

刘伟东,张本志,尤焕苓,等. 2014. 1978—2008 年城市化对北京地区气温变化影响的初步分析. 气象, 40(1): 94-100.

1978—2008 年城市化对北京地区气温变化影响的初步分析^{* 1}

刘伟东^{1,2} 张本志¹ 尤焕苓¹ 杨 萍²

1 北京市气象局, 北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

提 要: 应用北京地区 20 个常规站 1978—2008 年经均一性序列多元分析方法均一化处理的气温数据, 初步分析了北京地区城市化对年平均和不同季节日最高、最低以及平均气温的影响。结果表明, 1978—2008 年, 年平均日最低、平均气温空间分布自北向南、自西向东, 温度逐渐升高, 在城区达到最高, 日最高气温表现为从西向东南逐步升高, 在城区形成较为明显的热岛。温度变化趋势表明, 各站日最低气温、平均气温、最高气温均呈升温趋势。城市化对北京地区城区及近郊区站点日平均气温和最低气温影响最大, 对自北部佛爷顶至昌平到城区一带站点的最高气温影响最大。城市化对北京(观象台)站的增温影响最为明显, 对城区站点温度平均的增温影响次之, 对全市站点温度平均的增温影响最小。城市化对观象台站、城区站点平均、全市站点平均日平均气温、最低气温的年平均、各季节均非常显著, 其中在秋季影响最大, 对日最高气温的影响则是在夏季最大。

关键词: 热岛, 城市化, 增温, 贡献

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 01. 011

Preliminary Analysis of Urbanization Effects on Temperature Change in Beijing During 1978—2008

LIU Weidong^{1,2} ZHANG Benzhi¹ YOU Huanling¹ YANG Ping²

1 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Based on a homogenized surface temperature dataset of 20 meteorological stations in Beijing, the urbanization effect on seasonal and annual daily minimum temperature, mean temperature and maximum temperature in Beijing during 1978—2008 is evaluated in this paper. The results show that for the annual minimum, mean and maximum temperatures, their spatial distributions show an increasing trend in Beijing area from north to south and from west to east, and there exists an obvious heat island for the annual maximum air temperature. This region is undergoing rapid increases in the minimum, mean and maximum temperatures. Regarding the minimum and daily mean temperatures the most affected stations are located in urban area and near-suburban area, while for the maximum temperature the most affected stations are located in the middle zone from north to south in Beijing Area. The effect of urbanization on temperature increase is the most obvious in Beijing Observatory Station, followed by the effect on urban area stations and all the weather stations. In autumn, the urbanization effect on the minimum and daily mean temperature is more significant and in summer, the urbanization effect on maximum is more significant.

Key words: heat island, urbanization, warming trend, contribution

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0509020)、北京市科技计划课题(Z111100074211010)和国家自然科学基金项目(40975066)共同资助

2012 年 12 月 12 日收稿; 2013 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者: 刘伟东, 主要从事城市气候和城市遥感等研究工作. Email: wdliu@ium. cn

引 言

全球变暖是气候变化研究领域关注的核心问题。根据器测的全球地表温度,近百年(1906—2005 年)的温度线性趋势为 $0.74^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ a})^{-1}$,近 50 年(1956—2005 年)的线性趋势为 $0.13^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,几乎是近百年(1906—2005 年)的两倍(IPCC, 2007)。在出现显著变暖的区域与观测到的许多与变暖相一致的事实表明,变暖的原因不仅是自然变率,人类活动的影响也不可低估(Jin et al, 2005; De Laat et al, 2006; Kalnay et al, 2006; Mckitrick et al, 2007; Jones et al, 2010; Fall et al, 2010)。然而,测站环境变化特别是城市化的影响是造成气候变化分析中资料不确定性的重要因素(丁一汇等, 1994)。在诸多的人类活动研究中,城市化效应对气候变暖的影响已成为气候变化研究的新热点(任王玉等, 2010; 李思思等, 2011)。

过去的许多研究没有考虑城市化对气温资料序列的影响,城市化影响还保留在当时广泛使用的陆地地面气温序列中,这可能使受城市化影响的分析结果存在一定偏差(Portman, 1993; Li et al, 2010; Wang et al, 2012; Ren et al, 2008; Li et al, 2010a; Choi et al, 2011)。由于城市化对气温资料的影响,不少学者对全球和区域地表平均气温序列的代表性提出质疑(Peterson, 2003; Parker, 2006)。Peterson(2003)评估了美国的城市对于乡村气象站地面气温的影响,发现微尺度或局地尺度环境对观测气温的影响超过了中尺度城市热岛的影响。在我国, Li 等(2004)基于第五次人口普查数据和均一化的年平均气温数据,分析了城市热岛效应对过去 50 年我国年平均气温的影响,认为热岛效应对中国气温的变化没有特别显著的影响。邵全琴等(2009)研究表明,20 世纪 70 年代以来,全国因热岛效应对气象观测站点产生影响而对区域气温造成了一定程度的高估,其中热岛效应造成的全国气温高估的贡献约为 0.01°C ,在气温高估区域的贡献达到 0.09°C 。张爱英等(2010)研究表明,由国家站资料建立的中国大陆年平均气温序列在 44 年间线性增温率为 $0.278^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,而由参考站资料建立的中国大陆年平均气温序列同期增温率为 $0.202^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。就中国大陆平均来说,1961—2004 年国家站城市化增温率为 $0.076^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,占全部

增温率的 27.33%最近,国内几个地区的分析进一步表明,热岛效应对我国国家级气象站近几十年地面气温记录具有明显的影响,需要在区域平均地面气温序列建立中予以订正(Ren et al, 2008; Li et al, 2010a; 张爱英等, 2010; 初子莹等, 2005; Si et al, 2012; Yang et al, 2011; Du et al, 2007; Yan et al, 2010; 戴一枫等, 2011; 周雅清等, 2009; 司鹏等, 2010; 陆琛莉等, 2012)。这些研究为进一步订正区域地面气温序列中城市化引起的偏差和研究城市化气候效应奠定了基础。

尽管一些学者对北京地区城市化对温度的影响进行了一些研究(曹广珍等, 2010; 王佳丽等, 2012; 李书严等, 2008),但还没有针对城市化对北京地区各站长序列台站气温贡献影响的分析。因此,本文采用经过质量控制和均一化订正的北京地区 20 个常规气象观测站数据,分析 1978—2008 年北京地区城市化发展对年平均和不同季节北京(观象台)站、城区以及北京地区日最高、最低和平均气温的影响,以期分析北京地区城市化对北京地区气象台站观测温度的影响提供参考。

1 资料与方法

特殊的地形与高速城市化发展使北京地区在气象研究领域有其特殊的意义。由于台站迁移、资料处理方法改变等会导致北京地区各站原始资料存在非均一性问题,因此本研究采用 Li 等(2010b)通过均一性序列多元分析(Multiple Analysis of Series for Homogenization, MASH)方法检验和均一化后的北京地区 1978—2008 年 20 站逐日平均、最高和最低气温的均一化序列资料集,分析北京地区城市化对气温的影响。MASH 方法是目前国际通用的一种资料均一化方法,其基本原理在于对同一气候区多站序列逐站进行差值分析,再通过 Monte-Carlo 法进行统一性检验,从中判断并校订每个站所包含的非均一性间断。Yan 等(2010)通过北京等单站个例应用分析,检验了这套均一化结果的合理性。本文所采用台站分布如图 1 所示,台站所处地理位置见表 1。

除区域气候变化的影响,城市化和土地利用变化等人为作用也是影响地面气温变化的重要因素(龚道溢等, 2002; 任国玉, 2003)。本文中城市化是指由农业为主的传统乡村向以工业和服务业为主的

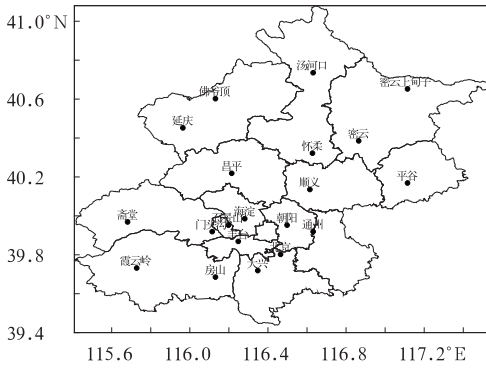


图1 北京地区气象观测站分布图

Fig. 1 Geographic location of observation stations in Beijing Area

表1 北京地区各气象站基本信息

Table 1 The location and description of observation stations in Beijing Area

站名	经度/E	纬度/N	海拔高度/m	站点环境
顺义	116°37'	40°08'	28.6	近郊
海淀	116°20'	40°01'	47.9	城区
延庆	115°58'	40°27'	487.9	远郊
佛爷顶	116°08'	40°36'	1224.7	山区
汤河口	116°38'	40°44'	331.6	山区
密云	116°52'	40°23'	71.8	远郊
怀柔	116°38'	40°22'	57.5	远郊
上甸子	117°07'	40°39'	294.3	山区
平谷	117°07'	40°10'	32.1	远郊
通州	116°38'	39°55'	43.3	城区
朝阳	116°30'	39°57'	35.3	城区
昌平	116°13'	40°13'	79.4	近郊
斋堂	115°41'	39°58'	440.3	山区
门头沟	116°07'	39°55'	92.7	近郊
观象台	116°28'	39°48'	31.3	城区
石景山	116°12'	39°57'	65.6	城区
丰台	116°15'	39°52'	55.2	城区
大兴	116°21'	39°43'	37.6	近郊
房山	116°08'	39°41'	39.2	远郊
霞云岭	115°44'	39°44'	407	山区

现代城市转变的过程,包括人口、产业结构和土地利用变化等。因此,北京地区气温的变化可认为是区域气候变化与城市化所决定的。假定非城市的温度变化趋势为区域气候变化趋势,则城区与非城市的温度变化趋势的差异可近似地归结为城市化影响。定量评价城市化对气温变化趋势的影响采用周雅清等(2009)提出的方法,即城市化影响是指由于城市热岛效应加强因素引起的城市附近台站地面气温的线性趋势变化。城市化影响贡献率是指城市化影响对城市附近台站气温趋势变化的贡献率,即城市化

影响在城市附近台站气温趋势变化中所占的比率。计算各站逐年的月、季、年平均气温距平值,季节采用气象季节定义,即1和2月及上一年的12月为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季。在此基础上,计算各站季、年平均温度变化的线性趋势及其温度变化速率。线性趋势采用最小二乘法进行估计,温度变化速率表示为每10 a温度变化的摄氏度数。

设 K_u 为城市站的气温变化趋势, K_r 为乡村站的气温变化趋势, K_e 为各站气温的变化趋势。城市化影响(ΔK_{ur})为:

$$\Delta K_{ur} = K_u - K_r \quad (1)$$

各站对北京地区气温影响为:

$$\Delta K_{er} = K_e - K_r \quad (2)$$

设 E_u 为城市化影响贡献率,可用下式表示:

$$E_u = \Delta K_{ur} / |K_u| = (K_u - K_r) / |K_u| \quad (3)$$

设 E_e 为各站对北京地区气温影响贡献率,可用下式表示:

$$E_e = \Delta K_{er} / |K_e| = (K_e - K_r) / |K_e| \quad (4)$$

乡村站采用初子莹等(2005)通过经验正交函数分解方法确定的6个乡村站(怀柔、霞云岭、汤河口、上甸子、斋堂和佛爷顶)表示,城区站用文献中通常使用的海淀、丰台、石景山和通州站4个站平均表示。观象台站即通常文献中所指的北京站。

2 结果与分析

2.1 城郊间气温空间分布差异

从北京地区1978—2008年多年平均气温空间分布(图2)可以看出,北京地区地形和城市化对温度有显著影响。从日平均最低气温空间分布(图2a)来看,气温自西北向东南逐渐升高,在城区达到最高,最低气温在区域内的差值可达8℃左右。日平均气温的分布(图2b)同最低气温类似,也是在城区形成一个温度较高的区域,但郊区中平谷、密云、怀柔、顺义的平均气温与城区接近,区域内的差值也可达到8℃。日平均最高气温分布与最低、平均气温的分布有一些差异,主要体现为从西北向东南逐步升高,在城区形成一个较为明显的城市热岛,区域内的差值可达8.5℃左右,而且自西北向东南温度递减较快(图2c)。

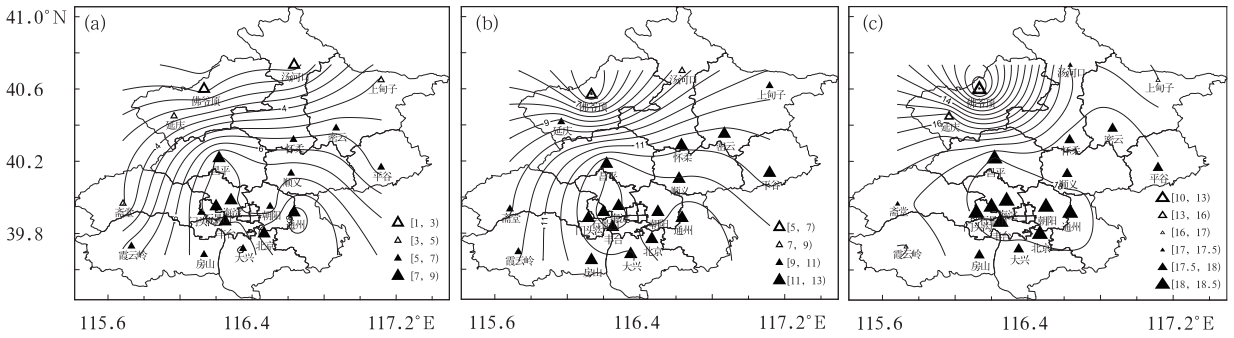


图 2 北京 1978—2008 年多年平均气温空间分布(单位: °C)

(a) 最低气温, (b) 平均气温, (c) 最高气温

Fig. 2 The spatial distribution of annual temperatures during 1978—2008 in Beijing Area (unit: °C)

(a) minimum temperature, (b) mean temperature, (c) maximum temperature

2.2 城郊间气温变化趋势空间分布差异

从日平均最低气温的变化趋势(图 3a)分布看,在延庆和城区多个站点,最低气温的升温趋势是最明显,能够达到 $0.82\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上,而山区的佛爷顶站,其升温趋势相对最弱,大约为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。西南部和东北部的升温趋势类似,升温趋势在 $0.64\sim 0.73\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,升温趋势的整体分布表现为从北部山区向城区,升温趋势逐渐增强;而城区各站的升温趋势大致相同,城区最低气温的升温趋势最明显。对于日平均气温的变化趋势(图 3b),

从北部和西部山区向中心城区,升温趋势逐渐增强,除朝阳气象站外,城区及其附近各站均表现明显的升温趋势,升温趋势可达 $0.6\sim 0.68\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,而在北部山区汤河口和上甸子,其增温趋势在 $0.39\sim 0.46\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 范围内,其他山区站的升温趋势较小。对于日平均最高气温变化趋势(图 3c),与平均气温和最低气温的分布有较大不同,主要表现为自西向东至城区升温趋势逐渐增强,佛爷顶、门头沟、石景山、海淀和观象台升温趋势在 $0.51\sim 0.57\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,而在延庆和斋堂站升温趋势在 $0.39\sim 0.43\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。

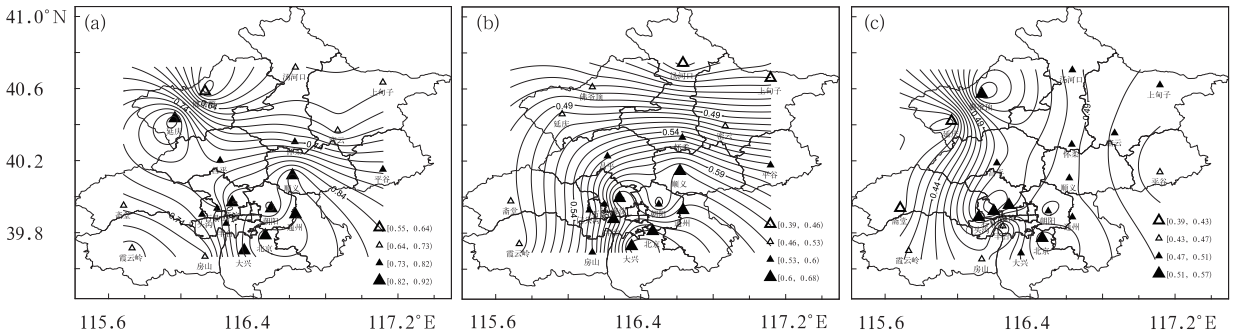


图 3 北京 1978—2008 年年平均气温变化趋势空间分布 [单位: $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$]

(a) 最低气温, (b) 平均气温, (c) 最高气温

Fig. 3 The spatial distribution of variation trend of annual mean temperatures during 1978—2008 in Beijing Area [unit: $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$]

(a) minimum temperature, (b) mean temperature, (c) maximum temperature

从最高、最低和平均气温变化趋势的对比看,最低气温的升温趋势最为明显,城区在 $0.82\sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 范围,山区在 $0.55\sim 0.64\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 范围,最高气温的升温趋势则较弱,城区在 $0.51\sim 0.57\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,郊区在 $0.39\sim 0.43\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10$

$\text{a})^{-1}$ 。平均气温的变化趋势介于最高和最低气温的变化趋势之间。

2.3 城市化对气温分布的贡献率分析

城市化影响贡献率是指城市化影响对城市附近

台站气温趋势变化的贡献率,即城市化影响在城市附近台站气温趋势变化中所占的比率。由图4a可知,对于日平均最低气温,除北部少数几个山区站外,城市化对北京地区多数站点升温的影响贡献为正,在远郊区 and 少数城区的贡献在0~15%范围内,而在城近郊区贡献在20%~25%范围内,对于观象台站,城市化的贡献可达30.2%,城市化影响程度最大站点主要集中在城区及其附近郊区。对于日平均气温(图4b),同城市化对于最低气温升温贡献类似,城市化对平均气温在北京地区的多数站点贡献为正,对于平均气温的贡献最大的区域包括观象台、顺义、海淀、朝阳、通州及大兴,其贡献率在20%~35%,主要是集中在城区及其北京东南部一带,影响最大的站点是大兴站,城市化的贡献可达34%,其

他站点则在0~20%范围内。城市化对于日平均最高气温(图4c)的贡献与对最低气温、平均气温的贡献有明显不同,在房山、丰台、平谷及延庆等站城市化的贡献为负,其他站点均为正,贡献率在0~17%范围内,城市化对最高气温的影响明显小于对最低气温和平均气温的影响。城市化影响最大的站点主要集中在自北部向南的北京地区中部一个条带,而对东部和西北地区的影响较小。但不论是日平均最低气温、平均气温和最高气温,均表现为对城区的站点影响最大,而对远郊区或山区的影响较小。

城市化对观象台站、城区及全市最低气温的年平均、各季节均非常显著(图5)。城市化对观象台站最低气温的贡献可达30.17%,影响最大的季节是秋季,可以达到42.53%,影响最小的季节是春

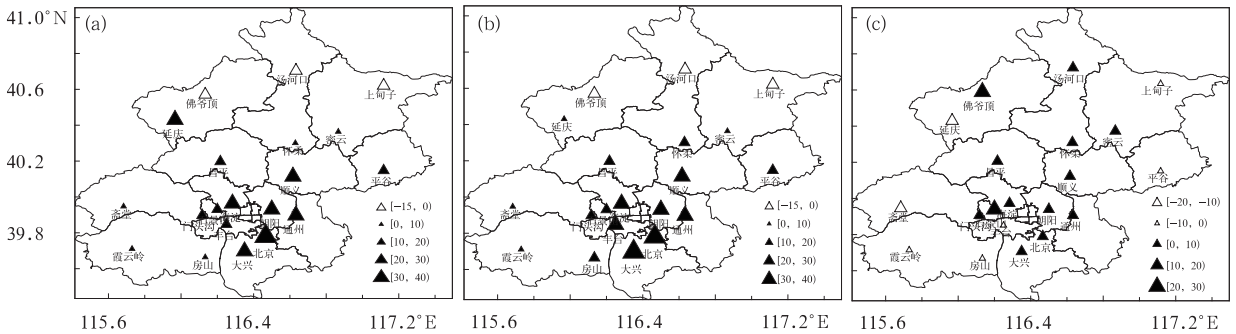


图4 北京1978—2008年城市化对北京市各站气温的贡献(单位:%)

(a) 最低气温, (b) 平均气温, (c) 最高气温

Fig. 4 The spatial distribution of contribution of urbanization to annual temperatures during 1978—2008 in Beijing Area (unit: %)

(a) minimum temperature, (b) mean temperature, (c) maximum temperature

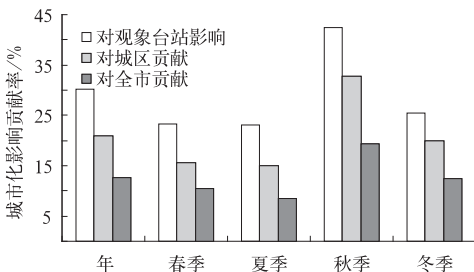


图5 1978—2008年城市化对观象台站、城区及全市站点日平均最低气温变化趋势的影响及贡献

Fig. 5 The contribution of urbanization to annual mean minimum temperatures of Beijing Observatory Station, urban and all of the stations in the whole region of Beijing during 1978—2008

季,其贡献为23.23%;城市化对城区的最低气温贡献可达20.89%,影响最大的秋季为32.73%,影响最小的季节是夏季,为15.05%;对于全市年平均最低气温的影响为12.71%,影响最大的季节是秋季,为19.35%,影响最小的季节为春季10.44%。

文献中通常使用北京地区的国家基本站观象台来代表北京地区的温度,也可以用北京地区各站的平均气温代表北京地区的气温。因观象台站处于近郊区,且紧邻高速公路,因此该站点的气温不可避免地受到城市化的影响,而北京地区20个气象站的气温也会受到城市化的不同影响。图6为城市化对北京地区、城区及观象台站温度在不同季节的影响。可以看出,城市化对观象台站的增温影响最为明显,对城区的气温影响次之,对全市的影响最小。城市化对观象台站平均气温的贡献31.54%,在秋季的

贡献为最大可达 37.14%，在春季的贡献最小为 22.94%；城市化对城区升温的贡献年平均可达 24.28%，在秋季最大而在春季、夏季较小；城市化对于全市的升温贡献可达 13.96%，对秋季的温度影响最大，而对夏季的增温影响最小。

城市化对最高气温的影响(图 7)与对平均气温的影响有较大不同，但也是对观象台站的气温影响最大，对观象台站年平均最高气温的贡献为 8.55%，对观象台站夏季气温的贡献可达 33.08%，但在春季则为 -3.40%；城市化对城区年平均最高气温的影响为 4.17%，在夏季为 17.39%，在春季为 -0.77%；城市化对全市年平均最高气温贡献为 1.33%，影响最大的是在夏季 10.67%，在秋季影响最小为 -3.81%。

可以看出，城市化对最高气温和最低气温及其

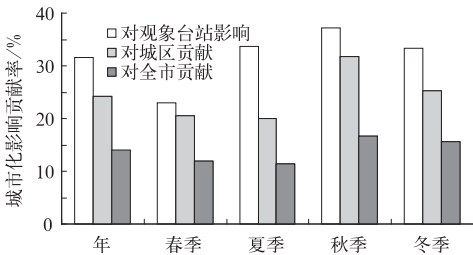


图 6 1978—2008 年城市化对观象台站、城区、全市站点平均气温变化趋势的贡献

Fig. 6 The contribution of urbanization to annual mean temperatures of Beijing Observatory Station, urban and all of the stations in the whole region of Beijing during 1978—2008

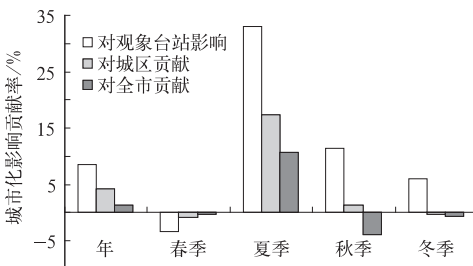


图 7 1978—2008 年城市化对观象台站、城区、全市站点平均日最高气温变化趋势的影响及贡献

Fig. 7 The contribution of urbanization to annual maximum temperatures of Beijing Observatory Station, urban and all of the stations in the whole region of Beijing during 1978—2008

平均气温的影响均不一样，对于观象台站、城区站和全市站点的影响也不相同。尤其是对平均、最低和最高气温在各季节的影响差异很大。城市化对观象台站、城区站、全市站的平均气温和最低气温均是在秋季的影响最大，对最高气温的影响则是在夏季最大。

3 结 论

本文基于北京地区 20 个常规站 1978—2008 年经 MASH 方法均一化处理的气温数据，分析了城市化对北京地区各站点年平均和不同季节最高、最低以及日平均气温的影响，得到如下结论：

(1) 北京地区 1978—2008 年，年平均日最低、平均气温空间分布自北向南、自西向东，温度逐渐升高，在城区达到最高，年平均日最高气温表现为从西向东南逐步升高，在城区形成较为明显的热岛。

(2) 温度变化趋势表明，在延庆和城区多个站点，年平均日最低气温升温趋势最为明显，能够达到 $0.82^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 以上，山区的佛爷顶站，升温趋势相对最弱，大约为 $0.55^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。对于平均气温，城区及近郊区除朝阳气象站外，均表现明显的升温趋势，在 $0.6 \sim 0.68^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 之间。对于年平均日最高气温变化趋势，表现为自西向东至城区升温趋势逐渐增强，佛爷顶、门头沟、石景山、海淀和观象台升温趋势在 $0.51 \sim 0.57^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 之间，而在延庆和斋堂站，升温趋势在 $0.39 \sim 0.43^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 之间。

(3) 城市化对北京地区年平均日平均气温和最低气温影响主要集中在城区及近郊区站点，对于年平均最高气温的影响最大的站点主要集中在北京地区自北向南中间带，在东部和西部站点则影响较小。城市化对观象台站的增温影响最为明显，对城区站点的气温影响次之，对全市站点的影响最小。

(4) 城市化对观象台站、城区站点、全市站点年平均日最低气温的年平均、各季节均非常显著。城市化对观象台站、城区、全市的平均气温和最低气温均是在秋季的影响最大，对最高气温的影响则是在夏季最大。

本文假设了参考站的温度变化趋势为区域气候变化趋势，而各站的温度受区域气候变化、局地气候和城市化等因素的综合影响，不同站点的温度及其变化趋势存在非对称型，因此本文中城市化对气温的影响存在一定的不确定性。同时，本文采用了山区站作为参考站评估城市化对气温的影响，由于山

区站相对海拔较高,可能受到低对流层温度变化的影响较大,在一定程度上可能放大了城市化对北京地区各站点气温升温贡献的影响,而目前北京平原地区气象站受城市化影响较大,如利用平原地区气象站作为参考站,则可能会低估城市化对北京地区气温的影响。从本文的分析结果可以看出,北京(观象台)站受城市化影响显著,结果对于定性分析城市化对北京地区变暖的影响及其区域气候变化的研究具有一定的参考意义。

参考文献

- 曹广真,侯鹏,毛显强. 2010. 北京市城市化对地表温度时空特征的影响. *气象*, 36(3):19-26.
- 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. *气象学报*, 63(4):534-540.
- 戴一帆,刘屹岷,周林炯. 2011. 中国东部地区城市化对气温影响的观测分析. *气象科学*, 31(4):365-371.
- 丁一汇,戴晓苏. 1994. 中国近百年来的温度变化. *气象*, 20(12):19-26.
- 龚道溢,王绍武. 2002. 全球气候变暖研究中的不确定性. *地学前缘*, 9(2):371-376.
- 李书严,陈洪滨,李伟. 2008. 城市化对北京地区气候的影响. *高原气象*, 27(5):1102-1110.
- 李思思,洪松,刘行健. 2011. 国际气候变化研究趋势. *气候变化研究进展*, 7(1):73-76.
- 陆琛莉,范晓红,宋文英,等. 2012. 杭州湾北岸持续热浪天气特点及城市化发展的影响. *气象*, 38(3):329-335.
- 任国玉. 2003. 地表气温变化研究的现状和问题. *气象*, 29(8):3-6.
- 任王玉,任国玉,张爱英. 2010. 城市化对地面气温变化趋势影响研究综述. *地理科学进展*, 29(11):1301-1310.
- 邵全琴,孙朝阳,刘纪远,等. 2009. 中国城市扩展对气温观测的影响及其高估程度. *地理学报*, 64(11):1292-1302.
- 司鹏,李庆祥,李伟. 2010. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测. *气象*, 36(2):13-21.
- 司鹏,李庆祥,轩春怡,等. 2009. 城市化对北京气温变化的贡献分析. *自然灾害学报*, 18(4):138-144.
- 王佳丽,张人禾,王迎春. 2012. 北京不同区域表面气温的变化特征以及北京市观象台气温的代表性. *气候与环境研究*, 17(5):563-573.
- 张爱英,任国玉,周江兴,等. 2010. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. *气象学报*, 68(6):957-966.
- 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. *高原气象*, 28(5):1159-1166.
- Choi W, Keuser A, Becker S. 2011. Identification of mid-latitude regional and urban temperature variabilities based on regional reanalysis data. *Theor Appl Climatol*, 107(1):87-98.
- De Laat A T J, Maurellis A N. 2006. Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends. *Int J Climatol*, 26(7):897-913.
- Du Yin, Xie Zhiqing, Zeng Yan, et al. 2007. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *J Geogr Sci*, 17(4):387-398.
- Fall S, Niyogi D, Gluhovsky Alexander, et al. 2010. Impacts of land use land cover on temperature trends over the continental United States: Assessment using the North American Regional Reanalysis. *Int J Climatol*, 30(13):1980-1993.
- IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- Jin M, Dickinson R E, Zhang D. 2005. The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS. *J Climate*, 18(10):1551-1565.
- Jones P D, Wigley T M L. 2010. Estimation of global temperature trends: What's important and what isn't. *Climatic Change*, 100(1):59-69.
- Kalnay E, Cai Ming, Li Hong, et al. 2006. Estimation of the impact of land-surface forcings on temperature trends in eastern United States. *J Geophys Res*, 111:D6.
- Li Q, Zhang A, Liu X, et al. 2004. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theor Appl Climatol*, 79(3-4):165-174.
- Li Qingxiang, Li Wei, Si Peng, et al. 2010a. Assessment of surface air warming in northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization. *Theor Appl Climatol*, 99(3-4):469-478.
- Li Zhen, Yan Zhongwei. 2010b. Application of multiple analysis of series for homogenization to Beijing daily temperature series (1960-2006). *Adv Atmos Sci*, 27(4):777-787.
- McKittrick R R, Michaels P J. 2007. Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data. *J Geophys Res*, 112:D24.
- Parker D E. 2006. A demonstration that large-scale warming is not urban. *J Climate*, 19(12):2882-2895.
- Peterson T C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No Difference Found. *J Climate*, 16(8):2941-2959.
- Portman D A. 1993. Identifying and correcting urban bias in regional time series: Surface temperature in China's northern plains. *J Climate*, 6(12):2298-2308.
- Ren Guoyu, Zhou Yaqing, Chu Ziyang, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *J Climate*, 21(6):1333-1348.
- Si Peng, Ren Yu, Liang Dongpo, et al. 2012. The combined influence of background climate and urbanization on the regional warming in Southeast China. *J Geogr Sci*, 22(2):245-260.
- Wang Fang, Ge Quansheng. 2012. Estimation of urbanization bias in observed surface temperature change in China from 1980 to 2009 using satellite land-use data. *Chinese Sci Bull*, 57(14):1708-1715.
- Yan Zhongwei, Li Zhen, Li Qingxiang, et al. 2010. Effects of site change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977-2006. *Int J Climatol*, 30(8):1226-1234.
- Yang Xuchao, Hou Yiling, Chen Baode. 2011. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *J Geophys Res*, 116:D14.