中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 7 期: 1034 ~ 1042
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

未来土地利用变化影响中国区域气候的数值模拟

华文剑[①②③], 陈海山[①③*], 李兴[①③]

① 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;
② 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;
③ 南京信息工程大学气候与环境变化国际联合实验室, 南京 210044
* 联系人, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

收稿日期: 2014-12-23; 接受日期: 2015-02-27; 网络版发表日期: 2015-06-23
全球变化重大科学研究计划项目(编号: 2011CB952000)、国家自然科学基金项目(批准号: 41475083)、教育部新世纪优秀人才支持计划、公益性行业(气象)科研专项项目(编号: GYHY201406042)和江苏高校优势学科建设工程项目资助

摘要 土地利用/土地覆盖变化(LUCC)是人类影响气候的重要强迫之一. 相对于历史时期LUCC 对区域气候的影响研究, 未来 LUCC 到底对气候有多大影响不得而知. 基于 CMIP5 推荐的土地覆盖数据, 采用区域气候模式 RegCM4, 通过当代和反映未来(2050 年)土地覆盖状况分布情况下各 15 年(2036~2050)的数值积分试验, 探讨了未来 LUCC 对中国区域气候的影响. 未来中国地区主要是以草地转换成森林为主要特征, LUCC 引起温度和降水的变化幅度和范围具有季节性差异, 其中夏、秋季区域响应最显著, 主要包括中国东北、华北和河套地区, 青藏高原东部以及华南等地. 进一步分析表明, LUCC 对大气环流也具有明显的影响, 在未来 LUCC 影响下, 印度半岛经孟加拉湾到南海及华南沿岸一带受到一致的异常西南风控制, 热带印度西南季风和南海西南季风均偏强, 来自南海和印度洋的异常水汽辐合使得中国南方降水偏多.

关键词
土地利用变化
区域气候
数值模拟

人类对气候系统的影响是明确的(Myhre等, 2013). 人类活动影响气候的主要方式除了使温室气体和硫酸盐等气溶胶过度增加之外, 另一种途径就是人类活动导致的土地利用/土地覆盖变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC). 作为人类有目的、有意识的活动, 土地利用变化贯穿在人类社会不断发展的整个历史进程中, 对全球及区域气候有重要的影响(Pielke, 2005). LUCC的研究得到了国际社会的普遍关注, 是全球变化领域重要的发展方向和前沿问题(Foley等, 2005). 众所周知, 温室气体浓度升高对气候的影响作用明显, 但是在某些情况下, LUCC对气候的影响甚至会超过温室气体的贡献(Christensen等, 2007; Myhre等, 2013).

LUCC通过改变地表反照率、粗糙度和蒸散等影响陆面和大气之间的能量、水分和动量过程, 以及陆气之间CO_2等痕量气体的交换. 很多学者从观测统计的角度, 已经证实了LUCC对气候的影响(Kalnay和Cai, 2003; Zhang等, 2005). 但是, 从观测中很难将LUCC的气候效应从全球变化的背景下剥离. 目前, LUCC的研究很多都是采用数值模拟的方法, 数值模式一直被认为是理解气候变化关键物理过程的重要工具. 早在20世纪70年代, Charney(1975)就利用大气

中文引用格式: 华文剑, 陈海山, 李兴. 2015. 未来土地利用变化影响中国区域气候的数值模拟. 中国科学: 地球科学, 45: 1034–1042
英文引用格式: Hua W J, Chen H S, Li X. 2015. Effects of future land use change on the regional climate in China. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5082-x

环流模式(GCM)探讨了萨赫勒(Sahel)干旱和植被变化的联系, 开创性地提出了生物地球物理反馈机制(Biogeophysical Feedback Mechanism). Hurtt等(2006)的研究表明, 1700~2000年间全球42%~68%的陆地表面已经被人类活动影响, 说明LUCC的变化足够达到改变大尺度气候的程度. LUCC不仅可以改变陆面的能量和水循环(de Noblet-Ducoudré等, 2012), 而且也会对大气环流产生影响(Fu, 2003; Takata等, 2009). 但是, LUCC对气候的影响十分复杂, 而且与气候背景联系紧密(Pitman等, 2011; 华文剑和陈海山, 2013). 不同区域LUCC的影响可能截然不同, 例如: 热带地区的造林有降温效应, 但是北方植树造林导致区域气温升高(Bonan, 2008).

中国区域地形复杂, 下垫面类型多样, 是世界上人类活动最活跃的地区之一, 该地区的气候与LUCC之间的联系一直备受众多学者的关注(郑益群等, 2002; 丁一汇等, 2005; 张井勇等, 2005; Ma等, 2013). 基于实际植被和自然(潜在)植被的研究工作有利于理解LUCC强迫对东亚区域气候的敏感性问题(符淙斌和袁慧玲, 2001; Gao等, 2003; 高学杰等, 2007; 华文剑和陈海山, 2013). 随着模式的完善以及陆面过程参数化的改进, 很多学者分析了不同时期、不同数据源的LUCC的气候效应, 进一步证实LUCC对气候影响的重要性(陈星等, 2006; 于燕和谢正辉, 2012; 陈海山等, 2015). 另外, 农业活动势必也会对区域气候产生影响(Zhang等, 2010; 毛慧琴等, 2011). 相对于对过去LUCC的影响研究, 人们也关注未来土地利用变化引起的气候效应(Feddema等, 2005). 利用土地利用情景变化模型, 很多学者分析中国区域未来的地表覆盖状况(何春阳等, 2004; 李月臣和何春阳, 2008). 宋帅等(2008)利用社会经济学模型与区域气候模式的耦合, 分析了未来50年中国气候的可能演变特征, 以及探讨了影响气候的原因.

众所周知, 中国近代土地利用变化的空间格局发生了改变(刘纪远等, 2009), 大部分地区植被活动在增强(方精云等, 2003). 那么, 随着未来人类活动的加剧、人口的增长以及经济、社会的发展, LUCC很可能会继续加速, 这种迅速的增长会不会对区域气候产生显著的影响? 一系列的研究工作已经论证了LUCC对区域气候环境的显著影响(华文剑等, 2014). 那么, 未来LUCC对中国气候的可能影响如何? 本文基于最新CMIP5推荐的土地覆盖数据, 采用区域气候模式RegCM4, 探讨未来LUCC对中国区域气候的可能影响.

1 模式、资料和试验设计

相对于全球模式, 具有更高分辨率的区域气候模式被广泛应用于区域气候变化研究(Yu等, 2010). 意大利国际理论物理中心(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, ICTP)发展的区域气候模式(RegCM)是最具代表性的模式之一. 在原来版本的基础上, ICTP于2010年发展了新的区域模式RegCM4(Giorgi等, 2012), 在行星边界层、积云参数化、陆面过程、海洋通量等方案都有较大的改进, 在中国地区有广泛的应用(Gao等, 2001; 鞠丽霞和王会军, 2006; Ju等, 2007; Zhang等, 2008; Gao等, 2013), 本文用的是RegCM4.1.1版本.

在本研究中, 模式模拟区域的中心格点为34°N, 105°E, 水平分辨率为50 km, 南北方向为144个格点, 东西方向为102个格点, 垂直分辨率为18层, 投影方式为兰伯特投影, 顶层气压为50 hPa. 主要的物理参数化方案如下: 辐射传输方案采用NCAR CCM3方案, 积云参数化方案采用MIT-Emanuel方案, 海洋通量参数化方案采用Zeng方案, 陆面参数化方案采用NCAR CLM3.5. 陆面模式CLM3.5垂直方向上分为10层土壤、1层植被和最多5层积雪, 以植被功能类型(Plant Function Type, PFT)对陆面植被覆盖进行分类, 每个网格可含多种地表覆盖类型. 陆面覆盖数据来自MODIS卫星产品, 是基于2000年11月至2001年12月卫星遥感信息(Lawrence等, 2007), 反映2000年左右的地表覆盖状况, 其在东亚地区的分布及其分类如图1所示. Hurtt等(2009)利用发展的土地利用模型(the Global Land Use Model)重建了全球1700~2005年的土地利用变化, 以及2006~2100年不同情景下未来土地覆盖变化, 这套数据也是CMIP5推荐的, 广泛地用于CMIP5的数值模拟, 参见(http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/forcing.html). Lawrence等(2012)将其发展了适合NCAR CLM模式的地表数据.

考虑到海气耦合模式EH5OM模拟效果的优越性(Reichler和Kim, 2008), 本研究关于当代和未来气候变化模拟的初始和侧边界数据由EH5OM提供. 当代

模拟采用EH5OM的RF模拟数据, 模式侧边界条件每6 h输入一次, 采用指数松弛方案. 边界场海温资料采用的SST_20C数据(http://users.ictp.it/~pubregcm/RegCM4/globedat.htm). 最近, 基于中国2400余个地面气象台站的观测资料建立的格点化数据集(CN05.1)为高分辨率模式的检验等提供了很好的支撑(Xu等, 2009; 吴佳和高学杰, 2013), 本文利用这套数据与模拟结果进行对比, 时间从1986~2000年, 空间分辨率为0.25°×0.25°. 而对于未来中国区域的气候模拟, 区域气候模式的初始场和侧边界值由EH50M提供的A1B情景模拟数据, 海表面温度采用SST_A1B数据, 同上RegCM4网站. 其他模式设计, 以及物理参数化方案的选择跟当代试验保持一致. 模式模拟的时间从2035~2050年.

为了探讨LUCC对未来中国地区气候的影响, 本研究设计了3组试验. (1) 参照试验(CTL): 陆面覆盖为MODIS基于2000年地表覆盖状况. 积分时段从1986年1月1日到2001年1月1日, 共计15年, 其中1986年作为模式初始化(spin-up)时段, 取1987~2000年共14年的结果分析. (2) 温室气体试验(EXP-G): 使用CTL的土地覆盖数据, 进行2035年1月1日到2051年1月1日的积分, 共计16年, 其中2035年作为模式初始化(spin-up)时段, 不做分析. (3) 温室气体+土地覆盖试验(EXP-GLC): 区别于试验EXP-G的是土地覆盖数据用反映2050年的地表状况(Lawrence等, 2012)代替, 考虑未来气候变化的温室气体排放策略, 基于代表性浓度路径情景RCP4.5的状况, 其余均保持一致, 同样进行上述时间段的积分. 试验(3)和(2)模拟结果的差代表中国地区未来LUCC产生的影响. 为了方便模式结果与观测数据的比较, 将观测数据插值到模式的网格点来进行分析.

图1给出了2000和2050年主要土地覆盖类型的空

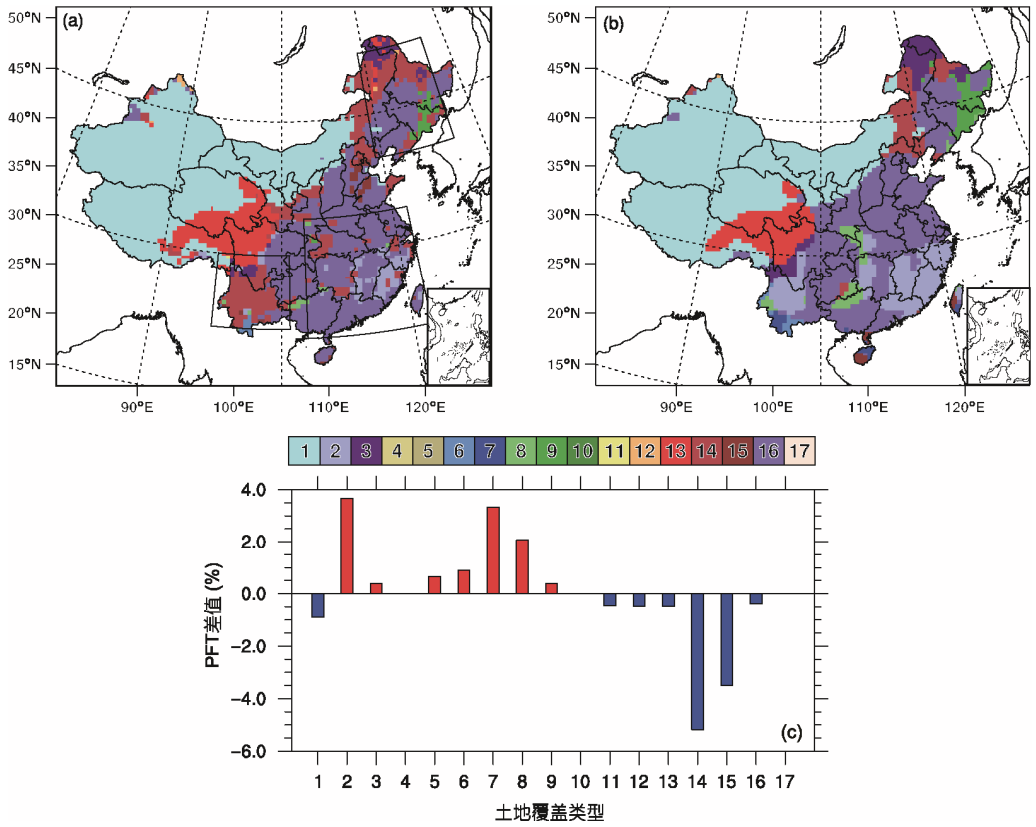


图 1　模式模拟区域及未来中国主要土地覆盖类型的空间分布

(a) 2000年的土地覆盖; (b) 2050 年的土地覆盖; (c) 中国区域平均17种PFT的差(2050–2000年). 1, 裸土; 2, 温带常绿针叶林; 3, 寒带常绿针叶林; 4, 寒带落叶针叶林; 5, 热带常绿阔叶林; 6, 温带常绿阔叶林; 7, 热带落叶阔叶林; 8, 温带落叶阔叶林; 9, 寒带落叶阔叶林; 10, 常绿阔叶灌丛; 11, 温带落叶阔叶灌丛; 12, 寒带落叶阔叶灌丛; 13, C3 极地草; 14, C3 非极地草; 15, C4 草; 16, 农作物; 17, 小麦

间分布(图1(a)和(b)), 可以发现, 地表覆盖类型在中国西南、华南和东北的差别显著, 其中, 东北地区阔叶林和灌丛增加, 针叶林取代原来的草地, 华南靠近福建和浙江等地农作物被温带常绿针叶林所代替, 西南地区草地转变为温带常绿针叶林. 从两个时期东亚区域平均的17种PFT的差值图可以看出(图1(c)), 主要是以草地转换成森林为主要特征, 这与前人利用社会经济学模型分析的未来土地利用变化类似(宋帅等, 2008).

2　结果分析

2.1　模式模拟性能检验

本研究基于区域气候模式讨论未来LUCC对中国区域气候的可能影响. 因此, 有必要就模式的模拟性能进行检验. 本节将参照试验CTL的模拟结果与CN05.1进行比对以检验、评估模式的模拟能力. 图2(a)和2(b)分别给出了CN05.1观测、模拟与观测差值的空间分布. 模式对于中国大部分地区的气温模拟出现冷偏差, 这与张冬峰等(2007)和Gao等(2013)的结果类似. 对于降水而言(图2(c)和2(d)), 模式基本能模拟出中国地区降水由东南部海洋至西北部内陆减少的空间分布特征, 但是华南地区模拟的降水偏低, 而在高原东侧模拟降水偏强, 存在模拟降水量偏少的缺陷, 这也是模式普遍存在的(张冬峰等, 2007; 张莉等, 2008). 总体说来, 模式对基本要素有一定模拟能力, 这为后文的研究奠定了基础.

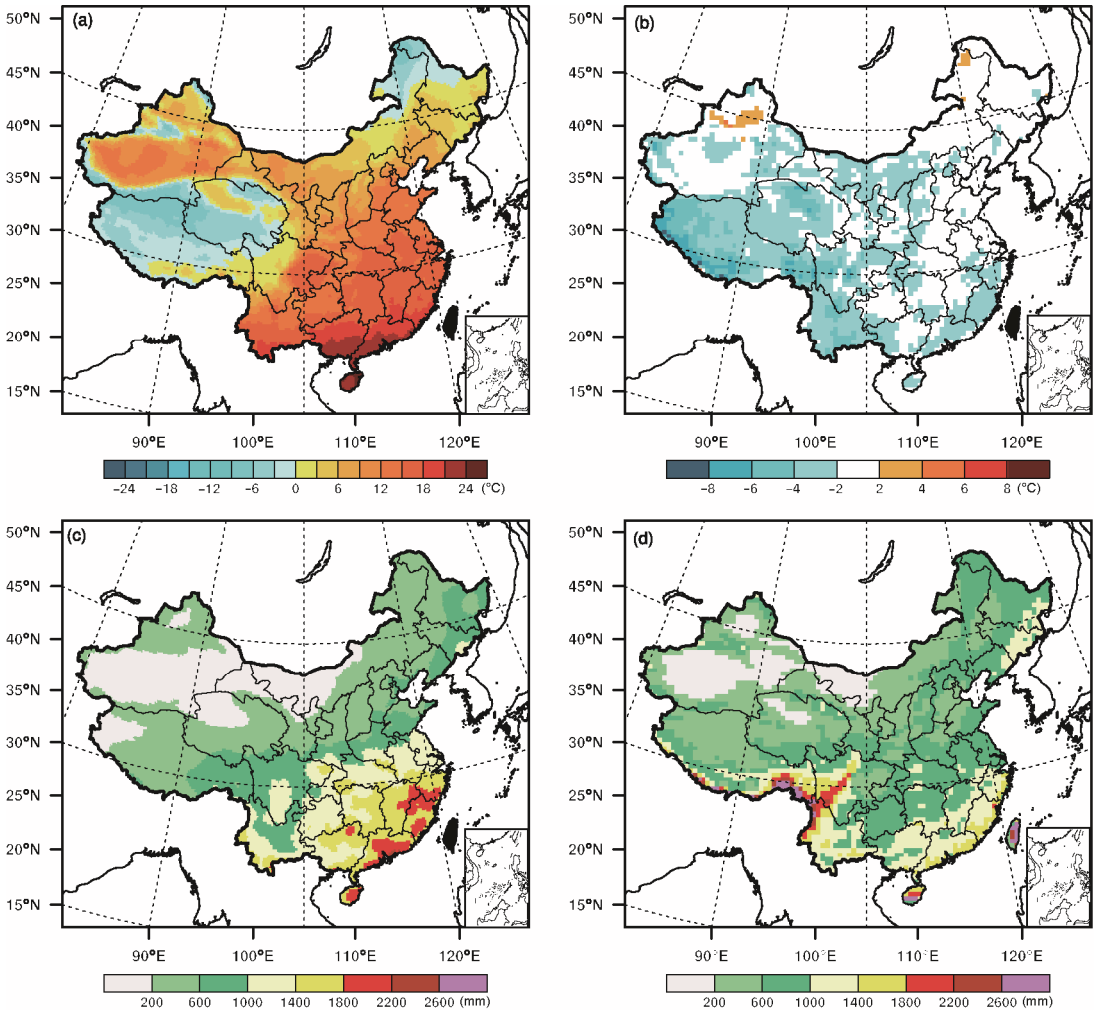


图 2　CN05.1 年平均气温(a)、CN05.1 与 CTL 年平均气温差(b)、CN05.1 年平均降水(c)和 CTL 年平均降水(d)图

2.2 未来 LUCC 的影响分析

地表覆盖类型的变化通过改变地表反照率、粗糙度、蒸散等地表物理属性等对区域气候产生影响. LUCC引起的气温变化较大的地区主要位于东北、西南以及华南, 温度的变化幅度和范围具有显著的季节性差异. 图3给出了未来LUCC引起的4个季节气温变化的空间分布. 冬季(图3(a))和春季(图3(b))的增温幅度约为0.6℃以内, 没有通过显著性检验. 夏季(图3(c)), LUCC引起的气温显著增加, 主要显著增温区域体现在中国东北、华北和河套地区, 青藏高原东部以及华南等地. 秋季的气温变化与冬季类似, 华南地区增温明显(图3(d)).

LUCC不仅会改变局地温度, 而且可以通过影响大气环流改变区域降水. 未来LUCC对降水的影响具有季节性差异, 但是对各季节降水的影响均不是很显著. 总体而言, 夏秋季节的降水响应较其他季节明显. 图4给出了4个季节降水差值百分率变化的空间分布. 夏季(图4(c)), 降水在中国西南和华南地区偏多, 幅度约为10%~15%. 秋季降水的变化较夏季相比类似, 但是部分地区影响强度和范围明显增大, 主要包括西北地区东部, 华北中南部, 黄淮流域, 最大降水幅度达20%以上. 值得注意的是, 未来LUCC不仅显著影响夏季气候, 而且对秋季的影响也不可忽视, 由此可见, LUCC的气候效应具有明显的季节性差异.

以上是对气温和降水的讨论, 那么对于局地大气环流的作用如何? 在850 hPa, 冬季的风场变化最弱(图5(a)), 但是在夏季, 在中国东部以及靠近东海存在一个异常的气旋性环流(图5(c)), 使得偏南风加强, 输送更多的水汽到中国南方. 从降水场上也可以看出南方大部分地区降水增加. 地表覆盖的变化使得东亚冬季风偏弱, 而夏季风偏强. 具体而言, 在冬

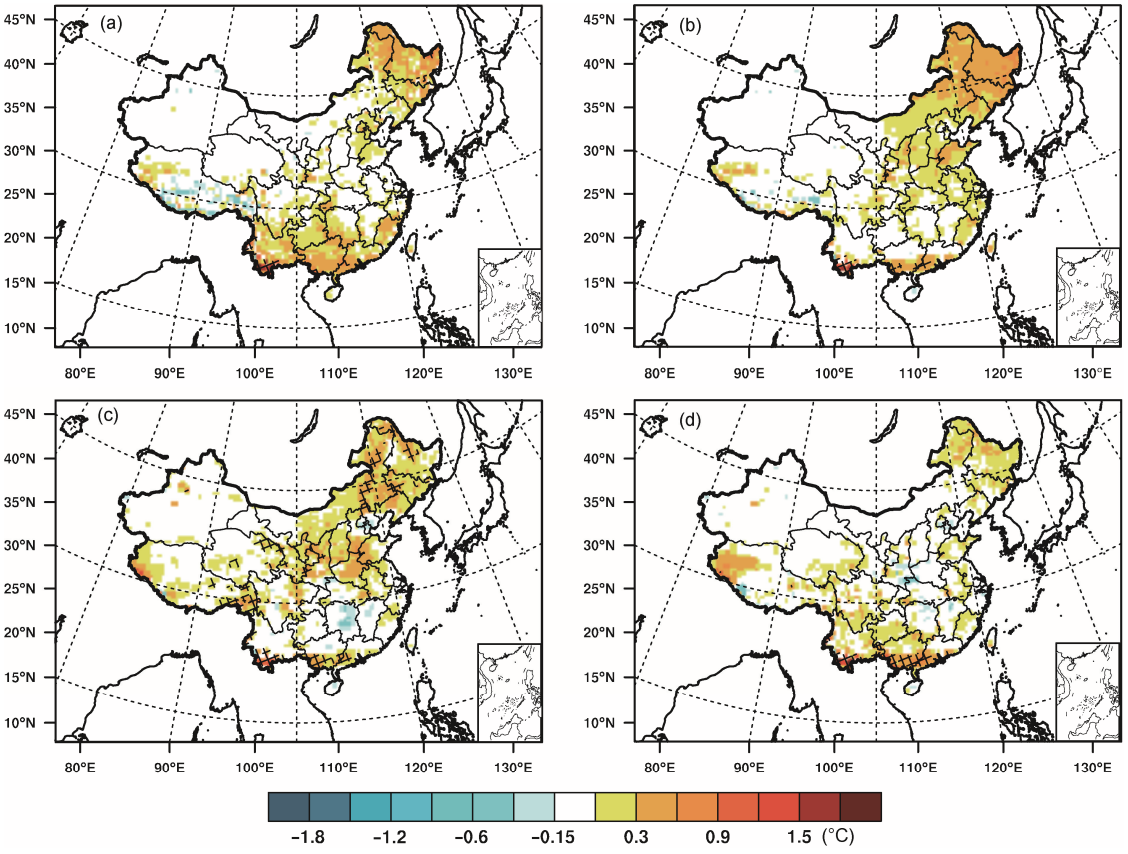


图 3 未来 LUCC 引起的气温(℃)变化

(a)冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季. 网格线表示通过 0.05 的显著性检验

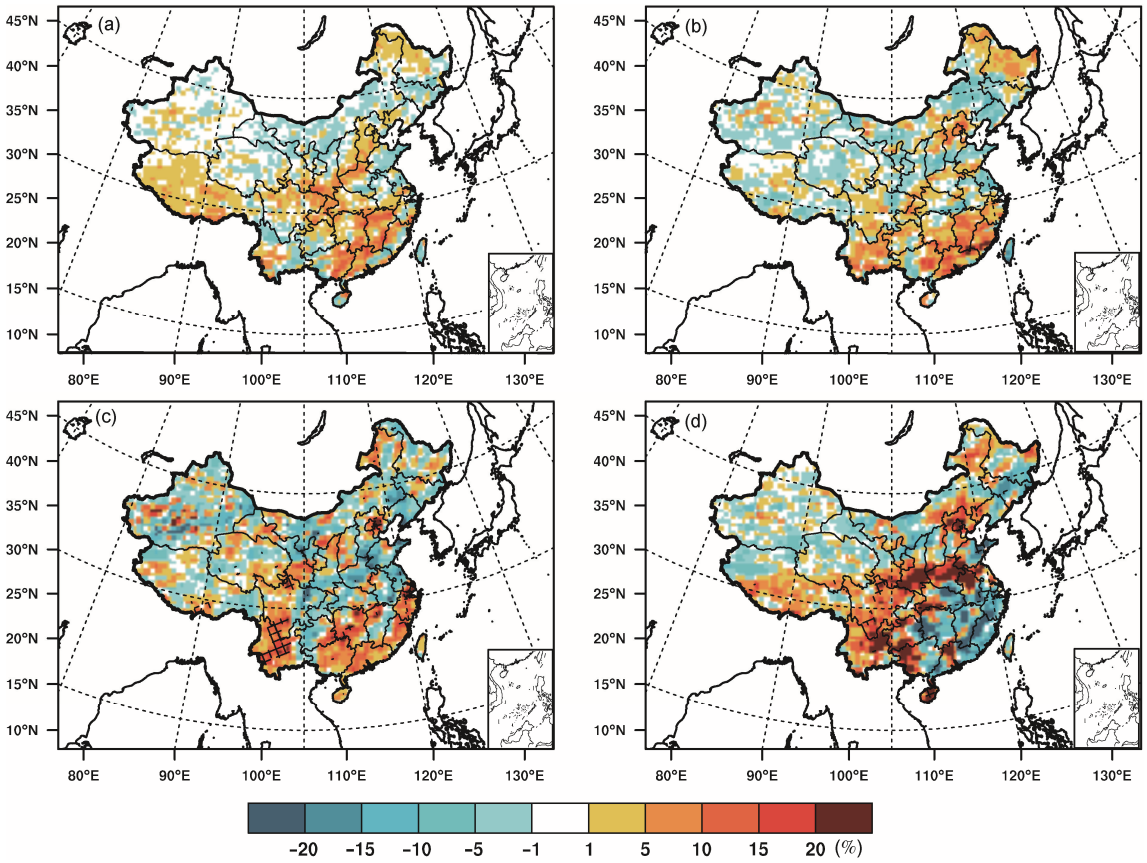


图 4　未来 LUCC 引起的降水百分率变化

(a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季. 网格线表示通过 0.05 的显著性检验

季850 hPa上, 高原南部有偏西气流, 在中国南方主要是西南风, 导致冬季盛行的西北风减弱, 季风强度减弱. 春季的情况和冬季类似, 主要的差别在北方蒙古, 可能是由于冬季积雪的覆盖, 地表覆盖的变化不显著, 在春季有较强的异常偏东气流. 夏季除了东海、中国东部的异常气旋性环流, 在外蒙古附近也有一个弱的气旋性环流, 对应降水场上有增加趋势. 以夏季为例, 降水场上可以看出两个较为明显的多雨区, 其中华南为显著多雨区, 华北地区降水有增多的趋势, 但不显著, 而江淮流域降水偏少. 从环流场上看, 热带季风和副热带季风环流的变异是造成降水如此异常分布的主要原因: 850 hPa风场上, 从印度半岛经孟加拉湾到南海及华南沿岸为一致的异常西南风控制, 表示热带的印度西南季风和南海西南季风均偏强, 热带辐合带活跃且位置偏北, 在后汛期华南更容易受到热带天气系统影响, 来自南海和印度洋的异常水汽辐合使得中国南方降水偏多.

通过以上分析, 未来LUCC对气候的影响在夏季明显, 不同区域LUCC造成的气候效应不同, 说明LUCC的影响具有局地性和季节性差异. 表1给出了典型区域LUCC引起气候因子变化的统计结果, 3个区域的划分参见图1(a).

相对于当代植被覆盖, 未来中国地区主要是以草地转换成森林为主要特征, 这种土地利用变化最直接的作用就是使得地表反照率减小, 地表粗糙度增加, 进而导致地表吸收的太阳辐射增多. 从3个典型的区域来看, LUCC使得地面吸收的太阳辐射都呈增加的趋势, 西南地区的短波辐射增加最多. 一方面, 草地的减小使得地表反照率减小, 吸收的短波辐射增加, 温度升高; 另一方面, 植被粗糙度增加, 冠层蒸发和植被蒸腾作用增加, 蒸散发能力增强, 使得温度降低. 从气温的响应看, LUCC使得3个区域的温

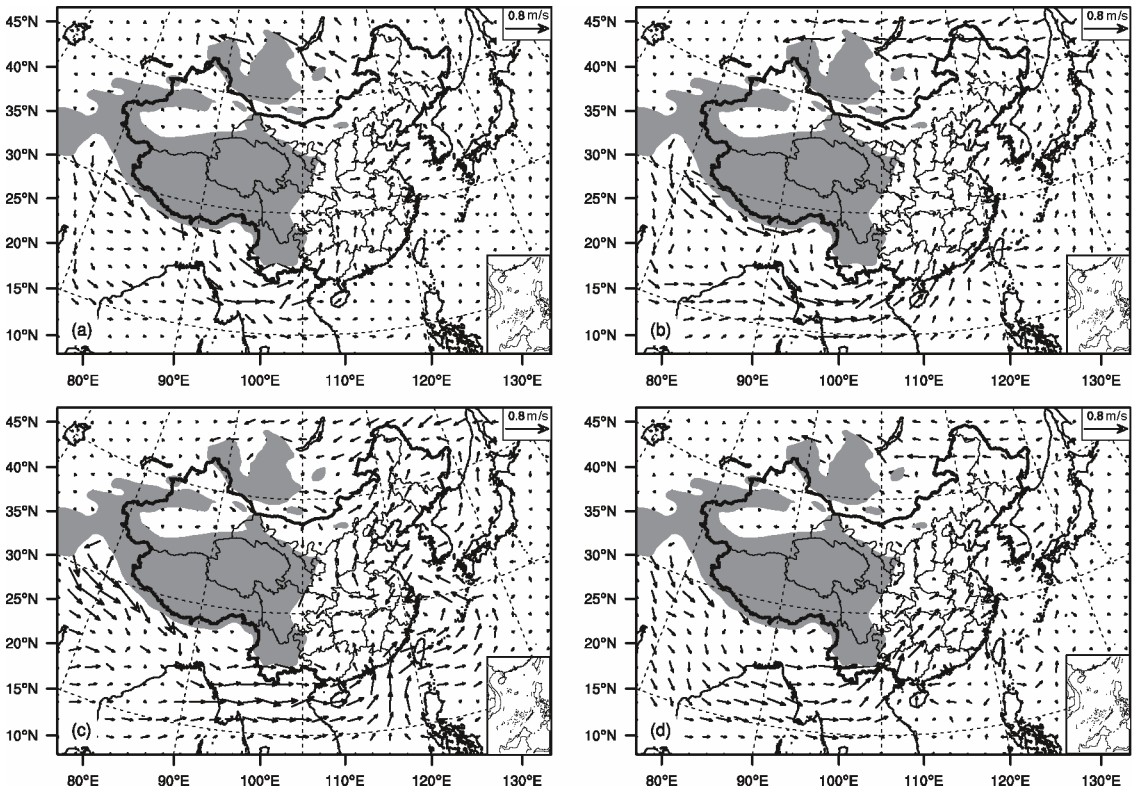


图 5 东亚地区 LUCC 引起的 850 hPa 风场的变化

(a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

度升高, 东北温度变化最大, 约为0.26℃. LUCC也会引起净辐射在感热和潜热间分配的变化. 对于3个区域而言, 感热都呈增加趋势. LUCC引起降水的变化比较复杂, 一方面, 地表覆盖的转变会影响地表粗糙度的变化, 使得地表蒸散发作用发生改变, 最终对降水产生影响; 另一方面, 由于LUCC引起低层环流场变化, 风场的变化引起辐合辐散以及大气中水汽的变化都会对降水产生重要作用. 对于3个区域而言, 中国东北的降水变化不明显, 而在中国华南以及西南地区降水增加, 这与印度半岛经孟加拉湾到南海及华南沿岸为一致的异常西南风控制有关, 来自南海和印度洋的异常水汽使得华南和西南降水偏多, 其中西南地区夏季的降水变化最大, 大约为0.32 mm/d.

3 讨论和结论

大量研究表明, LUCC对区域气候有显著影响. 本文通过数值模拟的方法进一步探索了未来LUCC影响中国气候的重要性. 基于最新CMIP5推荐的土地覆盖数据, 采用区域气候模式RegCM4, 通过当代和未来两种典型时期的土地覆盖作为强迫, 分别进行两组数值模拟试验, 探讨未来LUCC对中国区域气候的可能影响. 主要结论如下:

(1) 区域气候模式RegCM4能够对于中国地区历

表 1 LUCC 引起的夏季区域平均气候因子的变化

	太阳辐射(W m^{-2})	气温(℃)	降水(mm d^{-1})	蒸发(mm d^{-1})	感热(W m^{-2})
东北	2.98	0.26	–0.05	0.04	0.76
华南	3.20	0.10	0.10	0.03	1.70
西南	3.78	0.11	0.32	0.11	1.80

史时期的气温空间分布模拟较好, 但是模式对于中国大部分地区的气温模拟出现冷偏差. 模式能模拟出降水由东南部海洋至西北部内陆减少的空间分布特征, 但是华南地区模拟的降水偏低, 而在高原东侧模拟降水偏强.

(2) 东亚LUCC引起温度的变化幅度和范围具有季节性差异, 夏季气温响应最显著, 显著区域包括中国东北、华北和河套地区, 青藏高原东部以及华南等地, 变化幅度都在0.3℃以上. 未来LUCC不仅显著影响夏季降水, 对秋季的影响也不可忽视, 夏季降水在中国西南和华南地区偏多, 幅度约为10%~15%. 秋季降水的变化主要发生在西北地区东部, 华北中南部, 黄淮流域, 最大降水幅度达20%以上. LUCC对大气环流也具有明显的影响; 在未来LUCC影响下, 与印度半岛经孟加拉湾到南海及华南沿岸为一致的异常西南风控制有关, 来自南海和印度洋的异常水汽在中国南方辐合上升使得华南降水偏多.

(3) 相对于当代植被覆盖, 未来中国地区主要是以草地转换成森林为主要特征, 这种土地利用变化最直接的作用就是使得地表反照率减小, 地表粗糙度增加, 进而导致地表吸收的太阳辐射增多. 从3个典型的区域来看, LUCC使得地面吸收的太阳辐射都呈增加的趋势, 温度升高, 感热增加, 但是降水的响应存在明显不同, 主要是由于局地环流的作用.

本文对未来土地利用变化对中国气候的影响进行了一些探讨, 由于土地覆盖数据资料以及数值模式丰富多样, 人们利用数值模拟研究LUCC的气候效应仍存在很大的不确定性. 一方面, 不同土地利用资料对东亚地区土地覆盖描述的区域性差异很大, 另一方面, 模式间物理过程的差异也是LUCC的气候效应存在差异的一个原因, 因为不同的数值模式对于地表覆盖的描述是不一致的. 因此, 还需要在统一框架下进行更多的模拟试验, 才能对LUCC的影响进行更进一步探讨和分析. 另外, 区域气候模式模拟结果对模式本身、初始场和侧边界条件具有较大的依赖性, 还需要做更深入的不同数据的对比分析工作.

致谢　特别感谢中国气象局高学杰研究员和吴佳博士为本研究提供的格点化数据集(CN05.1).

参考文献

陈海山, 李兴, 华文剑. 2015. 近20年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟. 大气科学, 39: 357–369
陈星, 雷鸣, 汤剑平. 2006. 地表植被改变对气候变化影响的模拟研究. 地球科学进展, 21: 1075–1082
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. 气象学报, 63: 613–621
方精云, 朴世龙, 贺金世, 等. 2003. 近20年来中国植被活动在增强. 中国科学C辑, 33: 554–565
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. 科学通报, 46: 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. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 397–404
何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 2004. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. 地理学报, 59: 599–607
华文剑, 陈海山. 2013a. 全球变暖背景下土地利用/土地覆盖气候效应的新认识. 科学通报, 58: 2832–2839
华文剑, 陈海山. 2013b. 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, 9: 117–122
华文剑, 陈海山, 李兴. 2014. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述. 地球科学进展, 29: 1025–1036
鞠丽霞, 王会军. 2006. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候. 地球物理学报, 49: 52–60
李月臣, 何春阳. 2008. 中国北方土地利用/覆盖变化的情景模拟与预测. 科学通报, 53: 713–723
刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 2009. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. 地理学报, 64: 1411–1420
毛慧琴, 延晓冬, 熊喆, 等. 2011. 农田灌溉对印度区域气候的影响模拟. 生态学报, 31: 1038–1045
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. 气候与环境研究, 13: 759–774
吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. 地球物理学报, 56: 1102–1111
于燕, 谢正辉. 2012. 中国区域陆面覆盖变化的气候效应模拟研究. 气候变化研究进展, 8: 426–433
张冬峰, 欧阳里程, 高学杰, 等. 2007. RegCM3对东亚环流和中国气候模拟能力的检验. 热带气象学报, 23: 444–452
张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验. 大气科学, 32: 261–276
张井勇, 董文杰, 符淙斌. 2005. 中国北方和蒙古南部植被退化对区域气候的影响. 科学通报, 50: 53–58
郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果. 气象学报, 60: 1–16

Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science, 320: 1444–1449
Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Q J R Meteorol Soc, 101: 193–202
Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al. 2007. Regional Climate Projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al. eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 847–940
de Noblet-Ducoudré N, Boisier J, Pitman A, et al. 2012. Determining robust impacts of landuse induced land-cover changes on surface climate over North America and Eurasia; Results from the first set of LUCID experiments. J Clim, 25: 3261–3281
Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates. Science, 310: 1674–1678
Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. 2005. Global consequences of land use. Science, 309: 570–574
Fu C. 2003. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon. Global Planet Change, 37: 219–229
Gao X, Zhao Z, Ding Y, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Adv Atmos Sci, 18: 1224–1230
Gao X, Luo Y, Lin W, et al. 2003. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model. Adv Atmos Sci, 20: 583–592
Gao X, Wang M, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0. Atmos Ocean Sci Lett, 6: 381–386
Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. Clim Res, 52: 7–29
Hurtt G C, Frolking S, Fearon M, et al. 2006. The underpinnings of land-use history: Three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. Global Change Biol, 12: 1208–1229
Hurtt G C, Chini L P, Frolking S, et al. 2009. Harmonization of global land-use scenarios for the period 1500–2100 for IPCC-AR5. iLEAPS Newsl, 7: 6–8
Ju L, Wang H, Jiang D. 2007. Simulation of the Last Glacial Maximum climate over East Asia with a regional climate model nested in a general circulation model. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 248: 376–390
Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 423: 528–531
Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0). J Geophy Res, 112, doi: 10.1029/2006JG000168
Lawrence P J, Feddema J J, Bonan G B, et al. 2012. 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, 25: 3071–3095
Ma D, Notaro M, Liu Z, et al. 2013. Simulated impacts of afforestation in East China monsoon region as modulated by ocean variability. Clim Dyn, 41: 2439–2450
Myhre G, Shindell D, Bréon F M, et al. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 659–740
Pielke R A. 2005. Land use and climate change. Science, 310: 1625–1626
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. Nat Clim Change, 1: 472–475
Reichler T, Kim J. 2008. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? Bull Amer Meteor Soc, 89: 303–311
Takata K, Saito K, Yasunari T. 2009. Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustrial cultivation. Proc Natl Acad Sci, 106: 9586–9589
Xu Y, Gao X, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. Adv Atmos Sci, 26: 763–772
Yu E, Wang H, Sun J. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model. Atmos Ocean Sci Lett, 3: 325–329
Zhang D, Gao X, Ouyang L, et al. 2008. Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model. J Trop Meteorol, 14: 19–23
Zhang D, Gao X, Shi Y, et al. 2010. Agricultural land use effects on climate over China as simulated by a regional climate model. Acta Meteorol Sin, 24: 215–224
Zhang J, Dong W, Wu L, et al. 2005. Impact of land use changes on surface warming in China. Adv Atmos Sci, 22: 343–348