

周莉, 江志红, 李肇新, 等. 2015. 中国东部不同区域城市群下垫面变化气候效应的模拟研究 [J]. 大气科学, 39 (3): 596–610, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14157. Zhou Li, Jiang Zihong, Li Zhaoxin, et al. 2015. Numerical simulation of urbanization climate effects in regions of East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 596–610.

中国东部不同区域城市群下垫面变化气候 效应的模拟研究

周莉^{1,3} 江志红¹ 李肇新² 杨修群⁴

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 法国国家动力气象实验室, 巴黎 75252

3 湖南省气象台, 长沙 410000

4 南京大学大气科学学院, 南京 210088

摘要 本文利用法国动力气象实验室发展的大气环流模式 (LMDZ) 对珠江三角洲 (简称珠三角)、长江三角洲 (简称长三角) 和北京市、天津市、河北省区域 (简称京津冀) 城市群下垫面变化的东亚气候进行模拟试验, 以探讨不同区域城市群下垫面变化带来的夏季气候效应及其可能机制, 结果表明: 珠三角、长三角和京津冀城市群下垫面类型改变后, 地表潜热蒸发显著减少, 为了平衡地面能量收支, 地面温度升高, 进而感热通量、地表有效长波辐射增强, 地表通过升温对能量进行再分配和再平衡, 且下垫面改变引起的温度、地表能量变化基本集中于城市群下垫面变化区域, 温度响应具有显著的局地性; 对比不同区域城市化温度响应的强弱, 发现各区域地表气温变化和能量变化存在较好的对应关系, 长三角、珠三角城市群的总能量变化远高于京津冀城市群, 其局地增温也是京津冀城市群的一倍以上; 局地温度增加, 虽有利于低层形成热低压, 出现明显上升运动, 但蒸发减弱使局地水汽明显减少, 最终导致降水减少, 表明水汽条件改变是降水减少的主要因素。同时由于中国东部高层呈现南正北负的异常变化, 西太平洋副高加强西伸, 使降水减少区域并没有集中在局地, 特别是东部城市带试验中, 出现了东部地区大范围的降水偏少。

关键词 中国东部 下垫面变化 城市化 夏季气候效应 数值模拟

文章编号 1006-9895(2015)03-0596-15

中图分类号 P46

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14157

Numerical Simulation of Urbanization Climate Effects in Regions of East China

ZHOU Li^{1,3}, JIANG Zihong¹, LI Zhaoxin², and YANG Xiuqun⁴

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

2 Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris 75252

3 Hunan Provincial Meteorological Observatory, Changsha 410000

4 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210088

Abstract To explore effects on summer climate from land use changes in various metropolitan areas and the possible mechanisms, an atmospheric general circulation model (LMDZ) developed by the French dynamic meteorology

收稿日期 2014-03-28; 网络与出版日期 2014-05-07

资助项目 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 2010CB428505, 国家自然科学基金项目 41230528, 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介 周莉, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事天气气候诊断与模式模拟研究, E-mail: 442601285@qq.com

通讯作者 江志红, E-mail: zhjiang@nuist.edu

laboratory was used. East Asia climate change induced by land use changes in the Pearl River Delta, Yangtze River Delta and Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan area were simulated by the LMDZ. Results showed that changes of the underlying surface type in the Pearl River Delta, Yangtze River Delta and Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan area significantly reduced the surface latent heat flux. In order to balance the surface energy budget, the ground temperature increased and the sensible heat flux and surface effective long-wave radiation were enhanced. The surface energy budget was re-equilibrated with an elevation of the surface temperature. The main changes were situated in areas of modified underlying surface type. The temperature response has a significant local characteristic. Among the different areas, there was a good relationship between the regional surface temperature change and changes in surface heat flux. Changes in the total heat flux of the Yangtze River and Pearl River Deltas were much greater than those in the Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan zone. Local warming of the Yangtze River and Pearl River Deltas were also more than doubled in the Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan zone. Although a local temperature increase is favorable to a thermal low pressure and induces significant upward motion in the lower layers of the atmosphere, the decrease in evaporation significantly reduces the local water vapor decreasing precipitation. In fact, the change in moisture conditions was the primary factor contributing to the precipitation reduction. Since the geopotential height field in high layers exhibited negative anomalies in the north and positive anomalies in the south, the Western Pacific Subtropical High extended westward and strengthened. As such precipitation reduction was not limited to local areas, but extended to large zones in the eastern part of the domain. This was particularly true in the three-area combined experiment.

Keywords Eastern China, Land use change, Urbanization, Summer climate effects, Numerical simulation

1 引言

近 30 年来, 随着中国经济的快速发展, 城市化进入了空前发展的阶段 (Chen et al., 2013, 2014), 据统计, 我国目前城市化水平已达 50%, 特别是中国东部地区, 城市化水平已超过 55%, 并逐步形成了以珠江三角洲(简称珠三角)、长江三角洲(简称长三角)和北京、天津、河北(简称京津冀)三个特大规模城市群为代表的我国东部大规模沿海城市带 (Heilig, 2012)。这种情况在可预测的未来还将继续, 研究结果表明, 到 2030 年时, 全球有 587 万平方公里的土地有可能变为城市, 特别在中国的沿海一带, 实现大规模城市化的概率相当高 (Seto et al., 2012)。城市化伴随的土地覆盖与利用的变化, 可以改变地气系统的辐射强迫和通量交换, 是导致区域气候变化的重要原因之一 (侯依玲等, 2009; 黎伟标等, 2009; 陈锋和谢正辉, 2009; Zhang et al., 2009; 华文剑和陈海山, 2013)。

国内外对城市下垫面气候效应的研究为时已久, 很多学者利用高分辨率高质量的观测资料进行统计诊断分析 (Kalnay and Cai, 2003; Zhou et al., 2004; 刘熙明等, 2006; 王喜全等, 2008; 徐阳阳等, 2009; 杨续超等, 2009; 谢志清等, 2009; Lamptey, 2010; 段春锋等, 2012; 王芳和葛全胜, 2012; Cui and Shi, 2012)。由于城市发展的不可逆性, 单纯利用观测数据分析城市化效应比较困难, 特别是无法进行相关机理研究。

近年来, 随着数值模式模拟能力的提高, 国内外很多学者使用区域气候模式模拟研究城市化对气候的影响, 如 Kusaka and Kimura (2004) 通过二维中尺度气候模式研究人为加热、热容量状况和天空状况对东京热岛效应的影响, 发现人为加热会使大气温度上升, 尤其是夜晚大气温度; 墙体较大热容量会使得白天的温度下降, 夜晚温度上升。江晓燕等 (2007) 利用 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) 模式研究城市下垫面反照率的改变对北京城区热岛过程的影响, 结果表明反照率减小后城区的长波辐射比郊区大, 有利于热岛的形成, 也有利于城区近地层的风场辐合增加。使用 WRF (Weather Research and Forecasting) 区域模式, 国内不少学者用较为真实的城市化进程数据来研究城市化的气候效应 (Feng et al., 2012; Feng et al., 2013; Zhao et al., 2013), 但在大多数情况下, 气候信号微弱, 且数值试验长度较短, 所以一般结果的显著性不是很高。Zhan et al. (2013) 研究了京津冀地区从 2010 到 2030 年的气候演变, 包括了城市化引起的下垫面变化, 结果显示京津冀地区有一个较强的增温和降水增多的趋势, 但这到底是由下垫面的变化所致, 还是和全球变暖有关, 作者未能明确区分。Zhang et al. (2010) 也是用 WRF 模式来研究长三角城市化对局地气候的影响, 夏天升温幅度可以达到 1.9 度, 并且由于城市热岛作用, 局地降水有增加的趋势。

利用区域模式进行的研究大多关注单一区域的城市化效应，主要表现为局地气候效应，而对较大范围，如城市群气候效应的研究相对较少，且由于积分时间不够长，对气候效应模拟的可靠性也会有所影响。鉴于人类活动改变了区域尺度的下垫面，近期一些研究开始利用全球模式探讨人为土地变化带来的气候影响。Lawrence and Chase (2010) 使用 CCSM (Community Climate System Model) 气候系统模型进行了一系列的土地覆被变化的实验，研究全球土地覆盖变化对气候的影响，发现用潜在植被代替当前植被分布，会导致近地面大气地区性的增暖和变冷，但对全球平均温度影响不大；并且温度的变化主要受地面蒸发作用的影响，辐射能量的变化占次要地位。Findell et al. (2007) 对土地覆盖变化的模拟研究表明植被和农作物的减少可以造成明显的地表增暖，且欧洲地区地表温度升高最为明显。可见，使用全球模式研究下垫面变化气候效应，主要侧重分析对全球模态的影响，考虑城市群区域气候效应的研究也不多见。

最近，我们利用全球和区域模式相结合对长三角城市群下垫面变化的气候效应进行了研究（花振飞等，2013），发现长三角城市群发展引起的下垫面变化对局地气候有着显著的影响，但该文仅考虑了长三角区域城市群的气候效应。众所周知，珠三角、长三角和京津冀是我国目前城市化水平最高的三大城市群，各城市群发展对区域气候的影响如何？其气候效应有无差异？机理如何？东部三大城市群下垫面变化的整体效应如何？这些问题都缺乏系统研究。

本文利用法国动力气象实验室发展的高分辨可变网格全球大气环流模式 (LMDZ)，通过改变珠三角、长三角和京津冀地区下垫面类型，模拟不同区域城市群下垫面变化的气候效应，探讨不同区域城市化气候效应及其可能机理。考虑到篇幅有限，本文研究集中探讨不同区域城市化的夏季气候效应。

2 模式简介及试验设计

本文利用法国动力实验室 (Laboratoire de Météorologie Dynamique) 发展的全球大气环流模式 (LMDZ)，进行中国东部不同区域城市群下垫面变化的模拟试验，分辨率约为 $3^\circ \times 1.5^\circ$ ，垂直方向上模式采用了经典的混合坐标系，共 19 层，LMDZ

模式具有完整的物理参数化方案 (Li, 1999)，本文使用的是 LMDZ4，即模式的第四版本 (Hourdin et al., 2006)，大气和陆面过程是互相耦合的，陆面模式是 ORCHIDEE (Krinner et al., 2005)，但本文里只使用了它的能量和水分平衡部分，而生物过程部分没有打开，叶面积指数 LAI 是根据观测资料给定的，随着地理位置和季节的变化而变化。作为 LMDZ 模式下边界的海温 (SST) 场使用国际大气环流模式比较计划 II (简称 AMIP II) 提供的逐月观测资料，模拟时间为 1989 年 1 月～2009 年 12 月，共计 21 年。

ORCHIDEE 模式中的下垫面植被类型 (Plant Functional Type) 分为 13 类，分别为裸土、热带宽叶常青、热带宽叶雨林植被、温带针叶常青、温带宽叶常青、温带宽叶夏季植被、北方针叶常青、北方宽叶夏季植被、北方针叶夏季植被、C3 植物草坪、C4 植物草坪、C3 农作物和 C4 农作物。模式的每个陆地格点可以同时有几种植被类型并存，分别占据总格点面积的一定百分比。为模拟不同区域及中国东部主要城市群夏季气候效应，考虑到中国东部的城市化基本都是征用农村土地，故设计了 4 个敏感性试验 (表 1)，前 3 个敏感性试验设计方案为：分别将珠三角、长三角和京津冀地区下垫面植被类型中的 C3、C4 农作物改为最接近城市物理特性的裸土 (本文分别简称为珠三角试验、长三角试验和京津冀试验)；第 4 个敏感性试验设计方案为：同时将珠三角、长三角和京津冀地区下垫面植被类型中的 C3、C4 农作物改为裸土 (本文简称为东部城市带试验)。朴世龙和方精云 (2001) 研究显示，20 世纪最后 20 年里珠三角和长三角地区是植被覆盖下降趋势最明显的地区，刘纪远等 (2002) 的研究也表明，京津冀、长三角地区城镇居民建设用地的扩张侵占了大面积的耕地，将下垫面农作物改为裸土虽不能完全精确反应城市发展状况，但基本可以体现出当代中国东部区域陆面覆盖变化的基本特征。为进一步提高模拟结果的显著性，本文采用了集合试验的方案，即控制试验和敏感性试验均进行 7 次不同初始值的模拟，得到 7 组 21 年 (1989 年 1 月～2009 年 12 月) 模拟结果，本文分析的是 7 次模拟的夏季集合平均结果。

表 2 为控制试验中三个城市群下垫面的一些基本参数，可以看到，各区域裸土所占比例均不超过 5%，C3、C4 农作物所占比例之和大多接近 40%，敏感性

试验中将控制试验中的 C3、C4 农作物变为裸土, 很大程度上增加了裸土面积。控制试验和敏感性试验的差异除了受 C3、C4 类农作物所占比例影响外, C3、C4 类农作物在夏季的叶面积指数 LAI (LAI=绿叶总面积/占地面积) 也是重要的影响因子。C3、C4 类农作物在夏季 LAI 有着明显的南北差异, 长三角、珠三角地区夏季平均 LAI 高于京津唐地区, 故长三角、珠三角地区植被的生长较京津冀地区更加茂盛, 从而植被蒸腾作用的变化也较大。

表 1 三个城市群下垫面变化区域一览表

Table 1 List of simulations with land-use change in three different metropolitan areas

试验简称		下垫面改变区域
控制试验	CTL 试验	
敏感性试验 1	珠三角试验	珠三角 ($21^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $111^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)
敏感性试验 2	长三角试验	长三角 ($26^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$)
敏感性试验 3	京津冀试验	京津冀 ($37^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 119.5^{\circ}\text{E}$)
敏感性试验 4	东部城市带试验	珠三角、长三角、京津冀

注: 表中珠三角、长三角、京津冀分别代表珠江三角洲、长江三角洲以及北京、天津、河北地区, 下同

表 2 三个城市群控制试验下垫面类型

Table 2 Surface properties of the three metropolitan areas in the control run

	裸土所占比例	C3 农作物所占比例	C4 农作物所占比例	C3、C4 农作物夏季平均 LAI
珠三角	2.4%	2.3%	43.7%	3.31
长三角	3.4%	10.6%	33.7%	4.13
京津冀	5.0%	23.1%	15.3%	2.61

3 控制试验模拟能力评估

为了验证模式模拟的效果, 本文将模式模拟结

果与 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料、GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 降水资料进行对比, 其中 NCEP 再分析资料和 GPCP 降水资料的分辨率均为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$, 观测与模拟的对比时段为 1989~2009 年的夏季。

图 1 为 NCEP 再分析资料与模式控制试验结果在东亚范围内夏季平均 500 hPa 位势高度分布, 对比图 1a 和 b, 可以发现两者在空间结构上十分相似, 但控制中国东部沿海地区的副高强度模拟存在 40 gpm 负偏差。图 2 等值线为 NCEP 再分析资料与模式控制试验结果在东亚范围内夏季平均 2 m 空气温度分布, 可以看到, 控制试验大体模拟出由东南沿海向西北内陆递减的温度分布, 最大暖偏差出现在新疆东部以及甘肃西部地区, 东部地区平均暖偏差大约为 1°C 。图 2 阴影为 GPCP 资料与控制试验得到的东亚范围内夏季平均降水分布, 发现控制试验能模拟出降水量南多北少的分布形势, 最大湿偏差出现在四川盆地地区, 东部地区平均偏差大约为 1 mm d^{-1} 。

综上结果表明, LMDZ 全球模式能较好模拟东亚夏季平均 500 hPa 场结构, 中国东部沿海地区的副高模拟偏差低于 40 gpm。对夏季中国东部气候要素场的模拟在部分地区存在暖偏差、湿偏差, 但大部分区域暖偏差低于 2°C , 湿偏差小于 2 mm d^{-1} , 且模拟出温度由东南沿海向西北内陆递减、降水量南多北少的分布形势。可以认为该模式对东亚地区环流形势以及平均温度和降水场有较好的模拟能力。

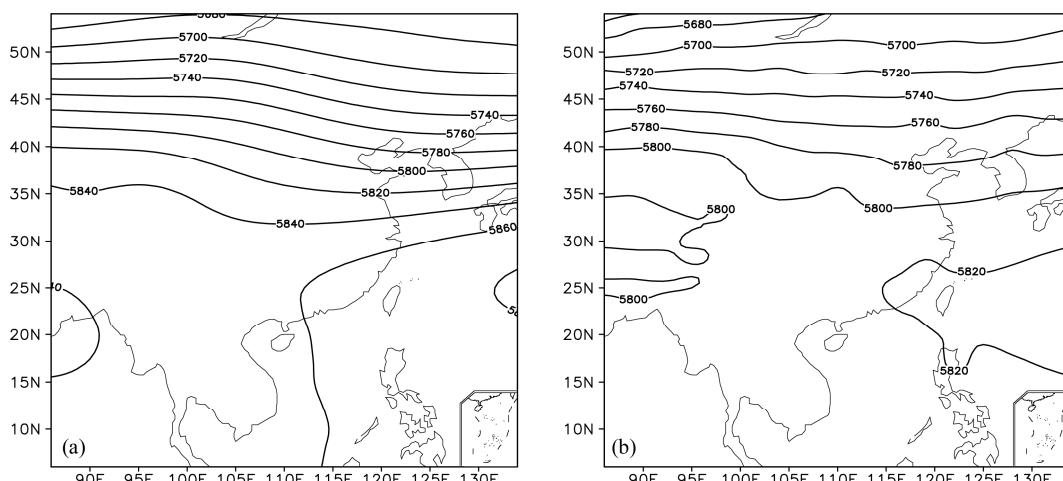


图 1 夏季 (6~8 月) 平均 500 hPa 位势高度分布 (单位: gpm): (a) NCEP 再分析资料结果; (b) 模式控制试验结果

Fig. 1 Distribution of summer (June to August, JJA) mean 500-hPa geopotential height (gpm) in (a) NCEP re-analysis and (b) control run

4 各区域城市群下垫面变化的气候效应及其可能机理

根据表 1 试验方案, 对比分析 4 组敏感性试验和控制试验的差别, 研究城市群下垫面变化引起的夏季气候效应及其可能机理。

4.1 温度响应与地表能量平衡的变化

下垫面类型变化会改变地气间的能量平衡关系, 导致近地表温度变化, 并进一步影响大气的热力状况。图 3 为各组敏感性试验与控制试验的夏季平均 2 m 气温差值场, 可以看到, 无论是三城市群分别变化的独立试验, 还是同时变化的东部城市带试验, 下垫面变化都引起了变化区域局地近地表温度的显著增加(通过了 95% 的信度检验), 这与多数学者在研究城市化以及土地利用变化时所得到的结论相一致(郑益群等, 2002; Zhang and Gao, 2009; Ma et al., 2013; Chen and Zhang, 2013)。其中, 长三角地区变化最明显, 尤其是其北侧区域, 最大变温超过 2.2°C, 珠三角地区次之, 京津冀地区变化最小, 最大变温为 1.0°C, Lawrence and Chase (2010) 研究发现陆面从潜在植被变化到当前的实际植被状态导致中国夏季平均增温 0.49°C, 这与本文试验结果接近。并且和我们得到的物理机制类似, 他们的增温效应主要是由蒸腾的改变而引起的。值得注意的是, 4 组试验的增温区域都基本集中于下垫面城市群变化区域, 且东部城市带试验的温度变化基本是三个城市群单独改变的线性叠加, 表明中国东部区域各城市群下垫面变化的温度响应有显著的局地性。Georgescu et al. (2014) 最近使用 WRF 模式研究了北美地区 21 世纪城市化的可能演变进程以及对区域气候的影响, 他们的结果显示, 21 世纪末, 大部分地区由于城市化带来的增温都可达 1 到 2 度, 甚至更高, 这也和我们在本文里得出的结果很接近。另外, Georgescu et al. (2014) 还做了几个很有意思的数值试验, 来测试是否可以抵消城市化带来的增温, 他们的测试包括把房顶涂成浅颜色以增加对短波辐射的反照率, 或者在房顶种植绿色植物, 增加蒸腾。这些措施都能有效地消弱增温作用。

由于地表植被类型的变化, 引起的地表反照率等物理性质的变化会导致下垫面改变区域接收的辐射量改变, 从而引起地表能量平衡发生变化, 包括地表接收的净短波辐射、地表有效辐射以及潜热、感热通

量的变化。图 4 到图 7 分别为各组敏感性试验与控制试验的夏季平均地表能量差值场。由图 4 到图 7 可以看到, 珠三角、长三角和京津冀城市群下垫面分别变化后, 其地表能量变化基本一致, 均表现为地表接收的净短波辐射增加、地表支出有效长波辐射也加大, 地表向上的感热通量增加、潜热通量减少。但不同城市群的变化幅度存在一定差异。

地表接收的净短波辐射(图 4)的增加在长三角地区最强(集中在北侧, 南侧几乎无变化), 最大变化超过 12 W m^{-2} , 京津冀地区次之(集中在南侧, 北侧几乎无变化), 珠三角地区变化最小, 最大变化仅达到 4 W m^{-2} 。净短波辐射的改变既和下垫面反照率的变化有关, 也和由于大气水汽的变化而引起的到达辐射量的变化有关。在我们的试验里, 是把农作物改成裸土, 由于农作物的反照率较高, 而潮湿的地面可以有较低的反照率, 所以有些地区(如长三角北部, 京津冀南部)净短波辐射增加值较大。在我们的试验里, 大气含水量都减少, 故有增加短波辐射的作用。地表有效长波辐射(图 5)在长三角地区的增加大于珠三角、京津冀地区, 最大变化超过 30 W m^{-2} 。潜热通量(图 6)和感热通量(图 7)的变化在三个地区差异不大, 京津冀地区的增加略小。类似于温度变化, 可以发现 4 组试验中各种地表能量变化都集中发生在下垫面改变的区域, 且大部分区域都通过了 95% 的信度检验。进一步分别对比图 4d 到图 7d 与图 4 到图 7 中的其他三幅图, 还可以看到, 东部城市带试验的地表能量变化基本是三个城市群单独改变的线性叠加, 显然, 这些都表明下垫面改变引起的地表能量变化也具有显著的局地性。

根据地表热量平衡方程, 若不考虑和深层土壤的能量交换

$$Q - F = E + H, \quad (1)$$

式中, Q 为地面接收的净短波辐射, F 为地面有效长波辐射, E 为蒸发潜热通量, H 为感热通量。当局地下垫面变化时, 可以得到, 各通量的变化存在以下关系:

$$\delta(Q - F) = \delta(E + H). \quad (2)$$

考虑到地表能量变化存在显著的局地性, 进一步计算 4 组试验中各城市群区域平均地表能量变化(见图 8), 注意图 8 中地面收入(支出)能量增加(减少)为正, 地面支出(收入)能量增加(减少)为负, 各区域左柱代表单一区域试验结果, 右柱代

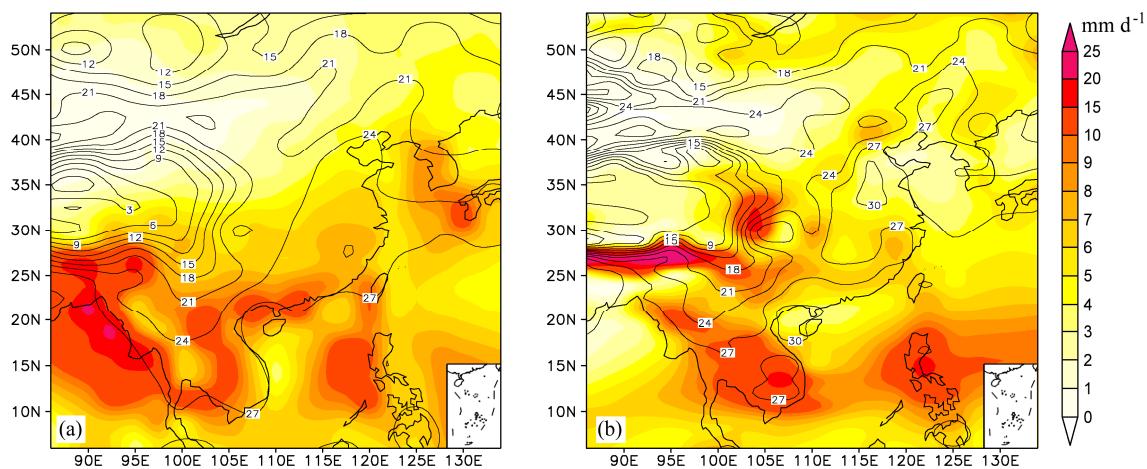


图2 夏季(6~8月)平均2 m空气温度(单位: °C)和降水量(单位: mm d⁻¹)分布(实线为温度, 阴影为降水): (a) NCEP再分析资料结果; (b)模式控制试验结果

Fig. 2 Distribution of summer (JJA) mean precipitation (mm d^{-1}) and 2-m surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$): (a) Observation; (b) simulation results. Contours: temperature; shading: precipitation

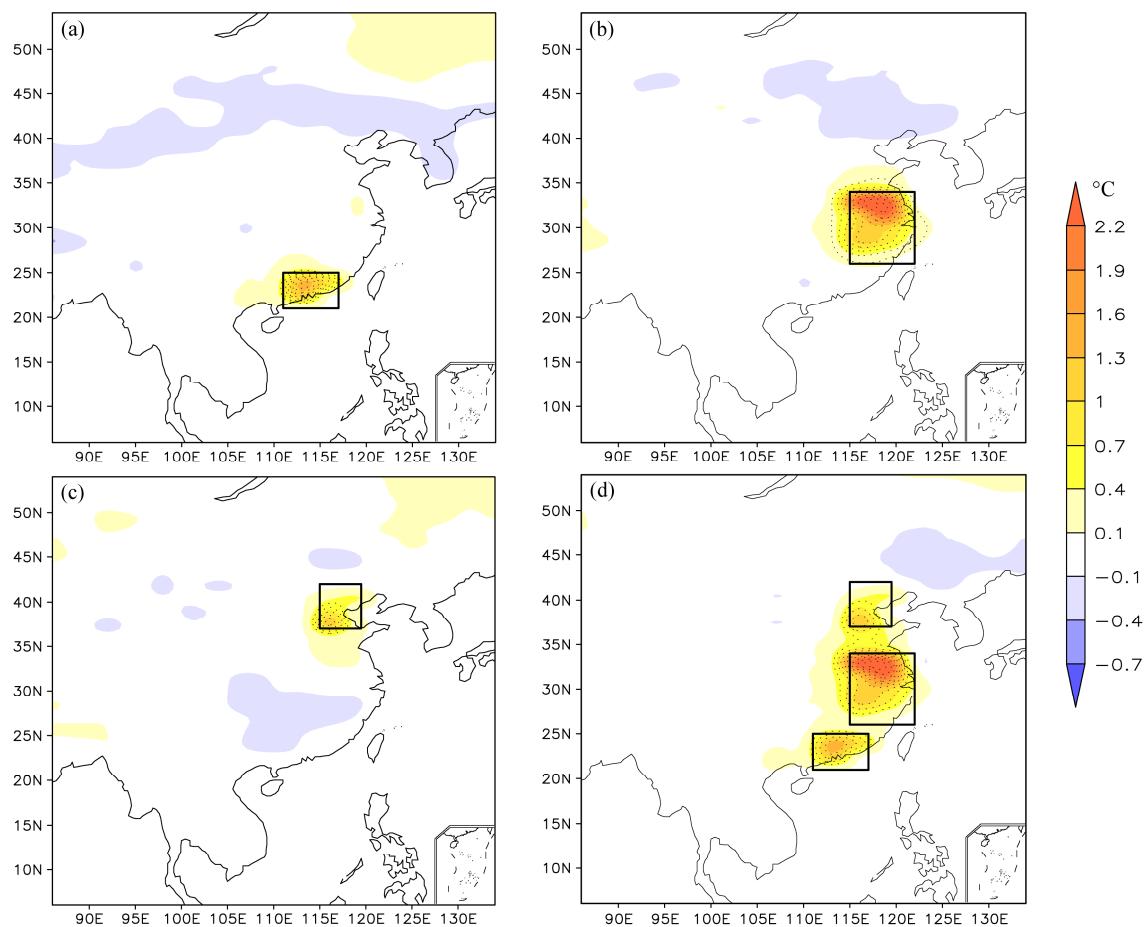


图3 敏感性试验与控制试验的夏季(6~8月)平均2 m空气温度差值场(单位: °C, 方框内为下垫面修改区域, 黑点覆盖区域的温度变化通过了95%信度检验): (a) 珠三角试验; (b) 长三角试验; (c) 京津冀试验; (d) 东部城市带试验

Fig. 3 Differences of summer (JJA) mean 2-m air temperature between the control and sensitivity experiments ($^{\circ}\text{C}$). Box is the area of land use change. Black spot covered areas denote zones exceeding the 95% confidence level. (a) Pearl River Delta; (b) Yangtze River Delta; (c) Beijing–Tianjin–Hebei agglomeration; (d) three-region combined simulation

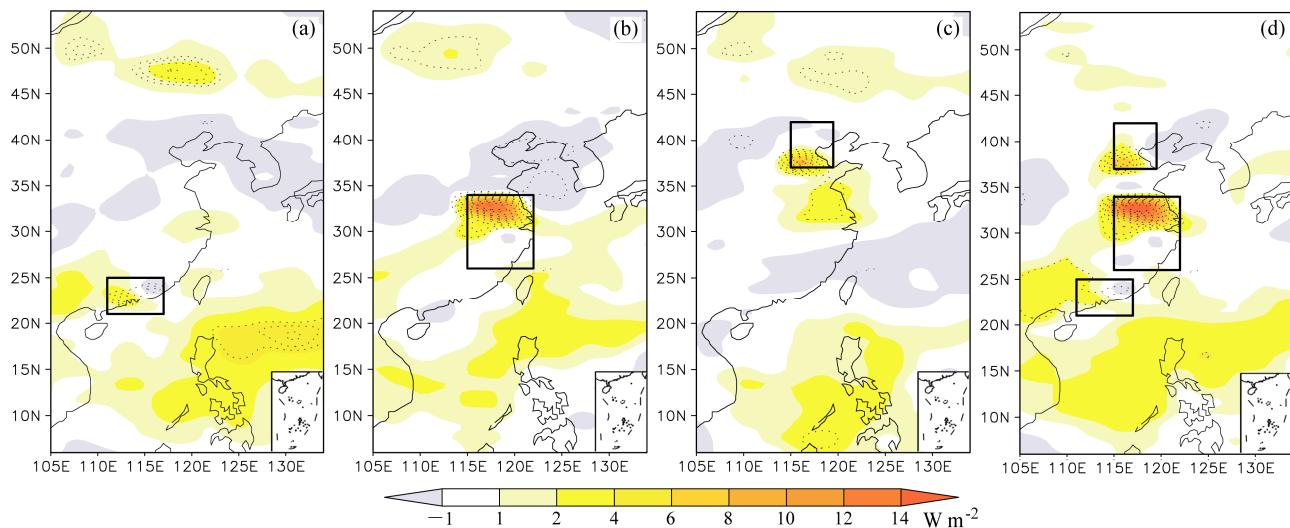


图4 敏感性试验与控制试验的夏季(6~8月)平均地表接收的净短波辐射差值场(单位: W m^{-2}), 方框内为修改区域, 黑点覆盖区域通过95%信度检验: (a) 珠三角试验; (b) 长三角试验; (c) 京津冀试验; (d) 东部城市带试验

Fig. 4 Difference of summer (JJA) mean surface net shortwave radiation between the control and sensitivity experiments (W m^{-2}). Box is the area of land use change. Black spot covered areas denote zones exceeding the 95% confidence level. (a) Pearl River Delta; (b) Yangtze River Delta; (c) Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan area; (d) three-region combined simulation

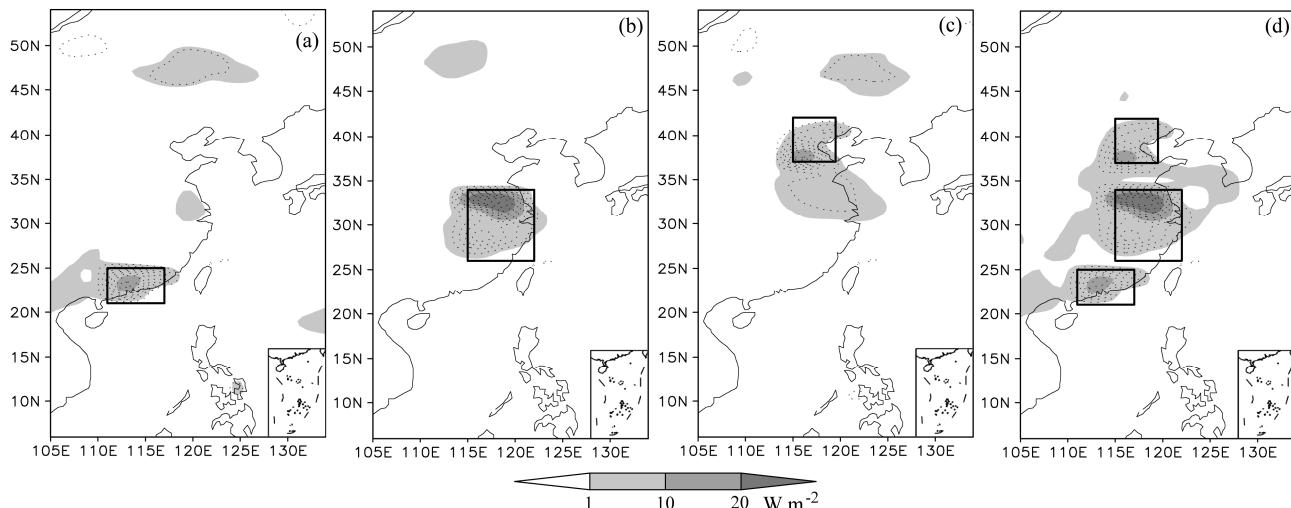


图5 同图4, 但为地表支出的有效长波辐射

Fig. 5 Same as in Figure 4, but for the surface effective net long-wave radiation

表东部城市带试验结果。可以看到, 各城市群改变下垫面后, 地表热量变化收入增加来自地面接收净短波辐射增加、支出潜热减少, 而地表有效长波辐射和感热通量增加, 则是地表热量变化支出项。但无论何城市群, 地表热量收支变化主要集中表现为潜热减少(至少占地表热量收入80%)、感热通量增加(占地表热量支出60%以上)。表明地表类型的变化, 显著减少了该区域潜热蒸发, 即显著减弱

了通过蒸发吸热作用降低气温的过程, 导致地面能量失衡, 为平衡地面能量收支, 地面温度升高, 进而感热通量、地表有效长波辐射增强, 地表通过改变温度对能量进行再分配和再平衡。

进一步对比不同城市群能量和气温变化(图9)大小, 可以看到长三角和珠三角城市群总的能量变化较接近, 各能量对热量收支贡献略有差异, 珠三角城市群潜热通量变化较大(占地表热量收入

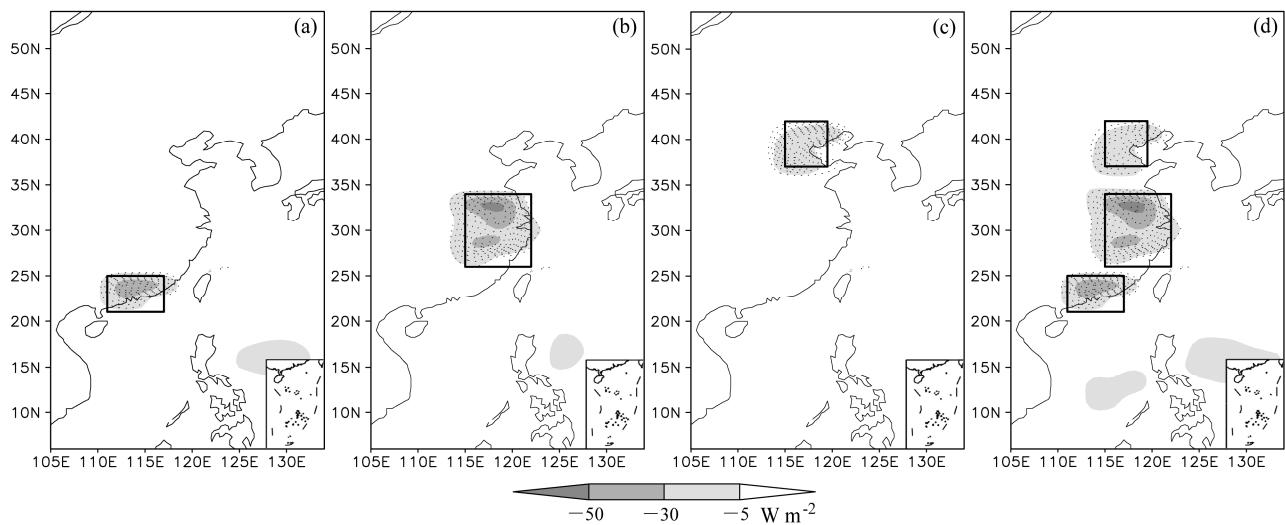


图 6 同图 4, 但为潜热通量

Fig. 6 Same as in Figure 4, but for the latent heat flux

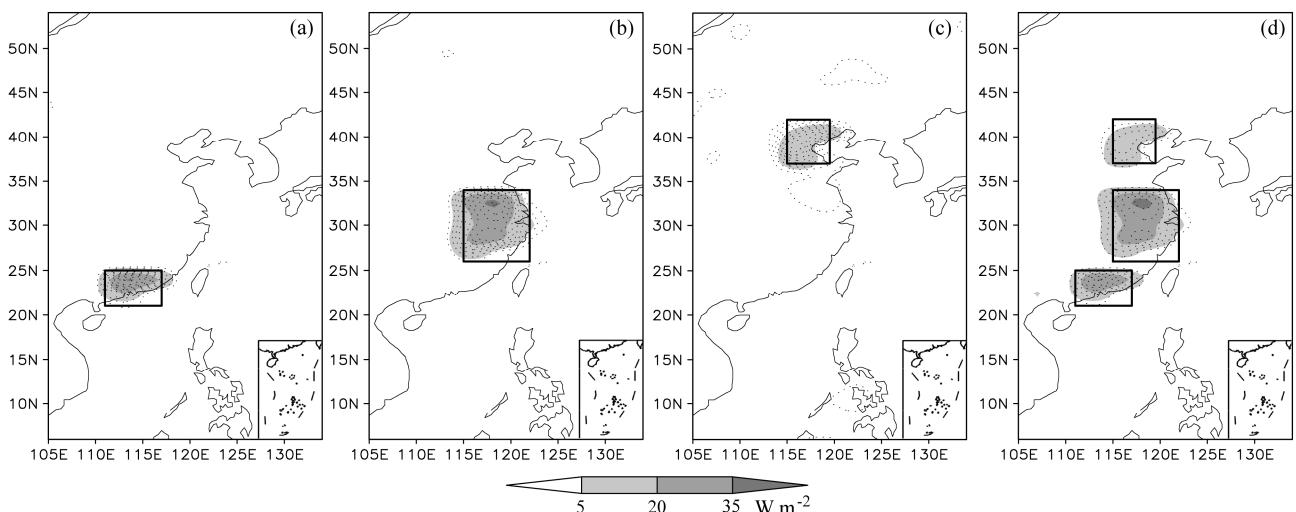


图 7 同图 4, 但为感热通量

Fig. 7 Same as in Figure 4, but for the sensible heat flux

94%), 长三角地表有效长波辐射变化略大(接近热量支出 40%); 京津冀城市群总的能量变化远低于长三角、珠三角城市群, 仅为后者的 50%。相应地, 珠三角、长三角城市群的局地增温在 0.6°C 左右, 而京津冀城市群的局地增温不足 0.3°C, 可见各区域地表气温变化和能量变化有着较好的对应关系。由于 C3、C4 农作物所占比例之和珠三角、长三角城市群接近 45%, 而在京津冀城市群只占 38%, 且珠三角、长三角城市群夏季平均 LAI 高于京津唐城市群, 综合两者变化可以看出, 珠三角、长三角城市群参加蒸腾作用的生物量变化要远

大于京津冀城市群, 从而能量变化和局地增温也较大。此外, 对比单一区域试验和东部城市带试验结果, 不难发现, 两者结果十分接近, 再次表明下垫面性质的变化引起的气候效应具有显著局地性。

由此可见, 当城市群改变下垫面后, 地表潜热蒸发显著减少, 即显著减弱了通过蒸发吸热作用降低气温的过程, 为了平衡地面能量收支, 地面温度升高, 进而感热通量、地表有效长波辐射增强, 表明地表通过升温对能量进行再分配和再平衡。而无论单一城市群还是整个东部城市带的试验, 都表明下垫面改变引起的温度响应、地表能量变化具有显

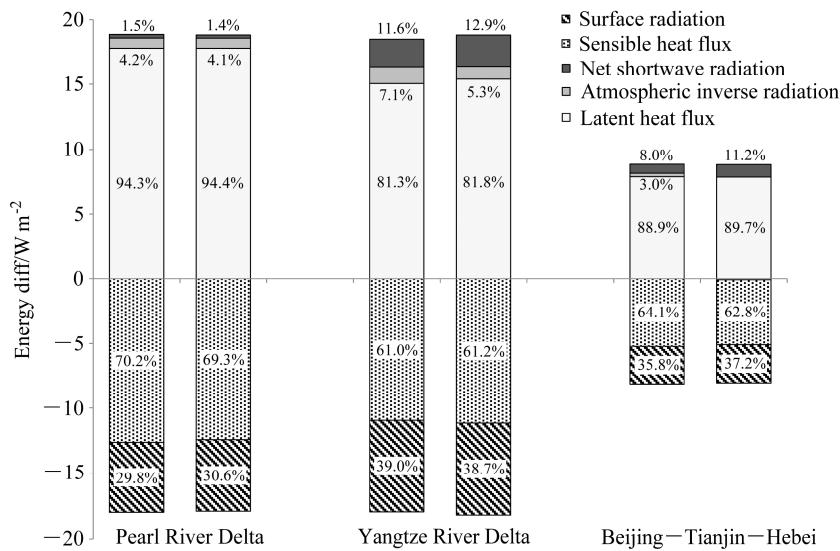


图 8 敏感性试验与控制试验各城市群区域夏季平均地表能量差值(单位: W m^{-2}), 各区域左柱代表单一区域试验结果, 右柱代表东部城市带试验结果

Fig. 8 Difference of summer mean surface heat fluxes between the control and sensitivity simulations in the three metropolitan areas (units: W m^{-2}). Left columns denote single-zone simulations, and right columns the three-region combined simulation

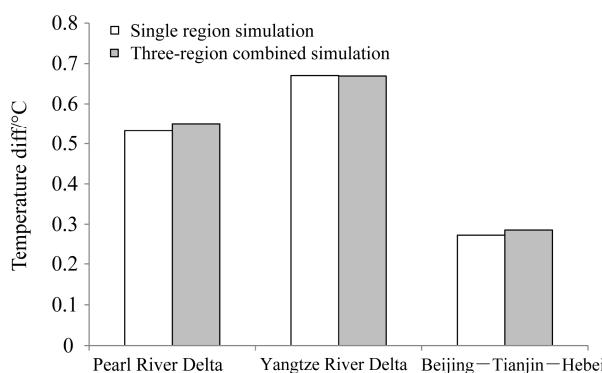


图 9 敏感性试验与控制试验各区域平均夏季 2 m 气温差值(单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 9 Differences of summer mean 2-m air temperature in the three metropolitan areas between the control and sensitivity simulations (units: $^{\circ}\text{C}$)

著的局地性。各城市群能量变化与相应气温响应的对比表明, 各区域地表气温变化和能量变化有着较好的对应关系, 长三角、珠三角城市群的总能量变化远高于京津冀城市群, 其局地增温也是京津冀城市群的一倍以上。

4.2 降水变化及其可能机理

图 10 为各组敏感性试验与控制试验的夏季平均降水差值场, 可以看到, 4 组试验的下垫面变化都引起珠三角、长三角和京津冀城市群平均日降水量的显著减少(通过了 95% 的信度检验)。单一区

域试验结果显示, 长三角、珠三角城市群日降水量变比较接近, 长三角中心变化区域超过 1.2 mm, 珠三角次之, 京津冀的变化最小, 仅达到 0.6 mm。东部城市带试验中, 各区域平均日降水量的减少较单一区域试验结果都有所加强。此外, 4 组试验降水减少区域都没有集中在局地, 尤其是东部城市带试验中, 东部地区存在大范围的降水偏少(图 10d), 这可能是由于降水是局地扰动和大尺度环流相互作用的结果, 故各地区平均日降水量减少并没有限制在局地。另外在东南亚也出现大面积的降水减少区, 从菲律宾以东的西太平洋经南海到中南半岛, 降水都有所减少。相反的在我国内陆地区有极微弱的降水增加信号。

值得一提的是 Zhang et al. (2009) 使用澳大利亚气象局的气候模式来研究观测到的植被相对于潜在植被对中国气候的影响。在夏季, 植被蒸腾减弱, 引起温度升高, 降水减少, 这和我们获取的结果很一致。其实早在上世纪 70 年代, Charney (1975) 在他的植被和气候相互作用的开创性工作里, 已经指出, 植被退化可以引起局地降水减少, 进而导致沙漠化。于燕和谢正辉 (2012) 使用区域气候模式来研究中国地区植被退化的气候效应, 也发现蒸腾减少的地区有很强的降水减少趋势。以上这些文献结果都从某种程度上加强了本文结果的可信性。

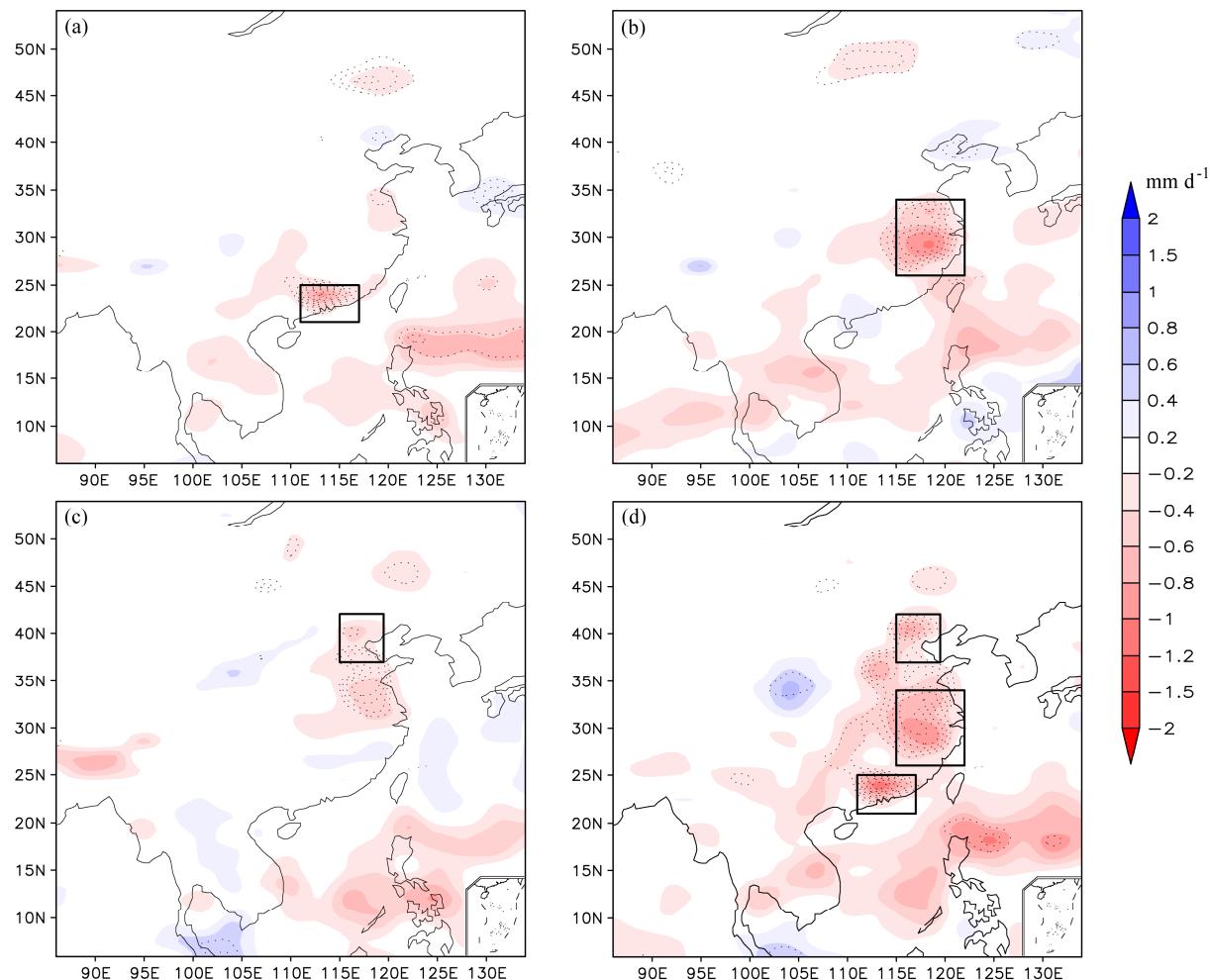


图 10 同图 3, 但为降水量 (mm d^{-1}) 差值场
Fig. 10 Same as in Fig. 3, but for precipitation (mm d^{-1})

图 11 为夏季平均海平面气压场 (MSLP) 和不同层次位势高度差值场, 由图 11a-d 可见, 珠三角、长三角、京津冀地区均在局地出现负 MSLP 异常区, 周围有正 MSLP 异常区, 但珠三角、京津冀地区变化幅度均小于长三角地区, 呈现微弱的热低压。表明当局部地下垫面改为城市下垫面后, 地表的能量平衡发生变化, 地表温度增加, 空气受热上升, 在该区域低层形成热低压, 四周空气向热低压地区流入以补偿该地区的上升运动, 故周围形成正 MSLP 异常区。

从 850 hPa (图 11e-h) 和 500 hPa (图 11i-l) 位势高度差值场看来, 长三角、珠三角地区无论是在单一区域试验还是东部城市带试验, 皆被正位势高度异常所控制。京津冀地区在单一区域试验中, 在 850 hPa 和 500 hPa 都被正异常所控制, 中高层为正压异常结构; 在东部城市带试验中, 850 hPa 为正异常, 500 hPa 则为负异常, 中高层为斜压

异常结构。

结合 500 hPa (图 11i-l)、200 hPa (图 11m-p) 位势高度差值场不难发现整个中国东部高层在 4 个试验中都呈现一个南正北负的异常变化, 这种异常变化形势有利于 500 hPa 副高在大陆的部分得到增强, 并且范围扩大至东部沿海地区, 造成其控制区域内降水减少, 显然 4 组试验降水减少区域没有集中在局地, 特别是东部城市带试验的降水变化与上述大尺度场的变化有关。进一步计算不同试验中位势高度场间的相似系数, 可得到 850 hPa 位势高度场各试验间的平均相似系数为 0.36, 500 hPa、200 hPa 位势高度场各试验间的平均相似系数分别增加为 0.46 和 0.67, 可以看出, 越到高层, 4 个试验的位势高度场相似程度越高, 下垫面扰动的具体位置对其影响越小。这表明下垫面性质变化产生的影响主要集中在近地面层, 在高层可能存在大尺度本征

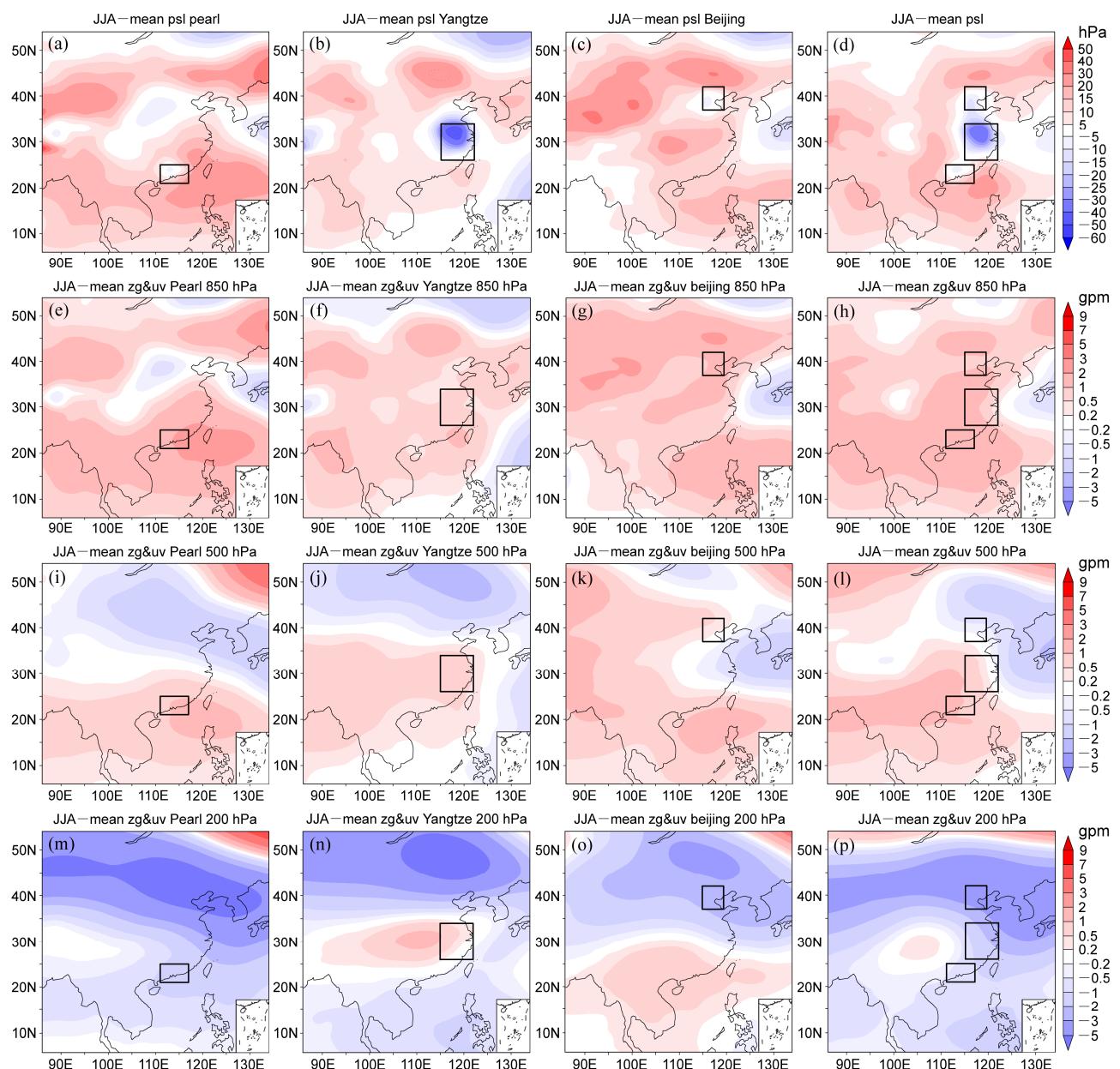


图 11 敏感性试验与控制试验的夏季(6~8月)平均海平面气压场(单位:hPa)和位势高度差值场(单位:gpm):(a-d)海平面气压场;(e-h)850 hPa;(i-l)500 hPa;(m-p)200 hPa。其中(a、e、i、m)为珠三角地区,(b、f、j、n)为长三角地区,(c、g、k、o)为京津冀地区,(d、h、l、p)东部城市带

Fig. 11 Differences of summer (JJA) mean sea level pressure (hPa) and geopotential height (gpm) between the control and sensitivity experiments. Box is the area of land use change. Dashed coverage area denotes anomalies exceeding 95% confidence level. (a-d) Sea level pressure ; (e-h) 850 hPa; (i-l) 500 hPa; (m-p) 200 hPa, (a, e, i, m) Pearl River Delta; (b, f, j, n) Yangtze River Delta; (c, g, k, o) Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area; (d, h, l, p) three-region combined simulation

模态(花振飞等, 2013), 这种本征模态不受下垫面性质变化的位置影响。

图 12 为 4 组敏感性试验与控制试验的夏季平均温度、比湿、垂直环流在 $110^{\circ}\text{--}122^{\circ}\text{E}$ 上的平均垂直剖面(箭头为经向环流, 等值线为比湿, 阴影

为温度), 可以看出, 4 组试验改变下垫面区域都呈现局地加热升温, 低层有明显的上升运动, 一般而言, 大气上升运动有利于降水的产生, 但值得注意的是, 由于下垫面性质的改变, 模拟降水量的变化是减少的(图 10), 表明下垫面变化导致的局地动

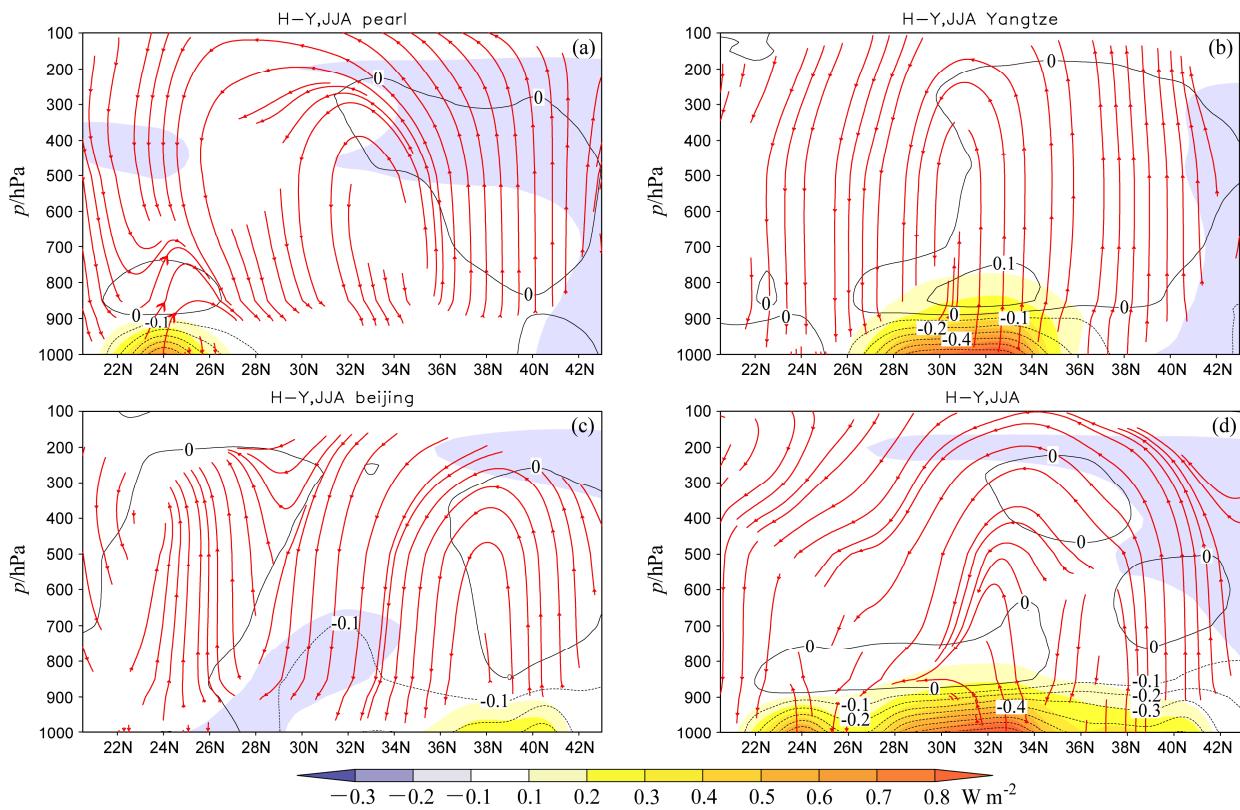


图 12 敏感性试验与控制试验的夏季(6~8月)平均差值的垂直剖面($110^{\circ}\sim122^{\circ}\text{E}$ 平均), 红色箭头代表经向环流, 等值线代表比湿(单位: g kg^{-1}), 阴影代表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 珠三角试验; (b) 长三角试验; (c) 京津冀试验; (d) 东部城市带试验

Fig. 12 Vertical profile of differences of summer (JJA) mean variables between the control and sensitivity experiments ($110^{\circ}\sim122^{\circ}\text{E}$): (a) Pearl River Delta; (b) Yangtze River Delta; (c) Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area; (d) three-region combined simulation. Red arrows represent the meridional circulation, contour lines represent specific humidity (g kg^{-1}), shading represents temperature ($^{\circ}\text{C}$).

力条件改变不是导致局地降水减少的原因。

众所周知, 降雨的产生主要是由两个因素决定的, 除了在大气动力学条件外, 大气中的水分供应也是另一个重要因素。4组试验都呈现改变下垫面区域比湿显著减少, 局地水汽明显减少, 呈现变暖变干的状态, 因此局地显著变干可能是导致城市群局地降水减少的主要因素。

根据大气中水分平衡方程, 蒸发, 降水和水汽输送存在如下关系

$$r - E = \Delta Q_a, \quad (3)$$

式中, r 为降水量, E 为蒸发量, ΔQ_a 为水汽净输送量。在一般区域范围内, E 变化不大, 那么 r 应随 ΔQ_a 而变化, 两者应有很好的对应关系。但在下垫面变化的局地地区, 由于 E 变化很大, r 和 ΔQ_a 就可能没有很好的对应关系。图 13 为 4 组敏感性试验与控制试验的夏季平均整层水汽通量及其散度差值场(矢量代表整层水汽通量, 阴影代表整层水

汽通量散度, 等值线代表降水), 不难发现, 珠三角、长三角和京津冀城市群区域降水和水汽通量散度无明显对应关系, 降水变化主要和蒸发有关。而下垫面修改区域外, 整层水汽输送和降水的变化基本相对应, 整层水汽辐散区对应降水减少区域, 反之亦然, 这也从另一方面再次证明, 局地水汽变化是导致局地降水减少的主要因素。

可见, 由于地表类型改变, 导致地表温度增加, 在局地低层形成热低压, 有明显上升运动, 但下垫面变化导致的局地蒸发减小使三个城市群水汽明显减少, 表明水汽条件改变是导致降水减少的主要因素。加上整个中国东部高层呈现南正北负的异常变化, 西太平洋副高加强西伸, 导致降水减少区域并没有集中在局地, 特别是东部城市带试验中, 出现东部地区大范围的降水偏少。虽然也有研究表明, 城市化可能会使所处区域的降水增加(黎伟标等, 2009; Zhang et al., 2010; Zhan et al., 2013),

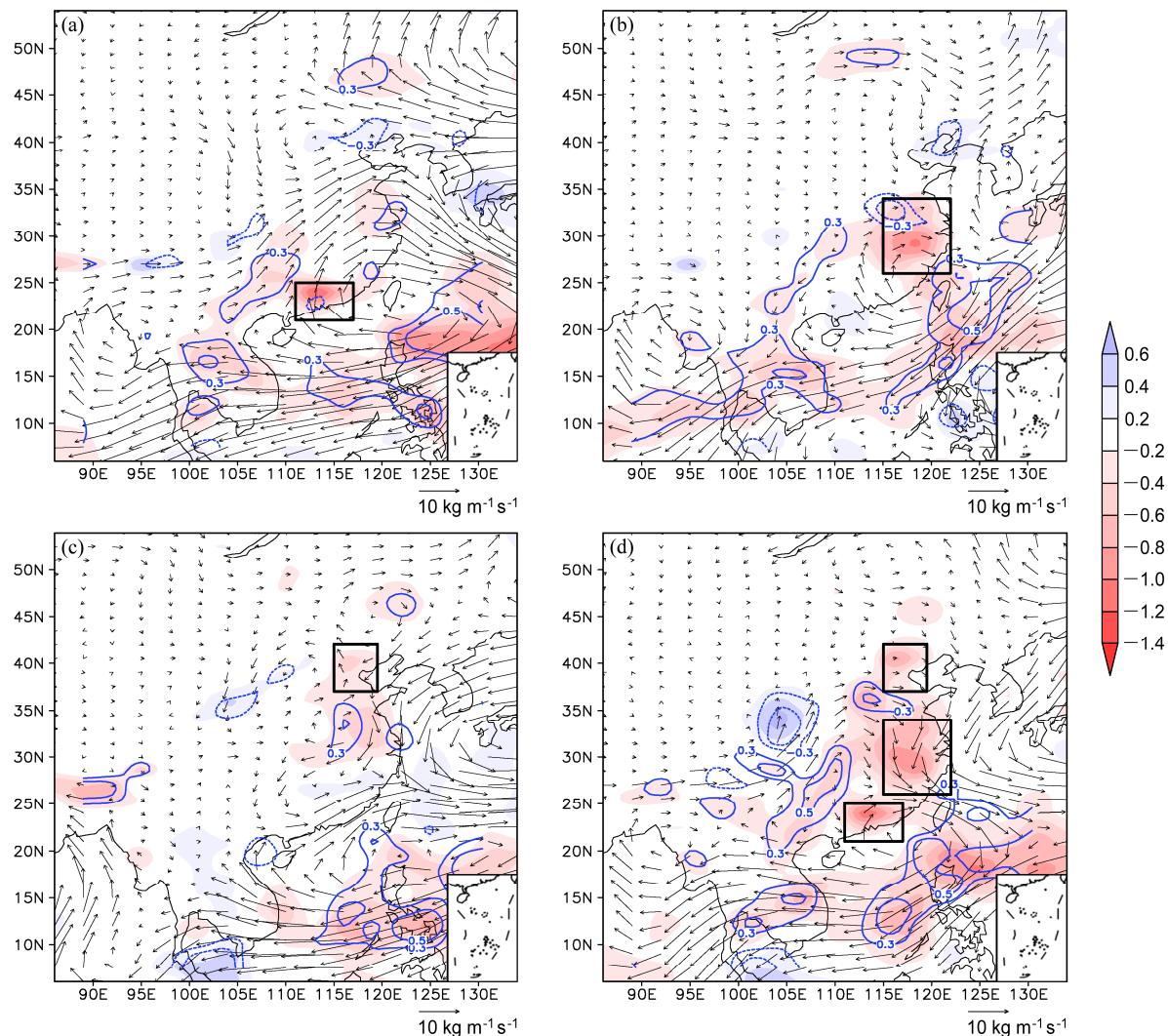


图 13 敏感性试验与控制试验的夏季 (6~8月) 整层水汽通量 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{d}^{-1}$) 及其散度 (单位: $\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) 差值场: (a) 珠三角试验; (b)

长三角试验; (c) 京津冀试验; (d) 东部城市带试验。矢量代表水汽通量, 阴影代表降水量, 等值线代表水汽通量散度

Fig. 13 Difference of summer (JJA) mean moisture flux ($\text{kg m}^{-1} \text{d}^{-1}$) and its divergence ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) between the control and sensitivity experiments: (a) Pearl River Delta; (b) Yangtze River Delta; (c) Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area; (d) three-region combined simulation. Vectors represent moisture flux, shading represents precipitation, contour lines represent moisture flux divergence

但主要是指对流性降水，且归因于动力因素和城市热岛效应。

5 结论

本文通过改变珠江三角洲、长江三角洲以及京津冀地区下垫面类型，模拟不同区域城市群下垫面变化的气候效应，探讨不同区域城市化夏季气候效应及其可能机理，主要结论如下：

(1) 各区域城市群下垫面变化的夏季气候效应及其机理基本一致。当各城市群下垫面中农作物改为裸土后，地表潜热蒸发显著减少，即显著减弱了

通过蒸发吸热作用降低气温的过程，为了平衡地面能量收支，地面温度升高，进而感热通量、地表有效长波辐射增强，地表通过升温对能量进行再分配和再平衡。而局地温度增加，虽有利于低层形成热低压，出现明显上升运动，但蒸发减弱使局地水汽明显减少，最终导致降水减少，表明水汽条件改变是降水减少的主要因素。

(2) 无论单一城市群还是整个东部城市带的试验，都表明三个城市群下垫面改变引起的温度响应、地表能量变化具有显著的局地性，三城市群下垫面同时改变时，各区域温度变化基本是三个城市

群单独改变的线性叠加。但由于中国东部高层呈现南正北负的异常变化, 西太平洋副高加强西伸, 导致降水减少区域并没有集中在局地, 特别是东部城市带试验中, 出现东部地区大范围的降水偏少。同时东南亚地区降水也减少, 而我国内陆却有微弱的降水增加信号。

(3) 不同地区城市化影响气候的强弱存在差异, 各区域地表气温变化和能量变化有着较好的对应关系, 珠三角、长三角城市群的总能量变化远高于京津冀城市群, 其局地增温也是京津冀城市群的一倍以上。京津冀城市群降水的变化也明显弱于珠三角、长三角城市群。

必须指出的是, 由于 LMDZ 模式中目前没有独立的城市冠层模块, 其城市群效应的敏感性试验在本文中是将下垫面农作物所占份额改为裸土, 过于理想化, 这有可能影响本文中城市群气候效应的模拟结果。未来需要用其它模式来交叉验证, 特别是和降水有关的部分, 自然变率大, 不确定性较强。

参考文献 (References)

- 陈锋, 谢正辉. 2009. 基于中国植被数据的陆面覆盖及其对陆面过程模拟的影响 [J]. 大气科学, 33 (4): 681–697. Chen Feng, Xie Zhengui . 2009. A land cover dataset based on Chinese vegetation data and its impact on land surface simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 681–697
- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101 (428): 193–202.
- Chen M X, Liu W D, Tao X L. 2013. Evolution and assessment on China's urbanization 1960–2010: Under-urbanization or over-urbanization? [J]. Habitat International, 38 (4): 25–33.
- Chen M X, Huang Y B, Tang Z P, et al. 2014. The provincial pattern of the relationship between urbanization and economic development in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 24 (1): 33–45.
- Cui L L, Shi J. 2012. Urbanization and its environmental effects in Shanghai, China [J]. Urban Climate, 2: 1–15.
- Chen H S, Zhang Y. 2013. Sensitivity experiments of impacts of large-scale urbanization in East China on East Asian winter monsoon [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (7): 809–815.
- 段春峰, 缪启龙, 曹雯, 等. 2012. 以高山站为背景研究城市化对气温变化趋势的影响 [J]. 大气科学, 36 (4): 811–822. Duan Chunfeng, Miao Qilong, Cao Wen, et al. 2012. Effect of urbanization on variation trend of air temperatures based on mountain stations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 811–822.
- Feng J M, Wang Y L, Ma Z G, et al. 2012. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China [J]. J. Climate, 25: 7187–7203.
- Feng J M, Wang J, Yan Z W. 2013. Impact of anthropogenic heat release on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (2): 363–373, doi:10.1007/s00376-013-3041-z.
- Findell K L, Sheviakova E, Milly P C D, et al. 2007. Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate [J]. J. Climate, 20 (14): 3621–3634.
- Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, et al. 2014. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111 (8): 2909–2914.
- 侯依玲, 陈葆德, 陈伯民, 等. 2009. 上海城市化进程导致的局地气温变化特征 [J]. 高原气象, 27 (增刊): 131–137. Hou Yiling, Chen Baode, Chen Bomin, et al. 2009. Characteristics of local air temperature variation influenced by Shanghai-urbanization [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (suppl): 131–137.
- 华文剑, 陈海山. 2013. 全球变暖背景下土地利用/土地覆盖变化气候效应的新认识 [J]. 科学通报, 58 (27): 2832–2839. Hua Wenjian, Chen Haishan. 2013. Recognition of climatic effects of land use/land cover change under global warming [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (27): 2832–2839.
- 花振飞, 江志红, 李肇新, 等. 2013. 长三角城市群下垫面变化气候效应的模拟研究 [J]. 气象科学, 33 (1): 1–9. Hua Zhenfei, Jiang Zhihong, Li Zhaoxin, et al. 2013. Numerical simulation of climate effects of urbanization over the Yangtze River Delta [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33 (1): 1–9.
- Houmard F, Musat I, Bony S, et al. 2006. The LMDZ4 general circulation model: Climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection [J]. Climate Dyn., 27 (7–8): 787–813.
- Heilig G K. 2012. World Urbanization Prospects: The 2011 Revision [J]. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (DESA), Population Division, Population Estimates and Projections Section, New York.
- 江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——个例分析 [J]. 气象学报, 65 (2): 301–307. Jiang Xiaoyan, Zhang Chaolin, Gao Hua, et al. 2007. Impact of urban albedo change on urban heat island in Beijing—A case study [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (2): 301–307.
- Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. Nature, 423 (6939): 528–531.
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model [J]. J. Appl. Meteor., 43 (12): 1899–1910.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, et al. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere–biosphere system [J]. Global Biogeochemical Cycles, 19 (1), doi:10.1029/2003GB002199.
- 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: D 辑, 32 (12): 1031–1040. Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Qing Dafang, et al. 2002. The analysis of recent pattern of land use change [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 32 (12): 1031–1040.
- 刘照明, 胡非, 李磊, 等. 2006. 北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 689–697. Liu Ximing, Hu Fei, Li Lei, et al. 2006. Summer urban climate trends and environmental

- effect in the Beijing area [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (3) : 689–697.
- 黎伟标, 杜尧东, 王国栋, 等. 2009. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1259–1266. Li Weibiao, Du Yaodong, Wang Guodong, et al. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1259–1266
- Li Z X. 1999. Ensemble atmospheric GCM simulation of climate interannual variability from 1979 to 1994 [J]. J. Climate, 12 (4): 986–1001.
- Lawrence P J, Chase T N. 2010. Investigating the climate impacts of global land cover change in the community climate system model [J]. International Journal of Climatology, 30 (13): 2066–2087.
- Lamptey B. 2010. An analytical framework for estimating the urban effect on climate [J]. International Journal of Climatology, 30 (1): 72–88.
- Ma D, Liu Z Y, Lü S H, et al. 2013. Short-term climatic impacts of afforestation in the East Asian monsoon region [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (17): 2073–2081.
- 朴世龙, 方精云. 2001. 最近18年来中国植被覆盖的动态变化 [J]. 第四纪研究, 21 (4): 294–302. Piao Shilong, Fang Jingyun. 2001. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 21 (4): 294–302
- Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109 (40): 16083–16088.
- 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 等. 2008. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响 [J]. 中国科学: D辑: 地球科学, 38 (11): 1438–1443. Wang Xiquang, Wang Zifa, Qi Yanbin, et al. 2008. The impact of urbanization on the distribution of winter precipitation in Beijing [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 38 (11): 1438–1443.
- 王芳, 葛全胜. 2012. 根据卫星观测的城市用地变化估算中国1980~2009年城市热岛效应 [J]. 科学通报, 57(11): 951–958. Wang Fang, Ge Quangsheng. 2012. Estimation of urban heat island of China from 1980 to 2009 according to the of land use based on satellite observation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 57(11): 951–958.
- 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 2007. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响 [J]. 地理学报, 62 (7): 717–727. Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, et al. 2007. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62 (7): 717–727.
- 徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等. 2009. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响 [J]. 大气科学, 33(4): 859–867. Xu Yangyang, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 33(4): 859–867.
- 杨续超, 张镱锂, 刘林山, 等. 2009. 中国地表气温变化对土地利用/覆盖类型的敏感性 [J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 39 (5): 638–646. Yang Xuchao, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. 2009. Sensitivity of surface air temperature change to land types in China [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 39 (5): 638–646.
- 于燕, 谢正辉. 2012. 中国区域地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 climate effects of land cover change in China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8 (6): 426–433.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果 [J]. 气象学报, 60 (1): 1–16. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2002. The effects of Vegetation Change on Regional Climate I: Simulation Results [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 60 (1): 1–16.
- Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, et al. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101 (26): 9540–9544.
- Zhang H Q, Gao X J. 2009. On the atmospheric dynamical responses to land-use change in East Asian monsoon region [J]. Climate Dy., 33 (2–3): 409–426.
- Zhang H Q, Gao X J, Li Y H. 2009. Climate impacts of land-use change in China and its uncertainty in a global model simulation [J]. Climate Dy., 32 (4): 473–494.
- Zhan J Y, Huang J, Zhao T, et al. 2013. Modeling the impacts of urbanization on regional climate change: A case study in the Beijing–Tianjin–Tangshan metropolitan area [J]. Advances in Meteorology, 2013: Article ID 849479, doi:10.1155/2013/849479.
- Zhao C H, Jiang Q N, Sun Z X, et al. 2013. Projected urbanization impacts on surface climate and energy budgets in the Pearl River Delta of China [J]. Advances in Meteorology, 2013: Article ID 542086, doi:10.1155/2013/542086.
- Zhang N, Gao Z Q, Wang X M, et al. 2010. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China [J]. Theor. Appl. Climatol., 102 (3–4): 331–342.