

赵娜, 刘树华, 虞海燕. 2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 373-385. Zhao Na, Liu Shuhua, Yu Haiyan. 2011. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 373-385.

近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析

赵娜^{1,3} 刘树华^{1,2} 虞海燕^{1,3}

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 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

3 北京市气象局, 北京 100089

摘 要 利用 1961~2008 年北京 12 个台站的气候观测资料, 研究分析了北京城区和郊区气温、降水、相对湿度、风速的年际和四季变化趋势及特点, 并探讨了城市化发展对北京区域气候的影响。结果表明: 近半个世纪以来, 平均气温上升明显, 其中尤以冬季最为突出, 而夏季最弱。通过气温变化的年代比较发现气温增加有加快的趋势, 尤其是城市地区, 导致热岛效应不断加强, 特别是 1990 年代以后增幅更加明显。最高和最低气温在近 48 年来也都呈上升趋势, 且城市化发展对最低气温的变化影响最大, 其次是平均气温, 对最高气温影响最弱。而降水有减弱的趋势, 尤其是夏季的降水减弱最为明显。城区的风速和湿度都呈减小的趋势, 这与城市化的加剧, 尤其是下垫面的变化有密切的关系。

关键词 北京 城市化 区域气候 季节变化

文章编号 1006-9895 (2011) 02-0373-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Urbanization Effects on Local Climate in Beijing in Recent 48 Years

ZHAO Na^{1,3}, LIU Shuhua^{1,2}, and YU Haiyan^{1,3}

1 Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Beijing Meteorology Bureau, Beijing 100089

Abstract The observational climate data during 1961-2008 are used to investigate the features of the seasonal and interannual variations of temperature, precipitation, relative humidity, and wind speed over the urban and rural areas in Beijing and the effects of urbanization on the regional climate in Beijing are discussed. The results show that, over the past half century, the average temperature has an increasing trend, in particular in the winter season, and there is a weaker signal in the summer season. By analyzing the decadal variations of the temperature, it is found that this increasing trend has become stronger in recent decades, enhancing the effects of urban heat island, especially after the 1990s. Both the maximum and minimum temperatures show increasing trend in recent 48 years and the

收稿日期 2010-04-12, 2010-07-15 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875004, 中国科学院大气边界层物理与大气化学国家重点实验室开放课题 LAPC-KF-2009-04, 中国气象局北京城市气象研究所城市气象科学研究基金资助项目 UMRF-200702

作者简介 赵娜, 女, 硕士研究生, 主要从事区域气候变化研究。E-mail: nana1997@sohu.com

通讯作者 刘树华, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

urbanization has the most important effects on the minimum temperature followed by the average temperature, and has the weakest effects on the maximum temperature. For precipitation, there is a decreasing trend, in particular for the summer season. Over the urban areas, both wind speed and relative humidity show decreasing trend which is closely related to the urbanization, especially to the changes of the surface types.

Key words Beijing, urbanization, local climate, seasonal variation

1 引言

近百年来,全球气候呈现变暖趋势,并得到了世界各国的广泛关注。IPCC 第四次评估报告(第三章)(IPCC, 2007)指出,从 1906~2005 年的 100 年里,全球平均地表温度上升了大约 0.72°C ,而且,过去的 50 年,气候变暖的速度几乎加快了一倍,达到每 10 年增加大概 0.13°C 。气候变化不仅仅反映在陆地和海洋温度的升高,还表现在暴雨、热浪、干旱等极端天气的频繁发生。

国内外学者对城市化发展对区域气候的影响做了很多研究。赵宗慈(1991)利用全国 160 个站点的数据分析研究 1951~1989 年期间的气温变化,发现全国 39 年大约增温 0.23°C ,其中冬季最为明显,而夏季反而有变冷趋势。Peterson et al. (1999)研究了全球农村气温变化趋势; Jones (1990)评估了城市化对大陆气温序列的影响;唐国利和丁一汇(2006)研究了近 44 年南京温度变化特征,通过不同类型城市间温度变化的差异反映了城市化影响的复杂性;谢庄等(2006)研究了北京城市热岛效应的昼夜变化特征;车慧正等(2005, 2006)研究了近 50 年西安气候演变趋势和城市化对西安局地气候影响;周淑贞(1983)研究了上海城市发展对气温的影响;林学椿和于淑秋(2005)利用北京地区 20 个观测站的资料研究了从 1961 年到 2000 年 40 年的气候变化发现,北京地区的气候变化具有华北地区气候的特征,1980 年之后增温明显;北京地区的气候具有典型的热岛特征,40 年的平均热岛强度接近 1°C 。孙继松和舒文军(2007)利用北京 20 个测站从 1975~2004 年的资料研究分析城市热岛对北京冬夏季降水变化,发现北京城区的南北两侧降水日数、降水量的变化趋势明显不同,他们把这种不同的变化归结于城市热岛结合地形所造成的温度梯度的不均。季崇平等(2006)用北京 20 个测站 1971 至 2000 年 30 年的资料研究城市化进程对城市热岛的影响,根据不同时次热岛强度的变化趋

势指出,北京热岛强度平均以每 10 年 0.22°C 的速度增加,并且发现热岛的强度与人口的对数呈线性关系。

不同地区的气候变化,不但受全球气候大背景的影响,也受到地形、下垫面(例如城市化、灌溉)、气溶胶等局地因素的影响。要想真正理解人类是如何影响气候变化的,尤其是区域气候,首先要对真实的气候变化做出尽可能准确的检测。北京的城市人口快速增加,截止到 2008 年末,北京人口已经达到将近 1700 万。随着城市的扩张、下垫面的变化和污染物的排放,这些因素对北京地区的气候都产生了不可避免的影响。真正了解北京的气候变化,尤其是城市化对温度降水的影响对将来采取措施应对气候变化所带来的负面影响意义重大。本研究的目的是利用北京地区城、郊区的站点资料,估测北京地区过去 48 年的气候变化,包括温度、降水、湿度和风,从而了解不同时期北京的气候特征以及城市化发展对北京区域气候的影响。

2 资料和方法

选取 1961~2008 年北京市朝阳、海淀、丰台、石景山、平谷、密云、延庆、上甸子、霞云岭、佛爷顶、汤河口、斋堂 12 个台站的月平均气温、月降水量、月平均相对湿度和月平均风速气候观测资料(其中海淀、石景山、汤河口、佛爷岭和斋堂从 20 世纪 70 年代中期开始观测,资料时长为 31~35 年不等)。

随着北京城市化的发展,有些站在早期属于郊区站,但之后已成为城区或相当于城区站了,比如通州、大兴、门头沟站等,如果单一的把这些站归类为城区站或郊区站,势必会造成记录的不连续,从而给分析结果造成偏差,因此,本文以相对于北京城区的距离划分,把平谷、密云、延庆、上甸子、霞云岭、佛爷顶、汤河口、斋堂八个远离城区、受城市化影响较小的观测站作为郊区代表站,把海淀、朝阳、丰台、石景山四个测站作为城区站。把这两类台站 48 年来的气候要素进行统计比较,分

析城市化对北京区域气候的影响。这里我们需要特别指出的是, 在 1980 年代以前, 北京城市发展缓慢, 相比于 1990 年代以后, 真正意义的城区面积要小很多。我们这里所列的海淀、朝阳、丰台和石景山四个站在 1960 年代、1970 年代不能算是真正意义的城区站, 主要表现在下垫面和郊区的区别不是很大, 例如有较多的植被、建筑物比较低, 导致下垫面远远没有 1990 年代以后的下垫面粗糙, 然而, 随着 1980 年代以后城市的迅速扩张和发展, 这四站具有典型的城区站的特征, 表现为下垫面植被迅速减少, 柏油水泥表面比例迅速增大, 下垫面也变的更粗糙。

气候资料处理上, 按照气候学上常用的方法进行季节划分, 即春季 3~5 月、夏季 6~8 月、秋季 9~11 月、冬季 12~2 月, 对各气候要素量进行年平均和季节平均, 形成相应的资料序列, 分析其变化趋势。考虑到台站海拔高度和台站迁移对气温资料的影响, 采用常用的气温垂直递减率, 即每上升 100 m 气温下降约 0.6°C, 将各个台站的气温都订正到海平面温度。

3 结果分析和讨论

3.1 气温

3.1.1 平均气温

图 1 是 1961~2008 年北京城区和郊区平均气温的年际变化曲线。从图 1 可以看出, 近 48 年来, 北京城区、郊区年平均气温均呈现较明显的上升趋势, 尤其是 1980 年以后。而 1961 年到 1976 年, 城区温度反而低于郊区温度。如前所述, 造成这种现

象的原因可能是 1976 年以前城区和郊区的差异较小, 尤其是下垫面的差异没有本质不同。城市偏冷则很有可能与农业操作有关, 比如近郊种植水稻、远郊为旱地作物。通过采用线性回归分析, 48 年来北京城区、郊区平均气温分别增加 2.2°C 和 0.8°C, 增温幅度分别大约为 0.45°C/10a 和 0.17°C/10a, 可以看出城区的增温速度明显超出郊区的增温速度。这个增温趋势远远高出我国年平均气温 0.04°C/10a 的增幅 (林学椿和于淑秋, 1990), 也超过同期全球地表平均气温升高的速度 (IPCC, 2007)。因此, 即使去除掉全球大背景增温趋势的影响, 北京的城市化发展似乎仍对北京区域的增温起到了重要的强迫作用。从图 1 还可以看出 1961 年到 1970 年代末北京城区和郊区的平均气温比较接近, 1970 年代末到 1980 年代初开始城郊气温差距逐渐拉大, 城区气温远大于郊区气温, 这与从 1980 年代, 即改革开放后, 北京进入了快速发展期相吻合 (林学椿和于淑秋, 2005), 也与前面关于城郊区站点的周边环境没有本质差别的论述一致。而随着城市的迅速发展, 城郊区的温度差别迅速扩大, 也很明显地说明城市化对温度的重要影响。

以上分析的是北京过去 48 年年平均气温的变化, 图 2 则给出了 1961~2008 年北京春、夏、秋、冬四季的平均气温变化。可以看出, 各季节城区郊区平均气温变化趋势和年变化趋势大体一致, 均呈上升趋势, 但变化幅度各季有所差别。冬季、春季增温幅度最大 (城区分别为 0.71°C/10a 和 0.53°C/10a; 郊区分别为 0.39°C/10a 和 0.19°C/10a), 秋季次之 (城区、郊区分别为 0.35°C/10a 和 0.09°C/10a)。

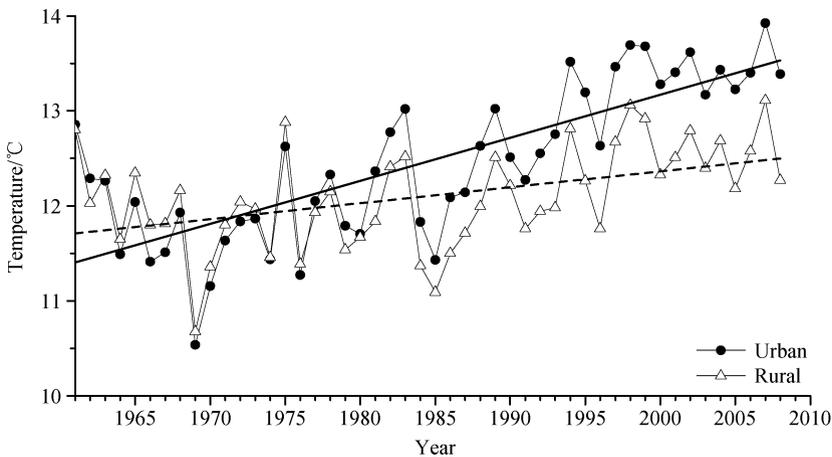


图 1 1961~2008 年北京平均气温的年际变化

Fig. 1 Annual variations of the average temperature in Beijing during 1961-2008

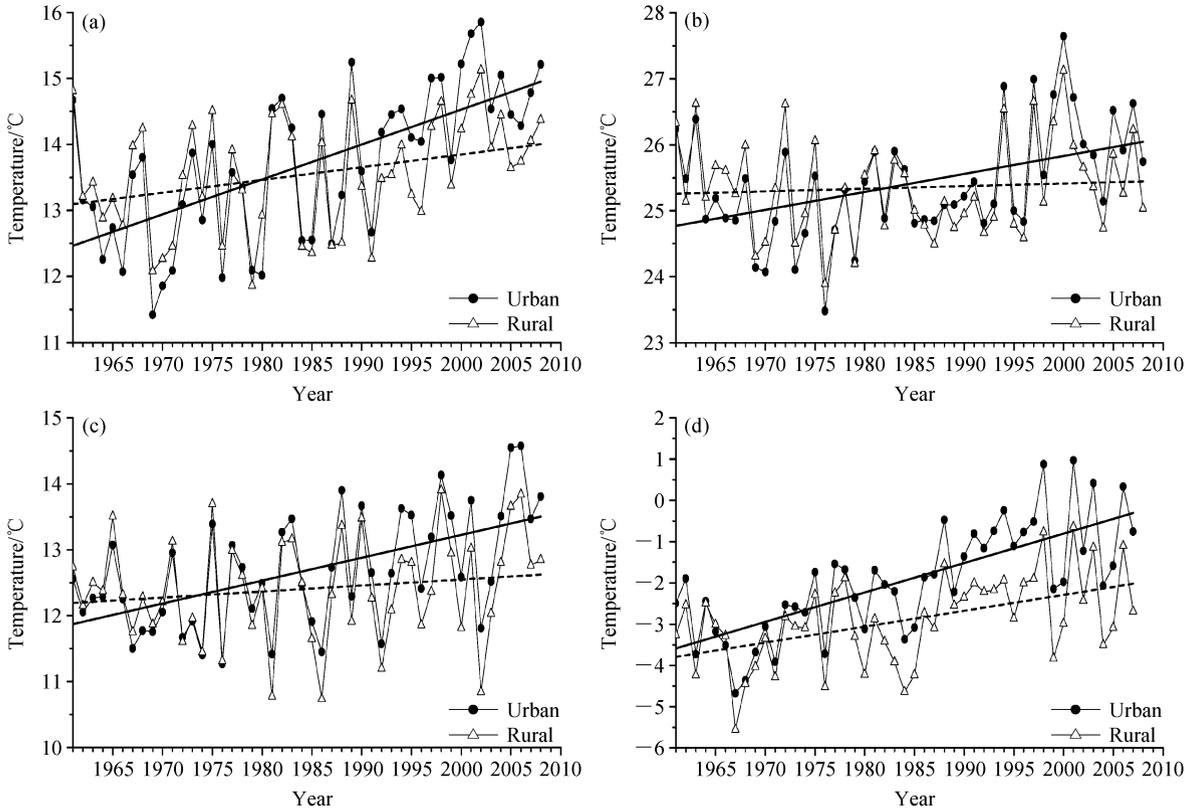


图2 1961~2008年北京平均气温的季节变化:(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig. 2 Seasonal variations of the average temperature in Beijing during 1961–2008: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

10a), 夏季最弱(城区、郊区分别为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.04^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。从图2我们还可以看出,冬季与春、夏、秋季和年变化不同的是,48年冬季城区气温基本都高于郊区,这充分说明了冬季城市化对温度的影响。不同季节温度趋势的差别,可能与北京地区的季节特点有关,北京地区的降水主要集中在夏秋季,降水的增多对夏秋季平均气温的升高起到了一定的削弱作用,而北京的供暖季大概为每年的11月中旬至次年的3月中旬,随着城市人口的增加,人为的热排放可能是导致冬季城区平均气温显著升高的主要原因。

根据图2城郊区温度的差别,我们可以进一步探讨城市化所带来的一个重要的影响,就是热岛现象。热岛现象简单来说,就是城区温度明显高于周边郊区温度的现象。而热岛强度通常定义为城区和郊区的月平均温度差。图3为热岛强度的年和春、夏、秋、冬四季的变化趋势,从图中可以看出无论是年趋势还是四季的变化趋势都与平均气温的变化一致,呈现上升趋势,且从1970年代末到1980年

代初开始进入快速增长期。48年来,热岛强度上升了 1.4°C ,上升幅度为 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,春、夏、秋、冬四季的热岛强度分别上升了 1.6°C 、 1.1°C 、 1.2°C 、 1.6°C ,上升幅度分别为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。表1列出了根据所选的城郊站点所计算的北京不同年代的热岛强度,结合图3我们可以看到,1960年代和1970年代热岛强度为负值,即冷岛,而从1980年代开始,呈现出热岛现象,且强度增加明显。这里,1960年代和1970年代的冷岛的原因可能是所选的城区四站周边为平原和以水稻为主的作物,而远郊(山区)多为旱地作物的结果。林学椿和于淑秋(2005)指出热岛和人为因素(下垫面性质改变、人为热排放和大量温室气体排放、大气污染等)以及局地天气气候条件(天气形势、风、云量等)有关,而人为因素以下垫面性质改变最为重要。他们用1963~1987年城市房屋和高级道路竣工的总面积作为北京城市发展指标和同期城市热岛强度对比分析发现几乎成直线关系,且1979~1987年平均

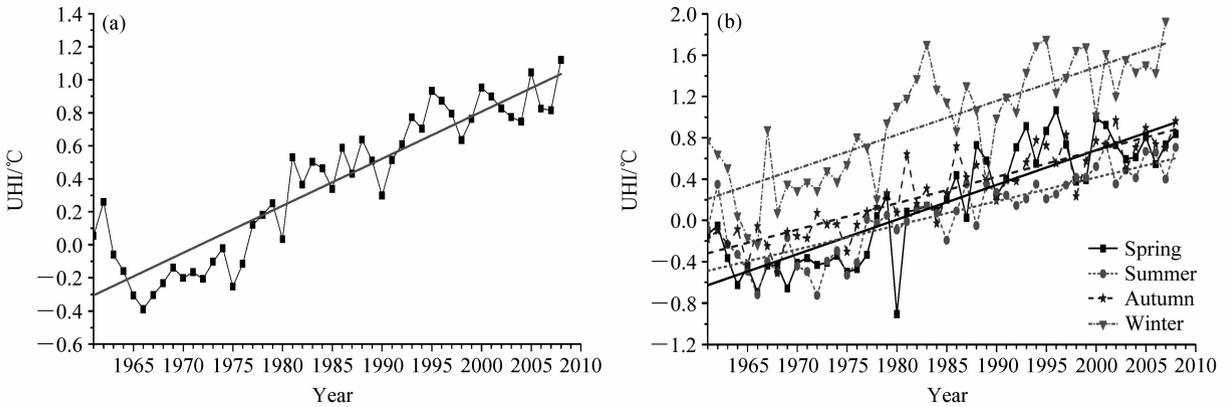


图 3 1961~2008 年北京热岛强度 (UHII) 的年际和季节变化: (a) 全年; (b) 四季 (春、夏、秋、冬)

Fig. 3 Annual and seasonal variations of the Urban Heat-Island Intensity (UHII) in Beijing during 1961-2008: (a) Yearly; (b) four seasons (spring, summer, autumn, winter)

城市房屋和高级道路竣工的总面积比 1963~1978 年增加了一倍, 对应的热岛强度也增加了一倍以上。郑思轶和刘树华 (2008) 利用 1961~2000 年北京市人口数量、基本建设投资额、房屋施工面积及道路面积等数据代表城市发展的数据分析发现: 1961~2000 年各项城市化指标都呈上升趋势, 其中 20 世纪 60 年代到 70 年代末, 各项城市化指标都呈缓慢上升态势, 为缓慢城市化阶段。1970 年代末、1980 年代初开始到 2000 年, 各项指标加速上升, 其中又以基本建设投资额和房屋施工面积上升最快, 为快速城市化阶段。这与本文得出的 1970 年代末到 1980 年代初开始热岛强度进入快速增长长期相吻合。

表 1 1961~2008 年不同年代、不同季节的北京城市热岛强度 (单位: °C)

Table 1 Urban heat - island intensity in Beijing in different seasons for five decades (units: °C)

	春季	夏季	秋季	冬季	年
1961~1970	-0.43	-0.30	-0.21	0.32	-0.15
1971~1980	-0.35	-0.29	-0.002	0.59	-0.03
1981~1990	0.26	0.11	0.36	1.13	0.47
1991~2000	0.7	0.31	0.58	1.41	0.75
2001~2008	0.72	0.55	0.77	1.54	0.88

Fukuoka (1983) 指出根据城市人口规模不同, 一般而言, 百万人的大城市城区平均气温约高于郊区 0.5~1.0°C。表 1 给出了从 20 世纪 60 年代开始的 5 个年代的热岛强度以及各个年代春、夏、秋、冬四季的热岛强度, 从表中可以看出, 与全年

平均一致的是, 1960 年代和 1970 年代北京地区春、夏、秋三个季节均呈现冷岛现象。但对冬季而言, 所有年代均表现为明显的热岛效应。与年平均气温一致的是, 进入 1980 年代后, 各个季节热岛效应开始增强, 冬季和春季尤为明显, 1980 年代的热岛强度为 0.47°C, 接近 0.5°C。进入 1990 年代以后, 除 1990 年代夏季热岛强度低于 0.5°C 外, 其他季节的热岛强度均在 0.5°C 以上。这或许可以归结为北京地区在 1990 年代以后进入了一个更快的城市化发展进程, 比如人口更快速增长, 车辆的增多, 能源的消耗的增大。

3.1.2 与平均最高、最低气温比较

为了研究城市化发展对其他温度要素的影响, 图 4 给出了北京最高、最低气温随时间的演变曲线。近 48 年来, 北京城区和郊区最高气温的增幅比较接近, 分别为 0.33°C/10a 和 0.29°C/10a; 而最低气温城区和郊区差异较最高气温显著, 城区为 0.57°C/10a, 郊区为 0.19°C/10a。与城区、郊区平均气温 0.45°C/10a 和 0.17°C/10a 相比, 北京城区最低气温增幅最大, 最高气温增幅最小; 郊区最高气温增幅最大, 平均气温增幅最小。图 5a~d 和图 6a~d 分别为北京春、夏、秋、冬四季最高、最低气温的变化, 城区最高气温分别上升 1.92°C、1.30°C、2.4°C, 增温趋势分别为 0.40°C/10a、0.20°C/10a、0.27°C/10a、0.499°C/10a, 郊区最高气温分别上升 1.54°C、0.77°C、1.10°C、2.42°C, 增温趋势分别为 0.32°C/10a、0.16°C/10a、0.23°C/10a、0.504°C/10a; 城区最低气温分别上升 3.12°C、1.87°C、1.97°C、4.18°C, 增温趋势分别为 0.65°C/

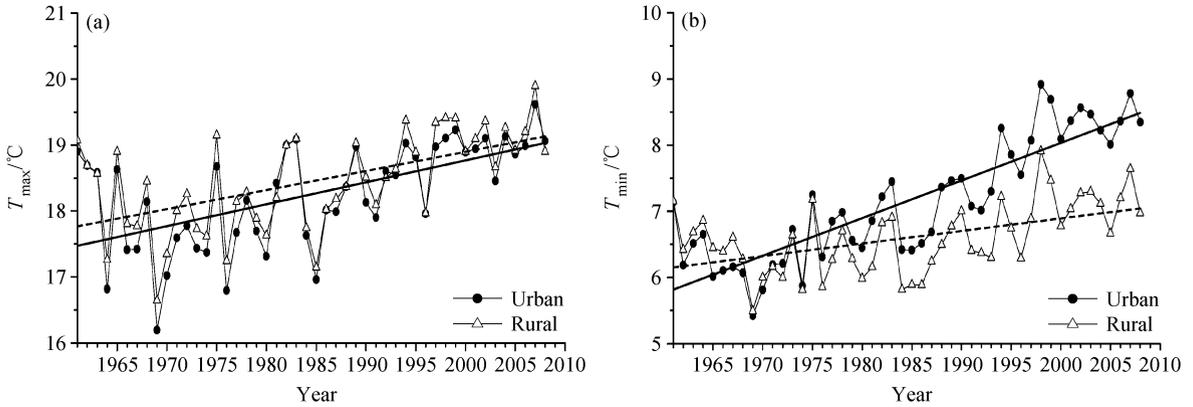


图4 1961~2008年北京平均最高、最低气温的年际变化:(a)最高气温;(b)最低气温

Fig. 4 Annual variations of the average maximum and minimum temperatures in Beijing during 1961–2008: (a) Maximum temperature (T_{\max}); (b) minimum temperature (T_{\min})

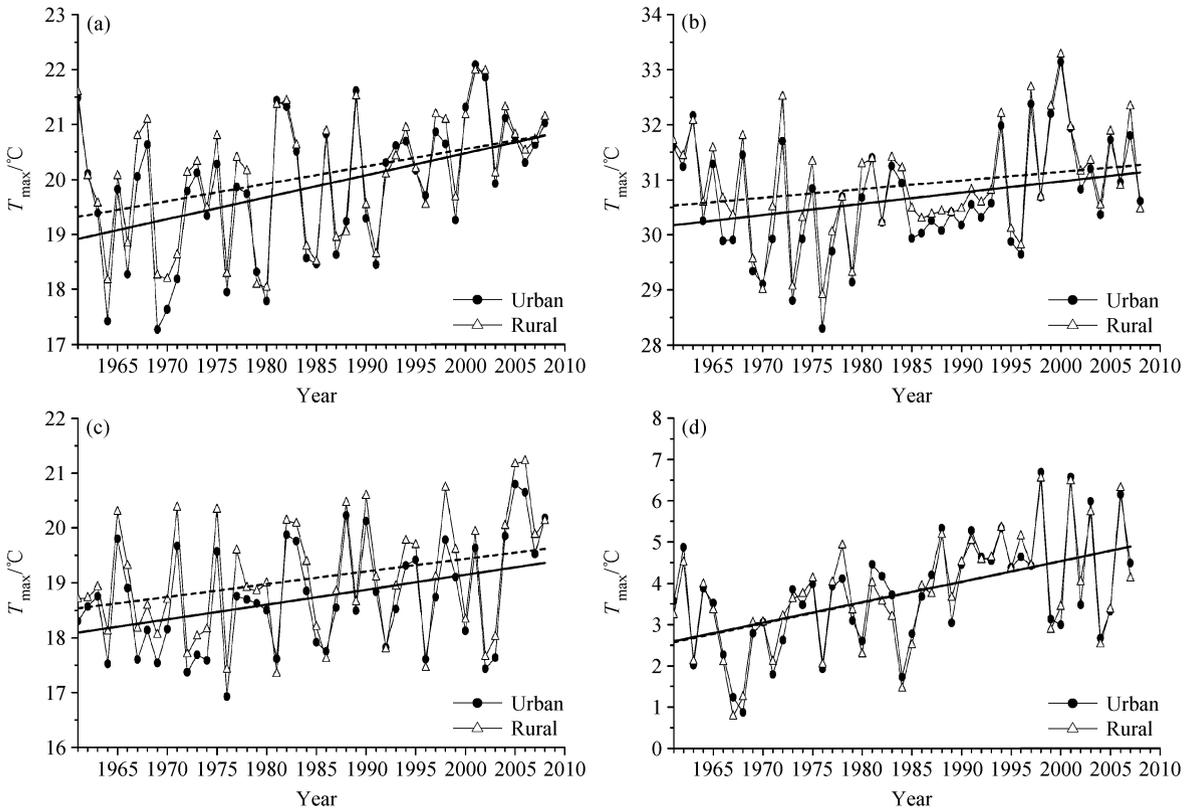


图5 1961~2008年北京平均最高气温的季节变化:(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig. 5 Seasonal variations of the average maximum temperatures in Beijing during 1961–2008: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

10a、0.39°C/10a、0.41°C/10a、0.87°C/10a, 郊区最低气温分别上升1.10°C、0.43°C、0.48°C、1.78°C, 增温趋势分别为0.23°C/10a、0.09°C/10a、0.10°C/10a、0.37°C/10a。从图5和图6中可以看出,北京春夏秋冬四季最高、最低气温均呈上升趋

势。与四季平均气温的变化相比较可以发现,对城区而言,最低气温增幅最大,其次是平均气温,最高气温增幅最小;对郊区而言,除冬季平均气温与最低气温增温幅度接近外,最高气温增幅最大,其次是最低气温,平均气温增幅最小。由此可知,城

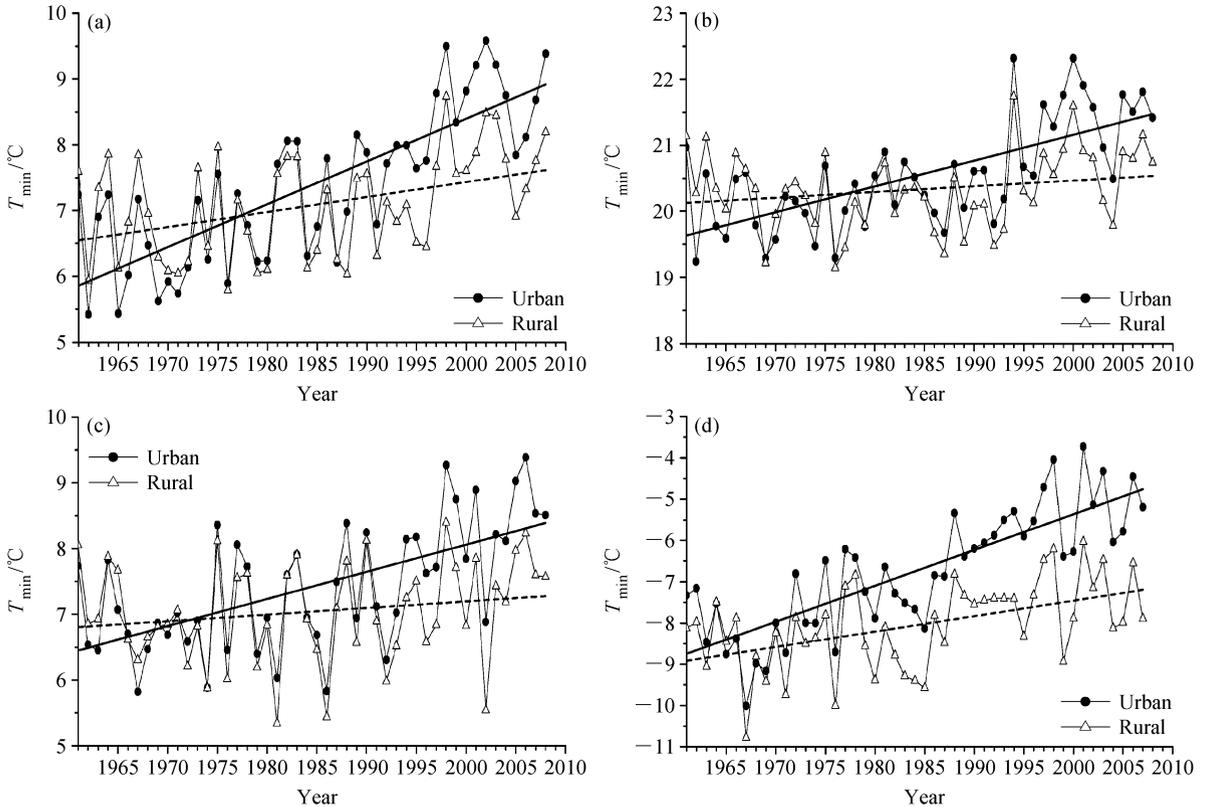


图 6 1961~2008 年北京平均最低气温的季节变化: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季
Fig. 6 Seasonal variations of the average minimum temperatures in Beijing during 1961-2008: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

市化发展对最低气温的变化影响最大, 其次是平均气温, 对最高气温影响最弱, 且城区气温的日较差明显减小, 而郊区气温的日较差相比略有增加。城区气温日较差的减小和最低气温的增高有密切的关系。这与周雅清和任国玉 (2009) 对华北地区最高最低气温和日较差变化的城市化影响研究结论一致。这可能与北京处在华北城市群区有关。

从城郊区春夏秋冬四季的最高和最低气温的增温趋势来看, 均呈现冬春季节增温最明显、秋季次之、夏季最小, 与平均气温的季节变化一致。

3.2 降水变化

城市化发展对区域降水的影响也是国际上争论的重点。为了研究北京近 48 年来城市化发展对降水的影响, 我们分析了北京城区、郊区年降水量的变化趋势。从图 7a 可看出, 近 48 年来北京城区和郊区的年降水在波动变化中均有减少的趋势, 相应变化趋势分别为 $-17.28 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-20.95 \text{ mm}/10\text{a}$ 。城区和郊区年平均降水量都呈减少的趋势, 这与王遵娅等 (2004) 的研究一致, 在他们的研究

结果中发现华北地区自从 1951 年的半个世纪以来降水有明显的减少趋势, 尤其是夏季的降水。图 7b~e 为北京城、郊区 48 年春、夏、秋、冬四季降水量的变化, 从图中可以看出, 北京四季降水量并不是单一的递减趋势, 夏季城郊区降水量下降最为显著 (城郊分别为 $-25.17 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-28.8 \text{ mm}/10\text{a}$), 冬季降水量减少幅度较小 (城郊分别为 $-0.55 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-0.13 \text{ mm}/10\text{a}$), 而春秋两季降水量都呈小幅上升趋势, 且春季城郊的降水 (城郊分别为 $5.43 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $6.19 \text{ mm}/10\text{a}$) 增加幅度比秋季城郊降水 (城郊分别为 $3.04 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $1.69 \text{ mm}/10\text{a}$) 增幅略大; 所以北京降水量的减少主要来自于夏季的贡献。图 7f 为城郊降水量的年代际变化 (其中 1960s 表示 1960 年代, 即 1961~1970 年, 1970s、1980s 和 1990s 依此类推, 2000s 为 2001~2008 年), 从图中可以看出同一个年代里城区和郊区降水量的差别不是很大, 而从 5 个年代的连续变化来看, 城区和郊区降水量在过去的近半个世纪基本呈下降趋势。2000 年~2008 年的城区和

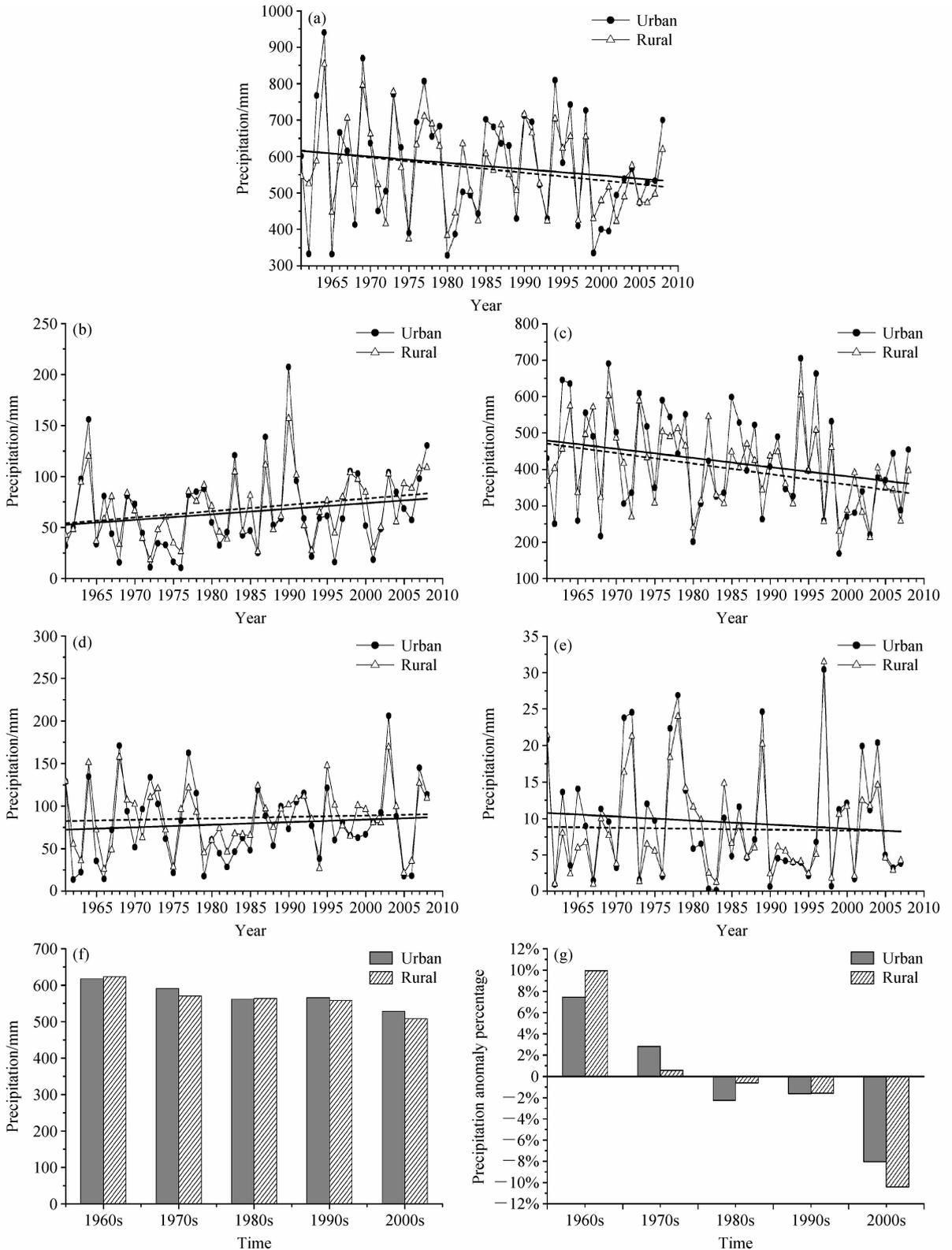


图7 1961~2008年北京降水量的年际和季节、年代际以及距平百分率变化:(a)全年;(b)春季;(c)夏季;(d)秋季;(e)冬季;(f)年代;(g)距平百分率

Fig. 7 Annual, seasonal, and interdecadal variations of the precipitation in Beijing during 1961–2008: (a) Yearly; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter; (f) interdecadal; (g) anomaly percentage

郊区平均降水量比 1960 年代分别下降了约 89 mm 和 115 mm。图 7g 给出了不同年代(10 年)的降水的距平(相对于所用 48 年的气候值)百分比变化, 这张图很清楚地显示出过去近半个世纪降水呈减少的趋势, 其中 1980 年代和 1990 年代略低于气候平均值, 而 2001~2008 年, 城、郊降水的减少幅度分别超过了 8%、10%。

区域降水与地理、地形有着复杂的关系, 且受全球和区域气候背景的影响, 土地利用变化、城市化对区域降水的影响机制也是人们关注的问题。Tayanç and Toros (1997) 指出, 区域局地气候的变化对降水形成的作用并不是决定因素, 城市化发展就局地而言, 对降水量的影响微弱, 要远小于对平均气温的影响。城市化发展对降水的时间分布的影响要远大于对降水量的影响。例如, 龚道溢等 (2006) 根据中国东部 194 个站点的资料, 发现东部人口密集的地区降水呈明显的周循环特征, 即空气污染严重的周中——气溶胶浓度最高的时间, 降水频率最小; 而降水出现在周末, 即气溶胶浓度明显低的时候的降水频率明显比周中多。他们得出结论, 气溶胶对降水的时间分布影响很大。具体到本文的研究, 到底城市化对降水的具体影响有哪些还有待更深一步的研究。我们没有分析降水的分布时间, 但具体城市化尤其是空气污染如何影响降水, 还无法得出任何有意义的结论。总体来讲, 降水主要受大的气候背景的影响, 而气溶胶和城市化更可能会影响降水的时空分布, 也有可能对局部的对流型降水产生影响, 而关于影响的程度和方向(加强或者减弱), 值得进一步的研究。

3.3 相对湿度

近年来, 城市化发展对区域大气相对湿度的影响, 因关系到城市舒适度和降水问题, 也受到人们的广泛关注。对此, 我们也分析了近 48 年北京城郊相对湿度的年和季节的变化特征。从图 8a 可以看出, 过去 48 年来北京城区年平均相对湿度呈下降趋势, 下降幅度为 6.9%, 下降速度为 1.43%/10a。相对湿度变化的最主要原因可能与全球变暖的大的气候背景关系密切, 根据克劳修斯—克拉珀龙方程, 每上升 1°C 大气容纳水汽的能力增加 7%, 从全球的观测资料来看, 相对湿度的趋势并不确定, 但总体还是变化不大 (IPCC, 2007)。而在我们的研究中, 城区相对湿度的下降, 可能与城区人类活

动密集、城市化程度高, 尤其是与水泥、沥青路面的明显增加有关, 这类下垫面透水性差, 不利于水分的保持和蒸发, 从而导致城区温度升高、湿度降低 (Akinbode et al., 2008)。郊区年平均相对湿度则略有上升, 上升幅度为 1.7%, 上升速度为 0.36%/10a。从图 8a 中可以看出, 1960 年代和 1970 年代城区相对湿度明显高于郊区, 1980 年代初期到 1990 年代初期城郊区相对湿度比较接近, 而在 1990 年代初期以后城区相对湿度迅速减小, 郊区的相对湿度反超城区。这可能和城市化开始迅速发展之前, 近郊种植水稻、远郊种植旱地作物有关系。但随着城市化的发展, 城区由于下垫面的改变而使相对湿度下降, 造成北京城区“干岛效应”的出现, 这是北京城市气候的特征之一。其它可能的原因, 比如下沉和辐散过程, 因为没有相应数据, 这里暂不做更多的讨论, 但值得进一步的研究。

由图 8b~e 可以看出, 城区四季相对湿度均呈下降趋势, 其中春季幅度最大, 为 -1.97%/10a, 秋季次之 (-1.55%/10a), 夏季 (-1.17%/10a) 和冬季 (-1.08%/10a) 降幅最小。郊区相对湿度呈现小幅上升的趋势, 冬季升幅最大, 为 0.88%/10a, 夏季 (0.54%/10a) 次之, 春季升幅只有 0.04%/10a, 而秋季变化趋势近似为零, 即无明显变化。

3.4 风速

城市化发展对城区风速的影响, 因关系到城市大气边界层结构、通风量和污染物的扩散等问题, 也受到人们的广泛关注。对此, 我们也分析了近 48 年北京城郊风速的年和季节的变化特征。从图 9a 可以看出, 48 年来北京城区、郊区平均风速均呈减小的趋势, 减幅分别为 $-0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其中郊区的平均风速减小的幅度和王遵娅等 (2004) 所分析的华北地区的减小幅度 ($-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$) 非常接近。所以, 北京风速的减小首先受到大的气候背景, 即季风减弱的影响。其次, 从 1980 年代中期以后郊区的风速普遍大于城区的风速, 可能与北京进入快速发展期后, 城区增加了大量的高大建筑物, 改变了城区下垫面的性质, 增大了下垫面的粗糙度有关, 进而导致风速的减少。徐阳阳等 (2009) 统计分析了 1993~2003 年中国科学院大气物理研究所大气边

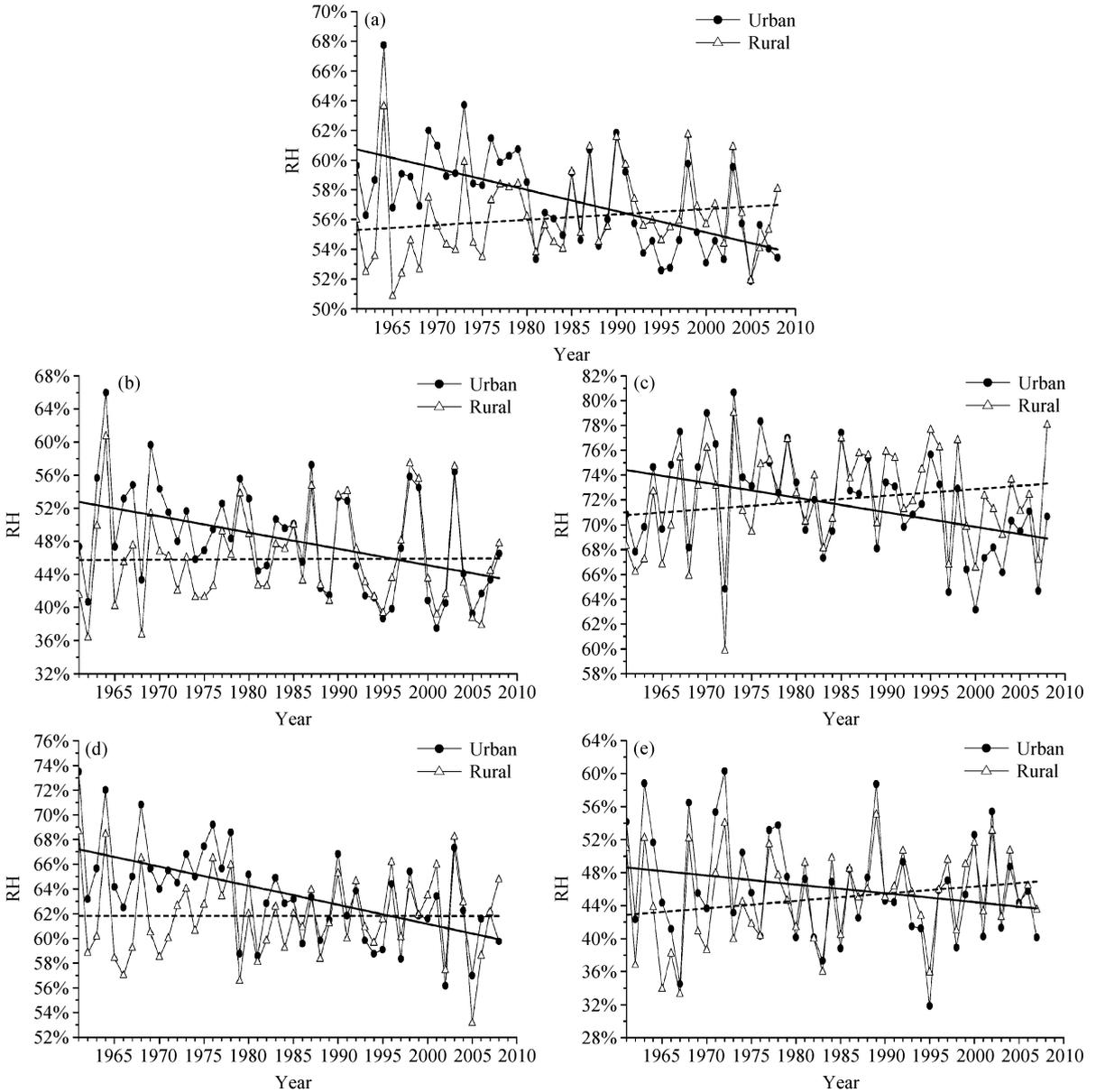


图 8 1961~2008 年北京相对湿度的年际和季节变化: (a) 全年; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 冬季

Fig. 8 Annual and seasonal variations of the Relative Humidity (RH) in Beijing during 1961–2008; (a) Yearly; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter

界层与大气化学国家重点实验室的北京 325 m 气象塔 15 层的风速廓线资料发现,随着城市化的发展,相对风速有逐年减小的趋势,并且越靠近地面,减小越明显,这充分反映了城市建筑对近地层空气流动的摩擦作用。图 9b~e 为北京城郊区春、夏、秋、冬四季平均风速的变化,可以看出各季节与年际变化一致,均呈下降趋势,其中,冬春季的减幅最明显(冬季城郊分别为 $-0.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 春季城郊分别为

$-0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$), 秋季次之(城郊分别为 $-0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$), 夏季最小(城郊分别为 $-0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $-0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$)。

4 结论

通过对北京 1961~2008 年 48 年的温度、降水、风和湿度的统计分析,可以得出如下结论:

(1) 近半个世纪以来,北京城区和郊区的平均

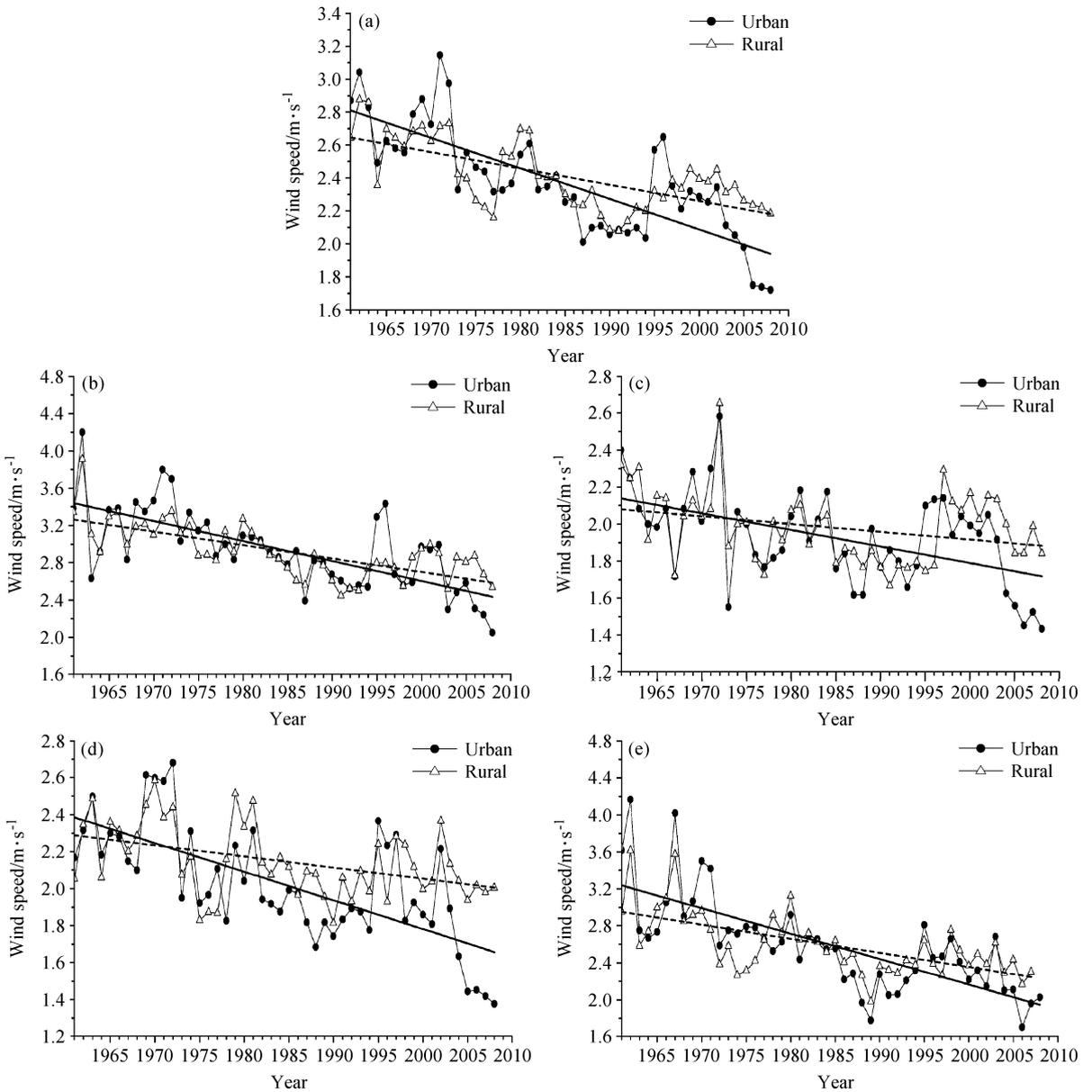


图 9 1961~2008 年北京平均风速的年际和季节变化: (a) 全年; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季; (e) 冬季
Fig. 9 Annual and seasonal variations of the average wind speed in Beijing during 1961-2008: (a) Yearly; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter

气温、最高气温、最低气温均呈现显著增加趋势,且平均气温从 1980 年代初开始进入快速增长阶段;从季节来看,平均气温和最高最低气温均表现为冬季和春季增加最大,其次是秋季,夏季最弱。城市化发展对最低气温的变化影响最大,其次是平均气温,对最高气温影响最弱。城区气温的日较差明显减小,而郊区气温的日较差相比略有增加。近 48 年北京地区热岛强度上升了 1.4℃,上升幅度为 0.29℃/10a,且 1980 年代后,各个季节热岛效应随

年代增强,冬季和春季尤为明显。

(2) 北京地区的降水量,过去近 50 年呈明显下降趋势,以 2000 年以后最为明显,城郊区降幅分别超过 8% 和 10%。从四季降水量的变化来看,表现为夏季减小最为明显、冬季减幅较小,而春秋两季呈小幅上升趋势。降水的减少可能与空气污染的加剧、气溶胶的增多、云滴的减少进而导致降水云的减弱有关,城市化可能对大尺度的降水不会有什么影响,但对局地对流型降水可能会有不可忽略

的影响。总而言之,城市化和降水频率、时空分布的关系有待进一步的研究和更多证据的支持。

(3) 北京城区的相对湿度呈减小趋势,这首先与全球变暖的大背景密切相关,当温度升高,空气容纳水汽的能力上升。其次还与城市化所导致的绿地的减少以及不具备保水能力的硬地路面的增加有着密切的关系。由此可见,随着城市化的发展,尤其是下垫面的变化,造成城区相对湿度下降,进而导致“干岛效应”的出现,这也是北京城市气候的特征之一。

(4) 48年来北京城区、郊区的年和四季的风速均呈减小趋势,这与其它研究一致,和季风减弱的大背景有关。但本研究认为这与城市化加剧导致的下垫面的粗糙度的增加有密切关系。

(5) 本文通过对温度、降水、湿度和风速几个主要气象要素的分析发现,在过去的48年中,在全球变暖的大气候背景下,温度的变化最为明显,其次是降水。但要分析具体城市化对上述几个气象要素的影响,还需要更多的数据和资料加强观测对比研究。温度的增加与城市化的关系已经越来越多地被认识,但城市化对降水量的影响,尤其是降水空间分布的影响,还有待更进一步的研究和分析。

参考文献 (References)

Akinbode O M, Eludoyin A O, Fashae O A. 2008. Temperature and relative humidity distributions in a medium-size administrative town in southwest Nigeria [J]. *Journal of Environmental Management*, 87 (1): 95–105.

车慧正, 张小曳, 李杨, 等. 2005. 过去50年西安气候演变趋势的研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 19 (7): 96–100. Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Li Yang, et al. 2005. The variation of local climate in Xi'an city during the past 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 19 (7): 96–100.

车慧正, 张小曳, 李杨, 等. 2006. 近50年来城市化对西安局地气候影响的研究 [J]. *干旱区地理*, 29 (1): 53–58. Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Li Yang, et al. 2006. Effect of urbanization on local climate in Xi'an city in recent 50 years [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 29 (1): 53–58.

Fukuoka Y. 1983. Physical climatological discussion on causal factors of urban temperature [J]. *Memories of the Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University*, 8: 157–178.

龚道溢, 郭栋, 罗勇. 2006. 中国夏季日降水频次的周末效应 [J]. *气候变化研究进展* [J]. 2 (3): 131–134. Gong Daoyi, Guo

Dong, Luo Yong. 2006. Weekend effect of daily precipitation frequency in summer of China [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 2 (3): 131–134.

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 C P, Liu W D, Xuan C Y. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 49 (1): 69–77.

Jones P D. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land [J]. *Nature*, 347 (4): 169–172.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

林学椿, 于淑秋. 1990. 近40年我国气候趋势 [J]. *气象*, 16 (10): 16–22. Lin Xuechun, Yu Shuqiu. 1990. Climatic trend in China for the last 40 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 16 (10): 16–22.

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.

Peterson T C, Gallo K P, Lawrimore J, et al. 1999. Global rural temperature trends [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (3): 329–332.

孙继松, 舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究 [J]. *大气科学*, 31 (2): 311–320. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (2): 311–320.

唐国利, 丁一汇. 2006. 近44年南京温度变化的特征及其可能原因的分析 [J]. *大气科学*, 30 (1): 56–68. Tang Guoli, Ding Yihui. 2006. The changes in temperature and its possible causes in Nanjing in recent 44 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (1): 56–68.

Tayanc M, Toros H. 1997. Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey [J]. *Climate Change*, 35: 501–524.

王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近50年来中国气候变化特征的再分析 [J]. *气象学报*, 62 (2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in china in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 62 (2): 228–236.

徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等. 2009. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响 [J]. *大气科学*, 33 (4): 859–867. Xu Yangyang, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 859–867.

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.
- 郑思轶, 刘树华. 2008. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 123 - 133. Zheng Siyi, Liu Shuhua. 2008. Urbanization effect on climate in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 123 - 133.
- 周淑贞. 1983. 上海城市发展对气温的影响 [J]. 地理学报, 38 (4): 397 - 405. Zhou Shuzhen. 1983. The influence of Shanghai urban development on temperature [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 38 (4): 397 - 405.
- 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.
- 赵宗慈. 1991. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响 [J]. 气象, 17 (4): 14 - 17. Zhao Zongci. 1991. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 17 (4): 14 - 17.