张雷, 任国玉, 任玉玉. 2015. 单次极端高温过程中城市热岛效应的识别 [J]. 气候与环境研究，20 (2): 167-176，doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13175. Zhang Lei, Ren Guoyu, Ren Yuyu. 2015. Identification of urban effect on a single extreme high temperature event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (2): 167-176.

单次极端高温过程中城市热岛效应的识别

张雷 [1, 2, 3]　任国玉 [2]　任玉玉 [2]

1 南京信息工程大学大气科学学院，南京 210044
2 中国气象局气候研究开放实验室，国家气候中心，北京 100081
3 中国气象局国家气象信息中心，北京 100081

摘　要　利用高密度自动观测站逐时气温资料和 NCEP 再分析资料，按照客观的标准选择参考站，分析 2010 年 7 月 2～6 日北京一次极端高温过程中城市热岛强度（I_{UHI}）对城区地面气温时空分布的影响。此次高温过程连续 5 日的日最高气温均超过 35.0 °C，为北京站 1951 年以来连续 5 日平均最高气温的最高值。大陆暖高压控制我国大部分地区，北京处于高压脊前，西北气流下沉增温，加之气流越山引起的焚风效应，是导致此次极端高温过程发生的环流背景。但受城市热岛效应影响，最高、最低和平均气温的空间分布均出现了以城区为中心的高值区，从城区中心向郊区平均 I_{UHI} 逐渐减小，最低气温 I_{UHI} 较大，四环线以内 5 日平均 I_{UHI} 达到 2.93 °C，四、五环线之间 1.87 °C，五、六环线之间 1.43 °C；最高气温 I_{UHI} 较小，但四环线以内，四、五环线之间和五、六环线之间 5 日平均 I_{UHI} 仍分别达到 1.45 °C、0.96 °C 和 0.72 °C。在 7 月 3～6 日夜间，四环内 I_{UHI} 极值均在 3.00 °C 以上，特别是 7 月 6 日凌晨达到 5.50 °C；白天 I_{UHI} 相对较小，其中 2 日早晨甚至还出现了负值。城区各地带 I_{UHI} 日变化规律几乎同步，具有两个相对稳定阶段和两个快速变化阶段。稳定的强 I_{UHI} 阶段从 21:00（北京时间，下同）持续到次日 05:00，稳定的弱 I_{UHI} 阶段从 08:00 至 18:00；05:00 至 08:00 是 I_{UHI} 快速衰减阶段，而 18:00 至 21:00 是 I_{UHI} 快速上升阶段。因此，城市热岛效应对北京城区夏季单次极端高温过程的强度及其空间分布具有显著影响，在很大程度上加重了城区特别是中心城区的高温影响。

关键词　极端高温　城市热岛强度　城市化影响　自动气象站　北京城区
文章编号　1006-9585（2015）02-0167-10　　**中图分类号**　P463.1　　**文献标识码**　A
doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13175

Identification of Urban Effect on a Single Extreme High Temperature Event

ZHANG Lei[1, 2, 3], REN Guoyu[2], and REN Yuyu[2]

1 *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044
2 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081
3 *National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

Abstract　On basis of selecting reference stations by using a relatively objective standard, this paper analyzes the influence of urban heat island (UHI) intensity (I_{UHI}) on spatial and temporal temperature characteristics in a high temperature process of Beijing from 2 July to 6 July 2010, by applying hourly data of high density automatic weather stations and NCEP reanalysis data. The maximum temperature (T_{max}) during the process is more than 35.0 °C for each day, and the five-day mean T_{max} breaks the records at Beijing Weather Station since 1951. Continental warm high pressure

收稿日期　2013-10-16；**网络预出版日期** 2014-04-28
资助项目　国家公益性行业（气象）科研专项 GYHY201206012，中国气象局气候变化专项 CCSF201340
作者简介　张雷，男，1980 年出生，博士，从事气候变化和极端事件研究。E-mail: zhang_lei@cma.gov.cn
通讯作者　任国玉，E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

controls most parts of China in the high-temperature process, and Beijing is in front of the high-pressure ridge. Major causes for the high-temperature process in Beijing are strong subsidence and the fohn effect of the northwesterly flowing over the Taihang Mountains. Affected by UHI effect, the distribution of the T_{max}, minimum temperature (T_{min}), and mean temperature (T_{mean}) exhibits a high-temperature area in the center of the city, with the mean I_{UHI} gradually decreasing from the within fourth-ring area to the fifth–sixth-ring areas. The I_{UHI} of T_{min} is obviously larger, reaching 2.93 °C, 1.87 °C, and 1.43 °C, respectively, for the central urban area, fourth–fifth-ring area, and fifth–sixth-ring area. The I_{UHI} of T_{max} is smaller, although the temperatures are as high as 1.45 °C, 0.96 °C, and 0.72 °C, respectively, for the three urban zones mentioned above. The night I_{UHI} high values within the fourth ring during 3−6 July are more than 3.00 °C, and the maximum I_{UHI} reaches 5.50 °C in the early morning on 6 July. The daytime I_{UHI} is relatively small, and the I_{UHI} shows a negative value in the morning of 2 July likely because the heating rate at reference stations is greater than that in the urban areas. The I_{UHI} diurnal variation of the three urban zones is nearly synchronic, and is characterized by a steadily strong I_{UHI} stage from 2100 LST to 0500 LST and a steadily weak I_{UHI} stage from 0800 LST to 1800 LST, with the periods of 0500–0800 LST and 1800–2100 LST undergoing a rapid decline and increase of the I_{UHI}, respectively. Therefore, the UHI effect has a marked influence on the strength and spatial distribution of the single extreme high temperature event in the urban area of Beijing.

Keywords Extreme high temperature, Urban heat island intensity, Urban effect, Automatic weather station, Beijing city

1 引言

高温是夏季常见的灾害性天气，不仅严重威胁到居民的身体健康，还会影响城市供电、供水及安全生产。近 30 年来，中国经济快速增长，城市人口迅速增加，城市区域下垫面发生明显改变，对地表能量平衡和近地面气温造成显著影响。随着全球气候变暖和城市化进程的加快，城市区域夏季高温事件出现频数和日最高气温均将进一步增加（翟盘茂和任福民，1997； Alexander et al.，2006；Solomon et al.，2007；Zhou and Ren，2011；管兆勇和任国玉，2012）。

北京夏季的高温事件及其影响，受到学者的广泛关注。谢庄等（1999）、孙建华等（1999）分析了 1999 年 6～7 月北京的高温过程，指出大陆副热带高压控制下的下沉绝热增温是导致北京高温的主要物理机制。王迎春等（2003）、郑祚芳和王迎春（2005）分析了 1996～2000 年间夏季出现的连续性高温天气，探讨了河套高压的形成机理与北京高温天气的联系，指出地形对气温影响主要通过焚风效应实现。已有很多工作研究了城市热岛效应对北京城市平均气温和高温事件频率的影响（徐祥德等，2002；初子莹和任国玉，2005；季崇萍等，2006；王郁和胡非，2006；Ren et al.，2007；李兴荣等，2007；Park et al.，2012；Yang et al.，2013）。曹巍等（2013）研究表明，城市建设用地对气温升高具有增强作用，林地对气温升高有抑制作用。刘勇洪和权维俊（2014）利用卫星资料与气象站资料，分析了日最高气温与遥感反演的城市地表温度的关系，初步确定了地表高温阈值，并建立了高温遥感监测指标。郑祚芳等（2006）发现，在 1998～2002 年期间北京城市热岛效应对夏季高温强度有明显的增幅作用。张雷等（2011）分析了城市化过程对北京站极端高温频率变化的影响，指出城市化使北京站夜间最低气温明显上升，暖夜日数显著增加，但暖日频数增加并不明显。张国华等（2012）发现，由于城市化影响，北京市日最高气温 35 °C 以上的高温日数从 1995～1996 年开始显著增加，而 37 °C 以上高温日数则在 1985～1986 年就开始显著增加。Yang et al.（2013）、刘伟东等（2013）和杨萍等（2013）利用高密度自动气象站观测数据的研究表明，北京城区热岛效应存在清晰的空间和时间分布规律，城区内热岛强度在冬季、夜间较强，春季、白天较弱，白天的热岛强度在夏季比其它季节强。

已有的研究多关注城市热岛效应对平均气温时空特征及其趋势变化的影响，也有研究探讨了城市化对某类极端高温指数序列趋势变化的贡献，但很少探讨城市化对单次极端高温过程可能产生的影响。过去的研究多利用北京站等少量台站观测资料，鲜有利用高密度自动站资料并通过较客观的方法选取参考站分析城市热岛效应影响的工作。

本文利用北京地区自动站资料，通过相对客观的标准选取参考站，分析城市热岛强度（I_{UHI}）对北京 2010 年 7 月单次极端高温过程的影响。我们的分析表明，城市热岛效应显著增加了北京城区这

次极端高温事件的强度，四环以内的中心城区受其影响尤其明显。

2 资料和方法

本文所用资料为北京市 2010 年 7 月 2～6 日 59 个自动气象站逐时气温资料、6 h 一次的 NCEP 再分析资料和北京气象站 1951 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日逐日最高气温资料。逐时自动站气温资料来自于北京气象局气象信息中心，杨萍等（2011）对该观测资料进行了较为合理和系统的质量评估，利用邻近站点的有效数据对少量缺测值进行空间插补，并剔除了存在大量错误数据的站点。将每日逐时气温的最大值确定为日最高气温，将逐时气温的最小值确定为日最低气温。

参考站的选取对于准确评估 I_{UHI} 至关重要。本文使用 Yang et al.（2013）的参考站遴选结果，确定城区周围 8 个站为参考站（图 1）。选站方法参考了 Ren and Ren（2011）发展的遥感方法，采用 2001 年 1 月 MODIS 数据绘制陆地表面亮度温度等值线，将位于最外围一条闭合等值线以外的台站看做乡村站。与其它方法相比，该方法不依赖社会和经济等数据，是一种相对客观的选站方法。所选参考站位于市区的不同方位，最远的参考站距离市中心天安门广场约为 54 km。参考站均处于开阔的自然或人工植被区域，远离高大建筑物和其他人工设施的影响。8 个参考站平均海拔高度比 51 个城区站平均低 8.9 m，差异很小，因此无需做高度订正，能够确保准确地估计城市站的 I_{UHI}。

北京经济发展迅速，人口增长快，城区范围不断扩张。从城中心向外，人口密度和建筑密度逐渐减小。根据城市环路所包括的范围，本文将城区分为 3 个地带，分别为四环以内的中心城区、四环至五环之间、五环至六环之间。四环以内共有 23 个站，四环至五环之间 13 个站，五环至六环之间 15 个站。表 1 给出了每个地带城市站平均海拔高度与整个城区（六环内）平均海拔高度的差异。表 2 总结了每个参考站的基本信息，并给出了参考站与城区平均海拔高度的差值。

城市热岛强度是指由于城市热岛效应等因素引起的城乡之间气温的差异，用 I_{UHI} 表示。城市热岛强度的表达式为

$$I_{\mathrm{UHI}} = T_{\mathrm{u}} - T_{\mathrm{r}}, \qquad (1)$$

其中，T_{u} 为城市站的气温，T_{r} 为参考站的气温。

表 1　北京地区 3 组城市站的海拔高度

Table 1　Elevations of three groups of urban stations in Beijing

区域	台站数	与城区海拔差/m
四环内	23	1.0
四环至五环	13	−0.8
五环至六环	15	−1.2

表 2　北京地区参考站的信息

Table 2　Information about reference stations in Beijing

站名	经度	纬度	与城区海拔差/m
凤凰岭	116.10°E	40.11°N	24.5
永乐店	116.78°E	39.68°N	−31.5
庞各庄	116.34°E	39.62°N	−14.5
安定	116.51°E	39.62°N	−24.5
南召	116.11°E	39.61°N	−14.5
东新城	116.45°E	40.22°N	−0.7
大孙各庄	116.92°E	40.09°N	−13.5
龙湾屯	116.85°E	40.23°N	3.5
平均	116.51°E	39.90°N	−8.9

3 结果分析

3.1 天气背景分析

2010 年 7 月 2～6 日，北京地区连续 5 日的日最高气温超过 35 °C，为北京气象站 1951 年以来连续 5 日平均最高气温的最高值，图 2 展示了北京气象站在此期间逐时气温变化情况。2010 年 7 月 5 日，北京气象站最高气温达到 40.6 °C，成为此站 1951 年以来第三高温。图 3 为 2010 年 7 月 5 日北京地区平均气温分布，可以看出城乡气温存在明显差异，北京城区气温比乡村气温高，形成了以城区为中心的高值区，说明极端高温日北京城区气温明显受到了城市建成区下垫面和人为热释放等因素的影响。

为了探究此次高温天气过程出现的原因，利用 NCEP 再分析资料，分析 2010 年 7 月 5 日 14:00（北京时间，下同）和 20:00 500 hPa 环流形势以及 850 hPa 物理场的特征（图 4）。分析 500 hPa 环流场可以发现，高温期间我国大部分地区受大陆暖高压控制，天气晴好太阳辐射充足，沿 40°N 经向剖面 700 hPa 以下北京地区为下沉运动（图 5），下沉增温导致北京气温升高。从 850 hPa 图上可以看出，北京地区处于高压脊前盛行西北风，北方大部分为干区相对湿度低于 30%，湿度较低的暖空气在

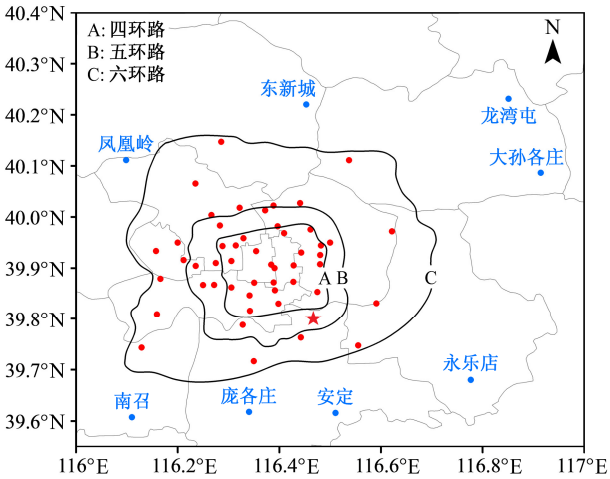

图 1 北京地区气象站的分布。蓝色为 8 个参考站，红色为 51 个城市站，★为北京气象站（编号 54511）的位置

Fig. 1 Distribution of weather stations in Beijing, including eight reference stations (blue) and 51 urban stations (red), ★ denotes the location of Beijing weather station (No. 54511)

越过北京西北山脉后沿背风坡下沉形成干绝热增温，即焚风效应，焚风效应使北京东南部的平原地区气温进一步上升，加剧了高温天气。由此可以得出，此次北京高温天气过程主要由大陆暖高压控制下的下沉增温和焚风效应引起。

3.2 城市热岛强度分析

图 6 显示了四环内、四环至五环、五环至六环和参考站气温及 I_{UHI} 的变化，城、乡气温最高值均出现在下午，最小值均在清晨出现。四环内平均 I_{UHI} 在 3 个区域中为最高值，平均 I_{UHI} 最低值出现在城区最外围的五环至六环之间，表明越靠近城区中心，I_{UHI} 会越强。7 月 3～6 日夜间四环内 I_{UHI} 极值均在 3 °C 以上，特别是 6 日凌晨四环内 I_{UHI} 最大值达到 5.5 °C；白天 I_{UHI} 相对较小，尤其是 2 日清晨 I_{UHI} 还出现了负值。

由图 6 可以看出，最低、最高气温一般出现在 05:00 和 15:00 左右，但是 5 日最高气温出现在 17:00

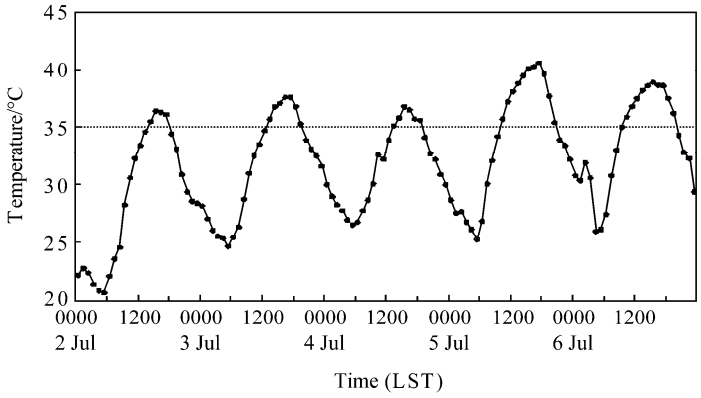

图 2 2010 年 7 月 2～6 日北京气象站的逐时气温

Fig. 2 Hourly temperature at Beijing Weather Station during 2－6 Jul 2010

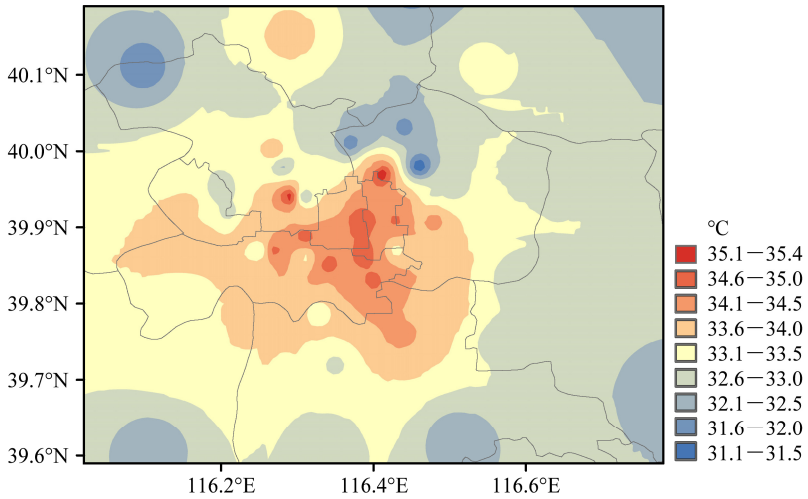

图 3 2010 年 7 月 5 日北京地区平均气温分布

Fig. 3 Distribution of mean temperature on 5 Jul 2010 in Beijing

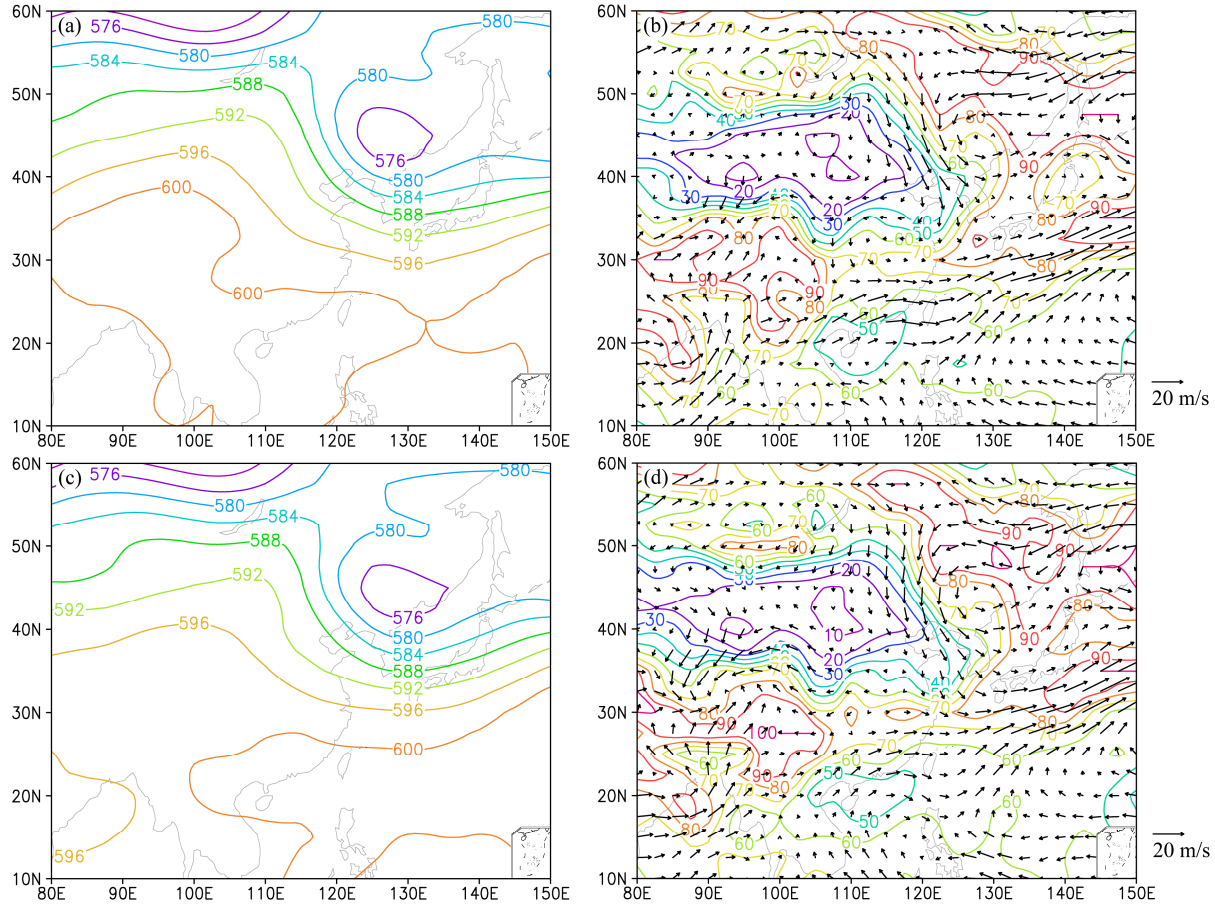

图 4　2010 年 7 月 5 日（a、b）14:00 和（c、d）20:00 500 hPa 位势高度（左列，实线，单位：dagpm）和 850 hPa 相对湿度（$\times 10^{-2}$，实线）和风场（矢量）（右列）

Fig. 4　500-hPa geopotential height (left panel, solid lines, units: dagpm) and 850-hPa relative humidity ($\times 10^{-2}$, solid lines) and wind field (vectors) (right penel) at (a, b)1400 LST and (c, d) 2000 LST on 5 Jul 2010

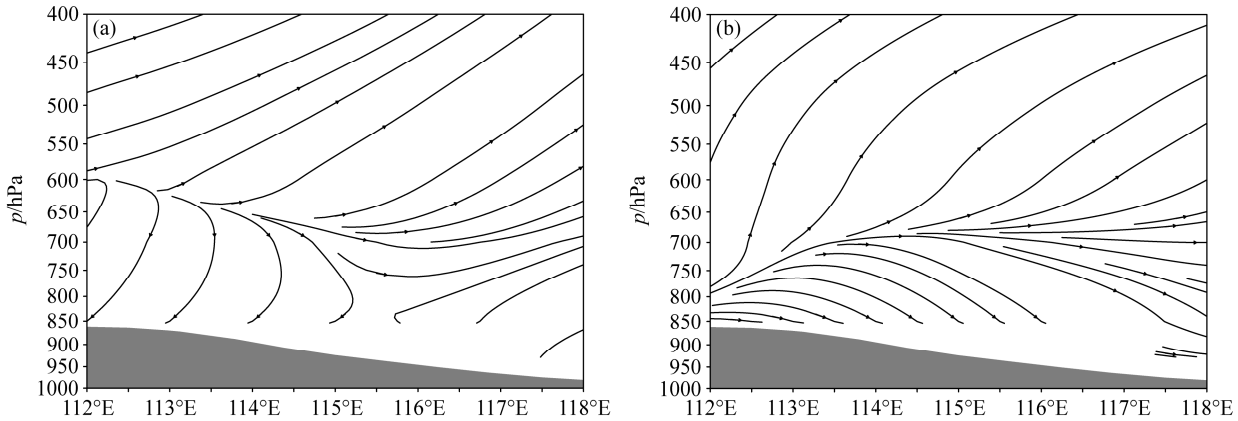

图 5　2010 年 7 月 5 日（a）14:00 和（b）20:00 沿 40°N 剖面的垂直速度

Fig. 5　Cross section of vertical speed along 40°N at (a) 1400 LST and (b) 2000 LST on 5 Jul 2010

左右，这种时间偏离是此次天气过程影响的结果；I_{UHI} 的低值、高值出现的阶段分别是 08:00 至 18:00 和 21:00 至次日 05:00。因此，I_{UHI} 的高、低值出现时间与气温的谷峰值并不对应。I_{UHI} 最小值常出现在城、乡气温快速上升阶段，7 月 2 日上午 I_{UHI} 还出现了短时间的负值，原因是乡村升温速率与城市

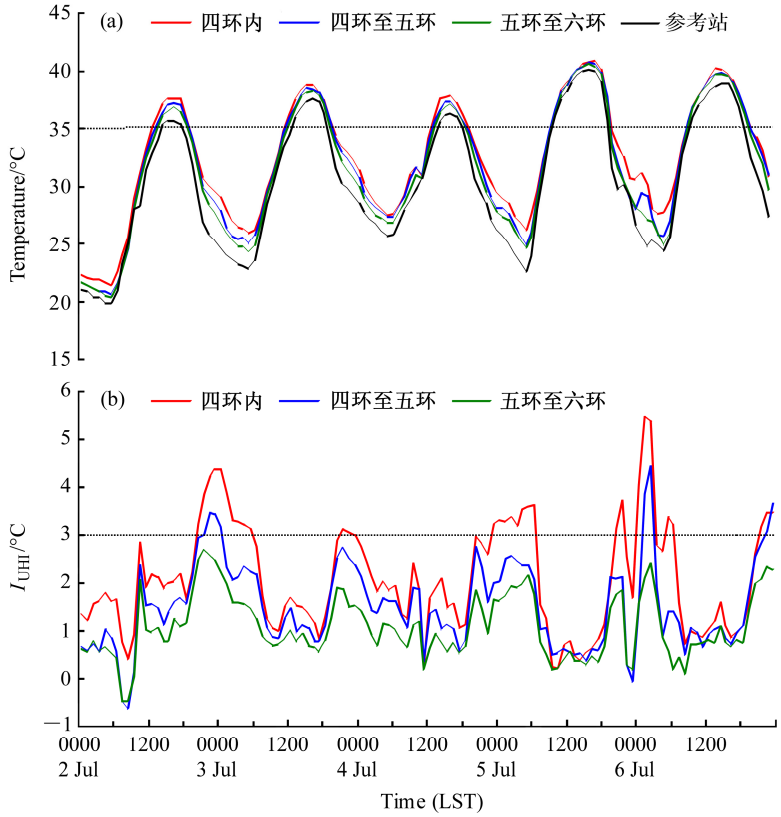

图 6 2010 年 7 月 2 日 00:00 至 6 日 23:00 北京地区 4 个区域（a）气温和（b）城市热岛强度的变化

Fig. 6 Changes of (a) temperature and (b) urban heat island (I_{UHI}) in four regions of Beijing from 0000 LST 2 Jul to 2300 LST 6 Jul, 2010

升温速率相比具有先快后慢的特点。

北京气象站 7 月 5～6 日记录到此高温过程的最高气温值，5 日 17:00 出现极大值为 40.6 °C。7 月 5 日、6 日 08:00 至 18:00 北京城区的 I_{UHI} 均处于低值阶段，其中 5 日在该时间段四环内、四环至五环和五环至六环 I_{UHI} 分别为 0.65 °C、0.61 °C 和 0.40 °C，6 日此时间段各地带 I_{UHI} 分别为 1.03 °C、0.90 °C 和 0.72 °C。5 日 21:00 至 6 日 05:00 的 I_{UHI} 处于高值阶段，从四环到六环分别为 3.51 °C、1.82 °C 和 1.27 °C，6 日凌晨四环内 I_{UHI} 最大值达到 5.5 °C。

从图 7 可以看出，此次高温过程 I_{UHI} 具有鲜明的日变化特征。白天 I_{UHI} 较小，夜间 I_{UHI} 较大。城市 3 个区域 I_{UHI} 日变化几乎是同步的，且均具有两个相对稳定阶段和两个迅速变化的阶段。稳定的强 I_{UHI} 阶段从 21:00 持续到次日 05:00 左右，四环以内、四环至五环和五环至六环平均 I_{UHI} 分别为 3.01 °C、2.05 °C 和 1.48 °C。稳定的弱 I_{UHI} 阶段出现在 08:00 至 18:00，四环内、四环至五环和五环至六环平均 I_{UHI} 分别为 1.26 °C、0.99 °C 和 0.70 °C。两个迅速变化阶段分别为 05:00 至 08:00 和 18:00 至 21:00，其特点是 I_{UHI} 呈现快速下降和快速上升变化。此次高温过程中 I_{UHI} 的日变化特征与多年平均的 I_{UHI} 日变化规律十分相似，但比气候态日变化振幅更大，主要表现为夜间 I_{UHI} 比多年夏季平均值（Yang et al., 2013）明显偏强。

表 3 展示了 7 月 2～6 日高温过程中最高、最低和平均气温的 5 日平均 I_{UHI}。从四环到六环 I_{UHI} 逐渐减小，最高气温的 I_{UHI} 分别为 1.45 °C、0.96 °C 和 0.72 °C，最低气温的 I_{UHI} 分别为 2.93 °C、1.87 °C 和 1.43 °C。整体上最低气温的 I_{UHI} 较大，最高气温的 I_{UHI} 较小，平均气温的 I_{UHI} 介于最低、最高气温之间。

表 3 高温过程中最高、最低和平均气温的 5 日平均城市热岛强度

Table 3 Five-day mean I_{UHI} for T_{max}, T_{min}, and T_{mean} in the high temperature process °C

区域	I_{UHI}		
	T_{max}	T_{min}	T_{mean}
四环内	1.45	2.93	2.08
四环至五环	0.96	1.87	1.51
五环至六环	0.72	1.43	1.08
城区	1.11	2.22	1.64

I_{UHI} 日变化出现明显阶段性的主要原因是，日落后城区建筑存储热能不断释放，加上人为释放热，致使地面大气降温速率远小于郊区，造成城乡最低气温差别大，形成强的城市热岛效应；日出后太阳辐射的加热作用引起城乡地面大气均迅速增温，但由于建筑物的热容量大、对阳光具有遮蔽作用，城区地面大气升温速率小于乡村；城区地表反照率小，吸收太阳辐射多，可透水性地面少，植物叶面积指数和植被覆盖度较小，通过潜热调节气温的作用弱，再加上人为释放热，白天城区最高气温比乡村要高，但午后大气稳定度减弱、地面风速增加，城乡最高气温的差异明显小于夜间最低气温（Oke et al.，1999；Grimmond et al.，2004；陈燕和蒋维楣，2007；王新平等，2008；刘红年等，2008；蒋维楣等，2009；苗世光等，2012；郑祚芳等，2012；曹巍等，2013）。

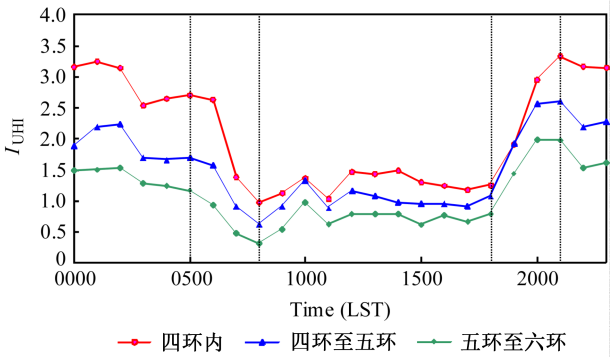

图 7　高温过程中逐时城市热岛强度的 5 日平均值

Fig. 7　Five-day mean of hourly I_{UHI} in the high temperature process

造成日最高、最低气温 I_{UHI} 差异的另一个可能原因是城乡上空气溶胶浓度的不同。白天城市内高浓度的气溶胶减弱了太阳的短波辐射，在一定程度上消弱了城市热岛效应的增温作用，使最高气温上升幅度相对较小，而夜间城市上空的气溶胶具有和低层云相似的影响，减弱了城区外逸的地面长波辐射和冷却效应。

图 8 给出了北京地区此次高温过程最高、最低和平均气温 5 日平均 I_{UHI} 的空间分布。受城市热岛效应的影响，I_{UHI} 均出现了以城区为中心的相对高值区。最高气温 I_{UHI} 高值区的面积最小，多集中在市区四环内，数值多在 1.6～2.5 °C 范围内；最低气温 I_{UHI} 高值区面积最大，六环内大部分区域出现了 1.6 °C 以上的高值区，四环内多在 2.6 °C 以上，部分区域甚至超过了 4.0 °C，最高达到 4.6 °C 左右，I_{UHI} 从四环以内的中心城区向六环附近逐渐降低；城市热岛效应对日平均气温的影响介于最高、最低气温之间，中心城区一般可达 2.1～3.0 °C。

4　讨论

目前研究单次高温过程中 I_{UHI} 的工作不多，已有的研究高温事件的工作（谢庄等，1999；郑祚芳等，2006），由于缺乏高时空分辨率的观测数据，不能很好地描述 I_{UHI} 的时空特征。本文利用北京地

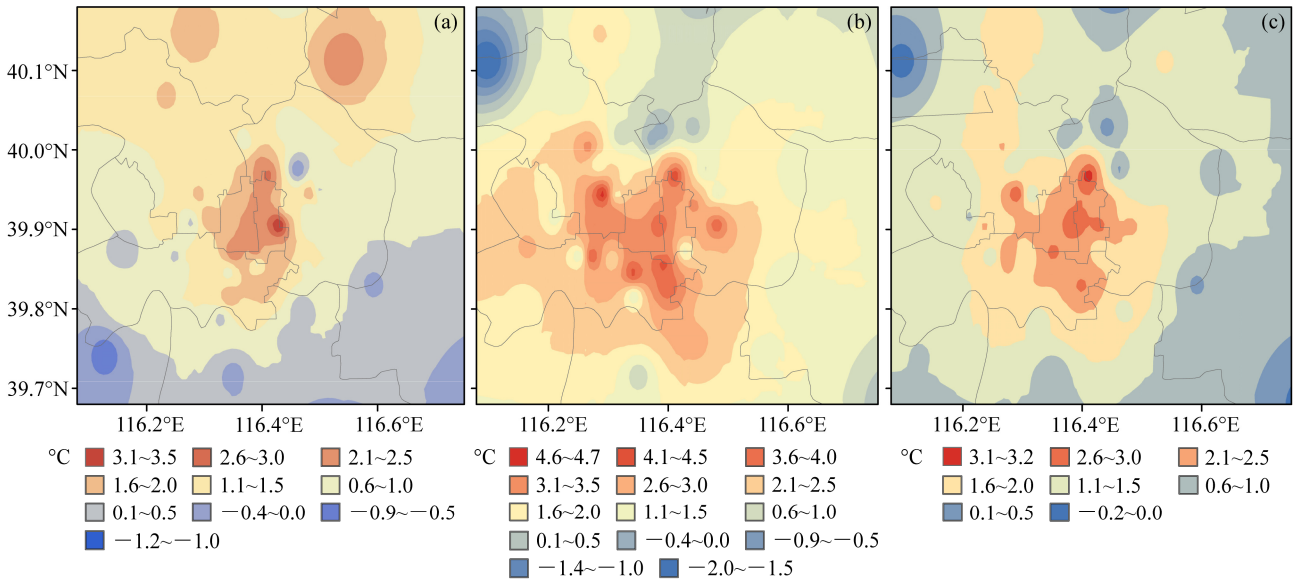

图 8　高温过程中（a）最高气温、（b）最低气温、（c）平均气温 5 日平均城市热岛强度的分布

Fig. 8　Distribution of five-day mean I_{UHI} for (a) T_{max}, (b) T_{min}, and (c) T_{mean} in the high temperature process

区逐小时加密自动站气温资料，通过遥感资料选择乡村参考站，能够更准确地估算单次高温过程中的 I_{UHI}，描述其详细的时空分布规律。

对北京地区此次高温过程中 I_{UHI} 的分析，进一步印证了前人的研究结论（谢庄和曹鸿兴，1996），表明不仅在气候平均态，而且在单次极端高温事件过程中，城市热岛效应对北京最低气温的影响比对最高气温的影响大得多，致使气温出现“非对称性”的日循环特征。周雅清和任国玉（2009）针对华北地区的分析，从长期趋势变化角度证实了城市站以及国家基准站和基本站地面最低气温变化受到城市化增温作用的影响明显强于最高气温变化，平均最高气温序列中的城市化影响很弱，而平均最低气温序列中的城市化影响则十分明显。刘伟东等（2013）和 Yang et al.（2013）通过分析气候学特征表明，北京城区不同地带 I_{UHI} 均具有明显的日变化周期，最低气温出现前后 I_{UHI} 很强，而最高气温出现的午后 I_{UHI} 偏弱。本文和先前的研究从不同角度揭示了北京城市热岛效应及其随时间加强过程对近地面气温日循环及其演化趋势的显著影响。

郑祚芳等（2006）将城区和郊区平均最高气温的差值定义为热岛指数，并指出北京地区夏季环境场出现 35 °C 高温天气过程时，平均热岛指数为 1.65 °C，出现 39 °C 以上的极端高温天气状况下，平均热岛指数达到 3.28 °C。这一数值比本文对单次高温过程中最高气温 I_{UHI} 的分析结果要大，造成这种差异主要是因为本文的最高气温实际上是指每天最高的小时平均气温，而不是观测到的瞬间日最高气温。前者明显小于后者。刘伟东等（2013）利用 2007～2009 年北京地区自动气象站数据，得到 I_{UHI} 平均日变化范围为 0.4～1.9 °C，7 月夜间在 1.4～1.6 °C 之间，白天为 0.4～0.6 °C。这些数值又比本文分析结果偏小，原因在于本文针对的是单次极端高温过程，而不是 7 月的平均状况。另外，所用乡村参考站不同可能也是造成分析结果差异的重要因素。本文采用了 Yang et al.（2013）选取的参考站。将本文分析的单次高温过程中 I_{UHI} 与 Yang et al.（2013）针对 4 年夏季平均结果进行比较（表 4），发现此次高温过程中日平均气温的 I_{UHI} 仍然偏大，其原因可能主要是这次极端高温过程中夜间 I_{UHI} 异常强造成的。

同样值得指出的是，Yang et al.（2013）发现，北京城区 2007～2010 年平均 I_{UHI} 日变化具有两个相对稳定阶段和两个迅速变化的阶段，稳定的强 I_{UHI} 阶段从 21:00 持续到次日早上大约 06:00，稳定的弱 I_{UHI} 阶段从 11:00 到 16:00，两个迅速变化阶段为 06:00 到 11:00 和 16:00 到 21:00。本文针对单次强高温事件的分析也发现 I_{UHI} 日变化具有两个相对稳定阶段和两个迅速变化阶段，但这几个阶段的起始时间与 Yang et al.（2013）不同，主要表现在稳定的强 I_{UHI} 阶段结束时间提前到 05:00，稳定的 I_{UHI} 阶段明显延长，快速下降阶段提前到 05:00 到 08:00。产生差别的主要原因是由于研究时间段的不同所引起的。本文分析的是 7 月初一次高温过程，此时日出时间早、日照时间长，致使 I_{UHI} 日变化特征不同于年平均和夏季平均变化规律。

表 4 北京单次高温事件城市热岛强度与夏季平均城市热岛强度（Yang et al., 2013）的比较

Table 4 Comparison in the I_{UHI} in the single high temperature event with aestival mean I_{UHI} (Yang et al., 2013) in Beijing °C

区域	I_{UHI}*	2010 年 7 月 2～6 日		2010 年 7 月 5 日	
		I_{UHI}	ΔI_{UHI}	I_{UHI}	ΔI_{UHI}
四环内	1.21	2.08	0.87	1.94	0.73
四环至五环	0.72	1.51	0.79	1.28	0.56
五环至六环	0.44	1.08	0.64	1.04	0.6
城区	0.79	1.64	0.85	1.51	0.72

注：ΔI_{UHI} 为 I_{UHI} 与 4 年平均夏季 T_{mean} 计算的 I_{UHI} 的差值。

*4 年平均夏季 T_{mean} 计算的热岛强度。

识别极端高温过程中城市热岛效应的影响，不仅定量揭示了城区 I_{UHI} 及其日变化的细节特征，还揭示了城区特别是中心城区由于受 I_{UHI} 影响极端高温事件的程度和范围均明显增加的事实。本研究对于北京城市区域精细化天气预报和气候预测具有一定的参考作用，对于深入理解城市气候变化特别是极端高温气候变化的规律和原因具有参考价值。

5 结论

本文应用经过质量控制的高密度自动气象站逐时气温资料和 NCEP 再分析资料，分析了北京 2010 年 7 月 2～6 日一次高温过程发生的天气背景和 I_{UHI} 对城区地面气温时空分布的影响，并得到以下结论：

（1）高温期间，我国大部分地区受到大陆暖高压控制，北京处于高压脊前，下沉增温以及脊前西

北越山气流形成的焚风效应是导致此次北京地区高温天气过程的主要原因。

（2）高温过程中 I_{UHI} 从四环到六环逐渐减小，最高气温的 I_{UHI} 分别为 1.45 °C、0.96 °C、0.72 °C，最低气温的 I_{UHI} 分别为 2.93 °C、1.87 °C、1.43 °C。整体上最低气温的 I_{UHI} 较大，最高气温的 I_{UHI} 较小，平均气温的 I_{UHI} 介于最低、最高气温之间。

（3）在 7 月 3～6 日夜间四环内 I_{UHI} 极值均在 3.00 °C 以上，特别是 6 日凌晨最大值达到 5.50 °C；白天 I_{UHI} 相对较小，尤其是 2 日清晨 I_{UHI} 还出现了负值，原因是日出后参考站升温速率明显大于城区升温速率。

（4）城市 3 个区域 I_{UHI} 日变化发生的时间几乎是同步的，同时增大、减小。北京城区 I_{UHI} 的日变化具有两个相对稳定阶段和两个迅速变化的阶段，稳定的强 I_{UHI} 阶段从 21:00 持续到次日早上大约 05:00，稳定的弱 I_{UHI} 阶段从 08:00 到 18:00，05:00 到 08:00 为 I_{UHI} 快速下降阶段，18:00 到 21:00 为 I_{UHI} 快速上升阶段。

（5）受城市热岛效应影响，最高、最低和平均气温的空间分布均出现了以中心城区为核心的 I_{UHI} 高值区。最高气温的高值区面积最小，最低气温的高值区面积最大。I_{UHI} 的空间分布反映了城市热岛效应对中心城区影响最明显，且对最低气温的影响要大于对最高气温的影响。

因此，在此次北京极端高温过程中，城市热岛效应对城区地面气温时空分布具有显著影响，加重了城区尤其是中心城区的高温强度。

致谢 感谢中国气象局干部培训学院杨萍副教授对本文提供的大力帮助，也感谢北京市气象信息中心为本研究提供了经过质量控制的自动站温度数据。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Pererson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111: D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

曹巍, 邵全琴, 刘纪远, 等. 2013. 北京地区土地利用/覆被及其变化对气温升温的影响分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 451–460. Cao Wei, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. 2013. Impact of land use/land cover and its change on climate warming in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 451–460.

陈燕, 蒋维楣. 2007. 南京城市化进程对大气边界层的影响研究 [J]. 地球物理学报, 50 (1): 66–73. Chen Yan, Jiang Weimei. 2007. Impact of Nanjing urban development on the boundary layer [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50 (1): 66–73.

初子莹, 任国玉. 2005. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响 [J]. 气象学报, 63 (4): 534–540. Chu Ziying, Ren Guoyu. 2005. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (4): 534–540.

Grimmond C S B, Salmond J A, Oke T R, et al. 2004. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum [J]. J. Geophys. Res., 109: D24101, doi: 10.1029/2004JD004936.

管兆勇, 任国玉. 2012. 中国区域极端天气气候事件变化研究 [M]. 北京: 气象出版社, 347pp. Guan Zhaoyong, Ren Guoyu. 2012. On Variations of Weather and Climate Extremes in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 347pp.

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

蒋维楣, 王咏薇, 张宁. 2009. 城市陆面过程与边界层结构研究 [J]. 地球科学进展, 24 (4): 411–419. Jiang Weimei, Wang Yongwei, Zhang Ning. 2009. Research on urban land-surface process and boundary layer structure [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (4): 411–419.

李兴荣, 胡非, 舒文军. 2007. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究 [J]. 气象, 33 (6): 25–31. Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun. 2007. Analysis and numerical simulation of summer strong urban heat island in Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (6): 25–31.

刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 等. 2008. 南京城市边界层微气象特征观测与分析 [J]. 南京大学学报（自然科学版）, 44 (1): 99–106. Liu Hongnian, Jiang Weimei, Sun Jianning, et al. 2008. An observation and analysis of the micrometeorological characteristics of the Nanjing urban boundary layer, eastern China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 44 (1): 99–106.

刘伟东, 杨萍, 尤焕苓, 等. 2013. 北京地区热岛效应及日较差特征 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 171–177. Liu Weidong, Yang Ping, You Huanling, et al. 2013. Heat island effect and diurnal temperature range in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 171–177.

刘勇洪, 权维俊. 2014. 北京城市高温遥感指标初探与时空格局分析 [J]. 气候与环境研究, 19(3): 332–342, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12190. Liu Yonghong, Quan Weijun. 2014. Research on high temperature indices of Beijing city and its spatiotemporal pattern based on satellite data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 332–342, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12190.

苗世光, 窦军霞, Chen Fei, 等. 2012. 北京城市地表能量平衡特征观测分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (9): 1394–1402. Miao Shiguang, Dou Junxia, Chen Fei, et al. 2012. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 55 (11): 1881–1890, doi: 10.1007/s11430-012-4411-6.

Oke T R, Spronken-Smith R A, Jáuregui E, et al. 1999. The energy balance of central Mexico city during the dry season [J]. Atmospheric Environment, 33: 3919–3930.

Park J K, Lu R Y, Li C F, et al. 2012. Interannual variation of tropical night frequency in Beijing and associated large-scale circulation background [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (2): 295–306.

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: L057711, doi: 10.1029/2006GL027927.

Ren Y Y, Ren G Y. 2011. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends [J]. J. Climate, 24: 3179–3189.

Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 235–336.

孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气 II. 模拟试验和机理分析 [J]. 气候与环境研究, 4 (4): 334–345. Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China Part II. Simulation and analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (4): 334–345.

王新平, 王琳琳, 高志球, 等. 2008. 夏季北京城市大气边界层湍流通量的塔层观测 [J]. 气候与环境研究, 13(5): 629–638. Wang Xinping, Wang Linlin, Gao Zhiqiu, et al. 2008. Measurements of atmospheric boundary layer over Beijing area in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (5): 629–638.

王郁, 胡非. 2006. 近10年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 61–68. Wang Yu, Hu Fei. 2006. Variations of the urban heat island in summer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (1): 61–68.

王迎春, 葛国庆, 陶祖钰. 2003. 北京夏季高温闷热天气的气候特征和2008 夏季奥运会 [J]. 气象, 29 (9): 23–26, 33. Wang Yingchun, Ge Guoqing, Tao Zuyu. 2003. Climatic characteristics of estival muggy weather in Beijing related to 2008 Olympics [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (9): 23–26, 33.

谢庄, 曹鸿兴. 1996. 北京最高和最低气温的非对称变化 [J]. 气象学报, 54 (4): 501–507. Xie Zhuang, Cao Hongxing. 1996. The asymmetric trend of change in maximum and minmum temperature in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (4): 501–507.

谢庄, 崔继良, 刘海涛, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气 I. 历史状况及个例分析 [J]. 气候与环境研究, 4 (4): 323–333. Xie Zhuang, Cui Jiliang, Liu Haitao, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China Part I. Statistics and synoptic case study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (4): 323–333.

徐祥德, 汤绪, 徐大海. 2002. 城市化环境气象学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 284pp. Xu Xiangde, Tang Xu, Xu Dahai. 2002. Urbanization Environmental Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 284pp.

杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 等. 2011. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估 [J]. 应用气象学报, 22 (6): 706–715. Yang Ping, Liu Weidong, Zhong Jiqin, et al. 2011. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22 (6): 706–715.

Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52 (8): 1803–1816, doi: 10.1175/JAMC-D-12-0125.1.

杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 2013. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析 [J]. 大气科学, 37 (1): 101–112. Yang Ping, Xiao Ziniu, Liu Weidong. 2013. Comparison of diurnal temperature variation in urban and rural areas in Beijing and its seasonal change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 101–112.

翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化 [J]. 气象学报, 55 (4): 418–429. Zhai Panmao, Ren Fumin. 1997. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (4): 418–429.

张国华, 张江涛, 金晓青, 等. 2012. 京津冀城市高温的气候特征及城市化效应 [J]. 生态环境学报, 21 (3): 455–463. Zhang Guohua, Zhang Jiangtao, Jin Xiaoqing, et al. 2012. Climate characteristics and effects of urbanization of the urban high temperature of Beijing, Tianjin and Hebei, China [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 21 (3): 455–463.

张雷, 任国玉, 刘江, 等. 2011. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响 [J]. 地球物理学报, 54 (5): 1150–1159. Zhang Lei, Ren Guoyu, Liu Jiang, et al. 2011. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing Meteorological Station [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 54 (5): 1150–1159.

郑祚芳, 王迎春. 2005. 北京夏季持续高温过程特征分析 [J]. 气象, 31 (10): 16–20. Zheng Zuofang, Wang Yingchun. 2005. A composite analysis of severe heat wave events in Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (10): 16–20.

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 (增刊): 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 (Suppl.): 48–53.

郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 2012. 城市化对北京夏季极端高温影响的数值研究 [J]. 生态环境学报, 21 (10): 1689–1694. Zheng Zuofang, Gao Hua, Wang Zaiwen, et al. 2012. Numerical simulation for the urbanization effects on a heat wave event around Beijing city [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 21 (10): 1689–1694.

周雅清, 任国玉. 2009. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响 [J]. 高原气象, 28 (5): 1158–1166. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2009. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (5): 1158–1166.

Zhou Y Q, Ren G Y. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961–2008 [J]. Climate Research, 50: 125–139.