

城市化与北京地区降水分布变化初探

王喜全¹ 王自发¹ 齐彦斌² 郭 虎³

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029
2 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062
3 北京市气象台, 北京 100089

摘 要 根据北京地区城市化进展的程度, 以 1980 年为分界点, 将 1961~1980 年划分为城市化慢速期, 1981~2000 年划分为城市化快速期。利用北京地区 14 个标准气象站 40 年的降水量资料, 研究了城市化对北京地区降水分布的可能影响。初步的研究结果表明: 北京地区冬季降水量分布发生了显著的系统性的变化, 即城市化缓慢期北京地区南部为降水较多地区, 北部为降水偏少地区; 城市化快速期相对降水量的分布则正好相反, 南部地区变为降水较少地区, 而北部变为降水偏多地区。其他季节, 北京地区的相对降水量分布并未发生整体性的显著变化。造成冬季降水分布变化的原因可能是随着城市规模的扩大, 北京冬季“城市热岛”和“城市干岛”效应增强进而使云下蒸发过程增强, 造成城区及南部地区地面降水量减少。至于夏季降水分布并未发生系统性的变化, 还需深入研究。以上结果与国内外的相关研究结论大相径庭。

关键词 城市化 城市降水 北京

文章编号 1006-9585 (2007) 04-0489-07 **中图分类号** P463.3 **文献标识码** A

Preliminary Inspect about the Effect of Urbanization on
Precipitation Distribution in Beijing Area

WANG Xi-Quan¹, WANG Zi-Fa¹, QI Yan-Bin², and GUO Hu³

1 *Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*
2 *Jilin Province Weather Modification Offices, Changchun 130062*
3 *Beijing Meteorological Observatories, Beijing 100089*

Abstract According to the urbanization extent of Beijing area, and defining 1980 as the dividing point, the period from 1961 to 1980 is defined as the slow urbanization period, and the period from 1981 to 2000 as the quick urbanization period, and then by using the precipitation data of 40 years and 14 normal standard weather stations, the possible influence of urbanization on the precipitation distribution in Beijing area is presented. The preliminary results concluded that by comparing the relative precipitation distribution, the significant change of precipitation distribution has been occurred in winter between the slow and quick urbanization period. In other words, during the slow urbanization period, the precipitation amount in the South area of Beijing is relatively more than that in the North area, and during the quick urbanization period, the precipitation amount in the South area is relatively less than that in the North area. For the other seasons, the significant and systematical change of the precipitation distribution did not occurred. The above conclusion is different from domestic and overseas relevant similar research

results.

Key words urbanization, urban precipitation, Beijing

1 引言

早在 1968 年 Changnon^[1]就指出了城市化对降水的可能影响问题,并导致了 METROMEX 计划(大城市气象观测试验计划)的发起和实施^[2]。Huff 等^[3]分析了圣路易斯城长期降水资料,结果表明:在城市的上空和下风方向月均和季均降水量以及降水天气现象的发生频率,明显高于周围临近地区;这种降水分布异常在夏季最显著,并且表现出随着城市化进程加快而增强的趋势。在对 METROMEX 观测资料分析和数值模拟的基础上,Changnon 等^[4~7]进一步指出城市对夏季中等以上强度的对流性降水的增雨效果尤其显著,并提出了 3 种城市增强降水机制假说。

METROMEX 计划关于城市对降水影响的研究,也存在一些值得推敲的疑点^[8]。尽管如此,仍不断有新的研究成果支持 METROMEX 计划的研究结论^[9~11],如文献^[12~15]对美国亚特兰大城市降水的研究,Ernesto 等^[16]对墨西哥城市降水的研究,周建康等^[17]对中国南京城市降水的研究等。

Rosenfeld^[18]的研究结果使城市增加降水的推测变得不确定起来。Rosenfeld 发现,在工业区和城市群空气污染排放源的下风向,由于大气污染物转化而来的冰核和云凝结核的加入,使层状云产生更多的小云滴,云滴谱分布更加均匀,降低了云水向雨水的转化效率,从而使城市下风向的降水受到抑制。Givati 等^[19]关于以色列和美国西海岸城市群下风向多年降水变化趋势的研究结果,支持和印证了 Rosenfeld 的结论。

对北京及其周边地区降水的研究,多从天气动力学的角度出发^[20~23]研究降水形成的天气条件。从城市作用的角度研究城市对降水的影响,目前还不多见。赵思雄等^[24]研究了 2001 年 12 月 7 日造成北京交通大堵塞的降水过程,指出了城市下垫面过程对道路结冰引起交通堵塞的重要作用。刘伟东等^①研究了 2004 年 7 月 10 日北京城中

心发生的强降水过程,指出了“城市热岛”环流对触发和加强此次降水的可能性。而从城市气候学的角度,着眼于城市化进程所引起的环境条件变化,对北京及其周边地区降水的研究到目前还没有充分开展。

北京及其周边地区是我国快速发展的三大城市群落之一(长江三角洲地区、珠江三角洲地区和京津塘地区)。随着城市规模的扩大以及人口的增长,加上华北地区的连年干旱^[25],北京的城市供水及工农业用水出现逐年紧张的状况,成为北京及其周边地区发展的制约因素。如何开源节流,解决对水资源不断增长的需求,受到政府和公众的广泛关注。降水是水资源的重要来源,因此,研究城市化对北京及周边地区降水的影响,对于了解北京水资源现状及其变化趋势,解决北京水资源短缺问题,一定会有所裨益。

本文利用北京地区 14 个降水站 1961~2000 年的降水量资料,采用将城市化进程分期的办法,即 1961~1980 年为城市化进程缓慢期,1981~2000 年为城市化进程快速期,研究这两个时期降水量分布的变化,探讨北京城市化进程对降水分布的可能影响。

2 研究方法简介

目前文献中出现的关于城市化对降水影响的研究方法,可大致分为 4 大类,即统计法、个例分析法、数值模拟法和卫星及雷达资料分析法^[26]。本文采用统计学方法,对北京城市化进程对北京地区降水的影响进行初步研究。

利用统计方法研究城市对降水的影响,需先解决两个关键问题:1) 如何排除地形的影响;2) 如何排除天气系统频率变化的影响。为了解决这两个问题,可将长期降水资料根据城市化进程的程度划分为前后两个时期,研究其降水分布的差异。

1961~2000 年北京地区 14 个标准气象站具有连续 40 年的降水资料,这给利用上述方法揭示北

① 刘伟东,等. 北京城市热岛、高温热浪监测技术研究. 技术报告, 2005

京地区城市化进程对降水分布的影响提供了基本的条件和可行性。20 世纪 80 年代以前, 北京城区基本在二环路以内; 80 年代以后, 北京的城市化进程加快。1978 年二环路建成, 1984 年三环路通车, 1990 年四环路建设, 2003 年五环路全线通车, 到现在的六环路建设, 北京城区从约 60 km^2 发展到目前的约 300 km^2 。目前, 东起定福庄, 西到石景山, 北起清河, 南到南苑, 方圆 $1\,040 \text{ km}^2$ 内城市化进展迅速。为此, 以 1980 年为分界线(快速城市化开始年), 将 1961~2000 年分为两个时期, 即 1961~1980 年为城市化进程缓慢时期, 1981~2000 年为城市化进程快速时期, 分析两个时期降水分布的差异, 探讨城市化对北京地区降水的可能影响。

降水主要由大尺度大气环流控制, 极端洪涝年和极端干旱年对多年平均值的影响很大, 因而直接比较台站的绝对降水量不是一个好的特征量; 另外, 由于降水在空间分布上的随机性和弱相关性(相对于位势高度场和温度场而言), 任何插值方法都会带来不可控制的插值误差。因此本文利用标准化相对降水量, 研究城市化对北京降水分布的影响。为此, 将降水资料相对于均值和标准差进行标准化, 得到标准化相对降水参数如下:

$$R = (P_{mi} - P_n) / \sigma_n$$

$$(n = 1961, \dots, 2000; i = 1, \dots, 14),$$

其中: R 为相对降水量, P_{mi} 为 14 个气象站年均降水量, P_n 为单站年均降水量, σ_n 为降水量年标准差, n 为年号, i 为气象站号。采用标准化相对降水量, 使降水量的分布不但可以在一个时期内进行比较, 也可以在两个时期间进行比较。为了检验两个时期降水分布差异的显著性, 我们采用了无参数 Mann-Whitney U 假设检验方法。由于相对降水量不满足正态分布, 也不满足等区间度量的假设, 因而不满足 t 检验的假设条件, 而无参数 Mann-Whitney U 假设检验方法不需要这些限定条件。

3 资料介绍

本章分析 1961~2000 年的地面降水资料, 1961~1980 年降水资料主要来自《北京气候资料》第 1~4 卷, 1981~2000 年降水资料主要来自

于每年的《北京地区气象年鉴》。在此期间, 北京地区有 15 个标准气象站, 包括延庆(406)、霞云岭(597)、门头沟(505)、通州(431)、密云(416)、怀柔(419)、昌平(499)、顺义(398)、丰台(514)、朝阳(433)、大兴(594)、房山(596)、平谷(424)、古北口(421)和北京观象台站(511)。由于北京观象台站在 1981 年和 1997 年的两次迁址, 其降水资料的代表性存在问题, 因此在讨论降水趋势时未考虑该站。

以地貌状况划分, 霞云岭、门头沟为山区站(海拔高度在 100 m 以上), 通县、密云、怀柔、昌平、顺义、丰台、朝阳、北京观象台、大兴、房山、平谷和延庆为平原站。以相对于北京城区的距离划分, 密云、平谷、延庆、怀柔和霞云岭为远郊站, 通县、顺义、昌平、房山、大兴和门头沟为近郊站, 丰台和朝阳为城区站。在 20 世纪 80 年代以前, 有些站属于郊区站, 但随着城市化, 这些站有的已成为城区或相当于城区站了, 比如通州和门头沟站等。

4 结果与讨论

4.1 城市化缓慢期与快速期年平均相对降水量分布之比较

图 1a 和 1b 分别给出了 1961~1980 年和 1981~2000 年北京地区年平均相对降水量的分布。比较这两个时期年平均相对降水量的分布归纳出如下特点:

(1) 北京地区东北部相对降水最多, 西北部相对降水最少, 两个时期几乎没有什么变化。

(2) 1961~1980 年, 北京西南部相对降水较多, 而 1981~2000 年, 该地区的降水有相对减少的趋势, 特别是门头沟和房山站减少的趋势更明显。

(3) 除朝阳站的相对降水量从 1961~1980 年的偏多变为 1981~2000 年的偏少外, 北京城区东部与南部作为降水相对较少地区, 两个时期的降水并没有太大的变化。

(4) 利用无参数 Mann-Whitney U 方法对相对降水量变化的显著性检验表明, 各台站相对降水量的年代变化不显著。

以上分析表明: 从北京地区的年降水量分布

来看,城市化进程缓慢时期和城市化进程快速时期并没有明显的差别。

4.2 城市化缓慢期与快速期季平均相对降水量分布之比较

图 2 给出了两个时期夏季平均相对降水量分布。由图可见,夏季所有站的相对降水量在城市化缓慢期与快速期并未发生显著的变化。另外,春季和秋季相对降水量的分布也未发生系统性的显著变化(图略)。

以上分析表明:城市化缓慢期与快速期,北京地区年与春、夏、秋季相对降水量分布的形势并未发生系统性变化,即西南部和东北部地区为

北京地区降水的多发区域。

图 3 给出了两个时期冬季平均相对降水量的分布。从图中可以看出,两时期间的相对降水量分布发生了系统性的变化。城市化缓慢期(1961~1980 年),北京地区南部为降水较多地区,北部为降水偏少地区;城市化快速期(1981~2000 年),相对降水量的分布则正好相反,南部地区变为降水较少地区,而北部变为降水偏多地区。两时期间变化的显著性检验也证明,北部的顺义站、怀柔站和古北口站相对降水增加显著,分别通过显著性水平为 $\alpha=0.10, 0.02, 0.02$ 的显著性检验;南部的丰台站、大兴站和房山站相对降水减

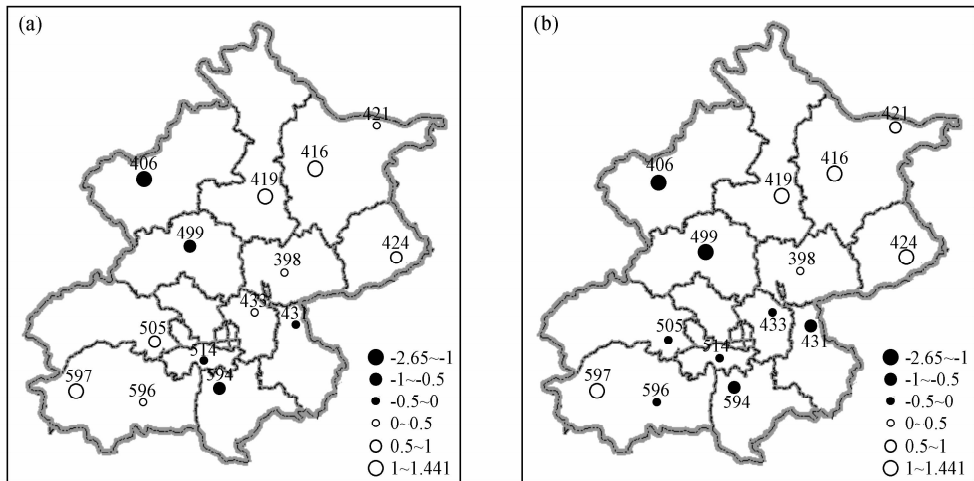


图 1 北京地区年平均标准化相对降水量分布:(a) 1961~1980 年;(b) 1981~2000 年

Fig. 1 The distribution of normalized relative annual mean precipitation in Beijing area: (a) 1961—1980; (b) 1981—2000

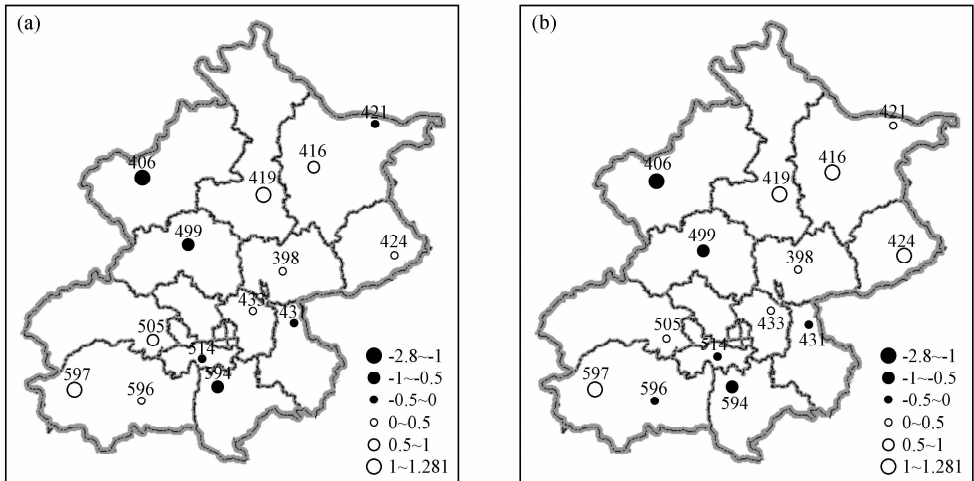


图 2 北京地区夏季年平均标准化相对降水量分布:(a) 1961~1980 年;(b) 1981~2000 年

Fig. 2 The distribution of normalized relative summer seasonal mean precipitation in Beijing area: (a) 1961—1980; (b) 1981—2000

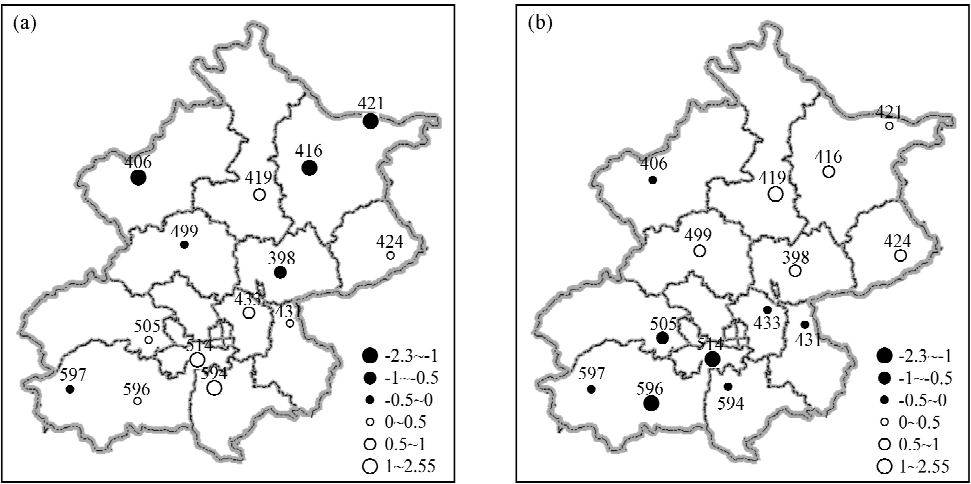


图 3 北京地区冬季年平均标准化相对降水量分布：(a) 1961~1980 年；(b) 1981~2000 年
Fig. 3 The distribution of normalized relative winter seasonal mean precipitation in Beijing area: (a) 1961—1980; (b) 1981—2000

少显著，分别通过显著性水平 $\alpha=0.02$ 、 0.10 和 0.05 的显著性检验。

从城市化缓慢期和快速期绝对降水量的变化来看，北京地区的冬季降水有减少的趋势。1961~1980 年北京地区年平均降水量为 10.6 mm；1981~2000 年为 7.5 mm，约减少 29%。北京地区北部 7 个站，包括延庆、密云、怀柔、昌平、顺义、平谷和古北口，1961~1980 年冬季年平均降水量为 9.9 mm，1981~2000 年为 8.0 mm，约减少 19%；北京地区南部 7 个站，包括霞云岭、门头沟、通州、丰台、朝阳、大兴和房山，1961~1980 年冬季年平均降水量为 11.3 mm，1981~2000 年为 6.9 mm，约减少 39%。从以上数据可以看出，虽然北京冬季降水在年代间有减少的趋势，但南北部地区减少的幅度有显著差别，南部的减少幅度约为北部的 2 倍。

综上所述，根据北京地区城市化进程的迅速程度，可以把 1980 年看作一个转折点。对转折点前后 20 年相对降水量分布的分析以及绝对降水量变化的对比研究中，我们看到，除冬季以外，北京地区的相对降水量（年平均和季节平均）分布并未发生整体性的显著变化。这与国内外的相关研究结果大相径庭。为了解释 1980 年前后北京地区冬季降水分布的系统性显著变化，在目前所掌握资料有限的情况下，分析了 1961~2000 年北京南部地区与北部地区冬季气温差的变化趋势。

图 4 为北京南部地区（丰台、大兴和房山）

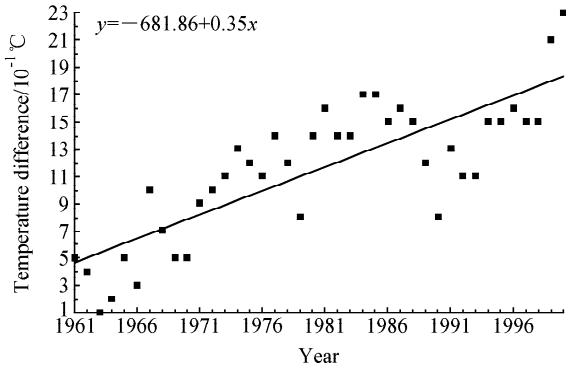


图 4 北京南部地区（丰台、大兴和房山站）与北部地区（顺义、密云和古北口站）冬季平均气温差回归曲线（显著性 $\alpha=0.01$ ）
Fig. 4 The regression plot of winter temperature difference between the south area (including Fengtai, Daxing and Fangshan) and the north area (including Sunyi, Miyun and Gubeikou) in Beijing from 1961 to 2000 year (Significance level $\alpha=0.01$)

与北部地区（顺义、密云和古北口）冬季平均气温差回归曲线。1961~1980 年和 1981~2000 年南北部冬季平均气温差分别为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，无参数 Mann-Whitney U 假设检验表明，两时期间的差异显著，显著性通过 $\alpha=0.01$ 检验。这里分析的北京南部地区的 3 个代表站，1980 年以来已基本与主城区连成一片，而北部地区的 3 个代表站，由于偏远和地形的原因，基本保持 1980 年前的格局。可以推断，造成这两个时期冬季气温差的显著差异，主要是“城市热岛”效应的结果。文献[27]表明：在 20 世纪 80 年代初期，北京冬季城区的空气湿度高于郊区，表现为“城市湿岛”

效应,其他季节城区表现为“城市干岛”。对城市进程快速期的有限资料分析表明,目前北京城区冬季的湿度也已变为低于郊区,“城市干岛”效应明显。由于城区的气温高、湿度低,势必增加云下的蒸发过程,使地面的降水量减少。这可能是造成城市化进程快速期和慢速期北京地区冬季降水量分布系统变化的主要原因。

与国外的研究相比,有两点值得注意:1)为什么北京地区城市化进程缓慢期和快速期之间的相对降水量分布差异在冬季最显著,而国外的相关研究结论一般是夏季的差异最为显著。2)为什么北京地区的城市化进程没有对夏季的降水分布产生系统性的显著影响;而国外的相关研究指出,在快速城市化进程前后城市及其周边地区降水分布一般都发生系统性变化。

以上初步研究,仅仅对北京地区的单一降水量要素分析得出结果。若要给出北京及其周边地区降水变化情况的完整描述,还需要分析降水强度和降水现象发生频率等要素以及城市下垫面状况的变化情况,并要对北京周边地区台站(特别是北京东部和东南部)资料进行分析研究。这项工作的开展,将为北京城市发展规划和北京及其周边地区水资源管理提供参考依据。

参考文献 (References)

- [1] Changnon S A Jr. The La Porte weather anomaly-fact or fiction? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1968, **49**: 4~11
- [2] Principal investigators of project METROMEX. METROMEX update. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1976, **57**: 304~308
- [3] Huff F A, Changnon S A Jr. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis. *J. Appl. Meteor.*, 1972, **11**: 823~842
- [4] Changnon S A Jr, Shealy R T, Scott R W. Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis. *J. Appl. Meteor.*, 1991, **30**: 126~134
- [5] Changnon S A Jr. Urban effects on severe local storms at St. Louis. *J. Appl. Meteor.*, 1978, **17**: 578~586
- [6] Changnon S A Jr. Rainfall changes in summer caused by St. Louis. *Science*, 1979, **205**: 402~404
- [7] Changnon S A Jr., Semonin R G, Huff F A. A hypothesis for urban rainfall anomalies. *J. Appl. Meteor.*, 1976, **15**: 544~560
- [8] Lowry W P. Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *J. Appl. Meteor.*, 1977, **16**: 129~135
- [9] Sanderson M, Gorski R. The effects of Metropolitan Detroit-Windsor on precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 1978, **17**: 423~427
- [10] Ramachandra Rao A. Stochastic analysis of annual rainfall affected by urbanization. *J. Appl. Meteor.*, 1980, **19**: 41~52
- [11] Palumbo A, Mazzarella A. Rainfall statistical properties in Naples. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**: 1041~1045
- [12] Bornstein R, Qinglu Lin. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmos. Environ.*, 2000, **34**: 507~516
- [13] Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. Rainfall modification by major urban areas: Observation from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J. Appl. Meteor.*, 2002, **41**: 689~701
- [14] Dixon P G, Motte T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 2003, **42**: 1273~1284
- [15] Diem J E, Mote T L. Interepochal changes in summer precipitation in the southeastern United States: Evidence of possible urban effects near Atlanta, Georgia. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**: 717~730
- [16] Ernesto Jauregui, Ernesto Romales. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 1996, **30**: 3383~3389
- [17] 周建康, 黄红虎, 唐运忆, 等. 城市化对南京市区域降水量变化的影响. 长江科学院院刊, 2003, **20** (4): 44~46
Zhou Jiankang, Huang Honghu, Tang Yunyi, et al. Influence of urbanization on regional precipitation of Nanjing City. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (in Chinese), 2003, **20** (4): 44~46
- [18] Rosenfeld D. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. *Science*, 2000, **287**: 1793~1796
- [19] Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J. Appl. Meteor.*, 2004, **43**: 1038~1056
- [20] 王笑芳, 丁一汇. 北京地区强对流天气短时预报方法研究. 大气科学, 1994, **18** (2): 173~183
Wang Xiaofang, Ding Yihui. Study on Method of Short-range Forecast of Severe Convective Weather in Beijing Area. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18** (2): 173~183
- [21] 孙明生, 汪细明, 罗阳, 等. 北京地区强对流天气展望预报方法研究. 应用气象学报, 1996, **7** (3): 336~343
Sun Mingsheng, Wang Ximing, Luo Yang, et al. A prospect forecasting method study of severe convective weather in Beijing area. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, **7** (3): 336~343
- [22] 李志楠, 李廷福. 北京地区一次强对流大暴雨的环境条件

- 及动力触发机制分析. 应用气象学报, 2000, **11** (3): 304~311
- Li Zhinan, Li Tingfu. Analysis on the environmental conditions and dynamic trigger mechanism of a severe convective rainstorm in Beijing. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, **11** (3): 304~311
- [23] 董佩明, 张维桓, 沈桐立. 下垫面强迫对京津冀大暴雨作用的数值模拟研究. 应用气象学报, 1999, **10** (4): 436~444
- Dong Peiming, Zhang Weiheng, Shen Tongli. Numerical study on the effects of underlying surface forcing on torrential rain process over Beijing-Tianjin-Hebei region. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, **10** (4): 436~444
- [24] 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 北京“12·7”降雪过程的分析研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (1): 7~21
- Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. A Study on Snowfall in Beijing on 7 December 2001. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 7~21
- [25] 许月卿, 李双龙, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究. 中国科学 (D辑), 2004, **34** (12): 1176~1183
- Xu Yueqing, Li Shuanglong, Cai Yunlong. Wavelet analysis on the time series of precipitation amount in North China Plain. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2004, **34** (12): 1176~1183
- [26] 王喜全. 北京城市气候与大气环境几个问题的研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007
- Wang Xiquan. Preliminary Study on several problems about urban climate and atmospheric environment in Beijing City. Ph.D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [27] 沈建柱, 王德辉, 徐兆生. 京津区域和城市生态气候因子图集. 北京: 科学出版社, 1986
- Shen Jianzhu, Wang Dehui, Xu Zhaosheng. *Maps of Urban and Ecosystem Climate in Beijing and Tianjin Area* (in Chinese). Beijing: Chinese Science Press, 1986