

北京夏季强热岛分析及数值模拟研究

李兴荣^{1,2} 胡 非¹ 舒文军³

- (1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;
2. 深圳市气象局; 3. 北京市气象局气候中心)

提 要: 应用北京地区 20 个常规地面气象站、2 个自动气象站和中国科学院大气物理研究所 325m 气象铁塔的资料, 对北京 2003 年 7 月热岛状况进行了统计分析, 发现北京夏季夜间存在强热岛效应, 夏季夜间存在强热岛效应的天数占到了 $\frac{1}{3}$, 强弱热岛天数合计占到了大约 $\frac{4}{5}$ 。进一步分析 7 月 1 日强热岛特征及其气象影响因子, 结果表明: 夜间存在强热岛时, 郊区所有测站的地面气温都要低于主城区地面气温, 城市强热岛的高温中心在天安门和白家庄连线的主城区; 白天日照充足的晴夜, 日落后城区 320m 以下低层大气存在逆温和弱的风速, 城区地面气温下降速率和幅度均远小于郊区, 城市强热岛因此得以形成和维持。日出后至正午, 北京北部郊区日照时间比城区长, 郊区地面大气得到来自太阳辐射的能量多于城区, 而太阳辐射的加热作用使城区低层大气逆温消失, 大气稳定度减弱, 并使郊区地面气温上升速率和幅度大于城区, 最终导致夜间出现的强热岛减弱、消失。此外, 应用 MM5 模式对强热岛进行了初步数值模拟研究, 发现在 MM5 中考虑城市人为热和热储存, 可以改善模式对热岛的数值模拟, 表明城市人为热和热储存在夏季强热岛的形成中有重要作用。

关键词: 城市热岛 逆温 弱风 人为热 热储存 数值模拟 MM5

Analysis and Numerical Simulation of Summer Strong Urban Heat Island in Beijing

Li Xingrong^{1,2} Hu Fei¹ Shu Wenjun³

- (1. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;
2. Shenzhen Meteorological Office, Guangdong Province; 3. Beijing Climate Center, Beijing Meteorological Bureau)

Abstract: Based on the data of 20 meteorological stations and two automatic stations and the data of 325m meteorological tower of IAP, characteristics of Beijing urban heat islands (UHI) in July, 2003 are analyzed. The results show that strong urban heat islands occur in the night in July over

Beijing under some specific weather conditions. The days with strong urban heat islands occupy about 1/3 of the total days. In addition, the characteristics and influencing factors of a strong urban heat island are analyzed in details. Results show that the UHI center lies over the urban area surrounding Tiananmen, Baijiazhuang, and the strong UHI occurs in the clear sky night with strong sunlight in the daytime. The weak wind and the temperature inversion are very important to the formation and maintenance of a strong UHI. But in the next daytime, the temperature inversion disappeared, and the amount of sunlight in northern suburb is more than that in the urban area, which makes the surface temperature of suburban atmosphere rise faster and higher than that of the urban surface atmosphere, and the intensity of UHI weaker. In addition, the strong urban heat island was simulated with MM5. And the results show that when only the physical properties such as the roughness of the underlying surface were considered in MM5, simulated the urban surface temperature and the intensity of UHI don't accord with the observational data. However when the anthropogenic heat and urban heat storage are taken into account, the numeric simulation of UHI could be improved effectively. The anthropogenic heat and urban heat storage play very important role in the formation of the strong UHI in the night.

Key Words: urban heat island temperature inversion weak wind urban anthropogenic heat urban heat storage numerical simulation MM5

引 言

城市热岛是指城区气温高于郊区,气温高的城区被气温相对低的郊区所包围的现象。19 世纪初,英国气象学家 Howard 对伦敦城区及其郊区的气温进行了观测研究,发现城区气温比郊区高^[1]。此后,各国学者对城市热岛的存在性、变化特征、垂直结构、影响因子、形成原因以及城市热岛的数值模拟等开展了大量研究工作。如 Park 发现热岛强度随风速的增大而减弱^[2];Ackerman 发现热岛强度随着云量的增加而减弱^[3];Maggie 等指出费尔班克斯市热岛强度随风速的增大而减弱^[4];Morris 等指出墨尔本市夜间热岛强度随着云量覆盖的增加而减弱^[5];Tumanov 等指出布加勒斯特市热岛在反气旋控制下最强^[6];Tapper 发现新西兰基督堂市上空大约 290m 高度以上乡村气温大于城区气温^[7]。我国从上世纪 80 年代起对城市

热岛现象进行了大量研究工作。有学者分别研究了北京、上海、福州、哈尔滨、景洪等城市的热岛现象^[8-12]。随着计算机技术的发展,城市热岛的数值模拟也开展了起来,并取得了许多成果,如杨玉华等成功地对北京冬季城市边界层热岛的日变化进行了数值模拟研究^[13]。

北京城区面积、人口和能源消耗在最近 20 年都有很大的增长。随着城市的发展、人口的增加和能源的大量消耗,城市人为热和下垫面热储存也大量增加,城市热岛效应也将发生变化。对于城市化发展情况下北京夏季城市热岛近况,所进行的研究工作不多。北京夏季最近几年有否出现强热岛?强热岛存在时各种气象要素特征是什么样的?如何对夏季的强热岛进行数值模拟研究?这些问题在全球变暖的大背景下,具有特别重要的意义。在夏季高温天气条件下,如果再出现强热岛而使城市地面气温显著高于郊区,势必严重影响到城市居民的舒适度,甚至影响

他们的健康。本文重点分析了城市化大发展的情况下北京城区 2003 年 7 月一个强热岛个例的特征及其气象影响因子,初步研究了强热岛数值模拟的方法。

1 观测资料

资料来源于北京 20 个常规地面气象观测站和 2 个自动气象站以及中国科学院大气物理研究所 325m 气象铁塔。气象铁塔的经纬度是 39.967° N, 116.367° E。气象铁塔分为 15 层,各层高度是 8m、15m、32m、47m、63m、80m、102m、120m、140m、160m、180m、200m、240m、280m、320m。常规地面观测站和自动站的经纬度、海拔高度等从略。

2 北京城市热岛效应及其气象影响因子分析

2.1 2003 年 7 月北京城市热岛效应概述

城区气温以海淀、天安门和白家庄 3 站气温平均值表示,郊区气温以顺义和大兴两站气温平均值表示,热岛强度定义为两者之差,即 $T_{u-s} = T_u - T_s$ 。依此定义计算出 2003 年 7 月逐日夜间 02 时热岛强度,并根据周明煜等^[8]对热岛等级的分类(夏季城郊温差 $\geq 2.0^\circ\text{C}$ 时为强热岛, $2.0^\circ\text{C} > \text{城郊温差} \geq 0.5^\circ\text{C}$ 为弱热岛,而城郊温差 $< 0.5^\circ\text{C}$ 时为无热岛),得到 2003 年 7 月,有 11 天强热岛,14 天弱热岛,6 天无热岛,强热岛占到了大约 $\frac{1}{3}$,强弱热岛之和占到了大约 $\frac{4}{5}$ 。可见,北京夏季夜间大多数天气都存在热岛。

7 月 1 日 02 时城市热岛强度达到 3.4°C ,是典型的强热岛,为了方便论述,把这一天称为强热岛日,下文以这个强热岛日作为研究对象,就其特征及气象影响因子等作进一步分析和初步数值模拟研究。

2.2 强热岛日北京地面气温分布日变化

6 月 30 日 14 时和 7 月 1 日 14 时,郊区昌平、顺义、怀柔等站的地面气温高于城区天安门、白家庄地面气温,城市热岛不存在。6 月 30 日 20 时和 7 月 1 日 08 时,城区地面气温比郊区略高,热岛强度分别为 1.1°C 、 0.5°C ,均是弱热岛。7 月 1 日 02 时,城区地面气温比四周所有郊区站的地面气温都高,热岛强度是 3.4°C ,为强热岛。夜间 02 时的地面气温分布如图 1 所示,其它时次地面气温分布图从略。

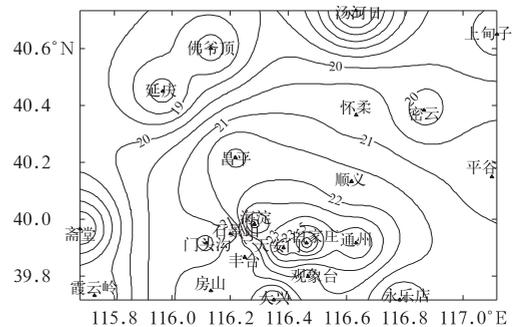


图 1 北京 2003 年 7 月 1 日 02 时地面气温分布

对于夜间城市弱热岛和强热岛的出现,城市人为热和人工构筑的城市下垫面的热储存无疑起着重要作用,它们是城市热岛得以形成的热量来源。

强热岛日夜间地面气温分布特征:北京主城区的地面气温比周边所有郊区测站的地面气温都高,在地面气温分布图上出现以天安门和白家庄为中心,以 0.5°C 为间隔的多条闭合线。

2.3 强热岛日北京城市热岛强度的逐时变化

为了更精细地研究城市热岛的特征,进一步分析城市热岛强度的逐时变化特征。选取密云站做郊区站的代表,天安门站做城区站的代表,以它们的地面气温差表示城市热

岛强度,来分析城市热岛强度的逐时变化。6月30日14时至7月1日20时城郊气温及城市热岛强度逐时变化可见图2。

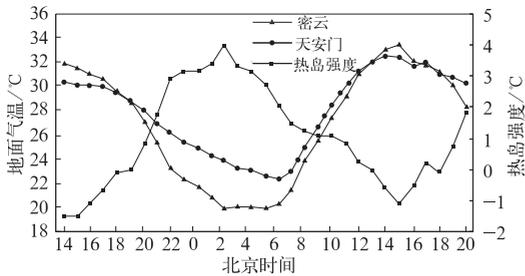


图2 2003年6月30日14时至7月1日20时北京城郊气温及城市热岛强度的逐时变化

30日14—19时,天安门和密云之间的地面气温差不大于 0°C ,城郊之间无热岛。30日20时,天安门和密云之间的地面气温差为 0.8°C ,出现弱热岛。6月30日23时至7月1日04时,天安门和密云之间的城市热岛强度均大于 3.0°C ,7月1日03时起,城市热岛逐步减弱,至11时为 0.8°C ,12时仅为 0.2°C ,14时后城区地面气温低于郊区。

夜间30日19时至1日凌晨02时,城区地面气温下降速率($-0.6^{\circ}\text{C}/\text{h}$)明显小于郊区($-1.26^{\circ}\text{C}/\text{h}$),且下降幅度(6.0°C)也要小于郊区(8.7°C),这种温度变化的显著差异直接导致了强热岛的出现。7月1日06—13时,城区地面气温上升速率($1.39^{\circ}\text{C}/\text{h}$)小于郊区($1.67^{\circ}\text{C}/\text{h}$),且上升幅度(7.7°C)也要小于郊区(9.7°C),热岛因此减弱和消失。

2.4 强热岛日日照和降水分析

6月30日白天天空晴朗,无降水,日照充足,整个北京地区日照时数在9.4小时以上。日照充足必然增加城市人工构筑物的热储存,加上城区人为热,使夜间城区近地大气比郊区近地大气有更多的热量来源,这是城市强热岛得以形成的能量来源。7月1日也是晴天,8时之前总日照时数,北部郊区的日照时数大于

城区;14时之前,北部郊区的日照时数也大于城区。北部郊区日照比城区多,与白天密云站地面大气的升温率和幅度大于城区天安门站是一致的,城郊得到太阳辐射的差异是城市热岛减弱的重要原因。

2.5 强热岛日地面风场和城区风速垂直分布

强热岛日地面风场分布分析:比较6月30日14时至7月1日14时北京地面风速的分布,发现从30日日落,风速在逐步变小,从30日22时至7月1日8时,大多数测站的风速都小于 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,尤其是6月30日23时至7月1日6时,绝大多数测站观测到的风速都小于 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,有的测站甚至观测到静风。此外,观测到夜间2时北京近郊有向城区的弱的地面风场辐合(图略)。

强热岛日城区风速垂直分布分析:据325m气象铁塔的风速资料,发现7月1日0时至6时,地面上47m(大约是城市冠层高度)以下风速都小于 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,8m以下风速小于 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,有时甚至为静风。夜间的这段时间,风场很弱,城区地面大气的热量不容易扩散出去,出现强热岛,表明近地面风速弱,有利于强热岛的形成。

2.6 强热岛日城区气温的垂直分布逐时变化

应用325m气象塔资料分析城区大气的温度廓线,得到北京城区6月30日14时至7月1日12时气温垂直分布(参见图3a、b、c)。

6月30日18时至7月1日06时,320m以下总有逆温存在。07时,320m以下逆温消失。8m到320m存在逆温的时间为30日18时至1日06时,而热岛存在的时间为30日20时至1日10时。逆温存在和消失的时间分别早于热岛形成和消失的时间。热岛最强的时段(23时至04时),也正是8m至320m之间逆温最强的时段。夜间存在逆温,大气层结稳定,湍流减弱,热量不易扩散

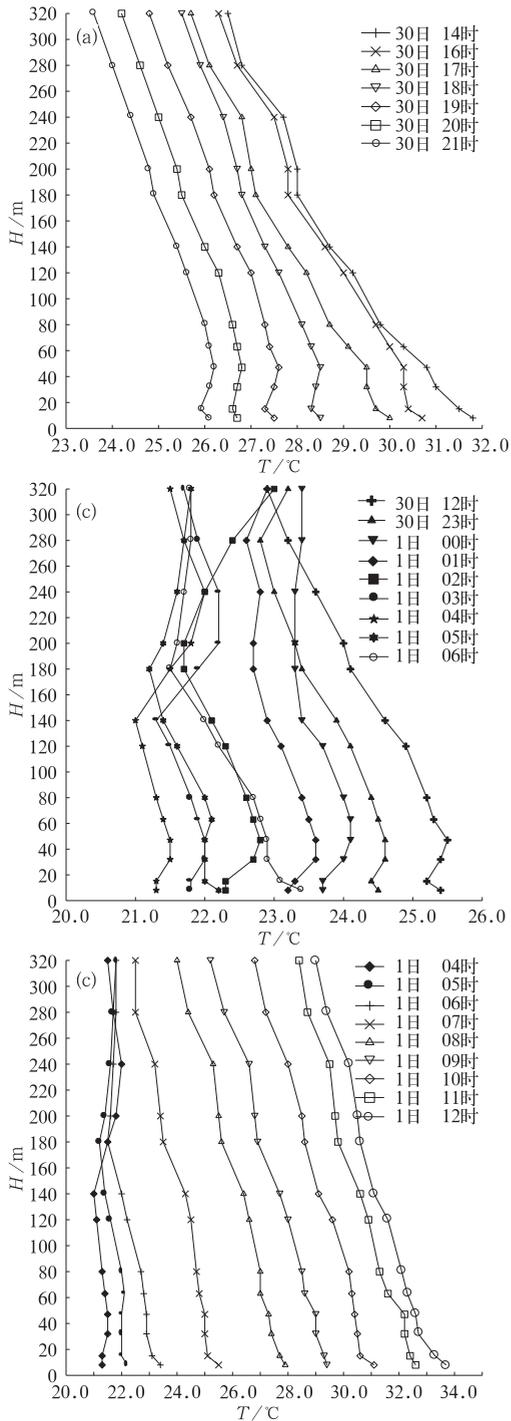


图 3 北京 2003 年 6 月 30 日 14 时至 7 月 1 日 12 时气温垂直分布

出城区,有利于强热岛的形成,而白天伴随城市近地大气逆温的减弱、消失,强热岛也逐步减弱、消失,这表明夜间城区低层大气逆温与城市热岛关系密切。

3 城市强热岛的数值模拟

所用的数值模式是 MM5,它是 PSU/NCAR 联合研制的中尺度非静力模式。这个模式的控制方程组、差分方程组等等,MM5 技术报告 Georg^[14]有详尽叙述,这里不再赘述。

3.1 模拟设计

模拟采用三重嵌套,三重嵌套的三个模式区域的中心点都选在天安门站(39°54'N、116°23'E)。三个区域的水平网格分别是 55×73、49×55 和 49×55,格距分别是 18km、6km 和 2km。模式在垂直方向采用 sigma 坐标系。模拟从下到上分为 24 个 sigma 层。

模拟采用 NCEP 1°×1°分析资料做初始场和侧边界条件,每 6 小时更新一次。模拟时间 2003 年 6 月 30 日 20 时至 7 月 1 日 8 时(北京时间),模式输出的时间间隔为 6 小时。

3.2 模式结果及分析

3.2.1 试验一模拟结果及分析

为了检验中尺度模式对城市热岛的模拟效果,本文首先设计了试验一。在中尺度模式中,对于城市的影响,只考虑了下垫面物理特性的不同。下垫面物理特性包括粗糙度、反照率、水汽有效率、比辐射率、热惯性。给出模式 sigma 为 0.995 高度的模拟结果如图 4。

由图 4 可知,本试验没有模拟出城市热岛和弱的风场辐合。另外,模拟所得温度大小仅为 291K,而实况是 297K,模拟结果与观测结果差别较大。

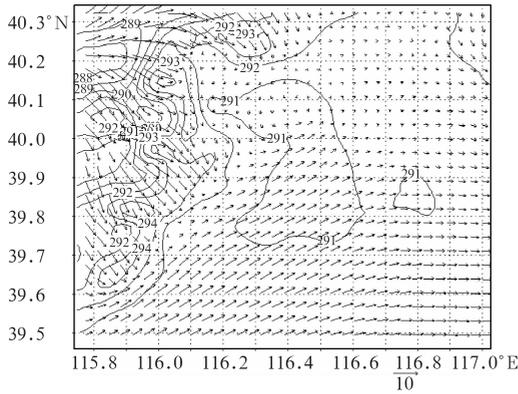


图 4 北京 2003 年 7 月 1 日 02 时试验一模拟的风场和温度场

3.2.2 试验二模拟结果及分析

为了改善模拟效果,试验二在模式中考虑城市人为热和热储存等城市大气热量来源。北京城市化发展使建成区面积增加,这势必增加建筑物热储存;生活和工业耗煤的大幅度增加以及空调等设备的使用则将大大增加人为热。因此,在中尺度模式中,考虑人为热和热储存的影响是必要的。人为热的大小,根据佟华^[15]得来。设定人为热是 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。城市热储存数值根据 Asaeda^[16] 设定为城区比郊区多 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。考虑城市人为热和热储存后,给出模式地面上 sigma 为 0.995 高度的模拟结果见图 5。由图 5 可知,试验二模拟出了城市热岛和流向城区的地面风场。此外,模拟所得 1 日 02 时城区

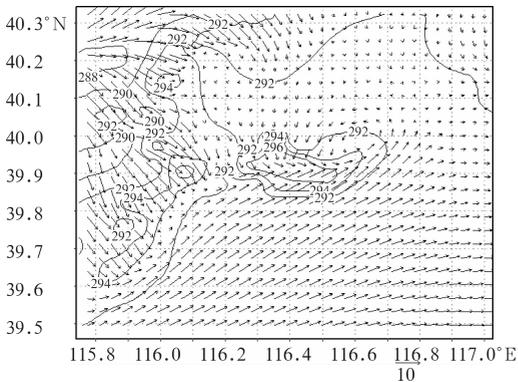


图 5 北京 2003 年 7 月 1 日 02 时试验二模拟的风场和温度场

气温是 296K,与观测得到的地面气温 297K 很接近,模拟效果得到改善。

城市强热岛数值模拟小结:

(1) 中尺度模式如果只考虑城市下垫面的物理特性,不能很好地模拟出城市热岛。

(2) 考虑了人为热和城市热储存因素后,可以改善模式对夏季城市强热岛的模拟。

需要指出,在模式中简单地考虑城市人为热和热储存初步模拟城市热岛,在技术上相对简单。详细地考虑建筑物对太阳辐射的响应及其对城区近地大气的加热作用以及人工构筑物对近地风场的影响,计算非常复杂,需要设计适当的参数化技术,这有待更深入的研究。

4 主要结论

(1) 北京城区夏季夜间存在城市强热岛。城市热岛是北京城区夏季夜间经常出现的现象。强热岛出现时,郊区所有测站的地面气温都要低于城区地面气温,在地面气温分布图上,出现以城区天安门和白家庄连线区域为高温中心,以 0.5°C 为间隔的多条闭合曲线。

(2) 北京城区夏季夜间城市强热岛形成是多种因子相互作用的结果。白天日照充足的晴夜,水平方向城郊地面风速极弱,甚至出现静风;垂直方向城区近地大气 47m 以下风速小于 $2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 8m 以下小于 $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 甚至出现静风;城区近地大气出现逆温。这些是城市强热岛得以形成和维持的重要气象条件。

(3) 夜间 19 时至凌晨 02 时,城区地面气温下降的速率和幅度远小于郊区,是城市强热岛形成的直接原因。白天日出后郊区比城市得到更多太阳辐射,郊区地面气温上升的速率和幅度大于城区,是城市强热岛减弱和消失的直接原因。

(4) 在中尺度模式中只考虑城市下垫面的粗糙度等物理特性,不能很好地模拟出城市热岛。考虑人为热和城市热储存,可以有效改善对城市热岛的数值模拟,模拟所得热岛强度和地面气温都与观测值接近。

参考文献

- [1] Howard L. The climate of London. I[M]. London: W. Phillips; 1818.
- [2] Park H-S. Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities[J]. Atmospheric Environment, 1986, 20:1859-1866.
- [3] Ackerman B. Temporal march of the Chicago heat island[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1985, 24: 547-554.
- [4] Magee N, Curtis J, Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1999, 64: 39-47.
- [5] Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city[J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40:169-182.
- [6] Tumanov S, Stan-Sion A, Lupu A, et al. Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 4173-4183.
- [7] Tapper N J. Urban influences on boundary layer temperature and humidity: results from Christchurch, New Zealand[J]. Atmospheric Environment B, 1990, 24:19-27.
- [8] 周明煜,曲绍厚,李玉英,等. 北京城区热岛和热岛环流特征[J]. 环境科学, 1980, 1(5):12-18.
- [9] 丁金才,周红妹,叶其欣. 从上海市热岛演变看城市绿化的重要意义[J]. 气象, 2002, 28(2):22-24.
- [10] 陈千盛. 城市效应对福州市气候的影响[J]. 气象, 1997, 23(1):41-45.
- [11] 郭家林,王永波. 近40年哈尔滨的气温变化与城市化影响[J]. 气象, 2005, 31(8):74-76.
- [12] 李红梅,刘文杰. 景洪市城市发展对气候的影响[J]. 气象, 1997, 23(3):38-41.
- [13] 杨玉华,徐祥德,翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1):61-68.
- [14] Grell G A, J Dudhia, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR/TN-398+STR[R]. NCAR TECHNICAL NOTE 1995.
- [15] 佟华,桑建国,刘辉志,等. 城市人为热对北京热环境的影响[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(3):409-420.
- [16] Asaeda T, Ca V T, Wake A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(3):413-427.