

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.

基于 ECMWF 集合预报的极端天气预报 产品应用和检验^{*}

董 全 代 刊 陶亦为 周 军

国家气象中心,北京 100081

提 要: 通过个例总结和大样本分析的方法,本文分析和总结了 ECMWF 集合预报系统(EPS)中的极端温度和降水预报产品。以上产品主要为 08—08 时的平均气温、最高气温、最低气温和降水量四个要素的极端天气预报指数(extreme forecast index,EFI)和 SOT(“shift of tail” index)。研究显示,气温 EFI 和 SOT 预报效果接近,降水 SOT 优于 EFI。运用过去 3 年的资料,以 TS 评分最大为标准,分别确定了不同时效、不同百分位的极端高低温和极端强降水事件在我国的预报阈值,及其对应的各检验参数。对于 1%(99%)百分位的极端低温(高温)事件,平均气温 EFI 和 SOT 的阈值分别在 -0.85(0.75)和 0.38(0),最高和最低气温的阈值与平均气温的阈值接近。对于 95%和 99%的极端强降水事件,EFI 的阈值分别在 0.45 和 0.7 左右,SOT 的阈值分别在 -0.6 和 0.4 左右。整体上呈现时效越长阈值越小,预报效果越差;事件越极端,阈值越大的特点。且此时的 bias 接近或略大于 1,表明预报的发生频率与实况比较接近,具有较好的应用价值。气温 EFI 和 SOT 的预报效果和阈值存在明显的季节差异,夏季预报较好,阈值较大,冬季预报较差,阈值较小。降水的季节差异不明显。EFI 和 SOT 的预报效果和阈值在空间分布上也存在一定的差异,且不同的产品空间分布差异不同。

关键词: 集合预报, 极端天气, 极端天气预报指数(EFI), SOT(“shift of tail” index)

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.007

Application and Verification of Extreme Weather Forecast Products of ECMWF Ensemble Prediction System

DONG Quan DAI Kan TAO Yiwei ZHOU Jun

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The extreme weather forecast products of ECMWF ensemble prediction system (EPS) are analyzed and verified. The products include extreme forecast index (EFI) and “shift of tail” index (SOT) of 08—08 BT mean temperature, maximum temperature, minimum temperature and total precipitation. The results indicate that the forecast skill of temperature EFI is similar to SOT for extreme temperature, but the precipitation SOT is better than EFI for extreme precipitation. Using the last 3 years’ dataset, the thresholds and corresponding measures are estimated for different lead times and extreme events over different percentiles of extreme temperature and precipitation, under the criteria of TS maximization. For the extreme low (high) temperature over 1% (99%) percentile, the thresholds of mean temperature EFI and SOT are about -0.85 (0.75) and 0.38 (0.00), respectively. The thresholds of maximum and minimum temperature EFI and SOT are nearly to that of mean temperature. For the extreme precipitation over 95% and 99% percentiles, the thresholds of EFI are about 0.45 and 0.7, and that of SOT are about -0.6 and 0.4. The longer the lead times, the smaller the thresholds and the lower the forecast skills. And the more

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306002、GYHY201206005)和国家科技支撑计划(2015BAC03B03)共同资助

2016 年 6 月 21 日收稿; 2017 年 5 月 31 日收修定稿

第一作者:董全,主要从事天气预报和天气预报技术的研究. Email:fermidq@gmail.com

extreme the events, the larger the thresholds. Under the criteria of TS maximization, the forecast biases are nearly 1, so these thresholds could be applied in the operation. The thresholds and forecast skill of temperature EFI and SOT show significant seasonal variation, with higher skill and thresholds in the summer half year and lower in the winter half year. The temporal variation of precipitation EFI and SOT is not significant. There are spatial variations of these thresholds and forecast skills and they are different for different indexes.

Key words: ensemble prediction system, extreme weather, EFI (extreme forecast index), SOT (“shift of tail” index)

引言

极端天气事件,往往造成严重的自然灾害和人类生命财产损失,但由于发生概率很小,所以预报难度非常大(翟盘茂等,2016)。近年来随着集合预报系统(Ensemble Prediction System, EPS)的不断发展,可以在一定程度上对预报不确定性进行定量的预估,从而使得数值模式对极端天气的预报能力不断提高(Bauer et al,2015;杜钧等,2014)。

Lalaurette(2003)基于 ECMWF EPS,开发了极端天气预报指数(extreme forecast index,EFI),假设如果模式天气相对于“模式气候”为极端事件,则实际天气相对于实际气候也为极端事件,通过积分加权的 EPS 的累计分布函数(cumulative distribution function,CDF)和“模式气候”的 CDF 之差,定量地确定未来某一气象要素发生概率相对于“模式气候”概率的差异,这一差异越大,说明天气偏离气候态越大,则极端事件发生的概率越大,从而可以对极端天气事件进行预报和早期预警。由于运用了相同模式系统的回算资料,EFI 较好地剔除了 EPS 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(Petroligis and Pinson,2014;董全等,2012;2016)。

为了进一步提高 EFI 对极端天气的预报技巧和 EPS 对极端天气的预报能力,ECMWF 采用相同模式回算资料,对 EFI 的“模式气候”进行了更新,改进了 EFI 的计算公式,从而使得 EFI 对 CDF 两端的信息更敏感,设计了 SOT(“shift of tails” index)指数,作为 EFI 的补充,用于指示某一极端事件发生概率相对于气候概率的大小(Zsótér,2006),从而使得对极端天气的预报更完善(Tsonevsky and Richardson,2012;Persson,2011)。

可见 ECMWF 基于其 EPS 已经构建了一套较为完善的极端天气预报产品,主要包括 EFI 和 SOT,要素包括 2 m 平均气温、2 m 最高气温、2 m 最低气温、10 m 风速、10 m 阵风、降水量、降雪量和 CAPE 等。以上产品在国内各级预报部门得到了越来越广泛的应用。但 EFI 和 SOT 作为指标体系,指示意义并不明确,对极端天气的预报能力和应用方法,需要通过应用检验来总结。Boisserie et al (2015)基于 EFI 和 SOT 构建了极端强风暴的预报方法,并通过大样本检验分析,给出了两个指数预报极端风暴的阈值,对于 7 年再现期的极端暴风雪事件,以 HSS(Heidke skill score)最大为标准时,2 d 时效的预报 EFI 和 SOT 的阈值分别为 0.7 和 -0.5。夏凡和陈静(2012)对比检验了基于中国 T213 模式 EPS 构建的 EFI 对 2008 年 1 月极端低温的预报效果,给出极端低温预警的 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)试验分析了基于 T213 集合预报系统的极端预报指数对气候累积概率分布的敏感性。刘琳等(2013)运用 T213 模式 EPS 构建的极端降水预报指数,开发了我国不同区域 6—8 月极端强降水的预报方法和 EFI 阈值。朱鹏飞等(2015)综合评估了 ECMWF 的降水 EFI 对安徽省不同季节极端降水的预报效果。

本文通过个例分析和大样本检验,对 ECMWF 的 EFI 和 SOT 在极端天气中的应用方法进行探索,并对我国各类极端天气的预报能力进行评估分析,从而帮助各级预报员进一步理解 EFI 和 SOT,并为深入应用奠定基础。限于篇幅,本文只研究分析气温和降水极端天气预报产品。

1 方法和资料

1.1 EFI 和 SOT 简介

经过不断的更新,目前 ECMWF 应用的 EFI 定

义如下(Zsótér, 2006):

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

式中, p 为概率, $F_f(p)$ 为集合预报小于等于“模式气候” p 分位数的概率, 权重 $1/\sqrt{p(1-p)}$ 会使得 EFI_{AD} 对两端的极端值更敏感。降水为非连续分布的变量, 设 p_1 为不发生降水的概率, 则降水 EFI_{AD}^p 为:

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

式中, $\theta_1 = \arcsin \sqrt{p_1}$ 。“模式气候”运用每周两次更新的, 过去 20 年回算的日历日附近 31 d 预报资料构建, 这一“模式气候”的应用, 一方面使得 EFI 有效地剔除了模式的系统性偏差, 另一方面也使得 EFI 表征的极端事件与季节高度相关。

EFI 的值在 $-1 \sim 1$, 越接近 -1 , 说明预报事件越偏向极端偏低情况, 如极端低温, 越接近 1 , 说明预报事件越偏向极端偏高情况, 如极端强降水、极端高温和极端大风, EFI 的值达到 $1(-1)$, 说明 EPS 预报的所有成员都大于(小于)“模式气候”的最大(小)值。

SOT 定义如下(Zsótér, 2006):

$$SOT_+(p) = -\frac{Q_f(p) - Q_c(1)}{Q_c(p) - Q_c(1)} \quad (3)$$

$$SOT_-(p) = -\frac{Q_f(p) - Q_c(0)}{Q_c(p) - Q_c(0)} \quad (4)$$

分别表示集合预报的 p 分位数与“模式气候”最大值和最小值的相对大小, 表征极端偏高和偏低的情况。式中, $Q_c(1)$ 和 $Q_c(0)$ 分别为“模式气候”的最大值和最小值, $Q_f(p)$ 和 $Q_c(p)$ 分别为集合预报和“模式气候”的 p 分位数。ECMWF 输出 $SOT_+(0.9)$ 和 $SOT_-(0.1)$ 。当集合预报的 90% 分位数 $Q_f(0.9) > (<) “模式气候”的 90% 分位数 $Q_c(0.9)$ 时, $SOT_+(0.9) > (<) -1$; 当 $Q_f(0.9)$ 大于“模式气候”最大值时——即集合预报最少 10% 的成员预报大于“模式气候”最大值, $SOT_+(0.9) > 0$ 。可见, $SOT_+(0.9) > -1$, 表示对“模式气候”90% 的分位数事件, 集合预报概率大于气候概率, 有一定的发生极端事件的可能性; $SOT_+(0.9)$ 的值越大, 表示集合预报有越多的成员预报大于“模式气候”极大值, 即发生极端偏大事件的可能性越大。 $SOT_-(0.1)$ 与 $SOT_+(0.9)$ 类似, 表示发生极端偏小事件的可能$

性, 此不累述。

与 EFI 的值域在 $-1 \sim 1$ 不同, SOT 的值域理论上为 $-\infty \sim +\infty$ 。当集合预报的所有成员都大于等于“模式气候”的最大值时, EFI 的值为 1 , 它不能反映成员大于“模式气候”最大值的程度, 而 SOT 刚好可以弥补这一不足, 集合成员相对于“模式气候”最大值越大, SOT 也越大(图 2d)。这正是提出 SOT 的初衷(Zsótér, 2006)。

1.2 资料

本文运用国家气象中心收集的 ECMWF EPS 2013 年 6 月至 2016 年 5 月的气温(2TI: 08—08 时平均气温; MN2TI: 08—08 时最低气温; MX2TI: 08—08 时最高气温)和 24 h 累计降水(TPI: 08—08 时累计降水)极端天气预报产品, 包括 EFI 和 SOT, 其中 SOT 的资料时间从 2015 年 1 月 15 日起, MN2TI 和 MX2TI 的 EFI 资料从 2015 年 7 月起。EFI 和 SOT 不仅预报 24 h 间隔的要素, 也预报 3、5 和 10 d 等间隔的要素(Zsótér, 2006), 限于篇幅, 本文只分析 24 h 间隔的预报。对于 24 h 间隔的预报, 2015 年 1 月 15 日之前预报时效为 5 d, 之后预报时效延长至 7 d。平均气温、最高气温和最低气温的 EFI 和 SOT 都是 08 时(北京时, 下同)至 08 时之间的, 和中央气象台业务中规定的日平均气温(每日 02、08、14 和 20 时气温平均值)、日最高气温(当日 02 时至次日 02 时的最高气温)、日最低气温(前一日 14 时至次日 14 时的最低气温)的规范有一定差别。这一差别会导致一定的预报误差, 在应用中需要注意。

实况资料运用国家气象信息中心归档整理的地面气象站基本气象要素日值数据集, 主要包括 24 h 降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、平均风和阵风等要素。

极端天气的定义采用分位数法(Tsonevsky and Richardson, 2012; Dong et al, 2011; 刘琳等, 2013; Boisserie et al, 2015)。由于 EFI 和 SOT 的“模式气候”构建, 是运用过去 20 年预报的日历日附近 31 d 回算资料(Zsótér, 2006), 其极端性是相对于历史同期而言。因此本文计算极端天气分位数的历史资料也采用类似的方法构建, 按照 WMO 对极端天气的定义, 选取 1983—2012 年的资料, 每个日历日前后各 15 d, 一共 $31 d \times 30 a = 930$ 个样本构建每个日历日的气候样本, 通过这一样本计算每个日历日的相

对于历史同期的极端天气。因此本文中涉及的“历史同期”专指这 930 个样本。由于资料的欠缺,部分站点、部分日历日的有效气候样本数小于 930 个,因此挑选样本数大于 $930 \times 0.9 = 837$ 的站点共 2311 个,作为本研究的站点。极端天气的分位数阈值分别选取 95%、97.5% 和 99%, 分别对应再现期约为 0.5、1 和 3 年一遇的事件(Boisserie et al, 2015)。

2 EFI 和 SOT 的应用

2.1 EFI 和 SOT 的理解

从 EFI 和 SOT 的计算公式以及回算资料构建的“模式气候”(Zsótér, 2006)可见, EFI 和 SOT 的应用过程中应注意以下几点:

(1) EFI 对极端天气预报的技巧与模式本身的准确率高度相关。以上指数假设模式极端事件和实况极端事件具有很强的相关性,即如果模式天气相对于“模式气候”为极端事件,则实际天气相对于实际气候也为极端事件(Petroliagis and Pinson, 2014)。由于模式和实况之间通常都具有很强的相关性(Bauer et al, 2015),因此这一假设基本成立。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 和 SOT 的预报技巧相应会较小,对极端天气的预报参考意义会显著下降。

(2) EFI 和 SOT 反映的是相对于当地历史同期的异常程度,和事件的绝对强度之间并没有直接的对应关系。EFI 并不是某一特定事件的发生概率,也并不对应于某一事件的强度,可以理解为某一类事件的发生概率之和,因此和历史同期某一再现期的事件存在一定的对应关系。另一方面,EFI 计算时,往往选取过去 20 年相同日历日前后共 31 d 的回算资料作为“模式气候”,所以 EFI 表征的极端事件是相对于历史同期而言的。因此不同季节、不同区域的 EFI 值所表示的意义和事件强度不同。

(3) 由于 EFI 对不同事件发生的概率进行了积分,导致部分信息的“损失”,相同的 EFI 并不代表某一极端事件发生的概率相同。因此引入 SOT_{90} 等指数,对比 EPS 预报的 90% 分位数与历史同期极值的相对大小,这一值越大,说明 EPS 至少有 5 个成员相对于历史极值越大,即极端事件发生的概率越大。尤其对于长时效的预报,由于离散度增大,EPS 的 CDF 和“模式气候”CDF 越来越接近,导致 EFI

的值较短时效预报明显减小,甚至 EFI 值表现不出极端情况(Tsonevsky and Richardson, 2012),但此时由于 EPS 有一定的成员预报了接近或大于“模式气候”极值的极端天气,因此 SOT 对此信息有很好的反映,表现出大于 0,甚至大于 1 的值。在应用中需要结合分析。

2.2 2015 年 4 月上旬“倒春寒”个例

2015 年 4 月上旬,我国出现大范围的低温天气,南方出现日平均气温低于 12°C 的“倒春寒”天气。此次低温天气的特征是,前期(3 月下旬)气温异常偏高,出现极端高温,尤其日最低气温偏高明显,之后在持续性的阴雨和冷空气影响下,导致剧烈降温,气温异常偏低。此次事件,部分站点日最低气温和降温幅度达到或接近历史同期极值,具有明显的极端天气特征(董全, 2016)。

图 1 所示为此次低温事件之前的极端高温和事件中的异常低温。3 月 31 日前后,我国大部地区在偏南暖平流和辐射影响下,升温至最高值,3 月 31 日的最低气温极端性明显,我国大部地区日最低气温达到或超过历史同期 95% 的分位数,其中 55 个站点达到或超过 1983—2012 年历史同期的最大值(图 1a)。从 24 h(图 1c)和 120 h(图 1e)时效预报的 3 月 31 日 08 时至 4 月 1 日 08 时平均气温的 EFI 和最低气温的 SOT 可见,EFI 在西北地区中东部和南方大部地区达到 0.8(24 h)和 0.6(120 h),说明有较大的出现极端高温的可能性。SOT 更为明显,不同时效在西北地区中东部和南方大部都大于 0,说明 EPS 至少有 5 个成员预报最低气温大于历史同期的最大值,预示出现突破历史同期最大值的较大可能性。

从 4 月 1 日开始,在持续的阴雨天气和后期冷空气的影响下,我国大部地区气温自北往南不断下降,至 4 月 7 日前后,南方气温下降至最低值。从日最低气温的极端性来看,黄淮南部、江汉、江淮和江南东北部出现低于历史同期 5% 分位数的极端低温,个别站点突破历史同期极值(图 1b)。从 24 h(图 1d)和 120 h(图 1f)时效预报的平均气温的 EFI 和最低气温的 SOT 来看,极端天气预报产品对此低温事件有较好的预报能力,EFI 值 < -0.7 , SOT > 0 ,预报落区与极端事件出现的落区也基本一致,主要位于黄淮南部、江淮、江汉和江南东北部。

图 1a 和 1b 中的最低气温为前一日 14 时至当

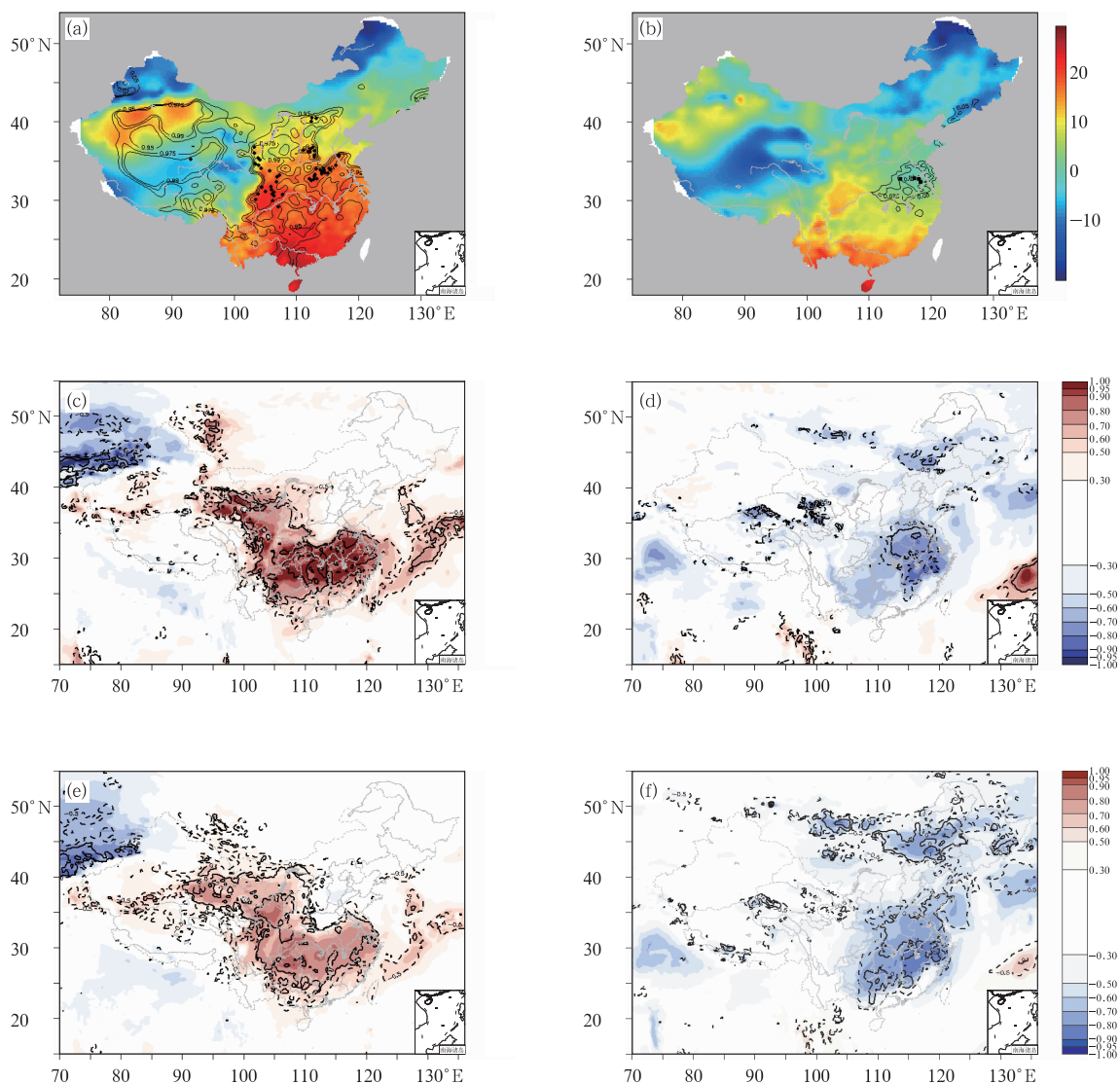


图1 2015年3月31日(a)和4月8日(b)全国日最低气温实况(填色,单位:℃)和占历史同期的百分位(等值线)(菱形为达到或突破历史同期极值的站点);与图1a(c, e)和1b(d, f)实况对应,分别为24 h(c, d)和120 h(e, f)时效的2 m平均气温EFI(填色)和2 m最低气温的SOT(等值线)

Fig. 1 The minimum temperature on 31 March (a) and 8 April (b) 2015 (shaded areas, unit: °C) and percentile according to climate records (contour) (The diamonds indicate the stations with temperature over the maximum values in records); corresponding to observations in Fig. 1a (c, e) and Fig. 1b (d, f), respectively being the 24 h (c, d) and 120 h (e, f) lead time forecasts of mean temperature EFI (shaded area) and minimum temperature SOT (contour)

日14时之间的最低气温,EFI和SOT对应的平均气温和最低气温都为08—08时的温度,和实况相差6 h。图1c和1e预报的31日08时至1日08时的极端天气落区,较图1a中30日14时至31日14时实况落区明显偏南。因此对于此次自北往南的降温过程,预报和实况落区之间的差异,除了本身的预报

误差之外,还有6 h的时效之差。因此在运用气温EFI和SOT产品时,需要根据具体情况而定,例如,由于最低气温往往出现在凌晨,因此图1d和1f中7日08时至8日08时的极端天气预报落区与实况图1b中7日14时至8日14时的落区更为一致。

3 定量检验

3.1 气温极端产品检验

从上述个例分析可见,EFI 和 SOT 主要对相对于历史同期的极端事件发生可能性的大小有很好的指示意义,因此与事件占历史同期的百分位之间有很好的对应关系。由于 EFI 和 SOT 的预报效果与模式和实况的相关性有关,相关性越高,预报效果越好,当相关性降低或者不相关时,EFI 和 SOT 失效(图略)。为了尽量避免模式落区预报误差的影响,

更好地揭示出 EFI 和 SOT 与事件所占历史百分位之间的关系,为 EFI 和 SOT 的应用提供参考,选择 2 m 平均气温 36 h 时效 EFI 预报与实况占历史同期百分位相关性达到 0.9 的气温个例 12 个,对比 EFI 和 SOT 与事件百分位之间的对应关系。

尽量消除模式预报与实况之间的落区误差后,图 2 所示分别为 36 h 时效平均气温 EFI、SOT90 和 SOT10 与日平均气温实况占历史同期百分位之间的散点图,可见当模式落区预报误差较小时,EFI 的值与事件占历史同期的百分位之间有很好的对应关系。从图 2a 估算,对于百分位在 95% 以上(5% 以下)的极端事件,36 h 时效 EFI 的阈值大概为

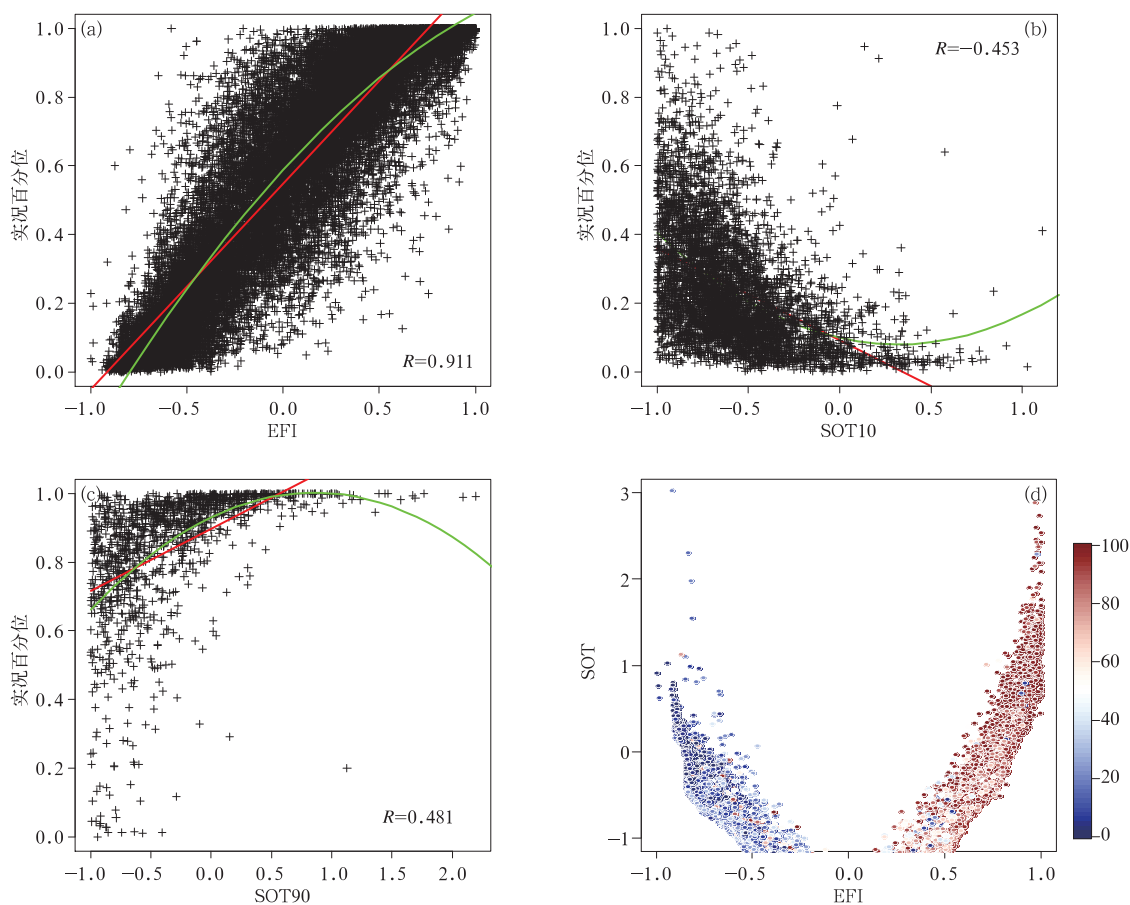


图 2 平均气温 EFI(a)、SOT10(b)和 SOT90(c)与实况日平均气温占历史同期百分位之间的散点图,及其相关系数和线性拟合方程,以及实况不同百分位(填色)时对应的 EFI 和 SOT(d)

(图中红线和绿线分别为一和二次拟合曲线,以上样本为 EFI 与平均气温占历史同期百分位相关系数大于 0.9 的 12 个个例)

Fig. 2 Mean temperature EFI (a), SOT10 (b) and SOT90 (c) vs. percentile of daily mean temperature corresponding to the historical climate, and the correlation coefficients and fitted linear function; and the EFI vs. SOT for different percentile (d)

(The red and green lines indicate the linear and 2nd fitted curves, the samples are the 12 weather processes whose correlations between EFI and daily mean temperature are larger than 0.9)

0.7(-0.8)左右, $SOT_{10}(SOT_{90}) > 0$ 时, 平均气温的百分位大都在 5% 以下(95% 以上), 另外从图 2d 可见, EFI 接近于 1 时, SOT 的值还存在较大的区别, 对于极端事件强度的预估有较好的辅助作用, 因此各类极端预报产品, 包括概率预报、确定性预报等产品应该综合运用。

由于 SOT 资料从 2015 年 2 月开始, 同时为了尽量避免模式版本升级对预报效果的影响, 分析 2015 年 3 月 1 日至 2016 年 2 月 29 日共一年的 EFI 和 SOT 对极端气温的预报效果。从图 2d 可见, EFI 和 SOT 之间有很好的线性对应关系, 以上个例分析(图 1)也显示, EFI 落区和 SOT 落区之间的一致性也很好, 两者对极端事件预报的 ROC 曲线(图 3a)来看, 两者预报效果接近, EFI 略优于 SOT。这与 SOT 设计的初衷一致, 即更好地反映事件的强度和极端性, 当 EPS 各成员都大于“模式气候”的最大值时, EFI 的值都为 1, 表现不出差异, 但 SOT 的值会有差异, 其值越大, 说明预报事件越极端(图 2d)。运用所有样本分析 72 h 时效 EFI 和 SOT 取不同阈值时对日平均气温 $\geq 95\%$ 分位数事件的预报评分(图 3b), 随 EFI 和 SOT90 的增大, 命中率(Hit)、空报率(F)和 bias 都逐步减小, 当 EFI 和 SOT90 分别取 0.6 和 -0.625 时, TS 评分达到最大, 分别为 0.37 和 0.36, 此时命中率分别为 0.56 和 0.62, 空报率为 0.03 和 0.04, bias 为 1.06 和 1.35, 可见两者的预报效果接近。bias 接近于 1, 说明以

TS 最大为标准所得的阈值, 具有较好的参考性。

以 TS 评分最大为标准, 分别对 1% 和 5% 百分位的极端低温事件, 以及 95% 和 99% 百分位的极端高温事件, 确定 EFI 和 $SOT_{10}(SOT_{90})$ 的预报阈值, 及其对应的 TS 评分、命中率和 bias 等检验参数。从图 4 和图 5 可见, 对于不同的极端事件, 在 TS 评分最大时, bias 都接近于 1, 只有 SOT90 对 99% 分位数的极端高温事件, bias 增大到 1.5 ~ 1.8, 因此这一阈值具有较好的业务应用价值。对于同一事件, EFI 和 SOT 预报的 TS 评分和命中率接近, 或 SOT 略小于 EFI, 说明两者对同一极端事件预报的效果接近, 与图 2d 和图 3a 结论一致。对于 1% 的极端低温事件, EFI 的阈值从 24 h 时效的 -0.9 逐渐增大到 180 h 时效的 -0.8, TS 评分在 0.3 左右, 命中率在 0.5 左右, SOT_{10} 的阈值在 0.38 左右; 对于 5% 的极端低温事件, EFI 的阈值增大到 -0.75(24 h) ~ -0.65(180 h), SOT_{10} 的阈值减小到 -0.38(24 h) ~ -0.12(24 h), TS 评分增大至 0.35 左右, 命中率略增大。对于 99% 百分位的极端高温事件, EFI 的阈值在 0.8(24 h) ~ 0.65(180 h), SOT90 的阈值在 0 左右, 此时 TS 评分在 0.25 左右, 命中率在 0.45 左右; 对于 95% 百分位的极端高温事件, EFI 的阈值减小到 0.6(24 h) ~ 0.5(180 h), SOT90 的阈值减小到 -0.65(24 h) ~ -0.5(180 h), TS 评分增大至 0.35 左右, 命中率增大至 0.55 左右。可见 EFI 的值越接近于 -1(1)、 SOT_{10}

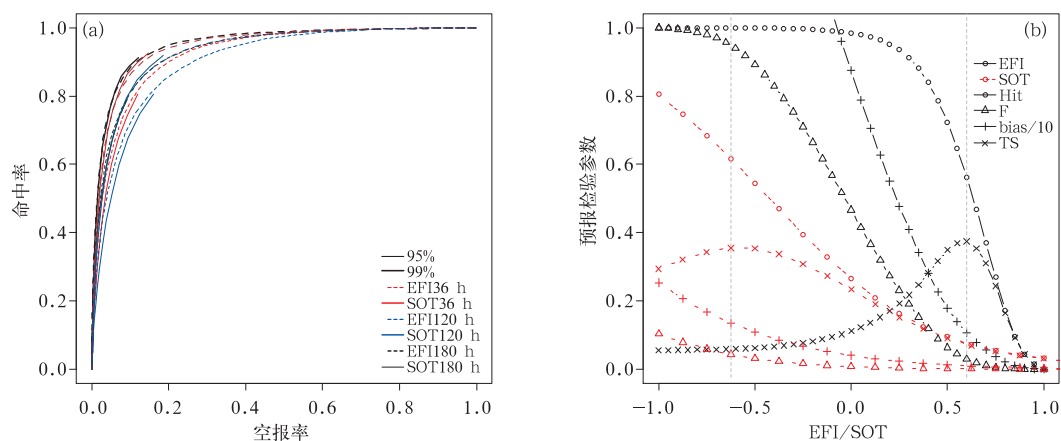


图3 不同时效日平均气温 EFI 和 SOT 对 95% 和 99% 以上百分位的极端高温事件预报的 ROC 曲线(a), 和 72 h 时效不同 EFI 和 SOT 对 95% 以上分位数事件的各项预报检验参数(b)

Fig. 3 The ROC curves of EFI and SOT for extreme events over 95% and 99% percentile for different lead times (a), and the performance measures of EFI and SOT for extreme events over 95% percentile of 72 h lead time (b)

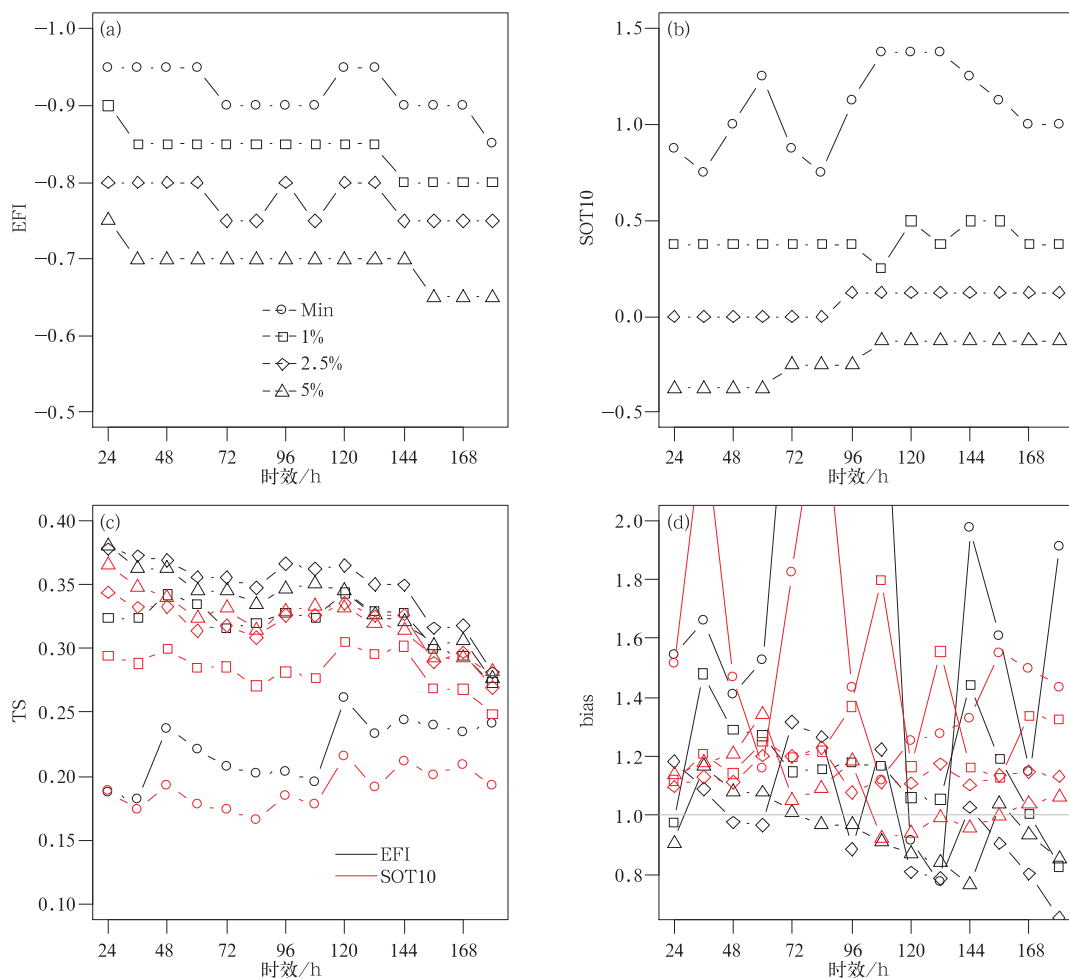


图4 不同时效平均气温 EFI(a)和 SOT10(b), TS 评分最大时, 对不同分位数的极端低温事件的阈值, TS 评分(c)及预报偏差 bias(d)

Fig. 4 Under the criteria of TS maximization, the thresholds of EFI (a) and SOT (b) for different percentile extreme low temperature events at different lead times and the corresponding TS (c), forecast bias (d)

(SOT90)的值越大,低温(高温)的极端性越强,当 TS 评分最大时,对 95%(5%)百分位的事件一再再现期为 0.5 年左右,EFI 和 SOT90(SOT10)的阈值分别为 0.7 (−0.7)和 −0.5 左右,对 99%(1%)百分位的事件一再再现期为 3 年左右,EFI 和 SOT90(SOT10)的阈值分别为 0.8(−0.85)和 0,当 EFI 接近 1(−1)、SOT90 (SOT10)大于 1 时,接近或突破历史同期极值的事件发生的概率会大大增大。以上阈值都表现出时效越短阈值的绝对值越大,随时效延长,阈值的绝对值减小的特点,从 24 h 延长至 180 h 时效,EFI 阈值减小量在 0.1 左右,SOT 阈值减小不明显。

对 EFI 和 SOT 不同月份的极端高低温事件的预报阈值和检验参数的对比可见(图 6),两者的预报效果存在一定的季节差异,总体上呈夏季预报较

好,冬季预报较差,尤其 EFI 对极端高温的预报。SOT 的季节差异不明显。对 5% 百分位的极端低温,EFI 的阈值冬季接近 −0.8,夏季在 −0.6 左右,TS 评分夏季接近 0.4,冬季在 0.2 左右,SOT10 的阈值在 −0.7 ~ −0.3,TS 评分在 0.2 ~ 0.4。对 95% 百分位的极端高温,EFI 的阈值夏季接近 0.7,冬季在 0.5 左右,TS 评分分别为 0.4 和 0.2 左右,SOT90 的阈值在 −1 ~ −0.5 左右,TS 评分在 0.4 左右。另外,EFI 和 SOT 对极端事件预报的最大 TS 评分、命中率和阈值,从 2013 年 6 月至 2016 年 5 月,都呈现出一定的增大的趋势,表明其预报性能在不断提高。可见对极端事件的预报,夏半年优于冬半年,且不同季节的阈值存在一定的差异。

需要注意的是,EFI 和 SOT 都是针对 08—08

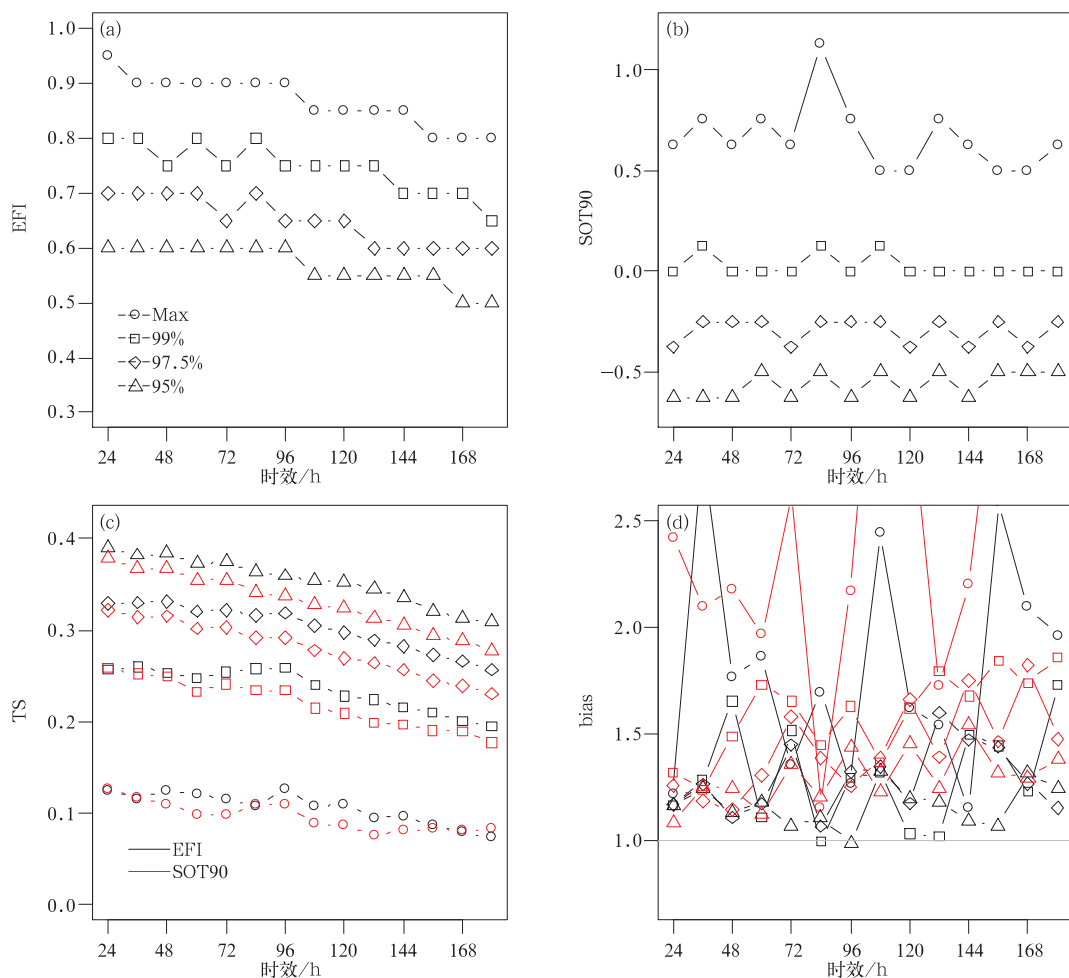


图5 同图4,但为SOT90和极端高温事件

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for SOT90 and extreme high temperature events

时间间隔的预报,而日平均气温为02、08、14和20时气温的平均值,两者之间有6h的差异,对于受冷空气影响的自北向南的过程性降温,这一时差会导致一定的预报误差。所以在应用EFI和SOT产品,以及以上总结的阈值和检验产品时,需要针对冷锋的位置,灵活运用。

08—08时最高和最低气温的SOT和EFI指数的资料时间分别从2015年2和7月开始,由于日最低气温往往出现在夜间,日最高气温出现在午后,因此当天的日最低气温检验时运用前一天的预报,例如对比检验2015年6月3日最低气温时,运用6月2日08时至3日08时的预报。

以TS评分最大为标准,确定最高气温和最低气温的EFI和SOT阈值,及其对应的各项检验评分(表1),可见阈值和平均气温的阈值接近,TS评分和命中率较平均气温略小,bias略大,但都小于2,其中,最低气温的阈值略低于最高气温的阈值,

TS评分和命中率较最高气温也略小,bias略大。可见,EFI和SOT对极端平均气温的预报效果最好,阈值也最大,极端日最高气温的预报效果次之,极端日最低气温的预报效果相对而言最低,阈值也最大。反映出极端低温的预报难度较高温大,预报时可适当降低预报阈值。

我国的天气气候存在明显的区域差异,对比48h时效以上各指数对低于5%百分位的极端低温事件,在不同区域的阈值(图略),可以发现阈值和检验参数存在明显的区域差异,对于相同的预报对象,由于EFI和SOT存在很强的相关性(图2d),两者的区域差异类似,而平均气温、最高气温和最低气温三者的区域差异存在一定的不同。对于极端偏低的平均气温,EFI和SOT的阈值在北方地区、云南、广东和两湖地区较小,分别在-0.9和-0.9左右,而在青藏高原、西南地区北部、华东和黄淮等地较大,分别在-0.7和-0.2左右,其余地区接近表1中的

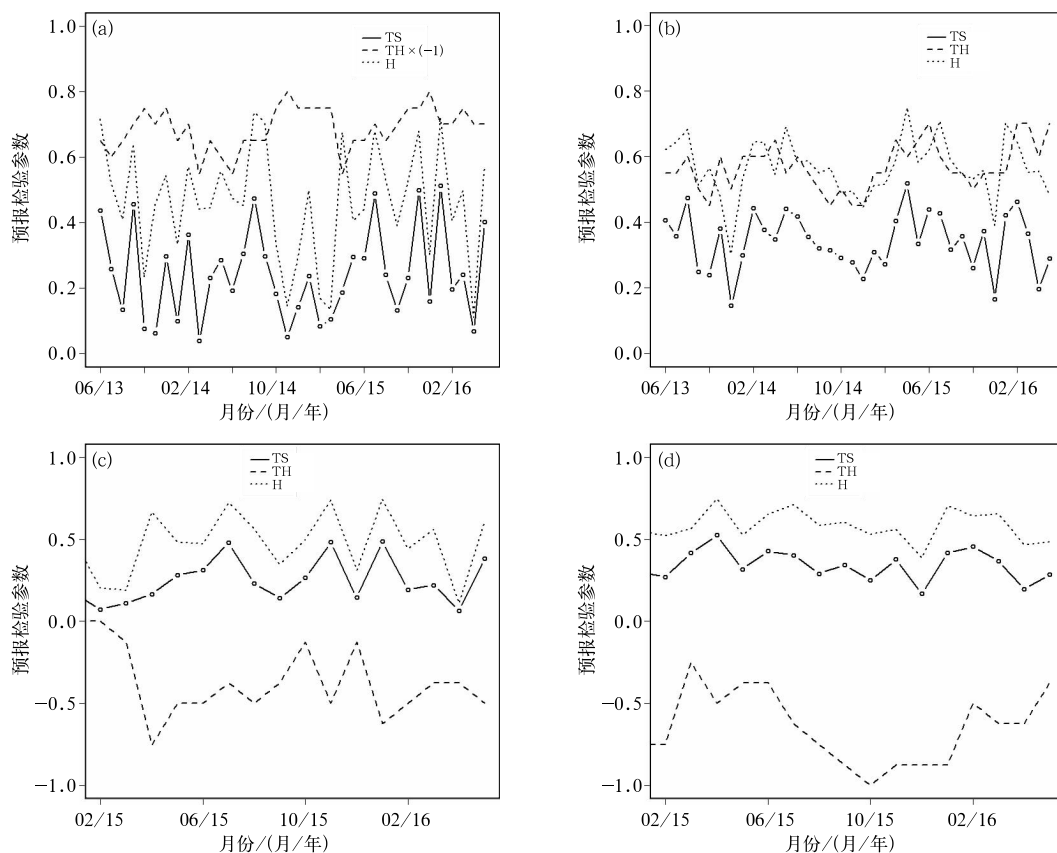


图 6 平均气温 36 h 时效 EFI(a,b) 和 SOT(c,d) 对 5% 百分位的极端低温(a,c) 和 95% 百分位的极端高温(b,d), TS 评分最大时不同月份的阈值(TH) 和命中率(H)

Fig. 6 The thresholds (TH) and hit rate (H) of mean temperature EFI (a, b) and SOT (c, d) for 5% percentile extreme low temperature (a, c) and 95% percentile extreme high temperature (b, d) in different months, under the criteria of TS maximization at 36 h lead time

全国阈值。对于极端偏低的最高气温,EFI 和 SOT 在贵州、青藏高原东部和北部,以及东北地区南部等地阈值较大,分别在 -0.8 和 -0.2 左右,其余地区分别在 -0.95 和 -0.8 左右,较表 1 中的全国阈值明显偏小,可见最高气温的阈值的区域差异更明显。对于极端偏低的最低气温,青藏高原、东北地区 and 云南等地较小,EFI 和 SOT 的阈值分别在 -0.95 和 -0.9 左右,其余地区接近或略大于表 1 中的全国阈值。

可见不同产品的预报效果和最优阈值存在较为明显的区域差异,且不同产品的区域差异不同,因此在应用中需要加强实时检验和总结。在最优阈值的情况下,预报的各项检验评分的空间差异与阈值类似(图略)。

3.2 降水极端产品检验

由于降水的非正态分布特征,降水较气温预报

难度更大。但降水只关注极端强降水,所以降水只计算 SOT90,不计算 SOT10。为了避免由于雨带位置预报误差而导致的 EFI 和 SOT90 预报的失效,从而得到真正的 EFI 和 SOT90 与降水事件占历史同期的百分位之间的关系,选取 2015 年 3 月至 2016 年 5 月,预报和实况之间的相关系数大于 0.77 的 12 次事件,分析 EFI 和 SOT90 与百分位之间的关系。

从图 7 可见,剔除了落区预报误差之后,与气温极端预报指数相同,降水 EFI 和 SOT90 与历史同期百分位之间存在很好的对应关系,受降水非正态分布的影响,降水 EFI 和百分位之间的相关系数明显小于气温,反映出降水较气温预报难度更大的特征。SOT90 预报不同的值时,降水事件占历史同期的百分位存在显著差异,随 SOT90 的增大,明显增大。SOT90 在不同的取值区间时,降水事件百分位

表 1 不同时效最高和最低气温 EFI 和 SOT10(SOT90),TS 评分最大时,对 1%和 5%分位数的极端低温事件,以及 95%和 99%的极端高温事件预报的阈值(TH)、TS 评分(TS)、命中率(H)和预报偏差 bias(B)

Table 1 Under the criteria of TS maximization, the thresholds (TH) of EFI and SOT for 1% and 5% percentile extreme low temperature and 95% and 99% percentile extreme high temperature at different lead times and the corresponding TS, hit rate (H), forecast bias (B)

			<i>T</i> _{Max}			<i>T</i> _{Min}		
			36 h	96 h	168 h	36 h	96 h	168 h
1%	EFI	<i>TH</i>	−0.9	−0.85	−0.8	−0.85	−0.8	−0.75
		<i>TS</i>	0.27	0.27	0.24	0.23	0.22	0.16
		<i>H</i>	0.41	0.44	0.36	0.43	0.49	0.41
		<i>B</i>	0.96	1.06	0.9	1.3	1.69	1.96
	SOT10	<i>TH</i>	0.38	0.38	0.38	0.25	0.38	0.38
		<i>TS</i>	0.24	0.23	0.2	0.18	0.18	0.15
		<i>H</i>	0.43	0.4	0.35	0.4	0.37	0.34
		<i>B</i>	1.18	1.19	1.12	1.61	1.5	1.63
5%	EFI	<i>TH</i>	−0.7	−0.7	−0.65	−0.7	−0.7	−0.65
		<i>TS</i>	0.3	0.28	0.23	0.32	0.29	0.22
		<i>H</i>	0.5	0.39	0.34	0.54	0.45	0.38
		<i>B</i>	1.14	0.81	0.82	1.22	0.97	1.08
	SOT10	<i>TH</i>	−0.38	−0.25	−0.25	−0.38	−0.25	−0.25
		<i>TS</i>	0.29	0.26	0.21	0.27	0.26	0.2
		<i>H</i>	0.48	0.42	0.39	0.51	0.47	0.4
		<i>B</i>	1.17	1.06	1.27	1.38	1.26	1.45
95%	EFI	<i>TH</i>	0.6	0.55	0.45	0.55	0.5	0.45
		<i>TS</i>	0.29	0.25	0.21	0.32	0.28	0.24
		<i>H</i>	0.56	0.5	0.5	0.57	0.56	0.49
		<i>B</i>	1.44	1.48	1.89	1.34	1.58	1.56
	SOT90	<i>TH</i>	−0.75	−0.62	−0.75	−0.75	−0.62	−0.62
		<i>TS</i>	0.33	0.27	0.22	0.3	0.28	0.24
		<i>H</i>	0.63	0.53	0.57	0.56	0.54	0.51
		<i>B</i>	1.57	1.46	2.17	1.39	1.47	1.66
99%	EFI	<i>TH</i>	0.8	0.75	0.7	0.75	0.7	0.65
		<i>TS</i>	0.16	0.12	0.1	0.21	0.17	0.13
		<i>H</i>	0.37	0.3	0.23	0.44	0.41	0.29
		<i>B</i>	1.77	1.67	1.47	1.56	1.75	1.53
	SOT90	<i>TH</i>	0	0.12	0	−0.12	0	−0.12
		<i>TS</i>	0.2	0.17	0.14	0.19	0.17	0.14
		<i>H</i>	0.46	0.36	0.36	0.45	0.38	0.38
		<i>B</i>	1.76	1.44	2.01	1.74	1.58	2.15

出现频率最大的区域明显不同,SOT90 在 −1~−0.5 时,百分位最大频数在 86%左右,SOT90 在 −0.5~0 时,百分位最大频数在 98%左右,当 SOT90>0 时,百分位最大频数在 99%以上,尤其当 SOT90>1 时,大多数样本的百分位达到 99%,接近历史同期极值。EFI 受值域的限制,对于接近或超过历史同期极值的事件,其值都接近或等于 1,不能反映出事件的极端程度。SOT90 和 EFI 不同,不受值域的限制,对接近或超过历史同期极值的事件有更好的预报能力,事件越极端,其值越大。对于接近 100%百分位的极端事件,EFI 的值都接近或等于 1,但 SOT90 的值之间存在较大差异。因此 SOT90

对于接近或大于历史同期极值的事件,较 EFI 更有优势。对比降水 EFI 和 SOT 之间的相关性(图略)和气温两者的相关性(图 2d)可见,相对于气温,降水 EFI 和 SOT90 之间的相关性明显降低,因此相对于气温而言,降水 EFI 和 SOT90 预报落区之间的差异更大。

运用所有降水样本对比分析降水 EFI 和 SOT90 之间的预报效果(图 8)。气温 EFI 和 SOT 预报效果接近,或前者略优于后者(图 3),但降水 SOT90 明显优于 EFI,且时效越长,优势越明显,这一结果与 Tsonevsky and Richardson(2012)个例分析结论一致,对于欧洲的一次暴雪过程,在 7 d 时

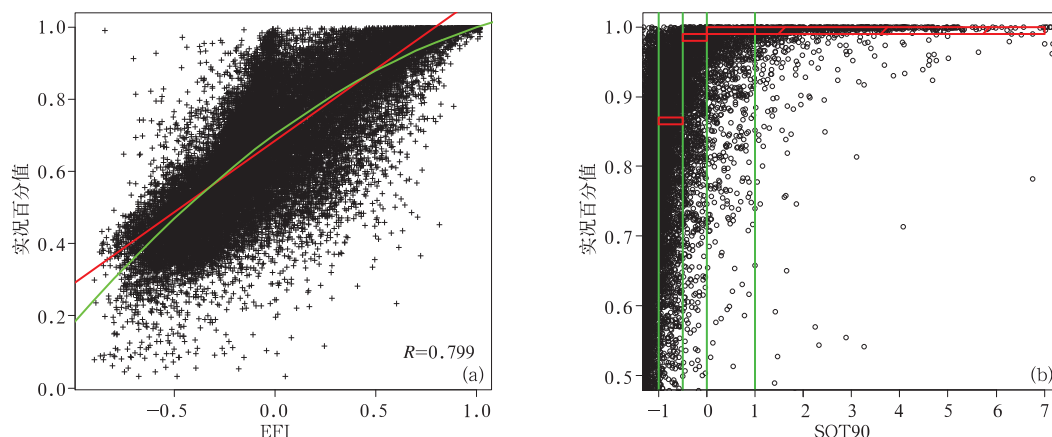


图 7 (a) 降水 EFI 与历史同期百分位之间的散点图, 及两者之间的相关系数和线性拟合函数 (红线为线性拟合直线, 绿线为二次拟合曲线), (b) SOT90 与历史同期百分位之间的散点图 (绿线分别为 -1 、 -0.5 、 0 和 1 的 SOT90 值, 红色区域为不同的绿线所示 SOT90 区间内, 百分位数频数分布最多的区间, 以上 EFI 和 SOT90 都为 36 h 时效预报)

Fig. 7 (a) Same as Fig. 2a, but for precipitation,

(b) precipitation SOT90 vs. observation percentile (The green lines indicate SOT90 values of -1 , -0.5 , 0 and 1 , and the red rectangles indicate the highest frequency bin in the corresponding green spaces; the forecast lead time is 36 h)

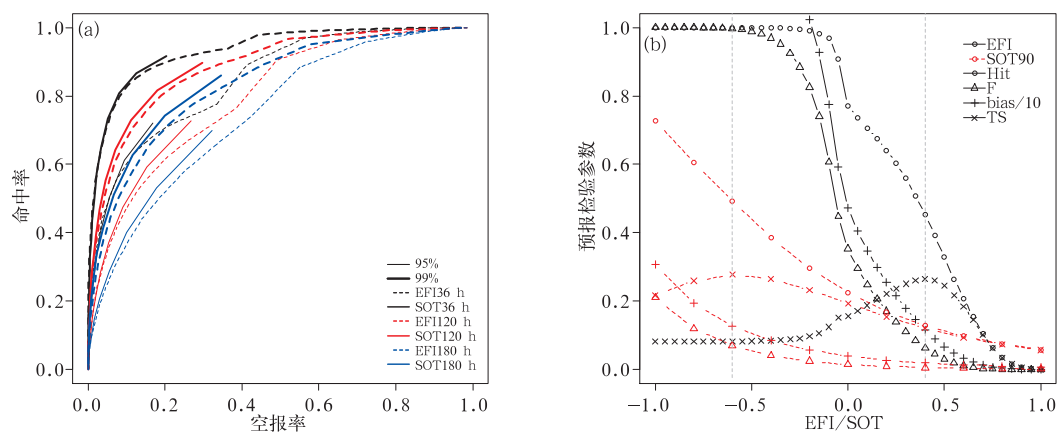


图 8 同图 3, 但为降水 EFI 和 SOT90

Fig. 8 Same as Fig 3, but for precipitation EFI and SOT90

效, EFI 对其没有反应, 而 SOT90 预报大于 1 的值, 提前预报了极端降雪的可能性, 3 d 时效, 两者对极端暴雪都有很好的预报。可见, 虽然对于极端气温, EFI 和 SOT 预报效果接近, 但对于极端降水, SOT90 预报效果优于 EFI。

分析 EFI 和 SOT90 取不同值时, 对 95% 百分位的极端事件的预报效果 (图 8b) 可见, EFI 和 SOT90 分别取 0.4 和 -0.6 时, TS 评分最大, 而且此时 SOT90 的 TS 评分大于 EFI 的 TS 评分, 两者的 bias 接近, 都略大于 1, 命中率也接近, 在 0.5 左右。

以 TS 评分最大为标准, 分别确定不同时效的 EFI 和 SOT90 对 95% 和 99% 百分位极端降水事件的预报阈值, 及其对应的 TS 评分、命中率和 bias。一方面为了尽量避免模式升级对预报效果的影响, 另一方面由于 SOT 资料的开始时间为 2015 年 2 月, 选用 2015 年 3 月至 2016 年 2 月整一年的资料进行阈值的计算。如图 9 所示, 对于 95% 百分位以上的极端降水事件, EFI 的阈值从 0.45 (36 h) 减小到 0.3 (168 h), SOT90 的阈值都在 -0.6 , TS 评分从 0.34 减小到 0.17, 命中率从 0.5 减小到 0.4, bias 从 1 增大到 1.5, 对于 99% 百分位以上的极端降水

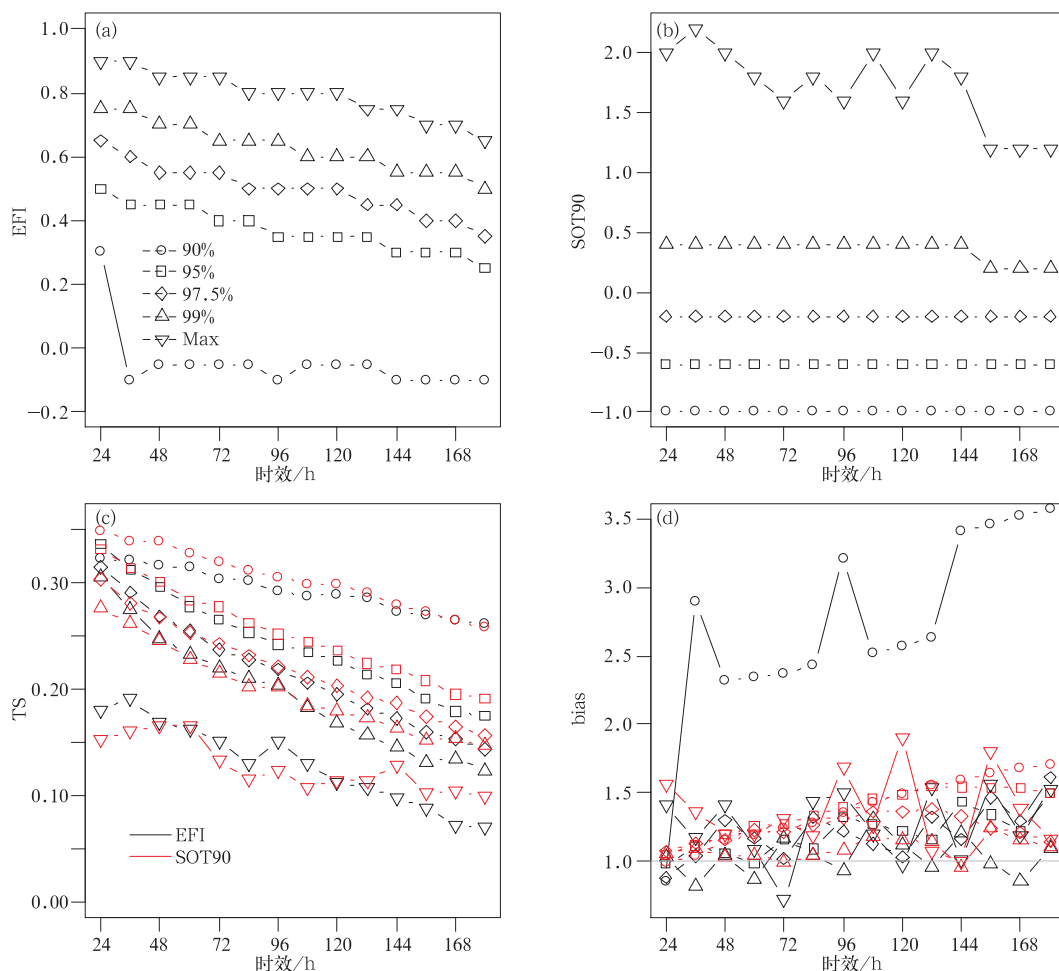


图9 同图4,但为降水EFI和SOT90

Fig. 9 Same as Fig. 4, but for precipitation EFI and SOT90

事件,EFI的阈值从0.75(36 h)减小到0.5(180 h),SOT90的阈值从0.4减小到0.2,TS评分从0.3减小到0.12,命中率从0.45减小到0.23,bias从1增大到1.3。相对于气温极端产品,降水EFI的阈值明显偏小,而SOT90的阈值明显偏大,阈值和各检验参数随时效的延长,减小更明显。可见,对于不同的要素,EFI和SOT90的阈值和预报效果明显不同,因此在每一个产品的应用中,都应该进行相应的分析和检验。

对降水EFI和SOT90的阈值和各检验参数随季节和空间区域上的变化特征进行分析,如图10所示。对于48 h时效、大于95%百分位的极端强降水事件,EFI和SOT90并没有比较明显的季节差异,这一点与气温极端预报产品不同。EFI的阈值从2013年6月至2015年6月大概在0.3~0.5波动,从2015年6月至2016年5月,阈值、TS评分和命中率都明显增大,到2016年5月,阈值增大到接近

0.6。EFI阈值在空间分布上很不均匀,在南方地区和东北地区偏大,在0.55左右,在华北和内蒙古中西部偏小,在0.35左右,我国其他地区接近图9中的均值0.45。SOT90阈值的季节差异更不明显,都与图9中的平均值-0.6接近,同时从2015年2月至2016年5月,阈值和各项检验参数提高不明显。在空间分布上,主要在南方地区偏大,在-0.3左右,在青藏高原中西部和南疆偏小,在-0.7左右,我国其他地区接近图9中的平均值-0.6。可见降水极端预报产品的阈值,整体上呈现南方偏大,北方偏小,同时没有明显的季节差异,EFI随模式的升级有一定的提高的趋势,SOT90提高的趋势不明显。

可见降水极端预报产品与气温极端预报产品明显不同,一方面表现在极端降水的阈值明显小于极端气温,另一方面降水阈值并没有较为明显的季节差异,同时在区域分布上,整体上呈现南方偏大,北方偏小。气温极端预报产品的空间差异各产品不同。

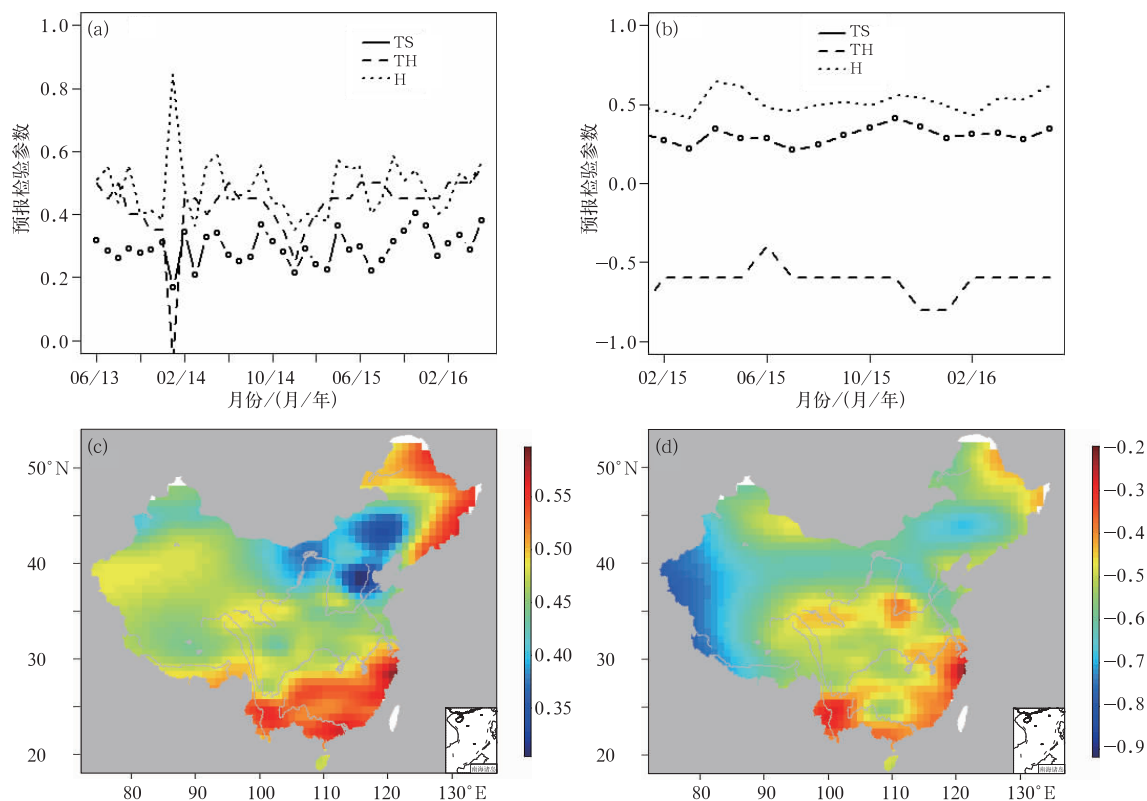


图 10 48 h 时效降水 EFI(a,c)和 SOT90(b,d),对 95% 百分位以上极端降水,不同月份的阈值和各项检验评分(a,b),阈值在空间上的差异(c,d)

Fig. 10 Temporal (a, b) and spatial distribution (c, d) of precipitation EFI (a, c) and SOT90 (b, d) thresholds and performance measures for 95% percentile extreme precipitation at 48 h lead time

4 结论和讨论

从以上个例分析和大样本总结可见,ECMWF 基于 EPS 的 EFI 和 SOT 产品对我国极端高温、低温和极端强降水都具有较好的预报能力,所得结论如下:

(1) 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”,因此与相对于历史同期的事件的百分位之间具有较好的对应关系,气温 EFI 和 SOT 之间的预报效果接近,降水 SOT 预报效果优于 EFI。

(2) 以 TS 评分最大为标准所得阈值,与欧洲等区域的阈值存在一定的差异,气温的阈值较后者明显偏大,降水的阈值较后者偏小。对于 5%(95%)的极端低温(高温)事件,EFI 和 SOT 的阈值分别在 $-0.7(0.6)$ 和 $-0.3(-0.6)$ 左右;对于 1%(99%)百分位的极端低温(高温)事件,EFI 和 SOT 的阈值

分别在 $-0.85(0.75)$ 和 $0.38(0)$;对于 95% 和 99% 的极端强降水事件,EFI 的阈值在 0.45 和 0.7 左右,SOT90 的阈值在 -0.6 和 0.4 左右。整体上时效越长阈值的绝对值越小,预报效果越差,事件越极端,EFI 和 SOT 的阈值的绝对值越大。TS 评分最大时,预报 bias 都接近于 1 或略大于 1,因此这一阈值具有较好的应用价值。

(3) 气温 EFI 和 SOT 的预报效果和阈值存在较为明显的季节差异,夏季预报较好,冬季预报较差,夏季预报阈值和各项评分较大,冬季较小。因此,冬季的极端低温比夏季的极端高温预报难度更大。在空间上同样存在较大的差异,不同产品的阈值和预报效果空间差异不同,另外最高和最低气温的 EFI 和 SOT 的阈值和各项检验参数与平均气温的接近。

(4) 降水 EFI 和 SOT 预报阈值的季节差异不明显,随着模式的升级,EFI 预报阈值有一定的提高的趋势,SOT 提高趋势不明显,在空间分布上,大体

上呈现南方偏大,北方偏小的特征。

由于EFI和SOT预报的极端性是相对于历史同期气候而言的,因此在应用中一方面可以根据EFI和SOT对事件的极端性进行预估,另一方面需要分析预报时刻的历史同期的不同百分位事件的强度,从而对事件的强度进行预报和预警。当预报大于“模式气候”极值时,SOT相对于EFI有更好的预报效果。

气温EFI和SOT产品,都是相对于08—08时的,因此和业务中的日平均气温、日最高气温、日最低气温存在一定的时差,必然会导致一定的预报误差,尤其当有冷空气自北往南快速移动带来过程性低温时,时差导致的预报差异会更明显(图1)。因此在运用气温EFI和SOT对极端气温进行预报时,需要根据冷暖空气的影响时段,参考相应预报时效的产品,或者多个时效的产品。另外,根据预报和实况之间的时差,构建新的预报产品和订正应用方法,也是一个值得探讨和研究的问题。

EFI和SOT由于运用了模式回算资料,较好地消除了模式的系统性偏差,利用这一特征,对模式降水量的系统性偏差进行预估和订正,也是一个值得研究的方法。

参考文献

- 董全,2016. 2015年4月上旬我国低温天气特征分析[J]. 天气预报, 8(1):23-29.
- 董全,金荣花,代刊,等,2012. 基于TIGGE资料的站点超级集合极端预报指数(EFI)设计及检验[C]//第九届全国灾害性天气预报技术研讨会论文集. 北京:中国气象中心.
- 董全,金荣花,代刊,等,2016. ECMWF集合预报和确定性预报对准河流域暴雨预报的对比分析[J]. 气象,42(9):1146-1153.
- 杜钧,Grumm R H,邓国,2014. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”:以北京2012年7月21日特大暴雨为例[J]. 大气科学,38(4):685-699.
- 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.
- 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.
- 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.
- 翟盘茂,李蕾,周伯铨,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.
- 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.
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature,525(7567):47-55.
- Boisserie M, Descamps L, Arbogast P, 2015. Calibrated forecasts of extreme windstorms using the Extreme Forecast Index (EFI) and Shift of Tails (SOT)[J]. Wea Forecasting, 31(5):1573-1589. DOI:10.1175/WAF-D-15-0027.1.
- Dong Quan, Chen Xing, Chen Tiexi, 2011. Characteristics and changes of extreme precipitation in the Yellow-Huaihe and Yangtze-Huaihe Rivers basins, China[J]. J Climate, 24(14):3781-3795.
- 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.
- Persson A, 2011. User guide to ECMWF forecast products[R]. Reading United Kingdom:ECMWF:63-67.
- Petroliagis T I, Pinson P, 2014. Early warnings of extreme winds using the ECMWF extreme forecast index[J]. Meteor Appl, 21(2):171-185.
- Tsonevsky I, Richardson D S, 2012. Application of the new EFI products to a case of early snowfall in Central Europe[R]. ECMWF Newsletter No. 133. Reading United Kingdom:ECMWF:4.
- Zsótér E, 2006. Recent developments in extreme weather forecasting[R]. ECMWF Newsletter No. 107. Reading United Kingdom:ECMWF:8-1.