



自然科学基金项目进展专栏

评述

# 深入探索全球变化机制

## ——国家自然科学基金委重大研究计划的战略研究<sup>†</sup>

《全球变化及其区域响应》科学指导与评估专家组\*

\* 联系人, 汪品先, E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2012-04-28; 接受日期: 2012-05-30

<sup>†</sup> 本文为国家自然科学基金委《全球变化及其区域响应》重大研究计划结题评估而撰写, 属于其战略研究报告. 受该研究计划科学指导与评估专家组的委托, 同济大学海洋地质国家重点实验室汪品先院士执笔撰写了该报告, 其基础是重大研究计划的多次研讨会与验收会, 提纲与初稿曾两次在专家组会上讨论, 力求反映专家们的见解与建议.

**摘要** 全球变化作为历史上第一个由科学界提出的全球性政治问题, 强有力地推动着学科发展. 同时, 国际主流意识在全球变暖问题上几十年来的巨大变化和当前面对的剧烈争论, 反映出全球变化理论认识上的不成熟性. 当前, 我国全球变化研究已获得国家重大科学研究计划的支持, 国家自然科学基金委可以集中力量支持变化机制基础理论的深入探索, 从地球系统科学的高度、在更大的时空范围内研究变化机理, 力争在基础理论上有所突破. 全球变化的机制, 主要涉及温室气体、CO<sub>2</sub>与生源要素循环和气候系统中的水循环三大基础科学问题. 建议我国针对基础问题, 结合本身特色, 聚集力量采取以下举措: (1) 开展长期观测——科学和技术的结合; (2) 穿越时空尺度——不同过程的辨识; (3) 促进学科交叉——发展比较行星学等学科; (4) 设置大型计划——发挥我国自然条件的优势. 藉以揭示地球系统的运行机制, 促使我国的相应学科尽早实现从跟踪到创新、从“原料输出型”到“深加工型”的转变.

**关键词**  
全球变化  
温室效应  
碳循环  
水循环  
地球系统

《全球变化及其区域响应》重大研究计划于2002年启动实施, 是国家自然科学基金委一项为期10年的研究计划. 该研究计划瞄准当前国际前沿, 以东亚大陆及近海海域若干全球变化的敏感区域为对象, 以碳氮循环、水循环和季风环境变化为核心, 组织开展了五大核心科学问题的研究. 该研究计划实施以来, 共资助项目57项, 资助金额5500万元, 取得了一系列具有重要影响力的学术成果, 有力地推进了我国全球变化研究及其相关学科的发展.

全球变化研究在我国起步较早, 近年来陆续设置了众多的研究机构与研究计划, 受到广泛的关注.

尤其是2010年国家科技部启动“中国全球变化研究国家重大科学研究计划”以来, 支持的力度大幅度上升, 使我国应对全球气候变化的研究能力得到进一步提升, 从而为国家可持续发展宏观决策、为国际气候变化谈判和环境外交提供科学依据和政策咨询建议. 在这种有利的环境下, 国家自然科学基金委可以在总结多年来“全球变化”重大研究计划经验和成果的基础上, 改变全面覆盖、广泛支持的做法, 集中力量支持全球变化机制的深入探索, 与当前主流研究既相衔接又有区别, 力争通过一段时间的努力, 在全球变化的基础理论研究上有所突破.

英文引用格式: Scientific Steering Group of the Major Project “Global Change and Regional Response”. Exploring the mechanism of global change—Research strategy of major projects of the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2012, 42: 795–804

## 1 全球变化基础科学问题的实质

世纪之交的前后，地球科学被推上了人类社会的“风口浪尖”。随着全球性温室气体排放限制措施的提出，全球变化进入了各国政府内政外交的核心层面，成为历史上第一个由科学界提出的全球性政治问题。学术问题一旦进入政治领域，就会给学科发展带来天赐良机，全球变化已经变成了社会的热点、科研的“显学”。然而在学术上，全球变化的机理远未查明，人类排放温室气体和全球变暖两者之间是否存在因果关系，目前还在争论。于是出现了政府间专门委员会气候变化的报告，一方面荣获诺贝尔和平奖、一方面又引起“全球变暖大骗局”之类反对意见的特殊现象。

回顾历史，“全球变化”之争不自今日始。早在 18 世纪末，后来的美国总统杰斐逊(T. Jefferson)利用新出现的温度计测量弗吉尼亚的气温，发现几十年逐渐变暖；而“美国文化之父”韦伯斯特(N. Webster)根据长期的证据加以驳斥，可见全球变暖之争在二百多年前就有先兆<sup>[1]</sup>。19 世纪以前学术界只承认气候有短期波动、不承认有长期变化，因此争论的主题与今不同，但是对气候问题的意见分歧则自古已然。由阿尔卑斯山漂砾引起的第四纪冰期之争，从 18 世纪延续到 20 世纪才有结论；而当前的全球变化之争涉及地球系统演变的机制问题，具有更大的科学深度，不可能在短期内结束。如果说 16 世纪的哥白尼革命是从地球向外看、放眼太阳系，导致了“地心说”到“日心说”的革命，那么当今的全球变化和地球系统科学的发展，是反过来从地外看地球的整体，预期的科学进展被喻为“第二次哥白尼革命”<sup>[2]</sup>，推测和五百年前的哥白尼革命一样，将是又一场的世纪之争<sup>[3]</sup>。

全球变化研究涉及的学科十分广泛。如果将成因机制的探索列为上游，应对措施的研究看作下游，那么前者涉及的有物理、化学、生物与地球科学等基础学科，而后者从循环经济、碳贸易、碳截存出发，涉及到从经济学到技术科学的诸多领域。在基础理论方面，最重要的可以提出温室效应、碳循环和水循环三大问题。温室气体如何产生气候效应、水循环如何实现气候过程，本质上属于物理问题；碳循环追踪碳排放后的去处，主要是化学或者说生物地球化学问题。字面上三者都属于老生常谈，其实都存在着悬而

未决的重大问题，从中可以深入到地球系统运行机制的核心部分。

### 1.1 温室气体的气候效应

作为物理现象，温室效应是在 19 世纪认识的：1827 年法国傅立叶(J. Fourier)提出红外热辐射现象；1863 年英国廷德(J. Tyndall)用实验证明水汽和二氧化碳能吸收红外辐射，确定了温室气体和温室效应；1896 年瑞典阿伦尼乌斯(S. Arrhenius)又对温室效应做出了定量计算。但是走出实验室，涉及温室气体的气候效应，却从一开始就有争议。1900 年瑞典物理学家 K. Ångström 指出大气增加 CO<sub>2</sub> 不会导致增温，因为大气里的 CO<sub>2</sub> 已经饱和，而且 CO<sub>2</sub> 能吸收的红外辐射已经被水汽吸收。他的错误在于当时的测量手段过于粗犷，不知道地球大气圈的 CO<sub>2</sub> 远未饱和，而水汽和 CO<sub>2</sub> 吸收的红外辐射谱线并不完全重叠；再说受 CO<sub>2</sub> 影响的谱段，红外辐射是从干冷的上层大气、而不是从湿热的下层大气散逸出去的。但是时至今日，从 19 世纪到 20 世纪经过百余年物理学家的努力，作为基础知识的温室效应已经确定无疑<sup>[4]</sup>。

那么是不是可以说，温室效应作为物理现象已经研究到家，不再存在什么问题了？确实有这样的认识，但这是一种误会。CO<sub>2</sub> 含量与大气温度的关系，无论从实际记录和理论计算上都存在着未解之谜。新生代早期大气 CO<sub>2</sub> 含量比现在高一个量级，气温比现在高得多，符合温室效应；但是到了二千多万年来中的中新世，CO<sub>2</sub> 含量不比现在高，然而气候却明显较今为暖<sup>[5]</sup>，又作何解释？看来地质历史上 CO<sub>2</sub> 含量与大气温度的关系不是简单的线性关系，而这种关系的揭示，既要有地球科学的资料、又要求物理科学的理论。在物理学上，辐射传输(radiative transfer)是温室效应的理论基础。近年来比较行星学的发展，揭示了其他星球上大气成分和温度的关系，大大拓展了研究温室效应的视野。比如氮气在今天的地球上并不吸收红外辐射，而对于土星最大的卫星土卫六(Titan)稠密而寒冷的大气来说，氮气就成了最主要的温室气体。再比如臭氧也是温室气体，地球由于臭氧层吸热造成了平流层升温，而火星和金星的大气圈没有臭氧层也就没有升温的平流层。地外星球大气圈多样性的发现，为辐射传输的理论研究提供了新的推动力<sup>[4]</sup>，也启发着地球科学界对于地球自身的温室效应进行更加深入的探索。地球演化过程中大气化学

成分的急剧变化,必然在地质历史上造成严重的气候效应.比如说,臭氧层出现以前的早期地球,大气圈应当没有平流层,那么大气环流的格局会像今天的金星,还是火星?

经过两百年的努力,辐射传输作为温室效应的理论基础已经确立;但是一旦用到大气圈又产生出众多的问题,要求作进一步的理论研究.温室气体与气候变化的关系,现有的辐射传输理论不足以解释观测到的现象;这种理论认识上的欠缺,反映为学术界主流意识的前后摇摆.三、四十年前在冷战背景下,谈论的是全球变冷和下一次冰期的来临.1972年,在美国布朗大学举行了“本次间冰期将如何结束?何时结束?”的国际学术会议,认为以往的间冰期只有一万年,而当前的间冰期时间已经超过,所以会议主席致函尼克松总统,指出:“假如人类不加干涉,现在的暖期将很快结束……全球变冷……可望在几千年、也许几百年后降临”<sup>[6]</sup>.1983年,美国学者正式提出“核冬天”,警告超级大国的核战争可以造成不复之劫,估算核战争可以造成15~25℃的降温<sup>[7]</sup>.当然这种估算并不确切,同样的作者几年后又将降温值改为10~20℃<sup>[8]</sup>.温室气体和全球变暖,对当时来说是求之不得的好事:“如果大气CO<sub>2</sub>增加为3倍,全球食品生产就会翻番”.因此主张“全球规模大量生产CO<sub>2</sub>,并泵入大气”.为此“至少要烧掉5000亿吨煤,这超过人类历史上烧掉的6倍.煤不够了,可以烧石灰来增加CO<sub>2</sub>”<sup>[9]</sup>.学术界三十年前后反差之大,只能说明温室效应的理论认识上还有着显著的不成熟性,警告我们需要保持独立思考的清醒头脑.温室效应的气候表现作为科学问题,还有待结合地质历史和地外行星的时空比较,在新的高度上加深认识.

## 1.2 CO<sub>2</sub>与生源要素循环

人类排放的CO<sub>2</sub>只有一半留在大气里,“漏失的碳”哪里去了?20世纪80年代开始探测,结果发现是被海洋和陆地生态系所吸收.但是随着全球变暖,这种生态系的碳汇作用究竟是在加强还是减弱?十年前的主流观点是陆地植被生长加速,碳汇作用加强<sup>[10,11]</sup>,这也就是所谓“CO<sub>2</sub>施肥”的概念.但是近年来新的观测和新的计算,发现的却是相反的趋势:树木生长反而在减慢<sup>[12]</sup>,热带树林的碳源作用也在加强<sup>[13]</sup>.再说,升温也不光是加强光合作用,还会加速呼吸作用,两者相抵还是放出的碳比吸收的碳多<sup>[14]</sup>.

简单地可以说,全球变暖使得土壤有机质加快分解属于正反馈,使得植物生长加快属于负反馈.至于在全球尺度上,陆地碳循环对于气候变化的响应,究竟整体说来是正反馈还是负反馈?至今并不清楚,因此也就无从科学预测未来大气的CO<sub>2</sub>浓度变化、更难以预测未来的温室效应<sup>[15]</sup>.根本的原因还是实际资料的依据不足:人类1958年才开始测量大气CO<sub>2</sub>,与碳循环的时间尺度相比观测记录太短;资料的代表性也不够,尤其是陆地生态系过于复杂,所谓陆地碳循环的全球数据往往是从全球数据减去海洋之后得出的.

因此,揭示碳循环机制的首要条件在于观测资料的全面性.海洋界一度争论陆架浅海究竟是碳汇还是碳源,其实全球陆架海有很大的时空变化,不是一个线性或均相系统,不能将某个海区的结果外推到全球<sup>[16]</sup>.我们有许多直观的概念,实际并没有得观测的支持.亚马逊流域是当今最大的热带雨林区,总以为水分多时应当排放CO<sub>2</sub>,结果却发现旱季是碳源、湿季是碳汇,原因是遗漏了季节过程的迟滞效应<sup>[17]</sup>.北冰洋海冰融化,应当使生产力增加、碳汇功能加强,但是“雪龙号”船2008年的北冰洋航次却发现碳汇功能比20世纪90年代下降<sup>[18]</sup>.意外的结果,揭示了原先认识的片面性.现在碳循环的模式,建立在“平面式”的数据之上:CO<sub>2</sub>浓度是根据近地面的数据,陆地生物圈根据地面以上的活生物量,海洋是根据真光带的观测.其实,碳循环是个穿越圈层的立体过程.海洋碳循环绝不限于真光带,从弱光带到海底才是海水的主体.但是与真光带不同,深部海水生物群的主体是微型生物,近年来发现的“微生物环”和“微型生物碳泵”<sup>[19]</sup>,说明原来海洋生物泵的概念过于局限.同样,陆地生态系碳循环的研究,历来是地面以上归植物学、地面以下归土壤学研究,两者并不衔接,对两者之间的非线性反馈当然缺乏认识,因而也得出陆地生态系如何响应气候变化的整体结论<sup>[20]</sup>.再说CO<sub>2</sub>测量,热带雨林近地面的碳通量数据在干季有代表性,而湿季时深对流发育,近地面的碳通量被深对流送入对流层的高空,并不具有代表性<sup>[17]</sup>,因此只在近地面测量CO<sub>2</sub>也是片面的.

总之碳循环的深入研究,要求打破空间和时间上的局限性.人类对碳循环的测量只有半世纪的历史,但是现代海水里就有年逾“万岁”的“老碳”,历史上17500年前也曾有大量“老碳”涌入大洋的“神秘时

段(Mystery Interval)<sup>[21]</sup>，揭示出冰期旋回的碳循环中还有从海洋深处的古老碳储库进入表层的现象。迄今为止，全球变化主题下的碳循环研究局限于地球表层的短暂过程，但如果放开时空视野将岩石圈和地质过程加进来，碳储库就会增大三个量级，碳在大洋储库里的滞留时间也就加长到十多万<sup>[22]</sup>。如果再进一步深入地球内部，就可以看到地壳不断地从地幔获得CO<sub>2</sub>，冒出地表后又被光合作用还原为有机碳<sup>[23]</sup>；相反，地球表层形成的有机碳和碳酸盐通过俯冲带进入地幔，在高温高压下再度产生CO<sub>2</sub>，这就是行星尺度上的地球碳循环。决不要以为这种理论探讨没有实际意义，今天陆上发现的深部CO<sub>2</sub>气和深海海底的“二氧化碳湖”<sup>[24]</sup>，以至于部分“可燃冰”中的碳，和今天海底支持“深部生物圈”生存的碳，都有可能来自地球深部。地球上的碳循环是表层和深部结合、短期与长期过程交织的产物，不可能只凭表面现象得到解释。

碳循环研究中另一个重大问题，是多种生源要素的相互作用。碳循环不能孤立起来研究，作为生物地球化学过程，必然和水循环和N, P, Si, Fe等其他营养元素的循环密切相关，其中氮循环尤为突出。氮循环与碳循环通过生产力相互连接，并且共同影响着气候系统。比如说，大气活性氮进入海水可以提高生产力，加强生物泵从大气吸收CO<sub>2</sub>；CO<sub>2</sub>增多引起的大洋酸化又会提高海洋自养浮游生物的C/N比，提升海洋固氮作用的效果<sup>[25]</sup>；而酸化还会减慢氮的氧化作用从而减少N<sub>2</sub>O的排放<sup>[26]</sup>，其结果都是在全球变化中起负反馈作用。不仅如此，人类通过粮食生产和化石燃料所造成的活性氮，导致全球氮循环的空前加速，引起一系列的环境恶果，因此氮循环本身就是全球变化的研究对象<sup>[27]</sup>。氮循环的研究为时不长，而且氮循环基本上属于微生物过程，加以与碳不同，氮循环每一步的全球通量都不能用卫星资料取得<sup>[28]</sup>，因此其基本数据都严重不足，当前的重要任务就是氮循环各个环节的定量化。如果放大时间尺度，在地质记录中探索海洋固氮和反硝化作用的平衡机制，那就是研究冰期旋回气候变化机制的新途径<sup>[29]</sup>。

### 1.3 气候系统中的水循环

全球变化中温室气体的气候效应，实际表现为水循环的变化。因此贯穿全球变化基础科学问题的两大红线，就是穿越地球各大圈层的碳循环和水循

环。水的气、液、固态的三相转换，是地球表层系统的特色；而地球上的气候变化，也正是通过水循环才能实现的。在全球尺度上气候评价的不确定性，根源就在于水文循环的理解不足<sup>[30]</sup>。然而与碳循环不同，水文变化的记录要比大气CO<sub>2</sub>浓度的记录丰富得多，不足的主要是地球表面以下的部分，特别是冰盖下的河湖系统和大洋底下的地下水。南极冰盖下面发现了一百几十个湖泊，其中包括世界第七大湖<sup>[31]</sup>，这种冰下水系通过冰盖不稳定性影响着地球的气候系统<sup>[32]</sup>。除了海底热液、冷泉和岩石圈“海底下的海洋”之外<sup>[33]</sup>，大洋下面还发育着源自陆地的地下水系统，估计大西洋海底下涌的地下水，总量可以与河流注入的径流量相比<sup>[34]</sup>。全面认识地球表面的水循环，就应当将这些地下过程包括进来。

从全球变化的角度来看，水循环研究中的关键在于其三相转换的过程和影响。这里包括高纬区冰和水的转换，和低纬区水和汽的转换；前者体现为冰盖的消长和由此决定的海平面升降，后者体现为以季风降水为代表的水文循环。两者相比，前者的过程相对简单，研究的程度也比较高；后者的过程比较复杂，研究程度明显不足。即便如此，研究冰盖的变化及其在气候系统中的作用，仍有一系列的待解之谜。就今天的过程来说，需要弄明白当前冰盖沿着海岸的崩解，原因究竟是在冰盖还是在海洋：是由于冰盖排水加快，还是海水升温的结果<sup>[35]</sup>？就远古的地质时期说，八亿年前整个地球很可能被冰盖包裹形成“雪球”，在那种没有水气蒸发、没有潜热输运能量的“雪球式地球”上，气候系统又如何运作<sup>[36]</sup>？这些都是地球系统研究中深层次的科学问题。

更加复杂的是低纬的水文循环，其中一个研究的难点在云。云不同于水蒸气，不但因为云对于辐射有反射作用，更因为水汽变成云而呈液态或者固态微晶时，吸收热量的能力就会提升千倍。云的反馈作用实际上控制着全球水文循环对于气候辐射的响应<sup>[37]</sup>，但是云与辐射的反馈作用由众多因素决定，近年来气溶胶作为云凝结核(CCN)和云微物理的研究虽然取得重大进展，至今仍然是全球变化气候模拟中一项最不确定的因素。气溶胶不仅通过颗粒的吸收和散射直接影响辐射量，还可以作为云凝结核改变云的光学性质和降水效率，对辐射量产生间接影响<sup>[38]</sup>，是当前全球变化研究中的一大热点，但目前对于气溶胶气候效应基本机制的理解，还不足以为观

测结果提供解释<sup>[39]</sup>. 大量的观测表明, 从 20 世纪 50 年代到 80 年代, 地面太阳辐射量逐渐减少, 推断是气溶胶增加的后果. 这种“全球黯化(global dimming)”现象一方面说明人类活动产生的气溶胶可以部分抵消温室效应, 另一方面又说明温室气体的实际增温效果应该更大. 由于气溶胶在大气中的滞留时间比温室气体短暂得多, 将来温室气体的增温效果还要比现在严重得多<sup>[40]</sup>. 但是观测记录表明地面辐射量在 20 世纪 80 年代以后又趋向于回升, “全球黯化”已经逆转为“全球亮化(global brightening)”, 这就很难再用气溶胶解释<sup>[41]</sup>, 急需更多的观测和模拟去获取答案.

水文循环研究的另一个关键在于季风. 迄今为止, 季风降水数值模拟的成功率比较低, 原因在于我们对低纬过程的理解不足. 随着全球和大洋遥感资料的出现, 出现了将季风与赤道辐合带(ITCZ)的南北位移结合起来、作为全球系统研究的新方向, 也就是“全球季风”的新视角<sup>[42]</sup>, 有可能将低纬过程的研究提升到新的高度, 也有可能为古气候学的研究带来新意. 当年从第四纪冰期起步的古气候研究, 历来以北半球冰盖的历史作为中心, 而将地球上其他区域的气候变化当作对冰盖消长的响应, 研究古季风无非是为冰期历史提供补充. 现在看来, 以两极为核心的高纬过程, 和以 ITCZ 即“气候赤道”为核心的低纬过程是全球气候系统的两种推动力, 应当从两者的相互作用中去理解气候演变的历史<sup>[43]</sup>. 从地球系统的广角度看来, 近两、三百万年来两极都被冰覆盖, 是显生宙六亿年来绝无仅有的特殊现象. 两极冰盖的发育改变了地球表面系统的水循环, 突出了高纬过程对于气候系统的控制作用, 但对于研究地质历史并不具有代表性<sup>[44]</sup>. 相反西太平洋暖池所在的低纬区, 接受着大量的太阳辐射, 应当是地球表层接受辐射能量的中心和寻找气候演变机制的重点. 总之, “气候是 CO<sub>2</sub> 和水的双人舞, 冰盖是一位客串演员<sup>[36]</sup>.” 从高、低纬过程相结合的高度着眼, 从水文循环的研究入手, 应当是解释气候变化机制的正确途径.

在更大的时空尺度上, 地球的水循环涉及地球的深部过程, 特别通过超基性岩的蛇纹石化所进行的水交换, 是地幔与地球表层系统的相互作用. 板块在俯冲带将海水带入地幔深处, 估计显生宙六亿年来, 已经有高达 10% 的大洋水进入地幔<sup>[45,46]</sup>, 是研究

地球表层变化不容忽视的深部因素. 总之, 无论水还是碳, 都经历着地球表层与深部部交换的“行星循环(planetary cycle)”, 属于地球科学正在起步的新方向. 行星循环如何影响地球表层过程, 是有待回答的新问题.

## 2 我国研究全球变化机制问题的重点举措

近年来, 随着研究实力和科技投入的增长, 我国在全球变化领域内的研究已经逐步从区域响应拓展到全球问题, 从现象描述深入到机制探索, 成为地球科学发展中的一支先头部队. 我国具有地域辽阔环境多样、学科设置相对齐全的优势, 如果今后能够进一步聚集力量“攻坚”, 针对温室效应、碳循环和水循环的基础问题, 有望在揭示地球系统运行机制上做出具有国际和历史价值的重要贡献. 为此, 建议以开展长期观测、穿越时间尺度、促进学科交流、设置大型计划等四方面为重点, 在新的层次上推进我国的全球变化基础研究.

### 2.1 开展长期观测——科学和技术的结合

如上所述, 全球变化研究的要害在于观测资料不足. 而随着人类对环境的需求和技术的进步, 当今地球科学各学科都在发展观测系统, 成为新世纪里地球系统科学新知识的重要源头. 其中的重点首先在于长期原位观测, 比如 20 世纪 80 年代 TOGA 计划在赤道西太平洋布放 70 个锚碇浮标, 多年水下观测的结果找到了厄尔尼诺的成因; HEBBLE 计划在西北大西洋海底投放 11 吨重的 SeaDuct 装置, 经过长期观测发现了 4800 m 处的“深海风暴”. 近年来, 从美国“地球透镜计划(EarthScope)”一类针对地球内部动力学过程的大型计划, 到加拿大“海王星”观测网(NEPTUNE-Canada)一类的深海观测系统, 长期观测系统的建设方兴未艾<sup>[47]</sup>.

无论原位长期或者高分辨率的观测, 都提出了技术改进的新要求. 科学需求与技术革新相结合, 就是科学创新的道路. 以创新的精神开展全球变化机理的研究, 就要求在观测技术上有所进展. 购买国外的仪器进行观测, 写成文章在国外发表, 回答国外提出的科学问题, 当然是科学研究的一种途径; 但如果我们能够国际水平上提出自己的科学问题, 能够

自己改进、甚至发明仪器进行观测，就有可能做出新的探测、取得新的突破，而其中的关键就是科学和技术的结合。国际上许多科研创新来自科学家和工程师的思想碰撞，甚至于在餐桌上讨论得出设计的初稿，就是所谓的“餐巾纸设计(napkin design)”。美国第一个海底观测实验站 LEO-15，大洋钻探第一个井下观测装置 CORK，都始于“餐巾纸设计”。我国一方面需要针对全球观测中的关键问题组织观测，另一方面要在观测目标和手段上有所创新，科学与技术的结合是唯一途径。

全球变化机理探索的突破点，很大程度在于观测内容和观测技术的创新。水文循环中蒸发的研究远不如降水，关键在于蒸发过程的观测。盘式蒸发(pan evaporation)的测量简单易行，但是只有在周围大气水分充足的前提下，才对实际的蒸发作用具有代表性，否则陆地蒸发(terrestrial evaporation)增强时盘式蒸发反而减弱，构成“蒸发作用的悖论(evaporation paradox)”<sup>[48]</sup>，直接影响对于当前全球变化趋势的评价<sup>[49]</sup>。可见改进水文循环的观测技术，是地学界的当务之急。比如氢、氧同位素分馏，为水文循环过程提供了示踪剂，其观测研究早已引起国际重视<sup>[50]</sup>，我国学术界应当在研究古今水文循环中给予高度注意。又如前面讨论的生源要素循环，实际上各个环节都是微生物的生物化学过程<sup>[51]</sup>，但是现在比较重视在宏观尺度上作生物地球化学的调查，对于微观尺度上观测生物化学的具体过程，却往往显得缺乏耐性。如果我国能够促成科学和技术携手并进，在观测内容和技术上有所革新、甚至另辟蹊径，必定能带来学术上的新意。

## 2.2 穿越时空尺度——不同过程的辨识

全球变化首当其冲的科学难题是人为因素与自然因素的区分，而其中关键在于不同时间尺度变化的辨别。某年的暖冬，究竟是年际、年代际振荡、或者更长的周期变化，还是大气成分变化的长期效应？由于全球变化是不同时间尺度现象的叠加和交错，答案的获取要求穿越时间尺度，一方面要了解同一种变化在不同时间尺度上的驱动因素，另一方面要了解同一因素在各种时间尺度上的不同表现。忽视这种差别，就可能得出与事实相反的结论。举例说，增温与碳循环的关系就是这样。中纬度区的增温可以

加速林区土壤有机质分解而放出  $\text{CO}_2$ ，但由于碳储库有限，这种碳源效应的时间短暂；而增温又会加速土壤氮的矿化，相当于施加氮肥加快树木生长，结果在长时间尺度上是吸收  $\text{CO}_2$  的碳汇<sup>[52]</sup>。

穿越时间尺度的前提，在于认识不同尺度的过程。我国有强大的现代过程和地质记录的研究力量，面临的任务是如何古今结合共同开展机理探索，这里数值模拟有着巨大的潜力，但是模拟只能在已经对机理有所假设的前提下进行。值得注意的是地质记录和现代过程在时间尺度上的衔接，比如百年和千年尺度上的数据，除树轮、珊瑚等外极其需要历史和考古的资料发掘，我国这方面潜力的发挥，也是国际学术界的殷切期望<sup>[53]</sup>。

有待穿越的不仅是时间、而是时空的尺度。海洋物理学在 20 世纪 60 年代发现了中尺度涡，纠正了海流稳定的错觉：原来海水运动在时间里的变化远远超过空间里的差异<sup>[54]</sup>，这种变化绝不是零星分布的锚系浮标所能测出，于是引出了零浮力剖面浮标 Argo 的观测计划，现在全大洋投放了 3000 多个 Argo 对海洋上层 2000 m 水体进行观测<sup>[55]</sup>，将物理海洋学的研究推上了新台阶。美国研究沉积作用的“从源到汇”计划，其特色就在于跨越尺度：空间上从毫米级的沉积颗粒到上百公里的地层剖面，时间上从秒级的波浪周期到  $10^7$  年的地层周期，通过现场观测和数值模拟的整合，像当年连接古埃及和古希腊文字的罗塞塔石碑(Rosetta Stone)那样，在现代沉积学和层序地层学之间架筑桥梁<sup>[56]</sup>。回顾一部科学发展史，就是人类不断拓宽时空视野的历史，全球变化的认识过程也不例外。20 世纪 80 年代全球变化研究的起步阶段，局限于人类社会活动的时空的尺度；世纪之交发展到“地球系统”，扩大到地球表面各个圈层、进入地质的时间尺度；近年来又进一步拓展到地球内部圈层和表层系统的相互作用，这就是所谓的“行星循环”或者“地球连接(Earth connection)”<sup>[57]</sup>。从政府部门应对气候变化决策需求的层面看，全球变化的研究当然要求贴近人类社会的时间尺度；而从自然科学寻求变化规律的角度出发，只有不受时空约束、一追到底才能揭示真相。我国的固体地球科学有强大的国际竞争力，但是与全球变化直接相关的主要是偏重第四纪的古气候研究，而与内力作用、甚至较早地质时期的研究工作缺乏沟通。其实，国际学术界通过“俯冲工厂”和“深部碳计划”一类的研究，正在探索

进入地球深部的水循环和碳循环, 时间上也正在将全球变化的研究与地球形成以来的演化过程相结合, 而这正是我国地学界可以大显身手的舞台. 最近我国学者正在大洋碳循环的研究, 上溯到晚新生代的轨道长周期<sup>[58]</sup>、中生代的大洋缺氧<sup>[59]</sup>、和古生代灭绝事件中的碳位移<sup>[60,61]</sup>, 显示出令人鼓舞的良好势头; 研究现代气候学的大气科学家、研究现代微生物的海洋科学家, 也都开始对于地质时期的季风演变、海洋碳循环历史发生兴趣, 展现出一派打破海陆界限、穿越古今尺度的新鲜气象, 值得进一步发扬光大.

### 2.3 促进学科交叉——发展比较行星学等学科

学科交叉, 虽在我国基础研究中不断加强, 但在实践中却并不理想, 包括数理科学参加全球变化研究的经历在内. 这里面存在着缺乏得力措施、受制于旧有传统等多种原因, 而归根结底都是要求科学工作者对于本身之外的其他学科也能发生兴趣. 如上所述, 温室效应本身是个物理问题, 碳循环是生物地球化学的问题, 而研究中的技术设备和数据处理又属于技术科学和信息科学问题, 并非靠号召或者经费所能解决, 而需要从学生到专家的不同层面促进知识普及、学术交流方能奏效. 近年来在生物与地学结合、古今结合方面都有一定的进展, 但是也有重大的欠缺, 其中突出的空白就是比较行星学.

地球在所知星球中具有最复杂的圈层结构, 因此全球变化也最为复杂, 但是在地球历史上是从简单发展到复杂的. 企图在深层次上揭示全球变化机理的重要途径, 是从早期的地球系统入手, 由老到新、由简入繁地认识其发展过程. 尤其是现在的地球科学已经发展到“行星循环”的高度, 更需要对于地球内部与表层联系更为紧密的早期演化加以研究. 近 20 多年来, 随着行星际探测技术的发展和探测范围的扩大, 以及天文学和地球科学的相互渗透, 比较行星学在欧美国家迅速发展, 为地球系统的研究开拓思路、为地球的全球变化提供比较. 恰如研究中国史须要参考外国史一样, 开展比较行星学研究将是全球变化机理研究升级换代的重要举措, 在这方面西方科学家为我们做出了表率. 比如 Lovelock<sup>[62]</sup>早在半世纪前就提出用大气成分识别星球有无生命活动的方法; Webster<sup>[63]</sup>用内行星的比较说明水在地球上三相共点的气候意义; Pierrehumbert<sup>[36]</sup>将“雪球式地球”与火星的早期相比较, 推论当时地球上的水文

循环与气候特征.

就像非洲的原始部落启发我们对人类早期社会的认识一样, 地外星球的今天为我们展现了地球的童年. 金星上的 CO<sub>2</sub> 大气和硫酸云, 是我们太古代还原型大气圈的参考系<sup>[64]</sup>; 火星上的湖相和风成沉积岩厚达 4000 m, 为原来局限于地球的沉积学机理研究打开了行星的大门<sup>[65]</sup>; 至于木卫二(Europe)上万米厚的冰下海水<sup>[66]</sup>, 土卫六(Titan)的甲烷湖泊和甲烷雨<sup>[67]</sup>, 都是打破地球系统局限性、使我们开阔思路的比较对象. 比较行星学的价值远不至于满足科学界的好奇心, 更为宝贵的是提供了地外星球上的全球变化模式, 前面在讨论温室效应的时候已经提到. 就气候而言, 研究最多的还是火星. 缺乏液态水的火星属于“超级大陆性”气候, 昼夜温差高达 120℃, 而且赤道的温度并不高, 火星上的经向温差直接发生在南北两极之间, 全球只有一个 Hadley 环流. 由于温差强烈、气候干燥, 火星上没有干季、湿季、分的是“晴空季”与“风尘季”, 常见高达万米的超级沙尘暴, 将天空染成橙色、在地面堆起沙丘<sup>[68]</sup>. 比较行星学是提升地球系统科学研究高度的必修科目, 我国务须及早补上.

### 2.4 设置大型计划——发挥我国自然条件的优势

我国有着世界上最大的基础研究队伍之一, 也有着增长最快的科研经费投入, 但是研究的科学问题却基本上是跟踪型的, 大多缺乏自己的研究思路, 取得的成果基本上属于分散型, 文章在数量上的优势并没有成为回答科学问题的优势. 近年来我国确实已经采取措施, 制订了战略规划、设置了超过以往规模的较大型计划, 但是与成功的国际研究计划相比, 无论视角的高度或者立项的范围, 大多存在着明显的差距. 当务之急是要利用本身的优势条件、考虑本身的特殊需求, 针对全球变化的重大科学问题, 设立我国的大型研究计划. 缺乏前瞻性学术思想碰撞的“规划”, 往往只能是现有研究题目的罗列, 成为变相的未来研究经费预分配, 无助于科学研究的深入, 为此需要组织高层的学术交流和战略研究.

结合我国优势设计大型研究计划, 有待于学术界的深入讨论. 我国地处亚洲和太平洋之交, 世上最大的大陆和最大的大洋之间的边缘海系列, 从珠峰到西太平洋海沟之间两万米的地形落差, 都为我们研究海陆之间的能量流和物质流、探索海陆相互作用

的全球影响提供了独特的条件. 多年来, 我国不同学科提出过各种设想和议论. 比如说, 针对我国西高东低、季风大河的特色, 提出过“东亚自然环境形成”研究计划的建议, 可以从西部板块碰撞、东部岩石圈减薄入手, 追踪地形倒转、河系改组, 直到季风气候与生物地理区系的形成, 组织从地球物理到生物学的大型学科交叉. 又如我国的海上研究, 既有南北极的考察、又有西太平洋环流的研究, 如果能够以西太平洋为对象, 将极地到热带海区的工作相互结合, 就可以从北冰洋的白令海峡到南极的罗斯海, 设立大型的西太平洋极地计划(简称“太极计划”). 季风是我国气候的特色、季风研究也是我国地球科学的强项, 无论是现代季风试验与模拟, 还是从黄土到石笋的古气候研究, 都取得了国际前沿的成果. 如果能够做到实质上的古今结合、并且从区域研究进入全球季风的境界, 就有可能设立穿越时间尺度的“多尺度季风变化”大型研究计划. 再如我国古生物化石群的研究, 在国际地学界具有突出的显示度, 近来正在与环境演变相结合, 如果能够与研究现代环境变化的力量、例如海洋化学、微生物生态学等方面的专家相结合, 完全有可能进行“攻坚”, 去探索“从雪球地球到生命大爆发”、“古生代冰室期到温室期的转变过程”、“地质时期的微生物碳泵”等重大课题. 这类题目可以提出很多, 一旦发动学术界讨论, 定会大量出现; 而一旦付诸实施, 就可以指望在重大问题上的重大进展.

但是, 这类大型计划的组织和实施, 都要求管理体制和研究风格上的革新. 只有一个能够高瞻远瞩的立项机制和朝气蓬勃的学术群体, 才能在学海上掀起万舟齐发的高潮, 才能不辜负我国得天独厚的

自然条件和当前数百年不遇的治学良机.

### 3 结束语

全球变化作为科学问题, 在 20 世纪 80 年代是作为追踪人类排放  $\text{CO}_2$  的去处而提出的. 经过 20 多年的发展, 已经远远超出当年的范围, 变为探索地球表层系统运作模式的“地球系统科学”, 并进而研究地球内部与表层系统的连接, 探索“行星系统”或者“地球的连接”<sup>[57]</sup>. 同时也进一步揭示了地球系统的复杂性. 地球系统里的“温室效应”决不只是物理学的温度变化, 而是引发出一系列的生物地球化学过程, 产生出高度非线性的后果. 正因为这样, 地球科学向着建立自己的理论体系前进了一大步.

从历史上看, 全球变化是第一次由科学家讨论的学术问题演变成了世界规模的政治问题. 从学术上看, 全球变化为地球科学的发展提供了空前良机, 有望促使地球科学从现象描述变成以探索机理、具有预测功能的新型学科. 这种脱胎换骨的变化, 是地球科学一场新的革命, 可喜的是这场学科革命发生在我国科技事业空前繁荣的良好时机, 我国的地球科学本身面临着从“原料输出型”向“深加工型”的转变, 从追随、“跻身”到独立思考、追求创新的转型. 只要认清方向、措施得当, 相信若干年后我国经济的发展必定会带来科学的腾飞. 当前以地球系统科学为代表的地学革命, 是继 19 世纪进化论、20 世纪活动论之后的又一次重大变革. 由于历史的原因, 我国对于前两个世纪的地学革命愧无贡献; 而在 21 世纪地学革命的征途上, 相信必定会留下中国地学界的脚印.

### 参考文献

- 1 Kendall J. America's First Great Global Warming Debate. *Smithsonian Magazine*, July 15, 2011. <http://www.Smithsonian.com>
- 2 Schellnhuber H J. "Earth system" analysis and the second Copernican revolution. *Nature*, 1999, 402: C19-C22
- 3 Sherwood S. Scientific controversies past and present. *Phys Today*, 2011, 64: 39-44
- 4 Pierrrhumbert R T. Infrared radiation and planetary temperature. *Phys Today*, 2011, 64: 33-38
- 5 Pearson P N, Palmer M R. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, 2000, 406: 695-699
- 6 Broecker W S, Kunzig R. *Fixing Climate*. New York: Hill and Wang, 2008
- 7 Turco R P, Toon O B, Ackerman T P, et al. Nuclear winter: Global consequences of Multiple nuclear explosions. *Science*, 1983, 222: 1283-1292
- 8 Turco R P, Toon O B, Ackerman T P, et al. Climate and smoke: An appraisal of nuclear winter. *Science*, 1990, 247: 166-176
- 9 Brown H. *The Challenge of Man's Future*. New York: Viking Press, 1954
- 10 Battle M, Bender M L, Tans P P, et al. Global carbon sink and their variability inferred from atmospheric  $\text{O}_2$  and  $\delta^{13}\text{C}$ . *Science*, 2000, 287: 2467-2470



- 11 Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414: 169–172
- 12 Silva L C R, Anand M, Leithead M D. Recent widespread tree growth decline despite increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. *PLoS ONE*, 2010, 5: e11543, doi: 10.1371/journal.pone.0011543
- 13 Jacobson A R, Sarmiento J L, Gloor M, et al. A joint atmosphere-ocean inversion for surface fluxes of carbon dioxide: 2. Regional results. *Global Biogeochem Cycles*, 2007, 21: GB1020, doi: 10.1029/2006GB002703
- 14 Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451: 49–52
- 15 Houghton R A. Balancing the global carbon budget. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 313–347
- 16 Cai W J, Dai M. Comment on “Enhanced Open Ocean Storage of CO<sub>2</sub> from Shelf Sea Pumping”. *Science*, 2004, 306: 1477
- 17 Saleska S R, Miller S D, Matross D M, et al. Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science*, 2003, 302: 1554–1557
- 18 Cai W J, Chen L, Chen B, et al. Decrease in the CO<sub>2</sub> uptake capacity in an ice-free Arctic Ocean Basin. *Science*, 2010, 329: 556–559
- 19 Jiao N, Azam F. Microbial carbon pump and its significance for carbon sequestration in the ocean. In: Jiao N, Azam F, Sanders S, eds. *Microbial Carbon Pump in the Ocean*. Science/AAAS, Business Office, 2011. 43–45
- 20 Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451: 289–292
- 21 Broecker W, Barker S. A 190‰ drop in atmosphere’s  $\Delta^{14}\text{C}$  during the “Mystery Interval” (17.5 to 14.5 kyr). *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 256: 90–99
- 22 Berner R A, Caldeira K. The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. *Geology*, 1997, 25: 955–956
- 23 Hayes J M, Waldbauer J R. The carbon cycle and associated redox processes through geological time. *Phil Trans R Soc B*, 2006, 361: 931–950
- 24 Nealon K. Lakes of liquid CO<sub>2</sub> in the deep sea. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 13903–13904
- 25 Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 2008, 451: 293–296
- 26 Beman J M, Chow C E, King A L, et al. Global declines in oceanic nitrification rates as a consequence of ocean acidification. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, doi: 10.1073/pnas.1011053108
- 27 Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320: 889–892
- 28 Horner-Devine M C, Martiny A C. News about nitrogen. *Science*, 2008, 320: 757–758
- 29 Deutsch C, Sermiento J L, Sigman D M, et al. Spatial coupling of nitrogen inputs and losses in the ocean. *Nature*, 2007, 445: 163–167
- 30 Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 1992, 359: 373–380
- 31 Siegert M J, Ellis-Evans C, Tranter M, et al. Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. *Nature*, 2001, 414: 603–609
- 32 Alley R B, Fahnestock M, Joughin I. Understanding glacier flow in changing times. *Science*, 2008, 322: 1061–1062
- 33 IPSC. 地球, 海洋与生命——IODP 初始科学计划(中译本). 上海: 同济大学出版社, 2003. 96
- 34 Moore W S, Sarmiento J L, Key R M. Submarine groundwater discharge revealed by <sup>228</sup>Ra distribution in the upper Atlantic Ocean. *Nature Geosci*, 2008, 1: 309–311
- 35 Truffer M, Fahnestock M. Rethinking ice sheet time scales. *Science*, 2007, 315: 1508–1510
- 36 Pierrehumbert R T. The hydrologic cycle in deep-time climate problems. *Nature*, 2002, 419: 191–198
- 37 Stephens G L. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review. *J Clim*, 2005, 18: 237–273
- 38 Lohmann U, Feichter J. Global indirect aerosol effects: A review. *Atmos Chem Phys*, 2006, 5: 715–737
- 39 Stanhill G. A perspective on global warming, dimming, and brightening. *EOS*, 2007, 88: 58–59
- 40 Andreae M O, Jones C D, Cox P M. Strong present day aerosol cooling implies a hot future. *Nature*, 2005, 435: 1187–1190
- 41 Wild M. Global dimming and brightening: A review. *J Geophys Res*, 2009, 114: D00D16, doi: 10.1029/2008JD011470
- 42 Trenberth K E, Stepaniak D P, Caron J M. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation. *J Clim*, 2000, 13: 3969–3993
- 43 Severinghaus J P. Monsoons and meltdowns. *Science*, 2009, 326: 240–241
- 44 Hay W W. Pleistocene-Holocene fluxes are not the Earth’s norm. In: NRC, *Material Fluxes on the Surface of the Earth*. Washington DC: National Academy Press, 1994. 15–27
- 45 Wallmann K. The geological water cycle and the evolution of marine  $\delta^{18}\text{O}$  values. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65: 2469–2485

- 46 Hay W W, Migdisov A, Balukhovskiy A N, et al. Evaporites and the salinity of the ocean during the Phanerozoic: Implications for climate, ocean circulation and life. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 240: 3–46
- 47 上海海洋科技中心, 海洋地质国家重点实验室. 海底观测——科学和技术的结合. 上海: 同济大学出版社, 2011
- 48 Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30
- 49 Brutsaert W. Indications of increasing land surface evaporation during the second half of the 20th century. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L20403, doi: 10.1029/2006GL027532
- 50 Aggarwal P K, Alduchov O, Araguás L A, et al. New capabilities for studies using isotopes in the water cycle. *EOS*, 2007, 88: 537–538
- 51 Francis C A, Beman J M, Kuypers M M M. New processes and players in the nitrogen cycle: The microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation. *ISME J*, 2007, 1: 19–27
- 52 Melillo J M, Stuedler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298: 2173–2176
- 53 Cheke R A. Thinking long term. *Science*, 2007, 318: 577–578
- 54 Munk, W. The evolution of physical oceanography in the last hundred years. *Oceanography*, 2002, 25: 135–141
- 55 Roemmich D, Owens W B. The Argo Project: Global ocean observations for understanding and prediction of climate variability. *Oceanography*, 2000, 13: 45–50
- 56 Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, et al. Writing a Rosetta stone: Insights into continental-margin sedimentary processes and strata. In: Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, et al, eds, *Continental Margin Sedimentation: from Sediment Transport to Sequence Stratigraphy*. Blackwell, 2007. 1–48
- 57 IODP. Illuminating Earth's Past, Present, and Future. The International Ocean Discovery Program, Scientific Plan for 2013–2023. Washington DC: IODP-MI, 2011. 84
- 58 Wang P, Tian J, Lourens L J. Obscuring of long eccentricity cyclicity in Pleistocene oceanic carbon isotope record. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 290: 319–330
- 59 Wang C, Hu X, Huang Y, et al. Cretaceous oceanic red beds as possible consequence of oceanic anoxic events. *Sediment Geol*, 2011, 235: 27–37
- 60 Xie S, Pancost R D, Yin H. Two episodes of microbial change coupled with Permo-Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 2005, 434: 494–497
- 61 Shen S, Crowley J L, Wang Y, et al. Calibrating the end-Permian mass extinction. *Science*, 2011, 334: 1367–1372
- 62 Lovelock J. A physical basis for life detection experiments. *Nature*, 1965, 207: 568–570
- 63 Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Rev Geophys*, 1994, 32: 427–476
- 64 Markiewicz W J, Titov D V, Limaye S S, et al. Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus. *Nature*, 2007, 450: 633–636
- 65 Malin M C, Edgett K S. Sedimentary rocks of early Mars. *Science*, 2000, 290: 1927–1937
- 66 Kargel J S, Kaye J Z, Head J W III, et al. Europa's crust and ocean: Origin, composition, and the prospects for life. *Icarus*, 2000, 148: 226–265
- 67 Stofan E R, Elachi C, Lunine J I, et al. The lakes of Titan. *Nature*, 2007, 445: 61–64
- 68 Forget F, Costard F, Lognonné P. *Planet Mars: Story of Another World*. Springer and Praxis, 2008. 229