

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 [J]. 大气科学, 39 (2): 357–369, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14114. Chen Haishan, Li Xing, Hua Wenjian. 2015. Numerical simulation of the impact of land use/land cover change over China on regional climates during the last 20 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 357–369.

近 20 年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟

陈海山^{1,2} 李兴^{1,2} 华文剑^{1,2}

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 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 区域尺度土地利用/土地覆盖变化 (LUCC) 的气候效应以及土地覆盖数据的不确定性, 一直是 LUCC 研究不可忽视的关键问题。本研究基于最新的遥感资料, 采用新的区域气候模式 RegCM4.0, 探讨了 1990 年至 2010 年中国 LUCC 对区域气候的影响。结果表明, 中国区域 LUCC 使得局地气温和日较差发生了显著改变, 而降水及低层环流场变化不显著; LUCC 的影响存在季节性差异, 其中, 夏秋季响应程度较大且主要体现在边界层内。就 LUCC 对气候影响的机理各地区有所不同, 华北地区 LUCC 的气候效应主要受蒸散发作用主导, 而长江流域则由反照率与蒸散发共同作用。这些结果均说明, 较短时间尺度的 LUCC 气候效应主要体现在其局地范围, 且在不同的季节有所差异。

关键词 土地利用/土地覆盖变化 区域气候 数值模拟

文章编号 1006-9895(2015)02-0357-13

中图分类号 P461+.8

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14114

Numerical Simulation of the Impact of Land Use/Land Cover Change over China on Regional Climates during the Last 20 Years

CHEN Haishan^{1,2}, LI Xing^{1,2}, and HUA Wenjian^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmosphere Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The climate effects of regional-scale land use/land cover change (LUCC), along with land cover data uncertainties, have typically been the focus of LUCC studies. Based on remotely sensed LUCC data, the Regional Climate Model (RegCM4.0) was used to investigate the climate effects of LUCC over China during the last 20 years. Results show that LUCC in China during the past 20 years has changed the regional temperature and diurnal temperature range significantly, but there has been no noticeable precipitation response or low-level atmospheric general circulation changes. The variation of these climate factors due to LUCC differ among the seasons, with greater responses in summer and autumn, and are mainly reflected in the boundary layer. The mechanisms involved vary significantly between regions. LUCC has exerted stronger evapotranspiration than albedo effects in the modulating North China climate, while the effects from these two factors are of equal importance in the Yangtze River Basin. These results indicate that the impact of shorter time scale LUCC is local and limited.

Keywords Land use/land cover change, Regional climate, Numerical simulation

收稿日期 2014-01-16; 网络预出版日期 2014-05-08

资助项目 全球变化重大科学研究计划项目 2011CB952000, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201406042, 国家自然科学基金项目 41475083, “新世纪优秀人才支持计划”, 江苏高校优势学科建设工程项目 PAPD

作者简介 陈海山, 男, 1973 年出生, 博士、教授, 主要从事陆面过程与气候数值模拟研究。E-mail: haishan@nuist.edu.cn

1 引言

全球变化已经成为近几十年的热点话题。根据 IPCC 第五次评估报告 (IPCC, 2013), 自工业革命以来, 人类活动的净影响已成为全球变暖的原因之一, 且与近半个世纪以来的海平面上升、极端天气气候事件的逐渐增多存在一定的联系。除温室气体和气溶胶以外, 人类活动影响气候的另一个重要方面是土地利用/土地覆盖的变化。早在 1995 年, 国际上就提出了“土地利用/土地覆盖变化”(Land Use and Land Cover Change, LUCC) 研究计划 (Turner et al., 1995)。人类活动引起的地表覆盖的变化对气候和生物地球化学圈的影响得到普遍关注 (Foley et al., 2005; Pielke Sr, 2005), LUCC 与全球变化的关系已经成为全球变化研究的核心内容之一 (傅伯杰等, 2005)。

LUCC 是人类改造自然生态系统的最直接的体现。其不仅会影响局地或者区域尺度的气候, 也会对季风以及大气环流产生影响 (符淙斌和袁慧玲, 2001)。同时, LUCC 还会引起 CO_2 (二氧化碳)、 CH_4 (甲烷) 等温室气体的过量排放, 改变大气化学成分。LUCC 对气候影响体现在多个方面, 其可以通过改变辐射、云、地表反照率和粗糙度等进而影响到陆—气之间的能量、水分交换。例如, 热带地区的森林砍伐会降低地表粗糙度, 导致蒸散发作用减弱, 引起增温 (Henderson-Sellers et al., 1993; Hahmann and Dickinson, 1997); LUCC 的一个极端体现就是“城市热岛”效应, 城市与自然下垫面性质的极大差异造成了能量、水循环的不同, 导致局地地表温度升高 (Zhang et al., 2005; 陈海山和张叶, 2013); LUCC 不仅可以影响局地的气候, 还会对大尺度全球气候产生影响, 如: 中纬度的 LUCC 会使得亚洲夏季风减弱 (Chase et al., 2000)、LUCC 也会通过遥相关影响其他地区的气候 (Chase et al., 2001; Werth and Avissar, 2002) 等。虽然大量研究表明 LUCC 对气候有明显影响 (Gao et al., 2003; 张耀存和傅小锋, 1998; Shi and Wang, 2003; Wang et al., 2003; 陈星等, 2006; 高学杰等, 2007; 于燕和谢正辉, 2012; 华文剑和陈海山, 2013; Hua and Chen, 2013; 李婧华等, 2013), 但是正如 IPCC 指出, 人类活动造成的 LUCC 对气候影响的研究仍然薄弱。其中, LUCC 导致的辐射强迫的不确定性仍然很大, 主要问题之一是对于历史资料、卫星遥感

等手段反演或者利用不同信息来源构建的土地覆盖数据存在差异, 数值模拟采用不同数据源的土地利用/土地覆盖数据可能会使得模拟结果存在不确定性 (Benítez et al., 2004; 陈锋和谢正辉, 2008)。

最近几十年, 由于社会、经济的迅速发展, 中国城市化进程加快, 区域农作物面积增加, 伴随的是自然资源的过度使用以及生态系统的破坏。随着卫星监测技术的迅速发展, 观测到的 LUCC 空间信息表明, 20 世纪 90 年代以来中国土地空间格局发生了重大的调整与结构性变化 (刘纪远等, 2002; 2009), 尤其是雨养农田、灌溉农田的改变。中国作为农业大国, 农田占有很大的国土面积, 且增长迅速, 农业上土地利用管理的变化 (如农田灌溉、农田免耕和作物轮作等) 也会对区域甚至更大尺度的气候产生影响, 例如, 农田灌溉的降温作用以及局地水文效应 (Kueppers et al., 2007; 陈锋和谢正辉, 2008; Zhang et al., 2010; 毛慧琴等, 2011b)。因此, 深入探究近代土地利用格局改变所引起的气候效应变得尤为重要。

大量研究已经证实了 LUCC 对区域气候的影响 (毛慧琴等, 2011a; 邵璞和曾晓东, 2012), 但是目前很多工作都是采用理想的土地覆盖试验 (例如大范围的植被替换, 不考虑人类活动影响下的理想植被), 不能反映较短时间尺度 (几十年) LUCC 气候效应。此外, 相比于全球模式, 区域气候模式在分辨率、中小尺度物理过程和局地气候的描述上要更加详细、精确, 其在东亚区域的应用比其他地区更为重要 (Gao et al., 2006), 可以更好地模拟出中国 LUCC 的区域气候效应。针对近 20 年来中国区域真实的 LUCC, 本文基于最新的遥感资料, 采用高分辨率的区域气候模式, 探讨 21 世纪初中国 LUCC 对区域气候的影响。

2 资料与模式

本研究所用到的模式为意大利国际理论物理中心 (The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, ICTP) 所开发的 RegCM4.0 模式 (Giorgi et al., 2012)。与第三代相比, RegCM4.0 在行星边界层、积云参数化、陆面过程和海洋通量等方案都进行了较大改进。因其对中国区域的模拟能力较好 (刘向培等, 2011; 邹靖和谢正辉, 2012), 该模式也被广泛应用到中国区域的古今及未来气候变化、LUCC 气候效应等研究当中 (高学杰等,

2007; Zhang et al., 2008; Shi and Gao, 2012)。

本研究试验区域中心格点为 (34°N, 105°E), 水平分辨率为 50 km, 东西方向 102 个格点, 南北方向 144 个格点, 垂直分辨率为非均匀的 18 层, 投影方式为兰伯特投影, 顶层气压为 50 hPa, 积分步长为 60 s。初始场采用美国大气研究中心/美国环境预报中心 (NCAR/NCEP) 的 2.5°×2.5°的 NCEP/DOE Reanalysis II 数据, 侧边界每 6 h 更新一次, 采用指数松弛方案。海温资料采用美国海洋大气局 (NOAA) 的 OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) 月平均资料。辐射传输方案采用 NCAR CCM3 方案 (Kiehl et al., 1996), 积云参数化方案采用 MIT-Emanuel 方案 (Emanuel and Zivkovic-Rothman, 1999), 海洋通量参数化方案采用 Zeng 方案 (Zeng et al., 1998), 陆面参数化方案采用生物圈—大气圈传输方案 BATS1e (Dickinson et al., 1993)。模式中默认使用的土地利用数据为美国 USGS (U.S. Geological Survey) 基于卫星反演的 GLCC (Global Land Cover Characterization) 资料, 时间为 1992 年 4 月~1993 年 3 月; 其在中国区域的分布类型如图 1 所示。不同土地利用资料对中国地区土地覆盖描述的区域性差异很大; 其中, 与其他资料相比, 模式自带资料对中国区域土地利用类型的描述存在诸多问题, 如: 准确度较低, 甚至与通量站观测数据完全相反 (宫鹏, 2009); 时效性较差, 仍使用 90 年代的土地利用/土地覆盖类型 (冉有华等, 2009); 数据存在较大的不确定性 (Herold et al., 2008), 尤其是在我国南方作物/混合耕作地和灌溉农田的分布上。本研究基于遥感数据反演获得中国土地覆盖分类产品, 数据源为 1990 年 3~10 月逐日 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 反射率数据和每三天的 AVHRR NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 数据, 以及 2010 年 3~10 月逐日的 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 反射率数据和每三天的 MODIS NDVI 数据, 均由 LTDR (Land Long Term Data Record) 数据集提供, 具体产品的提取与分类参见 Li et al. (2015)。杨永可等 (2014) 以 Google Earth (谷歌地球软件) 高分辨率遥感影像选取 729 个验证样本作为真实地表信息, 评价了国际上现有的五种大尺度土地覆盖产品在中国区域的精度, 结果表明这两组产品在中国区域的总体精度均高于国际上现有的五种大尺度

土地覆盖产品在中国区域的精度。

采用 1990 年与 2010 年的土地利用/土地覆盖类型资料, 目的在于更真实地描述两个典型年代的土地覆盖变化, 进而研究 21 世纪初 LUCC 对中国区域气候的影响。本研究共设计 2 组试验 (E90 和 E10 试验)。E90 试验: 采用 1990 年土地覆盖遥感资料, 将模式自带资料中中国区域的土地覆盖分布替换为遥感资料中相应区域的分布, 而中国外地区仍使用模式自带 GLCC 资料; E10 试验: 采用 2010 年土地覆盖遥感资料, 由于 LUCC 的分类和变化情况十分复杂, 基于 Li et al. (2014) 的研究, 发现中国区域主要的 LUCC 是农作物的改变, 所以在 E10 试验中, 对于每个格点, 将农作物所占的百分比由 1990 年的值修改为 2010 年的值 (模式里的农作物为: 作物/混合耕作地和灌溉农田), 相应地, 其他植被类型的百分比也做了线性调整, 其他设置同 E90 试验。两组试验积分时间均为 1989 年 1 月 1 日~2011 年 1 月 1 日, 其中 1989 年认为是模式初始化调整 (spin-up) 时段, 不做分析, 取 1990 年~2010 年共 21 年的数据进行分析。图 2a、b 分别给出了 1990 年和 2010 年土地覆盖资料的作物/混合耕作地与灌溉农田分布。对比模式自带 GLCC 资料, 不难发现, GLCC 资料对于中国南方土地利用类型 (尤其是农作物) 的描述准确度较低。1990 年和 2010 年土地覆盖资料农作物的差别主要集中于图 2 方框内所示地区, 分别代表 (I) 作物/混合耕作地减少区、(II) 作物/混合耕作地扩张区、(III) 灌溉农田变化区。以 E10 与 E90 试验模拟结果的差值作为 2010 年与 1990 年 LUCC 对气候的影响。除风场差异采用矢量 F 检验外 (施能等, 2004), 其他变量的差异显著性检验均采用 t 检验, 信度水平均取为 90%。

3 结果分析

3.1 LUCC 对温度和降水的影响

图 3 给出了两组实验各个季节的平均气温差值空间分布。不难看出, LUCC 主要影响夏秋季气温, 而对春冬季影响很弱。夏季时, 华北和长江流域大部分地区平均气温升高 0~0.5°C; 其中, 内蒙古中部升高较明显, 河北、山西北部稍有降低, 而长江流域气温变化最为明显, 升高幅度在 0.5°C 以上 (通过 0.1 统计显著性检验)。为进一步研究这种局地信号是否能延伸至高层, 从而影响高层大气的热力状

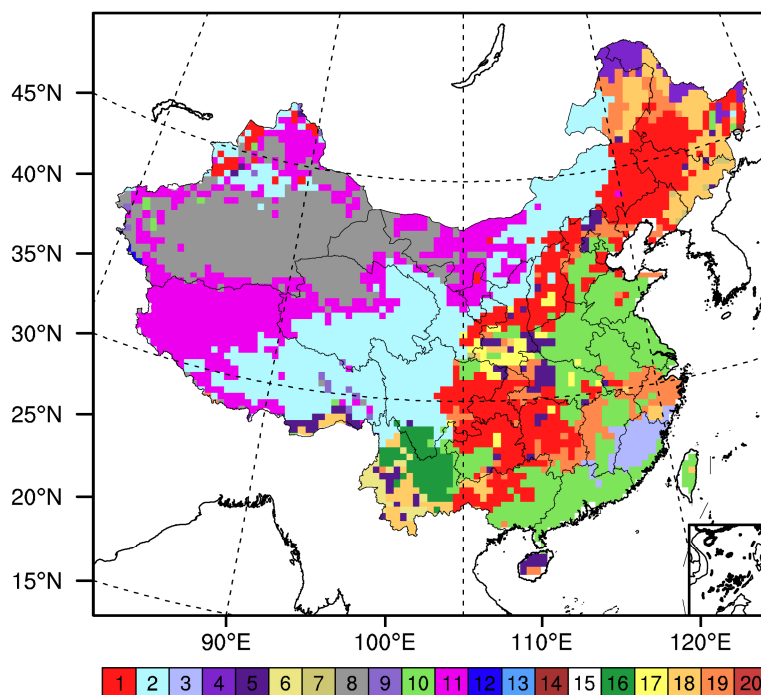


图1 模式模拟区域范围以及模式自带 GLCC (Global Land Cover Characterization) 数据中中国区域土地利用类型分布 (1 作物/混合耕地; 2 短草; 3 常绿针叶林; 4 落叶针叶林; 5 落叶阔叶林; 6 常绿阔叶林; 7 高草; 8 沙漠; 9 苔原; 10 灌溉农田; 11 半沙漠; 12 冰盖/冰川; 13 泥沼/沼泽; 14 内陆水; 15 海洋; 16 常绿灌木; 17 落叶灌木; 18 混交林地; 19 混合森林/田地; 20 水陆混合体)

Fig. 1 Study region and the default land covers over China within RegCM 4.0: 1 Crop/mixed farming; 2 short grass; 3 evergreen needle leaf tree; 4 deciduous needle leaf tree; 5 deciduous broadleaf tree; 6 evergreen broadleaf tree; 7 tall grass; 8 desert; 9 tundra; 10 irrigated crop; 11 semi-desert; 12 ice cap/glacier; 13 bog or marsh; 14 inland water; 15 ocean; 16 evergreen shrub; 17 deciduous shrub; 18 mixed woodland; 19 forest/field mosaic; 20 water and land mixture

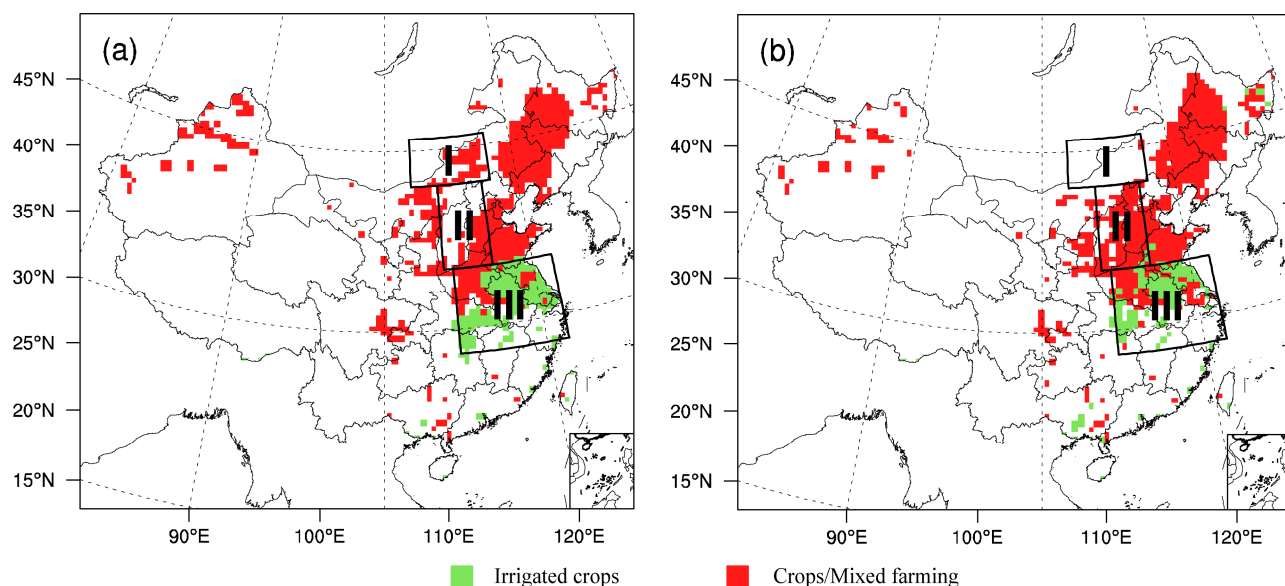


图2 1990年与2010年灌溉农田和农田/混合耕地空间分布, 蓝色代表灌溉农田, 红色代表作物/混合耕地。图中方框表示1990年与2010年土地利用类型差异较大区域, 从北到南分别为(I)作物/混合耕地减少区、(II)作物/混合耕地扩张区、(III)灌溉农田变化区

Fig. 2 Spatial distribution of irrigated crops and crops/mixed farming during 1990 and 2010 (blue: irrigated crops; red: crops/mixed farming; boxes: major regions) with greater differences between land use/land cover in 1990 and 2010; (I) decreased crops/mixed farming; (II) increased crops/mixed farming; (III) changed irrigated crops

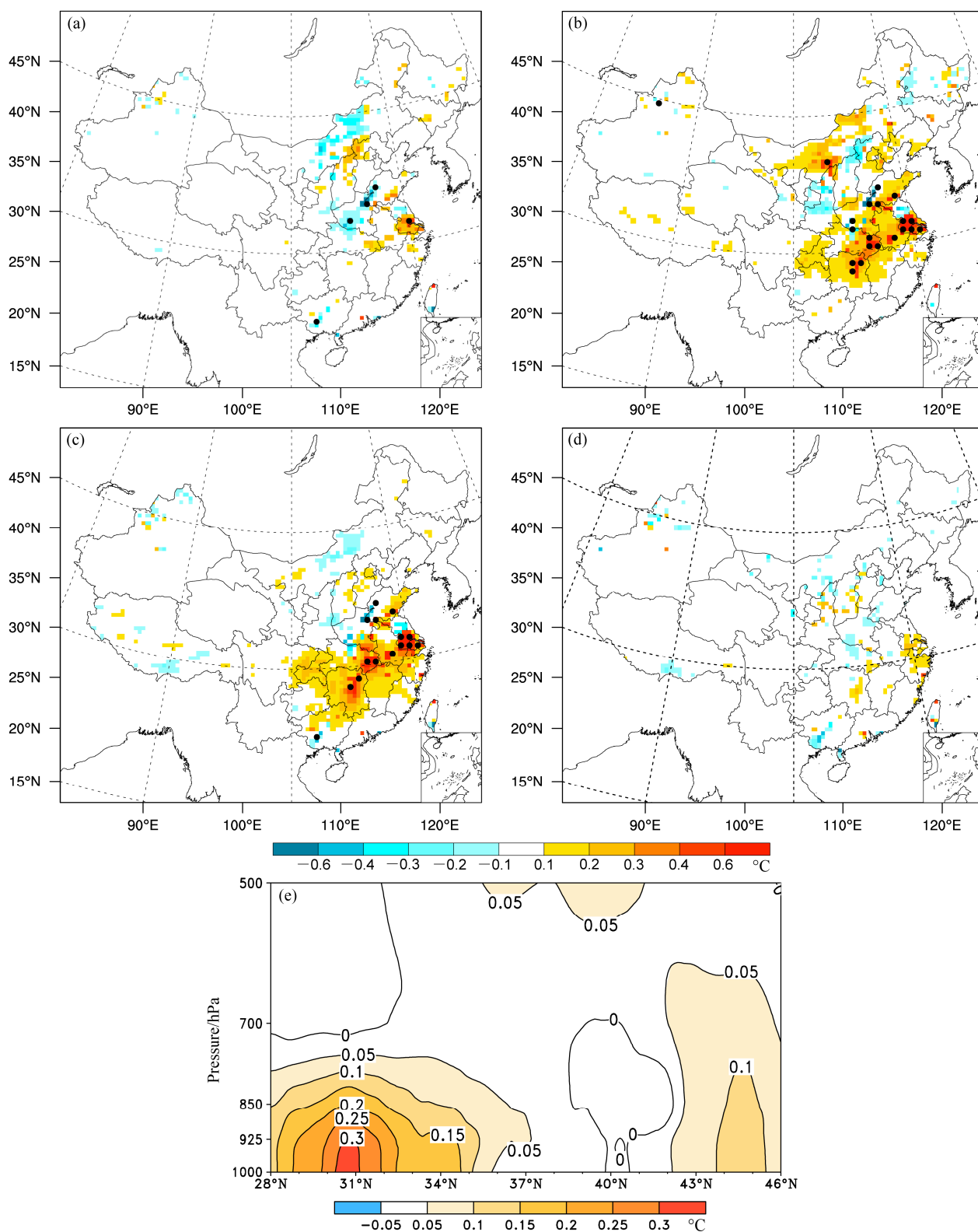


图3 LUCC引起的多年平均地面气温的差值分布 (E10减E90, 单位: °C): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季; (e) 112°E~117°E 平均的纬度-高度剖面。打点区域表示通过 0.1 显著性检验

Fig. 3 Changes in surface air temperature (°C) during (a) MAM; (b) JJA; (c) SON; (d) DJF and (e) mean meridional distribution along 112°E~117°E due to LUCC (E10 minus E90), black points are statistically significant at a 90% confidence level

况, 图 3e 给出了 LUCC 主要改变区域的经向平均 ($112^{\circ}\text{E}\sim 117^{\circ}\text{E}$) 夏季温度差值的纬度—高度剖面图。可以发现, 长江流域气温的变化可以延伸至边界层顶, 信号较强, 南北跨度较大; 而华北区域无论增温还是降温信号均较弱, 对高层大气影响并不明显; 可见 LUCC 的影响主要体现在边界层内。秋季的地面气温变化在长江流域和夏季较类似, 但在华北区域响应较弱。相比气温而言, LUCC 对日较差的显著影响在各个季节均得到了体现 (图 4), 这与华文剑和陈海山 (2013) 的结论一致。具体来说, 内蒙古中部以及河北、山西等地从春季到冬季的日较差均有显著的升高或降低, 其变化受最高气温和最低气温共同调制 (图略); 而对于长江流域来说,

过渡季节日较差变化主要是因为最高气温的升高导致的, 最低气温贡献较弱, 但在冷暖季受到最高和最低气温的共同影响, 可见 LUCC 在不同区域、不同季节造成的影响也不同。

图 5 给出了 LUCC 引起降水变化的空间分布。总体来看, LUCC 对各季节降水的影响均不显著; 相对而言, 夏秋季的降水量变化较其他季节明显。夏季, 中国中东部大部分地区降水减少 $5\%\sim 10\%$, 其中河北北部、安徽南部以及江西大部减少较明显, 而在甘肃东部, 四川以及陕西南部地区降水有所增加, 幅度约为 $10\%\sim 15\%$ 。秋季降水的变化较夏季相比较类似, 但在甘肃东南部部分地区和长江中游地区有比夏季更显著的增加或减少。上述分析

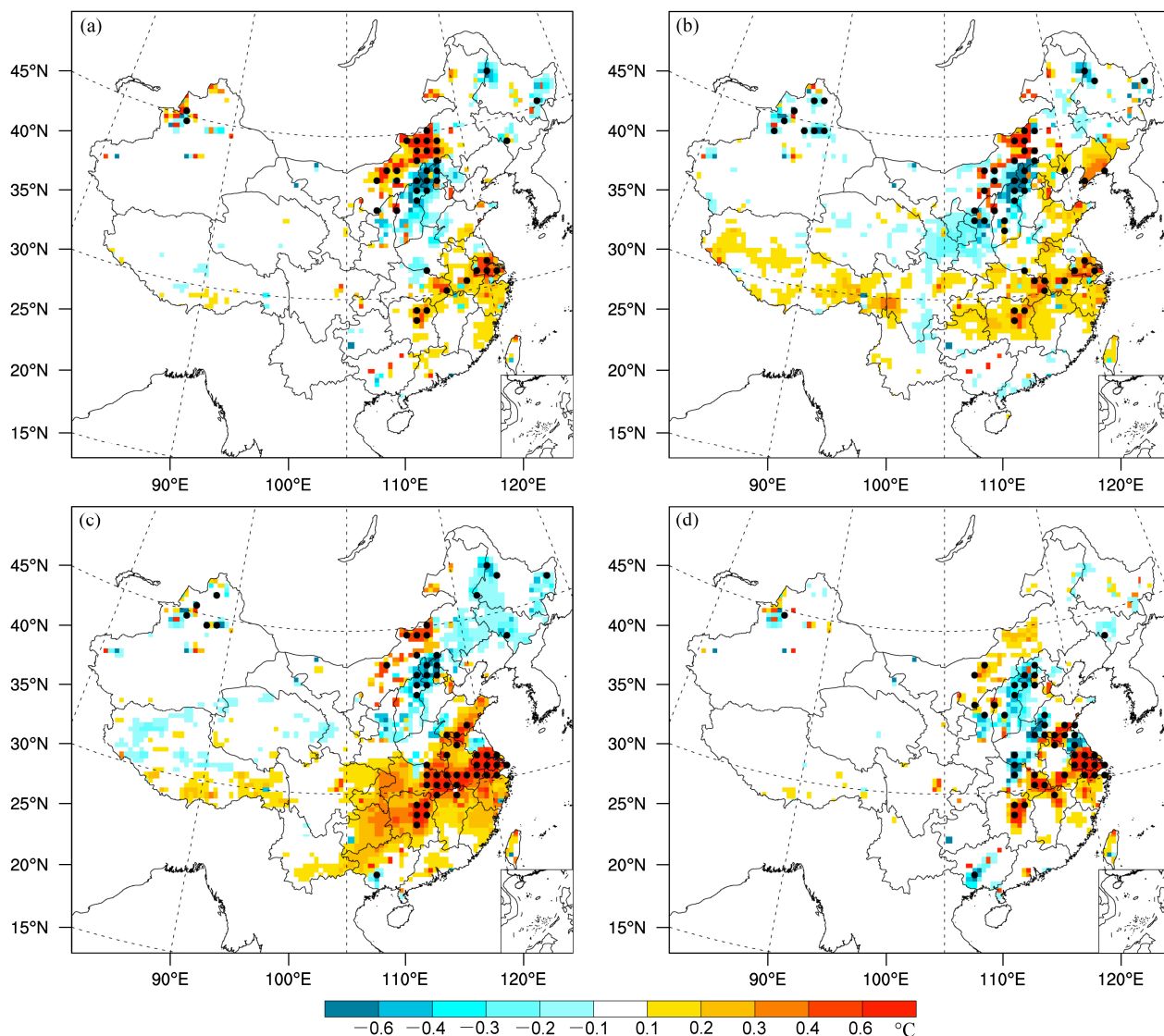


图 4 同图 3a-d, 但为日较差 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 The same as Fig. 3, but for diurnal temperature range (DTR) ($^{\circ}\text{C}$)

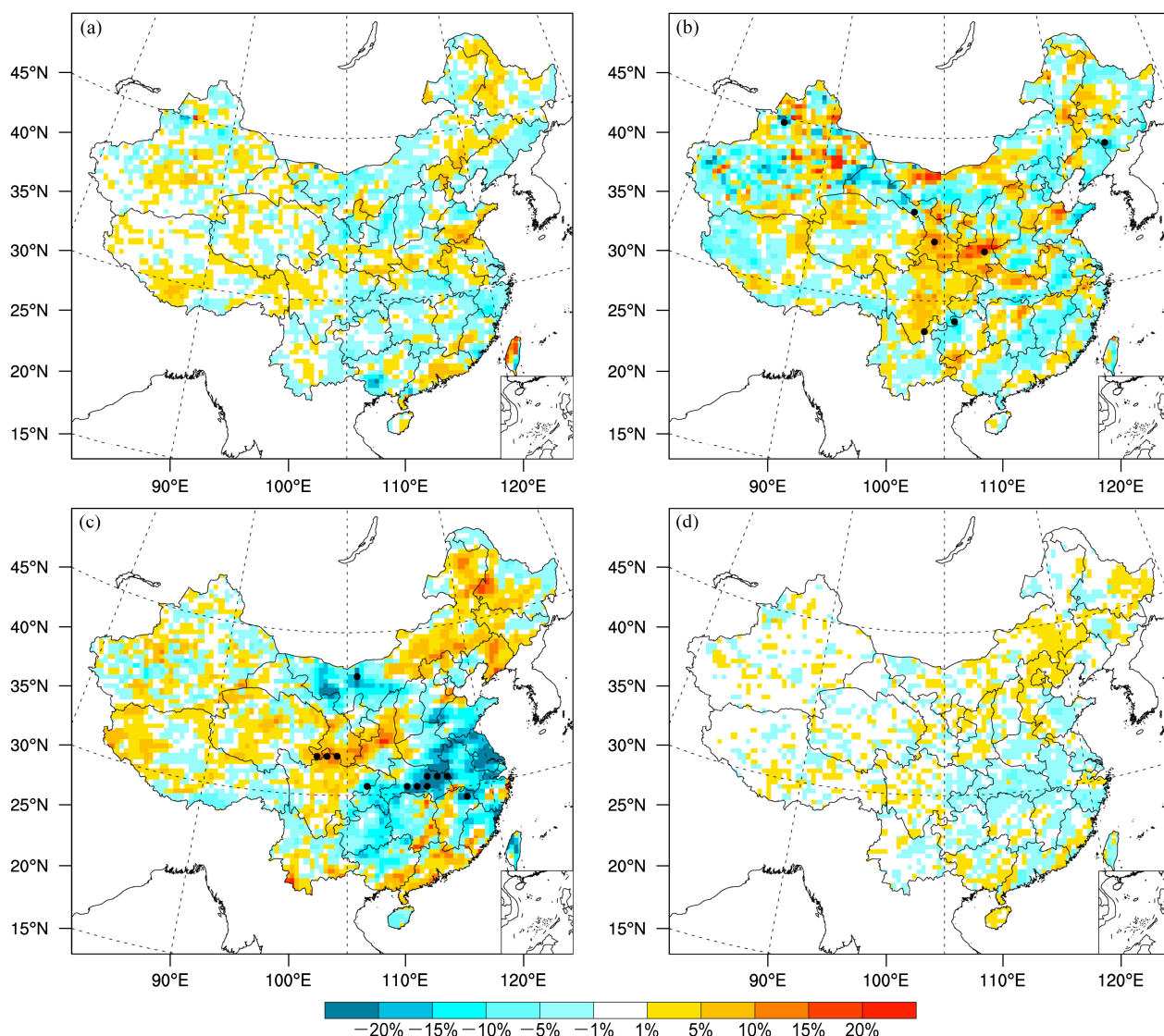


图 5 同图 3a-d, 但为降水差值百分率

Fig. 5 The same as Fig. 3, but for the percentage of precipitation

中值得关注的是, LUCC 不仅显著影响了夏季的气候, 而且对于秋季来说响应幅度也是不可忽略的, 但春冬两季的变化程度较微弱, 由此可见 LUCC 的影响可能具有较明显的季节性差异, 且这种差异也在许多研究中被发现(丁一汇等, 2005; Yamashima et al., 2011)。

3.2 LUCC 对低层环流场的影响

图 6 给出了两组试验各个季节的地面 10 m 风场差值。在 LUCC 的影响下, 各季地面风场均存在变化显著区域, 但这种风场的变化无论在程度以及范围上, 夏、秋季均要强于冬春季, 说明地面风场对 LUCC 的响应也存在季节性差异, 在不同环流背

景下响应是有区别的。春、秋、冬三季时, LUCC 可使中东部大部分地区近地面出现异常的西北风; 其中, 秋季的长江中下游和冬季的华北北部, 异常西北风最为明显, 这很可能是由于这些地区 LUCC 比较明显造成的。另外, 个别地区的风向和风速变化明显强于四周, 这或许与局地地表粗糙度的改变有关, 但在秋季如此呈规模的西北风增强也有可能是因为 LUCC 通过改变地表热力异常而导致了季风的变化。夏季时, 大范围的异常偏北风消失, 华南和华北地区均存在一个反气旋, 近地面气流辐散, 不利于上升运动和成云致雨。在两个反气旋的中间地带, 即江南北部地区, 为气流异常辐合区, 将导

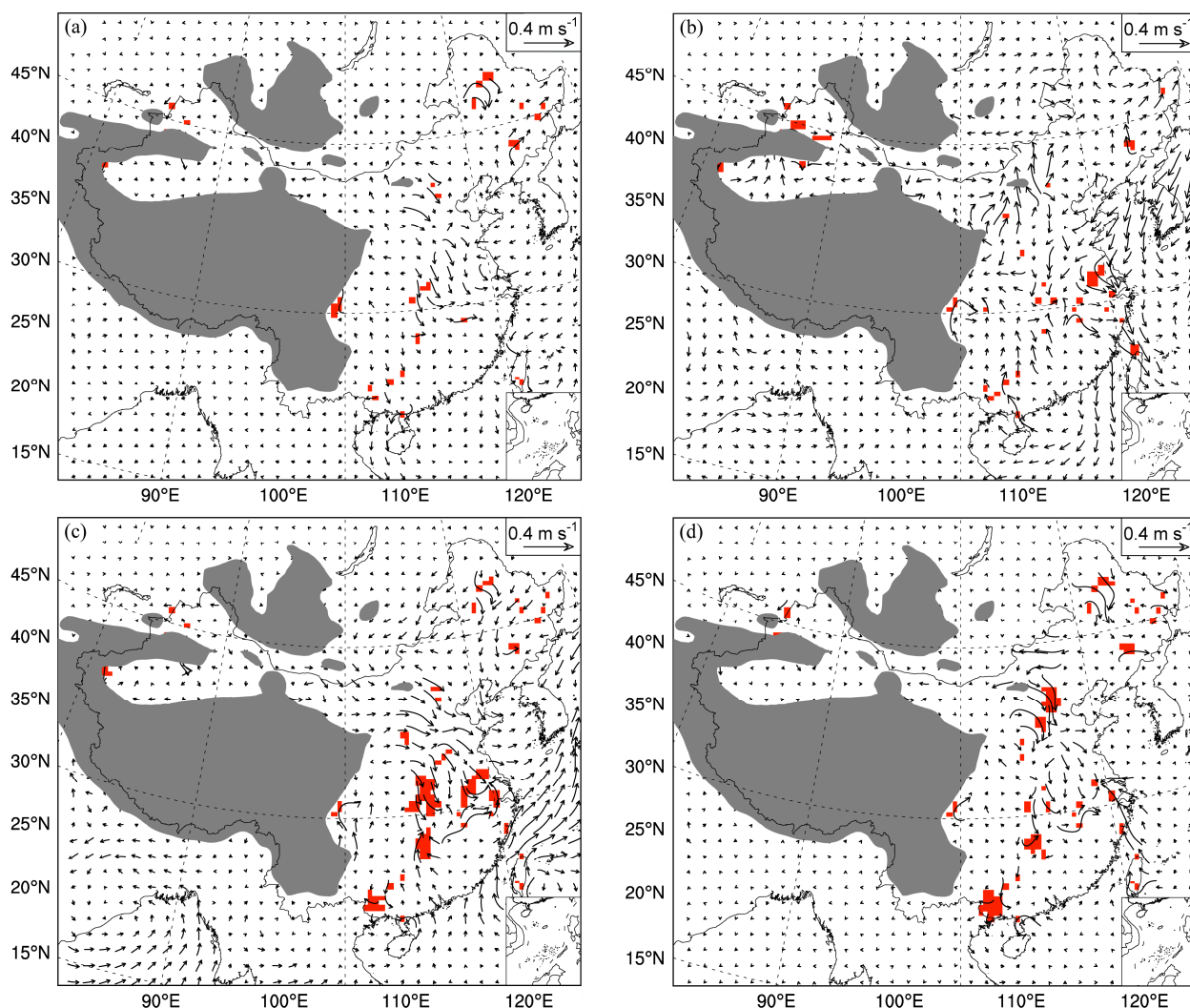


图6 LUCC引起的多年平均地面10 m风场差值分布(E10减E90,单位: m s^{-1}): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季。红色区域表示通过0.1显著性检验

Fig. 6 Changes in vector wind (m s^{-1}) at 10 m during (a) MAM; (b) JJA; (c) SON; (d) DJF due to LUCC (E10 minus E90), red regions are statistically significant at a 90% confidence level

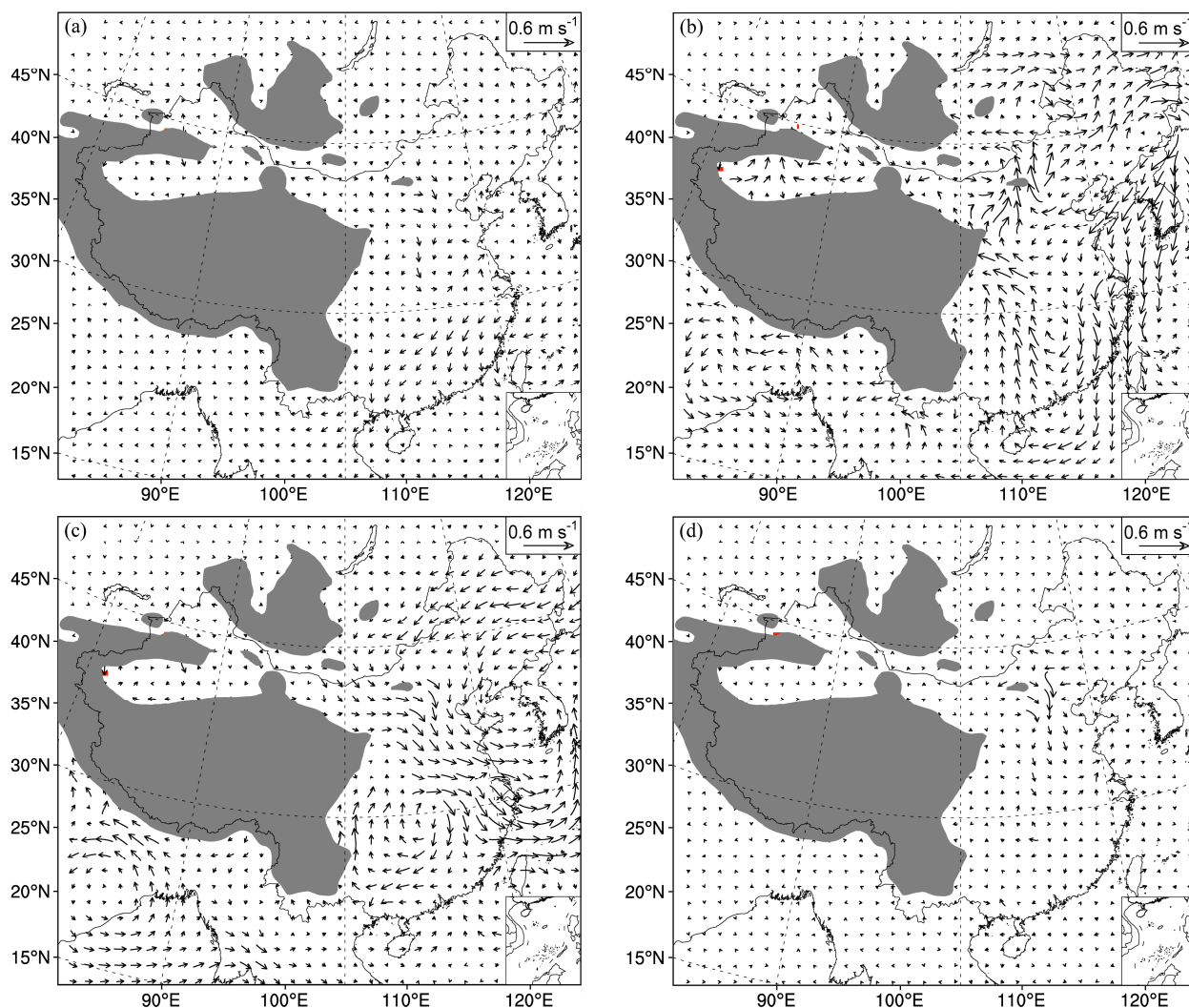
致该地降水有所增加。850 hPa 风场的变化(图7)与地面基本一致,但仍存在一些差异:春季和冬季的850 hPa 风场的变化不如地面显著;秋季东部海面上存在一个异常气旋,我国上空的异常西北气流仍然十分清晰,降水场上也可以看出南方大部分地区降水稀少,表明这种影响是系统性的,可能与夏季风提前撤退,冬季风提早建立有关,说明LUCC可能使由夏向冬的季节进程有所提前;在夏季,850 hPa 上能更清晰地看出我国上空受反气旋环流控制,表明夏季风强度总体偏弱,但在季风边缘区有所增强。综上,可以初步认为,LUCC使得东亚夏季风略微减弱,同时使夏季风向冬季风的季节过渡

提前;但在冬春季,风场的改变仅局限于地面,且冬季风的强度变化不明显。

4 不同区域 LUCC 的影响机理分析

以上分析表明,在LUCC明显的区域,气候响应较大,且尤以夏季最为突出,说明LUCC的影响具有局地性和季节性差异。不同区域LUCC造成的气候效应迥异,这可能与具体转变类型有关,为了进一步验证这一观点,下面将以夏季为例,对不同LUCC影响气候的机理进行比较分析。

相比于1990年,2010年中国区域土地覆盖类型的变化主要表现为作物/混合耕作地和灌溉农田

图 7 同图 6, 但为 850 hPa (单位: m s^{-1})Fig. 7 As Fig. 6, but for 850 hPa (m s^{-1})

的改变。区域 I 的 LUCC 体现为作物/混合耕地改变为短草, 可能增加了地表粗糙度, 减弱了地面风速 (图略), 伴随土壤湿度的降低, 促使蒸散发作用减弱 (见表 1), 导致气温升高约 0.13°C 且降水减少。尽管反照率小幅增加造成净辐射减少 (见表 1) 将会产生弱的降温作用, 但这不足以抵消蒸散发减少引起的升温。区域 II 的情形则相反, 作物/混合耕地的扩张使得土壤湿度增加, 蒸散发作用增强, 引起降温 (见表 1); 同时, 地表反照率的增加对降温也有一定的贡献。区域 I 和区域 II 的日较差变化相反, 其原因可能是 LUCC 对日较差具有一定的调节作用, 其可通过改变云量、土壤湿度、降水、相对湿度等影响日最高和最低气温, 尤其是最高气温 (Dai et al., 1999; 华文剑和陈海山, 2013)。

江淮一带灌溉农田的变化 (区域 III) 同样引起降水的减少, 其原因是由于灌溉农田减少导致土壤湿度减小, 进而使得蒸散发减弱 (见表 1), 区域大气中水汽含量降低, 最终导致降水减少, 这与 Pielke Sr (2001)、毛慧琴等 (2011b) 的结论一致。与前两个区域相比, 区域 III 的 LUCC 造成的升温幅度均高了近 0.1°C (见表 1)。主要是由于区域 III 的 LUCC 主要表现为灌溉农田改变为其他种类的植被 (大部分转变为混合森林/田地 and 作物/混合耕地), 而这将通过两种途径影响地面气温: 其一, LUCC 造成地表反照率减少, 地面吸收更多太阳辐射, 进而引起气温升高; 其二, LUCC 引起地表粗糙度增大, 地面风速减弱, 加上土壤湿度的降低抑制了蒸散发作用, 引起升温。由此可见, 作物/混合

表 1 不同区域 LUCC 引起的多年夏季平均气候变量的差异 (E10 减 E90)

Table 1 Changes in climate variables within each sub-region due to LUCC during JJA (Jun–Jul–Aug, E10 minus E90)

区域	气候变量的差值 (E10 减 E90)									
	降水/ mm d ⁻¹	地面气温/ °C	感热通量/ W m ⁻²	蒸散发/ mm d ⁻¹	表层土壤湿度/ mm	净短波辐射/ W m ⁻²	净辐射/ W m ⁻²	日最高气 温/°C	日最低气 温/°C	云量
I	-0.05	0.13	0.87	-0.07	-0.49	-0.58	-1.03	0.22	0.06	-0.16%
II	-0.02	-0.02	-2.73	0.05	0.38	-1.90	-1.25	-0.16	0.07	1.34%
III	-0.07	0.21	2.84	-0.10	-1.26	1.48	0.22	0.27	0.12	-1.88%

耕作地与灌溉农田的互相转变造成的气候差异要比作物/混合耕作地与短草相互转变造成的影响大的多。但对于日较差来说后者的转变造成的影响就要比前者大的多，后者转变主要影响了日最高气温，而云量的变化（见表 1）也证明了这一观点。而前者的转变虽然对日最高气温产生增温作用比后者大，但同时可能夜间的长波辐射变化也使得最低气温也发生升高，所以日较差增加幅度较小。总体而言，现有的土地利用方式将加重生态环境的恶化。

5 结论和讨论

人类活动的影响已经极大地改变了地球上的生态环境，LUCC 是人类活动的最直接体现之一。区域尺度 LUCC 的气候效应以及土地覆盖数据的不确定性，一直是土地利用/土地覆盖研究中不可忽视的问题。本文基于最新的遥感资料，采用的区域气候模式 RegCM4.0，探讨 21 世纪初中国真实的土地利用变化对区域气候的影响，主要通过以 1990 年和 2010 年两种不同的土地利用/土地覆盖类型作为强迫，分别进行了两组数值模拟试验，得出以下主要结论：

(1) 1990 年代至 21 世纪初的 LUCC 造成了区域气候的改变。气温方面，主要为夏秋两季变化较显著，在夏秋季节华北和长江流域大部分地区平均气温升高，但信号仅局限在边界层内，春冬季气温变化不显著。就日较差而言，各季节日较差变化较为显著，华北区域日较差变化主要是最高、最低气温的共同变化的结果，而长江流域主要是受最高气温的影响。对于降水，夏季我国中东部大部分地区降水偏少，四川盆地以和西北地区东部有所增加，但幅度不大。低层和近地面环流场上，LUCC 使得东亚夏季风略微减弱，且可能使夏季风向冬季风的季节过渡提前；而冬春季，仅地面风场有所改变。总体而言，较短时间尺度的 LUCC 对区域气候的影响主要表现在局地尺度，且影响较为有限。

(2) 不同区域 LUCC 对当地气候影响的机理不同。以夏季为例，作物/混合耕作地与短草互相转变，LUCC 对气候的影响主要通过蒸散发作用改变，而反照率的影响相对较弱：作物/混合耕作地变为短草，蒸散发作用减弱，导致气温升高、降水减少，反之亦然；作物/混合耕作地与灌溉农田的互相转变，LUCC 可以同时通过改变地表反照率和蒸散发作用影响气候：灌溉农田变为作物/混合耕作地等使得蒸散发作用减弱和反照率减小，进而使得气温升高，两者作用叠加使信号放大，对区域气候产生更加显著的影响，反之亦然。

本研究成果与前人的研究存在异同与不确定性；其一，由于本文旨在讨论真实发生的 LUCC 的气候效应，因此 50 km 的分辨率在描述较小范围变化时有些偏低，高分辨率 ERA-interim 再分析资料可能由于质量高用于驱动区域气候模式更为合适；其二，区域气候模式对于气候以及 LUCC 过程的描述都存在一定的缺陷，例如，本文使用的模式在东亚区域的气温和降水模拟方面都存在一定的偏差 (Zhang et al., 2008; Gao et al., 2013)，并且模式还不包含生化过程，可能并不能真实地反应 LUCC 的气候与生态效应；其三，用实际的环流场作为背景场来进行数值试验，包含了较多复杂因素的影响，陆面与大气的相互反馈可能被忽略，且已有研究表明，不同的气候背景场下 LUCC 的气候效应也会存在明显的差异 (Pitman et al., 2011; Hua and Chen, 2013)，甚至在不同年份也会有所不同 (Zhang et al., 2010)。

中国 LUCC 的气候效应近年来已经受到了广泛关注 (Fu, 2003; 李巧萍等, 2006; 高学杰等, 2007; 尹永飞等, 2009; 陈军明等, 2010; Wang et al., 2014)，然而，尽管资料及研究方法丰富多样，人们对于中国 LUCC 的气候效应仍不能给出确切的答案。一方面，这种不确定性可能来源于试验设计、使用的资料等方面的差异；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

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。

致谢 特此感谢全球变化重大科学研究计划项目 2011CB952000 第一课题组南京大学肖鹏峰副教授为本研究提供的土地利用/土地覆盖资料。

参考文献 (References)

- Benítez P C, McCallum I, Obersteiner M, et al. 2004. Global supply for carbon sequestration: Identifying least-cost afforestation sites under country risk consideration [R]. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, IASA IR2004-04-022.32.
- Chase T N, Pielke Sr R A, Kittel T G F, et al. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter [J]. *Climate Dyn.*, 16 (2–3): 93–105.
- Chase T N, Pielke Sr R A, Kittel T G F, 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 (D23): 31685–31631, 31691.
- 陈锋, 谢正辉. 2008. 农作物分布对南水北调受水区域陆面过程模拟的影响 [J]. *地理科学进展*, 27 (4): 28–36. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2008. Effects of crop distribution on land surface simulations over the intake area of the South-to-North Water Transfer Project [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 27 (4): 28–36.
- 陈海山, 张叶. 2013. 大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验 [J]. *科学通报*, 58 (13): 1221–1227. Chen Haishan, Zhang Ye. 2013. Sensitivity experiments of impacts of large-scale urbanization in East China on East Asian winter monsoon [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58 (3): 809–815.
- 陈军明, 赵平, 郭晓寅. 2010. 中国西部植被覆盖变化对北方夏季气候影响的数值模拟 [J]. *气象学报*, 68 (2): 173–181. Chen Junming, Zhao Ping, Guo Xiaoyin. 2010. Numerical simulation of the impact of changes in the vegetation in the western China on the summer climate over the northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (2): 173–181.
- 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 [J]. *地球科学进展*, 21 (10): 1075–1082. Chen Xing, Lei Ming, Tang Jianping. 2006. Simulating the effect of changed vegetation on the climate change in Eurasia [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21 (10): 1075–1082.
- Dickinson R E, Kennedy P J, Henderson-Sellers A. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [M]. National Center for Atmospheric Research, Climate and Global Dynamics Division.
- 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 simulation study of the impacts of vegetation changes on regional climate in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (5): 613–621.
- Emanuel K A, Živkovic-Rothman M. 1999. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56 (11): 1766–1782.
- Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. 2005. Global consequences of land use [J]. *Science*, 309 (5734): 570–574.
- Fu C B. 2003. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon [J]. *Global and Planetary Change*, 37 (3–4): 219–229.
- 傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 2005. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望 [J]. *地球科学进展*, 20 (5): 556–560. Fu Bojie, Niu Dong, Zhao Shidong. 2005. Study on Global change and terrestrial ecosystems: History and prospect [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 20 (5): 556–560.
- 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 experiment on the effects of natural vegetation recovery on the East Asia summer climate and environment [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 46 (8): 691–695.
- Gao X J, Luo Y, Lin W T, et al. 2003. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (4): 583–592.
- Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. 2006. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 86 (1–4): 173–185.
- Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 6 (5): 381–386.
- 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: 地球科学*, 37 (3): 397–404. Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. Numerical simulation on impact of land use change on regional climate in China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 37 (3): 397–404.
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains [J]. *Climate Res.*, 52 (1): 7–29. doi:10.3354/cr01018.
- 宫鹏. 2009. 基于全球通量观测站的全球土地覆盖图精度检验 [J]. *自然科学进展*, 19 (7): 754–759. Gong Peng. 2009. Accuracy test on global land cover map based on the global flux observation station [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 19 (7): 754–759.
- Hahmann A N, Dickinson R E. 1997. RCCM2-BATS model over tropical South America: Applications to tropical deforestation [J]. *J. Climate*, 10 (8): 1944–1964.
- Henderson-Sellers A, Dickinson R E, Durbidge T, et al. 1993. Tropical deforestation: Modeling local-to regional-scale climate change [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos. (1984–2012)*, 98 (D4): 7289–7315.
- Herold M, Mayaux P, Woodcock C, et al. 2008. Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 112 (5): 2538–2556.
- Hua W J, Chen H S. 2013. Recognition of climatic effects of land use/land cover change under global warming [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (31): 3852–3858.
- 华文剑, 陈海山. 2013. 区域尺度土地利用/土地覆盖变化对气温日较差的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (2): 117–122. Hua Wenjian, Chen Haishan. 2013. Impacts of regional-scale land use/land cover Change on

- diurnal temperature range [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 9 (2): 117–122.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [R]. Technical Note. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (United States). Climate and Global Dynamics Div.
- 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, doi:10.1029/2006GL028679.
- Li H X, Xiao P F, Feng X Z, et al. 2015. Land cover mapping over 30 years in China using LTDR time series data [J]. *Int. J. Remote Sens.* (in press)
- 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): 257–270. 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): 257–270.
- 李婧华, 陈海山, 华文剑. 2013. 大尺度土地利用变化对东亚地表能量, 水分循环及气候影响的敏感性试验 [J]. *大气科学学报*, 36 (2): 184–191. Li Jinghua, Chen Haishan, Hua Wenjian. 2013. Sensitivity experiments on impacts of large-scale land use change on surface energy balance, hydrological cycle and regional climate over East Asia [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (2): 184–191.
- 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 2002. 中国近期土地利用变化的空间格局分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 32 (12): 1031–1040. Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, et al. 2002. Spatial analysis on recent land use change in China [J]. *Science China: Earth Sciences* (in Chinese), 32 (12): 1031–1040.
- 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 [J]. *地理学报*, 64 (12): 1411–1420. Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang, et al. 2009. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 64 (12): 1411–1420.
- 刘向培, 王汉杰, 刘金波. 2011. 区域气候模式分辨率对夏季降水模拟的影响 [J]. *水科学进展*, 22 (5): 615–623. Liu Xiangpei, Wang Hanjie, Liu Jinbo. 2011. Influence of spatial resolution in a regional climate model on summer precipitation simulation [J]. *Advances in Water Science* (in Chinese), 22 (5): 615–623.
- 毛慧琴, 延晓冬, 熊喆. 2011a. 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. 2011a. An overview of impacts of land use change on climate [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16(4): 513–524.
- 毛慧琴, 延晓冬, 熊喆, 等. 2011b. 农田灌溉对印度区域气候的影响模拟[J]. *生态学报*, 31(4): 1038–1045. Mao Huiqin, Yan Xiaodong, Xiong Zhe, et al. 2011b. Modeled impact of irrigation on regional climate in India [J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 31 (4): 1038–1045.
- Pielke Sr R A. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall [J]. *Rev. Geophys.*, 39 (2): 151–177.
- Pielke Sr R A. 2005. Land use and climate change [J]. *Science*, 310 (5754): 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 [J]. *Nature Climate Change*, 1 (9): 472–475.
- 冉有华, 李新, 卢玲. 2009. 四种常用的全球 1 km 土地覆盖数据中国区域的精度评价 [J]. *冰川冻土*, 31 (3): 490–500. Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. 2009. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 31 (3): 490–500.
- Sedano F, Gong P, Ferrão M. 2005. Land cover assessment with MODIS imagery in southern African Miombo ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 98 (4): 429–441.
- 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.
- Shi W L, Wang H J. 2003. The regional climate effects of replacing farmland and re-greening the desertification lands with forest or grass in West China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (1): 45–54.
- 施能, 顾骏强, 黄先香, 等. 2004. 合成风场的统计检验和蒙特卡洛检验 [J]. *大气科学*, 28 (6): 950–956. Shi Neng, Gu Junqiang, Huang Xianxiang, et al. 2004. Significance test and Monte Carlo test used in composite analysis of window field and applications [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (6): 950–956.
- Shi Y, Gao X J. 2012. Projection of water availability in the Miyun watershed from an RCM simulation [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5 (6): 468–472.
- Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. 1995. Land-use and land-cover change. Science/Research Plan [R]. Global Change Report, IGBP Report No. 35 and HDP Report No. 37. Stockholm and Geneva.
- Wang Y L, Feng J M, Gao H. 2014. Numerical simulation of the impact of land cover change on regional climate in China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 115 (1–2): 141–152.
- Wang H, Pitman A J, Zhao M, et al. 2003. The impact of land-cover modification on the June meteorology of China since 1700, simulated using a regional climate model [J]. *International Journal of Climatology*, 23 (5): 511–527.
- Werth D, Avissar R. 2002. The local and global effects of Amazon deforestation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 107 (D20): LBA 55-1–LBA 55-8.
- Yamashita R, Takata K, Matsumoto J, et al. 2011. Numerical study of the impacts of land use/cover changes between 1700 and 1850 on the seasonal hydroclimate in monsoon Asia [J]. *Meteorological Society of Japan Serie*, 89: 291–298.
- 杨永可, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 2014. 五种大尺度土地覆盖数据集在中国及周边区域的精度评价研究 [J]. *遥感学报*, 18 (2): 453–475. Yang Yongke, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. 2014. Comparison and assessment of large scale land cover datasets in China and adjacent regions [J]. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 18 (2): 453–475.
- 尹永飞, 陈星, 张洁, 等. 2009. 中国过去 300 年土地利用变化及其气候

- 效应 [J]. 第四纪研究, 29 (6): 1162–1169. Yin Yongfei, Chen Xing, Zhang Jie, et al. 2009. Land use change of the past 300 years in China and its climate effects [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 29 (6): 1162–1169.
- 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[J]. 气候变化研究进展, 8 (6): 426–433. Yu Yan, Xie Zhenghui. 2012. A simulation study on climatic effects of land cover change in China [J]. Advances in Climate Change (in Chinese), 8 (6): 426–433.
- Zeng X, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. Journal of Climate, 11 (10): 2628–2644.
- Zhang J Y, Dong W J, Wu L Y, et al. 2005. Impact of land use changes on surface warming in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 22 (3): 343–348.
- Zhang D F, Gao X J, Ouyang L C, et al. 2008. Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model [J]. Journal of Tropical Meteorology, 14 (1): 19–23.
- Zhang D F, Gao X J, Shi Y, et al. 2010. Agricultural land use effects on climate over China as simulated by a regional climate model [J]. Acta Meteorologica Sinica, 24 (2): 215–224.
- 张耀存, 傅小锋. 1998. 苏南地区土地利用状况变化对区域气候环境的可能影响 [J]. 地球科学进展, 13 (4): 409–411. Zhang Yaocun, Fu Xiaofeng. 1998. The possible effects of land use condition changes on the regional climate environment in the southern part of Jiangsu Province [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 13 (4): 409–411.
- 邹靖, 谢正辉. 2012. RegCM4 中陆面过程参数化方案对东亚区域气候模拟的影响 [J]. 气象学报, 70 (6): 1312–1326. Zou Jing, Xie Zhenghui. The effects of the land-surface process parameterization of the RegCM4 on climate simulation in East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (6): 1312–1326.