

北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因

朱秀迪^{1,2,3}, 张强^{1,2,3}, 孙鹏⁴

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 4. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241002)

摘要: 快速城市化对区域降水过程的影响已成为人类活动对不同时空尺度水循环影响研究的热点。基于北京全区2011-2015年20个自动气象站逐小时降水资料, 利用Circular统计法等多种方法, 在揭示北京市降水总体特征基础上, 进一步从日、场次、小时等多种精细化时间尺度来探究北京市不同类型降水特征。研究表明: ① 场次暴雨平均降水量、场次降雨持续时间及降水强度高值中心主要位于北京城区, 与郊区降水过程相比, 城区总体降水过程历时较长、雨量较大。城市雨岛效应可能是上述降水指标在城区具有高值中心的原因之一。② 北京全区降水日分布不均, 不同区域降水类型有较大差异。北京市的暴雨雨型主要以午后型为主, 占总雨型的47.53%。山区总体及北部近郊、远郊区、南部近郊分别以午后型、正午型、夜晚型降水为主。而城区的暴雨类型显示出主城区的东西两侧有较大的差异, 西侧受山谷风环流及热岛环流影响类型较为复杂, 东侧以傍晚型为主。③ 场次暴雨的降水峰值出现时间主要集中在12:00-19:00, 且城区降水峰值发生时间较郊区降水峰值发生时间推迟。海拔的升高会使日降水峰值的出现时间的不确定性增大。④ 极端降水量指标及持续干燥、湿润指标均在城区显示出高值区, 极端降水频率指标高值区位于城区下风向。城市化可能通过人口膨胀、土地利用类型变更等方式间接提高极端降水发生的风险。

关键词: 城市化; 降水过程; 时空分布; 极端降水; 雨型; Circular统计法

DOI: 10.11821/dlxb201811004

1 引言

过去几十年, 人类社会经历了快速城市化进程, 并且这一趋势仍将持续。伴随城市化进程, 2008年全球城市人口首次超越总人口的一半; 到2050年, 全球城市人口预计将激增至63亿, 占全球总人口约70%^[1-3], 预示着城市化在自然环境中扮演着越来越重要的角色。中国作为全球人口最多的国家, 其城镇人口数量在2015年即已超过全国人口的一半, 高达56.1%。北京作为中国的首都, 目前已成为全球非常重要的国际化大都市, 其

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2018-06-30

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(41621061); 国家杰出青年科学基金项目(51425903); 国家自然科学基金项目(41771536, 41601023) [Foundation: Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China, No.41621061; National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China, No.51425903; National Natural Science Foundation of China, No.41771536, No.41601023]

作者简介: 朱秀迪(1992-), 女, 湖北十堰人, 博士研究生, 主要从事气象水文学研究。E-mail: lorainedi@foxmail.com

通讯作者: 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域气象水文学研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程及其对气候变化的响应机制与机理以及流域生态需水等领域的研究工作。

E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

城市化对区域生态环境、水循环以及区域气候变化的影响不容小觑。而其城市化过程所导致的城乡空间异质性、城市热岛效应、城市冠层、城市气溶胶等均驱动着小尺度局地气候发生显著改变^[4],这些变化对洪水及其引发的次生灾害有一定加剧作用,因而对人们生命、财产、环境、生态等造成了巨大潜在威胁^[5-6]。

城市化对区域水循环时空特征影响愈益引起人们的广泛关注,而城市化对区域降水的影响又是其中的研究热点。目前关于城市化对降水的影响主要通过观测数据及数值模拟等两个方面开展研究。观测数据主要有站点观测、遥感降水产品、雷达数据等^[7],数值模拟方面主要采用WRF、MM5等中尺度气象模式进行研究^[8-10]。已有研究从城市化对城区总降水量^[11]、季节降水量^[8, 12]、降水频率^[13]、极端降水^[14-15]等角度开展系统研究。大多数结果表明城市化在一定程度上增强了城区及其下风向的降水量及其频率,特别是暴雨及极端降水的增加更为显著。已有研究虽从不同角度揭示了城市化对不同时空尺度降水的影响,但由于受数据限制,已有研究多针对日尺度及以上降水过程进行分析,而针对小时尺度降水过程研究较少。此外,目前研究多关注于城市化对暴雨量级和频率的影响,但对于暴雨持续时间及降水峰值发生时间等涉及甚少,而这两个指标对于洪涝灾害预警、城市内涝应对与管理及水资源精准调配等皆具重要理论与现实意义。

基于此,本文以北京市为例,利用2011-2015年北京市20个国家级标准气象站小时降水量,计算精细时间尺度不同量级降水指标,对北京市降水时空特征开展精细化研究,并探讨城市化对降水过程的影响机制,为气候变化背景下城市内涝治理及灾害风险应对提供重要理论依据。

2 数据来源与研究区概况

研究选用北京20个国家级地面气象观测站站点的2011-2015年全年小时降水观测数据,所有站点观测数据来自国家气象中心。所有数据均经严格质控,每个站点的缺失值数量均低于该站点总降水小时数的0.1%。根据数据的质控编码提取出缺测数据,该缺失值由临近的小时降水量的平均值来填补^[16]。

图1为北京基本地形地貌,地表特征及人口分布。北京位于华北平原北部、燕山以南,地势总体上西北高,东南低。总面积约为 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北京属半湿润半干旱大陆性季风气候,年均气温 $11 \sim 12^\circ\text{C}$,年均降水量约 600 mm ^[17]。在过去几十年里,北京作为全球知名的国际大都市,经历了快速城市扩张。1973-2012年间,建成区从 184 km^2 增加到 1350 km^2 ,城市人口超过了2000万人^[8]。考虑到降水结构的时空异质性,借鉴Wang等^[18]提出的经验区域类型划分方法,结合北京地形特征及城市发展状况,采用Song等^[1]提出的区域类型划分方法,将北京划分为以下6个子研究区:城区、南部近郊区、北部近郊区、北部远郊区、北部山区和南部山区,本研究的站点数共20个,分别为城区6个站点:海淀、朝阳、通州、丰台、石景山、门头沟;南部近郊区3个站点:大兴、北京、房山;北部远郊区4个站点:密云、上甸子、平谷、密云、怀柔;北部近郊区2个站点:昌平、顺义;北部山区3个:佛爷顶、汤河口、延庆;南部山区2个站点:斋堂、霞云岭。

3 研究方法

3.1 降水指标

本文定义了4个降水指标,即年总降水量(Annual total precipitation amount, ATP),

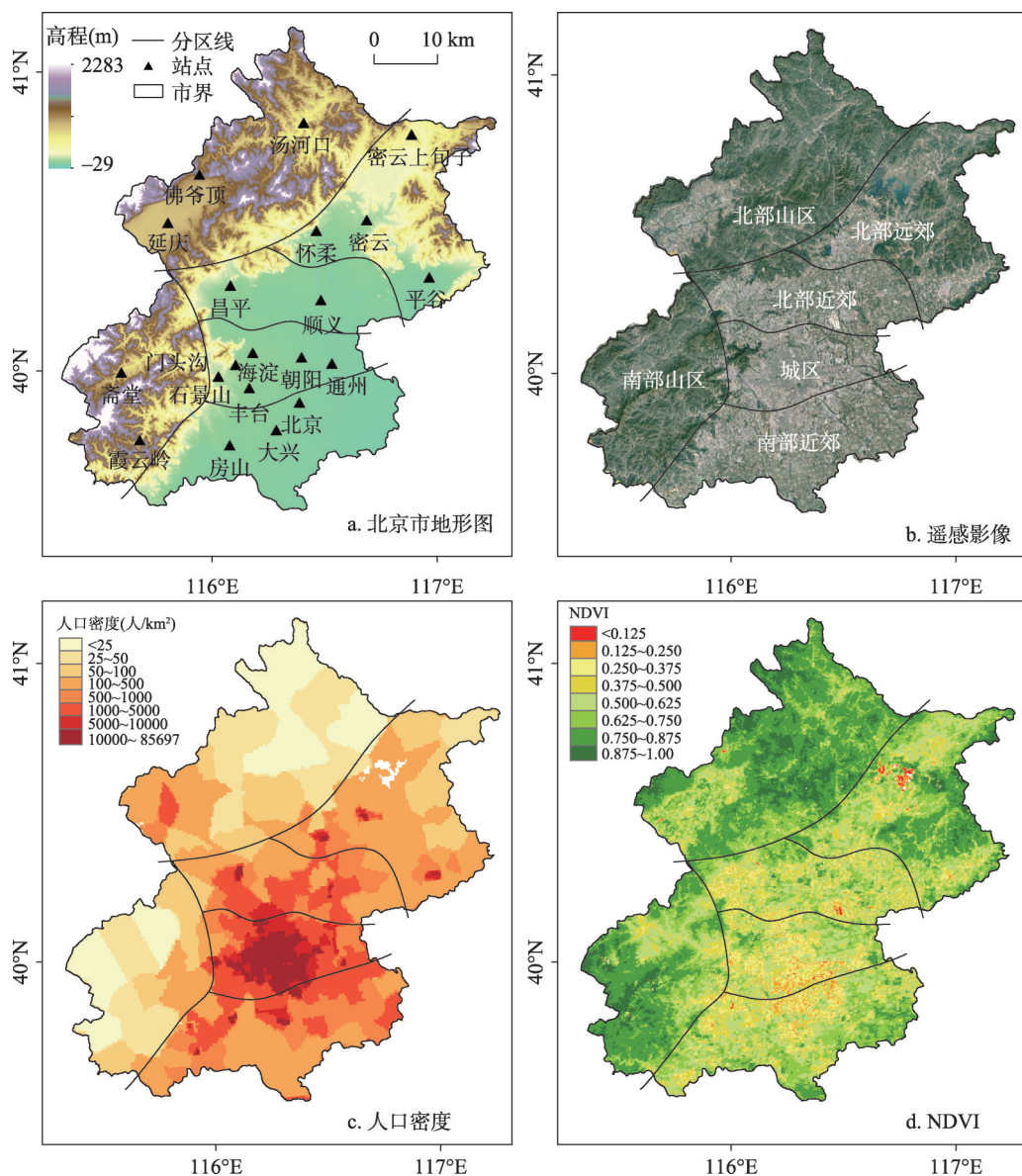


图1 北京地形、地表特征、人口密度与植被空间分布格局

Fig. 1 Spatial pattern of topography, underlying surface features, population density and NDVI across Beijing city

年总降水小时数 (Annual total rainy hours, ATH), 年均降水强度 (Annual mean precipitation intensity, API) 与年均场次降水小时数 (Annual mean rainy hours, AMH), 从降水历时及其贡献率角度精细刻画北京降水总体特征。本文以小时为时间单位定义降水小时, 即 1 h 累积降水量不低于 0.1 mm 的降水时间, 称为降水小时 (不足 1 h 的按 1 h 计)。若降水时间间隔中断 1 h 及以上, 则认定为两次降水过程。根据上述定义, 从各站小时降水序列中分析整理出各次降水过程。将一次降水过程从开始至结束的小时数定义为降水历时, 此段时间内的降水量之和定义为一次降水过程的降水量。对降水历时而言, 本文将其分成以下 4 类, 即 1~3 h、4~6 h、7~12 h、12 h 以上, 分别代表超短历时、短历时、中历时、长历时。为综合评价上述两个方面的变化, 定义降水发生率为各种降

水指标在某一分类情况下发生的次数占总次数的比值,而降水贡献率则表示某一分类情况下的降水量占总降水量的比值。

由于在降水事件中,暴雨和极端降水对人类的生活影响最大。针对降水等级划分,参考气象部门的日降水量等级划分以及 Yang 等^[8]对北京降雨等级划分,结合北京地区降水特征,选取全北京次降水达到 50 mm 以上的降水定义为暴雨。采用 CDD、CWD、PRCPTOT、R10、R20、R95p 等极端降水指标来刻画北京市极端降水特征(表 1)。

表 1 本文选用的极端降水指标定义
Tab. 1 Concepts of extreme precipitation indices considered in this study

指标简称	指标全称	定义	单位
CDD	持续干燥指数	连续日降水小于 1 mm 最长日数	d
CWD	持续湿润指数	连续日降水大于等于 1 mm 最长日数	d
PRCPTOT	年湿润日总降水量	日降水大于 1 mm 的全年总降水量	mm
R10	强降水日数	日降水大于 10 mm 的总降水天数	d
R20	极强降水日数	日降水大于 20 mm 的总降水天数	d
R95p	强降水总降水量	超过 95% 百分位的降水日总降水量	mm

3.2 暴雨雨型划分

将 w 次大于 50 mm 的场次降水提取出来,采用模糊聚类方法^[19]将每次降水降雨过程等分为 n 个时段,根据每段时间内雨量占总雨量的比例建立该场降雨过程的模式矩阵 X 。第 t 次降水的总降水量记为 p_{ts} ,此次降雨的第 i 个时段的降水量记为 p_{ti} ,占该次总降水量的比例表示为 x_{ti} ,总降水过程表示为 X_t ,计算如下:

$$x_{ti} = \frac{p_{ti}}{p_{ts}} \quad (t=1, 2, \cdots, w; i=1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

$$X_t = (x_{t1}, x_{t2}, \cdots, x_{tn}) \quad (t=1, 2, \cdots, n) \tag{2}$$

后通过 K-means 聚类分析法^[20]将模糊矩阵划分为 k 个类别,同时也得到这 k 个类别的模糊矩阵, k 类模糊矩阵中,第 j 个模糊矩阵 V_j 简记为:

$$V_j = (y_{k1}, y_{k2}, \cdots, y_{kn}) \quad (j=1, 2, \cdots, k) \tag{3}$$

计算每场降水与 j 种模糊矩阵 V_j 的贴近度 σ_j ,选择最小贴近度所对应的模糊矩阵作为该场降水近似雨型分布,其中贴近度的公式如下:

$$\sigma_j = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{ji} - x_{ti})^2 \quad (j=1, 2, \cdots, k; t) \tag{4}$$

3.3 圆形统计法(Circular 统计法)

对日降水的研究往往主要关注平均日峰值^[8, 21],降水的发生、结束时间^[22],而较少涉及一场降雨中降水峰值的发生时间。而降水峰值往往意味着大的雨强,对城区的社会经济、交通、人身安全等方面均可能造成威胁。此外,已有研究多采用均值,众数统计等常规方法来估计,且主要以平均值作为指标,多未经严格的统计学检验。Dhakal 等^[23]提出了一种圆形统计方法,将特定事件发生时间(月、日、时、分)定义为以原点为中心的单位圆周上的极坐标。该方法有助于研究降水峰值发生时间是否有集中于某一时刻或时段的倾向。

圆形统计法中,第 i 次暴雨降水峰值发生时刻所对应的角位置为 $D = 0$,代表该场次降水峰值发生在 00:00-01:00, $D = 23$ 代表场次降水峰值发生在 23:00-00:00。圆形统计法计算每一次暴雨事件峰值发生时间 θ_i 为:

$$\theta_i = D_i \times (\frac{2\pi}{24}) \tag{5}$$

某区域暴雨事件样本量为 n , 第 i 次暴雨平均发生时刻的 x 和 y 坐标计算如下:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \cos(\theta_i)}{n} \\ \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(\theta_i)}{n} \end{cases} \quad (6)$$

\bar{x} 和 \bar{y} 分别表示某区域所有暴雨事件发生时间的平均坐标, 其所对应的方向代表着 n 次暴雨事件平均发生时间, 即:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right) \quad (7)$$

对于样品容量为 n 的暴雨事件集合, 其平均合向量长度 (MRL) 通过下式计算:

$$\rho = \frac{\sqrt{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}}{n} \quad (8)$$

ρ 无量纲, 且 $0 < \rho < 1$, ρ 值接近 0 表示降水峰值发生时间较分散, 无明显集聚性; ρ 值接近 1 表示降水峰值发生时间集中于某一时间, 即具明显时间上的集聚性。每一降水峰值发生均对应圆上的一个点和一个方向。

圆的标准差 csd (circular standard deviation) 则由以下公式进行计算:

$$csd = \sqrt{-2 \ln \rho} \quad (9)$$

式中: 参数 $\bar{\theta}$ 、 ρ 和 csd 都能粗略反应每个站点降水峰值发生时间的变异性。研究结果采用 Watson、Kuiper、Rayleigh、Rao Spacing 这 4 种方法进行显著性检验^[24-26], 4 种非参数一致性检验方法在圆形统计文献中运用非常广泛。

降水峰值的概率密度分布采用非参数方法 Von Mises 分布进行分析。Von Mises 分布 (环状常态分布) 是一种对称单模型分布, 其概率密度函数计算方法如下所示:

$$f(\theta; \mu, k) = \frac{1}{2\pi I_0(k)} e^{k \cos(\theta - \mu)} \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi)$$

式中: 集中参数 $k \geq 0$; $I_0(k)$ 是改进的贝塞尔函数; μ 表示圆形统计的方向。

一般来说, 有 3 种环形概率分布类型: 均匀分布, 反射对称分布和不对称分布。环形分布函数是一种均匀分布的零假设将通过 3 种检验方法进行检验, 即 Rayleigh、Kuiper V_n 和 Watson $U^{[27]}$ 。如果上述 3 种检验方法的 p 值均大于 0.05, 则表示验证无效假设; 如果上述 3 种测试方法的 p 值之一小于 0.05, 则表示拒绝假设, 从而证实分布非均匀, 平均角有意义。

4 结果

4.1 各区域降水指标的总体差异

为阐述北京城区与城郊、山区之间降水过程差异, 本文定义了差异率 (图 2)。差异率为城区与 5 个非城区之间各降水指标的差值与该指标城区值的比率, 正值代表城区高于非城区, 负值代表城区低于非城区。由图 2 看出, 城区的 ATP 高于山区 22.6%~27.37%, 高于近郊区 9.49%~10.06%, 高于远郊区 7.17%。另外, 城区的 ATH 低于山区 0.47%~1.58%, 高于近郊区 5.14%~5.58%, 高于远郊区 1.86%。城区的 AMH 高于山区 6.41%~8.57%, 高于近郊区 0.39%~5.48%, 高于远郊区 7.67%。以上结果说明北京总降水

小时数与次降水小时数的分布并非完全一致。城区的API高于山区23.88%~27.93%，高于近郊区4.75%~4.80%，高于远郊区3.08%，以上表明城区的降水强度远高于山区，略高于郊区。综上所述，城市化在一定程度上促进了城区总体上的降水总量、场次降水持续时间及降水强度。

4.2 北京不同历时降水事件的发生频率及其对总降水量的贡献率

北京各历时降水事件发生频率随降水小时数的增加大致呈指数形式递减，其中连续1 h降水事件最常发生，约占总降水次数的40.02%，其次为连续2 h降水事件，其发生频率为20.98%，连续降水不超过6 h的降水事件占总降水事件的88.13%，表明北京全区多短历时降水，连续降水超过6 h的降水事件已较少发生，其发生频率为11.87%。而降水历时大于20 h的降水事件发生频率仅占总降水事件的0.60%。不同降水历时降水对总降水量的贡献率呈双峰分布。其中连续3 h降水事件其降水量对总降水量贡献最大，达到总降水量的13.16%，其次为连续2 h的降水事件，其对总降水量的贡献为12.18%。1 h降水虽然发生率最高，但对总降水量的贡献则较小，仅为4.36%。贡献率另一峰值出现在连续17 h降水事件，其发生率虽然较少，仅为0.28%，但其对总降水量的贡献却相较其他降水历时较长（如12~20 h）的降水事件对总降水量的贡献更大，占总贡献率的3.62%。但是降水历时为1 h及大于20 h的降水事件对总降水量的贡献均小于5%。

由图4看出，北京6个分区不同降水历时降水事件发生率及其贡献率变化既有共性，也存在明显区域性差异。各分区不同降雨历时降水事件发生频率都大致呈指数递减，即降水主要以短历时降水为主，较长降水历时的降水事件（如连续降水6 h及更长历时降水事件）发生率较低。对总降水量贡献率较大的降水事件主要是其降雨历时为1~6 h的短历时降水。但对具体分区来讲，又有较为明显的区域性差异。在城区，降雨历时为1 h的降水事件发生概率小于山区和郊区接近5%，但其贡献率却无明显降低。此外，虽然城区3 h降水发生的发生率小于山区和郊区，但其贡献率却高于其他区域。该现象表明城区虽然超短历时降水发生率较小，但其贡献率较大。上述结果表明城市化在一定程度上能够延长降水历时，并增大降水强度。

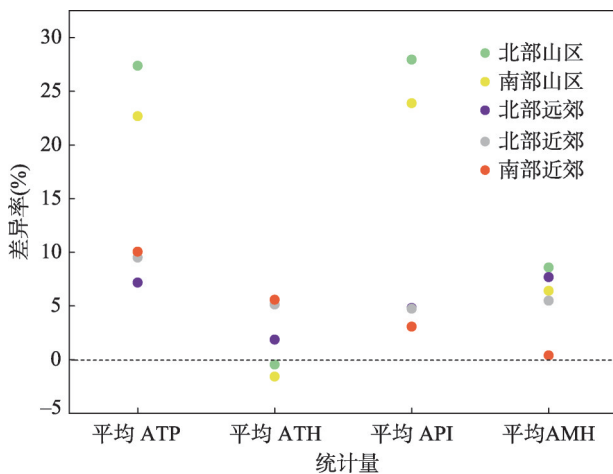


图2 北京郊区、山区与城区的总体降水统计量差异率
Fig. 2 Difference rate of precipitation statistics between urban zone, suburban and mountainous regions

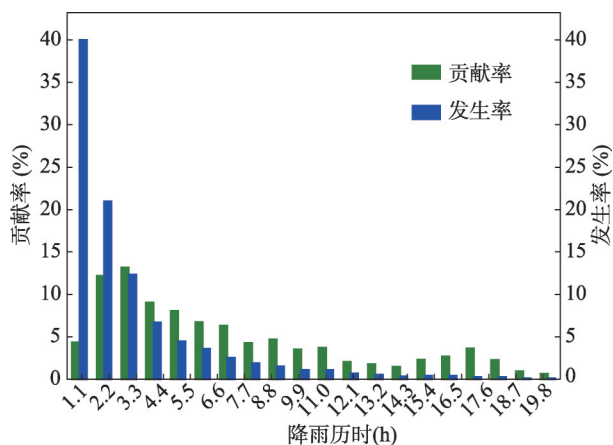


图3 北京不同降雨历时降水事件发生率及其对总降水量的贡献率

Fig. 3 Occurrences of precipitation regimes of different precipitation durations and related fractional contribution to total precipitation amount

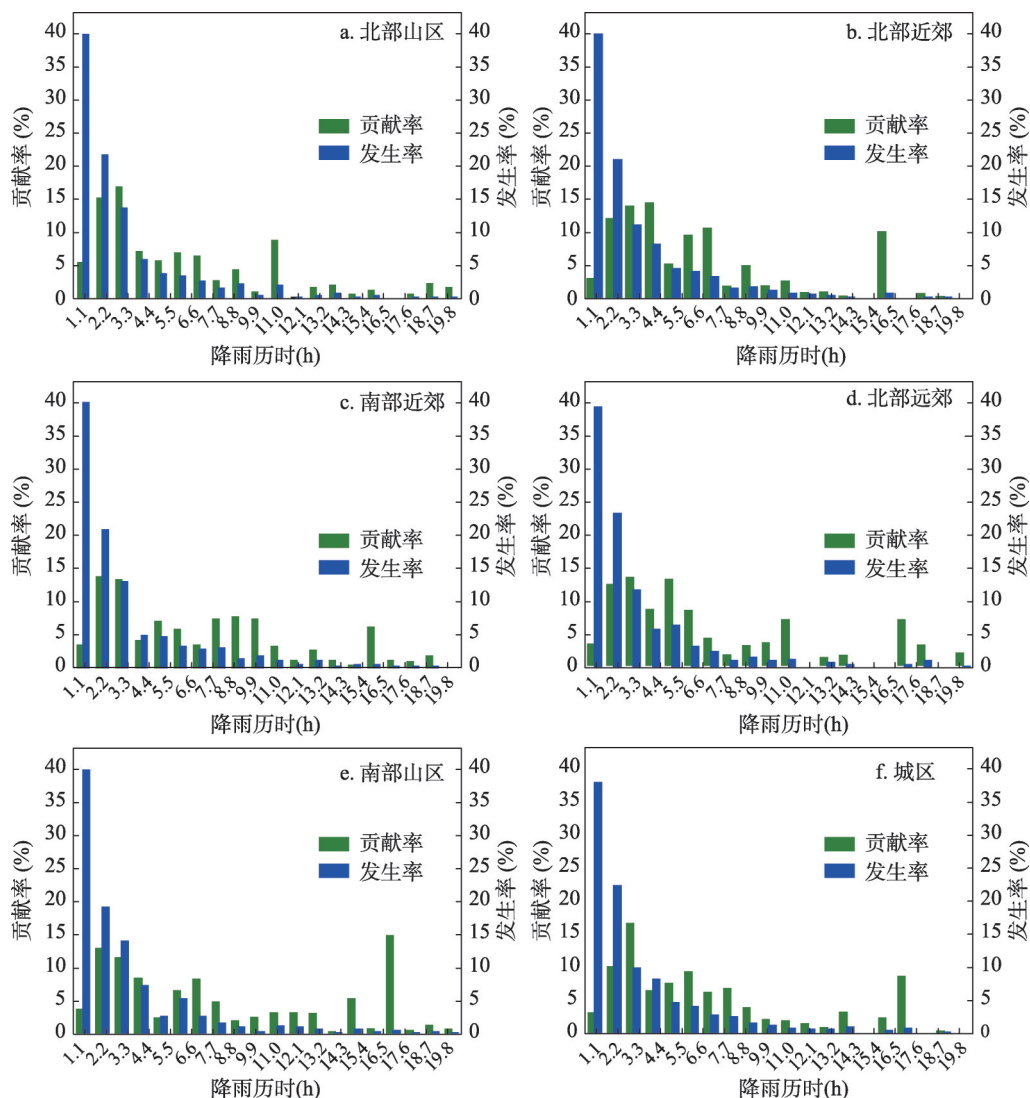


图4 北京市各分区降雨历时发生率及贡献率统计图

Fig. 4 Occurrence of precipitation regimes of different durations and related fractional contribution of precipitation regimes to total precipitation amount

由图5可看出,总体上全北京市的超短历时的降水事件(1~3 h)最常发生,约占总降水次数的73.32%,其次为短历时降水事件(4~6 h),其发生频率为14.8%,中历时与长历时降水的发生概率较低,分别仅占到全北京市总降水次数的8.81%及3.07%。但不同历时的降水的贡献率则与发生率不成正比关系。具体表现为,4种降水历时的贡献率相差较小,分别占总降水量的29.70%、23.84%、24.61%、21.85%,极差仅为7.85%。而不同历时发生率的极差达到70.25%。

各区域降水发生率分布与全市降水发生率分布较为相似,即降水发生率与降水时长呈现显著的负相关关系。而城区相较于城郊和山区超短历时降水(1~3 h)发生的频率都较小,具体表现为超短历时降水(1~3 h)发生概率小于郊区及山区1.8%~5.1%。城区的短历时(4~6 h)、中历时(7~12 h)、长历时(>12 h)发生的频率相较于山区和郊区都

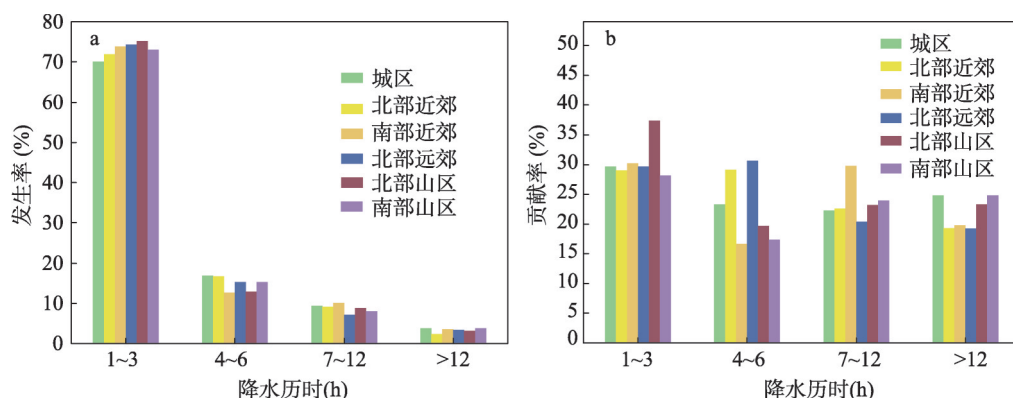


图5 北京各区域不同降水历时降水事件发生率及其对总降水量的贡献率

Fig. 5 Occurrences of precipitation regimes with different durations and related fractional contribution to total precipitation amount within each individual subregion of Beijing

较大,具体表现为短历时降水(4~6 h)发生概率大于郊区及山区0.2%~4.3%,中历时降水(7~12 h)发生概率大于郊区及山区0.21%~2.21%,长历时降水(>12 h)发生概率大于郊区及山区0.13%~1.36%。以上结果表明,城市化在一定程度上抑制了超短历时降水的发生的概率。而对大于3 h的降水事件的发生概率均有一定的促进作用。

以上研究结果表明北京市各区域的降水结构整体虽较为相似,但城市化在一定程度上削弱了超短历时降水的发生频率,这可能是由于城市冠层延缓降水系统的移动速度,从而延长了降水历时^[28]。

4.3 暴雨事件时空特征

4.3.1 暴雨事件空间分布 图6为北京暴雨事件不同特征时空分布,包括暴雨量、暴雨频次、暴雨强度、暴雨历时。由图6a看出,北京平原区暴雨量分布大致规律是:城区>南部近郊>北部远郊>北部近郊,4个区域平均降水量分别为88.26 mm、85.96 mm、81.37 mm、77.50 mm。此外城区的东、西两侧的暴雨量分布也有较大的差异,城区西、东侧的暴雨平均降水量分别为93.54 mm和80.76 mm,因此城区西侧暴雨发生频次是东侧的1.16倍。山区除了霞云岭站外,其他站平均降水量为68.12 mm,仅为城区降雨量的77.18%。霞云岭站平均暴雨量达到128.44 mm,是降水高值中心之一。综上,强降水大致呈东北—西南向带状分布,城区的降水大体上要高于郊区,这与马京津等^[29]的研究成果一致。

由图6b可以看出,和降水量一样,城区暴雨频次要高于郊区和山区。暴雨频次高值区位于城区,发生频次为10次,且高值中心位于人口最为密集的海淀,而郊区和山区的暴雨发生频次分别为8.7次和4.6次,因此城区暴雨发生频次是郊区和山区暴雨发生频次的1.15倍与2.17倍,郊区的高值中心主要分布在靠东北部山区的怀柔和密云,这与Li等^[30]的研究结果相近。城区东、西两侧的暴雨频次有着较大差异,城区东、西两侧暴雨平均发生频次分别为11.3次和9次,因此城区东侧暴雨发生频次是西侧的1.3倍。但山区暴雨频次特征呈现出明显的空间异质性,这可能是山区由于地势抬升,导致迎风坡更易发生强降水,而背风坡降水反之。

从图6c可以看出,暴雨强度和暴雨量、暴雨频次一样,城区暴雨强度要高于郊区和山区,城区的降水强度分别是远郊区、南部近郊、北部郊区、南部山区、北部山区的1.05倍、1.07倍、1.13倍、1.15倍、1.25倍。暴雨强度的高值区主要位于城区东侧的朝阳站,雨强达到10.02 mm/h,山区也存在两个雨强高值站点,分别为密云和延庆,平均降雨强度达到了9.45 mm/h、9.72 mm/h。城区东西两侧的暴雨强度同样存在较大差异,城

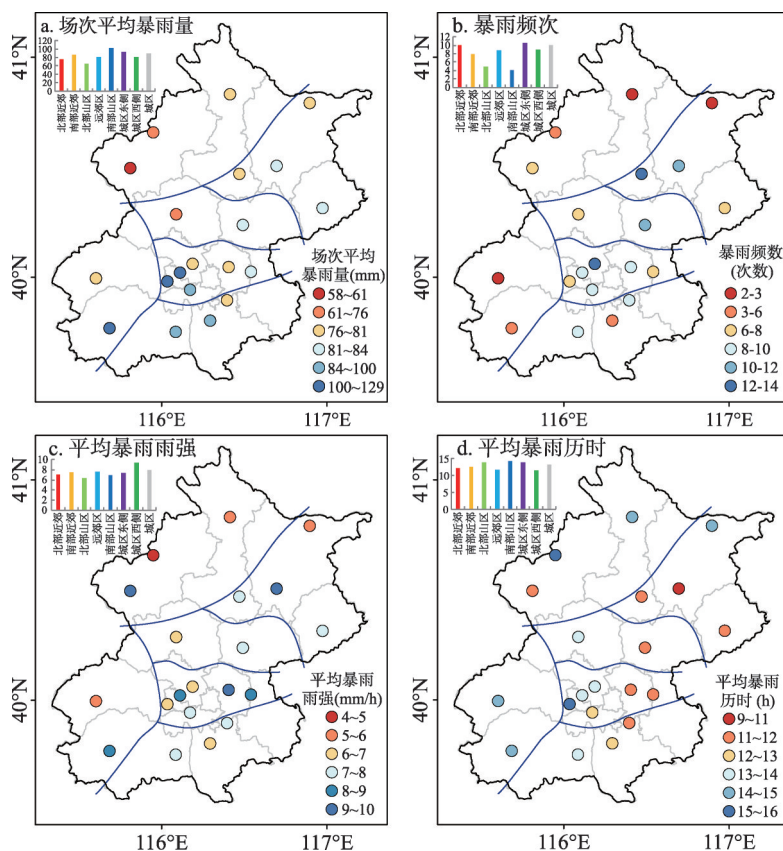


图6 北京市不同暴雨特征空间分布图

Fig. 6 Spatial patterns of different characteristics of rainstorms considered in this study

区东侧场次暴雨事件的强度相较于西侧要高, 城区东西侧两侧的暴雨强度分别为 9.31 mm/h 和 7.28 mm/h, 因此城区东侧暴雨强度是西侧的 1.28 倍。

图 6d 中, 暴雨历时大体呈现出由东南向西北逐渐递增的趋势。山区的暴雨时长相较于城区和郊区都较长。这是由于山区的森林能够使气流速度减缓^[31], 从而使降水历时延长。此外城区的暴雨降水时长相较于郊区仍然较长, 城区暴雨时长分别是南部近郊、北部郊区、北部远郊的 1.05 倍、1.08 倍、1.12 倍。以上结果表明城市化在一定程度上延长了暴雨历时, 这可能主要是由于城市冠层的拖曳作用可使经过城市的气流减速, 延缓降水系统的移动速度, 从而增强降水历时^[28]。此外, 还可以看出全北京的暴雨(日降水 > 50 mm)主要是以长历时降水为主。

以上结果表明地形及城市化均影响着暴雨特征的时空分布, 而城市化在一定程度上提高了暴雨量、暴雨频数、暴雨强度及暴雨历时。此外, 由于受盛行风的影响, 北京雨季的水汽通道主要来自东南风的水汽输送^[32], 城区东侧因更靠近水源地, 受海陆风环流影响, 该侧水汽更充分, 更易产生降水, 故该侧降水强度、频次较高。但北京城区西侧位于西部山区与平原区的交界地带, 因其靠近山前迎风坡, 地形的强迫抬升作用致使城区西侧相较于城区东侧降雨历时增长, 场次降水量增多^[33-34], 故因不同的降水机制致使城区东西两侧的降水过程有较大差异。

4.3.2 暴雨分型 为进一步探究城市化对精细化降水过程的影响, 图 7a 展示了北京市 4 种

主要的降水类型。Ⅰ型为夜晚型,Ⅱ型为午后型,Ⅲ型为正午型,Ⅳ型为傍晚型。由各种雨型可以看出暴雨日日降水主要集中在12:00-23:00。Ⅰ型和Ⅳ型的降水比较集中,分别主要集中在16:00-23:00及12:00-19:00。Ⅱ型和Ⅲ型的降水较为分散,但降水也主要分别集中在12:00-23:00及08:00-19:00之间。由4种雨型的分布可以看出,北京的降水在00:00-07:00降水量极少,这是由夜间气温直减率小,气层较为稳定,故降水概率小。

由图7b可知,总体上整个北京市城区与盛行风下风方向(北部郊区、北部远郊)的暴雨发生次数相对较多。具体表现为城区的降水频率高于远郊区及南部近郊约30%,低于北部近郊7.1%,高于山区75.67%~85.71%。此外,整个北京市的暴雨雨型分配主要由Ⅱ型雨为主,占总暴雨次数的47.53%。Ⅰ型、Ⅲ型、Ⅳ型的降水各占总暴雨次数的19.75%、20.99%、11.73%。山区、北部城郊的暴雨类型中Ⅱ型降水所占比例最大,分别占该地区的总暴雨次数的73.81%、72.92%,这反映出山区、北部城郊的降水主要发生在午后,且较为均匀。远郊区的雨型主要以Ⅲ型降水为主,占该区总暴雨次数的60.56%,反映出该区主要在正午时刻附近降雨量较多。南部近郊及靠近南部近郊的丰台站均以Ⅰ型为主,反映出南部近郊的暴雨量主要集中在傍晚。而城区的降水类型相较于其他区域较为复杂多变。首先,城区的东西两侧有较大的差异,东侧以Ⅱ型为主,西侧除丰台以外,主要以Ⅲ型、Ⅳ型为主,占到总暴雨次数的56.37%,反映出该区降水在中午至下午降水较为集中。其次,各站点之间降水类型的差异也较大,距离较近的不同站点的各个类型降水所占比例差异较大。山谷风和城市热岛环流复杂的耦合作用可能是造成城区东西两侧日降水类型差异较大的原因,其使城区西侧的降水类型较为多样^[35]。

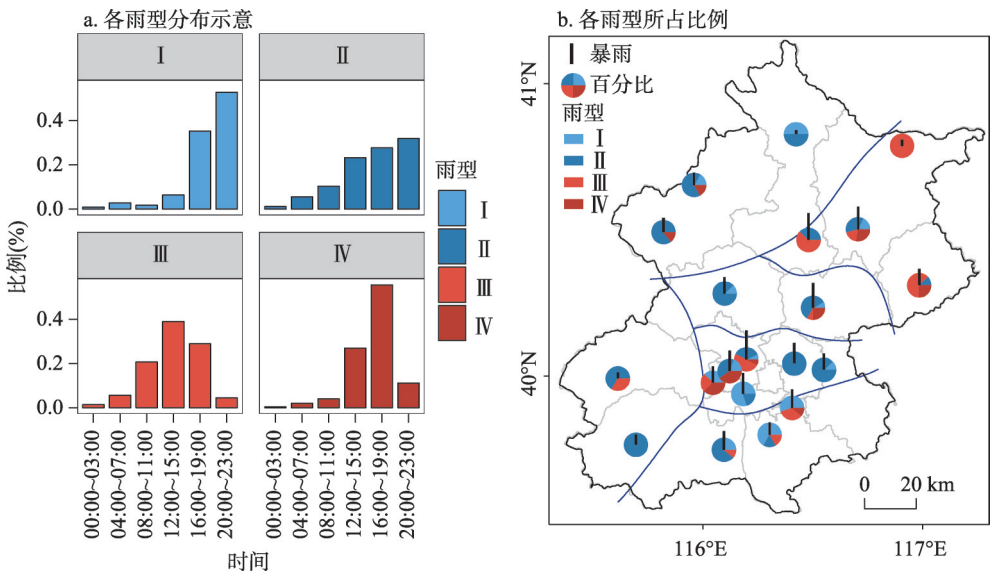


图7 4种雨型分布示意图及各雨型所占比例
Fig. 7 The distribution diagram of four kinds of rainfall patterns and the proportion of each rainfall pattern

4.3.3 降水峰值发生时间 图8展示了北京市各站点场次降水峰值平均发生时间 (Mean time) 和平均合向量长度 (Mean resultant length, MRL)。20个站点中有17个站点的MRL发生在午后 (12:00以后), 其中城区及城郊占88.24%。这说明山区的降水峰值发生时间相较于城区及城郊都要提前一些。20站点中仅有3个站点的降水峰值平均发生时间发生在09:30-12:00, 且均位于山区, 这些站点的暴雨发生时间均没有通过Circular统计检验,

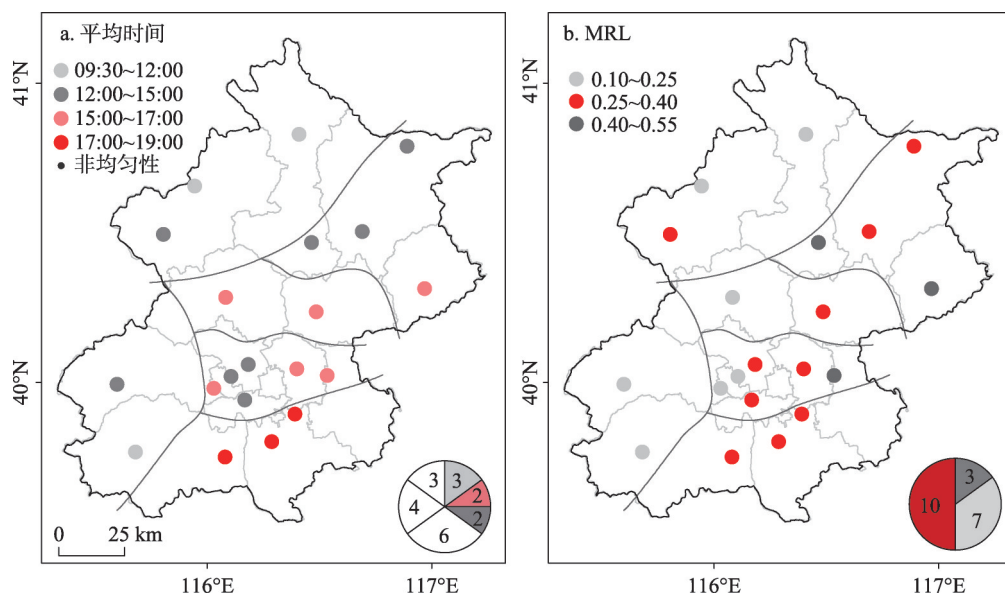


图8 降水峰值平均发生时间及平均合向量长度

Fig. 8 The mean time and mean resultant length of the peak of precipitation in Beijing

说明山区降水峰值发生时间有着较大的不确定性。有8个站点的降水峰值平均发生时间处于12:00-15:00, 主要位于远郊区及城区西侧, 占该时段总数的75%。山区也有零星分布。其中共有83.33%的站点通过了5%的显著性检验, 即平均角具有意义, 这些站点主要分布在远郊区和城区西侧, 即分布在平原区。共有6个站点的降水峰值平均发生时间处于15:00-17:00, 主要位于城区和北部郊区。且在这个时段中, 这两个区域除了城区西侧与山区交接处的站点未通过检验, 其他站点均通过了5%的显著性检验, 以上结果说明城区及北部城郊的降水峰值发生较为稳定。降雨平均时间发生在17:00-19:00的共有3个点, 且均通过了显著性检验。以上结果表明, 北京市降水峰值平均发生时间具有一定的空间异质性及区域性。因受到地形的影响, 城市西侧及东北部远郊区的降水峰值发生时间相较于其他平原区提前。由此可见, 山区及近山平原区的暴雨峰值发生时间相较于其他平原区域更加不稳定及难以预测。这可能主要是由于北京的降水峰值受内陆内蒙古低压系统的控制, 其由西北至东南快速移动^[12], 故由图8a可以看出降水峰值的出现时间从北京的西北至东南部的降水峰值发生时间逐渐延迟。

从图8b可以看出, 总体上北京市的MRL呈现出从右向左逐渐减少的趋势。平原区中的远郊区、城区东侧、南部近郊、北部近郊、城市西侧的MRL值分别为0.415、0.385、0.32、0.255、0.208。山区的北部山区和南部山区的MRL分别为0.193、0.13。远郊区的MRL分别是城区东侧、南部近郊、北部近郊、城区西侧的1.08、1.30、1.63、2.00。是北部山区和南部山区的2.15倍、3.19倍。平原区的平均MRL是山区的1.98倍。以上研究结果表明平原区的MRL约是山区的2倍。为了进一步验证地形与MRL的关系, 通过Pearson相关性分析来检验海拔与MRL之间的关系。研究结果显示北京全区的MRL与海拔呈负相关 ($R = -0.60$, $P < 0.05$)。此外, 如果将城区西侧的4个点移除以后MRL与海拔呈显著负相关 ($R = -0.73$, $P < 0.05$)。以上结果一方面显示出海拔的升高会使日降水峰值的出现时间的不确定性更大。另一方面显示, 由于局地环流中的山谷环流及热岛环流相互耦合引发的山—城环流很大程度上影响了城区的降水模式。这可能是由于山

区和城区降水类型的差异,山区主要的降雨类型主要是地形雨,而城区和城郊所在的地区为平原区,主要以对流雨及锋面雨为主。此外城区东侧的MRL是靠近山区的城区西侧的MRL的1.85倍。另一方向显示出山谷风环流致使山区及靠山城区的降水不稳定性增加,降水峰值发生时间的不确定性增大,但其机理有待进一步探究。

以往研究中, Circular统计方法多用于检测极端降水、洪峰发生日期的季节分布的单峰及多峰性^[23]。尚未有研究将此方法用在探索降水峰值的发生时间上,而由于降水峰值能够诱发城市洪涝,影响城市交通以及市民出行,使旅游业、商业、农业及城市景观受到较大的经济损失,故研究降水峰值发生时间及其空间分布能够帮助人们进一步理解天气系统及水循环,为降低洪涝风险提供一定的理论支撑。图9展示了圆形统计法分析6个区域代表站点的降水峰值日分布特征。从图9可以看出,各个区域的降水峰值发生时间均有较为明显的多峰性。由图9a、9b的密度图均可以看出,山区降水峰值事件发生较少且时间较为分散,没有明显的集中时段,圆形密度曲线表现出4~5峰,且峰值较为陡峭,反映出山区降水峰值事件发生的不集中性。从玫瑰直方图可以看出北部山区及南部山区在16:00发生降水的概率均较高。9c反映出北部远郊的降水峰值有较为明显的发生时段,主要发生在11:00-16:00之间,圆形密度曲线表现出3峰,且较为平缓,表现出降水峰值事件的发生具有一定的集中性。图9d、9e呈现出南部城郊、北部城郊和城区的圆形密度曲线均呈现较为平缓的3峰曲线,峰值多处于12:00-18:00。以上表明尽管平均北京全区降水峰值事件的核密度曲线呈多峰型,该事件在午后发生概率较大。

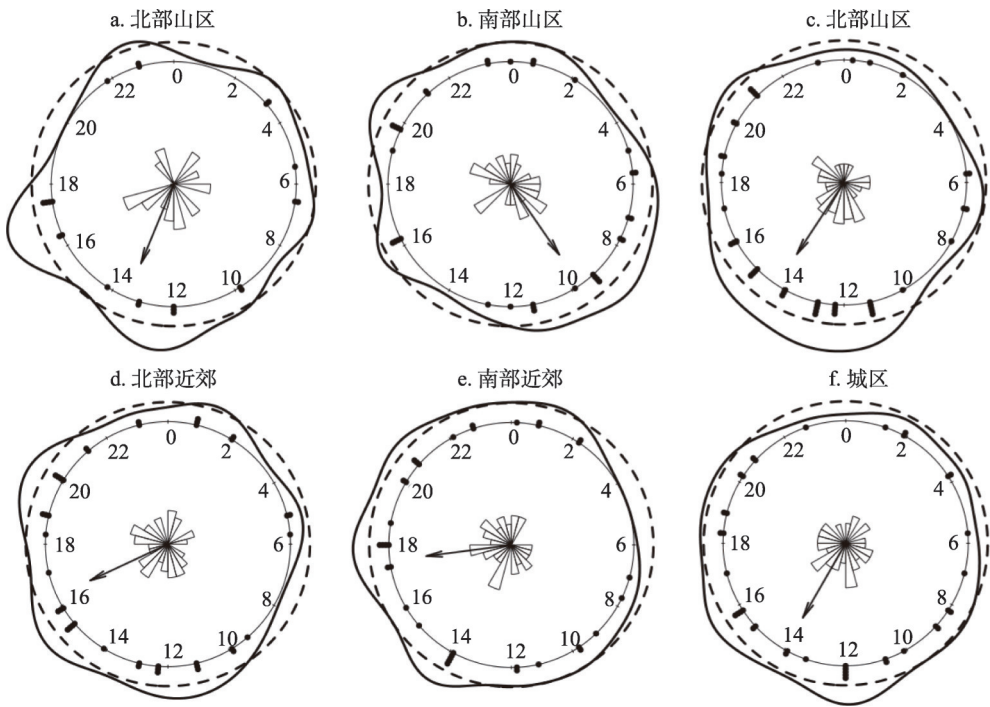


图9 圆形统计法分析6个区域代表区的降水峰值发生时间
Fig. 9 Analysis of peak of precipitation in six representative regions by circular statistics

4.4 极端降水事件时空特征

图10反映的是北京市各极端降水指标的空间分布图。总体来看,各极端降水指标沿着东北—西南方向做着有规律的变化。这是由于北京处在东部季风区,其降雨过程大体

上受渤海海陆风环流形成的东北—西南走向的雨带控制,故在整体空间上形成了东北—西南向的降水格局^[36-37]。由于北京市的总体地势西北高,东南低,故因受到燕山太行山地地形山谷风环流影响,山区和平原区的极端降水特征也有着显著的差异。再者,随着北京城市化的不断扩张,城区的“热岛”“干岛”效应也使北京的降水特征有着较为显著的城市特征。

从图 10a、A 可以看出,整个北京市的 CDD 都较高,全区的最长连续干旱天数达到 84.6~121.8 天。但山区的 CDD 相较于平原区有着显著的提高,山区的平均 CDD 要比平原区高 12.02%。平原区中,城区的 CDD 最高,平均 CDD 达到 103.7 d,相较于南部近郊、北部郊区、北部远郊要高 9.96%、3.59%、4.07%。由此说明城市化在一定程度上促进了极端干旱的发生,这是由于城市的扩张导致的不透水面积增加而引发的干岛效应造成的。此外,城区西侧及东侧的降水也有较为明显的差异。城区西侧 CDD 要高于城区东侧 6.80%,且城区西侧站点相对于其他区域的相近经度地区的 CDD 也要高接近 6.3%。由此反映出山谷风环流和城市环流相互耦合形成的山—城环流在一定程度上促进了城市干岛的发生。

由图 10b、B 可以看出,整个北京市连续降水的天数较少。城区的 CWD 仍表现出偏高值,城区的 CWD 相较于北部近郊、北部远郊、南部近郊分别升高了 4.65%、8.43%、25%。这主要是由于北京城区快速的城市化发展引发的城市热岛以及高层建筑减慢天气系统的移动速度,延长了极端降水的持续时间。CDD 值的范围在 84.6~121.8 d 之间,而 CWD 的值在 3~5.4 d 之间,故连续干燥天数约是连续湿润的天数的 25 倍。由此反映出北京遭遇旱灾的风险相较于洪涝灾害要更大。与 CDD 的空间分布不同的是,CWD 的南部山区和北部山区降水状况差异较大,南部山区相较于北部山区连续降水天数更加持久,具体表现为南部山区的 CWD 高于北部山区的 50%。此外,不难看出北京市发生极端连续干旱的概率相较于发生极端连续降水的概率要高很多。由 R95p 的空间分布也能看出北京市的极端降水强度也十分大,在城区的年平均极端降水总量高达 210.54~228.86 mm,这相当于平均年降水量的 28.35%~39.7%,这表明极端降水量高强度的降水对于城区的交通、旅游、人身安全均造成了巨大的影响和威胁。PRCTOT 的高值区仍然位于城区,其分别高于北部远郊、北部近郊、南部远郊 3.72%、9.11%、6.11%。

指示极端降水发生频率的指标 R10、R20 基本呈现由东向西逐渐减少的过程。但不同指标的空间分布仍存在着显著的差异。由图 10d、10f、D、F 可知 R10 的高值区主要位于其北部远郊的城市下风向地区,城区的平均 R10 与南部近郊差异较小,仅相差 0.59%,高于北部近郊 4.79%,低于北部远郊 5.27%。R20 同样在城市下风方出现高值区,而在上风方向出现低值区。具体表现为城区的 R20 分别低于北部远郊、北部近郊 5.62%、7.84%,而高于南部近郊 3.07%。总得来说,表征频率的极端降水指标主要在北京城区的下风向存在高值区。该结论与目前一些研究结果相近^[38-42]。这些研究结果表明城市化引发下风向极端降水频率升高主要的途径有以下几种:① 城市热岛效应通过加强北京城区下风向地区的风速和水汽水平输送,促进了下风向地区的辐合与上升运动,进而诱发和强化该地区的湿对流活动^[38-39]。② 在盛行风、地形因素及其附近的密云水库所形成的陆—湖环流及地形抬升作用下,北京城区下风向地区的湿度及空气扰动均有一定的提升,更利于降水的发生^[41]。③ 城市冠层使暴雨云团在通过城区时发生分离,并在通过主城区之后在城市下风区激发^[43]。

综上所述,由于北京的地形及海陆风环流的影响,其极端降水大体上呈现东北—西南走向的格局。但在城市化的作用下,城区的 CDD、CWD、R95p、PRCTOT 均有较为明显的提升,R10、R20 在城市下风向出现高值区。

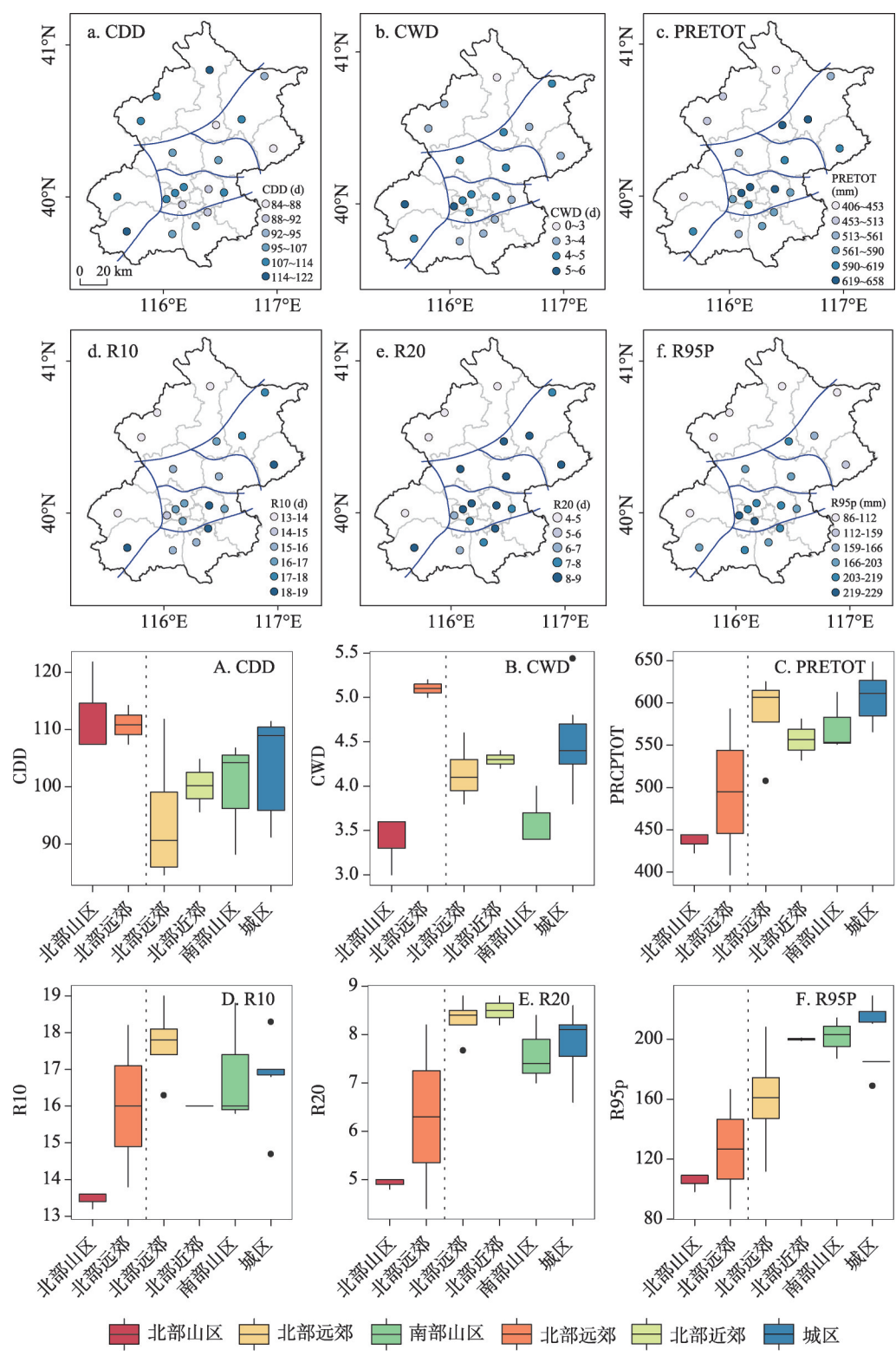


图 10 北京市不同极端降水特征及空间分布图

Fig. 10 Characteristics and spatial distribution of different extreme precipitation events in Beijing

4.5 北京市极端降水成因探讨

采用 Pearson 相关系数对北京市各站点的各地形因子（纬度、经度、海拔）、城市因子（人口对数、NDVI）与各极端降水指数进行相关性分析（图 11）。6 种极端降水指标中，PRCTOT、R95p、R10、R20 相互之间均呈现较为显著的正相关关系，这 4 个指标除了 R95p 和 R10 之间的相关系数 0.46 较小外，其余指标两两之间的相关系数均达到 0.72 以上，这说明极端降水量级与频率之间相关性较好。

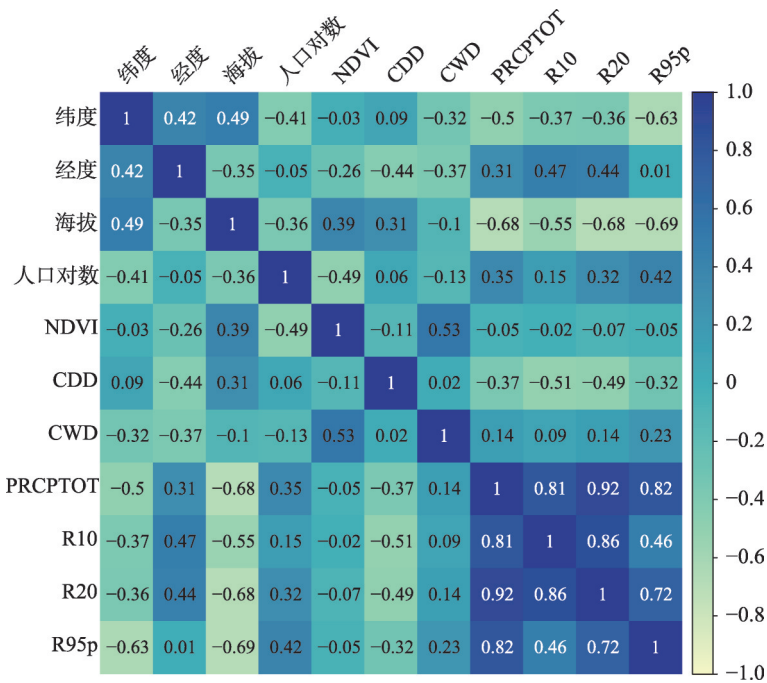


图 11 北京市城市因子与各极端降水指数之间相关关系

Fig. 11 The relationship between urban factors and extreme precipitation indices in Beijing

此外各极端降水指标与地形因子、人口因子、植被因子均有一定的相关。纬度与降水之间呈现一定的负相关，与极端干旱指标（CDD）无明显关系，即随着纬度的增加极端降水的量级、发生频率及持续时间都会有一定的下降。这可能是由于随着纬度的增加，太阳辐射相应降低，致使其环流效应相应减弱。而经度则与各极端降水指标中 PRCTOT、R95p、R10、R20 呈正相关，与极端连续干旱及湿润指标呈负相关。这可能是由于随着经度的增加，站点距离沿海的距离越近，故水汽越丰盈，发生极端降水的可能性也相对提升。PRCTOT、R95p、R10、R20 与人口对数呈正相关这在一定程度上说明城市化所带来的人口增加间接增加了城区热排放，增强了热岛效应，进而促进了极端降水的发生。NDVI 所反映了某个地区的植被生长情况，图 11 显示人口与 NDVI 呈负相关，表明人类活动降低了植被覆盖，而极端降水指标 PRCTOT、R95p、R10、R20 等与 NDVI 呈微弱负相关，说明两者间无显著互相反馈作用。但城市化通过改变土地利用类型，降低了地表覆被，随之替代的是低地表反照率、高地表粗糙度、低地表渗透率的不透水面及城市冠层，故地气通量交换、水及能量循环过程等发生变化，从而影响辐射强迫，促使极端降水发生改变^[42]。

城市热岛、城市冠层、气溶胶是促进城市强降水发生发展过程中非常重要的影响因

素。城市热岛效应通过提升近地表温度扰动层结,诱发深湿对流,加强水平辐合及垂直对流运动进而提高城区及其下风向极端降水的强度与频率。城市冠层因温度升高致使城区空气中的饱和水汽压上升,为城区降水提供了较好的水汽条件^[43]。城市冠层因增大了地表粗糙度,进而扰动边界层水汽和能量过程,阻滞降水系统运动,从而使降水事件延长、强度增大^[44]。此外,城市冠层还通过降低地表风速,导致近地面风场产生地面风场产生辐合,触发高强度对流性降水^[45]。另一方面,在极端降水高发的湿润季节,随着人类活动的加强,城区的气溶胶增多会通过增加凝结核,延长云滴空中滞留的时间,抑制下沉气流发生,冰相过程释放潜热的加热作用增强上升运动等方式,促进极端降水的发生^[46-48]。

虽然大部分研究结果倾向于支持城市化促进极端降水的发生^[49-50],但仍有部分研究的结论与之相悖。如部分研究结果证明城市化与极端降水并无明显关系^[51-52],这也可能与当地的气候条件与城市发展程度有密切关系。同时也说明目前关于城市化对降水的影响机制机理尚未完全明晰。此外,由于影响极端降水发生的因素十分广泛,且城市化也是一个较为笼统的概念,如何剥离非城市化因素,选取适当的因子定量研究城市化对降水过程的影响,在观测及数值模拟研究中仍亟待解决。

5 结论

本文基于北京市20个自动降水观测站小时降水资料,从降水的总体特征,暴雨特征以及极端降水特征较为全面地描述了北京市对人类影响较大的降水事件的特征,揭示了北京市精细化时间尺度下的不同量级降水的变化过程,得出如下主要结论:

(1) 从北京市各站点的总体降水指标统计结果可以看出,总体上城市化提高了北京市城区的降水总量、场次降水持续时间及降水强度,抑制了超短历时降水的发生的概率。此外,城市化也在一定程度上提高了城区的暴雨总量、暴雨频数、暴雨强度及暴雨历时。

(2) 整个北京市的雨型分配主要以午后型降水为主,占总雨型的47.53%。相较于城区和城郊,山区总体及北部城郊的暴雨类型中,午后型降水所占比例最大,在远郊区的雨型以正午型降水为主,南部城郊以夜晚型降水为主。而城区的暴雨类型显示出主城区的东西两侧有较大的差异,西侧受山谷风环流及热岛环流影响类型较为复杂、东侧以傍晚型为主。场次暴雨的降水峰值出现时间主要集中在12:00-19:00,且城区降水峰值发生时间较郊区产生延迟效应。海拔的升高会使日降水峰值的出现时间的不确定性更大。

(3) 由于受渤海海陆风环流形成的东北—西南走向的雨带控制,各极端降水指标沿着东北—西南方向做着有规律的变化。极端降水量指标及连续干燥、连续湿润指标均在城区显示出高值区。这在一定程度上表明城市化同时促进了极端降水的强度、总量以及持续时间。但极端降水频率指标高值区位于城区下风方。此外,北京市发生极端干旱的风险要高于发生极端降水的风险。

(4) PRCTOT、R95p、R10、R20均与人口对数成正比,反映了城市化可能通过人口膨胀、土地利用类型变化等方式引发城市热岛效应、城市冠层、城市气溶胶等城市特征来影响水热气循环,形成辐射强迫,从而间接增加极端降水发生的风险。

(5) 开展北京地区降水的精细化特征研究,掌握降水的演变规律,对于改进区域数值模式和提高气象预测水平有较为重要的意义。但由于已有资料的限制,本文所用的资料仅局限于2011-2015年,故样本量不足所带来的分析结果的代表性问题有待后续随着资

料的丰富做进一步考证和研究。同时,对于各个季节降水日变化、场次变化和空间分布特征成因的研究也不够充分,相关研究工作也有待进一步开展。

参考文献(References)

- [1] Song X, Zhang J, Aghakouchak A, et al. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 119(19): 11, 211-250, 271.
- [2] Li X, Zhou W, Ouyang Z. Forty years of urban expansion in Beijing: What is the relative importance of physical, socioeconomic, and neighborhood factors? *Applied Geography*, 2013, 38(1): 1-10.
- [3] Heilig G K. *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. 2011. United Nations, Washington D C, 2012. http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2011_Report.pdf.
- [4] Yang L, Tian F, Niyogi D. A need to revisit hydrologic responses to urbanization by incorporating the feedback on spatial rainfall patterns. *Urban Climate*, 2015, 12: 128-140.
- [5] Mishra V, Wallace J M, Lettenmaier D P. Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(16): 1-7.
- [6] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [7] Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(20): L20710.
- [8] Yang P, Ren G, Hou W, et al. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing Municipality based on a high-density AWS dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, 33(13): 2769-2780.
- [9] Lin C, Chen W, Chang P, et al. Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in Northern Taiwan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(2): 339-353.
- [10] Shem W, Shepherd M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmospheric Research*, 2009, 92(2): 172-189.
- [11] Han J Y, Baik J J. A theoretical and numerical study of urban heat island induced circulation and convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 65(6): 1859-1877.
- [12] Zhong S, Qian Y, Zhao C, et al. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(20): 903-914.
- [13] Kishitawala C M, Niyogi D, Tewari M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 1908-1916.
- [14] Pathirana A, Deneke H B, Veerbeek W, et al. Impact of urban growth-driven land use change on microclimate and extreme precipitation: A sensitivity study. *Atmospheric Research*, 2014, 138(3): 59-72.
- [15] Shastri H, Paul S, Ghosh S, et al. Impacts of urbanization on Indian summer monsoon rainfall extremes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(2): 496-516.
- [16] Zhang Q, Singh V P, Li J, et al. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D23): D23106.
- [17] Zhai Y, Guo Y, Zhou J, et al. The spatio-temporal variability of annual precipitation and its local impact factors during 1724-2010 in Beijing, China. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2192-2201.
- [18] Wang J, Zhang R, Wang Y. Areal differences in diurnal variations in summer precipitation over Beijing metropolitan region. *Theoretical & Applied Climatology*, 2012, 110(3): 395-408.
- [19] Yin Shuiqing, Wang Yang, Xie Yun, et al. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 617-624. [殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征. *水科学进展*, 2014, 25(5): 617-624.]
- [20] Ahmad A, Dey L. A K-mean clustering algorithm for mixed numeric and categorical data. *Data & Knowledge Engineering*, 2007, 63(2): 503-527.
- [21] Li J, Yu R, Wang J, et al. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(12): 1933-1936.
- [22] Yang P, Ren G, Yan P. Evidence for strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in Beijing urban area. *Journal of Climate*, 2017, 30(15): 5851-5869.
- [23] Dhakal N, Jain S, Gray A, et al. Nonstationarity in seasonality of extreme precipitation: A nonparametric circular statistical approach and its application. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4499-4515.

- [24] Zhang Q, Gu X, Singh V P, et al. Timing of floods in southeastern China: Seasonal properties and potential causes. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 732-744.
- [25] Mardia K V, Jupp P E. *Directional Statistics*. New York: Wiley, 1999.
- [26] Jammalamadaka S R, Sengupta A. *Topics in Circular Statistics*. Singapore: World Scientific, 2001.
- [27] Köplin N, Schädler B, Viviroli D, et al. Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes*, 2013, 28(4): 2567-2578.
- [28] Jin M, Li Y, Su D. Urban-induced mechanisms for an extreme rainfall event in Beijing China: A satellite perspective. *Climate*, 2015, 3(1): 193-209.
- [29] Ma Jingjin, Li Shuyan, Wang Ji. The study of Beijing's rainstorm division and its return periods. *Meteorological Monthly*, 38(5): 569-576. [马京津, 李书严, 王冀. 北京市强降雨分区及重现期研究. *气象*, 2012, 38(5): 569-576.]
- [30] Li H, Cui X, Zhang D L. A statistical analysis of hourly heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region during the warm seasons of 2007-2014. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(11): 4027-4042.
- [31] Wu Yongqiu, Lu Ruijie, Liu Baoyuan, et al. *Physical Geography*. Beijing: Beijing Normal University Press, 2012. [伍永秋, 鲁瑞洁, 刘宝元, 等. *自然地理学*. 北京: 北京师范大学出版社, 2012.]
- [32] Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July-August. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2): 345-357. [周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 影响华北汛期降水的水汽输送过程. *大气科学*, 2008, 32(2): 345-357.]
- [33] Zhang C, Chen F, Miao S, et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D2): D02116.
- [34] Yuan Weihua, Yu Rucong, Fu Yunfei. Study of different diurnal variation of summer long-duration rainfall between the southern and northern parts of the Huai River. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(3): 752-759. [原韦华, 宇如聪, 傅云飞. 中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析. *地球物理学报*, 2014, 57(3): 752-759.]
- [35] Li J, Yu R, Wang J, et al. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(12): 1933-1936.
- [36] Luo Y, Gong Y, Zhang D L. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu Front in East China. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(1): 203-221.
- [37] Liu Zhenxin, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. A comparison study of the simulation accuracy between WRF and MM5 in simulating local atmospheric circulations over Greater Beijing. *Science China Earth Science*, 2012, 42(2): 301-312. [刘振鑫, 刘树华, 胡非, 等. MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(2): 301-312.]
- [38] Zhong S, Qian Y, Zhao C, et al. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17(8): 1-57.
- [39] Baik J J, Kim Y H, Kim J J, et al. Effects of boundary-layer stability on urban heat island-induced circulation. *Theoretical & Applied Climatology*, 2007, 89(1/2): 73-81.
- [40] Inamura T, Izumi T, Matsuyama H. Diagnostic study of the effects of a large city on heavy rainfall as revealed by an ensemble simulation: A case study of Central Tokyo, Japan. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2011, 50(3): 713-728.
- [41] Yang Ping, Xiao Ziniu, Shi Wenjing. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(3): 475-489. [杨萍, 肖子牛, 石文静. 基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征. *大气科学*, 2017, 41(3): 475-489.]
- [42] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 997-1027.
- [43] Yang L, Smith J A, Baeck M L, et al. Impact of urbanization on heavy convective precipitation under strong large-scale forcing: A case study over the Milwaukee-Lake Michigan Region. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(1): 261-278.
- [44] Zhang Jianyun, Song Xiaomeng, Wang Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. [张建新, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605.]
- [45] Miao S, Chen F, Li Q, et al. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2011, 50(4): 806-825.
- [46] Qian Y, Gong D, Fan J, et al. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2009, 114(D7): D00K02.
- [47] Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(611): 2639-2663.

- [48] Li Z, Niu F, Fan J, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 888-894.
- [49] Wan H, Zhong Z, Yang X, et al. Impact of city belt in Yangtze River Delta in China on a precipitation process in summer: A case study. *Atmospheric Research*, 2013, 125-126: 63-75.
- [50] Kai W, Yang X Q. Urbanization and heterogeneous surface warming in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(12): 1363-1373.
- [51] Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit. *Journal of Climate*, 2007, 20(10): 2299-2306.
- [52] Wang X, Wang Z, Qi Y, et al. Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(2): 250-256.

Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related causes

ZHU Xiudi^{1,2,3}, ZHANG Qiang^{1,2,3}, SUN Peng⁴

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, Anhui, China)

Abstract: Due to rapid urbanization and relevant impacts on precipitation in both space and time, effects of urbanization processes on precipitation changes have been widely discussed in recent years. Based on hourly precipitation dataset from 20 stations covering the period of 2011-2015 across Beijing city, statistical methods such as circular statistical method were applied to examine spatio-temporal characteristics of precipitation with respect to precipitation types, extreme precipitation events and so on. The results indicated that: (1) regions in the central Beijing city are dominated by higher rainstorm precipitation amount, duration and precipitation intensity. Compared with rainstorm events in suburbs, precipitation processes in the central city are characterized by long duration and larger precipitation amount. Urban Rain Island effects could contribute to the above-mentioned rainstorm changes in the central city. (2) Uneven daily distribution of precipitation can be found across Beijing with remarkable regional difference. Rainstorm events mostly occurred after noon, accounting for 47.53% of the total precipitation type. Rainstorms in mountainous regions, northern and southern Beijing occurred mostly after noon, at noon and even at night. However, due to valley wind circulation and heat island circulation, precipitation patterns in central Beijing are relatively complicated and storms in western-central part of the city occurred mainly at nighttime. (3) Peak value of precipitation intensity of rainstorms occurred mainly during 12:00-19:00 and delayed occurrence of peak rainstorm values was observed in central city when compared to that in suburbs. Meanwhile, altitude can further induce uncertainty in occurrence time of peak precipitation amount. (4) The extreme precipitation index and the continuous drought as well as moisture index showed the high value in the urban area. The high value of the frequency of extreme precipitation index was found in the downwind direction of the urban area. Urbanization may indirectly increase the risk of extreme precipitation by population growth and land-use change.

Keywords: urbanization; precipitation process; spatio-temporal distribution; extreme precipitation; rain type; circular statistical method