

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研究

赵玮¹ 郝翠¹ 曹洁^{*2} 周璇¹ 卢俐³

1、北京市气象台, 北京 100089

2、南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3、北京市气象信息中心, 北京 100089

摘要 利用北京地区 20 个国家站 1980-2020 年的长期逐时降水资料, 分析了北京夏季降水的基本气候特征和日变化时空分布特征。结果表明: (1) 北京地区夏季 40 年平均降水量分布具有西北山区小, 平原大, 山区向平原过渡区的迎风坡最大的特点; 降水频率则相反, 平原降水频率整体小于山区; 降水强度整体表现为西北弱, 东部强, 城区与南部居中的特点。北京夏季降水的强度和极端性较强, 致灾风险高。(2) 北京夏季平均降水量日变化主体呈单峰型, 降水频次为双峰型, 降水强度为多峰型, 三者同时在 22 时(北京时间)达到最大, 在 12 时最小。(3) 降水的峰值时间随月份依次后推, 6 月最早, 7 月次之, 8 月最晚; 峰值雨量 7 月最大, 8 月次之, 6 月最小。(4) 降水量、降水频率和降水强度的日峰值空间分布具有较强的一致性, 西北山区四站出现在 20 时以前, 其余 16 站出现在 20 时及以后。使用 K 均值聚类算法将 20 站划分为两个区域, 结果显示两个区域的降水量、降水频率和强度的日变化具有完全不同的分布特点。(5) 近 40 年北京地区的降水结构在不断调整, 短持续时间降水主导期和长持续时间降水主导期交替出现。2000 年以前以小于 6 小时的短持续性降水为主, 近 15 年大于 6 小时的长持续性降水明显增多。

关键词 北京地区 夏季降水 日变化 气候特征 K 均值聚类算法

文章编号 2022028C

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22028

1、引言

降水的时空分布、过程演变和不同时间尺度变化, 对生态环境、水资源分布、水循环过程有着重要的调节作用。降水日变化是地球系统中大气热力和动力过程对水循环过程综合影响的结果 (Sorooshian et al., 2002; Dai and Trenberth, 2004), 涉及水汽相变和成云致雨的诸多物理和化学过程, 又受到不同尺度海-陆-气及复杂地形的综合影响 (Yu et al., 2014; Dirmeyer et al., 2015; Zhu et al. 2020; Song and Wei, 2021)。降水日变化不仅是表征精细化天气过程或降水事件的一个重要物理特征 (Jo et al. 2020; Ha et al. 2020;

收稿日期 2022-01-31; 网络预出版日期

作者简介 赵玮, 女, 1983 年出生, 高级工程师, 主要从事北京地区灾害天气研究。E-mail: zhaowei308@sina.com

通讯作者 曹洁, E-mail: 003542@nuist.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41875074, 91937301)、北京市气象局科技项目 (BMBKJ202001005) Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grants 41875074, 91937301), and the Scientific Program by Beijing Meteorological Administration (Grant BMBKJ202001005).

Park et al., 2021), 也是气候变化相关研究的重点 (Li et al. 2008; Yuan et al. 2010; 张灵玲等, 2016; 李星雨等, 2018)。

以往的研究显示, 中国的降水具有明显的日变化特征和很强的季节性、地域性特点 (宇如聪等, 2016; 孔锋等, 2017)。青藏高原地区夏季降水量和降水频率表现出明显的凌晨和傍晚的双峰结构, 而降水强度的双峰结构却不太明显 (胡亮等, 2010; 段丽君等, 2017; 计晓龙等, 2017)。位于高原东侧的四川盆地通常在后半夜降水量达到峰值 (白爱娟等, 2011; 董新宁等, 2022)。我国东部的南北两区域夏季降水表现为午后和清晨双峰并存的特征 (原韦华等, 2014; 赵玉春和王叶红, 2020)。秦岭南部降水量和降水频率日峰值主要出现在夜间, 而秦岭北部降水量和频率的日峰值出现在午后 (张宏芳等, 2020)。海南岛夏季降水量日变化峰值表现为单峰特点, 出现在下午 (Zhu et al. 2017)。华北夏季降水日峰值在太行山以西基本出现在傍晚; 而在华北平原北部出现在深夜, 在华北平原中南部出现在上午。华北地区夏季降水量、降水频率的日变化呈现出典型的双峰结构 (韩函等, 2017)。北京位于华北平原北端, 东临渤海, 西倚太行, 北靠燕山, 同时具有山地、平原和丘陵等地貌。境内地势总体西北高, 东南低, 山区与平原的地形落差、陆地与海洋的下垫面差异, 加上近年来城市化快速发展等人类影响因素的共同作用, 导致北京山区与平原、城区与郊区的降水气候和日变化特征有着较大的差异, 目前针对北京地区降水日变化的研究并不多 (李建等, 2008; 杨萍等, 2017), 提高对北京地区降水日变化的科学认识, 有助于我们准确的把握降水的时空变化特征, 提高精细化降水预报能力, 合理利用和保护水资源, 趋利避害。

本文中采用了北京地区 20 个国家站近四十多年的逐时夏季降水资料, 可以对该地区夏季降水日变化的长期气候特征演变趋势及区域分布特点进行更细致的分析, 从而为深入了解北京地区夏季降水局地气候特征提供信息及依据。

2、资料和方法

2.1 资料:

本文所用的降水资料为中国国家级地面气象站逐小时降水数据集 (V2.0) 和北京地区自动站逐小时观测数据。中国国家级地面气象站逐小时降水数据集 (V2.0) 是由中国气象局国家气象信息中心提供, 包含 2100 余个国家级地面气象站经过严格质量控制和一致性检验后所形成的数据集 (张强, 2016), 该数据覆盖时段为 1951-2015 年。本文选取其中北京地区 20 个国家站 1980-2015 年 6-8 月的逐小时降水数据 (其中延庆佛爷顶站由于建站时间较晚, 其资料长度为 1982-2015 年) 作为研究资料的一部分。北京地区自动站逐小时数据经过北京市气象局实时业务流程的数据质量控制, 用于日常业务和科研 (窦以文等, 2008), 本文选取其中 2016-2020 年 6-8 月 20 个国家站逐小时降水数据作为研究资料的另一部分, 两部分数据组合成一套近 40 年 6-8 月北京地区 20 站逐小时降水数据, 用于北京地区降水日变化气候态特征分析。图 1 为北京地区 20 个国家站分布图。

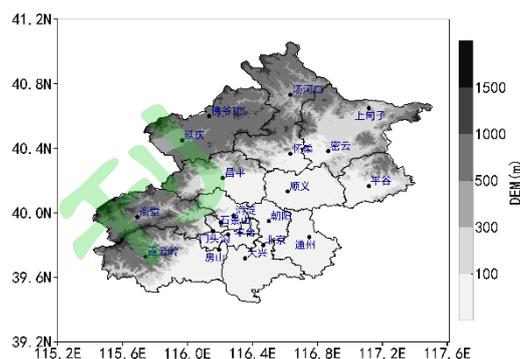


图 1、北京地区 20 个国家站位置分布图（色斑为地形高度）

Fig. 1 The locations distribution of 20 national observation stations in Beijing (the shading is topographic height)

2.2 方法:

将小时降水量大于等于 0.1mm 作为降水发生的判据（中国气象局，2003），对 1980–2020 年 6–8 月逐小时降水数据进行统计，计算多年平均夏季降水量、降水频率、降水强度，筛选单站最大日降水量，用于降水的气候特征分析；计算小时平均降水量、小时降水频率和强度，用于降水日变化特征分析；参考 Yu et al. (2007a) 和 Zhou et al. (2008)，统计不同降水持续时间、降水量日峰值 (Peak Precipitation Amount, 简称 PPA)、降水强度日峰值 (Peak Precipitation Intensity, 简称 PPI) 和降水频率日峰值 (Peak Precipitation Frequency, 简称 PPF) 等。计算公式和统计方法如下：

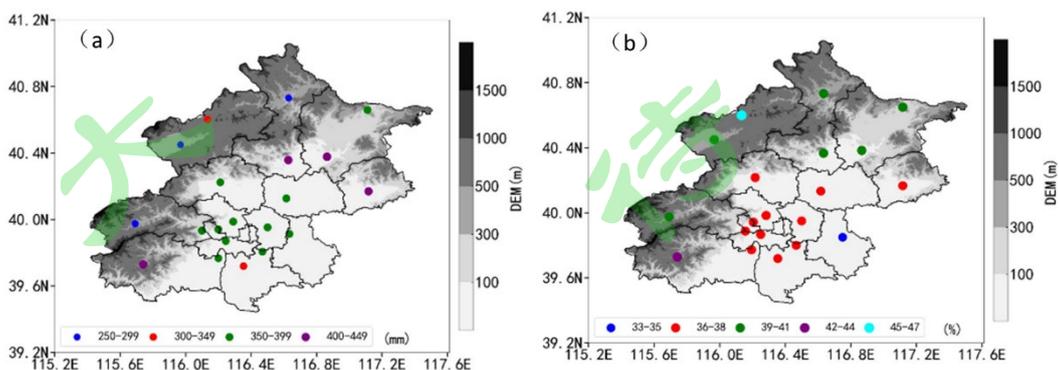
- (1) 多年平均夏季降水量 = (总降水量 / 总非缺测日数) * 92d (mm)
- (2) 夏季降水频率 = 总降水日数 / 总非缺测日数 * 100%
- (3) 夏季日降水强度 = 总降水量 / 总降水日数 (mm/d)
- (4) 平均小时降水量 PA = 该时次总降水量 / 该时次非缺测小时数 (mm/h)
- (5) 平均小时降水频率 PF = 该时次有降水的小时数 / 该时次非缺测小时数 * 100%
- (6) 降水强度 PI = 该时次总降水量 / 该时次有降水的小时数 (mm/h)

持续时间的定义：某日第一个时刻降水量大于等于 0.1mm 记为降水开始时间，之后连续 2h 没有降水，判定这次降水结束。将一次降水开始至结束的小时定义为其持续时间（李建等，2008），以 1h 为间隔，对持续 1–24 小时的降水进行统计，超过 24 小时的持续降水事件不在本文的讨论范围内。本文所有时间均为北京时。

K 均值聚类分析方法：是一种经典聚类算法，归类原则是使相似的样本尽可能划分为一类 (Nakamura et al. 2009; 郑颖青等, 2013; 周颖等, 2020)。该算法是一种动态聚类算法，其步骤是将数据分为 K 组，随机选取 K 个对象作为初始的聚类中心，然后计算每个对象与各个种子聚类中心之间的距离，把每个对象分配给距离它最近的聚类中心。聚类中心以及分配给它们的对象就代表一个聚类，直到聚类中心不再发生变化时结束，误差平方和最小分类效果最优。

3、北京地区近 40 年夏季降水的气候特征

降水日变化具有很强的区域特征，例如四川盆地的降水具有夜雨特点，海南岛夏季降水的峰值出现在午后。这些差异是多种因素共同作用的结果，其中区域降水的基本气候特征是影响降水日变化的一个重要因素。本节利用北京地区 20 个国家站近 40 年的降水观测资料进行气候特征分析。从北京地区夏季近 40 年平均降水量空间分布（图 2a）来看，降水量分布具有西北山区小，平原大，山区向平原过渡区的迎风坡最大的特点。降水量的多寡与地形有很大的关联，西北山区降水量小于 300mm 的三个站点位于延庆、怀柔、门头沟的谷地，而同样位于西北部山区的佛爷顶站由于坐落在山上，平均降水量高于山谷地区的三站，为 325mm。平原地区的降水量绝大多数超过了 350mm，位于平原向山区过渡的山前迎风坡的东北部三站（怀柔、密云、平谷）和西南部浅山区向山区过渡的霞云岭站多年平均降水量更是超过了 400mm。多年平均降水量最大值出现在东北部的密云站（442mm），最小值出现在西北部的延庆站（269mm），二者相差达 150mm 以上，可见北京地区夏季降水的区域差异之大。此外，北京地区全年平均降水量在 600mm 左右，近 40 年夏季平均降水量为 370mm，约占全年降水的六成以上，和张庆云（1999）研究结果相近。可见夏季降水的丰沛与否将对北京地区水资源的多寡造成重要影响。图 2b 给出了 20 站夏季多年平均降水频率的空间分布。与降水量分布相反，平原降水频率整体小于山区，降水频率最大的站点是西北部的佛爷顶站，达到 46%，比频率最小的通州站多 13%。西南部的霞云岭站一枝独秀，降水量和降水频率均位列前茅。降水强度（图 2c）整体表现为西北弱，东部强，城区及南部居中的特点。宇如聪等（2021）研究了全国 2100 个台站 5-9 月多年平均日降水强度，华北地区的日降水强度在 5~6mm/d，北京地区 6-8 月多年平均日降水强度为 11 mm/d；北京东部六站的平均降水强度为 12mm/d，虽然二者研究的时间段有差异，但可以从侧面反映北京地区夏季降水的强度还是较为可观的。除了降水量、降水强度外，台站在历史上是否出现过特大暴雨也是表征强降水的一个方面。气象业务中将日降水量大于等于 250mm 的降水定义为特大暴雨，图 2d 是北京地区夏季日最大降水量的空间分布，北京地区 20 个站点中有 9 个站点日最大降水量超过了 250mm，这些站点集中分布在 40° N 以南的平原和西部山前，位于城区和南部人口密集区域。综上所述，北京虽然是北方城市，但是其夏季降水的强度和极端性均不低，致灾风险高。因此研究北京降水的气候特征及日变化特征非常必要。



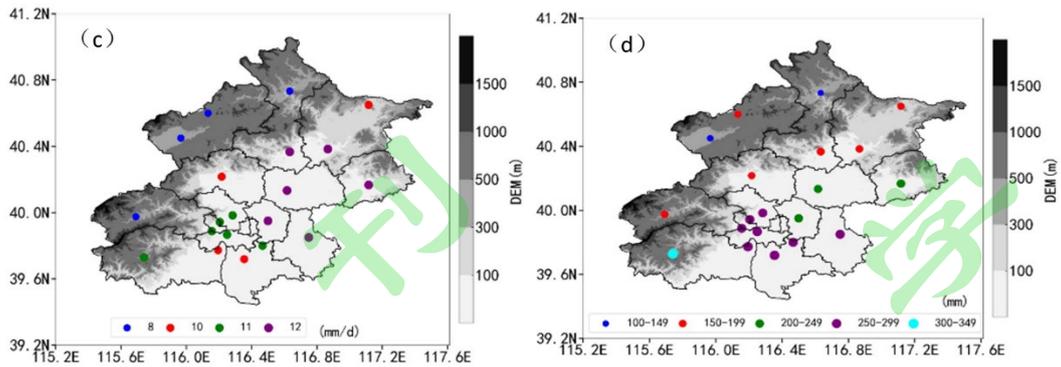


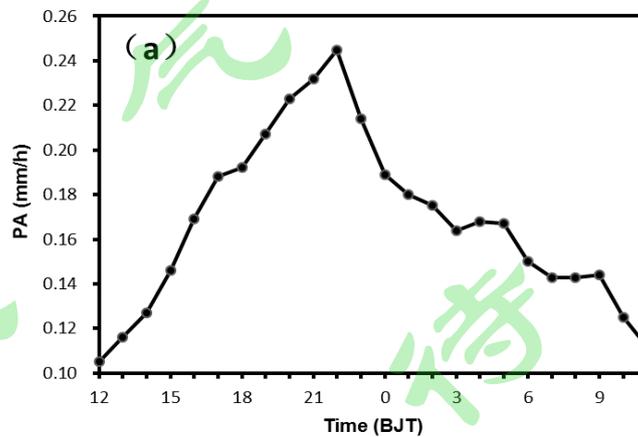
图 2、北京地区 20 站夏季 40 年平均降水量 (a)、平均降水频率 (b)、平均日降水强度 (c)、日最大降水量空间分布图 (d) (色斑为地形高度)

Fig. 2 Spatial distribution of the average precipitation amount (a), average precipitation frequency (b), average daily precipitation intensity (c) and daily maximum precipitation amount (d) of 20 stations in Beijing in summer of the past 40 years (the shading is topographic height)

4、北京地区近 40 年夏季降水日变化的基本特征

4.1 北京夏季区域平均降水日变化特征

从图 3 可以看出，北京夏季区域平均降水量日变化主体呈单峰型，谷值出现在中午 12 时，12 时至 22 时为一段陡立的增长区间，在 22 时达到顶峰，之后开始下降，在下降过程中有两个微弱的波动变化，分别在凌晨 4 时和上午 9 时。降水频率为双峰型，主峰值时间出现在 22 时，次峰值时间出现在早晨 6 时。降水强度为多峰型，主峰值在 22 时，次峰值在 17，此外上午 09 时也是一个高点。通过分析发现，降水量、降水强度和降水频率在 22 时同时达到最大，而在 12 时同时出现最低值。这和以往的研究有所不同，韩函等（2017）研究的华北地区的降水量日变化为双峰结构，而李建等（2008）研究的北京观象台单站降水量日变化则为三峰型曲线，这说明降水日变化与研究区域的范围和站点的分布有很大的关系，特别是与地形密切相关，我们将在 4.3 节讨论北京地区夏季降水日变化的区域差异。



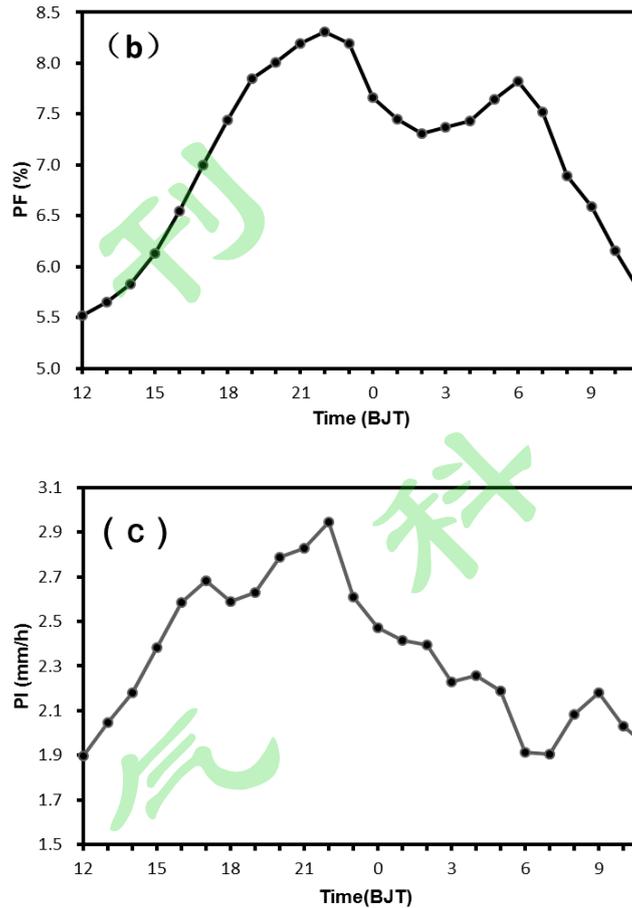


图3 北京夏季区域平均降水量 PA (a)、降水频率 PF (b)、降水强度 PI (c) 的日变化特征 (时间均为北京时间)

Fig. 3 Diurnal variations of summer PA (Precipitation Amount), PF (Precipitation Frequency), and PI (Precipitation Intensity) regionally averaged in Beijing (the time is Beijing time)

4.2 北京夏季月平均降水量日变化特征

从北京夏季 6-8 月逐月降水量的日变化曲线 (图 4) 可以看出夏季不同月份的降水量具有不同的日变化特点, 6 月降水量日变化曲线最为平缓, 峰值最小, 出现时间最早, 在 17 时和 20 时两个时间点出现。7 月日变化曲线有一个主峰值两个次峰值, 主峰值出现在 21 时, 对应降水量也最大。次峰值分布出现在凌晨 4 时和上午 9 时。8 月日变化曲线峰区最为陡立, 峰值出现在 22 时。虽然 6-8 月的降水量峰值时间各不相同, 但最低值出现时间确较为一致, 均出现在中午 11-12 时。从 6 月到 8 月降水的峰值依次后推, 峰值雨量 7 月最大, 8 月次之, 6 月最小。这一方面与影响北京夏季降水的主要天气系统有关, 6 月多为东北冷涡影响, 而 7 月和八月随着东亚夏季风的加强, 副热带高压的北跳, 北京进入主汛期; 另一方面说明 6 月的降水主要以对流性降水为主, 出现时间多为午后到傍晚, 因而降水量的峰值时间在 17-20 时, 而 7、8 月多为系统性降水, 出现时间与天气系统的影响时间关系较大。

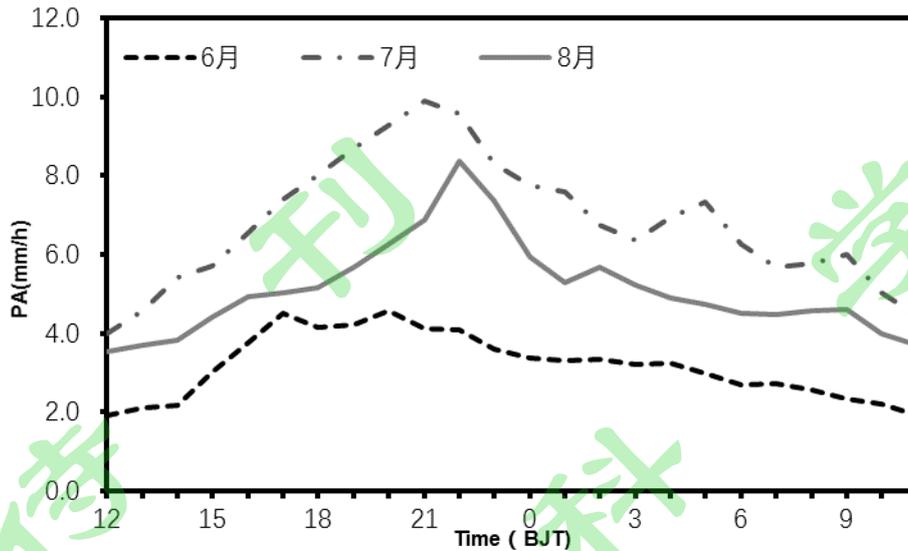


图4 北京地区6-8月降水量日变化特征

Fig. 4 Diurnal variations of June to August PA (Precipitation Amount), regionally averaged in Beijing

4.3 北京地区夏季降水日变化的区域差异

从图 5a 可以看出,北京地区夏季降水量日峰值 PPA 在空间分布上具有明显的区域特征,西北四站的 PPA 出现时间均在 20 时以前,分别为斋堂站 15 时、佛爷顶站 17 时,汤河口 18 时,延庆 19 时。其余 16 站出现在 20 时以后(含 20 时)且多数为 22 时。降水频率日峰值 PPF 和降水强度日峰值 PPI 在空间分布上和降水量日峰值 PPA 较为一致(图 5b、c),大致上为西北四站出现在 20 时以前,其余 16 站出现在 20 时及以后。根据 PPA, PPF 和 PPI 表现出的一致性,结合近 40 年夏季平均降水量、频率和强度的气候分布特点,将 20 个国家站的经纬度、海拔高度、PPA、PPF、PPI、40 年夏季平均降水量 PA、平均降水频率 PF、平均降水强度 PI 统一进行归一化处理后,利用 K 均值聚类分析算法进行分类,分类结果为两个区域。区域 1 包括西北四站(延庆、佛爷顶、汤河口、斋堂),区域 2 包括其余 16 站(图 5d)。从图 6 可以看出两个区域的降水量、降水频率和强度的日变化具有完全不同的分布特点。区域 1 降水量日变化曲线大体上呈双峰,一主一次,主峰出现在傍晚到前半夜,具有峰宽顶平的特点,在 16-21 时都处于降水量高值区,16 时和 19 时是两个高点。次峰相对主峰而言降水量整体偏小,出现在早晨时段,5 时和 7 时为两个高点。区域 1 和区域 2 的降水频率日变化曲线均为双峰结构,傍晚到前半夜(17-22 时)以及早晨(5-7 时)是区域 1 降水频率的高频时段。区域 1 的降水频率主峰值时间(18 时)要比区域 2 的主峰值时间(22 时)提前 4 个小时,但是次峰值出现时间较为接近,均为早晨 5、6 时。区域 1 的降水强度分布具有明显的两极分化特点,下午到傍晚时间段为高强度区,22 时以后至上午为低强度区。区域 1 的主峰降水对应为高强度高频率的降水,次峰降水对应较高频率低强度的降水。区域 2 的降水量、降水频率和降水强度曲线形态与北京全区域的曲线较为接近,峰值出现时间也较为一致,但三者峰值比全区域更高。

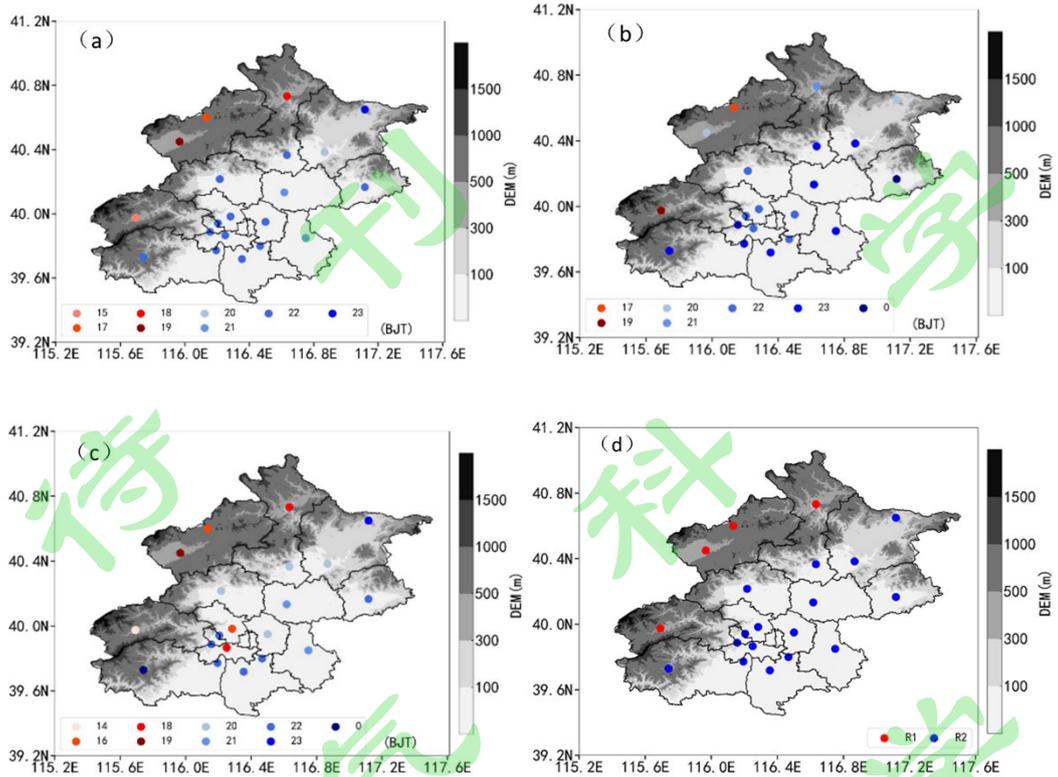


图5 北京地区夏季降水量日峰值 PPA (a)、降水频次日峰值 PPF (b)、降水强度日峰值 PPI (c) 空间分布图及两个区域划分图 (d)

Fig. 5 Spatial distribution of the summer PPA's occurrence time (dots; Beijing time in a day (24 h) in Beijing area (a); (b) same as in (a) but for PPF; (c) same as in (a) but for PPI; (d) The two regions: R1 and R2

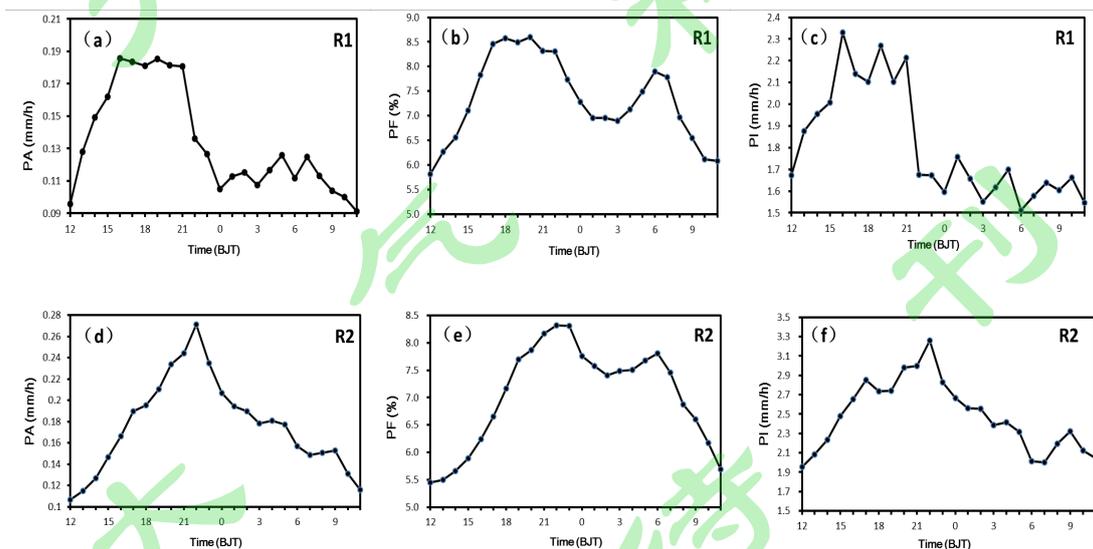


图6 区域1 降水量 PA (a)、降水频次 PF (b)、降水强度 PI 的日变化特征 (c) , 区域2 降水量 PA (d)、降水频次 PF (e)、降水强度 PI 的日变化特征 (f)

Fig.6 Diurnal variations of the summer PA (a)(d),PF (b)(e), and PI (c)(f) regionally averaged over region1 and region2.

5 北京夏季不同持续时间降水逐年演变特征

根据不同持续时间对近 40 年北京夏季降水进行了分类,分别统计 1-24 小时不同持续时长的降水事件。图 7 是 1980-2020 年北京夏季不同持续时间降水的累计降水量逐年分布及演变趋势,图 8 为 1980-2020 年北京夏季不同持续时间降水量占总降水量的百分比,如绿色表示持续时间为 1-3 小时的累计降水量与当年夏季总降水量的百分比。综合两张图可以看出 20 世纪 80 年代开始到 90 年代初期,持续时间小于六小时的短时降水较为活跃,在 20 世纪 90 年代初达到了峰值,这一点与李建等(2008)的研究结果较为一致。随后大于 6 小时的长持续性降水有所增加,特别是 8-10 小时这个区间的降水量出现明显增长。2000 年以来,虽然短时降水间歇性活跃,但是与 2000 年以前相比降水量明显减少,2005 年以后长持续性降水开始增多,在 2012 年达到近 20 年的峰值。近五年长持续时间降水量占夏季总降水量的比重明显增加。综上可知近 40 年北京地区夏季降水出现结构性调整,短持续时间降水主导期和长持续时间降水主导期交替出现。整体来看 2000 年以前以短持续性降水为主,近 15 年长持续性降水明显增多。

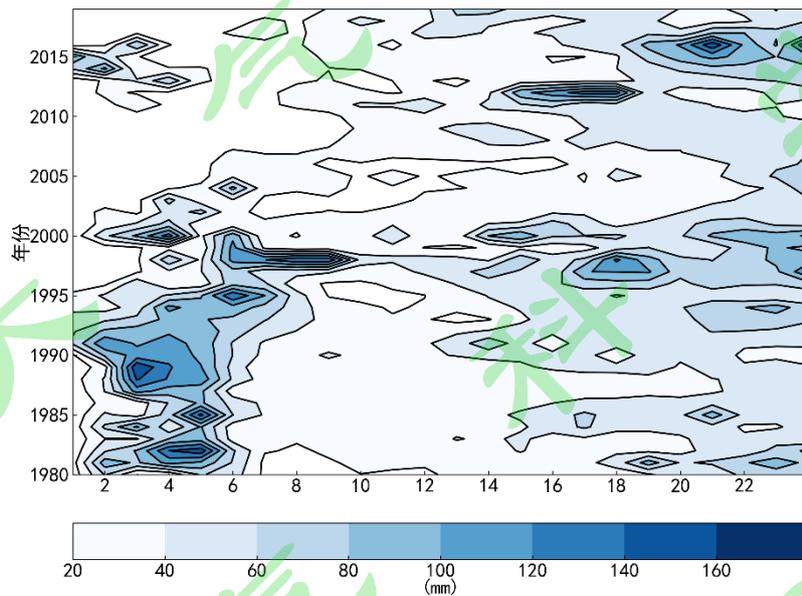


图 7 1980-2020 年北京夏季不同持续时间降水的累计降水量逐年演变图

Fig.7 annual evolution of the accumulative precipitation with different duration in summer from 1980 to 2020

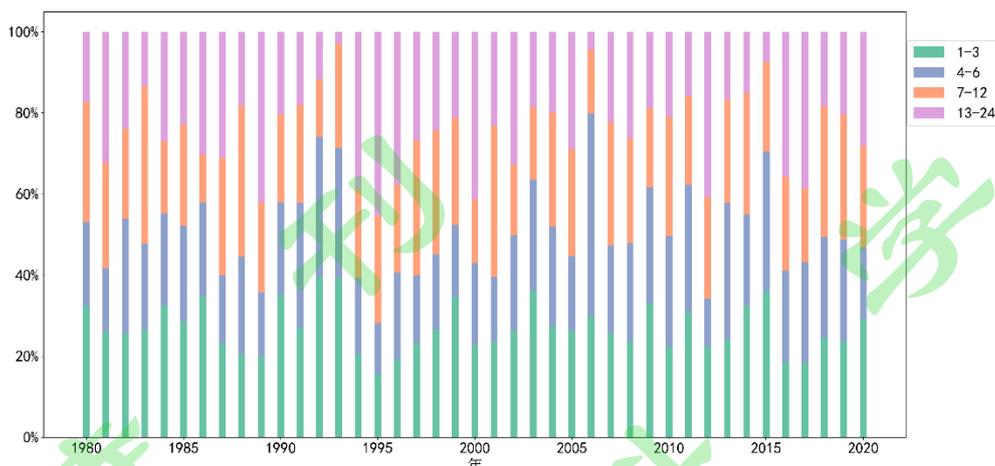


图 8 1980-2020 年夏季不同持续时间降水量占总降水量百分比图

Fig.8 Percentage of precipitation with different duration in summer precipitation from 1980 to 2020

6 结论和讨论

本文利用北京地区 20 个国家站近四十年的长期逐时降水资料，分析了北京夏季降水的气候特征和日变化时空分布特征。主要结论如下：

1、北京地区夏季 40 年平均降水量分布具有西北山区小，平原大，山区向平原过渡区的迎风坡最大的特点；降水频率则相反，平原降水频率整体小于山区；降水强度整体表现为西北弱，东部强，城区与南部居中的特点。北京地区 20 个站点中有 9 个站点日最大降水量超过了 250mm，这些站点集中分布在 40° N 以南的平原和西部山前，位于城区和南部人口密集区域。北京虽然是北方城市，但是夏季降水的强度和极端性均不低，致灾风险高。

2、北京夏季区域平均降水量日变化主体呈单峰型，峰值时间 22 时；降水频次为双峰，主峰值时间 22 时，次峰值时间早晨 6 时；降水强度多峰型，主峰值在 22 时，次峰值 17 时，此外上午 09 时也是一个高点。降水量、降水强度和降水频率在 22 时同时达到最大，而在 12 时同时出现最低值。降水日变化与研究区域的范围有很大的关系。

3、从 6-8 月逐月降水量的日变化曲线可以看出不同月份具有不同的分布特点，降水的峰值时间随月份依次后推，6 月最早（17 时和 20 时），7 月次之（21 时），8 月最晚（22 时）；峰值雨量 7 月最大，8 月次之，6 月最小。

4、降水量日峰值 PPA、降水频率日峰值 PPF 和降水强度日峰值 PPI 在空间分布具有较强的一致性，大致上为西北四站出现在 20 时以前，其余 16 站出现在 20 时及以后。利用 K 均值聚类分析后将北京地区 20 站分为两个区域，结果显示两个区域的降水量、降水频率和强度的日变化具有不同的分布特点。区域 1 降水量日变化曲线大体上呈双峰，主峰出现在傍晚到前半夜，具有“峰宽顶平”的特点，区域 1 的降水频率主峰值时间（18 时）要比区域 2 的主峰值时间（22 时）提前 4 个小时，但是次峰值出现时间较为接近，区域 1 的降水强度分布具有明显的两极分化特点，下午到傍晚时间段为高强度区，22 时以后至上午为低强度区。区域 2 的降水量、降水频率和降水强度曲线形态与北京全区域的曲线较为接近，峰值出

现时间也较为一致，但峰值皆比全区域的更高。

5、从不同持续时间降水的逐年累积降水量演变可以看出近 40 年北京地区的降水结构在不断调整，短持续时间降水主导期和长持续时间降水主导期交替出现。整体来看 2000 年以前以短持续性降水为主，近 15 年长持续性降水明显增多。

降水日变化受诸多因素的影响，如复杂地形的影响、山谷风、海陆风、局地对流、低空急流、东亚夏季风等都是影响降水日变化特征的重要因素 (Yu et al., 2007; Zhou et al., 2008; Qian et al., 2010; Zhuo et al., 2013; Zhu et al. 2020)，本文虽然利用长时间序列降水资料对北京地区夏季降水日变化特征进行了更加细致的分析，在一定程度上揭示了北京降水日变化的气候态、季节和区域特征及差异，获得了不同持续时间降水交替主导的降水结构特征，但对北京夏季降水日变化的机制还不清楚，需要利用高分辨率模式和再分析数据，进一步深入研究北京夏季降水日变化的产生机理。另外，2005 年前后北京短时降水事件累计降水量变化的原因有待在今后结合卫星等其他资料进一步探究。

参考文献：

- 白爱娟, 刘晓东, 刘长海. 2011. 青藏高原与四川盆地夏季降水日变化的对比分析 [J]. 高原气象. 30 (4) :852-859. Bai Aijuan, Liu Xiaodong, Liu Changhai. 2011. Contrast of Diurnal Variations of Summer Precipitation between the Tibetan Plateau and Sichuan Basin. [J]. Plateau Meteorology. 30 (4):852-859.
- 董新宁, 吴遥, 黄安宁, 唐红玉. 2022. 川渝地区夏季极端降水日变化特征分析[J]. 大气科学. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21032 Analysis of diurnal variation characteristics of summer extreme precipitation in Sichuan and Chongqing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. In press.
- 窦以文, 屈玉贵, 陶士伟等, 2008. 北京自动气象站实时数据质量控制应用. 气象, 34 (8): 77-81. Dou Yiwen., Qu Yugui, Tao Shiwei, et al. 2008. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations. Meteor Mon, 34 (8): 77-81.
- 段丽君, 段安民, 胡文婷, 巩远发. 2014 年夏季青藏高原狮泉河与林芝降水低频振荡及陆—气过程日变化特征[J]. 大气科学, 2017, 41(4): 767-783. Lijun Duan, Anmin Duan, Wenting Hu, Yuanfa Gong. Low Frequency Oscillation of Precipitation and Daily Variation Characteristic of Air-Land Process at Shiquanhe Station and Linzhi Station in Tibetan Plateau in the Summer of 2014[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(4): 767-783.
- 计晓龙, 吴昊旻, 黄安宁等. 2017. 青藏高原夏季降水日变化特征分析[J]. 高原气象, 36(5) : 1188-1200. Ji Xiaolong, Wu Haomin, Huang Anning, et al. 2017. Characteristics of the precipitation diurnal variation over Qinghai-Tibetan Plateau in summer [J]. Plateau Meteorology, 36(5) : 1188 - 1200. DOI: 10.7522/j.issn.1000 - 0534. 2016. 00119 .
- 韩函, 吴昊旻, 黄安宁. 2017. 华北地区夏季降水日变化的时空分布特征 [J]. 大气科学, 41 (2) : 263-274. Han Han, Wu Haomin, Huang Anning. 2017. Temporal and spatial distributions of the diurnal cycle of summer precipitation over North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(2):263-274, doi:10.3878/j. issn. 1006-

9895.1610.15312.

- 胡亮, 杨松, 李耀东. 青藏高原及其下游地区降水厚度季、日变化的气候特征分析[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 387-398. HU Liang, Song YANG, LI Yaodong. Diurnal and Seasonal Climatology of Precipitation Depth over the Tibetan Plateau and Its Downstream Regions[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(2): 387-398.
- 孔锋, 吕丽莉, 方建. 1991~2010年中国小时暴雨时空变化格局及其与城镇化因子的空间相关分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(3): 355-364. Feng KONG, Lili LÜ, Jian FANG. Spatiotemporal Pattern of Hourly Heavy Rainfall in China and Its Spatial Correlation with Urbanization Factors during 1991-2010[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(3): 355-364.
- 李建, 宇如聪, 王建捷. 北京市夏季降水的日变化特征. 科学通报, 2008, 53(7): 829-832. LI Jian, YU Rucong, WANG Jianjie. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(12): 1933-1936.
- 李星雨, 毕训强, 张贺. 全球模式 NCAR CESM 和 CAS ESM 对亚洲东部夏季气候的模拟性能评估: 气候平均态和降水日变化分析[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(6): 645-656. Xingyu LI, Xunqiang BI, He ZHANG. Evaluation of NCAR CESM and CAS ESM Models for the Simulation of Boreal Summer Climate over Eastern Asia: Climatological Mean and Diurnal Cycle of Precipitation[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(6): 645-656.
- 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 Ping, XIAO Ziniu, SHI Wenjing. 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.
- 宇如聪, 李建. 2016. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析. 气象学报, 74(1): 18-30. Yu Rucong, Li Jian. 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China. Acta Meteorologica Sinica, 74(1): 18-30.
- 宇如聪, 李建, 陈昊明, 原韦华. 2021. 中国降水日变化. [M]. 北京: 科学出版社. Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, Yuan Weihua. 2020. Diurnal variation of precipitation in China. [M]. Beijing. Science Press.
- 原韦华, 宇如聪, 傅云飞. 2014. 中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析 [J]. 地球物理学报, 57 (3): 752-759. Yuan Weihua, Yu Rucong, Fu Yunfei. 2014. Study of different diurnal variations of summer long-duration rainfall between the southern and northern parts of the Huaihe River [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 57 (3): 752-759, doi:10.6038/cjg20140306.
- 张灵玲, 许遐祯, 韩珏静等. 2016. 近 30a 江苏夏季降水日变化的气候学特征. 气象科学, 36 (6): 826-833. ZHANG Lingling, XU Xiazhen, HAN Juejing, et al. Climatic features of diurnal variation of rainfall in Jiangsu province during summer for recent 30 years. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(6): 826-833. doi:10.3969/2016jms.0050
- 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等, 2020. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析 [J]. 高原气象, 39 (5): 935-946. ZHANG Hongfang, PAN Liujie, CHEN Haoming, et al, 2020. Diurnal Variations and Causes of Warm Season Precipitation in Qinling and Surrounding Areas [J]. Plateau Meteorology, 39 (5): 935-946. DOI: 10.7522/j. issn. 1000-0534. 2019. 00067.

- 张强, 赵煜飞, 范韶华, 2016. 中国国家级气象台站小时降水数据集研制. 暴雨灾害, 35 (2): 182-186. Zhang Qiang, Zhao Yufei, Fan Shaohua. 2016. Introduce of hourly precipitation data sets in China in recent 50 years. *Torrential Rain and Oisasters*. 35 (2): 182-186.
- 张庆云. 1999. 1880 年以来华北降水及水资源的变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 486 - 495. Zhang Qingyun. 1999. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880 [J]. *Plateau Meteor. in Chinese*, 18 (4): 486-495, doi:10.3321/j.issn:1000-0534. 1999.04.003.
- 赵玉春, 王叶红. 我国东南沿岸及复杂山地后汛期降水日变化的数值研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 371-389. ZHAO Yuchun, WANG Yehong. A Numerical Study of the Diurnal Variations in Second Rainy Season Rainfall in the Coastal and Mixed Topographical Regions of Southeast China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(2): 371-389.
- 周颖, 张贺, 张珂玮. 2020. 基于 K-均值聚类方法的大气环流模式 IAP AGCM4.1 对西北太平洋热带气旋的模拟评估 [J]. 大气科学, 44(5): 1141 - 1154. Zhou Ying, Zhang He, Zhang Kewei. 2020. Evaluation of Simulated Tropical Cyclones over the Western North Pacific with IAP AGCM4.1 Based on K-Means Method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(5): 1141-1154. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19252
- 郑颖青, 余锦华, 吴启树, 等. 2013. K-均值聚类法用于西北太平洋热带气旋路径分类 [J]. 热带气象学报, 29(4): 607-615. Zheng Yingqing, Yu Jinhua, Wu Qishu, et al. 2013. K-means clustering method for classification of the northwestern Pacific tropical cyclone tracks [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 29(4):607-615.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范. [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2003. *The Criterion of Surface Meteorological Observation* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Chang-Kyun PARK, Minhee CHANG, Chang-Hoi HO, et al. 2021. Two Types of Diurnal Variations in Heavy Rainfall during July over Korea. *Advances in Atmospheric Sciences*. 38: 2201-2211
- Dai A G, Trenberth K E. 2004. The diurnal cycle and its depiction in the community climate system model [J]. *J. Climate*, 17 (5): 930-951, doi:10.1175/1520-0442 (2004)0172.0.CO;2.
- Dirmeyer, P.A., Peters-Lidard, C. and Balsamo, G. (2015) Land- atmosphere interactions and the water cycle. In: Brunet, G, Jones, S. and Ruti, P.M. (Eds.) *Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months*. Geneva, Switzerland: WMO-1156, World Meteorological Organization, pp. 145-154.
- Ha, K.-J., S. Moon, A. Timmermann, and D. Kim, 2020: Future changes of summer monsoon characteristics and evaporative demand over Asia in CMIP6 simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087492, <https://doi.org/10.1029/2020GL087492>
- Jo, E., C. Park, S.-W. Son, J.-W. Roh, G.-W. Lee, and Y.-H. Lee, 2020: Classification of localized heavy rainfall events in South Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 77-88, <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00128-7>.
- Li J, Yu R C, Zhou T J. 2008. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in southern contiguous China. [J]. *J. Climate*, 21 (22): 6036-6043.

- Nakamura J, Lall U, Kushnir Y, et al. 2009. Classifying North Atlantic tropical cyclone tracks by mass moments [J]. *J. Climate*, 22(20):5481-5494. doi:10.1175/2009JCLI2828.1
- Qian J H, Robertson A W, Moron V. 2010. Interactions among ENSO, the monsoon, and diurnal cycle in rainfall variability over Java, Indonesia [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67 (11): 3509–3524, doi:10.1175/2010JAS3348.1
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information [J]. *J. Climate*, 15 (9): 983–1001, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0983:DOVOTRR>2.0.CO;2.
- Song, Y., & Wei, J. 2021. Diurnal cycle of summer precipitation over the North China Plain and associated land–atmosphere interactions: Evaluation of ERA5 and MERRA-2. *International Journal of Climatology*, 41(13), 6031–6046. <https://doi.org/10.1002/joc.7166>
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007a. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (1): 223–234, doi:10.1029/2006GL028129.
- Yu, R., Li, J., Chen, H. and Yuan, W. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China. *Journal of Meteorological Research*, 28(5), 877–902.
- Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al. 2010. Subseasonal characteristic of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China. [J]. *J. Climate*, 23 (24): 6684-6695.
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al. 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations [J]. *J. Climate*, 21 (16): 3997–4010, doi:10.1175/2008JCLI2028.1.
- Zhuo H, Zhao P, Zhou T J. 2013. Diurnal cycle of summer rainfall in Shandong of eastern China [J]. *Int. J. Climatol.*, 34 (3): 742–750, doi:10.1002/joc.3718.
- Zhu, L., Meng, Z., Zhang, F., & Markowski, P. (2017). The influence of sea - and land - breeze circulations on the diurnal variability in precipitation over a tropical island. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(21), 13,213–13,232
- Zhu, L., Chen, X., & Bai, L. (2020). Relative roles of low - level wind speed and moisture in the diurnal cycle of rainfall over a Tropical Island under monsoonal flows. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087467. <https://doi.org/10.1029/2020GL087467>

Study on diurnal variation characteristics of summer precipitation and precipitation events with different durations in Beijing in recent 40 years

Wei ZHAO¹, Cui HAO¹, Jie CAO^{*2}, Xuan ZHOU¹, Li LU³

¹ Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089

² Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

³ Beijing Meteorological Information Center, Beijing 10089

Abstract Using the long-term hourly precipitation data of twenty national stations in Beijing in

recent forty years, this study investigates the temporal and spatial distribution characteristics of diurnal variation of summer precipitation in Beijing. Results are as follows:(1) The precipitation amount is small in the Northwest Mountainous Area and large in the plain, and the slope in the transition area from mountainous to plain is the largest; On the contrary, the precipitation frequency in plain is less than that in mountainous area; The precipitation intensity is weak in the northwest and strong in the East. The intensity and extremes of summer precipitation in Beijing are strong, and the risk of disaster is high. (2) The diurnal variation of precipitation amount in summer in Beijing is single peak type, the precipitation frequency is double peak type, and the precipitation intensity is multi peak type. They reach the maximum at 22:00 (Beijing time) and the minimum at 12:00. (3) The peak time of precipitation varies with the month, the earliest in June, the second in July and the latest in August; The peak precipitation amount is the largest in July, followed by August and the smallest in June.(4) The spatial distribution of the peak precipitation amount, peak precipitation frequency and peak precipitation intensity have strong consistency. They appear before 20 o'clock (BTJ) in the Northwest Mountainous area, and on or after 20 o'clock in the other 16 stations. Using K-means clustering algorithm, 20 stations are divided into two regions. The results show that the diurnal variation of precipitation amount, precipitation frequency and precipitation intensity in the two regions have completely different distribution characteristics. (5) In the past 40 years, the precipitation structure in Beijing has been continuously adjusted, and the short duration precipitation dominant period and long duration precipitation dominant period appear alternately. Before 2000, it was dominated by short duration precipitation within 6 hours, and the long duration precipitation greater than 6 hours increased significantly in recent 15 years.

Key words Beijing area, Summer precipitation, Diurnal variation, Climatic characteristics, K-means clustering algorithm