霍飞，陈海山. 2011. 大尺度环境风场对城市热岛效应影响的数值模拟试验 [J]. 气候与环境研究，16 (6)：679－689. Huo Fei，Chen Haishan. 2011. Numerical simulation of the effect of large-scale wind on urban heat island [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，16 (6)：679－689.

大尺度环境风场对城市热岛效应影响的数值模拟试验

霍飞[1,2] 陈海山[1,2]

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室，南京 210044
2 南京信息工程大学大气科学学院，南京 210044

摘 要 利用耦合模式 WRF-UCM 模拟了上海、南京两个地区 4 次城市热岛现象，发现城市热岛效应高温的水平分布与大尺度环境风场之间有着密切的联系：城市热岛的高温带在地面风的影响下，向下风方平移，导致城市下游郊区的气温明显上升。从气温垂直剖面图上可以看出，在地面风的作用下，低层大气都出现了一个水平方向上的高温带，从城区一直延伸到下游郊区。气温差异的垂直剖面图表明：城市化过程使城市以及城郊过渡带上空大气获得更多的热量，气温明显上升。在计算城郊过渡带的平流加热率后发现，大尺度环境风场下城市对下风方郊区大气的平流加热作用不可忽视。

关键词 城市热岛效应（UHI） 数值模拟 城市化 大尺度环境风场
文章编号 1006－9585（2011）06－0679－11 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Numerical Simulation of the Effect of Large-Scale Wind on Urban Heat Island

HUO Fei[1,2] and CHEN Haishan[1,2]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education*，*Nanjing University of Information Science and Technology*，*Nanjing* 210044
2 *College of Atmospheric Sciences*，*Nanjing University of Information Science and Technology*，*Nanjing* 210044

Abstract The Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with a single-layer Urban Canopy Model (UCM) is used to simulate the Urban Heat Island (UHI) features in Shanghai and Nanjing, two different cities in China. Results show that the horizontal distribution of UHI is determined by large-scale surface wind, which causes high air temperature of downstream rural area. Cross sections of the difference of air temperature between the urban and rural surfaces are analyzed, the model suggests that more heat is transported from the land to the air over urban area, which leads to the continuous transportation of heat to the downstream rural surface under the control of the steady large-scale wind. It is concluded that the effect of large-scale surface wind on UHI can increase the downstream rural air temperature, which shouldn't be ignored.

Key words UHI, numerical simulation, urbanization, large-scale wind

收稿日期 2010－02－18 收到，2011－09－20 收到修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展计划资助 2010CB428505，江苏省“六大人才高峰”计划资助项目
作者简介 霍飞，男，1984 年出生，硕士，主要从事陆气相互作用及气候变化研究。E-mail：feihuo@live.com
通讯作者 陈海山，E-mail：haishan@nuist.edu.cn

1 引言

城市化进程使得地球表面发生了巨大的改变，这种改变足以影响区域气候（Landsberg，1970；Changnon，1978）。有研究表明：最近几十年，陆地上观测到气温日较差不断减小，有一半的原因是受到了城市或者其它的陆面使用情况变化的影响（Kalnay and Cai，2003）。Ren et al.（2007）在分析了国家级气象站——北京站和武汉站的数据后发现：最近20年内，两个测站及其附近的郊区站的年地表气温和季节地表气温都有明显的上升，并且总增温的65%～80%是城市化所引发的增温。董喜春等（2008）使用高分辨率区域气候模式RegCM3，对长江中下游地区城市化进程中土地利用的变化所引起的地气能量交换和水分收支的改变进行了模拟研究，发现城市化会减少地表水分蒸发所引起的潜热释放，从而导致地表温度增加。

城市热岛效应（Urban Heat Island，UHI）是城市气候最主要的特点之一。周淑贞（1988）、孙奕敏和边海（1988）、桑建国（2000）、胡小明（2005）、王喜全（2006）、谢庄（2006）和李兴荣等（2008）等对UHI及其形成机制进行了多方面的研究。有研究表明雷暴的形成与发展会受到城市热岛的影响（蒙伟光等，2007）；UHI还会影响城区及邻近地区的降水（孙继松和舒文军，2007）。

数值模式可以模拟UHI空间和时间上的变化规律，是研究UHI的有力工具。郑祚芳等（2006）应用中尺度MM5模式，对2000年7月的1次典型高温天气过程进行了数值模拟。试验表明：模式对于北京地区夏季高温及城市热岛的范围和强度均有较好的模拟能力。蒙伟光等（2007）使用WRF-UCM耦合模式很好地模拟了广州城区2 m高度气温的演变，成功再现了夜间热岛的形成及分布特征。Miao et al.（2009）利用WRF-UCM模式模拟北京市城市气候的一些特性，并同观测资料进行了对比，发现模式能很好地模拟出UHI强度的日变化和空间分布，以及风速、风向的日变化。Zhang et al.（2009）等使用了WRF-UCM模式对Baltimore区域的城市热岛进行模拟并与观测资料比对，研究表明：地面风上游的城市化过程会加剧下游的UHI。

虽然国内外已经有大量关于UHI效应的研究，但是由于观测资料的限制，对于UHI的水平结构及其与地面风的关系还没有进行系统地研究。根据1997～1998年7～8月高温加密观测资料和卫星遥感资料，丁金才等（2002）分析指出风向是影响上海地区城市热岛范围最主要的气象因子，地面风造成城市热岛向下风方扩展。邓莲堂等（2001）利用Davis自动气象观测资料，对上海市UHI效应的变化特征进行了分析，并发现热岛中心存在位置漂移现象。由于测站个数很有限，加密观测的成本也比较大，直接使用观测资料分析城市热岛的水平结构难度很大。

本文的主要目的是通过使用嵌套了单层的城市冠层模型的中尺度模式WRF（Weather Research and Forecasting model），考察不同陆面状况的城市在大尺度环境风场的影响下，UHI所表现出的水平分布特征。挑选了上海和南京两个城市，一定程度上反映了本文所揭示特征的客观性。每个城市都选择了两个环境风场截然不同的个例进行研究，多方面展现了不同风向对于UHI的影响。文章将从各种物理量的在敏感性试验中所表现的异同，来探讨大尺度环境风场影响UHI水平分布的物理特征及其对城市规模的依赖性，并在最后给出结论。

2 模式与试验方案

数值模式使用的是非静力平衡、可压缩的中尺度模式WRF，版本V2.2.1。初始条件与边界条件由美国NCEP2.5°（纬度）×2.5°（经度）再分析资料NCEP/NCAR Reanalysis Project（NNRP）提供。

边界层参数化方案使用的是Mellor-Yamada-Janjic（MYJ）行星边界层（PBL）方案，可以描述湍流动能和边界层中各层物理量的湍流交换。其它物理参数化方案如下：RRTM长波辐射方案，Dudhia短波辐射方案，Noah陆面模式。

在WRF V2.2.1中，Noah陆面模式内嵌了单层的城市冠层模型（UCM），能够模拟城市地表能量平衡过程和风的垂直切变，并且考虑了二

维城市结构、建筑物的阴影、城市冠层对辐射的反射作用、太阳高度角和城市建筑的朝向（Chen et al.，2004）。

为了考虑地面风对 UHI 水平分布的影响在不同地域的异同，选择了两个城市分别进行模拟分析：上海市和南京市。每个城市都挑选了两个地面风向稳定并且不同的个例（分别记为：上海，SH1、SH2；南京，NJ1、NJ2），从多方面考察风向对 UHI 水平结构的影响。模拟时间段以及空间分辨率如表 1 所示。为了加强对城市边界层的模拟，垂直分层中 14 层在 2 km 以下。

表 1　试验的模拟时间范围及空间分辨率
Table 1　Time range and space resolution of the experiments

试验名称	模拟时间（北京时间）	水平格距（4 层嵌套）	垂直分辨率
SH1	2007－07－13 02 时至 2007－07－14 02 时	13.5 km，4.5 km，1.5 km，0.5 km	28 层，其中 14 层在 2 km 以下
SH2	2007－08－10 02 时至 2007－08－11 02 时		
NJ1	2007－08－13 02 时至 2007－08－14 02 时		
NJ2	2008－07－20 02 时至 2008－07－21 02 时		

模拟的前 4 个小时为 spin-up 时间，从第 5 个小时开始分析模式输出的结果。模拟区域分布如图 1 所示。为了考察 UHI 的分布状况对于城市规模的敏感性，对于每一个模拟个例，除了控制试验（CTL）以外，都分别增加了一组对比试验：城市规模扩大试验，将模拟最内层区域的城市周边植被用城市表面替代，代表大规模城市化以后的情况（V2U），城市发展之后的植被覆盖情况如图 2b 和 2d。为了考察 UHI 的分布状况对于城市的依赖性，设计了第 2 组对比试验：无城市试验，把模拟区域的城市表面用草地代替，模拟去除城市影响时的天气状况（U2V）。模拟植被类型分布如图 2 所示。

3　模拟结果

试验模拟了两个城市，共 4 个个例：SH1、SH2、NJ1、NJ2。每一个个例又由 CTL、U2V 和 V2U 共 3 组试验构成。下面分别对两个城市的模拟结果进行分析。

3.1　上海个例（SH1、SH2）

首先分析个例 SH1 的模拟情况。图 3a1、3b1、3c1 分别给出了 CTL、U2V、V2U3 个试验在 2007 年 7 月 13 日 16 时（北京时间，下同）2 m 高度上气温的模拟结果。从 CTL 试验的 10 m 高度的风场上来看，上海市处于稳定的东北风的控制下。CTL 试验表现出了明显的热岛效应，同一时刻 U2V 试验中完全没有 UHI 的迹象，而 V2U 试验则显现出范围更广、强度更大的热岛效

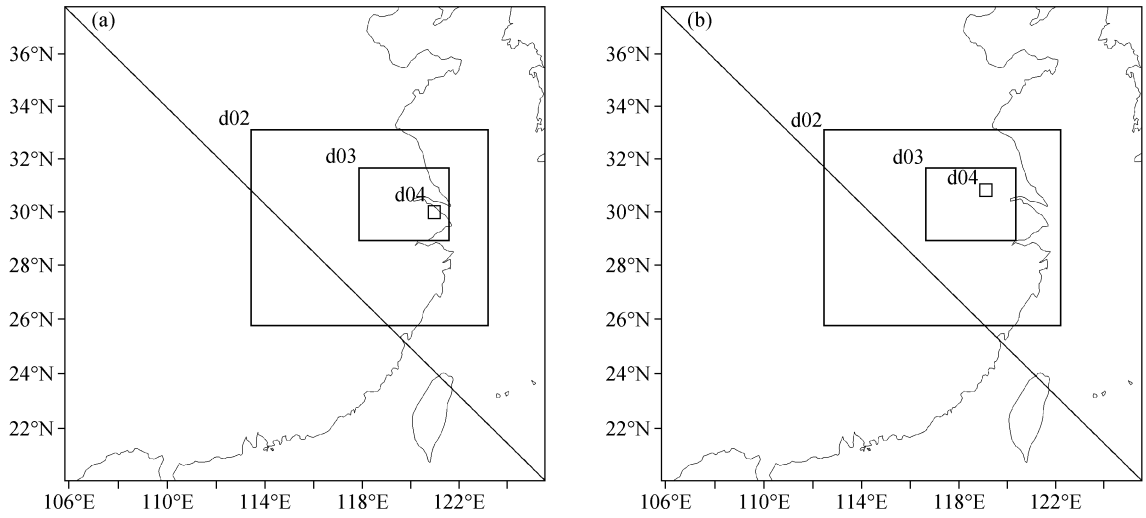

图 1　不同试验的模拟区域：(a) 上海（SH）；(b) 南京（NJ）
Fig. 1　Domain configuration and location of the study areas：(a) Shanghai (SH)；(b) Nanjing (NJ)

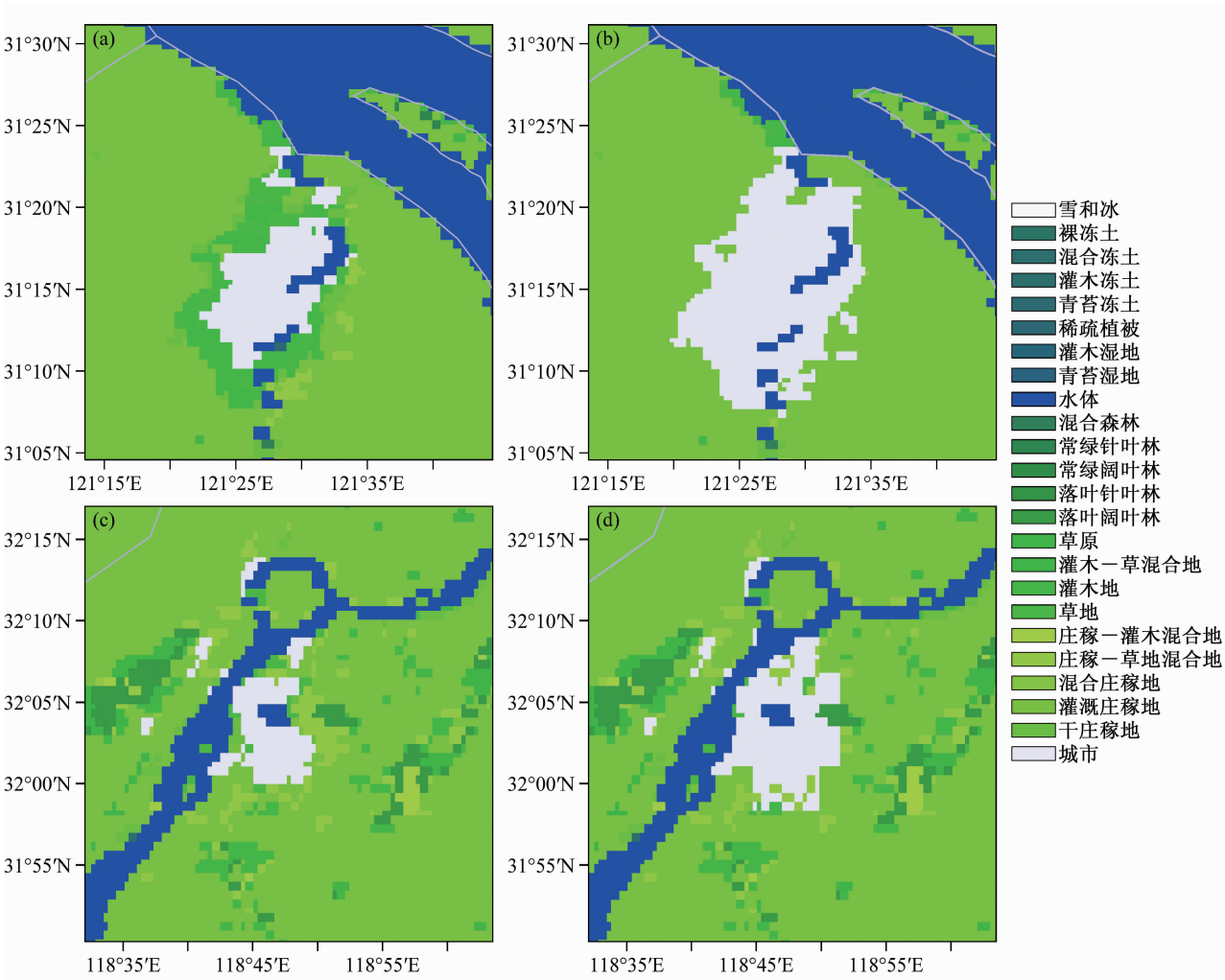

图 2 不同试验个例所模拟区域的植被类型分布（USGS 的 24 种陆面覆盖类型）：（a）SH-CTL；（b）SH-V2U；（c）NJ-CTL；（d）NJ-V2U

Fig. 2 Land cover of the study areas (USGS 24-category landuse categories): (a) SH-CTL; (b) SH-V2U; (c) NJ-CTL; (d) NJ-V2U

应。显然，城市热岛的强度与城市的规模是成正比的。在大尺度环境风场的影响下，控制试验 CTL 中 UHI 的高温中心明显向城市西南方郊区偏移，造成了郊区的高温。类似的，V2U 试验中西南部郊区的气温也显著升高；而 U2V 试验则没有该现象。模式模拟的 2 m 气温的分布与地表温度的分布（图 3a2、3b2、3c2）有着密切的联系，城市表面有着较低的反射率，所以在白天可以吸收更多的太阳短波辐射，因而有着较高的地表温度。城市的高温地表向大气输送更多的感热，造成了白天的 UHI 现象。在大尺度环境风场的影响下，城市表面输送给大气的热量向西南方向转移，所以气温的高温带与地表温度的高温带的分布不完全一致，而是出现了 UHI 高温中心向西南方偏移的现象。

下面给出另外一个个例 SH2 的模拟结果。如图 3d1 所示，上海市在东南风的控制下。2007 年 8 月 10 日 13 时的 2 m 气温模拟情况（见图 3d1、3e1、3f1）：CTL 和 V2U 试验都表现出 UHI 效应，U2V 试验中城市的气温与其周边郊区的气温没有明显差别。同一时刻的地表温度的模拟结果（图 3d2、3e2、3f2）表明，城市的地表温度要明显高于郊区的地表温度。U2V 试验中的城市表面换成草地后，地表温度与 CTL 试验相比就显著降低了。与 SH1 类似，CTL 和 V2U 试验中气温的高温带与地表温度的高温带的分布不完全一致，UHI 在东南风的影响下，表现为城市西北方郊区的气温升高，而同一位置地表温度的增温则不太

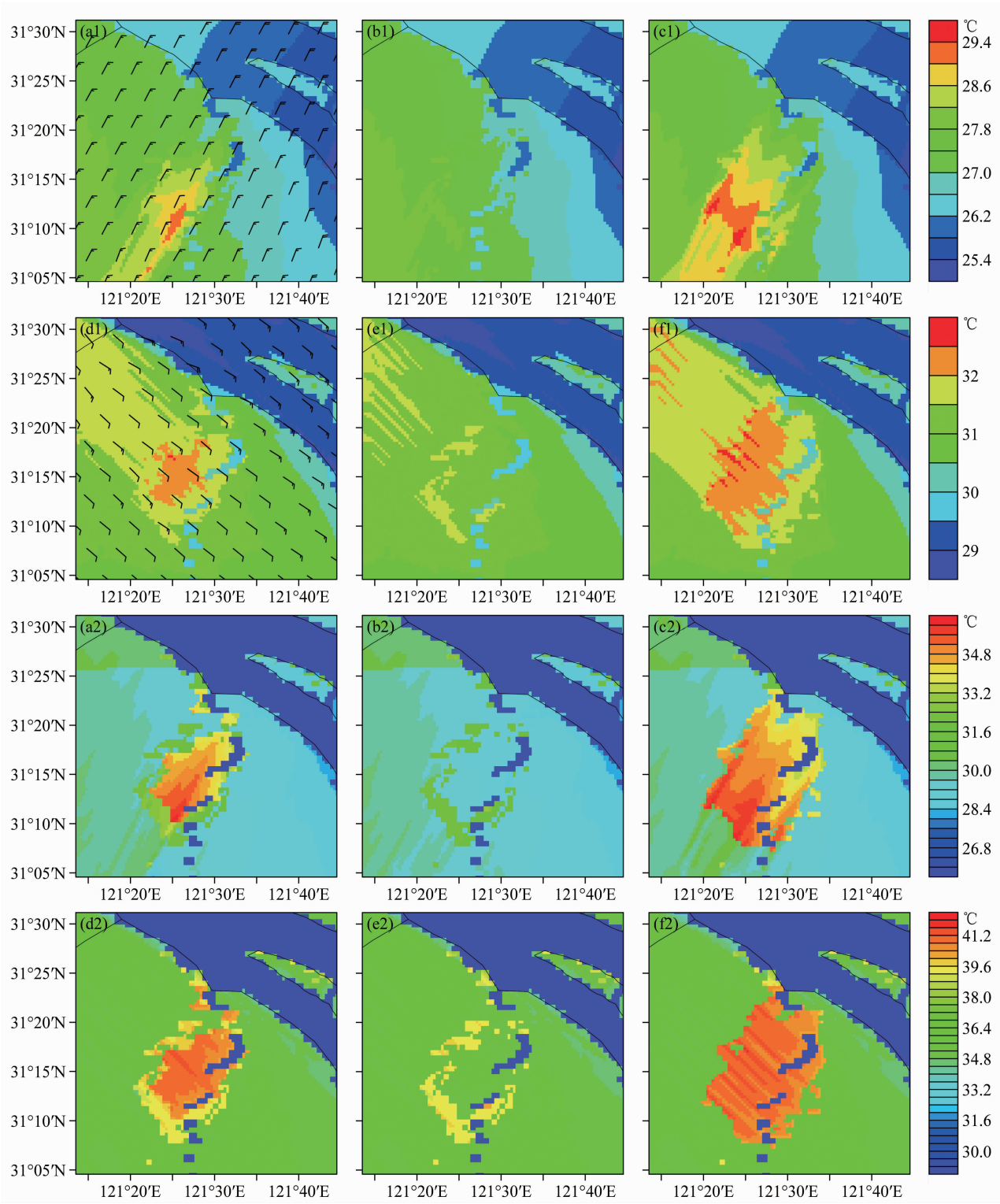

图 3　模式模拟的（a1－c1）、（a2－c2）2007 年 7 月 13 日 16 时和（d1－f1）、（d2－f2）2007 年 8 月 10 日 13 时上海两个个例不同试验 2 m 高度上（a1－f1）气温和（a2－f2）地表温度的情况，以及（a1、d1）CTL 试验的地面风情况：（a、d）CTL；（b、e）U2V；（c、f）V2U

Fig. 3　2-m (a1－f1) air temperature, (a2－f2) surface temperature, and (a1, d1) surface wind in CTL of the simulated results in Shanghai at (a1－c1), (a2－c2) 1600 LST 13 Jul 2007 and (d1－f1), (d2－f2) 1300 LST 10 Aug 2007: (a, d) CTL; (b, e) U2V; (c, f) V2U

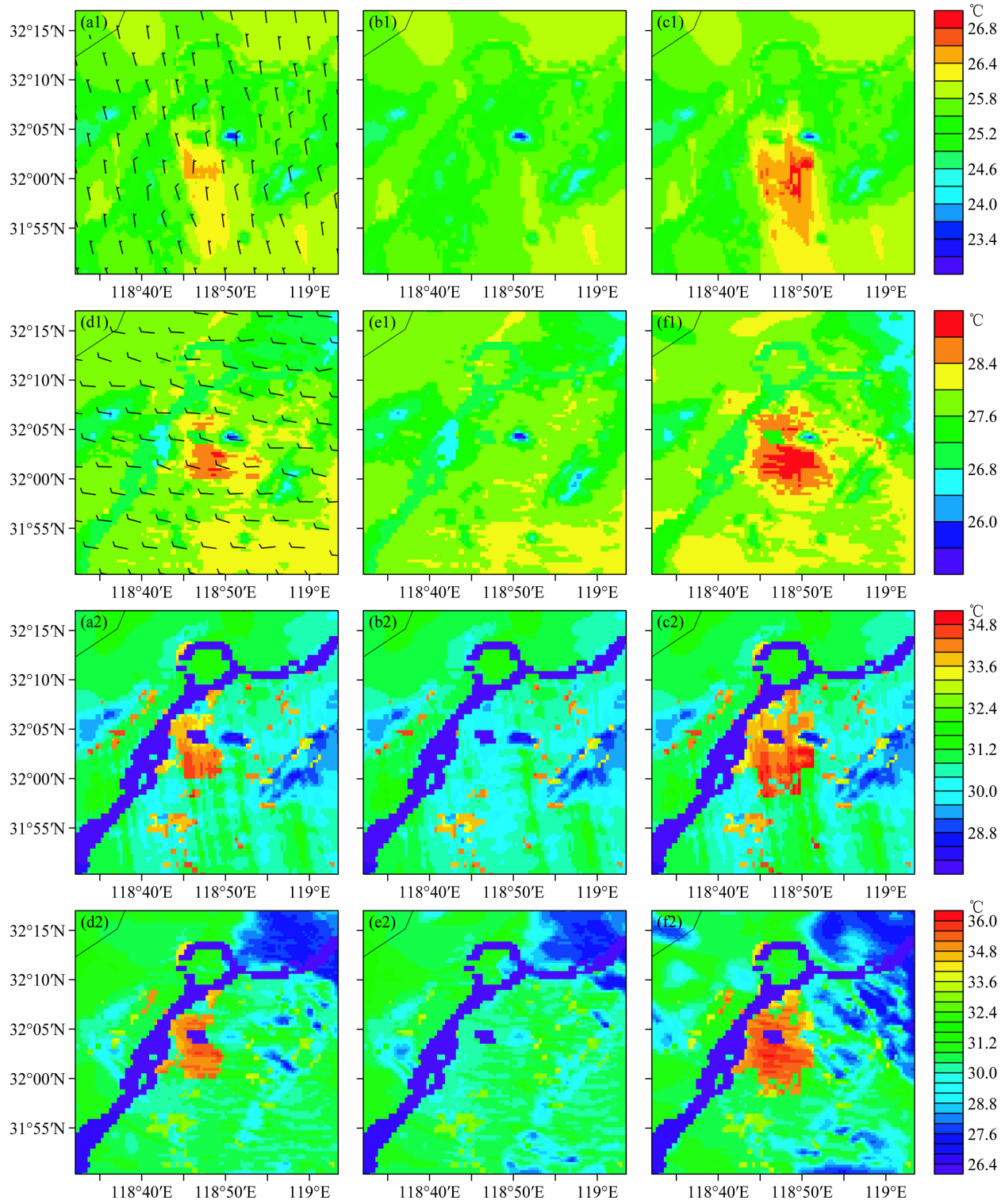

图 4 同图 3，但为模式模拟的（a1－c1）、（a2－c2）2007 年 8 月 13 日 10 时和（d1－f1）、（d2－f2）2008 年 7 月 20 日 16 时南京的情况

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for Nanjing at (a1－c1), (a2－c2) 0000 LST 13 Aug 2007, (d1－f1), (d2－f2) 1600 LST 20 Jul 2008

明显。

3.2 南京个例（NJ1、NJ2）

先给出个例 NJ1 模式模拟的 2007 年 8 月 13 日 10 时 2 m 高度上气温的情况。如图 4a1、4b1、4c1 所示，U2V 试验中没有出现热岛效应；V2U 试验中热岛强度要大于 CTL 试验。南京受北风控

制下，CTL 和 V2U 试验的气温的分布与地表温度（图 4a2、4b2、4c2）相比，气温的高值带明显向南偏移，同一时刻的地表温度的高值带则是严格地与城市下垫面相吻合的。CTL 与 V2U 试验中都可以看到：城区表面由于吸收了更多的太阳短波辐射，地表温度要明显高于郊区。

再分析个例 NJ2 模式 2008 年 7 月 20 日 16 时 2 m 高度上气温的模拟结果（见图 4d1、4e1、4f1）。环境风场表现为西风（图 4d1）。CTL 试验有明显的 UHI 效应；V2U 试验中的 UHI 无论是范围还是强度都要大于控制试验 CTL；U2V 试验中没有突出的高值中心。CTL、V2U 试验中，气温的高值区向城区东部郊区偏移明显，其高温分布与地表温度的分布（图 4d2、4e2、4f2）有一定的偏差。

3.3　大尺度风场下城市化对热岛结构的影响

上海和南京有着不同的地理位置和植被分布，在不同的大尺度环境风场的影响下，所有的控制

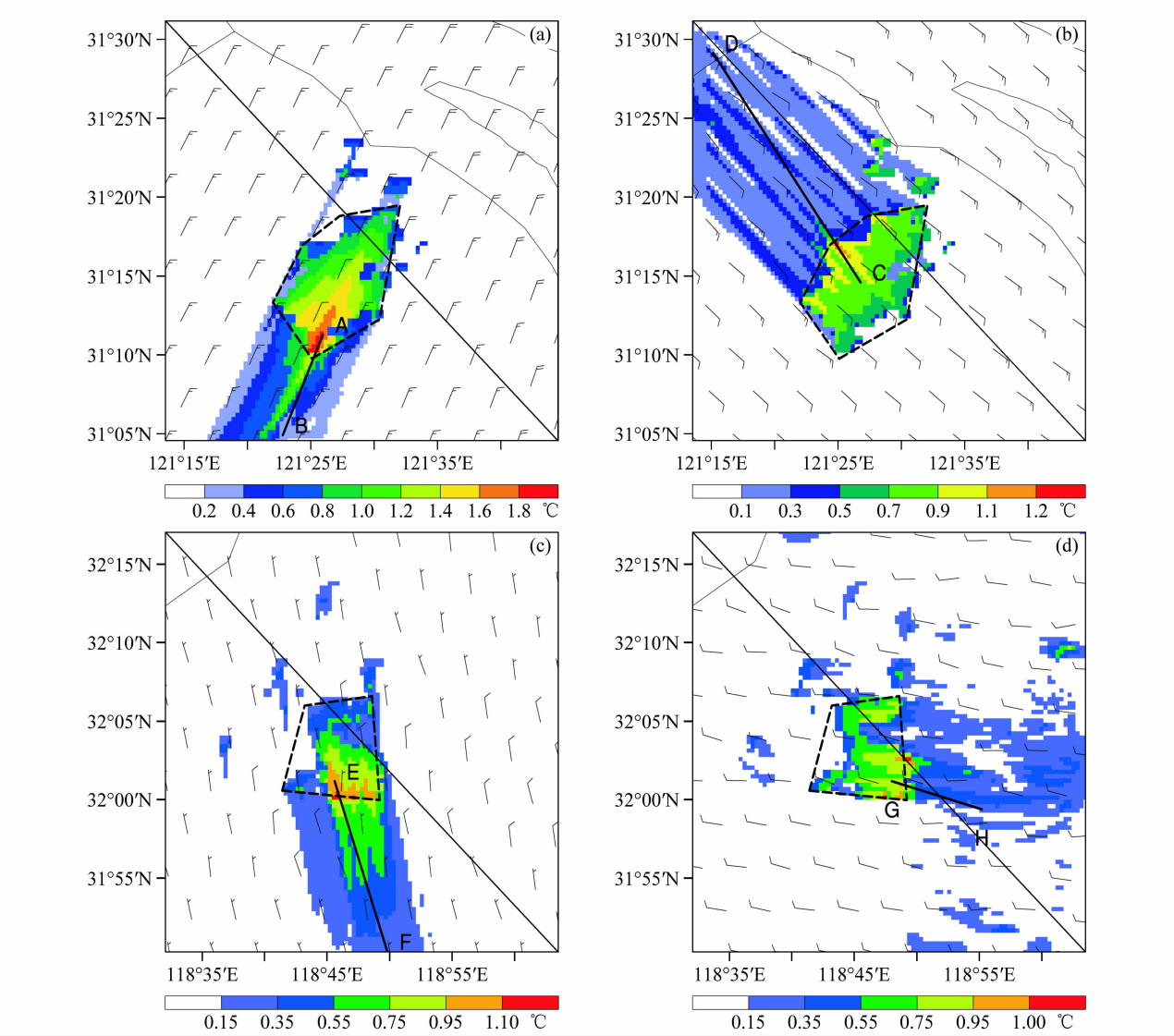

图 5　4 个个例不同试验 2 m 高度上气温的差异（CTL－U2V）及 CTL 试验中的 10 m 高度上风场情况：(a) SH1，2007 年 7 月 13 日 16 时；(b) SH2，2007 年 8 月 10 日 13 时；(c) NJ1，2007 年 8 月 13 日 10 时；(d) NJ2，2008 年 7 月 20 日 16 时。黑色直线为剖面图截取的位置，黑色虚线代表城区所在位置

Fig. 5　Difference of 2-m air temperature (CTL－U2V), 10-m surface wind in CTL for different cases: (a) SH1, 1600 LST 13 Jul 2007; (b) SH2, 1300 LST 10 Aug 2007; (c) NJ1, 1000 LST 13 Aug 2007; (d) NJ2, 1600 LST 20 Jul 2008. Black solid lines indicate the positions of the cross sections, black dashed lines show the urban surfaces area

试验都能很好地模拟出 UHI 现象。V2U 试验用来研究 UHI 在城市规模扩大以后所发生的变化，可以看到城市发展以后，所有的 V2U 试验中 UHI 的范围都变得更广，强度也更大了。从不同个例中 CTL 和 V2U 试验的模拟结果可以看出，UHI 的水平结构与大尺度风场之间有着密切的联系。在地面风的作用下，UHI 的高值中心明显向下游偏移，使得城市下风方郊区的气温显著上升。图 5 分别给出了不同个例中 2 m 高度上气温的差异（CTL－U2V）。可以看出，差值的高温中心出现在城市所在的位置，高值带顺着地面风的方向，从城市向下游延展。气温差异说明，城市化的结果不仅增加了城区局地的地面气温，并且在大尺度风场的作用下，使得城市下游郊区的气温也明显上升。

从 CTL 试验中平行于环境风场的气温垂直剖面图可以看出，在 4 个个例中低层大气都出现了一个水平方向上的高温带，从城区一直向下游郊区延伸（图 6）。这可能是城市近地层大气从下垫面所获得的热量被源源不断地输送到下游的郊区的结果。在地面大尺度风场的影响下，城市下风方郊区低层大气比其它位置郊区能获得更多的热量，气温明显偏高。

图 7 所示的是两组试验（CTL－U2V）气温差异的剖面图。从 CTL 和 U2V 试验的差异可以看出城市化对低层气温的影响：城市化过程使城市以及城郊过渡带上空大气获得更多的热量，气温明显上升。城市出现以后，其上空低层大气获得了“过剩”（这部分能量很明显是城市化带来的）的热量，在近地面风场的作用下不断向下游

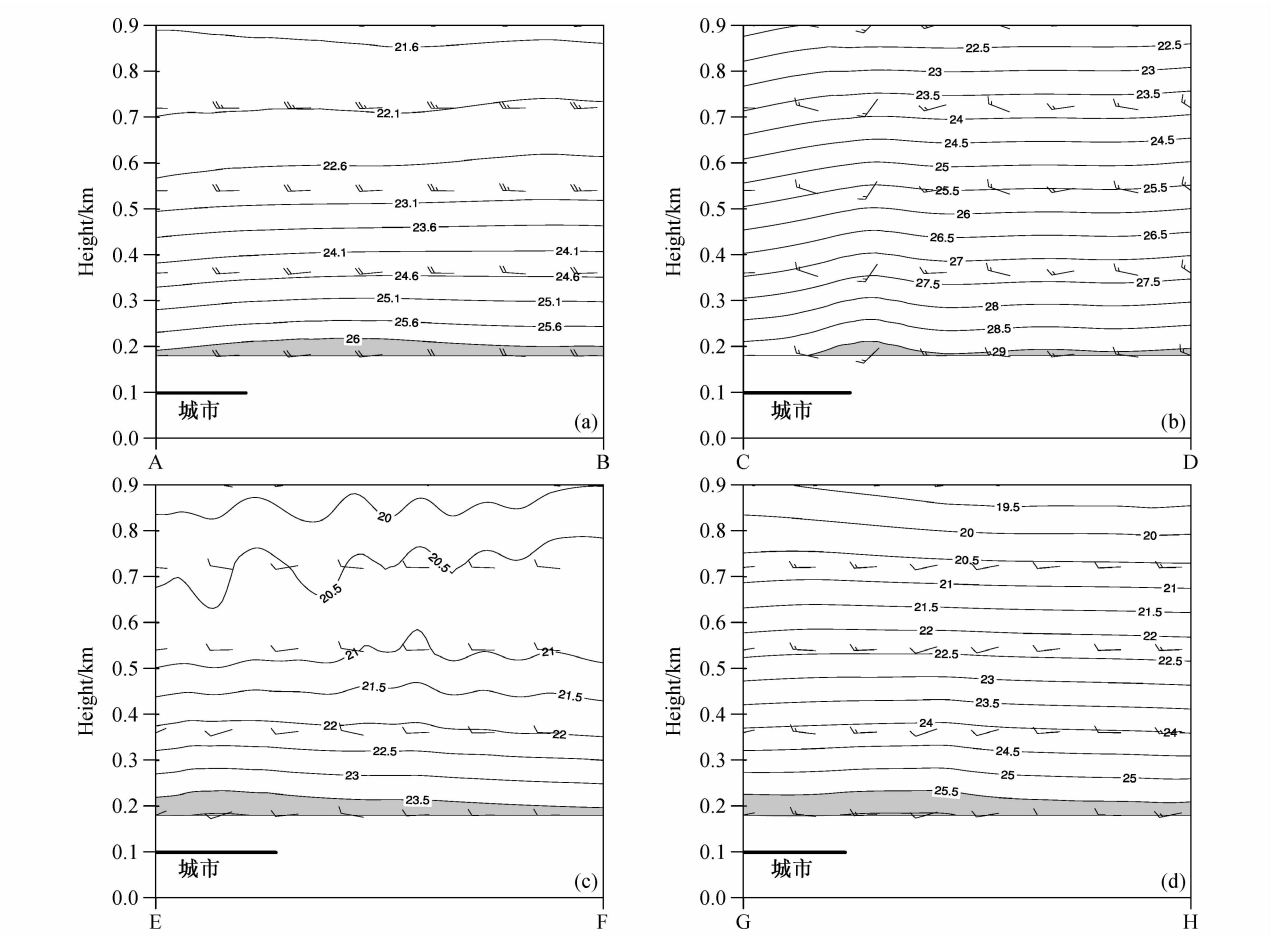

图 6 4 个个例在试验 CTL 中气温（单位：℃）及风场的剖面图：(a) SH1；(b) SH2；(c) NJ1；(d) NJ2。剖面截取的区域为图 5 中黑色直线所在的垂直剖面，图下方的粗黑实线表示城市所在的表面，灰色阴影部分为高值区，模拟时间同图 5

Fig. 6 Cross sections of air temperature (℃) and wind in CTL along the lines (shown as the black solid lines in Fig. 5) at the same time as Fig. 5: (a) SH1; (b) SH2; (c) NJ1; (d) NJ2. Urabn areas are marked with solid black horizontal lines, shaded areas indicate high values

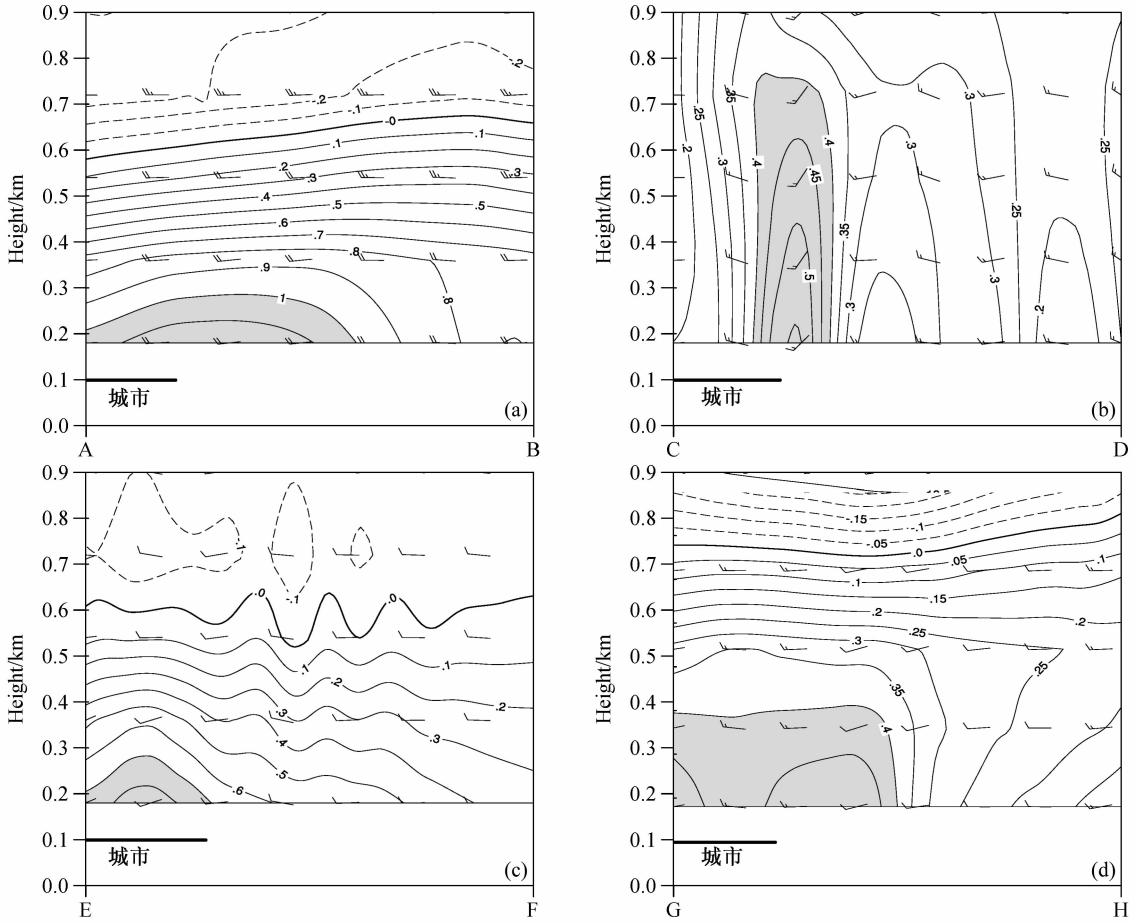

图 7　同图 6，但为 4 个个例两组试验气温的差异（CTL－U2V）（单位：℃）及 CTL 试验的风场剖面图

Fig. 7　Same as Fig. 6，but for the cross sections of difference of air temperature（CTL－U2V）(℃) and wind in CTL

输送，为下游郊区地面气温上升提供了能量来源。

为了估算暖平流对下风方郊区增温作用的强度大小，使用王开存等（2004）的方法，考虑简化的热量守恒方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t}=-u\frac{\partial T}{\partial x}-v\frac{\partial T}{\partial y}-w\frac{\partial T}{\partial z}, \qquad (1)$$

地面风稳定，所以取 x 轴方向与下风方城郊过渡带的平均风向一致，则风速的分量 v 为 0，不考虑下沉或抬升（$w=0$），（1）式可以改写成：

$$\frac{\partial T}{\partial t}=-u\frac{\partial T}{\partial x}, \qquad (2)$$

对（2）式取平均后，改成差分形式：

$$\frac{\Delta\overline{T}}{\Delta t}=-u\frac{\Delta\overline{T}}{\Delta x}. \qquad (3)$$

利用（3）式来计算下风方城郊过渡带的平流加热率 $\Delta\overline{T}/\Delta t$，$\Delta\overline{T}/\Delta x$ 为 x 方向下风方城郊过渡带上的平均水平温度梯度。这里 T 使用的是模式输出的 2 m 高度上气温数据。

图 8 为 4 个个例 CTL 试验中的下风方城郊过渡带平流加热率的日变化。由图可以看出，从 17 时开始，平流加热率迅速上升，并在 19 时左右达到最大，然后又开始下降。除了某些个例的个别时次外，大部分时间平流加热率都可以达到 2 K·h^{-1}，极大值则都高于 6 K·h^{-1}。说明城郊过渡带由于平流作用而产生的加热作用相当明显。

4　结论

本文使用了 WRF-UCM，模拟研究了上海和南京两个不同城市 4 次典型的 UHI 现象，分析探讨了 UHI 的水平结构与大尺度环境风场之间的关系。UHI 的高温区在地面风的作用下，向城市下游平移，形成一个横跨城郊的高温带。下风方的郊区受到上游城市的影响，气温明显高于其它方

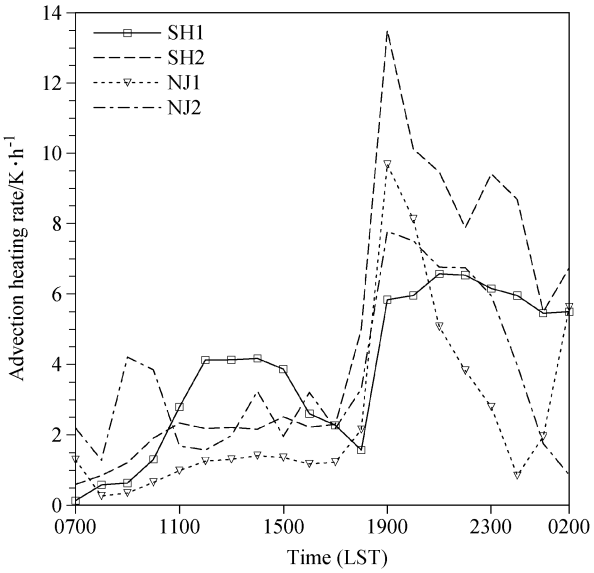

图8 4个个例在城郊过渡带处的平流加热率

Fig. 8 Advection heating rate over transition zone between urban and rural areas in different cases

位的郊区。城市规模的扩大不仅会使局地城市热岛的强度增加，也会同时加强对下风方的增温。从气温垂直剖面图中可以看出，在4个个例中低层大气都出现了一个水平高温带，从城区一直延伸到下游郊区。通过对气温差异的剖面图进行分析，可以看出城市化对低层气温的影响：城市化过程使城市以及城郊过渡带上空大气获得更多的热量，气温明显上升。文章最后计算了下风方城郊过渡带的平流加热率大小，结果表明：城郊过渡带的地面气温受到来自城市的暖平流产生的加热作用十分显著。

本文结果表明，UHI的影响不仅仅在城市，大尺度环境风场会改变UHI高温的水平分布，使得下风方郊区的气温明显上升。但是，因为本研究中使用的城市冠层模型UCM是比较简单的单层模型，并没有考虑城市的高建筑对于低层大气边界层的影响；为了研究方便，本文忽略了城市地表的多样性，城市表面采用同一种地表参数，对于城市边界层的模拟比较粗糙；模式不完善以及空间分辨率、初始和边界条件的选取等问题都会造成本文的结论在一定程度上具有局限性。在以后的研究中可以使用复杂的城市冠层模型，在更加精细的参数化方案下，加深了解城市和大气边界层的相互作用；另外，计划在后面的工作中加入模拟结果与观测资料的对比分析，增加结论的可信度。

参考文献（References）

Changnon S A. 1978. Urban effects on severe local storms at St. Louis [J]. J. Appl. Meteor., 17 (5): 578-586.

Chen F, Kusaka H, Tewari M, et al. 2004. Utilizing the coupled WRF/LSM/urban modeling system with detailed urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the greater Houston area [C]. Fifth Conference on Urban Environment, Vancouver, BC, Canada, Amer. Meteor. Soc., 23-27.

邓莲堂，束炯，李朝颐. 2001. 上海城市热岛的变化特征分析 [J]. 热带气象学报，17 (3)，273-280. Deng Liantang, Shu Jiong, Li Chaoyi. 2001. Character analysis of Shanghai urban heat island [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 17 (3): 273-280.

丁金才，张志凯，奚红，等. 2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究 [J]. 大气科学，26 (3)：412-420. Ding Jincai, Zhang Zhikai, Xi Hongzhou, 2002. A study of the high temperature distribution and the heat island effectin the summer of the Shanghai area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 412-420.

董喜春，汤剑平，王元，等. 2008. 长江中下游地区城市化进程中地表植被变化气候效应的数值模拟 [J]. 气象科学，28 (2)：147-154. Dong Xichun, Tang Jianping, Wang Yuan, et al. 2008. Numerical simulation of the climate effect of the urbanization course along the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (2): 147-154.

胡小明，刘树华，梁福明，等. 2005. 北京区域近地边界层特征数值模拟 [J]. 北京大学学报（自然科学版），41 (4)：514-522. Hu Xiaoming, Liu Shuhua, Liang Fuming, et al. 2005. Numerical simulation of features of surface boundary-layer over Beijing area [J]. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis (in Chinese), 41 (4): 514-522.

Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. Nature, 423: 528-531.

Landsberg H E. 1970. Man-made climatic changes: Man's activities have altered the climate of urbanized areas and may affect global climate in the future [J]. Science, 170 (3964): 1265.

李兴荣，胡非，舒文军，等. 2008. 北京秋季城市热岛效应及其气象影响因子 [J]. 气候与环境研究，13 (3)：291-299. Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun, et al. 2008. Characteristics of urban heat island effect and its meteorological influencing factors over Beijing in autumn [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (3): 291-299.

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

urbanization on severe thunderstorms over Pearl River delta [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)，31 (2)：364－376.

Miao S G，Chen F，LeMone M A. et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology，48 (3)：484－501.

Ren G Y，Chu Z Y，Chen Z H，et al. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations [J]. Geophys. Res. Lett.，34 (5)：1－5.

桑建国，张治坤，张伯寅. 2000. 热岛环流的动力学分析 [J]. 气象学报，58 (3)：321－327. Sang Jianguo，Zhang Zhikun，Zhang Boyin，2000. Dynamical analyses on heat island circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)，58 (3)：321－327.

孙继松，舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究 [J]. 大气科学，31 (2)，311－320. Sun Jisong，Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)，31 (2)：311－320.

孙奕敏，边海. 1988. 天津市城市热岛效应的综合性研究 [J]. 气象学报，46 (3)：341－348. Sun Yimin，Bian Hai，1988. A comprehensive study on urban heat island effect in Tianjin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)，46 (3)：341－348.

王开存，陈长和，张镭，等. 2004. 城乡过渡地带低空温度平流和边界层特征的观测分析 [J]. 高原气象，23 (4)：529－533. Wang Kaicun，Chen Changhe，Zhang Lei，et al. 2004. Observational study on character of boundary layer and low-level tempearture advection over transitionzone between urban and rural [J]. Plateau Meteorology (in Chinese)，23 (4)，529－533.

王喜全，王自发，郭虎. 2006. 北京“城市热岛”效应现状及特征 [J]. 气候与环境研究，11 (5)，627－636. Wang Xiquan，Wang Zifa，Guo Hu. 2006. The study of the urban heat island in Beijing city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，11 (5)：627－636.

谢庄，崔继良，陈大刚，等. 2006. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析 [J]. 气候与环境研究，11 (1)：69－75. Xie Zhuang，Cui Jiliang，Chen Dagang，et al. 2006. The annual seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，11 (1)：69－75.

Zhang D，Shou Y X，Dickerson R R. 2009. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects [J]. Geophys. Res. Lett.，36，L24401，doi：10.1029/2009GL041082..

郑祚芳，范水勇，王迎春. 2006. 城市热岛效应对北京夏季高温的影响 [J]. 应用气象学报，17 (S1)：48－53. Zheng Zuofang，Fan Shuiyong，Wang Yingchun. 2006. Effects of urban heat island on summer high temperatures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)，17 (S1)：48－53.

周淑贞. 1988. 上海城市气候中的“五岛”效应 [J]. 中国科学 B 辑，11：1226－1234. Zhou Shuzhen，1988. Five island effect of urban climate in Shanghai [J]. Science in China (Ser. B) (in Chinese)，11：1226－1234.