

徐同,杨玉华,李佳,等,2019. SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. 气象,45(8):1065-1074. Xu T, Yang Y H, Li J, et al, 2019. An objective verification of forecasting ability of SMS-WARMS V2.0 model precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 45(8):1065-1074(in Chinese).

SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区 降水预报能力的客观检验*

徐 同^{1,2,3} 杨玉华^{1,2,3} 李 佳^{1,2,3} 陈葆德^{1,2,3}

1 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

2 中国气象局台风数值预报重点实验室,上海 200030

3 上海区域高分辨率数值预报创新中心,上海 200030

提 要: 本文采用标准降水检验方法、EDI 方法和 MODE 方法对新一代上海区域中尺度模式 SMS-WARMS V2.0 模式 2015 年 12 月至 2016 年 11 月的西南地区降水预报效果进行评估。结果表明:(1)模式对西南地区四季的降水 TS 评分均较高,夏季和秋季相对更高,且在 48 h 内预报性能比较稳定。(2)预报偏差和 TSS 评分显示,模式对西南地区春、夏两季的各个量级降水预报均较实况偏多,而对秋季的大暴雨和冬季的大雨以上量级预报则相对偏少。总体而言,对西南地区的降水技巧呈现出预报成功率高于空报率的特征。(3)模式对西南地区的小雨、暴雨和大暴雨预报评分优于 EC 模式。(4)EDI 检验显示模式对西南地区的极端降水有较高的预报技巧,对四川中部和东北部以及贵州西南部的极端降水预报技巧相对更高。(5)模式对 2015 年 8 月一次西南涡诱发的暴雨过程的空间落区预报较好,强度较实况偏强。(6)MODE 方法统计结果表明,模式对西南地区暴雨预报的目标质心偏差较小,降水中心强度偏强。

关键词: SMS-WARMS V2.0 模式,中国西南地区,降水,检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.003

An Objective Verification of Forecasting Ability of SMS-WARMS V2.0 Model Precipitation in Southwest China

XU Tong^{1,2,3} YANG Yuhua^{1,2,3} LI Jia^{1,2,3} CHEN Baode^{1,2,3}

1 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

2 Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, CMA, Shanghai 200030

3 Shanghai Innovative Center of Regional High-Resolution NWP, Shanghai 200030

Abstract: Standard precipitation verification method, extreme dependency index and method for object-based diagnostic evaluation (MODE) are applied in this paper to make evaluation of SMS-WARMS V2.0 precipitation in Southwest China from December 2015 to November 2016. The results show that (1) the treat scores of four seasons in Southwest are high, especially in spring and summer, and the performance is relatively stable within 48 h. (2) The results of frequency bias and true skill score show each magnitude precipitation in spring and summer forecasted by SMS-WARMS V2.0 in Southwest China is more than observation, but the model forecast to torrential rain in autumn and heavy rain in winter is relatively less.

* 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0109700)、国家自然科学基金青年项目(41505087)和上海市气象局科技开发项目(MS201802)共同资助

2017 年 9 月 7 日收稿; 2019 年 6 月 5 日收修定稿

第一作者:徐同,主要从事数值天气预报检验工作. Email: xut@mail.typhoon.gov.cn

通信作者:陈葆德,主要从事数值天气预报研究. Email: baode@mail.typhoon.gov.cn

Overall, the forecast skill in Southwest China exhibits the features that the POD is higher than FAR. (3) The treat scores of light rain, torrential rain and downpour forecasted by SMS-WARMS V2.0 are higher than ECMWF model. (4) Model has a good performance in forecasting extreme precipitation in Southwest through extreme dependency index, especially better for central and northeastern Sichuan and southwestern Guizhou. (5) Precipitation area forecast of a rainstorm process caused by a southwest vortex in August 2015 performed well in space, but the intensity was stronger than observation. (6) Statistic results made by MODE show that the rainstorm object centroid has a small bias between forecast and observation, but the central intensity of precipitation is stronger than observation.

Key words: SMS-WARMS V2.0, Southwest China, precipitation, verification

引 言

我国西南地区地处中印半岛北部、青藏高原东南侧,包括云南全省、贵州西部、四川西南部、广西西北部以及西藏东部一带。由于其特殊的地理位置及其特定的地形,使该地出现一些像西南涡和高原低涡类的中尺度天气系统,较小的时空尺度决定其区域性、突发性和剧烈性。肖玉华等(2010)基于 T639、T213、日本和德国数值预报模式对 2008 年 5—9 月的预报分区域进行了客观检验分析,结果表明各模式在西南地区的降水预报能力随着降水级别的增加而减弱,到暴雨级别,西南区已成为各模式 TS 评分最低区域,正确率最低值出现在四川盆地。公颖等(2010)利用 AREM、T213L31、JAPAN 三个模式对 2008 年夏半年(5—11 月)西南地区降水预报进行了统计检验,结果表明三个模式在青藏高原东南缘地区均有降水空报现象,对于西南低涡这一尺度小、结构复杂的特殊天气系统,当前模式对其强度、位置和诱发的强降水预报效果仍有待提高。张利红和何光碧(2014)研究了 GRAPES_MesoV3.1 模式对 2011 年夏季青藏高原东部及周边区域的预报效果,研究表明对于降水预报,无论是 6 h 还是 24 h 累加降水,V3.1 模式的 TS 评分都高于 V2.5 模式,尤其是大雨和暴雨预报,V3.1 模式能明显减小漏报率、提高日平均降水准确率,但对空报率和云南以西的虚假降水改善不明显。王静等(2017)利用 2015 年 6—8 月 GRAPES-RPES 区域集合预报资料,评估了模式对西南低涡发生、发展、移动及降水过程集合预报性能,证明模式有较优的预报技巧。华东区域 9 km 分辨率的中尺度模式系统是华东区域气象中心主要的数值预报业务模式系统,2013 年该模式系统进行了全面升级改进,模式的预报范围扩大至全国

(以下简称 SMS-WARMS V2.0)。徐同等(2016)将 SMS-WARMS V2.0 与旧版模式进行了对比统计检验,结果显示新版模式对降水、2 m 气温和 10 m 风速的预报性能均优于旧版模式。由于西南地区邻近青藏高原,地形复杂多变,因此对数值预报有较大挑战,对该地区的客观检验有助于进一步了解华东区域模式对该地区的预报性能,并且西南地区相对较多且可靠的观测资料使得检验结果较为可信,可以为该模式在西南地区的应用提供参考依据。

1 资 料

用于统计检验的模式预报资料为 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式和 ECMWF 高分辨率模式(以下简称 EC 模式)08 时(北京时)预报降水资料,个例检验资料为 2015 年 8 月 16 日 08 时模式预报降水资料。2015 年 8 月 16 日 08 时至 18 日 08 时,受盆地西南涡西移影响,四川、重庆、贵州等地出现大范围降雨天气,暴雨主要位于川渝交界的四川盆地东部地区,超过 100 mm 的降雨站点数为 37 个,超过 200 mm 的降雨站点数为 3 个,其中四川高坪区观测站累积降雨量更是达到 331 mm。此次强降雨对川、渝多个市、县造成洪涝、塌方、滑坡等灾害,人民财产遭受重大损失。因此,本文选择此个例进行检验。

使用的观测资料主要包括:2015 年 12 月至 2016 年 11 月全国 2400 个观测台站逐 6 h 降水量观测数据,24 h 累积降水由 6 h 间隔资料累加得到,个例检验观测资料为 2015 年 8 月 16—17 日。本文定义的西南地区检验范围为 $25^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 、 $97^{\circ}\sim 110.5^{\circ}\text{E}$,主要包含青藏高原东部、四川、重庆、贵州、青海东南部、甘肃南部、陕西南部、云南北部、广西北部等地。评估区域 462 个观测站点分布如图 1 所示。

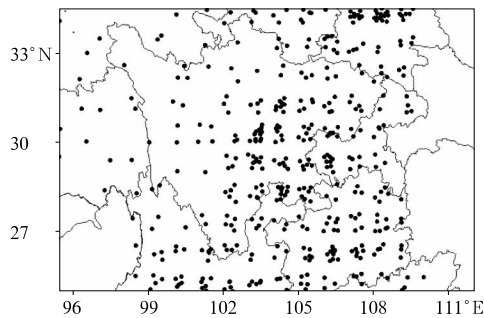


图 1 检验区域 462 个观测站点分布

Fig. 1 Distribution of observation stations in verification region, including 462 stations

2 检验方法

2.1 标准降水检验方法

本文常规降水检验方法主要采用 TS 技巧评分、预报偏差(BIAS)和 TSS 评分。王雨等(2014)、潘留杰等(2014)、公颖等(2015)、陈超君等(2015)和屠妮妮等(2016)也采用这些方法开展了相关的检验评估工作。三种评分指数均来自于列联表(表 1),分别表示如下:

(1) 临界成功指数(CSI):

$$CSI = \frac{A}{A + B + C}$$

通常也称之为 TS 评分,TS 评分的取值范围为 [0,1],CSI=1 表示预报完美。

(2) 预报偏差(BIAS):

$$BIAS = \frac{A + B}{A + C}$$

表示预报事件发生的次数与观测事件发生次数的比率,BIAS=1 表示预报完美。

(3) TSS 评分:

$$TSS = \frac{AD - BC}{(A + C)(B + D)}$$

$$TSS = POD - POFD$$

式中,POD 为成功率,POFD 为空报率,TSS 反映

表 1 降水检验列联表

Table 1 Contingency table of rainfall verification

预报事件	观测事件	
	发生	未发生
发生	A	B
未发生	C	D

了成功预报与空报的差异,阈值范围[-1,1],理想的预报 TSS=1,TSS=0 则表示无预报技巧。

2.2 极端降水检验方法

标准降水检验方法(例如 TS、ETS 等)评估模式确定性预报的极端二元事件(例如极端降水时)会依赖于基准率(base rate,即样本气候值,是事件发生的相对频率)的大小,当检验的事件变得越来越极端时,评分会退化为一个很小的值,接近于 0。众所周知,受局地气候的影响,某一地区例如我国西北和华南极端降水事件出现频次是有很大差异的,因此,用 TS 等评分评价极端降水预报的技巧是不够客观的。Stephenson et al (2008)、Ferro and Stephenson(2011)提出了用于极端天气事件的检验方法极端依赖评分(EDS)以及极端依赖指数(EDI),这些检验方法解决了评分技巧会随事件极端性增加而趋向于 0 的问题,也不依赖于基准率,因此是目前为止检验极端降水的较为客观的方法。Ghelli and Primo(2009)将 EDS 检验方法应用于 EC 模式的极端降水预报检验研究。本文将采用 EDI 评估 SMS-WARMS V2.0 对西南地区的极端降水预报性能。基准率和 EDI 的计算公式如下:

$$Base\ Rate = \frac{A + C}{A + B + C + D} \quad (1)$$

式中,A,B,C,D 定义参见表 1。

$$EDI = \frac{\log F - \log H}{\log F + \log H} \quad (2)$$

式中,F 为空报率, $F = \frac{B}{B + D}$; H 为击中率, $H =$

$\frac{A}{A + C}$; EDI 取值范围为[-1,1],EDI=1 表示预报完美。

2.3 基于目标的诊断检验方法(MODE)

空间检验技术是近十年发展起来的新兴检验技术,主要面向中尺度天气数值预报模式。Davis et al (2006a;2006b)发展的一种基于目标的诊断评估方法(method for object-based diagnostic evaluation, MODE),该方法可以客观地从预报和观测场中识别出检验目标,并且可以对预报和观测目标的相关属性进行对比,这些属性包括位置、形状、移向等。通过空间属性的计算和对比,提供了一种类似于预报员主观检验的方法,该方法更适用于中尺度高分辨率模式的检验。近年来,国内尤凤春等(2011)、王国

荣等(2014)、薛春芳和潘留杰(2016)、李佳等(2016)、张博等(2017)也开展了 MODE 方法在数值模式检验中的应用研究,本文中 MODE 方法的卷积半径为 6 个格距,检验阈值 24 h 累积降水大于 50 mm,关于该方法的详细介绍参见李佳等(2016)。

3 检验结果分析

3.1 常规检验方法分析

图 2 显示了模式 2015 年 12 月至 2016 年 11 月对西南地区四季降水的 TS 评分以及偏差情况。24 h 累计降水分别按照小雨(24 h 累积降水量 > 0.1 mm)、中雨(24 h 累积降水量 > 10 mm)、大雨(24 h 累积降水量 > 25 mm)、暴雨(24 h 累积降水量 > 50 mm)和大暴雨(24 h 累积降水量 > 100 mm)进行检验。其中四季如下定义,冬季(2015 年 12 月至 2016 年 2 月)、春季(2016 年 3—5 月)、夏季(2016 年 6—8 月)、秋季(2016 年 9—11 月)。如图 2 所示,除个别量级外(例如秋季 48 h 暴雨和大暴雨评分),模式对西南地区四季的降水 TS 评分总体随着降水量级的增加而降低,即小雨评分最高,大暴雨评分最低。随着预报时效增加(24 h 增至 48 h),预报技巧降低并不显著,例如春季和夏季 24 h 小雨预报技巧评分分别为 0.55 和 0.60,48 h 技巧评分则分别为 0.53 和 0.58。对比不同季节的降水预报技巧可见,模式对西南地区夏季和秋季降水的预报技巧相对较高,而冬季的预报技巧相对较低。对比张利红和何光碧(2014)的研究结果可见,从 TS 评分来看,SMS-WARMS V2.0 模式对夏季西南地区的降水有较高的预报技巧,并且在 48 h 以内预报性能比较稳定。

预报偏差是统计区域内(该降水等级)预报降水站数与实况降水站数的比值,因此预报偏差越接近 1,说明该量级预报范围越接近实况,偏差大于 1 说明该量级预报降水较实况偏多(范围偏大),偏差小于 1 说明该量级预报降水较实况偏少。由图 2 可见,模式对西南地区春季降水(图 2b)的预报偏差在各个量级均高于 1,说明模式预报降水较实况偏多;夏季(图 2d)的情况与春季类似;秋季模式(图 2f)对小雨至暴雨的预报偏差都大于 1,而对大暴雨的预报偏差小于 1,说明模式对西南地区秋季大暴雨量级的降水预报比实况偏少;冬季模式对西南地区降

水预报偏差(图 2h)在小雨和中雨量级较实况偏多,在大雨以上量级较实况偏少。

TSS 评分反映了成功预报与空报的差异,如图 3a 所示,模式对西南地区春季降水预报的 TSS 评分随着降水阈值的增加(小雨到暴雨)有逐渐降低的趋势,说明随着降水量级的增加,模式正确预报率和空报率越来越接近。24 h 大暴雨 TSS 评分高于暴雨评分,说明模式对西南地区春季大暴雨的预报正确率和空报率的差异大于暴雨。随着检验阈值增加(小雨至大暴雨;图 3b),模式夏季降水预报正确率和空报率的差异逐渐减小,TSS 评分逐渐降低。秋季情况与夏季类似(图 3c),不同的是大暴雨的 TSS 评分要高于暴雨。模式对西南地区冬季降水预报的 TSS 评分在暴雨和大暴雨量级为 0(图 3d),表示这两个阈值的预报正确率和空报率相等。从以上分析可以看出,模式对西南地区的降水技巧总体呈现出预报成功率高于空报率的特征。

图 4 为 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 与 EC 模式对西南地区的降水预报 TS 评分,由图可见,EC 模式对西南地区的中雨和大雨预报 TS 评分相对要高于 SMS-WARMS V2.0 模式,如 EC 模式的中雨 24 和 48 h 预报评分分别为 0.24 和 0.21,SMS-WARMS V2.0 模式则分别为 0.23 和 0.19。SMS-WARMS V2.0 模式对小雨、暴雨和大暴雨的预报 TS 评分要高于 EC 模式,在 24 h 累积降水量 > 100 mm 以上表现的比较明显,例如 SMS-WARMS V2.0 的大暴雨 24 和 48 h 预报评均为 0.02,EC 模式则分别为 0.01 和 0.004,说明 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区的暴雨以上强降水有较高的预报技巧。

3.2 极端降水检验方法分析

图 5 显示了 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区四季降水预报的 EDI 评分、TS 评分和基准率,评分阈值分别为 24 h 累积降水 > 25 mm、 > 50 mm、 > 80 mm、 > 100 mm。从基准率分析可见,西南地区四季降水事件出现频率均随着事件极端性的增加而迅速趋向于 0,与之对应的 TS 评分由于对基准率的依赖性,也有类似的特征,例如夏季 24 h 累积降水量 > 100 mm 的基准率为 0.002,对应的 TS 评分为 0.01。与 TS 评分相比,EDI 评分并不随着降水事件极端程度的增加而迅速减小并向 0 收敛,相反对暴雨以上极端降水仍有较高的预报技巧。

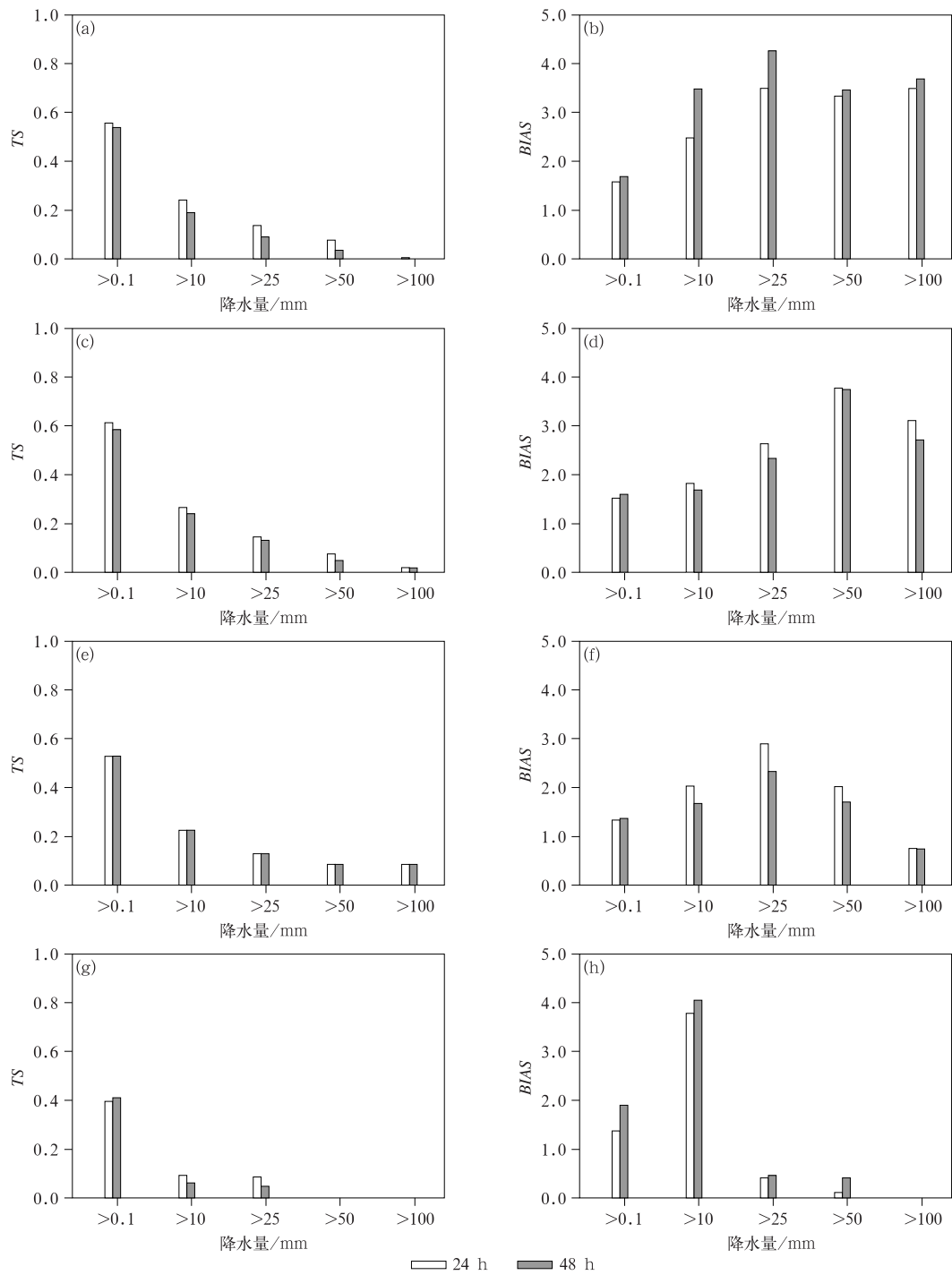


图 2 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区四季(24 和 48 h)降水预报的 TS 评分(a, c, e, g)及预报偏差(b, d, f, h)
(a, b)春季, (c, d)夏季, (e, f)秋季, (g, h)冬季

Fig. 2 TS (a, c, e, g) and BIAS (b, d, f, h) of precipitation forecast of four seasons in Southwest China by SMS-WARMS V2.0 from December 2015 to November 2016
(a, b) spring, (c, d) summer, (e, f) autumn, (g, h) winter

以春季为例,24 h 累积降水量>80 mm 降水的 EDI 评分为 0.58,夏、秋、冬季的 EDI 评分也分别达到

0.50、0.75 和 0.78;春季 24 h 累积降水量>100 mm 降水的 EDI 评分为 0.56,夏、秋、冬季的

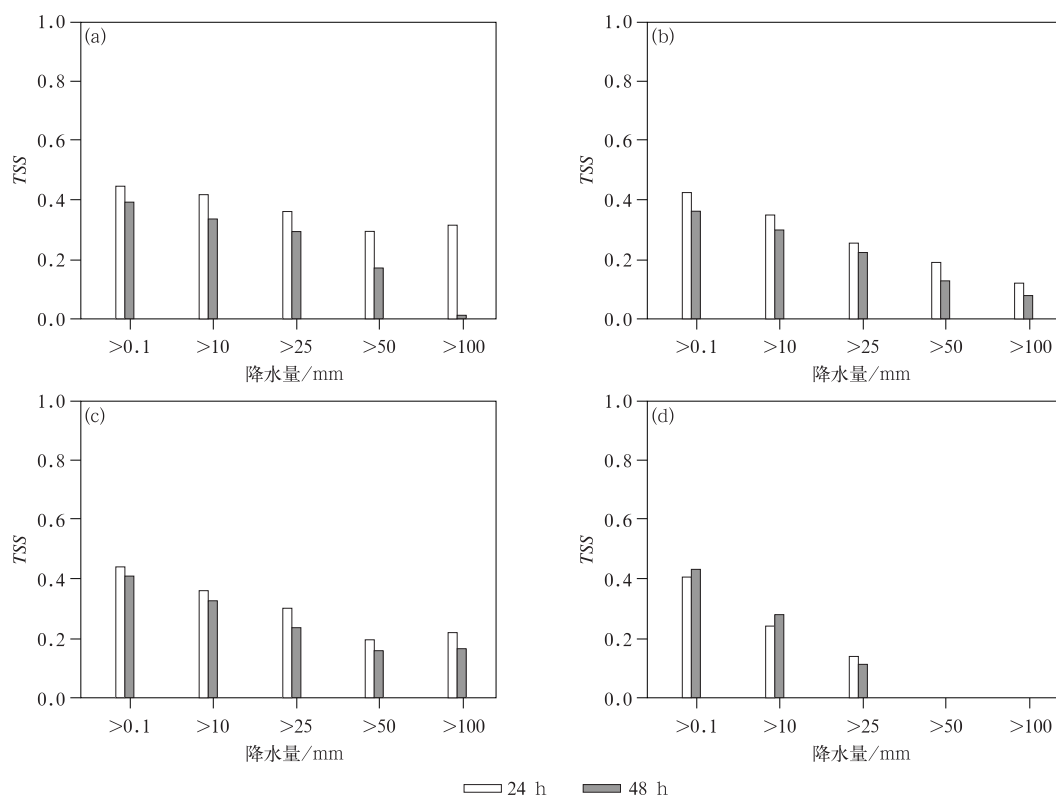


图 3 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区四季(24 和 48 h)降水预报的 TSS 评分
(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 3 TSS of precipitation forecast of four seasons in Southwest China by SMS-WARMS V2.0 from December 2015 to November 2016
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

EDI 评分分别为 0.60、0.70 和 0.74。可见 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区四季极端降水均有较高的预报技巧,具有较好的参考价值。

图 6 显示了 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区 2015 年 12 月至 2016 年 11 月预报 EDI 评分空间分布情况,阈值分别取 24 h 累积降水量 > 25 mm、 > 50 mm、 > 80 mm。从 24 h 累积降水量 > 25 mm 的 EDI 评分空间分布(图 6a)可见,评分较高的区域主要位于高原东部、青海南部、四川中部及甘肃南部,其中评分最高站点为四川广元(0.88),评分最低站点为四川万源(0.06)。从模式对西南地区 24 h 累积降水量 > 50 mm(暴雨量级以上)降水预报 EDI 评分指数分布分析可见(图 6b 和 6c),模式对西南地区的极端降水有较高的评分技巧,24 h 累积降水量 > 50 mm 和 > 80 mm 所有站点的平均评分分别为 0.72 和 0.85,图 6b 中 EDI 评分高值主要位于四川中部和东北部、甘肃西南部等地,其中评分最

高站点为重庆奉节(0.87),评分最低站点为珙县(0.32),图 6c 中 EDI 高值主要位于四川中部和东北部、贵州西南部等地,其中评分最高站点为四川雅安(0.82),评分最低站点为泸县(0.59)。

3.3 西南涡强降水过程检验

西南低涡是影响中国降水的重要天气系统之一。由西南低涡诱发或加强的暴雨过程往往能给西南地区带来严重的自然灾害和生命财产损失。2015 年 8 月 16 日开始,四川盆地出现了范围最广、强度最大的一次区域暴雨性过程,暴雨从 16 日晚一直持续至 18 日白天。此次暴雨的主要天气影响系统为西南低涡,水汽主要来源于孟加拉湾,暖湿空气沿着副热带高压外围的西南气流进入四川盆地,与来自北方的冷空气在川东北地区相遇,为暴雨提供了充足的水汽条件。如图 7a 所示,8 月 16 日 08 时至 17 日 08 时,强降水主要出现在四川偏东部地区,大暴

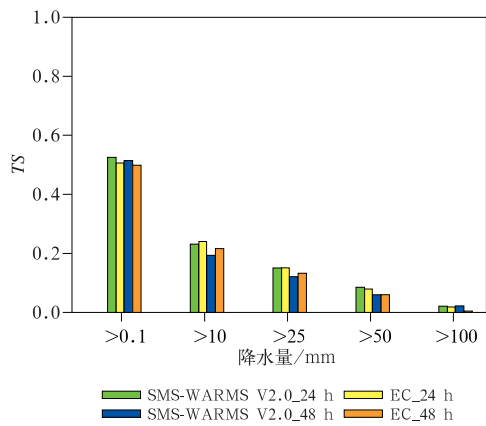


图 4 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式与 EC 模式对西南地区 24 和 48 h 降水预报的 TS 评分

Fig. 4 The precipitation TS forecasted by SMS-WARMS V2.0 and EC model from December 2015 to November 2016

雨中心位于德阳至资阳一带。17 日 08 时至 18 日 08 时,随着低涡东移,强降水主要出现在四川东部和贵州北部(图 7b)。

图 8 为 SMS-WARMS V2.0 模式 2015 年 8 月 16 日 08 时预报经由 MODE 方法识别出的配对目标(阈值为 24 h 累积降水 >50 mm,表示识别的是暴雨以上的目标)。由图可见,本次预报共识别出一个目标。表 2 中列举出了图 8 中配对目标的部分属性,这些属性包括了面积、质心距离以及百分位强度比率等,这些属性值客观地从空间反映出模式预报的性能。例如,预报目标面积为 623,观测目标面积为 603,两者面积之差为 20,面积比为 1.03,因此可见模式对暴雨落区的预报面积和观测面积非常接近,说明模式对本次西南涡暴雨影响的空间范围预报较为准确。经计算,预报目标的质心位置位于 30.32°N、105.61°E,对应观测目标质心位置位于 30.49°N、105.85°E,两者非常接近。预报目标与观

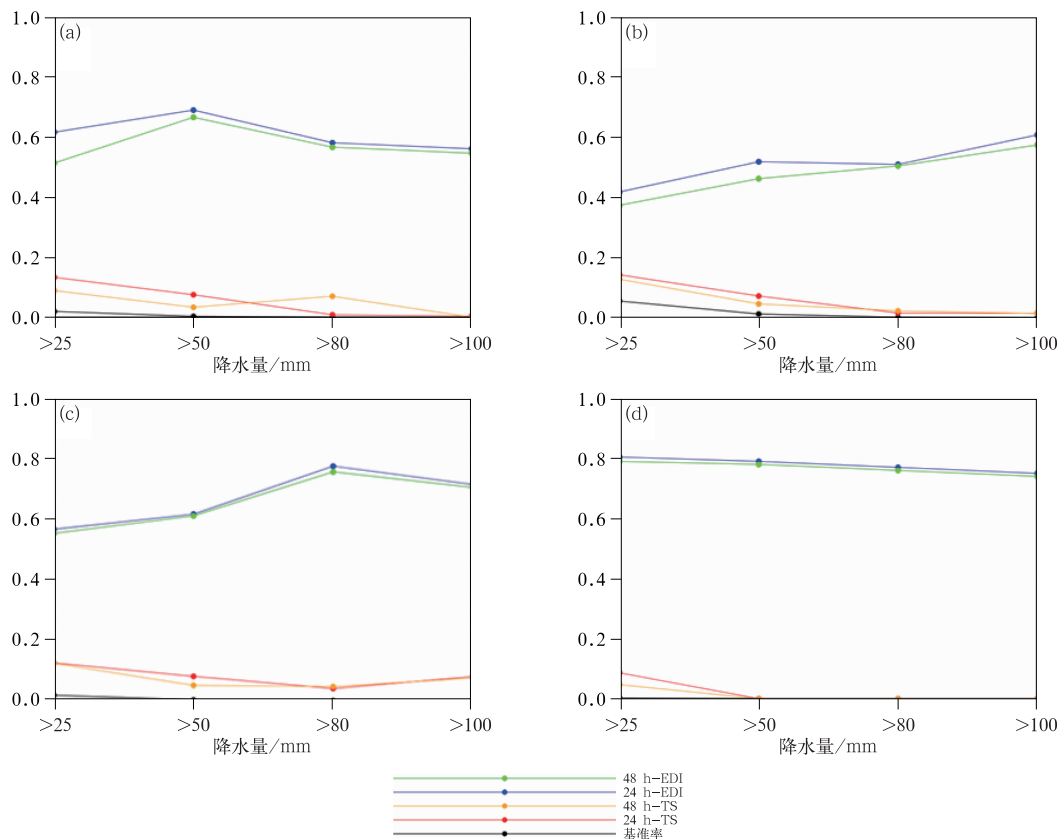


图 5 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区四季 EDI、TS 评分及降水预报基准率 (a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 5 Extremal dependence indice (EDI), TS and base rate of precipitation forecast of four seasons in Southwest China by SMS-WARMS V2.0 from December 2015 to November 2016 (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

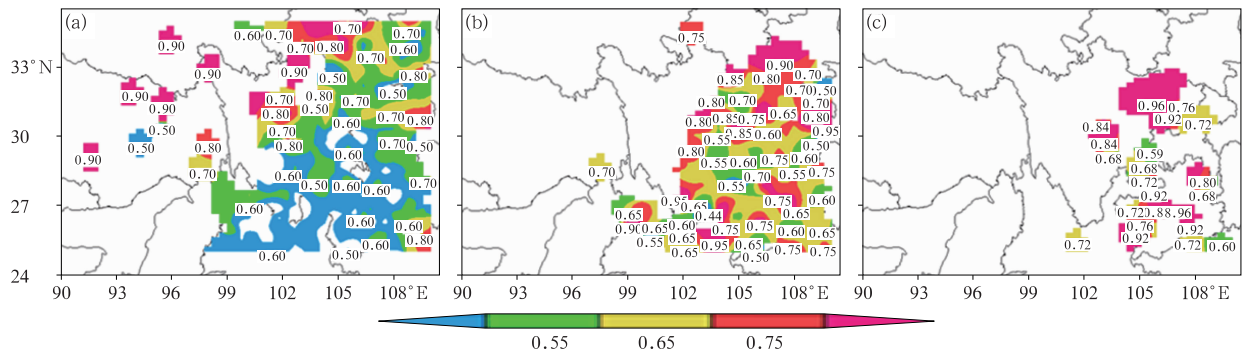


图 6 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区 24 h 降水预报 EDI 空间分布
(a) >25 mm, (b) >50 mm, (c) >80 mm

Fig. 6 EDI distribution of precipitation forecast in Southwest China by SMS-WARMS V2.0
from December 2015 to November 2016
(a) >25 mm, (b) >50 mm, (c) >80 mm

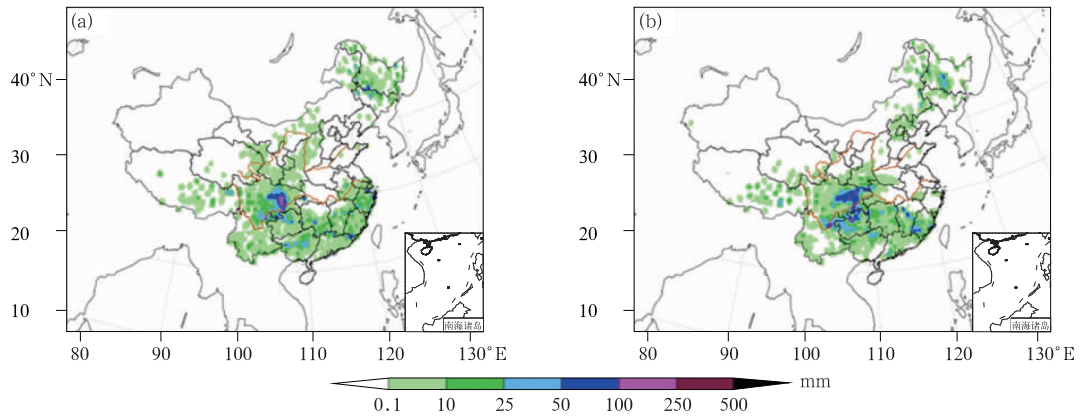


图 7 2015 年 8 月 16 日 08 时至 17 日 08 时(a), 17 日 08 时至 18 日 08 时(b)
24 h 累积实况降水量

Fig. 7 Accumulated 24 h observed rainfall from 08:00 BT 16 to 08:00 BT 17 (a),
08:00 BT 17 to 08:00 BT 18 (b) August 2015

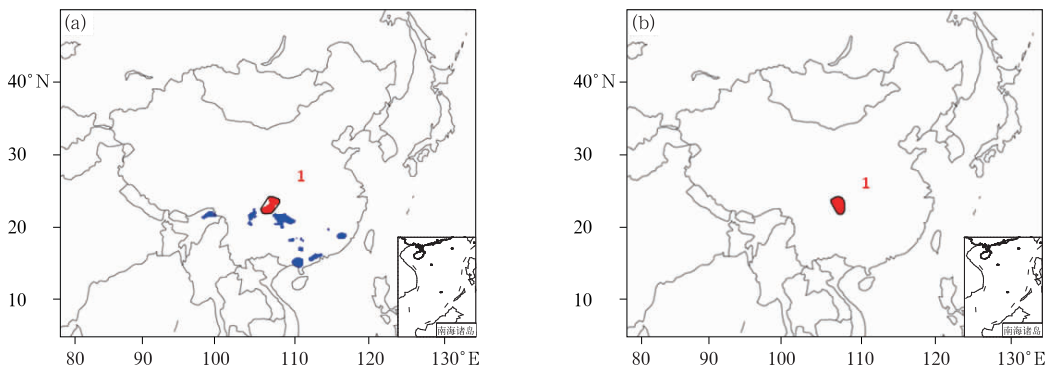


图 8 2015 年 8 月 16 日 SMS-WARMS V2.0 模式单次预报识别出的配对目标
(a) 预报, (b) 观测

Fig. 8 Matched object identified for the 16 August 2015 case shown in Fig. 7 for
(a) SMS-WARMS V2.0 and (b) observation

表 2 图 8 中配对目标属性值和属性比值
Table 2 Matched object attribute and attribute comparisons shown in Fig. 8

对象属性值/比值	合成对象序号
模式预报面积	623
MICAPS 面积	603
交叉面积	407
面积比	1.03
预报目标质心纬度	30.32°N
观测目标质心纬度	30.49°N
预报目标质心经度	105.61°E
观测目标质心经度	105.85°E
质心距离	3.35 格距
预报场 50%分位强度	62.76
观测场 50%分位强度	66.22
50%分位强度比率	0.95
预报场 90%分位强度	125.71
观测场 90%分位强度	92.29
90%分位强度比率	1.36

测目标之间的质心距离为 3.35 格距, 约为 30.1 km, 并且两者之间交叉面积达到 407, 说明预报对象与观测对象之间空间偏差很小。从预报强度来看, 预报目标的 50%分位强度为 62.76, 即预报场中有 50%的格点降水强度大于 62.76 mm, 对应观测目标 50%分位强度为 66.21, 两者之比为 0.95, 强度基本相当; 预报目标的 90%分位强度为 125.71, 即预报场中有 10%的格点降水值大于 125.71 mm, 而观测目标的 90%分位强度为 92.29, 两者之比为 1.36, 说明模式预报的降水强度总体要

强于观测, 在 90%分位表现得更为明显。

3.4 MODE 方法统计检验

表 3 给出 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式预报西南地区暴雨经由 MODE 方法检验识别出的暴雨目标对象平均统计值, 共有 43 个统计样本, 其中目标质心纬度的平均偏差为 0.05°, 说明模式预报的目标位置相对于观测略偏北, 目标质心经度平均偏差为 -0.31°, 说明模式预报的目标位置相对于观测略偏西。从目标质心的纬度和经度偏差可见, 模式对降水目标的空间落区比较准确, 偏差较小。预报目标和观测目标的平均面积比为 2.03, 说明模式预报的暴雨以上强降水的范围要大于观测。90%分位比率为 1.83, 表明模式对强降水中心的预报强于观测。

分析模式对西南地区春、夏、秋、冬四季的空间预报检验属性平均值可见, 春季和秋季的目标平均质心纬度为 -0.10 和 -0.09°N, 表明预报目标位置相对于观测偏南, 而夏季和冬季偏北; 从目标质心经度分析, 四季的预报目标位置相对于观测均为偏西; 从面积比分析, 模式四季的预报目标和观测目标平均面积比均 > 1, 其中秋季误差最小 90%分位比率均大于 1。综上所述, MODE 方法的多项空间检验指标表明模式对西南地区的夏季和秋季暴雨预报技巧相对更高。

表 3 2015 年 12 月至 2016 年 11 月西南地区暴雨经由 MODE 方法检验识别的多个目标平均属性值及四季平均值
Table 3 Average attribute value of objects distinguished by MODE in Southwest China from December 2015 to November 2016 and four seasons

属性	总样本	春季	夏季	秋季	冬季
目标质心纬度(预报-观测)	0.05	-0.10	0.007	-0.09	0.38
目标质心经度(预报-观测)	-0.31	-0.27	-0.22	-0.19	-0.56
面积比	2.03	2.12	1.93	1.12	2.95
90%分位强度比率	1.83	1.65	1.59	1.23	2.85

注: 目标质心纬度(经度)的正值表示偏北(东), 负值表示偏南(西)。

Note: The positive value of object centroid latitude (longitude) means north (east), the negative value means south (west).

4 结论和讨论

本文采用多种降水检验方法评估 2015 年 12 月至 2016 年 11 月 SMS-WARMS V2.0 模式对我国西南地区的降水预报性能, 得出以下主要结论:

(1) TS 评分显示, SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区四季的降水评分均有较高的预报技巧, 夏季和秋季相对更高, 并且在 48 h 内预报性能比较稳

定。从预报偏差的分析可以看出, 模式对西南地区春、夏两季的各个量级降水预报均较实况偏多, 而对秋季的大暴雨和冬季的大雨以上量级预报则相对偏少。TSS 评分检验表明, 模式对西南地区的降水技巧总体呈现出预报成功率高于空报率的特征。SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区的小雨、暴雨和大暴雨预报 TS 评分优于 EC 模式。

(2) 由西南地区四季降水预报的 EDI 评分及其空间分布可见, SMS-WARMS V2.0 模式对西南地

区的极端降水预报总体有较好的技巧,对四川中部和东北部以及贵州西南部的极端降水预报技巧相对更高。

(3) 将 MODE 空间检验方法应用于 2015 年一次西南低涡暴雨过程检验,预报面积和质心距离两种检验指标分析显示,SMS-WARMS V2.0 模式对西南低涡暴雨的空间范围预报较为准确,预报降水较观测偏强,暴雨中心表现得更为明显。

(4) MODE 方法统计检验结果表明,SMS-WARMS V2.0 模式对西南地区的暴雨预报空间落区较为准确,降水目标质心偏差较小,降水中心强度偏强,多项空间检验指标表明模式对西南地区的夏季和秋季暴雨预报技巧相对更高。

参考文献

- 陈超君,李俊,王明欢,2015. 2013 年汛期华中区域业务数值模式降水预报检验[J]. 气象与环境学报,31(2):1-8. Chen C J, Li J, Wang M H, 2015. Verification of precipitation forecast using an operational numerical model during flooding season of 2013 in the middle area of China[J]. J Meteor Environ, 31(2):1-8 (in Chinese).
- 公颖,王叶红,赖安伟,2010. 三个模式对 2008 年夏半年西南区降水预报效果的检验[J]. 高原气象,29(6):1441-1451. Gong Y, Wang Y H, Lai A W, 2010. Verification of three model precipitation forecast performances in Southwest China in summer half year, 2008[J]. Plateau Meteor, 29(6):1441-1451 (in Chinese).
- 公颖,周小珊,杨森,等,2015. 2012 年东北地区重大天气过程 WRF 模式预报效果检验[J]. 气象与环境学报,31(6):27-33. Gong Y, Zhou X S, Yang S, et al, 2015. Verification of forecasting effect by WRF model for important weather processes in northeast China in 2012[J]. J Meteor Environ, 31(6):27-33 (in Chinese).
- 李佳,陈葆德,徐同,2016. 目标检验方法在高分辨率数值天气预报检验中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象,10(5):1-9. Li J, Chen B D, Xu T, 2016. Application of the object-based verification method for high resolution NWP[J]. Desert Oasis Meteor, 10(5):1-9 (in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,王建鹏,等,2014. 日本高分辨率模式对中国降水预报能力的客观检验[J]. 高原气象,33(2):483-494. Pan L J, Zhang H F, Wang J P, et al, 2014. An objective verification of forecasting ability of Japan high-resolution model precipitation in China[J]. Plateau Meteor, 33(2):483-494 (in Chinese).
- 屠妮妮,何光碧,衡志炜,等,2016. 基于 MET 系统对 SWCWARMS 及 GRAPES 模式在西南地区的站点检验分析[J]. 高原山地气象研究,36(2):8-16. Tu N N, He G B, Heng Z W, et al, 2016. The station verification in Southwest China from SWCWARMS model and GRAPES model based on MET system[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 36(2):8-16 (in Chinese).
- 王国荣,陈敏,尤凤春,等,2014. 基于对象诊断的空间检验方法(MODE)[J]. 气象科技,42(4):652-656. Wang G R, Chen M, You F C, et al, 2014. Method for object-based diagnostic evaluation and its application[J]. Meteor Sci Technol, 42(4):652-656 (in Chinese).
- 王静,陈静,钟有亮,等,2017. GRAPES-REPS 西南低涡预报检验评估[J]. 气象,43(4):385-401. Wang J, Chen J, Zhong Y L, et al, 2017. Verification and evaluation of the southwest vortex forecast by GRAPES-REPS[J]. Meteor Mon, 43(4):385-401 (in Chinese).
- 王雨,公颖,陈法敬,等,2014. 区域业务模式 6h 降水预报检验方案比较[J]. 应用气象学报,24(2):171-178. Wang Y, Gong Y, Chen F J, et al, 2014. Comparison of two verification methods for 6 h precipitation forecasts of regional models[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2):171-178 (in Chinese).
- 肖玉华,赵静,蒋丽娟,2010. 数值模式预报性能的地域性特点初步分析[J]. 暴雨灾害,29(4):322-327. Xiao Y H, Zhao J, Jiang L J, 2010. Analysis on geography & physiognomy character of numerical model prediction performance[J]. Torr Rain Dis, 29(4):322-327 (in Chinese).
- 徐同,李佳,杨玉华,等,2016. SMS-WARMS V2.0 模式预报效果检验[J]. 气象,42(10):1176-1183. Xu T, Li J, Yang Y H, et al, 2016. Verification of SMS-WARMS V2.0 model forecast results[J]. Meteor Mon, 42(10):1176-1183 (in Chinese).
- 薛春芳,潘留杰,2016. 基于 MODE 方法的日本细网格模式降水预报的诊断分析[J]. 高原气象,35(2):406-418. Xue C F, Pan L J, 2016. Diagnostic analysis of precipitation forecasting from Japan thin-grid model based on MODE[J]. Plateau Meteor, 35(2):406-418 (in Chinese).
- 尤凤春,王国荣,郭锐,等,2011. MODE 方法在降水预报检验中的应用分析[J]. 气象,37(12):1498-1503. You F C, Wang G R, Guo R, et al, 2011. The application analysis of MODE method to the rainfall forecast test[J]. Meteor Mon, 37(12):1498-1503 (in Chinese).
- 张博,赵滨,牛若芸,等,2017. 全球模式对华北区域性强降水中期预报能力检验[J]. 暴雨灾害,36(2):118-124. Zhang B, Zhao B, Niu R Y, et al, 2017. The performance verification of several numerical models in middle range forecasting of regional heavy rainfall in North China[J]. Torr Rain Dis, 36(2):118-124 (in Chinese).
- 张利红,何光碧,2014. GRAPES_Meso 模式对 2011 年夏季青藏高原东部及周边区域的预报检验[J]. 高原气象,33(1):14-25. Zhang L H, He G B, 2014. Verification for GRAPES_Meso model in eastern Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings in summer of 2011[J]. Plateau Meteor, 33(1):14-25 (in Chinese).
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006a. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to meso-scale rain areas[J]. Mon Wea Rev, 134(7):1772-1784.
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006b. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems[J]. Mon Wea Rev, 134(7):1785-1795.
- Ferro A T, Stephenson D B, 2011. Extremal dependence indices: improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events[J]. Wea Forecasting, 26(5):699-713.
- Ghelli A, Primo C, 2009. On the use of the extreme dependency score to investigate the performance of an NWP model for rare events[J]. Meteor Appl, 16(4):537-544.
- Stephenson D B, Casati B, Ferro C A T, et al, 2008. The extreme dependency score: a non-vanishing measure for forecasts of rare events[J]. Meteor Appl, 15(1):41-50.