iLEAPS

陆地生态系统—大气过程集成研究

科学计划与实施战略

气象出版社

GLOBAL IGBP CHANGE

陆地生态系统—大气过程集成研究
科学计划与实施战略

iLEAPS科学指导委员会　编
曲建升　林　海　译

气象出版社

内容简介

本书是陆地生态系统－大气过程集成研究(iLEAPS)计划科学指导委员会组织编写、出版的《Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study　Science Plan and Implementation Strategy》一书的中译本。主要介绍了 iLEAPS 的科学目标、主要的科学问题及其实施战略等内容。本书有助于我国全球变化以及相关领域的研究人员了解 IGBP 第二阶段新设立的 iLEAPS 计划，并对我国开展陆地—大气界面过程研究有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

陆地生态系统—大气过程集成研究　科学计划与实施战略/曲建升，林海译.
—北京：气象出版社，2006.10
ISBN 7-5029-4209-2

Ⅰ.陆…　Ⅱ.曲…　Ⅲ.陆地-生态系统-研究　Ⅳ.P9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 126479 号

出版者：气象出版社　　地　址：北京市海淀区中关村南大街 46 号
网　址：http://cmp.cma.gov.cn　　邮　编：100081
E-mail：qxcbs@263.net　　电　话：总编室：010-68407112　　发行部：010-62175925
责任编辑：李太宇　章澄昌　　终　审：延晓冬
封面设计：王广田
印刷者：中国电影出版社印刷厂
发行者：气象出版社发行　全国各地新华书店经销
开　本：889×1194　1/16　　印　张：4.00　　字　数：100 千字
版　次：2006 年 11 月第 1 版　　2006 年 11 月第 1 次印刷
印　数：1～1200
定　价：20.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等，请与本社发行部联系调换

中译本翻译指导委员会成员

葛全胜	CNC-IGBP 副秘书长，CNC-IHDP 秘书长，研究员
张志强	中国科学院国家科学图书馆兰州分馆（中国科学院资源环境科学信息中心） 馆长，研究员
延晓冬	中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室主任，研究员
周广胜	中国科学院植物研究所，研究员
Meinrat O. Andreae	iLEAPS 科学指导委员会共同主席
Pavel Kabat	iLEAPS 科学指导委员会共同主席
Almut Arneth	iLEAPS 科学指导委员会成员
Anni Reissell	iLEAPS 国际项目办公室执行主任
Erik Huss	IGBP 秘书处科学编辑
Bill Young	IGBP 秘书处前科学编辑

iLEAPS 科学指导委员会成员（原著编写组）

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 Arneth（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）
延晓冬（中国）
Kazuyuki Yagi（日本）
Anni Reissell（iLEAPS 国际项目办公室执行主任）

原著版权信息

IGBP 报告 54：iLEAPS（2005）科学规划和实施战略. 52pp.

IGBP 秘书处
Box 50005
E－104 05, Stockholm
SWEDEN
Ph：＋46 8 166448
Fax：＋46 8 166405
Web：www. igbp. net

iLEAPS 国际项目办公室
Department of Physical Sciences
Division of Atmospheric Sciences
P. O. Box 68
00014 University of Helsinki
Finland
Web：www. atm. helsinki. fi/ileaps

主　　编：Meinrat O. Andreae，Pavel Kabat，Almut Arneth，Anni Reissell
丛书编辑：Bill Young
ISSN 0284-8105
Copyright © 2005

中译本序言

随着全球变化研究工作的不断深入和拓展，科学家们日益认识到地球环境是一个复杂的巨系统，原来各研究领域相互分离的研究格局已经不能满足全球环境变化研究的需要，跨学科、集成研究逐步进入全球变化研究组织者和科学家的视野。

应对这种研究需要，IGBP 确定了其第二阶段的研究对象，即地球系统的陆地、大气和海洋这三个重要组成部分及其界面，IGBP 也因此设立了相应的专门研究计划。陆地生态系统—大气过程集成研究计划(iLEAPS)即是 IGBP 针对陆地—大气界面而设立的一项新的科学研究计划。该计划成立于 2004 年 3 月，国际项目办公室(IPO)设立于芬兰赫尔辛基大学。

自 iLEAPS 成立伊始，中国科学家即参与了其筹备和《科学计划与实施战略》的编写工作。目前我国已经建立了 iLEAPS 中国联络处(iLEAPS-China)，设立于中国科学院大气物理研究所。我们相信在陆地—大气界面过程科学研究以及推动 iLEAPS 发展方面，我国科学家将做出更大的贡献。

值此地球系统科学联盟(ESSP)开放科学大会在北京召开之际，我们将《iLEAPS 科学计划与实施战略》中译本作为一份献礼，以扩大国际全球环境变化研究的最新成果的传播范围。最重要的是，希望藉此增进我国全球变化研究工作者对 IGBP 跨学科集成研究思维和手段、iLEAPS 科学计划的研究内容及其实施战略的了解，把握国外同行研究工作的现状、进展和方向，以推动我国相关研究工作的进程。

IGBP 秘书处、iLEAPS 国际项目办公室、IGBP 中国全国委员会(CNC－IGBP)秘书处和中国科学院国家科学图书馆兰州分馆(中国科学院资源环境科学信息中心)以及葛全胜、张志强、延晓冬、周广胜、谢力、Anni Reissell、Erik Huss、Bill Young 等对本书的翻译出版工作给予了大量的指导，中国科协、CNC-IGBP 秘书处、中国科学院知识创新工程方向项目“生态环境与资源海洋创新基地战略研究与科学评价(KZCX2-YW-501)”和中国科学院“西部之光”项目提供了经费资助。设立于中国科学院国家科学图书馆兰州分馆的中国全球环境变化研究信息中心以及曲建升、林海、高峰、何晓波、李太宇、李明启等同志承担了具体的翻译和出版工作。向以上单位和个人表示衷心的感谢！本译著转引了原著中所引用的部分出版单位和研究者的图片、资料和数据，在此一并致谢！

由于译校者知识所限，本译著难免有纰漏、不当之处，请广大读者批评指正。

国际地圈生物圈计划中国全国委员会

2006 年 10 月

序

陆地生态系统—大气过程综合研究(iLEAPS)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质的合成)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。由于这些科学问题复杂、涉及科学领域众多,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。

致谢

《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过渡小组成员包括:Meinrat O. Andreae(德国)、Pavel Kabat(荷兰)、Almut Arneth(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。

2005年12月

目　录

中译本序言
序
致　谢
执行概要 …… (1)
绪　论 …… (4)
科学专题 …… (8)
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 …… (9)
子专题 1.1　二氧化碳 …… (10)
子专题 1.2　甲烷 …… (11)
子专题 1.3　挥发性有机化合物 …… (13)
子专题 1.4　氮氧化物 …… (14)
尺度问题 …… (15)
研究主题 …… (16)
专题 2　气候系统中陆地生物群系、气溶胶和大气成分之间的反馈 …… (17)
子专题 2.1　生物圈—气溶胶—云的相互作用 …… (18)
子专题 2.2　地气交换和大气的自净机制 …… (19)
研究主题 …… (21)
专题 3　陆面—植被—水—大气系统中的反馈和遥相关 …… (22)
子专题 3.1　水文—生物地球化学横向联系 …… (22)
子专题 3.2　区域问题 …… (23)
子专题 3.3　全球性问题 …… (24)
尺度问题 …… (26)
研究主题 …… (27)
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 …… (27)
子专题 4.1　湍流通量测量传感器的发展 …… (31)
子专题 4.2　通量塔斑块尺度测量 …… (31)
子专题 4.3　非守恒标量 …… (33)
子专题 4.4　边界层收支法 …… (33)
子专题 4.5　通量、大气成分的机载测量 …… (33)
子专题 4.6　遥感 …… (34)
尺度问题 …… (34)

研究主题 …… (34)
实施战略 …… (36)
观测、模拟战略和集成 …… (36)
观测与模拟的结合:尺度连接工具 …… (38)
相关科学活动的协作 …… (39)
组织结构 …… (40)
项目管理 …… (40)
活动 …… (41)
能力建设和知识传播 …… (42)
交流 …… (43)
参考文献 …… (44)
缩略词表 …… (54)

执行概要

地球环境是一个复合的系统，它包含了大量错综地联系在一起的各种过程。这一过程中的任何一个变化都可能从几秒到数百年的时间尺度、从分子到全球范围的空间尺度上反馈至同一过程以及其他各种不同的过程。地球气候系统包括陆地和海洋等环境。地表—大气界面在地球系统中通过控制能量、动量和物质的传输功能发挥重要的作用。

iLEAPS(陆地生态系统—大气过程集成研究)是国际地圈生物圈计划(IGBP)中关注陆地—大气相互作用的一项新的国际研究计划。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识，特别强调的是从过去到未来、从局地到全球的尺度上的各种相互作用和反馈机制。

iLEAPS 针对陆地与大气界面的传输和转换过程在地球系统中的动力学的重要意义开展研究。这些重要的问题是：①在工业时代以前陆地—大气系统功能是怎样的？②人类活动如何影响陆地—大气系统？③在各种时间和空间尺度上陆地植被在多大程度上决定了它的物理和化学环境。

本科学计划和实施战略提出在未来 10 年内解答这些关键科学问题。这些科学问题首先从 4 个专题分别提出来，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交换过程紧密联系在一起，并对气候变化非常敏感，同时也会通过对流层内的化学和辐射通量反过来影响气候强迫。例如二氧化碳、甲烷和氧化亚氮以及活性挥发性有机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。特别有趣的是生产、传输、转换和沉降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群系、气溶胶和大气成分之间的反馈

专题 2 包括由于生物引起的和人为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圈自净机制中的大气反应的耦合。专题 2 特别重视热带，本专题研究自然和人为气溶胶的直接排放以及次生气溶胶粒子和云凝结核。这些研究将有助于理解气溶胶

粒子(包括尘埃、生物质烟霾和生物气溶胶)对辐射通量和云降水过程产生的直接和间接的影响。地表和大气间的交换过程在决定羟基这一左右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过程的氧化能力。因此,陆气交换以及混合和输送在调节化学转换方面具有很关键的作用。同时气相化学方面的变化也影响气溶胶的形成和生长过程。

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量和陆地—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对大气中甲烷和二氧化碳浓度存在潜在的强烈反馈。人类作用影响所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平衡态、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结果。由于众多过程间相互作用的复杂性,测量结果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、机载测量及遥感技术。测量和模拟的集成包括多项研究,譬如说如何衡量从局地观测值所估计的尺度转换以及对完全耦合的各种陆气模式的敏感性研究。

研究专题 1~3 高度重视对于生物圈和大气圈的耦合十分关键的过程。这些活动的时间跨度可以从几秒到几十年,空间跨度从分子到全球。其中涉及到各种复杂的反馈机制,所以孤立地研究单个过程是不能够充分说明问题的。专题 1 和专题 2 包含这些联系复杂性的例子。在水循环和植物体内的碳化合物和氮化合物(CO_2、CH_4、NO_x、VOC)交换之间的紧密耦合先在专题 1 中讨论。接下来在专题 2 中讨论了气溶胶通过影响云和降水调节水循环的作用。对复杂过程的认识和预测依赖于测量值和模拟。由于已经在专题 1~3 中陈述了过程的性质,所以在接下来的专题 4 中模拟和测量值就明确地连接在一起了。

为了能集中观测并且选择代表性的外场实验点,iLEAPS 实施战略包括战略性模拟试验和多参数敏感性研究。研究任务可能要根据地理边界选择以讨论区域问题,或者根据共同环境因子选择以讨论关键的科学不确定性,也可根据陆气系统中的关键过程和现象选择任务来扩展 iLEAPS 的研究。iLEAPS 将与其他相关计划,包括 IGAC、SOLAS、GLP 和 GEWEX 建立密切的联系。

能力建设和知识传播是 iLEAPS 的主要组成部分。知识传播包括跨学科的培训,能力建设和大学生扩展领域(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 成果发表在 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、通讯和新闻发布会是交流和扩展的一部分。iLEAPS 也鼓励与社

团和政策相关的扩展领域活动同区域集成计划的结合。

iLEAPS 运行的方式包括为阐明具体的 iLEAPS 科学问题而设立的过程研究网络、野外活动、模拟(工具研发、评估和对比)、长期的集成的外场实验、国际跨学科的实验、集成研究、数据库以及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提交科学研究建议的指南。

绪　论

在 IGBP 的框架下，过去 10 年的全球变化研究使全世界对地球科学的认识发生了根本性的变化。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、岩石圈和生物圈。此外，现在人们很清楚的是这些影响不能被看作是孤立的，地球系统各部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超过 400 000 年的南极冰芯记录中非常明显（图 1）。这些近似同步的变化引出了有关原因和结果的问题：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，从而改变了这些气体的排放？目前的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。

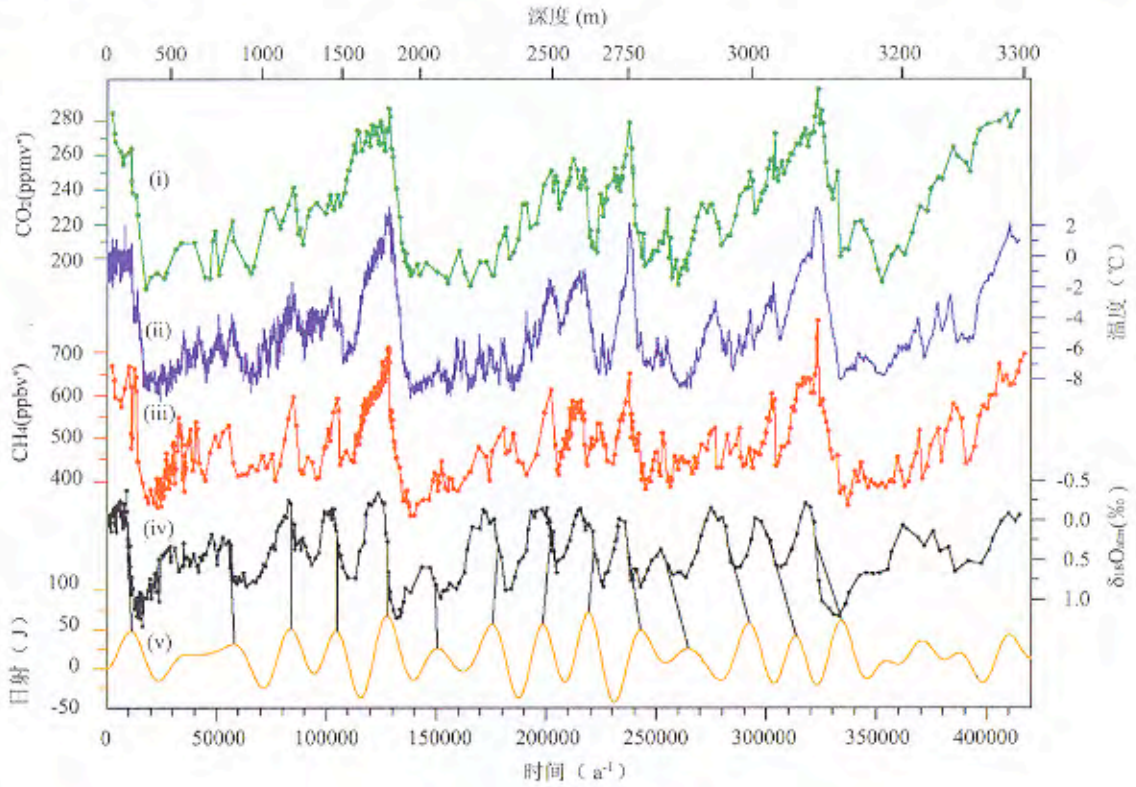

图 1　Vostok 数据组和距今时间（底轴）、冰芯深度（顶轴）

（i）CO_2；（ii）大气同位素温度；（iii）CH_4；（iv）$\delta^{18}O_{atm}$；（v）6 月中旬在 65°N 的日射（$W \cdot m^{-2}$）（Petit et al.，1999）

这就意味着地球气候系统是由无生命世界的和有生命的世界——生物圈——共同决定的。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

* 1 ppbv=10^{-9}；1 ppmv=10^{-6}

过程以及能量和动量通量要经过这一界面。同时，不论自然的还是人为的原因，如化学物质的传输及沉降等大气过程和气候变率是生物地球化学循环的一个关键因素。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际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计划(GCTE)的主要成果(Walker et al.，1999)。大气中气体和气溶胶的沉降有时作为肥料有时作为毒性物质，也强烈地影响着生态系统的功能。从 IGBP 水循环的生物学方面(BAHC)得到的经验是，土地利用和土地覆盖变化强烈影响着地表和大气之间的水及能量的交换，使得它们成了气候系统中重要的组成部分(Kabat et al.，2004)。因此，人类活动引起的土地覆盖变化很可能导致区域气候和全球气候的变化。反过来，气候变化又在各种时间和空间尺度上影响着陆地生态系统，甚至在某种程度上干扰像亚马孙流域(Cox et al.，2000)或泰加林(北方针叶林)等较大区域。

因此，作为复合系统的地球，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)，但一旦突破临界值，系统就可能突变为另一种状态。这里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史无前例的状态——气候以及其他环境状况与近 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极端重要。

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——譬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整体的组成部分来研究，这样就可以认识到它们之间的相互作用和反馈。此外，在全球变化时代，必须把人类因素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的主要的生物物理组分(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 科学研究目标一直强调对科学认识所必需的重要问题，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显著作用的区域。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"阀门"，这些局地的和区域性的变化应该对整个地球系统具有最强烈的影响力(图 3)。后面的例子说明了一些关键的区域和问题。

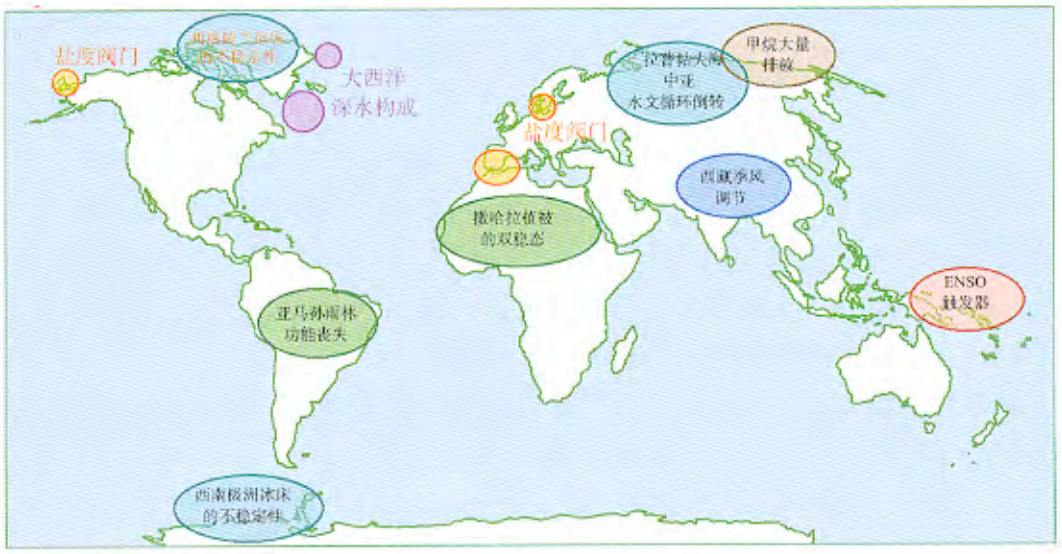

图 3 预计对地球系统有强烈影响的关键区域(Schellnhuber,2002)

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、生物质燃烧所产生的气溶胶,它们共同作用剧烈地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"热力发动机",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再分布(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的微量气体排放。

IGAC 第一个 10 年的主要发现之一就是认识到大气气溶胶现在超出了热带地区是认识了解过去及未来气候变化的关键(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。把所有复杂的气候效应考虑在内的情况下,气溶胶强迫与温室气体强迫可能属于同一数量级,但作用相反(Anderson et al.,2003;IPCC,2001)。这就揭示了所观测到的上世纪温度变化(全球约增 0.7℃)是可能的,它是由很小的净全球强迫所驱动的,并意味着它具有较高的气候敏感度,即随着人类产生的辐射强迫作用增强会使得温度的幅度上升加大(Andreae et al.,2005)。这种温度上升很可能引起对 21 世纪气候系统发展趋势的担心。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对健康具有十分严重的影响(Pope et al.)。正是因为这个原因在可预见的将来,气溶胶的排放可望有所降低。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北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 10 年气候突然剧烈变化危险的极大关注。

活性碳及氮的化合物陆面通量的改变,水文、土地利用变化和植被动态变化的耦合,不仅可以明显地影响气候系统,而且会影响大气圈的化学功能。IGAC 的一个重要发现就是生物活动和大气成分有着密切的关系。自然生态系统一直在与原始大气密切的相互作用中发展,并且大气自净机制(从大气中清除自然和人为排放产物)正与这些排放处在同一个紧密的反馈

链中。正如专题 2 所叙述的，陆面交换的变化可能会以深刻的方式、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半球北部区域（ACIA，2005）。过去 10 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、积雪和冰川消融加快。后果是植被带可能发生移动，火灾发生频率和强度都在增加，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陆面和大气之间水分能量交换基本的起决定因素的部分。GCTE 高度关注生态系统、大气 CO_2 和气候之间的相互作用。iLEAPS 将以高层次的集成把这些过程整合在一起。

iLEAPS 作为一个界面计划将会在 IGBP 科学构架下与有关的陆地和大气项目紧密合作，如，全球土地计划（GLP）和国际全球大气化学计划（IGAC）。然而，从集成的地球系统观点看，iLEAPS 着眼于地球系统的动力学和人类在地球系统中的作用。因此 iLEAPS 最终是更全面地集成，而这一集成研究将通过 IGBP 计划中的地球系统分析、集成与模拟计划（AIMES）和国际科学理事会（ICSU）的四项全球变化计划的组成的地球系统科学联盟（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。另外还要与上层海洋—低层大气研究计划（SOLAS）、过去全球变化研究计划（PAGES）、全球排放清单活动（GEIA）、全球碳计划（GCP）和全球水系统计划（GWSP）紧密相连。

本科学计划描述了 iLEAPS 的关键科学问题。问题分为下面这 4 个专题，但这并不意味着它们彼次独立。能量分配、化学成分的排放、陆地生物群系的碳吸收，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，研究应该基于外场实验、过程和个例研究、卫星观测以及模拟。观测方法和理论基础的创新是极为重要的。

科学专题

iLEAPS 研究涉及以下 4 个问题：

(1)相互作用的物理、化学和生物过程怎样通过陆地—大气系统传输并转变能量、动量和物质？

(2)地球系统动力学的作用是什么？

(3)在工业时代之前状态下的陆地—生态/大气系统是怎样运行的？人类活动如何影响？

(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？

解答这些问题的研究工作可分为以下 4 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群系、气溶胶和大气成分之间的反馈。

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 4 个专题，这包括对陆地—大气系统中有关关键过程和要涉及的特殊问题的简短回顾。

图 4 iLEAPS 科学专题横跨了从分子层次到全球尺度的集成测量和模拟

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

很多物质在陆地和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影响气候强迫。大量气体种类在生物群系和大气之间交换(Scholes et al.，2003)。最丰富的化合物是二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、挥发性有机化合物(VOC)、活性氮氧化物($NO_x = NO + NO_2$)、以及水汽(H_2O)。其他一些重要的化合物是氧化亚氮(N_2O)、氨(NH_3)和各种各样的硫以及卤化物。生物圈通过化学反应为大气圈提供物质和能量基础；大气化学和动力学决定了这些成分及其反应产物的输送和分布，而这些反应的产物却常常远离其源地。

图 5　专题 1 研究主题包括各种化合物的排放、转化和沉降

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。氮是一种营养也是光合作用酶的主要成分(例如 Rubisco)。由于人为氮的排放，有效氮日益增加，从而在一些环境下刺激光合作用和植物的生长。在 CO_2 增加的环境中，缺氮植物会出现明显的氮积累现象，同时当空气中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，以及降低其他营养物如钼(一种关键的固氮酶)的可获得性(Hungate et al.，2004)。植物得到的氮供给可以随植物之间、土壤植物之间长期的相互作用所改变，亦或通过改变水循环进行调整。这可能可以解释植物水平和整个生态系统水平相比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中时，需要考虑在生态系统层次上的碳吸收和储存的相互作用，其值取决于在土壤里氮循环的速率。关于 VOC，某些重要化合物(如异戊间二烯)与光合碳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 CO_2 施肥效应对同化率的影响。此外，沼泽地的甲烷生产可能与根的分泌物有联系，因而与碳和营养物的循环有关。

气态化合物在与大气中的主要氧化剂：氢氧基(OH)、硝酸根(NO_3)、以及臭氧(O_3)的反应特性差别极大(Atkinson，2000)。例如，包括 VOC 和氮氧化物的混合参与的快速反应(分钟的量级)可以发生在植物冠层下面，反之较少的反应化合物，像 N_2O 和 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上的限制，只有很小部分 VOC 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。

为了预测这些化合物的未来变化对空气质量、气候和生态系统功能的影响，需要着重认识在陆地生态系统和大气系统之间和各自之中的碳和氮循环的细节。对许多过程的认识尚未达

到一定详细的水平，而这对于弥合收支平衡，在全球变化条件下定量预测碳、氮循环或者研究陆地—生物圈与大气圈之间的相互作用和反馈机制非常必要。

在短期内，主要的反馈链包括对植物气孔的控制和土壤水平衡对蒸发和其他排放量的影响。蒸发对陆面能量平衡的直接耦合是众所周知的：气孔的关闭将降低植物的蒸腾，这样将会使更多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散增加。在从数年到几个世纪的时间尺度上，反馈的叠加起着重要的作用。这些反馈作用是由于呼吸作用和扰动（火灾、啃食）过程引起的营养供应、第一生产力和碳损失与植被动态之间的时滞性（不同步性）导致的。所有时间和空间尺度上各种化合物之间相互作用的多样性对定量确定陆气系统中各成分的作用提出较大的挑战。

前面简要地说明了在陆地大气系统内进行的广泛相互作用。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各节中分别考虑。不过，应当指出它们的生产、输运、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。

子专题 1.1 二氧化碳

主要起源于人类的温室气体 CO_2，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_2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所吸收（Prentice，2001）。

在定量说明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增加机制的理解。一个可能的直接机制是碳同化的增加及其导致的生产力的增强。一些过程：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有效氮的增加）间接地影响碳的吸收。此外，在土地利用和林业实践的变化也会有助于增加陆地碳汇。然而，土地覆盖和土地利用变化对地区的和全球的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_2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）。另外的错综复杂的问题是由于在增加（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_2损失之间的时间延迟。在许多情况中，在碳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很好地了解（Schimel et al.，1997，Arneth et al.，1998，Knohl et al.，2002）。

对局地尺度的陆地生物圈中对 CO_2净吸收有影响的较为可能的过程已经在可控制的实验中进行了广泛研究。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_2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。这类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。最新的动态全球植被模型（DGVMs）已着手处理这些问题，

但需要进一步改进(Cramer et al.,2001)。例如,对于自然的或者人为引起燃烧的真实描述仍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_2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_2和其他化合物之间的耦合机制。非CO_2化合物的生物通量(甲烷,VOC_s,见下面)通常都与陆地—大气系统中CO_2的交换有关。例如,湿地产生的甲烷和植物腐烂分解产生的CO_2之间的由于依赖于土壤中的水份条件,这两种痕量气体之间的平衡在着一种联系。森林 VOC 排放部分地与植物光合作用有关。这些联系需要 DGVMs 的发展,DGVMs 模式能够以统一的方式解释多种化学成分,并将局地尺度下CO_2和其他气体的模拟结果(例如,FLUXNET)与在较大尺度下(例如,GLOBALVIEW 网络和遥感数据)大气的测量值进行对比。

子专题 1.2 甲烷

甲烷是对温室效应最有力的贡献者之一。用CO_2作为参考,一个质量单位的甲烷的辐射强迫潜能大约是 100 年内CO_2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_4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)。甲烷和其他的 VOC 与氮循环之间存在重要的联系。在 NO 存在的情况下,甲烷和 VOC 被氧化产生二氧化氮(NO_2),反过来通过光分解作用和随后的反应形成O_3。这对对流层的O_3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_x、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十年来很可能一直在增加。

在最后 4 个冰期—间冰期旋回期间,与大气中的CO_2情况相似,甲烷在大气中的浓度在相对确定的范围内(400 到 700 ppb)变化(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,达到当前的浓度 1750 ppb(Prather et al.,2001)。所以说当今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)。

人类对大气甲烷容量最重要的贡献与食物生产有关,还包括来自反刍动物直接的排泄物和动物废物的排放以及淹水稻田。自然湿地的微生物过程一直都是大气中甲烷的一个主要来源,并且据估计至今仍被 认为占总排放的 4 0% (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(当湿润条件超出一定阈值时)甲烷的排放是主要受到温度和植物种类组成的控制(Christensen et al., 2003)。这些变化也会影响微生物的活动和甲烷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,而且在确定甲烷的排放量方面,它是甲烷生产的第三大限制条件。例如,最近已经提出根部的分泌液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结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 和 Heimann,2000)。

基于过程的全球模型,对于天然湿地的甲烷排放源的估计浓度范围在 92 $Tg \cdot a^{-1}$到 260 $Tg \cdot a^{-1}$之间(Cao et al.,1996,Walter et al.,2001),其中有两个关键的源区:北纬和热带地区。尽管在绝对值方面有较大的差异,这些过程模型在热带地区对全球年总量有绝对优势的贡献方面是一致的,虽然北纬地区占有至今为止最大面积的湿地。基于大气浓度反演模式得出,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受限于生物生长季的短促。模式预测未来气候显示: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的,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生长季的延长。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。在非持续的永久冻土地区,永久冻土会自身瓦解并导致甲烷生产在空间上的扩张(Christensen et al.,2004)。同时,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生长季延长使得固碳增加,由于温度升高导致北半球北方生态系统的呼吸作用产生的 CO_2通量增加以及区域水平衡方面的变化。

全球甲烷收支中未知的因素是地热的来源和天然气水合物。天然气水合物主要是高浓度甲烷与冰水的结晶(Kvenvolden,1988)。水合物只在高压和低温的环境下才稳定。在苔原地区和有永冻沉淀物的近海地区,它特别接近于地表。其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天然气水合物趋于不稳定,从而引起甲烷向大气大量的释放,因此加剧温室效应。一般认为这类敏感地区首先是北极海岸附近的沉积物,在那里海洋变暖可能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)。

陆面和土地利用的变化对区域和全球甲烷排放模式的潜在意义是很明显的。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目前依旧是永久冻土的地区可能会成为甲烷源区。影响甲烷排放的其他人为因子包括由于氮肥和以酸的形式存在的氮沉积物使得土壤 CH_4氧化能力产生变化(Smith et al.,2000;Prieme and Christensen,1999)。

子专题 1.3 挥发性有机化合物

VOC 是一族不稳定的有机化合物，这些化合物源自人类和自然的排放。除了甲烷外，最常见的生物源 VOC 是异戊二烯、甲基丁烯醇（MBO）和单萜（例如，α 萜，β 萜），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（Kesselmeier，2001）。相比自然源和汇主要在土壤和沉积物中的甲烷，VOC 主要是由植物产生的。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 1×10^{14} g C a^{-1}，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 1.2×10^{15} g C a^{-1}（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有相当大的变化。与甲烷相比，大多数的 VOC 存在于大气中的时间都比较短。而与甲烷（Arkinson，2000）类似的是 VOC 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。

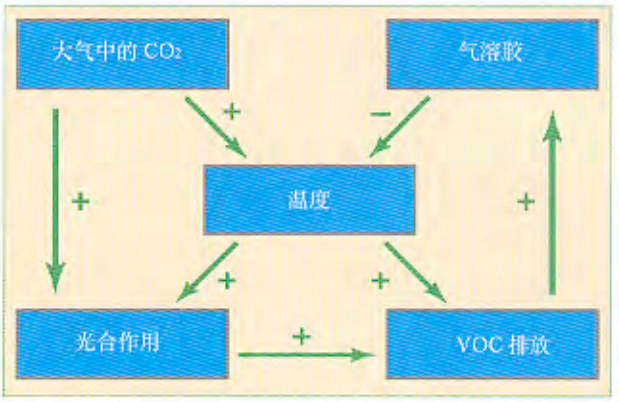

图 8 在二氧化碳浓度、大气温度、碳的吸收作用以及 VOC 排放量和气溶胶的形成之间的简单、可能的反馈链（引自 Kulmala et al.，2004）

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型的不同而变化。对一些 VOC 来说，生态生理学上的反馈会影响其产生和释放（Kesselmeier and Staudt，1999）。异戊间二烯，一种在数量上占绝对优势的 VOC，已经发现可以帮助叶绿素的细胞膜适应高温（Sharkey and Singsaas，1995），但是植物合成并且排放出异戊二烯的原因目前还没有完全弄清楚。特别有趣的是，更原始的植物（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性的变化（Hanson et al.，1999）。异戊二烯从来不储存在叶子里，而都是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地依赖于光和温度。单萜的产生和排放过程与异戊二烯类似，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药草，单萜化合物可能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，除非储存器官的结构被损坏从而导致释放率的升高。所有 VOC 的排放物也会受到水和氮的可获取量（通过对初级生产和生理反应的调节的影响）以及叶片发展阶段的限制。

对于植物和生态系统来说，VOC 的排放可代表碳的实际损失（Kesselmeier et al.，2002）。活性碳的净通量相对于在一昼夜、季节或年，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，在生物群系尺度下（也就是当与净生物群系产量相比时），这些活性碳在碳平衡中可以达到相当大的比例。在生态系统水平下，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的，所以在估算 VOC 对净生态系统的产量（NEP）影响时，排放物和沉积收支都必须考虑进去。

单萜和倍半萜（烯）化合物的光氧化作用和臭氧离解作用可以产生可凝结的反应物，因此也

可以产生次生有机气溶胶(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,有机蒸汽的粒子成核作用既能增加总的浓度,或者也能使那些不易挥发的有机化合物很容易地凝结在已存粒子上。凝结的化合物能增加粒子大小,因此使他们更有效地形成云凝结核(CCN)。不过,我们对 SOA 的形成机制和源了解不多,因此,其全球来源的不确定性达一个数量级(Penner et al.,2001;Penner et al.,2001)。燃烧也是气溶胶的一个巨大来源,并且在热带地区的旱季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,以及降低大气的温度递减率。通过这个机制以及通过他们作为 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 节)。此外,VOC 也将有助于调节对流层氢氧基的浓度(见 2.2 节),它在确定大气甲烷的增长率中起着重要作用。

子专题 1.4 氮氧化物

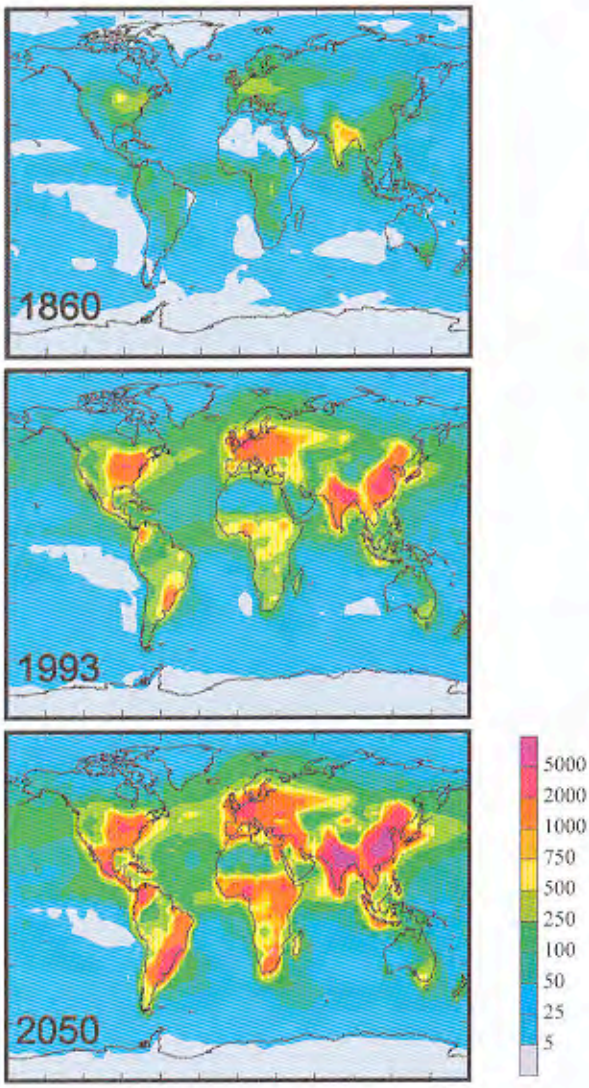

图 7 模拟的无机氮总沉积量(mg·m^{-2}·a^{-1})在 1860 年(上)、20 世纪 90 年代早期(中)和 2050 年(下)的空间分布(Galloway et al.,2004)

短寿命的和长寿命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 VOC 与氮氧化物相互作用形成的,特别重要的是,NO_x 与 VOC 之间的比率在确定臭氧在对流层内是产生还是受破坏是很重要的(Meixner et al.,1994)(见 2.2 节)。有机和无机 NO_y(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,其沉积和吸收影响陆地和水生生态系统(图 7)。N_2O 是一种重要的温室气体,其寿命超过 100 年,并且在大气中的增长率是 0.8 nmol(mol)$^{-1}$·a^{-1}。

从全球来看,人类和生物的排放物中氮氧化物大致相当,它们分别是:15～29 Tg·N·a^{-1}和 6～18 Tg·N·a^{-1}(Delmas et al.,1997)。土壤是生物排放 NO_x 的主要来源(Potter et al.,1996;Delmas et al.,1997),通过硝化作用和反硝化作用过程,土壤也排放相当数量的 N_2O。所以,N_2O 和 NO_x 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),因此,这些通量随后也会随时间和空间的变化而变化。例如,与我们所观测到的 CO_2 的情况类似(Arneth et al.,1998,Kelliher et al.,1999),在旱季后的第一场雨将会产生一个 NO 的排放跳跃,从而导致在排放物中氮氧化物含量增加 10 倍左右(Davidson,1992;Meixner et al.,1997,

1999;Scholes et al.,1997)。N_2O 通量也随着干燥的土壤变湿而增加,但是程度较小。NO_x 向大气的排放量将会受到生产和消耗的复杂的相互作用的控制,并且这些过程的相对量级在不同的环境状况下有着很大的差异(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,所以仅仅根据局地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 NO_x 和 N_2O。最近,人们在北方森林中已经观测到了 UV 导致 NO_x 的排放(Hari et al., 2003)。这项研究为在陆地植被生长和大气化学之间的一个新的反馈提供证据,因为氮氧化物有助于臭氧、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 NO_x 的排放量。此研究结果促进了为量化北纬地区生物群落对自然大气自净过程的贡献的更进一步的研究(见子专题 2.2)。

由于氮氧化物的反应性,陆面 NO_x 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陆面干沉降通量(例如,Ganzeveld et al., 2002)。一氧化氮、二氧化氮和它们的光化反应产物,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,NO_x 已被从植物冠层内去除(参阅 2.2 节)。在很多模型中这称为植被冠层缩减因子。不同景观将会有不同的植被冠层缩减因子出现,这些植被冠层缩减因子取决于植物的类型和数量。目前,对植被冠层削减因子还不能很好地量化。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到达对流层的氮的数量。

未来的挑战是改进 N_2O 和 NO_x 通量随着土地利用和土地覆盖的变化而变化的模型。已经对在区域或全球尺度下对 N_2O 和 NO 通量进行了多次模拟估算(Potter et al, 1996; Kirkman et al., 2001;Holland and Larmarque,1997),但这些估算结果仍存在着不确定性。

尺度问题

一旦生物源重要微量气体在对流层中产生或被释放,他们的寿命可以变化几个数量级。例如,CO_2 具有 5~200 年的寿命(由于不同的清除过程中吸收速率不同),而目前大气中 CH_4 具有 8 年以上的寿命。相反,活泼的 VOCs 可能几分钟或更短时间内在快速反应中从一种化合物转化为另一种化合物。对于非甲烷挥发性有机物,在对流层内的寿命不仅取决于化合物,也取决于与它发生反应的氧化物。例如,计算的 α-松萜在对流层内的寿命在分钟到小时的量级,这取决于反应物(OH、NO_3、或者 O_3)及其浓度,然而甲醇反应要几天或几年(Fuentes et al., 2000; Atkinson, 2000)。活泼的 VOC 也可作为气溶胶前体或较不活跃化合物的前体,因此在大气圈内迁移并在其他地方沉降。对某些植物种类需考虑由于贮存引起的、发生在生产和排放之间的滞后效应。对于快速反应的化合物(如倍半萜烯),排放物的测定和调查会与测量的大气含量值远远不同。因为它们不仅反映了生理活动也反映了物理化学环境,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举的有关过程,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予以解释。十年和百年以上的变化反映了土地覆盖和植被活动。这些活动调整了陆面排放/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所引起生态系统的衰退或陆面覆

盖的变化。

研究主题

陆面排放和吸收许多化合物，它们对于大气中潜在的辐射强迫、云微观物理过程和对流层化学都具有重要的意义。气候系统的物理化学方面直接或间接由土壤湿度模式居间调节，这种调节是通过表面能量平衡、痕量气体排放、燃烧的频率/剧烈度、边界层发展和对流活动性进行的。因此，本节讨论的具有生物和化学活性的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)。

下面所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、年、10 年和百年时间尺度上的排放和沉降？在不同控制过程间有什么联系？例如：

• CO_2的陆气交换与像氮氧化物、甲烷和 VOC 等其他化合物的交换是怎样联系的？在不同的时间和空间尺度上活性碳的通量是多大？

• 那些植被过程及不同寿命的化合物如何影响局地观测到的浓度？

• 什么是控制过程？例如在土壤、植被冠层和边界层之间的活性氮和碳的化合物的交换作用的控制过程是什么？

(2)控制过程如何影响生态系统/小流域/景观内部或与外部的净陆气交换？在过去这些过程是如何发挥作用的？

• 对于主要陆地生态系统的氮循环，能够达到收支闭合吗？人类活动是怎样改变这些通量的？

• 在原始环境中是否存在决定挥发性有机化合物(由此产生的气溶胶、CCN，见 2.2 节)浓度的自我调节机制？

• 如何确定与 VOC 排放相关的不同的时间和空间尺度，特别是在净生物群系生产力、中/长距离输送、转化和沉降方面？

(3)在不同空间和时间尺度净交换量的模型的研究过程中，哪些过程是关键的，所要求的复杂性程度如何？

• 可以定量评价微量气体和气溶胶生产/降解、对流层化学及与给定植被类型的生存环境阈值(如湿地退化、草地中灌丛入侵)有关的气候的反馈作用吗？这些阈值是否导致关键微量气体循环和相应反馈的突变或渐变？

• 是什么原因引起了大气甲烷增长率年际变率？

• 对水循环的大气分量的反馈是什么？进而对气溶胶的产生和氮排放的反馈是什么？

• 是否能够把所有控制氮氧化物和 VOC 排放的因素综合到模型中，以准确地预报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主要微量气体通量的相互作用和反馈以及净生态系统交换产生什么影响？

专题 2　气候系统中陆地生物群系、气溶胶和大气成分之间的反馈

通过土地利用变化、砍伐森林、城市化以及工业化的综合作用引起的陆面变化在热带和亚热带地区最迅速。这些变化极大地改变了地表和大气之间的相互作用，结果扰动了整个地球系统。热带地区变化最根本和深远的结果很可能来自人类对两个过程的影响：①生物源的和人为源的气溶胶与气候系统的相互作用（子专题 2.1）包括水循环；②控制大气化学过程与生物、水文和气象过程的耦合（子专题 2.2）。

图 8　专题 2 研究主题围绕热带以及森林火灾的影响

表面上这些问题好像是相互独立的，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发动机，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的，所以在这两方面热带地区都是非常重要的。降水的总量、强度、频率、位置和性质对于热带生态系统与大气微量气体、水分和能量的交换方式具有核心重要性。由于事件的连锁反应，降水的改变甚至可能导致大范围热带森林生态系统不稳定（Nepstad et al.，1999）。因为能够降解大部分微量气体的氢氧根，在热带地区对流层最丰富，所以大气自净作用主要发生在热带对流层（Crutzen，1995）。氢氧根是通过包括陆地生物圈和人为排放的痕量气体的化学过程形成的。

土地利用变化、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驱动力量。随着热带森林被牧场、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 研究将与 IGAC 紧密协作。IGAC 专注于在垂直和水平大气输送以及大气中化学、物理过程方面和人为（尤其是城市）的排放源，iLEAPS 专注于陆地生物群系和大气之间的交换过程，以及大气特性变化、水循环和生态系统行为之间的反馈。

子专题 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式内的直接效应已经导致了这些模式能力的实质性提高，从而再现在已经观察到的过去 150 年中全球年平均温度的增加（Mitchel 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。现在从已经可以合理地定性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评价。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体中观测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（包括生物质的燃烧）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）。如果气溶胶具有强烈吸收作用（例如，黑碳），它们可能剧烈地加热大气，减少地面增温而导致云的形成减少和云的蒸发加速（Hansen et al.，1997；Koren et al.，2004）。

生物圈通过提供大量 CCN 给自然大气，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）原生生物来源的有机气溶胶（例如，植物碎屑、微生物、孢子）是主要的 CCN（Andreae et al.，2002）。源于生物前体间接形成的 CCN 最近受到越来越多的关注。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的 CCN 生成。最初的分子团的形成是由于无机的各种蒸汽而随后的增长是由于来源于生物圈的可凝结的有机化合物（Kulmala et al.，2001；Graham et al.，2003；Guyon et al.，2004）。这种气溶胶产生机制在北半球北方生态系统显得特别重要，而在热带，源于气相的新有机气溶胶的产生似乎很少，这是因为有机蒸汽的凝结主要导致已存粒子的增长。由植被直接或间接形成的 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，研究了热带地区陆地生物群系影响 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，这与在海上观测到的浓度相似，这突显了人类活动的影响（Roberts et al.，2001）。自然植被诱发过程形成的气溶胶少于人为的气溶胶粒子。亚马孙流域人为气溶胶导致了 CCN“过量播撒”，随着冰相过程和闪电活动越来越重要，使得发生了从雨季出现的典型海洋型对流动力过程到上述观察到的大陆污染区域的云的转变（例如非洲和北半球发达的大陆等）（Andreae et al.，2004）。在更多受干扰地区，相同的云物理性质的转变业已出现。由于具有大气环流热力发动机中心作用的热带大陆地区，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 的增加所引起的云物理的扰动可能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所造成的。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位于哈得莱环流下沉分支下面的热带、副热带区（Tegen，

2003)。尘埃是由于干燥陆面上风的高度非线性作用形成的。重要源区可能相当有限,而尘埃的输送可以将矿物气溶胶从亚洲带到北美,从撒哈拉带到北美和南美。尘埃的沉积为陆地和海洋生态系统提供了重要的而有时也是限制性养分,同时通过干沉降和湿沉降进行的营养传输都是由植物自身决定的(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增强尘埃移动的扰动。由于对各种来源尘埃的光学性质的认识不够充分和缺乏尘埃源强数据,对人为尘埃在气候变化方面的直接影响尚未充分了解。尘埃在某些条件下可能与水融性化合物(硫酸盐、硝酸盐)结合,从而可作为云凝结核(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把化合物输送至上部对流层,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鲜为人知。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的降水格局及养分沉降,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清除所产生的影响仍然缺乏认识,需要定量化。

植物对光照(包括直接散射辐射率、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的行为十分关键。最近工作指出:碳吸收在少云日有所增强,通常解释为散射光照到植物冠层很均匀所致,同时,云对辐射强度的减弱也限制了水汽压的亏缺。然而,辐射特性对水汽压亏缺的相对重要性(或是其他因素)还所知甚少。

子专题 2.2 地气交换及大气的自净机制

大量活性化化合物不断的排放到大气中。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 节)。这些化合物首先经氧化为水溶性化合物(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、雪或冰晶吸收并通过降水和地表干沉降而被清除。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,及氧原子和水的反应。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_4、CO 和其他微量气体的氧化都发生在"巨型热带反应器"——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,而变化着的氢氧基浓度也影响重要的温室气体浓度和寿命。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。

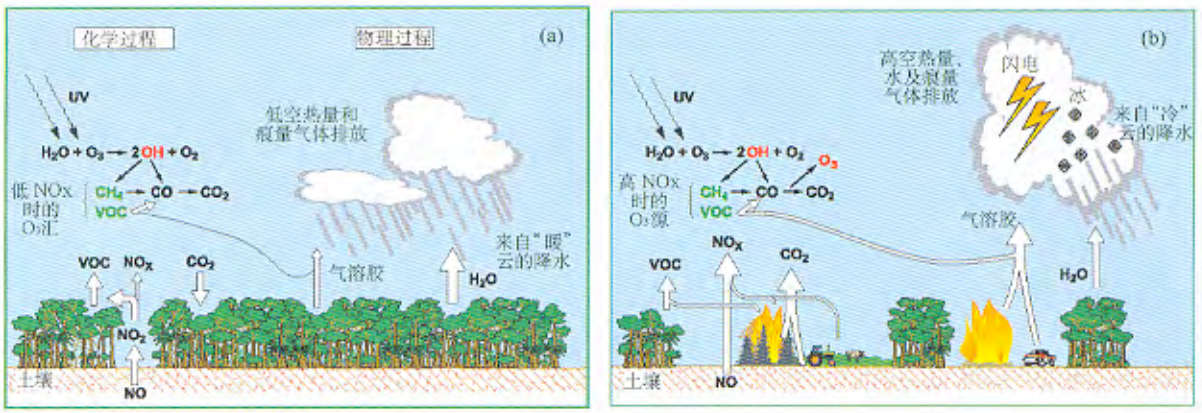

图 9 巨大的热带反应器—生物圈—大气圈相互作用在不同条件热带地区上空的微量气体、气溶胶和云的概念模型
(a)在自然条件下;(b)在森林砍伐和发展之后(由马普化学研究所 Meinrat O. Andreae 提供)

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。氮氧化物浓度很低时,碳水化合物氧化离解臭氧以及消耗氢氧基,而当氮氧化物浓度高时,就生成更多的臭氧和活性反应基。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 的比率像氧化物的浓度很低一样,使对流层处于低臭氧状态(见子专题 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,允许氮元素能有效地更新,阻止氮轻易地逸入大气。随着土壤中有机物的腐烂和氮元素的更新,生成一氧化氮,其中部分气体通过土壤逃入大气层。在大气中,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有助于臭氧形成。

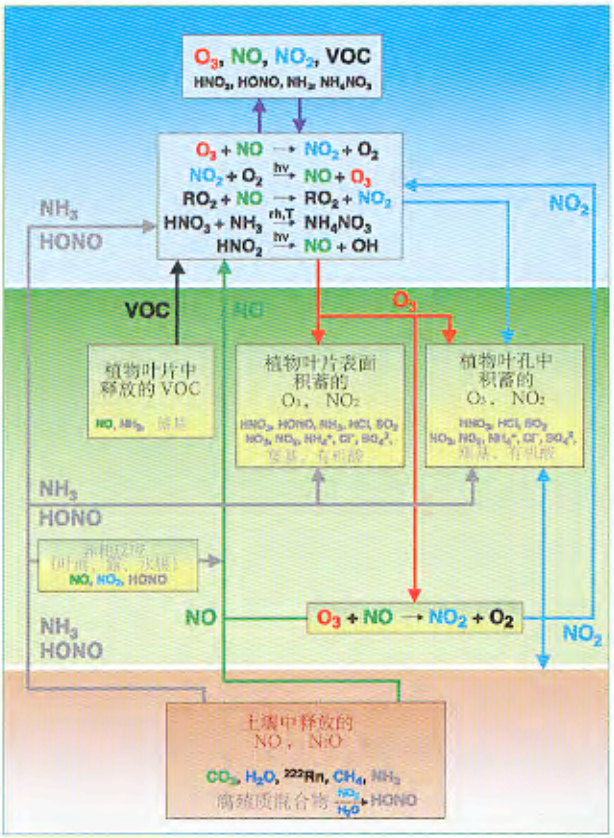

图 10 土壤—冠层—地表—地层的过程和相互作用
(引自马普化学研究所 Franz X. Meixner)

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层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器的低臭氧状态过渡为高臭氧化学烟雾(Keller et al.,1991)。

气相化学的变化也能导致气溶胶的产生。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变化中占主导作用。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。土地利用变化及其对水循环的扰动动预计可引起氧循环以及热带地区大气自净机制的变化。

土地利用和土地覆盖的变化，以及随之导致的微气象及水循环的变化，被认为也可以通过干、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(见子专题 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清除，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利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。

研究主题

下面给出专题 2 的各子专题的研究主题，子专题 2.1 的研究主题可分为如下 4 个主要问题：

(1)是什么过程调节各类气溶胶在近地面形成和生长？是什么控制气溶胶粒子的大小、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)的丰度、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？

• 哪些源自生物的 VOC 对气溶胶的产生有重要意义？次生有机气溶胶通过哪些物理机制而形成？这类气溶胶的产生是怎样依赖于微量气体化学的？

• 现在和先前的全球尘降的量级是什么？与尘埃直接相关的辐射效应是什么？在气候变化情况下尘降强度如何变化？

(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、化合物到对流层上部的垂直输送有怎样的影响？

• 源自生物的、燃烧的气溶胶对冰晶形成有什么影响？哪些类别的粒子参与了冰相物理和微物理过程？

• 水和气溶胶空间变化的耦合或相关会达到何种程度？

• 自然产生的、人为产生的含碳气溶胶的液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)包括生物燃烧在内的人为排放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？该影响对生物活性(包括初级产物)有什么作用？其辐射散射对陆气交换过程有何影响？

• 气溶胶对水循环的大气部分有什么反馈作用？进而，对气溶胶的产生及营养物循环又有什么作用？

(4)上述生物圈、大气圈的相互作用在全球气候模式中表达如何？对此能怎样加以改善？

子专题 2.2 的研究主题也能够陈述为如下 4 个主要问题(包含几个小问题)：

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

• 源自生物的 VOC 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响应？生产能力、植物物种组成、生物源的排放以及干沉降会受影响吗？

(2)植物燃烧的排放在干扰大气的自净能力进而对大气成分方面起怎样的作用？

(3)陆地生态系统变化直接或间接效应会怎样影响大气圈的氧化能力？

• 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？

• 变化中的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显著影响？

专题 3　陆面—植被—水—大气系统中的反馈和遥相关

图 11　专题 3 研究主题包括北纬和冰冻圈地区

陆面—大气相互作用通过两条交织联系的途径发生：生物物理的途径以及生物地球化学的途径。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。作为水汽的蒸腾或蒸发的潜热和气溶胶通过生物物理过程和生物地球化学过程得以交换。在两种途径中，非线性反馈很常见，或是正向的(增强)或是负向的(衰弱)。两种途径的反馈均直接地影响近地面的能量、动量和湿度(潜热)通量(例如 Nair et al.，2003；Adegoke et al.，2003)。

子专题 3.1　水文—生物地球化学横向联系

iLEAPS 的目标之一就是了解地—气相互作用的动力过程，在陆地、大气之间物理、化学、生物过程怎样传输和转换动量、能量和物质。重点是了解反应化合物

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。这些联系从功能上来看可认为是沿着河流流域的梯度变化，从少水透气土壤条件，到陆地河流交界的水饱和区，再到河流。流域集成了从小溪到区域的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放到大气，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)。溶入河水中的 CO_2 分压(P_{CO_2})是陆地和河流环境之间碳与水循环耦合的一个简化表达式。河水中二氧化碳的浓度几乎总是远大于大气中浓度，这取决于一系列复杂的生物过程、天气过程及其相互作用，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在下游表现为有机物质量和输送进入的所溶解的无机碳含量，它们经由水中或栖息在河岸的初级生产和呼吸作用而增加。从热带和较暖的系统逸出的气体估计超过 $1 Pg\ a^{-1}$(Richey et al.，2002)。

子专题 3.2　区域问题

近年来，高纬生态系统因为高纬生态系统可能的气候敏感性得到了特别的重视，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(CliC)计划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植被一般比较暗，能比裸土或积雪表面吸收更多的辐射。在北半球高纬地区，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生长(Bonan et al.，1995)。然而，这种高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。高纬度系统具有碳密度高的特征，大约有 15%的陆地碳存贮在永冻带(Prentice et al.，2001)。这个贮碳库受温度和降水改变的影响，及相关的冻层深度改变的影响，具有对大气 CO_2、CH_4 浓度，进而对气候具有强大的反馈作用。有争议的是，高纬度地区的变暖是否会引起现在北方碳汇的衰减，或者导致汇和源的转化。然而，也已指出温度的增高会促进土壤营养成分的释放，从而提高生产能力以及碳的吸收。

最近的研究也证明在北方植被覆盖区、冰(雪)区及与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(Kulmula et al.，2001)，并且已成为深入研究的焦点(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)。有人已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)。在北极、亚北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，很明显这与 iLEAPS 也有关。

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"阀门"有关，因为局地和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)中发挥了重要作用。同样地，iLEAPS 将在季风亚洲区域集成研究中与其他国际计划合作。

子专题 3.3 全球性问题

在地球的特定区域的气候系统的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，雷暴在该地区发生机率要高很多。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，在生长季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风的强度有负相关关系(Bamzai and Shukla，1999)。

Riehl 和 Malkus(1957)指出，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，这些区域的土地覆盖变化对全球的影响可能相当于或者更甚于 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很可能继续减少。过去十年全球尺度的植被覆盖面积的改变趋势以及年际变化已经由 Zeng 等(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及其变化有很大的影响，这是因为它持续存在时间长、数量巨大以及空间一致性大(Pielke，2002)。

由于景观变化引起的热量、湿度以及能量的空间再分配对局地、区域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(2001)指出：在美国中部，地上短草和长草生物量的增加(由于 CO_2 含量较高)会影响生长季的温度和降水。Narisma and 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消由于土地利用变化的温度效应。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 et al.，2003；Pielke et al.，2002)。在区域尺度上，Marshall 等(2003，2004)已经阐明了佛罗里达州景观的改变是怎样影响夏季和冬季气候的。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℃(图 12)。由于湿地排水的结果，农作物区冻害的频率和强度均有所加强。

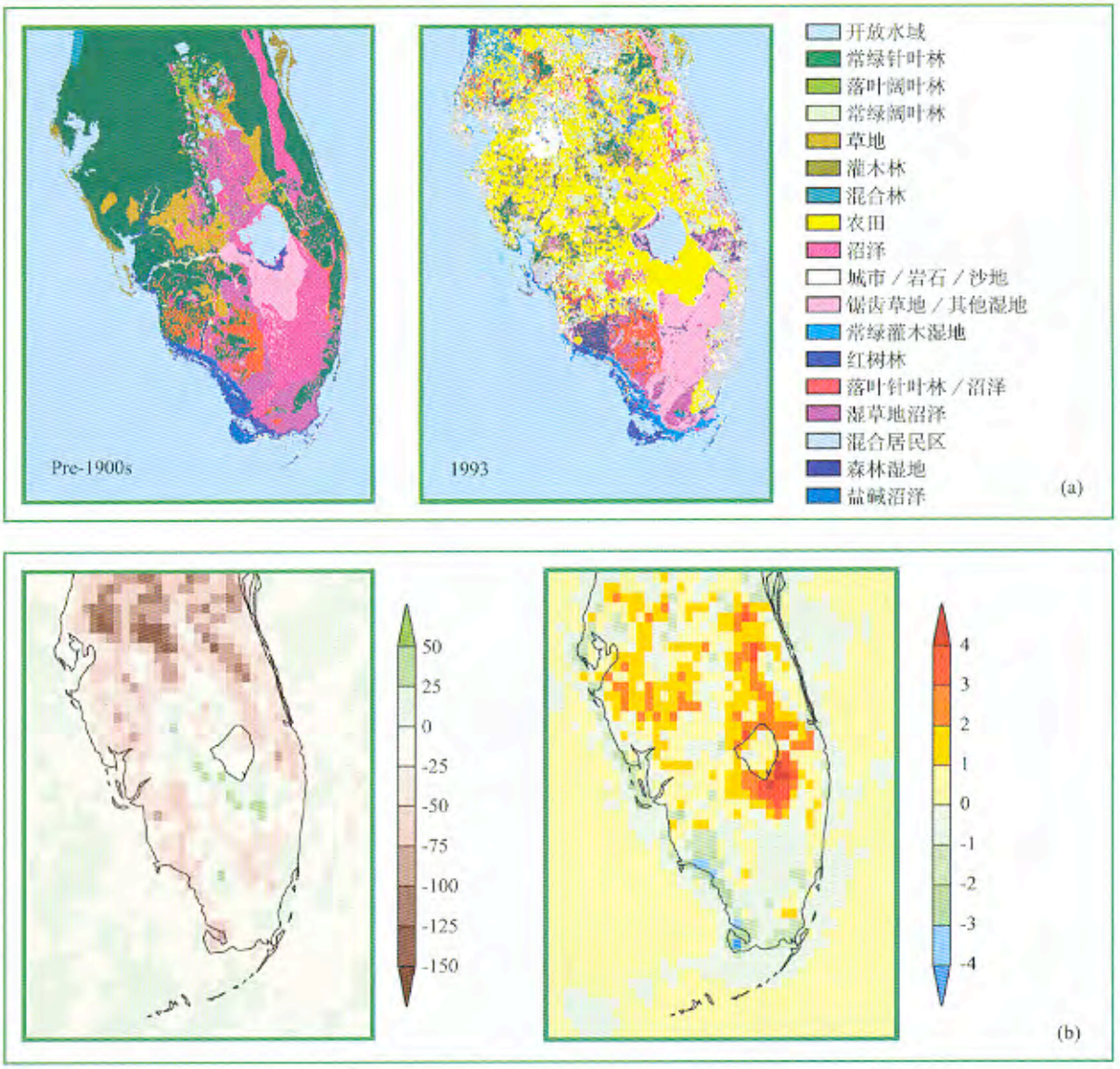

图 12 美国佛罗里达州南部(a)美国地质调查 20 世纪前土地覆盖数据(上左)与 1993 年土地利用(上右);(b)模拟累计对流降水(mm)(下左)和模拟 1989 年 7~8 月平均日最大温度(℃)(下右)。两图均代表 20 世纪前期的土地覆盖和 1993 年的土地利用条件下的差。

最近的一些研究表明,至少在某些区域未被干扰的陆气系统存在多平衡态。例如,Wang 和 Eltahir (2000)指出了大气和生态系统动力学的结合导致西非地区的干旱或者湿润状态,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。在亚热带以外是否存在多平衡态还不确定,至少在目前和末次盛冰期 (LGM) 气候状态下。多重平衡的重要性在于他们具有可以解释突发的植被结构变化的潜力(Brovkin et al., 1999; Claussen et al., 2003)。Zeng et al.(2004)的模式研究表明了由于植被和对应土壤之间的相互作用产生在中国内蒙古存在多平衡态的草地和沙漠。以上的例子都表明平衡状态之间转变可能是突发的、气候上跳跃的(Rial et al., 2004)。此外,人为引起的景观扰动能降低区域气

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。多平衡态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将要求 iLEAPS 做出主要的贡献。

尺度问题

通过研究一系列尺度上动量、能量和二氧化碳的交换问题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。在叶片尺度，气孔通过不断的水汽蒸腾，调节辐射能量的感热和潜热的分配，优化 CO_2 同化作用（Cowan，1982）。生物控制通过由可用光和二磷酸核酮糖羧化酶（Rubisco）的吸收量在设定的界限之间的关系得到了很好的平衡（Farquhar et al.，1980；Collatz et al.，1991）。在冠层尺度，通过对环境做出反应的碳分配的遗传上限定的模式，使叶片尺度的表现集成到冠层结构中。这个结构与下层土壤蒸发一同决定了从日到季节时间尺度的动量吸收、反照率和土壤蒸散（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，由生物决定的土壤蒸散每天均由对流边界层（CBL）反馈补充。

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，边界层湍流 CBL 起着非常重要的作用。边界层演变受某些动力学因子的影响，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。通过潜热和感热对蒸散的影响，土壤湿度对边界层厚度有着决定性的影响。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。这也相应地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蒸散（Raupach，2000）。几天时间内在景观尺度，因为水分和辐射能量供给的主要限制，使得这些反馈甚至可以忽略。这些情况导致了大量像 Priestley-Taylor 方程的公式，表明在景观尺度上植被常被认为在受水不供性影响的能量分配和蒸发中起到间接作用（Raupach et al.，2002）。

对流边界层演化的重要性可以通过森林里土壤水分蒸散、低的云量、地表辐射平衡和碳的吸收之间的反馈来说明（Freedman et al.，2001；Gu et al.，2002）。为了量化这些反馈，需研究地表的辐射和湍流，必须能精确地模拟云量和对流边界层的演化。夹卷作用如何加热干燥对流边界层决定了云在特定的日子能否形成。在云的可见边界和到达地表的辐射之间的正确联系需要认定，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变化着的生物物理反馈和遥相关。所以，必须考虑植被的长期响应，因为生物群区和景观对温度、降水、日射、风的变化以及人类活动的直接影响会具有响应。辐射属性（例如反照率）、结构属性（例如空气动力学的粗糙度）和与地表湿度相关的属性，都会受到植被覆盖种类和数量的影响。由于大尺度的天气和局地地面通量之间的相互作用，近地面的气候既可刺激植被的发展，又可限制植被的发展。

研究主题

地表和大气以及气候系统其他分量之间的相互作用和反馈影响着区域气候的变率及与全球气候系统之间的相互作用。陆面土壤水分含量、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。这些条件在日、季、年尺度上发生动态变化。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 4 方面的研究问题：

(1)从大陆到全球尺度生物物理和生物地球化学过程怎样相互影响？

(2)在陆面—植被—水—大气系统中，短期(日到年际)陆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气交换过程中的影响是什么？

• 土壤水分格局与季节性及长期陆气物质和能量交换之间如何及在哪些区域发生相互作用？土壤水分、温度、物候现象和植被如何综合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_2 排放有什么样的影响？

• 对在全球变暖条件下的亚马孙森林预测的不稳定性是因为在该环境下对生物多样性的参数化不够正确导致的吗？

• 植被动力学在何处和怎样影响气候变率？

• 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会如何影响未来气候变化？

• 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？其中包括突变、极端事件以及导致向另一平衡方向运动的阈值？

• 如何适当度量景观变化对气候的影响？

• 影响到地球系统层次的土地覆盖变化是什么？

• 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帮助指导对土地利用的决策？

(4)陆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的媒介吗？

• 由于热带地区砍伐森林引起的中纬度系统的扰动是否与一次厄尔尼诺事件所引起的扰动相当？

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 中着重关注的过程在生物圈和大气圈的耦合中是至关重要的。从秒到数十年的时间尺度，从分子到全球的空间尺度上，这些过程都在起着作用。这些过程涉及到复杂的反

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

馈，因而孤立地研究各个分量是不够的。认识和预测这些复杂过程依赖于模拟和测量。提出假设需要模拟，对假设的经验需要测量。专题 1～3 中讨论的这些过程的性质对数据和理解提出了新的要求，为此只能通过模拟和测量的集成研究才能达到，这是专题 4 的研究范围。

有关许多复杂的反馈例子已在专题 1 和 2 中讨论过。例如，水循环和植被的碳、氮化合物(CO_2、CH_4、NO_x、VOC)交换之间的紧密耦合在专题 1 中具体涉及，而专题 2 中讨论了生物气溶胶通过对云和降水的影响在调节水循环中发挥作用。

作为成果，4 项关键的生态和水文研究主题已经明确，进而通过测量和模拟进一步改进分析是必要的：①生态系统的净碳吸收、光合作用和呼吸作用；②大气和生态系统之间能量、动量、粒子和活性痕量气体的交换；③碳、水、氮和其他营养元素的平衡；④这些过程年际变率间的相互作用。

由于 iLEAPS 聚焦于陆气的相互作用，主要关注的是测量、模拟各种重要的碳、氮化合物、气溶胶粒子及能量、动量在大气和陆面之间的通量，尤其是通过土壤—植被界面的通量。

直到约十年前，陆地—大气交换的微气象学观测主要以动态方式(campaign mode)进行(注释框 1)。选择地点和测量周期使之水平均匀、气流稳定和源—汇分布等近乎理想的条件，这些假设条件是数据分析所依赖的模式框架所隐含的。近来，FLUXNET 站点(Baldocchi et al.，2001)的长期数据记录已经揭示了大量意想不到的大气传输过程方面的信息，表明理想气流条件的假设不适用于连续长期的观测(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，可以有效提供用来弥补局地测量的陆气交换时空变率的额外信息。这些方法要求发展适当的预测模式，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。

因为所关心的尺度超过通量塔斑块尺度，因此需要新的数据源。边界层收支法把空气动力学方法从通量塔斑块尺度扩展到区域尺度(注释框 1)，而遥感提供了前所未有的空间覆盖数据，只是它的时间分辨率太低。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的处理方法，这些方法称作“多重约束法”。在这方面，iLEAPS 将同 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 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、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、气孔和冰—雪层过程决定其传输速率。

注释框 1　用于测量地表通量交换的空气动力学法

叶室，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层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)将尺度扩大至整个森林冠层的封闭部分，然而冠层封闭不可避免地扰动了辐射平衡以及湍流交换，所以这种方法只能限制在非常苛刻的条件下才能应用(Dunin and Greenwood，1986)。至少近 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度量回避了采样问题。

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面的气流与其中浓度的变化(通常称为储存项)，然后通过差值推算地表交换(图 14)。在塔基测量中假设控制体的顶面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)。

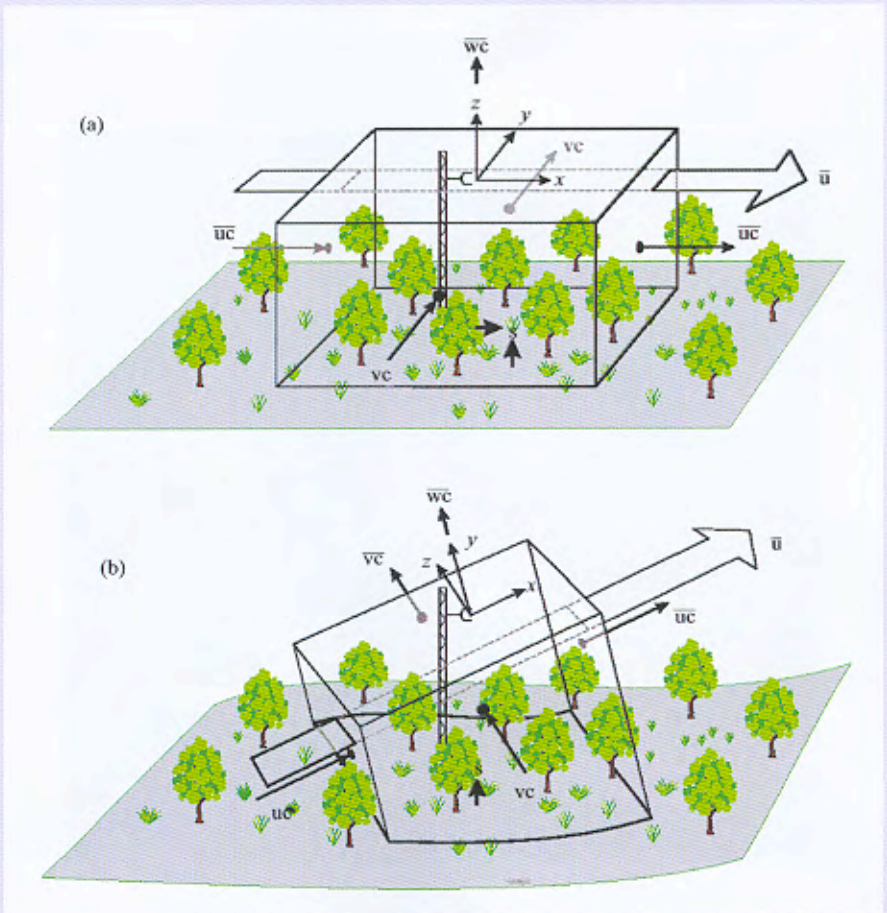

图 14　冠层斑块上的概念性控制体：控制体的形状和方向由平均风场确定

(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面的垂直交换；(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

控制体形状由质量平衡方程的坐标系和气流场确定。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面的立方体(图 14a)。在复杂地形气流下相同坐标系中，墙面和顶面不再垂直和平行于地表(图 14b；也可参见 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，控制体中的平衡可简化为盖子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质量平衡中，同时在平流状态下，通过控制体的向上和向下墙面的水平气流没有处于平衡之中，所以水平通量散度也必须计入地表交换。

对于重要生物的标量(热量、水汽和 CO_2)，在控制体顶部的通量测量可以利用涡度相关法获得。以前使用的方法比如涡度积累或梯度扩散传输机制假设。这些处理方法仍然用于没有快速响应传感器的外部标量测定中。

尽管通量塔观测项目早就开展，但是相同的质量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观测塔情况不同，飞行器能够记录飞行线路上数公里的通量数据，但是质量平衡中其他组分(如存储量和水平平流)必须通过间接估算。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，各种观测量中最精确的是浓度，对此，在地表交换推导出来之前还必须利用 PBL 顶部夹卷通量和平流通量的估计值进行补充。当在多个方法联合应用时，空气动力学方法通常是最好的，这一结果并不令人惊讶。

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，认识这些控制陆面的过程。概括地讲(可能气孔对清除少量微量气体的贡献例外)，气体和气溶胶的地面吸收的目前认识主要依赖于经验，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_2、SO_2以及气溶胶是重要的汇。近来研究表明，一系列痕量气体如氧化 VOC 和过氧化氢的清除比预料的要大(Karl et al.，2004；Ganzeveld et al.，2005)。这非气孔吸收有显著贡献，这与以前对臭氧沉降的发现是相类似的(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、复合沉降和叶排泄。第二个任务是认识这些化合物的大气传输机制，为此空气动力学方法(注释框 1)就能应用于测量面积平均交换率。

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)在一般的数据同化框架下，通过整合来自通量塔、边界层收支、遥感和其他监测技术的数据，在从局部到区域尺度上推进陆地大气交换的长期测量；

(2)把对能量和 CO_2 的长期测量能力扩展到对广泛的生物活性化合物的长期测量能力；

(3)利用测量结合模拟来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已经由 BAHC、GEWEX 和其他一些项目的经验所解决。此外，通量测量网络(例如 FLUXNET)提供的多年的高时间分辨率测量结果已经改变了学术界对生态数据的期望。然而在所有尺度上都存在着测量困难，因此 iLEAPS 的首要挑战就是拓展通量塔足迹的空间范围从斑块到区域而不失其时间上的高分辨率，并增加其他重要物种，例如气溶胶和活性气体的测量数据。

子专题 4.1　湍流通量测量传感器的发展

各种快速响应、开路传感器应用于热量、水汽和二氧化碳的测量上有一段时间了。快速闭路系统，诸如可调的二极管激光器能以很高的频率(Friborg et al.，2000)测量累积的多种源于生物的重要化合物(CH_4、N_2O 等)。最近质子迁移反应质谱仪 PTR-MS 同微气象技术结合(例如分离涡度协方差或者松弛涡度累积)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)。对 NO 已经可以用化学发光技术来测量(Rummel et al.，2002)，NO_x可以用快速催化技术测量。可是在更通常的情况下，对有些微量气体的浓度测量却十分困难，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，梯度法的应用范围是有局限性的，事实上，在植物冠层内部和其上部其通量梯度关系完全断裂(Denmead and Bradley，1987)。因而更多的间接技术在估计气溶胶粒子通量时仍是必要的(Rannik et al.，2003)。

子专题 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(注释框 1)用于连续测量生物圈和大气圈之间的二氧化碳、水汽以及能量的交换(Baldocchi et al.，2001)。通过它们获得的数据不仅提供通量塔足迹范围内生态过程的详细空间分辨率信息，也可提供多种陆地生态系统碳交换的日总量和年总量信息。除了有这些优势外，在解释通量塔数据方面依然存在一些严重的问题，这些问题的征兆是不能闭合白天地表的能量收支和低估了风静夜间的 CO_2 呼吸作用。

作为一个结果，未经校正的通量塔结果得出的全球和区域平均净生物群系生产量产值比大气反演法和调查法值大 2 到 5 倍，尤其是在热带地区(Schimel et al.，2001；Malhi and Grace，2000；Phillips et al.，1998)。这些差异可能有几类原因。

第一类型问题是那些影响通量塔结果(净生态系统碳交换)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)，从而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)；③在扰动通量或者大气反演算法估计结果上的系统误差。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有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会在白天和夜晚之间有所不同，因为传输机制随着大气稳定度而变化，这直接导致通量塔在估计净能量交换中产生系统误差(Moncrieff et al.，1996)。具体的原因有以下几个：

(1)地形的影响：许多的通量站点位于复杂地形条件下，这里因为不同的坡度、地貌、土壤湿度含量和植被种类使太阳能量的吸收不相同以及地形影响使气流扭曲，因而出现平流是可能的(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涡度协方差的高通滤波，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：夜间的呼吸通量比起同时发生的生物学测量值来说常常被低估。这两种方法的差异在大气非常稳定的状态下能特别明显地表现出来(Goulden et al.，1996)。在几个复杂地形站点的测量值强烈地表示出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(即使是平坦地形)时湍流传输的间隙性和由于日出时冠层空间高浓度的二氧化碳率先减少引起的空间取样误差。

通量塔站网对于推进对生态系统过程的认识是非常重要的。iLEAPS 将会鼓励在已建立通量塔站点中增加传感器测量要素的范围。发挥已有设施的优势，并利用新旧测量值提供珍贵的共同约束。根据这个思路，提高长期塔观测空气动力学分量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)无论是处于中性条件下的地形，或稳定层结与地形的共同影响，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。即使经费不成问题，也不可能有足够的测量值来解决这个问题。关键在于积累复杂地形上空大气流动特征的知识，以帮助发展和检验可用作系统数据同化依据的模式。

(2)低频涡流通量的存在显示出行星边界层(PBL)的通量传输机制量没有被完全认识。

(3)认识夜间稳定层间歇湍流特征以及在早晨和夜间转换期间 PBL 的特征，这对于设定所有的运转最好的站点上的通量塔收支置信度界限是非常重要的。

子专题 4.3 非守恒标量

传统的空气动力学方法(注释框 1)假设被测标量是守恒的。在被测标量经历化学反应或者粒子大小分布发生变化时,这种假设是不适用的。被用作数据同化(即使在理想状态,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的方程组。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要经历化学的或者物理的变化,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 中一个关键将是优先建立大气化学和冠层交换相结合的模式,调试该综合模式并用以作数据同化的工具,从而推断活跃的和非守恒标量的地面交换。

子专题 4.4 边界层收支法

边界层收支法把空气动力学法(注释框 1)从通量塔斑块的概念性影响范围扩展到了整个 PBL。但是,并没有在 PBL 尺度上连续测量的方法,而且一般的 PBL 数据均局限于来自气球和飞机的浓度和同位素比率廓线的测量,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。

边界层收支法主要(不唯一)应用于白天对流边界层(CBL),并且在地表通量远大于通过冠层顶部的拖曳通量时此方法最成功。有两个其他的因素的限制常常让人们使用这一方法:有关逆温层以上大气状态和由水平的和时间的异质性驱动的平流通量两方面知识的匮乏。这些中有些可以通过使用改进的取样技术来改进,例如无人驾驶飞机(UAVs)。这些都可以利用改进的 CBL 动力模式作为同化的基础得以补充。尤其是在与通量塔景观尺度一样具有对流问题的复杂地形上,目前用作数据同化基础的一维 PBL 模型应该由更复杂充分的模式取代(Weaver and Avissar,2001)。

夜间稳定层结为边界层收支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"充分混合"的假设必须放弃,但拖曳通量应该保留。然而在夜间,由于地形原因产生强迫平流,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,强烈的稳定度产生的间歇湍流完全排除了边界层收支法的应用。

边界层收支法和通量塔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。首先要确定边界层收支法有效的条件,进而促进完善更复杂的 PBL 模式作为在更少理想条件下应用边界层收支法的基础。

子专题 4.5 通量、大气成分的机载测量

在 20 世纪 90 年代机载测量通量基本上是所有集成计划中的一个重要部分。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中的另一类(详见注释框 1)。突然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)。各种化合物(包括二氧化碳)的浓度和同位素比率的测量比直接通量的测量看来更成功,但是应改善仪器的轻便和精密度(Andreae et al.,2002,Lloyd et al.,2002,Styles et al.,2002)。iLEAPS 将促进进一步发展机载测量及其解译,包

括低速、低空轻型的飞行器和 UAV 技术，用以改善对湍流通量的估计。

子专题 4.6 遥感

虽然遥感不能直接传送地表交换的测量，但在提供从叶面、样地到区域及全球尺度从提供数据到扩展过程模型方面遥感技术是重要的手段。例如，未来 CO_2 卫星测量将会使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观测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，用以推算季、年、10 年的生物物理特性和植被参数图。这些特性对光合碳吸收、水的释放及对陆面能量的影响的耦合的生理模型至关重要。用不同技术获取的大范围空间和时间数据必须用一种新的方法——数据同化方法给予集成。

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。对用于解释卫星测量结果和推断气溶胶属性和分布的算法需要进一步的评价。随着植被类型和燃烧区域卫星遥感技术的发展，燃烧和陆地气溶胶排放的估算方法需要进一步改善。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)。

尺度问题

当研究痕量气体在陆气系统的产生、迁移、转化和消失时，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输送的速度几乎一样快。如果大气是稳定的，湍流输送受到压制，痕量气体的浓度可能升高到影响生理的水平。

需要经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，利用适合的模型综合各种时空尺度上的测量，估计发生在测量尺度间的生产、输送、转化，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)。模拟也是唯一的能够说明显见于大多数地球景观(例如，地形、植被的存在/缺失、植被类型和年龄)中的空间异质性的工具，这种异质性影响生产和沉积过程，也使得通过单独测量定量描述陆气相互作用变得不切实际。

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，不是完全放弃现有可用技术的直接测量，而是需要更仔细地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，因此下列问题需要提出：

(1)边界层过程：在表征各种痕量气体地表—大气通量的日变化格局中生物活性和边界层状态演变(例如，高度、稳定度和湍流结构)的相对贡献是什么？

- 地形如何影响冠层内部和其上空的交换？
- 冠层过程是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的交换需要什么样的冠层微气候模型？

• CBL 演变是怎样影响陆面－大气交换的，尤其在与前一天残留层混合的情况下？

• 与 CBL 高度相关的地形条件达到何种复杂程度时现有模拟技术失效？

(2)表面过程：景观是具有不同的植被类型、积雪冰面或裸土的复杂镶嵌体。如何很好地表征这些陆面类型的交换特性？它们如何能够被整合在大尺度模型中并准确地代表它们的平均交换作用？

• 没有植被的陆面(土壤、冰)控制吸收的机制是什么？

• 陆面(土壤、冠层)湿度是怎么样影响排放和沉降的？

• 为了能描述不同尺度的交换的动力学特征，我们究竟需要如何从与地形有关的垂直和水平方向定性描述植被特征类型和冠层结构？

(3)测量问题：在从土壤通量观测室到边界层收支法的尺度内，地表交换测量的空气动力学方法特别假设了简单的气流条件(例如，水平均匀性和/或稳定性)和物种守恒。如何扩展这些技术以取消此类假设限制？

• 在 PBL 中平流和低频通量产生的起因是什么，他们对标量传输的贡献是什么以及能否系统地进行修正？

• 平流(由稳定的排放造成的水平传输)对于夜间交换的贡献是什么？怎样才能对它进行表征以及能否进行系统纠正？

• 在很强分层的气流中湍流交换的空间和时间不均匀性的机制是什么？它怎样影响夜间通量的测量值？

• 非守恒物种(活性化学品和气溶胶)如何能在地表交换测量的空气动力学方法中适用？

• 具有模拟在陆面能量平衡区别功能的中尺度三维模型能否用作边界层收支估算的基础？

(4)数据同化、模拟数据融合以及多重约束方法：能否发展过程模型使其适合于非守衡物种、地形不均匀、非稳定条件，并将其作为数据同化方法的基础，以便推广？

• 修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？

• 能否发展简单输送模式适合于非守恒标量的数据同化，从而把空气动力学测量扩展到这些物种？

实施战略

观测、模拟战略和集成

iLEAPS是一个典型的集成研究计划，需要同时考察多种尺度、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：一个优先的战略模拟和多重参数的敏感性研究。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（如扰动期间和再生长期）和生态群区（如：热带、北半球北方/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。流域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。

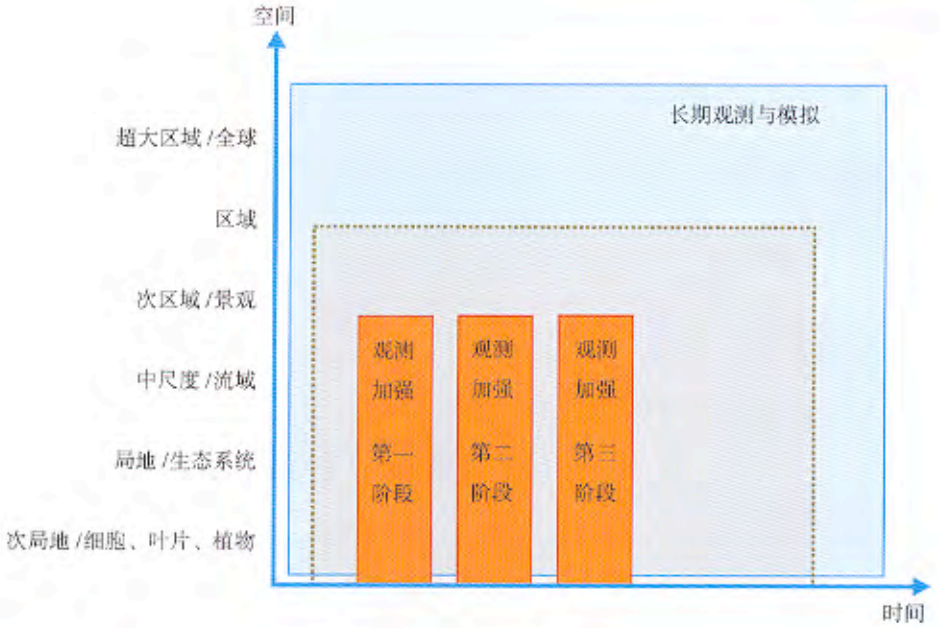

图16 地球系统研究中理想的研究活动，在大范围时间空间尺度内将实验研究与观测、模拟相结合，在iLEAPS中也应采取与此类拟的处理。

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)。

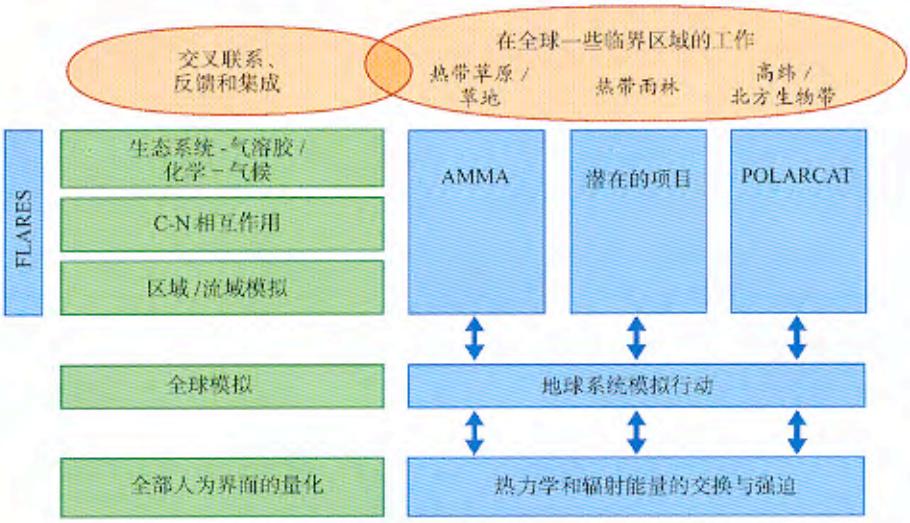

图 17 关注区域过程以及交叉研究主题的 iLEAPS 正在执行和规划中的研究实例(蓝色)

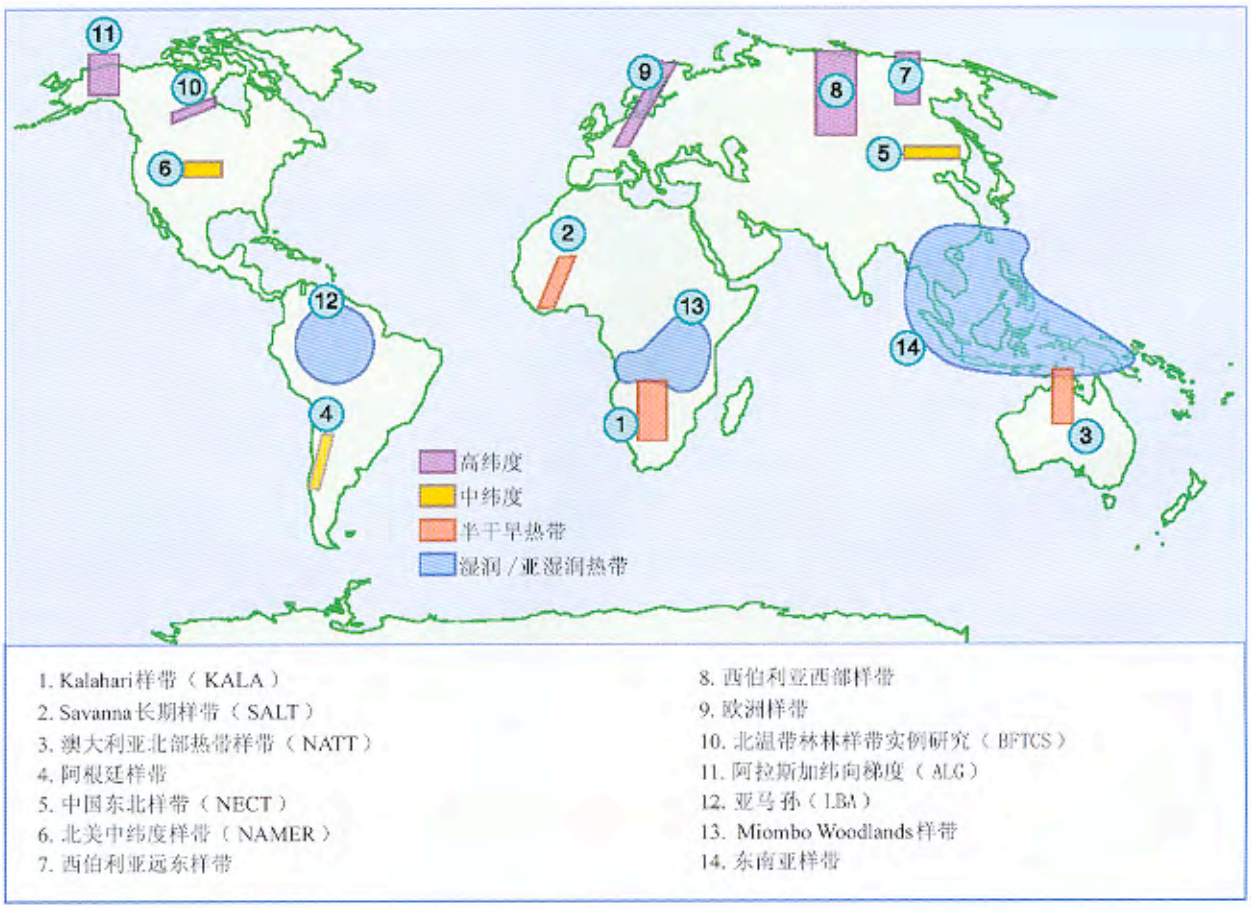

图 18 传统 IGBP 陆地样带。样带 12~14 基于土地利用变化强度的概念梯度

摘自 Canadell et al.,2002,感谢 Opulus 出版社

iLEAPS 支持采用传统 IGBP 陆地样带，这些样带是沿着温度、降水和土地利用全球变化梯度方向构建的。IGBP 陆地样带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的（图 17）。iLEAPS 的燃烧—陆地—大气区域生态系统研究（FLARES）是一项交叉研究计划跨越学科（生物、气候、化学 和物理）以及地理区域，并向广泛的整合和比较分析方向运作。

观测与模拟的结合：尺度连接工具

对大量陆地—大气系统反馈机制进展的了解需要在各个尺度上进行的测量值与使用物理和生物学精确方法的区域、全球模式相整合。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的实施上。耦合模式增加了对与排放、碳循环与水循环相关的反馈、辐射影响和气候系统的机制的理解。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发展。需要对现有的在过程层次和大尺度两方面将气溶胶耦合在气候系统中的模式进行评估。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处在根本分离状态，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及实验工作的科学家之间的合作。具体地讲，观测和模式的综合、模式发展和评估应该包括在以下工作之中（在下面各节深入论述）：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仍然在相对大于观测的空间尺度上运行。利用观测范围从观测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，应该考虑并评估更适合的方法。在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（向陆海风）相比较，中尺度不均匀的重要性取得共识已久（Pielke，2002；Weaver and Avissar，2001），但是这种效应在自然界中的作用只是通过孤立的个例研究获证。能够模拟这种现象的三维中尺度模式通常不作为在边界层平衡中的数据同化的基础。当水平的温度差异很大时（水—陆界面），低云气候学是第一步，强迫积云可成为有用的示踪物。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联系的生物物理模式被较好地建立，生物地球化学和动力植被模拟将会从多竞争尝试中受益，至少在 iLEAPS 项目的前 5 年。在这些尝试当中，生物物理、生物地球化学和动力植被模式的一致性是至关重要的。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链，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基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。碳循环模式应该予以改进，从而得出通量站点的 CO_2 和 H_2O 通量的季节和年际变化，同样，得到浓度测量站点上大气 CO_2 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。

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具有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_2 碳化合物通量不可能从 CO_2 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。

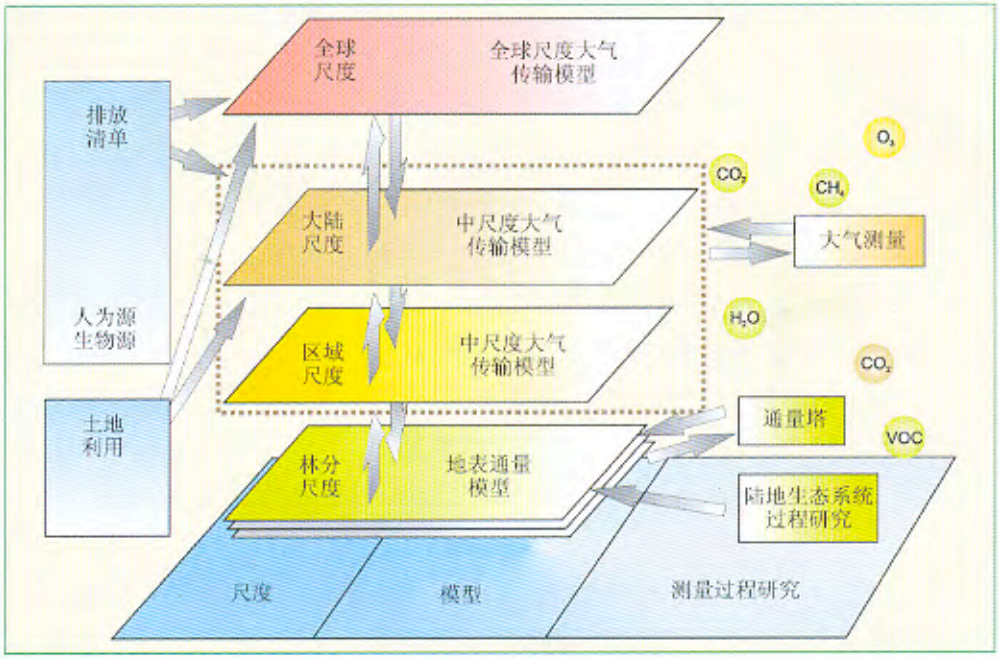

图 19 研究方法及协作和整合的示意图说明

组织结构

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、国际项目以及关心科学研究和全球变化评估的社团之间的合作；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等；

(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。

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；⑤跨学科的国际大型活动；⑥集成研究；⑦数据库；⑧具体科学问题会议；⑨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“已认可的计划”，其他任务是“已认可的支撑行动”。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。

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）正如本文前面部分所提出的，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；

（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相结合并加以集成；

（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。

申请引导

任务申请书应基于研究上述的指导方针。可以在任何时间提交给 IPO；IPO 会将符合要求的申请呈交 SSC 评论和批准。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。

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。

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，这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休假来实现。

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中或完成之后进行，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）。

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该地区人们的意识。

（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 andHeintzenberg J (2003). Climate forcing by aerosols a hazy picture. Science 300: 1,103—1,104

Andreae M O, Artaxo P, Brandao C, Carswell FE, Ciccioli P, da Costa AL, Culf AD, Esteves JL, Gash JHC, Grace J, Kabat P, Lelieveld J, Malhi Y, Manzi A O, Meixner FX, Nobre A D, Nobre C, Ruivo MdLP, Silva-Dias M A, Stefani P, Valentini R, von Jouanne J and Waterloo M J (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 M O, Rosenfeld D, Artaxo P, Costa A A, Frank G P, Longo KM and Silva-Dias MAF (2004). Smoking rain clouds over the Amazon. Science 303:1,337—1,342

Andreae M O, Jones C D and Cox P M (2005). Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. Nature 435: 1,187 1, 190

Arneth A, Kelliher F M, Gower S T, Scott N A, Byers JN and McSeveny T M (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 VOC, and NO_x. 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, Hitzenberger 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, quist M, Svensson BH, Nyk nen 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, kerman 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, L tkemeier 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 Global Change 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 Bauguitte SJ-B (2003). What controls photochemical NO and NO 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_2 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_x sources. Nutrient Cycling in Agroecosystems 48: 51—60

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_2 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_2 assimilation in leaves of C3 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 CH4 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 P schl 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_x 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 Vorosmarty 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_x 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, Eca 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_x emissions and NOy 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_x 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_2 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, 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, L tkemeier 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 Meteorology94(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 (VOC) 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, H meri K, Aalto PP, Mäkel JM, Pirjola L, Nilsson ED, Buzorius G and Rannik (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 , 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 andTurbulence, Long Beach, CA, American Meteorological Society, Boston, MA. pp56—57

Lloyd J and Farquhar GD (1996). The CO_2 dependence of photosynthesis, plant growth responses to elevated atmospheric CO_2 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, KelliherFM, 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_2 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, Tchebakova 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). Dissolvedorganic 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, Ser a 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, H meri 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, Leaitch R, Murphy D, Nganga J, Pitari G et al. (2001). Aerosols, their direct and indirect effects. In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, NoguerM, 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, P pin 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 Qu r 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

Priem 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 , 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:10.1029/203JD003542

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-Ducoudr 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_2. 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 HJI, 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

Rotstayn 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, J ger 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_2O 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 Singsaas EL (1995). Why plants emit isoprene. Nature 374:769

Smith KA, Dobbie KE, Ball BC, Bakken LR, Sitaula BK, Hansen S, BrummeR, Borken W, Christensen S, Priem A, Fowler D, Macdonald JA, Skiba U, Klemedtsson L, Kasimir-Klemedtsson 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 andImplementation Strategy. IGBP Report 50. IGBP Secretariat, Stockholm. 88pp

Spanke J, Rannik , 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_2) 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, Zolotukhine D, Lawton KA, Tchebakova N, Francey RJ, Arneth 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 K llberg 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: 21—24

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

缩略词表

ACIA	Arctic Climate Impact Assessment 北极气候影响评估
AICI	Air-Ice Chemistry Interaction 空气—冰化学相互作用
AIMES	Analysis, Integration and Modelling of the Earth System 地球系统分析、集成与模拟
AMMA	African Monsoon Multidisciplinary Analysis 非洲季风多学科研究计划
APN	Asia-Pacific Network for Global Change Research 全球变化亚太地区研究网络
BAHC	Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle 水循环的生物学方面计划
CBL	convective boundary layer 对流边界层
CCMLP	Carbon Cycle Model Linkage Project 碳循环模型连接计划
CCN	cloud condensation nuclei 云凝结核
CliC	Climate and Cryosphere 气候与冰冻圈计划
DGVM	dynamic global vegetation model 全球植被动力模型
ENSO	El Niño-Southern Oscillation 厄尔尼诺—南方涛动
ESSP	Earth System Science Partnership 地球系统科学联盟
GABLS	Global Atmospheric Boundary Layer Study 全球大气边界层研究
GCP	Global Carbon Project 全球碳计划
GCTE	Global Change and Terrestrial Ecosystems 全球变化和陆地生态系统

GEIA	Global Emissions Inventory Activity 全球排放清单活动
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment 全球能量与水循环实验
GLASS	Global Land-Atmosphere System Study 全球陆地/大气系统研究
GLP	Global Land Project 全球土地计划
GOFC	Global Observation of Forest Cover 全球森林覆盖观测计划
GOLD	Global Observation of Land Cover Dynamics 土地覆盖动力学全球观测
GTOS	Global Terrestrial Observing System 全球陆地观测系统
GWSP	Global Water System Project 全球水系统计划
IAI	Inter-America Institute for Global Change Research 泛美全球变化研究所
ICSU	International Council for Science 国际科学理事会
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry 国际全球大气化学
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme 国际地圈生物圈计划
iLEAPS	Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study 陆地生态系统—大气过程集成研究
IPCC	Inter-governmental Panel on Climate Change 政府间气候变化专门委员会
IPO	International Project Office 国际项目办公室
IRS	integrated regional study 区域集成研究
ISLSCP	International Satellite Land Surface Climatology Project 国际卫星陆面气候学计划
LBA	Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia 亚马孙大尺度生物圈—大气圈实验
PAGES	Past Global Changes 过去全球变化

PBL	planetary boundary layer 行星边界层
SOLAS	Surface Ocean-Lower Atmosphere Study 上层海洋—低层大气研究
SSC	Scientific Steering Committee 科学指导委员会
START	Global Change System for Analysis, Research and Training 全球变化的分析、研究和培训系统
UAV	unmanned aerial vehicle 无人驾驶飞机
VOC	volatile organic compound 挥发性有机化合物
WCRP	World Climate Research Programme 世界气候研究计划
WGCM	Working Group on Coupled Modelling 耦合模型工作组

iLEAPS

陆地生态系统—大气过程集成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

ICSU：www.icsu.org

责任编辑：李太宇
章澄昌

ISBN 7-5029-4209-2

ISBN 7-5029-4209-2/P·1545
定价：20.00元