

# 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究

孙继松<sup>1, 2</sup> 舒文军<sup>1</sup>

1 北京市气象台, 北京 100089

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

**摘 要** 利用北京地区 20 个气象观测站最近 30 年 (1975~2004 年) 冬季 (12~2 月)、夏季 (6~8 月) 平均气温、降水量和降水日数资料, 研究了城市热岛效应的年代际变化及其对降水的影响。结果表明: (1) 最近 30 年来, 北京城区与北部山区之间的温度梯度在明显加大, 其中, 冬季温度梯度的平均增幅为  $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 夏季约为  $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。(2) 在北京城区南北两侧, 冬季和夏季的降水日数、降水量的相对变化趋势明显不同: 相对区域平均而言, 在城区及南部近郊区, 冬季降水日数和降水量都在明显增加; 夏季, 城区北侧的降水日数呈加速增长趋势, 尽管南部平原郊区的相对降水日数变化不大, 但降水量在相对减少。(3) 城市热岛效应对不同季节降水分布的影响, 可能是城乡温度梯度与盛行风相互作用的结果, 就北京地区而言, 地形的存在, 强化了城区与北部郊区之间的温度梯度: 冬季盛行北风气流, 在北部郊区, 热岛效应强迫产生的边界层下沉运动有可能造成局地降水天气过程相对减少, 城区及其南侧则相反; 夏季盛行南风气流, 随着城市热岛效应的增强, 发生在北部近郊区的弱降水天气过程趋于增多。

**关键词** 热岛效应 年代际变化 降水 季节变化

**文章编号** 1006-9895 (2007) 02-0311-10

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## The Effect of Urban Heat Island on Winter and Summer Precipitation in Beijing Region

SUN Ji-Song<sup>1, 2</sup> and SHU Wen-Jun<sup>1</sup>

1 *Beijing Municipal Meteorological Office, Beijing 100089*

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

**Abstract** The inter-decadal evolutions of urban heat island (UHI) and the seasonal precipitation distribution in Beijing area have been investigated by using winter (December - February) and summer (June - August) mean temperature, rain or snow days and precipitation data from the recent 30 years (1975 - 2004) at 20 meteorological stations, and finally, a possible mechanism how UHI effects the seasonal distribution of precipitation has been discussed by a simplified mesoscale dynamical principle. The results indicate that (1) the temperature gradient between Beijing urban areas and northern mountain region has been becoming stronger and stronger in the recent 30 years, specially in winter, its average rising speed is about  $0.6^{\circ}\text{C}$  per 10 years, and in summer, it is about  $0.2^{\circ}\text{C}$  per 10 years; (2) the relatively evolutionary tendencies for the days and amount of precipitation in winter and summer are evidently different on the southern and northern sides of Beijing urban areas: Comparing with regional average, the days and amount of precipitation in urban areas and southern suburb are obviously increasing in winter, however, rain days in northern suburb are becoming more and more in summer, although rain days in southern suburb do not show evidently

**收稿日期** 2005-09-14, 2006-03-20 收修定稿

**资助项目** 北京市科技计划项目“奥运会气象保障科学技术试验与研究”, 中国气象局资助项目 CMATG2005Y03

**作者简介** 孙继松, 男, 1965 年出生, 硕士, 正研高工, 目前主要从事中短期天气预报及灾害性天气机理研究工作。

E-mail: sunjs\_0314@sina.com

change, the amount of precipitation is obviously decreasing; (3) a simplified mesoscale theory shows that the different effect of UHI on seasonal precipitation distribution is possibly related to the interaction between seasonal prevailing wind and the temperature gradient of urban areas and suburb. In Beijing region, topography makes the temperature gradient between urban areas and northern suburb strengthen, therefore, in winter when the prevailing flow is north wind, the descending motion in boundary layer forced by UHI is disadvantageous for local precipitation weather in northern suburb and the days and amount of precipitation decrease, and in urban areas and southern suburb, the situation is opposed to in northern. However, in summer when the prevailing flow is southern wind, the strengthening UHI is advantageous for occurring weak precipitation in northern suburb.

**Key words** urban heat island, inter-decadal change, precipitation, seasonal evolution

## 1 引言

气象学家们已经注意到城市化进程对全球气候变化的影响。统计分析证实,一些特大型城市年平均气温的增暖幅度明显大于全球平均变暖的幅度<sup>[1, 2]</sup>,城市热岛效应的影响造成了评估全球气候变暖幅度的不确定性<sup>[3, 4]</sup>。数值试验<sup>[5]</sup>表明,在大城市群增大扩展的地区,近地面气温全年都在升高,增加幅度为 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ ,这种增温效应以大城市群为中心向四周比较均匀的扩散。城市热岛效应不仅造成城市及其周边地区气温的升高,越来越多的观测研究表明,城市热岛效应还可能通过流场的作用,对冬夏季降水过程产生影响。Daniel<sup>[6]</sup>认为,在气候状态下,城市化和工业污染将造成下游的降雨、降雪量增加。孙继松等<sup>[7]</sup>的研究表明,在夏季晴空背景下,中午前后,城市热力强迫有利于形成城市中尺度低空风场辐合线,并加强边界层内中心城区风场垂直切变,这种强迫有利于对流降水的维持。桑建国等<sup>[8]</sup>发现,在冬季同样存在这种热岛效应的强迫作用,即城市热岛效应容易形成一个以市区为中心的低压系统以及指向市中心的气压梯度力。城市热岛效应与环境流场之间的相互作用过程,还有可能对更大范围的降水分布产生影响。陈隆勋等<sup>[9]</sup>的观测研究指出,长江三角洲地区降水量增加的趋势可能与该地区气温迅速变暖有关,这种区域性变暖是由于一些中心城市联合而成的“区域性热岛”而形成的。苗曼倩等<sup>[10]</sup>和李维亮等<sup>[11]</sup>的数值模拟证实,由于海风、(江)湖风环流与城市热岛效应之间存在相互增强的过程,长江三角洲地区沿江一带容易形成水平风速辐合。也就是说,该地区降水量的增加可能与边界层内水平风速辐合带的形成有直接关系。

气候意义上的城市热岛,本质上是由于城市化的人为因素与局地天气气候变化相互作用的结果。

下垫面性质的改变、人为热源的排放、环境大气因素的不同等都会造成城乡之间出现气温差异,而气温差异的出现必然强迫局地流场发生调整,从而有可能产生局地天气气候要素(例如风、云以及降水等)的差异,局地天气气候要素上的差异反过来对城乡之间的气温差异产生影响。由于我国大多数城市处于季风控制区,年降水量中绝大部分来源于夏季,而夏季城市热岛效应表现最弱<sup>[12]</sup>,因此,单纯用年平均或夏季平均降水量来判断城市发展过程对局地降水分布的影响是很难令人信服的。另一方面,季风区的平均风场具有明显的季节变化,“城市上游”和“城市下游”在不同季节是相互转换的。那么,城市热岛效应与平均流场之间的相互作用对局地降水分布产生了何种影响?这种影响在不同季节存在怎样的区别?这些问题不仅是城市气候学的根本问题,也是城市精细化天气预报理论的基础问题。本文将结合北京城市热岛的演变情况,对北京城市热岛的年代际变化特征以及对冬、夏季降水分布的影响进行研究,并就冬、夏季降水分布差异的可能原因进行简要的讨论。

## 2 资料

本文使用的资料为北京地区 20 个气象观测站(观象台、丰台、海淀、石景山、朝阳、通州、大兴、房山、霞云岭、门头沟、斋堂、昌平、延庆、佛爷顶、怀柔、汤河口、密云、上甸子、顺义、平谷)1975~2004 年冬季(12 月~2 月)、夏季(6 月~8 月)逐年平均降水量、平均气温资料,其中石景山资料始于 1977 年,佛爷顶的资料始于 1978 年。鉴于北京地区大多数冬季天气过程的降雨(雪)量很小,同时,为了尽可能避免遗漏夏季相对孤立的中小尺度天气系统降水过程,在本文中,某一个测站的日降水量 $\geq 0.0\text{ mm}$ (微量降水)记为一个降水日。

### 3 北京城市化进程与城市热岛效应的演变

由于城市热岛效应的影响区域比城区面积大得多<sup>[13]</sup>,如何从实际温度观测资料中将城市热岛效应从自然因素中完全分离出来,目前仍然没有完全解决。例如,在北京地区城市热岛的相关研究<sup>[14~16]</sup>中,由于热岛强度的定义方法不同,造成研究结果差异较大,可比性很差。在这里,我们无意讨论城市热岛强度定义方式的科学性,不过,由于本文旨在了解北京地区城市热岛效应对降水分布产生的可能影响,首先有必要对 30 年来北京城乡之间气温相对变化的演变进行分析。

为了尽可能地消除测站海拔高度上存在的差异、大气环流背景本身的年代际变化对平均气温造成的影响,首先将北京地区 20 站的平均气温按照  $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  的垂直递减率统一订正到平原地区的平均海拔高度,然后分别计算 1975~1984 年、1985~1994 年、1995~2004 年北京地区 20 站 10 年的平均气温与同期各站平均气温的差值(即空间距平值)。从冬季平均气温空间距平(图 1)的年代际变化可以看到:1975~2004 年的 3 个 10 年间,市区气温的相对增幅并不大,暖中心的偏高幅度分别为  $0.8^{\circ}\text{C}$ 、 $1.1^{\circ}\text{C}$ 、 $1.2^{\circ}\text{C}$ ,但是,城区与北部山区之间的气温梯度正以  $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速度在加强:过去的 30 年中,城区与北部山区之间的最大温差分别为  $2.7^{\circ}\text{C}$ 、 $3.3^{\circ}\text{C}$ 、 $3.9^{\circ}\text{C}$ 。这表明,尽管城市的发展从总体上看,造成了城市热岛效应明显加强,然而,由于热岛效应存在以城区为中心向四周扩散的现象,使得这种增温效应在一个比城区大得多的范围之内被重新分布:比较 1995~2004 年和 1975~1984 年  $0.8^{\circ}\text{C}$  等值线所包含的面积(略去西南山区的暖中心)可以发现,最近 10 年的面积是 20 年前面积的 4 倍以上。但是,这种向外扩散过程明显地受到了地形的阻挡,造成山区与城区之间的温度梯度明显加大,而城区与南部平原郊区之间的温度梯度并没有加强,反而有减弱的趋势。这也从一个侧面证实了城市热岛效应可能只存在于近地面非常薄的一层大气中,变暖趋势并不表明整个对流层都在升温<sup>[17]</sup>,因此,在评估城市热岛对周边环境大气温度的影响时,城市所处的地形背景可能是需要特别关注的一个因素。

从冬季平均气温空间距平的年代际变化还可以发现,城市发展还可能造成了暖区中心位置的变化,并对热岛的分布形态产生了明显影响:1975~1984 年,北京城近郊区的暖中心位于城区西侧(门头沟城关附近到石景山),气温空间距平的暖区分布呈西南-东北走向;随着中心城区、东部和南部郊区相对变暖,尤其是通州附近暖中心的出现(图 2a),最近 10 年的暖区分布已经演变为东南-西北走向(图 1c)。

在夏季,城市热岛效应造成的水平温度梯度比冬季弱得多:根据最近 30 年的资料,城区与北部山区之间的温度梯度以  $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的平均速度增强,约为冬季的三分之一;即便是在城市热岛效应最强的最近 10 年,城区与北部山区的最大温差也只有  $1^{\circ}\text{C}$  左右,不及冬季的三分之一(图略)。尽管如此,夏季气温空间距平的年代际差异仍然比较显著,比较最近 10 年(1995~2004 年)与 1975~1984 年的冬、夏季气温的相对变化(图 2a、b)可以看到,它们在大部分地区的演变趋势基本一致:北京城区和东南平原郊区正在迅速增温,北部山区和西南山区则相对降温,其中,城区和东南郊区的相对增温幅度超过  $0.6^{\circ}\text{C}$ ;西南山区的相对降温最明显,幅度也都超过  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。夏季气温的这种相对变化,同样造成了暖区形态分布由西南-东北走向演变为东南-西北走向。

综上所述,最近 30 年来,城市热岛效应造成北京城区及平原地区与山区之间的温度梯度在明显加大,冬季更加明显。同时,城市发展布局的变化对城市热岛的形态分布可能产生了明显影响,北京地区的暖区分布由西南-东北走向演变为东南-西北走向。

### 4 北京地区冬夏季降水相对变化的年代际演变

某一区域降水量和降水日数的年代际绝对变化主要是由于大气环流背景差异造成的。对于经度和纬度跨度不超过  $2^{\circ}$  的内陆区域而言,区域内各测站降水参量(降水量、降水日数)与区域平均降水参量之间的相对变化(即各站与区域平均之间的差值),可以被认为能够在很大程度上表征局地环境差异对降水系统的影响。

从北京地区冬季降水日数相对变化的年代际演变(图 3)可以看到,1975~1984 年冬季降水日数

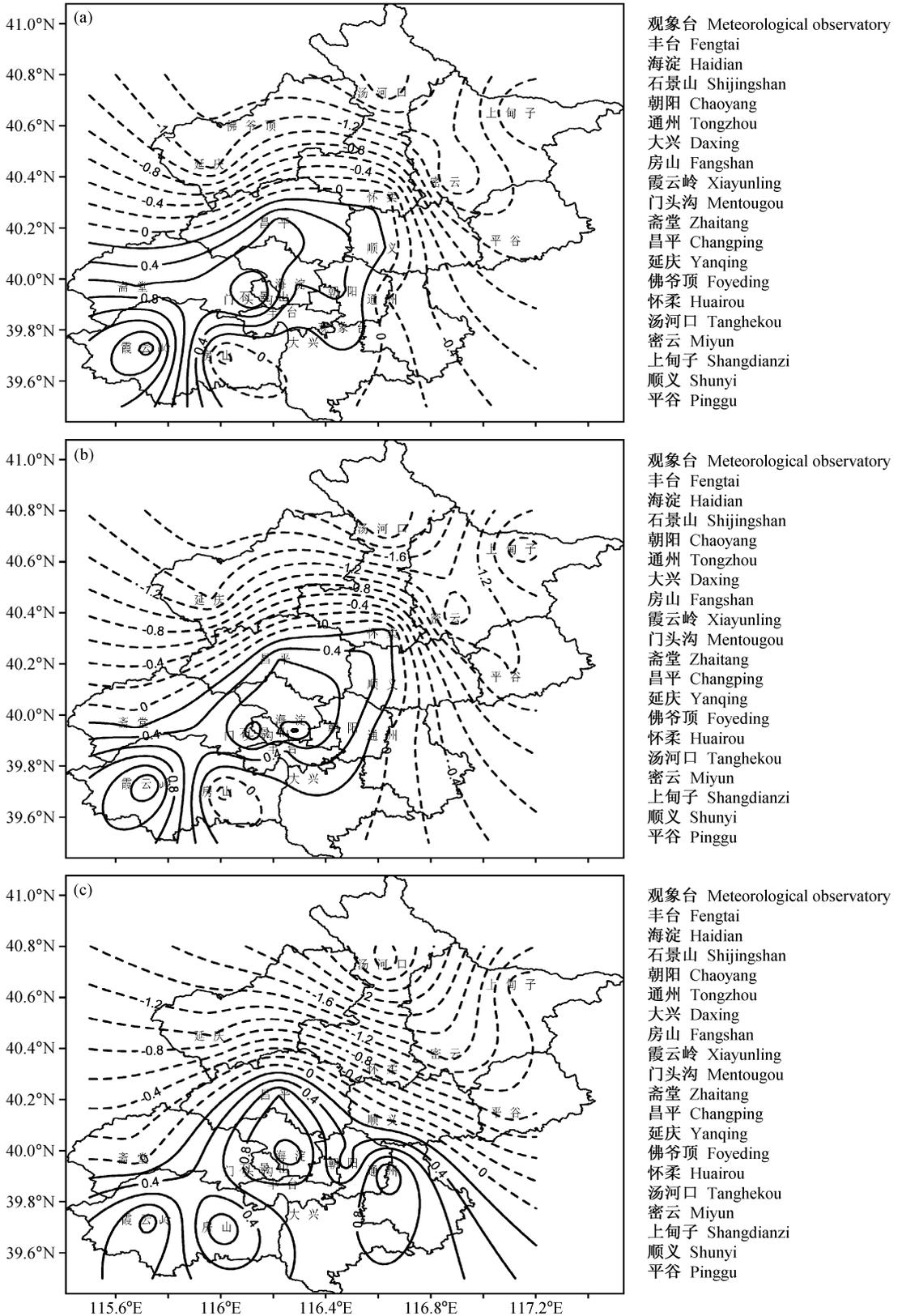


图1 北京地区冬季气温空间距平(间隔: 0.2°C)分布: (a) 1975~1984年; (b) 1985~1994年; (c) 1995~2004年  
 Fig. 1 The decadal spatial departures of winter temperature in Beijing region (interval; 0.2°C): (a) 1975-1984; (b) 1985-1994; (c) 1995-2004

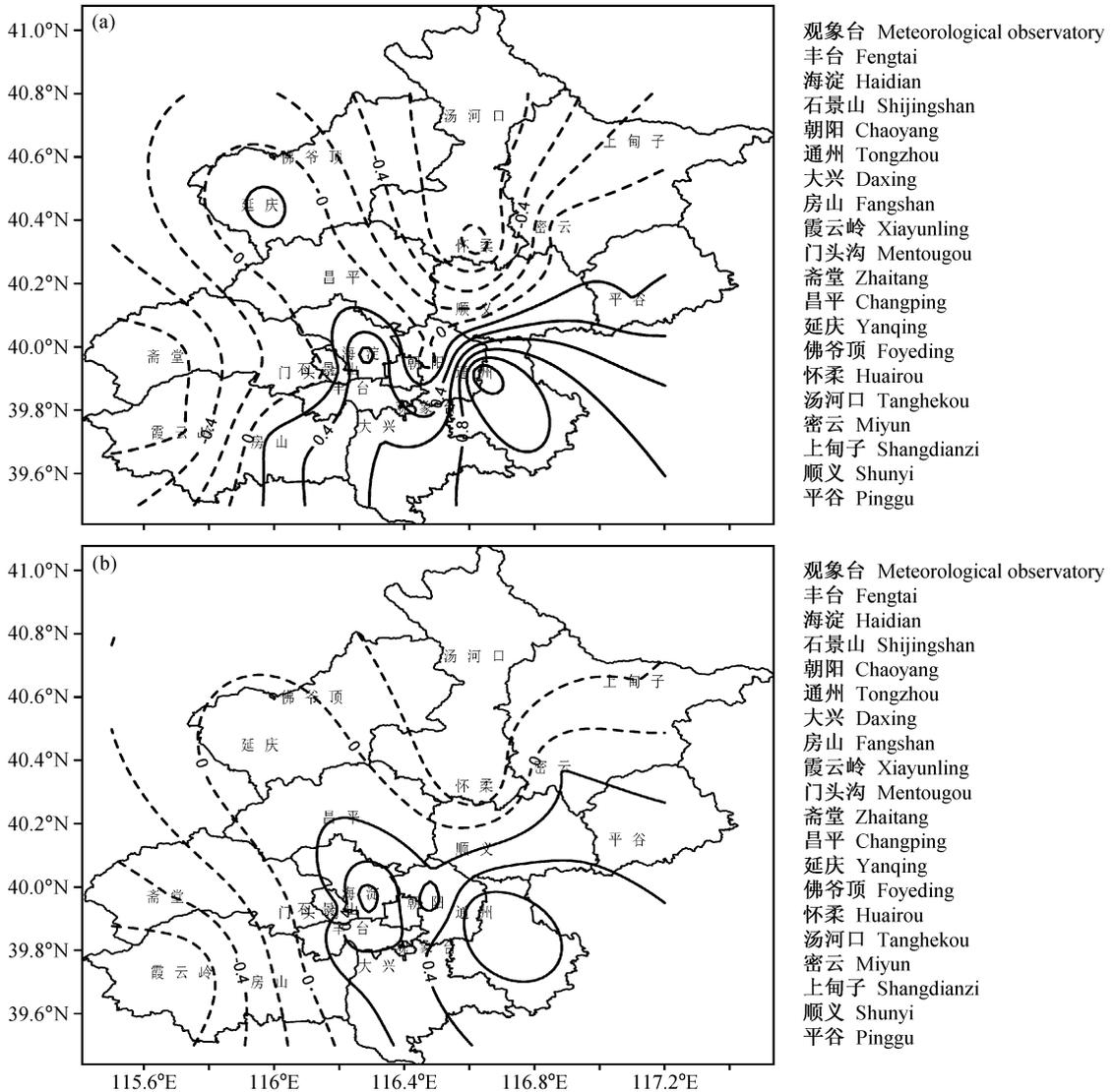


图 2 北京地区 1995~2004 年与 1975~1984 年气温空间距平的差 (间隔: 0.2°C): (a) 冬季; (b) 夏季  
 Fig. 2 The spatial departure discrepancies of temperature between the two decades (1995-2004 and 1975-1984) in Beijing region (interval: 0.2°C): (a) Winter; (b) summer

空间距平的正负分界线基本上是沿着山脉走向、靠近平原一侧分布的, 显示出该期间地形在局地环流系统演变过程中的核心作用, 总体而言, 降水日数自西北向东南方向逐渐减少, 但是城区的降水日数, 在平原地区相对最少。随后的两个 10 年, 西北部山区的相对降水日数在逐渐减少, 城区及其东南部近郊区在逐渐增加, 最近 10 年, 城区降水日数已经与西北部山区相当。

降水量年代际相对变化 (图略) 证实了城区和东南近郊区冬季降水日数的这种相对变化, 1975~1984 年城区冬季降水量表现为明显的相对负距平,

1985~1994 年城区降水量与区域平均降水量相当, 1995~2004 年, 城区降水量已经超过了区域平均降水量, 东南部近郊区甚至出现了一个比西北部山区更强的降水中心。这表明, 随着城市规模的不断扩张, 城市热岛效应对北京地区冬季降雨 (雪) 分布特征的影响可能正在逐渐显现。

北京地区夏季降水日数的年代际演变与冬季明显不同, 30 年来, 相对于区域平均而言, 夏季北京城区与区域平均的降水日数大体相当。但是, 在城区南北两侧的降水日数变化趋势明显不同, 南侧平原郊区相对降水日数 30 年间变化很小, 但在靠近

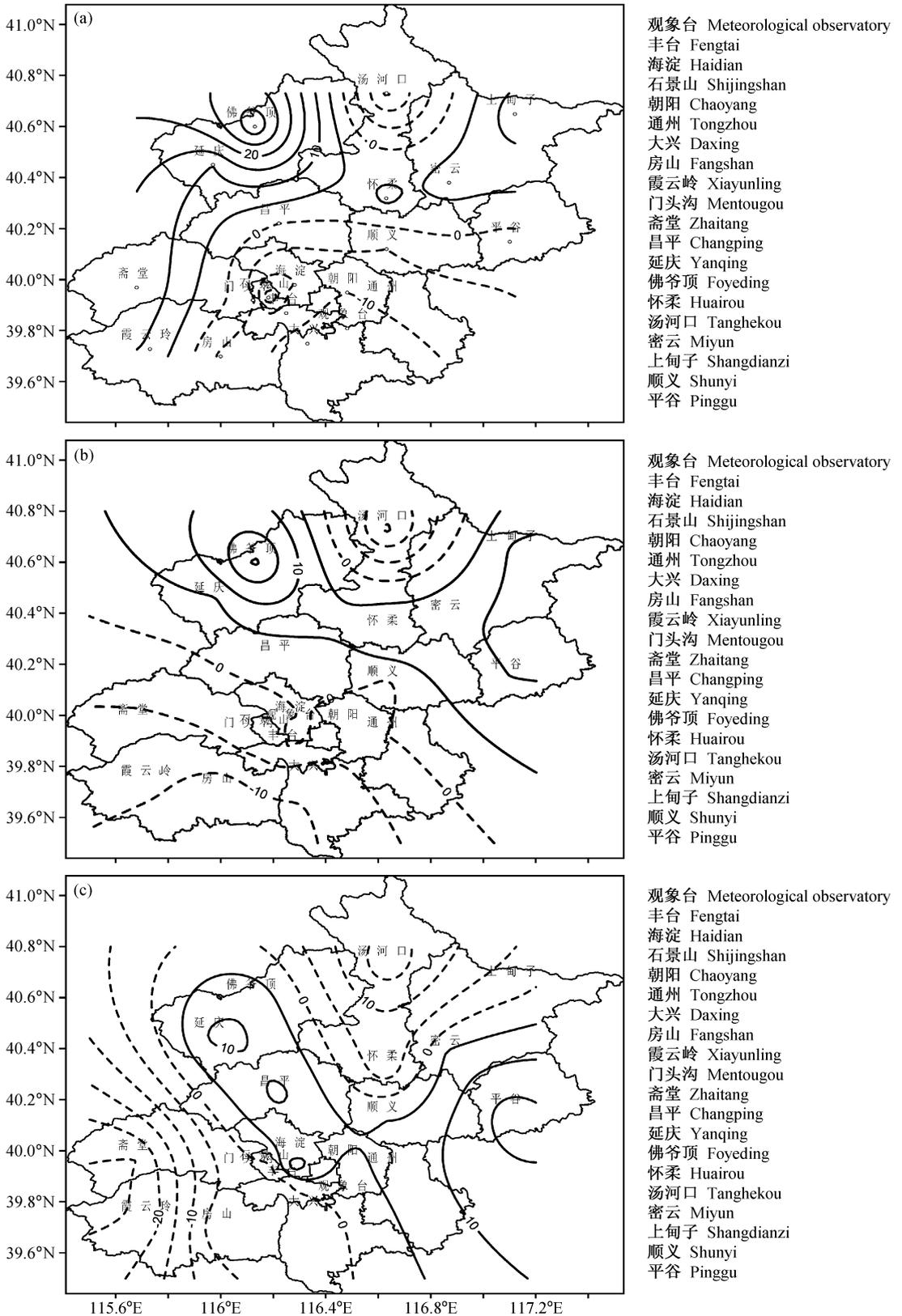


图3 北京地区冬季降水日数的空间距平百分率分布(间隔:5%);(a)1975~1984年; (b)1985~1994年; (c)1995~2004年  
 Fig.3 The decadal spatial percentage departures of winter precipitation days in Beijing region (interval: 5%); (a) 1975 - 1984; (b) 1985 - 1994; (c) 1995 - 2004

城区的北部郊区, 其降水日数相对于区域平均而言在迅速增加, 造成降水日数由北郊向南郊递减的梯度迅速加大。从 1975~1984 年平均来看 (图略), 降水日数的相对变化基本上是沿山脉走向分布的, 即山区的降水日数偏多, 尤其是西部山区。但是随后的 2 个 10 年 (图略), 在北郊平原与山区的过渡带, 相对降水日数迅速增加, 形成了一个东西向分布的多雨日带: 1985~1994 年 10 年平均的降水日数中心位于城区的东北方向 (怀柔区与顺义区之间), 1995~2004 年城区的西北方向 (昌平区) 出现了一个降水日数最多的中心, 构成了一个东西向分布、双中心的多雨日带。

最近 10 年 (1995~2004 年) 与 1975~1984 年冬、夏季降水日数 10 年空间距平的相对变化 (图 4) 较好地描述了城市发展对不同季节的局地降水系统的影响: 相对区域平均而言, 冬季降水日数的相对变化幅度明显大于夏季, 冬季的最大相对变化 (正负中心值的差) 超过 60%, 夏季约为 30%。另一方面, 夏季降水日数的变化主要体现在靠近城区的北部近郊区降水日数增加, 而城区降水日数并没有发生明显变化; 冬季, 以城区为中心的平原地区, 降水日数都在明显增加, 其中城区和东部郊区的增加幅度超过 15%, 中心城区的降水日数甚至超过了 20%。

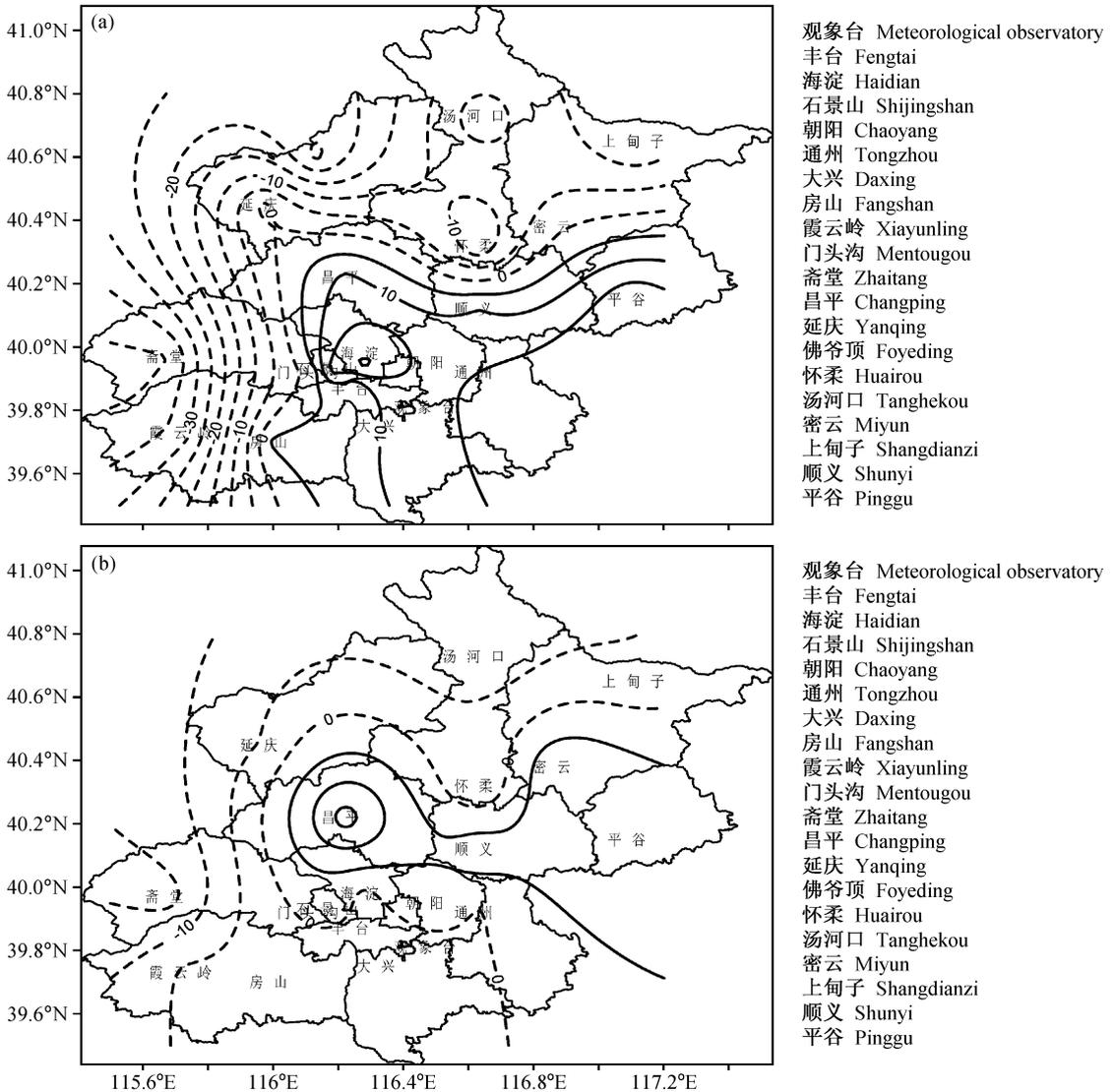


图 4 北京地区 1995~2004 年与 1975~1984 年降水日数空间距平的差 (间隔: 5%): (a) 冬季; (b) 夏季  
 Fig. 4 The spatial departure discrepancies of precipitation days between the two decades (1995 - 2004 and 1975 - 1984) in Beijing region (interval: 5%): (a) Winter; (b) summer

夏季相对降水日数的年代际变化与降水量之间的对应关系远不如冬季清楚。从最近 10 年 (1995~2004 年) 降水量的空间距平与它之前 2 个 10 年 (分别对应 1975~1984 年和 1985~1994 年) 的差异 (图略) 可以看到非常类似的变化: 南部平原郊区和整个东部地区的相对降水量明显减少, 西部地区降水量相对增加。冬、夏季降水量与降水日数对应关系的差异, 显然与不同季节的局地天气过程降水量的变率有关, 发生在冬季的局地降水天气过程的降水量一般很小, 降水量与降水日数构成了良好的对应关系; 而夏季的局地降水天气过程一般以对流性降水为主, 过程降水量变率很大。另一方面, 尽管在构成局地环境的各种要素中, 地形分布几乎是不变的, 但是, 由于地形对夏季降水量分布具有重大影响<sup>[18]</sup>, 而且与风向、气流的垂直分布、不稳定条件等多种大气环流要素构成了复杂的相互作用<sup>[19, 20]</sup>, 因此, 地形的动力、热力作用也是夏季降水日数与降水量之间很难构成良好对应关系的重要因素。

上述分析表明, 城市热岛的强度变化和环场的季节性更替, 可能都对冬、夏季的局地性降水系统产生了明显影响: 冬季盛行西北气流, 降水日数和降水量的空间距平呈西北-东南走向, 随着城市的不断扩张, 相对区域平均而言, 城区及其下游方向 (南部郊区) 的降水日数和降水量都在明显增加; 夏季盛行偏南气流, 城市下游方向 (城区北侧) 的降水日数呈加速增长趋势, 尽管南部平原郊区的相对降水日数变化不大, 但降水量在明显减少。另一个值得注意的变化是, 整个东部郊区的降水量也在明显减少。

## 5 城市热岛效应对冬、夏季降水分布影响的一种可能机制

上一节的观测研究表明, 北京地区降水过程局地变化似乎与城市热岛效应存在密切联系, 城市的规模越大, 或者说城市热岛强度、影响区域越大, 城市热岛效应对区域性降水分布的影响作用也就愈加明显; 另一方面, 季节性环境风场的变化对局地性降水落区也存在明显的影响。那么, 热岛效应与环境风场是通过什么样的相互作用过程对降水的相对变化产生影响的?

为了简化讨论, 取  $x$  坐标沿盛行风方向, 并假定水平方向只存在  $x$  方向上的扰动量, 我们可以把

热岛环流简化为  $x-z$  平面上的二维问题。热岛效应造成的中尺度扰动满足 Boussinesq 近似:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = \lambda \theta, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

其中,  $\pi$  是中尺度扰动气压的 Exner 函数, 即  $\pi = c_p \Theta_0 (p/p_0)^{R/c_p}$ ,  $\lambda$ 、 $k$  都是常用参量, 这里不再赘述。对 (1)、(3) 式分别作  $z$ 、 $x$  的偏微商, 有

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial}{\partial z} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) + k \frac{\partial^3 u}{\partial z^3}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}. \quad (6)$$

利用 (5) 式和 (6) 式, 并略去  $\partial^3 / \partial z^3$  项的影响, 有

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (7)$$

为了讨论热岛环流的平均特征, 对 (7) 式取时间平均, 利用 (4) 式, 令  $D = \partial u / \partial x$ , 当  $u \neq 0$  时, 可以得到:

$$\overline{\frac{\partial D}{\partial z}} = -\frac{\lambda}{u} \overline{\frac{\partial \theta}{\partial x}} - \overline{\frac{w}{u} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}. \quad (8)$$

也就是说, 在时间平均状态下, 如果略去湍流扩散项  $[(w/u)(\partial^2 u / \partial z^2)]$  的影响, 平均温度梯度和水平风速的大小将直接影响到水平散度的垂直变化。

由于热岛效应是沿城市中心区向四周逐渐减弱的, 在城区的上风方,  $\partial \theta / \partial x > 0$ , 因此, 水平散度随高度减小, 表现为低层辐散气流随高度减弱, 逐渐转变为上层辐合运动, 或者辐合气流随高度逐渐加强。根据质量方程, 边界层内的垂直运动表现为下沉气流; 而在城区的下风方, 水平散度随高度变化正好相反, 边界层内的垂直运动表现为上升气流。水平温度梯度越大, 边界层内的垂直运动速度也越大。另一方面, 在温度梯度相同的情况下, 平均水平风速的降低, 也会造成垂直运动速度加大。

在冬季, 盛行气流为偏北风, 随着城市热岛效应的加强, 北京上游方向 (北部) 水平温度梯度在不断加大, 边界层内不断增强的下沉运动不仅削弱了天气尺度降雨 (雪) 系统的上升运动, 而且有可

能对地形强迫产生的上升气流产生了抑制作用。因此,这种作用不仅使得系统性降雨(雪)天气过程趋于减弱,也不利于局地降雨(雪)天气过程的发生。也就是说,相对城区而言,北部郊区的降水量、降水日数趋于减少。而在下游方向的城区及其以南,尽管温度梯度( $<0$ )的绝对值明显小于上游,但是由于城市建筑物等对气流的阻滞作用,使得扰动风速减小,仍然可能在边界层内产生明显的上升运动,造成降水量、降水日数相对增加。其中,城市中轴线南侧附近的负温度梯度最强,在不考虑扰动风速差异的情况下,热岛效应造成的上升运动最强。对比图 2a 和图 4a,可以清楚地看到热岛效应温度梯度的年代际演变对降水分布产生的这种影响。

夏季盛行南风气流,北部郊区位于城市热岛的下游,边界层内的上升运动有利于局地弱降水过程的产生。尽管夏季城市热岛效应造成的水平温度梯度比冬季弱得多,但是,热岛效应造成的边界层内上升气流正好位于地形的迎风坡一侧,两者的共同作用有可能进一步造成局地降水过程的增加。而在城市的上游(南部),夏季热岛效应造成的温度梯度比城市下游地区更弱,上游地区边界层内的垂直下沉运动可能不足以对降水天气过程产生根本性影响。因此,平均而言,夏季城市热岛效应对城区南部及其近郊区降水系统产生的影响应该明显小于北郊。

以上分析说明,城市热岛效应对不同季节降水分布的影响,可能是通过城乡温度梯度与盛行风相互作用来实现的。就北京地区而言,地形的存在,强化了城区与北部郊区之间的温度梯度,在冬季北风气流的作用下,北部郊区局地降水天气过程相对减少,城区及其南侧则相对增加;夏季盛行南风气流,随着城市热岛效应的增强,发生在北部近郊区的局地弱降水天气过程将相对增多。

## 6 结论

本文对最近 30 年(1975~2004 年)北京地区 20 个气象观测站的温度、降水日数和降水量的水平空间距平年代际变化进行了分析研究,利用简化的中尺度动力学原理较好地解释了城市热岛效应对冬、夏季降水的影响,主要结论如下:

(1) 30 年的气温资料分析表明,北京城区与北

部山区之间的气温梯度在明显加大,其中,冬季温度梯度的平均增幅为  $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,夏季约为  $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。随着城市的发展,热岛形态也发生了明显的改变,由西南-东北走向演变为东南-西北走向。

(2) 热岛效应存在以城区为中心向四周扩散的现象,使得城市热岛造成的增温效应在一个比城区大得多的范围之内被重新分布。在北京地区,由于热岛的扩散作用受到西侧和北侧地形的阻挡,造成城区南北两侧的水平温度梯度变化趋势明显不同。

(3) 北京地区冬季和夏季的降水日数、降水量的相对变化趋势明显不同:相对区域平均而言,在城区及南部近郊区,冬季降水日数和降水量都在明显增加;夏季,城区北侧的降水日数呈加速增长趋势,尽管南部平原郊区的相对降水日数变化不大,但降水量在相对减少。

(4) 城市热岛效应对冬、夏季降水日数和降水量分布的影响,可能是城市热岛效应与环境风场相互作用的结果:盛行风的下游方向,温度梯度产生的边界层内垂直上升运动有利于局地降水过程的发生,而在上游方向则相反。就北京地区而言,地形的存在,强化了城区与北部郊区之间的温度梯度,在冬季北风气流的作用下,北部近郊区局地降水天气过程相对减少,城区及其南侧则相对增加;夏季盛行南风气流,随着城市热岛效应的增强,发生在北部近郊区的局地弱降水天气过程将相对增多。

**致谢** 作者就本文的部分内容与北京市气象局季崇萍博士进行过有益的讨论,两位审稿人提出了很好的修改建议,在此一并谢忱!

## 参考文献 (References)

- [1] Fan Daidu, Guo Yanxia, Li Congxian, et al. Shanghai regional response to global change. Abstracts of International Symposium on Climate Change, Beijing, 2003. 160
- [2] Chung Yong-Seung, Yoon Ma-Byung. On climate variations and related factors observed in Korea. Abstracts of International Symposium on Climate Change, Beijing, 2003. 103
- [3] Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. *J. Climate*, 1988, **11**: 1099~1123
- [4] 龚道溢,王绍武. 全球气候变暖研究中的不确定性. 地学前沿, 2002, **9** (2): 371~376  
Gong Daoyi, Wang Shaowu. Uncertainties in the global warming studies. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9** (2): 371~376
- [5] 刘洪利,李维亮,周秀骥,等. 长江三角洲地区区域气候模

- 式的发展和检验. 应用气象学报, 2005, **16** (1): 24~34
- Liu Hongli, Li Weiliang, Zhou Xiuji, et al. A regional scale climatic model over the Changjiang Delta; Development, evaluation and analysis. *Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2005, **16** (1): 24~34
- [6] Daniel R. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, **287** (10): 1793~1796
- [7] 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用. 大气科学, 2006, **30** (2): 221~234
- Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 221~234
- [8] 桑建国, 刘万军. 冬季城市边界层风场和温度场结构分析. 气象学报, 1990, **48** (4): 459~468
- Sang Jianguo, Liu Wangjun. An analysis on flow and temperature structure of wintertime urban boundary layer. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1990, **48** (4): 459~468
- [9] Chen Longxun, Zhu Wenqin and Zhou Xiejie. Characteristics of environmental and climatic change in ChangJiang Delta and its possible mechanism. *Acta Meteor. Sinica*, 2000, **14** (2): 129~140
- [10] 苗曼倩, 唐有华. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化影响. 高原气象, 1998, **17** (3): 280~289
- Miao Manqian, Tang Youhua. Interaction between sea and land breeze and heat island circulation during the summer over the delta region on Yangzi river and urbanization effect on climate. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1998, **17** (3): 280~289
- [11] Li Weiliang, Liu Hongli, Zhou Xiuji. Analysis of influence of Taihu lake and urban heat island on local circulation in Yangze Delta. *Science in China* (Series D), 2003, **46** (4): 405~415
- [12] Arnfield A J. Two decades of urban climate research; A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 2003, **23** (1): 1~26
- [13] 丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究. 大气科学, 2002, **26** (3): 412~420
- Ding Jincai, Zhang Zhikai, Xi Hong, et al. A study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 412~420
- [14] 周明煜, 曲绍厚, 李玉英, 等. 北京地区热岛和热岛环流特征. 环境科学. 1980, **1** (5): 12~18
- Zhou Mingyu, Qu Shaohou, Li Yuying, et al. The heat island and its circulation characteristics in Beijing. *Environmental Science* (in Chinese), 1980, **1** (5): 12~18
- [15] 张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变. 应用气象学报, 2002, **13** (增刊): 43~50
- Zhang Guangzhi, Xu Xiangde, Wang Jizhi, et al. A study of characteristics and evolution of urban heat island over Beijing and its surrounding area. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Suppl.): 43~50
- [16] 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温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 Shuqiu. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (1): 39~45
- [17] NRC ( National Research Council ). *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. Washington D C: National Academy Press, 2000. 85
- [18] 张朝林, 季崇萍, Kuo Ying-Hwa, 等. 地形对“00.7”北京特大暴雨过程影响的数值研究. 自然科学进展, 2005, **15** (5): 572~578
- Zhang Chaolin, Ji Chongping, Kuo Ying-Hwa, et al. A numerical simulation of the topographic effect on ‘00.7’ torrential rain process happened in Beijing. *Progress of Nature Science* (in Chinese), 2005, **15** (5): 572~578
- [19] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响. 高原气象, 2005, **24** (1): 62~69
- Sun Jisong. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (1): 62~69
- [20] 孙继松, 石增云, 王令. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究. 气候与环境研究, 2006, **11** (1): 76~84
- Sun Jisong, Shi Zengyun, Wang Ling. A study on topography impacting on distribution of hail events. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (1): 76~84