量、分布目前尚不知道,因此无法重建大气

中 CO 的历史,更遑论预测其未来。所幸的是一种卫星探测 CO 垂向积分量的技术正在发展。

目前对流层化学过程研究的主要问题是:痕量气体的全球分布和变化趋势,生物和表面交换过程,气相光化学反应,来自陆地植被和土壤,以及来自海洋微生物的重要的痕量气体的通量的测定,及其间关系的研究。

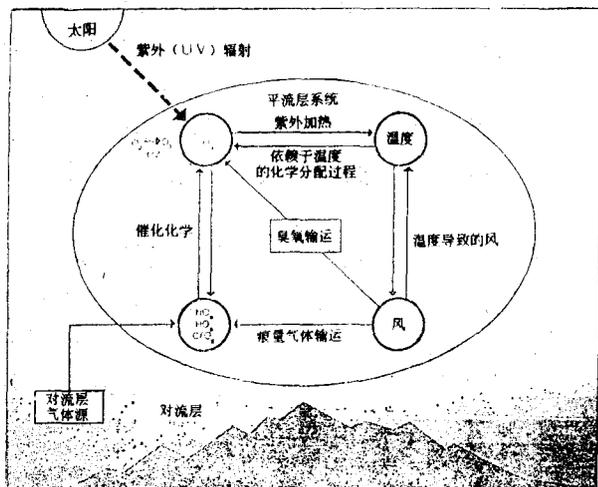


图 11 平流层化学过程,关键是维持臭氧层,臭氧层为陆地生命物质屏蔽紫外辐射

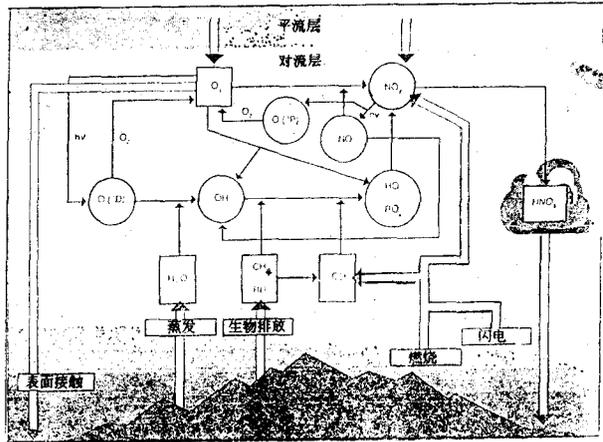


图 10 对流层化学过程

5.4 平流层化学过程 平流层化学过程中居主导地位的是 O<sub>3</sub> 的光化学反应。氧分子受紫外辐射作用而变成臭氧,而臭氧又与来自对流层的活性物质反应,在离地约 40 公里处二者大致平衡。O<sub>3</sub> 吸收紫外辐射而温度提高,它对平流层温度分布和平流层环流有重要影响,且影响其下方对流层的运动。另一方面 O<sub>3</sub> 吸收了大量紫外辐射,对地面生物系统起着保护作用。图 11 是平流层化学过程的示意图。

应该指出, O<sub>3</sub> 的光化学反应是在平流层大气运动过程中进行的,因而是

一种动力学-光化学过程。从这种观点出发来研究平流层化学过程，目前还正在起步。

为了使大家对 10—100 年时间尺度上的地球系统科学研究的现状有一概貌的了解，表 2 列出了主要的长期测量项目，指出了它们的重要性和目前测量所能达到的水平。

**表 2 对于 10—10<sup>2</sup> 年全球变化研究十分重要的持续长期测量项目的现状**

表中符号的含义为

重要性：★★★ 最基本；★★ 高度重要；★ 重要。

分析质量：A 良好地定量及标定过；B 能良好地区分，绝对精度尚可怀疑；C 有用，但不能良好区分鉴别；D 定性指标，但对其诠释尚存疑；F 没有信息；- 没有全球范围的资料

变 量	重要性	分析所得 成果的质量	变 量	重要性	分析所得 成果的质量
外 部 动 力					
太阳辐射	★★★	A	火山喷发指数	★	D
紫外通量	★★	B			
重要的辐射及化学痕量成分					
CO <sub>2</sub>	★★★	A	平流层 O <sub>3</sub>	★★★	C
N <sub>2</sub> O	★★	A	平流层 H <sub>2</sub> O	★★	C
CH <sub>4</sub>	★★	B	平流层 NO <sub>2</sub>	★	C
氯氟甲烷	★★	A	平流层 HNO <sub>3</sub>	★	C
对流层 O <sub>3</sub>	★★	C-	平流层 HCl	★	C-
CO	★★	D-	平流层气溶胶	★★	B
大 气 响 应 变 量					
表面气温	★★★	B	对流层水汽	★★	D
对流层温度	★★★	B	降水	★★★	C-
平流层温度	★★	C	地球辐射收支成分	★★	B
气压 (表面)	★★★	A	云量, 云种, 云高	★★	D
热带风	★★	C-	对流层气溶胶	★	D
温带风	★	B			
陆 地 表 面 特 性					
地面辐射温度	★	F	表面特性 (对于反照率, 粗		
入射太阳辐射通量	★	C-	糙度, 红外及微波辐射)	★	C-
雪盖	★	C	土地利用变化指数		
雪的水折合量	★	F	(植被的大致分类)	★★	F
河流径流 (体积)	★	B	植被覆盖指数	★★★	D
河流径流 (沉积负荷)	★	D-	陆表面湿润指数	★	F
河流径流 (化学成分)	★	F	土壤湿度	★★★	F
			生物量、生产力、营养循环	★★★	F
海 洋 变 量					
海表面温度	★★★	C	入射太阳辐射通量	★	D
海冰量	★★	B	表层下环流	★★★	C-
海冰类型	★	D	海洋叶绿素	★★★	C-
海冰运动	★	C-	生物地球化学通量	★★	C
海洋风应力	★★★	C	海洋 CO <sub>2</sub>	★★	C
海平面	★★	D			

## 6 前景·机会·但是……

对于地球系统科学的发展来说，未来的20年至至关重要。因为，从我们最为关注的中等时

间尺度的地球过程来看，20年包含着太阳黑子活动的两个周期，将发生5—10次火山喷发，将经历2—5次“厄尔尼诺”，森林毁坏的后果亦将显示出来。因此从80年代开始的全球性的、系统的、持续的、同步的有关地球状态的观测，在此期间应该能够积累必要的的数据，人们所提出的种种地球系统模型亦将经受初步但实时的检验，从而大大加深人类对自身生存环境的整体性、规律性的认识。另一方面，从现在开始为应付我们所面临的全球性挑战而采取的一系列措施，亦将在此期间显示其结果，而这一结果对于人类未来的命运极为重要。有鉴于此，人们提出了一系列全球性的研究计划。而这些计划的实施又是以全世界各国人民、科学家和政府之间的合作为前提的。作为地球大家庭的一个成员，中国应该尽自己的义务，同时也从全球性的合作中获取制订国策的地球系统科学的依据。

回顾科学发展的历史，如果说30—50年代航空、航天事业的开拓曾经吸引了许多领域的科学工作者，并大大地推动了现代科学技术的进步；如果说，50年代以来，生命现象的深入探讨，正汇聚着现代科学技术各个分支的力量，向未来的生命的世纪进军，把科学的进程推向一个更高级的螺旋；那么，崛起于80年代的地球系统科学，必将以其巨大的紧迫性和深刻的吸引力，召唤全世界各个领域的科技工作者投身于它，以致力于认识我们的“家”，协调我们的“家庭”成员的关系的努力之中。毫无疑问，在此过程中，古老而又年青的力学必将发挥其巨大的作用。

从根本上来说，现代科学发轫于力学。力学的方法（即观测→从现象抽象出过程→建立概念模型或数学模型→观测、检验→……）正是以定量分析为其特色的现代科学方法的典型代表。所以，总的来看，地球系统科学领域里可供力学驰骋的天地大体来说有二：①地球过程（各种时间尺度上）是力学的、物理的、化学的、生命的各种运动形式的综合。其中力学运动的规律的研究，正是力学的固有领域。②力学的概念和方法在现象的观测，过程的抽象，模型的建立和分析等方面将发挥大于人们一般想象的作用。所以，在地球系统科学的王国里，力学是大有用武之地的。但是要真正做到这点，一是要变通，不要把力学已有的程式看得太过于神圣；二是要让力学在新的天地里生根、开花、结果，而不是把新领域纳入力学王国的版图。

地球系统科学是在人类与地球关系史上的一个转折关头（从“征服”走向协调）应运而生的，既有巨大的科学意义，又有至为重大的实用价值，可以说与人类的命运攸关。无疑，它具有光明的前景。但是——

①复杂系统的研究往往迫使人们离开具体的事件，从方法学的高度作审慎的思考。人们历来有两种认识世界的途径。一种认为整体是由局部构成的，因此，了解了构成整体的各个局部的规律以及其间的相互作用，就认识了整体；另一种看法认为局部决定于整体，因而整体具有任何局部所没有的独特的性质。前者是现代科学规范（paradigms）的基石。地球系统科学也是沿着这条轨道前进的（这一点从上文不难看出）。经验告诉我们，研究的对象越复杂，就越需要从整体出发来考虑问题。因此，对地球整体行为来说，地球系统科学目前所走的路从方法学的高度来看是否一定正确呢？有没有必要改弦易辙，或者说有没有可能两者并举呢？这里，老子在《道德经》里的一段文字是颇值得回味的。他说：“以身观身，以家观家，以乡观乡，以国观国，以天下观天下”。就是说：只有用与所考察对象相适应的方法去考察它，才能获得正确的认识。而这里的方法并非指具体的手段，而是从方法学的层次来讲的。

②地球系统科学的目标是应付人类面临的全球性的挑战。而这一目标能否付诸实现，取决于多种因素，地球系统科学只是其必要条件。从根本上起作用的是观念的改变，是社会的文化和教育，是人类的良知。而良知，又往往屈从于“不得不……”。

孔夫子尚且能“知其不可为而为之”，我们或许也应该有点“不知其可为或不可为，而为之”的精神准备吧。

### 参 考 文 献

- 1 Earth System Science: Program for global change. Report of the Earth System Sciences Committee, NASA Advisory Council, Washington, D. C. (1988)
- 2 Houghton J T (ed). The Global Climate. Cambridge University Press (1984)
- 3 The International Geosphere Biosphere Programme: A Study of Global Change. Final Report of the Ad Hoc Planning Group on Global Change, prepared for the 21st General Assembly of International Council of Scientific Unions (1986)

## EARTH SYSTEM SCIENCE—CHALLENGE AND OPPORTUNITIES

Jia Fu Tao Zu-lai

Institute of Mechanics, Academia Sinica

**Abstract** This article gives a brief outline of a new field of scientific investigations, which is being intensively engaged by international scientific community of various disciplines and concerned by the people all over the world, now entitled “Earth System Science”. Its advent is a consequence of the urgent need to meet the challenge imposed by the severe crises of the deteriorating fundamental living environment of mankind—the earth’s global change. Earth System Science regards the earth as an integrate system composed of various interacting components (atmosphere, lithosphere, biosphere, hydrosphere etc.), which are subject to both natural external variations and the impact of mankind’s activities. The goal of the Earth System Science is to obtain a scientific understanding of the entire Earth System on a global scale by describing how its component parts and their interactions have evolved, how they function, and how they may be expected to continue to evolve on all time scales; thereby to enhance the predicative ability on the variation trend of the living environment of mankind, particularly the variations over decades to a century in future. The Earth System Science will be one of the most grandiose scientific career of mankind at the end of 20th century and over the whole 21st century. Scientists working in the field of mechanics can and ought to make their due contributions in it.

**Keywords** *Earth System Science; climate; biosphere; global change*