

# 天地生人系统与大地球科学

The Cosmic Environment— Inorganic Earth— Biosphere— Anthroposphere System and Big Earth Science

陈之荣

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100101)

20世纪50年代以来,地球科学的发展异常迅速,其基本特征是从以分析为主向以综合为主的方向转变。综合是有层次的。首先是在单个地球圈层层次上,如20世纪60年代板块构造假说的建立,使人们认识到岩石圈是一个不断产生和消亡的有机整体;再到多个地球圈层层次上,如20世纪80年代由美国学者提出的地球系统科学,它以多个地球自然圈层构成的地球系统为研究对象<sup>[1]</sup>。20世纪90年代国际上开始实施的地圈生物圈计划,就是以它为指南。地球系统科学是一门大地球科学<sup>[2]</sup>但仍属于自然科学范畴。几乎与此同时,中国有些学者已开始认识到,人类已成为一个独立的地球圈层人类圈<sup>[3]</sup>,并在中国古代天地人思想和当时中国天地生相互关系研究的基础上,初步提出了天地生人系统概念<sup>[4]</sup>。这一科学概念超出了纯自然科学范畴,是跨自然科学和社会科学两大领域的综合科学的研究对象。天地生人系统是比地球系统综合层次更高的系统。对它的研究,不仅有利于认识地球的过去,而且更有利于认识地球的现在,在某种意义上还可推知其未来。然而,值得一提的是,地球系统和地球系统科学的研究由于得到国际社会和各国政府的有力支持,发展很快,现已得到国际科学界的普遍认同;与此相反,天地生人系统的研究由于它本身的复杂性和得不到有力的支持,至今还鲜为人知。笔者集近20年学习和研究的认识,在本文中通过对地球的整体特征和全球问题根源的讨论,进一步揭示天地生人系统概念的科学内涵,及研究天地生人系统的现实意义。

## 一、天地生人系统

“天”、“地”、“生”、“人”概念的内涵十分丰富。从地球科学角度,可分别将它们理解为:“天”是行星地球存在和演化的天文背景;“地”为无机地球(由地核、地幔、岩石圈、水圈和大气圈等构成的地球;或由岩石圈、水圈和大气圈等构成的地球);“生”为地球生物界或狭义生物圈;“人”为最新的地球圈层人类圈。

天一地一生一人是一个演化序列。其中前者的形成和发展是后者出现的前提,后者的演变也是前者改变的强大动力。地球概念的内涵随着地球科学的发展而变化,它已由“无机地球”,经“生物地球”(由无机地球和生物圈构成),到“人类地球”(由生物地球和人类圈构成)。行星地球,即作为行星的整体地球,其演化已经历了无机地球、生物地球和人类地球3个阶段。现代的行星地球已演化为人类地球,包括地、生、人及其间的关系。它通过物理—化学过程、生物过程、生产—消费过程及其间相互作用而成为一个整体,并不断演变。地幔之上包括岩石圈在内的现代行星地球为狭义现代地球系统<sup>[5]</sup>。无论广义还是狭义的现代行星地球或现代地球系统都由地生人系统及其天文环境构成,都是天地生人系统。因此可以说,以天地生人系统为研究对象的科学,就是一门大地球科学。其基本目标就是要建立统一的行星地球理论<sup>[6]</sup>。天地生人系统包括天地子系统(此处的“地”为人类地球)、地圈生物圈子系统、人地子系统(此处的“地”为生物地球)3部分。

根据现代地球科学和相邻科学的研究成果及对“天”、“地”、“生”、“人”的上述理解,笔者认为,天地生人的关系可用图1系统模式来表示。从图1可见,天地生人系统模式实际上应视为是我国古代天地人思想与相关研究成果相结合的产物。本文主要讨论狭义行星地球或狭义现代地球系统中的一些基本问题。

## 二、行星地球的功能和结构

系统研究是一种整体研究。系统是功能和结构的统一。因此,研究行星地球的功能和结构是研究行星地球整体特性的基本途径。

### 1. 行星地球的功能

功能是系统与其外部环境之间相互联系和相互作用过程的秩序和能力的体现。行星地球的功能主要是指地球与天文环境之间物质和能量交换状况。自地球诞生以来,地球与天文环境有着连续的、数量巨大的能量交换(如不间断的太阳短波辐射的

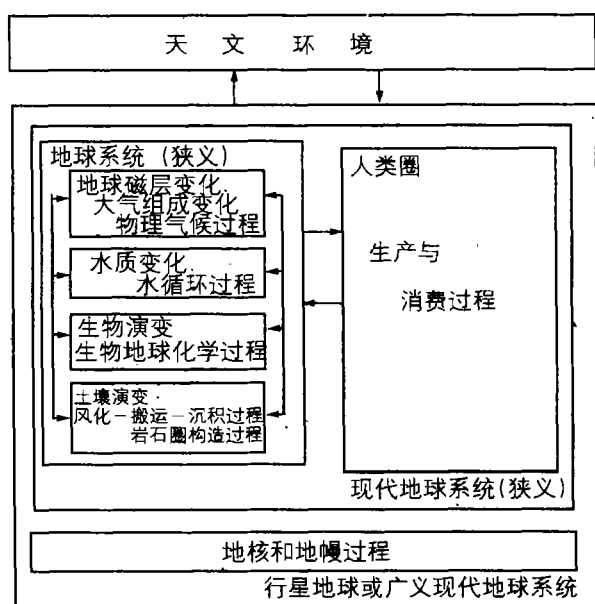


图1 天地生人系统模式

输入和地球长波辐射的输出)，而物质交换的情况则变化巨大。

(1) 开放系统阶段 现代地球起源假说认为，地球是由星子的碰撞吸积而成。地球碰撞吸积不是一次完成，普遍认为它经历两个主要阶段。有人认为：第一阶段吸积了现代地球质量的90%左右（称为原始地球吸积阶段），相当于目前地球上、下地幔之间的过渡带以下的地球部分；第二阶段吸积了现代地球质量的10%左右（称为晚期吸积阶段），相当于目前地球的上地幔和随后形成的大陆壳<sup>[7]</sup>。在这期间，地球与天文环境既有物质又有能量交换，是个名副其实的开放系统。

(2) 近似封闭系统阶段 距今38亿年来，地球与天文环境的关系发生了显著变化。这时，来自地外的陨星（小行星和彗星等）已急剧减少，从而使地球与其环境之间的物质交换在地球生存中的作用变得越来越小。因而这期间的地球已不是真正的开放系统，而只能算是一个近似的封闭系统<sup>[8,9]</sup>。这里的“近似”包括两层含义，其一是地球与天文环境之间物质交换的数量很少。有人估计，当今落向地球的物质每年只有20万吨左右<sup>[10]</sup>。这一点点点数的物质，对地球来说实际上可以忽略不计。其二是较大地外来客（如直径约1~10km小行星）撞击地球的数量极少。有人估计，直径大于1km的小行星撞击地球的概率约为0.25Ma一次，直径等于或大于10km的小行星撞击地球的概率约为30Ma（或100Ma）一次<sup>[11]</sup>。因而被称之为稀有事件，并且每次撞击过程的时间也极短。应该强调，虽然它们的直接影响是扰动、是破坏，但从未中断过地球生物在30多亿年里的演化。

天地关系的演变有如下基本特点。一是“地法天”，即地球上的变化受天文因素控制。例如，地球上多种现象的日变化受地球自转控制；地球上多种现象的年变化受地球公转控制；第四纪大冰期中的冰期和间冰期的更替主要受地球轨道变化（即黄道倾斜、偏心率和岁差三要素的变化）控制等等。二是随着地球结构的演化，太阳短波辐射转变为地球自由能的数量越来越大。例如，大气环流的出现大约使6%的太阳辐射能转变为地球表层的自由能；水循环的出现又使大约24%的太阳辐射能转变为地球表层的自由能<sup>[12]</sup>，生物循环是更高级的物质循环形式，它的出现又使部分太阳辐射能转变为生物化学能。地球系统自由能的增加提高了地球的活力。三是在宇宙中，地球相当于一艘宇宙飞船。它不能依靠从地外获得物质资源，同时也不能向地外排放废弃物来维持生存和推动发展。地球未来的理性经济，实质上只可能是一种物质循环的经济。

## 2. 行星地球的结构

结构是系统内部各组成要素之间相互联系和作用过程的方式或秩序。在此拟从以下4方面来讨论行星地球的结构。

(1) 行星地球的基本构成要素 对于行星地球有哪些基本要素构成，地球科学界仍有严重分歧，主要表现在人类（圈）是否是行星地球的一个基本构成要素。本文前已提及，在天地生人系统中，“人”是行星地球的一个有机组成部分。其主要依据是：

①从统一行星地球看，人类是行星地球的一部分，这是无法否定的客观存在的事实；②从地球圈层演化看，岩石圈、大气圈、水圈和生物圈是地球分化的产物，是行星地球的一部分，那么，人类圈也是地球分化的产物，它理应也是行星地球的一部分；③从人类与地球自然界相互作用看，不仅人类的生存和发展离不开地球自然界，而且人类对地球自然界的作用也已日益强大，现已成为改变行星地球面貌的主要驱动力之一。

人类圈实际上是最新演化出来的地球圈层，它是从地球系统演化、人类与地球自然界相互关系的角度来整体地研究人类。人类圈从人类诞生开始孕育，到地理大发现（即人类开始全球化）开始形成<sup>[13]</sup>。人类圈（“人”）与无机地球（“地”）和生物圈（“生”）及其关系共同构成现代行星地球，它的生存和演变又与天文环境密切相关。以这样定位的行星地球为研究对象的地球科学，就是一门层次更高的大地球科学。这门大地球科学可称为行星地球学，亦可称为现代地球系统科学，或直接称为天地生人系统学。这门大地球学科具有旺盛的生命力，它必将随着全球问题的出现和日益严重、“天人合一”和“天地人”思想重新获得重视、人类圈和可持续发展相关性研究的深入以及天地生人综合研究的蓬勃

发展等,而受到科学界越来越密切的关注。

(2) 行星地球组成多样性增加 分化是地球演化的基本特征之一。原始地球首先分化出地核和地幔,而后岩石圈又从地幔中分化出来,接着又依次分化出大气圈、水圈、生物圈和人类圈。而在每个地球圈层内部也同样存在着分化现象。这就使得地球组成的多样性随着时间推移而不断增加。

与地球圈层的增加相对应,地球表层系统的演化也呈现出明显的阶段性。起初,地球表层系统只是由原始岩石圈和原始大气圈 2 个地球圈层构成,称为二元系统演化期;后来,随着水圈、生物圈和人类圈的依次形成,地球表层系统先后经历三元和四元系统演化期,现在正处在由岩石圈、大气圈、水圈、生物圈和人类圈 5 个地球圈层构成的五元系统演化期<sup>[3]</sup>。五元地球表层系统是包括了人类圈的地球系统。为了与通常所说的地球系统概念相区别,我们把它称为现代地球系统<sup>[5]</sup>或现代行星地球。

(3) 地圈与生物圈协同共进 地圈由大气圈、水圈和岩石圈等无机地球圈层构成。地圈和生物圈组成地球系统或称生物地球。在生物地球中,无论地圈内部,还是地圈与生物圈之间的关系都十分复杂。由于生物具有吸收、转换和储存太阳辐射能的能力,因而使生物(圈)在该系统的长期演化中起着某种中心的作用。例如:在具有光合能力的蓝藻的长期作用下,主要由二氧化碳等构成的还原性大气被改变成主要由氮氧构成的氧化性大气,并在平流层中形成臭氧层;随着生物的发展和大气组成的改变,水圈的化学组成也发生相应变化,它起于氯化物水圈,经氯化物—碳酸盐水圈,再变化到氯化物—碳酸盐、硫酸盐水圈;在生物的直接和间接作用下,岩石圈也发生了显著变化,诸如巨厚碳酸盐的形成,带状铁质夹层沉积岩、陆相红岩和大量硫酸钙沉积的形成,土壤的形成,煤、石油等有机岩的形成,等等。在这些地球圈层改变的同时,生物圈也发生了相应变化。例如:随着地表环境由还原型向氧化型的转变,促进了喜氧生物的出现和发展;随着臭氧层的形成,为生物在水面、陆上、空中的出现和繁荣提供了必要条件;土壤是地质大循环和生物小循环共同作用的产物,它既是植物及与之相适应的微生物和动物发展的不可缺少的条件,同时也随生物(尤其是植物)的进化而不断发展,等等。可见,生物的进化非但不是以地球无机环境的退化为代价,反而成为推动地球无机环境优化的重要条件。

(4) 现代行星地球演变中的“人法地” 在现代行星地球演变中,“人法地”是基本法则。“人法地”是指人类的生存和发展要受地球进化基本规律的制约。主要表现在 3 方面。一是“地”是“人”生存和发展的前提。经过 40 余亿年的演化,地球自然界为人类的生存和发展准备了优越条件,诸如氮氧大

气、适宜的地表温度、广阔的海洋和清洁淡水、多种形态的地形、肥沃土壤、丰富矿床、广袤森林、辽阔草原,以及陆上、空中和水里种类繁多的动植物等。若没有这些条件,人类就缺少必须的物理和化学条件,就没有衣食住行的物质来源,人类的生存和发展就无从谈起。二是地球环境的差异对人类生存和发展的影响明显。例如,埃及、巴比伦、印度和中国四大文明古国都发祥于大河流域的中下游,工业化国家起源于西欧,以及中国东西部在发展上的明显差异等等,都有其地球环境上的原因。三是地球的有限性与发展模式的改变。20 世纪 50 年代以来,一系列全球问题的出现使人们清楚地认识到地球资源—环境的有限性,进而暴露出传统发展模式的弊端与局限,并推动向可持续发展模式的转变。

构成人类圈的人具有智慧、会制造工具、有语言和文字等,因而它具有更高的主动性,在现代行星地球演化中起着主导作用。农业革命和工业革命就是这种主导作用的重要表现。它在推动人类(圈)进步和改变地球环境中的作用已有大量论述,这里不再重复。但是,人类圈的主导作用必须遵循地球进化基本规律,否则就要受到地球自然界的惩罚,当代众多全球问题的出现就是有力的证明。

### 三、当代行星地球的结构巨变与全球问题

当代行星地球是现代行星地球的目前阶段,大约起始于 20 世纪 50 年代。其基本标志是一系列全球性问题(诸如人口膨胀、资源匮乏和全球环境恶化等)的出现。

天地生人系统是研究全球问题根源的基本框架。从行星地球的功能看,当代行星地球与天文环境之间的物质交换可以忽略不计,而能量交换方面虽有变化,但并未超出其正常范围;从行星地球的结构看,由 4 个自然地球圈层构成的全球环境自身变化也并不大,因而,全球问题产生的主要根源只能从人类圈中去找。需求水平、产业体系和文化状况是构成人类圈结构的三要素<sup>[14]</sup>。这三要素的变化及其对全球问题的影响是十分重要而又复杂的,在此作一些初步讨论。

#### 1. 生存和发展需求的强大压力

以 10 至 100 年为时间尺度来考察,近几百年来现代行星地球的演变主要取决于地球自然界供给和人类圈需求之间的关系。人类圈的需求主要是指对自然资源及其产品的需求,以及对良好自然环境的需求等。人类圈需求的总量是人口数量和人均需求水平的乘积。人口规模越大,人均需求水平越高,人类圈需求的总量就越大。近二三百年来,尤其是近半个世纪以来,人类圈需求的增长异常迅速。例如,在 20 世纪后半半个世纪里,世界谷物消费增加 3 倍、能源消耗增长 4 倍。又如,罗马俱乐部创建人和

总裁奥雷利奥·佩西在《未来的 100 页》中,曾引用过一种估计,即“地球上的现有居民在他们的一生中较所有他们的祖先在以前 1 万个世纪中消费了更多的自然资源”<sup>[15]</sup>。在自然资源中,非再生资源是工业革命以来国民经济的物质基础。矿产资源是一种非再生资源,“当代矿产资源的需求约占社会需求自然资源总量的 60%,为工业提供了 95% 的能源和 80% 的原料。”<sup>[16]</sup>人类对资源需求的迅速增长,在一些重要方面已远远超过地球自然界可持续供给的能力,对地球的资源—环境产生了巨大压力。

## 2. 以非再生资源为基础的低效产业体系

产业是指各种生产和经营事业,如农业、工业、服务业、信息业和环保产业等。产业体系是各种产业及其关系的总和。产业的发展是扩大地球环境容量、满足社会日益增长需求的基本手段。毫无疑问,未来地球上人口的增长和生活水平的提高,也要靠产业的发展来满足。同时,产业或技术也是改变地球环境的重要手段。地球环境的改变程度与人为力量的大小有关。在当代行星地球中,人的力量在一些重要方面已可同自然力量相比。例如,通过造山运动、海底扩张形成大洋地壳以及河流向海洋输送沉积物等方式,自然力每年搬运的物质总量为  $37\text{km}^3$ ,而人类搬运的岩石、土壤、水、废料和天然气等地球物质也已达  $35\text{km}^3$ <sup>[17]</sup>。如果再考虑到一些自然力搬运物质的数量也要受人为因素的影响,那么,人类对岩石圈的作用就更大了。人类不仅对岩石圈,而且对大气圈、水圈和生物圈的作用也都十分巨大,所以,现已有人把人的作用同太阳和地核的作用并列,作为现代全球变化的三大驱动力之一<sup>[18]</sup>。为了强调人类在地质和生态中的核心作用,诺贝尔奖获得者 Crutzen 等人于 2000 年在《全球变化简讯》上提出“人类世”(“Anthropocene”)这一地质年代名词,并认为 18 世纪后半叶的工业革命为这一地质时代的起点<sup>[19]</sup>。可见,“工业”这一产业的兴起在划分这一地质时代中的重要地位。

产业或技术不是万能的,因为地球的环境容量不可能无限扩大,不同性质的产业也有不同功能,其中有些能改善,而另一些则能恶化地球环境。最近,现任国际地圈生物圈计划(IGBP)主席 Moore 在“变化中的地球所面临的挑战:全球变化的科学理解”一文中,列举了一系列与人类产业活动有关的全球资源—环境问题:(1)人类可能在几代人时间内,耗尽地球几亿年来积蓄的化石燃料;(2)差不多一半陆地表面直接由人类活动改变;(3)若以当前的砍伐速度,雨林约在 100 年内消失,并引起大多数动植物灭绝和全球气候变化;(4)人类已直接或间接地利用了 50% 以上的淡水,地下水资源也在迅速减少;(5)海岸栖息地显著改变,50% 红树林已消失,湿地也减少了一半;(6)22% 的渔业过度捕捞,44%

已接近利用极限;(7)在海洋和陆地生态系统中,生物灭绝速度显著增加,现在地球正处于由单一物种的活动引起物种大灭绝事件的中间位置<sup>[20]</sup>。造成当代资源—环境问题的直接原因,都与以非再生资源为基础的规模庞大的工业、农业和交通运输等产业有关。

## 3. 鼓励索取和追求高消费的文化

“文化”有广义和狭义之分。本文所指的“文化”是狭义文化,即社会的意识形态,以及与之相适应的制度和组织机构等。应该指出,在人类圈和当代行星地球的研究中,我们特别关注地球观、价值观,以及与之相应的制度、组织机构和决策管理等文化因素。当代人类圈的文化仍然是以掠夺式地球观为基础,它通过人类圈的需求和产业影响地球自然界。美国原副总统戈尔名为《濒临失衡的地球》的全球畅销书,副标题为“生态与精神文化”。该书用了大量篇幅论述了以人类与地球自然界分离为特征的人类精神(文化)对生态系统的破坏作用<sup>[21]</sup>。这种文化实际上是造成全球更深层问题的根源。

总之,正是由于上述结构中人类圈的迅速膨胀,才导致当代行星地球结构的巨大改变,进而造成一系列全球问题。我们还可以进一步推知,要克服全球问题、推进包括人类圈在内的当代行星地球的进化(即可持续发展),必须改造人类圈的不合理结构,即改造人类圈的不合理需求、产业和文化,亦即改造人类圈不合理的生活方式、生产方式和思维方式<sup>[22]</sup>。其中,尤需首先从改造人类圈的落后文化或思维方式开始,并带动人类圈需求与产业、生活方式和生产方式的相应改变。这是人类面临的一项紧迫而又神圣的使命。

## 参考文献

- [1] NASA 地球系统科学委员会·陈泮勤,马振华,王庚辰,等译.地球系统科学.北京:地震出版社,1992
- [2] 王维.地学哲学对谈录.北京:地质出版社,1996
- [3] 陈之荣.地球表层系统非线性演化模式.地球物理学报,1987(4):389~398
- [4] 谢家泽.从“水利比上天还难”到“天地生人系统观”,见《天地生综合研究进展》.北京:中国科学技术出版社,1989,6~8
- [5] 陈之荣.现代地球系统科学——可持续发展的科学基础.地球科学进展,1998(2):198~203
- [6] “跨世纪的中国地球科学”调研组.地球科学发展趋向,见《地球系统科学—中国进展·世纪展望》(陈述彭主编).北京:中国科学技术出版社,1998,13~17
- [7] 欧阳自远,王世杰,张福勤.天体化学:地球起源与演化的几个关键问题.地学前缘,1997(3~4):175~183
- [8] I·普利高津等.复杂性的进化和自然界的定律,见《普利高津与耗散结构理论》(湛垦华、沈小峰等编).陕西科学技术出版社,1988,149~211
- [9] 陈之荣.38 亿年来,地球在近似封闭状态下进化——(下转第 35 页)

有待于历史去检验,但其符合可持续发展的规划理念为人类工业的发展描绘了美好的前景。丹麦的卡伦堡(Kalundborg)位于北海之滨,在20世纪50年代凭借其优良的港口开始发展,80年代通过发电厂和炼油厂之间相互利用废水、废汽等而自发形成了卡伦堡“工业共生体系”。卡伦堡“工业共生体系”是世界上第一个生态工业园,其成功的运行,为其他生态工业园区的实践提供了良好的榜样。澳大利亚伯恩赛德清洁生产中心及法国PALME生态园区的建设则为生态工业园区在全世界范围的推广起到了积极作用。尽管这些园区或中心的历史并不悠久,但其良好的经济效益、生态效益和社会效益得到了全球各界人士的好评,而且其运行模式也有不断发扬光大之势。

深入分析国外这些EIP的成功运行,可以总结出以下一些基本规律:(1)是在商业基础上逐步形成的,所有企业都从中得到了好处;(2)几个既不同又能互补的大企业相邻;(3)环境保护法规起重要作用;(4)良好的商业信誉是成功建立EIP的基础;(5)完善的风险管理,即参与“废弃物到原料”的贸易对买卖双方都存在着风险,这种风险主要来自“原料”的生产过程,因此没有市政当局及社区领导的经济与政治上的支持,EIP是很难成功的;(6)EIP的成功不仅在于其良好的环境效应,还在于它能满足市场的需求。

### 三、发展展望

工业生态学的发展为工业的可持续发展提供了理论参考,而EIP的成功运行则为工业的可持续发展提供了现实依据。尽管EIP并不是无可挑剔的,如卡伦堡工业共生体,其能量的输入还是依靠外界

的化石燃料,因此他对环境的污染在一定阶段内还是不可避免的。但EIP的产生和发展,是对传统工业理念的一次深刻变革,而且正在对工业生态系统产生着深远的影响。

国外有关工业生态学和生态工业园区的研究报道也越来越广泛和深入。美国一些著名的大学正在加紧开展相关的研究,如:麻省的技术、商业和环境计划,耶鲁的工业与环境管理计划,普林斯顿的能源、环境与智力研究中心所进行的一些研究等。此外,耶鲁还在1997年组织出版了第1份工业生态学杂志。总体而言,国外的研究工作主要集中在以下几个方面:(1)可减轻工业对环境影响的具体技术措施,包括废物零排放系统、物质替代、非物质化和功能经济;(2)对整个工业生态过程进行分析、监测和评价的方法;(3)可促进生态工业及生态工业园区规划和建设的管理制度。

国内的工业生态学及生态工业园区建设与国外还有一定差距。虽然目前我国的工业园区的数量也不少,但效益好,尤其是经济效益、生态效益和社会效益能和谐统一的就屈指可数了。如何在现有的基础上把工业生态系统向理想的工业生态系统推进,从而把现有的工业园区建设成真正意义上的EIP是我国目前城市工业园区建设的首要问题,也是实现城市可持续发展所必须解决的现实难题。

#### 参考文献

- [1] Frosch R. A., Industrial ecology: a philosophical introduction, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1992, 89: 800-803
- [2] Seager T. P., T. L. Theis. A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology. Journal of cleaner production, 2002, 10: 225-235
- [3] 苏伦·埃尔克曼著,徐兴元译.工业生态学.北京:经济日报出版社,1999 (责任编辑 王宏章)
- (上接第21页)
- 自组织理论面临的一个难题.科技导报,2001(11)
- [10] 李启斌.人类生存的外空环境,见《世界数据中心中国中心与地球系统科学数据》.北京:科学出版社,1995,88~90
- [11] 殷鸿福,徐道一,吴瑞棠.地质演化突变观.北京:中国地质大学出版社,1988,107
- [12] 槌田敦,室田武.水、生物、人类与熵的理论(洪时明译).世界科学,1984(9):4~11
- [13] 陈之荣.最新的地球圈层——人类圈.地理研究,1997(3):95~100
- [14] 陈之荣.人类圈与全球变化.地球科学进展,1993(3):63~69
- [15] 奥雷利奥·佩西.未来的100页——罗马俱乐部总裁报告(汪帼君译).北京:中国展望出版社,1984,34
- [16] 朱训,吕国平,周瑶琪,白屯.地球科学与可持续发展.北京:中国科学技术出版社,1999,54
- [17] P·Neumann—Mahlkau.人为物质流,见《地学与人类生存环境、自然灾害、全球变化》(籍传茂主编).北京:地质出版社,1999,63~67
- [18] 叶笃正主编.中国的全球变化预研究.北京:气象出版社,1992
- [19] Crutzen P. J., Steerner E. F. The “Anthropocene”. IGBP Newsletter, 2000, 41: 17~18
- [20] Moore B. III. Challenges of a Changing Earth: Towards a Scientific Understanding of Global Change. 地学前缘, 2002, 9(1), 41~47
- [21] 阿尔·戈尔.濒临失衡的地球——生态与精神文化(陈嘉映等译).北京:中央编译出版社,1997
- [22] 陈之荣.现代地球系统的突变期与可持续发展,见《地学·哲学·发展》(王子贤主编).北京:地震出版社,2000,80~87
- (责任编辑 蔡德诚)