

董思言, 延晓冬, 熊喆. 2014. 东北农田扩张对气候影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 351–361, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13022.
Dong Siyan, Yan Xiaodong, Xiong Zhe. 2014. Modeled impacts of land-use and land-cover change in Northeast China on climate [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 351–361.

东北农田扩张对气候影响的数值模拟

董思言^{1,2,3} 延晓冬⁴ 熊喆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

³ 国家气候中心, 北京 100081

⁴ 北京师范大学, 北京 100875

摘 要 基于 1990、2005 年两期不同土地利用/覆盖资料, 利用区域环境集成模拟系统 (RIEMS2.0) 分别进行 2 次连续 15 年数值模拟, 探讨东北土地利用/覆盖变化对气候的影响, 分析集中于气温和降水等要素变化上, 并对结果进行统计显著性检验。结果表明: (1) 东北农田扩张后, 东北夏季和冬季平均气温降低, 降水减少, 并且农田面积扩张的范围越大, 气温变化幅度也越大。在夏季, 黑河西部、呼伦贝尔南部部分地区降温超过 0.5 °C, 并通过显著性检验 ($P < 0.05$), 大兴安岭南、黑河西部等地区夏季降水减少 20% 左右, 其中产生减少的大部分区域通过显著性检验 ($P < 0.05$)。 (2) 东北农田扩张通过影响潜热通量的变化和净吸收辐射通量的变化来影响气温的变化, 其中东北南部土地利用/覆盖类型变化主要表现为短草类型转变为农田类型, 这使得夏季蒸散发增加, 潜热通量增加, 气温降低。 (3) 东北农田扩张也影响大气环流场的变化, 并与降水的变化有密切的关系。辽宁西部和东北北部部分地区夏季蒸散发增加, 大气中水汽增加, 但是由于大气环流场变化, 降水在这两个地区并未增加。

关键词 区域气候模式 土地利用/覆盖变化 东北区域 气候变化 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0351-11

中图分类号 P461⁺.8

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13022

Modeled Impacts of Land-Use and Land-Cover Change in Northeast China on Climate

DONG Siyan^{1,2,3}, YAN Xiaodong⁴, and XIONG Zhe¹

¹ Key laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ National Climate Center, Beijing 100081

⁴ Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract Two simulations in 1990 and 2005 of land-use and land-cover in Northeast China were used to investigate the impact of land-use and land-cover change (LUCC) on climate. Using a regional environmental system integration model (RIEMS2.0) the authors simulated two consecutive 15-year periods to explore effects of the Northeast China LUCC on climate, focusing on temperature and precipitation changes, and testing their statistical significance. Results show that the expansion of northeast farmland had the following impacts on climate: (1) Mean temperatures in summer and winter in Northeast China were reduced, and precipitation decreased. The expansion of farmland areas also brought about increased

收稿日期 2012-01-24 收到, 2013-05-07 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421100、2010CB950903, 国家自然科学基金项目 91025003

作者简介 董思言, 1982 年出生, 博士, 助理研究员, 主要从事气候变化及气候模拟研究。E-mail: dongsy@cma.gov.cn

通讯作者 延晓冬, E-mail: yxd@bnu.edu.cn

changes in amplitude. Temperature changes of more than 0.5 °C is statistically significant ($P < 0.05$) in summer in the west of Heihe and in the southern cooling areas of Hulun Buir. In summer in the south of Da Hinggan Ling and west of Heihe precipitation decreased by 20%, the greatest decrease of the regions that showed statistically significant changes ($P < 0.05$). (2) The expansion of farmland has an influence on mean temperature through changes in the latent heat flux and the net absorption of the radiation flux. In the south of Northeast China, in which land cover type converted from mainly short grass to farmland, total summer evapotranspiration increased, the latent heat flux increased, and the temperature decreased. (3) Farmland expansion in Northeast China also results in changes in atmospheric circulation, and precipitation changes are closely related to the circulation changes. In the west of Liaoning and the northern part of Northeast China, summer water vapor in the atmosphere increased, but atmospheric circulation change at these areas did not result in an increase in precipitation in these two areas.

Keywords Regional climate model, Land-use and land-cover change, Northeast China, Climate change, Numerical simulation

1 引言

人类活动影响全球气候的主要途径是通过人为化石燃料的燃烧等方式,产生 CO₂ 的排放,使全球气温升高,这已得到广泛的共识。人类活动影响气候还有另一个重要的途径:土地利用/覆盖变化。土地利用/覆盖变化(Land Use and land Cover Change, LUCC)被列为气候系统内部重要要素(NRC, 2005)。研究大尺度 LUCC 过程对气候与生态环境的影响,成为全面、科学认识人类活动对全球气候变化影响的迫切需求(刘纪远等, 2011)。另外, Brian (2009)认为通过合理调节土地利用变化可以缓解气候变化,可能比减少温室气体排放更有效。因此,进行土地利用/覆盖变化对气候影响研究具有重要意义(Mahmood et al., 2010)。

自然植被(主要是森林和草地)与农田互相转换是人为土地利用/覆盖变化中的重要过程。因为农田与自然植被生物地球物理作用差异大,所以这种土地利用/覆盖变化过程对区域气候影响尤为重要。在 NRC (2005)中已将农业列入气候系统的一部分。目前大部分高质量的农业用地已经用于栽培,但是农业用地的需求还在增加,尤其在中国东北更是如此。对东北地区来说,1990~2005 年土地利用/覆盖变化主要表现为农田面积增加,自然植被面积减少,但是随着人口的增加,对粮食的需求会更大,土地利用向农田转变在将来还可能继续。

除了农田土地利用变化对气候有影响外,农田管理对气候也有一定的影响(如农田灌溉、免耕、轮作等),其中农田灌溉对气候的影响研究较多(Lobell et al., 2006)。灌溉的主要热力学作用是重新分配灌溉区域感热通量和潜热通量,其结果是降

低感热通量,增加蒸散发作用(Pielke, 2001),通过改变蒸散发过程,来影响降水分布,并且由灌溉引起土壤湿度异常能持续至少几个月(Yeh et al., 1984)。

过去很多学者对中国区域进行了模拟研究(如: Fu, 2003; Suh and Lee, 2004; 高学杰等, 2007; Takata et al., 2009; Zhang et al., 2010)。东北地区是当前中国商品粮生产基地,也是近些年土地利用/覆盖变化影响剧烈的地区,但是对东北近十几年土地利用/覆盖变化的气候效应进行模拟研究相对较少,数值模拟的水平分辨率较粗、积分时间较短,加上过去土地利用/覆盖变化研究是采用虚拟完全类型替换的方法,现实土地利用/覆盖资料没有经过实际订正等因素,使得资料不能很好地反映现实土地利用/覆盖变化特征。因此,开展研究东北近十几年土地利用/覆盖变化对中国区域气候的影响是非常必要的。本文利用中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心自主构建的区域气候模式 RIEMS2.0,进行高分辨率、长时间的模拟,通过对两个试验结果的模拟分析,来研究东北农田扩张对东北地区气温和降水的影响,同时也关注土地利用/覆盖变化对东北地面通量和局地大气环流的影响,并揭示对其中国东北不同季节平均气温和降水影响机制。

2 试验设计及分析方法

2.1 试验设计

本研究采用中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心研究开发的区域环境集成模拟系统(RIEMS2.0),它是在 RIEMS1.0 基础上开发的区域气候模式,该模式对季风亚洲区多年平

均环流特征、气温和降水具有较好的模拟性能 (Xiong et al., 2009; 赵得明等, 2009), 并参加区域气候模式比较计划 RMIP (Regional climate Model Inter-comparison Project), 在区域气候模拟方面有良好的表现 (Fu et al., 2005)。

在本研究中, RIEMS2.0 采用辐射方案为 NCAR CCM3 (National Center for Atmospheric Research Community Climate Model 3) 方案 (Kiehl et al., 1997), CCM3 辐射方案是在 CCM2 基础上, 短波部分加进了气溶胶影响, 长波部分加进了痕量气体如甲烷、氮氧化物影响。陆面过程使用 BATS1e (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme1e) 方案, (Dickinson et al., 1993), 行星边界层方案使用 MRF (Medium Research Forecast) 方案, 其中在 RIEMS2.0 模拟中, 不同参数化方案对东北地区降水模拟均偏强, Grell 方案与观测最为接近 (赵得明等, 2009), 所以选择 Grell 方案作为积云对流参数化方案 (Grell, 1993)。

初始场和侧边界场由美国国家环境预测中心再分析资料 NCEP II 得到, 其中侧边界方案采用指数松弛边界方案。模式的水平分辨率为 30 km, 中心位于 (46°N, 123°E), 采用 Lambert 投影方式, 模式模拟的范围包括整个中国东北区域。

本研究所用到的土地利用/覆盖数据是来自中国科学院地理科学与资源研究所最新开发的土地利用/覆盖数据库, 该数据库选取遥感影像资料, 利用调查统计资料进行订正, 同时为了实现高空间分辨率的下垫面数据向大尺度气候模式的嵌入, 在高分辨率数据库基础上, 采用满足气候模式模拟所需的 LUCC 数据升尺度方法, 这样能够将成果数据的面积精度损失减少到最小, 准确反映土地利用与土地覆被的空间分布的自然地带性演变规律, 保证空间分布格局复杂地区的地类分布形态, 空间分布星散且单体面积微小但地位重要的地类在输出成果数据中得到合理体现。并在处理过程中, 采取更加合理的分类方法, 得到较为准确的资料, 它能更好反映中国土地利用/覆盖的现实特征。在这套数据集中, 1990 年土地利用/覆盖数据资料 (即 LUC90 资料) 和 2005 年土地利用/覆盖数据资料 (即 LUC05 资料) 具有较高的精确性。

本研究设计两组数值模拟试验, 第一个试验东北土地利用/覆盖资料采用 LUC90 资料 (LUC90 试验), 另一个试验东北土地利用/覆盖资料采用

LUC05 资料 (LUC05 试验)。采用 BATs 分类方法, 将这两种土地覆盖资料转化为模式读取 18 种植被/土地覆盖类型: 1 雨养农田/混合农田、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、13 沼泽/湿地、14 内陆水、15 海洋、16 常绿灌木、17 落叶灌木、18 混交林。LUC90 资料和 LUC05 资料比较表明 (图 1): 东北地区 2005 年的土地利用/覆盖相对于 1990 年土地利用/覆盖来说, 部分区域产生了变化, 如黑龙江北部灌溉农田面积增加, 辽宁西部、吉林西部大面积草地变为农田。统计计算表明, 中国东北区域 823 个格点中有 188 个的格点发生变化, 而这些变化的格点中有 116 个的格点是从森林或者草地转变为雨养农田类型, 其中有 35 个格点由雨养农田转变为森林或者草地, 相当于农田类型增加 81 个格点。从以上可以看出, 1990~2005 年东北土地利用/覆盖变化的主要特征是农田面积增加, 这期间东北土地利用/覆盖变化的表现为农田扩张明显, 所以在文中将东北土地利用/覆盖变化的过程简称为东北农田扩张。

在模拟试验中, 除了东北土地利用/覆盖资料有差异外, 其余模式参数方案设置均相同, 积分模拟时间从 1990 年 1 月 1 日到 2006 年 2 月 28 日, 其中 1990 年为积分稳定时间 (spin-up) 时段, 分析 1991 年 3 月 1 日到 2006 年 2 月 28 日一共 15 年的数据。

2.2 分析方法

将 LUC90 试验和 LUC05 试验 15 年平均结果进行差异分析 (LUC05 试验模拟结果减去 LUC90 试验模拟结果), 来表征人类活动所造成东北农田扩张对中国东北区域气候的影响。同时, 对两个试验气温和降水变化的模拟结果进行统计显著性检验。所采用的检验方法是 Student *t* 检验, 将变化结果中通过置信度 95% 的 *t* 检验的格点, 认为是通过显著性检验 ($P < 0.05$)。对两试验气温和降水的距平变化进行研究, 来分析东北农田扩张对年际变化的影响, 对比年际变化分析采用的观测气温和降水资料分别为 Xu et al. (2009) 发展的 0.5° (纬度) × 0.5° (经度) 气温资料 (CN05) 和 Xie et al. (2007) 发展的 0.5° (纬度) × 0.5° (经度) 的降水资料 (EA05)。

同时, 为了揭示东北地区小尺度现象和特征, 进行东北不同季节分区的研究。夏季包括 6 月、7 月和 8 月, 冬季包括 12 月、1 月和 2 月。根据中国

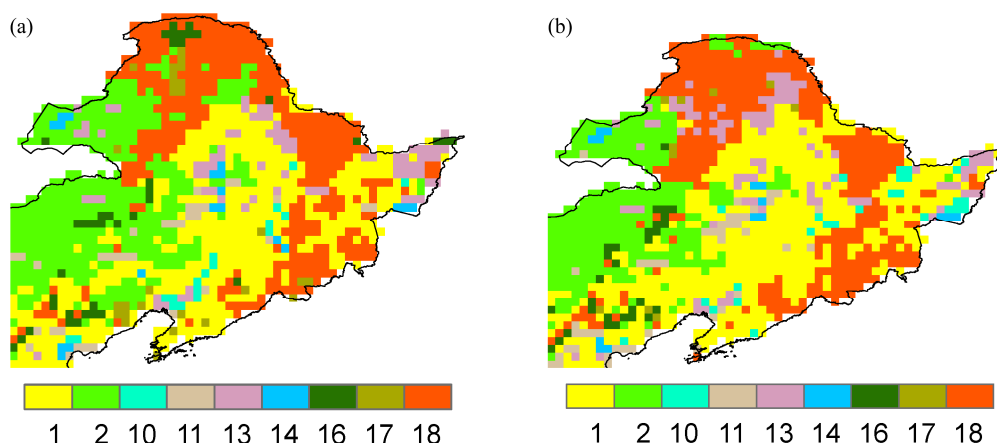


图 1 (a) 1990 年 (LUC90 资料) 和 (b) 2005 年 (LUC05 资料) 东北土地利用/覆盖类型

Fig. 1 Land use/cover type maps in Northeast China in (a) 1990 (LUC90) and (b) 2005 (LUC05)

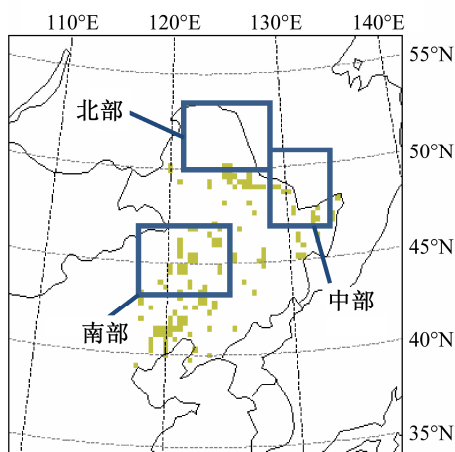


图 2 东北农田扩张后变为农田的格点

Fig. 2 Grids which were converted to farmland

的东北土地利用/覆盖变化中森林和短草等变化为雨养农田的格点和气候特点分布 (图 2 中黄色格点), 将东北划分 3 个区域, 分别为北部、中部和南部, 进行不同气候要素的分区研究。

3 结果分析

3.1 对气温的影响

已经有很多研究表明土地利用/覆盖变化对气温的影响具有明显的季节特征 (Snyder et al., 2004; Diffenbaugh, 2009; Dong et al., 2013), 本研究表明, 农田扩张会使东北冬季和夏季气温都降低, 但是东北冬季气温降低幅度更大, 这与 Dong et al. (2013) 中的研究结果类似。图 3 为东北农田扩张后多年平均气温变化的空间分布。对夏季来说 (图

3a), 东北气温降低 0.04°C , 其中在内蒙古呼伦贝尔南部、通辽、辽宁朝阳、黑龙江黑河西部与内蒙交界处气温降低, 降低 $0.25\sim 1^{\circ}\text{C}$ 之间, 黑河西部、呼伦贝尔南部降温超过 0.5°C 的地区通过显著性检验 ($P<0.05$)。黑龙江北部大兴安岭地区气温升高 $0.25\sim 1^{\circ}\text{C}$, 多数格点升高显著 ($P<0.05$)。对冬季来说 (图 3b), 东北气温降低 0.09°C , 黑龙江西北部大兴安岭、黑河西部、辽宁西部和北部等地区降温, 在 $0.25\sim 1^{\circ}\text{C}$ 以上, 黑龙江西南部、吉林中部降温超过 0.5°C , 甚至部分超过 1°C , 并通过显著性检验 ($P<0.05$), 黑龙江北部、辽宁东部等小部分区域气温升高, 但是变化不显著。对于年均温来说 (图 3c), 东北年均温降低 0.05°C , 黑龙江西北部大兴安岭、黑河西部、辽宁西部和北部等地区降温, 在 $0.25\sim 1^{\circ}\text{C}$ 以上, 黑龙江西南部、北部、吉林中部等区域降温超过 0.5°C , 吉林中部小部分区域降温超过 1°C , 这些地区都通过显著性检验 ($P<0.05$), 黑龙江北部、辽宁东部等小部分区域气温升高, 其中只有很小面积的区域通过显著性检验 ($P<0.05$)。

总体来看, 东北农田扩张会使东北平均气温降低, 冬季气温降低幅度更大, 不同的分区气温变化情况也不同, 东北北部区夏季气温升高, 冬季气温降低, 其他两个分区的夏季气温和冬季气温都降低 (表 1)。

3.2 对降水的影响

土地利用/覆盖变化对降水影响研究多数认为毁林会减少降水 (Pielke et al., 2007)。个别研究认为, 植被对降水的影响不大, 但能在一定条件下改

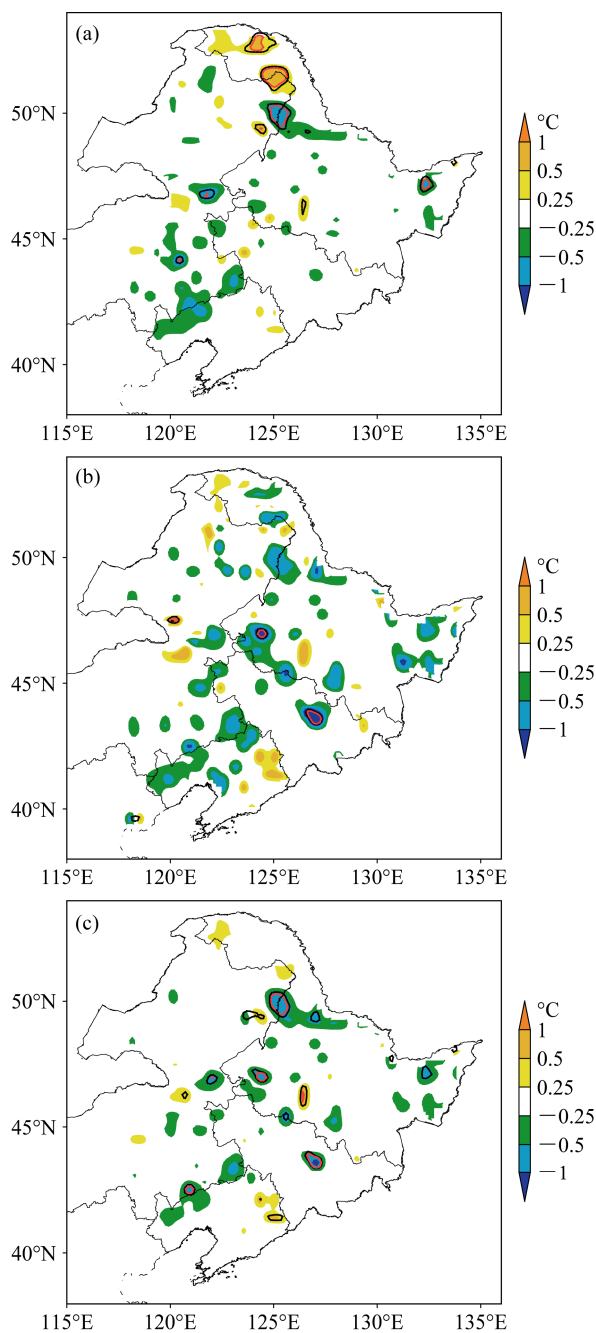


图3 农田扩张后气温变化(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 夏季平均; (b) 冬季平均; (c) 年平均。红色虚线区域内为 t 检验置信度超过95%的地区, 黑色虚线区域内为 t 检验置信度超过90%的地区

Fig. 3 Effects of farmland expansion on mean surface air temperature change ($^{\circ}\text{C}$) pattern in (a) summer, (b) winter, and (c) the whole year. Red dashed lines indicate the 95% confidence level; black dashed lines indicate the 90% confidence level

变降水在水循环系统中的分配(周广胜和王玉辉, 1999; Findel et al., 2007)。图4为东北农田扩张后多年平均降水变化的空间分布。对夏季降水来说(图4a), 农田扩张后, 东北地区减少0.82%, 一些区域变化较明显, 如在大兴安岭南、黑河西部、

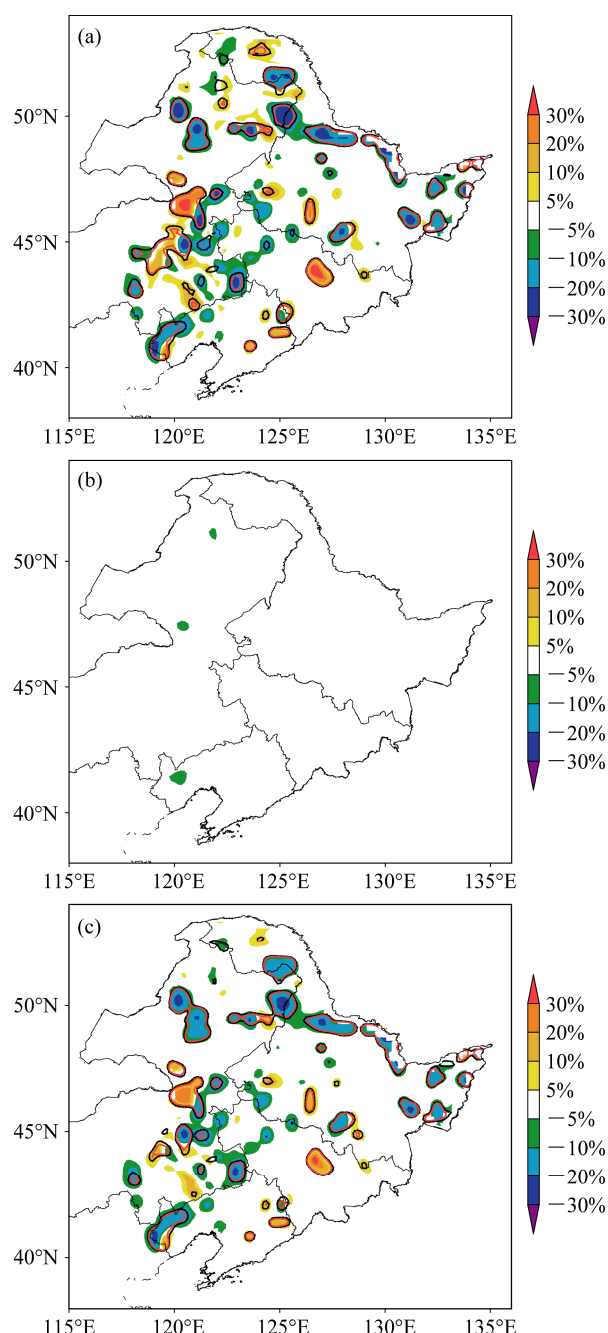


图4 农田扩张后降水变化率: (a) 夏季平均; (b) 冬季平均; (c) 年平均。红色虚线区域内为 t 检验置信度超过95%的地区, 黑色虚线区域内为 t 检验置信度超过90%的地区

Fig. 4 Effects of farmland expansion on mean precipitation change pattern in (a) summer, (b) winter, and (c) the whole year. Red dashed lines indicate the 95% confidence level; black dashed lines indicate the 90% confidence level

内蒙古、辽宁西部等降水减少, 减少量在5%~30%之间, 其中减少区域中的多数通过显著性检验($P < 0.05$), 吉林中部、内蒙兴安盟等地区降水增加5%~30%之间, 个别区域超过30%, 其中多数区域也通过了显著性检验($P < 0.05$)。对冬季降水

来说(图 4b),大部分区域降水几乎未发生变化。对年降水来说,东北降水降低 0.93%,年降水变化空间分布和夏季降水变化空间分布类似(图 4c),这是因为夏季是中国降水最多的季节,其降水量占全年降水的比例很大。

总体来看,东北农田扩张导致东北地区降水减少,从不同分区来看,无论夏季还是冬季,降水都减少,其中东北中部区夏季降水减少最多(表 1),但是减少可能对东北南部如辽宁西部和内蒙古生态环境较脆弱的地区影响更大,恶化当地的生态环境。

表 1 东北及各分区不同季节气温、降水和地表能量通量变化
Table 1 Surface air temperature, precipitation, and surface fluxes change in different seasons in Northeast China and its subareas

分区	季节	地面气温变化		净吸收辐射	潜热通	感热通
		/°C	降水变化	通量变化/ W m ⁻²	量变化/ W m ⁻²	量变化/ W m ⁻²
南部	夏季	-0.10	-0.65%	-0.14	0.29	-0.24
	冬季	-0.13	-1.30%	-0.09	-0.19	-0.07
北部	夏季	0.05	-1.46%	0.63	0.60	-0.03
	冬季	-0.06	-0.80%	-0.53	-0.16	-0.55
中部	夏季	-0.06	-5.19%	-0.81	-0.60	-0.20
	冬季	-0.17	-0.19%	-0.18	-0.05	-0.36
东北	夏季	-0.04	-0.82%	-0.03	0.22	-0.11
	冬季	-0.09	-0.90%	-0.13	-0.10	-0.12

3.3 对地面能量通量及大气环流的影响分析

土地利用/覆盖变化通过粗糙度、地表发射率、叶面积指数等地表参数的改变,影响大气环流和能量平衡,从而引起气温和降水发生,同时降水和气温的变化又发过来影响大气环流和能量平衡,它们之间存在着复杂的关系(高学杰等, 2007; de Noblet-Ducoudré et al., 2012)。东北农田扩张使得东北局地气温和降水产生显著地影响,造成这样影响的原因,需要对地面能量通量和大气环流的变化结果过进行细致分析。

LUCC 对净辐射(Forster et al., 2007)及感热通量和潜热通量之间的分配都有影响(Pitman et al., 2009)。首先,进行不同季节潜热通量、感热通量和净吸收辐射通量变化分析,来初步解释不同季节气温的变化机理。东北农田扩张后,对夏季来说,东北潜热通量增加 0.22 W/m²,感热通量减少 0.11 W/m²,净吸收辐射通量减少 0.03 W/m²,图 5a、5c、5e 为东北农田扩张导致的夏季潜热通量、感热通量以及净吸收辐射通量变化的空间分布,从图中可以看出,潜热增加、感热减少的地区对应气温降

低,反之对应气温升高。从东北地区气温变化和地表通量变化的空间相关性分析发现:潜热通量变化和气温变化的空间相关系数为-0.87,感热通量变化和气温变化的空间相关系数为 0.70,净吸收辐射通量变化与气温变化的空间相关系数为 0.35,夏季感热通量和潜热通量变化的空间分布和气温变化的空间分布有很好的对应关系,因为蒸发散降低对平均气温的影响作用和反照率造成的影响共同作用,所以潜热通量增加和反照率增加是东北平均气温降低的原因。

东北农田扩张引起的东北地面能量通量变化空间分布范围在冬季不如夏季大。对冬季来说,潜热通量减少 0.1 W/m²,感热通量减少 0.12 W/m²,净吸收辐射通量减少 0.13 W/m²。图 5b、5d、5f 为东北农田扩张导致的冬季潜热通量、感热通量以及净吸收辐射通量变化的空间分布,潜热通量变化和气温变化的空间相关系数由负相关变为正值 0.60,感热通量变化和气温变化的空间相关系数为 0.56,净吸收辐射通量变化与气温变化的空间相关系数为 0.62,与夏季相比,潜热通量变化与气温变化空间负相关系数消失,而净吸收辐射通量变化与气温变化的空间相关系数增加,这是可能由于冬季潜热通量变化较夏季小,那么对气温变化影响作用也变小,冬季由于雪盖的作用使得地表反照率上升,净吸收辐射通量下降,温度也下降(Claussen et al., 2001),所以净吸收辐射通量变化与气温变化的空间相关系数增加,对气温变化的影响作用大于蒸散发对气温变化的作用,所以净吸收辐射通量减少是东北冬季气温降低的主要原因。

土地利用/覆盖变化通过影响潜热通量的变化和净吸收辐射通量的变化来影响气温的变化,而东北地区地面能量通量的变化和不同土地利用/覆盖类型转变也有密切关系。从表 1 可以进一步发现不同分区地面能量通量变化与土地利用/覆盖类型变化的关系,这有利于理解其对气温的影响机制。东北农田扩张后,在东北南部主要表现为短草类型转变为雨养农田类型,农田和短草在夏季有相似的地表反照率,短草变为雨养农田净吸收辐射通量变化较小,但是雨养农田比短草的叶面积指数、地表粗糙度更大(Chase et al., 1999; Paruelo et al., 2001; Bonan, 2002),由图 1 和图 5a 可以看出短草变为农田,夏季潜热通量都增加,引起气温降低,这是由于农田在生长季较短草茂盛,蒸散发增加,潜热

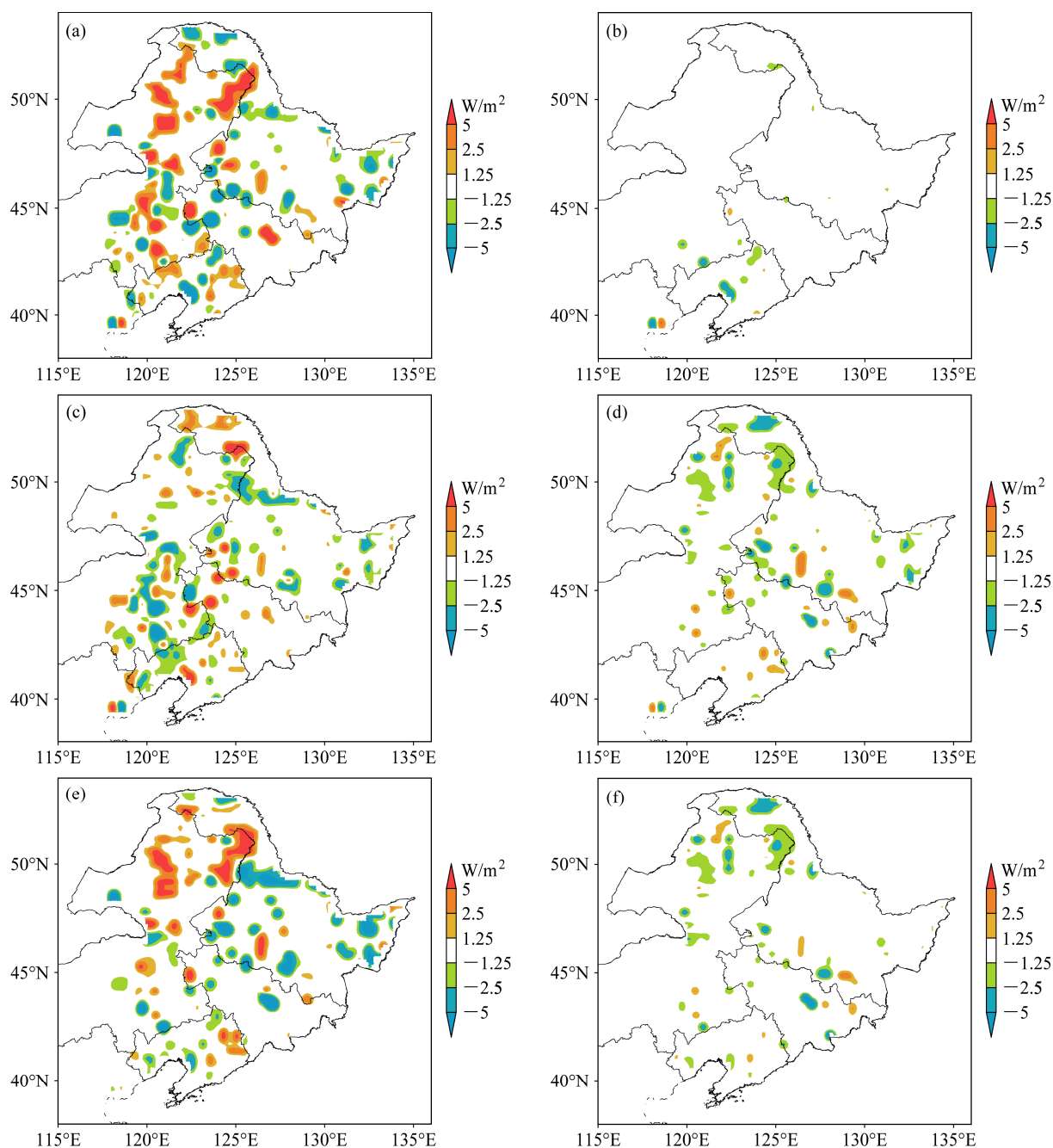


图5 农田扩张引起地面通量变化(单位: W/m^2): (a) 夏季潜热通量; (b) 冬季潜热通量; (c) 夏季感热通量; (d) 冬季感热通量; (e) 夏季净吸收辐射通量; (f) 冬季净吸收辐射通量

Fig. 5 Effects of farmland expansion on mean surface fluxes change (W/m^2) pattern: (a) Latent heat flux in summer; (b) latent heat flux in winter; (c) sensible heat flux in summer; (d) sensible heat flux in winter; (e) net absorbed solar flux in summer; (f) net absorbed solar flux in winter

通量增加, 气温降低, 而冬季收割后农田的地表反照率要大于短草的地表反照率, 使得冬季净吸收辐射减少, 所以气温降低。东北北部土地利用/覆盖变化的主要特点是森林转变为雨养农田以及大兴安岭部分地区森林得到恢复, 森林转变为雨养农田的格点, 对导致夏季净吸收辐射降低和蒸散发减小, 两者共同作用导致气温降低, 但由于存在其他多种

土地利用/覆盖类型的转换, 东北北部地面能量通量变化的影响较为复杂, 所以总体效应是北部夏季净吸收辐射通量增加, 潜热通量增加, 气温增加。而东北中部东北农田扩张, 有一部分格点由雨养农田转变为灌溉农田, 但是主要转变过程是由湿地转变为农田, 农田地表反照率要大于湿地的地表反照率, 并且夏季更加明显, 这样会导致全年净吸收辐射通

量减少, 蒸散发减少, 潜热通量减少, 气温降低。

东北农田扩张不仅影响气温、降水和地面能量通量变化, 而且影响局地大气环流的变化。图 6 为东北农田扩张后 850 hPa 风场和水汽混合比变化。东北农田扩张后, 对夏季来说, 辽宁西部土地利用类型由短草变为雨养农田, 使得蒸散发增加, 而东北黑龙江北部灌溉增加等土地利用/覆盖转变过程, 使得蒸散发增加, 这两个地区大气中水汽增加 (图 6b), 过去很多人认为农田灌溉使云覆盖增加, 对流性降水增加和下游降水增加 (Pielke, 2001; Sack et al., 2009), 灌溉比较多的地方降水也偏多 (Sega et al., 1998; Douglas et al., 2006), 但是本研究并未发现灌溉农田导致黑龙江北部降水增加, 这主要是因为农田扩张后引起大气环流变化的作用。由于夏季 850 hPa 风场的变化 (图 6a), 使得黑龙江北部增加的水汽输送到东北的北部俄罗斯, 而辽宁西部增加的水汽输送到赤峰一带, 因此东北区域降水减少。另外灌溉面积增加较小, 这样少的格点对东

北气温和降水的作用也很不确定。对冬季来说, 冬季农田扩张的格点上, 蒸散发变化很小, 大气中水汽也几乎没有变化 (图 6d), 尽管 850 hPa 风场风速变化较夏季增加 (图 6c), 但是对降水影响不大, 东北冬季的降水几乎没有变化。

3.4 东北农田扩张对年际变化的影响

气候的年际变化也是分析东北农田扩张气候效应影响的一个重要方面, 在气候平均态和季节气候变化的分析基础上, 对气候的距平年际变化进行分析, 通过计算两个试验不同季节气温和降水的距平, 可以消除模拟结果中的系统偏差, 也可以更清楚地发现, 农田扩张过程对东北气温和降水年际变化的影响, 采用验证的观测气温资料为 CN05, 观测降水资料为 EA05。从东北及不同土地覆盖类型变化格点上的距平变化与观测相关系数来看 (表 2), 两个试验对不同季节平均气温和降水年际变化模拟效果较好。当对东北农田扩张后土地利用/覆盖发生变化的格点进行分析时, 发现 LUC90 试验和

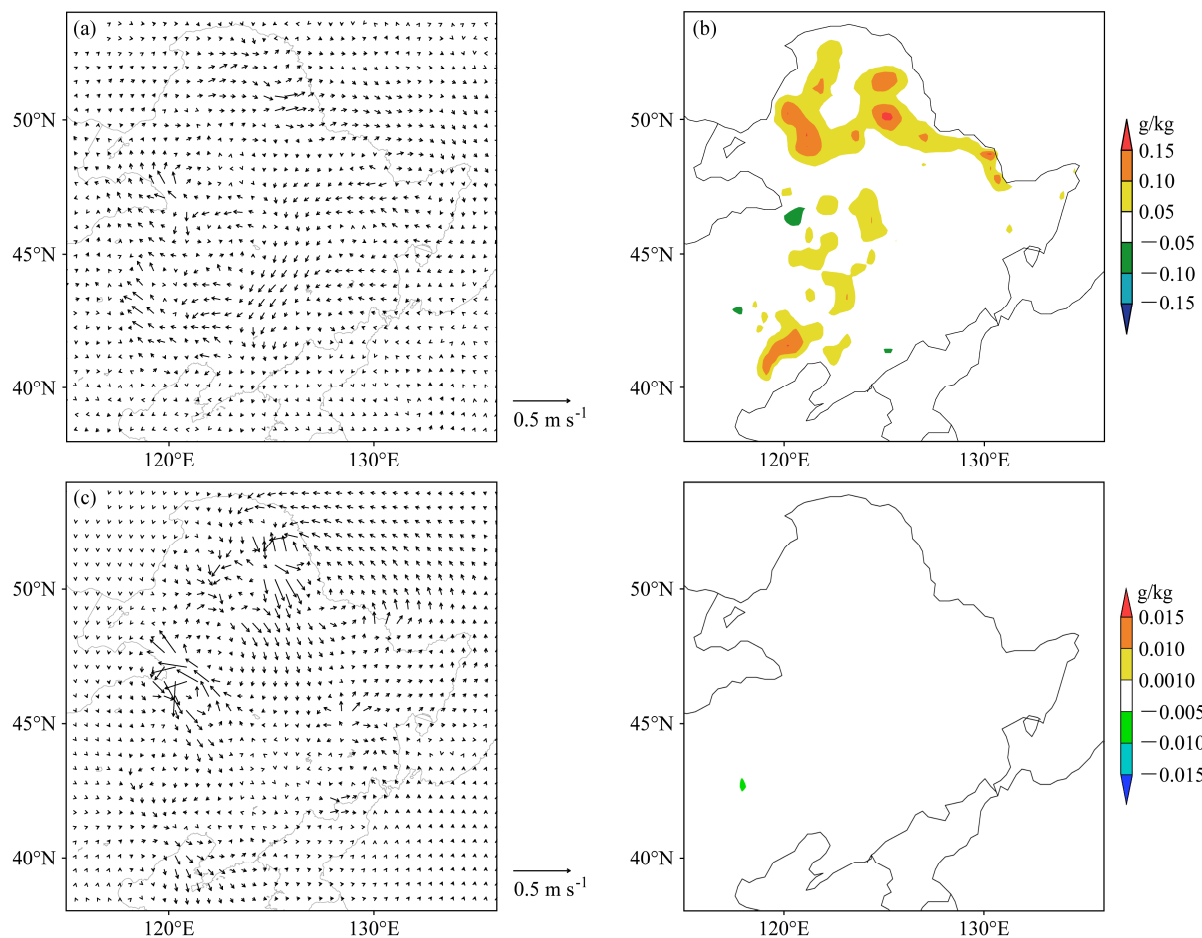


图 6 农田扩张引起多年 (a、b) 夏季平均、(c、d) 冬季平均 (a、c) 850 hPa 风场变化 (单位: m/s) 和 (b、d) 水汽混合比变化 (单位: g/kg) averaged in (a, b) summer and (c, d) winter

表2 东北及不同类型格点上不同季节气温、降水距平变化模拟与观测的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of simulated and observed temperature and precipitation anomalies in different seasons in Northeast China and different types of grids

	LUC90 与观测相关系数				LUC05 与观测相关系数			
	夏季气温	冬季气温	夏季降水	冬季降水	夏季气温	冬季气温	夏季降水	冬季降水
东北	0.94	0.96	0.51	0.89	0.94	0.96	0.52	0.89
草地变为雨养农田 (GTOR)	0.94	0.97	0.70	0.78	0.94	0.96	0.70	0.78
雨养农田变为灌溉农田 (RTOI)	0.88	0.93	0.28	0.65	0.86	0.93	0.32	0.67
森林变为雨养农田 (FTOR)	0.84	0.91	0.32	0.75	0.82	0.92	0.41	0.73

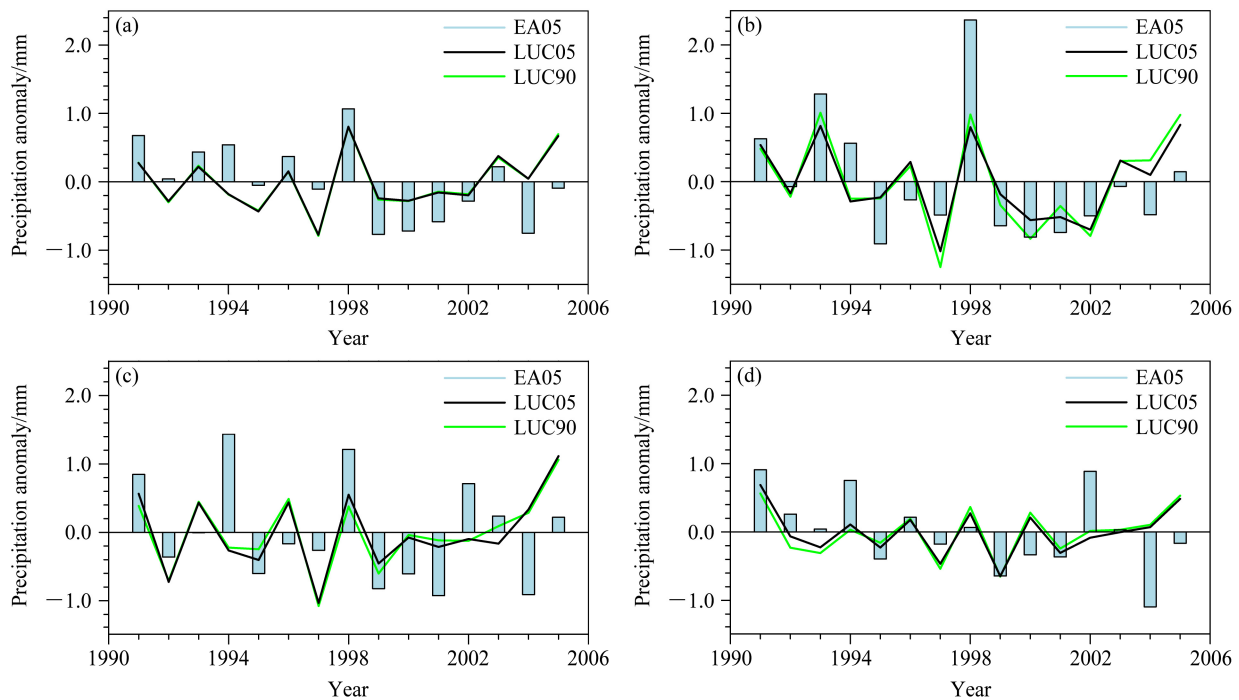


图7 东北及不同类型格点上夏季降水距平(单位: mm)模拟和观测的年际变化: (a) 东北; (b) 草地变为雨养农田 (GTOR); (c) 雨养旱田变为灌溉农田 (RTOI); (d) 森林变为雨养农田 (FTOR)

Fig. 7 Interannual variability of simulated and observed summer rainfall anomalies (mm) in Northeast China and different types of grid points: (a) Northeast China; (b) grass to rainfed farmland (GTOR); (c) rainfed farmland to irrigated farmland (RTOI); (d) forest to rainfed farmland (FTOR)

LUC05 试验的年际变化趋势接近,但是东北农田扩张后,年际变化模拟略有改进,对模拟降水改进比气温更加明显,与观测年际变化趋势更一致。东北农田扩张后,东北夏季降水的距平变化模拟与观测相关系数增加,距平变化模拟与观测更接近,年际变率的模拟能力提高(图 7),雨养农田变为灌溉农田格点(图 7b)和森林变为雨养农田格点上,夏季降水距平变化模拟与观测的相关系数都增加较多,年际变化的模拟能力提高较大,其中森林变为雨养农田格点上更加明显(图 7d)。

4 结论与讨论

近十几年来,中国东北土地利用/覆盖发生很大

的变化,从 LUC05 资料和 LUC90 资料对比可以发现,东北土地利用/覆盖变化后,农田类型增加 81 个格点,因此这种变化主要特点是由自然植被向农田转变,这将影响东北以及东北局地的气候变化。本文利用区域环境系统集成模式 (RIEMS2.0) 进行长时间、高分辨率的模拟,利用中国科学院地理科学与资源研究所最新土地利用/覆盖数据库的数据,研究东北农田扩张对区域气温、降水以及地面能量通量和局地大气环流的可能影响,并揭示其对东北不同季节平均气温和降水的影响机制。

(1) 中国区域土地利用/覆盖具有复杂多样的特点,准确反映中国土地利用/覆盖特征一直是过去相关研究中棘手的问题。本文所用的东北土地利用/覆盖资料,是选取遥感影像资料,利用调查统计资

料进行订正,进行升尺度合成,并采取更加合理的分类方法,得到较为准确的资料,这对于东北土地利用/覆盖变化的气候影响模拟具有重要意义。

(2) 东北农田扩张年均温和季节平均气温降低,局地变化很明显,如在夏季黑河西部、呼伦贝尔南部降温超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地区通过显著性检验 ($P < 0.05$),在南部地区由于农田扩张面积范围大,也更加明显。不同分区中,东北北部夏季气温升高,冬季气温降低,中部和南部分区无论是冬季还是夏季气温降低。东北土地利用/覆盖变化后,使得东北平均降水减少,如在大兴安岭南、黑河西部等夏季降水减少,其中减少的大部分区域通过显著性检验 ($P < 0.05$),使得冬季降水也减少,但是减少不大,3 个分区不同季节的降水都减少。

(3) 东北农田扩张引起的气温变化与感热通量和潜热通量变化有密切关系。对于夏季和冬季来说,东北地区都是感热通量减少、潜热通量增加的格点区域对应气温下降,但是夏季的潜热通量、感热通量变化与气温变化空间相关系数相对于冬季来说更大,而冬季的净吸收辐射通量变化与气温变化的空间相关系数比夏季大。从年际变化来看,东北夏季降水的距平变化模拟与观测相关系数增加,距平变化模拟与观测更接近,年际变率的模拟能力提高,雨养农田变为灌溉农田格点和森林变为雨养农田格点上也有同样的表现,其中森林变为农田格点上更加明显。东北南部主要表现为短草类型转变为农田类型,夏季蒸散发增加,潜热通量增加,气温降低,冬季净吸收辐射通量减少,气温降低。另外,东北农田扩张后,黑龙江北部一些地区灌溉面积增加,但是灌溉面积增加较小,这样少的格点,蒸发加大不明显,对东北气温和降水的作用也较小,对灌溉农田的影响研究,需要更多的数值模拟试验,才能对机理有进一步的认识。

(4) 东北农田扩张后,对夏季来说,辽宁西部和东北北部地区蒸散发增加,大气中水汽增加,但是这两个地区降水并未增加,造成这一现象的主要原因是大气环流场的作用,由于风场的变化,使得增加的水汽,输送到东北的北部及赤峰一带,因此东北区域降水减少。对冬季来说,冬季农田扩张的格点上,蒸散发变化很小,大气中水汽也几乎没有变化,所以东北冬季的大部分区域降水几乎没有变化。东北农田扩张,会使降水量减少,使得干旱增加,导致东北西部和内蒙古一带水资源进一步缺

乏,这些地区灌溉需求进一步加剧。因此,在未来东北土地利用管理上,应该重视制定合理的土地利用管理的策略,这有助于土地利用的可持续性以及促进人与自然的和谐关系 (Gao et al., 2006)。

(5) 一个完善的区域气候模式评估需要考虑更多的耦合过程,在未来研究中,区域气候模式中不仅要考虑土地利用/覆盖变化的生物地球物理效应,而且也要考虑土地利用/覆盖变化的生物地球化学效应。在未来应该系统估算土地利用/覆盖变化对中国东北区域气候变化的影响,尤其是对区域增暖的影响作用,综合分析土地利用/覆盖变化、温室效应和气溶胶对气候变化的相对贡献,为气候变化的归因和检测分析提供依据。

参考文献 (References)

- Bonan G B. 2002. *Ecological Climatology: Concepts and Applications* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 678pp.
- Brian S Jr. 2009. Mitigating climate change could be better achieved by regulating land use change than emissions reductions alone[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 43 (24): 9052–9056.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel T G F, et al. 1999. Potential impacts on Colorado Rocky Mountain weather due to land use changes on the adjacent Great Plains [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D14): 16673–16690.
- Claussen M, Brovkin V, Ganopolski A. 2001. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (6): 1011–1014.
- de Noblet-Ducoudré N, Boisier J P, Pitman A, et al. 2012. 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]. *J. Climate*, 25 (9): 3261–3281, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00338.1.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Technical Report, NCAR/TN-387+STR.
- Diffenbaugh N S. 2009. Influence of modern land cover on the climate of the United States [J]. *Climate Dyn.*, 33 (7–8): 945–958.
- Dong S Y, Yan X D, Xiong Z. 2013. Varying responses in mean surface air temperature from land use/cover change in different seasons over Northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33 (3): 167–171, doi: 10.1016/j.chnaes.2013.03.007.
- Douglas E M, Niyogi D, Frothingham S, et al. 2006. Changes in moisture and energy fluxes due to agricultural land use and irrigation in the Indian monsoon belt [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (14): L14403.
- 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.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in Atmospheric

- Constituents and in Radiative Forcing [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 129–234.
- 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.
- Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86 (2): 257–266.
- Gao J, Liu Y S, Chen Y F. 2006. Land cover changes during agrarian restructuring in Northeast China [J]. *Applied Geography*, 26 (4): 312–322.
- 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 (Ser. D): Earth Sciences*, 50 (4): 620–628.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (3): 764–787.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1997. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [R]. Technical Report NCAR/TN-420_ST, Colorado: NCAR, 160pp.
- 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 等. 2011. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探 [J]. *地球科学进展*, 26 (10): 1015–1022.
- Liu Jiuyan, Shao Quanqin, Yan Xiaodong, et al. 2011. An overview of the progress and research framework on the effects of land use change upon global climate [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 26 (10): 1015–1022.
- Lobell D B, Bala G, Bonfils C, et al. 2006. Potential bias of model projected greenhouse warming in irrigated regions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (13): L13709, doi: 10.1029/2006GL026770.
- Mahmood R, Quintanar A I, Conner 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.
- NRC (National Research Council). 2005. *Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties* [C]. National Research Council, 208pp.
- Paruelo J M, Burke I C, Lauenroth W K. 2001. Land-use impact on ecosystem functioning in eastern Colorado, USA [J]. *Global Change Biology*, 7 (6): 631–639.
- Pielke 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 R A, Adegoke J, Beltrán-przekurat A, et al. 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall [J]. *Tellus*, 59 (3): 587–601.
- Pitman A J, de Noblet-Ducoudré N, Cruz I 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 (14): L14814, doi: 10.1029/2009GL039076.
- Sacks W J, Cook B I, Buening N, et al. 2009. Effects of global irrigation on the near-surface climate [J]. *Climate Dyn.*, 33 (2–3): 159–175.
- Sega M, Pan Z, Turner R W, et al. 1998. On the potential impact of irrigated areas in North America on summer rainfall caused by large-scale systems [J]. *J. Appl. Meteor.*, 37 (3): 325–331.
- Snyder P K, Delire C L, Foley J A. 2004. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate [J]. *Climate Dyn.*, 23 (3–4): 279–302.
- Suh M S, Lee D K. 2004. Impacts of land use/cover changes on surface climate over East Asia for extreme climate cases using RegCM2 [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D2): D02108.
- Takata K, Saito K, Yasunari T. 2009. Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustrial cultivation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (24): 9586–9589, doi: 10.1073/pnas.0807346106.
- Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (3): 607–626.
- Xiong Z, Fu C B, Yan X D. 2009. Regional integrated environmental model system and its simulation of East Asia summer monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 (22): 4253–4261.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (4): 763–772, doi: 10.1007/s00376-009-9029-z.
- Yeh T C, Wetherald R, Manabe S. 1984. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—a numerical experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112 (3): 474–490.
- 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.
- 赵得明, 符淙斌, 延晓冬. 2009. 区域环境集成模拟系统 RIEMS2.0 对中国多年降水和气温模拟能力分析 [J]. *科学通报*, 54 (16): 2379–2387.
- Zhao Deming, Fu Congbin, Yan Xiaodong. 2009. Testing the ability of RIEMS2.0 (Regional Integrated Environment Modeling System) to simulate multi-year precipitation and air temperature in China [J]. *China Science Bulletin*, 54 (17): 3101–3111.
- 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.