

曲巧娜,吴炜,2024. 多种模式降水预报的稳定性特征研究[J]. 气象,50(4):420-433. Qu Q N, Wu W, 2024. Stability characteristics of multi-model precipitation forecast[J]. Meteor Mon, 50(4):420-433(in Chinese).

多种模式降水预报的稳定性特征研究^{*}

曲巧娜^{1,2} 吴 炜^{1,2}

1 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气象科学研究所, 济南 250031

提 要: 预报的稳定性是指对同一时段在不同时间发布的多时效预报结论的一致性, 是模式预报质量的一个重要方面, 较大的不稳定性会给使用者造成困扰。为深入了解业务常用模式的稳定性, 使用相对标准偏差指标计算不同时效预报的降水量波动大小, 并改进了 Flip-Flop 指数(改进后简称 FF_{norm}), 计算多时效降水量预报变化趋势的翻转程度, 衡量预报变化趋势的稳定性, 对 2 种全球模式(ECMWF、NCEP-GFS)、3 种区域模式(CMA-MESO、CMA-SH9、HHUPS-ST), 在中国 6 个气候分区中降水预报的稳定性进行对比分析, 分为实况有降水和暴雨及以上降水 2 种情况进行了讨论。结果表明: 实况有降水时, 相对区域模式来说, 全球模式的多时效降水预报的相对标准偏差较小, 即模式降水量预报的波动较小; 各模式对西南区的西部、东北区的东部以及华南区的南部预报的波动性相对较小, 西北区的西部波动性较大。就多时效降水量预报变化趋势而言, 2 种情况下均为 CMA-MESO、NCEP-GFS 和 ECMWF 的稳定性较好, 其 FF_{norm} 指数小于 HHUPS-ST 和 CMA-SH9 模式, 其中 CMA-MESO 对西南区、华南部分地区降水量预报变化趋势的稳定性较为突出; CMA-SH9 的指数最大, 多时效降水量预报变化趋势稳定性较差; 各模式对长江中下游地区的 FF_{norm} 指数相对较大, 多时效预报趋势的稳定性较差。有降水时, CMA-MESO 随时效临近的降水量预报变化趋势稳定(单调递增、单调递减或不变)的频次最多, 其次是 NCEP-GFS, 2 种降水情况下, 该 2 种模式的降水量预报均为随时效临近单调递增次数大于递减次数, 且 CMA-MESO 单调递增特征尤其显著。以上特征能够为模式调试和预报决策提供参考。

关键词: 多时效降水量预报, 相对标准偏差, 改进的 Flip-Flop 指数, 稳定性

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 103001

Stability Characteristics of Multi-Model Precipitation Forecast

QU Qiaona^{1,2} WU Wei^{1,2}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong Province, Jinan 250031

2 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031

Abstract: The stability of forecast refers to the consistency of multiple timeliness forecast conclusions issued at different times in the same period. It is an important aspect of the model system, and the large instability will cause trouble to users. In order to understand the stability of common operational models, the relative standard deviation index is used to calculate the magnitude of precipitation fluctuation, and the Flip-Flop index (FF_{norm}) is improved to measure the reversal degree of precipitation forecast trend in this paper. Besides, the stability of precipitation forecast in two global models (ECMWF, NCEP-GFS) and three regional models (CMA-MESO, CMA-SH9, HHUPS-ST) in six climate zones in China, is discussed on the basis of the two cases of the observed precipitation and the rainstorm and the above. The results are

^{*} 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MD040)、环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202007 和 QYXM202202)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022P012)和山东省气象局面上课题(2020sdqxm7)共同资助

2023 年 2 月 8 日收稿; 2023 年 9 月 12 日收修定稿

第一作者: 曲巧娜, 主要从事灾害性天气预报技术研究. E-mail: quqiaona77@163. com

通讯作者: 吴炜, 主要从事海洋气象、数值预报研究. E-mail: wuwei_sd@163. com

as follows. When there is precipitation, the relative standard deviation of multiple timeliness precipitation forecasts of global models is smaller than that of regional models. That is, the fluctuation of model precipitation forecast is small. The volatility of each model for the western part of the southwest region, the eastern part of the northeast region and southern part of South China is smaller, while that for the western part of the northwest region is larger. In terms of the change trend of multiple timeliness precipitation forecast, the stability of CMA-MESO, NCEP-GFS and ECMWF is better in the two cases, and the index of FF_{norm} is smaller than that of HHUPS-ST and CMA-SH9. Among them CMA-MESO has a more prominent stability effect in the forecast for Southwest China and parts of South China. The index of CMA-SH9 is the largest and the model forecast is unstable. Each model has a relatively large index in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and the stability of multiple timeliness forecast is poor. When there is precipitation, the frequency of stable (monotonically increasing or decreasing or constant) trend of precipitation forecast of CMA-MESO is the most, followed by NCEP-GFS. Under the two precipitation conditions, the precipitation forecast of the two models for each region is that the number of monotonically increasing times is greater than the number of decreasing times, and the monotonically increasing characteristics of the CMA-MESO model are particularly significant. The above characteristics could provide some references for model debugging and forecast decision-making.

Key words: multiple timeliness precipitation forecast, relative standard deviation, improved Flip-Flop index (FF_{norm}), stability

引言

预报稳定性是指两次预测对某一事件的发生时间、持续时间或空间范围的一致程度(Pappenberger et al, 2011),在气象中从一个发布时间到下一个发布时间预报的变化程度是衡量预报系统性能的一个重要方面(Zsoter et al, 2009; Griffiths et al, 2019)。持续性的稳定预报对于成功地预测极端降水事件具有重要的作用, Buizza et al (2017)调查了2000年10月14—16日发生在意大利北部的一场极端天气过程(1951年以来波河最严重的洪水),指出了一致性预报的重要性。较大的不稳定性意味着不同时效降水量预报的“反复无常”,增加了应用决策难度。因此,在天气预报业务中评估模式的稳定性,使用者能够正确认识不同数值预报模式产品性能,可以有针对性地对产品加以订正,从而提高业务预报准确性。

学者们开发了翻转指数、收敛指数、不一致指数等用以代表多次预测的变化程度。Zsoter et al (2009)提出了不一致性指数(纬度加权均方根误差),该指数基于区域平均的连续两个预测序列差值与两次预报的平均标准差之比,较好地描述了前后两次预报之间的不一致性。Ruth et al (2009)定义

了预测收敛分数,通过统计“预报跳跃”的次数进行不一致性分析,反映的是前后两次预报之间的偏差随时效的变化特征。Ehret (2010)定义了收敛指数,包含不同起报时次预报结果与预报时刻实况结果的偏差随预报时效变化情况,采用收敛(即连续多次预报趋于实况)和波动(即连续多次预报在实况附近上下波动)两个标准衡量预报的不一致性问题,体现的是前后两次预报的误差随时效变化特征。McLay (2011)研究了360 h时效内24 h间隔的共15个预报时效的稳定性,将相邻时效之差求最大值,然后利用百分位甄别出最不稳定和最稳定的情况。为了对预报趋势的翻转性进行量化,Griffiths et al (2019)在前人的基础上开发了Flip-Flop指数,该指数能够定量计算降水量变化趋势的翻转程度大小,并且不惩罚单调递增或递减的序列,可以用于比较不同时间或空间尺度以及不同周和季节的预报特征。目前国内研究较多的是基于国外的研究方法开展的应用,郭换换等(2016b)给出了Zsoter et al (2009)提出的不一致指数、Ehret (2010)定义的收敛指数、Lashley et al (2008)和Ruth et al (2009)提出的预报收敛分数以及Toth et al (2003)提出的基于Tala-grand分布的时间一致性直方图等几种研究不一致方法的综述。郭换换等(2016a)、郭达烽等(2018)、智

协飞等(2018)、夏旻惠和智协飞(2020)采用 Zsoter et al(2009)提出的方法对 ECMWF 业务预报模式地面气温以及 TIGGE 资料中 ECMWF、NCEP、CMA 3 个预报系统的东亚地面气温、500 hPa 位势高度场、海平面气压场等要素预报的不一致性特征进行了研究。以上学者开展的研究,或评估的是连续 2 个预报时效的不一致性,或不体现单调递增/单调递减等特征,或者未考虑不同气候背景下降水量级差异等情况。

本文改进了 Flip-Flop 指数(改进后简称 FF_{norm}),使用相对标准偏差指标计算降水量波动大小,使用 FF_{norm} 指数衡量降水量预报趋势的翻转程度以及变化趋势稳定性等,研究在实况有降水和暴雨及以上两种降水情况下,5 种模式对中国 6 个气候分区(熊敏谔,2017)的随时效临近降水量预报的变化特征,以探讨多个业务常用模式多个连续时效降水量预报趋势的稳定性,为预报以及模式的改进提供参考。

1 参与检验的模式及资料

1.1 参与检验的模式介绍

欧洲数值预报中心(ECMWF)和美国国家环境预报中心(NCEP-GFS)是目前国内预报业务最常参考和应用的全球数值模式,中国气象局区域中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)和华东区域气象中心高分辨率数值模式(CMA-SH9)是业务常用的区域模式(辛辰和漆梁波,2018;王晓峰和周荣卫,

2021;苏翔等,2022;刘静等,2022)。其中,ECMWF 2016 年 3 月 8 日起进行了全面升级(Hólm et al, 2016),此后不间断进行 IFS 循环和同化等方面更新(Buizza et al, 2017; Diamantakis and Váňa, 2022); NCEP-GFS 最近的两次升级分别在 2019 年 6 月和 2021 年 3 月(<https://www.emc.ncep.noaa.gov/users/meg/home/future.html> [2021-3-18]); GRAPES_MESO v4.0 版本包含了分辨率的提高、模式动力框架和物理过程改进以及有效应用雷达资料的云分析系统的引入(沈学顺等,2020),雨带分布更接近观测,能够更好地描述降水细节分布(黄雨萍等,2017),2021 年 10 月该模式停止下发产品,升级改进后的系统为 CMA-MESO 3 km(CMA-MESO v5.1);CMA-SH9 2.0 版利用 ADAS 同化系统有效融合了全国雷达基数据、FY 红外和可见光数据等在内的多源资料,采用了复杂的云分析,并在模式物理过程等方面较上一版本进行大量改进(吕林宜等, 2019)。参与对比的还有山东省气象科学研究所逐半小时同化预报系统(HHUPS-ST),该系统于 2020 年 1 月 1 日正式运行,每 12 小时更换一次背景场,每半小时同化一次数据等。模式动力框架、资料同化、参数化方案以及时空分辨率等的不同,可能会使得不同模式的稳定性存在差异。各模式产品的主要特征见表 1。参与检验的模式资料为每日 08 时(北京时,下同)和 20 时起报的 24、36、48、60 和 72 h 时效的降水量预报产品,检验时段为 2020—2021 年 6—9 月。

表 1 业务常用预报产品及主要特征

Table 1 The commonly used forecast products and main characteristics in forecast service

产品类型	产品名称	时、空分辨率	起报时间/BT	预报时效
全球模式	ECMWF	3 h, 0.125°	08、20	0~15 d
	NCEP-GFS	1 h, 0.25°	02、08、14、20	0~16 d
	CMA-MESO	3 h, 10 km	02、08、14、20	0~84 h
区域模式	CMA-SH9	1 h, 9 km	02、08、14、20	0~72 h
	HHUPS-ST	1 h, 13 km	08、20	0~96 h

1.2 实况观测资料

由于我国东临太平洋、西接欧亚大陆,为季风气候,降水量具有区域性特征,因此本文采用熊敏谔(2017)利用近 60 年中国日降水量资料得到的分区进行稳定性评估。研究的区域包括西北区(简称

NW)、西南区(简称 SW)、东北区(简称 NE)、华北区(简称 NC)、长江中下游地区(简称 CJ)和华南区(简称 SC)。分区及站点分布如图 1 所示。实况资料采用熊敏谔(2017)选取的 484 个国家级(地面)气象观测站,研究的时间段为 2020—2021 年汛期(6—9 月)。

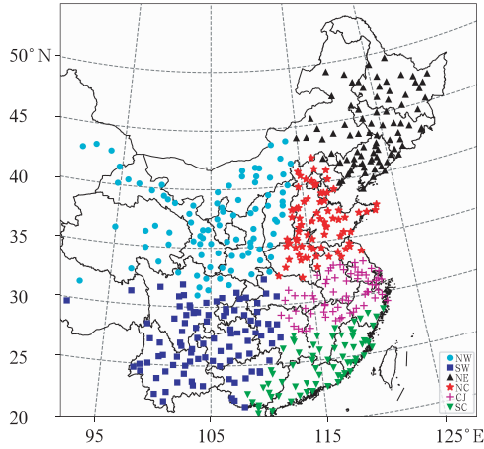


图 1 484 个国家级(地面)气象观测站的 6 个分区分布示意图[分区站点引自熊敏谏(2017)]

Fig. 1 Distribution of six climate divisions over China for the 484 stations
(quoted from Xiong, 2017)

本文对 24 h 累计降水量(实况 20 时至次日 20 时)进行模式预报的稳定性评估,分为实况有降水(24 h 降水量大于等于 0.1 mm)、暴雨及以上降水(24 h 降水量大于等于 50 mm)2 种情况。另外,当实况有降水时,单站样本数最少为 11 d,最多为 194 d,全部样本参与统计评估;当实况为暴雨及以上的强降水时,由于该降水等级天气相对较少,筛掉样本数不足 5 d 的样本,选取 ≥ 5 d 的站点进行分析。

2 方 法

2.1 相对标准偏差

相对标准偏差(RSD)又叫标准偏差系数、变异系数、变动系数等,公式如下:

$$RSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}}{\bar{f}} \quad (1)$$

式中: f_i 代表某个时效的降水量预报值, $\bar{f}$ 代表多时效预报的平均值, n 为参与检验的时效个数,文中选取了 24、36、48、60 和 72 h 共 5 个时效。本文将 RSD 用于多时效降水量预报的波动性特征分析,与标准偏差(用以衡量数据值偏离算术平均值的程度)相比,相对标准偏差能够去除样本平均值差异的影响,有利于消除不同气候背景的差异性, RSD 值越

大说明多时效的降水量预报波动性越大。然而,该方法不能反映降水量预报变化趋势的特征。

2.2 Flip-Flop_{norm} 指数

为了研究多时效预报变化趋势的稳定性, Griffiths et al(2019)提出了 Flip-Flop 指数(简称 FF 指数),该指数能够量化地给出多时效降水量预报趋势的翻转幅度,公式如下:

$$FF = \frac{1}{n-2} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} |f_i - f_{i+1}| - A \right\} \quad (2)$$

$$A = \max f_i - \min f_i \quad (3)$$

式中: f_i 代表某个时效的降水量预报值, f_{i+1} 代表与 f_i 相邻时效的预报值, $\max f_i$ 代表所有时效中预报的降水量最大值, $\min f_i$ 代表所有时效中预报的降水量最小值, n 为参与检验的时效个数。指数的范围区间为 $[0, A]$, 当指数为 0 时,表示预报值随时效的临近单调递增或递减;指数越大说明降水量变化趋势的翻转程度越大;指数的最大值 A 为多个预报时效中的降水量最大值与最小值的差。以 24、36、48 h 时效为例,降水量的预报值分别为 f_{24} 、 f_{36} 、 f_{48} , 当 $f_{24} \leq f_{36} \leq f_{48}$ 或 $f_{24} \geq f_{36} \geq f_{48}$ 时,表示随时效的临近降水量预报单调递减或递增,如果 f_{36} 与 f_{24} 和 f_{48} 相比是一个异常大或者小的值,那么 FF 指数代表 f_{36} 分别与 f_{24} 和 f_{48} 之间的差异较小的值,该值越大,预报值的翻转程度越大。

由于 FF 指数值受降水量大小影响较大,而不同区域降水量差异显著,为消除降水量差异产生的干扰,本文对 FF 指数进行了改进,将其进行归一化处理,改进后称为 Flip-Flop_{norm} 指数,简称 FF_{norm} 指数,改进后的公式如下:

$$FF_{\text{norm}} = \frac{1}{n-2} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |f_i - f_{i+1}|}{A} - 1 \right\} \quad (4)$$

式中 f_i 、 f_{i+1} 和 n 同公式(2),具体参与检验时效同 2.1 节,该指数的区间范围是 $[0, 1]$,当指数为 0 时,表示预报值随时效的临近单调递增或递减,随着指数的增大,预报降水量的翻转程度越大。

以 2021 年 8 月 12 日 20 时至 13 日 20 时过程为例(表 2), ECMWF、NCEP-GFS 和 HHUPS-ST 模式 60 h 和 48 h 时效降水量预报较 72 h 明显增大,随着时效的临近,36 h 和 24 h 时效预报的降水量再减小,因此 5 个时效(72~24 h)的预报呈现增

加一减小的波动趋势,而 CMA-MESO、CMA-SH9 则是从 72~24 h 的降水量预报基本为单调递减的,

因此其 FF_{norm} 明显小于 ECMWF、NCEP-GFS 和 HHUPS-ST。

表 2 58343 站的 2021 年 8 月 12 日 20 时至 13 日 20 时过程多种模式预报趋势稳定性 FF_{norm} 指数

Table 2 The FF_{norm} of multi-model forecast trend for No. 58343 Station
from 20:00 BT 12 to 20:00 BT 13 August 2021

模式产品	各时间(时效/h)预报的降水量/mm					FF_{norm}
	10 日 20 时(72)	11 日 08 时(60)	11 日 20 时(48)	12 日 08 时(36)	12 日 20 时(24)	
ECMWF	16.58	22.15	28.89	11.17	15.23	0.31
NCEP-GFS	4.94	22.26	23.21	19.62	11.93	0.21
CMA-MESO	41.31	24.93	27.88	23.91	12.58	0.07
CMA-SH9	31.52	36.51	15.16	9.37	0.39	0.05
HHUPS-ST	3.56	31.77	32.67	15.05	9.45	0.26

3 多种模式预报稳定性特征分析

3.1 相对标准偏差分布特征

通过统计有降水时各模式多时效的相对标准偏差可知,全球模式 ECMWF 和 NCEP-GFS 的相对标准偏差均较小,分别为 0.586、0.594。区域模式的相对标准偏差较大,其中 CMA-MESO 最大为 0.926,其次是 CMA-SH9 为 0.903。总体而言,全球模式随时效临近预报的降水量波动幅度小于区域模式。

图 2 给出的是有降水时不同区域的 5 种模式的多时效降水预报的相对标准偏差空间分布及其区域平均值特征。全球模式 ECMWF(图 2a)和 NCEP-GFS(图 2b)的相对标准偏差均较小,其预报的最小区域位于 SW、SC 的西部和南部(小于 0.4),其次是 SC 的大部地区、NE 的东部、NW 的南部和 CJ 的中游地区,在 0.4~0.6,相对标准偏差较大的地区位于 NC、NE 的中西部,为 0.6~0.8,最大的区域位于 NW 的西北部,大于 0.8。区域模式中 HHUPS-ST(图 2e)的相对标准偏差相对较小,在 SW、SC 和 NE 的东部地区较小,为 0.6~0.8,其他区域基本大于 0.8,其中 NW 的西北部最大值达 1.35;CMA-MESO(图 2c)和 CMA-SH9 模式(图 2d)的相对标准偏差相对较大,在 SW 和 NE 的部分地区以及 NW 的南部相对较小,为 0.6~0.8,其他区域大于 0.8,其中 NC、SC、CJ 和 NW 均有站点相对标准偏差大于 1.2,2 种模式的极大值均位于 NW 的西北部。

结合不同区域平均的相对标准偏差(图 2f)可

知,ECMWF 对 NW、SW、NE、SC 和 NCEP-GFS 对 NC、CJ 区域的相对标准偏差相对较小,CMA-MESO 模式对 NW、SW、NE、NC 和 CMA-SH9 对 CJ、SC 区域的相对标准偏差相对较大。各模式对 SW 的西部和 NE 的东部以及 SC 的南部预报的波动幅度较小,对西北区的西部预报的波动幅度较大。

为了探索不同模式相对标准偏差指标存在差异的原因,本文分析了各模式降水量预报量级分布特征。统计表明,在实况有降水的情况下,多种模式全部时效的不同降水量级预报的频次(图 3a)特征为:各模式预报的降水量级频次峰值均为小雨,随着降水量级增大频次迅速降低;全球模式对小雨和中雨的预报次数最多,区域模式对大雨、暴雨和大暴雨的次数相对较多;对于预报无降水而言,区域模式尤其是 CMA-MESO 72~36 h 时效未预报降水的次数远远高于其他模式。以 NCEP-GFS(图 3b)和 CMA-SH9(图 3c)为例分析了不同模式降水预报的频次分布特征,结果显示,CMA-SH9 频次分布较宽,尤其是对 70 mm 以上降水量的预报频次显著大于 NCEP-GFS,这与区域模式对局地大降水有更强的反应能力有关。以上表明,区域模式降水预报的局地性特征更加明显,是其相对标准偏差指标大于全球模式的可能原因之一。

3.2 FF_{norm} 指数特征对比分析

采用箱线图对实况有降水时多种模式的 FF_{norm} 指数进行综合分析(图 4),CMA-MESO 指数的中位数最小,为 0.23;NCEP-GFS 和 ECMWF 指数的中位数相同,为 0.24,只是 ECMWF 的整体分布比 NCEP-GFS 更加集中,说明 ECMWF 对各站的稳定

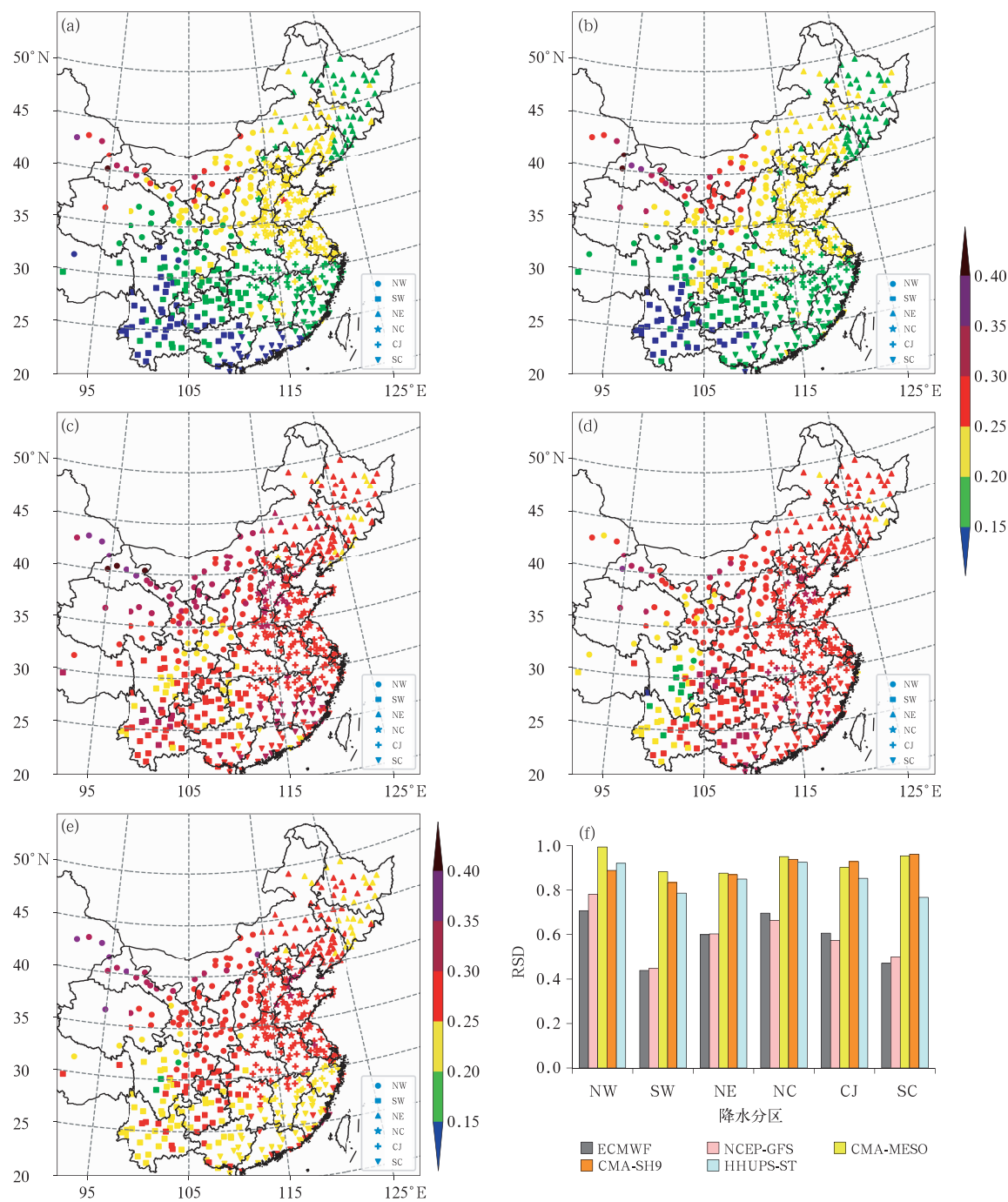


图 2 2020—2021 年 6—9 月 (a)ECMWF, (b)NCEP-GFS, (c)CMA-MESO, (d)CMA-SH9, (e)HHUPS-ST 多种模式的多时效预报降水的相对标准偏差分布及其 (f) 区域平均
Fig. 2 Distribution of relative standard deviations (RSD) for the precipitation forecasts with multiple lead times and multiple models of (a) ECMWF, (b) NCEP-GFS, (c) CMA-MESO, (d) CMA-SH9, (e) HHUPS-ST and (f) their regional averages from June to September in 2020—2021

性预报特征较为一致; HHUPS-ST 的中位数为 0.26; CMA-SH9 的中位数最大, 为 0.27, 且整体高于其他模式。总的来说, CMA-MESO 多时效降水

预报趋势的稳定性最好, 其后依次是 ECMWF、NCEP-GFS 和 HHUPS-ST, CMA-SH9 多时效降水预报趋势的稳定性最差。

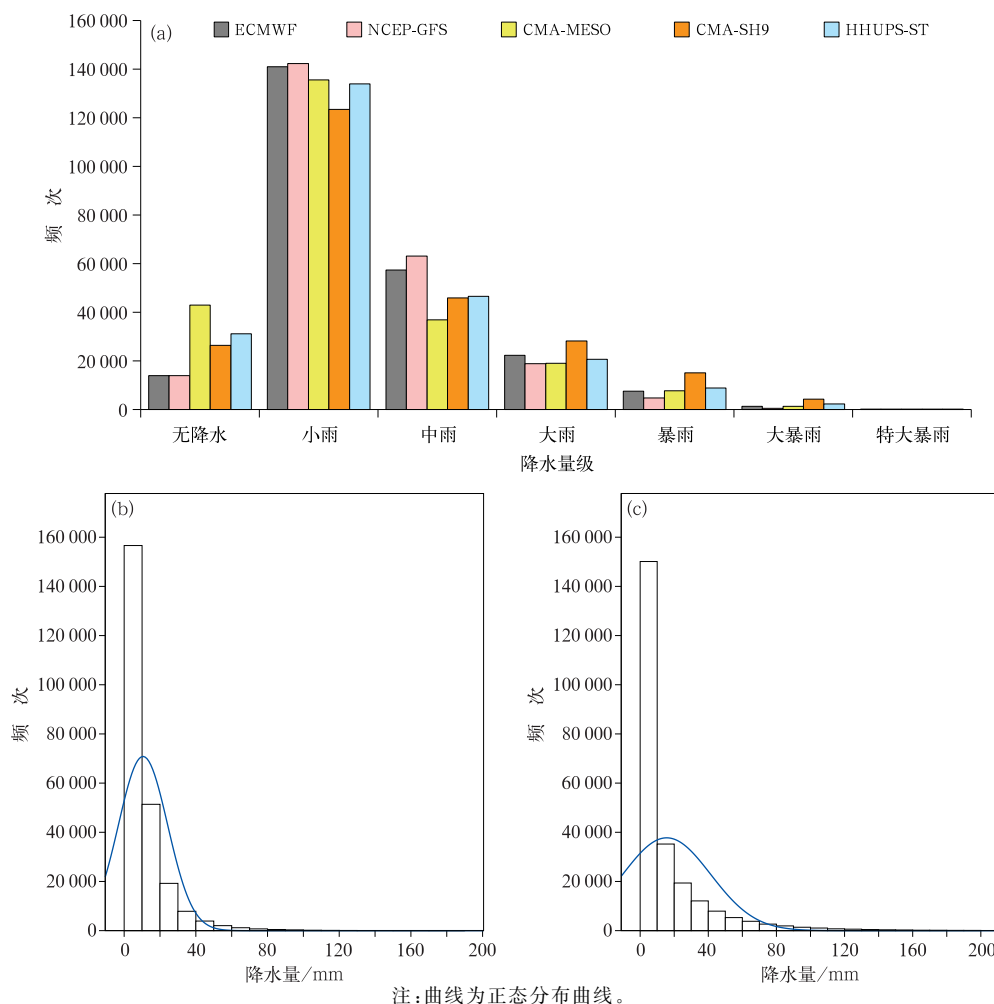


图 3 2020—2021 年 6—9 月 (a) 多种模式的多时效预报的降水量级频次统计, (b) NCEP-GFS, (c) CMA-SH9 降水频次的直方图分布

Fig. 3 (a) The frequency statistics of precipitation magnitude of the precipitation forecast with multiple lead times and multiple models and (b, c) the frequency of precipitation histograms of (b) NCEP-GFS, (c) CMA-SH9 from June to September in 2020—2021

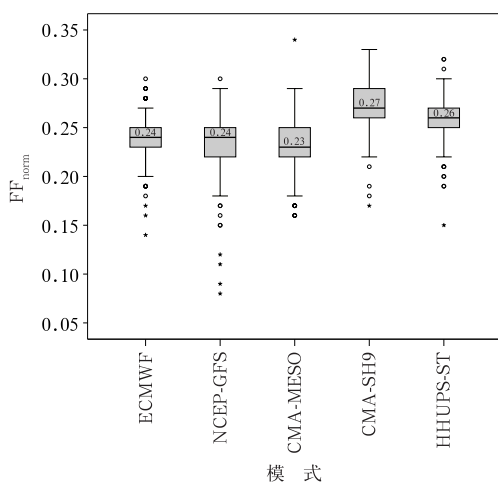


图 4 2020—2021 年 6—9 月多种模式的多时效预报降水的 FF_{norm} 指数箱线图

Fig. 4 The box-line diagram of the FF_{norm} index for the precipitation forecasts with multiple lead times and multiple models from June to September in 2020—2021

下面探讨当实况有降水时,多个模式对各降水分区的 FF_{norm} 指数预报特征。CMA-MESO(图 5c)在各区均有 FF_{norm} 指数小于 0.20 的站点,尤其是 SW 的站点数最多,SC 的南部和 NW 的西部指数均较小,指数较大的站点位于 NE 的北部和南部地区、CJ 的下游地区以及 NC 的北部地区,在 0.25~0.30。ECMWF 模式(图 5a) FF_{norm} 指数小于 0.20 的站点主要位于 NW,指数较大的站点(0.25~0.30)主要位于 SW 的西部、NE 的中东部、NC 的西部、CJ 的下游地区和 SC 的西南部。NCEP-GFS(图 5b)在 NW 有部分站点 FF_{norm} 指数较小,小于 0.20, NCEP-GFS 在各区均有 0.25~0.30 的指数较大站点,其中在 CJ、SW 的西南部和 NE 的北部的站点数最多。HHUPS-ST(图 5e)仅有 4 个位于 NW 的站点 FF_{norm} 指数小于 0.20,大部分区域指数在 0.20~0.30,在

NW、SW、NE 和 CJ 区域均有少量站点的指数大于 0.30。CMA-SH9(图 5d) 仅 3 个站点(NW 区) FF_{norm} 指数小于 0.20, 大部分区域指数 ≥ 0.25 , 且是

各模式中指数大于 0.30 的站点数最多的, 其中位于 SW 的站点数最多, SC 的南部以及 NW、NE 和 NC 的交界处也有较多的站点分布。

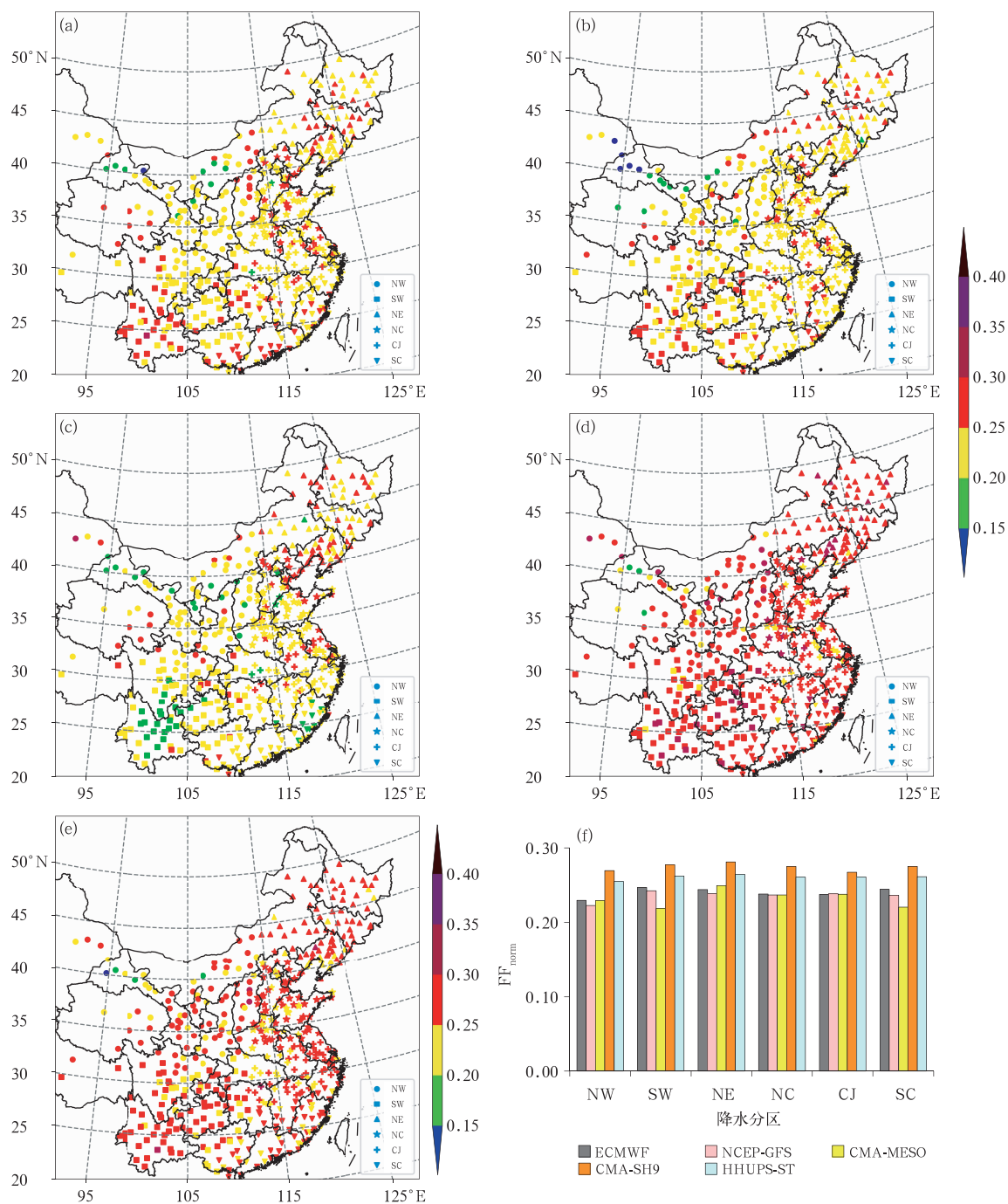


图5 2020—2021年6—9月(a)ECMWF,(b)NCEP-GFS,(c)CMA-MESO,(d)CMA-SH9,(e)HHUPS-ST多种模式的多时效预报降水的 FF_{norm} 指数分布及其(f)区域平均
Fig. 5 Distribution of the FF_{norm} index for the precipitation forecasts with multiple lead times and multiple models of (a) ECMWF, (b) NCEP-GFS, (c) CMA-MESO, (d) CMA-SH9, (e) HHUPS-ST and (f) their regional averages from June to September in 2020—2021

综合区域平均的 FF_{norm} 指数(图 5f)可得出以下结论:各区均为 CMA-MESO、NCEP-GFS、ECMWF 的降水量预报趋势稳定性指数小于 CMA-SH9 和 HHUPS-ST; CMA-MESO 对 SW 和 SC 的预报趋势稳定性指数明显小于其他模式, NCEP-GFS 对 NW、NE 的 FF_{norm} 指数最小, 降水量预报趋势的稳定性较好; CMA-SH9 对于 6 个区域的 FF_{norm} 指数均最大, 说明 CMA-SH9 随着时效的临近降水预报趋势的翻转程度较大, 降水预报趋势不够稳定, 尤其是对 NE 的降水预报趋势的稳定性较差。

当实况为暴雨及以上量级降水时, 多种模式 FF_{norm} 指数的综合分布情况(图 6)为: CMA-MESO 模式 FF_{norm} 指数的中位数最小, 为 0.22; NCEP-GFS 和 ECMWF 模式指数的中位数相同, 为 0.24; HHUPS-ST 模式指数的中位数为 0.27; CMA-SH9 模式指数的中位数最大, 为 0.28, 整体高于其他模式。与有降水时的特征一致, CMA-MESO 降水预报趋势的稳定性最好, CMA-SH9 降水预报趋势的稳定性最差。

分析多种模式对不同区域的暴雨及以上降水预报的 FF_{norm} 指数空间分布可知, 小于 0.15 的站数为 CMA-MESO(图 7c)最多(23 个), 其次是 ECMWF(图 7a)为 18 个, NCEP-GFS(图 7b)为 11 个, HHUPS-ST(图 7e)为 4 个, CMA-SH9(图 7d)最少为 2 个。

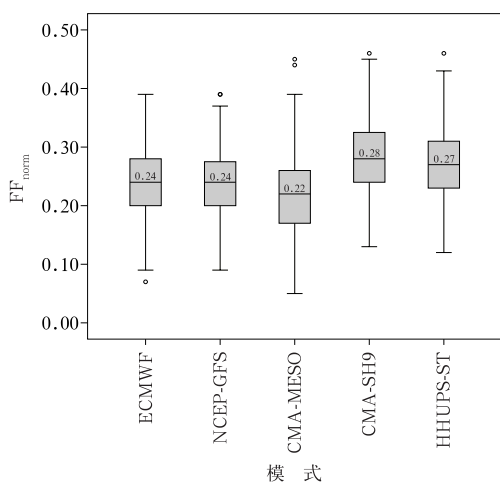


图 6 2020—2021 年 6—9 月多种模式的多时效预报暴雨及以上降水的 FF_{norm} 指数箱线图

Fig. 6 The box-line diagram of the FF_{norm} index for the forecasts of rainstorm and above it with multiple lead times and multiple models from June to September in 2020—2021

CMA-MESO 模式的 FF_{norm} 指数在 5 种模式中相对较小, 指数小于 0.15 的区域位于 SW、CJ 的中游和 NC 西部的部分地区, 此外, 各个区域均有指数大于 0.3 的站点, 其中 CJ 的站数较多, 最大值位于 NE 的辽宁省; 其次是 ECMWF 和 NCEP-GFS 模式, ECMWF 模式 FF_{norm} 指数小于 0.15 的站点主要分散在 NC、SC 和 SW 的局部地区, 而在 SW、NE、NC、CJ 和 SC 区域均有大于 0.3 的站点, 其中 SW 和 CJ 区所占的站数相对较多, 指数最大位于 CJ, NCEP-GFS 模式 FF_{norm} 指数小于 0.15 的站点主要位于 CJ 下游的浙江省, 除 NW 外, 其他区均有大于 0.3 的站点, 其中 CJ 的站数最多, 其次是 SW 的中东部, 指数最大位于 CJ; HHUPS-ST 模式 FF_{norm} 指数小于 0.15 的站点位于 NC 的西部地区, 各区均有大于 0.3 的站点, 其中 CJ 的站数最多, 其次是 NC 和 SW, 指数最大位于 SW 的东南部; CMA-SH9 在 5 种模式中大于 0.3 的站数最多, 其中位于 NC 的站数最多, 其后依次是 SW、SC 和 CJ, 指数最大的站点位于 NC 的北部。上述分析表明, 对暴雨及以上降水, 各模式在不同区域的预报趋势稳定性指数差异较大, 而对 CJ 的随时效临近降水预报趋势的稳定性均较差。

结合区域平均(图 7f)可以得出, 与有降水时的预报特征相似, 各区 FF_{norm} 指数均为 CMA-MESO、NCEP-GFS、ECMWF 小于 CMA-SH9 和 HHUPS-ST 模式; CMA-MESO 对 SW、NC、CJ 和 NCEP-GFS 对 NE、SC 以及 ECMWF 对 NW 的 FF_{norm} 指数明显小于其他模式, 降水预报趋势的稳定性较好; CMA-SH9 对于大部分区域的 FF_{norm} 指数均最大, 尤其是对 NC 降水预报趋势的稳定性较差。

4 降水量预报变化趋势稳定的频次特征分析

多时效降水量预报变化趋势稳定频次是指各模式随时效的临近, 预报的降水量单调递增、递减或均预报无降水的次数。图 8a 为当实况有降水时, 各模式降水量预报变化趋势稳定的频次分布, CMA-MESO 对各区的变化趋势稳定预报频次均最多, 显著高于其他模式, 其次是 NCEP-GFS, HHUPS-ST 和 ECMWF 的变化趋势稳定预报频次比较接近, 最低为 CMA-SH9。各模式对于 NW 的变化趋势稳定预报频次均较高。当实况为暴雨及以上降水时, 模

式预报变化趋势稳定的频次分布如图 8b 所示,CMA-MESO 对 NW、SW、NC、CJ 和 SC 预报的总频次最多,NCEP-GFS 对 NE 预报的总频次最多,CMA-SH9 对

SW、NC 和 SC 预报的频次最少,HHUPS-ST 对 NW、NE 和 CJ 预报的频次最少。

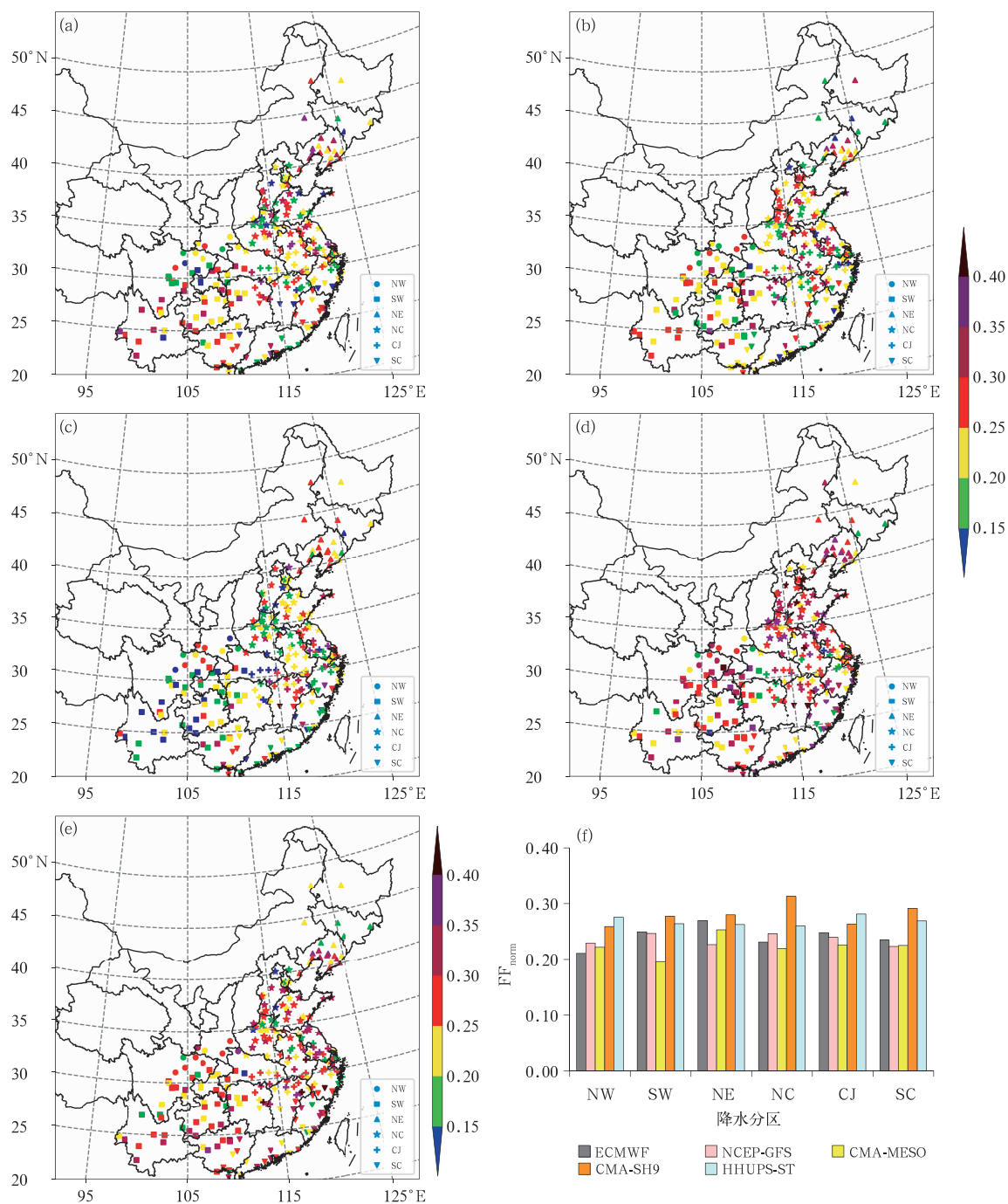


图 7 2020—2021 年 6—9 月 (a)ECMWF, (b)NCEP-GFS, (c)CMA-MESO, (d)CMA-SH9, (e)HHUPS-ST 多种模式的多时效预报暴雨及以上降水的 FF_{norm} 指数分布及其 (f) 区域平均

Fig. 7 Distribution of the FF_{norm} index for the precipitation forecasts of rainstorm and above it with multiple lead times and multiple models of (a) ECMWF, (b) NCEP-GFS, (c) CMA-MESO, (d) CMA-SH9, (e) HHUPS-ST and (f) their regional averages from June to September in 2020—2021

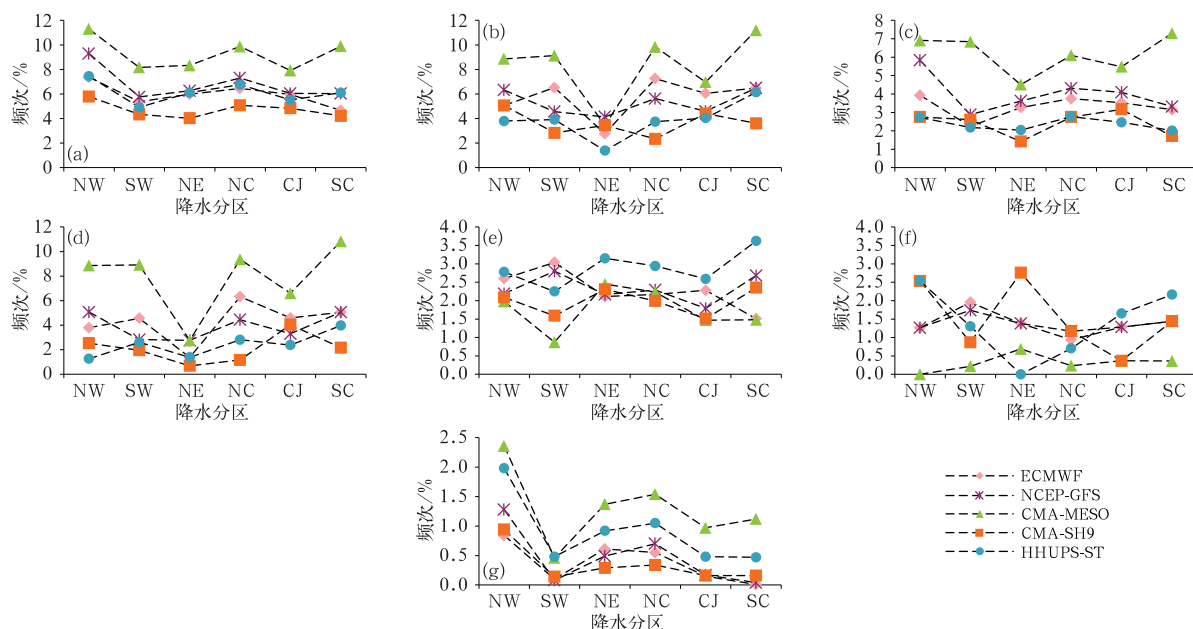


图 8 2020—2021 年 6—9 月多种模式对(a,c,e,g)实况有降水和(b,d,f)实况为暴雨及以上降水随着预报时效的临近降水量预报(c,d)增加,(e,f)减小,(g)持续为 0 mm 以及(a,b)综合的频次统计

Fig. 8 The frequency statistics of the multi-model forecasted precipitation to (c, d) increase, (e, f) decrease, (g) continue to be 0 mm and (a, b) the total with forecast time approaching from June to September in 2020—2021

(a, c, e, g) rainfall for actual condition, (b, d, f) rainstorm and above for actual condition

进而分析随时效临近模式预报的降水量单调递增(图 8c,8d)和递减(图 8e,8f)特征,结合单调递增与递减频次的差值(表 3)来看,无论是何种降水,CMA-MESO 和 NCEP-GFS 对各区的预报均为随时效临近预报的降水量单调递增次数大于递减的,且 CMA-MESO 对 NW、SW、NC、CJ 和 SC 的单调递增次数显著大于其他模式。ECMWF 在 NW、NE、NC、CJ 和 SC 区域对有降水的预报单调递增次数大于递减的,在 SW 区的预报相反;对各区暴雨及以上降水的预报均为单调递增次数大于递减的,尤其是对 NC 的预报。CMA-SH9 在有降水时,对 NW、NC、SW 和 CJ 区域预报的单调递增次数略大于递减次数,对 NE 和 SC 区域的预报则相反;关于暴雨及以上降水的预报在 CJ 单调递增大于递减,在 NE 的预报相反,其他地区单调递增和递减次数基本一致。HHUPS-ST 对各区降水的预报均为随着时效临近降水量单调递减大于递增次数,在 NW、NE、NC、CJ 和 SC 递减的次数大于其他模式;对暴雨及以上降水的预报在大部分地区预报的递增次数大于递减的(NW 除外)。

在此基础上,为了部分消除气候背景和样本局

限性的影响,以 ECMWF 作为参考对象,考察 NCEP-GFS、CMA-MESO、CMA-SH9 和 HHUPS-ST 模式随时效临近降水量预报单调递增与递减的情况(图 9)。总体上,NCEP-GFS 的单调递增与递减频次的差值比较接近 ECMWF;CMA-MESO 的频次差值大于 ECMWF,随时效临近降水量预报逐渐增大的特征比较明显;CMA-SH9 和 HHUPS-ST 在大部分区域预报的频次差值比 ECMWF 偏小,尤其是有降水时,HHUPS-ST 随着时效临近逐渐减小频次大于逐渐增加频次。

图 8g 为当实况有降水时,模式的多时效降水预报量均为 0 mm 的频次分布,CMA-MESO 对各区预报的频次均最多,其次是 HHUPS-ST,CMA-SH9 预报的频次相对最少。各模式对 NW 预报的频次最高,对 SW 和 SC 预报的频次相对较低。当实况为暴雨及以上降水时(图略),各模式基本上未有预报降水量为 0 mm 的情况。

以上分析表明,当实况有降水时,CMA-MESO 预报的降水量随时效临近单调递增、递减和预报无降水的总次数均最多,其次是 NCEP-GFS,并且该 2 种模式对各区的降水量预报均为随时效临近递增

表 3 2020—2021 年 6—9 月多种模式随着预报时效的临近对实况有降水、暴雨及以上降水量预报单调递增与递减的频次差值特征(单位:%)

Table 3 The frequency characteristics of difference between continuous increase and continuous decrease in precipitation with forecast time approaching of multiple models about rainfall and rainstorm and above it from June to September in 2020—2021 (unit: %)							
降水量级	模式	NW	SW	NE	NC	CJ	SC
有降水	ECMWF	1.33	−0.80	1.16	1.58	1.25	1.64
	NCEP-GFS	3.64	0.08	1.45	2.02	2.30	0.64
	CMA-MESO	4.93	5.97	2.06	3.87	4.01	5.82
	CMA-SH9	0.66	1.02	−0.89	0.76	1.66	−0.64
	HHUPS-ST	−0.05	−0.07	−1.11	−0.17	−0.13	−1.61
暴雨及以上降水	ECMWF	2.53	2.61	0.00	5.39	3.30	3.61
	NCEP-GFS	3.80	1.09	1.38	3.28	2.02	3.61
	CMA-MESO	8.86	8.70	2.07	9.13	6.24	10.45
	CMA-SH9	0.00	1.09	−2.07	0.00	3.67	0.72
	HHUPS-ST	−1.27	1.30	1.38	2.11	0.74	1.81

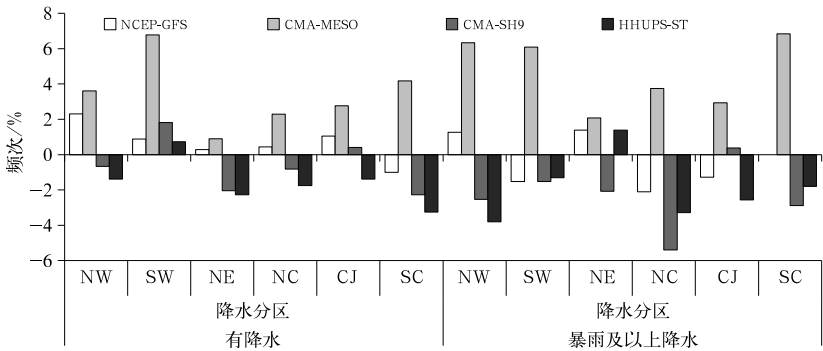


图 9 多种模式预报的降水量随时效临近单调递增和递减频次差值与 ECMWF 的差异

Fig. 9 Difference between ECMWF and NCEP-GFS, CMA-MESO, CMA-SH9, HHUPS-ST in the frequency difference between continuous increase and continuous decrease in precipitation with forecast time approaching

次数大于递减的,稳定预报频次最少的是 CMA-SH9;当实况为暴雨及以上降水,CMA-MESO 在大部分地区的稳定预报频次最高,各模式基本为单调递增次数大于递减次数;以 ECMWF 模式为基准,CMA-MESO 随时效临近单调递增与单调递减的差值大于 ECMWF,NCEP-GFS 与 ECMWF 较为接近,CMA-SH9 和 HHUPS-ST 模式在大部分区域小于 ECMWF。

5 结论与讨论

为更好地了解不同数值模式降水预报产品性能,本文深入研究了业务常用的全球模式 ECMWF、

NCEP-GFS 以及区域模式 CMA-MESO、CMA-SH9、HHUPS-ST 预报的稳定性。采用相对标准偏差指标计算不同时效降水量预报波动大小、改进并使用 FF_{norm} 指数衡量降水量预报趋势的翻转程度以及变化趋势稳定预报的频次等方法,分实况有降水、暴雨及以上降水 2 种情况,对 5 种模式在中国 6 个气候分区汛期(6—9 月)降水预报的稳定性特征进行了分析。主要结论如下:

(1)当实况有降水时,全球模式多时效降水预报的相对标准偏差小于区域模式,即全球模式降水量预报波动相对较小,这可能与全球模式降水量频率分布较窄,对大雨及以上降水预报频次相对较少,区域模式降水量频率分布较宽,降水量预报局地性特

征更加显著有关。各模式对西南区的西部、东北区东部以及华南区的南部预报的波动性较小,对西北区的西部预报的波动性较大。

(2)就降水预报趋势的稳定性而言,2种降水情况下均为CMA-MESO、NCEP-GFS和ECMWF的稳定性较好,FF_{norm}指数小于HHUPS-ST和CMA-SH9,CMA-SH9对各区的FF_{norm}指数最大、降水量预报变化趋势稳定性较差。当实况有降水时,各模式均对西北区的西北部预报趋势的稳定性最好,此外,CMA-MESO对西南区、华南区南部降水量预报变化趋势的稳定性较为突出;当实况为暴雨及以上降水时,CMA-MESO对西南区、NCEP-GFS对华南区的预报稳定性最好。各模式对长江中下游地区的指数相对较大,多时效降水预报趋势的稳定性较差。

(3)趋势稳定预报(单调递增、递减或均预报无降水)的频次特征为:有降水时,CMA-MESO预报的降水量随时效临近单调递增、递减和预报无降水的总次数均最多,其次是NCEP-GFS,此2种模式对各区的降水量预报均为随时效临近递增次数大于递减的,且CMA-MESO以单调递增为主,稳定预报频次最少的是CMA-SH9;暴雨及以上降水时,CMA-MESO在大部分地区的稳定预报频次最高(仅NCEP-GFS在东北区次数最多),各模式基本为单调递增次数大于递减次数(CMA-SH9对东北区、HHUPS-ST对西北区预报除外);以ECMWF作为参考对象,NCEP-GFS与ECMWF较为接近,CMA-MESO随时效临近单调递增与递减差值的频次大于ECMWF,即随时效临近降水量预报逐渐增大的特征较为明显,CMA-SH9和HHUPS-ST在大部分区域小于ECMWF。

本文研究了多种模式多时效降水预报的稳定性特征,以上结论能够为模式调试以及模式产品在预报业务和决策中应用提供参考。本文未涉及模式预报的准确性,需要在后续工作中将预报准确率与稳定性结合展开探讨。

参考文献

郭达烽,段明铿,夏旻惠,等,2018. 模式降水与温度预报的不一致性特征[J]. 应用气象学报,29(3):321-332. Guo D F, Duan M K, Xia M H, et al, 2018. The inconsistency of forecasting in operational numerical prediction products[J]. J Appl Meteor Sci, 29(3):321-332(in Chinese).

郭换换,段明铿,智协飞,等,2016a. 基于TIGGE资料的预报跳跃性特征[J]. 应用气象学报,27(2):220-229. Guo H H, Duan M K,

Zhi X F, et al, 2016a. Characteristics of the forecast jumpiness based on TIGGE data[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):220-229(in Chinese).

郭换换,智协飞,段明铿,等,2016b. 数值天气预报中的不一致性问题综述[J]. 气象科学,36(1):134-140. Guo H H, Zhi X F, Duan M K, et al, 2016b. Review on the inconsistency of numerical weather prediction[J]. J Meteor Sci, 36(1):134-140(in Chinese).

黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报,28(1):25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1):25-37(in Chinese).

刘静,任川,赵梓琪,等,2022. 多区域高分辨率模式强降水预报检验分析[J]. 气象,48(10):1292-1302. Liu J, Ren C, Zhao Z Q, et al, 2022. Comparative analysis on verification of heavy rainfall forecasts in different regional models[J]. Meteor Mon, 48(10):1292-1302(in Chinese).

吕林宜,王新敏,栗晗,2019. 华东区域模式对河南“7·19”特大暴雨的数值检验与分析[J]. 气象与环境科学,42(1):101-109. Lv L Y, Wang X M, Li H, 2019. Verification and analysis of SMS-WARMS forecast for “7·19” extraordinary rainstorm in Henan Province[J]. Meteor Environ Sci, 42(1):101-109(in Chinese).

沈学顺,王捷建,李泽椿,等,2020. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. 气象学报,78(3):451-476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):451-476(in Chinese).

苏翔,刘梅,康志明,等,2022. 2020年江苏主汛期短期暴雨预报检验[J]. 气象,48(3):357-371. Su X, Liu M, Kang Z M, et al, 2022. Verification of short-range torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. Meteor Mon, 48(3):357-371(in Chinese).

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).

夏旻惠,智协飞,2020. ECMWF业务预报模式地面气温预报的不一致性特征研究[J]. 大气科学学报,43(4):652-662. Xia M H, Zhi X F, 2020. Study on the inconsistency characteristics of surface air temperature forecasts of the ECMWF operational forecast model[J]. Trans Atmos Sin, 43(4):652-662(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 Dis, 37(4):383-391(in Chinese).

熊敏谄,2017. 近60年中国日降水量分区及气候特征[J]. 大气科学,41(5):933-948. Xiong M Q, 2017. Climate regionalization and characteristics of daily precipitation in China in recent 60 years

- [J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(5):933-948(in Chinese).
- 智协飞, 胡耀兴, 俞剑蔚, 等, 2018. 基于 TIGGE 资料的东亚地面气温预报的不一致性研究[J]. *大气科学学报*, 41(3):298-307. Zhi X F, Hu Y X, Yu J W, et al, 2018. On the inconsistency of the surface air temperature forecasts over East Asia using TIGGE data[J]. *Trans Atmos Sin*, 41(3):298-307(in Chinese).
- Buizza R, Bechtold P, Bonavita M, et al, 2017. IFS Cycle 43r3 brings model and assimilation updates[J]. *ECMWF Newsletter*, (152): 18-22.
- Diamantakis M, Váňa F, 2022. A new way of computing semi-Lagrangian advection in the IFS[J]. *ECMWF Newsletter*, (173): 27-31.
- Ehret U, 2010. Convergence index: a new performance measure for the temporal stability of operational rainfall forecasts[J]. *Meteor Z*, 19(5):441-451.
- Griffiths D, Foley M, Ioannou I, et al, 2019. Flip-Flop index: quantifying revision stability for fixed-event forecasts[J]. *Meteor Appl*, 26(1):30-35.
- Holm E, Forbes F, Lang S, et al, 2016. New model cycle brings higher resolution[J]. *ECMWF Newsletter*, (147): 12-19.
- Lashley S L, Fisher L, Simpon B J, et al, 2008. Observing verification trends and applying a methodology to probabilistic precipitation forecasts at a National Weather Service Forecast Office[C] // 19th Conference on Probability and Statistics. New Orleans: American Meteorological Society.
- McLay J G, 2011. Diagnosing the relative impact of “sneaks,” “phantoms,” and volatility in sequences of lagged ensemble probability forecasts with a simple dynamic decision model[J]. *Mon Wea Rev*, 139(2):387-402.
- Pappenberger F, Cloke H L, Persson A, et al, 2011. HESS Opinions “On forecast (in) consistency in a hydro-meteorological chain: curse or blessing?”[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 15(7):2391-2400.
- Ruth D P, Glahn B, Dagostaro V, et al, 2009. The performance of MOS in the digital age[J]. *Wea Forecasting*, 24(2):504-519.
- Toth Z, Talagrand O, Candille G, et al, 2003. Probability and ensemble forecasts[M] // Joliffe I, Stephenson D. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. New York: Wiley & Son:137-164.
- Zsoter E, Buizza R, Richardson D, 2009. “Jumpiness” of the ECMWF and Met Office EPS control and ensemble-mean forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 137(11):3823-3836.

(本文责编:俞卫平)