

龙妍妍, 范广洲, 段炼, 等. 2016. 中国近 54 年来夏季极端降水事件特征研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (4): 429–438. Long Yanyan, Fan Guangzhou, Duan Lian, et al. 2016. A study on the characteristics of summertime extreme precipitation events over China in recent 54 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (4): 429–438, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15130.

中国近 54 年来夏季极端降水事件特征研究

龙妍妍¹ 范广洲² 段炼¹ 冯琬¹ 王钦¹ 李飞¹ 张永莉²

¹ 中国民用航空飞行学院, 四川广汉 618307

² 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

摘 要 利用 1960~2013 年中国 6~8 月无缺测的 571 站逐日降水资料, 定义 7 个极端降水指数, 研究中国夏季极端降水事件特征。结果表明: (1) 极端降水事件空间分布存在明显的区域性差异, 长江中下游地区、华南地区、西北地区表现为增加趋势, 东北地区、华北地区、西南部分地区表现为减少趋势; 时间分布表现出具有显著的年际和年代际变化特征, 极端降水事件有增加趋势, 在 20 世纪 90 年代初期有明显转折。(2) M-K 检验表现出极端降水事件在 20 世纪 90 年代初发生突变, 突变前(后) 偏弱(强)。(3) 极端降水指数周期振荡不完全一致, 准 15 年周期振荡为主, 其次是准 7 年周期, 最强振动出现在 1998 年。(4) 除持续干期指数外, 其他极端降水指数间存在较好的相关性。

关键词 中国 极端降水事件 气候变率 时空特征

文章编号 1006-9585 (2016) 04-0429-10

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15130

A Study on the Characteristics of Summertime Extreme Precipitation Events over China in Recent 54 Years

LONG Yanyan¹, FAN Guangzhou², DUAN Lian¹, FENG Wan¹, WANG Qin¹, LI Fei¹,
and ZHANG Yongli²

¹ Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307

² College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225

Abstract The daily precipitation data collected from 571 stations in China for the summer (from June to August) from 1960 to 2013 are used to define seven extreme precipitation indices to investigate the characteristics of summertime extreme precipitation events over China. The results show that: (1) The spatial distribution of extreme precipitation events demonstrates remarkable regional differences. An increasing trend is found in the middle and lower reaches of the Yangtze River, South China, and Northwest China, while a decreasing trend occurs in Northeast China, North China, and part of Southwest China. Extreme precipitation events in China also show significant interannual and interdecadal variabilities with an increasing trend during the study period. An abrupt change occurred in the early 1990s. (2) Extreme precipitation events experienced a sudden change in the early 1990s based on M-K test results; extreme precipitation

收稿日期 2015-05-20; 网络预出版日期 2016-03-02

作者简介 龙妍妍, 女, 1985 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事气候变化研究。E-mail: longyanyan1985@126.com

资助项目 国家自然科学基金项目 91537214、41275079、41305077、41405069、41505078, 中国民用航空飞行学院重点项目 XM1885, 中国民用航空飞行学院面上项目 J2014-58, 成都信息工程大学科研项目 J201516、J201518

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91537214, 41275079, 41305077, 41405069, and 41505078), Key Program of Civil Aviation Flight University of China (Grant XM1885), General Program of Civil Aviation Flight University of China (Grant J2014-58), Scientific Research Program of Chengdu University of Information Technology (Grants J201516, J201518)

weakened (intensified) before (after) the sudden change. (3) The periodic oscillation of extreme precipitation events is dominated by the oscillation at the period of 15 years, followed by the secondary oscillation at the period of 7 years and the strongest oscillation occurred in 1998. (4) Extreme precipitation indices except CDD (consecutive dry days) are highly correlated with each other.

Keywords China, Extreme precipitation event, Climate variability, Spatial and temporal characteristic

1 引言

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 是由世界气象组织和联合国环境规划署于 1988 年联合建立的, 其主要职责是评估有关气候变化问题的科学信息以及评价气候变化的环境和社会经济后果, 并制定现实的应对策略。自成立起, IPCC 分别在 1990 年、1995 年、2001 年、2007 年、2013 年共撰写了 5 次评估报告, 观测事实说明了气候系统变暖是毋庸置疑的。IPCC 第四次评估报告 (IPCC, 2007) 指出, 极端事件在 21 世纪将变得更加频繁, 基于 SRES 情景下 21 世纪预估结果很可能强降水事件在大部分地区的发生频率增加。极端降水事件可对国家经济财产造成严重损失, 因此, 研究极端降水事件显得非常重要。

极端降水事件是一种小概率事件, 突发性强, 损害性大, 根据概率分布, 近些年表现出极端降水出现概率增大, 即更容易发生极端降水事件。王苗等 (2012) 指出, 对于极端降水事件国内外学者目前主要研究的是极端降水表征值的确定、极端降水分布和演变趋势特征、极端降水成因分析以及运用模式对极端降水进行模拟评估等方面的内容。为了对以上内容进行定量研究, 学者们采用了不同标准以多种方式定义极端降水事件。目前常用的方法有分级法 (Gong et al., 2004)、标准差法、百分位法 (翟盘茂和潘晓华, 2003)、Frich et al. (2002) 提出的 5 个极端降水指数、ETCCDMI 定义的 11 个极端降水指数 (Kiktev et al., 2003) 以及使用降水统计极值概率分布的参数化方法来定义 (陈栋等, 2015)。例如, Groisman et al. (1999) 使用 Gamma 分布拟合逐日降水量来定义极端降水, Solow and Moore (2000) 利用泊松分布研究不连续飓风极端降水发生的频数来定义飓风暴雨, 此外还有应用广义极值理论分布 (GEV) 和广义线性模型 (GLM) (Coles, 2001; Nadarajah, 2005; Kao and Ganguly, 2011) 来定义的。王静等 (2015) 认为 GEV 分布模型使很多可用极值信息被丢弃, 于是还采用了基于 POT

(Peaks-Over-Threshold) 的广义 Pareto 分布研究极端降水的特征。

国内外学者在极端降水事件方面已经做了很多工作 (Tank and Können, 2003; Han and Gong, 2003; Goswami et al., 2006), 研究表现出极端降水事件具有明显的区域性特点。在此基础上, 很多学者也侧重研究了我国各地区的极端降水事件的变化特征 (王冀等, 2008; 杨金虎等, 2008; 李明刚等, 2012; 李丽平等, 2012; 罗梦森等, 2013; 尤焕苓等, 2014; 王静等, 2015), 得出了较有意义的结论。同时, 极端降水事件具有季节性特点。陈海山等 (2009) 指出多年平均极端降水事件表现出显著的季节性差异; 邹用昌等 (2009) 指出我国各季极端降水过程时空变化异常型明显不同, 春季和秋季异常型主要表现为“偶极型”变化, 夏季异常型主要表现为“三极型”变化, 冬季异常型主要表现为“单极型”变化。

以往对中国极端降水事件的研究大都集中在年极端降水事件上, 事实上夏季特征更为显著, 影响较大, 因此研究中国夏季极端降水事件特征甚为重要。利用指数对中国夏季极端降水事件的研究还不多见, 本文将定义 7 个极端降水指数, 选取中国近 54 年 6~8 月无缺测的 571 站日降水量, 分析夏季极端降水事件的特征。

2 资料来源

观测资料来源于中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 中 824 个基准、基本气象站逐日降水资料。考虑到缺测及台站迁徙所造成的观测资料的不完整性, 剔除了缺失数据的站点, 最后选取 571 站 1960~2013 年夏季 6~8 月降水资料。研究区域为中国地区 ($15^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$), 站点分布如图 1 所示。

3 极端降水指数的定义

根据 WMO 气候委员会等组织联合成立的气候

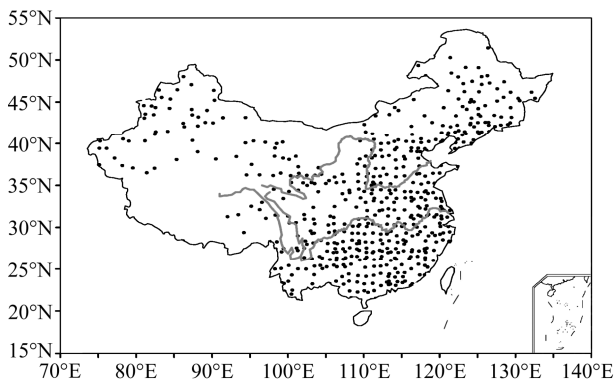


图 1 中国 571 站的分布情况
Fig. 1 Geographic locations of the 571 stations in China

变化监测和指标专家组定义的 27 个典型气候指数中用于探讨极端降水事件的 11 个降水指数（翟盘茂和刘静，2012），本文定义了研究所需要的 7 个夏季极端降水指数，其代码、指数名称、定义和单位如表 1 所示。

表 1 极端降水指数的定义

Table 1 Definitions of extreme precipitation indices			
代码	指数名称	定义	单位
R95pTOT	强降水量	日降水量大于 95%分位值的夏季累 计降水量	mm
CDD	持续干期	日降水量小于 1 mm 的最大持续日数 d	d
CWD	持续湿期	日降水量大于或等于 1 mm 的最大 持续日数	d
Rx1day	1 日最大降水量	夏季最大 1 日降水量	mm
Rx5day	5 日最大降水量	夏季连续 5 日最大降水量	mm
SDII	降水强度	夏季降水总量与湿日日数（日降水 量大于或等于 1 mm）的比值	mm d ⁻¹
PRCPTOT	夏季总降水量	日降水量大于或等于 1 mm 的夏季 累计降水量	mm

本文为更好地反映降水变化的区域性特征，采用相对阈值方法，利用百分位法求得。具体做法是：将中国各站 1960~2013 年夏季逐年 6~8 月日降水量序列的第 95 个百分位值的 54 年平均值定义为该站夏季极端强降水事件的阈值，如果夏季该站某日降水量超过这一阈值，则称该站发生了极端强降水事件。

参照 Bonsal et al. (2001) 计算第 95 个百分位降水量的方法，把夏季日降水序列的 n 个值按升序排列为 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$ ，某个值小于或等于 x_m 的概率为 $P = (m - 0.31) / (n + 0.38)$ ，式中 m 为 x_m 的序号， n 为降水序列（含无降水日）长度，第 95 个百分位值是指 $P=95\%$ 所对应的 x_m 值。本文所研究的中国夏季 $n=92$ （6~8 月总日数），当 $P=95\%$ 时，

计算得到 $m=88.071$ ，取第 95 个百分位上的值为排序后的 x_{88} 和 x_{89} 的线性插值。

4 中国夏季极端降水事件特征

4.1 中国地区夏季极端降水的时空变化特征

图 2 给出了 1960~2013 年中国夏季极端降水指数随时间变化趋势的空间分布。强降水量指数在空间分布上（图 2a），长江中下游地区、华南地区、青海省中部及新疆西部部分地区呈上升趋势，即强降水量趋于加强，上升趋势明显，变化速率最大为 $62.3 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ，6.8% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平。东北地区、华北地区、广西省和云南省部分地区呈下降趋势，即强降水量趋于减少，下降趋势明显，变化速率最大为 $-34.5 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ，1.75% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平。经计算得出，中国地区强降水量夏季的变化速率为 $4.3 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ，表明 1960~2013 年中国强降水量趋于加强。

图 2b 显示，在东北东南部部分地区、新疆东北部地区、甘肃西部地区持续干期指数的趋势为正，即该地区持续干期趋于增加，变化速率最大达到 $2.3 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ ，7.0% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平。而新疆大部分地区、华南大部分地区、长江中下游地区、内蒙古中部部分地区趋势为负，持续干期趋于减少，变化速率最大为 $-3.6 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ ，3.3% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平。经计算得出的中国地区持续干期夏季的变化速率为 $0 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ ，表明 1960~2013 年中国持续干期趋于稳定。

图 2c 给出了持续湿期指数趋势空间分布结果，表现出东北北部部分地区、西北地区、长江中下游地区持续湿期的天数趋于增加，变化速率最大为 $0.4 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ ，1.4% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平。东北、华北大部分地区、西南大部分地区、江西省和福建省大部分地区持续湿期天数趋于减少，变化速率最大为 $-1.2 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ ，4.4% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平。通过计算中国地区持续湿期夏季的变化速率，得到值为 $-0.1 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ ，表明 1960~2013 年中国持续湿期略有下降趋势。

1 日最大降水量指数（图 2d）和 5 日最大降水量指数（图 2e）随时间变化趋势在空间分布上具有

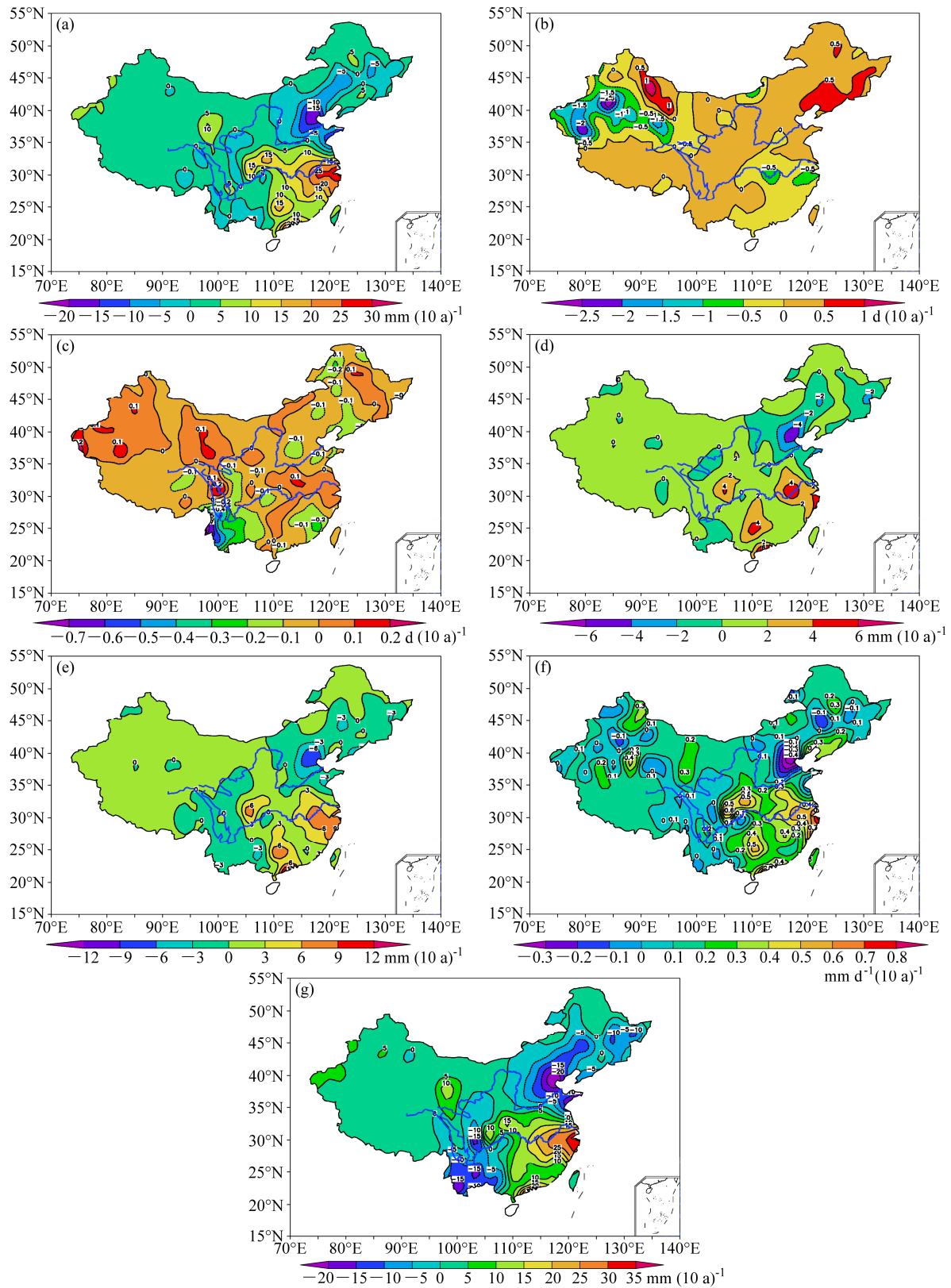


图2 1960~2013年中国夏季极端降水指数趋势的空间分布: (a) 强降水量; (b) 持续干期; (c) 持续湿期; (d) 1日最大降水量; (e) 5日最大降水量; (f) 降水强度; (g) 夏季总降水量

Fig. 2 Spatial distributions of the trends of extreme precipitation indices in summertime from 1960 to 2013 in China: (a) R95pTOT (amount of heavy rainfall); (b) CDD (consecutive dry days); (c) CWD (consecutive wet days); (d) Rx1day (maximum 1-day precipitation); (e) Rx5day (maximum 5-day cumulative precipitation); (f) SDII (rainfall intensity); (g) PRCPTOT (total summertime precipitation)

一定的相似性, 总体都呈现出长江中下游地区、华南部分地区、四川省东部地区呈明显上升趋势, 这些地区的 1 日最大降水量和 5 日最大降水量都趋于加强。其中, 1 日最大降水量的变化速率最大值为 $16.5 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 7.0% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平, 5 日最大降水量的变化速率最大值为 $34.9 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 4.9% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平。华北地区、东北地区呈明显下降趋势, 这些地区的 1 日最大降水量和 5 日最大降水量趋于减少, 略有区别的是, 5 日最大降水量指数在西南地区也呈现出下降趋势。存在下降趋势的这些地区, 1 日最大降水量的变化速率最大值为 $-14.2 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 1.2% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平, 5 日最大降水量的变化速率最大值为 $-20.6 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 2.3% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平。计算得出, 中国地区夏季 1 日最大降水量的变化速率为 $0.8 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 5 日最大降水量每 10 年的变化速率为 $0.9 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 表明 1960~2013 年中国 1 日最大降水量和 5 日最大降水量都趋于加强。

降水强度指数随时间变化趋势的空间分布 (图 2f) 表现出, 中国大部分地区, 包括长江中下游地区、华南地区、东北东南部和西北部地区、黄河流域、西南地区、西北地区呈上升趋势, 即降水强度趋于加强, 变化速率最大为 $1.7 \text{ mm d}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$, 9.5% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平。华北地区、东北中部地区、新疆中部少部分地区呈下降趋势, 即降水强度趋于减少, 变化速率最大为 $-1.0 \text{ mm d}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$, 0.9% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平。经计算得出, 中国地区降水强度夏季的变化速率为 $0.2 \text{ mm d}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$, 表明 1960~2013 年中国降水强度趋于加强。

总降水量指数随时间变化趋势的空间分布 (图 2g) 同强降水量指数 (图 2a), 长江中下游地区、华南地区、青海省部分地区、新疆部分地区呈明显上升趋势, 总降水量趋于加强, 变化速率最大为 $70.3 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 6.5% 的站的增加趋势通过了 0.05 的显著性水平。东北地区、华北地区、西南地区呈明显下降趋势, 总降水量趋于减少, 变化速率最大为 $-57.9 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 3.7% 的站的下降趋势通过了 0.05 的显著性水平。中国地区总降水量夏季的变化速率为 $2.8 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 表明 1960~2013 年中国总降水量趋于加强。

比较图 2a~2g 发现, 以上 7 个极端降水指数在反映中国夏季极端降水事件随时间变化趋势的空间分布存在略微差异, 这主要是指指数不同导致的。但是总体特征表现为长江中下游地区、华南地区、西北地区的夏季极端降水事件呈增加趋势, 东北地区、华北地区、西南部分地区的夏季极端降水事件呈减少趋势, 该结论与陈海山等 (2009) 利用百分位方法进行研究的结果相一致, 但本文通过 7 个方面来反映这种空间分布特征更为全面。通过各指数对极端降水事件贡献的分析, 可以表明, 长江中下游地区和西北地区极端降水事件增加是由于降水量的增加、降水强度的增大和持续时间的增加共同导致的; 华南地区极端降水事件增加是由于降水量的增加和降水强度的增加导致的; 东北地区和华北地区极端降水事件减少是由于降水量的减少、降水强度的减弱和持续时间的减少共同导致的; 西南地区的极端降水事件减少是由于降水量的减少和持续时间的减少导致的。

通过以上对中国地区夏季各指数每 10 年变化率的计算, 可以表明中国近 54 年来夏季极端降水事件是增加的。极端降水事件的增加一方面体现在降水量的增加, 如强降水量、1 日最大降水量、5 日最大降水量和总降水量都在增加, 另一方面体现在降水强度增强。尤其在总降水量增加、持续干期不变、持续湿期减少的情况下, 更能够说明极端降水事件发生历时趋于更短, 强度趋于更强, 这可能由于极端降水事件产生更加趋于同中小尺度天气过程产生的对流性降水有关。

图 3 给出了 1960~2013 年中国夏季极端降水指数距平时间序列。强降水量指数在时间分布上 (图 3a) 呈增强趋势, 20 世纪 90 年代初期有明显转折, 20 世纪 60 年代初期至 90 年代初期表现出明显的负距平集中期, 90 年代初期至 2013 年表现出明显的正距平集中期, 说明中国夏季强降水量在 90 年代初期前偏弱, 90 年代初期后偏强。最大值出现在 1998 年, 比常年增加 65.4 mm, 最小值出现在 1978 年, 比常年减少 51.9 mm。

持续干期指数在时间分布上 (图 3b) 呈波动趋势, 20 世纪 60 年代至 70 年代初期表现出明显的正距平集中期, 70 年代初期至 2004 年表现出明显的负距平集中期, 2004 年以后表现出明显的正距平集中期, 说明中国夏季持续干期指数在 60 年代至 70 年代初期偏强, 70 年代初期至 2004 年偏弱, 2004

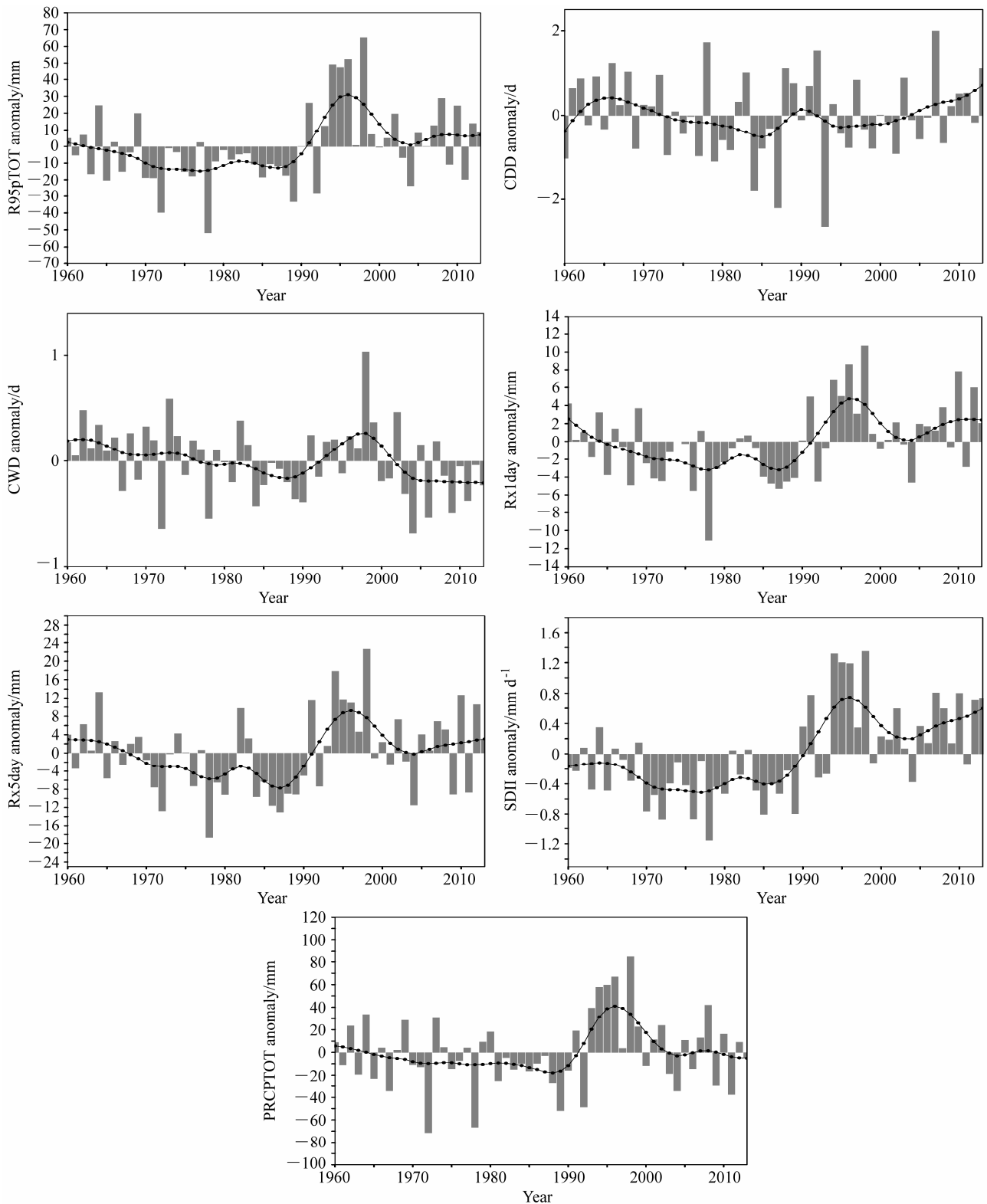


图 3 1960~2013 年中国夏季极端降水指数距平时间序列 (图中曲线为指数距平 11 年低滤波结果): (a) 强降水量; (b) 持续干期; (c) 持续湿期; (d) 1 日最大降水量; (e) 5 日最大降水量; (f) 降水强度; (g) 夏季总降水量

Fig. 3 Time series of extreme precipitation indices anomalies in summertime from 1960 to 2013 in China (dashed lines in the figures are 11-year low-pass filtering results of indices anomalies): (a) R95pTOT; (b) CDD; (c) CWD; (d) Rx1day; (e) Rx5day; (f) SDII; (g) PRCPTOT

年至 2013 年偏强。最大值出现在 2007 年, 比常年增加 2.0 d, 最小值出现在 1993 年, 比常年减少 3.0 d。

持续湿期指数时间分布(图 3c)表现出, 20 世纪 60 年代至 70 年代后期持续湿期为明显的正距平, 该时期持续湿期指数偏强, 70 年代后期至 90 年代初期为明显的负距平, 该时期指数偏弱, 90 年代初期至 2001 年为正距平, 该时期指数偏强, 2001 年至 2013 年为负距平, 该时期指数偏弱。最大值出现在 1998 年, 比常年增加 1.0 d, 最小值出现在 2004 年, 比常年减少 0.7 d。

1 日最大降水量指数(图 3d)、5 日最大降水量指数(图 3e)和降水强度指数(图 3f)时间分布情况与强降水量指数(图 3a)时间分布情况相同。其中, 1 日最大降水量指数最大值出现在 1998 年, 比常年增加 10.7 mm, 最小值出现在 1978 年, 比常年减少 11.1 mm; 5 日最大降水量指数最大值出现在 1998 年, 比常年增加 22.6 mm, 最小值出现在 1978 年, 比常年减少 18.7 mm; 降水强度指数最大值出现在 1998 年, 比常年增加 1.4 mm d^{-1} , 最小值出现在 1978 年, 比常年减少 1.2 mm d^{-1} 。

总降水量指数在时间分布上(图 3g)呈波动状态, 20 世纪 60 年代中期到 90 年代初期表现出明显的负距平集中期, 90 年代初期至 2001 年表现出明显的正距平集中期, 2001 年至 2013 年表现出负距平, 说明了中国夏季总降水量指数在 60 年代中期到 90 年代初期偏弱, 90 年代初期至 2001 年偏强, 2001 年至 2013 年偏弱。最大值出现在 1998 年, 比常年增加 84.5 mm, 最小值出现在 1972 年, 比常年减少 71.4 mm。

4.2 中国地区夏季极端降水的 M-K 突变检测和周期特征

以上的分析中可以发现, 中国夏季极端降水事件各指数表现出了明显的长期变化趋势, 为此下面进一步检测其突变情况。如图 4a 为强降水量指数序列 M-K 检验结果, 1960 年开始强降水量序列呈下降趋势, 20 世纪 90 年代后呈上升趋势, 21 世纪初这种上升趋势超过显著性水平 0.05 临界线, 上升趋势十分显著。强降水量指数两检验曲线在 1993 年相交, 年代际突变发生在 20 世纪 90 年代初期。

持续干期指数序列的检测结果(图 4b)显示, 1960 年开始持续干期序列呈上升趋势, 20 世纪 60 年代末以来呈下降趋势。持续干期指数年代际突变发生在 20 世纪 60 年代末。持续湿期指数序列检测

结果(图 4c)显示, 在 20 世纪 60 年代, 持续湿期序列呈小幅上升趋势, 20 世纪 60 年代中期至 20 世纪末呈下降趋势, 80 年代后期至 90 年代中期下降趋势显著。持续湿期指数两检验曲线在 1976 年和 1994 年相交, 说明先后发生了减少和增加两次年代际突变。

1 日最大降水量指数(图 4d)、5 日最大降水量指数(图 4e)、降水强度指数(图 4f)和总降水量指数(图 4g)序列检测结果均显示, 1960 年开始各指数序列呈下降趋势, 并且趋势显著, 20 世纪 90 年代以来呈上升趋势, 总降水量指数两检验曲线在 1990 年相交, 其余指数检验曲线都在 1994 年相交, 说明各指数年代际突变发生在 20 世纪 90 年代初期, 突变前为中国夏季极端降水减弱期, 突变后为中国夏季极端降水增强期。

采用小波分析的方法对各指数进行了周期分析(图略)。结果表明, 中国夏季各极端降水指数的周期振荡不完全一致, 但强降水量、1 日最大降水量、5 日最大降水量、降水强度和总降水量指数均表现出准 15 年周期振荡为主, 其次是准 7 年周期振荡。其中, 持续湿期、1 日最大降水量、5 日最大降水量、降水强度和总降水量指数最强振动均出现在 1998 年, 与图 3 中对应的夏季中国极端降水指数距平最大值出现年份相同, 比图 4 中对应的 M-K 突变时间较晚。以上事实证明了中国夏季极端降水事件在 1998 年表现得最为强烈, 同时与前文讨论的中国夏季极端降水事件突变时间发生在 20 世纪 90 年代初期和夏季极端降水事件趋于加强的趋势结论一致。

4.3 中国地区夏季各极端降水指数间相关系数

进一步计算了中国夏季各极端降水指数间的相关系数, 如表 2 所示。可见, 各指数间相关系数大部分通过显著水平 0.05 的显著性水平, 没通过检验的都是与持续干期的相关系数, 说明除持续干期指数外, 其他指数间具有很好的相关性, 对极端降水事件都具有很好的指示意义。其中, 强降水量与 1 日最大降水量、5 日最大降水量、降水强度、夏季总降水量关系密切, 相关系数均大于 0.8; 1 日最大降水量与 5 日最大降水量、降水强度关系密切, 相关系数均大于 0.8; 5 日最大降水量与降水强度关系密切, 相关系数大于 0.8。通过以上分析, 也可以看出强降水量、1 日最大降水量和 5 日最大降水量都与降水强度关系密切, 说明这三个指数对降水

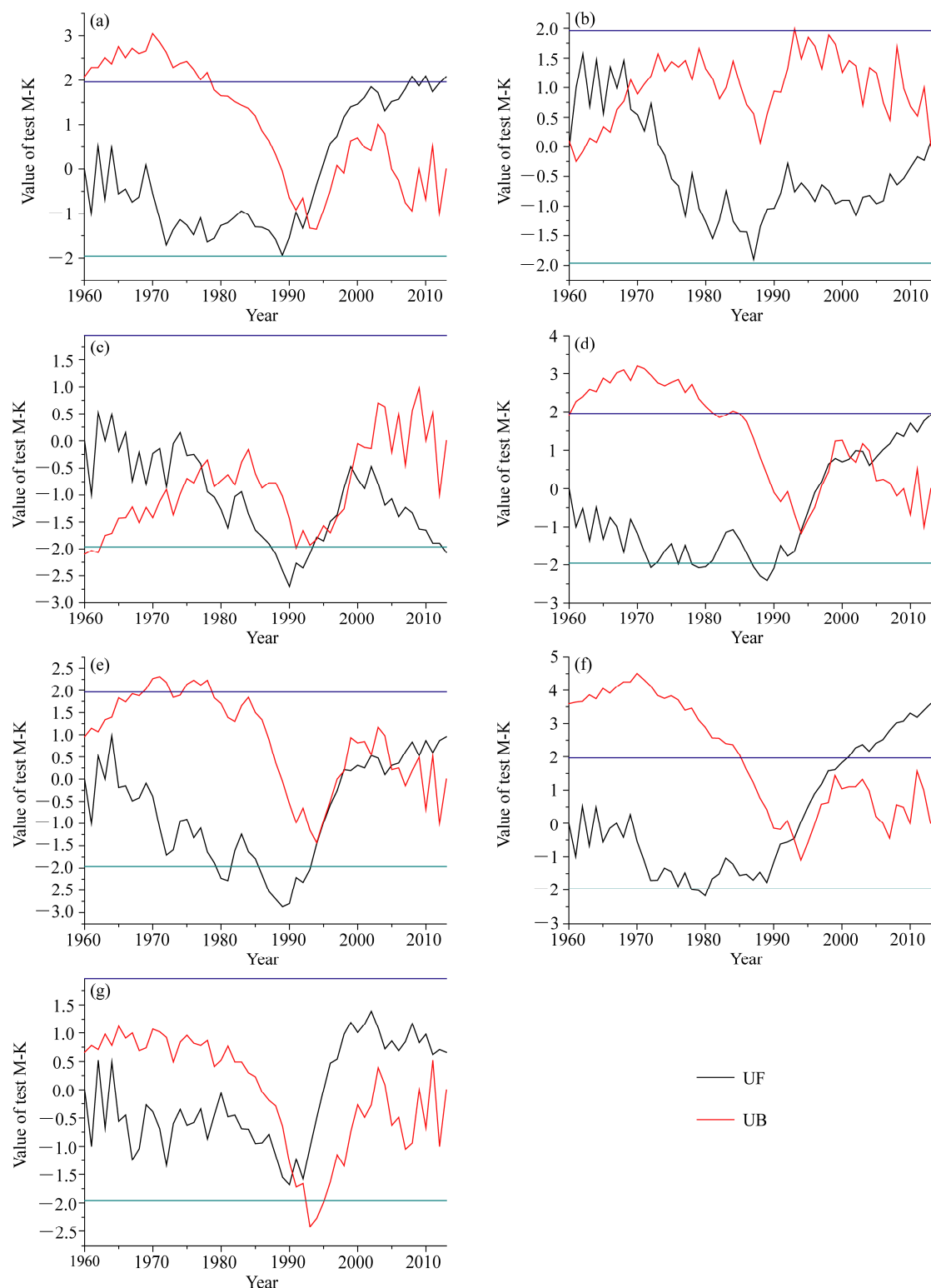


图4 1960~2013年中国夏季极端降水指数M-K突变检验:(a)强降水量;(b)持续干期;(c)持续湿期;(d)1日最大降水量;(e)5日最大降水量;(f)降水强度;(g)夏季总降水量。水平直线为0.05显著性水平临界值,以正(逆)序时间序列计算的统计变量为UF(UB)

Fig. 4 Forward (UF, black line) and backward (UB, red line) statistic rank series of summertime extreme precipitation indices in the Mann-Kendall (M-K) test from 1960 to 2013 in China: (a) R95pTOT; (b) CDD; (c) CWD; (d) Rx1day; (e) Rx5day; (f) SDII; (g) PRCPTOT. Horizontal lines: 0.05 significant level in the M-K test

强度有很好的指示意义。

表 2 中国夏季各极端降水指数间相关系数
Table 2 Correlation coefficients between summertime extreme precipitation indices in China

	强降 水量	持续 干期	持续 湿期	1 日最大 降水量	5 日最大 降水量	降水 强度	夏季总 降水量
强降水量	1	-0.21	0.53	0.90	0.87	0.89	0.93
持续干期		1	-0.11	-0.12	0.03	0.06	-0.37
持续湿期			1	0.42	0.63	0.30	0.68
1 日最大降水量				1	0.89	0.88	0.76
5 日最大降水量					1	0.82	0.78
降水强度						1	0.70
夏季总降水量							1

注：表中粗体代表通过 95%的信度检验，95%信度的相关系数检验临界值为 0.268。

5 结论

(1) 通过对 1960~2013 年的中国夏季各极端降水指数的时空分布分析得出：①空间分布。各极端降水指数随时间变化趋势的空间分布存在略微差异，但总体特征表现为长江中下游地区、华南地区、西北地区的夏季极端降水事件呈增加趋势，东北地区、华北地区、西南部分地区的夏季极端降水事件呈减少趋势，趋势变化与降水量、降水强度和持续时间关系密切。通过计算各指数每 10 年变化率，表明中国近 54 年来夏季极端降水事件是增加的，这一方面体现在降水量的增加，另一方面体现在降水强度的增强。②时间分布。强降水量、1 日最大降水量、5 日最大降水量、降水强度指数总体呈增加趋势，20 世纪 90 年代初期有明显转折，90 年代前（后）偏弱（强）。持续干期、持续湿期、总降水量指数总体呈波动趋势。

(2) 中国夏季极端降水在 20 世纪 90 年代初存在明显突变现象，突变前（后）为中国夏季极端降水减弱（增强）期。其中强降水量指数、1 日最大降水量指数、5 日最大降水量指数、降水强度指数、总降水量指数反应较好，突变点一致为 20 世纪 90 年代初，持续干期指数、持续湿期指数还存在其他突变点。

(3) 中国夏季极端降水指数的周期振荡不完全一致，但主要以准 15 年周期振荡为主，其次是准 7 年周期振荡。最强振动出现在 1998 年。

(4) 除持续干期指数外，其他极端降水指数间具有很好的相关性。强降水量、1 日最大降水量和

5 日最大降水量都与降水强度关系密切，这三个指数对降水强度有很好的指示意义。

参考文献（References）

Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. *J. Climate*, 14 (9): 1959–1976, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2.

陈栋, 黄荣辉, 陈际龙. 2015. 我国夏季暴雨气候学的研究进展与科学问题 [J]. *气候与环境研究*, 20 (4): 477–490. Chen Dong, Huang Ronghui, Chen Jilong. 2015. Recent progress and prospective scientific problems concerning climatological research on summer heavy rainfall in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20 (4): 477–490, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15038.

陈海山, 范苏丹, 张新华. 2009. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异 [J]. *大气科学学报*, 32 (6): 744–751. Chen Haishan, Fan Sudan, Zhang Xinhua. 2009. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 744–751.

Coles S. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values* [M]. London: Springer-Verlag, 209pp, doi:10.1007/978-1-4471-3675-0.

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]. *Climate Research*, 19: 193–212.

Gong D Y, Shi P J, Wang J A. 2004. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 59 (4): 771–784, doi:10.1016/j.jaridenv.2004.02.006.

Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. *Science*, 314 (5804): 1442–1445, doi:10.1126/science.1132027.

Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change [J]. *Climatic Change*, 42 (1): 243–283, doi:10.1023/A:1005432803188.

Han H, Gong D Y. 2003. Extreme climate events over northern China during the last 50 years [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 13 (4): 469–479, doi:10.1007/BF02837886.

Kao S C, Ganguly A R. 2011. Intensity, duration, and frequency of precipitation extremes under 21st-century warming scenarios [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(D16): D16119, doi:10.1029/2010JD015529.

Kiktev D, Sexton D M H, Alexander L, et al. 2003. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes [J]. *J. Climate*, 16 (22): 3560–3571, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3560:COMAOT>2.0.CO;2.

李丽平, 许冠宇, 成丽萍, 等. 2012. 华南后汛期极端降水特征及变化趋势 [J]. *大气科学学报*, 35 (5): 570–577. Li Liping, Xu Guanyu, Cheng Liping, et al. 2012. Characteristics of extreme precipitation and its variation trend in the post-flood of South China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (5): 570–577.

李明刚, 管兆勇, 韩洁, 等. 2012. 近 50 a 华东地区夏季极端降水事件的年代际变化 [J]. *大气科学学报*, 35 (5): 591–602. Li Minggang, Guan

- Zhaoyong, Han Jie, et al. 2012. Interdecadal changes of summertime precipitation extremes in East China in recent five decades [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (5): 591–602.
- 罗梦森, 熊世为, 梁宇飞. 2013. 区域极端降水事件阈值计算方法比较分析 [J]. *气象科学*, 33 (5): 549–554. Luo Mengsen, Xiong Shiwei, Liang Yufei. 2013. Comparative study of calculated threshold values in regional extreme precipitation [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 549–554, doi:10.3969/2013jms.0031.
- Nadarajah S. 2005. Extremes of daily rainfall in west central Florida [J]. *Climatic Change*, 69 (2–3): 325–342, doi:10.1007/s10584-005-1812-y.
- Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. 2007. Impacts, adaptation and vulnerability [M]// *Climate Change 2007: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Solow A R, Moore L. 2000. Testing for a trend in a partially incomplete hurricane record [J]. *J. Climate*, 13 (20): 3696–3699, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3696:TFATIA>2.0.CO;2.
- Tank A M G K, Können G P. 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99 [J]. *J. Climate*, 16 (22): 3665–3680, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIDOT>2.0.CO;2.
- 王冀, 江志红, 严明良, 等. 2008. 1960~2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析 [J]. *气象科学*, 28 (4): 384–388. Wang Ji, Jiang Zhihong, Yan Mingliang, et al. 2008. Trends of extreme precipitation indices in the mid–lower Yangtze River Valley of China during 1960–2005 [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 28 (4): 384–388.
- 王静, 余锦华, 何俊琦. 2015. 江淮地区极端降水特征及其变化趋势的研究 [J]. *气候与环境研究*, 20 (1): 80–88. Wang Jing, Yu Jinhua, He Junqi. 2015. Study on characteristics and change trend of extreme rainfall in the Jianghuai region [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20 (1): 80–88, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13222.
- 王苗, 郭品文, 郭昀, 等. 2012. 我国极端降水事件研究进展 [J]. *气象科技*, 40 (1): 79–86. Wang Miao, Guo Pinwen, Wu Yun, et al. 2012. Progresses in researches on extreme precipitation over China [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 40 (1): 79–86.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国西北极端降水事件年内非均匀性特征分析 [J]. *中国沙漠*, 28 (1): 178–184. Yang Jinhua, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Analysis on innerannual inhomogeneity characteristic of extreme precipitation events over Northwest China [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 28 (1): 178–184.
- 尤焕苓, 刘伟东, 任国玉. 2014. 1981~2010 年北京地区极端降水变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 19 (1): 69–77. You Huanling, Liu Weidong, Ren Guoyu. 2014. Variation characteristics of precipitation extremes in Beijing during 1981–2010 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (1): 69–77, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12143.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 58 (S1): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (S1): 1–10, doi:10.11821/xb20037s001.
- 翟盘茂, 刘静. 2012. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾 [J]. *中国工程科学*, 14 (9): 55–63. Zhai Panmao, Liu Jing. 2012. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background [J]. *Engineering Sciences (in Chinese)*, 14 (9): 55–63.
- 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 45 (1): 98–109. Zou Yongchang, Yang Xiuqun, Sun Xuguang, et al. 2009. Seasonal difference of the spatial–temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 45 (1): 98–109.