Analysis on the Characteristics of Extreme Precipitation Change in Beijing

Haiyu Jia

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan Email: jiahaiyucuit@outlook.com

Received: Oct. 14th, 2019; accepted: Oct. 29th, 2019; published: Nov. 5th, 2019

Abstract

Based on the daily precipitation data from 1960 to 2014 in Beijing, the temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation in Beijing were analyzed. The study found that all extreme precipitation indices showed a downward trend (except CDD), indicating that Beijing's precipitation decreased and its intensity decreased; extreme precipitation had a significant mutation point in 1990s, daily maximum precipitation (Rx1day) and maximum precipitation on the 5th. The amount (Rx5day) has a significant mutation point at the beginning of the 21st century, and the other indexes have no obvious mutations; the extreme precipitation days (R25mm) and the precipitation intensity (SDII) have similar spatial distribution, showing that the value from northeast to northwest of Beijing is gradually decreasing; the probability of R25mm and SDII large value areas appearing in urban areas is large, indicating that the disaster risk faced by urban areas is high; the spatial distribution of the extreme precipitation index changes in Beijing shows obvious differences; the extreme precipitation indexes are mainly composed of three different large, medium and small. The periods of scale are nested with each other.

Keywords

Beijing, Extreme Precipitation, Time and Space Changes

北京市极端降水变化特征分析

贾海玉

成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 Email:jiahaiyucuit@outlook.com

收稿日期: 2019年10月14日; 录用日期: 2019年10月29日; 发布日期: 2019年11月5日

摘要

利用北京1960~2014年日降水资料分析了北京地区极端降水时空变化特征。研究发现:各极端降水指数 均呈下降趋势(CDD除外),表明北京降水有所减少、强度有所减弱;极端降水量在1990s有一显著突变

点,日最大降水量(Rx1day)和5日最大降水量(Rx5day)在21世纪初有一显著突变点,其它指数无明显突变;极端降水日数(R25mm)与降水强度(SDII)具有相似的空间分布,表现为北京东北部至西北部值逐渐减小;R25mm与SDII大值区在城区出现概率较大,表明城区面临的灾害风险较高;北京各极端降水指数变化率空间分布表现出明显的差异性;各极端降水指数主要是由大中小三个不同尺度的周期相互嵌套。

关键词

北京,极端降水,时空变化

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

1. 引言

降水是指空气中的水汽遇冷而凝结,降落地表的现象[1]。极端降水是降水量偏离平均状态时的降水, 是极端天气气候的重要表现之一,是一种典型的灾害性天气[2]。极端降水造成的危害范围随着社会经济 的发展而不断扩大,不仅影响航天飞行、损坏基础设施,而且会造成泥石流和山体滑坡等自然灾害,严 重影响我国经济社会发展[3] [4]。近年来,随着全球变暖不断加剧,我国极端降水发生的频率也随之增高, 这进一步增大了对国民经济和人民生命财产安全的影响[5] [6]。

国内外很多学者对我国极端降水进行了深入研究。有研究发现,全国年降水量、降雨日数和强降水 比率指数整体为上升趋势,地理差异显著[7]。此外,我国降水极值也存在明显区域性特征[8]。部分研究 进一步对我国北方地区极端降水进行了分析,发现我国的降水量呈减少趋势,其中持续性极端降水量的 减少更明显,极端降水更多以非持续性形式出现[9] [10] [11]。

北京地处中国华北地区,其西、北及东北地区以山地为主,东南部是源源向渤海倾斜的平原。由于特殊地形与四季分明、雨热同季的季风气候的共同影响,导致泥石流与洪涝等灾害频发。关于北京极端降水特征、变化趋势和成因己有很多研究。研究表明,北京地区的极端强降水事件的发生与由向东南移动的东北-西南走向的飑线右端的强降水超级单体有关[12]。利用高分辨率数值模式模拟也发现云凝结核浓度对北京强降水过程具有重要影响[13]。地形、冷池出流和暖湿空气的相互作用也是造成北京局地强降水的主要因素之一[14]。对于北京夏季极端降水主要形成的大气环流而言,其强降水过程的形成和发展一般与副热带高压异常、贝加尔湖阻塞高压异常密不可分[15]。以往大量研究对北京夏季极端降水进行了细致分析,但相关研究主要基于部分气象观测数据,并未充分利用北京市不同地区的气象观测资料,相关分析也未能考虑日最大降水量、多日最大降水量、极端降水日数和强度。因此,利用北京地区多个气象站观测资料开展北京市日最大降水量、多日最大降水量、极端降水日数和强度等时空演变特征分析具有重要意义。

2. 资料和方法

2.1. 资料

降水量数据采用北京市 1960 年以来 16 个气象台站的逐日降水资料。

2.2. 方法

研究极端降水时选取世界气象组织气候学委会/世界气候研究计划与气候变率和可预测性计划气候 变化探测和指标联合专家组定义的极端气候指数来表征极端降水,相关指标如表1所示。

Table 1. Eight extreme precip	itat

贾海玉

指数类型	极端降水指数	缩写	定义	单位
法结长数	持续干燥指数	CDD	日降水量 <1 mm 的最长连续日数	d
廷头伯奴	持续湿润指数	CWD	日降水量 ≥1 mm 的最长连续日数	d
443 マナナセン 米ケ	降水总量	PRCPTOT	每年日降水量 ≥1 mm 的降水总量	mm
把利佰奴	极端降水日数	R25mm	每年日降水量 ≥25 mm 的总日数	d
相对指数	极端降水量	R95p	每年日降水量 > 95%百分位的降水量之和	mm
	日最大降水量	RX1day	每年的最大日降水量	mm
强度指数	5 d 最大降水量	RX5day	每年中连续5日最大降水量	mm
	降水强度	SDII	日降水量 ≥1 mm 的总量与总日数之比	mm/d

 Table 1. Eight extreme precipitation indices and their definitions

 表 1.8 个极端降水指数及其定义

研究极端降水指数时间变化特征采用 Mann-kendall (M-K)方法进行时间变化特征显著性分析[16]。 Mann-kendall 方法气象学用于进行突变检验的一种常用方法,其实质为非参数统计检验方法,也被称之 为无分布检验,其主要优点是样本不必遵从一定分布,也不会受到少数异常值的干扰,更适合于类型变 量和顺序变量,因此对于气候变化趋势检验十分适用。

小波分析[17]亦称多分辨率分析,基本思想是一簇小波函数系来表示或逼近某一信号或函数。因此,小波函数是小波分析的关键。小波函数 $\varphi(t) \in L^2(R)$ 且满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 0 \tag{1}$$

式中为 $\varphi(t)$ 基小波函数,它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{d}_t$$
⁽²⁾

式中, $\varphi_{a,b}(t)$ 为子小波; *a* 为频率参数,反映小波周期长度; *b* 为时间参数,反映波动在时间上的平移。 对于任意给定的能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$ 其连续变换小波为:

$$W_{f}(a,b) = \left|a\right|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(7)

其中几种比较典型的小波有 shannon 小波, Coiflet 小波, Morlet 小波, Harr 小波。本文中选用 Morlet 连续复小波变换来分析北京各极端降水指数多时间尺度特征。

3. 极端降水变化特征分析

3.1. 时间变化特征及突变检验

从北京市持续干燥指数(CDD)的年际变化曲线(实测值)与 5a 滑动平均曲线图(图略)上可见,持续干燥 指数有略微下降的趋势,线性趋势为-0.526 d/10a, 1984 年最大值可达 139.7 d, 2003 年最小值低至 41.3 d, 进一步计算其趋势系数发现,线性趋势并未通过显著性检验。进一步对持续干燥指数进行 M-K 突变检验。 图 1(a)为持续干燥指数的突变检验示意图,由图可知,结果持续干燥指数在近几十年中并无明显的突变 现象发生。对北京地区持续湿润指数(CWD)的年际变化曲线与 5a 滑动平均曲线图进行分析(图略),结果 表明,近几十年中持续湿润指数总体为下降趋势,其线性趋势为-0.054 d/10a,通过显著性检验,1996 年 最大值可达 8.6 d, 1975 年最低值为 2.19 d。由持续湿润指数 M-K 突变检验可知(图 1(b)),与持续干燥指 数类似,北京地区持续湿润指数在近几十年中也无明显的突变产生。进一步对从北京地区降水总量 (PRCPTOT)的年际变化曲线和 5a 滑动平均曲线进行分析(图略),结果表明北京地区降水总量随时间总体 呈下降趋势,其线性趋势为-15.274 mm/10a。此外,降水总量的年际变化非常明显,1969 年降水总量高 达 840.03 mm,而 2005 年最小值仅为 261.82 mm。由降水总量 M-K 检验可知(图 1(c)),降水总量仍然没 有明显突变现象发生。从北京的极端降水日数(R25 mm)的年际变化曲线及 5a 滑动平均的年际变化曲线(图 略)可以发现,近几十年来北京地区极端降水日数随时间略有减少,其线性趋势为-0.255 d/10a,且年际变 化十分明显,1977 年达到最大值,为 11.3 d,而 1999 年则低至 1.25 d。由极端降水日数 M-K 检验可知(图 1(d)),结果同样无明显突变。



Figure 1. M-K test on continuous index and absolute index. (a) CDD; (b) CWD; (c) PRCPTOT; (d) R25mm 图 1. 连续指数和绝对指数的 M-K 检验结果。(a) CDD; (b) CWD; (c) PRCPTOT; (d) R25mm

图 2 给出了北京市极端降水量(R95p)、日最大降水量(RX1day)、5 日最大降水量(RX5day)以及降水强度(SDII)的年际变化和 5a 滑动平均曲线。由北京地区 R95p 年际变化及 5a 滑动平均(图 2(a))可知,极端降水量随时间的变化呈下降趋势,线性趋势为-17.724 mm/10a,最大值为 2012 年的 337.12 mm,最小值为 1980 年的 23.66 mm。由极端降水量 M-K 检验结果可知(图 3(a)),北京地区 R95p 在 1990s 存在一个明显的突变点,之后一直到 21 世纪初期均为显著的下降趋势。从北京地区的 RX1day 的年际变化与 5a 滑动 平均曲线可知(图 2(b)),北京地区日最大降水量呈年代际减少趋势,其线性趋势为达到-3.659 mm/10a,

同时还存在明显的年际变化特征,最大值为 2012 年 153.76 mm,最小值为 1980 年的 43.17 mm。由日最 大降水量 M-K 突变检验可知(图 3(b)),1998 年在临界线之间存在一交点,表明 20 世纪末期日最大降水 量下降趋势已经超过了显著性水平 0.05 临界线。由 RX5day 的年际变化和 5a 滑动平均曲线图上可见(图 2(c)),5 日最大降水量仍然为减少趋势,其线性趋势为-9.024 mm/10a;与其他指数类似,仍存在较大的 年际变化差异,最大值为 1963 年 251.13 mm,最小值为 1980 年的 55.29 mm。5 日最大降水量 M-K 检验 (图 3(c))与日最大降水量(图 3(b))类似,同样在 1998 年存在明显的年代际突变现象。由北京地区降水强度 (SDII)的年际变化与 5a 滑动平均曲线可知(图 2(d)),降水强度减小趋势较为明显,其线性趋势达到 -0.209/10a。降水强度也仍然存在较大的年际变化特征,最大值在 1994 年,为 17.21 mm,而最小值为 1980 年的 7.99 mm,2010 年后降水强度有所增加。进一步由降水强度的 M-K 突变检验结果可知(图 3(d)), 2000~2010 年之间呈明显的下降趋势,但并无突变点存在。



Figure 2. Inter annual variation of relative index and intensity index in Beijing. (a) R95P; (b) RX1day; (c) RX5day; (d) SDII 图 2. 北京相对指数和强度指数的年际变化曲线。(a) R95P; (b) RX1day; (c) RX5day; (d) SDII

3.2. 空间变化特征

3.2.1. 极端降水指数年平均空间分布

由北京连续指数、绝对指数、相对指数和强度指数空间分布(图略)可以看出,CDD 低值中心在霞云 岭和怀柔地区较为明显,海拔较高的山地 CDD 值普遍偏低。海拔较高的霞云岭 CWD 值较高,北部及东 北地区 CWD 值普遍偏低,与 CDD 基本反向对应。Preptot、R25mm、RX1day、RX5day、SDII 都表现出 相似的空间分布特征,呈现出延庆始终处于低值区,自延庆向东值有所增加的分布特征。整体来看,西 南至东南地区指数值普遍偏高,在城区附近偶尔出现区域性高值区。



Figure 3. M-K test on relative index and intensity index. (a) R95p; (b) RX1day; (c) RX5day; (d) (SDII) 图 3. 相对指数和强度指数的 M-K 检验结果。(a) R95p; (b) RX1day; (c) RX5day; (d) (SDII)

3.2.2. 极端降水指数空间趋势分析

由北京连续指数、绝对指数、相对指数和强度指数的变化率空间分布(图略)以及北京地区极端降水指数趋势统计表(表 2)可知,降水指数呈现出上升趋势的站点主要分布在北京市东北部地区,但持续干燥指数并未表现出同样分布特征。进一步分析发现,朝阳以南地区 CDD 变化率呈现增加趋势,而朝阳以北地区日降水量 < 1 mm 的最长连续日数随时间的变化有所减弱,延庆、怀柔、密云、上荀、顺义、平谷等站经过了 0.05 显著性水平检验。CWD 的变化率正值区主要位于北京北部的顺义、怀柔、朝阳及丰台等地,北京南部及西北地区日降水量 ≥ 1 mm 的最长连续日数随时间的变化减弱显著;降水总量 PRCPTOT的变化率空间分布差异十分明显,除通州外,总体表现为显著的下降趋势。因此,可认为北京年降水量 > 1 mm 的降水总量持续减少易增大干旱风险,影响水资源的供给;各气象站日降水量 ≥ 25 mm 的日数随时间变化有所减少,昌平站下降最为显著,除朝阳外,极端降水日数均通过了 0.05 显著性水平检验。进一步对逐年日降水量 > 95%百分位的降水量进行分析,发现日降水量 > 95%百分位的降水量呈现逐年减少趋势,且空间分布差异明显,16个站点均通过 0.05 显著性检验,从西向东下降趋势越显著;怀柔站逐

年最大日降水量则随时间有所增加,其线性趋势达到 0.803 mm/10a,其它站点线性趋势均为负值,且除顺义和怀柔外,均通过了 0.05 显著性水平检验,下降趋势显著;五日最大降水量变化趋势从北京东北部向西南方向依次递减,均通过 0.05 显著性水平检验;降水强度的变化范围为-0.36~-0.067/d/10a,除平谷站外,降水强度整体呈显著性下降。

指数	上升趋势站数	下降趋势站数	显著上升趋势站数	显著下降趋势站数
CDD	8	8	1	5
CWD	4	12	0	10
PRCPTOT	0	16	0	15
R25mm	0	16	0	14
R95p	0	16	0	16
RX1day	0	16	0	12
Rx5day	0	16	0	16
SDII	0	16	0	14

 Table 2. Trends in the trend of extreme precipitation indices in Beijing

 表 2. 北京地区极端降水指数趋势统计

3.3. 极端降水指数周期

进一步对 1960~2014 年北京极端降水指数序列进行小波分析(图 4)。由持续干燥指数小波系数实部等 值线图可知正负震荡中心交替出现(图 4(a)),在演变过程中存在着 9~32、9~18 以及 2~7a 的三类尺度周期 变化规律,其中 9~32a 的震荡周期最强,为持续干燥指数的第一周期; 9~18a 时间尺度为持续干燥指数 的第二周期,并出现了偏少~偏多交替的准四次震荡,在 20 世纪 70 年代震荡较为明显。由持续湿润指数 小波系数实部等值线图(图 4(b))可知,在 1960~2014 年时间域上存在 8~32a 时间尺度的年代际变化周期, 震荡周期最强,为持续湿润指数的第一周期;在年际变化尺度上还存在 8~18a 左右的短周期,在 2000 年 附近较为明显;另外还存在 8~12a,4~6a 不等的小周期。由降水总量小波系数实部等值线图(图 4(c))可知 正负震荡中心交替出现,在演变过程中存在 5~30a、5~18a、10~14a 和 4~6a 不同尺度的变化周期。其中 5~30a 的震荡周期最强,为第一周期;在 5~18a 的时间尺度为降水总量的第二周期;10~14a 和 4~6a 尺度 不等的小周期出现频次。由极端降水日数小波系数实部等值线图(图 4(d))可知,演变过程中存在着 6~30a、 6~18a、7~12a、4~6a 以及 2a 不等的 5 类尺度周期。其中,第一周期和第二周期在 20 世纪 70~80 年代较 为明显。由极端降水量小波系数实数部等值线图(图 4(e))可知,演变过程中存在着 6~32a、12~23a、8~12a 和 4~6a 不同尺度的变化周期,6~32a 的震荡最强为第一周期,12~23a 为第二周期,在 1980s 附近较为明 显。日极端降水量、5 日极端降水量和降水强度小波系数实部图类似,周期不稳定,大中小三种周期尺 度相互嵌套,偏少-偏多交替出现(图 4(f)~(h))。

4. 结论

本文利用 1960~2014 年北京 16 个站的日降水资料分析了北京 8 个极端降水指数的时空分布及周期, 得出如下结论:

1) 年际变化上,除持续干燥指数外,北京地区各极端降水指数均呈下降趋势;同时,各降水指数都 具有明显的年际变化,其中持续湿润指数、极端降水量、降水强度年际变化趋势相似,即1994~1996s 偏 强,1999~2016a 呈波动减少趋势;降水总量、极端降水日数、日最大降水量及降水强度分析结果波动, 2010年后极端降水量、极端降水日数及强度均有增加的趋势,这与近些年全球变暖引起极端事件频发相一致。时间突变上,各极端降水指数随时间均有波动。其中极端降水量在 1990s 有一显著突变点,日最大降水量和 5 日最大降水量在 21 世纪初有一显著突变点。



Figure 4. Morlet wavelet analysis of the extreme precipitation index from 1960 to 2014 图 4. 1960~2014 年北京极端降水指数 Morlet 小波分析图

2) 空间上,极端降水日数与降水强度具有相似的空间分布,表现为北京东北部至西北部值逐渐减小, 降水强度和降水持续时间长短是导致北京极端降水变化的主导因子。极端降水日数与降水强度大值区在 城区出现概率较大,表明城区面临的灾害风险较高。极端降水指数空间趋势的分析结果表明,北京各极 端降水指数变化率空间分布表现出明显的差异性,尤其是降水总量,变化率变化幅度在-20.844~-2.202 mm/10a 之间。

3)周期变化上,各极端降水指数主要是由大中小三个不同尺度的周期相互嵌套,持续干燥指数存在 9~32a、9~18a和 2~7a三个周期,9~18a为第二周期,经历了偏少-偏多的准四次振荡;持续润湿指数存 在 8~32a、8~18a、8~12及 4~6a 左右的 4 个主要振荡周期;降水总量出现 5~30a、5~18a、10~14a和 4~6 左右的 4 个振荡周期;极端降水日数存在着 6~30a、6~18a、7~12a、4~6a 以及 2a 不等的 5 类尺度周期; 极端降水量存在着 6~32a、12~23a、8~12a和 4~6a不等的 4 类尺度周期。

基金项目

成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019007,BKJX2019013,BKJX2019042,BKJX2019056, BKJX2019062,BKJX2019081,BKJX2019089,BKJX2019120和JY2018012)支持。

参考文献

- [1] 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 于季晶. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报, 2006, 43(6): 618-625.
- [2] 李湘瑞, 范可, 徐志清. 2000 年后中国北方东部地区夏季极端降水减少及水汽输送特征[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 1109-1124.
- [3] 刘晶,周玉淑,杨莲梅,张迎新.伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 959-974.
- [4] 翟盘茂,任福民,张强.中国降水极值变化趋势检测[J]. 气象学报, 1999, 57(2): 208-216.
- [5] 莫崇勋,何嘉奇,班华珍,阮俞理,孙桂凯. 澄碧河流域极端降水变化分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 6-10.
- [6] 贺冰蕊, 翟盘茂. 中国 1961-2016 年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 437-444.
- [7] 方浩, 乔云亭. 中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景[J]. 热带气象学报, 2019, 35(4): 517-527.
- [8] 李健颖, 毛江玉. 亚洲夏季风 30-60 天季节内振荡对中国东部地区持续性极端降水的影响[J]. 大气科学, 2019, 43(4): 796-812.
- [9] 张瑞麟. 北京市降水年内分配特征量化研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 9-13.
- [10] 李佳秀, 徐长春, 王晓, 高沈瞳, 赵杰. 新疆极端降水事件时空变化特征研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(2): 33-37.
- [11] 贺振, 贺俊平. 1960 至 2012 年黄河流域极端降水时空变化[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 490-520.
- [12] 张文龙, 崔晓鹏, 黄荣, 黎慧琦. 北京"623"大暴雨的强降水超级单体特征和成因研究[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 1171-1190.
- [13] 王婧卓, 马红云, 宋洁, 邵海燕. 云凝结核浓度对北京一次降水过程影响的数值模拟[J]. 气象科学, 2018, 38(1): 95-103.
- [14] 章翠红, 夏茹娣, 王咏青. 地形、冷池出流和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. 大气科 学学报, 2018, 41(2): 207-219.
- [15] 刘海涛,杨洁. 1951-2015 年北京极端降水变化研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(1): 109-117.
- [16] 符艳红,谢世友,高洁.基于 Mann-kendall 法的嘉陵江流域降水量时空分布规律[J].西南大学学报(自然科学版), 2018,40(6):132-139.
- [17] Torrence, C. and Compo, G.P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of American Meteorological Society, 79, 61-78. <u>https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2</u>