

罗玲, 娄小芬, 傅良, 等, 2019. ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J]. 气象, 45(10):1382-1391. Luo L, Lou X F, Fu L, et al, 2019. Application of precipitation extreme forecast index from ECMWF in Typhoon Rainstorm in East China [J]. Meteor Mon, 45(10):1382-1391(in Chinese).

ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究^{*}

罗 玲 娄小芬 傅 良 钱 浩

浙江省气象台, 杭州 310007

提 要: 台风强降水易引发极端天气事件, 预报的难度和不确定性都很大。选取 2013—2017 年影响华东的 13 个台风个例, 研究 ECMWF 集合预报降水极端天气预报指数 (extreme forecast index, EFI) 与台风暴雨的统计关系。研究表明: EFI 降水指数对台风暴雨的预报具有一定的指示意义, 对不同时效选取不同的 EFI 阈值可以作为暴雨落区预报的参考依据。总体来看: EFI 增大, 发生强降水的可能性增大; 随着预报时效的增加, EFI 阈值逐渐减小。以 TS 评分最大为标准, 分别确立了不同时效、不同等级暴雨在华东区域的预报阈值。对于 24、48、72、96 h 时效的暴雨预报, EFI 阈值分别取 0.7/0.8、0.7、0.6、0.5 可以获得较高的 TS 评分及合理的预报偏差, 因此可将它们作为不同时效暴雨预报的参考阈值。EFI 与降水的气候百分位有较好的相关关系, EFI 值越大, 降水气候百分位值也越大。当 EFI 值较大时, 可参考相对应气候百分位的实况降水量来估测台风降水。极端天气预报指数对极端降水天气具有较好的识别能力, 可提前 3~5 d 提供极端降水信息。

关键词: 集合预报, 极端天气指数, 台风, 暴雨

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.005

Application of Precipitation Extreme Forecast Index from ECMWF in Typhoon Rainstorm in East China

LUO Ling LOU Xiaofen FU Liang QIAN Hao

Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017

Abstract: The typhoon heavy rainfall can easily induce an extreme weather event, and it is difficult to predict. In this study, we investigate the statistical relationship between the precipitation extreme forecast index (EFI) from ECMWF ensemble forecast system and the observed typhoon heavy rainfall with 13 typhoons that affected East China during 2013—2017. The results show that the EFI is a good indicator to predict the typhoon rainfall. Different EFI thresholds should be used as the reference for precipitation of rainstorm area. Overall, the possibility of heavy rainfall occurrence increases with the increase of EFI. The threshold of EFI gradually decreases when the forecast lead time increases. With the criteria of TS maximization, the EFI thresholds for different lead times and different storm levels are estimated in East China. Higher TS scores and reasonable BS scores are obtained when the thresholds are 0.7/0.8, 0.7, 0.6, 0.5 for rainstorm precipitation with lead time of 24, 48, 72, 96 h, respectively. Therefore, they can be used as EFI thresholds for different lead times. Significant positive correlation is found between the EFI and

^{*} 中国气象局关键技术发展专项(YBGJXM(2018)1B-06)、浙江省气象科技计划重点项目(2017ZD03)与中国气象局台风预报专家创新团队和浙江省智能网格预报团队共同资助。

2018 年 5 月 19 日收稿; 2019 年 5 月 29 日收修定稿

第一作者: 罗玲, 主要从事台风、暴雨等灾害性天气预报和研究. Email: 76847787@qq.com

the climatic percentile of precipitation. The larger precipitation percentile appears when the EFI increases. When the EFI is prominently large, the typhoon rainfall can be estimated with the corresponding climatic percentile of observed rainfall. The EFI is a good indicator for extreme rainfall, and can predict the situation 3—5 days in advance.

Key words: ensemble prediction, extreme forecast index, typhoon, rainstorm

引 言

我国东南沿海每年夏、秋季节经常遭受台风侵袭,特别是台风暴雨造成的洪涝等灾害影响严重。台风强降水易造成极端天气事件,不确定性大、预报难度大。极端降水事件一旦发生,往往给国民经济和人民生命财产造成重大损失,所以准确预报这类小概率高影响事件对开展决策气象服务、指导防灾减灾具有重要意义。在过去的十多年中,数值天气预报取得了迅速的发展,利用数值预报模式模拟分析暴雨、台风等极端天气成为可能,但由于大气是一个混沌系统,小概率极端天气事件的发展演变存在诸多不确定性,用单一数值天气模式预报其未来演变是不严谨的,对极端天气事件的预报预测仍然存在巨大的挑战(杜均和陈静,2010;陈法敬等,2011;任志杰等,2011)。自 20 世纪 90 年代国际上引入集合预报以来,不少研究成果表明,集合预报可以在一定程度上对预报不确定性进行定量的预估,从而使数值模式对极端天气的预报能力不断提高(陈静等,2005;董全等,2016;陶亦为等,2017;Petroliagis and Pinson, 2014)。

为了对台风暴雨等极端事件进行更准确的预报和预警,从集合预报中提炼极端事件发生与否的信息,Lalaurette(2003)发展了极端预报指数(extreme forecast index,EFI)。假设如果集合预报的某一事件相对于“模式气候”为极端事件,那么与之对应的实况天气相对于真实气候也为极端事件。基于这一假设,通过积分集合预报要素预报累积概率分布函数和这一要素“模式气候”累积概率分布函数之间的差,可以表征集合预报概率函数相对于“模式气候”概率函数的“偏移”情况。由于运用了相同模式系统的回算资料,EFI 较好地剔除了集合预报的系统性偏差,同时所指示的极端事件为相对于当月或当季节气候态的极端事件,因此对极端事件的预报具有更好的针对性,在极端天气的预报中得到了广泛的应用。

夏凡和陈静(2012)构建了基于 T213 模式的

EFI,并对 2008 年 1 月极端低温的预报效果进行检验,得出极端低温预警的 EFI 阈值为-0.3,可提前 3~5 d 对极端低温事件进行预警。汪骄阳等(2014)运用空间扩展的方式来增加模式气候样本数,其生成的模式气候累积概率分布能提高 EPFI 对极端强降水的识别技巧。刘琳等(2013)运用 T213 集合预报模式构建了极端降水预报指数,该指数可提前 3~7d 提供极端降水信息。朱鹏飞等(2015)评估了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的降水 EFI 和实况暴雨、降水气候距平的统计关系,发现降水 EFI 大值区和强降水具有较好对应关系。

通过对 EFI 降水指数的日常应用,发现其对暴雨落区和强度的预报具有一定指示意义。但以往对暴雨 EFI 阈值的研究没有针对不同类型的降水分别统计,其提炼的暴雨 EFI 阈值在华东台风降水的预报中并不适用,往往容易造成暴雨预警范围偏大、空报率偏高。7—9 月华东地区的暴雨主要是由台风等东风带系统引起的,台风暴雨在总暴雨中的占比可达 50%~70%,且降水强度越强,台风暴雨的占比越大(王咏梅等,2008;刘通易等,2013),因此有必要针对台风暴雨研究强降水与 EFI 之间的统计关系,便于预报员在使用 EFI 订正台风强降水落区时有一个参考阈值。本文以华东区作为评估区域,对 2013—2017 年台风降水量及 ECMWF 集合预报 EFI 指数开展应用效果评估,分析台风暴雨的 EFI 预警指标,以期台风降水 EFI 预报产品在业务中的应用提供一定参考依据。

1 资料与方法

1.1 EFI 算法

ECMWF 所用的 EFI 为累积的“集合预报的概率分布函数”同“模式气候的概率分布函数”之差(Zsótér,2006),其计算公式为

$$EFI_{AD} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{p - F_f(p)}{\sqrt{p(1-p)}} dp \quad (1)$$

以式(1)来表征 EPS 概率函数相对于“模式气候”概

率函数的“偏移”情况。式中, EFI_{AD} 是极端预报指数值, p 是为某一事件在“模式气候”中的概率, $F_j(p)$ 为某一时刻的集合预报中小于等于“模式气候” p 分位数的事件的概率, 权重 $1/\sqrt{p(1-p)}$ 会使得 EFI_{AD} 对两端的极端值更敏感。

对于降水, 需要剔除无降水事件的影响, 积分应该从 p_1 (无降水日占总日数的比例, 即有降水的气候概率) 开始, 将 EFI 归一化得到:

$$EFI = \frac{2}{\pi - 2\theta_1 + \sin 2\theta_1} \int_{p_1}^1 \frac{p - F_p}{\sqrt{p(1-p)}} dp \quad (2)$$

式中 $\theta_1 = \arcsin \sqrt{p_1}$, 模式气候的累积概率分布函数根据历史同期的模式预报结果计算得到的。图 1 为极端天气指数的示意图, EFI 用图 1b 中阴影面积的大小表示, 即模式气候和集合预报的累积概率分布函数(CDF)线所围成的面积。两个概率函数越接近, 即 EFI 的值越接近于 0, 表示 EPS 的概率函数越接近历史概率, 即发生极端事件的可能性很小; 反之, 两个概率函数之间的差异越大, 则 EFI 的值约接近 1 或 -1, 表示发生极端事件的概率越高。EFI 的优点在于能自动消除模式偏差的潜在影响, 且直接使用概率计算, 其绝对值大小不但反映了事件的异常度(与模式气候平均值的距离), 也包含了预报的可信度信息(集合预报概率密度函数峰值分布的宽窄和高低)。

1.2 资料和方法说明

文中使用的降水 EFI 资料为欧洲中心集合预报提供的 2013—2017 年 13 个台风影响期间 20 和 08 时(北京时)起报的逐日降水极端天气指数。评估中使用的观测资料为对应时段华东地区($23^\circ \sim$

$33^\circ N$, $114^\circ \sim 123^\circ E$) 586 个站 08—08 时实况降水资料, 台风暴雨日共计 35 d。降水气候平均值为浙江区域 67 个基准站 1980—2016 年每日 08—08 时降水资料。先采用双线性插值法将 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的格点 EFI 插值到站点, 再分别以不同阈值($EFI = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.0$) 代表大雨、暴雨、大暴雨预报落区, 分别计算暴雨预报的 TS、ETS 评分和预报偏差(Bias)。最后以 TS 评分最高为标准确立不同时效、不同等级暴雨的预报临界阈值。

集合预报资料时间长度较短, 浙江省从 2013 年才开始接收并储存数据, 而近年影响华东的台风个数相对较少, 如图 2 所示, 本文选取 13 个台风个例(1307 苏力、1312 潭美、1323 菲特、1410 麦德姆、1509 灿鸿、1513 苏迪罗、1521 杜鹃、1601 尼伯特、1614 莫兰蒂、1617 鲇鱼、1709 纳沙、1710 海棠、1720 卡努), 除了 2014 年外, 每年 3 个台风。从影响台风的路径和登陆点看, 除了 1509 灿鸿和 1720 卡努外, 都在福建沿海登陆。其中, “卡努”虽然登陆广东西部沿海, 距离华东较远, 但其台风倒槽和冷空气结合, 在浙江沿海地区造成了暴雨、大暴雨天气, 且在舟山、宁波地区 9 个站点出现了 400 mm 以上的极端降水, 因此将其选入作为影响华东的台风个例。

由于 EFI 的“模式气候”构建是运用过去 18 年预报的每日前后 15 d 回算资料, 其极端性是相对于历史同期而言。本文计算极端天气百分位数的历史资料也采用类似的方法构建(董全等, 2017), 按照 WMO 对极端天气的定义, 选取 1980—2016 年的资料, 每日前后各 15 d, 一共 $31 d \times 36 a = 1116$ 个样本构建每日的气候样本, 通过这一样本计算每日的相对于历史同期的气候百分位数。将第 95 个百分位

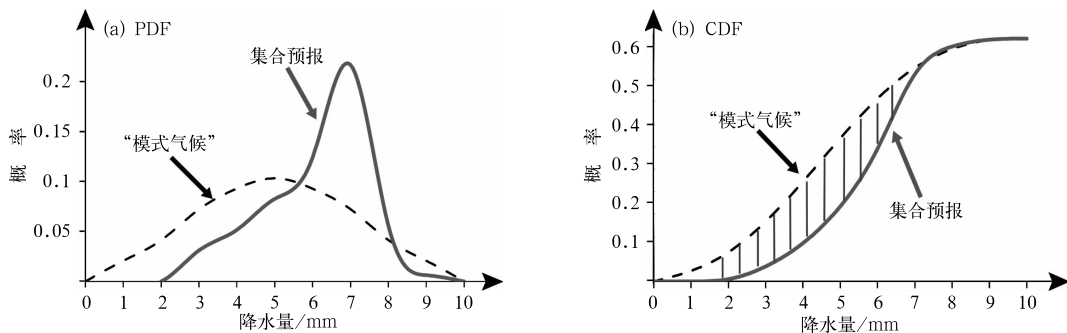


图 1 极端天气预报指数(EFI)示意图: 集合预报的概率分布(实线)与模式气候概率分布(虚线)比较
(a) 概率密度函数(PDF), (b) 累积概率分布函数(CDF, 其中阴影面积表示 EFI)

Fig. 1 A schematic diagram of EFI : comparison between ensemble-based probabilistic distribution (solid line) and model climate-based probabilistic distribution (dashed line)

(a) probability density function (PDF), (b) cumulative probability distribution function (CDF)

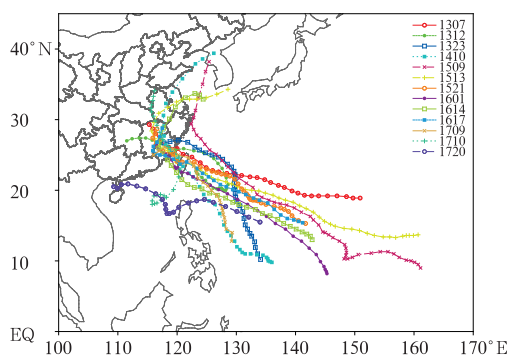


图 2 台风个例路径图

Fig. 2 The path chart of typhoon cases

的日降水量定义为气候平均极端降水阈值,当该测站某日降水量超过了该站极端降水的阈值,就认为该日出现了极端降水事件(翟盘茂和潘晓华,2003)。

2 台风降水 EFI 阈值研究

2.1 暴雨 TS 及 Bias 评分结果

由于降水 EFI 代表了当前预报和“模式气候”的偏移情况,当两者差异正值越大,即两者分布曲线间面积越大,降水量级越大,达到一定程度后就可以判断为极端强降水。而预报员迫切需要明确极端降水天气预报指数取哪一个值,可以发出极端强降水预警信号,本节重点研究极端降水预报指数阈值的确定方法。

以不同降水 EFI 阈值分别代表大雨、暴雨和大暴雨预报落区,计算降水 TS、ETS 及 Bias 评分,把不同时效中评分最高时对应的 EFI 值作为该时效不同等级降水预报的 EFI 临界阈值,如:以 $EFI > 0.8$ 的区域作为暴雨落区,计算暴雨预报的 TS 评分和预报偏差。图 3 给出了不同预报时效 EFI 的降水 TS 评分和 Bias 评分。在 0~24 h 预报时效,对于大雨量级的预报,当 $EFI=0.6$ 时 TS 评分最高,达到 0.52,ETS 评分(图略)也在 $EFI=0.6$ 时达到最高,预报偏差在 1 左右,在合理误差之内。当逐日降水 EFI 值增加时,预报偏差虽然逐渐减小,但 TS 评分呈现下降趋势;反之,预报偏差迅速增加,空报率增加,TS 评分也同时下降。同理,对于暴雨预报, $EFI=0.8$ 时 TS 评分最高,达到 0.4,但同时发现 $EFI=0.7$ 时 TS 评分也接近 0.4,而 Bias 评分更接近 1,因此将 0.7 或 0.8 作为 24 h 暴雨的预报阈值都

可以。对于大暴雨预报, $EFI=0.8$ 或 0.9 时 TS 评分最高,预报偏差在 0.5~1。因此可以将 0.6、0.7/0.8、0.8/0.9 分别作为 24 h 大雨、暴雨、大暴雨预报的 EFI 阈值,这样就不仅获得较高的 TS 评分,预报偏差也在合理范围内。从图 3b、3c、3d 不难发现,随着预报时效的延长,对于相同量级降水 EFI 阈值逐渐减小:24、48、72、96 h 时效的暴雨的 EFI 阈值分别为 0.7/0.8、0.7、0.6、0.5,大暴雨的 EFI 阈值分别为 0.8/0.9、0.8、0.7、0.6。

以上主要是针对 EFI 对不同级别降水的预报指示意义上进行分析,为了更全面地了解 EFI 与降水量的对应关系,我们结合降水量和 EFI 的箱线图(图 4)分析 EFI 与降水量的统计特征。

从图 4 可以发现,随着逐日 EFI 值的增加,所对应的降水量总体呈现增加的趋势。如 24 h 预报,当 $EFI=0.9$ 时,降水量的中位值达到了 60 mm,75% 以上站点降水量超过 30 mm,25% 以上的站点降水量超过了 75 mm。随着逐日 EFI 值的降低,发生强降水的可能性也逐渐降低,当 EFI 降低到 0.6 时,降水量中位值仅为 25 mm。当预报时效不断增加至 96 h,在 $EFI=0.9$ 时,降水量的中位值为 50 mm,相对 24 h 略有下降,但对应的降水量发散度明显变大,尤其是最大值从 170 mm 增加到 220 mm。因此由图 4b、4c、4d 分析可以发现,随着预报时效的逐渐增加,相同的 EFI 所对应的实况降水量发散度加大,即 EFI 与降水量之间对应关系的不确定性增大,EFI 对极端降水的识别技巧降低。

综上所述,EFI 值的大小与降水的强度有一定对应关系:随着 EFI 值的增加,强降水发生的可能性也在不断增大;对逐日降水 EFI 大值区和降水落区 TS 评分表明,在最优 TS 评分条件下,EFI 阈值随着降水量级增加而增大,随着预报时效增加而降低。对于暴雨、大暴雨 24、48、72、96 h 时效的预报,EFI 阈值分别取 0.7/0.8、0.7、0.6、0.5 和 0.8/0.9、0.8、0.7、0.6 可以获得较高的 TS 评分及合理的预报偏差,因此可将它们作为不同时效台风暴雨预报的 EFI 阈值。

2.2 各 EFI 阈值对应暴雨发生频次

图 5 给出了 EFI 阈值在 0~1.0 暴雨发生的频次,0.1 的点对应 EFI 值 0~0.1,以此类推。

对于 24 h 预报,EFI 值取 0.8 时暴雨发生的频

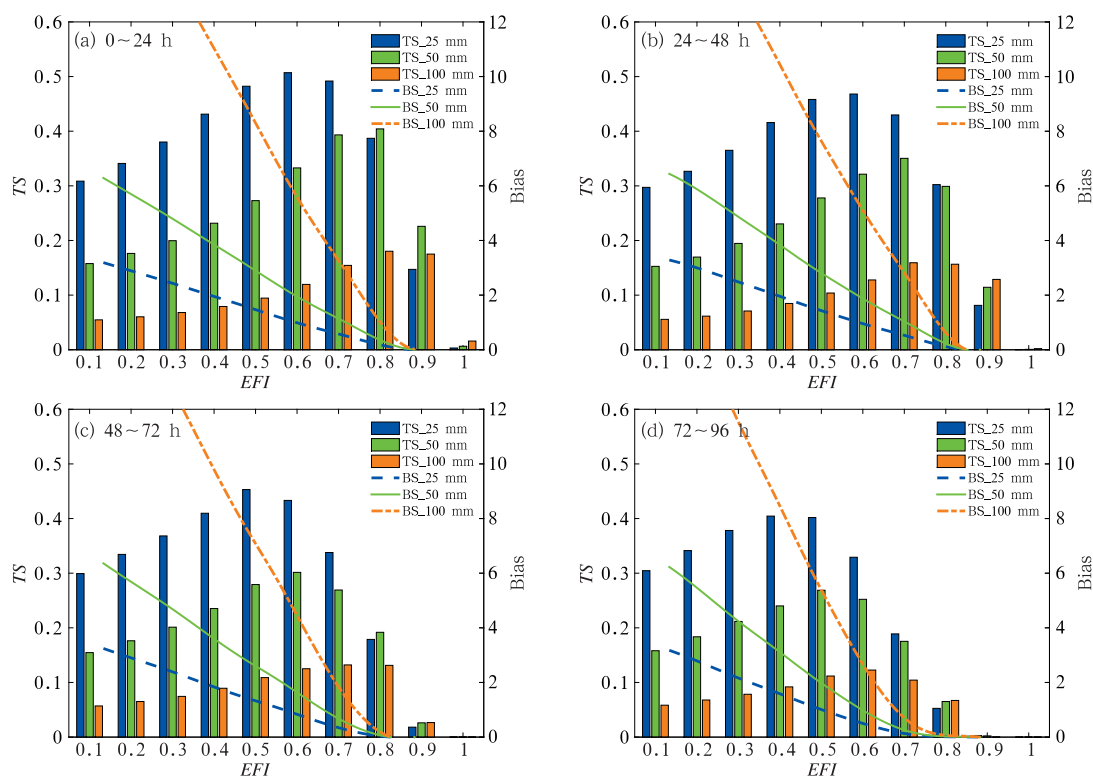


图 3 不同预报时效逐日降水 EFI 对应的大雨、暴雨、大暴雨的 TS 评分(柱状)、Bias 评分(线条)

Fig. 3 The TS (bar) and Bias (line) with the different 24 h EFI thresholds for heavy rain, rainstorm and torrential rainstorm at lead time of (a) 0—24 h, (b) 24—48 h, (c) 48—72 h, (d) 72—96 h

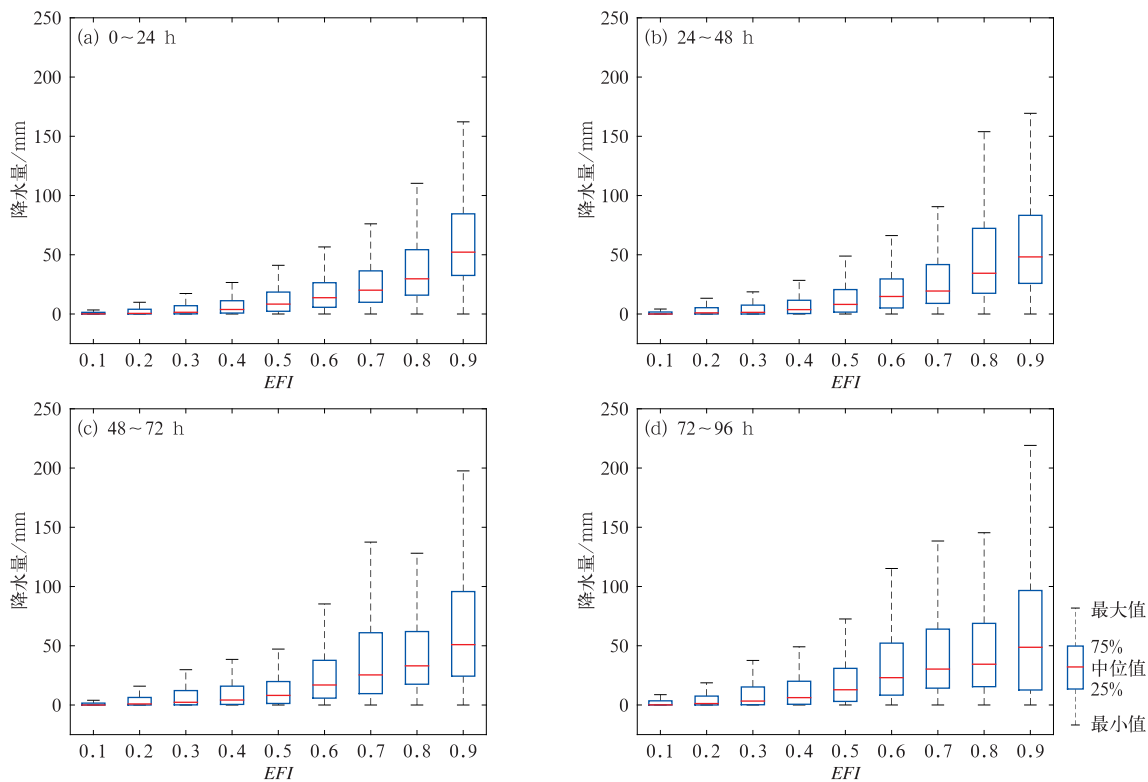


图 4 不同逐日降水 EFI 对应的降水量箱线图

Fig. 4 Boxplots of EFI index for daily precipitation at different lead time of (a) 0—24 h, (b) 24—48 h, (c) 48—72 h, (d) 72—96 h

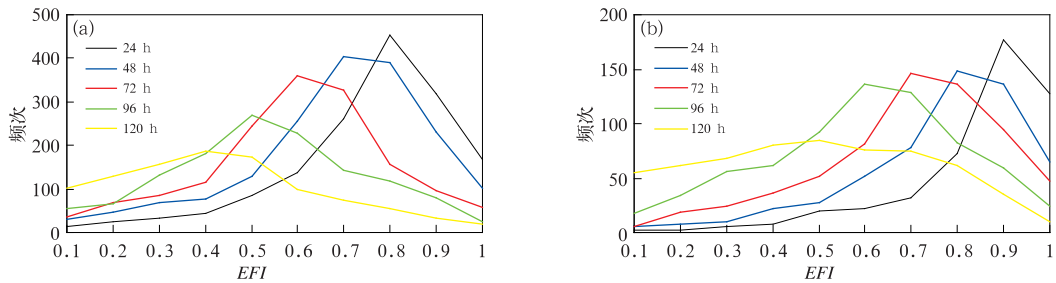


图 5 各 EFI 阈值对应暴雨(a)、大暴雨(b)发生的频次

Fig. 5 The frequency for EFI thresholds of rainstorm (a) and torrential rainstorm (b)

次最大,达到 453,且当 $EFI < 0.7$ 时暴雨发生的站次小于 100,在总的暴雨发生次数中占比很小,因此对 24 h 暴雨预报的 EFI 取值应该大于 0.7,而随着时效的增加,暴雨站次出现频率最高时对应的 EFI 值也越来越小,而且 EFI 取较小值时也会出现较大的暴雨站次,表明随着预报时效的增加,EFI 阈值也应该越来越小,较小的 EFI 值也可能对应实况强降水,EFI 对极端降水的识别能力降低。

图 5b 为 EFI 阈值在 0~1.0 大暴雨发生的频率。对于 24 h 预报,EFI 值取 0.9 时暴雨发生的频率最大,达到 152 站次,随着 EFI 值的减小,暴雨发生的站次迅速减小。然而随着预报时效的推移,暴雨发生的站次最多时对应的 EFI 值逐渐减小,当预报时效达到 120 h 时,不同的 EFI 取值区间对应的暴雨站次变化很小,说明 EFI 阈值在预报时效较长时,取值要减小。

综合 TS、ETS、Bias 评分的结果和各 EFI 区间暴雨频次的分析,华东地区台风暴雨预报根据预报时效的不同,确定不同的阈值,总的来说 EFI 阈值随着降水量的增加而增加,随预报时效的增加而减小(表 1)。

2.3 实例验证

按照以上研究结果,以 2015 年 8 月 8 日为例,使用 $EFI = 0.7, 0.8$ 作为发布暴雨、大暴雨预警信号的阈值,分析 EFI 对极端降水 36 h 时效的识别效果。

图 6 为 2015 年 8 月 7 日 20 时起报的 36 h 极端强降水预报指数与暴雨、大暴雨分布,阴影区域为极端降水天气预报指数判断有暴雨、大暴雨发生的区域。图 6a 将 $EFI \geq 0.7$ 和实况暴雨区进行叠加,可以发现除了在福建南部有一些空报以外, $EFI \geq 0.7$ 的范围和暴雨的落区非常接近;对于大暴雨情况也类似(图 6b),除了在浙江台州地区局部漏报、福建

表 1 08 时和 20 时起报的不同预报时效的暴雨和大暴雨 EFI 阈值

Table 1 The EFI thresholds of rainstorm and torrential rainstorm at different lead times starttime from 08:00 and 20:00 BT

时效/h	暴雨 EFI 阈值	大暴雨 EFI 阈值
24	0.7/0.8	0.8/0.9
48	0.7	0.8
72	0.6	0.7
96	0.5	0.6
120	0.5	0.6
36	0.7	0.8
60	0.7	0.7
84	0.6	0.7
108	0.5	0.6
132	0.5	0.5

中部沿海部分站点空报以外,将 $EFI \geq 0.8$ 作为 36 h 大暴雨的预警区域还是具有较高的参考价值。

图 6c、6d 分别为集合平均的暴雨和大暴雨与实况的对比图,可以发现对于不同量级的暴雨,集合平均的预报在浙南地区的漏报率比 EFI 阈值更高一些。从 TS、ETS 评分结果来看(表 2),用 EFI 阈值发布暴雨预报相比于集合平均的预报其 TS、ETS 评分都有不同程度的提高,尤其对于大暴雨优势更明显一些,TS 评分从 0.41 增加到 0.48。因此用 EFI 阈值发布暴雨预警相比集合平均具有一定的优势,在业务预报中可以在一定程度上弥补集合平均对于大量级降水预报偏弱的不足。

3 EFI 与降水气候百分位之间的统计关系研究

EFI 运用了过去多年历史同期的模式回算资料作为“模式气候”,如果模式气候与实况历史气候具有很强的相关性,那么 EFI 与相对于历史同期的事件的百分位之间将会存在较好的对应关系(董全等,

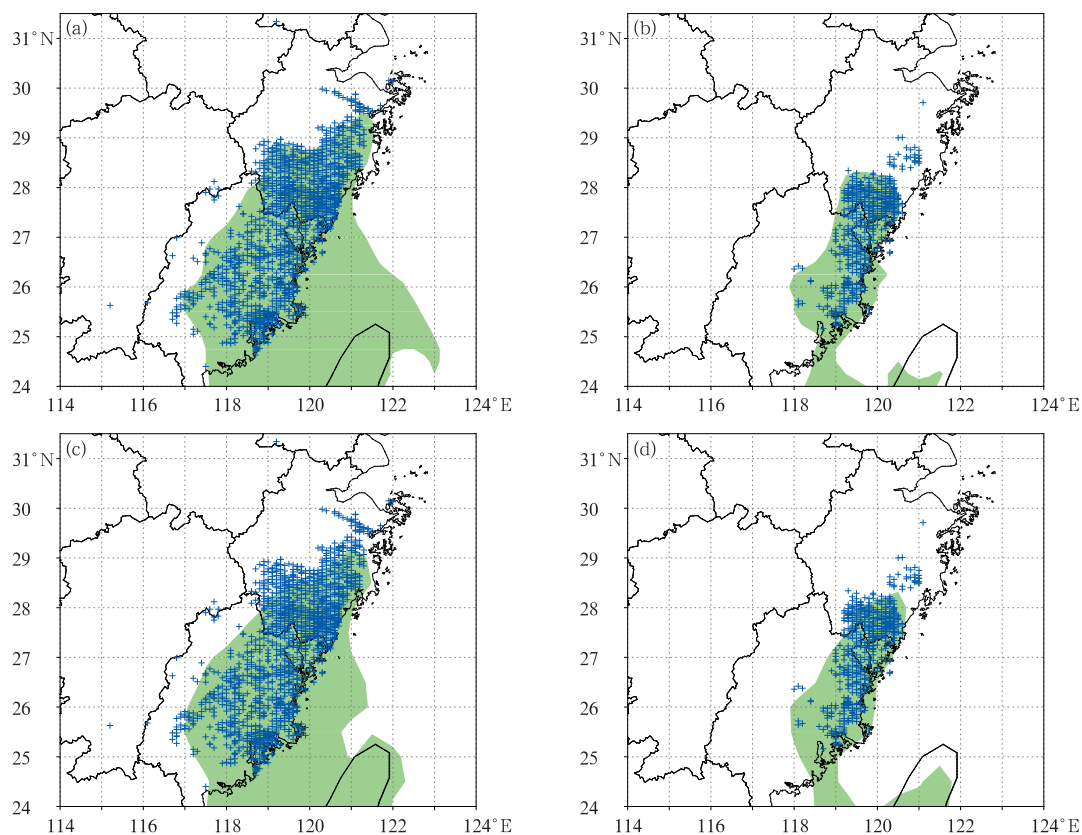


图 6 2015 年 8 月 8 日 08 时至 9 日 08 时不同等级实况降雨(叉号)及 EFI 值(填色,7 日 20 时起报)分布图

(a)降水量 ≥ 50 mm 及 $EFI \geq 0.7$, (b)降水量 ≥ 100 mm 及 $EFI \geq 0.8$.
(c)实况与集合平均暴雨区(≥ 50 mm), (d)实况与集合平均大暴雨区(≥ 100 mm)

Fig. 6 Distribution of different levels of rainfall (cross) and EFI (shaded) from 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9 August 2015

(a) rainfall ≥ 50 mm and $EFI \geq 0.7$, (b) rainfall ≥ 100 mm and $EFI \geq 0.8$,
(c) rainstorm area of observation and ensemble averaged forecast (≥ 50 mm),
(d) torrential rainstorm area of observation and ensemble averaged forecast (≥ 100 mm)

表 2 EFI 暴雨阈值与集合平均降水量的 TS、ETS

Table 2 The TS, ETS of rainstorm of EFI thresholds and ensemble average

	暴雨(≥ 50 mm)		大暴雨(≥ 100 mm)	
	EFI	集合平均	EFI	集合平均
TS	0.59	0.56	0.48	0.41
ETS	0.55	0.52	0.45	0.39

2017)。

图 7 给出了 13 个台风在影响浙江期间降水 EFI 值与历史气候百分位之间的关系,可以看到,EFI 与降水的气候百分位有着一定的相关关系,两者的相关系数在 24 h 时效达到了 0.63,并且 EFI 值随降水气候百分位的增大呈现线性增长的趋势,

当降水气候百分位越大时,预报的 EFI 总体越大,且降水的气候百分位值一般大于 EFI 值。而在 48 h 时效两者的相关系数为 0.59,线性关系略差于 24 h,但 EFI 值随气候百分位逐渐增加的趋势是一致的。值得注意的是部分 EFI 值甚至小于 0,而有部分大的降水气候百分位点对应较小的 EFI 值,这可能是由于雨带位置预报的偏差或对强降水漏报造成的。计算 EFI 的公式假设模式极端事件和实况极端事件具有很强的相关性,当模式出现较大的误差时,两者的相关性显著下降甚至不相关,EFI 的预报技巧相应会较小,因此 EFI 值与气候百分位较好的对应关系只有在降水预报效果较好时才成立,降水预报落区或强度偏差较大时,EFI 对强降水的预报参考意义会显著下降。本文由于资料的限制,不

能选取预报效果较好的个例来研究 EFI 与降水量之间的统计关系,随着集合预报台风个例的增加,选取预报和实况相关系数较高的个例可以提高 EFI 对台风强降水的识别技巧。

从降水 EFI 值与气候百分位的箱线图(图 8)也可以发现,随着 EFI 值的增大发生极端降水事件的可能性也随之增加。对于 24 h 预报而言,当 EFI 值达到 0.8 时,气候百分位的中位值基本达到了 0.95, $EFI=0.9$ 时,气候百分位基本达到了 0.99,接近或超过历史同期的极值。对于 48 h,相同的 EFI 值对应的气候百分位略有降低。因此,当 $EFI \geq 0.8$ 时可以判断极端降水事件发生可能性较大,并可参考相应气候百分位的实况降水值对台风降水量预报进行订正。

受台风苏迪罗影响,2015 年 8 日 08 时至 9 日

08 时浙南和东南沿海地区出现了暴雨、大暴雨天气。浙南部分地区累积雨量超过了 200 mm,最大的为文成(不含中尺度站),达到了 274.3 mm,日降雨量达到或超过历史同期极值的有 10 个站点,具有较明显的极端天气特征。图 9 为此次降水过程的历史同期百分位及不同时效 EFI 值对比图,从日降水量的极端性来看,浙中南部到浙南地区出现高于历史同期 95% 分位数的极端降水,温州、丽水部分站点日降水量占的历史同期分位数 $\geq 99\%$,突破历史同期极值(图 9a)。从 24 h(图 9b)时效预报的降水 EFI 来看,极端天气预报产品对此次强降水事件有较好的预报能力, $EFI \geq 0.8$ 预报落区与极端事件(历史同期百分位 $\geq 95\%$)出现的落区也基本一致,主要位于浙南地区;随着预报时效的增加,相同的实况历史百分位数对应的 EFI 值逐渐减小,在 120 h

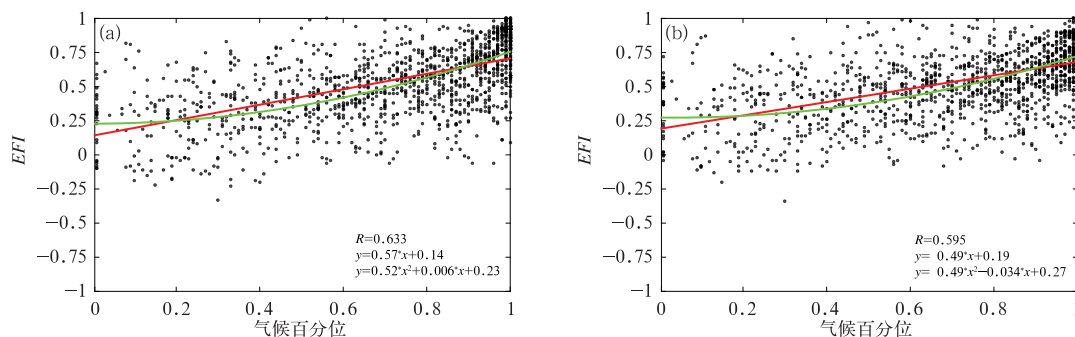


图 7 2013—2017 年台风影响期间,24 h(a)和 48 h(b)浙江 67 站降水的气候百分位与 EFI 值的散点图
(红线为线性拟合,绿线为二次拟合)

Fig. 7 Scatter plots of 24 h (a) and 48 h (b) climatic percentile and precipitation EFI for 67 stations in Zhejiang during the typhoon processes from 2013 to 2017
(Red and green lines indicate the linear and 2nd fitting curves)

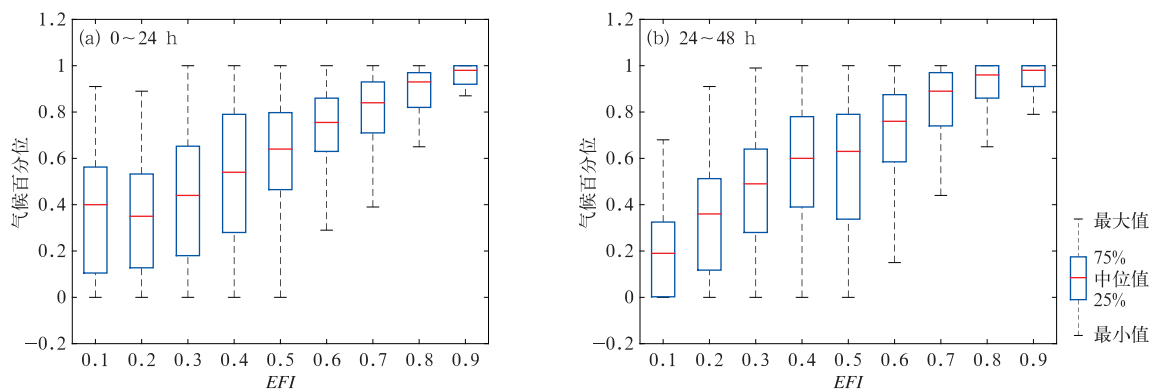


图 8 不同逐日降水 EFI 对应的气候百分位统计图

(a) 0~24 h, (b) 24~48 h

Fig. 8 Boxplots of precipitation EFI thresholds for climatic percentile at lead time of

(a) 0—24 h, (b) 24—48 h

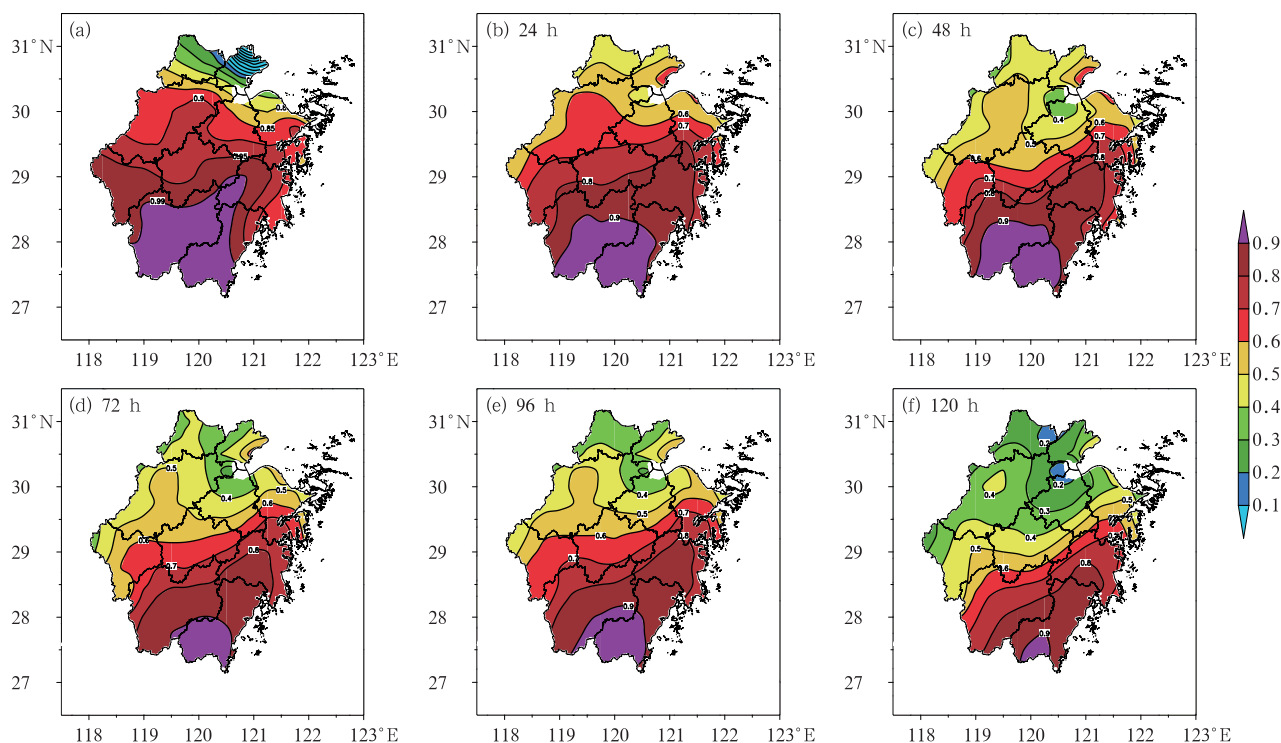


图 9 降水占历史同期百分位(a)与 24~120 h 预报时效(b~f)EFI 值

Fig. 9 The precipitation percentile according to climate records (a) and EFI of different lead times (b~f)

预报时效 $EFI \geq 0.6$ 的区域对应了实况强降水,对极端天气依然有较好的指示意义。由此可见,极端天气预报指数对极端降水天气具有较好的识别能力,可提前 3~5 d 发出极端降水预警信号。随着预报时效从 24 h 的延长,极端天气预报指数的预报技巧是逐渐降低的。

4 结论和讨论

台风暴雨易引发极端天气事件,预报的难度和不确定性都很大。本文选取 2013—2017 年影响华东的 13 个台风个例,研究 ECMWF 集合预报的 EFI 降水指数与台风暴雨的统计关系。研究表明:EFI 对台风暴雨的预报具有一定的指示意义,对不同时效选取不同的 EFI 阈值可以作为暴雨落区预报的参考依据。

(1) 由于降水 EFI 代表了当前预报和“模式气候”的距平,因此 EFI 值与降水量有较好的对应关系,通过分析发现随着 EFI 值的增加,对应的实况降水量也逐渐增加;随预报时效的延长,EFI 阈值有减小的趋势,也就是说对长时效的暴雨落区预报,应该选取较小的 EFI 阈值。

(2) 以不同降水 EFI 阈值区域代表暴雨、大暴雨预报落区,再分别计算不同时效预报的 TS、Bias 评分,结果表明:对于 24、48、72、96 h 时效的暴雨、大暴雨预报,EFI 阈值分别取 0.7/0.8、0.7/0.6、0.5 和 0.8/0.9、0.8/0.7、0.6 可以获得较高的 TS 评分及合理的预报偏差,因此可将它们作为不同时效暴雨预报的 EFI 阈值。实例验证表明:利用 TS 评分最大为标准确定的 EFI 阈值发布暴雨预警对台风强降水落区有较好的识别能力,相比集合平均的预报具有一定优势。

(3) EFI 运用了过去多年历史同期的模式回算资料作为“模式气候”,因此与降水的气候百分位有较好的相关关系,且随着降水气候百分位的增加 EFI 值逐渐呈现出增加的趋势。当 EFI 值较高时(如 24 h 预报 $EFI \geq 0.8$),可参考相应气候百分位的实况降水值对台风降水量预报进行订正。

(4) 极端降水天气预报指数可以充分利用集合降水累积概率密度分布的尾端信息,为极端强台风降水提供科学合理的预报。极端天气预报指数对台风极端降水天气具有较好的识别能力,可提前 3~5 d 发出极端降水指示信号。随着预报时效的延长,极端天气预报指数的识别能力是逐渐降低的。

由于资料时长有限,有集合预报资料以来影响华东的台风个例不多,所选的个例包含秋季台风,由于受较多系统的影响,模式对秋季台风降水的预报能力不足,特别是台风与冷空气结合时降水偏差较大,导致 EFI 的预报技巧降低,影响了所得结论的代表性。在今后的工作中如能选择预报与实况降水相关性较好的个例,并分季节进行研究,可以获得更有价值的结论。

参考文献

- 陈法敬, 矫梅燕, 陈静, 2011. 一种温度集合预报产品释用方法的初步研究[J]. 气象, 37(1): 14-20. Chen F J, Jiao M Y, Chen J, 2011. A new scheme of calibration of ensemble forecast products based on Bayesian processor of output and its study results for temperature prediction[J]. Meteor Mon, 37(1): 14-20(in Chinese).
- 陈静, 薛纪善, 颜宏, 2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究[J]. 大气科学, 29(5): 717-726. Chen J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5): 717-726(in Chinese).
- 董全, 代刊, 陶亦为, 等, 2017. 基于 ECMWF 集合预报的极端天气预报产品应用和检验[J]. 气象, 43(9): 1095-1109. Dong Q, Dai K, Tao Y W, et al, 2017. Application and verification of extreme weather forecast products of ECMWF ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 43(9): 1095-1109(in Chinese).
- 董全, 金荣花, 代刊, 等, 2016. ECMWF 集合预报和确定性预报对淮河流域暴雨预报的对比分析[J]. 气象, 42(9): 1146-1153. Dong Q, Jin R H, Dai K, et al, 2016. Comparison between ECMWF ensemble and deterministic forecast for heavy rainfall in the Huaihe River basin of China[J]. Meteor Mon, 42(9): 1146-1153(in Chinese).
- 杜钧, 陈静, 2010. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 36(11): 1-11. Du J, Chen J, 2010. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts-ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction[J]. Meteor Mon, 36(11): 1-11(in Chinese).
- 刘琳, 陈静, 程龙, 等, 2013. 基于集合预报的中国极端强降水预报方法研究[J]. 气象学报, 71(5): 853-866. Liu L, Chen J, Cheng L, 2013. Study of the ensemble-based forecast of extremely heavy rainfalls in China: Experiments for July 2011 cases[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 853-866(in Chinese).
- 刘通易, 吴立广, 张娇艳, 等, 2013. 1965—2010 年 7—9 月影响中国的热带气旋降水变化趋势分析[J]. 气象学报, 71(1): 63-75. Lin T Y, Wu L G, Zhang J Y, et al, 2013. Analysis of tropical cyclone precipitation changes in China in July, September during 1965—2010[J]. Acta Meteor Sin, 71(1): 63-75(in Chinese).
- 任志杰, 陈静, 田华, 2011. T213 全球集合预报系统物理过程随机扰动方法研究[J]. 气象, 37(9): 1049-1059. Ren Z J, Chen J, Tian H, 2011. Research on T213 ensemble prediction system stochastic physics perturbation[J]. Meteor Mon, 37(9): 1049-1059(in Chinese).
- 陶亦为, 代刊, 董全, 2017. 2016 年 1 月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J]. 气象, 43(10): 1176-1185. Tao Y W, Dai K, Dong Q, 2017. Extreme analysis and ensemble prediction verification on cold wave process in January 2016[J]. Meteor Mon, 43(10): 1176-1185(in Chinese).
- 汪娇阳, 陈静, 刘琳, 等, 2014. 极端降水天气预报指数对气候累积概率分布敏感性研究[J]. 暴雨灾害, 33(4): 313-319. Wang J Y, Chen J, Liu L, et al, 2014. The sensitivity of the extreme precipitation forecast index on climatological cumulative probability distribution[J]. Torr Rain Dis, 33(4): 313-319(in Chinese).
- 王咏梅, 任福民, 李维京, 等, 2008. 中国台风降水的气候特征[J]. 热带气象学报, 24(3): 233-238. Wang Y M, Ren F M, Li W J, et al, 2008. Climatic characteristics of typhoon precipitation over China[J]. J Trop Meteor, 24(3): 233-238(in Chinese).
- 夏凡, 陈静, 2012. 基于 T213 集合预报的极端天气预报指数及温度预报应用试验[J]. 气象, 38(12): 1492-1501. Xia F, Chen J, 2012. The research of extreme forecast index based on the T213 ensemble forecast and the experiment in predicting temperature[J]. Meteor Mon, 38(12): 1492-1501(in Chinese).
- 翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等, 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 631-640(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(S1): 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 Geogr Sin, 58(S1): 1-10(in Chinese).
- 朱鹏飞, 邱学兴, 王东勇, 等, 2015. ECMWF 降水极端天气指数在安徽省的应用评估[J]. 暴雨灾害, 34(4): 316-323. Zhu P F, Qiu X X, Wang D Y, et al, 2015. Assessment and applications of precipitation extreme forecast index (EFI) from ECMWF to Anhui Province[J]. Torr Rain Dis, 34(4): 316-323(in Chinese).
- Lalauette F, 2003. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 129(594): 3037-3057.
- Petroliagis T I, Pinson P, 2014. Early warnings of extreme winds using the ECMWF extreme forecast index[J]. Meteor Appl, 21(2): 171-185.
- Ren F M, Gleason B, Easterling D, 2002. Typhoon impacts on China's precipitation during 1957—1996[J]. Adv Atmos Sci, 19(5): 943-952.
- Zsótér E, 2006. Recent developments in extreme weather forecasting [R]. ECMWF Newsletter No. 107, Reading United Kingdom: ECMWF: 8-17.