

顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 中国年和季节极端降水时空特征及极值分布函数上尾部性质[J]. 地理科学, 2017, 37(6): 929-937. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Kong Dongdong et al. Spatiotemporal Patterns of Extreme Precipitation Distributions with Annual and Seasonal Scales and Potential Impact of Tropical Cyclones in China. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(6): 929-937.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.06.015

# 中国年和季节极端降水时空特征 及极值分布函数上尾部性质

顾西辉<sup>1</sup>, 张强<sup>2,3,4</sup>, 孔冬冬<sup>5</sup>, 刘剑宇<sup>5</sup>, 范科科<sup>2,3,4</sup>

(1. 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 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;  
3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 北京师范大学减灾与应急管理研究院,  
北京 100875; 5. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 基于热带气旋时间、路径、强度数据和中国 728 个气象站点 1951~2014 年日降水数据, 分析了年和季节极端降水广义极值(GEV)分布函数特征及受热带气旋的影响。通过检查年和各季节极端降水的非一致性, 发现具有变异点或显著时间趋势的站点占总站点数的比例较低。仅考虑满足一致性的站点, 年和各季节极端降水 GEV 分布上尾部在全国大部分区域表现出厚尾特征, 且不具有上边界。总体来看北方厚尾特征重于南方, 秋季和冬季明显高于年和夏季。年极端降水厚尾特征受到不同季节极端降水机制的混合影响。而且, 热带气旋对中国沿海区域极端降水有重要影响, 往往引发大量级极端降水。东南沿海地区最大 10 场极端降水由热带气旋引发的比例达到 60% 以上。因此热带气旋趋向于增加沿海区域年极端降水 GEV 分布形状参数的大小, 并控制着曲线上尾部的形状。

**关键词:** 极端降水; 热带气旋; 非一致性; GEV 分布

**中图分类号:** P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2017)06-0929-09

极端气象水文事件往往对人类社会及经济发展带来巨大影响。正因为如此, 气象水文极值的研究已引起人们的广泛关注。近几十年来, 气候模式模拟结果表明全球水文循环有加剧趋势<sup>[1]</sup>。尤其在全球变暖影响下, 中国 21 世纪极端降水过程将发生显著变异<sup>[2]</sup>。中国极端降水事件已呈现增加趋势<sup>[3]</sup>, 并对农业产生重大影响<sup>[4]</sup>。中国是农业大国, 农业生产的重要性不言而喻, 因此, 极端气象水文事件时空特征及成因已成为当前研究热点<sup>[5,6]</sup>。

对于中国极端降水时空特征的研究已有较多<sup>[5,6]</sup>, 然而对于中国极端降水极值分布函数特征及尾部性质的研究却鲜有报导。极端降水频率分析的主要目的之一是计算设计标准和重现期。它应该尽可能准确, 从而为水利工程、供水设施、防洪排涝和水资源管理提供可靠的依据。一般通过

估计极值分布函数[例如广义极值(GEV)分布、皮尔逊-III 型等]的参数(位置参数、尺度参数和形状参数)来计算设计标准和重现期。近年来, 大量研究表明气象水文序列的非一致性对极值分布函数的参数估计具有显著影响<sup>[7,8]</sup>。Salas 定义一致性为: 气象水文序列满足无显著时间趋势、无变异、无周期<sup>[9]</sup>。极端降水极值分布函数的上尾部(极值拟合曲线的上端)特征对于设计标准和重现期的估计, 尤其对罕见稀有事件(例如百年一遇、千年一遇等)具有显著的影响。GEV 分布提供了一个有利的框架用来分析极端降水的上尾部性质(薄尾、厚尾、有无上边界等)<sup>[10]</sup>。GEV 分布位置、尺度和形状参数决定了曲线的形状。

中国长江以南地区热带气旋降水量占夏季降水量的比重可达 10% 以上, 7、8 月份东南沿海地区

**收稿日期:** 2016-08-15; **修订日期:** 2017-01-20

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金(51425903)、地表过程模型与模拟国家基金委创新群体(41621061)与国家自然科学基金项目(41401052)资助。[Foundation: National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (51425903), Fund for Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China (41621061), and National Natural Science Foundation of China (41401052).]

**作者简介:** 顾西辉(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事气象水文学研究。E-mail: guxihui421@163.com

**通讯作者:** 张强, 教授。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

的热带气旋降水量最大可达 100 mm 以上,达到当月总降水量的 40%<sup>[11]</sup>。研究热带气旋对中国沿海区域极端降水极值分布函数上尾部特征的影响,有助于科学制定更可靠的防洪排涝、水利设施等设计标准。综上所述,本文拟在以上研究基础上重点关注以下 3 个科学问题:① 中国年和季节极端降水一致性检测(是否具有变异或显著时间趋势);② 中国年和季节极端降水分布函数上尾部特征;③ 中国沿海地区年极端降水极值分布函数上尾部受热带气旋的影响。

## 1 数据来源

中国地域广阔,地形复杂,气候变化区域差异性较大(图 1),张家诚将中国划分为 8 个气候区域<sup>[12]</sup>:西部干旱区、青藏高原区、东部干旱区、西南区、东北区、华北区、华中区和华南区(图 1)。从中国国家气象局收集到 1951~2014 年中国 728 个站点日降水数据(不包含港澳台地区),数据累积缺测时间不超过 365 d。缺测数据采用 Zhang 等人提出的方法进行插值<sup>[13]</sup>。从每年中全年、春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)和冬季(12 月和次年 1~2 月)日降水数据中选择最大 1 日降水量分别组成年和季节极端降水序列。另外,从中国气象局热带气旋资料中心收集到了 1951 年以来西北太平洋(含南海,赤道以北,180°E 以西)海域热带气旋每 6 h 的位置和强度数据<sup>[14]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 变异点检测

分段回归被广泛用于检测气象水文序列在变异点前后时间趋势方向具有显著差异的变异点位置<sup>[15]</sup>。

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon & t \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2(t - \alpha) + \varepsilon & t > \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中  $t$  为时间(a),  $\beta_0$  为线性回归常量,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  均为线性回归斜率,  $y$  为响应变量(例如极端降水频率序列、温度序列),  $\alpha$  为响应变量变异点的位置,检验显著性水平为 0.05。为了避免变异前、后序列较短和去除端点对变异点检测的影响,至少保证变异前、后序列有 10 a 的长度。

### 2.2 时间趋势分析

Mann-Kendall(MK)法由于其为非参数检验方法,对异常值不敏感,从而被 WMO(World Meteorological Organization, 国际气象组织)推荐用

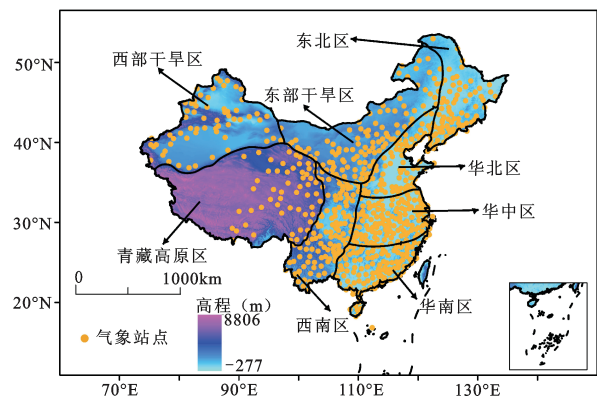


图 1 中国气象站点空间分布和地理分区

Fig. 1 The distribution of meteorological stations and geographical zone in China

来检测连续性时间序列(中国极端降水量级和发生时间)的趋势<sup>[16]</sup>。极端降水序列的自相关性对 MK 检测结果有一定的影响,因此采用修正的 MK 在检测时间趋势前对序列进行“预白化”(pre-whiten)处理<sup>[16]</sup>。

### 2.3 GEV 分布函数

GEV 分布被广泛运用于气象水文学极值分析中<sup>[17,18]</sup>。GEV 分布的累积概率分布函数为:

$$F_i(x|\mu_i, \sigma_i, \xi_i) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi_i \left( \frac{x - \mu_i}{\sigma_i} \right) \right]^{-1/\xi_i} \right\} \quad (2)$$

式中  $\mu$  为位置参数,范围为  $[-\infty, +\infty]$ ;  $\sigma$  为尺度参数,范围为  $[0, +\infty]$ ;  $\xi$  为形状参数,范围为  $[-\infty, +\infty]$ 。  $\xi > 0$ , GEV 分布没有上边界;  $\xi < 0$ , GEV 分布具有上边界  $\mu - \sigma/\xi$ 。  $\xi$  趋于 0, GEV 分布变成 Gumbel 分布,并具有无上边界的瘦尾特征。采用最大似然估计来估计 GEV 分布函数的参数,用 Kolmogorov-Smirnov's statistic D 进行拟合优度检验,并用形状参数  $\xi$  作为指标评价极端降水的上尾部特征。

### 2.4 极端降水受热带气旋影响的识别

识别热带气旋对极端降水影响的关键是建立一场具体的热带气旋和极端降水事件在时间上的联系。根据 Villarini 等的研究<sup>[19]</sup>,当一场极端降水满足以下 2 个条件时,则被认为此次极端降水过程受到热带气旋的影响:① 降水站点位置在热带气旋中心 500 km 以内;② 极端降水发生时间位于热带气旋发生时间前后 1 d 范围之内。

### 3 研究结果

#### 3.1 一致性分析

本文采用分段回归分析了极端降水序列是否有变异点(图略),采用修正MK分析了极端降水序列是否具有显著时间趋势(图2)。年和季节极端降水出现变异的站点较少。全年、春季、夏季、秋季和冬季极端降水具有变异的站点数分别为19个、8个、16个、14个和29个。年及季节大部分站点变异时间位于1990年以前,这可能跟1980年代

观测标准发生变化有关,也可能跟站点位置迁移、台站周围环境发生了很大变化有关<sup>[20]</sup>。

变异点对水文序列的时间趋势方向和程度具有显著的影响<sup>[21]</sup>。同时,年和季节极端降水序列具有变异点的站点数较少,因此采用修正MK法去检测无变异点站点的时间趋势(图2)。尽管年和各季节极端降水时间趋势的空间格局不同,但是大部分站点呈上升或显著上升趋势。年和夏季在海河流域、春季在西南部和东部沿海区域、秋季在东北部和东部沿海区域、冬季在中部,极端降水呈下

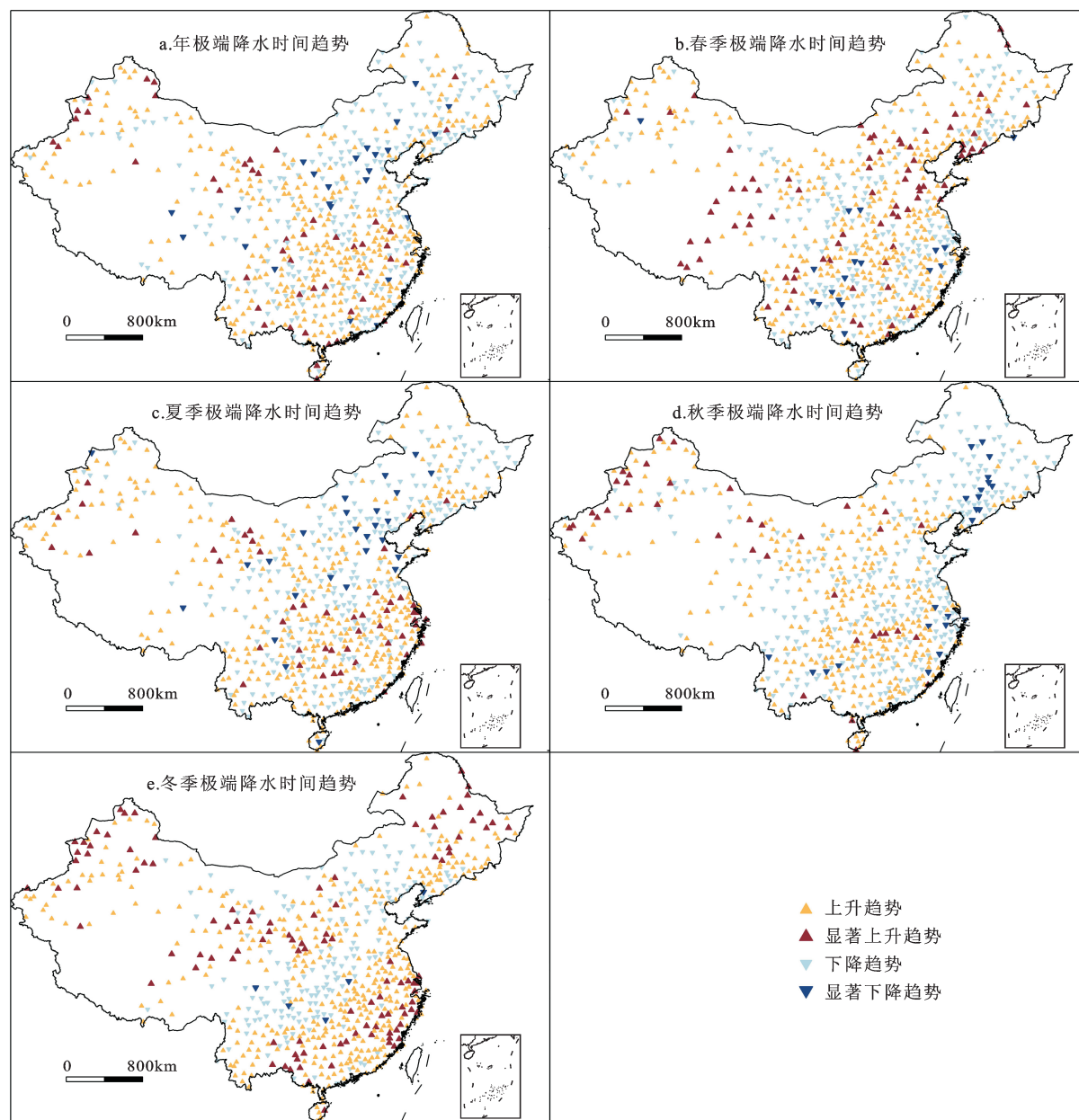


图2 中国年和季节极端降水不具有变异点的站点时间趋势

Fig.2 Spatial distribution of trends in annual and seasonal extreme precipitation without change points



降或显著下降趋势。春季、秋季和冬季极端降水呈显著上升趋势的站点分别明显集中在青藏高原区域和海河流域、新疆西部及东北部、中北部、新疆北部和东部沿海区域。年及春季、夏季、秋季和冬季具有显著上升趋势的站点数分别为48个、82个、51个、38个和111个,具有显著下降趋势的站点分别为24个、18个、26个、23个和5个。冬季极端降水呈显著上升趋势的站点数量明显高于其他季节。除了冬季,其他季节具有显著趋势变化的站点数量占总站点728的比例均不到10%。

### 3.2 极端降水极值分布函数特征及上尾部性质

在分析GEV分布函数形状参数空间分布时,仅考虑具有一致性(无突变点和显著时间趋势)特征且通过Kolmogorov-Smirnov's statistic D拟合优度检验的站点(图3)。全国大部分地区年和各季节极端降水形状参数大于0,表明极端降水极值分布曲线上尾部没有上边界。年和夏季极端降水形状参数空间分布较为一致,多位于0~0.2之间,年极端降水形状参数大于0.2的站点共有125个,大于0.33的站点共有23个。春季和秋季极端降水形

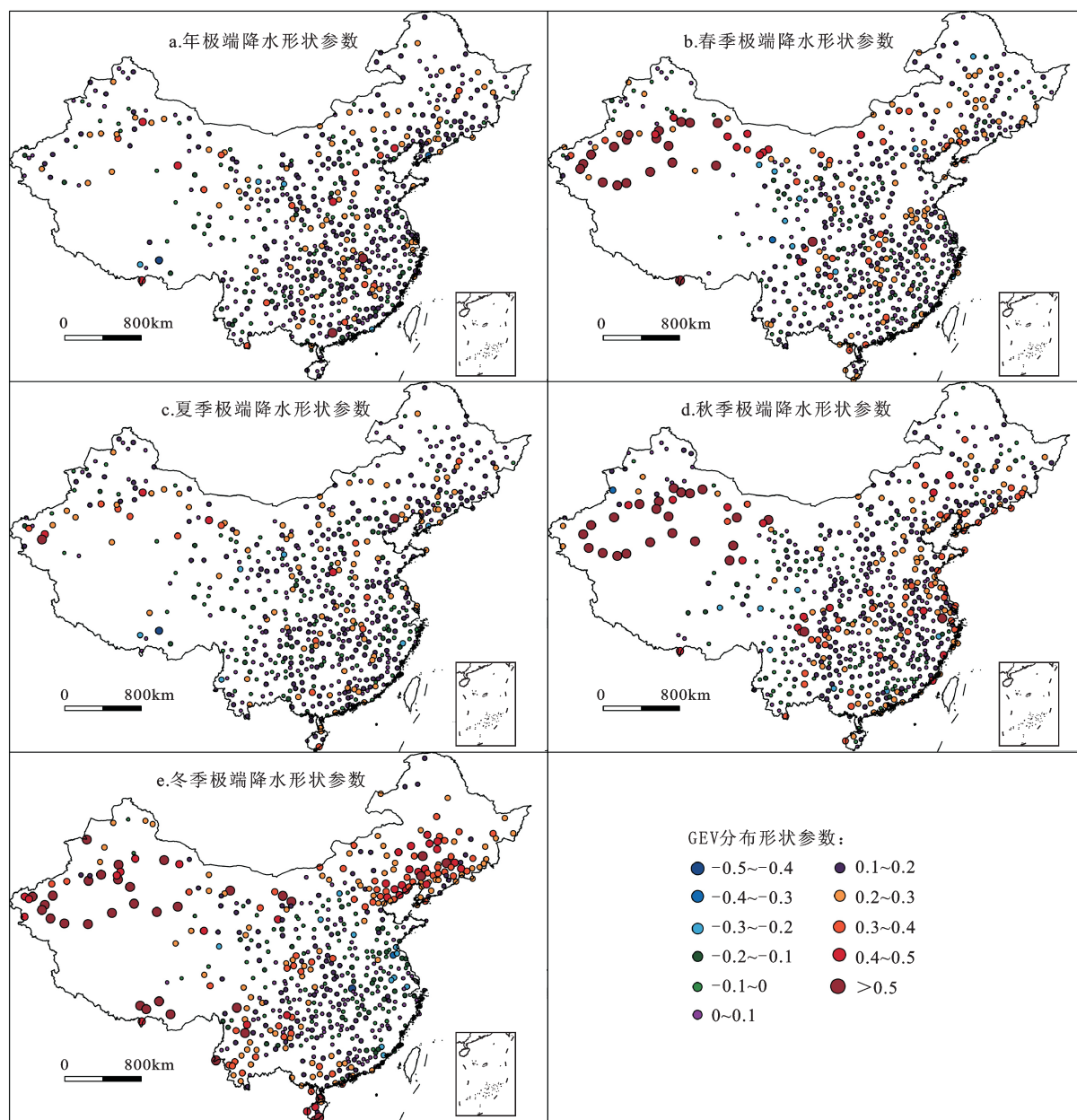


图3 中国各季节具有一致性站点极端降水GEV分布形状参数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of shape parameter of GEV distribution for seasonal precipitation extremes with stationarity across China



状参数相比年和夏季更大,且中国北方的春季和秋季降水形状参数高于南方,大于0.2的站点分别有170和196个,大于0.33的站点分别有48个和83个。冬季极端降水形状参数大于0的区域是年和各季节中最高的,主要集中在中国东北方和西方,大于0.2的站点有267个,大于0.33的站点有122个;然而华中区东部和华南区东部冬季极端降水参数小于0,表明上述区域极值分布函数上尾部具有上边界 $\mu - \sigma/\xi$ 。形状参数具有较高的值,例如

大于0.2,表明极值分布函数曲线上尾部特征具有明显的厚尾性质,形状参数大于0.33意味着极值分布函数三阶矩或更高的阶矩是无限的。

基于形状参数的空间分布(图3),需要进一步查明年极端降水的上尾部呈现的厚尾特征(形状参数大于0)能否用混合分布来解释(图4)。各季节极端降水用来近似代表不同的降水产生机制。各个分区累积分布函数为0.5时对应的年和各季节形状参数均大于0,表示超过一半的站点极值分

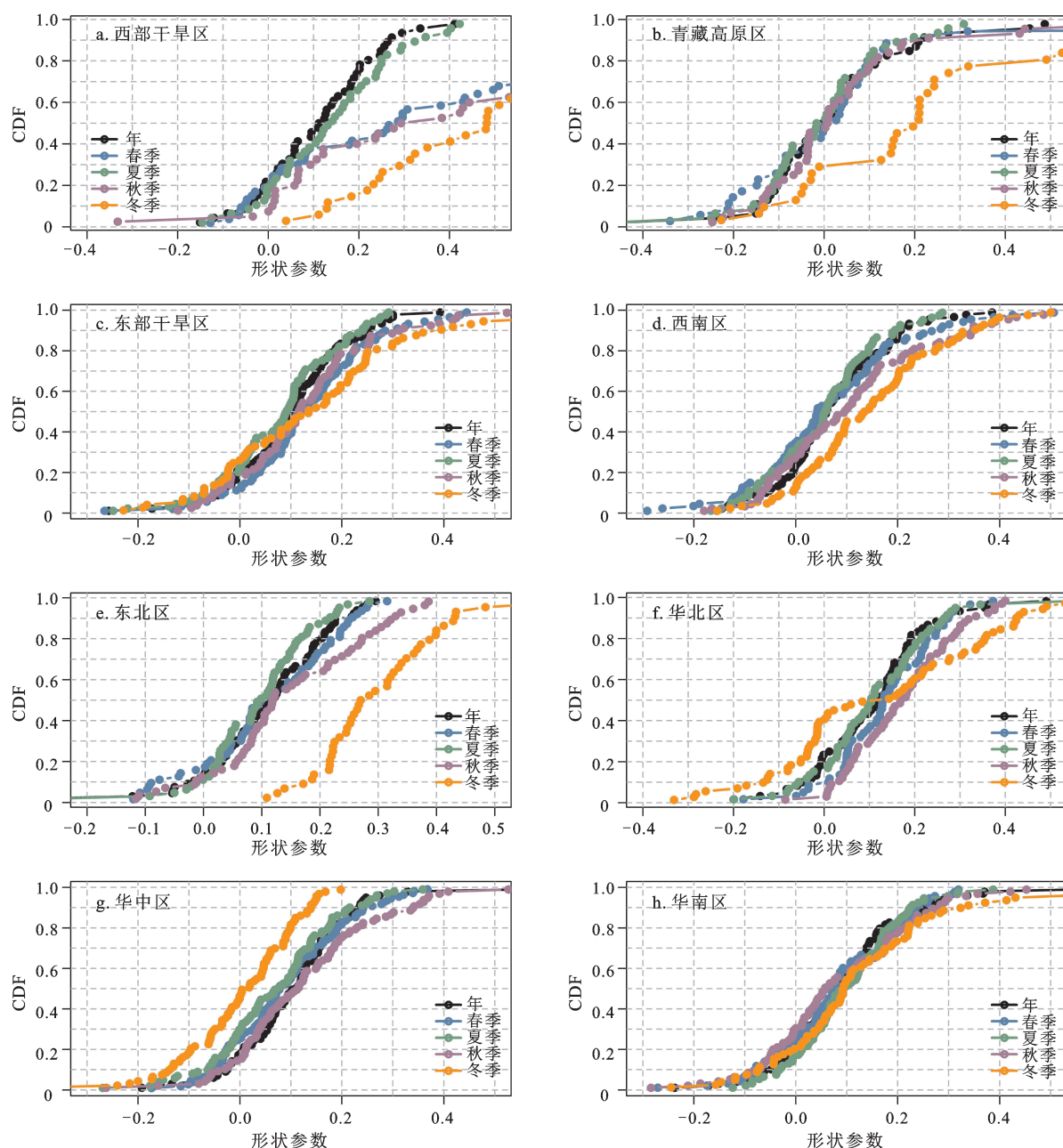


图4 中国年和季节一致性站点极端降水形状参数经验累计概率分布函数(CDF)

Fig.4 Empirical cumulative probability distributions for the shape parameter of GEV distribution for annual and seasonal extreme precipitation

布函数上尾部具有厚尾性质,尤其各分区(除华中区)冬季极端降水明显比年和其他季节厚尾性质更加显著。从各分区来看,年和夏季极端降水经验累积概率分布函数均保持较高的相似性,表明夏季降水机制是年极端降水极值分布函数的上尾部厚尾特征重要来源;东部干旱区、华北区和华南区年和各季节形状参数经验累积概率分布函数差异较小(图4c、f、s),表明不同季节极端降水产生机制的混合可能是潜在的方式解释年极端降水极值分布函数上尾部的厚尾性质及无边界特征;青藏高原区、西南区和东北区年和春季、夏季及秋季形状参数累计概率分布差异较小,冬季形状参数累计概率分布明显高于年和其他季节(图4b、d、e),表明年极端降水极值分布函数性质主要受到春季、夏季和秋季的混合影响。西部干旱区年和夏季极端降水形状参数经验累积概率分布函数极为相似,且明显低于其他各季节,表明西部干旱区年极端降水极值分布函数的上尾部厚尾特征主要受夏季极端降水产生机制的影响,几乎不受其他季节的干扰。华中区冬季形状参数明显低于年和其他季节,且年和其他季节形状参数累计概率分布函数均保持较高的相似性,因此华中区年极端降水极值分布函数上尾部厚尾性质和无边界特征主要来源于四季降水机制的混合,相较其他各区,冬季降水机制是非常重要的补充来源。

### 3.3 热带气旋对沿海地区极值分布的影响

中国年极端降水产生机制比较复杂,主要集中在春、夏两季,其中中国沿海区域还受到热带气旋的重要影响。因此,将年极端降水根据不同的形成机制划分为3类:发生在春季(3~5月)、发生于暖季(6~9月)和由热带气旋引发的。春季和暖季发生的极端降水不包含由热带气旋引发的。中国东南部 and 新疆西部及南部年极端降水发生在春季的比例较高,大部分站点比例在30%以上(图5a)。春季温带系统与东南部极端降水的发生有密切关系,有序强烈的对流天气系统常常诱发暴雨和恶劣气候。年极端降水发生在夏季的比例由东南向西北和东北两个方向均在逐步增加。中国东北、中部和西南年极端降水发生在暖季的比例达到80%以上,几乎集中了所有最大量级的极端降水(图5b)。这些区域极端降水大多由夏季剧烈对流天气或雷暴系统引发,并且具有很大的量级,例如北京“7.21暴雨”事件。东部和南部沿海区域

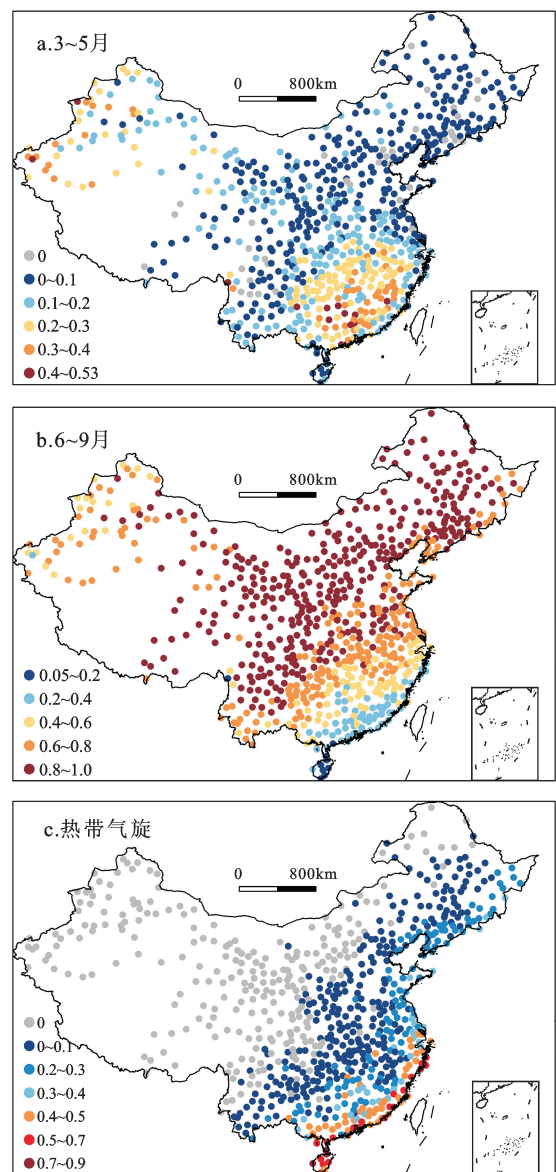


图5 年极端降水分别在3~5月(a)、6~9月(b)和由热带气旋诱发(c)的比例

Fig.5 Percentage of annual extreme precipitation in March- May(a), June-September(b) and caused by tropical cyclone(c)

发生在暖季的相当一部分比例年极端降水与热带气旋相关。热带气旋引发的年极端降水比例具有明显的空间异质性。东南沿海区域,超过30%的年极端降水由热带气旋引发;在东部沿海区域,这一比例降低到10%~30%。在往内陆深入时,这一比例降低到不足10%,其原因在于热带气旋也逐步向温带系统转换,减小其对降水产生的影响。

热带气旋与年极端降水的联系必然对极值分布函数的尾部特征有重要的影响。选择年极端降

水受热带气旋影响比例在10%以上且满足一致性的站点,分别计算整体序列和去除受到热带气旋影响的序列的GEV分布形状参数(图6)。去除热带气旋影响后,年极端降水极值分布函数形状参数明显减小,极值分布曲线由厚尾趋向于薄尾。进一步分析对极值分布函数尾部特征有重要影响的最大10场降水由热带气旋引发的比例(图略)。东南沿海地区最大10场极端降水由热带气旋引发的比例达到60%以上。东部沿海区域也有至少30%的最大10场极端降水与热带气旋相关。从沿海到内陆,最大10场极端降水由热带气旋引发的比例逐步下降,这与图5热带气旋引发的极端降水比例是吻合的。

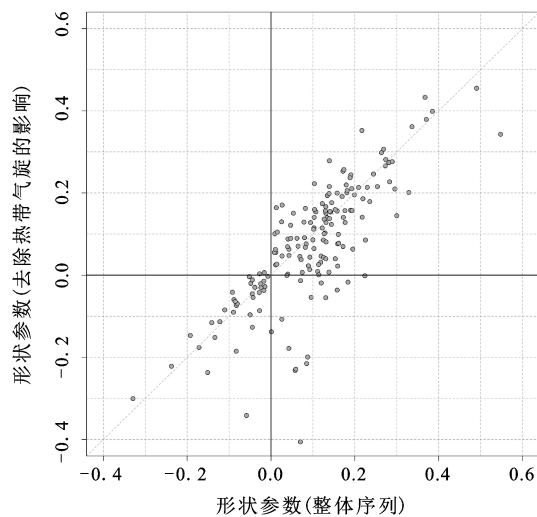


图6 热带气旋对沿海区域一致性站点极端降水GEV分布尾部性质的影响

Fig.6 Plot of the shape parameters from the entire series versus the series after removing the extremes caused by tropical cyclones

## 4 讨论

不同的气象学、水文学及气候学机制(例如热带气旋、中尺度系统、雷暴系统、锋区通道、急流、海洋表面温度异常、季风等)均能带来大量水汽,引起极端降水发生<sup>[22]</sup>。中尺度系统往往孕育极端强降水过程,例如2012年北京“7.21”暴雨事件<sup>[23]</sup>。雷暴系统往往伴随着暴雨事件,并且在中国西南及东南地区呈高发态势<sup>[24]</sup>。东亚季风对中国气候与环境也有重要的影响,夏季风强度和范围在很大程度上决定着东部地区旱涝分布<sup>[25]</sup>。高空急流

则对东亚季风有重要影响,进而影响中国局部区域暴雨生成<sup>[26]</sup>。海洋表面温度异常通过海洋-大气动态耦合作用,影响水汽输送,在大尺度长时期上影响中国各区域降水过程<sup>[27]</sup>。东南沿海区域大量级极端降水过程往往由热带气旋带来的大量水汽诱发。影响极端降水过程的多种机制之间,彼此还相互作用、相互影响及相互调节,例如海洋表面温度异常不仅影响季风变化还影响热带气旋的生成及移动路径。因此定量剖析各个气候系统对极端降水的影响,目前还是一个较大的挑战。

## 5 结论

本文基于全国728个气象站点1951~2014年日降水和热带气旋资料,分析年和季节极端降水极值分布函数时空特征,可以得出以下有意义的结论:

1) 年和季节极端降水存在变异点的站点均较少,且没有很强的空间集聚特征。变异点出现的原因有可能是站点观测标准不统一、位置迁移或者周围环境变化。

2) 虽然冬季极端降水达到显著时间趋势的站点明显高于其他季节,但是年和其他季节极端降水具有变异点或显著时间趋势的站点总数占总站点728的比例不足10%。

3) 中国大部分区域年和季节极端降水极值分布曲线上尾部均倾向于表现出厚尾特征且不具有上边界,总体来看北方的厚尾特征重于南方,秋季和冬季明显高于年和夏季。夏季极端降水是年极端降水厚尾特征的重要来源,除西部干旱区外,其他分区年极端降水厚尾特征还受其他季节降水机制的混合影响,尤其表现在华南区。

4) 中国东南方年极端降水多发生在春季(3~5月),而北方几乎全集中在夏季(6~9月)。热带气旋对中国沿海区域年极端降水有着重要的影响,其影响比例由沿海到内陆逐步递减,且具有较大的空间异质性。热带气旋引发的极端降水往往量级很大,东南沿海地区最大10场极端降水由热带气旋引发的比例达到60%以上。去掉热带气旋引发的极端降水,年极端降水GEV分布的形状参数趋向于减小。

## 参考文献(References):

[1] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in cli-



- mate and the hydrologic cycle[J]. *Nature*, 2002, 419(693): 224-232.
- [2] Li J, Zhang Q, Chen Y D et al. Changing spatiotemporal patterns of extreme precipitation regimes in China during 2071-2100 based on earth system models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(19): 12537-12555.
- [3] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 718-730. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Kong Dongdong. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 718-730.]
- [4] Zhang Qiang, Sun Peng, Singh V P et al. Spatial-temporal precipitation changes (1956-2000) and their implications for agriculture in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 82-83: 86-95.
- [5] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 基于Copula函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 3-12. [Zhang Qiang, Li Jianfeng, Chen Xiaohong et al. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 3-12.]
- [6] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200-1210. [She Duixian, Xia Jun, Zhang Yongyong et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1200-1210.]
- [7] 顾西辉, 张强. 考虑水文趋势影响的珠江流域非一致性洪水风险分析[J]. *地理研究*, 2014, 33(9): 1680-1693. [Gu Xihui, Zhang Qiang. Non-stationary flood risk analysis in Pearl River Basin, considering the impact of hydrological trends. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1680-1693.]
- [8] 顾西辉, 张强, 陈晓宏, 等. 气候变化与人类活动联合影响下东江流域非一致性洪水频率[J]. *热带地理*, 2014, 34(6): 746-757. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Chen Xiaohong et al. Non-stationary flood frequency analysis considering the combined effects of climate change and human activities in the East River Basin. *Tropical Geography*, 2014, 34(6): 746-757.]
- [9] Salas J D. *Handbook of hydrology*[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [10] Coles S. *An introduction to statistical modeling of extreme Values*[M]. London: Springer, 2001.
- [11] 申茜, 张世轩, 赵俊虎, 等. 近海热带气旋对中国东部夏季降水的贡献[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 189201. [Shen Qian, Zhang Shixuan, Zhao Junhu et al. Contribution of typhoon over coastal waters to summer rainfall in eastern China. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 189201.]
- [12] 张家诚, 林之光. *中国气候*[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. [Zhang Jiacheng, Lin Zhiguang. *Climate of China*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985.]
- [13] Zhang Q, Li J, Singh V P et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[M]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 57-76.
- [14] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [15] Toms J D, Lesperance M L. Piecewise regression: A tool for identifying ecological thresholds[J]. *Ecology*, 2003, 84(8): 2034-2041.
- [16] 张强, 孙鹏, 陈喜, 等. 1956-2000年中国地表水资源状况: 变化特征, 成因及影响[J]. *地理科学*, 2011, 31(12): 1430-1436. [Zhang Qiang, Sun Peng, Chen Xi et al. Water resources in China from 1956 to 2000: changing properties, causes and implications. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1430-1436.]
- [17] 顾西辉, 张强, 刘剑宇, 等. 变化环境下1951-2015年珠江流域洪水频率变化特征, 成因及影响研究[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(5): 661-670. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Liu Jianyu et al. Characteristics, causes and impacts of the changes of the flood frequency in the Pearl River drainage basin from 1951 to 2010. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(5): 661-670.]
- [18] 顾西辉, 张强, 陈永勤. 基于GEVcdn模型的珠江流域非一致性洪水频率分析[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(4): 157-166. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Chen Yongqin. GEVcdn-based analysis of inconsistent flood frequency of Pearl River Basin. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(4): 157-166.]
- [19] Villarini G, Denniston R F. Short communication contribution of tropical cyclones to extreme rainfall in Australia[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(2): 1019-1025.
- [20] 吴增祥. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(4): 461-467. [Wu Zengxiang. Preliminary analysis of the information on meteorological station historical evolution and its impacts on homogeneity of observational records. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(4): 462-267.]
- [21] 顾西辉, 张强, 王宗志. 1951-2010年珠江流域洪水极值序列平稳性特征研究[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 824-835. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Wang Zongzhi. Evaluation on stationarity Assumption of annual maximum peak flows during 1951-2010 in the Pearl River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 824-835.]
- [22] Hirschboeck K K. *Flood hydroclimatology*[M]. John Wiley & Sons, Hoboken, 1988.
- [23] 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析[J]. *气象*, 2012, 38(10): 1278-1287. [Fang Chong, Mao Dongyan, Zhang Xiaowen et al. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(10): 1278-1287.]
- [24] 巩崇水, 曾淑玲, 王嘉媛, 等. 近30年中国雷暴天气气候特征分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(5): 1442-1449. [Gong Chongshui, Zeng Shuling, Wang Jiayuan et al. Analyses on climatic charac-

- teristics of thunderstorm in China in recent 30 years. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(5): 1442-1449.]
- [25] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 1961~2009年中国季风区范围和季风降水变化[J]. *大气科学*, 2015, 39(4): 722-730. [Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. Monsoon area and precipitation over China for 1961-2009. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(4): 722-730.]
- [26] 陆日宇, 林中达, 张耀存. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响[J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 331-340. [Lu Riyu, Lin Zhongda, Zhang Yaocun. Variability of the East Asian upper-tropospheric Jet in summer and its impacts on the East Asian Monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 331-340.]
- [27] 王月, 张强, 张生, 等. 淮河流域降水过程时空特征及其对ENSO影响的响应研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(1): 128-134. [Wang Yue, Zhang Qiang, Zhang Sheng et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation in the Huaihe River basin and its response to ENSO events. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(1): 128-134.]

## Spatiotemporal Patterns of Extreme Precipitation Distributions with Annual and Seasonal Scales and Potential Impact of Tropical Cyclones in China

Gu Xihui<sup>1</sup>, Zhang Qiang<sup>2,3,4</sup>, Kong Dongdong<sup>5</sup>, Liu Jianyu<sup>5</sup>, Fan Keke<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

**Abstract:** Based on the daily precipitation and tropical cyclones data in 728 stations from 1951 to 2014 in China, spatio-temporal patterns of extreme precipitation Generalized Extreme Value (GEV) distribution with annual and seasonal scales and potential relationships with tropical cyclones were analyzed. We examined the non-stationarity in annual and seasonal extreme precipitation and found that the frequency of stations with change point or significant temporal trend on total 728 stations was small. For stations with stationary in annual and seasonal extreme precipitation, the distribution curves of annual and seasonal extreme precipitation had thick upper tails and unbounded. And the upper tails in north of China were thicker than south of China with bigger in autumn and winter than annual and summer. However, the thick tails at annual scale were influenced by seasonal extreme precipitation. In addition, tropical cyclones play an important role in extreme precipitation generating mechanisms on China's coastal regions, which often caused precipitation with bigger magnitude. More than 60% of the ten largest annual precipitation extremes were caused by tropical cyclones. Therefore, anomalously large values of the GEV shape parameter estimates were linked to the role of tropical cyclones in controlling the upper tail of extreme precipitation distributions.

**Key words:** extreme precipitation; tropical cyclones; nonstationarity; GEV distribution