

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 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 563–573, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11024. Wang Jiali, Zhang Renhe, Wang Yingchun. 2012. Features of the surface air temperature in different areas of Beijing and the representativeness of Beijing Observatory [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 563–573.

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

王佳丽^{1,2} 张人禾³ 王迎春⁴

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

4 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘 要 利用北京地区 14 个观测站 1990~2007 年逐日和 2004~2007 年逐时的 2 m 气温观测资料, 分析了北京城区、郊区、南部山区以及北部山区 4 个区域表面气温的年变化、季节变化以及春、夏、秋、冬 4 个季节的日变化特征, 指出 4 个区域的气温变化特征具有明显的差异。在所有时间尺度上城区气温受城市热岛效应影响最大, 表现为温度最高, 郊区次之, 南部山区较低, 北部山区最低。1990~2007 年 4 个区域的气温都表现出增温趋势, 其中城区增温最明显, 增温率明显大于其他区域。城区与其他区域气温的差异有明显的季节变化, 城区与郊区、城区与北部山区气温的差异在冬季最大, 夏季最小; 城区与南部山区气温的差异在夏季最大, 春季最小。在气温的日变化方面, 城区气温在各个季节的日较差都是最小的, 南部山区最大。通过比较作为北京代表站的北京市观象台的气温与 4 个区域的差异, 发现观象台与城区气温在各个时间尺度上的差异都最小, 与其他区域存在显著差异, 北京市观象台气温主要代表了城区, 对其他区域的代表性较差。

关键词 北京表面气温 北京市观象台代表性 年变化 季节变化 日变化

文章编号 1006-9585 (2012) 05-0563-11

中图分类号 P423

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11024

Features of the Surface Air Temperature in Different Areas of Beijing and the Representativeness of Beijing Observatory

WANG Jiali^{1,2}, ZHANG Renhe³, and WANG Yingchun⁴

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract Using observed daily 2-m air temperature data during 1990–2007 and hourly measurements during 2004–2007 recorded at 14 meteorological stations in Beijing, we investigated the annual, seasonal, and diurnal variations of the surface air temperature among four different areas of Beijing: The urban area (UA), suburban area (SA), north mountainous area (NMA), and south mountainous area (SMA). Distinct features were observed in the four areas. For all

收稿日期 2011-02-21 收到, 2011-07-04 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 40921003, 科技部国际科技合作项目 2009DFA21430

作者简介 王佳丽, 女, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化研究, E-mail: wjl1985jl@163.com

time scales, due to the urban heat island effect, the maximum surface air temperature was observed in UA, followed by SA, SMA, while the minimum was in NMA. During 1990–2007, surface air temperatures in all the four areas showed a significant warming trend, with the largest warming rate being in UA. The difference in surface air temperature between UA and the other areas was season-dependent. The difference in surface air temperatures between UA and SA and between UA and NMA were largest in winter and smallest in summer, while the largest difference in air temperatures between UA and SMA occurred in the summer, and the smallest was in spring. The minimum daily range of the surface air temperature was observed in UA in each season while the maximum was in SMA. Comparing the surface air temperature of Beijing Observatory with the four areas, the best fit was with UA while significant differences were observed with the other areas at all time scales.

Key words Beijing surface air temperature, Beijing Observatory representativeness, annual variation, seasonal variation, diurnal variation

1 引言

城市的发展不仅会改变城市的局地气候,也会影响城市及其周边地区天气和气候系统的演变。北京是世界上最大的城市之一,对于北京区域气候特征的研究,在认识城市对局地气候的影响方面具有典型的代表性。关于北京地区气温变化和城市化的影响已有很多研究,张光智等(2002)利用北京 16 个气象站 1961~2000 年气温资料采用尺度滤波分析得到:北京城市热岛效应在 1980~1990 年和 1990~2000 年之间显著增强,且增强区域与城市位置十分吻合;且城市热岛的主中心内还有更高的小中心嵌套其中。林学椿和于淑秋(2005)利用北京 20 个地面观测站的气温资料研究了 1960~2000 年北京气温以及热岛强度的年际变化,发现 1981 年是显著的气温跃变点,跃变后的北京地区气温比跃变前升高了 0.55 °C。于淑秋等(2005)利用北京地区 20 个气象观测站 1960~2000 年的气温资料研究得到:北京城市热岛存在明显的季节变化,以冬季最强,夏季最弱;热岛强度具有逐年增温的特点,其年际变化与城市化指数的年际变化具有良好的线性关系。初子莹和任国玉(2005)利用 1961~2000 年 20 个观测站的气温资料研究发现:城市热岛效应对区域温度序列的绝对影响随时间增大,但对全部区域增暖的贡献呈下降趋势;提出目前全国或较大区域的气温序列在很大程度上保留有城市化的影响。季崇萍等(2006)利用 1971~2000 年北京 20 个气象站的逐 6 h 气温资料,对北京城市热岛日变化的长期变化进行研究,指出夜间 02:00(北京时间,下同)热岛强度最强,中午 14:00 强度最弱;且冬季 4 个时次的热岛都强于其他季节,夏季热岛

强度最弱。Ren et al. (2007) 利用中国北方地区 282 个站点 1961~2000 年的月平均气温研究比较了大、中、小城市表面气温的差异,发现大城市的增温效应达 0.16 °C/10 a,而小城市只有 0.07 °C/10 a。李书严等(2008)利用北京 20 个气象站 1970~2005 年冬季 08:00 的气温资料研究得到:北京地区热岛效应呈现强度增强、面积增大,由单一向多个热岛中心演变的趋势;并指出人口密度的对数以及城区面积都与气温呈线性相关。司鹏等(2009)对北京 14 个观测站 1960~2006 年的地面最高、最低气温进行了均一化检验并作订正后,研究指出城市化对北京地区年平均和季节平均气温的增暖效应非常显著,并且春、冬季气温升高尤为突出。Liu et al. (2009)利用北京市观象台和密云两个站点 1971~2003 年的气温资料研究了城郊气温差异的日变化,指出在 02:00、08:00 以及 20:00 城郊温差较大而在午后 14:00 城郊温差最小。另外,数值模式也能较好的模拟出北京城市热岛的位置及强度(Hu et al., 2005; Miao et al., 2009)。

在对北京天气和气候的研究中,往往将北京市观象台(39°48'N, 116°28'E, 海拔高度 31.3 m)的气象资料作为代表北京的基本数据(例如:高庆先等, 2002; 王淑英等, 2003; 王迎春等, 2003; Li et al., 2008)。但已有的研究表明,用区域内不同的站点资料去研究相同的问题,可以得出不同的结果(Pielke et al., 2000)。这说明利用一个站点的气象资料来研究区域的天气或气候,往往不具有代表性(Siljamo et al., 2008),其主要原因是不同的下垫面状况(例如山地、城市、河流、植被等)会对局地天气和气候产生不同的影响(Huff and Vogel, 1978; Oki and Musiak, 1994; Wu et al., 2003; 张人禾和刘晶淼, 2005)。

北京地形复杂，山区面积占全北京面积的三分之二，城市的发展以及纬度和地形高度的影响使得北京不同区域的气温存在明显差异。因此，作为北京代表站的北京市观象台在多大程度上代表了北京的气象状况是一个值得研究的问题。在认识北京区域天气和气候特征时，有必要考虑下垫面以及纬度和地形高度的差异，从而了解这些差异所造成的局地天气和气候的差异，这也是认识北京市观象台观测资料代表性的重要基础。定量认识北京市观象台对于北京不同区域气温的代表性，能够为提高天气预报准确率及改善天气预报评分制度提供有力参考，同时，观测资料的代表性也是气候观测系统设计中所涉及到的一个重要问题（张人禾，2006）。鉴于以上因素，本文将北京分为城区、郊区、南部山区和北部山区 4 个区域，从年际变化、季节变化以及春、夏、秋、冬 4 个季节的日变化来比较分析 4 个区域表面气温的差异；并通过将北京市观象台的观测资料与每个区域进行比较，探讨北京市观象台观测资料的代表性问题。

2 资料和方法

文中所用资料为北京市气象局提供的北京 14 个观测站 2004~2007 年 1~12 月逐小时和 1990~2007 年 1~12 月逐日的 2 m 气温资料，14 个站点分别为：海淀（HD）、朝阳（CY）、丰台（FT）、石景山（SJS）、北京市观象台（NJ）、密云（MY）、上甸子（SDZ）、怀柔（HR）、平谷（PG）、汤河口（THK）、延庆（YQ）、佛爷顶（FYD）、斋堂（ZT）、霞云岭（XYL），站点的具体分布如图 1 所示。所用资料经过了严格的质量控制，且所选序列的缺测率少于 1%。文中所指时间均为北京时，春、夏、秋、冬季分别定义为 3~5 月、6~8 月、9~11 月、以及 12 月至次年 2 月。

台站迁移是造成中国观测气温时间序列非均一性的最主要因素。根据北京市基层气象台站简史（北京市气象局，2009）显示，北京地区所有气象观测台站自建站以来，大部分有过 1 至 2 次迁站记录。特别是北京市观象台（54511 站）自建国以来就发生过 6 次迁移。其中 1990~2007 年的迁移站点及迁移时间如表 1 所示。利用初子莹和任国玉（2005）的方法，选取未经迁站的海淀站和丰台的平均气温作为参考序列，分别计算它与 6 个迁移

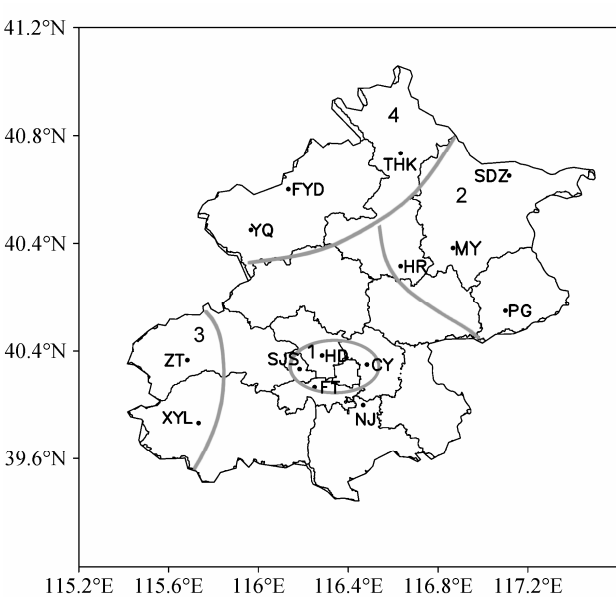


图 1 北京 14 个站点的位置分布（图中的 1、2、3、4 分别表示城区、郊区、南部山区以及北部山区；灰色实线为以上 4 个区域的分界线）

Fig. 1 Distribution of the 14 meteorological stations in Beijing (1, 2, 3, and 4 denote the urban area, the suburban area, the northern mountainous area, and the southern mountainous area, respectively. Grey lines denote the boundaries of the four areas)

表 1 1990~2007 年的迁移站点、迁移时间、*t* 检验得到的跃变时间和对应的 *p* 值，以及均一化订正值

Table 1 Relocated stations and years during 1990-2007, *p* values when a jump appeared, and corrections for each relocated station

站点	迁站时间	跃变时间	<i>p</i> 值	订正值 (°C)
石景山	1997 年	1997~1998 年	0.037	-0.3
朝阳	2007 年	2006~2007 年	0.036	-0.2
怀柔	1996 年	1995~1996 年	0.013	0.5
平谷	2003 年	2002~2003 年	0.050	-0.2
延庆	2000 年	—	—	—
观象台	1996 年	1996~1997 年	0.012	-0.2

站点的温度差值序列，结果为 6×18 的矩阵。由于北京地区所有站点都处于同一的大尺度环流背景中，因此认为各站差值序列的年间波动（即后一年减去前一年得到的新序列）服从正态分布，结果为 6×17 的矩阵。分别对这 6 个迁移站点的新序列做 *t* 检验，显著性水平小于 0.05 则认为这是由于迁站引起的跃变点。从表 1 可以看出，除了延庆站以外，其他 5 个经迁移的站点都在迁移时间点产生了跃变。对于每个迁移站点，利用与其发生跃变同期的其他

站点的波动平均值,对跃变时间以后的气温序列进行订正。文中月、年平均气温均为订正后的结果。

本文将北京划分为 4 个区域,即城区、郊区、南部山区和北部山区。城区选择位于北京 5 环以内的主城区站点,包括海淀、丰台、朝阳、石景山;郊区站点选择离城区较远,受城市化影响较小的密云、怀柔、平谷、上甸子;考虑到山区的气候特征与平原有较大的差异,选择汤河口(怀柔境内)、延庆、佛爷顶(延庆境内)作为北部山区;将斋堂(门头沟境内)、霞云岭(房山境内)作为南部山区。这种分区不但考虑了高度城市化的区域,将远离城区的站点划为郊区,而且还考虑了海拔高度及纬度的差异,将南部山区和北部山区划为两个区域。北京市观象台没有被划入以上 4 个区域,本文将对其气温的变化特征与 4 个区域进行比较,来探讨北京市观象台气温的代表性。

本文把气温与时间序列的一元线性回归系数的 10 倍定义为增温率,单位为 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (张爱英等, 2010)。就地表气温而言,北京地区处于同样的大尺度环流背景下,即若地表气温受大尺度环流的影响,则在北京地区各个台站应当基本相当。因此,在北京地区同一时期不同台站、特别是城郊台站直接地表气温的差异主要反映的是台站所在城市化或土地利用变化的局地影响(初子莹和任国玉, 2005)。考虑到山区台站气温还受到地形高度的影响,我们定义城市台站和郊区台站增温率的差值为城市化增温率,并将城市化增温率与北京地区平均增温率的比值定义为城市化增温贡献(张爱英等, 2010)。

本文选取了 5 个统计检验参数(胡江林等, 2008)来比较北京市观象台与 4 个区域的偏差,分别为:(1)均方根误差(RMSE);(2)平均绝对误差(MAE);(3)Pearson 相关系数(R);(4)标准化均方误差(NMSE);(5)标准化平均误差(NME)。这 5 个检验统计参数的表达式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x_0(t) - x_s(t)]^2}, \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |x_0(t) - x_s(t)|, \quad (2)$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x_0(t) - \bar{x}_0] \cdot [x_s(t) - \bar{x}_s]}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x_0(t) - \bar{x}_0]^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x_s(t) - \bar{x}_s]^2}}, \quad (3)$$

$$\text{NMSE} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [x_0(t) - \bar{x}_s]^2}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_0(t) \cdot \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_s(t)}, \quad (4)$$

$$\text{NME} = \frac{\sum_{t=1}^N |x_0(t) - x_s(t)|}{\sum_{t=1}^N x_0(t)}, \quad (5)$$

其中, x_0 和 x_s 分别为用于检验的两个时间序列, N 为时间序列长度。本文中在检验观象台的代表性时, x_0 依次取为城区、郊区、南部山区以及北部山区的区域平均时间序列, x_s 则取为观象台的时间序列。

3 年变化

图 2 分别给出了北京城区、郊区、南部山区和北部山区的区域平均的 1990~2007 年的气温年变化。可以看到不同区域的气温有着明显的差异,城区受城市热岛影响最明显,气温最高,年平均气温达 12.8°C ,郊区次之,北部山区气温最低,年均气温只有 8.2°C ,与城区的温差达到 4.6°C 。对 4 个区域的年平均气温做 t 检验,得到 4 个区域表面气温的差异在统计上都是显著的,显著性水平小于 0.001。

北京 4 个区域气温的变化均表现出增温趋势,其中城区增温最明显,1990~2007 年的线性增温率达到 $0.55^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,并通过显著性水平为 0.01 的显著性检验;郊区的增温趋势较弱,增温率为 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,通过显著性水平为 0.04 的显著性检验;北部山区虽然气温最低,但增温趋势比郊区和南部山区强,增温率达到 $0.41^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,通过显著性水平为 0.05 的显著性检验;南部山区的增温也达到 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,但是未通过信度为 0.05 的显著性检验。由此可见,城市热岛效应确实对气候变暖产生了贡献,城市化增温率高达 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,对全北京地区的增温贡献达 60.1%。与前 40 年相比,城市化增温率有所增加,而城市化增温贡献率有所下降(初子莹和任国玉, 2005),这也说明城市热岛强度增加的同时,整个北京地区在近 20 年的气温也受到大尺度增温的影响。

从图 2 可看出,观象台气温的年变化及其变化趋势都与城区最接近,年平均气温为 13.1°C ,

1990~2007 年的增温率为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 并通过显著性水平为 0.02 的显著性检验。为了更清晰的显示观象台与 4 个区域年平均气温的异同, 我们用各个区域的年平均气温减去观象台的年平均气温, 所得结果越接近零线则说明二者的差异越小, 结果如图 3 所示。可看出观象台与城区的气温差值总是在零线附近波动, 平均差值为 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与郊区的平均差值为 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与南部山区的平均差值为 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与

北部山区的平均差值最大, 为 $-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对观象台的年平均气温分别与城区、郊区、北部山区以及南部山区的气温做 t 检验, 结果表明, 观象台与城区气温的差异不显著 (显著性水平 0.17), 而与郊区、南部山区以及北部山区的差异都通过显著性水平为 0.001 的显著性检验。这说明观象台的年平均气温对城区具有代表性, 而对于郊区和山区不具有代表性。

4 季节变化

图 4 给出了 4 个区域以及观象台的 1990~2007 年 1~12 月的平均气温。总体而言, 一年四季城区的气温都高于其他区域, 秋、冬季尤为明显, 城市化增温对全北京地区的贡献呈现春、夏、秋、冬逐季递增的规律。城区 1 月份的气温比郊区高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比南部山区高 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比北部山区高 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冬季城市化增温率为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 对北京地区的增温贡献达到 93.5%, 说明城市热岛增强是冬季增温的最主要因素。春、秋季热岛效应有所减弱, 城区气温比郊区高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 比南部山区的春季高 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、比秋季高 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比北部山区高 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 其中春季城市化增温率很小 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 对北京地区的增温贡献只有 9.72%; 秋季城市化增温率达到 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 对北京地区的增温贡献为 70.7%。夏季城市热岛效应明显减弱, 城区气温只比郊区高 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比南部山区高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比北部山区高 $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夏季城市化增温率为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 对北京地区的增温贡献为 44.4%。与前 40 年的研究结果相比 (于淑秋等, 2005), 近 20 年的热岛强度在 4 个季节均有明显增强。需要注意的是, 城区气温比山区气温高, 也有海拔高度和纬度的影响, 由于山区海拔高度较高, 北部山区纬度也较城区高, 使得北部山区气温大大低于平原地区。

从图 4 还可看出, 观象台一年四季的气温与城区都是最接近的, 2 月份开始观象台的气温也达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 一直持续到 11 月份; 而且观象台 12 个月的月平均气温均高于郊区和山区。图 5 给出的 4 个区域月平均表面气温与观象台的差值更清晰地显示了这些差异。可以看到, 观象台与城区的差值总是在零线附近波动, 4、5 月份差值几乎为零; 最大差值的绝对值在秋季也不会超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 观象台与郊区的差值较大, 尤其是在冬季的差值绝对值达

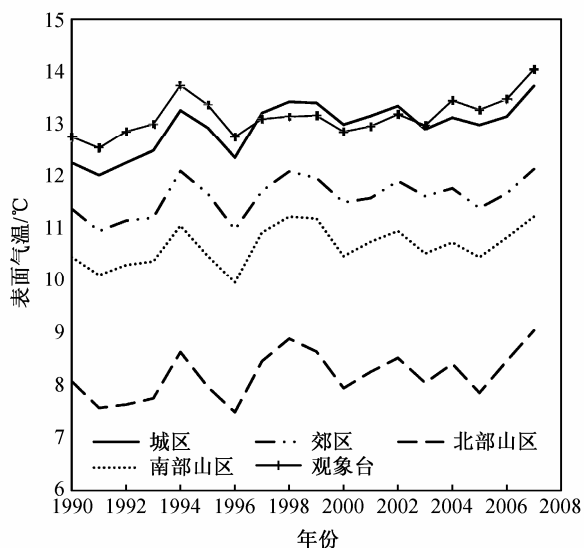


图 2 1990~2007 年观象台、城区、郊区、北部山区及南部山区气温的年变化

Fig. 2 Annual variations of surface air temperature at Beijing Observatory (BO), urban area (UA), suburban area (SA), north mountainous area (NMA), and south mountainous area (SMA) during 1990–2007

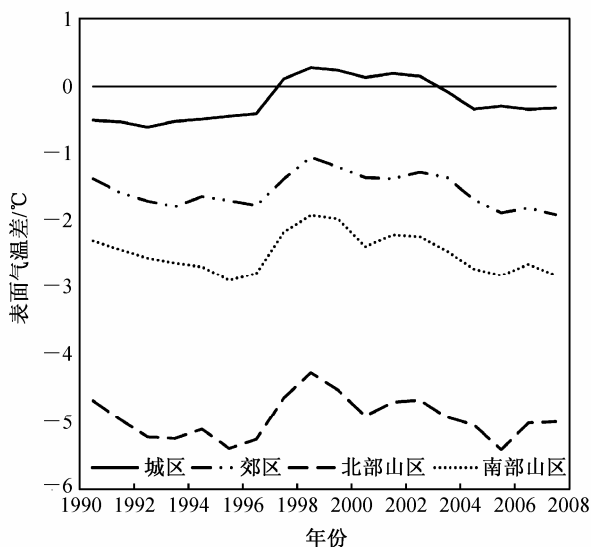


图 3 1990~2007 年各区域与观象台气温差值 (各区域减去观象台) 的年变化

Fig. 3 Annual variation of the surface temperature difference between each area and BO during 1990–2007

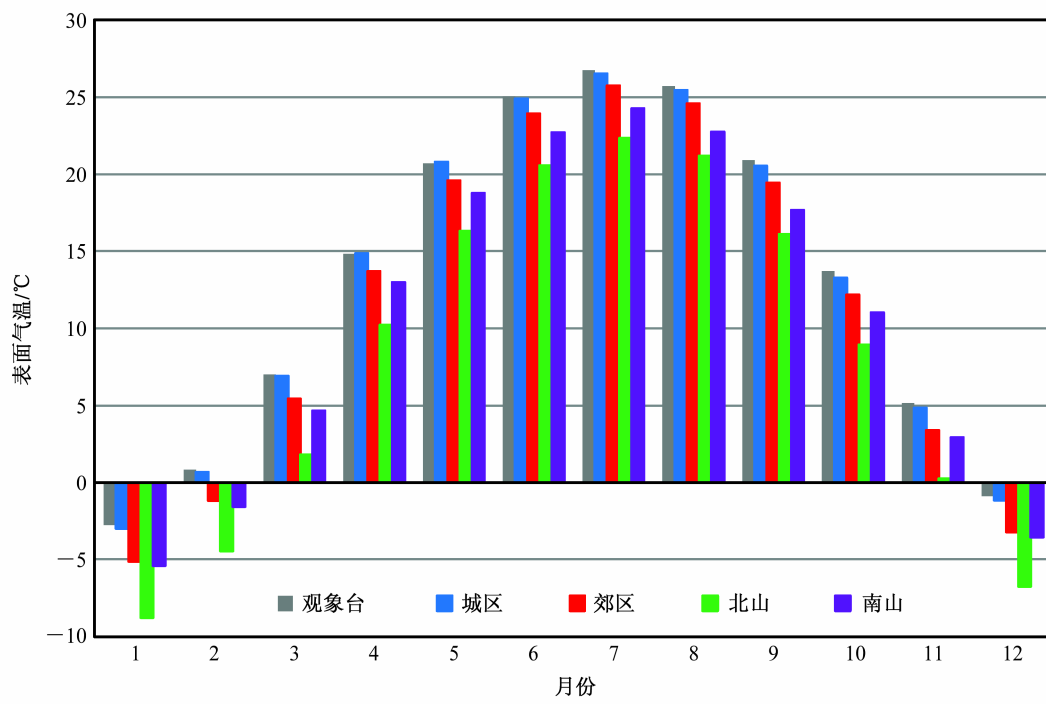


图 4 1990~2007 年观象台及城区、郊区、北部山区、南部山区气温的月变化

Fig. 4 Monthly variations of the surface air temperature in BO, UA, SA, NMA, and SMA during 1990~2007

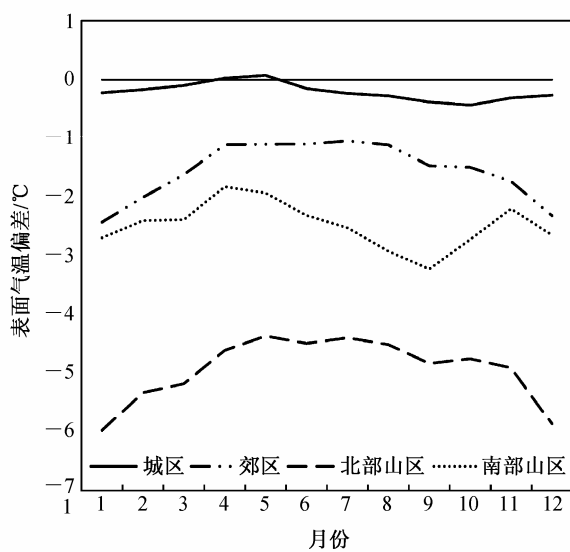


图 5 1990~2007 年各区域与观象台气温差值 (各区域减去观象台) 的月变化

Fig. 5 Monthly variations of surface air temperature difference between each of the four areas and BO during 1990~2007

到 2.4 °C；观象台与南部山区的最大差值也出现在秋季，达到 3.2 °C；观象台与北部山区的差值最大，冬季尤为明显，最大差值的绝对值达 6.0 °C，而在夏季观象台与北部山区的差值绝对值也达到 4.5 °C。对观象台 1990~2007 年逐年 1~12 月的月

平均气温分别与城区、郊区、北部山区及南部山区的气温做 t 检验，得到观象台与城区的差异不显著（显著性水平 0.80）；与郊区的差异的显著性水平为 0.17，比与城区的差异要显著；与南、北部山区气温的差异非常显著，全部通过显著性水平小于 0.05 的显著性检验。这就说明，观象台 1990~2007 年逐年的月平均气温对于城区具有代表性，而对于郊区和山区不具代表性。

5 不同季节的日变化

如图 5 所示，4 个区域与观象台气温的差值在不同季节有较大的差异，因此，本节将针对不同季节讨论气温的日变化。图 6 给出了 2004~2007 年春、夏、秋、冬的城区、郊区、南部山区、北部山区和观象台的气候平均表面气温的逐时变化情况。可以看到 4 个季节均以城区表面气温最高、郊区次之，南部山区气温较低，北部山区最低；从日变化特点来看，4 个季节均表现出午后 15:00 左右的气温峰值，而在清晨 06:00 左右为气温最低值。具体而言，4 个区域的差异在于城区的气温最高值出现得更晚（15:00），而郊区和山区最高气温出现在 14:00，可能是因为郊区和山区空旷，太阳辐射能量

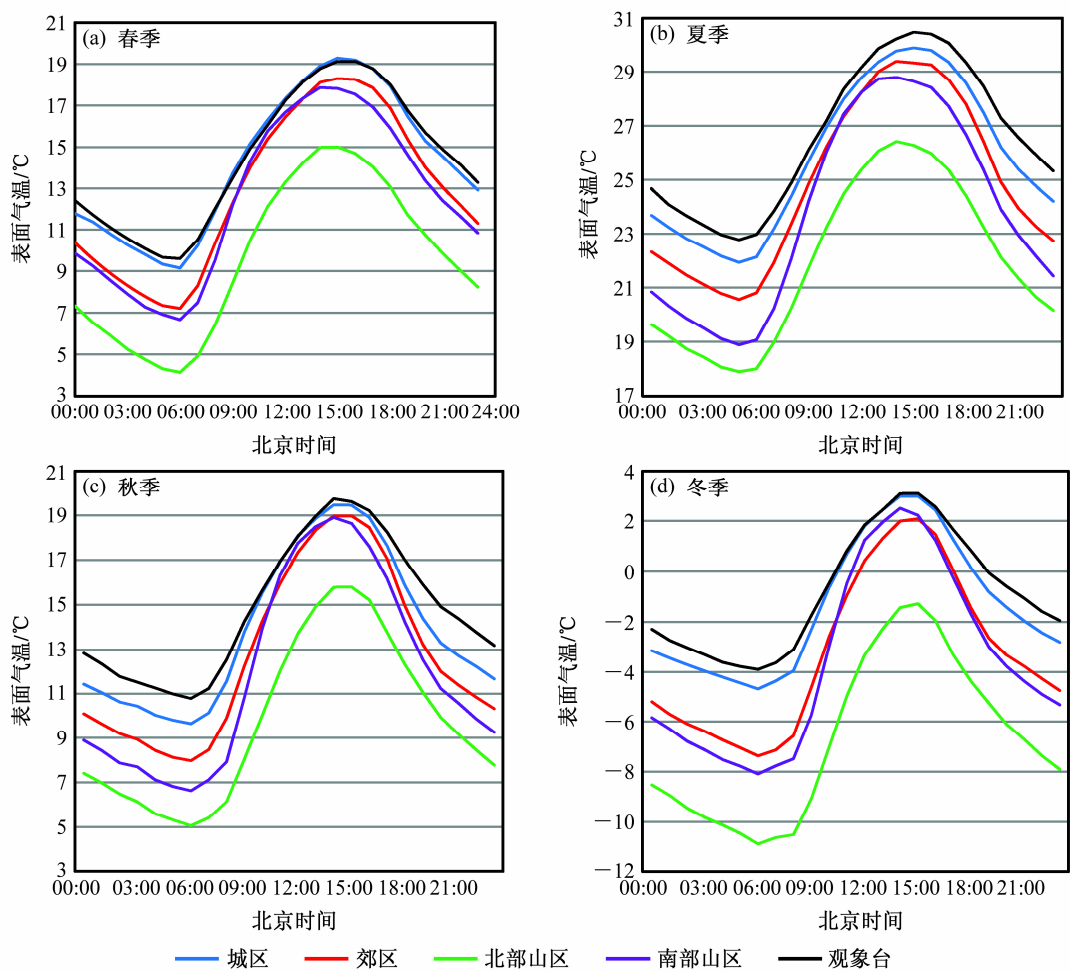


图6 2004~2007年观象台、城区、郊区、北部山区以及南部山区的气温在4个季节的日变化：(a)春季；(b)夏季；(c)秋季；(d)冬季
Fig. 6 Diurnal variations of the surface air temperature in BO, UA, SA, NMA, and SMA in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter during 2004–2007

没有大的损失就到达地面，而城区建筑物等对太阳辐射的吸收使得达到最高气温的时间滞后。另外，南部山区在清晨的最低气温明显低于郊区，而到了中午前后其最高气温甚至高于郊区，这是因为山区海拔高度高，山地以上的空气稀薄，接受太阳直接辐射较多，所以其午后温度很高；另外由于南部山区纬度较低，并且离城区较近，受城市热岛扩散的

影响，其温度要高于北部山区。
本文还计算了1990~2007年春、夏、秋、冬4个时段（02:00、08:00、14:00以及20:00时）的城市化增温率及其对全北京地区的增温贡献，结果如表2所示。与其他季节相比，春季4个时段的城市化增温率和增温贡献都是最小的，在14:00和20:00为负值，对全北京地区为负贡献，这是由于

表2 1990~2007年春、夏、秋、冬季4个时段的热岛增温率（单位：℃/10 a）及其增温贡献
Table 2 Urban heat island increasing trends (units: ℃/10 a) and warming contributions of spring, summer, autumn, and winter at four hours during 1990–2007

时次	春季		夏季		秋季		冬季	
	热岛增温率 (℃/10 a)	增温贡献	热岛增温率 (℃/10 a)	增温贡献	热岛增温率 (℃/10 a)	增温贡献	热岛增温率 (℃/10 a)	增温贡献
02:00	0.14	25.5%	0.50	115%	0.59	184%	0.50	151%
08:00	0.33	43.8%	0.39	76.0%	0.50	102%	0.55	137%
14:00	-0.13	-14.3%	0.09	13.5%	-0.03	-4.3%	-0.03	-11.1%
20:00	-0.06	-9.0%	0.30	68.6%	0.32	99.1%	0.13	44.4%

郊区在春季 14:00 和 20:00 的增温率大于城区；秋季和冬季在 02:00 和 08:00 的热岛增温率和增温贡献较春季和夏季大；08:00 的城市化增温率和增温贡献也呈现由春、夏、秋、冬递增的变化特点，与第 4 节 的季节变化一致。比较 4 个时次而言，各个季节的城市化增温率和增温贡献都以 02:00（或 08:00）最大，而以午后 14:00 最小，这也说明热岛效应在夜间至清晨最强，而在午后最弱。

表 3 2004~2007 年城区、郊区、北部山区、南部山区及观象台的气温日较差

Table 3 Daily ranges of the surface air temperature in UA, SA, NMA, SMA, and BO during 2004–2007 °C

	城区	郊区	北部山区	南部山区	观象台
春季	10.1	11.1	10.9	11.2	9.8
夏季	7.6	8.8	8.6	9.9	7.7
秋季	9.5	11.0	10.8	12.3	9.1
冬季	7.7	9.5	9.6	10.6	7.4

表 3 给出了各个区域及观象台 2004~2007 年气温的日较差，可看出南部山区的气温日较差在 4 个季节都是最大的，而城区的气温日较差最小，这是城区建筑物、人为热源等在白天吸收了大量短波辐射，晚上反过来向大气释放的结果。而从季节变化来看，4 个区域的气温日较差均以夏季最小。

由图 6 可看出，观象台的表面气温与城区最接近，表 3 也表明观象台的日较差与城区相当。为了清楚地表示观象台气温日变化与 4 个区域的差异，图 7 分别给出了 4 个季节城区、郊区、南部山区以及北部山区的逐时气温与观象台的差值。可以看到，观象台与城区气温的差值最小，总是在零线附近，与郊区的差值次之，与南部山区气温的差值在正午前后高于郊区，与北部山区气温差值的绝对值最大，尤其在秋、冬季节，冬季最大日平均差值达 7.3 °C。总体而言，观象台与

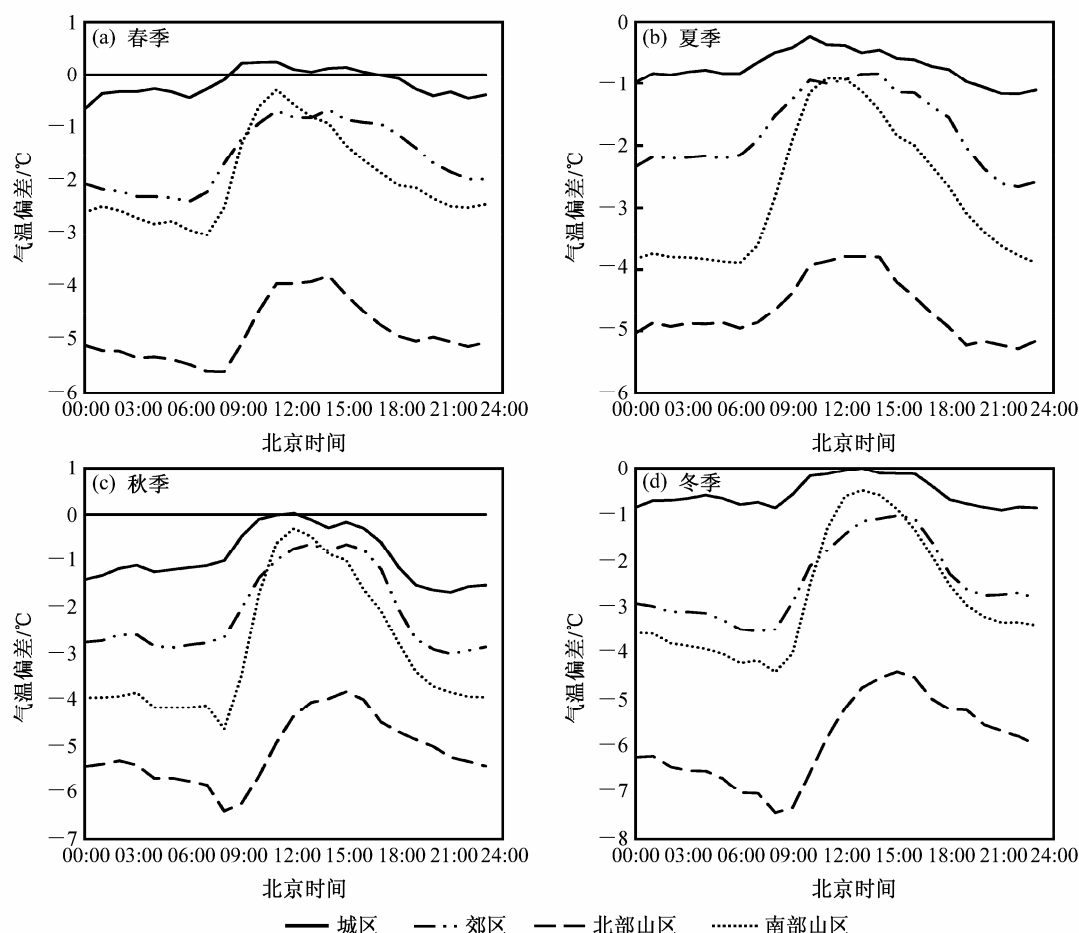


图 7 2004~2007 年北京不同区域逐时气温与观象台的差值在 4 个季节的日变化：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

Fig. 7 Diurnal variations of the surface air temperature difference between each of the four areas and BO in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter during 2004–2007

4 个区域的差值在 4 个季节都以晚上至第 2 天清晨达到最大，其中夏季最大温差出现在 22:00 至 23:00；春季与城区的最大温差出现在 00:00，与郊区和山区的最大温差出现在 06:00 至 08:00；秋季与城、郊的最大温差出现在 21:00，与山区的最大温差出现在 08:00；冬季与城区的最大温差出现在 21:00，与郊区、山区的最大温差出现在 07:00 至 08:00。而日间由于郊区和山区的气温上升较快，使得热岛强度明显减小。以上结果与谢庄等（2006）、季崇萍等（2006）研究的北京城市热岛的昼夜变化特点完全一致。

分别对观象台与城区、郊区、北部山区、南部山区气温的差异做 t 检验，夏、秋、冬季观象台与城区的差异不显著，与郊区的差异都超过 0.05 的显著性水平，与南、北部山区的差异都超过了 0.01 显著性水平；春季观象台与城区的差异不显著，与北部山区的差异都超过了 0.01 显著性水平，与郊区差异的显著性水平为 0.14，与南部山区差异的显著性水平为 0.07。从北京不同季节气温的日变化来看，总体而言，观象台气温代表了城区气温的特征，而对其他区域的气温不具有代表性。

6 观象台气温代表性的统计验证

根据第 2 节介绍的方法，本文计算了均方根偏差(RMSE)、平均绝对偏差(MAE)、相关系数(R)、标准化的均方偏差(NMSE)、标准化的平均偏差(NME) 5 个统计参数，来验证观象台的表面气温对于不同区域在不同时间尺度上的代表性。将公式 1-5 中的 x_s 取为观象台的气温时间序列， x_0 分别取为不同区域平均值的时间序列。若某一区域中 4 个与偏差有关的统计参数越小、相关系数越接近 1，说明观象台对该区域具有较好的代表性。表 4 为利用 2004~2007 年夏季(6~8 月)逐时气温资料计算的 5 个统计参数，可以看到，城区气温与观象台的 4 个偏差统计参数与其他区域具有较大的差异，城区与观象台的偏差远小于其他区域，郊区增大，南部山区更大，北部山区最大；各区域气温与观象台的相关系数总体较高，差异不明显，但城区与观象台的相关系数最大，郊区次之，南、北部山区最小。这说明了观象台的逐时温度资料对城区最具代表性。其他季节的逐时气温也具有与此一致的特征。利用同样的方法，我们对 1990~2007 年

逐年平均气温、1990~2007 年 1~12 月逐月平均气温计算了以上统计参数，它们分别在表 5 和表 6 中给出。可以看到与夏季逐时气温计算的结果一致，城区气温与观象台的 4 个偏差统计参数与其他区域具有较大的差异，城区最小，郊区增大，南部山区更大，北部山区最大；各区域气温与观象台的相关系数差异不明显，逐年平均气温还出现了郊区略大于城区。从 4 个偏差统计参数来看，也进一步说明观象台的表面温度对城区的代表性是最优的。

表 4 2004~2007 年夏季(6~8 月)观象台与 4 个区域逐时气温的 5 个统计参数

Table 4 Five statistical parameters calculated by the hourly surface air temperature between each of the four areas and BO in summer (June to August) during 2004-2007

	RMSE	MAE	R	NMSE	NME
城区	0.95	0.71	0.97	0.001	2.75%
郊区	2.1	1.65	0.93	0.01	6.71%
北部山区	4.96	4.65	0.90	0.02	21.66%
南部山区	3.37	2.96	0.91	0.04	12.72%

表 5 观象台与 4 个区域 1990~2007 年平均气温的 5 个统计参数

Table 5 Five statistical parameters calculated by the yearly average surface air temperature (1990-2007) between each of the four areas and BO

	RMSE	MAE	R	NMSE	NME
城区	0.36	0.57	0.76	0.00	2.53%
郊区	1.37	1.16	0.80	0.01	11.42%
北部山区	4.95	2.22	0.73	0.23	60.18%
南部山区	2.50	1.57	0.69	0.04	23.27%

表 6 观象台与 4 个区域 1990~2007 年 1~12 月逐月平均气温的 5 个统计参数

Table 6 Five statistical parameters calculated by the monthly average surface air temperature (January to December, 1990-2007) between each of the four areas and BO

	RMSE	MAE	R	NMSE	NME
城区	0.42	0.36	0.9999	0.001	2.85%
郊区	1.46	1.35	0.998	0.01	11.48%
北部山区	5.0	4.94	0.997	0.23	60.59%
南部山区	2.55	2.48	0.996	0.05	23.36%

7 结论和讨论

本文利用北京地区 14 个地面常规观测站 1990~2007 年逐日, 以及 2004~2007 年逐时的气温资料, 从不同时间尺度考察了城区、郊区、南部山区以及北部山区表面气温的变化特征以及北京市观象台气温的代表性。我们选择 5 环以内的海淀、丰台、石景山、朝阳作为城区站点; 选择远离城区的平谷、怀柔、上甸子、密云作为郊区站点; 考虑到山区天气和气候与平原地区的差异, 选择汤河口、延庆、佛爷顶作为北部山区站点; 选择斋堂、霞云岭作为南部山区站点。本文分析了 4 个区域表面气温的年变化、季节变化以及春、夏、秋、冬季的日变化特征。结果表明, 4 个区域气温变化特征具有显著差异, 这也说明了我们的分区方法是合理的, 能够客观地反映出北京不同区域气温变化的差异。受城市热岛效应的影响, 城区气温在各个时间尺度上都是最高的, 郊区次之, 南部山区较低, 北部山区最低。1990~2007 年间 4 个区域都表现出显著的增温趋势, 其中城区受到热岛效应的影响增温最明显, 增温率明显大于其他区域。城区与其他区域气温的差异有明显的季节变化, 城区与郊区、城区与北部山区气温的差异在冬季最大, 夏季最小; 城区与南北山区气温的差异在夏季最大, 春季最小。在气温的日变化方面, 城区的气温日较差最小, 南部山区最大。

本文还比较了作为北京代表站的北京市观象台的气温与 4 个区域的差异, 发现观象台与城区气温在各个时间尺度上的差异都最小, 在统计上差异不显著, 而与其他区域有显著的差异, 即北京市观象台的气温受城区的影响显著, 主要代表了城区的气温。为了进一步验证以上结论, 我们选用均方根偏差、平均绝对偏差、相关系数、标准化的均方偏差、标准化的平均偏差 5 个统计参数来论证观象台对不同区域代表性的优劣。根据不同时间尺度(年、月、小时尺度)的气温资料计算得到的结果都表明: 观象台对城区的代表性是最优的。

本文在选择不同区域的站点时, 把远离城区的站点选作郊区站点, 这是考虑到这些站点受城市化的影响较小, 更能代表局地的天气和气候特征, 文中的分析结果也说明了这一点。为了考察近郊气温的变化特征及观象台对其代表性, 我们选择通州、

大兴、房山、昌平、顺义 5 个站点作为近郊站, 采用与前面相同的均一化检验和订正的方法, 对近郊气温的变化进行了分析。结果表明, 无论是年变化、季节变化还是不同季节的日变化, 近郊与城区几乎一致, 说明近郊明显受到城市化的影响。

致谢 感谢中国气象局沈晓农先生对此研究的鼓励 and 具体帮助。感谢北京市气象局提供了本研究所用的气温数据。

参考文献 (References)

- 北京市气象局. 2009. 北京市基层气象台站简史 [M]. 北京: 气象出版社, 147pp. Brief History of Beijing Basic Meteorological Station (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 147pp.
- 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 Ziyang, 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.
- 高庆先, 苏福庆, 任阵海, 等. 2002. 北京地区沙尘天气及其影响 [J]. 中国环境科学, 22 (5): 468-471. Gao Qingxian, Su Fuqing, Ren Zhenhai, et al. 2002. The dust weather of Beijing and its impact [J]. China Environmental Science (in Chinese), 22 (5): 468-471.
- 胡江林, 张人禾, 牛涛. 2008. 长江流域 0.1° 网格逐日降水数据集及其精度 [J]. 自然资源学报, 23 (1): 136-148. Hu Jianglin, Zhang Renhe, Niu Tao. 2008. A daily precipitation grid dataset with 0.1° resolution in Changjiang River Valley and its precision [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 23 (1): 136-148.
- Hu X M, Liu S H, Wang Y C, et al. 2005. Numerical simulation of wind and temperature fields over Beijing area in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica, 19 (1): 120-127.
- Huff F A, Vogel J L. 1978. Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis Region [J]. J. Appl. Meteor., 17 (5): 565-577.
- 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.
- Li J, Yu R C, Wang J J. 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (7): 1933-1936.
- 李书严, 陈洪滨, 李伟. 2008. 城市化对北京地区气候的影响 [J]. 高原气象, 27 (5): 1102-1110. Li Shuyan, Chen Hongbin, Li Wei. 2008. The impact of urbanization on city climate of Beijing region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (5): 1102-1110.
- 林学椿, 于淑秋. 2005. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应 [J]. 地球物理学报, 48 (1): 39-45. Lin Xuechun, Yu Shuqiu. 2005. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (1): 39-45.
- Liu W D, You H L, Dou J X. 2009. Urban-rural humidity and temperature differences in the Beijing area [J]. Theor. Appl. Climatol., 96: 201-207.

- 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: 484–501.
- Oki T, Musiak K. 1994. Seasonal change of the diurnal cycle of precipitation over Japan and Malaysia [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33 (12): 1445–1463.
- Pielke R A, Stohlgren T, Parton W, et al. 2000. Spatial representativeness of temperature measurements from a single site [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81: 826–830.
- Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2007. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in north China [J]. *J. Climate*, 21: 1333–1348.
- 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 [J]. *自然灾害学报*, 18 (4): 138–144. Si Peng, Li Qingxiang, Xuan Chunyi, et al. 2009. Contribution of urbanization to change of air temperature in Beijing [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 18 (4): 138–144.
- Siljamo P, Sofiev M, Ranta H, et al. 2008. Representativeness of point-wise phenological Betula data collected in different parts of Europe [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 17: 489–502.
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因素统计分析 [J]. *气象科技*, 31 (2): 109–114. Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 31 (2): 109–114.
- 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): 23–27. 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): 23–27.
- Wu P M, Hamada J I, Mori S, et al. 2003. Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area of Sumatra Island [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42 (8): 1107–1115.
- 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.
- 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 2005. 北京城市热岛“尺度”变化与城市发展 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 35 (增刊): 97–106. Yu Shuqiu, Bian Lingen, Lin Xuechun. 2005. Changes in the spatial scale of Beijing UHI and urban development [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences (in Chinese)*, 32 (Suppl.): 97–106.
- 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 [J]. *气象学报*, 68 (6): 957–966. Zhang Aiyang, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, et al. 2010. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (6): 957–966.
- 张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 2002. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变 [J]. *应用气象学报*, 13 (增刊): 43–50. Zhang Guangzhi, Xu Xiangde, Wang Jizhi, et al. 2002. A study of characteristics and evolution of urban heat island over Beijing and its surrounding area [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 13 (Suppl.): 43–50.
- 张人禾. 2006. 气候观测系统及其相关的关键问题 [J]. *应用气象学报*, 17 (6): 705–710. Zhang Renhe. 2006. Climate observing system and related crucial issues [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (6): 705–710.
- 张人禾, 刘晶淼. 2005. 海洋和陆面过程在中国气候变化中的作用 [M]// 秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 科学出版社, 319–357. Zhang Renhe, Liu Jingmiao. 2005. Effects of ocean and land processes on the climate change in China [M]// Qing Dahe, Chen Yiyu, Li Xueyong. *Climatic and Environmental Evolution in China (Volume I) (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 319–357.