

王萃萃, 翟盘茂. 2009. 中国大城市极端降水事件变化的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 553–560. Wang Cuicui, Zhai Panmao. 2009. Changes of precipitation extremes in China's large cities [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 553–560.

中国大城市极端强降水事件变化的初步分析

王萃萃¹ 翟盘茂²

1 气象出版社, 北京 100081

2 中国气象局, 北京 100081

摘 要 利用中国 753 个台站 1951~2005 年的逐日降水资料, 初步分析了人口在一百万以上的大城市极端强降水事件的变化特征及其与周围的区别。得到以下主要结论: 大城市极端降水事件的变化受所在区域的变化影响很大, 不同地区大城市又具有其独特的变化特点, 半数以上的大城市极端降水强度和频数的变化趋势比周围大。大体上, 北方尤其是在华北南部, 大城市极端降水强度和频数增加的趋势比周围大; 与华北地区整体上的减弱趋势不同, 华北东南部大城市极端降水强度呈较明显的增强趋势。

关键词 大城市 极端降水 变化

文章编号 1006-9585 (2009) 05-0553-08 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Changes of Precipitation Extremes in China's Large Cities

WANG Cuicui¹ and ZHAI Panmao²

1 *China Meteorological Press, Beijing* 100081

2 *China Meteorological Administration, Beijing* 100081

Abstract Characteristics of precipitation extremes and the differences between the large cities with a population over one million and the surrounding stations with a population below 500 thousand were investigated based on daily precipitation data of 753 stations of China from 1951 to 2005. Results reveal that changes of precipitation extremes at large city stations display similar regional features. Moreover, the large city stations also have their own characteristic of change. More than a half of the large city stations experienced a more obvious change of the extreme precipitation than the surrounding stations. On the whole, if extreme precipitation intensity and frequency at the large city stations were increased, the increasing trends were more obvious than the surrounding stations. Most of such large city stations are in northern China, especially in the south of North China. Different from the decrease trends in North China, mean extreme precipitation intensity at the large city stations in southern North China has increased obviously.

Key words large city, precipitation extremes, change

收稿日期 2008-06-19 收到, 2009-07-13 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目“近 50 年中国降水频率、强度和总量变化”(40575038), 国家科技支撑计划课题“气候变化的检测和预估技术研究”(2007BAC03A01)和“近百年来我国极端天气气候事件变化特征及其影响”(2007BAC29B02)

作者简介 王萃萃, 女, 1982 年出生, 硕士, 主要从事气候变化、极端事件研究。E-mail: wchlji@yahoo.com.cn

1 引言

许多重要的气候影响取决于一些超出正常变化范围的罕见的极端天气、气候事件 (Sun et al., 2001)。IPCC AR4 综合报告 (IPCC, 2007) 指出: 极端气候事件对人类环境和社会经济的影响主要是负面的。极端降水事件引起了国内外许多学者的关注 (Groisman et al., 1999, 2005; Trenberth, 1998; Karl et al., 1996; Alexander et al., 2006; Frich et al., 2002; 刘小宁, 1999; Changnon, 2001; Dessens, 1995)。中国的极端强降水平均强度、极端强降水频数和极端强降水量都有增加的趋势, 尤其是在 20 世纪 90 年代, 极端强降水量比例趋于增大 (翟盘茂等, 2004; Zhai et al., 2004, 2005)。

近年来, 大城市极端气候事件频繁发生。由各城市发生的气象灾害事实可见, 极端强降水事件发生频繁、影响严重 (王维国等, 2008)。如: 2007 年 7 月 17 日, 重庆遭遇了 115 年来最强雷暴雨的袭击, 受灾人口达 272.35 万, 造成了巨大的财产损失; 2007 年 7 月 18 日, 济南特大暴雨降水量创历史纪录, 造成了重大的人员伤亡和财产损失; 2007 年 10 月 9 日, 杭州遭遇了 40 年一遇罕见内涝, 21 万人受灾。大城市人口密集, 地表渗水能力差, 加上城市规模不断扩大、人口增长以及机动车辆增加等因素, 使城市承受灾害能力的脆弱性和风险增大 (王维国等, 2008), 一旦发生极端强降水事件, 其危害异常严重。

改革开放以来, 中国工业化和城市化进程加快, 随着城市规模的不断扩大, 城市上空气溶胶浓度增大, 大气边界层与郊区差异显著, 使城市本身的气候状况同郊区自然条件下的气候状况相比有着很大差异。目前对大城市与其周围极端降水变化差异的研究较少, 本文以筛选出来的 44 个大城市测站及每个大城市周围不同方向距离最近的 5 个非大城市测站 1951~2005 年的逐日降水资料为基础, 对中国大城市与其周围的极端降水事件变化的差异进行了研究, 然后对大城市极端降水的变化特征与周围差别明显的华北地区和北京市分别进行了讨论。

2 资料与方法

2.1 资料集的选取

本文用到的资料主要是由中国气象局气象信息中心提供的中国 753 个测站 1951~2005 年逐日降水量观测资料。

为了保持资料的准确性和完整性, 本文在研究中要求资料必须满足以下条件:

- (1) 每年缺测资料的日数少于总日数的 10%;
- (2) 实测降水资料时间长度不少于 40 年;
- (3) 各要素资料必须在特定变化范围内, 如降水量不能为负值等。

符合上述条件的站点共 632 个。

2.2 分析方法

2.2.1 大城市确定及城市气候分析方法

将所选的中国 632 个测站中 50 万人口以下的测站进行分离, 得到 547 个非大城市测站。为使对比明显, 在对比大城市与周围非大城市极端降水变化情况时, 取 100 万人口以上的大城市测站进行研究讨论, 共有 44 个满足上述条件的大城市测站。所选大城市与非大城市站点分布见图 1a。每个大城市测站周围, 选取不同方向距离最近且分布相对均匀的 5 个非大城市测站, 作为与大城市测站对比的周边非大城市测站。可以看出, 中国的大城市主要集中在 100°E 以东, 因此文中讨论的主要是中国东部大城市的极端强降水事件。

分析大城市测站极端降水事件的变化时, 通过对大城市测站与其周围极端降水事件变化的对比, 揭示大城市极端降水事件的变化特征, 及其与处于大致相同背景下的周围测站的差异。

2.2.2 极端降水事件阈值的确定以及极端降水指数的选取

以 1971~2000 年 30 年中某测站所有降水日最强的 5% 的降水量作为该测站极端降水量的阈值 (Zhai et al., 2005)。各大城市极端降水阈值如图 1b 所示。

极端降水事件的变化主要通过极端降水强度和极端降水频数表现出来, 因此根据极端降水阈值的确定, 本文通过以下极端降水指数来研究极端降水事件的趋势变化: 年极端降水频数, 指一

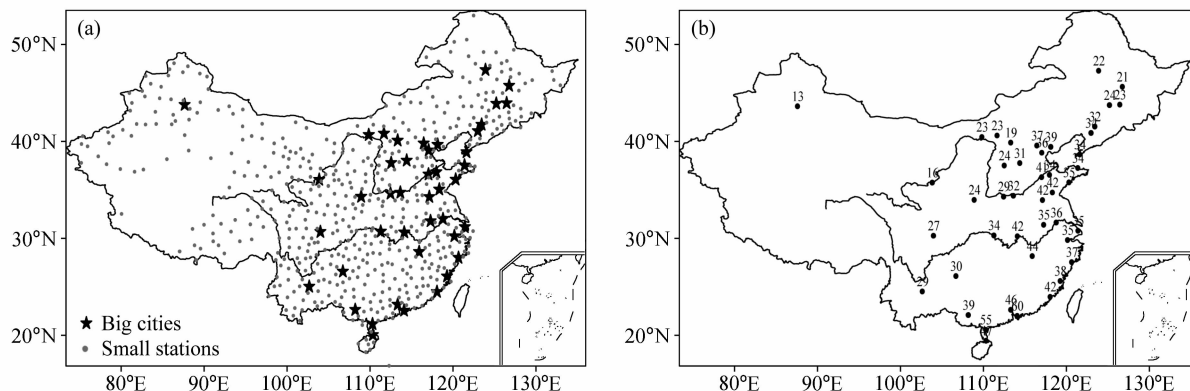


图1 (a) 本文选用的全国百万人以上的大城市测站(五角星)和50万人口以下的非大城市测站(小圆点)分布,以及(b)大城市测站的极端降水阈值(单位: mm)

Fig. 1 (a) The large cities with a population above a million (stars) and the stations with a population below 500 thousand (dots), (b) the threshold of extreme precipitation at the large city stations (units: mm)

年中日降水量超过极端降水阈值的日数; 年极端降水强度, 指超过极端降水阈值的年极端降水量与年极端降水频数的比值。

2.2.3 线性趋势显著性检验方法

Kendall-tau 检验是一种用于检验时间序列变化趋势的非参数检验方法。这种方法的优点在于它允许缺测值的存在, 并且无需证明资料服从某一特定分布; 此外, 因为该检验方法的本质是用来检测资料的相对量级, 故资料量级很小时, 依然适用。

统计量:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)(t_j - t_k), \quad (1)$$

如果

$$\begin{cases} x_j - x_k \neq 0, & n_1 = n_1 + 1, \\ t_j - t_k \neq 0, & n_2 = n_2 + 1, \end{cases} \quad (2)$$

则

$$\tau = \begin{cases} s/\sqrt{n_1 n_2}, & n_1 \neq 0, n_2 \neq 0, \\ 0, & n_1 = 0 \text{ 或 } n_2 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

式中, x 为某气象要素; t 为时间; sgn 为数学函数, 对于 $y = \text{sgn}(x)$, 当 $x > 0$ 时, $y = 1$, 当 $x = 0$ 时, $y = 0$, 当 $x < 0$ 时, $y = -1$; n_1 是气象要素 x 的样本数; n_2 是 t 的样本数。给定显著性水平 α (本研究中取 0.05), 若 $\tau > t_\alpha$, 则认为趋势是显著的。

2.2.4 分区方法

考虑到我国大城市的分布情况, 本文分区域

讨论时主要将中国分为东北、华北、长江中下游、长江以南和华中五个地区(如图2所示)。

3 大城市极端降水事件的变化特征

3.1 极端降水强度变化

图3a给出了大城市1951~2005年平均极端降水强度变化趋势的空间分布。全国有半数以上大城市年平均极端降水强度变化呈增加趋势。与以前研究得出的整个华北地区年平均极端降水强度的减弱趋势(Zhai et al., 2004)不同, 华北东南部大城市呈较明显的增加趋势; 长江下游大部分大城市年平均极端降水强度呈增加趋势; 大连、青岛、淄博、上海、福州、厦门、湛江和海口这些沿海大城市极端降水强度增加趋势相对较明显;

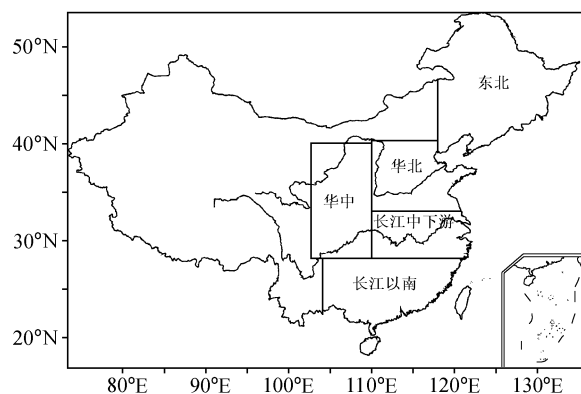


图2 文中所涉及到的地区分区情况图

Fig. 2 Regions involved in the paper

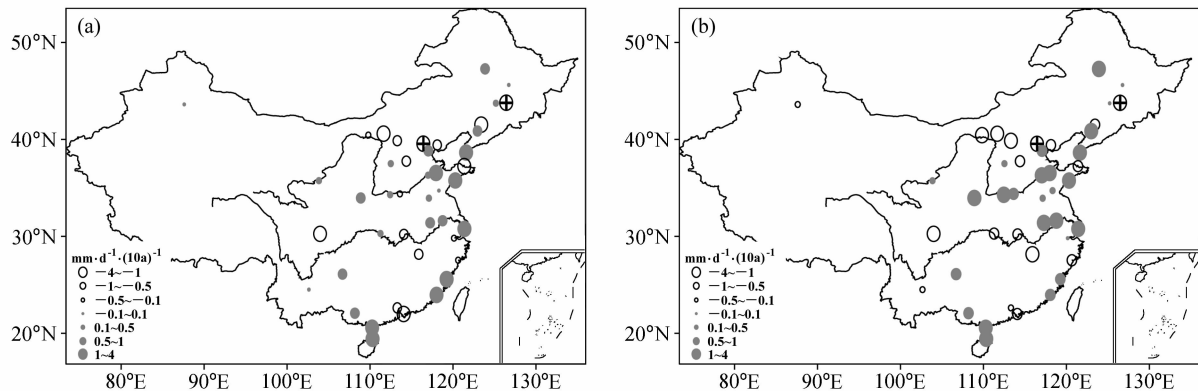


图3 大城市 1951~2005 年 (a) 平均极端降水强度变化趋势及 (b) 大城市与周围极端降水强度变化趋势的差异。其中, 带十号的表示该大城市的变化趋势超过 0.05 的显著性水平

Fig. 3 (a) The trend of mean extreme precipitation intensity at the large city stations and (b) the difference from the surrounding stations during 1951 - 2005. Trends significant at the 0.05 level are marked by plus (+)

华北北部大城市 1951~2005 年平均极端降水强度呈减小趋势, 其中北京减小趋势显著, 超过 0.05 的显著性水平。

用大城市每个测站 1951~2005 年平均极端降水强度变化趋势减去其周围 5 个非大城市站点年平均极端降水强度变化趋势, 得到 55 a 平均极端降水强度变化趋势的差异 (图 3b)。可见, 1951~2005 年极端降水强度趋势差异的空间分布与大城市极端降水强度趋势分布较一致, 极端降水强度增强的大城市, 其增强趋势比周围明显。全国有一半以上的大城市年平均极端降水强度增强趋势比周围大, 尤其是辽宁南部、华北南部、长江下游的大城市极端降水强度趋势明显比周围大。有 13 个大城市比周围极端降水强度趋势偏强 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上, 这些大城市在华北南部地区较集中, 有 12 个大城市与周围趋势差在 $0.5 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间。大城市与其周围年平均极端降水强度变化趋势之差大连最大, 达到 $2.67 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其次是青岛、南京和合肥, 变化趋势差均达到 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上。北京和吉林等城市年平均极端降水强度呈显著的减弱趋势, 超过了 0.05 的显著性水平, 与周围趋势差达到负的最大值, 为 $-3.06 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

3.2 极端降水事件频数变化

图 4a 给出了大城市 1951~2005 年极端降水事件频数变化趋势的空间分布。大城市年极端降

水频数的变化趋势大体上与各地区整体的大范围的变化趋势 (Zhai et al., 2005) 一致。有 1/3 以上的大城市年极端降水频数变化呈相对较明显的增加趋势, 尤其是华南沿海的大城市, 乌鲁木齐、济南、厦门和湛江增加趋势显著; 但北京减小趋势显著, 超过了 0.05 的显著性水平, 东北大部、华北西北部一直到华中地区、山东半岛的大城市年极端降水频数呈减少趋势。

用大城市每个测站 1951~2005 年极端降水频数变化趋势减去其周围 5 个非大城市站点年极端降水频数的变化趋势, 得到 55 a 极端降水频数变化趋势的差异 (图 4b)。有半数以上大城市与它们周围的极端降水频数变化的趋势差为正。华北大部和华南沿海大城市与其周围年极端降水频数变化趋势之差均为正, 有 11 个大城市的变化趋势比它们周围的大 $0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上, 这些大城市在华北地区比较集中; 有 5 个大城市与周围趋势差在 $0.1 \sim 0.2 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 之间。厦门、湛江、济南和乌鲁木齐年极端降水频数变化趋势与周围差异最大, 趋势均比周围大 $0.5 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上。青岛、杭州、北京和海口年极端降水频数变化趋势比周围小 $0.4 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上。虽然华北中部大城市年极端降水频数呈减少趋势, 但由图 4b 可看出, 华北中部大部分大城市的减少趋势没有周围的大。乌鲁木齐和华南沿海年极端降水频数增加趋势相对较明显的大城市, 其增加趋势也比周围大。

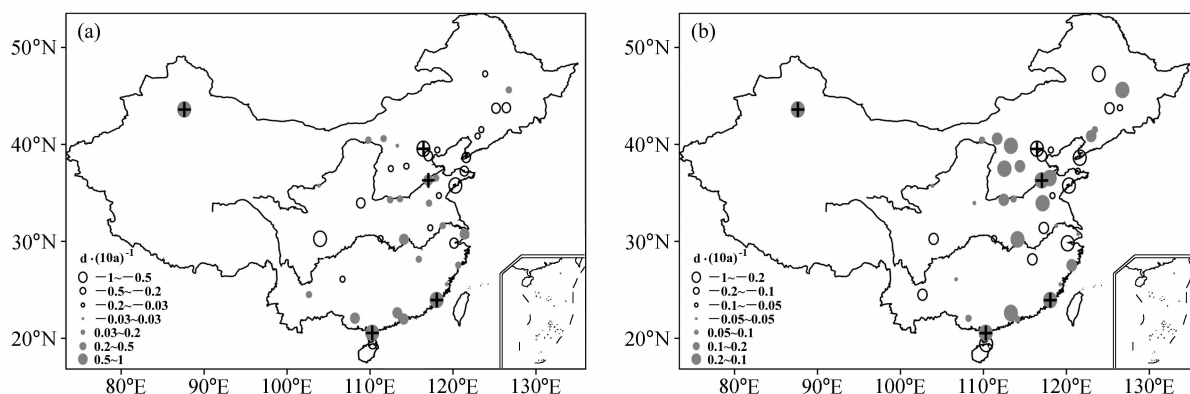


图4 大城市 1951~2005 年 (a) 极端降水事件频数的变化趋势及 (b) 大城市与周围极端降水事件频数变化趋势的差异。其中，带十号的表示该大城市的变化趋势超过 0.05 的显著性水平

Fig. 4 (a) The trend of annual extreme precipitation days at the large city stations and (b) the difference from the surrounding stations during 1951–2005. Trends significant at the 0.05 level are marked by plus (+)

3.3 不同地区大城市的极端降水变化特征

由图 3 和图 4 可见，1951~2005 年华北地区大城市年极端降水强度虽然总体上变化趋势不明显，但其东南部大城市极端降水强度增加相对明显，且东部和南部大城市极端降水强度的增加趋势比周围大；华北地区极端降水事件频数总体上略呈减少趋势，其南部大城市极端降水事件频数呈增加趋势，且比周围的增加趋势大。

1951~2005 年东北地区大部分大城市极端降水强度呈增加趋势，且其增加趋势比周围大，吉林市极端降水强度显著减弱，且减弱趋势比周围大；东北地区大部分大城市极端降水事件频数减少，且多数大城市减少趋势比周围大。

长江下游大部分大城市极端降水强度增加，且其增加趋势比周围大；该区域各大城市极端降水事件频数的变化趋势较不一致。

长江以南大部分大城市极端降水强度和极端降水事件频数呈增加趋势，且趋势比周围大。

华中中部地区大城市极端降水强度呈增加趋势，且增加趋势比周围大，而其南部和北部的大城市极端降水强度呈减弱趋势，且减弱趋势比周围大；华中地区大部分大城市极端降水事件频数呈减少趋势，且减少趋势比周围大。

4 华北地区大城市极端降水事件的变化特征

由以上讨论可知，1951~2005 年与周围各极

端降水强度、频率增强增多趋势差较大的大城市多分布在北方，尤其是华北地区。

华北地区包括北京、天津、石家庄、太原、徐州、济南、青岛、郑州、洛阳、烟台、临沂和淄博 12 个大城市。总体上，华北地区大城市年平均极端降水强度不但相对明显强于周围，而且该区域东南部大城市 55 年来极端降水强度的增强趋势也很明显。图 5a 给出了华北地区大城市与周围年平均极端降水强度的变化曲线。华北地区大城市年平均极端降水强度明显比非大城市强，该地区大城市 49 年来平均极端降水强度比非大城市强 $6.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，且 20 世纪 90 年代以后年平均极端降水强度差异更大，1997 年大城市年平均极端降水强度达到最大值 $77.39 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。虽然华北地区的极端降水强度总体上是减弱趋势 (Zhai et al., 2004, 2005)，干旱化趋势明显 (Ma et al., 2004; 刘莉红等, 2008)，华北地区非大城市年平均极端降水强度以 $0.61 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的趋势减弱，但该地区大城市极端降水强度总体上无明显变化趋势，这是因为该地区有一半以上大城市极端降水强度呈相对较明显的增强趋势。这说明，华北地区极端降水强度的减弱趋势主要由该地区非大城市极端降水强度的减弱趋势引起。

图 5b 给出了华北地区大城市与周围非大城市 1957~2005 年的年极端降水频数变化曲线。与华北地区总体上显著减小的趋势 (Zhai et al., 2004, 2005; 杨金虎等, 2008) 一致，该地区大城

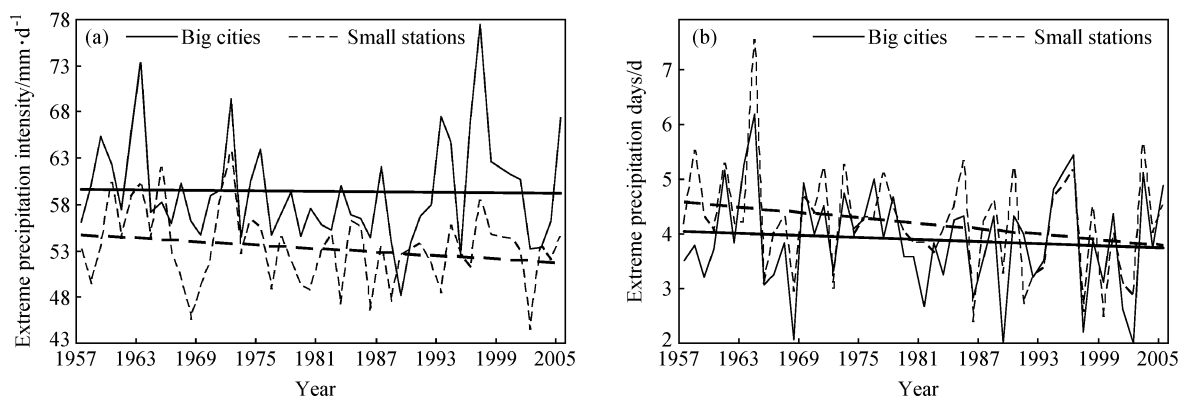


图5 华北地区大城市和周围非大城市 1957~2005 年的 (a) 年平均极端降水强度, (b) 年极端降水事件频数变化曲线

Fig. 5 The change of (a) mean extreme precipitation intensity, and (b) extreme precipitation days at the large city stations and the surrounding stations in North China during 1951 - 2005

市 49 年来年极端降水频数总体上略呈减少趋势, 这是由于华北地区部分大城市年极端降水频数呈增加趋势。由上面讨论可知, 华北地区总体上大城市极端降水强度无明显变化, 而极端降水事件频数减少, 这表明该地区 49 年来大城市极端降水事件时段越来越集中。

5 北京极端降水事件变化特征

由以上讨论可知, 北京极端强降水强度和频率及它们的变化趋势均与周围有很大差别, 本节将着重讨论北京极端强降水及其变化特征。

图 6 给出了北京及其周围非大城市 1957~2005 年的年极端降水事件频数、年平均极端降水强度的变化曲线。可见, 虽然北京极端降水频数

和极端降水强度 49 年平均值均比周围大, 但变化趋势与华北地区总体上的减小趋势 (Zhai et al., 2004, 2005) 相一致, 49 年来极端降水频数和极端降水强度均显著减小, 超过 0.05 的显著性水平。而北京周围则无明显变化趋势。北京年平均极端降水强度比其周围大约强 $11 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 但近年来年平均极端降水强度已经减弱到接近周围的水平。且 1957~2005 年北京年降水量、年降水日数以及年平均降水强度也呈显著的减小趋势。

北京年平均极端降水强度呈显著的减小趋势主要是由于北京位于华北北部, 而华北北部和接近内蒙这一带整体上大城市年平均极端降水强度均呈减弱趋势。北京年极端降水频数呈显著减小趋势主要也是因为北京位于华北北部年极端降水频数减少的地区。图 7 为北京与其周围非大城市

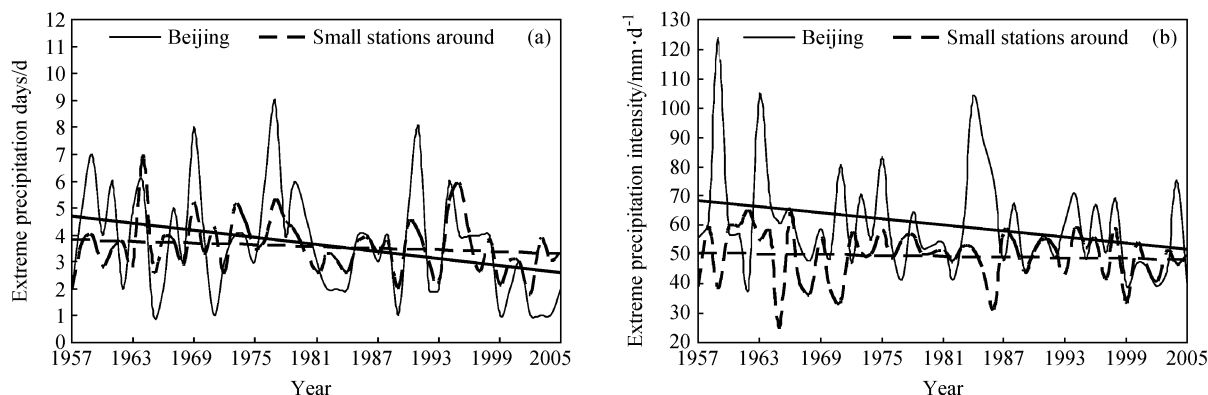


图6 北京及其周围非大城市 1957~2005 年 (a) 年极端降水频数, (b) 年平均极端降水强度变化曲线

Fig. 6 The change of (a) extreme precipitation days, and (b) mean extreme precipitation intensity in Beijing and the surrounding stations during 1957 - 2005

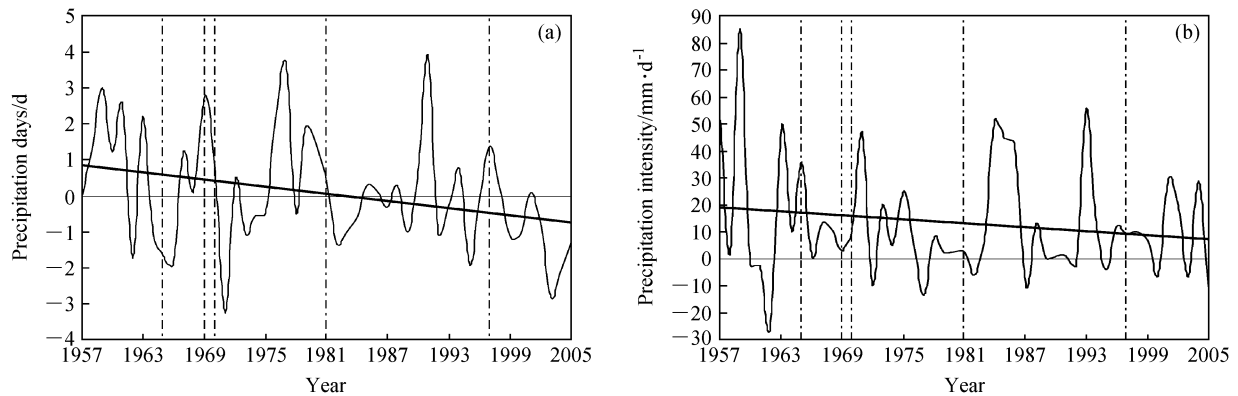


图7 北京与其周围非大城市 1957~2005 年的 (a) 年极端降水频数之差, (b) 年平均极端降水强度之差的变化曲线, 其中实线表示极端降水频数和强度的差值, 虚线表示迁站年份

Fig. 7 The changes of differences of (a) extreme precipitation days and (b) mean extreme precipitation intensity between Beijing and the surrounding stations during 1957–2005. The solid lines indicate the differences of extreme precipitation days and intensity, and the dashed lines indicate the years that Beijing station was moved

1957~2005 年的年极端降水频数和年平均极端降水强度之差的变化曲线。其中竖直线对应的横坐标为北京迁移站点的年份, 通过 M-K 突变检验发现在北京迁移站点的年份, 北京极端降水未出现明显的不连续现象, 因此可以认为北京的迁站对其 49 年来极端降水频数和强度的整体变化没有明显影响。

北京极端降水的变化与其他大城市明显不同的现象, 除了因为北京处于华北北部的大气候背景下, 也可能与北京城市化进程非常快有关, 城市化进程中人类活动的影响通过对下垫面性质的改变和使市区大气污染严重等方面, 影响着大城市的气候变化, 使大城市与郊区的气候有很大差别, 例如, 城市中大气污染物比郊区多 5~25 倍, 其中凝结核和微粒比郊区多 10 倍, 气体混合物比郊区多 5~25 倍, 日照时数城市比郊区少 5%~15%, 太阳总辐射比郊区少 10%~20% (章国材, 2002)。

6 小结

本文对中国大城市极端强降水事件的变化特征进行了分析, 总结如下:

(1) 大城市极端强降水的变化受所在区域的变化影响很大, 不同区域的大城市又有其独特的变化特征。全国有半数以上大城市年平均极端降水强度和年极端降水事件频数的变化趋势, 比周

围大。大体上, 年极端降水强度和年极端降水事件频数增加的大城市, 其增加趋势比周围大。相对来说, 辽宁南部、黄河下游、长江下游的大城市年平均极端降水强度变化趋势明显比周围大。北京年平均极端降水强度的减小趋势与周围差别最大; 华北大部和华南沿海大城市年极端降水频数变化趋势比周围大。虽然华北中部大城市年极端降水频数呈减少趋势, 但华北中部大部分大城市年极端降水频数的减少趋势没有周围的减少趋势明显。

年极端降水强度和年极端降水事件频数的增加趋势与周围差别较大的大城市大多分布在北方地区, 尤其是在华北地区比较集中。

(2) 华北地区大城市年平均极端降水强度不但明显强于周围, 而且与该地区整体上年平均极端降水强度的减弱趋势不同, 华北东南部大城市呈相对较明显的增加趋势。华北地区极端降水强度的减弱趋势主要由该地区非大城市极端降水强度的减弱趋势引起。与华北地区整体上年极端降水频数的显著减少趋势不同, 该地区大城市减少趋势非常小, 这是由于华北地区部分大城市年极端降水频数呈增加趋势。

(3) 北京年平均极端降水强度和年极端降水事件频数比周围测站的平均值大, 且减小趋势均非常显著, 其年际变率, 尤其是年极端降水频数的年际变率明显比周围测站的平均值大。

本文仅在整体上对我国大城市极端强降水事

件进行了初步分析,我国地域广阔,不同区域气候特征不同,各区域极端强降水事件的变化特征有待进一步研究讨论。

参考文献 (References)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290
- Changnon S A. 2001. Thunderstorm rainfall in the conterminous United States [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82: 1925–1940.
- Dessens J. 1995. Severe convective weather in the context of a nighttime global warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 22: 1241–1244.
- Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth Century [J]. *Clim. Res.*, 19 (3): 193–212.
- Groisman P Y, Karl T R, Easterling R W, et al. 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change [J]. *Climatic Change*, 42: 243–283.
- Groisman P Y, Knight R W, Easterling D R, et al. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record [J]. *J. Climate*, 18 (9): 1326–1350.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. 1996. Indices of climate Change for the United States [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 279–292.
- 刘莉红, 翟盘茂, 郑祖光. 2008. 我国北方夏半年最长连续无降水日数的变化特征 [J]. *气象学报*, 66 (3): 474–477. Liu Li-hong, Zhai Panmao, Zheng Zuguang. Variations in longest consecutive dry days in warm half year over Northern China during 1951–2004 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (3): 474–477.
- 刘小宁. 1999. 我国暴雨极端事件的气候变化特征 [J]. *灾害学*, 14 (1): 54–59. Liu Xiaoning. 1999. Climatic characteristics of extreme rainstorm events in China [J]. *Journal of Catastrophology* (in Chinese), 14 (1): 54–59.
- Ma Zhuguo, Dan Li, Hu Yuewen. 2004. The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years [J]. *Journal of Geographical Science*, 14 (3): 275–281.
- Sun B, Groisman P Y, Mokhov I I. 2001. Recent changes in cloud type frequency and inferred increases in convection over the United States and the former USSR [J]. *J. Climate*, 14: 1864–1880.
- Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates with climate change [J]. *Climatic Change*, 39: 667–694.
- 王维国, 王秀荣. 2008. 2007 年城市极端天气事件及其危害分析 [J]. *气象*, 34 (4): 16–21. Wang Weiguo, Wang Xiurong. 2008. Analysis about extreme weather events and their endangerment of city in 2007 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34 (4): 16–21.
- 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 Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (1): 75–83.
- Zhai Panmao, Chao Qingchen, Zou Xukai. 2004. Progress in China's climate change study in the 20th Century [J]. *Journal of Geographical Sciences*, (supplement): 3–11.
- 翟盘茂, 章国材. 2004. 气候变化与气象灾害 [J]. *科技导报*, (7): 11–14. Zhai Panmao and Zhang Guocai. 2004. Climate change and meteorological disasters [J]. *Science and Technology Review* (in Chinese), (7): 11–14.
- Zhai Panmao, Zhang Xuebin, Wan Hui, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *J. Climate*, 18 (4): 1096–1107.
- 章国材. 2002. *中国天情* [M]. 北京: 开明出版社, 484 pp.
- Zhang Guocai. 2002. *Weather in China* [M] (in Chinese). Beijing: Kaiming Press, 484 pp.