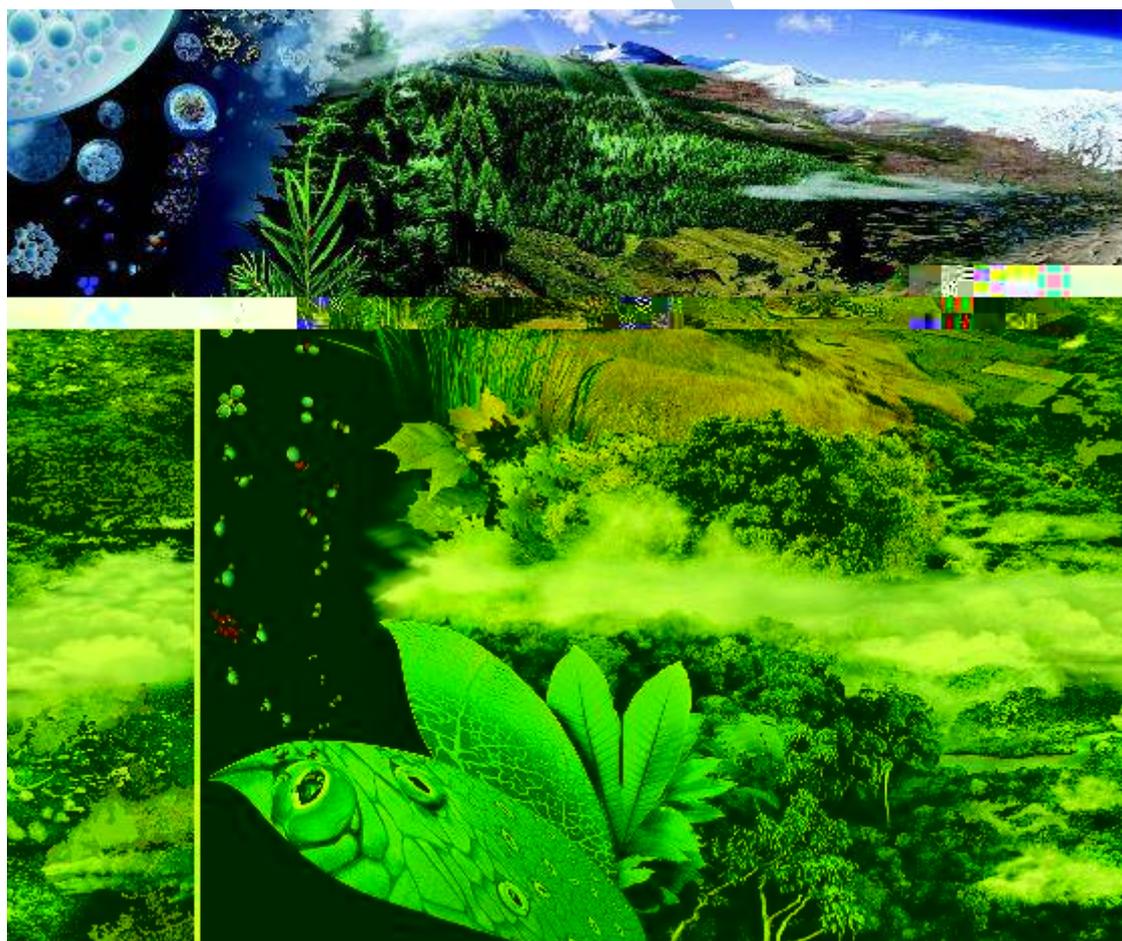




# IGBP报告 54



## 科学计划与实施战略

GLOBAL  
I G B P  
CHANGE

# 陆地生态系统—大气过程 综合研究 科学计划与实施战略

iLEAPS 科学指导委员会编写

2006 年 10 月

## 英文版版权信息

---

Published by:

IGBP Secretariat  
Box 50005  
E-104 05, Stockholm  
SWEDEN  
Ph: +46 8 166448  
Fax: +46 8 166405  
Web: [www.igbp.net](http://www.igbp.net)

iLEAPS International Project Office  
Department of Physical Sciences  
Division of Atmospheric Sciences  
P.O.Box 68  
00014 University of Helsinki  
Finland

Web: [www.atm.helsinki.fi/ileaps](http://www.atm.helsinki.fi/ileaps)

Editors: Meinrat O.Andreae,PavelKabat, Almut  
Arneth and Anni Reissell

Series Editor: Bill Young  
Graphic Design: Hilarie Cutler

ISSN 0284-8105  
Copyright © 2005

该报告如被引用，请注明：

iLEAPS (2005) 科学规划和实施战略. IGBP报告 54. IGBP秘书处，斯德哥尔摩. 52pp.

## 正式出版前将补充相关信息

《iLEAPS 科学计划与实施战略》最早在iLEAPS规划会议（巴黎，2002年10月）以及iLEAPS开放科学大会（赫尔辛基，2003年9-10月）上提出，iLEAPS过渡小组(2003)以及科学指导委员会和国际项目办公室（2004—2005）对这一报告进行了修订。

iLEAPS科学指导委员会成员包括：Meinrat O. Andreae (iLEAPS科学指导委员会共同主席,德国)、Pavel Kabat (iLEAPS科学指导委员会共同主席, 荷兰)、Almut Arneht (瑞典)、Paulo Artaxo (巴西)、Roni Avissar (美国)、Mary Anne Carroll (美国)、Torben Christensen (瑞典)、Paul Dirmeyer (美国)、John Finnigan (澳大利亚)、Laurens Ganzeveld (德国)、Sandra Harrison (英国)、Michael Keller (美国)、Markku Kulmala (芬兰)、Nathalie de Noblet-Ducoudré (法国)、Luanne Otter (南非)、Daniel Rosenfeld (以色列)、Xiaodong Yan (中国)、Kazuyuki Yagi (日本) 和iLEAPS执行主管Anni Reissell。

iLEAPS过渡小组成员包括：Meinrat O. Andreae (德国)、Pavel Kabat (荷兰)、Almut Arneht (瑞典)、Paulo Artaxo (巴西)、John Finnigan (澳大利亚)、Laurens Ganzeveld (德国)、Michael Keller (美国)、Markku Kulmala (芬兰)、Luanne Otter (南非)、Vinay K. Dadhwal (印度)、Pierre Friedlingstein (法国)、Roger A. Pielke Sr. (美国)、Andy Pitman (澳大利亚)、Jan Polcher (法国) 和Xubin Zeng (美国)。

以下人员参与了本报告的写作、审查和编辑：Nuria Altimir (iLEAPS国际项目办公室)、Hanna Lappalainen (iLEAPS国际项目办公室)、Rick Lawford (GEWEX国际项目办公室)、Franz X. Meixner (德国)、Colin Prentice (美国)、Mary Scholes (南非)、Will Steffen (澳大利亚)、Tanja Suni (澳大利亚)、Bill Young (IGBP 秘书处)、Petter Kinnunen (协助制图, 芬兰)、Glynn Gorick (封面美工, 英国)。Meinrat O. Andreae和Pavel Kabat作为iLEAPS 科学指导委员会共同主席对本报告的出版做出了重要贡献。

本报告中文版的编译出版由IGBP秘书处、iLEAPS国际项目办公室、IGBP中国国家委员会秘书处和中国科学院国家科学图书馆兰州分馆全球环境变化信息中心（CNC-IGBP信息中心）资助，曲建升承担了具体的协调组织工作，译校工作由林海、曲建升、何晓波完成。iLEAPS国际项目办公室和中国iLEAPS以及延晓冬、张志强、葛全胜、Bill Young等专家学者对本报告的翻译出版工作给予了大量的指导和帮助。

# 中文版序言

*(将在出版前完成。主要融合以下内容，并增加相关中文版信息)*

## 前言

陆地生态系统—大气过程综合研究 (GLEAPS) 科学计划与实施战略确定了国际地圈生物圈计划中陆地—大气项目的科学目标和主要研究问题，同时也为说明主要研究问题列出了实施战略的大纲。

**iLEAPS** 的研究范畴囊括了从分子水平过程（例如植被中挥发性有机化合物的合成）到地球系统的科学问题以及气候和全球变化。**iLEAPS** 研究强调陆地—大气界面中众多过程之间的关系、反馈和遥相关。由于这些科学问题的复杂性和范围巨大，**iLEAPS** 对集成研究手段和合作尤其重视，这需要不同领域的科学家、实验和模拟工作者，还有国际性的研究项目和计划的积极参与。

---

摘要	1
绪论	3
科学专题	7
1 专题 1: 陆地—大气间活性和长寿命化合物的交换: 地球系 统中关键的相互作用和反馈	8
1.1 二氧化碳	9
1.2 甲烷	10
1.3 挥发性有机化合物	11
1.4 氮氧化物	12
1.5 尺度问题	13
1.6 研究主题	14
2 专题 2: 气候系统中陆地生物区系、气溶胶和大气组成之间的 反馈	16
2.1 生物圈—气溶胶—云的相互作用	16
2.2 地气交换和大气的自净机制	18
2.3 研究主题	19
3 专题 3: 陆面—植被—水—大气系统中的反馈和 遥相关	21
3.1 水文—生物地球化学横向联系	21
3.2 区域问题	21
3.3 全球性问题	22
3.4 尺度问题	24
3.4 研究主题	24
4 专题 4: 物质和能量在土壤/ 冠层/ 边界层系统内的 输送: 测量和模拟	26
4.1 湍流通量测量传感器的发展	29
4.2 通量塔斑块尺度测量	29
4.3 非守恒标量	30
4.4 边界层收支法	30
4.5 大气成分、通量的机载测量	31

4.6 遥感	31
4.7 尺度问题	31
4.8 研究主题	32
实施战略	34
1 观测、模拟战略和综合	34
2 观测与模拟的结合：尺度连接工具	36
3 相关科学活动的协作	37
4 组织结构	38
4.1 项目管理	38
4.2 活动	38
4.3 能力建设和知识传播	39
4.4 交流	40
参考文献	41
缩词表	51

地球环境是一个复杂的系统，包含了大量杂乱有联系的过程。过程中的任何一个变化都可能从分钟到数百年的时间尺度、从细胞到全球范围的空间尺度上反馈相同的过程以及其它各种不同的过程。地球气候系统,包括陆地和海洋环境。地表—大气界面在地球系统控制能量、动量和物质的传输功能方面起着重要的作用。

iLEAPS（陆地生态系统—大气过程综合研究）是国际地圈生物圈计划(IGBP)中关注陆地—大气相互作用的一个新的国际研究方案。iLEAPS 的总体目标是：

*加强对通过陆地和大气界面来传输转换能量和物质的物理、化学和生物过程是怎样相互作用的认知，特别强调的是在过去到未来、局地到全球的尺度上的相互作用和反馈机制。*

iLEAPS瞄准于研究陆地与大气界面的传输和转换过程对于地球系统中的动力学将意味着什么。重要的问题是：①在工业时代以前陆地—大气系统功能是怎样的？②人类活动是如何影响陆地—大气系统？③以及在各种时间和空间尺度下多大程度上陆地植被决定了它的物理和化学环境。

科学计划和实施战略提出在 10 年内解决这些关键科学问题。这些科学问题首先从 4 个专题分别提出来的，但是由于它们之间有着复杂并且相互交错的联系，因而不能将他们看作孤立的命题。整个科学问题将有助于不同的时间和空间尺度上的区域气候和全球气候的研究。

### 专题 1：陆地—大气间活性和长寿命化合物的交换：地球系统中关键的相互作用和反馈

陆地和大气间各种各样的物质的交换过程紧密联系在一起，并对气候改变非常敏感，同时也会通过对流层内的化学反应和辐射通量反过来影响气候强迫。例如二氧化碳，甲烷和一氧化二氮以及活性挥发性有机化合物和氮氧化物等长寿命气态化合物都在碳和氮的地球化学循环中相互联系，特别是生产、传输、转换和清除过程之间的相互作用。专题 1 跨越了生物学，物理学和化学等多门学科。

### 专题 2：气候系统中陆地生物区系、气溶胶和大气组成之间的反馈

专题 2 包括由于生物引起的和人类产生的气溶胶粒子与气候系统的相互作用以及生物和水文过程与控制大气自净机制中的大气反应的耦合。本专题研究自然和人为气溶胶的直接排放以及气溶胶粒子二次形成和云凝结核的产生。这些研究将有助于理解气溶胶粒子（包括尘埃、生物烟雾和生物气溶胶）对辐射通量和云降水过程产生的直接和间接的影响。地表大气的交换过程在决定羟基这一确定大气中化合物化学移除率的主要氧化剂浓度方面是非常重要的。土地利用和土地覆盖变化直接或间接地影响到大气和陆地化学清除的氧化能力。因此，地气交换以及混合和输送在调节化学转换方面起到很关键的作用。同时气相化学方面的变化也影响气溶胶的形成和成长过程。

### 专题 3：陆面—植被—水—大气系统中的反馈和遥相关

为了考察不同化合物交换和陆地—大气相互作用对这些通量的控制，必须对小到溪流大到大陆盆地尺度的水文和生物地球化学循环进行研究。高纬度地区生态系统特别重要，因为该地区现在和未来气候的快速变化和对大气中甲烷和二氧化碳浓度潜在的强烈反馈，所以。人类作用影响产生的景观变化导致了热量、湿度和能量在空间上重新分配的巨大变化。在这个专题里也会讨论到在气候系统里的多重平衡、阈值和突变。

### 专题 4：物质和能量在土壤/冠层/边界层系统内的输送：测量和模拟。

专题 4 的目标在于描述研究专题 1—3 中提到的各种过程、相互作用和反馈的测量类型。由于众多过程间相互作用的复杂性，测量和模拟工作要明确地联结在一起。测量方法包括地表通量测量、边界层收支、飞机测量及遥感技术。测量和模拟之综合是指，比如说从局地观测到估计区域交换的尺度分析以及完全耦合的地气模式的敏感性研究。

研究专题 1—3 突出的是过程，而过程被认为对于生物圈和大气圈的联系是十分关键的。这些活动的时间跨度可以从几秒到几十年，空间跨度从细胞到整个行星。过程涉及到各种复杂的反馈，所以孤立地研究单个过程是不能够充分说明问题的。在专题 1 和专题 2 可以看到这些联系复杂性的例子。在水循环和植物内的碳化合物和氮化合物(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC)交换之间的紧密耦合初次被提出来讨论是在专题 1。接下来在专题 2 中讨论了生物成因气溶胶组成在通过影响云和降水来调节水循环的作用。对过程的认识和预测依赖于测量和模拟。由于已经在专题 1—3 中陈述的过程性质，所以在接下来的专题 4 里模拟和测量明确地连接在一起了。

为了能集中测量并且选择代表性的野外研究场点，iLEAPS 实施战略包括战略性模拟试验和多参数敏感性研究。为了解释关键科学问题中的不确定性，研究任务必须根据所提出的区域问题的地理边界或者通常的环境因素来选择。也可以挑选一些研究课题来促进基于陆地—大气系统中主要过程和现象研究的 iLEAPS 任务发展。iLEAPS 将与其他相关计划，包括 IGAC、SOLAS、GLP 和 GEWEX 的联接。

能力建设和知识传播是 iLEAPS 的基本组成部分。知识传播包括跨学科的培训，能力建设和学生的扩展(最初的接触和地区的介入，现场训练，后续的专题讨论会，数据库)，以及相互之间的交流。Ileaps 学术论文将会发表在 IGBP 通讯和其他各种国际期刊上。会议以及大型区域集成计划的宣传页、网站、通讯和出版发行物是交流和扩展的一部分。iLEAPS 也鼓励社团和政策相关的扩展活动与区域集成计划结合。

iLEAPS 运行的方式包括为阐明具体的 iLEAPS 科学问题分析的过程研究的网络、野外活动、模拟(工具研发，评估和对比)、长期的综合性实地考察、国际跨学科的众多活动、综合研究、数据库，和专题科学问题的研讨会和综合性会议。

iLEAPS 研究经科学指导委员会(SSC)核准，所举行的各种活动也将会由位于芬兰的赫尔辛基大学的国际项目办公室(IPO) 协调。这个科学计划和实施战略还包括为科学研究申请书的提交提供给各种指导。

## 绪 论

在IGBP的统一指导下，过去十年的全球变化研究为全世界对地球科学的观点带来了根本性的改变。现在已经很清楚的是全球变化——人类活动对环境的影响——涉及到了地球系统的所有组成部分——海洋、大气、岩石圈、生物圈。此外，现在人们很清楚的是这些影响不能被看作是独立存在的，地球系统组分之间的相互作用和反馈扮演着强有力的和基本的角色（Steffen et al., 2004）。

全球气候和大气中生物微量气体（二氧化碳和甲烷）之间紧密结合的例证在南极超过400,000年的冰芯记录中非常明显（图1）。这些相近的变化提出的原因和结果的问题：是生物温室气体的波动驱动气候变化，还是外部强迫气候变化，而改变了这些气体的排放？最近的一致意见认为这不是一个简单的问题，也许是生物群及其地球物理和地球化学环境协同作用所造成的复杂反馈。

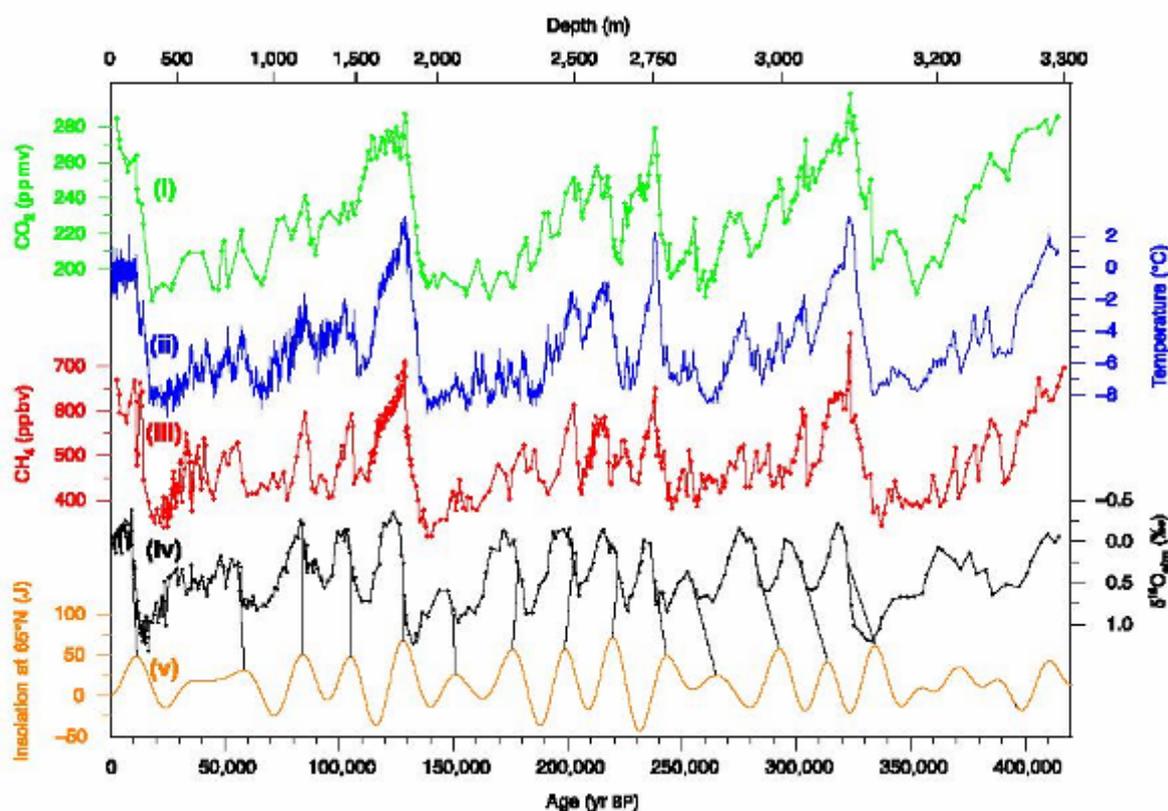


图1 ostok数据组和距今时间（底轴）、冰芯深度（顶轴）

(i)  $\text{CO}_2$ , (ii) 大气同位素温度, (iii)  $\text{CH}_4$ , (iv)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ , (v) 六月中旬在  $65^\circ\text{N}$  的日射 ( $\text{W m}^{-2}$ )。(Petit等, 1999)

这就意味着地球气候系统是由无机和生命世界——生物圈共同决定。地表—大气界面对于地球系统的机能是至关重要的，这是因为生物地球化学过程和水文过程以及能量和动量通量要经过这一界面。同时，不论自然还是人为原因，如化学物质的传输及沉降等大气过程和气候变率是对生物地球化学循环的一个主要约束。例如，通过生理学和生产力相关反馈，所有空间和时间尺度上碳吸收的年度变化受到气候变化的强烈影响；这也是IGBP中全球变化和陆地生态系统的计划（GCTE）的主要成果（Walker et al., 1999）。大气中气体和气溶胶的沉降也强烈地影响着生态系统的功能，有时作为肥料有时作为毒性物质。从IGBP水循环的生物方面计划（BAHC）中得到的经验是土地利用和土地覆盖变化强烈的影响着地表和大气之间的水及能量的交换，使得它们成为了气候系统中重要的组成部分

(Kabat et al., 2004)。因此人类带来的土地覆盖变化极有可能导致重要的区域气候和全球气候变化。反过来，气候变化又在各个时间和空间尺度上影响着陆地生态系统，甚至在某种程度上破坏着像亚马孙流域 (Cox et al, 2000) 或针叶林森林等较大区域。

因此，作为复杂系统的地球，它的一个基本特性就是它们对变化的反应是高度非线性的或者以突发的方式。在最初的强迫下，这些系统可能具有较好的缓冲 (well-buffered)，但一旦突破极限，系统就可能突变为另一种状态。这儿有一个有力的证据表明地球系统倾向于突然变化：极地臭氧空洞或者末次冰河时代的气候振荡 (“Dansgaard-Oeschger” 事件) (Ganopolski and Rahmstorf, 2001)。人类导致的全球变化将地球系统推入了一种非类比状态——气候以及其它环境状况与近50万年的情况不同，由于潜在有害的后果，导致不可预测的变化可能性在增加 (Steffen et al., 2004b,c)。所以，探索并量化地球系统相互作用十分重要。

有关地球系统新的、较为全面的观点需要新的科学方法和有创新的理念与技术手段。单个的地球系统成分、性质和过程——比如大气的组成和环流模式，仍然需要研究，但是应该作为系统中的一个组成部分来研究，这样就可以认识到它们之间的相互作用和反馈。此外，在全球变化的领域内，人类因素必须被考虑为地球系统的一部分。IGBP已经对这一挑战作出回应，建立了基于地球系统主要的生物地球化学组分 (陆地、大气和海洋) 的科学框架，并且通过它们的相互作用和反馈项目作为补充 (图2)。

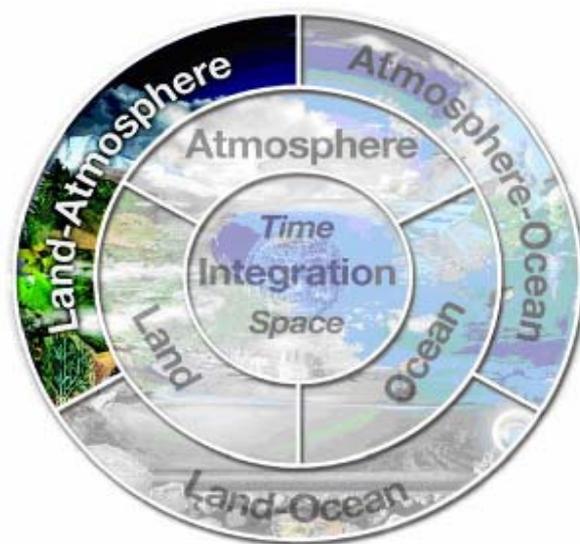


图2 IGBP科学框架

iLEAPS在IGBP框架内专注于陆地—大气相互作用和反馈。iLEAPS目的在于认识相互作用的物理、化学以及生物过程是怎样通过陆地—大气界面传输并转变能量和物质的。iLEAPS科学研究目标一直紧贴对科学认识所必需的科学问题，以及前期研究已经提出的对相互作用、反馈以及遥相关起到重要作用的区域。选择的问题和区域也代表着地球系统中一些关键的“开关”或“气门 (choke)”，这些地方的局部和区域变化应该是对整个地球系统具有最强烈的影响力 (图3)。后面的例子说

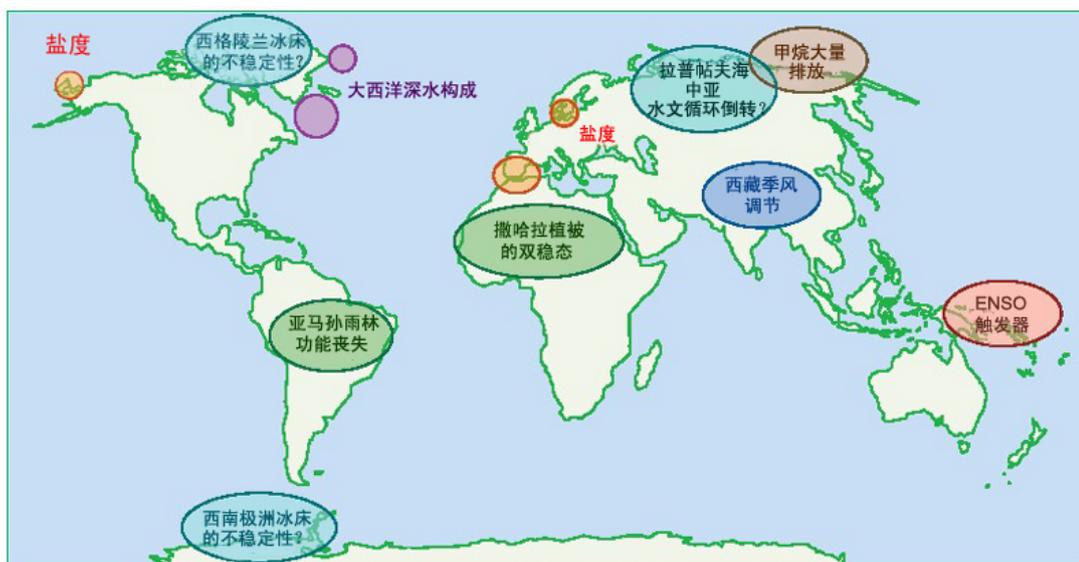


图3 预计对地球系统有强烈影响的关键区域 (Schellnhuber, 2002)

明了一些关键的区域和问题。

一系列相互作用的例证是土地利用变化（砍伐森林）和大气污染物的排放——特别是工业、生物燃烧所产生的气溶胶，它们一同作用剧烈扰动着热带地区的大气。因为热带是驱动大尺度大气环流的“热力机”，热带地区的云以及降水过程的扰动预计会影响全球气候动力过程。主要产生于地表的人为排放气溶胶及其前体物能够影响云的性质，从而影响降水的强度和降水区域以及大气中污染物的垂直分布（Andreae et al., 2004）。这些影响通过作用于陆地水循环反馈地表，最终影响水的可利用程度、农业生产力和源自陆地生态系统微量气体的排放。

除了在热带地区，IGAC第一个十年的一个主要发现就是大气气溶胶现在被认为是认识了解过去及未来气候变化的关键点（Brasseur et al., 2003）。气溶胶强迫的复杂性和它们的反馈正变得越来越明显。考虑所有复杂的气候效应，气溶胶强迫与温室气体强迫就属于同一量级（Anderson et al., 2003; IPCC, 2001）。这使得观测到的上个世纪温度变化（全球约增0.7℃）是可能的，而这是由很小的净全球强迫所驱动，意味着较高的气候敏感度；人类产生的辐射强迫增加会使得温度大幅度上升（Andreae et al., 2005）。这一上升明显关系到21世纪气候系统的发展。随着工业化国家和发展中国家因各种疾病而导致死亡率的增加，人们现在知道气溶胶具有十分严重的健康效应。尤其因为这个原因在可预见的将来，气溶胶的排放可望降低。气溶胶的降低、温室气体排放的增加、由于气候和地面覆盖的变化导致的源于生物圈的碳通量增长以及由于生态系统和南极积雪覆盖的变化引起的地面反射率改变等综合作用引起了人们对未来十年突然剧烈气候变化危险的极大关注。

活性碳及氮化合物表面通量的改变，水文、土地利用变化的耦合和植被动态变化，不仅可以明显的影响气候系统，而且会影响大气的化学功能。IGAC的一个重要发现就是生物活动和大气组成有着密切的关系。自然生态系统一直在与原始大气密切的相互作用中发展，并且大气的自净机制（从大气中清除自然和人为排放产物）是与这些排放处在同一个密闭的反馈链。正如专题2所叙述的，地表交换的变化可能会以较为深刻的方式在较大区域范围内影响这种自净机制。

目前，最剧烈的气候变化发生在北极和北部区域（ACIA, 2005）。过去十年这一区域的大部分地区温度和降水迅速增高，河水径流增加、积雪冰川消融加快。结果植被覆盖区域预期会发生变化，火灾发生频率和程度都在增加，极有可能直接对人类社会造成明显的影响。因此这一区域就成为一个对自然气候、生态系统、水和碳循环以及人类社会进行研究的理想的自然实验室。

BAHC已经表明陆地生态系统是地表和大气之间水分能量交换必要的起决定因素的部分。GCTE强调在生态系统、大气CO<sub>2</sub>和气候之间的相互作用。iLEAPS将这些过程在更高综合层次上融合在一起。

iLEAPS 作为一个界面计划将会与 IGBP 科学构架下着手于陆地和大气的项目紧密合作，如：全球土地计划（GLP）和国际全球大气化学计划（IGAC）。然而，从综合地球系统的观点看，iLEAPS 着眼于地球系统动力学意义和人类在地球系统中的角色。因此iLEAPS 最终处于更全面地综合，而这一综合研究将通过 IGBP 计划中的地球系统分析、综合与模拟计划（AIMES）和国际科学理事会（ICSU）的四项全球变化计划中地球系统科学联盟（ESSP）的区域集成研究（IRS）活动来完成。iLEAPS 也会与世界气候研究计划（WCRP），特别是其中的全球能量和水循环试验（GEWEX）计划、全球陆地/大气系统研究（GLASS）以及全球大气边界层研究（GABLS）密切互动。另外还要与表层海洋

—低层大气计划（SOLAS）、过去全球变化研究计划（PAGES）、全球排放总量评价（GEIA）、全球碳计划（GCP）和全球水系统计划（GWSP）紧密相连。

iLEAPS 要描述科学计划所提出的关键科学问题。问题分为下面这四个重点,但这些都 不是单独的主题单元。能量分割、化学化合物的排放、陆地生物群的碳吸收,所有这些都 以不同的方式在不同的时间和空间尺度上对区域和全球气候产生影响。共同的研究思路是 考察（过去）原始环境以及沿环境扰动梯度（包括极端事件的作用）中的各个过程。大多 数情况下,研究应该基于现场测量、过程和个案研究、卫星观测以及模拟。观测方法和创 新理论基础是极为重要的。

# 科学专题

iLEAPS研究目标在于解决以下四个问题：

- (1) 相互作用的物理、化学和生物过程是怎样通过陆地—大气系统传输并转变能量、动量和物质？
- (2) 地球系统动力学的意义是什么？
- (3) 在工业时代之前状态下的陆地—生态/大气系统是怎样的？人类的活动是如何影响它的？
- (4) 陆地植被在多大程度上决定着自身不同时间和空间尺度的物理和化学环境？

解决这些问题的研究工作被组织为以下四项专题（图4）：

**专题1：** 陆地—大气间活性和长寿命化合物的交换：地球系统中关键的相互作用和反馈。

**专题2：** 气候系统中陆地生物区系、气溶胶和大气组成之间的反馈。

**专题3：** 陆面—植被—水—大气系统中的反馈和遥相关。

**专题4：** 物质和能量在土壤/冠层/边界层系统内的输送：测量和模拟。

后面的章节将说明这四个专题，这包括对陆地—大气系统中有关关键过程的简短回顾以及需要说明的特殊问题。



图4 iLEAPS 科学专题囊括了从分子层次到全球尺度的综合测量和模拟

## 1 专题1: 陆地 - 大气间活性和长寿命化合物的交换: 地球系统中关键的相互作用和反馈

很多物质在陆地大气交换的过程中被紧紧地耦合在一起, 并对气候变化非常敏感, 同时也反过来通过影响对流层化学反应和辐射通量为气候强迫做贡献。大部分气体种类是在生物区系和大气之间交换(Scholes et al., 2003)。最丰富的化合物是二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )、挥发性有机化合物(VOCs), 活性氮氧化物( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ )、以及水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )。其他一些重要的化合物是一氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}$ ), 氨( $\text{NH}_3$ )和各种各样的硫以及卤化物。生物圈通过大量化学反应将燃料提供给大气; 大气化学和动力学决定了这些组成的输送和分布, 而他们反应的产物常常远离他们的源地。



图5. 专题1研究主题包括各种化合物的排放、转化以及沉降

从概念上讲, 碳循环和氮循环之间的紧密联系是很好理解的。氮是一种能够促进光合作用的酶的主要营养成分(例如Rubisco)。由于人为N的排放, 氮的获取日益增加, 从而在一些环境下刺激光合作用和植物的生长。在 $\text{CO}_2$ 增加的环境中, 缺氮植物会出现明显的氮积累现象, 同时当氮的含量受到限制时, 对植物生长的刺激可能减少或者甚至消除。大气二氧化碳的增加可能会引起植物

固氮的长期下降以及对其他营养物如钼, 一种关键的固氮酶, 会有有效的减少(Hungate et al., 2004)。植物得到的氮供给可以被植物间, 土壤和植物相互作用之间长期的相互作用所改变, 亦或者通过改变了的水循环进行调整。这可能可以解释植物和整个生物系统水平上观测到的碳吸收和储存过程中的差别(Stitt and Krapp, 1999, Lloyd and Farquhar, 1996)。当研究氮氧化物释放到大气时, 在生态系统层次上的碳吸收和储存的相互作用也将需要被解释, 这取决于在土壤里氮循环的速率。关于VOC, 这些主要排放化合物(类似于异戊间二烯)与促进光合作用的碳(C)同化作用有直接关系, 因此对于未来排放率的估计不仅需要考虑在气候系统中物理方面的可能变化造成的影响, 而且也要考虑 $\text{CO}_2$ 施肥对同化率的影响。此外, 在沼泽地的甲烷类产物可能与根的分泌液有关系, 然后发生碳和营养物的循环。

气态化合物在与大气中的主要氧化剂: 羟基(OH), 硝酸根( $\text{NO}_3$ ), 以及臭氧( $\text{O}_3$ )发生反应后将会有很大变化。(Atkinson, 2000)。例如包括VOC和氮氧化物的混合参与的快速反应(分的量级)可以发生在植物冠层下面, 反之较少的反应化合物, 像 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CH}_4$ 那样的不那么活泼的化合物就逃散到大气中。由于在取样和分析方法的限制, 只有很小部分VOCs的化学转化产物才能被识别, 更不用说确定它的数量。植物冠层上下的环境状况、排放物和氧化能力的变化可能会影响到交换气体的寿命, 性质和数量, 因此这些化合物也会沉降和散逸混合。

为了预测未来变化对空气质量、气候和生态系统功能的影响, 着重需要认识在陆地生态系统和大气系统之间和之中的碳氮循环的细节。定量预测全球气候变化中碳和氮循环或者研究陆地生物圈和大气圈之间的相互作用和反馈时许多过程尚未被认识。

在短期内, 主要的反馈环是指对植物气孔的控制和土壤水平衡对蒸发和其他标量排放

的影响。蒸发对地表能量平衡的直接耦合是非常明显的：气孔的关闭降低植物的蒸散，这样将会增加将入射辐射转换为感热，这种地面感热通量的增加驱动大气较干空气夹卷的增加，随后会使陆地空气变干从而导致蒸发蒸腾增加。在从数年到几十年再到几个世纪的时间框架中，附加的反馈起重要的作用。这些反馈是由于营养的存在、初级生产力和碳损失对呼吸或者短暂事件（燃烧，草食习惯）之间的时间延迟，导致植被的动力过程遮盖了。所有时间和空间尺度上各种化合物之间大量的相互作用对在陆地大气系统里定量确定每种化合物的作用提出一项较大的挑战。

在陆地大气系统内进行的多种相互作用在上面已简要地说明了。为了明确目的和篇章的结构，一些关键痕量气体和化合物组将在以后的章节里单独陈述。不过，应当指出它们的生产，运输，转化和沉降之间的相互作用，换句话说就是物理、化学以及生物之间的相互作用将会在iLEAPS内特别考虑。

## 1.1 二氧化碳

主要起源于人类的温室气体CO<sub>2</sub>，在大气中的浓度已经在过去的150年增加了30%还多。这是由于矿物燃料燃烧以及接着发生的土地覆盖和土地利用的变化。大气CO<sub>2</sub>浓度的增加量近似于人为排放总量的50%，这就意味着另一半已经被海洋和陆地生物圈吸收(Prentice, 2001)。

在定量陆地生物圈碳吸收的过程中一个不确定的主要来源是缺乏对驱动全球尺度陆地碳吸收的增加机制的理解。一个可能的直接机制是碳吸收的增加和随后生产力的增强。这类过程例如像气候变化或生产力的增加（不是通过氮沉降的增加就是土壤氮可用性的增加）间接地影响碳的吸收。此外，在土地使用和林业习惯做法的变化也会有助于增加陆地碳汇。然而，土地覆盖和土地使用变化对地区的和全球碳收支的贡献是很不确定的，这是因为把植物变化换算成CO<sub>2</sub>净通量不论是流向大气还是流出大气都不是微不足道的(Houghton et al., 1999)。另外的错综复杂是由于在增加(或者减少)的碳吸收，生产力和来自陆地生物圈的源于呼吸作用的CO<sub>2</sub>损失之间的时间延迟。在许多情况中，平衡中呼吸作用的机制研究是较少涉及的。扰动和偶然事件(例如：火灾、食草习惯、风灾、洪水等)与生产力和气候之间的相互作用目前也没有被很好认识(Schimel et al., 1997, Arneeth et al., 1998, Knohl et al. 2000)。

对局地尺度内陆地生物圈中CO<sub>2</sub>净吸收有影响的较为可能的过程已经在可控制的实验中被广泛研究。另一方面，需要有更多的研究来了解这些不同的过程是如何控制大气与陆地之间从局地到全球尺度的CO<sub>2</sub>通量，以及确定在气候系统中各种相关反馈的数量。气候与生态系统耦合的模式模拟结果表明这些反馈可能是很重要的(Cox et al., 2000, Friedlingstein et al., 2001)。为了取得这方面进展，应该建立包含有关潜在强迫机制的数据的综合数据库。数据应该与那些陆地生物圈的机制模式相结合，同时也要与陆地大气系统中长期观测的基础数据相比较。最新的全球植物动力模型(DGVMs)开始处理这些问题，但需要进一步发展(Cramer et al., 2001)。例如，对于自然的或者人为引起燃烧的真实表达还是处于发展的早期阶段(Thonicke et al., 2001)。同样地，更多的研究只是要求描述燃烧对于生物圈的功能、CO<sub>2</sub>通量以及活性气态化合物的影响。现在的研究也应该努力搞清楚在生物圈与大气系统内CO<sub>2</sub>和其它化合物之间的耦合。非CO<sub>2</sub>化合物的生物通量(甲烷，VOCs，见在下面)通常都与陆地一大气系统中CO<sub>2</sub>的交换有关。例如，湿地产生的甲烷和腐烂时分解产生的CO<sub>2</sub>之间与取决于土壤中水的这两痕量气体之间的平衡之间均存在着一种联系。植物光合作用需与森林VOC排放相耦合。这些联系需要DGVMs的发展，DGVMs模式能够以一种可靠的方式解释多种化学组成，并将局地尺度下CO<sub>2</sub>和其它气体的模拟结果(例如，FLUXNET)与在较大尺度下(例如，GLOBALVIEW网络和遥感数据)大气的测量进行对比。

## 1.2 甲烷

甲烷是对温室效应最有力的贡献者之一。用CO<sub>2</sub>作为参考，一个数量单位的甲烷的辐射强迫潜能大约是100年内CO<sub>2</sub>的辐射强迫的23倍还多(Ramaswamy et al., 2001)。甲烷在对流层化学反应中也扮演着重要角色，因为大气圈中的大多数甲烷(和那些非甲烷烃，参阅1.3部分)是通过与氢氧基反应氧化生成的。所以全球的CH<sub>4</sub> 排放不仅对于地球能量收支中辐射强迫相当重要，而且对大气圈的氧化能力也很有意义(见专题2)。甲烷和其它的VOC与氮循环之间存在重要的连系。在NO存在的情况下，甲烷和VOC被氧化产生二氧化氮(NO<sub>2</sub>)，反过来通过光分解作用和随后的反应形成O<sub>3</sub>。这个顺序为对流层的O<sub>3</sub> 收支具有重要意义(Monson and Holland, 2001; Brasseur et al., 2003))，以及对氢氧基的浓度也很重要，因为氢氧基主要由那些光分解作用产生的臭氧组成。由于NO<sub>x</sub>、一氧化碳(CO)和VOC排放的增加，它们与氢氧基发生较快的氧化反应，这样反应较慢的甲烷在大气圈中的存在寿命在近几年来很可能一直在增加。

在最后4个冰期—间冰期的循环期间，与大气中的CO<sub>2</sub>情况相同，甲烷在大气中的浓度(400到700 ppb) 相对确定得很好(Petit et al., 1999)。然而自从工业时代开始，甲烷的浓度已经增加了大约2.5倍，达到当前的大气浓度1750 ppb(Prather et al., 2001)。所以说当今的大气中的甲烷浓度水平是史无前例的，至少在可以引证的时间段内是没有达到这个水平。工业化以来，在通常大气甲烷浓度上叠加了一定的增量，这是事实。但目前无法解释其年际变化。同样不能解释的是在20世纪90年代已经观察到大气甲烷浓度增长率的缓慢减少和短时间内快速的变化，(例如 Dlugokencky et al., 1998; Lelieveld et al., 1998; Prather et al., 2001))。

最重要的人类对大气甲烷承载力的贡献与食品生产有关，包括来自反刍动物直接的排泄物和动物废物的排放以及洪水期的稻米。自然界湿地里的微生物过程一直都是大气中甲烷的一个主要来源，并且直至今日仍认为占总排放的40% (Walter and Heimann, 2000)。天然和人工湿地排放的甲烷由于天气和水资源管理波动每年都会发生变化。从月到年的时间尺度上，当潮湿条件超出一定范围，甲烷的排放将主要受到温度和植物种类组成的控制(Christensen et al., 2003)。这些变化将会影响微生物的活动和影响通过土壤和植物气孔的甲烷扩散(Conrad, 1987)。酶化作用的有效性不仅会直接受到净初级生产力(NPP)和微生物腐烂的影响，也会间接地受到温度和其他气候因素的控制。在确定甲烷的排放量方面，它是甲烷生产的第3大的限制条件。例如，根部的分泌液在最近已经被提出是湿地排放的主要调节因素。(Ström et al., 2003)。人们通常认为观测到的大气中甲烷浓度增长的波动大部分直接或间接地归功于气候变化导致湿地甲烷排放量的变化。频繁的变化是调节甲烷消耗和生产这种交替的状态最重要的控制器，具体来讲就是干燥的土壤作用等同于甲烷的汇，浸没潮湿的土壤是甲烷的源(Harriss et al., 1982)。这个起主导作用的控制形成甲烷排放模型的基础(Walter and Heimann, 2000)。

基于全球过程模型，对于天然湿地的甲烷排放源的估计浓度范围在92 Tg a<sup>-1</sup>到260 Tg a<sup>-1</sup>之间(Cao et al., 1996, Walter et al., 2001),其中有两个关键的源区,它们是:北纬和热带地区。尽管在绝对值方面有较大的差异，这些过程模型对热带地区全球年总数有绝对优势的贡献方面是一致的，虽然北纬地区包含至今为止最大面积的湿地。基于大气浓度递增的模式得出，在热带地区也存在最为丰富的湿地甲烷源。(Hein et al., 1997; Houweling et al., 1999)。

北纬地区甲烷的产生主要是受生物的一个短期活跃季的限制。未来气候预测模式的模拟结果显示：温度将上升，并且降雨量也会增加。在生态系统中冬季休眠后生物活动的恢复是由高于冰点的温度所触发，因此系统对温暖并且潮湿的环境非常敏感。这一现象将会引起生物系统活跃期的延长。另外，随着气候变暖，在永久冻土地区每年土壤解冻深度将

会增加。在不连续的永久冻土地区，永久冻土自身瓦解导致甲烷生产在空间上的扩张(Christensen et al., 2004)。由于温度升高，甲烷排放可能增加或者因为蒸散和蒸发的增加使得土壤变干而降低。一些重要的间接反馈机制可能包括由于生物活跃期的变长使得固碳增加，由于温度升高来自北方生态系统的呼吸作用产生的CO<sub>2</sub> 通量增加以及区域水平衡方面的变化。

全球甲烷平衡中未知的因素是地热的来源和甲烷的水合物。气态的水合物是含有高浓度温室气体甲烷的结晶水的基本要素(Kvenvolden, 1988)。水合物只在高压和低温的环境下稳定。在苔原地区和有永久冻土沉淀物甲烷的近海地区，水合物特别接近于地表。气态水合物的释放是一个自然过程，但是对自然释放的数量的估计是很不确定的(Kvenvolden, 2002)。在特别敏感的地区，较暖的气候可能会引起气态水合物不稳定，从而引起甲烷向大气的实际释放，因此增加温室效应。这类敏感地区首先最初是北极海岸附近的沉积物，在这里温暖的海洋预期对相对较浅的永久冻土能够产生最迅速的影响(Kvenvolden, 1988; 2002; Harvey and Huang,1995; Glasby, 2003)。

土地表面和土地使用的变化对区域和全球甲烷排放模式有明显的潜在意义，这一点是很显然。人为引起的排水或者干旱导致的温和的气温和/或降雨的减少将会降低湿地的排放。另一方面，如上所述，在更为温暖的气候里今天依旧是永久冻土的地区可能会成为甲烷源区。影响甲烷排放的其它人为因子包括由于氮肥和以酸的形式存在的氮的沉积物使得土壤的CH<sub>4</sub>氧化能力的变化(Smith et al., 2000; Prieme and Christensen, 1999)。

### 1.3 挥发性有机化合物

VOC这个词描述了一大批不稳定有机化合物，这些化合物源自人类和自然的排放。绝大多数的化合物是异戊二烯、甲基丁烯醇(MBO)和单萜(例如， $\alpha$ 萜, $\beta$ 萜)，除了源于生物的排放物中的一些重要部分化合物，包括倍半萜(烯)化合物和含氧化合物(OVOCs)，例如乙醇、碳酰基和一些有机酸，它们中的一些已经被植物吸收并沉淀于植物体内(Kesselmeier, 2001)。相比自然源和汇主要在土壤和沉积物的甲烷，VOC主要是由植物产生的。两者很大部分都是由生物燃烧以及人类活动如掩埋的垃圾物或矿物燃料燃烧而来。全球由人类活动造成的VOC通量估计有 $1 \times 10^{14}$  g C a<sup>-1</sup>，而由生物的排放物作为主要原因引发的VOC通量大约高出10倍之多，即 $1.2 \times 10^{15}$  g C a<sup>-1</sup>(Guenther et al., 1995)。但是在不同的生态系统和不同的地区之间排放物的排放强度是有相当大的变化。与甲烷相比大多数的VOCs存在于大气中的时间都比较短。而与甲烷(Arkinson, 2000)类似的是VOCs的氧化性有助于对流层臭氧的形成以及气溶胶粒子的形成(Kulmala et al., 2001)，这一点与氢氧基也很相像。

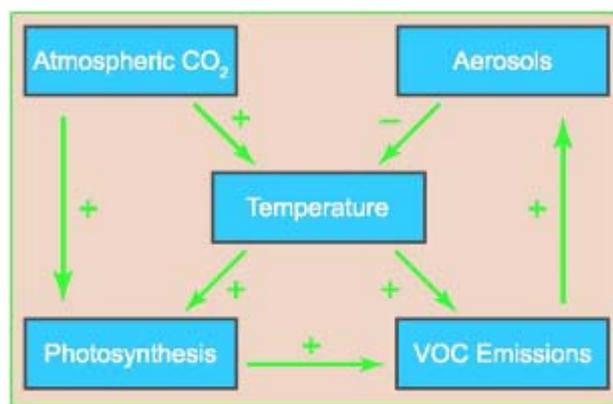


图6 二氧化碳浓度、大气温度、碳的吸收作用以及VOC排放量和气溶胶的形成之间简单、可能的反馈链(引自Kulmala et al., 2004)

由植物合成和排放的VOC的范围和排放强度将会随着植物类别的不同而变化。对一些VOC来说，生理学上的反馈将会影响其产生和释放是很清楚的(Kesselmeier 和Staudt, 1999)。异戊二烯，一种在数量上占绝对优势VOC，已经发现可以帮助叶绿素的细胞膜适应高温(Sharkey and Singaas, 1995)，但是植物合成并且排放出异戊二烯的原因目前还没被完全弄清楚。特别有趣的是，进化较慢的高级植物(例如，泥炭藓，尤其是蕨类植物)也能排放出异戊二烯。这表明在早些时候植物的演化期间就已经存在这样一个生态生理学方面的适应(Hanson et al., 1999)。异戊二烯

从来不储存在叶子里，而是都在产生之后立即释放。由于叶片的生物化学和生理的影响，异戊二烯的生产速率和排放速率将会强烈依赖光和温度。单萜的产生和排放过程与异戊二烯的类似，但在一些植物种类方面，例如，松柏类植物和有密封管和特别香毛簇的草药，单萜化合物可能被储存在特别的器官里。来自这些储存器官的不稳定化合物的释放主要是受温度的调节，除非存储器官的结构被损坏从而导致释放率的升高。所有 VOCs 的排放物也会受到水和氮的获取(通过对初级生产和生理反应的调节的影响)以及叶片发展的阶段的限制。

对于植物和生态系统来说，VOCs 的排放可体现碳的实际损失( Kesselmeier et al., 2002 )。能够发生反应的碳净通量相对于在一昼夜、季节或是年，以及生态系统尺度的初级生产总量(GPP)来说可能是比较小的。然而在一个生物群区尺度下(也就是当与一个单一的生物群区相比时)这些能够发生反应的碳在碳平衡中可以达到一个相当大的比例。在生态系统尺度下，相当一部分以VOC 形式排放的碳是以有机酸或者有机粒子的形式沉积下来，所以在估算VOC对单一生态系统的生产量 ( NEP ) 的影响时，排放物和沉积收支都必须被考虑进去。

单萜和倍半萜(烯)化合物的光氧化作用和臭氧分解作用可以产生可凝结的反应物，因此也可以产生二级有机气溶胶(SOA)。最近，在亚马孙热带雨林气溶胶测出了橡胶基质低挥发光氧化产物 (Claeys et al.,2004)。当出现一定的条件时，气体有机物的粒子成核作用也能增加总浓度，或者那些不易挥发的有机化合物能使现有粒子很容易发生凝结。凝结的化合物能增加粒子大小，因此使他们更有效地成为云凝结核(CCN)。不过，我们对SOA的形成机制和来源不是很了解，因此，其全球来源的数量级还不确定(Penner et al., 2001; Penner et al.,2001)。燃烧也是提供一个气溶胶的巨大来源，并且在热带地区干旱季节的大气中占主导地位。由于源于生物和燃烧的气溶胶排放强烈散射和吸收太阳辐射，因此将会降低地表的光化通量和加热大气圈自身，以及降低大气的沉降速率。通过这个机制，和通过他们作为CCN的活动，有机气溶胶将与云和降雨的形成以及水循环发生相互作用，(见 2.1)。此外，VOCs也将有助于调节对流层羟基的浓度(见2.2)，因此它在确定大气中甲烷的增长率时起着重要作用。

#### 1.4 氮氧化物

短周期的和长周期的氮氧化物在陆地大气系统中都具有重要意义。对流层的臭氧是在有阳光的情况下通过VOCs与氮的多氧化物相互作用形成，特别重要的是，NO<sub>x</sub>与VOCs之间的比率在确定臭氧在对流层内是被生产还是被破坏是很重要的(Meixner et al., 1994) (见 2.2)。有机和无机N<sub>2</sub>O氧化生产(像硝酸过氧化乙酰硝酸盐、烃基硝酸盐和氮酸)也是十分重要的，因为他们影响人为源下风区的大气光化学以及其沉积和吸收影响陆地和水生生态系统(图7)。N<sub>2</sub>O是一种重要的温室气体，其生命周期超过100年，并且在大气中的增长率是0.8 nmol mol<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>。

从全球来看，人类和生物的排放物中氮的氧化物是大致相当的，它们分别是：15—29 Tg N a<sup>-1</sup> 和6—18 Tg N a<sup>-1</sup>(Delmas et al., 1997)。土壤是生物排放NO<sub>x</sub>的主要源(Potter et al., 1996; Delmas et al., 1997)，同时也是硝化作用和反硝化作用过程中渗漏的相当数量的N<sub>2</sub>O排放。所以，N<sub>2</sub>O和NO<sub>x</sub>通量将会受到土壤参数的控制，这些土壤参数包括温度，湿度和氮含量等(Saad and Conrad, 1993; Davidson, 1993; Conrad, 1997)。这些通量随后也会随时间和空间的变化而变化。例如，与我们所观察到的CO<sub>2</sub>的情况类似 ( Arneeth et al., 1998, Kelliher et al., 1999)，在旱季后的第一场雨将会产生一个NO的脉冲变化，从而导致在排放物中氮的氧化物的含量增加10倍左右 (Davidson, 1992; Meixner et al., 1997, 1999; Scholes et al., 1997)。N<sub>2</sub>O 通量也随着干燥的土壤变湿而增加，但只是较小的程度。排放到大气中的NO<sub>x</sub>排放量将会受到生产和消耗的复杂的相互作用的控制，并且这些

过程在不同的环境状况下有着很大的差异性 (Galbally, 1989; Saad and Conrad, 1993; Conrad, 1996, 1997)。因为环境因素会随着空间和时间的变化而变化, 所以仅仅根据局部的土壤测量情况来推断区域的或者全球的土壤情况是很难的。在生物燃烧过程中也会产生 $\text{NO}_x$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 。最近, 人们在北纬地区的森林地带已经观测到了UV导致 $\text{NO}_x$ 的排放(Hari et al., 2003)。这项研究为在陆地的植被活动和大气中的化学反应之间的一个新反馈提供证据, 因为氧化氮有助于臭氧、氢氧基以及气溶胶粒子的形成。这些粒子形成后将会影响太阳光的辐射特性, 从而也会影响  $\text{NO}_x$  的排放量。研究的结果确保了为量化北纬地区生物群落对自然界中大气自净过程的贡献的更进一步的研究 (见2.2)。

由于氮氧化物的反应性, 地表氧化氮的实际交换也取决于土壤排放、湍流、化学和植物冠层中的干沉降之间的相互作用。由于这些各种不同的相互反应, 尽管土壤排放通量的存在, 我们仍然能观测到一个地表干沉降通量 (例如, Ganzeveld et al., 2002)。一氧化氮、二氧化氮和他们的光化反应产出, 例如硝酸( $\text{HNO}_3$ )和有机硝酸盐 (例如, PAN), 可以被植物吸收或者沉积在叶片中 (Jacob and Bakwin, 1991; Sparks et al., 2001)。因此在它们逃逸进入对流层前 $\text{NO}_x$ 已被去除在植物冠层内(参阅2.2)。在很多模型中这被称为植被冠层简化因子。不同景观将会有不同的植被冠层简化因子出现, 这些植被冠层简化因子取决于植物的类型和数量。目前, 植被冠层简化因子还不能被很好地量化。因为有许多土地管理方面的实际行动, 例如生物的燃烧量、播种、耕作、以及肥料应用等, 都会引起在氮通量方面的较大变化, 所以土地利用的变化将会改变达到对流层的氮的数量。

未来的挑战是改进 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{NO}_x$ 通量随着土地利用和土地覆盖的变化而变化的模型。在区域或全球尺度下对 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{NO}$ 通量已经进行了多次模拟尝试(Potter et al.人, 1996; Kirkman et al., 2001; Holland and Larmarque, 1997),但这些模拟仍然存在大量的不确定。

### 1.5 尺度问题

一旦他们产生或被释放, 生物来源的重要微量气体在对流层中的寿命变化的数量级较大: 例如, (由于不同的消除过程中吸收速率不同)  $\text{CO}_2$ 具有 5—200 年的寿命, 而目前大气中 $\text{CH}_4$ 具有 8 年以上的寿命。相反, 活泼的 $\text{VOC}_s$ 可能几分钟或更短时间内在快速反应中从一种化合物被转化为另一种化合物。对于非甲烷挥发性有机物, 对流层内的寿命不仅取决于化合物, 也取决于与它起反应的氧化物。例如, 计算出 $\alpha$ -松萜在对流层内的寿命在几分钟到几小时内, 这取决于反应物 ( $\text{OH}$ ,  $\text{NO}_3$ , 或者 $\text{O}_3$ ) 和反应物浓度, 然而甲醇反应要

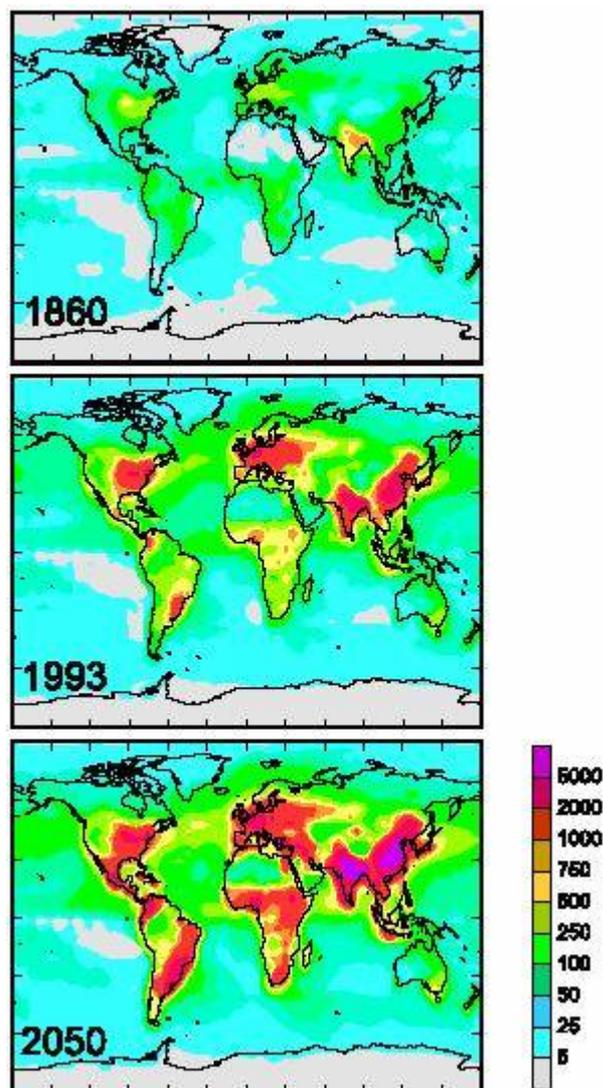


图7 1860年(上)、20世纪90年代早期(中)和2050年(下)模拟的无机氮总沉积量( $\text{mg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )的空间分布 (Galloway et al., 2004)

几天或几年(Fuentes et al., 2000; Atkinson, 2000)。活泼的VOC可能也作为气溶胶前体物或更不活跃化合物的前体物，因此在大气圈内迁移并在其他地方沉降。更为复杂的是针对在某些植物种类中单萜的引入，由于这些化合物储存在特别的植物组织中，要考虑产生和释放之间的时间滞后效应。对于快速反应的化合物（如，倍半萜烯），释放物的测量和编目会与测量的大气含量远远不同。它们不仅反映了生理活动也反映了物理化学环境，因此在几乎所有情况下都要考虑释放、转化和消除的日、季节、年度循环。因为补充到表面的土壤水影响了所有列在此处的过程，所以这些循环可通过源于季节性干湿环境和干湿年之间的变化而加以说明。十年和百年以上的变化反映了表面覆盖和植被活动。这些活动调整了地表释放/消除能力，可能反映了由于气候系统的改变或极端事件的发生引起生态系统的衰退或表面覆盖的变化。

## 1.6 研究主题

陆地表面释放和吸收大量化合物，它们对于大气的辐射驱动潜能、云微观物理过程和对流层化学都具有重要的意义。天气系统的物理化学方面直接或间接由土壤湿度模式调整，这种调整是通过表面能量平衡、痕量气体排放、燃烧的频率/程度、边界层发展和对流活动进行的。因此，本节内讨论的具有生物和化学活性化合物循环的研究一定是与陆地水循环研究和生物圈在大气自净作用中的作用紧密联系的（专题 2—4）。

下面的研究问题将用于说明在这个研究中最重要的一些方面。

**（1）是什么控制了陆气生态系统中具有生物和化学活性的痕量气体在区域至全球空间尺度在日、季节、年、十年和百年时间尺度内的排放和沉降？在不同控制过程间有什么联系？例如：**

- CO<sub>2</sub>的陆气交换与像氮氧化物、甲烷和VOC<sub>s</sub>等其他化合物的交换是怎样联系的？在不同的时间和空间内活性碳的通量是多大？
- 植被冠层里的过程是什么？具有不同寿命的化合物如何贡献局地测量的浓度？
- 支配性过程例如在土壤、植被冠层和边界层间的活性氮和碳的化合物的交换作用的过程是什么？

**（2）控制过程如何影响在生态系统/流域/景观内部或之上的净陆气交换？它们过去是怎么产生同样影响的？**

- 对于主要陆地生态系统氮循环，能够获得闭合的收支吗？人类活动是怎样改变这些通量的？
- 在原始环境中存在决定挥发性有机化合物（由此产生的气溶胶、CCN，见 2.2）浓度的自我调节机制吗？
- 如何确定与 VOC 排放相关的不同的时间和空间尺度，特别是在净生物群落生产力、中/长距离运输、转化和沉积方面？

**（3）研究在不同空间和时间尺度净交换量的模型中，哪个过程是关键，复杂性程度如何？**

- 对于给定的植被类型（例如湿地的破坏；草地中的灌木入侵），是否能够定量研究在环境阈值条件下有关微量气体和气溶胶的产生/分解，以及对流层的化学和气候的反馈吗？在关键微量气体的循环和关联的反馈中，这些阈值是否意味着突然或瞬时变化吗？
- 是什么原因引起了大气甲烷增长率年度变化？

- 对水循环大气部分的反馈是什么？进而对气溶胶的产生和氮排放的反馈是什么？
- 是否能够综合所有控制氮氧化物排放的因素输入到模型中，以准确地估计区域和全球尺度的通量？

(4) 土地利用和土地覆盖的变化将对于主要微量气体通量的反馈和相互作用以及生态系统净交换量产生什么影响？

## 2 专题2: 气候系统中陆地生物区系、气溶胶和大气组成之间的反馈

通过土地利用改变、砍伐森林、城市化以及工业化的综合作用引起的地球表面人为改变迅速地推进了热带和亚热带地区的发展。这些转变极大的改变了地表和大气之间的相互作用,并且导致的扰动效应影响了整个地球系统。热带地区变化最基本和深远的结果很可能来自人类对两个过程的影响:①生物来源和人类来源气溶胶与包括水圈(主题2.1)在内的气候系统的相互作用;②控制大气自净机制的大气反应与生物和化学过程的耦合(主题2.2)。

初看这些问题好像是独立的,仔细观察后就可以发现它们在地理和生物物理上有着密切的关系。因为它们是大气环流系统的热力机,并且大量的热能传输是通过地表蒸发和云中水汽凝结实现,所以在这两方面热带地区都是非常重要的。降水的强度、频率、位置和性质对于热带生态系统与大气微量气体、水分和能量的交换相当重要。由于事件的级联,降水的改变甚至可能导致大范围区域热带森林生态系统不稳定(Nepstad et al., 1999)。因为能够去除大部分微量气体的氢氧根,在热带地区对流层氢氧根十分丰富,所以大气自净作用主要发生在热带对流层(Crutzen, 1995)。氢氧根形成的化学过程包括陆地生物和人为排放的微量气体。

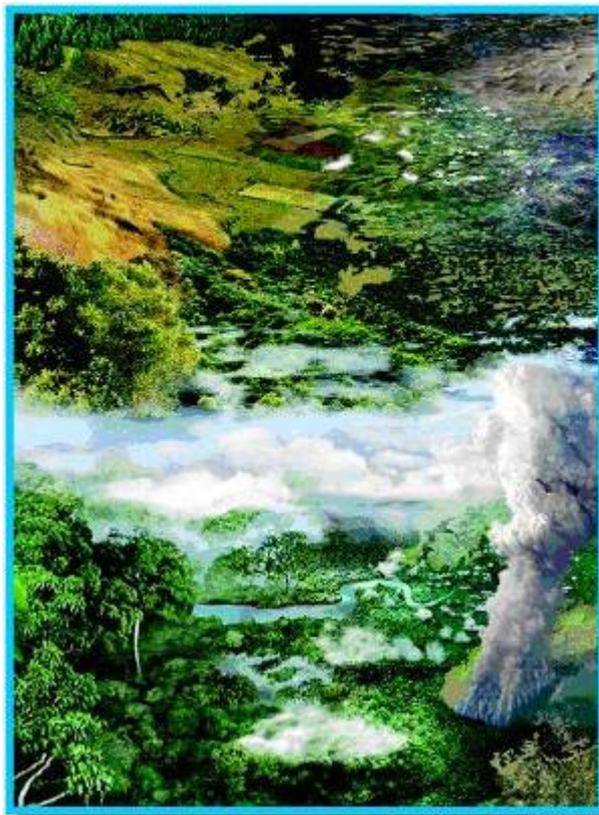


图8 专题2研究主题包含了热带以及森林火灾的影响

人类通过改变土地利用、城市化以及工业化所产生的扰动是气溶胶—气候相互作用和大气自净作用变化的主要推动力量。随着热带森林正在被牧草草场、农田、城市和公路所取代,微量气体和气溶胶的排放也正在发生变化。燃烧——土地的原始清理及人类生存的维持、生态系统的控制和能量的主要来源——作为活性微量气体和气候活性气溶胶的来源起到了关键的作用。最终,在气溶胶以及微量气体化学过程和由于气溶胶驱动的云性质的改变引起的大气输送机制的扰动之间存在强烈的相互作用关系。

这一领域的iLEAPS研究将会与IGAC紧密协作。IGAC专注于在垂直和横向大气输送以及大气中化学、物理过程方面的人为(尤其是城市)的排放源,iLEAPS专注于陆地生物区系和大气之间的交换过程,以及大气特性、水循环和生态系统行为之间的反馈。

### 2.1 生物圈—气溶胶—云的相互作用

近年来,气溶胶直接效应(阳光与气溶胶颗粒本身相互作用)和间接的辐射效应(对于云的微物理特性改变所产生的影响)已经引起了越来越多的关注。包含在全球大气环流模型内的直接效应已经导致了这些模型能力的实质性提高,从而得出了在已经观察到的过去150年中全球年平均温度的增加(Mitchell et al., 2001; Stott and Kettleborough, 2002)。在确定人为气溶胶粒子的直接辐射强迫和它们对区域和全球气候影响的研究方面已经获得了重大的进展。

然而，气溶胶粒子的间接效应在区域和全球气候研究中具有极大的不确定性。现在从概念上已经可以合理地理解来自人为源的云凝结核（CCN）浓度增加会引起云反照率的提高，但仍然很难做到定量。气溶胶粒子对降水过程的影响更加不确定。通常可以在源于自然过程的气溶胶混合物中观察到的较大范围的气溶胶粒径分布将产生促使降水发展的宽云滴谱。由于人为排放（包括生物量的燃烧）气溶胶粒子浓度的增加，将使云滴谱的滴径减小、谱变窄，继而改变或抑制降水过程 (Andreae et al., 2004)。如果气溶胶被强烈吸收（例如，黑碳），它们可能剧烈的加热大气，减少地面增温而导致减少云的形成和加速云的蒸发 (Hansen et al., 197; Koren et al., 2004)。

通过多数 CCN 提供给自然大气，生物圈会强烈影响云辐射和微物理特性，进而影响气候和水循环 (Andreae et al., 2002)。直接由自然源产生的有机气溶胶粒子是有效的 CCN (Bauer et al., 2003)，位于远离大陆地区(像亚马孙流域中部)初级生物来源的有机气溶胶(例如，植物碎石、微生物、孢子)可以是主要的 CCN (Andreae et al., 2002)。源于生物的前体物间接形成的 CCN 最近发现存在增加的趋势，在远离大陆的地点观测到小的气溶胶粒子的形成以及随后增长成 CCN。最初的分子群形成是由于无机的水汽以及随后的生长是由于来源于生物圈的可压缩有机化合物 (Kulmala et al., 2001; Graham et al., 2003; Guyon et al., 2004)。这一气溶胶产生机制在北方生态圈特别重要，而在热带，源于气相的新有机气溶胶产生似乎很少，这是因为有机水汽的凝结可能主要引起了已经存在的粒子的增长。由植被直接或间接的形成的 CCN 可能控制了原始自然环境的 CCN 浓度,从而调节降水，改变云的持续时间。

最近，已研究了热带地区陆地生物区系影响 CCN 浓度的规律。在原始自然环境和没有燃烧的状态下，CCN 的浓度保持在一个低的水平，与在海上观察到的浓度相似。因此，这里强调了人类活动作为一个主要扰动因素的影响 (Roberts et al., 2001)。因此，自然植被诱发过程形成的气溶胶远不如人为的气溶胶粒子。在亚马孙流域人为气溶胶导致了“CCN 过多”，表明在雨季出现的典型海洋性对流动力过程，到在被污染的大陆地区上空已经观察到的伴随冰相过程和闪电活动的云类型出现了一个转变，(Andreae et al., 2004)。在非洲和北半球发达国家等更多受干扰地区，相同的基本云物理性质的转变可能已经存在。由于作为大气环流热能中心角色的热带大陆地区，其潜热和感热之间转化机制的变化对于气候动力学具有特别的意义。同时，由于 CCN 的增加引起的云物理的扰动被认为是通过降低气溶胶和某些微量气体的净化效率从而降低大气的自净效率。其结果使大量的污染物被输送到对流层的中部和上部。

大气矿物尘埃粒子的主要源区是位于哈得莱环流下沉分支下面的热带、副热带区 (Tegen, 2003)。尘埃的形成是由于干燥表面上空风的高度非线性活动造成。重要源区可

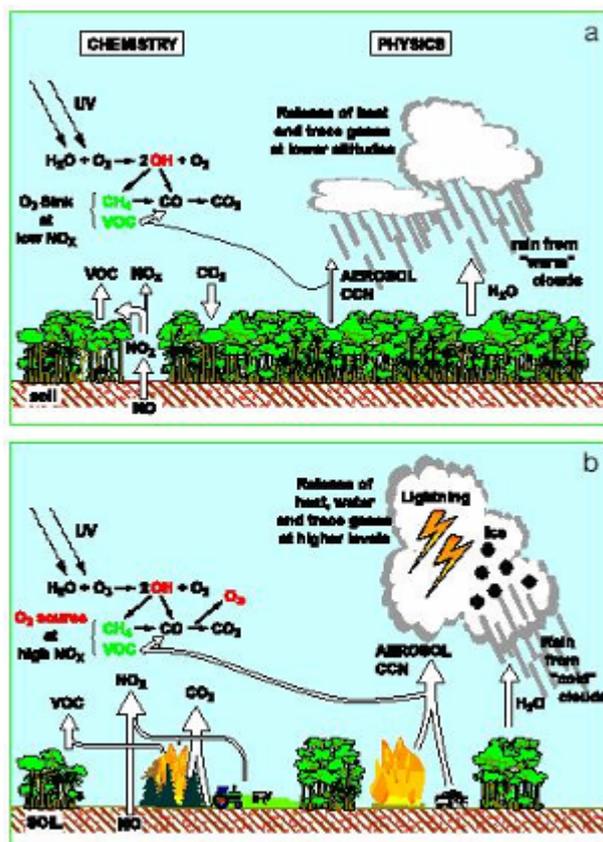


图9 热带地区（巨大的热反应堆）微量气体、气溶胶和云的生物圈/大气圈相互作用概念模型 a)在自然条件下；b)在森林砍伐和发展之后 (由马普化学研究所 Meinrat O. Andreae 提供)

能是非常局地化的，而尘埃的输送依然可以从亚洲将矿物气溶胶带到北非，从撒哈拉到北美和南美。尘埃的沉积为陆地和海洋生态系统提供了重要的和有时是有限的营养，而同时通过干沉降和湿沉降进行的营养传输都是由植被自身决定的 (Swap et al., 1992)。除了风以外，尘埃从地面移动的范围取决于地面土壤颗粒大小分布和土壤湿度。尘埃的光学特性取决于当地土壤的化学性质。由于森林砍伐和农业活动引起的土地利用的改变可能导致土壤变干和可能增加尘埃的扰动。由于对各种来源的尘埃的光学性质的认识不够充分和缺乏尘埃源强数据，人为尘埃在气候变化方面的直接影响尚未被充分了解。尘埃在某些条件下可能与水融性化合物（硫酸盐、硝酸盐）接合，从而作为云凝结核 (Yin et al., 2002)。尘埃粒子作为冰核起到重要的作用。碳质颗粒和尘埃通过改变云物理和降水，以及改变感热与潜热的垂直传输和上部对流层的化合物，从而对气候产生影响。与气候变化相联系的反馈过程也能够改变矿物气溶胶来源的强度 (Tegen et al., 2004)。

气溶胶过程对云动力学的影响以及与水循环的相互影响还很少被认识。如前面提到过的，在热带地区，因为CCN数量的增加，云动力学特征可能正由海洋型云占主导改变为有利于大陆型对流的形成。这一变化可能调整当地和区域降水状态和营养化合物的沉积，从而对生态系统行为进行反馈。由于气候机制中热带深对流的中心作用，热带云动力学扰动可能影响全球气候，但是这些影响还没有被认识 (Werth and Avissar, 2002; Nober et al., 2003)。CCN的增加可能也会提高闪电频率并支持气溶胶和微量气体向上部对流层的输送。这些变化对气溶胶和微量气体的湿消除所产生的影响仍然缺乏认识，依然不能量化。

植物对光照(包括直接漫射辐射率、亮暗转换和光谱性质)的响应需要研究。确定不同事件在一天中的时间对精确预报系统行为十分关键。最近工作指出：碳吸收在部分云天是提高了，通常解释为漫射光照到植物冠层很不均匀所致，同时，云对辐射强度的减弱也限制了水汽压的短缺。然而，辐射特

性对水汽压短缺的相对重要性(或是其它因素)尚未所知。

## 2.2 地气交换及大气的自净机制

大量活性化学混合物排放到大气中。其中大部分为甲烷和其他源自生物的碳水化合物，其每年总量超过 10 亿吨 (Prather et al., 2001, 见 1.3)。这些化合物首先经氧化为水溶性化合物（例如，极地有机物或二氧化碳）从而从大气中被清除，其次被液态水、雪或冰晶吸收和通过降水和地表干沉降被清除。化学清除机制最初最重要的一步就是与氢氧基（大气清洁剂）的反应 (Crutzen, 1995)。氢氧基主要源于臭氧的光解作用，以及随之的氧原子和水的反应。在热带地区，紫外线强，水汽充沛，因此氢氧基浓度最高，大部分 CH<sub>4</sub>、CO 和其他微量气体的氧化都发生在“热带反应区”——氢氧基浓度较高的热带对流层 (图 9)。因此，热带地区不仅在调节物理气候方面有重要作用，在维持大气化学成分方面也有重要作用。因为同氢氧基的反应对于甲烷也是主要的汇，而变化的氢氧基浓度也影响其寿命，于是也对重要的温室气体浓度发生影响。然而，尽管热带大气被认为在化学氧化剂循环以及对流层的自净过程具有决定性的作用，但是由于观测资料的缺乏尚不能验证模式的预测结果。

碳水化合物和氮氧化物的相对浓度对碳水化合物的光化学氧化有至关重要的作用。氮氧化物浓度低时，碳水化合物氧化去除臭氧以及消耗氢氧基，而当氮氧化物浓度高时，更多的臭氧和活性反应基被生成。在原始大气条件下，对流层中低层的碳水化合物以及氮氧化物均主要来源于生物圈，因此氮氧化物转化为 VOC 的比率导致氮氧化物的浓度很低，从而对流层处于低臭氧状态 (见 1.4)。

在热带雨林区，由于生物、化学、物理过程的紧密相互作用，允许氮元素能有效的更

新，阻止氮轻易地流进大气。随着土壤中有机的腐烂和氮元素的更新，在这期间一氧化氮生成，且部分气体通过土壤逃入空气层。在空气中，一氧化氮和臭氧反应生成二氧化氮，并有效地沉降在森林冠层的植物表面，有利于植物生长。只有很小一部分从土壤释放的一氧化氮能从森林逃逸到大气中且在臭氧形成中起作用。

森林砍伐以及随之的树木冠层被草植被所代替，紧密的氮氧化物再循环系统被打破。由于从土壤到草地冠层顶的距离较短，一氧化氮氧化为二氧化氮的机会以及二氧化氮沉降到叶面的机会均大大降低。同时由于更多的氮氧化物逃逸，植被变化减少了源于生物的 VOC 排放，并改变了排放物的构成。森林砍伐的生物燃烧和土地管理为区域大气提供了更多的氮氧化物和碳水化合物。其结果是从热带反应堆的低臭氧状态过渡为高臭氧化学烟雾 (Keller et al.,1991)。

气相化学的变化也导致气溶胶的产生。在自然条件下，萜烯类的光氧化产生的气溶胶相当少，因为主要反应链产生相对活跃的化合物，此类化合物较难凝结为粒子。然而，在高臭氧浓度区，可以形成更多的低活性化合物，而它们是可以形成气溶胶粒子的 (Kanakidou et al., 2000)。

由于大气化学过程的高非线性特征，混合和传输在调节化学转变中占主导作用。尤其在潮湿的热带地区，通过调节土壤水含量，水循环对物理输送的动力过程有强烈影响。土地使用改变以及其导致的水循环的混乱被认为可引起氧循环以及热带地区大气自净机制的混乱。

土地使用和土地覆盖变化，以及随之导致的微气象及水循环的改变，被认为可以通过干、湿沉降从而改变微量气体和气溶胶的清除过程。由于湍流交换和地表有效吸收的改变，生物量的多寡以及陆地表面粗糙度的变化通常可以导致大气成分干沉降的变化 (见 4.4)。由于湿沉降过程不仅仅包含分解、水相化学转变以及降水，同时也包含化合物对云及雨滴谱、云雨形成以及对流输送的反馈作用，使得通过水循环的变化来估量湿沉降过程变化的影响较为复杂。由于多相态化学的复杂作用，使得通过由于降水和地表露水拦截而引起的地表湿度的变化来定量估计土地使用以及土地覆盖变化对干沉降过程的影响变得较为困难。现在一个有挑战性的研究课题就是氧化能力、干、湿沉降过程的变化怎样通过影响生物地球化学，例如，通过提高氧化剂浓度，使土壤酸化、富营养化和植被直接曝晒，来影响植物—土壤系统的机能。

总之，iLEAPS 这部分的总体目标就是确定陆地生态系统的变化怎样直接或间接地影响大气的氧化能力以及地表清除作用，这种影响又怎样反馈于生态系统和生物排放。

### 2.3 研究主题

(1) 是什么过程调节各类气溶胶在近地面形成及其增长？是什么控制气溶胶粒子的大小和数浓度及 CCN 浓度？

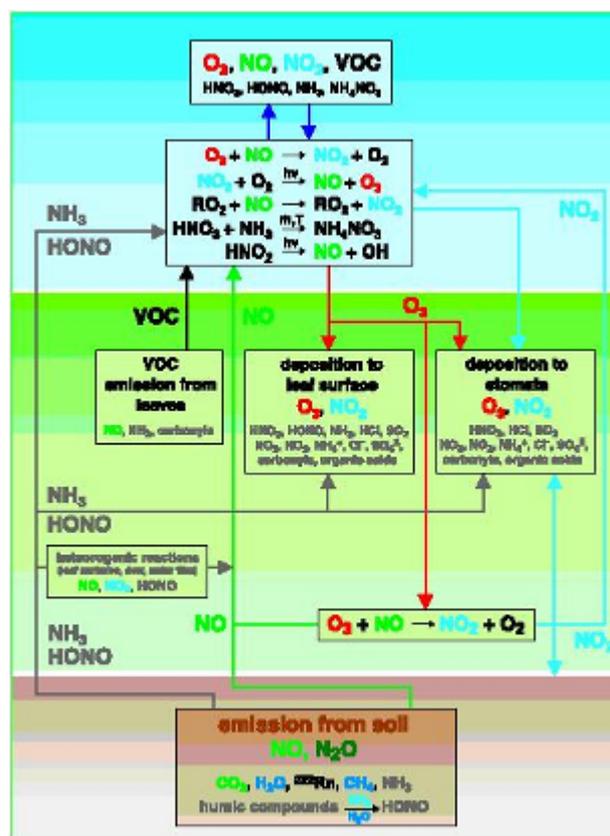


图 10 土壤—冠层—地表一层中的过程和相互作用 (引自马普化学研究所 Franz X. Meixner)

然而，在高臭氧浓度区，可以形成更多的低活性化合物，而它们是可以形成气溶胶粒子的 (Kanakidou et al., 2000)。

由于大气化学过程的高非线性特征，混合和传输在调节化学转变中占主导作用。尤其在潮湿的热带地区，通过调节土壤水含量，水循环对物理输送的动力过程有强烈影响。土地使用改变以及其导致的水循环的混乱被认为可引起氧循环以及热带地区大气自净机制的混乱。

土地使用和土地覆盖变化，以及随之导致的微气象及水循环的改变，被认为可以通过干、湿沉降从而改变微量气体和气溶胶的清除过程。由于湍流交换和地表有效吸收的改变，生物量的多寡以及陆地表面粗糙度的变化通常可以导致大气成分干沉降的变化 (见 4.4)。由于湿沉降过程不仅仅包含分解、水相化学转变以及降水，同时也包含化合物对云及雨滴谱、云雨形成以及对流输送的反馈作用，使得通过水循环的变化来估量湿沉降过程变化的影响较为复杂。由于多相态化学的复杂作用，使得通过由于降水和地表露水拦截而引起的地表湿度的变化来定量估计土地使用以及土地覆盖变化对干沉降过程的影响变得较为困难。现在一个有挑战性的研究课题就是氧化能力、干、湿沉降过程的变化怎样通过影响生物地球化学，例如，通过提高氧化剂浓度，使土壤酸化、富营养化和植被直接曝晒，来影响植物—土壤系统的机能。

总之，iLEAPS 这部分的总体目标就是确定陆地生态系统的变化怎样直接或间接地影响大气的氧化能力以及地表清除作用，这种影响又怎样反馈于生态系统和生物排放。

### 2.3 研究主题

(1) 是什么过程调节各类气溶胶在近地面形成及其增长？是什么控制气溶胶粒子的大小和数浓度及 CCN 浓度？

- 源自生物的气溶胶（主要的、次生的、含碳的、无机的）的数量、化学特性、光学特性及微物理特性受什么过程控制？这些过程对全球变化有怎样的反馈？
- 哪种源自生物的气溶胶对气溶胶的产生有重要意义？次生有机气溶胶通过何种物理机制而形成？这类气溶胶的产生是怎样依赖微量气体化学的？
- 人为的尘源达到怎样一个量级？与尘埃直接相关的辐射效应是什么？在气候变化和可变性情况下尘埃来源强度如何变化？

(2) 陆地产生的气溶胶（源自生物的、烟、尘）在改变云的特征及行为方面具有怎样的作用？

- 这些气溶胶怎样影响云动力驱动力？对感热、潜热、化合物的垂直输送到对流层顶有怎样的影响？
- 源自生物的、燃烧的气溶胶对冰晶形成有什么影响？哪类粒子参与了冰相的物理、微物理过程？
- 水和气溶胶耦合或关联的空间变化会达到何种程度？
- 自然产生的、人为产生的含碳气溶胶的水相化学转变对粒子光学特性和化合物溶解性方面的变化有什么重要意义？

(3) 人为排放以及生物燃烧产生的气溶胶数量及分布变化的局地、区域以及全球影响是什么？

- 气溶胶对大气辐射场有什么影响？该影响对生物活动（包括初级生产）有什么作用？
- 对水循环大气部分有什么反馈作用？反之，对气溶胶的产生及营养物循环又有什么反馈？

(4) 上述生物、大气的相互作用在全球气候模式中有怎样的体现？对此能怎样加以改善？

专题 2.2 的研究主题也能够陈述为四个主要问题（包含几个小问题）：

(1) 作为地点和时间的函数，大气圈—生物圈交换过程对大气氧化能力有什么定量的影响？

- 源自生物的气溶胶排放和输送以及部分氧化碳水化合物的化学作用对区域及全球大气的氧化能力起什么作用？
- 陆地生态系统对大气氧化能力的变化有什么反应？生产力、植物物种组成、生物源的排放以及干沉降的变化是否归咎于氧化能力的相应改变？

(2) 植被燃烧的排放对扰乱大气的自净能力以及因此导致的扰乱大气成分方面起怎样的作用？

(3) 氧化能力对由于陆地生态系统方面引起的直接或间接影响将会做出怎样的反应？

- 生态系统的变化对甲烷、VOC 以及氮氧化物的通量有什么影响？
- 改变水汽通量对边界层化学有怎样的影响？

(4) 控制臭氧的战略是否需要考虑生物圈和预期生物圈变化的作用？生物圈通量的长期变化能否对空气质量产生影响？

### 3 专题3: 陆面 - 植被 - 水 - 大气系统中的反馈和遥相关

陆面-大气相互作用通过两条错综复杂的途径发生: 生物物理的以及生物地球化学的。动量、辐射能量和感热代表了生物物理传输, 而二氧化碳和许多微量气体则与发生在植物或土壤表面的生物地球化学活动相关联。作为水汽的蒸散或蒸发的潜热和气溶胶通过生物物理过程以及生物地球化学过程得以交换。在两种途径中, 正向的(自增强的)或者负向的(自衰减的)非线性反馈经常发生。两种途径的反馈均直接地影响近地表的能量、动量、潜热通量(例如 Nair et al., 2003; Adegoke et al., 2003)。

#### 3.1 水文-生物地球化学横向联系

iLEAPS 的目标之一就是理解地-气相互作用的动力过程, 在陆地、大气之间物理过程、化学过程、生物过程怎样传输和转变动量、能量和物质。明确的目的是去了解并控制反应化合物交换的量级和控制因素, 其中一个关键的边界条件是通过水圈和生物地球物理循环的联系而建立起来的。这些联系基本上来看可认为是沿着河流流域的梯度变化, 从陆地和开阔水体边缘的含水量较少到饱和的需氧土壤区域, 再到开阔水体本身。流域综合了各种尺度从小溪到区域直至大陆流域尺度的水循环以及生物地球化学循环。

二氧化碳以及甲烷从淡水中排除到大气, 是水循环和生物地球化学过程之间相互关联的一个例证(见专题 1)。二氧化碳溶入河水中的分压( $p\text{CO}_2$ )是陆地和河流环境之间碳与水循环耦合的一个简化的表达式。河水中二氧化碳的浓度(几乎总是远大于大气中浓度)取决于复杂的生物过程、天气过程及其相互作用的一系列活动, 反映了在上游的陆地生态系统中内在的碳的动力过程以及外在的生物地球化学过程。这种内在动力过程与外在过程的耦合的下游表示式为有机物质和通过河流系统又输送到河流系统所溶解的非有机碳含量, 这些有机物的含量将通过溶解入水或栖息在河岸的初级生产力和呼吸作用而增加。从热带和更暖的系统排除的气体估计超过  $1\text{Pg a}^{-1}$  (Richey et al., 2002)。

#### 3.2 区域问题

近年来, 高纬生态系统得到了特别的重视, 因为高纬生态系统可能的气候敏感性, 它已成为北极气候影响评估(ACIA, 2005)的重点。。由于认识到冰冻圈对气候系统的生物物理反馈作用, WCRP 在 2001 年建立了气候与冰冻圈计划(CliC)来进一步提高对冰冻圈(包括积雪覆盖面、海洋、湖泊、河冰、冰川、冰层、冰盖以及冰面)以及它与全球气候系统之间相互作用的了解。其生物物理反馈的一个重要的例证就是地表反照率反馈, 它产生的原因是由于雪覆盖面、海洋、湖泊、河冰、冰川、冰层、冰盖以及冰面比赤裸的土壤或积雪表面吸收了更多的辐射, 高植被覆盖区通常更暗。在北方地区, 这种反馈导致了所谓的“针叶林-苔原”反馈, 即是积雪覆盖的森林(针叶林)比积雪覆盖的苔原的反照率更低, 因而吸收更多的辐射而产生较暖的地表气候条件从而促进了其自身的发展

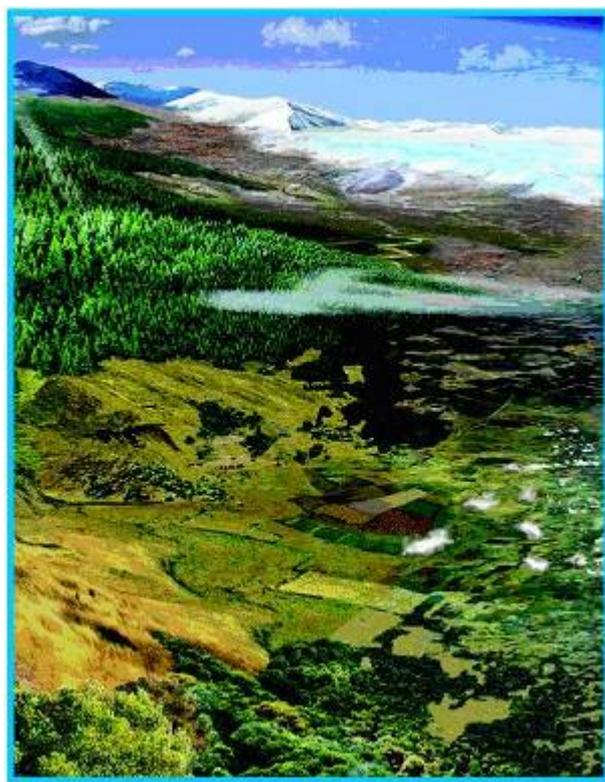


图 11 专题 3 研究主题包括北纬和冰冻圈地区

(Bonan et al., 1995)。然而, 这种靠北纬地区的和冰冻圈地区的生物地球化学作用并没有得到广泛的认同。高纬度系统具有高浓度碳的特征, 大约有 15% 的陆地的碳存贮在永久冻结带 (Prentice et al., 2001)。这个贮碳池受温度和降水改变的影响, 同时也受与潜在的大气甲烷与二氧化碳浓度强反馈以及气候相关联的冻土深度改变的影响。现存的一个争议是, 高纬度地区的变暖是否会引起现在北方碳汇的衰减, 或者甚至导致汇来源的转变。然而, 也指出温度的增高会促进土壤营养成分的释放, 从而提高生产力以及碳的吸收。

最近的研究也证明在北方植被覆盖区、冰(雪)区以及大气之间存在明显的非二氧化碳生物地球化学交换。例如, 在北方森林生态系统发现了新粒子的形成 (Kulmala et al., 2001) 并且成为了深入研究的焦点(见专题 1 和 2)。在这些遥远地区成核作用过程需要高活性的 VOC 的释放 (Spanke et al., 2001)。只是在最近, 才有人提出了在大陆性区域成核作用过程的物理机制 (O'Dowd et al., 2002)。在极圈、亚极圈以及南极的极地大气边界层已经观测到了臭氧的损耗(例如, Wessel et al., 1998)。野外实验以及实验室实验已经揭示了雪的光化学机理(例如, Honrath et al., 1999; Cotter et al., 2003)。对于这些新发现, IGAC 和 SOLAS (SOLAS, 2004) 已经提出了空气-冰化学相互作用 (AICI) 计划, 很明显与 iLEAPS 有关。

全球性后果的区域问题是 ESSP 的区划集成研究的主要内容。所选择的地区和科学问题通常与地球系统中的“开关”或“气门”有关, 因为局地 and 区域变化会强烈影响地球系统(图 3)。BAHC 在第一个区域集成研究项目: 亚马孙大尺度生物圈-大气圈试验(LBA)中发挥了关键作用。同样地, iLEAPS 将在季风亚洲区域集成研究中与其它国际计划合作。

### 3.3 全球性问题

在地球的特定期区域的气候系统自然振荡能通过遥相关(对几千公里以外的其他过程产生影响)而导致全球性的后果。这种全球性后果的典型例子就是厄尔尼诺以及南方涛动(ENSO)事件 (Wu and Newell, 1998)。在一般年份, 很少有雷暴在中、东热带太平洋区域产生, 而在暖的 ENSO 事件发生的年份中, 由于海面温度较一般年份高, 雷暴在该地区发展。大气在空间上不均匀加热将产生全球尺度的气候影响。在季节和区域尺度上来说, 在播种初期最初的土壤湿度的改变对该年剩余时间的气候有强烈的影响 (Pielke et al., 1999)。在某些区域, 较湿的初始阶段能增加平均蒸发量(降低地表温度)。然而, 初始土壤湿度条件的影响, 可能不仅仅只是在局部地区比较明显。例如, 在欧亚大陆西部的雪覆盖与来年印度夏季热带季风的强度有反相关关系 (Bamzai and Shukla, 1999)。

Riehl 和 Malkus (1957) 表明, 热带雷暴之所以在气候系统中具有重要作用的原因在于它们可以长距离地传输大量的热能、湿度以及动能。由于大多数的雷暴都发生在热带或者大陆上, 这些区域的地表覆盖物的改变对全球的影响相当于或者更甚于 ENSO 所造成的影响。自 1980 年以来, 热带地区的森林面积持续大量减少 (Defries et al., 2002), 同时在将来, 由于人为原因造成的热带森林覆盖面积将更有可能继续减少。上一个十年中全球尺度的植被覆盖面积的改变趋势以及年际变化已经被 Zeng et al., (2003) 评估计算。人为原因或者自然植被动力过程所导致的地表覆盖以及覆盖变化有很大的影响, 这是因为存在时间长、数量巨大以及空间一致性大 (Pielke, 2002)。

由于景观引起的热量、湿度以及能量的空间分配对局地的、区域的和全球的气候系统都产生了较大的影响, 而这不只是在热带地区 (Chase et al., 2001; Pitman et al., 1999; Zhao et al., 2001; Werth and Avissar, 2002; Zhao and Pitman, 2002; Avissar and Werth, 2005)。基于一个大气与/陆面耦合模式得到的结果来看, 二氧化碳含量的增加对生物地球化学的影响在气候变化中同样重要。例如, Eastman 等人 (2001) 指出: 在美国中部草地生长季节里, 地上短草和长草生物量的增加(由于 CO<sub>2</sub> 含量较高)会影响温度和降水。Narisma 和 Pitman (2003) 认为, 在澳大利亚, 这样的生物地球化学的反馈作用能抵偿由于土地

使用造成的温度改变的影响。由于对局地的以及区域的温度的影响程度并没有完全了解，景观的改变使得重建全球地表温度记录的尝试变得混乱（Hanamean等，2003；Pielke等，2002）。在区域尺度上，Marshall 等人（2003，2004）已经阐明佛罗里达州景观的改变是怎样影响夏季和冬季的气候。在模式模拟中，佛罗里达州南部区域7—8月的平均降水的减少超过10%，而日最高气温则升高了1°C（图12）。由于湿地排水的结果，农作物区冻结的持续时间和强度均有所加强。

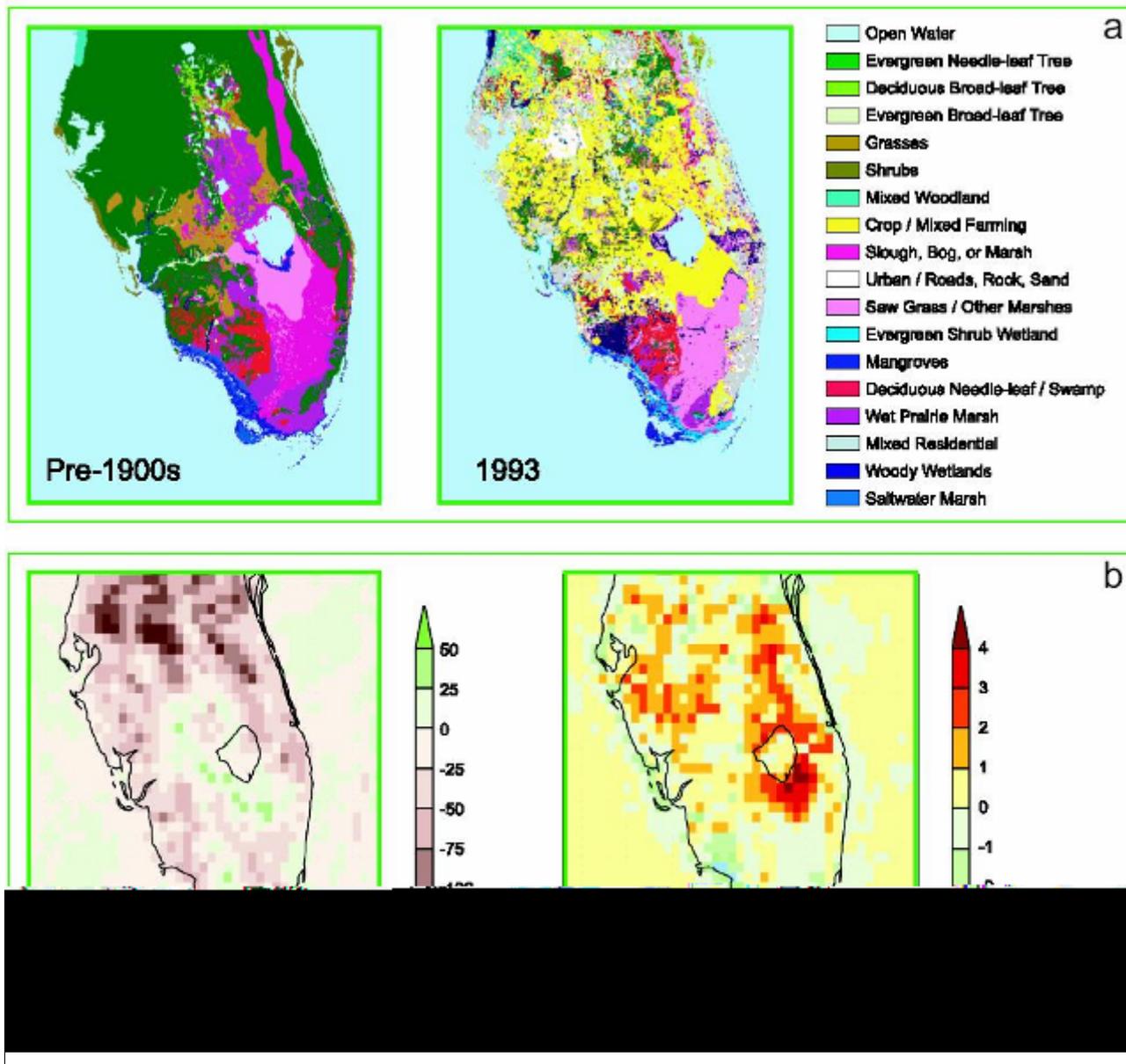


图 12 美国佛罗里达州南部：(a)美国地质调查 20 世纪前土地覆盖数据(上左)与 1993 年土地利用(上右)；(b)模拟累计降水(mm)(下左)和模拟 1989 年 7—8 月平均日最大温度(°C)(下右)两图均明显显示出 20 世纪前期的土地覆盖和 1993 年的土地利用状态之间的不同点。

最近的一些研究表明自然的陆地—大气系统，至少在某些区域中存在多方面的平衡。例如，Wang 和 Eltahir (2000)阐明了大气和生态系统动力学的结合是如何在西非地区导致可能的干旱或者湿润状态，这取决于这个耦合系统的初始状态。如同Claussen (2003)讨论的一样，不同的模式都已经预测到在非洲西北部的多种气候平衡，但是植被—大气系统的稳定性可能会随着时间而改变。如果多平衡在亚热带以外有可能，这一点是不确定的，至少在目前和晚冰期极大值 (LGM) 气候状态下。多平衡的全部重要性在于他们的潜能可以

解释突发的植被结构变化(Brovkin et al., 1999; Claussen et al., 2003)。Zeng 等人(2004)的模式研究表明了由于植被和生长有指示性植被的土壤之间相互作用产生的内蒙古多平衡状态的存在(草地对沙漠)。以上的例子都表明平衡状态之间转变可能是突然的、气候上的奇迹(Rial et al., 2004)。此外,人为引起的景观扰动能降低整个区域气候的稳定性。这方面海平面温度起着很重要的作用,因此气候系统的稳定性是一个地球系统层次上的问题,包括陆地、大气、海洋之间的联系。多平衡系统中阈值的识别应该是地球系统科学联盟(ESSP)优先开展研究的领域,因为研究的结果对于社会的贡献是巨大的。对这些问题理解的过程以及相关问题的解决需要iLEAPS做出主要的贡献。

### 3.4 尺度问题

考虑到一系列尺度上动量、能量和二氧化碳的交换可以阐明前面提到的生物物理反馈和遥相关的紧密耦合特性。相对于水汽蒸腾,叶面气孔优先吸收二氧化碳,由此调节叶面潜热和感热的能量辐射(Cowan, 1982)。生物控制被很好地平衡在由可用光和二磷酸核酮糖羧化酶(Rubisco)的含量设定的界限之间。(Farquhar et al., 1980; Collatz et al., 1991)。在整个冠层范围内,通过对环境做出反应的碳分配分类程序模式,叶子层次的活动被集合到冠层结构。这个结构与下层土壤蒸发一同决定从天到季节时间尺度的动量的吸收、反照率和土壤水分蒸发蒸腾损失总量(Kelliher et al., 1995; Lu et al., 2001; Narisma and Pitman, 2003)。然而随着空间尺度从几十到成百上千公里的增长,生物决定的土壤水分蒸发蒸腾损失总量每天被对流边界层(CBL)反馈弥补。

在从地面到云的形成和自由对流层的生物来源物质垂直输送的时效和能效方面湍流CBL起着非常重要的作用。边界层演变被某些机制性因子的影响,例如:风力、地表形状、粗糙度和诸如来自地面输入的潜热和感热的热力学因子。通过在能量上划分为潜热和感热的水分蒸发蒸腾损失,土壤湿度对于边界层厚度有着至关重要的影响。由于通过关闭气孔或者落叶植物减少蒸腾,地面大部分的辐射被转变为感热。这也相应的增加了干燥空气通过对流边界层顶部逆温区域的夹卷作用,使边界层变得干燥从而增加水分蒸发蒸腾损失(Raupach, 2000)。几天时间内在整个景观单元,因为水分和辐射能量的供给限制这些反馈甚至可以忽略。这些情况导致了大量像 Priestley-Taylor 系数的公式,它是表明地形植被常被认为在能量划分和水分供给影响的蒸发起到间接作用(Raupach et al., 2002)。

对流边界层变化的重要性可以通过森林里土壤水分蒸发蒸腾、低云量、地表辐射平衡和碳的吸收之间的反应来说明(Freedman et al., 2001; Gu et al., 2002)。为了量化这些结果,研究地表辐射和湍流是必要的,能够精确的模拟云量和对流边界层的生长。夹卷作用如何加热干燥对流边界层决定了云在特定时间能否形成。在云的可见边界和到达地表的辐射之间的正确联系需要被确定,气溶胶以及云对辐射特性和植被的影响将会在 2.1 节中讨论。

在较长的时间尺度内,各种各样的其他因素影响生物物理反应和遥相关。所以,植被的长期反应必须被包括进来,因为生物群落、景观对温度、降水、日射、风的变化以及人类活动的直接影响会做出反应。辐射属性例如反照率、结构属性例如空气动力学的粗糙度和地表湿度相关的属性,这些都会被植被覆盖种类和数量所影响。由于大尺度的天气和局地地面通量之间的相互作用,近地面的气候是要么刺激植被的发展、要么减弱植被的发展。

### 3.5 研究主题

地表和大气以及其他气候成分之间的相互作用以及反馈影响着地区气候的变化性和全球气候系统之间的相互作用。地表土壤水分含量、辐射吸收和能量分配是局地、区域、和全球陆地—植被—水—大气系统的关键因素。这些条件在整个日、季、年期间动力学上发生变化。但是,因为自然以及人类活动的持续时间和大范围的空间尺度,它们所引起的植

被类型、土地覆盖、以及景观变化产生了额外的重要影响。这些导致了以下研究问题：

(1) 从陆地到全球尺度生物物理和生物地球化学过程是怎样相互影响？

(2) 在地表—植被—水—大气系统中，短期（日到年际）地表—大气交换对于土地利用变化以及植被动力过程的有关作用是什么？

- 辐射特性的变化在陆地—大气交换过程中的影响是什么？
- （最初的）土壤水分形式与季节性及长期陆地—大气物质和能量交换之间是怎样以及在哪里进行互动的？土壤水分、温度、物候现象和植被是怎样影响土壤中的碳排放？
- 全球变暖对冻土的稳定性以及潜在的甲烷和 CO<sub>2</sub> 释放有什么样的影响？
- 对全球变暖作出响应的亚马孙森林不稳定性是否是在环境中精确的生物多样性参数不足的后果？
- 植被动力学在何处怎样影响气候变化的？
- 物候现象和植被分布的变化是怎样影响大气尘埃量的？

(3) 过去人类引起的土地覆盖变化对气候变化有怎样的贡献？这些正在发生的变化是如何影响未来气候变化的？

- 我们能否评估人类引起的土地覆盖变化对气候变率的影响？其中包括突发、极端事件以及导致向不同平衡方向运动的阈值？
- 测量景观变化对气候影响的适当度量是什么？
- 什么是地球系统层次上的土地覆盖变化？
- 在多大程度上对地表和气候之间的耦合强度的逐步了解可以指导土地利用的决策？

(4) 地表—大气交换过程的扰动以何种方式波及到偏远地区？

- 气溶胶是潜在的遥相关媒介吗？
- 由于热带地区砍伐森林引起的中纬度系统扰动是否与厄尔尼诺事件所引起的扰动相当？

#### 4 专题 4: 物质和能量在土壤/冠层/边界层系统内的输送: 测量和模拟

在专题 1—3 研究中着重突出的过程被认为是在生物圈和大气的耦合中是至关重要的。在从秒到数十年的时间尺度, 从细胞到整个行星的空间尺度上, 这些过程都在起着作用。这些过程包括了复杂的反馈, 因而对于单个元素过程的研究是不充分的。认识和预测这些复杂过程依赖于模拟和测量。为了模拟需要提出假设, 测量需要这些假设的经验验证。专题 1—3 中考察的这些过程本质是为满足数据和理解上的需要, 也是模拟和测量集成研究的需要, 这是专题 4 的研究范围。



图 13 专题 4 研究主题包括模拟和通量塔、飞机与卫星数据的综合

有关许多复杂的反馈例子将在专题 1 和 2 中被讨论。例如, 水循环和植被中碳、氮化合物 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{VOC}$  等) 交换之间的紧密耦合在专题 1 中首先被讨论, 接下来专题 2 中讨论生物气溶胶形成在调节水循环中起的作用, 以及对云和降水的影响。

四项关键的生态和水文研究主题已经明确, 其中通过测量和模拟进行的分析必须改进: ①生态系统的碳净吸收、光合作用和呼吸作用; ②大气和生态系统之间能量、动量、粒子和活性微量气体的交换; ③碳、水、氮和其他营养元素的平衡; ④前三项之间的相互作用以及年际变化。

由于 iLEAPS 聚焦于陆地—大气的相互作用, 主要关注的是测量、模拟各种重要的碳、氮化合物、气溶胶粒子、以及大气和陆面之间尤其是通过土壤—植被层的能量和动量通量。

直到约十年前, 陆地—大气交换的微气象学观测主要以移动方式 (campaign mode) 进行 (框图 1)。地点和测量周期的选择水平均匀、气流稳定和源—汇分离等近乎理想的条件, 这些假设隐含在模式框架中是数据分析的根据。近来, FLUXNET 站点 (Baldocchi et al., 2001) 的长期数据记录已经揭示了大量大气传输过程方面的信息, 表明理想流体状态的假设与连续长期的测量不一致 (Finnigan et al., 2003; Finnigan, 2004)。现在已经很清楚的是通过在从通量塔斑块尺度到区域尺度数据同化方法的综合应用, 需要增加局部测量的陆地—大气交换中空间和时间变动方面的额外信息可以以最有效方式的得到。这些方法要求发展适当的预测模型, 使其能够应用在反演模型中作为数据同化的基础, 由此将测量和模拟紧密结合。

因为感兴趣的尺度超过通量塔斑块尺度, 因此需要新的数据源。边界层平衡法从通量塔斑块到区域扩展了空气动力学方法 (框图 1), 而遥感提供了意想不到的空间覆盖数据但是时间分辨率太低。此类信息转化为陆地—大气交换测量数据要求有超越过去传统数据同化的新方法。这指的是多约束法。在此内容内, iLEAPS 应和 GLP (GLP, 2005) 和 GCP (GCP, 2003) 计划紧密合作。

专题 1—3 考虑的一系列与生物圈交换的化合物需要定量化。生物气溶胶和活性化合物如 VOC、甲烷、臭氧以及  $\text{NO}_x$  通量不仅需要新的测量技术, 而且需要扩展早期作为处理冠层和边界层内非守恒物种流动和传输数据同化基础的模型。至于水汽、 $\text{CO}_2$ , 地表和大气之间这些化合物的交换并不一定受湍流传输过程控制。取而代之的是叶面、气孔和积雪—冰面过程决定其传输速率。

框图 1 测量地表交换的空气动力学法

叶管, 枝条袋气体交换法和土壤观测室提供了土壤-植被连续体组分与上覆大气之间清楚的气体交换测量。它们是光合作用和土壤呼吸这些特殊局部过程珍贵的信息来源, 但是在局部和区域水平上利用这些方法评估生物圈-大气圈交换时将会导致临界取样问题。为回避这个取样问题, 直接围绕法(极少情况)扩大将尺度至整个森林冠层的封闭部分, 然而冠层封闭不可避免的扰动了辐射平衡以及湍流交换, 所以这种方法被限制在非常苛刻的应用(Dunin and Greenwood, 1986)。至少40年期间, 微气象学家应用空气动力学方法, 利用气流不可分离部分的湍流混合作为一个平均算子从而回避了采样问题。

空气动力学方法包括在代表性地表斑块上构建概念性控制体(或影响范围)、测量进出此体积所有空气面的气流, 加上其中浓度的变化(通常称为储存项), 然后通过差值推论地表交换(图14)。在塔基测量中假设控制体的顶盖穿过最高处的传感器, 以测量所关注的通量数量(图14)。这一高度由传感器观测代表性地表斑块所需要的高度, 并利用足迹分析法计算得到(Schmid, 2002)。

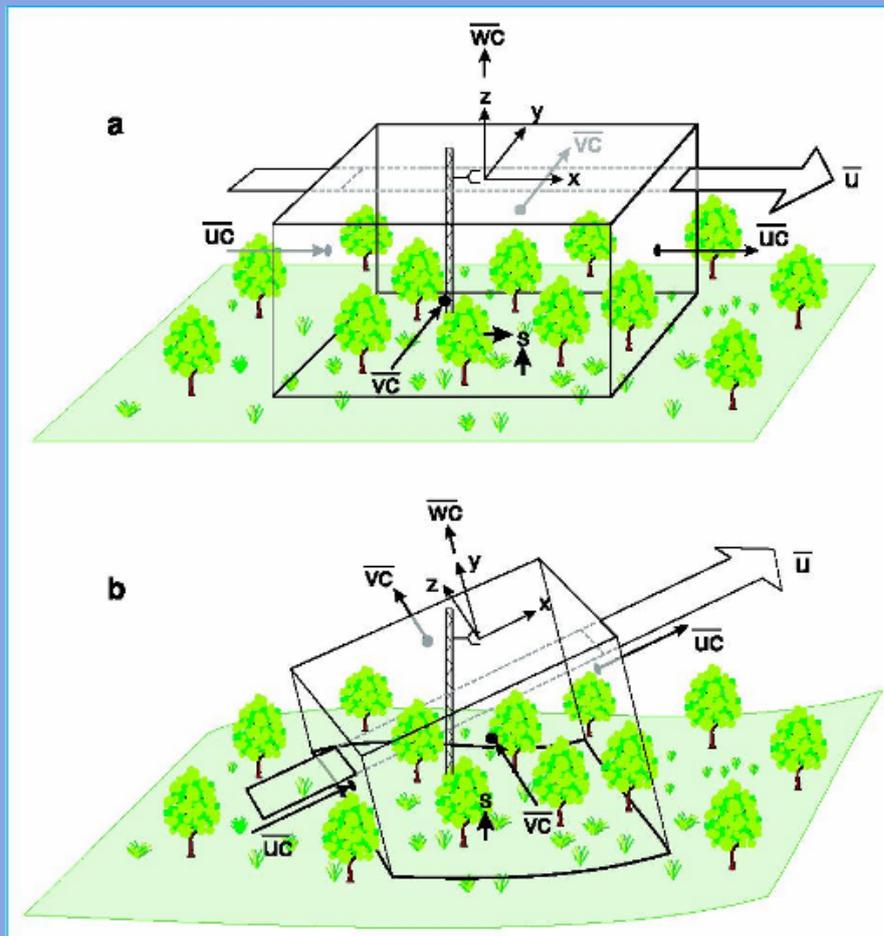


图14 冠层斑块上的概念性控制体: 控制体的形状和方向有平均风场确定

(a) 水平均匀地形稳定气流的控制体; 平流项总量为零并且仅仅需要测量通过控制体顶盖的垂直交换; (b) 复杂地形上的控制体; 平均风向量不与局部地表平行, 必须考虑水平方向上的平流项。摘自Finnigan et al., (2003)

控制体形状是由用来物质平衡方程的坐标体系和气流场确定的。在水平均匀气流的笛卡儿坐标中，控制体是一个垂直墙面和平行于地面的顶盖的立方体（图14a）。在复杂地形气流下相同坐标系中，墙面和顶盖不再垂直和平行于地表（图14b；也可见 Finnigan et al., 2003）。当应用到可以忽略储存量的稳定、水平均匀气流时，控制体中的物质平衡可简化为墙部高度测量的垂直通量和通过地表交换之间的等式。在非稳定气流控制体中的浓度变化率必须计入到物质平衡中，同时平流状态下，通过控制体的向上和向下墙面的水平气流不处于平衡之中，所以水平通量散度也必须计入地表交换的计算。

对于重要生物的标量（热量、水汽和CO<sub>2</sub>），在控制体顶部的通量测量可以利用涡度相关法获得。以前使用的是比如涡度积累或梯度扩散传输机制假设。这些方法仍然用于没有快速响应传感器的外部标量。

尽管塔测项目已经开始，但是相同的物质平衡基本原理落后于机载测量和边界层收支技术。与测量控制体顶部单点通量的塔测情况不同，飞行器能够记录飞行线路上数公里的通量数据，但是物质平衡中其他组分（如存储量和水平平流）必须间接估算。相反的是边界层收支法应用于整个作为控制体的PBL上。但在这一个例中，观测量中最精确的是浓度，在地表交换推导出来之前还必须利用PBL顶部夹卷通量的估计进行补充。在多个方法综合应用时，空气动力学方法通常是最好的，关于这一点这并不令人惊讶。



图15 森林冠层通量塔  
位于澳大利亚新南威尔士州Tumbarumba的 Ozflux站

已经明确的两个任务是：第一，认识这些控制地面的过程。概括地讲（可能气孔对少量微量气体去除的贡献例外），气体和气溶胶的地面吸收的最近的知识极大地依赖于经验，并且对下垫面过程的认识也较为有限（Gallagher et al., 2002）。例如，干沉降对于一些气体如臭氧、硝酸、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>以及气溶胶是重要的汇。近来研究表明一系列微量气体如氧化VOC和过氧化氢的去除比先前假定的要大（Karl et al., 2004; Ganzeveld et al., 2005）。这意味着一个明显的非气孔吸收贡献，这与以前对臭氧沉降的类似发现是相一致的（Altimir et al., 2004）。对土壤和植被湿润作用的了解还很缺乏，这包括液相化学、合沉降和叶排泄。第二个任务是认识这些化合物大气传输的机制，就此空气动力学方法就能够被应用于测量平均面积交换率。

考虑到上述两点和专题 1—3 的需要，专题 4 的长期目标是：

(1) 在通常的数据同化框架下，通过整合来自通量塔、边界层平衡、遥感和其他监测技术的数据和模拟，在从局部到区域尺度上推进陆地大气交换的长期测量；

(2) 扩展能量和CO<sub>2</sub>之外广泛生物活性化合物的长期测量能力；

(3) 利用结合模拟的测量回答生态学和水文学的关键问题。

通量测量和数据处理方面的许多重要问题一直被 BACH, GEWEX 和其他一些项目的经验所明确。此外，通量测量网络例如 FLUXNET 提供的多年期间的高时间分辨率测量结果已经改变了有些研究机构关于通量测量的观点。然而在所有尺度都存在测量困难，因此 iLEAPS 的首要挑战就是拓展通量塔涉足的空间范围从片到区域而不失去时间上的高分辨率，增加其他重要物种，例如气溶胶和活性气体的测量数据。

#### 4.1 湍流通量测量传感器的发展

快速响应、开放路径传感器一直以来随时可以被应用到热、水汽和二氧化碳上的测量上。快速闭合路径系统诸如可调的二极管激光器能以很高的频率（Friborg et al., 2000）测量不断增加的多种源于生物的重要化合物（CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 等）。最近质子迁移反应质谱仪 PTR-MS 和微气象技术结合（例如分离的涡度协方差或者张弛随机涡度相加）已经为测量一定范围 VOC 的通量提供了新的可能性（Rinne et al., 2001）。NO 已经可以用化学发光技术来测量（Rummel et al., 2002），NO<sub>x</sub> 可以被快速催化技术测量。可是更通常的情况下，有些微量气体的浓度的测量十分困难，只能在低频状态达到测量所需的精确度，因而只有涡度相加法或者梯度法才可用在通量测量上。然而，利用梯度法是有其局限性的，并且实际上在植物冠层内部和其上部的通量梯度关系完全断裂（Denmead and Bradley, 1987）。甚至更多的间接技术在估计气溶胶粒子通量时也是必要的（Rannik et al., 2003）。

#### 4.2 通量塔斑块尺度测量

目前，超过 240 个通量塔应用空气动力学方法（框图 1）连续测量着生物圈和大气之间的二氧化碳、水汽以及能量的交换（Balducchi et al., 2001）。提供的有关生态过程的数据空前详细，也有大范围生态系统日际和年际陆地碳交换总量的详细数据。除了这些优势以外，由于不能获取低频对于涡流和夜间下沉气流的贡献，在解释通量塔数据方面依然存在一些重要的问题，这些问题在于稳定的静夜停止了白天的地面能量平衡和二氧化碳吸收。

未被校正的通量塔结果给出的全球和区域平均净生物量产值比大气逆算法和生物总量研究值大 2 到 5 倍，尤其是在热带地区（Schimel et al., 2001; Malhi and Grace, 2000; Phillips et al., 1998）。这些差异可能源自几个典型问题。

第一类型问题是那些影响通量塔结果（净生态系统交换）与生物量总量和大尺度逆算法（测量净生物量产值）对比的问题。原因包括：①通量站点位置的误差——主要在欧洲和

美国森林区域(Falge et al., 2001), 导致了样本生物类型、历史和气候类型的不平衡; ②在不稳定的碳氢化合物和地下水溶解碳形成方面, 不可测量的碳损失(Guenther et al., 1995; McClain et al., 1997); 并且/或者 ③在湍流通量或者大气逆向算法估计的结果上的系统误差。上面三种误差的可能原因没有一个在通量塔和其他方法之间碳汇估计中可能导致如此巨大的系统误差。

第二类问题属于通量塔测量本身。这些误差的量级和正负号可能随着大气稳定性传输机制的变化在白天和夜晚有所不同, 这直接导致塔在估计净能量交换中的系统误差 (Moncrieff et al., 1996)。原因有以下几个:

(1) 地形的影响: 许多的通量站点地形条件复杂, 这里平流是可能的, 因为随着坡度、地貌、土壤湿度含量和植被种类以及地形影响的气流扭曲, 使太阳能吸收不相同 (Finnigan, 2004; Raupach, 1998)。

(2) 平均、滤波和坐标旋转: 在大多数 FluxNET 站点使用的时间系列平均和坐标旋转的方法等价于高通滤波涡度协方差, 导致了对涡流通量有贡献的低频丢失。平均时间 2—4 小时的增加和坐标旋转法的改变对于一些站点能量收支的平衡可能是必须的。

(3) 重力流引起的平流: 夜间呼吸通量比同时发生的生物学测量常常被低估。两种方法的差异在大气非常稳定的状态下尤其显著的表现出来(Goulden et al., 1996)。在几个复杂地形站点的测量强烈的暗示着由重力流产生的平流导致了上述一些差异。

(4) 不连续传输事件的取样: 目前未量化的系统误差可能来源是在强烈稳定状态 (甚至是平坦地形) 时湍流传输的间隙和由于日出时冠层空间高浓度的二氧化碳优先去除引起的空间取样误差。

通量塔站网对于推进我们理解生态系统过程非常重要。iLEAPS将会鼓励这里讨论的在建立通量塔站点中增加传感器测量范围。改进已有设施, 以及利用新旧测量提供珍贵的对比。根据这个思路, 增加长期塔测空气动力学成分的置信度就成为必须优先考虑的事情。所以以下三个补充战略是有必要的。

(1) 无论是处于稳定分层的中性条件的地形, 还是由地表覆盖变化引起的(Wilson, 2003)平流状态下的测量问题都不能仅仅通过建立更多的通量塔就可以解决的。甚至在经费也不成问题时, 也不可能有足够的测量来解决这个问题。关于如何利用复杂地形上的气流这方面的知识积累能帮助发展和检验被用作系统数据融合根据的模式。

(2) 低频涡流的存在显示出行星边界层 (PBL) 的通量传输机制没有被完全理解。

(3) 认识夜间稳定层间歇湍流以及在早晨和夜间转换期间的 PBL 对于设定所有的运转最好的站点上的通量塔平衡置信度界限是非常重要的。

### 4.3 非守恒标量

传统的空气动力学方法 (框图 1) 假设有被测标量是守恒的。在被测标量经历化学反应或者粒子大小分布发生变化时, 这种假设是无效的。被用作数据同化 (甚至在理想状态, 这个模式仅仅是一个水平均匀、稳定状态的假设) 基础的模式需要包括化学反应或者粒子碰撞增长方程。如同专题 1 和 2 提到的那样, 许多参与生物圈和大气圈之间相互作用的重要标量都经历化学或者物理变化, 其变化的时间尺度可以与冠层和边界层中物理传输过程相比拟。因此, iLEAPS 专题 4 中一个关键的优先将是建立大气化学和冠层交换相结合的模式, 以调试该综合模式并用作数据同化的工具, 从而推断反应的和非守恒标量的地面交换。

### 4.4 边界层平衡法

边界层平衡法把空气动力学法 (框图 1) 从通量塔斑块的概念性影响范围扩展到了整

个 PBL。但是，没有在 PBL 尺度上连续测量的方法，而且总体上，PBL 数据局限于来自气球和飞机的浓度和同位素比率剖面的测量，或者局限于一个或几个层次上的连续测量。为了将这些数据转换为地面交换值，要求数据同化到 PBL 标量传输模型中。

边界层平衡法主要应用于白天对流边界层（CBL），并且在地表通量大于通过冠层顶部的夹卷通量时此方法更为准确。两个其他的因素常常让人们使用这些方法：对于逆温层以上大气状态和由水平和时间的不均一性驱动的平流通量知识的匮乏。这些问题中有些问题可以通过使用改进的取样技术，例如无人驾驶飞机（UAVs）。这些都可以利用改进的 CBL 动力模式作为融合的基础得到完善。尤其在与通量塔测景范围一样具有对流问题的复杂地形上，目前用作数据融合基础的一维 PBL 模型应该被更复杂充分的模型取代（Weaver and Avissar, 2001）。

夜间稳定层相为边界层平衡法引发了一系列不同的问题。这个在 CBL 模式中非常典型使用的“高度混和”的假设应该被抛弃，但夹卷通量应该保留。然而在夜间，由于地形原因迫使平流产生，在层结稳定的条件下会遇到更多的问题，另外根据目前的知识，强烈的稳定性产生的间歇湍流完全排除了边界层平衡法的应用。

结合边界层收支法和塔测的结合是外延通量塔测量数据到超出通量塔斑块尺度的基本步骤。因此当目前边界层平衡技术是可用时，iLEAPS 的一个优先领域应该是确定这些条件，并且完善更复杂的 PBL 模式作为应用边界层平衡技术的基础，并由更少的理想条件。

#### 4.5 大气成分、通量的机载测量

在二十世纪九十年代飞行器测量通量基本上是所有综合计划当中一个重要部分。目的是获得大尺度、平均通量和通量的空间变化。机载通量测量是空气动力学方法（详见框图 1）的一种。尽管机载通量测量仍然是困难的，机载和通量塔测量之间的差异目前已基本解决(Isaac et al., 2003; Lenschow, 2004)。不同化合物（包括二氧化碳）的浓度和同位素比率测量直接通量看来更成功，但是仪器的轻便和精密还是应该被改良(Andreae et al., 2002, Lloyd et al., 2002, Styles et al., 2002)。iLEAPS 将进一步发展机载测量以及相关的解释包括低速、低空轻型的飞行器和 UAV 技术，用以改善湍流通量估计。

#### 4.6 遥感

虽然不能直接传送地表交换测量，但在提供从叶面、点到区域及全球尺度扩展过程模型的数据方面遥感技术是必要的。例如，未来 CO<sub>2</sub> 卫星测量将会是大尺度大气反演方法得以应用。遥感产品的地面验证应该成为通常与通量塔通量测量同时进行的生态实验的一部分。在和 GLP 紧密合作过程中，iLEAPS 应该进一步发展遥感算法，用以推导季、年、十年的生物物理属性和植被参数图。这些属性对于促进光合作用的碳吸收，水的生理学相关排放以及对于地表能量平衡的影响是很重要的。用不同技术获取的大范围空间和时间数据应该用一种新的模式—数据同化方法给予整合。

iLEAPS 也将支持进一步发展气溶胶化学成分和通量快速测量的新技术。用于解释卫星测量和推断气溶胶属性和分布的算法需要进一步的评价。当燃烧生成的和陆地气溶胶粒子的排放清单需要被改进，因为已经存在更好的植被类型和燃烧区域的卫星测量。目前模拟的气溶胶总光学厚度与测量值不一致是由于排放估计的不确定性导致的（Penner et al., 2001）。

#### 4.7 尺度问题

当研究微量气体在陆气生态系统的产生、迁移、转化和破坏时，必须考虑其尺度范围。通常生理反应发生在毫秒至几分钟之内，而土壤和叶片释放以及植被冠层通过扩散或湍流向上或下迁移的速度是一样的快。如果大气是稳定的，湍流迁移受到压制，微量气体

的浓度可能升高到影响生物学性质的一定程度。

需要仔细计划的研究方案来阐明在 iLEAPS 研究中遇到的众多尺度问题。理想情况下，利用适合的模型解释发生在各种测量尺度间的生产、迁移、转化的同时，应该研究不同时空尺度的联合测量（例如，观测室、涡动相关、稳定同位素、机载和卫星信息）。模拟是唯一的能够说明显见于大多数地球景观（例如，地形和植被、植被类型、植被年龄的存在/缺失）中的空间不均匀，并且这种不均匀影响生产和沉积过程。这种不均匀性使得通过单独测量定量描述陆气相互作用变得不切实际。

#### 4.8 研究主题

发生在陆面—大气系统中控制动量、能量以及物质的沉降和排放、传输的物理和化学过程变化，不是完全排除现有可用技术的直接测量，就是需要更仔细的调整和修正测量数据。因此 iLEAPS 必须进一步推动理论、模式和测量技术的改进以改善不同化合物和陆地—地表结构的广泛范围的陆面—大气交换的定量化。各种测量技术和模式的综合常常是唯一现实的方法，因此下列问题需要被提出：

(1) 边界层过程：在表征各种微量气体地表—大气通量的日变化方式中生物活动和边界层状态演变（例如，高度、稳定性和湍流结构）的相对贡献是什么？

- 地形是如何影响冠层内部和上空的交换？
- 冠层过程怎样影响活性气体和气溶胶的？
- 考虑到冠层中不均匀化学混合以及不连续交换，不同时间和空间尺度上描述冠层内外交换需要什么样的冠层微气候模型？
- CBL 尤其在与前一天残留层混合情况下是怎样影响地表—大气交换的？
- 在目前模拟技术失败之前与 CBL 高度相关的地形条件有多复杂？

(2) 表面过程：景观有不同的植被类型、积雪冰面或裸土复杂镶嵌。如何很好的定性这些地表中每一个的交换特性？它们如何能够被整合在大尺度模型中准确代表它们的平均交换？

- 没有植被的地表（土壤、冰）控制吸收的机制是什么？
- 地表（土壤、空间）湿度是怎样影响排放和沉降的？
- 为了能描述不同尺度的交换动力学特征，我们究竟需要怎样定性与地形相关的植被类型和垂直和水平的空间结构？

(3) 测量问题：在从土壤通量观测室到边界层平衡法的尺度内地表交换测量的空气动力学方法特别假设了简单流体状态（例如，水平均匀和/或稳定）和物种守恒。这些技术如何能够发展去除此类限制？

- PBL 中平流和低频通量的原因是什么，他们对标量传输的贡献是什么以及能否系统修正？
- 平流（水平传输，排泄）对于夜间交换的贡献是什么？怎样才能对它进行定性以及能否进行系统纠正？
- 在严格分层气流中湍流交换的空间和时间不均匀性的机制是什么？它对于夜间通量测量的影响是怎样的？
- 非守恒物种（活性化学和气溶胶）如何能够在地表交换测量的空气动力学方法中被调节的？

- 能够模拟地表能量平衡对比的中尺度三维模型能否用作边界层收支的基础？

(4) 数据同化、模拟数据整合以及多约束方法：能否为非守恒物种、地形强迫非均匀性和非稳定态发展为数据同化方法基础服务从而扩展测量方法的过程模型？

- 纠正非均匀流通量塔观测数据的同化模型最合适的形式是什么？
- 能否为非守恒标量的数据同化开发简单传输模型以扩展空气动力学方法对这些物种的应用？

# 实施战略

## 1 观测、模拟战略和综合

iLEAPS 是一个典型的综合研究计划，需要同时考察许多尺度、过程和变量。为处理这些复杂因素，可靠的实验设计技术非常有用。例如：一个优先战略模型以及多参数的敏感性研究。通过预先界定系统中最灵敏的部分，把测量作为重点，使大型试验变得更为切实可行。野外站点应该事先选择在对大型生态系统的类型（例如，森林、农业系统和湿地）、发展阶段（如：扰动期间和的再次生长）和生态群区（如：热带，北/亚北极地、地中海）具有代表性，并将遥感与大尺度模拟相结合。

iLEAPS研究活动在理想情况下应该包括覆盖一个大范围的时间空间尺度内的强化观测周期、长期监测和模拟（图16）。沿十字形联系的样带，反馈和整合问题是重要的。集水区是一个很好界定的景观单元，它在许多案例中是一个较为合适的研究对象。

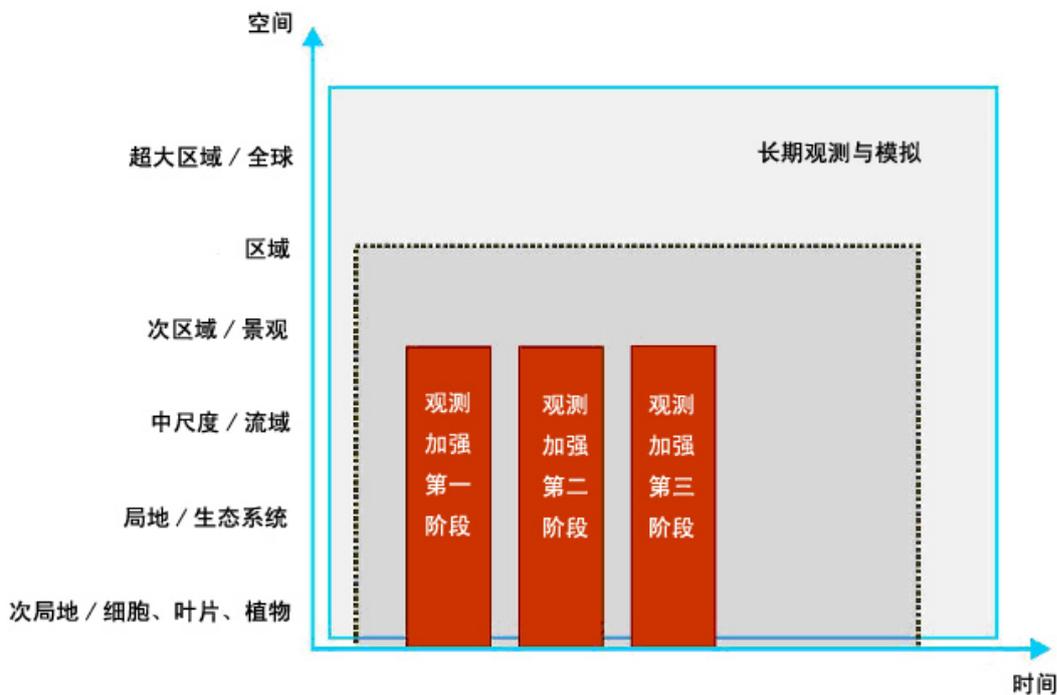


图16 地球系统研究中理想的研究活动，在大范围时间空间尺度内将实验研究与观测、模拟相结合。

为了说明区域热点（如亚马孙河流域）或者为了能说明认识方面的主要不足（如永久冻结地带、地中海气候）根据普通的环境因子，研究任务可能以地理边界为基础加以选择。图3中标明了对地球系统有强烈影响的关键区域，另外除了上面提及的区域外，还包括西非和亚洲季风区。iLEAPS在有全球影响热点区的研究活动是在西非地区的非洲季风多学科研究计划（AMMA）以及北极区域的国际极地年计划POLARCAT（利用飞行器、遥感、地表测量和模拟研究极地的气候、化学、气溶胶和传输）（图17）。

iLEAPS支持传统IGBP陆地样带的使用，这些样带是沿着温度、降水和土地利用全球变化梯度方向组建的。IGBP陆地样带被建立在覆盖大部分环境条件和生物群区/群落交错带的主要区域。全球变化研究采用这一方法来说明区域和全球意义的大空间现象。像高纬度（由于全球变暖）和热带区域（由于土地利用的快速改变）的高敏感区域有专门的研究专题（Steffen et al., 1992; Koch et al., 1995）。当样带与沿单一环境梯度的现场实验整合时，样带对于测试模型开发和验证关键的机制认识方面是十分有力的。从样带中获取的

信息可以通过模拟和使用空间的遥感数据被换算到区域、大陆和全球尺度。在iLEAPS中，样带能够与过程研究的网络以及像FLUXNET这样的观测网络一同使用。

选择研究主题的可选的方法将改进iLEAPS任务，这是以陆地—大气系统中关键的过程或者现象为基础（图17）。iLEAPS的燃烧—陆地—大气区域生态系统研究（FLARES）一个交叉研究计划，它跨越学科（生物、气候、化学 和物理）以及地理区域来实现，并向广泛的整合和比较分析方向运作。

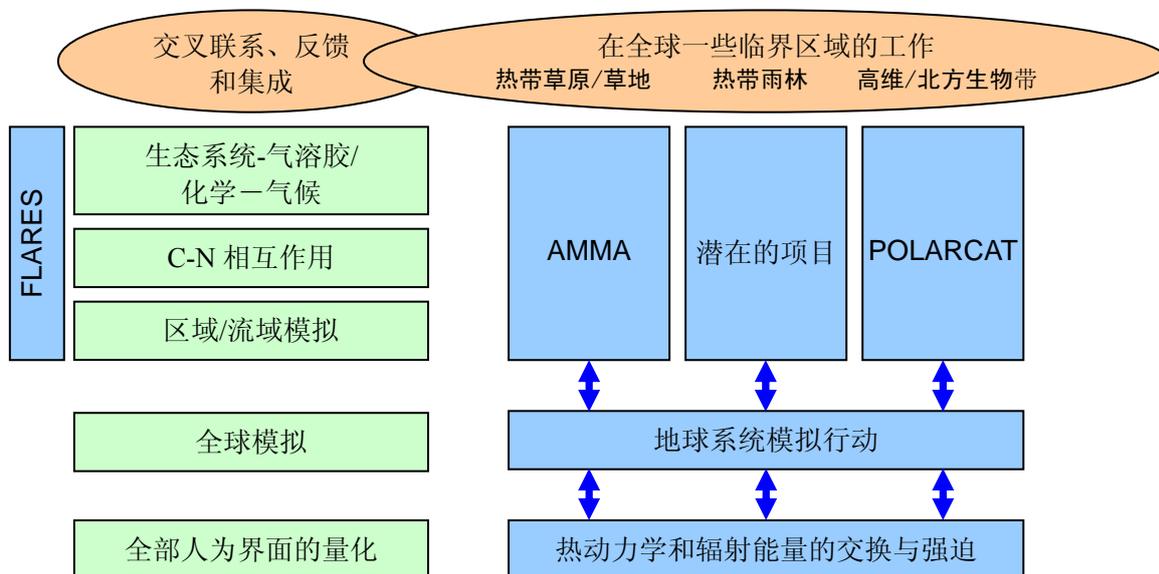


图17 关注区域过程以及交叉研究主题的iLEAPS正在执行和规划中的研究实例（蓝色）



图18 传统IGBP陆地样带。样带12—14是土地利用变化强度的概念梯度为依据  
摘自Canadell et al, 2002; Opulus出版社授权使用

## 2 观测和模拟的结合：连接尺度的工具

大量陆地—大气系统反馈机制研究需要在各个尺度上的测量与使用物理和生物学精确方法的区域、全球模式相整合。因而为了对各种整合和相互作用的物理、生物、化学过程进行尺度分析，iLEAPS 研究需要发展新的手段。在本节内容中，模式数据同化的发展将是中心内容。

iLEAPS 的目的是发展局地、区域和全球气候耦合模式，其中包括陆地碳循环、大气化学和水文过程。iLEAPS 模式工作的关键重点区域将会放在和 IGBP, WCRP 和 ESSP 中的相关项目紧密协作。耦合模式增加了对于排放、碳循环与水循环相关的反馈、辐射影响和气候系统的机制理解。描述植被、气溶胶前体物和气溶胶排放与水循环之间交互循环的模式需要被改进。现有的在过程层次和大尺度两方面上将气溶胶耦合在气候系统中的模式需要被评估。目前，已有云尺度上的微物理模型和全球气候尺度上云过程的高度参数化表征之间存在基本分离，这是提高对气候变化中气溶胶—云相互作用认识的最大障碍之一。

为了能够完成上述提到的目标，需要加强模式工作者和野外和试验工作的科学家之间的合作。详细的来讲，测量和模式的综合、模式发展和评估应该包括在以下工作之中：①从局部观测到区域模型的尺度分析；②改进区域耦合模型中的陆地—地表不均一性的处理方法；③整合生物物理学模式和生物化学和动力学的植被模式；④基准。

通常用于说明区域和全球问题的数值模式依然在相对大于观测的空间尺度上运行。利用测量范围从测量室到飞行器测量的非自动测量技术，许多大型野外试验仅能获得短期测量数据。从综合的物理、生物和化学过程所引发的新的方法论问题这一角度出发，应该考虑并评估更合适的方法。拥有大量可用野外数据的情况下，模式和数据融合的产品（如气候、微量气体和其他数据的再次分析）是很有价值的。因为再分析包含了模拟和数据的融合，当再分析能不能作为运行和测试模式的标准时，决定运行环境是很重要的。

地表不均一对于栅格尺度的影响的尺度分析依然是有问题的。例如，由于同地表能量平衡（内陆海风）相比较，中尺度不均匀的重要性已被公认有一段时间了(Pielke, 2002; Weaver and Avissar, 2001)，但是孤立的个例研究已证明了在自然界中的作用。能够模拟这种现象的3维中尺度模式通常不被当作在边界层平衡做数据同化的基础。当水平的温度差异是很大的时候（水—陆界面），低云气候学是第一步，强迫积云成为有用的示踪物。例如，云形成和消散循环用于土壤—植被—大气—传输和CBL参数化耦合试验。

当陆地—地表能量和水通量以及他们和光合作用的联系的生物物理模式被相对确定的时候，生物地球化学和动力植被模拟将会从多竞争成果中受益，至少在iLEAPS项目的前半阶段。在这些努力当中，生物物理、生物地球化学和动力植被模式的一致性至关重要的。例如，大多数生物物理陆地模式采用一层冠层，但是一些动力植被模式考虑两层冠层，以及冠层下的森林和草地(Foley et al. 1998)。在iLEAPS项目的后半部分，生物地球化学和动力植被模式的集成是必须的。

为了识别和分类各种过程对不确定性的敏感度以及识别某些关键反馈环，研究许多试验和模式的耦合个例是必要的。对于碳循环或者气候模式的系统性评价在过去就已经开展了，但是主要是在全球尺度范围内。类似的系统评价可以在局地和区域尺度下利用大型塔的通量测量以及径流测量进行。这些评价应该是iLEAPS 和 GEWEX-GLASS和CCMLP、AIMES的交叉研究工作。碳循环模式应该被改进，从而得出通量站点的CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O通量的季节和年际变化，同样，得到浓度测量站点上大气CO<sub>2</sub>浓度和气溶胶的变化。利用充分耦合的地表大气模式的敏感性研究可以用来评估区域性土地利用或土地覆盖变化和气溶胶或温室气体排放之间遥相关的重要性。

### 3 相关科学活动的协作

iLEAPS 计划的研究覆盖了联系陆气交换、大气圈、水圈和对流层化学的基础过程。以上计划的活动与其他实施的计划存在各种联系。最明显的联系是同 IGAC（包括含有大尺度传输的大量研究大气过程的项目）和 GLP（从事与陆地生态、土地利用和土地覆盖相关的伴随很强的人类因素成分的研究项目）。iLEAPS 与 SOLAS 共同需要描述大气边界层特征及其与下垫面相互作用的完善的理论，以及改进的通量测量技术。

iLEAPS 也将发展与 WCRP 紧密的伙伴关系，并已经促成了下列合作领域的重要研究：陆面过程和大气耦合（GEWEX-GLASS）、卫星遥感和陆面气候学（GEWEX-ISLSCP）、边界层发展物理（GEWEX-GABLS）、北极环境过程（CliC）和耦合模型（WGCM）。所有 iLEAPS 模拟活动将从与 AIMES 紧密的相互作用中获益。

iLEAPS项目将开展一些协作，例如，与卫星遥感团体（例如，GOFC）协作，正在开发一定量的燃烧范围和植被产品，或与改进大气模式中云参数化的GEWEX-GCSS项目协作。起反应的非CO<sub>2</sub>碳化合物通量不可能被从CO<sub>2</sub>通量中分开处理，要求与全球碳（GCP）方面的ESSP联合计划协作。FLUXNET应该是一个与iLEAPS内部联系的主要活动。iLEAPS陆地—大气相互作用的古气候方面应与PAGES合作。

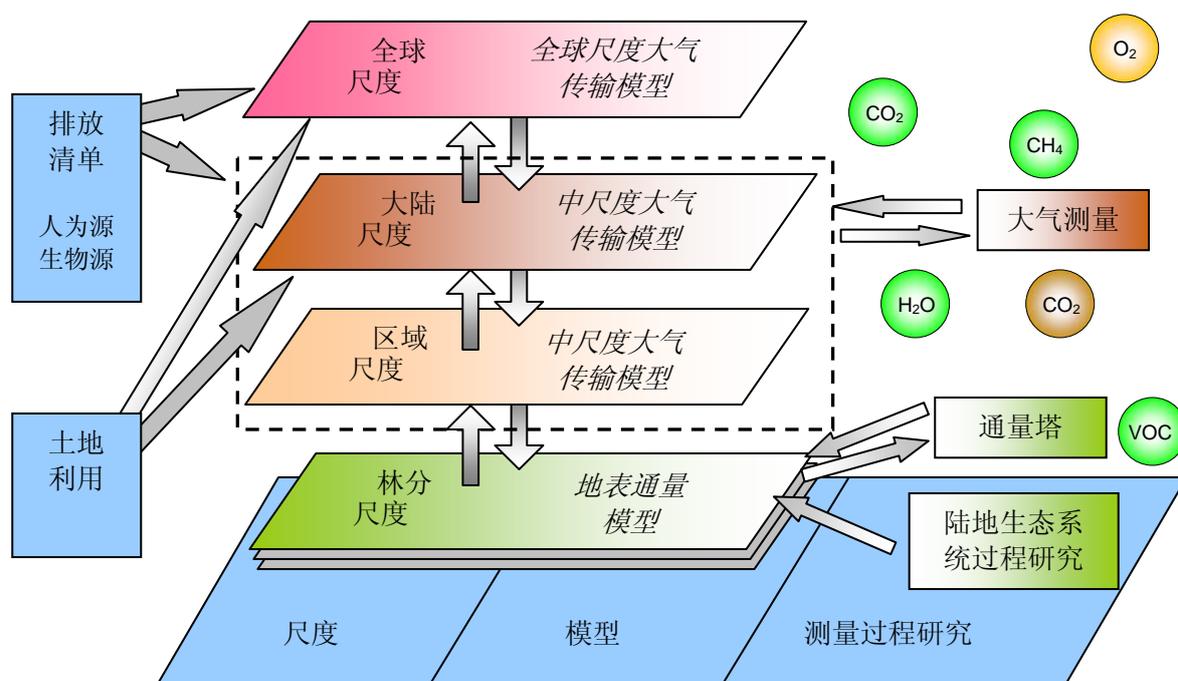


图19 研究方法综合及协作的示意图说明

## 4 组织结构

### 4.1 项目管理

SSC 新成员由 SSC 提名并由 IGBP 官员批准任命。主席和其他 SSC 成员将服务三年，并可以延长任期。为与 IGBP 一致，SSC 的主要任务将是：1.为 iLEAPS 提供科学指导，检查 iLEAPS 发展、计划和执行情况；2.包括以适当形式感谢 IGBP 和 ICSU 支持的成果出版物，在科学团体中鼓励 iLEAPS 的提升和广泛的知名度；3.通过确定和监控重大事件和结果来表明进步和成绩；4.鼓励国家政府，地方和国际基金机构支持 iLEAPS 的研究；5.鼓励 iLEAPS 与其他 IGBP、国际项目和关心科学研究和全球变化评估的社团的合作；特别是，一些 SSC 成员将作为联络员参与在 IGBP 和 ESSP 的活动。

iLEAPS 活动由位于芬兰 Helsinki 大学的国际项目办公室 (IPO) 来协调。IPO 将负责：1.帮助制定和执行研究计划、数据库管理、数据集成和培训活动；2.积极促进全球的 iLEAPS 科学团体间的交流；3.汇编和散发培训课程、暑期学校等信息；4.帮助 SSC 汇集和综合 iLEAPS 研究。

### 4.2 活动

iLEAPS 开展并推动 iLEAPS 的研究活动，其中包括长期野外综合研究、野外活动、模型开发、集成研究、会议以及研讨会。iLEAPS 将会认可有清晰目标和限定期限的任务，包括 1.说明特别科学问题的过程研究网；2.野外试验 3.模拟（工具开发、验证和对比）；4.长期综合性现场研究；4.跨学科的国际大型活动；5.集成研究；6.数据库；7.具体科学问题会议；8.综合会议。科研团体提交的任务请 SSC 批准以及定期评估。有的任务——如全球数据库的维护和发展——将与 iLEAPS 伙伴计划（例如，AIMES、IGAC、SOLAS 和 GLP）紧密协作来运作。综合多学科、交叉学科任务是“被认可的计划”，其他任务是“被认可的支撑行动”。iLEAPS 科学会议将促进科学成果的交流和研究团体之间的切磋。会议将在全世界范围内组织，以确保广泛的地理代表性。

#### 4.2.1 研究引导

iLEAPS将会利用专题1—4的研究框架来改进对陆地—大气过程以及地球系统方面的科学认识。iLEAPS采用自下而上、自上而下两种方式：开展必要的科学研究，认可有科学家建议的适当研究活动。研究的执行主要由科研团队运作，这是仅有的确保创新的想法和过程认识、测量和模拟。虽然如此，还有几个构成iLEAPS研究基础的必要指导方针如下：1、项目应该考虑在陆地—大气系统中多参数及其相互作用和反馈，正如在本文前面部分所提出的；2、iLEAPS中研究活动应该鼓励对不同时间和空间尺度上陆地—大气系统的基础过程的理解；3、iLEAPS活动必须从开始并贯穿整个研究过程将测量与模拟和集成相结合；4、项目应由对区域和全球十分重要的科学问题所驱动；5、iLEAPS 活动将跨越传统的学科和各种组织的界线而进行；6、科研活动必须是国际性的并对来自所有国家和组织的参与者公开，对于参与者的选择将取决于他们对于科学的贡献；7、活动中必须包括能力建设。一些备受关注的任务如回答专门科学问题的过程研究网络可能不能完全符合上面的方针。

#### 4.2.2 申请引导

任务申请书应基于研究上述指导方针。可以在任何时间提交给IPO；IPO会将符合要求的申请呈交SSC寻求意见和批准。IPO会代表SSC签署一份协议书任命其中的一位作为此任务的主要联系人。

申请书应不超过10页，包括：1、任务题目；2、任务协调人的详细联系方式；3、背景；4、科学问题说明的叙述；5、活动范围（时间和空间）；6、测量和模拟；7、区域和

全球意义；8、参与人的详细联系方式；9、时间表和完成日期；10、预算；11、研究基础和能力建设；12、数据存档；13、通讯评议文稿和资料。

SSC 会议每年会评估已批准的任务。任务协调人应在 SSC 会议前六周提交不超过三页的任务摘要简明陈述：1、科学活动和成果；2、与已批准申请书一致的列表；3、对最初申请事项的变更。已发表的论文和其他相关材料应该随同年度报告一起递交。

iLEAPS 欢迎从多个 IGBP 和 WCRP 计划中寻求批准的任务，正如一些国际和国家任务可以有与多个计划相关的研究项目；非洲季风多学科研究计划就是一个例子。

### 4.2.3 认可行动的利益和责任

iLEAPS 认可行动的利益在于：1、参与 iLEAPS 的发展、计划和实施；2、由于通过研究和获得信息，提高了科研价值；3、通过 iLEAPS 工作组、会议和出版物，加速成果的交流；4、与其他国际计划和项目互动；5、增加获得国家和国际资金支持的机会；6、为学生和年青科学工作者建立 iLEAPS 国际培训学校；7、增加学生和年青科学工作者参与网络工作的机会。

iLEAPS 认可行动的责任是：①接受 iLEAPS 的原则和目标；②依照科学计划的相关方面进行研究；③通过任务管理团体协助 iLEAPS 计划和发展；④为更大的科研团体提供任务资料；⑤每年向 SSC 汇报进展；⑥在包括科学论文的科研成果中应标注 iLEAPS。

### 4.3 能力建设和知识传播

能力建设和知识传播是 IGBP 也是 iLEAPS 的基本组成部分。通过学生扩展的能力培养和交叉学科训练对于 iLEAPS 是很重要的。

iLEAPS 中研究项目的实施必须是跨学科的，特别是因为 iLEAPS 研究覆盖了陆地和大气。最近几年，尽管跨学科项目已经变得越来越普遍，但在跨学科方法上仍然需要更多的训练。研究生层次上的学生明显缺乏训练，但在发展中国家讲师水平也经常是这样。已有的训练活动是寒暑期学校和加强的培训课程。因此，iLEAPS 将确认和宣传现有合适的涉及大气物理和化学、陆地过程和陆气相互作用的学校或研讨会。鼓励从事 iLEAPS 任务的科学家参加这样的培训活动，并在其中授课。

所有 iLEAPS 研究本质来说是培养能力，在区域性综合研究和长期观测以及研究项目中也是特别重要的。大部分研究主要是在令人愉悦的发达国家进行。然而，在世界发展中国家（如巴西的 LBA）特别是在土地利用变化剧烈的地方，进行区域性研究的需求日益增加。为了能够在这些发展中区域继续进行长期研究，关键是培养当地科研人员的能力。这可以通过研究生，交换学生，特定地点或现场课程和培训以及发达国家科学家在发展中国家的假期来实现。

iLEAPS 认可的所有项目都将包含一个能力建设和学生培训的部分。某些活动可能与 START, IAI 和 APN 联合发起，这些工作提供给发展中国家一些综合项目和合作关系。以下列出了可能的机制：①初次接触和涉及的区域；②现场培训；③后续专题学术讨论会；④数据输出。

为了使区域科学家和学生都包括在项目中，在项目开始前必须先接触。iLEAPS 办公室将保持一份能帮助调查者获得本区域有兴趣的科学家姓名的 IGBP 地区代表和国家委员会名单。区域研讨会帮助建立与地区科学家和学生面对面接触，并提供参与的机会。当地政府经常有关于外国科学家工作的具体规定。在任何研究开始前必须考虑这些规定并且用心遵守这些规定。这些东道国政府的热心参与和支持是整个活动成功的先决条件。

发展中地区经常缺乏用于测量陆气相互作用的设备和技术知识。一方面在项目中通过组织一个现场培训课程。这不仅是教学生和研究人员的技术和设备知识，而且也包括如何

建立完整的地面观测站。这可能联系到或与寒暑期学校平行运作。如果发展中地区有足够感兴趣的学生参加寒暑期学校，那么讲授人员来到这些学生身边可能更加有效。

专题学术讨论会可能在地区项目进行或完成之后进行，也可以是重要的专题报告。最后的专题报告将不仅以科学会议的形式，而且也以公众、学校、政府能够参加的论坛形式进行。后者对地区来说影响最大，并应该证明初始目标已经达到。这对于区域项目和 iLEAPS 来说都是重要的提升。

数据共享办法必须进入所有地区项目。这经常采取数据库形式，这也是必须的；然而在发展中国家一定存在有其他传输数据的方式。在一些地区网络访问是非常差的，因此必须建立适合的战略（例如分发 CD 数据）。

#### 4.4 交流

为促进 iLEAPS 的发展，对于科学家、社会、政治家和普通公众，行动和成果必须是可见的。公众和媒介关系将会通过 iLEAPS IPO 协调，并且包括了下面的活动：

(1) 说明 iLEAPS 和其研究宣传册的出版散发将会促进对地球系统的认识。宣传册将用于推动 iLEAPS 发展并且在区域行动开始前提高地区人们的意识。

(2) 在 IGBP 和其他通讯中发表 iLEAPS 论文创造知名度和突出 iLEAPS 重点领域。

(3) 主要为科学家参与 iLEAPS 活动而建立和维护 LEAPS 网站和通讯。这将告知科学家相关的目前和将来的活动、会议、专题讨论会、课程和寒暑期学校。

(4) 为会议和大区域综合性项目准备的告知公众关于 iLEAPS 活动的出版材料。任务协调人应该与 IPO 就出版材料的内容和日期保持联络。

iLEAPS 将与 IGBP 紧密协调制定计划和实施各种行动，包括能力建设和知识传播行动。iLEAPS 也会建立与全球变化国家委员会定期的联系。iLEAPS 将鼓励与区域综合项目有关的社团和政策相关的拓展活动。

## 参考文献

- ACIA (2005) Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1,020pp.
- Adegoke JO, Pielke RA Sr, Eastman J, Mahmood R and Hubbard KG (2003) Impact of irrigation on midsummer surface fluxes and temperature under dry synoptic conditions: a regional atmospheric model study of the U.S. High Plains. *Monthly Weather Review* 131: 556–564.
- Altimir N, Tuovinen J-P, Vesala T, Kulmala M and Hari P (2004) Measurements of ozone removal to Scots pine shoots: calibration of a stomatal uptake model including the non-stomatal component. *Atmospheric Environment* 38:2,387–2,398.
- Anderson TL, Charlson RJ, Schwartz SE, Knutti R, Boucher O, Rodhe H and Heintzenberg J (2003) Climate forcing by aerosols – a hazy picture. *Science* 300: 1,103–1,104.
- Andreae MO, Artaxo P, Brandão C, Carswell FE, Ciccioli P, da Costa AL, Culf AD, Esteves JL, Gash JHC, Grace J, Kabat P, Lelieveld J, Malhi Y, Manzi AO, Meixner FX, Nobre AD, Nobre C, Ruivo MdLP, Silva-Dias MA, Stefani P, Valentini R, von Jouanne J and Waterloo MJ (2002) Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. *Journal of Geophysical Research* 107: 8,066, doi:10.1029/2001JD000524.
- Andreae MO, Rosenfeld D, Artaxo P, Costa AA, Frank GP, Longo KM and Silva-Dias MAF (2004) Smoking rain clouds over the Amazon. *Science* 303:1,337–1,342.
- Andreae MO, Jones CD and Cox PM (2005) Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. *Nature* 435: 1,187–1,190.
- Arneeth A, Kelliher FM, Gower ST, Scott NA, Byers JN and McSeveny TM (1998) Environmental variables regulating soil carbon dioxide efflux following clear-cutting of a *Pinus radiata* D. Don plantation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 103(D5): 5,695–5,705.
- Atkinson R (2000) Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment* 34 (12–14): 2,063–2,101.
- Avissar R and Werth D (2005) Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation. *Journal of Hydrometeorology* 6: 134–145.
- Bamzai AS and Shukla J (1999) Relation between Eurasian snow cover, snow depth and the Indian summer monsoon: An observational study. *Journal of Climate* 12: 3,117–3,132.
- Baldocchi D, Falge E, Gu L, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Xuhui L, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U KT, Pilegaard K, Schmid HP, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K and Wofsy S (2001) FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapour and energy flux densities. *Bulletin of American Meteorological Society* 82: 2,415–2,434.
- Bauer H, Giebl H, Hitznerberger R, Kasper-Giebl A, Reischl G, Zibuschka F and Puxbaum H (2003) Airborne bacteria as cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research* 108: 4,658, doi:10.1029/2003JD003545.
- Brasseur GP, Prinn, RG, Pszenny AAP (Ed.s) (2003) *Atmospheric Chemistry in a Changing World: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 300pp.
- Brovkin V, Ganopolski A, Claussen M, Kubatzki C and Petoukhov V (1999) Modelling climate response to historical land cover change. *Global Ecology and Biogeography Letters* 8(6): 509–517.
- Bonan GB, Chapin FS III and Thompson SL (1995) Boreal forest and tundra ecosystems as components of the climate system. *Climatic Change* 29: 145–167.
- Canadell JG, Steffen WL and White PS (2002) IGBP/GCTE terrestrial transects: dynamics of terrestrial ecosystems under environmental change – introduction. *Journal of Vegetation Science* 13: 297–450.
- Cao M, Marshall S and Gregson K (1996) Global carbon exchange and methane emission from natural wetlands:

application of a process-based model. *Journal of Geophysical Research* 101: 14,399–14,414.

Chase TN, Pielke RA Sr, Kittel TGF, Zhao M, Pitman AJ, Running SW and Nemani RR (2001) Relative climatic effects of land cover change and elevated carbon dioxide combined with aerosols: a comparison of model results and observations. *Journal of Geophysical Research* 106(D23): 31,685–31,691. Christensen TR, Joabsson A, Ström L, Panikov N, Mastepanov M, Öquist M, Svensson BH, Nykänen H, Martikainen P and Oskarsson H (2003) Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters* 30: 1,414, doi:10.1029/2002GL016848. Christensen TR, Johansson T, Malmer N, Åkerman J, Friborg T, Crill P, Mastepanov M and Svensson B (2004) Thawing sub-Arctic permafrost: effects on vegetation and methane emissions. *Geophysical Research Letters* 31: 4,501, doi:10.1029/2003GL018680.

Claussen M (2003) Feedbacks, synergisms, multiple equilibria, and teleconnections. In: Kabat P, Claussen M, Dirmeyer PA, Gash JHC, de Guenni LB, Meybeck M, Vörösmarty CJ, Hutjes RWA, Lütkeemeier S (Ed.s), *Vegetation, Water, Humans and the Climate: A New Perspective on an Interactive System*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp37–63.

Claeys M, Graham B, Vas G, Wang W, Vermeylen R, Pashynska V, Cafmeyer J, Guyon P, Andreae MO, Artaxo P and Maenhaut W (2004) Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene. *Science* 303: 1,173–1,176.

Collatz GJ, Ball JT, Grivet C and Berry JA (1991) Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology* 54: 107–136.

Conrad R (1996). Metabolism of nitric oxide in soil and soil micro-organisms and regulation of flux into the atmosphere. In: Murrell JC and Kelly DP(Ed.s), *Microbiology of Atmospheric Trace Gases: Sources, Sinks and GlobalChange Processes*. Springer-Verlag, Berlin. pp67–203.

Conrad R (1997). Production and consumption of methane in the terrestrial biosphere. In: Helas G, Slanina J and Steinbrecher R (Ed.s), *Biogenic Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*. SPB Academic Publishing, Amsterdam, Netherlands. pp27–44.

Cotter ES, Jones AE, Wolff EW and Bauguittie SJ-B (2003) What controls photochemical NO and NO<sub>2</sub> production from Antarctic snow? Laboratory investigation assessing the wavelength and temperature dependence. *Journal of Geophysical Research* 108(D4): 4,147, doi:10.1029/2002JD002602.

Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA and Totterdell IJ (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184–186.

Cowan IR (1982). Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB and Ziegler H (Ed.s), *Physiological Plant Ecology II. Water Relations and Carbon Assimilation*. Springer, Berlin. pp589–613.

Cramer W, Bondeau A, Woodward FI, Prentice IC, Betts RA, Brovkin V, Cox PM, Fisher V, Foley JA, Friend AD, Kucharik C, Lomas MR, Ramankutty N, Sitch S, Smith B, White A and Young-Molling C (2001) Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology* 7: 357–373.

Crutzen PJ (1995) Overview of tropospheric chemistry: developments during the past quarter century and a look ahead. *Faraday Discussions* 100: 1–21.

Davidson EA (1992) Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil. *Soil Science Society of America Journal* 56: 95–102.

Davidson EA (1993) Soil water content and the ratio of nitrous oxide to nitric oxide emitted from soil. In: Oremland RS (Ed.), *The Biogeochemistry of Global Change: Radiative Active Trace Gases*. Chapman and Hall, New York. pp368–386.

DeFries RS, Houghton RA, Hansen MC, Field CB, Skole D and Townsend J(2002) Carbon emission from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99: 14,256–14,261.

Delmas R, Serça D and Jambert C (1997) Global inventory of NO<sub>x</sub> sources. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48:

Denmead OT and Bradley EF (1987) On scalar transport in plant canopies. *Irrigation Science* 8 (2): 131–149.

Dlugokencky EJ, Masarie KA, Lang PM and Tans PP (1998) Continuing decline in the growth rate of atmospheric methane. *Nature* 393: 447–450.

Dunin FX and Greenwood EAN (1986) Evaluation of the ventilated chamber for measuring evaporation from a forest. *Hydrological Processes* 1: 47–62. Eastman JL, Coughenour MB and Pielke RA (2001) The effects of CO<sub>2</sub> and landscape change using a coupled plant and meteorological model. *Global Change Biology* 7: 797–815.

Ehhalt D, Prather M, Dentener FJ, Derwent R, Dlugokencky EJ, Holland E, Isaksen I, Katima J, Kirchhoff V, Matson P, Midgley P, Wang M, et al. (2001) Atmospheric chemistry and greenhouse gases. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA (Ed.s), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. University Press, Cambridge. pp239–287.

Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N-O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai CT, Law BE, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger JW, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K and Wofsy S (2001) Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology* 107(1): 71–77.

Farquhar GD, von Caemmerer S and Berry JA (1980) A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* 149: 78–90. Finnigan J, Clement R, Malhi Y, Leuning R, Cleugh HA (2003) A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part 1: Averaging and coordinaterotation. *Boundary Layer Meteorology* 107: 1–48.

Finnigan JJ (2004a) Advection and Modelling. In: Massmann W, Lee X and Law BE (Ed.s), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements*. Kluwer Academic Publishers, Boston. pp209–244.

Finnigan JJ (2004b) A re-evaluation of long-term flux measurement techniques Part 2: Coordinate systems. *Boundary-Layer Meteorology* 113: 1–41. Freedman JM, Fitzjarrald DR, Moore KE and Sakai RK (2001) Boundary layer clouds and vegetation-atmosphere feedbacks. *Journal of Climate* 14(2):180–197.

Friborg T, Christensen TR, Hansen BU, Nordstroem C and Soegaard H (2000) Trace gas exchange in a high arctic valley 2. Landscape CH<sub>4</sub> fluxes measured and modelled using eddy correlation data. *Global Biogeochemical Cycles* 14(3): 715–723.

Friedlingstein P, Bopp L, Ciais P, Dufresne J-L, Fairhead L, LeTreut H, Monfray P and Orr J (2001) Positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophysical Research Letters* 28: 1,543–1,546.

Foley JA, Levis S, Prentice IC, Pollard D and Thompson SL (1998) Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology* 4:561–579.

Fuentes JD, Lerdau M, Atkinson R, Baldocchi D, Bottenheim JW, Ciccioli P, Lamb B, Geron C, Gu L, Guenther A, Sharkey TD and Stockwell W (2000) Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: a review. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81(7): 1,537–1,575.

Fuzzi S, Andreae MO, Huebert BJ, Kulmala M, Bond TC, Boy M, DohertySJ, Guenther A, Kanakidou M, Kawamura K, Kerminen V-M, Lohmann U, Russell LM and Pöschl U (2005) Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate and global change. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 5: 11,729–11,780.

Galbally IE (1989). Factors controlling NO<sub>x</sub> emissions from soils. In: Andreae MO and Schimel DS (Ed.s), *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. John Wiley and Sons, New York. pp23–38. Gallagher MW, Nemitz E, Dorsey JR, Fowler D, Sutton MA, Flynn M andDuyzer J (2002) Measurements and parameterizations of small aerosol dry deposition velocities to grassland, arable crops, and forest: influence of surface roughness length on deposition. *Journal of Geophysical Research* 107:10.1029/2001JD000817.

Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, Boyer EW, Howarth RW, Seitzinger SP, Asner GP, Cleveland CC, Green PA, Holland EA, Karl DM, Michaels AF, Porter JH, Townsend AR and Vörösmarty CJ (2004) Nitrogen cycles: past, present and future, *Biogeochemistry* 70: 153–226.

- Ganopolski A and Rahmstorf S (2001) Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature* 409: 153–158.
- Ganzeveld LN, Lelieveld J, Dentener FJ, Krol MC, Bouwman AF and Roelofs G- J (2002) Global soil-biogenic NO<sub>x</sub> emissions and the role of canopy processes. *Journal of Geophysical Research* 107: 4,298, doi:10.1029/2001JD001289. Ganzeveld L, Valverde-Canossa J, Moortgat G, Steinbrecher R (2005) Evaluation of peroxide exchanges over a coniferous forest in a single-column chemistry-climate model. *Atmospheric Environment*, submitted.
- Glasby GP (2003) Potential impact on climate of the exploitation of methane hydrate deposits offshore. *Marine and Petroleum Geology* 30: 163–175.
- GCP (2003) Science Framework and Implementation. Earth System Science Partnership Report 1; Global Carbon Project Report 1. Canberra, Australia. 69pp GLP (2005) Global Land Project Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report 53; IHDP Report 19. IGBP Secretariat, Stockholm, Sweden. 64pp.
- Goulden ML, Munger JW, Fan SM, Daube BC and Wofsy SC (1996) Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance – methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology* 2(3): 169–182.
- Graham B, Guyon P, Maenhaut W, Taylor PE, Ebert M, Matthias-Maser S, Mayol-Bracero OL, Godoi RHM, Artaxo P, Meixner FX, Lima Moura MA, Eça D’Almeida Rocha CH, Van Grieken R, Glovsky MM, Flagan RC and Andreae MO (2003) Composition and diurnal variations of the natural Amazonian aerosol. *Journal of Geophysical Research* 108: 4,765, doi:10.1029/2003JD004049.
- Gu LH, Baldocchi D, Verma S, Black TA, Vesala T, Falge E and Dowty PR(2002) Advantages of diffuse radiation for terrestrial productivity. *Journal of Geophysical Research* 107, 4,050: doi:10.1029/2001JD001242. Guenther A, Hewitt CN, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, McKay WA, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J and Zimmermann P (1995) A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research* 100(D5): 8,873–8,892.
- Guyon P, Graham B, Roberts GC, Mayol-Bracero OL, Maenhaut W, Artaxo P and Andreae MO (2004) Sources of optically active aerosol particles over the Amazon forest. *Atmospheric Environment* 38(7): 1,039–1,051.
- Hanamean JR, Pielke RA Sr, Castro CL, Ojima DS, Reed BC and Gao Z(2003) Vegetation greenness impacts on maximum and minimum temperatures in northeast Colorado. *Meteorological Applications* 10: 203–215.
- Hansen J, Sato M and Ruedy R (1997) Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research* 102: 6,831–6,864.
- Hanson DT, Swanson S, Graham LE and Sharkey TD (1999) Evolutionary significance of isoprene emission from mosses. *American Journal of Botany* 86(5): 634–639.
- Hari P, Raivonen M, Vesala T, Munger JW, Pilegaard K and Kulmala M (2003) Atmospheric science: ultraviolet light and leaf emission of NO. *Nature* 422: 134. Harriss RC, Sebacher DI and Day FP (1982) Methane flux in the great dismal swamp. *Nature* 297(5,868): 673–674.
- Harvey LD and Huang Z (1995) Evaluation of the potential impact of methane clathrate destabilization on future global warming. *Journal of Geophysical Research* 100D: 2,905–2,926.
- Hein R, Crutzen PJ and Heimann M (1997) An inverse modelling approach to investigate the global atmospheric methane cycle. *Global Biogeochemical Cycles* 11(1): 43–76.
- Holland EA and Lamarque J-F (1997) Modelling bio-atmosphere coupling of the nitrogen cycle through NO<sub>x</sub> emissions and NO<sub>y</sub> deposition. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48: 7–24.
- Honrath RE, Peterson MC, Guo S, Dibb JE, Shepson PB and Campbell B(1999) Evidence of NO<sub>x</sub> production within or upon ice particles in the Greenland snowpack. *Geophysical Research Letters* 26 (6): 695–698. Houghton RA (1999) The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 51(2): 298–313.
- Houweling S, Kaminski T, Dentener FJ, Lelieveld J and Heimann M (1999) Inverse modelling of methane sources and sinks using the adjoint of a global transport model. *Journal of Geophysical Research* 104 (D21): 26,137–26,160.

- Hungate BA, Stiling PD, Dijkstra P, Johnson DW, Ketterer ME, Hymus GJ, Hinkle CR and Drake BG (2004) CO<sub>2</sub> elicits long-term decline in nitrogen fixation. *Science* 304: 1291.
- IPCC (2001). Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA (Ed.s), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Isaac PR, Leuning R, Hacker JM, Cleugh HA, Coppin PA, Denmead OT and Raupach MR (2003) Estimation of regional evapotranspiration by combining aircraft and ground-based measurements. *Boundary-layer Meteorology* 110: 69–98.
- Jacob DJ and Bakwin PS (1991) Cycling of NO<sub>x</sub> in tropical forest canopies. In: Rogers JE and Whitman WB (Ed.s), *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes*. American Society of Microbiology. pp237–253.
- Kabat P, Claussen M, Dirmeyer PA, Gash JHC, de Guenni LB, Meybeck M, Vörösmarty CJ, Hutjes RWA, Lütkeemeier S (Ed.s) (2004) *Vegetation, Water, Humans and the Climate: A New Perspective on an Interactive System*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 300pp.
- Karl T, Potosnak M, Guenther A, Clark D, Walker J, Herrick JD, Geron C(2004) Exchange processes of volatile organic compounds above a tropical rain forest: implications for modelling tropospheric chemistry above dense vegetation. *Journal of Geophysical Research* 109: doi:10.1029/2004JD004738.
- Katul GG, Angelini C, De Canditiis D, Amato U, Vidakovic B and Albertson JD (2003) Are the effects of large-scale flow conditions really lost through the turbulent cascade? *Geophysical Research Letters* 30: 1,164, doi:10.1029/2002GL015284.
- Kalnay E and Cai M (2003) Impact of urbanization and land use change on climate. *Nature* 423: 528–531.
- Kanakidou M, Tsigaridis K, Dentener FJ and Crutzen PJ (2000) Human-activity-enhanced formation of organic aerosols by biogenic hydrocarbon oxidation. *Journal of Geophysical Research* 105: 9,243–9,254.
- Keller M, Jacob DJ, Wofsy SC and Harriss RC (1991) Effects of tropical de forestation on global and regional atmospheric chemistry. *Climatic Change* 19: 139–158.
- Kelliher FM, Leuning R, Raupach MR and Schulze ED (1995) Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology* 73(1–2): 1–16.
- Kelliher FM, Lloyd J, Arneth A, Luhker B, Byers JN, McSeveny TM, Milukova I, Grigoriev S, Panfyorov M, Sogatchev A, Varlargin A, Ziegler W, Bauer G, Wong SC and Schulze ED (1999) Carbon dioxide efflux density from the floor of a central Siberian pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 94(3–4): 217–232.
- Kesselmeier J and Staudt M (1999) Biogenic volatile organic compounds(VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry* 33: 23–88.
- Kesselmeier J (2001) Exchange of short-chain oxygenated volatile organic compounds (VOCs) between plants and the atmosphere: a compilation of field and laboratory studies. *Journal of Atmospheric Chemistry* 39(3): 219–233.
- Kesselmeier J, Ciccioli P, Kuhn U, Stefani P, Biesenthal T, Rottenberger S, Wolf A, Vitullo M, Valentini R, Nobre A, Kabat P and Andreae MO (2002) Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget. *Global Biogeochemical Cycles* 16(4): 1,126, doi:10.1029/2001GB001813.
- Kirkman GA, Yang WX and Meixner FX (2001) Biogenic nitric oxide emissions up scaling: An approach for Zimbabwe. *Global Biogeochemical Cycles* 15:1,005–1,020.
- Knohl A, Kolle O, Minaeva TI, Milyukova IM, Vygodskaya NN, Foken T and Schulze ED (2002) Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology* 8(3): 231–146.
- Koch GW, Vitousek PM, Steffen WL and Walker B (1995) Terrestrial transects for global change research. *Vegetatio* 121: 53–65.
- Koren I, Kaufman YJ, Remer LA and Martins JV (2004) Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation. *Science* 303:1,342–1,345.

- Kulmala M, Hämeri K, Aalto PP, Mäkelä JM, Pirjola L, Nilsson ED, Buzorius G and Rannik Ü (2001) Overview of the international project on biogenic aerosol formation in the boreal forest (BIOFOR). *Tellus* 53B: 324–343.
- Kulmala M, Suni T, Lehtinen KEJ, Dal Maso M, Boy M, Reissell A, Rannik Ü, Aalto P, Keronen P, Hakola H, Bäck J, Hoffmann T, Vesala T and Hari P (2004) A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics* 4: 557–562.
- Kvenvolden KA (1988) Methane hydrates and global climate. *Global Biogeochemical Cycles* 2: 221–229.
- Kvenvolden KA (2002) Methane hydrate in the global organic carbon cycle. *Terra Nova* 14: 302–306.
- Lee X, Finnigan JJ and Paw U KT (2004) Coordinate systems and flux bias error. In: Lee X, Massman W and Law B (Ed.s), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements*. Kluwer Academic Publishers. pp33–64.
- Lelieveld J, Crutzen PJ and Dentener FJ (1998) Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus* B 50: 128–150. Lenschow DH and Sun J (1997) Measuring mesoscale fluxes over land surfaces from an aircraft. Preprint from Special Symposium on Boundary Layer and Turbulence, Long Beach, CA, American Meteorological Society, Boston, MA. pp56–57.
- Lloyd J and Farquhar GD (1996) The CO<sub>2</sub> dependence of photosynthesis, plant growth responses to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations, and their interaction with soil nutrient status. I. General principles and forest ecosystems. *Functional Ecology* 10: 4–32.
- Lloyd J, Kruijt B, Hollinger DY, Grace J, Francey RJ, Wong SC, Kelliher FM, Miranda AC, Farquhar GD, Gash JHC, Vygodskaya NN, Wright IR, Miranda HS and Schulze ED (1996) Vegetation effects on the isotopic composition of atmospheric CO<sub>2</sub> at local and regional scales – theoretical aspects and a comparison between rain forest in Amazonia and a boreal forest in Siberia. *Australian Journal of Plant Physiology* 23(3): 371–399.
- Lloyd J, Langenfels RL, Francey RJ, Gloor M, Tchepakova NM, Zolotukhine D, Brand WA, Werner RA, Jordan A, Allison CA, Zrazhewske V, Shibistova O, Schulze E-D (2002) A trace gas climatology above Zotino, central Siberia. *Tellus* 54B: 749–767.
- Lu L, Pielke RA, Liston GE, Parton WJ, Ojima D and Hartman M (2001) Implementation of a two-way interactive atmospheric and ecological model and its application to the central United States. *Journal of Climate* 14: 900–919.
- Malhi Y and Grace J (2000) Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution* 15(8): 332–337.
- McClain ME, Richey JE, Brandes JA and Pimentel TP (1997) Dissolved organic matter and terrestrial-lotic links in the central Amazon basin of Brazil. *Global Biogeochemical Cycles* 11(3): 295–311.
- Marshall CH Jr, Pielke RA Sr and Steyaert LT (2003) Crop freezes and land use change in Florida. *Nature* 426: 29–30.
- Marshall CH Jr, Pielke RA Sr, Steyaert LT and Willard DA (2004) The impact of anthropogenic land cover change on the Florida Peninsula sea breezes and warm season sensible weather. *Monthly Weather Review* 132(1): 28–52.
- Meixner FX, Fickinger T, Marufu L, Serça D, Nathaus FJ, Makina E, Muku-rumbira L and Andreae MO (1997) Preliminary results on nitric oxide emission from a southern African savannah ecosystem. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48: 123–138.
- Meixner FX and Eugster W (1999) Effects of landscape patterns and topography on emissions and transport. In: Tenhunen JD and Kabat P (Ed.s), *Integrating Hydrology, Ecosystem Dynamics and Biogeochemistry in Complex Landscapes*. Dahlem Workshop Report. John Wiley and Sons, Chichester. pp147–175.
- Mitchell JFB, Karoly DJ, Hegerl, GC, Zwiers FW, Allen MR, Marengo J, et al. (2001) Detection of climate change and attribution of causes. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA (Ed.s), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge. pp695–738.
- Moncrieff JB, Malhi Y and Leuning R (1996) The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. *Global Change Biology* 2(3): 231–240.

- Monson RK and Holland EA (2001) Biospheric trace gas fluxes and their control over tropospheric chemistry. *Annual Review of Ecology and Systematics* 32: 547–576.
- Nair US, Lawton RO, Welch RM and Pielke RA Sr (2003) Impact of land use on Costa Rican tropical montane cloud forests: I. Sensitivity of cumulus cloud field characteristics to lowland deforestation. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 108: 10.1029/2001JD001135.
- Narisma GT and Pitman AJ (2003) The impact of 200 years of land cover change on the Australian near-surface climate. *Journal of Hydrometeorology* 4(2): 424–436.
- Nepstad DC, Verissimo A, Alencar A, Nobre C, Lima E, Lefebvre P, Schlesinger P, Potter C, Moutinho P, Mendoza E, Cochrane M and Brooks V (1999) Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature* 398: 505–508.
- Nober FJ, Graf H-F and Rosenfeld D (2003) Sensitivity of the global circulation to the suppression of precipitation by anthropogenic aerosols. *Global Planetary Change* 37: 57–80.
- O’Dowd CD, Aalto PP, Hämeri K, Kulmala M and Hoffmann T (2002) Atmospheric particles from organic vapours. *Nature* 416: 497–498.
- Penner JE, Andreae MO, Annegarn H, Barrie L, Feichter J, Hegg D, Jayaraman A, Leitch R, Murphy D, Nganga J, Pitari G et al. (2001) Aerosols, their direct and indirect effects. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA (Ed.s), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge. pp289–348.
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola J-M, Basile I, Benders M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov VM, Legrand M, Lipenkov VY, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E and Stievenard M (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429–436.
- Phillips OL, Malhi Y, Higuchi N, Laurance WF, Nunez PV, Vasquez RM, Laurance SG, L.V. Ferreira LV, Stern M, Brown S and Grace J (1998) Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science* 282(5,388): 439–442.
- Pielke RA Sr (2002) *Mesoscale meteorological modelling*. Academic Press, San Diego. 676pp.
- Pielke RA Sr, Liston GE, Eastman JL, Lu L and Coughenour M (1999) Seasonal weather prediction as an initial value problem. *Journal of Geophysical Research* 104: 19,463–19,479.
- Pielke RA Sr, Marland G, Betts RA, Chase TN, Eastman JL, Niles JO, Niyogi DDS and Running SW (2002) The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system – relevance to climate change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 360: 1,750–1,719.
- Pitman AJ, Slater AG, Desborough CE and Zhao M (1999) Uncertainty in the simulation of runoff due to the parameterisation of frozen soil moisture using the Global Soil Wetness Project methodology. *Journal of Geophysical Research* 104(D14): 16,879–16,888.
- Pope CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K and Thurston GD (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association* 287: 1,132–1,141.
- Potter CS, Matson PA, Vitousek PM and Davidson EA (1996) Process modelling of controls on nitrogen trace gas emissions from soils worldwide. *Journal of Geophysical Research* 101: 1,361–1,377.
- Prentice IC, Farquhar GD, Fasham MJR, Goulden M, Heimann M, Jaramillo VJ, Kheshgi HS, Le Quéré C, Scholes RJ, Wallace DWR et al. (2001) The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA (Ed.s), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. pp183–237.
- Priemé A and Christensen S (1999) Methane uptake by a selection of soils in Ghana with different land use. *Journal*

of Geophysical Research 104:23,617–23,622.

Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, Hauglustine D, Haywood J, Myhre G, Nakajima T, Shi GY, Solomon S, Betts R et al. (2001) Radiative forcing of climate change. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K and Johnson CA (Ed.s), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. University Press, Cambridge. pp349–416.

Rannik Ü, Aalto P, Keronen P, Vesala T and Kulmala M (2003) Interpretation of aerosol particle fluxes over a pine forest: dry deposition and random errors. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres* 108: 4,544, doi:10.1029/2003JD003542.

Raupach MR (1998) Influence of local feedbacks on land-air exchanges of energy and carbon. *Global Change Biology* 4: 477–494.

Raupach MR (2000) Equilibrium evaporation and the convective boundary layer. *Boundary-layer Meteorology* 96: 107–141.

Raupach MR, Kirby JM, Barrett DJ, Briggs PR, Lu H and Zhang L (2002) Balances of water, carbon, nitrogen and phosphorus in Australian landscapes. *Bios Release 2.04*. National Land and Water Resources Audit Project 5.4A. CSIRO Land and Water. Final Delivery CD-ROM.

Rial J, Pielke RA Sr, Beniston M, Claussen M, Canadell J, Cox P, Held H, de Noblet-Ducoudré N, Prinn R, Reynolds JF and Salas JD (2004) Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system. *Climatic Change* 65(1–2): 11–38.

Richey JE, Melack JM, Aufdenkampe AK, Ballester VM, Hess LL (2002) Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 416: 617–620. Riehl H and Malkus JS (1957) On the heat balance and maintenance of circulation in the trades. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 83: 21–29.

Rinne HJ, Guenther A, Warnecke C, de Gouw JA and Luxembourg SL (2001) Disjunct eddy covariance technique for trace gas flux measurements. *Geophysical Research Letters* 28: 3,139–3,142.

Roberts GC, Andreae MO, Zhou J and Artaxo P (2001) Cloud condensation nuclei in the Amazon Basin: “Marine” conditions over a continent? *Geophysical Research Letters* 28: 2,807–2,810.

Rotstajn LD (1999) Indirect forcing by anthropogenic aerosols: global climate model calculation of the effective-radius and cloud-lifetime effects. *Journal of Geophysical Research* 104: 9,369–9,380.

Rummel U, Ammann C, Gut A, Meixner FX and Andreae MO (2002) Eddy covariance measurements of nitric oxide flux within an Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research* 107: 8,050, doi:10.1029/2001JD000520.

Saad OALO and Conrad R (1993) Temperature dependence of nitrification, denitrification and turnover of nitric oxide in different soils. *Biology and Fertility of Soils* 15: 21–27.

Schellnhuber HJ (2002) Coping with Earth System complexity and irregularity. In: Steffen W, Jäger D, Bradshaw C (Ed.s), *Challenges of a Changing Earth: Proceedings of the Global Change Open Science Conference*. Amsterdam. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. pp151–156.

Schmid HP (2002) Footprint modelling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology* 113:159–183.

Schimel DS, Emanuel W, Rizzo B, Smith T, Fisher H, Kittel TGF, McKeown R, Painter T, Rosenbloom N, Ojima DS, Parton WJ, Kicklighter DW, McGuire AD, Melillo JM, Pan Y, Haxeltine A, Prentice C, Sitch S, Hibbard K, Nemani R, Pierce L, Running S, Borchers J, Chaney J, Neilson R and Braswell BH (1997) Continental scale variability in ecosystem processes— models, data and the role of disturbance. *Ecological Monographs* 67(2):251–271.

Schimel D, House JI, Hibbard KA, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell BH, Apps MJ, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G, Cramer W, Denning AS, Field CB, Friedlingstein P, Goodale C, Heimann M, Houghton RA, Melillo JM, Moore III B, Murdiyarso D, Noble I, Pacala SW, Prentice IC, Raupach MR, Rayner PJ, Scholes B, Steffen W and Wirth C (2001) Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414: 169–173.

- Scholes MC, Martin R, Scholes RJ, Parsons D and Winstead E (1997) NO and N<sub>2</sub>O emissions from savannah soils following the first simulated rains of the season. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 48: 115–122.
- Scholes MC, Matrai PA, Andreae MO, Smith KA and Manning MR (2003). Biosphere-atmosphere interactions. In: Brasseur GP, Prinn RG, Pszenny AAP(Ed.s), *Atmospheric Chemistry in a Changing World: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. pp19–72. Sharkey TD and Singaas EL (1995) Why plants emit isoprene. *Nature* 374: 769.
- Smith KA, Dobbie KE, Ball BC, Bakken LR, Sitaula BK, Hansen S, Brumme R, Borken W, Christensen S, Priemé A, Fowler D, Macdonald JA, Skiba U, Klemmedtsson L, Kasimir-Klemmedtsson A, Degórska A and Orlanski P (2000) Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology* 6: 791–803.
- SOLAS (2004) *The Surface Ocean–Lower Atmosphere Study. Science Plan and Implementation Strategy*. IGBP Report 50. IGBP Secretariat, Stockholm. 88pp.
- Spanke J, Rannik Ü, Forkel R, Nigge W and Hoffman T (2001) Emission fluxes and atmospheric degradation of monoterpenes above a boreal forest: field measurements and modelling. *Tellus* 53B: 406–422.
- Sparks JP, Monson RK, Sparks KL and Lerdau M (2001) Leaf uptake of nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) in a tropical wet forest: implications for tropospheric chemistry. *Oecologia* 127: 214–221.
- Steffen WL, Walker BH, Ingram JSI and Koch GW (1992) *Global change and the terrestrial ecosystems: the operational plan*. IGBP Report 21. IGBP Secretariat, Stockholm, Sweden.
- Steffen W, Sanderson A, Tyson PD, Jäger J, Matson PA, Moore III B, Oldfield F, Richardson K, Schellnhuber HJ, Turner II BL and Wasson RJ (2004a) *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 336pp.
- Steffen W, Andreae MO, Bolin B, Cox P, Crutzen PJ, Cubasch U, Nakicenovic N, Talaue-McManus L and Turner II BL (2004b) Earth system dynamics in the Anthropocene. In: Schellnhuber H-J, Crutzen PJ, Clark WC and Claussen M (Ed.s), *Earth System Analysis for Sustainability*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. pp313–340.
- Steffen W, Andreae MO, Bolin B, Cox PM, Crutzen PJ, Cubasch U, Held H, Nakicenovic N, Scholes RJ, Talaue-McManus L and Turner II BL (2004) Abrupt changes: the Achilles' heels of the Earth System. *Environment* 46(3):8–20.
- Stitt M and Krapp A (1999) The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. *Plant, Cell and Environment* 22: 583–621.
- Stott PA and Kettleborough JA (2002) Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty-first century temperature rise. *Nature* 416(6,882): 723–726.
- Ström L, Ekberg A, Mastepanov M and Christensen TR (2003) The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9: 1,185–1,192.
- Styles JM, Lloyd J, Zolotukhina D, Lawton KA, Tehebakova N, Francey RJ, Arneeth A, Salamakho D, Kolle O, Schulze E-D (2002) Estimates of regional surface carbon dioxide exchange and carbon and oxygen isotope concentration during photosynthesis from concentration profiles in the atmospheric boundary layer. *Tellus* 54B: 768–783.
- Swap R, Garstang M, Greco S, Talbot R and Källberg P (1992) Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus* 44B: 133–149.
- Tegen I (2003) Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. *Quaternary Science Reviews* 22: 1,821–1,834.
- Tegen I, Werner M, Harrison SP and Kohfeld KE (2004) Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission. *Geophysical Research Letters* 31: L05105, doi:10.1029/2003GL019216.
- Thonicke K, Venevsky S, Sitch S and Cramer W (2001) The role of fire disturbance for global vegetation dynamics. Coupling fire into a dynamic global vegetation model. *Global Ecology and Biogeography* 10: 661–678.
- Walker BH, Steffen WL, Canadell J and Ingram JSI (Ed.s) (1999) *The Terrestrial Biosphere and Global Change*:

Implications for Natural and Managed Ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 439pp.

Walter B and Heimann M (2000) A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate. *Global Biogeochemical Cycles* 14 (3): 745–765.

Walter B, Heimann M and Matthews E (2001) Modelling modern methane emissions from natural wetlands I. Model description and results. *Journal of Geophysical Research* 106(D24): 34,189–34,206.

Wang G and Eltahir EAB (2000) Modelling the biosphere-atmosphere system: the impact of the subgrid variability in rainfall interception. *Journal of Climate* 13(16): 2,887–2,899.

Weaver CP and Avissar R (2001) Atmospheric disturbances caused by human modification of the landscape. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82: 269–282.

Werth D and Avissar R (2002) The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research* 107: 8,087, doi:10.1029/2001JD000717.

Wessel S, Aoki S, Winkler P, Weller R, Herber A, Gernandt H and Schrems O (1998) Tropospheric ozone depletion in polar regions – a comparison of observations in the Arctic and Antarctic. *Tellus B* 50(1): 34–50.

Wilson JD, Flesch TK and Harper LA (2001) Micro-meteorological methods for estimating surface exchange with a disturbed windflow. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 207–225.

Wu ZX and Newell RE (1998) Influence of sea surface temperature on air temperatures in the tropics. *Climate Dynamics* 14: 275–290.

Yin Y, Wurzler S, Levin Z and Reisin TG (2002) Interactions of mineral dust particles and clouds: Effects on precipitation and cloud optical properties. *Journal of Geophysical Research* 107: 4,724, doi:10.1029/2001JD001544.

Zhao M and Pitman AJ (2002) The impact of land cover change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation. *Geophysical Research Letters* 29: 2–1–2–4.

Zhao M, Pitman AJ and Chase T (2001). The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dynamics* 17: 467–477.

Zeng X, Rao P, DeFries RS and Hansen MC (2003) Inter-annual variability decadal trend of global fractional vegetation cover from 1982 to 2000. *Journal of Applied Meteorology* 42: 1,525–1,530.

Zeng XD, Shen SS, Zeng X and Dickinson RE (2004) Multiple equilibrium states and the abrupt transitions in a dynamical system of soil water interacting with vegetation. *Geophysical Research Letters* 31: L05501, doi: 10.1029/2003GL018910.

# 缩词表

ACIA 北极气候影响评估	GTOS 全球陆地观测系统
AICI 空气—冰化学相互作用	GWSP 全球水系统计划
AIMES 地球系统分析、综合与模拟	IAI 美洲国家间全球变化研究所
AMMA 非洲季风多学科研究计划	ICSU 国际科学理事会
APN全球变化亚太地区研究网络	IGAC 国际全球大气化学计划
BAHC 水循环的生物学方面计划	IGBP 国际地圈生物圈计划
CBL 对流边界层	iLEAPS 陆地生态系统—大气过程综合研究
CCMLP 碳循环模型连接计划	IPCC 政府间气候变化专门委员会
CCN 云凝结核	IPO 国际项目办公室
CLiC 气候与冰冻圈计划	IRS 区域集成研究
DGVM 全球植动力模型	ISLSCP 国际卫星陆面气候学计划
ENSO 厄尔尼诺—南方涛动	LBA 亚马孙大尺度生物圈—大气圈实验
ESSP 地球系统科学联盟	PAGES 过去全球变化研究计划
GABLS 全球大气边界层研究	PBL 行星边界层
GCP 全球碳计划	SOLAS 表层海洋—低层大气研究计划
GCTE 全球变化和陆地生态系统	SSC 科学指导委员会
GEIA 全球排放总量评估	START 全球变化的分析、研究和培训系统
GEWEX 全球能量和水循环实验	UAV 无人驾驶飞机
GLASS 全球陆地/大气系统研究	VOC 挥发性有机化合物
GLP 全球土地计划	WCRP 世界气候研究计划
GOFC 全球森林覆盖观测计划	WGCM 耦合模型工作组
GOLD 土地覆盖动力学全球观测	

## iLEAPS

陆地生态系统—大气过程综合研究  
是国际地圈生物圈计划（IGBP）的  
一个多学科项目。IGBP是国际科学  
理事会（ICSU）的一个交叉学科体。

有关计划发起的更多信息见：

IGBP: [www.igbp.net](http://www.igbp.net)

ICSU: [www.icsu.org](http://www.icsu.org)