

杨梦琪,陈国民,陈琛,等,2025. 2023 年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. 气象,51(12):1669-1682. Yang M Q, Chen G M, Chen C, et al, 2025. Evaluation of typhoon forecast accuracy in the Northwest Pacific and the South China Sea in 2023[J]. Meteor Mon, 51(12):1669-1682(in Chinese).

2023 年西北太平洋和南海台风预报精度评定^{*}

杨梦琪^{1,2,3} 陈国民^{1,2,3} 陈 琛^{1,2,3} 张喜平^{1,2,3}
汤立春^{1,2} 白莉娜^{1,2,3} 郭 蓉^{1,2,3}

1 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

2 亚太台风研究中心,上海 201306

3 中国气象局台风数值预报重点实验室,上海 200030

提 要: 评定 2023 年西北太平洋和南海台风业务定位和定强、路径和强度预报精度,结果表明:2023 年官方台风预报机构的台风定位误差总体平均为 17.1 km,台风定强误差总体平均为 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,定位精度相比 2022 年有所提高,而定强精度有所下降。主观和客观台风预报方法的 24、48 和 72 h 预报时效台风路径预报平均误差相比 2022 年有所减小,官方台风预报机构 24 h 路径预报平均误差创历史新低。客观预报方法中,ECMWF-IFS、NCEP-GFS、CMA-TRAMS 路径预报平均误差相对较小。NCEP-GFS、CMA-TYM 和 ANNGA 强度预报平均绝对误差普遍较小且技巧评分相对较高。

关键词: 台风,定位和定强误差,路径预报误差,强度预报误差

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2025. 090101

Evaluation of Typhoon Forecast Accuracy in the Northwest Pacific and the South China Sea in 2023

YANG Mengqi^{1,2,3} CHEN Guomin^{1,2,3} CHEN Chen^{1,2,3} ZHANG Xiping^{1,2,3}
TANG Lichun^{1,2} BAI Lina^{1,2,3} GUO Rong^{1,2,3}

1 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

2 Asia-Pacific Typhoon Collaborative Research Center, Shanghai 201306

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

Abstract: Errors of typhoon operational position and intensity estimation, as well as errors of typhoon track and intensity forecast over the Northwest Pacific and the South China Sea in 2023 are evaluated. The results show that the mean error of typhoon position estimation by official typhoon forecasting agencies in 2023 was 17.1 km, and the mean error of typhoon intensity estimation was $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Compared to the errors in 2022, the accuracy of typhoon position estimation got improved in 2023, whereas the accuracy of typhoon intensity estimation decreased. The mean errors of track forecasts with 24, 48 and 72 h lead time by subjective and objective forecast methods in 2023 were reduced than in 2022. In 2023, the mean errors of 24 h track forecast by the official typhoon forecasting agencies reached a historic low. Among objective forecasts, mean errors of track forecasts by ECMWF-IFS, NCEP-GFS, CMA-TRAMS were relatively

* 上海市自然科学基金项目(R22ZR1476400)、中国气象局重点创新团队(台风团队)(CMA2023ZD06)和上海市气象局台风赛道团队共同资助

2025 年 4 月 24 日收稿; 2025 年 9 月 11 日收修定稿

第一作者:杨梦琪,从事台风预报检验技术研究. E-mail: yangmq@typhoon.org.cn

通讯作者:陈国民,从事台风预报精度分析技术研究. E-mail: chengm@typhoon.org.cn

small. Mean absolute errors of typhoon intensity forecasts by NCEP-GFS, CMA-TYM and ANNGA were generally small, and their intensity forecast skill scores were relatively high.

Key words: typhoon, position and intensity estimation error, track forecast error, intensity forecast error

引 言

我国是世界上受自然灾害影响最严重的国家之一,其中台风是致灾因素中最重要的组成部分。2023 年西北太平洋和南海共有 17 个台风活动,其中热带风暴级 3 个,强热带风暴级 3 个,台风级 1 个,强台风级 2 个,超强台风级 8 个,共有 6 个台风登陆我国,登陆地段集中,深入内陆,影响范围广,灾害影响重(聂高臻等,2025)。

精准台风预报是有效防御台风灾害、减轻灾害损失的基石。近百年来,中国台风预报技术经历了数个主要发展阶段,如看云识天、天气图分析、半客观天气学预报、客观统计预报、数值预报及其集成应用等(余晖等,2025)。21 世纪初以来,台风数值预报技术得到了快速发展,适用于“灰区”尺度分辨率的台风模式物理过程参数化方案(Zhang et al, 2023; 朱雪松等,2024)和高分辨率台风资料同化的技术(Luo et al, 2022)是目前阶段研究的重点(余晖等,2025)。台风确定性数值预报技术发展的同时,台风集合预报技术也得到了发展,为台风预报的不确定性提供了量化估计(张璟等,2022)。中国集合预报业务实现了从早期以引进集成为主的谱模式集合预报,到自主可控的全球/区域同化集合预报系统的跨越(陈静和李晓莉,2020; 陈静等,2025)。初值扰动技术从集合变换卡尔曼滤波法(马旭林等,2008; 张涵斌等,2017),升级为多尺度奇异向量初值扰动方法(叶璐等,2020),同时采用随机扰动物理过程倾向项方案和随机能补偿方案结合的方法产生模式扰动,推动中国集合预报水平的进步(陈静和李晓莉,2020; 沈学顺等,2020; 陈静等,2025)。

随着综合探测体系和数值预报技术的不断进步完善,近十几年来中央气象台的台风路径业务预报水平进展显著,但台风强度预报进展相对较慢(李泽椿等,2020)。台风预报检验是促进台风预报模式发展、提升模式预报产品可靠性的重要依据,也为有效订正模式提供参考(程正泉和廖代强,2012; 潘留杰等,2014; 漆梁波,2015; 陈笑等,2018)。为客观评估台风业务预报能力,自 1988 年起,上海台风研究所

受委托每年对全国台风业务定位和定强,以及预报精度进行年度评定(雷小途,2021)。延续历年评估框架(陈国民等,2021; 2022; 杨梦琪等,2023; 2024),本文针对 2023 年西北太平洋和南海海域的 17 个台风,评定台风业务定位和定强精度,以及路径和强度预报精度,旨在让业务和科研人员系统了解 2023 年台风业务预报方法的性能。

1 资料与方法

1.1 资料

评定依据为中国气象局台风最佳路径数据集(<https://tcdatalab.typhoon.org.cn/zjljsjj.html>),该数据集包含台风逐 6 h 的位置和强度。自 2018 年起,对于登陆我国的台风,在其登陆我国前 24 h 和在我国陆地活动的期间,台风位置和强度频次为逐 3 h 一次(Ying et al, 2014; Lu et al, 2021)。

纳入评定的主观和客观预报方法汇总于表 1,涵盖 5 个官方台风预报机构、14 个确定性客观预报方法(含 5 个全球数值预报模式、4 个区域数值预报模式和 5 个统计预报方法),以及 6 个集合预报模式。统计预报方法中 SSTC、FJOP 和 JSPC 是台风路径预报方法,WIPS 是台风强度预报方法,以及利用其他统计预报方法、数值模式和官方台风预报机构对台风路径和强度进行预报。

1.2 评定方法

台风定位、定强及预报精度评定参照《台风业务和服务规定》(中国气象局,2012)中的台风分析和预报质量评定方法。

2 台风定位定强精度评定

表 2 汇总了官方台风预报机构(CMA、JMA、JTWC、KMA 和 HKO)对 2023 年台风的定位平均误差以及定强平均绝对误差,其中 CMA 的定位平均误差为 12.4 km,定强平均绝对误差为 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同样本比较显示,CMA 对台风的定位和定强

表 1 参加评定的主观和客观方法汇总

Table 1 Subjective and objective forecast methods for evaluation

台风预报机构或预报方法全称		英文缩写	参考文献
主观预报 (官方台风 预报机构)	中国气象局(中央气象台)	CMA(NMC)	
	日本气象厅	JMA	
	美国联合台风警报中心	JTWC	
	韩国气象厅	KMA	
	香港天文台	HKO	
全球 模式	中国气象局全球同化预报系统	CMA-GFS	张进等(2023)
	美国国家环境预报中心全球预报系统	NCEP-GFS	Zhou and Juang(2023)
	欧洲中期天气预报中心综合预报系统	ECMWF-IFS	ECMWF(2023a)
	英国气象局天气与气候统一模式	UKMO-MetUM	Heming(2016)、Short and Petch(2018)
	日本气象厅全球谱模式	JMA-GSM	Yonehara et al(2025)
区域 模式	上海台风数值预报模式	SHTM	Niu et al(2025a;2025b)
	中国气象局南海台风数值预报系统	CMA-TRAMS	徐道生等(2020)、Zhang et al(2022)
	中国气象局区域台风数值预报系统	CMA-TYM	麻素红等(2021a;2021b)
	美国国家环境预报中心飓风研究和预报系统	HWRF	Biswas et al(2020)
客观 预报 统计 方法	西北太平洋台风路径多模式集成预报方法	SSTC	郭蓉等(2019)
	广西遗传神经网络预报系统	ANNGA	金龙等(2020)、黄颖等(2024)
	福建优选概率权重法台风路径预报系统	FJOP	中国气象局(2012)
	江苏概率圆法台风路径决策预报系统	JSPC	朱定真等(1996)、中国气象局(2012)
	西北太平洋台风强度统计预报	WIPS	中国气象局(2012)
集合 预报	上海台风研究所台风集合同化预报系统	STI-TEDAPS	Li et al(2019)
	欧洲中期天气预报中心全球集合预报系统	ECMWF-EPS	Palmer(2019)、ECMWF(2023b)
	日本气象厅全球集合预报系统	JMA-GEPS	Ota et al(2023)
	美国国家环境预报中心全球集合预报系统	NCEP-GEFS	Zhou et al(2022)
	英国气象局集合预报系统	UKMO-EPS	Inverarity et al(2023)
	加拿大气象局集合预报系统	MSC-CENS	Gagnon and Deng(2019)

表 2 官方台风预报机构对 2023 年台风的定位平均误差和定强平均绝对误差

Table 2 Official typhoon forecasting agencies' mean position estimation errors and mean absolute intensity

estimation errors for TCs in 2023

样本类型	统计项	CMA	JMA	JTWC	KMA	HKO	平均
非同样本	定位平均误差/km	12.4(465)	18.5(466)	18.1(409)	19.1(422)	17.7(382)	17.1
	定强平均绝对误差/($m \cdot s^{-1}$)	1.7(465)	2.9(466)	2.9(409)	4.0(422)	2.5(382)	2.8
同样本	定位平均误差/km	12.2	17.1	16.8	17.8	16.5	16.1
	定强平均绝对误差/($m \cdot s^{-1}$)	1.6	2.9	2.8	4.2	2.4	2.8

注:非同样本括号内为定位/定强次数,单位:次;同样本定位次数:344 次,同样本定强次数:335 次。

性能保持最优。2021—2023 年各机构的定位平均误差整体呈持续下降趋势(图 1a),2023 年定位平均误差介于 12.4~19.1 km,总体平均为 17.1 km,较 2022 年的 22.3 km 改进了 23.3%。相比之下,各机构 2023 年的定强平均绝对误差相比 2022 年没有保持同比减小,2023 年定强平均绝对误差介于 1.7~4.0 $m \cdot s^{-1}$,总体平均升至 2.8 $m \cdot s^{-1}$ 。除了 JTWC 以外,其他 4 个机构的 2023 年定强平均绝对误差均高于 2021 年和 2022 年(图 1b),较 2022 年增幅 0.4~1.2 $m \cdot s^{-1}$ 。

将最佳路径台风强度按照热带风暴、强热带风暴、台风、强台风、超强台风等级进行分类。图 2 为

2021—2023 年 CMA 在各台风强度等级的定位样本占比和定位平均误差,结果表明:CMA 定位平均误差与台风强度等级大体呈负相关,2023 年热带风暴样本的占比减小且热带风暴等级定位平均误差减小是全年定位平均误差减小的原因之一。

3 台风路径预报精度评定

3.1 确定性预报

3.1.1 路径预报误差

表 3 为 2023 年各预报方法各预报时效的路径

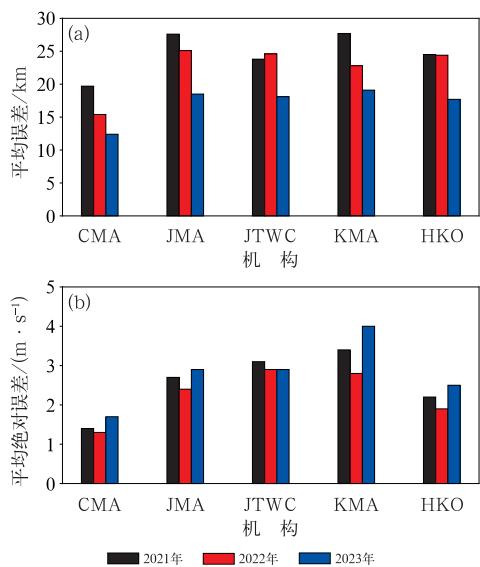


图 1 2021—2023 年官方台风预报机构对台风的(a)年度定位平均误差和(b)年度定强平均绝对误差

Fig. 1 (a) Annual mean position estimation errors and (b) annual mean absolute intensity estimation errors for TCs by each official typhoon forecasting agencies during 2021–2023

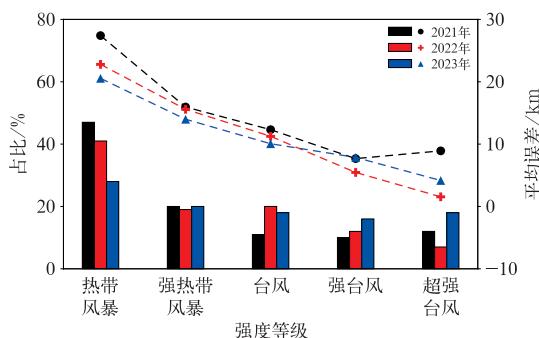


图 2 2021—2023 年 CMA 在各台风强度等级的定位样本占比(柱状)和定位平均误差(折线)

Fig. 2 Sample proportions (bar chart) and mean errors (line chart) of position estimation at each typhoon intensity grade by CMA during 2021–2023

预报平均误差。5 个官方台风预报机构 24、48、72、96 和 120 h 路径预报平均误差区间分别为 60.1~67.3、108.0~117.7、164.0~179.6、236.7~269.0 和 328.5~364.6 km, 24 h 路径预报平均误差同比减小 12~17 km 不等, 其中 CMA 24 h 路径预报平均误差同比减小 12 km。全球模式的路径预报性能的差异随预报时效的增长而加大, 区域模式中 CMA-TRAMS 48、60、72 h 的路径预报性能相比全

球模式存在一定优势, 只有 CMA-TRAMS 48 h 路径预报平均误差小于 100 km。统计方法中, SSTC 路径预报平均误差较小, 24、48、72 h 路径预报平均误差分别在 50、100、150 km 以内。

路径预报同样本平均误差(表略)表明: 全球模式中 ECMWF-IFS 各预报时效的路径预报平均误差最小, 其次为 NCEP-GFS。区域模式中 CMA-TRAMS 各预报时效的路径预报平均误差最小, 我国区域模式路径预报平均误差均小于国外区域模式 HWRF。

图 3 展示了官方台风预报机构(图 3a~3c)、全球模式和区域模式(图 3d~3f)历年路径预报平均误差演变趋势, 主观预报和客观预报方法历年路径预报平均误差变化趋势大体一致。2008—2013 年, 官方台风预报机构和数值预报模式 24、48、72 h 路径预报平均误差总体呈减小趋势, 官方台风预报机构 24、48、72 h 路径预报平均误差先后于 2012—2013 年首次分别向下突破 100、150、250 km。此后至 2022 年, 官方台风预报机构和数值预报模式的路径预报平均误差整体呈波动状态, 2022 年路径预报平均误差较 2021 年有所回落, 2023 年路径预报平均误差再度减小, 2023 年官方台风预报机构和部分数值预报模式 24 h 路径预报平均误差创历史新低。

3.1.2 技巧评分

相对于台风路径预报气候持续方法(中国气象局, 2012), 2023 年参加评定的台风路径预报方法在 24、48 和 72 h 展现出正预报技巧评分(表 4), 5 个官方台风预报机构 24、48 和 72 h 路径预报技巧评分区间分别为 62.2%~68.5%、63.5%~70.2%、62.5%~69.2%, 客观预报方法 24、48 和 72 h 路径预报技巧评分区间分别为 58.8%~74.9%、60.3%~74.3%、55.8%~75.2%, 其中 SSTC 的 24、48 和 72 h 路径预报技巧评分均在 70% 以上。

2010—2017 年各预报方法相对于气候持续法的路径预报技巧整体呈现缓慢上升的趋势, 2017—2023 年路径预报技巧评分变化幅度不大, 2023 年路径预报技巧评分较 2022 年普遍略有下降(图略)。

在台风业务预报中, 由于数值模式运行、后处理以及资料传输等耗时原因, 数值模式预报产品的获取滞后于数值模式的起报时刻(钱奇峰等, 2014; 危国飞等, 2021)。因此, 预报员在制作当前起报时刻的业务预报时, 主要参考数值模式前一起报时刻的预报结果。以 12 h 为起报间隔的数值模式为例, 预

表 3 2023 年主观和客观预报方法各预报时效的台风路径预报平均误差(单位:km)

Table 3 TC mean track forecast errors with each lead time by subjective and objective forecast methods in 2023 (unit: km)

方法名称	预报时效										
	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h	84 h	96 h	108 h	120 h	
主观预报	CMA	43.3(427)	64.2(382)	89.2(341)	115.4(302)	141.7(268)	175.0(240)	—	269.0(195)	—	362.1(160)
	JMA	41.3(236)	60.1(383)	—	108.3(303)	—	165.7(240)	—	255.0(195)	—	364.6(158)
	JTWC	43.7(385)	63.7(352)	85.3(320)	108.0(290)	—	164.0(234)	—	236.7(192)	—	328.5(155)
	KMA	46.8(391)	67.3(357)	92.2(325)	113.6(295)	—	173.8(238)	—	257.9(196)	—	351.2(159)
	HKO	—	62.6(282)	—	117.7(241)	—	179.6(199)	—	266.3(165)	—	360.4(134)
全球模式	CMA-GFS	55.7(392)	77.4(358)	107.6(328)	141.3(298)	184.0(268)	233.3(236)	291.1(214)	372.1(194)	457.5(176)	532.2(158)
	NCEP-GFS	43.1(370)	60.8(341)	81.1(311)	107.9(283)	138.4(255)	167.3(229)	197.9(208)	233.7(190)	276.6(172)	333.1(156)
	ECMWF-IFS	35.1(390)	50.3(356)	72.6(326)	101.5(300)	134.4(267)	165.4(242)	198.9(219)	233.1(101)	282.9(90)	333.3(81)
	UKMO-MetUM	41.6(195)	57.0(178)	79.0(163)	103.5(148)	138.7(132)	173.7(120)	213.4(108)	261.9(98)	314.4(86)	390.3(76)
	JMA-GSM	40.5(389)	61.5(355)	85.4(323)	116.4(295)	153.7(265)	193.2(237)	247.7(214)	314.4(192)	369.9(171)	434.6(152)
客观预报	STHM	46.9(174)	62.9(161)	84.8(148)	113.5(134)	148.0(120)	187.0(107)	247.6(96)	313.2(86)	389.5(75)	473.6(68)
	CMA-TRAMS	34.9(190)	52.4(175)	78.1(160)	99.9(145)	127.1(132)	162.4(120)	—	—	—	—
	CMA-TYM	46.3(388)	67.4(355)	87.9(324)	117.4(294)	153.1(266)	191.9(235)	236.6(213)	284.4(193)	358.3(176)	451.1(158)
	HWRF	48.3(232)	71.1(219)	95.3(204)	129.8(189)	169.8(175)	207.0(159)	242.0(145)	272.4(134)	322.2(123)	384.6(111)
	SSTC	29.6(380)	47.2(353)	68.8(323)	91.5(295)	121.1(267)	149.8(241)	186.3(218)	230.8(197)	281.2(179)	337.9(161)
统计方法	ANNGA	39.0(328)	57.6(295)	83.3(260)	103.6(231)	131.5(206)	163.9(185)	207.9(164)	251.8(151)	308.3(139)	356.2(128)
	FJOP	37.7(123)	61.6(116)	90.4(109)	122.4(100)	152.4(92)	186.1(84)	—	—	—	—
	JSPC	38.4(59)	54.9(52)	85.3(48)	109.2(40)	136.1(35)	147.6(28)	—	205.4(15)	—	219.7(8)

注:括号内为样本数,单位:个;“—”表示台风报文在该预报时效无预报数据。

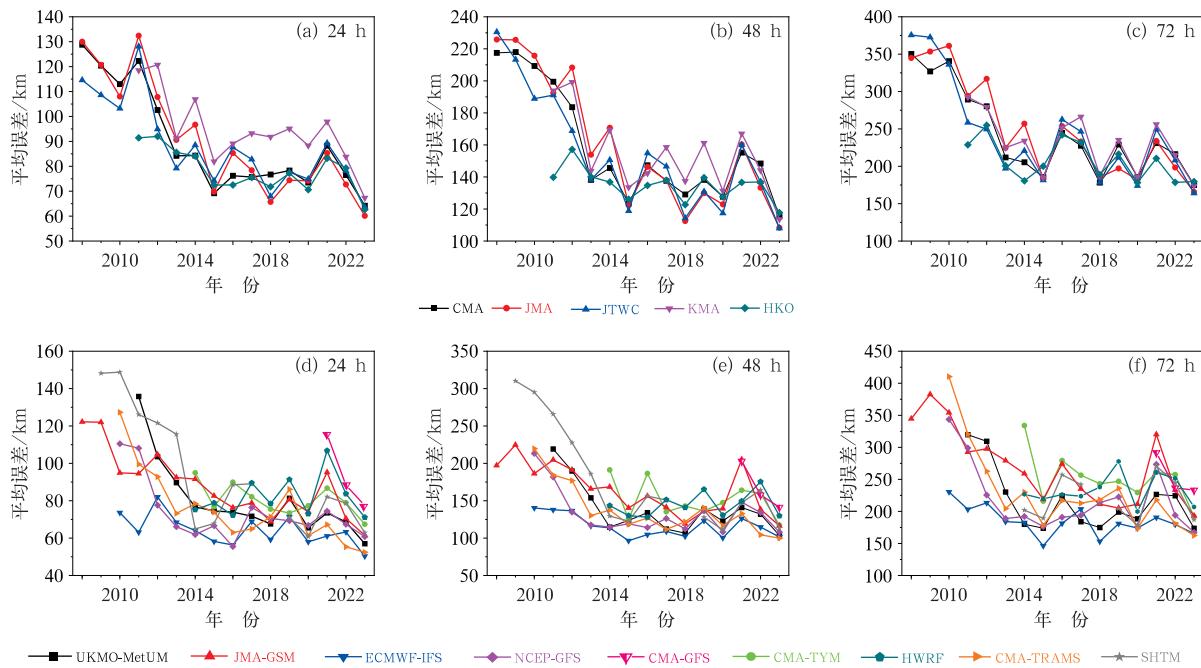


图 3 2008—2023 年(a~c)主观和(d~f)客观预报方法的历年 24、48、72 h 预报时效台风路径预报平均误差

Fig. 3 Annual mean track forecast errors for TCs with 24, 48, 72 h lead time by (a–c) subjective and (d–f) objective forecast methods during 2008–2023

报员在 00 UTC 制作 24 h 时效的台风路径与强度预报,所参考的数值模式的起报时刻为前一天 12 UTC,相当于参考数值模式的 36 h 时效的预报(钱奇峰等,2014)。

为了定量评估预报员对数值模式的台风路径预报的订正水平,以 2023 年全球模式中路径预报平均误差最小的 ECMWF-IFS 为基准,将官方台风预报机构发布的 24、48、72、96、120 h 路径预报分别与

ECMWF-IFS 的 36、60、84、108、132 h 路径预报进行同样本比较,计算对应的技巧评分。结果表明:5 个官方台风预报机构的 24、48、72、96、120 h 路径预报分别相对于 ECMWF-IFS 的 36、60、84、108、132 h 路径预报的技巧评分依次为 10.2%~21.2%、15.5%~23.0%、10.9%~16.2%、6.6%~12.9% 和 6.5%~14.4%,技巧评分随预报时效呈现“先

升-后降-趋稳”的三段式演变:24 h 和 48 h,技巧评分有所增大,主观订正的增益增强;48、72、96 h,技巧评分呈线性递减,96 h 技巧评分小于 24 h 技巧评分;96 h 和 120 h,技巧评分区间的变动幅度小于 2%,技巧评分趋于稳定。以上结果表明,预报员对数值预报的订正有效提升了台风路径预报的准确性。

表 4 2023 年主观和客观预报方法的台风路径预报技巧评分(单位:%)

Table 4 TC track forecast skill scores (unit: %) by subjective and objective

forecast methods in 2023

	方法名称	预报时效		
		24 h	48 h	72 h
主观 预报	CMA	65.8(355)	67.3(288)	66.6(233)
	JMA	68.5(357)	69.5(290)	68.6(234)
	JTWC	66.8(343)	70.2(281)	69.2(227)
	KMA	64.6(348)	68.3(286)	67.0(231)
	HKO	62.2(278)	63.5(237)	62.5(196)
全球 模式	CMA-GFS	58.8(349)	60.3(289)	55.8(229)
	NCEP-GFS	67.2(333)	69.7(275)	68.4(223)
	ECMWF-IFS	73.4(348)	71.8(291)	68.9(235)
	UKMO-MetUM	70.1(173)	71.2(143)	67.5(115)
	JMA-GSM	67.9(347)	67.3(287)	63.2(231)
客观 预报	STHM	67.2(156)	68.1(129)	64.4(104)
	区域 模式	CMA-TRAMS	71.1(170)	70.5(140)
	CMA-TYM	64.0(346)	66.9(285)	63.5(228)
	HWRF	64.6(212)	63.9(182)	57.8(153)
	统计 方法	SSTC	74.9(344)	74.3(286)
	ANNGA	66.1(277)	68.5(222)	65.6(180)
	FJOP	61.0(115)	60.4(99)	59.7(83)
	JSPC	65.1(51)	69.4(40)	75.2(28)

注:括号内数值为样本数,单位:个。

3.1.3 综合评定指标

台风路径预报的综合评定指标由 6 个要素加权构成,分别为方向稳定度、距离稳定度*、有效稳定度、变速灵敏度、转向灵敏度,以及相对于气候持续法的归一化技巧评分,对应权重依次为 0.2、0.2、0.3、0.1、0.1、0.1,称为一级综合评定指标。再将 24 h 与 48 h 的一级综合评定指标分别赋权重 0.4 与 0.6,得到二级综合评定指标(中国气象局,2012)。

2023 年 5 个官方台风预报机构二级综合评定值的区间为 0.81~0.84,客观预报方法二级综合评定值的区间为 0.78~0.89。CMA-TRAMS 和 SSTC 的二级综合评定值较高,分别为 0.89 和 0.88(表略)。

2023 年官方台风预报机构 24 h 要素中,方向

稳定度最高、变速灵敏度最低。具体分析如下:距离稳定度为 0.79~0.85,表明 24 h 路径预报误差小于 100 km 的样本占比为 79%~85%。方向稳定度为 0.93~0.97,表明预报路径和实际路径在纬向或经向、或经纬向一致的样本占比为 93%~97%,该指标体现了台风移动方向预报的高精度。转向灵敏度为 0.70~0.78,表明转向预报正确的样本占比为 70%~78%。变速灵敏度为 0.61~0.67,表明对突然加速(后 24 h 平均移速>前 24 h 平均移速的两倍)或突然减速(后 24 h 平均移速<前 24 h 平均移速的一半)预报正确的样本占比为 61%~67%,该指标相对较低,亟待发展台风移速突变的预报技术。

3.1.4 登陆点预报误差

2023 年共有 6 个台风先后 12 次登陆我国,登陆点集中在华南地区。2304 号台风“泰利”先后登陆

* 定义 2023 年距离稳定度的距离上限 $\epsilon_{24\text{ h}}$ 为 100 km, $\epsilon_{48\text{ h}}$ 为 200 km。

2 次,2305 号超强台风“杜苏芮”登陆 1 次,2309 号超强台风“苏拉”登陆 1 次,2311 号强台风“海葵”先后登陆 4 次,2314 号超强台风“小犬”登陆 1 次,2316 号强热带风暴“三巴”先后登陆 3 次。

表 5 为 2023 年各预报方法的登陆点预报误差。结果表明:除 JMA 外,其他机构和预报方法对“苏拉”在广东阳江的 24 h 登陆点预报误差较大。“苏拉”在菲律宾以东洋面呈现南折、打转的异常路径,随后趋向我国广东。在“苏拉”登陆前 24 h,其移动方向与海岸线形成的夹角较小。在“苏拉”与“海葵”产生的双台风效应、弱引导气流,以及台风移动方向

与海岸线夹角较小等因素的共同影响下,导致“苏拉”的登陆点预报难度加大。除“苏拉”和“三巴”外,CMA 对其他台风 24 h 以内登陆点预报误差范围为 5~45 km,且登陆点预报误差普遍小于其他官方台风预报机构。客观预报方法中,CMA-GFS 对“杜苏芮”在福建晋江的登陆点预报误差小于其他全球模式。CMA-TRAMS 和 FJOP 对“海葵”在台湾台东的登陆点预报最为理想。SSTC 对“杜苏芮”在福建晋江和“海葵”在福建东山的登陆点预报最为理想。此外,CMA-TRAMS 和 CMA-TYM 分别成功预报出了“三巴”在广东遂溪和海南临高的登陆点。

表 5 2023 年主观和客观预报方法的台风登陆点预报误差(单位:km)

Table 5 Forecast errors of landfall points for TCs by subjective and objective methods in 2023 (unit: km)

台风	名称 (编号)	泰利 (2304)		杜苏芮 (2305)		苏拉 (2309)		海葵 (2311)		小犬 (2314)		三巴 (2316)	
		广东湛江	广西 南三岛	福建 晋江	广东	台湾	台湾 台东	福建	广东	台湾	海南	广东	海南
	登陆地点	广东湛江	广西 南三岛	福建 晋江	广东 阳江江城	台湾 台东	台湾 高雄	福建 东山	广东 饶平	台湾 屏东	海南 东方	广东 遂溪	海南 临高
	时效	20 h	22 h	20 h	24 h	20 h	24 h	21 h	23 h	24 h	24 h	13 h	24 h
主观 预报	CMA	32	19	45	255	11	#	5	12	24	90	#	#
	JMA	—	10	51	21	26	#	19	31	38	76	#	#
	JTWC	39	106	78	#	17	#	33	47	58	77	#	#
	KMA	41	111	73	258	22	#	5	15	44	#	#	#
	JKO	25	96	65	#	11	#	9	17	34	#	#	#
全球 模式	CMA-GFS	13	#	25	#	19	#	32	46	16	#	#	#
	NCEP-GFS	34	32	27	164	16	#	23	24	31	#	#	#
	ECMWF-IFS	9	#	42	211	4	#	11	25	11	#	#	#
	UKMO-MetUM	—	110	—	—	29	#	30	46	21	86	#	#
	JMA-GSM	22	10	49	#	40	#	18	23	39	#	#	#
客观 预报	SHTM	—	82	—	—	16	#	28	44	#	#	#	#
	CMA-TRAMS	—	32	—	—	0	#	39	59	33	#	17	#
	CMA-TYM	43	59	33	148	13	#	44	63	33	#	2	2
	HWRF	99	227	23	—	—	—	—	—	10	#	#	—
统计 方法	SSTC	11	12	0	204	18	#	0	8	20	#	#	#
	ANNGA	29	10	—	245	17	#	—	—	29	—	#	#
	FJOP	—	14	—	—	0	#	7	17	4	—	—	—
	JSPC	—	19	—	—	21	#	23	47	37	—	—	—

注:“时效”表示起报时刻和登陆时刻的间隔;同一登陆点,各预报方法的起报时刻一致;“—”表示该预报方法在起报时刻没有预报数据;“#”表示该预报方法在起报时刻没有预报出登陆点。

3.2 集合预报

2023 年 6 个集合预报系统的台风集合平均路径预报误差显示(图 4),各系统间的平均误差差异随预报时效增长而加大,24、48、72、96 和 120 h 集合平均路径预报误差的区间分别为 49.2~82.4、96.3~151.4、153.2~229.9、235.7~320.9、325.3~471.8 km,其中 ECMWF-EPS 的集合平均路径预报误差为各预报时效误差区间的下限(图 4a)。同样本比较表明(图 4b);ECMWF-EPS 各预报时效的

集合平均路径预报误差最小,其次为 NCEP-GEFS 和 STI-TEDAPS, MSC-CENS、JMA-GEPS 和 UKMO-EPS 集合平均路径预报误差相对较大。

图 5 以双向分位图形形式展示 2023 年各集合预报系统的台风集合平均路径预报误差和集合离散度,如果集合平均预报误差低于(高于)集合离散度,即对应高估(低估)路径不确定性。2023 年,MSC-CENS(图 5e)对路径不确定性刻画得当,ECMWF-EPS(图 5a)与 NCEP-GEFS(图 5c)高估了路径不确定性,而 JMA-GEPS(图 5b)、UKMO-EPS(图 5d)

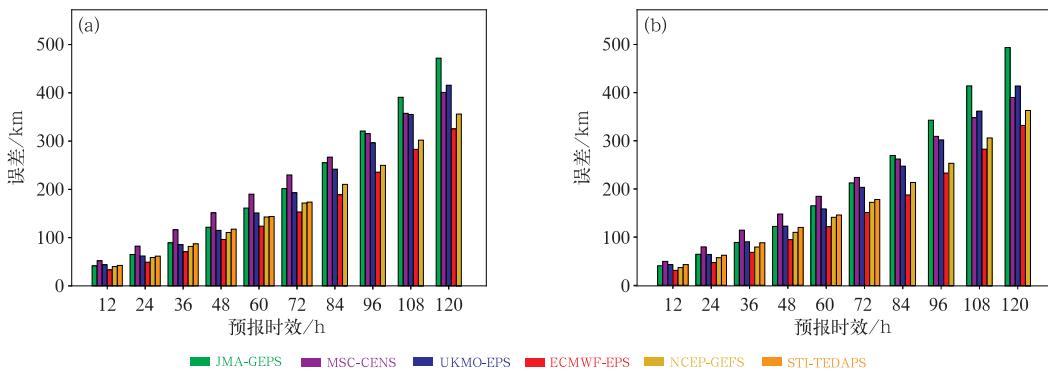


图 4 2023 年集合预报系统各预报时效的(a)非同样本和(b)同样本的台风集合平均路径预报误差

Fig. 4 TC ensemble mean track forecast errors with each lead time for (a) non-homogeneous and (b) homogeneous comparison by ensemble prediction systems in 2023

以及 STI-TEDAPS(图 5f)随着预报时效增长则低估了路径不确定性。

4 台风强度预报精度评定

4.1 确定性预报

4.1.1 强度预报误差

表 6 汇总了 2023 年各主观和客观预报方法对台风强度(台风底层中心附近最大平均风速)预报的平均绝对误差(MAE)、预报趋势一致率(RCT)和均方根误差(RMSE)。其中, RCT 用于衡量强度变化趋势的预报准确性, 定义为实况强度变化和预报强度变化的同号率。RCT 越高, 表明预报趋势与实况越吻合。由表 6 可见, 5 个官方台风预报机构全年 24、48、72、96 和 120 h 强度预报 MAE 区间分别为 $4.4 \sim 6.3$ 、 $5.7 \sim 7.9$ 、 $6.2 \sim 8.7$ 、 $7.0 \sim 9.5$ 、 $7.5 \sim 10.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。全球模式强度预报误差的差异较大, 其中 NCEP-GFS 各预报时效的 MAE 和 RMSE 较小, RCT 相对较高。全球模式中 JMA-GSM 略微倾向于高估台风强度, CMA-GFS、NCEP-GFS、ECMWF-IFS、UKMO-MetUM 倾向于低估台风强度。除了 NCEP-GFS 之外, 区域模式和统计方法的台风强度预报性能普遍优于全球模式。区域模式中 CMA-TYM 和 HWRF 各预报时效的 MAE 较小, 此外 HWRF 各预报时效的 RCT 高于其他客观预报方法。统计方法中, ANNGA 的 MAE 和 RMSE 较小且 RCT 较高。

强度预报同样本 MAE(表略)表明: 全球模式中, NCEP-GFS 各预报时效强度预报 MAE 最小。区域模式中, CMA-TYM 96 h 及以内强度预报

MAE 普遍最小, HWRF 96 h 以上强度预报 MAE 最小。

纵向比较各预报方法历年强度预报的 MAE(图 6), 结果表明: 2023 年各预报方法的强度预报 MAE 较 2022 年有不同程度的增大或减小。长时间序列来看, 各主观预报和客观预报方法的强度预报性能在 2017 年有较大幅度提升, 但随后几年强度预报误差整体没有明显减小。近 5 年(2019—2023 年), 主观预报 24、48 和 72 h 强度预报 MAE 大体在 $4 \sim 6$ 、 $5 \sim 8$ 、 $5 \sim 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 官方台风预报机构中 CMA 强度预报 MAE 相对较小, 区域模式和全球模式中 CMA-TYM、HWRF 和 NCEP-GFS 强度预报 MAE 相对较小。

4.1.2 技巧评分

2023 年 5 个官方台风预报机构 24、48 和 72 h 相对于台风强度预报气候持续法(中国气象局, 2012)的强度预报技巧评分均表现出了正技巧水平(表 7), 24、48 和 72 h 强度预报技巧评分区间分别为 $13.6\% \sim 40.1\%$ 、 $26.1\% \sim 47.8\%$ 、 $24.5\% \sim 48.2\%$ 。对于 24、48 和 72 h 强度预报技巧评分, 全球模式中只有 NCEP-GFS 均达到了正技巧(24、48 和 72 h 技巧评分分别为 13.5% 、 31.3% 和 33.4%), 区域模式中 CMA-TRAMS、CMA-TYM、HWRF 和所有统计预报方法(ANNGA 和 WIPS)均达到了正技巧。区域模式中 CMA-TYM 和 HWRF, 以及统计方法中 ANNGA 的技巧评分相对较高。2010—2020 年各主观预报和客观预报方法的强度预报技巧整体呈现缓慢上升的趋势, 2020—2023 年强度预报技巧评分没有提高, 2023 年 24 h 强度预报技巧较 2022 年普遍有所下降(图略)。

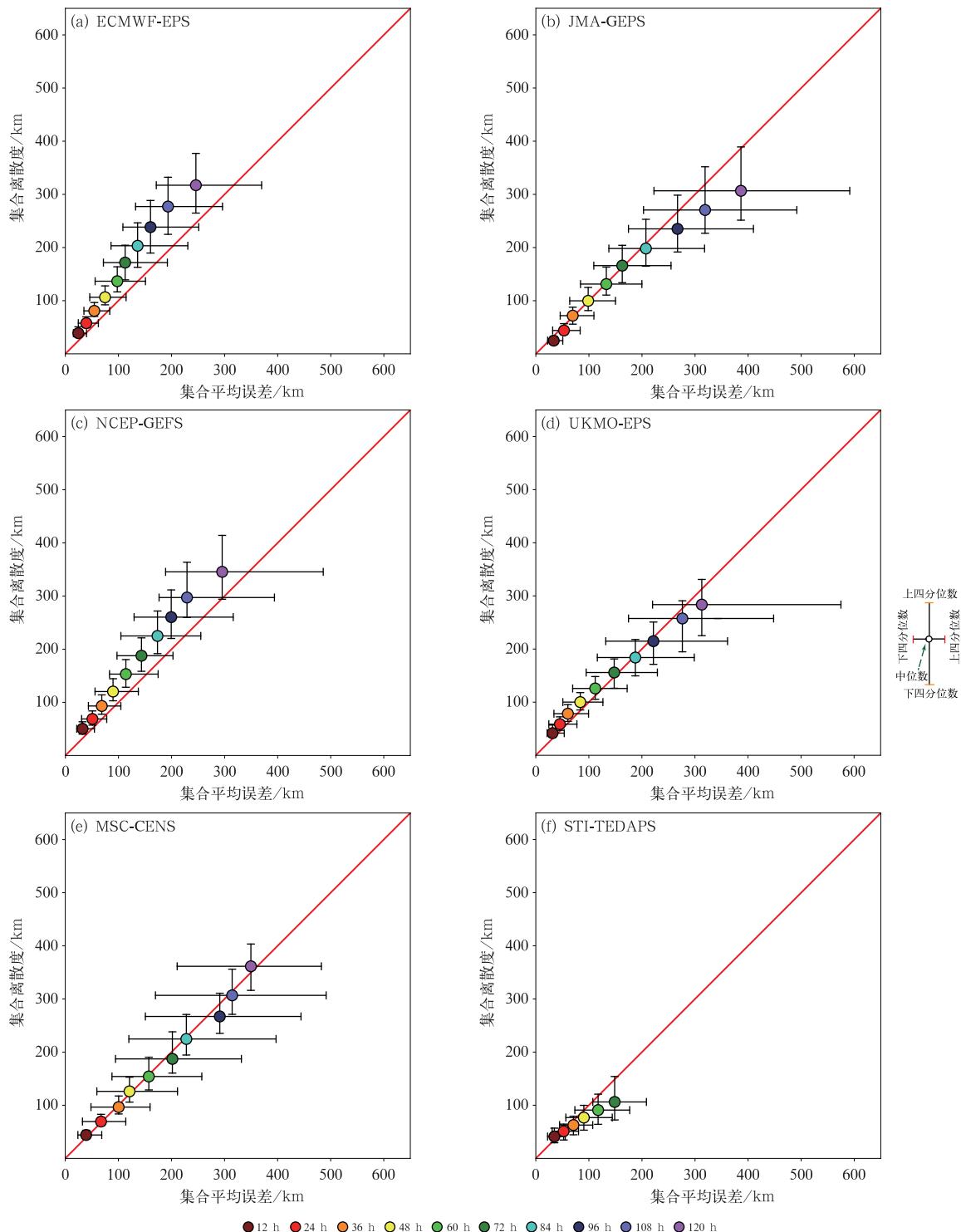


图 5 2023 年集合预报系统各预报时效的台风集合平均路径预报误差和集合离散度双向分位图

Fig. 5 Bi-directional quantile plot of TC ensemble mean track forecast errors and ensemble spreads with each lead time by ensemble prediction systems in 2023

为了定量评估预报员对数值模式的台风强度预报的订正水平,以 2023 年全球模式中强度预报平均误差最小的 NCEP-GFS 为基准,将官方台风预报机构发布的 24、48、72、96、120 h 强度预报分别与

NCEP-GFS 的 36、60、84、108、132 h 强度预报进行同样本比较,计算对应的技巧评分。结果表明(表略):5 个官方台风预报机构的 24、48、72、96、120 h 强度预报分别相对于 NCEP-GFS 的 36、60、84、108、

表 6 2023 年主观和客观预报方法各预报时效对台风强度预报平均绝对误差、预报趋势一致率和均方根误差
Table 6 MAE, RCT and RMSE of TC intensity forecasts with each lead time by subjective
and objective forecast methods in 2023

方法名称	预报时效																				
	24 h				48 h				72 h				96 h				120 h				
	MAE	RCT	RMSE	SIZE	MAE	RCT	RMSE	SIZE	MAE	RCT	RMSE	SIZE	MAE	RCT	RMSE	SIZE	MAE	RCT	RMSE	SIZE	
主观 预报	CMA	5.3	74.4	6.7	382	7.3	75.8	9.0	302	7.3	82.1	9.2	240	7.7	79.5	9.4	195	9.4	81.9	11.2	160
	JMA	5.5	71.3	6.6	380	7.5	76.7	8.9	300	7.9	83.7	9.3	233	9.2	75.7	10.9	189	10.6	77.8	12.5	153
	JTWC	4.4	78.1	6.0	352	5.7	81.7	7.6	290	6.2	84.2	8.4	234	7.0	79.7	9.2	192	7.5	86.5	9.9	155
	KMA	6.3	71.2	7.9	357	7.9	79.0	9.7	295	8.7	82.8	10.4	238	9.5	79.1	11.3	196	9.9	83.7	11.8	159
	HKO	5.1	74.5	6.5	282	7.0	78.0	8.5	241	8.0	84.9	9.5	199	8.9	80.6	10.1	165	9.5	81.3	11.2	134
全球 模式	CMA-GFS	10.4	62.9	13.1	358	11.5	67.5	14.2	298	12.4	73.7	15.5	236	13.5	70.1	16.7	194	14.2	69.0	17.4	158
	NCEP-GFS	6.4	69.4	8.4	341	7.4	75.9	9.8	283	8.4	79.9	10.8	229	9.5	75.3	12.1	190	9.7	78.2	12.5	156
	ECMWF-IFS	10.4	65.5	13.5	356	10.7	67.3	14.3	300	11.5	69.8	15.4	242	11.2	74.3	15.1	101	11.9	74.1	16.2	81
	UKMO-MetUM	8.4	29.2	10.7	178	11.8	40.5	14.6	148	13.7	45.0	16.7	120	14.6	48.0	17.7	98	13.6	51.3	17.3	76
	JMA-GSM	7.0	66.7	8.9	354	10.3	68.1	12.5	295	11.9	76.4	14.7	237	13.2	71.2	16.3	191	13.5	66.5	16.5	152
客观 预报	STHM	6.8	77.6	9.1	161	6.9	77.6	9.1	134	8.4	76.6	10.6	107	10.1	76.7	12.5	86	12.8	82.4	16.2	68
	CMA-TRAMS	6.6	65.7	8.4	175	8.6	76.6	10.6	145	9.4	79.2	11.2	120	—	—	—	—	—	—	—	—
	CMA-TYM	5.6	75.2	7.3	355	6.9	82.0	9.0	294	8.2	80.0	11.1	235	9.2	81.4	12.4	193	10.7	82.3	14.1	158
	HWRF	5.4	79.0	7.2	219	6.9	82.0	9.9	189	7.1	86.8	9.5	159	8.2	88.1	11.1	134	9.3	89.2	11.8	111
	ANNGA	5.5	71.2	6.7	295	6.9	79.2	8.3	231	7.9	84.3	9.5	185	8.7	80.8	10.4	151	8.8	82.8	10.4	128
统计 方法	WIPS	6.7	69.8	9.0	314	9.5	74.6	11.8	248	10.5	73.1	12.1	186	—	—	—	—	—	—	—	—

注:强度预报平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE),单位: $m \cdot s^{-1}$;预报趋势一致率(RCT),单位:%;样本数(SIZE),单位:个;“—”表示台风报文在该预报时效无预报数据。

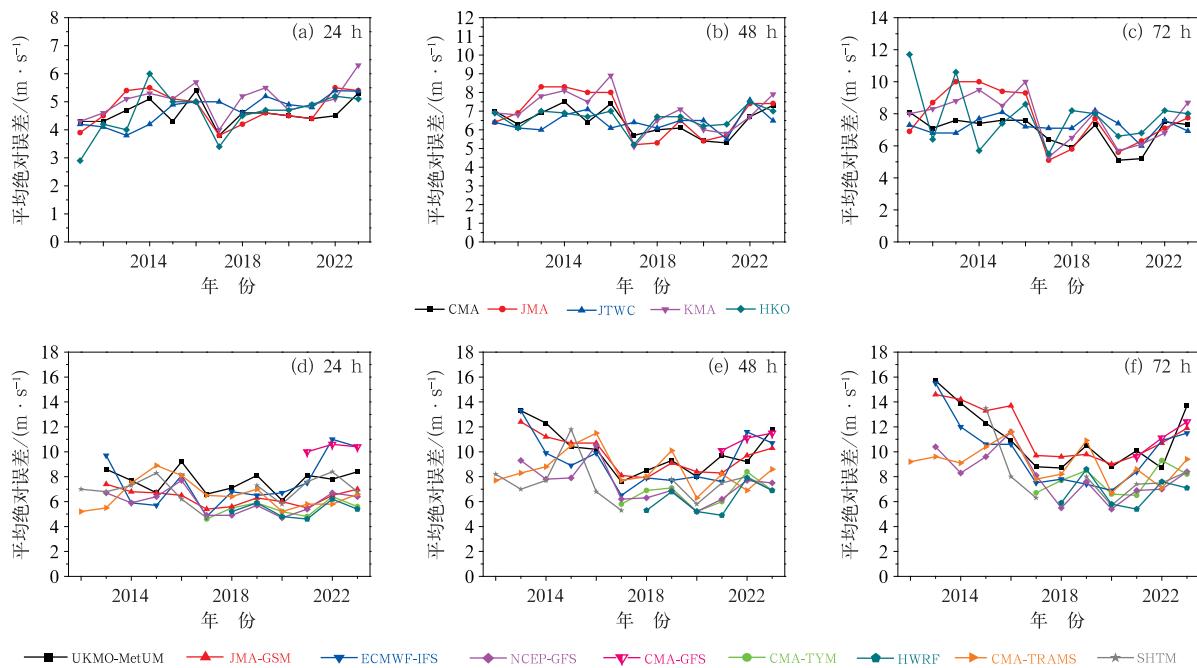


图 6 2011—2023 年(a~c)主观和(d~f)客观预报方法的历年 24, 48, 72 h 预报时效的台风强度预报平均绝对误差

Fig. 6 Annual mean absolute errors of intensity forecasts for TCs with 24, 48 and 72 h lead time by (a~c) subjective and (d~f) objective forecast methods during 2011–2023

132 h 强度预报的技巧评分依次为 4.3%~21.4%、-1.2%~20.5%、1.1%~21.6%、2.0%~23.5% 和 6.8%~27.1%。除 KMA 以外, 其他官方台风

预报机构各预报时效相对于 NCEP-GFS 的技巧评分均高于 5%, 且 CMA、HKO 和 JTWC 的技巧评分整体高于 JMA 和 KMA。

表 7 2023 年主观和客观预报方法的台风强度预报技巧评分(单位:%)
 Table 7 TC intensity forecast skill scores (unit: %) by subjective and objective forecast methods in 2023

	方法名称	预报时效		
		24 h	48 h	72 h
主观预报	CMA	25.6(343)	29.7(286)	33.9(195)
	JMA	21.8(341)	28.4(283)	28.9(188)
	JTWC	40.1(337)	47.8(279)	48.2(189)
	KMA	13.6(342)	26.1(284)	24.5(195)
	HKO	26.5(271)	28.4(232)	31.0(168)
客观预报	CMA-GFS	-44.9(343)	-8.9(287)	-4.0(192)
	NCEP-GFS	13.5(326)	31.3(272)	33.4(188)
	ECMWF-IFS	-43.1(340)	1.5(288)	7.8(196)
	UKMO-MetUM	-23.6(171)	-11.5(142)	-12.4(98)
	JMA-GSM	2.0(338)	0.8(283)	-6.1(192)
预报方法	STHM	-5.9(158)	28.0(132)	19.9(91)
	区域模式	CMA-TRAMS	2.2(167)	17.0(139)
	区域模式	CMA-TYM	21.6(340)	31.9(283)
	统计方法	HWRF	17.9(204)	31.4(178)
	统计方法	ANNGA	17.5(267)	29.0(220)
	统计方法	WIPS	8.0(305)	10.8(241)
注:括号内数值为样本数,单位:个。				

4.2 集合预报

图 7 为集合预报系统各预报时效的台风集合平均强度预报误差,集合预报系统的强度预报误差的差异显著,24、48、72、96 和 120 h 集合平均强度预报误差的区间分别为 8.4~16.5、9.1~18.4、9.6~19.9、11.6~19.6、11.2~18.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7a)。同样本比较表明(图 7b):NCEP-GEFS 和 STI-TEDAPS 集合平均强度预报误差较小,其次为 ECMWF-EPS 和 JMA-GEPS, MSC-CENS 和 UKMO-EPS 集合平均强度预报误差较大。

5 结 论

2023 年西北太平洋及南海台风的业务定位、定强精度,以及路径与强度预报性能如下:

(1) 2023 年官方台风预报机构的台风定位精度相比 2022 年均有所提高,定强精度有所下降,CMA 对台风的定位与强度性能优于其他官方机构。CMA 的定位平均误差随台风强度等级的升高而减小,2023 年热带风暴样本的占比减小且热带风暴等级定位精度提高是全年定位平均误差减小的原因之一。

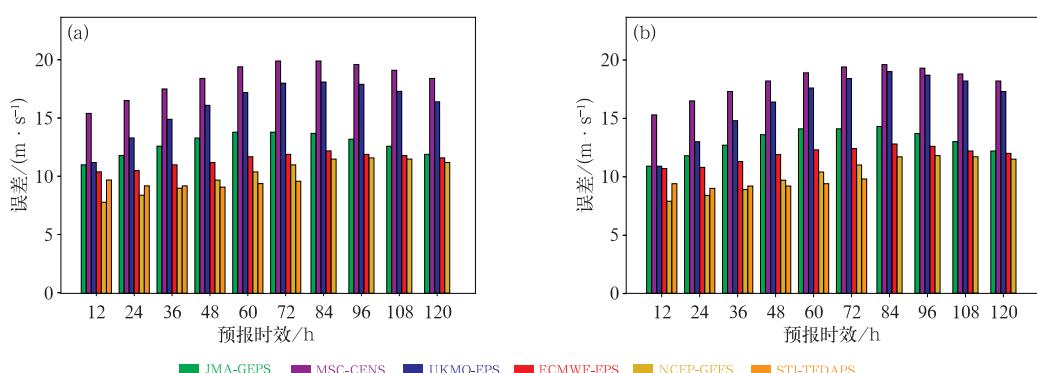


图 7 2023 年集合预报系统各预报时效的(a)非同样本和(b)同样本的台风集合平均强度预报误差

Fig. 7 TC ensemble mean intensity forecast errors with each lead time for (a) non-homogeneous and (b) homogeneous comparison by ensemble prediction systems in 2023

(2) 2023 年官方台风预报机构 24 h 路径预报平均误差创历史新高, 主观和客观预报方法 24、48、72 h 预报时效的台风路径预报平均误差低于 2022 年, 其中 CMA 24 h 路径预报平均误差同比减小 12 km。2023 年, 确定性全球模式中 ECMWF-IFS 路径预报平均误差最小, 其次为 NCEP-GFS。确定性区域模式中 CMA-TRAMS 路径预报平均误差最小, 且 CMA-TRAMS 48、60 和 72 h 的路径预报性能相比全球模式存在一定优势, 此外我国区域模式路径预报平均误差均小于国外区域模式。集合预报系统中 ECMWF-EPS 集合平均路径预报误差最小, 其次为 NCEP-GEFS 和 STI-TEDAPS, 但 ECMWF-EPS 和 NCEP-GEFS 高估了路径不确定性, 而 STI-TEDAPS 则低估了路径不确定性。各主观预报和客观预报方法对 2309 号超强台风“苏拉”在广东阳江的 24 h 登陆点预报误差普遍较大。2010—2017 年主观预报和客观预报方法相对于气候持续法的路径预报技巧整体呈现缓慢上升的趋势, 2017—2023 年路径预报技巧评分变化幅度不大。

(3) 2019—2023 年官方台风预报机构 24、48 和 72 h 强度预报平均绝对误差大体为 4~6、5~8、5~9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。2023 年, 确定性全球模式中 NCEP-GFS 强度预报 MAE 最小且强度预报技巧评分相对较高, 但是倾向于低估台风强度。确定性区域模式中 CMA-TYM 96 h 及以内强度预报 MAE 普遍最小, HWRF 96 h 以上强度预报 MAE 最小。集合预报系统中 NCEP-GEFS 和 STI-TEDAPS 集合平均强度预报误差较小。2010—2020 年主观预报和客观预报方法的强度预报技巧整体呈现缓慢上升的趋势, 2020—2023 年强度预报技巧评分没有提高。

参考文献

- 陈国民, 杨梦琪, 张喜平, 等, 2022. 2020 年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. 气象, 48(4): 516-525. Chen G M, Yang M Q, Zhang X P, et al, 2022. Verification on forecasts of typhoons over western North Pacific and South China Sea in 2020[J]. Meteor Mon, 48(4): 516-525(in Chinese).
- 陈国民, 张喜平, 杨梦琪, 等, 2021. 2019 年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. 气象, 47(10): 1266-1276. Chen G M, Zhang X P, Yang M Q, et al, 2021. Verification on forecasts of typhoons over western North Pacific and South China Sea in 2019[J]. Meteor Mon, 47(10): 1266-1276(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).
- 陈静, 朱跃建, 段晚锁, 等, 2025. 集合预报进展、挑战及展望[J]. 气象学报, 83(3): 480-502. Chen J, Zhu Y J, Duan W S, et al, 2025. A review on development, challenges, and future perspectives of ensemble forecast[J]. Acta Meteor Sin, 83(3): 480-502(in Chinese).
- 陈笑, 赵东, 何晓风, 等, 2018. 基于 MODE 对模式预报强风风场的检验分析[J]. 气象, 44(8): 1009-1019. Chen X, Zhao D, He X F, et al, 2018. Evaluation and analysis of model forecast performance of high wind based on MODE method[J]. Meteor Mon, 44(8): 1009-1019(in Chinese).
- 程正泉, 廖代强, 2012. 数值天气预报模式产品在预报业务中的应用[J]. 广东气象, 34(4): 1-5, 9. Cheng Z Q, Liao D Q, 2012. Applications of numerical weather prediction model in forecast practices[J]. Guangdong Meteor, 34(4): 1-5, 9(in Chinese).
- 郭蓉, 余晖, 漆梁波, 等, 2019. 台风路径多模式集成预报技术研究[J]. 气象科学, 39(6): 839-846. Guo R, Yu H, Qi L B, et al, 2019. A study on multi-model ensemble forecast technique for typhoon track[J]. Sci Meteor Sin, 39(6): 839-846(in Chinese).
- 黄颖, 黄小燕, 赵华生, 等, 2024. 基于遗传神经网络方法的 2309 号台风“苏拉”路径和强度预报分析[J]. 气象研究与应用, 45(2): 109-113. Huang Y, Huang X Y, Zhao H S, et al, 2024. Analysis of the track and intensity of Typhoon “Saola”(2309) based on the genetic neural network method[J]. J Meteor Res Appl, 45(2): 109-113(in Chinese).
- 金龙, 黄颖, 姚才, 等, 2020. 人工智能技术的热带气旋预报综述(之一)——BP 神经网络和集成方法的热带气旋预报研究和业务应用[J]. 气象研究与应用, 41(2): 1-6. Jin L, Huang Y, Yao C, et al, 2020. A review of tropical cyclone forecast based on artificial intelligence (part 1) — BP neural network and ensemble method for tropical cyclone forecast research and operational application[J]. J Meteor Res Appl, 41(2): 1-6(in Chinese).
- 雷小途, 2021. 中国台风联防与科研协作及其对中国台风学科发展的作用综述[J]. 气象学报, 79(3): 531-540. Lei X T, 2021. Overview of typhoon prevention and cooperative research and their contribution to typhoon study in China[J]. Acta Meteor Sin, 79(3): 531-540(in Chinese).
- 李泽椿, 张玲, 钱奇峰, 等, 2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. 大气科学学报, 43(1): 10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 10-19(in Chinese).
- 麻素红, 沈学顺, 龚建东, 等, 2021a. 国家气象中心台风数值预报系统的发展[J]. 气象, 47(6): 685-692. Ma S H, Shen X S, Gong J D, et al, 2021a. Development of typhoon numerical prediction system in National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6): 685-692(in Chinese).
- 麻素红, 张进, 瞿安祥, 等, 2021b. 垂直分层加密和预报区域扩大对 GRAPES_TYM 台风预报的影响[J]. 气象学报, 79(1): 94-103. Ma S H, Zhang J, Qu A X, et al, 2021b. Impacts to tropical

- cyclone prediction of GRAPES_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast domain[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(1):94-103(in Chinese).
- 马旭林,薛纪善,陆维松,2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究[J]. *气象学报*, 66(4):526-536. Ma X L, Xue J S, Lu W S, 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(4):526-536(in Chinese).
- 聂高臻,许映龙,王海平,2023. 2023年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. *气象*, 51(3):369-381. Nie G Z, Xu Y L, Wang H P, 2023. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon activities in the western North Pacific in 2023[J]. *Meteor Mon*, 51(3):369-381(in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,王建鹏,2014. 数值天气预报检验方法研究进展[J]. *地球科学进展*, 29(3):327-335. Pan L J, Zhang H F, Wang J P, 2014. Progress on verification methods of numerical weather prediction[J]. *Adv Earth Sci*, 29(3):327-335(in Chinese).
- 漆梁波,2015. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J]. *气象*, 41(6):661-673. Qi L B, 2015. Operational progress of high-resolution numerical model on severe convective weather warning[J]. *Meteor Mon*, 41(6):661-673(in Chinese).
- 钱奇峰,张长安,高拴柱,等,2014. 台风路径集合预报的实时订正技术研究[J]. *热带气象学报*, 30(5):905-910. Qian Q F, Zhang C A, Gao S Z, et al, 2014. Real-time correction method for ensemble forecasting of typhoon tracks[J]. *J Trop Meteor*, 30(5):905-910(in Chinese).
- 沈学顺,王建捷,李泽椿,等,2020. 中国数值天气预报的自主创新与发展[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).
- 危国飞,刘会军,潘宁,等,2021. 台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用[J]. *大气科学*, 45(1):195-204. Wei G F, Liu H J, Pan N, et al, 2021. Real-time correction method for numerically modeled typhoon tracks and its integrated application[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(1):195-204(in Chinese).
- 徐道生,陈子通,张艳霞,等,2020. 南海台风模式 TRAMS 3.0 的技术更新和评估结果[J]. *气象*, 46(11):1474-1484. Xu D S, Chen Z T, Zhang Y X, et al, 2020. Updates in TRAMS 3.0 model version and its verification on typhoon forecast[J]. *Meteor Mon*, 46(11):1474-1484(in Chinese).
- 杨梦琪,陈国民,张喜平,等,2023. 2021年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. *气象*, 49(8):1005-1019. Yang M Q, Chen G M, Zhang X P, et al, 2023. Verification on typhoons forecasts over the western North Pacific and the South China Sea in 2021[J]. *Meteor Mon*, 49(8):1005-1019(in Chinese).
- 杨梦琪,陈国民,张喜平,等,2024. 2022年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. *气象*, 50(5):630-641. Yang M Q, Chen G M, Zhang X P, et al, 2024. Verification on typhoon forecasts over the western North Pacific and the South China Sea in 2022[J]. *Meteor Mon*, 50(5):630-641(in Chinese).
- 叶璐,刘永柱,陈静,等,2020. 集合预报多尺度奇异向量初值扰动方法研究[J]. *气象学报*, 78(4):648-664. Ye L, Liu Y Z, Chen J, et al, 2020. A study on multi-scale singular vector initial perturbation method for ensemble prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(4):648-664(in Chinese).
- 余晖,陈联寿,谈哲敏,等,2025. 中国台风预报技术发展的历史、现状与未来[J]. *气象学报*, 83(3):786-797. Yu H, Chen L S, Tan Z M, et al, 2025. Development of tropical cyclone forecasting technology in China: past, present, and future[J]. *Acta Meteor Sin*, 83(3):786-797(in Chinese).
- 张涵斌,智协飞,陈静,等,2017. 区域集合预报扰动方法研究进展综述[J]. *大气科学学报*, 40(2):145-157. Zhang H B, Zhi X F, Chen J, et al, 2017. Achievement of perturbation methods for regional ensemble forecast[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(2):145-157(in Chinese).
- 张进,孙健,沈学顺,等,2023. CMA-GFS V4.0 模式关键技术研发和业务化[J]. *应用气象学报*, 34(5):513-526. Zhang J, Sun J, Shen X S, et al, 2023. Key model technologies of CMA-GFS V4.0 and application to operational forecast[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(5):513-526(in Chinese).
- 张璟,李泓,段晚锁,等,2022. 台风集合预报研究进展[J]. *大气科学学报*, 45(5):713-727. Zhang J, Li H, Duan W S, et al, 2022. Review on the research progress of typhoon ensemble forecast[J]. *Trans Atmos Sci*, 45(5):713-727(in Chinese).
- 中国气象局,2012. 台风业务和服务规定[M]. 4 版. 北京:气象出版社:38-41. China Meteorological Administration, 2012. *Regulations on Typhoon Operations and Services*[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press:38-41(in Chinese).
- 朱定真,樊永富,周曾奎,1996. 用概率圆法决策台风预报路径[J]. *气象*, 22(1):26-28. Zhu D Z, Fan Y F, Zhou Z K, 1996. The probability ellipse method of typhoon track forecast[J]. *Meteor Mon*, 22(1):26-28(in Chinese).
- 朱雪松,黄伟,余晖,等,2024. 适用于台风预报的尺度自适应物理过程参数化方案及其配置优选[C]//大气科学研究与应用百年进展纪念文集. 北京:中国气象学会:735-750. Zhu X S, Huang W, Yu H, et al, 2024. Scale-adaptive physical process parameterization scheme for typhoon forecasting and its configuration preference[C]// *Proceedings of the Anthology of 100 Years of Progress in the Study and Application of Atmospheric Science*. Beijing: Chinese Meteorological Society:735-750(in Chinese).
- Biswas M K, Zhang J A, Grell E, et al, 2020. Evaluation of the Grell-Freitas convective scheme in the Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) model[J]. *Wea Forecasting*, 35(3):1017-1033.
- ECMWF, 2023a. IFS Documentation-Cy48rl - Part III : dynamics and numerical procedures[R]. Reading: ECMWF.
- ECMWF, 2023b. IFS Documentation-Cy48rl - Part V : ensemble prediction system[R]. Reading: ECMWF.
- Gagnon S, Deng X X, 2019. Ensemble forecast systems and future applications at MSC[C]// *Proceedings of the 8th NCEP Ensemble*

- User Workshop. Maryland:College Park.
- Heming J T, 2016. Met Office unified model tropical cyclone performance following major changes to the initialization scheme and a model upgrade[J]. *Wea Forecasting*, 31(5):1433-1449.
- Inverarity G W, Tennant W J, Anton L, et al, 2023. Met Office MOGREPS-G initialisation using an ensemble of hybrid four-dimensional ensemble variational(En-4DEnVar) data assimilations[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 149(753):1138-1164.
- Li H, Luo J Y, Xu M T, 2019. Ensemble data assimilation and prediction of typhoon and associated hazards using TEDAPS: evaluation for 2015—2018 seasons[J]. *Front Earth Sci*, 13(4):733-743.
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(4):690-699.
- Luo J Y, Li H, Xue M, et al, 2022. Direct assimilation of radar reflectivity data using ensemble Kalman filter based on a two-moment microphysics scheme for the analysis and forecast of Typhoon Lekima(2019)[J]. *Remote Sens*, 14(16):3987.
- Niu Z Y, Wang D L, Mu M, et al, 2025a. Machine-learning(ML)-physics fusion model accelerates the paradigm shift in typhoon forecasting with a CNOP-based assimilation framework [J]. *Geophys Res Lett*, 52(15):e2025GL115926.
- Niu Z Y, Zhang L, Yang Y H, et al, 2025b. Assimilating FY-4B AGRI three water vapor channels in operational Shanghai Typhoon Model(SHTM) using GSI-based 3-DVar approach[J]. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 18:3599-3610.
- Ota Y, Chiba J, Ichikawa Y, et al, 2023. Upgrade of JMA's global ensemble prediction system[R]. Tokyo: Japan Meteorological Agency.
- Palmer T, 2019. The ECMWF ensemble prediction system: looking back (more than) 25 years and projecting forward 25 years[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(S1):12-24.
- Short C J, Petch J, 2018. How well can the Met Office unified model forecast tropical cyclones in the western North Pacific? [J]. *Wea Forecasting*, 33(1):185-201.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 31(2):287-301.
- Yonehara H, Kuroki Y, Ujiie M, et al, 2025. Upgrade of JMA's operational global numerical weather prediction system[R]. Tokyo: Japan Meteorological Agency.
- Zhang X, Bao J W, Huang W, et al, 2023. Statistics of the subgrid cloud of an idealized tropical cyclone at convection-permitting resolution[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 15(5):e2022MS003534.
- Zhang Y X, Xu D S, Chen Z T, et al, 2022. Offline diagnostics of skin sea surface temperature from a prognostic scheme and its application in typhoon forecasting using the CMA-TRAMS model over South China[J]. *Atmosphere*, 13(8):1324.
- Zhou X Q, Juang H M H, 2023. A model instability issue in the National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System version 16 and potential solutions [J]. *Geosci Model Dev*, 16(11):3263-3274.
- Zhou X Q, Zhu Y J, Hou D C, et al, 2022. The development of the NCEP global ensemble forecast system version 12 [J]. *Wea Forecasting*, 37(6):1069-1084.

(本文责编:何晓欢)