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.

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

王明娜¹ 韩哲² 张庆云³

1 中国科学院计算地球动力学重点实验室,中国科学院大学,北京100049
2 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室,中国科学院大气物理研究所,北京100029
3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京100029

摘 要 利用区域模式 WRF (Weather Research and Forecasting)模拟分析了 21 世纪初期 2001~2010 年中国北方 半干旱区土地利用变化对地表温度影响,通过给出区域尺度的人类活动影响气候变化的定量表达,有助于我们理 解中国北方半干旱区气候变化的归因,也将对我国科学规划土地利用、合理开展有序人类活动具有一定的参考价 值。研究结果表明:农田扩张、植树造林和草地恢复 3 类土地利用与覆盖变化 (land use and cover change, LUCC) 现象对格点尺度多年平均温度的影响均呈现负效应。农田扩张导致当地多年平均温度降低 0.11 ℃,夏季和冬季分 别降温 0.39 ℃ 和 0.06 ℃。植树造林格点的多年平均温度降低 0.33 ℃,冬季强于夏季,冬季平均温度减小 0.24 ℃, 夏季减小 0.15 ℃。草地恢复使得格点年平均温度降低 0.41 ℃,夏季降低 0.58 ℃,冬季减小 0.51 ℃。LUCC 对最 低温度的影响强于最高温度,并且由于最低温度减小使得大部分地区日较差显著增大。LUCC 导致的局地温度变 化与同期背景温度的变幅相当,但对区域平均温度的影响很小。一方面由于 LUCC 格点占区域的面积很小,另一 方面由于正、负温度效应在区域平均的过程中相互抵消,使得 LUCC 对区域温度变化的影响微乎其微,21 世纪初 期现实 LUCC 对地表温度的影响主要限于局地。

关键词 半干早区 土地利用与覆盖变化 温度 WRF 模式
文章编号 1006-9585(2016)01-0065-13 中图分类号 P461⁺.8 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15197

Impact of Land Use and Cover Change in the Semi-arid Regions of China on the Temperature in the Early 21st Century

WANG Mingna¹, HAN Zhe², and ZHANG Qingyun³

Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The impacts of land use and cover change (LUCC) in the early 21st century on the temperature in the semi-arid regions of China were simulated using the WRF model. Determining the contribution rate of regional-scale LUCC on climate warming can improve and deepen our understanding of climate change attribution, which can in turn

收稿日期 2015-08-25; 网络预出版日期 2015-10-20

作者简介 王明娜,女,1982年出生,博士,主要从事气候变化归因、减缓方面的研究。E-mail: wangmn@ucas.ac.cn

资助项目 国家重大科学研究计划 2014CB954300,国家自然科学基金——青年基金项目 41405072

Funded by The Major State Basic Research Development Program of China (Grant 2014CB954300), National Natural Science Foundation of China—Youth Fund (Grants. 41405072)

provide an important scientific basis for climate warming mitigation through the regulation of human activity. The simulated results show that the three main types of LUCC phenomena in the semi-arid regions, including farmland expansion, afforestation, and grassland restoration, all appear to have had negative effects on local-scale surface air temperature. Farmland expansion resulted in a decrease in local annual mean temperature by 0.11°C, with the summer and winter values being 0.39 °C and 0.06 °C, respectively. Afforestation reduced local annual mean temperature by 0.33 °C, with winter witnessing stronger cooling than summer (0.24 °C and 0.15 °C, respectively). Grassland restoration resulted in a decrease in local annual mean temperature by 0.41 °C, with the values for summer and winter being 0.58 °C and 0.51 °C, respectively. The influence of LUCC on the minimum temperature was more than the maximum temperature; moreover, the diurnal temperature range increased, mainly due to the decrease in minimum temperature. The local temperature changes caused by LUCC were comparable with the grid-scale background temperature changes, while the impact of LUCC on the regional average temperature was negligible. On the one hand, the share of LUCC grids was small; while on the other hand, the positive and negative effects in the process of regional averaging offset each other. Therefore, the influence of actual LUCC on temperature was mainly limited to the local scale.

Keywords Semi-arid region, Land use and cover change, Temperature, WRF model

1 引言

地球表面有着纷繁复杂的地表状态和植被,不同的地表形态共同组成了大气运动的下边界条件。土地利用和覆盖基本上决定了局地的能量和水分平衡,在某些条件下也能够影响到区域乃至全球的大气环流(孙岚等,2000)。人类在开发利用土地的过程中改变陆地表面的覆盖状况,至少有 1/3的地球表面受人类活动的直接影响(邵璞和曾晓东,2012)。土地利用与覆盖变化(land use and cover change, LUCC)客观地记录了人类改变陆表特征的空间格局,在一定程度上反映了地球表面景观的时空变化(史培军等,2002)。

LUCC 活动改变了地表的反照率、蒸发散等生物地球物理过程和碳循环、温室气体排放等生物地球化学过程,以致在不同的时空尺度上,对局地、区域和全球尺度的气候产生影响。当前,国际政府间气候变化谈判存在一种倾向,即把全球和区域生态、气候变化完全归结到人类活动所导致的温室气体排放,忽略土地利用变化导致的生物物理过程对气候变暖的影响(刘纪远等,2011)。通过厘定大尺度LUCC导致温室气体收支变化与陆—气界面过程变化对气候变暖的贡献率,可完善和深化对全球气候变化成因的科学认识,同时也为人类社会通过调控自身土地利用行为,达到减缓气候变暖的目的提供重要的科学基础。

当代中国土地利用与覆盖变化是人类活动作 用的结果。中华人民共和国成立后,人口的增加使 耕地的需求量增加,为了解决人民的温饱问题,在

国家政策和个人利益的驱动下,在中国东部季风区 人们如火如荼地开始了围湖造田、开垦"北大荒"、 垦荒造田和兴修水利等大范围的 LUCC 活动。但 21 世纪后,在国家大力推进生态文明建设布局的指导 下,大规模开展的退耕还林还草、"三北防护林" 建设等LUCC活动给工程重点区内的植被覆盖带来 了巨大的变化。退耕还林还草工程从 1999 年开始 在四川省、陕西省、甘肃省试点进行,到 2000 年 开始扩大到 25 省区,至 2002 年底,累计退耕还林 59×10⁵ hm²。"三北防护林"东起黑龙江省宾县, 西至新疆乌兹别里山口, 工程完成后三北地区森林 面积可增加到 6057×10⁴ hm²,覆盖率达到 15%, 生态效益累计可达到 13000 多亿元人民币 (http:// tghl.forestry.gov.cn[2014-12-27])。可见, 21世纪后, 中国北方干旱半干旱区内,在大力发展农业的基础 上,也开始了大规模的生态恢复建设,人类活动更 为活跃使得气候对土地利用与覆盖变化的响应更 为复杂。LUCC 将会导致什么样的气候后果,是目 前亟需定性与定量化解决的科学问题。

以往LUCC的数值模拟研究大多采用模式自带的下垫面类型数据(多为美国地质调查局USGS提供)与潜在植被模拟结果比较来体现人类活动导致土地利用变化后的气候变化(Fu, 2003; Gao et al., 2003, 2007; Zhang et al., 2010; 毛慧琴等, 2011); 或者直接采用虚拟实验,将某一区域的下垫面类型 替换成另一种极端情形 (Shukla et al., 1990; Bonan et al., 1992; Zhang et al., 2005; Wang et al., 2013)以此来模拟某一种重大LUCC现象对气候的影响,如将热带森林替换成裸地或农田,来评估森林砍伐 对气候的影响(Shukla et al., 1990; Bonan et al

1992)。这些试验结果虽然可以体现历史时期或植被 类型极端变化后 LUCC 对全球或区域气候的影响, 在一定程度上可以加深对全球气候变化成因的科 学认识,但却无法正确厘定实际情况下的大尺度 LUCC 对气候变暖的贡献率,尤其是不能反映中国 近现代土地资源利用、发展实际情况在气候变化过 程中所起的作用。

我国干旱半干旱区约占陆地面积的40%,是中 国境内对全球变化反应敏感的生态系统过渡带(胡 隐樵和张强, 2001)。北方农牧交错带其主体部分 北起大兴安岭西麓呼伦贝尔,向西南延伸, 经内蒙 古东南、河北北部、山西北部, 直至陕西北部、鄂 尔多斯高原,这一地域年降水量 200~400 mm,是 从半干旱区向干旱区,从高原地区向丘陵平原地区 的过渡带,也是将农业区与草原牧区分割开的半农 半牧、时农时牧区(史培军和哈斯, 2002)。中国 北方半干旱区地处土地利用交错区,降水稀少,植 被稀疏,属于气候变化敏感区、生态系脆弱区,还 是我国少数民族聚居地区(张兰生等,1997;周广 胜, 1999; 蒋卫国等, 2005)。所以, 如何通过"有 序人类活动" (叶笃正等, 2001) 科学地开发和利 用土地资源,实现人类与自然的和谐相处,是一个 亟待解决并有现实意义的科学问题。

基于以上的问题,本文将基于 21 世纪初期中 国北方半干旱区各种人类活动(例如植树造林、农 田扩张等)造成的土地利用改变,获取人类活动所 导致的土地利用的时空变化特征,利用区域气候模 式研究人类活动影响下的中国北方半干旱区的温 度变化,给出区域尺度的人类活动影响气候变化的 定量表达。这将有助于我们理解中国北方半干旱区 气候变化的归因,也将对我国科学规划土地利用、 合理开展有序人类活动具有一定的参考价值。

2 模式和试验设计

2.1 模式设置

本 试 验 使 用 的 模 式 版 本 为 WRF(Weather Research and Forecasting)/ARW (Advanced Research WRF) 3.6.1。模式采用兰伯特投影,中心经度 112°E, 中心纬度 42°N,双标准纬线为 30°N 和 60°N,标准 经线 112°E。水平分辨率为 20 km,横向为 100 个 格点,纵向为 96 个格点。垂直方向 38 层,顶层气 压 50 hPa。模式的初始场和边界场来自 CFSR (The Climate Forecast System Reanalysis) 资料, CFSR 再 分析资料的分辨率为 0.5°(纬度) × 0.5°(经度), 同化了几乎所有的卫星观测,是目前国际上常用的 再分析资料之一,每6h更新一次数据。模拟时间 为从 2000 年 12 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日, 其 中 2000 年 12 月作为缓冲(spin-up)阶段,其结果 不用做分析,只分析 2001~2010 年 10 年的结果。 模式的物理选项如表1所示,他们共同组成了WRF 模式行星边界层垂直对流过程的下边界条件。为了 进行长时间的区域气候模拟,本模式中的长短波辐 射方案均采用 CAM 方案,并随积分更新海温和土 壤深层温度。陆面模式使用的是 CLM4(Community Land Model Version 4, Oleson et al., 2010; Lawrence et al., 2011), CLM4 模式从大气模式的边界层方案、 辐射方案、微物理方案和对流参数化方案中获得所 需信息,然后结合内置的陆面状态变量和土地表面 性质量进行运算,通过陆点和海冰格点将感热通 量、潜热通量、温度、湿度以及其他变量反馈给大 气模式 (Skamarock et al., 2008)。本试验使用 NASA 的分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 资料更新的土地利用/ 覆盖数据。

表1 WRF 模式的参数化方案

Table 1Configuration of the physical parameterizationschemes in WRF model

物理过程	选项
微物理参数化方案	WSM 3-class simple ice 方案
积云对流参数化方案	Grell-Devenyi ensemble 方案
近地层参数法方案	Monin-Obukhov 方案
陆面过程	CLM 陆面方案
行星边界层方案	YSU 方案
长波辐射方案	CAM 长波辐射方案
短波辐射方案	CAM 短波辐射方案

控制试验(CTL)和敏感性试验(SEN)均采 用同样的基本设置,模式采用相同的初始场,不间 断连续积分。如图1所示,CTL试验利用2001年 的植被覆盖资料,对图1区域进行积分。SEN试验 利用2010年的植被覆盖,其余各项包括试验所用 资料和模式各参数及物理过程等的选取与CTL保 持相同,对相同区域进行积分。

2.2 研究区域土地利用变化分析

2001 年和 2010 年研究区域内的土地利用类型 如图 1 所示,从图中可以看出,本研究区域正好覆 盖了中国东部农田、北方草地及西北干旱半干旱区

67

的裸地/稀疏植被3类主要的土地利用类型。主要的 土地利用类型从东南到西北依次为农田、草地和 裸地。从图1的细节处可以看出,研究区域内土 地利用变化也主要发生在这三大类型交错转换的 地带。

如图 2 所示,发生变化的格点主要集中在以下 3 个区域:1)从东北到甘肃一宁夏的农牧交错带区 域,主要类型转换为从草地转换为农田,以及太行 山区的草地、农田转换为混合林;2)在内蒙古中 部至蒙古国的草地裸地交错区,主要类型转换为从 裸地转换为草地;3)在内蒙古东北部地区,草地、 农田转换为混合林、农林混合类型。在模拟区域, 2001~2010 年发生土地利用变化的格点数一共有 876 个。对发生变化的格点数目进行分析,图 3 为 变化最多的 8 种类型转换,将他们进行合并分类后, 包括以下3类:农田扩张(垦草,包括草地转换为农田和草地转换为农田/自然植被镶嵌类型)的格点数一共有379个(图3中的红色类型标注),造林(包括草地转换为混合林、农田转换为混合林以及农田/自然植被镶嵌类型转换为混合林)的格点数一 共有247个(蓝色),草地恢复(裸地或稀疏植被 类型转换为草地,以及农田转换为草地)的格点数 有201个(绿色)。可见,与1980~2000年中国 东部以森林、草地转换为农田的生态破坏过程为主 不同(董思言等,2014;Wang et al., 2015),2001~ 2010年的10年间,在中国北方发生了生态恢复过 程,这和刘纪远等(2009)对21世纪初土地利用 类型转换的分析是一致的。本文下面的研究也主要 集中分析农田扩张、造林和草地恢复这3类土地利 用变化的气候效应。



图 1 CTL 和 SEN 试验的下垫面土地利用类型(1 常绿针叶林,2 常绿阔叶林,3 落叶针叶林,4 落叶阔叶林,5 混合林,6 密闭灌木林,7 开 放灌木林,8 灌木草原,9 稀树大草原,10 草地,11 永久湿地,12 农田,13 城市和建筑用地,14 农田/自然植被镶嵌,15 冰雪,16 裸地或稀 疏植被,17 水体,18 灌木苔原,19 混合苔原,20 裸露苔原)

Fig. 1 Land use categories in the (a) control test (CTL) and (b) sensitivity test (SEN) (1—Evergreen needleleaf forest, 2—Evergreen broadleaf forest, 3—Deciduous needleleaf forest, 4—Deciduous broadleaf forest, 5—Mixed forest, 6—Closed shrublands, 7—Open shrublands, 8—Woody savanna, 9—Savanna, 10—Grasslands, 11—Permanent wetlands, 12—Croplands, 13—Urban and built-up land, 14—Cropland/natural vegetation mosaic, 15—Snow and ice, 16—Barren or sparsely vegetated, 17—Water, 18—Wooded tundra, 19—Mixed tundra, 20—Barren tundra)



图 2 发生土地利用变化的格点(图中显示的是 SEN 试验的下垫面类型) Fig. 2 Changed grid cells (indicated by the land use categories in the sensitivity test)



Fig. 3 Changed grid cell numbers of all kinds of land use type conversions

3 结果分析

3.1 模式对温度模拟性能检验

与模式模拟结果进行验证的观测温度数据为

中国气象局最新的 CN05.1 格点日观测数据(吴佳 和高学杰,2013),空间分辨率为0.25°(纬度)×0.25° (经度)。图 4 为观测和模拟的多年平均气温、最 低和最高温度的空间分布。从观测可以看出,中国 北方半干旱区气温总体呈现从南到北逐步递减的趋 势。将 WRF 模式的结果插值到 0.25°(纬度) × 0.25° (经度),从模拟的结果可以看出,WRF模式可以 合理地模拟出半干旱地区年平均温度的气候态分 布,空间相关系数为0.98,均方根误差为2.75。从 模拟和观测的差值可以看出,模式模拟的大部分地 区多年平均温度误差在-3~3 ℃之间,在河北南 部、河南北部和陕西中部的部分格点模拟温度误差 最大,最大可偏高3 ℃以上(图4c)。WRF/CLM 模式对最低温度的模拟在北方地区偏暖(图 4d、4e、 4f),最高温度在北方地区偏冷(图 4g、4h、4i), 但还是可以基本展现最低、最高温度的分布态势。 通过多年平均温度的对比,可以看出,模式可以合 理地模拟出温度的空间分布特征,其对温度的模拟 是合理可靠的,所以可以使用 WRF 模式进行区域 气候的研究。

3.2 LUCC 对温度的影响分析

研究区域内多年平均、夏季(6~8月)、冬季 (12月至次年2月)的温度变化如图5所示,可见, 除少数格点升温外,大部分以降温为主,并且多集



图 4 (a、d、g) 观测、(b、e、h) 模拟的多年(a-c) 平均温度、(d-f) 平均最低温度和(g-i) 平均最高温度及(c、f、i) 模拟与观测的差值 Fig. 4 Spatial distributions of (a, d, g) CN05-observed and (b, e, h) model-simulated (a-c) annual mean temperature, (d-f) annual mean minimum temperature, and (g-i) annual mean maximum temperature and (c, f, i) their differences



中发生在上述3大类土地利用变化的地区。

1 期

No. 1

分别对农田扩张、植树造林、草地恢复3大类 LUCC 活动进行分析。

如图 6 和表 2 所示,农田扩张导致地表平均温 度降低,多年平均温度降低 0.11 °C,夏季和冬季分 别降温 0.39 °C 和 0.06 °C。值得注意的是,草地变 为农田对温度的影响存在着季节和地区差异。在东 北地区,冬季要比夏季降温大 0.4 °C 左右,而从辽 宁西南部到宁夏的农牧交错带区域,农田扩张在夏 季和冬季则呈现相反的效应,夏季有-0.2~0.6 °C 的降温,在冬季有 0.2~0.6 °C 左右的增温。

植树造林格点的多年平均温度降低 0.33 ℃。植 树造林对温度的影响冬季强于夏季,冬季平均温 度减小 0.24 ℃,夏季减小 0.15 ℃。但是在东北 地区,农田或草地变为混合林使得冬季、夏季温度 变化的趋势相反,夏季温度略有降低,冬季升温 明显。

草地恢复使得年平均温度降低 0.41 ℃, 夏季降低 0.58 ℃, 冬季减小 0.51 ℃。其中, 由裸地转换为 草地的格点温度降低十分显著, 多年平均温度降低 0.57 ℃, 夏季 (-0.84 ℃)强于冬季 (-0.64 ℃)。而 农田转换为草地格点的季节变化与前述的农田扩张 (草地转换为农田)的冬季、夏季温度变化趋势相 反,夏季升温 0.33 ℃,冬季略有降温(-0.04 ℃)。

综合来看,在模拟区域内对温度影响最大的 LUCC事件依次为草地恢复(裸地变草地),其次是 农田扩张(草地变农田)和植树造林(草地、农田 变混合林)。

表 2 农田扩张、植树造林、草地恢复的土地利用类型转换 对夏季平均温度、冬季平均温度及多年平均温度的影响

Table 2Effects of land type conversion of farmlandexpansion, afforestation and grassland restoration onannual mean temperature, summer mean temperature, andwinter mean temperature°C

		夏季平均	冬季平均	年平均
LUCC	类型转换	温度	温度	温度
农田扩张	草地→农田	-0.4	-0.01	-0.08
	草地→农田/自然植被镶嵌	-0.35	-0.57	-0.4
	合计	-0.39	-0.06	-0.11
植树造林	合计	-0.15	-0.24	-0.33
草地恢复	裸地→草地	-0.84	-0.64	-0.57
	农田→草地	0.33	-0.04	0.14
	合计	-0.58	-0.51	-0.41

00

图 7 和表 3 显示的是最高、最低温度和日较差 (diurnal temperature range, DTR)的变化。总体来 看,LUCC 对最低温度的影响比最高温度更为剧 烈(图 7a-7f)。在季节变化方面,除裸地变草地 外,LUCC 对最高温度的影响冬季(图7c)均强于 夏季(图7b);而LUCC对于最低温度的影响,除 植树造林外, 夏季 (图 7e) 温度的变化均大于冬季 (图 7f),但草地和农田两者之间的转换对冬季和 夏季最低温度影响的正负效应不同(表3)。日较差 的变化方面,除农田转换为草地外,其他 LUCC 格 点的年平均最低温度均降低,相应的 DTR 均增加 (图 7d)。在夏季,除农田转换为草地使最低温 度升高外,其他均减小,相应的 DTR 除农田转换 为草地外均显著增加(图 7b、7e、7h)。冬季的 DTR 变化, 除农田扩张的区域减小外, 植树造林和 草地恢复处均增加(图7c、7f、7i)。可见,土地利 用变化后,由于最低温度减小得更大使得大部分地 区日较差增大。农田扩张、植树造林和草地恢复地 区年平均 DTR 分别增高 0.25 ℃、0.54 ℃ 和 0.58 ℃ (表3)。

3.3 机制分析

对引起温度变化的物理机制进行分析(表4)。

夏季,农田扩张使得地表反射的短波辐射增加,地表净短波辐射减小,而另一方面,农田扩张 后潜热通量增加,所以农田扩张使得夏季地表温 度降低。冬季,草地变为农田使得净短波辐射减 小,但是潜热通量减小,两者共同作用导致温度升 高。最终,农田扩张使得年平均温度略有降低(图 8)。

植树造林使得地表反照率减小,净短波辐射增加,潜热通量增加。在东北地区,辐射的影响大于 蒸发散,使得东北地区的温度升高,尤其是在冬季 更明显;而在南部地区蒸发散的作用更强,使得温 度降低。

在干旱半干旱区,裸地变成草地后,净短波辐射增加,冬季和年平均的潜热通量也增加(图9), 而夏季潜热通量却没有太大的变化。由此可见,地 表净短波辐射及能量支出分配变化难以直接解释 裸地变成草地后的夏季降温。根据边界层气象学的 知识,近地层空气以湍流运动为主,温度垂直梯度



图 5 LUCC 对 (a) 多年平均、(b) 夏季平均、(c) 冬季平均温度的影响(黑点标注的格点为通过 95%信度检验) Fig. 5 Effects of land use and cover change (LUCC) on (a) annual mean temperature, (b) summer mean temperature, and (c) winter mean temperature (dark dots indicate changes significant at the 95% confidence level)

表3 7	欠田扩张、	植树造林、	草地恢复导致	的最低温度、	最高温度及日	日较差的变	22化			
Table 3	Effects o	f land type	conversion of fa	rmland expa	nsion, afforest	ation, and	grassland	restoration or	ı annual,	summer, and

winter maximum and minimum mean temperature, as wen as diurnal temperature range (DTK)										
		夏季			冬季			年		
LUCC	类型转换	最低温度	最高温度	日较差	最低温度	最高温度	日较差	最低温度	最高温度	日较差
农田扩张	草地→农田	-0.80	-0.01	0.07	0.05	-0.08	-0.13	-0.21	0.05	0.26
	草地→农田/自然植被镶嵌	-0.67	-0.09	0.58	-0.48	-0.64	-0.16	-0.49	-0.31	0.18
	合计	-0.79	-0.02	0.77	0.01	-0.13	-0.14	-0.23	0.02	0.25
植树造林	合计	-0.31	0.01	0.32	-0.49	0.05	0.54	-0.60	-0.06	0.54
草地恢复	裸地→草地	-1.39	-0.41	0.98	-1.12	-0.15	0.97	-0.97	-0.21	0.76
	农田→草地	0.64	0.01	-0.63	-0.24	0.18	0.42	0.19	0.10	-0.09
	合计	-0.95	-0.32	0.63	-0.93	-0.08	0.85	-0.72	-0.14	0.58



图 6 (a-c) 农田扩张、(d-f) 植树造林和 (g-i) 草地恢复的多年平均 (左列)、夏季 (中列) 和冬季 (右列) 平均温度变化 Fig. 6 Effects of (a-c) farmland expansion, (d-f) afforestation, and (g-i) grassland restoration on annual mean temperature (left panel), summer mean temperature (middle panel), and winter mean temperature (right panel)

近似于 0。裸地变草地,一方面增加了表面冠层高度,根据模式参数设置,零平面高度升高;另一方面增加了表面粗糙度,湍流增强,这两方面的影响使得近地层变厚,感热扩散的空气动力学阻抗减小,这可能是该地区夏季草地恢复导致表面气温降低的主要原因。

3.4 背景温度和 LUCC 导致的局地温度变幅的比较

在 CTL 试验中,侧边界和海表温度来自再分析 资料,主要反映了大尺度气候变化特征,本文应用 CTL 试验模拟的结果来表示背景温度的变化。如图 10 所示,2001~2010 年,研究区域的格点尺度和 区域平均的背景温度都是变冷的,这和目前一些关

73



图 7 SEN 和 CTL 试验多年平均(左列)、夏季(中列)、冬季(右列)的(a-c)最高温度、(d-f)最低温度、(g-i)日较差的差值(黑点标注的格 点为通过 95%信度检验区)

Fig. 7 Differences of annual (left panel), summer (middle panel), and winter (right panel) mean (a–c) maximum and (d–f) minimum temperature, as well as (g–i) the DTR between the SEN test and CTL test (dark dots indicate changes significant at the 95% confidence level)

于全球变暖停滞的研究结论是相似的,本文不予展 开讨论。LUCC导致的局地温度变化方面,除农田 变草地是温度升高外,其他也都是温度降低,两者 在量级上是相当的。农田扩张、草地恢复和植树造 林导致的局地温度变幅与当地背景温度变幅的比 率分别为4.10、0.41和1.57。虽然LUCC导致的局 地温度变化与当地背景温度变幅属于同一数量级, 但是LUCC对区域平均温度的影响很小,约为 -0.02 ℃, 远小于背景温度的变幅。这主要可能有两个方面的原因: 一是 LUCC 的面积占区域总面积的比例非常有限 (9.12%); 二是不同类型 LUCC 对温度的影响正、负各异,计算区域平均时会相互抵消。

4 结论

本文对 21 世纪初期中国北方半干旱区农牧交



图 8 多年平均(左列)、夏季(中列)、冬季(右列)的(a-c)地表反射短波辐射和(d-f)净短波辐射的变化(黑点标注的格点为通过 95%信度检验区)

Fig. 8 Effects of LUCC on annual (left panel), summer (middle panel), and winter (right panel) mean (a-c) downward shortwave radiation and (d-f) net shortwave radiation (dark dots indicate changes significant at the 95% confidence level)



图 9 (a) 多年平均、(b) 夏季、(c) 冬季的地表潜热通量的变化(黑点标注的格点为通过 95%信度检验区) Fig. 9 Effects of LUCC on (a) annual, (b) summer, and (c) winter mean latent heat flux (dark dots indicate changes significant at the 95% confidence level)

错带的土地利用变化进行了高分辨率长时间的模 拟分析,用以定量揭示 LUCC 对地表温度的影响。 结果表明,2001~2010年,中国北方半干旱区的土 地利用变化通过改变地表辐射状况和能量平衡对 地表温度产生了显著的影响。 研究区域内土地利用类型转换主要发生在农 田、草地、荒漠3种类型交错转换的地带,主要的 LUCC现象包括农田扩张、造林和草地恢复。农田 扩张、植树造林和草地恢复3类LUCC现象对格点 尺度多年平均温度的影响均呈现负的效应。农田扩

75



图 10 LUCC 导致的局地、区域温度变化及同期背景温度变化

Fig. 10 Effects of LUCC on local and regional temperature, as well as large scale temperature change

表 4 农田扩张、植树造林、草地恢复对年、夏季和冬季的平均地表净短波辐射和潜热通量的影响 Table 4 Effects of land type conversion of farmland expansion, afforestation, and grassland restoration on annual, summer, and winter net shortwave radiation, as well as latent heat flux W m⁻²

and winter net shortwave radiation, as well as latent heat flux W m							$W m^{-2}$	
		夏季		冬季	БР Г	年		
LUCC	类型转换	净短波辐射	潜热通量	净短波辐射	潜热通量	净短波辐射	潜热通量	
农田扩张	草地→农田	-4.44	12.98	-6.90	-2.31	-4.90	3.22	
	草地→农田/自然植被镶嵌	-2.75	4.53	-7.52	1.52	-5.44	1.63	
	合计	-4.30	12.27	-6.95	-1.99	-4.95	3.09	
植树造林	合计	7.46	0.31	11.14	1.26	10.78	0.66	
草地恢复	裸地→草地	1.08	-3.37	7.58	6.15	5.01	3.19	
	农田→草地	3.87	-12.81	10.65	0.36	8.66	-4.58	
	合计	5.63	-5.42	8.25	4.89	5.80	1.50	

张导致当地地表平均温度降低,多年平均温度降低 0.11 ℃,夏季和冬季分别降温 0.39 ℃ 和 0.06 ℃。 植树造林格点的多年平均温度降低 0.33 ℃。植树造 林对温度的影响冬季强于夏季,冬季平均温度减小 0.24 ℃,夏季减小 0.15 ℃。草地恢复使得格点年平 均温度降低 0.41 ℃,夏季降低 0.58 ℃,冬季减小 0.51 ℃。LUCC 对最低温度的影响比最高温度更为 剧烈,由于最低温度减小使得大部分地区日较差增 大。可见,LUCC 导致的局地温度变化与同期背景 温度的变幅相当。

但是,在LUCC对区域温度的影响上,一方面 由于LUCC格点所占的区域面积很小,另一方面由 于正、负温度效应在区域平均过程中相互抵消,使 得LUCC对区域温度变化的影响微乎其微,LUCC 对地表温度的影响主要限于局地。

本文仅使用了 WRF 这一种区域气候模式及

CLM 这一种陆面模式进行模拟并用来揭示 LUCC 的气候效应,但是不同的区域气候模式和陆面参数 化方案可能会导致模式模拟的 LUCC 效应的差异,所以未来有必要对 LUCC 的气候效应进行多模式的 集合模拟比较研究。另外,本文主要阐述了半干旱 区 LUCC 对地表温度的影响,仅分析了辐射和能量 平衡的变化,为了更全面认识 LUCC 的气候效应还 需进一步分析水汽、降水及大气环流的变化。

参考文献(References)

- Bonan G B, Pollard D, Thompson S L. 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate [J]. Nature, 359 (6397): 716–718, doi: 10.1038/359716a0.
- 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. 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13022.

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, doi: 10.1016/S0921-8181(02)00207-2.

- 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (4): 583–592, doi: 10.1007/BF02915501.
- Gao X J, Zhang D F, Chen Z X, 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, doi: 10.1007/s11430-007-2060-y.
- 胡隐樵, 张强. 2001. 开展干旱环境动力学研究的若干问题 [J]. 地球科 学进展, 16 (1): 18–23. Hu Yinqiao, Zhang Qiang. 2001. Some issues of arid environment dynamics [J]. Advances in Earth Sciences (in Chinese), 16 (1): 18–23, doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2001.01.005.
- 蒋卫国,陈云浩,李京,等. 2005. 中国北方农牧交错带生态环境的空间 格局演变 [J]. 自然资源学报, 20 (6): 871–878. Jiang Weiguo, Chen Yunhao, Li Jing, et al. 2005. Change and spatial pattern of eco-environment in the farming-pastoral ecotone of the Northern China [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 20 (6): 871–878, doi: 10.11849/zrzyxb.2005.06.010.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the community land model [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 3 (1), doi: 10.1029/2011MS00045.
- 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 Jiyuan, 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.
- 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. 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.
- 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 [J]. 生态学报, 31 (4): 1038–1045. Mao Huiqin, Yan Xiaodong, Xiong Zhe, et al. 2011. Modeled impact of irrigation on regional climate in India [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 31 (4): 1038–1045.

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 Tech. Note TN-478+STR.

- 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.
- 史培军,哈斯. 2002. 中国北方农牧交错带与非洲萨哈尔地带全新世环境 变迁的比较研究 [J]. 地学前缘,9 (1): 121–128. Shi Peijun, Ha Si. 2002. Comparison between Holocene environmental changes in North China agro-pastoral zone and Africa Sahelian Belt [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese),9 (1): 121–128, doi:10.3321/j.issn:1005-2321. 2002.01.015.

史培军, 宋长青, 景贵飞. 2002. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生

态环境安全影响的研究——从荷兰"全球变化开放科学会议"看人 地系统动力学研究的发展趋势 [J]. 地球科学进展, 17 (2): 161–168. Shi Peijun, Song Changqing, Jing Guifei. 2002. Strengthening the study of land use/cover change and its impact on eco-environmental security—The trend of the study of the dynamics of human-nature system based on "Global Change Open Science Conference 2001" in Amsterdam, Netherlands [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 17 (2): 161–168, doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2002.02.001.

- Shukla J, Nobre C, Sellers P. 1990. Amazon deforestation and climate change [J]. Science, 247 (4948): 1322–1325, doi: 10.1126/science.247. 4948.1322.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN–475+STR.
- 孙岚, 吴国雄, 孙菽芬. 2000. 陆面过程对气候影响的数值模拟: SSiB 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 耦合及其模式性能 [J]. 气象学报, 58 (2): 179–193. Sun Lan, Wu Guoxiong, Sun Shufen. 2000. Numerical simulations of effects of land surface processes on climate: Implementing of SSIB in IAP/LASG AGCM L9R15 and its performance [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (2): 179–193, doi: 10.11676/ qxxb2000.019.
- Wang M N, Zhang X Z, Yan X D. 2013. Modeling the climatic effects of urbanization in the Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan area [J]. Theor. Appl. Climatol., 113(3-4): 377–385, doi: 10.1007/s00704-012-0790-z.
- Wang M N, Xiong Z, Yan X D. 2015. Modeling the climatic effects of the land use/cover change in eastern China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, doi: 10.1016/j.pce.2015.07.009.
- 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 [J]. 地球物理学报, 56(4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(4): 1102–1111, doi: 10.6038/cjg20130406.
- 叶笃正, 符淙斌, 季劲钧, 等. 2001. 有序人类活动与生存环境 [J]. 地 球科学进展, 16 (4): 453–460. Ye Duzheng, Fu Congbin, Ji Jinjun, et al. 2001. Orderly human activities and subsistence environment [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 16 (4): 453–460, doi: 10.3321/j.issn: 1001-8166.2001.04.001.
- 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.
- Zhang J Y, Dong W J, Fu C B. 2005. Impact of land surface degradation in northern China and southern Mongolia on regional climate [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (1): 75–81, doi: 10.1360/04wd0054.
- 张兰生,方修琦,任国玉,等. 1997. 我国北方农牧交错带的环境演变 [J]. 地学前缘,4 (1-2): 127-136. Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu, et al. 1997. Environmental changes in the North China farming-grazing transitional zone [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese),4 (1-2): 127-136.
- 周广胜. 1999. 气候变化对生态脆弱地区农牧业生产力影响机制与模拟 [J]. 资源科学, 21(5): 46-52. Zhou Guangsheng. 1999. Impact of climate change on NPP of agriculture and animal husbandry in ecologically vulnerable areas: Mechanism and modeling [J]. Resources Science (in Chinese), 21(5): 46-52, doi: 10.3321/j.issn:1007-7588.1999.05.008.