

基于降水极端预报指数的福建台风极端降水预报研究*

官晓军^{1,2,3} 潘宁^{1,4} 黄待静⁵ 王琦⁶ 李玲³
GUAN Xiaojun^{1,2,3} PAN Ning^{1,4} HUANG Daijing⁵ WANG Qi⁶ LI Ling³

1. 福建省灾害天气重点实验室, 福州, 350001
2. 武夷山国家气候观象台, 武夷山, 354300
3. 福建省气象服务中心, 福州, 350001
4. 福建省气象台, 福州, 350001
5. 南平市气象台, 南平, 353000
6. 国家气象信息中心, 北京, 100081

1. *Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001, China*
2. *Wuyishan National Climatological Observatory, Wuyishan 354300, China*
3. *Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou 350001, China*
4. *Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001, China*
5. *Nanping Meteorological Observatory, Nanping 353000, China*
6. *National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China*

2020-07-07 收稿, 2021-01-11 改回.

官晓军, 潘宁, 黄待静, 王琦, 李玲. 2021. 基于降水极端预报指数的福建台风极端降水预报研究. 气象学报, 79(3): 414-427

Guan Xiaojun, Pan Ning, Huang Daijing, Wang Qi, Li Ling. 2021. A study of typhoon extreme precipitation forecast in Fujian based on precipitation extreme forecast index. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):414-427

Abstract The Extreme Forecast Index (EFI) is an indication of potential extreme weather event based on measurement of the differences between the ensemble prediction and the model climate. By using 24 h total precipitation EFI product from the ECMWF ensemble prediction system, an objective method of EFI threshold is developed to predict extreme precipitation events in Fujian province caused by tropical cyclones (TCs). For individual national synoptic weather station, its daily TC rainfall observation exceeding the 95th percentile of its climatological ones from 1961 to 2017, used as the extreme threshold, is defined as TC extreme precipitation event. The EFI threshold at each lead time up to 5 d for TC extreme precipitation at every station is defined by a minimum threshold method, which takes the minimum value as the threshold after removing the anomalous values (outliers and negative values of EFI forecast in this study) from the EFI box plot drawn with the EFI forecasts when the TC extreme precipitation events occurred during the period from August 2015 to December 2018. Experiments have been done by applying the EFI thresholds to reforecast and forecast TC extreme precipitation events in Fujian province from August 2015 to December 2017 and in 2018, respectively, and the performances are evaluated based on the threat score (TS), false alarm ratio and miss rate. The results are as follows. The TC extreme precipitation threshold gradually reduces from coastal areas to inland areas in the northwest of Fujian province. The coastal areas in north central Fujian province have the largest threshold (greater than 100 mm) while the inland area in the northwest of Fujian province has the smallest threshold (less than 50 mm). Daily precipitation caused by TCs, especially extreme precipitation, has significant positive correlation with 24 h precipitation EFI. The box difference indexes of EFI also show

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506905)、中国气象局气象预报业务关键技术发展专项(YBGJXM(2018)1B-05)、福建省气象局开放式基金(2019KH03)和福建气象局数值预报产品解释与应用技术研究创新团队项目。

作者简介: 官晓军, 主要从事数值模式解释应用研究。E-mail: 40392689@qq.com

通信作者: 潘宁, 主要从事短期天气预报和数值模式解释应用研究。E-mail: pancathy@163.com

great capability to distinguish TC extreme and non-extreme precipitation events. TS for the forecast experiments are 0.26, 0.22, 0.20 and 0.19 with lead times of 12–36, 36–60, 60–84 and 84–108 h initialized at 20:00 BT. Forecast experiments have better forecast skills than reforecast experiments in general, and TC cases with significant extreme precipitation tend to have better forecast results. The disadvantages of both experiments are high false alarm rates which are more likely to occur in TC cases with no extreme precipitation. In summary, precipitation EFI is a good indicator to forecast TC extreme precipitation. This objective forecast method based on precipitation EFI provides a reference for TC extreme precipitation forecast.

Key words Extreme precipitation, Forecast method, EFI, Typhoon

摘要 应用 1961—2017 年中国气象局热带气旋最佳路径数据集、国家地面气象观测站日降水观测资料和 2015 年 8 月—2017 年 12 月欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 集合预报系统降水极端预报指数 (EFI) 数据, 根据百分位法定义台风影响期间福建省各站点的台风极端降水阈值, 采用最小阈值法剔除台风极端降水时 EFI 箱线图图中的异常值, 保留最小值作为台风极端降水 EFI 阈值, 建立基于 EFI 阈值的台风极端降水预报方法。用该方法分别对 2015 年 8 月—2017 年 12 月和 2018 年登陆或影响福建台风进行台风极端降水回报和预报试验, 采用 TS、空报率、漏报率对回报和预报结果进行检验。结果表明: 福建台风极端降水阈值由沿海向西北内陆逐渐减小, 其中中北部沿海地区的阈值最大; 台风日降水量与日降水 EFI 预报、台风极端降水时的日降水量与日降水 EFI 预报均存在明显的正相关, 日降水 EFI 预报的箱线图差异指数 (I_{bd}) 也表明 EFI 可以较好地地区分台风极端降水和非极端降水; 预报试验 20 时 (北京时) 起报时效 12—36、36—60、60—84 和 84—108 h 的台风极端降水预报 TS 分别达到 0.26、0.22、0.20 和 0.19, 总体上略优于回报试验; 台风极端降水越显著, 台风极端降水预报效果越好, 回报和预报都存在的不足是空报率高, 主要出现在台风极端降水不明显的个例中。降水 EFI 预报对台风极端降水预报具有较好的指示意义, 基于降水 EFI 阈值的台风极端降水预报产品可在业务中作为台风极端降水预报的参考。

关键词 极端降水, 预报方法, 极端预报指数 (EFI), 台风

中图法分类号 P457.6 P456.7

1 引言

全球变暖大背景下极端降水事件频发, 其引发的洪涝及次生灾害常造成严重生命财产损失。因此, 极端降水的特征、形成机理和预报方法研究越来越受到关注 (翟盘茂等, 2007)。目前, 极端降水的特征研究多注重其全球或区域性的年代际和年际变化特征 (翟盘茂等, 1999, 2003, 2016; Tang, et al, 2013; Chen, et al, 2013), 研究表明中国极端降水的变化态势与全球保持一致, 受 ENSO 和季风环流调制, 中国西北和西南地区极端降水呈上升趋势而华北地区呈下降趋势。另一主要研究分支是针对不同地区的极端降水过程, 建立物理概念模型、寻找前兆信号和发展规律, 例如用经验正交函数分解和聚类分析等方法提取相似环流背景下极端降水过程的共同特征, 或根据大气遥相关型和低频振荡特征等寻找极端降水的前兆信号 (林爱兰等, 2013, 2015; Chen, et al, 2014; 章开美等, 2015; 苗芮等, 2017)。

以上研究主要揭示了长时间尺度的极端降水变化特征, 预报方法也主要从延伸期预报 (10—30 d) 角度出发, 极端降水预报的时、空分辨率达不到短

期天气预报的要求。针对短期预报的极端降水客观预报方法仍是目前业务上亟需解决的重点和难点。

与确定性数值模式相比, 集合预报系统包含了预报不确定性, 能为极端天气预报提供更多信息。对集合预报系统的预报产品进行解释应用, 可获得极端降水概率预报 (张宇彤等, 2016)。Lalurette (2003) 基于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 集合预报系统开发了极端天气预报指数 (EFI), 该指数表征了模式预报天气偏离模式气候态的程度, 可用于判断极端天气发生的可能性。指数绝对值越大, 则偏离模式气候态越明显, 出现极端天气的可能性越高。

目前, 中外利用 EFI 进行极端天气尤其是极端降水预报已有一定研究基础。例如利用对流有效位能 (CAPE) EFI 和对流有效位能与水平风垂直切变的组合 (CAPE-SHEAR) EFI 进行强对流天气预报 (Tsonevsky, et al, 2018); 用降水 EFI 和集合水汽输送 (IVT) EFI 分别对伊比利亚半岛冬季极端降水进行短期和中长期预报 (Lavers, et al, 2018); 夏凡等 (2012) 借鉴 ECMWF EFI 算法, 利用 T213 集合预报系统预报数据开发了温度 EFI 产品, 刘琳等 (2013) 则建立了该集合预报系统的极端降水天气

预报指数(EPFI),并综合考虑TS和预报偏差评分确定EPFI判别极端强降水的临界阈值,用于2011年7月极端强降水预报试验取得较好的预报效果;朱鹏飞等(2015)对降水EFI和强降水、降水气候距平的统计关系进行分析,重点评估了降水EFI在安徽省暴雨预报中的应用效果;龙柯吉等(2016)研究表明,降水EFI对四川盆地暴雨预报具有较好的指示意义;董全等(2017)通过个例总结和样本分析,评估EFI和SOT(shift of tail index,表征极端天气的极端程度,是对EFI的补充)产品对极端气温和降水的预报能力。

以上研究在应用EFI进行极端降水预报方面已取得一定成果,但是对极端降水进行预报时,并未对引起极端降水的天气系统进行具体区分。实际上,极端降水与特定天气系统密切相关,例如,张家国等(2018)就总结出5种引起长江中游地区极端降水天气的主要天气系统类型。对福建省来说,台风是造成该地区极端降水的主要天气系统之一,台风极端降水预报是业务预报的一大难点(梁必骐等,1995;林小红等,2008)。近期,罗玲等(2019)研究了降水EFI和华东台风暴雨的统计关系,并证明EFI与浙江台风降水气候百分位有较好的相关关系,当EFI值较大时,可参考对应气候百分位的实况降水量来估测台风降水。该研究的重点集中在分析不同降水等级尤其是暴雨和降水EFI的关系,但暴雨不等同于气候意义上的台风极端降水。因此,本研究直接针对台风极端降水,以福建为例,进一步利用EFI建立区分台风极端降水和非极端降水的客观预报方法,以期能为台风极端降水预报提供参考依据。

2 数据和方法

2.1 数据

文中使用的数据如下:①台风路径资料采用1961—2018年中国气象局热带气旋最佳路径数据集(Ying, et al, 2014),包含台风活动的时间、位置和强度等数据。数据集来自http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html;②1961—2018年福建省68个国家地面气象观测站日降水资料(08—08时(北京时,下同));③国家气象信息中心下发的2015年8月—2018年12月ECMWF集合预报系统的日降水EFI预报产品,应用邻近点法与测站空

间匹配。其中,1961—2017年台风路径和站点日降水资料用于定义各站点的台风极端降水阈值;2015年8月—2017年12月台风影响期间的站点日降水资料和EFI预报产品用于分析台风降水与台风极端降水的EFI统计特征、定义台风极端降水EFI阈值和回报试验;2018年台风期间的站点日降水资料和EFI产品用于预报试验。考虑到实际业务中EFI产品的可用时效,以及随着预报时效延长EFI产品指示意义逐渐降低的特点,分析以20时起报预报时效12—36、36—60、60—84和84—108 h的EFI产品为主,08时起报预报时效24—48、48—72、72—96和96—120 h的EFI数据为辅。

2.2 方法

2.2.1 EFI算法

ECMWF集合预报系统的某要素EFI预报产品是该要素集合预报累积概率分布函数(CDF)与其模式气候CDF之差的积分。模式气候用每周一和周四更新的近20年同期再预报构建,从2015年5月12日起,用于再预报的集合预报包含11个集合成员(10个扰动成员和1个对照预报),配置与当前业务运行的集合预报系统相同。对某一地点,一共有 $9 \times 11 \times 20 = 1980$ 个再预报样本用于定义当前日期的模式气候。EFI具体计算公式(Zsótér, 2006; Zsoter, et al, 2015)如下

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

式中, p 为模式气候中的概率, $F_f(p)$ 为集合预报不大于模式气候 p 的概率,权重系数 $\sqrt{p(1-p)}$ 使分布在两端的概率值具有更高权重,使EFI对极端事件更为敏感。由于降水量为非连续变量,因此,降水EFI的积分从有降水发生的气候概率 p_1 开始,计算公式修改为

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

$$\theta_1 = \arcsin \sqrt{p_1} \quad (3)$$

EFI反映的是集合预报相对多年历史同期模式预报气候态的极端性,基于如下假设可指示实际极端天气发生的可能性:若模式预报天气相对模式气候态呈异常或极端,则实际天气相对实际气候也为异常或极端。EFI产品的优势在于:①它包含了集合预报的不确定性和所有集合成员的预报信息;

②模式气候态的构建方法消除了系统偏差,并能够避免因季节变化引起的跳跃现象;③EFI对极端天气预报更具针对性。

EFI的取值范围是[-1, 1],越接近于0表示集合预报越接近模式气候态,反之则偏离模式气候态。EFI等于1(-1)表示所有集合预报成员都大于(小于)模式气候态最大(小)值,发生极端天气的可能性极大。对于降水EFI,同一地区长时间累计降水EFI为负值意味着该地区出现干旱的可能性很大,但是24 h累计降水EFI为负值没有意义,因此,本研究将日降水EFI负值视为异常值处理。

2.2.2 福建台风极端降水阈值定义

根据福建省地方标准^①,筛选出1961—2018年登陆或影响福建省的台风(指热带风暴及以上等级热带气旋)个例,其中,影响福建省的台风是指未登陆福建省,但中心进入福建省热带气旋警戒区(图1中绿色框)且造成福建省至少1个沿海测站(有海岸线的市或县的国家地面气象观测站和台山气象观测站)阵风≥8级或至少1个省内国家地面气象观测站日雨量≥50 mm的台风。1961—2017年共363个个例,总计台风影响日数857 d,其中2015年8月—2017年12月的20个个例(图1中蓝色路径,影响日数55 d)作为回报试验样本,2018年的7个个例(图1中红色路径,影响日数15 d)作为预报试验样本。

参考单站热带气旋极端降水阈值的定义(王晓等,2017),利用百分位法,选取1961—2017年台风影响福建期间各站点逐日降水序列(升序)95百分位数作为不同站点的台风极端降水阈值。将台风影响时日降水大于或等于台风极端降水阈值为台风极端降水,否则为非极端降水。

2.2.3 箱线图差异指数

箱线图差异指数 I_{bd} (Peng, et al, 2012)最早用于判断各物理量对热带扰动发展为台风的重要程度,也可用于筛选对短时强降水等对流性天气有重要影响的物理参数(洪伟等,2018)。其计算公式为

$$I_{bd} = \frac{M_1 - M_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4)$$

式中, M_1 、 σ_1 分别表示事件发生时某变量的均值和

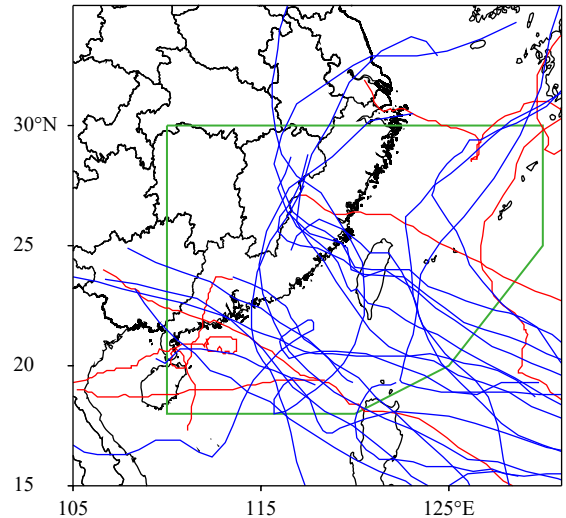


图1 回报(蓝色)和预报(红色)试验的台风路径(绿色多边形框表示福建省台风警戒区)

Fig. 1 Typhoon tracks from reforecast (blue) and forecast (red) experiments (The green polygon indicates the typhoon warning zone of Fujian)

标准差, M_0 、 σ_0 分别表示事件未发生时该变量的均值和标准差。若事件发生和不发生时某变量的均值差异大而总方差小,则该变量可以有效区分事件是否发生。 I_{bd} 指数越大,区分能力越高。具体而言, $I_{bd}=0$ 表示无法区分事件是否发生, $I_{bd}=0.5$ 表示可以区分一部分事件, $I_{bd} \geq 1$ 则表示该变量可以很好地区分事件是否发生。

本研究应用 I_{bd} 定量分析降水EFI对台风极端降水和非极端降水的区分能力,这时,式(4)中的 M_1 、 σ_1 分别表示实况为台风极端降水时降水EFI预报的均值和标准差, M_0 、 σ_0 分别表示未出现台风极端降水时降水EFI的均值和标准差。图2用箱线图表示了二个示范测站在台风极端降水(图中extreme)和非极端降水(图中non-extreme)时降水EFI预报的概率分布,预报为20时起报,预报时效为12—36 h。从图2可见,58748站的台风极端降水和非极端降水的EFI分布具有清晰分界,其 I_{bd} 达到1.05,确定适当的EFI阈值就可以很好地区分该站点的台风极端降水与非极端降水,而58928站的 I_{bd} 为0.48,其台风极端降水和非极端降水的EFI分布存在箱体部分重合的情况,仅用EFI阈值不能完全区分台风极端降水与非极端降水。

① 福建省质量技术监督局,福建省地方标准DB35/T 1413-2014 登陆和影响福建热带气旋。

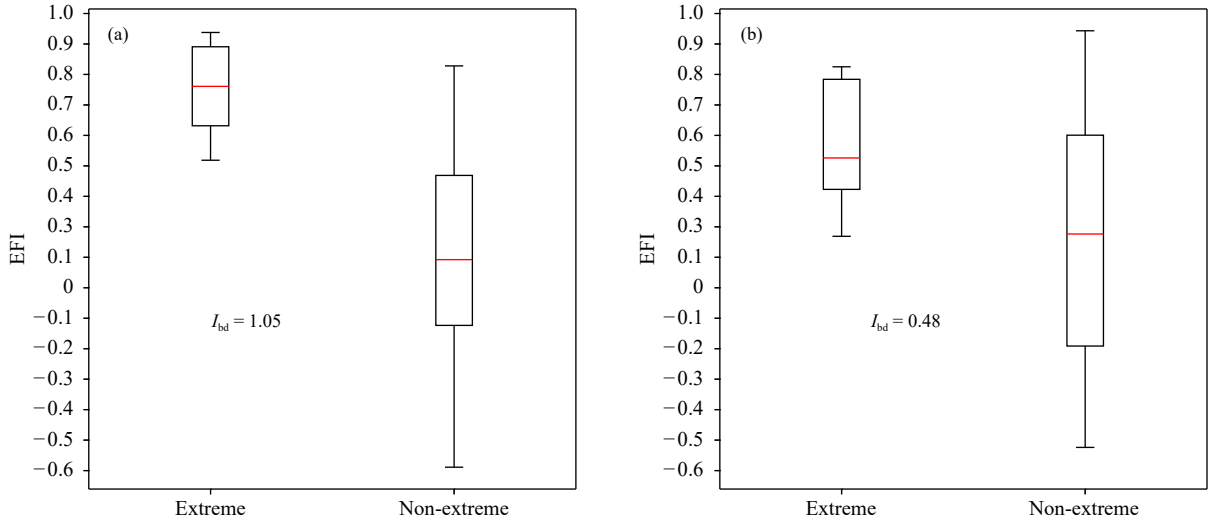


图 2 两个示范测站 (a. 58748, b. 58928) 20 时起报 12—36 h 预报 EFI 的箱线图差异指数

Fig. 2 Box difference indexes of EFI at forecast lead time of 12–36 h initialized at 20: 00 BT at two stations (a. 58748, b. 58928)

2.2.4 最小阈值法

利用 2015 年 8 月—2017 年 12 月台风影响期间各站点出现台风极端降水时的日降水 EFI 预报, 应用最小阈值法(洪伟等, 2018)确定各站不同起报时段和预报时效的台风极端降水 EFI 阈值。具体做法是: 对各站点出现台风极端降水时的 EFI 预报值进行箱线图分析, 将剔除异常值(包括离群点和 EFI 负值)之后的最小值作为 EFI 阈值。若统计时

段内某站未出现台风极端降水, 或者台风极端降水时的降水 EFI 预报均为异常值, 则参考周边站点或取区域平均作为该站的 EFI 阈值。

图 3a 为最小阈值法示意, 图中测站 58938 (该站出现台风极端降水次数最多) 剔除小于 0 的 EFI 后取最小值(图中 Threshold)作为阈值。图 3b 是应用最小阈值法得到的台风极端降水 EFI 阈值空间分布(图中红色圆点表示未出现台风极端降水

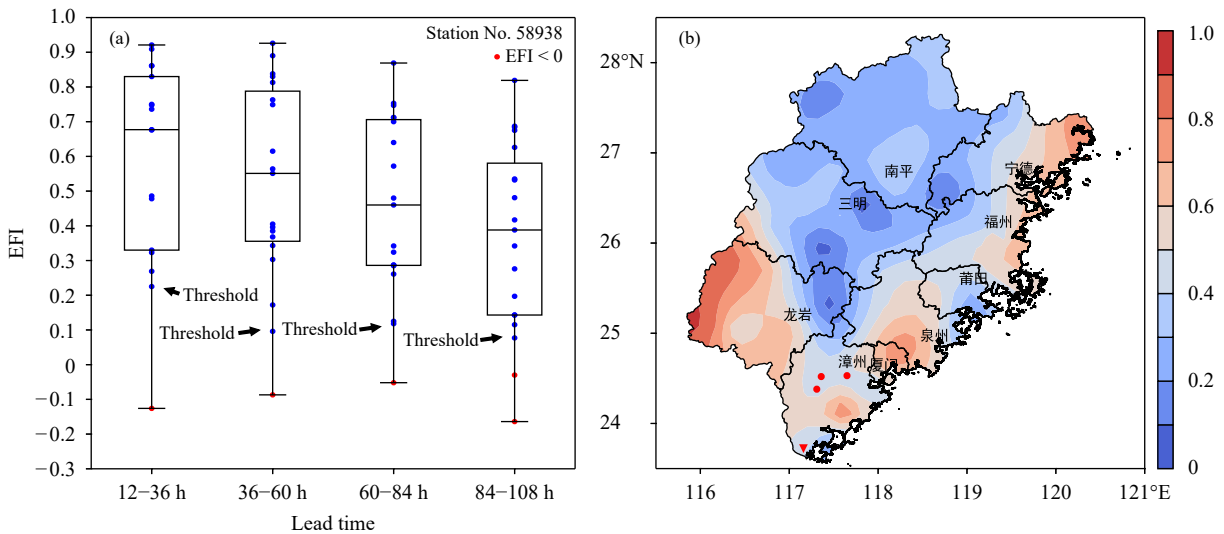


图 3 (a) 最小阈值法示意和 (b) 12—36 h 台风极端降水 EFI 阈值

(红色圆点和倒三角形分别表示该站点未出现台风极端降水以及出现台风极端降水时该站点的降水 EFI 都为异常值)

Fig. 3 (a) Schematic diagram of minimum threshold method, and (b) typhoon extreme precipitation EFI threshold at forecast lead time of 12–36 h initialized at 20: 00 BT (Red dots and inverted triangles indicate stations with no extreme precipitation and no valid EFI values, respectively)

的站点,红色倒三角形表示该站点出现台风极端降水时降水 EFI 预报都是异常值), 预报时效为 12—36 h。可以看出,台风极端降水 EFI 阈值的高值区主要位于福建沿海和南部地区,而西北部地区 EFI 阈值较低。随着预报时效延长,各地 EFI 阈值减小(图略)。

3 台风极端降水和降水 EFI 统计特征

3.1 台风极端降水特征

从图 4 可以看出,1961—2017 年台风影响期间平均日降水量、台风极端降水平均值和台风极端降水阈值的空间分布特征相似,都是从东南沿海向西北内陆逐渐递减,与姜丽黎等(2019)和夏侯杰等(2017)所得出的结论类似。图 4 还显示,同一地区的台风极端降水平均值远大于台风平均日降水量,说明在台风降水研究中,台风降水的极端性相对于台风降水的整体特征更值得关注。台风平均日降水量越大(总体上受台风降水影响越严重)的地区,其台风极端降水平均值和台风极端降水阈值也越

大。从台风极端降水阈值的空间分布(图 4c)来看,沿海地区的阈值明显高于内陆地区,最大阈值(超过 100 mm)位于中北部沿海地区,而内陆地区阈值一般低于 50 mm。

3.2 台风极端降水 EFI 特征

2015 年 8 月—2017 年 12 月登陆或影响福建台风总计 20 个,台风影响日数 55 d。台风影响期间单站日降水量与该站不同预报时效日降水 EFI 预报的相关系数分布如图 5 所示。

罗玲等(2019)研究表明,降水 EFI 与浙江台风降水的气候百分位具有较好的相关。由图 5a 可知,福建地区台风日降水量与降水 EFI 也存在明显的正相关,进一步证明降水 EFI 指数在东南沿海台风降水预报中的适用性。然而,相关系数计算时段内闽南地区(泉州、漳州和厦门)台风降水总体较弱,该区域的多数测站相关系数随时效变化较大,部分站点只有预报时效 12—36 h 和 36—60 h 的相关系数通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验。其余地区的相关则较为稳定,随时效延长相关系数缓慢减小,除

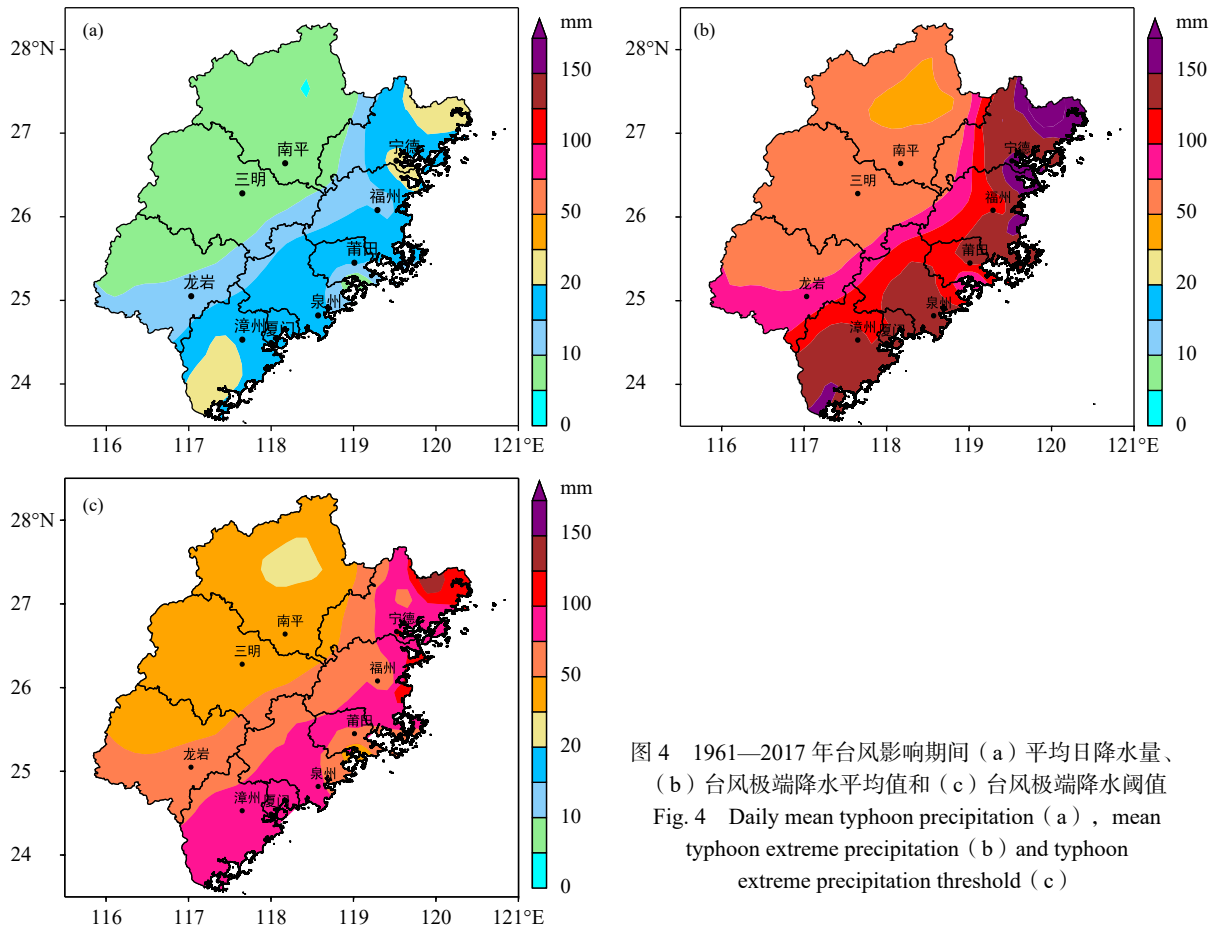


图 4 1961—2017 年台风影响期间 (a) 平均日降水量、(b) 台风极端降水平均值和 (c) 台风极端降水阈值
Fig. 4 Daily mean typhoon precipitation (a), mean typhoon extreme precipitation (b) and typhoon extreme precipitation threshold (c)

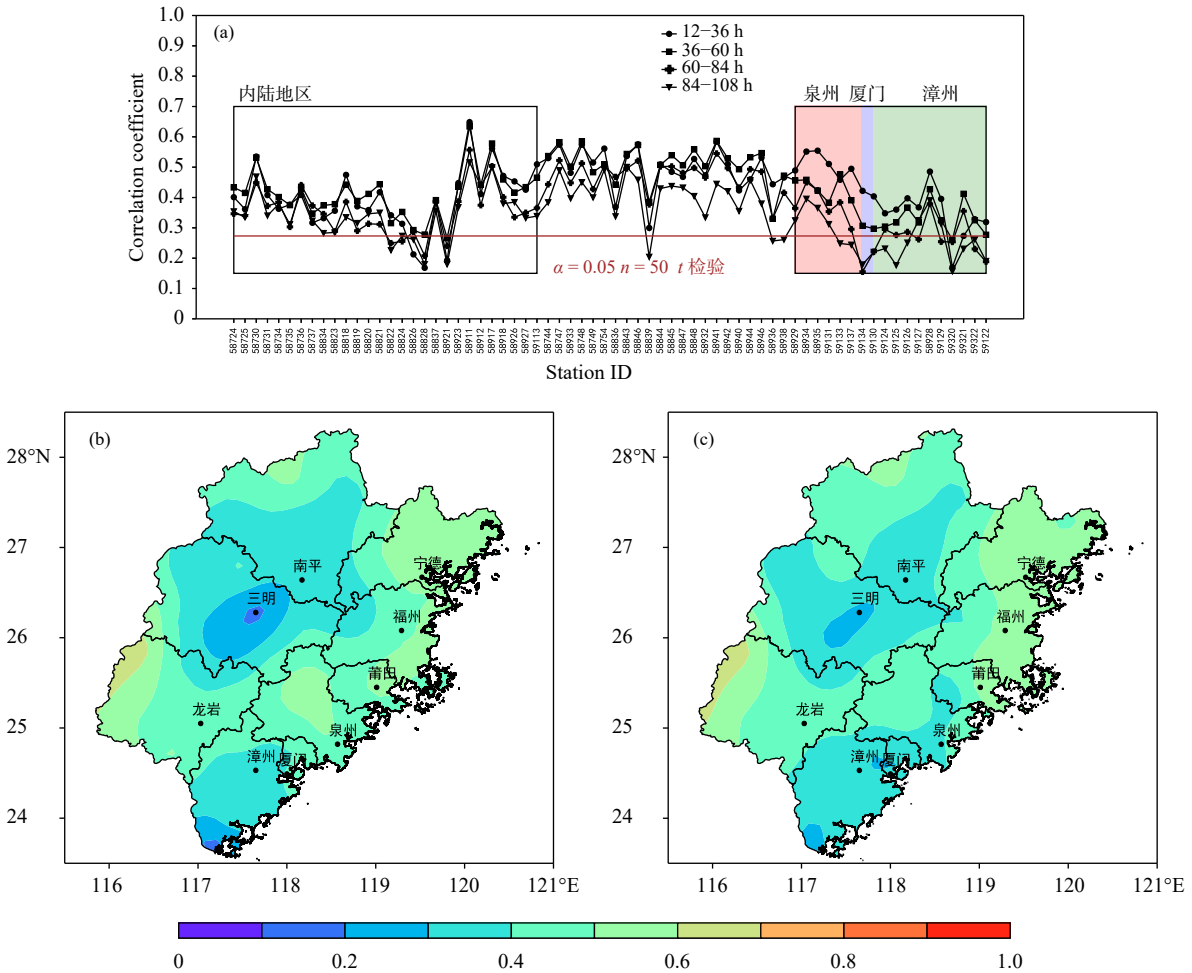


图5 20时起报不同预报时效各站点台风日降水量与日降水EFI预报的(a)相关系数、预报时效为(b)12—36 h和(c)36—60 h相关系数的空间分布

Fig. 5 (a) Correlations of typhoon daily precipitation and EFI at different stations and forecast lead times with forecast initialized at 20: 00 BT , and spatial distributions of correlation between typhoon daily precipitation and EFI at forecast lead times of (b) 12—36 h and (c) 36—60 h

了内陆地区(南平、三明和龙岩)的个别站点,所有预报时效的相关系数均通过了显著性 t 检验。

从相关系数的空间分布(图5b、c,限于篇幅仅给出预报时效12—36和36—60 h结果)来看,在中北部沿海和西南内陆的部分地区,台风日降水量与EFI相关较好,而内陆地区的中部和闽南地区的南部相关较差。比较图5b和图4c可以发现,除了闽南地区的南部,其余地区相关系数与台风极端降水阈值的空间分布特征一致,都是从沿海向西北内陆递减,说明台风降水影响严重的地区,降水EFI与台风降水的相关程度更高。

进一步统计全省测站出现台风极端降水时日降水量与不同预报时效降水EFI的相关系数,12—

36、36—60、60—84和84—108 h时效分别达到0.26、0.31、0.26和0.22(有效样本数分别为275、314、321和324),均通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验。

从各站点台风极端降水次数及台风极端降水和非极端降水对应的不同预报时效日降水EFI均值(图6a)可见,2015—2017年台风影响福建时闽南地区的南部出现台风极端降水次数较少,次数最多的是中部沿海地区;各站台风极端降水和非极端降水的EFI均值存在明显差别,非极端降水EFI均值很小(小于0.3),而闽西南地区(龙岩)部分站点台风极端降水的EFI均值达到0.8(预报时效12—36 h)。尽管随着时效延长两类降水EFI均值的差异有所减小,但仍存在明显分界。从各站点不同预

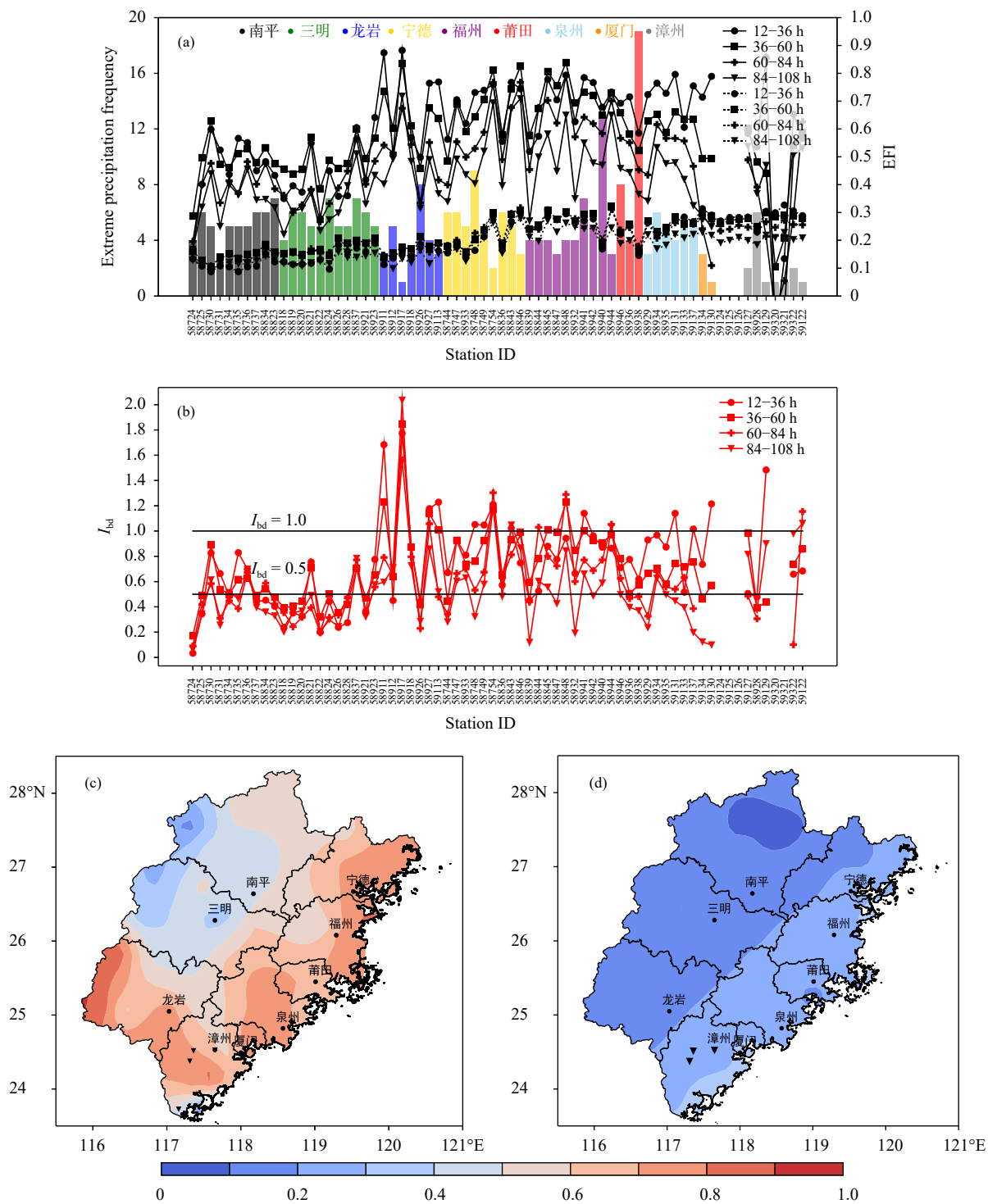


图6 20时起报不同预报时效的站点 (a) 台风极端降水 EFI 均值 (实线)、非极端降水 EFI 均值 (虚线) 和各站点出现台风极端降水次数 (柱状) 以及 (b) I_{bd} 分布, 20 时起报 12—36 h 台风 (c) 极端降水 EFI 均值和 (d) 非极端降水 EFI 均值空间分布 (黑色倒三角形表示未出现台风极端降水站点)

Fig. 6 (a) Mean 24 h precipitation EFIs of typhoon extreme (solid line) and non-extreme (dashed line) precipitation, and the typhoon extreme precipitation frequency (bars), (b) I_{bd} at different stations and lead times, and spatial distributions of typhoon (c) extreme and (d) non-extreme precipitation at forecast lead time of 12—36 h initialized at 20: 00 BT (Black inverted triangles represent the stations without typhoon extreme precipitation)

报时效的箱线图差异指数 I_{bd} (图 6b) 可见, 各站点 I_{bd} 的分布特征与台风极端降水 EFI 均值十分相近, 闽西南(龙岩)、闽东北(宁德)、中部沿海地区(福州和莆田)的 I_{bd} 较大(超过 1)。随着时效延长, I_{bd} 逐渐减小, 说明 EFI 区分台风极端降水与非极端降水的能力随时效延长而逐渐下降。由于 2015—2017 年闽南地区出现台风极端降水的站(次)数较少, 因此该地区台风极端降水 EFI 值离散度大, 造成台风极端降水与非极端降水 EFI 均值的界线不清晰, 二者存在交叉现象。此外, 图 6b 显示闽南地区个别站点没有有效 I_{bd} 值, 其原因如下: ① 站点没有出现台风极端降水, 如漳州地区的 59124(南靖)、59125(平和)和 59126(漳州); ② 出现台风极端降水但是相应的 EFI 均为负值, 例如 59320(诏安)和 58929(安溪)分别出现 1 次和 3 次台风极端降水, 但是某些预报时效站点的 EFI 均为负值, 说明其台风极端降水时的 EFI 数据不具代表性(次数少)且不符合 EFI 的意义; ③ EFI 数据缺失。从图 6c、d 可知, 台风极端降水 EFI 均值的空间分布特征与相关系数(图 5b)一致, 而且除了内陆地区中部和漳州南部, 其余地区台风极端降水和非极端降水 EFI 均值的差异非常显著(图 6c 中黑色倒三角形表示未出现台风极端降水的站点)。

以上分析结果表明, 降水 EFI 与实际气候中的台风降水和台风极端降水都有较好的相关, 且在一定预报时效内降水 EFI 对台风极端降水与非极端降水具有较高的区分能力。

4 回报和预报试验及检验

应用单站台风极端降水 EFI 阈值, 对历史登陆或影响福建的台风进行回报和预报试验, 并采用 TS、空报率和漏报率对回报和预报结果进行检验, 计算公式如下

$$TS: TS = N_A / (N_A + N_B + N_C) \quad (5)$$

$$\text{空报率: FAR} = N_B / (N_A + N_B) \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{漏报率: MR} = N_C / (N_A + N_C) \times 100\% \quad (7)$$

式中, N_A 为预报正确站(次)数(实况有台风极端降水并预报正确), N_B 为空报站(次)数(预报有台风极端降水但实况无), N_C 为漏报站(次)数(预报无台风极端降水但实况有)。

4.1 回报结果和检验

台风极端降水回报时段为 2015 年 8 月—2017 年 12 月。从该时段各站点出现台风极端降水的次数(图 7a)可见, 该时段台风极端降水主要发生在北部地区, 漳州部分站点未出现台风极端降水。08 和 20 时起报不同预报时效的台风极端降水预报评估结果如表 1 所示, 总体上, 08 和 20 时起报的预报 TS 相差不大, 都在 0.1—0.2; 临近时效预报的漏报率相对较低(24—48 和 12—36 h 漏报率分别为 15.8% 和 17.4%), 但随着时效延长漏报率明显增大, 96—120 和 84—108 h 的漏报率分别达到 47.7% 和 48.6%; 空报率较高, 所有预报时效都超过 80%。从 20 时起报 12—36 h 预报检验结果的空间分布(图 7b—d)可见, 中北部沿海和闽西南地区预报效果较好, 其 TS 相对较高, 且漏报率和空报率较低, 而内陆地区的西北部漏报率和空报率最高, 宁德东北角和闽南地区沿海的漏报率和空报率也较高。

对台风极端降水逐日回报检验结果的分析表明, 实况出现台风极端降水站点越多且分布越集中的台风个例, 其 TS 越高, 漏报率和空报率也越低, 空报现象主要出现在实况台风极端降水站点较少或者无极端降水的台风个例中, 说明台风极端降水 EFI 阈值可以较好地捕捉到较强的台风极端降水事件, 不足之处是降水相对弱的台风空报较多。

4.2 预报结果和检验

2018 年登陆或影响福建台风共 7 个, 分别为台风“艾云尼”(1804)、“玛莉亚”(1808)、“山神”(1809)、“云雀”(1812)、“贝碧嘉”(1816)、“山

表 1 2015 年 8 月—2017 年 12 月台风极端降水回报检验

Table 1 Verification of typhoon extreme precipitation reforecasts from August 2015 to December 2017

预报时效	08时起报			预报时效	20时起报		
	TS评分	漏报率(%)	空报率(%)		TS评分	漏报率(%)	空报率(%)
24—48 h	0.17	15.8	82.5	12—36 h	0.16	17.4	83.0
48—72 h	0.16	29.3	83.1	36—60 h	0.18	24.5	81.0
72—96 h	0.16	39.0	82.7	60—84 h	0.16	36.0	82.4
96—120 h	0.12	47.7	86.7	84—108 h	0.14	48.6	83.4

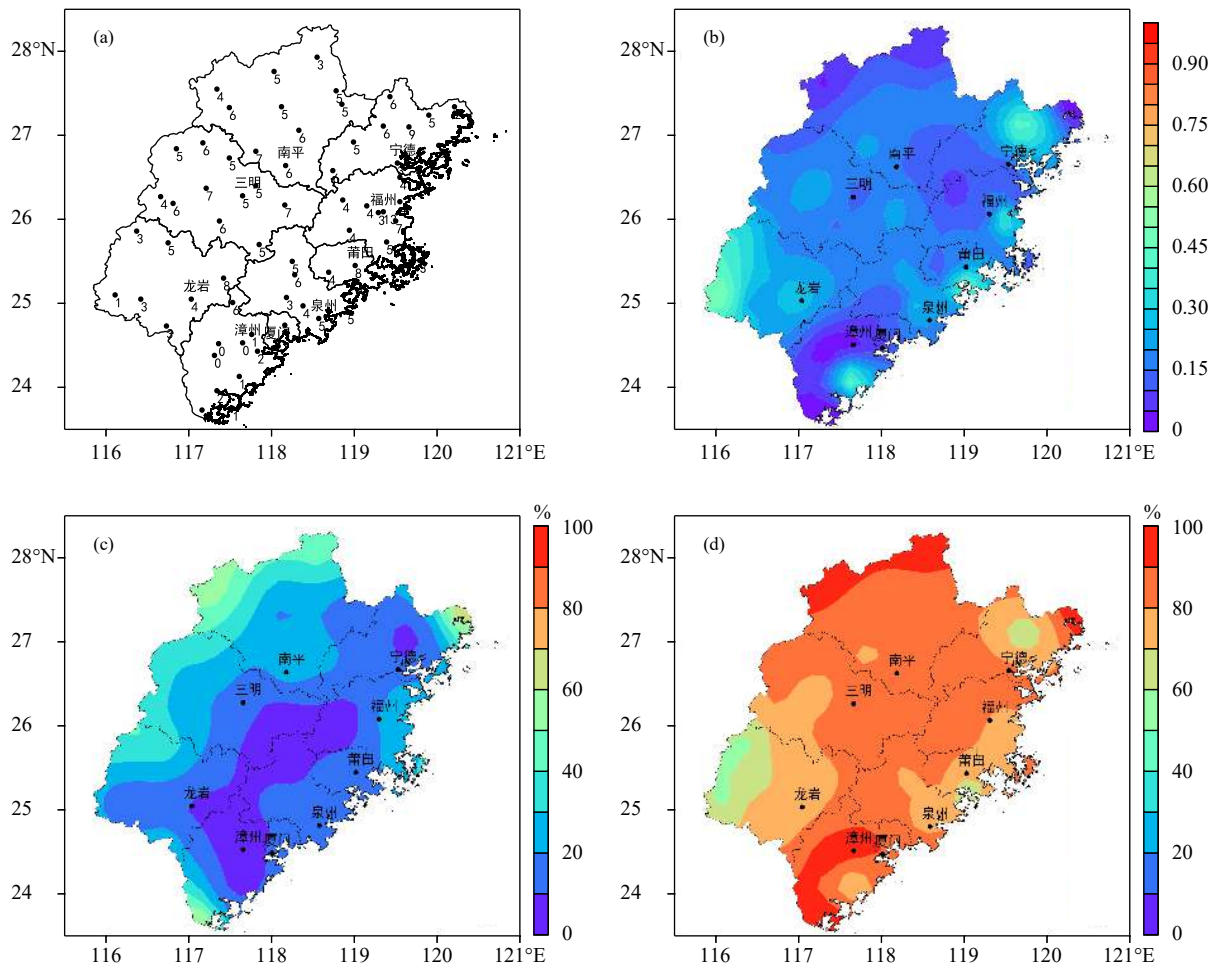


图7 2015年8月—2017年12月 (a) 台风极端降水次数, 20时起报 12—36 h 预报 (b) TS、(c) 漏报率和 (d) 空报率

Fig. 7 (a) Typhoon extreme precipitation frequency from August 2015 to December 2017, spatial distributions of (b) TS, (c) missing rate and (d) false alarm rate at forecast lead time of 12–36 h initialized at 20:00 BT

竹”(1822)和“潭美”(1824),影响日数共计15 d。2018年各站台风极端降水次数(图8a)表明,该年台风极端降水主要发生在内陆和北部沿海的部分地区。应用EFI阈值对2018年台风个例进行台风极端降水预报试验,预报检验结果如表2所示,其中08时起报24—120 h逐24 h预报的TS评分分别为0.23、0.19、0.17和0.17,而20时起报12—108 h逐24 h预报(与08时起报的预报时段相对应)的TS评分分别为0.26、0.22、0.20和0.19,略高于08时起报结果,并且空报率和大部分预报时效的漏报率也都低于08时起报。无论是08时起报还是20时起报,预报试验的预报效果总体优于回报,TS评分更高且空报率更低,但部分预报时效的漏报率高于回报。从20时起报预报时效12—36 h的单

站TS、漏报率和空报率分布(图8b—d,空白部分是实况无台风极端降水,预报也没有报的区域)来看,总体上内陆地区的TS高于沿海地区,这与该年内陆地区台风极端降水频次较多有关。

台风极端降水逐日预报检验表明,在台风极端降水较强(实况台风极端降水站数 ≥ 3)的台风个例中,除1822号台风“山竹”预报较为失败之外,其余台风的预报评分结果都优于降水弱(实况台风极端降水站数 < 3)的台风,其中1804号台风“艾云尼”的预报效果最佳,台风极端降水的预报落区与实况接近,并且空报率较低。图9给出了台风“艾云尼”和“山竹”的预报及检验结果。受台风“艾云尼”影响,6月6日福建的台风极端降水主要出现在内陆地区和宁德西部(图9a),基于EFI阈值的台风极端

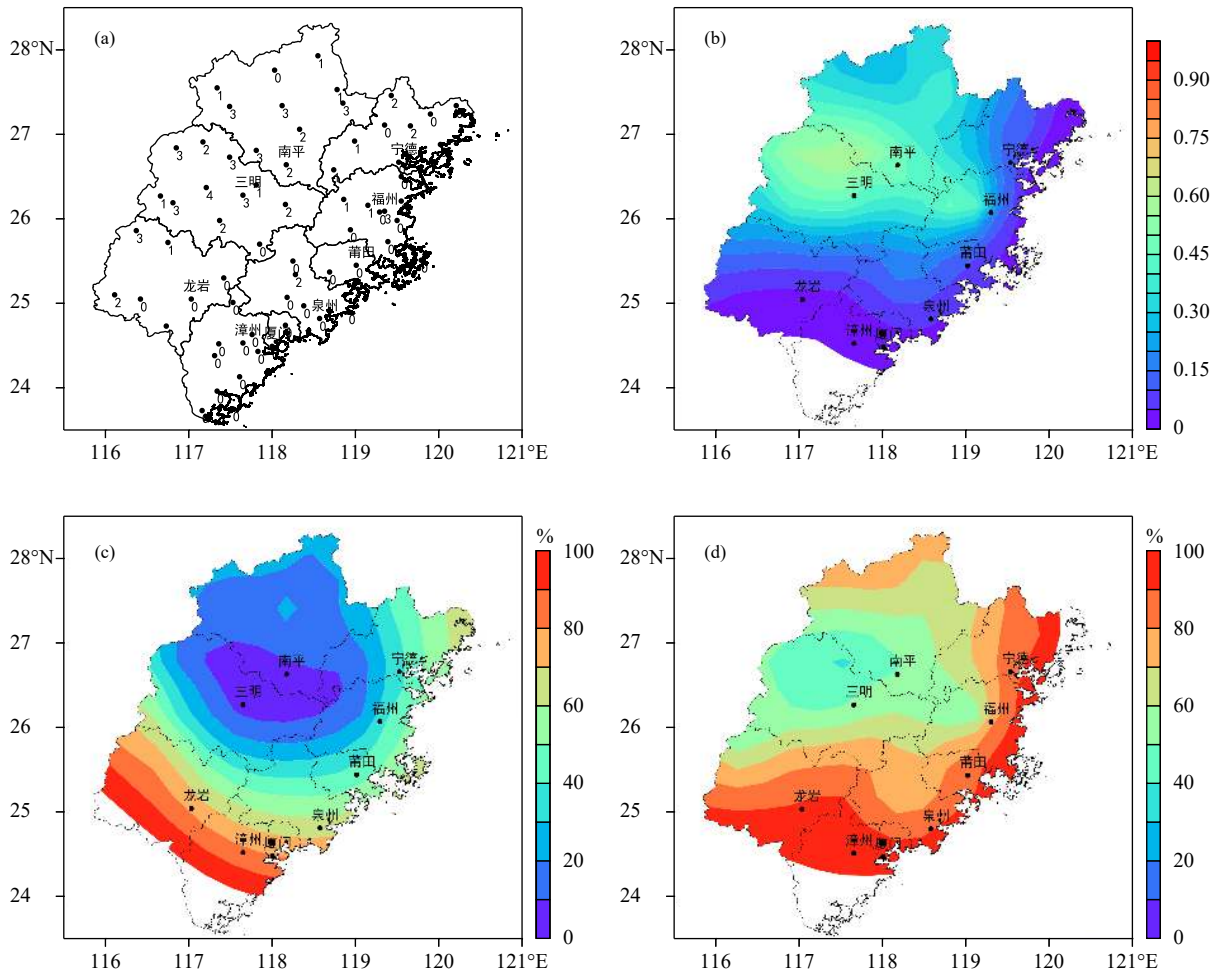


图 8 2018 年 (a) 台风极端降水次数, 20 时起报 12—36 h 预报 (b) TS、(c) 漏报率和 (d) 空报率
(空白处为实况无台风极端降水预报也没有报)

Fig. 8 (a) Typhoon extreme precipitation frequency in 2018, spatial distributions of (b) TS, (c) missing rate and (d) false alarm rate at lead time 12—36 h initiated at 20: 00 BT

表 2 2018 年台风极端降水预报检验
Table 2 Verification of typhoon extreme precipitation forecasts in 2018

预报时效	08时起报			预报时效	20时起报		
	TS	漏报率(%)	空报率(%)		TS	漏报率(%)	空报率(%)
24—48 h	0.23	25.5	74.5	12—36 h	0.26	27.7	71.2
48—72 h	0.19	44.6	78.2	36—60 h	0.22	28.5	75.5
72—96 h	0.17	44.4	80.8	60—84 h	0.20	35.9	77.7
96—120 h	0.17	46.3	80.4	84—108 h	0.19	40.0	78.6

降水 12—36 h 预报(图 9b)仅沿海 1 个站点空报, 内陆地区的台风极端降水落区与实况吻合。台风“山竹”(图 9d—f)的极端降水弱于台风“艾云尼”, 主要位于北部地区, 但预报的台风极端降水落区较实况偏南, 并在闽南地区的南部出现大范围空报, 这种显著的落区偏差可能是集合预报系统对本次台风降水落区的预报偏差导致的。

根据 EFI 建立的台风极端降水预报方法除了可以直接给出站点是否出现台风极端降水的预报结果, 还可以对业务上已有的客观降水预报(如确定性模式预报)进行订正。图 9c 的填色部分是 ECMWF 高分辨率模式的日降水量预报, 采用邻近点法将格点降水预报插值到测站, 达到极端降水阈值的站点用黄色星号表示。可见, ECMWF 模式

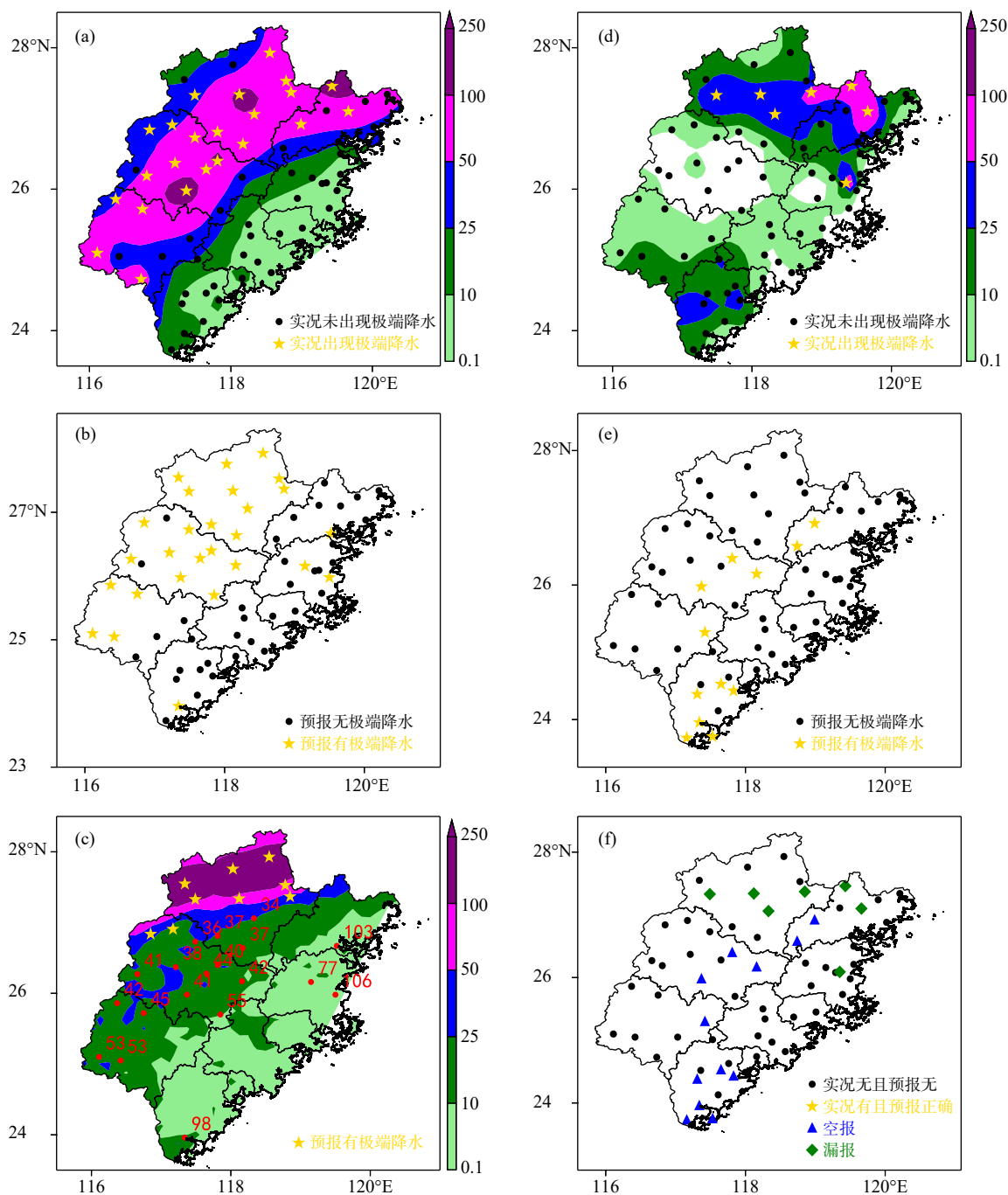


图 9 (a)1804 号台风“艾云尼”6 月 6 日实况极端降水、(b)12—36 h 时效 EFI 台风极端降水预报和(c)ECMWF 高分辨率模式降水预报、(d)1822 号台风“山竹”9 月 18 日实况极端降水(空白处是无降水)、(e)12—36 h 时效 EFI 台风极端降水预报和(f)预报检验 (色阶为日降水量, 单位: mm; a、d 中黄色五角星和黑点分别表示实况出现台风极端降水和没有极端降水的站点, b、e 中黄色五角星和黑点分别表示预报出现极端降水和没有极端降水的站点, c 中红色圆点和数字分别表示订正的站点和订正后的降水量)

Fig. 9 (a) Daily precipitation of typhoon Ewinari (#1804) on 6 June , (b) extreme precipitation forecast of EFI and (c) precipitation forecast of ECMWF at forecast lead time of 12—36 h; (d) daily precipitation of typhoon Mangkhut (#1822) on 18 September , extreme precipitation (e) forecast of EFI and (f) verification at forecast lead time of 12—36 h (Shadings indicate daily precipitation, unit: mm; Yellow stars and black dots in Fig. 9a, d represent observations of typhoon extreme and non-extreme precipitation, respectively, yellow stars and black dots in Fig. 9b, e represent forecasts of typhoon extreme and non-extreme precipitation, respectively, red dots and numbers in Fig. 9c represent the bias corrected stations and precipitation, respectively)

预报的台风“艾云尼”强降水落区偏北且范围偏小, 内陆地区台风极端降水的漏报严重。因此, 对于高分辨率模式预报中未达到台风极端降水阈值的站点, 当该站点 EFI 预报达到其台风极端降水 EFI 阈值时, 可相应地将该站点的降水量预报提高至该站点的台风极端降水阈值(图 9c 中红色圆点标记的站点, 数字是该站点订正后的降水量), 从而一定程度上减小降水预报偏弱和台风极端降水漏报的现象。

5 结论与讨论

利用中国气象局热带气旋最佳路径数据集、福建省国家地面气象观测站日降水资料和 ECMWF 集合预报的日降水 EFI 预报产品, 用百分位法定义单站福建台风极端降水阈值, 采用最小阈值法确定了各站点不同起报时次和预报时效的台风极端降水 EFI 阈值, 建立了基于 EFI 阈值的台风极端降水预报方法, 并对历史影响台风进行回报和预报试验及检验。主要得到以下 3 个结论:

(1) 福建台风极端降水阈值具有由沿海向西北内陆逐渐递减的空间分布特征, 阈值最大的区域主要位于中北部沿海, 部分站点超过 100 mm, 而内陆地区阈值一般小于 50 mm。

(2) 台风日降水量与日降水 EFI 预报、台风极端降水时的日降水量与日降水 EFI 预报均存在明显的正相关, 台风降水影响越严重的地区相关程度越高。各站点台风极端降水和非极端降水的 EFI 均值差异显著, 降水 EFI 的 I_{bd} 也表明, 降水 EFI 可以较好地区分台风极端降水和非极端降水天气。

(3) 基于 EFI 阈值的台风极端降水预报方法具有参考价值。2015 年 8 月—2017 年 12 月台风极端降水的回报结果表明, 该方法 TS 为 0.1—0.2, 漏报率相对较低但是空报率较高, 极端降水越强的台风预报效果越好, 降水较弱的台风空报现象较为严重。2018 年该方法台风极端降水预报的 TS 略优于回报结果, 最高 TS 达到 0.26, 空报率也低于回报, 但部分时效预报的漏报率高于回报。业务上可参考该方法的台风极端降水预报对已有的客观降水预报产品(例如 ECMWF 高分辨率模式等)进行订正。

EFI 虽然是针对极端天气事件研发的产品, 但其最终来源于集合预报系统, 预报能力受到集合预报系统预报能力的限制, 模式对天气系统和天气落

区的预报偏差也会导致极端天气预报出现偏差。此外, 在应用 EFI 进行台风极端降水预报时应注意 EFI 指数的特点, 即 EFI 越大时, 它与降水气候百分位的对应关系越好, EFI 值小时易出现混淆的情况。本研究的不足之处是收集的 ECMWF 集合预报系统 EFI 数据时间跨度有限, 台风个例样本也不充分, 部分地区的台风日降水量和 EFI 分布都存在数据不平衡的问题。例如, 闽南南部沿海 2015—2017 年台风极端降水次数较少, 导致得到的阈值不够稳定和缺乏代表性, 1822 号台风“山竹”在闽南南部地区的空报可能是该地区台风极端降水 EFI 阈值不够稳定引起的。回报和预报中都存在的问题是空报率较高, 这跟台风极端降水阈值的定义、台风极端降水 EFI 阈值的选取方法、台风个例样本容量和 EFI 数据的时间跨度都有一定联系。在未来的研究中, 将重点针对以上问题, 积累更多样本和数据, 尝试更多研究方法, 以期在业务中进一步改进台风极端降水的预报水平。

参考文献

- 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. *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. *Meteor Mon*, 43(9): 1095-1109 (in Chinese)
- 洪伟, 郑玉兰. 2018. 基于 ECMWF 产品福建省前汛期短时强降水预报方法. *应用气象学报*, 29(5): 584-595. Hong W, Zheng Y L. 2018. A method of short-time strong rainfall forecasting during pre-rainy season in Fujian based on ECMWF productions. *J Appl Meteor Sci*, 29(5): 584-595 (in Chinese)
- 姜丽黎, 余晖. 2019. 基于动力相似方法的台风极端降水概率预报研究. *热带气象学报*, 35(3): 353-364. Jiang L L, Yu H. 2019. A research on the prediction of typhoon extreme precipitation based on dynamic similitude methods. *J Trop Meteor*, 35(3): 353-364 (in Chinese)
- 梁必骥, 梁经萍, 温之平. 1995. 中国台风灾害及其影响的研究. *自然灾害学报*, 4(1): 84-91. Liang B Q, Liang J P, Wen Z P. 1995. Study of typhoon disasters and its affects in China. *J Nat Disaster*, 4(1): 84-91 (in Chinese)
- 林爱兰, 李春晖, 郑彬等. 2013. 6 月 MJO 对广东降水调制与直接影响系统的联系. *应用气象学报*, 24(4): 397-406. Lin A L, Li C H, Zheng B, et al. 2013. Modulation effect of MJO on the precipitation over Guangdong and its link with the direct impact system in June. *J Appl Meteor Sci*, 24(4): 397-406 (in Chinese)
- 林爱兰, 谷德军, 郑彬等. 2015. 6 月广东持续性暴雨过程概念模型的建立. *热带气象学报*, 31(3): 289-299. Lin A L, Gu D J, Zheng B, et al. 2015. Establishment of conceptual model for Guangdong persistent torrential rain in June. *J Trop Meteor*, 31(3): 289-299 (in Chinese)

- 林小红, 任福民, 刘爱鸣等. 2008. 近 46 年影响福建的台风降水的气候特征分析. *热带气象学报*, 24(4): 411-416. Lin X H, Ren F M, Liu A M, et al. 2008. Climatic variation features of typhoon precipitation influencing Fujian for the past 46 years. *J Trop Meteor*, 24(4): 411-416 (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. *气象学报*, 71(5): 853-866. Liu L, Chen J, Cheng L, et al. 2013. Study of the ensemble-based forecast of extremely heavy rainfalls in China: Experiments for July 2011 cases. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 853-866 (in Chinese)
- 龙柯吉, 陈朝平, 郭旭等. 2016. 基于 ECMWF 极端降水天气指数的四川盆地暴雨预报研究. *高原山地气象研究*, 36(2): 30-35. Long K J, Chen C P, Guo X, et al. 2016. Research of heavy rain prediction based on ECMWF-EFI in Sichuan Basin. *Plateau Mountain Meteor Res*, 36(2): 30-35 (in Chinese)
- 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. *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. *Meteor Mon*, 45(10): 1382-1391 (in Chinese)
- 苗芮, 温敏, 张人禾. 2017. 2010 年华南前汛期持续性降水异常与准双周振荡. *热带气象学报*, 33(2): 155-166. Miao R, Wen M, Zhang R H. 2017. Persistent precipitation anomalies and quasi-biweekly oscillation during the annually first rainy season over South China in 2010. *J Trop Meteor*, 33(2): 155-166 (in Chinese)
- 王晓, 余晖, 鲍旭炜等. 2017. “菲特”(1323)台风降水的极端性分析. *气象科学*, 37(4): 514-521. Wang X, Yu H, Bao X W, et al. 2017. Analysis on extreme characteristics of the precipitation brought by typhoon “Fitow”(1323). *J Meteor Sci*, 37(4): 514-521 (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. *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. *Meteor Mon*, 38(12): 1492-1501 (in Chinese)
- 夏侯杰, 朱伟军, 任福民. 2017. 两广地区热带气旋极端降水特征及成因初探. *热带气象学报*, 33(4): 510-518. Xia H J, Zhu W J, Ren F M. 2017. Characteristics of tropical cyclone extreme precipitation and its preliminary causes over mainland of the South China. *J Trop Meteor*, 33(4): 510-518 (in Chinese)
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. *气象学报*, 57(2): 208-216. Zhai P M, Ren F M, Zhang Q. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes. *Acta Meteor Sinica*, 57(2): 208-216 (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. *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. *Acta Geogr Sinica*, 58(S1): 1-10 (in Chinese)
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究. *气候变化研究进展*, 3(3): 144-148. Zhai P M, Wang C C, Li W. 2007. A review on study of change in precipitation extremes. *Adv Climate Change Res*, 3(3): 144-148 (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. *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 Appl Meteor Sci*, 27(5): 631-640 (in Chinese)
- 张家国, 王珏, 吴涛等. 2018. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析. *暴雨灾害*, 37(1): 14-23. Zhang J G, Wang J, Wu T, et al. 2018. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze river. *Torrential Rain and Disasters*, 37(1): 14-23 (in Chinese)
- 章开美, 李丽平, 项连东等. 2015. 华南前汛期极端降水气候变化特征及其与太平洋海温相关关系研究. *气象与减灾研究*, 38(1): 1-7. Zhang K M, Li L P, Xiang L D, et al. 2015. Characteristics of extreme precipitation during the pre-rainy season in Southern China and their correlations with the Pacific SST. *Meteor Disaster Reduction Res*, 38(1): 1-7 (in Chinese)
- 张宇彤, 矫海燕, 陈静等. 2016. 基于贝叶斯方法的极端降水概率预报试验. *气象*, 42(7): 799-808. Zhang Y T, Jiao M Y, Chen J, et al. 2016. Probabilistic forecasting of extreme precipitation experiment based on Bayesian theory. *Meteor Mon*, 42(7): 799-808 (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. *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. *Torrential Rain Disaster*, 34(4): 316-323 (in Chinese)
- Chen Y, Zhai P M. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010. *Climate Res*, 57(2): 143-155
- Chen Y, Zhai P M. 2014. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in Central-Eastern China. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(682): 1467-1478
- Lalauette F. 2003. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129(594): 3037-3057
- Lavers D A, Richardson D S, Ramos A M, et al. 2018. Earlier awareness of extreme winter precipitation across the western Iberian Peninsula. *Meteor Appl*, 25(4): 622-628
- Peng M S, Fu B, Li T, et al. 2012. Developing versus nondeveloping disturbances for tropical cyclone formation. *Part I: North Atlantic. Mon Wea Rev*, 140: 1047-1066
- Tang Y B, Gan J J, Zhao L, et al. 2013. On the climatology of persistent heavy rainfall events in China. *Adv Atmos Sci*, 23(5): 678-692
- Tsonevsky I, Doswell III C A, Brooks H E. 2018. Early warnings of severe convection using the ECMWF extreme forecast index. *Wea Forecasting*, 33(3): 857-871
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(2): 287-301
- Zsótér E. 2006. Recent developments in extreme weather forecasting. *ECMWF Newsletter*, No. 107-Spring. Reading, United Kingdom: ECMWF, 8-17
- Zsótér E, Pappenberger E, Richardson D. 2015. Sensitivity of model climate to sampling configurations and the impact on the Extreme Forecast Index. *Meteor Appl*, 22(2): 236-247