

张霞,王新敏,栗晗,等,2020.基于环境参数的极端暴雨指数构建及其应用[J].气象,46(7):898-912. Zhang X, Wang X M, Li H, et al, 2020. Construction and application of extreme rainstorm index based on environmental parameters[J]. Meteor Mon, 46 (7):898-912(in Chinese).

## 基于环境参数的极端暴雨指数构建及其应用\*

张霞<sup>1,2</sup> 王新敏<sup>1,2</sup> 栗晗<sup>1,2</sup> 吕林宜<sup>1,2</sup>

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003

2 河南省气象台,郑州 450003

**提 要:** 采用百分位法和 1981—2010 年 30 年逐年日降水量资料,设置了河南省极端暴雨阈值和区域极端暴雨标准,据此选取 1981—2016 年河南省极端暴雨两个例 13 例,使用欧洲中期天气预报中心  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料(ERA-Interim)对其环境参数进行分析,发现:表征大气水汽、动力及不稳定条件的环境参数,如 850 hPa 比湿和涡度、700 hPa 垂直速度和  $V$  风分量,200 hPa 散度、整层可降水量、 $K$  指数、0~3 km 垂直风切变等,在极端暴雨过程中的平均值远远偏离其气候平均值,上述环境参数对极端暴雨预报有指示意义;环境参数的标准差倍数与降雨量具有较好相关性,二者的分位值基本沿  $y=x$  的对角线分布,环境参数标准差倍数分位值  $\geq 80\%$  时,对异常降水(降水分位  $\geq 90\%$ )有明显正相关;而环境参数标准差倍数分位较低时( $< 40\%$ ),则更多对应了少量级降水。单一环境参数的异常往往不能体现降水异常程度,基于对极端暴雨有明确指示意义的 8 个环境参数,组建了极端暴雨指数(ERI),经 13 例极端暴雨两个例回代和预报效果评估,ERI  $\geq 0.7$  时,极端暴雨 TS 评分达 35%,漏报率为 27%,空报率为 49%,可将其作为极端暴雨预报的参考阈值。2018 年“温比亚”台风极端暴雨过程中应用表明,该指数对极端暴雨落区预报有较好参考意义。

**关键词:** 极端暴雨指数,环境参数,标准差,窗口密度,分位值

**中图分类号:** P456, P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.07.003

## Construction and Application of Extreme Rainstorm Index Based on Environmental Parameters

ZHANG Xia<sup>1,2</sup> WANG Xinmin<sup>1,2</sup> LI Han<sup>1,2</sup> LYU Linyi<sup>1,2</sup>

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

**Abstract:** Using percentile method and the 1981—2010 daily precipitation data, this paper proposed extreme rainstorm threshold and regional extreme rainstorm standard of Henan Province. Aiming at the selected 13 extreme rainstorm cases in 1981—2016, this paper analyzed the environment parameters of these cases using the ECMWF reanalysis datasets. The results show that the average values of environment parameters such as specific humidity and vorticity at 850 hPa, vertical speed and  $V$  wind component at 700 hPa, divergence at 200 hPa, whole-layer precipitate water,  $K$  index and 0—3 km vertical wind shear, which represent the water vapor, dynamics and instability conditions, deviate far from their climatic average during the extreme rainstorms. This means these environment parameters are instructive to extreme rainstorm forecasting. The standard deviation multiple of environment parameters has good correlations

\* 河南省气象局重点项目(Z201601)、河南省科技攻关项目(172102310463、182102310757)和国家自然科学基金项目(91637105、41475041)共同资助

2018 年 12 月 12 日收稿; 2019 年 10 月 9 日收修定稿

作者简介:张霞,主要从事短期天气预报和灾害性天气预报技术研究. E-mail:zhxia1970@163.com

通讯作者:王新敏,主要从事天气预报技术和暴雨机理研究. E-mail:995378392@qq.com; hnwxm@cma.gov.cn

with rainfall, and their quantile values are distributed along the diagonal line. When quantile value of standard deviation multiple of environment parameters is greater than or equal to 80%, it is positively correlated to abnormal precipitation (quantile values  $\geq 90\%$ ). However there are more light precipitations when standard deviation multiple of environment parameters is at lower quantile value ( $< 40\%$ ). The anomaly of single environment parameter cannot reflect the degree of precipitation anomaly in general. Thus we build the extreme rainstorm index (ERI) based on the eight environment parameters discussed above and also test it with the 13 extreme rainstorm cases. The test results show that the TS, missing rate and false rate are 35%, 27%, 49% respectively when ERI is greater than or equal to 0.7. These values can be used as the reference thresholds for the forecasting of extreme rainstorm. The practical application of ERI during "Rumbia" typhoon extreme rainstorm process indicated that ERI has good reference meaning for the forecast of extreme rainstorm location.

**Key words:** extreme rainstorm index, environmental parameter, standard deviation, window density, quantile value

## 引言

极端暴雨作为一种小概率事件,因其降水量过大,极易引发洪涝、山洪、泥石流等自然灾害,从而造成严重人员伤亡和巨大经济损失。河南“7·8”特大暴雨是我国著名的极端降水事件,过程最大雨量达1 631 mm,板桥水库附近的林庄自动气象站最大6 h雨量为830 mm,创造了国内同类指标的最高纪录,特大暴雨致驻马店地区60多个水库垮坝溃决,超过2.6万人死难,直接经济损失近百亿元(李泽椿等,2015)。近50年来中国极端降水事件研究表明,在全球变暖背景下极端降水事件的频率和强度均有升高的趋势(高涛和谢立安,2014)。近年来,我国大城市极端暴雨频繁发生,如2012年“7·21”、2016年“7·20”、2018年“7·16”北京的极端暴雨,2017年“5·7”广州极端暴雨等事件,引发城市交通瘫痪,经济损失和社会影响巨大,因而受到全社会的普遍关注。

国内外气象学者在极端降水表征值的确定、极端降水分布和演变趋势、极端降水的影响因子分析及极端降水模拟等方面取得了丰硕成果。王苗等(2012)、高霞等(2009)用通用的极端气候指数分析了近45年河北省极端降水事件频率变化的时空特征,指出河北省强降水日数和暴雨日数在降水日数中的比重有增大趋势。王登炎等(2010)认为湖北省极端暴雨事件与南亚高压的东西向移动密切相关。南亚高压的停滞、摆动以及强度等因素均对暴雨的关键影响系统产生重要影响。张芳华等(2014)指

出,锋生过程是构成有利于极端暴雨过程的天气尺度环流背景,来自孟加拉湾异常充沛的水汽输送形成了冷季暴雨的水汽条件。

近年来,多位学者通过个例诊断分析,获得了极端暴雨过程中环境场和物理参数的一些共性特征,对于预报业务具有很好的参考价值。例如:肖递祥等(2017)对1981—2015年四川盆地23例极端暴雨过程的基本特征做了详细分析,认为极端暴雨过程中环境参数具有低层高比湿、整层相对湿度大、暖云层厚、垂直风切变小、850 hPa比湿和假相当位温具有显著正距平等特征。李琴等(2016)采用数值模拟资料分析了四川盆地一次灾害暴雨过程12个动力因子的演变特征,认为动力因子对该次强降水过程的发展演变具有一定预报能力。多位学者对北京2012年“7·21”和2016年“7·20”大暴雨过程(湛芸等,2012;孙军等,2012;赵洋洋等,2013;雷蕾等,2017;赵思雄等,2018)分析后认为:极端降水过程发生在高层辐散、中低层低涡切变和地面辐合线等高低空系统耦合的背景下;高层位涡异常向南发展造成低空低涡(气旋)新生、发展和移动,极大地加强了天气尺度垂直上升运动,触发对流;异常大的水汽含量(可降水量达60~80 mm)及与其相关的物理量异常,可作为判断极端降水的重要因子。马月枝等(2017)分析了2016年“7·9”豫北特大暴雨过程,发现雨区上空存在着异常的水汽供应和不稳定条件,异常的垂直上升运动和太行山地形抬升是降水增幅的主要原因。而广州2017年“5·7”极端暴雨过程(傅佩玲等,2018;田付友等,2018;伍志芳等,2018)的研究结果则有所不同,极端暴雨过程环境条件和

动力强迫较弱,天气尺度的动力、热力和水汽条件等极端性不显著,强降水是由中尺度对流系统直接产生的,偏南暖湿气流的持续输送、花都地形的阻挡和冷池的作用是高效率强降水对流系统较长时间维持的主要原因。

极端降水事件预报,目前仅在气候预测和短时临近预警方面有少量公开发表成果,李正泉等(2018)采用累积概率分布函数转换方式,降尺度预估了未来气候情景下杭州极端降水发生趋势;周莉等(2018)使用 NEX-GDDP(NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections)提供的 19 个 CMIP5 降尺度高分辨率数据( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ),给出 21 世纪前期(2016—2035 年)长江中下游流域极端降水的可能变化。王坚红等(2015)基于局地雷达回波基数据强度与雷达体扫面内相应地区强降水量之间的统计关系,构建了未来 1 h 极端暴雨短时临近预警方法。而针对极端暴雨的中短期预报技术方法目前公开发表的成果不多见。

以往对极端暴雨个例的研究成果显示,环境参数及物理量在极端暴雨过程中有一定的异常特征,但因极端暴雨机理复杂,影响因子众多,同一地区不同的极端暴雨过程中,各环境参数的表现特征也不尽相同,单一参数难以全面描述复杂暴雨过程。因此,本研究通过对 1981—2016 年间河南省 13 例极端暴雨事件的环境参数异常性做诊断分析,寻找对极端暴雨预报有指示意义的因子组建极端暴雨综合预报指数(以下简称极端暴雨指数,以 ERI 表示),旨在为极端暴雨预报业务提供一个新的参考指标。

## 1 资料说明及极端暴雨定义

### 1.1 资料说明

本文所用降水资料选自国家气候中心质量控制后的地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)逐日 20 时至次日 20 时的 24 h 日雨量资料;分析诊断及极端暴雨指数构建和回代均采用欧洲中期天气预报中心(ECWMF)1981—2016 年逐日 6 h 间隔  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  再分析资料(ERA-Interim);ERI 指数业务应用采用 ECWMF 细网格分析场和预报场资料。

### 1.2 极端暴雨定义

极端暴雨尚无统一标准和定义。一些学者依据

经验或对社会和经济是否有重大影响等作为判断依据,孙继松等(2015)将一次暴雨过程中北京地区所辖区域的任意一个区(县)代表站 24 h 内降水量超过 100 mm,且暴雨区内至少有一个自动气象站降水强度超过  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的暴雨事件定义为极端暴雨事件;王登炎等(2010)定义研究区域内一个以上自动气象站 24 h 雨量  $\geq 200 \text{ mm}$ ,同时相邻两站  $\geq 100 \text{ mm}$ ,或一个以上站 48 h 累计雨量  $\geq 300 \text{ mm}$  作为一次极端暴雨过程。

由于河南省地形复杂,日降水量差异大,不能用统一固定的日降水量简单定义,故本文借鉴翟盘茂和潘晓华(2003)提出的百分位法定义:将 1981—2010 年 30 年逐年日降水量序列的第 99 个百分位值的 30 年平均值设定为极端降水事件阈值,当某站某日降水量超过本站极端降水事件阈值时,称之为该站的一次极端降水事件;若某日河南省范围内有超过 25% 的测站发生极端降水事件时,称之为一次区域性极端暴雨事件。

## 2 基于环境参数的极端暴雨指数构建

### 2.1 河南省极端暴雨阈值分布特征

依据 1.2 节极端降水事件定义,利用 1981—2010 年的 30 年逐日 20 时至次日 20 时的日降雨量资料,计算了河南省 119 个站极端暴雨阈值如图 1a 所示,河南省极端暴雨阈值呈现由西向东、自北向南递增趋势,豫西地区极端暴雨阈值普遍低于 60 mm,尤其是三门峡和洛阳西部地区,阈值低于 50 mm,而东部和南部地区阈值大于 80 mm,其他地区为 60~80 mm,极端暴雨阈值的分布特征与余卫东等(2008)研究的 1971—2000 年极端暴雨阈值分布特征较接近。

1981—2016 年逐月极端暴雨站次分布显示(图 1b),河南省极端暴雨在 3—11 月都有发生,36 年来共 4784 站次出现极端暴雨,3 月、4 月、10 月及 11 月出现极少(总计出现站次数占总站次的 4%),96% 的极端暴雨出现在 5—9 月,以主汛期 6—8 月为集中时段(占总站次 80.7%),其中又以 7 月出现频率最高(占总站次 42%),8 月次之(占总站次 25%)。

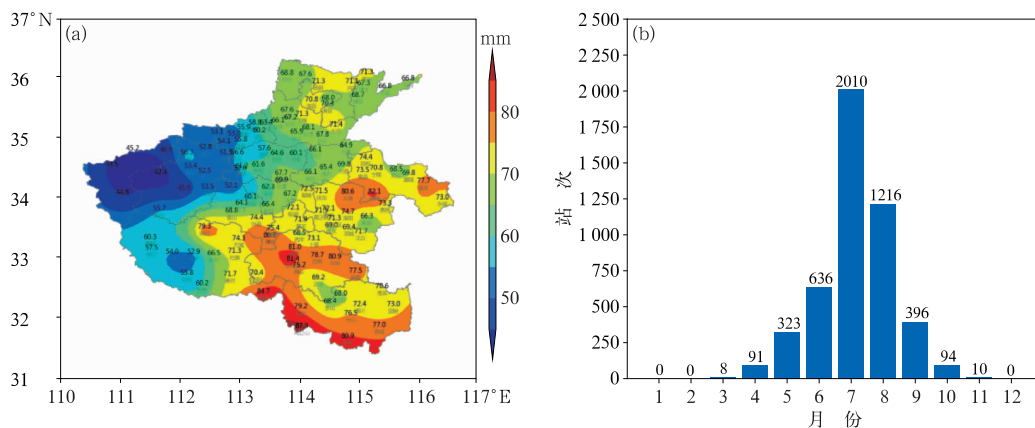


图 1 1981—2016 年河南省各站极端暴雨阈值(a)和逐月极端暴雨事件站次(b)分布

Fig. 1 Distribution of extreme rainstorm threshold (a), monthly frequency distribution of extreme rainstorm event (b) in Henan Province during 1981—2016

### 2.2 河南省极端暴雨个例选取

参考河南省极端暴雨的时空分布特点,选取每年 5—9 月份为研究时段,依据 1.2 节中区域性极端暴雨的定义,1981—2016 年共挑选出区域极端暴雨个例 13 例,采用欧洲中期天气预报中心 1981—2016 年逐日 6 h 间隔 1°×1°再分析资料(ERA-Interim)诊断分析环境参数的气候特征及其在极端暴雨过程中的异常表现。

分析 13 例区域极端暴雨过程影响系统发现:台风影响 3 例,西南涡影响 4 例,切变线影响 5 例,黄淮气旋影响 1 例,不同影响系统下,极端暴雨过程的雨带位置具有一定相似性特征,有 9 例极端暴雨雨带位于豫西和豫北,呈准南北向分布,4 例位于东部和南部,呈准东西向分布,这或与河南省地形特征密切相关,因此,采用 EOF 分析方法,将河南省的极端暴雨分为南(4 例)、北(9 例)两片,分片示意图见图 2,所选个例基本概况见表 1。

### 2.3 极端暴雨过程的环境参数特征

#### 2.3.1 环境参数的选取及气候平均值特征

选取表征环境水汽、热力、动力、不稳定等特征的物理参数如:比湿、水汽通量、水汽通量散度、涡度、散度、垂直速度、V 风分量、假相当位温、垂直风切变、温度平流等共 32 类(高空参数自 1000~100 hPa

共 10 层),依据 2.2 节中分片规则,分别计算了 1981—2010 年 30 年河南省南北两片区域的环境参数逐月气候平均值和 13 个极端暴雨个例过程中超阈值站点的环境参数平均值,对比极端暴雨过程中环境参数与相应月份相应区域的气候平均值,依据各环境参数在极端暴雨过程中的数值应明显大于(小于)其气候平均值、对极端暴雨的预报有指示意义的原则,筛选出如表 2 所示的 14 个参数做进一步分析(下文中环境参数的名称及单位均参照表 2)。

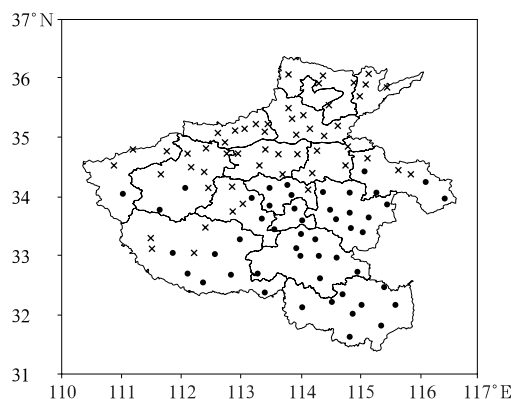


图 2 河南省极端暴雨南北分片站点示意图(圆点表示南片各站,“×”表示北片各站)

Fig. 2 Distribution of northern and southern stations of Henan extreme rainstorms (Dot is for southern stations, and ‘×’ for northern ones)

表 1 1981—2016 年河南省极端暴雨事件概况

Table 1 Extreme rainstorm events in Henan during 1981—2016

序号	时间	分属区域,平均雨量	主要影响系统
1	1982 年 8 月 1 日	北片,57 mm	台风
2	1984 年 8 月 9 日	北片,89 mm	台风
3	1989 年 6 月 7 日	南片,82 mm	切变线+低涡
4	1994 年 7 月 12 日	北片,92 mm	台风
5	1998 年 8 月 4 日	北片,63 mm	切变线+低涡
6	1999 年 7 月 5 日	北片,65 mm	切变线+低涡
7	2000 年 7 月 5 日	北片,59 mm	切变线+华北低涡
8	2007 年 7 月 14 日	南片,68 mm	西南涡
9	2008 年 7 月 22 日	南片,85 mm	西南涡
10	2009 年 8 月 17 日	北片,61 mm	切变线
11	2010 年 7 月 19 日	北片,63 mm	西南涡
12	2013 年 5 月 26 日	南片,73 mm	西南涡
13	2016 年 7 月 19 日	北片,59 mm	黄淮气旋

图 3 给出了部分环境参数南、北两片区域的气候平均值,大多数环境参数具有明显的月变化特征,整层可降水量、850 hPa 比湿、850 hPa 水汽通量等表征水汽的参数自 5 月起明显增大,7—8 月为最大,9 月开始明显下降,如整层可降水量,5 月气候平均值已升至 20 mm 以上,7—8 月则超过 40 mm (图 3a);700 hPa 上升运动亦是 7 月、8 月为最盛,该参数 7—8 月 30 年气候平均值小于 0 (图 3b),说明动力上升运动在盛夏季节降水中扮演着重要角色;与水汽和上升运动相对应,700 hPa 的 V 风分量呈相同变化趋势,7 月南风分量明显强于其他月份,南风加强有利于水汽的增强和输送,同时也使动力条件加强;K 指数的气候平均值更是在 7 月达到

表 2 环境参数说明

Table 2 Description of environment parameters

因子分类	环境参数标示	参数名称	参数单位
水汽因子	shum_850	850 hPa 比湿	$g \cdot kg^{-1}$
	uvq_850	850 hPa 水汽通量	$g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$
	uvqdiv_850	850 hPa 水汽通量散度	$10^{-7} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$
动力因子	wvc	整层可降水量	mm
	w_700	700 hPa 垂直速度	$10^{-2} Pa \cdot s^{-1}$
	vort_850	850 hPa 涡度	$10^{-5} s^{-1}$
	div_200	200 hPa 散度	$10^{-5} s^{-1}$
	vwnd_700	700 hPa V 风分量	$m \cdot s^{-1}$
热力因子	etheta_850	850 hPa 假相当位温	$^{\circ}C$
	KI	K 指数	$^{\circ}C$
稳定度因子	etheta850_500	850 与 500 hPa 假相当位温差	$^{\circ}C$
	Sweat	Sweat 指数	无量纲
	si	沙氏指数	$^{\circ}C$
	shr3	0~3 km 垂直风切变	$m \cdot s^{-1}$

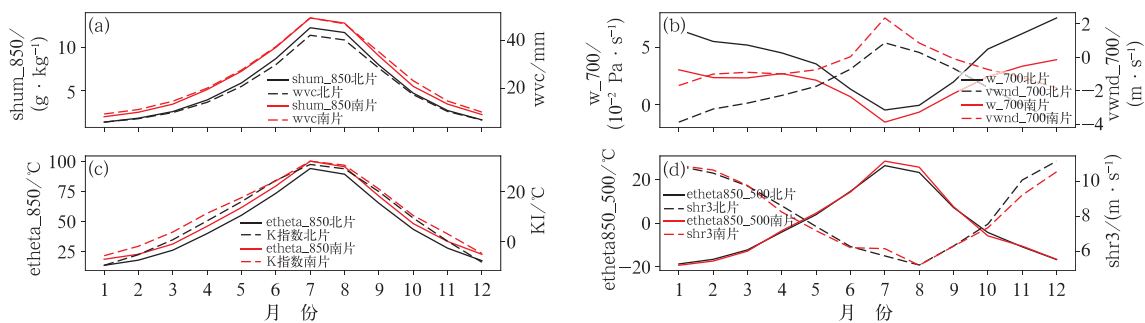


图 3 1981—2010 年河南省逐月南片(红线)、北片(黑线)环境参数气候平均值变化曲线

(a)850 hPa 比湿和整层可降水量,(b)700 hPa 垂直速度和 V 风分量,

(c)850 hPa 假相当位温和 K 指数,(d)850 与 500 hPa 假相当位温差和 0~3 km 垂直风切变

Fig. 3 Monthly climate average of environmental parameters in northern (black line) and southern (red line) Henan during 1981—2010

(a) specific humidity at 850 hPa and whole-layer precipitable water, (b) vertical velocity and V wind component at 700 hPa, (c) pseudo-equivalent potential temperature at 850 hPa and K index,

(d) pseudo-equivalent temperature difference between 850 hPa and 500 hPa and 0—3 km vertical wind shear

30℃(图 3c),而 0~3 km 环境风垂直切变在盛夏则为一年中较小值(图 3d)。各环境参数的逐月变化特征表明,7 月和 8 月是水汽充足、上升运动最强、不稳定能量最大的时段,也是出现强降水最有利的时段,统计表明,1981 年以来 13 例极端暴雨有 11 例出现在 7—8 月(占总次数 84.6%),其中 7 月有 7 例(占总次数 53.8%)。

图 3 中各参数的南、北片气候平均值对比也反映出,河南省南部和北部环境场有一定差异,南部的水汽条件较北部更好,低层动力条件也比北片显著,同等的环境参数,北部的异常性要较南部更大,因而,当有较强系统影响使环境条件具备时,北部更易出现极端降水。

### 2.3.2 极端暴雨过程的环境参数特征

#### (1) 环境参数异常及其标准差倍数特征

不同影响系统造成的极端暴雨,环境参数的极端性并不相同,如 2016 年 7 月 19 日豫北的极端暴雨过程中,700 hPa 垂直速度异常偏强,为 1980—2016 年间该区域所有强降水过程最大值,呈现出明显极端性,而水汽条件并未表现出极端偏强的特征(栗晗等,2018)。

那么,极端暴雨过程中,环境参数与气候平均值相比具有什么样的异常特征? 分别计算了极端暴雨过程中超过极端暴雨阈值的站点环境参数平均值,并计算了环境参数相对于同月份气候平均的距平百分率(5 月、6 月极端暴雨仅有南部个例,气候平均取南片值;7 月、8 月南北片均有,气候平均和极端暴雨的参数值取南北两片平均),见图 4。

极端暴雨过程中,出现极端暴雨的各站环境参数除 850 hPa 假相当位温和沙氏指数外(沙氏指数极端暴雨站点也大于 0),其他参数有明显异于气候平均值的表现,特别是对流层低层 850 hPa 水汽通量散度、涡度,200 hPa 散度,700 hPa 垂直速度、V 风分量等环境参数,极端暴雨过程中的参数值较气候平均值的距平百分率达数倍甚至上百倍,这些指数通常较敏感,在一般天气情况下数值较小,一旦有强降水过程则迅速增大(减小),导致距平百分率迅速增大;而整层可降水量、K 指数等,月变化特征明显,盛夏季节气候均值相应较大,极端暴雨过程中偏离气候值的幅度则明显偏小。

发生在不同季节的极端暴雨过程,环境参数偏离气候值的程度也不尽相同,5 月(春季)的极端暴雨过程整层可降水量、850 hPa 比湿等表征水汽的

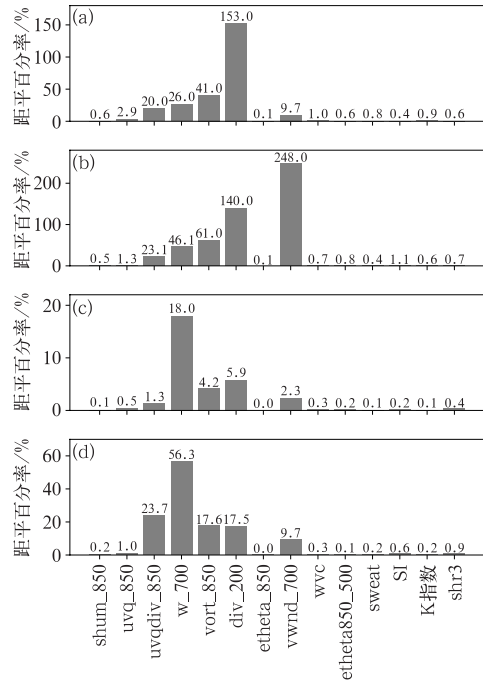


图 4 河南省 1981—2016 年 5 月(a)、6 月(b)、7 月(c)和 8 月(d)极端暴雨过程环境参数平均值与同期气候平均值的距平百分率

Fig. 4 The anomaly percentage between mean environmental parameter values of extreme rainstorm events and climate average values in the same periods in Henan in May (a), June (b), July (c) and August (d) of 1981—2016

参数表现更异常,而 7—8 月,700 hPa 垂直运动偏离气候态程度更大。

依据参数意义明确,在极端暴雨过程中异常性明显、计算便捷、业务获取方便等原则,兼顾极端暴雨产生的各条件,从上述 14 个环境参数中,筛选出 850 hPa 比湿、整层可降水量、700 hPa V 风分量、700 hPa 垂直速度、850 hPa 涡度、200 hPa 散度、K 指数、0~3 km 垂直风切变等 8 个参数,作为后期极端暴雨指数构建的入选因子。

由于不同时期环境参数值差异较大,各参数的距平百分率差异亦较大,无法统一衡量,进一步计算了各环境参数相对于历史同期气候平均值(历史同期指的是计算日及其前后两天共 5 d 的气候平均值)的标准差倍数,计算公式见下式

$$n = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: $\mu$  为计算日及前后两天共 5 d 的气候态平均值, $\sigma$  为计算日及前后两天共 5 d 的气候态标准差, $X$  为计算日的环境参数平均值。

由于极端暴雨有三种情况:较强系统影响但移速快、中等强度系统影响持续时间相对较长、较强系统影响且持续时间长,考虑环境参数这一时刻的状态量与暴雨累积量间的匹配,每一个站点环境参数的计算规则如下:利用 ERA-Interim 资料计算每个极端暴雨日逐 6 h 共 4 次的超过极端暴雨阈值的站点环境参量值,依据式(1)得到相对于同期气候平均的标准差倍数;取 4 次的标准差倍数平均值与极大值(极小值)的算术平均作为该站点的物理量标准差值。这样取值规则一定程度上表征了环境参数对降水强度和持续时间的双重影响。

图 5 给出了 13 例极端暴雨个例中出现极端降水站点的平均环境参数箱线图,每个极端暴雨过程中,环境参数的箱线值特征有明显差异,有的过程

中,仅有个别环境参数的标准差倍数异常偏高,而有些极端暴雨过程中,则有多个环境参数均表现异常。平均降水量较大的极端暴雨过程,通常会有更多数量的环境参数的标准差倍数平均值表现异常。如 1984 年 8 月 9 日和 1994 年 7 月 12 日出现在河南省北部的两例极端暴雨,平均降水量分别高达 89 和 92 mm,两次过程的整层可降水量、850 hPa 比湿、700 hPa 垂直速度等 3 个环境参数标准差倍数与其他个例相比呈现更明显极端性,而 1989 年 6 月 7 日发生在南部的极端暴雨,平均降水量达 82 mm,是南部 4 例中平均降水量最大的 1 例,与其他同区域个例相比,该个例的 700 hPa 垂直速度标准差倍数弱于其他个例,但 850 hPa 比湿、整层可降水量、0~3 km 垂直风切变、700 hPa V 风分量及 K 指数等 5

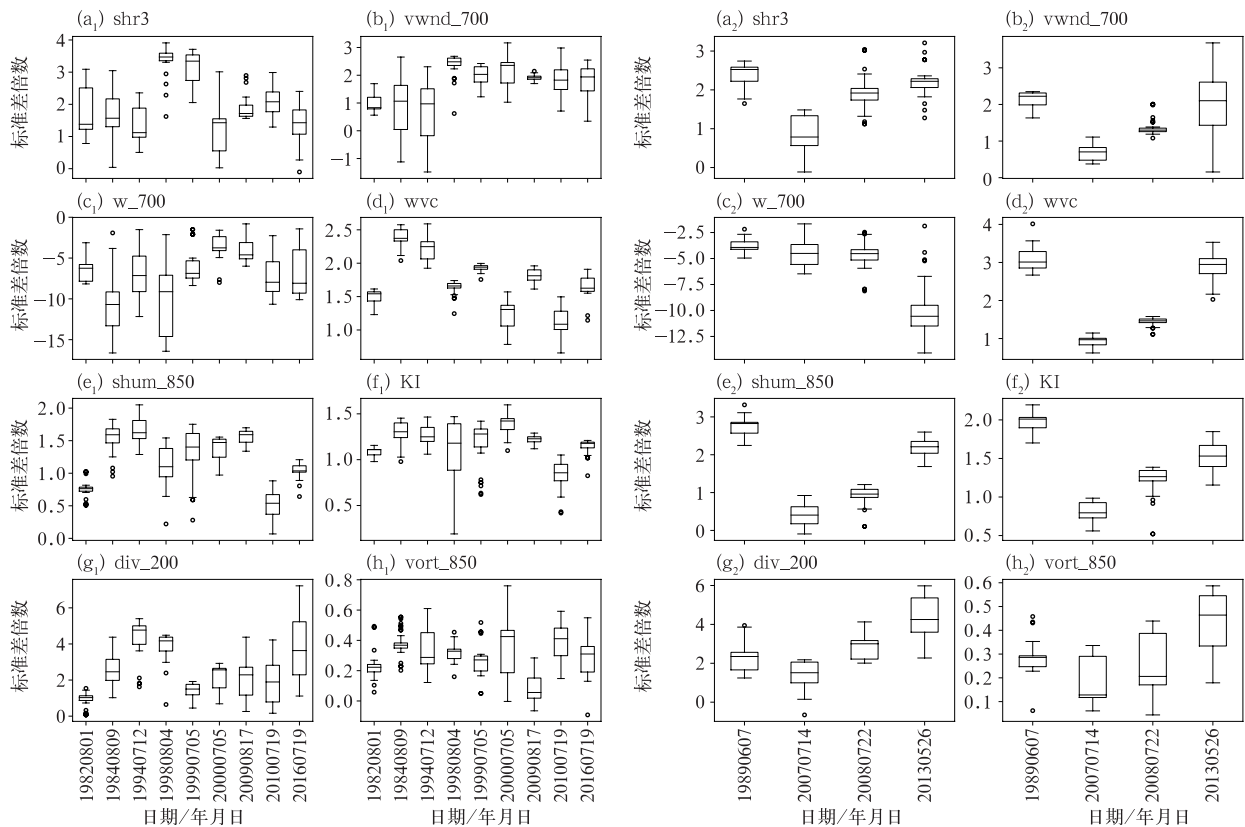


图 5 1981—2016 年河南省极端暴雨北片( $a_1 \sim h_1$ )和南片( $a_2 \sim h_2$ )环境参数日平均标准差倍数箱线图

(a) 0~3 km 垂直风切变, (b) 700 hPa V 风分量, (c) 700 hPa 垂直速度,

(d) 整层可降水量, (e) 850 hPa 比湿, (f) K 指数, (g) 200 hPa 散度, (h) 850 hPa 涡度

Fig. 5 The boxplot about daily average standard deviation multiple of environmental parameters of extreme rainstorms in northern ( $a_1 \sim h_1$ ) and southern ( $a_2 \sim h_2$ ) Henan in 1981—2016

(a) 0—3 km vertical wind shear, (b) V wind component at 700 hPa, (c) vertical velocity at 700 hPa,

(d) whole-layer precipitable water, (e) specific humidity at 850 hPa, (f) K index,

(g) divergence at 200 hPa, (h) vorticity at 850 hPa

个参数均较其他个例表现更极端。

发生在不同区域的极端暴雨过程,同一环境参数表现的差异性也各不相同。如:北片个例中,850 hPa 比湿的标准差倍数的平均值一般为 1~2 倍(图 5e<sub>1</sub>),整层可降水量的标准差倍数的平均值为 1.5~2.5 倍(图 5d<sub>1</sub>),而南片个例 850 hPa 比湿有两例接近 3 倍(图 5e<sub>2</sub>),整层可降水量则大于 3 倍(图 5d<sub>2</sub>),说明河南南部出现极端暴雨时,其湿度条件的极端性明显高于北部;但 700 hPa 垂直速度北部通常较南部个例更强,北部多个个例的平均倍数在 5 倍以上,而南部通常不足 5 倍。这一特征或与北片有太行山和伏牛山地形的动力抬升有关。

选取北片中安阳和南片中方城作为代表站,制作日降水量≥50.0 mm 时降水量和各环境参数标准差倍数的点聚图(图 6),拟合结果显示:环境参数标准差倍数与降水量之间存在一定的关联,但由于

降水机理的复杂性,各环境参数的标准差倍数并非随降水量增大而增大,某一站点雨量最大的极端暴雨过程,其环境参数标准差倍数不一定是最大的,如安阳站历史降水量最大为 249.2 mm,发生在 1994 年 7 月 12 日,由 9406 号台风 Tim 造成,该过程中,各环境参数标准差倍数均不是最大值,但多个环境参数标准差倍数明显较大,其环境特征总体极端性更强;方城站最大日雨量为 287.8 mm,发生在 2004 年 7 月 17 日,是由西南低涡东移影响所致,该过程中的各环境参数同样具有极端性,但单个环境参数却并非最极端值。而两站未达到极端暴雨阈值的过程中,也有环境参数标准差倍数较大的特征出现。两个代表站的点聚图反映出,依据单个环境参数的标准差倍数大小无法将极端暴雨与一般暴雨区分开,但极端暴雨过程中,综合多个环境参数或能区分出极端暴雨。

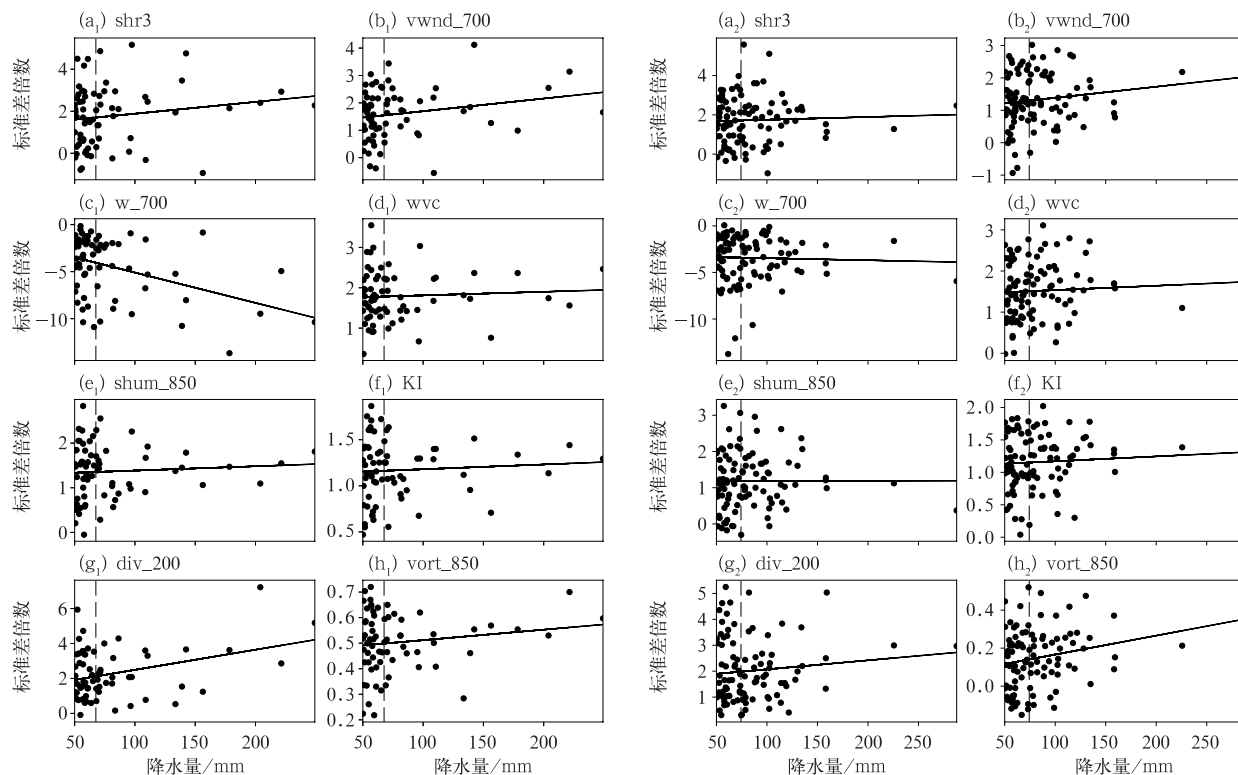


图 6 1981—2016 年安阳站(a<sub>1</sub>~h<sub>1</sub>)和方城站(a<sub>2</sub>~h<sub>2</sub>)≥50 mm 降水的环境参数标准差倍数点聚图  
(虚线为该站极端暴雨阈值,实线为趋势线;图 6a~6h 同图 5)

Fig. 6 Scatter diagrams of standard deviation multiple of environmental parameters at Anyang (a<sub>1</sub>—h<sub>1</sub>) and Fangcheng (a<sub>2</sub>—h<sub>2</sub>) station for precipitation events ≥ 50 mm during 1981—2016  
(Dotted line represents the extreme rainstorm threshold, solid line represents the trend;

Figs. 6a—6h are same as Fig. 5)



## (2) 环境参数与降水二者分位值关系分析

为进一步研究环境参数的历史排位与其对应的降水排位间的相关性,逐月制作了 1981—2016 年上述 8 个环境参数标准差倍数与降水的分位聚类图(图 7),图中横坐标是降水分位值,纵坐标是环境参数标准差倍数分位值,采用高斯核密度估计方法对样本点的分布函数进行估计,计算样本的二维密度估计函数,从而得到平滑的样本点分布曲线,绘图上的值代表单位面积的样本点数目。直观上看,深色区域是点的集中区域,如果点更多地集中在  $y=x$  直线上说明两个量的一致性最好;右上角和左下角的点密度较大,表明有更多点集中在这两个区域,其对应的结果是指环境参数高排位和降水的高排位对应较好,而环境参数低排位和降水的低排位对应较好。

分析逐月各环境参数与降水的分位聚类,各月间各环境参数具有一些一致性特征,各参数的标准差倍数与降水量的分位值基本沿  $y=x$  的对角线分布,特别是降水分位  $<30\%$  时,各环境参数的标准差倍数排位也多  $<40\%$ ,而降水分位较高达  $80\% \sim 90\%$  以上时,环境参数的分位值一般也  $\geq 60\%$ ,这样的对应特征,使基于环境参数标准差倍数分位数来预测降水的分位数成为可能。

逐月计算了降水分位  $\geq 90\%$  和  $<30\%$  时(图 8),环境参数标准差倍数的各分位出现频率,发现:当降水分位  $\geq 90\%$  时(图  $8a_1 \sim 8e_1$ ),各环境参数标准差倍数分位  $\geq 90\%$  的频率在  $20\% \sim 40\%$ ,  $\geq 60\%$  的频率达  $60\% \sim 80\%$ ;说明环境参数的高分位与降水异常密切相关,环境参数标准差倍数分位

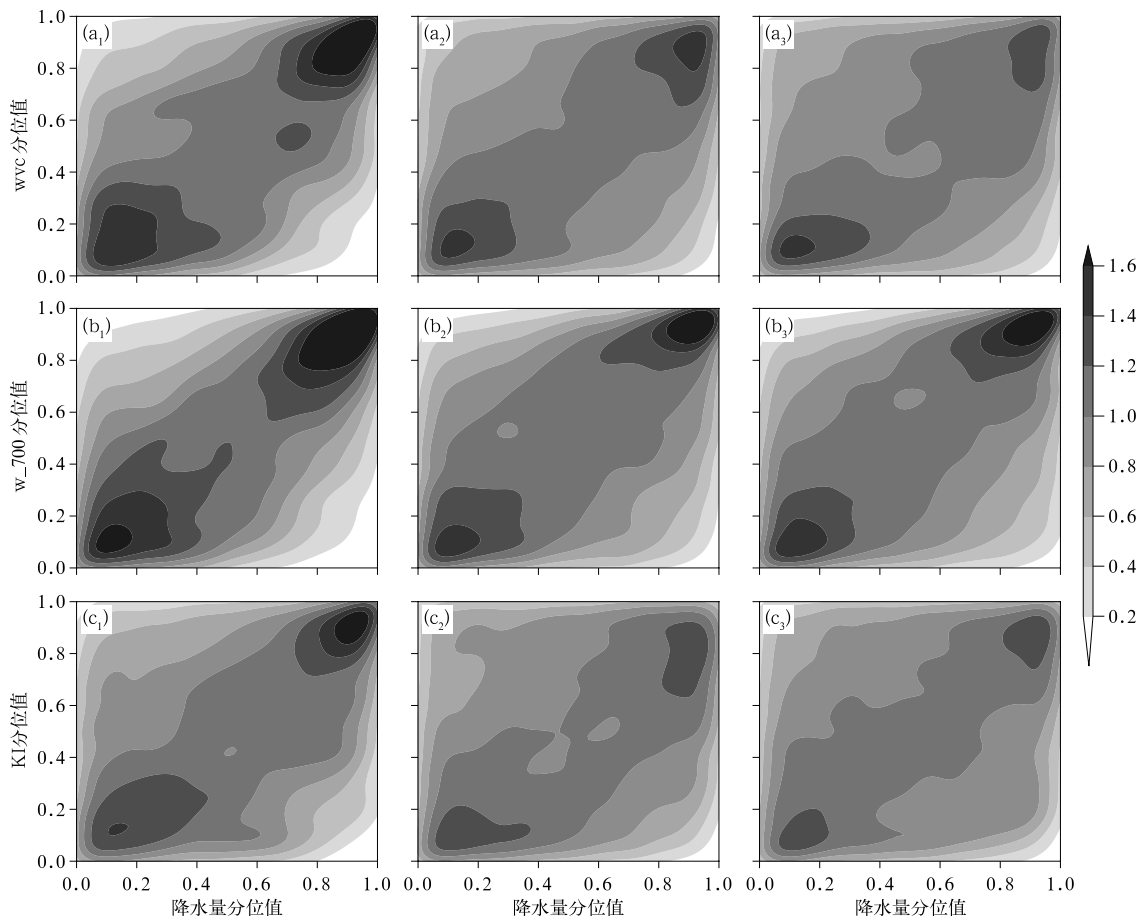


图 7 1981—2016 年 5 月 ( $a_1, b_1, c_1$ )、7 月 ( $a_2, b_2, c_2$ ) 和 8 月 ( $a_3, b_3, c_3$ )

环境参数标准差倍数与日降水量二者分位聚类图

(a) 整层可降水量, (b) 700 hPa 垂直速度, (c) K 指数

Fig. 7 Clustering diagram of standard deviation multiple of environmental parameters and daily precipitation in May ( $a_1, b_1, c_1$ ), July ( $a_2, b_2, c_2$ ) and August ( $a_3, b_3, c_3$ ) of 1981—2016

(a) whole-layer precipitable water, (b) vertical velocity at 700 hPa, (c) K index

≥60%时,有 60%~80% 概率的降水排位 ≥90%。降水分位 ≥90% 时,各环境参数高分位出现频率并不相同,以 700 hPa 垂直速度和整层可降水量出现高分位频率最高,各月的 700 hPa 垂直速度 ≥90% 的频率高达 30%~40%,有接近 80% 站次的垂直速度排位 ≥60%,且其对应着 ≥90% 分位的降水,该环境参数分位与降水分位相关性最好。

对于较小量级降水,其分位较低,对应的环境参数分位是否同样较低? 图 8a<sub>2</sub>~8e<sub>2</sub> 给出了 <30% 分位的降水,各环境参数标准差倍数的不同分位值出现的频率。可看到,环境参数标准差倍数分位值 <40% 的站次出现的频率超过了 50%。

综合图 8a、8b,环境参数分位值 ≥60% 时,尤其是分位 ≥80% 的环境参数,对异常降水(降水分位 ≥90%)有明显正相关;而环境参数分位较低时 (<40%),则更多地对应了小量级的降水,也就是说极端降水过程中,出现分位较低的环境参数可能性较小。

### 2.4 极端暴雨指数的构建方法

综合上文分析,极端暴雨过程中,各环境参数标准差倍数的分位值与降水分位值具有一定正相关性,但每一个环境参数在极端暴雨过程中的异常性表现不尽相同,单一环境参数的异常不能体现降水异常程度,因此,基于多个环境参数,组建极端暴雨指数,据此定量地预测降水的极端程度。

极端暴雨指数公式如下

$$ERI = a_1 f_1 + a_2 f_2 + a_3 f_3 + a_4 f_4 + a_5 f_5 + a_6 f_6 + a_7 f_7 + a_8 f_8 \quad (2)$$

式中:ERI 为极端暴雨指数,  $f_1, f_2, \dots, f_8$  为 8 个预报因子,对应表 1 中的 8 个环境参数。取一日中 02、08、14、20 时四个时次的环境参数和当日最大环境参数做算术平均,作为该日环境参数的基础值,再采用式(1)计算其标准差倍数,取其历史分位值做为预报因子。  $a_1, a_2, \dots, a_8$  为各因子权重系数,权重系数的确定方案如下:

对于 1981—2016 年 5—9 月间大于 1 mm 的逐

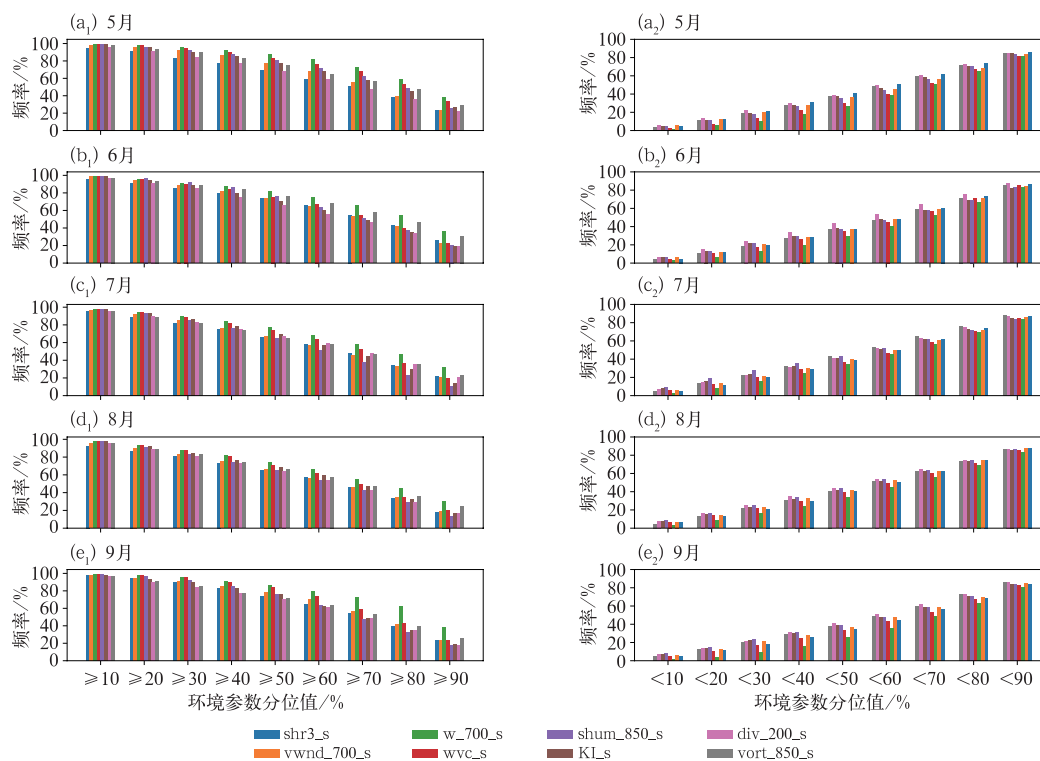


图 8 降水分位 ≥90% (a<sub>1</sub>~e<sub>1</sub>) 和 <30% (a<sub>2</sub>~e<sub>2</sub>) 时环境参数不同分位值出现的频率 (a)5 月, (b)6 月, (c)7 月, (d)8 月, (e)9 月

Fig. 8 Frequency of environmental parameter quantile values with precipitation quantile value 90% (a<sub>1</sub>~e<sub>1</sub>) or <30% (a<sub>2</sub>~e<sub>2</sub>) (a) May, (b) June, (c) July, (d) August, (e) September

月降水样本数据集,取降水排位 $\geq 90\%$ 的降水样本子集,计算此样本子集中上述预报因子分位值 $\geq 70\%$ 占该子集样本总数的比例,并对逐月的各预报因子占比进行归一化得到各因子逐月权重如表 3。

各预报因子分位数值取 0.1~1.0(对应 10%~

100%的分位数),为减少空报,对预报因子分位数 $< 40\%$ 的认为对极端暴雨的产生无正贡献,取其值为 0,8 个预报因子权重之和为 1,采用式(2)计算所得的 ERI 值为 0~1。

表 3 基于环境参数的预报因子权重

Table 3 Weight of forecast factors based on environmental parameters

月份	预报因子							
	shr3	vwnd_700	w_700	wvc	shum_850	KI	div_200	vort_850
5月	0.107	0.119	0.154	0.145	0.132	0.123	0.101	0.12
6月	0.127	0.123	0.152	0.126	0.117	0.114	0.107	0.134
7月	0.125	0.121	0.153	0.136	0.098	0.117	0.126	0.124
8月	0.122	0.122	0.147	0.132	0.114	0.126	0.112	0.125
9月	0.123	0.128	0.165	0.133	0.109	0.111	0.111	0.121

## 2.5 极端暴雨指数历史回代效果及预报阈值

极端暴雨指数建成后,对 13 例极端暴雨个例的 ERI 指数做历史回算,并将 ERI 指数分为 $\geq 0.5$ 、 $\geq 0.6$ 、 $\geq 0.7$ 、 $\geq 0.8$ 、 $\geq 0.9$ 五个等级,按不同阈值做 TS 评分,综合 TS 评分结果,确定极端暴雨指数的预报参考阈值。

评分规则:当某站 ERI 达某阈值时,若站点降水量 $\geq$ 该站极端暴雨阈值,则认为 ERI 预报正确,站点降水量 $<$ 极端暴雨阈值认为空报,若站点降水量 $\geq$ 该站极端暴雨阈值,而 ERI 指数小于某阈值,则认为漏报。

13 例极端暴雨过程不同阈值的 ERI 评分结果见图 9,逐个个例评分结果显示(图 9b~9d),除 2007 年 7 月 14 日极端暴雨 ERI 指数的预报效果较差外,其他个例预报效果相对较好,当 ERI 取 0.5、0.6、0.7 阈值时 TS 评分相当且高于其他阈值评分(图 9a);当 ERI $\geq 0.7$  时,TS 平均为 0.35,空报率 0.49,而 ERI 阈值为 0.5 和 0.6 时的空报率则明显偏高,分别为 0.63 和 0.61,且 ERI $\geq 0.7$  时,有相对较低的漏报率。综合三者的 TS 评分、空报率和漏报率,选取 ERI=0.7 作为预报极端暴雨的参考阈值,即当某站的 ERI $\geq 0.7$  时,认为该站将出现超过极端阈值的降水。

## 3 极端暴雨指数的应用

采用 EC 细网格模式预报产品,计算相应环境参数,应用式(2)形成 24~84 h 逐 24 h 间隔的极

端暴雨指数客观预报产品,供预报业务参考应用。

2017—2018 年,河南省共发生区域性暴雨 6 例,达到区域极端暴雨的仅有 1 例,为 2018 年 1818 号台风温比亚影响所致。其余 5 例为区域暴雨,对流性强,极端暴雨站点较少且较分散,计算的 ERI 指数相对较小,多小于 0.7,因此,本文主要以“温比亚”台风极端暴雨为例说明该指数的业务应用。

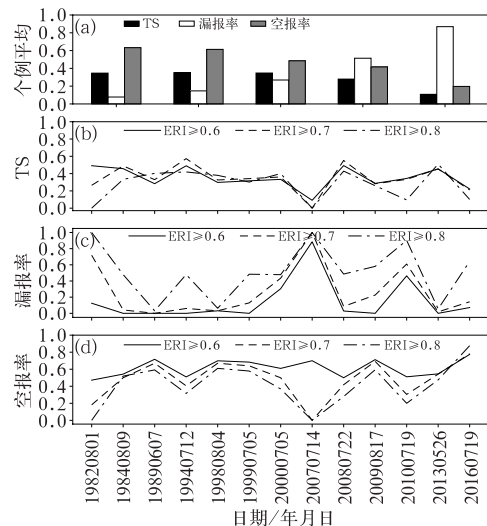


图 9 1981—2016 年 13 例极端暴雨过程中 ERI 预报效果评估

(a) 平均预报效果, (b) TS, (c) 漏报率, (d) 空报率

Fig. 9 Assessment of ERI of 13 extreme rainstorms in 1981—2016

(a) average forecast effect, (b) TS, (c) missing rate, (d) false alarm rate

### 3.1 极端降水概况

台风温比亚登陆后西行,于 8 月 18 日 03 时进入河南东南部,移速减慢在河南省境内滞留时间长达 40 h,引发河南东部大范围特大暴雨,有 478 站超过 100 mm,占全省总站的 17.8%,降水超过 500 mm 的有 2 站,分别为柘城县远襄集(553.5 mm)、睢县长岗(543.4 mm),最大小时雨强为  $112 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,共有 43 个自动站超过极端暴雨阈值,其中有 8 个站日降水量突破建站以来历史极值(图 10)。

### 3.2 极端暴雨指数预报

图 11 是不同起报时次的 18 日 08 时至 19 日 08 时 24 h 降水 ERI 预报图,可以看出,72 h 时效  $\geq 0.7$  的区域主要位于河南省北中部及东南部,其中有分散的、若干个 ERI 中心值  $\geq 0.95$  的高值区,商丘地区 ERI 值在  $0.6 \sim 0.7$ ;48 h 和 24 h 时效  $\geq 0.7$

的区域向东调整,  $\geq 0.9$  的高值区位于商丘、周口两地区,尤其是 24 h 时效  $\geq 0.8$  的区域与实况中出现极端降水的区域相对应,且  $\geq 0.95$  区域位于商丘地区和周口地区北部,与实况中商丘、周口降水量突破历史极值的站点相吻合。

该过程中极端暴雨指数的 TS 评分如图 12,随着预报时效的临近,TS 评分逐渐提高,空报率及漏报率有明显下降,特别是极端指数  $\geq 0.8$  时,TS 评分最高,且有相对 ERI  $\geq 0.7$  较小的空报率,该阈值在本次过程中更具参考性。

### 3.3 极端暴雨的定量预报试验

EC 细网格模式是业务中常用数值模式之一,因其要素场预报较稳定且与实况误差小而被各级预报员信赖,但应用检验评估显示,该模式对河南的降水预报常有偏差,特别是对大暴雨以上降水预报能力较弱。

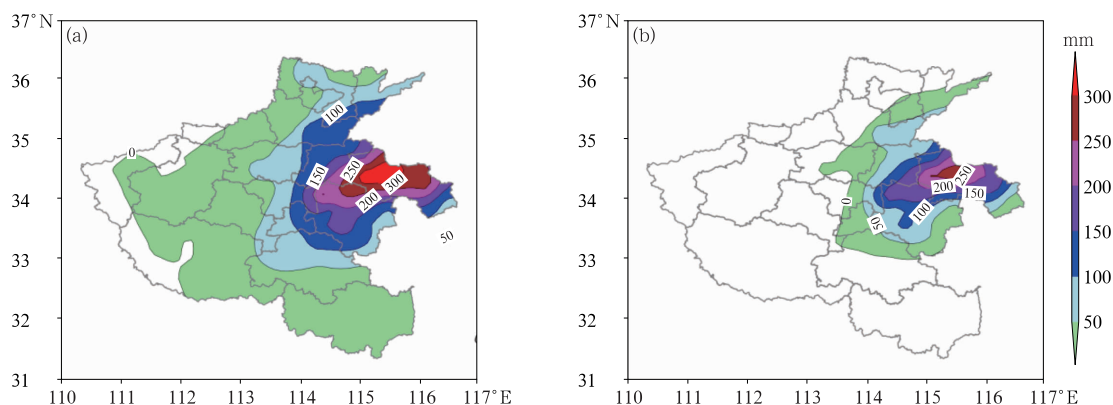


图 10 2018 年 8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时河南省区域站降水量(a)和实况雨量与极端阈值的差值分布(b)

Fig. 10 Observed precipitation of regional stations (a) and distribution of difference between observed precipitation and extreme thresholds (b) from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 19 August 2018

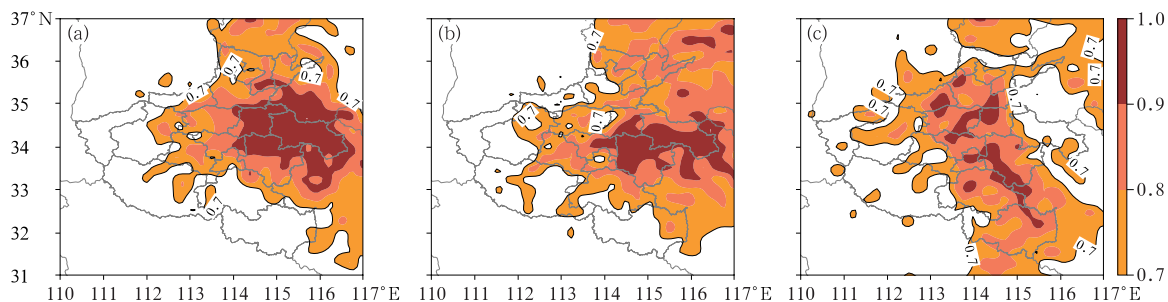


图 11 2018 年 8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时 24 h(a),48 h(b),72 h(c)极端暴雨指数预报

Fig. 11 ERI forecast at 24 h (a), 48 h (b) and 72 h (c) from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 19 August 2018

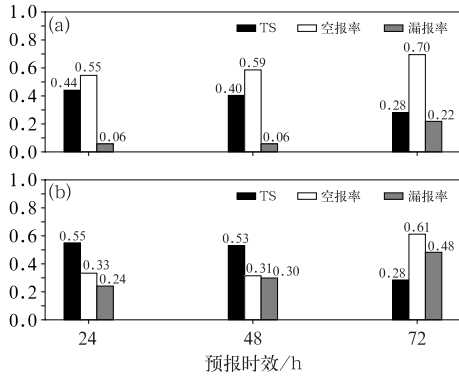


图 12 2018 年 8 月 18—19 日“温比亚”台风极端暴雨过程的 ERI 预报效果评估

(a) ERI ≥ 0.7, (b) ERI ≥ 0.8

Fig. 12 Assessment of ERI during ‘Rumbia’

Typhoon extreme rainstorm process

in 18—19 August 2018

(a) ERI ≥ 0.7, (b) ERI ≥ 0.8

上文分析可知,基于 EC 细网格的要素场建立的 ERI 指数,一定程度上能够预报降水的极端性及其极端程度,当 ERI ≥ 0.9 时,出现破历史极值的降

水可能性极大,因此,采用基于 EC 细网格要素场计算所得的 ERI 指数、各站历史降雨极值、极端降水阈值和降水分位数等数据,依据 ERI 的使用经验,尝试对 EC 细网格的降水量预报产品作订正,目的是弥补 EC 细网格模式对河南省大暴雨预报偏小的不足。订正规则如下:

(1)当 ERI ≥ 0.9,以 EC 降水预报和历史极值中最大者赋值;

(2)当 0.8 ≤ ERI < 0.9 时,以 EC 降水预报和极端暴雨阈值最大者赋值;

(3)当 0.7 ≤ ERI < 0.8 时,若 EC 细网格预报降水 ≥ 50 mm,以 EC 降水预报和极端阈值最大者赋值;当 30 mm < EC < 50 mm 时,取 EC 值和分位数最大者赋值;否则取 EC 值。

(4) ERI < 0.7 时,不做订正。

采用该规则对 2016 年“7·19”和 2018 年“温比亚”两次极端暴雨过程的 EC 细网格定量降水预报产品进行订正(图 13),给出了两次过程中该方法 24 h 时效的预报结果(图 13a<sub>1</sub>, 13a<sub>2</sub>)与 EC 细网格

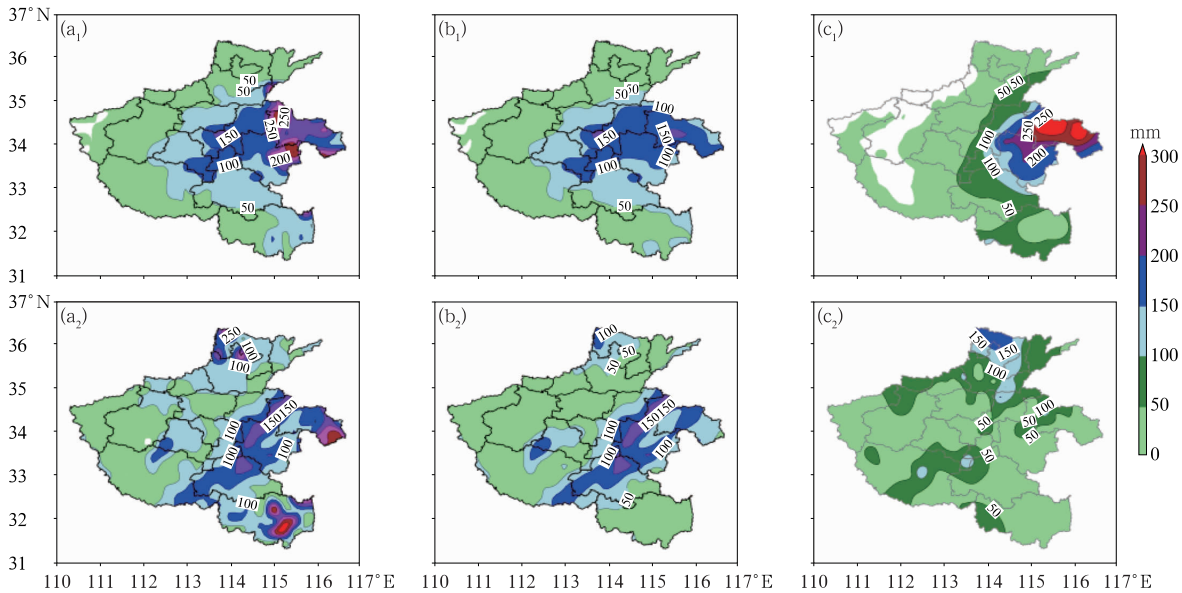


图 13 2018 年台风温比亚(a<sub>1</sub>~c<sub>1</sub>)和 2016 年“7·19”(a<sub>2</sub>~c<sub>2</sub>)极端

暴雨过程的定量预报试验与 EC 细网格模式预报结果对比

(a) 定量预报试验结果, (b) EC 细网格模式预报,

(c<sub>1</sub>) 2018 年 8 月 17 日 20 时至 18 日 20 时降水实况, (c<sub>2</sub>) 2016 年 7 月 19 日 08 时至 20 日 08 时降水实况

Fig. 13 Quantitative forecasting experiments of Typhoon Rumbia (a<sub>1</sub>—c<sub>1</sub>) in 2018 and the 19 July extreme rainstorm (a<sub>2</sub>—c<sub>2</sub>) in 2016 compared with EC forecast results

(a) results of quantitative prediction, (b) EC prediction,

(c<sub>1</sub>) observed precipitation from 20:00 BT 17 to 20:00 BT 18 2018,

(c<sub>2</sub>) observed precipitation from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 20 July 2016

数值模式的时段预报结果(图 13b<sub>1</sub>, 13b<sub>2</sub>)对比和预报时段降水实况(图 13c<sub>1</sub>, 13c<sub>2</sub>),该方法对“温比亚”所致的豫东特大暴雨有较好预报能力(图 13a<sub>1</sub>),对 EC 模式的大暴雨以上量级降水有较好订正效果;而在 2016 年“7·19”豫北特大暴雨过程中,通过该方法订正,报出了豫北的特大暴雨(EC 细网格模式预报偏弱)(图 13a<sub>2</sub>),但对东南部降水预报量级偏大,极端暴雨明显空报。

## 4 结论与讨论

(1)采用百分位法和 1981—2010 年 30 年逐年日降水量资料,设置了河南省极端暴雨阈值,分析发现:河南省极端暴雨阈值呈现由西向东、自北向南递增的趋势,豫西地区极端暴雨阈值最低,多低于 55 mm;豫东和豫南极端暴雨阈值较高,多高于 80 mm。80%以上站次的极端暴雨发生在主汛期 6—8 月,其中又以 7 月出现频率最高(占总站次 42%)。

(2)大多数环境参数具有明显的月变化特征,7—8 月是水汽充足、上升运动最强、不稳定能量最大的时段,1981 年以来河南省共出现 13 例区域极端暴雨,有 11 例发生在盛夏的 7—8 月(占总次数 84.6%),其中 7 月发生 7 例为最多(占总次数 53.8%)。

(3)表征大气水汽、动力及不稳定条件的环境参数,如 850 hPa 的比湿、水汽通量、涡度,700 hPa 垂直速度、V 风分量,200 hPa 散度及整层可降水量、K 指数、0~3 km 垂直风切变等,在极端暴雨过程中的平均值远远大于气候平均值,上述环境参数对极端暴雨的预报有指示意义。

(4)环境参数的标准差倍数与降水量具有较好相关性,一般极端暴雨过程中,降水量超过极端阈值的站点,其环境参数的标准差倍数一般可达至数倍;二者的分位值基本沿  $y=x$  的对角线分布,环境参数标准差倍数分位值  $\geq 60\%$  时,尤其是分位  $\geq 80\%$  的环境参数,对异常降水(降水分位  $\geq 90\%$ )有明显正相关;而环境参数标准差倍数分位较低时( $< 40\%$ ),则更多地对应了小量级的降水,环境参数的上述特征表明,标准差倍数为高分位的环境参数更有利于极端降水的发生,而较低分位的环境参数出现极端降水的可能性较小。

(5)各环境参数在极端暴雨过程中的异常性表现不尽相同,单一环境参数的异常往往不能体现降

水异常程度。基于对极端暴雨有明确指示意义的 8 个环境参数,组建极端暴雨指数,经 13 例极端暴雨个例回代,  $ERI \geq 0.7$  时,极端暴雨的 TS 评分达 35%,漏报率为 27%,空报漏 49%。

(6)该指数在 2018 年河南省 1818 号“温比亚”台风极端暴雨过程有较好表现,24 h 时效预报的  $ERI \geq 0.7$  时,极端暴雨的 TS 评分达 44%,仅有 6%的漏报率,空报率为 55%。

(7)初步尝试依据环境场建立的极端暴雨指数,对 2016 年“7·19”和 2018 年台风温比亚两次极端暴雨过程的 EC 细网格定量降水预报产品进行订正,该方法对 EC 数值模式大暴雨以上量级降水具有较好订正能力,但也存在一定的空报风险,其普适性还需今后进一步完善和改进。

基于环境参数构建的极端暴雨指数,可作为对 EC 细网格数值产品大暴雨以上量级降水预报能力订正的依据之一;同时也可对雨带偏差订正具有一定参考。但由于极端暴雨属小概率事件,机理复杂,影响因子众多,从历史个例回代及 2018 年业务应用中发现,该指数尚存在较高空报;基于数值模式计算的环境参数,因模式分辨率和模式自身误差等因素,对环境参数标准差倍数及其分位值有不同程度影响,需在业务应用中适当订正;此外,极端暴雨的定量化预报及极值估测等科学问题有待于今后做进一步研究。

## 参考文献

- 湛芸,孙军,徐珺,等,2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018.2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J].气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):500-510(in Chinese).
- 高涛,谢立安,2014.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,29(5):577-589. Gao T, Xie L A, 2014. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. Adv Earth Sci, 29(5):577-589(in Chinese).
- 高霞,王宏,于成文,等,2009.近 45 年来河北省极端降水事件的变化研究[J].气象,35(7):10-15. Gao X, Wang H, Yu C W, et al, 2009. Analysis of extreme precipitation events change for Hebei Province[J]. Meteor Mon, 35(7):10-15(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,何娜,等,2017.“7.20”华北特大暴雨过程中低涡发展

- 演变机制研究[J]. 气象学报, 75(5):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(5):685-699(in Chinese).
- 栗哈, 王新敏, 张霞, 等, 2018. 河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the north of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9):1136-1147(in Chinese).
- 李琴, 杨帅, 崔晓鹏, 等, 2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J]. 大气科学, 40(2):341-356. Li Q, Yang S, Cui X P, et al, 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province[J]. Chin J Atmos Sci, 40(2):341-356(in Chinese).
- 李泽椿, 湛芸, 张芳华, 等, 2015. 由河南“75.8”特大暴雨引发的思考[J]. 气象与环境科学, 38(3):1-12. Li Z C, Chen Y, Zhang F H, et al, 2015. Consideration by “75.8” extreme heavy rainfall event in Henan[J]. Meteor Environ Sci, 38(3):1-12(in Chinese).
- 李正泉, 宋丽莉, 梁卓然, 等, 2018. 杭州市降水特征及极端降水趋势预估[J]. 气象, 44(6):781-789. Li Z Q, Song L L, Liang Z R, et al, 2018. Precipitation characteristics and projection of extreme precipitation trend in Hangzhou City[J]. Meteor Mon, 44(6):781-789(in Chinese).
- 马月枝, 张霞, 胡燕平, 2017. 2016年7月9日新乡暖区特大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 36(6):557-565. Ma Y Z, Zhang X, Hu Y P, 2017. Cause analysis of a warm-sector excessive heavy rainfall event in Xinxiang on 9 July 2016[J]. Torren Rain Dis, 36(6):557-565(in Chinese).
- 孙继松, 雷蕾, 于波, 等, 2015. 近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 73(4):609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):609-623(in Chinese).
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):469-484(in Chinese).
- 王登炎, 周小兰, 刘静, 2010. 南亚高压的东西震荡对湖北省极端暴雨事件的影响分析[J]. 暴雨灾害, 29(2):148-152, 165. Wang D Y, Zhou X L, Liu J, 2010. Influences of vacillation of South Asia High on the event of extreme rainfall of Hubei Province[J]. Torren Rain Dis, 29(2):148-152, 165(in Chinese).
- 王苗, 郭品文, 邹昀, 等, 2012. 我国极端降水事件研究进展[J]. 气象科技, 40(1):79-86. Wang M, Guo P W, Wu Y, et al, 2012. Progresses in researches on extreme precipitation over China[J]. Meteor Sci Technol, 40(1):79-86(in Chinese).
- 王坚红, 黄维, 王群, 等, 2015. 雷达回波预测极端暴雨概率方法构建原理与应用研究[J]. 高原气象, 34(2):575-585. Wang J H, Huang W, Wang Q, et al, 2015. Construction and application of extreme rainstorm probability prediction based on radar echo base data[J]. Plateau Meteor, 34(2):575-585(in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017年广州“5.7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 肖逸祥, 杨康权, 俞小鼎, 等, 2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象, 43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 43(10):1165-1175(in Chinese).
- 余卫东, 柳俊高, 常军, 等, 2008. 1957—2005年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展, 4(2):78-83. Yu W D, Liu J G, Chang J, et al, 2008. Changes in extreme temperature and precipitation in Henan Province during 1957—2005[J]. Adv Clim Chang Res, 4(2):78-83(in Chinese).
- 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(9):1-10. Zhai P M, Pan X H, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th Century[J]. Acta Geograph Sin, 58(9):1-10(in Chinese).
- 张芳华, 陈涛, 杨舒楠, 等, 2014. 一次冬季暴雨过程中的锋生和条件对称不稳定分析[J]. 气象, 40(9):1048-1057. Zhang F H, Chen T, Yang S N, et al, 2014. Diagnosis of the frontogenesis and CSI features during a torrential rainfall event in winter[J]. Meteor Mon, 40(9):1048-1057(in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7.20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3):351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in north China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3):351-360(in Chinese).
- 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等, 2013. 北京“7.21”特大暴雨环流形势极端性客观分析[J]. 气象学报, 71(5):817-824. Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al, 2013. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 71(5):817-824(in Chinese).
- 周莉, 兰明才, 蔡荣辉, 等, 2018. 21世纪前期中长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析[J]. 气象学报, 76(1):47-61. Zhou L, Lan M C, Cai R H, et al, 2018. Projection and uncertainties of extreme precipitation over the Yangtze River valley in the early 21st century[J]. Acta Meteor Sin, 76(1):47-61(in Chinese).