

珠江三角洲地区土地利用变化 对夏季6月气候的影响*

杜东升^{1,2}, 林文实¹, 李江南¹, 杨大勇³, 叶晓阳⁴

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 湖南省气象局气候中心, 湖南 长沙 410007;

3. 国家环境保护总局华南环境科学研究所, 广东 广州 510655;

4. 惠州市惠阳区环境保护局, 广东 惠州 516211)

摘要: 采用高分辨率的美国中尺度气象非静力模式 MM5 来模拟珠江三角洲土地利用变化对夏季月气候要素的影响, 最高分辨率为 3 km。模拟时间段为 2005 年 6 月。结果分析表明: 模拟的月平均温度和月降水量与实际观测资料符合较好。城市扩展导致珠江三角洲地区尤其是在城市区域月平均地面温度增加, 热岛效应增强。在城市扩张和郊区土地利用改变以后, 广州、佛山、江门等城市区域降水增加, 而东莞、珠海和深圳部分城市区域降水减少。

关键词: 珠江三角洲地区; 城市热岛; 土地利用变化

中图分类号: X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2010) 01-0138-07

Effect of Land Use Change on Summer Monthly Climate over the Pearl River Delta

DU Dongsheng^{1,2}, LIN Wenshi¹, LI Jiangnan¹, YANG Dayong³, YE Xiaoyang⁴

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410007, China;

3. South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510655, China;

4. Huiyang District Environmental Protection Bureau, Huizhou 526211, Guangdong, China)

Abstract: In this study, a mesoscale model (MM5) is used to simulate the impact of land use change on monthly climate in summer over the Pearl River Delta (PRD) region. The simulated period of time is June in 2005. The simulated results show that the simulated monthly average 2-m temperature and monthly precipitation correspond to those observed in domain D02. The simulated monthly mean 2-m temperature in the PRD increases and a heat island effect become distinctly strong. Due to the urban expansion, the precipitation in Guangzhou, Foshan and Jiangmen increases, whereas the precipitation decreases in Dongguan, Zhuhai and Shenzhen.

Key words: urban heat island effect; land-use change; the Pearl River Delta region

随着我国经济的快速发展, 城市人口大量增长, 城市规模正在急剧扩张, 土地利用发生了巨大的变化。土地利用的改变直接关系到地表植被变

化, 进而导致局地气候发生变化, 如城市热岛效应加强和改变降水分布等。

在国内的一些观测和模式研究表明: 城市化

* 收稿日期: 2008-12-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2010CB428504); 国家环境保护局公益性基金资助项目 (200709023); 广东科技计划项目 (2007B080703006)

作者简介: 杜东升 (1981 年生), 男, 工程师; 通讯作者: 李江南; E-mail: essljn@mail.sysu.edu.cn.

导致城市下风向的降水类型、降水量和降水分布产生变化。吴息等^[1]探讨北京城市化对短时降水的影响时发现, 在发生暴雨时, 城市作用造成雨量增加, 在城区最显著; 中到大雨时, 城市作用造成雨量增加, 在下风区最明显。周建康^[2]等发现南京城市化后城区降水量的增大, 大雨和暴雨次数的增多, 出现峰高量大的暴雨洪水机会增多。2006 年郭学良^[3]等利用中尺度模式 MM5 模拟了北京城市化对对流性降水系统的影响, 并做了在无城市资料情况下的模拟对比, 发现在城市和郊区的交界处降水增多, 但在模拟的整个区域尤其是城市降水则是减少的, 降水的峰值中心和区域出现在城市的下风方向。蒙伟光等^[4]利用广东省 GIS 数据的土地利用类型的资料, 采用 MM5 模拟珠三角城市化对雷暴天气的影响, 发现了雷暴系统的发展和演变与“城市热岛”的效应以及城区粗糙度增大有密切关系。Changnon^[5]和 Landsberg^[6]发现在暖季城市下风向降水增加 9% ~ 17%。Marshall 和 Pielke^[7]采用 1900 年以前和 1993 年的土地利用资料, 利用 RAMS 模式分别模拟了佛罗里达半岛在 1973、1989 和 1993 年暖季 (7 月、8 月) 的气候要素, 发现土地利用改变后, 夏季最高温度上升, 对流降水减少, 土壤水汽含量减少。

珠三角位于我国南方, 常住人口超过 5000 万, 20 多年来, 珠三角的土地利用有了巨大的改变, 原来的农、林、渔用地正逐渐被城市用地所取代, 拥有香港、深圳、广州、澳门、佛山、惠州、江门、中山、珠海、东莞等主要城市, 形成了一个大的城市群。近几年来珠三角土地利用对气候影响的研究是当前一个热点和重点, 研究多集中在城市热岛效应以及引起的局地环流, 如陈晓玲等^[8]利用卫星遥感对珠三角的热岛效应做了研究; 而城市化对降水量以及降水分布改变的研究则比较少。林文实^[9]在 2006 年对城市化对珠三角秋季 (2004 年 10 月) 月平均气候要素的影响进行模拟研究, 结果表明, 由于城市扩张, 地面气温、感热通量和行星边界层高度增加, 混合比和潜热通量减少。

本论文的研究是在林文实等^[9]的基础上, 通过数值模拟及其与观测资料的比较, 讨论在不同地表资料的情况下, 月平均地面温度、月总降水量、月平均地面水汽含量、月平均相对湿度 (模式最低层)、月平均地面感热通量和潜热通量等要素的差异, 目的是为了探讨珠三角土地利用对夏季月平均气候要素的影响。

1 模式、试验设计和资料

本文采用美国宾州大学和美国国家大气研究中心开发的中尺度非静力模式 MM5v36^[10]来模拟珠三角土地利用变化对夏季月气候要素的影响。模拟试验采取 Mercator 地图投影的三重双向嵌套网格, 最细分辨率为 3 km。模拟区域的中心位于 (114.0°E, 24.0°N), 见图 1 (a)。模拟区域 D01 的格点数为 97 × 97, 格距为 27 km; 模拟区域 D02 的格点数为 97 × 97, 格距为 9 km; 模拟区域 D03 的格点数为 73 × 73, 格距为 3 km。垂直方向分为 31 σ 层。模式顶层为 50 hPa。

模式的 3 个模拟区域均采用 MRF 行星边界层方案和 CCM2 辐射参数化方案。陆面模式选择 Noah LSM 方案^[11]。显式云微物理方案在模拟区域 D01 采用简单冰相 Dudhia 方案^[12], 在模拟区域 D02 和 D03 都采用 Reisner 方案^[13]。积云参数化在模拟区域 D01 和 D02 中采用 Grell 方案^[10], 在模拟区域 D03 中由于网格可以分辨出云尺度物理量, 不采用任何积云对流参数化方案。在最粗的模拟区域 D01 采用四维资料同化方法 (FDDA)。

将美国环境预报中心 (NCEP) 全球一天 4 次 1° × 1° 分辨率的再分析资料^[14]水平插值到粗网格区域 D01 (27 km 水平分辨率), 垂直插到 31 层 σ 面上作为背景场。模拟时间从 2005 年 5 月 15 日 00 时至 2005 年 7 月 01 日 00 时, 积分 48 d。由于利用气候月平均土壤温度和湿度资料作为 Noah LSM 陆面模式的初值场, 为避免初值 “spin-up” 的影响, 剔除前 17 d 的模拟结果, 只采用 2005 年 6 月时间段 (即 2005 年 6 月 1 日 00 时至 2005 年 7 月 1 日 00 时) 的模拟结果进行分析。在模拟区域 D01、D02、D03 积分步长分别为 60、20、6.7 s。

为了探讨土地利用对气候的影响, 设置了 3 个模拟试验, 分别为试验 FL、试验 UL 和试验 PL, 分别在最细模拟区域 D03 采用了不同的 1 km 分辨率的地表资料做试验, 模拟区域 D01 和 D02 采用相同的 10 km 分辨率地表资料。其中试验 FL 采用美国地理测量局 (USGS) 提供的 1993 年土地利用资料, 试验 UL 则是采用了 2000 年珠江三角洲的城市景观资料, 试验 PL 则采用了 2000 年珠江三角洲土地利用资料。这 3 个试验仅是在模拟区域 D03 城市地表资料有不同, 试验的其它参数设置完全一致, 见图 1 (b-d)。UL 试验相对于 FL 试验, 城市区域有了很大的扩展, 设置此试验是为了评估城市化的影响。PL 试验与 FL 试验土地利用的不同则主

要表现在 3 个方面：城市扩展显著；顺德鱼塘水面面积增大；珠江三角洲地区灌溉用地减少，旱地大大增加。土地利用改变后，相应植被类型的夏季物理参数发生了改变，如反射率、粗糙度、土壤热力

性质等。如灌溉农田被城市取代后，反射率由 18% 下降到 15%，土壤含水量由 50% 下降到 10%，粗糙度由 15 上升到 50 cm。

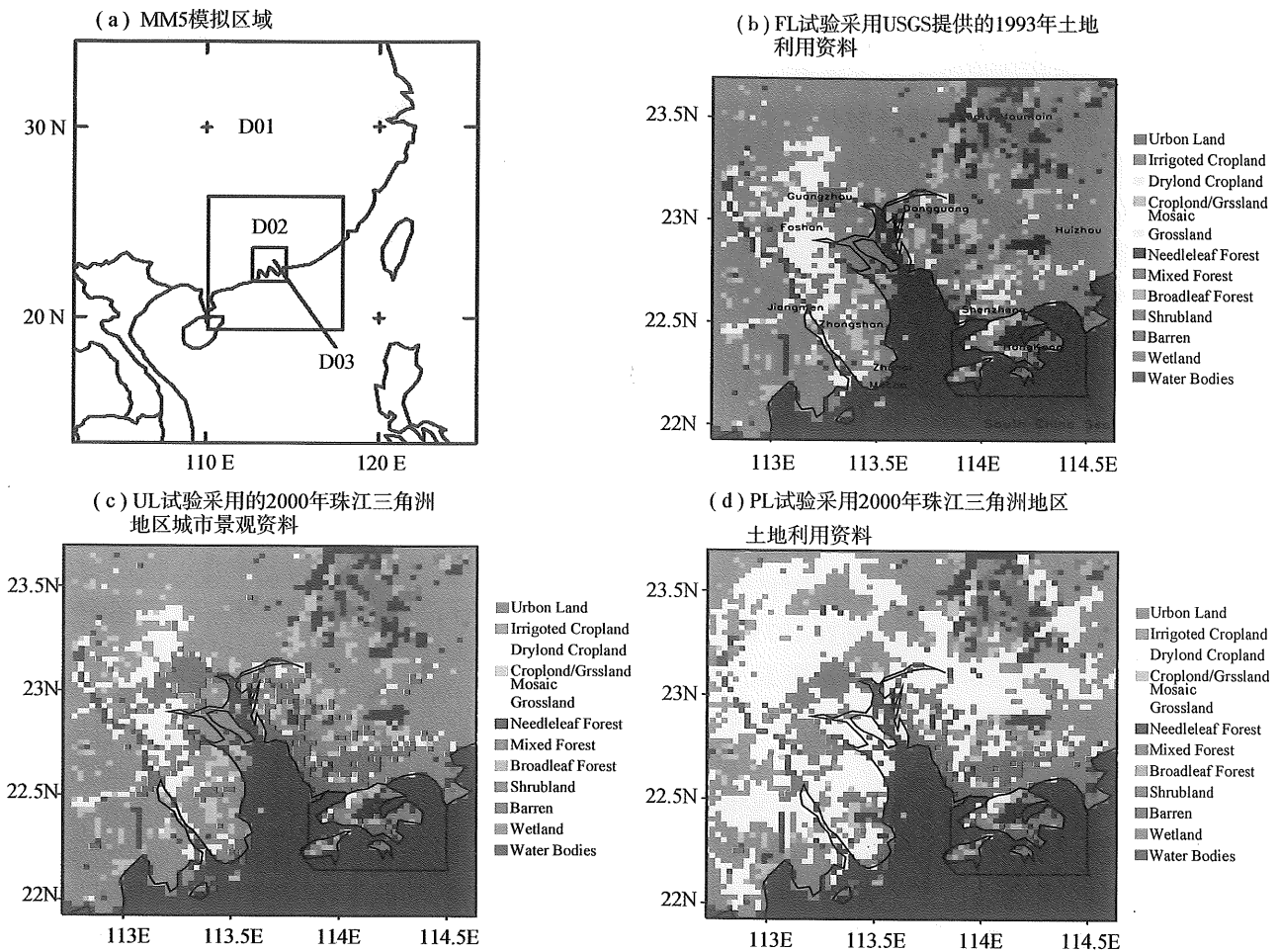


图 1 MM5 模拟区域和 D03 土地利用情况 (红色表示城市地表)

Fig. 1 Computed domains and land use datasets used for MM5 simulations

2 天气形势分析

2005 年 6 月全国降水量比常年同期偏多，平均气温较常年同期偏高。其中广东中北部月降水量偏多 1~2 倍，珠江三角洲地区也较常年升高 50%~100%。该月广东地区月平均温度与往年差异不大。该月华南地区有几次强的降水过程。在 6 月 18-25 日，受高空槽、切变线、西南季风和冷空气的共同影响，广东、广西等华南地区出现了大范围的持续性暴雨、大暴雨，局部特大暴雨的天气，广东省最强降水中心位于河源-龙门-新丰一带，次中心位于珠江口两侧沿海地区。惠州市龙门县录得过程累积雨量 1 300.2 mm，汕尾市海丰县、河源市、韶关市新丰县分别录得 868.4、722.0 和

600.1 mm 过程累积雨量^[15]。

2005 年 6 月只有一个热带风暴纳沙生成，对广东影响很小，同时该月珠江三角洲地区降水量很大，故选取该月的模拟结果分析土地利用变化对珠江三角洲地区夏季月气候的影响。

3 土地利用变化对夏季月气候要素的影响

3.1 地面气温

图 2a 是实际观测到的广东省 2005 年 6 月月平均气温分布图。由图 2b 可知，FL 试验在 D02 区域模拟的月平均气温分布形势与实际观测大体符合较好，在珠三角地区最高温度都是 28℃，但在粤西地区模拟气温都偏低。

在模拟的 D03 区域，如图 3，UL 试验中城市扩展区域温度明显上升，PL 试验较 FL 试验在郊区温度有显著的升高（图 3a，3b），UL 试验在珠江三角洲城市区域的月平均气温较 FL 试验要普遍高出 0~0.3℃，在广州、深圳、东莞等城市扩展区域高出 0.6~0.9℃，凸显了城市化导致的热岛效应。在 PL 试验中珠江三角洲地区的郊区，月平均温度上升 0~0.3℃，可能是由于旱地的土壤含水量相对于灌溉农田等的土壤含水量有较大的降低，导致地表植被潜热蒸发降温的能力减小，从而地表

温度上升，感热通量增加，进一步加热了近地面大气。而在 PL 试验中，在佛山的郊区月平均温度则小幅度的降低 0.2℃ 左右，这可能是因为在佛山地区大量农田被水产养殖的池塘代替，在试验中该地区被设置为湿地，湿地的热力惯性较大，定容比热容较大，湿地上升的温度也要较原来植被小，则向上传输的热量要较原来的植被小。另外城市扩张等的土地利用变化，导致珠江三角地区月平均地面最高气温升高，月平均地面最低气温降低（图略）。

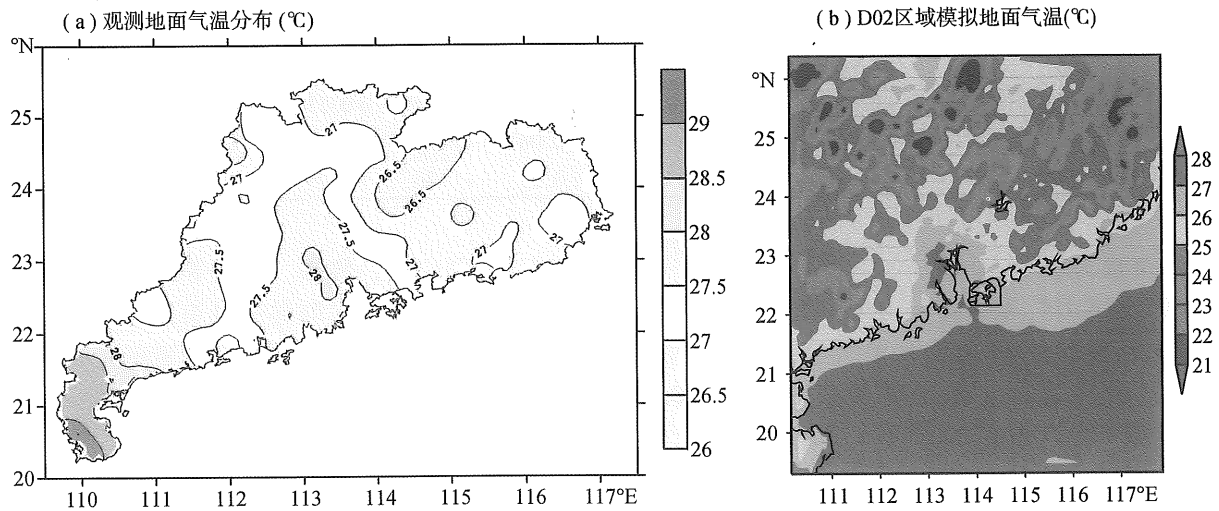


图 2 广东省 2005 年 6 月观测和模拟区域 D02 的月平均地面气温分布
 Fig. 2 Monthly average 2-m temperature of June 2005. Observed (a) and simulated (b) in domain D02 of Experiment FL

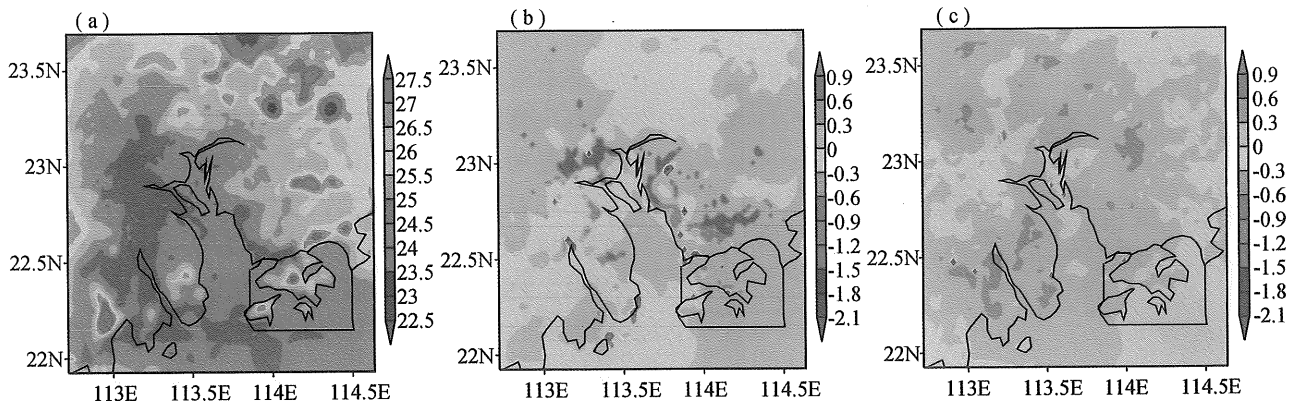


图 3 (a) FL 试验模拟的区域 D03 的月平均地面气温分布，(b) UL 试验和 FL 试验的月平均的地面温度之差，(c) PL 试验和 UL 试验的月平均的地面温度之差（单位：℃）

Fig. 3 (a) Simulated monthly average 2 m temperature of June 2005 in domain D02 of Experiment FL (unit:℃)
 (b) The difference of temperature between experiments in domain D03 between UL experiment and FL experiment;
 (c) The difference of temperature between experiments in domain D03 between PL experiment and UL experiment

表 1 表明, 模式结果显示相对于 FL 试验, 在 D03 整个区域、陆面区域以及城市区域, UL 试验和 PL 试验的月平均地面气温都有上升, 且 PL 试验的增幅都强于 UL 试验。同时相比于 FL 试验, UL 试验和 PL 试验的月平均日最高地面气温在 3 个区域都有上升, 相反月平均日最低气温都有降低。

可见在 UL 试验和 PL 试验的地面温度日变化振幅较 FL 试验加大, 在城市区域更是分别加大了 1.83 °C 和 1.9 °C。

由以上的讨论可知, 土地利用改变尤其是城市扩展, 导致地面气温的上升, 且其引起的极端气温变化较平均气温更加剧烈。

表 1 三个试验在 D03 区域、陆面区域、城市区域模拟的月平均气候要素值之差

Table 1 The areal mean values of key variables in the PBL from the three experiments subject to three different landuse conditions

平均变量	模拟区域平均			陆面区域平均			城市区域平均		
	UL-FL	PL-FL	PL-UL	UL-FL	PL-FL	PL-UL	UL-FL	PL-FL	PL-UL
	°C								
气温	+0.03	+0.09	+0.06	+0.05	+0.14	+0.09	+0.32	+0.37	+0.05
最高气温	+0.19	+0.28	+0.09	+0.23	+0.36	+0.13	+1.45	+1.57	+0.12
最低气温	-0.06	-0.02	+0.04	-0.08	0.00	+0.08	-0.38	-0.33	+0.05
气温日变化幅度	+0.25	+0.3	+0.05	+0.31	+0.36	+0.05	+1.83	+1.90	+0.07

4.2 月降水

2005 年 6 月广东省地区出现了大范围持续的降水, 尤其在 6 月 18 - 25 日期间的暴雨过程中, 广东省惠州市龙门录得过程累积雨量 1 300.2 mm^[15]。图 4 为广东省 2005 年 6 月的降水总量分布, 最强降水中心位于河源 - 龙门 - 新丰一带, 最大值高达 160 cm, 次中心位于珠江口两侧沿海地区的汕尾、珠海斗门区和金湾区, 最大值分别达到 110 和 70 cm。模拟的月降水总量表明 (图略), 3 个试验广东省的强降水中心位置模拟都比较好, 但最大降水量只达 120 cm 左右。

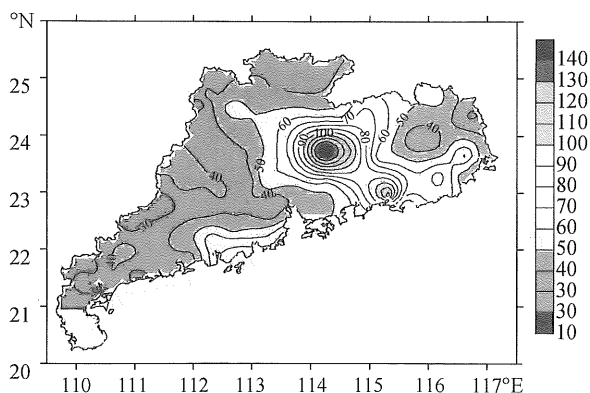


图 4 广东省 2005 年 6 月观测的月降水总量分布

Fig. 4 Observed monthly average precipitation of June 2005

总的说来, UL 试验模拟的 2005 年 6 月的月降水总量在城市扩展地区较 FL 试验增加, 并使模拟的珠江三角洲地区整个降水分布形势与实际情况更符合。在城市扩展的基础上改变了郊区的土地

利用后, 则广州、佛山、江门等城市区域降水增加, 东莞、珠海和深圳部分城市区域降水是减少的, 可见土地利用的改变对降水量的变化响应极大, 见图 5a 和图 5b。PL 试验降水模拟效果的有待提高, 具体原因需要更进一步的探讨。

4.3 土地利用变化引起的城市热岛效应

在本文中城市热岛 (UHI) 强度定义为在城市区域地面月平均温度与郊区所有海拔在 100 m 以下区域月平均温度之差。在 UL 试验中, 所有海拔低于 100 m 的郊区月平均地面温度值为 26.62 °C, 所有城市区域的月平均地面温度值为 27.19 °C, 月平均的热岛效应强度为 0.57 °C; 由图 6 可知, UL 试验热岛效应最强是在当地时间的 13:00, 城市区域要高出郊区 1.32 °C, 在当地时间的 06:00, 热岛效应最弱, 强度只有 0.16 °C。在 PL 试验中, 郊区月平均温度为 26.74 °C, 要较 UL 试验高 0.12 °C; 城市区域为 27.25 °C, 要较 UL 试验高 0.06 °C, 可见土地利用的改变要比单纯城市地表的改变对地面温度的贡献要大 (图 7)。PL 试验的月平均热岛效应强度达到了 0.51 °C, 较 UL 试验略低, 同 UL 试验一样, 热岛效应最强是在当地时间的 13:00, 最弱是在 06:00。图 8 为 PL 试验和 UL 试验热岛强度之差, 可以看出 PL 试验的热岛强度要比 UL 试验月平均低 0.06 °C, 尤其是在当地时间的 17:00 左右。但总的说来, 在城市扩展的基础上进一步改变郊区土地利用, 虽然没有强化城市的热岛效用, 但同时提升了城市和郊区所有区域的地面温度, 使珠江三角洲地区的地面温度进一步升高。

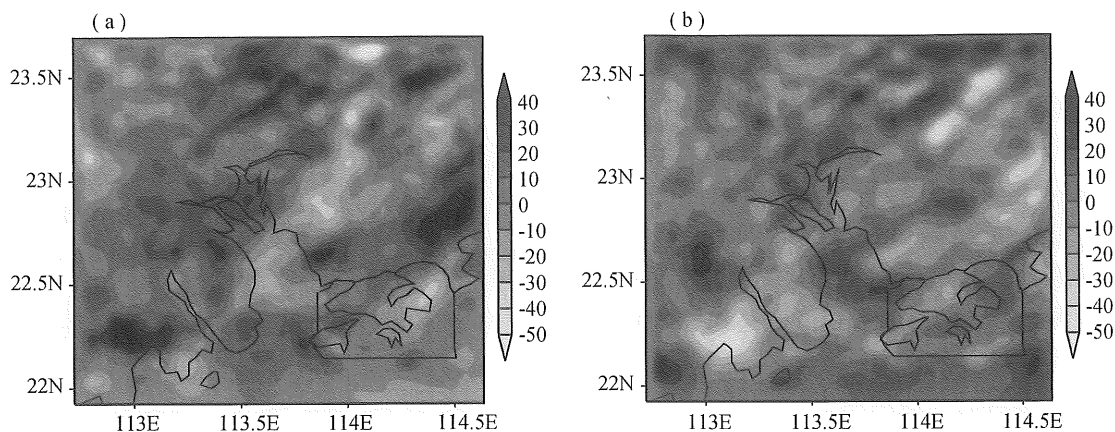


图 5 (a) UL 试验和 FL 试验的月降水总量之差, (b) PL 试验和 UL 试验的月降水总量之差 (cm)
 Fig. 5 (a) The difference of monthly precipitation in domain D03 between UL experiment and FL experiment;
 (b) The difference of monthly precipitations in domain D03 between PL experiment and UL experiment

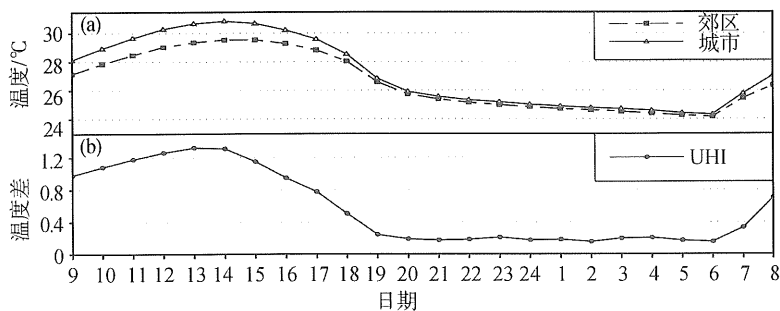


图 6 (a) UL 试验在 D03 城市区域和海拔低于 100 m 的郊区月平均地面温度日变化, (b) UL 试验的热岛强度
 Fig. 6 (a) The monthly 2-m temperature diurnal cycle in the urban area and rural area at the altitude lower than 100 meters; (b) The Intensity of Urban Heat Island (UHI) in experiment UL

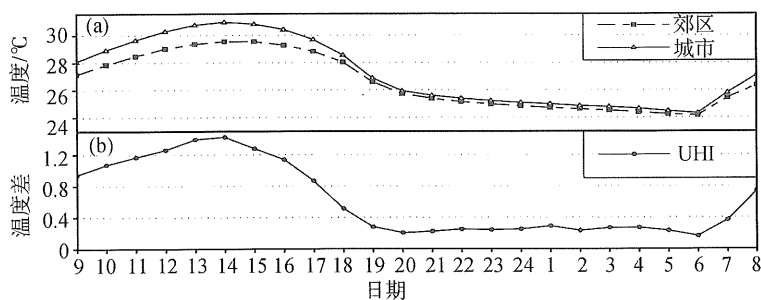


图 7 (a) PL 试验在 D03 城市区域和海拔低于 100 m 的郊区月平均地面温度日变化, (b) PL 试验的热岛强度
 Fig. 7 (a) The monthly 2 m temperature diurnal cycle in the urban area and rural area at the altitude lower than 100 m; (b) The Intensity of Urban Heat Island (UHI) in experiment PL

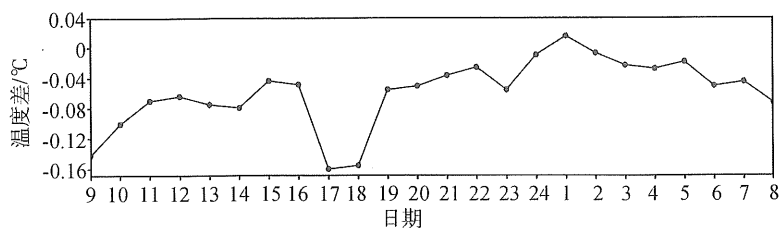


图 8 PL 试验和 UL 试验热岛强度之差
 Fig. 8 The difference of the UHI between experiment PL and experiment UL

5 结 论

本文利用中尺度非静力模式 MM5, 采用 3 份不同的地表资料, 一份是美国地理测量局 (USGS) 提供的 1993 年土地利用资料, 另两份则是采用了 2000 年珠江三角洲的城市景观资料和土地利用资料, 较好的模拟了 2005 年 6 月珠江三角洲城市扩展等土地利用改变对月气候要素影响。模拟结果表明: 在珠江三角洲地区, 城市扩展导致的热岛效应显著。在郊区的土地利用进一步发生变化后, 提升了珠江三角洲地区的地面气温。可见土地利用改变尤其是城市扩展, 导致地面气温的上升, 且其引起的极端气温变化较平均气温更加剧烈。

由 UL 试验可知城市扩展对珠江三角洲城市区域降水有加强的作用, 在加入城市地表资料后, 对珠江三角洲地区月降水总量的模拟有显著的改善作用; 在城市扩展的基础上改变了郊区的土地利用后, 广州等城市地区月降水量有较大增加, 部分城市区域的降水则是减少的。

本文对土地利用改变导致珠江三角洲地区气候要素变化做了探讨, 但缺乏对人为排放温室气体等其它人为的因素进行数值模拟试验。还需提高数值模拟方法, 进行更多的数值试验来分析人类活动导致的气候变化, 以及各种因素之间的相互影响。未来在土地利用影响气候方面的工作, 可以包括其他季节的模拟, 进行多年积分和对结果进行统计显著性检验^[16]。

致谢 本文使用的 2000 年城市地表资料由中国科学院资源环境科学数据中心提供。计算在中山大学网络与信息技术中心的高性能与网格平台上完成的。

参考文献:

[1] 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 城市化效应对北京市短时降水特征的影响[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 68-72.

[2] 周建康, 黄红虎, 唐运亿, 等. 城市化对南京市区域降水量变化的影响[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 44-46.

[3] GUO Xueliang, FU Danhong, WANG Jing. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City[J]. Atmospheric Research, 2006, 82: 112

- 126.

[4] 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 364-376

[5] CHANGNON Jr S A. The La Port weather anomaly-fact or fiction? [J] Bull Amer Meteorol Soc 1968, 49: 4-11.

[6] LANDSBERG H E. Man-made climate changes[J]. Science, 1970, 170: 1265-1274.

[7] MARSHALL C H, PIELKE Sr R A. The impact of anthropogenic land-cover change on the Florida Peninsula sea breezes and warm season sensible weather[J]. Monthly Weather Review, 2004, 132: 28-52.

[8] CHEN Xiaoling, ZHAO Hongmei, LI Pingxiang, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 133-146.

[9] LIN W S, SUI C H, YANG L M, et al. A numerical study of the influence of urban expansion on monthly climate in dry autumn over the Pearl River Delta, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 89: 63-72.

[10] GRELL G A, DUDHIA J, STAUFFER D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)[R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398 + STR, National Center for Atmospheric Research, 1994, Boulder, Co: 117.

[11] CHEN F, DUDHIA J. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 2001, 129: 569-585.

[12] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. J Atmos Sci, 1989, 46: 3077-3107.

[13] REISNER J, RASMUSSEN R M, BRUINTJES R T. Explicit forecasting of super-cooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1998, 124: 1071-1107.

[14] KISTLER R, KALNAY E, COLLINS W, et al. The NCEP-NCAR 50-year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2001, 82: 247-268

[15] 马慧, 陈桢华. 2005 年 6 月华南暴雨的气候背景[J]. 广东气象, 2005, (4): 14-16.

[16] 高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 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, 2007, 37: 397-404.