

毛慧琴, 延晓冬, 熊喆. 2011. 土地利用变化对气候影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 513-524. Mao Huiqin, Yan Xiaodong, Xiong Zhe. 2011. An overview of impacts of land use change on climate [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 513-524.

土地利用变化对气候影响的研究进展

毛慧琴^{1,2,3} 延晓冬¹ 熊喆¹

1 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094

摘要 为满足人类对食物、纤维、水和居住地的需求, 全球土地利用格局发生了巨大的变化, IPCC 第四次评估报告 (IPCC, 2007) 指出土地利用变化是人类影响气候的重要强迫之一。土地利用变化对气候的影响分为生物地球物理作用和生物地球化学作用。分别对有关生物地球物理作用和生物地球化学作用的研究进展以及研究热点进行了综述; 并从定量评估两者对气候影响的相对贡献以及两者共同效应的角度, 回顾了辐射强迫计算和耦合模式数值模拟两种方法的研究进展, 及其在森林恢复、人工造林以及碳封存等气候变化应对措施可行性评估中的应用。最后分析和展望了当前土地利用变化对气候影响相关研究中的不确定性以及未来发展方向。

关键词 土地利用变化 生物地球物理作用 生物地球化学作用 模拟

文章编号 1006-9585 (2011) 04-0513-12 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

An Overview of Impacts of Land Use Change on Climate

MAO Huiqin^{1,2,3}, YAN Xiaodong¹, and XIONG Zhe¹

1 *Key Laboratory of Regional Climate - Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094*

Abstract Worldwide land use changes are being driven by the demand of food, fiber, water, and shelter to more than six billion people. Land use change is becoming an important anthropogenic forcing of global climate system as referred by IPCC AR4 (IPCC, 2007). The impacts of land use change on climate system can be divided into two major processes, that is biogeophysical and biogeochemical. The authors reviewed relative researches and hot topics on the two processes, respectively, and introduced two methodologies of assessing the relative importance for the two processes, one is to calculate their radiative forcing, the other is to use the couple model to simulate the two processes at the same time. These two methodologies were applied to access the policy of climate change such as afforestation, reforestation, and carbon sequestration. The uncertainties and further research topics were also discussed.

Key words land use change, biogeophysical effect, biogeochemical effect, simulation

收稿日期 2009-10-12 收到, 2011-05-05 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2006CB400500、2010CB950903, 国家自然科学基金项目 40675048

作者简介 毛慧琴, 女, 1974 年出生, 博士, 主要从事全球变化与区域气候模拟研究。E-mail: maohq@tea.ac.cn

通讯作者 延晓冬, E-mail: yxd@tea.ac.cn

1 引言

在 IPCC 第四次评估报告中, 科学家们一致认为人类“很可能”是气候变暖的主要原因(90%以上可能性)(IPCC, 2007)。人类活动影响气候的途径主要有两种: 化石燃料的燃烧和土地利用变化。化石燃料燃烧使得大气中温室气体浓度增加进而导致全球变暖已取得科学界和公众的共识。人类土地利用变化对全球、区域以及局地的影响问题也日益引起人们的重视, 如美国 NASA 土地利用/覆盖变化研究项目, 国际地圈-生物圈联盟(International Geosphere - Biosphere Program, IGBP) 设立土地利用/覆盖变化研究专项。为满足全球 60 亿人口对食物、纤维、水和住所的需求, 世界范围内森林、农田、水域发生了巨大的变化。如过去 300 年, 由于农田扩张, 木材砍伐, 世界的森林面积损失了约 $7 \times 10^6 \sim 11 \times 10^6 \text{ km}^2$; 过去 40 年内, 灌溉农田面积增加了约 70% (Foley, 2005); 由于人口、工业和农业用水, 使得河流径流量迅速减少, 在半干旱地区甚至出现河流断流, 水资源条件恶化。因此, 土地利用变化问题由环境问题日益上升为生境问题乃至人类的生存问题。人类对自然资源的无限需求和自然生态系统的有限承载力使得人类陷入两难的境地。如何实现“有序人类活动”(叶笃正等, 2001)是当今人类面临的重要挑战。科学地评估和预测土地利用变化对气候的影响, 为政府机构提供决策依据、决策理论和决策建议, 具有重要的社会意义。

土地利用变化如何影响气候? 土地利用变化对气候产生怎样的影响? 如何定量评估土地利用变化对气候的影响? 围绕这些问题国内外学者展开了广泛深入的研究。关于土地利用变化对气候的影响研究最早可以追溯到 20 世纪 70 年代 Charney (1975)、Charney et al. (1977) 关于地表反照率变化与撒哈拉地区干旱机制之间的研究, 之后出现大量关于地表物理特征参数(如地表反照率、地面粗糙度、叶面积指数、土壤湿度等)单一因子对气候(气温、降水以及大气环流等)的影响研究, 以及后来在气候模式中同时改变多个地表参数的模拟研究。到了 80 年代, 人们认识到土地

利用不仅可以通过改变地表物理特性影响气候, 还可以通过温室气体的排放影响气候(Houghton et al., 1983), 之后涌现关于土地利用对碳循环的影响研究, 土地利用变化对气候的影响不仅仅是一个简单的生物地球物理过程, 还是生物地球化学过程(Brovkin et al., 1999)。20 世纪 90 年代, 以全球变暖为主要特征的全球气候变化引起国际社会的广泛关注, 气候变暖的监测和归因以及如何应对全球变化使得定量评估导致气候变化的各因子的相对贡献显得尤其重要。土地利用变化是起增暖作用还是冷却作用? 相对化石燃料的燃烧, 由土地利用变化引起的温室气体排放的相对贡献如何? 影响气候的各因子的“辐射强迫”计算是定量评估的有效手段(IPCC, 2007)。由于辐射强迫概念的局限性, 目前评估和预测土地利用变化对气候的影响主要采用气候、碳循环过程耦合的耦合模式进行模拟。本文围绕土地利用变化的生物地球物理作用、生物地球化学作用以及两者的相对贡献定量评估的相关研究成果进行较为全面的介绍和评述, 讨论研究中存在的不确定性今后的发展方向。

2 土地利用变化对气候的生物地球物理作用

大气圈与陆地、海洋或冰盖之间通过交换水分、能量和动量相互作用, 地表和大气之间的任何通量发生变化都会剧烈影响大气热力状况和大气环流。土地利用变化通过改变地表物理特性(如地表反照率、地表粗糙度以及蒸散)引起地表通量发生变化, 进而影响气候的过程称之为生物地球物理作用。土地利用变化对气候的生物地球物理作用其机制十分复杂(Foley et al., 2003; Kabat et al., 2004), 如水循环过程和辐射过程对地表气温的影响往往具有相反的作用(Brovkin et al., 1999; Betts, 2001)。目前, 土地利用变化的生物地球物理作用的研究方法主要采用数值模拟的方法。

2.1 模拟研究概述

土地利用变化的生物地球物理作用的模拟研究采用的模式主要包括大气环流模式, 大气-陆地-海洋耦合气候模式、中等复杂程度地球系统

模式、区域气候模式。

早期的研究多采用大气环流模式，用强迫—响应方法进行敏感性试验 (Pielke et al., 1998)，即用地表特性参数 (如反照率、粗糙度、蒸散等) 的变化来表征土地利用的变化，先采用大气环流模式进行控制实验，然后改变模式中的地表特性参数化进行模拟与对照试验进行对比分析得到气候对土地利用变化的响应。Charney (1975) 最早采用此方法研究了地表反照率与撒哈拉沙漠干旱化的正反馈机制。之后许多研究采用此方法研究了气候对蒸散 (Shukla and Mintz, 1982)、地表粗糙度 (Sud and Smith, 1985)、气孔导度 (Henderson-Sellers et al., 1995)、叶面积指数 (Chase et al., 1996) 等地表特性参数的响应。

土地利用变化对气候的影响，其关键过程是陆面—大气之间的相互作用，陆面过程参数化尤为重要 (Xue et al., 2004)。随着陆面过程参数化方案 (如 NCAR LSM、BATS1e、SiB2) 的发展，大气和陆面过程相耦合的气候模式进一步发展；现实土地利用资料与历史土地利用资料 (或潜在自然植被) 的对比研究逐渐取代单个参数的敏感性试验。随后人们采用混合层海洋模式或海洋—大气双向耦合模式代替海温固定的海气相互作用方案，探索了海洋对土地覆盖变化的响应和反馈 (Delire et al., 2001; Zhao et al., 2001; Voldoire and Royer, 2005)，发现土地利用变化可以影响临近地区海温，进而影响其他地区的气候。这样，大气—陆面—海洋充分耦合的气候模式逐步应用在土地利用变化的影响研究之中 (Feddemma et al., 2005; Bala et al., 2007)。

在耦合气候模式的发展和应用过程中，中等复杂程度地球系统模式 (Earth system Models of Intermediate Complexity, EMICs) (尹崇华等, 2007) 由于采用参数化的方法极大地简化了气候中诸多的过程及反馈，涵盖了地球系统几乎所有组分 (大气、海洋、生物圈、冰盖)，对气候中存在的各个动力过程及反馈都进行了全面的描述，其中动态植被模块的集成，EMICs 可以研究考虑了植被和气候之间的瞬时响应以及植被地理分布的变化对气候的影响。因此很多研究者采用 EMICs 进行百年、千年时间尺度的历史土地利用变化试验 (Brovkin et al., 1999, 2004, 2006;

Bertrand et al., 2002; Sitch et al., 2005; 石正国等, 2007)。

相对于土地利用变化对全球气候的影响，人们更关注区域和局地气候的响应。不论大气—陆面—海洋充分耦合的气候模式，还是中等复杂程度的地球系统模式，研究区域、局地尺度问题其分辨率都太低。在近十几年来，高分辨率的区域气候模式 (如 RegCM2、RegCM3、RAMS、RI-EMS、RegCM-NCC 和 IPCR-RegCM 等) 在区域土地利用变化研究中得到广泛的应用，有敏感性试验，如荒漠化试验 (吕世华和陈玉春, 1999; 郑益群等, 2002)、热带森林砍伐试验 (Moore et al., 2007)、植被恢复试验 (符淙斌和袁慧玲, 2001) 等；也有利用现实的土地利用资料与潜在自然植被进行对比分析，研究土地利用变化对区域气温 (Kueppers et al., 2007)、降水 (Douglas et al., 2009)、极端气候事件 (Suh and Lee, 2004) 以及季风环流 (Fu, 2003; Sen et al., 2004) 等的影响；以及土地利用变化对国家尺度上的区域基本气候特征的影响 (Copeland et al., 1996; Pan et al., 1999; 丁一汇等, 2005; 高学杰等, 2007; 宋帅等, 2008; Diffenbaugh, 2009)。

2.2 森林覆盖的变化

全球森林覆盖约 $42 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占全球陆地面积的 30%，森林覆盖通过生物地球物理作用对气候有着重要影响 (Bonan, 2008)，森林相对于草地或农田，反照率低，吸收的太阳短波辐射多。此外，森林生长季节比草本植物的蒸腾作用更为旺盛，释放更多的潜热。森林覆盖的变化会引起反照率和水循环的变化，从而引起气候变化，如森林砍伐，反照率增加，对环境起着降温作用，但是森林砍伐导致蒸腾作用减少，对环境是增温作用，不同纬度森林砍伐活动，两者所引起的气候变化是不同的。

热带森林砍伐的数值模拟试验表明，热带森林维持高的蒸散率，较低的反照率，若热带雨林替换成草地或农田，蒸散作用使得局地或区域降水、蒸散减少，地表温度升高。最典型的是亚马逊地区 (Henderson-Sellers and Gornitz, 1984; Dickinson and Henderson-Sellers, 1988; Eltahir and Bras, 1993; Lean and Rowntree, 1993; Da

Rocha et al., 1996; Costa and Foley, 2000; Gedney and Valdes, 2000; Werth and Avissar, 2002; Moore et al., 2007)、热带非洲地区 (Xue et al., 1990; Zheng and Eltahir, 1997, 1998; Semazzi and Song, 2001; Werth and Avissar, 2005a)、东南亚地区 (Mabuchi et al., 2005a, 2005b; Werth and Avissar, 2005b) 以及整个热带区域 (Sud et al., 1996; Zhang et al., 1996a, 1996b; Avissar and Werth, 2005; Findell and Knutson, 2006) 的森林砍伐数值模拟分析也得到相似的结论。热带森林砍伐不仅影响当地的气候, 还可以影响其他地区的气候, 如热带森林砍伐可能导致异常 Rossby 波发展, 通过遥相关对高纬地区气候产生影响 (Chase et al., 2000), 热带地区对流模态的变化会影响 Hadley 环流和 Walker 环流的位置和强度的变化, 因而可以将热带地区的气候扰动传播到中纬度地区 (Delire et al., 2001; Zhao et al., 2001; Voltaire and Royer, 2004); 此外, 热带森林砍伐可以影响临近海洋的海温变化, 进一步加强遥相关作用 (Avissar and Werth, 2005; Neelin and Su, 2005; Voltaire and Royer, 2005)。

高纬地区森林砍伐对气候的影响与热带地区明显不同, 北方森林主要通过改变地表辐射的能量收支影响气候, 其反照率作用要强于植被蒸散的作用, 因此北方森林砍伐导致区域气温降低 (Bonan et al., 1992; Brovkin et al., 1999; Govindasamy et al., 2000)。

温带森林在地理上位于热带森林和北方森林的纬度带之间, 由于其地理位置的独特性, 温带森林砍伐对气候的影响具有很大的不确定性 (Bonan, 1999, 2008), Bonan (1999) 研究了美国温带森林替换成农田对气候的影响发现, 温带森林砍伐使美国中部和东部 (100°W 以东地区) 年平均气温降低 $0.6\sim 1^{\circ}\text{C}$; Snyder et al. (2004) 认为温带森林砍伐对气候的影响取决于季节, 冬春季雪盖森林反照率高, 森林砍伐对气候的影响类似于北方森林砍伐的降温作用; 夏季则与热带森林砍伐的作用相似; 全球温带森林砍伐模拟结果为: 冬季和春季分别降温 1.9°C 、 1.3°C , 夏季和秋季分别增温 1.3°C 、 0.2°C , 年平均降温 0.8°C 。

2.3 农田管理

为了满足世界人口对粮食的需求, 农田面积日益增长, 1700~1992年, 全球共有 11.4×10^6 km^2 的森林转化为农田 (Ramankutty and Foley, 1999)。上述森林砍伐模拟结果表明, 农田扩张会对区域以及全球气候产生影响。目前, 人们更为关注农田管理对气候的影响, 如农田灌溉、免耕制度、作物轮作等, 其中关于农田灌溉的影响研究最多。过去 200 年, 灌溉农田面积扩张迅速, 1800 年, 全球灌溉农田的面积约为 8×10^6 ha, 1900 年增加至 4×10^7 ha, 2000 年为 2.7 亿 ha (Kueppers et al., 2007)。全球农田灌溉用水占整个人类用水的 70% (Douglas et al., 2009)。

在全球尺度上, 全球气候模式的模拟结果 (Sacks et al., 2009) 表明农田灌溉对全球年平均温度的影响基本可以忽略, 但是在区域上降温作用明显; 农田灌溉每年向大气输送的水汽通量 (包括蒸发和蒸腾) 为 2600 km^3 , 是全球农田灌溉用水 (约为 1200 km^3) 的两倍, 与全球因森林砍伐作用减少的水汽通量 (3000 km^3) 量级相当 (Gordon et al., 2005)。农田灌溉和森林砍伐的共同作用促进大气中的水汽在全球尺度的重新分配, 可见灌溉在全球水循环中的重要作用, 在气候预测的气候模式中考考虑农田灌溉的影响十分必要。

区域尺度的农田灌溉研究表明: 1) 中国、印度、巴基斯坦、泰国, 北美以及咸海流域是主要的农田灌溉区 (Kueppers et al., 2007)。2) 农田灌溉使得区域大气中水汽含量明显增加, 在适当的天气条件下, 可以使得区域降水增加 (Barnston and Schickedanz, 1984; Segal et al., 1998; Boucher et al., 2004; Douglas et al., 2006)。3) 农田灌溉对区域起降温作用 (Adegoke et al., 2003; Haddeland et al., 2006; Lobell et al., 2006; Kueppers et al., 2007; Diffenbaugh, 2009; Douglas et al., 2009), 且使得日较差减少 (Lobell and Bonfils, 2008)。降温的主要机制为: 农田灌溉主要通过潜热和感热的重新分配影响气候。灌溉农田面积增加, 潜热通量增加, 感热通量减少。潜热增加导致云覆盖增加, 地表净辐射减少。4) 降温作用有明显的季节变率, 干季降温较大, 雨季降温不明显 (Kueppers et al., 2008);

降温作用存在明显的区域差异 (Lobell et al., 2009)。灌溉农田的面积不同, 模拟研究中对照试验的土壤湿度不同, 云对灌溉的响应特性不同, 是造成区域气候响应差异的主要原因。5) 部分地区 (如北美加州地区、印度西北和中国东北地区) 的农田灌溉冷却效应和温室气体增加的增温效应量级相当 (Kueppers et al., 2007), 对气候变暖起缓解作用。根据土地利用变化预测, 这些地区灌溉农田面积在未来几十年内有减少趋势, 这将导致增暖加剧。

3 土地利用变化对气候的生物地球化学作用

土地利用变化通过向大气排放或吸收 CO₂ 等温室气体改变大气中温室气体的浓度进而影响气候 (Pielke et al., 2002)。因此土地利用变化的生物地球化学作用最直接最主要的影响是对碳循环的影响。土地利用变化以何种形式影响碳循环? 土地利用变化引起的碳通量变化是何种量级? 在土地利用变化对碳循环影响的研究中还存在什么问题? 这些问题是相关领域研究最关心的问题。

3.1 土地利用变化对碳循环的影响途径

森林砍伐、人工造林和森林恢复以及农业活动是土地利用变化对碳循环影响的主要途径。

关于土地利用变化对碳循环的影响, 研究得最多的是森林砍伐活动, 尤其是热带森林砍伐。自 1850 年以来, 全球森林面积减少 20%, 森林砍伐导致的碳排放占土地利用变化碳排放的 90% (Houghton, 1999), 在全球碳收支中, 森林砍伐引起的碳排放占人为碳排放 (包括化石燃料燃烧和土地利用变化) 的 33% (IPCC, 2007)。

在全球变暖的背景下, 碳封存 (carbon sequestration) 成为减缓气候变化的应对措施之一, 人工造林和森林恢复对碳循环的影响也逐渐成为研究热点。在全球尺度上, 尽管人工造林尚未对陆地碳汇造成影响, 但在区域尺度上, 却存在区域碳汇, 如中国地区自 20 世纪 70 年代以来人工造林封存了 0.45 Gt(C) (Fang et al., 2001)。人工造林对碳循环的主要作用并非直接作用而是其滞后效应。一些研究表明森林恢复是土地利用碳汇的主要因子 (Pacala et al., 2001; Schimel et

al., 2001; Hurtt et al., 2002), 全球尺度上, 20 世纪随着农业和林业的集约化管理, 中纬度森林面积呈增加趋势, 区域尺度的相关研究表明中纬度森林恢复是一个很强的碳汇。

农业活动对碳循环也有显著的影响, 自然植被退化成农田, 植物生物量损失, 土壤有机物分解增强, 成为 CO₂ 的主要来源。反之, 由于高产品种和化肥的使用, 农业灌溉、残根管理以及免耕制度可以在农业管理区域减少碳的损失、加强对碳的吸收 (Cole et al., 1996), 如美国农业的免耕制度使得土壤有机物含量增加, 在过去 30 年存储了 1.4 Gt(C)。然而, 土壤有机物的逐年增加只能维持 50~100 年, 之后系统将达到一个新的平衡 (Smith et al., 1997); 而且, 现代的免耕方式通常要大量使用依赖化石燃料的化肥和农药, 这会抵消土壤封存碳的能力。

3.2 土地利用变化引起的碳排放的估算

在碳循环研究中, 一个重要的科学问题是回答区域或全球的碳源和碳汇的大小、分布及其变化。在全球碳平衡的计算中, 土地利用变化是估算陆地生态系统碳源和碳汇中最不确定因素 (King et al., 1995; Levy et al., 2004)。对 20 世纪 90 年代的碳平衡估算发现, 10 年期间全球每年大约有 2.9 Pg(C) 的“碳失汇” (Cole et al., 1996), 由于海洋碳汇较小 [约为 2.0 Pg(C)], 不确定性也很小 (Siegenthaler and Oeschger, 1978), 因此, 全球碳汇的增加大部分存在于不确定性很大的陆地生态系统中 (Tans et al., 1990)。这些“失汇”被认为可能来源于植物生长量的增加或土壤碳储存增加, 而土地利用变化无疑是影响植物生长和土壤碳储存量的主要原因之一 (Canadell, 2002)。

目前, 对土地利用变化造成生态系统碳循环变化的研究主要以模型模拟为主, 碳循环模型有簿记法模型 (book-keeping) 和生态系统过程模型 (如 TEM、HRBM、LPJ 以及 IBIS)。Houghton (2003) 利用世界粮农组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 以及其他来源的土地利用变化数据, 驱动簿记法碳循环模型, 估计出全球 20 世纪 80 年代由于土地利用变化排放的碳为 $2.0 \pm 0.8 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}(\text{C})$, 90 年代为 $2.2 \pm 0.8 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}(\text{C})$; Fearnside (2000) 也采用 FAO 的土地利用变化数据

驱动簿记法模型估算出 20 世纪 80 年代热带地区土地利用变化引起的碳排放为 $2.4 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 。McGuire et al. (2001) 和碳循环模式联合计划 (Carbon Cycle Model Linkage Project, CCMLP) 基于历史土地利用数据, 利用 4 个过程驱动的陆地碳循环模型 (TEM、HRBM、LPJ 和 IBIS) 估计出全球农业活动引起的碳排放为 $0.6 \sim 1.0 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 。此外, DeFries et al. (2002) 利用 1980 ~ 2000 年 AVHRR 卫星遥感资料驱动簿记法碳模型, 估算出 20 世纪 80 年代和 90 年代热带地区陆地利用变化引起的碳通量分别为 $0.6 (0.3 \sim 0.8) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 和 $0.9 (0.5 \sim 1.4) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 。Achard et al. (2008) 利用 Landsat TM 遥感资料估算出 90 年代热带地区土地利用碳通量为 $1.1 \pm 0.3 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 。IPCC 第四次评估报告 (IPCC, 2007) 采用了 Houghton (2003) 和 DeFries et al. (2002) 的平均值, 并给出更大不确定性区间, 即 20 世纪 80 年代为 $1.4 (0.4 \sim 2.3) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$, 90 年代为 $1.6 (0.5 \sim 2.7) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$ 。

很明显, 不同的研究者给出的估计结果差别较大, 目前关于土地利用变化引起的碳排放估计仍然存在着很大的不确定性 (Ramankutty et al., 2007), 这些不确定性包括: 1) 由于历史资料匮乏, 历史土地利用变化的评估十分困难。2) 历史土地利用变化形式多样, 很难确定局地土地利用变化的具体方式, 如森林砍伐是用于农田还是用于木材利用? 而不同的土地利用形式对碳循环的影响是不同的; 3) 历史土地利用变化碳排放估计方法不同导致估计的结果差异很大。如 Houghton (2003) 和 Fearnside (2000) 的对历史土地利用变化碳排放估计中忽略了大气中的 CO_2 、气候和陆地碳动态过程三者之间相互反馈机制, 估计结果明显偏高; 而 DeFries et al. (2002) 和 Achard et al. (2008) 利用卫星遥感技术, 森林砍伐区域面积要小, 从而估计出低的碳排放。4) 用于估算土地利用碳排放的模型所包含的过程以及模型假设的差异也会直接影响估算结果。

针对如上的不确定性, 为了对土地利用变化引起的碳排放估计的相关研究之间有可比性, Jelle et al. (2009) 认为, 在土地利用变化引起的碳通量估算中需遵循的 3 个标准: 1) 全面考虑森林砍伐过程中以及森林砍伐后陆地覆盖的动态过程

(包括土壤碳的作用); 2) 考虑几十至百年时间尺度的历史土地利用变化。3) 准确估计森林砍伐清除的碳的最终去处及其量值 (fate of cleared carbon), 如燃烧、长时间后木材加工品的氧化等等。

4 生物地球物理作用和生物地球化学作用的共同影响研究

土地利用变化对气候的影响既然是生物地球物理作用和地球物理化学作用的共同作用, 那么在全球、区域以及局地尺度上, 两者的相对贡献如何? 谁起着主导作用? 在很长一段时间内, 由于认识的局限性, 以及学科交叉和合作的缺乏, 土地利用变化对气候的生物地球物理作用和生物地球化学作用研究在各自的研究领域独立进行, 两者的共同影响及相对贡献研究很少。

20 世纪 90 年代以来, 在全球变暖的背景下, 气候变暖的监测和归因以及如何应对全球变化使得定量评估导致气候变化的各因子的相对贡献显得尤其重要。土地利用变化是起增暖作用还是冷却作用? 相对化石燃料的燃烧, 由土地利用变化引起的温室气体排放的相对贡献如何? 关于土地利用变化的生物地球物理作用和生物地球化学的共同效应研究旨在解决这些问题。目前关于两者共同效应的研究集中表现在两个方面: 1) 从辐射平衡的角度, 研究两者对大气辐射强迫的大小; 2) 包含生物地球物理过程和生物地球化学过程的耦合模式的综合模拟。

4.1 辐射强迫计算

“辐射强迫”这一概念是定量评估导致全球气候变化众多机制相对重要贡献的指示器 (Betts et al., 2007)。土地利用变化引起的辐射强迫的变化分为两类, 一是土地利用变化通过碳存储或释放碳, 改变大气中温室气体以及气溶胶粒子的浓度进而影响长波辐射, 是生物地球化学过程; 二是地表反照率的变化, 改变地表对太阳短波辐射的收支, 称之为反照率辐射强迫 (IPCC, 2007), 是生物地球物理过程。通过比较两者的相对大小, 即可以定量评估出它们的相对贡献。前者辐射强迫的计算一般采用 Betts (2000) 的方法: 首先估算土地利用变化引起的碳通量变化; 然后根据陆地生态系统碳储量的变化值得出大气中 CO_2 浓度

的变化值；最后根据 CO_2 浓度的变化与辐射强迫之间的关系式计算出辐射强迫。因此关键在于估算土地利用变化引起的碳储量的变化。

关于土地利用变化改变地表反照率影响辐射平衡的研究很多，如 Brovkin et al. (2006) 利用 6 个中等复杂程度地球系统模式估算出相对 1700 年的辐射强迫为 $-0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，Hansen et al. (2005) 利用全球气候模式 GISS 计算出相对 1750 年的辐射强迫为 $-0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，两者的研究中土地利用变化都仅仅考虑农田面积的变化；Betts et al. (2007) 同时考虑农田和牧场草地面积的变化，采用 HadAM3 大气环流模式模拟得出相对于 1750 年土地利用变化的辐射强迫为 $-0.18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，相对潜在植被为 $-0.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；IPCC 第四次评估报告 (IPCC, 2007) 给出相对于 1750 年土地利用变化反照率辐射强迫全球平均值为 $-0.2 \pm 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，为中—低置信水平。

通过比较土地利用变化引起的两种辐射强迫的净作用，Betts et al. (2007, 2008) 的研究发现温带和北方地区的人工造林的缓减气候变化的措施会加剧气候变化，因为反照率辐射强迫的增温作用强于碳封存辐射强迫的降温作用。IPCC (2007) 报告中指出：相对于 1750 年，大气中温室气体 CO_2 增加导致的辐射强迫全球平均值为 $+1.66 \pm 0.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其中 1/3 的强迫为土地利用变化。

迄今为止，“辐射强迫”概念一直是定量比较土地利用变化与其他影响气候的因子（如温室气体排放）的有效工具。但也一直受到科学家们的质疑，Hansen et al. (2005)、Kleidon (2006) 认为，辐射强迫的概念只强调了土地利用变化对辐射平衡的影响，事实上土地利用变化（尤其是热带地区）还可能引起地表热通量、水汽通量以及动量通量的改变；此外，由于辐射强迫在空间分布上存在很大的差异，不同地区的辐射强迫符号是相反的，辐射强迫的空间平均并不能准确描述土地利用变化对气候的影响。

4.2 耦合模式的综合模拟

耦合了气候、碳循环、动态植被过程的模式同时考虑了生物物理过程和生物化学过程，因此耦合模式成为研究土地利用变化影响研究的重要工具。耦合模式包括中等复杂程度地球系统模式

(EMICs) 和全球气候模式。

中等复杂程度气候系统模式应用较广泛 (Claussen et al., 2001; Brovkin et al., 2004; Sitch et al., 2005)。Claussen et al. (2001) 采用大气—海洋—植被耦合的中等复杂程度地球系统模式 CLIMBER-2 进行了极端植被变化试验（即在潜在植被的基础上，森林全部砍伐或是在有植被的地方全部替换为森林），结果表明：热带森林砍伐 CO_2 的增温作用起主要作用，中纬度、高纬地区，生物地球物理过程（主要是雪—植被—反照率反馈以及海洋—冰—反照率的反馈过程）的降温作用超过碳循环的增温作用。在全球尺度上，森林砍伐的净作用为降温作用，森林种植为增温作用。由于敏感性试验不能代表真实的土地利用变化，Brovkin et al. (2004) 同样采用模式 CLIMBER-2，并利用历史土地利用重建资料模拟分析了过去 150 年土地利用变化在气候变化和 CO_2 浓度变化中的作用。结果表明：在全球尺度上，土地利用变化的生物地球物理作用和生物地球化学作用两者净效益基本可以忽略，但在温带和高纬地区，土地利用变化导致的地表反照率增加引起的降温作用超过了土地利用变化导致 CO_2 排放的增温作用。中等复杂程度地球系统模式的空间分辨率很低，如 CLIMBER 的大气模式的水平分辨率，纬向为 10° ，经向为 51° ，海洋模式和海冰模式的分辨率为 2.5° 。

近几年，随着高性能计算的发展，在全球尺度上，全球气候系统模式也逐步应用于评估土地利用变化对气候的影响，受分辨率的限制目前尚没有实现区域尺度的研究。如 Bala et al. (2007) 采用集成气候与碳模式 INCCA (INtegrated Climate and Carbon) 研究了大尺度森林砍伐的生物地球物理过程和生物地球化学过程的共同作用。INCCA 为陆地—大气—海洋充分耦合模式，考虑植被动态以及海洋碳循环过程，大气模式经向和纬向的分辨率为 2.8° ，海洋模式的水平分辨率为 $(2/3)^\circ$ 。模拟结果表明：在全球尺度上，由于反照率和蒸散的变化引起的冷却作用强于碳排放的增温作用，全球尺度的森林砍伐其净作用为冷却作用；热带地区的人工造林可以缓解全球尺度的气候变暖，而在温带地区人工造林却起到相反的作用。

在全球变暖的背景下,人类活动很可能是气候变暖的主要原因,采用预测的未来土地利用变化资料,预测和评估未来土地利用变化对未来气候的可能影响成为研究的热点。土地利用变化的预测一般基于 IPCC 社会和经济发展的排放情景(如 A1B、A2、B1 等),利用土地利用变化预测模型(如 IMAGE2.2)得到未来土地利用变化资料。如 Sitch et al. (2005) 研究了未来土地利用变化对大气中的 CO₂ 和气候的影响。他们采用集成评估模式 IMAGE2.2 的 4 个情景(A1B、A2、B1、B2) 下的土地利用变化预测数据,使用模式为中等复杂程度地球系统模式 CLIMBER-LPJ,即在 CLIMBER-2 的基础上,碳循环模式加入动态植被和植被地理学模块。结果表明:到 2100 年,A2 情景中未来热带地区生物地球化学过程的增温作用强于生物地球物理过程的冷却作用;B1 情景中北半球退耕还林的生物地球物理过程的增温作用明显。Schaeffer et al. (2006) 采用 IMAGE 的两个情景(A1、B1) 预测结果,结合陆地—大气—海洋—海冰耦合模式 ECBilt-CLIO 研究了热带外地区未来土地利用变化(为了发展生物燃料工业,农田退化转为种植生物燃料工业原材料),研究结果表明:热带外地区土地利用变化的生物地球物理作用和生物地球化学作用相当。

5 研究展望

土地利用变化对气候影响研究自 Charney (1975) 提出的撒哈拉干旱机制以来,人们的认识日益深入,从土地利用变化的生物地球物理作用的研究,到生物地球化学作用的研究以及两者的共同作用研究,土地利用变化的影响问题逐渐发展成一个天气气候学、生态学、遥感和社会学、经济学等多学科交叉的研究课题。在全球气候变暖的背景下,由于应对气候变化的政策本身是土地利用变化的驱动因子,评估和预测土地利用变化对气候的影响将会促进政府决策的科学化,因而更具有实际意义和社会价值。如人工造林、植被恢复等试图缓解气候变暖的政策,研究结果证明在热带地区是可行的,但在高纬度地区却使气候变暖加剧。

然而目前关于人类土地利用变化对气候影响

的研究结论尚存在很大的不确定性。主要原因有:

(1) 土地利用变化资料的不确定性。基于历史文献和估测模型的历史土地利用变化资料,其精度很难验证;现实土地利用/覆盖资料大都是卫星遥感产品,然而即便是最先进的卫星图像,也不是百分之百的准确。此外,在遥感图像处理中,分类方法、采样大小、分类中人为主观判断的差异等等因素都会给土地利用变化资料带来不确定性 (Ge et al., 2007)。未来土地利用变化的预测资料大多基于 IPCC 气候变化情景,其不确定性更大 (IPCC, 2007)。因此,土地利用变化格局的估测模型以及遥感数据的处理方法,尚待进一步发展和完善。同时可以利用多种土地利用变化资料进行对比研究。

(2) 模式的不确定性。由于大气圈和生物圈相互作用是高度非线性的,不论是气候模式还是碳循环模式陆面过程参数化十分困难。为了改善模式参数化过程,开展不同下垫面的长时间边界层协同观测十分必要。此外开展多模式的集合模拟可以消除各模式参数化方案带来的误差。

(3) 关于城市化过程的模拟研究较少。由于城市面积小,下垫面复杂参数化难度大;全球气候模式和区域气候模式普遍没有模拟城市化过程。事实上,城市化对局地气候有显著影响,如城市化产生了“城市热岛”,局地增温明显 (Arnfield, 2003),城市气溶胶对降水有显著影响 (Pielke et al., 2007)。随着社会经济的发展,城市人口将日益增多,城市的面积还会进一步扩张,城市化的气候效应也将日益突出。评估和预测城市化的影响是今后工作的主要方向之一。

(4) 耦合模式尚处在初级阶段。土地利用变化对气候的影响表现为生物地球物理作用和生物地球化学作用,在更长的长时间尺度上,还有植被地理分布变化引起的生物地理作用 (Pielke et al., 2002)。数值模拟是土地利用变化对气候影响研究的主要手段。完全耦合的中等复杂程度的地球系统模式尽管全面考虑了这些过程,但是其参数化过于简单,空间分辨率过低;全球气候系统模式为大气—海洋—陆地耦合模式,模式中陆面过程考虑了地表能量通量、水循环、碳循环和动态植被等过程 (Bonan, 2008),对计算机资源要求较高,很难模拟长时间尺度土地利用变化问

题; 受空间分辨率的限制, 不适合应用于区域或局地尺度; 区域气候模式目前较多应用于研究区域土地利用变化的生物地球物理作用, 模式没有考虑碳循环和动态植被过程, 海洋的作用一般也做简化处理。因此, 随着高性能计算机的发展, 开发充分耦合的高分辨率地球系统模式是土地利用变化影响研究的重要方向。

参考文献 (References)

- Achard F, Eva H D, Mayaux P, et al. 2008. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 18 (2), GB2008, doi: 10.1029/2003GB002142, 2004.
- Adegoke J O, Pielke R A, Eastman J, et al. 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (3): 556-564.
- Arnfield A J. 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island [J]. *Int. J. Climatol.*, 23 (1): 1-26.
- Avissar R, Werth D. 2005. Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation [J]. *J. Hydrometeorol.*, 6 (2): 134-145.
- Bala G, Caldeira K, Wickett M, et al. 2007. Combined climate and carbon-cycle effects of large scale deforestation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (16): 6550-6555.
- Barnston A G, Schickedanz P T. 1984. The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern Great Plains [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 23 (6): 865-888.
- Bertrand C, Loutre M F, Crucifix M, et al. 2002. Climate of the last millennium: A sensitivity study [J]. *Tellus A*, 54 (3): 221-244.
- Betts R A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo [J]. *Nature*, 408 (6809): 187-190.
- Betts R A. 2001. Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: Near-surface temperature change and radiative forcing [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2 (14): 39-51.
- Betts R A, Falloon P D, Goldewijk K K, et al. 2007. Biogeophysical effects of land use on climate: Model simulations of radiative forcing and large-scale temperature change [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142 (2-4): 216-233.
- Betts R A, Malhi Y, Roberts J T. 2008. The future of the Amazon: New perspectives from climate, ecosystem and social sciences [J]. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 363: 1729-1735.
- Bonan G B, Pollard D, Thompson S L. 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate [J]. *Nature*, 359 (6397): 716-718.
- Bonan G B. 1999. Frost followed the plow: Impacts of deforestation on the climate of the United States [J]. *Ecological Applications*, 9 (4): 1305-1315.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 320 (5882): 1444-1449.
- Boucher O, Myhre G, Myhre A. 2004. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate [J]. *Climate Dyn.*, 22 (6-7): 597-603.
- Brovkin V, Ganopolski A, Claussen M, et al. 1999. Modelling climate response to historical land cover change [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 8 (6): 509-517.
- Brovkin V, Sitch S, Von Bloh W, et al. 2004. Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years [J]. *Global Change Biology*, 10 (8): 1253-1266.
- Brovkin V, Claussen M, Driesschaert E, et al. 2006. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six earth system models of intermediate complexity [J]. *Climate Dyn.*, 26 (6): 587-600.
- Canadell J G. 2002. Land use effects on terrestrial carbon sources and sinks [J]. *Science in China (Ser. C)*, 45 (Suppl.): 1-9.
- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 (428): 193-202.
- Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (9): 1366-1385.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel T G F, et al. 1996. The sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D3): 7393-7408.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel S, et al. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter [J]. *Climate Dyn.*, 16 (2): 93-105.
- Claussen M, Brovkin V, Ganopolski A. 2001. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (6): 1011-1014.
- Cole C V, Cerri C, Minami K, et al. 1996. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions [M] // *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analyses*. Cambridge: Cambridge University Press, 745-771.
- Copeland J H, Pielke R A, Kittel T G F. 1996. Potential climatic impacts of vegetation change: A regional modeling study [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D3): 7409-7418.
- Costa M H, Foley J A. 2000. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia [J]. *J. Climate*, 13 (1): 18-34.

- Da Rocha H R, Nobre C A, Bonatti J P, et al. 1996. A vegetation-atmosphere interaction study for Amazonia deforestation using field data and a single column model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (531): 567-594.
- DeFries R S, Houghton R A, Hansen M C, et al. 2002. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 99 (22): 14256-14261.
- Delire C, Behling P, Coe M T, et al. 2001. Simulated response of the atmosphere-ocean system to deforestation in the Indonesian Archipelago [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (10): 2081-2084.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A. 1988. Modeling tropical deforestation—A study of GCM land-surface parametrizations [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114 (480): 439-462.
- Diffenbaugh N S. 2009. Influence of modern land cover on the climate of the United States [J]. *Climate Dyn.*, 33 (8): 945-958.
- 丁一汇, 李巧萍, 董文杰. 2005. 植被变化对中国区域气候影响的数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 63 (5): 613-621.
- Ding Yihui, Li Qiaoping, Dong Wenjie. 2005. A numerical study of the impacts of vegetation changes on regional climate in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (5): 613-621.
- Douglas E M, Niyogi D, Frolking S, et al. 2006. Changes in moisture and energy fluxes due to agricultural land use and irrigation in the Indian Monsoon Belt [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (14): L14403.
- Douglas E M, Beltran-Przekurat A, Niyogi D, et al. 2009. The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation—A mesoscale modeling perspective [J]. *Global and Planetary Change*, 67 (1-2): 117-128.
- Eltahir E A B, Bras R L. 1993. On the response of the tropical atmosphere to large-scale deforestation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119 (512): 779-793.
- Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 292 (5525): 2320-2322.
- Fearnside P M. 2000. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation [J]. *Climatic Change*, 46 (1): 115-158.
- Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates [J]. *Science*, 310 (5754): 1674-1678.
- Findell K L, Knutson T R. 2006. Weak simulated extratropical responses to complete tropical deforestation [J]. *J. Climate*, 19 (12): 2835-2850.
- Foley J A, Costa M H, Delire C, et al. 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate [J]. *Frontiers in Ecology and Environment*, 1 (1): 38-44.
- Foley J A. 2005. Global consequences of land [J]. *Science*, 309: 570-574.
- Fu C B. 2003. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon [J]. *Global Planetary Change*, 37 (3-4): 219-229.
- 符淙斌, 袁慧玲. 2001. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验 [J]. *科学通报*, 46 (8): 691-695.
- Fu Congbin, Yuan Huiling. 2001. A virtual numerical experiment to understand the impacts of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 46 (8): 691-695.
- 高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 2007. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟 [J]. *中国科学 (D辑)*, 37 (3): 397-404.
- Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. A numerical study of the impacts of reality land-use on regional climate in China [J]. *Science in China (Ser. D) (in Chinese)*, 37 (3): 397-404.
- Ge J J, Qi J G, Lofgren B M, et al. 2007. Impacts of land use/cover classification accuracy on regional climate simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D5): D05107.
- Gedney N, Valdes P J. 2000. The effect of Amazonian deforestation on the Northern Hemisphere circulation and climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (19): 3053-3056.
- Gordon L J, Steffen W, Jonsson B F, et al. 2005. Human modifications of global water vapor flows from the land surface [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (21): 7612-7617.
- Govindasamy B, Duffy P B, Caldeira K. 2000. Land use changes and Northern Hemisphere cooling [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2): 291-294.
- Haddeland I, Lettenmaier D P, Skaugen T. 2006. Effects of irrigation on the water and energy balances of the Colorado and Mekong river basins [J]. *J. Hydrol.*, 324 (1-4): 210-223.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. 2005. Efficacy of climate forcings [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D18): D18104.
- Henderson-Sellers A, Gornitz V. 1984. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation [J]. *Climatic Change*, 6 (3): 231-257.
- Henderson-Sellers A, McGuffie K, Gross C. 1995. Sensitivity of global climate model simulations to increased stomatal resistance and CO₂ increases [J]. *J. Climate*, 8 (7): 1738-1736.
- Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, et al. 1983. Change in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere [J]. *Ecological Monographs*, 53 (3): 235-262.
- Houghton R A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990 [J]. *Tellus B*, 51 (2): 298-313.
- Houghton R A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land ma-

- agement 1850–2000 [J]. *Tellus B*, 55 (2): 378–390.
- Hurtt G C, Pacala S W, Moorcroft P R, et al. 2002. Projecting the future of the U. S. carbon sink [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 (3): 1389–1394.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: The physical science basis* [M] // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996.
- Jelle G V, Goldewijk K K, Stehfest E, et al. 2009. The importance of three centuries of land-use change for the global and regional terrestrial carbon cycle [J]. *Climatic Change*, 97 (1): 123–144.
- Kabat P, Claussen M, Dirmeyer P A, et al. 2004. *Vegetation, water, humans and the climate: A new perspective on an interactive system* [M]. Berlin: Springer, 600.
- King A W, Emanuel W R, Wullschlegel S D. 1995. In search of the missing carbon sink: A model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO₂ [J]. *Tellus B*, 47 (4): 501–509.
- Kleidon A. 2006. The climate sensitivity to human appropriation of vegetation productivity and its thermodynamic characterization [J]. *Global Planetary Change*, 54 (1–2): 109–127.
- Kueppers L M, Snyder M A, Sloan L C. 2007. Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (3): L03703.
- Kueppers L M, Snyder M A, Sloan L C, et al. 2008. Seasonal temperature responses to land-use change in the western United States [J]. *Global and Planetary Change*, 60 (3): 250–264.
- Lean J, Rowntree P R. 1993. A GCM simulation of the impact of Amazonian deforestation on climate using an improved canopy representation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119 (511): 509–530.
- Levy P E, Friend A D, Wllite A, et al. 2004. The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems [J]. *Climate Change*, 67 (2): 185–209.
- Lobell D B, Bala G, Duffy P B. 2006. Biogeophysical impacts of cropland management changes on climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (6): L06708.
- Lobell D B, Bonfils C. 2008. The effect of irrigation on regional temperatures: A spatial and temporal analysis of trends in California, 1934–2002 [J]. *J. Climate*, 21 (10): 2063–2071.
- Lobell D, Bala G, Mirin A, et al. 2009. Regional differences in the influence of irrigation on climate [J]. *J. Climate*, 22 (8): 2248–2255.
- 吕世华, 陈玉春. 1999. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 18 (3): 416–424. Lü Shihua, Chen Yuchun. 1999. The influence of Northwest China afforestation on regional climate in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 8 (3): 416–424.
- Mabuchi K, Sato Y, Kida H. 2005a. Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region. Part I: Case of the Northern Hemisphere summer [J]. *J. Climate*, 18 (3): 410–428.
- Mabuchi K, Sato Y, Kida H. 2005b. Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region. Part II: Case of the Northern Hemisphere winter and impact on the extratropical circulation [J]. *J. Climate*, 18 (3): 429–446.
- McGuire A D, Sitch S, Clein J S, et al. 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the Twentieth Century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 15 (1): 183–206.
- Moore N, Arima E, Walker R, et al. 2007. Uncertainty and the changing hydroclimatology of the Amazon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (14): L14707.
- Neelin J D, Su H. 2005. Moist teleconnection mechanisms for the tropical South American and Atlantic sector [J]. *J. Climate*, 18 (18): 3928–3950.
- Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. 2001. Consistent land-and atmosphere-based US carbon sink estimates [J]. *Science*, 292 (5525): 2316–2320.
- Pan Z, Takle E, Segal M, et al. 1999. Simulation of potential impacts of man-made land cover change on U. S. summer climate under various synoptic regimes [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D6): 6515–6528.
- Pielke R A, Avissar R, Raupach M, et al. 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate [J]. *Global Change Biology*, 4 (5): 461–475.
- Pielke R A, Marland G, Betts R A, et al. 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 [J]. *Philos. trans. Roy. Soc. London*, 360 (1797): 1705–1719.
- Pielke R A, Adegoke J, Beltran-Przekurat A. 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall [J]. *Tellus B*, 59 (3): 587–601.
- Ramankutty N, Foley J A. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 13 (4): 997–1027.
- Ramankutty N, Gibbs H K, Achard F, et al. 2007. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation [J]. *Global Change Biology*, 13 (1): 51–66.
- Sacks W J, Cook B I, Buenning N. 2009. Effects of global irrigation on the near-surface climate [J]. *Climate Dyn.*, 33 (2): 159–175.
- Schaeffer M, Eickhout B, Hoogwijk M, et al. 2006. CO₂ and albedo climate impacts of extratropical carbon and biomass planta-

- tions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 20: GB2020.
- Shimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 414 (6860): 169-172.
- Segal M, Pan Z, Turner R W, et al. 1998. On the potential impact of irrigated areas in North America summer rainfall caused by large-scale systems [J]. *J. Appl. Meteor.*, 37 (3): 325-331.
- Semazzi F H M, Song Y. 2001. A GCM study of climate change induced by deforestation in Africa [J]. *Climate Res.*, 17 (2): 169-182.
- Sen O L, Wang Y Q, Wang B. 2004. Impact of indochina deforestation on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (6): 1366-1380.
- 石正国, 延晓冬, 尹崇华. 2007. 人类土地利用的历史变化对气候的影响 [J]. *科学通报*, 52 (12): 1436-1444. Shi Zhengguo, Yan Xiaodong, Yinconghua. 2007. Impacts of historical land-use on climate [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 52 (12): 1436-1444.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land surface evapotranspiration on the Earth's climate [J]. *Science*, 215 (4539): 1498-1501.
- Siegenthaler U, Oeschger H. 1978. Predicting future atmospheric carbon dioxide levels [J]. *Science*, 199 (4327): 388-395.
- Sitch S, Brovkin V, Von Bloh W, et al. 2005. Impacts of future land cover changes on atmospheric CO₂ and climate [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19 (2): GB2013.
- Smith P, Powlson D S, Glendinin M J, et al. 1997. Potential for carbon sequestration in European soils: Preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments [J]. *Global Change Biology*, 3 (1): 67-79.
- Snyder P K, Delire C, Foley J A. 2004. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate [J]. *Climate Dyn.*, 23 (3): 279-302.
- 宋帅, 鞠永茂, 王汉杰. 2008. 有序人类活动造成的土地利用变化对区域降水的可能影响 [J]. *气候与环境研究*, 13 (6): 759-774. Song Shuai, Ju Yongmao, Wang Hanjie. 2008. Possible impacts of land use change on regional rainfall associated with orderly human activities [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (6): 759-774.
- Sud Y C, Smith W E. 1985. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 33 (1): 15-49.
- Sud Y C, Walker G K, Kim J H, et al. 1996. Biogeophysical consequences of a tropical deforestation scenario: A GCM simulation study [J]. *J. Climate*, 9 (2): 3225-3247.
- Suh M S, Lee D K. 2004. Impacts of land use/cover changes on surface climate over east Asia for extreme climate cases using RegCM2 [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D2): D02108.
- Tans P, Fung I P, Takahashi T. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget [J]. *Science*, 247 (4949): 1431-1438.
- Voldoire A, Royer J F. 2004. Tropical deforestation and climate variability [J]. *Climate Dyn.*, 22 (8): 857-874.
- Voldoire A, Royer J F. 2005. Climate sensitivity to tropical land surface changes with coupled versus prescribed SSTs [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7): 843-862.
- Werth D, Avissar R. 2002. The local and global effects of Amazon deforestation [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20): 8087.
- Werth D, Avissar R. 2005a. The local and global effects of African deforestation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (12): L12704.
- Werth D, Avissar R. 2005b. The local and global effects of Southeast Asian deforestation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (20): L20702.
- Xue Y K, Liu K N, Kasahara A. 1990. Investigation of biogeophysical feedback on the African climate using a two dimensional model [J]. *J. Climate*, 3 (3): 337-352.
- Xue Y K, Juang H M H, Li W P, et al. 2004. Role of land surface processes in monsoon development: East Asia and West Africa [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D3): D03105.
- 叶笃正, 符淙斌, 季劲钧, 等. 2001. 有序人类活动与生存环境 [J]. *地球科学进展*, 16 (4): 454-460. Ye Duzheng, Fu Congbin, Ji Jinjun, et al. Orderly human activities and subsistence environment [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 16 (4): 454-460.
- 尹崇华, 延晓冬, 石正国. 2007. 近年来中等复杂程度地球系统模式的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 22 (3): 70-76. Yin Chonghua, Yan Xiaodong, Shi Zhengguo. 2007. Progress of the study on Earth system models of intermediate complexity in recent years [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 22 (3): 70-76.
- Zhang H, Henderson-Sellers A, McGuffie K. 1996a. Impacts of tropical deforestation. Part I: Process analysis of local climatic change [J]. *J. Climate*, 9 (7): 1497-1517.
- Zhang H, McGuffie K, Henderson-Sellers A. 1996b. Impacts of tropical deforestation. Part II: The role of large-scale dynamics [J]. *J. Climate*, 9 (10): 2498-2521.
- Zhao M, Pitman A J, Chase T. 2001. The impact of land cover change on the atmospheric circulation [J]. *Climate Dyn.*, 17 (5-6): 467-477.
- Zheng X Y, Eltahir E A B. 1997. The response to deforestation and desertification in a model of West African monsoons [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (2): 155-158.
- Zheng X Y, Eltahir E A B. 1998. The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons [J]. *J. Climate*, 11 (8): 2078-2096.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果 [J]. *气象学报*, 60 (1): 1-16. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2002. The effects of vegetation change on regional climate. I: Simulation results [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 1-16.