

4. 目前北半球的碳汇是多过程共同作用的结果, 包括森林再生、大气CO<sub>2</sub>浓度和氮肥施用、气候变化、土壤侵蚀和淡水的累积作用。对这些过程的相对重要性还没有完全了解(图13)。

5. 尽管未来几十年预期的大气组成和气候的变化将导致陆地碳汇的潜力增加, 但该增加不可能一直持续下去, 陆地碳汇的强度将最终稳定, 继而下降。

6. 在高CO<sub>2</sub>水平下(>550×10<sup>-6</sup>), 由于水和养分不足等环境条件的限制, 陆生植物的光合作用将快速地达到生理饱和状态。

7. 土地利用/覆盖的变化是中期(几十年)气候和碳循环变化的主要驱动因子, 而气候对土地利用/覆盖变化的响应又将对土地的管理措施产生反馈。

8. 在大尺度(从区域到洲际)水平上, 决定陆-气CO<sub>2</sub>通量的大小和方向的因素包括:

(1) 极端气候事件(如, 干旱、季节温度的大幅变动、大尺度气溶胶含量扰动像火山喷发等引起的辐射变化);

(2) 火灾、砍伐发生的频率及其他大面积的干扰将导致陆地碳大量而迅速地流失, 其后碳储量的恢复将是一长期而缓慢的过程; 全球陆地植被的净第一性生产力(NPP)大约为57 PgC a<sup>-1</sup>, 其中5%~10%的碳将通过燃烧(作为燃料或者由于野火等)返回大气中;

(3) 环境压力或土地利用变化导致的植物物种分布和生物区系边界的变化将影响大面积碳库的储量和周转(例如, 常绿林转变为落叶林, 森林转变为草地或草地转变为林地, Archer, 1995; Hibbard et al., 2001)。

(4) 生物多样性消失和外来种入侵可能影响碳、养分(尤其是氮)和水的保持及其利用效率(Schulze et al., 2000)。

9. 非稳定状态和多态平衡状态可能在组成物理气候、水文、碳和氮循环的耦合生物物理和生物地球化学系统中发生。这可能由大气、陆地、海洋和冰川之间的能量和物质交换的非线性变化及其反馈作用引起。如El Niño 南方涛动(ENSO)现象、北大西洋的热盐环流的减缓或停止, 冰川反射的减弱(Ghil, 1994)和荒漠化(Ganopolski et al., 1998)。

10. 气候、大气温室气体浓度和人类对碳循环的干扰之间有强烈的相互作用。这正引导着人类进行全球干预, 如采取组织和制定UNFCCC及《京都议定书》的形式, 二者都是朝着减少温室气体向大气的净排放而制定的政策(图14)。

#### 研究现状

就碳循环中的生物物理过程而言, 观测和模拟实验是阐明和验证有关控制碳(以及水分、养分和能量)在构成循环的各库间的流量及转换机制的重要手段。同时, 这些工作也促进模型的参数化。关于人类活动, 过程研究对描述社会活动、经济活动、组织管理活动的假设和模型的提出及测试具有类比作用。对全球碳循环研究起关键作用的过程实验和过程模型发展取得的进展如下:

#### 陆地生理生态过程

已经有了一系列有关生理过程的研究网络, 包括前面提到的通量网(Fluxnet)和ILTER研究计划。通量网络

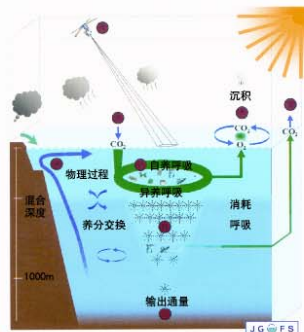


图12 海洋的生物碳泵是浮游植物、生物过程及其反馈途径综合作用的结果, 这个途径在碳从浅层海面(光可穿透的区域)向深海转移过程中起着重要作用

首先, 基于太阳光和溶解的无机营养通过光合作用把大气中的CO<sub>2</sub>转变为有机碳, 这是形成海洋食物链的基础。自养和异养的有机体在其生长和死亡时分泌颗粒和溶解物质。这些颗粒携带着碳通过水柱流向海底。因此, 生物泵是调节大气CO<sub>2</sub>浓度途径之一, 其他的有物理“溶解泵”。一般地, 通过微生物对CO<sub>2</sub>的循环作用使之再返回到大气中去, 产生的颗粒和可溶有机物质的再循环是显而易见的。

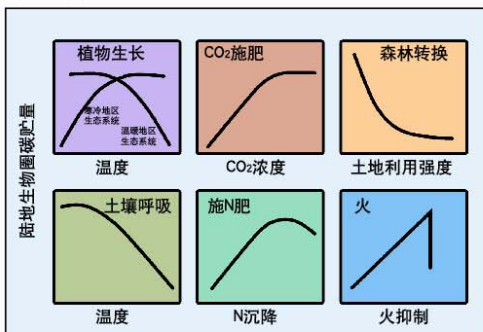


图13 当前陆地碳汇及其在全球变化驱动下的未来动态的多个响应机制(资料来源: Pep Canadell)

的观测研究为揭示碳、水汽和能量通量在日、季和年际等不同时间尺度上的控制因子起到了重要作用。另外, IGBP的核心计划“全球变化和陆地生态系统计划”(GCTE)建立了一系列生理和实验网络,以研究现在以及未来全球变化情景下碳、水汽和能量通量的控制过程。生物圈—大气圈稳定同位素网络(BASIN)主要研究光合和呼吸过程中同位素的差异,其目的就是利用大气同位素信号进一步明确全球碳源/汇的评估以及生态系统中各通量分量(如光合作用和呼吸作用)。BASIN的研究表明,水分的有效性是控制大气CO<sub>2</sub>中<sup>13</sup>C的关键因素,而生态系统呼吸作用产生的δ<sup>13</sup>C值可用于揭示各环境因子对冠层动态和生态系统的综合影响(Pataki et al., 2003)。

模拟实验在发展和验证生理生态和生物地球化学模型中亦起了关键作用。这包括土壤和冠层的增温实验、自由大气二氧化碳富集(FACE)、采用灌溉或遮雨的水分平衡研究以及养分添加实验等(Canadell et al., 2002a; Norby et al., 2001; Rustad et al., 2001)。这些实验的结果对理解未来环境条件下生态系统将发生的变化及其可能的关键驱动因子具有重要的作用。例如,一些研究表明,CO<sub>2</sub>施肥效应将在大气CO<sub>2</sub>浓度升高到500 × 10<sup>-6</sup>~600 × 10<sup>-6</sup>时达到饱和,这远低于生理饱和点(大约1000 × 10<sup>-6</sup>; Mooney et al., 1999)。

这些实验中涉及的另一问题是陆地生态系统的呼吸对诸如温度、水分和养分的有效性等环境因子变化的响应,尤其是对温度变化的响应不同于以往的研究结果(Valentini et al., 2000)。根据新的研究结果,过去在全球碳循环模型中对陆地生态系统呼吸速率的估算偏高(Cox et al., 2000)。土壤呼吸和土壤的温湿条件间的交互作用、干旱季节过后降水的影响、积雪覆盖和生长季时间长短的影响等问题也需进一步的阐释,并加强模拟模型的发展。

需要注意的是,长期陆—气碳交换的驱动因子不同于短期碳交换。前者包括由于生物群区的再分布引起的生态系统结构的变化以及不同方式的干扰。其关键问题为,考虑在当前生态系统破碎化条件下气候变化对生物群区变化的瞬时影响以及大尺度生物群区再分布的动态。

#### 干扰、土地利用和管理

干扰和土地利用/覆盖的变化是碳储量的重要控制因素。土地利用/覆盖类型的转变导致了陆地生物圈碳通量大幅度的变化(Houghton, 1999; Pacala et al., 2001),可导致某一区域由碳汇变为碳源(Kurz and Apps, 1999)。由于保护森林变得愈加重要,同时发现基于土地的减排措施有助于减缓大气CO<sub>2</sub>浓度的升高,因此现在大量的研究关注于各种土地利用方式对碳汇强度和碳储量的影响(IPCC, 2000b; Canadell et al., 2002b)。土地利用包括造林、再造林、毁林、农业利用和农业弃荒地的演替等。

生物燃烧、野火及其他干扰被认为是温室气体CO<sub>2</sub>, CO 和 CH<sub>4</sub>的主要来源。干扰导致的CO<sub>2</sub>释放在某些时期可与矿物燃料燃烧的碳排放量相当,目前正进行干扰强度的变化及其对大气温室气体浓度升高贡献的量化研究。像西伯利亚地区木材资源、亚马孙和亚洲热带地区的农田对这些国家的经济发展变得愈加重要;然而,这些资源的开发也导致干扰频率的变化以及受干扰的生态系统碳潜力的改变。人类影响、采伐、毁林、野火以及气候变异和变化间的相互作用很复杂,是各研究领域的关注焦点。例如,西伯利亚和亚洲热带地区的相关研究、在亚马孙进行的长期大气圈—生物圈实验(LBA)。湿地排水或火烧引起的碳排放应引起更多的重视。

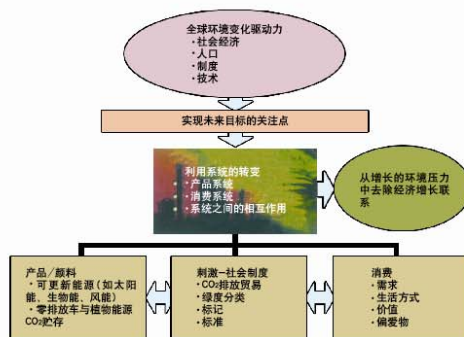


图14 减碳能量系统

由社会经济、人口、制度和技术变化驱动的全球环境变化引起了为满足未来需求的公众的关注。当减小全球环境的影响时,满足当前和未来的能源需求是一个挑战,这需要主要能源系统的变革,其中包括生产、消费及形成相互作用的激励机构。这个变革的可能选择有新能源的替代、CO<sub>2</sub>排放贸易的介入和生活方式和价值观的转变等(Courtesy of Vellinga and Wiczorek, 2002)。

### 海—气通量和海洋上层水域中生物地球化学过程的控制因素

在海洋生态系统中,从年际到年代际的气候波动(北极、北大西洋、北太平洋的南方涛动)以及二者的综合作用已被确定为控制海洋上层水域的生物地球化学过程和海—气碳通量的主要因素(Doney et al.,2000)。研究海—气碳通量的物理和生物学控制机制的方法包括:定期的水文地理调查、时间序列观测台站和其他与碳、水文地理和示踪测量整合计划相结合的海洋观测。南大洋铁释放实验(SOIREE)项目在太平洋赤道海域和南大洋进行的铁元素施肥实验表明,在高养分/低叶绿素区域内铁元素含量高低对碳循环具有重要的影响。这些实验发现,在南大洋表层水域加入铁6周后浮游植物就会有所响应(Boyd et al.,2000)。关于铁元素含量限制作用的研究还有利用SOIREE的研究结果研究气候在冰期和间冰期间的转换(Watson et al.,2000)。未来海洋过程研究将注重阐释海洋的输出通量及其与群落结构(硅藻及其微生物群落环境)的相关性、地理化学功能群(固氮者、钙化者)、物理变异(热带的不稳定波浪、中尺度的旋涡)和微量营养元素示踪等方面。

### 大气同位素与示踪研究

对同位素信息的解释与综合已经成为理解碳通量过程和诊断大尺度碳通量格局和变异极具价值的工具(在主题1中也进行了适当的讨论)。在这两个领域,同位素的研究将着重以下方面的内容:

(1)通过对大气 $\text{CO}_2$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $\text{O}_2/\text{N}_2$ 的研究,并结合质量守恒的计算以及大气反演,已经对由矿物燃料的燃烧、陆—气交换和海—气交换所形成的进入大气的碳通量进行了量化分析(IPCC,2001a; Schimel et al., 2001)。特别是,大气中 $^{13}\text{C}$ 的观测研究表明大气 $\text{CO}_2$ 浓度增长速率的变化主要是由于北半球碳交换的变化而不是南半球碳交换的变化引起,而大气 $\text{CO}_2$ 浓度增长速率的年际间变化则是由陆地生态系统而不是海洋生态系统决定。

(2)当前氧收支方面存在较大的不确定性。研究表明,由于 $\text{O}_2/\text{N}_2$ 测定解释的困难导致了估算海洋中由于温度的增加和洋流模式改变所引起的氧储量长期变化的不确定性。由此可见,目前IPCC(2001a)关于海洋和大气碳汇大小的估算可能是有缺限的。

(3)在几十年时间尺度上对全球及区域范围的海洋碳储量分布模式的估算受到包括数字模型(经常用 $^{14}\text{C}$ 和其他瞬时示踪剂校准)、DIC的时间演化、海洋 $^{13}\text{C}$ 场以及基于数据集对DIC的人为估算的技术制约(Sabine and Feely,2001)。

(4)陆地生态系统的总第一性生产力(GPP)以及NPP/GPP比率的估算可以从 $\text{CO}_2$ 中 $^{18}\text{O}$ 的变化得到(Ciais and Meijer,1998)。

### 经济技术发展对矿物燃料释放的控制作用

一般认为,矿物燃料燃烧造成的碳排放是碳循环的外部驱动力。因此,对矿物燃料燃烧造成的碳排放进行精确的量化研究非常重要(Marland et al.,2000)。然而,人类已察觉到由于自身无意识地干扰所造成的危险并对此采取行动,全球碳循环未来的发展将由矿物燃料排放和碳—气候—人类系统的相互作用来决定。因此,把矿物燃料的排放整合到碳—气候—人类系统模式中是预测研究面临的一个严峻挑战。

### 公共制度和碳循环的相互作用

要全面理解土地管理、矿物燃料排放和碳循环之间的反馈作用,需要认识当前人类响应活动中的社会经济驱动因子。关于智利的一个农牧系统研究阐明了土地利用以及气候变化的脆弱性对碳循环中生物物理、社会政治和经济变量的影响方式(McConnell et al.,2001)。一方面,崎岖的地形和发育未成熟的土壤使这些区域具有大量分散的公共土地,这些土地一般用于种植一年生作物。另一方面,个人的私有土地一般分布在相对更富饶、平整的山谷内,种植诸如葡萄等多年生作物,并几乎控制了所有的灌溉水。因此,位置和作物类型是用于鉴别地产价值的两个标准。以上这两种土地利用对气候变化的敏感性和可能的响应肯定是不一样的。

这种对当前和未来碳储量和通量的研究表明我们应根据基于过程水平的理解进行整合。有关个例(如,热带的毁林、集约农业生产等)的比较研究将提供关于土地覆盖变化的人为驱动因素以及地形和历史因素如何影响土地覆盖变化的全面理解和认识。

### 尺度间的相互作用

过程研究和模型通常涉及到多种时空尺度(如,与陆地生态系统有关的空间尺度有:细胞、叶片、冠层、

斑块、区域和全球等)。无论是时间或空间,不同尺度间的信息转换均是必要的。这些信息可以是模型参数,或是过程模型对过程的描述。我们从小尺度向大尺度的信息转换称为“尺度上推”或“聚合”,反之称为“尺度下推”或“解析”。

聚合的常规问题包括由植物叶片尺度模型估算冠层净光合作用、基于点模型的国家温室气体清单的陆地碳源汇的预测和在大尺度大气模型中对格点平均通量的标准化。这些问题已经成为一些学科主要评述的内容(Bolle et al.,1993; Michaud and Shuttleworth,1997; 气象学问题; Ehleringer and Field,1993; 植物生理问题; Kalma and Sivapalan,1995; 水文学问题)。

目前正致力于尺度化方法的阐释,并收集数据以对这些方法进行测试:

- (1)几个关于陆地生态系统和大气相互作用的大尺度实验已经积累了多尺度的大量数据(Hutjes et al.,1998)。
- (2)BigFoot计划的研究目标是拟定检验规程和解决尺度化问题,这将促进对卫星遥感资料的理解(Running et al.,1999)。
- (3)陆地生态系统碳通量及相关通量模型的尺度化聚合系统方法正在发展之中(Baldocchi et al.,1996; Raupach et al.,2002)。

#### 碳循环的脆弱性:非线性动态、阈值和机制转换

碳-气候-人类系统的动态可能包含着由非线性反馈及系统的主要组成部分与过程之间的相互作用导致的未知变化和阈值(Charney,1975; Claussen,1998; Falkowski,2000)。碳循环脆弱性研究主要包括:

- (1)洋流的稳定性(如洋流过程中热盐循环的可能减缓或停止)。
- (2)目前已达饱和的陆地生态系统碳汇在未来的碳截留能力( $\text{CO}_2$ 施肥,废弃后的森林再生)(Cramer et al.,2001)。
- (3)物候、土壤呼吸、冻融季节动态的变化、永冻层的消融、水位的变化、干旱、雪的丰歉、火和虫灾等导致碳循环控制过程发生变化,从而导致当前陆地碳库持久性的不确定性。
- (4)陆地和海洋系统间的反馈作用,如由于来自陆地沙尘的沉积而导致的海洋NPP的增加。
- (5)社会和政策对碳系统和碳管理的驱动力(这与由于气候变化及应对气候变化所制定的控制大气温室气体累积的政策所带来的危机的理解相关联)。

这些过程大多是由处于变化中的气候、人类系统和全球碳循环之间相互作用所导致的,伴随着加速或减缓大气 $\text{CO}_2$ 浓度增加的潜在可能,这些过程的大部分是变化的气候、人类系统和全球碳循环相互作用的结果。这些相互作用表明,为使大气 $\text{CO}_2$ 浓度相对稳定,显著减少矿物燃料的排放和增加碳截留是当务之急。

虽然这些相互作用可能发生,但受地球系统复杂组分的限制要定量表述他们是困难的,因为完全耦合的碳-大气-人类模型并不存在(参见下文《综合模型的发展》)。然而,耦合的碳-气候模型可以阐明可能存在的非线性响应类型。这些模型表明,在本世纪中期陆地生态系统碳汇强度将减弱,并在本世纪末期转变为碳源(Cox et al.,2000;图15)。耦合的生物物理和决策模型也得出相同结果(Roughgarden and Schneider,1999)。

#### 综合模型发展

由于我们缺乏对地球系统生物物理组分之间反馈和相互作用的理解,且需要对大尺度人类干扰(如,矿物燃料的燃烧和陆地植被覆盖变化)的重要性进行评估,因此应该通过地球系统的模拟来理解全球碳循环。同时,地球系统的变化和人类对相关问题的理解的反馈也很重要,因为它们可能导致我们管理和使用能源系统的

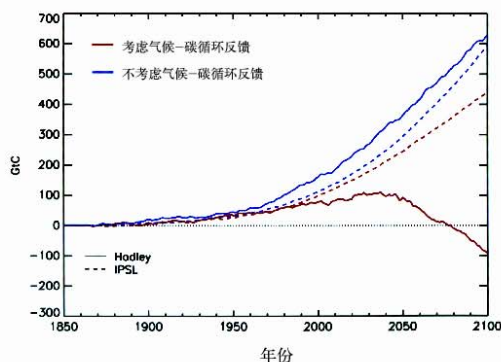


图15 基于两个耦合的气候-碳循环GCMs预测的全球陆地碳(植被和土壤)变化

正值代表陆地碳储量增加,连续线表示Hadley中心研究结果,虚线代表IPSL模型的结果,蓝线代表在没有气候变化情景下得到的结果,红线代表完全耦合模型模拟包括气候碳循环的反馈作用的结果(Cox et al.,2000)。

政策和态度的重大变化。

中尺度地球系统模型(EMICs)能轻松地完成跨越几千年的数据集成,但因为它们比完全基于过程的耦合模型包含着更多的相互作用,因而在对地球系统进行模拟时仍然具有一定的困难。目前,EMICs 主要关注地球系统(包括岩石圈、大气圈和生物圈)的生物物理组分以及诸如有关土地利用和CO<sub>2</sub>排放等形式的人为干扰。该领域目前的研究方向之一是如何在模型中更好地描述生命世界(生物圈)和人文因素(人类圈)。这里存在的另一个问题是为充分表现全球尺度的关键过程应该如何选择空间的分辨率。

大气圈、海洋和陆地及低温层的综合三维全球气候模型(GCMs, 同时完全耦合碳循环)现正处于不断的改进中。这些模型能提供大气和海洋传输过程最为真实的模拟,并能把陆地植被过程整合到模型的生物物理参数化过程中。因此,这就能对物理环境因子与生物因子间的相互作用进行模拟。基于上述原因,这些模型可能成为最具前景的预测工具。

所有大型复杂模型面临的一个重要问题就是模型的验证。与其他模型不同的是,预测模型的组分要与气候因素联系在一起。目前,综合模型的验证主要包括4个方面。(1)在模型校正数据的范围内以及超越这个范围的情况下分别测试模型的各个组分(陆地、海洋、大气、经济或社会)。(2)再现历史趋势的能力是验证的关键,或是冰期-间冰期的生物物理组分纪录的再现,或是完全耦合模型的工业时代纪录的再现。(3)通过更替模型的不同模块或子模型可以评估模型的模拟结果对于某一具体模块假设的依赖程度。(4)利用区域尺度生物物理的社会因子变化进行区域模型间的相互比较,从而在亚全球尺度对模型进行验证。

把社会经济因素整合进碳循环模型还包括综合评估模型,如评估温室气体影响的综合模型(IMAGE; Leemans and van den Born, 1994)以及基于对策论的、反映对《京都议定书》社会响应的政治系统模型以及工业/能源系统和工业转型的模型。

#### 不确定性及优先研究领域

对于影响全球碳循环的过程、控制因素及相互作用的理解仍然存在着许多问题,这主要包括:

(1)关键生物物理过程机理的理解仍然缺乏,因此在当前模型中亦没有得到充分表达。这些机制包括:

1)土地利用方式和对陆地碳通量具有控制作用的生态系统生理过程与干扰之间的相互影响以及它们在影响碳源/汇的现状与未来动态时的相对重要性。

2)碳在陆地生态系统各组分中的分配动态及其对环境因子的响应。

3)陆地和海洋系统中异养呼吸作用动态及其对气候变化(尤其是温度)的响应。

4)碳由陆地向海洋的横向传输。

5)在大气CO<sub>2</sub>浓度升高条件下,洋流、海冰、化学过程和生态系统动态是如何影响海洋对碳的吸收量和碳汇的格局。

6)海洋生态系统(浮游植物及更高营养级水平的捕食者)的结构和动态。

7)不同海洋区域中养分动态的驱动过程,这些过程随时间而变化,并且在不同的区域具有不同的驱动过程(例如,在北太平洋养分亏缺的海域,可发生与气候变化相联系的生态系统变化的氮和磷限制之间的转换)。

8)与碳在大气-表层水域-深层水域这一连续体中传输有关的生物过程、化学过程和物理过程间的相互作用。

(2)环境变化条件下全球碳循环过程中的一些碳库(如,冻土、湿地和热带森林)存在很大的脆弱性,其排放到大气中的碳亦对气候变化具有正反馈作用。

(3)在探索引起碳循环发生变化的与社会制度、政策有关的驱动因子方面,我们还只是刚刚起步。这些驱动因子包括国际、国家、区域和地方事务的决策过程。深入了解这些驱动因子至关重要,因为人类活动领域不仅存在碳循环研究中最大的不确定性,同时人类对碳循环进行干预的最大机会也存在于该领域。

(4)冰芯纪录显示,在过去50万 a里,大气CO<sub>2</sub>浓度一直保持在 $180 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$ 的范围内。但是,保持大气CO<sub>2</sub>浓度在这样一个范围内波动的机制仍有争议。

(5)更为重要的是,我们对于上述过程如何影响全球碳循环的动态变化以及该影响作用与气候、生物地球化学循环和人类活动等环境因子的关系仍然不明了,这就需要对碳循环涉及的各个过程间的相互作用与反馈以及由于这些相互作用和反馈赋予全球碳循环的新特性进行综合评估。

基于上述不足提出主题2的优先研究领域:碳循环动态变化的控制及反馈机制(包括人为因素与自然因素)是什么?

1. 控制古生态和工业革命前大气CO<sub>2</sub>浓度的机制是什么?
  - (1) 明确控制机制的特征；模拟冰期—间冰期碳—气候系统的时间动态。
2. 当前水体(包括海洋和淡水两个方面)碳汇的各种机制是什么？这些机制的相对贡献及其间的相互作用如何？
  - (1) 量化控制生物泵机制之间的相互作用。这些机制包括营养元素(铁、硅等)含量的增加引起的水体生态系统结构和功能的变化及其对水生生态系统碳汇功能的影响，气候变化和变率对其碳汇功能的影响。
  - (2) 量化控制溶解泵和碳酸盐化学机制之间的相互作用。这些机制包括淡水—海洋表层水域碳通量(冰雪融化、河流输入和降水)变化；碳在表层水域的横向运移和减少；海—气能量、水和CO<sub>2</sub>的交换以及气候变异的动态。
  - (3) 确定沉积碳库和淡水水体中的需氧、厌氧在分解途径间的相互作用。
3. 当前陆地碳汇的控制机制、其相对贡献与相互作用是什么？
  - (1) 确定当前陆地碳汇的机制及其相互作用，包括气候变化(如降水、温度、湿度、辐射和气候变异)；大气组成和输入的变化(如大气CO<sub>2</sub>浓度升高和氮沉降)；土地利用和管理(如历史的、当前的森林砍伐以及火的管理控制)的变化。
  - (2) 就自然和人类干扰(如火、草食动物的啃食、收获和暴风雨灾害等)对碳吸收、排放的影响进行评估。
4. 大气、海洋和陆地水体中水平碳通量的控制机制是什么？
  - (1) 定量研究全球碳循环变化与海洋、大气碳和能量传输之间的反馈作用。
  - (2) 定量研究陆地—近海—海洋碳交换的关键驱动过程及其间的相互作用。
5. 现存碳汇机制未来的可能动态是什么？陆地生态系统的碳汇将出现饱和抑或出现相反趋势？海洋碳泵在本世纪将如何演化？
  - (1) 使用多种数据和改进的诊断模型，基于假定的全球碳—气候系统变化情景，建立区域化的未来情景。
  - (2) 对区域预测结果进行综合和验证，进而对全球发展情景实现约束和反馈。
  - (3) 使用长期的海洋观测资料(现存的、未来的水文地理调查、时间序列台站和遥感监测纪录)验证和改善海洋碳预测模型；并用这些模型预测下世纪海洋碳泵的变化。
6. 人为引起的碳通量和储量的控制机制是什么？
  - (1) 阐明各种区域发展途径对碳通量和储量的驱动作用。
  - (2) 阐明生产/消费格局和土地利用变化对温室气体排放的驱动作用。
  - (3) 阐释生产中的能源利用强度和能源生产中碳密度的驱动力。
  - (4) 确定解释电力生产中使用混合燃料的因子。
  - (5) 明确公众和个人活动及二者间的相互作用是如何驱动毁林的速率和影响土地利用实践的。
  - (6) 阐明住宅冷热系统变化的控制因子。
  - (7) 量化并解释运输系统特征的变化。
  - (8) 理解变化的气候循环(例如，ENSO，太平洋年代际涛动和北大西洋涛动)对人为引起的CO<sub>2</sub>通量(如，矿物燃料、土地利用、火等)的影响。
7. 自然和人类过程间的反馈是如何加强或削弱人为、非人为引起的碳通量？
  - (1) 发展耦合碳—气候—人类系统的简单(低维的)模型，包括陆地过程中自然和人类的相互作用，海洋生物学、碳酸盐化学和洋流的相互作用以及人类引发的碳循环变化所导致的结果。
  - (2) 建立耦合碳、气候和人类系统的地球系统模型，包括社会经济成分、人类活动和社会制度。
  - (3) 借助模型研究引起气候—碳—人类系统不稳定的可能反馈机制及其阈值，确定产生突变的关键点。

### 主题3 碳管理

#### 研究目的

碳循环的未来动态是生物圈、地圈的自然动态和人类活动引起的净碳平衡综合作用的结果。受干扰的碳循环的过去、现在和未来动态在主题1和2中已进行了讨论。主题3将重点关注管理气候—人类系统的科学，以此作为人类稳定大气CO<sub>2</sub>及相关气候变化的干预点。

另外，产生未来有价值的预期结果或情景的能力对于制订区域、国家和国际层面的政策具有重要意义。直接影响这一能力的因子包括：(1) 人类活动是对全球碳循环干扰的原始驱动力之一，人类如何抉择引发未来发展的不确定性。(2) 人类导致的全球碳循环变化有可能改变全球气候系统，进而影响水和食物资源、环境的恢

复力、生物多样性、健康乃至国际政治稳定。因此，全球碳循环研究不单单是为缓解气候变化的负面影响，而且已经变成一个重要的政治问题，现在正成为关于发展、可持续性和公平原则的一个重要组成部分。构建这种情景成分(如，政策、减排措施的减排能力)和对未来情景有效分析的能力是UNFCCC为实现稳定大气CO<sub>2</sub>含量这一目标需要解决的科学和政策之间的关键接口(图16)。

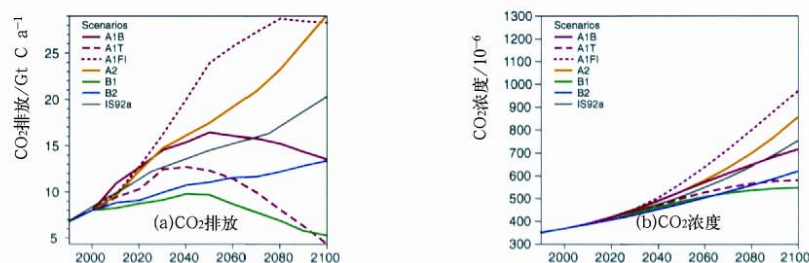


图16 来自于几个大气环流模式的21世纪未来CO<sub>2</sub>浓度情景  
(a)CO<sub>2</sub>排放和(b)CO<sub>2</sub>浓度(IPCC,2000a)

### 研究基础

减排结果的合理接近和能力归因于耦合碳循环模型的综合评估模型的分析、当前趋势的系列分析以及归纳推理。有关这个主题的研究基础包括一系列的“情景组成成分”和对技术发展及创新的评估(IPCC,2000a,b, IPCC,2001a,b,c; Field and Raupach,2003);

1. 尽管实施减排行动，大气CO<sub>2</sub>浓度亦将持续增加几十年，甚至随着重大减排措施的实施，CO<sub>2</sub>浓度的增加也将达到工业前的2倍时才趋于平缓。
2. 2002年世界原始能源的生产达到380 EJ (10<sup>18</sup> J, 2002年世界能源BP统计评论)。其中,81%来自矿物燃料。
3. 减排途径并非唯一的，每个国家都需要结合其社会经济、政治和环境状况选择适宜的减排途径。
4. 人类对不利气候变化所产生的威胁，大部分可能出现在下一个世纪。
5. 21世纪上半叶能源利用效率的不断提高、造林、低碳能源和天然气的利用将是重要的减排途径。为达到大气CO<sub>2</sub>浓度的稳定，还需要创新性的非矿物能源。
6. 据预测，到2050年森林能保持和吸收60~87 PgC，而农田将吸收 44 PgC，与届时矿物燃料释放量的10%~20%相当。
7. 人类对不利气候变化带来的危机将做出反应。1997年《京都议定书》的制定是一个开始(尽管首次委员会期间《京都议定书》对减缓温室气体浓度增加的作用微乎其微)。人类对气候变化威胁的响应在下一个世纪将得到加强,尽管其速度不确定、制度及其可塑性水平亦不确定。

### 研究现状

#### 减排的多种选择

全球气候问题不可能笼统地通过某一种减排技术或方法得以解决。相反，国家和地区需要根据它们各自的社会文化和环境条件以确定多种减排措施的最佳组合。目前，围绕可利用的减排措施及其减排能力展开了大量研究(Gupta et al.,2001)，其中尤为关注的减排措施有5种(IPCC,2000b; IPCC,2001c; Field and Raupach,2003)。

(1)节约和增效。技术的发展、政策和人类行为方面的变化能减少社会对能量的需求，同时还可以提高经济效益，或是降低生产成本。这方面的例子包括：高效节能设备、交通设施(如，用电力恢复损失机械能的混合的交通工具)，良好的城市规划(如，良好的公共交通)，聚集能量(来自电站的低级热能的恢复和利用)，饮食结构的变化—要求低能食物摄入(如，向蔬菜食品的转换)。这些减排措施的减排潜力是很大的，能达到该部门原来碳排放的10%到百分之几百的效果。

(2)非矿物燃料能源。这些主要包括水力发电、风能、太阳能、地热能、潮汐能和生物燃料(这些作为生物燃料的作物在它的生长过程中吸收的碳至少等于它们燃烧时释放的碳)。到2100年，用于生物质能源作物的土地

(3) 基于陆地的减排措施(包括减少干扰和增加生物截留)。由于额外的环境和发展方面获益的潜在可能,如增加土壤肥力和林业活动,该类型的减排措施吸引着大量的研究者(Yamagata and Alexandrov, 2001)。到2010年,通过造林、再造林和土地恢复(为《京都议定书》承诺的基于土地的减排措施)形成的碳截留可达 $1 \text{ PgC a}^{-1}$ ,林业管理的改革也能形成 $0.175 \text{ PgC a}^{-1}$ 的截留量。减少毁林也具有较大的减排潜力,因为毁林导致的碳排放占人为碳排放总量的20%~25%。然而,虽然停止毁林是一个值得称赞的目标,但是这对于大多数地区来说,其实施存在着许多困难或根本不可行。阐明毁林的现实社会经济动机和根本驱动力(如市场、政策)才能以此作为减排的干预点,这方面的研究正在进行中。此外,农业部门的减排行为为温室气体的排放减少20%左右,从全球尺度而言,这相当于 $40 \sim 90 \text{ PgC}$ 。

(5) 陆地和海洋对  $\text{CO}_2$  的工程处置。在深海注入纯液体  $\text{CO}_2$  的研究是一个新生事物, 但当我们致力于构建综合的减排清单时它尤其值得关注。然而对深海注入的生物化学结果和物理特性的理解仍显不足。相反, 在沉积物和岩石中的地质碳库的研究取得了较大进展, 这表明在废弃油气田和盐水层中对  $\text{CO}_2$  处置具有较大的潜力可挖。这是一个防止  $\text{CO}_2$  往外逸的相对清洁解决办法。宿主岩石的分解、矿石资源的灭菌或无法预料的对地下水的影响仍值得深入研究。

一个策略可能达到的最大减排是其技术潜力。对碳量的生物物理估计仅包括可能的吸收和温室气体的免排,没有关注其他的人为和环境的限制因素。然而,有效的实际减排潜力要比技术所提供的小(通常非常小),这是因为由于存在大量的经济、环境和社会多种因素的驱动和约束,在一定程度上降低了技术的利率率和社会的可接受性(图17)。例如,对碳吸收和能源作物种植(如,通过植树以增加生物碳汇)在全球实施的大量限制因素分析表明,只有2000~5000 MtC a<sup>-1</sup>技术潜力的10%~20%在实际中能够达到(Cannell, 2003)。一个高度集成的新的研究领域正在兴起,以评估可能达到开发实施的大量减排选择、对气候减排的直接效益和可持续发展等。采用恰当的适应气候变化策略也是非常关键的,政策制定者和社会活动者需要权衡减排和适应的正反两个方面,其中包括寻求两种政策共赢的情景。

经济因素：经济市场在支配利用资源和政府的利用强度方面扮演了重要角色，同时它可激发启动低碳能源清单的动机。经济因素包括：

对其他资源的环境需求：提供生活必需品，诸如食物、纤维和水资源的需求，能减弱预计的技术潜力。

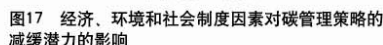


图17 经济、环境和社会制度因素对碳管理策略的减缓潜力的影响

技术能力(上部的水平线, 独立成本)受经济因素(市场、贸易、经济结构、城市化、工业化)、环境因素(对土地的需要、水和其他资源, 废水处理、财产所有权)以及制度和社会因子(等级制度、政治和政策、非正式规则、生活方式、态度、行为)的综合影响。这取决于碳的费用, 即碳减排对于其他目的的量度。政策引起的碳吸收部分是可持续获取的潜力与技术潜力的比率。该图也显示了基本的减排潜力, 反映了碳管理策略在“正常商业”情景下的程度(Raupach et al., 2003)。

环境限制：减排活动可招致环境代价，如废弃物处置和生态影响。

社会因素：国家之间、乡村之间社会因素的差异严重影响减排效果。在个人水平上，阶级结构和生活方式常常与增加消费和作为文化象征的相关碳日用品(如驾车和旅行等)的使用相联系。生活方式也与技术的掌握及应用的多寡相关。在社会水平上，价值观和态度通过教育和社会形象(如当前消费、超前消费和过于保守的消费)决定了对碳管理政策支持的程度。

制度因素：制度决定着管理选择的动机，如在税收、信用、津贴、部门分配、所有制和其他的成分等诸方面。它们也影响在气候或信息政策方面的动机。例如，气候政策包括制度的实行水平、腐败程度和既得利益的范围与特点等。当阐明最后这点时，在公共和私人部门内引起了显著的限制作用，以致影响了技术的开发速度和对系统的选择机会。现有能源技术的所有者可使用他们的经济和技术方面的巨大影响力阻碍可选择系统的开发和应用。同样地，为了达到保护国家利益的目的，政府部门可以使用他们手中拥有的权利去控制在减排技术方面的投资流动或在他们国家的技术应用。

技术转让的制度和时间方面：像淬火系统之类的技术转让体系的一些特点不允许所有的国家和地区去使用最快最适合的技术。这些技术转让的时间是一个有待解决的问题，很多技术专利需要50~70 a的时间才能完全解除限制。

人口统计学：人口的密度、移民类型和分布是另一类限制因素，尤其在严重存在种族隔离的国家。

消费：消费的增长和形式，人口统计学和经济学中不受约束的变化等限制了选择使用技术的机遇。

研究需要超越这些因素的限制，因为社会采取的实际技术有助于改变制度和驱除经济的限制作用。与此同时，对它们的限制或缺乏决定着研究和开发的优先实施问题，因而也决定着技术潜力的知识基础是否与时俱进。这两个关键的反馈作用需要在未来的减排和适应的发展途径中得以考虑以及以上一系列的限制因子也应得到关注。这是因为我们在当前的限制条件下要为未来做出选择，而过去的选择影响着未来选择的种种可能性。因此，所有可能发生的事情对我们来说是不可利用的，未来的途径将会进一步受到限制，不容乐观。

#### 全球碳排放前景

假设未来的发展态势可以进行预测，则今天的政策制定者可以对未来碳排放的情景进行分析。这些分析考虑到与现实趋势的不同及不同社会模型可供选择的规律，同时也将气候减排及其治理的程度考虑进去。这些分析虽然不是预测未来的惟一方式，但它们却探讨了采取相应特殊行动和完善政策与否的长期后果。最近，Nakicenovic et al.(1999)和IPCC关于排放情景的专门报告(IPCC, 2000a)对此进行了分析。

一个重要的研究领域是探讨减排途径与费用的无碳减排水平(或“正常商业”的其他本底情景)与需要稳定一定浓度水平(正如UNFCCC所强调的那样)的差异。即使在“正常商业”情景IS92a——假使到2100年由发电产生的碳排放为75%以及比1990年全球石油和天然气生产提供更多能源的商业生物量——亦不能达到在本世纪稳定CO<sub>2</sub>浓度的目标(Edmonds et al., 2003)。因此，本世纪末达到稳定大气CO<sub>2</sub>浓度的任何排放情景都将需要在技术和政策方面有新的巨大进展。对基于社会经济与碳耦合模型得到的一些情景进行分析有助于进一步探讨需要改变的程度和代价及制定最佳时间表。

情景是实施大量技术变化的制度(在社会组织的各级水平的制度)需求的工具。因此，情景将有助于确定在设计、协调和执行旨在稳定大气CO<sub>2</sub>浓度的高效气候模式中的前景。

#### 不确定性及优先研究领域

在利用多种可选择的途径试图发展能源系统之前，需要认真研究环境、经济和社会的后果。效率、公平和可持续性之间的权衡补偿导致了从一个选择到另一个选择的转变。完善发展综合技术、经济、制度、环境和社会因素的情景是澄清补偿机制的需要，需进一步展开详细的分析研究。

在大多数地方，运输系统依赖于矿物燃料的燃烧。这直接关系到人类的交通需求和碳循环之间的联系。运输排放的CO<sub>2</sub>量占整个人类排放总量的25%~30%。此外，还有交通工具的制造、道路建设和水泥生产等方面亦排放了大量的CO<sub>2</sub>。有关交通系统设计的问题来自于3个方面：技术、区域尺度和复杂性以及制度。这些问题需从各成分间相互影响的复杂动态关系来考虑。

因此，对未来情景或发展变化规律的研究包括诸如那些早期列出的发展和验证“情景组成成分”以及研究他们之间的相互作用及其反馈(包括特性和不一致性)。为政策制定者提供较好的决策支持工具的可靠评估

是解决这些问题的关键所在。

然而，在给定的大量生物物理和社会经济限制条件下，尽管这些限制因素难以预测，但实施稳定CO<sub>2</sub>的途径以达到最终控制目标浓度是非常重要的，而这并不是命令和控制过程的结果(Vellinga and Herb,1999)。因此，发展适应系统以明确并加以利用出现的干预点和机遇，并根据这个系统的现实属性，采取最终稳定CO<sub>2</sub>水平的途径，以达到稳定其浓度的目标。

基于这些不确定性，提出主题3的优先研究领域是：未来碳—气候—人类系统将如何变化？人类对这一系统进行管理的干预点和机遇何在？

1.人类何时才能对碳循环变化做出响应？如何响应？

(1)设计减排选择的清单，这些选择在不同地理、环境、社会和经济条件下必须都是切实可行的。

(2)探索减排无意识选择结果的潜力，评估持续可行的曾被认为是负面影响的潜力。

(3)确定减排选择引起的其他间接利益及其与适应对策之间的相互作用(如双赢的减排选择)。

(4)研究分析各种政策选择的相对优势(如排放贸易，碳吸收)。

2.碳循环的自然动态怎样？人类活动反馈如何影响未来大气CO<sub>2</sub>浓度？

(1)在给定的自然碳循环进入未来动态情景下，确定稳定CO<sub>2</sub>浓度途径的潜力范围。

(2)评估采取减排清单后对碳和气候变化的影响及人类行为变化的反馈作用。

(3)探讨基于未来陆地温室气体净排放的非技术因素的影响。

(4)探讨与减排协议相关的区域和城市发展的可供选择途径。

3.什么行政因素需被克服以鼓励基于经济考虑的矿物燃料的其他选择？

(1)研究慢速和快速利用能源制度的影响及其对能源利用强度的影响。

(2)确定工业和非工业国家、社会、自然、经济和技术条件之间能源利用的差异，这些因素解释了能源强度的差异。

(3)确定和量化指导私有能源部门朝着开发低能技术和市场迈进的技术、经济和社会的驱动力。

(4)在能源和材料使用上确定消费者的需求和表现。

(5)探索如何从对碳循环影响中部分或完全地分离出行政因素的影响？

4.世界上不同国家和地区的机遇和干预点如何？

(1)确定生物(陆地和海洋两个方面)减排选择的时空机遇。

(2)确定基于减排选择的能源系统的时空机遇。

(3)阐明人类选择在未来开发有效选择中的影响。

5.制度在决定自然和人类对碳—气候系统变化响应的作用如何？

(1)确定制度、社会心理和技术管理对显著减轻有害环境影响起作用的交易、投资和生活方式的可能影响。

(2)探讨有效稳定温室气体浓度的制度、监测机制和可塑性机制，它们演变的可预测性？

(3)研究UNFCCC和《京都议定书》所提出的措施的影响和效果。

(4)探讨设计、协调和实行一个更有效的气候制度的前景。

6.在中长期气候变化影响情景下，气候—碳系统的变化对不同社会、区域有什么样的影响？未来的情况又怎样？

(1)研究敏感的社会经济部门和地方将如何应对这种变化？

## 三、实施战略

实施战略围绕3个科学主题来组织：(1)格局与变率；(2)过程和相互作用；(3)碳管理。每个主题分为3项行动计划。这些行动计划是GCP执行期间的主要研究领域。在每项行动计划内，有一系列研究任务。这些研究任务有的是相对独立的研究单元，有的是逐渐实现总目标的组成部分(图18)。同时，它们的目的是进行全球碳循环或它的组成部分的阶段性综合、发展交流的具体产品以及提出GCP项目相关研究者所能达到的范围。

这一部分描述了GCP项目10 a宏伟研究规划的一套初步行动计划。GCP网站([www.globalcarbonproject.org](http://www.globalcarbonproject.org))将定期提供该实施战略的最新进展和一些行动计划执行情况的相关信息。

3个主题的行动计划将同时展开。这就要求多个部门之间加强多学科的合作以成功推动全球碳-气候-人类系统的集成。尽管一些研究团队在特定行动计划中处于领导地位，但每个行动计划最终目标的实现需要实施战略的其他研究团队的坚实支撑。

该研究早就在一些GCP的倡议计划，如IGBP, IHDP, WCRP的支持下联合进行，它们绝大多数是具有学术意义的碳循环研究。同样，碳循环方面的亚全球研究工作也通过许多国家和区域的碳研究计划得以开展。GCP将通过促进协作以达到更高层次的集成，并提高这些研究的价值，从而使GCP有能力提出更广阔的全局碳循环研究前景。

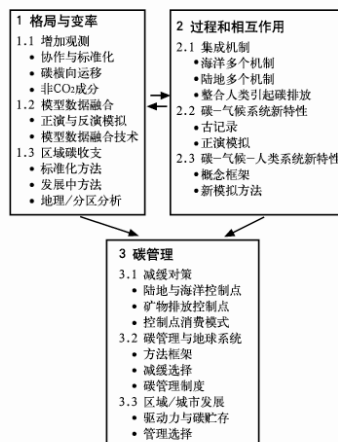


图18 全球碳项目实施战略

### 主题1 格局与变率

#### 行动计划1.1 加强主要碳储量和通量的观测

许多区域和国家的碳循环研究项目具有通过建立共同的协议、共享数据、提供为新的应用服务信息的快速传递和技术以及合作项目中共享资源以达到相互补充和增强的潜力。然而，目前这些研究项目的合作大部分依赖于研究者个人的合作。许多国家正在寻求增强研究的国际合作，但是国家和区域已有研究项目的信息很难获取。并且，没有旨在弥补各方面相互融合、本该可以推荐的全球性战略。在这种情形下，GCP将在国家和区域观测和实验项目的参与下做出以下贡献：

- (1)提供合作研究的机会以增强实验观测的价值；
- (2)促进技术和方法的标准化以提高结果的可比较性；
- (3)鼓励项目内的结果和方法的快速交流；
- (4)除大气CO<sub>2</sub>外还包括对非CO<sub>2</sub>的碳输送途径；
- (5)通过模型数据融合，提供跨海洋、陆地、大气和人类等方面的碳循环集成研究方法；
- (6)为提高国家和区域的碳项目网络设计和协作水平提供建议。

为了达到这些目标，GCP需要研究区域或单个组分碳循环的多种研究团体参与，这些研究团体可以有不同程度的正式协议。

这个行动计划的一个重要方面在于推动技术和测量方法的标准化，使结果间的相互比较和量化评估成为可能。譬如，许多观测和实验计划基本的标准亦不存在或采用SI单位，尤其是大量的实验数据和方法不能得到高水平的融合。

#### 任务1.1.1 碳储量和通量观测方法的统一和标准化

海洋：GCP和SCOR-IOC顾问委员会在海洋CO<sub>2</sub>的协作已经建立起来，即国际海洋碳协作项目(IOC-CP)。这个项目将鼓励全球尺度海洋碳监测工作的协作，包括CLIVAR计划中WOCE部分的新启动项目以及作为海洋-低层大气研究(SOLAS)一部分的表面CO<sub>2</sub>分压及其时间序列的观测。相似的协作也在大气-

海洋CO<sub>2</sub>通量和海洋CO<sub>2</sub>沉积测量方面进行。IOCCP已经在校准并建立已有的Web信息以发展用于协作工作的模式,包括推动协作的周期性工作组(<http://www.ioccp.org>; 图19)。这将需要提出新的国家和国际项目以及其他项目以更好地合作和利用有限资源。

陆地: GCP将推进陆地观测、校准和大量网络数据处理及各国已有全球数据库的标准化, 如森林清样调查资料、通量塔(Fluxnet)、土地利用变化(FAO、UNFCCC)、生物燃烧(火工作组)以及控制实验。GCP注意到大量工作组已经开始这方面工作(如, GTOS), 并将与他们一起继续推进这一工作。GCP也将尽可能地为陆地观测与大气观测和海洋观测网的协作提供联系。

大气: 几个全球计划正在推进大气观测的标准化, GCP将与它们一起提出质量评估/质量控制可比性方案。这包括GLOBALVIEW计划(该计划在14个国家的100多个站点进行了统一的观测)和大气成分观测的GLOBALHUBS方案, 该方案通过世界气象组织(WMO)和国际原子能机构(IAEA)共同召集的观测专家会议来推进观测方法与标定的标准化。GCP也将与其他相关研究组协作开展如下观测: O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>测量、大气潜氧(APO)、稳定同位素(GCTE-BASIN)、水分和热量等等。最终, GCP将从空间及其与数据同化方法的联系和验证方案方面推进大气CO<sub>2</sub>测量的发展。

人类: 有一些与人类活动密切相关的碳储量和碳通量需要标准化并使之可用于一些主要用户, 如碳收支和大气反演计算。这些观测包括矿物燃料CO<sub>2</sub>释放以及树木砍伐、废渣填埋、农业活动等土地利用引起的CO<sub>2</sub>排放观测的适宜时空布局。GCP将在特定地区与多个研究团队密切协作以确保国家和区域工作的协调以及在某些关键应用中的沟通。

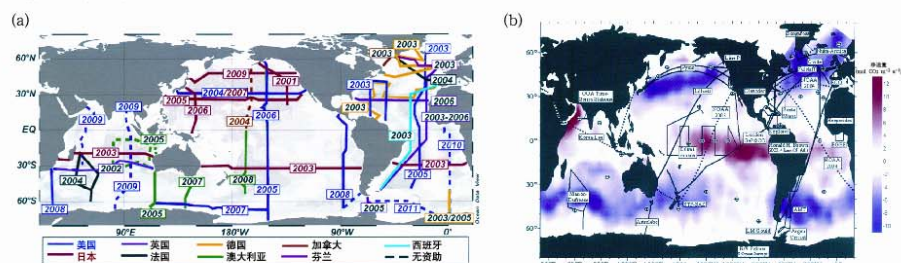


图19 IOCCP(任务1.1.1)的首批结果

(a)与碳系统观测相联系的水文地理剖面全球分布图(实线表示已经资助的观测, 虚线为计划中的观测); (b)已有和已计划中的近表层CO<sub>2</sub>分压观测的全球分布图(实线表示已经存在的观测, 虚线表示计划中的观测, 标志表示船名或计划名称, ⊕表明已计划和已存在的时间系列站对表层CO<sub>2</sub>观测的初步估计)。背景图显示取自Takahashi et al., 2002; Sabine and Hood, 2003。

#### 任务1.1.2 碳横向运动的观测

河流运输。GCP将优先在2个领域开展工作:

(1)淡水水体的碳汇。不久以前, 人们还认为河流中的碳在运输过程中和海岸区域大部分被氧化了。然而, 现在有确凿的证据表明其中的一些碳在大型水坝中沉积了下来, 形成了临时碳汇。GCP将促进这方面的研究开展, 以提高在区域和全球尺度上对陆地和水坝间碳转换的精确估计以及这些水体碳汇能力的评估。

(2)海岸带是碳源还是碳汇。海岸带是碳源还是碳汇仍然有很大的不确定性。GCP将通过对已有和最新数据的收集与分析, 推进海岸带碳动态的研究, 主要包括: 1)量化不同类型大陆边缘的水平碳通量; 2)评估大陆架碳沉积的重要性; 3)综合与评估大陆边缘及途经大陆边缘的碳通量。

风输送。碳的风输送是全球碳收支的一个小分量。然而, 沙尘暴可以跨区域输送大量的碳以及许多其他重要的养分, 如铁和硫。在碳沉积的区域, 风将影响碳的源和汇。GCP将在侵蚀研究网络的参与下量化易发沙尘暴区的碳移动以及淡水水体及海岸带由于养分输入引起的碳源/汇变化。一些案例研究将获支持。

贸易。许多矿物燃料被开采, 许多生态系统被利用, 在一些情况下, 矿物燃料开采和生态系统利用的强度非常大。以矿物燃料、木材或食物形式的碳通过国内或国际贸易被横向输送。在一些地方, CO<sub>2</sub>被释放到大气中(如矿物燃料燃烧或食物)或被积累起来(如家具), 而不是在这些地方被固定的。尽管由于贸易造成的碳源和汇

并没有全球影响,但在区域水平它们影响着碳的源和汇格局和变率。GCP将运用农业和森林统计学方法整理并综合这些数据,以期能够以地理参考数据的形式图示因贸易而导致的碳通量。

#### 任务1.1.3 其他相关碳化合物的观测

GCP将在以下2个领域优先开展工作:

(1)非CO<sub>2</sub>气体也贡献于全球增暖。它们较短的大气留存时间和增温潜力使它们成为短期增暖和减缓变暖趋势的研究对象。为了限制这些温室气体特别是甲烷的区域和全球收支, GCP将综合可获取的数据并用于增强观测系统。

(2)黑碳是生物燃烧的主要产品,因其难以分解而成为长期碳汇。GCP将综合这些数据并鼓励新的研究以加深全球大量易发火区域,包括热带稀树草原、温带森林和北方林,黑碳的数量和质量的全球性评估将会被提出。

#### 行动计划1.1的成果

(1)主要国家、区域和全球的碳计划及项目的信息网站(<http://www.globalcarbonproject.org/carbonportal.htm>)。

(2)提供海洋观测、相关研究组活动及合作研究最新信息的基于网页的信息工具。这个网址将向GCP-CO<sub>2</sub>专家委员会的IOCCP提供基本信息(<http://www.ioccp.org>)。

(3)在IGOS-P的IGCO参与下的优化观测资源,确定合作观测计划潜在科学价值的定期建议。

(4)与观测计划和区域/盆地计划一起建立的较好的观测方法和观测一致性要求的指导规则。

(5)标准化用于全球碳收支估算和模型验证的数据库,包括海洋、陆地、大气和与人类活动有关的碳观测以及推进GLOBALHUBS计划开展全球CO<sub>2</sub>浓度和同位素的相互校验。

(6)编辑和更新现有数据库,包括溶解无机质和河流系统中的有机碳传输以及水库和大陆架碳沉积的最新估算。

(7)对贸易引起的碳输送强度和时间趋势的最新评估与方法以及农业和林业产品统计资料一致化的新的估算和方法。

(8)现有影响源汇(如CH<sub>4</sub>, 黑碳)的人类活动因素数据库的编辑和综合。

(9)对于大量的新的资料的验证产品,如基于MODIS/Aqua的光合作用和表面温度以及空间观测的CO<sub>2</sub>浓度的大量验证产品。

#### 与其他项目和行动计划的联系

这项行动计划需要与区域和国家计划相协作,与国际上已经开始运行碳循环研究计划协作。在碳研究方面,GCP需要与IMBER、SOLAS和CLIVAR协作开展研究。在IOCCP行动计划中,IOC/SCOR CO<sub>2</sub>专家组通过IOCCP活动参加GCP有关海洋方面的研究。对于碳的横向输送,GCP将与海岸带陆海相互作用(LOICZ)、JGOFS-LOICZ联合大陆边缘任务组(CMTT)和IMBER一起合作。就陆地而言,GCP将与GCTE(如BASIN、侵蚀网络)、土地利用与土地覆盖变化(LUCC)、新的IGBP/IHDP陆地计划、通量网、工业转型(IT)及其他计划一起工作。来自于空间的CO<sub>2</sub>研究将与全球能量和水循环实验(GEWEX)一起工作。考虑到协作、标准化和新的操作观测要求,GCP与IGCO的重要联系正在建立,与陆地碳观测对策(GTOS)和GOOS计划的特殊关系亦正在建立。GCP与全球变化的分析、研究与培训系统(START)的共同倡议关系正在建立。南中国海区域碳计划与START东南亚区域委员会的共同倡议关系正在进行之中。与所有国家和区域碳循环研究计划的联系将被建立(如澳大利亚、欧洲碳计划,北美碳计划(NACP),中国、日本、亚马孙大尺度生物圈大气实验(LAB))。

#### 行动计划1.2 模型发展与模型数据融合

模型数据融合正作为综合数据和过程信息的基本工具而出现,以用于预测碳循环的时空格局和变率。模型数据融合技术也为过程研究的综合分析提供了一个有力的工具,特别是那些过程和参数数目巨大的同步研究,也就是我们所理解的多元限制应用。这项行动计划的核心是方法的建立和应用。这些方法可以将大气、海洋和陆地数据融入生物物理和生物地球化学模型中。从大气、海洋和陆地数据和模型的同步应用到关于决定碳

循环格局和变率的问题都特别需要关注多元限制的应用。

#### 任务1.2.1 正演和反演模型的发展

这项任务将产生新一代改进模型。通过模型比较和模型数据比较以及包含人类活动干扰如土地撂荒及其演替、火灾胁迫和施肥等产生新一代改进模型。模型将具有利用合适的观测和实验数据来标定自身的诊断能力。

本项任务基于一系列由IGBP的分析、解释和模型(IGBP-GAIM)任务组启动的研究项目。它们包括：

大气示踪(trace)传输模型比较(TransCom)。TransCom的目的是量化并且诊断全球碳循环反演运算的不确定性。这种不确定性源于模拟大气传输的误差、大气CO<sub>2</sub>数据的选择以及反演方法的选择。TransCom3实验对估计的源/汇分布及其对不同传输模型的敏感性进行了严格的评估。TransCom3的近期活动将包括CO<sub>2</sub>观测被垂直综合时的输送比较，大气数据直接引入陆面过程模型以及更为先进的表面观测方法的应用，如连续和多物种数据。其他的工作将包括具体化非CO<sub>2</sub>测量限制和任务1.2.2中描述的数据同化模型方法的发展。

海洋碳循环模型比较计划(OCMIP)。OCMIP计划的目的是改善全球海洋CO<sub>2</sub>通量的评估，理解现有的三维全球海洋碳循环模型的不同之处。OCMIP计划将基于自然和人为CO<sub>2</sub>模拟的标准协议继续开展最多12个研究组参与的模型比较。OCMIP-2研究组的一部分将进行新的模拟研究，包括：1)北部海洋碳交换研究(NOCES)；2)基于反演模拟得到的自然和人为CO<sub>2</sub>的大气-海洋交换的限制；3)发展海洋模型输出的自动模拟海洋诊断工具(AutoMOD)。

生态系统模型数据比较(EMDI)。EMDI为全球陆地碳循环模型提供了一个与观测的NPP相比较的机会。这个计划表现出来的主要问题是，在假定自养呼吸通量的限制和完善的定量生物物理驱动条件下，以观测的NPP数据测试模拟控制和对水分、碳及其他养分收支的模拟结果。EMDI将利用新的数据集，加全球凋落物数据库、其他的年际NPP观测数据、涡动相关通量比较、栅格数据的年均分析和年际分析以及MODIS的NPP产品组织新的模型-数据比较。

#### 任务1.2.2 模型数据融合技术的发展

模型数据融合可定义为观测资料引入模拟框架以提供：1)改善模型参数或状态变量的估计；2)参数和模型输出的不确定性；3)否定一个模型的能力。该模拟框架中包含了大量方法，包括反演方法(大气的、海洋的、生物地球化学的反演方法)、数据同化、参数估计和多种限制方法。这些方法具有将过程研究、观测和模型联系在一起成为碳循环全球集成的潜力。

##### 该任务主要的重点

- (1)使用合适的参数化过程模型(许多完全的过程模型参数过多)；
- (2)发展尺度推绎方法以在模型数据融合过程中整合小尺度过程信息；
- (3)从复杂数据集中估计参数的方法发展；
- (4)在非线形反演中不确定性分析的发展；
- (5)基于众多综合碳循环相关观测信息的模型一致性交叉验证；
- (6)使用新的卫星遥感CO<sub>2</sub>浓度数据产品的方法发展；
- (7)建立与天气预报在线数据同化的关系，以在这些同化中包含碳循环数据；
- (8)基于观测网络和适宜敏感性分析过程研究的效率改进并发展网络设计方法。

#### 行动计划1.2的成果

- (1)应用新的数学方法和数据流新数据的模型融合方案；
- (2)在正式模型数据融合框架内的当前和计划中的观测体系和分析方法的评估；
- (3)在模型数据融合技术和观测系统方面培训过的许多不同学科的新一代科学工作者。这项工作将由世界上不同机构支持的研究课题资助，每个研究机构将有2~4周时间讨论和事实研究训练，并且将提供全球碳循环的3个分室：大气、海洋和陆地之一的数据同化工具和方法。最终的目的是在地球系统尺度进行数据同化；
- (4)一个基于网页界面的，可用于研究和培训的集成四维数据库；
- (5)训练材料和用于模型数据融合分析的模拟；
- (6)包含数据同化方法、数据有效性和不确定性分析的初步评述以及为地球生物化学研究网络设计的出版物。

### 与其他项目和行动计划的联系

与大量可操作观测计划的重要伙伴关系将通过与IGOS-P 的IGCO的协作以及与GTOS(和其TOC对策)和GOOS计划的具体联盟关系建立。因为多种数据集参与了数据同化,参与者与许多研究组的伙伴关系将被建立。这些研究组包括:GAIM、GCTE、新的IGBP/IHDP陆地计划、LUCC、SOLAS、LOICZ、JGOFS、IMBER和CLIVAR。作为大气模型的数据融合专家,GCP将与数值工作组(WGNE)的JSC/CAS建立重要联系。与GEWEX的重要伙伴关系将有助于促进对垂直空间和表面计划的全球CO<sub>2</sub>观测的理解与发展,如全球陆地/大气系统研究(GLASS)和它的子项目陆面参数化方案(PILPS)以及GEWEX模拟与预测专家委员会(GMPP)。关于全球模拟将通过与GAIM的合作进行。GCP亦将与大量发展模型-数据融合方案的区域碳计划,如欧洲碳计划与NACP建立伙伴关系。全球模拟工作将在与GAIM的密切合作下进行。合作者仍然要从含模型数据融合的区域碳项目参与者中选取,如“欧洲碳计划”(CarboEurope)和NACP。

### 行动计划1.3 综合的国家、区域和局地碳收支

GCP将促进现有的国家、区域和流域尺度碳收支估算方法的统一,确保其在具有不同社会、经济和环境状况及历史的区域间的可比性。本行动计划将从现有的国家、区域和局地方法出发,提供特定区域碳收支的完整分析。所用方法将依据行动计划1.1(增强观测)和行动计划1.2(模型数据融合)进行修改,使之成熟。本行动计划也将基于驱动碳变化的人类因素及其在关键区域的空间分布记录以及提供碳管理的潜在控制点与行动计划3.3(区域发展)相联系。

行动计划1.3将:(1)比较区域碳收支以获取在全球格局和变率方面的理解;(2)运用区域碳平衡评估以限定全球评估;(3)推进大量空间尺度的可靠碳收支系统的协调发展。

最后一项研究将重点关注与UNFCCC(温室气体清单)和《京都议定书》要求的碳量评估和验证要求相关的多元限制方法(行动计划1.2),以作为新IPCC实践指导报告应用于温室气体清单的制定。本行动计划的最终目的是将前2项行动计划结合在一起,在合适的空间分辨率上给出人类活动引起的碳平衡全球情景。

#### 任务1.3.1 区域和流域尺度综合碳收支评估标准化方法的发展

在过去的10年中,在全球的不同地点,国家、区域或者局地以及部门的碳收支已因不同原因而被建立。对这些结果的比较是十分有限的,因为这些碳收支方案中考虑到的因素和消费构成都不一样。一些陆地碳收支估算考虑了土地利用变化和矿物燃料释放,而一些只考虑了自然生态系统,忽略了直接的人类活动;一些基于基础数据(如,森林清查资料),而另一些依赖于过程尺度的模型模拟。

本项任务目的在于统一不同的分析方法,建立一套通用方法以用于不同尺度的碳储量、碳储量变化和碳通量的综合评估,使之可用于地区间的比较。碳储量和碳通量观测数据的综合方法也将统一起来。许多区域和国家的碳收支,如国家呈交给UNFCCC的报告,源于国家层次的统计数据,而没有确切的地理参考数据。然而土地利用和土地覆盖、气候、生态系统结构、站点的历史和干扰方面的地理参考数据是必需的,它们对直接观测数据运用到新模型以及满足国际社会的核查需要起着重要的作用。

#### 任务1.3.2 示踪和预测区域及流域尺度碳收支随时间变化方法的发展

本项任务的目的在于量化影响碳循环的自然和人类因素的时空格局,并将在碳收支的方法方面拓展与完善任务1.3.1:

(1)增加区域碳收支的时间变化观测;

(2)检测不同形式的人类活动(如,能源、农业、林业、渔业、交通、工业、家政、废水处理)和自然生态系统对区域碳平衡随时间变化的贡献;

(3)量化影响碳循环的人类和自然因素,定量研究全球主要地区人为干扰的空间分布。

社会、经济和环境条件随时间变化的资料将被用于建立历史演变途径。不同的时间尺度(区域碳收支的季节变化、年际变化、年代际变化以及长期变化)将被用于确定不同因素的重要性。对需要降低不确定性的区域、部门和特殊数据的鉴别将与行动计划1.1(增强观测)相联系。

这些数据驱动的区域尺度分析的结果将被用于检验过程尺度模型和行动计划1.2(模型数据融合)发展起来的新的模型数据融合方法,并为大气反演方法提供更多的输入信息。

### 任务1.3.3 人类活动引起的碳循环变化的地理和分区分析

本行动计划将积极促成一个国际间的初始研究，以比较和分析区域碳收支的变化，全球碳循环的人为因素及其对全球碳循环的贡献。这项研究将从全球关键地区的确定开始，即利用现有的综合评估模型以确定该地区当前的社会、经济和环境条件对近年或将来变化的敏感性。我们鼓励利用多元方法分析这些脆弱区域的碳循环，综合区域评估以实现不同区域间的比较，阐明控制区域碳收支变化的关键人为和自然因素。最初，这些分析将基于现有的区域和部门的碳收支，以后将与行动计划1.2发展起来的模型数据融合和多元限制过程结合起来。

### 行动计划1.3的成果

- (1)国家、区域和全球水平所有部门的碳收支；
- (2)国家和区域的碳收支以及在全球碳收支中使用由下向上的限制条件的评估；
- (3)关于现有的陆地和海洋碳平衡的国家和区域方法的综述，并为提高这些分析和方法提供建议；
- (4)与不确定性分析和校验技术相联系的改进的碳评估系统；
- (5)作为行动计划3.3中应用的案例研究描述的区域碳平衡及其随时间的变化；
- (6)来自于多个项目和国家计划的数据和结果的完全应用、可获取性和比较将增强国家、区域和全球碳计划的相互关系；
- (7)包括国家和区域碳计划的信息、野外实验和合作与协作的机会、研究议程、亮点和报告等的国际互联网；
- (8)通过合作研究增强对瞬时碳贮量和碳交换时空格局的理解(包括一系列专题讨论和图书)。

### 与其他项目和行动计划的联系

本行动计划与多个国家和地区的碳研究项目有联系。正在进行的IPCC相关行动计划包括以下已经存在的任务：(1)关于土地利用、土地利用变化和森林的实践指导；(2)对来自直接的人为活动引起的森林及其他植被破坏的清单排放的确定与方法选择；(3)间接的人为活动引起的碳储量和温室气体排放变化的因子区分。与碳源汇相关的SBSTA和UNFCCC活动，如温室气体清单和《京都议定书》报告，GCTE，LUC，新IGBP/IHDP陆地计划，IT，IGCO和GTOS，START，JGOFs，CLIVAR，SOLAS，SCOR-IOC CO<sub>2</sub>专业委员会，IMBERT和LOICE以及与国际能源机构(IEA)生物能源任务38关于生物质与生物能源系统的温室气体平衡的联系。

## 主题2 过程和相互作用

### 行动计划2.1 控制碳储量和通量的机制及其反馈

本行动计划将促进新的研究和综合，以加深对自然和人类驱动的碳源/汇控制及其空间因果关系的理解。研究重点将放在理解耦合碳-气候-人类系统的各组分之间的相互作用及反馈机制。这种理解是：(1)探求允许人类调整碳循环动态的干预点的基础；(2)研究陆地和海洋碳汇未来动态和稳态性的基础。这二者是稳定大气CO<sub>2</sub>浓度的关键。

### 任务2.1.1 海洋碳动态控制机制的集成研究

这项任务将促进鉴别多种源和汇机理的研究和综合，确定这些机理的相对重要性以及它们之间关乎未来和当前海洋及淡水水体净碳通量的相互作用。也就是说，碳系统的各个过程是怎样工作的？每个过程怎样？综合起来又是怎样？这些过程包括传输和混合、生物碳固定和分解以及它们的相互作用。强调的重点如下：

- (1)海洋生产力和透光层群落结构的决定性因素，如铁的可用性；
- (2)表层海域和淡水水体的矿化过程；
- (3)气候变率和气候变化怎样影响碳在大气-海洋系统中的分配；
- (4)子系统间的相互作用(如，土壤干旱对铁向远洋输送的影响)；
- (5)理解这些机理和相互作用的未来动态，特别是在海洋碳汇可能饱和时它们的表现。

本研究的成果将是碳源和碳汇强度的分布及其驱动机理的评估和二者间的潜在反馈作用。本项任务将使GCP考虑每一个影响源和汇主要机理的数量属性，以建立综合的区域碳平衡。GCP将通过主题1鼓励这些流域和区域综合碳平衡的研究。

#### 任务2.1.2 陆地碳动态控制机制的集成研究

这项任务将促进鉴别多种源和汇机理的研究和综合，确定这些机理的相对重要性以及它们之间关于未来和当前陆地净碳通量的相互作用。特别关注以下方面：

- (1)发展服务于当前陆地碳汇机制的归因、量化及影响因子的方法。强调陆地碳汇的间接人为成分研究，如CO<sub>2</sub>和N的施肥效应以及如在Marrakech召开的UNFCCC-COP会议所要求的来自于过去人类干扰的固碳再增加；
- (2)理解因土地利用变化，包括森林、农业用地和牧场的管理所导致的碳源和碳汇的变化；
- (3)理解当前碳汇机制的稳定性以及未来陆地碳汇饱和的可能性；
- (4)在强调量化碳危机、碳库的潜在数量及其对气候和其他驱动力敏感性的同时，研究易受影响的未来碳损失的区域和部门的碳库；
- (5)气候变化对异养呼吸作用(对气候具有重要的反馈作用)的影响。

本任务将生成不同碳汇机制的地点和数量图以及给出影响陆地碳源和碳汇机理之间反馈作用的空间评估。本项任务将使GCP在考虑每一个影响现在和未来碳源和碳汇的主要机制的定量贡献时，给出综合区域碳平衡。通过主题1，GCP将鼓励这些国家和地区的综合碳平衡研究。

#### 任务2.1.3 人为碳排放的集成研究

本项任务将逐个确定形成生产/消费与土地利用变化格局的驱动因素，这种格局引起了人为温室气体的排放。本项任务还研究不同人类驱动因素和碳排放之间的相互作用、协同作用以及非线性作用。这将需要进行全球范围的典型案例研究，这些案例可被聚合和外推到更大的区域尺度。这些研究将包括具有历史意义的碳变化趋势和最近的碳变化趋势以及与人类活动密切相关的驱动因素和区域间的相互联系(如，一些地区由于牛肉需求增加而导致的森林退化)。

#### 行动计划2.1的成果

- (1)适用于：1)模型应用，2)碳减缓措施和人为干预点确定的机理及其相互作用的更深理解。
- (2)与观测的全球碳通量格式一致的海洋和陆地碳汇机理的空间贡献及其相互作用。
- (3)CO<sub>2</sub>与N施肥和森林林龄结构对陆地碳汇影响的综合状况以及一整套服务于陆地碳汇机理解释和SBSTA要求的统一工具。
- (4)易受未来碳损失影响的碳库及其对气候系统(行动计划2.2)的分析。
- (5)增暖对异养呼吸作用影响的综合以及模拟改进的建议。
- (6)增加温室气体排放的人类驱动力的综合(如，生产/消费和土地利用变化的驱动力)。

#### 与其他项目和行动计划的联系

生物物理机制的研究将通过与GCTE,新IGBP/IHDP陆地计划,JGFOS,IMBER,SOLAS和LOICZ的合作得到加强和发展。碳排放人为驱动的研究进程与LUCC,IT,全球环境变化制度因素(IDGEC),IPCC工作组II和III以及气候变化影响和适应的评估(AIACC)密切联系。GCP还将与SBSTA-IPCC建立密切合作关系。

#### 行动计划2.2 耦合碳-气候系统的新特性

新特性是指各子系统之间或组分之间相互作用影响的系统行为。新特性包括多种平衡状态或不稳定状态，如海洋盐环流的盒(box)模型的建立；准周期振荡，如碳-气候系统中冰期-间冰期循环；突发性的非线性变化，如快速气候变化事件以及James Lovelock的Daisyworld模型中的稳态过程。当将人类干扰和响应耦合到模拟方案中并强迫模型运行全球变化引起的未来新情景时，相似的行为可能很明显。

首先，本行动计划将关注增进对碳-气候系统过去变率的理解，特别是冰期-间冰期CO<sub>2</sub>的变化。该行动计划中最重要的组织问题是：人类对碳循环的干预能否延缓或加速下一个冰期的到来？尽管已有许多机制被用以解释冰期-间冰期的交替，但是关于地球系统中这种可变性的主要方式仍然没有权威性的解释。在富含信息的冰芯记录给出的大背景中，GCP将考虑碳-气候系统长期变异的现有简单模型。一个重要的目的是确定古气候记录是如何限制内在模型参数，从而设置未来自然碳循环行为的范围。

第二，本行动计划将研究在受干扰的碳循环被作为地球系统内一个交互式成分而出现的其他系统属性，特

别是来自于二者耦合时出现的阈值和不稳定性。直到最近,气候系统的大气环流模式(GCM)还没有考虑气候-碳循环的反馈,而是假设海洋和陆地的碳吸收对气候变化不敏感。包含碳循环作为一个交互式成分的第一个全球气候模式(GCM)试验建议这种反馈可以明显地加快大气CO<sub>2</sub>浓度的增加,由此强化了21世纪的气候变化。但是,相关的不确定性非常大。在本行动计划中,碳-气候系统的简化模型(在冰期循环中的内容,如前所述)将被用于阐明一些人类驱动的关键敏感点。并且,这项任务也将专门探究全球变暖背景下海洋和陆地吸收人类释放出的CO<sub>2</sub>的可能变化。为此,行动计划2.1提供了机理,行动计划1.2提供了数据融合技术。关于海洋和陆地碳汇的可能饱和应给予特殊关注。

#### 行动计划2.2的成果

- (1)综述耦合碳-气候系统模型的发展,并鼓励气候和碳研究科学家之间的进一步合作;
- (2)模型比较和可获取的器测记录的运用以及用于模型验证和发展的古数据;
- (3)与行动计划1.2相联系,促进适宜的数据同化程序的发展;
- (4)来自于古气候和CO<sub>2</sub>记录的气候-碳循环反馈的新的限制;
- (5)基于过程的知识(如,关于未来碳-气候反馈方面的知识,像土壤碳动态、大尺度植被动态以及海洋环流)在模型发展中更有效的应用与表达;
- (6)对人类干扰下可引起碳-气候-人类系统发生可能令人惊奇或突变的深刻理解。

#### 与其他项目和行动计划的联系

本行动计划将与以下计划密切合作:耦合的碳循环气候模型比较计划(GAIM/WCRP-C4MIP), WCRP耦合模拟工作组(WGCM)和古全球变化(PAGES)。加强与行动计划1.2的协作关系,特别是数据同化以及任务2.1关于碳循环变化的影响和机制的联系。

#### 行动计划2.3 耦合碳-气候-人类系统的新特性

碳循环的物理模型、生物化学模型和人类因素模型的耦合正在发展中。这项行动计划将帮助启动这个领域的交叉研究,并关注当所有这些子系统耦合在一起时产生的新特性。它将促进更为详细的预测工具和概念框架的发展,包括从与碳模型耦合的气候系统的大气环流模式(作为行动计划2.2的下一阶段)到基于使然力的模型。该行动计划也将提供一种解释来自这些较为复杂模型的结果的概念框架。

耦合碳-气候-人类模型的构建将从两个方向进行:将物理和生物地球化学反馈引入人类活动影响的基于使然力的模型中以及将人类活动的影响和响应引入气候-碳系统的基于微分方程的模型中。这将是一个很大的挑战,因为不同子系统的模型有着完全不同的基本结构。譬如,物理气候模型和生物地球化学模型通常基于连续的微分方程,而人类系统模型则经常是基于使然力的模型。本行动计划亦将使用其他较简单的模拟工具和概念性的非量化框架以研究大量人类干扰情景下的系统行为。由此建立的模型将提供一些相应的见解以及上述方法之间要求的一致性将对任何一种方法产生额外的限制。

上述潜在方法包括:(1)耦合碳模型的GCM模式;(2)中度复杂的模型;(3)集成评估模型;(4)基于使然力模型;(5)耦合简单气候模型的环境经济学方法;(6)动态系统和对策论方法;(7)最优化/控制论;(8)概念框架;(9)研究系统行为的交互模拟器。

使然力模型是一个研究耦合系统很有前途的领域,因为它们可以更直接地反应系统中使然力的适应和进化行为,无论它们是指单个农民还是国家或全球的制度。

GCP将(1)确定模拟最耦合碳系统的这些人类系统方面的进展,一旦发现何处存在严重的不足,这类模型的进一步发展将得到鼓励;(2)利用这些方法改进模型,并用它们去探究受干扰的气候-碳-人类系统,重点关注可能产生快速和非线性变化的反馈作用。

#### 行动计划2.3的成果

- (1)一本关于耦合气候-碳-人类系统现状与大有可为的新方法的评述著作,包括动态系统、最优化/控制论、对策论、使然力模型等;
- (2)新一代工具(包括新模型)和方法,可用于研究耦合的气候-碳-人类系统,包括对地球系统模型发展的贡献;

- (3)影响气候-碳-人类系统的关键相互作用，特别是与碳循环管理有关的相互作用的确定和特征化；
- (4)在人类干扰的新领域，可能出现的在碳-气候-人类系统中令人惊奇或突变的深刻认识。

#### 与其他项目和行动计划的联系

该行动计划将通过与C4MIP, WGCM, PAGES和使用包括LUCC和IDGEC在内的使然力模型的许多IHDP活动的紧密联系而展开。而且，它也贡献于全球碳计划的主题3。

### 主题3 碳管理

通过整合碳-气候-人类系统的有效管理和评估的观测知识(主题1)和过程理解(主题2)，主题3将使全球碳计划的总体科学框架得以完善。在这方面，主题3关注的是政策实体和各种国际国内有关气候变化的过程所急需的关于：(1)未来碳循环的进展与动态，(2)干预机会。经历21世纪的地球系统发展是自然过程、人类驱动和人类响应3方面共同作用的结果。

#### 行动计划3.1 干预点确定和减排方案评估

该行动计划的任務包括：(1)确定和评估可能影响碳循环过程未来演变的具体干预点；(2)以可持续发展(即三重底线)为目标，对各种减排方案的减排潜力进行评估。

在政策的制定过程中，减排是指努力调控并最终减少温室气体的排放，同时在碳-气候系统里避免重要的人为改变，由此将消除气候变化作为一个政策问题。换句话说，减排的方法表明了碳循环中的人为干预，由此人类可以影响大气CO<sub>2</sub>未来的发展轨迹(任务3.1.1和3.1.2)。其他干预点与消费模式有关，这些消费模式是碳排放的关键驱动因子(任务3.1.3)。干预点是人类直接影响碳循环的控制点。

##### 任务3.1.1 陆海碳交换的干预点

有目的地引导陆地和海洋的长期碳存储为人类减排提供了一个重要的干预点，由此人类可以改变碳循环的动态，在某种程度上影响当前大气CO<sub>2</sub>浓度上升的趋势。它包括：

- (1)减少陆地干扰(如避免砍伐森林)引起的碳排放；
- (2)陆地和海洋的生物碳汇的储存；
- (3)在地质和海洋库的CO<sub>2</sub>工程处置。

除了缓解温室效应，大规模的碳储存和处置计划在环境、经济和社会文化等方面也各有利弊。一方面，一旦实施的调控与可持续发展的利害关系相冲突时，各种方法技术方面的减排潜力和实际可以达到的减排量之间还有很大的差距。例如，由于大尺度单一林种的种植将减少江河流量及生物多样性，从而限制该人工林在干旱、半干旱地区的种植。另一方面，正面的附带效应将使减排方案在金融的可行性及得到社会更广泛的支持方面成为可能。例如，大规模地造林可以增加土壤的肥力并减少盐渍化，从而为实施这项计划的个人和组织带来额外利益。最后，一项减排方案实施的可行性很可能由其附带的利害关系所决定。

GCP将基于环境、社会和经济标准(即三重基线)对大量的计划和减排措施进行系列分析。这些标准包括：(1)达到减缓气候变化目的的有效性；(2)技术可行性；(3)经济生存能力；(4)社会的可接受性；(5)环境效应而不是气候效应；(6)公平性。对于减缓气候变化上的有效性不仅关注碳截存的量，而且关注该新碳库的稳定性、渗透和核实。对照最近国际评估提供的技术上(或理论上)能达到的减排潜力，进行以上分析可提供更现实可行的减排潜力。

这些分析将从以下方面着手：

- (1)作为案例研究的大规模碳截存计划，该计划的可行性和有效性评估基于三重底线分析；
- (2)一些全球重要的地区(例如，东南亚)；
- (3)全球。

##### 任务3.1.2 矿物燃料排放的干预点

有许多方法可以改变能源生产中碳的强度及经济产品中的能源强度。例如，非矿物燃料能源的生产选择，包括可更新能源、核裂变和聚变以及为增加能源利用效率的选择，在现有能源通过利用废能发电和分配系统

以及在交通部门使用混合或非矿物燃料的车辆以提高能源利用效率。除此之外，也考虑工程学的碳截存，即在矿物燃料燃烧前、中或后从矿物燃料中去除碳。正如任务3.1.1所述，减排方案的评估需要考虑环境、社会和经济3方面的标准(三重底线)。

这些分析将从如下两方面来实现：

- (1)作为案例研究的大范围计划；
- (2)对特定减排方案可能达到的减排潜力的全球分析。

#### 任务3.1.3 干预点的碳消费模式

消费模式是矿物燃料释放和其他环境污染问题的根本驱动力。同时，消费模式应人类需求、需要、价值和喜好这些基本的压力而出现，最终转变为市场活动和生产行为。环境污染已经通过干预生产方面取得了一定的改善；另一方面，由此引起的改变行为和导致社会变革的努力却常常不能取得成功。就矿物燃料释放而言，很可能需要消费模式的基本改变才能产生关键的响应。

GCP将就消费模式和生产—消费系统的演变开展大量的案例研究，以提出考虑到环境和碳的排放的更具可持续性的消费模式；特别是这些消费模式的变化是否以及怎样影响整个生产系统，反之又如何？

#### 行动计划3.1的成果

(1)对于大量减排选择的现实和可持续且可取得成功的碳减排潜力的专业评述论文的分析。这些分析按主要减排选择的类型可归为以下几类：1)陆地生物截存和减少干扰；2)海洋生物截存；3)陆地和海洋的工程CO<sub>2</sub>处理；4)非矿物燃料能源资源；5)能源的节约和高效利用。这些分析是针对全球范围的，但是特定的国家和地区按照其地区和全球的重要性将被作为主要目标。

(2)在消费模式水平上，一整套有关潜在干预点的分析和建议。

#### 与其他项目和行动计划的联系

包括国家和国际能源计划；IPCC；IDGEC和IT；GCTE、LUCC、新IGBP/IHDP陆地计划；SOLAS、IMBER，综合评估团体，IEA和全球环境变化与食物系统(GECAPS)。

#### 行动计划3.2 地球系统的碳管理

任何碳减排或组合方案的总体成功取决于许多方面，包括气候变化减缓的有效性，正负附加影响的平衡以及对于合理的生物物理方法实施有利或不利的人类过程。所有方面都有一个很强的时空尺度，这些时空尺度要求给定地区减排方案特定组合的发展以及制度能力的建立，以利用这一机会实现减排。这项行动计划亦将贡献于评估整个地球系统怎样响应于人类活动的必要监测和研究。

这项行动计划将形成一个正式的框架以评估整个系统分析框架中最好的减排方案(任务3.2.1)，为特定地区设计动态的碳减排组合(任务3.2.2)，并为碳管理提供制度以分析、设计和合适的制度评估来提高该碳减排方案组合(任务3.2.3)的有效性。

##### 任务3.2.1 综合减排方案框架设计

这项任务将形成一个正式框架来分析CO<sub>2</sub>在碳—气候—人类交互作用过程中的稳定途径，包括在碳减排、适应和其他可持续发展目标之间的正负作用。适应和缓解气候变化的策略需要全面综合考虑，这不仅是因为许多减排策略(如改善农业管理措施、林业管理以及使用清洁能源)对改善气候变化的影响有可能提供有益的帮助，而且还因为适应与发展活动之间的联系。因此，适应与减排方案一起进行联合评估是非常重要的，特别需要关注一些问题，如基于可持续发展观点的有关费用和收益。这样的评估将可权衡利弊，尽可能得出双赢或毫无遗憾的策略。该方法可以检测这些活动对于其他生态系统功能和服务的潜在意义，例如生物多样性的规定与保护、土壤肥力、食物与纤维、非木材的森林产品、气候调控及洪水和风暴的预防。这些服务和功能是关键的，而且与当地社会及可持续的生计问题紧密相联。

利用特殊工具和方法(如计算机模拟工具)且在任务3.2.2设计和评估减排方案的概念框架将被发展，以在总体上直接支持碳管理。这将包括对贸易政策的选择及包括对当前碳源/汇间接影响的整个地球系统响应的评价

和估算。对于投资者介入政策制定、贸易决策及预见政策选择后果和发展途径的方法都需要考虑进去。当快速发展的综合评估作为利用复杂的多学科观点形成相关政策的选择依据就是一个好的例证。这些方法和工具包括：

- (1)综合评估模型和方法，包括模拟工具；
- (2)情景的建立及基于情景的原因；
- (3)转型管理、适应管理及在实践中学习；
- (4)参与方法。

对于这些活跃的研究领域，全球碳计划试图向这些工作提供一个碳前景，如包含碳循环组分的综合评估模型。

#### 任务3.2.2 减排方案动态组合设计

稳定大气温室气体浓度将要求改变能源系统、森林和农业管理及其他人类活动。这并不是单个技术或方法可以达到这个目标。相反，要成功取得更程度的发展、持续和公平的稳定，需要各种减排方案的有机组合。各个国家和地区需要设计各自具体的减排方案组合以与其环境、社会经济和制度相协调。总体而言，尽管相似的模式在两个具有相似情况的国家或地区可能出现，但它们不可能设计相同的组合。实际上，这个组合并不是始终静止的和最好的，而是动态的和不断发展的。

这个行动计划将利用任务3.2.1所形成的框架和工具，并为许多差异巨大和全球性的相关地区设计“最佳”的减排混合方案以最终建立行动计划3.1中所要达到的减排能力。混合方案的设计需要用最小的花费(包括环境)获得最大的利益，同时需要考虑对于减排的促进(和阻碍)作用，并且在它们出现时利用好这一时机。最后，重要的是有长期远见以保证研究结果满足更多的需求(例如，《京都议定书》签约国首先履行义务的阶段)。

以下初步列出了这个分析所选择的地区，包括亚太地区(中国、日本、菲律宾、泰国)、非洲(塞内加尔)、欧洲(德国、西班牙)和美洲(美国、墨西哥、阿根廷)。

#### 任务3.2.3 碳管理制度制定

任何碳管理策略的有效和成功取决于在地区、国家和国际不同水平上的科技、机构和制度因素的综合。通过评估在过去管理环境及相关资源所形成的不同制度结构和设计可以得到更有价值的理解，这需要确定制度、评估工具和评价范例。这些分析可以对什么该做、什么不该做提供更深入的理解，也可采纳边实践边学习的策略。这项任务包括分析制度、机构、科技的选择和策略。在国际层次上，它将包括政权在多大程度上改变政策、调整行为和按照国际协议调整国家政策。在这些分析中，要有一个各种政策选择相对优势的评估(如，排放贸易、碳截留)。

根据进行碳管理所学习到的内容，选择和分析一系列案例研究。这些案例包括成功的蒙特利尔协议、酸雨和有关《京都议定书》到现在为止的进展分析。

#### 行动计划3.2的成果

- (1)评估减排方案组合的正式框架，包括建立计算机模拟工具以测试政策在碳—气候—人类系统中的影响；
- (2)对于被选择的国家和地区的减排方案组合，初步包括亚太地区(中国、日本、菲律宾、泰国)、非洲(塞内加尔)、欧洲(德国、西班牙)和南北美洲(美国、墨西哥、阿根廷)；
- (3)分析各种政策选择的相对优点(例如，排放贸易、碳截留)以及结合减排组合和适应性选择的潜在利益；
- (4)从以往国际环境协议分析获得的对碳管理具有借鉴作用的大量文献；
- (5)有关京都机制—排放贸易、联合实施、清洁发展机制和碳截留选择以及这些机制和减少总的温室气体排放的其他选择方法之间的系统比较的一系列详细研究；
- (6)关于新的制度制订的建议，以最大限度地减少在达到一个假定的稳定情景和基于目前的制度所能达到的减排潜力之间的差距。

#### 与其他项目和行动计划的联系

包括IDGEC, GCTE, LUCC, 新IGBP/IHDP陆地计划和START；SCOR, IOC, CO<sub>2</sub>专家组和关于海洋碳截留的IMBER；IPCC第二工作组(影响、适应和脆弱性)和第三工作组(减排)，UNFCCC SBSTA和UNFCCC秘书处；全球变化研究亚太地区网络(APN)，美洲间全球变化研究所(IAI)，全球变化研究欧洲网络(ENRICH)和

GECAFS。

### 行动计划3.3 区域发展模式对碳源/汇的影响

区域发展途径是社会、经济和政治系统一系列相关变化的结果，它们随着时间和地点的不同而变化，一方面对于碳沉积和流通可能有不同的结果，另一方面反过来对发展过程产生反馈。

城市化和具体规划是整合碳管理到发展中的关键过程。尽管城市及其周边仅占了地球表面的一小部分，但是它们在促使碳循环改变的过程中发挥着巨大的和逐渐增强的作用。未来几十年城市设计和管理的方法将对未来碳循环产生巨大影响。一方面，设计良好的城市可以为减少单位碳排放量提供许多科技机会；另一方面，文化和生活方式随着城市化而转变，将使消费水平、矿物燃料的使用、水资源的利用和垃圾的产生呈上升趋势。

尽管有人认为碳管理正成为发展计划中重要的一部分，很有可能需要考虑的不仅仅是经济和社会发展目标，而且还包括维持其他生态系统物质和服务的能力。各阶层的人们正通过直接的或长期的一系列转化、替代和传输链条而依赖这些物质和服务谋生。因此，我们提议进行一个以碳为重点的研究，以“发展的观点看碳”，同时理解相互作用，特别是生物多样性的保护，纯净水的提供、需求和供应以及农业、水产业和渔业所提供的食物。

团体、政府和个人所采取的许多行动被认为是出于各种理由而非碳管理本身，但是仍就对碳循环产生非常重要的影响。例如，关心城市和工业区空气质量及过度拥挤和延伸的大城市的旅游时间。因此，该计划的关键部分在于研究怎样使地区的、区域的和全球的目标或个人的和公共的目标联系在一起。

全球碳计划将对贡献于区域案例研究的网络进行比较分析。这个区域要足够大，即能包括一系列景观类型(城市、工业、农业、森林)，因此它可以是一个国家以下的地区、一个国家或多个国家(此种情况很少)。其研究重点在于征集案例研究区域，包括城市，这是因为预测城市化对碳排放和截留的重要性。

本项行动计划的重点在于理解区域发展过程中关键的社会、生态和生物物理过程及其相互作用，而理解的最終目的是应用于情景的发展和政策分析。

这项行动计划的关键问题包括：

- (1)不同的区域发展模式对碳储量和通量的影响如何
- (2)社会发展导致不同碳收支结果的关键过程和相互作用是什么？
- (3)碳储量和通量变化与生态系统的其他服务功能(尤其是食物、水、清新的空气以及生物多样性保护)之间最重要的相互联系和相互制约如何？

本行动计划的第一步将是：

- (1)建立一个有关区域研究的国际网络，允许对不同发展途径的碳收支结果进行结构和协同比较。
- (2)确定一系列需要测量和理解的关键变量(或过程和序列群)，通过比较来说明这些研究问题。
- (3)首先开始从世界上征集6~12个区域进行研究，它们统一依靠最小的数据集和共享协议来展开联合分析。这里面需要包括较高比例的城市区域以说明城市化问题。

这些案例研究的分析将包括以下两项任务：

#### 任务3.3.1 区域发展的驱动力及其对碳源/汇的影响

- (1)确定主要的结构和过程，以解释为什么不同区域发展途径对碳沉积和流动有不同的结果。
- (2)在碳沉积和流动的潜力研究案例之间确定主要的不同之处。
- (3)使用各种方法，包括模型和敏感性分析、统计分析和对历史过程的深入总结(如相关的能源使用和政策)来确定不同之处的外在和内在原因。

#### 任务3.3.2 碳管理措施和未来情景

- (1)研究碳管理怎样被整合到发展中去，并提出一些能通过情景和政策分析检验的方法；
- (2)从案例研究的历史经验中确定在碳管理目标和各种服务(特别是对人类重要的服务)之间主要的协调点。

### 行动计划3.3的成果

- (1)START和GCP将组织许多有关这一主题的研究活动，将于2003年7月在美国科罗拉多博耳德举行的