

文章编号: 1001-8166(2005)05-0490-09

# 从地球过程到人地和谐 ——关于地球系统研究科学战略的思考\*

马福臣<sup>1</sup>, 林海<sup>1</sup>, 黄鼎成<sup>2</sup>, 张志强<sup>3</sup>, 姚玉鹏<sup>1</sup>

(1·国家自然科学基金委员会, 北京 100085; 2·中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;  
3·中国科学院资源环境科学信息中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要** 较为详尽分析了地球系统科学的由来与发展, 我国地球系统科学研究所面临的机遇与挑战, 阐明了我国开展地球系统科学研究的基本思路, 从而提出 8 个战略重点: 区域气候环境系统变化与适应, 水系统、水循环与水安全, 生态系统与全球碳循环; 人类活动与地球表层系统, 地球内部动力学与地球系统演化, 地球灾变事件与生命过程, 地球观测系统与地球系统模拟以及耦合过程动力学、响应动力学、适应和预测理论。

**关键词** 地球系统 地球系统科学 科学战略  
**中图分类号** P  **文献标识码** A

自 20 世纪 80 年代以来, 地球科学开始进入一个新的发展时期。随着人类社会谋求可持续发展的意愿不断加强, 地球科学的研究需要回答诸如地球资源还能支持人类社会多久, 人类生存环境对人类自身发展的极限承载力, 全球环境在人类活动干预下的变化趋势, 以及如何规范人类活动以达到人与自然协调发展的目的等问题。回答这些问题, 需要把地球的大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、地幔和地核以及近地空间视作密切联系的整体, 并关注人类活动的影响, 理解它们相互作用的过程和机理。因而地球系统科学理念<sup>[1]</sup>逐渐成为引领新世纪地球科学的发展方向。

## 1 地球系统科学的由来与发展

1.1 地球系统科学缘起于人类迎接全球环境问题的挑战而首先形成的集成研究方法

当代人类所面临的资源、环境、灾害问题的严重性, 在于它们不只是局地的或区域的问题, 而是跨越国界的全球性问题。如: 气候变暖、臭氧耗损与臭氧洞的形成、荒漠化加剧、植被破坏和物种大量消失、水资源短缺、能源危机、矿产枯竭等。其主要原因是

人类的不合理开发利用地球资源所致。上述由人类活动引发的全球环境问题就其发生的频率和强度而言, 已接近甚至超过自然因素引发的环境变化, 并正在继续加剧, 可能对人类的生存环境产生不可逆转的后果, 危及到我们子孙后代的生存与发展。就科学内容而言, 这些问题远远超出了单一学科的研究范围, 涉及大气、海洋、土壤、生物、地球内部等各类因子, 又与物理、化学、生物过程和人类活动紧密相关。只有多学科交叉融合, 从地球系统整体行为研究寻求解决的办法。

近 20 年来, 国内外地球科学领域众多科学家广泛进行了由国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)、生物多样性计划(DIVERSITAS)以及大洋钻探计划(ODP-IODP)等大型研究计划组成的全球环境变化研究, 深入的研究工作使大家愈来愈认识到地球的大气圈、水圈(包括冰冻圈)、生物圈、岩石圈、地幔和地核等各个组成部分是一个具有密切联系而又相互作用着的整体, 是一个所有的组成要素处在相互作用之中的动态系统。任一层圈过程都在不同程度上与其它层圈不同时空尺度过程存在着

\* 收稿日期: 2005-03-28 修回日期: 2005-04-10.

作者简介: 马福臣(1942-), 男, 山东菏泽人, 研究员, 主要从事地质学研究. E-mail: mafu@maail.nsc.gov.cn

相互影响和制约,任一圈层结构、功能和行为都是地球系统在局部的反映;其中某一成分的变化都会引起其它成分的响应,往往又是其它成分共同作用的结果。由此提出了地球系统(Integrated Earth System)和地球系统科学的概念。可见以理解地球系统整体运行与变化为目的的地球系统科学是一个新兴的、多学科交叉的复杂性科学研究领域,必将发展为一门新兴的学科<sup>[2]</sup>。

1.2 地球系统科学以认识地球系统组成部分之间的相互作用与变化为关注焦点,其终极挑战在于把不同学科中的科学发现综合成大气圈、水圈、生物圈和岩石圈耦合系统的一种整体表现。耦合的地球模型是预测地球系统未来变化及趋势的最佳工具。

地球科学分支学科的成熟促进了各学科之间的紧密联系和相互依赖的认识,已从学科分化为主体转向学科间大跨度交叉渗透的总体趋势。新兴交叉学科的出现,使无机界与有机界在原子尺度到全球尺度上建立了跨越圈层的联系,并为联系地球系统的现代监测结果与地球系统的真实历史记录建立了跨越时间尺度的桥梁。

在地球科学研究执行战略中,需要构建地球系统过程和状态的跨学科研究框架,一个高度交叉整合集成的研究框架。研究地球系统过程的三大主题:地球系统的联系,探讨岩石圈、水圈、气圈、生物圈及人类活动之间是如何相互作用和相互联系的;地球系统的演化,探讨自45亿年前地球形成以来,控制地球特征的过程是如何变化的;预测地球系统的未来,规范人类活动的行为。

1.3 观测、研究和模拟相结合是地球系统研究的基本方法,对地观测技术是推动地球系统科学进步的引擎。

在地球过程的所有时空尺度的研究中,地球系统科学侧重于行星(或全球)尺度、几十年到百年时间尺度的变化。当然,任何时间尺度的变化都包含了发生在地球系统过程的各种尺度的相互作用,也不能被忽视。长期的地球系统各要素的观测实验数据是研究地球过程的基础,因此,获取科学数据的新型观测技术、数据转化、处理、压缩技术和大量复杂模型计算技术以及科学数据、资料共享的信息系统至关重要。地球系统各种基本过程的综合全面分析和模型的建立,是整体研究的集成。用数学模型描写各子系统相互适应的关系,描写各种循环(水、碳、生物地球化学循环等)和各种过程的内在联系,

最终达到定量模拟和预测未来地球环境变化的目的。

## 2 地球系统科学研究的挑战与机遇

对地球系统的整体性研究已经成为人类社会可持续发展的科学支柱。展望21世纪,地球系统科学的新思维与对地观测技术、对地球系统过程的模拟和预测,将进一步推进自然科学及其与社会科学的交叉融合去研究复杂的地球过程,为解决人类生存与发展中的资源环境问题和增强人类管理地球的能力将产生革命性的影响<sup>[3]</sup>。

### 2.1 我国对全球变化与地球系统研究的贡献与差距

自20世纪80年代以来,我国政府及有关部门高度重视全球变化与地球系统科学研究,给予强有力的支持,促使该领域的科学研究呈现出蓬勃发展的局面。部分研究成果在国际学术界产生了重要影响;部分领域的研究水平已在国际前列;已有一批活跃在国际学术舞台的研究梯队,其中部分科学家在国际学术组织和项目实施中任职,叶笃正院士荣获第48届国际气象组织奖,刘东生院士荣获国际泰勒环境科学成就奖和2003年国家最高科技奖。但是,从总体而言,我国的全球变化与地球系统研究和国际的发展态势仍不适应国际前沿的许多热点问题,尚未提上日程,“原料输出”的状况没有根本改变,落后于国际的差距仍有拉大的趋势<sup>[4]</sup>。主要表现在学术影响力、科学贡献、能力建设和财政投入等方面。

(1) 科学问题的提出多有贡献,但对国际计划的组织与实施的影响力极弱。在全球变化研究计划的组织与实施过程中,中国科学家通过多种形式提出了一系列具有导向性的重大全球变化问题,如在IGBP计划的酝酿阶段,提出要以气候变化作为全球变化的中心问题加以研究<sup>[5]</sup>,从而导致了IGBP的执行计划以全球气候变化为中心展开,1988年在21届ICSU大会上,叶笃正与英国科学家提出将土地利用引发的全球环境问题作为除温室气体以外的另一类重大的全球变化问题加以高度重视,从而导致了土地利用/土地覆盖核心计划(LUCC)的诞生;在国际地圈生物圈计划中国委员会(CNC-IGBP)1988年的国家报告中指出,认识到目前为止到底发生了一些什么样的全球变化,人类处在(变化中的)什么阶段的问题,导致其后10年国际上一批科学家对此问题的关注和探讨。90年代,叶笃正提出全球气候变化的适应问题,并指出要规范人类自身的行为,以

适应全球变化。这一观点引起了国际科学界的广泛关注。<sup>21</sup> 世纪初 符淙斌等又提出了亚洲季风是具有全球意义的重大区域环境问题,从而导致季风亚洲成为 IGBP /START 第二阶段集成研究的重点。

通过对推动国际科学研究计划的领导人(主席、执行主任)、各级科学指导委员会的组成,以及机构的设置的分析,可以直观地显示各国科学家在组织实施国际科学计划中的学术影响力。

自 IGBP 启动以来,其科学委员会(SC-IGBP)主席和秘书处执行主任共轮换了 6 任领导人,涉及 5 个国家的 8 位科学家,出任 IGBP 核心项目科学指导委员会主席的共有 25 位科学家,涉及 12 个国家。我国没有人出任过 IGBP 的两级学术领导人,只有一位担任过 IGBP 12 人组成的特别委员会成员,一位担任过 SC-IGBP 常委,现有一位科学家担任 SC-IGBP 副主席。在全部 364 名科学委员会(SC)和科学指导委员会(SSC)成员中,中国有 27 位科学家曾在或正在其中任职,约占全部成员的 7%。

同样,中国科学家也没有人出任过全球环境变化研究的其他三个国际计划 WCRP、IHDP、DIVERSITAS 科学委员会及其核心项目的学术领导人;在 WCRP 我国先后有 4 位科学家出任联合科学委员会(JSC)委员,3 位科学家担任过 WCRP 核心项目科学指导委员会成员,而在 IHDP 和 DIVERSITAS 计划的两级学术机构中,中国仅有几位科学家担任或曾任过 SSC 一般成员。

美、德、瑞(典)、英、法、澳、挪、荷、西、瑞(士)等 10 个国家先后主宰了 IGBP 秘书处及核心项目办公室。这 10 个国家对全球变化计划及地球系统研究的发展起着至关重要的作用。此外, WCRP 及其 6 个核心项目办公室, IHDP 及其 4 个核心项目办公室也均无一例外地设在发达国家。

(2) 科学上有一定贡献,但难于面对国际重大成果。过去 20 年,我国全球变化领域形成了相当规模的研究队伍,取得了一批具有国际影响的研究成果<sup>[6]</sup>。地球系统整体观念不断增强,突出区域特色研究及其对全球问题的研究,为国际全球变化与地球系统研究的发展做出了应有贡献。同时,也为我国在资源、环境和经济战略问题上的宏观决策、参与《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)谈判与国际履约提供了科学依据和技术支持。

如加强了全球气候变化的研究,发展了我国自行设计的气候系统动力模式(包含有大气、大洋和陆面过程相耦合的气候系统模式),为《联合国气候

变化框架公约》提供了进一步的科学依据;发展了由我国科学家提出的全球变化中气候和生态过渡带的概念及其在全球变化中的敏感性和可能出现早期信号的重要科学思想,通过对季风区多种尺度气候与生态系统关系的研究,提出了季风驱动的生态系统的新概念,相关项目建议被 IGBP /START 列为东亚地区全球变化研究的第一优选领域,提出东亚季风系统的概念,并利用黄土古土壤序列、第三纪风尘堆积、湖泊、海洋、岩溶记录、冰芯及历史记录等,建立了季风区环境演化序列,在国际全球变化研究领域具有重要学术地位;由我国科学家建议、设计和主持的 ODP184 航次在南海 6 个站位取芯超过 5 000 m,实现了中国海大洋钻探零的突破,建立起西太平洋区近 3 000 万年来最佳深海地层剖面,取得了东亚季风演变的深海记录,揭示了气候周期演变中热带碳循环的作用,为我国古气候研究的海陆对比提供了依据,由我国组织发起并得到联合国教科文组织和国际地科联资助的“地质、气候、水文和岩溶形成”(IGCP299)、“岩溶作用与碳循环”(IGCP379)项目,揭示了氧同位素各阶段的古气候变化事件,为古环境变化的重建提供了一种新的途径,围绕青藏高原的气候环境变化研究已成为国际关注的科学热点,特别是高原冰芯研究以及青藏高原上空夏季臭氧异常低值中心的发现等,在国际上有着重要的影响;在大气水循环、流域水循环、水循环的生物过程、社会经济与水循环、农业与水承载力等与农业有关的诸多水问题方面取得了重大进展,在全国尺度的气候植被分类、区域蒸散模式、自然植被 NPP 与碳储量的空间格局、土壤有机碳库的储量、生态系统的碳密度与收支、湿地生态系统的 CH<sub>4</sub> 及相关痕量气体的通量观测和产生及排放问题的探索,取得了重要研究成果;在世界上率先开展了陆架边缘海海洋通量的研究,系统开展了渤海、东黄海生态系统动力学的研究,估量了陆架边缘海气碳通量的数据,为回答全球陆架在全球碳循环中的作用提供了有力的科学依据。

此外,在我国及周边地区,开展了大规模科学试验,并与国际计划相结合,成功实施了一批由我国科学家领衔的国际性科学计划,如淮河流域能量与水循环的试验研究是全球能量与水循环计划(GEWEX)的组成部分;中国季风区古环境演变是国际南极—赤道—北极剖面(PERP13)计划在中国的实施;东亚古季风的海洋记录是国际大洋钻探计划(ODP)<sup>184</sup> 航次在中国南海的实施。

然而,中国科学家在国际全球变化研究出版物上发表文章实在太少,而有影响的文章就更少了。IGBP有4种出版物,到目前为止,共出版了50本IGBP Report,58期Global Change News Letter,7本IGBP Book Series和5本IGBP Science。我国学者(含台湾)在IGBP Report、Global Change News Letter和IGBP Book上仅发表10篇文章,在IGBP Science上没有文章。这一事实表明:如果我们过去10年全球变化研究取得的5大成果,即地球是一个独特的自适应系统、人类活动以多种方式影响着地球的环境、地球系统具有临界阈值和突变的动力学特征、人类活动可能触发具有灾难后果的全球变化、地球系统运行状态正在发生变化等进行分析,并自问中国科学家有哪些贡献时,将难以面对。

(3) 能力建设发展速度较快,但整体性、系统性不足,重复建设依然存在。为了推动全球变化和地球系统科学研究,国际科学界从能力建设角度提出了发展全球立体观测系统,以构建一个地球系统的研究平台。该平台包括:全球气候观测系统(GCOS)、全球陆地观测系统(GTOS)、全球海洋观测系统(GOOS)、全球环境监测系统(GEMS)、地球观测系统(EOS)和全球通量观测网(Fluxnet)。我国是生态研究网(ILTER)的最早成员,是最先建立指标体系、探讨对生态系统诸要素进行规范观测的国家,也是最早进行全球变化联网研究的国家。此外,建成了由8个站点组成的森林、草地、农田碳通量观测网,促进了全球通量观测网的建设。

我国在全球立体观测平台建设方面的差距是,在全球气候观测系统建设方面,虽进行了地基观测现状的分析,但没有对如何参与全球气候观测系统进行规划设计;中国气候观测系统与中国海洋观测系统的建设还未提到议事日程,未对中国陆地观测系统进行规划设计,更没有理清它们的关系。陆地观测和通量观测的站点密度不够,环境监测系统、地球观测系统还没有建立实用的业务运行系统。

模拟在全球变化和地球系统科学的研究中占有非常重要的地位,涉及模型设计与发展(软件)和模拟所需的计算机(硬件环境)两个方面。过去10年,国际上计算机的运算速度提高了4~5个数量级,以日本的地球模拟器(Earth Simulation)为代表,已达到每秒 $35 \times 10^{12}$ 次,具有海气耦合气候模型水平分辨率在10 km左右,海洋大洋环流气候模型的水平分辨率在5 km左右的计算能力。我国目前用于气候模拟的计算机“神威 I”,其峰值浮点运算速

度为 $3.840$ 亿次,与国外相差2个数量级。我国科学家在研究工作中较多引进了国外的模型和软件,而自主设计的模拟系统还非常少。我国的全球气候模式在物理过程、生态过程乃至化学过程的描写方面与国外相比精度较低,存在明显差距。

(4) 财力投入增长幅度较大,但总体投入偏低,分配机制不尽合理。财政是全球变化和地球系统研究发展的保证。我国是发展中国家,不能奢望财政的投入像发达国家一样,但至少应与发展中大国的地位相称。宏观上看,我国财力投入增长幅度较大,但总量仍然偏低。更为重要的是有限的资源是否被合理的分配和充分的利用。

全球变化和地球系统研究的经费主要来自科学技术部、国家自然科学基金委员会和中国科学院。据不完全统计,1996—2000年,上述3个部门在全球变化领域的投入约6亿元,是前10年的4倍以上;1997年至2003年,在全球变化领域共资助了大约240个项目,总经费约13亿元。特别需要指出的是进入21世纪以来,该领域研究的经费投入上升更快,从1999年的28项增至2003年的91项。

投入产出比的定量分析是一个非常困难的问题,其难点在于如何定量描述产出,投入产出比的科学性和合理性,如何进行横向比较以及横向比较的科学性和可比性等。然而,由于我国未建立项目间(Inter-Project)的运作机制、计划间(Inter-Programme)运作机制和合作伙伴关系(Partnership),经费投向不合理与重复投入的状况仍然存在。

## 2.2 面临经济社会可持续发展的严峻挑战

党的十六大提出全面建设小康社会的历史任务,要求在创造物质财富的过程中,同时要创造一个优美的人与自然和谐发展的环境。面对这样艰巨的任务,必须分析当前我国资源、环境的状况,从而明确地球科学所面临的挑战与历史责任。

(1) 自然资源供需矛盾十分突出。据预测,到2020年中国对一次能源需求至少是2000年的2倍。煤炭资源丰富,但精查储量少,可供量不足。45种主要矿产资源可供利用储量,2010年可保证需求的矿产有21种,到2020年仅有9种。特别是铁、锰、铜、铝、钾盐等大宗支柱矿产资源,对国际原材料市场依赖越来越高。全国25种主要金属415个大中型矿山,面临保有储量潜在危机,严重影响矿产资源的保障能力。

我国有近一半陆地国土面积缺水,1/10地区水资源仅能满足生存的基本条件,还有2000多万农

村人口饮水困难。随着人口增长、城市化、社会经济发展、生态环境改善,使得水资源紧缺更加严重。

(2) 有限资源浪费巨大。我国单位 GDP 产品加工、转换、贮运的能源终端利用效率约为 34% (西方国家 80 年代末为 41%)。我国金属矿山采选回收率平均比国际水平低 10% ~ 20%, 大量乡镇、民办小矿利用率极低。用水效率不高, 严重浪费现象普遍存在。全国农业灌溉用水利用系数平均约为 0.45, 而先进国家达到 0.7 ~ 0.8。全国多数城市用水器具和自来水管网的浪费损失率估计在 20% 以上。

(3) 环境污染和生态破坏严重。我国环境污染已经从陆地蔓延到近海水域, 从地表水延伸到地下水, 从一般污染物扩展到有毒有害污染, 已经形成点源与面源污染同在, 生活污染与工业排放叠加, 各种新旧污染与二次污染复合的态势。在区域和流域范围(特别是长江、珠江三角洲和环渤海地区) 已经出现大气、水体、土壤污染相互作用的复合污染格局, 对生态系统、食品安全、人体健康构成日益严重的威胁。

我国自然环境先天不足, 占陆地国土面积 52% 的自然条件脆弱地区, 难以承受庞大的人口规模和快速的经济所带来的压力。各类生态系统的整体功能下降, 生态恶化范围扩大, 程度加剧, 危害加重。表现为: 原始森林所剩无几、总体质量低下, 草地退化, 湿地萎缩, 土地沙化加速, 水土流失严重, 生物多样性锐减, 有害外来物种入侵, 生态安全受到严重威胁。

我国是世界上受自然灾害影响最严重的少数国家之一。据统计, 我国每年由于各种突发性自然灾害造成的直接经济损失约为当年新增国内生产总值的 25% ~ 35%。近 20 年来极端灾害事件, 如旱涝灾害发生的频率和强度呈上升趋势, 地震、滑坡、泥石流灾害、农林病虫害有增无减。诸如水土流失、土地沙化、盐渍化和气候长周期演变、淡水资源趋势性减少等缓变的环境灾害和造成的损失更为严重。

巨大的资源、环境压力既使地球科学面临严峻的挑战, 又为其发展提供了良好机遇。我国已进入“可持续发展”框架下的现代社会。以“科学发展观”有效地解决资源利用、资源配置和环境保护问题, 现有的认识和技术能力已远远不足, 迫切需发展新的理论和新的技术。

### 2.3 我国发展地球系统研究的优势

政府和有关部门对全球变化与地球系统研究的

重视, 拥有一批活跃在国际学术界的科技队伍, 部分领域已跨入国际先进行列, 面临的资源、环境压力及高强度的人类活动等, 都是我国开展地球系统研究的学术资源优势。为更好地理解战略重点的选择, 本文仅简单阐述我国独特的自然条件和人文优势。

我国是地质背景特别复杂的地区。全球五大造山带, 即环太平洋、地中海、乌拉尔—蒙古、北大西洋和北冰洋中的前 3 条在中国境内汇聚, 决定了中国大陆岩石圈结构的复杂性和全球意义。中国的地质记录之完整和丰富, 在世界上是少有的; 从地球动力学过程来看, 中国大陆是全球最年轻的大陆, 为研究当代地球动力学过程在诸多方面提供了实例, 成为具有全球意义的得天独厚的野外实验室。漫长演化历史与复杂的动力学过程造就了地貌单元的多元性与全球代表性。我国拥有青藏高原、黄土高原、岩溶高原、高山峡谷区、丘陵区、广阔的陆架海、边缘海及横穿多地貌单元的河流。多样化的地质地貌类型、土壤类型和气候条件形成了多样化的生态系统, 包括森林、草原、荒漠、湿地、海洋和海岸自然生态系统, 以及多种多样的农田生态系统。多样化的生态系统又维系着丰富的物种、种群和遗传资源。

我国位于地球环境变化速率最大的亚洲季风区, 东临太平洋, 发育着宽阔的陆架海和典型的边缘海, 海—陆—气之间的物质、能量循环具全球意义, 已成为当前世界气候研究的一个关键地区。我国气候南北分带与区域垂直分带在世界上具有典型性。青藏高原对我国的气候格局有重要的控制作用, 也是影响全球大气环流和气候演变的重要因素。

我国拥有灿烂的古代文明, 而且与现代社会在文化上一脉相承, 没有发展间隔。迄今为止有文字记载的历史可以追溯到夏、商、周, 并且已为考古发掘所证实。依靠丰富的历史文献和各种信息, 可以提供更长、更多的气候和自然地理变化状况, 有可能了解通过自然载体所不能得到的信息。中国气象局通过对历史文献记录和年轮气候研究, 已完成《中国近 500 年旱涝分布图集》, 最近又完成了《中国三千年气象记录总集》的编制。

中国人口众多, 是世界上最大的发展中国家。改革开放以来, 经济快速发展, 人类活动对环境的扰动及灾害频繁等问题, 已构成中国经济与社会可持续发展的严重障碍, 受到政府和社会的重视。我国对人类活动的调控, 可能对世界产生深远影响, 倍受国际关注。

### 3 我国地球系统研究科学战略

#### 3.1 基本思路

地球系统科学研究的目标是通过对地球系统及其各子系统(包括大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、近地空间、人类活动)的相互作用,及其物理、化学、生物过程等的研究,提高对地球的认识水平;同时,利用认知地球的知识为解决资源利用、环境优化、减轻灾害等问题提供科学技术支撑,协调人与自然的关 系,服务于社会经济的可持续发展。

地球系统研究是国际地学界共识的 21 世纪地球科学的前沿领域,但是,各国际组织或国家战略的研究模式并不尽然相同<sup>[7-12]</sup>,大致可归纳为两种,既“海、陆、气相互作用模式”与“大气圈、水圈、生物圈、岩石圈相互作用模式”。究其原因 是基于各自学术资源的优势和需求。基于我国的实际情况,可以将国际上的两种模式结合起来,强化人类活动的因素,形成我国地球系统研究科学战略概念模型(图1)<sup>[13]</sup>。其基本研究思路是探索海、陆、气、生及地球内部物质、能量循环的内在联系,并考虑人类活动(图中桔红色组成的两个“人”字)的影响。从图中可以看出,地表—近地表范围是各种界面物理、化学、生物作用过程及其伴随的物质、能量交换与传输的临界地域,也是维系生命活动的关键地域,更是人类活动与社会可持续发展密切相关的地域,无疑是地球系统研究的重点区域。当然,要探讨地球系统整体行为的自然驱动力,对太阳辐射变化(尤其是近地空间过程)和地球内部过程的研究也不能被忽视。

根据国际地球科学发展的趋势,结合我国地球



图1 我国地球系统研究科学战略概念模型

Fig 1 Conceptual model of the strategy of

Earth system research in China

系统研究科学发展的基本思路,认为今后 10~20 年内中国科学家可在 3 个方面做出贡献:一是地球科学的相关学科更多地从地球系统概念推动学科发展,使原有学科更加深化和完善,学科间的交叉渗透更为加强,焕发出新的活力;二是关注地球系统及各子系统之间的相互作用研究,描述并理解其物理、化学、生物过程和人类活动的影响,推动和发展一门实质性的综合科学,即地球系统科学;三是跨越自然与社会科学的界限,关注人类面临的环境、资源、灾害等重大科学问题的研究,强化服务于人类社会可持续发展的功能。通过上述三方面的努力,可以实现“从地球过程到人地和谐”的战略意图。

#### 3.2 战略重点选择

面向学科前沿,发挥学术资源优势,满足国家需求是选择战略重点的基本根据;推动地球科学的发展,培养精干的研究队伍,提升我国的国际地位是实现战略重点的根本目的。这就确定了选择近期战略重点的基本准则。

(1) 把握科学前沿,对认识地球系统将起到重要作用或产生重大影响,具有良好基础并能充分发挥我国自然条件和人文优势,有利于迅速提升我国的国际地位。

(2) 把握我国发展中急需解决的环境、资源、灾害和安全中的重大科学问题,关注人与自然的协调发展。

(3) 有利于学科交叉,特别是地球科学与生物学、物理化学、数学、技术科学等的交叉融合,提升自主创新能力。

(4) 有利于促进年轻学术骨干的培养,特别是跨学科学术带头人的培养。

(5) 鼓励科学家积极参与大型国际研究计划,充分利用国际先进的观测、探测技术平台,特别支持我国科学家以自身的优势主持大型国际研究计划,加速我国技术平台的建设。

##### 3.2.1 区域气候环境系统变化与适应

气候环境系统系由陆地、大气、海洋、冰雪、地球内部、生物过程作为内部因素,由人类活动和天文影响作为外部因素构成的影响地球气候环境的状态与变异行为的巨系统。青藏高原除具有全球独特的气候环境系统外,还控制了西北干旱与季风亚洲的气候环境系统的演变与宏观格局。理解区域气候环境系统的过程与规律,了解区域与全球气候环境系统的联系,建立预测理论与方法体系,提供人类适应气候环境系统变化的科学基础。重点研究:

(1) 宏观环境格局的形成、演化与气候环境

系统。

②季风亚洲气候环境系统中的海—陆—气相互作用、各种时间尺度变异的原因和物理机制。

(3) 气候系统与环境系统的耦合过程。

(4) 区域气候环境系统变异的模拟和预测。

(5) 人类适应气候和环境系统变异的理论和方法。

### 3.2.2 水系统、水循环与水安全

全球水系统是由与水相关的人类、物理、生物和生物地球化学过程及其相互作用组成的整体系统,在地球系统的演化中发挥着无处不在、无时不有的重要作用。水循环是联系地球系统各子系统的纽带,其演化规律是地球科学的一个重大基础研究领域。我国对水的开发利用使陆地与近海水体的水质以及水生境产生深刻的影响。淡水资源短缺及其导致的生态系统退化,以及水污染导致的水质恶化等的水安全问题,已严重制约社会经济发展和人民的生活质量,并成为全球关注的问题。重点研究:

(1) 全球变化与区域水系统和水循环。

(2) 区域水系统、水循环与区域生态系统。

(3) 水资源管理与水安全。

### 3.2.3 生态系统与全球碳循环

全球碳循环是指碳元素在大气(主要以  $\text{CO}_2$  的形式)、海洋(表层水域、中层水域、深层水域及海洋沉积物)、陆地生态系统(植被、凋落物和土壤)之间的迁移和转化。它不可避免地与气候、水分循环、养分循环以及生物、物理、化学过程相联系。准确地评估生态系统的碳循环不仅是准确地估算未来大气  $\text{CO}_2$  浓度、预测气候变化及其对生态系统影响的关键,也是履行《气候变化框架公约(UNFCCC)》与《京都议定书》及制定应对策略的关键。我国作为一个生态系统繁多、人口众多且经济快速发展的国家,在未来地球大气  $\text{CO}_2$  浓度的控制中起着极为重要的作用。目前,我国温室气体排放已占全球的 11% 成为第二排放大国,在国际环境外交中,不能不引起高度重视。重点研究:

(1) 生态系统碳收支的格局和变率。

(2) 碳循环与界面过程。

(3) 生态系统碳收支的过程和圈层相互作用。

(4) 生态系统碳过程与人类干扰。

(5) 碳输送及其区域效应。

(6) 碳管理与区域发展途径。

### 3.2.4 人类活动与地球表层系统

地球表层是人类居住和活动的主要场所,是水、

土、气、生、人相互作用的复杂系统,是保障人类生存和可持续发展的物质基础和载体,是地球系统中与人类目前面临的环境、生态和发展问题联系最为直接的部分。人类对地球系统的调控主要通过对表层系统的改造实现,因此对表层系统的调控是整个地球系统可持续管理的关键。地球表层系统各部分的功能又表现出明显的区域差异性,直按地球系统圈层相互联系和陆、海、气相互作用的思路,以生命支撑能力和人地关系为核心,以区域为操作平台,以物质和能量的生物地球化学循环和物理传输系统在不同时空尺度上的过程研究为重点,以过程、影响和响应为研究主线。围绕区域独特性,结合国家资源、环境和生态的重大问题,应成为我国近期地球表层系统研究的战略选择。重点研究:

(1) 地球表层过程的机理与模拟。

(2) 人类活动对地表过程影响的定量评估。

(3) 文明演进与环境变化。

(4) 全球环境变化的适应性。

### 3.2.5 地球内部动力学与地球系统演化

地球内部的动力学过程是驱动海陆格局变化、构造地貌单元分野、地球内部与表层物质、能量循环的动力。地球内部过程主要表现在核—幔—壳—幔之间的物质、能量交换与传输,核、幔、岩石圈物质组成与状态的不均一性及其时空变化。地球内部过程的变化可以导致地球表层海陆分布、大洋环流、构造地貌、大气组成与环流、生物演化等地球系统各部分的变化以及相互作用过程。当然,这类变化过程主要是构造尺度的,但亦有灾难性的突发事件,如地震、火山、海啸等。因此,研究地球内部动力学过程,特别是中、新生代以来的地球动力学过程对理解当代地球系统状态是如何演化而来的至关重要。结合我国在理解地球内部过程与地球系统演化方面所具有独特的自然条件优势,重点研究:

(1) 地球内部圈层的物质循环及其与地球表层系统的联系。

(2) 地球内部过程对地球表层系统的驱动作用

(3) 地球内部动力学过程的资源和灾害效应。

### 3.2.6 地球灾变事件与生命过程

生命与环境的关系是当代自然科学和社会科学领域最重大的基础科学问题之一,它涉及到生命和生命环境的起源,环境因子对生命活动的制约机理;生命的环境适应基础和物质表达方式;生物和人类的生存空间的物态和流态;人与自然协调发展等基础理论和社会需求等诸方面。地质时期的特殊地球

环境及其剧变过程和重大生命转折,完全是第四纪以来的全球变化所远不能及的。对地球系统运行机制的认识,迫切需要对这些信息的进一步解读。只有全面和正确认识了地球灾变事件和生命过程,才能更好地把握人类的未来,创造人类与地球环境和諧发展的空间。结合我国特色地学资源,重点研究:

- (1) 早期地球环境与生命过程。
- (2) 重大地质转折事件与转折期生命演变形式及过程。
- (3) 当代全球变化与生物多样性剧减。
- (4) 极端环境条件下的生命形式和过程。

### 3.2.7 地球观测系统与地球系统模拟

地球观测系统和地球系统模拟是研究地球系统的基础,也是建立数字地球的关键。加强对地球观测系统与地球系统的模拟研究,不仅使模拟地球系统演变成为可能,而且可增强地球科学、生态科学、资源环境科学等学科领域的研究和创新能力,增强对地学数据的监管能力和科学决策水平。未来10~20年,国家对地球观测系统应坚持“天地统筹、重点突破、稳定队伍、数据共享”的原则,以增量投入带动布局的整合与关键技术的突破,发展地球系统模式,增强人类了解和认识地球系统的能力。重点研究:

- (1) 对地观测与遥感技术体系。
- (2) 地球深部探测技术体系。
- (3) 地球物质研究技术体系。
- (4) 海洋探测技术体系。
- (5) 气候观测系统。
- (6) 发展物理气候系统模式。
- (7) 开发生物地球化学系统模式。
- (8) 发展地球系统模式。

### 3.2.8 耦合过程动力学、响应动力学、适应和预测理论

地球系统的宏观行为状态及其变化,本质上是由构成地球系统的各分量(大气、海洋、固体地球、冰雪、生物过程和人类活动、地外的影响等)的过程及其相互作用所决定的。所谓耦合过程是指地球系统各分量之间的相互作用和协同过程,因此,耦合过程应该包括决定地球系统状态及其变化的有关分量之间的相互作用。从耦合过程的性质可以分为:地球系统物理过程的耦合、地球系统生物地球化学过程的耦合、地球系统自然过程与人类活动的耦合等。耦合过程动力学研究是了解地球系统各种宏观行为的耦合过程和变化规律、建立动力学理论、提供模拟

和预测这些行为的科学基础。重点研究:

- (1) 地球系统物理过程的耦合动力学。
- (2) 地球系统生物地球化学过程的耦合动力学。
- (3) 地球系统自然与人类活动耦合过程的动力学。
- (4) 地球系统重大变异行为的预测和适应。

要实现上述科学战略意图,建议成立国家地球系统研究科学指导委员会,加快我国地球观测系统和信息平台建设,优化科技资源配置,实现信息资源与大型设备共享,实施人才强国战略,建设具有国际水平的地球系统科学研究队伍,加强国际合作,积极参与国际重大研究计划,加大对地球系统科学研究的投入,建立多元化的投资体制。在国际地球系统科学研究走向新高点的今天,只要能做到洞悉现状,把握方向,发挥学术资源优势,取人之长补己之短,就能使中国地球科学在解决人类社会经济可持续发展所面临的重大科学问题中,有所裨益,腾飞有日。

致谢: 本文是国家自然科学基金委员会地球科学部“地球系统科学战略调研组”的成果之一。撰写过程中陈洋勤、赵生才、郭正堂、王会军、李秀彬、周广胜、孙效功、施俊法研究员提供了素材,并进行了深入的讨论,在此一并致谢。

### 参考文献(References):

- [1] NASA. Earth System Science[R]. Washington DC: NASA, 1988.
- [2] Zhou Xujie. Some Cognitions on Earth system Science[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 513-515. [周秀骥. 对地球系统科学的几点认识[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 513-515.]
- [3] Sun Shu. Some thoughts of global Change and Earth System Science studies in China [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 6-10. [孙枢. 对我国全球变化与地球系统科学研究的若干思考[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 6-10.]
- [4] Wang Pinxian. Earth system in China Quo Vadis? [J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(6): 837-851. [汪品先. 我国的地球系统科学研究向何处去[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 837-851.]
- [5] Yeh T, Fu C. Climatic Change—A Global and Multidisciplinary Themes [A]. In: Malone T F, Poblones J G. Global Change, The Proceedings of A Symposium Sponsored by the ICSU [C]. Canada: Cambridge University Press, 1985. 27-446.
- [6] Ye Duzheng, Lin Hai, et al. China Contribution to Global Change Studies [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [7] Steffen W, Tyson P. Global Change and the Earth System: A plan-

- et under pressure [ R ] . IGBP science No.1 ,IGBP Secretariate , Stockholm ,2002 .
- [ 8 ] NASA . Understanding Earth System Change ,NASA ' s Earth Science Enterprise ( ESE ) Research Strategy for 2 000-2 010 [ R ] . 2000 .
- [ 9 ] NSF Directorate For Geosciences . NSF Geosciences Beyond Understanding and Predicting Earth ' s Environment and Habitability [ R ] . NSF00-28 .2000 .
- [ 10 ] Liu Dongsheng . Global change and sustainable development [ J ] . Earth Science Frontiers ,2002 ,9( 1 ) :1-9 . [ 刘东生 . 全球变化和可持续发展 [ J ] . 地学前缘 ,2002 ,9( 1 ) :1-9 . ]
- [ 11 ] Natural Environment Research Council ( UK /NERC ) . Science for A Sustainable Future 2 002-2 007 [ R ] .2002 .
- [ 12 ] Integrated Ocean Drilling Program ( IODP ) Planning Sub-Committee ( IPSC ) , Earth , Oceans and Life , IODP Initial Science Plan , 2003-2013 [ R ] . International Working Group Support Office ,2001 .
- [ 13 ] Yao Yupeng , Ma Fuchen . A discussion on the conceptual model for strategy of the Earth System research in China [ J ] . Advances in Earth Science ,2005 ,20( 2 ) :144-148 . [ 姚玉鹏 , 马福臣 . 关于我国开展地球系统研究战略概念模型的讨论 [ J ] . 地球科学进展 ,2005 ,20( 2 ) :144-148 . ]
- [ 14 ] Ye Duzheng . Global change and sustainable development research in China [ J ] . Advances in Earth Science ,1999 ,14( 4 ) :317-318 . [ 叶笃正 . 中国的全球变化与可持续发展研究 [ J ] . 地球科学进展 ,1999 ,14( 4 ) :317-318 . ]

## FROM EARTH PROCESSES TO HUMAN-EARTH RELATIONSHIP IN HARMONY : A VISION ON THE STRATEGY OF EARTH SYSTEM RESEARCH IN CHINA

MA Fu-chen<sup>1</sup> , LIN Hai<sup>1</sup> , HUANG Ding-cheng<sup>2</sup> , Zhang Zhi-qiang<sup>3</sup> , Yao Yu-peng<sup>1</sup>  
( 1 . National Natural Science Foundation , Beijing 100085 , China , 2 . Institution of Geography and Geophysics ,  
Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China , 3 . Scientific Information Center for Resources and  
Environment , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China )

**Abstract :** This paper underlines the origin and evolution of earth system science and the opportunities and challenges China will face in earth system research . While elucidating the ideology of the earth system research in China , we propose eight key strategic issues : evolution and adaptation of regional climate environment system ; water system , water cycle and water security ; ecological system and global carbon cycle ; human activities and earth surface system ; earth interior dynamics and earth system evolution ; earth catastrophic events and life process ; earth system observation , earth system simulation , and coupling process dynamics , response dynamics and theory for adaptation and prediction .

**Key words :** Earth system , Earth system science , Development strategy .