

王晓峰,周荣卫,2021. 全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验[J]. 气象,47(10):1193-1205. Wang X F, Zhou R W, 2021. Performance verification of global precipitation forecast over Yalong River Basin in flood season[J]. Meteor Mon,47(10): 1193-1205(in Chinese).

全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验^{*}

王晓峰^{1,2} 周荣卫^{1,2}

1 华风气象传媒集团有限责任公司,北京 100081

2 北京玖天气象科技有限公司,北京 100081

提 要: 结合气象和水文观测资料,检验分析了 ECMWF-IFS、NCEP-GFS、GRAPES-GFS 三种全球模式在雅砻江流域 2018 年汛期的日降水预报。总体上,三天内三种降水预报与站点观测的一致性较好,可以较为准确地预报晴雨和小雨,漏报现象少,但空报偏多;对中到大雨的预报能力有限,空报或漏报都很普遍;在雅砻江流域,全球模式对于东移高原槽配合西南暖湿气流背景下的降水预报效果最优,低层切变影响下的降水预报效果最差,而当西伸副热带高压占据主导时,全球模式的降水预报表现不稳定。对比三种降水预报发现:整体预报效果的优劣排序为 ECMWF-IFS、GRAPES-GFS、NCEP-GFS,但各模式对不同量级降水的预报效果存在差异:对于弱降水,GRAPES-GFS 的预报最优,NCEP-GFS 次之,ECMWF-IFS 的预报效果较差,空报现象偏多;而当降水达中雨及以上量级时,ECMWF-IFS 的检验评分最高,GRAPES-GFS 稍逊之,但仍优于 NCEP-GFS,后者易出现漏报;此外,ECMWF-IFS 预报的降水量偏多,而其余两者的降水量偏少。

关键词: 全球数值模式,降水预报,检验,水利水电,雅砻江流域

中图分类号: P456,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.10.003

Performance Verification of Global Precipitation Forecast over Yalong River Basin in Flood Season

WANG Xiaofeng^{1,2} ZHOU Rongwei^{1,2}

1 Huafeng Meteorological Media Group Co., Ltd., Beijing 100081

2 Beijing Jiutian Weather Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100081

Abstract: The precipitation forecasts made by three global models, ECMWF-IFS, NCEP-GFS, and GRAPES-GFS, are verified based on the meteorological and hydrological observations over Yalong River Basin in western Sichuan Province in 2018 flood season. Generally, the 3 d precipitation forecasts of the three models consist fairly well with observations, especially for light rains in which omissions are less but false alarms are more common. However, in moderately and heavily rainy days, precipitation forecasts appear less useful. These forecasts work the best when east-moving plateau trough coupled with southwest stream dominates, but are the worst when weather induced by low-level shears along with southwest stream is more prevailing. When the west-extending subtropical high dominates, their skills in predicting rainfall are unstable. Moreover, intercomparisons of these three precipitation forecasts show that in Yalong River Basin ECMWF-IFS performs best, GRAPES-GFS ranks next, but more care needs to be taken when NCEP-GFS is applied in daily operation. ECMWF-IFS usually forecasts more rainfall and its TS scores for moderate and heavy rains are usually higher than the TS scores of the other two models, but it

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507801)和中国电力建设股份有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02)共同资助

2020 年 8 月 22 日收稿; 2021 年 7 月 1 日收修定稿

第一作者:王晓峰,主要从事精细化数值预报及其解释应用研究. E-mail: wangxiaofeng@jtmnet.com

more probably makes false alarms for light rains. Precipitation forecasted by GRAPES-GFS is less than others, TS scores for light rains are the highest among the three models, while its ability of predicting moderate and heavy rains is still weaker than ECMWF-IFS. NCEP-GFS can forecast light rain well, but more easily misses moderate and heavy rains.

Key words: global numerical model, precipitation forecast, verification, water conservancy and hydropower, Yalong River Basin

引 言

我国大江大河遍布,水利资源丰富,水力发电已成为我国的重要能源之一。径流预测是洪峰预测预警、水库蓄水调节、水电站发电调度等的基础(Sene, 2010;雷晓辉等,2018)。降水预测是径流预测的一项关键输入,准确的高分辨率气象要素预报,可以协助水力发电企业精准应对径流变化,合理利用水资源(García-Morales and Dubus, 2007);同时,流域降水量的空间变化也会对径流预测、洪峰的精准预测预警等产生重大影响(赵琳娜等,2012)。目前,各国气象机构普遍综合参考多种数值预报产品。数值预报根据初始场的差异,可分为确定性预报和集合预报,前者基于确定的初始场得到常规气象要素预报,而后者则利用扰动初始场等技术得到气象要素预报的集合;根据预报时效的长短,预报又可分为气候预测(长期预报)、中期预报、短期预报、短时临近预报,可满足不同时效、不同分辨率的预报需求;根据空间区域范围的不同,还可分为区域预报和全球预报,其中,在天气预报领域,区域预报多为短期和短时临近预报,一般通过实时同化多源观测资料、快速滚动更新的方式实现,可提供区域精细化气象要素预报,为后续的各类短期预警、临近预警提供客观依据(Kalnay, 2003;陈德辉等, 2008;张人禾和沈学顺, 2008; Forbes et al, 2015;毕宝贵等, 2016;代刊等, 2016; Owens and Hewson, 2018; National Center for Environmental Prediction, 2019;陈超辉等, 2020;陈静和李晓莉, 2020)。

全球数值模式可提供中长期全球三维气象要素预报,此类模式的开发者一般更关注模式在大范围(如洲际尺度、国家尺度)内的预报效果,其本身的动力框架、物理过程的参数化方案选择、时空分辨率、地形等的设置偏向于大范围内的总体情况(Owens and Hewson, 2018; National Center for Environmental Prediction, 2019),但在日常公众和专业服

务中,预报员更关注全球模式应用于局部地区(如省域、市域、流域等较小范围)的预报效果。这种应用范围的巨大变化,一般伴随着预报评估结果的差异,尤其在一些复杂地形区域,全球数值预报仅能提供区域内的总体天气情况,预报数据和实际站点观测往往存在较大差别。因此,检验全球数值预报,分析其短期预报效果,一方面可以评估全球预报应用于局部区域的预报效果,增强预报员对全球数值模式在相关区域的预报性能的认识;另一方面,短期区域模式多以全球预报为初始场和边界条件(何静等, 2019),而优良的初始场和边界条件是提高短期区域数值预报准确性的重要一环。评估全球预报的性能将为后续的短期精准预报预警服务、短期预报预警的解释应用及订正提供必要参考。

ECMWF-IFS (European Centre for Medium-range Weather Forecast, Integrated Forecasting System), NCEP-GFS (National Center for Environmental Prediction, Global Forecasting System), GRAPES-GFS (Global/Regional Assimilation and Prediction System, Global Forecasting System)是目前国内预报业务最常参考和应用的全球数值模式,它们在不同区域不同季节的预报性能已经过多次检验和评价。

ECMWF-IFS 数值模式由欧洲中期天气预报中心开发,其在我国不同地区(如南方地区、西北地区、四川盆地、西南地区、安徽省、天津市等)不同季节的降水预报检验结果表明:秋季、冬季、春季系统性降水的预报效果较好,夏季降水预报的空报率偏高,主要因为对流性降水预报的降水落区和降水量往往出现较大误差(肖红茹等, 2013;张宏芳等, 2014;符娇兰和代刊, 2016;翟振芳等, 2017;辛辰和漆梁波, 2018;王万筠等, 2018;曹越等, 2019);应用于各流域(如长江流域、淮河流域、太湖流域等)时,该模式对降水过程的预报效果较好,对有无降水和强降水预报有一定的应用参考价值(董全等, 2016;邱辉等,

2017;吴娟等,2017)。

NCEP-GFS 来自于美国国家环境预报中心,该预报可以提前 8 天报出夏季我国南方的降水过程,提前 2 天报出强降水带,但降水量偏多(董颜等,2015);在我国西南地区,其预报的降水落区有显著偏移,且降水量偏少(董颜等,2018);在长江流域,降水量预报的变化趋势与实况一致,有助于流域径流预测(周惠成等,2010)。

我国自主开发的新一代数值预报系统 GRAPES,有全球预报版本(GRAPES-GFS)和中尺度版本(GRAPES-MESO)。GRAPES-GFS 在全球范围内的日降水分布合理,能够反映出日降水的时空演变特征,但在低纬度区、中纬度区和特定关键区仍存在系统性偏差(刘帅等,2021);在我国西南地区的短期降水预报稳定性整体较好,但对流性降水预报偏差明显(宫宇等,2018;肖玉华等,2019)。GRAPES-MESO 在流域降水预报中已有一些应用,如基于 GRAPES-MESO 降水预报的淮河流域面雨量预报具有一定的参考价值(朱红芳等,2007);在长江流域,其对降水的预报能力较强,空报较少,漏报偏多(徐双柱等,2007)。全球数值预报在雅砻江流域的预报效果检验很少,过往的研究多关注区域模式的降水预报效果且仅具有试验性质,如通过评估采用不同微物理参数化方案的降水预报,Yang et al (2015)找出最优参数化方案组合,为 WRF 模式应用于雅砻江流域降水预报提供了必要参考。综上可知,以往的全球数值预报性能评估多面向较大的区域范围,如我国南方地区、长江流域、西南地区、省域等,针对小流域尤其是雅砻江流域的检验评估很少,适用于较大范围或其他区域的全球数值预报检验评估结论是否适用于小区域(具体为雅砻江流域)仍亟待解决,因此本项工作将有利于预报人员了解全球降水预报应用于较小流域的性能表现。

本文将利用检验评分、平均误差、平均绝对误差、平均绝对误差率等气象领域常用的降水检验指标,评估全球模式在雅砻江流域 2018 年汛期(6—8 月)的短期降水预报能力。该流域位于四川西部,呈西北—东南走向(图 1),为金沙江最大支流,其干流长度为 1571 km,流域面积为 13.6 万 m^2 ,地理落差达 3800 m 以上,年径流量约为 600 亿 m^3 ,丰水期为每年的 6—10 月,在此期间主要由降水补给径流,

流域中下游地区降水多,水资源丰富,水电装机容量及开发潜力大(袁雅鸣和陈新国,2013;黄小梅等,2017;李荣波等,2017)。

1 数据与方法

1.1 预报数据

本文使用的全球模式降水预报数据来自于 ECMWF-IFS 的中期预报、NCEP-GFS 全球预报系统,以及 GRAPES-GFS 全球预报系统。其中,ECMWF-IFS 的空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,72 h 以内的预报是逐 3 h 间隔,之外是逐 6 h 间隔(Hólm et al,2016;Owens and Hewson,2018);NCEP-GFS (National Center for Environmental Prediction,2019)

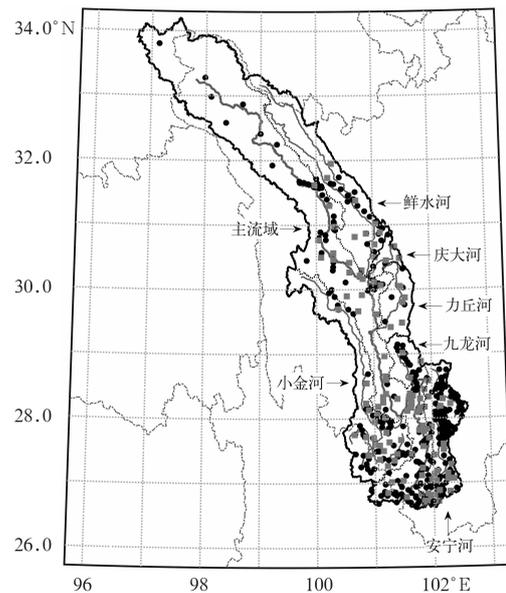


图 1 雅砻江流域及子流域概图,以及流域内的水文站(灰色方块)和气象站(黑色圆点)的空间分布

(灰色线条表示雅砻江流域内的各级河流,黑色线条划出了雅砻江流域及其子流域的大致范围,浅灰色细线为省界)

Fig. 1 Illustration of Yalong River Basin and its subbasins, and the distribution of hydrological stations (grey solid squares) and meteorological stations (black solid circles)
(Grey lines represent the rivers in the basin, black lines encompass the domain of Yalong River Basin and its subbasins, thin light grey lines represent provincial borders)

和 GRAPES-GFS(宫宇等, 2018)的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为 3 h。所有分析均使用 2018 年 6—8 月每日 12 时(本文所用时间均为世界时)起报的预报数据, 并选取其中 12~84 h 作为未来 1~3 d 预报参与检验。

1.2 实况数据

实况数据选取 2018 年 6—8 月流域内 377 个气象站(包括区域站和国家站)的逐小时降水量和 129 个水文站的逐日累积降水量。气象站和水文站的分布(图 1)显示: 上游(即流域北部地区)气象站和水文站的站点数量都偏少, 从中游(即流域中部地区)开始, 气象站和水文站的数量逐渐增多, 其中下游(即流域南部地区)人口城镇稠密地区, 观测站点分布相对密集。另外, 气象站的位置和水文站的位置互补性较好, 部分气象站沿河流分布, 可以在一定程度上弥补水文站数量上的不足。

1.3 检验方法和指标

本文采用气象行业通用的检验方法和指标, 利用雅砻江流域内水文站和气象站的降水观测数据检验了全球数值模式的日降水预报。通过截取每日 12 时起报的 12~84 h 数据, 并每隔 24 h(即 12~36, 36~60, 60~84 h)进行累加, 获得未来 1~3 d 的日累积降水量预报; 气象站的日降水量实况则通过累加当日 01 时至次日 00 时逐小时降水量得到。

检验时, 利用双线性插值的方法, 将格点预报数据插值到对应观测站点上; 377 个气象站和 129 个水文站的观测数据合并为降水观测数据集。通过评估对比各站点的降水预报值和观测值, 并计算一定时段和区域内的站点检验统计平均值, 从而得到降水预报的检验评估结果。

1.3.1 检验指标

(1) TS 评分:

$$TS_k = \frac{NA_k}{NA_k + NB_k + NC_k} \quad TS_k \in [0, 1]$$

(2) 漏报率:

$$PO_k = \frac{NC_k}{NA_k + NC_k} \quad PO_k \in [0, 1]$$

(3) 空报率:

$$FAR_k = \frac{NB_k}{NA_k + NB_k} \quad FAR_k \in [0, 1]$$

(4) ETS 评分(也被称为 GSS 评分):

$$ETS_k = \frac{(NA_k - a_r)}{(NA_k - a_r) + NB_k + NC_k}$$

$$a_r = \frac{(NA_k + NB_k)(NA_k + NC_k)}{NA_k + NB_k + NC_k + ND_k}$$

$$ETS_k \in [-\frac{1}{3}, 1]$$

(5) TSS 评分(也被称为 PSS 评分):

$$TSS_k = \frac{NA_k ND_k - NB_k NC_k}{(NA_k + NC_k)(NB_k + ND_k)}$$

$$= \frac{NA_k}{NA_k + NC_k} - \frac{NB_k}{NB_k + ND_k} \quad TSS_k \in [-1, 1]$$

(6) CSS 评分:

$$CSS_k = \frac{NA_k}{NA_k + NB_k} - \frac{NC_k}{NC_k + ND_k}$$

$$CSS_k \in [-1, 1]$$

(7) Bias 评分:

$$Bias_k = \frac{NA_k + NB_k}{NA_k + NC_k}$$

(8) 平均误差:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - RO_i)$$

(9) 平均绝对误差:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i - RO_i|$$

(10) 平均绝对误差率:

$$MAER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|R_i - RO_i|}{RO_i}$$

(11) 相关系数(Wilks, 2019):

$$r_{R, RO} = \frac{\sum_{i=1}^N [(R_i - \bar{R})(RO_i - \bar{RO})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (RO_i - \bar{RO})^2}}$$

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i, \bar{RO} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RO_i$$

上述公式中: NA_k 、 NB_k 、 NC_k 分别为第 k 等级降水预报正确的次数、空报的次数、漏报的次数, ND_k 为第 k 等级预报无降水的正确次数; R_i 、 RO_i 分别为降水预报值、观测值。 a_r 表示在降水预报率(降水预报站点数与总站点数之比)和降水实际发生率(实际发生降水站点数与总站点数之比)一定的条件下, 降水随机预报的正确站点数的期望; N 表示站点或样本总数, i 表示不同站点或样本, k 代表不同降水等级。降水量等级划分参考我国相关标准(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准

化管理委员会,2012)。检验时按照相应的降水量区间分别进行检验。

上述若干指标中:TS 评分,主要用于衡量不同量级降水预报的准确程度,数值越大,预报效果越好,数值等于 1 表示预报完全准确,数值等于 0 表示预报完全错误;漏报率,数值越小越好,等于 0 时表示没有漏报或空报;ETS 评分与 TS 评分类似,但去除了随机预报的影响,评分结果更加公平,数值等于 1 表示预报完全正确,从 a_r 的形态可以看出,空报(NB_k)和漏报(NC_k)对 ETS 评分结果都有很强的惩罚作用(WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research,2009),空报或漏报过多均会显著抵消命中(NA_k)对评分的贡献;TSS 评分(CSS 评分),可以用于表征正确预报和空报(漏报)之间的差异,空报(漏报)对评分结果的惩罚效应明显,空报(漏报)过多时评分显著减小,其中表达式右侧第一项表示命中站点数与实际有降水发生站点数(预报有降水站点数)之比,右侧第二项为空报(漏报)站点数与实际无降水站点数(预报无降水站点数)之比;Bias 评分表示预报有降水站点数与实际有降水站点数之比,其数值大于 1 表示降水预报落区较实际偏大,小于 1 表示降水预报落区较实际偏小(Jolliffe and Stephenson,2012)。

1.3.2 晴雨检验

晴雨检验,即考虑有无降水两种情况进行检验,其中:降水量 ≥ 0.1 mm,即为有降水;降水量 < 0.1 mm,即为无降水。

晴雨预报正确率(Jolliffe and Stephenson,2012):

$$PC = \frac{NA + ND}{NA + ND + NB + NC} \quad PC \in [0,1]$$

式中 $NA+ND$ 代表晴/雨预报正确的总次数,因此预报正确率和不同量级降水量 TS 评分含义一致,都是对降水预报效果的评估,但 PC 更偏向于对降水有无的整体评价,TS 评分考查不同量级降水的有无。后文中为叙述方便,个别地方会使用“晴雨 TS 评分”代表“晴雨预报准确率”。数值等于 0 表示晴雨预报完全错误,等于 1 则表示预报完全正确。

2 检验分析

2.1 2018 年汛期雅砻江流域降水概况

来自孟加拉湾的西南季风输送丰富水汽,配合

东移高原槽、低层切变、冷涡、副热带高压(以下简称副高)西伸北抬等不同动力、热力条件,形成了 2018 年汛期雅砻江流域的多个降水过程(王靖和张玲,2018;张芳和何立富,2018;张夕迪和孙军,2018;周星妍等,2019)。6—8 月雅砻江流域的汛期累计降水量一般为 200~500 mm,整体而言,流域下游地区的累计降水量明显多于中上游地区,其中流域下游局部地区的累计降水量可达 500 mm 以上。在下游地区,6 月降水量为 100~200 mm;7 月降水较 6 月和 8 月明显偏多,月降水量为 100~300 mm;8 月流域降水最少,月降水量普遍在 100 mm 左右。与往年同期相比,2018 年汛期雅砻江流域降水略有偏少,其中,下游地区降水量与往年持平或略有偏多,而中上游地区降水量偏少(四川省气候中心,2018a;2018b;2018c)。

2.2 2018 年汛期模式降水预报检验

2.2.1 日降水预报检验

考虑到水文站和气象站的分布互为补充,且部分气象站分布在河流沿线,所以检验日降水预报时将水文站和气象站资料合并处理。整体而言,三种模式的降水预报检验评分(除 ETS、TSS、CSS 等评分外)在三天内都很稳定,没有出现明显的波动,所以比较分析时仅考虑了三天评分的平均值(表 1)。

晴雨检验中,三种模式降水预报的晴雨预报准确率(约为 0.7)、空报率(约为 0.3)、漏报率(约为 0.01)非常接近(表 1),说明不同全球模式对于晴雨的预报效果都较好,且水平接近,预报的降水落区可以覆盖实际出现降水的观测站点(漏报率极低),但覆盖范围偏大(空报率约为 0.3)。模式的 ETS 评分约为 0.1~0.3(图 2a),Bias 评分在 1.5 以下(表 1),扣除空报漏报因素(即随机预报命中)后,ETS 评分较 TS 评分显著降低;模式降水的 TSS 评分为 0.2~0.4(图 2b),CSS 评分稳定在 0.6 附近(图 2c),TSS 明显低于 CSS 评分,说明模式降水空报对晴雨预报准确率影响更大,与上述空报率明显高于漏报率的结果一致。上述分析说明,虽然晴雨预报的 TS 评分较高,但这仅能从一个方面说明三种模式的降水预报效果好,再进一步考虑 ETS、TSS、CSS 等评分结果时,我们发现空报对三种模式的晴雨预报评分结果影响较大。这说明全球模式虽

然可以指示大范围内的总体降水趋势,但应用到具体站点时,则会存在较大误差。更进一步分析 ETS、TSS、CSS 评分,我们还注意到:第一天,三种模式的 ETS、TSS、CSS 评分差别不大;第二天和第三天,ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的 ETS、TSS 评分逐渐减小,CSS 评分保持稳定,其中 ECMWF-IFS 衰减得更快,而 NCEP-GFS 的三种评分随时间略有增长,在第三天其评分明显高于另外两种模式。这说明,对于晴雨预报而言,三种模式的漏报都较少或相对稳定,但 ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的空报随预报时间逐渐增多,NCEP-GFS 的空报现象保持相对稳定。

在小雨检验方面,三种模式的 TS 评分表现相当,为 0.5~0.6,其中 NCEP-GFS 略微高于其他两种模式;空报率约为 0.43,漏报率接近于 0(见表 1)。与晴雨检验类似:第一天,三种模式的 ETS、TSS、CSS 评分差异很小,而在第二天和第三天,ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的 ETS、TSS 评分逐渐减小,其中 ECMWF-IFS 衰减更快,NCEP-GFS 却略有增加(图 2a,2b),三种模式的小雨预报 CSS 评分(图 2c)随预报时间保持稳定。

但是对于中雨和大雨量级的降水,模式的预报能力有限,三种模式的预报效果基本相当(中雨 TS 评分为 0.12~0.21,大雨 TS 评分小于 0.1)。其中,ECMWF-IFS 的中雨预报效果最好(TS 约为 0.2),漏报率约为 0.5,明显少于另外两家模式(漏

报率 >0.7);大雨量级时 GRAPES-GFS 的表现与 ECMWF-IFS 近似(TS 评分约为 0.05,漏报率约为 0.91),而此时 NCEP-GFS 的 TS 评分最低,漏报率最高,几乎没有预报出大雨量级的降水(表 1)。模式的 ETS、TSS、CSS 评分均为负值,NCEP-GFS 的评分随预报时间变化小,基本稳定,而 ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的评分则逐渐减小(图 2)。

以上不同量级降水的检验评分结果说明:模式对晴雨和小雨的预报效果较好,模式降水预报能够覆盖出现降水的观测站点,漏报率低,但覆盖范围偏大,应用到具体站点时预报结果易出现空报,这意味着后期解释应用中需借助一些后处理或订正技术进行相应处理;NCEP-GFS 的降水预报性能随预报时间更为稳健,而 ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的降水预报性能则会逐渐降低。模式对中雨及以上量级降水的预报能力有限,很难准确把握较强降水的落区及量值,但 ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的较强降水预报稍好于 NCEP-GFS。此外,在评价模式的降水预报效果时需综合考虑多种评分指标,需针对不同的评价目标选取合适的评分标准,如:对降水空报敏感时,除了常规的空报率和 TS 评分外,还可以考虑 TSS 评分,增加对降水空报的扣罚;对降水漏报敏感时,可以追加考虑 CSS 评分,额外扣罚漏报;而借助 ETS 评分在一定程度上可以评价模式的降水预报相较于随机预报是否更为有效。

表 1 2018 年汛期雅砻江流域全球数值模式日降水预报检验结果
Table 1 Verifications of daily precipitation forecasts from global numerical models over Yalong River Basin during the 2018 flood season

检验指标	模式	晴雨	小雨	中雨	大雨
降水分级 TS 评分 (晴雨预报准确率)	ECMWF-IFS	0.696	0.542	0.214	0.054
	NCEP-GFS	0.705	0.584	0.120	0.008
	GRAPES-GFS	0.704	0.563	0.139	0.045
空报率	ECMWF-IFS	0.306	0.455	0.721	0.864
	NCEP-GFS	0.297	0.408	0.695	0.906
	GRAPES-GFS	0.298	0.431	0.748	0.911
漏报率	ECMWF-IFS	0.004	0.009	0.519	0.916
	NCEP-GFS	0.014	0.021	0.835	0.995
	GRAPES-GFS	0.011	0.018	0.763	0.918
Bias 评分	ECMWF-IFS	1.435	1.819	1.724	0.622
	NCEP-GFS	1.403	1.654	0.544	0.041
	GRAPES-GFS	1.409	1.725	0.938	0.914

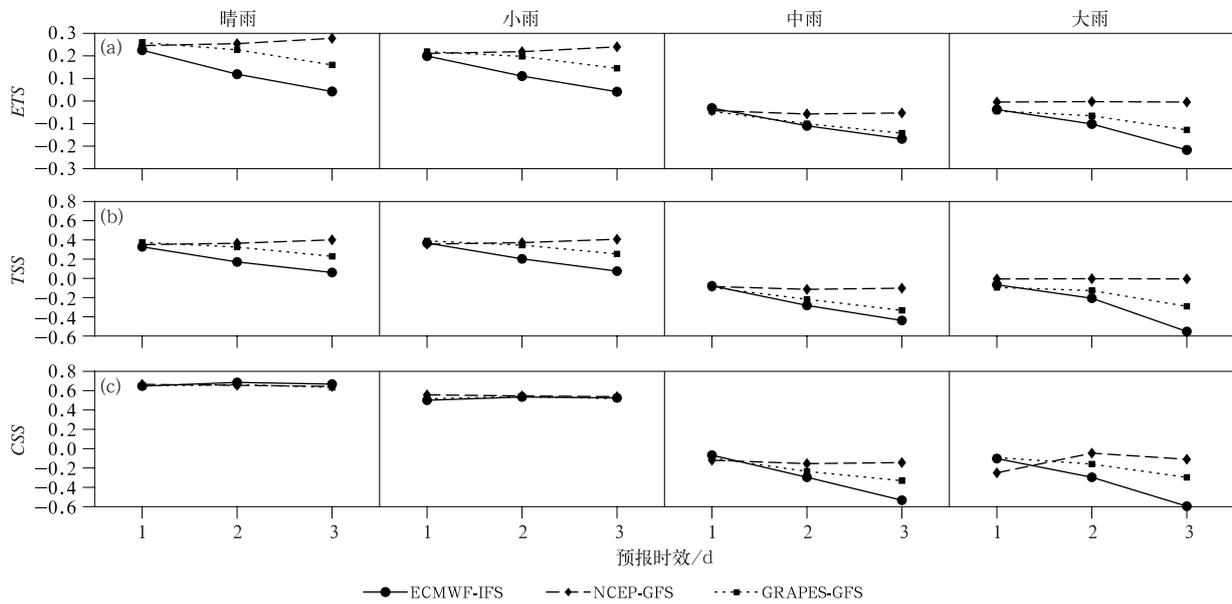


图 2 2018 年汛期雅砻江流域的日降水预报检验
(a)ETS, (b)TSS, (c)CSS

Fig. 2 Verification of daily precipitation forecasts over Yalong River Basin during the 2018 flood season
(a) ETS, (b) TSS, (c) CSS

2.2.2 子流域的日降水预报检验

雅砻江流域包括安宁河、鲜水河、小金河等七块子流域(图 1)。各子流域的观测站受地形、人口等因素影响而分布不均,如:主流域北部、鲜水河北部、庆大河、小金河北部等流域北部区域的气象和水文观测站较少;而在南部地区观测站分布较多,其中安宁河流域的站点数量多且分布稠密均匀。

检验各子流域的日降水预报时,考虑到评分随预报时间的变化较小,所以之后内容关于各检验指标的讨论仅考虑三天检验评分的平均值。因为出现弱降水时三种模式的漏报少,空报更多,所以 ETS 主要受空报影响,而在较强降水时,空报和漏报都很多,且对 ETS 的影响近似,故以下讨论仅选取 ETS 评分进行论述,而忽略 TSS 和 CSS 评分。与雅砻江流域的总体检验结果类似,模式对弱降水(晴雨、小雨)预报的 TS 评分(>0.4)和 ETS 评分($0.1 \sim 0.3$)较高,漏报率低,有一定空报(Bias 评分为 $1.0 \sim 2.0$);而对于较强降水(中雨及以上量级降水)的预报能力有限,TS 评分(<0.1)、ETS 评分(<0)都很低。三种模式的晴雨和小雨 TS 评分接近,GRAPES-GFS 和 ECMWF-IFS 的中雨和大雨预报的 TS 评分优于 NCEP-GFS,后者易漏报较强降水;但分析 ETS 评分(图 3b)时发现,GRAPES-GFS 和 NCEP-GFS 评分明显高于 ECMWF-IFS,ECMWF-

IFS 在各量级降水预报上都易产生空报(Bias 评分相对最大)。

检验局地气象要素预报时,不可避免地需要讨论数值模式在复杂地形区域的预报效果。整体而言,雅砻江流域以山地地形为主,北部海拔高,南部海拔稍低,全流域地形复杂;另外受到东移高原槽、西南水汽副高西伸、低层切变等条件因素共同影响,夏季天气系统复杂。因此,很难判断流域内的降水预报主要受地形强迫影响还是复杂天气系统影响,或是两者皆是。比较各子流域的检验评分可知:九龙河的晴雨预报准确率(约为 0.75 ,图 3a)和小雨 TS 评分(约为 0.7)最高,安宁河在此降水量级的 TS 评分最低(晴雨为 0.6 ,小雨为 0.5),Bias 评分最大(晴雨为 1.5 ,中雨为 2.0 ,图 3c),即空报偏多。九龙河流域海拔较高,仅在河流沿岸区域有观测站,站点分布集中,流域代表性差;而安宁河流域海拔较低,观测站分布相对密集且均匀,流域内山川河谷交错分布,观测站点在多种地形上均有分布,这意味着安宁河流域观测站点的代表性更优。但观测站点分布的代表性高,并不意味着数值模式降水预报的代表性高。雅砻江流域范围狭长,宽度不过 $1^\circ \sim 2^\circ$ (即 $100 \sim 200$ km 左右),如 1.1 节所述,三种全球模式的水平分辨率仅为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 或 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,十余个格点即可覆盖流域的东西范围,每个

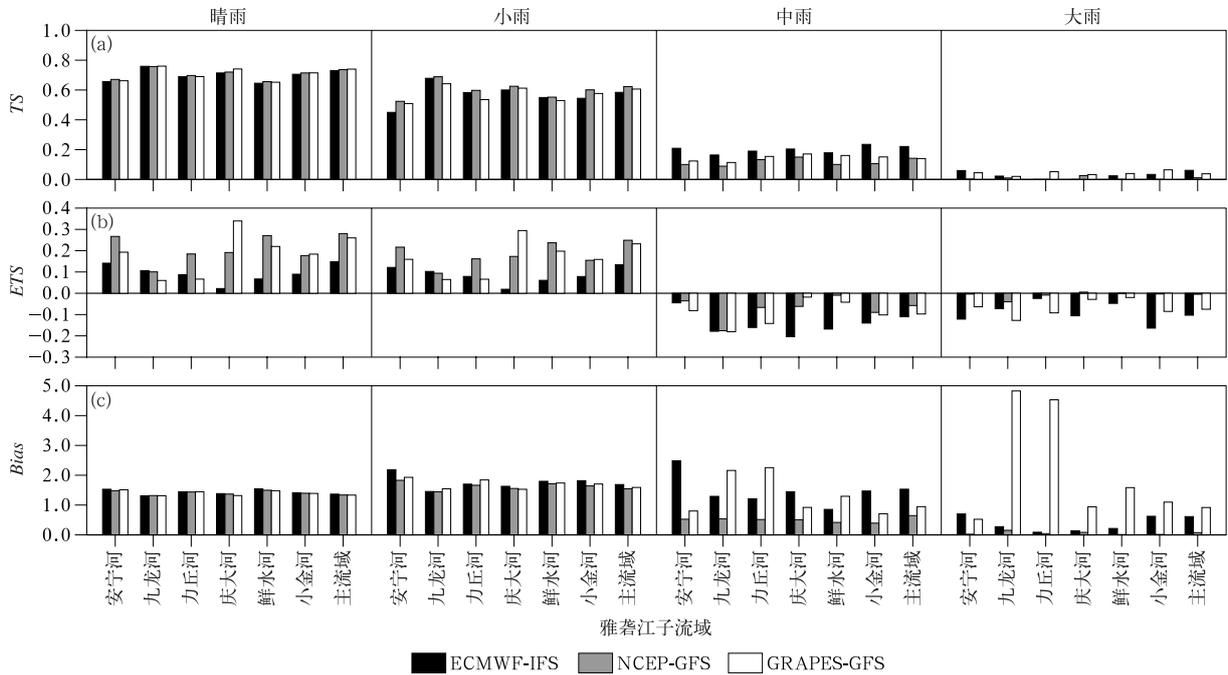


图 3 2018 年汛期雅砻江各子流域的日降水预报检验
(a) TS, (b) ETS, (c) Bias

Fig. 3 Verification of daily precipitation forecasts over all subbasins within Yalong River Basin during the 2018 flood season
(a) TS, (b) ETS, (c) Bias

格点可能包含多个站点(如在安宁河子流域);针对这些站点进行双线性插值(仅考虑水平经纬度差异,不考虑垂直海拔高差)获取站点预报时,采用的四个预报格点相同,这就造成了这些站点之间的差异性明显减弱,不同站点之间的预报结果的比较意义不大;此外,模式本身的地形分辨率低,地形地貌与实际情况偏离较大。因此,基于上述考虑,本文的检验结果难以用于讨论复杂地形对全球数值模式预报效果的影响,这种影响的讨论需要基于更大的区域范围,更大尺度的地形差异。

2.3 2018 年汛期雅砻江流域的主要降水过程的统计检验

2018 年汛期,孟加拉湾季风持续向西南地区输送水汽(西南暖湿气流),为西南地区夏季长期的阴雨或强降水天气的形成创造了良好的水汽条件。6 月上旬和中旬,东移的高原槽配合西南暖湿气流,促成了雅砻江地区几次降水过程。6 月下旬至 7 月下旬,副高北抬,副高西侧气流和孟加拉湾西南季风叠加,配合北方南下冷空气,在西南地区形成多次切变和低涡,引发大范围降水,局地并伴有短时强降水天气。8 月,副高中心稳定在黄海以东洋面,584 dagpm

线向西延伸,覆盖雅砻江流域,在高压控制下,西南暖湿气流、低层高温高湿、地形抬升、局地层结不稳定等因素易引发对流性降水过程。

2018 年汛期(6—8 月)主要降水时段为 6 月中旬、7 月中上旬、7 月底至 8 月初及 8 月中旬(图 4),具体降雨过程和主要影响天气系统详见表 2。考虑到水利水文的实际应用更关注流域内的总体或平均降水情况,因此以下讨论均针对各检验指标或物理量的流域平均值。整体来说,全球模式降水预报的时间序列与站点观测一致:在各主要降水时段,模式基本可以得到有效的降水预报,其中 ECMWF-IFS 与观测之间的相关性最高,GRAPES-GFS 次之,NCEP-GFS 相关性明显偏低(图 4)。降水预报的平均绝对误差为 1.5~5.0 mm,其中小雨预报的平均绝对误差为 1.5~2.0 mm,中雨及以上量级降水预报的平均绝对误差较大(图 5a);降水预报的平均误差为 -5.0~-0.5 mm,其中小雨预报的平均误差为 -1.8~-0.2 mm,中雨及以上量级预报的平均误差较大(图 5b);总体降水预报和小雨预报的平均绝对误差率普遍较大(>2.0),中雨及以上量级降水的平均绝对误差率都在 1.0 左右(图 5c)。

由图 4 可见,6 月 8—15 日,流域内降水明显,平

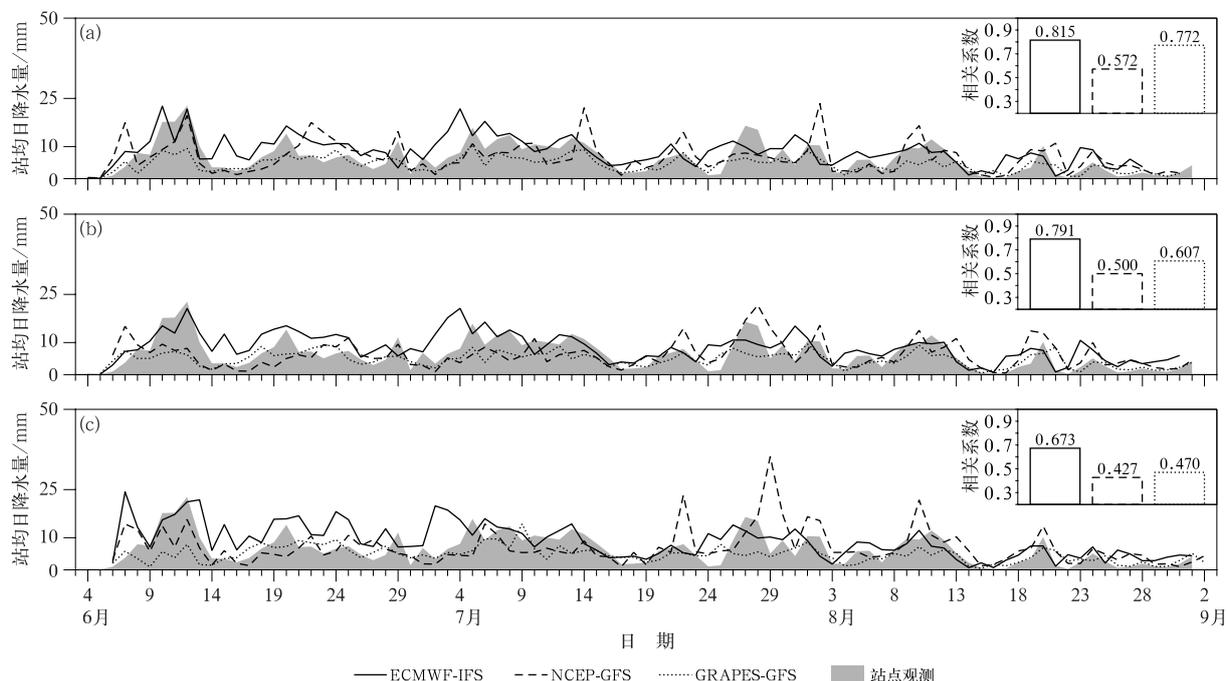


图 4 2018 年汛期雅砻江流域站点平均的日降水量预报和观测实况的时间序列

(a) 12~36 h, (b) 36~60 h, (c) 60~84 h

(站点平均值的计算仅考虑有降水发生的站点, 右上角绘出日降水量预报值与观测值时间序列之间的相关系数)

Fig. 4 Time series of daily precipitation forecasts and observations over Yalong River Basin during the 2018 flood season

(a) 12-36 h, (b) 36-60 h, (c) 60-84 h

(Grey shaded areas show averaged daily observations over all stations with precipitation. In each upper-right corners, coefficients between forecast and observation time-series for three models are illustrated)

均降水量约为 20 mm, 三种模式提前三天均可以预报出流域将有降水过程。ECMWF-IFS 60~84 h 和 36~60 h 预报的流域平均降水量与站点观测基本一致, 但是经过调整后, 12~36 h 的预报却出现偏差, 降水峰值出现的时段明显提前, 第二个峰值显著加强。NCEP-GFS 的降水预报较站点观测偏小, 12~36 h 的预报调整了降水量, 更新后的降水预报与站点观测更为接近。GRAPES-GFS 的降水预报明显偏小, 即使是提前一天的降水预报依然偏弱。7 月 6—12 日, ECMWF-IFS 的 12~36、36~60、60~84 h 的平均降水量预报均与实况接近, GRAPES-GFS 的降水量变化趋势与实况一致, 但量值明显偏小, NCEP-GFS 效果最差。8 月 10—15 日, ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的降水预报表现与前述两时段一致, NCEP-GFS 预报效果尚可, 但前期降水预报过大。但是在弱降水时段(如 6 月 16—28 日), GRAPES-GFS 的降水预报与实况最为一致, ECMWF-IFS 的降水量普遍偏大, NCEP-GFS 表现最不稳定, 或偏大或偏小。

2018 年汛期造成流域降水的主要天气系统包括(表 2): (1) 东移高原槽配合西南暖湿气流(如 6 月 8—15 日、7 月 14—17 日); (2) 低层切变配合西南气流(如 6 月 20—27 日、7 月 6—12 日、7 月 26—31 日); (3) 副高西伸, 受高压或其边缘气流控制(如 8 月 2—4 日、8 月 10—15 日、8 月 25—27 日)。东移高原槽配合西南暖湿气流可能造成流域内的大范围较强降水, 对于这类降水, 全球数值模式的预报效果较好, 降水量的相对误差最小(平均绝对误差率在 2.0~3.0, 图 5b), 其中 ECMWF-IFS 效果最佳, 平均绝对误差率仅为 2.0, GRAPES-GFS 次之, NCEP-GFS 最差。全球数值模式对于低层切变配合西南气流造成的降水的预报能力较弱, 降水量的平均绝对误差率大都超过 3.0(图 5b), 明显高于前一类型的降水, ECMWF-IFS 和 GRAPES-GFS 的表现相当, 且均优于 NCEP-GFS。而对于第三种天气系统造成的降水, 全球模式的预报效果较为不稳定, 或误差较大(如 8 月 10—15 日降水过程中 GRAPES-GFS 的平均绝对误差率接近于 4.0, 8 月

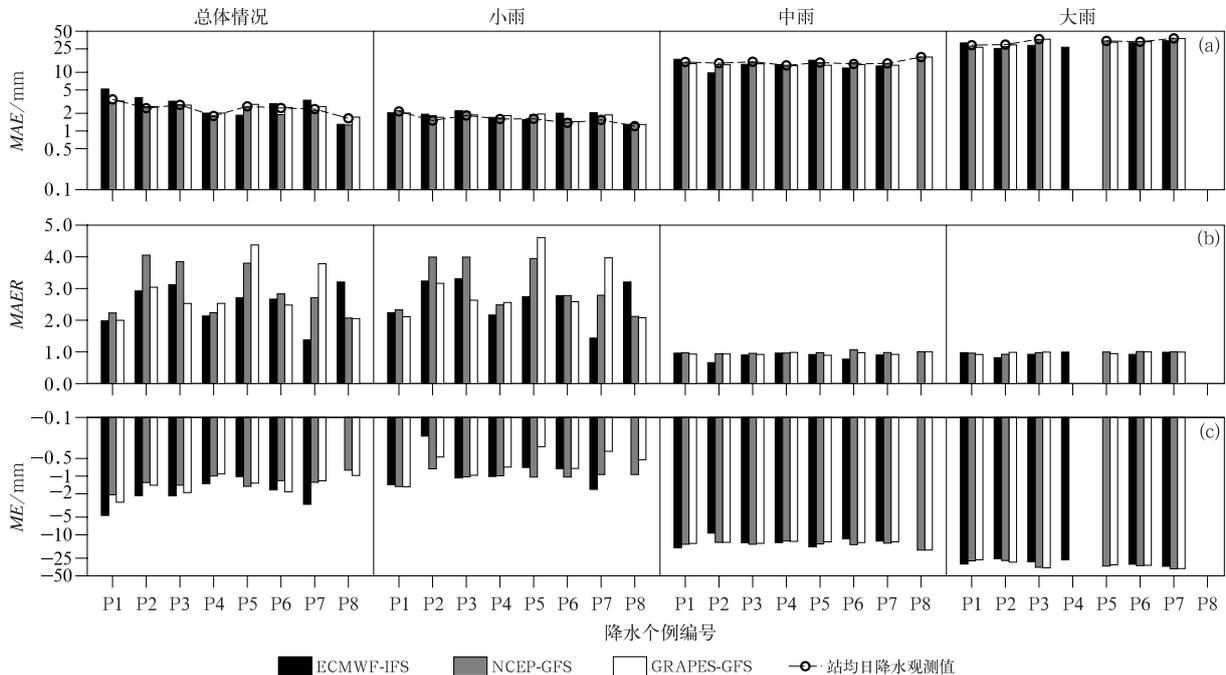


图 5 2018 年汛期雅砻江流域的降水预报个例检验
(a) 平均绝对误差 (MAE), (b) 平均绝对误差率 (MAER), (c) 平均误差 (ME)
(横坐标代表不同的检验个例, 简称释义见表 2)

Fig. 5 Verification of precipitation forecasts over Yalong River Basin for some cases during the 2018 flood season
(a) mean absolute errors (MAE), (b) rate of mean absolute errors (MAER), (c) mean errors (ME)
(Abscissas show different cases, as detailed in Table 2)

表 2 2018 年汛期雅砻江流域降水个例

Table 2 Precipitation cases in Yalong River Basin during the 2018 flood season

编号	降水时段	主要天气系统
P1	6 月 8—15 日	高原槽东移、西南暖湿气流
P2	6 月 20—27 日	副高北抬、低层切变、西南暖湿气流
P3	7 月 6—12 日	低层切变、西南暖湿气流
P4	7 月 14—17 日	高原槽东移、副高西侧暖湿气流
P5	7 月 26—31 日	低层切变、副高西侧偏南暖湿气流
P6	8 月 2—4 日	高压控制、西南暖湿气流、对流降水
P7	8 月 10—15 日	高压控制、西南暖湿气流、对流降水
P8	8 月 25—27 日	高压控制、西南暖湿气流、对流降水

25—27 日过程中 ECMWF-IFS 的平均绝对误差率超过 3.0), 或误差较小(如 8 月 10—15 日降水过程中 ECMWF-IFS 的平均绝对误差率约为 1.5)。此外, 从平均误差的检验结果可以看出, 三种模式的降水误差更多来自于总体降水量的偏少, 尤其是中雨及以上量级降水的漏报现象严重(图 5c), 这对于流域水利水电调度调配等方面易造成消极影响。

3 结论和讨论

本文结合气象和水文观测资料, 以 2018 年汛期雅砻江流域降水为例, 检验分析了欧洲 ECMWF-IFS、美国 NCEP-GFS、中国 GRAPES-GFS 三种全球数值模式的降水预报。总体来看, 三天内三种降水预报与站点观测的一致性较好, 可以较准确地预报晴雨和小雨, 漏报现象少, 但易出现空报, 而对中到大雨的预报效果较差, 空报或漏报现象都很普遍。

比较三种模式的降水预报效果, 发现: ECMWF-IFS 的整体预报效果最优, GRAPES-GFS 次之, NCEP-GFS 较差。但针对不同量级降水, 三种数值模式的预报效果存在差异: ECMWF-IFS 预报的降水量偏多, GRAPES-GFS 和 NCEP-GFS 的降水量总体偏少; 对于弱降水, GRAPES-GFS 的预报效果最优, 与实际观测吻合较好, NCEP-GFS 次之, ECMWF-IFS 的预报效果较差, 易出现降水空报; 而在中雨及以上量级降水, ECMWF-IFS 的检验评分

最高, GRAPES-GFS 逊于前者, 但仍优于 NCEP-GFS, 后者易漏报中雨以上量级降水。

流域内的降水过程主要受三种天气系统支配: (1) 东移高原槽配合西南暖湿气流, (2) 低层切变配合西南气流, (3) 副高西伸, 流域受高压或副高边缘气流控制。全球模式对第一种天气系统降水的预报效果最优; 当第二种天气系统出现时, 模式的预报效果最差; 而降水天气主要受第三种天气控制时, 模式降水预报的表现不稳定, 或表现优良, 或效果较差。

雅砻江流域范围狭长, 呈西北—东南走向, 海拔高度从北向南递减, 全流域以复杂山地地形为主; 流域内站点分布极为不均, 总体上北部站点稀疏, 南部站点稠密, 这造成北部地区的观测站点代表性不足。同时, 本文的检验对象是全球模式的降水预报, 其水平分辨率低, 只有 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 或 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 东西方向仅有十余个格点即可覆盖雅砻江地区, 尤其在南部地区, 每个模式格点内可包含多个观测站点; 模式地形相对于真实情况严重简化; 此外双线性插值获得站点降水预报时, 仅为水平插值, 未考虑垂直差异; 关于全球模式的上述情况限制了其降水预报在小流域内的代表性。因此, 基于上述考虑, 仅仅通过本次检验很难确定降水预报效果与复杂地形之间的明确关系。

全球降水预报覆盖面广、预报时效长, 有利于预报员把握天气形势, 但应用于具体区域时, 其分辨率低、更新频次少等缺点降低了降水预报的准确性, 特别是, 碍于低时空分辨率和参数化方案, 模式很难有效预报对流性天气。这些缺点限制了全球数值模式在日常精细化业务和精准服务中的应用。在水利水电应用中, 水资源的调配调节更关注流域内的总体或平均降水情况(如面雨量等), 这在某种程度上降低了对模式水平分辨率的依赖, 全球模式降水预报的区域总体或平均降水量表现尚可, 可以满足水利水电的部分需求。此外, 在评价模式的降水预报效果时, 除了常规的 TS 评分、空报率、漏报率外, 还需要针对不同的评价目标选取合适的评分指标或评价标准, 如: 对降水空报敏感度高时, 可以考虑 TSS 评分, 扣除空报因素后考察预报效果; 对降水漏报更敏感时, 可以追加考虑 CSS 评分, 额外罚扣漏报现象; 而 ETS 评分综合考虑了空报和漏报因素, 借此可在一定程度上评价模式的降水预报相较于随机预报是否更为有效。

参考文献

- 毕宝贵, 代刊, 王毅, 等, 2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 534-549(in Chinese).
- 曹越, 赵琳娜, 巩远发, 等, 2019. ECMWF 高分辨率模式降水预报能力评估与误差分析[J]. 暴雨灾害, 38(3): 249-258. Cao Y, Zhao L N, Gong Y F, et al, 2019. Evaluation and error analysis of precipitation forecast capability of the ECMWF high-resolution model[J]. Torr Rain Disaster, 38(3): 249-258(in Chinese).
- 陈超辉, 王勇, 杜钧, 等, 2020. 欧洲业务集合预报系统进展[J]. 气象科技进展, 10(2): 19-29. Chen C H, Wang Y, Du J, et al, 2020. Overview of the European operational ensemble prediction systems[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 19-29(in Chinese).
- 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等, 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报, 53(20): 2396-2407. Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al, 2008. Overall design of global/regional assimilation and prediction system (GRAPES)[J]. Chin Sci Bull, 53(20): 2396-2407(in Chinese).
- 陈静, 李晓莉, 2020. GRAPES 全球/区域集合预报系统 10 年发展回顾及展望[J]. 气象科技进展, 10(2): 9-18, 29. Chen J, Li X L, 2020. The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 9-18, 29(in Chinese).
- 代刊, 曹勇, 钱奇峰, 等, 2016. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J]. 气象, 42(12): 1445-1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al, 2016. Situation and tendency of operational technologies in short- and medium-range weather forecast[J]. Meteor Mon, 42(12): 1445-1555(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).
- 董颜, 刘寿东, 王东海, 等, 2015. GFS 对我国南方两次持续性降水过程的预报技巧评估[J]. 气象, 41(1): 45-51. Dong Y, Liu S D, Wang D H, et al, 2015. Assessment on forecasting skills of GFS model for two persistent rainfalls over Southern China[J]. Meteor Mon, 41(1): 45-51(in Chinese).
- 董颜, 王东海, 卞赞, 2018. 西南地区持续性强降水的多模式可预报性评估[J]. 中国科技论文, 13(9): 1078-1086. Dong Y, Wang D H, Bian Y, 2018. Multimodel predictability assessment of persistent heavy rainfall in Southwest China[J]. China Sciencepaper, 13(9): 1078-1086(in Chinese).
- 符娇兰, 代刊, 2016. 基于 CRA 空间检验技术的西南地区东部强降水 EC 模式预报误差分析[J]. 气象, 42(12): 1456-1464. Fu J L, Dai K, 2016. The ECMWF model precipitation systematic error in the east of Southwest China based on the contiguous rain area method for spatial forecast verification[J]. Meteor Mon, 42

- (12):1456-1464(in Chinese).
- 宫宇,代刊,徐珺,等,2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象,44(9):1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast [J]. Meteor Mon, 44(9):1148-1159(in Chinese).
- 何静,陈敏,仲跻芹,等,2019. 雷达反射率三维拼图观测资料在北方区域数值模式预报系统中的同化应用研究[J]. 气象学报,77(2):210-232. He J, Chen M, Zhong J Q, et al, 2019. A study of three-dimensional radar reflectivity mosaic assimilation in the regional forecasting model for North China [J]. Acta Meteor Sin, 77(2):210-232(in Chinese).
- 黄小梅,蒋兴文,肖丁木,2017. 四川地区 7 月和 8 月降水异常空间型及其环流特征[J]. 热带气象学报,33(5):654-665. Huang X M, Jiang X W, Xiao D M, 2017. Analysis of July and August precipitation in spatial distribution patterns and associated atmospheric circulation characteristics in Sichuan [J]. J Trop Meteor, 33(5):654-665(in Chinese).
- 雷晓辉,王浩,廖卫红,等,2018. 变化环境下气象水文预报研究进展[J]. 水利学报,49(1):9-18. Lei X H, Wang H, Liao W H, et al, 2018. Advances in hydro-meteorological forecast under changing environment [J]. J Hydraul Eng, 49(1):9-18(in Chinese).
- 李荣波,魏鹏,纪昌明,等,2017. 雅砻江流域近 60a 径流趋势特征分析[J]. 人民长江,48(5):38-42. Li R B, Wei P, Ji C M, et al, 2017. Analysis of runoff tendency characteristics of Yalong River for past 6 decades [J]. Yangtze River, 48(5):38-42(in Chinese).
- 刘帅,王建捷,陈起英,等,2021. GRAPES_GFS 模式全球降水预报的主要偏差特征[J]. 气象学报,79(2):255-281. Liu S, Wang J J, Chen Q Y, et al, 2021. The main characteristics of forecast deviation in global precipitation by GRAPES_GFS [J]. Acta Meteor Sin, 79(2):255-281(in Chinese).
- 邱辉,李春龙,张方伟,2017. 长江流域多模式降雨预报效果检验[J]. 水利水电快报,38(6):39-42, 46. Qiu H, Li C L, Zhang F W, 2017. Verification on precipitation forecast of multi-model over Yangtze River Basin [J]. Expr Water Res Hydropower Info, 38(6):39-42, 46(in Chinese).
- 四川省气候中心,2018a. 2018 年 6 月四川省气候影响评价[R]. 成都:四川省气象局:1-11. Climate Centre of Sichuan Province, 2018a. Climate impact assessment of Sichuan Province in June, 2018 [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Meteorological Service: 1-11(in Chinese).
- 四川省气候中心,2018b. 2018 年 7 月四川省气候影响评价[R]. 成都:四川省气象局:1-9. Climate Centre of Sichuan Province, 2018b. Climate impact assessment of Sichuan Province in July, 2018 [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Meteorological Service: 1-9(in Chinese).
- 四川省气候中心,2018c. 2018 年 8 月四川省气候影响评价[R]. 成都:四川省气象局:1-7. Climate Centre of Sichuan Province, 2018c. Climate impact assessment of Sichuan Province in August, 2018 [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Meteorological Service:1-7(in Chinese).
- 王晴,张玲,2018. 2018 年 8 月大气环流和天气分析[J]. 气象,44(11):1501-1508. Wang Q, Zhang L, 2018. Analysis of the August 2018 atmosphere circulation and weather [J]. Meteor Mon, 44(11):1501-1508(in Chinese).
- 王万筠,殷海涛,赵敬红,等,2018. 2014—2016 年数值降水预报在天津的检验评估[J]. 气象科技,46(4):718-723, 767. Wang W J, Yin H T, Zhao J H, et al, 2018. Verification of numerical forecast products for Tianjin precipitation forecast in recent three years [J]. Meteor Sci Technol, 46(4):718-723, 767(in Chinese).
- 吴娟,林荷娟,刘敏,等,2017. 太湖流域汛期面雨量多模式预报检验评估[J]. 水利水电快报,38(10):22-24, 27. Wu J, Lin H J, Liu M, 2017. Verification on areal rainfall forecast of multi-model over Taihu Lake [J]. Expr Water Res Hydropower Info, 38(10):22-24, 27(in Chinese).
- 肖红茹,王灿伟,周秋雪,等,2013. T639、ECMWF 细网格模式对 2012 年 5—8 月四川盆地降水预报的天气学检验[J]. 高原山地气象研究,33(1):80-85. Xiao H R, Wang C W, Zhou Q X, et al, 2013. Synoptic meteorology verification of precipitation forecast for T639, ECMWF fine grid models from May to August 2012 in Sichuan Basin [J]. Plateau Mountain Meteor Res, 33(1):80-85(in Chinese).
- 肖玉华,王佳津,蒋丽娟,等,2019. GRAPES_GFS 在西南地区的预报稳定性及其误差与地形的关系[J]. 暴雨灾害,38(1):59-65. Xiao Y H, Wang J J, Jiang L J, et al, 2019. Prediction stability of GRAPES_GFS in Southwest China and the relationship between its error and the terrain [J]. Torr Rain Disaster, 38(1):59-65(in Chinese).
- 辛辰,漆梁波,2018. ECMWF 模式对南方春雨期降水预报的检验和分析[J]. 暴雨灾害,37(4):383-391. Xin C, Qi L B, 2018. Verification and analysis on precipitation forecast of ECMWF model during spring rain period in South China [J]. Torr Rain Disaster, 37(4):383-391(in Chinese).
- 徐双柱,张兵,谌伟,2007. GRAPES 模式对长江流域天气预报的检验分析[J]. 气象,33(11):65-71. Xu S Z, Zhang B, Chen W, 2007. Forecasting verification of GRAPES model in the reaches of Changjiang River [J]. Meteor Mon, 33(11):65-71(in Chinese).
- 袁雅鸣,陈新国,2013. 雅砻江流域降雨天气特征及致洪暴雨预报[J]. 人民长江,44(3):1-5, 19. Yuan Y M, Chen X G, 2013. Rainfall characteristics and flooding rainstorm forecast of Yalong River Basin [J]. Yangtze River, 44(3):1-5, 19(in Chinese).
- 翟振芳,魏春璇,邓斌,等,2017. 安徽省 ECMWF 数值模式降水预报性能的检验[J]. 气象与环境学报,33(5):1-9. Zhai Z F, Wei C X, Deng B, et al, 2017. Verification and analysis of rainfall forecasted by the ECMWF model in Anhui Province [J]. J Meteor Environ, 33(5):1-9(in Chinese).
- 张芳,何立富,2018. 2018 年 6 月大气环流和天气分析[J]. 气象,44(9):1237-1244. Zhang F, He L F, 2018. Analysis of the June 2018 atmospheric circulation and weather [J]. Meteor Mon, 44(9):1237-1244(in Chinese).

- 张宏芳,潘留杰,杨新,2014. ECMWF、日本高分辨率模式降水预报能力的对比分析[J]. 气象,40(4):424-432. Zhang H F, Pan L J, Yang X, 2014. Comparative analysis of precipitation forecasting capabilities of ECMWF and Japan high-resolution models[J]. Meteor Mon, 40(4):424-432(in Chinese).
- 张人禾,沈学顺,2008. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展[J]. 科学通报,53(20):2393-2395. Zhang R H, Shen X S, 2008. On the development of the GRAPES—A new generation of the national operational NWP system in China [J]. Chin Sci Bull, 53(20):2393-2395(in Chinese).
- 张夕迪,孙军,2018. 2018 年 7 月大气环流和天气分析[J]. 气象,44(10):1370-1376. Zhang X D, Sun J, 2018. Analysis of the July 2018 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 44(10):1370-1376(in Chinese).
- 赵琳娜,包红军,田付友,等,2012. 水文气象研究进展[J]. 气象,38(2):147-154. Zhao L N, Bao H J, Tian F Y, et al, 2012. Advances in hydrometeorological research[J]. Meteor Mon, 38(2):147-154(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012. 降水量等级:GB/T 28592-2012[S]. 北京:中国标准出版社:1-2. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2012. Grade of precipitation:GB/T 28592-2012[S]. Beijing: Standards Press of China:1-2(in Chinese).
- 周惠成,唐国磊,王峰,等,2010. GFS 未来 10 天数值降雨预报信息的可利用性分析[J]. 水力发电学报,29(2):119-126. Zhou H C, Tang G L, Wang F, et al, 2010. Analysis on the exploitability of medium-term quantitative precipitation forecasts by global forecasting system[J]. J Hydro Eng, 29(2):119-126(in Chinese).
- 周星妍,曾红玲,王遵娅,等,2019. 2018 年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象,45(4):543-552. Zhou X Y, Zeng H L, Wang Z Y, et al, 2019. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2018[J]. Meteor Mon, 45(4):543-552(in Chinese).
- 朱红芳,王东勇,朱鹏飞,等,2007. GRAPES 模式在淮河流域面雨量预报中的应用[J]. 气象,33(3):76-82. Zhu H F, Wang D Y, Zhu P F, et al, 2007. Application of GRAPES model to area-rainfall forecast in the Huaihe River Basin[J]. Meteor Mon, 33(3):76-82(in Chinese).
- Forbes R, Haiden T, Magnusson L, 2015. Improvements in IFS forecasts of heavy precipitation[J]. ECMWF Newsl, (144):21-26.
- García-Morales M B, Dubus L, 2007. Forecasting precipitation for hydroelectric power management: how to exploit GCM's seasonal ensemble forecasts[J]. Int J Climatol, 27(12):1691-1705.
- Hólm E, Forbes R, Lang S, et al, 2016. New model cycle brings higher resolution[J]. ECMWF Newsl, (147):14-19.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2012. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science[M]. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell:31-59.
- Kalnay E, 2003. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability[M]. Cambridge: Cambridge University Press:1-30.
- National Center for Environmental Prediction, 2019. The global forecasting system [EB/OL]. [2019-06-12]. https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs/documentation.php.
- Owens R G, Hewson T, 2018. ECMWF forecast user guide [R]. Reading: ECMWF.
- Sene K, 2010. Hydrometeorology: Forecasting and Applications[M]. London: Springer:141-145.
- Wilks D S, 2019. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences [M]. 4th ed. Cambridge: Elsevier:54-57.
- WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, 2009. Forecast verification-issues, methods and FAQ [EB/OL]. [2020-04-22]. https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/verif_web_page.html.
- Yang M X, Jiang Y Z, Lu X, et al, 2015. A weather research and forecasting model evaluation for simulating heavy precipitation over the downstream area of the Yalong River Basin[J]. J Zhejiang Univ Sci A, 16(1):18-37.