

# 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响

王喜全<sup>①\*</sup>, 王自发<sup>①</sup>, 齐彦斌<sup>②</sup>, 郭虎<sup>③</sup>

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

\* E-mail: [wxq@mail.iap.ac.cn](mailto:wxq@mail.iap.ac.cn)

收稿日期: 2008-01-09; 接受日期: 2008-07-16

中国科学院三期创新项目(编号: KZCX2-YW-219)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB422205)资助

**摘要** 根据北京地区城市化程度将城市化进程分成两个时期: 即以 1980 年为分界点, 将 1961~1980 年划分为城市化慢速期, 1981~2000 年为城市化快速期. 利用北京地区 14 个标准气象站 40 a 的降水量资料, 研究了城市化进程对北京地区降水分布的影响. 结果表明: 北京地区冬季降水分布发生了显著的、系统性的变化; 城市化缓慢期, 北京地区南部为降水相对较多地区, 北部为降水相对偏少地区; 城市化快速期, 相对降水量的分布正相反, 南部地区变为降水相对较少地区, 而北部变为降水相对偏多地区. 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, 加速了云下降水物的蒸发过程, 使城区及南部地区的降水相对减少. 这可能是造成北京冬季降水分布变化的重要原因之一.

**关键词**

城市化进程  
城市降水  
城市热岛  
城市干岛

早在 19 世纪就有人提出城市化对降水的可能影响问题<sup>[1]</sup>. 1968 年 Changnon<sup>[2]</sup> 建议发起和实施了 METROMEX 计划(大城市气象观测试验计划)<sup>[3]</sup>, 其主旨是寻找城市化对降水影响的证据. Huff 等<sup>[4]</sup> 分析圣路易斯城(St. Louis City, US)长期降水资料的研究结果表明: 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; 这种降水分布的异常在夏季最显著, 并且表现出随着城市化进程增强的趋势. 在对 METROMEX 观测资料分析和数值模拟的基础上, Changnon 等<sup>[5~8]</sup> 进一步指出了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的结论, 并提出了 3 种城市增强降水机制的假说. 虽然 METROMEX 计划关于城市对降水影响的结论还存在不确定因素<sup>[9]</sup>. 但仍不断有新的研究结果支持 METROMEX 计划的研究结论<sup>[10~18]</sup>.

Rosenfeld<sup>[19]</sup> 的研究结果指出: 在工业区和城市群空气污染排放源的下风方向, 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, 从而降低了云水向雨水的转化效率, 使城市下风方向的降水受到抑制. Givati 等<sup>[20]</sup> 关于以色列和美国西海岸城市群下风方向多年降水变化趋势的研究结果, 支持和印证了 Rosenfeld 的结论.

我国科研人员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<sup>[21~24]</sup>, 研究降水形成的天气条件; 从城市作用的角度研究城市因素对降水的影响, 多属个例研究<sup>[25]</sup>; 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还没有充分开展<sup>[26]</sup>.

北京及其周边地区是我国快速发展的城市群之一. 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<sup>[27]</sup>, 北京的城市供水及工农业用水出现逐年紧张的状况, 成为北京及周边地区发展的制约因素. 降水是水资源的重要来源. 因此研究城市化对北京及其周边地区降水的影响, 对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会有所帮助.

本文利用北京地区 14 个降水站 1961~2000 年的降水量资料, 根据城市化程度, 采用将城市化进程分期的办法: 即城市化进程缓慢期和城市化进程快速期, 研究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影响.

## 1 研究方法

目前文献中出现的关于城市化对降水影响的研究方法大致包括统计法、个例分析法、数值模拟法和卫星及雷达资料分析法<sup>[28]</sup>等 4 类. 本文采用统计学方法, 探究城市对降水的影响. 为此需首先回答和解决两个关键问题: (1) 如何排除地形对降水分布的影响; (2) 如何排除天气系统频率变化对降水分布的影响.

未有北京城时的降水分布已湮灭在历史中. 因此只能对比研究城市规模对降水分布的影响的差异. 最可能、最现实的方法就是将长期降水资料根据城市化程度划分为前后两个时期, 研究这两个时期降水分布的差异, 揭示城市化对降水分布的影响. 这可能是目前能够解决和回答上述两个问题的最佳方案. 1961~2000 年北京地区有 14 个标准气象站具有连续 40 a 的降水资料. 这给利用上述方法揭示北京地区城市化进程对降水分布的影响提供了基本条件和可行性. 20 世纪 80 年代以前, 北京城区基本在二环路以内, 城区面积约 60 km<sup>2</sup>; 20 世纪 80 年代以来, 北京的城市化进程加快, 至 2000 年城区面积发展到约 300 km<sup>2</sup>. 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 年为城市化进程慢速时期和 1981~2000 年为城市化进程快速时期, 分析这两个时期降水分布的差异.

由于降水在空间分布上的随机性和弱相关性(相比于地面气压场和温度场而言), 任何插值方法都会带来不可控制的插值误差. 因此我们不采用常用的等值线法表述和分析降水分布. 极端洪涝年和极端干旱年以及偶然性突发强降水, 对降水量均值影响

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. 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, 将降水相对于其均值和标准差进行标准化, 得到标准化相对降水量:

$$R=(P_{ni}-P_n)/\sigma_n^p, (n=1961, \dots, 2000; i=1, \dots, 14),$$

其中:  $R$  为相对降水量,  $P_{ni}$  为降水量,  $P_n$  为年均降水量,  $\sigma_n^p$  为降水量年标准差,  $n$  为年号,  $i$  为降水站号. 采用标准化相对降水量的另一个好处是, 降水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. 为了进一步消除单站偶然突发降水对显著性检验的影响, 采用无参数 Mann-Whitney  $U$  假设检验方法, 检验两个时期降水分布差异的显著性<sup>[29]</sup>.

## 2 资料

本文分析的 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 个标准降水站, 包括延庆(54406, 台站号, 下同)、霞云岭(54597)、门头沟(54505)、通州(54431)、密云(54416)、怀柔(54419)、昌平(54499)、顺义(54398)、丰台(54514)、朝阳(54433)、大兴(54594)、房山(54596)、平谷(54424)、古北口(54421)和北京观象台站(54511). 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, 在讨论降水趋势时未考虑该站. 以相对于北京城区的距离进行划分, 密云、平谷、延庆、怀柔、霞云岭为远郊站, 通县、顺义、昌平、房山、大兴、门头沟为近郊站, 丰台、朝阳为城区站. 在 20 世纪 80 年代以前, 其中有些站属于郊区站, 但随着城市化的发展, 这些站已成为城区或相当于城区站了, 如通州和门头沟站.

## 3 结果与讨论

### 3.1 城市化缓慢期与快速期年均降水量分布比较

图 1(a)和(b)分别给出了 1961~1980 年(城市化缓慢期, 下同)和 1981~2000 年(城市化快速期, 下同)北京地区年均降水量的分布, 图中的降水量分布由标准化相对降水量表示. 比较这两个时期降水量的分布, 可归纳出如下几个特点:

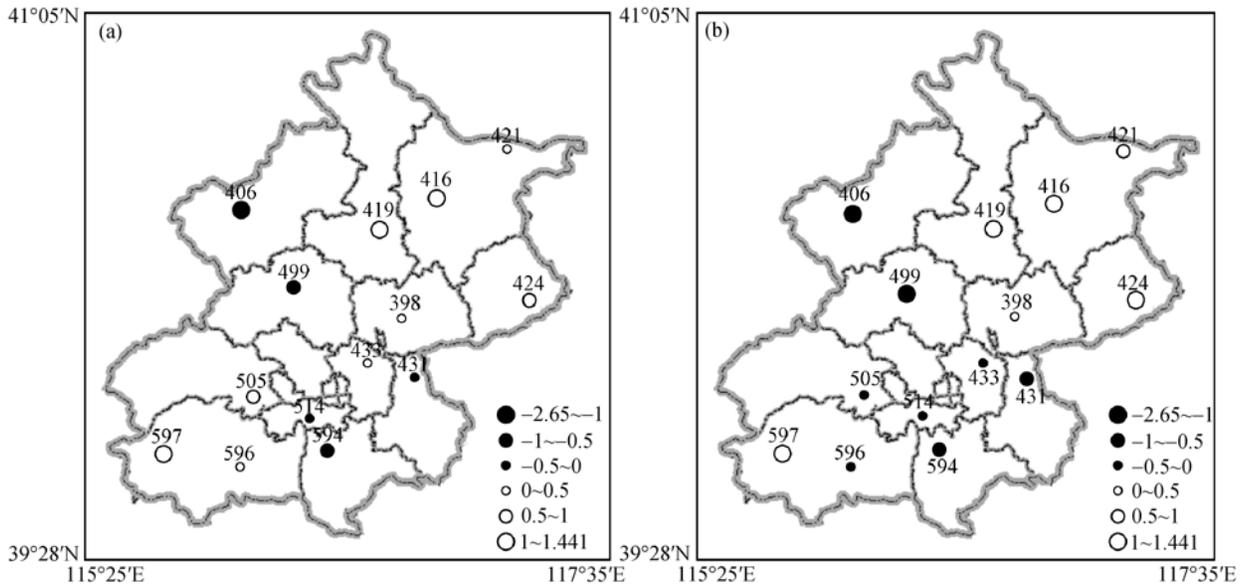


图 1 北京地区年平均标准化相对降水量分布

(a) 1961~1980 年; (b) 1981~2000 年. 实心圈表示相对降水偏少, 空心圈表示降水偏多, 偏多偏少的程度与圆圈的直径成正比(下同)

(1) 北京地区东北部降水最多, 西北部降水最少. 城市化缓慢期与快速期这种降水分布格局几乎没有变化.

(2) 城市化缓慢期北京西南部降水相对较多, 城市化快速期该地区的降水有相对减少的趋势, 特别是门头沟站和房山站减少的趋势更为明显一些.

(3) 除朝阳站的降水从城市化缓慢期的偏多变为城市化快速期的偏少外, 北京城区东部与南部作为降水相对较少的地区, 两个时期的降水分布格局并没有太大的变化.

利用无参数 Mann-Whitney  $U$  方法对上述降水分布变化的显著性检验表明(显著性水平 0.10), 各台站两个时期的降水分布变化不显著, 说明北京地区城市化缓慢期和城市化快速期, 年均降水量的分布没有发生显著变化.

### 3.2 城市化缓慢期与快速期季节平均降水量分布比较

利用与 3.1 节同样的方法, 分析两个时期夏、春、秋季平均降水量分布的结果也表明城市化缓慢期与快速期的降水分布亦未发生显著的变化(图略).

图 2 给出了两个时期冬季平均降水量的分布(表示方法同图 1). 从图 2 中可以看出, 两个时期的降水

量分布发生了系统性的变化: 城市化缓慢期, 北京地区南部为降水相对较多地区, 北部为降水相对偏少地区; 城市化快速期, 降水量的分布正好相反, 即南部地区变为降水相对较少地区, 北部变为降水相对偏多地区. 两时期变化的显著性检验证明, 北部的顺义站、怀柔站和古北口站降水相对增加显著, 分别通过显著性水平  $\alpha = 0.10, 0.02, 0.02$  的检验; 南部的丰台站、大兴站和房山站降水相对减少显著, 分别通过显著性水平  $\alpha = 0.02, 0.10, 0.05$  的检验.

为了进一步说明上述冬季降水分布的变化, 我们比较了城市化缓慢期和城市化快速期绝对降水量的变化. 北京地区 1961~1980 年冬季年平均降水量为 10.6 mm, 1981~2000 年为 7.5 mm, 约减少 29%. 这与华北地区近几十年冬季降水的趋势相同<sup>[27]</sup>. 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.

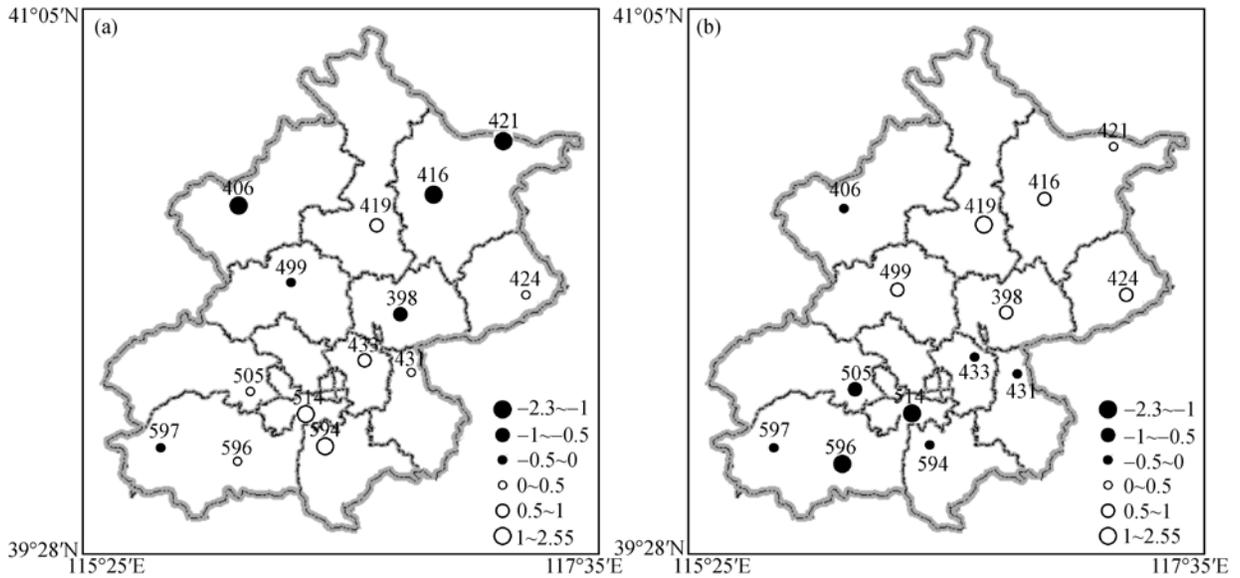


图 2 北京地区冬季平均标准化相对降水量分布  
(a) 1961~1980 年; (b) 1981~2000 年. 图例说明同图 1

为了对 1980 年前后北京地区冬季降水分布的系统性显著变化给出初步的解释, 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 3 为北京南部地区(丰台、大兴和房山)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 年南北部冬季平均气温差为  $0.8^{\circ}\text{C}$ , 1981~2000 年南北部冬季平均气温差为  $1.5^{\circ}\text{C}$ , 无参数 Mann-Whitney  $U$  假设检验表明, 两时期间的差异显著, 显著性通过了  $\alpha = 0.01$  检验. 城市化进程快速期北京南部地区的 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 年以前的格局. 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[30]表明: 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的分析表明, 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. 最新的研究<sup>1)</sup>印证了这一结论. 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. 这可能是造成北京地区冬季降水分布发生系统性变化的重要原因.

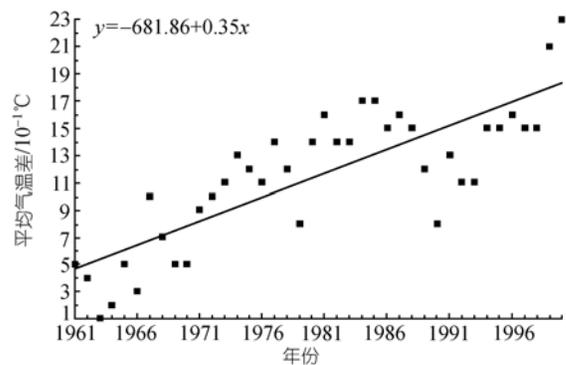


图 3 北京南部地区(丰台、大兴、房山站)与北部地区(顺义、密云、古北口站)冬季平均气温差回归曲线  
显著性水平  $\alpha = 0.01$

#### 4 总结及展望

除冬季发生系统性显著变化以外, 北京地区的降水分布(年平均和季节平均), 在快速和慢速城市化之间, 并未发生整体性的显著变化. 即使个别站有变化, 其显著性程度也不是很高. 这一方面说明, 城市化进程对降水分布影响的季节性; 另一方面也说明,

1) 郑思轶, 刘树华. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水影响的研究. 气候与环境研究, 2008

城市化对降水的影响程度不可过分地高估. 由于近年来北京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, 很有必要进一步开展研究, 特别是应注意与其他城市的对比研究, 如不同气候背景、不同污染程度、不同污染物成分、不同主要影响天气系统和不同城市下垫面状况等.

北京地区冬季降水多属层状云降水. 按照国外的研究结果, 从动力学和热力学角度, 城市对这类降水系统的影响可以忽略. 但从“城市干岛”和城市大气污染对降水微物理过程影响的角度考虑, 城市对降水的影响可能会表现出不同的特征. 云下蒸发过程对地面降水量的影响, 人工影响天气中过量播撒对

降水的抑制作用, 这些都是显而易见的常识, 但却是现有的相关研究中被普遍忽略的因素. 值得注意的是, 20世纪80年代以来, 华北地区也和全球一样, 冬季气温有增加的趋势, 再加上“城市热岛”和“城市干岛”的作用, 势必增加云下蒸发过程和雨量器中降水物的蒸发. 另外, 随着城市的发展, 北京的空气污染(特别是PM<sub>2.5</sub>)日趋严重, 降水凝结核的过量效应也是一个不可忽略的因素. 国外已有一些利用TRMM卫星资料证明城市污染抑制降水的研究和报道, 但由于北京地区没有TRMM卫星资料, 不能直接验证统计分析的结果, 不能不说是一种遗憾. 如果有冬季人工增雪试验作业, 应密切关注并积极参与, 可能会获得宝贵的资料, 以验证本文统计分析的结果.

**致谢** 感谢曾庆存院士的鼓励和建议, 感谢评审员提出的宝贵意见.

## 参考文献

- 1 P. A. 克拉特采尔, 著. 谢克宽, 译. 城市气候. 北京: 中国工业出版社, 1963. 158—175
- 2 Changnon S A Jr. The La Porte weather anomaly—fact or fiction? Bull Amer Meteorol Soc, 1968, 49: 4—11
- 3 Principal Investigators of Project METROMEX. METROMEX update. Bull Amer Meteorol Soc, 1976, 57: 304—308[doi]
- 4 Huff F A, Changnon S A Jr. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis. J Appl Meteorol, 1972, 11: 823—842[doi]
- 5 Changnon S A Jr, Shealy R T, Scott R W. Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis. J Appl Meteorol, 1991, 30: 126—134[doi]
- 6 Changnon S A Jr. Urban effects on severe local storms at St. Louis. J Appl Meteorol, 1978, 17: 578—586[doi]
- 7 Changnon S A Jr. Rainfall changes in summer caused by St. Louis. Science, 1979, 205: 402—404[doi]
- 8 Changnon S A Jr, Semonin R G, Huff F A. A hypothesis for urban rainfall anomalies. J Appl Meteorol, 1976, 15: 544—560[doi]
- 9 Lowry W P. Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. J Appl Meteorol, 1977, 16: 129—135[doi]
- 10 Sanderson M, Gorski R. The effects of Metropolitan Detroit—Windsor on precipitation. J Appl Meteorol, 1978, 17: 423—427[doi]
- 11 Ramachandra R A. Stochastic analysis of annual rainfall affected by urbanization. J Appl Meteorol, 1980, 19: 41—52[doi]
- 12 Palumbo A, Mazzarella A. Rainfall statistical properties in Naples. Mon Weather Rev, 1980, 108: 1041—1045[doi]
- 13 Bornstein R, Lin Q L. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. Atmos Environ, 2000, 34: 507—516[doi]
- 14 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 Meteorol, 2002, 41: 689—701[doi]
- 15 Dixon P G, Motte T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. J Appl Meteorol, 2003, 42: 1273—1284[doi]
- 16 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 Meteorol, 2005, 44: 717—730[doi]
- 17 Ernesto J, Ernesto R. Urban effects on convective precipitation in Mexico City. Atmos Environ, 1996, 30: 3383—3389[doi]
- 18 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

- 19 Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793—1796[[doi](#)]
- 20 Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J Appl Meteorol*, 2004, 43: 1038—1056[[doi](#)]
- 21 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
- 22 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
- 23 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
- 24 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
- 25 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
- 26 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 等. 城市化与北京地区降水分布变化初探. *气候与环境研究*, 2007, 12(4): 489—495
- 27 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: 地球科学*, 2004, 34(12): 1176—1183
- 28 王喜全. 北京城市气候与大气环境几个问题的研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007. 53—59
- 29 Hans von Storch, Francis W Z. *Statistical Analysis in Climate Reserch*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 99—126
- 30 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. 195—207