

邵璞, 曾晓东. 2012. 土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 103–111, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10029. Shao Pu, Zeng Xiaodong. 2012. Progress in the study of the effects of land use and Land cover change on the climate system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 103–111.

土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展

邵璞^{1,2} 曾晓东¹

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 土地利用和土地覆盖变化 (LUCC 或 LULCC) 不仅对人类赖以生存的地球环境有重要影响, 同时与人类福祉密切联系。人类活动对气候的强迫不仅包括温室气体排放导致的气候变暖, 还通过直接改变地表物理性状以及间接改变其他生物地球物理过程和生物地球化学过程等对气候系统产生深刻影响。作者在此认识的基础上回顾了 LUCC 对气候系统影响的研究历史, 结合新近的研究结果归纳了诸如森林砍伐、城市化、修坝等 LUCC 活动在区域和全球尺度的气候效应。LUCC 具有高度的空间异质性, 因此气候系统对它的反馈也具有明显的空间差异。由于全球平均后变化幅度相对区域上的小, LUCC 对区域气候影响显著, 而对全球气候影响不明显。它对区域气候的影响取决于反照率、蒸散发效率和地表粗糙率等变化的综合效应: 在热带地区 LUCC 主要引起温度升高, 在高纬度地区使温度下降。在全球尺度上 LUCC 导致气候的变暖主要通过减少蒸散发和潜热通量引起陆表水循环的改变, 其次通过改变地表反照率导致辐射强迫改变。最后指出目前 LUCC 在气候变化学科中的研究存在的问题。在此基础上提出了未来的研究首先需要评估的 3 个气候指标, 并倡导多学科间的相互合作。

关键词 土地利用 土地覆盖变化 气候系统 区域尺度 全球尺度

文章编号 1006-9585 (2012) 01-0103-09 **中图分类号** P461+.8 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10029

Progress in the Study of the Effects of Land Use and Land Cover Change on the Climate System

SHAO Pu^{1, 2} and ZENG Xiaodong¹

1 *International Centre for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

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

Abstract Land Use and Land Cover Change (LUCC or LULCC) has a significant influence on the environment on which mankind's survival depends, and it is closely related to human being's social-economical activities. The role of humans within the climate system involves much more than global warming due to greenhouse gases. By changing the natural land surface directly and other biogeophysical or biogeochemical processes indirectly, LUCC represents a first-order human climate forcing. This manuscript reviews the history of the study of LUCC and its correlation to

收稿日期 2010-03-01 收到, 2011-09-26 收到修定稿

资助项目 “十一五”国家高技术研究发展计划重点项目 2009AA122100, 中国科学院知识创新工程重要方向项目群 KZCX2-YW-219

作者简介 邵璞, 男, 1982 年出生, 博士, 助理研究员, 从事动态植被和气候模式研究。E-mail: shaopu0608@gmail.com

climate system briefly. Forcing due to LUCC has significant spatial heterogeneity, leading to spatial variability in the associated climate response. Summarizing recent peer-reviewed papers, the authors conclude that the impact of LUCC such as deforestation, urbanization, damming, etc on regional climate is robust while it does not have strong effects at global level, because the variability of LUCC has regional magnitudes much greater than its global average. The net biogeophysical impact of LUCC results from the competition between the effects of variation of albedo, evapotranspiration efficiency, and surface roughness. LUCC leads to warming in tropical and subtropical regions and cooling in temperate and boreal zones. Current global warming owing to LUCC is predominantly driven by changes in surface hydrology through reduced evapotranspiration and latent heat flux, with the radiative forcing playing a secondary role. Finally existing issues in current study of the influence of LUCC on climate system are pointed out. The authors recommend that three climate metric should be assessed as a start and interdisciplinary cooperation is essential in future research.

Key words land use, land cover change, climate system, local scale, global scale

1 引言

土地利用和土地覆盖变化 (Land Use and Land Cover Change, 简称 LUCC 或 LULCC) 是指农田耕作、森林砍伐、牲畜放牧、城市化、修筑水坝等人类活动对自然资源的管理行为以及随后对陆表状况产生的影响。它包括两个方面: 一个是因, 即土地利用, 它是指人类为达成一定目的而在一定土地上投资劳力或资本, 以发挥土地的功能。我国《土地利用现状分类》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007) 国家标准按照功能不同把土地利用分成耕地、园林、林地等 12 个一级类和 57 个二级类; 另一个是果, 即土地覆盖变化 (Land Cover Change, LCC), 它是指土壤和植被系统结构的改变。LUCC 客观地记录了人类改变陆表特征的空间格局, 在一定程度上反映了地球表面景观的时空变化 (史培军等, 2002)。它与气候变化、生物多样性、环境演变、生态安全、人类可持续发展等诸多方面密切相关 (陈怀亮等, 2005)。气候系统一般是指大气、海洋和陆表层状况所构成的气候状态整体 (曾庆存和林朝晖, 2010)。

人类几千年来持续频繁地对土地进行改造, 特别是近几十年社会经济活动迅猛发展, 工业化和城市化进程加速、人口急剧增加, 对居住空间、食物和淡水等资源的需求随之增加, 很大程度上改变了如植被的地理分布和覆盖度、地表水热平衡状态等陆表状况。过去 50 年人类对陆地生态系统改造的强度超过了历史上任何时期 (Reid et

al., 2005)。LUCC 既给人类带来了福祉, 同时农田、牧场、人工林、城市等扩张也带来了生态系统退化、生物多样性丧失等诸多问题, 其中 LUCC 对气候的影响也受到世界各国的广泛关注。本文回顾了過去此类研究的历史和方法, 并根据最近几年的研究结果归纳了 LUCC 对区域和全球气候系统产生的具体影响及其机制影响, 进而探讨 LUCC 在过去、未来气候变化中可能扮演的角色。最后指出目前面临的困难和亟待解决的问题。

2 研究方法

对 LUCC 本身的研究历史悠久, 最初主要集中在 LUCC 类型的人工调查、分类与制图。20 世纪 50~60 年代由地理科学领域发起的计量革命 (quantitative revolution) 对 LUCC 的研究产生了重大而深远的影响, 从那时起以气象问题为开端展开了 LUCC 对全球环境影响的研究。1992 年国际地圈生物圈计划 (International Geosphere - Biosphere Program, IGBP) 和国际全球环境变化人文因素计划 (International Human Dimensions Programme, IHDP) 将 LUCC 作为两大国际计划合作进行的纲领性交叉研究课题, 中心议题之一就是 LUCC 与全球气候及生物地球化学变化间的相互作用。两个组织的共同研究计划指明了 LUCC 的 4 个研究方向, 包括土地覆盖状况的评估、全球 LUCC 的建模与预测、不同空间尺度上 LUCC 强迫之间的联系以及数据开发与数据信息系统 (Turner et al., 1993, 1995)。混合像元分解技术的发展、新的卫星传感器 (如 Landsat 7、

SPOT 5、MODIS、MERIS) 和全球影像技术 (Global Image) 的开发以及系统的全球追踪战略的建立, 为 LUCC 对气候影响的定量化研究提供了数据基础。目前应用较多的卫星数据有 NOAA/AVHRR 1 km 分辨率的影像以及 EOS/MODIS 250 m、500 m、1 km 高精度地表覆盖数据。2005 年, 由美国国家研究委员会 (National Research Council, NRC) 倡议, IGBP-iLEAPS (integrated Land Ecosystem-Atmosphere Process Study) 和 GEWEX-GLASS (Global Energy and Water cycle EXperiment-Global Land/Atmosphere System Study) 资助开展了大型国际合作计划 LUCID (Land-Use and Climate, IDentification of robust impacts)。2007 年, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在 IGBP 指导下利用多个气候模式开展了一系列 LUCC 情景的模拟研究, 构建新的气候系统模型以涵盖 LUCC 对生物圈和碳循环的影响, 进行 LUCC 背景下气候系统的脆弱性评估。

LUCC 气候效应的定量评估方法主要有两种, 一种是敏感性分析 (或脆弱性评估), 它利用各种资料如卫星观测、化石、湖底沉积、树木年轮等分析气候因子和 LUCC 间的联系, 主要关注局地 and 区域尺度上较短时间内 LUCC 对气候的直接强迫; 另一种是情景模拟, 依靠模式结果得到 LUCC 前后的气候变化情况。第二种方法相对简单, 只需要考虑事先假定的强迫因子 (植被、温室气体、地形等), 一旦确定了哪些因子对气候有压力 (threat), 就可以用情景模拟预测这种影响是否会发生, 进而量化这种可能性。它主要关注全球尺度气候的长期变化。该方法关键在于气候系统模式中 LUCC 过程的建模。以农田为例, NCAR 在自己的陆面过程模式 CLM-CN (Thorn-ton et al., 2007) 里引进美国农业部的 Agro-IBIS 模型 (Kucharik et al., 2000; Kucharik and Brye, 2003), 考虑了玉米、大豆、小麦等农作物的生理过程和物候方案, 以其与大气环流模式 CAM 耦合评估农业化对气候的影响 (Levis et al., 2009)。未来的模型还将引入水稻, 并模拟农业管理过程 (例如播种、施肥、灌溉等)。Hurtt et al. (2009) 利用自己发展的土地利用模型 (the Global Land Use Model) 重建了全球 1700~2000 年 LUCC 的年际变化, 并将其作为全球陆面模式

LM3V 的输入量, 以此来追踪 LCC 对全球碳循环和气候变化的影响。

已有的 LUCC 的数值模拟大部分基于地表覆盖尤其是植被变化对气候产生的影响。植被占陆地生态系统 90%~99% 以上的质量或体积, 是气候、土壤等环境最鲜明的反映和综合标志 (张新时, 1993)。它是人类、各种动物和微生物赖以生存的基础, 受 LUCC 影响明显。长期高强度的 LUCC 活动破坏了许多地区原有的顶级植被类型。以我国为例, 目前广泛分布在暖温带低山丘陵地区的灌草丛植被取代了原有的顶级天然植被——暖温带落叶阔叶林, 长期维持在以荆条、菅草、酸枣等为优势种的落叶灌草丛状态 (中国植被编辑委员会, 1980)。我国东部、印度、欧洲、美国中东部的农业区分布最广、农业化程度最高, 农业用地取代了原本生长在相应地区的温带和热带森林及草原。

我们在 ISI 数据库和中国知网 (CNKI) 数据库中以气候和 LUCC 为关键词检索了近 10 年国内外的相关文献, 从图 1 可以直观地了解到目前国内 LUCC 和气候系统间相互关系的研究情况。尽管我国的研究者对中国区域气候对 LUCC 的响应做出了一些有自己特色的工作, 例如 Gao Qiong et al. (2003) 研究发现土地利用会限制邻近地区能量和物质的交换从而减弱不同植物类型间的竞争, 导致灌木和阔叶落叶林增多; LUCC 可能对我国的季风环流产生显著影响 (李巧萍等, 2006; 高学杰等, 2007), 但总地来说我国在这方面的研究还相对缺乏。

3 LUCC 的气候效应

LUCC 通过改变地表反照率、土壤和植被的蒸散发、温室气体和活性痕量气体的排放、矿物粉尘及生物气溶胶的收支等途径对区域气候事件的发生频率和强度乃至全球气候产生一系列影响。受影响气候因子包括温度、蒸散发、云量、降水、气压场和风场等。除了 CO₂ 的排放, 其他人类活动包括 LUCC 及其后续影响也是气候系统最重要的强迫因子之一 (Pielke et al., 2009)。过去几百年乃至上千年的 LUCC 对气候系统的效应需要像温室气体、气溶胶、太阳变率以及 O₃ 层的变化一

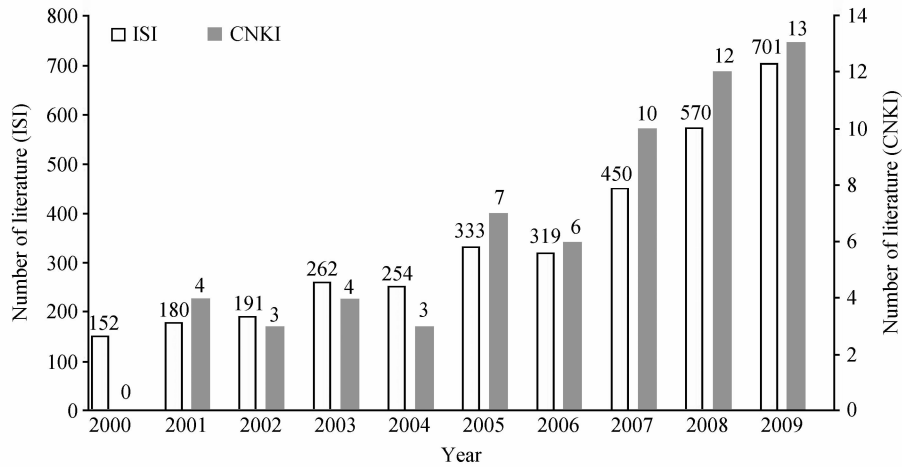


图1 2000~2009年ISI和CNKI数据库中关于LUCC和气候的文献数

Fig. 1 Number of literatures about LUCC and climate from 2000 to 2009 in ISI and CNKI databases

样被重新评估 (Feddemma et al., 2005a; Davin et al., 2007)。

3.1 LUCC对区域气候的影响

LUCC对区域气候的影响取决于反照率、蒸散发效率和地表粗糙率等变化的综合效应。LUCC影响地表能量收支、波文比以及降水在土壤水、蒸散发和径流间的分配,从而对区域气候尤其是降水和温度产生影响(周广胜和王玉辉, 1999; Foley et al., 2005; Findell et al., 2007; 曹丽娟等, 2010)。在热带、亚热带和半干旱等人类活动密集的地区,LUCC的气候效应较为明显(Shi et al., 2007),历史上农业活动强度较大的地区主要分布在温带森林地区,以森林砍伐、草地退化及相应的耕地面积扩大为主要特点。在寒带地区LUCC活动偏弱。

一般情况下热带地区森林砍伐会使地表粗糙度下降,导致拖曳系数下降,地表蒸散发减少(Hahmann and Dickinson, 1997),其增温效应超过由于反照率增加引起的降温效应,从而使地表温度增加。反之植被覆盖度上升导致水汽增加,使得云量增加、入射太阳辐射减少,从而抵消地表反照率下降产生的增温效应,使温度下降。以亚马逊地区为例,大范围森林砍伐减少了该地区土壤中的植物根系分布和叶面积指数,在旱季土壤对大气的水汽输送明显减少(Kleidon and Heimann, 1999; Werth and Avissar, 2002)。该地区28%~33%的降水来自于陆表蒸散发的再循环水分(Costa and Foley, 1999),因此森林减少

使得该地区旱季的持续时间延长,干旱的强度变大,雨季的降水减少且雨季发生漂移。如果森林完全退化成草原,南美洲的气候可能变得长期炎热干燥(Shukla et al., 1990)。在温带和寒带地区,森林砍伐引起的反照率增加的效应占主导,使温度下降。需要指出的是森林砍伐对水分循环的影响会因河流流域面积、气候区和植物群落结构等因素的不同而存在差异,例如在长江干流LUCC会使径流量在夏季增加,越向下游增幅越大(曹丽娟等, 2010)。

作为一个农业大国,LUCC可能是20世纪我国北方降水减少和温度上升的原因之一(Zhao and Zeng, 2002; Gao et al., 2004)。Gao Xuejie et al. (2003)用区域气候模型RegCM2分析了我国下垫面为潜在植被(森林)和实际植被(农田、灌木)下气候的差异,认为LUCC造成了中国西北地区年降水减少,促进了干旱、半干旱区域的形成,并使得内陆一些地区温度升高、沿海地区温度下降。处于亚热带的澳大利亚的愈来愈频繁和严重的干旱灾害主要也是由于19世纪新移民破坏植被、拓展农牧业所造成(Mcalpine et al., 2009),其因果关系甚至可以追溯到距今1.5万年(Miller, 2005a, 2005b),通过恢复自然植被等措施可以缓解这种干旱趋势(Pitman et al., 2004a)。需要指出的是,当森林转化为农田后,农业灌溉通常会使地表蒸散发增加、大气湿度上升,从而使露点温度增加(气压为1000 Pa时露点温度上升1℃相当于气温增加2.5℃),从而有

利于地表温度下降。而水汽冷凝释放的大量潜热(对流可利用潜能)有利于云和雷雨的形成和发展,使局地降水增加。

城市的“热岛效应”是LUCC影响区域气候的一个极端情形。1950年以后美国地表温度上升有50%的贡献来自于城市化(Stone, 2009)。虽然城市只占陆地总面积的1%~3%,但城市对局地和中尺度气候的影响高于它们的面积比重,并且未来城市化的范围和强度将迅速增长(Shepherd, 2005)。城市与自然地理覆盖明显不一样,广泛分布在城市里的非透水性地面、屋顶和墙等影响了能量通量、水和化学物质的循环,使得地表蒸散发下降、地表热量不易散发,加上人为热量的排放、植被覆盖的减少等因素,导致地表温度升高(Schulze, 2000; Bonan, 2002; Kato and Yamaguchi, 2007)。据2004年NOAA的调查,美国非透水陆地(如人行道、公路、停车场)面积大约为112610 km²,接近于俄亥俄州的总面积。在城市地区栽种大量植物或者把屋顶涂成绿色,降低城市表面的反射率能有效缓解城市热岛效应(Rosenzweig et al., 2009)。城市在气候系统模型中的表征还处于起步阶段。Oleson et al. (2008a, 2008b)结合陆面模式CLM设计了一个初步的城市参数化方案,用它进行离线模拟表明气候系统中的热储量和感热通量对大气和陆表参数的不确定性非常敏感。目前定性的结论包括城市地区日最低气温比日最高气温增加的幅度大,导致日温差减小;随着非透水性陆面比重的增加,波文比和城市冠层气温升高。

此外,不合理的土地利用方式如围垦水域等会造成水土流失和河床湖库泥沙淤积,大大降低流域的泄洪与调节能力,加剧干旱、洪水等气象灾害。在大的流域筑坝可能会对气候系统产生诸多影响:气候带向两极移动;区域降水和水分蒸发改变;水库底部缺氧造成生物的厌氧分解,释放出温室气体CH₄;对ENSO等事件的不准确预测引起水坝管理上的混乱,导致极端天气引发的水灾造成的风险增加(United Nations Environment Programme, 2000)。

3.2 LUCC对全球气候的影响

相对于温室气体、气溶胶等IPCC关注的其他强迫因子,LUCC的大尺度气候效应还有很大不

确定性。但是观测数据和土地调查表明过去300年受人类活动影响到的陆地面积百分比达到了42%~68%(Vitousek et al., 1997; Hurtt et al., 2006),约40%的陆地可以转化为农业用地(包括农田、牧场以及木材林),其中一半以上已经被人类利用(World Bank, 2004)。例如美国54%的土地被用作农业用地,东部落叶林、针叶林和中部的草原大部分都被农田取代(Bonan, 1997);全球人为的非透水陆地面积可能达到783330 km²,接近土耳其的总面积,其中中国、美国、印度所占比重最大,共25284 km²(Elvidge et al., 2007)。这些数据说明LUCC的面积已经大到足够改变大尺度气候的程度。IPCC第四次评估报告(IPCC, 2007)认为自1750年以来LUCC导致的反照率变化对地表净辐射通量的影响为-0.2 W·m⁻²,这种影响虽然和温室气体浓度变化(2.3 W·m⁻²)无法相提并论,但相对O₃层变化(0.35 W·m⁻²)、卤烃浓度变化(0.34 W·m⁻²)等不可忽略。Chase et al. (2000, 2003)的研究表明中纬度LCC导致北半球春天地表温度下降,同时使亚洲季风强度减弱。用工业化前后的陆表覆盖数据做边界条件,气候模式模拟的地表能量通量的减少会导致亚洲季风区降水减少10%~30%,与通过测量喜马拉雅冰芯得到的结论一致(Takata et al., 2009)。大范围尤其是热带地区的LCC和全球其他地区的气候变化存在遥相关(Werth and Avissar, 2002; Lambin and Geist, 2006; 宋帅等, 2008)。例如亚马逊地区森林转化为草地引起对流变化、大尺度环流弱化,会通过行星波对北半球冬季降水产生影响,使得北大西洋和西欧降水减少、美国东南部降水增加(Gedney and Valdes, 2000)。

一些研究表明LUCC对全球平均气候影响甚微,主要原因可能是LUCC的气候效应有明显的时空异质性,使其对气候造成的影响也具有时空差异(National Research Council, 2005),大尺度环流也可能减弱LUCC产生的局地气候效应(Pitman et al., 2004b; Findell et al., 2007)。例如Pitman et al. (2009)分别以潜在自然植被、1870年的以及当代的土地覆盖数据为下边界条件,用7个不同的气候系统模式评估了LCC对全球气候的影响。由于不同气候模式本身对北半球

夏季潜热通量、近地面气温的长期变化趋势的模拟就不一样,导致评估的 LCC 对全球长期气候的效应不一致,结论是 LCC 对全球气候长期趋势的影响不明显。7 个模式中只有 3 个模拟出森林砍伐导致潜热通量的减少,其余 4 个模式的模拟结果正好相反。LUCC 引起的区域非绝热加热格局(对大气加热或者冷却)的变化不局限于 LUCC 发生的区域,它通过对大尺度气候事件如 ENSO、PDO 和 NAO 的影响对全球气候造成扰动(Chase et al., 2001)。将全球平均气候作为分析对象会掩盖不同分布、不同变化程度的区域上的气候变化,忽略极端气候事件如干旱、洪涝和飓风等,尽管后者的发生和全球辐射不平衡有间接的因果关系。

Lawrence and Chase (2010) 研究发现 LCC 的全球气候效应主要是使陆表水循环改变(减少蒸散发和潜热通量)导致全球增温,其次才是地表反照率改变引起的辐射强迫变化,这种增温效应在区域尺度上更强,但被季节变化削弱。森林砍伐使得进入全球陆地的水汽通量减少约 4% ($3000 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), 大约相当于人类灌溉增加的总水汽量 ($2600 \text{ km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), 但两者的空间分布型不一样(Gordon et al., 2005)。总地说来,如果不考虑海洋的调节作用,全球大范围的森林退化成草原会使气温上升,并最终导致陆面蒸散发和来自海洋的水汽辐合通量减少,使得一些地区降水减少(Davin and Noblet - Ducoudré, 2010)。

其次,LUCC 会间接影响年代际尺度上温室气体尤其是 CO_2 以及气溶胶的浓度变化,进而对气候系统产生影响(Houghton, 2003; 周旺明等, 2005)。一般来说,气溶胶本身有削弱太阳辐射的作用,但黑炭等对大气具有加热作用,黑炭等沉降附着在雪盖、冰盖表面能加速它们的消融。20 世纪 90 年代每年土地利用产生的碳排放大约相当于每年化石燃料燃烧产生的 CO_2 的 33% (Bonan, 2002), 其中间接排放是直接排放的两倍(Melillo et al., 2009)。森林通过吸收或者排放碳影响着气候,但不同地区的森林影响程度不一样。热带森林通过蒸散发过程放大 LUCC 的人为气候效应,而寒带森林减少释放出 CO_2 等温室气体的长期升温效应和地表反照率上升导致的短期降温效应会部分抵消(Bonan, 2008)。20 世纪中期以后,中高纬度的主要土地利用方式由毁林造田变

成退耕还林,同时大面积森林火灾得到有效控制,草本植物被木本植物取代,增强了中纬度陆地对碳的吸收能力(Houghton et al., 2000)。此外,尽管对气溶胶的大气化学过程对气候的影响有一定认识,空间异质性大的 LUCC 释放的气溶胶的间接气候效应还不清楚。

4 面临的困难和待解决的问题

目前研究 LUCC 的气候效应的两种主要方法即敏感性分析和情景模拟都有不足之处。前者需要大量详实的数据,且忽略气候的长期变化,而后的困难在于很难找到一个全球普适的 LUCC 模拟方案。目前众多的气候系统模式对 LUCC 的处理方案多不一致,列举如下几个方面: 1) 农业用地和其他土地覆盖类型划分标准不统一; 2) 农作物物候表征方法不同; 3) 反照率的参数化方案不一样; 4) 不同土地覆盖类型蒸散发的表征方案不一致。因此不同模式模拟的 LUCC 气候效应不一样,甚至完全相反。观测得到的气候因子如地表温度的长期变化趋势仍不确定(Climate Change Science Program, 2006), LUCC 的气候效应也就无从分析。此外情景模拟多采用不同 LUCC 数据驱动模式进行对比,并没有考虑 LUCC 的具体过程。模式本身是对已知过程净效应的评估,而无法对未来的进行预测。

我们建议首先需要对当前气候系统自身特征有深入了解,以重新评估 3 个气候相关的物理量作为开始(Mahmood et al., 2010): 1) 陆表感热和潜热的空间分布。它们的全球分布随时间不断变化,进入大气后会导致各种空间尺度上气候特征的变化; 2) 降水和水汽辐合区的空间分布。全球湿润区、干旱区的边界渐变使得不同区域旱涝发生概率改变。它的空间分布型的改变源于感热、潜热分布型以及地表反照率和空气动力学粗糙度的变化; 3) 区域辐射加热归一化梯度。LUCC 强迫导致的区域对流层平均温度的变化会影响区域的气压场和风场。用辐射梯度作标准衡量温室气体对气候的影响是用平均值为标准的 60 倍(Matsui and Pielke, 2006), LUCC 的情况类似(Feddema et al., 2005b)。这 3 个量可以用观测数据、模式输出或者再分析资料计算出来。

其次需要多学科间的合作。在自然植被模拟 (Levis et al., 2004)、农作物模拟 (Jones and Kinniry, 1986; Mearns et al., 1999)、城市化模拟 (Oleson et al., 2008a) 以及包含 LUCC 过程的模式构建 (Levis et al., 2009) 等多个相关学科领域的研究均有一定基础, 为了更有效率地在该研究上取得进展, 陆面模式方面的专家、农业学科及土地、水资源、环境管理和规划等领域的科学家之间的合作亟待加强。

总之, 如果仅把 CO₂ 做为人类对气候的首要影响因子有失偏颇, 会导致缓解气候变化的相关决策效果事倍功半。过去气候变化的归因和对未来气候的评估预测需要考虑更多的耦合过程, 一个完善的气候系统模式需要考虑 LUCC 对气候的直接效应以及它通过对气溶胶、温室气体的影响导致的间接效应。

参考文献 (References)

- Bonan G B. 1997. Effects of land use on the climate of the United States [J]. *Climatic Change*, 37: 449–486.
- Bonan G B. 2002. *Ecological climatology: Concepts and applications* [M]. New York: Cambridge University Press, 678pp.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 320 (5882): 1444–1449.
- 曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 2010. 土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究 [J]. *大气科学*, 34 (4): 726–736.
- Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2010. Sensitivity research of the effects of land use change on climate and runoff over the Yangtze River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (4): 726–736.
- Climate Change Science Program. 2006. *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences* [M]. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 164pp.
- 陈怀亮, 徐祥德, 刘玉洁. 2005. 土地利用与土地覆盖变化的遥感监测及环境影响研究综述 [J]. *气象科技*, 33 (4): 289–294.
- Chen Huailiang, Xu Xiangde, Liu Yujie. 2005. Review of researches on remote sensing monitoring and impact on environment of land use/cover change [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 33 (4): 289–294.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel T, et al. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter [J]. *Climate Dyn.*, 16: 93–105.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel T, et al. 2001. Relative climatic effects of landcover change and elevated carbon dioxide combined with aerosols: A comparison of model results and observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 31685–31691.
- Chase T N, Knaff J A, Pielke R A, et al. 2003. Changes in global monsoon circulations since 1950 [J]. *Natural Hazards*, 29 (2): 229–254.
- Costa M, Foley J. 1999. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D12): 14189–14198.
- Davin E L, Noblet-Ducoudré D, Friedlingstein P. 2007. Impact of land cover change on surface climate: Relevance of the radiative forcing concept [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (13), L13702, doi: 10.1029/2007GL029678.
- Davin E L, Noblet-Ducoudré D. 2010. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes [J]. *J. Climate*, 23 (1): 97–112.
- Elvidge C, Tuttle B, Sutton P, et al. 2007. Global distribution and density of constructed impervious surfaces [J]. *Sensors*, 7 (9): 1962–1979.
- Feddema J, Oleson K, Bonan G, et al. 2005a. A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land cover representations [J]. *Climate Dyn.*, 25 (6): 581–609.
- Feddema J, Oleson K, Bonan G, et al. 2005b. The importance of land-cover change in simulating future climates [J]. *Science*, 310 (5754): 1674–1678.
- Findell K L, Shevliakova E, Milly P C D, et al. 2007. Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate [J]. *J. Climate*, 20 (14): 3621–3634.
- Foley J, DeFries R, Asner G, et al. 2005. Global consequences of land use [J]. *Science*, 309 (5734): 570–574.
- Gao Qiong, Li Xiaobin, Yang Xiusheng. 2003. Responses of vegetation and primary production in north-south transect of eastern China to global change under land use constraint [J]. *Acta Botanica Sinica*, 45 (11): 1274–1284.
- Gao Xuejie, Luo Yong, Lin Wantao, et al. 2003. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (4): 583–592.
- Gao Zhiqiang, Liu Jiyuan, Cao Mingkui, et al. 2004. Impacts of land use and climate change on regional net primary productivity [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 14 (3): 349–358.
- 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. Simulation of effects of contemporary land use in China on regional climate [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 37 (3): 397–404.
- Gedney N, Valdes P. 2000. The effect of Amazonian deforestation on the Northern Hemisphere circulation and climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 3053–3056.
- Gordon L, Steffen W, Folke C, et al. 2005. Human modification of global water vapor flows from the land surface [J]. *Proceed-*

- ings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102 (21): 7612–7617.
- Hahmann A, Dickinson R. 1997. RCCM2 CBATS model over tropical South America: Applications to tropical deforestation [J]. *J. Climate*, 10: 1944–1964.
- Houghton R, Skole C, Nobre J, et al. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon [J]. *Nature*, 403: 301–304.
- Houghton R. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000 [J]. *Tellus*, 55 (2): 378–390.
- Hurt G C, Frolking S, Fearon M G, et al. 2006. The underpinnings of land-use history: Three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands [J]. *Global Change Biology*, 12 (7): 1208–1229.
- Hurt G C, Chini L P, Frolking S, et al. 2009. Harmonisation of global land-use scenarios for the period 1500–2100 for IPCC-AR5 [J]. *iLEAPS Newsletter*, 7: 6–8.
- IPCC. 2007. 气候变化 2007: 综合报告. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一、第二和第三工作组的报告 [M]. 核心撰写组, Pachauri R K, Reisinger A, Eds. 日内瓦, 瑞士: IPCC, 104pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II, and III Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change [M]. Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A, Eds. Geneva, Switzerland: IPCC, 104pp.
- Jones C, Kiniry J. 1986. CERES – Maize: A simulation model of maize growth and development [M]. College Station, Texas: A&M Univ. Press, 194pp.
- Kato S, Yamaguchi Y. 2007. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 110 (1): 1–17.
- Kleidon A, Heimann M. 1999. Deep-rooted vegetation, Amazonian deforestation, and climate: Results from a modelling study [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 8 (5): 397–405.
- Kucharik C, Foley J, Delire C, et al. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14 (3): 795–825.
- Kucharik C, Brye K. 2003. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Environmental Quality*, 32 (1): 247.
- 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 2006. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟 [J]. *气象学报*, 64 (3): 257–269.
- Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. 2006. A numerical simulation on impact of historical land use changes on regional climate in China since 1700 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (3): 257–269.
- Lambin E, Geist H. 2006. Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts [M]. New York: Springer, 84pp.
- Lawrence P J, Chase T N. 2010. Investigating the climate impacts of global land cover change in the community climate system model (CCSM 3.0) [J]. *International Journal of Climatology*, 10.1002/joc.2061.
- Levis S, Bonan G, Vertenstein M, et al. 2004. The community land model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide [Z]. NCAR Technical Note NCAR/TN–459+IA, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO., 54pp.
- Levis S, Thornton P, Bonan G, et al. 2009. Modeling land use and land management with the Community Land Model [J]. *iLEAPS Newsletter*, 7: 10–12.
- Mahmood R, Pielke R, Hubbard K G, et al. 2010. Impacts of land use/land cover change on climate and future research priorities [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (1): 37–46.
- Matsui T, Pielke R. 2006. Measurement-based estimation of the spatial gradient of aerosol radiative forcing [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L11813, doi: 10.1029/2006GL025974.
- Mcalpine C A, Syktus J, Ryan J G, et al. 2009. A continent under stress: Interactions, feedbacks and risks associated with impact of modified land cover on Australia's climate [J]. *Global Change Biology*, 15 (9): 2206–2223.
- Mearns L O, Mavromatis T, Tsvetinskaya E, et al. 1999. Comparative responses of EPIC and CERES crop models to high and low spatial resolution climate change scenarios [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D6): 6623–6646.
- Melillo J, Reilly J, Kicklighter D, et al. 2009. Indirect emissions from biofuels: How important? [J]. *Science*, 326 (5958): 1397–1399.
- Miller G H. 2005a. Ecosystem collapse in pleistocene Australia and a human role in megafaunal extinction [J]. *Science*, 309 (5732): 287–290.
- Miller G H. 2005b. Sensitivity of the Australian monsoon to insolation and vegetation: Implications for human impact on continental moisture balance [J]. *Geology*, 33 (1): 65–68.
- National Research Council. 2005. Radiative forcing of climate change: Expanding the concept and addressing uncertainties [R]. Washington D. C.: The National Academies Press, 208pp.
- Oleson K, Bonan G, Feddes J, et al. 2008a. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47 (4): 1038–1060.
- Oleson K, Bonan G, Feddes J, et al. 2008b. An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47 (4): 1061–1076.
- Pielke Sr R, Beven K, Brasseur G, et al. 2009. Climate change: The need to consider human forcings besides greenhouse gases [N]. *EOS*, 90 (45), doi: 10.1029/2009EO450008.

- Pitman A J, Narisma G T, Pielke R A, et al. 2004a. Impact of land cover change on the climate of southwest Western Australia [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D18): 10.1029/2003JD004347.
- Pitman A J, McAvaney B J, Bagnoud N, et al. 2004b. Are inter-model differences in AMIP-II near surface air temperature means and extremes explained by land surface energy balance complexity? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (5), L05205, doi: 10.1029/2003GL019233.
- Pitman A J, Noblet-Ducoudré N, Cruz F T, et al. 2009. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L14814, doi: 10.1029/2009GL039076.
- Reid W, Watson R, Zakri A H, et al. 2005. Millennium Ecosystem Assessment (MA) [R]. Washington D. C.: Synthesis, Island Press.
- Rosenzweig C, Solecki W, Parshall L, et al. 2009. Mitigating New York City's heat island: Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (9): 1297-1312.
- Shi Zhengguo, Yan Xiaodong, Yin Conghua, et al. 2007. Effects of historical land cover changes on climate [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (18): 2575-2583.
- 史培军, 宋长青, 景贵飞. 2002. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究 [J]. *地球科学进展*, 17 (2): 161-167. Shi Peijun, Song Changqing, Jing Guifei. 2002. Strengthening the study of land use/cover changes and its impact on environmental security [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 17 (2): 161-167.
- Schulze R. 2000. Modelling hydrological responses to land use and climate change: A southern African perspective [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29 (1): 12-22.
- Shepherd J. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. *Earth Interactions*, 9: 1-27.
- Shukla J, Nobre C, Sellers P. 1990. Amazon deforestation and climate change [J]. *Science*, 247 (4948): 1322-1325.
- 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.
- Stone B. 2009. Land use as climate change mitigation [J]. *Environmental Science and Technology*, 43 (24): 9052-9056.
- Takata K, Saito K, Tetsuzo Y. 2009. Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 9570-9575, doi: 10.1073/pnas.0807346106.
- Thornton P E, Lamarque J F, Rosenbloom N A, et al. 2007. Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO₂ fertilization and climate variability [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 21 (4), GB4018, doi: 10.1029/2006GB002868.
- Turner B, Moss R H, Skole D. 1993. Stockholm: Relating land use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-IHDP core project [R]. IGBP Report, 24, IHDP Report, 5, 65pp.
- Turner B, Sanderson D, Fischer G, et al. 1995. Land-use and land-cover change. Science/Research plan [R], IGBP Report, 35, IHDP Report, 7, 132pp.
- United Nations Environment Programme. 2000. Climate Change and Dams: An Analysis of the Linkages between the UNFCCC Legal Regime and Dams [M]. Kenya: United Nations Foundation, 73pp.
- Vitousek P, Mooney H, Lubchenco J, et al. 1997. Human domination of Earth's ecosystems [J]. *Science*, 277 (5325): 494-499.
- Werth D, Avissar R. 2002. The local and global effects of Amazon deforestation [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20): 8087-8094.
- World Bank. 2004. World Development Indicators (9th Sep 2004/First edition). ESDS International, University of Manchester. doi: http://dx.doi.org/10.5257/wb/wdi/2011-04.
- 曾庆存, 林朝晖. 2010. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展 [J]. *地球科学进展*, 25 (1): 1-6. Zeng Qingcun, Lin Zhaohui. 2010. Recent progress on the Earth system dynamical model and its numerical simulations [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 25 (1): 1-6.
- 张新时. 1993. 研究全球变化的植被-气候分类系统 [J]. *第四纪研究*, 02: 63-75, 99-102. Zhang Xinshi. 1993. A vegetation-climate classification system for global change studies in China [J]. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 02: 63-75, 99-102.
- Zhao Ming, Zeng Xinmin. 2002. A theoretical analysis on the local climate change induced by change of land use [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 19 (1): 45-63.
- 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 2007. 中华人民共和国国家标准 (GB/T21010-2007): 土地利用现状分类 [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 中国植被编辑委员会. 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1375pp. Editorial Committee for Vegetation of China. 1980. *Vegetation of China* [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 1375pp.
- 周广胜, 王玉辉. 1999. 土地利用/覆盖变化对气候的反馈作用 [J]. *自然资源学报*, 14 (4): 318-322. Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. 1999. The feedback of land use/cover change on climate [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 14 (4): 318-322.
- 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 2005. 三江平原不同土地利用方式对区域气候的影响 [J]. *水土保持学报*, 19 (5): 155-158. Zhou Wangming, Wang Jinda, Liu Jingshuang, et al. 2005. Influence of different land use to regional climate in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 19 (5): 155-158.