# 印度农田扩张对区域气候影响的数值模拟

# 毛慧琴'熊 喆" 延晓冬 张丽娟

(<sup>1</sup>环境保护部卫星环境应用中心,北京 100094;<sup>2</sup>中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心,北京 100029; <sup>3</sup>北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

> 摘 要 选取耕地面积居世界第二位的印度作为研究区域,利用中国自主研发的区域气候 模式(RIEMS2.0)和土地利用变化资料,进行潜在植被和雨养农田的长时间积分模拟对比 试验,分析了印度农田扩张对区域气候的影响及其机制。结果表明:农田扩张使得印度区 域平均气温升高 0.1 ℃,平均降水强度减少 0.1 mm • d<sup>-1</sup>,总降水量减少 12.8%;农田扩张的 气候效应存在明显区域差异和季节差异,在副热带湿润区气温增加 0.5~1.0 ℃,在干旱和 半干旱区气温增加 0.3~0.5 ℃,在热带地区气温则下降;农田扩张使得季风前期和冬季气 温分别增加 0.5 ℃和 0.2 ℃;季风后期气温降低 0.5 ℃,季风季节气温没有明显变化;在副 热带湿润区、干旱和半干旱区降水明显减少,干旱季节特别是季风前期降水减少最为显著, 达到 0.3 mm • d<sup>-1</sup>;印度农田扩张使得年平均感热通量增加、潜热通量减少,其中植被的蒸 散作用引起的潜热通量的变化,尤其是季风前期潜热通量明显减少,是区域气温升高、降水 减少的重要原因;农田扩张使得印度大陆上空(850 hPa 高度)受较弱的辐散环流控制,辐散 下沉气流是造成当地气温升高、降水减少的又一原因。

关键词 农田扩张;印度;区域气候;模拟

**Modeled impact of cropland expansion on regional climate in India.** MAO Hui-qin<sup>1</sup>, XIONG Zhe<sup>2\*</sup>, YAN Xiao-dong<sup>3</sup>, ZHANG Li-juan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; <sup>3</sup>State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China).

**Abstract**: With the second highest percentage of farmland in the world , India was selected as the simulation experiment region to determine the impact and the mechanism of cropland expansion on regional climate. Based on global potential vegetation datasets and cropland dataset of HYDE V3 , simulation experiments were conducted by using the Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS) version 2.0 over potential vegetation and rainfed cropland areas of India. The results showed that , at the national scale , over the 10-year time period , the annual averaged air temperature increased by 0.1 °C and the precipitation rate decreased by 0.1 mm • d<sup>-1</sup> (12.8%) . The climatic effect of cropland expansion varied in different climatic zones and different seasons in India. The temperature increased by 0.5–1.0 °C in subtropical humid region , 0.3–0.5 °C in semi-arid and arid region , and decreased in tropical wet and dry region. The temperature increased by 0.2 °C in winter and 0.5 °C in pre-monsoon season and decreased by 0.5 °C in post-monsoon season , and there was no notable change in monsoon season. The subtropical humid region , semi-arid and arid regions saw the notable decreased precipitation , and dry season saw the decreased precipitation , with the largest of 0.3 mm • d<sup>-1</sup> in the pre-monsoon season. The imper-monsoon season. The imper-monsoon season for the largest of 0.3 mm • d<sup>-1</sup> in the pre-monsoon season. The imper-monsoon season with the largest of 0.3 mm • d<sup>-1</sup> in the pre-monsoon season. The imper-monsoon season is season for the largest of 0.3 mm • d<sup>-1</sup> in the pre-monsoon season. The imper-monsoon season is a season saw the decreased precipitation , with the largest of 0.3 mm • d<sup>-1</sup> in the pre-monsoon season. The imper-monsoon season is the decreased sensible heat flux , the decreased latent heat flux and the downward flow due to the diver-

环保公益项目(201309011)和国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB950903)资助。

收稿日期: 2015-08-26 接受日期: 2016-02-18

<sup>\*</sup> 通讯作者 E-mail: xzh@ tea.ac.cn

gence circulation at 850 hPa resulting from the rainfed cropland expansion can give the reasonable explanation for the increased temperature and decreased precipitation.

Key words: cropland expansion; India , regional climate; simulation.

过去 300 年,全球人口急剧增长,为了满足人类 对食物、木材的需求,人类滥伐森林,扩张农田。据 估计从 1700 年至今全球森林面积减少了 8×10<sup>6</sup>~13 ×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,农田面积增长了5倍(Goldewijk et al., 2004) ,尤其是 20 世纪 50-80 年代 ,森林砍伐的面 积超过了 18、19 世纪的总和。土地利用变化使得地 表能量水热交换和驱动机制发生了相应的变化 从 而对区域乃至全球气候产生重大影响(Werth et al., 2002);同时,土地利用变化的气候效应有明显的区 域差异 如低纬度地区热带雨林砍伐使得区域气温 升高(Dickinson et al., 1992; Henderson-sellers, 1993; Hahmann et al. ,1997; Costa , et al. ,1997; Bounoua et al. 2002);高纬度地区森林砍伐使得区域气温降 低(Bonan et al., 1992; Brovkin et al., 1999; Gedney et al. 2000); 而中纬度温带森林砍伐的气候效应则 具有很大的不确定性,升温或降温效应一般取决于 反照率作用和蒸散作用的相对强弱(Bonan et al., 1999; Govindasamy et al. 2001; Bonan et al. 2008) 。

印度的耕地面积居世界第二位,仅次于美国 (李美娇等 2015)。印度农业发展较早,在1700年 农田面积占全国面积的 7%,主要集中在印度的几 大河流域(如恒河、讷尔默达河以及戈达瓦里河 等) 以后随着人口的增长,农业的发展,到 2000年 全国农田面积增长了4倍约占国土总面积的1/2, 农田几乎遍布全国地区,目前关于印度区域农田扩 展气候效应已有相关研究,主要利用全球模式研究 其对区域水循环的影响(Takata et al. 2009; Yamashima et al. ,2011; Tuinenburg et al. ,2014); 由于全球 模式在区域尺度上模拟能力较低 ,而印度农田扩张 的气候效应属于区域尺度科学问题,因此需要采用 高分辨率的区域气候模式来展开定量研究。此外, 研究表明 印度区域近 100 年来气温上升了 0.5 ℃ (Kothawale et al. 2005) 近年印度区域高温热浪等 极端气候事件频繁发生(李清泉等,2015),尤其是 2015 年 5-6 月高温热浪造成超过 2500 人死亡; 热 带地区森林开发农田扩张具有升温效应(Mahmood et al. 2014) 因此进一步开展印度区域农田扩张的 气候效应研究十分必要。

# 1 研究地区与研究方法

# 1.1 研究区概况

印度地处南亚,属热带季风气候,境内气候差异显著,从北部喜马拉雅山南麓的山区气候向温带气候以及南端的热带气候过渡,共有山地、干旱地区、 半干旱地区、副热带湿润地区、热带湿润地区和热带 干旱地区等6个气候区(Chang et al.,1967);同时印 度区域季节差异十分显著,具有季风前期(3—5月) 高温少雨、季风季节(6—9月)高温多雨、冬季(1—2 月)低温干旱等特征。印度境内森林面积约占 20% 农田面积约占一半,土地垦殖率居世界前列 (为53.8%),主要农作物为水稻、小麦和棉花等,由 于印度境内降水主要集中在季风季节(占全年约 80%),干季和雨季差别明显,所以印度耕作制度一 般是一年一熟。

# 1.2 区域气候模式及实验设计

本研究所使用的模式为中国科学院大气物理研 究所自主研发的区域气候模式 RIEMS2.0。该模式 采用中尺度模式 MM5V3 的非静力动力框架,以及 经过修正的全球大气模式(CCM3)中的辐射方案和 生物圈-大气圈传输方案(BATS1e),同时引入了区 域海洋模块和大气化学模块,该模式对于季风亚洲 区多年平均环流特征、气温和降水具有较好的模拟 能力(Fu et al. 2005; Xiong et al. 2006; Zhao 2012)。 在本研究中 模式的水平分辨率取 50 km,模拟区域 中心位于(80°E,22°N),覆盖范围包括整个印度大 陆及周边地区;模式垂直方向分 23 层,顶层高度为 50 hPa;模式驱动场采用美国环境预报中心 NCEP-FNL 再分析资料,其水平分辨率为 1°×1°,时间间隔 为 6 h。

为了定量分析农田面积扩张对印度区域气候的 影响,本研究设计了2个模拟实验,包括自然植被实 验POT(potential vegetation)和雨养农田实验RFC (rainfed crop),分别进行10年积分模拟,积分时段 为1990年1月1日到2000年12月31日的积分, 共计11 a,其中1990作为模式初始化(spin-up)时 段不做分析。其中实验POT中模式区域植被资料 使用 Ramankutty 等(1999) 潜在植被资料,并将其15 种植被类型对应到 RIEMS2.0 陆面过程模式 BATS1e的18种植被类型(Dickinson et al.,1993) (图1a);实验 RFC 中模式区域植被资料是在实验 POT 的基础上,叠加 HYDE 资料集中2000年的农 田面积资料(Goldewijk et al.,2004),将农田对应于 BATS1e中的雨养农田类型(dry land crop)(图1b)。 对比图1a、图1b可以看出,农田区域对应的潜在植 被主要为分布于印度半岛热带和副热带地区的落叶 阔叶林,其次为印度东北部、孟加拉湾北部副热带湿 润地区的常绿阔叶林、西南部阿拉伯海沿岸的热带 湿润地区常绿阔叶林、西北部干旱地区和半干旱地 区的落叶灌木。

# 1.3 分析方法

气候学上一般用 30 年平均表示一个气候态,由 于计算资源的限制,本文分别用自然植被实验 (POT)和雨养农田实验(RFC)10 年积分模拟结果 的平均值表征这2种植被条件下的气候态,RFC 实 验和 POT 实验两个气候态的差异即为农田扩张的 气候效应;通过计算气温、降水和能量通量及大气环 流等要素的年、季差异及时空分别特征,就可以定量 描述印度区域农田扩张对气候的影响;并用 *t* 检验 进行显著性分析,置信度超过 95%显著性水平的区 域即为气候效应显著区。文中的季节划分采用印度 气象局的划分方法,即一年共分为四季:冬季(winter)(1—2月)、季风前期(premonsoon)(3—5月)、 季风期(monsoon)(6—9月)和季风后期(postmonsoon)(10—12月)。

#### 2 结果与分析

### 2.1 对气温的影响

由图 2a 可见 相对潜在植被 农田扩张使得印 度区域地表年平均气温升高 0.1 ℃,尤其是印度北 部恒河流域以及孟加拉湾北部等副热带湿润地区升 温最显著,升温达 0.5~1.0 ℃(超过 95% 显著性水 平) 塔尔沙漠边缘的干旱、半干旱地区和西南沿海 的半干旱地区气温升高 0.3~0.5 ℃; 但是在印度半 岛的大部分热带半干旱和半湿润地区气温略有下 降,可见在不同的气候区农田扩张有不同的气候效 应。此结论与相关研究结论相符,全球模式热带亚 马逊地区森林砍伐实验结果表明:森林砍伐使得区 域气温升高,同时不同的实验由于模式分辨率、采用 陆面过程方案 海洋强迫方案等差异 气温升高的幅 度有较大差异 如 Learn 等(1993)的研究结果为升 温 2.1 ℃, 而 Zhang 等(1996)为 0.3 ℃。有关沙漠 化问题的研究也表明,沙漠边缘植被退化地面温度 升高 如 Xue 等(1993)的研究表明 Sahel 地区沙漠 化使得地表升温 0.5 ℃ 蒙古和内蒙古草原沙漠化 使地表升温 0.7~1.3 ℃。此外 ,Bonan 等(1999) 研 究了美国地区森林砍伐替换成农田对气候的影响, 发现 美国中部和东部年平均气温降低 0.6~1.0 ℃。 总之 增温或降温效应主要取决于植被变化引起的 反照率变化和蒸散作用变化的净效益。如本研究中 印度热带和副热带湿润地区的常绿阔叶林,森林的 蒸散作用很旺盛 若替换成雨养农田 其蒸散冷却作 用大大减少 反照率增加导致的降温效应相对较弱,







图 2 RFC 实验和 POT 实验 10 年平均气温差异的空间分布 Fig.2 10-year averaged difference in temperature between RFC and POT a.年 b.冬季 c.季风前期 d.季风期间 e.季风后期。

因此净效应为升温;而印度半岛热带半干旱和半湿 润地区落叶阔叶森林砍伐,其蒸散作用减少引起的 升温作用弱于以反照率增加导致的降温效应,因此 以降温为主;沙漠边缘的干旱和半干旱地区的落叶 灌木转化为农田后对气温的影响则类似于土地荒漠 化引起的升温。

模拟试验表明,在 RFC 实验中,自然植被替换 为雨养农田后,对印度区域气温的影响存在明显的 季节差异(表1)。从图 2b-e 可以看出,冬季(+0.2 ℃)和季风前期(+0.5 ℃)升温区域都通过显著性检 验 季风季节没有明显变化,季风后期则是显著性降 温(-0.6 ℃)。之所以存在这种显著的季节性差异, 和印度区域本底气候的季节差异有关,如季风季节 是印度降水最充沛的季节,不论是森林还是雨养农 田其土壤含水量都较高,蒸散作用相比差异不明显, 同时也是作物生长最旺盛的季节,反照率的差异也 不明显,因此气温差异不明显;而季风前期是高温和 少雨的季节,森林尤其热带常绿林的蒸散作用远强 于雨养农田,导致升温显著;而季风后期属于低温少 雨季节,蒸散作用较弱,以反照率增加导致的降温效 应为主;冬季是寒冷干旱季风,尤其是干旱和半干旱 地区降水更少,这些地区森林砍伐变为农田所引起 的气候效应类似于土地荒漠化引起的升温。另一方 面,从各季节的最高最低气温的变化来看(表1),对

月份	平均气温	最高气温 (∞)	对流降水强度		总降水 亦化來 ( @)	蒸散	潜热通量	<b>感热通量</b>	净辐射通量
	( L)	( )	(mm • d ·)	(mm • d ·)	受16平(%)	(mm • d ·)	(W•m²)	(W•m²)	(W•m²)
1	0.0	-0.6	-0.1	-0.1	-15.7	-0.2	-6.0	2.4	-3.2
2	0.4	0.2	-0.1	-0.1	-18.4	-0.4	-10.0	4.4	-5.1
冬季	0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-17.0	-0.3	-8.0	3.4	-4.1
3	0.6	0.6	-0.2	-0.2	-29.4	-0.4	-12.2	5.5	-6.0
4	0.6	0.6	-0.3	-0.4	-31.8	-0.4	-11.2	5.9	-4.7
5	0.4	0.5	-0.2	-0.2	-12.9	-0.3	-7.4	3.0	-3.9
季风前期	0.5	0.6	-0.2	-0.3	-24.7	-0.4	-10.3	4.8	-4.9
6	0.2	0.4	-0.3	-0.3	-7.3	-0.1	-3.9	1.7	-2.0
7	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-1.6	0.1	1.3	-1.0	0.0
8	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	-2.1	0.1	1.8	-1.5	0.1
9	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	-4.0	0.1	3.4	-3.0	-0.1
季风期间	0.1	0.0	-0.2	-0.2	-3.7	0.0	0.6	-1.0	-0.5
10	-0.6	-2.0	0.1	0.1	9.0	0.3	8.5	-6.6	0.7
11	-0.4	-1.4	-0.1	-0.1	-20.2	0.1	1.6	-2.6	-1.3
12	-0.3	-1.2	0.0	0.0	-18.9	-0.1	-3.7	0.7	-3.0
季风后期	-0.4	-1.5	0.0	0.0	-10.0	0.1	2.2	-2.8	-1.2
年	0.1	-0.3	-0.1	-0.1	-12.8	-0.1	-3.2	0.8	-2.4

表1 RFC 实验和 POT 实验 10 年平均月、季、年各要素差异 Table 1 Difference of monthly items between RFC and POT

于暖季 如4—7月 最高气温升高 0.4 ℃ ,最低气温 升高 0.1 ℃; 而冷季 ,头年 11 月至次年 2月 ,最高气 温降低 0.8 ℃ ,最低气温没变化 ,可见农田扩张使得 暖季最高气温升高 容易导致夏季极端高温。

# 2.2 对降水的影响

从图 3a 可以看出:农田扩张使得整个印度区域 年平均总降水减少 0.1 mm • d<sup>-1</sup>,降水百分率减少 12.8%,主要是对流性降水(表 1)。Takata 等 (2009) 基于全球模式的研究表明: 工业革命前印度 区域农田扩张使得印度区域降水减少约 20%,可见 两者比较接近。从空间分布上看,印度东北部、西南 沿海等湿润地区以及塔尔沙漠边缘的干旱地区和半 干旱地区降水显著减少(超过95%显著性水平);其 他地区降水变化不明显。全球模式在热带地区森林 砍伐模拟实验的普遍结论也认为:热带森林砍伐使 得区域降水减少,如 Dickinson 等(1992)的结果为 减少 1.4 mm • d<sup>-1</sup>;同时 同处热带地区不同地理位 置森林砍伐对降水影响的程度有差异,如 Zhang 等 (1996)的结果表明,在相同的实验设计条件下,亚 马逊地区森林砍伐使得该地区降水减少 21% ,东南 亚地区减少8% 热带非洲地区减少4%。有关沙漠 化问题的研究也表明,沙漠边缘干旱和半干旱地区 植被退化使降水减少,干旱化加剧,Charney 等 (1975) 首次提出了半干旱地区植被退化与荒漠化 进程的正反馈机制, Chervin 等(1979)和 Sud 等 (1988)利用大气环流模式进一步验证了该机制。

值得注意的是,在 RFC 实验中,自然植被替换 为雨养农田后 对印度区域降水的影响存在明显的 季节差异(表1)。如季风季节(6-9月)降水减少 3.7% 而其他 3 个季节降水减少分别为 17% (冬 季)、24.7%(季风前期)和10%(季风后期)。因此, 在印度区域进行森林砍伐 从事雨养农业活动 浍使 得干旱季节(冬季、季风前期、季风后期),尤其是在 干旱高温的季风前期干旱更加严重,而在季风雨季, 尽管降水减少的百分率较少,但是由于印度降水主 要集中在季风季节(占全年降水 76.8%) 季风降水 对印度农业和国计民生意义重大,其变干的趋势仍 旧值得高度关注,尤其是干旱、半干旱等生态脆弱区 (图 3d 中降水减少显著区)。关于降水对区域森林 砍伐的季节响应,Werth 等(2002,2005a,2005b)分 别就亚马逊地区、热带非洲地区、印尼和马来西亚地 区进行森林砍伐进行了模拟实验 结果表明:亚马逊 地区森林砍伐使得雨季降水明显减少,干季降水变 化不明显;热带非洲地区则相反,印尼和马来西亚地 区年内各月降水减少没有明显差异。本文的结果与 热带非洲森林砍伐实验类似。

#### 2.3 对地面能量通量及大气环流的影响

农田扩张引起印度区域气温和降水的变化,可 以从地气能量通量及大气环流变化的角度做出合理 的解释。由表1可以看出,农田扩张使得年平均地 表净辐射减少(-2.4 W•m<sup>-2</sup>),其中,潜热通量减少 (-3.2 W•m<sup>-2</sup>) 感热通量增加(0.8 W•m<sup>-2</sup>),可见



图 3 RFC 实验和 POT 实验 10 年平均降水强度差异的空间分布 Fig.3 10-year averaged difference in precipitation rate between RFC and POT a.年 b.冬季 c.季风前期 d.季风期间 e.季风后期。

农田扩张使地表净辐射在年平均潜热通量和感热通 量之间的分配发生了较大的改变;另外可以看出,能 量通量差异有明显的季节变化,总体上季风前期差 异明显,季风季节变化无明显变化;其中潜热通量年 内变化最明显,如季风季节(6—9月)潜热变化百分 率小(在0值附近),季风前期潜热减少30%,这和 降水的变化吻合。可见地表植被的变化通过影响地 表净辐射在感热和潜热之间的分配影响局地的气温 和降水,而印度区域森林砍伐,农田扩张带来的变化 主要表现为植被的蒸散作用引起的潜热通量的变 化,尤其是季风前期潜热通量明显减少,使气温升 高、降水减少。 从年平均 850 hPa 风场图上(图4)可以看出, 印度大陆西南部低空形成一个较弱的反气旋式环 流 辐散下沉气流是造成当地气温升高、降水减少的 主要原因。在印度东北,孟加拉湾北部有气旋式环 流,气流辐合抬升有利于水汽输送,然而从 850 hPa 水汽差异分布图上可以看出,该地区上空水汽是减 少的,主要原因是该地区由于年降水十分充沛,自然 植被条件下,热带常绿阔叶林和热带常绿针叶林蒸 散作用非常旺盛,如热带森林替换成雨养农田,蒸散 作用大大减弱,导致大气中水汽含量减少,从而导致 该地区降水减少。



图 4 RFC 实验和 POT 实验年平均 850 hPa 风场(左) 和水汽混合比(右) 的空间差异分布 Fig.4 10-year averaged difference in wind (left) and water vaper (right) between RFC and POT

#### 3 讨 论

农田扩张是印度区域人为土地利用活动最为主 要的方式之一。农田扩张对区域气候的影响引起研 究者的广泛关注 本文利用区域气候模式 RIEMS2.0 进行长期积分模拟实验,利用自然植被实验(POT) 和雨养农田实验(RFC)模拟的气候态差异探讨农田 扩张对印度区域气候的影响,弥补了以往同类研究 中基于全球模式(如 Tuinenburg et al. 2014) 空间分 辦率的不足;且相对利用中尺度进行短期敏感实验 (如 Douglas et al. 2009) 更能表征农田扩张的长期 气候效应。从印度地区的观测事实来看,印度区域 1901—2003 年 气 温 变 化 趋 势 为 升 温 (Kothawale et al. 2005) ,1961-2000 年降水距平为-0.6 (Guhathakurta et al., 2008)。可见,本文结果与观测事 实也较为吻合。同时 本研究发现 农田扩张使得高 温季节的最高气温显著升高,容易导致极端高温事 件的发生 这可能是印度近年高温热浪等极端气候 事件频繁发生(李清泉等 2015)的原因之一。

相关研究表明,模式分辨率是影响天气气候模 拟效果的一个重要因子,提高模式分辨率能显著提 高模式模拟能力(Li et al. 2015)。本研究假定模式 网格为同种植被类型,没有考虑其斑块特征,这和实 际的土地覆盖类型存在一定的差距,因此需要提高 模式分辨率,以便采用更高分辨率的LUCC数据;另 一方面,本研究采用的区域气候模式 RIEMS2.0 中 的陆面过程模型为 BATS1e 农田是其中的一种植被 类型,并未考虑不同农作物类型及其生理、物候特 性,为了表征真实的农业活动对气候的影响需要在 区域气候模式中耦合作物模型(熊伟等,2005);此 外,本文由于受计算机资源的限制,仅用 10 年的平 均值表征气候态,与理想的气候态也有差别,因此开展 30 年甚至更长时间的积分模拟是下一步需要进行的工作。

#### 参考文献

- 李清泉,王安乾,周 兵,等. 2015. 2014 年全球重大天气 「候事件及其成因. 气象,41(4): 497-502.
- 李美娇,何凡能,肖 冉. 2015. 中美巴印过去 300 年耕地时 空变化的比较研究. 地理科学进展, **34**(1): 64-72.
- 熊 伟,许吟隆,林而达,等.2005.区域气候模式与作物模型联接的影响评估模拟实验及不确定性分析.生态学杂志,24(7):741-746.
- Bonan GB , Pollard D , Thompson SL. 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*, 359: 716–718.
- Bonan GB. 1999. Frost followed the plow: Impacts of deforestation on the climate of the United States. *Ecological Applications*, 9: 1305–1315.
- Bonan GB. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320: 1444–1449.
- Bounoua L , DeFries R , Collatz GJ , et al. 2002. Effects of land cover conversion on surface climate. *Climatic Change* , 52: 29–64.
- Brovkin V , Ganopolski A , Claussen M , et al. 1999. Modelling climate response to historical land cover change. Global Ecology and Biogeography , 8: 509–517.
- Chang , JH. 1967. The Indian Summer Monsoon. Geographical Review , 57: 373–396.
- Charney JG. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101: 193-202.
- Chervin , RM. 1979. Response of the NCAR general circulation model to changed land surface albedo. WMO Climate Models: Performance , Intercomparison and Sensitivity Studies , 22: 563-581.
- Costa MH , Foley JA. 2000. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric  $CO_2$  concentrations on the climate

of Amazonia. Journal of Climate, 13: 18-34.

- Dickinson RE, Kennedy P. 1992. Impacts on regional climate of Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters*, 19: 1947–1950.
- Dickinson RE , Henderson-Sellers A , Kennedy PJ. 1993. Bio– sphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Note , NCAR/TN-387+STR.
- Douglas E , Beltranprzekurat A , Niyogi D , et al. 2009. The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation: A mesoscale modeling perspective. Global and Planetary Change , 67: 117-128.
- Fu C , Wang S , Xiong Z , et al. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia. Bulletin of the American Meteorological Society , 86: 257–266.
- Gedney N , Valdes PJ. 2000. The effect of Amazonian deforestation on the northern hemisphere circulation and climate. *Geophysical Research Letters*, 27: 3053-3056.
- Goldewijk K , Ramankutty N. 2004. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets. *GeoJournal* , **61**: 335–344.
- Govindasamy B , Duffy PB , Caldeira K. 2001. Land use changes and northern hemisphere cooling. *Geophysical Research Letters*, 28: 291–294.
- Guhathakurta P , Rajeevan M. 2008. Trends in the rainfall pattern over India. International Journal of Climatology , 28: 1453–1469.
- Hahmann AN , Dickinson RE. 1997. RCCM2-BATS model over tropical South America: Applications to tropical deforestation. *Journal of Climate* , 10: 1944–1964.
- Henderson-sellers A , Dickinson R , Durbidge T , et al. 1993. Tropical deforestation: Modeling local-scale to regionalscale climate change. Journal of Geophysical Research , 98: 7289–7315.
- Kothawale DR , Kumar K. 2005. On the recent changes in surface temperature trends over India. *Geophysical Research Letters*, 32: L18714.
- Learn J , Rowntree PR. 1993. AGCM simulation of the impact of Amazonian deforestation on climate using an improved canopy representation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **119**: 509–530.
- Li J, Yu R, Yuan W, et al. 2015. Precipitation over East Asia simulated by NCAR CAM5 at different horizontal resolutions. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 7: 774–790.
- Mahmood R , Pielke RA , Hubbard K , et al. 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. International Journal of Climatology , 34: 929–953.

- Ramankutty N , Foley JA. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. Global Biogeochemical Cycles , 13: 997–1027.
- Sud YC, Molod A. 1988. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall. *Monthly Weather Review*, 116: 2388–2400.
- Takata K , Saito K , Yasunari T. 2009. Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustri– al cultivation. Proceedings of the National Academy of Sci– ences of the United States of America , 106: 9586–9589.
- Tuinenburg OA , Hutjes RWA , Stacke T , et al. 2014. Effects of irrigation in India on the atmospheric water budget. Journal of Hydrometeorology , 15: 1028–1050.
- Werth D, Avissar R. 2002. The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**, doi: 10.1029/2001JD000717.
- Werth D , Avissar R. 2005a. The local and global effects of African deforestation. *Geophysical Research Letters*, 32: L12704.
- Werth D , Avissar R. 2005b. The local and global effects of Southeast Asian deforestation. *Geophysical Research Letters*, 32: L20702.
- Xiong Z , Fu CB , Zhang Q. 2006. On the ability of the regional climate model RIEMS to simulate the present climate over Asia. Advances in Atmospheric Sciences , 23: 784–791.
- Xue Y , Shukla J. 1993. The influence of land surface properties on Sahel Climate , Part I: Desertification. *Journal of Climate* , 6: 2232–2245.
- Xue Y. 1996. The influence of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate. *Journal of Climate*, 9: 2173–2189.
- Yamashima 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. Journal of the Meteorological Society of Japan , 89A: 291–298.
- Zhang H , Henderson-Sellers A , McGuffie K. 1996. Impacts of tropical deforestation. Part I: Process analysis of local climatic change. *Journal of Climate*, 9: 1497–1517.
- Zhao DM. 2012. Performance of Regional Integrated Environment Modeling System (RIEMS) in the simulation of surface air temperature over East Asia. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5: 145-150.

作者简介 毛慧琴,女,1974年生,博士,高级工程师,从事 区域气候及空气质量数值模拟研究。E-mail: huiqin.mao@ hotmail.com 责任编辑 李凤芹