科学通报 2013 年 第 58 卷 第 27 期：2832 ~ 2839
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

全球变暖背景下土地利用/土地覆盖变化气候效应的新认识

华文剑[①②], 陈海山[①②*]

① 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;
② 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
* 联系人, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

2013-02-04 收稿, 2013-04-07 接受, 2013-06-09 网络版发表
全球变化重大科学研究计划(2011CB952000)、国家自然科学基金(41230422)、公益性行业科研专项(GYHY201206017)、江苏省“333 高层次人才培养工程”、“青蓝工程”和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助

摘要 温室气体排放和土地利用/土地覆盖变化(land use/land cover change, LUCC)是人类影响气候变化的两种主要活动; 在全球变暖背景下, 温度和降水是否显著增加从而导致 LUCC 的气候效应更加剧烈? 利用 NCAR CAM4.0 模式, 考虑温室气体和 LUCC 的年际变化情况下, 探讨不同气候背景下 LUCC 气候效应的重要性. 研究表明, 在 1850 年温室气体含量背景下, LUCC 引起的气候敏感性为 0.54℃/(W/m^2), 而在当代温室气体含量背景下, LUCC 引起的气候敏感性为–0.26℃/(W/m^2). 不同气候背景场对 LUCC 引起的温度差异在偏高纬度显著, 全球变暖主要改变中高纬度的积雪-反照率来影响 LUCC 对温度的变化; 而在热带和副热带区域, 全球变暖引起的降水的区域差异是造成 LUCC 的气候响应存在不同的主要原因.

关键词
土地利用/土地覆盖变化
全球变暖
气候效应

近百年来的全球变暖与人类活动密切相关[1]. 当前的大气温室气体含量已超出过去 65 万年来的自然变化范围, 人类活动排放是导致全球变暖最确凿的因素之一. 另一个显著的人类活动是大范围土地利用/土地覆盖变化(land use/land cover change, LUCC). 由于社会和经济的发展, 使得大量森林和草原变成农田, 同时人口的增长也使得城市化进程加快[2]. 数值试验结果表明, 森林砍伐、沙漠化以及城市化可以显著改变区域气候[3~7]. 但是这种大范围的土地覆盖变化对气候的影响研究仍然是薄弱环节, 至今仍然缺乏系统的评估和定量的结论[8].

土地利用通过改变下垫面属性, 影响陆面和大气之间的热量、动量和水分交换[9]. LUCC 对区域气候影响的生物地球物理机制主要包括: (1) 地表反照率减少, 进而造成净辐射增加; (2) 粗糙度的变化, 引起地表蒸散的改变; (3) 净辐射在潜热和感热之间分配的变化, 影响冰雪-反照率之间的正反馈过程[10~14]. LUCC 也可以通过生物地球化学作用影响区域及全球气候[15], 大气中 CO_2 的增加, 有 1/3 是土地利用变化的贡献[1]. 基于观测统计分析, 证实了土地利用变化对气候的影响[16,17]. 数值模拟也是研究土地利用变化的重要工具, 研究表明, 当低纬度地区没有森林覆盖会导致蒸发量减少, 温度和 CO_2 浓度升高; 而在北半球中高纬度却有降温作用[18~20], Swann 等人[21]研究表明, 中纬度造林有增暖作用. “辐射强迫”计算是定量评估气候因子的有效手段[13], 相对于 1750 年 LUCC 反照率辐射强迫全球平均值为–0.2±0.2 W/m^2, 而 CO_2 增加导致的强迫辐射为 1.66±0.17 W/m^2[1], 但是这并不能说明 LUCC 的作用不显著, 在区域尺度上, LUCC 的作用是否能和诸如温室气体的

引用格式: 华文剑, 陈海山. 全球变暖背景下土地利用/土地覆盖变化气候效应的新认识. 科学通报, 2013, 58: 2832–2839
英文版见: Hua W J, Chen H S. Recognition of climatic effects of land use/land cover change under global warming. Chin Sci Bull, 2013, 58: 3852–3858, doi: 10.1007/s11434-013-5902-3

气候效应比拟[22~24]? Pitman 和 Zhao[25]比较了 LUCC 和 CO_2 的相对贡献, 在高纬度区域, 反照率引起的辐射强迫甚至超过温室气体的作用[26], 而 Lee 等人[27]认为, LUCC 在区域尺度上对降水的影响与 SST 强迫作用同样重要.

de Noblet-Ducoudré 等人[12]利用两种不同的土地覆盖类型(1870 和 1992 年)、两种 CO_2 含量和对应 SST 来比较 LUCC 的相对贡献. Voldoire[28]也讨论过未来 LUCC 情景下的类似情况. 但是, Pitman 等人[29]指出气候背景场在 LUCC 影响区域气候的重要性, 温室气体增加引起的雪和降水的变化改变了雪反照率反馈和水循环过程, 这些变化很大程度上控制了 LUCC 对区域气候的净影响. 所以在利用数值模式讨论 LUCC 的气候影响时, 采用的不同时期温室气体含量条件会直接影响 LUCC 的气候效应, 甚至可能产生不一致的结论, 对于这方面的研究有待进一步深入. Pitman 等人[29]的试验方案中利用的是给定的气候态 SST 和固定的土地覆盖强迫, 而且考虑的是极端情形(固定 CO_2 含量和 CO_2 含量加倍), 难于真实反映外强迫因子对气候的反馈作用. 在土地利用变化的气候效应研究工作中, 很少有考虑土地利用的年际变化情况, 但是由于人类活动的影响, 这种年际变化是真实存在的, 其次, 气候背景场对 LUCC 的气候效应也十分重要, 特别是当前全球变暖是一个热门话题, 这种气候背景下温度和降水的显著变化是否导致 LUCC 的气候效应存在显著差异就是我们想要探讨的问题. 本文利用大气环流模式, 综合考虑包含 SST 强迫和具有年际变化的气候因子(温室气体含量和土地利用变化), 探讨这种不同气候背景下大尺度 LUCC 的影响, 通过这种大尺度的 LUCC 敏感性试验, 针对不同气候变化背景下 LUCC 的气候效应进行研究, 试图探讨不同气候背景下的 LUCC 对区域气候影响及其可能机制.

1 模式简介与模拟方案

研究所用的模式为美国国家大气研究中心(NCAR)的通用大气环流模式(CAM4.0), 关于模式的更多详细介绍参见文献[30]. 此外, CAM4.0 还包括了陆面模块 CLM4.0, 为大气模式提供陆面的状况和陆气之间的能量、动量和水汽交换等下边界条件[31]. 模式的水平分辨率为 1.9°×2.5°, 垂直方向采 σ-p 混合坐标, 共 26 层. CAM4.0 和 CLM4.0 分别是 NCAR 公共地球系统模式(CESM)的大气和陆面的分量, 对历史气候具有较强的模拟能力, 是科学研究重要的工具[32~34].

数值模拟试验从 1971 年 1 月 1 日起积分到 2000 年 12 月, 海洋和海冰作为模式的初始场和边界条件由 Hadley 中心的观测资料提供, 用该时段的初始场驱动模式, CLM4.0 提供下边界条件, 但是不包括动态植被模块. 针对 LUCC 和温室气体含量变化, 设计了 1 组控制试验和 3 组瞬变试验(表 1), 除温室气体含量和土地覆盖变化不同, 4 组试验的太阳辐射、火山活动等自然因素的设置条件保持一致. 控制试验中给定温室气体浓度为 1850 年的值, 其中 1850 年 CO_2 浓度的值为 284.7 ppm (1 ppm=1 μL L^{-1}, 下同), 土地覆盖固定为潜在植被[35], 反映没有受人类活动显著影响的(1850 年)土地覆盖情形, 图 1(a)给出了 1850 年每个格点主要土地覆盖类型的空间分布, 其中农作物全球面积加权平均占 3.28%. 瞬变试验是在控制试验的基础上只改变 LUCC 和温室气体含量, 考虑它们在 1971~2000 年期间的年际变化. Hurtt 等人[36]利用发展的土地利用模型(the Global Land Use Model)重建了全球 1700~2000 年的 LUCC 年际变化, 这套数据也是 CMIP5 推荐的, 广泛地用于 CMIP5 的数值模拟, 详细内容可参见 http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/forcing.html. 由于地表类型的分类不同, 需要做分类数据的处理, Lawrence 等人[34]基于前人的工作, 发展了适合 NCAR 模式的土地利用变化数据, 本

表 1 试验设计

模式名称	试验类型	考虑情形	初始值
ctl	控制试验	无温室气体和土地利用的强迫	分别固定 1850 年的情形
RG	瞬变试验	仅考虑温室气体浓度的变化	土地覆盖固定 1850 年情形
RL	瞬变试验	仅考虑土地利用的变化	温室气体浓度固定为 1850 年的值
RGL	瞬变试验	同时考虑土地利用和温室气体浓度的变化	–

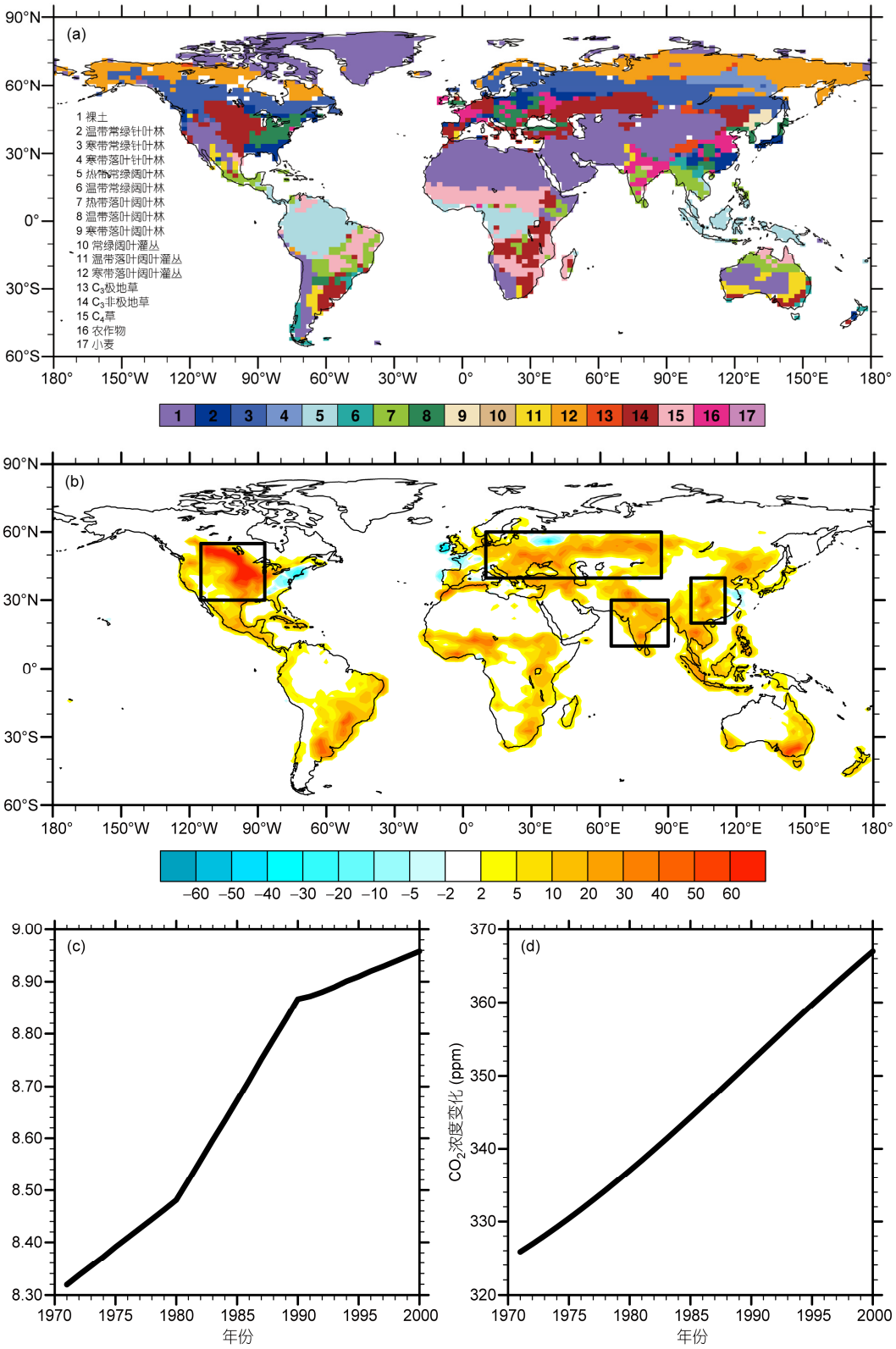


图 1 土地覆盖和温室气体变化的基本信息

(a) 主要土地覆盖类型的空间分布(1850 年), (b) 典型年份(2000~1850 年)农作物差值百分比的空间分布(%), (c) 全球面积加权平均的农作物的时间序列, (d) CO_2 浓度变化的时间序列

文的试验中就利用这个包含土地利用年际变化的数据集, 而考虑温室气体浓度变化, 是基于这一时期的温室气体含量(图 1(d)). 瞬变试验分别表示为: (ⅰ) 仅考虑土地利用变化引起的气候响应(RL), 温室气体固定为 1850 年的值; (ⅱ) 仅考虑温室气体浓度变化引起的气候响应(RG), 土地类型固定为 1850 年的情况, 图 1(c); (ⅲ) 考虑土地利用和温室气体变化共同引起的气候响应(RGL), 即两种外强迫因子都给定这 1971~2000 年时期的年际变化. 由于大多数研究 LUCC 的数值模拟都是采用固定的气候态海表面温度(SST), 这样就使得海表温度和海冰的反馈作用被忽略, 从某种程度上限制了对气候系统的响应, 而且使用固定的土地覆盖类型, 也不具代表多年 LUCC 的情况, 尤其是在当代由于人类活动的影响, 农作物的面积迅速增加(图 1(c)). 本文综合考虑这些强迫因子的年际变化, 试验中前 5 年作为 spin-up 时间, 取后 25 年的气候平均结果做分析, 采用统计 t 检验来检验结果差异的显著性.

2 模拟结果

2.1 LUCC 的气候敏感性

“辐射强迫”概念是定量比较外强迫因子(如温室气体排放、土地利用)气候效应的有效工具, 目前 LUCC 的气候效应还存在很大的不确定性[37]. Davin 等人[38]利用气候模式估算了过去 LUCC 引起的气候敏感性为 0.52℃/(W/m^2), 即 LUCC 引起大概 1 W/m^2 的辐射强迫, 全球温度升高 0.52℃. 气候敏感性(climate sensitivity, λ)具体表示为

$$\lambda = \frac{\Delta T}{\Delta F - \Delta R}, \quad (1)$$

ΔT 代表 LUCC 引起的全球温度的变化, ΔF 是全球平均辐射强迫的变化, ΔR 代表大气层顶净辐射的变化. 根据 4 组试验结果, 可以计算两种温室气体背景下的 LUCC 引起反照率变化的气候敏感性(RL-ctl; RGL-RG), 在 1850 年温室气体含量背景下 LUCC 引起全球地表温度变化为–0.04℃, 气候敏感性为 0.54℃/(W/m^2); 而当代温室气体含量背景下, 温度变化 0.01℃, 气候敏感性为–0.26℃/(W/m^2), 上述气候敏感性符号相反的差异将是本文要研究的一个重点.

2.2 空间特征

通过分析 RG-ctl 的年平均温度差值的空间分布可以发现, 温室气体含量的增加造成了全球温度的上升(图 2(a)), 然而 LUCC 引起的气候效应却具有明显的区域特征. 中高纬度出现明显的降温趋势, 而在热带和副热带地区有升温现象(图 2(b)). 上述气候效应主要是因为在较低纬度 LUCC 使得地表蒸散发决定的; 而在偏高纬度, 主要是由于地表反照率的改变, 以及冰雪-气候的反馈作用. 综合上述两种强迫作用, LUCC 在中高纬度的降温部分抵消了温室气体的增暖, 而在低纬度 LUCC 和温室效应都导致增温(图 2(c)).

为了探讨气候背景在 LUCC 区域影响研究中的重要性, 图 3 给出了当代温室气体背景下 LUCC 引起的气温变化的空间分布(RGL-RG). 与 1850 年的气温相比(图 2(b)), 不同气候背景下, LUCC 引起的温度变化存在明显的区域差异, 尤其是北美、欧亚大陆及印度地区出现了温度响应相反的情况. 图 4 给出了两种气候背景下温度响应的纬向分布, 可以发现, 当代气候背景下温度均出现不同程度的偏高, 尤其是中高纬度地区. 温室气体的温室效应会降低积雪深度, 减弱冰雪-反照率的正反馈过程; 同时, 暖气候有利于降水增多, 蒸发加大, 这两种主要作用共同决定了 LUCC 引起的气候效应.

2.3 典型区域分析

为了理解 LUCC 在不同背景下的气候效应, 进一步选取了典型的 LUCC 变化显著区域来分析. 在 RL 和 RGL 两组瞬变试验中, 给定了 1971~2000 年具有年际变化的 LUCC 强迫. 为了说明由于人类活动造成的 LUCC, 图 1(b)给出了 2 个典型年份(1850 和 2000 年)农作物变化的空间分布. 可以看出, 由于人类活动的影响, 农作物的面积大幅度的增加; 在北美、欧亚大陆、印度和东亚的农作物扩张迅速, 而取而代之的是森林和草地面积的减少.

对于中纬度区域而言(北美和欧亚大陆, 表 2), 在当代气候背景下降水偏多, 潜热增加, 潜热的变化有降温作用, 但是年平均的温度结果是增加的, 这是由于暖气候下的冰雪减少, 引起冰雪反照率的变化, 地表反照率偏低(表 2), 地面吸收的太阳辐射增加, 这种作用在冬春季节明显(图略). 从 2 个区域的温度响应结果来看, 在中纬度区域的温度是增加的, 所以在中纬度地区主要还是地表反照率的作用主导温度的变化, 而地表水循环变化的影响不明显.

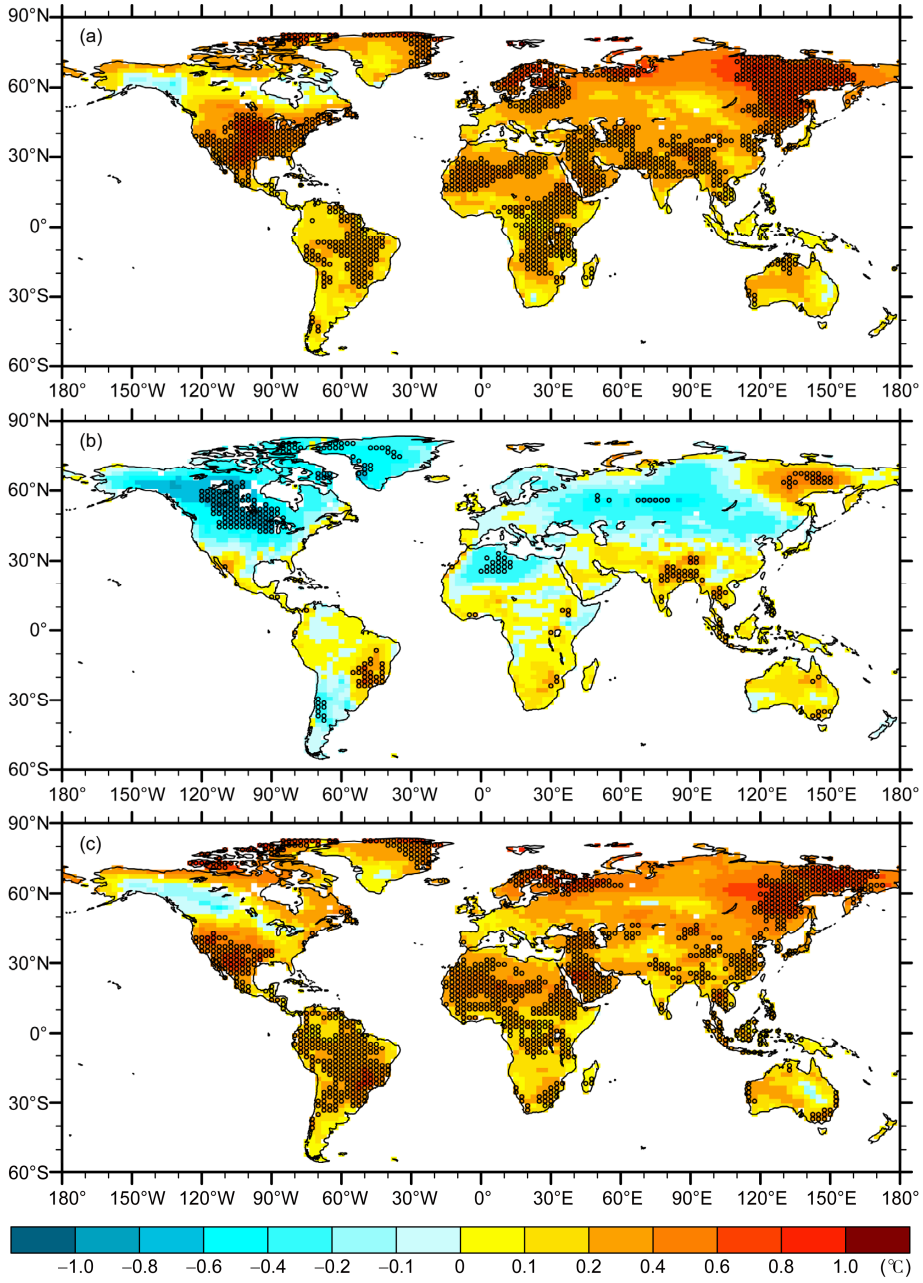


图 2 不同试验模拟的气温差值的空间分布

(a) RG-ctl 年平均温度差值; (b) RL-ctl 年平均温度差值; (c) RGL-ctl 年平均温度差值; 空心点表示通过 95%的信度检验

热带和副热带地区(印度和东亚), 在不同气候背景下, LUCC 引起的温度变化却存在区域差别. 在当代温室气体含量背景下, 印度地区温度偏低, 而在东亚区域偏高(表 2). 众所周知, 土壤水文过程对气候变化有重要影响, 土壤水能够改变地表反照率、热容量等影响气候, 而且土壤湿度对降水有很强的反馈作用[39,40]. Dai[41,42]指出全球变暖会使得全球的降水、径流增加, 也会使干旱化加剧. Dai[41,42]利用降水、径流资料以及 Palmer 干旱指数, 发现在非洲大部分地区、东亚、南亚、欧洲南部、以及东澳大利亚有变干的趋势. 从我们的模拟结果发现, 东亚区域在气候变暖背景下也出现降水减少, 土壤变干的情况. 从地表水分收支平衡可知, 降水增多, 利于土壤湿度增加, 湿度的增加会使得地表蒸发偏大, 蒸发的作用可使

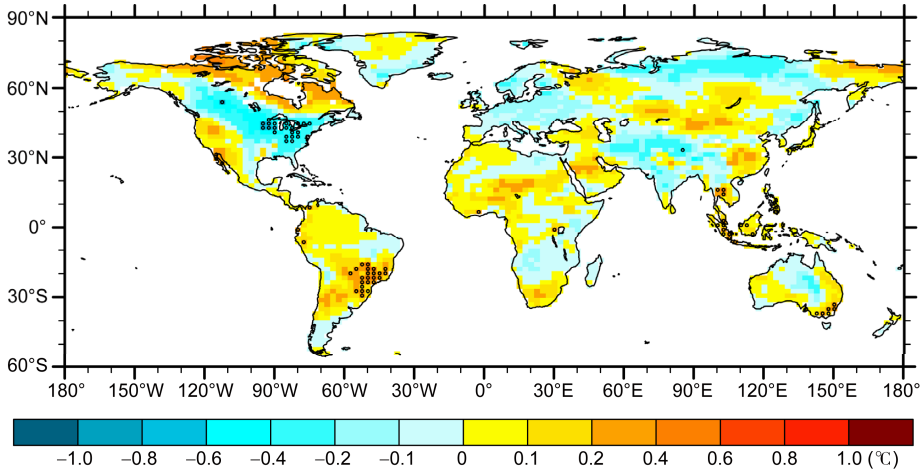


图 3　当代温室气体背景下 LUCC 引起的气温变化(RGL-RG)

空心点表示通过 95%的信度检验

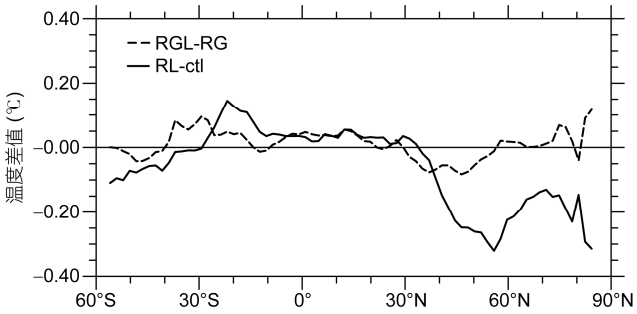


图 4　LUCC 引起的温度差值的纬向分布

实线表示 1850 年温室气体含量背景(RL-ctl), 虚线表示当代温室气体含量背景(RGL-RG)

得后期降水增加持续，会引起潜热增加，有降温作用. 但是反照率变化在偏低纬度的变化不是很明显，所以在低纬度地区水文过程对 LUCC 的气候效应起主要作用，即在气候变暖背景下，LUCC 引起的气候效应在低纬度更加容易出现差异，甚至信号相反的情况.

3　结论和讨论

基于 NCAR CAM4.0 模式，通过 4 组敏感性试验，考虑包含年际变化的气候因子强迫(温室气体含量和土地利用变化)的贡献，探讨不同背景场下大尺度 LUCC 的气候效应. 研究表明，在两种温室气体含量背景下，LUCC 引起全球平均的地表温度符号相反，造成 LUCC 的气候敏感性不同. 进一步证实了气候背景在 LUCC 影响区域气候中的重要性.

为了讨论这种影响的可能机制，本文通过 4 个典型 LUCC 变化区域来分析. 众所周知，森林的反照率比农作物低，当原来的森林变成农作物以后将增加地表反照率，尤其是当有雪存在的中高纬度地区，将大大地增加地表反照率，减少地表对太阳辐射的吸收. 通过两个典型区域(北美和欧亚大陆)分析发现，在当代气候背景下，冰雪减少，导致地表反照率的变化，造成地表净辐射的增加，温度升高，这种作用在冬春季节明显. 另一方面，暖气候背景下中纬度的降

表 2　LUCC 引起的区域平均气候要素的变化 a)

	气温(℃)		降水(mm)		潜热(W/m^2)		净辐射(W/m^2)		反照率(×10^{-2})	
	1850 年	当代	1850 年	当代	1850 年	当代	1850 年	当代	1850 年	当代
北美	−0.40	−0.19	−9.24	1.47	−0.98	−0.35	−1.78	−1.23	0.96	0.73
欧亚	−0.22	−0.02	−3.76	−2.54	−0.43	−0.09	−1.15	−0.73	0.77	0.55
印度	0.20	−0.09	−28.71	91.21	−0.89	1.12	−0.64	−1.62	0.22	0.30
东亚	−0.01	0.04	10.64	−49.25	−0.08	−0.05	−1.39	−0.80	0.53	0.50

a) 1850 年试验指: RL-ctl; 当代试验指: RGL-RG

水是增加的, 降水也影响地表净辐射在感热和潜热之间的分配, 蒸发潜热的变化会有降温的效应. 但是从我们的结果上看, 在中高纬度主要是由于地表反照率变化主导温度的响应. 热带和副热带地区(印度和东亚), 当代温室气体含量背景下, 印度地区温度偏低, 但是在东亚区域偏高. 这是因为全球变暖不仅会使得区域降水增多, 也会使干旱化加剧, 这种机制尤其在低纬度有显著的区域差别. 所以土壤湿度和降水的变化在低纬度决定了 LUCC 的气候效应.

Pitman 等人[29]指出气候背景在 LUCC 对区域气候影响的重要性. 但是, 目前大多数的 GCMs 都采用固定的气候态海温强迫, 只考虑 LUCC 的平衡态模拟, 忽略对气候系统的反馈作用. 我们通过瞬变试验, 考虑温室气体含量和 LUCC 年际变化情况下, LUCC 引起的气候效应的可能原因. 从我们的试验中认为, 并不是土地利用变化直接影响 LUCC 的气候效应, 而是由于土地利用变化导致的地表反照率和水文过程主导的. 在 Pitman 等人[29]的试验中, 发现加倍的 CO_2 情况下会使得降水增多, 但是在我们的瞬变试验中, 并不是全球变暖下降水都偏多[41,42], 土壤湿度对降水存在正反馈作用, 所以在利用模式模拟 LUCC 对区域影响的问题时, 模式对暖气候的模拟要具备可靠的能力, Pitman 等人[43]利用 7 个气候模式, 相同的试验方案讨论夏季 LUCC 对气候的影响, 发现模式存在很大的不确定性; 另外, 选取不同的强迫条件对 LUCC 的气候效应研究也存在显著的差异, 就本文的结果表明, 不同的气候背景, LUCC 的气候敏感性就是相反的信号, 这是特别值得注意的问题. 因为气候背景的不同, 可能就会造成 LUCC 引起的气候效应存在差异, 本文通过考虑年际气候因子变化的数值试验, 为以后的 LUCC 气候影响研究提供了一定的参考依据. 另外, 本文的试验只是一个初步的结果, 还需要设计更为合理仔细的试验, 尚存在许多值得进一步研究的问题和不确定性, 例如, 考虑 LUCC 的年际变化和只给定固定的土地覆盖对气候的影响问题, 也值得进一步研究. 由于模拟结果对模式本身、以及初始场和侧边界的依赖, 需要做更深入的工作.

参考文献

1 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007. 748–845
2 Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. Science, 2005, 309: 570–573
3 Xue Y. Biosphere feedback on regional climate in tropical North Africa. Quart J Roy Meteorol Soc, 1997, 123: 1483–1515
4 Hasler N, Werth D, Avissar R. Effects of tropical deforestation on global hydroclimate: A multi-model ensemble analysis. J Clim, 2009, 22: 1124–1141
5 Davin E L, de Noblet-Ducoudré N. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes. J Clim, 2010, 23: 97–112
6 van der Molen M K, van den Hurk B J J M, Hazeleger W. A dampened land use change climate response towards the tropics. Clim Dyn, 2011, 37: 2035–2043
7 陈海山, 张叶. 大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验. 科学通报, 2013, 58: 1221–1227
8 符淙斌, 袁慧玲. 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. 科学通报, 2001, 46: 691–695
9 Bounoua L, Defries R, CollaTz G J, et al. Effects of land cover conversion on surface climate. Clim Change, 2002, 52: 29–64
10 石正国, 延晓冬, 尹崇华, 等. 人类土地利用的历史变化对气候的影响. 科学通报, 2007, 52: 1436–1444
11 高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 397–404
12 de Noblet-Ducoudré N, Boisier J, Pitman A, et al. Determining robust impacts of land-use-induced land cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. J Clim, 2012, 25: 3261–3281
13 Betts R A, Falloon P D, Goldewijk K K, et al. Biogeophysical effects of land use on climate: Model simulations of radiative forcing and large-scale temperature change. Agric Forest Meteorol, 2007, 142: 216–233
14 华文剑, 陈海山. 大尺度土地利用/土地覆盖变化对气温日较差的影响. 气候变化研究进展, 2013, 9: 117–122
15 Pongratz J, Reick C H, Raddatz T, et al. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. Geophys Res Lett, 2010, 37: L08702, doi: 10.1029/2010GL043010
16 Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change in climate. Nature, 2003, 423: 528–531
17 Zhang J, Dong W, Wu L, et al. Impact of land use changes on surface warming in China. Adv Atmos Sci, 2005, 22: 343–348

18 Bathiany S, Claussen M, Brovkin V, et al. Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model. Biogeosciences, 2010, 7: 1383–1399
19 Bonan G B, Pollard D, Thompson S L. Effects of boreal forest vegetation on global climate. Nature, 1992, 359: 716–718
20 Lee X, Goulden M L, Hollinger D Y, et al. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. Nature, 2011, 479: 384–387
21 Swann A L S, Fung I Y, Chiang J C H. Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, 109: 712–716
22 Chase T N, Pielke Sr R A, Kittel T G F, et al. Relative climatic effects of landcover change and elevated carbon dioxide combined with aerosols: A comparison of model results and observations. J Geophys Res, 2001, 106: 31685–31691
23 Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Adv Atmos Sci, 2001, 18: 1224–1230
24 Zhao M, Pitman A J. The relative impact of regional scale land cover change and increasing CO_2 over China. Adv Atmos Sci, 2005, 22: 58–68
25 Pitman A J, Zhao M. The relative impact of observed change in land cover and carbon dioxide as simulated by a climate model. Geophys Res Lett, 2000, 27: 1267–1270
26 Lohila A, Minkkinen K, Laine J, et al. Forestation of boreal peatlands: Impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. J Geophys Res, 2010, 115: G04011, doi: 10.1029/2010JG001327
27 Lee J E, Lintner B R, Boyce C K, et al. Land use change exacerbates tropical South American drought by sea surface temperature variability. Geophys Res Lett, 2011, 38: L19706, doi: 10.1029/2011GL049066
28 Voldoire A. Quantifying the impact of future land-use changes against increases in GHG concentrations. Geophys Res Lett, 2006, 33: L04701, doi: 10.1029/2005GL024354
29 Pitman A J, Avila F B, Abramowitz G, et al. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate. Nat Clim Chang, 2011, doi: 10.1038/NCLIMATE1294
30 Neale R B, Richter J H, Conley A J, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 4.0). Technical Note NCAR/TN-485+STR. 2010
31 Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR. 2010
32 Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. The community climate system model version 4. J Clim, 2011, 24: 4973–4991
33 Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. The CCSM4 land simulations, 1850–2005: Assessment of surface climate and new capabilities. J Clim, 2011, 25: 2240–2260
34 Lawrence P J, Feddema J J, Bonan G B, et al. Simulating the biogeochemical and biogeophysical impacts of transient land cover change and wood harvest in the Community Climate System Model (CCSM4) from 1850 to 2100. J Clim, 2012, 25: 3071–3095
35 Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. Glob Biogeochem Cycles, 1999, 13: 997–1027
36 Hurtt G C, Chini L P, Frolking S, et al. Harmonization of global land-use scenarios for the period 1500–2100 for IPCC-AR5. iLEAPS Newslett, 2009, 7: 6–8
37 Matthews H D, Weaver A J, Eby M, et al. Radiative forcing of climate by historical land cover change. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1055, doi: 10.1029/2002GL016098
38 Davin E L, de Noblet-Ducoudré N, Friedlingstein P. Impact of land cover change on surface climate: Relevance of the radiative forcing concept. Geophys Res Lett, 2007, 34: L13702, doi: 10.1029/2007GL029678
39 Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science, 2004, 305: 1138–1140
40 Zhang J, Wang W, Wei J. Assessing land-atmosphere coupling using soil moisture from the Global Land Data Assimilation System and observational precipitation. J Geophys Res, 2008, 113: D17119, doi: 10.1029/2008JD009807
41 Dai A. Drought under global warming: A review. WIREs Clim Chang, 2011, 2: 45–65
42 Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models. Nat Clim Chang, 2013, 3: 52–58, doi: 10.1038/NCLIMATE1633
43 Pitman A J, de Noblet-Ducoudré N, Cruz F T, et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. Geophys Res Lett, 2009, 36: L14814, doi: 10.1029/2009GL039076