

# 珠三角城市化对大气边界层特征影响的数值模拟\*

洪莹莹, 刘一鸣, 张舒婷, 范绍佳, 樊琦  
(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 利用 WRF/UCM 模式对珠江三角洲 2008 年秋季一次大气污染过程的气象场特征进行模拟。在模式中针对下垫面类型数据和人为热通量来设置敏感性试验以探讨城市化对大气边界层特征的影响。研究表明: 城市化发展(包括城市土地利用类型的改变以及人为热通量的加入和增加)均能增强城市热岛效应和干岛效应, 使夜间地面逆温现象更加显著, 地面污染物容易积累; 地表粗糙度的增加使风速减小, 城市化使热岛环流增强, 污染物难以扩散, 这也是造成空气污染事件的原因; 同时城市的发展能抬升白天和夜晚的大气边界层高度。

**关键词:** 城市化; 土地利用类型; 人为热; 大气边界层

**中图分类号:** P461.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)01-0116-09

## Numerical Simulation of the Urbanization Impact on Atmospheric Boundary Layer Characteristics over the Pearl River Delta, China

HONG Yingying, LIU Yiming, ZHANG Shuting, FAN Shaojia, FAN Qi

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** WRF/UCM model was used to simulate the meteorological characteristics of an air pollution episode over the Pearl River Delta (PRD) in autumn, 2008. In order to study the impact of urbanization on atmospheric boundary layer characteristics, this article set up sensitivity experiments by changing the surface land-use type and the anthropogenic heat flux. The results showed that urbanization, including the increase of urban area, anthropogenic heat and the increase of its flux, helped to strengthen the effect of urban heat island and urban dry island, and the surface temperature inversion turned to be more obvious, which resulted in the accumulation of surface pollutants. Urbanization not only decreased the wind speed due to the increase of surface roughness, but also strengthened the heat island circulation, which was adverse to the diffusion of pollutants and caused the pollution episodes in urban areas. Moreover, the urbanization could raise the atmospheric boundary layer height both in daytime and nighttime.

**Key words:** urbanization; land use type; anthropogenic heat; atmospheric boundary layer

近年来随着社会经济的飞跃进步, 城市化进程加快, 而城市的发展对区域大气环境的影响愈来愈重要<sup>[1-4]</sup>。城市化一方面改变了城市的下垫面土地利用类型, 增加了城市的粗糙度从而影响地面风场<sup>[5]</sup>; 另一方面城市化使城市的人口数量迅速增

长, 人为热通量增加, 对大气边界层结构有重要的影响<sup>[6]</sup>。

大气边界层外场观测成本高、难度大、周期长, 而随着中小尺度数值模式的快速发展, 模式中各种物理过程参数化方案的完善, 数值模拟逐渐成

\* 收稿日期: 2014-03-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(41275100), 公益性行业(气象)科研专项基金(GYHY201306042, GYHY201406031), 广东省自然科学基金(S2012020011044), 欧盟框架7项目PANDA(FP7/3206429)共同资助项目

**作者简介:** 洪莹莹(1990年生), 女; **研究方向:** 大气数值模拟; **通讯作者:** 樊琦; E-mail: eesfq@mail.sysu.edu.cn

为研究大气边界层问题的重要手段。WRF (The Weather Research and Forecasting model) 是一个中小尺度气象模式<sup>[7]</sup>, 它能较好的模拟大气边界层特征<sup>[8-9]</sup>, 其中的城市冠层模式 UCM (Urban Canopy Model) 考虑了城市区域几何建筑对地表能量平衡以及风切变的影响<sup>[10-11]</sup>, 对城市热岛效应有较好的模拟效果<sup>[12]</sup>。张璐等<sup>[13]</sup>利用 WRF/UCM 模式研究了夏季长三角城市群热岛效应对大气边界层的影响, 结果表明城市热岛使城市上空产生强烈的上升气流, 使边界层高度升高。LIN 等<sup>[14]</sup>也利用 WRF/UCM 模式对台北的大气边界层特征进行研究, 结果表明城市热岛效应不仅抬高了边界层高度, 而且使正午边界层高度的发展时间提前。珠江三角洲是我国三个经济最发达的区域之一, 由于地形、气候和人口等差异, 珠三角地区有着典型的大气边界层特征<sup>[15-17]</sup>。蒙伟光等<sup>[18]</sup>考察了 WRF/UCM 模式在副热带高压和台风外围气流的影响下广州高温天气和热岛效应模拟研究中的应用, 但没有深入地研究城市化对大气边界层特征的影响。

本文利用 WRF/UCM 模式对 2008 年 10 月中旬珠三角地区一次大陆高压系统控制过程的大气边界层特征进行模拟, 通过分别改变下垫面土地利用类型和人为热来探讨城市化对大气边界层特征的影响, 包括温度场、湿度场、风场、地表感热通量和边界层高度等。

## 1 资料和方法

WRF 模式是美国多家机构共同研制的中尺度数值天气预报系统, 是目前应用最广的气象模式之一。本文以 WRF 模式作为研究工具, 设计了图 1a 所示的三重嵌套网格, 格距分别为 36 km, 12 km 和 4 km, 主要研究的是第三重网格的模拟结果 (包括整个珠三角地区), 垂直方向上层数为 35 层。模式采用 WDM 6 微物理化方案, Monin-Obukhov 表层方案, Noah 地表方案, YSU 边界层方案, Kain-Fritsch 2 积云方案以及 UCM 城市冠层方案。模拟时间是从 2008 年 10 月 15 日 08 时到 10 月 20 日 08 时 (LST) 共 5 d, 其中前 2 天作为 spin-up 时间, 后 3 天作为主要研究时段, 期间珠三角地区受大陆高压系统控制, 天气较为稳定, 系统风速较小, 热岛环流、海陆风、山谷风等局地环流影响显著。2008 年 10 月中旬, “国家高技术研究发展计划 (863 计划) 重大项目” 在珠三角开展了一次综

合实验, 本文使用了从化站由小球探空得到的边界层高度小时值数据以及从化站、广州站和开平站温度、相对湿度和风速的日均值数据。为了讨论方便, 文中如无特别说明, 均对模拟结果做 3 天平均来处理。

下垫面土地利用类型和人为热是表征城市化的两个重要特征。图 1b 和图 1c 分别是 WRF 模式中采用的两套土地利用类型数据 USGS 和 MODIS, 其中 USGS 是 1993 年采集的土地利用类型数据, 城市面积区域较小, 集中在广州地区; 而 MODIS 是由卫星资料反演的 2004 年土地利用类型数据, 从图中可以看到城市区域面积拓展到了整个珠江口沿岸。随着时间的演变, 下垫面土地利用类型发生显著的变化, 对珠三角的边界层特征造成一定的影响。人为热也是影响边界层特征的另一个因素, UCM 模式考虑了人为热对大气环境的影响, 模式中的人为热参数设置参考文献 [19], 人为热通量全天平均值为  $41.1 \text{ W/m}^2$ 。本文设计了 1 个控制试验 (CTRL) 和 3 个敏感性试验 (USGS, AHO, AH \* 2), 控制试验 CTRL 考虑了人为热并采用 MODIS 土地利用类型数据, 敏感性试验在控制试验的基础上进行修改, 其中 USGS 试验采用了 USGS 土地利用类型数据, 而 AHO 试验不考虑人为热的影响, AH \* 2 试验考虑的人为热通量为原来的两倍。通过对比试验的模拟结果可以得到下垫面土地利用类型和人为热对边界层特征的影响。

## 2 模式验证

表 1 是 CTRL 控制试验模拟的 2 m 高度温度 (T2)、2 m 高度相对湿度 (RH2) 和 10 m 高度风速 (WSP10) 的统计检验表, 用到的观测数据是从化、广州和开平 3 个站点的日平均观测资料, 其中 OBS 是观测平均值, SIM 是模拟平均值, MB 是平均偏差, RMSE 是均方根误差, IOA 是符合指数,  $r$  是相关系数, 计算公式参考文献 [20]。从统计表可以看到, 温度、相对湿度和风速的 IOA 都超过 0.89, 其中温度和相对湿度的符合指数 IOA 更是接近 1.0, 而且温度和相对湿度的相关系数也超过了 0.81。模式模拟的风速与观测值的相关系数为 0.52, 模拟较实测偏大一些, 风速的模拟效果没有温度和相对湿度好。总体上 3 个要素的模拟值都略微偏高, 但平均偏差和均方根误差较小, 模拟结果能较好的反映大气的实际情况。

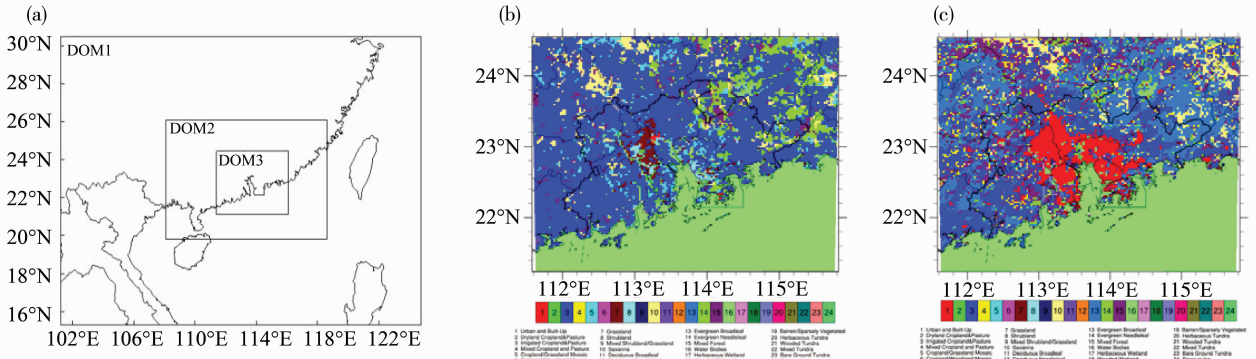


图 1 WRF 三重网格设置 (a) 及珠三角土地利用类型空间分布图, (b) 为 USGS, (c) 为 MODIS

Fig. 1 Three nested domains for WRF (a) and spatial distribution of land use type in PRD. (b) is USGS and (c) is MODIS

表 1 模式验证统计表

Table 1 Statistic parameters of model evaluation

气象要素	OBS	SIM	MB	RMSE	IOA	r
T2/°C	26.5	26.7	0.2	0.2	0.99	0.89
RH2 /%	67.8	72.5	4.7	4.7	0.99	0.81
WSP10/(m·s <sup>-1</sup> )	1.7	2.8	1.1	1.0	0.89	0.52

如图 2a 所示, 由于香港沙头角站点靠近海洋, 受到海洋下垫面的影响, 边界层高度只有约 1 000 m, CTRL 控制试验模拟的边界层高度的量级和变化特征与观测结果相近。从图 2b 可见, 从化站白天边界层高度为 1 100 ~ 1 500 m, 夜晚边界层高度为 300 ~ 600 m, 模式能较好的捕捉到边界层高度正中高夜低的日变化特征, 在 19 日中午的时候模拟值与观测值尤为相近。WRF/UCM 模式对珠三角地区的边界层高度的变化也具有较好的模拟能力。

### 3 下垫面土地利用类型对大气边界层特征的影响

#### 3.1 温湿场的影响

图 3a 是 CTRL 控制试验对温度的模拟结果, 在 1 000 m 高度以下, 温度的日变化较大, 近地面最高温度出现在 15 时, 温度超过 30 °C, 最低温度出现在早上 7 时, 温度低于 25 °C。从 20 时到第 2 天的 07 时, 天气晴朗, 在近地面出现较明显的逆温现象, 不利于污染物的扩散。城市热岛效应在白天比在夜晚强, 影响的高度可达 1 000 m, 在 1 000 m 高度以上, 温度的日变化并不明显。1993 年珠三角地区城市面积较小, 相比于 CTRL 控制试验, USGS 试验 (图 3b) 模拟的城市热岛效应较弱, 影响高度也降低了 100 m 左右, 低层大气的温度降低了 1 ~ 2 °C, 而且温度日变化较小, 夜晚的逆温强度也较弱。在 1 000 m 高度以上, USGS 试验模拟

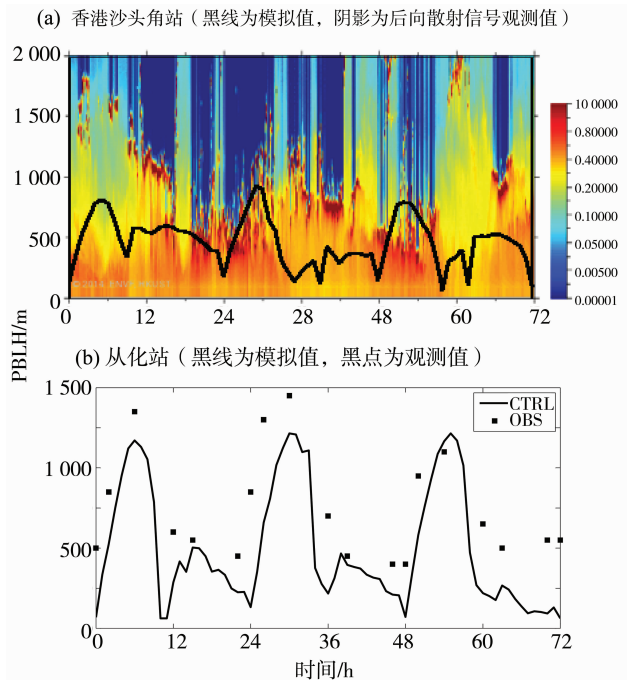


图 2 2008 年 10 月 17 日 08 时 - 20 日 08 时

(LST) 模式模拟的边界层高度与观测资料对比图

Fig. 2 Comparison of simulated and observed planetary boundary height during 8:00 17<sup>th</sup> to 8:00 20<sup>th</sup> October, 2008

的温度与 CTRL 控制试验相差并不大。

城市地区近地面的相对湿度表现出与温度相反的日变化趋势 (图 4a), 在 800 m 高度以下, 白天的相对湿度比夜晚低, 随着高度的上升相对湿度逐渐升高。在约 1 000 m 高度以上, 随着高度的上升相对湿度逐渐降低, 在高层和低层之间存在着相对湿度较高的水汽层, 傍晚水汽层的高度在约 1 200 m 高度, 早晨在约 400 m 高度。与 CTRL 控制试验相比, USGS 试验 (图 4b) 模拟的近地面相对湿度升高了约 10%, 水汽层的高度也降低到了约 100 m, 说明城市化使得城市的气候环境变得干燥。

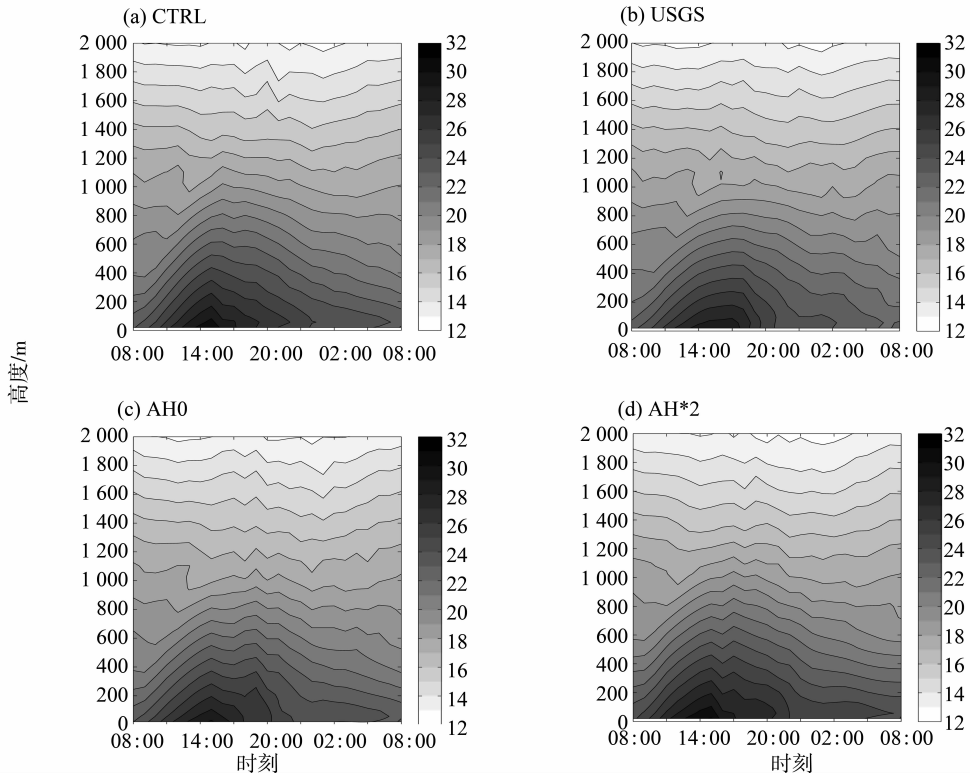


图 3 2008 年 10 月 17 - 19 日模式模拟的广州站 3 d 平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 随高度和时间的变化

Fig. 3 Daily and vertical variation of three-day mean temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) at Guangzhou site during 17 - 19<sup>th</sup> October, 2008

张璐等<sup>[13]</sup>通过人为改变长三角地区城市下垫面也发现城市化能使温度升高,使湿度降低,这与本文所得的结论一致。

### 3.2 风场的影响

在模拟时间内,受大陆高压系统的控制,珠三角地区吹东北风。把 CTRL 控制试验模拟的 10 m 高度风场减去 USGS 试验模拟结果可以得到图 5a 的风场差别图。伴随着城市的发展,城市地区的建筑物也越来越多,高度也越来越大,增加了地表粗糙度,能减弱风场的强度,从而减小风速,从图可以看到在整个珠三角地区风速差别都为负,在珠江口附近城市发展最快的地区,风速差别可达  $-1.5 \text{ m/s}$ 。受热岛效应的影响,城市地区上空存在明显的上升气流,作为补偿城市周边地区的近地面气流流向城市地区,从而形成城市地区特有的热岛环流现象。广州和佛山位于珠三角城市群中心位置,是珠三角城市化程度最高的地区,从图可以看到风速差矢量都指向了广州、佛山和中山交界的地方,形

成一个气流的辐合中心,说明 CTRL 控制试验模拟的热岛环流要比 USGS 试验要强,城市化能加强热岛环流。

### 3.3 地表感热通量的影响

由于温度的差异,热量在大气和下垫面之间通过湍流输送的方式发生了交换,交换的强度用地表感热通量来表征(图 6a)。城市化的程度越高,粗糙度越大,湍流强度也就越强,使感热通量增大。在 USGS 和 MODIS 两套下垫面类型数据中,  $22^{\circ}\text{N}$  以南的海洋区域和  $23.5^{\circ}\text{N}$  以北的山区土地利用类型变化不大,CTRL 控制试验和 USGS 试验模拟的感热通量基本一致。珠海 ( $22.1^{\circ}\text{N}$  左右) 和广佛地区 ( $22.5 \sim 23.5^{\circ}\text{N}$ ) 城市发展较快,湍流强度增加也快,使 CTRL 控制试验模拟的感热通量比 USGS 试验要高  $100 \sim 200 \text{ W/m}^2$ 。  $22.2 \sim 22.5^{\circ}\text{N}$  的地区城市发展较慢,湍流强度变化不大,所以 CTRL 控制试验和 USGS 试验模拟的地表感热通量差别并不大。

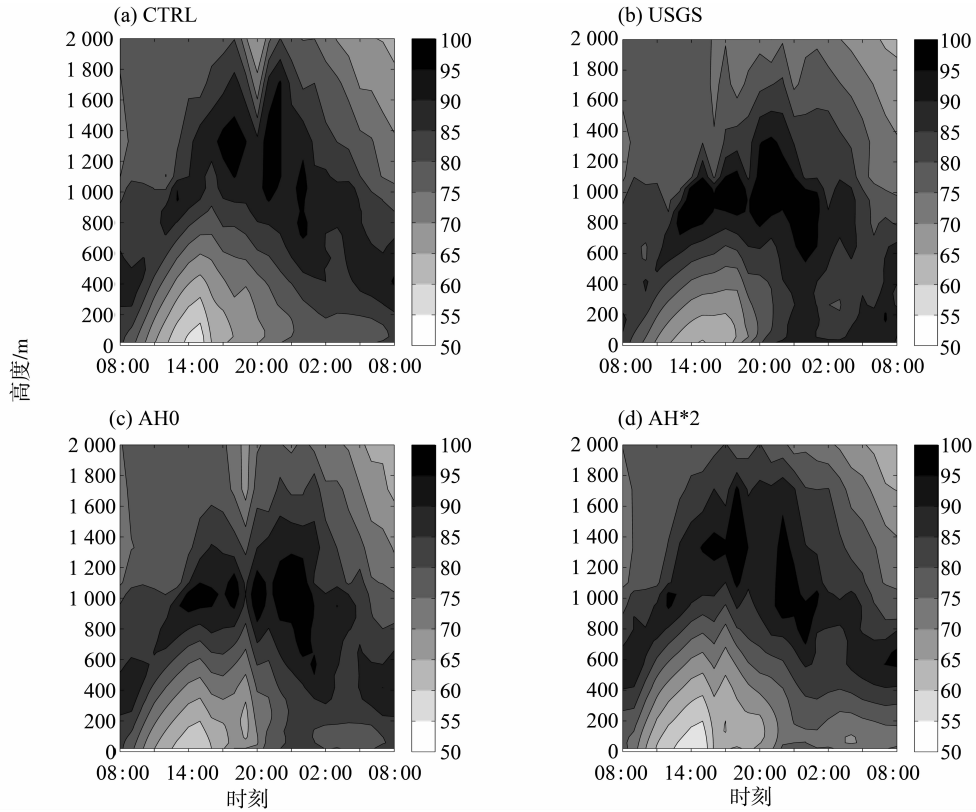


图 4 2008 年 10 月 17 - 19 日模式模拟的广州站 3d 平均相对湿度 (%) 随高度和时间的变化

Fig. 4 Daily and vertical variation of three-day mean relative humidity (%) at Guangzhou site during 17 - 19<sup>th</sup> October, 2008

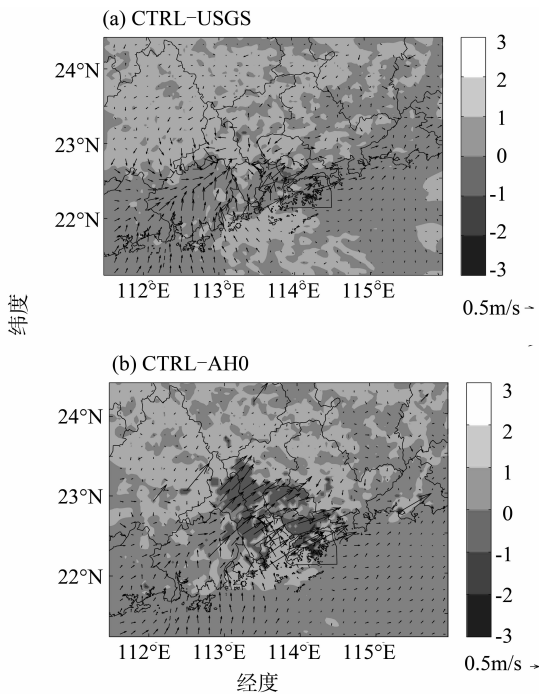


图 5 2008 年 10 月 17 - 19 日模式模拟的珠三角 3d 平均风场 (m/s) 差别图

Fig. 5 Difference of three-day mean of modeled wind field (m/s) over PRD during 17 - 19<sup>th</sup> October, 2008

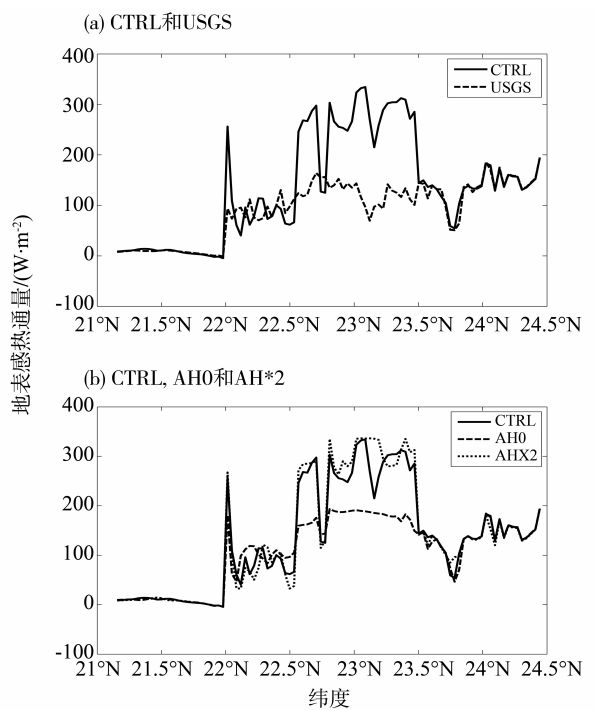


图 6 2008 年 10 月 17 日 13 时 (LST) 沿 113.2°E 经线感热通量 ( $W/m^2$ ) 随纬度的变化

Fig. 6 The latitudinal variation of surface heat flux ( $W/m^2$ ) along 113.2°E at 13:00 on October 17, 2008

### 3.4 大气边界层高度的影响

边界层高度是表征大气边界层的一个重要特征，如图 7a 所示，广州站白天边界层高度可达 1 500 m，夜晚只有约 300 m。与 CTRL 控制试验相比，USGS 试验模拟的边界层高度要低 100 ~ 400 m，模拟的最大边界层高度要低 300 m。CTRL 控制试验和 USGS 试验模拟的边界层高度在白天的差值比夜间大，这是由于下垫面改变所造成的城市热岛效应使得白天的对流发展旺盛，因此白天边界层可抬升至更高的高度，而夜间边界层高度降低，两者之间的差距减小，从图中可见 00 时到 06 时两者模拟的边界层高度基本一致。

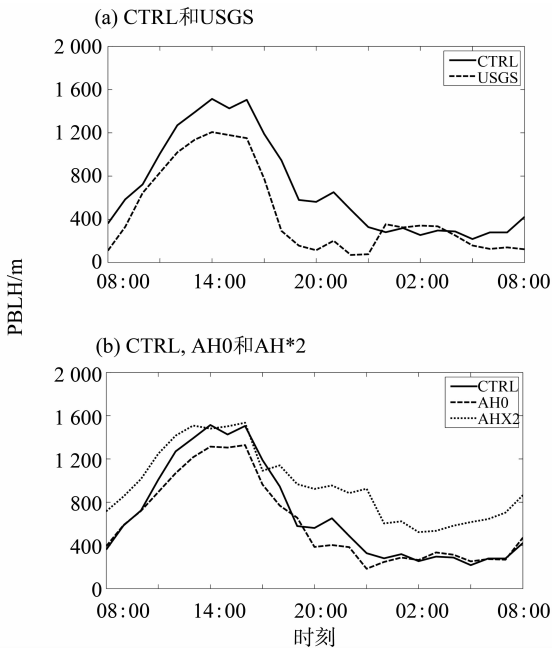


图 7 2008 年 10 月 17 - 19 日模式模拟的广州站三天平均边界层高度随时间的变化图  
Fig. 7 Daily variation of three-day mean of modeled planetary boundary layer height at Guangzhou site during 17 - 19<sup>th</sup> October, 2008

在水平分布上（图 8），白天 14 时，在图 2b 所示的城市地区边界层高度要比周边地区高，到了凌晨 02 时边界层高度比周边地区低。海洋上的边界层高度日变化并不大，在 400 m 左右。把 CTRL 控制试验模拟的边界层高度减去 USGS 试验的模拟结果得到图 9a（14 时）和图 9b（02 时），边界层高度差别最大的地方出现在珠三角的城市地区。与图 7a 反映的情况一致，城市的发展使城市地区的边界层高度升高 100 ~ 400 m，而在深夜 02 时边界层高度升高并不明显。

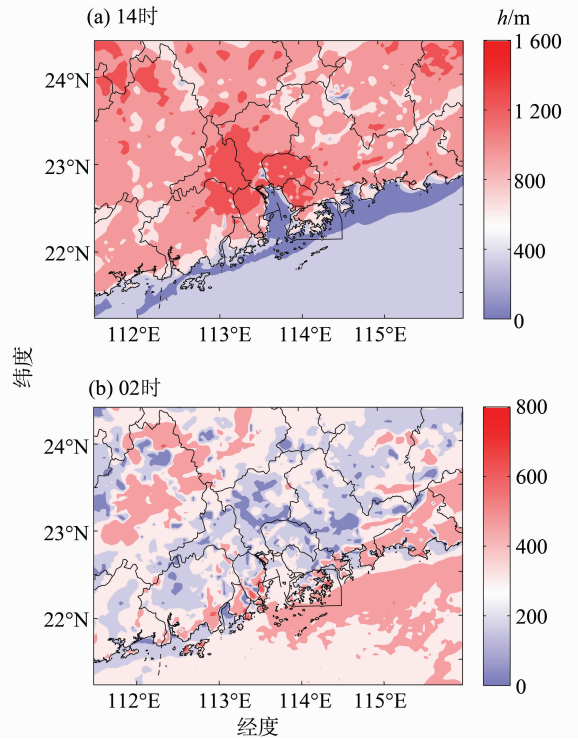


图 8 2008 年 10 月 17 - 19 日 CTRL 试验模拟的 3 d 平均 14 时和 02 时边界层高度的分布图  
Fig. 8 Horizontal distribution of three-day mean of planetary boundary layer height at 14:00 (a) and 02:00 (b) in CTRL experiment during 17 - 19<sup>th</sup> October, 2008

## 4 人为热对大气边界层特征的影响

### 4.1 温湿场的影响

为了研究人为热对大气边界层特征的影响，设置了 AH0 和 AH \* 2 两个敏感性试验，前者没有考虑人为热，后者则把人为热通量加倍（图 3c 和 3d）。结果表明，随着人为热通量的增加，白天地表最高温度升高，城市热岛效应影响高度升高，而夜间的逆温强度也有所增强。从图 4c 和图 4d 相对湿度的模拟结果来看，AH0 试验的模拟结果与 USGS 试验较为接近，地面的相对湿度比 CTRL 控制试验高；AH \* 2 模拟的近地面相对湿度比 CTRL 控制试验低，城市干岛效应更加明显。

### 4.2 风场的影响

图 5b 是 CTRL 控制和 AH0 试验的风场差别图，AH \* 2 试验与 CTRL 控制试验的风场差别图（图略）与图 5b 相似。与图 5a 一样，在珠三角城市群中心的周边地区风场差别矢量都指向珠三角地区的城市中心，广州和佛山，说明人为热的考虑及其通量的增加都能通过增强城市热岛效应从而增强城市的热岛环流。另一方面加入人为热后，使珠三

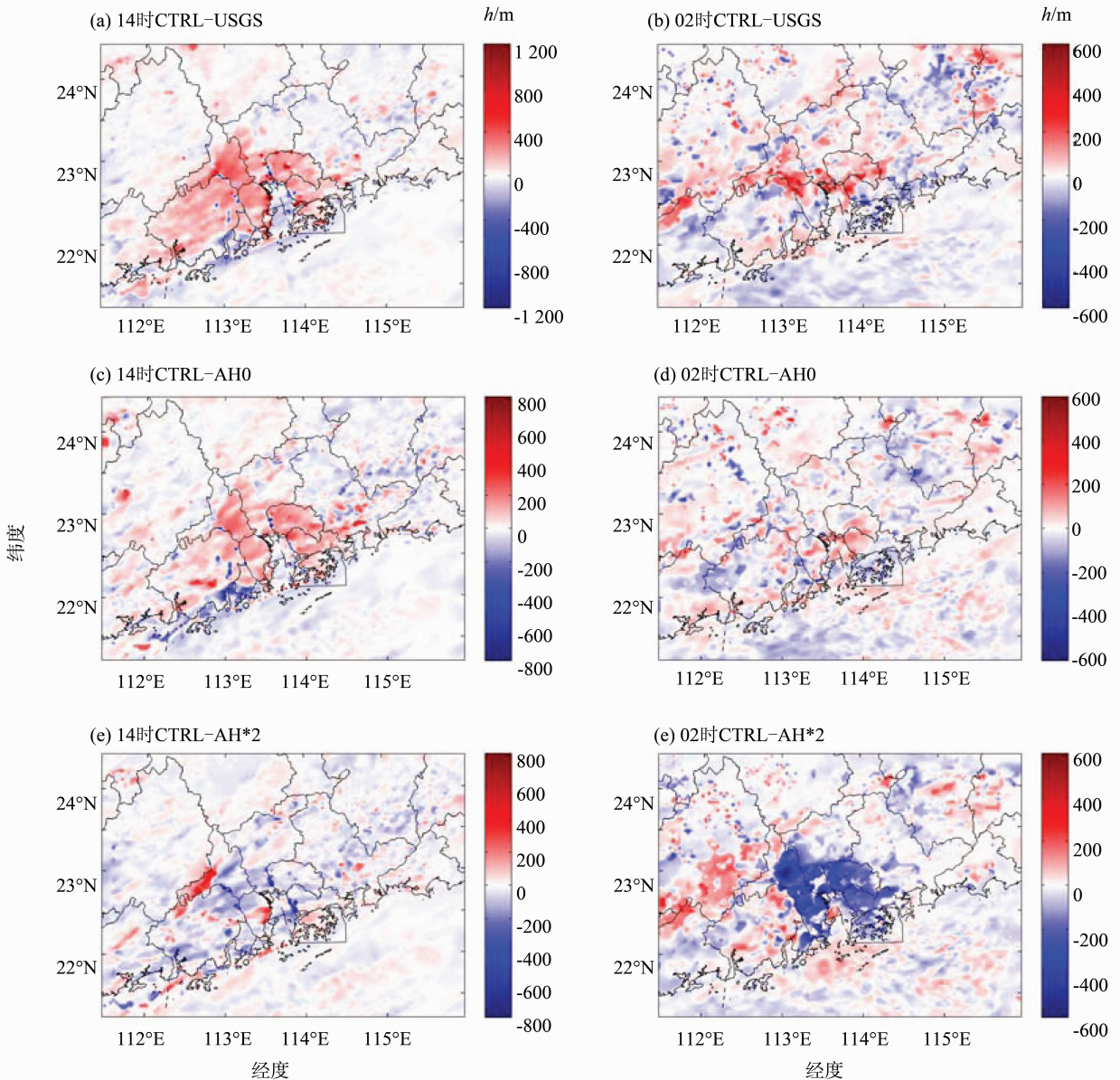


图9 2008年10月17-19日模式模拟的3 d 天平均14时(a, c, e)和02时(b, d, f)边界层高度差别(m)分布图

Fig. 9 Distribution difference of three-day mean of modeled planetary boundary layer height (m) at 14:00 (a, c, e) and 02:00 (b, d, f) during 17-19<sup>th</sup> October, 2008

角地区地表风速减小,特别是在图1c所示的城市地区,在受东北风的控制下风速减为 $-2\text{ m/s}$ ,影响比较明显。热岛环流能使城市地区污染物难以扩散,容易造成空气污染事件。

#### 4.3 地表感热通量的影响

图6b展示了13时地表感热通量的模拟结果,人为热的加入和加倍对海洋、山区和郊区的影响并不大,差别主要出现在珠海、广州和佛山等城市地区,没有考虑人为热时(AH0试验)地表感热通量只有 $200\text{ W/m}^2$ ,考虑人为热后(CTRL控制试验)大气与下垫面的温度差异增大,地表感热通

量升高,达到 $300\text{ W/m}^2$ 左右,把人为热通量加倍(AH\*2试验)后感热通量同样也增加,上升至 $350\text{ W/m}^2$ 左右。以上分析得到,人为热的加入及其通量的加倍都会使城市的地表感热通量增加。

#### 4.4 大气边界层高度的影响

对于边界层高度的模拟结果(图7b),CTRL、AH0和AH\*2试验的差别在白天和夜晚并不一样。白天AH0试验模拟的城市地区边界层高度比CTRL控制试验低。由于人为热具有日变化特征<sup>[19]</sup>,白天太阳辐射较强,热力作用明显,所以加入人为热后正午边界层抬升较大,CTRL控制试验比AH0试

验要高 100 ~ 200 m (图 9c), 而夜晚抬升较小 (图 9d)。人为热加倍后, AH \* 2 模拟的城市边界层高度比 CTRL 控制试验高, 正午差别较小 (图 9e), 而夜晚差别较大, 特别是在图 1c 所示的城市地区, AH \* 2 试验要比 CTRL 控制试验高 200 ~ 300 m (图 9f), 这可能是由于夜晚没有太阳辐射, 人为热因素起主导作用, 因而人为热加倍后夜间边界层高度升高较白天明显。总的来说, 人为热的加入和加倍均会使边界层高度升高。

## 5 结 论

利用 WRF/UCM 模式对珠三角一次高压系统控制的天气过程进行模拟, 通过改变下垫面土地利用类型和人为热通量来研究城市化对大气边界层特征的影响。模式验证结果显示温度、相对湿度和风速的符合指数 IOA 和相关系数  $r$  较高, 同时模拟的边界层高度能捕捉到观测值的日变化特征, 表明 CTRL 控制试验对珠三角大气边界层特征有较好的模拟效果。敏感性试验的对比分析得到以下主要结论:

1) 城市的发展, 包括 1993 年 USGS 和 2004 年 MODIS 土地利用类型的变化以及人为热通量的加入和加倍, 都会使近地面温度升高 1 ~ 2 °C, 夜间的逆温强度加强, 容易造成近地面污染物的积累。城市面积和人为热通量的增加也使城市干岛现象更加突出。

2) 城市的发展一方面增加了地表粗糙度, 使风速减小, 污染物难以扩散, 另一方面增强了热岛环流, 污染物从城市周边地区向城市输送, 容易造成空气污染事件。

3) 海洋和山区受城市化的影响不大, 地表感热通量基本不变。城市面积的增加和人为热的加入能有效地增加珠海、广州和佛山等城市地区的地表感热通量, 而人为热通量的加倍对城市地区感热通量的增加效果并不明显。

4) 城市化均使白天和夜晚的大气边界层高度均有所抬高, 其中白天的变化更加明显。土地利用类型的变化可使边界层高度升高 100 ~ 400 m, 人为热的加入使白天边界层高度升高 100 ~ 200 m, 而人为热通量的加倍可使夜晚边界层高度上升了 200 ~ 300 m。就整个珠三角地区而言, 白天珠江口岸城市集中区域的边界层高度要比周边地区高, 而到了晚上情况则相反。

致谢: 本文的计算在中山大学网络与信息技术中心的高性能与网络平台上完成。

## 参考文献:

- [1] QIAO Z, TIAN G, XIAO L. Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: A case study of Beijing using MODIS data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 85:93 - 101.
- [2] CUI L L, SHI J. Urbanization and its environmental effects in Shanghai, China [J]. Urban Climate, 2012, 2:1 - 25.
- [3] TONKAZ T, CETIN M. Effect of urbanization and land-use type on monthly extreme temperatures in a developing semi-arid region, Turkey [J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(1):143 - 158.
- [4] 解令运, 汤剑平, 路屹雄, 等. 城市化对江苏气候变化影响的数值模拟个例分析 [J]. 气象科学, 2008, 28(1): 74 - 80.
- [5] 张弛, 束炯. 土地利用类型变化对城市大气边界层特征影响的数值模拟 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, 4: 83 - 93.
- [6] 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 74 - 82.
- [7] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the Advanced Research WRF version 3 [Z]. NCAR Technical Note: NCAR/TN-475 + STR, 2008.
- [8] MIAO S, CHEN F, MARGARET A L, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(3): 484 - 501.
- [9] 缪国军, 张镭, 舒红. 利用 WRF 对兰州冬季大气边界层的数值模拟 [J]. 气象科学, 2007, 27(2): 169 - 175.
- [10] KUSAKA H, KONDO K, KIKEGAWA Y, et al. A simple single layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models [J]. Boundary Layer Meteorology, 2001, 101:329 - 358.
- [11] KUSAKA H, KIMURA F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2004, 82(1): 67 - 80.
- [12] CHEN F, YANG X, ZHU W. WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China [J]. Atmospheric Research, 2014, 138:364 - 377.

狭管流, 风速值约为来流风速的 1.4 ~ 1.7 倍; 街谷建筑物之间出现弱涡旋, 各建筑物的背风尾流区风速微弱。

4) 揭示的上述微气候特征有助于城市规划中完善及综合考虑各种下垫面的布局、建筑走向及建筑形式的优化选择。

#### 参考文献:

- [1] KNOCH K. Über das Wesen einer Landesklimaaufnahme [J]. Meteorol Z, 1951, 5: 173 - 184.
- [2] BAUMOLLE R J, REUTER U. Demands and requirements on a climate atlas for urban planning and design [R]. Stuttgart: Office of Environmental Protection, 1999.
- [3] YAMAMOTO Y. Measures of mitigate urban heat islands [J]. Global Change and Sustainable Development, 2008, 1(2): 18 - 46.
- [4] Architectural Institute of Japan. Observational studies of the urban heat island-cooling effect of urban park [R]. Tokyo: Architect Institute of Japan, 2008.
- [5] CUHK. Urban climatic map and standards for wind environment-feasibility study[R]. Hong Kong: Planning Department, 2006.
- [6] 任超, 吴恩融, KATZSCHNER L, 等. 城市环境气候图的发展及其应用现状[J]. 应用气象学报, 2012, 23(5): 593 - 603.
- [7] 桑建国, 刘辉志, 王宝民, 等. 街谷环流和热力结构的数值模拟[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特): 69 - 81.
- [8] WANG B M, LIU H Z, SANG J G, et al. Numerical simulation of pedestrian level winds around tall buildings [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(2): 102 - 109.
- [9] HANG J, LI Y G, RICCARDO B, et al. On the contribution of mean flow and turbulence to city breathability: the case of long streets with tall buildings[J]. Science of the Total Environment, 2012, 416: 363 - 373.
- [10] 陈卓伦, 赵立华, 孟庆林, 等. 广州典型住宅小区微气候实测与分析[J]. 建筑学报, 2008, 11: 24 - 27.
- [11] 李晋, 张威. 体育馆非对称形态对观众区风环境的影响[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(9): 139 - 159.
- [12] BRUSE M, HERIBERT F. Simulating surface plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [J]. Environmental Modelling & Software, 1998, 13(4): 373 - 384.
- [13] FAZIZ A T and HELMUT M. Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons [J]. Solar Energy, 2007, 81: 742 - 754.
- [14] 周宇, 穆海振. 微尺度气象模式在环境影响评价中应用初探[J]. 高原气象, 2008, 27(增): 203 - 209.
- [15] BLOCKEN B, CARMELIETA J, STATHOPOULOS T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 941 - 962.
- [16] SIMOENS S, AYRAULT M, WALLACE J M. The flow across a street canyon of variable width-Part 1: Kinematic description [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 9002 - 9017.
- [17] FAN S J, FAN Q, YU W, et al. Atmospheric boundary layer characteristics over the Pearl River Delta, China, during the summer of 2006; measurement and model results [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11: 6297 - 6310.
- [18] 蒙伟光, 张艳霞, 李江南 等. WRF/UCM 在广州高温天气及热岛效应模拟中的应用 [J]. 热带气象学报, 2010, 26(3): 273 - 282.
- [19] 王志铭, 王雪梅. 广州人为热初步估算及敏感性分析 [J]. 气象科学, 2011, 31(4): 422 - 430.
- [20] 蓝静. 珠三角区域气溶胶污染及低能见度过程的数值模拟 [D]. 广州: 中山大学, 2013.

(上接第 123 页)

- [13] 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 2011, 31(4): 431 - 440.
- [14] LIN C Y, CHEN F, HUANG J C, et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan [J]. Atmos Environ, 2008, 42(22): 5635 - 5649.
- [15] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用 [J]. 热带气象学报, 2005, 21(3): 286 - 292.
- [16] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(Suppl.): 4 - 6.