

刘海文, 丁一汇. 2010. 华北汛期日降水特性的变化分析 [J]. 大气科学, 34 (1): 12-22. Liu Haiwen, Ding Yihui. 2010. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 12-22.

华北汛期日降水特性的变化分析

刘海文^{1, 2} 丁一汇³

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 国家气候中心, 北京 100081

摘要 基于中国 740 站逐日降水资料, 使用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验等方法, 分析了华北汛期降水量、5 类汛期降水频率及其贡献率的趋势特征和年代际变化, 揭示出一些比较有意义的新事实, 结果如下: 华北汛期降水量、5 类降水频率及其贡献率都有一定的下降趋势, 华北汛期降水量下降趋势最明显。5 类降水频率的下降趋势, 表现出明显的渐变特点, 其中, 小雨频率下降趋势最大, 暴雨频率和大暴雨频率的下降趋势并不显著。5 类降水贡献率下降趋势中, 华北暴雨贡献率下降趋势最大。50 年来, 华北汛期大雨贡献率最大, 接近于总降水的 1/3。华北汛期降水量的多寡主要受其汛期大雨的频率和暴雨的贡献率影响。华北汛期降水量和暴雨贡献率都在 1978 年前后发生了年代际突变, 华北暴雨贡献率的年代际突变是造成华北汛期降水量发生年代际突变的内在因素。

关键词 降水频率 降水贡献率 长期变化 突变

文章编号 1006-9895 (2010) 01-0012-11 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Analysis of Daily Precipitation Characteristics over North China during Rainy Seasons

LIU Haiwen^{1, 2} and DING Yihui³

1 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

2 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

3 *National Climate Center, Beijing 100081*

Abstract Based on the daily precipitation data from 740 stations, by means of linear trend estimate, Mann-Kendall test method, the long-term trends and interdecadal variation of precipitation, frequency, contribution to the total rainfall over North China during rainy seasons are analyzed. Some new results are discovered as follows: the rainfall over North China during rainy seasons, and five kinds of precipitation frequency and contribution over North China during rainy seasons have a certain decreased trend with different decreased rates. The most obvious decreased trend is the rainfall over North China during rainy seasons. The long-term decreased trend of the five kinds of precipitation frequency has obvious characteristic of gradual change, and the decreased trend of light rain frequency is biggest while the decreased trend of torrential rain and excessively heavy rainfall frequency is not significant. Meanwhile, the decreased trend of contribution of heavy rain to the total rainfall over North China are biggest. The biggest contribution to the total rainfall over North China is from heavy rain and close to one-third of the total rainfall in the

收稿日期 2008-11-19, 2009-05-20 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403604, 国家科技支撑计划项目 2007BAC03A01

作者简介 刘海文, 男, 1969 年出生, 博士研究生, 天气气候高级工程师, 主要从事天气气候诊断研究。E-mail: lhw499@126.com

past 50 years. The rainfall over North China during rainy seasons is mainly influenced by the heavy rain frequency and the excessively heavy rainfall contribution. The interdecadal abrupt change took place in 1978 for both rainfall and excessively heavy rainfall contribution over North China during the rainy season, so the interdecadal abrupt change of excessively heavy rainfall contribution during rainy seasons results in the interdecadal abrupt change of rainfall over North China.

Key words precipitation frequency, precipitation contribution, long term variability, abrupt change

1 引言

华北汛期降水具有明显的年代际变化特征(黄荣辉等, 1999; 陆日宇, 2002)。传统天气学中, 把日降水量定义为小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨 5 种类型(简称 5 类降水)。显然气候意义上的月、季、年降水量是这 5 种类型降水量所组成。降水日数、无降水日数、降水强度、不同日降水量对总降水的贡献率引起了人们的关注和研究(Nobuhiko et al., 2005; Fumiaki et al., 2006)。Matsumoto and Takahashi (1999) 研究了日降水值大于 50 mm 对夏季降水的贡献率, 认为较大值主要在长江中游、淮河流域和中国南方沿海区域。Zhai et al. (1999) 认为: 1951~1995 年, 中国年降水没有显著的趋势, 而且还认为其趋势变化具有显著的地域和季节特点(Zhai et al., 2005)。Gong et al. (2004) 研究了华北半干旱区域日降水的变化, 认为尽管华北夏季降水总量有略微的下降趋势, 但是在某些方面却显示出显著的变化特点。中国年雨日已经明显减少, 而且雨日的减少比降水量的减少明显得多, 平均每 10 年减少雨日 3.8 天, 各季的雨日都是负趋势, 雨日的长期趋势变化与降水量的长期变化并不完全一致(王颖等, 2006)。最近, 李红梅等(2008) 分析了近 40 年我国东部盛夏即 7、8 月份降水量长期趋势和年代际变化特征, 按小雨、中雨、大雨及暴雨降水强度分类, 探讨了不同强度降水在我国东部降水变化中的贡献。

参照李红梅等(2008) 的做法, 本文也将降水频率、降水强度等统计指标称为降水特性, 变化分析也包括长期趋势、年际以及年代际突变。显然, 以上研究都是针对一些不同的降水特性指标, 分析和研究了中国或者华北的降水特征。虽然华北汛期降水的年代际变化是 5 类降水共同变化的结果, 但是, 在这 5 类汛期降水类型中, 哪一类型降水的哪一类降水特性指标主要决定了华北汛期降水量的多

寡? 以及哪一类型降水的哪一类降水特性指标对华北汛期降水量年代际变化起主要作用? 上面的研究还尚未涉及。仔细分析上述主要统计指标, 能够引起华北汛期降水量年代际变化的最有可能就是降水频率、雨日或降水贡献率, 因为它们是影响降水量多少的主要因子。

因此, 本文首先把逐日降水按照小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨分成 5 种类型, 然后分析华北汛期 5 类降水频率及其贡献率的变化特征, 最后得出引起华北汛期降水量年代际变化的降水特性指标。

2 数据和方法

本文所用资料为: 中国气象局国家气象中心资料室提供的中国 740 个测站 1951~2006 年逐日降水。由于在 1957 年之前我国建立的台站还比较稀疏(鲍名, 2007), 因此, 为了得到比较多的华北站点, 以上资料时间上从 1957 年开始, 止于 2006 年。

按照传统天气学定义, 把降水定义为小雨(0.1~9.9 mm/d)、中雨(10~24.9 mm/d)、大雨(25~49.9 mm/d)、暴雨(50.0~99.9 mm/d)、大暴雨(100 mm/d 以上) 5 个类型。刘海文, 丁一汇(2008) 基于对汛期的理解和认识, 用 Samel et al. (1999) 设计的半客观统计分析方法以及 Mann-Kendall 突变分析和滑动 t 检验等方法, 通过分析和研究 1957~2006 年华北台站的日降水资料, 从气候学角度确定了华北汛期的起讫日期, 即 6 月 30 日~8 月 18 日作为华北汛期, 这与传统的华北“七下八上”的雨季定义要早半个月, 这一方面反映了定义上的差别, 另一方面也反映了年代际变化的结果, 方法更加客观, 对华北降水集中期的全貌刻画更全面。因此, 按照刘海文等(2008) 确定的华北区域范围以及华北汛期的起讫日期, 也将(35°N~43°N, 110°E~120°E) 作为华北区域范围, 6 月 30 日~8 月 18 日作为华北汛期, 所谓某一站汛期降水

即是该站这 50 天降水量总和,把华北区域范围内从 1957~2006 年无缺测值的 44 站,作为华北地区代表站(刘海文等,2008)。

定义华北 44 站汛期降水量的算术平均值,作为华北汛期降水量。而华北汛期各类降水频率,则被定义为 44 站对应降水类型发生次数的算术平均值除以汛期日数(50 d)。汛期各类降水贡献率被定义为华北 44 站汛期对应类型降水量的和,除以 50 年华北 44 站总降水量(即 532087.0 mm),由此可以得到 1957~2006 年华北汛期降水量,5 类降水频率和 5 类降水量贡献率的值,显然,5 类降水量贡献率值 50 年之和等于 1。

使用方法有:趋势分析、合成分析、统计 t 检验、Mann-Kendall 突变分析(魏凤英,1999)。

3 结果分析

3.1 华北汛期降水量与 5 类降水频率、贡献率的相关分析

为了弄清华北汛期降水量与 5 类降水频率、5 类降水贡献率哪一个指标关系最为密切。我们计算了 1957~2006 年华北汛期降水量分别与 5 类降水频率、5 类降水贡献率的相关系数值。华北汛期降水量和 5 类降水频率的相关系数值分别是 0.625、0.796、0.912、0.690、0.669,和 5 类降水贡献率相关系数值分别为 0.619、0.818、0.909、0.927、0.655。由此可见,50 年来,华北汛期降水量和 5 类降水频率、5 类降水贡献率都呈显著的正相关,而且都通过了 0.001 的显著性水平。显然,贡献率越大,则对应类别的降水量就越大。因此,5 类等等级降水中,无论哪一个等级降水,其发生次数越多,贡献率越大(表明该等级降水量越大),则华北汛期降水量就越多。进一步从相关系数值来看,华北汛期降水量和大雨频率、暴雨贡献率的相关系数值最大。因此,大雨频率以及暴雨贡献率对华北汛期降水量的影响十分显著。华北地区 6~8 月的降雨量占年降雨量的 50% 以上,且主要由几场暴雨造成,一次暴雨的日降水量有时可达月降水量的 50% 以上(孙建华等,2005)。可见,华北汛期大雨的频率和暴雨的贡献率决定了华北汛期降水量的多寡。

3.2 5 类降水频率和贡献率的长期变化趋势

接下来,我们分析 1957~2006 年期间华北汛

期降水量、5 类降水频率的长期变化以及趋势变化特征(图 1)。在趋势变化分析中,我们进行了线性倾向估计计算(魏凤英,1999)。需要说明的是,图 1 中的方程是对应时间序列的回归方程, x 代表时间, y 代表变量, r 值是变量与对应时间的相关系数。由图 1 可见,50 年来,华北汛期降水量,5 类降水频率都有明显的年际变化特征,长期变化趋势都有线性减小趋势。比较分析华北汛期降水量和 5 类降水频率的倾向值,当属华北汛期降水量的倾向值的绝对值最大,表明其下降趋势最为明显,而且其下降趋势达到了 0.05 显著性水平。在华北汛期降水频率中,小雨频率下降趋势最大,大雨频率下降趋势位居第二,大暴雨频率下降趋势最小。以上 5 类降水频率与对应时间的相关系数表明,小雨、中雨、大雨的下降趋势都很显著,都达到了 0.05 显著性水平,但是暴雨和大暴雨频率虽然也有下降趋势,两者的下降趋势没有达到 0.05 显著性水平。

用同样方法分析 5 类降水贡献率的长期变化以及趋势变化特征(图 2)。图 2 表明,5 类降水贡献率也呈一致的下降趋势。比较分析 5 类降水贡献率的倾向值,则发现暴雨贡献率下降趋势最大,小雨贡献率的下降趋势最小。5 类降水贡献率与对应时间的相关系数表明,它们的下降趋势都达到了 0.05 显著性水平。分别对 50 年来小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨 5 类降水贡献率求和,它们的值分别为 16.2%、26.3%、28.2%、21.4%、7.9%。可见,50 年来大雨的贡献率最大,几乎接近总降水的 1/3。钱维宏等(2007)也认为,华北的有效降水来自大雨的贡献,这与本文的结论类似。

3.3 5 类降水频率和贡献率的年代际突变

由以上分析可知,华北汛期降水量和 5 类降水频率、降水贡献率都存在显著的正相关关系,那么在 5 类降水频率、降水贡献率中,如果有一类或几类降水特性与华北汛期降水量的突变时间相一致,该类或该几类降水特性就是导致华北汛期降水量发生年代际突变的重要的内在因素。因此,这里分别对华北汛期降水量、华北汛期 5 类降水频率和 5 类降水贡献率的时间序列进行了 Mann-Kendall 气候突变检验。图 3 是华北汛期降水量和华北汛期 5 类降水频率的 Mann-Kendall 检验结果。由图 3a 可见,华北汛期降水量在 1978 年左右发生了年代际跃变,1978 年前华北汛期降水处于偏多阶段,1978

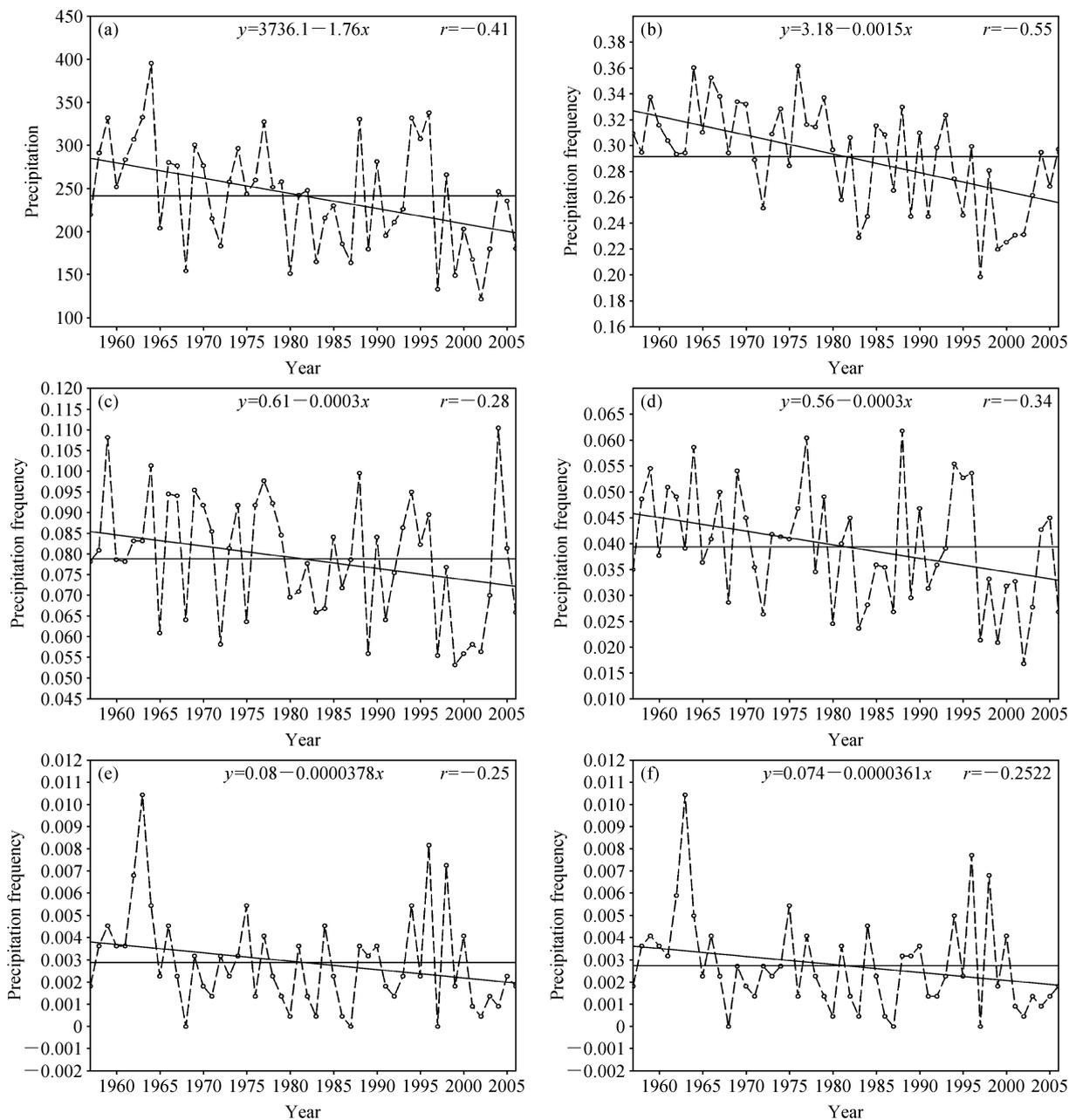


图1 华北汛期日降水特性的时间序列(虚线)及其线性趋势(实线): (a) 降水量(单位: mm); (b) 小雨频率; (c) 中雨频率; (d) 大雨频率; (e) 暴雨频率; (f) 大暴雨频率。水平直线: 平均值

Fig. 1 Time series (dashed lines) and their linear trends (solid lines) during rainy season over North China: (a) Precipitation (mm); (b) light rain frequency; (c) moderate rain frequency; (d) heavy rain frequency; (e) torrential rain; (f) excessively heavy rainfall frequency. The level line indicates the mean of the variable

年后华北汛期降水转入偏少阶段。而1978年前后,随着东亚夏季风的减弱,长江流域降水增多,华北地区降水则减少,使得中国东部地区降水呈现出“南涝北旱”的分布特征(李红梅等, 2008; 陈隆勋等, 1998, 2004; Ding et al., 2004; 黄荣辉等, 2006)

由于目前突变检验方法的局限性,对于存在多年尺度波动序列的检测尚存在一些困难,检验结果中对应两序列的交叉点不能说明存在跃变(李红梅等, 2008)。因此,我们从更严格的条件出发,认为检验结果中只出现一个交叉点,而且该交叉点又位于Mann-Kendall检验显著水平范围内,才认为该

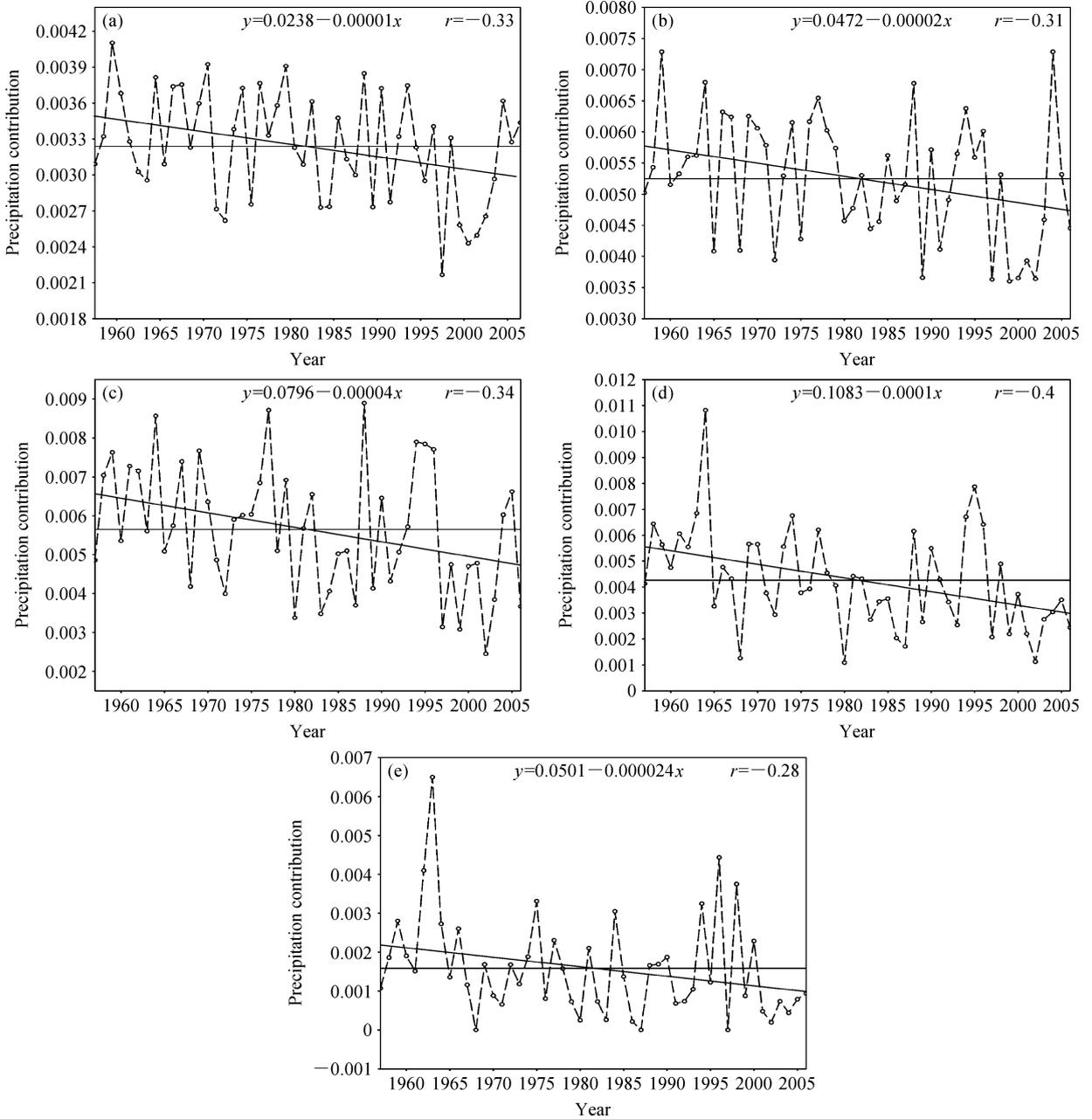


图2 同图1, 但为贡献率: (a) 小雨; (b) 中雨; (c) 大雨; (d) 暴雨; (e) 大暴雨

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for contribution to the total rainfall: (a) Light rain; (b) moderate rain; (c) heavy rain; (d) torrential rain; (e) excessively heavy rainfall

交叉点对应的时间是该时间序列的跃变时间。由图3b~f可见, 小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨的降水频率都没有出现年代际突变点。值得指出的是, 在华北汛期大雨频率的 Mann-Kendall 统计曲线中, 虽然在 1979 年前后也出现了交叉点, 但是在 1994 年前后统计曲线又出现了交叉点, 所以华北汛期大雨频率没有发生年代际突变。因此, 尽管华

北汛期大雨频率和华北汛期降水量的关系十分显著, 但是其仍不是造成华北汛期降水量发生年代际突变的内在因素。总而言之, 从 5 类降水频率的长期变化来看, 它们的下降趋势更多地表现出明显的渐变特征, 而不是突变特征。

下面, 分析华北汛期降水贡献率的年代际突变(图4)。虽然小雨贡献率、中雨贡献率、大雨贡献

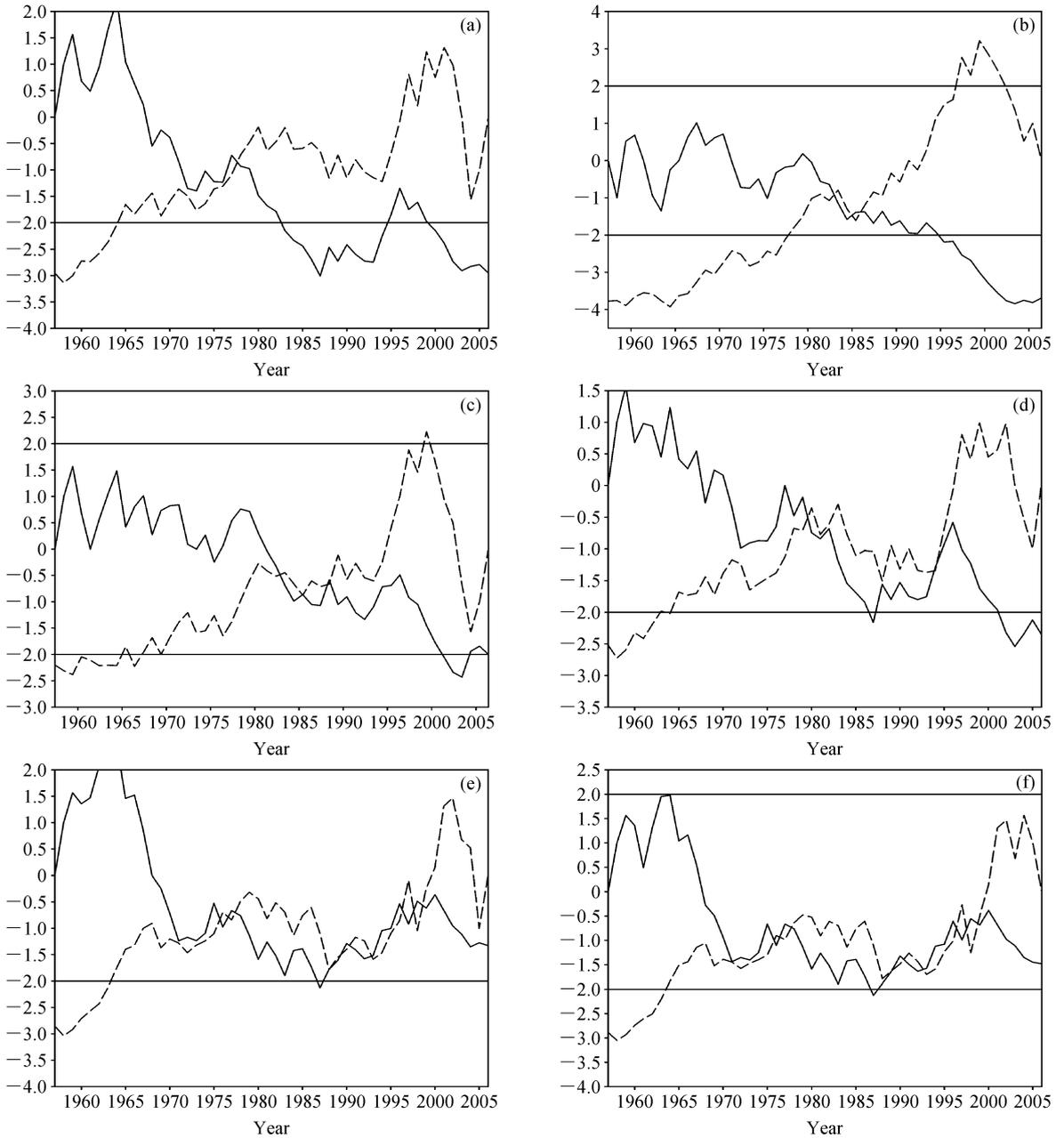


图3 华北汛期日降水特性的 Mann-Kendall 检验。实线：顺序统计检验曲线；虚线：逆序统计检验曲线；水平线：Mann-Kendall 检验 0.05 显著水平。其余同图 1

Fig. 3 The forward (solid lines) and backward (dashed lines) statistic rank series in the Mann-Kendall test of daily precipitation characteristics over North China during rainy season. The level line indicate the 0.05 significance level of the Mann-Kendall test. The others are the same as Fig. 1

率、大暴雨贡献率都没有出现年代际突变点，但是暴雨贡献率在 1978 年前后却发生了年代际突变。结合前面分析的结果，可以认为华北汛期暴雨贡献率发生的年代际突变是造成华北汛期降水量发生年代际突变的内在因素。

贡献率决定了华北汛期降水量的多寡，但是只有华北汛期暴雨贡献率在 1978 年前后发生了年代际突变，其突变年和华北汛期降水量的突变年份相一致，因此，华北汛期暴雨贡献率发生的年代际突变是造成华北汛期降水量发生年代际突变的内在因素。

总而言之，虽然华北汛期大雨的频率和暴雨的

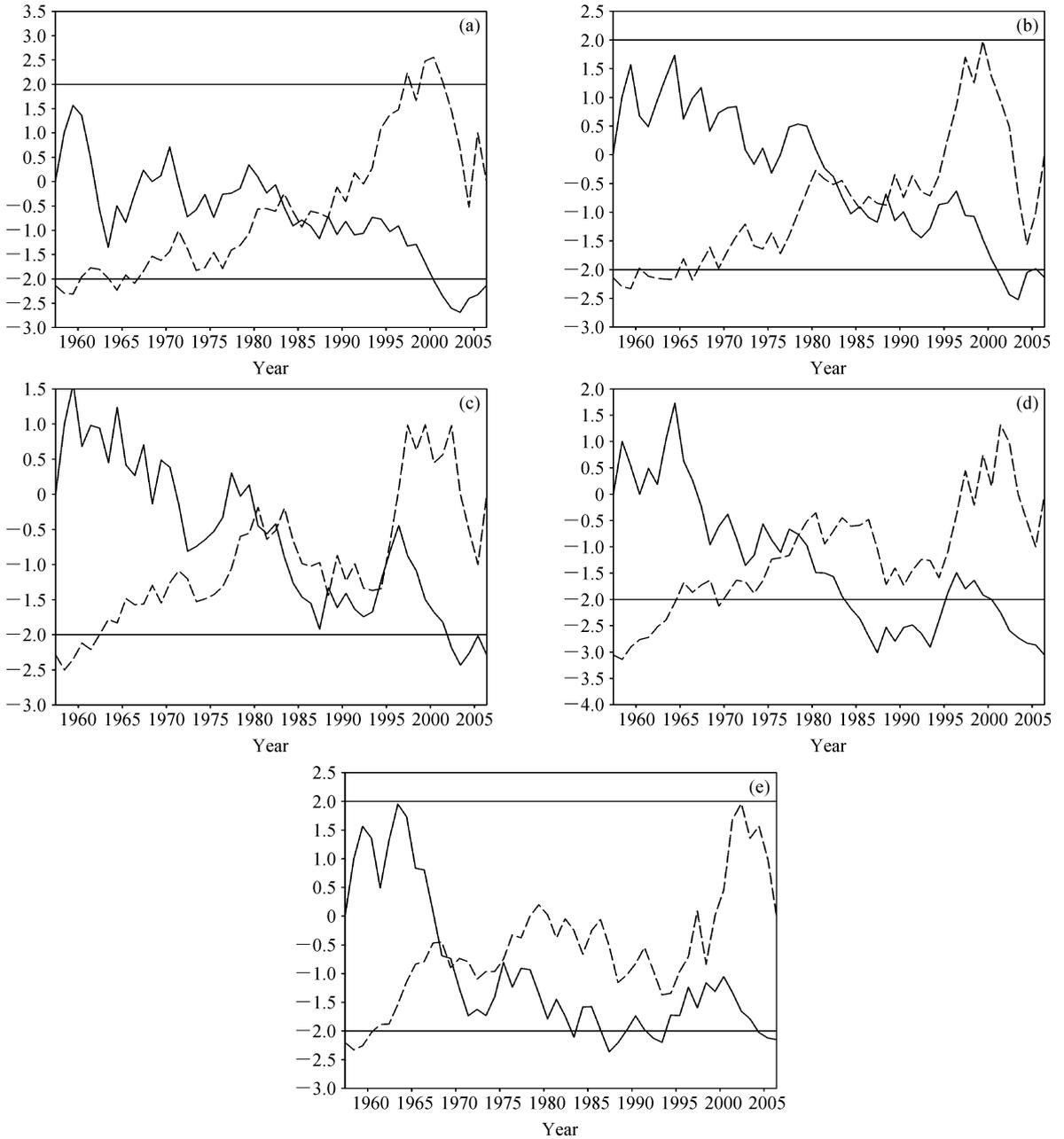


图4 同图3, 但为贡献率: (a) 小雨; (b) 中雨; (c) 大雨; (d) 暴雨; (e) 大暴雨

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for contribution to the total rainfall: (a) Light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain, (d) torrential rain, (e) excessively heavy rainfall

3.4 5类降水雨日和贡献率的年代际变化空间分布特征

陈烈庭(1999)在研究华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征时,将华北划分成8个自然区,分区范围较大。而本文研究的华北范围,基本上是传统意义上的华北区域,不包括陈烈庭(1999)文中的黄淮平原、黄河河套和渭河区。因

此,在本文所研究的华北范围内,仍使用陈烈庭(1999)的分区称谓。由于华北汛期降水在1978年前后发生了年代际突变,所以以1978年为界,将华北汛期降水划分为偏多(1957~1978年)和偏少(1979~2006年)两个时期。图5给出了华北汛期降水偏少期与偏多期平均雨日的差值场,并且用统计 t 检验检查了雨日在两个阶段平均值差异的显著

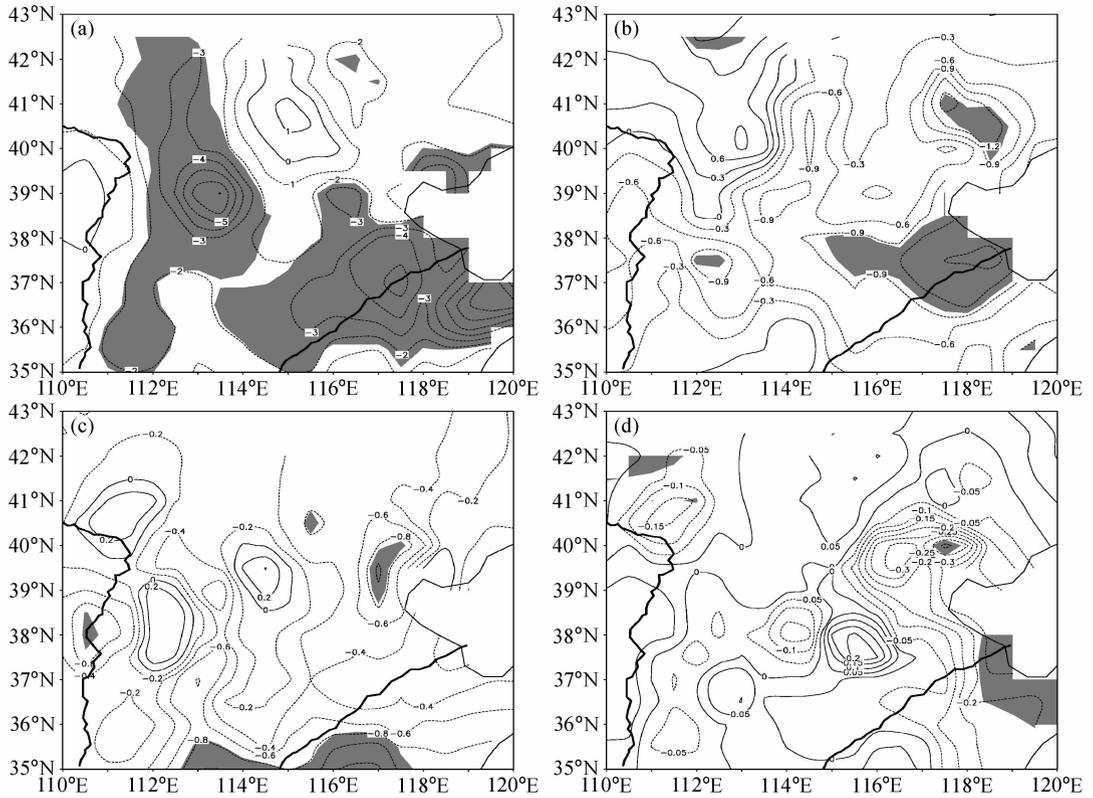


图 5 华北汛期降水偏少期 (1979~2006 年) 平均雨日减去降水偏多期 (1957~1978 年) 平均雨日所得的差值 (单位: d): (a) 小雨日; (b) 中雨日; (c) 大雨日; (d) 暴雨日。阴影: 通过了 0.05 显著性水平检验的区域

Fig. 5 The differences of the mean rain days between the wet period (1979 - 2006) and the dry period (1957 - 1978) in the interdecadal variability of rain season over North China (units: d): (a) Light rain; (b) moderate rain; (c) heavy rain; (d) torrential rain; (e) excessively heavy rainfall. Shading is significant at a 0.05 significance level

程度。由图 5 可见, 从通过 0.05 的显著性水平检验的区域来讲, 除了中雨日在华北区域没有出现一致的年代际减少外, 其它类别的雨日在华北区域都表现为年代际减少。具体特征为: 小雨日表现为大范围的年代际减少; 中雨日减少区域主要位于黄河下游以及冀北山地的东部地区, 在黄土高原北部还出现了中雨日的增加; 大雨日的年代际减少的范围要比小雨日、中雨日减少的范围小, 3 个减少区域分别位于黄土高原西部、河北平原东区以及黄河中游地区的南部; 暴雨日的年代际减少区域主要位于河套北部、黄河入口处以及燕山附近。由于华北北部一些站点 50 年以来, 从未出现过一次大暴雨日, 因此, 为了避免插值误差, 此处用符号标出华北汛期期间大暴雨日增加和减少的台站 (图 6)。图 6 表明 (未给出显著性水平检验), 河北平原东区以及黄河下游地区表现出华北大暴雨日减少, 但是在黄土高原也出现了大暴雨日增加的台站。就雨日的年

代际变化的空间范围来讲, 小雨日年代际减少的区域范围最大, 随着日降水强度的增加, 雨日减少的范围缩小, 而且, 中雨日在黄土高原北部还出现了增加。总之, 除了小雨日的年代际减少分布具备华北大范围的区域特征外, 其余 4 类降水雨日的年代际分布具有明显的地域特征: 黄土高原北部出现了中雨日的年代际增加和暴雨日的减少, 河北平原东区是 4 类雨日减少区, 黄河中下游地区是大雨日和大暴雨日年代际减少区。

华北汛期小雨、中雨、大雨以及大暴雨降水贡献率的年代际变化空间分布特征, 与其对应的雨日年代际变化空间分布特征十分相似, 只是通过 0.05 的显著性水平检验的区域大小有所改变 (图略)。究其原因, 这是因为华北汛期小雨、中雨、大雨、大暴雨降水贡献率 and 对应降水频率相关很大, 其相关系数值分别是 0.897、0.996、0.997、0.617, 都远远超过了 0.001 的显著性水平。虽然暴雨的贡献

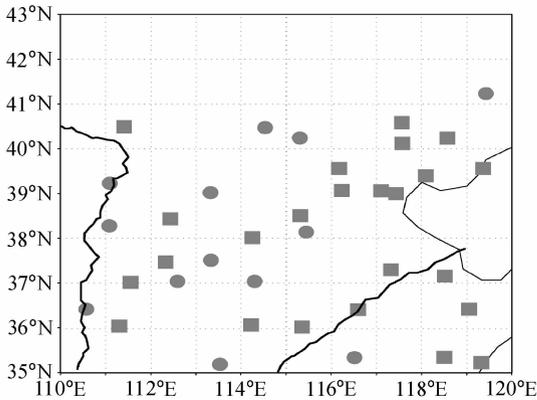


图6 华北汛期降水偏少期(1979~2006年)平均大暴雨天数减去降水偏多期(1957~1978年)平均大暴雨天数所得的差值。

方块: 大暴雨日减少的台站; 实心圆: 大暴雨日增加的台站
Fig. 6 The difference of the heavy rainstorm days between the wet period (1979 - 2006) and the dry period (1957 - 1978) in the interdecadal variability of rain season over North China. The solid squares indicate the increase of heavy rainstorm days, and the solid circles indicate the decrease of the heavy rainstorm days

率和暴雨频率的相关系数数值也很大(为0.635),但是由于暴雨贡献率发生了年代际变化,而暴雨频率在1978年前后并没有发生年代际突变,因此,两者的年代际变化的空间分布特征出现了不一致现象。然而,从华北汛期降水量和暴雨贡献率的年代际变化空间分布来看(图略),两者的空间分布基本一致。华北汛期降水量年代际减少的区域分布特征是,从黄河流域下游开始,等值线大致在太行山脉、燕山山脉与华北东部的海陆线之间呈南北状向北延伸,两个减少中心分别位于燕山和泰山南部,差值中心值分别为80 mm和160 mm,同时冀北山地附近也属于降水减少区。值得强调的是,泰山南部、冀北山地以及位于燕山东南部的沿海地区,正是华北暴雨贡献率年代际减少的区域。因此,从华北汛期降水量和暴雨贡献率的年代际空间分布的一致性方面来讲,又进一步说明了华北暴雨贡献率的年代际减少是汛期降水量减少的内在因素。

4 结论和讨论

利用中国740站逐日降水资料,在把日降水量划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨的基础上,分析了华北汛期降水、华北5类汛期降水频率及其贡献率的长期变化,发现了一些比较有意义的新事实,揭示出造成华北汛期降水年代际减少的内在因

素,结论和讨论如下:

(1) 华北汛期降水、5类降水频率和贡献率都有一定的下降趋势,但是三者下降趋势程度并不相同。其中,华北汛期降水量下降趋势最明显。5类降水频率长期变化的下降趋势表现出明显的渐变特征,而且小雨频率下降趋势最大,暴雨和大暴雨的下降频率并不显著。5类降水贡献率下降趋势中,暴雨贡献率下降趋势最大,小雨的贡献率下降趋势最小。

(2) 50年来,大雨的贡献率最大,接近于总降水的1/3。华北汛期大雨发生的频率和暴雨的贡献率决定了华北汛期降水量的多寡。

(3) 华北汛期降水量和汛期暴雨贡献率在1978年前后都发生了年代际突变。华北汛期暴雨贡献率的年代际突变是造成其汛期降水量发生年代际突变的内在因素,而且华北汛期降水量和汛期暴雨贡献率的年代际变化空间分布基本一致。其中,泰山南部、冀北山地以及燕山南部是两者减少的主要区域。

(4) 5类降水雨日的年代际变化特征是,除了小雨日的年代际减少分布具备华北大范围的区域特征外,其余4类降水雨日的年代际分布具有明显的地域特征,黄土高原北部出现了中雨日的年代际增加和暴雨日的减少,河北平原东区是4类雨日减少区,黄河中下游地区是大雨日和大暴雨日年代际减少区。

(5) 由于暴雨贡献率发生了年代际变化,而暴雨频率表现为年代际渐变特征,因此暴雨贡献率和暴雨日的年代际变化空间分布形态不同,其它类型降水的贡献率及其对应的雨日年代际变化空间分布特征十分相似。

丁一汇(2005)指出,天气尺度系统如锋面、气旋、高空槽,在水汽供应充分条件下只能造成中-大雨,并不是直接造成暴雨的天气系统。而暴雨是各种尺度天气系统相互作用的产物(陶诗言,1980)。倘若仅从自然气候变率的角度解释上述5类日降水特性发生年代际变化的原因,就必须研究各种尺度天气系统发生的年代际变化。加之,人类活动,包括温室气体、气溶胶在内的外强迫也对东亚气候年代际变化存在影响(宇如聪等,2008; Menon et al., 2002)。因此,自然气候变率叠加上人类活动对华北汛期气候的影响,使得寻找导致上

述 5 类日降水特性的年际、年代际以及趋势性变化的原因, 显得十分困难, 而这些都是有待于我们做进一步的深入研究。

致谢 感谢两位匿名审稿人对本文有价值的建议。

参考文献 (References)

鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 31 (5): 779-792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 779-792.

陈烈庭. 1999. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征 [J]. 高原气象, 18 (4): 477-485. Chen Lieting. 1999. Regional features of interannual and interdecadal variations in summer precipitation anomalies over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 477-485.

陈隆勋, 朱文琴, 王文, 等. 1998. 中国近 45 年来气候变化的研究 [J]. 气象学报, 56 (3): 257-271. Chen Longxun, Zhu Wenqin, Wang Wen, et al. 1998. Studies on climate changes in China in recent 45 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (3): 257-271.

陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. 气象学报, 62 (5): 634-646. Chen Longxun, Zhou Xiujie, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 634-646.

Ding Yihui, Sun Ying. 2004. Changes in Asian summer monsoon and possible mechanisms [G]. Newsletter on Climate Change, 2003/2004, 47-49.

丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 585pp. Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 585pp.

Fujibe F, Yamazaki N, Kobayashi K. 2006. Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901-2004) [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 84 (6): 1033-1046.

Gong D Y, Shi P J, Wang J A. 2004. Daily precipitation changes in the semiarid region over northern China [J]. Journal of Arid Environments, 59: 771-784.

黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465-475. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465-475. 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730-

743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730-743.

李红梅, 周天军, 宇如聪. 2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析 [J]. 大气科学, 32 (2): 358-370. Li Hongmei, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Analysis of July-August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 358-370.

刘海文, 丁一汇. 2008. 华北汛期的起讫及其气候学分析 [J]. 应用气象学报, 19 (6): 688-696. Liu Haiwen, Ding Yihui. 2008. Identification on the beginning date and end date of rainy season over North China and their climatology [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 19 (6): 688-696.

陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. 大气科学, 26 (5): 611-624. Lu Riyu. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 611-624.

Matsumoto J, Takahashi K. 1999. Regional difference of daily rainfall characteristics in East Asian summer monsoon season [J]. Geographical Review of Japan, 72B: 193-201.

Menon S, Hansen J E, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 297: 2250-2253.

Endo N, Ailikon B, Yasunari T. 2005. Trends in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rainfall events during summer in China from 1961 to 2000 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 83 (4): 621-631.

钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展, 22 (7): 673-684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673-684.

Samel A N, Wang W C, Liang X Z. 1999. The monsoon rainband over China and relationships with the Eurasian circulation [J]. J. Climate, 12 (1): 115-131.

孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 492-506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 492-506.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyang. 1980. Heavy Rainfalls in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.

魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 1999. Diagnosis and Forecasting Methods of Modern Climatic Statistics (in Chinese) [M]. Beijing:

China Meteorological Press, 296pp.

王颖, 施能, 顾骏强, 等. 2006. 中国雨日的气候变化 [J]. 大气科学, 30 (1): 162–170. Wang Ying, Shi Neng, Gu Junqiang, et al. 2006. Climatic variations of wet days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 162–170.

宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of

three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893–905.

Zhai P M, Sun A, Ren F, et al. 1999. Changes of climate extremes in China [J]. Climatic Change, 42: 203–218.

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18: 1096–1108.