

责任编辑: 王奉安
张 斌



地球系统科学联盟(ESSP)报告 No.1

全球碳计划(GCP)报告 No.1

全球碳计划

(The Global Carbon Project)
柴育成 周广胜 周 莉 许振柱 译



Josep G. Canadell, Robert Dickinson, Kathy Hibbard, Andrew Townsend & Chen Yuesong 主编

全球碳循环国际协作研究框架

气象出版社

ISBN 7-5029-3872-9



9 787502 938727 >

ISBN 7-5029-3872-9/P.1370
定价: 35.00元

地球系统科学联盟(ESSP)报告 No.1

全球碳计划(GCP)报告 No.1

全球碳计划

气象出版社



Earth System
Science Partnership



GLOBAL
CHANGE



WCP

www.globalcarbonproject.org



全球碳计划(Global Carbon Project)

——科学框架与实施

柴育成 周广胜 周莉 许振柱 译 周广胜 审校

主编:

Josep G. Canadell, Robert Dickinson,
Kathy Hibbard, Michael Raupach & Oran Young

全球碳计划科学指导委员会:

Michael Apps, Alain Chedin, Chen-Tung Arthur Chen, Peter Cox, Robert Dickinson,
Ellen R.M. Druffel, Christopher Field, Patricia Romero Lankao, Louis Lebel, Anand Patwardhan,
Michael Raupach, Monika Rhein, Christopher Sabine, Riccardo Valentini, Yoshiki Yamagata,
Oran Young

文献引用格式:

Global Carbon Project (2003) Science Framework and Implementation. Earth System Science Partnership (IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS) Report No. 1; Global Carbon Project Report No. 1, 69pp, Canberra.

封面图片来源:

林火: Brian Stocks; 烟排放: www.freephoto.com; 海洋: Christopher Sabine

图书在版编目(CIP)数据

全球碳计划/ (美)卡纳戴尔(Canadell,J.G.)等著;
柴育成等译. —北京:气象出版社,2004.11
ISBN 7-5029-3872-9

I.全... II.①卡...②柴... III.碳循环—研究
IV.X511

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第113366号

全球碳计划

J. G. Canadell, R. Dickinson, K. Hibbard, M. Raupach & O. Young主编

柴育成 周广胜 周 莉 许振柱 译

周广胜审校

责任编辑:王奉安 张 斌

终审:顾仁俭

气象出版社出版发行

(北京市中关村南大街46号 邮编:100081)

中共辽宁省委机关印刷厂

开本:210×297 1/16 印张:4.3 字数:154千字

2004年11月第1版 2004年11月第1次印刷

印数:1~1000 定价:35.00元

ISBN 7-5029-3872-9/P.1370

译 者 的 话

碳循环、水循环以及食物与纤维已成为当今全球变化研究的三大热点。准确地评估陆地生态系统碳循环不仅是准确地估算未来大气CO₂浓度、预测气候变化及其对陆地生态系统影响的关键，也是履行《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》与《京都议定书》及制定应对策略的关键。全球碳循环的正确认识还是理解地球环境演变及预测和管理地球未来的关键，它不可避免地气候、水分循环、养分循环以及陆地和海洋的光合作用相联系。正是在这一形势下，2001年3个国际全球变化研究计划，即国际地圈—生物圈计划(IGBP)、全球环境变化的人文因素计划(IHDP)及世界气候研究计划(WCRP)共同开始了一个国际协作计划——全球碳计划(GCP: Global Carbon Project)。

中国作为一个地大物博、陆地生态系统种类繁多以及人口众多且经济快速发展的国家，在未来地球大气CO₂浓度的控制中起着极为重要的作用。目前，我国CO₂排放已占全球的11%，成为第二排放大国，在国际环境外交大战的今天，不能不引起高度重视。

我们希望该书的翻译能对碳循环的研究起到促进与推动作用，以有效地应对能源系统转换和全球碳循环管理所面临的挑战，服务于我国社会经济的可持续发展。

本书的出版得到了气象出版社的大力支持，在此特表谢意。中国科学院植物研究所的王玉辉研究员、蒋延玲助理研究员、王凤玉博士、翁思生博士、贾丙瑞博士以及中国气象局沈阳大气环境研究所王笑影博士均参与了该书部分内容的翻译，对他们的辛勤劳动致以衷心的感谢。同时，中国气象局沈阳大气环境研究所王奉安编审对该书进行了认真的编校，特此感谢。

本书由全球碳计划(GCP)，中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”课题“草地生态系统碳循环模型研究”(KZCX1-SW-01-12)以及中国气象局的“东北地区干旱化和生态系统相互作用的观测和模拟”项目共同资助出版。

由于译者水平有限，可能有不妥之处，敬请读者指出，以便再版时改正。

译 者
2004年10月

前 言

以“全球碳计划科学框架及其实施战略”为标志的地球系统科学联盟（Earth System Science Partnership, ESSP）系列报告的出版，标志着国际全球变化研究迈入了一个新纪元以及运用不同于传统方法研究碳循环的新阶段。

地球系统科学联盟（ESSP）由4个全球变化研究计划：生物多样性科学计划（DIVERSITAS）、国际地圈—生物圈计划（IGBP）、全球环境变化的人文因素计划（IHDP）和世界气候研究计划（WCRP）组成。这一联盟的建立是为了综合研究地球系统、地球系统正在发生的变化以及这些变化对全球可持续发展的影响。全球碳计划以及其他一些与食物、水资源和人类健康有关的ESSP项目已经考虑将全球变化和地球系统的基础研究与人们所关注的重大问题有机地联系起来。

碳循环研究通常与能量系统研究独立进行，它一般只关注碳源/汇的生物物理格局及其过程。与现有研究相比，全球碳计划的重大进展主要体现在以下5个方面：首先，该计划从一开始就包含了人类和自然两方面的因素，它强调的是碳—气候—人类系统（包括以矿物燃料为基础的能源系统、生物物理碳循环和物理气候系统），而不仅仅只是生物物理碳循环。第二，发展分析和综合模拟碳循环的新方法是该计划的核心。第三，该计划为国家和区域的碳循环研究在世界范围内进行协作与整合提供了一个内在稳固的框架结构。第四，该计划所研究的问题直接与政策相关，如为达到大气CO₂浓度的稳定所需制定的管理策略以及区域可持续发展途径等。最后，全球碳计划超出了以往的全球变化研究计划，它不仅致力于全世界发展中地区的经济发展与资源管理和碳循环关系的研究，也从事工业、能源与碳循环关系的研究。

我们相信该计划将在未来至少10 a内促进和影响全世界的碳循环研究。同时，我们也相信，该计划将为我们提供一个具有坚实理论基础的框架，以有效应对能源系统转换和全球碳循环管理所面临的挑战。

Michel Loreau：DIVERSITAS 主席

Anne Larigauderie：DIVERSITAS 执行理事

Guy Brasseur：IGBP 主席

Will Steffen：IGBP 执行理事

Coleen Vogel：IHDP 主席

Barbara Göbel：IHDP 执行理事

Peter Lemke：WCRP 主席

David Carson：WCRP 理事

内 容 提 要

变化中的碳循环

碳循环是地球系统的核心，它与气候、水循环、养分循环以及陆地和海洋的生物量生产密切相关。正确地理解全球碳循环是了解地球及其居民环境历史的关键，亦是预测和指导二者协调发展的关键。

人类介入全球碳循环已有几千年的历史。可是，人类活动引起的碳通量在数量上与全球碳循环的主要自然碳通量相当则是在最近200 a发生的。而且，直到20世纪末期人类才广泛地认识到这一后果带来的威胁，并开始有所行动。当人类开始应对管理地球环境的挑战时，这一过程对全球碳循环的新的反馈作用将对未来的地球系统产生深远的影响。

全球碳计划

科学家们所面临的挑战是监测(量化)、理解(归因)和预测地球系统碳循环的变化(包括对人类活动的反馈作用)。这就需要跨学科、区域研究的新的研究方法和综合分析手段，并强调碳循环是耦合碳-气候-人类系统的一个不可缺少的组成成分。

全球碳计划(GCP)由3个国际全球变化研究计划共同发起，即国际地圈-生物圈计划(IGBP)、全球环境变化的人文因素计划(IHDP)和世界气候研究计划(WCRP)。此报告概述了这一计划的研究与实施战略框架，适用于自然科学和社会科学领域大型研究组织以及政策制定者。

科学主题

全球碳计划(GCP)的目标是深入全面地理解全球碳循环，包括自然因素、人为因素及二者间的相互作用对碳循环过程的影响，并为碳排放相关政策的制定提供科学依据。为此，本计划将围绕以下3个主题展开研究：

1. 格局与变率：当前全球碳循环过程中主要碳储量和通量的时空分布如何？
2. 过程和相互作用：碳循环动态变化的控制及反馈机制（包括人为因素和自然因素两方面）是什么？
3. 碳管理：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？

实施战略

全球碳计划将通过与各国碳项目、国际碳项目和资助机构的协作，领导一个有限数量的高难度、多学科的、3~5 a可行的新的研究计划，以实现全球碳计划的目标。该实施战略围绕该计划的3个科学主题制定。

主题1 格局与变率

通过编制新的局地 and 区域碳收支，发展模型数据融合技术，定量研究当前主要碳储量和通量的时空分布。

(1)主要碳储量和通量：通过签订公约、共享数据、应用新软件和技术进行信息的快速传递以及在交叉项目中资源互补，补充与加强区域和国家碳循环研究间的国际协作。

(2)数据融合：开发与使用能够将大气、海洋和陆地的数据融入碳-气候-人类系统模型的方法，特别要强调将多元限制(通过大气、海洋和陆地数据和模型的同步使用来实现)应用于碳循环格局和变率的研究。

(3)综合的国家、区域和局地碳收支：促进现有的国家、区域和流域尺度碳收支估算方法的统一，确保区域之间的可比性。

主题2 过程和相互作用

促进新的研究与综合，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，特别强调对耦合碳-气候-人类系统中各组分之间相互作用及反馈机制的理解。

(1)碳储量和通量的控制机制及其反馈：确定碳源/汇机制、相对重要性及其相互影响。探索碳循环过程的各个环节是如何既相互独立又相互联系地运行的。

(2)耦合碳-气候系统的新特性：研究受干扰的碳循环作为一个相互作用成分包含在碳-气候系统中时，系统所表现出的新特性，特别要研究在整个系统耦合过程是否出现阈值、不稳定性和变异。

(3)耦合碳-气候-人类系统的新特性：开展碳循环的物理、生物化学和人类因素模型(定性或定量的)耦合的交叉研究，重点是当这几个子系统耦合时所出现的新特性。鼓励更为详细的预测工具和概念框架的发展。

主题3 碳管理

确定和量化碳循环过程中的干预点和机会窗，控制耦合碳-气候-人类系统的演变与发展。

(1)干预点和减排方案：确定和评估可能影响碳循环过程未来演变的具体干预点，准确评估在考虑可持续发展(即经济、社会和环境3个基本方向的发展)原则时这些减排方案可实现的碳排放减缓潜力。

(2)地球系统的碳管理：建立系统分析框架，评估减排方案的最佳组合，在一些特殊地区要设计动态的碳减排方案，制定适宜的碳管理制度。

(3)区域发展模式对碳源/汇的影响：通过不同区域案例间的比较分析以增进对以下方面的理解：

- 1) 不同的区域发展模式对碳储量和通量的影响；
- 2) 社会发展导致不同碳收支结果的关键过程和相互作用；

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)之间的相互联系和相互制约。

综合与交流

GCP将面向研究和评估群体提供高水平的碳循环相关综合信息，为政策制定者、教育工作者及公众提供碳循环相关的书籍和网络资源；根据不同的学科要求，提供碳循环信息产品，以期整个社会达成对碳循环的共识。

能力建设

GCP将开展一些与主要研究主题相关的能力建设活动，在多学科高度交叉的碳-气候-人类系统研究中促进新一代科研工作者的培养。

预期研究成果

通过为期10 a的全球碳循环研究，拟取得如下成果：

- (1)增进对耦合碳-气候-人类系统的认识，提高对之进行定性、定量研究和预测的能力；
- (2)在模型中耦合控制碳循环的生物物理过程和人为干扰；
- (3)加强碳循环研究、监测和评估群体之间的协作，增强碳循环动态迅速评估和反应的能力；
- (4)通过更好的协作和信息交流，增加国内、国际研究和监测计划的成果输出；
- (5)知识的延展与交流：包括相关文章和专著研究的综合，电子资源（如数据、图表和报告材料），网站，教育资源（如海报和传单）以及通过各种研究活动提供高等教育的机会。

项目资助对象

GCP的主要资助对象包括处理如下事务的科学、评估和政策实体：

- (1)局地到全球尺度碳收支的量化和预测；
- (2)减少温室气体净排放的政策制定；
- (3)国际公约的发展和遵守；
- (4)旨在实现环境、经济和社会目标的区域发展。

与国际、国内研究计划的联系：

由于全球碳计划的综合性，有必要以已有的碳项目为基础，并与那些研究领域与GCP有交叉而又不完全重叠的研究实体合作，尤其是：

- (1)通过IGBP, IHDP, WCRP及综合全球观测战略联盟 (IGOS-P) 的其他成员协调的研究实体；
- (2)国家和区域的碳循环研究项目；
- (3)应对碳循环变化的影响和脆弱性结果及其与水资源、食物系统和生物多样性间联系的评估和决策群体。

GCP要求

- (1)充分认识跨学科及多时空尺度研究的需要，发展整合全球碳循环的生物地球化学过程、生物物理过程和人为干扰因素的研究框架；
- (2)为国际、国内碳项目提供全球性的研究平台，以改善观测和研究网络设计、统一数据标准、促进信息传递、提高研究活动和基于过程的实验时间的调配，并发展模型数据融合技术；
- (3)通过更好地协作、目标的明确和概念框架的发展，加强国家、区域及国际组织如IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS和其他观测实体的碳相关研究计划的实施；
- (4)鼓励在缺乏了解，但可能在全球碳循环中发挥重要作用的区域开展碳循环研究；
- (5)在众多的研究和政策实体中进行有关碳—气候—人类系统的最新研究成果的综合与交流。

目 录

译者的话

前言

内容提要

一、引言

1

碳的挑战	1
展望	2
要求和方法	2

二、科学主题

5

主题1 格局与变率	5
研究目的	5
研究基础	5
研究现状	6
不确定性及优先研究领域	12
主题2 过程和相互作用	13
研究目的	13
研究基础	13
研究现状	14
不确定性及优先研究领域	18
主题3 碳管理	19
研究目的	19
研究基础	20
研究现状	20
不确定性及优先研究领域	22

三、实施战略

24

主题1 格局与变率	24
行动计划1.1 加强主要碳储量和通量的观测	24
任务1.1.1 碳储量和通量观测方法的统一和标准化	24
任务1.1.2 碳横向运动的观测	25
任务1.1.3 其他相关碳化合物的观测	26
行动计划1.2 模型发展与模型数据融合	26
任务1.2.1 正演和反演模型的发展	27
任务1.2.2 模型数据融合技术的发展	27
行动计划1.3 综合的国家、区域和局地碳收支	28
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	28
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	28
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	29
主题2 过程和相互作用	29
行动计划2.1 控制碳储量和通量的机制及其反馈	29

任务2.1.1 海洋碳动态控制机制的集成研究	29
任务2.1.2 陆地碳动态控制机制的集成研究	30
任务2.1.3 人为碳排放的集成研究	30
行动计划2.2 耦合碳-气候系统的新特性	30
行动计划2.3 耦合碳-气候-人类系统的新特性	31
主题3 碳管理	32
行动计划3.1 干预点确定和减排方案评估	32
任务3.1.1 陆海碳交换的干预点	32
任务3.1.2 矿物燃料排放的干预点	32
任务3.1.3 干预点的碳消费模式	33
行动计划3.2 地球系统的碳管理	33
任务3.2.1 综合减排方案框架设计	33
任务3.2.2 减排方案动态组合设计	34
任务3.2.3 碳管理制度制定	34
行动计划3.3 区域发展模式对碳源/汇的影响	35
任务3.3.1 区域发展的驱动力及其对碳源/汇的影响	35
任务3.3.2 碳管理措施和未来情景	35
综合与交流	36
能力建设	36
时间表	37
管理机构与执行	37
四、致谢	39
五、参考文献	41
六、附录	47
七、缩写和缩略词	58

一、引言

全球碳计划(GCP)是由国际地圈-生物圈计划(IGBP)、全球环境变化的人文因素计划(IHDP)和世界气候研究计划(WCRP)三大计划联合发起的,专门致力于全球碳循环的研究。同时,全球碳计划也是地球系统科学联盟(ESSP,由IGBP、IHDP、WCRP和DIVERSITAS共同发起)开展的第一个研究计划。本报告概述了全球碳计划(GCP)的研究框架,主要面向自然科学及社会科学的大型科研和决策实体。

本报告包括3个主要部分。第一部分(引言)是全球碳计划的概述,指出研究的目的、前景,并介绍了主要的基本原理;第二部分(科学主题)概述了GCP的3个科学主题,从而给出全球碳循环的全景及其与气候和人类活动的相互影响,每一主题均从研究目的、研究基础、研究现状、不确定性及优先研究领域4个方面展开;第三部分(实施战略)概述了在未来3~5 a里,通过与其他研究计划合作,GCP将开展的研究以及对整个研究计划的展望(大约10a)。文章末尾部分是与GCP相关的附录,包括各国、国际与碳循环有关的研究项目及研究网络的信息。

碳的挑战

碳循环是地球系统的核心,它与气候、水循环、养分循环以及陆地和海洋的生物量生产密切相关。绿色植物通过光合作用合成的生物量以食物和纤维的形式维持着包括人类在内的整个动物界的生存。因此,正确理解全球碳循环是了解地球及其居民环境历史的关键,亦是预测和指导二者协调发展的关键。

冰芯记录了大气CO₂浓度的自然变化范围及其变化曲线(图1),图1是俄罗斯东方站冰芯的4个冰期循环。从图中可看出近42万 a来大气CO₂和CH₄浓度与气温之间的相关关系。从大约50万 a前到距今约200 a的时期内,气候系统在CO₂浓度、CH₄浓度和温度相对有限的范围内运行。工业革命前,大气CO₂浓度以10万 a为周期在 $180 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$ 之间变化。与此同时,CO₂气候系统在冰期和间冰期之间交替。冰芯记录表明,大气组成与气候(尤其是温度)密切相关。

冰芯记录和当前大气CO₂浓度观测值的对比可知,地球系统已经严重偏离了冰期-间冰期这种有规律的循环状态(图2)。目前的大气CO₂浓度比间冰期的CO₂最高浓度要高出几乎 100×10^{-6} ,而其增长速度比过去42万 a中的任何时期都要高出至少10倍,甚至100倍。包括CH₄和N₂O在内的其他温室气体浓度也正在以相似的速率升高,这些气体浓度的升高无疑是由人类活动引起的,并已对气候产生重要的影响。过去千年温度的记录表明,气候系统已对大气中温室气体浓度的变化产生响应。据预测,大气CO₂浓度在未来的几百年将发生更大的变化,预测的置信度随着政府间气候变化专业委员会(IPCC)的第二和第三次的评估报告而稳步提高。以上事实表明,地球系统已经脱离了碳循环在过去50万 a中的运作范围,并且这一变化以空前的速度单向进行。也就是说,人类正在将地球系统推向一个前所未有的领域。

人类对碳循环的影响由来已久,数千年来人类通过农业、林业、商业活动以及工业和运输业中的能源利用深深地影响着全球碳循环。然而,这些活动充分扩展、匹敌于主要的自然力则是在近两三个世纪发生的。而且,人类社会和制度(社会制度、文化制度、政治制度 and 经济制度)在驱动碳循环变化的同时,它们也受碳循环和气候变化的影响,并对此产生响应,而这种响应又对碳循环具有潜在的反馈作用(Young, 2002;图3)。最典型的例子就是试图管理作为全球大气成分的温室气体排放。

确定大气、陆地和海洋间碳交换的位置和数量的研究表明,影响碳循环的自然因素和人为因素间具有复杂的相互作用,要区分二者对碳循环的影响非常困难。当前陆地碳汇(从大气中吸收CO₂的陆地区域)的位置在很大程度上取决于土地利用变化的格局及其对重复干扰生理响应的量级;海洋碳汇格局受从大陆经大气传输来的含Fe沙尘的影响,而沙尘也受土地利用和气候变化的影响。人类可能控制碳循环的领域包括:在陆地生

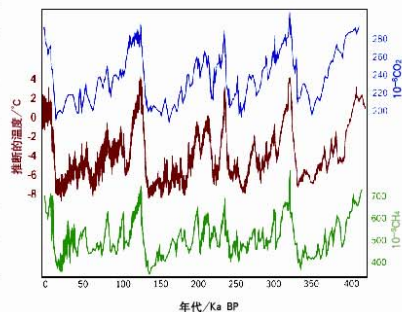


图1 大气CO₂浓度变化以及由俄罗斯东方站冰芯的同位素推测得的42万 a来大气温度和CH₄浓度的变化 (Petit et al., 1999), 图源自IGBP/PAGES

态系统和海洋中加强碳截留，最小化矿物燃料燃烧造成的碳排放。

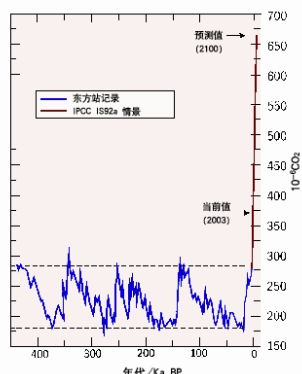


图2 俄罗斯东方站冰芯的大气CO₂浓度变化记录(Petit et al., 1999)和在IPCC第三次评估报告中使用的“正常商业”(business as usual)的预测结果(IPCC, 2001)

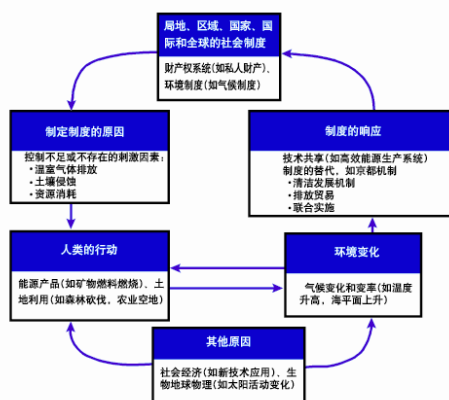


图3 社会制度及其对碳循环的影响(摘自Young, 2002)

全球碳循环的研究集中在监测、理解其格局和过程及它们的环境效应方面。不同的研究群体利用不同的资源和方法，如卫星数据、大气采样网和反演数值方法(自上而下)可以确定全球和洲际尺度碳源/汇的强度和位置，地表监测和过程研究(自下而上)可在区域、生态系统尺度上评估陆—气之间、海—气之间的碳通量，并检查该尺度碳通量的控制机制(图4)。对碳循环自然动态和减缓潜力的理解是通过政策手段和国际政治制度降碳的基础。

展望

GCP核心目标就是增进对全球碳循环，包括碳循环的自然和人为因素以及二者间相互作用的综合的、与政策相关的理解。

实现这一目标需要国际上所有相关学科、地区的科学群体的协作以及可利用资源和技术的应用。目前，还没有一个国际研究计划提供这种框架。GCP的建立填补了这个空白，它提供解决关于碳—气候—人类系统的高度学科交叉和复杂问题的全面协调。

GCP将采用学科交叉的方式来理解自然状况下未受干扰的碳循环过程、受干扰的碳—气候—人类系统以及社会对一些可预见的或确实存在的威胁的响应与系统自然动态之间的反馈(图5)。

通过1999～2003年一系列的专题学术研讨会，科学团体确定了碳循环研究的3个主要科学主题。这些科学主题明确了GCP的科学领域，促成了对碳循环的监测、归因和预测的能力发展。预测部分的内容主要集中在人类在未来如何干预扰动的碳循环动态。每一个主题都可以用一个高度概括的问题来描述：

- 1 格局与变率：当前全球碳循环主要碳储量和通量的时空分布如何？
- 2 过程和相互作用：碳循环动态的控制和反馈机制(包括人为因素和自然因素两方面)是什么？
- 3 碳管理：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？

要求和方法

为了实施GCP的目标及其3个科学主题，GCP将遵循以下科学规则：

(1)充分认识跨学科及多时空尺度研究的需要，发展整合全球碳循环的生物地球化学过程、生物物理过程和人为干扰因素的研究框架；

(2)为国际和各国碳计划项目的实施提供全球性的研究平台，以改善观测和研究网络设计、统一数据标准、促进信息传递、提高研究活动和基于变化过程的实验时间的调配，发展模型数据融合技术；

(3)通过更好地协作、目标的明确和概念框架的发展，加强国家、区域及国际组织如IGBP, IHDP, WCRP、

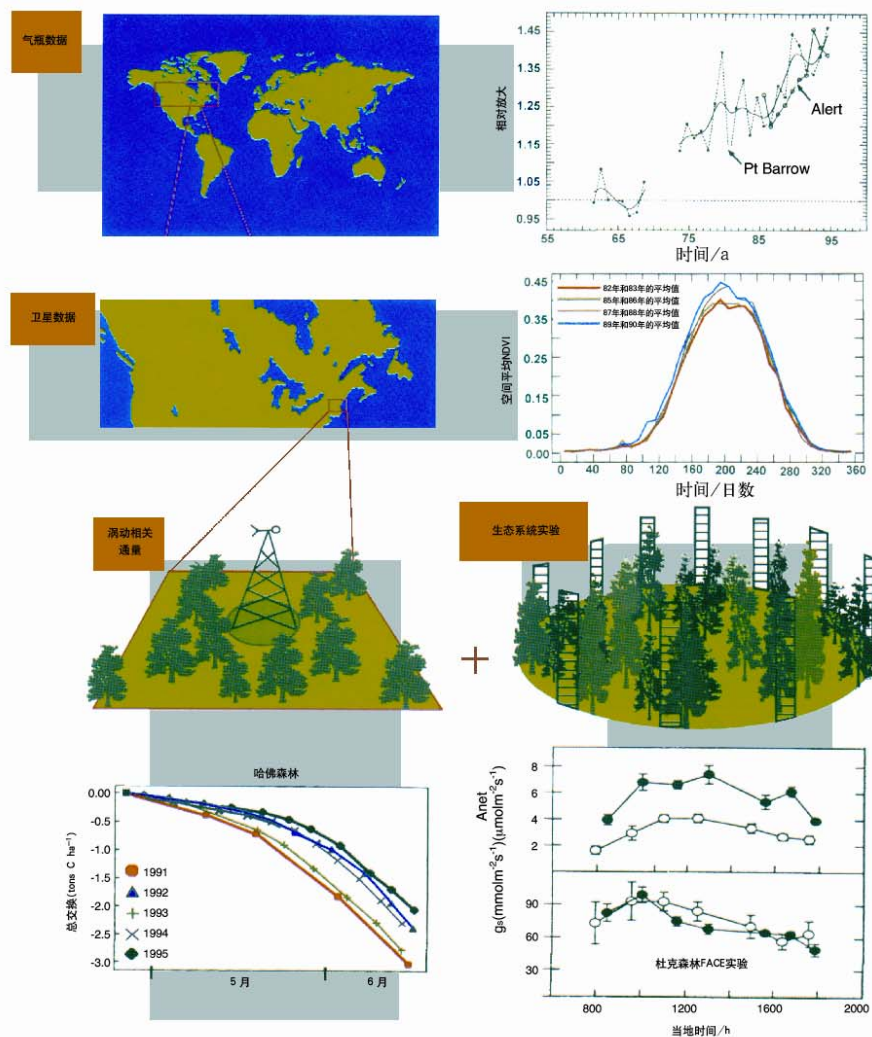


图4 测量陆地生态系统碳代谢过程：技术和结果(Canadell et al., 2000)

DIVERSITAS和其他观测实体的碳相关研究计划的实施；

(4)鼓励在缺乏了解但可能在全球碳循环中发挥重要作用的区域开展碳循环研究；

(5)在众多的研究和政策群体中，进行有关碳—气候—人类系统的最新研究成果的综合与交流。

方法：GCP将通过两条途径实现它的研究计划。其一，以学科为导向的碳循环研究，全球尺度的碳循环研究主要是通过GCP发起并主办的一系列研究计划得以实施（附录A1），全球尺度以下尺度的碳循环研究主要是通过国家或者区域的碳研究项目得以实施（附录A2）。为达到GCP综合研究全球碳循环的要求，GCP通过促进项目间的协作提升和增强这些科学研究的价值。其二，对于碳循环研究中高难度的高度学科交叉问题，GCP将启动并领导一些在3~5 a的研究框架中切实可行的新的研究活动。

科学指导：科学指导委员会(SSC)对GCP的工作进行指导和管理。科学指导委员会主要是由涵盖GCP科学框架的主要学科领域的科学家组成，并且也充分考虑由它发起的研究项目和计划所提出的建议。

管理和时间框架：GCP对它的3个发起组织(IGBP, IHDP, WDRP)的主席和理事组成的委员会负责。GCP从2002年开始，预计研究期限为10 a。3个发起组织将对计划进行中期考核，以评估其近期目标的完成情况、监测其长远目标的进展，并提出提高计划效率的建议。

相关组织：广义而言，碳循环的研究是解决地球系统的环境问题和全球可持续发展的关键。GCP将与一些观测、评估和政治实体建立正式、非正式的伙伴关系，主要包括：

(1)在综合全球观测战略联盟(IGOS-P)的指导下，基于全球观测系统(包括全球海洋观测系统(GOOS)、全球陆地观测系统(GTOS)、全球气

候观测系统(GCOS))和全球碳计划(GCP；附录B)，发展全球碳循环综合观测战略(综合全球碳观测，IGCO)。

(2)全球碳循环对于各国、国际气候变化减缓、可持续发展以及生态系统服务3个方面政策的制定尤为重要。因此，GCP通过适当的评估实体将国际、各国决策实体联系起来是必须的。

(3)按照联合国气候变化框架公约(UNFCCC)下属的科技建议辅助机构(SBSTA)、生态系统千年评估(MA)及其他评估项目的要求，由IPCC负责评估碳循环的研究工作，并向决策实体解释这些研究成果。

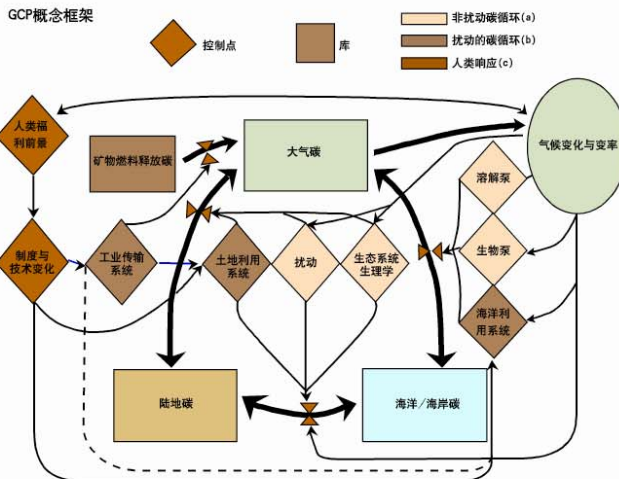


图5 全球碳循环的3个前景

全球碳循环的3个前景：(a)冰期和间冰期期间以及重大人类活动之前，全球碳循环仅是包含陆地、海洋和大气圈碳储存的链接系统。这个系统过去且仍然被气候变异和它自己内在的动态所控制或驱动。例如，海洋碳系统与海-气间气体交换紧密联系在一起，并通过自然的生物泵来传送碳。陆地表面和大气圈的相互作用被陆地和生态系统生理学所驱动。(b)大约在200 a前，由于工业化和土地利用变化的加速，从而向碳循环过程中增加了那部分原先以矿物碳储存的新碳，使得全球碳循环复杂化。人类并没有从一开始就意识到未来的利益会受到威胁。不管社会对向大气圈中增加矿物燃料的投入回应如何，或者目前土地利用方式的剧烈变化后果怎样，全球碳循环已经受到剧烈的影响。(c)在过去的最近几十年内，人类已经开始认识到气候变化和地球系统已经深刻地影响到人类的利益，而这种影响是通过地球碳循环实现的。机构和制度的实施以及对全球碳循环的管理对当代社会将产生一系列新的反馈。

二、科学主题

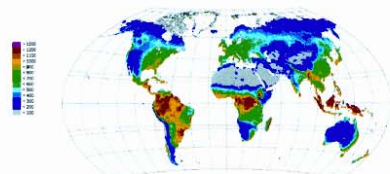
全球碳计划包括3个科学主题：格局与变率、过程和相互作用以及碳管理。每个科学主题从研究目的、研究基础、研究进展、不确定性及优先研究领域4方面展开。需要注意的是，许多研究课题贯穿了这3个科学主题。

主题1 格局与变率

研究目的

碳循环是指碳元素在大气(主要以CO₂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)、河流和入海口以及矿物燃料等不同碳库之间的迁移、转化。不同碳库之间碳通量和贮量时空分布格局的变化反映了自然动态和人类活动的影响(图6)。有关碳通量及其贮量时空分布格局与变率的研究对于了解碳循环过程是至关重要的。它有利于探索碳循环的驱动过程、反演历史状况、预测人类强烈干扰情况下的未来趋势。

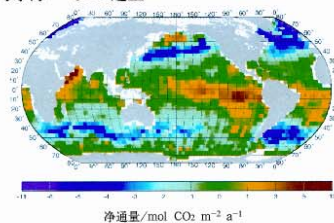
(a)陆地净第一性生产力



(b)1995年由人类活动引起的碳排放



(c)年均净海—气CO₂通量



(d)人类活动引起的CO₂柱清单

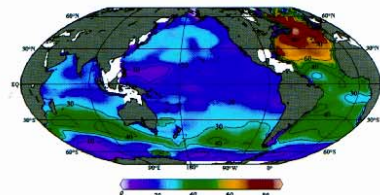


图6 确定碳循环的储量和通量格局与变率的关键空间观测

- (a)全球陆地净第一性生产力 gC m^{-2} ，源自IGBP 波茨坦NPP模型比较结果(Cramer et al., 2001)。
(b)1995年来自矿物燃料燃烧、水泥生产、煤气燃烧释放的CO₂量，以1度栅格为基础(Brenkert, 1998；
<http://cdiac.esd.ornl.gov/>，美国田纳西州橡树林国家实验室的R.J.Olson提供图)。
(c)1995年年均净海—气CO₂通量($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)(Takahashi et al., 2002)。
(d)人类活动引起的CO₂柱清单($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$)(Sabine et al., 2003)。

研究基础

目前全球碳通量格局与变率的理解主要来源于：

- (1)大气CO₂等气体浓度的全球观测、卫星监测以及在陆地与海洋的定点观测；
- (2)大气与海洋动态以及生物地球化学过程的模拟研究；
- (3)质量守恒定理。

基于上述研究，得到如下结论(IPCC, 2001a; Field and Raupach, 2003; CDIAC, 2003)：

1. 自工业革命以来,全球矿物燃料燃烧引起的碳排放不断增加,从1980年的5.2 PgC上升到2002年的6.3 PgC,并且该增加主要集中在北半球。

2. 自1750年以来,大气中二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)以及氧化亚氮(N_2O)的浓度分别增加了31%、150%和16%。

3. 矿物燃料燃烧排放到大气中的 CO_2 约有50%被陆地和海洋所吸收。

4. 通过大气 CO_2 浓度和 O_2/N_2 比率的观测以及大气模式的反演表明,陆地碳汇主要出现在北半球中纬度地区。

5. 土地利用变化导致热带地区碳排放显著增加,而土地管理方式变化则使北半球中纬度区成为一主要碳汇。

6. 据观测,最近几十年大气 CO_2 浓度的变化十分明显(图7),并且碳在大气中累积速率的年际变化与矿物燃料碳排放量的年均变化十分接近。

7. 陆地生态系统对大气碳交换年际变率的影响比海洋更为明显。

8. 2000年,全球以谷物、木材和纸质产品等形式进行的碳贸易约为0.72 PgC,这对区域碳汇(生产)、碳源(消费)及碳的临时储存(如家具)产生了明显的影响(图8)。

9. 1995年海-气间碳通量约为2.2 PgC($-19\% \sim +22\%$);海洋模式及观测结果显示全球海洋 CO_2 通量的年际变率约为 0.5 PgC a^{-1} ,其中太平洋赤道区是年变率最大的区域。

10. 大气 CO_2 的海洋源/汇的大致分布为:碳源主要出现在热带海域,其中最显著的区域在太平洋赤道区;而碳汇主要在高纬度海区,其中最显著区域在北大西洋。

11. 河流传输对碳源/汇分布格局具有明显的影响,每年由河流输送到海岸带的碳素超过1 PgC。

研究现状

上述研究结果主要是基于观测及模式模拟。本部分将继续描述通过观测及模式方法对碳循环的格局和变率所开展的研究工作,包括对人类活动与碳循环相互作用的观测研究以及模式和观测研究相结合的对策。

全球监测

长期监测是监测、归因和预测全球碳循环时空格局的基本研究手段。长时间序列的观测数据是了解和验证全球碳循环和地球系统科学研究的重要依据(IPCC, 2001a),如来自Mauna Loa, Cape Grim等本底观测站几十年的有关大气成分(尤其是大气 CO_2 浓度)的监测记录(Keeling and Whorf, 2000),以及图1所示的东方站冰芯中42万 a来的记录(Petit et al., 1999)。同时,空间数据对于了解、验证全球碳循环和地球系统科学研究也具有重要的作用,如利用一系列全球生物地球化学模型推导出的陆地净第一性生产力在全球的分布格局(图6a)。

理解地球系统(包括全球碳循环和人类对其的影响)的全球观测工具正被组合成一个全球综合观测战略,即综合全球观测战略联盟(IGOS-P)。IGOS-P的宗旨是发展用于陆地、海洋和大气全球环境观测的主要地基和空基系统的耦合战略。

作为综合全球观测战略联盟(IGOS-P)的一部分,全球碳循环在下一个10 a的观测战略已形成,它将以全球碳的综合观测(IGCO)为主题,并与全球碳计划(GCP)紧密协作(附录B)。其战略目标如下:

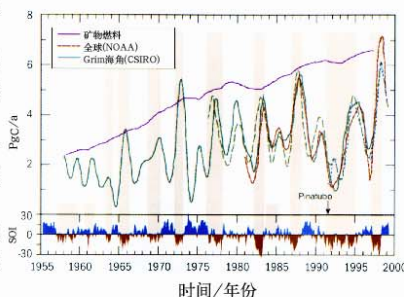


图7 与过去40 a矿物燃料排放量相比的 CO_2 全球增长率(在此表示为自开展 CO_2 监测以来大气碳累积, $10^{15} \text{ gC a}^{-1}$)

平均而言,55%的与人类活动有关的 CO_2 排放被保留在大气中,但具有与南方涛动指数(SOI)相关的较大的年际变率(1991年火山爆发后的较低增长是一个例外)。所有的 CO_2 资料均用650 d滑动平均以消除季节影响。该资料来自SIO/NOAA收集的冒纳罗亚(Mauna Loa)观测资料、NOAA收集的全球50个站点的资料,或CSIRO收集的Cape Grim所有最近轨道的全球增长率(资料来源:R J Francey, EC-IGBP-GTOS陆地碳会议,2000-05-22-26,哥斯达黎加)

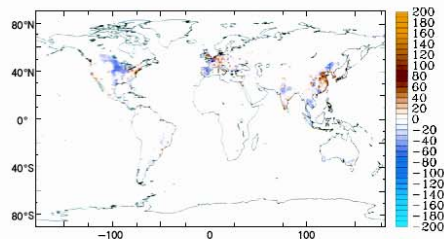


图8 粮食产品生产与新陈代谢引起的碳源汇 ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, Ciais et al., 2001)

- (1)整合遥感观测与地面样点观测;
- (2)联合海洋、陆地和大气观测;
- (3)与全球碳循环研究及评估团体紧密协作。

基于上述目的,归属于GTOS计划的陆地碳观测计划(Terrestrial Carbon Observation,TCO)通过与地面及卫星遥感数据的结合来揭示陆地生态系统碳源/汇的时空分布格局。

MODIS和其他卫星的最新遥感数据将提供有关陆地与海洋碳吸收、碳排放的长期动态信息,包括大量全球碳循环组成要素连续的、经过校正的实时信息。如图9所示的全球净第一性生产力(NPP)记录,其空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$,观测时间间隔为8 d。

大气观测

许多国家都将大气主要痕量气体浓度的监测作为其研究项目的组成部分,取得的数据对气候变化的预警和理解具有重要作用。大气是表层通量时空变化的良好过滤器,它将滤过短期的波动而保留大尺度的信号(Tans et al., 1990)。因而,大气 CO_2 的分布状况及其随时间的演变可用于表层通量的量化研究。

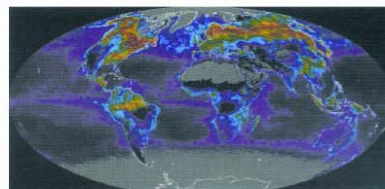
目前区域尺度碳收支的估算,主要是利用站点(约100个) CO_2 的测量结果,结合几个高塔和航空观测的数据,通过大气反演的方法进行的。重要结论之一是发现主要碳汇出现在北半球的陆地和海洋(IPCC, 2001a; Gurney et al., 2002; Rödenbeck et al., 2003)。同时,表层通量的时空分布格局具有高度的不确定性。在不考虑其他限制因素的情况下,即使在取样最为稠密的北半球中纬度地带,要想把经度带或海洋与陆地之间的碳源或汇区分开几乎是不可能的。虽然这些限制因素可通过局地尺度的过程研究而获得(Wofsy et al., 1993),但仍难以以上推到全球尺度。如果没有多尺度多平台的 CO_2 观测,甚至无法确定 CO_2 分布的不确定性是源于传输模式、数据,还是反演过程。

为了解决 CO_2 测定的准确性和一致性的问题,设立了大气数据整合协作计划GLOBALVIEW- CO_2 。目前,它包括了来自大约14个国家的24个组织(图10),并已建立一个一致的连续21 a的全球数据库。除 CO_2 以外,该系统还对观测 CO_2 中的 ^{13}C 和 ^{18}O , CH_4 , CO , O_2/N_2 等指标进行观测。通过 ^{13}C 和 O_2/N_2 比率的测定可以推断分别由矿物燃料释放、陆-气交换以及海-气交换而进入大气的净碳通量。通过 ^{18}O 的测定可以估算植被总第一性生产力,并与净生态系统交换形成对照。根据 CH_4 和 CO 的测定结果可以估算矿物燃料燃烧对碳排放的贡献。另外,GLOBALHUBS已经制定了一个计划以对 CO_2 浓度和同位素含量进行内部校验。

大气观测的3个重要进展如下:

(1)洲际尺度大气组成(包括 CO_2 及上述提及的 CH_4 , CO 等气体)的随机观测是对网络站观测的补充。为了消除局地源汇状况的影响,现有的大气观测网络主要集中于远洋边界层的监测。这些资料不能作为本底资料,有必要加强各大

2002年6月



2002年12月

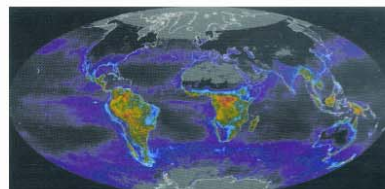


图9 基于MODIS空间观测和NASA地球观测组建立的算法估算的2002年6月和12月的全球净第一性生产力($\text{kgC m}^{-2} \text{a}^{-1}$; 资料来源于NASA Earth Observatory)

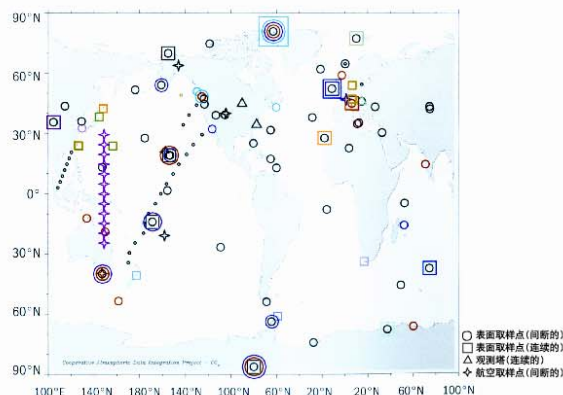


图10 大气 CO_2 浓度气瓶观测点的全球分布(注意南半球以及欧亚大陆、非洲和南美洲的站点稀少)(GLOBALVIEW- CO_2 2002) (<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html>)

洲的其他观测。由于大气CO₂混合受地表下垫面异质性及陆-气边界层在对流与稳定状态间的日循环引起的强时空变化影响使得相关的观测变得更加复杂。但取样技术的不断进步可能会逐步克服其困难。目前所进行的观测主要通过气瓶取样、通量网、商业或专门的飞机以及船只来完成。为了开展连续的CO₂观测，便携、低维护的CO₂传感器新近研发成功，其精度可与目前本底观测所用仪器相比。

(2)网络优化方法将改进已经存在的采样网络。作为优化网络设计的基本技术，这些网络优化方法取决于数据融合方法的利用。

(3)目前，大气采样网络在陆地、海洋及大气中采样点分布不均匀(如前所述，它将严重限制大气反演，Rayner and O'Brien, 2001)，这可通过CO₂的遥感监测得以弥补。

大气CO₂的遥感观测

利用空间设备对地球表面和大气的遥感监测将促进碳循环的研究。为了从空基进行CO₂探测，专用于气象探测的两个新的红外设备正在研发，即于2002年3月地球观测系统卫星EOS-Aqua(The Earth Observing System, EOS)上发射的大气红外探测仪(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)以及将于2005年从第一代气象专用极地卫星(The first Meteorological Operational Polar Satellite, METOP)上发射的红外大气探测干涉仪(Infrared Atmospheric Sounder Interferometer, IASI)。AIRS和IASI可测定高光谱分辨率下的绝大多数红外波段，如果同时使用一个微波探测器(AMSU)可增进其效能。这主要是因为AMSU仅能探测气温的变化，而AIRS和IASI还对大气CO₂浓度十分敏感。同时，希望CO₂的其他特性也能够从这些传感器上获得(Chedin et al., 2003a)。

基于现有的仪器设备，如自1978年以来美国国家海洋大气局极地气象卫星(NOAA)发射的电视红外观测临近卫星(Television Infrared Observational Satellite-N, TIROS-N)的可控垂直探测器(Operational Vertical Sounder, TOVS)已经获得了概念性研究的证据。尽管这些空间辐射仪的空间分辨率很有限，但从TOVS的观测结果仍然能提取到有关CO₂及其他温室气体季节动态特征和变化趋势，并可解释这些气体浓度的年季变化(Chedin et al., 2002, 2003b)。

2002年从Envisat平台上发射的用于大气制图的扫描影像吸收光谱仪(Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, SCIAMACHY)对于CO₂浓度遥感监测数据的反演也具有重要作用(Bovensmann et al., 1999)。该仪器可提供高分辨率地球长波反射光谱，其中关于通过大气层时被吸收的波段信息可用于温室气体CO₂、CH₄、N₂O、H₂O和CO的反演。对于CO₂、CH₄和H₂O，总的体积估算精度为1%，而对于CO和N₂O的估算精度为10%(Buchwitz et al., 2000)。SCIAMACHY对于相关气体基准测定的水平分辨率通常为30 km × 120 km(高纬度地区为30 km × 120 km, 30 km × 240 km)。与此类似的被动吸收微分技术最近被用于欧洲空间代理机构的碳循环监测(CARBOSAT)以及具有较高时空分辨率的轨道碳观测(Orbiting Carbon Observatory, OCO)。

这些任务的关键在于CO₂体积浓度的测定精度都要高于1%(<3 × 10⁻⁶)。模拟显示通过卫星遥感观测得到的CO₂通量与地面观测站测定的结果相比，精度大约可以提高10倍。而且，随时空尺度的增加，通过卫星遥感观测进行估算的精度也提高，尽管单点估算的准确性可能低于大气采样网络的测定结果(Rayner and O'Brien, 2001)。

陆地观测

陆地碳观测的初衷是为了进行生物资源的开发，这促使许多国家进行森林资源清样调查(Cannell et al., 1999; Houghton, 2003)，并且建立监测网络以支持森林、农田和草原的持续利用。与此同时，各国还在一系列样地展开长期的生理生态观测研究，并加强土地覆盖的遥感观测。

目前，有一系列与陆地碳观测相关的国际协作观测网络(数据提供者)，包括全球范围的地面观测和卫星遥感观测(附录C)。其中，地面观测网的通量网计划包含了全球200多个样地。在每一样地，利用涡动相关仪对地-气间的CO₂交换、水汽交换及热量交换等进行连续监测(图11)。在其中的大部分样地，还同时进行着植被、凋落物和土壤库的碳储量和通量及其他生理生态变量的综合测定。通过尺度化，通量塔的观测数据已经成功地用于洲际尺度的通量计算(Papale and Valentini, 2003)，并揭示了其季节与年际动态的控制因子。而且，这些通量数据也可对MODIS的数据新产品(如植被净第一性生产力)进行验证。

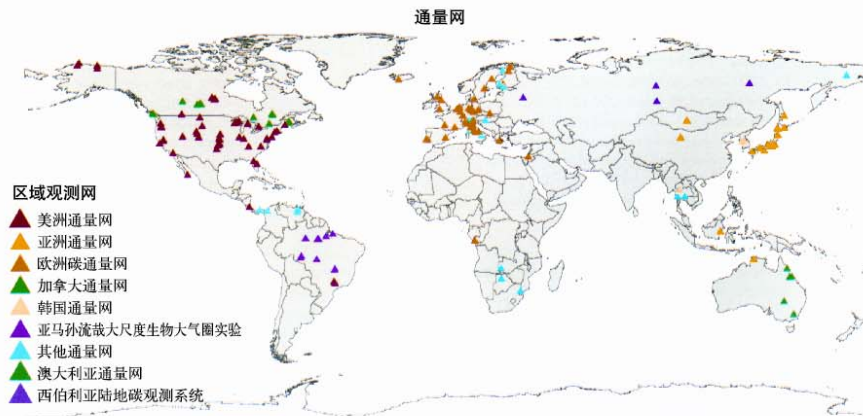


图11 通量观测点的空间分布及其代表性发起国家

这是对生理生态和生态系统观测以及不同观测网间进行标准化的一大进展。通量网是国际协调如何实现国家间和学科间交流和信息一个重要例证。全球碳计划的一个重要目的就是鼓励和促进成功网络的成功发展、协调和拓展，如通量网 (<http://www-eosdis.ornl.gov/FLUXNET>)。

国际长期生态研究网络(International Long-term Ecological Research Network, ILTER)在进行生态变化观测的同时还进行了大量技术含量较低的生理生态观测。作为全球陆地观测网络(GT-Net)(附录C)计划的一部分，区域地面观测协调计划已由GTOS提出。同时，一些研究计划已开始对各国数据进行统一化，如对北美和亚洲各国森林资源清样资料的比较(Goodale et al., 2001)以及对一些国家土壤有机质数据库的比较(Smith et al., 2001)。

陆地碳观测数据的使用者是需要陆地生态系统碳循环信息的机构和研究团体(附录C)。不同尺度(全球尺度、洲际尺度和国家尺度)、不同数据产品类型及不同的使用群体对数据的要求也不同。在某些情况下，国家机构需要的信息可能超出其疆域。

除了上面提到的数据和产品生产计划，为促进全球系统观测能力的发展还有一些计划在进行，如全球森林覆盖观测计划(Global Observations of Forest Cover, GOF-C);提供有关生物量燃烧数据的世界火灾网络;提供用于净第一性生产力估算数据的GTOS净第一性生产力计划;促进生态系统生产力算法改进的IGBP的NPP比较研究计划(Cramer and Field, 1999)。

在今后几年，陆地碳库及通量的观测将加快以下方面的发展：

- (1)多尺度观测，如涡动相关观测，生理生态观测与过程观测研究以及遥感监测(见主题2，研究现状：尺度相互作用)；
- (2)通过反演、数据同化以及多元限制等方法进行陆地模型和观测的整合(见主题1，研究现状：观测与模型的综合)；
- (3)同位素或其他示踪元素的应用(^{13}C , ^{14}C , ^{18}O , ^{15}N , ^2H , ^3H)将使新测定方法成为可能，并成为模型中的限制因素；
- (4)按照《京都议定书》的要求，各国需要分门别类地对碳库及其通量进行估算，这将使陆地观测方法更趋多样化。

海洋观测

传统的海洋调查对于采样必不可少，它提供连续的历史数据，可对整个海水剖面采样进行高精度的室内分析及详细的过程研究。目前，国际海洋碳协作计划(IOCCP)已在全球范围展开海洋的连续勘察，这是一个GCP和关于海洋 CO_2 研究的SCOR-IOC咨询小组共同发起的试验计划。IOCCP还将与CLIVAR合作，进一步开展

关于全球海洋循环实验(World Ocean Circulation Experiment, WOCE)中水文地理的有关研究。

海洋调查所获得的高分辨率空间数据可供定点的表层测量使用,如在海-气通量估算中就需要利用海洋表面CO₂分压(pCO₂)数据。在海洋观测(如最近WOCE联合JGOFS进行的水文地理调查)中,通常会用到船载CO₂分压系统,并且试图与船测(SOOP)资料相结合。未来将进行更多的上述观测。为了优化观测点在区域或全球的分布,需要更好的协作。

因为耗资巨大,利用船只的大尺度海洋调查不能频繁进行。这种限制下的海洋观测只能说明碳在海洋中的大致分布状况,但无法很好地揭示季节、年际及年代际尺度上的海洋碳变率。为了解海洋碳的时间分布格局,定点进行碳及其他生物化学变量的长期连续观测至关重要。目前,海洋长期定位观测最为著名的是在夏威夷(夏威夷海洋时间序列计划, Hawaii Ocean Time-series programme-HOT)和百慕大群岛(百慕大大西洋时间序列研究, Bermuda Atlantic Time-series study-BATS)附近的美国JGOFS站,该站已有十几年历史。HOT计划和BATS研究获得的数据,包括每月的碳酸盐系统参数、生物地球化学参数(如初级生产力、叶绿素、养分和近表面沉积)。通过这些观测已取得了一系列重要的发现:海洋表层水域溶解态无机碳(DIC)的浓度在增加,以及亚热带太平洋海域具有重要的固氮作用。为提高效率,应将这些长期定位观测站点彻底整合到水文及商船调查研究计划中(包括停泊观测和漂流观测),并且使时间序列的观测与空间调查相互补充。

大量的卫星观测数据可直接应用于海洋碳系统(附录C)。最为突出的例子是海水颜色数据,该数据的采集始于海岸带海水颜色扫描资料(CZCS, 1979~1986),并在最近几年得到快速的拓展(资料来自海水颜色和温度扫描器, OCTS, 1996~1997);地球反射的极化与定向(POLDER)以及海洋观测宽视域传感器(SeaWiFS, 1997年底至今)。与此相关的物理数据库包括用于中尺度变率与物理循环的海平面高度(包括TOPEX——美国、法国合作进行的利用雷达高度计/海神式导弹测定海平面高度的研究计划、欧洲遥感计划)、海面温度(甚高分辨率辐射计—AVHRR)以及海面风速(包美国国家航空航天机构散射计—NSCAT; 速测—QuickScat)。新技术的发展将使遥感监测海洋盐分成为可能。

目前海洋观测研究的主要发展方向为:

(1)海洋观测无论在观测的空间密度和时间频度方面,还是在观测的化学和生物学参数方面都持续拓展。关于海面温度(SST)、风、海水颜色的遥感资料将连续提供大尺度海洋上层物理和生物学特性的格局和变率的重要信息。定点海面自动观测和采样技术也在不断的发展以弥补遥感监测的不足。化学采样领域有发展前景的包括新类型自动数据采集传感器(包括CO₂分压(pCO₂)、溶解态无机碳(DIC)、养分、颗粒状无机碳、颗粒状有机碳(POC)以及生物光等参数数据的采集)以及海洋观测平台(如系留, 漂流, 垂直浮动, 滑翔, 水下自动观测车)的研发。

(2)用于海洋观测诠释的放大方法将提供其他有关区域海-气通量年际变率的信息。这样的信息来源于海洋表层水域CO₂分压的重复观测。在进行流域尺度海洋碳收支研究时,必须对海洋碳储量和传输变化进行估算。

(3)综合海洋碳观测系统的开发将通过改善组织和协作而得到更大发展。这将包括:1)确定和支持目前正在开展的海洋观测研究计划的基本组成部分(如海洋时间序列观测站、水文地理观测站及船测)或正在计划阶段的海洋观测研究计划的基本组成成分;2)召集和鼓励专家组国际会议以探讨一个科学的、可操作的海洋观测系统应具备的条件;3)发展与其他物理、化学和生物海洋野外观测的协作关系,特别是与CLIVAR和GOOS计划的协作关系。这些科学计划目前正在北大西洋和北太平洋开展以连续监测来自于船测航线的流域尺度的特性。但是,这些计划都需要长期支持以建立和维持有效的数据库。

(4)海洋碳同化和反演模式正取得快速进展(就大气和陆地观测而言)。大量有关过程水平信息对于揭示海洋碳通量时空分布格局及其控制因子至关重要。随着海洋观测的不断完善它们将会提供丰富的数据,并迅速应用于模型的驱动。而模型的发展又有助于提供时空尺度的数据插值,以估算全球碳通量和储量。

人类与全球碳循环相互作用的观测

全球碳循环的人类成分包括碳的排放、固定、横向运动、农产品生产与消费。这些由人类活动引起的碳通量与其他人类变量相互作用,包括人口、健康、能源系统、技术途径、环境价值及限制因素(Dietz & Rosa, 1997)。这种相互作用通过人为作用导致的碳循环变化的认识以及其他主要因素如经济、社会驱动因素、水和食物供给等实现。

一系列现存系统都提供了与人为作用有关的碳通量数据。这些系统包括国家碳排放、森林及土地利用调查,

国家碳储量估算系统, 区域环境报告以及商品进出口贸易数据。如何整合这些类型不同、来源各异的数据(大多为间接数据)是个严重的挑战。

人类与碳循环相互作用观测领域的主要研究方向包括:

(1)不同国家、区域及局地在碳循环中作用的差异。例如, 绝大多数矿物燃料释放的碳出现在北半球, 而土地利用变化造成的碳排放则主要发生在热带地区。国家间的合作对于收集数据和分析变化趋势具有十分重要的促进作用(Mason, 1997)。

(2)对气候变化和碳循环变化的区域响应和脆弱性的更准确评估。尽管关于这一问题已有不同方法, 但是一个十分重要的挑战就是要探讨不同区域、局地、生态系统及社会实体将如何面对和管理碳循环的变化(O'Brien and Leichenko, 2000)。

观测和模型的综合

上述所提到观测研究只有少数可以提供直接的全球碳循环的通量和储量的信息, 还没有一种观测能直接给出全球碳的时空分布格局。因此, 必须通过推断获得有关结果。尽管现有的推断方法多种多样, 但都基于观测与模型信息的综合, 也称之为“模型-数据融合”。其一般原则就是通过调整模型的一个或多个参数, 使模拟结果与观测值之间达到最佳匹配。这一原则的实现有两个途径: 第一, 改变模型参数。这里的参数包括4种类型: 模型参数(输入模型方程的常数)、空间边界层条件、初始时间条件及模型自身的状态变量。第二, 探讨这些参数适宜值的调查方法, 这依赖于问题的复杂性及其表达公式。一般来说, 一个最适过程应该提供3种输出: 变量的适宜值、值的不确定性以及在给定数据不确定条件下评估这些值是否适合于模型。

已经有几个分析这些可能性的方法:

大气海洋反演方式。全球大气反演应用来自全球流动与本底观测网络的大气组成观测, 结合全球大气传输模式, 以揭示陆面和大气间的空间平均净CO₂通量和其他元素通量的空间分布(Enting, 2002; Gurney et al., 2002)。其原理是探讨指示物, 特别是CO₂的源/汇分布; 与大气传输模式相结合, 提供全球浓度测定的最大一致性。在这样的条件下, 模型被改变的特征是边界条件。“反演”本质上就是反向运行大气传输模式。

大气反演提供了对总碳源/汇的限制, 但是无法提供过程反应。目前, 它们的时空分辨率是十分粗糙的。该模式可以区分在热带、南半球、北半球等极典型区域以及陆地和海洋间的碳交换, 但是无法表明热带的碳平衡并且无法满意地分辨出经度格局(Schimel et al., 2001)。由于数据的短缺, 特别是热带和大陆边缘, 强烈限制了区域问题的解决。目前正在努力使用垂直剖面来填补这一空白。另外, 反演还依赖于大气传输模式的选择, 特别在海盆、大陆或更小的尺度上更是如此。

利用中尺度模式(Gloor et al., 2001)和大气边界层平衡方法(Lloyd et al., 1996), 大气反演方法也被用于区域尺度。通过物种和同位素测定的林火和城市面积研究亦已经被用于获取气体源有用的信息。在植被冠层尺度大气反演方法的应用已经被用于植被和土壤间碳源/汇的分配(Raupach, 2001)。

海洋反演基于相似原理以利用海洋CO₂分压和其他数据来探讨海洋和大气的CO₂交换量。这些数据要求与大气反演的数据要求很相似, 特别是数据测量的准确性和密度是一个主要问题, 而且海洋和大气CO₂的交换量对海洋输送模式十分敏感。

参数估算。在这一情况下, 被改变的模型特性是参数, 这些参数不是基于对过程的理解获取的。对于生物地球化学循环和碳循环模型, 这些参数包括量子产量、光利用效率、温度对呼吸作用的影响或库周转时间(Barret, 2002)。为使模型更好地适用于测试数据, 对参数进行选择是必要的。找到最适参数的方法有许多, 从简单的图形拟合(如线性斜率拟合)到为了同时发现多个参数的先进搜索过程。

在参数估算过程中同时使用多种数据(多元限制)是一个发展方向。许多不同种的数据——大气成分、遥感、库和通量的当地观测是可用的。不同的数据在模型中限制了不同的过程。例如, 大气浓度和涡动相关的测定限制了净CO₂交换量(生态系统净交换)。而遥感通过NDVI等指标可以间接反映总交换量(总第一性生产力)。这样, 不同的模型参数会受到不同种数据的限制, 而同时使用不同种的数据是综合模式所必需的。这种方法已经在一些研究中进行了初步尝试, 包括对洲际尺度的地面数据和大气浓度数据的共同使用(Wang & Barret, 2002), 全球尺度的大气组成、遥感数据和涡动相关数据的联合研究(Kaminski et al., 2002), 利用洲际尺度的生态数据来约束全球碳循环的生态系统模型(Kaminski et al., 2002)以及在冠层尺度的应用(Styles et al., 2002)。

多重限制方法依赖于具有很大空间、时间和过程分辨率差异的强迫数据,从而产生更多限定性的预测。该方法提供了一种手段以区分哪些是重要的或不重要的研究途径,从而提高碳循环模型中过程的代表性,因为应用目前的反演技术带来了估计参数的不确定性。降低这种不确定性的方法之一就是要不断增加模型整体预测的信息含量。为了降低模型参数的不确定性,潜在的数据源应被评估。该方法需要数据的不确定性特征,而不需要准确有效的数据,这样就允许提前验证实验设计。

数据融合方法。数据融合包含未来模型在整合过程中自身状态变量的调试。这也可能通过连续地调整模型的初始条件来实现,如在天气预报过程中四维变量数据的融合方法即将使用。这里全球时间序列的数据被用来强迫动态模型与某一给定时间的数据相符合,直到不同地区的最基本需要在模型中得到体现,如质量守恒(Chen and Lamb, 2000; Park and Zupanski, 2003)。未来这些方法将在碳循环模型中得到应用。

数据和模型综合方面的主要研究方向有:

- (1)为提高对碳循环的理解,需要发展其他被动示踪物值得注意的是目前一些有效的碳循环示踪物仍没有被使用,并且要不断提高对大气CO₂和海洋CO₂分压以及其他指示物的测定密度、校准和解释。
- (2)提高数据覆盖范围,以允许对降尺度的区域估算,尽管区域估算也需要提高全球的背景知识(对任何一点估算能力的提高都意味整体估算能力的提高)。
- (3)3个有助于收集更多与区域反演相关数据的技术:1)连续观测,通过主要变量来反映区域源的变化;2)空间CO₂累积可能的全球覆盖;3)可在恶劣环境下使用的便携式传感器可以填补目前网络观测的空白,同时也需要国际间的数据管理系统努力去处理不断扩大的数据量。
- (4)区域反演及“演习模式”都可以提供过程信息(如来自于火或城市区域的大气扩散研究以及区域海洋传输研究)。
- (5)用多元限制方法模拟生物、物理和生物化学过程的耦合。
- (6)为了在多重限制研究中得到应用,碳循环过程模型的发展集中在适宜参数水平的模拟(注意许多过程模型为了使用多元限制方法过多地参数化了)。
- (7)发展经验性的非线性查询方法。
- (8)通过使用多重数据源的子数据库更好地对模型的不一致性进行验证。
- (9)进一步加强不确定性分析,特别是有关非线性反演的内容。

不确定性及优先研究领域

尽管最近10年间相关研究已经取得了很大的进展,但是仍然有许多的不确定性存在:

- (1)由于观测网络的匮乏,目前的全球模式和观测都不能以可信的精度来揭示区域、洲际或年际时间尺度的碳源/汇状况。如,在北美和欧亚大陆之间的北半球碳汇的划分仍然还不确定。
 - (2)用于确定碳循环主要通量空间分布格局的“从上到下”和“从下到上”的两种方法间还缺乏系统的、令人信服的一致性。区域、洲际或流域尺度的碳收支与全球的分析结果还存在出入,特别是在南部海域和热带陆地等这些关键地区。另外,对一些关键通量,如与土地利用变化相关的通量的估算只采用了“从下到上”的尺度化方法,从全球看还存在很大的不确定性。最近的证据表明,一些横向的碳传输及海岸带对区域碳收支的作用比以前预想得强烈。
 - (3)主要碳通量的时间格局以及碳贮存在超过几年的时间尺度上仍然还不清楚。无论是通过区域分析还是通过生物化学的方法仍然无法判断那些碳贮存对东方站冰芯或短期记录所显示的长期全球大气CO₂浓度升高具有重要作用。
 - (4)目前全球海洋通量格局状况只能通过分析几十年的观测资料来了解。但是这一期间通量的空间格局已经发生了改变,这就使得对某年甚至10年的通量估算存在很大的不确定性。估算的精度取决于对一些空白区域进行时间和空间插值的精度。
 - (5)由人类活动所引起的碳通量的时空分布格局以及人类活动对碳通量的影响过程还不确定,如土地撂荒、人为陆地碳汇、矿物燃料的燃烧等对碳通量的影响等(IPCC, 2000a,b)。
- 综上所述,对科学主题1的优先研究领域为:当前全球碳循环过程中主要碳库及其通量的时空分布如何?
- 1.大尺度(洲际、海洋盆地)的碳通量和贮量的空间分布格局如何?
 - (1)确定热带地区的陆地碳收支,特别是土地利用变化对碳排放的影响。

- (2)确定北美和欧亚大陆间北半球陆地碳汇的经度分布以及欧洲和亚洲间的欧亚碳汇经度分布。
- (3)确定海洋碳源、汇及贮量的大小和空间分布格局，特别在南大洋。
- (4)确定从陆地到内陆湖泊水体再到沿海区域与水流相关的碳通量和贮量以及沿海区域与远洋间的碳交换。
- (5)确定由于水或风的抬升、运移及沉积对全球碳收支的影响。
- (6)确定非CO₂气体（甲烷或挥发性有机化合物）在全球碳收支中的作用。
2. 区域或亚区域碳通量与全球碳循环的相互作用如何？
 - (1)确定海洋生物泵和溶解泵的时空动态以及它们在区域和全球碳平衡中的作用。
 - (2)确定目前关键陆地生物群区（热带、稀树草原、中纬度地区、北方林、苔原）碳收支发展趋势。因为随着耦合碳与气候系统的全球尺度的变化，这些关键生物群区的碳收支亦在发生改变。
 - (3)发展用区域或亚区域碳收支限制全球碳收支的方法，反之亦然。
3. 组成全球或区域尺度碳收支的碳通量或贮量在季节或年代际尺度的变化如何？改变的原因是什么？
 - (1)确定海洋、陆地生物圈和人类碳排放波动对全球碳收支的相对作用。
4. 人类对碳循环，包括矿物燃料燃烧的释放和土地利用排放影响的时空分布格局如何？
 - (1)量化人类影响的核心区域（农村或城市，特别是人口上百万计的大城市）或地区（工业或农业地区）的碳通量和贮量。
 - (2)解决历史上和当前关于土地利用和土地覆盖变化速率与格局测量的不一致。
 - (3)确定人类活动在热带陆地，特别是土地利用变化引起的碳源中的作用。
5. 碳循环变化的社会影响如何？
 - (1)分析碳循环变化的脆弱性、适应性的社会和区域格局。

主题2 过程和相互作用

研究目的

碳循环过程中各碳库间的碳通量和储量受一系列过程支配，包括：

- (1)大气、海洋和河流中的物理过程。
- (2)陆地、海洋的生物和生理生态过程。
- (3)生物地球化学转变。
- (4)自然和人类对陆地生态系统的干扰，如火灾、农业和砍伐。
- (5)人类使用矿物燃料引起的碳排放过程(如能源系统)。

这些过程控制着全球碳循环及其对人类干扰的响应（如陆地碳汇的饱和，热盐循环的稳定性和海洋生物泵的特性）。

深入理解上述过程的基本机制以及在这些过程相互作用时的影响因子是必要的。这对于理解碳循环的现状与未来动态、认识并阐明碳循环的关键过程和机制之间的相互作用与反馈具有重要意义。同时，有关这些过程的理解对于诊断和预测工具的发展(第三部分的行动计划1.2, 2.2 和 2.3)，并最终整合生物物理过程和人类活动过程也是必需的。诊断和预测工具的发展使一些关键系统阈值（如，脆弱性）的确定、减排措施的选择及其减排潜力的评估成为可能(行动计划2.3)。

研究基础

通过田间观测、室内研究、田间模拟实验和过程的模拟研究等途径已经对碳循环的控制过程(尤其是这些过程的机制)有了深入理解(Walker et al., 1999; IPCC, 2001a; Field and Raupach, 2003)，主要包括：

1. 海—气间的净碳交换量主要为一些物理过程控制，包括海水温度突变层和深层水域之间的流动过程(溶解泵)以及碳从海洋表层水域到深层水域再分配的生物学过程(生物泵)。
2. 生物泵控制的一个关键生物学过程是大型浮游植物将颗粒碳从海洋表层向深层的输送(图12)。如果不考虑大尺度洋流变化带来的影响，在未来大气CO₂浓度升高情景下，海洋对大气碳的吸收将增加。
3. 一系列反馈过程控制着陆地表面与大气之间耦合的能量、水分和碳交换，使得这些通量对干扰(如土地覆盖的渐变或转型)的响应应具有显著的尺度依赖性。这些反馈包括植物对大气温度和湿度、土壤温度和湿度的生理响应。