

胡祖恒, 徐忠峰, 马柱国. 2018. 欧洲地区不同温室气体背景下土地利用/覆盖变化的气候效应 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 176–184. Hu Zuheng, Xu Zhongfeng, Ma Zhuguo. 2018. The impact of land use/land cover changes under different greenhouse gas concentrations on climate in Europe [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 176–184, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17010.

欧洲地区不同温室气体背景下土地利用/覆盖变化的气候效应

胡祖恒^{1,2} 徐忠峰¹ 马柱国¹

¹ 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过温室气体排放和土地利用/覆盖变化, 人类活动对气候变化产生显著影响。为了探究在不同温室气体浓度 (Greenhouse gas concentration, GHG) 背景下, 相同的土地利用/覆盖变化 (Land Use and Land Cover Change, LULCC) 对于欧洲区域气候的影响差异, 采用 CESM (Community Earth System Model) 耦合模式进行了模拟研究。研究发现, 在 1850 年温室气体浓度背景下, 土地利用/覆盖变化导致欧洲中东部地区降水显著增加, 而在 2000 年温室气体浓度背景下, 土地利用/覆盖变化导致欧洲中东部地区降水减少。温室气体增加后, LULCC 导致该地区对流层低层大气环流由辐合变为辐散, 气温以及大气水汽含量降低, 这些变化能较大程度的改变 LULCC 对区域降水的净影响力。

关键词 温室气体浓度变化 土地利用/覆盖变化 区域气候效应

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0176-09

中图分类号 P461.8

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17010

The Impact of Land Use/Land Cover Changes under Different Greenhouse Gas Concentrations on Climate in Europe

HU Zuheng^{1,2}, XU Zhongfeng¹, and MA Zhuguo¹

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Human activities have modified the Earth's climate through emissions of greenhouse gases and land-use and land-cover changes (LULCC). To investigate the impacts of LULCC under different greenhouse gas concentrations (GHG) on regional climate, several numerical experiments are performed using the fully coupled community earth system model (CESM). Results are as follows. Under the concentrations of greenhouse gases around 1850, the LULCC lead to increases in precipitation in central and eastern Europe, while under concentrations of greenhouse gases around 2000, the LULCC lead to decreases in precipitation in central and eastern Europe. Under the increased GHG concentration, LULCC lead to changes in the atmospheric circulation from convergence to divergence and decrease the air temperature and moisture

收稿日期 2017-01-10; **网络预出版日期** 2017-06-16

作者简介 胡祖恒, 男, 1989 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化与气候模拟研究。E-mail: huzh@tea.ac.cn

通讯作者 马柱国, E-mail: mazg@tea.ac.cn

资助项目 国家科技攻关计划项目 2016YFA0600403, 国家自然科学基金项目 41675080、91637103

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600403), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675080 and 91637103)

content. These changes play a dominant role in determining the net impact of LULCC on regional precipitation.

Keywords Increased greenhouse gas concentration, Land use and land cover changes, Regional climate

1 引言

近一百多年来, 温室气体浓度 (Greenhouse gas concentration, GHG) 的迅速上升与人类活动是密切相关的, 其导致的直接结果是地面气温自 1880 年至 2012 年来平均上升了 $0.65\sim 1.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2013)。除影响温度之外, 温室气体增加还会加速全球水循环过程和增加全球平均降水 (Held and Soden, 2006)。另一方面, 人类活动导致大范围的土地利用/覆盖变化 (Land Use and Land Cover Change, LULCC)。土地利用/覆盖变化主要表现为大面积的自然植被转化为农田、牧场等。至今人类活动引起的土地利用/覆盖变化已经约占全球陆地面积的 50% (Hurt et al., 2006)。IPCC 第五次评估报告指出, 由于大范围的土地利用/土地覆盖变化, 地面反照率发生变化, 从而影响全球辐射强迫 (IPCC, 2013)。而非辐射效应例如地面蒸散发的改变, 也在气候变化当中扮演着重要作用 (Pitman et al., 2009; Davin and de Noblet-Ducoudre, 2010; 毛慧琴等, 2011)。

在温室气体和土地利用/覆盖变化对气候变化的影响研究方面, 前人已做了很多工作 (Held and Soden, 2006; 高学杰等, 2007; Pitman et al., 2009; Lawrence et al., 2012; 邵璞和曾晓东, 2012; Sun and Mu, 2013; Xu et al., 2015; 王明娜等, 2016)。从全球平均的角度来说, 温室气体扮演着重要作用, 其影响远大于土地利用/覆盖变化的影响; 但在区域尺度上, LULCC 导致的变化非常显著 (Lawrence et al., 2012; Pitman et al., 2012), 植被覆盖的变化导致东亚地区地表温度、地面气温、降水量和 850 hPa 风场发生明显变化 (符淙斌和袁慧玲, 2001; 曹富强等, 2015)。温室气体排放和土地利用/土地覆盖变化是人类影响气候变化的两种主要活动。那么在温室气体增加背景下, 相同的 LULCC 是否会导致不同的气候效应?

最近有研究指出, 在当代温室气体浓度背景和 1850 年温室气体浓度背景下, 相同的 LULCC 引起的气候响应是不同的, 从而导致地面气温的变化存在差异 (华文剑和陈海山, 2013)。Pitman et al.

(2011) 发现, 在不同的气候背景下 (CO_2 浓度水平分别为 1850 年和 2000 年), LULCC 对欧洲地区地面气温的影响是不同的, 原因在于温室气体增加导致积雪减少, 继而改变地面反照率, 从而改变 LULCC 对区域气候的影响。既然在不同气候背景下, 相同的 LULCC 对欧洲温度的影响有所不同, 那么其对降水的影响如何? 另外, 前人的研究发现了在不同温室气体浓度背景下土地利用/覆盖变化的作用存在差异, 然而这样的影响差异是否是显著的, 却并没有进行说明 (Pitman et al., 2011; 华文剑和陈海山, 2013)。这都是值得关注的问题, 但目前这两方面的认识还比较缺乏, 本文利用 CESM (Community Earth System Model) 耦合模式, 探讨在不同温室气体浓度背景下, 相同的 LULCC 对欧洲区域降水的影响差异效应及其可能机制。

2 模式和资料

2.1 模式介绍

本文研究所用模式为地球系统模式 CESM (Community Earth System Model) 1.0.3 版本, 关于模式的详细信息参见文献 Gent et al. (2011)。CESM 模式由 4 个模式分量组成, 分别是大气模式、陆面模式、海洋模式和海冰模式。大气模式为 CAM5 (Community Atmosphere Model) 模式, 相对于之前的 CAM4 版本, CAM5 版本改进了物理过程和参数化方案。陆面模式为 CLM 4.0 (Community Land Model), 陆面状况被分为不同的类型 (包括树木、灌木、草地、农田和裸土), 每种类型都有与其对应的叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI), 大气和陆面模式的分辨率为 2.5° (纬度) $\times 1.875^{\circ}$ (经度), 在 CLM 陆面模式中, 当存在次网格不一致时 (Subgrid heterogeneity, 如植被覆盖资料与模式分辨率不同), 其允许通过将植被覆盖进行分数化配置 (Fractional allocation), 转变为数种以上的植被功能类型 (Plant Functional Type, PFT), 在 CLM 模式的每一个格点中, 每种植被功能类型占一定的百分比, 所有百分比加起来等于 1 (Lawrence and Chase, 2007)。海洋过程和海冰过程分别由海洋模式 POP2 (Parallel Ocean Program version 2) 和

海冰模式 CICE4 (Community Sea Ice Code) 进行模拟, 海洋模式和海冰模式分辨率相同, 均为 320 (纬向)×384(经向)网格格点。CESM(Community Earth System Model) 模式和其前身 CCSM (Community Climate System Model) 模式, 已成为研究气候系统对于外部强迫响应 (比如温室气体和土地利用/覆盖变化) 的有力工具 (Notaro et al., 2011; Marsh et al., 2013; Xu et al., 2015), 研究表明 CESM 模式可以较好地模拟中纬度和低纬度地区地面气温和降水 (Lindvall et al., 2013; Xu et al., 2015)。

2.2 试验设计

为了研究在不同温室气体背景下, 相同的 LULCC 对欧洲区域降水的影响差异。我们设计了如下几种试验方案: (1) 潜在土地覆盖状况 (Potential land cover, 即受人类活动影响之前的植被状态) 和 1850 年温室气体浓度水平 (以下简称为 P1); (2) 潜在土地覆盖状况和 2000 年温室气体浓度水平 (以下简称为 P2); (3) 当前土地覆盖状况 (Current land cover) 和 1850 年温室气体浓度水平 (以下简称为 C1); (4) 以及当前土地覆盖状况和 2000 年温室气体 (以下简称为 C2)。几种模拟方案均积分 140 年, 取前 40 年为模式调整 (Spin-up) 期。当然, 40 年的模式调整期也不足以让深层海洋达到平衡状态, 但对于陆面和浅层海洋而言, 已足够使其达到一个较好的平衡状态 (Wohlfahrt et al., 2004)。

如表 1 所示, C1、P1 代表在 1850 年温室气体浓度水平下, 土地利用/覆盖变化的强迫作用。而 C2、P2 代表在 2000 年温室气体浓度水平下, 土地利用/覆盖变化的强迫作用。如此, C2 模拟方案减去 P2 模拟方案 (C2-P2) 和 C1 模拟方案减去 P1 方案 (C1-P1) 就分别表示在两种不同气候背景下相同的土地利用/覆盖变化的强迫作用。Pitman et al. (2009) 针对欧洲地区, 研究了在不同气候背景下 (分别为 1850 年和 2000 年温室气体浓度水平), 相同的 LULCC 对欧洲地区气温的影响。而我们通过对比分析 C2-P2 与 C1-P1 试验, 从而探寻在 1850 年和 2000 年温室气体浓度水平下, 相同的 LULCC 对欧洲区域降水的影响差异。本文采用考虑了数据序列自相关性的 t 检验 (Zwiers and von Storch, 1995), 这种经过改进的 t 检验方法检测显著的阈值比普通的 t 检验更加严格。

表 1 试验设计介绍

Table 1 Description of experiments

试验方案	试验描述	温室气体设置	土地利用/覆盖设置
P1	1850 年温室气体浓度, 无土	1850 年浓度水平	潜在植被覆盖地利用/覆盖变化
P2	仅考虑温室气体浓度的变化	2000 年浓度水平	潜在植被覆盖
C1	仅考虑土地利用/覆盖变化	1850 年浓度水平	当前植被覆盖
C2	同时考虑温室气体和土地利	2000 年浓度水平	当前植被覆盖用/覆盖变化

当前植被覆盖资料来源于 2000 年的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星资料, 分辨率为 0.05° (纬度)× 0.05° (经度), 潜在植被资料为在当前植被资料的基础上消除人为活动影响所得 (Ramankutty and Foley, 1999; Lawrence and Chase, 2010), 潜在植被资料的具体处理方法为: 对于存在土地利用的地区, 潜在植被是由在当前温室气体浓度条件下平衡陆面生物圈 BIOM3 (Equilibrium Terrestrial Biosphere Model) 模式模拟所得 (Haxeltine and Prentice, 1996), 对于无土地利用的地区, 潜在植被获取于 MODIS 卫星资料, 与当前植被状况保持一致。即潜在植被处理时仅改变存在人类活动/土地利用的地区, 因此, 潜在植被可以被理解为在当前气候条件下, 无人类活动/土地利用影响的自然植被状况 (Haxeltine and Prentice, 1996; Lawrence and Chase, 2010)。潜在植被资料经过长期的论证和完善, 已被广泛应用于 CLM 陆面模式和一系列的研究当中 (Lawrence and Chase, 2007, 2010; Oleson et al., 2010)。欧洲地区潜在植被和当前植被的叶面积指数, 以及相对于潜在植被状况, 当前植被状况下叶面积指数的变化如图 1 所示。

由图 1 可见, 叶面积指数减小的大值区域主要分布在欧洲中部和东部。如表 2 所示, LULCC 主要表现为森林转变为农田和草地, 其中温带常绿针叶林和温带阔叶落叶林减少幅度最大。这主要由人类大规模的土地利用所导致, 下文即开始分析这样的 LULCC 在不同温室气体浓度下对欧洲区域降水的影响差异。

3 模拟结果

3.1 降水变化空间特征

图 2a 为在 2000 年温室气体浓度下, LULCC

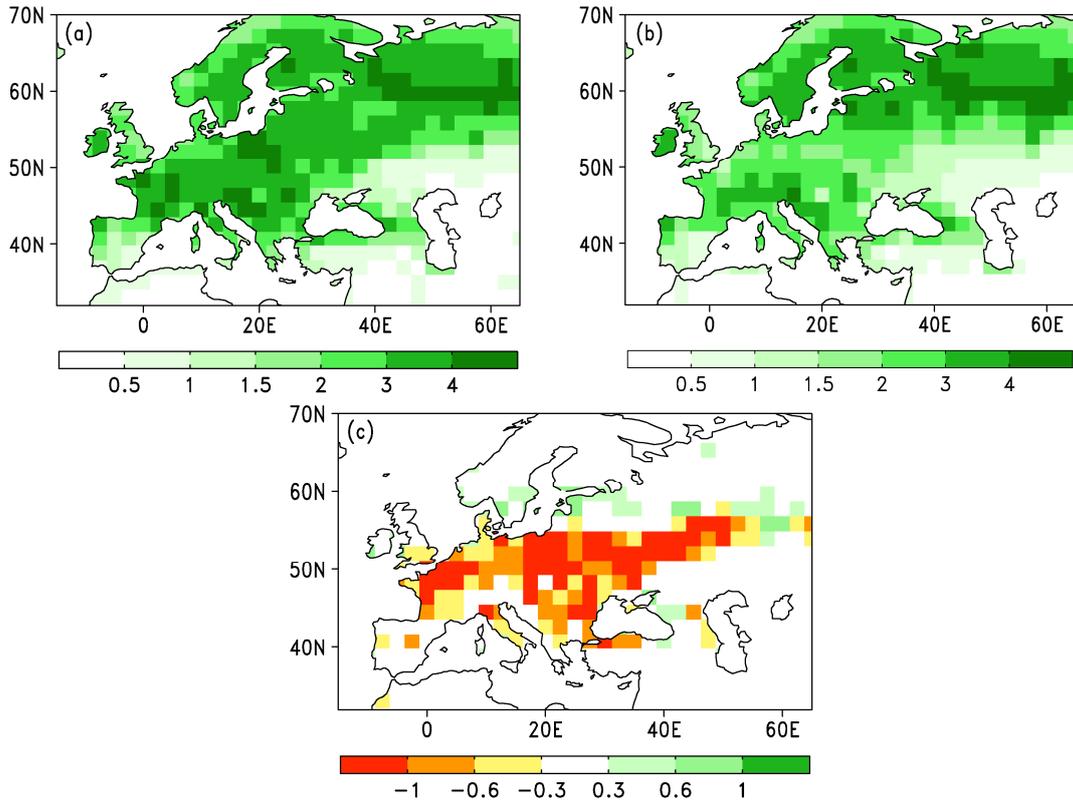


图 1 欧洲地区 5~9 月平均 (a) 潜在植被和 (b) 当前植被状况的叶面积指数以及 (c) 相对于潜在植被状况变为当前植被状况后的叶面积指数
Fig. 1 Changes in the May–September mean leaf area index of (a) potential vegetation and (b) current vegetation, and (c) between experiments with potential and current vegetation

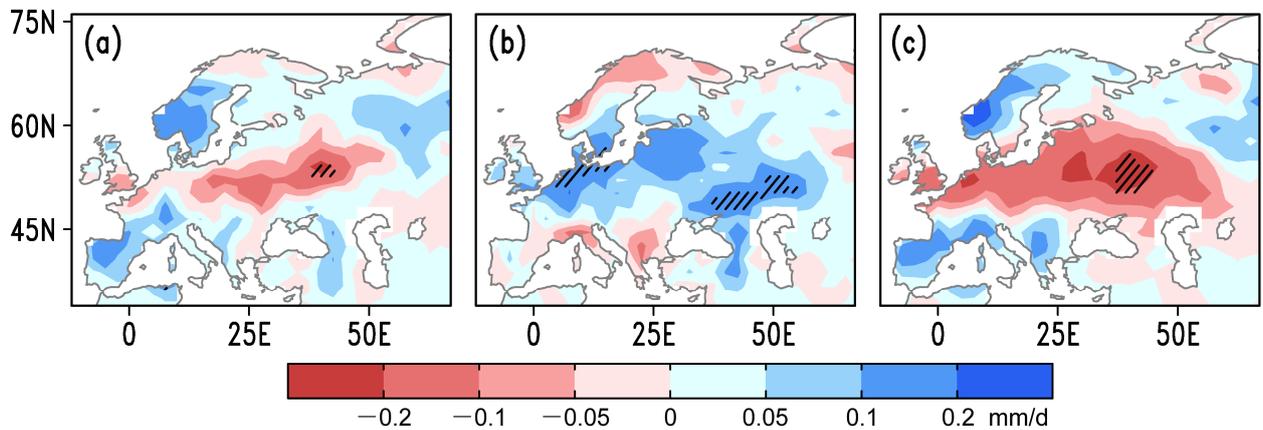


图 2 在 (a) 2000 年温室气体浓度水平和 (b) 1850 年温室气体浓度水平下土地利用/覆盖变化对暖季 (5~9 月) 降水的影响, 以及 (c) 两者的差异: (a) C2–P2 试验; (b) C1–P1 试验; (c) C2–P2 试验减去 C1–P1 试验。图中画斜线区域表示变化达到 0.05 显著性水平
Fig. 2 Under greenhouse gas concentration levels of (a) 2000 and (b) 1850 the LULCC-induced changes in precipitation (LULCC, Land Use and Land Cover Change) and (c) their differences in warm season (May–September): (a) Experiment C2–P2 (scheme C2 minus scheme P2); (b) experiment C1–P1 (scheme C1 minus scheme P1); (c) experiment C2–P2 minus experiment C1–P1. The regions with slashes are areas where the changes are significant at 0.05 level

对暖季 (5~9 月) 降水的影响。LULCC 导致东欧地区降水显著减少 ($0.1 \sim 0.2 \text{ mm d}^{-1}$)。然而, 在 1850 年温室气体浓度水平下, 相同的 LULCC 则导致东欧和西欧地区降水显著增加 ($0.1 \sim 0.2 \text{ mm d}^{-1}$) (图 2b)。为了验证两者之间的差异是否显著, 本文计

算了在两种温室气体下 LULCC 对降水的影响差异的显著性。由图 2c 可见, 温室气体浓度从 1850 年水平变为 2000 年水平后, LULCC 的影响差异表现为在东欧地区降水显著减少 ($\geq 0.2 \text{ mm d}^{-1}$)。为了探寻降水变化的原因, 本文进一步分析了 850 hPa

表 2 CLM 陆面模式中当前植被覆盖相对于潜在植被覆盖的植被功能类型在欧洲地区 (0°~50°E, 38°N~60°N) 的百分比变化

Table 2 Fractional changes of CLM (Community Land Model) plant functional types between current and potential vegetation maps over Europe (0°~50°E, 38°N~60°N)

植被功能类型	百分比变化
裸土	-0.82%
温带常绿针叶林	-11.23%
寒带常绿针叶林	-1.58%
寒带落叶针叶林	0
热带常绿阔叶林	0
温带常绿阔叶林	-0.05%
热带落叶阔叶林	0
温带落叶阔叶林	-15.59%
温带落叶阔叶林	-1.17%
温带常绿灌木	-0.38%
温带落叶灌木	-1.95%
寒带落叶灌木	-0.11%
C3 极地草	+0.08%
C3 草	+2.41%
C4 草	+0.14%
农田	+28.48%

风场, 水汽含量以及气温的改变。

3.2 降水变化机制分析

为了研究土地利用/覆盖变化在温室气体浓度增加的背景下为何会导致东欧降水产生显著的差异, 本文首先对大气环流背景进行分析。图 3a 为在 2000 年温室气体浓度水平下 LULCC 对 850 hPa 风场的影响。从中可以清楚看出, 在中东欧地区存在一个清晰的反气旋环流, 东欧地区受西北气流控制。而与之相反的是, 在 1850 年温室气体浓度水

平下 LULCC 的影响则是导致西欧上空形成一个气旋式环流, 因而东欧地区受西南气流控制 (图 3b)。从图 3c 两者的差值可见, 温室气体增加后, LULCC 影响的差异在于欧洲上空 850 hPa 表现为明显的反气旋环流, 东欧地区为辐散气流控制, 对流层底层这样的配置不利于降水的发生。

分析水汽条件可知, 在 2000 年温室气体浓度下, 土地利用/覆盖变化对欧洲区域 850 hPa 比湿并无显著的影响作用, 但可看出土地利用/覆盖变化在东欧地区是导致比湿减少的 (图 4a)。而在 1850 年温室气体浓度下 LULCC 则使东欧地区 850 hPa 比湿显著增加 (图 4b)。从图 4c 显而易见, 温室气体升高后, LULCC 的影响差异使东欧地区 850 hPa 比湿显著降低, 这样的水汽条件同样不利于降水发生。

分析 LULCC 对 850 hPa 气温的影响可知, 在两种温室气体背景下, 土地利用/覆盖变化均导致欧洲 850 hPa 气温显著降低 (图 5a、5b), 区别在于温室气体浓度由 1850 年增加到 2000 年水平后, LULCC 影响差异使东欧地区 850 hPa 气温显著降低, 联系图 3c 风场和图 4c 比湿的变化可以看出, 东欧地区处于西北干冷气流控制当中。对流辐合运动和充足的水汽是产生降水的必要条件, 通过结合分析两种温室气体浓度背景下 850 hPa 风场、比湿和气温可知, 在 2000 年温室气体的气候背景下, 各气候变量不利于降水的发生发展。

在不同温室气体浓度下, LULCC 对降水影响的差异主要体现在东欧地区。因此本文选取 25°E~50°E 做区域平均, 分析 LULCC 在两种温室气体背

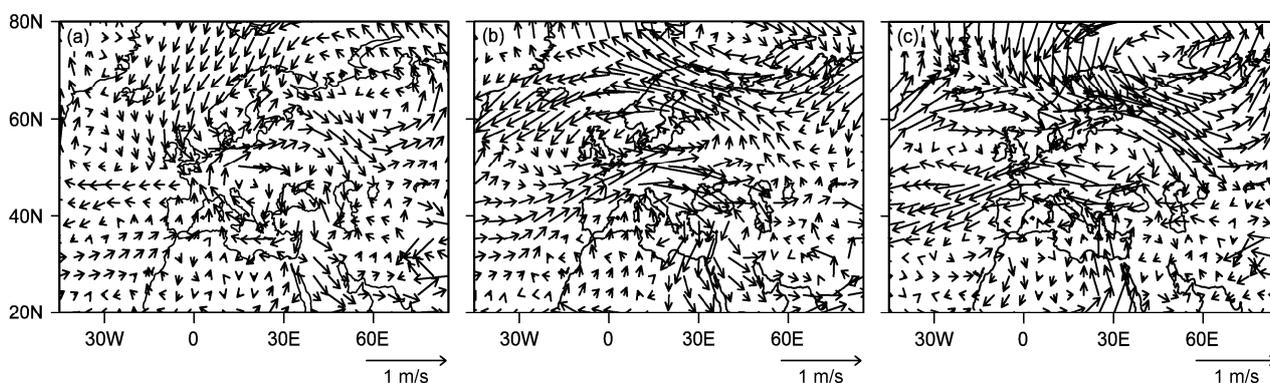


图 3 在 (a) 2000 年温室气体浓度水平和 (b) 1850 年温室气体浓度水平下土地利用/覆盖变化对暖季 (5~9 月) 850 hPa 风场的影响, 以及 (c) 两者的差异: (a) C2-P2 试验; (b) C1-P1 试验; (c) C2-P2 试验减去 C1-P1 试验

Fig. 3 Under greenhouse gas concentration levels of (a) 2000 and (b) 1850 the LULCC-induced changes in 850-hPa wind field and (c) their differences in warm season (May-September): (a) Experiment C2-P2; (b) experiment C1-P1; (c) experiment C2-P2 minus experiment C1-P1

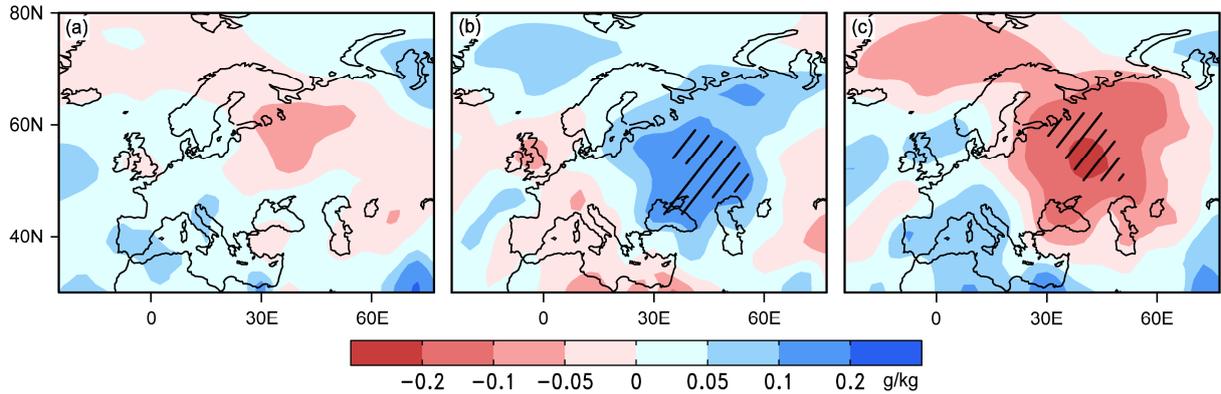


图4 在 (a) 2000 年温室气体浓度水平和 (b) 1850 年温室气体浓度水平下土地利用/覆盖变化对暖季 (5~9 月) 850 hPa 比湿的影响, 以及 (c) 两者的差异: (a) C2-P2 试验; (b) C1-P1 试验; (c) C2-P2 试验减去 C1-P1 试验。图中画斜线区域表示变化达到 0.05 显著性水平

Fig. 4 Under greenhouse gas concentration levels of (a) 2000 and (b) 1850 the LULCC-induced changes in specific humidity and (c) their differences in warm season (May-September): (a) Experiment C2-P2; (b) experiment C1-P1; (c) experiment C2-P2 minus experiment C1-P1. The regions with slashes are areas where the changes are significant at 0.05 level

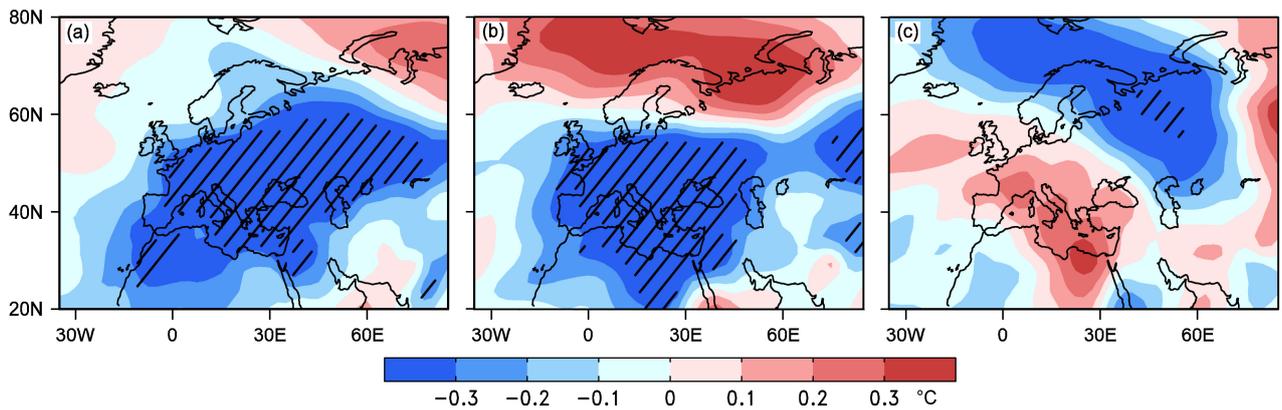


图5 在 (a) 2000 年温室气体浓度水平和 (b) 1850 年温室气体浓度水平下土地利用/覆盖变化对暖季 (5~9 月) 850 hPa 气温的影响, 以及 (c) 两者的差异: (a) C2-P2 试验; (b) C1-P1 试验; (c) C2-P2 试验减去 C1-P1 试验。图中画斜线区域表示变化达到 0.05 显著性水平

Fig. 5 Under greenhouse gas concentration levels of (a) 2000 and (b) 1850 the LULCC-induced changes in 850-hPa air temperature and (c) their differences in warm season (May-September): (a) Experiment C2-P2; (b) experiment C1-P1; (c) experiment C2-P2 minus experiment C1-P1. The regions with slashes are areas where the changes are significant at 0.05 level

景下对风场和气温影响作用的垂直剖面特征。从图 2 可以看出, 降水显著变化区域分布在 50°N~55°N 附近。在 2000 年温室气体浓度下 LULCC 的影响, 几乎在整个对流层 55°N 处均为下沉冷气流控制(图 6a)。1850 年温室气体浓度下, 从地面至 500 hPa, 50°N~55°N 为冷暖空气交界处, 同时也是辐合上升区(图 6b), 通常这样的配置是有利于降水产生的。两者的差值清楚的显示, 温室气体增加后, 50°N~55°N 为辐散下沉气流控制(图 6c)。

图 7 为土地利用/覆盖变化在两种温室气体背景下对比湿影响作用的垂直剖面。在 2000 年温室气体浓度下, 除在对流层底层为轻微增加之外, 在

55°N 处 LULCC 使整个对流层比湿降低(图 7a)。而在 1850 年温室气体浓度下, 从地面至 700 hPa, 50°N~55°N 比湿显著增加(图 7b), 为降水的产生提供了必要的水汽条件。两者的差值表明温室气体增加后, LULCC 的影响差异表现为 50°N~55°N 对流层低层比湿显著降低。

4 结论和讨论

本文基于 CESM 模式, 考虑温室气体和土地利用/覆盖变化两种气候因子强迫, 分别设计 4 组长期积分试验, 探讨不同温室气体背景下欧洲地

区土地利用/覆盖变化的气候效应。研究表明，在两种温室气体浓度背景下，相同的土地利用/覆盖变化的气候相应不同，具体表现为 LULCC 引起降水变化符号相反，尤其在东欧地区表现为显著性

的差异。

在温室气体增加的背景下，土地利用/覆盖变化对欧洲地区东部降水的影响差异表现为显著减少的特征，为了讨论这种差异的可能机制，本文通过分析

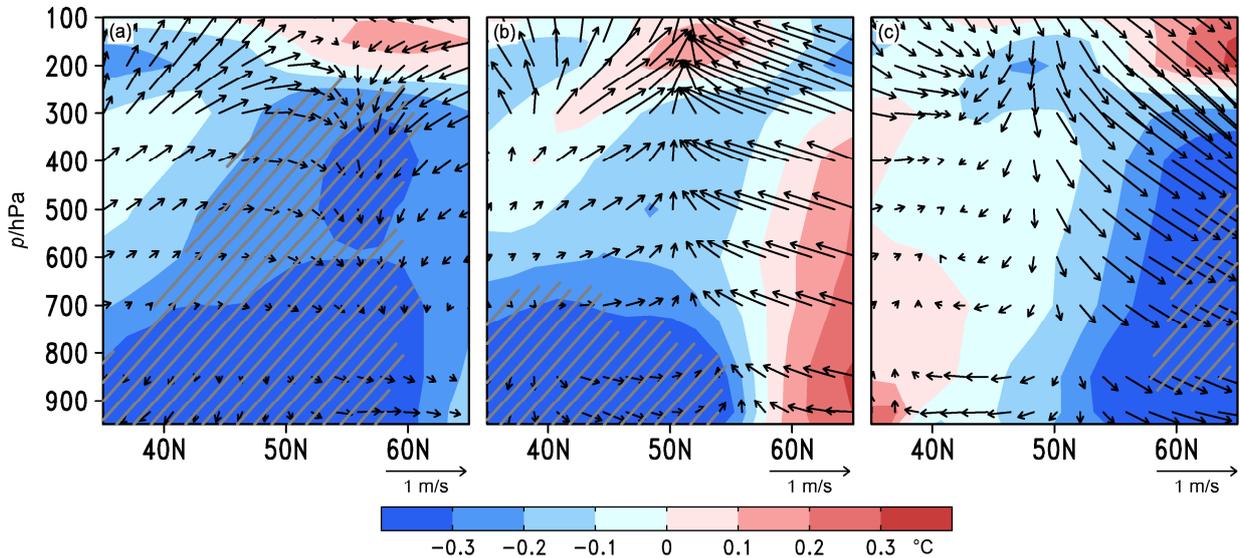


图 6 25°E~50°E 区域平均暖季(5~9 月)土地利用/覆盖变化对风场和气温影响的经向垂直剖面: (a) 2000 年温室气体浓度水平 C2-P2 试验、(b) 1850 年温室气体浓度水平 C1-P1 试验以及 (c) 两者的差异(C2-P2 试验减去 C1-P1 试验)。阴影代表气温的变化,斜线表示气温变化达到 0.05 显著性水平

Fig. 6 Longitudinal cross sections of wind field and air temperature averaged over 25°E-50°E under greenhouse gas concentration levels of (a) 2000 and (b) 1850 the LULCC-induced changes and (c) their differences in warm season (May-September): (a) Experiment C2-P2; (b) experiment C1-P1; (c) experiment C2-P2 minus experiment C1-P1. The shaded indicates changes in air temperature, the regions with slashes are areas where the changes in temperature are significant at 0.05 level

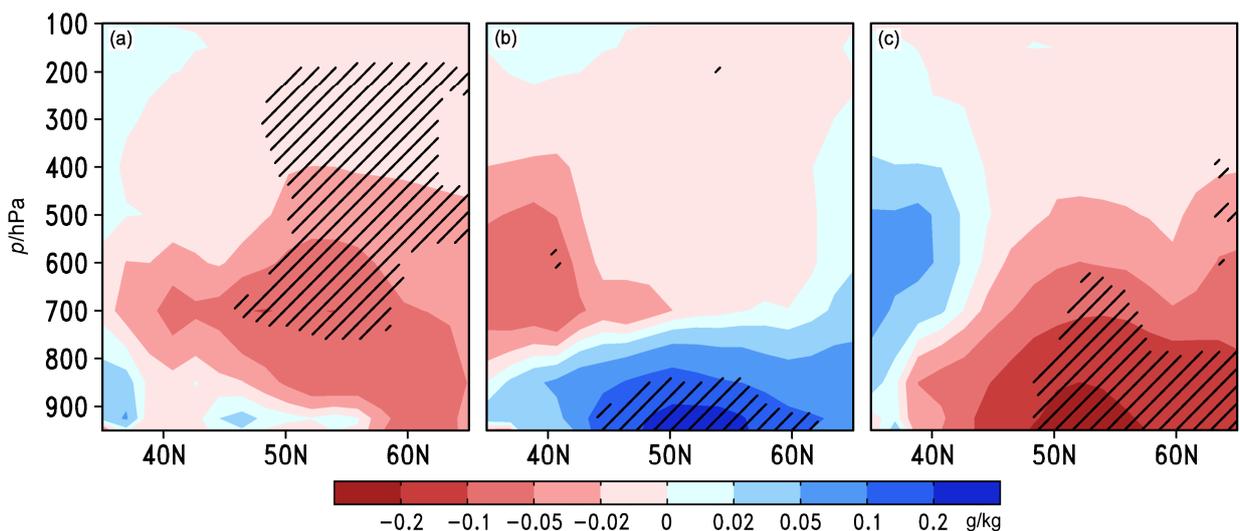


图 7 25°E~50°E 区域平均暖季(5~9 月)土地利用/覆盖变化对比湿影响的经向垂直剖面: (a) 2000 年温室气体浓度水平 C2-P2 试验、(b) 1850 年温室气体浓度水平 C1-P1 试验以及 (c) 两者的差异(C2-P2 试验减去 C1-P1 试验)。阴影代表比湿的变化,斜线表示比湿变化达到 0.05 显著性水平

Fig. 7 Longitudinal cross sections of specific humidity averaged over 25°E-50°E under greenhouse gas concentration levels of (a) 2000 and (b) 1850 the LULCC-induced changes and (c) their differences in warm season (May-September): (a) Experiment C2-P2; (b) experiment C1-P1; (c) experiment C2-P2 minus experiment C1-P1. The shaded indicates the changes in specific humidity, the regions with slashes are areas where the changes in specific humidity are significant at 0.05 level

了大气环流,水汽和热力条件的变化特征。通过分析 850 hPa 风场、比湿和气温发现,在 2000 年温室气体的气候背景下,LULCC 的影响作用导致东欧地区 850 hPa 为西北气流,整个对流层低层表现为下沉辐散气流,比湿显著降低,这几种作用共同决定了 LULCC 在温室气体增加下引起的气候效应差异。

本文研究表明了温室气体浓度背景在土地利用/覆盖变化影响区域气候中的重要性。这说明在历史和未来气候变化模拟和预估研究中,需要同时考虑二者的变化。需要指出的是,本文的试验只是一个初步的结果,还存在许多值得进一步研究的问题和不确定性,数值模式能否合理描述温室气体和 LULCC 对气候的影响需进一步检验,这也对模式的发展和改进都提出了更高的要求。

参考文献 (References)

- 曹富强,丹利,马柱国. 2015. 中国农田下垫面变化对气候影响的模拟研究 [J]. 气象学报, 73 (1): 128–141. Cao Fuqiang, Dan Li, Ma Zhuguo. 2015. Simulative study of the impact of the cropland change on the regional climate over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73 (1): 128–141, doi: 10.11676/qxxb2015.001.
- Davin E L, de Noblet-Ducoudré N. 2010. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes [J]. Journal of Climate, 23: 97–112. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI13102.1>
- 符宗斌,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. One virtual test of restoration of natural vegetation affecting the climate and environment in the summer of eastern 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 (地球科学), 37 (3): 397–404. Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model [J]. Science in China Series D (Earth Sciences), 50 (4): 620–628, doi: 10.1007/s11430-007-2060-y.
- Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. 2011. The community climate system model version 4 (CCSM4) [J]. J. Climate, 24: 4973–4991, doi: 10.1175/2011JCLI4083.1.
- Haxeltine A, Prentice I C. 1996. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types [J]. Global Biogeochemical Cycles, 10 (4): 693–709, doi: 10.1029/96GB02344.
- Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. J. Climate, 19: 5686–5699, doi: 10.1175/JCLI3990.1.
- 华文剑,陈海山. 2013. 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 [J]. 科学通报, 58 (27): 2832–2839. Hua Wenjian, Chen Haishan. 2013. Recognition of climatic effects of land use/land cover change under global warming [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (31): 3852–3858, doi: 10.1007/s11434-013-5902-3.
- Hurtt 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, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01150.x.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis [M]// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535 pp.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2012. The CCSM4 land simulation, 1850–2005: Assessment of surface climate and new capabilities [J]. J. Climate, 25: 2240–2260, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00103.1.
- Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0) [J]. J. Geophys. Res., 112: G01023, doi: 10.1029/2006JG000168.
- Lawrence P J, Chase T N. 2010. Investigating the climate impacts of global land cover change in the community climate system model [J]. International Journal of Climatology, 30 (13): 2066–2087, doi: 10.1002/joc.2061.
- Lindvall J, Svensson G, Hannay C. 2013. Evaluation of near surface parameters in the two versions of the atmospheric model in CESM1 using flux station observations [J]. J. Climate, 26 (1): 26–44. DOI:10.1175/JCLI-D-12-00020.1.
- 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.04.12.
- Marsh D R, Mills M J, Kinnison D E, et al. 2013. Climate Change from 1850 to 2005 simulated in CESM1 (WACCM) [J]. J. Climate, 26: 7372–7391, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00558.1.
- Notaro M, Chen G S, Liu Z Y. 2011. Vegetation feedbacks to climate in the global monsoon regions [J]. J. Climate, 24: 5740–5756, doi: 10.1175/2011JCLI4237.1.
- Oleson K W, Lawrence D M, Gordon B, et al. 2010. Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR.
- Pitman A J, de 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.
- Pitman A J, Avila F B, Abramowitz G, et al. 2011. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate [J]. Nature Climate Change, 1 (9): 472–475, doi: 10.1038/nclimate1294.
- Pitman A J, de Noblet-Ducoudré N, Avila F B, et al. 2012. Effects of land cover change on temperature and rainfall extremes in multi-model ensemble simulations [J]. Earth System Dynamics, 3: 213–231, doi: 10.5194/esd-3-213-2012.
- 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, doi: 10.1029/1999GB900046.
- 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. 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10029.
- Sun G D, Mu M. 2013. Using the Lund-Potsdam-Jena model to understand the different responses of three woody plants to land use in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30 (2): 515–524, doi: 10.1007/s00376-012-2011-1.
- 王明娜, 韩哲, 张庆云. 2016. 21 世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响 [J]. *气候与环境研究*, 21 (1): 65–77. Wang Mingna, Han Zhe, Zhang Qingyun. 2016. Impact of land use and cover change in the semi-arid regions of China on the temperature in the early 21st century [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 21 (1): 65–77, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15197.
- Wohlfahrt J, Harrison S P, Braconnot P. 2004. Synergistic feedbacks between ocean and vegetation on mid- and high-latitude climates during the mid-Holocene [J]. *Climate Dyn.*, 22: 223–238, doi: 10.1007/s00382-003-0379-4.
- Xu Z F, Mahmood R, Yang Z L, et al. 2015. Investigating diurnal and seasonal climatic response to land use and land cover change over monsoon Asia with the community earth system model[J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 120: 1137–1152, doi: 10.1002/2014JD022479.
- Zwiers F W, von Storch H. 1995. Taking serial correlation into account in tests of the mean [J]. *J. Climate*, 8: 336–351, doi: 10.1175/1520-0442(1995)008<0336:TSCIAI>2.0.CO;2.