

# WRF - ARW 模式在北京城市热岛模拟研究中的应用

刘倩<sup>1</sup> 刘斌<sup>2</sup> 王晓云<sup>3</sup> 王锋<sup>1</sup> 王畅<sup>1</sup>

(唐山市曹妃甸工业区气象局<sup>1</sup>,唐山 063200;南京信息工程大学遥感学院<sup>2</sup>,南京 210044;中国气象局气象探测中心<sup>3</sup>,北京 100000)

**摘要** 为了分析城市化对北京城市热岛效应的影响程度,利用 NCEP 1 °C × 1 °C 逐日再分析资料、Landsat 遥感产品数据以及中尺度 WRF 模式,对北京城市下垫面因子的变化进行模拟。分析城市化对北京城市热岛强度的影响。结果表明:白天北京的城市、近郊、远郊存在气温的逐级递减趋势,而夜间热岛分布广且城郊温差小,城市热岛强度总体维持在 1 °C 以上。下垫面由郊区变为城市会使当地的气温升高;并且这种升温效果在夜间比较显著。城区面积的扩张,会进一步增加城市中心区的温度。从不同年份小风区面积的变化看出,城市化在夜晚不断的加剧城市热岛效应,而白天则先增强后减弱。

**关键词** 城市热岛 WRF 模式 北京城市气象

中图法分类号 P463.3; 文献标志码 A

随着全球气候的不断变暖以及城市化进程的快速发展,城市热岛效应越来越显著。城市热岛<sup>[1-2]</sup>这一概念的提出以来,国内外许多气象学家对城市热岛研究方法进行了探索,大致有三种研究方法:观测数据分析、遥感影像反演及数值模拟。

## 1 相关工作

20 世纪 60 年代开始,主要采用对观测数据分析法来研究城市热岛效应。Katsoulits 等<sup>[3]</sup>通过对希腊雅典城市 221 年的温度资料分析城市热岛现象和成因。Barring<sup>[4]</sup>也通过对瑞典气象资料进行了分析,总结了城市和道路热岛对城市的综合影响。我国于 20 世纪 80 年代开始城市热岛研究,对北京<sup>[5]</sup>、上海<sup>[6]</sup>等大城市研究的相对较多。

随着卫星遥感技术的发展,通过对遥感影像资料对城市热岛的研究技术被广泛应用<sup>[7]</sup>。1979 年 Priece 等<sup>[8]</sup>通过对相关的卫星数据分析了城市热岛效应。1989 年 M. Roth 和 Oke 等<sup>[9]</sup>对美国加州 3 个沿海城市的遥感数据中的红外线数据作了相关的分析,指出在研究城市热岛和进行建模时发现的参数设定和局限性等一些问题。武腾飞等<sup>[10]</sup>对北京市影像图分析,发现城市热岛效应与建筑指数之间存在正相关关系。黄聚聪等<sup>[11]</sup>利用 1987 ~ 2007 年厦门市 5 景 Landsat 遥感影像进行分析,对厦门城市热

岛景观格局演变的时空特征进行了分析。

近些年来,数值模拟技术飞速发展,研究学者利用 WRF 研究模拟较大时空尺度的城市热岛效应,数值模式逐渐成为研究城市气候的有力工具<sup>[12]</sup>。李雨鸿等<sup>[13]</sup>研究了北京市夏季高温特征及成因,并用 WRF 模式设计了 4 个案例,来分析高温天气下,城市热岛的变化状态。姜润等<sup>[14]</sup>通过对南京夏季城市热岛进行模拟研究,通过对近地面温度、温廓线、湍流动能及热通量的分布,来三维的描述热岛效应。宋迅殊等<sup>[15]</sup>对苏州市在不同年代的下垫面进行模拟研究,分析了城市化的发展下,导致城市下垫面变化对城市气象环境的影响。

为了分析城市化对北京城市热岛效应的影响程度,本文通过运用 WRF 模式,选取 Landsat 卫星观测到的北京地区城市 1990 年、2000 年及 2011 年三年的城市下垫面特征数据(建成区范围)来驱动模式运行,并对最终的实验结果进行比较分析,得出城市化对北京城市热岛强度的影响。

## 2 过程概括

2012 年 7 月 1 日 00 时至 7 月 3 日 00 时北京受副热带高压控制,是典型的晴空高温天气。通过分析大气环流背景图形势可以发现,我国大部分地区,在高温天气期间,会受到大陆暖高压控制,天气晴好。同时,北京西北山脉会发生湿度较低的西北风,在山脉的背风坡下沉,形成干绝热增温,即焚风效应;而北京东南部的平原地区因为焚风效应的影响,使当地的气温进一步的升高,从而促进高温天气的出现。由此可以得出,大陆暖高压控制下的脊前下

2014 年 8 月 15 日收到 公益性行业(气象)科研专项  
(GYHY201106032-03)、国家自然科学基金项目(61375030)资助  
第一作者简介:刘倩(1986—),女,助理工程师,硕士。研究方向:  
城市气候与数值模拟。E-mail: qianxuna13@126.com。

沉增温和焚风效应是引起此次北京高温天气过程主要因素。

### 3 模式和试验方案设计

本试验采用 WRFV3.4 版本,选用多层城市冠层方案(BEP 方案),利用  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP/NCAR 全球 6 h 一次的再分析资料 FNL 插值生成初始场和边界值场,下垫面数据使用 1990 年、2000 年及 2011 年 Landsat 遥感数据转换得到(图 1),来驱动中尺度

WRF 模式进行数值模拟,模式初始时间为 2012 年 7 月 1 日 00 点每隔 1 h 输出一次模拟结果。

本研究模拟区域包括了北京城郊区建成区及其周围部分山区;为实现高分辨率模拟,采用了同一中心经纬度下的 4 重区域嵌套,静态地形数据分辨率分别为 10 min、5 min、2 min 和 30 s。模拟中心经纬度为:116.55E、39.95N。4 重网格数(分辨率)分别为  $100 \times 100$  (27 km)、 $100 \times 100$  (9 km)、 $100 \times 100$  (3 km) 和  $136 \times 124$  (1 km)。模拟区域垂直坐标采用 35 层,顶层气压为 50 hPa,投影方式为 Mercator。各嵌套区域如图 2 所示,最内层 d04 区域为研究区范围。

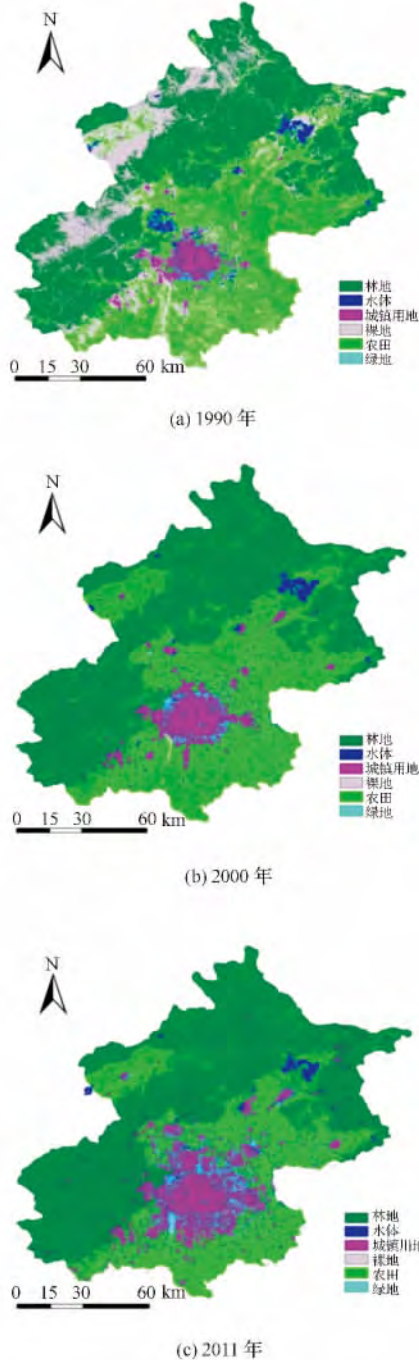


图 1 北京市 Landsat 遥感影像图  
Fig. 1 Beijing Landsat remote sensing images

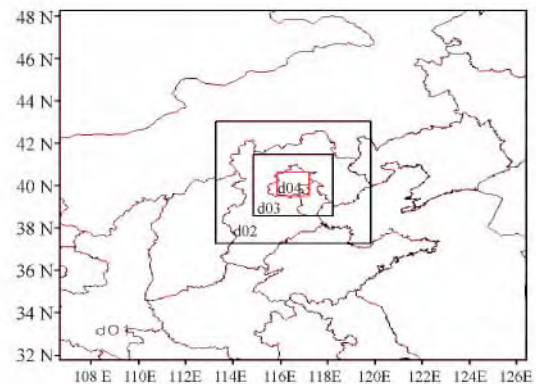


图 2 数值模拟嵌套区域范围示意图  
Fig. 2 Four nested domains of WRF

通过参考北京地区 WRF 数值模拟的相关文献,总结了一套适合北京区域数值模拟的参数选取方案,见表 1。

表 1 模式物理方案选取

Table 1 Suggest examples of physics choice

物理过程	方案选取
云微物理过程(mp_physics)	WRF Single-Moment 6-class scheme
长波辐射方案(ra_lw_physics)	Rrtm scheme
短波辐射方案(ra_sw_physics)	Dudhia scheme
近地面层方案(sf_sfclay_physics)	MYJ Monin-Obukhov
陆面过程(sf_surface_physics)	Noah Land Surface Model
边界层过程(bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic scheme
积云参数化(cu_physics)	Kain-Fritsch( new Eta) scheme

## 4 结果分析

### 4.1 模式验证

为了验证在北京地区运用 WRF 模式及本方案的设计的可行性,需要将模拟结果与实测数据进行对比分析。代表站点选择海淀站(54399)为城区的温度、通州站(54431)作为城郊地区的温度和密云站(54416)作为郊区的温度,图 3 为三个站点的分

布图。

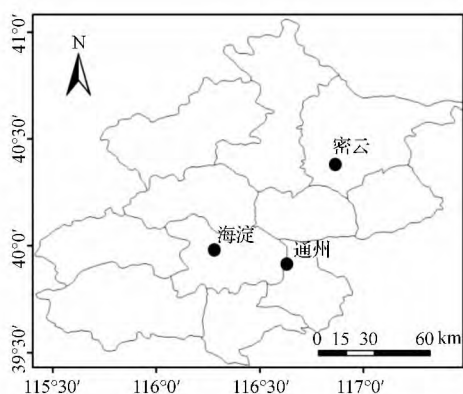


图3 北京市三个站点分布图

Fig. 3 Three distribution sites of Beijing

对照试验模拟的是2012年7月2日00时至7月2日23时所选三个站的地近地面气温,三个年份的下垫面特征实测数据与模拟数据的对比结果如图4所示。分析可知海淀站凌晨时分模拟效果较差,模拟值基本都大于实况值,其余时段模拟效果较好;通州站的24h模拟值基本都小于实况值;而密云站在白天模拟效果最好,但夜晚和凌晨时分,其模拟效果较差,和实况值出入较大。

总体来说,城郊三站的模拟温度在夜晚和凌晨时分呈低值时和实测值偏差较大,其余时段则模拟相对较好,对照试验能较好地模拟城区气温日变化趋势情况,模拟与实况结果相差较小,对比表明,模拟效果总体较好。

#### 4.2 城市化进程对近地面温度的影响

以02时刻代表夜间、14时刻代表白天,分析夏季的温度场。图5是通过模拟得到算例1990、2000和2011年02时和14时近地面气温分布。可以明显的看到无论在白天还是夜间,都会发生城市热岛效应,不同时间次的温度场有着不同的特征。02时,城区温度明显高于周围温度,2011年相对高值温度区域完全覆盖了主城区、部分覆盖了门头沟区、房山区、顺义区。1990、2000和2011年主城区一直都处于高温范围。14时,从1990年到2011年,高温区域位于延庆区,其面积不断增大,主城区的温度变化则不是很大。

图5从总体上看,东北部的山区是气温低值区,02时主城及其周围是气温高值区,14时则高值区位于延庆区。此外,东北角的密云水库气温也较周围低。1990年北京市区面积较小,热岛范围较小;1990~2000年,由于北京市城区的扩张,城市热岛范围扩大,城市与郊区温差增大。在这一时期,城区周围的土地不断的被开发,而城市热岛范围显著向

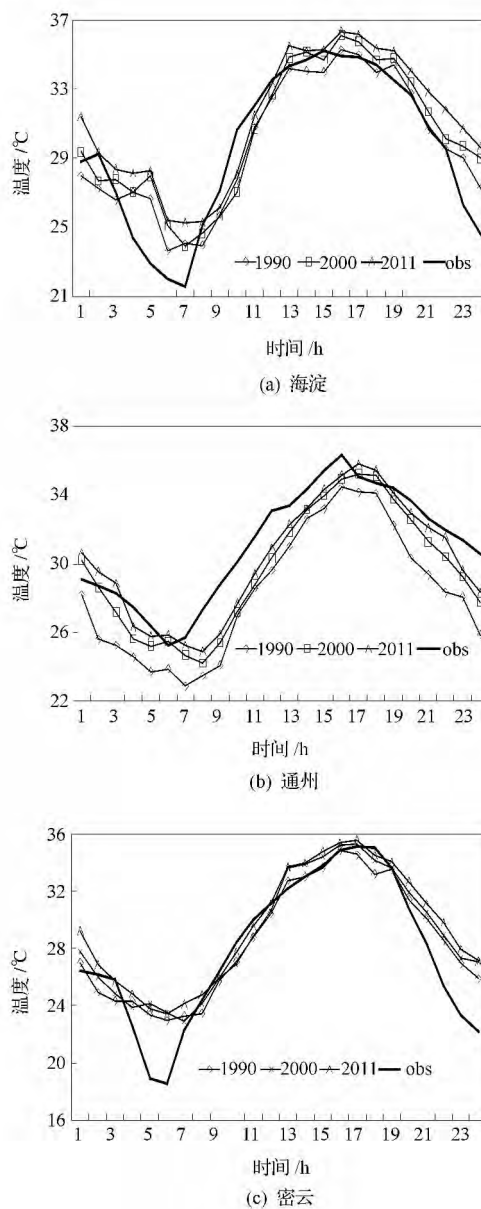


图4 实况与对照模拟的城区近地面气温演变时间序列

Fig. 4 Diurnal variations of observed and simulated hourly urban temperatures of control experiment for urban

城区周围扩张。而如密云等一些远郊地区,城区扩张并不明显,近地面气温与1990年差别不是很大。

2000~2011年,北京城市化进程更加迅速,城区面积不断扩张,城市热岛范围也进一步加大。与2000年相比,北京市区的热岛范围明显向顺义区发展,及向下的房山、大兴,这是由于在这十年中,位于北京城区周围的一些区县逐渐开发完成。而一些如密云这样的远郊,则气温变化不是很大。由此可见,城区的分布以及城市化发展的方向与城市中高温区的分布以及其扩张的趋势基本相一致的。

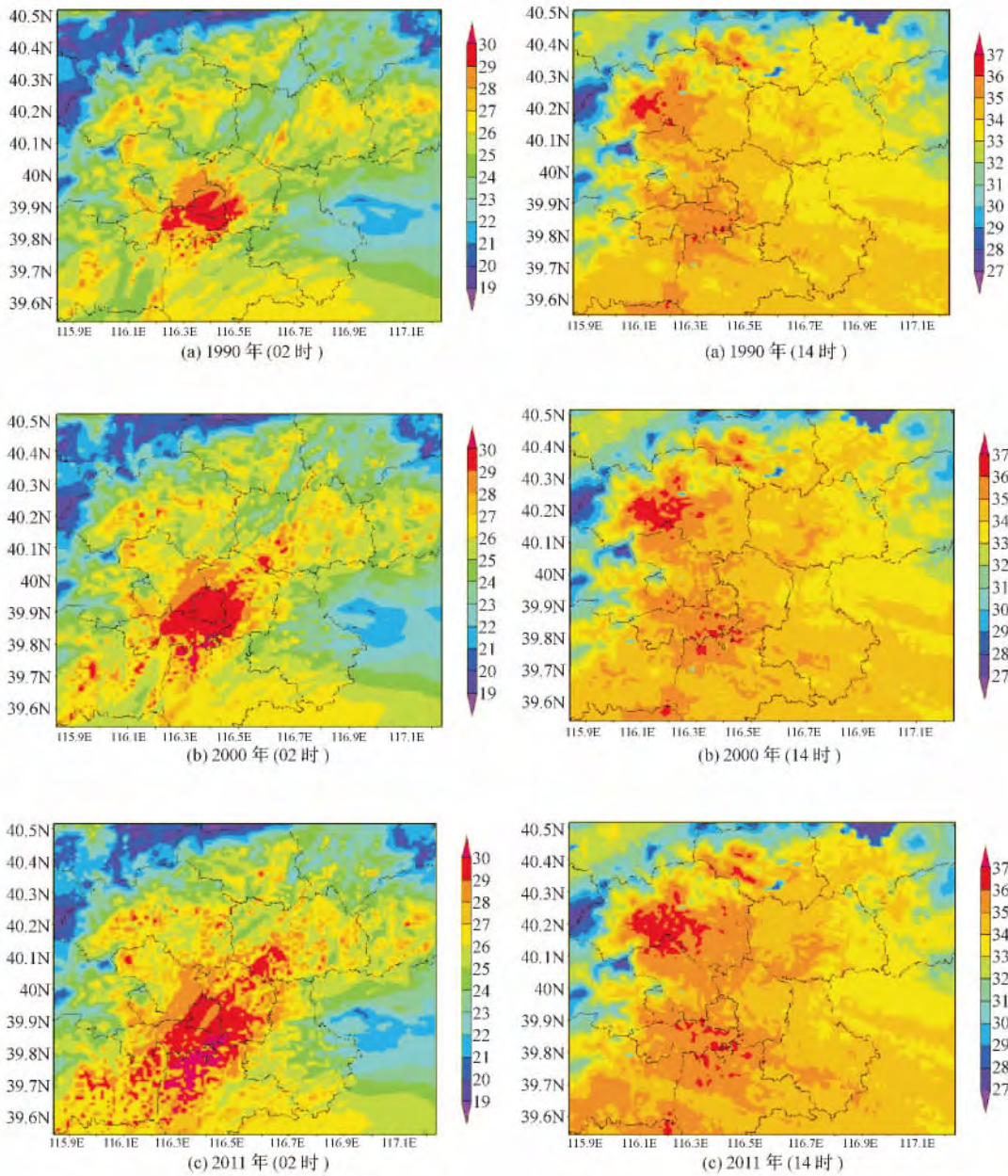


图 5 北京市近地面温度场分布(02 时/14 时)

Fig. 5 The surface temperature field in Beijing(02:00 , 14:00)

### 4.3 三个典型点近地面气温变化

试验选取了 3 个比较典型的站点:(a)为海淀站、(b)为通州站、(c)为密云站。通过对 2012 年 7 月 2 日的模拟数据进行分析,了解北京城市化对近地面气温的影响程度(图 6)。其中(b)点在 2000、2011 年算例中为城市,1990 年算例中为郊区;而(a)点在 3 个算例中均为城市;(c)点在 3 个算例中均为郊区。从图 6 看出 15 时左右(a)、(b)、(c)三站点的近地面气温基本达到了最大值。在 1990 年的算例中,(b)点的气温要比算例 2000 和 2011 年气温低大约 2℃,并且在夜晚(18 时以后)要高出许

多,尤其是 22 时左右,差异达到了 4℃,在 18 时以前这种差异相对较小。这说明,下垫面状况由郊区转为城市会使当地的气温升高,并且这种升温效果在夜间比较显著。(a)点和(c)点下垫面状况均没有改变,但是其气温的变化却有所区别。(c)点的近地面气温在模拟 3 个下垫面里也有所变化,但变化幅度要小于(b)点,2011 年凌晨时刻其温度明显大于其他两个年份,特别是在夜间,温度升高比较明显,达到了 2℃左右。说明在 2000~2011 年,郊区密云也有所发展,在白天和夜晚则差距不是很大,说明在城市化进程下,郊区的气温变化较小。城区

(a) 点虽然下垫面的性质没有改变,但是温度却在升高,这说明城市化进程下,城区面积的扩张,会进一步增加城市中心区的温度。

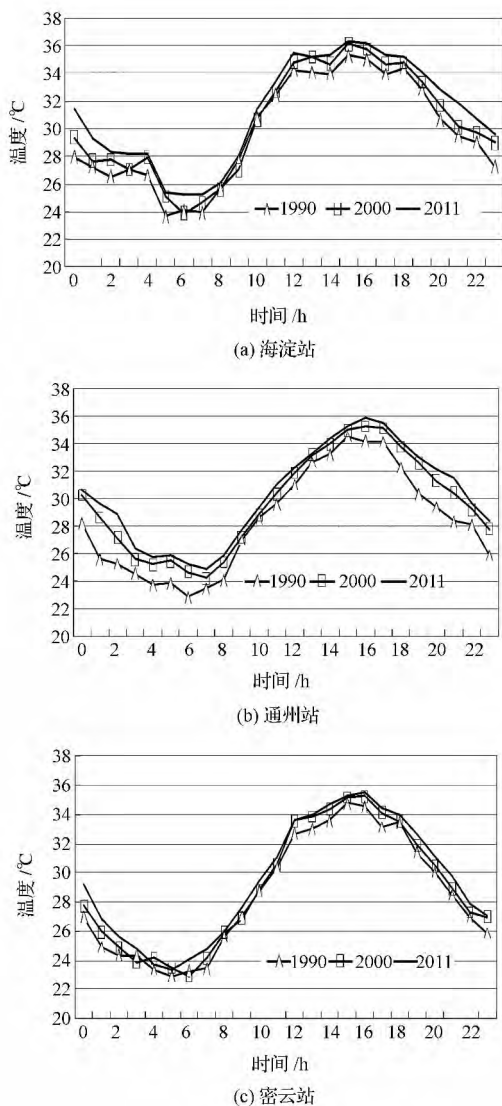


图6 三个典型地点的近地面气温随时间变化  
(海淀站、通州站及密云站)

Fig. 6 Changes of near surface temperature over time

#### 4.4 城市化进程对热岛强度的影响

对2012年7月2日的模拟数据进行分析,分别计算不同年份的热岛强度值,热岛强度是指城郊气温的差值,它是衡量城市热岛强弱的重要指标。在1990年情况下,北京地区城市日平均热岛强度为 $1.26^{\circ}\text{C}$ ;在2000年情况下,日平均城市热岛强度为 $1.43^{\circ}\text{C}$ ;在2011年情况下,日平均城市热岛强度为 $1.72^{\circ}\text{C}$ 。这可以看出在城市化过程中,城市热岛强度在不断增强。从总体上看,强度最大的峰值在03~05时之间,这一时段的热岛强度达到 $4.5^{\circ}\text{C}$ 左右。次峰值在22时左右,强度为 $2.78^{\circ}\text{C}$ 左右,一天

中热岛强度主要呈双峰分布。在1990、2000及2011年的情况下,凌晨时分是热岛强度的谷区,在07时和09时甚至出现了冷岛现象。但是随着北京城市快速发展,夜间热岛强度在不断增强,然而白天热岛强度变化不大,并且在中午之后有略微的减小。由此说明,夜晚和凌晨是城市化进程中城市热岛强度受影响的时刻。

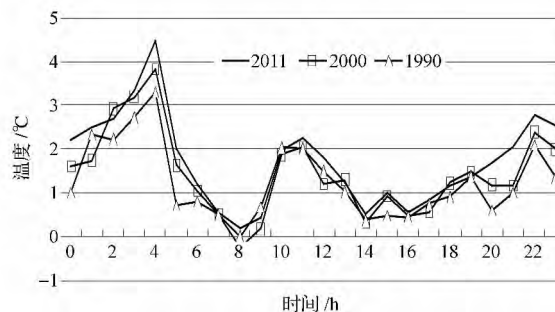


图7 三个年份下热岛强度随时间变化

Fig. 7 Changes of the urban heat island intensity over time within the three years

#### 4.5 城市化进程下小风区面积和热岛面积比较

对2012年7月2日的地表温度的模拟结果进行分析,分别计算出三个年份的小风区面积和热岛面积。风速是对城市热岛最大的影响因子之一,如微风和静风,易加剧城市热岛效应。鉴于此,为反映城市热岛效应的变化情况,本文选用区域内风速小于等于 $1\text{ m/s}$ 区域所占的面积比例来衡量,即小风区面积所占比例越高,说明越能加剧城市热岛效应。从表2中可看出,小风区面积均是14时大于02时,说明北京市城市化进程中白天比夜晚的会更加加剧城市的热岛效应;从不同年份来看,02时的小风区面积随着城市化的进程,其面积在逐渐增大,并呈现加速态势,14时的小风区面积随着城市化进程,面积先增加后减少,说明随着北京市城市化的进程,在夜晚不断的加剧城市热岛效应,而白天则先增强后减弱,城市热岛的强度与城市化过程中城市规模扩大如城区土地利用面积的增大与改变等有关。用热岛强度(即温差大于 $1.5^{\circ}\text{C}$ )的区域所占面积的百分比来衡量。从表中可看出,02时的热岛面积在1990年是小于14时的,而在2000年和2011年是大于14时的,说明北京市在城市化进程中,夜晚的热岛面积先是小于后天的,而后在城市下垫面面积不断的扩张下,夜晚的热岛面积则逐渐大于白天了。从表中不同年份来看,02时的热岛面积随着城市下垫面的不断扩张,其热岛面积也在不断的增大,而14时的热岛面积在1990~2000年基本无变化,在2000~2011年其热岛面积也在不断的增大,表明随着北京

市城市化的进程,02 时的热岛面积呈现不断增大的状态,14 时的热岛面积在 20 世纪 90 年代变化不大,而在 21 世纪初时,热岛面积不断增大。

表 2 三个年份的小风区面积和热岛面积(02 时、14 时)

Table 2 Small wind area and three heat island area (02:00, 14:00)

	1990 年		2000 年		2011 年	
	02 时	14 时	02 时	14 时	02 时	14 时
小风区面积( $\leq 1$ m/s)	1.88%	7.55%	2.70%	8.15%	4.58%	7.92%
热岛面积( $> 1.5$ °C)	48.14%	48.7%	50.97%	48.3%	58.02%	54.8%

随着北京市城市化的进程,夜晚和白天的的小风区面积逐渐增大,也会更加剧北京城市热岛效应,热岛面积也会逐渐增大。总体上,白天比夜晚的更能加剧城市热岛效应,而夜晚的热岛面积先是小于白天的热岛面积,后逐渐大于白天。

## 5 结论与讨论

土地城市化是北京城市热岛强度的主要影响因素,本文通过运用 WRF 模式,选取 1990 年、2000 年及 2011 年三年的城市下垫面特征数据,通过替换模式里的数据,来比较分析城市化对北京城市热岛强度的影响。结论如下:

(1) 模式验证表明在凌晨时分城市气温的模拟较差,其他时间模拟效果较好。气温模拟值和实测值总体分布相一致,模式的性能良好,应用于北京城市气象特征模拟是可信的。

(2) 白天北京的城市、近郊、远郊存在气温的逐级递减趋势,而夜间热岛分布广且城郊温差小,城市热岛强度总体维持在 1 °C 以上。

(3) 下垫面由郊区变为城市会使当地的气温升高,并且这种升温效果在夜间比较显著。在城市化进程下,郊区的气温变化较小,城区虽然下垫面的性质没有改变,但是温度却在升高,这说明城市化进程下,城区面积的扩张,会进一步增加城市中心区的温度。

(4) 小风区面积在 02 时随着下垫面的变化,其面积也在扩大,但总体较小,在 14 时小风区面积先增大后减小,但 2011 年的还是大于 1990 年;热岛面积总体上随着下垫面面积的增长,面积也在扩大,且夜晚的热岛面积要大于白天。说明城市下垫面的扩张,会加剧城市热岛效应,且夜晚的影响程度要大于白天。

## 参 考 文 献

1 Howard L. The climate of London: deduced from meteorological observations made at different places in the neighbourhood of the me-

tropolis. In Two Volumes. W. Phillips, 1820

2 Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958; 84 (359): 70—72

3 Katsoulis B D, Theoharatos G A. Indications of the urban heat island in Athens, Greece. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1985; 24(12): 1296—1302

4 Barring L, Mattsson J O, Lindqvist S. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. Journal of Climatology, 1985; 5(4): 433—444

5 季崇萍,刘伟东,轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. 地球物理学报, 2006; 49(1): 69—77  
Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. Journal of Geophysics, 2006; 49(1): 69—77

6 鲍文杰,马蔚纯,邢超群,等. 超大城市热岛研究方法对比: 以上海为例. 复旦学报(自然科学版), 2010; 49(5): 634—641  
Bao Wenjie, Ma Weichun, Xing Chaoqun et al. Comparison of large city heat island study method: a case study of Shanghai. Journal of Fudan University (Natural Science). 2010; 49(5): 634—641

7 陈云浩,史培军,李晓兵. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究. 测绘学报, 2002; 31(2): 139—144  
Chen Yunhao, Shi Peijun, Li Xiaobing. Research on spatial thermal environment in Shanghai city based on remote sensing and GIS. Journal of Surveying and Mapping 2002; 31(2): 139—144

8 Price J C. Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data. Monthly Weather Review, 1979; 107(11): 1554—1557

9 Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. International Journal of Remote Sensing, 1989; 10(11): 1699—1720

10 武鹏飞. 基于 TM 影像的北京市城市热岛效应及其影响研究. 北京: 北京林业大学, 2010  
Wu Pengfei. Study of urban heat island effect of Beijing city based on TM image and its influence. Beijing: Beijing Forestry University, 2010

11 黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例. 生态学报, 2012; 32(2): 622—631  
Huang Jucong, Zhao Xiaofeng, Tang Lina et al. Analysis on spatio-temporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: a case study of Xiamen City. Journal of Ecology, 2012; 32(2): 622—631

12 汤浩,贾丽红. 美国 ARW 模式系统简介. 新疆气象, 2007; 29(6): 24—26  
Tang Hao, Jia Lihong. Introduction American ARW model system. Xinjiang Meteorological, 2007; 29(6): 24—26

13 李雨鸿. 北京夏季高温特征、成因及其模拟研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012  
Li Yuhong. Research on characteristics of summer high temperature, causes and simulation study in Beijing. Nanjing: University of Information Science & Technology, 2012

(下转第 164 页)

(6): 20—23

## Study on the Effect of Erosion Time on Erosion Corrosion Rate in Different Mediums of 20Cr Steel

WANG Zhi-guo<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, QU Wen-tao<sup>2</sup>, DOU Yi-hua<sup>1</sup>(School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University<sup>1</sup>, Xi'an 710065, P. R. China;Sinopetroleum Technology Inc<sup>2</sup>, Beijing 100088, P. R. China)

**[Abstract]** Experimental study was conducted on erosion-corrosion (E-C) properties of typical material of 20Cr steel for oilfield ground gathering transferring system. Three kinds of fluid are used in the experiment; they are distilled water, 3.5% NaCl aqueous solutions and saturated CO<sub>2</sub> aqueous solutions respectively mixed with quartz grain. Experimental results show that in three kinds of fluid, The E-C rate decreases with time. In the early stage of E-C, the E-C rate decreased gradually, but the rate of decline is slower, when the E-C time exceeds a specified level, due to the deposition of corrosion product film in the metal surface, the product film covered the metal surface, E-C rate has been significantly reduced. The surface corrosion product film and surface morphology are analyzed by scanning electron microscope. It is point out that the corrosion product film is the key factors affecting E-C rate.

**[Key words]** 20Cr weight loss method corrosion product film erosion-corrosion rate

(上接第 151 页)

- 14 姜润. 南京夏季城市热岛时空分布特征观测及模拟研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012  
Jiang Run. Distribution and simulation of urban heat island in summer of Nanjing city space observation. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology 2012
- 15 宋迅殊 陈燕 张宁. 城市发展对区域气象环境影响的数值

模拟: 以苏州为例. 南京大学学报(自然科学版), 2011; 1(9): 55—76

Song Xunshu, Chen Yan, Zhang Ning. Influences of urban development on meteorological environment: a case study of Suzhou, Eastern China. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2011; 1(9): 55—76

## Application of WRF/ARW in the Simulation of Urban Heat Island Around Beijing City

LIU Qian<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>, WANG Xiao-yun<sup>3</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, WANG Chang<sup>1</sup>(Caofeidian Meteorological Bureau<sup>1</sup>, Tangshan 063200, P. R. China;College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology<sup>2</sup>, Nanjing 210044, P. R. China;Academy of Meteorological Observation Center<sup>3</sup>, Beijing 100000, P. R. China)

**[Abstract]** In order to analysis the influence degree of the urbanization for Beijing urban heat island effect, using the NCEP 1 °C × 1 °C daily reanalysis data, Landsat remote sensing data products and WRF mesoscale model, the change of the underlying surface factor of Beijing is simulated, analysed the influence of the urbanization for Beijing urban heat island effect. The results show: during the day, the temperature of Beijing urban, suburban, exurban exist decreasing trend at night, and heat island wide distribution and temperature difference between urban area and suburbs is small, heat island intensity of urban remain above 1 °C. The changed of underlying surface from suburb to city make local temperature rise, and the heating effect is significant in the night; the expansion of urban area will further increase the temperature of the areas of the city. See from different years the changes of small wind area, urbanization constantly intensifying heat island effect of urban at night, and first increase and then decrease during the day.

**[Key words]** urban heat island WRF model Beijing city meteorological