

郑祚芳. 2016. 北京地区夏季降水与气温的对应关系. 气象, 42(5):607-613.

北京地区夏季降水与气温的对应关系^{*}

郑祚芳

中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

提 要: 随着全球气候的持续变暖, 各种高影响天气气候事件的发生频率和强度均有明显增强。由于大气热力条件与降水的变化有着密切的联系, 开展降水与气温对应关系的研究具有重要的科学意义。本文应用北京地区 20 个气象站 1978—2012 年夏季逐日降水及气温资料, 分析了不同量级降水与气温的对应关系及城、郊区间的差异。结果表明: (1) 北京地区降水量随气温的升高有一个先升后降的过程。中雨及以上量级的降水, 当气温达到临界值后雨量保持平稳, 随气温变化不明显。而当气温进一步上升到一定程度后, 降水量开始随气温升高而迅速减弱。越是强度大的降水, 其在达到峰值前随气温的增速越接近 Clausius-Clapeyron 变率。 (2) 降水频率、强度随气温变化的临界值各不相同。当气温超过临界值后, 降水频率及强度均开始减弱。 (3) 城、郊区间不同量级的降水随气温具有相似的变化趋势, 但到达临界值前城区降水随气温的增速比郊区更大, 表明城区降水对气温的敏感性比郊区更强。鉴于城市化对区域气候的主要影响是导致热岛效应的增强, 这将有助于我们从另一个角度探讨城市化效应对降水的影响机制。

关键词: 降水, 气温, Clausius-Clapeyron 关系, 北京

中图分类号: P423, P426

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.010

A Study on Relationship Between Summer Precipitation and Air Temperature in Beijing Area

ZHENG Zuofang

Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Based on the observation data of daily precipitation and air temperature of 20 weather stations in Beijing Area from 1978 to 2012, the empirical relationship between precipitation and air temperature and the differences between urban and suburban areas in summer (June to August) were analyzed. The results showed that: (1) Daily precipitation presented a first increasing then decreasing trend with air temperature rising. For moderate and heavy rainfalls, precipitation kept stable and varied weakly with air temperature increasing after air temperature reached a threshold. While the air temperature rose further to a certain threshold value, precipitation decreased rapidly with air temperature rising. Before it reached the maximum value, the heavier the precipitation was, the closer the precipitation increase rate was to Clausius-Clapeyron (CC) variability. (2) The critical values of precipitation frequency and intensity varying separately with air temperature variation were not the same. When air temperature was higher than the threshold, precipitation frequency and intensity also began to weak. The different magnitudes of precipitation varying with the air temperature had similar trends between the urban and suburban areas. However, precipitation increase rate before precipitation reached the maximum value was bigger in urban area than in the suburb, which indicated that precipitation in urban areas was more sensitive to temperature than that in suburbs.

* 国家自然科学基金项目(41575010 和 41175015)、中国科学院战略性先导专项(XDA05090202)共同资助

2014 年 12 月 23 日收稿; 2015 年 11 月 4 日收修定稿

作者: 郑祚芳, 主要从事城市气候变化相关研究. Email: zfzheng@163.com

Key words: precipitation, air temperature, Clausius-Clapeyron relationship, Beijing

引 言

随着全球气候的持续变暖,各种高影响天气气候事件在各地频繁出现,有关大城市的降水问题正受到人们越来越多的关注(于淑秋, 2007; 吴庆梅等, 2012; 王令等, 2012; 周宁芳等, 2014)。王迎春等(2012)基于近年来城市气象观测与模拟研究的最新进展,展望了城市气象学科未来的发展方向和重点研究领域,其中有关城市降水的变化及预测被认为是急需解决的关键科学问题之一。

已有的研究表明(Boer, 1993; Allen et al, 2002; Pall et al, 2007),在全球及区域尺度范围内,热力条件与降水的变化均有着密切的联系,因此开展降水与气温对应关系的研究具有重要意义。Clausius-Clapeyron 方程(以下简称 CC 关系)

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{L_v(T)e_s}{R_v T^2} \quad (1)$$

式中, e_s 为饱和水汽压, T 为环境气温, L_v 为大气蒸发潜热, R_v 是大气水汽压常数。该方程描述了理想大气中饱和水汽压作为环境温度、环境气压函数的变化特征, Boer(1993)根据该方程推算得出大气的水汽存储能力随气温升高约呈现 $6.5\% \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$ 的增长趋势,由此为研究降水与气温的关系提供了物理基础。实际情况中,降水随气温的变化关系较为复杂。Allen 等(2002)通过数值模拟发现,全球平均降水量随地表气温变暖的增长趋势约为 $3.4\% \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$,远低于 CC 关系描述的 $6.5\% \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$ 的增长幅度。但亦有分析发现,一些地区日极端降水量随气温的增长趋势保持在 CC 关系附近(Trenberth et al, 2003; Haerter et al, 2010; Jones et al, 2010; Shaw et al, 2011)。在某些地区,极端降水强度的增长趋势甚至会出现超过 CC 关系变率的情况(Lenderink et al, 2008)。国内关于气温与降水对应关系的分析文献还很少见,最近孙激等(2013)分析了我国华南暖季极端降水强度与气温的关系,发现当气温低于 25°C 时,区域内日极端降水强度随气温升高而加强,但当气温高于 25°C 时,日极端降水强度开始随气温升高而减弱,并发现越极端的降水出现向两倍 CC 变率转换的气温越低。上述研究表明,不同气候区、甚至不同强度的降水随地表气温的

升高可能有着不同的变化趋势。因而,针对其他典型气候区进行相关分析,对于进一步了解降水的变化特征是有意义的。

北京位于华北北部,地理位置重要,为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,是我国气候变化敏感区,亦是中国城市化发展最快最典型地区之一,其天气气候变化历来受到诸多重视。本文将利用北京地区 20 个常规气象站 1978—2012 年夏季逐日观测资料,试图揭示北京地区夏季不同量级降水频率、强度与气温对应关系的一些基本事实。

1 资料和方法

考虑到气温对降水的影响并非瞬时响应,而是存在一个能量的不断积累与系统逐渐发展的过程。为较好地反映降水事件的整体环流背景及其与气温的对应关系,分析中多采用日平均气温资料(Trenberth et al, 2003; 孙激等, 2013)。本文所用资料包括北京地区 20 个常规气象站 1978—2012 年夏季(6—8 月)逐日降水量(08 时至 08 时,北京时)及日平均气温数据,数据来源于北京市气象信息中心,均经过质量控制,所选序列无缺测。

王佳丽等(2012a; 2012b)在分析中发现,北京不同区域的表面气温及降水的变化特征均存在显著差异,仅用南郊观象台一个站的代表性比较有限,不足以反映各地间的地域差异。因而在讨论北京降水、气温变化特征时,应分为不同的区域分别予以考虑。并在综合各站下垫面及纬度和地形高度的差异的基础上,通过聚类分析的方法,采用相关系数作为聚类指标,将北京划分为城区、郊区、南部山区及北部山区。检验表明,各区域内的气温和降水变化均具有较好的相关性,而区域之间的降水、气温变化差异明显。本文采用类似王佳丽等(2012a; 2012b)的方法,将北京 20 个站点分为城区、郊区、南部山区和北部山区四个区域(如图 1a),其中城区 5 站(朝阳、海淀、丰台、石景山和观象台)、郊区 10 站(昌平、顺义、通州、大兴、房山、门头沟、怀柔、密云、平谷和上甸子)、北部山区 3 站(延庆、汤河口和佛爷顶)、南部山区 2 站(斋堂和霞云岭)。

在降水与气温关系的研究中,通常按降水日的日平均气温进行分组,在各气温区间分别讨论其与

降水的对应关系。本文以 1°C 为间隔,来讨论不同气温区间内各等级降水(分为小雨、中雨、大雨以上、极端降水等)频率及强度的变化趋势。其中小雨、中雨、大雨过程的判定采用中国气象局发布的通用行业标准。在极端降水的判定过程中,由于北京区域降水的局地性差异明显,不同站点都采用同一阈值显然是不合适的(李聪等,2012;郑祚芳等,2013;赵琳娜等,2015;肖子牛等,2016)。文中采用百分位的方法来定义每个台站的极端降水事件的阈值。方法如下:对每个台站,将 1978—2012 年夏季(6—8 月)日降水量按升序排列,取日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的子样本的第 95 个百分位的日降水量,定义为气候平均

极端降水阈值,作为确定极端降水事件的气候标准。当某站某日降水量超过这一阈值,就认为该日出现了极端降水事件。从图 1b 可见,各站点由于所处下垫面环境不同,极端降水阈值差异明显,最低的阈值出现在延庆站为 49.7 mm ,最高的阈值出现在密云站,高达 88.0 mm 。由图亦可见,北京各站极端降水阈值分布与地形高度关系密切,位于西部、北部高海拔山区的站点极端降水阈值明显低于平原地区,降水较强区域主要位于西部、北部山前迎风坡处。

图 2 给出的是北京地区 20 站 1978—2012 年夏季不同强度的降水样本数(站·次数)随气温的分布。由于有海拔较高的山区站点,降水样本从日平

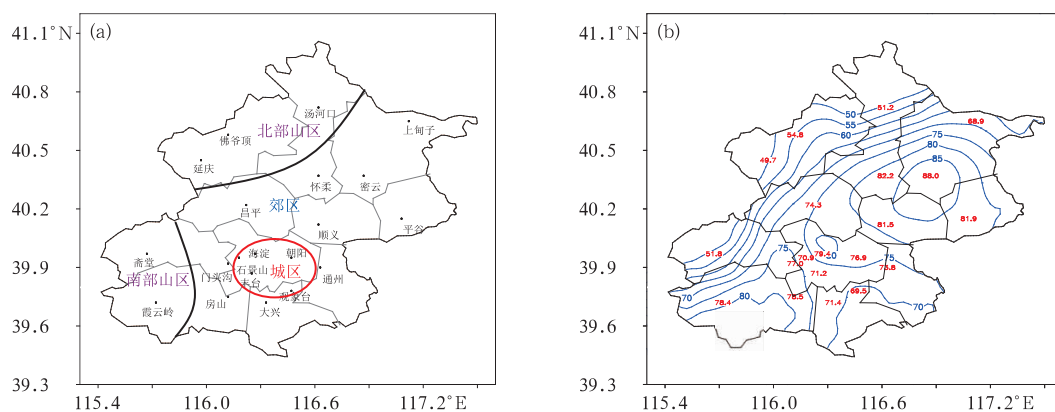


图 1 北京地区 20 个站点(a)及各站极端降水阈值分布(b,等值线间隔:5 mm)

Fig. 1 Spatial distribution of the 20 rain gauge stations (a) and their extreme precipitation thresholds (b) in Beijing Area (interval in: 5 mm)

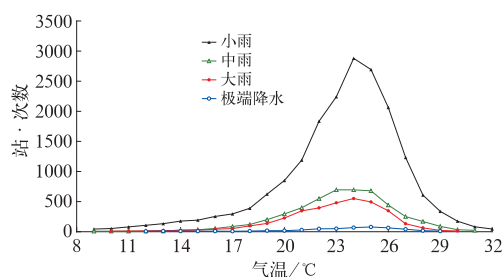


图 2 北京地区不同量级降水样本数随气温的分布

Fig. 2 Dependency of different levels of precipitation samples on temperature in Beijing Area

均气温 $9\sim 32^{\circ}\text{C}$ 均有分布。从统计来看,不同量级的降水样本数随气温的升高均呈现准正态分布。具体到每一个气温间隔内降水样本数可从 $7\sim 2880$ 个不等,其中小雨量级的样本数最多($44\sim 2880$ 个),

较强的极端降水样本数相对较少($7\sim 79$ 个)。总体上看,降水主要集中在 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$ 气温区间。

2 结果分析

2.1 降水量

图 3 给出的是北京各区夏季不同等级降水量占总雨量百分比随气温的变化趋势。可见不同量级的降水,其随气温大多有一个先升后降的过程,但不同量级降水的变化具有明显的差异。对于小雨级别的降水(图 3a),当日平均气温处于 $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ 时,降水量所占的百分比最大(其中不同区域达到降水峰值的临界温度略有差异,南部山区约在 15°C ,城区和郊区在 16°C ,北部山区在 17°C)。在达到峰值前,南部山区和郊区降水量随气温的增长趋势接近 CC 变率 [$6.5\% \cdot (^{\circ}\text{C})^{-1}$],北部山区降水量随气温的增长

趋势则要明显低于 CC 变率。城区小雨量级的降水不存在随气温先升后降的现象,而是随气温的升高而逐渐减少。

中雨量级的降水量随气温的变化趋势如图 3b,当日平均气温处于 $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时,降水量所占的百分比达到峰值。低于此气温时,各地降水量均是随气温的增长而增加的,其增速除城区外均低于 CC 变率。当日平均气温高于 $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时,除北部山区外波动较大外,其他区域内降水量多保持在一个相对稳定的水平,较少随气温而变化。

大雨以上量级的降水(图 3c)有类似中雨的变化趋势,当日平均气温处于 $17\sim 19^{\circ}\text{C}$ 时,降水量所占的百分比达到峰值。低于此气温时,降水量随气温而增加。高于此气温时,降水趋于稳定,随气温变化很小。而当气温进一步升高(北部山区约为 22°C ,其他区域为 27°C)时,降水量开始随气温升高

而迅速减少。

极端降水过程雨量随气温的变化较为剧烈(图 3d)。在达到临界温度(北部山区约 18°C ,城区、郊区约 21°C ,南部山区约 22°C)前,降水量随气温急剧增加,除北部山区外,其他区域降水随气温的增幅均接近 CC 变率。与中雨及大雨以上降水类似,当日平均气温高于临界值时,降水变化不明显。而当气温进一步攀升到一定程度(北部山区约为 22°C ,其他区域为 27°C)后,降水量开始随气温升高而迅速减少。这表明,越是强度大的降水,其雨量在达到临界值前随气温的增速越接近 CC 变率。同时可见,在日平均气温位于 $21\sim 27^{\circ}\text{C}$ 时,城、郊区极端降水量占总雨量比重超过 80% (城区占比达 85%),较其他区域、其他等级的降水更为集中。这种特征与我国华南地区明显不同(孙激等,2013)。

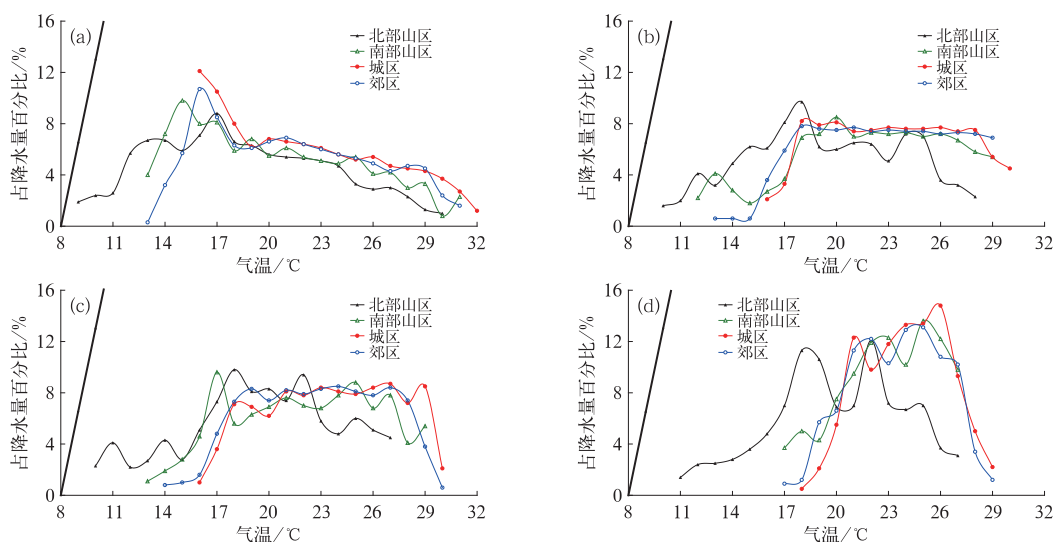


图 3 北京各区降水量随气温的变化

(a) 小雨, (b) 中雨, (c) 大雨以上, (d) 极端降水
(直线为 CC 变率)

Fig. 3 Dependency of the percentage of different levels of precipitations with temperature in different districts of Beijing

(a) light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain, (d) extreme precipitation
(Solid straight line is for CC scaling)

2.2 降水频率

图 4 为北京夏季各等级降水频率随气温的变化趋势。由图可见,各区域不同量级的降水频率,都有一个随气温先升后降的过程,多为单峰型非对称结构,但其临界气温则各有不同。小雨级别的降水

(图 4a),在日平均气温处于 22°C 时,北部山区的降水频率达到最高;处于 24°C 时,南部山区及郊区的降水频率最高;城区降水频率在 25°C 时达到峰值。当气温超过此阈值时,各地降水频率开始明显下降。中雨量级的降水(图 4b),山区站在 22°C 左右时降水频率达到最高,城区、郊区站在 25°C 左右时降水频

率最高。大雨以上量级的降水(图 4c),北部山区站在 21°C 左右时降水频率达到最高,其他区域在 24°C 左右时降水频率最高。在峰值处,城区的降水频率要明显高于其他区域。关于极端降水的情况如图 4d 所示,北部山区站在 19°C 左右时降水频率即已达到最高,南部山区站在 23°C 左右时降水频率达到最

高,城区、郊区要在 $24\sim 25^{\circ}\text{C}$ 左右时降水频率最高。在峰值处,城区的降水频率亦高于郊区。同时我们注意到,越是强度大的降水,其降水频率在达到峰值前随气温的增速越接近 CC 变率。孙激等(2013)认为这种现象可能与极端降水的对流效应有关。

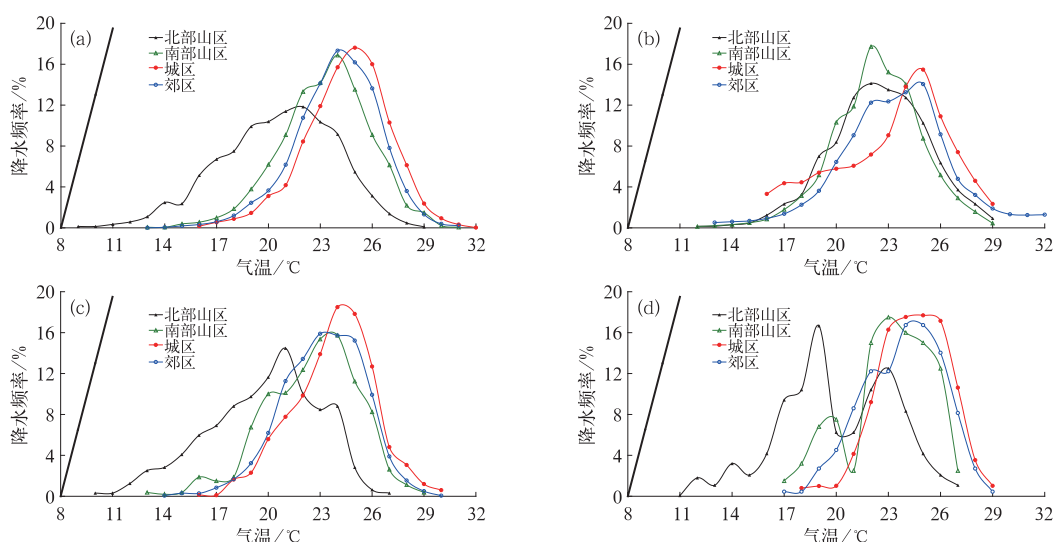


图 4 同图 3, 但为降水频率

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for precipitation frequency

2.3 降水强度

为进一步分析北京夏季降水对气温变化的响应,统计了各地平均降雨强度随气温的变化(图 5)。对于小雨量级的降水(图 5a),当日平均气温处于 16°C 左右时,城区雨强最大,其他区域的雨强先是随气温升高而加强,并在 14°C 左右雨强达到峰值,之后随着气温升高降水强度逐渐减弱。中雨及大雨以上量级的降水强度随气温的变化趋势与之类似(图略),当日平均气温处于 $17\sim 29^{\circ}\text{C}$ 时,降水强度处于

较稳定的状态,各地雨强无明显差异。日平均气温低于 17°C 时各区域降水强度随气温是逐渐增加的,当气温高于 29°C 时,降水强度明显减弱。各地极端降水强度随气温的变化如图 5b 所示,亦为单峰型非对称结构,在日平均气温为 26°C 左右时,各地极端降水的雨强最大,平均可达 $120\sim 125\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。日平均气温低于 26°C 时,极端降水强度随气温是增加的,日平均气温高于 26°C 时,降水强度开始迅速减弱。总体上看,在达到峰值前北京各地降水强度随气温的变化明显弱于 CC 变率。

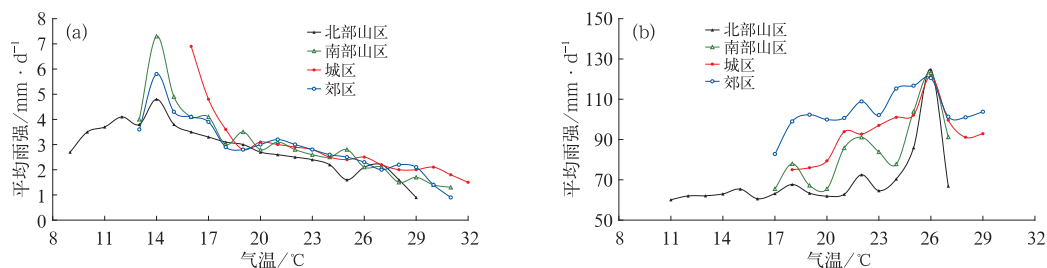


图 5 北京各区降水强度随气温的变化

(a) 小雨, (b) 极端降水

Fig. 5 Dependency of precipitation intensity with temperature in Beijing

(a) light rain, (b) extreme precipitation

2.4 降水量贡献率的城、郊差异

已有的研究表明,大城市的快速发展对区域降水有较明显的影响。位于城市的不同位置,降水差异明显(王喜全等,2007;于淑秋,2007;孙继松等,2007)。由于热岛效应的存在,城区相对郊区具有更高的地面气温。从图 6 给出的是北京城、郊区(关于城区和郊区的划分见图 2a)不同量级降水量随气温的变化可见,城、郊区间不同量级的降水几乎在相同的气温条件下达到雨量峰值,并且在达到峰值前降

水随气温大都有一个先增加,后维持,再减少的过程(城区小雨量级的降水除外),但在达到峰值前城区降水随气温的增速比郊区更大,更接近 CC 变率。当日平均气温位于 $21\sim 27^{\circ}\text{C}$ 时,容易出现较极端降水,特别是当气温达到 26°C 时,城区极端降水所占百分比最高,达到 15% 以上。当气温低于 21°C 或高于 27°C 时,极端降水所占的比例很小,均低于 5%。郊区的极端降水随气温的分布相对要平缓一些。这表明,城区降水对气温的敏感性比郊区更大,并且强度越大的降水,对气温的敏感性也越强。

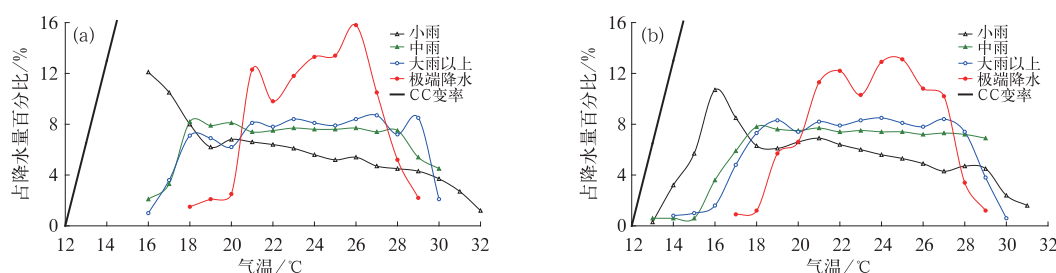


图 6 北京地区降水量随气温的变化

(a) 城区, (b) 郊区

Fig. 6 Dependency of precipitation amount with temperature in (a) urban area and (b) suburbs of Beijing

3 结 论

本文应用北京地区 20 个气象站 1978—2012 年夏季逐日降水及气温观测资料,分析了不同等级降水与气温的对应关系及城、郊区间的差异。结果表明:

(1) 北京各地降水量随气温大多有一个先升后降的过程。中雨及以上量级的降水,当气温达到临界值后雨量保持平稳,随气温变化不明显。而当气温进一步上升到一定程度后,降水量开始随气温升高而迅速减弱。越是强度大的降水,其雨量在达到临界值前随气温的增速越接近 CC 变率。

(2) 不同量级的降水频率随气温亦有一个先升后降的过程,但其临界气温各不相同。城区的临界气温要更高一些,当气温超过临界值后,降水频率开始明显下降。越是强度大的降水,其降水频率在达到峰值前随气温的增速越接近 CC 变率。

(3) 降雨强度随气温的变化为单峰型非对称结构。在达到临界温度前,雨强随气温升高而增加,但明显弱于 CC 变率。到达临界温度后,随着气温升

高降水强度减弱。

(4) 城、郊区间不同量级的降水随气温具有相似的变化趋势,但到达临界值前城区降水随气温的增速比郊区更大,更接近 CC 变率。表明城区降水对气温的敏感性比郊区更大,并且强度越大的降水,对气温的敏感性也越大。

随着全球气候的持续变暖,各种高影响天气气候事件的发生频率和强度均有明显增强。其中,城市降水的变化及预测是急需解决的关键科学问题之一。由于大气热力条件与降水的变化有着密切的联系,开展降水与气温对应关系的研究具有重要的科学意义。本文分析表明,随着气温的增加,降水频率和强度都有不同程度的变化。这可能是探讨气候变暖影响局地降水变化的一个新途径。鉴于城市化对区域气候的主要影响是导致热岛效应的增强,这亦有助于我们从另一个角度探讨城市化效应对降水的影响机制。

参考文献

- 李聪,肖子牛,张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征. 气象, 38(4): 419-424.

- 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. 大气科学, 31(2):311-320.
- 孙激,李建,宇如聪,等. 2013. 华南暖季极端降水与气温的对应关系. 气候变化研究进展, 9(2):96-101.
- 王佳丽,张人禾,王迎春. 2012a. 北京不同区域表面气温的变化特征及北京观象台的代表性. 气候与环境研究, 17(5):563-573.
- 王佳丽,张人禾,王迎春. 2012b. 北京降水特征及北京市观象台降水资料代表性. 应用气象学报, 23(3):265-273.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象, 38(3):281-290.
- 王喜全,王自发,齐彦斌,等. 2007. 城市化与北京地区降水分布变化初探. 气候与环境研究, 12(4):489-495.
- 王迎春,梁旭东,苗世光,等. 2012. 城市气象研究动向的思考. 气象, 38(10):1232-1237.
- 吴庆梅,杨波,王国荣,等. 2012. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用. 气象, 38(2):174-181.
- 肖子牛,石文静,段玮. 2016. 云南夏季降水量在21世纪初的突变减少及原因分析. 气象, 42(3):261-270.
- 于淑秋. 2007. 北京地区降水年际变化及其城市效应的研究. 自然科学进展, 17(5):632-638.
- 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. 气候与环境研究, 13(2):123-133.
- 赵琳娜,董航宇,吴亮,等. 2015. 黄淮地区夏季日降水分区概率预报方法研究. 气象, 41(12):1503-1513.
- 郑祚芳,王在文,高华. 2013. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响. 气象, 39(12):1682-1688.
- 周宁芳,康志明,赖芬芬. 2014. 2012年夏季华北降水和环流形势的低频振荡特征分析. 气象, 40(9):1106-1113.
- Allen M R, Ingram W J. 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. Nature, 419:224-232.
- Boer G J. 1993. Climate change and the regulation of the surface moisture and energy budgets. Clim Dynam, 8: 225-239.
- Haerter J, Berg P, Hagemann S. 2010. Heavy rain intensity distributions on varying time scales and at different temperatures. J Geophys Res, 115, D17102, doi:10.1029/2009JD013384.
- Jones H, Westra R, Sharma A. 2010. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. Geophys Res Lett, 37, L22805, doi:10.1029/2010GL045081.
- Lenderink G, Meijgaard E. 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. Nature Geoscience, 1: 511-514.
- Pall P, Allen M, Stone D. 2007. Testing the clausius-clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO₂ warming. Clim Dynam, 28:351-363.
- Shaw S B, Royem A A, Riha S J. 2011. The relationship between extreme hourly precipitation and surface temperature in different hydroclimatic regions of the US. J Hydrometeor, 12(2): 319-325.
- Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation. Bull Amer Meteor Soc, 84:1205-1218.