

中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟

高学杰^{①*} 张冬峰^{①②} 陈仲新^③ Jeremy S. Pal^④ Filippo Giorgi^④

(① 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081; ② 山西省气象局, 太原 030006; ③ 中国农业部资源遥感与数字农业重点实验室, 北京 100080; ④ The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste 34100, Italy)

摘要 使用 RegCM3 区域气候模式, 嵌套欧洲数值预报中心(ECMWF)ERA40 再分析资料, 分别进行了中国区域在实际植被和理想植被分布情况下各 15 年时间长度(1987~2001)的积分试验, 以探讨中国土地利用状况对气候的影响. 通过两个试验结果的对比, 研究了中国土地利用状况对气候的影响. 分析主要集中于气温和降水等变化上, 并对结果进行了统计显著性检验. 结果表明, 当代土地利用/植被覆盖变化加强了中国地区冬、夏季的季风环流, 同时改变了地表能量平衡状况, 从而对各气候要素产生重要影响. 冬季, 植被改变引起长江以南降水减少、气温降低, 长江以北降水增加. 夏季, 植被改变显著影响了南方地区的气候, 使得南方降水增多, 黄淮、江淮气温降低, 华南气温上升; 同时引起中国北方降水减少, 气温在西北部分植被退化地区升高. 植被变化对日最低、最高气温的影响更大. 总体而言, 土地利用引起了年平均降水在南方增加、北方减少, 年平均气温在南方显著降低.

关键词 土地利用 数值模拟 区域气候模式 气候变化

人类活动影响着陆地表面特征, 如引起植被覆盖等的变化. 进行陆地表面过程对大气影响的研究, 探讨下垫面特征变化的气候效应, 从而正确估计人类活动对气候及人类生存环境的影响, 在科学和实际社会生活中均具有重要价值. 特别是在中国地区, 由于历史上的长期垦伐, 以及近代的过度开垦、放牧和森林砍伐等, 引起了植被覆盖状况的巨大变化, 对其气候效应的研究, 在加深对现有气候和气候变化的认识, 进行未来气候变化展望, 以及合理开发和利用有限的国土资源和气候资源, 促进经济和社会的可持续发展等众多方面, 具有非常重要的意义.

土地利用/植被覆盖变化引起的气候变化的研究, 是当今全球气候变化研究中的热点之一, 其中针对

中国地区也有了相关工作, 取得很多有益的结果 [1~12]. 但由于模式本身以及计算资源的限制, 上述研究都存在着一些问题, 共同的如全球模式对中国地区气候的模拟效果有所欠缺; 区域气候模式则由于积分时间不够长, 从而影响植被变化气候效应研究的代表性和可靠性; 试验方案设计也经常过于理想化, 如将全部研究区域的草地换成沙漠等或反之, 与实际情况产生差别. 随着气候模式和计算机技术的发展, 对这一问题进行更深入的研究变得非常必要.

本文使用一个区域气候模式, 在中国地区分别进行了实际植被覆盖和理想植被覆盖下的长时间(15 年)模式模拟试验, 通过对两个试验结果的对比分析,

收稿日期: 2005-10-02; 接受日期: 2006-03-16

中国气象局气候变化专项(批准号: CCSF2006-7)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB400506)资助

* E-mail: gaoxj@cma.gov.cn

研究了中国土地利用/植被覆盖变化对气候产生的影响, 并对其影响机制进行了初步探讨.

1 模式、资料和试验设计

本文所使用的模式, 为意大利国际理论物理中心(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics)于近年间研制开发的区域气候模式 RegCM2^[13,14]的改进版 RegCM3(可在网站 <http://www.ictp.it/~pubregcm> 得到). 较之以往版本, RegCM3 在物理过程等多方面有了许多改进, 模拟性能也有所提高¹⁾.

在本研究中, 模式的水平分辨率取 50 km, 覆盖范围包括整个中国大陆及周边地区. 模式垂直方向分 18 层, 顶层高度为 100 hPa. 模式中的辐射采用 NCAR CCM3 方案, 陆面过程使用 BATS1e(生物圈-大气圈传输方案), 行星边界层方案使用 Holtslag 方案, 积云对流参数化方案选择为 Grell 方案. 模式中海温使用美国海洋大气局(NOAA)的 OISST 资料, 初始场和侧边界值由欧洲数值预报中心(ECMWF)的 ERA40 再分析资料得到, 侧边界场采用指数松弛边界方案, 每 6 h 输入模式一次. 计算采用模式的并行版本, 在 Sunway HPC 集群(cluster)上完成. 更详细的模式和试验介绍可参见资料²⁾.^[15]

试验 1 中, 模式在中国区域内使用实际植被覆盖资料^[16], 区域外使用美国 USGS 基于卫星观测反演的 GLCC(Global Land Cover Characterization)资料, 进行 1986 年 10 月 1 日到 2002 年 1 月 1 日的积分, 共计 15 年 3 个月, 其中 1986 年 10~12 月作为模式初始化(spin-up)时段, 不做分析.

试验 2 中所区别于试验 1 的是将中国区域内植被替代为理想植被分布资料, 其余均和试验 1 保持一致, 同样进行上述时间段的积分. 所使用的理想植被资料, 是由改进后的生命力(Life Zone)^[17,18]模型, 根据当代中国气候特征计算得到.

试验 1 和 2 两者结果的差别, 被认为是中国地区实际土地利用相对于理想植被所产生的气候变化. 和一般植被对气候影响的试验不同, 本研究所作的是实际植被和理想植被的对比, 而非在某一个区域

将那里所有的植被替代成另一种, 如将蒙古地区的沙漠全部换成草地等^[11].

图 1(a)和(b)分别给出中国区域内实际和理想两种植被的分布. 由图中可以看到, 中国现有植被覆盖与理想状况相比有很大区别, 总体特征为以人类对土地的开发利用, 如森林砍伐、农业垦殖等引起的自然植被退化为主, 主要有: 乔木林区向灌木林区的转变(如东北部分地区和南方的山地、丘陵地带等), 森林和草地向农业用地的转变(如东北部分地区、华北和江淮平原、四川盆地、河套地区、长江中下游和沿海地带等), 以及西北部分地区土地的沙漠化等.

模式格点中, 在中国境内的数目为 4082 个, 相对于理想状况, 当代土地利用引起的植被变化的点数为 2931 个, 占总数的 72%. 上述植被变化引起了地表参数变化, 包括粗糙度的普遍降低, 特别是在东部森林砍伐和退化区, 以及反照率的普遍增加, 尤其是在西北部分沙漠化地区等(图略).

对试验 1 结果的分析表明, 在实际植被覆盖条件下, RegCM3 较好地模拟出了中国地区地面气温和降水年、季空间分布的基本特征, 对主要雨带的季节性南北移动也有较好地模拟, 此外它对气温和降水年际变率的模拟也较为合理. 同时由于其较高的分辨率, 在一些观测站点稀少、观测资料缺乏的地区, 如青藏高原和西北部分地方, 模式的模拟结果可以提供对局地气候更全面和详细的描述, 增加对局地气候的认识. 其模拟存在的主要问题是: 中国地区温度模拟存在系统性的冷偏差(这是数值模式存在的普遍问题); 降水模拟总体北方偏大、南方偏小, 引起降水最大区地理分布上的误差等²⁾.^[15] 就降水而言, 相对于另一个模式(MM5V3)对东亚地区长期积分的结果, RegCM3 对冬季中国降水的模拟较差, 而对夏季的模拟则较好^[19].

本文将着重分析试验 1 与 2 两者结果差别中, 中国地区降水、气温及地表热通量等的变化, 即中国当代土地利用对上述气候要素的影响. 为分析方便, 同样将模拟的结果插值到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 经纬网格点上. 统计显著性检验采用 t 检验, 信度水平取为 95%.

1) Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. The ICTP RegCM3 and RegCNET: regional climate modeling for the developing world. Bull Amer Meteorol Soc, 2007, in press

2) 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验. 热带气象学报, 2007, 待刊

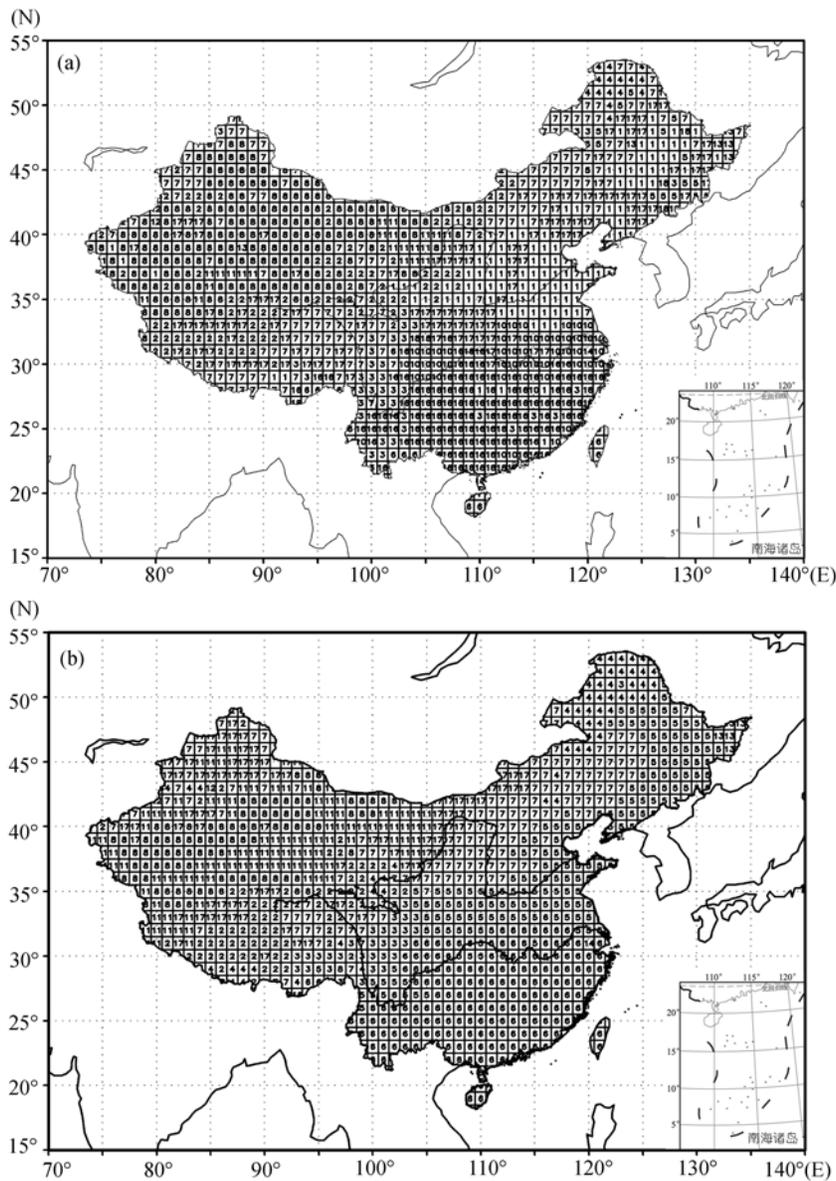


图 1 中国地区的植被分布

(a) 实际植被; (b) 理想植被. 1. 旱作农业; 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; 10. 水田; 11. 半沙漠; 16. 常绿灌木; 17. 落叶灌木; 18. 混合林地

2 对中国地区降水的影响

图 2 中给出了中国地区从理想植被到现有植被分布引起的降水变化分布。

土地利用引起的冬季降水变化的主要特征(图 2(a))为: 南方降水的普遍减少, 减少的幅度一般在 10% 以上; 以及北方降水的普遍增加, 增加的幅度一般在 10% 以上, 其中在黄淮和华北至东北南部沿海地区的增加达到 20% 以上。但这些变化都没有达到信度检验水平。中国地处东亚季风区, 特别是在北方

及西北地区和在冬季, 旱涝灾害频繁, 气候的年际变率大, 使得土地利用引起的气候要素变化有时难以达到统计信度检验。

夏季是中国的主要降水季节, 其降水量占全年降水的很大比例。从夏季降水的变化上可以看到(图 2(b)), 土地利用改变引起了中国北方和西北地区降水的大范围减少, 其中在华北地区减少 10% 左右, 在河套西部和西北部分地区减少的幅度达到 20% 以上。大致以淮河为界, 中国整个南方地区的降水普遍增

加, 增加的幅度达到 10%~30%, 其中长江中下游以南, 广西和贵州西部等地降水的增加超过 95% 信度检验水平. 对照图 1(a)和(b), 可以看到降水变化较大的地方, 均对应着植被的明显改变区. 在南方, 以水田农业的出现和森林由乔木向灌木的退化为主; 在华北和西北, 以森林和草地向农业的转化及沙漠化为主.

土地利用改变引起的中国年平均降水的变化(图 2(c)), 总体表现为北方和西部地区降水的减少, 以及南方地区降水的增加. 具体来说, 中国北方除东北北部和西北部分地区外, 降水变化均为减少, 减少的幅度一般在 5%~10%之间, 个别地方如准噶尔盆地等, 可以达到 15%. 在塔里木盆地南侧沿昆仑山和阿尔金山山麓, 有一个降水增加区, 这主要由这一地区的农业灌溉以及理想植被资料反演时产生的误差引起(在个别点实际植被状况好于理想植被). 中国东部降水在黄河以南均为增加, 增加的幅度一般也在 5%~10%之间, 其中江淮等地达到 10%以上. 西南地区降水以略有减少为主, 但在四川盆地东北部有一个较强的增加区, 增加值达到 20%以上.

上述试验结果表明, 总体而言, 在中国南方, 现有土地利用状况(以森林退化和水田为主)将加重当地夏季的洪涝程度; 而对华北、西北干旱和半干旱气候下生态环境较脆弱的地区, 现有土地利用状况(森林砍伐、农业及沙漠化)将导致局地降水进一步减少, 恶化当地的生态环境.

3 对中国地区地面气温的影响

图 3 给出土地利用引起的中国地区地面平均气温变化分布.

土地利用改变引起中国大部分地区冬季平均气温的降低(图 3(a)), 降低幅度在中国东部淮河以北和西部地区较小, 一般在 0~0.5°C 间. 长江以南地区气温则有显著下降, 其中广东、广西南部等地气温的下降幅度达到 1°C 以上.

土地利用改变引起的夏季平均气温变化幅度较大(图 3(b)). 中国北方地区的气温以略有上升为主, 西北一些地方气温升高 0.5°C 以上, 并在中心地带达到 95% 统计显著性水平. 中国南部从福建沿海至广东、广西和云南, 为一个大的气温升高区, 气温的升高幅度为 0.5~1.0°C 或更高, 并在大部分地区达到显著水平. 而夏季气温变化的最明显特征, 是以长江上

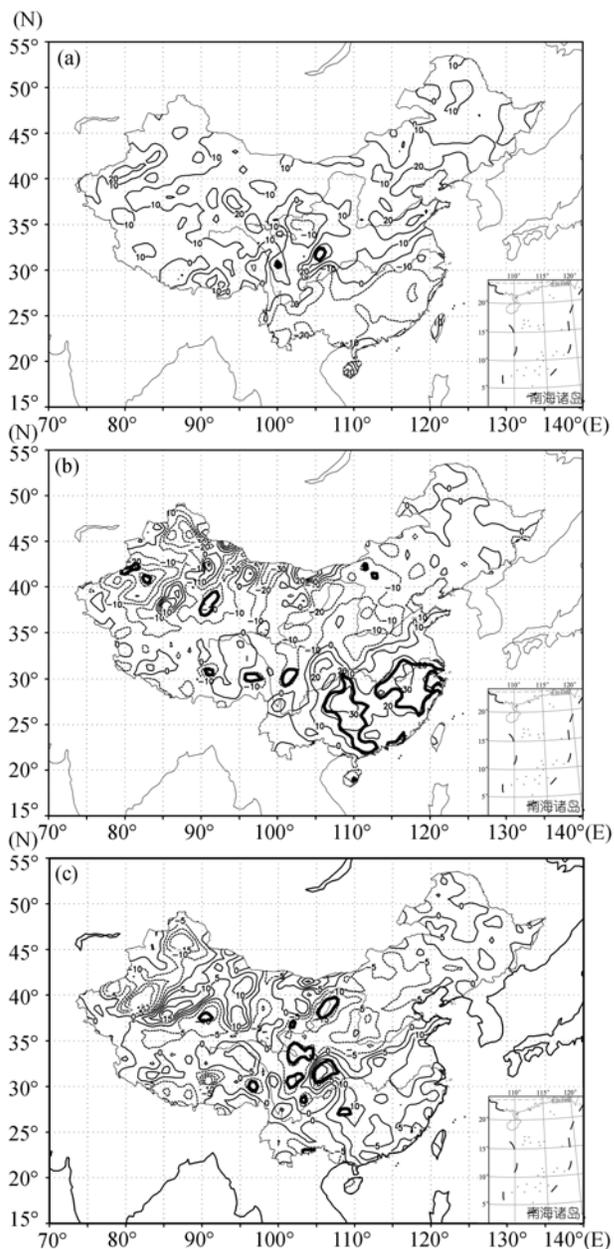


图 2 中国地区土地利用引起的降水变化

(a) 冬季平均降水变化; (b) 夏季平均降水变化; (c) 年平均降水变化. 单位为%. 粗实线中为 t 检验信度超过 95% 显著性水平的地区

游至以长江中下游为中心的大范围地区地面气温的显著降低, 降低的幅度可以到 1°C 以上. 这里的主要土地利用状况为以水田为主的农业区.

中国地区年平均气温的变化, 以南方地区气温的普遍显著下降为主, 下降值一般在 0.5°C 以上, 在江淮地区降低可以达到 1°C(图 3(c)).

为考察土地利用变化对极端天气、气候事件的影响, 下面对夏季平均日最高气温和冬季平均日最低

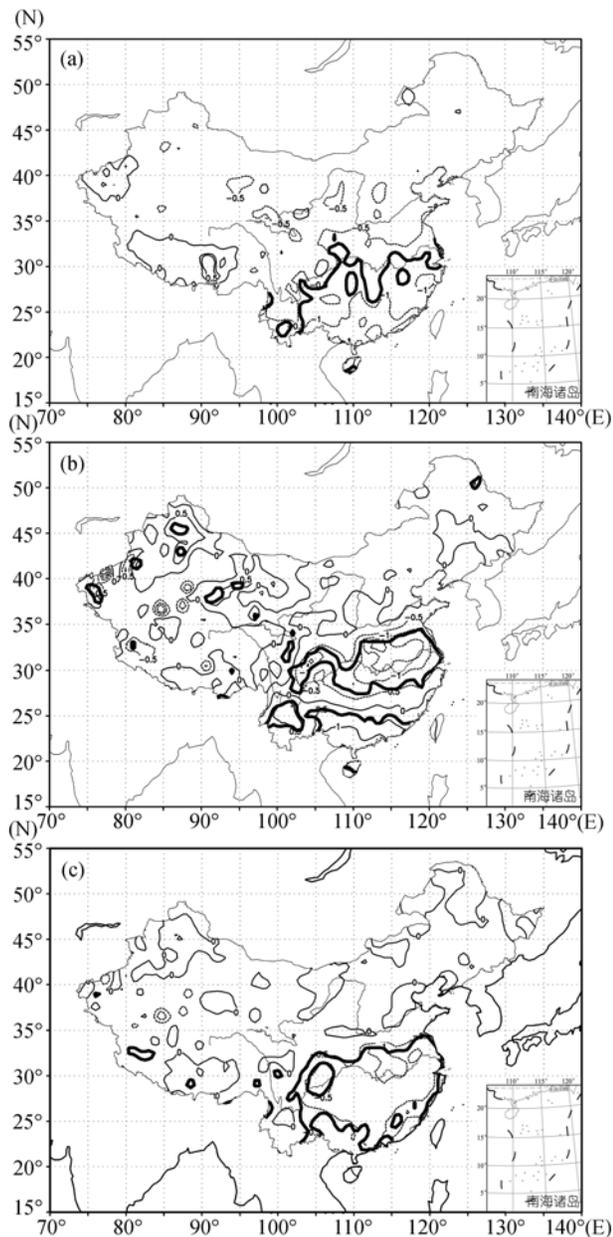


图3 中国地区土地利用引起的气温变化

(a) 冬季平均气温; (b) 夏季平均气温; (c) 年平均气温. 单位为 $^{\circ}\text{C}$. 粗实线说明同图2

气温的变化进行一些分析.

图4(a)给出了夏季平均日最高气温变化. 从图中可以看到, 相对于平均气温, 夏季平均日最高气温的变化更加明显. 和平均气温相似, 最高气温在北方以升高为主, 但幅度较低, 只在个别地方达到 0.5°C . 自广东至云南一带, 最高气温的升高明显, 升高幅度在 1°C 以上且通过信度检验. 长江沿线, 特别是以长江中下游地区为中心, 土地利用导致了这一地区最高气温的显著降低, 幅度一般在 1°C 以上, 在许多地方

气温的降低达到 3°C 之多.

图4(b)为冬季平均日最低气温的变化. 其主要特征为在中国东部北方以降低为主, 但幅度较小, 一般低于 0.5°C ; 气温在西北植被变化剧烈地区为增加, 可能是由当地沙漠化导致绿洲的“冷岛效应”被破坏所引起^[20]. 以长江为界, 加上陕西南部地区, 中国南方冬季最低气温出现大范围的显著降低, 降低的幅度一般在 1.0°C 以上, 在许多地方达到 $1.5\sim 2^{\circ}\text{C}$.

由以上讨论可知, 总体而言, 土地利用变化引起的极端气温变化较平均气温更加剧烈.

4 环流场及地面热通量场变化的初步分析

中国地处东亚季风区, 地面风场表现出很大的季节差异. 冬季, 中国大陆总体被来自于西北方向的冷气流所控制, 中国北方盛行西北风, 南方盛行西北风及转向后的东北风. 夏季中国南方气流受西太平洋副热带高压影响, 长江以南风向以东南风为主, 在长江以北转为西南风, 中国北方则主要以西风为主(图略).

图5(a)和(b)给出中国及邻近地区冬、夏季 10 m 高度地面风场的变化. 由图中可以看到, 无论冬夏, 地面风场的变化和地面风场本身显示出了很高的一致性, 表明土地利用加强了中国地区的季风环流, 特别是在南方, 其中冬季北风分量和夏季南风分量都可增加 $1\sim 2$ 倍(图略). 这应该主要是由土地利用导致的地表粗糙度降低所引起. 中国南方冬季风增强, 更多干燥冷空气的南下, 使得南方地区降水减少、气温降低(参见图2(a)和3(a)). 冷空气南下所形成的质量堆积, 引起上层大气, 如 850 hPa (图5(c)), 在东部海洋上空产生回流, 形成一个大的气旋式环流, 补充北方的质量损失. 这个气旋的北部位于中国东北至华北一带, 气流在这一地区重新进入陆地时, 由于携带了来自于海上及中国湿润南方的水汽, 使得这里的降水出现增加现象(参见图2(a)).

夏季季风气流加强在导致更多水汽进入中国南方的同时, 在 850 hPa 上以长江中下游地区为中心, 形成一个气旋式的环流(图5(d)), 引起这一地区降水的显著增加(参见图2(b)). 当地植被覆盖状况(水田)导致的蒸发增加, 在这里降水的增加中也起到了很大作用. 这个气旋式环流的范围较冬季小, 没有影响到中国北方. 在 850 hPa 上, 北方的气流变化以西风增强为主. 来自于内陆地区的西风本身水汽含量很

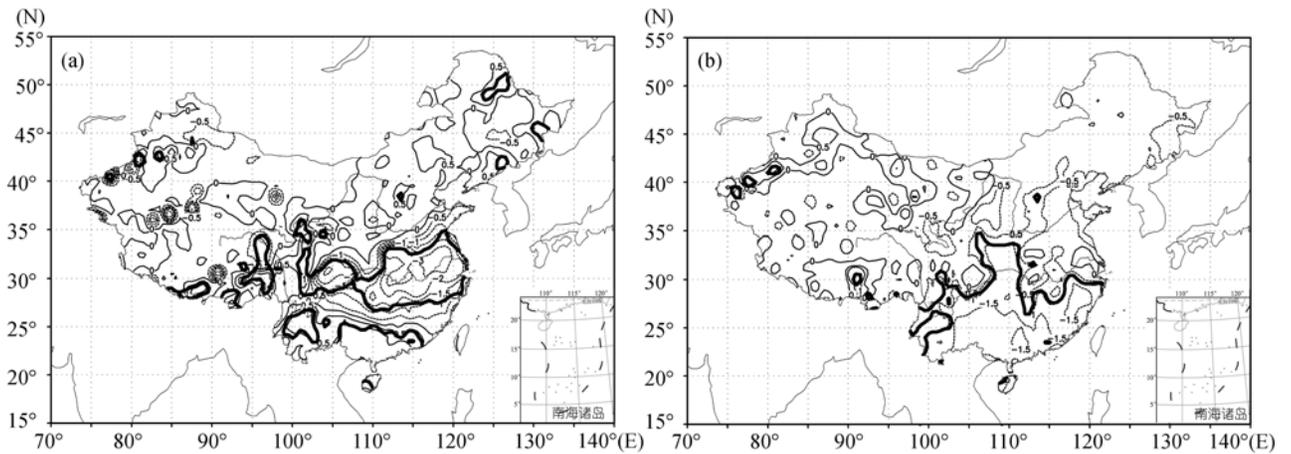


图 4 中国地区土地利用引起的平均日最高、最低气温的变化
(a) 夏季最高气温; (b) 冬季最低气温. 单位为 $^{\circ}\text{C}$. 粗实线说明同图 2

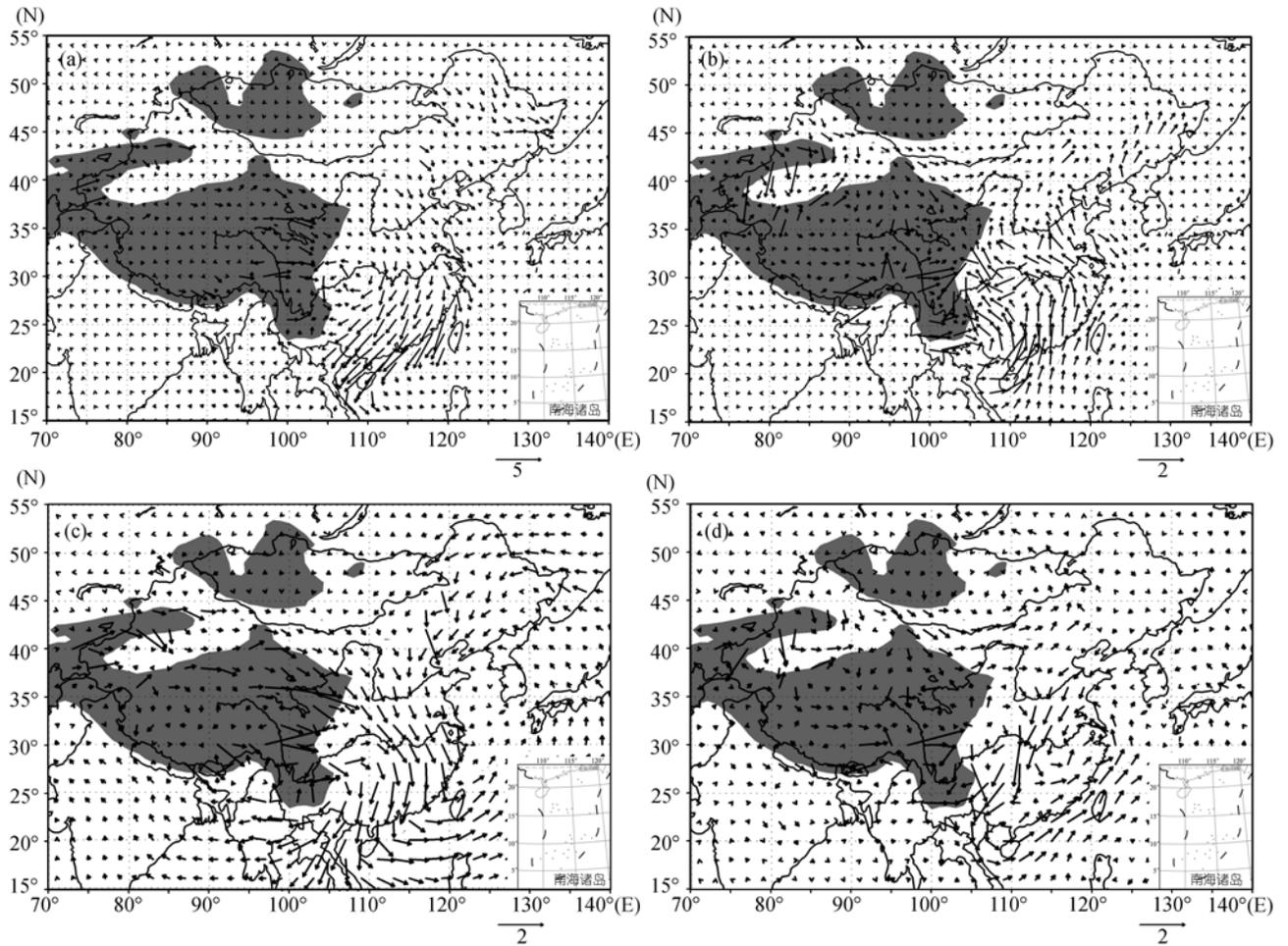


图 5 中国及邻近地区风场的变化
(a) 冬季地面风场; (b) 夏季地面风场; (c) 冬季 850 hPa 风场; (d) 夏季 850 hPa 风场. 单位为 m/s

低, 土地利用导致的地表水含量的降低使得局地蒸发也减小, 导致这里降水的减少.

地表植被类型的改变, 通过粗糙度、反照率、叶面指数等参数的改变影响地面环流和能量平衡, 从

而引起降水和气温等发生变化,同时降水和气温等的变化又会反过来影响环流和地面能量平衡,这几者之间存在着复杂的关系。

土地利用引起的地表反照率的改变,影响着地表吸收短波太阳辐射和放射长波辐射.与云的变化结合在一起,产生的地表净辐射的变化为冬季在南方地区有所增加,数值在 $5\sim 10\text{ W/m}^2$,北方变化较小.夏季地表净辐射在西北大部分地区将减少,减少的中心值可以达到 20 W/m^2 .此外以长江中下游地区为中心的地区是一个大的减少区,减少幅度最大可以达到 10 W/m^2 以上(图略).

粗糙度的变化通过改变拖曳系数影响感热输送,但感热更多地取决于地表气温的变化.土地利用引起的中国地区感热变化在冬季不太明显,其中长江中下游为感热显著减少的地区,减少幅度在 $10\sim 20\text{ W/m}^2$ 间.夏季感热变化比较显著的地区包括新疆北部准噶尔盆地的显著减少,以及长江中下游地区大范围的显著减少,其中后者的减少幅度可以达到 30 W/m^2 以上(图略).

植被变化对潜热的影响同样有直接和间接两个方面.直接影响为:地表粗糙度的降低使得表面混和减弱,从而降低潜热释放;反照率增加使得净辐射降低的同时导致蒸发减少;叶面指数降低引起的叶面截留降低以及气孔阻力增加,都会使得蒸发减少.间接作用方面更多的是降水-蒸发之间的反馈:降水是决定地表蒸发的主要因子,而地表蒸发是降水形成的重要水汽来源.

土地利用引起的中国地区冬、夏季潜热变化参见图6.由图6可以看到,冬季潜热变化以长江中下游

地区的显著增加为主,增加的数值在 $10\sim 20\text{ W/m}^2$ 间,其原因应该是当地水田农业导致的地表蒸发增加引起的.在西北和东北部分地区,潜热有显著的下降,但数值很小,这是由于植被退化引起土壤含水量降低,进而使得蒸发减少引起的.

夏季中国地区潜热变化较大.其中北方和西北以减少为主,一些地方达到显著性水平,如准噶尔盆地,青藏高原东麓至河套东部等,这主要是由局地蒸发减少所造成.相反,中国南方潜热大范围显著增加,其中沿长江流域增加的幅度达到 $20\sim 30\text{ W/m}^2$.这一地区潜热增加的原因,一部分为水田引起的蒸发加大,另外更主要的是由于降水的增加.而同时当地潜热释放的增加,有利于局地对流,又会对降水产生正反馈作用,这需要更多的数值试验,才能够对这一机理有进一步认识.

5 结论和讨论

使用 RegCM3 区域气候模式嵌套 ERA40 再分析资料,对中国土地利用状况引起的气候变化进行了数值模拟和分析,并对试验结果进行了统计显著性检验.结果表明,中国地区的土地利用/植被覆盖改变,通过影响环流和改变地表能量平衡状态等,对降水和气温等都产生了较大影响.

(1) 植被改变会引起冬季中国南方地区降水减少,北方降水增多;引起夏季南方降水显著增加和北方降水减少.总体而言,北方的森林砍伐、农业及土地沙漠化等会加剧北方干旱,而南方森林退化和农业活动引起的气候效应更显著,会使江淮流域等地区洪涝灾害增多.

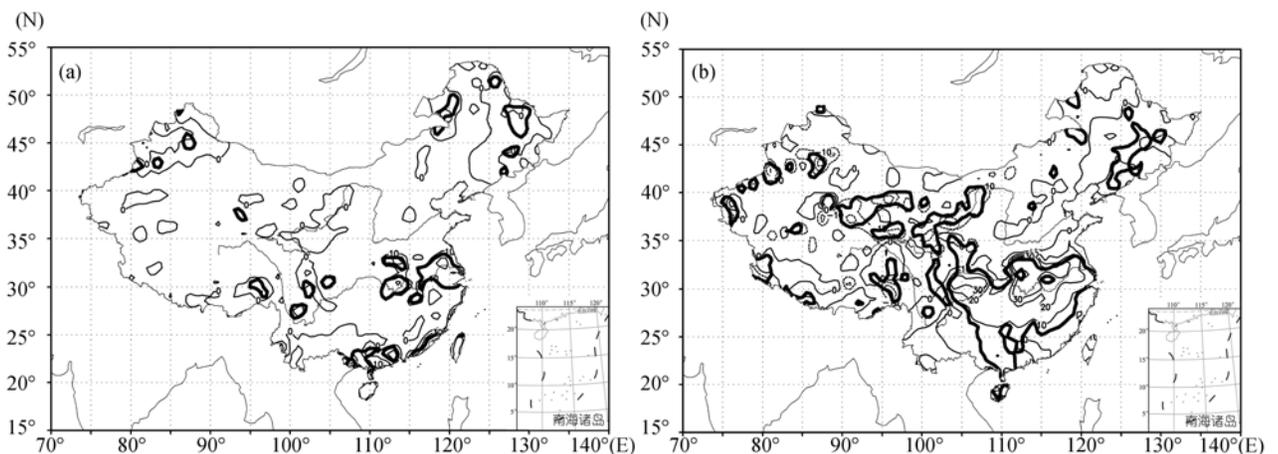


图6 中国地区土地利用引起的潜热变化
(a) 冬季; (b) 夏季. 单位为 W/m^2 . 粗实线说明同图2

(2) 植被变化引起中国南方冬季气温显著降低; 夏季长江沿线气温显著降低, 西北部分地区气温升高. 年平均气温的变化, 以其在南方的显著降低为主. 植被变化对日最高和最低气温的作用更大, 冬季日最低气温在南方显著下降, 在西北部分地区上升; 夏季日最高气温在长江沿线则有很大幅度的显著降低.

(3) 土地利用通过引起地表粗糙度、反照率等的变化, 影响环流及地表能量平衡, 从而影响气候. 在中国地区, 可能粗糙度降低引起的风速加强在冬季起了更重要作用; 而夏季粗糙度变化的动力作用, 及其与反照率变化等结合在一起的热力作用, 在对局地气候影响方面则同样重要. 一般而言, 植被的退化会引起降水减少和气温升高, 而在中国南方特别是长江中下游地区, 得到了相反的结论, 这和其他个别模拟类似^[8]. 其主要原因, 可能是由于这里大面积水田所产生的蒸发增加造成的, 对于这一问题及植被对气候影响机制的深入理解, 有待于更多数值模拟及分析的进行.

(4) 人类活动排放的温室气体、气溶胶, 以及土地利用, 是人类活动影响气候的几个重要因素, 它们同时在影响着中国的气候. 观测表明, 近几十年到十几年间中国地区气温, 出现了在北方明显变暖, 南方地区变暖不明显或气温下降的现象. 除气候的自然变化外, 一方面, 温室效应本身在北方更明显^[21]; 另一方面, 人类活动排放的气溶胶会引起南方地区气温的下降^[22,23]; 而本研究表明, 土地利用变化引起的中国南方气温的显著下降, 可能对此也有所贡献. 观测结果同时表明, 降水出现了江淮地区增多、华北地区减少等现象, 其原因除温室效应外^[21], 土地利用可能也起到了重要作用.

土地利用和人类活动排放的温室气体及气溶胶等共同影响气候, 本文对其中土地利用对中国气候的影响进行了一些探讨. 今后需进行更多的数值试验和分析研究, 来区别三者各自所起的作用, 及考察它们相互作用下的气候效应, 这对当前气候变化进行归因、检测分析, 及进行气候变化预估等多方面, 都具有重要的科学和实际意义.

参 考 文 献

- Xue Y K. The impacts of desertification in the Mongolian and Inner Mongolian grassland on the regional climate. *J Clim*, 1996, 9: 2173—2189[DOI]
- Wei H L, Fu C. Study of the sensitivity of a regional model in response to land cover change over northern China. *Hydrol Process*, 1998, 12: 2249—2265[DOI]
- 范广洲, 吕世华, 罗四维. 西北地区绿化对该区及东亚、南亚区域气候影响的数值模拟. *高原气象*, 1998, 17(3): 300—308
- Wang H J. Role of vegetation and soil in the Holocene megathermal climate over China. *J Geophys Res*, 1999, 104(D8): 9361—9367 [DOI]
- 吕世华, 陈玉春. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟. *高原气象*, 1999, 18(3): 416—424
- 王汉杰, 张洪峰, Pitman A J. 近代(1700~1990年)土地利用变化对中国区域性气候影响的数值模拟研究. 见: 王汉杰, 编. 西部开发与生态建设. 北京: 中国林业出版社, 2001. 143—164
- 符淙斌, 袁慧玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. *科学通报*, 2001, 46(8): 691—695
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果. *气象学报*, 2002, 60(1): 1—15
- Wang H, Pitman A J, Zhao M, et al. The impact of historical land cover change on the June meteorology of China since 1700 simulated using a regional climate model. *Int J Climatol*, 2003, 23: 511—527[DOI]
- Gao X J, Luo Y, Lin W T, et al. Simulation of effects of land use change on climate in china by a regional climate model. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(4): 583—592
- Zhao M, Pitman A J. The relative impact of regional scale land cover change and increasing CO₂ over China. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22(1): 58—68
- 张井勇, 董文杰, 符淙斌. 中国北方和蒙古南部植被退化对区域气候的影响. *科学通报*, 2005, 50(1): 53—58
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon Weather Rev*, 1993, 121: 2794—2813[DOI]
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon Weather Rev*, 1993, 121: 2814—2832[DOI]
- 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟. *气候变化研究进展*, 2005, 3(1): 119—121
- 汤剑平, 苏炳凯, 赵鸣, 等. 东亚区域气候变化的长期数值模拟试验. *气象学报*, 2004, 62(4): 752—763
- 侯学煜, 主编. 中华人民共和国植被图(1:4000000). 北京: 地图出版社, 1982
- Holdridge L R. *Life Zone Ecology (Revised Edition)*. San Jose: Tropical Science Center, 1967
- 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. *第四纪研究*, 1993, 2: 157—169
- Hu Y Q, Su C X, Zhang Y F. Research on the microclimate characteristics and cold island effect over a reservoir in the HEXI Region. *Adv Atmos Sci*, 1988, 5(1): 117—126
- Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(6): 1224—1230[DOI]
- 高学杰, 林一骅, 赵宗慈. 用区域气候模式模拟人为硫酸盐气溶胶在气候变化中的作用. *热带气象学报*, 2003, 19(2): 134—141
- Giorgi F, Bi X, Qian Y. Indirect vs. direct effects of anthropogenic sulfate on the climate of East Asia as simulated with a regional coupled climate-chemistry/aerosol model. *Clim Change*, 2003, 58(3): 345—376[DOI]