

郑祚芳, 祁文, 李青春, 等. 2015. 基于自动站观测的北京夏季降水特征 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 201-208, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14160.
Zheng Zuofang, Qi Wen, Li Qingchun, et al. 2015. Statistical characteristics of precipitation in summer in Beijing area during 2007–2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (2): 201-208.

基于自动站观测的北京夏季降水特征

郑祚芳¹ 祁文² 李青春¹ 李林³

¹ 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

² 安徽省铜陵市气象局, 铜陵 244100

³ 北京市气象局, 北京 100089

摘 要 应用 2007~2011 年北京地区 237 个自动气象站资料, 分析了北京夏季降水的精细化时空分布特征及城郊差异, 结果表明: (1) 北京大部分地区夏季平均有效降水时数约 120~160 h, 降水时数高值区主要位于北部怀柔、密云山前迎风坡一带。城、郊区间有效降水时数差异并不明显, 城市化对局地降水强度有较明显影响。(2) 北京夏季降水主要出现在傍晚到前半夜, 凌晨到正午降水较少出现。夏季平均降水量极大值出现在 17:00 (北京时间), 为 3.2 mm/h。降水量存在较明显的周期变化特征, 其中 7 d 左右的周期是主周期。(3) 夏季城区平均降水量多于郊区, 城、郊雨量差异主要来自较强降水过程。城市效应会导致城区弱降水事件的减少, 亦会导致较强降水事件的增多。(4) 城、郊区间降水持续时长的差异主要由较强降水过程决定, 多数情况下城区降水持续时长大于郊区, 午后到前半夜发生的降水尤甚。

关键词 自动气象站 降水特征 城郊差异 北京

文章编号 1006-9585 (2015) 02-0201-08

中图分类号 P468.0

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14160

Statistical Characteristics of Precipitation in Summer in Beijing Area during 2007–2011

ZHENG Zuofang¹, QI Wen², LI Qingchun¹, and LI Lin³

¹ Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

² Tongling Meteorological Bureau, Anhui Province, Tongling 244100

³ Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

Abstract Using hourly precipitation data from 237 automatic weather stations in Beijing area from June to August 2007–2011, the fine-scale spatiotemporal distribution of precipitation and the effect of the city on local precipitation in Beijing were studied. Based on the analysis, the major findings can be summarized as follows: Firstly, in most areas of Beijing, the average number of effective precipitation hours in summer was between 120 h and 160 h. The maximum value of effective precipitation hours was recorded in the piedmont windward area in the north of Beijing. The difference in effective precipitation hours between urban and suburban areas was not obvious, and the main impact of urbanization was on precipitation intensity. Secondly, summer precipitation in Beijing occurred mainly in the evening until midnight; from midnight to noon there was less precipitation. The average annual rainfall maximum appeared at 1700 LST reaching 3.2 mm/h. Furthermore, there was an obvious precipitation cycle, for which the main length of the period was about seven days. Thirdly, the differences in precipitation between urban and suburban areas were mainly caused by heavy rainfall,

收稿日期 2014-08-05; **网络预出版日期** 2014-12-04

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05090202, 国家自然科学基金项目 41105024、41175015

作者简介 郑祚芳, 男, 1972 年生, 硕士, 副研究员, 主要从事区域气候及精细天气预报相关研究。E-mail: zfzheng@ium.cn

with urbanization leading to a reduction in weak precipitation events but a strong increase in precipitation events as a whole. Finally, the differences in continuous precipitation hours between urban and suburban areas was determined mainly by heavy rainfall; in most cases, the duration of precipitation was higher in the suburbs, occurring most commonly in the period from afternoon to midnight.

Keywords Automatic weather station, Precipitation characteristics, Urban/suburban contrast, Beijing

1 引言

北京地处中纬地带, 具有明显的暖温带、半湿润大陆性季风气候特点。同时由于所处独特地理位置, 在气象研究领域历来深受重视。关于北京地区降水分布、变化规律及城市化影响的研究已有很多(谢庄和王桂田, 1994; 李建等, 2008; 王佳丽等, 2012; 郑祚芳等, 2014)。这些工作揭示了北京地区降水分布、变化的许多细节。但不同研究结果还存在较大差异, 如于淑秋(2007)分析认为城市对降水分布的影响反映为雨岛效应特征, 但刘熙明等(2006)则认为, 城市化对北京地区降水分布的影响主要为干岛效应特征, 会加剧城区降水的减少。孙继松和舒文军(2007)、王喜全等(2007)进一步分析发现, 城市效应对不同季节降水量的影响亦有所不同。这表明, 城市对降水的影响是很复杂的, 基于降水分布的不均匀性, 这些差异的存在可能与所采用资料序列长度、资料密度及代表站点的选取不同有关。另一方面, 受常规气象台站观测资料的时空分辨率所限, 对于降水的精细化分布的一些细节, 如小时时间尺度上的降水频率、降水强度、降水持续时长等, 还并不是很清楚。

相比常规气象站观测, 自动气象站观测具有高精度、高时空分辨率等优点。作为基础气象资料, 日常天气预报业务对自动站数据依赖度越来越高。目前关于自动气象站资料的应用多集中在天气过程分析方面(孙继松等, 2006; 陈敏等, 2008)。对更长时间尺度上的气候规律研究则主要在城市热岛效应及其形成机制方面(邓莲堂等, 2001; 张立杰等, 2011; 李艳红等, 2013), 针对自动站降水的分析研究还很少见, 这与早期降水数据观测质量相对较差有关。

近年来, 随着气象现代化建设的逐步推进, 北京市气象局在国内率先进行了较大规模的自动气象站建设。截止到 2012 年底, 已布设了 295 套自动站, 其中国家级自动站 20 套, 区域自动站 275 套, 初步形成了城区平均间距 5 km、郊区 10~15 km

的自动观测网, 显著提高了气象监测的时空精度。同时, 还建立了用于数据实时质量监控的业务平台“综合气象观测系统运行监控平台”及“省级自动站实时数据质量控制系统”, 可实现对所有自动站整点数据的实时质量控制, 并对判断可疑的数据进行标注(孙成云等, 2013)。杨萍和刘伟东(2013)对北京地区自动气象站资料进行了系统的质量评估和分析。评估结果证实, 北京地区自动气象站观测数据有较好的准确性和可靠性, 表明北京地区自动站的观测质量有了很大的提高, 为进一步开展逐小时自动站气象数据的分析应用提供了基础。最近, 刘伟东等(2014a, 2014b)利用 2007~2010 年 4~10 月的自动站资料分析了北京地区降水的精细化时空分布特征, 得到一些有意义的结论, 认为北京城市“雨岛效应”主要体现在 7 月的夜间, 且主要通过降雨强度的增大来实现, 但其对站点进行的聚类分区结果与王佳丽等(2012)尚有差异。

本文采用 2007~2011 年北京地区数据质量较好、缺测较少的 237 个加密自动气象站资料, 进一步分析北京夏季降水的时空分布精细化特征及城郊差异, 探讨大城市对不同强度降水过程影响的气候特征。以期对北京夏季降水变化规律及城市防汛减灾提供更多的参考。

2 资料与方法

多年统计数据表明, 北京地区降水主要发生在夏季(6~8 月), 夏季降水量可达到全年降水的 70%~90%。且由于多数自动气象站尚不能在冬季对固态降水进行观测, 因此本文主要针对夏季自动站降水资料进行分析。所用资料为 2007~2011 年北京地区夏季(6~8 月)观测数据质量较好、缺测较少的 237 个加密自动气象站逐时观测数据(站点分布如图 1 所示), 并对其中极少量的观测错误进行了人工剔除。

文中还对自动站逐时降水资料进行了城、郊对比分析, 参考王佳丽等(2012)的工作, 定义(39.82°N~40.0°N, 116.27°E~116.50°E)为城区

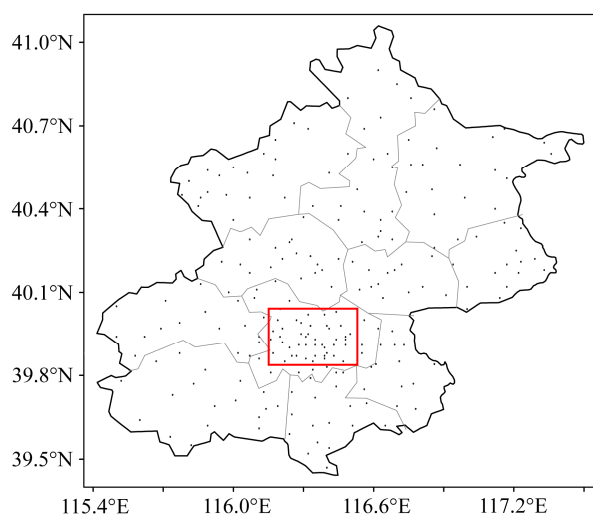


图 1 本文研究中所用自动站点分布

Fig. 1 Distribution of automatic weather stations in Beijing area

范围(大约为北京四环线范围,图 1 中红色实线方框所示),其中包含自动站点 42 个。定义平原地区海拔高度在 80 m 以下的非城区站点为郊区站,计 138 站。避免了站点较少可能导致的代表性不足问题。

参考我国关于降水量等级划分的国家标准(GB/T 28592-2012, 现行),当某站某小时降水量 ≥ 0.1 mm 时认为该站该时次有降水发生。为方便比较,文中对逐时降水量级的划分主要分为弱降水(小雨)或较强降水(中雨及以上)两类。即在有降水发生时,当某站某时次降水量 ≤ 2.5 mm,定义为该站该时次出现了小雨。当某站某时次降水量 > 2.5 mm 时,定义为该站该时次出现了中雨以上量级的降水。文中以下几个量用来表征降水的细节特征,均按城、郊区分别统计。

总降水量(单位: mm): 研究时段内各站点产生的降水量的累计值;

小时平均降水量(单位: mm): 研究时段内该时次所有站点降水的平均值;

小时最大降水量(单位: mm): 研究时段内该时次所有站点多年最大降水量的平均值;

有效降水小时数(单位: h): 研究时段内某站点出现降水的小时数;

降水频数(%): 该时次发生降水站数/总站点数,即发生降水的概率;

降水强度(单位: mm/h): 研究时段内该时次所有站点降水量与降水站次数的比值。其与小时平均降水量的差异在于它统计的是出现降水的站点

的平均降水强度,而后者统计的是所有站点的平均降水强度。

降水持续时长(单位: h): 研究时段内该时次起始发生的降水平均持续时长。类似李建等(2008)的定义,即对某一时次起始发生的降水,统计研究时段内所有降水站点持续时长的平均值,反映降水的持续程度。统计时,对于某时次某站起始发生的降水,若之后连续 2 h 无降水,则认为降水中止。

此外,文中应用了标准 Morlet 小波变换来分析降水分布的周期性特征。

3 结果与分析

3.1 北京地区夏季降水分布特征

图 2 给出的是北京地区 2007~2011 年夏季多年平均的降水量分布。可以看出,相对于 20 个常规站点的观测(图 2b),加密自动站观测(图 2a)能够揭示降水量分布的更多细节,显示出降水分布的局地性特征。在图 2a 中存在多中心结构,4 个主要降水中心如图中 A、B、C、D 所示,中心强度均超过 400 mm,其中位于城区偏北部(图中 A 点所示)并向东南方向延展的降水中心强度可达 420 mm 以上。而在由 20 个站组成的常规观测中(图 2b),仅能分辨两个强中心,相对于图 2a 强度也偏弱。如图 2a 中的自动站观测的降水偏少的中心(图中 E 点所示),平均雨量少于 240 mm。在图 2b 中,由于相应的位置缺少观测,由周边站点插值得到的降水量在 340 mm 以上,二者间差异显著。可见,由于降水分布的不均匀性,充分应用高密度的自动站观测网,对于了解降水的精细化分布特征是很有必要的。

图 3 给出的是北京地区 2007~2011 年夏季多年平均的有效降水时数及小时雨强分布。由图 3a 可见,北京大部分地区夏季平均有效降水时数约在 120~160 h,降水时数高值区主要位于北部怀柔、密云山前迎风坡一带,可达 200 h 以上。就平均有效降水时数而言,城、郊差异并不明显。平均降水强度的分布则大致与地形高度走向类似(图 3b),西部、北部山区雨强较弱(小于 2 mm/h),平原地区雨强相对较大。其中城区偏北部(图 3b 中 A 点所示)及东南部(图 3b 中 B 点所示)为两个较明显的高值中心,超过 3 mm/h。图 3c 给出的是北京地区近 5 年夏季平均的小时最大降水强度。其分布

形势依然是西部、北部山区雨强较弱,平原地区雨强较大。其中城区部位为一高值中心(图中 A 所示),平均最大雨强可达 45 mm/h。此外,西南部山前地带(图中 B 所示)及东北部(图中 C 所示)还

各有一个超过 50 mm/h 的强中心。3 个主要的雨强中心基本位于一条东北—西南走向的线上。

对照图 2a 所示的夏季平均降水量分布可见,北京地区夏季总雨量多寡主要由降水强度决定,而

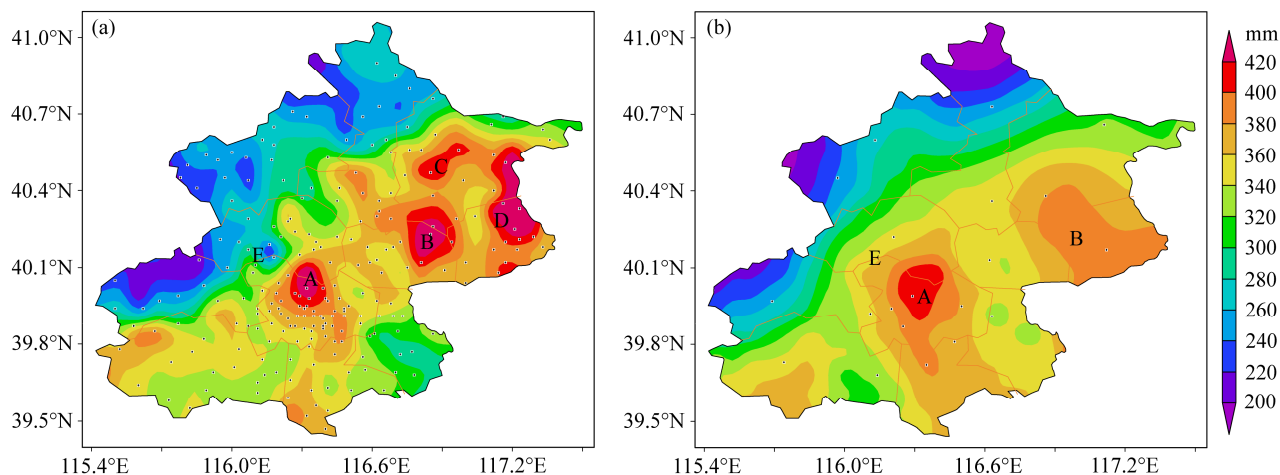


图 2 2007~2011 年北京地区夏季平均降水量分布: (a) 自动气象站; (b) 国家基本站

Fig. 2 Distribution of average precipitation in summer in Beijing during 2007-2011: (a) Automatic weather stations; (b) national basic weather stations

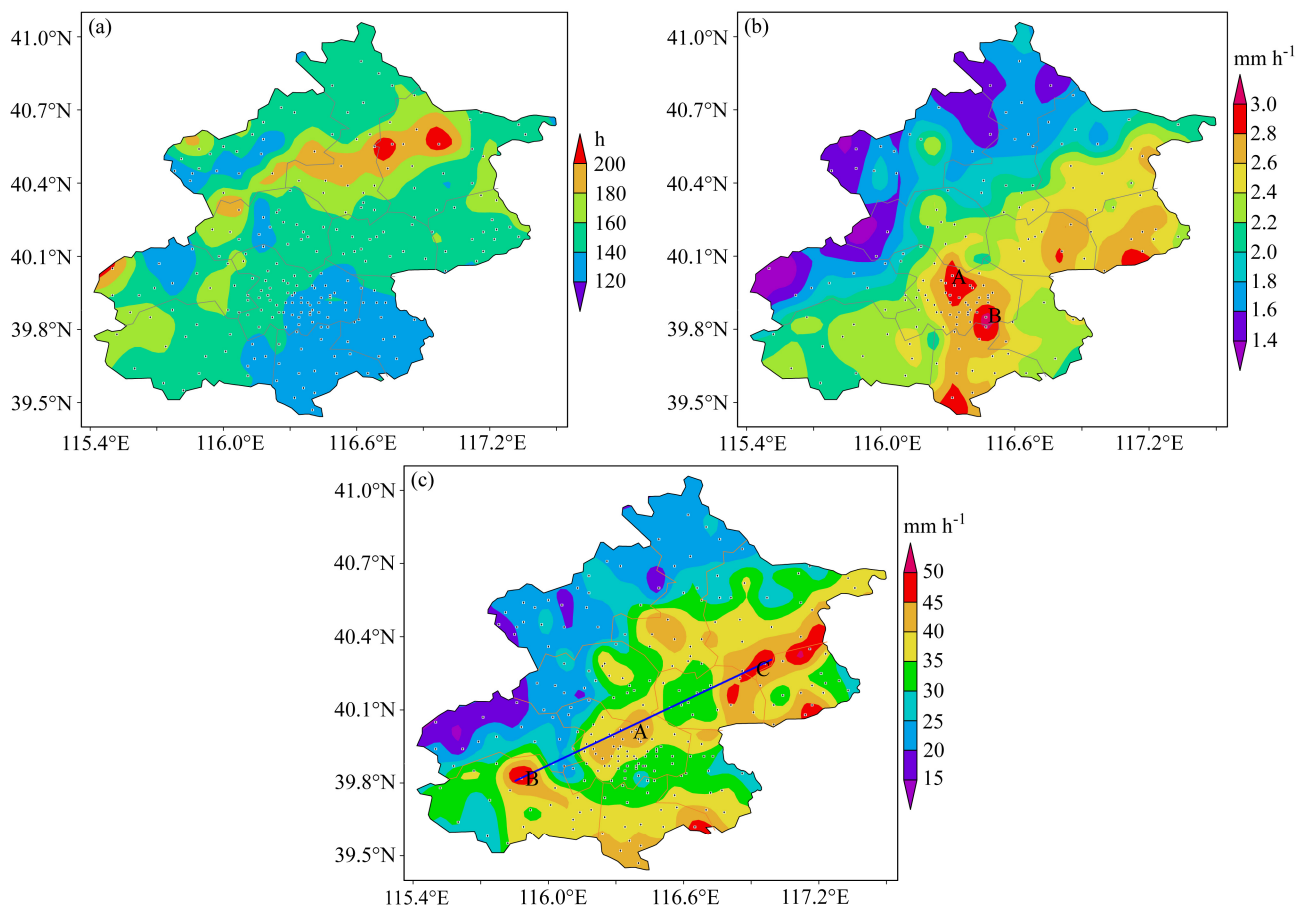


图 3 2007~2011 年北京地区夏季平均降水分布: (a) 有效降水小时数; (b) 小时平均雨强; (c) 小时最大雨强

Fig. 3 Distribution of average precipitation in summer in Beijing during 2007-2011: (a) Effective precipitation hours; (b) average hourly precipitation; (c) maximum hourly precipitation

与当地有效降水小时数关系并不明显,有效降水小时数则主要由地形高度决定。相对郊区而言,城区为小时雨强的高值区。很可能,城市化对局地降水强度影响较大,而对局地降水频率的总体影响不是很明显。

为进一步了解降水的逐时分布及日变化特征,统计了近 5 年夏季降水量逐时分布(图 4)。其中平均降水量指的是 5 年中某时次所有站点降水的平均值,最大降水量统计的是该时次所有站点多年最大降水量的平均值。图中蓝色和红色虚线分别为逐时平均降水及最大降水的均值。由图可见,北京地区夏季降水主要出现在傍晚到前半夜(16:00 至 23:00,北京时间,下同),凌晨到正午前(05:00 至 14:00)降水相对较少出现。李建等(2008)在分析南郊观象台逐时降水资料时亦有类似的发现,并认为这可能与太阳辐射加热有关,由于太阳辐射加热的日变化,低层大气在下午和傍晚易于达到不稳定状态,并激发出局地湿对流活动形成短时降水。Wang et al.

(2012)分析认为,这种降水分布特征不仅与城、郊区之间的下垫面热力差异过程有关,并与北京独特地理条件所导致的局地环流(山谷风、城市热岛环流)的耦合效应有关联。统计还发现,北京夏季逐时平均降水量极大值出现在 17:00,为 3.2 mm/h。逐时最大降水量与平均降水量有着类似的分布特征,亦是主要出现在傍晚到前半夜,凌晨到正午前雨量相对较小,但其随时间的波动幅度更大一些。夏季逐时最大降水量的极大值出现在 20:00,可达到 69.4 mm/h。

变量的周期性特征是气候分析中常涉及到的内容之一。已有的研究表明(Cerveny and Balling, 1998),在美国东海岸大城市及其邻近地区,降水

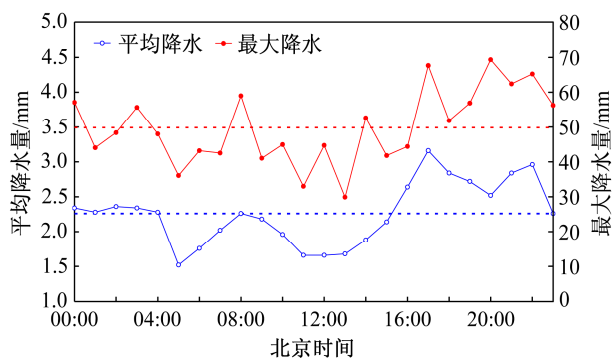


图 4 2007~2011 年北京地区夏季逐时平均降水量分布

Fig. 4 Diurnal variation of hourly precipitation in summer in Beijing during 2007–2011

具有明显的周循环特征。龚道溢等(2006)分析了我国人口较密集的东部地区夏季日降水频次的气候特征,亦发现其存在明显的周循环规律。小波分析作为一种重要的气候序列分析手段,不仅可以给出气候序列变化的尺度,还可以显示出各频率随时间的变化以及不同频率之间的关系。本文应用标准 Morlet 小波变换来分析降水分布的周期性特征,计算时先将逐时降水量转换成日降水量。从图 5 给出的小波变换系数来看,北京夏季降水量存在较明显的 16 d 左右的准双周变化(主要存在于 6 月下旬至 8 月下旬)、7 d 左右的周变化(存在于 6 月中旬到 8 月中旬)、以及 3~5 d 左右的周期(存在于 7 月中旬到 8 月底)变化特征。应用功率谱方法作进一步分析发现,7 d 左右的周期是主周期,能够通过 95%的信度标准。龚道溢等(2006)认为,城市及邻近地区降水的周循环特征很可能与人类活动导致的气溶胶的间接影响有关。

3.2 小时降水分布的城郊差异

以往有一些工作利用日降水资料分析了北京城郊降水的差异,并将之归结为城市化的影响。一般认为,城市化有使降水增加的效应,特别是城市下风区,被称为城市雨岛效应(孙继松和舒文军, 2007; 于淑秋, 2007)。但也有分析认为,城市化不会导致夏季降水的增加,甚至会加剧城区降水的减少(刘熙明等, 2006; 王喜全等, 2007)。这表明,城市化对降水的影响是很复杂的,尚未有定论。有必要应用更精细化的观测分析来揭示更多的事实。

图 6 给出的是北京地区近 5 年夏季不同量级降水特征的城、郊差值(42 个城区站点的平均—138 个郊区站点的平均)。从逐时降水量的差值分布来看(图 6a),城、郊区间不同量级的降水差值有着类似的变化趋势,多数时次均表现为城区降水多于郊区降水,仅在个别时次城区降水量小于郊区降水。这表明,从总体上看城区降水要多于郊区。这与孙继松和舒文军(2007)、于淑秋(2007)、刘伟东等(2014b)的分析结果是基本一致的。此外可见,城、郊区间总降水量差值与中雨以上降水的差值分布非常一致,说明城、郊区降水量的差异主要来自较强降水过程(中雨以上)的雨量差异。

图 6b 给出的是城、郊降水频率差异的逐时分布。城、郊区间所有量级降水频率差值与中雨以上量级的降水频率差有类似的分布,在大多数时次,城区降水频率要大于郊区。城市对于不同强度的降

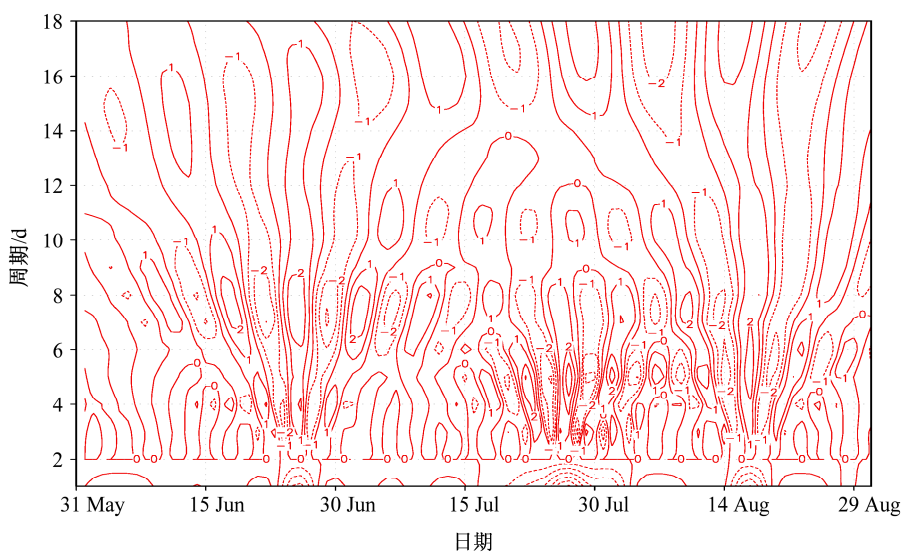


图5 2007~2011年北京地区夏季降水的小波变换系数

Fig. 5 Quotient of the Morlet wavelet transform of precipitation in summer in Beijing during 2007-2011

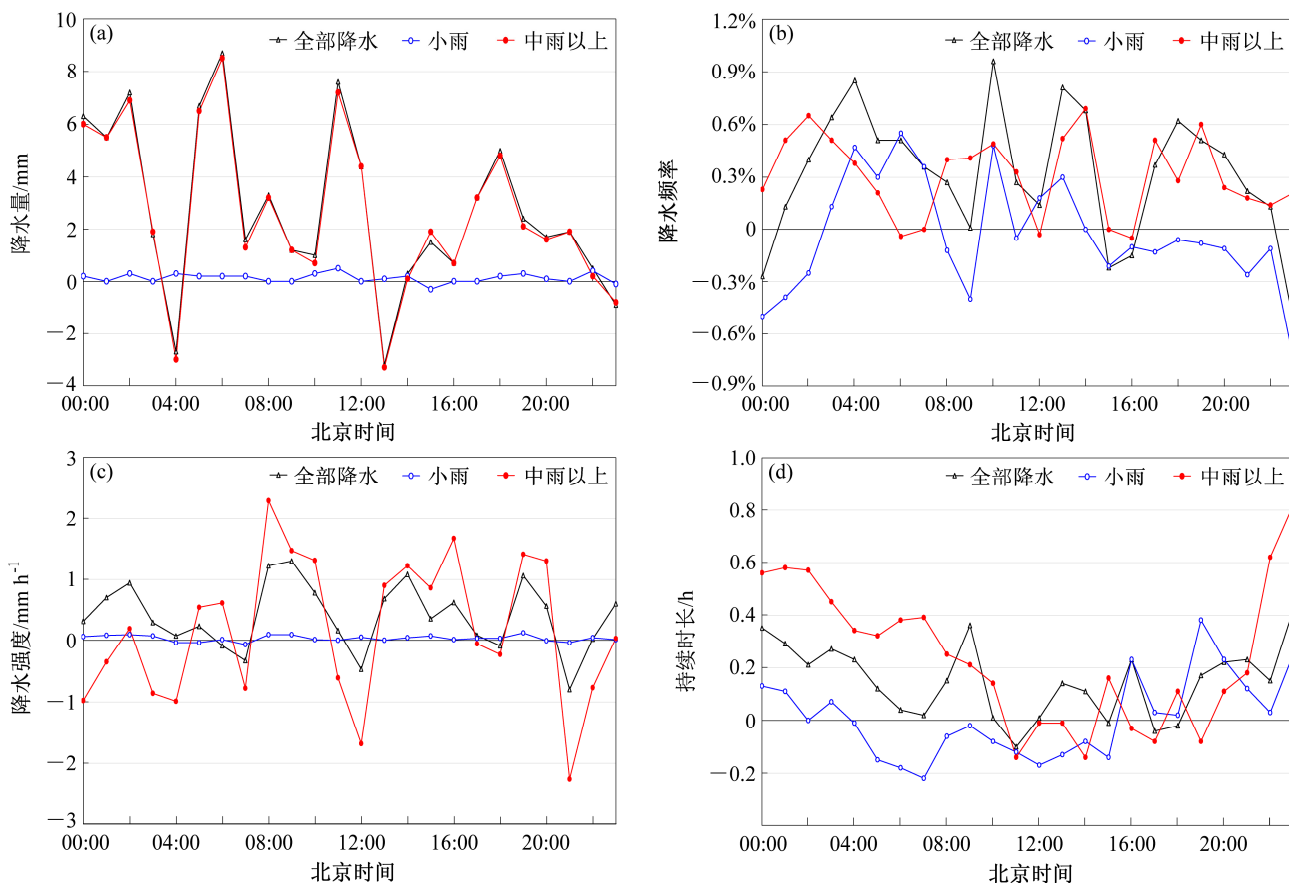


图6 2007~2011年北京地区夏季降水分布的城、郊差值:(a) 降水量;(b) 降水频率;(c) 降水强度;(d) 持续时长

Fig. 6 Diurnal variation of the differences between urban and suburban areas of Beijing in summer during 2007-2011: (a) Precipitation; (b) precipitation frequency; (c) precipitation intensity; (d) continuous precipitation hours

水事件影响明显不同,除个别时次外,城区中雨以上量级的降水频率要大于郊区。但是多数时次城区小雨量级的降水频率要小于郊区,在午后到前半夜

尤为明显。这表明,城市效应会导致城区弱降水事件(小雨)的减少,亦会导致较强降水事件(中雨以上)的增多。这与郑祚芳等(2014)基于北京地

区 20 站近 40 a 逐日降水资料的分析结果是一致的。

图 6c 给出的是北京城、郊区平均降水强度差值的逐时分布。可见对强度较大的降水(中雨以上),白天(08:00 至 20:00)雨强以城区大于郊区为主,傍晚到夜间的多数时次,则是郊区平均雨强要大于城区。对于较弱的降水(小雨量级),除极少数时次外,多数时次城区降水强度均大于郊区,说明城市效应对不同强度降水的影响不同。综合所以量级的降水事件来看,在多数时次,城区平均降水强度略大于郊区。

以往利用逐日资料的分析中,受常规观测精度限制,很少讨论降水的持续时长。图 6d 给出的是基于自动站观测统计的降水持续时长的城郊差异分布。可见,对于较弱的降水(小雨),若发生在午后到前半夜,城区降水持续时长要多于郊区,其他时段发生的降水,郊区降水持续时长大于城区。对于较强的降水(中雨以上量级)过程,仅在白天的少数时次城区降水持续时长小于郊区,其他时次城区降水持续时长均多于郊区,午后到夜间开始的降水尤甚。综合所有量级的降水过程统计来看,城、郊区降水持续时长的差异类似中雨以上量级降水的分布,这表明北京城、郊区间降水持续时长的差异主要由较强降水过程决定。

4 结论与讨论

本文应用 2007~2011 年北京地区数据质量较好的 237 个加密自动气象站资料,分析北京夏季降水的精细化时空分布特征及城郊差异,主要结论如下:

(1) 北京大部分地区夏季平均有效降水时数约在 120~160 h,降水时数高值区主要位于北部怀柔、密云山前迎风坡一带。平均降水强度的分布大致与地形高度走向类似。城、郊区间有效降水时数差异并不明显,城市化对局地降水强度有着较明显的影响。

(2) 北京地区夏季降水主要出现在傍晚到前半夜,凌晨到正午降水相对较少出现。夏季逐时平均降水量极大值出现在 17:00,为 3.2 mm/h。逐时最大降水量与平均降水量有着类似的分布特征,但其随时间的波动幅度更大。

(3) 北京夏季降水量存在较明显的 16 d、7 d 以及 3~5 d 左右的周期变化特征。其中 7 d 左右的

周期是主周期,能够通过 95%的信度标准。

(4) 北京夏季城区平均降水量多于郊区,城、郊雨量差异主要来自较强降水过程。城市效应会导致城区弱降水事件的减少,亦会导致较强降水事件的增多,并且对不同强度降水过程的影响也有所不同。

(5) 北京城、郊区间降水持续时长的差异主要由较强降水过程决定,多数情况下城区平均降水持续时长大于郊区,午后到前半夜发生的降水尤甚。

本文分析表明,城市效应对不同强度的降水影响差异明显,这种差异的形成应该与城市特殊下垫面的热力及动力作用有关,亦可能与人类活动导致的气溶胶在不同强度降水中的作用不同有关联。经典云物理理论认为,气溶胶作为云滴的凝结核可增加降水,但最新的观测资料表明,人类活动导致的气溶胶浓度的大量增加可能会对降雨不利。在夏季,暖云降水对流较强,而气溶胶的增加导致更多云滴的形成,但同时云滴直径更小。这对于碰并过程是不利的,同时较弱的对流就能将细小云滴带到对流层中、高层形成冰晶和高云,均不利于降雨(Rosenfeld, 2000)。龚道溢等(2006)亦认为,近几十年来我国东部地区夏季弱降水日数的减少很可能与气溶胶浓度的增加有关。然而,由于缺乏足够细致的观测作为支撑,对气溶胶气候强迫的认识目前还存在很大的不确定性。

由于降水分布的不均匀性,应用高时、空分辨率的自动站观测资料,较之常规站点观测能够更好的揭示降水分布的细节特征。文中应用逐时自动站观测数据,分析了北京地区夏季降水的精细化时空分布特征,并就降水量、降水频率、降水强度、降水持续时长等方面统计了其城、郊差异,这对于我们进一步了解北京地区夏季降水变化规律是有意义的。然而,仅利用有限的观测资料来探讨城市化对降水过程的影响机理是不够的。今后有必要利用高分辨率数值模式进行城市气候效应模拟,以进一步探讨城市化过程的气候效应,分析其对降水过程的影响机制。

参考文献 (References)

- Cerveny R S, Balling R C Jr. 1998. Weekly cycles of air pollutants, precipitation, and tropical cyclones in the coastal NW Atlantic region [J]. *Nature*, 394 (6693): 561–563.
- 陈敏, 仲跻芹, 郑祚芳. 2008. 北京地区一次强降水过程的多种观测资

- 料四维变分同化试验 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 44 (5): 756–764.
- Chen Min, Zhong Jiqin, Zheng Zuofang. 2008. Four dimensional variational data assimilation of multiple types of observations for a severe storm in Beijing area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 44 (5): 756–764.
- 邓莲堂, 束炯, 李朝颐. 2001. 上海城市热岛的变化特征分析 [J]. 热带气象学报, 17 (3): 273–280. Deng Liantang, Shu Jiong, Li Chaoyi. 2001. Character analysis of Shanghai urban heat island [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 17 (3): 273–280.
- 龚道溢, 郭栋, 罗勇. 2006. 中国夏季日降水频次的周末效应 [J]. 气候变化研究进展, 2 (3): 131–134. Gong Daoyi, Guo Dong, Luo Yong. 2006. Weekend effect of daily precipitation frequency in summer of China [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2 (3): 131–134.
- 李建, 宇如聪, 王建捷. 2008. 北京市夏季降水的日变化特征 [J]. 科学通报, 53 (7): 829–832. Li Jian, Yu Rucong, Wang Jianjie. 2008. Analysis on diurnal variation of summer precipitation in Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 53 (7): 829–832.
- 李艳红, 李智才, 周晋红, 等. 2013. 基于自动站资料的太原城市热岛研究 [J]. 干旱区资源与环境, 27 (12): 173–179. Li Yanhong, Li Zhicai, Zhou Jinhong, et al. 2013. The urban heat island effect in Taiyuan [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 27 (12): 173–179.
- 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 2014a. 北京地区精细化的降水变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (1): 61–68. Liu Weidong, You Huanling, Ren Guoyu, et al. 2014a. Subtle precipitation characteristics in Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 19 (1): 61–68.
- 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 2014b. 北京地区自动站降水特征的聚类分析 [J]. 气象, 14 (7): 844–851. Liu Weidong, You Huanling, Ren Guoyu, et al. 2014b. AWS precipitation characteristics based on K-means clustering method in Beijing area [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 14 (7): 844–851.
- 刘熙明, 胡非, 李磊, 等. 2006. 北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 689–697. Liu Ximing, Hu Fei, Li Lei, et al. 2006. Summer urban climate trends and environmental effect in the Beijing area [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49 (3): 689–697.
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 287 (5459): 1793–1796.
- 孙成云, 宋巧云, 梁丰, 等. 2013. 北京自动站数据流程及业务应用情况分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 30 (3): 98–101. Sun Chengyun, Song Qiaoyun, Liang Feng, et al. 2013. Data flow and business application of Beijing automatic weather station [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments* (in Chinese), 30 (3): 98–101.
- 孙继松, 王华, 王令, 等. 2006. 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 [J]. 大气科学, 30 (2): 221–234. Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (2): 221–234.
- 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 [J]. 大气科学, 31 (2): 311–320. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (2): 311–320.
- 王佳丽, 张人禾, 王迎春. 2012. 北京降水特征及北京市气象台降水资料代表性 [J]. 应用气象学报, 23 (3): 265–273. Wang Jiali, Zhang Renhe, Wang Yingchun. 2012. Characteristics of precipitation in Beijing and the precipitation representativeness of Beijing weather observatory [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 23 (3): 265–273.
- Wang J L, Zhang R H, Wang Y C. 2012. Areal differences in diurnal variations in summer precipitation over Beijing metropolitan region [J]. *Theo. Appl. Climatol.*, 110 (3): 395–408.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 12 (4): 489–495. Wang Xiquan, Wang Zifa, Qi Yanbin, et al. 2007. Preliminary inspect about the effect of urbanization on precipitation distribution in Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (4): 489–495.
- 谢庄, 王桂田. 1994. 北京地区气温和降水百年变化规律的探讨 [J]. 大气科学, 18 (6): 683–690. Xie Zhuang, Wang Guitian. 1994. The changes of temperature and precipitation in Beijing during last 100 years [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 18 (6): 683–690.
- 杨萍, 刘伟东. 2013. 北京地区加密自动气象站数据的质量分析 [J]. 气象科技进展, 3 (6): 27–34. Yang Ping, Liu Weidong. 2013. Evaluating the quality of meteorological data measured at automatic weather stations in Beijing during 1998–2010 [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 3 (6): 27–34.
- 于淑秋. 2007. 北京地区降水年际变化及其城市效应的研究 [J]. 自然科学进展, 17 (5): 632–638. Yu Shuqiu. 2007. Analysis on interannual variability of precipitation in Beijing and its city effect [J]. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 17 (5): 632–638.
- 张立杰, 李磊, 江崑, 等. 2011. 基于自动站观测资料的深圳城市热岛研究 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 479–486. Zhang Lijie, Li Lei, Jiang Yin, et al. 2011. A study of the urban heat island in Shenzhen based on data from automatic weather stations [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16 (4): 479–486.
- 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 2014. 北京地区降水空间分布及城市效应分析 [J]. 高原气象, 33 (2): 522–529. Zheng Zuofang, Gao Hua, Wang Zaiwen, et al. 2014. Analysis on spatial distribution of precipitation in Beijing and its city effect [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (2): 522–529.