

珠江三角洲城市尺度规划对大气环境的影响效应*

王雪梅¹, 陈燕², 蒋维楣³, 吴志勇¹, 林文实¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;
2. 江苏省气候中心, 江苏 南京 210008; 3. 南京大学大气科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 为探讨城市尺度规划对局地气象环境的影响, 以珠江三角洲不同时期的下垫面为例, 选取2001年3月的气象条件, 采用数值模拟手段, 模拟并分析比较该地区城市群的发展对城市气象环境的影响。结果表明, 珠江三角洲城市化发展过程带来热岛强度和范围的扩大, 城市区域风速减小, 小风面积增大。利用城市尺度规划大气环境评估体系, 对广州城市发展规划进行评估, 给出影响和优劣比较的定量结果, 城市发展对气象环境影响较明显的是城市热岛强度、小风区分布、大气自净能力3个指标, 即城市热岛增强, 风速减小, 大气的自净能力下降。综合评价指数表明在不利天气条件下, 城市化过程带来的大气环境影响较大。

关键词: 大气环境影响效应; 城市尺度规划; 珠江三角洲

中图分类号: X22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)06-0115-06

Impacts of Urban Planning on Atmospheric Environment over the Pearl River Delta Region

WANG Xuemei¹, CHEN Yan², JIANG Weimei³, WU Zhiyong¹, LIN Wenshi¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Climate Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China;
3. Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The data collected from the Pearl River Delta were used to study the impact of urban planning on local meteorology. The results show that urban heat island became stronger and the influenced area was larger compared with pre-urban situation. Wind speed decreased and light wind speed area increased. The influence of Guangzhou urban planning was assessed based on atmospheric environmental assessment indices. The apparent influencing indices are urban heat island intense, distribution of light wind speed and atmospheric self-clear capability. With urban expansion, urban heat island became stronger, wind speed decreased and atmospheric self-clear capability decreased. The integrated analysis shows that urban expansion has obvious influence on atmospheric environment.

Key words: urban scale planning; atmospheric environment effect; the Pearl River Delta

城市是一个建筑林立, 生态环境次生人工化的环境, 城市对局地气象条件以及污染物扩散的影响是由其下垫面特征决定的, 主要表现在: 建筑物对气流有摩擦阻力作用、阻止作用, 城区风速明显低于郊区, 造成城市通风能力下降, 导致城市大气污

染浓度成倍地增加。由于城市下垫面的热力性质和人类活动的影响, 形成城市热岛, 导致小风情况下, 气流向市中心汇集, 从而引起城区内大气污染物的累积, 加重大气污染^[1-4]。而城市规划是城市建设和发展的蓝图, 是建设和管理城市的基本依

* 收稿日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U0833001, 40875076); 国家教育部留学回国基金资助项目(4125310); 广州市环境保护局科技项目(4205296)

作者简介: 王雪梅(1969年生), 女, 副教授; E-mail: eeswxm@mail.sysu.edu.cn

据。和国外相比,我国现阶段经济社会快速发展和城市化已导致部分城市环境质量急剧恶化,城市空气污染严重,城市及区域生态系统受到了严重的威胁,严重地制约经济和社会的持续发展,在这种背景下,如何更合理的实施城市规划以实现城市的可持续发展,减少规划建设过程中带来的人为的负面影响是目前发展过程中有待解决的问题。因此除了建立一种长远的、有序可持续发展的城市规划运作和管理机制外,发展和完善城市规划科学的理论、方法与实施是我国城市化进程中的迫切要求。由于城市规划是一门复杂的综合学科,本文仅以城市规划与气象环境为结合点,以珠江三角洲为例,利用数值模拟手段研究珠江三角洲区域在城市发展过程中,不同下垫面情况对该区域内城市气象环境的影响;利用大气环境评估指标体系^[5],确定了易于量化的多个单项评估指标,以期为城市群或都市圈

的经济布局与发展决策提供参考。

1 数值模式和模式验证

1.1 数值模式

WRF (Weather Research and Forecast) 是继 MM5 之后的新一代中尺度气象模式。本文选取的模拟区域涵盖了整个珠三角,模式中心点选在 23.2°N、113.6°E,水平格局为 12 km,格点数为 37 × 37,垂直方向分为 24 层,顶层为 100 hPa。模拟区域使用了两套不同的土地利用资料,分别为美国地质调查局 (USGS) 提供的 1993 年 1 km 分辨率资料 (如图 1a) 和基于 2004 年 500 m 分辨率的 MODIS 卫星影像的土地利用资料 (如图 1b)。1 km 分辨率的 USGS 和 MODIS 资料采用相同的方法整合到水平格距为 12 km 的模拟区域上。

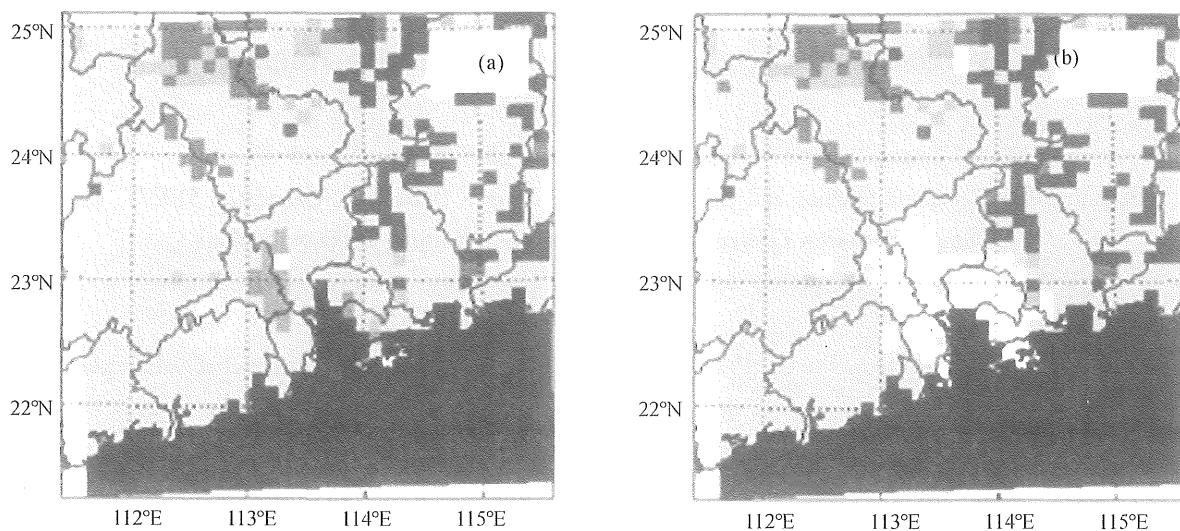


图 1 模拟区域土地利用类型 (a) 城市化前; (b) 城市化后; (a) 与 (b) 唯一的不同只在于城市部分 (标记为白色)

Fig. 1 Land cover in the model domain. (a) pre-urbanization; (b) urbanization;

The difference between (a) and (b) is urban area shown in white color.

珠江三角洲是广东省城市和人口最密集的地区之一,近 20 年来,珠江三角洲地区已形成既有特大城市、又有中小城市相连的城市群,为了研究珠江三角洲城市群的形成与发展对气象环境的影响,利用了历史和现状 2 种不同下垫面条件,将 MODIS 中城市部分替换 USGS 中的相应下垫面的数据,其它土地利用类型保持不变,因此图 1a 和 1b 的不同只在于城市部分,前者反映了 20 世纪 90 年代初珠三角地区城市的分布 (主要是广州和香港),后者则反映了目前的城市分布。从图 1 可以看出,珠三角以广州、佛山、东莞和深圳为中心经历了快速

的城市扩张,并且城市分布非常密集,形成了珠三角城市群。珠三角的城市扩张主要是水田和草地、灌木向城市转变的过程,土地利用类型不同,其物理性质也不同。本次模拟时间为 2001 年 3 月 1 日 0000UTC 至 2001 年 3 月 30 日 230000UTC,初始和边界条件由 1° × 1° NCEP 再分析资料提供,并内插至模拟区域。

在模拟中选取的物理参数化方案包括: NCEP 5 类微物理过程参数化方案^[6], 新 Kain-Fritsch 积云对流方案^[7], Dudhia 短波辐射方案^[8], RRTM 长波辐射方案^[9], YSU 边界层方案和 Noah 陆面过

程方案^[10-11]。Noah 陆面过程方案提供感热通量、潜热通量和地表表层温度作为 WRF 模式的下层边界条件。为了表征出城市下垫面的热力和动力效应，将 Kusaka (2001) 和“Kusaka 与 Kimura” (2004) 的单层城市冠层模型 (UCM) 与 Noah 方案进行了耦合。

因此，在本次研究中利用 WRF 模式进行了 2 次模拟试验，第 1 次采用 1993 年 USGS 的土地利用资料 (此后称为城市化前)，第 2 次采用 2004 年 MODIS 的土地利用资料 (此后称为城市化后)，两次试验采用的物理方案和初始和边界条件均相同，唯一的不同只在于土地利用资料。

1.2 模拟结果的验证

利用模拟区域的气象观测资料对 URBAN 试验的模拟结果进行验证，利用的气象观测资料时段为 2001 年 3 月 1-30 日，每日数据包括 00、06、12 和 18 时 (UTC 时间) 4 个时间点。计算了 2 m 温度、相对湿度和风速的偏差 (bias)、平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和命中率 (Hit Rate, HR)，bias 和 MAE 均满足 95% 的置信区间，2 m 温度、相对湿度和风速的 HR 计算标准分别为 2 °C、1 m/s、2 g/kg。如表 1 所示，对比 22 个区域台站的资料，相对湿度和 2m 温度的命中率都超过了 50%，由于本研究中对风速命中率的计算标准取为 1 m/s，相对较严格，其命中率为 30%，模拟结果可以反映实际大气的情况。

表 1 各气象要素的模拟值与观测值的对比

Table 1 Comparison of simulation and observation for meteorological variables

要素	站点数/个	bias	MAE	RMSE	HR
2 m 温度	22	0.7	1.8	2.3	0.627
相对湿度	22	-5.3	10.5	13.5	0.859
风速	19	1.3	2.0	2.6	0.303

2 大气环境评估指标体系

城市规划大气环境影响评估是大气环境评价的重要内容之一，建立城市大气环境影响评估体系的目的是要提供一个科学的、可供操作的评估手段，以便能对城市规划建设对气象环境带来的影响有效的进行多层次多因素的评估，参照层次分析法，可以把城市规划-气象条件-大气环境归结成一个层次体系，最高层次的综合评估指标指明了城市规划对气象条件和大气环境的影响程度，综合指标向下

分为单项评估分指标，针对城市尺度评估范围的特点，从环境气象条件和污染物扩散两方面，确定了热岛强度、混合层高度、逆温层持续时间、小风区分布、自净时间等 5 个评估分指标 (见图 2)，将以上分指标进行加权，获得城市尺度的综合评估指标，具体见文献 [5]。

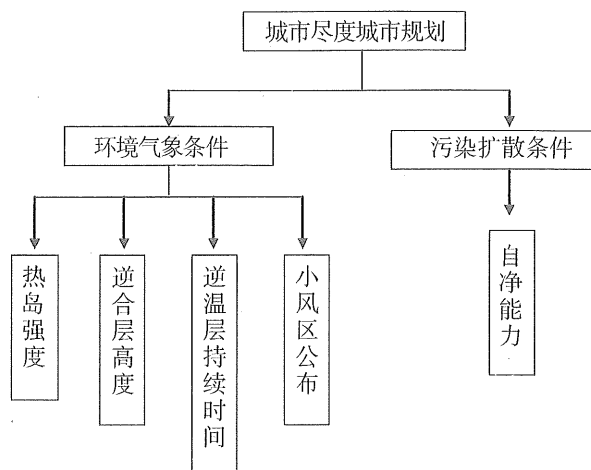


图 2 城市尺度规划对大气环境影响评估定量示意图

Fig. 2 Flowchart for the impact of urban planning on atmospheric environment

图 2 给出了城市尺度规划对大气环境影响评估定量指标体系的总框架，其中单项评估指标分别解释如下：

(1) I_1 : 热岛强度。城市规划将影响地面的温度和气温的水平、垂直分布，从而影响污染物的混合扩散过程。根据模式计算结果，可以分析其具体的影响程度和影响后的分布特征，热岛强度、混合层高度、逆温层持续时间这 3 个分指标主要就是分析城市规划对地面温度和气温影响的定量指标。

在首先获取城市以外的平均温度 T_0 的基础上，根据城市温度 (2 m 高度) 与 T_0 差值的大小来衡量热岛强度，按将城市热岛强度分为强、中等、弱、无 4 个等级，他们与城市以外区域温差 (°C) 依次为 >2.5 、 $2.5 \sim 1.5$ 、 $1.5 \sim 0.5$ 和 ≤ 0.5 。

热岛强度指标由 2m 高度热岛强度等级为“无”及“弱”的区域所占的面积百分比来衡量，最终确定热岛强度无量纲评估分指标 (I_1) 的标准见表 2。

(2) I_2 : 混合层高度。混合层高度，是地面上空某一给定区域污染物可发生混合的垂直距离，即空气污染物可以上升的最大高度，混合层高度越

高,越有利于污染物垂直方向的扩散,混合层高度是决定地面污染浓度的重要因子。

本指标用评估区域混合层平均高度来衡量,根据混合层平均高度的数值范围确定混合层高度无量纲评估分指标 (I_2) 见表 2。

(3) I_3 : 逆温层持续时间。大气稳定度是影响空气污染物的热力因素。逆温层大气非常稳定,可阻止混合层空气与上层空气的混合,污染物停留在低层空间,无法向上扩散,如果同时遇到不利的天气和地形,就容易发生污染事故。而当大气处于不稳定状态时,向上排放的污染物易于上升,迅速与高空的清洁空气混合,有利于稀释扩散。

本指标以评估区域逆温层持续时间来衡量,根据逆温层持续时间的数值范围确定逆温层持续时间无量纲评估分指标 (I_3) 见表 2。

(4) I_4 : 小风区分布。本指标用 10 m 高度上,评估区域风速 ≤ 1 m/s 的区域所占的面积比例来衡量,该指标一定程度上反映了城市污染物混合扩散能力。

最终确定小风区分布无量纲评估分指标 (I_4) 的标准见表 2。

(5) I_5 : 自净能力。自净能力表征污染物在大气中的输送与扩散能力。具体公式如下:

$$F = \frac{C_0 - C}{C_0}$$

其中, C_0 为某污染物环境质量标准, C 为某污染物日均浓度,利用 $F > 30\%$ 的区域所占的面积百分比来衡量,最终确定大气自净能力无量纲评估分指标 (I_5) 的标准见表 2。

表 2 评估定量指标体系中单项评估指标

Table 2 Single evaluated index in assessment system

评估分指标	1	2	3	4	5
热岛区域面积百分比	$p \leq 20$	$20 < p \leq 40$	$40 < p \leq 60$	$60 < p \leq 80$	$p > 80$
混合层高度范围	$p \leq 150$	$150 < p \leq 350$	$350 < p \leq 600$	$600 < p \leq 900$	$p > 900$
逆温层持续时间	$c > 12$	$10 < c \leq 12$	$6 < c \leq 10$	$2 < c \leq 6$	$c \leq 2$
小风区面积百分比	$p > 80$	$60 < p \leq 80$	$40 < p \leq 60$	$20 < p \leq 40$	$p \leq 20$
自净能力 $F > 30\%$ 区域所占的面积百分比	$p \leq 20$	$20 < p \leq 40$	$40 < p \leq 60$	$60 < p \leq 80$	$p > 80$

将以上分指标进行加权,获得城市尺度的综合评估指数 I :

$$I = 0.3 \times I_1 + 0.1 \times I_2 + 0.1 \times I_3 + 0.1 \times I_4 + 0.4 \times I_5$$

3 大气环境影响效应研究在规划实践中的应用

3.1 气象环境特征的变化

图 3 为用城市化前和城市化后 2 种下垫面模拟得到的整个珠江三角洲地区地面 2 m 高度温度场的月平均值及其差值。从图 3 可以明显看到城市化过程使得珠江三角洲热岛面积扩大,强度增大。同城市化前的情况相比,广州南部、佛山、东莞、深圳的温度增加了 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 左右,增温的区域与城市化扩张的区域相吻合,并且有向外辐散的趋势。陈燕等^[12]在珠江三角洲针对两种下垫面选择冬季典型天气的研究也同样发现,城市化后城市热岛面积和强度明显的加强。

图 4 为 2 种下垫面模拟得到的整个珠江三角洲地区月平均地面 10 m 高度风速等值线图,可以看

出城市化前,广州和佛山地区风速比东莞和深圳小,在 $3.5 \sim 4.5$ m/s 之间;城市化后(图 4b),广州南部、佛山、东莞的平均风速只有 2.2 m/s,深圳和香港由于靠近海边,平均风速仍然可以达到 3.0 m/s;从风速的差值区域也可以明显的看出,与城市化发展相对应的区域,风速有明显的减小,广州南部、佛山、东莞和深圳风速减小约 2.5 m/s,由于城市化的影响,这些城市的外围风速也有明显的减小,减小可达 1 m/s。

3.2 大气环境评估指标体系的应用

根据前述第 2 节大气环境评估指标体系中的方法,利用模拟结果计算了广州市城市化前后对大气环境的综合效应,见表 3。由表中的指数值可以看出,城市化对气象环境影响较明显的是城市热岛强度、小风区分布、大气自净能力。广州城市化带来的结果是城市热岛增强,风速减小,大气的自净能力下降。综合评价指数表明在不利天气条件下,城市化过程带来的影响较大。

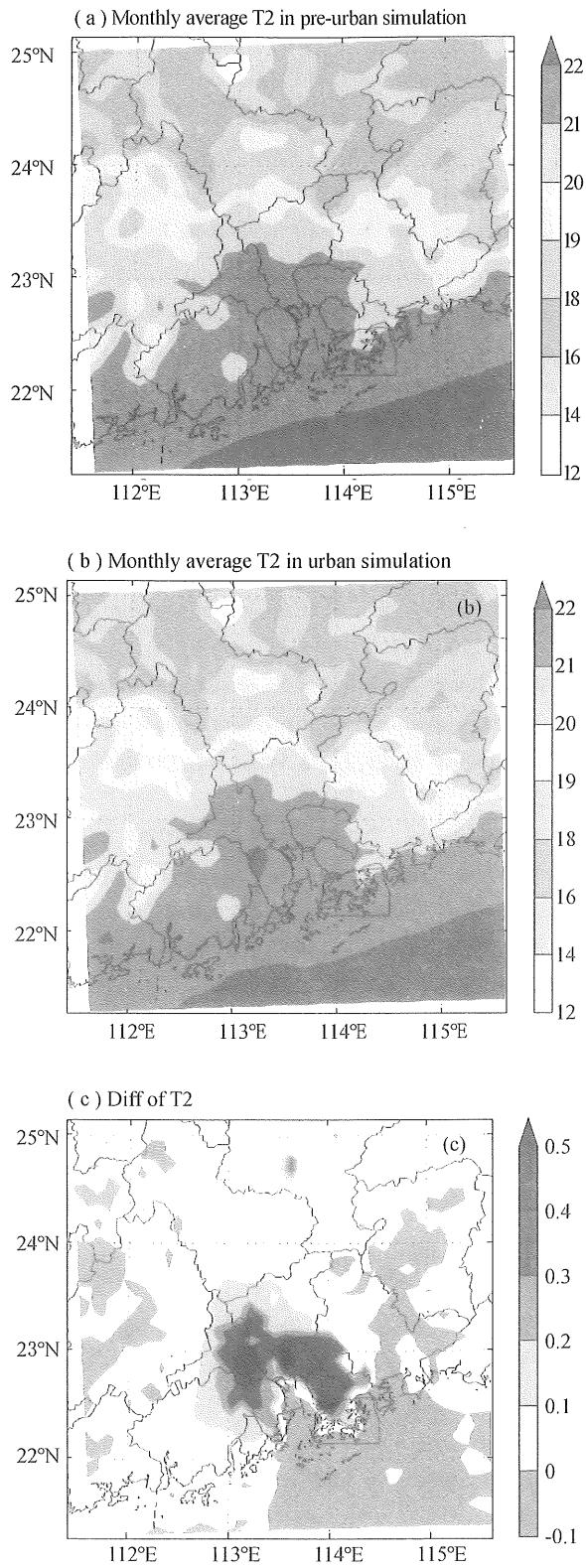


图 3 月平均地面 2 m 高度温度场及
城市化后与城市化前的差值
(a) 城市化前; (b) 城市化后; (c) 差值
Fig. 3 Monthly averaged 2-m temperature and
difference between urbanization and pre-urbanization

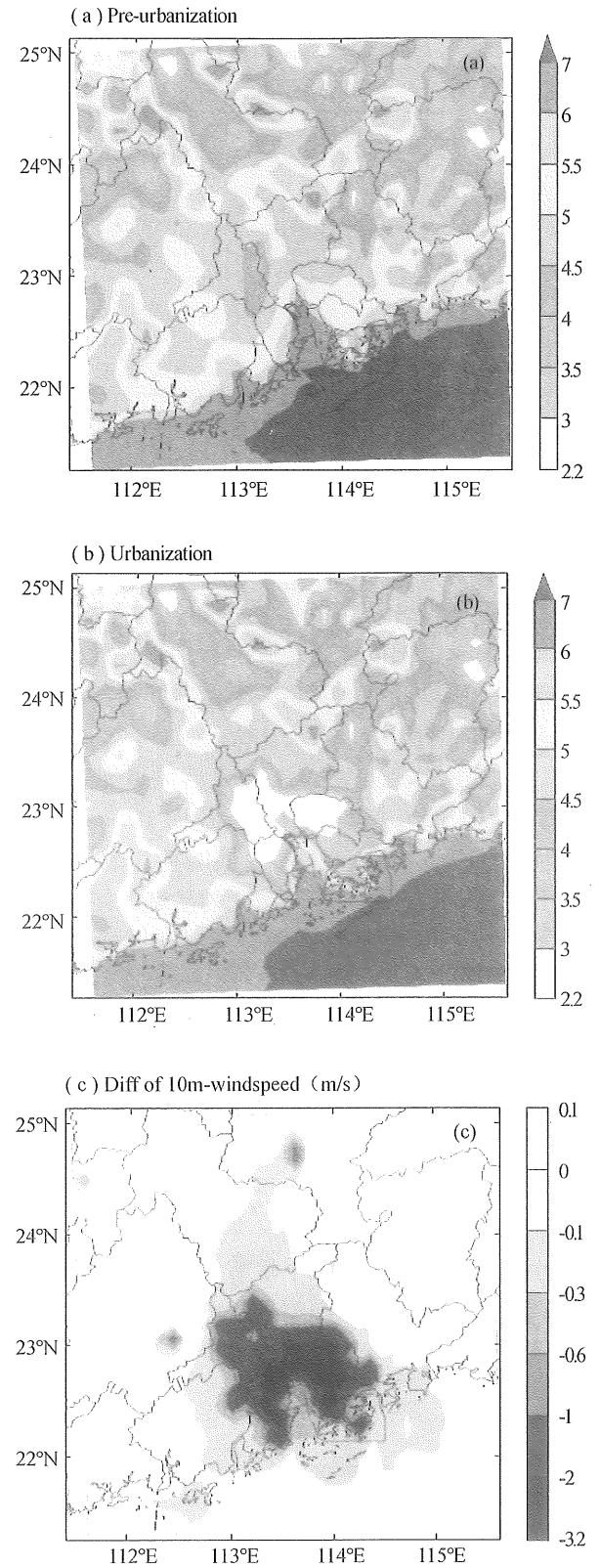


图 4 月平均地面 10 m 高度风速及
城市化后与城市化前的差值
(a) 城市化前; (b) 城市化后; (c) 差值
Fig. 4 Monthly averaged 10-m wind speed and
difference between urbanization and pre-urbanization

表 3 广州城市化前后大气环境效应综合评估表

Table 3 Integrated assessment of atmospheric environmental effects after urbanization

评价指标	现状下垫面	历史下垫面
热岛强度	2	5
混合层高度	3	3
逆温层持续时间	1	1
小风区分布	2	3
自净能力	2	3
综合评估指数	2.0	3.4

4 结 论

(1) 在 2001 年 3 月天气条件下, 模拟城市化前和城市化后 2 种下垫面情况下的温度变化, 同历史下垫面的情况相比, 珠江三角洲热岛面积扩大, 强度增大, 地面温度变化较大的是广州、佛山、东莞、深圳, 平均约增加了 0.5 °C 左右, 并且热量向外辐散, 郊区的温度也有所增加。

(2) 从地面风场看, 城市化后风速有明显的减小, 广州、佛山、东莞、深圳地面 10 m 风速减小最大, 约为 2.5 m/s 左右, 同时由于城市的影响, 风速减小的区域大于城市化的区域, 使得这些城市的外围地区风速也有明显的减小, 减小可达 1 m/s。

(3) 从大气环境评估单项指标来看, 城市化对气象环境影响较明显的是城市热岛强度、小风区分布、大气自净能力三个指标。广州城市化带来的结果是城市热岛增强, 风速减小, 大气的自净能力下降。综合评价指数表明在不利天气条件下, 城市化过程带来的影响较大。

由于本模拟指针对一个季节的气象条件进行的模拟试验, 在以后的工作中将对不同天气及大气环境单项指标评估的可信性做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 周淑贞. 城市气候学[M]. 北京:气象出版社,1988.
 [2] 汪光焘, 气象、环境与城市规划[M]. 北京:北京出版社,2004.
 [3] 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 Pearl River Delta, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 89(1-2): 63-72.

- [4] WANG X M, LIN W S, YANG L M, et al. A Numerical Study of Influences of Urban Land-use Change on Ozone Distribution over the Pearl River Delta Region[J]. China Tellus B, 2007, 59B: 633-641.
 [5] 北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系研究课题组. 城市规划与大气环境[M]. 北京:气象出版社,2004.
 [6] HONG S Y, JUANG H M H and ZHAO Q. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model[J]. Monthly Weather Review, 1998, 126: 2621-2639.
 [7] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 170-181.
 [8] 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.
 [9] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. J Geophys Res, 1997, 102: 16663-16682.
 [10] NOH Y, CHEON W G, HONG S Y, et al. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 107(2): 401-427.
 [11] Chen F, J Dudhia. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569-585.
 [12] 陈燕, 蒋维楣, 郭文利, 等. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 700-701.
 CHEN Y, JIANG W M, GUO L W. Impacts of urban development over PRD on local atmospheric pollutants diffusion[J]. J of Environmental Science, 2005, 25(5): 700-701.