北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响

郑思轶[1,4] 刘树华[2,3]

1 北京大学环境学院环境工程系，北京 100871
2 北京大学物理学院大气科学系，北京 100871
3 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室，北京 100081
4 中国气象局，北京 100081

摘 要 利用1961～2000年北京13个台站的气候观测资料及北京统计年鉴资料，分析了过去40年北京城区、郊区的气温、相对湿度和降水等气候因子的年际、季节变化趋势，结合北京城市化进程中人口、基本设施投资额、房屋施工面积和道路面积等城市发展数据的年际变化进行分析。结果表明：在这40年中，北京城区、郊区的年平均温度都呈明显上升趋势，城区比郊区上升幅度快，热岛强度也在不断加强，其中以城区最低温度上升最为明显，并且热岛强度与北京人口等城市发展数据的年际变化有较强的相关性。城区年平均相对湿度总体呈下降趋势，郊区则略有上升；本地年均降水量呈下降趋势，城区下降幅度比郊区明显，并且波动性增强。各气候因子的季节变化趋势总体上与年平均变化趋势一致，个别季节变化趋势受城市化及季节自身因素影响，与年平均变化趋势有所差异。过去40年北京城区、郊区的气候演变趋势及与城市发展数据的关系表明，城市的快速发展和城市化进程的加快已经对北京局地气候变化产生了重要的影响。

关键词 北京 城市化 气候 影响
文章编号 1006-9585（2008）02-0123-11 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Urbanization Effect on Climate in Beijing

ZHENG Si-Yi[1,4] and LIU Shu-Hua[2,3]

1 *Department of Environmental Engineering*, *Peking University*, *Beijing* 100871
2 *Department of Atmospheric Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871
3 *Laboratory of Climate Research*, *National Climatic Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
4 *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract By climate observation data collected from 13 weather stations of Beijing region from the period from 1961 to 2000 and the data of yearbook in Beijing region, annual and seasonal variation of temperature, relative humidity and precipitation of urban and rural stations in Beijing area during those 40 years and the data of Beijing development were analyzed. The results showed that annual temperatures of urban and rural stations in Beijing area increased obviously. The average temperature and the lowest temperature in urban stations increased faster than those in rural ones. The urban heat island was also increasing and there was a significantly positive correlation between urbanization index and heat island intensity. The relative humidity in urban stations in Beijing area decreased while the relative humidity of rural stations in Beijing area increased slightly. Precipitations in Beijing area decreased obviously. The precipitation in urban stations decreased faster and fluctuated greatly than that in rural ones. Seasonal varia-

收稿日期 2007-04-16收到，2008-01-20收到修定稿
资助项目 中国气象局气候变化专项CCSF2006-38和CCSF2007-39及高等学校博士学科点专项科研基金20050001030
作者简介 郑思轶，男，1980年出生，硕士研究生，主要从事气候变化和环境科学研究。E-mail：zhengsy@cma.gov.cn

tion trends of temperature, relative humidity and precipitation of urban and rural stations in Beijing area were consistent with their annual variation trends. The differences of variation trends between some seasons and their annual resulted from the effect of urbanization and seasonal characteristics. The climate variation trends in Beijing during the recent 40 years and the data of Beijing development indicated that the rapid development of Beijing city and urbanization had greatly influenced the local climate change in Beijing.

Key words Beijing, urbanization, climate, influence

1 引言

城市化发展对区域及全球气候变化的影响是人们广泛关注的问题。IPCC 第三次评估报告研究表明：从 1861 年开始，全球气候的变化趋势是变暖，迄今地球表面的平均气温大约升高了 0.6±0.2 ℃。导致全球变暖最主要的原因是人类活动、土地利用的变化、城市化发展和温室气体排放[1]。而《气候变化国家评估报告》指出，在最近 50 年，中国年平均地表温度增加 1.1 ℃，达到 0.22 ℃·(10 a)$^{-1}$[2]，明显高于全球或北半球同期平均增温率。

随着城市化的进程，森林、耕地面积大量减少，而城市地面大部分为混凝土或沥青构成的不透水的路面和建筑物。另外，随着城市规模的发展、城市面积的扩大和城市人口的增加，大量生活、交通、工业人为热及温室气体排放，在城市下垫面的热力、动力作用和温室效应的影响下，形成了城市区域气候。

国内外学者对城市气候效应及城市化发展对区域气候的影响已做了很多研究，如 Peterson 等[3]研究了全球农村气温变化趋势；Jones[4]评估了城市化对大陆气温序列的影响。我国学者自 20 世纪 90 年代开始对城市化增温现象进行了研究，赵宗慈[5]研究过近 39 年中国的气温变化以及城市化的影响；张一平等[6]研究过北京、昆明和景洪 3 个地区的室内外气温的年变化和长期变化趋势；车慧正等[7,8]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；赵晶等[9]研究了兰州城市化的气候效应；周淑贞[10]研究了上海城市发展对气温的影响；李林[11]研究了城市化对西宁市区气候的影响；林学椿等[12~14]在分析了我国近 40 年的气候变化趋势的基础上，研究了北京地区温度的年代际变化和热岛效应及北京城市化与热岛强度的关系；谢庄等[15]研究了北京城市热岛效应的昼夜变化特征；Zhou 等[16]利用城市人口数据和卫星图像分析了中国东南部城市化进程对气候的影响；Weng 等[17]利用城郊区温度的对比研究了广州城市发展对热岛强度的影响；孙继松等[18]研究了北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响。

北京城市化的发展对区域气候的影响一直是人们关注的问题。特别是近几十年来在全球变化及华北干旱的背景下，北京从 20 世纪 60 年代到近几年，经过了国民经济困难、文革、改革开放和快速发展的时期。那么，不同时期北京的气候特征是怎样的？北京城市化发展对区域气候及降水的影响如何？为了解释这些人们普遍关注的问题，本文对北京城市和郊区 1961～2000 年的气象站资料，进行分析研究。

2 资料和方法

2.1 气候资料

主要选取北京市北京、朝阳、海淀、丰台、石景山、门头沟、上甸子、汤河口、佛爷岭、延庆、密云、斋堂和平谷 13 个站 1961～2000 年 40 年的月平均温度、相对湿度、降水、风速、日照时数等气候要素（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 23～27 年不等）。

引起气候变化的原因主要有自然因素和人类活动，其中人类活动又集中体现为城市化。根据北京的行政区划划分，选取城市化速度较快，受人类活动影响较大的北京、朝阳、海淀、丰台、石景山和门头沟 6 个站作为城区代表站，认为这 6 个站 40 年来的气候变化同时受自然变化和城市化影响；选取远离城区，受城市化影响较小的上甸子、汤河口、佛爷岭、延庆、密云、斋堂和平谷 7 站作为郊区代表站，认为这 7 个站 40 年来的气候

变化只受自然变化影响，不受（或略受）城市化影响。把这两类台站（见图 1）40 年来的气候要素进行统计分析比较，分析城市化对北京区域气候的影响。

2.2 城市发展资料

城市化主要是指研究时段内城市的人口、建筑及城市用地的变化。根据北京 50 年的统计资料，选取 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代表城市发展的数据，结合气候资料，分析城市发展对北京区域气候的影响。

图 1 北京城区、郊区台站分布

Fig. 1 The locations of urban and rural stations in Beijing

2.3 分析方法

计算各种气候因子的年平均值，分析其年际变化趋势；按照气候学上的常用方法，选取 4、7、10 月及次年 1 月分别代表春、夏、秋、冬的典型月份，计算这 4 个月各种气候因子的月平均值，分析变化趋势。

分析平均气温时，由于选取的台站海拔高度不同，需把温度订正到同一海平面才能进行分析，本文采用干绝热订正法（即海拔高度每上升 100 m，温度下降 0.6 ℃）对所选台站的温度进行了高度订正。

3 结果分析和讨论

3.1 城市化进程

一个地区的城市化进程，主要表现在该地区人口、经济、建筑及城市用地的变化。从图 2 可以看出，1961～2000 年北京市常住人口数量、基本建设投资额、房屋施工面积及道路面积等都呈

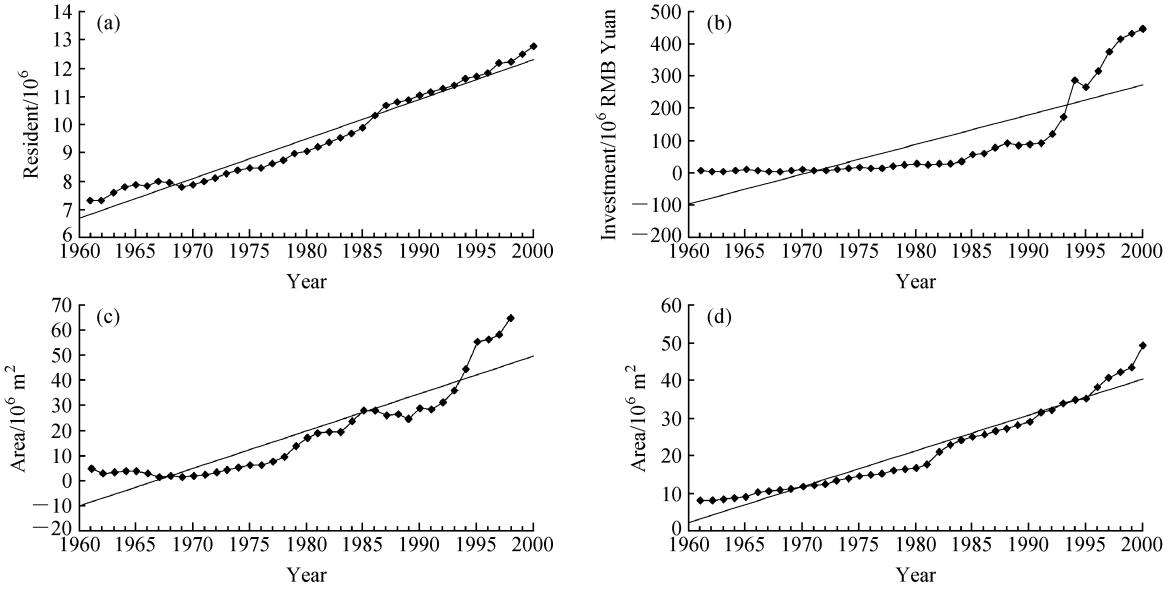

图 2 1961～2000 年北京各项城市化指标的年际变化：(a) 常住人口数；(b) 基本建设投资额；(c) 房屋施工面积；(d) 道路面积

Fig. 2 Annual variations of four urbanization indexes in Beijing area during 1961 to 2000：(a) resident；(b) infrastructure investment；(c) area in construction of buildings；(d) area of roads

上升趋势。其中又可分为两个阶段，第一阶段是从 20 世纪 60 年代开始到 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。第二阶段是从 70 年代末 80 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。

3.2 平均气温和热岛强度

把订正后城区、郊区台站近 40 年的气温资料分别进行平均，得出 1961～2000 年的平均温度城区为 12.4 ℃，郊区为 11.8 ℃，把城区台站与郊区台站的平均温度之差定义为热岛强度，得出两者相差 0.6 ℃。文献［19］指出，根据国外热岛研究结果，一般百万人口以上的大城市平均气温约高于郊区 0.5～1.0 ℃，可见北京地区是存在热岛状况的。图 3 给出北京 1961～2000 年城区和郊区温度的年际变化和四季热岛强度的年际变化特征。

从图 3a 可以看出，城区和郊区年平均温度总体呈上升趋势，并且城区年平均温度始终高于郊区。从 70 年代末 80 年代初开始，两者之间的差距逐渐加大，城区年平均温度呈快速上升趋势，这与北京快速城市化阶段相一致。40 年来城区年平均温度上升幅度达到 1.56 ℃，超过全球平均升温[1]的 2 倍多，上升幅度达 0.39 ℃ • $(10\ a)^{-1}$，通过置信度 99%的信度检验。郊区年平均温度上升 0.62 ℃，与全球平均升温幅度一致，上升幅度为 0.16 ℃ • $(10\ a)^{-1}$，通过置信度 95%的信度检验。由此可见，北京近 40 年来城市化发展对区域温度的影响。

为了了解不同季节的北京城市热岛强度的年际变化及对全年热岛强度的影响权重，选取了 4、7、10 月及次年 1 月代表春、夏、秋、冬的典型月份，将这 4 个月城区和郊区的月平均温度差定义为热岛强度。由城区与郊区代表台站的年平均温度之差得出北京地区热岛强度的年际变化特征（见图 4）。

由图 3b～e 和图 4 可见，北京区域春、夏、秋、冬热岛强度的年际变化与年热岛变化趋势基本一致，都是 1965～1975 年热岛强度较小，从 70 年代末 80 年代初开始有快速上升趋势，热岛强度分别上升 0.95、0.63、0.9 和 0.9 ℃，增温趋势

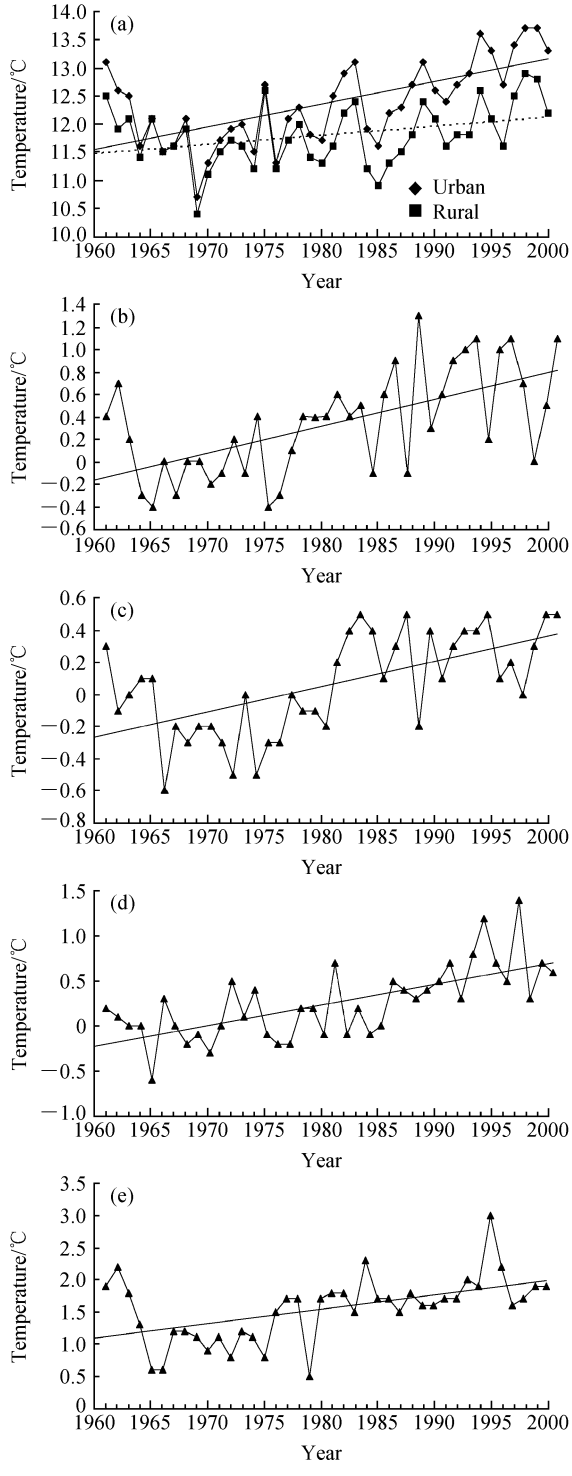

图 3 1961～2000 年北京（a）城区、郊区温度的年际变化和（b）春季（4 月）、（c）夏季（7 月）、（d）秋季（10 月）、（e）冬季（1 月）热岛强度年际变化

Fig. 3 Annual variations of temperature (a) and heat island intensity at spring (Apr) (b), summer (Jul) (c), autumn (Oct) (d), winter (Jan) (e) at urban and rural district in Beijing area during 1961 to 2000

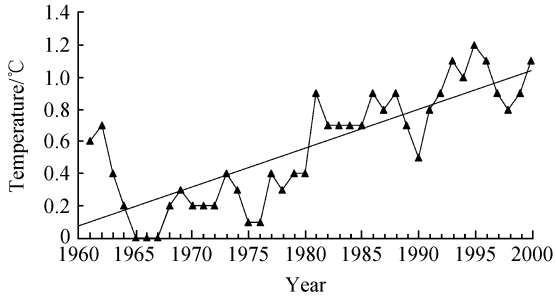

图 4　1961～2000 年北京城市热岛强度的年际变化特征

Fig. 4　Annual variations of urban heat island in Beijing area during 1961 to 2000

分别达 0.24、0.16、0.23 和0.23 ℃ · (10 a)$^{-1}$，并都通过了置信度 99%的信度检验。从增温趋势来看，4 和 10 月及次年 1 月的热岛增温趋势大致相同，都达到约 0.23 ℃ · (10 a)$^{-1}$，而 7 月的热岛增幅与其他 3 个月相比较缓慢，这可能与北京属温带季风性气候有关。温带季风性气候降水大多集中在夏秋季，大量的降水降低了城区温度，导致了热岛强度的减小。从城郊区温度差别来看，1 月城郊区温度差别最大，最小温差为 0.5 ℃，最大温差达到 3 ℃，可以明显看出，1 月热岛对年热岛贡献率最大，即北京地区热岛现象在冬季强于其他季节，这可能与冬季北京城区供暖和人为热的释放有关。

北京近 40 年来城区与郊区温度上升，与全球气候升温有密切联系，其中城区温度上升是在全球升温的大背景下叠加了北京快速城市化对区域气候影响的综合效应下的结果。

由图 4 可见，北京地区热岛强度 60 年代中期至 70 年代末较低，从 70 年代末 80 年代初开始，呈加速上升趋势，与快速城市化阶段同步，热岛强度上升到 0.9 ℃，上升幅度达0.23 ℃ · (10 a)$^{-1}$，此后一直维持较高的热岛强度，并且增强明显，通过置信度 99%的信度检验。

分别计算各类城市发展指标年际变化与城区年平均温度、郊区年平均温度和热岛强度年际变化的相关系数（见表 1）。除基本建设投资额年际变化与城区年平均温度年际变化的相关系数略高于其与热岛强度年际变化外，其余各项与热岛强度年际变化的相关系数均大于城区，而城区又大于郊区，由此可见，人口的增加、道路房屋的建设，导致人为热释放（如空调等[20]）的增加及下垫面性质的改变，使城区温度上升较郊区为快，对热岛强度急剧升高产生重要影响。

由图 5a 可看出，城区和郊区最高温度的年际变化相差不大，基本都呈上升趋势。城区和郊区 40 年来年际最高温度分别上升了 0.98 和 1.03 ℃，增温幅度分别达 0.24 和 0.26 ℃ · (10 a)$^{-1}$，均通过置信度 95%的信度检验。

由图 5b～e 可见，北京城区和郊区春、夏、秋、冬季最高温度的年际变化基本都呈上升趋势。城区四季最高温度分别上升 1.9、0.48、0.85 和 0.48 ℃，增温趋势分别达 0.47、0.12、0.21 和 0.12 ℃ · (10 a)$^{-1}$；郊区四季最高温度分别上升 1.9、0.50、1.10 和 0.95 ℃，增温趋势分别达 0.48、0.12、0.28 和 0.24 ℃ · (10 a)$^{-1}$。其中城区和郊区春季的最高温度上升最为明显。

郊区最高温度上升较城区快，在秋冬季尤为明显，可能是由于城市扩大，郊区人口逐渐增加，冬季取暖散发热量增加，使得郊区秋冬季最高温度上升较快。另外，城区秋季的最高温度上升幅度较郊区为低，可能与城区秋季降水较郊区多有关，较多的降水降低了城区的最高温度。

由图 6a 可看出，城郊区最低温度的年际变化基本都呈上升趋势，其中城区和郊区 40 年来年际最低温度分别上升了 2.04 和 0.86 ℃，增温幅度分别达 0.51 和 0.21 ℃ · (10 a)$^{-1}$，都通过了置信度 99%的信度检验。

由图 6b～e 可见，北京城区和郊区春、夏、秋、冬季最低温度的年际变化基本都呈上升趋势，城区四季最低温度分别上升 2.26、1.13、1.52 和 2.45 ℃，增温趋势分别达 0.56、0.28、0.38 和

表 1　各类城市发展指标年际变化与北京城郊区温度、热岛强度年际变化的相关系数

Table 1　The correlation between annual variation of urbanization index and the annual variation of temperature and heat island intensity at urban and rural district

	城市发展指标			
	常住人口数量	基本建设投资额	房屋施工面积	道路面积
热岛强度	0.82	0.68	0.82	0.81
城区年平均温度	0.70	0.72	0.73	0.70
郊区年平均温度	0.41	0.52	0.46	0.42

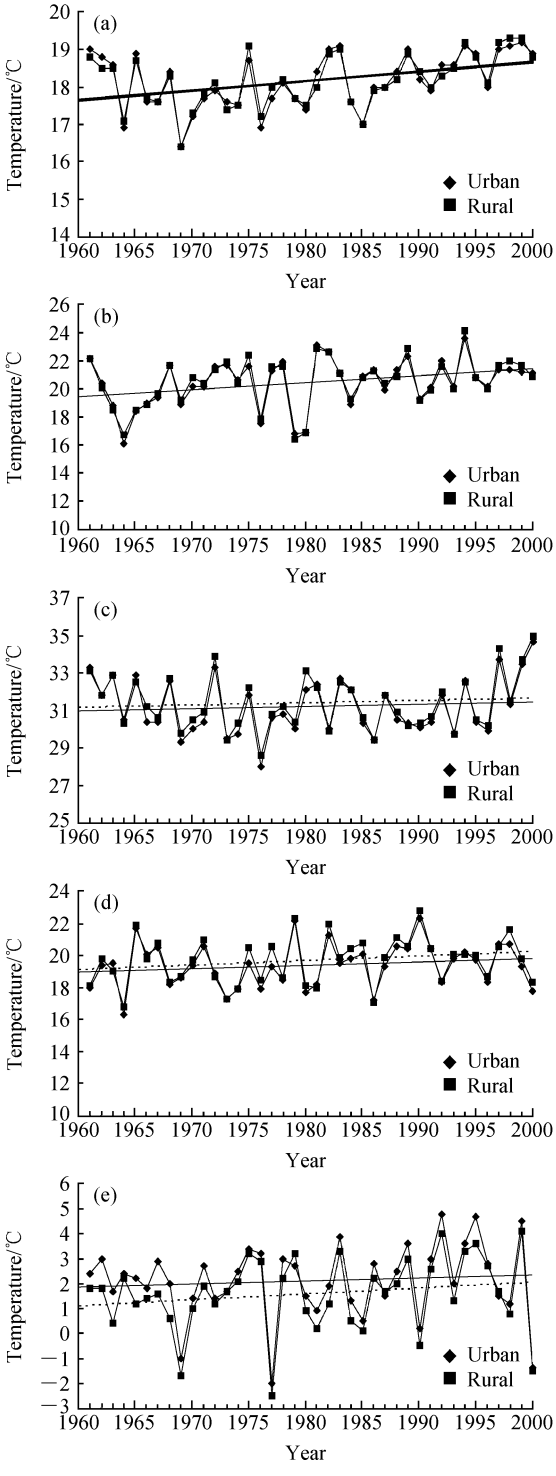

图 5 1961～2000 年北京城区、郊区最高温度的年际变化：(a) 全年；(b) 春季（4 月）；(c) 夏季（7 月）；(d) 秋季（10 月）；(e) 冬季（1 月）

Fig. 5 Annual l variations of the highest temperature at urban district and rural district in Beijing area during 1961 to 2000 (trends): (a) yearly; (b) spring (Apr); (c) summer (Jul); (d) autumn (Oct); (e) winter (Jan)

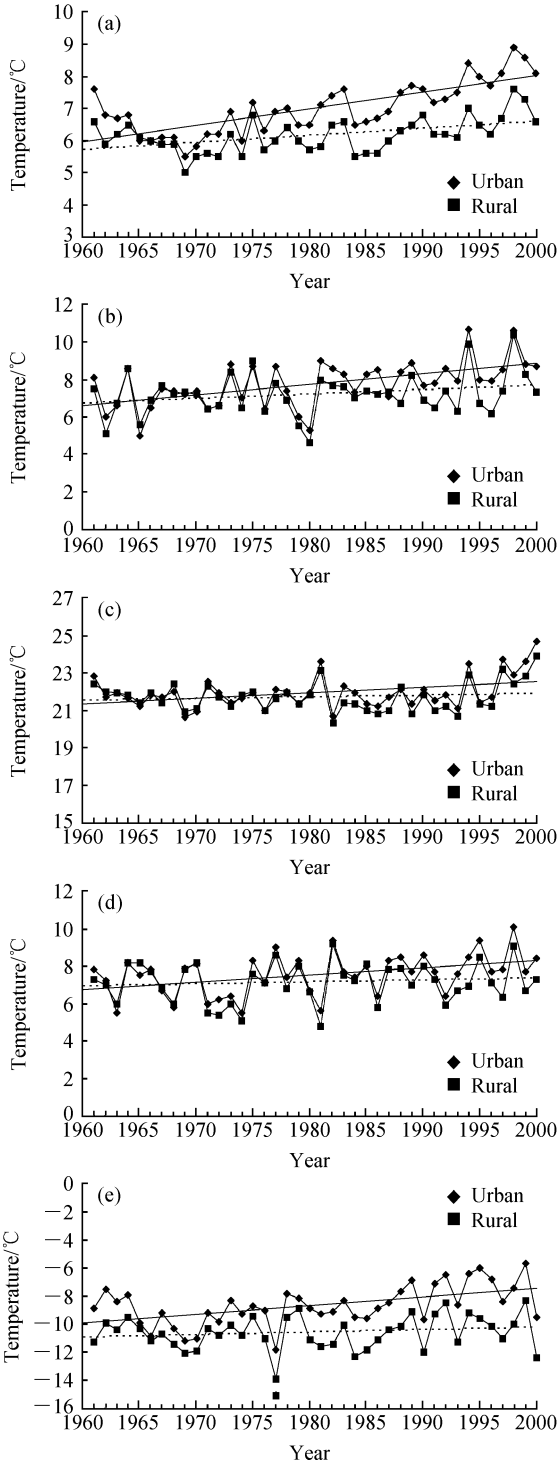

图 6 1961～2000 年北京城区、郊区最低温度的年际变化：(a) 全年；(b) 春季（4 月）；(c) 夏季（7 月）；(d) 秋季（10 月）；(e) 冬季（1 月）

Fig. 6 Annual l variations of the lowest temperature at urban district and rural district in Beijing area during 1961 to 2000 (trends): (a) yearly; (b) spring (Apr); (c) summer (Jul); (d) autumn (Oct); (e) winter (Jan)

0.61 ℃·(10 a)$^{-1}$。郊区四季最低温度分别上升0.94、0.34、0.38 和 0.68 ℃，增温趋势分别达0.23、0.08、0.10 和 0.17 ℃·(10 a)$^{-1}$。

城区年际及四季最低温度上升远比郊区为快，在春冬两季最为明显，这与城区冬季大量集中取暖有直接关系。另外，城区人口的增加、人为热的排放也使城区最低温度上升较快。同样，城区夏秋两季较郊区为多的降水也使城区夏秋季最低温度上升幅度较其他季节缓慢。

由城区与郊区平均最高、最低温度的比较可以看出，由于城市发展的影响，北京城区的温差变小，已形成有别于郊区的气温变化特点，这也是北京城市气候的特征之一。

3.3 相对湿度

从图 7a 可以看出，过去 40 年来北京城区年平均相对湿度呈下降趋势，下降幅度为 5%，下降速度为 1.25%(10 a)$^{-1}$，并通过置信度 99%的信度检验。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，从而导致城区温度升高有关[21]。

郊区年平均相对湿度则略有上升，上升幅度为 2.5%，上升速度为 0.6%(10 a)$^{-1}$。从 80 年代中期开始，郊区年平均相对湿度高于城区年平均相对湿度。由此可见，随着城市化的发展，城区面积扩大，城区相对湿度下降，造成北京城区“干岛效应”的出现，这也是北京城市气候的特征之一。

由图 7b～e 可以看出，城区典型月份相对湿度总体呈下降趋势，其中春季（4 月）、秋季（10 月）两季都达 2%(10 a)$^{-1}$，夏季（7 月）达 1%(10 a)$^{-1}$，冬季（1 月）则略有上升，为 0.25%(10 a)$^{-1}$。郊区典型月份相对湿度无明显趋势，其中春季（4 月）、秋季（10 月）两季略有下降，都为 0.5%(10 a)$^{-1}$，夏季（7 月）、冬季（1 月）两季有所上升，分别为 0.25%(10 a)$^{-1}$和 1.5%(10 a)$^{-1}$。

采用 6 次多项式对相对湿度的波动性进行研究，发现城区和郊区相对湿度年际变化的波动曲线（图 8）与图 7 趋势线方向基本一致，城郊区典型月份相对湿度波动总体一致。

3.4 平均降水量

从图 9a 可以看出，北京城区、郊区 40 年来的

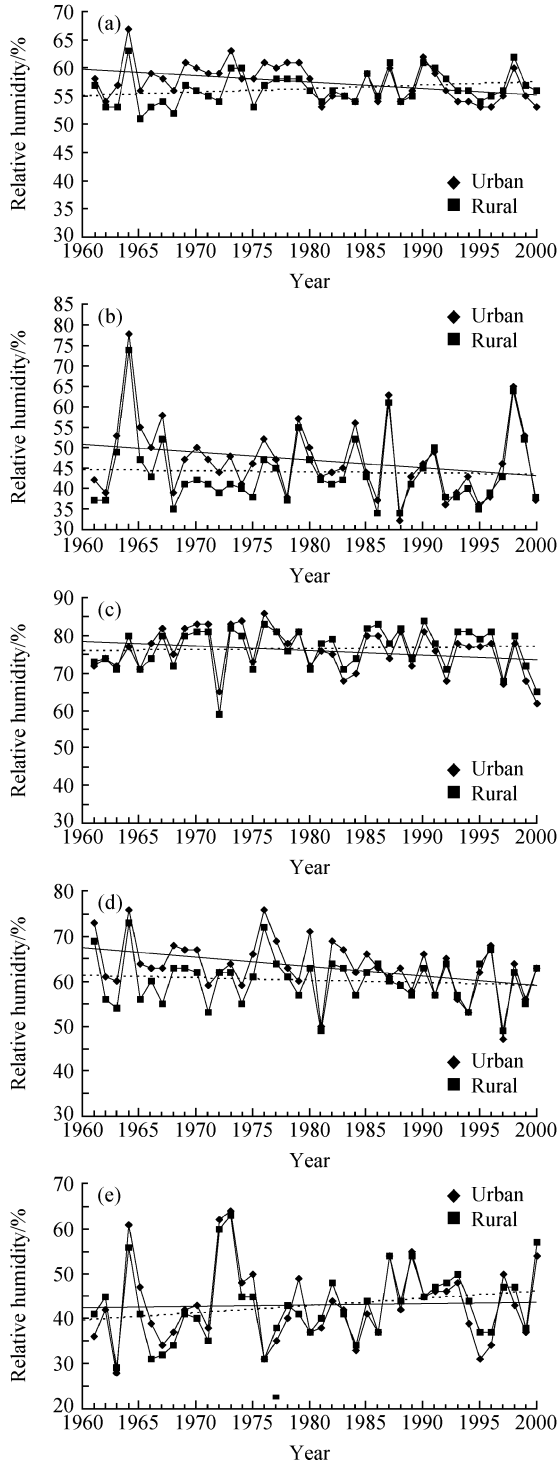

图 7 同图 5，但为相对湿度（趋势）

Fig. 7 The same as Fig. 5, but for the trend of relative humidity

年平均降水量呈下降趋势，其中，城区年平均降水量下降 48 mm，下降幅度为 12 mm·(10 a)$^{-1}$，郊区下降 39 mm，下降幅度为 9.75 mm·(10 a)$^{-1}$，

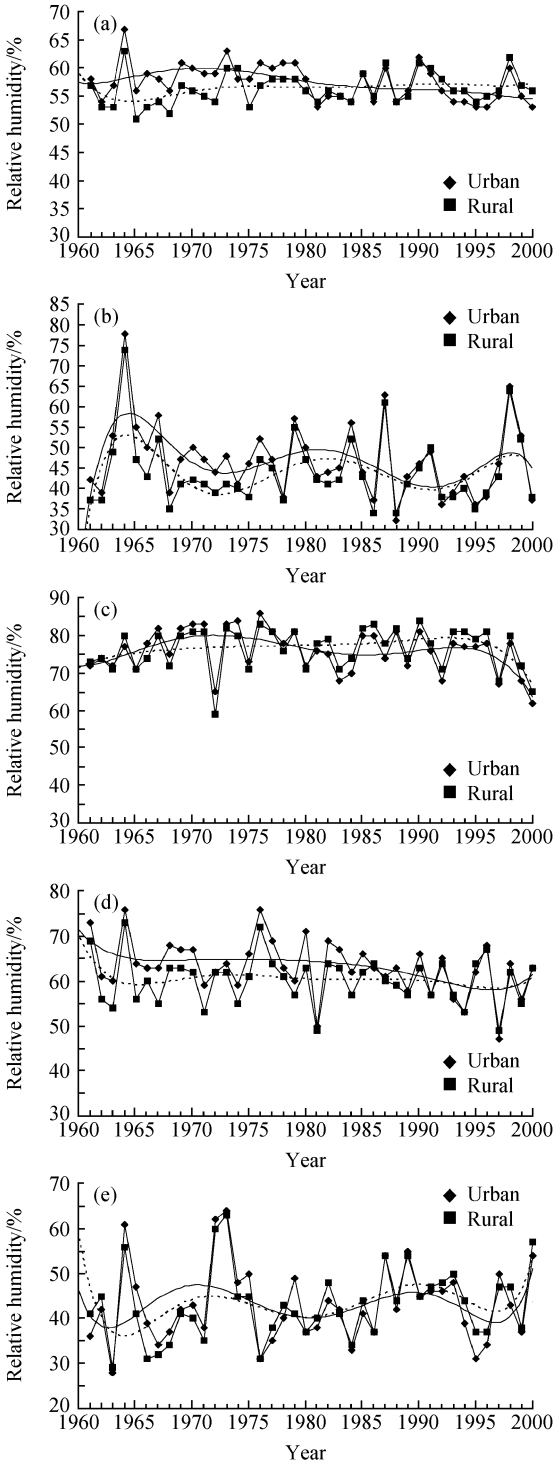

图 8 同图 5，但为相对湿度（波动）

Fig. 8 The same as Fig. 5, but for the fluctuation of relative humidity

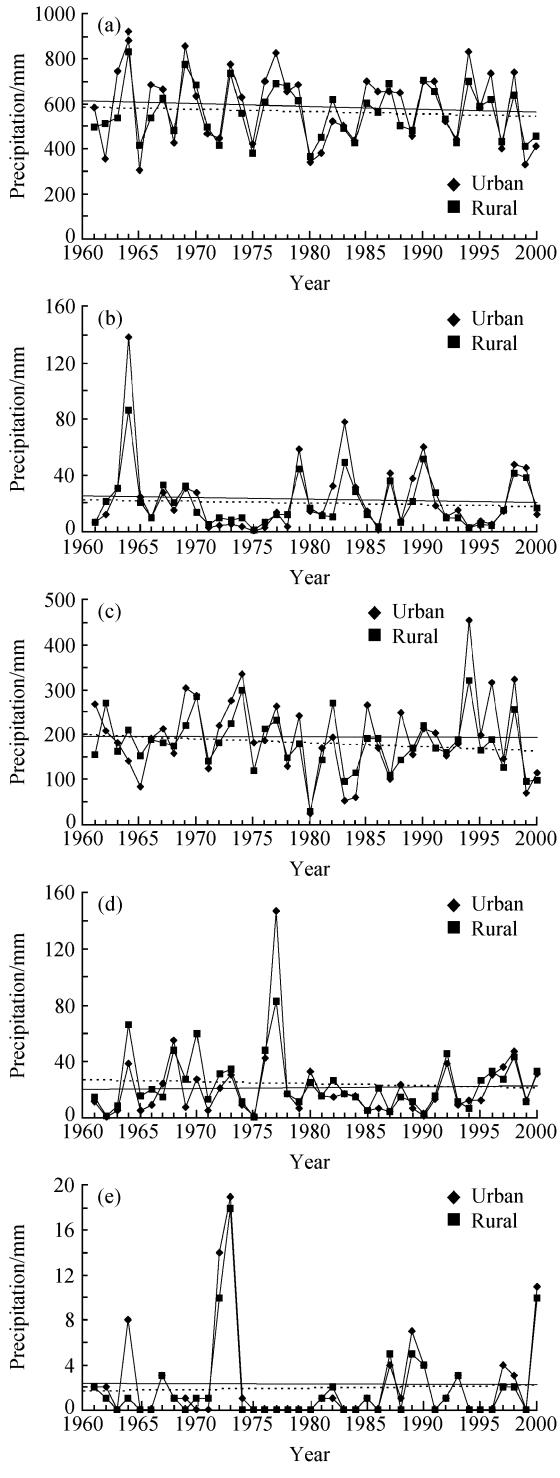

图 9 同图 5，但为降水（趋势）

Fig. 9 The same as Fig. 5, but for the trend of precipitation

城区下降幅度较郊区稍大。城区和郊区年平均降水量的同步减少，与我国北方干旱化加剧是一致的，而城区减少幅度较郊区大，则可能是受城市化及热岛效应影响[22]，城区下垫面不透水层面积扩大，植被覆盖减少，导致蒸发减少。另外，城区大气气溶胶等污染物也会吸收大气中的水汽，

影响成云致雨，最终造成降水的减少。

由图 9b～e 可以看出，40 年来春季（4 月）、夏季（7 月）城区典型月份降水量呈下降趋势，分别达 1.25 和 0.5 mm·（10 a）$^{-1}$，秋季（10 月）略有上升为 0.5 mm·（10 a）$^{-1}$，冬季（1 月）降水稀少，基本无大变化。在郊区典型月份降水量中，春季（4 月）、夏季（7 月）和秋季（10 月）都呈下降趋势，分别为 1.25、9 和 1.25 mm·（10 a）$^{-1}$，冬季（1 月）略有上升，为 0.13 mm·（10 a）$^{-1}$。

注意到，在城区年平均降水量下降幅度超过郊区的大趋势下，城区夏、秋两季的降水量下降幅度反而比郊区小，甚至城区秋季降水量还略有上升。北京属温带季风性气候，每年的夏秋季，东南季风为北京上空带来丰沛水汽。而由于城区人类活动频繁，向大气中排放了大量的温室气体、气溶胶及其他颗粒物，这几类物质一方面增加了降水的凝结核，另一方面也加剧了北京市的热岛效应。在水汽充沛的条件下，城区上空增多的凝结核以及相对较高的下垫面温度，有利于形成较郊区更多的降水，减缓城区年平均降水量的下降趋势。降水降低了城区的温度，热岛强度也随之下降，这可能是北京夏季（7 月）的热岛强度及其增幅较其他 3 个季节低的主要原因之一。反过来，在水汽缺乏的条件下，城区上空增多的凝结核无法形成降水，反而加剧了热岛效应，这也是北京冬季（1 月）热岛强度较其他 3 个季节高的主要原因之一。

从图 10c 和 10d 可以看出夏季（7 月）和秋季（10 月）城区降水波动趋势线上下几次穿越郊区降水波动趋势线，说明夏秋季城区降水波动较郊区大。再考虑由图 7 分析得出的城区夏秋两季的降水量下降幅度比郊区慢，甚至城区秋季降水量还略有上升这个事实，说明北京城区夏秋季降水变化极端性增强，即旱年愈旱，涝年愈涝，这也是北京城市气候的特征之一。

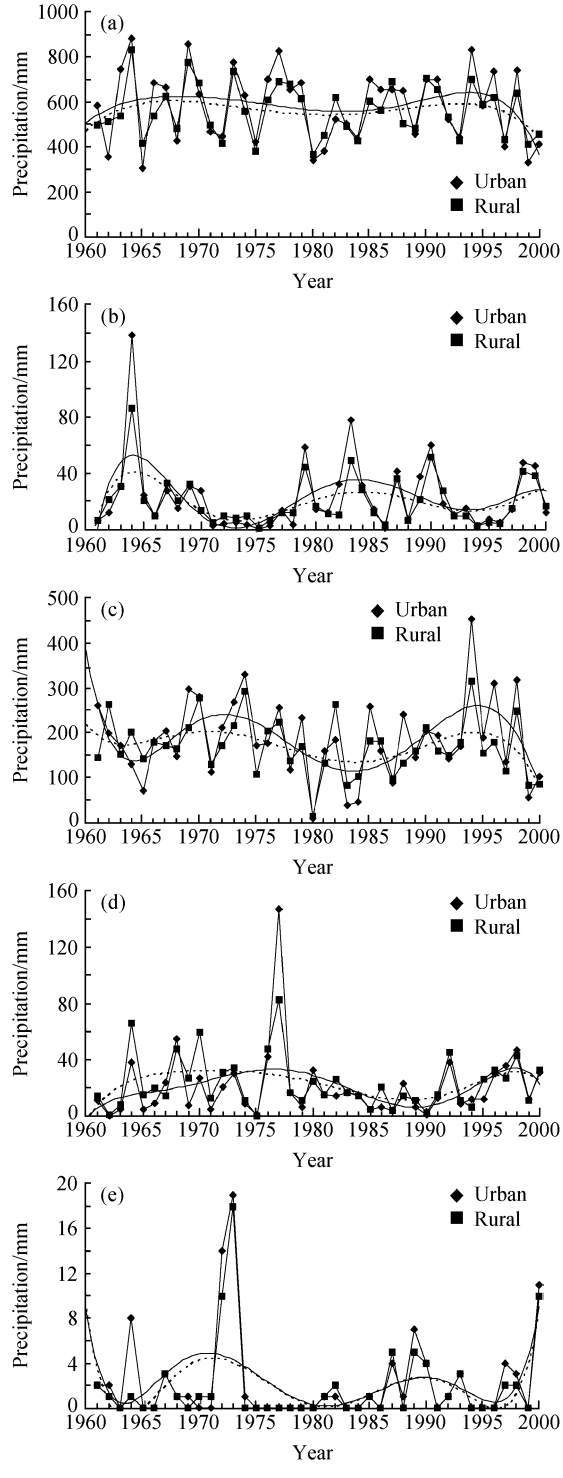

图 10　同图 5，但为降水（波动）

Fig. 10　The same as Fig. 5, but for the fluctuation of precipitation

4　结论

通过对北京城区和郊区 1961～2000 年的气候资料和城市发展资料的统计分析，可以得到如下结论：

（1）随着城市化进程的加快，北京城区与郊区 40 年来的年平均温度呈现明显上升趋势，并从 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始，城区年平均温

度呈快速上升趋势。40年来城区年平均温度上升1.56 ℃，超过全球平均升温的2倍多；郊区年平均温度上升0.62 ℃，与全球平均升温幅度一致。

（2）北京热岛强度40年来明显加强，并从70年代末80年代初开始，呈快速上升趋势。热岛强度上升0.9 ℃，上升幅度达0.23 ℃·（10 a）$^{-1}$。热岛强度在冬季最大，夏季最小，热岛强度上升幅度在春、秋、冬三季基本一致，夏季最小。城区和郊区年际和四季最高最低温度都呈上升趋势，其中城区年际及四季最低温度上升尤为明显，并且集中体现在冬季。热岛强度与人口、基本设施投资额、房屋施工面积和道路面积等城市发展数据的年际变化有较强的正相关关系。

（3）过去40年来北京城区相对湿度呈下降趋势，下降幅度为5%，下降速度为1.25%（10 a）$^{-1}$，郊区相对湿度略有上升，上升幅度为2.5%，上升速度为0.6%（10 a）$^{-1}$。郊区相对湿度在80年代中期开始超过城区。随着北京城市化的发展，城区温度上升，相对湿度下降，造成北京城区“干岛现象”日益突出。

（4）北京城区和郊区40年来的年平均降水量呈下降趋势，城区年平均降水量的下降幅度为12 mm·（10 a）$^{-1}$，郊区为9.75 mm·（10 a）$^{-1}$。总体上，城区和郊区春季（4月）、秋季（10月）、冬季（1月）降水量变化差别不大，而夏季（7月）城区降水量下降趋势远较郊区缓慢，这可能是在城市化过程中，城区排放的大量气溶胶及温室气体有利于降水的形成，减缓了夏季（7月）城区降水量的下降趋势，也减轻了北京夏季（7月）的热岛强度。另外，城区降水的波动性增强，旱年愈旱，涝年愈涝。

（5）随着城市的快速发展，北京城区已经逐步形成较过去不同的气候特点，如温差变小、相对湿度下降、降水减少和降水极端性增强等。

（6）北京受城市化影响，温度、相对湿度和降水等气候因子发生不同程度的变化，如何量化城市发展与气候因子变化的内在联系，以及气候因子发生变化后，它们之间内在联系的变化等，这些问题需要进一步深入讨论。

参考文献（References）

[1] IPCC. *Climate Change* 2001：*The Scientific Basis*. Cambridge：Cambridge University Press，2001

[2] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京：科学出版社，2007
National Assessment Report on Climate Change Editorial Committees. *National Assessment Report on Climate Change*（in Chinese）. Beijing：Science Press，2007

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

[4] Jones P D. Assessment of urbanization effects in time aeries of surface air temperatures over land. *Nature*，1990，**347**（4）：169～172

[5] 赵宗慈. 近39年来中国的气温变化与城市化影响. 气象，1991，**17**（4）：14～17
Zhao Zongci. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years. *Meteorological Monthly*（in Chinese），1991，**17**（4）：14～17

[6] 张一平，何云玲，马友鑫，等. 中国不同地区城市化对室内外气温影响的比较研究. 地理科学，2003，**23**（1）：42～48
Zhang Yiping，He Yunling，Ma Youxin，et al. A comparative study about effect of urbanization on the indoor and outdoor air temperature on different cities of China. *Scientia Geographica Sinica*（in Chinese），2003，**23**（1）：42～48

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

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

[9] 赵晶，王乃昂，杨淑华. 利用R/S方法分析兰州城市化气候效应. 气象，2001，27（2）：7～15
Zhao Jing，Wang Naiang，Yang Shuhua. The analysis of urbanization effect on climate in Langzhou by the method of R/S. *Meteorological Monthly*（in Chinese），2001，**27**（2）：7～15

[10] 周淑贞. 上海城市发展对气温的影响. 地理学报，1983，**38**（4）：397～405
Zhou Shuzhen. Urban heat island effect of Shanghai. *Acta Geographica Sinica*（in Chinese），1983，**38**（4）：397～405

[11] 李林. 城市化对西宁市区的气候影响. 青海环境，1997，**7**（4）：171～174

Li Lin. The effect of the urbanization on climate in Xining city. *Qinghai Environment* (in Chinese)，1997，**7** (4)：171～174

[12] 林学椿，于淑秋. 近 40 年我国气候趋势. 气象，1990，**16** (10)：16～22
Lin Xuechun，Yu Suqiu. Climate trend of China in recent 40 years. *Meteorological Monthly* (in Chinese)，1990，**16** (10)：16～22

[13] 林学椿，于淑秋. 北京地区温度的年代际变化和热岛效应. 地球物理学报，2005，**48** (1)：39～45
Lin Xuechun，Yu Suqiu. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese)，2005，**48** (1)：39～45

[14] 林学椿，于淑秋，唐国利. 北京城市化与热岛强度关系的研究. 自然科学进展，2005，**15** (7)：882～886
Lin Xuechun，Yu Suqiu，Tang Guoli. Study on the relation between urbanization and Beijing UHI intensity. *Progress in Natural Science* (in Chinese)，2005，**15** (7)：882～886

[15] 谢庄，崔继良，陈大刚，等. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析. 气候与环境研究，2006，**11** (1)：69～75
Xie Zhuang，Cui Jiliang，Chen Dagang，et al. The annual，seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese)，2006，**11** (1)：69～75

[16] Zhou Liming，Dickinson R，Tian Yuhong，et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *PNAS*，2004，**101** (26)：9540～9544

[17] Weng QiHao，Yang Shihong. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*. 2004，**70** (2)：145～156

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

[19] 徐祥德，汤旭. 城市化环境气象学引论. 北京：气象出版社，2002：62～80
Xu Xiangde，Tang Xun. *An Introduction to Meteorology in Urbanization Environment* (in Chinese). Beijing：China Meteorological Press，2002：162～80

[20] Ohashi Y，Genchi Y，Kondo H，et al. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer：Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*，2007，**46** (1)：66～81

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

[22] Kaufmann R K，C K Seto，Schneider A，et al. Climate response to rapid urban growth：Evidence of a human-induced precipitation deficit. *J. Climate.*，2007，**20** (10)：2299～2306