



王冷力, 任国玉, 战云健. 2025. 北京地区夏季分钟强降水气候学特征 [J]. 气候与环境研究, 30(3): 260–274. WANG Lingli, REN Guoyu, ZHAN Yunjian. 2025. Climatological Characteristics of Summer Minute-Scale Intense Precipitation in Beijing Area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 30 (3): 260–274. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24065

北京地区夏季分钟强降水气候学特征

王冷力¹ 任国玉^{1,2} 战云健³

¹ 中国地质大学(武汉)大气科学系, 武汉 430070

² 国家气候中心, 北京 100081

³ 国家气象信息中心, 北京 100081

摘要 根据北京地区 20 个国家气象站 1961~2021 年 6~9 月的逐分钟降水观测资料, 探讨了不同连续时间下分钟强降水事件的空间分布和日内变化特征。结果表明: 北京地区分钟强降水事件的发生频次和强降水量都在平原地区和东北山前地带存在高值, 降水历时越长, 平原上分钟强降水量高值的分布范围越大; 与西部和北部山区的乡村站相比, 平原地区的城市站和郊区站具有更高的分钟强降水强度, 年际变异性也相对更大; 分钟强降水事件在城市站多发生于每日 21:00 (北京时间, 下同) 至次日 09:00, 强降水量在 18:00 和 21:00 前后出现峰值, 而在山区乡村站主要发生在 03:00 至 06:00, 分钟强降水量在 12:00 前后更大。

关键词 分钟强降水 空间分布 日内变化 气候特征 北京地区

文章编号 1006-9585(2025)03-0260-15

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24065

Climatological Characteristics of Summer Minute-Scale Intense Precipitation in Beijing Area

WANG Lingli¹, REN Guoyu^{1,2}, and ZHAN Yunjian³

¹ Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430070

² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

³ National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Minute-by-minute precipitation data from 20 national meteorological stations in Beijing collected from June to September during 1961–2021 were analyzed to explore the spatial distribution and diurnal variation in minute intense precipitation events at different durations. The results show that the frequency and intensity of minute intense precipitation events are higher in the plain and northeast piedmont areas of Beijing. As the duration of precipitation increases, the distribution range of high-intensity precipitation in the plains expands. Urban and suburban stations in the plains experience higher intensity and greater interannual variability in minute intense precipitation compared to rural stations in the western and northern mountains. Most minute intense precipitation events occur at urban stations between 2100 LST and 0900 LST, and the following day with peaks around 1800 LST and 2100 LST. In contrast, these events mainly occur between 0300 LST and 0600 LST in mountainous rural areas, with the greatest intensity around midday.

Keywords Minute intense precipitation, Spatial distribution, Diurnal variation, Climatic characteristic, Beijing area

收稿日期 2024-04-16; 网络预出版日期 2024-08-27

作者简介 王冷力, 女, 硕士研究生, 研究方向为城市气候变化。E-mail: wanglingli@cug.edu.cn

通讯作者 任国玉, 男, 研究员, 研究方向为气候变化监测、检测及归因。E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划 2018YFA0605603

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFA0605603)

1 引言

由于气候变化和人类活动的直接影响, 近几十年来全球水循环的各组成部分发生了明显变化 (Douville et al., 2021)。降水是水循环中至关重要的一环, 也是直接受到气候变化影响的重要气象因子之一, 其中强降水事件会对人类社会和生态系统产生一系列的潜在影响, 其对大尺度气候变化和变率的响应一直是广泛关注的问题 (Handmer et al., 2012)。

翟盘茂等 (2007)、杨金虎等 (2008)、Donat et al. (2013, 2016)、Westra et al. (2013)、O’Gorman (2015)、李东欢等 (2017) 研究发现, 全球范围内大多数地区的极端降水量、强度和频率都呈现增加趋势, 日极端降水也越来越多。增加的极端降水事件及降水强度会增大暴雨洪涝的频率和强度, 对洪水风险产生影响 (丁一汇, 2008; Donat et al., 2016)。因此, 即使不考虑城市化本身引起的特大城市极端降水变化, 在大尺度气候变化和变率背景下, 随着城市化及其城郊人口快速增长和基础设施老化, 城市和城郊地区将更容易受到极端降水事件的影响 (Caretta et al., 2022)。城市地区在全球变暖和城市化的双重影响下发生城市内涝的风险大大提升, 并可能引发一系列的次生灾害和经济损失。

短历时强降水是暴雨的重要组成部分, 相较于持续时间长的稳定型降水造成的暴雨, 短历时强降水造成的暴雨具有降水强度大、持续时间短、空间尺度小等特征 (丁一汇, 2005)。此类强降水的发生发展过程更复杂, 致灾性更强, 精准预报和防御难度更大, 对人民安全和城市建设造成了更大威胁 (Lyman et al., 2005; 廖移山等, 2010)。

北京作为我国首都, 经历了快速的城市扩张后成为超大型城市。北京地区的气候为典型的温带大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 降水的季节分配很不均匀, 夏季降水量占到了年总降水量的 2/3 (杨萍等, 2017), 其强度和极端性较强, 具有较高的致灾风险 (赵玮等, 2022)。近 20 年来, 北京市极端降水事件频繁发生, 据统计出现了超过 30 次极端降水事件, 其中最典型的是发生于 2012 年和 2016 年的暴雨事件 (袁冯, 2020) 以及 2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日暴雨事件。2012 年的“7·21”暴雨事件造成北京市至少 79 人死亡,

160.2 万人受灾, 经济损失达 116.4 亿元 (孙继松等, 2012; 孙建华等, 2013)。尽管 2016 年“7·20”暴雨事件没有造成巨大损失, 反而有效地补充了北京的地下水资源 (田付友等, 2021), 但 2023 年“7·31”罕见暴雨事件再次引起严重灾害, 因灾死亡 33 人, 失踪 18 人。

目前, 北京地区极端降水的空间分布特征表现为西南—东北以及城区较强 (尤焕苓等, 2014), 极端降水指数在城区和平原南部上升 (Song et al., 2019), 小时极端降水量和短历时强降水的发生频率均呈现城市地区高于乡村地区的特征 (Yang et al., 2017; Yuan et al., 2020), 在山地迎风坡也有较高的发生频率 (Zheng et al., 2021)。自动气象站逐时降水数据的分析结果显示 (Yang et al., 2013a), 短历时强降水事件在夏季降水中占主导地位, 尤其是在城市地区, 降水强度则自东南向西北明显减小, 在城区和东北部有高强度中心, 7 月城区短历时降水强度最大 (刘伟东等, 2014)。近年来研究发现, 城市化对北京城市的降水和极端降水产生了显著影响 (Yang et al., 2013b, 2017; Liu et al., 2021), 城区和下风方向的降水量明显增加 (Yu et al., 2019), 强降水强度和频次也都增加 (Song et al., 2014; Yang et al., 2014; Liu et al., 2021), 面临着更加频繁的暴雨和洪水事件。另有研究发现, 北京地区的极端强降水事件多发生于傍晚至夜间和凌晨至清晨 (Yang et al., 2017; Yuan et al., 2020), 城市地区相比于其他地区更集中于傍晚和清晨 (Zheng et al., 2021)。

然而, 针对小时特别是次小时尺度的区域极端降水研究很少。战云健等 (2021) 分析了中国夏季分钟极端降水变化, 发现小时内不同历时最大降水量存在增加趋势, 其中 15~45 min 最大降水量的增速最大, 这可能是导致夏季极端降水事件增加的主要因素。但是, 不论是在全国范围, 还是在北京地区, 还没有对分钟极端降水的气候学特征开展系统性研究。因此, 目前对北京地区分钟尺度极端降水的时空分布特征还缺乏基本了解。

随着国家级台站自记纸资料的数字化, 长时间序列的分钟降水数据集得以建立 (Ju et al., 2019)。对北京地区的 20 个国家级气象站而言, 个别站点的分钟降水记录最早可以追溯到 1951 年, 1961 年后所有站点的分钟降水资料均有记录, 目前已经完成了数字化和质量控制, 为开展相关研究提供了重

要数据基础。本文利用分钟降水数据,分析了北京地区 1961~2021 年 6~9 月小时内不同持续时间下强降水事件的发生频次、平均强降水量和最大强降水量 3 个特征量的空间分布和日变化特征。这项工作可以增进对北京地区次小时尺度极端降水气候学基本特征的理解,为短历时极端降水天气预报预警和城市暴雨内涝灾害风险评估提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区域

北京位于中国华北平原北部,其西部、北部和东北部三面环山,海拔多在 1000 m 以上,东南部是一片缓缓向渤海倾斜的平原,海拔均在 100 m 以下复杂的地形造成了北京地区降水的多样性。图 1 给出了北京地区土地利用和 20 个国家气象站的分布情况。

现有研究中的城乡划分依据通常是人口密度 (Ren et al., 2008; Liang and Ding, 2017)、夜间灯光数据 (Owen, 1998; Hansen et al., 1999)、土地利用类型 (Tysa et al., 2019) 或站点所在地理位置 (Yang et al., 2013b; Zhang et al., 2019) 等信息。在北京地区,前人根据台站年平均气温和季节平均气温 (初子莹和任国玉, 2005)、不同半径下缓冲区内建成区的相对面积 (Tysa et al., 2019) 和环线交通系统 (Yang et al., 2013b) 对国家级气象站进行了分类,挑选出了城市站和乡村站。

为了分析不同站点的分钟强降水特征,北京地区的气象站点将会被划分为城市站、郊区站和乡村

站 3 类。结合前人的分类结果,本文中站点的详细划分情况见表 1。

表 1 北京地区国家气象站名称、缩写及分类情况

Table 1 Name, abbreviation, and classification of national meteorological stations in Beijing area

气象站名称 (缩写)	
城市站	顺义 (SY)、海淀 (HD)、通州 (TZ)、朝阳 (CY)、北京 (BJ)、石景山 (SJS)、丰台 (FT)、大兴 (DX)
郊区站	密云 (MY)、怀柔 (HR)、平谷 (PG)、昌平 (CP)、门头沟 (MTG)、房山 (FS)
乡村站	延庆 (YQ)、佛爷顶 (FYD)、汤河口 (THK)、上甸子 (SDZ)、斋堂 (ZT)、霞云岭 (XYL)

2.2 数据介绍

本文所用降水资料为北京市 20 个国家站地面分钟降水数据集,来源于中国气象局国家气象信息中心提供的中国国家级地面气象站分钟降水数据集。该数据集的时间分辨率为 1 min,包含了 1951 年以来中国 2400 多个站点的每分钟降水量记录,经过了多重质量控制和一次质量评估,具有较高完整性和准确性 (Ju et al., 2019)。2004 年以前数据以自记纸记录为主,2004 年后逐渐被自动观测系统转换的分钟降水数据取代 (战云健等, 2021)。

由于北京地区 20 个国家站分钟降水资料的起始年份各异,并且早期数据存在缺测情况,分钟极端降水主要发生在夏季,本文选取 1961~2021 年 6~9 月的分钟降水数据进行研究。另外,还对各台站每年的数据进行了筛选,剔除了 6~9 月有效数据不足 3/4 的年份,仅选用数据完整性和连续性更高的序列参与后续分析。

在介绍研究区域时使用到的 2020 年中国土地利用数据集由中国科学院资源与环境科学数据中心提供 (<http://www.resdc.cn>[2024-01-19])。该数据集的空间分辨率为 1.0 km×1.0 km,是基于美国陆地卫星 Landsat 遥感影像,通过人工目视解译构建而成,其中土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 个一级土地利用类型以及 25 个二级类型。本研究中将二级类型中的城镇用地和其他建设用地作为城市用地。

2.3 分析方法

本文使用的分钟降水数据在自记纸时期的精度为 0.01 mm,因此分钟降水量≥0.01 mm 表示有降水发生;自 2004 年开始,自动站时期的分钟降水

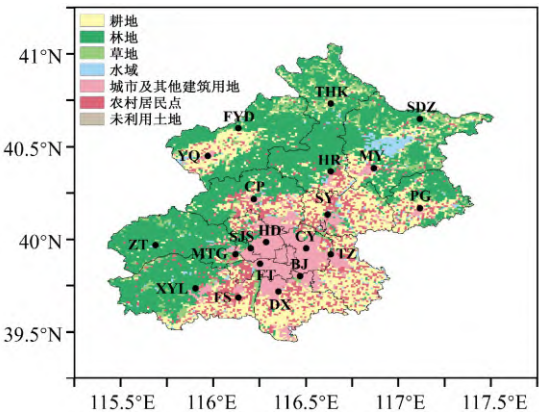


图 1 北京地区土地利用类型和国家气象站分布情况。

Fig.1 Land use types and distribution of national meteorological stations in Beijing area.

数据精度为 0.1 mm。为了研究不同持续时间下强降水事件发生频次、平均强降水量和最大强降水量的空间分布和日变化特征，根据资料高时间分辨率的特点，选择持续时间为 1、5、10、15、20、30、45、60 min 的强降水事件进行研究。在根据不同降水历时确定降水过程时，采用滑动选取法（环海军等, 2017），该方法在时间上不受日和月边界的限制，但不可以跨年挑选。这种方法挑选降水过程会出现各过程间相重叠的情况，但它却可以减少因样本量小带来的统计误差。

分钟强降水事件依据不同连续时间下降水事件的累计降水量，采用相对阈值法进行定义；取 1981~2010 年各降水历时累计降水量的第 95 百分位数作为强降水阈值，将累计降水量超过强降水阈值的降水事件记为强降水事件，从而统计出不同降水历时下强降水事件在研究时段内每年的发生频次、平均强降水量、最大强降水量及强降水强度（详细定义见表 2）。

为了进一步说明分钟强降水事件的挑选方式和各统计量的定义，以持续时间为 5 min 的降水事件为例进行说明。若连续 5 min 每分钟均有降水，则可以确定一次连续 5 min 降水事件并得到累计降水量。取 1981~2010 年期间所有 5 min 累计降水量的第 95 百分位数作为 5 min 降水事件的强降水阈值，将累计降水量超过强降水阈值的事件定义为 5 min 强降水事件。这样就可以统计得到 1961~2021 年 5 min 强降水事件在每一年的统计量。

根据上述定义，可以得到北京地区 20 个站点在不同降水历时下逐年的强降水阈值、发生频次、最大强降水量和平均强降水量，为了观察这些统计量在空间上的分布特征，在计算出每个站点的多年平均值，使用反距离权重法（Inverse Distance Weighted, IDW）将站点数值插值到格点上，得到

相对均匀的强降水空间分布特征。反距离权重法的具体计算方法为

$$w_j = \frac{d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^{20} d_i^{-2}}, \quad (1)$$

其中， w_j 为插值点到每个站点的权重系数， d_i 为插值点到各站点的距离。

$$x_j = pw, \quad (2)$$

其中， x_j 为插值点的对应数值， p 为 20 个站点的数值矩阵， w 为插值点的权重系数矩阵。在本研究中，站点数值将被插值到 0.0125° （纬度） $\times 0.0125^\circ$ （经度）的网格点上。

本研究所使用的高时间分辨率降水数据，可以更细致地揭示出强降水的日内变化特征。在筛选出各站点的强降水事件时，可以统计强降水事件在日内的发生时间，从而得到强降水事件发生频次、平均强降水量和最大强降水量在一天内不同时刻下的数值，再根据站点分类情况得到 3 个统计量在城市站、郊区站和乡村站的日变化情况。由于数据的时间分辨率较高，为了更好地观察分钟强降水的日内特征，在给出逐分钟变化的基础上增加了滑动平均曲线，滑动窗口设置为 30 min。

3 结果分析

3.1 空间分布特征

1961~2021 年 6~9 月，不同持续时间下分钟强降水事件相对阈值的多年平均值在空间上主要呈现东高西低的分布，高值区域主要以东北山前地带为主，东南部平原地区的相对阈值也较高，尤其是在降水持续时间较长时，并随着持续时间增加逐渐明显。在 1 min 强降水事件的相对阈值（图 2a）中，高值区主要在顺义、平谷周围及其北部，随着降水

表 2 北京地区 1961~2021 年 6~9 月强降水事件相关统计量的定义

Table 2 Definitions of statistics related to intense precipitation events from June to September during 1961–2021 in Beijing area

统计量名称	定义	单位
发生频次	一年中强降水事件的发生次数	
平均强降水量	一年中强降水事件累计降水量的算术平均值	mm
最大强降水量	一年中强降水事件累计降水量的最大值	mm
平均强降水强度	一年中平均强降水量与降水持续时间的比值	mm/min
最大强降水强度	一年中最大强降水量与降水持续时间的比值	mm/min

历时的增加, 相对阈值的高值区逐渐向南扩展; 持续时间 20 min 以上的强降水事件相对阈值在城市西南角的高值逐渐明显。从图 2h 中可以看到, 北京大部分地区的 60 min 强降水事件相对阈值都较大, 仅在北部和西部小范围内呈现为低阈值。

分钟强降水事件发生频次多年平均值的空间分布如图 3 所示。强降水事件发生频次较高的站点, 在平原地区主要位于六环内的偏北部, 在山区主要集中在怀柔 and 密云。城区发生频次偏高的特征在 5 min (图 3b) 和 10 min (图 3c) 强降水事件中更为明显; 山区怀柔 and 密云高值中心的特征, 除了 1 min (图 3a) 强降水事件外, 在其他强降水事件的频次分布中都很明显。10 min 以下的强降水事件中, 西南部的霞云岭站有着很高的发生频次, 但随着降水历时增加, 其强降水事件发生频次与周围地

区的差异逐渐减小。在平原地区, 整体上看, 不同持续时间下强降水事件的发生频次都呈现出不同程度的城乡差异, 这说明城市化的确对大型城市分钟降水事件的发生产生了影响, 使其相对于乡村地区, 更加频繁地发生于城区。

与强降水事件相对阈值的空间分布类似, 分钟最大强降水量 (图 4) 也呈现自东南向西北减少的分布态势。在平原地区, 30 min 以内最大强降水量高值区域主要在六环内的北部和城市东北部山前, 降水历时增加后高值区向西南方向扩展, 并且北京东南部和西北部最大强降水量的差异也逐渐增大。从图 5 中可以看出, 平均强降水量的空间分布情况与最大强降水量和相对阈值的空间分布基本一致, 也自东南向西北减少, 其大值区在较短历时的降水事件中主要位于北京中部及东北部的平原地区和怀

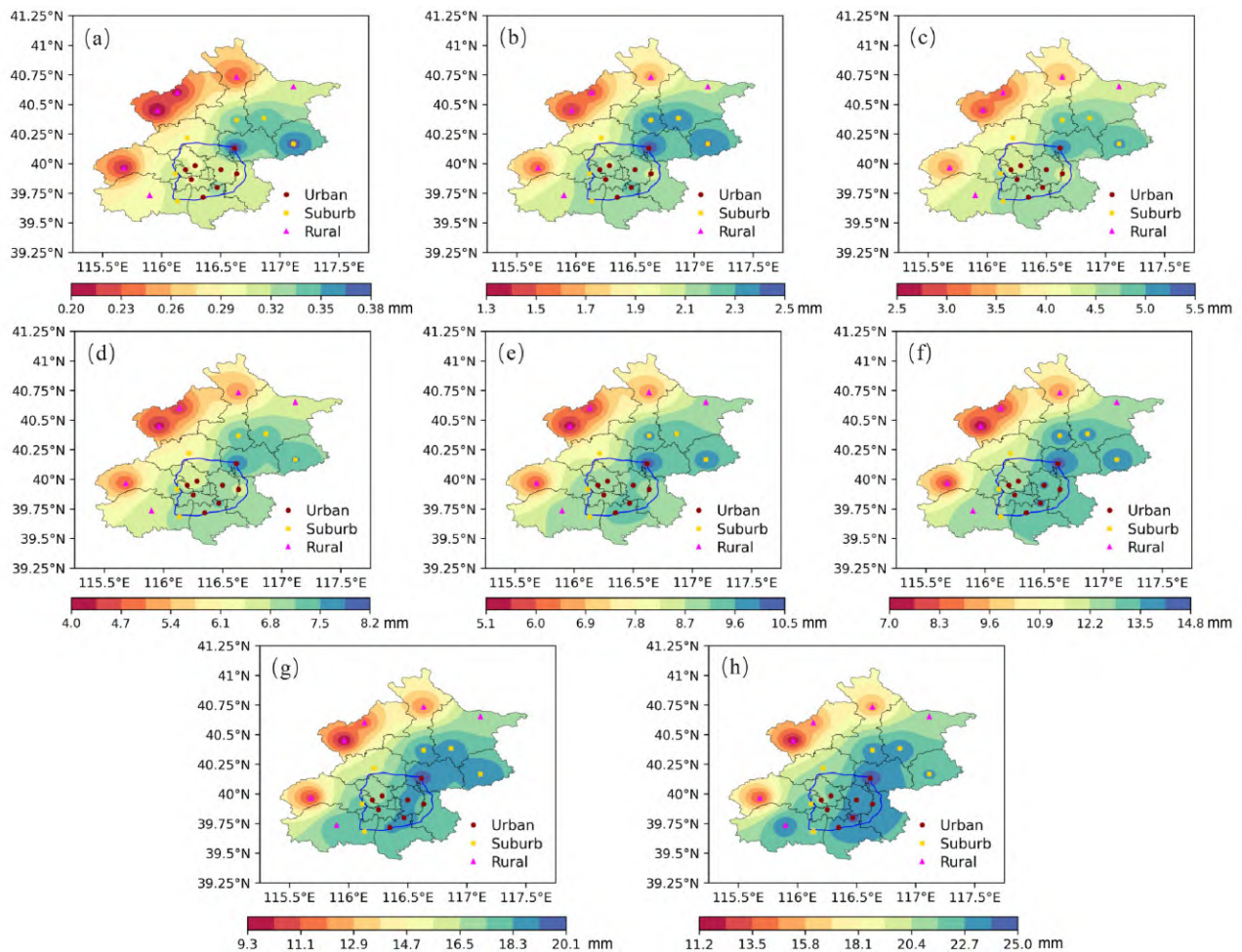


图2 1961~2021年6~9月北京地区连续 (a) 1、(b) 5、(c) 10、(d) 15、(e) 20、(f) 30、(g) 45、(h) 60 min 强降水事件相对阈值的空间分布 (蓝色环线: 六环线)。

Fig. 2 Spatial distributions of the relative thresholds of intense rainfall events for continuous (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 15, (e) 20, (f) 30, (g) 45, and (h) 60-minute from June to September during 1961–2021 in Beijing area (blue ring: The Sixth Ring Road).

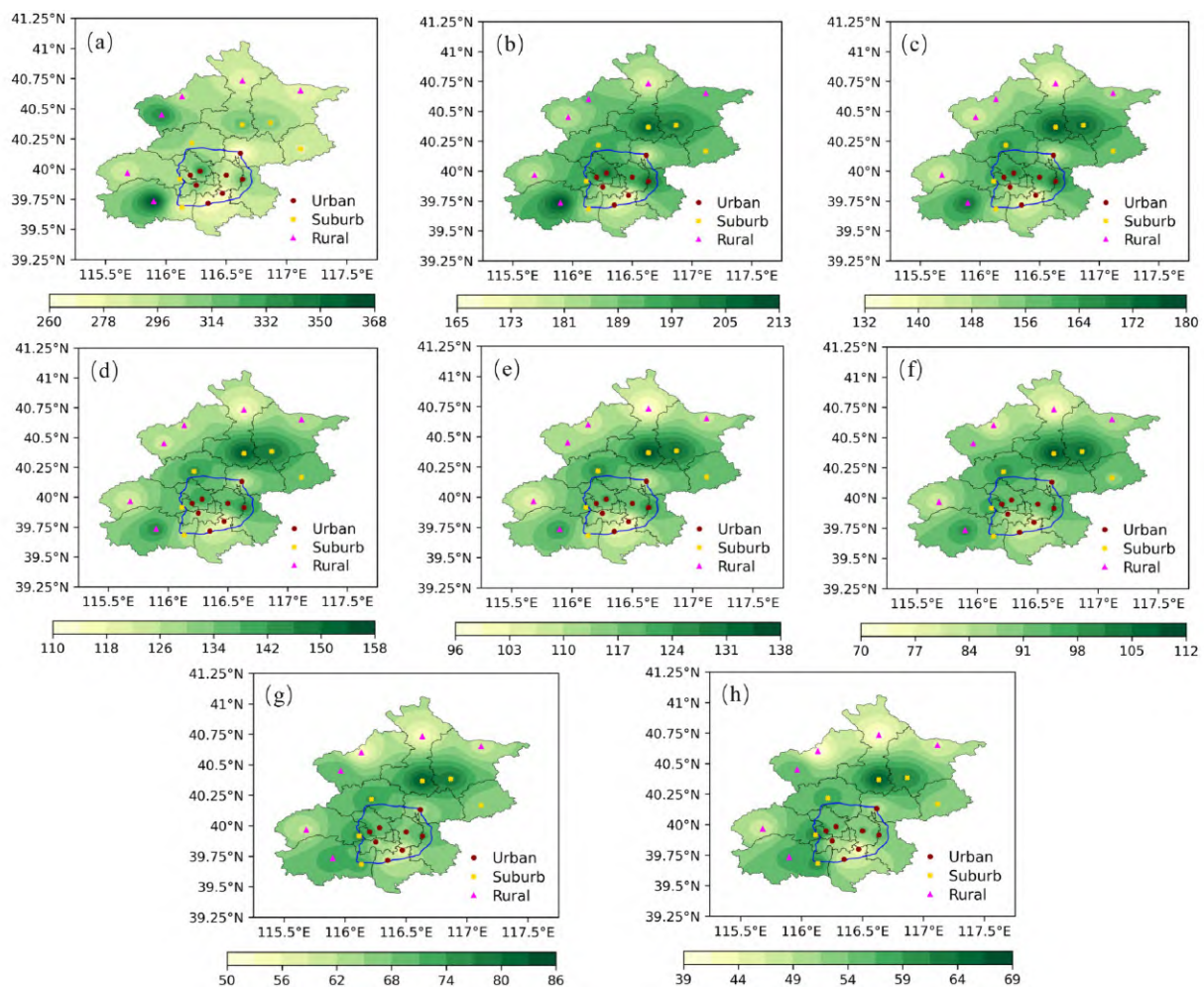


图3 同图2, 但为发生频次。

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the frequency.

柔、密云山区, 随着强降水事件历时增加, 高值区域逐渐向西南延伸。

不论是最大强降水量还是平均强降水量, 都在东北部平原地区的顺义和山区、山前的密云、怀柔和平谷站出现高值, 并且平原和山前迎风坡的数值大于山区。Song et al. (2014) 使用小时降水数据的研究, 也发现北京平原地区的城市区域及其东北部山前地带降水量出现相对增加趋势。产生这一现象可能主要存在两个原因, 一方面是城市化导致城区和东北下风方向短历时强降水增加 (杨萍等, 2017), 另一方面是由于北京地区地形的存在强化了盛行风下游方向的温度梯度, 在山前迎风坡产生了低空风的垂直切变, 增强了边界层内的垂直上升运动, 有利于局地对流降水的发生发展 (孙继松和杨波, 2008)。密云站和怀柔站出现了发生频次和强降水量的高值, 这些还可能与附近存在的水库有

关, 他们可以提供充足的水汽, 有利于降水过程的产生和持续 (郑祚芳等, 2017)。

图6给出了城市、郊区和乡村3类站点在不同降水历时中的平均强降水强度和最大强降水强度。对比之下最大强降水强度明显大于平均强降水强度, 并且降水持续时间越短, 二者间的差异越明显。平均强降水强度在城市、郊区和乡村站随着降水历时增加均呈现出先增后减的趋势, 在持续时间为5 min的强降水事件中强度达到峰值, 而最大强降水强度则是随着降水时长的增加逐渐降低。不同类别站点的平均强降水强度和最大强降水强度也有细微差异, 乡村站的强度最小, 城市站和郊区站的强度不相上下, 并且稍大于乡村站的强度。在城市站和郊区站, 降水历时越长, 平均强降水强度的数值范围越大, 即不确定性越大, 而城市、郊区和乡村站的最大强降水强度则是降水历时越短, 不确定性

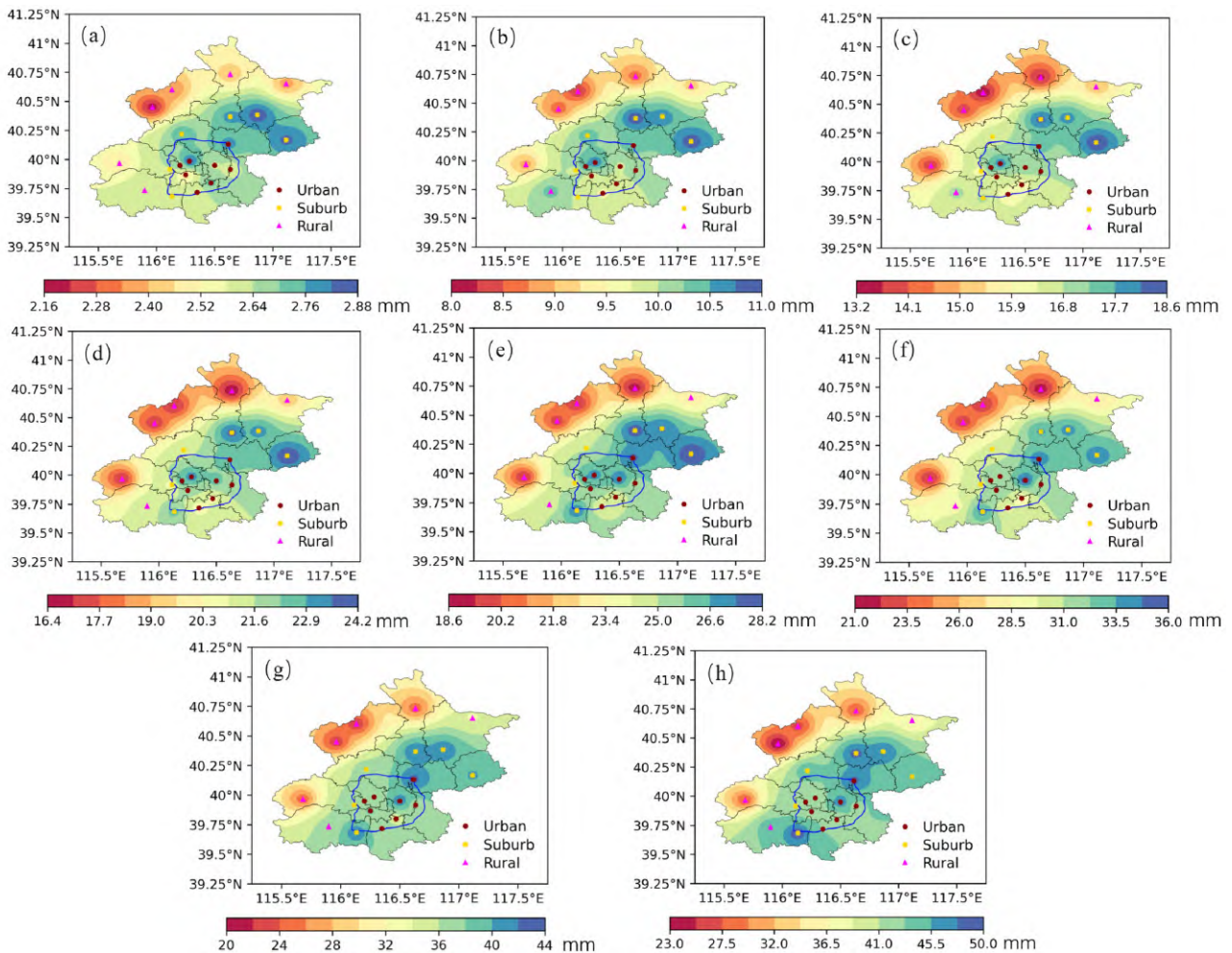


图4 同图2, 但为最大强降水量。

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the maximum precipitation.

越大。较大的不确定性意味着分钟强降水事件的强度没有稳定在具体的数值, 容易受一些局地、区域或更大尺度上的因素影响, 存在着更大的随机性。

3.2 日内变化特征

图7展示出了强降水事件发生频次在城市、郊区和乡村站的日内变化情况。整体上看分钟强降水事件更多地出现在09:00(北京时间, 下同)以前和18:00以后, 但随着降水持续时间的增加, 12:00和15:00前后也开始有更多的分钟强降水发生, 尤其是在45 min及以上的强降水事件中。

城市地区发生强降水次数更多的时刻主要为09:00前和21:00后, 10~45 min强降水事件在15:00至18:00的发生频次高于其他历时。随着降水历时的延长, 城市地区分钟强降水事件06:00前的发生频次渐渐上升, 并在30 min以上的事件中有集中于06:00的迹象, 09:00前的稍有减少, 21:00

后的发生频次反而先降后升, 并在45 min以上的强降水事件中达到峰值。郊区的强降水多发生于21:00至次日06:00, 降水持续时间增加后, 12:00前后的发生频次增多; 乡村短历时强降水发生的时间随机性更大, 但最明显的是所有降水历时中都有较多的强降水事件发生于03:00至06:00, 18:00后的分钟强降水事件从降水持续时间20 min以上开始明显减少。对比之下, 乡村短时强降水发生的时间随机性更大, 但最明显的是发生在06:00前的强降水事件更多。Zhong et al. (2017) 在对比了长三角地区进行的3组数值模拟试验后发现, 城市化对午后极端小时降水发生频次的影响最显著, 尤其是在天气尺度强迫较弱的情况下。12:00后产生的强降水可能与地面净辐射不断增大, 在午后达到最大, 为强降水事件的发生提供了充足的热力条件有关。

然而, 不同持续时间下分钟强降水事件平均强

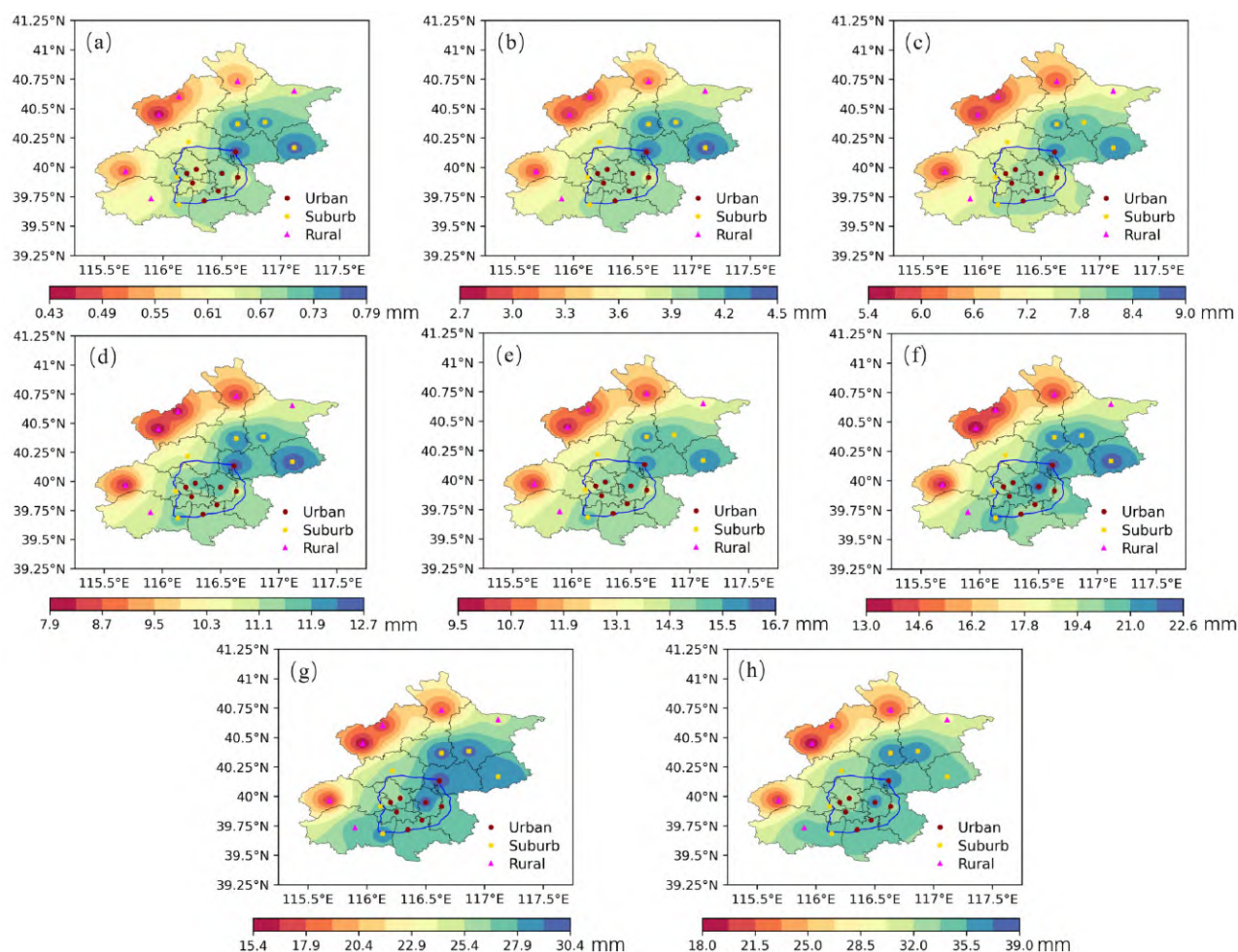


图5 同图2, 但为平均强降水量。

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the average precipitation.

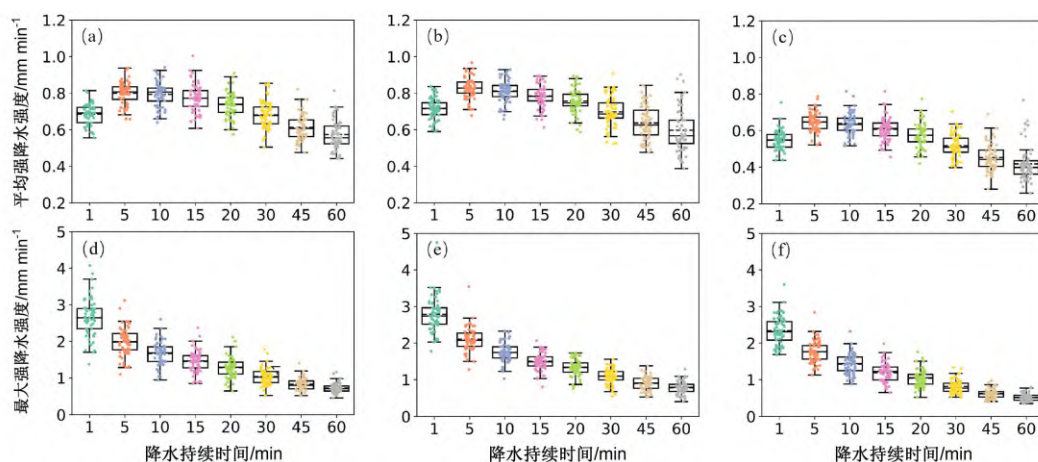


图6 1961~2021年6~9月北京地区城市(第一列)、郊区(第二列)、乡村站(第三列)每年(a~c)平均强降水强度和(d~f)最大强降水强度的箱线图(箱体下、上边缘分别为第25%、第75%分位值;虚线为平均值,实线为中位值;晶须上、下边缘分别为最大值和最小值,超出部分为异常值)。

Fig. 6 Box plots of annual (a-c) average intense precipitation intensity and (d-f) maximum intense precipitation intensity at urban (the first column), suburban (the second column), and rural stations (the third column) from June to September during 1961–2021 in Beijing area (the lower and upper edge of the box is the 25% quantile and the 75% quantile, respectively; the dotted line is the average value and the solid line is the median value; the upper edge of the whisker is the maximum value, the lower edge of the whisker is the minimum value, and the excess part is the outlier).

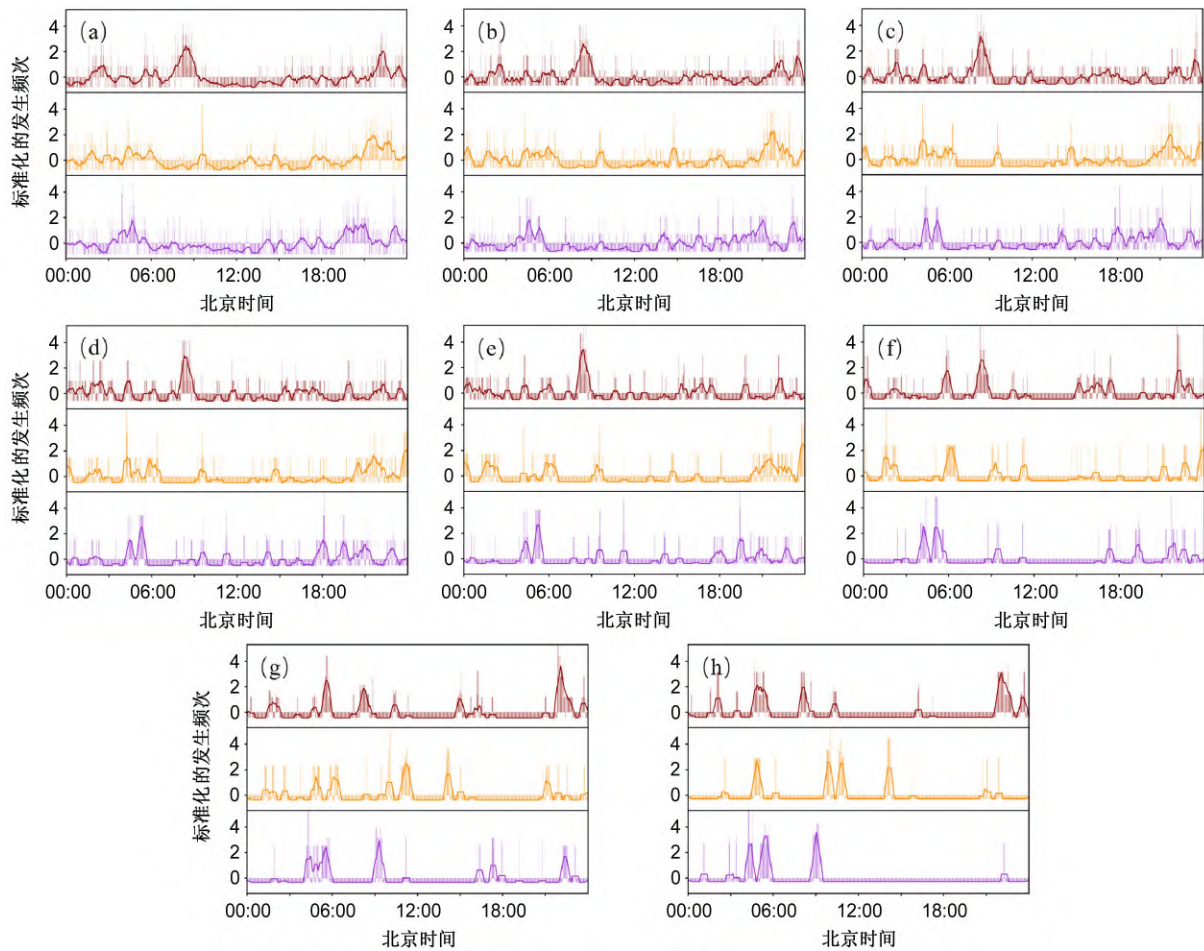


图7 1961~2021年6~9月北京地区连续(a) 1、(b) 5、(c) 10、(d) 15、(e) 20、(f) 30、(g) 45、(h) 60 min强降水事件发生频次的日变化特征(深红:城市站;橙色:郊区站;紫色:乡村站)。

Fig. 7 Diurnal variation characteristics of the frequency of intense precipitation events for continuous (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 15, (e) 20, (f) 30, (g) 45, and (h) 60-minute from June to September during 1961–2021 in Beijing area (dark red: Urban station, orange: Suburban station, purple: Rural station).

降水量(图8)的日内分布与发生频次大有不同,在时间上相对更加平均,波动更加频繁。城市地区的平均强降水量在15:00至24:00存在高值,这一现象随着降水持续时间的延长提前至了15:00至18:00,但在60 min强降水事件(图8h)中高值集中于18:00至21:00。夜间平均强降水量更大、发生频次更多可能是由于夜间城市热岛效应更明显(Yuan et al., 2020),有着更好的热力条件。郊区平均强降水量多的时刻主要在15:00后,降水持续时间超过20 min以18:00后为主,60 min强降水事件中03:00至06:00也出现了较多的平均强降水量。乡村地区的1 min平均强降水量在21:00前后较多,在其他持续时间的降水事件中可以发现12:00前后出现了较明显的峰值,降水历时越长峰值越明显,15 min以上的事件中18:00前也出现了峰值,仅次于12:00前后。

图9为最大强降水量的日内分布情况,其变化情况与平均强降水量基本一致,并无明显差异,但其峰值会稍大于平均强降水量的峰值,尤其是在城市地区和乡村地区。

4 讨论

先前的研究主要集中在小时及以上的时间尺度上,本研究使用的分钟降水数据具有更高的分辨率和更长的时间跨度,可以捕捉到更加精细化的城市地区短历时强降水的气候学特征。Yang et al. (2014)、Liu and Niyogi (2019)、Zhang et al. (2019)、Zheng et al. (2021)研究表明,城市中心及其下风方向可以观测到降水异常,极端降水发生频率和降水量通常大于其他地区,极端降水发生在迎风坡的频率也较高;城市地区在夏季出现得更

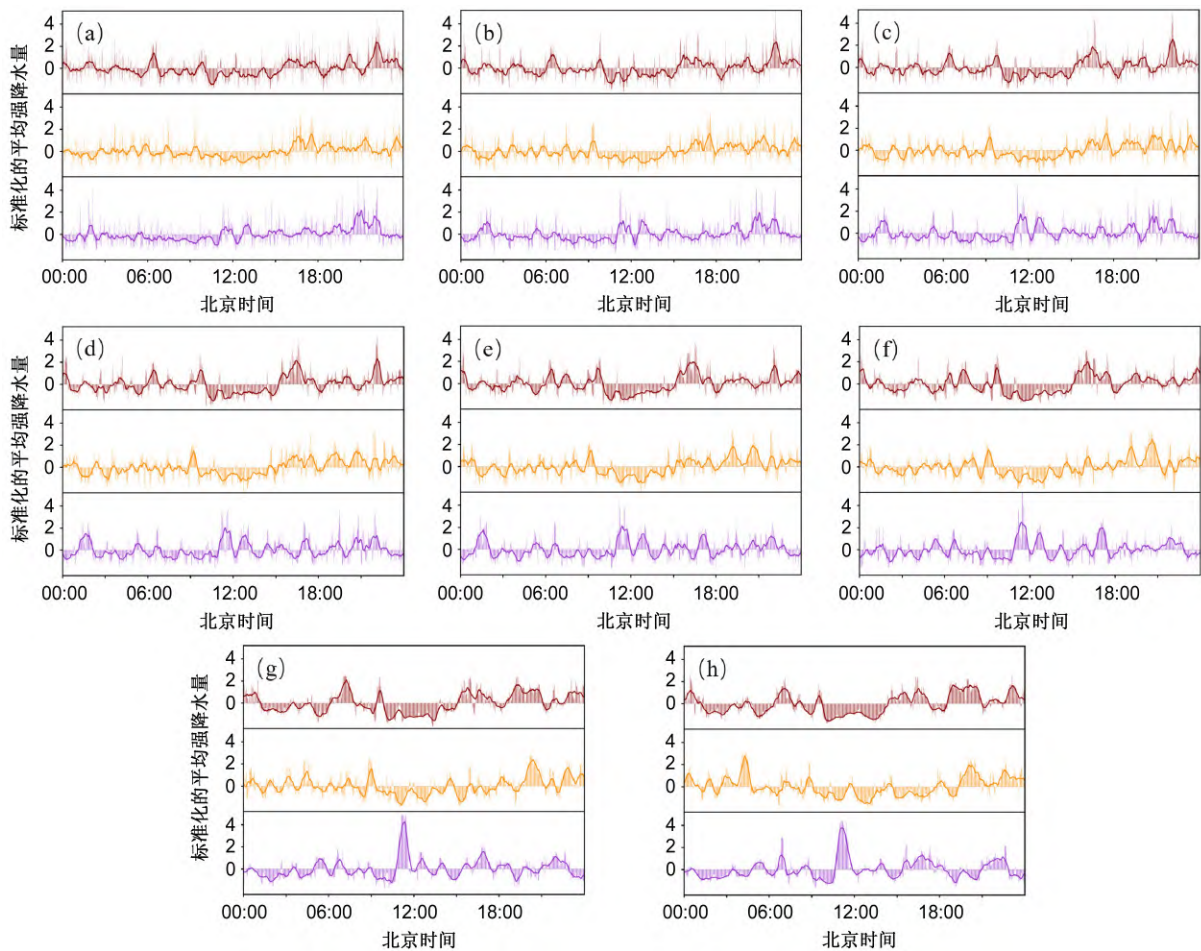


图 8 同图 7, 但为平均强降水量。

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the average intense precipitation.

多的是持续时间更短、突发性更强的降水事件 (Yang et al., 2013a, 2017; Wu et al., 2019)。根据小时内分钟强降水事件的空间分布特征, 北京地区的平原和东北部山前地带具有更频繁的短历时强降水事件和更高的强降水量, 这与前人所得结论一致。

产生这一现象主要是受城市化、地形作用和局地水体特征的影响。特殊的地表特性和人为热量排放使得城市地区明显比周围地区更热 (Yang et al., 2013b), 这不仅增加了大气边界层的不稳定性 (Argüeso et al., 2016), 还使城市地区输送来更多的水汽至高层大气 (Fan et al., 2017; Li et al., 2021), 为形成、加强或延长对流性天气提供了良好的热力条件 (陈明轩等, 2013)。下垫面物理属性造成的热力差异使城市地面形成了中尺度风速辐合线, 对对流单体有明显的组织作用 (孙继松等, 2006), 另外城市地表粗糙度增大, 导致了更强的低层辐合 (Li et al., 2021), 这些都会使城市地区

或者城乡边界处出现更多的对流单体 (Ganeshan and Murtugudde, 2015; Lin et al., 2021), 容易产生短时强降水事件。

分钟强降水相对阈值似乎和站点海拔高度存在一定关系。图 10 中展示各站点海拔高度和相对阈值的关系, 可以看出, 随着海拔高度的增加, 相对阈值大体上呈现下降趋势, 并且持续时间越长的强降水, 相对阈值的下降幅度越大。但也可以明显地看出, 在大约 100 m 以下的平原地区, 相对阈值对高度变化呈现一定波动, 说明在低海拔区域海拔高度差异不大的情况下, 站点附近其他局地因素可能是造成相对阈值空间差异的主要原因。在海拔较高的站点间, 相对阈值也存在一定波动, 这可能是因为受地形影响, 位于山体迎风坡和背风坡的站点具有不同的动力抬升条件, 致使强降水相对阈值出现不同。

北京三面环山的特殊地形使得山前区域在偏东

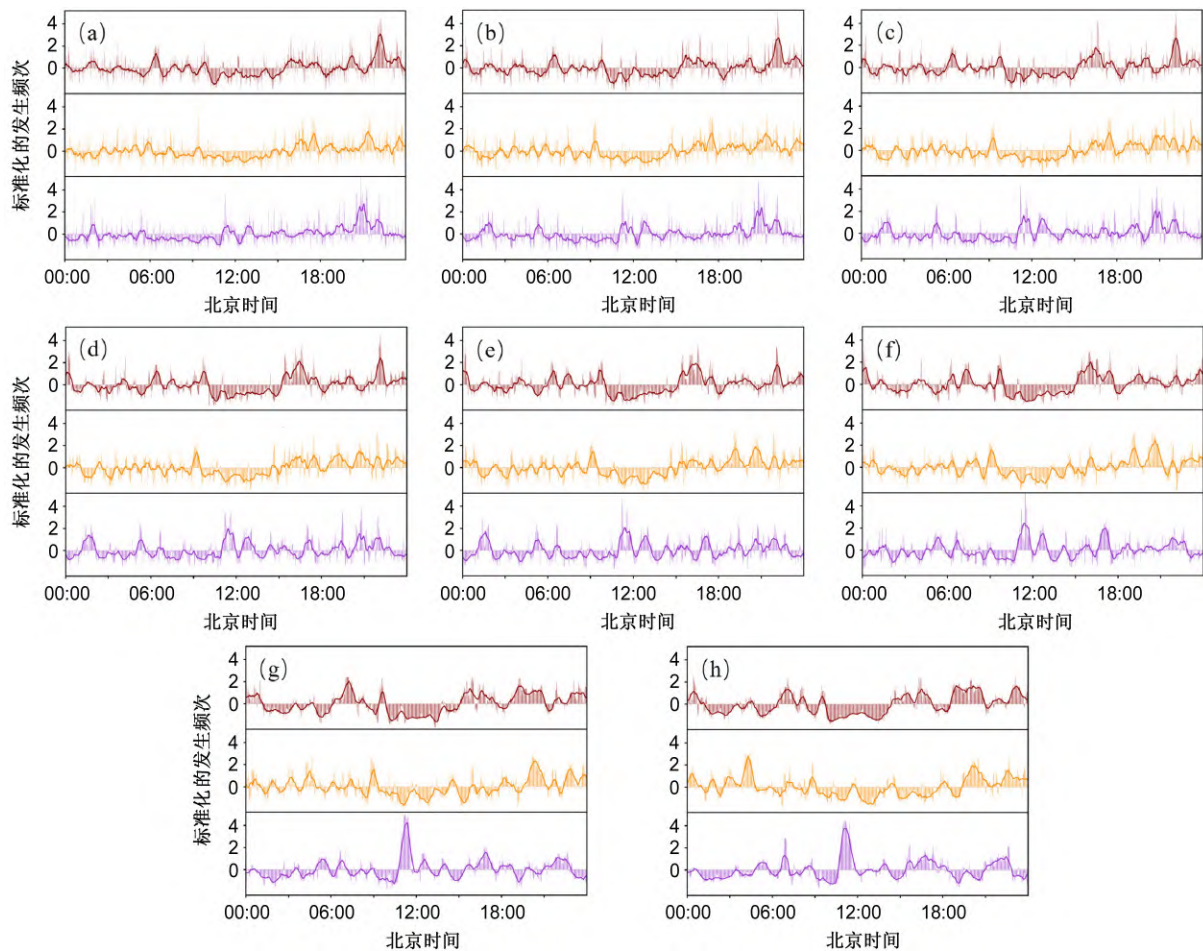


图9 同图7, 但为最大强降水量。

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the maximum intense precipitation.

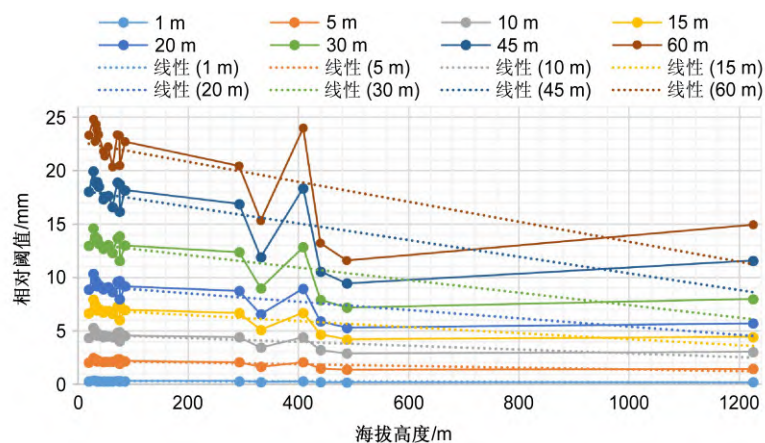


图10 不同持续时间下北京地区20个站点海拔高度和1961~2021年6~9月强降水事件相对阈值的折线图及线性趋势。

Fig. 10 Line graph and linear trend of altitude and relative thresholds of intense precipitation events from June to September during 1961–2021 at 20 stations with different durations in Beijing area.

气流或偏南气流的影响下极易产生或维持降水过程。浅薄偏东风能使局地形成较强辐合,在暖湿空气集中和热力不稳定时直接触发对流,造成突发性局地

暴雨,而深厚偏东风产生的辐合较厚,具有较强的水汽输送能力,利于对流的发展和维持(张文龙等,2013)。孙继松等(2012)和陈明轩等(2013)

的研究发现,在中尺度对流系统的形成阶段,地形强迫效应非常有利于偏南气流带来的暖湿空气在山前迎风坡抬升,低层风形成的辐合带长时间维持也有利于水汽积聚,从而促进了对流的发展,加大山前降水量。在密云和怀柔附近的水库可以为降水的产生和维持提供或补充水汽(郑祚芳等, 2017),从而使北京东北部山前地带出现更多、更大的分钟强降水事件,并且该区域内的高值特征比平原地区更为明显。

然而,本研究发现平原地区较长历时的分钟强降水事件会产生更大范围的强降水量高值区域,发生频次并未随着降水历时的变化呈现出明显的规律性变化。这说明城市化对超短历时强降水事件的影响更具局地性,而持续时间较长的强降水过程则会在更大的空间范围内产生影响。另外,与小时以上的强降水相比,城市及其周边地区分钟强降水事件在落区上具有一定的随机性,由于降水时长更短,更易受到一些局地因素的影响。这也导致了城市站和郊区站的分钟强降水强度比乡村站更强,年际变异性也更大。

北京地区夏季极端降水一般出现在傍晚前后、夜间或凌晨前后(孙继松和杨波, 2008; 赵玮等, 2022),短历时强降水在城区大多开始于 16:00 至 22:00 和 00:00 至 06:00 (Yang et al., 2017)。本研究得到了更加精确的日内变化,城市站的分钟强降水事件在每日 21:00 至次日 09:00 发生得更加频繁,强降水量的高值出现在 18:00 和 21:00 前后;而乡村站主要发生于 03:00 至 06:00,强降水量则是在 12:00 前后更大。Zhang and Zhai (2011) 的研究表明,中国大部分地区的地表会受太阳辐射影响加热,使极端降水事件的最高发生频次主要出现在下午和傍晚;华南地区城市热岛效应引起的热扰动会触发、促进午后的局地对流(Wu et al., 2019);长三角地区在城市化、海陆风和太阳辐射的综合影响下,降水强度的城乡差异在午后和深夜更明显(Liang and Ding, 2017; Jiang et al., 2020)。不同纬度地带城市化对短历时强降水日内变化的影响可能具有明显差异,其具体原因需要开展进一步研究。

虽然本研究利用长时间序列分钟降水资料对北京地区 6~9 月强降水事件的气候学特征进行了分析,在一定程度上揭示了北京超短历时强降水的空间分布特征和日变化特征,并对空间分布的形成机制进行了讨论,但本文对强降水事件日变化的成因

和机制,仅做粗浅讨论,还需要进一步研究。

5 结论

本文根据北京市 20 个国家气象站 1961~2021 年 6~9 月的分钟降水观测资料,给出了北京地区分钟强降水的空间特征和日内变化特征,结论如下:

(1) 北京地区分钟强降水事件主要发生在平原地区和东北山前地带,强降水量在该区域内也存在高值,其中平原地区分钟强降水量高值区域的分布范围随着降水历时的增加也逐渐增大。

(2) 平原地区城市站和郊区站的分钟强降水强度稍大于西部和北部乡村站的强度,但乡村站强度的年际变异性相对较小,城市站和郊区站有着比乡村站更大的分钟强降水强度和变异性。

(3) 分钟强降水事件在平原地区的城市站更频繁地发生于每日 21:00 至次日 09:00,强降水量的高值出现在 18:00 和 21:00 前后,对于在山区的乡村站而言,则主要发生在 03:00 至 06:00, 12:00 前后有着更大的强降水量。

参考文献 (References)

- Argüeso D, Di Luca A, Evans J P. 2016. Precipitation over urban areas in the western maritime continent using a convection-permitting model [J]. *Climate Dyn.*, 47(3-4): 1143-1159. doi:10.1007/s00382-015-2893-6
- Caretta M A, Mukherji A, Arfanuzzaman M, et al. 2022. Water [M]//IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 551-712. doi:10.1017/9781009325844.006
- 陈明轩,王迎春,肖现,等. 2013. 北京“7·21”暴雨雨团的发生和传播机理 [J]. *气象学报*, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 71(4): 569-592. doi:10.11676/qxxb2013.053
- 初子莹,任国玉. 2005. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响 [J]. *气象学报*, 63(4): 534-540. Chu Z Y, Ren G Y. 2005. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing region [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63(4): 534-540. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.04.015
- 丁一汇. 2005. 高等天气学(2版) [M]. 北京: 气象出版社, 309-456. Ding Y H. 2005. *Advanced Synoptic Meteorology (2nd ed.)*

- (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 309–456.
- 丁一汇. 2008. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响 [J]. 中国水利, (2): 20–27. Ding Y H. 2008. Human activity and the global climate change and its impact on water resources [J]. China Water Resources (in Chinese), (2): 20–27. doi:10.3969/j.issn.1000-1123.2008.02.008
- Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118(5): 2098–2118. doi:10.1002/jgrd.50150
- Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. 2016. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. Nature Climate Change, 6(5): 508–513. doi:10.1038/nclimate2941
- Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. 2021. Water cycle changes [M]/IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1055–1210. doi:10.1017/9781009157896.010
- Fan Y F, Li Y G, Bejan A, et al. 2017. Horizontal extent of the urban heat dome flow [J]. Scientific Reports, 7(1): 11681. doi:10.1038/s41598-017-09917-4
- Ganeshan M, Murtugudde R. 2015. Nocturnal propagating thunderstorms may favor urban “hot-spots”: A model-based study over Minneapolis [J]. Urban Climate, 14: 606–621. doi:10.1016/j.uclim.2015.10.005
- Handmer J, Honda Y, Kundzewicz Z W, et al. 2012. Changes in impacts of climate extremes: Human systems and ecosystems [M]/Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 231–290. doi:10.1017/CBO9781139177245.007
- Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, et al. 1999. GISS analysis of surface temperature change [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 104(D24): 30997–31022. doi:10.1029/1999JD900835
- 环海军, 刘岩, 孟伟, 等. 2017. 鲁中地区不同持续时间年最大降水特征 [J]. 干旱气象, 35(5): 815–821. Huan H J, Liu Y, Meng W, et al. 2017. Characteristics of annual maximum precipitation with different durations in the middle area of Shandong Province [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 35(5): 815–821. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0815
- Jiang X L, Luo Y L, Zhang D L, et al. 2020. Urbanization enhanced summertime extreme hourly precipitation over the Yangtze River Delta [J]. J. Climate, 33(13): 5809–5826. doi:10.1175/JCLI-D-19-0884.1
- Ju X H, Huang S P, Li C J, et al. 2019. Development of a self-recording per-minute precipitation dataset for China [J]. J. Meteor. Res., 33(6): 1157–1167. doi:10.1007/s13351-019-9061-6
- 李东欢, 邹立维, 周天军. 2017. 全球 1.5°C 温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估 [J]. 地球科学进展, 32(4): 446–457. Li D H, Zou L W, Zhou T J. 2017. Changes of extreme indices over China in response to 1.5°C global warming projected by a regional climate model [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 32(4): 446–457. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.04.0446
- Li Y N, Wang W W, Chang M, et al. 2021. Impacts of urbanization on extreme precipitation in the Guangdong–Hong Kong–Macau Greater Bay Area [J]. Urban Climate, 38: 100904. doi:10.1016/j.uclim.2021.100904
- Liang P, Ding Y H. 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014 [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(3): 321–334. doi:10.1007/s00376-016-6120-0
- 廖移山, 李俊, 王晓芳, 等. 2010. 2007 年 7 月 18 日济南大暴雨的 β 中尺度分析 [J]. 气象学报, 68(6): 944–956. Liao Y S, Li J, Wang X F, et al. 2010. A meso- β scale analysis of the torrential rain event in Jinan in 18 July 2007 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(6): 944–956. doi:10.11676/qxxb2010.089
- Lin Y, Fan J W, Jeong J H, et al. 2021. Urbanization-induced land and aerosol impacts on storm propagation and hail characteristics [J]. J. Atmos. Sci., 78(3): 925–947. doi:10.1175/JAS-D-20-0106.1
- Liu J, Niyogi D. 2019. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification [J]. Scientific Reports, 9(1): 7301. doi:10.1038/s41598-019-42494-2
- Liu J R, Schlünzen K H, Frisius T, et al. 2021. Effects of urbanization on precipitation in Beijing [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 122: 103005. doi:10.1016/j.pce.2021.103005
- 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 2014. 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 W D, You H L, Ren G Y, et al. 2014. Subtle precipitation characteristics in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(1): 61–68. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12142
- Lyman R E, Schroeder T A, Barnes G M. 2005. The heavy rain event of 29 October 2000 in Hana, Maui [J]. Wea. Forecasting, 20(4): 397–414. doi:10.1175/WAF868.1
- O’Gorman P A. 2015. Precipitation extremes under climate change [J]. Current Climate Change Reports, 1(2): 49–59. doi:10.1007/s40641-015-0009-3
- Owen T W. 1998. Using DMSP-OLS light frequency data to categorize urban environments associated with US climate observing stations [J]. Int. J. Remote Sens., 19(17): 3451–3456. doi:10.1080/014311698214127
- Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China [J]. J. Climate, 21(6): 1333–1348. doi:10.1175/2007JCLI1348.1
- Song X M, Zhang J Y, AghaKouchak A, et al. 2014. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119(19): 11250–11271. doi:10.1002/2014JD022084
- Song X M, Zhang J Y, Zou X J, et al. 2019. Changes in precipitation extremes in the Beijing metropolitan area during 1960–2012 [J]. Atmospheric Research, 222: 134–153. doi:10.1016/j.atmosres.2019.02.006
- 孙继松, 何娜, 王国荣, 等. 2012. “7·21” 北京大暴雨系统的结构演

- 变特征及成因初探 [J]. 暴雨灾害, 31(3): 218–225. Sun J S, He N, Wang G R, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 31(3): 218–225.
- 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 J S, Wang H, Wang L, 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.05
- 孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨 [J]. *大气科学*, 32(6): 1352–1364. Sun J S, Yang B. 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(6): 1352–1364. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.10
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等. 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征 [J]. *大气科学*, 37(3): 705–718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al. 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(3): 705–718. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12.202
- 田付友, 杨舒楠, 郑永光, 等. 2021. 北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析 [J]. *暴雨灾害*, 40(1): 27–36. Tian F Y, Yang S N, Zheng Y G, et al. 2021. Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 40(1): 27–36. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.004
- Tysa S K, Ren G Y, Qin Y, et al. 2019. Urbanization effect in regional temperature series based on a remote sensing classification scheme of stations [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(20): 10646–10661. doi:10.1029/2019JD030948
- Westra S, Alexander L V, Zwiers F W. 2013. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation [J]. *J. Climate*, 26(11): 3904–3918. doi:10.1175/JCLI-D-12-00502.1
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, et al. 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(8): 1799–1819. doi:10.1175/JAMC-D-18-0284.1
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. *气候与环境研究*, 13(1): 75–83. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(1): 75–83. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.10
- Yang L, Tian F Q, Smith J A, et al. 2014. Urban signatures in the spatial clustering of summer heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(3): 1203–1217. doi:10.1002/2013JD020762
- Yang P, Ren G Y, Hou W, et al. 2013a. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing municipality based on a high-density AWS dataset [J]. *Int. J. Climatol.*, 33(13): 2769–2780. doi:10.1002/joc.3622
- Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013b. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(8): 1803–1816. doi:10.1175/JAMC-D-12-0125.1
- Yang P, Ren G Y, Yan P C. 2017. Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area [J]. *J. Climate*, 30(15): 5851–5870. doi:10.1175/JCLI-D-16-0671.1
- 杨萍, 肖子牛, 石文静. 2017. 基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征 [J]. *大气科学*, 41(3): 475–489. Yang P, Xiao Z N, Shi W J. 2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(3): 475–489. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16134
- 尤焕苓, 刘伟东, 任国玉. 2014. 1981~2010 年北京地区极端降水变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 19(1): 69–77. You H L, Liu W D, Ren G Y. 2014. Variation characteristics of precipitation extremes in Beijing during 1981–2010 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19(1): 69–77. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12143
- Yu M, Liu Y M, Miao S G. 2019. Impact of urbanization on rainfall of different strengths in the Beijing area [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 139(3–4): 1097–1110. doi:10.1007/s00704-019-03035-z
- 袁冯. 2020. 北京市暴雨分布规律与洪涝灾害风险评估研究 [D]. 北京建筑大学硕士学位论文, 46pp. Yuan F. 2020. Study on the distribution of rainstorm and the risk assessment of flood disaster in Beijing [D]. M. S. thesis (in Chinese), Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 46pp. doi:10.26943/d.cnki.gbjzc.2020.000399
- Yuan Y F, Zhai P M, Chen Y, et al. 2020. Hourly extreme precipitation changes under the influences of regional and urbanization effects in Beijing [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(2): 1179–1189. doi:10.1002/joc.6784
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. *气候变化研究进展*, 3(3): 144–148. Zhai P M, Wang C C, Li W. 2007. A review on study of change in precipitation extremes [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 3(3): 144–148. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.03.004
- 战云健, 鞠晓慧, 范邵华, 等. 2021. 1965~2019 年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析 [J]. *气象学报*, 79(4): 598–611. Zhan Y J, Ju X H, Fan S H, et al. 2021. An analysis of minute summer precipitation in China during 1965–2019 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 79(4): 598–611. doi:10.11676/qxxb2021.036
- Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(5): 1177–1183. doi:10.1007/s00376-011-0020-0
- 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春, 等. 2013. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用 [J]. *大气科学*, 37(4): 829–840. Zhang W L, Cui X P, Wang Y C, et al. 2013. Roles of low-level easterly winds in the local torrential rains of Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(4): 829–840. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.

[2012.12058](#)

- Zhang Y Y, Pang X, Xia J, et al. 2019. Regional patterns of extreme precipitation and urban signatures in metropolitan areas [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(2): 641–663. doi:[10.1029/2018JD029718](#)
- 赵玮, 郝翠, 曹洁, 等. 2022. 近 40 年北京地区夏季降水日变化及不同持续时间降水事件的特征 [J]. *大气科学*, 46(5): 1167–1176. Zhao W, Hao C, Cao J, et al. 2022. Diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in the past 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(5): 1167–1176. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22028](#)
- 郑祚芳, 任国玉, 王耀庭, 等. 2017. 大型人工湖气候效应观测研究——以密云水库为例 [J]. *地理科学*, 37(12): 1933–1941. Zheng Z F, Ren G Y, Wang Y T, et al. 2017. Observational study on climate effect of large artificial lake: Taking Miyun reservoir as an example [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 37(12): 1933–1941. doi:[10.13249/j.cnki.sgs.2017.12.018](#)
- Zheng Z F, Xu G R, Gao H. 2021. Characteristics of summer hourly extreme precipitation events and its local environmental influencing factors in Beijing under urbanization background [J]. *Atmosphere*, 12(5): 632. doi:[10.3390/atmos12050632](#)
- Zhong S, Qian Y, Zhao C, et al. 2017. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(8): 5439–5457. doi:[10.5194/acp-17-5439-2017](#)